

第 87 回 博士學位論文

指導教授 李 彦 求

Cool Roof 시스템의 성능기준 및
설계지침에 관한 연구

A Study on the Performance Standards
and Design Guidelines of Cool Roof System

中央大學校 大學院

建築學科 建築計劃 및 環境專攻

金 玉

2010年 8月

Cool Roof 시스템의 성능기준 및
설계지침에 관한 연구

A Study on the Performance Standards
and Design Guidelines of Cool Roof System

이 論文을 博士學位論文으로 提出함.

2010年 8月

中央大學校 大學院

建築學科 建築計劃 및 環境專攻

金 玉

金 玉의 博士學位論文으로 認定함.

審査委員長	박진철	
審査委員	조근호	
審査委員	이현우	
審査委員	전영권	
審査委員	이영구	

中央大學校 大學院

2010 年 8月

목 차

제 1 장 서론	1
1.1 연구의 배경 및 목적	1
1.2 연구의 내용 및 방법	3
제 2 장 Cool Roof의 이론과 연구동향	7
2.1 Cool Roof에 대한 이론적 고찰	7
2.1.1 Cool Roof의 정의	7
2.1.2 지붕 마감재의 종류 및 특징	16
2.2 Cool Roof에 관한 국내·외 연구동향	20
2.2.1 국내 연구동향	20
2.2.2 국외 연구동향	22
제 3 장 Cool Roof의 성능 기준	27
3.1 국외의 Cool Roof 성능기준	27
3.1.1 ASHRAE Standard	27
3.1.2 캘리포니아 Title 24 Standard	32
3.1.3 그 외 Cool Roof 성능기준	37
3.1.4 Cool Roof 관련 에너지 절약 프로그램	42
3.2 Cool Roof의 성능 요소 및 측정방법	47
3.2.1 Cool Roof의 성능 및 측정방법	47
3.2.2 CRRC의 Cool Roof Data Base	50
3.2.3 Cool Roof Calculator	51

제 4 장 모형실험을 통한 Cool Roof의 성능분석	53
4.1 실험개요	53
4.2 지붕 마감재에 따른 모형실험	57
4.3 실험 결과	59
4.4 소결	75
제 5 장 Cool Roof의 에너지 절약효과 분석	77
5.1 시뮬레이션 해석의 신뢰도 검증	77
5.1.1 시뮬레이션 프로그램의 선정	77
5.1.2 해석모델 및 경계조건	80
5.1.3 에너지 해석 프로그램의 신뢰도 검증	81
5.2 건물의 에너지 효율에 영향을 미치는 지붕요소 민감도 분석	83
5.2.1 해석 개요	84
5.2.2 민감도 분석	84
5.3 Cool Roof 적용에 따른 경제성 분석	90
5.3.1 경제성 분석 방법	90
5.3.2 분석기준 설정	92
5.3.3 Cool Roof 경제성 분석	94
5.4 소결	102

제 6 장 Cool Roof의 국내 적용을 위한 성능기준 및 설계지침	104
6.1 국내 Cool Roof 적용을 위한 요구 성능	104
6.1.1 지붕 관련 국내외 법규/기준	104
6.1.2 국내 Cool Roof 도입 시 요구 성능 및 사항	105
6.2 Cool Roof의 설계지침	135
6.2.1 신축건물의 Cool Roof 설계 지침	136
6.2.2 리모델링건물의 Cool Roof 설계 지침	138
6.3 소결	141
제 7 장 결론	144
[부 록]	148
[참고 문헌]	156
국 문 초 록	166
ABSTRACT	170

표 차례

<표 2.1> 친환경인증제도 내 Cool Roof의 최소 성능	14
<표 2.2> 지붕 재료의 반사와 방사 성능에 관한 일반 사항	15
<표 3.1> Cool Roof를 위한 지붕 열관류율(U-factor)계수	29
<표 3.2> Cool Roof를 위한 지붕의 열관류율(U-factor) 계수	29
<표 3.3> 지붕에 Cool Roof 적용 시 지붕의 열관류율(U-factor) 계수	31
<표 3.4> ASHRAE Standard 90.2-2007에 의한 지붕 열 저항값	31
<표 3.5> 주거용 Cool Roof 할인프로그램의 태양 반사율과 열 방사율	45
<표 4.1> 각 재료별 태양 반사율 및 열 방사율	58
<표 5.1> DOE-2의 PLANT	78
<표 5.2> SYSTEMS Load	79
<표 5.3> 프로그램 해석 조건	80
<표 5.5> 해석 모델의 경계 조건	84
<표 5.6> 건물 최상층 에너지 효율 매개변수 및 인자	86
<표 5.7> 변수에 따른 최상층 최대 냉방부하	87
<표 5.8> 변수에 따른 최상층 최대 난방부하	88
<표 5.9> LCC 분석 조건	93
<표 5.10> LCC 비용 산정 기준	94
<표 5.11> 현가법 적용 기준	94
<표 5.12> 일반 지붕 마감 시 초기 투자비	95
<표 5.13> Cool Roof 마감 시 초기 투자비	96
<표 5.14> 일반 지붕 마감 시 유지 관리비	97
<표 5.15> Cool Roof 마감 시 유지 관리비	97
<표 5.16> 일반 전력(을) 사용전력	98
<표 5.17> 일반용 전력(을) 계절별 시간대별 구분	98
<표 5.18> 일반 마감 시 에너지 비	99
<표 5.19> Cool Roof 마감 시 에너지 비	100
<표 5.20> 일반 지붕마감과 Cool Roof 마감의 LCC 집계	101

<표 6.1> Cool Roof 관련 법규/기준 구축을 위한 기술항목 분류	105
<표 6.2> 중부지역 단열재 두께에 따른 지붕의 열관류율	106
<표 6.3> 남부지역 단열재 두께에 따른 지붕의 열관류율	115
<표 6.4> 제주지역 단열재 두께에 따른 지붕의 열관류율	122

그림 차례

(그림 1.1) 연구의 흐름도	6
(그림 2.1) 지붕을 통한 열전달	7
(그림 2.2) 태양 스펙트럼	10
(그림 2.3) 일반지붕과 Cool Roof의	10
(그림 2.4) 지붕에서의 일반적인 열성능	10
(그림 2.5) Cool Roof의 개념	11
(그림 2.6) 마감재의 태양 반사율과 열방사율에 따른 평균 온도	12
(그림 2.7) 지붕의 재료에 따른 지붕표면의 온도	12
(그림 3.1) ASHRAE에서 규정한 미국 기후대	32
(그림 3.2) 캘리포니아 16개의 기후대 지역	35
(그림 3.3) 낮은 경사각의 비주거용 건물에서 Cool Roof 적용 시	35
(그림 3.4) 미국 상업용 건물의 에너지 규정	38
(그림 3.5) 미국 주거용 건물의 에너지 규정	39
(그림 3.6) CRRC의 Cool Roof 제품 디렉토리	50
(그림 3.7) Cool Roof Calculator	51
(그림 4.1) 모형 실험체 제작 모습	54
(그림 4.2) 외부 표면온도 측정 방법	55
(그림 4.3) 실험체 내부 온도변화	55
(그림 4.4) 실험체 외부 온도변화	55
(그림 4.5) 실험체 사이즈 및 지붕재료	56
(그림 4.6) 실험체(1, 2 ,3)의 전경	57
(그림 4.7) 태양반사율과 열방사율 측정기기	58
(그림 4.8) 각 실험체의 온도센서 위치	59
(그림 4.9) 지붕 마감재에 따른 실내 온도 변화(하절기 청천공)	60
(그림 4.10) 지붕 마감재에 따른 마감재 내부 온도변화(하절기 청천공)	60
(그림 4.11) 지붕 마감재에 따른 지붕 표면온도 변화(하절기 청천공)	61
(그림 4.12) 지붕 마감재에 따른 공기 온도 변화(하절기 청천공)	61

(그림 4.13) 하절기 청천공 시 옥상 표면 온도	62
(그림 4.14) 지붕 마감재에 따른 실내 온도 변화(하절기 담천공)	63
(그림 4.15) 지붕 마감재에 따른 마감재 내부 온도변화(하절기 담천공)	64
(그림 4.16) 지붕 마감재에 따른 지붕 표면온도 변화(하절기 담천공)	64
(그림 4.17) 지붕 마감재에 따른 공기 온도 변화(하절기 담천공)	64
(그림 4.18) 지붕 마감재에 따른 실내 온도 변화(중간기 청천공)	66
(그림 4.19) 지붕 마감재에 따른 마감재 내부 온도변화(중간기 청천공)	66
(그림 4.20) 지붕 마감재에 따른 지붕 표면온도 변화(중간기 청천공)	66
(그림 4.21) 지붕 마감재에 따른 공기 온도 변화(중간기 청천공)	67
(그림 4.22) 지붕 마감재에 따른 실내 온도 변화(중간기 담천공)	68
(그림 4.23) 지붕 마감재에 따른 마감재 내부 온도변화(중간기 담천공)	68
(그림 4.24) 지붕 마감재에 따른 지붕 표면온도 변화(중간기 담천공)	69
(그림 4.25) 지붕 마감재에 따른 공기 온도 변화(중간기 담천공)	69
(그림 4.26) 지붕 재료에 따른 실내 온도 변화(동절기 청천공)	70
(그림 4.27) 지붕 재료에 따른 마감재 내부 온도변화(동절기 청천공)	71
(그림 4.28) 지붕 재료에 따른 지붕 표면온도 변화(동절기 청천공)	71
(그림 4.29) 지붕 재료에 따른 공기 온도 변화(동절기 청천공)	71
(그림 4.30) 동절기 청천공 시 옥상 표면 온도	72
(그림 4.31) 지붕 재료에 따른 실내 온도 변화(동절기 담천공)	73
(그림 4.32) 지붕 재료에 따른 마감재 내부 온도변화(동절기 담천공)	73
(그림 4.33) 지붕 재료에 따른 지붕 표면온도 변화(동절기 담천공)	74
(그림 4.34) 지붕 재료에 따른 공기 온도 변화(동절기 담천공)	74
(그림 5.1) DOE 4.0 알고리즘	77
(그림 5.2) 실측 및 시뮬레이션의 기후데이터 비교	81
(그림 5.3) 청천공 시 지붕 관류열손실 결과 비교	82
(그림 5.4) 담천공 시 지붕 관류열손실 결과 비교	82
(그림 5.3) 변수에 따른 냉방부하량	87
(그림 5.4) 변수에 따른 난방부하량	89
(그림 5.5) 일반지붕과 Cool Roof적용에 따른 LCC 분석	101

(그림 5.6) 누적 LCC	102
(그림 6.1) 우리나라 냉·난방도일	106
(그림 6.2) 방사율 0.1일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실 ...	107
(그림 6.3) 방사율 0.2일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실 ...	108
(그림 6.4) 방사율 0.3일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실 ...	109
(그림 6.5) 방사율 0.4일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실 ...	110
(그림 6.6) 방사율 0.5일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실 ...	111
(그림 6.7) 방사율 0.6일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실 ...	111
(그림 6.8) 방사율 0.7일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실 ...	112
(그림 6.9) 방사율 0.8일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실 ...	113
(그림 6.10) 방사율 0.9일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실 ...	114
(그림 6.11) 방사율 0.1일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실 ...	115
(그림 6.12) 방사율 0.2일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실 ...	116
(그림 6.13) 방사율 0.3일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실 ...	117
(그림 6.14) 방사율 0.4일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실 ...	118
(그림 6.15) 방사율 0.5일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실 ...	119
(그림 6.16) 방사율 0.6일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실 ...	119
(그림 6.17) 방사율 0.7일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실 ...	120
(그림 6.18) 방사율 0.8일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실 ...	121
(그림 6.19) 방사율 0.9일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실 ...	122
(그림 6.20) 방사율 0.1일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실 ...	123
(그림 6.21) 방사율 0.2일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실 ...	124
(그림 6.22) 방사율 0.3일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실 ...	125
(그림 6.23) 방사율 0.4일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실 ...	126
(그림 6.24) 방사율 0.5일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실 ...	127
(그림 6.25) 방사율 0.6일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실 ...	128
(그림 6.26) 방사율 0.7일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실 ...	129
(그림 6.27) 방사율 0.8일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실 ...	129
(그림 6.28) 방사율 0.9일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실 ...	130

(그림 6.29) 중부지역 지붕을 통한 냉방에너지 절감률	132
(그림 6.30) 중부지역 지붕을 통한 난방에너지 절감률	132
(그림 6.31) 남부지역 지붕을 통한 냉방에너지 절감률	133
(그림 6.32) 남부지역 지붕을 통한 난방에너지 절감률	133
(그림 6.33) 제주지역 지붕을 통한 냉방에너지 절감률	134
(그림 6.34) 제주지역 지붕을 통한 난방에너지 절감률	135
(그림 6.35) 신축건물 지붕 설계 지침	138
(그림 6.36) 리모델링 시 설계 지침	140

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

우리나라에서 사용되고 있는 에너지 소비량의 해외 의존도는 2008년을 기준으로 약 96.5%로 거의 전량을 수입에 의존하고 있다. 우리나라의 에너지 수입량은 전체 수입량에 31.9%를 차지하는 것으로, 약 702억불이 에너지 수입액으로 사용된다.

우리나라의 전체 에너지 소비량 중에서 건물분야에서 사용되는 에너지는 약 19.8%를 차지하고 있다.¹⁾ 물론 건물이외에 산업과 교통 분야에서도 많은 에너지를 사용하고 있지만, 산업 및 교통 분야는 그동안 꾸준히 산업공정의 고효율화와 자동차 연비개선에 노력해왔기 때문에 에너지 소비효율이 크게 향상되었다. 그러나 건물분야는 그 동안 생활수준의 급격한 향상과 건축물의 수요증대 및 에너지 절약 정책의 미흡 등으로 에너지효율이 크게 떨어져 있으며, 따라서 에너지 효율 향상을 통한 절약의 가능성이 가장 큰 분야이다.

특히 최근에는 건물의 냉방에너지가 크게 증가하고 있으며, 특히 상업용이나 업무용 건물의 경우 에너지비용 중 약 53%²⁾가 냉방에너지로 사용되고 있다. 이러한 상업용 건물이나 업무용 건물은 실내 발열부하가 많아 다른 건물에 비해 냉방부하가 많이 발생하고, 특히 하절기에는 일사의 영향으로 지붕면을 통해 실내 온도가 상승하여, 거주자의 열적 쾌적성을 저하시키는 등 많은 열적 취약조건을 가지고 있다.

우리나라 사무용 건물의 지붕은 주로 평지붕으로 이루어져 있어, 하절기 주간의 높은 태양 고도각은 지붕을 통해 더 많은 일사량을 건물로 유입시키고, 이로 인해 건물의 최상층은 최하층이나 중간층에 비해 더 많은 냉방을 위한 에너지 사용을 요구한다. 또한, 증가된 최상층의 냉방부하는 건물 전체 피크부하를 증가시켜, 건물에 과도한 장비용량 산정 및 전력사용요금을 증가시키는 원인이 된다.

현재 지붕을 통한 에너지를 저감하는 방안으로 옥상녹화 시스템 적용에 따른 지붕의 열관류율 저감 방안과 옥상구성 재료의 변화에 따른 단열 성능 강화 등이

1) 에너지관리공단, 에너지절약 통계 핸드북 2010. <http://www.kemco.or.kr/>

2) California Energy Commission, 2005 Building Energy Efficiency Standard, Nonresidential Compliance Manual, www.energy.ca.gov

이루어져왔다. 그러나 옥상 녹화 시스템은 초기투자비용 증가, 시공의 어려움, 지붕층의 누수, 식생의 성장으로 인한 지붕파괴, 옥상의 하중 증가로 구조체 보강, 식생 유지관리상의 어려움 등 여러 가지 문제점들이 발생돼, 이러한 문제점들의 해결방안에 관한 연구들이 지속적으로 이루어지고 있다.

그 외 지붕으로 유입되는 열류 차단 방법으로는 일사 차광막을 활용한 실내 온도 저감 방안, 지붕 살수를 통한 증발 냉각방안, 최상층 에너지 저감을 위한 최적의 지붕 기울기 분석 등 하절기 지붕에서의 열류를 차단하는 방안에 관해 연구가 진행되고 있다. 따라서 지붕에 에너지 저감을 위해 보다 간단하고, 기존건물에도 적용이 용이한 다른 에너지 저감 방안이 요구되고 있다.

최근 국외에서는 지붕의 일사열 조절에 따른 에너지 저감 방안에 관한 다양한 방안들이 연구되고 있으며, 이 중 현재 가장 많이 적용하고 있는 Cool Roof 시스템은 지붕 재료에 높은 태양 반사율과 열 방사율을 적용함으로써 건물의 열획득 감소 및 냉방 효율을 향상시키는 방안으로, 기존 건물에도 적용 가능한 하절기의 자연 냉방기법으로 평가받고 있다.

Cool Roof 시스템은 기존의 일반적인 지붕에 비해 높은 태양 반사율과 열 방사율 가지고 있는 모든 지붕시스템을 통칭하는 것으로, 이와 같은 열적 물성으로 인해 일반적인 지붕에 비해 표면온도를 낮게 유지한다. 태양 반사율이 높은 Cool Roof 시스템은 하절기 일사를 일반적인 지붕에 비해 더 많이 반사시켜 건물의 냉방 비용을 저감할 수 있다. 또한 일반적인 지붕에 비해 표면온도가 낮기 때문에 지붕을 통해 실내로 유입되는 열량을 차단하여 실내 거주자의 쾌적감을 향상시키고, 도심의 열섬현상을 감소시켜 외기의 오염물질과 스모그 형성을 저감시킬 수 있는 것으로 국외 연구 결과 나타났다.

이러한 지붕의 Cool Roof 적용에 따른 건물의 냉방 에너지저감 및 도심 열섬현상 저감과 관련하여 국외에서는 Cool Roof 성능 기준과 적용 프로그램 등을 개발하여 건물 지붕에서의 에너지 저감방안을 모색하는데 반해, 현재 국내에서 지붕 재료와 관련 된 규정으로는 지붕 재료의 약 70% 이상 적용되고 있는 방수재료와 관련하여 인장강도, 신장률, 내화학적 등 재료의 내구 성능만을 요구하고 있으며, 그 외 재료의 열적 성능에 관한 요구 성능은 없는 것으로 나타났다.

이에 따라 지붕의 열적 성능저하에 따른 최상층의 취약한 열환경 개선을 위해 지붕의 일사조절 및 단열의 향상 등에 관한 검토의 필요성이 요구되고 있으며, 이러한 건물 지붕에서의 에너지 성능 향상을 위해 건물 지붕의 특성 및 지붕을 통해 실내로 전달되는 열량에 관해 정량적으로 평가하고, 지붕을 통한 다양한 에너지 저감 방안에 관하여 지속적으로 연구되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 지붕을 통해 발생하는 냉방에너지 부하를 저감할 수 있는 친환경 냉방 기법인 Cool Roof의 국내 적용을 위한 요구 성능 기준 및 설계 지침을 제안하기 위해, Cool Roof의 국내 적용 가능성을 분석하고, 그에 따라 우리나라 지역에 따른 지붕 마감재의 태양 반사율과 열 방사율, 적정 단열성능 기준을 마련한다. 이것으로 토대로 신축건물과 리모델링 건물의 Cool Roof 설계 지침을 제안하여, 국내 지붕 마감재로 Cool Roof 도입 시 활용 가능한 자료를 마련하고자 한다.

1.2 연구의 내용 및 방법

오늘날 건물에서 소비되고 있는 많은 에너지 중 하절기 건물의 냉방을 위해 요구되는 에너지는 건물 전체 에너지 소비량 중 약 53% 이상을 차지하고 있어, 이러한 냉방에너지의 소비량을 감소시키고, 재실자의 열적 쾌적성 증가 및 도심지역의 열섬현상 해소를 위한 환경친화적인 방안이 요구되고 있다. 또한 건물 최상층에서 발생하는 냉방부하는 지붕을 통해 유입되는 일사로 인해 중간층의 냉방부하와 비교하여 약 12~22%³⁾ 높은 것으로 나타났다.

따라서 본 연구에서는 건물에서 하절기 지붕을 통해 유입되는 다량의 일사열을 효과적으로 차단하여, 건물 최상층 열적 불균형의 해결이 가능한 친환경적인 Cooling 기법인 Cool Roof 시스템의 유효성을 검토하고자, 건물의 지붕 재료의 열성능을 파악하고, 지붕 마감재의 열성능에 따른 에너지 성능실험을 실시하였다. 이러한 Cool Roof 시스템의 국내 도입 타당성을 분석하기 위해

3) 윤성환 외, “공동주택의 세대위치별 열부하 특성 분석”, 대한건축학회 논문집(계획계), v.25 n.10, 2009.10, p289~297

일반 마감재와 비교하여 경제성 분석을 실시하고, 국내 지역별 Cool Roof 적용 시 요구 성능기준과 건물 지붕의 친환경 설계지침을 제시하였다.

본 연구에서 수행된 연구의 내용 및 방법의 세부사항은 다음과 같다.

(1) Cool Roof 이론고찰

Cool Roof의 이론적 원리를 고찰하고, Cool Roof적용 시 지붕의 열성능 향상에 따른 건물의 에너지 저감량과 관련된 객관적 지표와 자료를 정리한다. 또한, Cool Roof와 관련된 국외 성능 규정 및 기존 연구 문헌을 검토하여, 국내 Cool Roof 적용 시 요구 되는 열성능 지표를 파악한다.

(2) Cool Roof의 성능 기준 고찰

국내·외 건물의 지붕에 적용되고 있는 Cool Roof의 현황 및 Cool Roof의 성능기준들에 관련하여 조사함으로써 재료에 따른 열성능 및 에너지효율의 특징에 관해 파악하고, 지붕 재료에 따른 에너지 성능분석을 위한 축소모형 실험의 기초적 자료로 활용 한다. 이러한 지붕재료 성능기준과 관련된 기초 자료는 건물 지붕에서의 에너지 성능 분석을 위해 실시 할 해석 시뮬레이션의 모델링 구현 자료로 활용하고, 국내 Cool Roof 적용 기준을 마련하는데 활용한다.

(3) 모형을 통한 Cool Roof의 성능 분석

Cool Roof의 기초자료 분석을 토대로 현재 지붕 재료로 가장 많이 적용되는 Coating재와 동일 재질의 Cool Roofing재, 옥상녹화를 대상으로 지붕의 열성능과 관련하여 축소모형 실험을 실시한다. 이러한 축소모형 실험의 결과를 통해 얻어진 데이터를 토대로 건물 지붕에서 Cool Roof의 특성에 따른 열성능 및 에너지 성능 평가 시뮬레이션의 신뢰도 검증을 실시한다.

(4) 건물의 에너지 효율에 영향을 미치는 지붕요소 민감도 분석

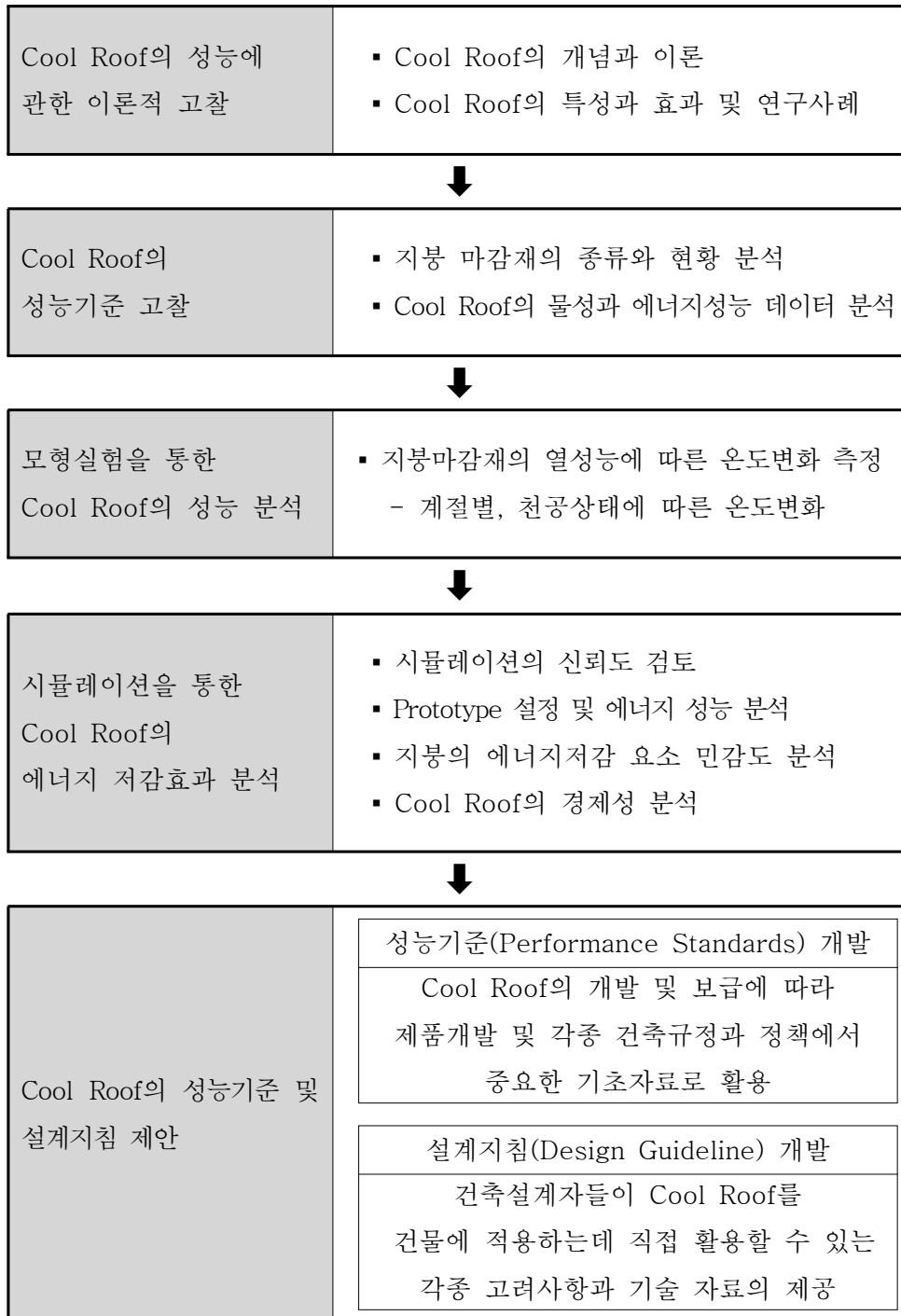
Cool Roof 적용에 따른 에너지 절약효과를 알아보기 위해 사무소 건물의 Prototype을 설정하고, 건물의 최상층 에너지 사용량에 영향을 미치는 건물 지붕요소와 관련하여 민감도분석을 실시하여, 지붕요소에 따른 건물의 에너지 저감량을 확인한다.

(5) Cool Roof 경제성 분석

국내 Cool Roof 도입의 타당성을 파악하기 위해 사무소 건물의 Prototype에 일반 지붕마감과 Cool Roof 지붕 마감의 적용에 따른 초기투자비용과 유지관리비, 에너지비를 LCC의 현가법을 통해 비교·분석한다.

(6) 사무소 건물의 Cool Roof 적용방안 및 기준 마련

Cool Roof의 국내 적용방안 마련을 위해 사무소 건물 지붕 마감재의 단열 성능 및 태양 반사율, 열 방사율에 관한 지역별 요구 성능기준을 마련한다. 이러한 국내 지역별 사무소건물 지붕의 성능기준을 토대로, 신축건물과 리모델링 건물의 지붕설계 시 쉽게 활용이 가능한 설계 기법을 제안한다.



(그림 1.1) 연구의 흐름도

제 2 장 Cool Roof의 이론과 연구동향

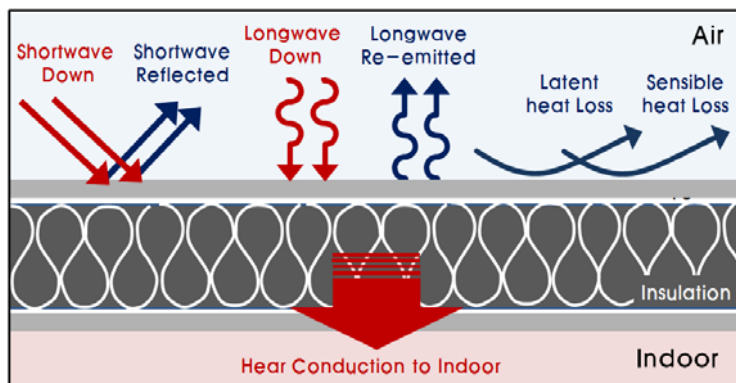
본 장은 Cool Roof를 국내 건축 지붕 재료로써 적용하기 위한 적정성능 기준을 마련하고 친환경 지붕설계 지침을 마련하기 위한 예비적 연구 고찰이다. 먼저, Cool Roof가 지붕에 적용 될 때 건물의 에너지 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해, 현재 적용되고 있는 Cool Roof의 종류와 그 특성에 관하여 조사하고, Cool Roof의 적용방안 및 성능 기준에 관한 기존 연구를 검토한다.

2.1 Cool Roof에 대한 이론적 고찰

2.1.1 Cool Roof의 정의

건물에 있어 지붕은, 하절기에 건물로 유입되는 많은 양의 태양열을 차단하여 건물 최상층의 온도 상승을 저감하는 역할을 한다. 태양으로부터 지붕에 도달하는 일사열 중 일부는 지붕 표면으로부터 반사되고, 나머지는 지붕을 통해 건물 내로 흡수되는데 이때, 지붕의 구조체 내로 흡수된 열은 건물의 실내로 유입되거나 다시 대기 중으로 방사된다. 이때 건물 최상층의 냉방부하를 결정하는 지붕 재료의 열성능은 지붕의 단열 성능과 지붕표면의 태양 반사율(solar reflectance)과 열 방사율(thermal emittance)이다.

다음 (그림 2.1)은 지붕을 통한 열전달을 나타낸 것이다.



(그림 2.1) 지붕을 통한 열전달

건물의 지붕에서 발생하는 열전달은 (그림 2.1)과 같이 7가지의 유형이 있으며 이를 열평형 방정식으로 나타내면 [식 2.1]¹⁾과 같다.

$$\begin{aligned}
 & SW_{down} - SW_{up} + LW_{down} - LW_{up} - Q_{convection} - Q_{conduction} - Q_{latent} \\
 & = C_{roof} \times \frac{d}{dt} \left[\frac{T_{roof} + T_{ceiling}}{2} \right] \quad \text{[식 2.1]}
 \end{aligned}$$

여기서 SW , LW , $Q_{convection}$, $Q_{conduction}$, Q_{latent} 은 각각 단파장복사, 장파장복사, 대류, 전도 및 잠열에 의한 열의 이동을 나타낸다.

식의 우측항은 지붕구조의 열함유량의 변화량을 나타내는데, 지붕구조의 평균온도와 지붕구조의 단위면적당 열용량계수(Heat Capacity Coefficient, Roof)의 곱으로 계산할 수 있다. 이 식에서 만일 좌측항이 플러스의 값을 갖는다면, 이는 지붕구조에서 단위시간당 손실되는 열보다 획득되는 열이 더 많다는 뜻이다. 이와 같은 단위시간당 에너지의 증가는 지붕구조의 열함유량 증가로 나타난다.

여기서,

$$\begin{aligned}
 SW_{down} &= \text{지붕표면에 도달하는 단파장 태양에너지} \\
 &= Direct\ Solar + Diffuse\ Solar \\
 SW_{up} &= \text{지붕표면으로부터 반사되는 단파장 태양에너지} \\
 &= \alpha \cdot SW_{down} \\
 LW_{down} &= \text{지붕표면에 도달하는 장파장 복사에너지} \\
 &= (0.605 + 0.048 \cdot e^{1/2}) \cdot \sigma \cdot T_{air} \\
 LW_{up} &= \text{지붕표면으로부터 방사되는 장파장 복사에너지} \\
 &= \epsilon_s \cdot \alpha \cdot T_{roof}^4 \\
 Q_{convection} &= \text{대류에 의한 열손실(혹은 획득)} \\
 &= \gamma_2 (T_{roof} - T_{air})
 \end{aligned}$$

1) Greg O'Keeffe, Dan Braman, Energy Balance Modeling Applied to a Comparison of White and Green Roof Cooling Efficiency, <http://www.roofmeadow.com/technical/publications/GaffinetPaperDC-0009.pdf>

$$Q_{conduction} = \text{전도에 의한 열손실(혹은 획득)} \\ = K(T_{roof} - T_{ceiling})$$

$$Q_{latent} = \text{증발에 의한 열손실} \\ = \frac{Q_{convection}}{\beta} \quad (\text{옥상녹화의 경우}) \\ \approx 0 \quad (\text{일반지붕의 경우})$$

을 나타낸다.

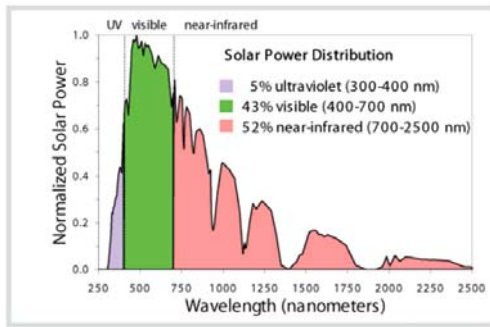
α	: albedo (태양반사율)	σ	: Stefan-Boltzmann 상수
T_{air}	: 외기 온도	e	: 대기의 수증기압
ϵ_s	: 지붕표면의 장파장 방사율	T_{roof}	: 지붕의 표면온도
γ	: 표면 대류 전단율	$T_{ceiling}$	: 실내 ceiling 온도
K	: Thermal Conductance(W/m ² K)		
β	: Bowen비 (현열량과 잠열량의 비)		

지구 표면에 도달하는 태양에너지의 전체 스펙트럼은 (그림 2.2)²⁾와 같이 250~2500nm로, 그 중 자외선이 5%, 가시광선이 43%, 적외선이 52%를 차지한다. 하절기에 태양에너지로 인해 증가하는 냉방부하를 저감하기 위해 전체 태양 에너지 스펙트럼 중 많은 량의 적외선을 반사시켜, 건물의 지붕을 통해 유입되는 태양 에너지를 저감할 수 지붕 마감재를 Cool Roof라 한다. Cool Roof는 일반적으로 흰색이나 밝은 색으로 이루어져있어, 태양 반사율과 열 방사율이 높은³⁾ 특징을 갖고 있다.

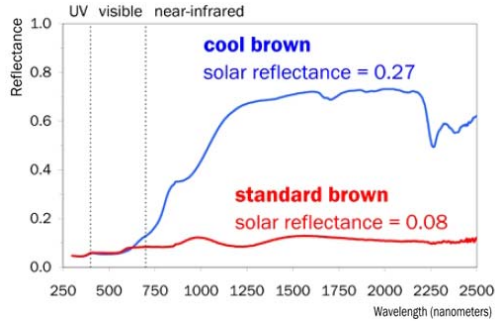
이러한 Cool Roof는 (그림 2.3)과 같이, 일반 코팅 마감재는 적외선의 절반 이상을 흡수하지만, Cool Roofing 코팅 마감재는 높은 태양 반사율로 인하여 적외선의 흡수량이 적다.

2) California Energy Commission Public Interest Energy Research Program, COOL-COLOR ROOFING MATERIAL, 2006, <http://www.energy.ca.gov/2006publications/CEC-500-2006-067/CEC-500-2006-067.PDF>

3) Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies, <http://www.epa.gov/hiri/resources/pdf/CoolRoofsCompendium.pdf>

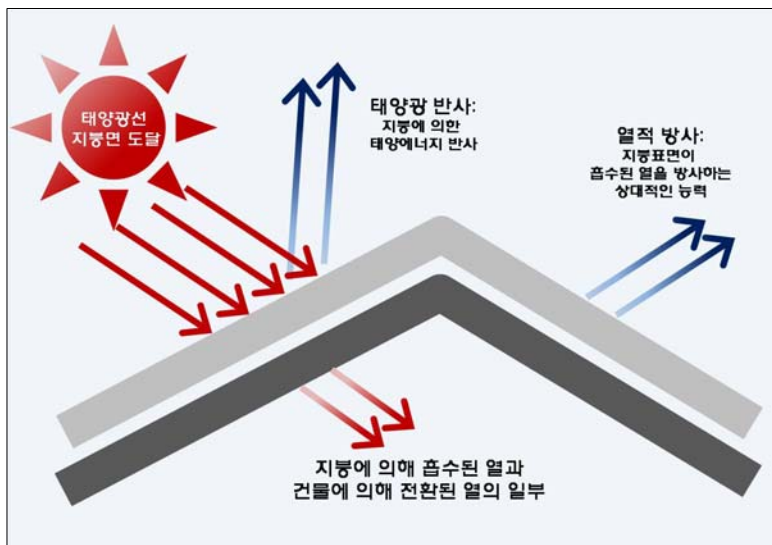


(그림 2.2) 태양 스펙트럼

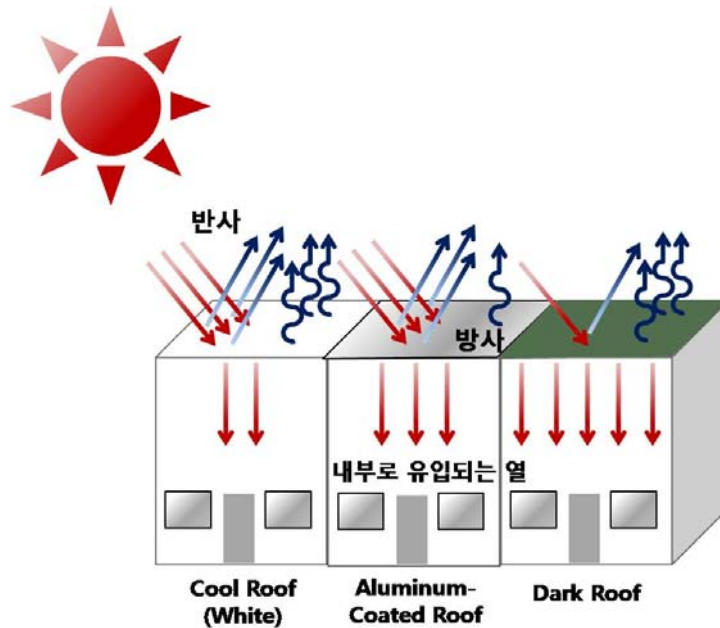


(그림 2.3) 일반지붕과 Cool Roof의 태양 반사능력

표면온도를 낮게 유지하는 Cool Roof는 기존의 일반적인 지붕에 비해 높은 태양 반사율과 열 방사율 가지고 있는 모든 지붕을 통칭하는 것으로, 이와 같은 열적 물성으로 인해 일반적인 지붕에 비해 지붕의 표면온도를 낮게 유지할 수 있다. 다음 (그림 2.4)는 건물 지붕이 갖는 일반적인 열성능을 나타낸 것이고, (그림 2.5)는 Cool Roof의 기본 개념을 나타낸 것이다.



(그림 2.4) 지붕에서의 일반적인 열성능



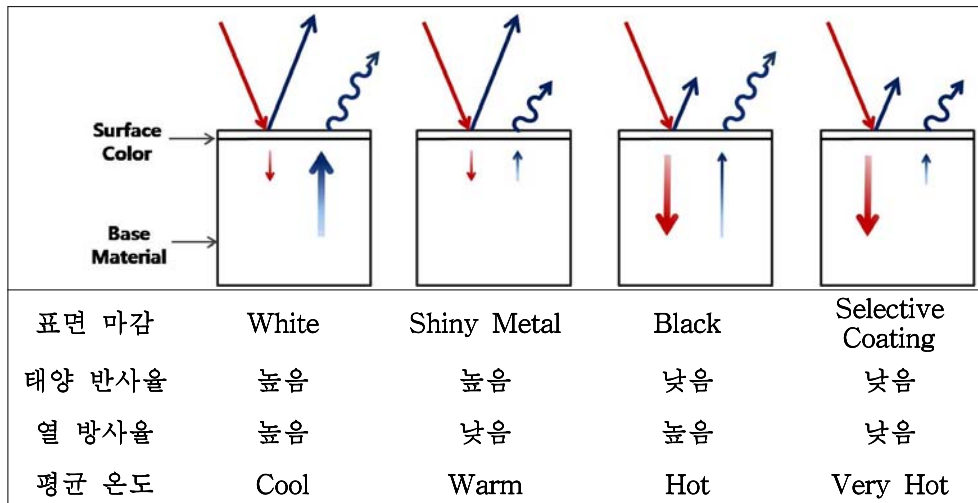
(그림 2.5) Cool Roof의 개념

하절기에 건물의 지붕부분에 일반적으로 이용되고 있는 지붕마감재를 적용할 때보다, Cool Roof를 적용하게 되면 지붕의 표면온도를 낮출 수 있어, 그로인해 얻을 수 있는 장점은 다음과 같다.⁴⁾

- 하절기 냉방 비용저감을 통한 연간 전력비 저감
- 사용시간 개선을 통한 최대 수요 전력비용 저감
- 지붕의 수명을 증가시킴으로써 지붕 유지비용과 교체비용 감소
- 지붕표면으로부터 열을 반사시켜 하절기 실내 쾌적 증가
- 도시와 시가지에서 열섬현상 감소
- 공기 오염물질과 스모그 형성 저감

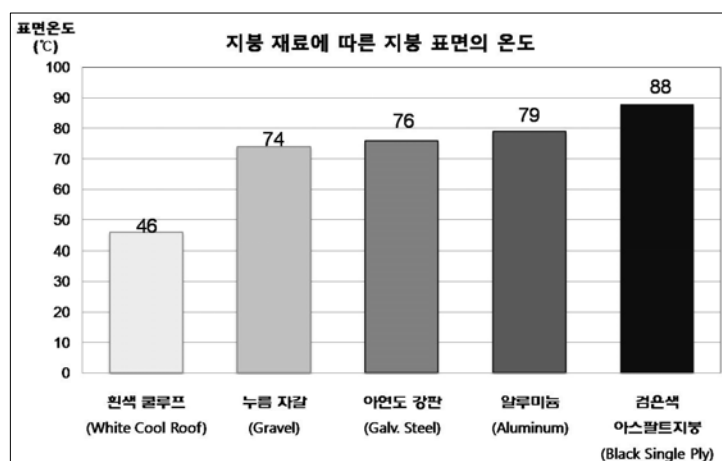
이러한 Cool Roof는 다른 지붕 마감 재료보다 낮은 표면온도를 유지하는데, 이는 (그림 2.6)과 같이 태양 반사율과 열 방사율이 다른 마감재에 비해 상대적으로 높아 평균 온도(Equilibrium Temperature)⁵⁾가 낮아지기 때문이다.

4) <http://www.consumerenergycenter.org/coolroof/index.html>



(그림 2.6) 마감재의 태양 반사율과 열방사율에 따른 평균 온도

다음 (그림 2.7)은 지붕 재료의 평균온도에 따른 표면온도를 나타낸 것이다.



(그림 2.7) 지붕의 재료에 따른 지붕표면의 온도

Cool Roof는 지붕 재료로 사용되는 재료로써 어떤 규격화된 제품이 아닌 지붕에 적용 가능한 다양한 재료로, 그 재료가 갖고 있는 다양한 물리적 성질 중 태양 반사율과 열 방사율의 능력에 따라 Cool Roof의 등급이 결정된다.

5) Nobert Lechner, Heating, Cooling, Lighting: Design Methods for Architects, John Wiley & Sons, Inc. p43-44

Cool Roof의 성능은 CRRC(Cool Roof Rating Council)을 통해 평가 시스템이 구축되었고, CRRC에서 만들어진 평가 프로그램을 통해 지붕 제품의 태양반사와 열의 방사 능력을 측정하고 그 결과를 온라인 디렉토리를 통하여 건축법규, 건축시방서, 건축주와 설계자에게 지붕의 에너지 저감방안에 관한 제공자 역할을 한다.

1) Cool Roof의 일반적인 요구 성능

건물에 있어 지붕은 난방 및 냉방 에너지와 관련하여 건물의 전생애 비용에 영향을 미치나, 지붕은 기후나 계절에 따른 부하 등과 같은 것에 영향을 받기 때문에 지붕 성능의 영향 평가는 굉장히 어렵다. 지붕의 성능평가에 영향을 미치는 요인은 다음과 같다.

- 기후 - 냉·난방 에너지
- 계절에 따른 기간부하
- 경제성(초기투자비, 이자율, 물가상승률 등)
- 지붕의 유효 수명(내용연수)

Cool Roof 시스템의 성능 향상을 위하여 미국에서는 지붕 제조업자들이 2003년부터 재료에 따라 성능을 검증하고 분류한 후 제품 성능이 다음과 같은 사항에 부합하도록 준수하고 있다.

- 타일을 제외한 모든 지붕의 반사율 : 0.7이나 그 이상
- 타일의 반사율 : 0.4나 그 이상
- 최소 방사율 : 0.75
- 액체로 적용된 지붕제품은 반드시 지붕 전체에 걸쳐 최소 건조 두께 20mm 이상

또한 Cool Roof 시스템의 인증을 받기 위해 지붕제품은 ASTM(American Society for Testing and Materials) 기준 실험에 반드시 따라야 한다.⁶⁾

6) www.astm.org

국의 친환경 인증제도 내 Cool Roof의 최소 성능은 <표 2.1>과 같다.

<표 2.1> 친환경인증제도 내 Cool Roof의 최소 성능

	Solar Reflectance	Emittance	Solar Reflectance Index
ENERGY STAR®			
Low Slope Initial	0.65		
Low Slope Aged	0.5		
Steep Slope Initial	0.25		
Steep Slope Aged	0.15		
Green Globes			
	0.65	0.90	
USGBC LEED			
Low Slope			78
Steep Slope			29

2) Cool Roof의 특징

Cool Roof 시스템과 일반 지붕 재료와의 차이점은, 재료가 갖고 있는 성질 중 태양 반사율과 열 방사율 부분에서 다른 일반 지붕 재료와 비교하여 높은 값을 가진다는 것이다.

일반적으로 알베도(Albedo)로 알려진, 태양 반사율은 소수나 백분율로 나타내는데, 0~1의 값으로 설정한 후 0의 값은 모든 태양 복사를 흡수하는 표면을 나타내고, 1의 값은 유입되는 에너지를 모두 반사할 수 있는 능력을 나타내는 것이다.

또한 방사율도 반사율과 마찬가지로 물체의 방사 능력을 0~1의 값으로 설정한 후, 같은 온도의 흑체에서 방사하는 에너지 값과 물체가 방사하는 에너지 값을 비교한 것으로, 방사율 값이 높은 물체로부터 더 많은 양의 에너지가 방출된다.

지붕 재료에 있어 재료가 갖는 일반적인 반사성능 및 방사성능에 관한 사항은 <표 2.2>와 같다.

<표 2.2> 지붕 재료의 반사와 방사 성능에 관한 일반 사항

지붕의 성능	특징
반사 성능 (Reflectivity)	▪ 지붕에 도달 한 태양에너지와 지붕에 의해 반사된 태양에너지의 비율 ▪ 흰색 재료가 태양 반사성능이 가장 높음 ▪ 검은색이 태양 반사성능이 가장 낮음
방사 성능 (Emissivity)	▪ 흑체의 방사 성능을 기준으로 지붕표면으로부터 방사된 에너지 비율 ▪ 높은 방사성능은 지붕표면의 온도를 낮게 유지하는데 도움 ▪ 금속성 표면은 방사성능이 낮음

현재 우리나라를 포함한 전 세계의 대부분의 지붕은 일반적으로 어두운 색으로 (미국의 경우 지붕의 약 90% 이상⁷⁾)되어 있다. 이러한 어두운 색으로 처리 된 지붕은 표면의 온도를 약 60~90℃까지 상승시켜, 그로인해 건물에 미칠 수 있는 영향은 다음과 같다.

- 냉방에너지와 설비장치용량 증가
- 건물 피크 전력 상승 - 전기료 및 잠재적으로 부담되는 전력 배관망 증가
- 거주자의 쾌적감 저감
- 열섬 현상 증가로 인한 공기의 오염 증가
- 지붕 재료의 온도 변화에 따른 잦은 수축과 팽창으로 인한 수명 저하
- 지붕의 유지관리 비용 증가 및 폐기물 증가

Cool Roof는 높은 태양 반사율과 열 방사율로 지붕을 통해 건물 내로 유입되는 에너지비용 저감을 즉각적이고 장기간동안 제공할 수 있으며, 건물 지붕에 Cool Roof 적용 시 건물에 미치는 영향은 다음과 같다.

- 건물 지붕을 통한 열획득 감소
- 하절기 냉방 전력 소비량 저감

7) Michelle van Tijen and Rebecca Cohen, "Features and Benefits of Cool Roofs: The Cool Roof Rating Council Program", Journal of Green Building, Volume 3, Number 2, 2008.02, p.13~19

- 지붕 재료와 건물의 냉방 장비의 수명 증가
- 열섬 현상 감소로 인한 공기오염 및 온실 가스 방출 저감
- 지붕 재료의 수명 증가로 유지관리 비용 증가 및 폐기물 저감

지붕 재료로써 Cool Roof 적용 시 하절기 도심에서 발생하는 열섬현상의 감소 원인은 Cool Roof가 가지는 높은 반사율과 방사율로 일반 지붕과 표면 온도 비교 시 약 20℃정도 낮아 도심의 열섬현상을 저감할 수 있는 것으로 나타났다. 이러한 열섬현상은 스모그 형성에도 영향을 미치는데, 일반적으로 21℃이하의 온도에서는 스모그의 집중으로 인한 문제점이 발생하지 않으나 35℃ 정도의 온도에서는 스모그로 인한 문제점이 발생할 가능성이 있는 것으로⁸⁾ 나타나 Cool Roof를 통해 지붕의 표면온도를 저감하게 되면 도심의 열섬현상 저감 및 스모그 형성 저감에도 영향을 미칠 수 있는 것으로 판단된다.

2.1.2 지붕 마감재의 종류 및 특징

ENERGY STAR®⁹⁾에서 제공하는 지붕재료 적용되는 제품의 목록을 분석한 결과, Cool Roof로 적용되고 있는 제품은 현재 Built-Up-Roof(BUR), Coating, Metal, Modified Bitumen, Shingles, Tile 등 총 6개의 종류로 분류 되고 있다. 또한 이러한 지붕 제품은 각 재료별 초기 태양 반사율, 3년경과 후 태양 반사율, 초기 열 방사율과 함께 적용 시 건물에 적합한 지붕 기울기 등을 기술하고 있다.

1) Built-Up-Roof(BUR)

Built-Up Roofs (BUR)은 아스팔트 루핑과 같이 외겹이나 다 층의 막의 형태로 건물 지붕에 적용되는 것으로, 주로 펠트, 유리섬유나 폴리에스테르로부터 만들어진 섬유를 포함한다.

BUR은 얇은 조각으로 되어있거나 유동성 폴리에스테르 물질과 함께 적용 되며, 폴리머의 색은 검정부터 흰색까지 다양한 범위로 적용할 수 있다. 아스팔트 루핑의 표면은 다양한 색상과 태양의 반사율이 결정된 착색된 물질과 함께 코팅되어

8) Michelle van Tijen and Rebecca Cohen, "Features and Benefits of Cool Roofs: The Cool Roof Rating Council Program", Journal of Green Building, Volume 3, Number 2, 2008.02, p.13~19

9) EPA ENERGY STAR® Roof Product List, "Roof Product List Current as of April 06, 2009", 2009

구성되고, 만일 합성물질로 구성될 경우에는 아스팔트와 유사한 탄화수소나 EPDM(에틸렌 프로필렌고무), 폴리비닐 염화물(PVC)과 같은 합성 폴리머로 제작된다. 폴리머의 색상은 검은색에서부터 흰색까지 다양하게 낼 수 있으며, 이러한 색상은 카본 블랙(carbon black)의 총량에 의해 결정된다.

2) Coating

Coating재는 현재 지붕 재료로 가장 많이 사용되고 있는 것으로, 제품 표면이 불투명하며 태양을 반사하기 위해 아크릴과 흰색 안료(착색제)와 같은 물질로 구성된다. 이러한 Coating재는 일반적으로 태양 에너지의 약 70~80%를 반사시키며, 자외선으로부터 표면을 보호하기 위해 자외선의 약 95%를 반사하는 특징을 가지고 있으며, Coating재의 종류는 다음과 같다.

① Roof Coatings, White

흰색의 코팅재는 아크릴과 흰색 안료, 투명한 중합체와 제품이 불투명하며 태양을 반사시킬 수 있도록 타이타늄이산화물을 포함하고 있다. 흰색의 지붕 코팅재는 태양 에너지의 약 70~80%를 반사시키고, 자외선을 약 5%만 흡수하여 폴리머 질과 접착면내부를 자외선으로부터 보호한다. 이러한 코팅재의 두께는 대략 1mm 범위로 일반적인 흰색 페인트보다 상당히 두껍게 적용되며, 코팅재의 높은 반사율을 만족시키기 위해 충분한 안료 사용과 매끄러운 지붕 마감 시공을 필요로 한다. 만일 지붕 마감재가 이미 밝은 색으로 적용된 경우에는, 적은 량의 안료를 지붕에 도포하여 높은 반사율을 얻을 수 있다.

평지붕의 경우 강우 후 빗물이 고여 지붕의 오염이 다른 지붕에 비해 빠르게 발생하여 태양 반사율이 감소할 수 있어, 장기간 높은 태양 반사율을 유지하기 위해서는 일정한 물매를 주는 것이 유리하다. 또한 대기 중에 습도가 높은 경우에는 지붕 표면에 곰팡이와 같은 오염이 발생 될 수 있는데, 이 경우에는 지붕 표면에 곰팡이살균제를 살포하여 생물학적인 성장을 차단해 지붕 표면 오염을 지연시킬 수 있다.

② Roof Coatings, Aluminum

일반적으로 알루미늄 지붕 코팅재는 “leafing(박)” 알루미늄 조각이 포함된 아스팔트 타입의 수지를 사용한다. 외기에 노출되는 코팅재의 표면은 알루미늄 조각을 겹쳐 적용되므로 지붕 표면은 알루미늄 층으로 연속되어 태양의 자외선

으로부터 아스팔트 물질을 보호한다. 이러한 알루미늄 코팅재는 아스팔트만 적용된 지붕 마감재보다 태양 반사율이 50% 정도 높고, 일반 반사형 코팅재에 비해 약 4%정도 높은 것으로 나타났다. 알루미늄 지붕 코팅재의 단점은 다른 일반 지붕재에 비해 열 방사율이 상대적으로 낮은 것인데, 이에 따른 지붕의 표면 온도 상승 문제로 인해 금속재가 갖고 있는 높은 태양 반사율 이점을 상쇄시킨다.

3) Metal

Metal 제품은 대체로 철이나 알루미늄으로 이루어진 지붕 재료로써, 지붕 널이나 셰이크(shake), 또는 곡선형태의 맞춤식 단일지붕 제품으로 만들어지며, 전형적인 돌출 잇기(standing seam)형태가 가능하며, 제품 제작 시 다양한 형상이 가능하다는 특징을 가지고 있다.

그 중 알루미늄과 철의 경우에는 태양에너지의 약 60%를 반사시킬 수 있어, 하절기 지붕의 표면온도를 낮출 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 이러한 Metal 제품들은 알루미늄 지붕코팅재와 같이 재료의 열 방사율이 다른 지붕 재료에 비해 낮은 경향이 있어 지붕의 표면 온도 상승에 영향을 미친다. 이러한 Metal 제품의 태양 반사율과 열 방사율은 외부표면 상태와 표면의 금속산화물 적용 유무, 오일 필름의 적용 등 표면 거칠기에 민감하며, 일반적으로 Metal 제품들은 태양에 노출되었을 때 태양 반사율이 높기 때문에 표면온도가 다른 제품에 비해 낮다. 그러나 Metal 제품의 열 방사율이 다른 비해 상대적으로 낮은 경우 표면온도는 일반 지붕제품과 유사하다. 이를 검증하기 위해 방사율이 낮은 아연철제와 검은 표면의 지붕 재료를 태양에 노출시킨 결과, 두 재료 모두 동일한 온도로 표면온도가 상승하는 결과를 가져왔다.

4) Modified Bitumen

고무화 아스팔트(Modified Bitumen)의 태양 반사율은 일반적으로 5~20% 정도이며, 주로 검은색이나 회색으로 이루어져, 지붕의 표면 온도를 증가시킨다. 고무화 아스팔트의 낮은 태양 반사율은 지붕널의 미립자 코팅 내 밝은 색 안료의 양을 제한하고 표면 거칠기를 제어한 결과로, 아스팔트의 태양 반사율을 향상시키기 위해 현재 지붕 재료의 최상부에 아스팔트와 함께 강화 플라스틱을 혼입하는 방법을 사용하고 있다.

5) Shingles

싱글 타입의 모든 제품들은 재료의 종류와 관계없이 지붕 형태에 맞춰 적당한 장소에 적용된다. 아스팔트 싱글(Asphalt shingles)의 경우, 주로 주택 지붕에 적용되며, 시공의 용이성을 위해 일반적으로 규격화되어 보급된다.

아스팔트 싱글은 경제적이며, 주로 적용되는 곳은 경사로 이루어진 주택의 지붕으로 태양 반사율의 경우, 낮은 경사로 이루어진 지붕에 적용 시 롤 형태로 이루어진 아스팔트 지붕과 매우 유사하다. 아스팔트 싱글은 지붕의 표면온도가 상승하는 동안 재료에 압축된 1mm 사이즈의 돌(분쇄된 화강암), 무기질 규산염 물질과 함께 코팅된 미립자에 의해 자외선으로부터 지붕을 보호한다.

6) Tile

기와지붕은 세라믹(높은 온도로 구운 점토)이나 콘크리트를 가공된 것으로, 지붕의 무게를 저감하기 위해 섬유 재질(셀룰로오스)로 이루어진 제품을 적용하여 지붕의 무게를 저감할 뿐만 아니라 제품의 강도 또한 증가시킨다. 이러한 기와지붕은 다양한 색상을 낼 수 있으나, 현재 태양반사율과 관련된 데이터양은 재료에 비해 충분히 제공되고 있지 않기 때문에 유사색 페인트 코팅재의 반사율을 이용하여 건물에 적용한다.

기와지붕은 외기가 타일의 외부 표면과 타일 아래 부분을 동시에 순환할 수 있어 다른 지붕 타입과 비교 시 공기의 순환이 높고, 많은 공기의 순환을 통하여 이러한 기와지붕은 태양열을 좀 더 쉽게 발산할 수 있을 뿐만 아니라¹⁰⁾ 화재로부터 안전하다는 장점을 가지고 있다. 그러나 기와지붕은 다른 지붕 재료에 비해 중량구조이며, 저가의 아스팔트 싱글 지붕과 비교 시 설치 비용이 증가한다는 단점을 가지고 있다.

10) www.burbankca.org/building

2.2 Cool Roof에 관한 국내·외 연구동향

현재 국내에서 이루어진 지붕에서의 에너지저감방안으로는 옥상녹화 시스템 적용에 따른 지붕의 열관류율 저감 방안과 옥상구성 재료의 변화에 따른 단열 성능의 민감도 분석, 지붕면에 일사 차광막을 적용한 실내온도 변화와 지붕 살수를 통한 증발 냉각방안, 최상층 에너지 저감을 위한 최적의 지붕 기층기 분석 등 하절기 지붕에서의 열류 차단 방안이 주된 연구다.

그 중 가장 많은 연구가 이루어진 분야는 옥상 녹화 시스템 적용에 따른 에너지 저감방안으로 옥상 표토층의 두께와 식생의 종류에 따른 복사온도의 변화, 옥상 녹화 방법에 따른 관리의 용이성 및 표면온도 등에 관해 연구가 이루어졌다.

그러나 옥상 녹화 시스템은 지붕층의 누수, 식생의 성장으로 인한 지붕파괴, 옥상의 하중 증가로 구조체 보강, 식생의 유지관리상의 어려움 등의 문제점들이 발생 되어 보다 간단하고, 기존건물에도 적용이 용이한 다른 에너지 저감 방안이 요구되고 있다.

한편 국외에서는 지붕의 일사 조절에 따른 에너지 저감 방안과 관련하여 다양한 방안들이 연구되고 있으며, 이 중 현재 가장 많이 적용하고 있는 Cool Roof 시스템은 지붕 재료에 높은 태양 반사율과 열 방사율을 적용함으로써 건물의 열획득 감소 및 방사 능력이 뛰어나 냉방 효율을 향상시키는 방안으로, 건물에 적용 가능한 하절기의 자연 냉방기법으로 평가받고 있다.

2.2.1 국내 연구동향

건물 지붕의 에너지절약 방안에 관한 연구는 지붕의 열관류율(K-value) 감소 기법과 지붕 마감재의 반사 성능 향상으로 구분되며, 현재 국내에서 주로 이루어진 연구는 1990년 후반부터 열관류율 저감방안의 하나인 옥상녹화 시스템의 적용에 따른 에너지 저감방안에 관한 연구이다.

먼저 전성원등¹¹⁾은 옥상 잔디 구조체의 열성능과 식재 토양의 수분수지 특성에 영향을 미치는 증발산량에 대한 측정실험을 실시하여, 옥상식재 구조체의 경우 기존 옥상 구조체보다 실내기온을 평균 1~2℃ 정도 낮추고, 토양의 종류에

11) 전성원, 황정하, 이명호, 옥상잔디식재의 열환경 조절기능에 관한 기초적 연구, 대한건축학회논문집, v.14 n.12, 1998.12, pp.239~248

다른 식생 성장 정도를 분석하고, 흡습율과 증발산량을 파악하여 옥상녹화를 통한 열환경 및 구조적 측면에서 효과를 확인했다.

김현수 등¹²⁾¹³⁾은 환경친화적 건축 기반 기술 개발의 일환으로 시공성과 경제성을 갖춘 보급형 옥상녹화시스템 개발 및 Prototype 제안과 이러한 옥상녹화 시스템의 요구조건에 관하여 단열성 및 구조적 안정성 평가를 제시하고, 건물 지붕에서 에너지 방안을 목표로 녹화에 따른 옥상시스템의 열적 특성과 에너지 절감 부문에 대한 평가를 현장 실험을 통해 하계와 동계의 열성능을 확인했다.

서승직 등¹⁴⁾은 건물의 계절별 열적 성능을 포함한 옥상녹화 시스템의 효율 향상 및 자중과 배수 문제 해결 방안에 관하여 연구를 실시하고, 권시원 등¹⁵⁾과 김현수 등¹⁶⁾, 장대희 등¹⁷⁾은 지붕에 옥상 녹화 적용 시 발생 가능한 문제점 해결을 위하여 방수 공법 강화 방안과 역전 지붕형 시스템 개발방향과 옥상 녹화시스템의 공법 제시 및 성능 비교에 관하여 연구했다. 유대중¹⁸⁾은 공동주택 건물에서 경량형 옥상녹화시스템 적용 시 자체 단열 성능으로 건물 내 냉방부하 절감량에 관하여 확인할 결과, 식재의 증발냉각 효과 미적용에 따라 전체 에너지소비량의 약 3.5%의 저감이 가능한 것에 관해 연구했다.

한편, 현재 국내에서는 본 논문에서 연구하고자하는 지붕의 반사 성능에 따른 에너지 저감방안에 관해 연구문헌이나 저널 등에 관한 자료가 없으며, 기타 지붕에서 에너지 저감 방안으로 증발 냉각 시스템에 관해 신우철 등¹⁹⁾은 일반지붕 구조체와 비교하여 증발냉각 시스템 적용가능성에 관해 실험적 연구를

-
- 12) 김현수, 강재식, 변혜선, 옥상녹화시스템의 개발과 열성능에 관한 기초 연구, 대한건축학회논문집, 제15권 제3호, 1999.03
 - 13) 김현수, 한국형 Green Roof System 개발을 위한 Prototype 제안, 한국생태환경건축학회 논문집 Vol.3, Np. 3, 2003.09, pp.3~11
 - 14) 서승직, 이충국, 최원기, 기하학적 형태의 옥상 녹화 시스템에 관한 연구, 대한건축학회 논문집 19권 10호(통권 180호) 2003.10, pp.177~186
 - 15) 권시원, 조일규, 배기선, 오상근, 옥상녹화시스템의 방수재료 및 공법개발에 관한 필요성 분석, 한국건축시공학회 논문집 제4권 1호(통권 11호), 2004.03, pp.111~118
 - 16) 김현수, 이진호, 역전지붕형 녹화옥상시스템 개발 방향에 관한 연구, 대한건축학회 논문집, 20권 12호(통권194호), 2004.12, pp.219~226
 - 17) 장대희, 김현수, 이진호, 박창영, Green Roof System의 다양한 성능 추구를 위한 공법 제시 및 성능 비교 실험 연구, 한국생태환경건축학회 논문집 Vol.6, No.2, 2006.06, pp.59~66
 - 18) 유대중, 경량형 옥상녹화시스템의 냉방부하절감 효과에 관한 연구, 중앙대학교 대학원, 석사학위논문, 2007.12
 - 19) 신우철, 임득환, 장문석, 백남춘, 지붕 증발냉각시스템의 열성능에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 논문집 16권4호(통권138권), 2000.04, pp.109~115

수행하였고, 최동호 등²⁰⁾은 지붕에서 증발냉각작용에 따른 최상층 실내 온열 환경에 미치는 영향에 관하여 분석한 결과, 최상층의 실내온도를 0.7~1.0℃ 낮출 수 있어 중간층과의 온도차 대비 약 39~43% 정도 실온 상승 억제효과를 가져와 실내 열환경 개선효과가 있다는 것을 확인했다.

최동호 등²¹⁾은 건물의 최상층 부분의 열성능 향상을 위하여 일사차광막 설치에 따른 최상층에서의 실내 온열환경을 일반 지붕 건축물과 비교분석한 결과, 중간층과의 온도차 대비 약 20~30% 정도 실온 상승 억제효과를 가져와 실내 열환경 개선효과가 있음을 확인했다. 또한 태원진²²⁾은 지붕의 기울기에 따른 냉방부하저감에 관하여 에너지 해석 프로그램을 이용하여 지붕의 종류에 따른 적정 기울기에 관하여 연구했다.

위에서 살펴본 바와 같이, 지붕에서의 에너지 저감 방안과 관련한 현재 국내의 연구로는 지붕의 열관류율 저감 방안 중 하나인 옥상녹화 시스템 적용에 따른 에너지성능 향상에 관련한 연구가 주를 이루고 있다. 그렇지만, 건물 최상층의 에너지 성능에 많은 영향을 미치며, 적용이 용이하고 에너지 효율을 증대시킬 수 있는 Cool Roof의 국내 적용을 위해 에너지 저감 성능 및 열 성능 기준 마련과 관련된 연구는 전무한 실정이다.

2.2.2 국외 연구동향

국외에서 건물 지붕의 에너지 저감을 위한 연구 사례는 현재 다양한 방법들이 있고, 그 중 건물 지붕에 높은 반사성능(High-Albedo)을 갖고 있는 재료를 적용하여 그에 따라 건물에서 사용하는 에너지를 저감하고, 건물에 적정 태양 반사율을 확인한 연구들은 다음과 같다.

먼저, Danny S. Parker²³⁾등은 플로리다의 주거용 건물에서 반사성 지붕

20) 최동호, 이부용, 지붕살수에 의한 증발냉각작용이 최상층 실내 온열환경에 미치는 영향 분석, 대한건축학회논문집 22권 5호(통권 211호), 2006.05, pp.287~294

21) 최동호, 이부용, 지붕면 일사차광막 설치에 따른 일사 차폐가 최상층 실내온열환경에 미치는 영향 분석, 대한건축학회논문집 22권 5호(통권 211호), 2006.05, pp.271~278

22) 태원진, 냉방부하 최소화를 위한 지붕의 최적기울기에 관한 연구, 한국태양에너지학회 논문집, vol.25, No. 4, 2005, pp.119~123

23) Danny S. Parker, Stephen F. Barkaszi, Jr, Roof solar reflectance and cooling energy use: field research results from Florida, Energy and Buildings, 25(1997) 105~115

코팅재 적용에 따른 냉방에너지 저감에 관하여 연구한 결과, 알베도 값이 높은 여러 코팅재 지붕의 경우 일반지붕과 하절기의 에너지 사용량 비교 시 냉방부하의 저감량은 전체 2~43% 범위로, 전력사용량의 평균 19% 저감할 수 있고, 설비 피크 부하의 경우 평균 22% 저감이 가능했다.

A. Spala²⁴⁾ 등은 옥상녹화(표토층 70cm, 알베도 0.58)의 알베도 값에 따른 사무소 건물(2층)에 적용 시 미적, 에너지 잠재적 투자에 관해 정확한 동적 수치 모델을 통하여 에너지절약을 계산한 결과, 하절기 냉방부하의 약 40%(건물 전체 저감량 16~39%, 최상층의 경우 27~58%)를 저감하는 것으로 나타났다. 그러나 겨울철의 경우, 난방 부하량을 확인한 결과(건물 전체와 최상층의 경우 각각 2월 2%와 5%, 4월 6%와 14%, 10월 8%와 17%) 증가했다.

또한 최근 Xiaoxin Wang²⁵⁾ 등은 태양 반사물질로 코팅된 지붕 재료를 적용하여 전 세계 6개 지역의 소규모 건물에서 년 간 냉난방 부하와 에너지 소비량, 여러 색상의 코팅재, 지붕 기울기, skin 타입을 통해 태양반사 성능에 따른 건물의 부하량 및, CO₂ 방출량에 관하여 측정했다. 또한 에너지 해석 프로그램인 EDSL TAS version 9.0.9를 통해 12개의 코팅재(태양 반사 : 0.05~0.65 방사 : 0.87~0.91), 밝은 회색, 어두운 회색, 검정, 유칼리나무, 적색 타일, 파란 슬레이트 등 마감재의 표면 종류에 따라 냉난방 부하량 및 전기 소비량에 관해 비교했다. 그 결과, 반사율이 높은 코팅재 사용 시 25~38% 에너지 저감이 가능한 것으로 연구됐다.

Ronnen Levinson²⁶⁾ 등은 캘리포니아의 기후조건을 16개로 구분한 후 Cool Roof 적용에 따른 에너지 해석을 실시한 결과, 지붕의 높은 태양 반사율과 열 방사율을 가진 지붕 재료를 적용할 때 건물의 실내 온도를 낮출 수 있는 것을 확인 했다.

Akbari, H. ²⁷⁾ 등은 북아메리카의 도심지역의 경우 도심 외각 지역에 비해

24) A. Spala, H.S. Bagiorags, M.N.Assimakopouls, J. Kalavrouziotis, D. Matthopoulos, G. Mihalakakou, On the green roof system. Selection, state of the art and energy potential investigation of a system installed in an office building in Athens, Greece, Renewable Energy, 33 (2008) 173-177

25) Xiaoxin Wang, Chris Kendrick, Ray ogden, James Maxted, Dynamic thermal simulation of a retail shed with solar reflective coatings, Applied Thermal Engineering 28(2008) 1066-1073

26) Ronnen Levinson, Hashem Akbari, Steve Konopacki, Sarah Bretz, Inclusion of cool roofs in nonresidential Title 24 prescriptive requirements, Energy Policy 33 (2005) 151 - .170

온도가 약 1~5℃ 높아, 도시 최대 전기전력 요구량이 약 5~10% 가량 증가하는 것을 연구했다. 이러한 도심 열섬 문제의 해결책으로 지붕의 반사능향상에 따른 도심 환경에 미치는 영향에 관해 연구했다. 그 연구에 따르면, 도시의 온도 상승은 스모그 형성에 영향을 주기 때문에 반사능이 높은 지붕재료 적용 시 건물 지붕의 표면온도 감소로 인해 외기온도가 감소하고, 감소된 외기온도는 공조기 용량 및 에너지 사용 감소와 도시의 스모그 형성을 저감할 수 있어, 사람의 건강과 외부환경의 쾌적성을 증가시킬 수 있다. 또한 지붕의 표면온도의 저감으로 인해 외압이 낮아져 지붕의 수명이 증가하고, 이러한 지붕 수명 증가로 인해 유지관리비와 건축 폐기물이 감소한다고 한다.

Taha et al., 1997²⁸⁾, 1999²⁹⁾, 2000³⁰⁾; Taha, 2001³¹⁾; Rosenfeld et al., 1995³²⁾ 등이 Los Angeles에서 측정한 데이터와 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 스모그와 도심 온도에 관한 영향을 연구한 결과, 대기의 온도가 낮아지면 오존(O₃) 농도가 저감되는 것으로 나타났다. 이 시뮬레이션의 결과로 대기 온도가 1.5~2℃ 냉각 시 10~12%의 스모그(오존)의 농도가 감소할 수 있다고 예측하고, 도시의 온도를 낮추는 것의 약 1/3 정도는 Cool Roof를 통해 가능하다고 주장했다. 대기 중 10~12%의 오존량 감소는 도로위의 자동차가 방출하는 량과 동일하다고 한다. 또한 Cool Roof를 통한 소비 전력 감소와 피크부하 저감을 통해 NO_x, CO₂와 PM₁₀ 을 방출하는 발전소를 줄일 수 있고,

-
- 27) Akbari, H., Pomerantz, M., Taha, H., 2001. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy* 70 (3), 295 - 310.
 - 28) Taha, H., Konopacki, S., Akbari, H., 1997. Impacts of lowered urban air temperatures on precursor emission and ozone air quality. *Journal of Air and Waste Management Association* 48, 860 - 65.
 - 29) Taha, H., Konopacki, S., Gabersek, S., 1999. Impacts of large-scale surface modifications on meteorological conditions and energy use: a 10-region modeling study. *Theoretical and Applied Climatology* 62, 175 - 85.
 - 30) Taha, H., Chang, S.-C., Akbari, H., 2000. Meteorological and air quality impacts of heat island mitigation measures in three US cities. LBL-44222. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA.
 - 31) Taha, H., 2001. Potential impacts of climate change on tropospheric ozone in California: a preliminary episodic modeling assessment of the Los Angeles Basin and the Sacramento Valley. LBNL-46695. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA.
 - 32) Rosenfeld, A., Akbari, H., Bretz, S., Fishman, B., Kurn, D., Sailor, D., Taha, H., 1995. Mitigation of urban heat islands: material, utility programs, updates. *Energy and Buildings* 22, 255 - 65.

특히 최대 전력요구량 감소는 최대전력을 위한 건설되는 발전소를 줄일 수 있다고 연구결과 나타났다(CEC, 2000, p. 81).³³⁾

Hashem Akbari³⁴⁾ 등은 캘리포니아 내 기후대가 다른 3개의 Site에서 소매점, 초등학교, 냉장 설비공장 등 건물의 에너지 저감량, 평균 최대부하 저감량과 관련하여 Cool Roof의 영향을 모니터링했다.

Paul Berdahl³⁵⁾ 등은 더운 기후대에서 지붕 재료의 태양 반사성능에 영향을 미치는 요소(혼합물)와 거칠기, 순도 등과 같은 재료의 다양한 성능에 따라 공조 에너지 저감 및 재실자 쾌적 개선에 관하여 연구한 결과를 토대로 설계자가 건물에 적용 가능하도록 그 값을 제공했다.

S. Hassid³⁶⁾ 등은 외기온도가 냉방부하에 미치는 영향을 분석하기 위해 Athens의 97년과 98년 7월 평균온도와 최대 온도 변화를 비교 분석했다. 그 결과 97년에 비해 98년의 하절기 외기 온도가 최대 5℃, 평균 2~3℃ 증가했고, 그에 따라 냉방일수도 증가했다. 또한 외기 온도가 증가함에 따라 건물 내 전체 냉방부하와 최대냉방부하가 증가해 그로 인해 공조기의 용량이 증가하여 초기 투자비가 증가한 것으로 나타났다.

H. Akbari³⁷⁾ 등은 반사형 지붕이 건물의 냉난방 부하에 미치는 영향을 파악하기 위해 년 간 전기, 가스, Net Energy 요금, 최대전기 요구량에 관해 1000ft²(92.9m²)의 지붕 면적을 갖춘 Prototype 건물에서의 에너지 해석을 실시했다. 에너지 해석 프로그램을 통해 Atlanta, Chicago, Los Angeles, Dallas, Houston, Miami/Fort Lauderdale, New Orleans, New York, Philadelphia, Phoenix, Washington 지역의 주거, 사무실, 소매점, 학교, 병원, 요양원, 식료품점을 대상으로 반사율이 높은 밝은 색의 지붕과 흡수율이 좋은 어두운색 지붕으로

33) CEC, 2000. California Energy Demand, 2000-2010. P200-00-02. California Energy Commission, Sacramento, CA.

34) Hashem Akbari, Ronnen Levinson, Leo Rainer, Monitoring the energy-use effects of cool roofs on California commercial buildings, Energy and Buildings 37 (2005) 1007 - 016

35) Paul Berdahl, Sarah E. Bretz, Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing materials, Energy and Buildings 25 (1997) 149- 158

36) S. Hassid, M. Santamouris, N. Papanikolaou, A. Linardi, N. Klitsikas, C. Georgakis, D.N. Assimakopoulos, The effect of the Athens heat island on air conditioning, Energy and Buildings 32(2000).131 - 141

37) H. Akbari, S. Konopacki, M. Pomerantz, Cooling energy savings potential of reflective roofs for residential and commercial buildings in the United States, Energy 24 (1999) 391-407

나누어 에너지 해석을 실시 한 결과 밝은 색 지붕이 더 많은 에너지 절약이 가능한 것으로 나타났다. 그 결과 대도시에서 년 간 2.6TWh의 전력사용량과, 1억9400 달러의 저감이 가능하고, 피크 전력 요구량은 1.7GW를 저감할 수 있는 것으로 분석했다.

일반적인 경사지붕의 경우 지면에서 바라볼 때 미적인 측면을 고려하여 흰색이 아닌 다른 색의 지붕을 선호하는 것으로 나타나, 이를 고려하여 Ronnen Levinson³⁸⁾등은 Cool Roof 중 흰색이 아니면서 적외선을 반사하는 Cooler tile-roofed에 관하여 연구를 실시했다. 먼저 다양한 캘리포니아 기후대에서 Cool Roof coating의 영향을 평가하기 위해 건물 온도상승과 지붕을 통한 열의 흐름에 관하여 Scale model을 통해 측정하였으며, 그 결과 최대 냉방에너지 저감량과 년 간 냉방 에너지 저감량은 240MW와 63GWh/yr으로 나타났다. 이러한 에너지 절약으로 인해 년 간 대기 중으로 방출되는 오염물질의 저감은 CO₂의 경우 35ton, NO_x는 1.1ton, SO_x는 0.86ton으로 나타났다. 또한 Cool tile coating의 표면 마감과 지붕 표면온도의 상관관계를 파악하기 위해 6가지 색상(검은색, 파랑, 회색, 적갈색(terracotta), 녹색, 초콜릿색)의 일반적인 색으로 칠한 지붕재와 Cool Tile Coating 한 것과 비교했다(외기온도 27℃, 수평지구일사량 820W/m² 일 때, ΔT 는 검은색 : 14.4℃, 파랑 : 2.3℃, 회색 : 5℃, 적갈색 : 4.4℃, 녹색 : 6.7℃, 초콜릿색 : 6.7℃). 그 결과 Cool tile coatings을 한 지붕재의 표면온도는 5~14℃, 열 흐름은 13~21% 감소하는 것으로 나타났다.

지붕을 통한 에너지 저감방안에 관해 국내·외 연구동향에 관하여 파악한 결과, 현재 국외에서는 건물 지붕의 태양 반사율 및 열 방사율이 높은 재료를 건물에 적용하여 그에 따른 건물의 에너지 성능 평가 및 지붕재료 개발, 도심 열섬 현상과의 관계와 관련 된 많은 연구들이 진행되었고, 현재 진행 중이다.

이러한 연구들이 지속적으로 진행 중이라는 점을 감안할 때 본 연구를 통해 얻어 질 수 있는 Cool Roof 시스템의 성능 기준 및 친환경 설계 지침 마련은 국내 건물의 에너지 저감 및 도시의 열섬 현상 개선에 많은 영향을 미칠 것이며, 동시에 친환경적인 설계 자료로써 활용도가 높을 것으로 판단된다.

38) Ronnen Levinson,, Hashem Akbari, Joseph C. Reilly, Cooler tile-roofed buildings with near-infrared-reflective non-white coatings, Building and Environment 42 (2007) 2591 - 2605

제 3 장 Cool Roof의 성능 기준

3.1 국외의 Cool Roof 성능기준

3.1.1 ASHRAE Standard

1) ASHRAE Standard 90.1

ASHRAE Standard 90.1에서 상업용 건물의 공조에너지 사용 저감을 위한 방안으로 태양 반사율이 높은 지붕 재료인 Cool Roof를 건물에 적용하기 위해 미국의 다양한 기후대에서 사용할 수 있도록, Cool Roof 적용 시 에너지 저감량에 관한 평가 및 지붕 재료 등에 대한 기준을 제시하였다.³⁹⁾

① Cool Roof의 영향

열 방사율이 높은 재료로 구성된 태양 반사형 지붕은 실내 공조 공간에 지붕을 통해 유입되는 열의 흐름을 감소시켜 하절기에 건물 최상층 내부를 저온으로 유지한다. 이러한 작용으로 인해 건물에서 하절기 냉방에너지의 요구량을 저감한다는 장점이 있지만, 동절기의 경우 태양 고도각이 낮고, 가조시간이 짧아, 지붕을 통해 유입되는 일사량이 하절기에 비해 적고, 지붕 마감재의 반사율이 높아 그로 인해 일사열의 유입이 감소하여 난방에너지를 증가시킬 수 있다는 단점을 가지고 있다. 그러나 동절기의 경우, 천공의 상태가 주로 담천공의 상태로 빈번하게 발생하여, 지붕의 반사율로 인해 증가되는 에너지량은 미미하다. 또한 동절기에 난방은 대체로 이른 아침과 이른 저녁에 실시하기 때문에 지붕의 태양반사 성능이 건물에 미치는 영향은 극히 적다할 수 있다.

② Cool Roof 성능 기준

지붕 제품의 열성능과 관련해 유리섬유가 포함된 아스팔트 싱글, 합성 고무 코팅재, 아스팔트 루핑, 금속 패널, 점토 타일과 콘크리트 타일은 태양 반사율과 열 방사율을 측정한다.

39) Akbari, H., S. Konopacki, D. Parker, B. Wilcox, C. Eley and M. Van Geem (1998) "Calculations in support of SSP90.1 for reflective roofs", ASHRAE Transactions, vol 104, no 1B, pp984-995

건물 지붕에 이용되는 지붕널(shingle)의 태양 반사율은 일반적으로 0.10~0.15 사이이며, 전체 0.03~0.26 범위이다. 검은색과 회색의 싱글 폴리 지붕재와 매끄러운 표면으로 구성된 아스팔트, 회색 과립상의 표면으로 이루어진 아스팔트와 같은 아스팔트 루핑 지붕재는 각각 0.06, 0.23, 0.06과 0.26의 태양 반사율을 가지고 있다. 지붕널(shingle)지붕은 색에 따라 0.12~0.34의 태양 반사율을 가지고 있고, 이러한 비금속 재료의 열 방사율은 0.8~0.9로 나타난다. 금속 지붕의 경우 높은 태양반사율(약 0.6이상)을 가지고 있으나, 낮은 열 방사율(0.1)로 인해 지붕 주변의 기류 속도가 낮을 경우, 어두운 색으로 설치된 지붕과 같은 표면온도 상승효과를 가져 온다.

아스팔트 알루미늄 코팅재는 0.3~0.61의 범위의 태양 반사율을 가지고 있고, 현재 새롭게 제안되고 있는 흰색 합성고무 코팅재는 0.6~0.85의 태양 반사율을 가지고 있고, 보통 새로운 흰색 싱글 폴리 아스팔트 루핑 지붕재는 0.7 이상의 태양 반사율을 가지고 있다. 그러나 이러한 지붕재들은 설치 후 시간이 경과하면 일반적으로 제품의 손상과 풍화작용으로 인해 합성고무재와 아스팔트 루핑의 경우 1년 이내 약 0.1~0.15 정도 태양 반사율이 저감되고, 그 이후에는 저감되는 값이 감소한다. 따라서 Cool Roof를 낮은 경사 지붕에 적용할 때에는 초기 태양 반사율이 0.7 이상, 경과 후 태양 반사율은 0.55 이상 되어야 하며, 열 방사율은 0.8 이상 되어야 한다.

③ Cool roof관련 규정

ASHRAE Standard 90.1-1999⁴⁰⁾는 Cool Roof과 관련하여 설정한 규정으로 초기 태양반사율 0.70 이상, 열 방사율 0.75 이상으로 한다. 또한 ASHRAE Standard 90.1-1999 (section 5.3.1.1)에서 건물 지붕에 Cool Roof 적용 시 제안하는 지붕의 열관류율값은 다음의 [식 3.1]을 통해 조절할 수 있다.

$$U_{roof\ adj} = U_{roof\ proposed} \times F \quad \text{[식 3.1]}$$

40) ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) (1999) ASHRAE Standard 90.1-1999: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings, SI Edition, American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA

$U_{roof\ adj}$ 는 건물 지붕의 적정 열관류율로 건물 지붕에 제안되는 열관류율값인 $U_{roof\ proposed}$ 와 지붕 열관류 계수인 F ($F \leq 1$)를 적용하여, Cool Roof 적용 시 지붕의 열관류율값을 결정한다.

F 는 다음 <표 3.1>을 기준으로 한 지붕의 열관류율 계수로 ASHRAE Standard 90.1-2001(ASHRAE 2001)⁴¹⁾에서는 Cool Roof의 성능기준과 관련하여 동일한 규정을 갖고 있으며, ASHRAE Standard 90.1-2004(ASHRAE 2004a)⁴²⁾에서는 미국을 기후대 별로 구획하여 열관류율 계수를 설정하고 있는데, 그 값은 다음 (표 3.2)와 같다.

<표 3.1> Cool Roof를 위한 지붕 열관류율(U-factor)계수

HDD65a	(HDD18)b	Roof U-Factor Multiplier
0-900	(0-500)	0.77
901-1800	(501-1000)	0.83
1801-2700	(1001-1500)	0.85
2799-3600	(1501-2000)	0.86
> 3600	(>2000)	1.00

a. Heating-Degree-Days based on 65°F

b. Heating-Degree-Days based on 18°C

(Table 5.3.1.1B of ASHRAE 90.1-1999)

<표 3.2> Cool Roof를 위한 지붕의 열관류율(U-factor) 계수

Climate Zone	Roof U-Factor Multiplier
1	0.77
2	0.83
3	0.85
4 - 8	1

(Table 5.5.3.1 of ASHRAE 90.1-2004)

41) ASHRAE (2001) ASHRAE Standard 90.1-2001: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings, SI Edition, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA

42) ASHRAE (2004a) ASHRAE Standard 90.1-2004: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings, SI Edition, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA

④ 개정

ASHRAE Standard 90.1-2001 (ASHRAE, 2001)은 Cool Roof와 관련하여 동일한 규정을 계속 유지하고 있고, ASHRAE Standard 90.1-2004 (ASHRAE, 2004a)와 관련한 기준의 현재 버전은 난방 도일보다는 미국 기후대에 따른 열관류율 계산을 기초로 일람표가 만들어져 있다.

2) ASHRAE Standard 90.2

ASHRAE Standard 90.2는 저층 주거용 건물을 위한 에너지 절약 설계기준으로, Cool Roof와 관련된 내용은 ASHRAE Standard 90.1과 유사하다.

① Cool Roof 적용 시 주거용 건물의 에너지 소비량 예측 방안

ASHRAE Standard 90.2는 이전 Standard 90.1의 주거용 건물의 프로토타입을 이용하여 난방과 냉방 에너지 사용량에 지붕의 태양 반사율이 미국의 29개의 기후대에서 어떠한 영향을 미치는지에 관해 모의실험을 하기 위해 에너지해석 프로그램을 통해 분석한다. Standard 90.2는 프로토타입 건물 내 다양한 변수 중에서 Attic 공간의 유무가 포함 돼 건물의 에너지 분석 시 덕트 위치 (attic이나 공조 공간), 덕트의 열 저항, 지붕의 태양 반사율(0.10, 0.25, 0.50나 0.75)과 천장의 열 저항값(R 1, 11, 19, 30)이 건물에 적용된다. ASHRAE Standard 90.2-2004에서는 건물 지붕에 Cool Roof를 적용할 경우, 구조체의 열관류율이 증가하더라도 지붕의 열성능 규정을 만족하는 것을 반영했다.

건물의 지붕 마감재로 Cool Roof를 적용 할 때 지붕의 열관류율 기준은 다음의 [식 3.2]와 같다.

$$U_{ceiling\ adj} = U_{ceiling\ proposed} \times F \quad [식\ 3.2]$$

$U_{ceiling\ adj}$ Cool Roof 적용 시 조정된 지붕 열관류율

$U_{ceiling\ proposed}$ 제안된 지붕의 열관류율

F 지붕의 열관류율 계수

<표 3.3> 지붕에 Cool Roof 적용 시 지붕의 열관류율(U-factor) 계수

Climate Zone	Ceilings with Attics	Ceilings without Attics
1	1.5	1.3
2	1.25	1.3
3	1.2	1.2
4	1.15	1.2
5	1.1	1.1
6,7,8	1	1

(Table 5.5 of ASHRAE 90.2-2004)

이 기준의 현재 버전인, ASHRAE Standard 90.2-2007 (ASHRAE 2007)⁴³⁾은 지붕의 열성능 준수를 위해 동일한 Cool Roof의 성능 기준을 가지고 있으나, 재료에 따른 열성능을 만족시키기 위해 결정된 지붕의 열관류율 계수 대신, <표 3.4>과 같은 열 저항값을 이용한다.

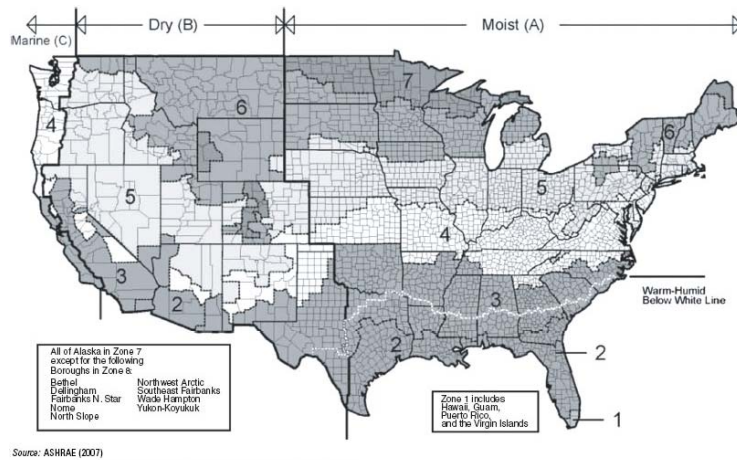
<표 3.4> ASHRAE Standard 90.2-2007에 의한 지붕 열 저항값 (ft²h°F/BTU)

Ceilings with Attics				
Climate Zone	Wood Frame		Steel Frame	
	Conventional Roof	Cool Roof	Conventional Roof	Cool Roof
1	30	20	30	20
2	30	24	30	24
3	30	27	30	27
4	38	38	38	38
5	43	43	43	43
6	49	49	49	49
7	49	49	49	49
8	52	52	52	52

Tables 5.2 and 5.6.1 of ASHRAE Standard 90.2-2007 (ASHRAE 2007).

43) ASHRAE (2007) ASHRAE Standard 90.2-2007: Energy-Efficient Design of Low-Rise Residential Buildings, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA

다음 (그림 3.1)은 ASHRAE에서 규정한 미국 기후대를 나타낸 것이다.



(그림 3.1) ASHRAE에서 규정한 미국 기후대

② Cool-roof 성능 기준

ASHRAE Standard 90.2-2004⁴⁴⁾의 Cool Roof와 관련된 규정 및 성능기준은 ASTM Standard E1980 (Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces (ASTM, 1998))에 의해 기준 풍속(2m/s) 상태에서 (a)초기 태양 반사율 0.65 이상, 열 방사율 0.75 이상 (b)태양 반사 지표(SRI) 75이상의 성능을 가진다.

SRI는 전형적인 하절기 오후 지붕표면의 온도에 관련한 상대적인 지표로, 깨끗한 검은 지붕의 경우(태양 반사율 0.05, 열 방사율 0.90)를 0으로 규정하고, 깨끗한 흰색 지붕(태양 반사율 0.80, 열 방사율 0.90)은 100으로 규정하는 것으로, 온도가 높은 지붕 표면의 경우 낮은 SRI를 가지고 차가운 표면은 높은 SRI를 가진다.

3.1.2 캘리포니아 Title 24 Standard

Cool Roof와 관련한 규정은 2001년에 캘리포니아 Title 24 기준에 추가 되었으며, 2005년에는 낮은 경사 지붕을 갖는 비주거용 건물에 Cool Roof

44) ASHRAE (2004b) ASHRAE Standard 90.2-2004: Energy-Efficient Design of Low-Rise Residential Buildings, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA

적용 시 요구되는 성능 기준을 마련했다. 또한 California Energy Commission(CEC)은 모든 용도의 건물에 Cool Roof를 적용하기 위해 건물의 용도별 Cool Roof의 기준 성능을 마련했다.

1) Cool Roof 성능 기준 (2001)

A Codes and Standards Enhancement(CASE)는 2000년 캘리포니아에서 건물 지붕에 Cool Roof 적용 시 에너지 절약 효과가 탁월하며, 건물의 피크 전력 저감도 가능하다는 연구결과를 Pacific Gas & Electric 회사를 통해 도출했다⁴⁵⁾. 또한 2001년 1월 캘리포니아 주는 건물 지붕에 Cool Roof 도입 시 Title 24의 성능기준을 마련하기 위해 ASHRAE Standards 90.1과 90.2의 Cool Roof 성능 기준을 활용했다⁴⁶⁾. 그에 따라 지붕의 초기 태양 반사율은 0.7 이상, 열 방사율은 0.75이상으로 하는 Cool Roof 열적 성능기준을 마련했고, 예외적으로 타일 지붕의 초기 태양반사율은 0.4이상으로 설정했다.

Title 24는 건물에 있어 Cool Roof 설치를 강제 조항으로 규정하지 않고, 건물에서 에너지 성능을 준수하기 위해 Cool Roof 재료를 설치 할 경우 태양 반사율은 0.55 이상의 제품을 적용하도록 권장하며, Cool Roof가 아닌 제품을 적용할 때 지붕의 태양 반사율은 최소 0.30으로 권장한다.

2) 비주거용 건물의 낮은 경사 지붕을 위한 규정적 요구사항(2005)

2002년 Berkeley Lab Heat Island Group은 비주거용 건물의 낮은 경사 지붕에 Cool Roof 도입 시 Title 24의 규정적 요구사항에 관해 연구를 시작했다. 분석 방법으로는 ASHRAE Standards 90.1과 90.2.에서 적정 Cool Roof의 열적성능을 분석하기 위해 사용했던 방법과 유사하게 Cool Roof를 통한 건물의 에너지 저감량에 관련된 문헌조사를 토대로 실제 에너지 사용량과 비교하고, Cool Roof의 이용가능성과 관련하여 시장 조사를 실시하였으며, 지붕재료

45) Eilert, P. (2000) High Albedo (Cool) Roofs: Codes and Standards Enhancement (CASE) Study, Pacific Gas & Electric report, www.energy.ca.gov/title24/2001standards/associated_documents/2000-11-17_PGE_CASE.PDF

46) CEC (California Energy Commission) (2001) 2001 Energy Efficiency Standards for Residential and Nonresidential Buildings, P400-01-024, California Energy Commission, Sacramento, CA

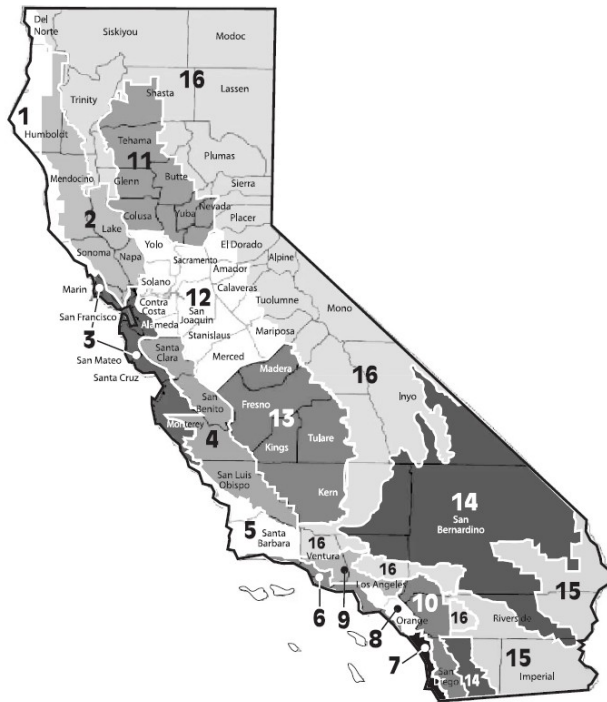
적용되는 물질의 내구성을 검토했다. 또한 Cool Roof의 환경적 영향력 조사와 Cool Roof를 통한 에너지 저감량과 피크 전력 요구량 저감에 관한 가능성을 예측하기 위해 에너지 해석 시뮬레이션을 통해 에너지 성능분석⁴⁷⁾을 실시하고, Cool Roof 재료의 물리적인 검토를 실시했다. 낮은 경사의 지붕에 적절한 Cool Roof를 적용하기 위해 선택한 지붕 재료는 built-up 지붕재, Modified Bitumen과 싱글 폴리아스팔트 루핑으로 3가지의 지붕 재료를 포함한 모든 종류의 지붕재료, 이러한 지붕 재료가 갖는 열성능은 다음과 같다.

- 초기 열 방사율 0.75 이상, 초기 태양 반사율이 0.70 이상
- 초기 열 방사율($\epsilon_{\text{initial}}$) 0.75, 초기 태양 반사율 $0.70 + 0.34 \times (0.75 - \epsilon_{\text{initial}})$

California의 16개 기후대에서 에너지 해석 시뮬레이션인 DOE-2.1E로 건물의 에너지 해석을 실시한 결과, California Title 24의 낮은 경사 지붕으로 이루어진 비주거용 건물 프로토 타입에 Cool Roof 적용 시 연간 평균 3.2kWh/m²의 냉방 에너지를 절약할 수 있고, 천연가스 사용량을 연평균 5.6 MJ/m² 저감할 수 있으며, 건물의 원료로 사용되는 에너지의 30 MJ/m² 저감과 피크 전력 요구량을 평균적으로 2.1W/m²을 저감 할 수 있다. 이러한 전체 에너지 저감량은 냉방 설비장치의 사이즈 감소로 건물의 초기 투자비용을 저감하고, 더불어 15년 순현재가치(net present value-NPV)로 면적당 US\$1.90/m²~\$8.30/m²의 에너지 사용량을 저감할 수 있다. 2005년 California Title 24 Standard에 California 전역에 낮은 경사 지붕으로 이루어진 비주거용 건물에 Cool Roof를 적용하는 것을 법적 요구사항으로 채택했다.

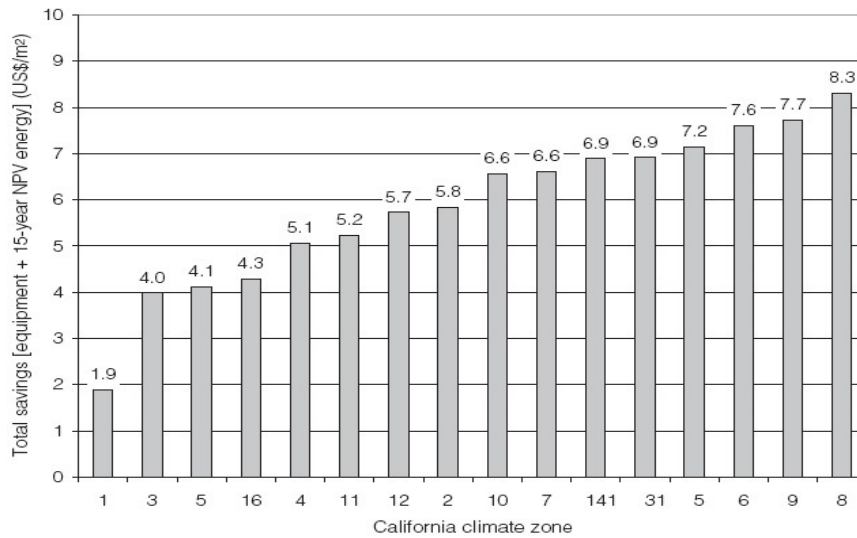
다음 (그림 3.2)은 16개로 구획된 캘리포니아의 기후대를 나타낸 것으로, 우리나라 기후대와 유사한 지역은 Zone 14나 16 이다.

47) Levinson, R., H. Akbari, S. Konopacki and S. Bretz (2005a) "Inclusion of cool roofs in nonresidential Title 24 prescriptive requirements", Energy Policy, vol 33, no 2, pp151 - 170



Source: Eley Associates

(그림 3.2) 캘리포니아 16개의 기후대 지역



Source: Levinson et al (2005a)

(그림 3.3) 낮은 경사각의 비주거용 건물에서 Cool Roof 적용 시
캘리포니아의 기후대에 따른 지붕면적 당 전체 에너지 저감량

3) 급경사 주거 및 비주거용 건물의 지붕, 낮은 경사 주거용 건물의 지붕을 위해 제안된 규범적 요구사항(2008)

2005년, Berkeley Lab Heat Island Group은 2008 Title 24 Standards에 급경사지붕인 비주거용 건물, 급경사 지붕인 주거용 건물과 낮은 경사 지붕인 주거 건물을 포함한 모든 용도의 건물 지붕에 Cool Roof를 적용하기 위하여 추가적인 요구사항을 연구했다. 비주거용 건물에 Cool Roof를 적용할 경우에 대한 적정 열성능을 파악하기 위해 MICROPAS building energy simulation tool⁴⁸⁾을 이용하여, 프로토 타입의 주거용 건물과 작은 비주거용 건물의 시간 별 에너지 사용량을 분석했다⁴⁹⁾⁵⁰⁾

4) 급경사 지붕의 비주거용 건물

Berkeley Lab은 급경사(기울기 5:12이상) 지붕으로 이루어진 3개의 Cool Roof 제품(유리섬유 아스팔트 싱글, 콘크리트 타일과 폴리머로 코팅된 금속재)을 프로타입 건물에 적용하여 각각의 에너지 저감량을 평가했다. 그 결과, 캘리포니아 전체 16개 기후대에서 냉방 에너지저감에 따른 냉방 장비의 규모 축소로 인해 초기 설치비용을 저감하고, 30년 순현재가치(net present value -NPV)로 US\$2.8/m² ~ US\$24.4/m²의 에너지 사용량을 저감했다. 급경사 지붕에 적용 가능한 Cool Roof 제품을 일반지붕재와 설치비용을 비교했을 때 프리미엄은 US\$0.0/m² ~ US\$2.2/m²로, Cool Roof를 캘리포니아 전체 16개 기후대에 적용 시 비용 효율적일 것으로 예상된다.

5) 낮은 경사 지붕의 주거용 건물

Berkeley Lab은 2005 Title 24 Standards를 준수하는 주거용 건물의 프로토 타입을 설정하고, Cool Roof 적용 시 에너지 사용량을 분석하기 위해 낮은

48) MICROPAS (2007) MICROPAS product website, <http://micropas.com>

49) Akbari, H., C. Wray, T. T. Xu and R. Levinson (2006) "Inclusion of solar reflectance and thermal emittance prescriptive requirements for steep-sloped nonresidential roofs in Title 24", http://energy.ca.gov/title24/2008standards/prerulemakingdocuments/2006-05-18_workshop/2006-05-19_NONRESIDENTIAL_STEEP-SLOPED_COOL_ROOFS.PDF

50) Wray, C., H. Akbari, T. T. Xu and R. Levinson (2006) Inclusion of Solar Reflectance and Thermal Emittance Prescriptive Requirements for Residential Roofs in Title 24, www.energy.ca.gov/title24/2008standards/prerulemaking/documents/2006-05-18_workshop/2006-05-17_RESIDENTIAL_ROOFS.PDF

경사지붕으로 이루어진 지붕에 일반지붕재($p=0.20$)와 Cool Roof($p=0.55$) 지붕을 설치하여 에너지 해석을 실시했다.

2005 Title 24 Standards를 만족시키기 위해서는 동일 기후대(2,4와 8~15)에 있는 주거용 건물에 일사 차단을 위한 보조지붕을 필요로 한다. 일사 차단을 위한 보조지붕은 낮은 경사 지붕으로 이루어진 주거용 건물에서는 일반적으로 설치하지 않는다. 일사 차단막이 없는 프로토 타입의 에너지 저감량은 지붕면적 당 전체 에너지 저감량(규정된 냉방 장비 용량 저감에 의한 초기 비용 저감에 Time-Dependent Valuation(TDV) 에너지 저감으로부터 30년 NPV를 합한 값)은 전체 캘리포니아 16개 기후대에서 US \$2.4/m²~\$8.2/m²다. 일사 차단막이 있는 경우의 에너지의 사용 저감량은 US \$2.5/m² ~ \$8.2/m² 으로 에너지 저감량이 적은 캘리포니아 연안의 기후대는 하절기 냉방에 요구되는 에너지량이 적어 이러한 결과가 발생했다.

6) 급경사 지붕의 주거용 건물

Berkeley Lab은 2005 Title 24 Standards를 포함한 급경사 지붕(지붕의 기울기 5:12 이상)으로 이루어진 주거용 건물의 프로토 타입에 서로 다른 3가지(유리섬유 아스팔트 싱글, 경량 콘크리트 타일, 폴리머 코팅 금속) Cool Roof 지붕재를 적용하여 일반 지붕과 에너지 사용량을 비교했다. 일반 지붕 제품의 태양 반사율은 0.10, 아스팔트 싱글은 0.25, 경량콘크리트 타일과 폴리머 코팅금속 제품은 각각 0.40의 태양 반사율을 적용하고, 전체 지붕재의 열 방사율은 0.90으로 지정했다.

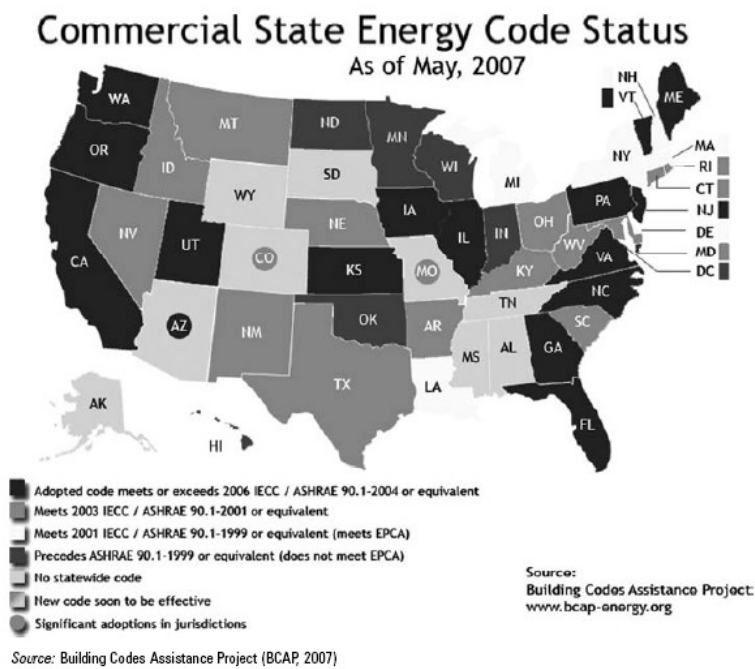
3.1.3 그 외 Cool Roof 성능기준

1) International Energy Conservation Code

2003 IECC; International Energy Conservation Code에서는 건물 지붕에 Cool Roof 적용과 관련하여 강제조항으로 규정하지 않고, 상업용 건물의 경우, 2003 IECC와 ASHRAE Standard 90.1에서 Cool Roof 성능 규정을 제공하고, 건축주가 이러한 요구 사항을 준수하도록 한다. 또한 2003 IECC에는 주거용 건물과 관해 지붕에 Cool Roof 적용을 강제적 조항으로 설정하지 않고, Cool Roof의 성능기준을 제공한다.⁵¹⁾

2006 IECC에서는 상업용 건물을 위해 ASHRAE Standard 90.1의 Cool Roof 성능 규정을 유지하도록 하고, 주거용 건물을 위해 Cool Roof의 기준 성능을 명확하게 제공한다. 이에 따라 2006 IECC⁵²⁾ 주거용 건물의 지붕 태양 반사율은 0.52, 열 방사율은 0.90로 한다.

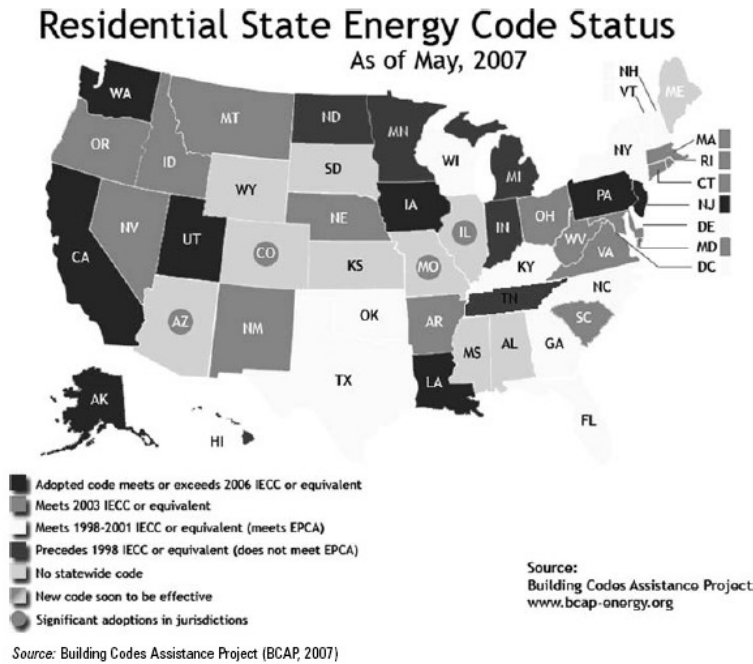
미국 각 주의 2007년 3월 IECC나 ASHRAE 기준의 채택은 (그림 3.4)의 상업용 건물 규정과 (그림 3.5)의 주거용 건물 규정과 같다.



(그림 3.4) 미국 상업용 건물의 에너지 규정

51) ICC (International Code Council) (2003) 2003 International Energy Conservation Code, www.iccsafe.org

52) ICC (2006) 2006 International Energy Conservation Code, www.iccsafe.org



(그림 3.5) 미국 주거용 건물의 에너지 규정

2) Chicago, Illinois(시카고, 일리노이)

도시 열섬현상의 완화를 위해 시카고(일리노이)는 2001 Energy Conservation Code의 section 18-13-303에서 낮은 경사각의 지붕(2:12의 기울기를 넘지 않는 비율)의 경우, 지붕의 초기 태양 반사율은 0.65 이상, 설치 후 3년간 0.5 이상의 태양 반사율을 유지하는 규정을 추가했다. 중간 기울기의 지붕(2:12보다는 높고 5:12보다는 낮거나 같은 기울기)의 경우에는 초기 설치 시와 3년간 태양 반사율이 최소 0.15 이상 되도록 설정하고, 낮은 기울기의 지붕과 중간 기울기의 지붕 모두 0.9 이상의 열 방사율을 유지하도록 한다. 단 건물 옥상에 PV나 태양열, 옥상 정원시스템을 적용한 지붕이나 지붕의 일부분에 적용한 경우 이러한 요구사항으로부터 제외한다.⁵³⁾

Energy Conservation Code의 Cool Roof와 관련된 규정은 2001년 이래로 여러 번 개정돼 왔고, 현재(2007) Code는 낮은 경사각의 지붕의 경우, 2008

53) Chicago (2001) "Amendment of Title 18 of Municipal Code of Chicago Concerning Energy Efficiency Requirements", Journal of the City Council of Chicago, 6 June, p60939

12월 31일부터 초기 태양 반사율이 0.75 이상 되는 제품을 설치하도록 요구하며, US EPA Energy Star label(초기 값과 설치 후 태양 반사율이 각각 0.65와 0.50 이상)에 의해 검증 받은 제품을 반드시 사용해야 한다.

3) Florida

플로리다 주는 Building Code 2001 Ver에 주거용 건물에 Cool Roof 적용 시 적정 성능기준을 처음 제안하고, 흰색의 주거용 건물 지붕의 태양 반사율은 0.65 이상, 열 방사율 0.80 이상으로 제안한다.(FBC, 2001⁵⁴⁾, sections 607.1.A.5 and 607.2.A.3.6). 흰색 지붕이 설치된 주거용 건물은 기존건물과 비교 시 하절기 천장으로부터 유입되는 열에너지의 45% 감소한 반면, 동절기에는 유출되는 열에너지가 4.4% 증가한 것으로 나타났다.

2007년 주거용 건물에 적용한 Cool Roof의 열성능 분석을 위해, 에너지 해석 프로그램인 Energy Gauge USA FlaRes 2007⁵⁵⁾을 이용하여⁵⁶⁾ 확인한 결과 태양 반사율은 0.25 이상으로 2004년 Cool Roof 규정을 위해 사용된 0.15의 태양 반사율보다 더 큰 값을 가지고 있다.⁵⁷⁾

2004년 플로리다의 건축법규의 상업용 건물의 Cool Roof 성능 기준은 ASHRAE Standard 90.1-2004와 동일하며, section 13.404.1.C.1의 규정을 준수하기 위해 열관류율을 플로리다 기후대에 맞게 변경해 사용한다.⁵⁸⁾⁵⁹⁾

4) 하와이

하와이의 호놀룰루시는 2001년 저층 주거용 건물의 지붕 성능은 다음의 규정 사항 중 최소 1가지 이상 만족하도록 변경했다.

54) FBC (Florida Building Commission) (2001) 2001 Florida Building Code, Florida Building Commission, Tallahassee, FL, www.floridabuilding.org

55) Energy Gauge (2007) EnergyGauge USA FlaRes2007 Energy and Economic Analysis Software, www.energygauge.com

56) FBC (2007) Proposed Modification to the Florida Building Code: Chapter 11, Energy Efficiency, www.dca.state.fl.us/FBC/thecode/Res_Chapter_11.rtf

57) Parker, D. (2007) Pers comm from Danny Parker, Florida Solar Energy Center, 13 August

58) FBC (2004) 2004 Florida Building Code, Florida Building Commission, Tallahassee, FL, www.floridabuilding.org

59) Swami, M. (2007) Pers comm from Muthusamy Swami, Florida Solar Energy Commission, Developer of FLA/COM performance compliance software, 14 June

- 단열재의 열 저항 값 $19\text{ft}^2 \text{ h } ^\circ\text{F}/\text{BTU}$
- 2인치 연속 폼보드 단열재
- 복사열 차단과 Attic 공간의 환기
- 0.70 이상의 태양반사율과 0.75 이상의 열 방사율 갖은 Cool Roof(ROH, 2001, section 32-14.2)

2005년 마우이(Maui) 카운티는 호놀룰루의 주거용 건물에서 지붕 성능 규정을 채택하였고(MCC, 2004), 현재 호놀룰루와 마우이에서 시행되고 있는 건물 에너지 규정에서는 건물에 Cool Roof 적용에 따른 지붕 성능 기준을 가지고 있다. 또한 2001, 2002와 2005년 각 각의 호놀룰루, 카우아이와 마우이 카운티는 ASHRAE Standard 90.1-1999를 기초로 하여 비주거용 건물과 고층 주거용 건물을 위해 Cool Roof 성능기준을 마련했다.⁶⁰⁾ 건물에서 사용되는 에너지 사용량을 저감하기 위한 건물외피(e.g. section 32-8 of ROH, 2004)⁶¹⁾ 규정은 Hawaii Model Energy Code로부터 수정된 Cool Roof의 성능 기준을 사용한다.⁶²⁾ 비주거용 건물을 위해 별도의 Cool Roof의 규정이나 성능기준을 설정하지 않고, ASHRAE Standard 90.1-1989를 사용한다.

5) 괄

비주거용 건물과 고층 주거용 건물을 위한 지붕의 성능기준(1995년에 채택)과 저층 주거용 건물(2000년에 채택)을 위한 지붕 성능기준의 요구사항은 다음과 같다.⁶³⁾

- Cool Roof의 태양반사율은 0.7 이상, 열방사율 0.75 이상
- 내부 벽 공간의 R-11의 단열재($1\text{ft}^2\text{h}^\circ\text{F}/\text{BTU}$)
- 두께 2인치의 연속 단열
- 열관류율은 $0.12 \text{ BTU}/\text{ft}^2\text{h}^\circ\text{F}$ 이하

60) Wiig, H. (2007) Pers comm from Howard Wiig, Institutional Energy Analyst, Department of Business, Economic Development and Tourism, Hawaii, 14 June

61) ROH (2004) Revised Ordinances of Honolulu, City and County of Honolulu

62) Eley Associates (2003b) Hawaii Commercial Building Guidelines for Energy Efficiency, www.archenergy.com/library/general/hawaiiig1

63) Eley Associates (2007) Guam Building Energy Code, <http://eley.com/guam>

3.1.4 Cool Roof 관련 에너지 절약 프로그램

1) US EPA Energy Star Label

일반적으로 미국 EPA Energy Star Label을 위한 자격으로 낮은 경사(2:12를 초과하지 않는 기울기를 갖은 지붕)로 이루어진 지붕의 초기 태양 반사율과 3년경과 후 태양 반사율은 각각 0.65와 0.50 이상 되도록 요구한다. 급경사 지붕(2:12 이상의 높은 기울기 비로 설치된 지붕)의 경우에는 반드시 초기 태양 반사율과 3년경과 후 태양 반사율이 각각 0.25와 0.15 이상 되어야 한다.⁶⁴⁾

Energy Star에서 Cool Roof의 요구사항과 관련한 2가지 결점은 첫째, 최소 열 방사율이나 태양 반사율의 색인이 자세히 기입되어있지 않아, 태양 반사율은 높으나 열 방사율이 낮아 건물 에너지 성능 향상에 영향을 미치지 못하는 금속지붕을 Cool Roof로 허용한다. 일반적으로 ASTM E1980의 Medium 풍속 상태에서 태양 반사율 0.5와 열 방사율 0.15로 이루어진 금속 지붕의 표면은 태양 반사율 0.5와 열 방사율 0.80인 경과된 흰색 지붕보다 약 12℃ 정도 높게 나타나 금속지붕 설치에 따른 건물의 에너지 성능 향상은 기대하기 어렵다. 둘째, 급경사 지붕을 위해 요구되는 성능 중, 어두운 안료로 이루어진 유리섬유 아스팔트싱글과 같은 지붕 제품의 3년 경과 후 태양 반사율을 제외한다. 그러나 급경사 지붕에 적용 가능한 Cool Roof 제품의 3년 경과 후 태양 반사율은 0.30 이상이어야 한다. 일반적으로 급경사 지붕에 태양 반사율 0.15, 열 방사율 0.80을 가진 지붕의 표면 온도는 태양 반사율 0.30, 열 방사율 0.80을 가진 지붕에 비해 약 10℃정도 더 높다.

2) LEED Green Building Rating System

① Cool Roof 요구성능

USGBC의 The Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) Green Building Rating System은 Sustainable Sites Credit 7.2 (Heat Island Effect, Roof)에서는 Cool Roof를 건물 지붕에 적용하는 것에 관해 하나의 등급 포인트로 지정하고 있다. LEED 버전 2.0 (2001)은 (a)

64) EPA (US Environmental Protection Agency) (2007) Roof Products Criteria for US EPA Energy Star Program, www.energystar.gov/index.cfm?c=roof_prods.pr_crit_roof_products

초기 태양 반사율과 2년경과 후 태양 반사율이 각각 최소 0.65와 0.50, 열 방사율 0.90을 갖는 물질로 이루어진 제품으로 건물 지붕을 75% 덮거나 (b)식생으로 이루어진 표면(옥상녹화)이 50%이상 지붕면을 덮도록 요구한다.⁶⁵⁾

LEED Version 2.1 (2002)은 Cool Roof와 관련하여 다음과 같은 성능을 요구한다.

- Energy Star 규정을 따르며, 지붕 표면에 75% 이상 설치 한 제품의 열 방사율은 0.9 이상.
- 옥상 녹화 계획 시 지붕면적의 50% 이상 설치.
- Cool Roof와 옥상녹화 모두 적용 시 두 개의 재료가 통합되어 지붕 표면에 75% 이상 설치((GBC, 2002).

Ver 2.0과 2.1 비교 시 급경사(2:12이상의 경사 비)로 이루어진 지붕에 요구하는 최소 초기 태양 반사율은 0.65로에서 0.25로 감소했고, 2년경과 후 최소 태양 반사율은 0.50에서 0.15로 감소했다. Ver 2.0과 2.1 모두 최소 열 방사율은 0.90로 규정하고 있으나, 이는 불필요하게 높은 수치로 대부분의 높은 열 방사율을 갖고 있는 지붕 재료들은 0.80~0.95 범위의 열 방사율을 갖고 있다. LEED의 열 방사율과 관련된 기준은 미미한 0.90 이하 값을 갖고 있는 흰색의 지붕재들을 Cool Roof 재료들에서 제외하는 경향이 있다. 그에 따라 이러한 문제를 해결하기 위해 열 방사율 측정 시 높은 불확실성(± 0.05)에 의해 열 방사율을 조정한다. Cool Roof의 ASHRAE와 Title 24 기준으로 적용된 열 방사율 값은 0.75로 LEED와 비교 시 낮은 열성능을 갖고 있어 일반적으로 최소 열 방사율 값이 0.80 이상인 지붕재를 적용한다.

LEED Ver 2.2(2005)는 옥상녹화를 적용하지 않는 지붕에 일반 지붕재의 사용을 제한하기 위하여 Cool Roof와 관련해 태양 반사율과 열 방사율 대신 SRI를 사용하거나 Energy-Star의 기준을 준수한다.⁶⁶⁾

65) GBC (US Green Building Council) (2001) Leadership in Energy and Environmental Design Green Building Rating System for New Construction and Major Renovations (LEED-NC), Version 2.0, US Green Building Council, www.usgbc.org

LEED 버전 2.2에서 Cool Roof와 관련된 요구사항은 다음과 같다.

- 최소 SRI 78(낮은 경사 지붕)이나 29(높은 경사 지붕)를 갖는 제품을 지붕면에 적용 시 최소 면적 75% 이상
- 지붕면에 옥상녹화 시 지붕 표면의 50% 이상적용
- 옥상녹화와 특정 기준을 만족하는 높은 SRI 물질 조합사용

LEED(Ver 2.2) 현재 버전에서 Cool Roof 요구사항은 낮은 경사지붕의 경우 태양 반사율 0.65와 열 방사율 0.90 이상, 높은 경사지붕은 태양 반사율 0.28과 열 방사율 0.90 이상을 만족하도록 하고 있다.

② Cool Roof 신뢰도 등급

USGBC의 Cool Roof의 신뢰도 등급으로는 LEED for New Construction and Major Renovations (LEEDNC) Version 2.2는 Sustainable Sites Credit 7.2 Heat Island Effect : Roof에서 인증하는 신뢰도 등급을 바탕으로 한다. LEED-NC에서는 낮은 경사 지붕의 경우 SRI(Solar Reflectance Index)값이 78 이상, 급경사의 지붕의 경우 SRI 값이 29 이상일 경우, 지붕 성능향상에 따른 점수를 제공한다. 이 때 지붕 제품의 SRI 값은 USGBC에서 제공하는 온라인 계산 장치를 통해 태양반사율과 열 방사율을 입력함으로써 계산한다.

LEED for Existing Buildings (LEED-EB) Version 2.0은 Sustainable Sites Credit 6.2, Heat Island Reduction: Roof 부분에서 Cool Roof 적용에 따른 점수를 제공하며, LEED-EB의 점수를 받기 위해서는 지붕 제품의 경우 반드시 에너지 스타에서 제공하는 태양 반사율과 열 방사율 값이 각각 0.90이상인 지붕제품을 건물에 적용해야 한다.

LEED-ND에서는 Green Construction and Technology Credit 10의 열섬 현상 저감 부분에서 Cool Roof 적용에 따른 점수를 제공한다.

66) GBC (2005) Leadership in Energy and Environmental Design Green Building Rating System for New Construction and Major Renovations (LEED-NC), Version 2.2, US Green Building Council, www.usgbc.org

3) California Cool-Roof Rebate Programmes

2001에서 2005년까지 캘리포니아와 그 외 여러 주에서는 지붕의 초기 태양 반사율 0.70 이상, 열 방사율 0.75이상의 Cool Roof를 건물 지붕에 설치함에 따라 \$0.10/ft² ~0.20/ft² 의 할인혜택을 제공했다.

Title 24 Standards는 현재(2005년) 건축 법규상 낮은 경사 지붕으로 이루어진 비주거용 건물에서 Cool Roof의 설치를 의무화하고 있고, 최근 이러한 프로그램은 주거용 건물에 초점을 맞추고 있다. 2006년 1월 이후, 새크라멘토 도시 설비지구(SMUD)는 태양 반사율 0.75 이상, 열 방사율 0.75이상의 주거용 평지붕에 설치 시 \$0.20/ft² 할인혜택을 제공하고, 2007년 3월, SMUD 프로그램은 급경사 주거용 지붕에 태양 반사율 0.40 이상, 열 방사율 0.75이상의 지붕재 설치에 따른 \$0.10/ft²의 할인을 제공하고 있다.⁶⁷⁾ 2007년 1월 캘리포니아의 Pacific Gas & Electric(PG&E)과 Southern California Edison(SCE)는 캘리포니아 기후 내에서 기존 주택에 Cool Roof 도입 시 \$0.10/ft² ~ 0.20/ft²의 할인혜택을 제공한다.⁶⁸⁾⁶⁹⁾

캘리포니아의 할인 혜택 프로그램에서 Cool Roof의 요구 성능은 <표 3.5>와 같다.

<표 3.5> 주거용 Cool Roof 할인프로그램의 태양 반사율과 열 방사율

ROOF	REBATE TIER	초기 태양 반사율	초기 열 방사율	할인율(US\$/ft ²)
Low ^a	n/a	≥ 0.7	≥ 0.75	0.2
Steep ^b	Tier 1	0.25 - 0.39	≥ 0.75	0.1
Steep ^b	Tier 2	≥ 0.4	≥ 0.75	0.2

Source: Pacific Gas & Electric (PG&E, 2007); Southern California Edison (SCE, 2007)

Notes: n/a = not applicable

a = 지붕의 경사율이 2:12 이하

b = 지붕의 경사율이 2:12 이상

67) SMUD (Sacramento Municipal Utility District) (2007) Sacramento Municipal Utility District Residential Cool-Roof Program, www.smud.org/rebates/cool%20roofs

68) PG&E (Pacific Gas & Electric) (2007) Pacific Gas & Electric Cool-Roof Rebate Program, www.pge.com/myhome/saveenergymoney/rebates/remodeling/coolroof

69) SCE (Southern California Edison) (2007) Southern California Edison Cool-Roof Rebate Program, www.sce.com/RebatesandSavings/Residential/_Heating+and+Cooling/CoolRoof

PG&E/SCE 프로그램은 낮은 경사로 이루어진 지붕에 흰색의 마감재 사용을 장려하기 위해 계획된 것이며, 급경사로 이루어진 지붕(기준 1: 태양반사율 0.25~0.39 지붕 제품 적용 시 \$0.10/ft², 기준 2: 0.40 이상의 태양 반사율을 갖은 지붕제품 적용 시 \$0.20/ft²)은 Cool-Coloured로 이루어진 제품(대부분 기준 1)을 적용하는 것을 장려하며, 이러한 프로그램을 통해 Cool-Coloured로 이루어진 제품(기준 2)의 개발과 판매를 촉진시킨다.

4) Green Globes

Green Globes는 건물 지붕에 Cool Roof 적용을 장려하기 위해 기본점수를 할당한 또 다른 캐나다의 그린빌딩 평가 프로그램으로, 미국의 Green Globes 프로그램을 도입하여 개발한 것이다. The Green Globes V.1 Rating System은 설문지 형식으로 이루어진 그린빌딩 평가시스템으로 모든 카테고리의 합산점수는 1000점이며, “site” 카테고리에 Cool Roof 제품을 건물에 적용 시 10점을 부여한다. LEED 프로그램처럼, Cool Roof의 성능기준은 SRI를 기본으로 하며, 낮은 경사지붕은 78, 급경사 지붕은 29의 최소값을 요구한다. 이 때 지붕에 Cool Roofing 재질로 덮이는 비율이 증가하면, 더 많은 점수를 얻을 수 있다.

5) ASHRAE/USGBC/IESNA Proposed Standard 189.1P.

The American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), the U.S. Green Building Council, and the Illuminating Engineers Society of North America (IESNA)는 고성능 그린빌딩을 위한 기준인 Proposed Standard 189.1P의 공동개발 스폰서로 고성능 그린빌딩은 계획한 건물의 그린빌딩화를 만족시키기 위한 기준을 제공하고 환경적 책임, 자원 효율, 거주자 쾌적과 웰빙 그리고 사회 민감도를 분석한다. 계획한 건물에 Cool Roof 적용 시, 지붕의 성능기준은 낮은 경사지붕의 경우 SRI 값 78이상, 급경사 지붕의 경우 SRI값 29이상이거나, U.S. EPA's ENERGY STAR Reflective Roof Program Requirements의 승인 시 적용이 가능하다. 이러한 태양 반사율과 열방사율 값은 Cool Roof Rating Council CRRC-1 Product Rating Program과 같이 국가적으로 인증된 승인 단체의 실험을 통해 결정된 값이어야만 한다.⁷⁰⁾

3.2 Cool Roof의 성능 요소 및 측정방법

본 절에서는 높은 태양 반사율과 열 방사율을 갖는 지붕 재료를 통하여 하절기에 건물 최상층의 냉방부하를 저감할 수 있는 Cool Roof의 성능에 영향을 미치는 요소들에 관해 파악한다. Cool Roof의 성능 측정 방법 및 각종 관련 Data Base를 확인하고, 국내 사무소 건물에 Cool Roof 적용 시 에너지 저감효과를 분석하기 위한 해석 프로그램 알고리즘을 검토한다.

3.2.1 Cool Roof의 성능 및 측정방법

현재 Cool Roof의 성능을 측정하고, 측정한 지붕 재료들의 성능을 Data Base로 구축하여 Web 상에서 자료를 제공하고 있는 CRRC(Cool Roof Rating Council)는 1998년에 조직된 비영리성단체로, 지붕제품의 태양 반사율과 열 방사율을 평가하고 라벨링 하기위해 정확하고 신뢰할 수 있는 측정 방안을 개발하고 이와 관련 된 기술 자료를 제공하고 있다. CRRC는 지붕제품의 방사에너지 효율 등급을 공정하고, 정확하게 측정하여 제공한다. 또한 지붕제품의 내구성 및 표면의 방사성능을 에너지 사용량과 관련하여 연구하고 이를 제공하고 있다. 이러한 객관적 자료를 제공함으로써 설계자나 건축주가 건물 계획 시 건물 지붕의 역할을 쉽게 이해하고, 지붕 선택 시 다양한 비교를 가능하게 한다. CRRC에서 지붕 성능을 나타내는 지표는 열 방사율과 태양 반사율로 초기 성능과 3년경과 후 성능(제품풍화 실험)을 측정하고 있으며 측정방법은 다음과 같다.

1) 실험 장소 요구 적용사항

실험 장소는 ISO 17025에 의해 인증 받아야 하며, 실험 장소에는 실험체가 다음의 기후에 노출 될 수 있어야 한다.

1. Hot/Humid
2. Cold/Temperate
3. Hot/Dry

70) Michelle van Tijen and Rebecca Cohen, "Features and Benefits of Cool Roofs: The Cool Roof Rating Council Program", Journal of Green Building, Volume 3, Number 2, 2008.02, p.13~19

또한 실험방법을 Data Base 하여 실험장소의 적합성을 인증 받아야 하고, 이러한 실험 장소는 지붕 제품의 성능 프로그램의 목적으로만 사용해야 한다.

2) 태양 반사율(Solar Reflectivity)

태양열 반사율 실험은 아래의 실험방법에 따라 진행된다.

① ASTM E903

- 분광 광도계를 사용하여 흑체를 기준으로 지붕 재료의 반사율과 투과율 스펙트럼을 통해 흡수율 측정
- 재료의 반사 특성과 확산에 관한 광학적 특성 파악
- 재료의 표면이 균일하지 않은 무늬나 주름지고 불투명하지 않은 시트 재질은 제외하고 측정

② ASTM E1918

- 실외에서 지붕 재료를 전천 일사계를 사용하여 수평 태양반사율 측정
- 태양의 각도가 표면으로부터 일반적으로 45° 이하 일 때 실시

③ ASTM C1549

- 코팅재나 마감재는 예정된 태양 반사성능을 생애주기 동안 반드시 유지
- 지붕 재료는 불투명한 상태로 실외나 실내 시험소에서 지붕 재료 표면의 초기 태양반사율과 노후 된 태양반사율을 측정
- 여러 지점을 측정하여 측정 데이터의 평균값으로 지정
- 휴대용 태양 반사율 측정기를 통해 태양 스펙트럼 중 4개의 파장에 반응하는 반사율 값을 측정하여 태양 반사율 값으로 결정 (380nm, 500nm, 650nm, 1220nm)

④ CRRC Test Method #1

- 편평하고 불투명하며 다양한 재료(아스팔트 루핑 지붕널 포함)가 섞인 지붕 재료의 평균 태양반사율 측정
- 재료 표면의 평균 태양 반사율은 ASTM C1549에 따라 휴대용 태양 반사율계로 측정된 무작위 지점에서의 평균 태양반사율로 결정
- 표준 시험은 ASTM C1549 함께 적용되어야 함.

지붕 제품의 변색이나 변색된 실험 sample들은 ASTM E1918또는 CRRC Test Method #1에 의해 태양 반사율 실험에 사용된다.

3) 열 방사율(Thermal Emissivity)

지붕 재료의 열 방출 실험은 ASTM C1371에 의해 진행된다.

- 휴대용 방사율 측정기를 이용하여 표준 시험방법에 의해 방사율 측정
- 휴대용 열 감응 방사율 측정기를 사용하여 측정된 방사율의 값으로 규정

4) 코팅 두께 실험

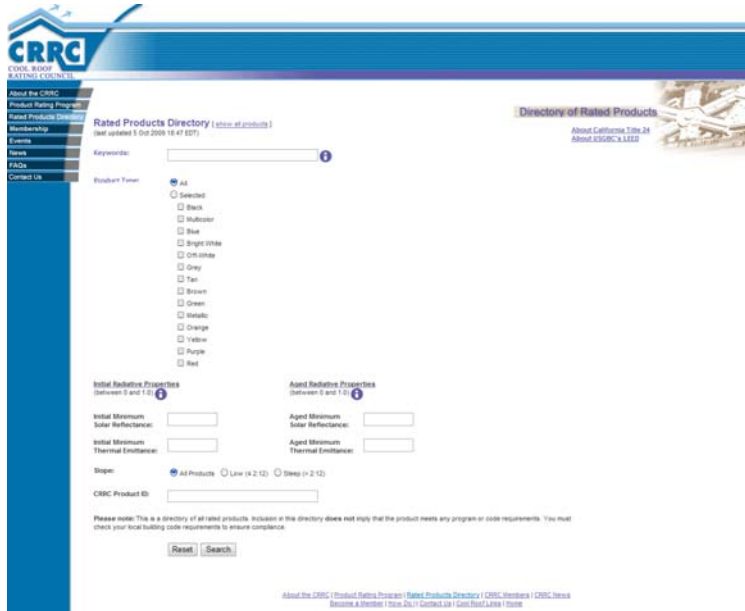
- 코팅 두께 실험은 ASTM D1669에 의해 진행
- 두께의 측정은 각 9개의 제품에 5군데의 지점 측정
- 5군데에서 측정한 값의 평균치로 각 sample의 코팅 두께를 결정

5) 풍화 실험(노후화 실험)

- AITL은 구형 방사성의 실험 방법을 요구하며 또한 Section 2.2.4와 2.2.5의 규정 따름
- 풍화 노출 실험은 공인된 실험 장소에서 초기 방사율 실험 후 실시
- 구형 방사성 실험 후 Licensed Seller 또는 Licensed OM에 보내지기 전, CRRC에서 인증한 90일간의 고정 풍화 실험에 의해 인정받아야 함
- Sample Mounting (sample 설치) : 각각의 sample은 Section 3.5와 같이 3년간 노출
- 금속제와 비금속제의 노출 시험은 ASTM G7에 따르며, 제품 sample들은 상업적인 사용이 준비되어야 함
- 풍화시험을 위한 재료는 실험장소의 합판위에서 미끄러지지 않도록 설치되어야 하며 제품은 낮은 각도에 설치되도록 제작되어야 함.
- Exposure Removal(노출의 이동): sample들은 3년간 움직이면 안 됨
- 노출한지 3년 후에 실험장소(실험공간)는 Licensed Seller나 Licensed OM과 협조하여 Aged Radiative Properties를 측정하기위해 AITL로 이동
- Exposure Notification : 실험 장소는 Licensed Seller나 Licensed OM에 노출실험의 시작과 끝을 통보하며 sample이 손상을 입었거나 일반적이지 않은 반응을 보였을 때 통보하고, 노출 위치 표시

3.2.2 CRRC의 Cool Roof Data Base

CRRC(Cool Roof Rating Council)는 건물의 지붕에 에너지 저감이 가능한 다양한 재료를 소개하기 위해 Cool Roof 제품과 관련하여 Web Data Base⁷¹⁾를 구축했고, 다음 (그림 3.6)과 같이 건축주나 설계자 등 다양한 사람들에게 제공하고 있다.



(그림 3.6) CRRC의 Cool Roof 제품 디렉토리

이러한 Web Data Base는 건축주나 설계자들이 쉽게 이용할 수 있도록 제품의 타입과 판매자, 제조업자와 브랜드 모델명과 색상에 따라 선택이 가능하다. 먼저 지붕 재료를 선택하면 지붕제품의 초기 최소 태양 반사율과 경과 후 태양반사율, 초기 최소 열방사율과 경과 후 열 방사율의 범위를 지정하고, 설치한 건물의 지붕 경사각을 선택하면, CRRC Data Base 내의 적절한 제품을 선택 할 수 있도록 한다.

CRRC에서 분류한 제품의 종류는 제품의 재질에 따라 총 10종류로 분류되어 있으며, 현재 제조사와, 브랜드, 모델명은 실험을 마친 모든 제품을 나열하고 있고, 색상을 통한 분류는 총 14가지로 나누어져있다.

71) <http://www.coolroofs.org/products/search.php>

3.2.3 Cool Roof Calculator

미국 에너지부(Department of Energy) Oak Ridge National Laboratory (Version 1.2)에서 개발된 Cool Roof Calculator는 평지붕으로 이루어진 건물에 검은 색이 아닌 Cool Roof 적용 시 지붕을 통해 건물 내로 유입되는 열 에너지량과 저감 가능한 냉방 에너지량을 예상하기 위해 개발한 것이다.⁷²⁾

Cool Roof Calculator는 프로그램을 추가적으로 설치하지 않고, Web 상에서 쉽게 이용이 가능하며, 주로 월간 피크부하의 변화 없이 전기를 소비하는 소규모나 중규모의 편의시설에 Cool Roof 적용 시 에너지 저감량을 계산한다. Cool Roof Calculator를 대형 편의 시설에 적용하여 에너지 저감량을 파악하기 위해서는 기존 Cool Calc Peak version에서 일사량 조절을 통해 에너지 저감량을 확인할 수 있다.

다음 (그림 3.2)는 Department of Energy's Oak Ridge National Laboratory에서 제공하는 Cool Roof Calculator이다.

(그림 3.7) Cool Roof Calculator

72) <http://www.ornl.gov/sci/roofs+walls/facts/CoolCalcEnergy.htm>

이러한 Cool Roof Calculator는 미국을 243개 지역으로 분류한 후 각 지역의 기후데이터를 토대로 냉방도일과 난방도일을 계산한 값과 지역별 일사량 데이터를 입력하여, 각 지역에 적절한 지붕의 Cool Roof의 성능 및 에너지 저감량을 계산한다. 먼저 계획하는 건물의 열관류율과 태양 반사율, 열 방사율을 입력하고, 하절기 전기에너지 사용량과, 공조기 효율, 난방 시 에너지를 입력하면 계획하는 건물에서의 냉방 및 난방의 에너지 저감율과 적정 단열값을 계산한다.

제 4 장 모형실험을 통한 Cool Roof의 성능분석

건물 최상층의 냉·난방 부하에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 건물의 지붕 통한 열손실 및 열획득으로 지붕을 통한 열손실 및 열획득을 저감하면 그에 따라 최상층의 에너지 저감은 물론 건물의 최대부하량이 감소하여 건물의 장비용량을 저감할 수 있고, 초기투자비 및 장비설치면적이 감소하는 장점을 가져온다.

따라서 본 장에서는 하절기 건물의 지붕을 통한 열획득 저감 방안과 관련하여, Cool Roof 설치에 따른 에너지 절약 효과 및 열성능을 분석하였다. 먼저 일반 사무소건물의 지붕과 열관류율이 동일한 3개의 모형 실험체를 제작하고, 모형 실험체의 지붕 마감재를 현재 일반적으로 가장 많이 시공되고 있는 지붕 재료, Cool Roof, 옥상녹화 마감으로 설치했다. 모형 실험체에 각각 다른 지붕마감재를 설치한 후, 모형의 실내외 온도와 지붕에 적용된 재료의 Layer별 온도, 외기 온도변화를 측정했다. 이렇게 측정한 데이터를 토대로 건물 지붕 재료에 따른 열성능을 파악하고, 이를 토대로 에너지 해석 프로그램의 신뢰도 검증을 실시한 후, 얻어진 신뢰도를 기반으로 Cool Roof를 통한 지붕의 에너지 효율 평가를 실시했다.

4.1 실험개요

모형실험은 건물 옥상에 Cool Roof 적용에 따른 에너지 저감성능을 분석하기 위해 일반 평지붕 형태의 건물 축소모형을 제작하고 일반옥상마감재, Cool Roof, 옥상녹화를 각 축소모형 지붕에 적용하였을 때, 마감 재료에 따른 지붕의 온도변화를 측정했다.

먼저, 모형실험과 실제 건물을 비교 시 지붕을 통한 열의 흐름과 관련하여 오차범위를 축소시키기 위해 실제 건물의 열관류율과 유사하게 제작했다. 따라서 지역별 열관류율 기준(설비기준 규칙 21조)인 중부지역 외기에 면한 벽체의 열관류율 $0.47\text{W/m}^2\text{℃}$, 지붕의 열관류율 $0.29\text{W/m}^2\text{℃}$ 토대로, 모형 실험에서는 지붕의 열관류율값인 $0.29\text{W/m}^2\text{℃}$ 의 열관류율을 갖고 있는 100mm

샌드위치 패널로 축소 모형을 제작했다.

모형 실험체는 모두 3개로 구성하였으며, 지붕 마감재의 종류에 따른 온도 변화 측정 시 다른 변수들을 제어하기 위해 실험체의 내부사이즈와 개구부 사이즈를 동일하게 제작했다.

실험체 1(일반 옥상마감)과 실험체 2(Cool Roof 마감)의 외부사이즈는 $1,400 \times 1,400 \times 1,300(\text{mm})$ 로 제작했고, 실험체 3은 옥상녹화 설치 시 추가적으로 시공되는 배수관, 흙, 식생 등의 마감처리를 위해 $1,400 \times 1,400 \times 1,400(\text{mm})$ 로 제작했다. 3개의 실험체 내부 사이즈는 내부 체적의 차이에 따른 변수를 제어하기 위해 $1,200 \times 1,200 \times 1,000(\text{mm})$ 로 모두 동일하게 제작했다.

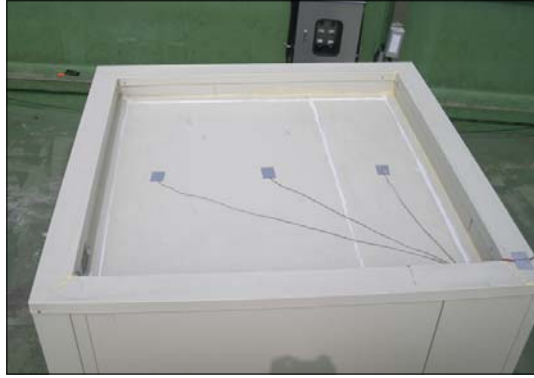
지붕에 종류에 따른 온도변화 모형실험을 위한 실험체의 제작 모습은 (그림 4.1)과 같다.



(그림 4.1) 모형 실험체 제작 모습

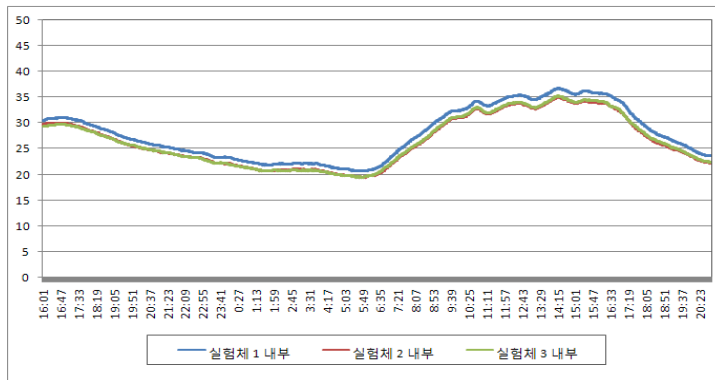
제작한 3개 실험체의 실내·외 온도조건이 동일한지를 파악하기 위해, 2009년 6월 30일부터 7월 1일까지 2일간 2분 간격으로 실험체 내·외부 온도를 측정했다. 모형 실험체의 실내·외 온도변화는 T-Type 열전대와 데이터 로거를 이용하여 측정했다. 실내 온도의 경우 축소 모형의 내부 천장의 중앙 지점에서 측정했고, 실외의 경우 지붕표면의 중앙 부분과 중앙으로부터 30cm 떨어진 지점에 열전대를 설치해 측정했다.

실외 지붕의 표면온도를 측정하기 위해 열전대를 설치한 모습은 (그림 4.2)와 같다.

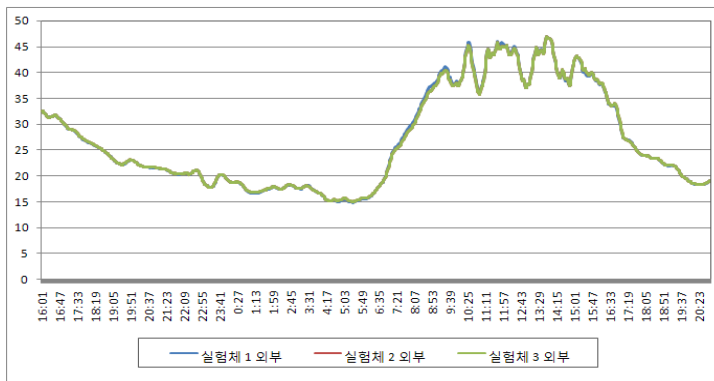


(그림 4.2) 외부 표면온도 측정 방법

T-Type 열전대를 각 축소모형 실험체에 설치한 후, 실내·외 온도변화를 살펴본 결과 (그림 4.3)와 (그림 4.4)의 그래프와 같이 나타났다.



(그림 4.3) 실험체 내부 온도변화

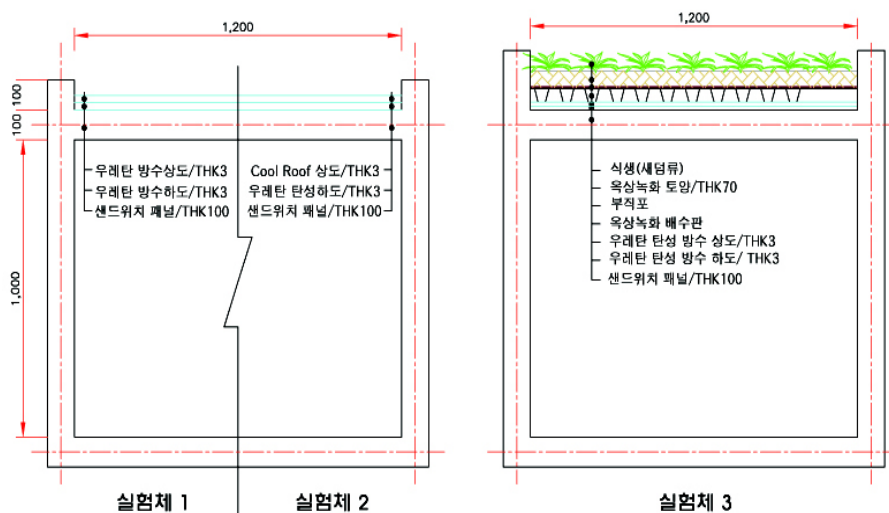


(그림 4.4) 실험체 외부 온도변화

제작된 3개 모형 실험체가 동일한 조건으로 제작한 것인지를 파악하기 위해 열전대를 이용하여 실내·외 온도변화를 살펴본 결과 먼저 실외온도의 경우, $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 의 온도차가 나타나, 추후 지붕 마감재 변화에 따른 온도변화를 실시하는데 문제가 발생하지 않을 것으로 판단된다. 실내온도의 경우 실험체 2와 실험체 3은 온도 변화가 동일하게 나타났는데, 실험체 1의 온도변화는 다른 2개의 실험체보다 지속적으로 1°C 가 높게 나타났다. 이는 실험체 1의 내부에 T-Type 열전대를 통해 얻어진 온도 데이터를 실시간으로 저장하기 위해 데이터 로거를 설치해 그에 따라 기기의 발열부하가 발생하여, 실험체 1이 다른 2개의 실험체의 내부온도보다 지속적으로 1°C 가 높은 것으로, 추후 지붕 마감재 변화에 따른 실내·외 온도변화 실험 시에는 실험체 1의 측정 온도 데이터 값을 보정했다.

3개의 모형 실험체의 온도변화를 분석한 결과, 실험체 1의 실내온도를 제외한 나머지 조건이 동일한 것으로 파악돼, 이러한 데이터를 토대로 3개의 모형 실험체 지붕표면에 서로 다른 지붕 마감재를 설치했다. 지붕마감재의 종류 따른 에너지 저장 성능을 측정하기 위해 실험체 1은 일반 지붕마감, 실험체 2는 Cool Roof 마감, 실험체 3은 옥상녹화로 마감 처리했다.

각 실험체의 지붕 마감 재료에 따른 시공방법은 (그림 4.5)과 같고, 설치 모습은 (그림 4.6)과 같다.



(그림 4.5) 실험체 사이즈 및 지붕재료



(그림 4.6) 실험체(1, 2, 3)의 전경

4.2 지붕 마감재에 따른 모형실험

지붕 마감재에 따른 모형실험은 마감재의 태양 반사율과 열 방사율에 따른 에너지 저감효율을 분석하기 위해 실시한 것으로, 먼저 지붕재로 가장 많이 적용되고 있는 코팅재를 지붕 마감재로 설정했다. 그에 따라 지붕 마감 색으로 가장 많이 적용되고 있는 회색을 실험체 1에 마감처리하고, 실험체 2는 코팅재 중 현재 우리나라에서 CRRC의 Cool Roof 인증을 받은 지붕 재료로 마감처리했다. 실험체 3은 실험체 1과 동일하게 마감처리 한 후, 배수판과 부직포, 토양과 식생을 설치하고, 지붕 마감재에 따른 에너지 효율 분석을 위해 실험체의 실내온도와 지붕의 실내·외 표면온도, 외기 온도를 측정했다.

지붕 재료의 태양 반사율 및 열 방사율에 따른 에너지 효율을 분석하기 위해 먼저, 각 지붕 재료의 태양 반사율과 열 방사율을 측정했다. 지붕 마감재의 열성능 측정기기로 태양 반사율은 Spectro-Photo-Meter CM-700d로 측정했고, 열 방사율은 FLIR i5(열화상카메라)를 통해 측정했다.

지붕 마감재의 태양 반사율과 열 방사율의 측정 장비는 (그림 4.7)과 같다.



(a) Spectro-Photo-Meter CM-700d

(b) FLIR i5

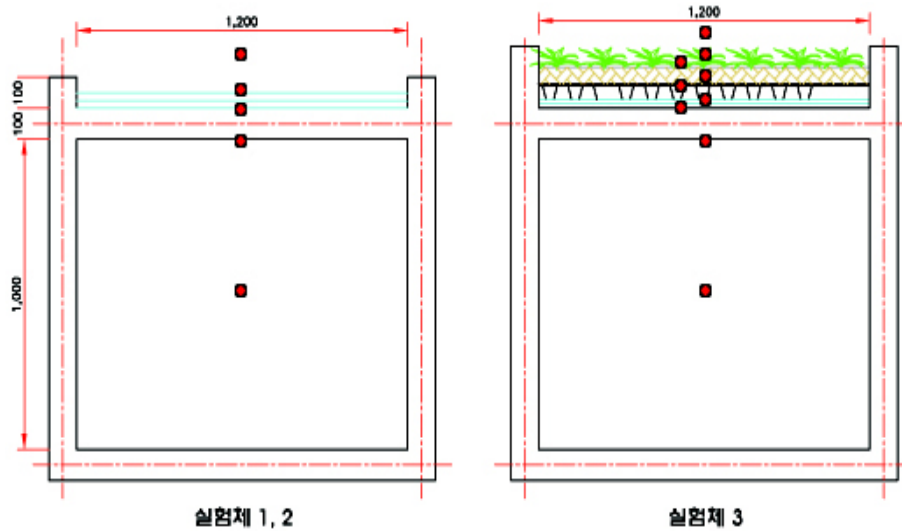
(그림 4.7) 태양반사율과 열방사율 측정기기

모형 실험체에 마감 처리한 일반 지붕과 Cool Roof, 옥상녹화 시스템의 태양 반사율과 열 방사율을 각 각의 측정 기기로 측정한 결과 <표 4.1>과 같이 나타났다.

<표 4.1> 각 재료별 태양 반사율 및 열 방사율

지붕 재료		태양 반사율(%)	열 방사율(%)	비고
일반 옥상 (우레탄_회색)		57	88	
Cool Roof (우레탄_흰색)		93	89	
옥상 녹화	흙	18	90	
	식물	29	90	

지붕 마감재의 태양 반사율과 열 방사율에 따른 지붕의 온도변화를 측정하기 위해 제작된 3개의 실험체에, T-Type의 열전대를 (그림 4.8)과 같이 설치하고, 7월 1일부터 현재까지 5분 간격으로 각 실험체의 온도변화를 측정했다.



(그림 4.8) 각 실험체의 온도센서 위치

4.3 실험 결과

모형 실험은 2009년 7월 1일부터 4월 30일까지 5분 간격으로 (그림 4.8)과 같이 각 각의 실험체에 지붕 마감재를 달리하여 외기의 변화에 따른 온도변화를 측정했다. 그 결과 모형 실험체의 온도변화에 가장 큰 영향을 미치는 것은 외기 일사량으로, 외기의 일사량 변화에 따라 실험체의 온도가 변화되는 것을 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 지붕 재료의 태양 반사율과 열 방사율에 따른 모형의 온도변화를 분석하기 위해 하절기, 동절기, 중간기의 청천공과 담천공⁷³⁾ 상태에서 각 실험체의 온도변화를 분석했다.

1) 하절기

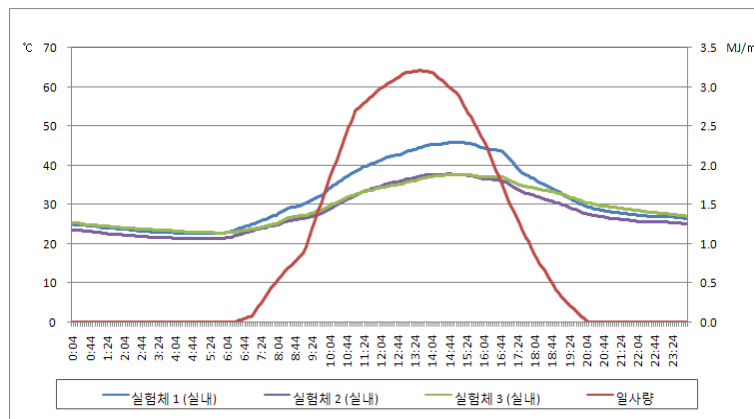
하절기는 건물로 유입되는 일사량이 많아, 건물 지붕 마감재의 태양 반사율과 열 방사율이 온도 변화에 많은 영향을 미친다. 따라서 지붕 마감재의 태양 반사율과 열 방사율이 건물에 미치는 영향을 분석하기 위해 청천공상태와 담천공상태 모두 분석했다.

73) 천공의 종류는 청천공(Clear), 부분담천공(Partly Cloudy), 담천공(Overcast)로 구분되며, 천공을 구분하는 방법으로는 천공비율법칙(Sky Ratio Method)이나 천공커버법칙(Sky Cover Method)이 있다. 본 연구에서는 천공커버법칙을 이용하여 천공을 덮은 구름의 양으로 0.0~0.3 인 청천공 상태와 구름이 천공을 0.8~1.0 덮은 상태인 담천공 상태를 놓고 비교 분석하였다. IESNA, Lighting Handbook, 9th Edition. 2000

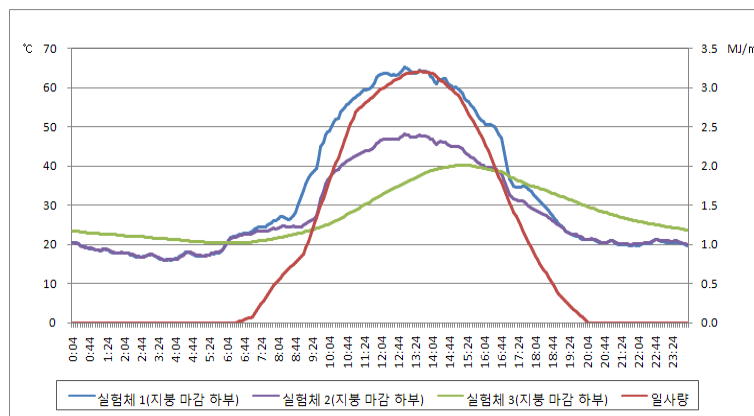
① 청천공

먼저 청천공 시 지붕 마감재의 태양 반사율과 열 방사율에 따른 실험체의 온도변화를 알아보기 위해 최고기온 33.4℃, 최저기온 24.7℃, 평균 운량 0.6인 2009년 8월 14일의 측정 결과 데이터를 이용해 분석했다.

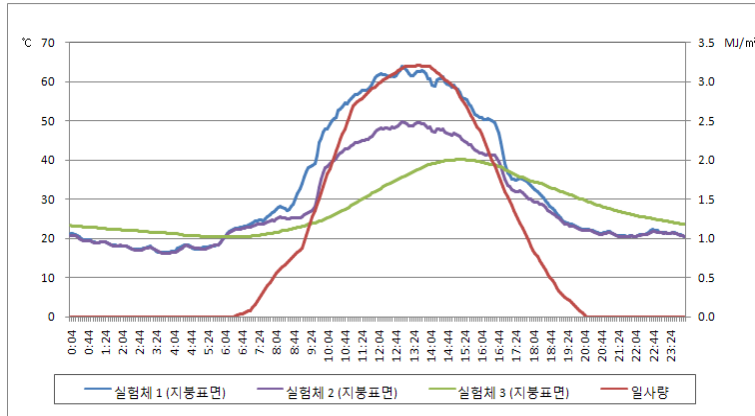
청천공 상태에서 지붕표면의 태양 반사율과 열 방사율에 따른 각 실험체의 온도 변화는 (그림 4.9), (그림 4.10), (그림 4.11), (그림 4.12)와 같다.



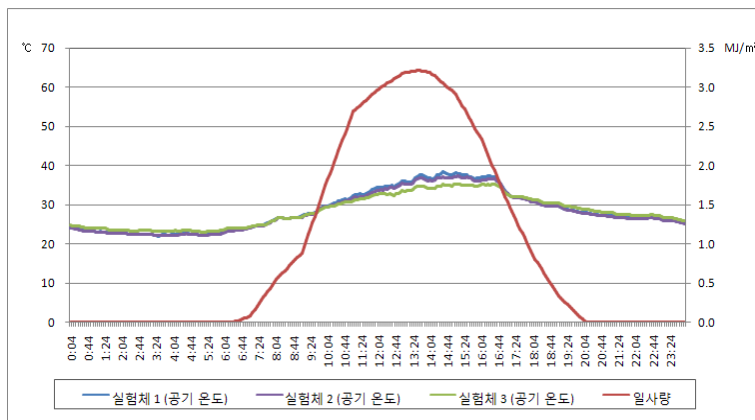
(그림 4.9) 지붕 마감재에 따른 실내 온도 변화(하절기 청천공)



(그림 4.10) 지붕 마감재에 따른 마감재 내부 온도변화(하절기 청천공)

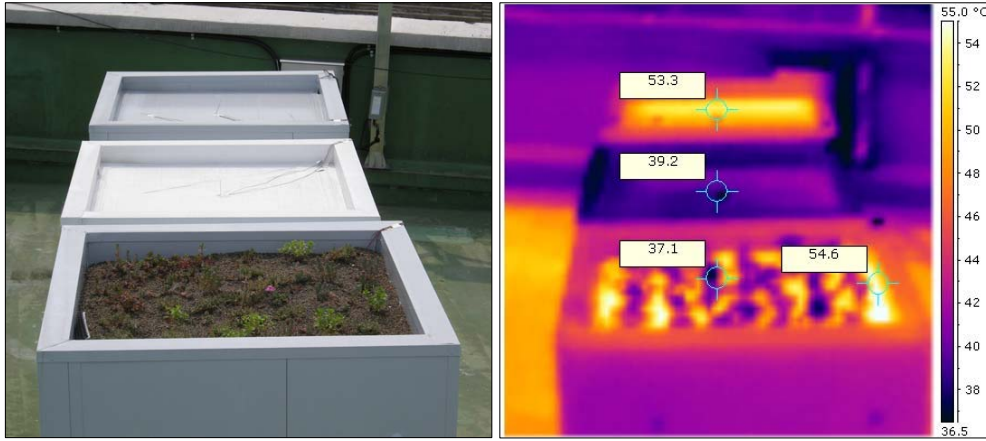


(그림 4.11) 지붕 마감재에 따른 지붕 표면온도 변화(하절기 청천공)



(그림 4.12) 지붕 마감재에 따른 공기 온도 변화(하절기 청천공)

청천공 상태에서 각 실험체의 태양 반사율과 열 방사율에 따른 실내온도, 마감재 내부 온도, 지붕의 외부 표면온도와 지붕에서 10cm 떨어진 공기의 온도 변화를 측정하고, 각 지붕의 표면 온도를 열화상카메라로 측정한 결과 (그림 4.13)과 같다.



(a) 지붕 재료에 따른 실험체 (b) 지붕 재료에 따른 옥상 표면 온도

(그림 4.13) 하절기 청천공 시 옥상 표면 온도

하절기 청천공 시 지붕 재료의 태양 반사율과 열 방사율에 따른 실험체 내부의 온도 변화를 확인한 결과, 각 실험체의 실내 최고온도의 경우 일반마감(45.7℃)과 Cool Roof 마감(37.8℃), 옥상녹화마감(37.8℃)의 온도차는 최대 8℃ 가량 차이가 났으며, Cool Roof 마감과 옥상녹화 마감의 실내온도변화는 동일한 것으로 나타났다.

지붕의 외부 표면온도 변화를 살펴본 결과, 일일 최대온도는 일반마감 63.9℃, Cool Roof 마감 49.8℃, 옥상녹화마감 42.1℃로 나타났다. 일반마감과 Cool Roof 마감 처리한 지붕의 표면온도는 최대 14.1℃ 차이가 나, 일반마감 지붕에 비해 Cool Roof를 적용한 지붕이 건물내부로 유입되는 일사열을 더 많이 차단시킬 수 있는 것으로 판단된다. 옥상녹화 마감의 경우에는 온도 센서를 통해 측정한 결과, 표면온도가 42.1℃로 가장 낮았지만, (그림 4.13)과 같이 식생이 자리한 곳과 자리하지 않은 곳과의 표면 온도 차가 큰 것으로 나타났다. 열화상카메라를 통해 실험체의 표면 온도를 측정한 결과, 일반마감의 경우 65.7℃(지붕면 온도편차 $\pm 2^{\circ}\text{C}$), Cool Roof 마감은 43.9℃(지붕면 온도편차 $\pm 2^{\circ}\text{C}$)로 나타났으나, 옥상녹화의 경우 흙의 표면온도는 최대 75.4℃, 식생의 표면온도는 37.4℃로, 그 차이가 매우 큰 것으로 나타났다. 따라서 옥상녹화로 마감한 지붕의 경우, 실내로 유입되는 일사열을 차단하기 위해서는 옥상녹화 마감 시 식생분포를 함께 고려해야 한다.

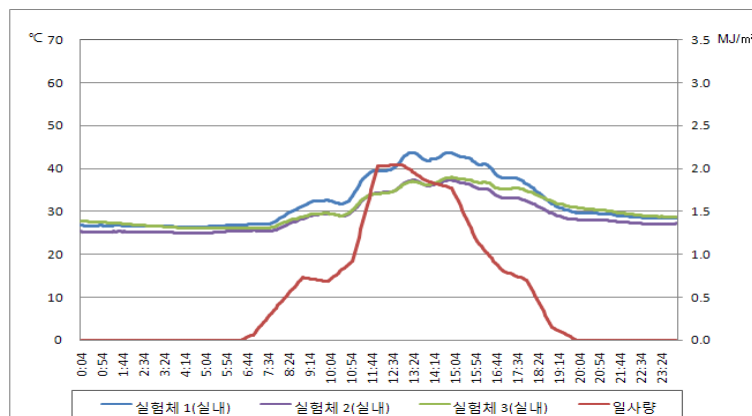
또한 지붕 마감재 하부(코팅재 하부)의 온도변화를 살펴본 결과, 지붕의 외부 표면온도보다 약간 높게 나타나고 있는데, 이는 옥상 표면의 경우 외부 바람에 의해 대류에 의한 열손실이 발생하여 이러한 결과가 나타난 것으로 판단된다.

지붕 마감재 상부의 공기온도 변화(마감재 기준 이격거리 100mm)를 측정한 결과, 일반 지붕 마감재의 공기온도는 38.3℃, Cool Roof 마감재의 공기온도는 37.1℃, 옥상녹화 마감 상부의 공기온도는 35.2℃로 나타났다. 일반 지붕의 경우 표면온도가 Cool Roof에 비해 약 14℃정도 높기 때문에 지붕 상부의 공기 온도가 약 1℃ 이상 높은 것으로 판단된다. 옥상녹화 마감 지붕의 상부 공기온도는 일반 마감을 한 지붕에 비해 약 3℃가량 낮은 것으로 나타났는데, 이는 식생의 증발냉각작용에 의해 이러한 결과나 나온 것으로 판단된다.

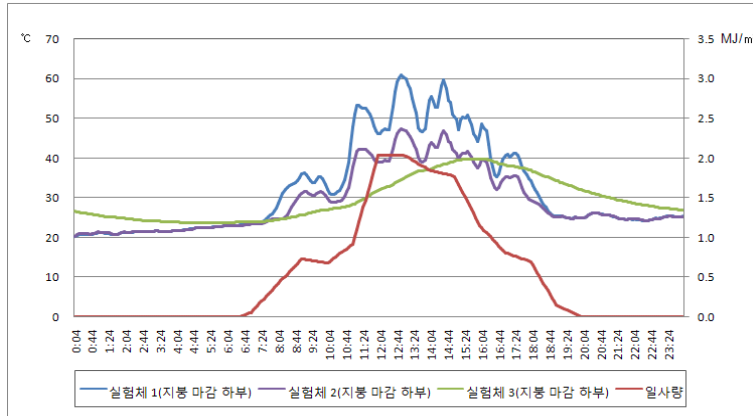
② 담천공

하절기 담천공 상태에서 지붕 재료의 태양 반사율과 열 방사율에 따른 온도 변화를 알아보기 위해 최고기온 31.8℃, 최저기온 25.1℃, 강수량은 없고, 평균 운량이 7.3인 2009년 8월 19일의 측정 데이터를 이용하여 분석했다.

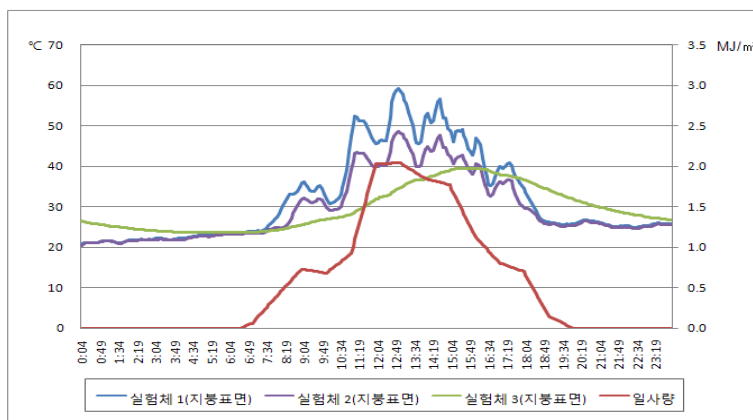
담천공 상태에서 지붕표면의 태양 반사율과 열 방사율에 따른 각 실험체의 온도 변화는 (그림 4.14), (그림 4.15), (그림 4.16), (그림 4.17)과 같다.



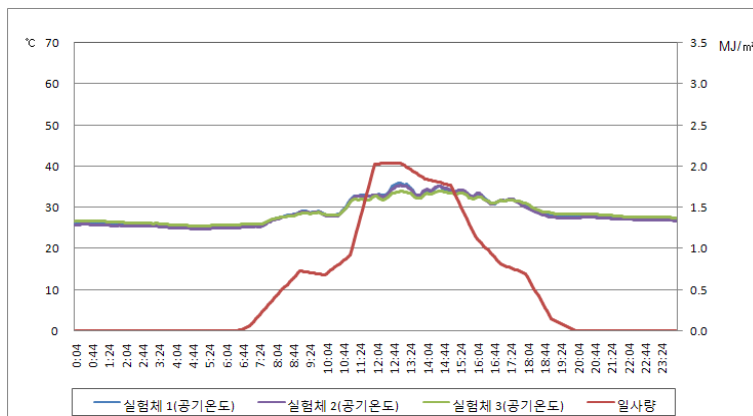
(그림 4.14) 지붕 마감재에 따른 실내 온도 변화(하절기 담천공)



(그림 4.15) 지붕 마감재에 따른 마감재 내부 온도변화(하절기 담천공)



(그림 4.16) 지붕 마감재에 따른 지붕 표면온도 변화(하절기 담천공)



(그림 4.17) 지붕 마감재에 따른 공기 온도 변화(하절기 담천공)

하절기 담천공 시 지붕 마감재의 태양 반사율과 열 방사율에 따른 실내 온도변화를 확인한 결과, 각 실험체의 실내 최고온도의 경우 일반마감(43.7℃)과 Cool Roofing 마감(37.2℃), 옥상녹화마감(37.9℃)의 온도차는 최대 6.5℃가 차이 났으며, Cool Roof 마감과 옥상녹화 마감 지붕은 Cool Roof로 마감한 지붕의 실내온도가 약 0.5℃ 가량 낮은 것으로 나타났다.

지붕 마감재에 따른 외부 표면온도의 변화를 확인한 결과, 일 일 최고온도는 일반마감 60.8℃, Cool Roof 마감 47.4℃, 옥상녹화마감 39.7℃로 나타났다. 일반마감과 Cool Roofing 마감 처리한 지붕의 표면온도는 최대 13.4℃ 차이가 나타나, 일반 지붕 마감에 비해 Cool Roof 적용 시 건물내부로 유입되는 태양의 일사열을 더 많이 차단시킬 수 있다.

지붕 상부의 공기온도 변화(마감재 기준 이격거리 100mm)를 측정한 결과, 일반지붕 마감재 상부의 공기온도는 35.9℃, Cool Roof 마감재 상부의 공기온도는 35.5℃, 옥상녹화 마감 상부의 공기온도는 34.1℃로, Cool Roof로 마감한 지붕이 일반 마감 지붕에 비해 0.4℃ 낮은 것으로 나타났다. 담천공 시 옥상녹화의 상부 공기온도가 가장 낮은 것으로 나타났는데, 이는 식생의 증발 냉각작용에 의한 것으로 판단된다.

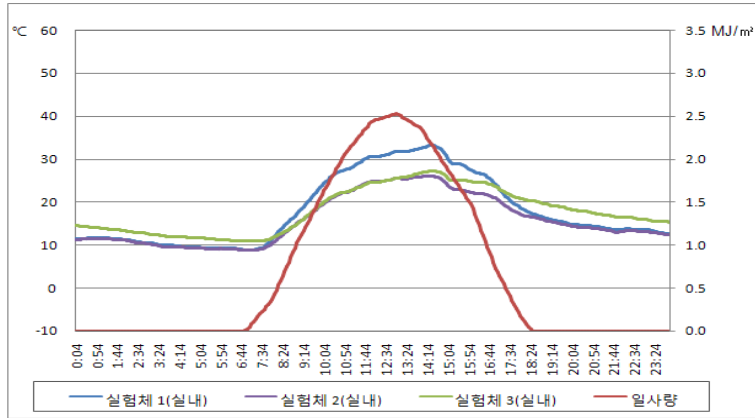
2) 중간기

중간기 지붕 마감재의 종류에 따른 모형 실험체의 온도변화를 측정하기 위해, 일일 평균기온과 최고기온, 최저 기온이 유사한 담천공과 청천공을 각각 선정하여 온도변화 값을 비교 분석했다.

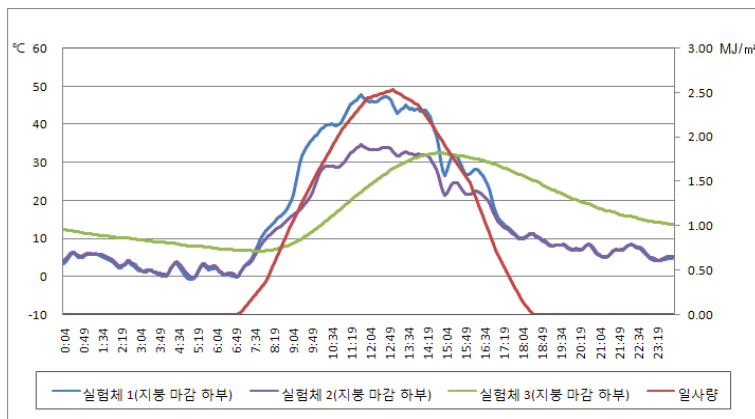
① 청천공

중간기 청천공 상태에서 지붕 마감재의 태양 반사율과 열 방사율에 따른 온도 변화를 알아보기 위해 평균기온 16.0℃, 최고, 최저기온은 각 각 21.3℃, 10.9℃, 평균운량은 0.6인 2009년 10월 10일의 측정데이터를 분석했다.

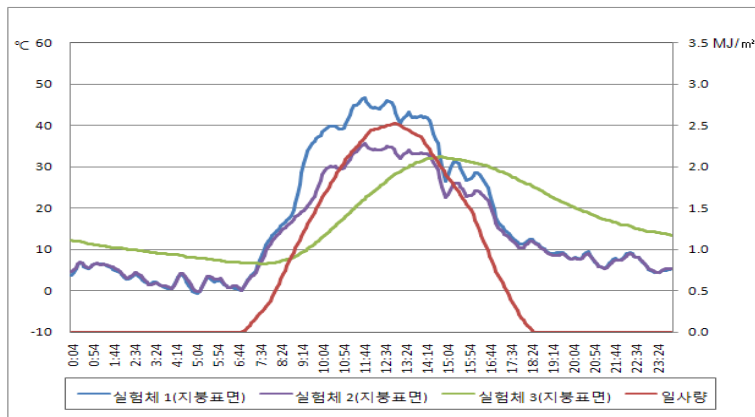
중간기 청천공 상태에서 지붕표면의 태양 반사율과 열 방사율에 따른 각 실험체의 온도 변화는 (그림 4.18), (그림 4.19), (그림 4.20), (그림 4.21)과 같다.



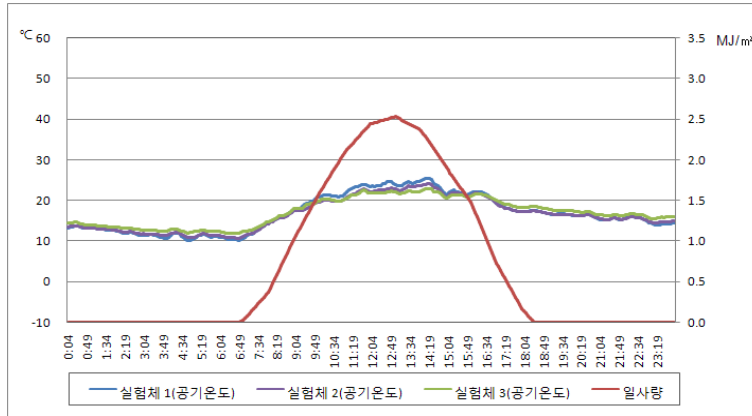
(그림 4.18) 지붕 마감재에 따른 실내 온도 변화(중간기 청천공)



(그림 4.19) 지붕 마감재에 따른 마감재 내부 온도변화(중간기 청천공)



(그림 4.20) 지붕 마감재에 따른 지붕 표면온도 변화(중간기 청천공)



(그림 4.21) 지붕 마감재에 따른 공기 온도 변화(중간기 청천공)

중간기 청천공일 때 지붕 마감재의 태양 반사율과 열 방사율에 따른 모형 실험체 내부 온도변화를 측정한 결과, 실험체 내부의 최고온도는 일반지붕 (34.2℃)과 Cool Roof 지붕(26.1℃)에서 8.1℃로 가장 큰 차이를 보였다.

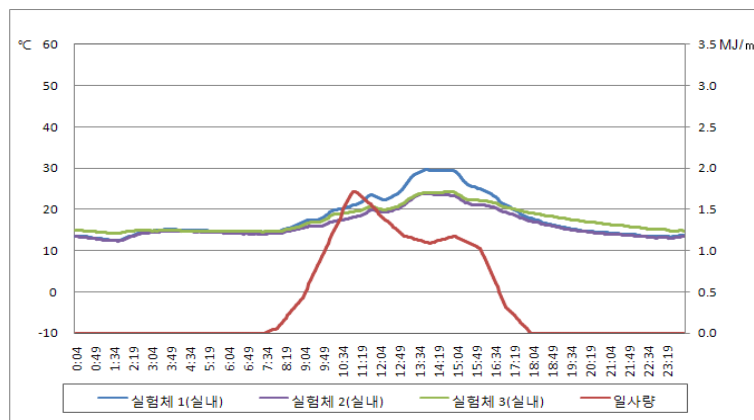
우리나라의 중간기에는 주간에는 냉방에너지와 야간에는 난방에너지를 요구하는데, (그림 4.18)과 같이 Cool Roof와 옥상녹화 마감 지붕의 경우 주간의 내부온도가 일반 지붕에 비해 8.1℃ 낮아 냉방 시 요구되는 에너지를 저감할 수 있다. 또한 야간의 내부온도는 Cool Roof와 일반마감지붕 모두 온도변화가 동일한 것으로 나타나, 우리나라의 건물 지붕에 일반 지붕을 대체 하여 Cool Roof를 적용할 때 그에 따른 야간에 추가되는 난방에너지는 없을 것으로 판단된다. 옥상녹화 지붕은 야간에 일반지붕과 Cool Roof 마감 지붕에 비해 내부온도가 약 2℃정도 높은 것으로 나타났고, 이는 흙의 축열 성능에 의한 것으로 판단된다.

지붕 표면 마감재 내부온도와 지붕의 외부 표면온도는 하절기 청천공일 때와 동일하게 일사의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. (그림 4.21)과 같이 지붕 표면온도는 일반지붕이 다른 Cool Roof와 옥상녹화 지붕에 비해 태양 반사율이 낮기 때문에 상대적으로 높은 것으로 나타났으며, 지붕표면의 최고온도의 경우 일반지붕 40.2℃, Cool Roof 35.7℃, 옥상녹화 32.4℃로 나타났다.

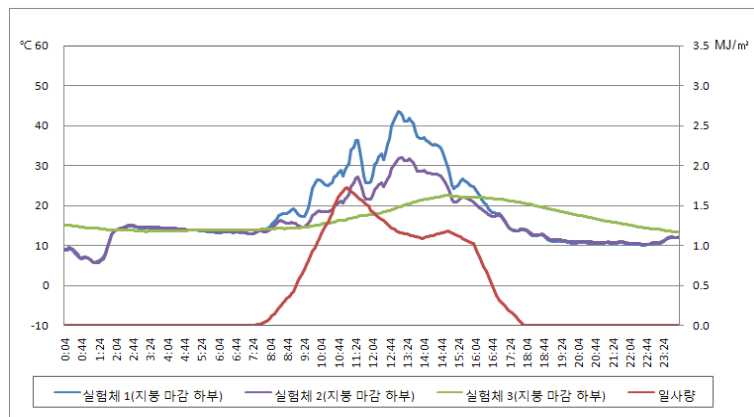
② 담천공

중간기 담천공 시 지붕 마감재의 태양 반사율과 열 방사율에 따른 온도 변화를 알아보기 위해 천청공과 외기온도 조건이 유사한 2009년 11월 09일의 측정데이터를 분석했고, 이 날의 평균기온은 16.8℃, 최고, 최저기온은 각각 21.8℃, 14.3℃, 평균운량 6.4인 것으로 나타났다.

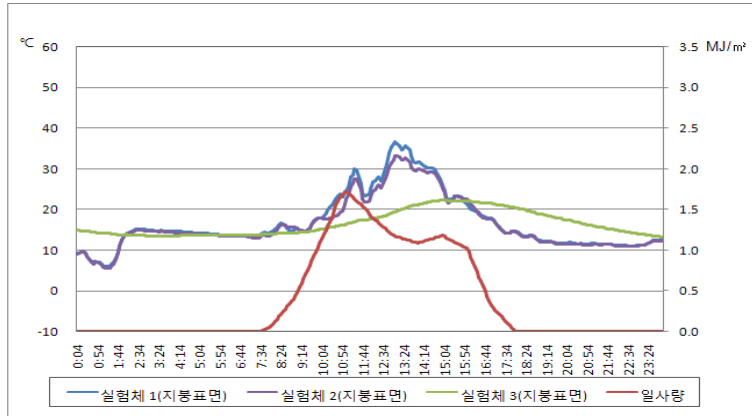
중간기 담천공 상태에서 지붕표면의 태양 반사율과 열 방사율에 따른 각 실험체의 온도 변화는 (그림 4.22), (그림 4.23), (그림 4.24), (그림 4.25)와 같다.



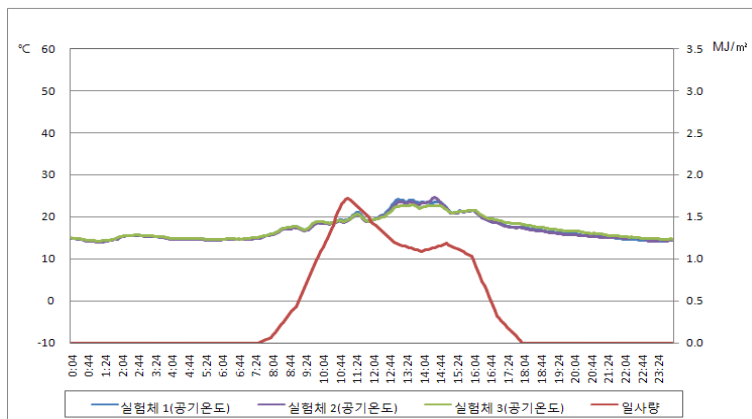
(그림 4.22) 지붕 마감재에 따른 실내 온도 변화(중간기 담천공)



(그림 4.23) 지붕 마감재에 따른 마감재 내부 온도변화(중간기 담천공)



(그림 4.24) 지붕 마감재에 따른 지붕 표면온도 변화(중간기 담천공)



(그림 4.25) 지붕 마감재에 따른 공기 온도 변화(중간기 담천공)

중간기 담천공 상태에서 지붕의 마감재의 태양 반사율과 열 방사율에 따른 중간기 모형 실험체의 내부온도를 측정한 결과, 실험체 내부의 최고온도차는 일반지붕(30.6℃)과 Cool Roof(23.9℃)에서 8.1℃로 가장 큰 차이가 나타났다. Cool Roof와 옥상녹화 지붕(24.2℃)의 내부온도는 0.3℃ 차로 최고온도는 유사한 것으로 나타났다. 또한 내부의 최저 온도는 일반지붕과 Cool Roof 지붕 모두 12.4℃로 동일하게 나타나, 우리나라의 건물 지붕에 일반 지붕을 대체하여 Cool Roof를 적용할 때 그에 따른 야간에 추가되는 난방에너지는 없을 것으로 판단된다. 옥상녹화 마감지붕의 실내 최저온도는 14.2℃로 흡의 축열 성능에 의해 다른 마감지붕에 비해 약 2℃가량 높은 것으로 판단된다.

중간기, 담천공과 청천공 상태에서의 지붕 마감재의 태양 반사율과 열 방사율에 따른 모형 실험체의 온도변화를 알아보기 위해 천공상태를 제외한 외기상태가 유사한 날을 선택하여 분석했다. 그 결과 실험체 내부의 온도 상승에 가장 많은 영향을 미치는 외부적 요소는 일사량인 것으로 판단되며, 건축적 요소는 마감재의 태양 반사율인 것으로 판단된다. 또한 야간의 실험체 내부 온도저하에 가장 많은 영향을 미치는 외부적 요소로는 청공상태(운량)인 것으로 판단되며, 건축적 요소로는 지붕 재료의 방사율에 의한 것으로 판단된다.

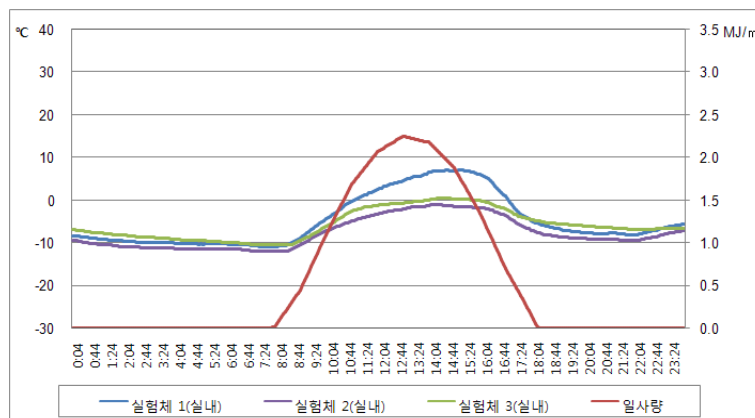
3) 동절기

Cool Roof의 최대 단점은 높은 반사율로 인해, 실내발열 부하가 적은 건물의 경우 동절기에는 오히려 에너지 소비량이 증가되는 문제점을 갖고 있어, 이에 따라 실내 발열부하가 없는 모형 실험체의 온도변화를 측정하여 Cool Roof 적용 시 추가적으로 요구되는 난방 에너지를 파악하고자 했다.

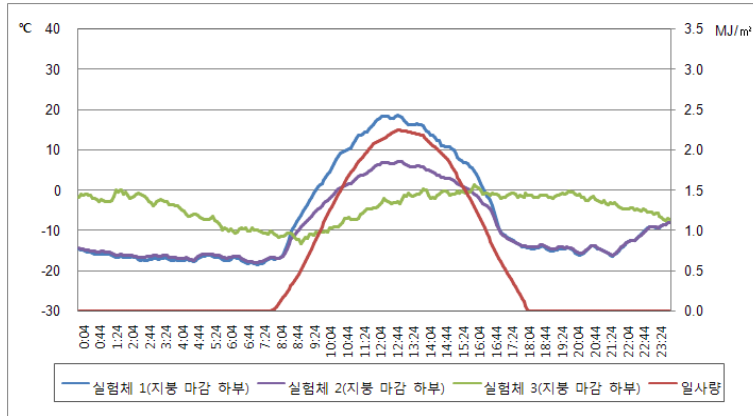
① 청천공

동절기 청천공 상태에서 모형 실험체의 온도변화를 분석하기 위해 2월 03일의 결과 데이터를 분석했고, 이 날의 외기 조건은 평균 운량 1.0, 평균기온 -8.0°C , 최고, 최저 기온은 각각 -5.0°C , -10.8°C 이었다.

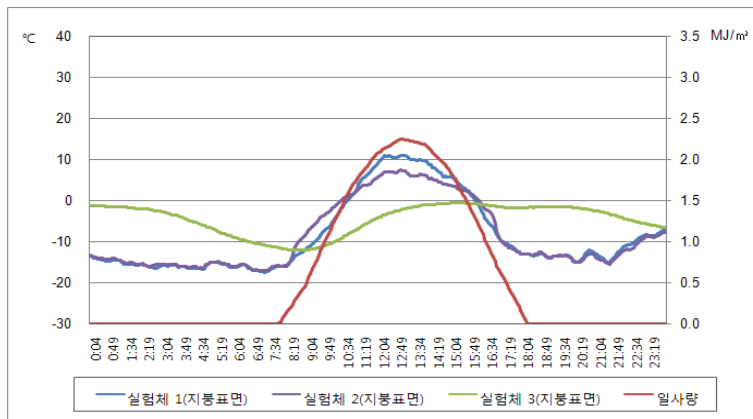
동절기 청천공 상태에서 지붕표면의 태양 반사율과 열 방사율에 따른 각 실험체의 온도 변화는 (그림 4.26), (그림 4.27), (그림 4.28), (그림 4.29)와 같다.



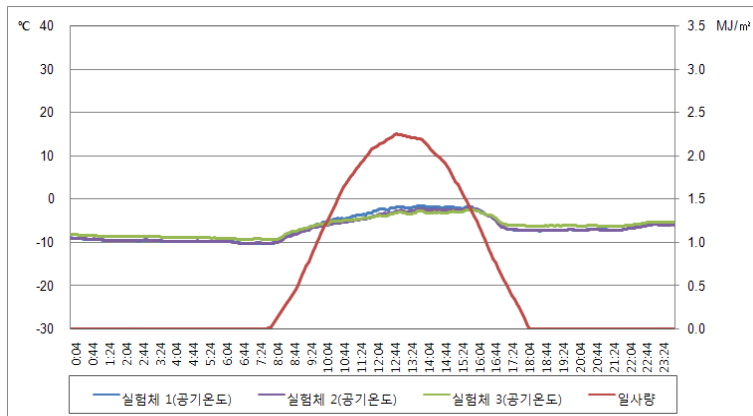
(그림 4.26) 지붕 재료에 따른 실내 온도 변화(동절기 청천공)



(그림 4.27) 지붕 재료에 따른 마감재 내부 온도변화(동절기 청천공)

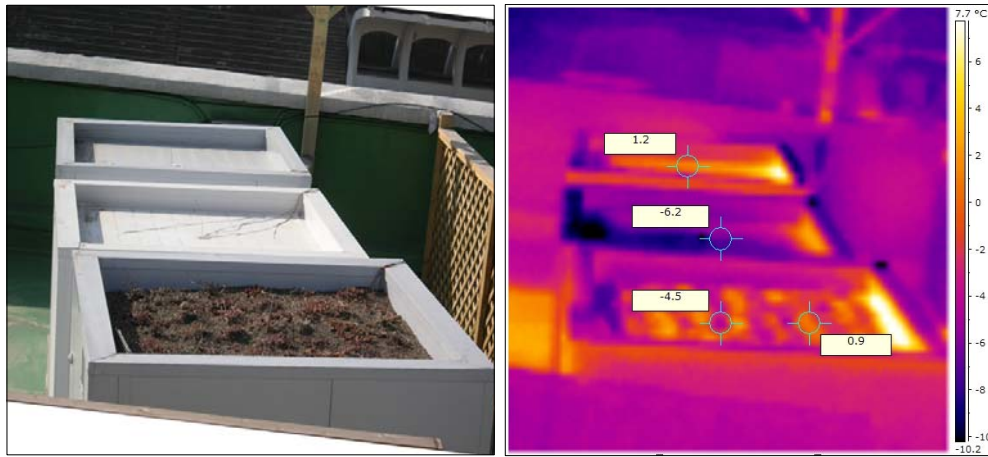


(그림 4.28) 지붕 재료에 따른 지붕 표면온도 변화(동절기 청천공)



(그림 4.29) 지붕 재료에 따른 공기 온도 변화(동절기 청천공)

동절기 청천공 상태에서 지붕 마감재의 태양 반사율과 열방사율에 따른 각 실험체의 온도변화를 측정하고, 각 지붕의 표면 온도를 열화상카메라 측정한 결과 (그림 4.30)과 같다.



(a) 지붕 재료에 따른 실험체 (b) 지붕 재료에 따른 옥상 표면 온도

(그림 4.30) 동절기 청천공 시 옥상 표면 온도

지붕의 마감재의 태양 반사율과 열방사율에 따른 동절기 청천공 시 모형 실험체 내부온도를 측정한 결과, 내부 최고온도는 Cool Roof(-1.1°C)이 일반 마감지붕(6.0°C)과 비교하여 7.1°C 로 낮은 것으로 나타났으며, 옥상녹화 지붕(0.4°C)과 Cool Roof의 내부 온도차는 1.5°C 차이가 났다. 또한 내부의 최저 온도는 옥상녹화 지붕(-10.5°C)과 일반 지붕(-11.8°C), Cool Roof(-12.0°C) 사이에 각각 약 1°C 가량 차이가 났다.

마감재의 외부 표면온도는 일반지붕과 Cool Roof의 경우 일사의 영향을 받아 일사량이 상승함에 따라 표면온도가 상승하고, (그림 4.28)과 같이 온도 변화 폭이 큰 것으로 나타났다. 옥상녹화 지붕의 경우, 흙의 축열 성능으로 인해 온도의 변화 폭이 좁고, 최고 온도가 다른 지붕에 비해 4시간 후 온도가 가장 높은 것으로 나타났다.

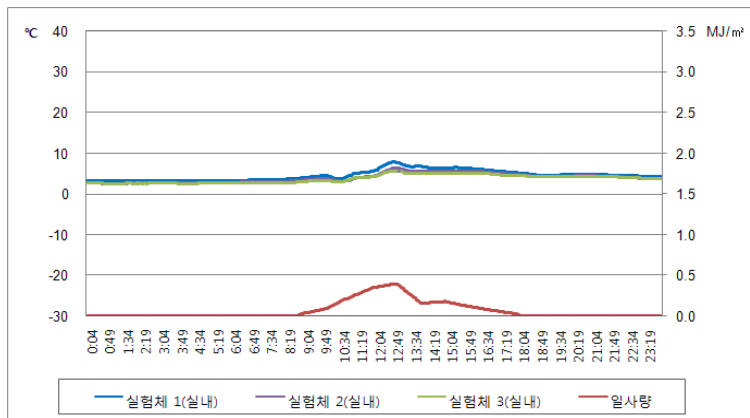
열화상 카메라를 통해 청천공 시 지붕의 표면온도를 측정한 결과, 일반 지붕의 경우 평균 표면온도는 10.1°C 인 것으로 나타났으며, Cool Roof의 경우 1.4°C , 옥상녹화의 경우 0.9°C 인 것으로 나타났다.

이러한 결과는, 하절기 부하 상승에 영향을 주었던, 일반지붕의 낮은 반사율이 일사를 더 많이 흡수하여 상대적으로 다른 지붕에 비해 표면온도가 높게 나타난 것으로 판단된다.

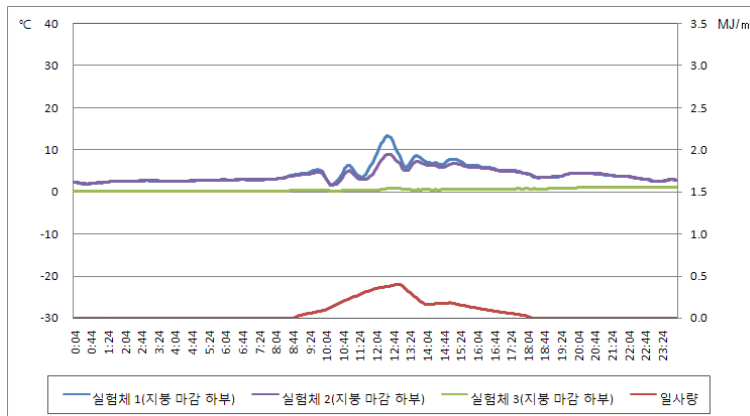
② 담천공

동절기 담천공 상태에서 모형 실험체의 온도변화를 알아보기 위해 2월 08일의 측정 데이터를 분석했고, 이 날의 외기 조건은 평균 운량 10.0, 평균기온 4.0℃, 최고, 최저 기온은 각 각 5.7℃, 3.0℃ 이었다.

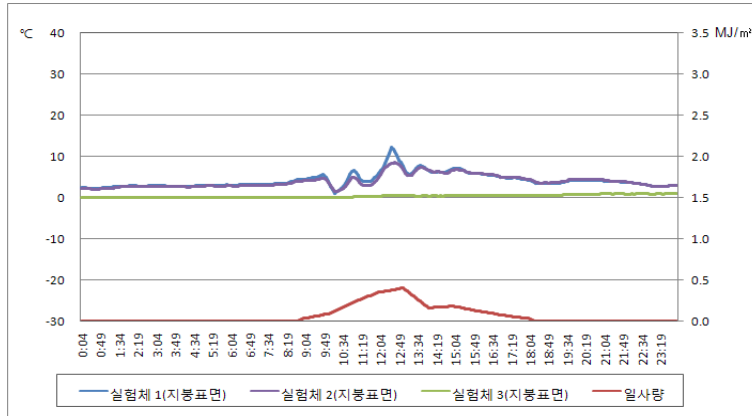
동절기 담천공 상태에서 지붕표면의 태양 반사율과 열 방사율에 따른 각 실험체의 온도 변화는 (그림 4.31), (그림 4.32), (그림 4.33), (그림 4.34)와 같다.



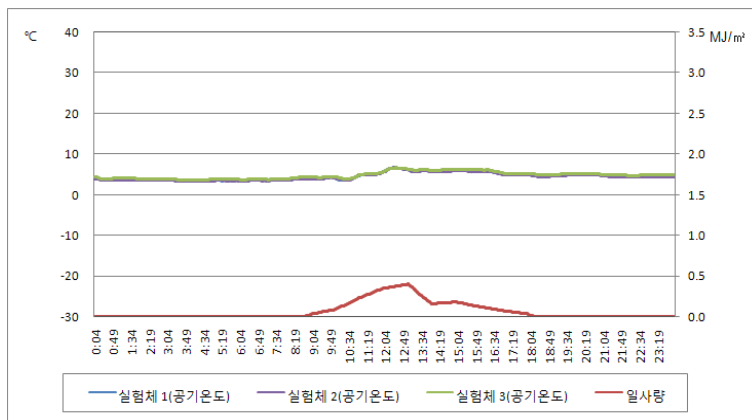
(그림 4.31) 지붕 재료에 따른 실내 온도 변화(동절기 담천공)



(그림 4.32) 지붕 재료에 따른 마감재 내부 온도변화(동절기 담천공)



(그림 4.33) 지붕 재료에 따른 지붕 표면온도 변화(동절기 담천공)



(그림 4.34) 지붕 재료에 따른 공기 온도 변화(동절기 담천공)

지붕의 마감재의 태양 반사율과 열 방사율에 따른 동절기 담천공 시 모형 실험체 내부 온도를 측정한 결과, 내부 최고온도는 일반지붕(8.9℃)과 Cool Roof(7.9℃), 옥상녹화 지붕(7.9℃)모두 유사한 것으로 나타났다. 이는 일사의 영향이 적어 지붕으로 유입되는 일사의 흡수량이 적기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 내부의 최저 온도는 옥상녹화 지붕(2.7℃)과 Cool Roof(3.2℃), 일반 지붕(4.2℃) 사이에 각 각 약 1℃ 가량 차이가 나는 것으로 나타났다.

4.4 소결

건물의 지붕 재료에 따른 에너지 저감량을 파악하기 위해 모형 실험체를 제작하고, 계절에 따른 온도변화를 살펴본 결과, 다음과 같이 나타났다.

1) 하절기

하절기 청천공과 담천공 시 지붕 마감재의 태양 반사율과 열 방사율에 따른 실험체 내부 온도 변화를 확인한 결과, 천공상태와 관계없이 일반 마감을 한 실험체의 내부온도가 Cool Roof와 옥상 녹화 지붕과 비교하여 약 5~8℃ 가량 높은 것으로 나타났다. 또한, 외부 마감재의 표면온도도 일반 마감을 한 실험체가 다른 두 마감재에 비해 약 13~14℃ 높은 것으로 나타나, 하절기 건물 최상층의 실내 온도 상승 저감을 위한 방안으로 반사율이 높은 재료를 건물 지붕에 마감재로 적용하거나 축열 성능이 우수한 재료를 적용하면 효과적일 것으로 판단된다.

열화상카메라를 통해 마감재의 표면 온도를 측정한 결과, 일반 지붕마감의 경우 65.7℃(지붕면 온도편차 $\pm 2^{\circ}\text{C}$), Cool Roofing 마감은 43.9℃(지붕면 온도편차 $\pm 2^{\circ}\text{C}$)로 나타났으나, 옥상녹화의 경우 흙의 표면온도는 최대 75.4℃, 식생의 표면온도는 37.4℃로 그 차이가 매우 큰 것으로 나타났다. 따라서 옥상 녹화 지붕 마감의 경우 실내로 일사열 유입을 차단하기 위해서 옥상녹화 마감 시 식생분포를 함께 고려해야 할 것으로 판단된다. 또한 하절기 도심의 열섬현상 저감을 위해 Cool Roof와 같이 반사율이 높은 재료를 건물 지붕 마감 재료로 적용하면, 효과적일 것으로 판단된다.

2) 중간기

중간기 청천공과 담천공 시 지붕 마감재의 태양 반사율과 열 방사율에 따른 모형 실험체의 온도변화를 살펴본 결과, 중간기는 일교차가 커 주간에는 냉방에너지와 야간에는 난방에너지를 요구한다. 청천공과 담천공 모두 Cool Roof와 옥상녹화 마감 지붕의 경우 주간의 내부온도가 일반 지붕에 비해 약 8℃가량 낮아 냉방 시 요구되는 에너지를 저감할 수 있다. 또한 야간의 내부 온도는 Cool Roof와 일반마감지붕 모두 온도변화가 동일한 것으로 나타나, 우리나라의 건물 지붕에 일반 지붕을 대체하여 Cool Roof를 적용할 때 그에 따른 야간에 추가되는 난방에너지는 없을 것으로 판단된다. 옥상녹화 지붕은 야간에 일반지붕과 Cool Roof 마감 지붕에 비해 야간의 내부온도가 약 2℃정도

높은 것으로 나타났고, 이는 흡의 축열 성능에 의한 것으로 판단된다.

중간기 지붕 마감재에 따른 실험체 내부 온도 상승에 가장 많은 영향을 미치는 외부적 요소는 일사량인 것으로 판단되며, 건축적 요소는 마감재의 태양 반사율인 것으로 판단된다. 또한 야간의 내부 온도저하에 가장 많은 영향을 미치는 외부적 요소로는 천공상태(운량)인 것으로 판단되며, 건축적 요소로는 지붕 마감재의 열 방사율에 의한 것으로 판단된다.

3) 동절기

지붕 마감재의 태양 반사율과 열 방사율에 따른 동절기 청천공 시 실험체 내부 온도를 측정한 결과, 청천공 시 일사의 영향으로 일반지붕이 Cool Roof와 옥상녹화 지붕에 비해 약 7℃ 가량 높은 것으로 나타났다. 그러나 담천공일 때는 태양 반사율에 따른 실험체 내부의 온도차가 크게 발생하지 않는 것으로 나타났다는데, 이는 담천공 시 지붕으로 유입되는 일사량이 적어, 외기 온도가 실험체 내부온도에 가장 큰 영향을 준 것으로 판단된다. 야간의 천공 복사로 인한 내부온도 저하의 경우, 마감재의 태양 반사율과 관계없이 모두 유사한 것으로 나타났다. 지붕의 야간 복사는 재료의 방사율에 의해 결정되는데, 일반지붕과 Cool Roof의 경우 마감재의 열 방사율이 유사해 이러한 결과가 나온 것으로 판단되며, 옥상녹화의 경우 흡의 축열 성능으로 인해 다른 실험체보다 내부온도가 높은 것으로 판단된다.

모형실험을 통해 지붕마감재의 열성능에 따른 온도변화를 확인한 결과, 하절기 냉방부하에 많은 영향을 미치는 외부적인 요소는 일사량, 건축적 요소는 마감재의 태양 반사율로 판단된다. 또한 동절기 난방부하에 영향을 미치는 외부적인 요소는 천공상태(운량), 건축적 요소는 마감재의 태양 반사율인 것으로 판단된다.

태양 반사율이 높은 지붕 마감재는 하절기 냉방부하 저감효과를 가져 올 수 있으나, 동절기 난방부하 상승의 문제를 유발시킬 수 있다. 그러나 겨울철의 난방부하는 주간보다는 야간에 더 많은 양을 요구하고 있고, 야간의 난방부하에 영향을 미치는 것은 마감재의 열 방사율인 것으로 실험결과 나타났다.

또한 우리나라의 기후데이터를 분석한 결과, 우리나라 동절기의 천공상태는 2009년 12월 1일부터 2010년 2월 28일 총 90일을 기준으로 청천공 37일, 부분담천공 40일, 담천공 13일인 것으로 나타나, 청천공일수가 1/3가량 차지하기 때문에 Cool Roof 적용 시 난방부하의 증가량은 크지 않을 것으로 판단된다.

제 5 장 Cool Roof의 에너지 절약효과 분석

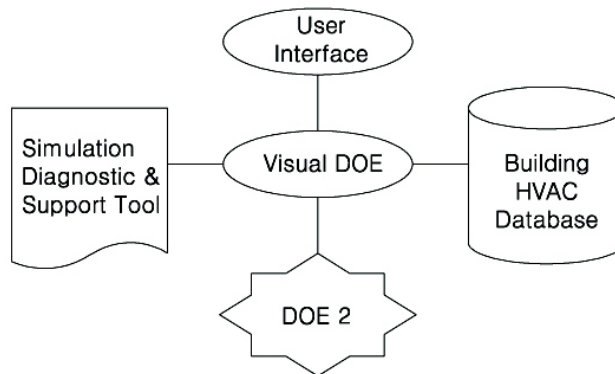
5.1 시뮬레이션 해석의 신뢰도 검증

건물 지붕 마감재의 태양 반사율과 열 방사율에 따른 건물의 에너지성능 및 열성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 분석하기 위해 앞에서 실시한 모형 실험의 결과를 토대로, 에너지 해석 프로그램의 신뢰도 검증을 실시했다.

5.1.1 시뮬레이션 프로그램의 선정

본 연구에서는 건물 지붕에 Cool Roof 적용 시 그에 따른 영향분석을 위해, 분석 Tool로써 DOE-2를 시뮬레이션 엔진으로 사용하는 Visual DOE 4.0을 이용하여 에너지 해석을 실시하였다.

Visual DOE 4.0은 빌딩 디자인 옵션들이 건물의 에너지 절약에 어떠한 영향을 미치는지 평가하기 위한 응용프로그램이다. 이 프로그램은 건물의 외피, 조명, 채광, 급탕, 공기조화, central plant까지 포함하며, Visual DOE은 에너지 사용과 최대 요구량을 시간에 따라 정확하게 산출하기 위하여 DOE-2.1 hourly simulation tool을 산출 엔진으로 사용한다.



(그림 5.1) DOE 4.0 알고리즘

Visual DOE 4.0은 The windows user interface, The building and HVAC database, The DOE-2 simulation engine, 그리고 The simulation

diagnostic and support tools의 4가지 큰 구성요소를 가지고 있다. 기존의 DOE-2 사용자가 편리하게 이용할 수 있도록 프로그램을 시각화한 것으로 지속적으로 개발·검증되고 있는 건물 에너지 해석 프로그램으로 주어진 기후 조건에서 건물에 대한 시간별 에너지소비량을 예측할 수 있다.

프로그램의 기본구성은 사용자가 건물에 관한 입력내용을 변환하는 BDL Processor와 4개의 시뮬레이션 프로그램(LOADS, SYSTEMS, PLANT, ECON)으로 구성되어 있으며 LOADS, SYSTEMS, PLANT, ECON의 순서에 따라 연속적으로 실행된다. LOADS에서 계산된 실의 열부하(Space Thermal Load)는 SYSTEMS의 입력 자료로 사용되며, 여기에서 계산된 시스템 열부하(SYSTEMS Thermal Load)가 다시 PLANT의 입력 자료가 된다. DOE-2의 PLANT 프로그램에서는 시스템 열부하(기기의 전기부하, 급탕부하 및 HVAC에 의해 실에 공급되는 냉·난방 시스템부하 등)를 공급하기 위해 열원설비(보일러, 냉동기, 축열조, 냉각탑 등)에 의해 실제 소비되는 연료 및 전기 에너지를 계산한다.

DOE-2의 PLANT 프로그램은 <표 5.1>과 같다.

<표 5.1> DOE-2의 PLANT

구분	기기
난방	Hot Water Boiler
	Steam Boiler
	Electric Boiler
	Electric hot-water Boiler
냉방	Hermetic Centrifugal Chiller
	Hermetic Reciprocating Chiller
	Solar-Fired Absorption Chiller
	1-Stage Absorption Chiller
	2-Stage Absorption Chiller
	Double Bundle Chiller
	Gas Engine Driven Reciprocation Chiller
급탕	Cooling Tower
	Domestic hot-water heater
축열조	Electrical Domestic hot-water Heater
	Hot and Cold Water Storage Tank
전기	Diesel Engine Generator
	Gas Turbine Generator

이때 PLANT에 입력되는 시스템 열원설비는 <표 5.2>와 같다.

<표 5.2> SYSTEMS Load

SYSTEMS Load
Heating Load in Btu/hr
Cooling Load in Btu/hr
Electrical Load in Btu/hr
Hot Water in Btu/hr
Gas in Btu/hr
Oil in Btu/hr

DOE-2에서 시뮬레이션 되는 PLANT는 각 열원설비의 기본적으로 Curve-fitting에 의해 수치 모델화되며, 시스템의 부하공급을 위해 소비되는 에너지와 기기의 구동을 위한 전기에너지가 계산된다.

시스템 열부하에 따라 각 열원설비에서 실제 소비되는 열에너지는 다음 [식 5.1]에 따라 계산된다.

$$HEAT = (CAP) \times (HIR_{des}) \times [HIR2(PLR)] \quad [\text{식 5.1}]$$

여기서 CAP 은 기기의 정격출력을 나타내며, HIR_{des} 는 설계조건(Design Conditions)하에서 정격출력에 대한 열 유입률(Heat Input Ratio)로서 그 역수는 기기의 효율이 된다. $[HIR2(PLR)]$ 는 부분부하 운전조건하에서의 성능변화를 고려하기 위한 보정계로서 부분부하율(PLR)에 의한 3차의 대수다항식으로 근사된다.

$$PLR = \frac{SYSTEMS\ Load}{CAP} \quad [\text{식 5.2}]$$

$$HIR2(PLR) = a + b \times PLR + c \times PLR^2 + d \times PLR^3 \quad [\text{식 5.3}]$$

열원설비의 구동을 위해 소비되는 전력사용량은 다음 [식 5.4]에 따라 계산된다.

$$HIR2(PLR) = (CAP) \times (EIR_{des}) \times [HIR2(PLR)] \quad [\text{식 5.4}]$$

여기서 HIR_{des} 는 설계조건(Design Conditions)하에서 정격출력에 대한 전력 사용율(Electric Input Ratio)을 나타내며, $[HIR2(PLR)]$ 는 부분부하 운전조건 의 보정계수가 된다.

5.1.2 해석모델 및 경계조건

지붕 마감재의 태양 반사율과 열 방사율에 따른 건물의 에너지 저감 성능을 분석하기 위해 건물 에너지 해석 시뮬레이션인 VisualDOE 4.0을 활용했다.

VisualDOE 4.0을 통해 마감재의 열성능에 따른 건물의 에너지 사용량을 해석에 앞서, 해석 프로그램의 신뢰도를 검증하기 위해서 앞 절에서 실시한 모형실험의 결과를 토대로 비교/분석했다.

앞 절에서 실시한 모형실험의 결과와 VisualDOE 4.0 프로그램을 비교 분석 하기위한 VisualDOE 4.0 프로그램의 해석 조건은 <표 5.3>와 같다.

<표 5.3> 프로그램 해석 조건

해석 모델 조건	경계 조건
▪ 대상지역	대한민국 서울
▪ 기상 데이터	태양에너지학회
▪ 바닥면적	$1.2\text{m} \times 1.2\text{m} = 1.44\text{m}^2$
▪ 높 이	1.2 m
▪ Aspect Ratio	1 : 1
▪ 개구부	$1.0\text{m} \times 1.0\text{m}$
▪ 구조체 단열성능	K-value : $0.29 \text{ W/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$
▪ 반사율	0.9
▪ 방사율	0.5

5.1.3 에너지 해석 프로그램의 신뢰도 검증

에너지 해석 시뮬레이션의 신뢰도 검증을 위해 모형실험의 결과와 비교분석을 실시했다. 먼저 태양에너지 학회에서 제공한 기상데이터를 토대로 외기 조건이 유사한 하절기의 담천공과 청천공 상태에서의 실내 온도 변화를 비교 분석했다.

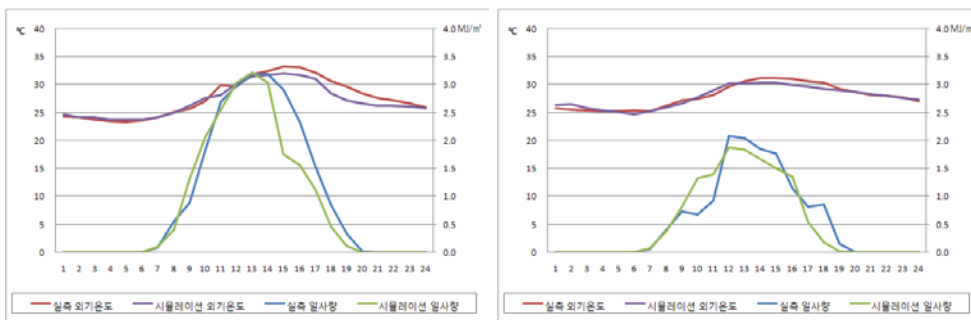
에너지 해석프로그램의 결과값은 건물의 부위별 유·출입되는 에너지의 부하량으로 계산되어지므로, 시뮬레이션과 모형실험을 비교하기 위해 지붕에서 관류에 의한 열손실량을 비교했다. 모형실험 데이터는 (그림 4.8)과 같이 지붕의 내·외부 표면온도 측정하였으며, 측정된 결과값을 토대로 [식 5.5]를 통해 부하량을 계산한 후 시뮬레이션과 비교 분석했다.

$$P_f = KA\theta \quad [\text{식 5.5}]$$

P_f : 관류에 의한 열손실율(W) K : 지붕의 열관류율값(W/m²℃)
 A : 각 부분의 면적(m²) θ : 실내와 외부환경의 온도차(℃)

하절기의 담천공과 청천공 상태의 모형실험과 시뮬레이션의 결과값을 비교하기 위해, 2009년 8월 14일(청천공)과 8월 19일(담천공)의 모형실험을 통해 측정된 데이터를 시뮬레이션 상의 외기 상태가 비슷한 7월 21일과 8월 31일 기준으로 비교 분석했다.

시뮬레이션과 실측데이터를 비교하기 위해 각 각의 기후데이터를 분석하였으며, 그 결과는 (그림 5.2)와 같다.



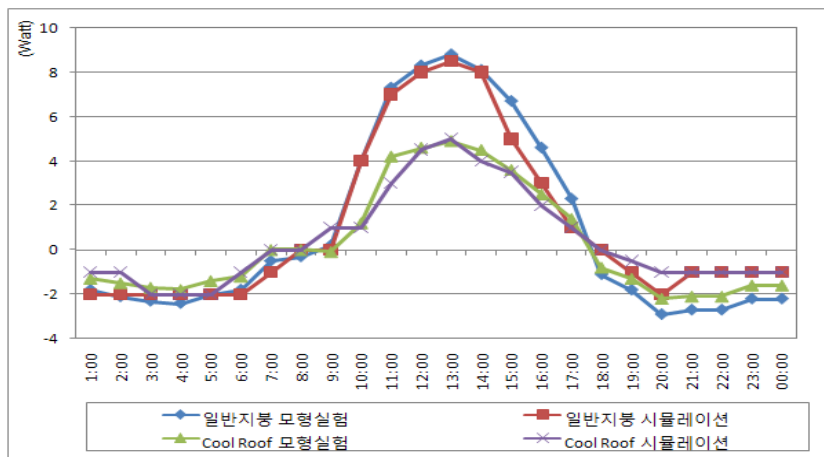
a. 청천공 시 기후데이터

b. 담천공 시 기후데이터

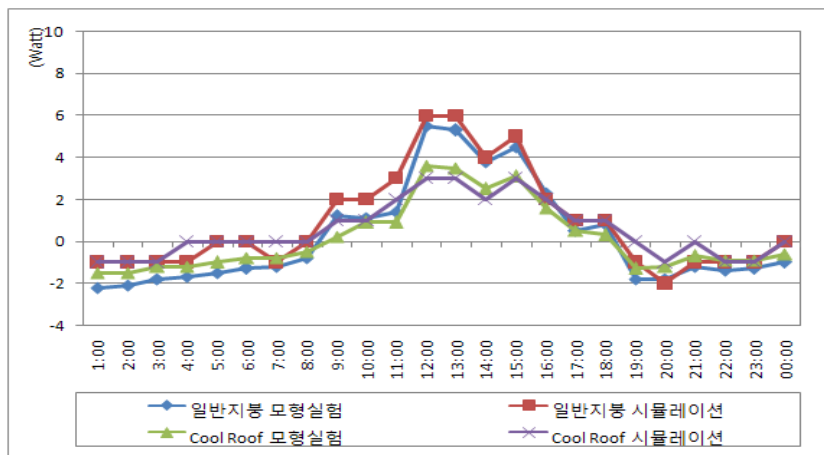
(그림 5.2) 실측 및 시뮬레이션의 기후데이터 비교

기상청에서 제공한 기상 데이터와 시뮬레이션에 활용된 기상데이터 간에 가장 유사한 날을 선택하여 계산식을 통해 얻어진 모형실험의 지붕의 관류열 손실과 시뮬레이션을 통해 얻어진 지붕의 관류열 손실을 비교했다.

천공 상태에 따라 청천공과 담천공으로 나누어 모형실험과 시뮬레이션을 비교한 결과 다음 (그림 5.3)과 (그림 5.4)와 같다.



(그림 5.3) 청천공 시 지붕 관류열손실 결과 비교



(그림 5.4) 담천공 시 지붕 관류열손실 결과 비교

모형실험과 시뮬레이션의 지붕을 통해 유출입되는 열량을 비교한 결과, 그 결과 값이 유사한 것으로 나타났다. 청천공 주간의 14:00 ~17:00까지 일반지붕의

열획득량에 차이가 발생하는 것으로 나타났는데, 이는 실제 기후데이터와 시뮬레이션에 활용된 기후데이터 간에 일사량의 차이가 발생되어 이러한 결과가 나온 것으로 판단된다. 그 외 실제 기후데이터와 시뮬레이션의 기후데이터가 유사한 시간대에서는 모형실험의 결과와 시뮬레이션의 결과값이 유사하게 나타나 Visual DOE 4.0을 해석시뮬레이션으로 활용하기 적합하다 판단되어, 본 논문의 에너지 해석을 위해 활용했다.

5.2 건물의 에너지 효율에 영향을 미치는 지붕요소 민감도 분석

일반적으로 건물의 부하에 영향을 주는 건축적 설계변수는 구조, 방위, 종횡비, 창면적비, 차폐계수, 외피면적 등과 설비적 설계변수인 설계 온·습도 조건, 공조 방식, 조닝 등에 의해 영향을 받는다. 본 연구에서는 건물 최상층의 에너지 사용량에 영향을 미치는 건축적 설계변수를 지붕으로 선정하여, 건물 지붕의 태양 반사성능과 열 방사성능이 건물의 에너지 사용량에 미치는지 영향을 파악하기 위해 지붕의 열성능을 제외한 모든 건축적 설계변수들을 통제하고 건물의 에너지 해석을 실시했다.

사무소 건물의 경우, 다른 용도의 건물과는 달리 사용되는 에너지의 약 53%를 냉방에너지로 사용하고 있어, 건물에서 사용되는 에너지량을 효과적으로 저감하기 위해서는 하절기 냉방부하를 저감해야 한다. 또한 건물 최상층의 냉방부하는 중간층의 냉방부하와 비교하여 약 12~22%⁷⁴⁾ 높은 것으로 나타났다. 이는 많은 량의 일사가 지붕을 통해 건물의 최상층에 유입되어, 그로 인해 건물의 최상층이 다른 중간층에 비해 부하량이 상대적으로 증가하는 것으로 건물 최상층의 부하량을 저감하기 위해서는 지붕을 통한 에너지 저감방안이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 사무소 건물의 에너지 효율에 영향을 미치는 지붕 요소의 민감도 분석을 실시하여, 지붕의 열성능 변수에 따른 에너지 사용량의 연관성을 분석했다.

74) 윤성환 외, “공동주택의 세대위치별 열부하 특성 분석”, 대한건축학회 논문집(계획계), v.25 n.10, 2009.10, p.289~297

5.2.1 해석 개요

사무소 건물의 지붕 열성능 변수에 따른 에너지 사용량을 분석하기 위한 해석 모델은 최소 기준의 규모로서 기존 연구 및 조사 자료에서 가장 출현 빈도가 높은 사항을 선정하여 결정하였으며, 그 내용은 <표 5.15>와 같다.

<표 5.5> 해석 모델의 경계 조건

건물 조건		모델 사항
▪ 대상지역		대한민국 서울
▪ 기상 데이터		태양에너지학회
▪ 바닥면적		20m × 20m = 400m ²
▪ Aspect Ratio		1 : 1
▪ 층 고		3.3 m
▪ 층 수		15 층
▪ 천장고		2.7 m
▪ 창 면적		바닥면적의 30%
▪ 구조체 단열성능	▪ 벽체	지역별 건축물 부위의 열관류율 [제21조 관련 별표4] 참고
	▪ 일반 복층 유리	K-value : 3.2W/m ² K, SC : 0.83
▪ 실내 발열 조건	▪ 조 명	25 W/m ²
	▪ 장 비	15 W/m ²
	▪ 재실인원 밀도	0.2 person/m ²
▪ 실내 설계 온도조건		하절기 : 26℃ RH : 50% 동절기 : 20℃ RH : 50%
▪ 냉난방 설계 외부 조건		T.A.C 2.5%

해석모델의 경계 조건을 설정하고 그에 따른 건물의 부하량을 에너지 해석 프로그램인 VisualDOE 4.1을 통해 확인했다.

5.2.2 민감도 분석

선정한 해석모델을 토대로 지붕의 열성능에 따른 건물의 에너지 효율을 분석하기 위해 매개변수를 태양반사율, 열 방사율, 단열성능으로 선정하고, 그에

따라 각 각의 변수들이 지붕 및 건물 최상층의 에너지 성능에 미치는 영향에 관해 시뮬레이션을 실시했다.

해석 모델의 지붕 기울기는 현재 우리나라 사무소 건물에서 가장 많이 적용되고 있는 지붕형태인 평지붕을 적용하여 지붕의 열성능에 따른 건물의 에너지 성능 평가를 실시했다. 또한 사무소 건물의 지붕 기울기에 따른 건물 에너지 효율과 관련된 기존 연구⁷⁵⁾ 결과, 사무소 건물의 냉방부하를 최소화하기 위한 최적의 지붕 기울기는 0°인 것으로 나타나, 따라서 본 연구에서는 지붕의 기울기를 0°로 고정한 상태에서 건물의 에너지 성능 평가를 실시했다.

1) 지붕의 에너지 효율 분석을 위한 매개변수

① 태양 반사율

태양 반사율은 0~1의 사이의 값을 갖고 있고, 0의 값은 모든 태양 복사 에너지를 흡수하는 표면을 나타내며, 1의 값은 유입되는 모든 에너지를 반사할 수 있는 물체의 표면 능력을 나타낸다. 외부로부터 유입된 에너지를 100% 흡수하거나 반사하는 물체는 흑체로 이 물체는 이론상으로만 존재는 것으로 실제 존재하지 않는다. 따라서 우리나라의 사무소 건물 지붕에 Cool Roof 도입 시 적정 태양 반사율값을 적용하기 위해 0.1부터 0.9까지 0.1씩 변화를 주어 시뮬레이션을 실시했다.

② 열 방사율

열 방사율은 어떤 온도의 물체가 방사하는 에너지의 세기 I 와, 동일 온도의 흑체 방사에너지 I_0 의 비로, 일반 물체는 0에서 1 사이의 값을 갖게 된다. 열 방사율도 태양 반사율과 마찬가지로 실제 100% 열을 방사하는 물체는 존재하지 않기 때문에, 적정 열 방사율 값을 파악하기 위해 태양 방사율로 동일하게 0.1부터 0.9까지 0.1씩 변화를 주어 시뮬레이션을 실시했다.

③ 단열 성능

지붕 마감재의 태양 반사율과 열방사율의 변화에 따른 지붕의 적정 단열 성능을 파악하기 위해, 먼저 건물 지붕의 기준 단열성능을 건축물의 에너지 절약 기준 제 4조 1항 지역별 건축물 부위의 열관류율 [제21조 관련 별표4]로

75) 태원진, '냉방부하 최소화를 위한 지붕의 최적 기울기에 관한 연구', 한국태양에너지학회 논문집, Vol 24, No. 4, 2005, p119~123

설정하고, 그에 따라 단열재의 두께를 30mm 씩 증가시켜가면서 시뮬레이션 했다.

다음 <표 5.6>는 지붕의 열성능을 통해 건물 최상층의 에너지 효율을 분석하기 위한 매개변수 및 인자를 나타낸 것이다.

<표 5.6> 건물 최상층 에너지 효율 매개변수 및 인자

매개변수	기준조건	설정 인자								
태양 반사율	0.5	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
열 방사율	0.9	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
단열 성능	70(mm)	60	90	120	150	180	210	240	270	300

▶ 축소모형 실험에 적용한 일반 지붕을 기준 값으로 선정

▶ 단열성능은 우레탄 패널 기준(열전도율 0.018W/m℃) - 중부지역 지붕의 적정 두께 70mm

2) 건물 최상층 부하량에 영향을 미치는 요소들 간의 민감도 분석

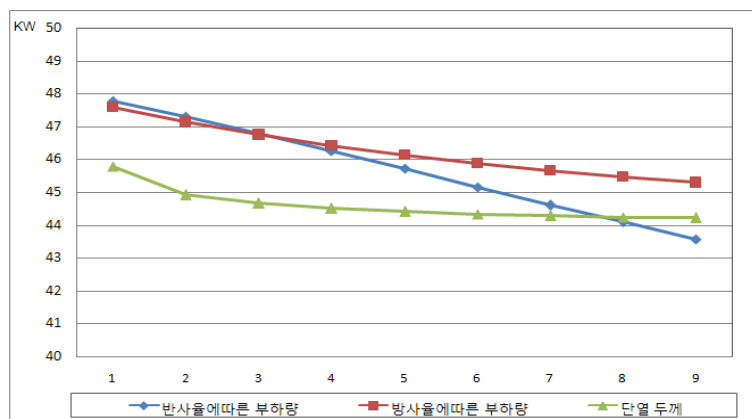
건물 지붕의 열성능에 따라, 건물에 미치는 에너지 효율을 분석하기 위해 각각의 변수를 독립 변수로 설정하고, 이러한 변수가 최상층에 에너지 부하에 미치는 영향을 분석했다.

먼저 <표 5.5>의 표준 해석모델을 기준으로 지붕의 태양 반사율 0.5, 열 방사율 0.9, 단열 두께 70mm의 기준 조건으로 건물의 에너지 해석을 실시한 결과, 1층의 최대 냉방부하량은 44.302kW, 중간층(2~14층)은 40.932kW로 층간의 부하량이 동일하게 나타났으며, 최상층은 45.328kW로 중간층에 비해 약 11% 가량 높은 것으로 나타났다. 또한 최대 난방부하의 경우, 1층은 -21.870kW, 중간층은 -14.737kW, 최상층은 -18.607kW로 최상층의 경우 중간층에 비해 약 26% 부하량이 많은 것으로 나타났다.

이러한 표준 해석모델의 부하량을 기준으로 지붕의 태양 반사율과 열 방사율, 단열성능과 관련하여 <표 5.6>과 같이 변수를 설정하고, 그에 따른 건물의 최대 냉방부하량을 살펴본 결과 다음과 같다.

<표 5.7> 변수에 따른 최상층 최대 냉방부하(kW)

척도	태양 반사율 (열 방사율 0.9, 단열 두께 70mm 고정 시)		열 방사율 (태양반사율 0.5, 단열 두께 70mm 고정 시)		단열 두께(단열 성능) (태양 방사율 0.5, 열방사율 0.9 고정 시)	
	변수	최상층 Peak Load	변수	최상층 Peak Load	변수	최상층 Peak Load
1	0.1	47.790	0.1	47.597	60mm	45.790
2	0.2	47.303	0.2	47.137	90mm	44.918
3	0.3	46.799	0.3	46.751	120mm	44.662
4	0.4	46.275	0.4	46.421	150mm	44.510
5	0.5	45.728	0.5	46.136	180mm	44.410
6	0.6	45.153	0.6	45.886	210mm	44.338
7	0.7	44.600	0.7	45.666	240mm	44.289
8	0.8	44.096	0.8	45.470	270mm	44.247
9	0.9	43.572	0.9	45.295	300mm	44.216



(그림 5.3) 변수에 따른 냉방부하량

사무소 건물의 최상층 냉방부하에 영향을 미치는 지붕의 성능요소를 태양 반사율, 열 방사율, 단열두께 3가지로 선정된 후 각의 요소들의 변수를 <표 5.7>과 같이 9단 척도로 나누어 최상층의 최대 냉방부하량에 가장 큰 영향을 미치는 민감도를 분석한 결과, 태양반사율 > 열 방사율 > 단열두께의 순으로 나타났다.

최상층 냉방부하에 영향을 미치는 지붕 성능요소간의 민감도 분석 결과를 토대로, 표준 사무소 건물에서 지붕의 태양 반사율, 열 방사율 그리고 단열 두께를 변화시켰을 때, 최대 냉방부하량은 다음의 수식을 통해 계산이 가능하다.

태양 반사율에 따른 냉방부하량은 다음 [식 5.6]을 통해 얻을 수 있고,

$$y = 0.019x^2 - 0.476x + 48.02 \quad [\text{식 5.6}]$$

지붕 재료의 열 방사율에 따른 최상층의 냉방부하량은 [식 5.7], 지붕 단열 두께에 따른 냉방부하량은 [식 5.8]로 예상이 가능하다.

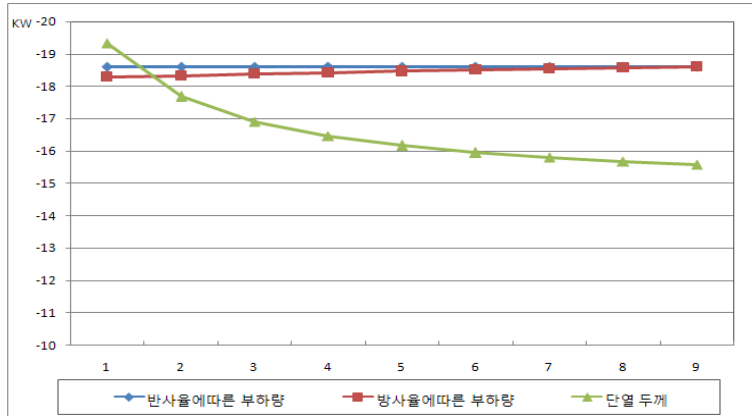
$$y = -0.002x^2 - 0.510x + 48.32 \quad [\text{식 5.7}]$$

$$y = 0.036x^2 - 0.522x + 46.04 \quad [\text{식 5.8}]$$

또한 지붕의 성능요소에 따른, 건물 최상층의 최대 난방부하량을 살펴본 결과 다음과 같다.

<표 5.8> 변수에 따른 최상층 최대 난방부하(kW)

척도	태양 반사율 (열 방사율 0.9, 단열 두께 70mm 고정 시)		열 방사율 (태양반사율 0.5, 단열 두께 70mm 고정 시)		단열 두께(단열 성능) (태양 방사율 0.5, 열방사율 0.9 고정 시)	
	변수	최상층 Peak Load	변수	최상층 Peak Load	변수	최상층 Peak Load
1	0.1	-18.607	0.1	-18.281	600mm	-19.331
2	0.2	-18.607	0.2	-18.33	900mm	-17.678
3	0.3	-18.607	0.3	-18.376	120mm	-16.912
4	0.4	-18.607	0.4	-18.42	150mm	-16.458
5	0.5	-18.607	0.5	-18.463	180mm	-16.162
6	0.6	-18.607	0.6	-18.503	210mm	-15.946
7	0.7	-18.607	0.7	-18.542	240mm	-15.799
8	0.8	-18.607	0.8	-18.579	270mm	-15.676
9	0.9	-18.607	0.9	-18.614	300mm	-15.582



(그림 5.4) 변수에 따른 난방부하량

사무소 건물의 최상층 난방부하에 영향을 미치는 지붕 요소를 3가지로 설정한 후 각 각의 요소 변수들의 설정인자에 따라 사무소건물 최상층의 최대 난방부하량에 관련하여 민감도를 분석했다. 그 결과, 건물의 최상층 난방부하에 영향을 미치는 지붕요소와 관련한 민감도분석의 결과와는 반대로 단열두께 > 열 방사율 > 태양 반사율의 순으로 나타났다.

건물에 있어 난방부하의 경우, 냉방부하와는 달리 지붕의 태양 반사율에 영향을 전혀 받지 않는 것으로 나타났고, 열 방사율도 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이러한 사무소 건물의 최상층 난방부하에 가장 많은 영향을 미치는 지붕요소는 (그림 5.4)와 같이 단열 두께(열관류율)인 것으로 나타났다.

최상층 난방부하에 영향을 미치는 지붕요소간의 민감도 분석 결과를 토대로, 표준 모델에서 지붕의 태양반사율, 열 방사율 그리고 단열 두께를 변화시켰을 때, 최대 난방부하량은 태양 반사율을 제외한 열 방사율과 단열 두께 값은 각 각의 [식 5.9]와 [식 5.10]으로 예측이 가능하다.

$$y = 0.051x - 18.23 \quad [\text{식 5.9}]$$

$$y = -0.081x^2 + 1.21x - 20.08 \quad [\text{식 5.10}]$$

5.3 Cool Roof 적용에 따른 경제성 분석

에너지 절약 기술이 건물에 적용되기 위해서는 경제성을 확보하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 Cool Roof의 에너지 절약효과가 건물 라이프 사이클을 통하여 경제적으로 타당성은 갖고 있는지를 분석함으로서 Cool Roof의 적용 가능성을 분석하였다. 경제성 평가를 위하여 일반 지붕 마감재를 적용한 건물과 Cool Roof를 적용한 건물간의 경제성을 비교하였고, 분석방법으로 LCC를 이용하였다.

5.3.1 경제성 분석 방법

국내 Cool Roof 적용의 타당성을 분석하기 위해 일반 마감재를 적용한 건물과 Cool Roof 적용한 건물 간에 경제성 분석을 실시하였다. 경제성 분석을 위해 사용되는 총 생애주기 비용(Life cycle cost : LCC)은 건축물의 기획 단계에서부터 폐기처분 시까지 모든 비용. 즉, 계획·설계비, 운영관리비, 폐기처분 비용을 합한 것으로 시설물의 생애에 필요한 모든 비용을 말한다. 따라서 LCC 분석이란 대안의 비교를 통해 총 생애주기비용(LCC)을 최소화 할 수 있는 의사결정기법을 의미한다.

LCC 분석법에는 각 대안 비교에 있어 시간적 가치에 대해 공통의 시점으로 환산하는 방법에 따라 현가법, 종가법, 연가법으로 구분할 수 있다. 이러한 환산방법은 설비투자가 이루어지는 현재시점의 가치로 환산하는 방법인 현가법(Present Value), 운용기간 중의 1년당의 비용으로 환산하는 방법인 연가법(Annual Value), 사용연수가 끝난 시점의 가치로 환산하는 방법인 종가법(Final Value)으로 나눈다. 일반적으로 현가법과 종가법은 대안 비교에 있어서 대안의 총비용 산정기간이 일정한 경우에 유용한 방법이고, 연가법은 내용연수가 상이한 경우에 적합한 방법이다. LCC 산출에서는 주로 현가법과 연가법이 주로 사용된다.

1) 현가법

현가법은 검토하는 시점 이후에 발생하는 지출을 현시점의 가격으로 환산하여 합계하는 방식으로, 현가 P는 유지비에 매년의 물가상승을 고려하는 것으로,

$$P = I_o + \sum_{p=1}^n a_p \frac{(1+e)^P}{(1+i)^P} + \frac{R}{(1+i)^n} \quad [\text{식 } 5.11]$$

P : 현가(원) a_p : P년도의 유지비(원/년)
 I_o : 취득연수(년) i : 연이율(%)
 n : 내용연수(년) e : 물가상승률(%) R : 폐각비(원)

$$P = I_o + a(PWF) + \frac{R}{(1+i)^n} \quad [\text{식 } 5.12]$$
$$PWF = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad [\text{식 } 5.13]$$
$$PWF' = \frac{(\frac{1+e}{1+i})^n - 1}{1 - (\frac{1+i}{1+e})} \quad [\text{식 } 5.14]$$

– 91 –

$$Y = I_o(CRF) + a(PWF')(CRF) + R \frac{i}{(1+i)^n - 1} \quad [\text{식 5.15}]$$

여기서 CRF 는 자본회수계수로 [식 5.16]과 같다.

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad [\text{식 5.16}]$$

각 년 현가누계금액에 [식 4.16]과 같은 자본회수계수를 곱함으로써 연평균비가 산출된다. 이러한 방법을 연가법이라고 하며, 이로써 각 년에서 현재가치로 환산한 비용일 얼마인지 판단할 수 있다.

5.3.2 분석기준 설정

1) 초기투자비 선정기준

초기투자비는 LCC분석의 적용범위에 따라 전체를 검토하는 경우와 부분을 검토하는 경우로 분류하여 살펴 볼 수 있다. 전체를 검토하는 경우에는 설계비, 건설공사비, 건설기획비, 계약비 등이 포함되지만 부분적인 검토를 할 경우에는 각 시스템을 구성하는 부분에 필요로 하는 건축 공사비, 기계설비 공사비 등이 포함된다. 본 연구에서는 부분적으로 구성된 각 대안에 대하여 검토를 하기 때문에 후자의 경우를 선택하여 산정했다.

2) 유지관리비 산정기준

유지관리비 또한 운용관리비와 보수교체비로 구분이 된다. 보수교체비는 초기비용에 대하여 보수율, 교체주기 등이 고려되며 이러한 것의 규정은 국토해양부 등에서 고시한 기준을 활용했다.

3) 에너지비용 산정기준

건물의 총 생애주기 동안 사용된 연간 에너지비용은 에너지해석 프로그램인 Visual DOE 4.0을 활용하여 계산했다.

4) 폐기 처분비 산정 기준

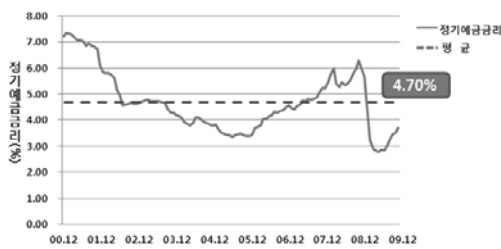
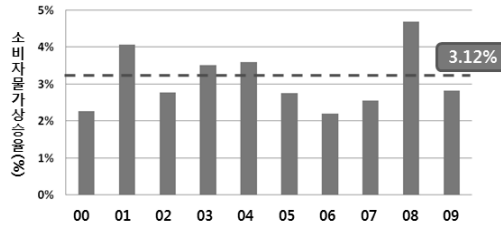
폐기 처분비는 구조물의 해체와 폐기물 처리에 소요되는 폐기비와 잔존 가치가 남아 있는 시스템의 매각으로 발생하는 수입인 처분비로 구성되며, 본 연구에서는 초기 투자비의 5%를 적용하여 계산하였다.

5) 비용의 통합기준

LCC 분석에 필요한 여러 비용을 통합하기 위해서는, 각기 다른 시점에서 발생하는 비용을 동일한 기준으로 비교해야 하므로, 현가법을 사용하여 비용을 통합했다.

비용의 통합을 위한 LCC 분석 조건은 다음과 같다.

<표 5.9> LCC 분석 조건

구 분	내 용
이 자 율	최근 10년간의 국내시중 은행 정기 예금금리 
물가 상승률	최근 10년간의 평균 소비자물가 상승률 
할 인 율	$i = \frac{1+i'}{1+j} - 1$ i : 실질할인율, i' : 시중은행 정기예금 금리, j : 소비자 물가상승율 주) 최근 10년간 물가상승율과 시중은행 정기예금 금리 2009년 12월을 기준으로 적용 - 실질할인율 1.53% 적용
내구 연수	시설물 내구연한 : 일반지붕 5년, Cool Roof 5 년

<표 5.10> LCC 비용 산정 기준

구 분	적 용	내 용
초기투자비	재료, 노무, 경비	▪ 전체 검토 : 설계비, 공사비, 간접비, 제세공과금 등 총비용 ▪ 부분 검토 : 재료비, 노무비, 경비만 포함
유지관리비	운영관리비, 교체비	▪ 운영관리비 : 수선, 청소비 등을 매 해 비용으로 환산 ▪ 교체비 : 재료의 내용연한 기준
폐기처분비	전체의 5%	▪ 일괄 적용
기 타	세금	▪ 해당하는 세금 및 공제 내용

<표 5.11> 현가법 적용 기준

구 분	적 용	내 용
비용 통합	현가법	▪ 비반복 비용 : n년 차에 1회 발생 비용 $P = F \frac{1}{(1+i)^n}$ ▪ 반복비용 : 매년 균등 발생비용 $P = A \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$ P : 현가환산 F : 미래가 A : 년 간 등가발생비용 i : 실제 할인율 n : 분석기간
		▪ 부위별 총 생애비용 산정 $P = A \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$ i : 초기 건축비, 보수교체비, 운영관리비, 에너지비

5.3.3 Cool Roof 경제성 분석

국내 Cool Roof 적용의 타당성을 분석하기 위해 5.1절의 에너지 효율성 평가에 활용한 모델을 기본으로, 지붕에 일반 마감재를 시공한 경우와 Cool Roof를 시공한 경우를 비교하여 경제성 분석을 실시했다. 경제성 비교 항목은 일반 지붕과 Cool Roof의 적용 시 초기투자비와, 유지관리비, 에너지 사용금액을 기준으로 했다.

1) 초기투자비

일반지붕과 Cool Roof의 초기투자비용은 축소모형 실험에 적용된 시공 비용을 토대로 사무소건물의 지붕면적을 400㎡(20m × 20m)으로 가정하고, 이 때 일반지붕과 Cool Roof 시공 시 요구되는 금액을 산정했다.

① 일반지붕의 초기투자비

사무소 건물에 일반지붕 마감재를 시공하는 경우의 초기 투자비용은 재료비와 인건비, 기타 잡비로 나뉘며, 일반 지붕 마감 시 초기 투자비용은 다음 <표 5.12>와 같다.

<표 5.12> 일반 지붕 마감 시 초기 투자비 (단위 : 원)

항 목				비용 계산	
지붕 설치비	재료비	하도	우레탄 탄성방수(16ℓ)	9 × 70,000	= 630,000
		중도	원샷탄 (16ℓ)	35 × 820,000	= 2,870,000
		상도	우레탄 탄성방수(16ℓ)	8 × 120,000	= 960,000
		회석제	T-1021(17ℓ)	3 × 58,000	= 174,000
		부자재	붓, 롤러, 기타		= 150,000
	인건비			5 인 × 4일 × 100,000	= 2,000,000
	기 타				= 1,216,000
합 계				8,000,000	

② Cool Roof의 초기투자비

사무소 건물에 Cool Roof 마감재를 시공하는 경우의 초기 투자비용의 항목은 일반 지붕 마감재 적용 시 동일하며, Cool Roof 마감 시 초기 투자비용은 다음 <표 5.13>과 같다.

<표 5.13> Cool Roof 마감 시 초기 투자비

(단위 : 원)

항 목				비용 계산	
지붕 설치비	재료비	하도	스피클 N 프라이머(16ℓ)	9 × 139,000	= 1,251,000
		중도	원샷탄 (16ℓ)	35 × 820,000	= 2,870,000
		상도	스피클탄 백색(16ℓ)	8 × 172,000	= 1,376,000
		회석제	T-1021(17ℓ)	3 × 58,000	= 174,000
		부자재	붓, 롤러, 기타		= 150,000
	인건비		5 인 × 4일 × 100,000	= 2,000,000	
	기 타			= 1,216,000	
합 계				9,037,000	

2) 유지관리비

대상 건물의 전 생애주기를 65년⁷⁶⁾으로 하여 운영기간동안 들어가는 유지관리비용을 확인했다.

① 일반지붕 적용 시

일반 지붕의 유지비 중 수선비 항목에서 내구연한은 5년, 수선율은 20%로 적용하고, 교체 시기는 15년⁷⁷⁾으로 적용하여 계산했다. 또한 3개월⁷⁸⁾마다 이루어지는 점검비용과 청소비 등은 Cool Roof와 동일하게 들어가는 금액이므로 제외했다.

대상 건물에 일반 마감재 적용 시 유지 관리비는 <표 5.14>와 같다.

76) 한국구조물진단학회, 콘크리트 구조물의 효율적인 유지관리를 통한 내구수명 확보방안 연구, 건설교통부, 2006.7

77) 주정유, 축사건축기술서, 농협중앙회 축산건설팀부, 2007

78) 집합건축물 유지관리 통합 매뉴얼, 건설교통부, 2007

<표 5.14> 일반 지붕 마감 시 유지 관리비 (단위 : 원)

항 목	비 용 계 산
수선비(수선율 20%)	$8,000,000 \times 8 \times 0.2 = 12,800,000$
교체비	$8,000,000 \times 5 = 40,000,000$
합 계	52,800,000

② Cool Roof 적용 시

사무소 건물에 지붕 마감재로 Cool Roof 적용에 따른 지붕의 유지비 중 수선비 항목의 내구연한은 5년, 교체 시기는 15년으로 적용하여 계산했고, 이때의 수선율은 20%를 적용했다. 기존의 국외 연구결과, Cool Roof 마감재의 내구연한이 일반마감재에 비해 더 긴 것으로 나타났으나, 정확한 산출근거가 없어, 마감재의 재료에 따른 내구연한을 적용했다.

대상 건물에 Cool Roof 적용 시 유지 관리비는 <표 5.11>과 같다.

<표 5.15> Cool Roof 마감 시 유지 관리비 (단위 : 원)

항 목	비 용 계 산
수선비(수선율 20%)	$9,037,000 \times 8 \times 0.2 = 14,459,200$
교체비	$9,037,000 \times 5 = 45,185,000$
합 계	59,644,200

3) 에너지비용

LCC 분석을 위해 분석한 에너지 사용비용은 일반지붕과 Cool Roof 마감재 적용에 따른 전기요금을 비교·분석했다. 일반적으로 냉방 시 에너지원은 전기를 사용하고, 난방 시 에너지원을 천연가스를 사용하는데, 일반지붕과 Cool Roof 적용에 따른 난방비의 차액이 발생하지 않아, 본 연구에서는 에너지 비용을 산정할 때, 전기요금만을 비교하였다. 냉방 시 에너지원으로 이용되는 전기 요금은 전력 사용량에 따라 기본요금과 사용요금이 달라지므로, 한국 전력 공사 기준을 토대로 계산을 실시했다.

에너지비용 분석 시 사용된 기본 자료는 다음과 같다.⁷⁹⁾

<표 5.16> 일반 전력(을) 사용전력

(2009.06 기준)

구분		기본요금 (원/kW)	전력량 요금(원/kWh)			
			시간대	여름철 (7~8월)	봄, 가을철 (3~6,9~10월)	겨울철 (11~2월)
고압A	선택 I	5,790	경 부 하	46.30	46.30	46.30
			중 간 부 하	92.30	68.80	85.10
			최 대 부 하	158.90	92.30	114.70
	선택 II	6,660	경 부 하	41.90	41.90	41.90
			중 간 부 하	87.90	64.40	80.70
			최 대 부 하	154.50	87.90	110.30
고압B	선택 I	5,790	경 부 하	44.90	44.90	44.90
			중 간 부 하	89.60	66.80	82.50
			최 대 부 하	153.40	89.60	111.00
	선택 II	6,660	경 부 하	40.50	40.50	40.50
			중 간 부 하	85.20	62.40	78.10
			최 대 부 하	149.00	85.20	106.60

(1,000kW이상 건물에 적용)

저압 : 표준전압110V~380V, 고압A : 3,300~66,000V, 고압B : 154,000V이상

<표 5.17> 일반용 전력(을) 계절별 시간대별 구분

(2009.06 기준)

구분	여름, 봄 · 가을철	겨울철
	(7월~8월), (3월~6월, 9월~10월)	11월~익년 2월
경부하 시간대	23:00~09:00	23:00~09:00
중간부하 시간대	09:00~11:00 12:00~13:00 17:00~23:00	09:00~18:00
최대부하 시간대	11:00~12:00 13:00~17:00	18:00~23:00

79) <http://cyber.kepco.co.kr>

① 일반지붕

지붕 마감재로 일반지붕을 적용 했을 때, 건물의 최상층 냉방부하를 기준으로 산출했고, 에너지 사용 금액은 냉방 에너지원인 전기를 기준으로 기본요금, 사용요금으로 나누어 계산했다.

Cool Roof 적용에 따른 에너지 사용 요금은 <표 5.18>과 같다.

<표 5.18> 일반 마감 시 에너지 비

(단위 : 원)

구 분	냉 방	난 방
전기 기본요금	5월 : 5,790(원) × 2.2 (kW) = 12,486	-
	6월 : 5,790(원) × 2.7 (kW) = 15,711	
	7월 : 5,790(원) × 3.2 (kW) = 18,460	
	8월 : 5,790(원) × 2.7 (kW) = 15,557	
	9월 : 5,790(원) × 1.9 (kW) = 10,955	
	10월 : 5,790(원) × 0.3 (kW) = 기본요금 적용	
	계 : 337,485 원/년	
전기 사용요금	5월 : 92.3 (원/kWh) × 10.5 (MWh) = 969,150	-
	6월 : 92.3 (원/kWh) × 11.2 (MWh) = 1,033,760	
	7월 : 158.9(원/kWh) × 11.4 (MWh) = 1,811,460	
	8월 : 158.9(원/kWh) × 11.3 (MWh) = 1,795,570	
	9월 : 92.3 (원/kWh) × 9.4 (MWh) = 867,620	
	10월 : 92.3 (원/kWh) × 8.7 (MWh) = 803,010	
	계 : 7,280,010 원/년	
합 계	7,618,055 원	

② Cool Roof

지붕 마감재로 Cool Roof를 적용 했을 때, 건물의 최상층 냉방부하를 기준으로 산출했고, 에너지 사용 금액은 냉방 에너지원인 전기를 기준으로 기본요금, 사용요금으로 나누어 계산했다.

Cool Roof 적용에 따른 에너지 사용 요금은 <표 5.19>와 같다.

<표 5.19> Cool Roof 마감 시 에너지 비

(단위 : 원)

구 분	냉 방	난 방
전기 기본요금	5월 : 5,790(원) × 0.1 (kW) = 기본요금 적용 6월 : 5,790(원) × 0.2 (kW) = 기본요금 적용 7월 : 5,790(원) × 1.0 (kW) = 기본요금 적용 8월 : 5,790(원) × 0.6 (kW) = 기본요금 적용 9월 : 5,790(원) × 0.4 (kW) = 기본요금 적용 10월 : 5,790(원) × 0.0 (kW) = 기본요금 적용 계 : 5,790 × 6 = 34,740 원/년	-
전기 사용요금	5월 : 92.3 (원/kWh) × 9.6 (MWh) = 886,080 6월 : 92.3 (원/kWh) × 10.2 (MWh) = 941,460 7월 : 158.9(원/kWh) × 10.5 (MWh) = 1,668,450 8월 : 158.9(원/kWh) × 10.4 (MWh) = 1,652,560 9월 : 92.3 (원/kWh) × 8.6 (MWh) = 793,780 10월 : 92.3 (원/kWh) × 7.9 (MWh) = 729,170 계 : 6,671,500 원/년	-
합 계	6,706,240 원	

4) LCC 평가

국내 건물 지붕 마감으로 Cool Roof의 적용 타당성을 분석하기 위해 일반 사무소 건물을 대상으로 일반지붕과 Cool Roof를 지붕 마감재로 적용 시 경제성 분석을 현가법에 따라 실시했다. 경제성 분석 시 비교·분석 항목은 지붕 마감재의 초기 투자비와 반복비용인 유지 관리비, 에너지비용으로, 그 결과는 다음과 같다.

① 초기 투자비

<표 5.12>와 <표 5.13>과 같이 지붕 마감에 따른 각각의 초기 투자비용은 일반 지붕 마감의 경우 8,000,000원, Cool Roof 마감의 경우 9,037,000원으로 Cool Roof 적용 시 약 13% 초기투자비가 증가한다.

② 비반복 비용

비반복 비용은 유지 관리비로 지붕 마감재의 수선비와 교체비로 나뉜다. 먼저 일반지붕의 내구연한은 5년, 수선율은 20%, 교체시기를 15년으로 하여 계산한 결과, 일반지붕의 수선비는 12,724,528원, 교체비는 18,699,894 원으로 나타났으며, Cool Roof의 수선비는 14,373,944원, 교체비는 21,123,868원으로

나타났다. 그에 따라 일반지붕의 유지관리비는 31,424,422원 Cool Roof의 유지관리비는 35,497,813 원으로 약 12% Cool Roof 적용 시 약 12% 증가한다.

③ 반복 비용

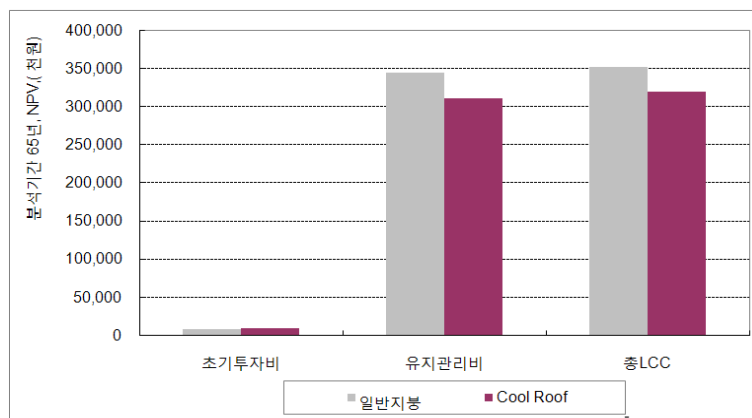
반복 비용은 에너지 사용금액으로 일반 지붕 마감 시 에너지 사용금액인 7,618,055원을 현가법을 이용하여 65년간 요구되는 에너지 사용금액을 계산한 결과 320,337,902원으로 나타났다. Cool Roof의 경우 6,706,240원을 현가법을 이용하여 65년간 요구되는 에너지 사용금액을 계산한 결과 283,990,769원으로 나타나, Cool Roof 적용 시 약 11% 에너지 사용요금을 절감할 수 있다.

④ 총 LCC 금액

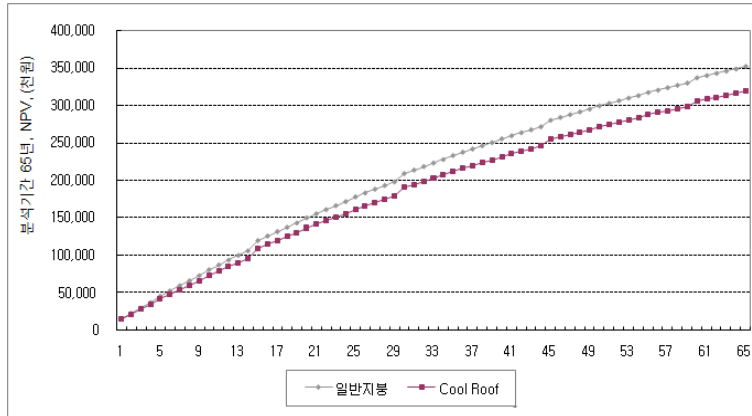
일반지붕과 Cool Roof 마감 적용 시 각각의 총 LCC 금액은 초기투자비와 유지관리비, 에너지비를 모두 합한 금액으로 다음과 같다.

<표 5.20> 일반 지붕마감과 Cool Roof 마감의 LCC 집계 (단위 : 원)

항목	일반 지붕 마감	Cool Roof 마감	절감율
초기투자비	8,000,000	9,037,000	13% 상승
비반복비용(유지관리비)	31,424,422	35,497,813	12% 상승
반복비용 (에너지비)	320,337,902	283,990,769	11% 절감
LCC 현가환산 금액	351,762,324	319,488,582	9% 절감



(그림 5.5) 일반지붕과 Cool Roof적용에 따른 LCC 분석



(그림 5.6) 누적 LCC

사무소 건물(지붕면적 400m²)의 지붕 마감재에 따른 LCC 분석을 실시한 결과, 초기 투자비는 현재 많이 적용되고 있는 일반 우레탄 지붕에 비해 Cool Roof 마감재 적용 시 약 13% 증가하는 것으로 나타났다.

그러나 반복비용인 유지관리비와 에너지 사용요금은 일반 지붕 마감재에 비해 Cool Roof 적용 시 년 간 10%를 저감할 수 있다. LCC 현가 환산 금액은 일반 지붕 마감의 경우, 351,762,324원, Cool Roof 마감의 경우, 319,488,582원으로 약 9% 비용절감이 가능하므로 Cool Roof의 국내 적용은 타당할 것으로 판단된다.

5.4 소결

1) 건물의 에너지 효율에 영향을 미치는 지붕 요소 민감도 분석

건물의 최상층 냉방부하에 영향을 미치는 지붕의 성능요소를 태양 반사율, 열 방사율, 단열두께 3가지로 선정한 후 각의 요소들의 간에 민감도 분석을 실시한 결과, 최상층의 최대 냉방부하량에 가장 큰 영향을 미치는 지붕의 열 성능 요소는 태양 반사율 > 열 방사율 > 단열두께의 순으로 나타났다. 또한 최상층의 최대 난방부하량에 가장 큰 영향을 미치는 지붕의 열 성능요소는 단열두께 > 열 방사율 > 태양 반사율의 순으로 나타나 나타났다. 따라서 건물 최상층의 냉난방 부하를 모두 고려하여 지붕의 열성능을 만족시키기 위해서는 태양 반사율, 열 방사율, 단열 두께를 동시에 고려해야 한다.

2) Cool Roof의 경제성 분석

국내 Cool Roof 적용의 타당성을 분석하기 위해 LCC 분석 방법 중 현가법을 이용하여 일반 지붕 마감재를 적용한 건물과 Cool Roof를 적용한 건물 간에 경제성 분석을 실시하였다.

일반 지붕 마감과 Cool Roof 마감의 각각의 초기 투자비용의 경우 일반 지붕 마감이 8,000,000원, Cool Roof 마감이 9,037,000원으로 Cool Roof 적용 시 약 13% 초기투자비가 증가한다. 유지 관리비인 지붕 마감재의 수선비와 교체비를 계산한 결과, 일반지붕의 수선비는 12,724,528원, 교체비는 18,699,894원으로 나타났으며, Cool Roof의 수선비는 14,373,944원, 교체비는 21,123,868원으로 나타났다. 그에 따라 Cool Roof 적용 시 일반 지붕에 비해 유지관리비가 약 12% 증가하는 것으로 나타났다. 에너지 사용금액은 일반 지붕 마감 시 65년간 요구되는 에너지 사용금액을 계산한 결과 320,337,902원, Cool Roof 마감 시 65년간 요구되는 에너지 사용금액을 계산한 결과 283,990,769원으로 나타나, Cool Roof 적용 시 약 11% 에너지 사용요금을 절감할 수 있다.

LCC 현가 환산 금액은 일반 지붕 마감은 351,762,324원, Cool Roof 마감은 319,488,582원으로 약 9% 비용절감이 가능하고, Cool Roof 적용 시 설치 후 2년 이내에 손익 분기점을 넘는 것으로 나타나 Cool Roof의 국내 적용은 타당한 것으로 판단된다.

제 6 장 Cool Roof의 국내 적용을 위한 성능기준 및 설계지침

6.1 국내 Cool Roof 적용을 위한 요구 성능

지붕의 태양 반사율과 열 방사율, 단열두께에 따른 부하 저감량을 확인한 결과를 토대로, 본 장에서는 Cool Roof의 국내적용 가능성을 검토하고, 적용 시 요구되는 성능 기준을 마련하고자 한다. 먼저, 국외의 Cool Roof와 관련된 요구 성능의 항목을 파악하고, 국내의 적용 가능성을 검토하기 위해 우리나라를 중부, 남부, 제주로 구분하여, Cool Roof의 요구 성능 기준을 마련한다. 또한 건축주나 설계자가 계획단계에서 쉽게 건물의 지붕을 설계할 수 있는 설계 지침을 개발하여 활용할 수 있도록 했다.

6.1.1 지붕 관련 국내의 법규/기준

현재 국내의 지붕과 관련한 법규 및 성능 기준으로는 지붕의 단열 성능 기준과 지붕 방수재료와 관련한 인장강도, 신장률, 내화학성 등 재료의 내구성만을 요구하고 있으며, 그 외 재료의 열적 성능에 관한 요구 성능은 없는 것으로 나타났다. ⁸⁰⁾⁸¹⁾ 그러나 국외에서는 지붕에 관련한 성능기준에 Cool Roof의 항목을 따로 분류하여, 적용 지역의 기후대별 요구되는 Cool Roof의 요구 성능과 관련 법규 및 설치 기준이 마련돼 있다.

이러한 내용은 본 논문의 2.2절에서 문헌을 통해 확인하였고, 그에 따라 국내 Cool Roof 도입 시 관련 법규 및 기준을 구축하고자 한다.

국내 Cool Roof 도입 시 고려해야 할 기술항목 및 관련근거는 <표 6.1>과 같다.

80) 박진상, 지붕 방수형 톱코트재의 평가방법 및 품질기준 제안에 관한 연구, 서울산업대 주택대학원, 석사학위논문, 2008.02

81) 이상수, 김수련, 박규성, 오상근, 옥상용 합성고분자 시트를 이용한 지붕노출 시스템 적용에 관한 연구, 한국건축시공학회 학술.기술논문발표회 논문집 : v.5 n.1(통권 제8집), 2005.05, pp179~183

<표 6.1> Cool Roof 관련 법규/기준 구축을 위한 기술항목 분류

기술 항목		국내	국외								
분류	세부항목	법규	1)	2)	3)	4)	5)	6)	7)	8)	9)
설계 기준	반사율	×	○	○	○	○	×	×	○	○	○
	반사지수	×	×	×	×	×	○	○	○	×	×
	방사율	×	○	○	○	×	×	×	×	×	○
운영 및 유지	반사율	×	○	×	×	×	×	×	×	○	×
	방사율	×	○	×	×	○	×	×	×	×	×

1) ASHRAE 2) CRRC Title 24 3) Florida Energy Code 2004 4) Energy Star
5) Green Globes 6) USGBC LEED 7) Austin's 2006 Energy Code 8) Dallas Cool Roof Code
9) City of Houston Commercial Energy Conservation Code

건물 지붕을 통한 에너지 절약을 위해 Cool Roof 도입 시 요구되는 성능 기준은 태양 반사율과 열 방사율로 설정하고, 국내 도입 시 설치 지역에 따른 요구 성능을 확인했다.

6.1.2 국내 Cool Roof 도입 시 요구 성능 및 사항

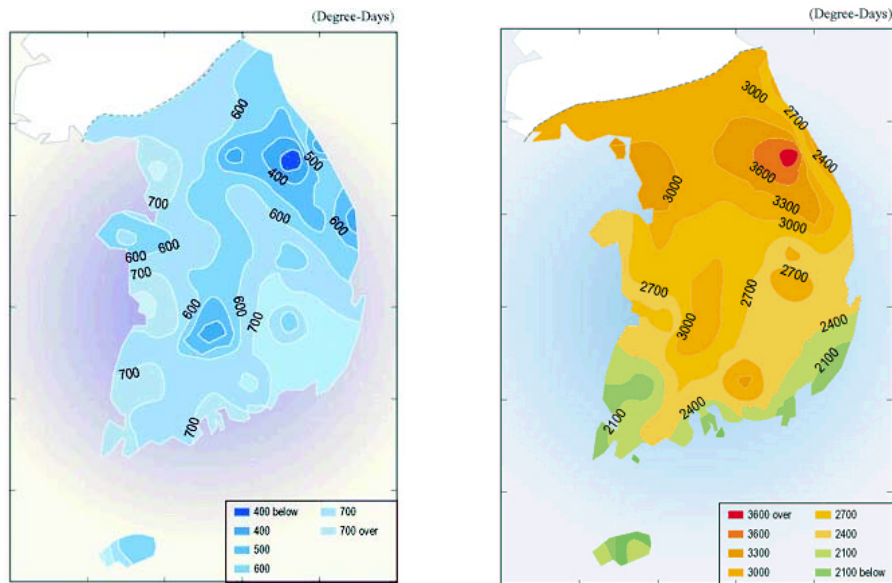
1) Cool Roof 도입 시 지역별 요구 성능

우리나라는 4계절이 뚜렷하여 하절기 지붕을 통한 에너지를 저감하기 위해 지붕의 태양 반사율과 열 방사율을 너무 높게 설정하면, 겨울철 많은 량의 일사열을 반사시켜 오히려 난방부하를 증가시킬 수 있어, Cool Roof를 통해 증가할 수 있는 겨울철 난방부하는 건물의 단열성능 향상을 통해 해결할 수 있다. 따라서 국내 Cool Roof를 도입하기 위해서는 지붕의 태양 반사율과 열 방사율뿐만 아니라 그에 따른 단열성능 기준도 마련해야 한다.

또한 우리나라의 경우, (그림 6.1)과 같이 냉·난방도일⁸²⁾에 따라 중부, 남부, 제주지역으로 분류가 되며, 그에 따라 계절적 영향이 달라지므로, 국내 Cool Roof 도입 시 요구되는 열적 성능을 지역에 따라 달리해야 한다.

따라서 국내 Cool Roof 도입 시 요구 성능을 지역에 따라 중부와 남부, 제주로 구분하여 에너지 해석 시뮬레이션을 통해 적정 성능을 파악했다.

82) http://www.keei.re.kr/main.nsf/index.html?open&p=%2Fweb_keei%2Ffaq09.nsf%2F0%2Fdd249c6ec0a5683149256c85001f1fb3&s=%3FOpenDocument



a) 우리나라 냉방도일

b) 우리나라 난방도일

(그림 6.1) 우리나라 냉·난방도일

① 중부

우리나라 중부지역에 Cool Roof 도입 시 지붕 마감재의 적정 태양 반사율 및 열방사율을 설정하기위해, 중부지역의 대표도시는 인구가 가장 밀집되어있는 서울로 설정했다. 그에 따라 태양 반사율, 열 방사율, 단열 두께를 변수로 설정하고 각 변수의 설정인자에 따라 에너지 해석 시뮬레이션을 실시했다. 시뮬레이션의 기본 모델은 본 연구 4.3절의 에너지 효율성 평가 시 적용한 사무소 건물을 활용했고, 이때 지붕의 열성능 변수로 선정한 단열두께의 설정인자는 다음 <표 6.2>와 같다.

<표 6.2> 중부지역 단열재 두께에 따른 지붕의 열관류율

단열두께 (mm)	60	70	90	120	150	180	210	240	270	300
열관류율 (W/m ² K)	0.346	0.290	0.219	0.161	0.127	0.105	0.089	0.078	0.069	0.062

단열재 기준 : 우레탄 패널 열전도율 0.018 (중부지역 범규 기준 70mm)

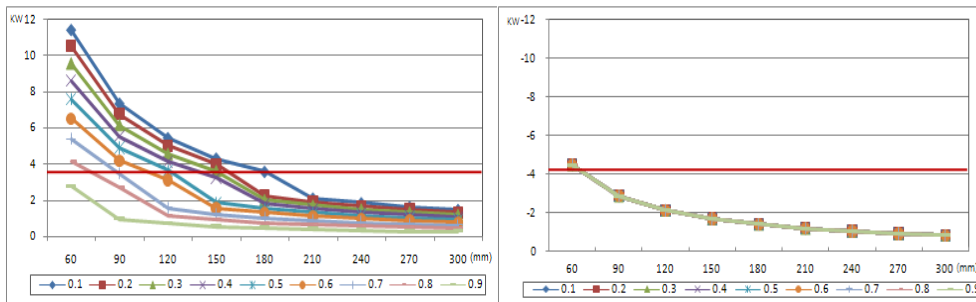
건축물의 설비기준 등에 관한 규칙 [별표4]

중부지역의 건물에 Cool Roof 적용을 위해 열성능 변수에 따른 지붕을 통한 관류열손실 및 열획득량을 파악하기 위해 건축물의 에너지 절약 기준 제 4조 1항을 토대로, 구조체의 단열성능을 설정한 후, 지붕을 통한 부하량을 확인했다.

먼저, 에너지 해석 기준 모델에 축소모형 실험에서 적용한 일반 지붕 마감재의 태양 반사율과 열 방사율 값을 입력하여 지붕을 통한 하절기 관류열획득량은 3.52kW, 겨울철 열손실량은 4.09kW로 나타났다. 따라서, 우리나라 중부지역에서 지붕면을 통해 발생하는 에너지 소비량을 저감하기 위해 Cool Roof 적용 시 요구되는 기준 열성능을 분석했다.

a. 열 방사율 0.1

지붕 마감재의 열 방사율이 0.1 일 때, 태양 반사율과 단열두께에 따른 건물의 지붕을 통한 관류열손실 및 열획득량을 분석하기 위해 에너지 해석 시뮬레이션을 실시했다. 건물의 에너지 저감을 위해 마감재의 열 방사율이 0.1 일 때, 적정 태양 반사율과 단열두께를 분석했고, 그 결과값은 다음 (그림 6.2)와 같다.



a) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득 b) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열손실
(그림 6.2) 방사율 0.1일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실

시뮬레이션 결과, 지붕의 단열 성능이 증가할수록 지붕을 통한 에너지 소비량이 저감하며, 단열두께가 180mm 이상일 경우에는 지붕을 통한 에너지저감효과가 크게 증가하지 않는 것으로 나타나 적정 단열 두께는 180mm인 것으로 판단된다.

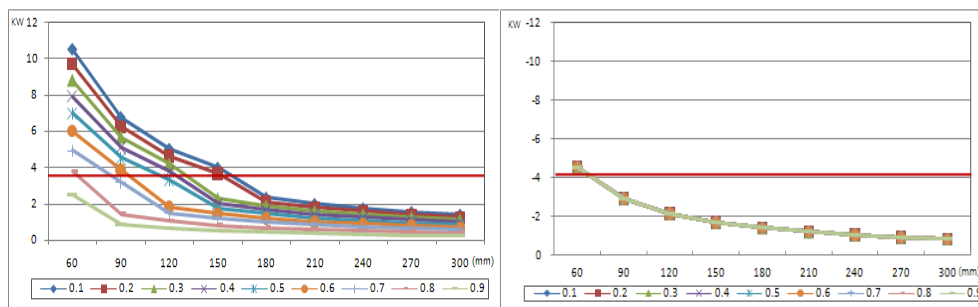
태양 반사율의 경우, (그림 6.2_a)와 같이 0.9인 경우 지붕의 열획득량이 11.4kW, 0.1인 경우에는 2.7kW로 4배 이상 차이가 발생해, 지붕을 통한 열획득량을

결정하는데 많은 영향을 미치는 것으로 태양 반사율인 것으로 판단된다. 태양 반사율은 값이 증가할수록 지붕의 열획득량을 저감하는 효과를 가져와, 건물 지붕의 마감재로 태양 반사율이 높은 재료를 적용하면 건물 최상층의 냉방부하 저감 및 지붕의 단열 두께를 저감하는 효과도 가져올 수 있다. 그러나 이러한 지붕의 태양 반사능은 (그림 6.2_b)와 같이 겨울철 지붕의 열손실량에는 영향을 미치지 않는다.

(그림 6.2)의 가로선은 기준 모델의 관류열획득 및 손실량으로, 기준선 이하의 태양반사율과 단열두께를 건물에 선정하면, 열 방사율 0.1일 때, 일반 지붕에 비해 에너지 저감을 할 수 있다.

b. 방사율 0.2

건물의 에너지 저감을 위해 마감재의 열 방사율이 0.2 일 때, 적정 태양 반사율과 단열두께를 분석했고, 그 결과값은 다음 (그림 6.3)과 같다.



a) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득 b) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열손실
(그림 6.3) 방사율 0.2일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실

시뮬레이션 결과, 지붕의 단열 성능이 증가할수록 지붕을 통한 에너지 소비량이 저감하며, 단열두께가 180mm 이상일 경우에는 지붕을 통한 에너지저감효과가 크게 증가하지 않는 것으로 나타났다. 따라서 지붕 마감재로 열 방사율이 0.2인 재료를 계획할 때, 지붕의 적정 단열 두께는 180mm인 것으로 판단된다.

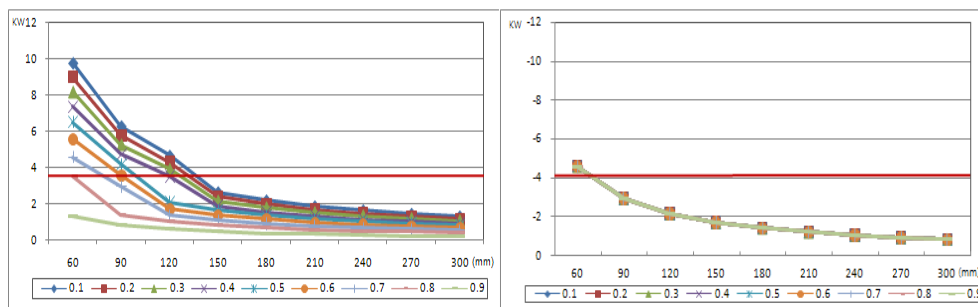
태양 반사율의 경우, (그림 6.3_a)와 같이 0.9인 경우 지붕의 열획득량이 10.5kW, 0.1인 경우 2.5kW로 4배 이상 차이가 발생했다. 따라서 지붕의 마감재로

태양 반사율이 높은 재료를 적용하면 건물 최상층의 냉방부하저감 및 지붕의 단열 두께를 저감하는 효과도 가져올 수 있다. 그러나 이러한 지붕의 태양 반사성능은 (그림 6.3_b)와 같이 겨울철 지붕의 열손실량에는 영향을 미치지 않는다.

(그림 6.3)에서 기준선 이하의 태양반사율과 단열두께를 건물 지붕 마감재의 열성능으로 적용하면, 마감재의 열 방사율 0.2일 때, 일반 지붕에 비해 에너지 저감을 할 수 있다.

c. 방사율 0.3

건물의 에너지 저감을 위해 마감재의 열 방사율이 0.3 일 때, 적정 태양 반사율과 단열두께를 분석했고, 그 결과값은 다음 (그림 6.4)와 같다.



a) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득 b) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열손실
(그림 6.4) 방사율 0.3일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실

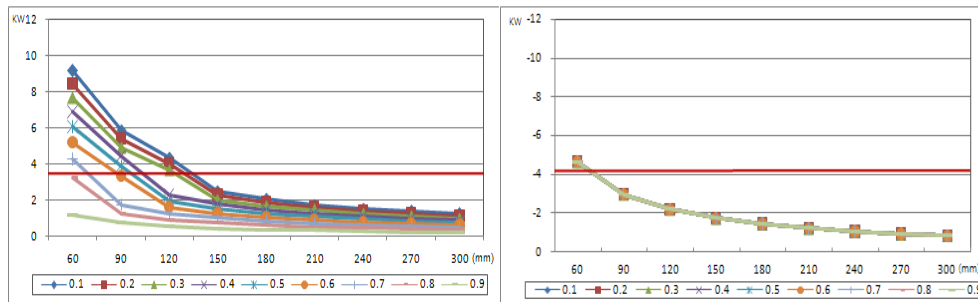
시뮬레이션 결과, 지붕의 열 방사율이 0.3일 때, 단열두께가 150mm 이상일 경우 지붕을 통한 에너지저감효과가 크게 증가하지 않는 것으로 나타나 적정 단열 두께는 150mm인 것으로 판단된다.

태양 반사율이 0.9일 때, 지붕을 통한 열획득량은 9.8kW, 0.1인 경우 1.3kW로 차이가 크게 발생해 태양 반사율이 높은 재료를 적용하면 건물 최상층의 냉방 부하저감 및 지붕의 단열 두께를 저감하는 효과도 가져올 수 있다.

(그림 6.4)에서 기준선 이하의 태양반사율과 단열두께를 건물에 선정하면, 열 방사율 0.5일 때, 일반 지붕에 비해 에너지 저감을 할 수 있다.

d. 방사율 0.4

건물의 에너지 저감을 위해 마감재의 열 방사율이 0.4 일 때, 적정 태양 반사율과 단열두께를 분석했고, 그 결과값은 다음 (그림 6.5)와 같다.



a) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득 b) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열손실
(그림 6.5) 방사율 0.4일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실

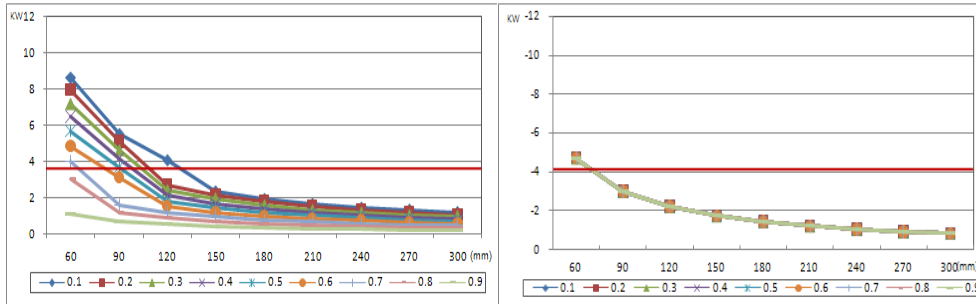
지붕의 열 방사율이 0.4일 때, 단열두께가 150mm 이상일 경우에는 지붕을 통한 에너지저감효과가 크게 증가하지 않는 것으로 나타나 적정 단열 두께는 150mm인 것으로 판단된다.

태양 반사율이 0.9일 때, 지붕을 통한 열획득량은 9.2kW, 0.1인 경우 1.2kW로 차이가 크게 발생해 태양 반사율이 높은 재료를 적용하면 건물 최상층의 냉방부하저감 및 지붕의 단열 두께를 저감하는 효과도 가져올 수 있다. 이러한 지붕 마감재의 태양 반사율은 그 값이 커질수록 하절기의 냉방에너지 저감량은 증가하지만, 겨울철 난방에너지 사용량에는 영향을 미치지 않는다.

(그림 6.5)에서 기준선 이하의 태양반사율과 단열두께를 건물에 선정하면, 열 방사율 0.5일 때, 일반 지붕에 비해 에너지 저감을 할 수 있다.

e. 방사율 0.5

건물의 에너지 저감을 위해 마감재의 열 방사율이 0.5 일 때, 적정 태양 반사율과 단열두께를 분석했고, 그 결과값은 다음 (그림 6.6)과 같다.



a) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득 b) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열손실
(그림 6.6) 방사율 0.5일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실

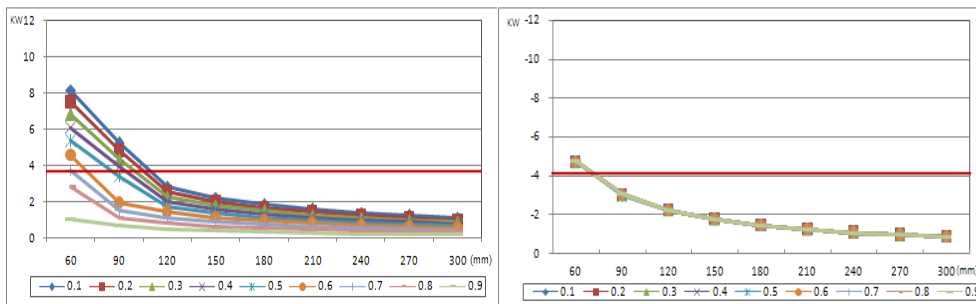
지붕의 열 방사율이 0.5일 때, 단열두께가 150mm이상일 경우에는 지붕을 통한 에너지저감효과가 크게 증가하지 않는 것으로 나타나 적정 단열 두께는 150mm인 것으로 판단된다.

태양 반사율이 0.9일 때, 지붕을 통한 열획득량은 8.6kW, 0.1인 경우 1.1kW로 차이가 크게 발생해 태양 반사율이 높은 재료를 적용하면 건물 최상층의 냉방 부하저감 및 지붕의 단열 두께를 저감하는 효과도 가져올 수 있다.

(그림 6.6)에서 기준선 이하의 태양반사율과 단열두께를 건물에 선정하면, 열 방사율 0.5일 때, 일반 지붕에 비해 에너지 저감을 할 수 있다.

f. 방사율 0.6

건물의 에너지 저감을 위해 마감재의 열 방사율이 0.6 일 때, 적정 태양 반사율과 단열두께를 분석했고, 그 결과값은 다음 (그림 6.7)과 같다.



a) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득 b) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열손실
(그림 6.7) 방사율 0.6일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실

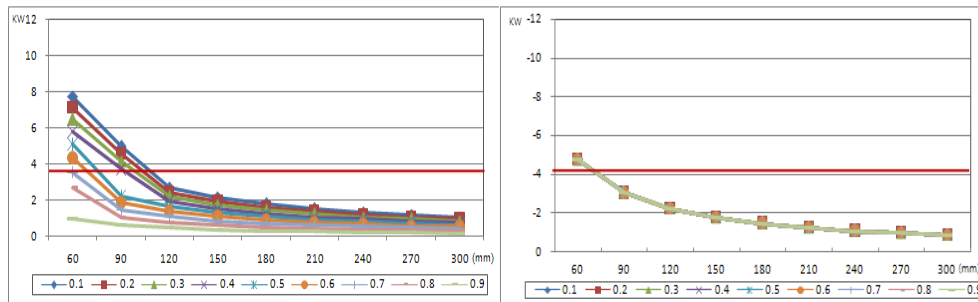
열 방사율이 0.6일 때, 단열두께가 120mm이상인 경우, 열획득량이 태양 반사율에 따른 영향을 받지 않고, 단열두께가 150mm이상인 경우에는 열손실량이 태양 반사율에 따른 영향 받지 않아, 적정 단열 두께는 150mm인 것으로 판단된다.

태양 반사율이 0.9일 때, 지붕을 통한 열획득량은 8.2kW, 0.1인 경우 1.0kW로 차이가 크게 발생해 태양 반사율이 높은 재료를 적용하면 건물 최상층의 냉방 부하저감 및 지붕의 단열 두께를 저감하는 효과도 가져올 수 있다.

(그림 6.7)에서 기준선 이하의 태양반사율과 단열두께를 건물에 선정하면, 열 방사율 0.6일 때, 일반 지붕에 비해 에너지 저감을 할 수 있다.

g. 방사율 0.7

건물의 에너지 저감을 위해 마감재의 열 방사율이 0.7 일 때, 적정 태양 반사율과 단열두께를 분석했고, 그 결과값은 다음 (그림 6.8)과 같다.



a) 방사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득 b) 방사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열손실
(그림 6.8) 방사율 0.7일 때 방사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실

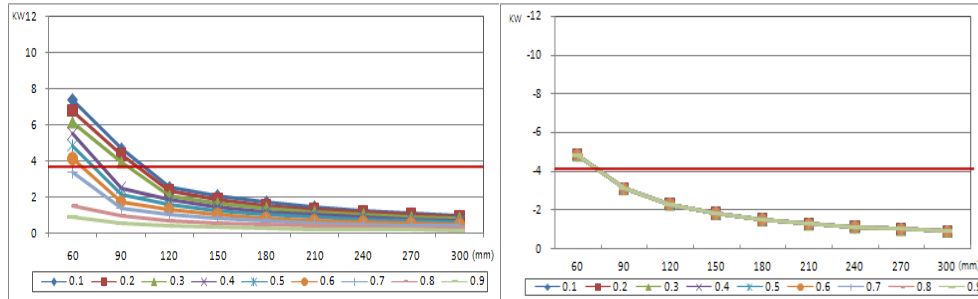
열 방사율이 0.7일 때, 단열두께가 120mm이상인 경우, 열획득량이 태양 반사율에 따른 영향을 받지 않고, 단열두께가 150mm이상인 경우에는 열손실량이 태양 반사율에 따른 영향 받지 않아, 적정 단열 두께는 150mm인 것으로 판단된다.

태양 반사율이 0.9일 때, 지붕을 통한 열획득량은 7.7kW, 0.1인 경우 0.9kW로 크게 발생해 태양 반사율이 높은 재료를 적용하면 건물 최상층의 냉방부하저감 및 지붕의 단열 두께를 저감하는 효과도 가져올 수 있다.

(그림 6.8)에서 기준선 이하의 태양반사율과 단열두께를 건물에 선정하면, 열 방사율 0.7일 때, 일반 지붕에 비해 에너지 저감을 할 수 있다.

h. 방사율 0.8

건물의 에너지 저감을 위해 마감재의 열 방사율이 0.8 일 때, 적정 태양 방사율과 단열두께를 분석했고, 그 결과값은 다음 (그림 6.9)와 같다.



a) 방사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득 b) 방사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열손실
(그림 6.9) 방사율 0.8일 때 방사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실

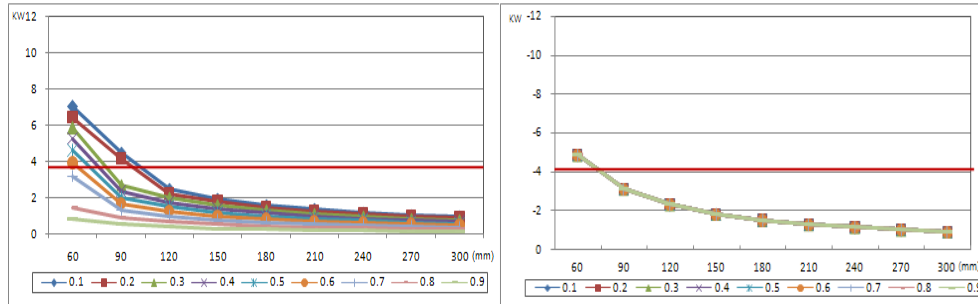
열 방사율이 0.8일 때, 단열두께가 120mm이상인 경우, 열획득량이 태양 방사율에 따른 영향을 받지 않고, 단열두께가 150mm이상인 경우에는 열손실량이 태양 방사율에 따른 영향 받지 않아, 적정 단열 두께는 150mm인 것으로 판단된다.

태양 방사율이 0.9일 때, 지붕을 통한 열획득량은 7.3kW, 0.1인 경우 0.8kW로 크게 발생해 태양 방사율이 높은 재료를 적용하면 건물 최상층의 냉방부하저감 및 지붕의 단열 두께를 저감하는 효과도 가져올 수 있다.

(그림 6.9)에서 기준선 이하의 태양반사율과 단열두께를 건물에 선정하면, 열 방사율 0.8일 때, 일반 지붕에 비해 에너지 저감을 할 수 있다.

i. 방사율 0.9

건물의 에너지 저감을 위해 마감재의 열 방사율이 0.9 일 때, 적정 태양 방사율과 단열두께를 분석했고, 그 결과값은 다음 (그림 6.10)과 같다.



a) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득 b) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열손실
(그림 6.10) 방사율 0.9일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실

열 방사율이 0.9일 때, 단열두께가 120mm이상인 경우, 열획득량이 태양 반사율에 따른 영향을 받지 않고, 단열두께가 150mm이상인 경우에는 열손실량이 태양 반사율에 따른 영향 받지 않아, 적정 단열 두께는 150mm인 것으로 판단된다.

태양 반사율이 0.9일 때, 지붕을 통한 열획득량은 7.0kW, 0.1인 경우 0.8kW로 차이가 크게 발생해 태양 반사율이 높은 재료를 적용하면 건물 최상층의 냉방 부하저감 및 지붕의 단열 두께를 저감하는 효과도 가져올 수 있다.

(그림 6.10)에서 기준선 이하의 태양반사율과 단열두께를 건물에 선정하면, 열 방사율 0.9일 때, 일반 지붕에 비해 에너지 저감을 할 수 있다.

② 남부

우리나라 중부지역에 Cool Roof 도입 시 지붕 마감재의 적정 태양 반사율 및 열방사율을 설정하기위해, 중부지역의 대표도시는 인구가 가장 밀집되어있는 광주와 부산, 대구로, 부산으로 범위를 한정했다. 이러한 도시 중 부산의 경우 해양의 영향을 받아 제주와 냉난방도일이 유사하여 남부지역에서 제외하고, 대구가 광주에 비해 인구수와 도시 면적, 도심의 규모가 더 큰 것으로 나타났다. 따라서 우리나라 남부의 대표 지역을 대구로 설정하여 에너지 해석을 실시했다.

우리나라 남부지역에 Cool Roof를 적용하기 위해 지붕의 열성능에 따라, 건물의 에너지 사용량에 영향을 미치는 요소들을 분석했다. 그에 따라 태양 반사율, 열 방사율, 단열 두께를 변수로 설정하고, 각 변수의 설정인자에 따라 에너지 해석 시뮬레이션을 실시했다.

남부 지역의 단열두께의 설정기준은 다음 <표 6.3>과 같다.

<표 6.3> 남부지역 단열재 두께에 따른 지붕의 열관류율

단열 두께 (mm)	58	60	90	120	150	180	210	240	270	300
열관류율 (W/m ² K)	0.350	0.337	0.216	0.159	0.125	0.104	0.088	0.077	0.068	0.061

단열재 기준 : 우레탄 패널 열전도율 0.018(남부지역 법규 기준 58mm)

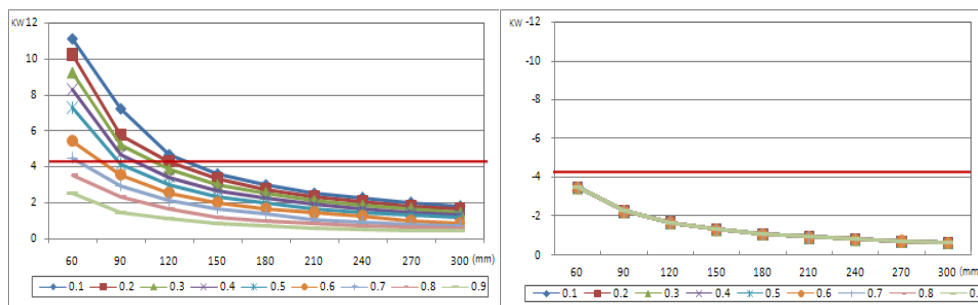
건축물의 설비기준 등에 관한 규칙 [별표4]

남부지역의 건물에 Cool Roof 적용을 위해 열성능 변수에 따른 지붕을 통한 관류열손실 및 열획득량을 파악하기 위해 건축물의 에너지 절약 기준 제 4조 1항을 토대로, 구조체의 단열성능을 설정한 후, 지붕을 통한 부하량을 확인했다.

먼저, 에너지 해석 기준 모델에 축소모형 실험에서 적용한 일반 지붕 마감재의 태양 반사율과 열 방사율 값을 입력하여 지붕을 통한 하절기 관류열획득량은 4.08kW, 겨울철 열손실량은 4.05kW로 나타났다. 따라서, 우리나라 남부지역에서 지붕면을 통해 발생하는 에너지 소비량을 저감하기 위해 Cool Roof 적용 시 요구되는 기준 열성능을 분석했다.

a. 방사율 0.1

지붕 마감재의 열 방사율이 0.1 일 때, 태양 반사율과 단열두께에 따른 건물의 지붕을 통한 관류열손실 및 열획득량을 분석하기 위해 에너지 해석 시뮬레이션을 실시했다. 건물의 에너지 저감을 위해 마감재의 열 방사율이 0.1일 때, 적정 태양 반사율과 단열두께를 분석했고, 그 결과값은 다음 (그림 6.11)과 같다.



a) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득 b) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열손실
(그림 6.11) 방사율 0.1일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실

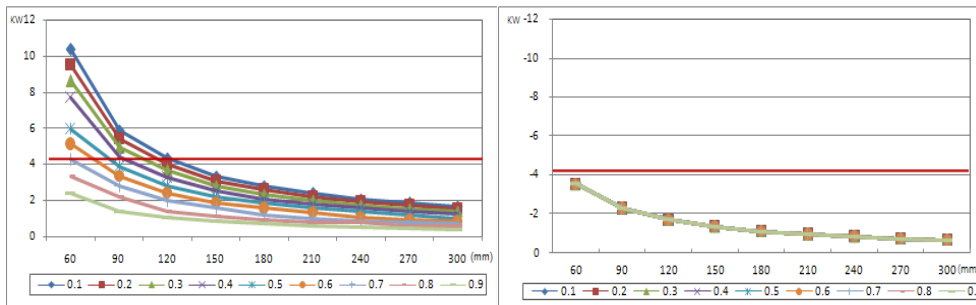
열 방사율이 0.1일 때, 단열두께가 180mm이상인 경우, 열획득량이 태양 반사율에 따른 영향을 받지 않고, 단열두께가 150mm이상인 경우에는 열손실량이 태양 반사율에 따른 영향 받지 않아, 적정 단열 두께는 180mm인 것으로 판단 된다.

태양 반사율의 경우, (그림 6.11_a)와 같이 0.9인 경우 지붕의 열획득량이 11.1kW, 0.1인 경우 2.5kW로 4배 이상 차이가 발생해, 지붕을 통한 열획득량을 결정하는데 많은 영향을 미치는 것으로 태양 반사율인 것으로 판단된다. 태양 반사율은 값이 증가할수록 지붕의 열획득량을 저감하는 효과를 가져와, 건물 지붕의 마감재로 태양 반사율이 높은 재료를 적용하면 건물 최상층의 냉방부하저감 및 지붕의 단열 두께를 저감하는 효과도 가져올 수 있다. 그러나 이러한 지붕의 태양 반사성능은 (그림 6.11_b)와 같이 겨울철 지붕의 열손실량에는 영향을 미치지 않는다.

(그림 6.11)의 가로선은 기준 모델의 관류열획득 및 손실량으로, 기준선 이하의 태양반사율과 단열두께를 건물에 선정하면, 열 방사율 0.1일 때, 일반 지붕에 비해 에너지 저감을 할 수 있다.

b. 방사율 0.2

지붕 마감재의 열 방사율이 0.2 일 때, 태양 반사율과 단열두께에 따른 건물의 지붕을 통한 관류열손실 및 열획득량을 분석하기 위해 에너지 해석 시뮬레이션을 실시했다. 건물의 에너지 저감을 위해 마감재의 열 방사율이 0.2 일 때, 적정 태양 반사율과 단열두께를 분석했고, 그 결과값은 다음 (그림 6.12)와 같다.



a) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득 b) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열손실
(그림 6.12) 방사율 0.2일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실

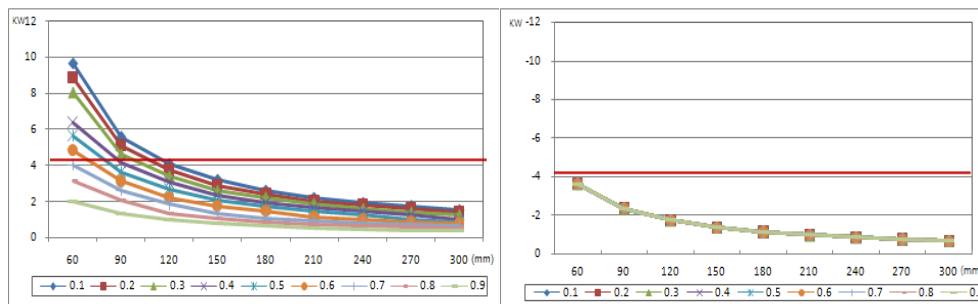
열 방사율이 0.2일 때, 단열두께가 180mm이상인 경우, 열획득량이 태양 반사율에 따른 영향을 받지 않고, 단열두께가 150mm이상인 경우에는 열손실량이 태양 반사율에 따른 영향 받지 않아, 적정 단열 두께는 180mm인 것으로 판단된다.

태양 반사율이 0.9일 때, 지붕을 통한 열획득량은 10.5kW, 0.1인 경우 2.5kW로 크게 발생해 태양 반사율이 높은 재료를 적용하면 건물 최상층의 냉방부하저감 및 지붕의 단열 두께를 저감하는 효과도 가져올 수 있다. 이러한 지붕 마감재의 태양 반사율은 겨울철 난방에너지 사용량에는 영향을 미치지 않는다.

(그림 6.12)에서 기준선 이하의 태양반사율과 단열두께를 건물에 선정하면, 열 방사율 0.2일 때, 일반 지붕에 비해 에너지 저감을 할 수 있다.

c. 방사율 0.3

건물의 에너지 저감을 위해 마감재의 열 방사율이 0.3 일 때, 적정 태양 반사율과 단열두께를 분석했고, 그 결과값은 다음 (그림 6.13)과 같다.



a) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득 b) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열손실
(그림 6.13) 방사율 0.3일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실

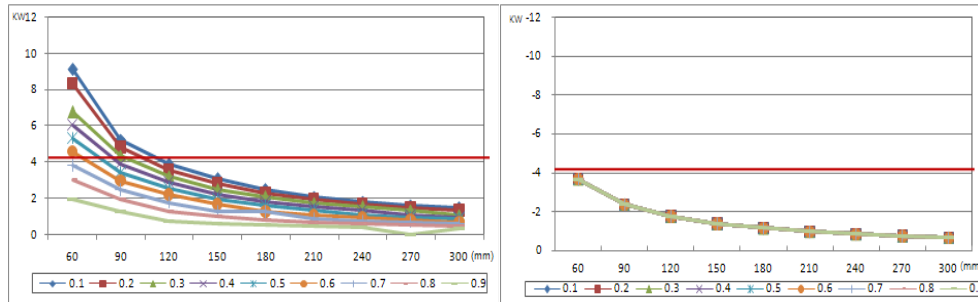
열 방사율이 0.3일 때, 단열두께가 180mm이상인 경우, 열획득량이 태양 반사율에 따른 영향을 받지 않고, 단열두께가 150mm이상인 경우에는 열손실량이 태양 반사율에 따른 영향 받지 않아, 적정 단열 두께는 180mm인 것으로 판단된다.

태양 반사율이 0.9일 때, 지붕을 통한 열획득량은 9.7kW, 0.1인 경우 2.0kW로 크게 발생해 태양 반사율이 높은 재료를 적용하면 건물 최상층의 냉방부하저감 및 지붕의 단열 두께를 저감하는 효과도 가져올 수 있다.

(그림 6.13)에서 기준선 이하의 태양반사율과 단열두께를 건물에 선정하면, 열 방사율 0.3일 때, 일반 지붕에 비해 에너지 저감을 할 수 있다.

d. 방사율 0.4

건물의 에너지 저감을 위해 마감재의 열 방사율이 0.4 일 때, 적정 태양 반사율과 단열두께를 분석했고, 그 결과값은 다음 (그림 6.14)와 같다.



a) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득 b) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열손실

(그림 6.14) 방사율 0.4일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실

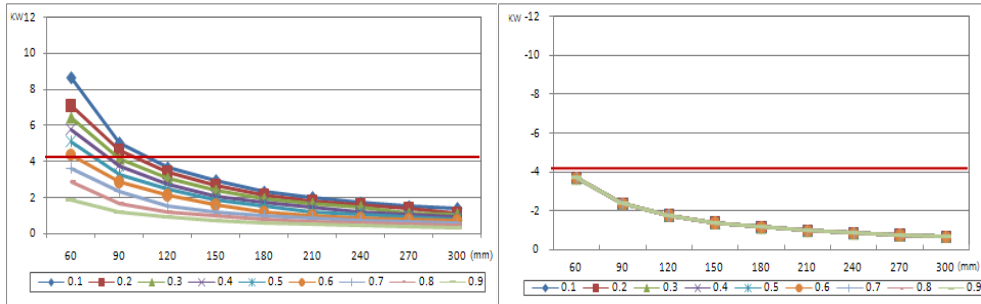
열 방사율이 0.4일 때, 단열두께가 180mm이상인 경우, 열획득량이 태양 반사율에 따른 영향을 받지 않고, 단열두께가 150mm이상인 경우에는 열손실량이 태양 반사율에 따른 영향 받지 않아, 적정 단열 두께는 180mm인 것으로 판단 된다.

태양 반사율이 0.9일 때, 지붕을 통한 열획득량은 9.1kW, 0.1인 경우 1.9kW로 크게 발생해 태양 반사율이 높은 재료를 적용하면 건물 최상층의 냉방부하저감 및 지붕의 단열 두께를 저감하는 효과도 가져올 수 있다.

(그림 6.14)에서 기준선 이하의 태양반사율과 단열두께를 건물에 선정하면, 열 방사율 0.4일 때, 일반 지붕에 비해 에너지 저감을 할 수 있다.

e. 방사율 0.5

건물의 에너지 저감을 위해 마감재의 열 방사율이 0.5 일 때, 적정 태양 반사율과 단열두께를 분석했고, 그 결과값은 다음 (그림 6.15)와 같다.



a) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득 b) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열손실
(그림 6.15) 방사율 0.5일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실

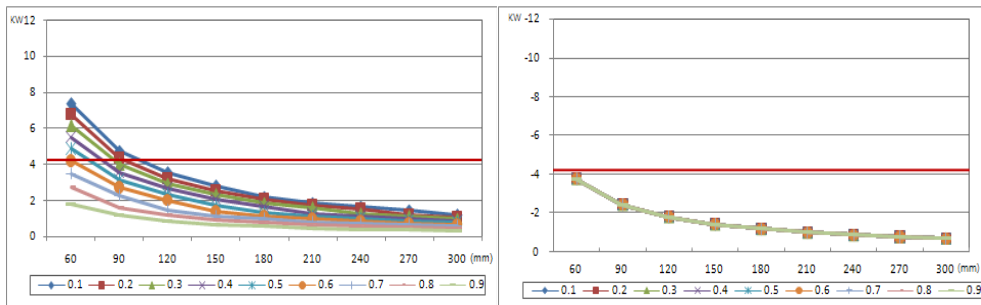
열 방사율이 0.5일 때, 단열두께가 180mm이상인 경우, 열획득량이 태양 반사율에 따른 영향을 받지 않고, 단열두께가 150mm이상인 경우에는 열손실량이 태양 반사율에 따른 영향을 받지 않아, 적정 단열 두께는 180mm인 것으로 판단된다.

태양 반사율이 0.9일 때, 지붕을 통한 열획득량은 8.6kW, 0.1인 경우 1.8kW로 크게 발생해 태양 반사율이 높은 재료를 적용하면 건물 최상층의 냉방부하저감 및 지붕의 단열 두께를 저감하는 효과도 가져올 수 있다.

(그림 6.15)에서 기준선 이하의 태양반사율과 단열두께를 건물에 선정하면, 열 방사율 0.5일 때, 일반 지붕에 비해 에너지 저감을 할 수 있다.

f. 방사율 0.6

건물의 에너지 저감을 위해 마감재의 열 방사율이 0.6 일 때, 적정 태양 반사율과 단열두께를 분석했고, 그 결과값은 다음 (그림 6.16)과 같다.



a) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득 b) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열손실
(그림 6.16) 방사율 0.6일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실

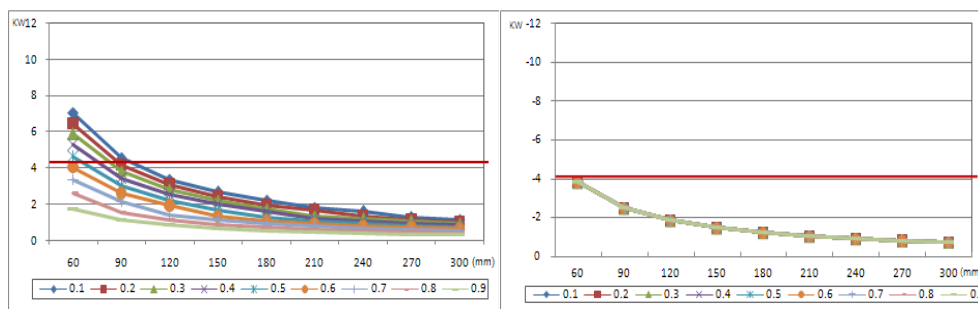
열 방사율이 0.5일 때, 단열두께가 180mm이상인 경우, 열획득량이 태양 반사율에 따른 영향을 받지 않고, 단열두께가 150mm이상인 경우에는 열손실량이 태양 반사율에 따른 영향을 받지 않아, 적정 단열 두께는 180mm인 것으로 판단된다.

태양 반사율이 0.9일 때, 지붕을 통한 열획득량은 7.4kW, 0.1인 경우 1.8kW로 차이가 크게 발생하며, 지붕의 태양 반사율값이 커질수록 하절기 에너지 저감 효과는 증가하지만, 열손실량에는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

(그림 6.16)에서 기준선 이하의 태양반사율과 단열두께를 건물에 선정하면, 열 방사율 0.6일 때, 일반 지붕에 비해 에너지 저감을 할 수 있다.

g. 방사율 0.7

건물의 에너지 저감을 위해 마감재의 열 방사율이 0.7 일 때, 적정 태양 반사율과 단열두께를 분석했고, 그 결과값은 다음 (그림 6.17)과 같다.



a) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득 b) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열손실
(그림 6.17) 방사율 0.7일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실

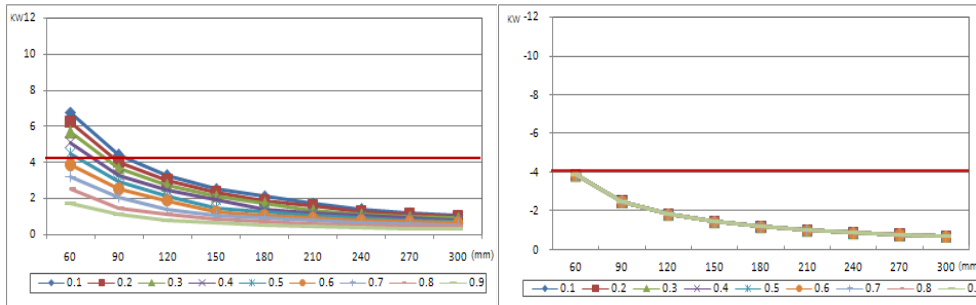
지붕의 열 방사율이 0.7일 때, 단열두께가 150mm 이상일 경우 지붕을 통한 에너지저감 효과가 크지 않는 것으로 나타나, 적정 단열 두께는 180mm인 것으로 판단된다.

태양 반사율이 0.9일 때, 지붕을 통한 열획득량은 7.0kW, 0.1인 경우 1.7kW로 차이가 크게 발생하며, 지붕의 태양 반사율값이 커질수록 하절기 에너지 저감 효과는 증가하지만, 열손실량에는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

(그림 6.17)에서 기준선 이하의 태양반사율과 단열두께를 건물에 선정하면, 열 방사율 0.6일 때, 일반 지붕에 비해 에너지 저감을 할 수 있다.

h. 방사율 0.8

건물의 에너지 저감을 위해 마감재의 열 방사율이 0.8 일 때, 적정 태양 반사율과 단열두께를 분석했고, 그 결과값은 다음 (그림 6.18)과 같다.



a) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득 b) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열손실

(그림 6.18) 방사율 0.8일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실

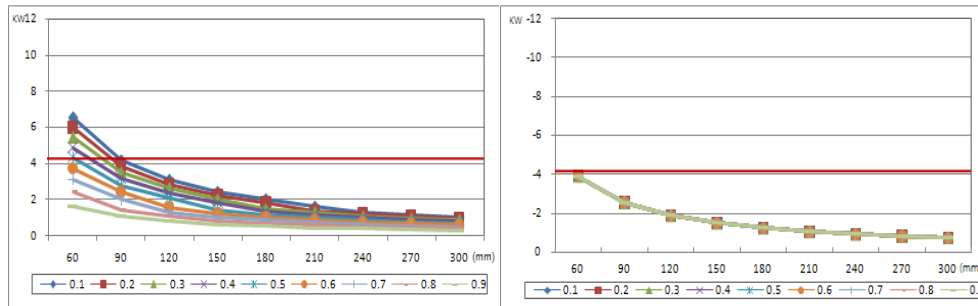
지붕의 열 방사율이 0.8일 때, 단열두께가 150mm 이상일 경우 지붕을 통한 에너지저감 효과가 크지 않는 것으로 나타나, 적정 단열 두께는 180mm인 것으로 판단된다.

태양 반사율이 0.9일 때, 지붕을 통한 열획득량은 6.7kW, 0.1인 경우 1.7kW로 차이가 크게 발생하며, 지붕의 태양 반사율값이 커질수록 하절기 에너지 저감 효과는 증가하지만, 열손실량에는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

(그림 6.18)에서 기준선 이하의 태양반사율과 단열두께를 건물에 선정하면, 열 방사율 0.6일 때, 일반 지붕에 비해 에너지 저감을 할 수 있다.

i. 방사율 0.9

건물의 에너지 저감을 위해 마감재의 열 방사율이 0.9 일 때, 적정 태양 반사율과 단열두께를 분석했고, 그 결과값은 다음 (그림 6.19)와 같다.



a) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득 b) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열손실
(그림 6.19) 방사율 0.9일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실

지붕의 열 방사율이 0.9일 때, 단열두께가 150mm 이상일 경우 지붕을 통한 에너지 저장 효과가 크지 않은 것으로 나타나, 적정 단열 두께는 180mm인 것으로 판단된다.

태양 반사율이 0.9일 때, 지붕을 통한 열획득량은 6.5kW, 0.1인 경우 1.6kW로 차이가 크게 발생하며, 지붕의 태양 반사율값이 커질수록 하절기 에너지 저장 효과는 증가하지만, 열손실량에는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

(그림 6.19)에서 기준선 이하의 태양반사율과 단열두께를 건물에 선정하면, 열 방사율 0.6일 때, 일반 지붕에 비해 에너지 저감을 할 수 있다.

③ 제주

우리나라 최남단인 제주는 해양의 영향을 받아 냉난방 도일이 다른 지역과 달리 난방일수가 적고, 냉방일수가 많은 것으로 나타났다. 지붕의 마감재의 열성능 따른 제주지역의 에너지 저장량을 분석하기 위해 태양 반사율, 열 방사율, 단열 두께를 변수로 설정하고 각 변수의 설정인자에 따라 에너지 해석 시뮬레이션을 실시했다. 이때, 단열두께의 설정인자는 다음 <표 6.4>와 같다.

<표 6.4> 제주지역 단열재 두께에 따른 지붕의 열관류율

단열 두께 (mm)	49	60	90	120	150	180	210	240	270
열관류율 (W/m ² K)	0.410	0.328	0.212	0.157	0.124	0.103	0.088	0.077	0.068

단열재 기준 : 우레탄 패널 열전도율 0.018(제주지역 법규 기준 49mm)
건축물의 설비기준 등에 관한 규칙 [별표4]

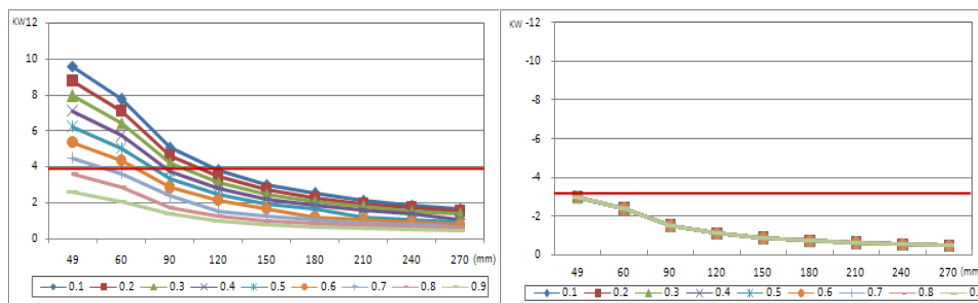
제주지역의 건물에 Cool Roof 적용을 위해 열성능 변수에 따른 지붕을 통한 관류 열손실 및 열획득량을 파악하기 위해 건축물의 에너지 절약 기준 제 4조 1항을 토대로, 구조체의 단열성능을 설정한 후, 지붕을 통한 부하량을 확인했다.

먼저, 에너지 해석 기준 모델에 축소모형 실험에서 적용한 일반 지붕 마감재의 태양 반사율과 열 방사율 값을 입력하여 지붕을 통한 하절기 관류열획득량은 3.9kW, 겨울철 열손실량은 3.15kW로 나타나, 중부 지역과 비교 시 하절기의 경우 약 0.4kW, 겨울철에는 약 1kW 정도 적은 것이다. 따라서 우리나라 제주지역에서 지붕면을 통해 발생하는 에너지 소비량을 저감하기 위해 Cool Roof 적용 시 요구되는 기준 열성능을 분석했다.

a. 방사율 0.1

지붕 마감재의 열 방사율이 0.1 일 때, 제주 지역의 태양 반사율과 단열두께에 따른 건물의 지붕을 통한 관류열손실 및 열획득량을 분석하기 위해 에너지 해석 시뮬레이션을 실시했다. 건물의 에너지 저감을 위해 마감재의 열 방사율이 0.1 일 때, 적정 태양 반사율과 단열두께를 분석했다.

마감재의 열방사율 0.1일 때 지붕의 열성능에 따른 지붕을 통한 관류열획득 및 손실량은 (그림 6.20)과 같다.



a) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득 b) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열손실
(그림 6.20) 방사율 0.1일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실

시뮬레이션 결과, 지붕의 단열 성능이 증가할수록 지붕을 통한 열획득량과 손실 열량이 저감했다. 하절기 열획득의 경우 단열두께가 150mm 이상일 경우 지붕을

통한 에너지저감효과가 크지 않은 것으로 나타났으며, 겨울철 열손실량의 경우 단열두께가 120mm 이상인 경우, 에너지 저감효과가 크지 않은 것으로 나타나 냉·난방 부하를 모두 고려한 적정 단열 두께는 150mm인 것으로 판단된다.

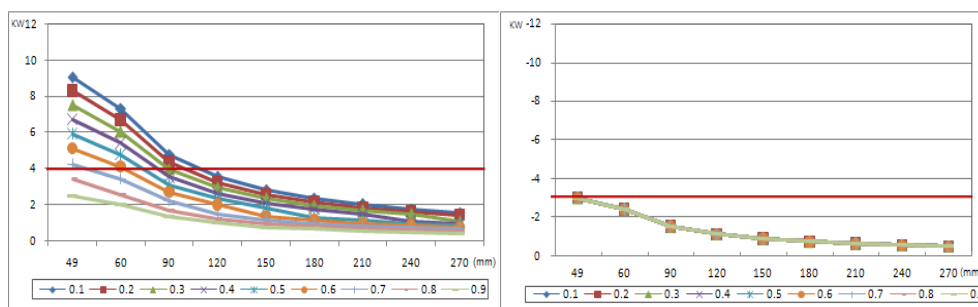
태양 반사율의 경우, 0.9인 경우 지붕을 통한 열획득량이 9.6kW, 0.1인 경우 2.6kW로 큰 차이가 발생하는 것으로 나타나, 지붕을 통한 열획득량을 결정하는데 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 지붕의 태양 반사율값이 커질수록 하절기 열획득량으로 인해 발생하는 에너지 사용량의 저감효과는 증가하지만, 겨울철 지붕을 통한 열손실량에는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

(그림 6.20)에서 기준선 이하의 태양반사율과 단열두께를 건물 지붕의 마감재로 선정하면, 지붕의 열 방사율 0.1일 때, 일반 지붕에 비해 에너지 저감을 할 수 있다.

b. 방사율 0.2

지붕 마감재의 열 방사율이 0.2 일 때, 제주 지역의 태양 반사율과 단열두께에 따른 건물의 지붕을 통한 관류열손실 및 열획득량을 분석하기 위해 에너지 해석 시뮬레이션을 실시했다. 건물의 에너지 저감을 위해 마감재의 열 방사율이 0.2 일 때, 적정 태양 반사율과 단열두께를 분석했다.

마감재의 열방사율 0.2일 때 지붕의 열성능에 따른 지붕을 통한 관류열획득 및 손실량은 (그림 6.21)과 같다.



a) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득 b) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열손실

(그림 6.21) 방사율 0.2일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실

시뮬레이션 결과, 지붕의 단열 성능이 증가할수록 지붕을 통한 열획득량과 손실 열량이 저감했다. 하절기 열획득의 경우 단열두께가 150mm 이상일 경우 지붕을 통한 에너지저감효과가 크지 않은 것으로 나타났으며, 겨울철 열손실량의 경우 단열두께가 120mm 이상인 경우, 에너지 저감효과가 크지 않은 것으로 나타나 냉·난방 부하를 모두 고려한 적정 단열 두께는 150mm인 것으로 판단된다.

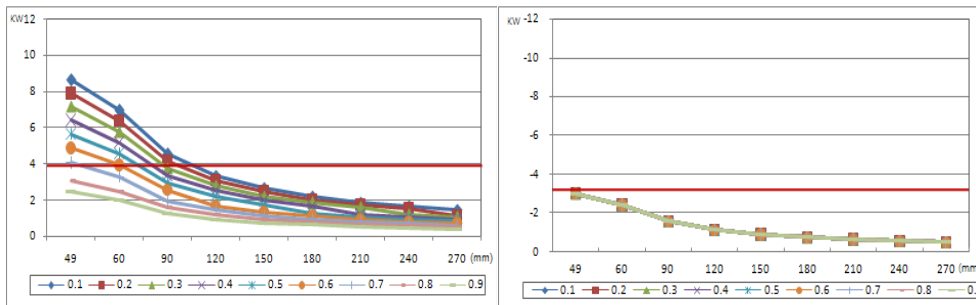
태양 반사율이 0.9일 때, 지붕을 통한 열획득량은 9.1kW, 0.1인 경우 2.6kW로 차이가 크게 발생하며, 지붕의 태양 반사율값이 커질수록 하절기 열획득량으로 인해 발생하는 에너지 사용량의 저감효과는 증가하지만, 겨울철 지붕을 통한 열손실량에는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

(그림 6.21)에서 기준선 이하의 태양반사율과 단열두께를 건물 지붕의 마감재로 선정하면, 지붕의 열 방사율 0.2일 때, 일반 지붕에 비해 에너지 저감을 할 수 있다.

c. 방사율 0.3

지붕 마감재의 열 방사율이 0.3 일 때, 제주 지역의 태양 반사율과 단열두께에 따른 건물의 지붕을 통한 관류열손실 및 열획득량을 분석하기 위해 에너지 해석 시뮬레이션을 실시했다. 건물의 에너지 저감을 위해 마감재의 열 방사율이 0.2 일 때, 적정 태양 반사율과 단열두께를 분석했다.

마감재의 열방사율 0.3일 때 지붕의 열성능에 따른 지붕을 통한 관류열획득 및 손실량은 (그림 6.22)와 같다.



a) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득 b) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열손실
(그림 6.22) 방사율 0.3일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실

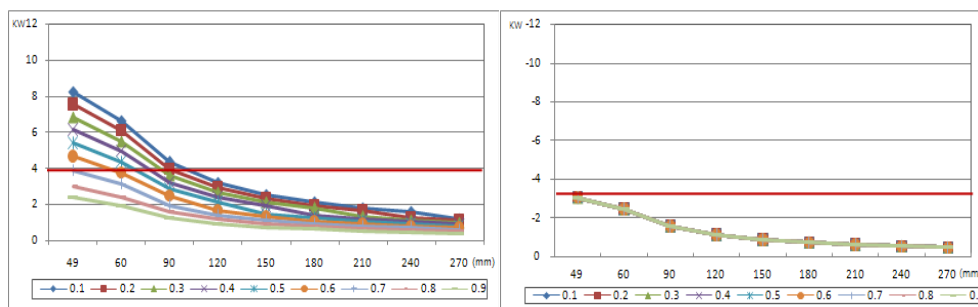
시뮬레이션 결과, 지붕의 단열 성능이 증가할수록 지붕을 통한 열획득량과 손실 열량이 저감했다. 하절기 열획득의 경우 단열두께가 120mm 이상일 경우 지붕을 통한 에너지저감효과가 크지 않은 것으로 나타났으며, 겨울철 열손실량의 경우 단열두께가 90mm 이상인 경우, 에너지 저감효과가 크지 않은 것으로 나타나 제주 지역의 냉·난방 부하를 모두 고려한 적정 단열 두께는 120mm인 것으로 판단된다.

태양 반사율이 0.9일 때, 지붕을 통한 열획득량은 8.6kW, 0.1인 경우 2.5kW로 차이가 크게 발생하며, 지붕의 태양 반사율값이 커질수록 하절기 열획득량으로 인해 발생하는 에너지 사용량의 저감효과는 증가하지만, 겨울철 지붕을 통한 열 손실량에는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

(그림 6.22)에서 기준선 이하의 태양반사율과 단열두께를 건물에 선정하면, 열 방사율 0.3일 때, 일반 지붕에 비해 에너지 저감을 할 수 있다.

d. 방사율 0.4

건물의 에너지 저감을 위해 마감재의 열 방사율이 0.4 일 때, 적정 태양 반사율과 단열두께를 분석했고, 그 결과값은 다음 (그림 6.23)과 같다.



a) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득 b) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열손실
(그림 6.23) 방사율 0.4일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실

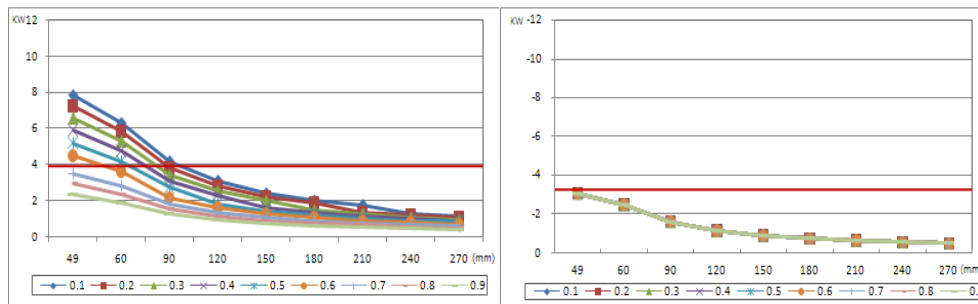
시뮬레이션 결과, 획득 열량의 경우 단열두께가 120mm 이상, 손실열량의 경우 단열두께가 90mm 이상 일 경우, 지붕을 통한 에너지 저감효과가 크지 않은 것으로 나타나 제주 지역의 냉·난방 부하를 모두 고려한 적정 단열 두께는 120mm인 것으로 판단된다.

태양 반사율이 0.9일 때, 지붕을 통한 열획득량은 8.2kW, 0.1인 경우 2.4kW로 차이가 크게 발생하며, 지붕의 태양 반사율값이 커질수록 하절기 열획득량으로 인해 발생하는 에너지 사용량의 저감효과는 증가하지만, 겨울철 지붕을 통한 열손실량에는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

(그림 6.23)에서 기준선 이하의 태양반사율과 단열두께를 건물에 선정하면, 열 방사율 0.4일 때, 일반 지붕에 비해 에너지 저감을 할 수 있다.

e. 방사율 0.5

건물의 에너지 저감을 위해 마감재의 열 방사율이 0.5 일 때, 적정 태양 반사율과 단열두께를 분석했고, 그 결과값은 다음 (그림 6.24)과 같다.



a) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득 b) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열손실
(그림 6.24) 방사율 0.5일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실

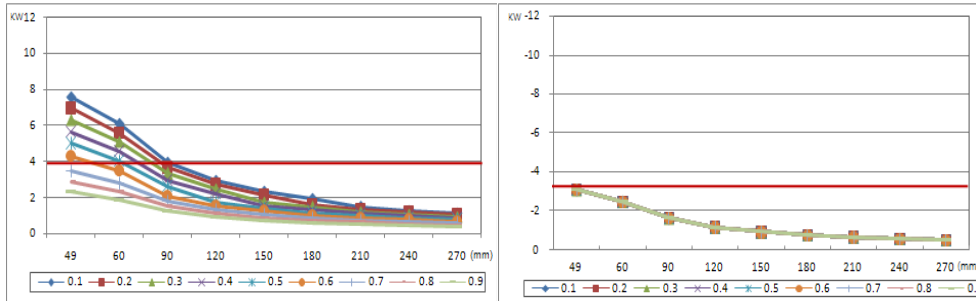
시뮬레이션 결과, 획득 열량의 경우 단열두께가 120mm 이상, 손실열량의 경우 단열 두께가 90mm이상 일 경우, 지붕을 통한 에너지 저감효과가 크지 않은 것으로 나타나 냉·난방 부하를 모두 고려한 적정 단열 두께는 120mm인 것으로 판단된다.

태양 반사율이 0.9일 때, 지붕을 통한 열획득량은 7.9kW, 0.1인 경우 2.4kW로 차이가 크게 발생하며, 지붕의 태양 반사율값이 커질수록 하절기 열획득량으로 인해 발생하는 에너지 사용량의 저감효과는 증가하지만, 겨울철 지붕을 통한 열손실량에는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

(그림 6.24)에서 기준선 이하의 태양반사율과 단열두께를 건물에 선정하면, 열 방사율 0.5일 때, 일반 지붕에 비해 에너지 저감을 할 수 있다.

f. 방사율 0.6

건물의 에너지 저감을 위해 마감재의 열 방사율이 0.6 일 때, 적정 태양 반사율과 단열두께를 분석했고, 그 결과값은 다음 (그림 6.25)와 같다.



a) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득 b) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열손실
(그림 6.25) 방사율 0.6일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실

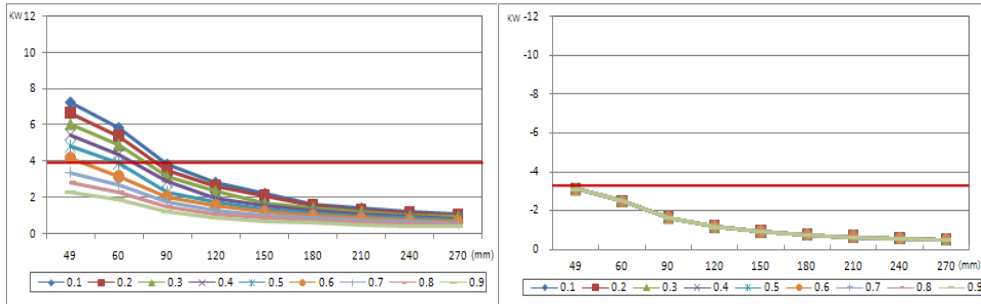
시뮬레이션 결과, 지붕을 통해 유입되는 획득열량은 단열두께가 120mm 이상인 경우 저감 효과가 미미하고, 손실 열량은 단열두께가 90mm 이상인 경우 지붕을 통한 에너지 저감효과가 크지 않은 것으로 나타나, 냉·난방 부하를 모두 고려한 적정 단열 두께는 90mm인 것으로 판단된다.

태양 반사율이 0.9일 때, 지붕을 통한 열획득량은 7.6kW, 0.1인 경우 2.3kW로 차이가 크게 발생하며, 지붕의 태양 반사율값이 커질수록 하절기 에너지 저감 효과는 증가하지만, 겨울철 지붕의 열손실량에는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

(그림 6.25)에서 기준선 이하의 태양반사율과 단열두께를 건물에 선정하면, 열 방사율 0.6일 때, 일반 지붕에 비해 에너지 저감을 할 수 있다.

g. 방사율 0.7

건물의 에너지 저감을 위해 마감재의 열 방사율이 0.7 일 때, 적정 태양 반사율과 단열두께를 분석했고, 그 결과값은 다음 (그림 6.26)과 같다.



a) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득 b) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열손실
(그림 6.26) 방사율 0.7일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실

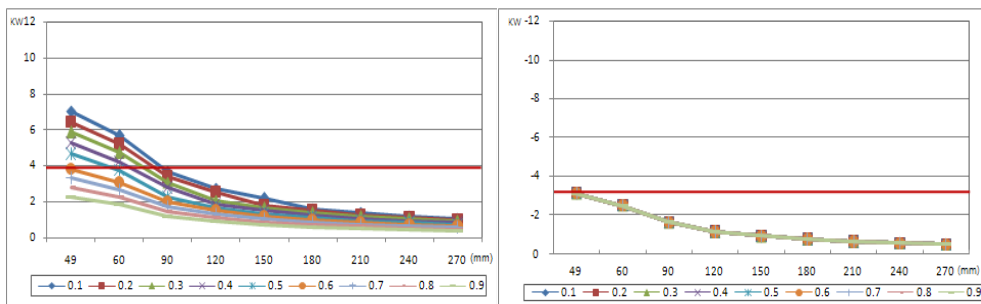
시뮬레이션 결과, 지붕에서의 열획득 및 열손실은 단열두께가 90mm 이상인 경우 지붕을 통한 에너지 저감효과가 크지 않은 것으로 나타나, 적정 단열 두께는 90mm인 것으로 판단된다.

태양 반사율이 0.9일 때, 지붕을 통한 열획득량은 7.2kW, 0.1인 경우 2.3kW로 차이가 크게 발생하며, 지붕의 태양 반사율값이 커질수록 하절기 에너지 저감효과는 증가하지만, 겨울철 지붕의 열손실량에는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

(그림 6.26)에서 기준선 이하의 태양반사율과 단열두께를 건물에 선정하면, 열 방사율 0.7일 때, 일반 지붕에 비해 에너지 저감을 할 수 있다.

h. 방사율 0.8

건물의 에너지 저감을 위해 마감재의 열 방사율이 0.8 일 때, 적정 태양 반사율과 단열두께를 분석했고, 그 결과값은 다음 (그림 6.27)과 같다.



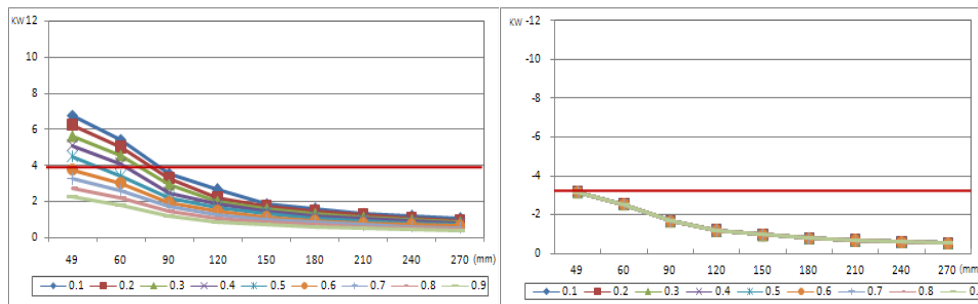
a) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득 b) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열손실
(그림 6.27) 방사율 0.8일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실

시뮬레이션 결과, 지붕에서의 열획득 및 열손실은 단열두께가 90mm 이상인 경우 지붕을 통한 에너지 저감효과가 크지 않은 것으로 나타나, 적정 단열 두께는 90mm인 것으로 판단된다.

태양 반사율이 0.9일 때, 지붕을 통한 열획득량은 7.0kW, 0.1인 경우 2.2kW로 차이가 크게 발생하며, 지붕의 태양 반사율값이 커질수록 하절기 에너지 저감 효과는 증가하지만, 겨울철 지붕의 열손실량에는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. (그림 6.27)에서 기준선 이하의 태양반사율과 단열두께를 건물에 선정하면, 열 방사율 0.8일 때, 일반 지붕에 비해 에너지 저감을 할 수 있다.

i. 방사율 0.9

건물의 에너지 저감을 위해 마감재의 열 방사율이 0.9 일 때, 적정 태양 반사율과 단열두께를 분석했고, 그 결과값은 다음 (그림 6.28)과 같다.



a) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득 b) 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열손실
(그림 6.28) 방사율 0.9일 때 반사율과 단열두께에 따른 지붕관류 열획득/열손실

시뮬레이션 결과, 지붕에서의 열획득 및 열손실은 단열두께가 90mm 이상인 경우 지붕을 통한 에너지 저감효과가 크지 않은 것으로 나타나, 적정 단열 두께는 90mm인 것으로 판단된다.

태양 반사율이 0.9일 때, 지붕을 통한 열획득량은 6.8kW, 0.1인 경우 2.2kW로 차이가 크게 발생하며, 지붕의 태양 반사율값이 커질수록 하절기 에너지 저감효과는 증가하지만, 겨울철 지붕의 열손실량에는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

(그림 6.28)에서 기준선 이하의 태양반사율과 단열두께를 건물에 선정하면, 열 방사율 0.9일 때, 일반 지붕에 비해 에너지 저감을 할 수 있다.

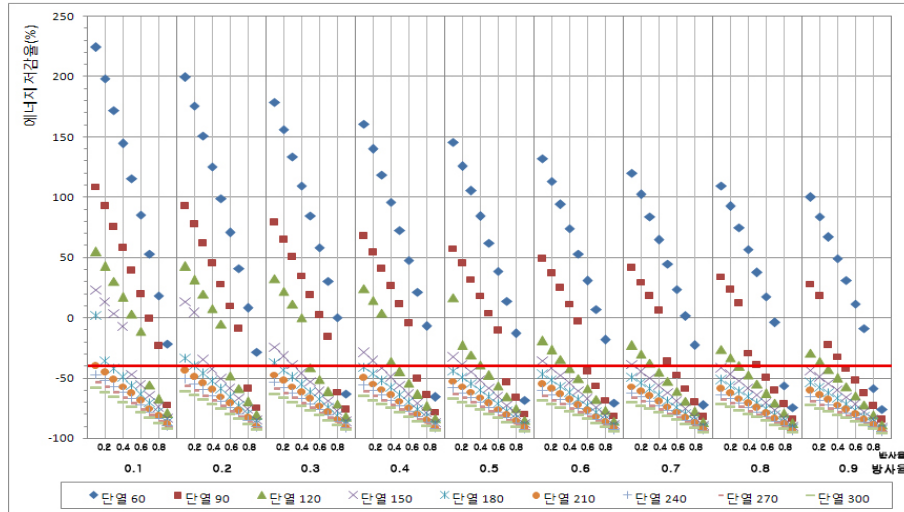
2) 지역별 요구 성능 기준

현재 서울시에서는 건물 에너지 합리화 사업을 추진하고 있으며, 건물의 에너지 절감률이 10% 이상일 경우 시는 ‘서울시 친환경 건축물’로 인정하고 절감률에 따라 등급 및 인센티브를 부여하고 있다. 따라서 본 연구에서는 Cool Roof 도입 시 지역에 따른 적정 태양 반사율과 열 방사율, 단열성능을 마련하기 위해 지붕에서의 에너지 절감률을 ‘서울시 친환경 건축물’의 등급 기준을 활용하였다. 건물의 에너지 절감률이 40%인 Platinum(I)을 기준으로, 건물 전체의 에너지 절감률인 40%를 건물 요소별 에너지 절감이 동일하게 이루어진다고 가정하였다. 그에 따라 지붕을 통해 절감되는 에너지를 40%로 설정하고, 지붕의 적정 열성능을 제안하였다.

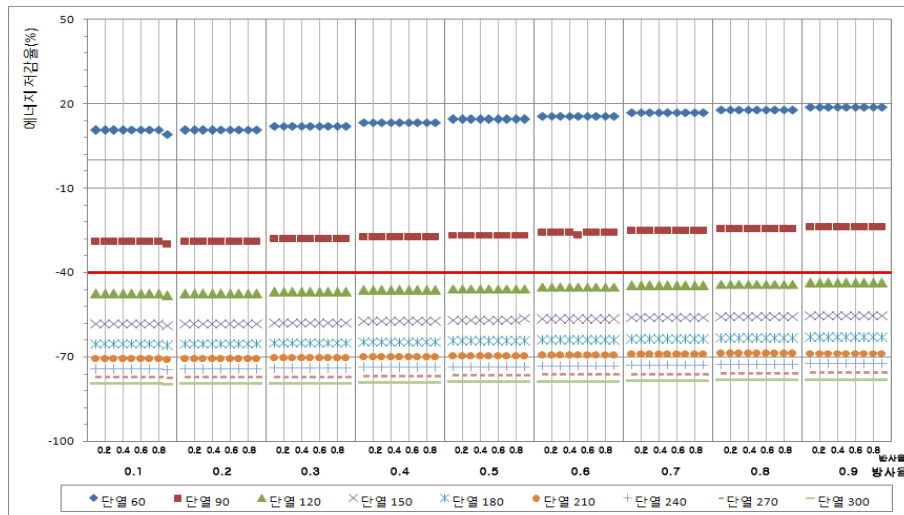
또한 지붕의 단열 성능을 나타내는 지표는 단열재의 R-값이나 단열재 두께, 지붕의 열관류율 등 다양하게 마련할 수 있다. 그러나 단열재의 두께는 단열재의 종류나 지붕의 구성 재료가 변경됨에 따라 그 값 또한 변경되어 정확한 지표가 될 수 없으므로, 본 논문에서는 지붕의 단열 성능 지표를 열관류율값으로 설정하였다.

① 중부지역

기준 해석모델의 지붕을 통해 획득 및 손실되는 열량을 기준으로 지붕의 열성능에 따라 획득 및 손실되는 열량간의 에너지 절감률을 확인하였다. 지붕의 단열 성능, 태양 반사율, 열 방사율에 따른 에너지 절감률은 다음 그림과 같고, 그림 내 기준선은 지붕을 통해 저감되는 에너지 절감률이 40%인 지점을 나타낸 것이다.



(그림 6.29) 중부지역 지붕을 통한 냉방에너지 절감률



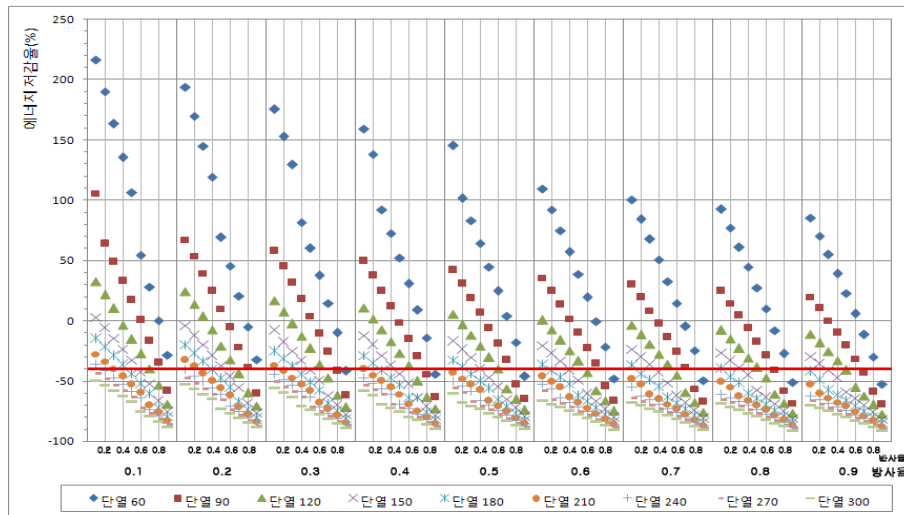
(그림 6.30) 중부지역 지붕을 통한 난방에너지 절감률

기준 해석모델의 지붕을 통한 에너지 절감률을 40%로 선정하고, 중부지역 건물 지붕의 적정 열성능을 확인한 결과 다음과 같다.

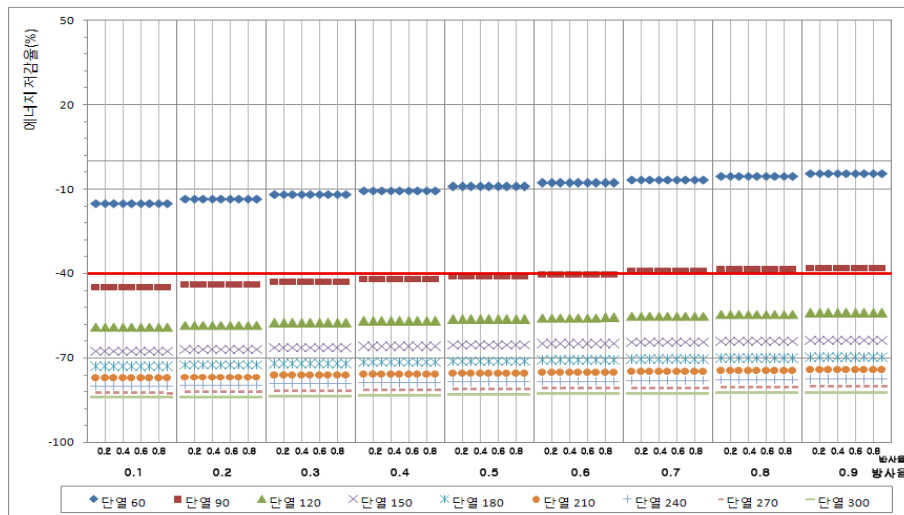
- 적정 단열두께 : $K\text{-value} = 0.127\text{W/m}^2\text{K}$
- 적정 열 방사율 : 0.7 이상
- 적정 태양 반사율 : 0.6 이상

② 남부지역

기준 해석모델의 지붕을 통해 획득 및 손실되는 열량을 기준으로 지붕의 열성능에 따라 획득 및 손실되는 열량간의 에너지 절감률을 확인하였다. 지붕의 단열 성능, 태양 반사율, 열 방사율에 따른 에너지 절감률은 다음 그림과 같고, 그림 내 기준선은 지붕을 통해 저감되는 에너지 절감률이 40%인 지점을 나타낸 것이다.



(그림 6.31) 남부지역 지붕을 통한 냉방에너지 절감률



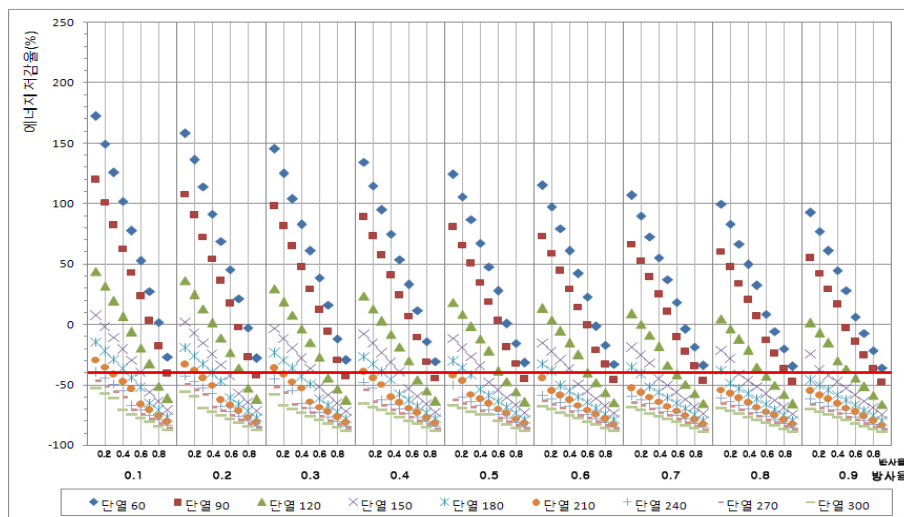
(그림 6.32) 남부지역 지붕을 통한 난방에너지 절감률

기준 해석모델의 지붕을 통한 에너지 절감률 40%를 기준으로 남부지역 건물 지붕의 적정 열성능을 확인한 결과 다음과 같다.

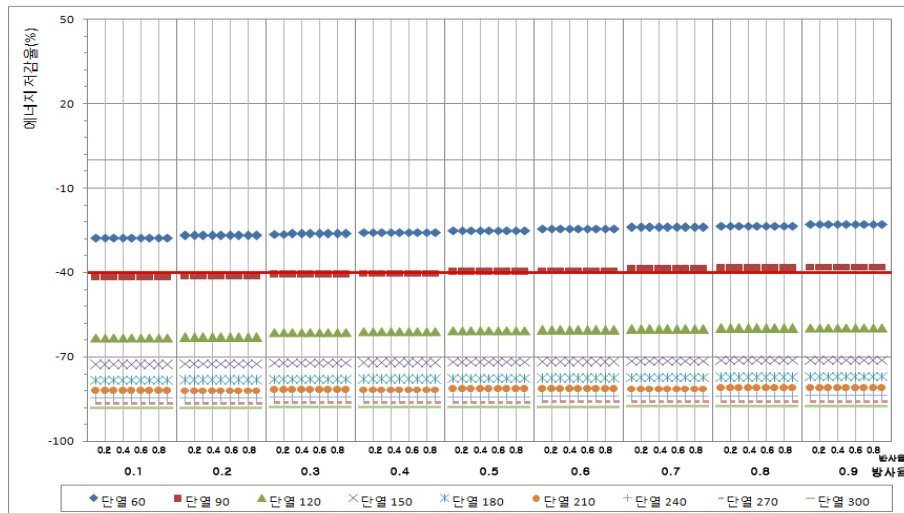
- 적정 단열두께 : K-value - 0.159W/m²K
- 적정 열 방사율 : 0.7 이상
- 적정 태양 반사율 : 0.7 이상

③ 제주지역

기준 해석모델의 지붕을 통해 획득 및 손실되는 열량을 기준으로 지붕의 열성능에 따라 획득 및 손실되는 열량간의 에너지 절감률을 확인하였다. 지붕의 단열 성능, 태양 반사율, 열 방사율에 따른 에너지 절감률은 다음 그림과 같고, 그림 내 기준선은 지붕을 통해 저감되는 에너지 절감률이 40%인 지점을 나타낸 것이다.



(그림 6.33) 제주지역 지붕을 통한 냉방에너지 절감률



(그림 6.34) 제주지역 지붕을 통한 난방에너지 절감률

기준 해석모델의 지붕을 통한 에너지 절감률 40%를 기준으로 제주지역 건물 지붕의 적정 열성능을 확인한 결과 다음과 같다.

- 적정 단열 성능 : K-value - 0.157W/m²K
- 적정 열 방사율 : 0.7 이상
- 적정 태양 반사율 : 0.7 이상

따라서 Cool Roof의 국내 도입 시 이러한 지역별 요구 성능을 검토하여, 지붕 마감재를 선택한다면, 지붕을 통한 냉방에너지 저감에 효과적일 것으로 판단된다.

6.2 Cool Roof의 설계지침

지붕의 설계과정은 건물의 유형에 따라 냉·난방부하계산에서 시작하여 지붕 마감재 선택 후 에너지 저감량 확인에 이르기까지 일련의 순차적 과정을 따라야 한다. 그러나 기존의 지붕 설계는 일관된 프로세스에 의해 설계되지 않고, 설계자나 건축주의 성향에 의해 결정되어 최상층의 냉난방 성능을 저하시키는 원인

중의 하나가 되어왔다. 이러한 점을 감안하여 본 연구에서는 다음과 같이 지붕설계 지침을 제안하고, 이를 통해 지붕 설계 시 설계자들의 편의성을 향상하도록 했다.

6.2.1 신축건물의 Cool Roof 설계 지침

신축건물 계획 시 건축주나 설계자, 시공자들이 에너지 절약적인 지붕을 설계하기 위해 다음의 지침을 통해 지붕 설계를 계획한다면, 쉽고, 편리하게 지붕을 설계할 수 있다.

1) 대상건물의 최상층 부하계산

① 프로젝트의 일반 정보

에너지 절약적인 친환경 지붕을 설계하기 위해서 먼저, 대상건물의 최상층 부하계산을 실시한다. 그에 따라 대상건물의 유형과 규모, 설계 현황 등을 파악한다. 건물의 부하 계산 시 발열부하와 재실자 스케줄은 건물의 유형에 따라 달라지므로 건물의 유형에 따른 발열 부하와 재실자 스케줄을 파악하고, 대상 건물의 창 면적, 방위, 매스 형태 등의 설계 현황을 파악한다.

② 대상건물의 정보 확인

프로젝트의 일반적인 정보를 확인하고, 대상건물과 관련된 일반적 정보를 확인한다. 건물은 건물이 위치한 미기후에 따라 그 성능이 달라지므로, 건축될 대상 지역의 기후를 확인하고, 건물 구조체의 열관류율값을 확인한다.

또한 최상층의 경우, 외기에 접한 면적이 다른 층에 비해 많고, 그 중 가장 많은 비율을 차지하는 곳이 지붕이므로, 지붕을 통한 에너지 손실량을 확인하기 위해 지붕의 면적, 열관류율 등 지붕과 관련된 정보를 확인한다.

③ 대상건물의 최상층 부하계산

일반적으로 계획한 건물이 4층 이상일 경우, 최하층(1층 기준)과 최상층을 제외한 중간층의 부하량은 층별 용도가 변경 되지 않는 한 동일하다. 최하층의 경우, 난방부하량이 다른 층에 비해 상대적으로 높게 나타나고, 최상층은 냉·난방 부하 모두 높게 나타난다. 따라서 최상층에서 발생하는 냉·난방부하를 저감하면 건물의 사용전력은 물론, 건물의 피크부하를 저감해 장비용량을 축소하고, 그로 인해 초기투자비용을 저감할 수 있다. 따라서 하절기 피크부하 저감을 위해

일반적인 지붕 재료와 Cool Roof를 건물에 각각 적용했을 때 최상층의 부하량을 계산하여, 비교하여 분석한다.

2) 지붕 설계 방안

① 지붕의 열관류율값 결정

프로젝트 계획 시 건물 지붕에 설정된 열관류율값과 대상건물이 위치한 지역의 적정 열관류율값을 본 연구의 5.1.2조 지역별 지붕의 적정 열관류율값의 결과를 토대로 비교한다.

프로젝트 계획 시 열관류율값이 본 연구에서 설정한 지역별 적정 열관류율값에 비해 낮으면, 본 연구에서 설정한 적정 열관류율값으로 변경하여 건물 지붕에 적용하고, 계획 시 열관류율값이 설정 열관류율값에 비해 높으면 계획 시 열관류율값을 적용(태양 반사율과 열 방사율이 기준 값보다 높은 지붕 재료를 사용할 수 있음)하거나, 지역별 적정 열관류율값을 적용한다. 만일 설정 열관류율값보다 낮은 계획 시 열관류율값을 그대로 적용한다면, 단열재 두께(열관류율)에 따른 적정 태양 반사율과 열 방사율을 확인하여 적용한다.

② 지붕 마감재 선택

대상건물의 지붕에 열관류율값이 결정되면, 지붕의 적정 마감재를 선정한다. 지붕의 마감재는 재료의 종류에 따라 열 방사율이 달라지므로, 대상 건물에 설정한 지붕의 열관류율값에 적절한 재료 열 방사율의 범위를 확인하여, 적용 가능한 지붕 마감재의 종류를 파악한다.

③ 지붕의 태양 반사율 설정

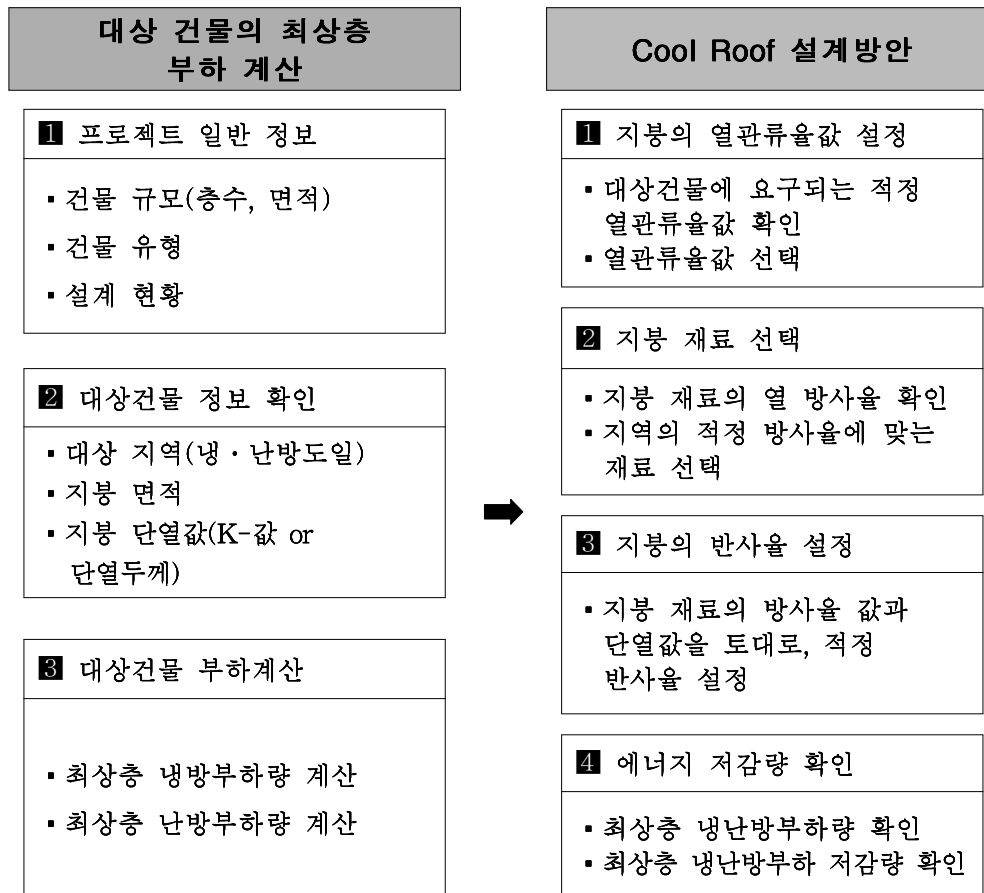
지붕 마감재의 태양 반사율은 마감재의 표면의 거칠기나 색상 등에 따라 달라진다. 지붕의 열관류율값을 통해 얻어진 적용 가능한 마감재의 종류(열 방사율)를 파악하고, 지역별 적정 태양 반사율값의 범위를 확인하여 건물 최상층의 에너지 저감을 위한 적정 마감재를 선택한다.

④ 에너지 저감량 확인

건물의 지역에 따라 요구되는 지붕의 열관류율값을 토대로, 열 방사율과 태양 반사율값이 적절한 지붕 마감재를 선택하여 건물에 적용한다. 프로젝트 계획단계에서 설정한 초기 지붕 마감재를 대상건물에 적용했을 때 건물의 최상층 냉·난방 부하량과, 대상건물의 지역에 따라 적정 Cool Roof 적용 시 최상층의

냉·난방 부하량을 비교하여, 에너지 저감량을 확인한다.

이러한 내용을 토대로, 신축건물의 최상층 냉·난방 에너지를 저감하고, 건물의 피크부하를 낮춰 설비 시스템의 장비 용량을 저감할 수 있는 친환경적인 지붕 설계 지침을 마련했고, 그 방법은 (그림 6.35)와 같다.



(그림 6.35) 신축건물 지붕 설계 지침

6.2.2 리모델링건물의 Cool Roof 설계 지침

리모델링 건물의 경우, 신축건물과는 달리 지붕의 열관류율값이 결정되어져 있는 상태이므로, 신축건물의 지붕 설계 지침과는 다른 방법으로 설계가 이루어져야 한다.

1) 기존 건물의 열관류율값 확인

리모델링 건물의 지붕을 설계하기 위해, 기존 건물 지붕의 열관류율값을 확인하고, 기존 건물의 열관류율값과 대상 건물의 지역에 따른 적정 열관류율값과 비교한다.

2) 리모델링 시 열관류율값 변경 여부 확인

지역에 따른 지붕의 적정 열관류율값을 기존 건물의 열관류율값과 비교한 후, 리모델링 시 열관류율값의 변경 여부를 판단한다.

리모델링 시 지붕의 열관류율값을 변경하지 않고, 이전의 열관류율값을 적용 할 경우, 단열두께(열관류율)에 따른 적정 열 방사율 값을 확인하고, 열관류율값을 변경할 경우에는 리모델링 건물의 지역을 확인하고, 그에 따른 적정 열관류율값을 확인한다. 지붕의 열관류율값을 변경하기 위해, 기존의 열관류율값에 추가적으로 적용하고자하는 지붕 재료를 선택하고, 적정 두께를 적용하여 리모델링 건물 지붕의 열관류율값을 변경한다.

3) 지붕 마감재료 선택

열관류율값을 변경하지 않고, 기존의 열관류율값을 사용할 경우에는 단열두께(열관류율)에 따른 지붕 마감재의 적정 방사율을 확인하고, 적용 가능한 지붕 마감재의 종류를 파악한다. 또한 지붕의 열관류율값을 그 지역의 적정 값으로 변경했다면, 해당 지역의 적정 열 방사율 값을 갖고 있는 지붕 마감재의 종류를 파악하여, 리모델링 건물에 적용이 적합한지 판단한다.

4) 지붕의 태양 반사율 설정

지붕 마감재의 태양 반사율은 마감재의 표면의 거칠기나 색상 등에 따라 달라진다. 지붕의 열관류율값을 통해 얻어진 적용 가능한 마감재의 종류(열 방사율)를 파악하고, 지역별 적정 태양 반사율 값의 범위를 확인하여 건물 최상층의 에너지 저감을 위한 적정 마감재를 선택한다.

5) 리모델링 건물에 적용

지붕 설계 지침을 통해 리모델링 건물의 지역에 따라 요구되는 지붕의 열관류율값을 토대로, 열 방사율과 태양 반사율 값이 적절한 지붕 마감재를 선택하여 건물에 적용한다. 이러한 설계 지침을 통해 선택한 지붕 마감재를 리모델링 건물에 적용 시 최상층 냉·난방 부하량과, 대상건물의 지역에 따라 적정 Cool Roof 적용 시 최상층의 냉·난방 부하량을 비교하여, 에너지 저감량을

확인한다.

리모델링 건물에 최상층 냉·난방 에너지를 저감하고, 건물의 피크부하를 낮춰 장비 용량의 축소가 가능하게 지붕설계를 도와줄 수 있는 친환경적인 지붕 설계 지침은 (그림 6.36)과 같다.

리모델링 시 Cool Roof 설계 지침	
1 기존 지붕의 열관류율(K-value) 확인	기존 지붕의 단열성능 확인
2 리모델링 시 열관류율 변경 여부 확인	- 미 변경 시 기존 열관류율 적용 - 변경 시 건물의 대상 지역 확인 - 지역에 따른 적정 지붕의 열관류율 설정
3 지붕 마감재료 선택	- 선정한 지붕 재료의 열 방사율 확인 - 지역 적정 방사율과 비교하여 적용 적합성 판단
4 지붕 재료의 색상 선택	- 방사율에 따른 적정 반사율값 선택 - 적용하고자하는 지붕의 색상확인 - 반사율에 따른 적정 색상 선택
5 리모델링 건물 적용	- 선택한 지붕재료 적용 시 에너지 저감 효과 확인 - 건물에 적용

(그림 6.36) 리모델링 시 설계 지침

이러한 친환경적인 지붕설계 지침은 건축주나 설계자들이 지붕 설계 시 쉽게 활용할 수 있도록 마련하였으며, 이러한 설계 지침은 체계화된 지붕 마감재의 태양 반사율 및 열 방사능을 제공 받을 수 있을 때 활용가능하다.

6.3 소결

1) 국내 Cool Roof 도입 시 요구 성능 기준

국내 Cool Roof 도입 시 지역별 지붕의 열관류율에 따른 적정 태양 반사율과 열 방사율은 다음과 같다.

■ 중부 지역의 단열값에 따른 적정 태양 반사율과 열방사율

열관류율 (W/m ² K)	0.346	0.219	0.161	0.127	0.105	0.089	0.078	0.069	0.062
태양 반사율	0.7	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5	0.4	0.3	0.2
열 방사율	0.8	0.8	0.7	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2

- 지붕의 태양 반사율과 열방사율 값이 증가할수록 벽체의 단열값을 저감할 수 있다.
- 냉난방 부하를 모두 고려하여 지붕의 에너지 성능을 향상시키기 위한 지붕의 열관류율은 0.127W/m²K 이고, 이 때 태양 반사율과 열 방사율은 각각 0.6, 0.7 이다.

■ 남부 지역의 단열값에 따른 적정 태양 반사율과 열방사율

열관류율 (W/m ² K)	0.337	0.216	0.159	0.125	0.104	0.088	0.077	0.068	0.061
태양 반사율	0.9	0.8	0.7	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4	0.3
열 방사율	0.9	0.8	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.4

- 지붕의 태양 반사율과 열방사율 값이 증가할수록 벽체의 단열값을 저감할 수 있다.
- 냉난방 부하를 모두 고려하여 지붕의 에너지 성능을 향상시키기 위한 지붕의 열관류율은 $0.159\text{W/m}^2\text{K}$ 이고, 이 때 태양 반사율과 열방사율은 각각 0.7, 0.7 이다.

■ 제주 지역의 단열값에 따른 적정 태양 반사율과 열방사율

열 관류율 ($\text{W/m}^2\text{K}$)	0.410	0.328	0.212	0.157	0.124	0.103	0.088	0.077	0.068
태양 반사율	0.9	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4	0.4
열 방사율	0.9	0.8	0.8	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5	0.4

- 지붕의 태양 반사율과 열방사율 값이 증가할수록 벽체의 단열값을 저감할 수 있다.
- 냉난방 부하를 모두 고려하여 지붕의 에너지 성능을 향상시키기 위한 지붕의 열관류율은 $0.159\text{W/m}^2\text{K}$ 이고, 이 때 태양 반사율과 열방사율은 각각 0.7, 0.7 이다.

2) Cool Roof 설계 지침

- 신축건물에 Cool Roof 적용에 따른 지붕 설계 방안
 - 건물의 규모, 유형, 설계현황 등 프로젝트의 일반정보 수집
 - 대상건물의 위치, 면적, 지붕의 단열값 확인하여 최상층의 부하량 계산
 - Cool Roof 적용 시 요구되는 지역별 지붕의 열관류율값 확인
 - 열관류율값에 적절한 열 방사율값을 갖는 지붕 마감재 선택
 - 지붕 재료의 방사율 값과 단열값을 토대로, 적정 반사율 설정
 - 건물의 계획 초기단계의 최상층 부하량과 Cool Roof 적용에 따른 건물 최상층 부하량을 비교하여 에너지 저감량 확인

- 리모델링 건물의 Cool Roof 설계 지침
 - 건물 지붕의 기존 열관류율 확인하고 리모델링 시 변경여부 파악
 - 열관류율 미 변경 시 기존열관류율 값에 따른 적정 지붕의 열 방사율에 따른 마감재 선택
 - 열관류율 변경 시 건물 대상 지역에 적정 열관류율값을 건물에 적용
 - 지역의 적정 열 방사율값에 적절한 지붕 마감재료 선택
 - 마감재의 적정 태양 반사율값에 맞는 색상 선택
 - 건물에 적절한 지붕 마감재 적용에 따른 에너지 저감효과 확인

제 7 장 결론

오늘날 생활수준의 향상과 기후변화로 인하여 건물에서 사용되는 냉방에너지의 수요가 급격히 증가하고 있다. 특히 건물의 최상층의 경우에는 지붕면에도달하는 과도한 일사부하로 인하여 다른 층에 비해 냉방 부하가 크게 증가하게 된다. 최상층의 과도한 냉방부하는 에너지 소비 증가와 함께 재실자의 쾌적도를 저하시키고 동시에 도시 열섬 현상의 원인이 되기도 한다. 따라서 건물의 에너지절약을 위해서는 지붕의 열성능을 향상시키는 것이 필수적이며, 이를 위해서는 지붕 표면에서의 일사량 조절 및 지붕의 단열성능 향상을 통하여 최상층의 냉방부하를 저감하는 방안이 연구되어야 한다.

본 연구에서는 최근 외국에서 기술개발 및 보급이 본격화되고 있는 Cool Roof에 대하여 이론과 연구동향을 고찰하고 모형실험을 통하여 성능을 파악하였다. 또한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 국내 적용을 위한 에너지 성능 시뮬레이션과 경제성 분석을 실시하였고, 지역별 성능기준과 설계지침을 제시하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) Cool Roof 적용 시 지붕의 온도변화 모형실험

지붕 마감재의 열성능에 따른 모형실험을 통해 각각의 계절 별 온도변화를 확인한 결과, 하절기 온도변화에 많은 영향을 미치는 외부적인 요소는 일사량, 건축적 요소는 마감재의 태양 반사율이며, 동절기 온도변화에 영향을 미치는 외부적인 요소는 천공상태(운량), 건축적 요소는 마감재의 태양 반사율인 것으로 나타났다. 태양 반사율이 높은 Cool Roof는 지붕 표면온도(일반지붕과 비교 시 최대 약 23℃차이)를 낮춰 하절기 내부로 유입되는 일사열을 저감하여, 냉방부하 저감효과를 가져 올 수 있으나, 동절기에는 이러한 열성능으로 인하여 난방부하량을 가중시킬 수 있다.

겨울철 난방부하는 주간보다 야간에 더 많은 량을 요구하며, 야간 난방부하에 영향을 미치는 것은 마감재의 열 방사율인 것으로 실험결과 나타나, Cool Roof 적용에 따른 동절기 난방부하량의 증가는 미미하여, 국내 Cool Roof 적용 시 난방부하량의 증가는 없을 것으로 판단된다.

2) 건물에너지 효율에 영향을 미치는 지붕요소의 민감도 분석

건물 최상층의 에너지 효율에 영향을 미치는 지붕의 열 성능요소를 태양 반사율, 열 방사율, 단열두께로 선정한 후 민감도분석을 실시한 결과, 건물의 냉방부하에 영향을 미치는 지붕의 열 성능요소는 태양 반사율 > 열 방사율 > 단열두께의 순서로 나타났다. 태양 반사율과 열 방사율의 경우 변수를 달리함에 따라 냉방부하량이 변화되지만, 단열두께는 150mm 이상일 경우 냉방부하에 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 또한 난방 부하에 영향을 미치는 지붕의 열 성능 요소에 관해 민감도 분석을 실시한 결과, 단열두께 > 열 방사율 > 태양 반사율의 순서로 나타났다. 건물의 최상층 난방부하는 지붕의 단열 두께에 따라 그 값이 변화하며 210mm 이상일 경우에는 난방부하에 미치는 영향도가 이전보다 감소하는 것으로 나타났다. 지붕의 열 방사율과 태양 방사율의 경우, 최상층 난방 부하에 미치는 영향력은 변수를 달리해도 미미한 것으로 나타났다.

따라서 건물의 지붕 에너지 성능을 향상시켜 건물 최상층의 냉·난방부하량을 저감하기 위해서는 태양 반사율, 열 방사율, 단열성능을 함께 고려해야 한다.

3) Cool Roof의 경제성 분석

Cool Roof의 에너지 절약효과에 따른 경제적 타당성을 분석하기 위해 일반 지붕 마감재를 적용한 건물과 Cool Roof를 적용한 건물 간의 경제성을 분석했다. Cool Roof 적용 시 일반 지붕마감재에 비해 초기투자비는 13% 증가하나, 지속적으로 요구되는 유지관리비와 에너지 사용요금이 10% 절감할 수 있어, Cool Roof 설치 후 2년 이내에 손익 분기점을 넘는 것으로 나타났다([부록 2] 참조). 건물의 생애주기를 65년으로 설정하여 일반 마감재와 Cool Roof 마감의 LCC를 비교한 결과, Cool Roof가 일반 지붕 마감에 대해 약 9% 비용 절감이 가능한 것으로 분석되어 Cool Roof의 국내 적용은 경제성 측면에서 타당한 것으로 판단된다.

4) 국내 Cool Roof 도입 시 요구 성능기준

국내 사무소 건물 지붕에 Cool Roof 도입 시 건물의 냉방 및 난방 부하를 모두 고려하여 지역별 적정 태양 반사율과 열 방사율, 단열성능을 마련하기 위해 에너지 해석 시뮬레이션을 활용하여 분석하였다.

중부지역의 기준 모델의 하절기 관류열획득량은 3.52kW, 겨울철 열손실량은 4.09kW, 남부지역의 하절기 관류열획득량은 4.08kW, 겨울철 열손실량은 4.05kW, 제주지역의 하절기 관류열획득량은 3.9kW, 겨울철 열손실량은 3.15kW인 것으로 나타났다. 그에 따라 각 지역별 지붕의 적정 열성능을 마련하기 위해 ‘서울시 친환경 건축물’ 인증 기준을 기본으로 하여 건물의 에너지 절감률이 40%인 Platinum(I)등급을 활용하였다. 건물 전체의 에너지 절감률을 각 각의 요구되는 에너지량 중 동일한 비율로 절감한다고 가정하고, 지붕을 통해 절감되는 에너지를 40%로 설정한 후 그에 따라 지붕의 적정 열성능을 제안한 결과, 우리나라 지역별 지붕의 적정 열성능 기준은 다음과 같다.

	중부지역	남부지역	제주지역
적정 열관류율	$K = 0.127W/m^2K$	$K = 0.159W/m^2K$	$K = 0.157W/m^2K$
적정 태양 반사율	0.6 이상	0.7 이상	0.7 이상
적정 열 방사율	0.7 이상	0.7 이상	0.7 이상

이러한 지붕의 적정 열성능 기준을 통해 건물 지붕에서의 발생하는 부하량을 저감할 수 있을 것으로 판단된다.

5) Cool Roof 설계지침

신축건물과 리모델링 건물에 각각 Cool Roof 설계 지침을 제안해 건물의 지붕 설계 시 설계자들에게 편의성을 제공하고, 건물 지붕을 통한 에너지 사용저감을 향상시킬 수 있도록 하였다.

■ 신축건물의 Cool Roof 설계 지침

- 중부 지역 $0.127W/m^2K$, 남부 지역 $0.159W/m^2K$, 제주 지역 $0.157W/m^2K$ 로 지붕의 열관류율 설정
- 지붕의 열 방사율은 건축 마감재의 종류에 따라 달라지므로, 지붕의 적정 열 방사율인 0.7 이상인 지붕 마감재료 선택
- 태양 반사율은 지붕 마감재의 표면 마감상태나 색상에 따라 달라지므로, 중부 0.6 이상, 남부 0.7이상, 제주 0.7이상인 마감재 선택

- 일반 지붕 마감재 적용 시와 Cool Roof 적용 시 건물의 부하량을 파악하여 Cool Roof 적용에 따른 에너지 절감률 확인
- 리모델링 건물의 Cool Roof 설계 지침
 - 리모델링 건물의 지붕 열관류율값 변경여부 확인
 - 미변경 시 대상 건물 지붕의 열관류율값을 6.3의 소결의 국내 Cool Roof 도입 시 요구 성능 기준을 참조하여 대상건물과 유사한 열관류율값 확인
 - 기존 열관류율값에 적정한 태양 반사율과 열 방사율을 갖는 지붕 마감재 선택
 - 지붕의 열관류율값 변경 시 신축건물과 동일하게 지역별 적정 열관류율값을 건물 지붕에 도입
 - 지붕의 적정 열 방사율인 0.7 이상인 지붕 마감재료 선택
 - 태양 반사율은 지붕 마감재의 표면 마감상태나 색상에 따라 달라지므로, 중부 0.6 이상, 남부 0.7이상, 제주 0.7이상인 마감재 선택
 - 기존 건물의 지붕을 통한 부하량과 Cool Roof 적용 시 건물의 부하량을 파악하여 Cool Roof 적용에 따른 에너지 절감률 확인

건물의 지붕 마감재로 Cool Roof를 적용 하는 주된 목적은 건물에서의 냉방 부하를 저감하기 위한 것으로, 본 연구는 국내에 Cool Roof 적용을 위해, 대상 건물을 냉방부하가 많이 요구되는 사무소 건물로 한정하여 Cool Roof의 요구 성능을 파악하였다. 그에 따라 본 연구의 진행과정 중 나타난 한계점과 추후 연구 과제를 요약하면 다음과 같다.

- 본 연구에서 제안하는 Cool Roof의 성능 기준은 사무소 건물의 지붕면 전체에서 일사열이 유입됐을 때를 가정한 것으로, 일반적으로 사무소 건물의 지붕에는 냉각탑이나, 물탱크 실 등이 자리한다. 따라서 Cool Roof 적용 시 정확한 에너지 저감 성능을 분석하기 위해서는 실제 일사가 유입되는 지붕면의 단위 면적당 에너지 저감율 분석이 요구된다.
- 본 연구의 Cool Roof의 성능 기준 및 설계지침은 사무소 건물만을 대상으로 한 것이므로, 건물 유형별 지붕의 요구 성능 마련이 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

[국내 논문]

- 권시원, 조일규, 배기선, 오상근, 옥상녹화시스템의 방수재료 및 공법개발에 관한 필요성 분석, 한국건축시공학회 논문집 제4권 1호(통권 11호), 2004.03, pp.111~118
- 김현수, 한국형 Green Roof System 개발을 위한 Prototype 제안, 한국 생태환경건축학회 논문집 Vol.3, Np. 3, 2003.09, pp.3~11
- 김현수, 강재식, 변혜선, 옥상녹화시스템의 개발과 열성능에 관한 기초 연구, 대한건축학회논문집, 제15권 제3호, 1999.03
- 김현수, 이건호, 역전지붕형 녹화옥상시스템 개발 방향에 관한 연구, 대한 건축학회 논문집, 20권 12호(통권194호), 2004.12, pp.219~226
- 박진상, 지붕 방수영 톱코트재의 평가방법 및 품질기준 제안에 관한 연구, 서울산업대 주택대학원, 석사학위논문, 2008.02
- 서승직, 이충국, 최원기, 기하학적 형태의 옥상 녹화 시스템에 관한 연구, 대한건축학회 논문집 19권 10호(통권 180호) 2003.10, pp.177~186
- 신우철, 임득환, 장문석, 백남춘, 지붕 증발냉각시스템의 열성능에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 논문집 16권4호(통권138권), 2000.04, pp.109~115
- 유대중, 경량형 옥상녹화시스템의 냉방부하절감 효과에 관한 연구, 중앙 대학교 대학원, 석사학위 논문, 2007.12
- 윤성환 외, “공동주택의 세대위치별 열부하 특성 분석”, 대한건축학회 논문집(계획계), v.25 n.10, 2009.,10 , pp289~297
- 이상수, 김수련, 광규성, 오상근, 옥상용 합성고분자 시트를 이용한 지붕 노출 시스템 적용에 관한 연구, 한국건축시공학회 학술.기술논문발표회 논문집 : v.5 n.1(통권 제8집), 2005.05, pp179~183
- 장대회, 김현수, 이건호, 박창영, Green Roof System의 다양한 성능 추구를 위한 공법 제시 및 성능 비교 실험 연구, 한국생태환경건축학회 논문집 Vol.6, No.2, 2006.06, pp.59~66

- 전성원, 황정하, 이명호, 옥상잔디식재의 열환경 조절기능에 관한 기초적 연구, 대한건축학회논문집, v.14 n.12, 1998.12, pp.239~248
- 최동호, 이부용, 지붕면 일사차광막 설치에 따른 일사 차폐가 최상층 실내온열환경에 미치는 영향 분석, 대한건축학회논문집 22권 5호(통권 211호), 2006.05, pp.271~278
- 최동호, 이부용, 지붕살수에 의한 증발냉각작용이 최상층 실내 온열환경에 미치는 영향 분석, 대한건축학회논문집 22권 5호(통권 211호), 2006.05, pp.287~294
- 태원진, 냉방부하 최소화를 위한 지붕의 최적기울기에 관한 연구, 한국태양 에너지학회 논문집, vol.25, No. 4, 2005, pp.119~123

[국내 보고서]

- 에너지관리공단, 에너지절약 통계 핸드북 2010.
- 주정유, 축사건축기술서, 농협중앙회 축산건설팀부, 2007102
- 건설교통부, 집합건축물 유지관리 통합 매뉴얼, 2007 102
- 한국구조물진단학회, 콘크리트 구조물의 효율적인 유지관리를 통한 내구수명 확보방안 연구, 건설교통부, 2006.7

[국외 논문]

- A. Spala, H.S. Bagiorags, M.N.Assimakopouls, J. Kalavrouziotis, D. Matthopoulos, G. Mihalakakou, On the green roof system. Selection, state of the art and energy potential investigation of a system installed in an office building in Athens, Greece, Renewable Energy, 33 (2008) 173-177

- Akbari, H., C. Wray, T. T. Xu and R. Levinson (2006) 'Inclusion of solar reflectance and thermal emittance prescriptive requirements for steep-sloped nonresidential roofs in Title 24', http://energy.ca.gov/title24/2008standards/prerulemakingdocuments/2006-05-18_workshop/2006-05-19_NONRESIDENTIAL_STEEP-SLOPED_COOL_ROOFS.PDF33
- Akbari, H., Pomerantz, M., Taha, H., 2001. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy* 70 (3), 295-310.
- Akbari, H., S. Konopacki, D. Parker, B. Wilcox, C. Eley and M. Van Geem (1998) "Calculations in support of SSP90.1 for reflective roofs", *ASHRAE Transactions*, vol 104, no 1B, pp984-99523
- Danny S. Parker, Stephen F. Barkaszi, Jr, Roof solar reflectance and cooling energy use: field research results from Florida, *Energy and Buildings*, 25(1997) 105-115
- H. Akbari, S. Konopacki, M. Pomerantz, Cooling energy savings potential of reflective roofs for residential and commercial buildings in the United States, *Energy* 24 (1999) 391-407
- Hashem Akbari, Ronnen Levinson, Leo Rainer, Monitoring the energy-use effects of cool roofs on California commercial buildings, *Energy and Buildings* 37 (2005) 1007-016
- Levinson, R., H. Akbari, S. Konopacki and S. Bretz (2005a) "Inclusion of cool roofs in nonresidential Title 24 prescriptive requirements", *Energy Policy*, vol 33, no 2, pp151-17031
- Michelle van Tijen and Rebecca Cohen, "Features and Benefits of Cool Roofs: The Cool Roof Rating Council Program", *Journal of Green Building*, Volume 3, Number 2, 2008.02, p.13~19
- Nowak, H., "The influence of atmospheric radiation on the heat balance of low-sloped roofs", *Millimeter Wave and Far-Infrared Technology*, 1989. ICMWFT '89. International Conference, 1989, pp174 - 177

- Parker, D. (2007) Pers comm from Danny Parker, Florida Solar Energy Center, 13 August38
- Paul Berdahl, Sarah E. Bretz, Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing materials, *Energy and Buildings* 25 (1997) 149– 158
- Ronnen Levinson,, Hashem Akbari, Joseph C. Reilly, Cooler tile-roofed buildings with near-infrared-reflective non-white coatings, *Building and Environment* 42 (2007) 2591–.2605
- Ronnen Levinson, Hashem Akbari, Steve Konopacki, Sarah Bretz, Inclusion of cool roofs in nonresidential Title 24 prescriptive requirements, *Energy Policy* 33 (2005) 151–.170
- Rosenfeld, A., Akbari, H., Bretz, S., Fishman, B., Kurn, D., Sailor, D., Taha, H., 1995. Mitigation of urban heat islands: material, utility programs, updates. *Energy and Buildings* 22, 255–65.
- S. Hassid, M. Santamouris, N. Papanikolaou, A. Linardi, N. Klitsikas, C. Georgakis, D.N. Assimakopoulos, The effect of the Athens heat island on air conditioning, *Energy and Buildings* 32(2000).131–141
- Taha, H., Konopacki, S., Akbari, H., 1997. Impacts of lowered urban air temperatures on precursor emission and ozone air quality. *Journal of Air and Waste Management Association* 48, 860–65.
- Taha, H., Konopacki, S., Gabersek, S., 1999. Impacts of large-scale surface modifications on meteorological conditions and energy use: a 10-region modeling study. *Theoretical and Applied Climatology* 62, 175–85.
- Taha, H., Chang, S.-C., Akbari, H., 2000. Meteorological and air quality impacts of heat island mitigation measures in three US cities. LBL-44222. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA.

- Taha, H., 2001. Potential impacts of climate change on tropospheric ozone in California: a preliminary episodic modeling assessment of the Los Angeles Basin and the Sacramento Valley. LBNL-46695. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA.
- Wiig, H. (2007) Pers comm from Howard Wiig, Institutional Energy Analyst, Department of Business, Economic Development and Tourism, Hawaii, 14 June38
- Xiaoxin Wang, Chris Kendrick, Ray ogden, James Maxted, Dynamic thermal simulation of a retail shed with solar reflective coatings, Applied Thermal Engineering 28(2008) 1066-1073

[국외 보고서, 기타]

- ASHRAE (2004a) ASHRAE Standard 90.1-2004: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings, SI Edition, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA26
- ASHRAE (2004b) ASHRAE Standard 90.2-2004: Energy-Efficient Design of Low-Rise Residential Buildings, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA29
- ASHRAE (2007) ASHRAE Standard 90.2-2007: Energy-Efficient Design of Low-Rise Residential Buildings, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA28
- ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) (1999) ASHRAE Standard 90.1-1999: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings, SI Edition, American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA25

- California Energy Commission, 2005 Building Energy Efficiency Standard, Nonresidential Compliance Manual, www.energy.ca.gov
- California Energy Commission Public Interest Energy Research Program, COOL-COLOR ROOFING MATERIAL, <http://www.energy.ca.gov/2006publications/CEC-500-2006-067/CEC-500-2006-067.PDF>
- CEC (California Energy Commission) (2001) 2001 Energy Efficiency Standards for Residential and Nonresidential Buildings, P400-01-024, California Energy Commission, Sacramento, CA30
- CEC, 2000. California Energy Demand, 2000-2010. P200-00—02. California Energy Commission, Sacramento, CA.
- Chicago (2001) ‘Amendment of Title 18 of Municipal Code of Chicago Concerning Energy Efficiency Requirements’, Journal of the City Council of Chicago, 6 June, p6093937
- Eilert, P. (2000) High Albedo (Cool) Roofs: Codes and Standards Enhancement (CASE) Study, Pacific Gas & Electric report, www.energy.ca.gov/title24/2001standards/associated_documents/2000-11-17_PGE_CASE.PDF30
- Eley Associates (2003b) Hawaii Commercial Building Guidelines for Energy Efficiency, www.archenergy.com/library/general/hawaiiigl39
- Eley Associates (2007) Guam Building Energy Code, <http://eley.com/guam39>
- Energy Gauge (2007) EnergyGauge USA FlaRes2007 Energy and Economic Analysis Software, www.energygauge.com37
- EPA (US Environmental Protection Agency) (2007) Roof Products Criteria for US EPA Energy Star Program, www.energystar.gov/index.cfm?c=roof_prods.pr_crit_roof_products39
- EPA ENERGY STAR® Roof Product List, “Roof Product List Current as of April 06, 2009”, 2009
- FBC (2004) 2004 Florida Building Code, Florida Building Commission, Tallahassee, FL, www.floridabuilding.org38

- FBC (2007) Proposed Modification to the Florida Building Code: Chapter 11, Energy Efficiency, www.dca.state.fl.us/FBC/thecode/Res_Chapter_11.rtf37
- FBC (Florida Building Commission) (2001) 2001 Florida Building Code, Florida Building Commission, Tallahassee, FL, www.floridabuilding.org37
- GBC (2005) Leadership in Energy and Environmental Design Green Building Rating System for New Construction and Major Renovations (LEED-NC), Version 2.2, US Green Building Council, www.usgbc.org41
- GBC (US Green Building Council) (2001) Leadership in Energy and Environmental Design Green Building Rating System for New Construction and Major Renovations (LEED-NC), Version 2.0, US Green Building Council, www.usgbc.org40
- ICC (2006) 2006 International Energy Conservation Code, www.iccsafe.org35
- ICC (International Code Council) (2003) 2003 International Energy Conservation Code, www.iccsafe.org35
- LEED for New Construction and Major Renovation Version 2.2 Registered Project Checklist
- MICROPAS (2007) MICROPAS product website, <http://micropas.com>33
- PG&E (Pacific Gas & Electric) (2007) Pacific Gas & Electric Cool-Roof Rebate Program, www.pge.com/myhome/saveenergymoney/rebates/remodeling/coolroof42
- ROH (2004) Revised Ordinances of Honolulu, City and County of Honolulu38
- SCE (Southern California Edison) (2007) Southern California Edison Cool-Roof Rebate Program, www.sce.com/RebatesandSavings/Residential/_Heating+and+Cooling/CoolRoof42
- SMUD (Sacramento Municipal Utility District) (2007) Sacramento Municipal Utility District Residential Cool-Roof Program, www.smud.org/rebates/cool%20roofs42
- Stuart Gaffin, Cynthia Rosenzweig, Lily Parshall, David Beattie, Robert Berghage, Greg O'Keefe1, Dan Braman, Energy Balance Modeling

Applied to a Comparison of White and Green Roof Cooling Efficiency,
<http://www.roofmeadow.com/technical/publications/GaffinetalPaperDC-0009.pdf>

- Swami, M. (2007) Pers comm from Muthusamy Swami, Florida Solar Energy Commission, Developer of FLA/COM performance compliance software, 14 June38
- Wray, C., H. Akbari, T. T. Xu and R. Levinson (2006) Inclusion of Solar Reflectance and Thermal Emittance Prescriptive Requirements for Residential Roofs in Title 24, www.energy.ca.gov/title24/2008standards/prerulemaking/documents/2006-05-18_workshop/2006-05-17_RESIDENTIAL_ROOFS.PDF33

[Web Site]

- <http://www.astm.org>
- <http://www.burbankca.org>
- http://www.buytnm.com/data/board/b08_78_b08_78_Emissivity.pdf
- <http://www.cyber.kepco.co.kr97>
- <http://www.coolroofs.org>
- <http://www.consumerenergycenter.org/coolroof/index.html>
- <http://www.ornl.gov/sci/roofs+ walls/facts/CoolCalcEnergy.htm>
- <http://www.roofcalc.com>
- <http://www.translate.googleusercontent.com>

[부 록 1]

■ ENERGY STAR®의 Cool Roof 마감의 열성능

▪ 아스팔트 루핑 지붕재의 태양 반사성능 및 열 방사성능

Product	Solar Reflectance	Infrared Emittance	Temperature Rise	Solar Reflectance Index	Reference
Gray EPDM	0.23	0.87	38 ℃	21	FSEC 1
White EPDM	0.69	0.87	14 ℃	84	FSEC 1
Black EPDM	0.06	0.86	46 ℃	-1	FSEC 1
Hypalon	0.76	0.91	10 ℃	95	FSEC 1
T-EPDM	0.81	0.92	7 ℃	102	FSEC 1
Fire stone SBS Bitumen on White	0.26	0.92	35 ℃	28	FSEC 1
Smooth Bitumen	0.06	0.86	46 ℃	-1	FSEC 1
White Granular Surface Bitumen	0.26	0.92	35 ℃	28	FSEC 1
Carlisle Syntec System Brite-Ply	0.77	0.9	9 ℃	96	LBNL 1
EcologyRoof	0.8	0.9	8 ℃	100	LBNL 1
HypsamRoofing Systems, Hyload	0.75	0.9	11 ℃	93	LBNL 1
Sarnafil Beige	0.43	0.92	27 ℃	49	LBNL 4
Sarnafil Blue	0.61	0.92	18 ℃	73	LBNL 4
Sarnafil White	0.83	0.92	6 ℃	104	LBNL 4
StevensHi-TuffEP white	0.78	0.9	9 ℃	97	LBNL 1
Trocal Roofing Systems, White	0.77	0.9	9 ℃	96	LBNL 1

Product	Solar Reflectance	Infrared Emittance	Temperature Rise	Solar Reflectance Index	Reference
Trocal Roofing Systems, White	0.83	0.9	6 °C	104	LBNL 1
Dark gravel on BUR roof	0.12	0.9	42 °C	9	Reagan
Light gravel on BUR roof	0.34	0.9	32 °C	37	Reagan
White-coated gravel on BUR	0.65	0.9	16 °C	79	Reagan

▪ 흰색 지붕 코팅재의 태양 반사성능 및 열 방사성능

Product	Solar Reflectance	Infrared Emittance	Temperature Rise	Solar Reflectance Index	Reference
KoolSeal Elasto-metric on hinges	0.71	0.91	12 °C	88	FSEC 1
Henry White Coating on Shingle	0.71	0.9	13 °C	87	LBNL 2
Aged Elasto-metric on plywood	0.73	0.86	12 °C	89	FSEC 1
Flex-tec Elasto-metric on Shingles	0.65	0.89	16 °C	79	FSEC 1
New Insultec on wood, thickness 0.5mm	0.841	0.89	6 °C	106	DSET 1
Insultec on metal swatch	0.78	0.9	9 °C	97	FSEC 1
Enerchron on metal swatch	0.77	0.91	9 °C	96	FSEC 1
White Coating (1coat,8mils)	0.8	0.91	8 °C	100	LBNL 2
White Coating (2 coats, 20 mils)	0.85	0.91	5 °C	107	LBNL 2
Triangle Coatings, Toughkote	0.85	0.91	5 °C	107	LBNL 1

Product	Solar Reflectance	Infrared Emittance	Temperature Rise	Solar Reflectance Index	Reference
Triangle Coatings, Trilastic	0.83	0.91	6 °C	104	LBNL 1
Triangle Coatings, high reflectance 7	0.84	0.91	6 °C	106	LBNL 1
National Coatings, Acryshield	0.83	0.91	6 °C	104	LBNL 1
Utrecht acrylic, titanium white	0.83	0.91	6 °C	104	LBNL 1
Guard coat, white	0.74	0.91	11 °C	92	LBNL 1
Koolseal elastomeric	0.81	0.91	7 °C	102	LBNL 1
MCI, elastomeric	0.8	0.91	8 °C	100	LBNL 1
Nexus/Visuron elastomeric	0.851	0.9	5 °C	107	LBNL 4

▪ 흰색 지붕 코팅재의 두께에 따른 태양 반사성능 및 열 방사성능

Product	Solar Reflectance	Infrared Emittance	Temperature Rise	Solar Reflectance Index	Reference
White Coating 1 (76.2 um)	0.6	0.91	18 °C	72	ORNL 1
White Coating1 (191 um)	0.72	0.91	12 °C	89	ORNL 1
White Coating1 (356 um)	0.77	0.91	9 °C	96	ORNL 1
White Coating1 (660 um)	0.79	0.91	8 °C	99	ORNL 1
White Coating2 (381 um)	0.81	0.91	7 °C	102	ORNL 1
White Coating2 (889 um)	0.81	0.91	7 °C	102	ORNL 1
White Coating2 (1143um)	0.82	0.91	7 °C	103	ORNL 1

Product	Solar Reflectance	Infrared Emittance	Temperature Rise	Solar Reflectance Index	Reference
White Coating3 (152 um)	0.68	0.91	14 °C	83	ORNL 1
White Coating3 (254 um)	0.75	0.91	11 °C	93	ORNL 1
White Coating3 (304 um)	0.78	0.91	9 °C	97	ORNL 1
White Coating3 (381 um)	0.77	0.91	9 °C	96	ORNL 1
White Coating3 (686 um)	0.8	0.91	8 °C	100	ORNL 1
White Coating3 (1143um)	0.8	0.91	8 °C	100	ORNL 1
White Coating4 (127 um)	0.68	0.91	14 °C	83	ORNL 1
White Coating4 (279 um)	0.78	0.91	9 °C	97	ORNL 1
White Coating4 (508 um)	0.8	0.91	8 °C	100	ORNL 1
White Coating4 (1143 um)	0.8	0.91	8 °C	100	ORNL 1

▪ 착색 지붕 코팅재의 태양 반사성능 및 열 방사성능

Product	Solar Reflectance	Infrared Emittance	Temperature Rise	Solar Reflectance Index	Reference
White Coating (1 coats, 8 mils)	0.8	0.91	8 °C	100	LBNL 2
White Coating (2 coats, 20 mils)	0.85	0.91	5 °C	107	LBNL 2
No pigment (1 coats, 18 mils)	0.36	0.91	31 °C	40	LBNL 2
No pigment (2 coats, 36 mils)	0.54	0.91	21 °C	64	LBNL 2
Raw Cotton (1coats,8 mils)	0.74	0.91	11 °C	92	LBNL 2

Product	Solar Reflectance	Infrared Emittance	Temperature Rise	Solar Reflectance Index	Reference
Raw Cotton (2 coats, 26 mils)	0.79	0.91	8 °C	99	LBNL 2
Gray Goods (1coats,8 mils)	0.4	0.91	28 °C	45	LBNL 2
Gray Goods (2 coats, 18 mils)	0.4	0.91	28 °C	45	LBNL 2
Desert Ridge (1 coats, 14 mils)	0.36	0.91	31 °C	40	LBNL 2
Desert Ridge (2 coats, 30 mils)	0.36	0.91	31 °C	40	LBNL 2
Red Pot (1 coats, 10 mils)	0.16	0.91	40 °C	14	LBNL 2
Red Pot (2 coats, 22 mils)	0.17	0.91	39 °C	16	LBNL 2
Charcoal Blue (1 coats, 16 mils)	0.12	0.91	42 °C	9	LBNL 2
White Stucco (2 coats, 86 mils)	0.67	0.91	14 °C	82	LBNL 2

▪ 알루미늄 지붕 코팅재의 태양 반사성능 및 열 방사성능

Product	Solar Reflectance	Infrared Emittance	Temperature Rise	Solar Reflectance Index	Reference
Aluminum	0.61	0.25	27 °C	50	FSEC 1
Lomiton Shingle	0.54	0.42	28 °C	46	FSEC 1
Premium nonfibred on black	0.56	0.41	27 °C	48	LBNL 1
Premium nonfibred on a rough surface	0.55	0.42	28 °C	47	LBNL 1
Non-fibred on black	0.52	0.44	29 °C	43	LBNL 1
Fibred on black	0.4	0.56	34 °C	30	LBNL 1

Product	Solar Reflectance	Infrared Emittance	Temperature Rise	Solar Reflectance Index	Reference
Premium fibered on a rough surface	0.37	0.58	36 °C	26	LBNL 1
Emulsion on a rough surface	0.3	0.67	38 °C	21	LBNL 1

▪ 금속 지붕재의 태양 반사성능 및 열 방사성능

Product	Solar Reflectance	Infrared Emittance	Temperature Rise	Solar Reflectance Index	Reference
New, bare galvanized steel	0.61	0.04	30°C	46	FSEC1
Aluminum	0.61	0.25	26°C	56	FSEC1
MBCI Siliconized Polyester White	0.59	0.85	20°C	71	FSEC1
Atlanta Metal Products Kynar Snow White	0.67	0.85	15°C	82	FSEC1

▪ 아스팔트 싱글의 두께에 따른 태양 반사성능 및 열 방사성능

Product	Solar Reflectance	Infrared Emittance	Temperature Rise	Solar Reflectance Index	Reference
White	0.21	0.91	38 °C	21	LBNL 1
ISP K-711 White	0.36	0.91	31 °C	40	LBNL 2
ISP K-711 White	0.31	0.91	33 °C	34	FSEC 1
Shast White	0.26	0.91	36 °C	27	FSEC 1
Generic White	0.25	0.91	36 °C	26	FSEC 1
Generic Grey	0.22	0.91	37 °C	22	FSEC 1
Antique Silver	0.2	0.91	38 °C	19	LBNL 1

Product	Solar Reflectance	Infrared Emittance	Temperature Rise	Solar Reflectance Index	Reference
Aspen Gray	0.18	0.91	39 °C	17	FSEC 1
Ocean Gray	0.12	0.91	42 °C	9	FSEC 1
Gray	0.08	0.91	44 °C	4	LBNL 1
Beachwood Sand	0.2	0.91	38 °C	19	FSEC 1
Light Brown	0.19	0.91	39 °C	18	LBNL 1
Medium Lt. Brown	0.1	0.91	43 °C	7	LBNL 1
Medium Brown	0.12	0.91	42 °C	9	LBNL 1
Autumn Brown	0.1	0.91	43 °C	7	FSEC 1
Dark Brown	0.08	0.91	44 °C	4	LBNL 1
Green	0.19	0.91	39 °C	18	LBNL 1
Surf Green	0.16	0.91	40 °C	14	FSEC 1
Onyx Black	0.03	0.91	46 °C	-2	FSEC 1
Island Brown	0.09	0.91	43 °C	6	FSEC 1
Weathered Wood	0.08	0.91	44 °C	4	FSEC 1
Coral	0.16	0.91	40 °C	14	LBNL 1
Saddle Tan	0.16	0.91	40 °C	14	LBNL 1
Desert Tan	0.12	0.91	42 °C	9	FSEC 1

▪ 기와지붕의 태양 반사성능 및 열 방사성능

Product	Solar Reflectance	Infrared Emittance	Temperature Rise	Solar Reflectance Index	Reference
red clay tile	0.33	0.9	58F	20 °C	FSEC 1
red concrete tile	0.18	0.91	71F	9 °C	FSEC 1
unpainted cement tile	0.25	0.9	65F	14 °C	FSEC 1

Product	Solar Reflectance	Infrared Emittance	Temperature Rise	Solar Reflectance Index	Reference
white concrete tile	0.73	0.9	21F	50 °C	FSEC 1
concrete tile, light beige coating	0.63	0.9	30F	42 °C	LBNL 4
concrete tile, light brown coating	0.42	0.9	50F	27 °C	LBNL 4
concrete tile, pale bluish purple (mauve)	0.41	0.9	51F	26 °C	LBNL 4
concrete tile, pink & gray coating	0.53	0.9	40F	35 °C	LBNL 4
concrete tile, off-white coating	0.74	0.9	20F	51 °C	LBNL 5
fiber cement, earth brown color	0.26	0.9	64F	15 °C	LBNL 5
fiber cement, pewter gray color	0.25	0.9	65F	14 °C	LBNL 5

[부 록 2]

■ 일반지붕과 Cool Roof 마감 지붕의 누적 LCC

년	누적 LCC		
	일반지붕	Cool Roof	차액
1	15,503,255	15,642,181	138,926
2	22,893,441	22,147,825	-745,615
3	30,172,260	28,555,433	-1,616,827
4	37,341,392	34,866,482	-2,474,910
5	45,885,512	42,757,687	-3,127,825
6	52,840,202	48,879,962	-3,960,241
7	59,690,089	54,909,977	-4,780,113
8	66,436,752	60,849,123	-5,587,630
9	73,081,747	66,698,769	-6,382,978
10	81,001,204	74,013,046	-6,988,158
11	87,447,435	79,687,719	-7,759,716
12	93,796,525	85,276,878	-8,519,647
13	100,049,937	90,781,812	-9,268,126
14	106,209,115	96,203,789	-10,005,326
15	119,920,088	110,179,605	-9,740,484
16	125,895,034	115,439,401	-10,455,633
17	131,779,940	120,619,935	-11,160,005
18	137,576,164	125,722,401	-11,853,763
19	143,285,042	130,747,976	-12,537,066
20	150,088,842	137,031,851	-13,056,991
21	155,626,957	141,907,102	-13,719,855
22	161,081,616	146,708,886	-14,372,731
23	166,454,077	151,438,309	-15,015,767
24	171,745,577	156,096,463	-15,649,114
25	178,051,950	161,920,923	-16,131,027
26	183,185,172	166,439,743	-16,745,429
27	188,241,040	170,890,467	-17,350,573
28	193,220,718	175,274,121	-17,946,597
29	198,125,355	179,591,716	-18,533,640
30	209,043,592	190,720,850	-18,322,742
31	213,801,523	194,909,298	-18,892,225
32	218,487,755	199,034,628	-19,453,126
33	223,103,367	203,097,792	-20,005,575
34	227,649,425	207,099,727	-20,549,699

년	누적 LCC		
	일반지붕	Cool Roof	차액
35	233,067,385	212,103,663	-20,963,722
36	237,477,462	215,985,892	-21,491,570
37	241,821,082	219,809,618	-22,011,464
38	246,099,246	223,575,723	-22,523,523
39	250,312,941	227,285,075	-23,027,866
40	255,334,792	231,923,172	-23,411,620
41	259,422,447	235,521,571	-23,900,877
42	263,448,504	239,065,743	-24,382,761
43	267,413,890	242,556,507	-24,857,383
44	271,319,520	245,994,668	-25,324,853
45	280,013,862	254,856,950	-25,156,912
46	283,802,668	258,192,268	-25,610,400
47	287,534,379	261,477,326	-26,057,053
48	291,209,854	264,712,879	-26,496,975
49	294,829,943	267,899,674	-26,930,269
50	299,144,339	271,884,377	-27,259,961
51	302,656,144	274,975,850	-27,680,294
52	306,115,028	278,020,736	-28,094,292
53	309,521,789	281,019,737	-28,502,052
54	312,877,212	283,973,545	-28,903,667
55	316,876,181	287,666,925	-29,209,256
56	320,131,237	290,532,379	-29,598,858
57	323,337,241	293,354,653	-29,982,588
58	326,494,933	296,134,396	-30,360,537
59	329,605,040	298,872,250	-30,732,789
60	336,528,463	305,929,407	-30,599,056
61	339,545,541	308,585,367	-30,960,174
62	342,517,154	311,201,303	-31,315,850
63	345,443,986	313,777,819	-31,666,167
64	348,326,712	316,315,508	-32,011,204
65	351,762,324	319,488,582	-32,273,743

국 문 초 록

Cool Roof 시스템의 성능기준 및 설계지침에 관한 연구

김 옥

중앙대학교 대학원

건축학과 건축계획 및 환경전공

지도교수 이 언 구

오늘날 생활수준의 향상과 기후변화로 인하여 건물에서 사용되는 냉방에너지의 수요가 급격히 증가하고 있다. 특히 건물의 최상층의 경우에는 지붕면에 도달하는 과도한 일사부하로 인하여 다른 층에 비해 냉방 부하가 크게 증가하게 된다. 최상층의 과도한 냉방부하는 에너지 소비 증가와 함께 재실자의 쾌적도를 저하시키고 동시에 도시 열섬 현상의 원인이 되기도 한다. 따라서 건물의 에너지절약을 위해서는 지붕의 열성능을 향상시키는 것이 필수적이며, 이를 위해서는 지붕 표면에서의 일사량 조절 및 지붕의 단열성능 향상을 통하여 최상층의 냉방부하를 저감하는 방안이 연구되어야 한다.

본 연구에서는 최근 외국에서 기술개발 및 보급이 본격화되고 있는 Cool Roof에 대하여 이론과 연구동향을 고찰하고 모형실험을 통하여 성능을 파악하였다. 또한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 국내 적용을 위한 에너지 성능 시뮬레이션과 경제성 분석을 실시하였고, 지역별 성능기준과 설계지침을 제시하였다.

1) Cool Roof 적용 시 지붕의 온도변화 모형실험

지붕 마감재의 열성능에 따른 모형실험을 통해 각각의 계절 별 온도변화를 확인한 결과, 하절기 온도변화에 많은 영향을 미치는 외부적인 요소는 일사량, 건축적 요소는 마감재의 태양 반사율이며, 동절기 온도변화에 영향을 미치는 외부적인 요소는 천공상태(운량), 건축적 요소는 마감재의 태양 반사율인 것으로 나타났다. 태양 반사율이 높은 Cool Roof는 지붕 표면온도(일반지붕과 비교 시 최대 약 23℃차이)를 낮춰 하절기 내부로 유입되는 일사열을 저감하여, 냉방부하

저감효과를 가져 올 수 있으나, 동절기에는 이러한 열성능으로 인하여 난방부하량을 가중시킬 수 있다.

2) 건물에너지 효율에 영향을 미치는 지붕요소의 민감도 분석

건물 최상층의 에너지 효율에 영향을 미치는 지붕의 열 성능요소를 태양 반사율, 열 방사율, 단열두께로 선정한 후 민감도분석을 실시한 결과, 건물의 냉방부하에 영향을 미치는 지붕의 열 성능요소는 태양 반사율 > 열 방사율 > 단열두께의 순서로 나타났다. 또한 난방 부하에 영향을 미치는 지붕의 열 성능요소에 관해 민감도 분석을 실시한 결과, 단열두께 > 열 방사율 > 태양 반사율의 순서로 나타났다. 지붕의 열 방사율과 태양 방사율의 경우, 최상층 난방부하에 미치는 영향력은 변수를 달리해도 미미한 것으로 나타났다.

따라서 건물의 지붕 에너지 성능을 향상시켜 건물 최상층의 냉·난방부하량을 저감하기 위해서는 태양 반사율, 열 방사율, 단열성능을 함께 고려해야 한다.

3) Cool Roof의 경제성 분석

Cool Roof의 에너지 절약효과에 따른 경제적 타당성을 분석하기 위해 일반 지붕 마감재를 적용한 건물과 Cool Roof를 적용한 건물 간의 경제성을 분석했다. Cool Roof 적용 시 일반 지붕마감재에 비해 초기투자비는 13% 증가하나, 지속적으로 요구되는 유지관리비와 에너지 사용요금이 10% 절감할 수 있어, Cool Roof 설치 후 2년 이내에 손익 분기점을 넘는 것으로 나타났다([부록 2]참조). 건물의 생애주기를 65년으로 설정하여 일반 마감재와 Cool Roof 마감의 LCC를 비교한 결과, Cool Roof가 일반 지붕 마감에 대해 약 9% 비용 절감이 가능한 것으로 분석되어 Cool Roof의 국내 적용은 경제성 측면에서 타당한 것으로 판단된다.

4) 국내 Cool Roof 도입 시 요구 성능기준

국내 사무소 건물 지붕에 Cool Roof 도입 시 건물의 냉방 및 난방 부하를 모두 고려하여 지역별 적정 태양 반사율과 열 방사율, 단열성능을 마련하기 위해 에너지 해석 시뮬레이션을 활용하여 분석하였다.

지역별 지붕의 적정 열성능을 마련하기 위해 ‘서울시 친환경 건축물’ 인증

기준을 기본으로 하여 건물의 에너지 절감률이 40%인 Platinum(I)등급을 활용하였다. 건물 전체의 에너지 절감률을 각 각의 요구되는 에너지량 중 동일한 비율로 절감한다고 가정하고, 지붕을 통해 절감되는 에너지를 40%로 설정한 후 그에 따라 지붕의 적정 열성능을 제안한 결과, 우리나라 지역별 지붕의 적정 열성능 기준은 다음과 같다.

	중부지역	남부지역	제주지역
적정 열관류율	$K = 0.127W/m^2K$	$K = 0.159W/m^2K$	$K = 157W/m^2K$
적정 태양 반사율	0.6 이상	0.7 이상	0.7 이상
적정 열 방사율	0.7 이상	0.7 이상	0.7 이상

이러한 지붕의 적정 열성능 기준을 통해 건물 지붕에서의 발생하는 부하량을 저감할 수 있을 것으로 판단된다.

5) Cool Roof 설계지침

신축건물과 리모델링 건물에 각각 Cool Roof 설계 지침을 제안해 건물의 지붕 설계 시 설계자들에게 편의성을 제공하고, 건물 지붕을 통한 에너지 사용저감을 향상시킬 수 있도록 하였다.

■ 신축건물의 Cool Roof 설계 지침

- 지역별 지붕의 적정 열관류율 설정
- 지붕의 적정 열 방사율인 0.7 이상인 지붕 마감재료 선택
- 태양반사율 중부 0.6 이상, 남부 0.7이상, 제주 0.7이상인 마감재 선택
- 일반 지붕 마감재 적용 시와 Cool Roof 적용 시 건물의 부하량을 파악하여 Cool Roof 적용에 따른 에너지 절감률 확인

■ 리모델링 건물의 Cool Roof 설계 지침

- 리모델링 건물의 지붕 열관류율값 변경여부 확인
- 미변경 시 대상 건물 지붕의 열관류율값을 6.3의 소결의 국내 Cool Roof 도입 시 요구 성능 기준을 참조하여 대상건물과 유사한 열관류율값 확인
- 기존 열관류율값에 적정한 태양 반사율과 열 방사율을 갖는 지붕 마감재 선택

- 지붕의 열관류율값 변경 시 신축건물과 동일하게 지역별 적정 열관류율값을 건물 지붕에 도입
- 지붕의 적정 열 방사율인 0.7 이상인 지붕 마감재료 선택
- 태양 반사율 중부 0.6 이상, 남부 0.7이상, 제주 0.7이상인 마감재 선택
- 기존 건물의 지붕을 통한 부하량과 Cool Roof 적용 시 건물의 부하량을 파악하여 Cool Roof 적용에 따른 에너지 절감률 확인

본 연구는 지붕을 통해 발생하는 냉방에너지 저감방안으로 Cool Roof의 국내 적용을 위한 요구 성능 기준 및 설계 지침을 제안했으며, 향후 본 논문의 연구결과를 고려하여 우리나라 지역에 따른 지붕 마감재의 적정 단열성능과 태양 반사율과 열 방사율, 적정 단열성능을 건물에 적용한다면, 건물의 지붕을 통해 유입되는 많은 양의 에너지를 저감할 수 있을 것으로 기대된다.

ABSTRACT

A Study on the Performance Standards and Design Guidelines of Cool Roof System

Ok Kim

Department of Architecture

The Graduate School of Chung-Ang University

Advised by Prof. Eon Ku Rhee, Ph.D.

Today, with the improvement in living standards and climate change, the demand for cooling energy is rapidly increasing. Especially in case of the top floor of a building, the cooling load will increase greatly due to the excessive solar radiation on the roof compared to other floors. Excessive cooling load of the top floor decreases the occupant's comfort with an increase in energy consumption, and also it is a cause of urban heat island phenomenon at the same time. Therefore, it is essential to improve the thermal performance of the building roofs for energy conservation, and we should study the methods for reducing the cooling load of the top floor through the adjustment of insolation on the roof surface and the improvement of the roof insulation performance.

In this study, I examined the theory and research trends regarding Cool Roof that begins in earnest for the technology development and dissemination in foreign countries, and investigated performance through model experiments. In addition, through computer simulations, I conducted energy performance simulations and economical efficiency analysis for the domestic application and then I proposed performance standards and design guidelines by region.

1) Model testing for temperature changes of Cool Roof.

According to the results of identifying seasonal changes in temperature by model experiments for the thermal performance of the roof finishing materials, it showed that insolation was the most significant external factor that affects temperature changes in summer and the architectural factor was solar reflectance of the finishing material. And the most

significant external factor in winter was sky conditions (amount of clouds) and the architectural factor was solar reflectance of the finishing material, respectively. Since Cool Roof having a higher solar reflectance reduces the temperature of the roof surface (up to 23°C difference compared to the general roofs), it can have the effect of lowering the cooling load in summer by reducing insolation thermal flows into the interior, but it can increase the heating load in winter by this thermal performance.

2) Sensitivity analysis of the roof factors affecting the energy efficiency of the building.

After selecting solar reflectance, thermal emittance and insulation thickness as the thermal performance factors of the roof affecting the energy efficiency of the top floor of the building, we conducted the sensitivity analysis. The result showed that the most significant thermal performance factors of the roof affecting the cooling load of the building were in the order of solar reflectance, thermal emittance, and insulation thickness. In addition, the result of conducting the sensitivity analysis on the thermal performance factors of the roof affecting the heating load showed that the factors were in the order of insulation thickness, thermal emittance, and solar reflectance. For thermal emittance and solar reflectance of the roof, their effects on the heating load of the top floor were insignificant even with the changed variables.

Thus, in order to improve energy performance of the building roof and reduce the heating and cooling loads of the top floor of a building, we should consider solar reflectance, thermal emittance and insulation performance together.

3) Economic evaluation of Cool Roof

In order to analyze the economic feasibility of energy savings by applying Cool Roof, I examined the economical efficiency comparison between the roof of general finishing materials and the roof finished with Cool Roof. When applying Cool Roof, the initial investment increases by 13% compared to the general roof finishing materials, but you can reduce the ongoing maintenance costs and energy costs by 10%, and reach the break-even point within two years after the installation of Cool Roof

(refer to [Appendix 2]). According to the analysis result of comparing the LCC between the general and Cool Roof finishing materials with the life cycle of a building set to 65 years, it showed that it is possible to save the cost about 9% by applying Cool Roof rather than general finishing materials. Therefore, domestic application of Cool Roof is considered feasible in terms of economical efficiency.

4) Required performance standards of Cool Roof in Korea

Taking into account both the cooling and heating loads of the building when applying Cool Roof on the office building roofs in Korea, I used Energy Analysis Simulation for the analysis in order to provide optimal solar reflectance, thermal emittance and insulation performance by region.

Accordingly, in order to provide optimal thermal performance of the roof by each region, Platinum (I) ratings in which the building's energy-saving rate is 40% were used based on the certification criteria of 'Eco-friendly buildings in Seoul'. Assuming that the entire building's energy-saving is achieved by the same rate for each amount of required energy, and the energy-saving rate through the roof is set at 40%, I have proposed the criteria for optimal thermal performance of the roof by region in Korea as follows.

	Central Region	Southern Region	Jeju Region
Optimal K-value	$K = 0.127\text{W/m}^2\text{K}$	$K = 0.159\text{W/m}^2\text{K}$	$K = 157\text{W/m}^2\text{K}$
Optimal Solar Reflectance	Above 0.6	Above 0.7	Above 0.7
Optimal Thermal Emittance	Above 0.7	Above 0.7	Above 0.7

Using these optimal thermal performance criteria of the roof, I think that we will be able to reduce the loads generated from the building roofs.

5) Cool Roof Design Guidelines

By proposing the Cool Roof design guidelines for new buildings and renovating buildings respectively, we will be able to support the designers in designing the building roofs and reducing the energy usage through the building roofs.

- Cool Roof design guideline for the new buildings
 - Set optimum heat transmission coefficient(K-value) each region of the roof
 - Select the roof finishing material with the thermal emittance above 0.7
 - Select the roof finishing material with the solar reflectance above 0.6 for the central region, above 0.7 for the southern and Jesu region
 - Check the energy-saving efficiency due to the application of Cool Roof by determining the difference of the building loads between applying the general roof finishing material and applying Cool Roof finishing material.
- Cool Roof design guidelines for the renovating buildings
 - Check if the heat transmission coefficient (K-value) of the renovating building roof is to be changed.
 - If not to be changed, determine K-value similar to the target building with reference to the performance criteria required when applying Cool Roof in Korea sintered at 6.3 as the overall heat transfer rate of the target building roof.
 - Select the roof finishing material with the optimal solar reflectance and thermal emittance for the existing K-value.
 - If K-value of the roof to be changed, apply the optimal K-value by region to the building roof in the same way as the new building.
 - Select the roof finishing material with the thermal emittance above 0.7
 - Select the roof finishing material with the solar reflectance above 0.6 for the central region, above 0.7 for the southern and Jesu region
 - Check the energy-saving efficiency due to the application of Cool Roof by determining the difference of the building loads between applying the existing roof and applying Cool Roof.

In this study, I have proposed performance criteria and design guidelines required for domestic application of Cool Roof as a way of reducing the cooling energy consumption through the roof. In the future, considering the research of this paper, I expect that the energy reduction through the roofs will be improved by applying the optimal solar reflectance, thermal emittance and proper insulation performance of the roof finishing materials to the buildings in the region of Korea.