

第 123 回 碩士學位論文

指導教授 李 彦 求

指導教授 朴 辰 哲

에너지 절약을 고려한 비용최적화 모델
개발에 관한 연구 - 공장건물을 중심으로

A Study on Development of Cost Optimal
and Energy Saving Building Model
: focused on Industrial Building

中央大學校 大學院

建築學科 建築環境計劃專攻

김 혜 연

2015年 8月

에너지 절약을 고려한 비용최적화 모델
개발에 관한 연구 - 공장건물을 중심으로

A Study on Development of Cost Optimal
and Energy Saving Building Model
: focused on Industrial Building

이 論文을 碩士學位論文으로 提出함.

2015年 8月

中央大學校 大學院
建築學科 建築環境計劃專攻

김 혜 연

金慧然의 碩士學位論文으로 認定함.

審査委員長 _____ ㉠

審査委員 _____ ㉠

審査委員 _____ ㉠

中央大學校 大學院

2015年 8月

목 차

제 1 장 서 론	1
1.1 연구의 배경 및 목적	1
1.2 연구의 범위 및 방법	3
제 2 장 건물의 성능과 최적화에 관한 고찰	5
2.1 성능을 고려한 디자인 방법론	5
2.2 최적화 기법의 종류와 특징	6
2.3 건물에너지 및 비용 최적화 연구사례	11
2.4 건물 에너지 및 비용 최적화와 유전 알고리즘(GA)	15
2.5 소결	21
제 3 장 생애주기비용(LCC) 분석 및 최적화를 위한 방법	22
3.1 LCC 분석 개요	22
3.2 LCC 최적화를 위한 방법	30
3.3 소결	34
제 4 장 대상건물의 에너지 시뮬레이션	36
4.1 대상건물의 선정	36
4.2 대상건물에 적용한 에너지 절약요소	37
4.3 건물 에너지 시뮬레이션	42
제 5 장 대상건물의 비용 최적화 모델 도출	49
5.1 대상건물의 LCC 분석을 위한 선정	49
5.2 대상건물의 비용 최적화를 위한 선정	53
5.3 유전 알고리즘에 의한 최적화	59

5.4 PV 패널의 초기투자비용에 따른 비용 최적화 모델	65
제 6 장 결론	67
참 고 문 헌	71
국 문 초 록	75
ABSTRACT	78

표 목 차

<Table 1.1> 연구의 흐름도.....	4
<Table 2.1> 국내외 건물 에너지 최적화 연구사례.....	11
<Table 2.2> 국내외 건물 비용 최적화 연구사례.....	13
<Table 3.1> 비용 통합 산정 방식.....	27
<Table 3.2> LCC 분석을 위한 비용항목 분류예시.....	29
<Table 4.1> 공장 모델의 개요.....	43
<Table 4.2> 외피 구성 및 물성치.....	44
<Table 4.3> 창호 물성치.....	44
<Table 4.4> 두 지역 간 평균기온의 비교.....	45
<Table 4.5> PV모듈 성능.....	47
<Table 5.1> 실질할인율 계산을 위한 10년간 데이터.....	50
<Table 5.2> 2015년도 신·재생에너지보급 - 건물지원사업의 지원 기준..	51
<Table 5.3> 재료비 산정 데이터.....	51
<Table 5.4> 전력량 요금 데이터.....	52
<Table 5.5> 설계변수 및 제약조건.....	56
<Table 5.6> 사례연구 결과.....	64
<Table 5.7> PV 가격 변동을 고려한 사례연구 결과 (2024년경 예측).....	66

그림 목차

(Fig.2.1) 설계공간 내 제약표면 (Rao, 2009).....	7
(Fig.2.2) 목적함수의 등고선 (Rao, 2009).....	8
(Fig.2.3) 유전 알고리즘의 용어	18
(Fig.2.4) 유전 알고리즘의 프로세스.....	20
(Fig.3.1) Life Cycle동안 비용지출 현황도	23
(Fig.3.2) 총비용 개념의 대안(Alt) 비교	24
(Fig.3.3) 생애주기비용 범위	30
(Fig.3.4) EnergyPlus와 연동된 MATLAB 기반 유전 알고리즘 흐름도.....	32
(Fig.3.5) M-Script에 작성된 Command(명령)내용 개요.....	33
(Fig.3.6) 에너지 절약을 고려한 비용최적화 모델 도출 과정	35
(Fig.4.1) 대상공장건물의 평면도와 실제 사진.....	36
(Fig.4.2) 대상공장건물의 단면도	36
(Fig.4.3) 공장 지붕 PV 적용사례	39
(Fig.4.4) 공장 지붕 천창 적용사례	40
(Fig.4.5) 에너지 절약 요소들 간 상호작용의 예.....	41
(Fig.4.6) 에너지 절약 요소를 적용한 공장 지붕	41
(Fig.4.7) DesignBuilder를 이용한 모델링.....	43
(Fig.4.8) 대상공장 일일 내부발열 스케줄.....	46
(Fig.4.9) 실내 조도감지 센서의 위치.....	48
(Fig.4.10) 조명 디밍제어 시 조도 제어 방식.....	48
(Fig.5.1) 작성 된 M-Script 일부.....	59
(Fig.5.2) 세대(Generation)의 진행에 따른 최대 적합도(비용최적화)	61
(Fig.5.3) 대안 간 생애주기비용 비교.....	64
(Fig.5.4) PV 패널의 가격 추이(~2002년) 및 예측자료.....	65

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

한국은 원유 5대 수입국 중 하나로, 자체 원유 생산을 하지 못하는 가운데 에너지 시스템에 사용하는 총 화석연료의 97%는 수입에 의존하고 있다.¹⁾ 이에 따라 에너지 절약은 점차 국가정책의 중요한 부분으로 자리하고 있다. 특히 에너지 소비량에서 건물분야는 약 30%를 차지하고 있어 에너지가격 증가와 국제 환경규제를 대비해 에너지 효율을 개선하고 신재생 에너지의 비중을 증가시킬 필요가 있다.

건물 부분에서 에너지 정책은 건물 외피의 U-value나 신재생에너지사용 의무 비율 등 에너지절약 요소들의 기준을 강화하고 있으나, 건물을 짓는 기업들은 기준 강화 때마다 각 요소들의 최소기준을 맞추는데 급급한 수동적인 태도를 보여 왔다. 대개 이러한 태도는 건물 에너지절약을 위한 노력이 수익성을 낮춘다는 오해에서 비롯되는 경우가 많다. 따라서 이익을 극대화하려는 합리적인 소비행위를 하는 투자자들에게 에너지 절약적인 건물은 투자가치가 희소해진다.

연구에 따르면²⁾, 여러 투자 장벽 중 하나는 정보의 부족이다. 에너지 예측 소비량이나 에너지 절약 전략에 투자했을 때 회수기간에 대한 정보부족은 건물의 에너지 절약을 위한 투자 및 에너지 절약 프로세스들을 채택하는데 장벽으로 작용한다. 에너지 데이터를 수집하거나 에너지 효율적인 새 장비의 선택 및 설치에 드는 정보비용은 단순히 에너지를 구매하는 경우와 비교했을 때 비용절약적인 투자로 인식되기 어렵다. 이는 특히 중소기업들에게 더 큰 장벽이 될 수 있다. 이러한 장벽을 극복하기 위해, 생애주기비용과 같은 금융

1) IEA. TASK 40/Annex 52 (2008). Towards net zero energy solar buildings, IEASHC Task 40 and ECBCS Annex 52. <http://www.ieashc.org/task40/index.html>,2011 (accessed 10.01.2011).

2) ASHRAE. AHSRAE Vision 2020, ASHRAE Vision 2020 Ad Hoc Committee. http://www.ashrae.org/doclib/20080226_ashraevision2020.pdf, 2008(accessed 10.10.10).4

정보는 건물 설계의 의사결정과정에서 제공되어야 한다.

에너지 절약을 고려한 건물의 설계단계에서 건축가는 여러 어려움을 겪는데, 그 첫번째는 에너지 절약에 영향을 미치는 수많은 변수들이 서로 상호작용을 하기 때문에 변수 간 최적의 조합을 찾는 것이 쉽지 않다는 점이다. 건축가는 설계과정에서 수많은 디자인 대안과 복잡한 현상에 대해 모두 분석하는 데 한계가 있기 때문에 몇 차례의 에너지 시뮬레이션을 수행하지만 최적의 디자인이라는 확신을 갖기 어렵다. 그러나 최적의 조합을 찾아주는 알고리즘으로 모델을 만들어 둔다면 건축가는 단시간에 에너지 절약적인 설계안을 도출할 수 있을 것이다.

두번째는 건물에서 에너지를 가장 적게 쓰는 에너지최적화 된 디자인을 선정했다 하더라도, 생애주기비용의 측면에서 봤을 때 충분한 투자가치가 있는지 판단하기 쉽지 않다는 점이다. 그러나 건물 설계단계에서 에너지 절약적인 요소를 적용하면서도 생애주기비용을 고려했을 때 비용이 가장 적게 드는 비용최적화 모델을 제시할 수 있다면, 기업들은 에너지 절약적인 건물을 짓는데 적극적으로 참여할 것이다.

따라서 본 연구에서는 요소 간 상호작용을 하는 건물 에너지 절약 전략들을 복합적으로 사용하면서도, 생애주기비용의 측면에서 판단했을 때 최소의 비용이 요구되는 모델을 제시하는 것을 목적으로 한다. 또한 기존 연구에서 많이 다루지지 않았지만 에너지 다소비 건물인 공장건물에 모델을 적용해봄으로써 비용최적화모델의 필요성 및 활용가능성을 보이고자 한다.

1.2 연구의 방법 및 범위

본 연구의 방법과 범위를 요약한 내용은 다음과 같다.

(1) 건물의 성능과 최적화에 관한 고찰

건물의 성능을 고려하는 디자인 방법론을 토대로 최적화에 대한 개념 및 종류와 특징을 분석하고, 최적화 이론이 건물에 적용된 연구사례를 살펴보고 적합한 최적화 방식을 도출한다.

(2) 생애주기비용 분석 및 최적화를 위한 방법론

문헌을 통해 건물의 생애주기비용 분석의 개념과 분석에 필요한 요소들을 알아본다. 에너지 절약이 고려된 생애주기비용을 최적화하기 위해 건물 에너지 시뮬레이션 프로그램과 비용 최적화 시뮬레이션 프로그램을 결합하는 방법을 소개한다.

(3) 대상건물의 에너지 시뮬레이션

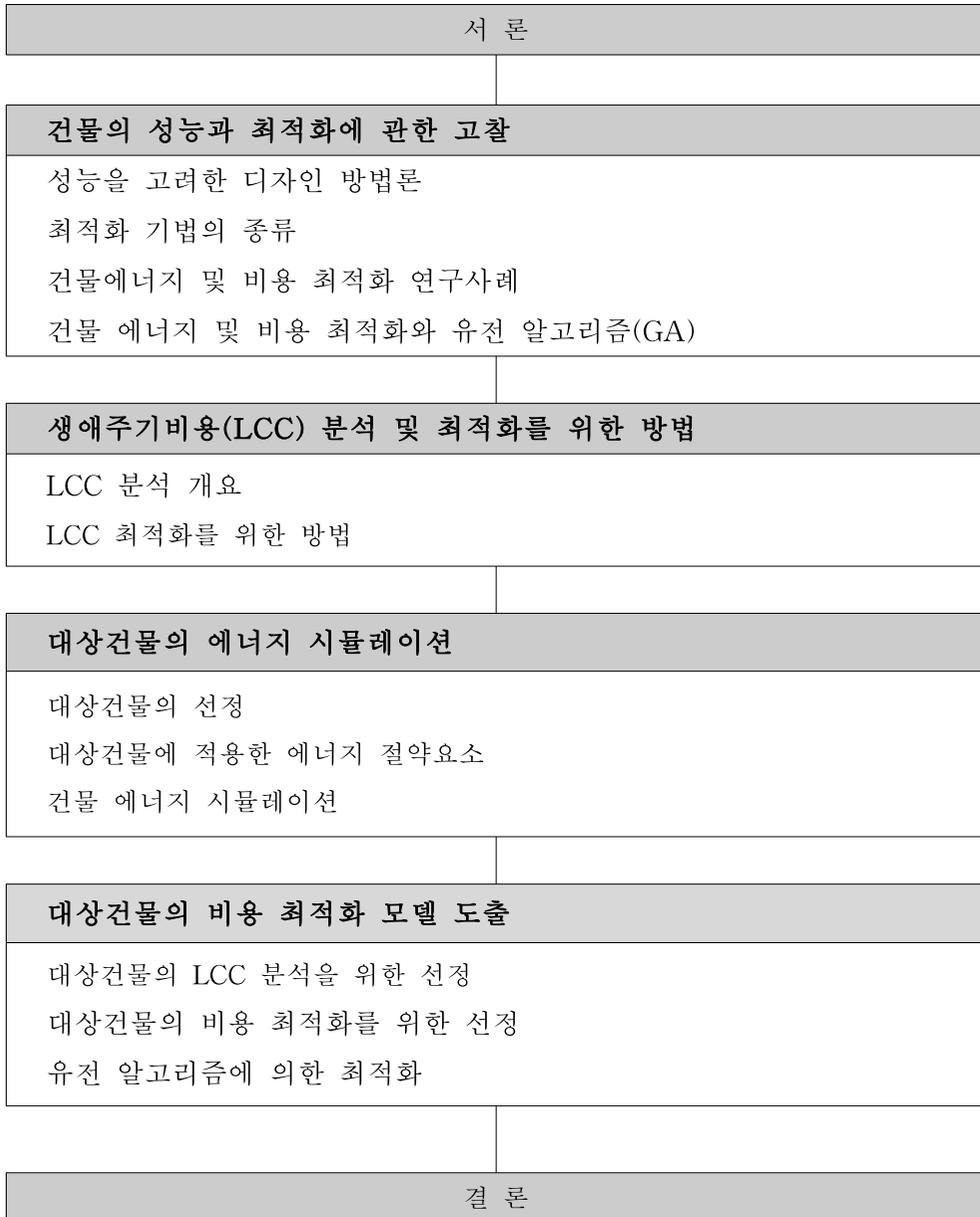
기존 연구들에서 많이 다루지지 않았으나 에너지 다소비 건물인 공장건물을 대상건물로 선정하여 Case study를 실시한다. 대상건물의 특성을 기반으로 주요 에너지 절약요소를 적용한 뒤, 대상건물에서 소비되는 냉방, 조명에너지와 생산되는 PV에너지를 에너지해석프로그램(EnergyPlus)으로 계산한다.

(4) 대상건물의 비용 최적화 모델 도출

건물의 생애주기비용을 분석하기 위해 필요한 가정과 분석범위를 선정하고, 분석범위에 맞는 구성하는 요소들의 가격 Data를 수집하여 비용을 산출한다. 대상건물에 적용한 주요 에너지 영향요소를 변수로 선정하고, EnergyPlus에서 계산되는 에너지를 비용화하여 초기투자비와 합산한 값을 목적함수로 선정한다. 그 후, MATLAB에서 유전 알고리즘을 통해 비용 최적화모델을 도출한다. 또한 에너지 최적화모델도 도출하여 비용 최적모델의 필요성을 제시한다.

본 연구의 흐름도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

<Table 1.1> 연구의 흐름도



제 2 장 건물의 성능과 최적화에 관한 고찰

2.1 성능을 고려한 디자인 방법론³⁾

건물의 성능을 고려한 디자인이란 건물에 대한 평가항목의 현재상태와 목적하는 또는 요구되는 성능을 조절하기 위한 기능을 가지며 대안산출 및 평가를 위해 시뮬레이션, 최적화, 지식베이스 기법 등을 사용한다.

성능을 고려한 디자인을 도출하는 과정은 일반적으로 목표설정단계, 문제 해결을 위한 해결안 설정단계, 대안의 평가 및 발전 단계로 나눌 수 있다. 목표설정 단계에서는 성능변수의 결정, 성능기준 설정이 이루어지고, 새로운 성능변수의 추가, 기존성능의 변경, 기존성능의 완화 등이 첨가된다. 해결안 설정 단계에서는 디자인 변수의 추출, 디자인 변수에 값 부여, 성능변수의 값 계산 등이 이루어지고, 해결안의 평가 및 발전단계는 성능 시뮬레이션을 이용하여 해결안의 성능을 검토하는 것으로 평가결과를 통해 해결안의 수정이 이루어진다.

그러나 성능을 고려한 디자인을 도출하기 위해서는 건축가에게 많은 노력과 시간이 요구되기 때문에 몇 요소들은 간과되는 경우가 많았다.

3) 원중서, 建物の 에너지 性能과 費用 最適化를 위한 數理모델에 관한 研究, 연세대학교 대학원, 박사논문, 2003

2.2 최적화 기법의 종류와 특징

2.2.1 최적화의 정의

최적화는 주어진 환경에서 요구되는 사항들을 만족시키는 대안 중 최상의 결과를 찾는 과정이라고 할 수 있다. 최적화 문제(optimization problem)는 주어진 대안 공간(design space) 내에서 전역적 최적해(global optimal)를 찾아내는 방법이다. 최적화를 수행하기 위한 기본 요소는 설계변수(design variable)와 목적함수(objective function) 그리고 제약조건(constraint)이며, 일반적인 최적화 수학적 표현방식은 다음과 같다.⁴⁾⁵⁾

$$\begin{aligned} \min \quad & R(X) \quad \text{<식 2.1>} \\ \text{subject to} \quad & g_i(X) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & l_j(X) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, p \end{aligned}$$

여기서 X 는 설계변수들(design variables)로 구성된 설계벡터(design vector)이고, $R(X)$ 는 설계벡터로 구성된 목적함수(objective function)이다. 그리고 $g_i(X) \leq 0, j = 1, 2, \dots, m; l_j(X) = 0, j = 1, 2, \dots, p$ 는 설계벡터의 제약조건(inequality constraints, equality constraints)이다. 이에 대한 정의 및 특성은 다음과 같다.⁶⁾

(1) 설계변수

최적화 설계 과정에서 변수들로 취급한 정량들을 설계변수 $x_i, i = 1, 2, \dots, n$ 라 하고, 설계변수의 집합을 <식 2.2>와 같이 벡터로 표현한 것이 설계벡터

4) 오세민, BIM 기반 시뮬레이션 모델과 유전 알고리즘, 파레토 최적을 이용한 건축 디자인 최적화, 성균관대학교 대학원, 석사논문, 2011

5) Singiresu S. RAO, 박한영 외3 옮김, 공학최적화 : 이론과 실제, 홍릉과학출판사, 2011

6) 김영진, 유전자 알고리즘, 파레토 최적, 환기 시뮬레이션을 통합한 환기 시스템 최적설계, 성균관대학교 대학원, 석사논문, 2008

이다.

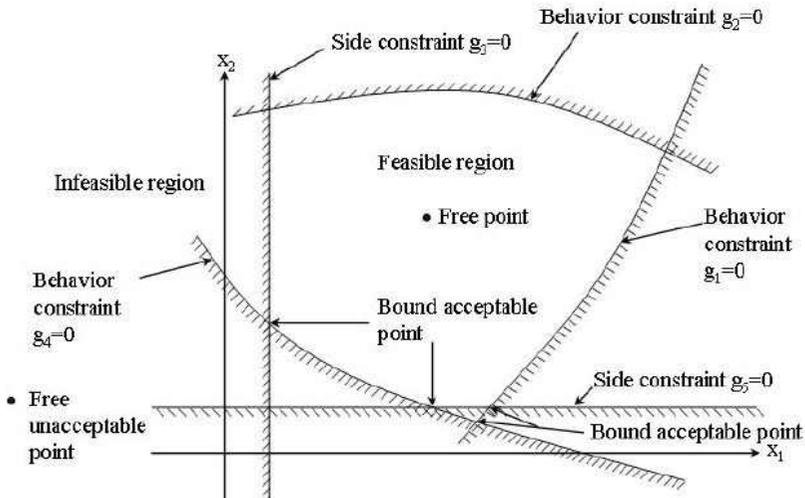
$$\begin{pmatrix} x \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$$

<식 2.2>

예를 들어 최적화에 해당하는 사물(object)이 창문이고, 창문의 크기를 최적화하는 문제라면 문의 가로, 세로 길이를 설계변수로 정할 수 있다. 설계변수의 선정은 엔지니어의 판단에 의해 결정된다.

(2) 제약조건

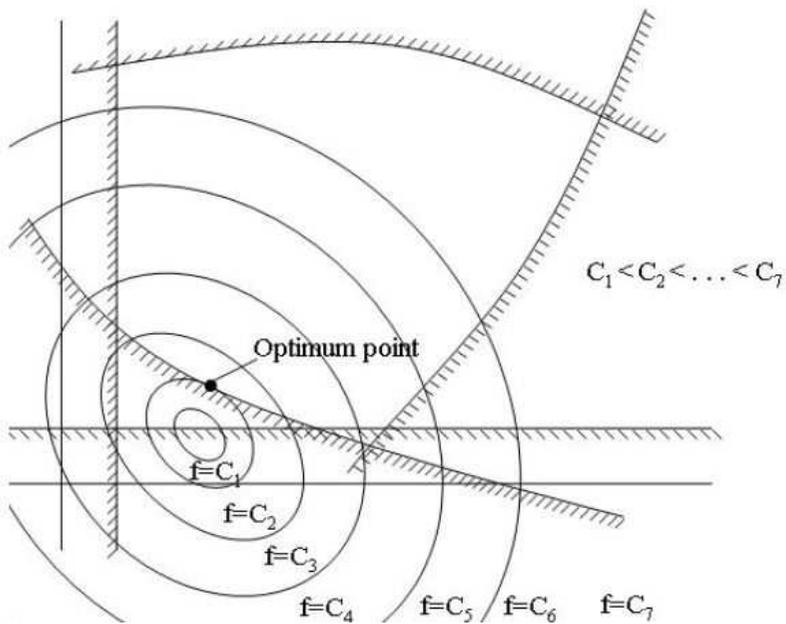
최적화를 위해 선정된 설계변수들은 목적하는 결과의 요구조건을 만족하기 위해 변수들의 제약조건(constraint)이 존재한다. 이러한 제약조건은 일반적으로 inequality/equality constraints(<식 2.1>의 $g_j(X), l_j(X)$)로 구분되며 (Fig.2.1)과 같이 설계 공간(design space)내에서 feasible/infeasible region의 경계(boundary)를 결정하는데 사용된다. 이때 feasible region은 설계 공간 내에서 제약조건들에 의해 만족하는 범위로써, 최적해 범위를 말한다. infeasible region은 feasible region의 반대범위이다.



(Fig.2.1) 설계공간 내 제약표면 (Rao, 2009)

(3) 목적함수

목적함수는 최적화에 해당되는 사물(object)로서 이를 구성하는 설계변수들을 통해 수학적 공식으로 정의한 것을 말한다. 이때 최적설계는 (Fig.2.2)와 같이 목적함수를 최적화하는 지점(optimum point)을 찾는 과정을 말한다. 단 (Fig.2.2)는 설계변수가 두개(x_1, x_2)이고 제약조건이 적은 경우(3개)이지만 현실에 대부분의 문제는 설계변수 제약조건이 많은 다기준(다목적) 최적화문제이다.



(Fig.2.2) 목적함수의 등고선 (Rao, 2009)

2.2.2 최적화 기법의 분류

최적화과정(optimal process)에서 엔지니어의 적절한 판단에 의해 설계변수, 제약조건, 목적함수를 선정하는 것이 가장 중요한 부분이며 기본적인 과정이다. 이 과정에서 중요 부분들이 정해지면 최적화 문제에 적합한 최적화기법(optimal technique)을 선정해야 한다.⁷⁾

최적화기법은 제약조건의 유/무, 목적함수의 개수 등에 따라 다양한 기법들이 있고, 그 분류기준도 다양하다. 그래서 본 연구에서는 일반적인 방법으로 결정론적 방법(Deterministic method), 확률론적 방법(Stochastic methods)으로 분류하였다.

(1) 결정론적 방법

이 방법은 해(Solution)의 특징으로 보면, 지역적 범위의 해를 구하며(local method) 대부분 Gradient method를 기반으로 한 매끄러운 볼록함수 형태를 사용한다. (볼록함수 형태를 취하지 않는 Deterministic method로는 simplex method와 Pattern search method 등이 있다.) Gradient method는 도함수를 이용한 수학적 처리방법으로, 도함수의 종류에 따라 First-Order Method(1계 도함수(first derivative)를 사용)와 Second-Order Method(2계 도함수(second derivative)를 사용)로 구분된다.

결정론적 방법의 전반적인 특징을 보자면 함수가 정확한 가정을 가지고 있을 때 연산속도가 빠른 장점이 있다. 그러나 비선형, 미분 불가능한 문제에는 적용하기가 어렵고, 특히 초기값 선정에 따라 다르게 도달하는 local minima를 optimal minima로 인식하는 경우가 있다.

(2) 확률론적 방법

이 방법은 지역적 범위의 해(local optima)에 빠지는 것을 피하기 위해서 무작위성(randomness)을 기반으로 전역적인 범위의 해를 구하는 방법(global optima)을 사용한다. 이는 Gradient method와 상반된 개념인 non-gradient

7) ibid.

method이자 함수 값만으로 이용하여 비교하는 방법이라 할 수 있다. 이 방식에는 SA(Simulated Annealing method), ES(Evolution Strategy), GA(Genetic Algorithm), TS(Tabu Search method), DE(Differential Evolution) 등이 있다. 그 중 SA는 순수한 Random search 기법으로 너무 오래 걸리기 때문에 잘 활용되지 않고 있다. ES는 수치적 최적화에 강력한 편이다. GA는 수치적 최적화에 강력한 방법은 아니지만 이진수로 표현되는 공간에서 유용한 binary search 방식으로 알려져 왔다.

확률론적 방법의 전반적인 특징을 보자면 비선형이고, 미분 불가능한 문제에서 global minima를 찾는데 효과적이지만 gradient method에 비해 시간이 오래 걸리는 편이다.

2.3 건물에너지 및 비용 최적화 연구사례

최적화 문제를 수행하는 데 있어 적합한 최적화 기법을 선정하고자 기존의 건물 분야에서 최적화 연구사례들을 고찰하였다. 기존 문헌 고찰은 ‘건물 에너지 최적화 연구사례’와 ‘건물 비용 최적화 연구사례’으로 구분하였다.

2.3.1 건물 에너지 최적화 연구사례

최근 국내외 건물 에너지 최적화 연구를 살펴보면, 건물의 디자인부터 시스템 적용까지 광범위한 스케일을 대상으로 최적화를 적용하고 있으며, 설계단계로 그치는 것이 아니라 운영기간동안에 최적제어에 대한 관심도 높아지고 있다. 이는 설계 시 단일 대상의 성능을 평가하기 위해 에너지 해석 프로그램의 패러미터로 에너지 절감효과를 예측하는 경험적 분석과 대조적이다. 따라서 다수의 최적화 대상(목적함수)을 갖는 다목적 최적화를 적용하며, 최적화 기법으로는 유전 알고리즘(GA), Taguchi-ANOVA method, PSO 알고리즘 등이 사용되고 있다. 연구들을 정리한 내용은 <Table 2.1>과 같다.

<Table 2.1> 국내외 건물 에너지 최적화 연구사례

연구자	목적	도구	결과
Ryozo Ooka (2009)	건물 에너지 시스템에 새로운 최적 디자인 제안	-GA(유전 알고리즘)	-포괄적인 연구를 바탕으로 -올은 최적해 계산하여 비교했을때 정확도 인정됨. -매우 복잡한 에너지 시스템에도 약간의 수정과 함께 최적 디자인으로서 활용 가능성 보임 -하루 측정에도 7시간 이상 걸리는 단점
Hwang Yi (2015)	Energy-emergy 접근과 통합된 환경적인 건물 디자인의 새로운 방법론 제시	-Taguchi-ANOVA method (최적화 기법) -EnergyPlus (에너지 시뮬레이션) -EMergy Analysis -MetaModel Development	환경적인 디자인 과정에 시뮬레이션 활용도 높이는 방법 제안

정민희 (2012)	신재생에너지시스템의 복합적용 시 최적화 기법에 적용하여 복합적용 계획 방법 제시	-GA(유전 알고리즘)	단지유형별 신재생에너지 시스템의 최적화 설계
고명진 (2013)	하이브리드 에너지 공급시스템 최적화	-GA(유전 알고리즘)	상용전·열원설비시스템과 신재생 에너지시스템이 통합 연계된 하이브리드 에너지공급시스템 최적화 설계방법을 개발
정장원 (2014)	네트워크와 최적화 기법의 결합을 통해서 건물시스템을 효율적으로 제어 할 수 있도록 비용함수를 최소화 하는 제어변수를 결정	-PSO 알고리즘 -모델리카	빌딩 시뮬레이션, 네트워크, 최적 제어, 증강현실과의 결합된 새로운 형태의 제어 시스템 개발

2.3.2 건물 비용 최적화 사례

최근 국내외 건물 비용 최적화 연구를 살펴보면, 국외에선 건물 에너지와 CO₂ 배출량 감소 뿐 아니라 이를 비용으로 환산하여 생애주기단계에서 보는 연구가 이슈화 되고 있다. 그러나 국내 연구에서는 건축분야에 적용되는 최적 비용에 관한 개념이 구조, 재료 및 시공분야에 주로 한정되고 있다.

생애주기비용을 최적화시키는 연구들의 다수가 에너지에 대한 고려를 하고 있기 때문에, 건물에너지 해석 프로그램의 결과를 비용화하여 최적화 기법을 적용하는 방식을 취하고 있다. 따라서 최적화 기법도 에너지 최적화에 사용하던 것과 유사한 GA(유전 알고리즘), Evolutionary algorithm(진화 알고리즘), Tchebycheff 최적화 등이 사용되었다. 연구들을 정리한 내용은 <Table 2.2>와 같다.

<Table 2.2> 국내외 건물 비용 최적화 연구사례

연구자	목적	도구	결과
Weimin Wang (2005)	다목적 최적화 모델 제안, 경제성과 환경적 문제를 위한 디자인 대안을 평가	-GA(유전 알고리즘) -ATHENA program	누적 exergy 소비량으로 평가, 녹색 빌딩을 위한 수많은 파레토 최선 해결책 확인
Daniel Tuhus-Dubrow (2010)	주거용 건물의 에너지 사용을 최소화시키는 건물 형태와 관련된 파라미터들의 최적값을 선정	-GA(유전 알고리즘) -DOE-2 (건물에너지 시뮬레이션)	직사각형과 사다리꼴 모양이 가장 낮은 생애주기비용을 가지며, 가장 좋은 때와 안 좋은 때 사이의 변화폭이 제일 적음
Mohamed Hamdy (2011)	2층 주택과 적용된 HVAC 시스템의 CO ₂ 배출량과 투자비를 최소화	-GA(유전 알고리즘) -IDA ICE (건물생산량 시뮬레이션)	-열원종류가 최적화에 큰 영향력 -외피의 단열재 두께는 창외의 열관류율만큼 에너지 감소에 영향 미침
Ehsan Asadi (2012)	주거용 건물의 개선(retrofit) 비용과 에너지 절약과 열적쾌적의 최적화	-Tchebycheff 최적화 (in MATLAB) -TRANSYS -GenOpt	외벽, 지붕의 단열재, 창 종류 변화와 집열관 설치를 변수로 두었을 때, 실용가능성과 상황에 맞는 설정에 따라 최적의 결과는 다름

Seung jun Roh (2014)	아파트의 생애주기 CO2배출량과 단위 비용 평가를 위한 최적 디자인 프로그램 적용성 평가 및 향상	-Evolutionary algorithm (진화 알고리즘)	환경친화적 건축기술들의 최적조합과 표준주택의 생애주기CO2 배출량과 생애주기 비용을 계산 가능 보임
정보라 (2009)	공기-비용 절충관계 최적화	GA(유전 알고리즘) 중, -Nondominated Sorting in Genetic Algorithm (비지배분류유전알고리즘) -Niched Rank Genetic Algorithm (순위적소유전알고리즘)	공기비용 절충관계를 고려하여 최적화모델에 유전알고리즘의 적용가능성을 검증
김중현 (2010)	친환경성, 경제성, 평가지표 SEG로 우수한 시스템을 선정	-최적화 탐색법	건축물의 부하, 자원조건, 기기성능, 사용목적이 다른 신재생에너지 시스템을 최적화 할 수 있는 시뮬레이션 MORE-B를 개발
우지환 (2011)	주택운용단계의 에너지소비량만을 위주로 평가하던 그린홈에 새로운 평가기준 연구	-Evolutionary algorithm (진화 알고리즘)	건축물의 전생애 주기에서 각 단계별 과정에서 발생하는 환경부하 및 경제성을 고려한 친환경 최적설계 평가 시스템 개발
이동철 (2012)	생애주기비용을 고려한 성능기반 다목적 최적 내진 보강 기법 연구	-GA(유전 알고리즘) 중, NSGA-II (다목적 유전 알고리즘)	접합부 보강을 통한 기존 철골 모멘트 골조의 생애주기비용을 고려한 성능기반 다목적 최적 내진 보강 기법을 제시

2.4 건물 에너지 및 비용 최적화와 유전 알고리즘(GA)

2.4.1 최적화 기법 선정

건물 에너지와 비용에 대한 최적화 문제들의 특성을 살펴보면, 넓은 다차원의 해공간을 갖고 있으며 여러 군데의 국소해(local minima)가 존재하는 다중 최적화 문제(Multi-objective Optimization Method)이다. 또한 큰 불연속성과 비선형성을 갖고 있으며 최적화 대상 변수가 이산변수와 연속변수가 함께 존재한다(Coley and Schukat, 2002 Wang and Jin, 2000, Wang et al., 2005). 또한 설계변수들의 조합에 의한 모든 경우의 수가 매우 크기 때문에 설계변수들의 조합을 모두 확인하는 것도 불가능하다. 특히, 목적함수가 미분가능하지 않은 경우가 많아 구배법을 통한 해의 탐색은 불가능하다.⁸⁾

이와 같은 특성을 가진 최적화 문제에 적합한 방식을 찾기 위해 2.2절에서 논의한 최적화 기법의 분류를 살펴보면, 결정론적 방법의 gradient method에 비해 연산속도는 느리지만 비선형이고, 미분이 불가능한 문제에 대해 효과적이고, global minima를 찾기 쉬운 확률론적 방법의 non-gradient method가 적당하다고 판단된다.

non-gradient method 중, 2.3절의 연구사례에서 건물 에너지 및 비용 최적화에 많이 적용되고 있는 유전 알고리즘의 특징은 다음과 같다(Haupt, 2004).⁹⁾

- (1) GA는 탐색 절차에서 도함수를 사용하지 않고 목적함수 값만 사용하기 때문에 미분 불가능한 함수에 대해서도 최적화가 가능하다.
- (2) 절차를 시작할 때 단일 설계점 대신 점들의 모집단(시도 설계벡터들)을 사용한다. 설계변수의 수가 n 개일 경우 통상적으로 모집단의 규격을 $2n \sim 4n$ 으로 취하기 때문에 최적해의 후보 점이 늘어나 GA는 국소 최적에

8) 서원준, 건물 에너지에 대한 발견적 해법과 메타 발견적 해법 최적화, 성균관대학교 석사학위논문, 2011

9) Singiresu S. RAO., op. cit.

포획될 확률이 줄어든다. 국소해 탈출 방법을 지니고 있기 때문에 여러 국소해가 존재하는 복잡한 목적함수를 최적화하는 데에 뛰어나다.

(3) GA에서 설계변수들은 이진 변수의 문자열로 표현되므로 이산, 정수 계획 문제를 해결할 때 이용하는 탐색방법을 적용하기 자연스럽다. 따라서 연속적인 변수나 이산적인 변수 두 가지 모두를 동시에 다룰 수 있다.

(3) 유일한 해를 도출하는 것이 아닌, 여러 개의 최적해를 도출한다.

(4) 컴퓨터를 이용한 병렬처리에 적합하다.

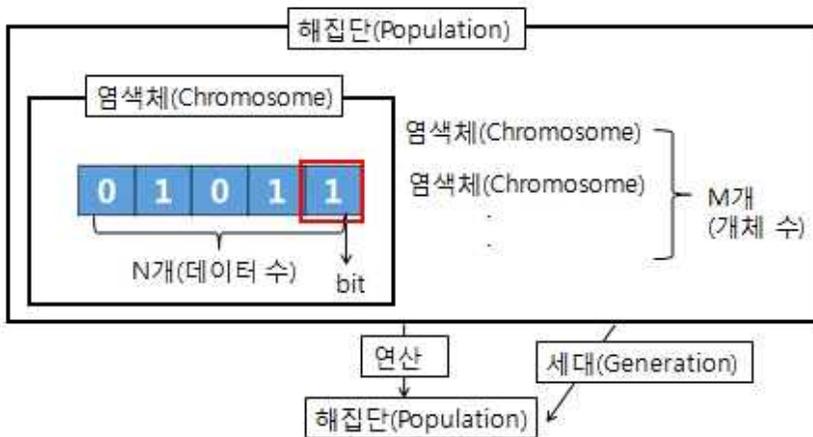
유전 알고리즘의 특징을 살펴보면 건물 에너지 및 비용 최적화 문제의 특성을 아우르기에 적합한 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 건물의 에너지 절약적인 설계에서 비용을 최적화하기 위해 유전 알고리즘을 최적화 기법으로 선정하였다.

2.4.2 유전 알고리즘

(1) 유전 알고리즘의 기본 용어

- 염색체(Chromosome) : 생명체에 유전정보를 담고 있는 DNA와 같이 유전자로 구성된 염색체가 있다. 간단하게 바이너리(0 or 1) 형태로 N개의 데이터로 표현되는데 유전자 하나는 비트가 된다. 염색체는 비트로 이루어진 N개의 데이터라 할 수 있다.
- 해집단(Population) : 복수개의 염색체 집합을 의미하며 어떤 생명체의 개체수라는 의미를 갖는다. 자연계에서 번식이나 사건들로 인해 개체수의 변화가 있는 것과 달리 유전 알고리즘에는 그 수를 일정하게 한다.
- 적합도 함수(Fitness Function) : 각각의 개체가 주어진 환경에 얼마나 생존하기 적합한지 판단하는 함수이다. 즉, 어떤 문제에서 염색체 정보가 그 문제를 잘 풀기 위한 해인지 판단해주는 함수이다.
- 세대(Generation) : 해집단에 속한 개체들이 자식을 낳아서 다음 해집단으로 변화하는 과정을 의미한다. 몇 번의 알고리즘 연산으로 진화 목표에 도달하는지에 따라 수렴 속도를 판단한다.

유전 알고리즘을 구성하는데 필요한 기본 용어들의 관계는 (Fig.2.3)과 같다.



(Fig.2.3) 유전 알고리즘의 용어

(2) 유전 알고리즘 프로세스

▪ 사상(Encoding) & 모집단(Population) 형성

GA는 최적화 문제를 해결하기 위해 먼저 2진수로 표현하는 사상과정을 거친다. 2진수로 표현된 각 개체는 여러 설계벡터들을 나타내는 무작위 문자열들의 모집단을 갖고 시작한다. 모집단의 크기 n 은 통상적으로 고정되고 각 문자열의 적합도 수치를 구하기 위해 각 문자열을 계산한다.

▪ 적합도 평가(Fitness evaluation)

개체의 성능을 다른 개체와 비교하거나 가상의 환경에 얼마나 적응하고 있는지 평가하는 것으로 목적함수나 다른 주관적 평가함수를 기반으로 결정된다. 목적함수 값의 범위가 문제마다 다른 것을 고려하여 보통 정해진 구간 사이의 양수의 값을 갖는 표준화 된 값으로 적합도를 선정한다.

▪ 선택(Selection)

적자생존의 자연법칙에 기초한 방법으로 교차를 하기위한 개체를 선택하는 과정이다. 주어진 환경에 대한 상대적인 적응 수준을 보여주는 적합도

(fitness) 수준과 확률적 처리과정을 통해 구한다.

- 교차(Crossover)

다른 구조를 갖는 새로운 해를 찾는 방법으로 두 개의 유전자를 일정부분을 맞교환하는 방법이다.

- 돌연변이(Mutation)

교차를 통한 유전자 교배에도 변경되지 않는 부분에 새로운 유전형질을 부여하는 방법으로, 염색체 내 비트 하나만 변경시킨다.

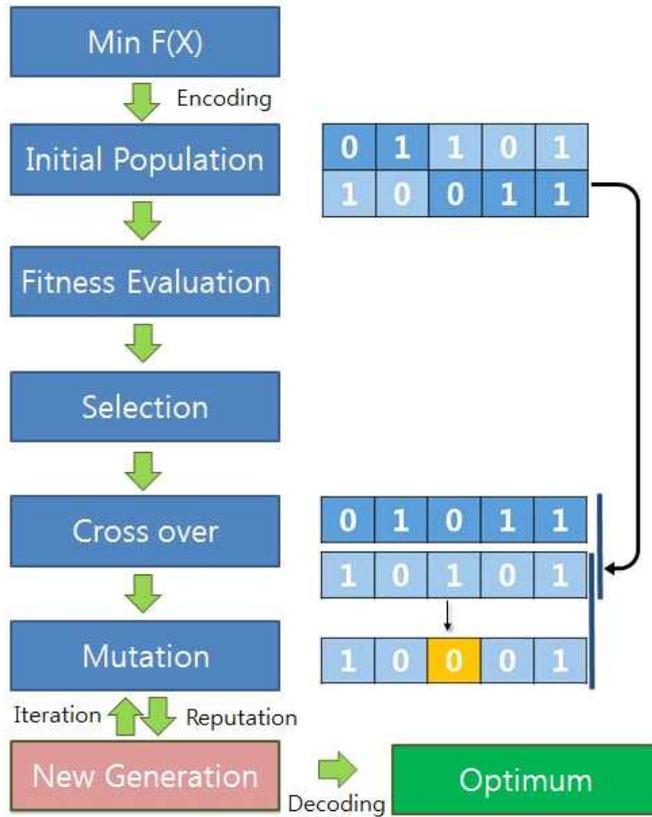
- 세대(Generation)의 형성

마지막으로 재생산된 우성인자는 최적의 대안이 될 때까지 계속해서 반복(iteration)하고, 최적화 값이 역사상(decoding)과정을 통해 실수로 다시 변환된다. 이와 같은 방식으로 기존의 집단(parents)에서 새로운 집단(offspring)을 만드는 것을 하나의 세대로 지칭한다.

- 최적해(Optimal solution) 생산

한 세대가 형성이 되면 목적함수를 통해 최적해를 생산하게 된다. 최적화 과정은 세대수(population size)만큼 반복한다.

유전 알고리즘의 프로세스를 간략하게 나타내면 (Fig.2.4)와 같다.



(Fig.2.4) 유전 알고리즘의 프로세스

2.5 소결

건물의 에너지 절약과 경제성이라는 성능을 만족시키는 디자인을 위해서는 많은 시간과 노력이 필요하다. 이를 최소화하기 위해 타 분야에서 많이 활용되고 있는 최적화기법을 제시하였다. 최적화 기법에 대한 문헌을 고찰한 결과, 최적화 기법은 기본적으로 설계변수, 제약조건, 목적함수를 설정해야 하며, 기법의 종류와 분류기준이 매우 다양하다. 본 논문에서는 크게 결정론적 방법과 확률론적 방법으로 나누어 장단점과 그 특징을 비교하였다.

본 연구에 적합한 최적화 기법을 선정하기 위해 기존의 건물 에너지 또는 비용에 관한 최적화 연구들을 살펴보았다. 그 결과, 건물 에너지 최적화 연구는 건물의 디자인부터 시스템 적용까지 광범위한 스케일을 대상으로 하며 사용하는 최적화 기법으로는 유전 알고리즘(GA), Taguchi-ANOVA method, PSO 알고리즘 등이 있다. 건물 비용 최적화 연구는 국외에서는 건물 에너지의 CO2 배출량 감소 뿐 아니라 이를 생애주기단계에서 보는 연구가 이슈화되고 있으나 국내는 재료 및 시공분야에 한정되고 있고, 사용하는 최적화 기법은 유전 알고리즘(GA), 진화 알고리즘(Evolutionary algorithm), Tchebycheff 최적화 등이 있다.

건물 에너지와 비용 최적화 문제들의 전반적인 특성을 살펴보면, 넓은 해공간에 여러 국소해(local minima)를 가지며 불연속성, 비선형성을 지니고 목적함수가 미분가능하지 않은 경우가 많아 구배법을 통한 탐색이 어렵다. 이와 같은 최적화 문제에는, 연산속도는 느리지만 비선형이고, 미분이 불가능한 문제에 대해 효과적이고, global minima를 찾기 쉬운 확률론적 방법의 non-gradient method가 적당하다고 판단된다. 그 중에서도 건물의 에너지 및 비용 최적화 연구에서 많이 사용되고 있는 GA를 본 연구의 최적화 기법으로 선정하였다.

GA는 염색체에 변수 조합을 포함시켜 적합도 평가를 통해 우수 개체를 선택하고, 연산을 통해 다음 세대를 형성하여 최적해를 생산하는 알고리즘을 갖는다.

제 3 장 생애주기비용(LCC) 분석 및 최적화를 위한 방법

3.1 LCC 분석 개요

3.1.1 LCC와 LCC 분석의 개념

생애주기비용(Life Cycle Cost, LCC)의 일반적인 의미는 제품의 생산, 사용, 폐기처분의 각 단계에서 발생하는 총 비용을 말한다. 건축에서도 이와 같은 프로세스 단계별로 기획부터 설계, 시공, 유지관리, 해체 및 폐기까지를 생애주기(Life-Cycle)로 보고 LCC의 개념을 적용하고 있다.

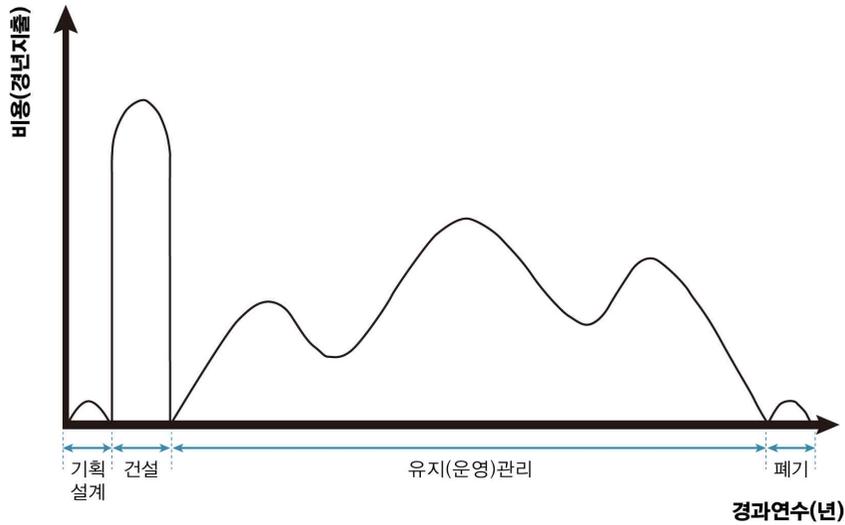
LCC분석은 어떤 설계 대안에 대해 경제적인 수명 범위 내에서 발생하는 모든 중요 비용을 등가 환산하여 경제성을 평가하는 방법이다(Dell'Isola). 즉, 목표 기준의 최소성능을 만족하면서도 건물의 생애주기 동안 가장 적은 비용이 소요되도록 최적안을 선택하는 방법이라 할 수 있다.

3.1.2 LCC 분석의 필요성

건물은 일반적으로 기획·설계, 시공, 유지관리, 해체 및 폐기단계의 생애주기를 갖는다. 각 단계에서 소요되는 비용을 살펴보면 유지관리 단계의 지출 비용이 높은 비율을 차지하고 있다. 실제 미국과 일본의 LCC 자료¹⁰⁾¹¹⁾를 살펴보면 유지관리단계에서 초기투자비의 약 3~5배 정도 소요된다. (Fig.3.1)

10) 石塚義高. (1996). “建築のライフサイクルマネジメソント”, 井上書院, p. 78, p. 97

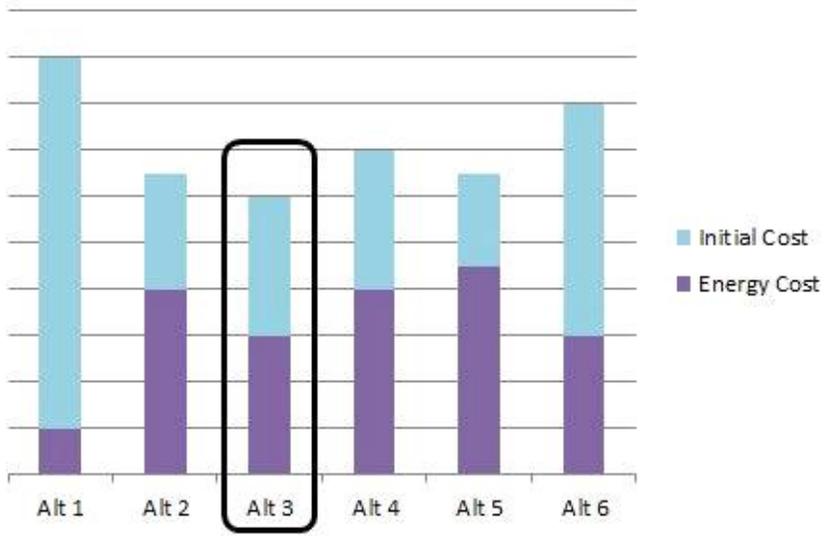
11) Shear Mel A. (1983). "Handbook of Building Maintenance Management Reston Publishing Company" p. 5



(Fig.3.1) Life Cycle동안 비용지출 현황도

그러나 초기투자비로 분류되는 건물의 기획·설계 및 시공단계에서는 운영 비용보다 단기간에 상대적으로 많은 비용이 요구되기 때문에 장기적인 안목이 없이는 투자하기 쉽지 않다. 건물의 유지관리단계에서 소요되는 운영비용이나 환경비용(CO2 배출권 가격) 등을 예측하여 비용단위로 환산한 자료가 제공된다면, 높은 초기투자비는 총비용의 관점에서 합리적인 비용으로 인식될 수 있다.

또한 환경 및 에너지에 대한 관심이 높아지면서 국가적으로 인증제도나 에너지 절약을 위한 방침이 강화되고 있는 가운데, 모든 에너지 절약방안을 활용하고 고가의 최고급 성능을 가진 건설자재들을 사용하고 해서 그 건물을 경제적이다 할 수 없다. 에너지 절약방안들은 상호관계가 있어 그 효과가 서로 상충하는 경우가 발생한다. 또한, 과도한 초기투자비가 에너지 비용의 감소와 정확한 비례관계를 이루지 않기 때문에 에너지 절약적인 건물 설계를 결정하는데 있어 총 비용의 분석이 요구된다. 예를 들어 (Fig.3.2)와 같은 경우에 에너지 절약만 고려한다면 대안 1을 선택하겠지만, 총 비용의 분석이 가능하다면 대안 3을 선택할 것이다. 따라서 초기설계단계에서 LCC에 대한 예측 및 분석은 건물 에너지 절약이 점차 의무화 되는 현 시점에서 투자자들의 현명한 의사결정을 위해 필요성이 강조되고 있다.



(Fig.3.2) 총비용 개념의 대안(Alt) 비교

3.1.3 LCC 분석 영향 인자

건물의 생애주기는 장기간에 걸쳐 발생하기 때문에 LCC 분석에서 중요하게 고려되는 변수 설정이 중요하다. 정확하고 합리적인 분석을 위해서는 현실성 있는 설정이 필수이기 때문이다. 그러나 LCC 분석은 예측이기 때문에 미래에 발생할 비용 산정에 있어 불확실성과 가정에 의존하게 된다. 따라서 LCC 분석에 있어 분석변수로 지정할 영향인자들은 최대한 객관적인 근거를 통한 방법으로 결정해야 한다. LCC 분석 영향인자에는 분석기간, 할인율, 물가 상승률 등이 있다.

(1) 분석기간

분석기간은 각 대안에 대한 총비용을 결정하는데 있어 수명주기를 어느 정도로 산정할지 가정한 것이다. 이 때 분석대상의 수명, 분석 목적, 필요성을 고려해야 한다. 건축물이나 부속설비의 내구연한이 일치하지 않기 때문에 분석대상이나 범위에 따라 적절한 분석시간을 설정해야 한다.

일반적으로 건축물의 수명은 물리적, 기능적, 사회적, 경제적, 법적 수명으로 나뉜다. 물리적 수명은 물리적인 노후화로 건축물 및 부재가 더 이상 수선이 불가능할 만큼 경과한 시점을 의미한다. 기능적 수명은 원래의 기능이 내외부의 새로운 변화에 대응할 수 없을 만큼 저하되는 경우를 말한다. 사회적 수명은 기술의 발달로 외부환경에 적응이 어려울 만큼 사용가치가 현저히 떨어진 시점을 의미한다. 경제적 수명은 건설비와 같은 자금상환과 수익간의 관계와 감가상각적인 관점과의 균형점에서 결정된다. 따라서 지가의 상승이나 기술의 발달로 경제성이 현저히 떨어진 경우를 수명으로 판단한다. 법적 수명은 공공의 안전을 위해 법으로 정해놓은 수명이다.

(2) 할인율

LCC는 미래의 여러 시점에서 발생하는 비용을 동등비교해서 합산하기 때문에 모든 비용을 한 시점의 가치로 환산할 필요가 있다. 이때 미래가치를 현재가치로 환산하기 위해서는 할인율(Discount Rate)을 적용한다.

할인율에는 인플레이션 효과가 고려된 공칭할인율(Nominal Discount Rate)과 인플레이션 효과가 제거된 실질할인율(Real Discount Rate)이 있다. 그 중 동일 시점에서 기회비용까지 고려되어 효용의 실질적인 시간 가치 환산에 사용되는 계수는 실질할인율()이다. 실질할인율은 투자자금에 대한 수익지표인 명목이자율(i_n)과 현금의 가치변화를 나타내는 물가상승률(f)에 영향을 받는다. 이들의 관계는 <식 3.1>과 같이 표현할 수 있다.

$$i_r = \frac{1+i_n}{1+f} - 1 \quad \text{<식 3.1>}$$

(3) 물가상승률

경제성을 비교할 때 물가상승률을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우는 대안 평가의 우선순위가 달라질 수 있기 때문에 물가상승률은 분석과정에서 필수적으로 고려되어야한다. 일반적으로 물가상승률 측정에는 소비자 물가지수가 이용되며, 각종 대안의 경제성 분석기간이 길어지면 대부분 평균 연간 물가상승률을 이용한다.¹²⁾

12) 통계청, 2001

3.1.4 LCC 분석에서 비용통합 산정 방식

LCC를 산출하는 비용 통합과정에 있어 장기간에 분산된 시점에서 발생하는 비용을 동일한 시점으로 가치를 환산하여야 한다. 이처럼 시간적 가치를 고려하여 환산하는 방법을 등가 환산이라 한다. 비용을 이와 같이 통합하는 방식에는 현가법, 연가법, 증가법이 있으며 각 방식에 대한 내용은 <Table 3.1>¹³⁾와 같다.

<Table 3.1> 비용 통합 산정 방식

구분	내용	
현가법	미래에 발생하는 비용을 현재의 가치로 환산하여 산정하는 방법으로 매년 균등하게 발생하는 반복비용과 비정기적으로 발생하는 비 반복 비용을 현재가치로 환산	
	1) 비 반복 비용의 환산	$F \frac{1}{(1+i)^n}$
	2) 반복 비용 환산	$P_A = A \frac{(1+i_r)^n - 1}{i_r(1+i_r)^n}$
	3) 비용 환산	$P = P_F + P_A$
	P_F : 비 반복비용의 현재가치의 합 A : 연간 등가 비용발생 F : 미래가 P : 현가 환산 i_r : 실질 이자율 n : 분석기간	
연가법	현재의 비용을 일정한 기간 동안의 동일한 비용으로 배분할 경우의 매년비용을 산정하는 방법(분석대상이 다른 내용연수를 갖는 경우 상대적인 LCC비교에 유용)	
	1) 현재 비용의 연간 등가비용화	$A = P \frac{i_r(1+i_r)^n}{(1+i_r)^n - 1}$
	2) 미래비용의 연간 등가비용화	$A = F \frac{i_r}{(1+i_r)^n - 1}$

13) LCC 기법을 적용한 현대한옥주택과 공동주택(아파트)의 경제성 비교분석, 서울과학기술대학교 석사학위 졸업논문, 2013.2

	현재의 비용이나 연간 증가비용을 미래의 일정한 지점의 비용으로 환산	
증가법	1) 현재 비용의 연간 증가비용화	$P(1+i)^n$
	2) 현재 비용의 연간 증가비용화	$F = A \frac{(1+i_r)^n - 1}{i_r}$

3.1.5 LCC 분석 비용 항목

건물의 계획 및 시공단계에서부터 건물의 사용 및 철거단계까지 수많은 과정에서 비용이 산출되는데 LCC 분석은 분석대상의 전체 비용을 현가로 합산하는 경제성분석인 것이다. 따라서 LCC분석에 적용할 비용항목은 분석대상에 따라 적절하게 설정해야 하는데, 건축물 전체를 고려할 수도 있고 건축물 내에서 특정대상을 고려할 수도 있다. LCC분석은 의사결정에 영향을 미칠 수 있고, 올바른 투자결정을 위해 반드시 포함되어야 할 만큼 많은 비용이 투입되는 항목을 주요 비용항목이라 분류하고 이를 분석의 대상으로 삼는다. 대안들 사이에서 비슷하게 고정적으로 지출되는 부분의 비용은 대안선정과정에서 큰 변수로 작용하지 못하기 때문이다.¹⁴⁾ 선행 연구¹⁵⁾에서 LCC 분석을 위해 작성한 비용분류체계를 예로 들면 다음과 같다.

14) 엄윤숙, 친환경 공동주택 요소기술의 경제성평가에 관한 연구, 중앙대학교 석사학위논문, 2008

15) 정종립, LCC분석에 의한 고층건물 설비시스템의 대안평가에 관한 연구, 연세대학교 대학원 박사학위논문, 2002. 6

<Table 3.2> LCC 분석을 위한 비용항목 분류예시

대분류	중분류	소분류	비고
초기 투자비	기획 설계비	기획비	기본설계비(타당성검토 등)
		설계비	실시설계비
	공사비	재료비	자재, 장비, 기타
		인건비	공사비내의 인건비
	기타잡비	순공사비 이외의 각종 간접비, 감리비(관련 타공사 : 수변전설비 등)	
운영비	에너지비	전기요금	공조/급탕 및 설비장비 운영을 위한 전기요금
		가스요금	공조/급탕을 위한 가스요금
		상하수도요금	공조/위생을 위한 상하수도요금
	유지보수비	수리부품비	일상운영에 필요한 수리 및 소모성 부품비
		교체비	장비, 배관 등의 주기적 교체비용
		청소비	수조청소 비용
	일반 관리비	세금	건물취득과 보유에 따르는 각종 세금
		보험료	사무소건물이 통상 지불하는 화재보험료
		인건비	건물의 일반관리를 위한 인건비
철거비	철거비	철거비	건물사용 종료시 철거비
		잔존가치	건물사용 종료시 잔존가치
기타	공간비용	공간이용비	설비 스페이스(기계실, 배관샤프트) 비용
	지원금	각종 지원금	한전지원금 등

3.2 LCC 최적화를 위한 방법

건물에서의 에너지 절약 전략들을 설계에 반영하는데 있어 비용적 측면에 가장 영향을 미치는 항목은 초기투자비의 재료비 및 설치비용과 운영비에서 에너지비용이다. 따라서 본 연구에서는 전 생애주기에서 두 단계의 비용만 산출하여 LCC를 분석하였다(Fig.3.3).



(Fig.3.3) 생애주기비용 범위

3.2.1 LCC 계산 방법

(1) 초기투자 비용 산출

초기투자 비용 중에서도 주요 재료비 및 설치비를 산정하였다. 한국물가자료¹⁶⁾를 이용하여 m^2 당 원 단위의 가격지표를 작성하였고, 단위가격에 건물 각 부위의 면적을 곱하는 형식으로 투자비용을 계산하였다.

(2) 운영비용 산출

건물의 생애주기에서 운영기간동안에 발생하는 비용을 산정하기 위해서는 건물에서 사용하는 에너지 및 생산 에너지의 파악이 필요하다. 연간 건물 에너지를 산출하기 위해 건물 에너지 해석 프로그램 중 타 프로그램과 연동에 용이한 EnergyPlus를 사용하였다. 산출된 에너지를 kW당 원 단위의 환산지표를 참고하여 운영비용을 산출하였다.

16) 한국물가자료, <http://www.kpi.or.kr/www/>

3.2.2 최적화 프로그램

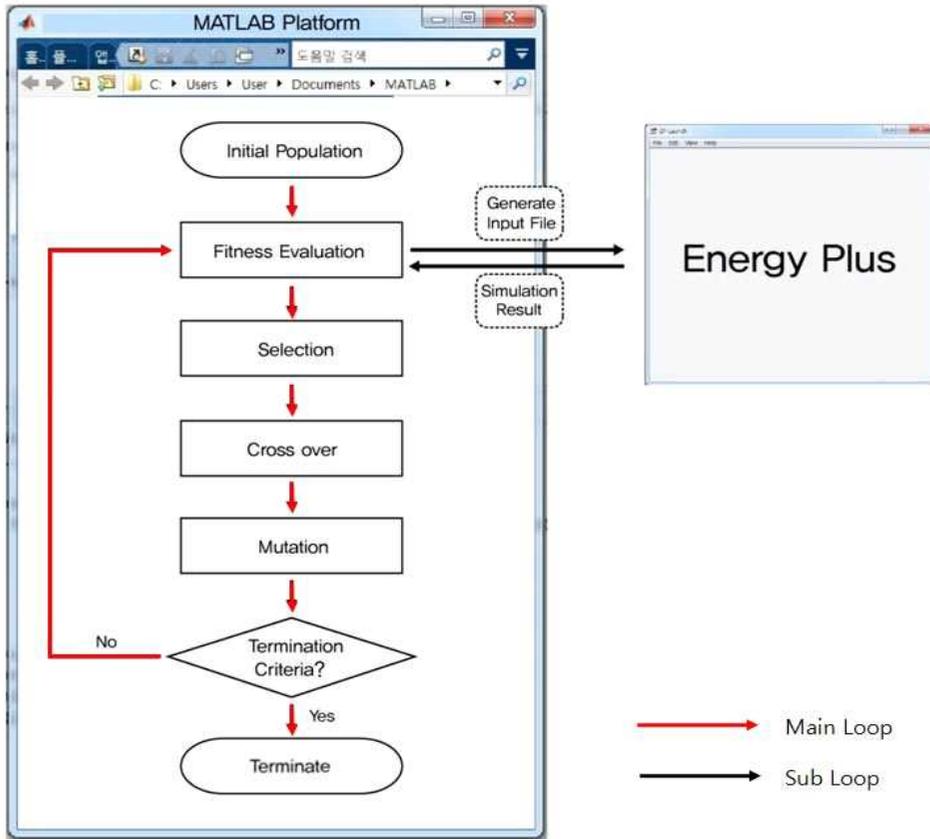
최적화 방식은 특정 알고리즘을 구성하면 조건에 맞는 해를 찾을 때까지 연산을 반복한다. 이를 위해 수학적 연산을 해결해줄 프로그램이 필요하다. 그 중에서 수치 연산뿐만 아니라 언어, tool, 내장된 수학 함수를 통해 여러 접근 방식을 살펴보고 스프레드시트나 기존의 프로그래밍 언어(C/C++ 또는 Java™ 등)를 통해 빠르게 솔루션을 찾을 수 있는¹⁷⁾ MATLAB을 사용하였다.

MATLAB은 최적화이론을 구현할 수 있는 알고리즘을 프로그램 언어로 입력한 뒤, 목적함수, 제약함수, 그리고 변수들의 범위를 작성하여 입력하면 빠르게 최적값을 도출할 수 있다. 해를 찾아가는 과정을 그래픽화하여 확인할 수 있는 장점이 있으며, 텍스트 형식의 자료들을 불러오는 작업이나 MATLAB 작업 화면에 맞는 형식으로 읽기, 새로 쓰기 등 다양한 작업이 가능하여 타 프로그램과 연동하여 최적제어 및 모니터링에도 많이 활용되고 있다.

3.2.3 최적화 프로그램과 LCC 연동 방법

LCC의 구성요소 중 초기투자비는 단위면적 당 비용 데이터가 있다면 비교적 간단한 함수식으로 표현되지만, 운영비용은 계절, 날씨, 태양의 고도 등 실외조건의 변화에 따라 복합적인 영향을 받기 때문에 수식으로 간단하게 표현하기 쉽지 않다. 이러한 문제를 해결하기 위해 기본적으로 최적화 기법은 앞서 선정한 MATLAB을 통해서 진행하되(Main loop), 건물의 에너지 비용 부분만 건물에너지 시뮬레이션(EnergyPlus)을 통해 도출하도록(Sub loop) 이중 Loop를 작성하였다. 유전 알고리즘에서 적합도 평가 시 필요한 적합도 함수는 LCC이기 때문에 EnergyPlus와의 연동은 이 때 이루어진다. EnergyPlus는 MATLAB에서 새로 작성한 IDF파일(EnergyPlus 파일형식)을 Input으로 받으며, 시뮬레이션 결과값을 MATLAB에 Output으로 보낸다(Fig.3.4)¹⁸⁾.

17) Mathworks, MATLAB 제품 설명, http://kr.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html?s_tid=srchtitle, 2015.6

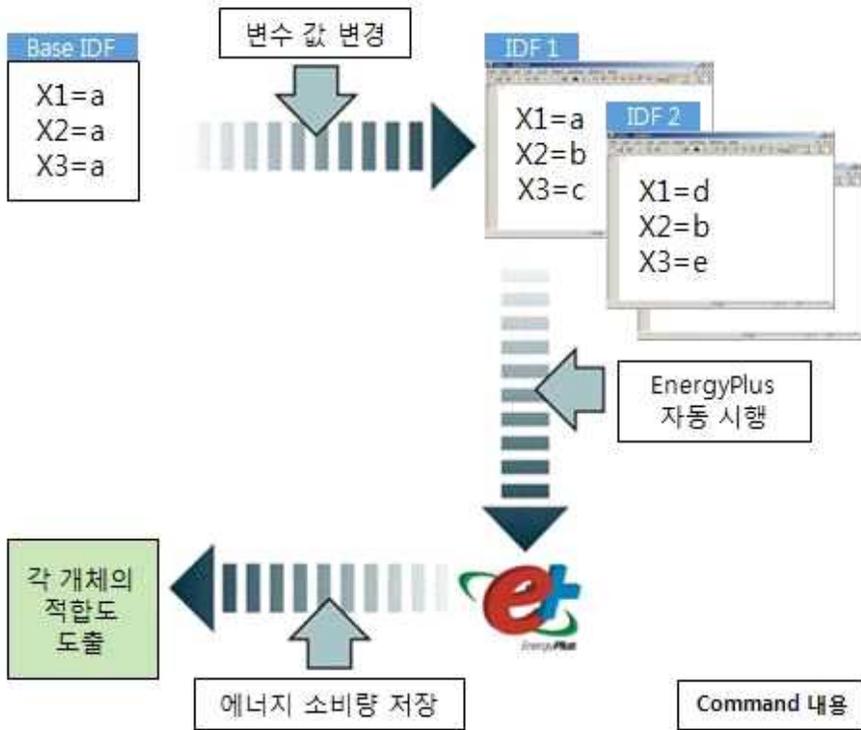


(Fig.3.4) EnergyPlus와 연동된 MATLAB 기반 유전 알고리즘 흐름도

MATLAB에서 유전 알고리즘을 통해 초기세대의 개체들이 임의적으로 생성되면, 기본 IDF 파일(EnergyPlus의 파일형식)에 각 개체를 담아 새로운 IDF 파일들을 만든다. 하나의 IDF 파일에는 설계변수들의 조합 하나가 담겨 있기에 EnergyPlus가 자동 실행되도록 지정하면 각 IDF 파일에 담긴 설계변수 값으로 건물 에너지 소비량이 도출된다. 그리고 이 값을 다시 MATLAB에서 읽도록 소환하여 적합도 함수를 작성하는데 사용한다. 이 과정을 수동으로 할 경우 많은 시간이 걸리기 때문에 본 연구에서는 M파일 형식의 Script(M-Script)를 작성하여 MATLAB Platform안에서 자동적으로 이루어

18) 서원준, op. cit. 그림 참조

지도록 하였다(Fig.3.5). 적합도 평가에 연동된 결과를 반영하고, 유전 알고리즘은 최대 세대수만큼 반복하여 최적 해를 얻게 된다.



(Fig.3.5) M-Script에 작성된 Command(명령)내용 개요

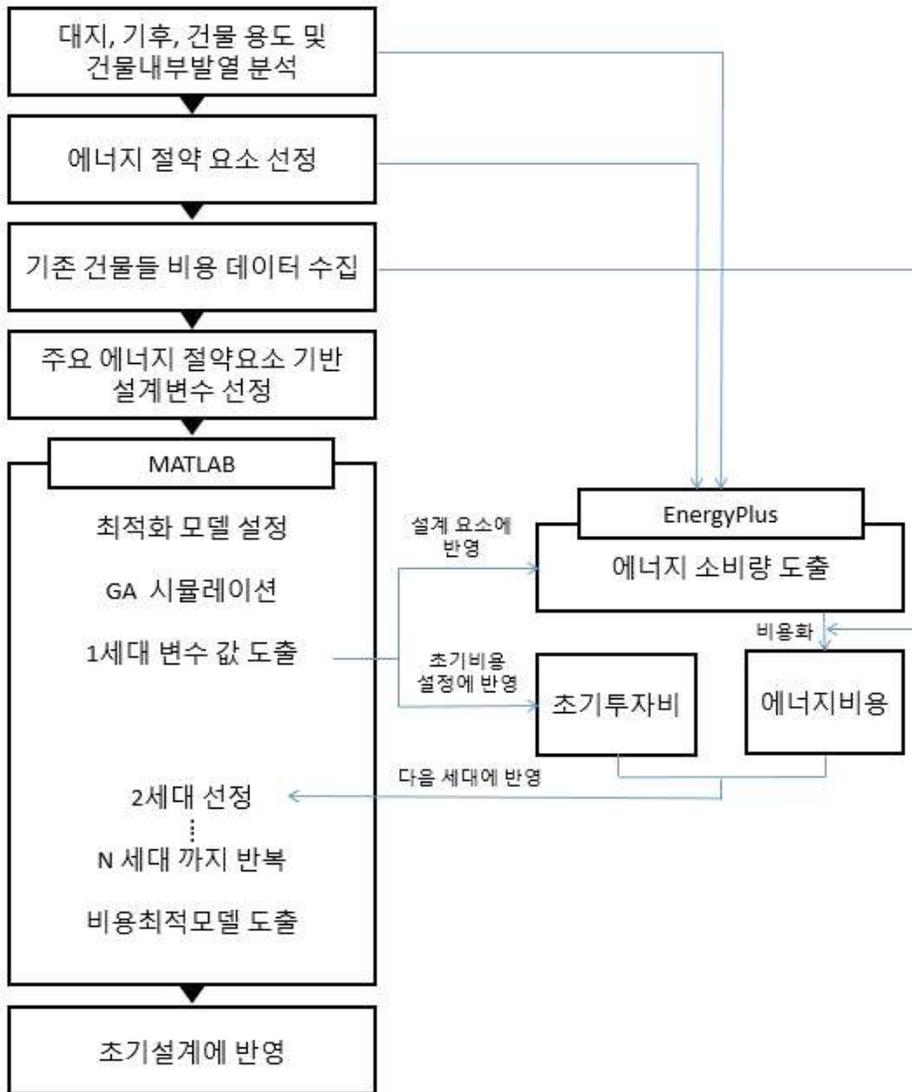
3.3 소결

에너지 절약을 고려한 비용최적화 모델을 도출하기 위해서는 적절한 최적화 기법, 비용 산출방법, 에너지 시뮬레이션과 최적화 기법을 연동 (Co-simulation)할 수 있는 방법의 선정이 필요하다.

본 연구에서 사용할 최적화 기법으로 유전 알고리즘(GA)을 선정하였고(2장), 비용 산출방법으로 LCC(생애주기비용)를 선정하였다. LCC분석은 건물의 생애주기동안 발생하는 모든 중요 비용을 등가 환산하여 경제성을 평가하는 방법으로, 초기투자비의 3~5배에 달하는 운영비용까지 포함하기 때문에 에너지 절약설계의 경제성을 판단할 수 있다. 고정적으로 지출되는 부분의 비용은 대안선정과정에서 큰 변수로 작용하지 못하기 때문에 중요 비용만을 LCC로 산정하였고, 초기투자비 중 주요 재료비 및 설치비와 운영비용 중 에너지 비용을 중요 비용 항목으로 선정하였다.

최적화 기법의 반복적인 알고리즘 수행을 위해 MATLAB을 사용하였다. 최적화 대상인 LCC 중 건물 에너지 비용부분은 기상데이터를 반영하여 연간 에너지 사용량을 수치화 하는데 한계가 있기 때문에 에너지 시뮬레이션인 EnergyPlus를 이용하였다. 두 프로그램 간 Co-simulation을 위한 방법으로는 MATLAB을 기반으로 최적화 알고리즘을 구현하되, 유전 알고리즘의 적합도 평가 단계에서 EnergyPlus로 도출되는 연간 에너지 비용 결과를 이용하였다.

이를 토대로 설기초기단계에서 이러한 모델을 적용하기 위한 과정은 (Fig.3.6)과 같다.



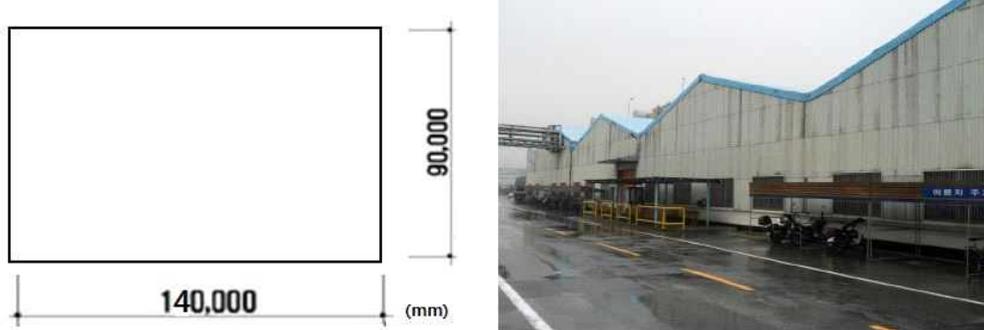
(Fig.3.6) 에너지 절약을 고려한 비용최적화 모델 도출 과정

제 4 장 대상건물의 에너지 시뮬레이션

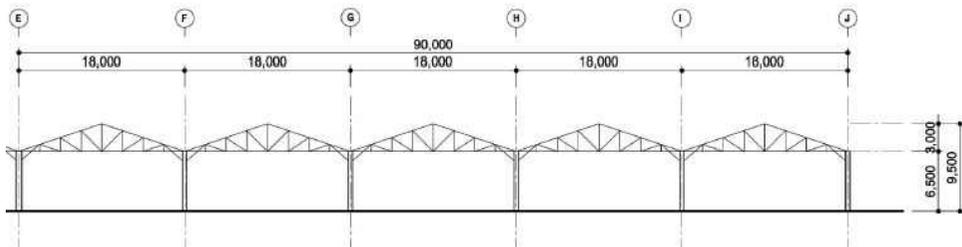
4.1 대상건물의 선정

본 연구에서는 대상건물을 선정하여 에너지 절약적인 설계에서 비용최적화 모델을 도출하는 방법의 Case study를 진행하였다. 이전까지의 건물 에너지와 비용최적에 관한 연구가 산업용 건물보다는 주로 주거와 오피스 건물에 초점을 맞춰왔기에 대상건물로 공장건물을 선정하였다.

대상공장건물은 울산지역에 위치한 자동차공장 건물로, 그 중 차체공장의 1/4 부분을 대상으로 하였다. 연면적은 $12600\text{m}^2(140\text{m} * 90\text{m})$ 로 6.5~9m의 층고를 가진 단층형 오픈 스페이스 건물이다. 지붕형태는 스패이 18m인 산형지붕으로 5개의 지붕 꼭대기가 있다.



(Fig.4.1) 대상공장건물의 평면도와 실제 사진



(Fig.4.2) 대상공장건물의 단면도

4.2 대상건물에 적용한 에너지 절약요소

4.2.1 공장건물의 특성

(1) 공장건물의 설계적 특성

공장건물은 일반건물과 다르게 대규모의 생산설비와 생산제품을 고려하여 대규모의 공간계획이 이루어진다. 작업 공정에 필요한 공간 확보를 위해 단일 오픈스페이스가 많으며 사용면적 대비 외피 면적이 넓은 편이다. 그 중에서도 지붕 면적이 높은 비중을 차지한다. 지붕의 형태는 생산 공정의 특성과 채광, 환기등과도 밀접한 관계가 있기 때문에 공장건물에 있어 매우 중요한 요소이다.

공장건물에서 지붕형태는 내부 생산 공정과 밀접한 관계가 있다. 일반적인 분류로는 평지붕, 산형지붕, 솟을지붕, 톱날지붕, 샬렌지붕 등이 있고 생산 공정의 특성에 따라 기둥 간격이나 환기, 자연채광계획을 고려하여 결정하게 된다.¹⁹⁾ 지붕의 경사는 1970년대에는 이음부의 누수방지를 위해 지붕경사가 급하고(경사도 3/10) 보온재를 사용하지 않았다. 그러나 80년대에 들어서면서 지붕의 경사가 다소 낮아졌고(1/10) 보온재도 사용하기 시작했다. 90년대에는 이음 없이도 시공이 가능해지면서 지붕의 경사도를 더 낮출 수 있게 되었다(3/100).

(2) 자동차공장(차체공장)건물의 설계적 특성

자동차공장 안에서도 대상건물인 차체공장은 프레스 공장에서 만들어진 패널들을 각종 용접로봇으로 자동차의 기본 골격을 완성시키는 곳이다. 대차가 운영되고 품질관리를 위해 중요위치에 검사용 로봇이 있다. 이때 외주에서 반입하는 물류의 동선을 고려해야 한다.²⁰⁾

자동차공장과 같이 내부공간이 넓은 공장은 외부의 빛을 내부 깊숙히 유입 시키기에 외벽의 측창으로는 한계가 있다. 그래서 주로 측창보다 지붕의 천

19) 채민수, 공장건물의 에너지 절약 계획에 관한 연구 : 자동차공장을 중심으로, 중앙대학교 석사학위논문, 2011

20) 엄성운, 자동차 생산공장의 배치계획에 관한 연구, 한양대 석사학위 논문, 2000

창을 통한 자연채광 유입이 효과적이며 천창, 고측창, 정측창 등이 주로 사용된다. 차체공장은 기계장비가 무겁고 진동이 심하기 때문에 단층형 건물형태를 많이 사용한다. 단층형은 공장건물에서 가장 많이 나타나는 형태로 화물운반을 위한 수평식 우송 수단의 기술공정에 유리한 편이다. 단층형 건물은 층고가 높기 때문에 천창으로 자연채광을 할 때 작업공간에 고른 조도를 형성한다. 그러나 높은 층고로 인해 상승기류로 인한 성층화 현상(Thermal Stratification)이 심하고 외비의 면적비율이 크기 때문에 외피에 의한 열손실 및 열획득이 크다.

지붕형태로는 기계장비의 규모가 크고 물류흐름이 활발하기 때문에 기둥스팬간격을 비교적 넓게 확보할 수 있는 산형지붕의 형태를 가진다.

4.2.2 공장건물의 특성을 반영한 에너지 절약요소

공장건물에서 에너지 소비량의 비중을 봤을 때 총에너지 사용량에서 제품생산기기의 에너지가 30%를 차지한다면, 냉난방 에너지가 40%, 조명에너지가 30%정도의 비율을 갖는다. 주요공정에 따라 차이는 있지만 조명부하는 총에너지 사용량의 40%까지도 차지한다.²¹⁾ 공장건물 내의 제품생산 기기 운영으로 인한 에너지 소비는 건물 디자인의 직접적인 영향을 받지 않지만, 그 외의 건물 에너지는 건물의 디자인을 통해 절약이 가능하다.

앞서 공장건물의 특성을 살펴본 결과, 건물의 형태는 기기 규모 및 작업 동선 상 넓은 표면적을 가지며 그 중 지붕 면적이 전체 표면적에서 약 70%정도를 차지한다.²²⁾ 또한 시공기술이 발달함에 따라 지붕의 각도도 점차 낮아지고 있어, 수평부재인 지붕은 수직적 요소들에 비해 태양열을 많이 받게 된다. 태양복사에너지를 실내에 전달하는데 있어 지붕이 큰 역할을 하는 만큼, 공장 지붕에 에너지 절약요소들을 적용한다면 그 효과가 클 것으로 예상된다.

21) Galayda, J., Yudelso, J. Inside Going Green: The little green book of corporate sustainability. 2009.

22) Wright, J., Loosemore, H., Farmani, R. Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm. Energy Build. 2002, 34, 959 - 972.

다. 이를 위해 공장건물 지붕에 적용하기 좋은 에너지 절약요소를 선행연구를 통해 정리하였다.

(1) PV 패널 설치

지붕은 PV(Photovoltaic)시스템을 활용하기에 여러 가지 장점을 가지고 있다. 지붕에 설치할 경우, 그림자에 의한 효율 감소를 방지할 수 있고, 지붕의 경사가 일사획득에 유리하며, 미적, 기능적으로 벽에 설치하는 경우보다 다양한 접근이 가능하다. 주로 남측 경사 지붕에서 활용되고 있으며 간편한 설치로 높은 발전효율을 기대할 수 있다.²³⁾ 대상건물과 같이 최소물매가 3/10이고 지붕경사면이 남향인 공장지붕에 PV 패널을 부착했을 때 일사효율은 약 90%에 달한다.²⁴⁾ 이와 같은 이점을 살려 PV를 적용한 공장지붕 사례는 (Fig.4.3)과 같다.



(a) 현대자동차 아산공장 PV 적용사례



(b) 정도 이너텍공장 PV 적용사례

(Fig.4.3) 공장 지붕 PV 적용사례

(2) 천창을 통한 자연채광

창을 통해 외부의 빛을 실내로 유입시키는 자연채광 기법은 주로 수직벽면의 측창을 통해 이루어지나, 건물의 특성을 고려하여 지붕면의 천창을 이용하기도 한다. 천창은 채광량 면에서 매우 유리하고, 조도분포의 균일화에 유

23) 이승환, 환경친화형 PV시스템의 건축물 적용기법 및 활성화방안에 관한 연구, 경희대학교 석사학위논문, 2002

24) 이충식, BIPV의 한국 산업용 건물 지붕 적용에 따른 효과분석 연구, 세명대학교 석사학위논문, 2009

리하며, 실이 어느 정도 넓어도 채광에 크게 불리하지 않다는 장점을 가지고 있다. 이는 층고가 높고, 넓은 오픈스페이스의 단층형 형태를 갖는 공장건물에 적합하다. 청천공의 상태가 많은 지역에서는 직사일광으로 채광하기가 상당히 곤란하므로 차양으로 차단하거나, 확산광으로 전환이 필요하며, 톱날지붕을 사용하여 균일한 북쪽의 태양광만 유입하는 것이 좋다.²⁵⁾ 이와 같은 이점을 살려 천창 적용한 공장지붕 사례는 (Fig.4.4)와 같다.

자연채광으로 인해 실내작업조도를 확보하면 조명의 디밍제어를 통해 조명 에너지 소비량이 많은 공장건물의 에너지 절감도 가능하다.



(a) 호제 양산공장 천창 적용사례



(b) 태림하이텍 천창 적용사례(내부)

(Fig.4.4) 공장 지붕 천창 적용사례

(3) 지붕의 단열성능 향상

건물의 외피를 통해 열손실과 열획득이 많이 일어나는데, 열이 흐르는 물체의 전열저항을 크게 하여 열 흐름을 적게 만드는 것이 단열의 역할이다. 단열방법 중 가장 많이 사용하는 방법은 재료의 두께를 증가시키거나 열관류율이 작은 재료를 사용하는 것이다.²⁶⁾ 공장건물의 외피구성 재료의 경우, 70~80년대에는 주로 석면슬레이트로 시공되었으나 이후 건축용 샌드위치패널이 널리 보급되어 있다. 샌드위치패널은 내부단열재 양면에 강판을 결합한 형태로 내부 단열재의 성능이 외피 전체의 열관류율에 미치는 영향이 크다.²⁷⁾

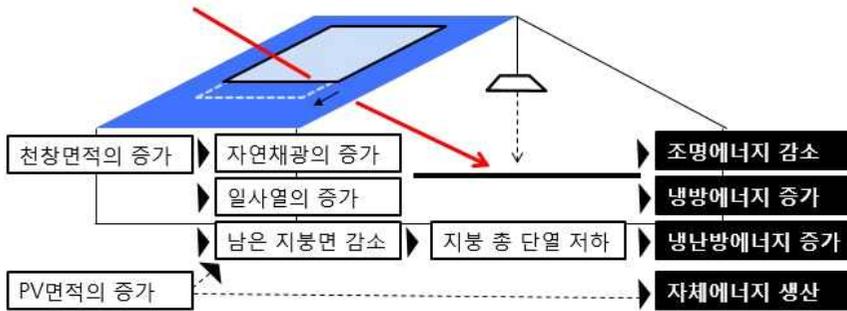
25) 유정수, 자연채광의 건축설계 적용기법 및 과정에 관한 연구, 건국대학교, 석사학위논문, 2001

26) 김종민, 건축물의 단열설계에 관한 연구, 삼척대학교 석사학위논문, 2005

27) 채민수, Op.cit.

4.2.3 대상건물에 적용한 에너지 절약요소

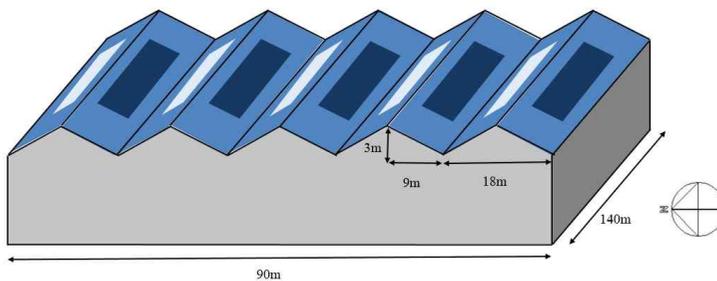
공장건물의 특성을 반영한 각 에너지 절약 요소들이 건물의 에너지를 절감하는데 좋은 효과가 있다는 것은 여러 연구들을 통하여 입증되어 왔다. 그러나 이러한 요소들은 서로 상호작용을 하면서 시너지 효과를 내기도 하지만, 반면에 상충되는 효과를 가져 오기도 한다(Fig.4.5).



(Fig.4.5) 에너지 절약 요소들 간 상호작용의 예

본 연구에서는 각 요소의 성능평가보다는 상충되는 에너지 절약요소들 간에도 최적조합을 도출하는 방법을 보이기 위해 다음과 같이 적용하였다.

대상 건물의 지붕 남쪽면 5개에는 PV 패널을 설치하였고, 지붕 북쪽면 5개에는 천창을 설치하였다(Fig.4.6). 지붕으로 들어오는 자연채광을 통해 작업면의 요구조도를 확보하고, 자연채광으로 해결하지 못하는 부분만 인공조명을 켜도록 디밍제어를 적용하였다. 샌드위치패널을 사용하는 지붕재의 심재인 단열재의 성능을 향상시키도록 하였다.



(Fig.4.6) 에너지 절약 요소를 적용한 공장 지붕

4.3 건물 에너지 시뮬레이션

4.3.1 에너지 시뮬레이션 도구

EnergyPlus는 BLAST(Building Loads Analysis and System Thermodynamics)와 미국 에너지부인 Department of Energy에서 개발한 DOE-2의 장점을 토대로 구성된 소프트웨어로, 프로그램이 가진 아래와 같은 특성들이 본 연구에 적합하다고 판단되어 에너지 해석 도구로 선정하였다.

- 사용자 인터페이스를 제공하기에 다양한 용도의 사용이 가능하다.²⁸⁾
- 통합건물에너지 시뮬레이션 엔진이기 때문에 건물의 내부발열, 자연채광, 자연환기, 조명제어, 신재생에너지 적용 등 현재 에너지 성능평가 소프트웨어 가운데 가장 다양한 에너지 분석을 실행하기에 여러 가지 에너지 절약 전략들을 적용 및 분석하기에 용이하다.
- 타 소프트웨어와는 달리 EnergyPlus만의 IDF 파일 형식을 운용하는데 이는 텍스트 기반으로 작성 및 수정이 가능하기 때문에 타 프로그램과의 연동에 유연하다.

28) 김지은, 개방형BIM기반 건물에너지 성능평가를 위한 시범객체라이브러리 체계 및 활용시나리오 구축 : OBES 시스템에서의 건물객체속성의 상호운용성 구현을 대상으로, 경희대학교 석사학위논문, 2012

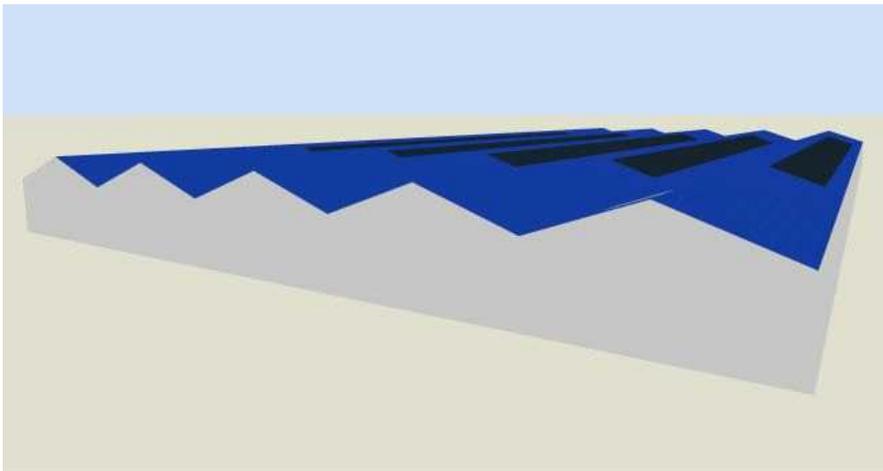
4.3.2 에너지 해석 모델링을 위한 정보

(1) 기상데이터 및 외피 모델링

시뮬레이션에는 대상건물의 위치를 고려하여 울산지역의 epw 날씨데이터를 사용하였고, 그 외에는 대상건물의 건축개요인 <Table 4.1>를 따랐다. 모델링은 DesignBuilder를 이용하여 기존 건물의 형태를 재연하였다(Fig.4.7).

<Table 4.1> 공장 모델의 개요

계획별 분류	계획요소	설정값
위치 & 날씨 데이터	위치	동경 129° 15', 북위 35° 36'
	날씨데이터	KOR_Ulsan.471520_IWEC.epw
규모 & 형태	실 치수 (m)	140 × 90 × 6.5
	층수	1층
	건물의 향	남향
	지붕의 높이 (m)	3



(Fig.4.7) DesignBuilder를 이용한 모델링

외피의 구성과 물성치는 <Table 4.2>와 같고, 여러 번 보수공사가 있던 건물인 것을 고려하여 대상건물의 가장 최신에 보수된 부분의 물성치를 기준으로 하였다.

<Table 4.2> 외피 구성 및 물성치

구성		재료	두께 (mm)	열전도율 (W/mK)	비열 (J/kg°C)	비중 (kg/m ³)	열관류율 (W/m ² K)
외벽	슬레이트 벽체	석면슬레이트	6.5	0.58	1004	2240	0.58
		단열재	50	0.03	837	30	
		밤라이트	45	0.58	1004	2240	
지붕	슬레이트 지붕재	외벽 물성치와 동일					
바닥	콘크리트	콘크리트	200	1.376	879	2198	2.80

천창이 없었던 기존 대상건물에 천창을 에너지 절약요소로 도입하면서 새롭게 창호의 물성치를 <Table 4.3>과 같이 설정하였다. 천창의 크기에 따른 자연채광 및 열전달의 효과를 보고자하므로 기존건물 측벽에 있던 창은 모델링에 반영하지 않았다.

<Table 4.3> 창호 물성치

구성	재료	두께 (mm)	열전도율 (W/mK)	차폐계수 (0~1)	태양열획득 (0~1)	열관류율 (W/m ² K)
이중창	맑은유리	6	0.90	0.7	0.8	2.4
	공기	13	0.02			
	맑은유리	6	0.90			

(2) 냉·난방 설정온도

영국 CIBSE²⁹⁾는 공장건물의 실내 적정온도로 겨울철 난방온도는 11°C~21°C, 여름철 냉방온도는 21 ~ 23°C로 제안하고 있다. 그러나 대상 지역인 한국의 울산지역과 영국의 런던지역의 평균기온을 비교했을 때, 겨울평균온도는 1°C 이하의 차이가 나지만, 여름 평균온도는 7°C 이상 나는 것을 확인하였다<Table 4.4>.³⁰⁾ 이를 참고하여 난방설정온도는 15°C로 하였고, 냉방설정온도는 영국기준보다 조금 높은 24°C로 하였다.

29) CIBSE(The Chartered Institution of Building Services Engineers) Guide, Environmental design

30) 기상청, http://www.kma.go.kr/weather/climate/average_regional04.jsp

<Table 4.4> 두 지역 간 평균기온의 비교

지역	여름 평균기온 (°C)	겨울 평균기온 (°C)
울산(한국)	24.1	3.4
런던(영국)	17.0	4.8

(3) 내부발열량

내부발열량은 동일 대상건물로 연구한 선행논문³¹⁾의 설정으로 유지하되, 본 연구에서는 축소된 모델사이즈를 고려하여 수정하여 사용하였다.

가) 내부기계발열량

대상공장은 Robot장비가 기계장비의 대부분을 차지하며, 각 공정(No.1, No.2)당 45대의 Robot장비가 있다. Robot 한 대당 소비전력은 1,527W, 총 Robot수량은 90대이므로 내부기계 전체 발열량은 137,430W이며, 단위면적당 발열밀도는 약 14.0W/m²로 산출되었다.

나) 인체발열량

대상공장은 크게 No.1공정과 No.2공정으로 나뉘며, 각 공정 당 42인씩 총 84명의 작업자가 근무를 하고 있다. 작업상태 및 장소에 따른 인체발열량은 ASHRAE Fundamentals³²⁾의 내용을 참조하였으며, 대상공장의 작업특성을 고려하여 가벼운 기계작업에 해당하는 현열 110W, 잠열 185W를 설정값으로 하였다.

다) 조명발열량

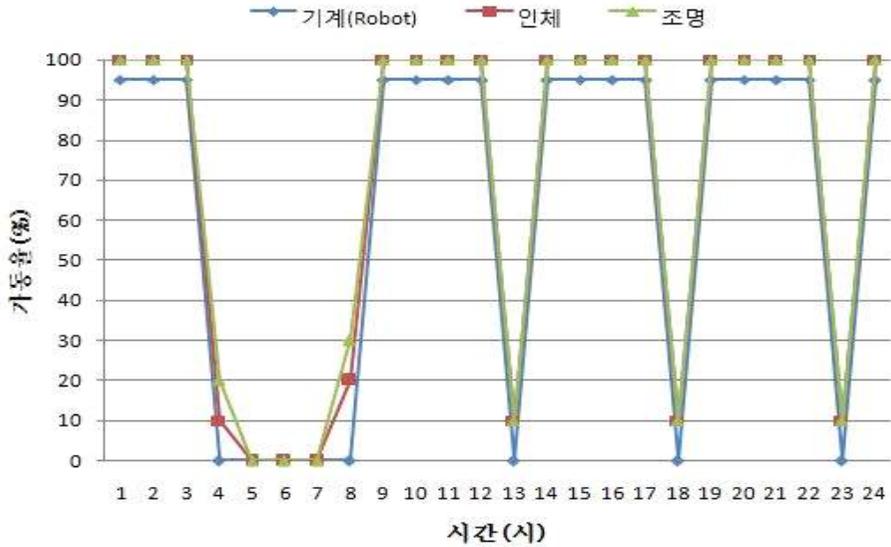
공장 내 조명기구류는 천창에 매달린 4등용(형광등 40W) 램프형을 사용하였고, 조명밀도는 4.4W/m²로 하였다

31) 채민수, Op.cit.

32) 2009 ASHRAE Handbook : Fundamentals, CHAPTER 18, NONRESIDENTIAL COOLING AND HEATING LOAD CALCULATIONS

라) 내부발열 스케줄

공장가동 스케줄은 월~금요일까지이며, 일별 작업시간은 주·야간 각 8시간 씩 총 16시간 가동하고 있다. 이에 따른 일일 내부발열 스케줄은 (Fig.4.8)와 같다.



(Fig.4.8) 대상공장 일일 내부발열 스케줄

마) 침기량 및 기계 환기량

EnergyPlus의 AirFlowNetwork 모델을 이용하여 연간 침기량을 적용하였고(0.31~0.6ACH), 각 공정별 급·배기팬의 풍량과 수량을 토대로 한 시뮬레이션 설정값으로는 배기팬의 환기율을 합산한 3.28ACH를 설정값으로 하였다.

(4) 에너지 절약 기술

가) PV 패널

남쪽을 향하는 지붕 5개면에 사용한 PV모듈의 모델 성능은 <Table 4.5>³³⁾와 같다.

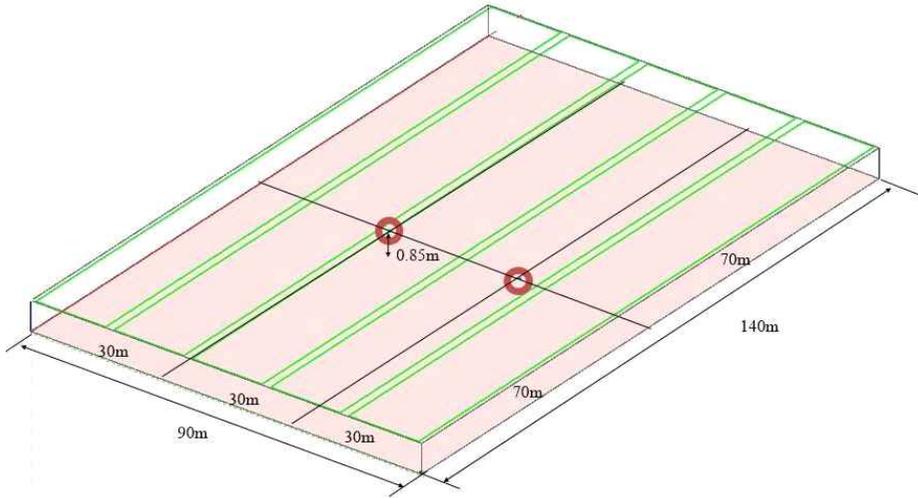
<Table 4.5> PV모듈 성능

모양	구분	규격
	Model	ASE 300-DFG/50
	Cell type	Crystalline Silicon
	Active area(m2)	3.37
	Max power(W)	300
	Module current at max power(A)	5.6
	Module voltage at max power(V)	50.5

나) 천창을 통한 자연채광 및 조명 디밍제어

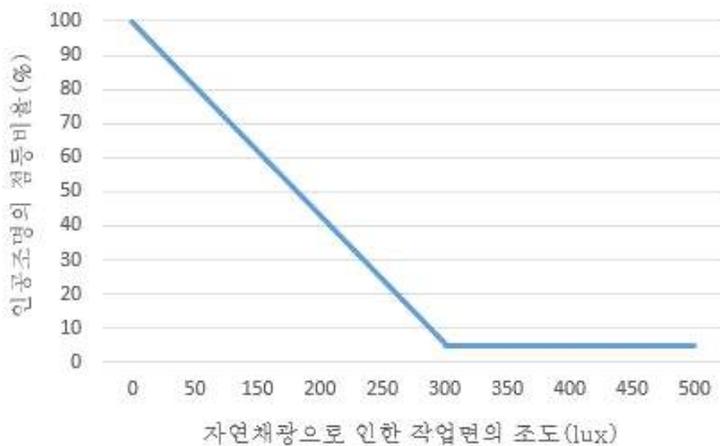
북쪽을 향하는 지붕 5개면에 천창을 설치하였고, 공장에서 가벼운 작업 시 필요한 작업면의 요구조도를 300lux로 설정하여 실내로 유입하는 자연채광을 최대한 활용하였다. 작업면은 바닥으로부터 0.85m 떨어진 지점으로 설정하였고, (Fig.4.9)과 같이 실내 두 곳에 조도 센서를 부착하였다.

33) ASE 300-DFG/50 모델정보, <http://www.affordable-solar.com>



(Fig.4.9) 실내 조도감지 센서의 위치

센서를 통해 현재 작업면의 조도를 체크하였고, 자연채광으로 300lux 미만이 확보되는 경우에 부족한 만큼만 인공조명을 켜는 디밍제어를 적용하였다. 이 때 적용한 디밍제어 시스템은 연속적 제어이며, 인공조명은 최소 5%의 점등은 유지하도록 하였다. 자연채광으로 인한 작업면에서의 조도와 인공조명의 점등비율과의 관계는 (Fig.4.10)과 같다.



(Fig.4.10) 조명 디밍제어 시 조도 제어 방식

제 5 장 대상건물의 비용 최적화 모델 도출

5.1 대상건물의 LCC 분석을 위한 선정

5.1.1 기본 가정

(1) 분석기간

건물은 서로 다른 수명을 가진 요소들의 집합체이기 때문에 생애주기를 정확하게 산정하는 과정은 쉽지 않다. 일반적으로 사용하는 법적수명주기는 내용연수라고도 하는데, 과세관청의 예규³⁴⁾에 따르면 철근 콘크리트조 공장의 기준내용연수는 20년으로 잡고 있다. 본 연구에서는 공장의 기준내용연수를 따라 20년을 분석기간으로 가정하였다.

(2) 할인율(=이자율)

이자율이 오른다고 할지라도 물가가 상승하여 돈의 가치가 하락한다면 수익이 생겼다고 하기 힘들다. 따라서 정확한 수익을 계산하기 위해 물가 상승률을 고려한 이자율을 사용하는데 이를 실질이자율, 실질할인율이라 한다.

본 연구에서 할인율은 <식 3.1>을 이용하여 실질할인율로 계산하였다. 매년 달라지는 이자율과 물가상승률을 모두 예측하는 것은 매우 어렵기 때문에 최근 10년간(2005년부터 2014년까지) 이자율과 물가상승률을 고려하여 계산된 실질할인율의 산술평균값을 사용하였다. 10년 동안의 데이터를 산술평균낸 결과, 1.32%를 얻었다. 계산에 필요한 이자율은 한국은행 경제통계시스템³⁵⁾에서 정기예금(5년 이상)자료를 이용하였고 소비자 물가지수와 물가상승률은 국가 통계포털³⁶⁾ 자료를 이용하였다.

34) 법인세법 시행규칙 별표5 제 3호, 2011.6

35) 한국은행 경제통계시스템, <https://ecos.bok.or.kr/>

36) KOSIS 국가통계포털, <https://kosis.kr/>

<Table 5.1> 실질할인을 계산을 위한 10년간 데이터

년도	이자율(%)	소비자 물가지수	물가상승률(%)	실질할인율(%)
2005	3.22	86.14	2.75	0.46
2006	3.98	88.07	2.24	1.70
2007	4.47	90.30	2.53	1.89
2008	5.22	94.52	4.67	0.53
2009	3.80	97.13	2.75	1.02
2010	4.59	100.00	2.30	2.24
2011	4.31	104.00	4.00	0.30
2012	3.92	106.28	2.19	1.69
2013	3.20	107.67	1.31	1.87
2014	2.83	109.04	1.27	1.54
평균	3.95	98.32	2.60	1.32

(2010년을 소비자물가지수를 100으로 두었을 때 기준)

(3) 비용통합 산정방식

장기간 동안의 비용을 비교하기 위해서는 기준시점이 필요하다. 그렇기 때문에 미래의 비용을 현재의 값, 현재 가치로 만들어줄 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 건물 LCC 분석 연구에서 많이 사용되고 있는 현가법을 사용하였다. 실질할인율(이자율) 1.32%로, 20년(n)동안 발생하는 에너지 비용을 매년 말에 합산하여 연단위로 현가로 환산한다고 가정했을 때, <Table 3.1>의 현가법 계산식을 통해 17.48을 현가가치계수로 산정하였다.

5.1.2 비용 산출

초기투자비용은 에너지 절약 요소로 적용한 부위만 산정하였다. PV 패널은 현재 산업통상자원부에서는 신·재생에너지보급(건물지원사업) 정책에 따라 지원을 받을 수 있다. 국가에서 고시하는 기준인 <Table 5.2>에 따라 계산한 결과, 2015년에는 약 26%정도의 지원이 가능하다. PV 패널은 K대학의 설치 사례를 참고하여 단위가격을 산정한 뒤, 74%만 부담한다는 가정 하에 단위가격을 산정하였다. 유리는 한국 유리공업 주식회사 견적과 한국물가자료를 참고하였고, 지붕은 S 건축사사무소의 실제 공장건물들의 사례들을 통하여 부위별로 단위면적당 금액을 산정하였다. 세 부위의 단위가격을 정리한 내용은 <Table 5.3>과 같다.

<Table 5.2> 2015년도 신·재생에너지보급 - 건물지원사업의 지원 기준

구분		지원범위 (단위 사업당)	지원예산액 (백만원)	보조금지원단가 (천원,VAT포함)	비고
건물 지원 사업	태양광 (고정식)	일반	75kW 이하	1,260/kW	계통 연계기준
		축사 및 축산시설		1,760/kW	

<Table 5.3> 재료비 산정 데이터

부위	단위가격(천원/m ²)	출처
PV	309.6	K대학 설치 사례 ³⁷⁾ , 건물지원사업 기준 ³⁸⁾
유리	49.51	한국 유리공업 주식회사 견적 및 물가정보지
지붕	$376.39 * (1/U_f * 0.28)^{0.35} + 922$	지붕재 단열성능에 따른 S사 가격 통계

(U_f:단열재의 U-value, W/m²K/)

37) 어승희 외 3, 강원대학교 내 PV 모듈 설치를 위한 적정부지 선정 및 연간에너지 생산량 예측, 강원 농업생명환경연구 25(2) : 37-45

38) 산업통상자원부, 2015년도 신·재생에너지보급 - 건물지원사업, 2015

운영비용은 kW당 원 단위로 환산할 수 있도록 사이버한전에서 제공하는 산업용 전력(갑) I 고압A, 선택 I 을 사용하였다. 2013년 11월 21일부터 적용되는 전력량 요금 데이터는 <Table 5.4>와 같다.

<Table 5.4> 전력량 요금 데이터

구분	기본요금 (원/kW)	전력량 요금(원/kWh)		
		여름철(6~8월)	봄·가을철(3~5,9~10월)	겨울철(11~2월)
산업용 전력 (갑) I 고압A 선택(I)	6,490	89.6	65.9	89.5

5.2 대상건물의 비용 최적화를 위한 선정

최적화를 위해서는 크게 설계변수, 제약조건, 목적함수, 최적화 기법선정 등이 이루어져야 한다. 2.2장에서 고찰한 내용을 간단히 정리하자면, 설계변수는 우리가 설계 시 조절하고자 하는 요소를 말한다. 제약조건은 변수가 무한의 변화가 가능한 것은 아니기 때문에 각 변수의 범위 제약이 있고, 변수 간 연관된 상황으로 인한 관계식의 형태의 제약이 있다. 목적함수는 우리가 최종적으로 최적화(최대화 혹은 최소화) 시키려는 대상을 말하며, 최적화 기법은 최적화 문제를 해결하는 데 있어 최적 해를 찾기 위해 사용하는 방법을 말한다.

5.2.1 설계변수 및 제약조건

대상건물에 적용한 에너지 절약요소를 기반으로 선정한 설계변수와 각 변수의 범위 제약은 다음과 같다.

(1) PV 패널 면적비

여기서 PV 패널 면적비란, 남쪽 지붕면적 대비 PV 패널의 면적의 비율을 말한다. 지붕의 면적은 고정되어 있으므로 PV 패널 면적비가 커질수록 PV 패널 면적 역시 증가한다. PV 패널 면적이 증가하면, 건물 자체적으로 기상조건이 좋은 때에 에너지 생산이 가능하므로 에너지 비용감소에 유리하다. 그러나 여름철 낮 시간대 패널의 과열로 인한 냉방비용 증가 및 고가인 PV 패널 자체의 재료비 및 설치비 때문에 비용감소에 불리할 수 있다. 이와 같이 PV 패널의 면적은 에너지비용의 측면에서 민감하기 때문에 설계요소로 선정하였다.

변수의 범위 제약으로는, 지붕에 설치하는 PV 패널의 가용 유효면적 비율³⁹⁾을 고려하여 남쪽 지붕면 면적의 65%를 최대 설치면적으로 두었다. 이를

39) 윤중호 외, 공동주택의 태양광시스템 적용성 평가를 위한 전기부하 매칭 해석연구,

수식으로 표현하면 <식 5.1>과 같다.

PV 널면적비

<식 5.1>

$$0 < X_1 \leq 0.65$$

(2) 천창 면적비

여기서 천창 면적비란, 북쪽 지붕면적 대비 천창 면적의 비율을 말한다. 지붕의 면적은 고정되어 있으므로 천창 면적비가 커질수록 천창 면적 역시 증가한다. 천창 면적이 증가하면, 자연채광을 통해 실내에 충분한 조도가 확보되어 디밍제어를 통해 조명을 적게 사용하므로 조명으로 인한 전기에너지 비용감소에 유리하다. 그러나 창을 구성하는 유리는 단열성능이 타 자재들보다 취약하기 때문에 일사에 인한 냉방에너지 비용 및 해가 진 후 난방에너지 비용 상승으로 이어져 비용감소에 불리하다. 이와 같이 천창 면적은 에너지비용의 측면에서 민감하기 때문에 설계요소로 선정하였다.

변수의 범위 제약으로는, 지붕에 설치하는 창문의 가용 유효면적 비율⁴⁰⁾을 고려하여 북쪽 지붕면 면적의 85%를 최대 설치면적으로 두었다. 이를 수식으로 표현하면 <식 5.2>과 같다.

$X_2 =$ 천창면적비

<식 5.2>

$$0 < X_2 \leq 0.85$$

(3) 지붕의 단열재 두께

여기서 지붕이란, PV패널의 면적과 천창의 면적을 제외한 부분을 말하며, 그 부분의 샌드위치 패널에서 심지 역할을 하는 단열재의 두께를 변화시키려 한다. 단열재 두께를 제외한 나머지 물성치가 고정되어 있으므로 단열재 두

한국태양에너지학회 춘계학술발표회 논문집, 2008. 04

40) 이종식, 공동주택 건축기술요소의 친환경 성능평가에 관한 연구, 중앙대학교 석사학위논문, 2009

L : 천창 면적 (Skylight Area)..... X 와 연관 (related X_2)
 A_{AI} : 추가 단열재 적용 면적 (Additional Insulation Area).. X_3 와 연관 (related X_3)

(2) 조명 디밍에 의한 관계

천창을 통한 자연채광으로 작업면에 확보되는 조도와, 인공조명으로 작업면에 확보되는 조도를 합하여 작업면의 설정 조도(300lux)를 만족시키도록 디밍 제어를 실시하였다. 따라서 천창의 면적비(X_2)는 자연채광량에 영향을 주고, 인공조명은 조명에너지 비용에 영향을 주는 관계를 갖는다. 관계식을 표현하면 <식 5.5>와 같다.

$$I_{DI} + I_{AI} \geq I_O \quad \text{<식 5.5>}$$

여기서,

I_{DI} : 자연채광으로 인한 작업면 조도 X_2 와 연관 (related X_2)
 (Illuminance on the work place from Daylighting)

I_{AI} : 인공조명으로 인한 작업면 조도..... 조명에너지 비용과 연관
 (Illuminance on the work place from Artificial lighting)

I_O : 작업면의 설정 조도 (Objective Illuminance on the work place).....고정(fixed)

설계변수들의 관계를 보면, 에너지 절약 요소들 중에 PV 패널 면적비와 천창 면적비는 서로 독립변수이나, 조명의 디밍제어는 천창 면적비에 따라 움직이며, 단열성능이 향상된 지붕 면적은 PV 패널 면적과 천창의 면적을 제외한 부위에 적용되므로 PV 패널 면적비와 천창 면적비에 종속되었다고 볼 수 있다. 설계변수 및 제약조건을 정리하면 <Table 5.5>와 같다.

<Table 5.5> 설계변수 및 제약조건

설계변수	범위	항목	관련변수	제약 조건
PV 면적비	$0 < X_1 \leq 0.65$	면적	X_1, X_2, X_3	$A_I = A_{TR}(1 - X_1 - X_2)$
천창 면적비	$0 < X_2 \leq 0.85$	조명디밍	X_2	$I_D + I_{AI} \geq I_O$
지붕 단열재 두께	$0.05 < X_3 \leq 0.26$	-	-	-

5.2.2 목적함수

제약조건 안에서 설계변수들(X_2, X_3)의 값이 각각 움직일 때, 최종적으로 문제에서 최적화 시키려는 대상인 목적함수($f(X)$)는 ‘대상건물의 생애주기비용(LCC)’이다. 이를 간단한 식으로 표현하면 <식 5.6>과 같다.

$$\begin{aligned}
 f(X) &= f(X_1, X_2, X_3) && \text{<식 5.6>} \\
 &= C \cdot (C_i + C_o) = C_P \cdot (C_m + C_E) \\
 &= C_P \cdot [C_m + C_C \cdot (E_C + E_H + E_L - E_{PV})]
 \end{aligned}$$

여기서,

C_p : 현가환산계수 (Conversion factor of Present value)

C_i : 초기비용 (Initial Cost)

C_o : 운영비용 (Operation Cost)

C_m : 재료비용 (Material Cost)

C_E : 에너지비용 (Energy Cost)

$$= (E_C + E_H + E_L - E_{PV})$$

여기서,

C_C : 비용환산계수 (Cost Conversion factor)

E_C : 냉방에너지 (Cooling Energy)

E_H : 난방에너지 (Heating Energy)

E_L : 조명에너지 (Lighting Energy)

E_{PV} : PV 생산에너지 (Energy production from PV)

5.2.3 유전 알고리즘을 위한 선정

유전 알고리즘을 적용하는 한 세대에 포함 된 개체 수는 일반적으로 30~200개 범위 안에서 결정하는데⁴²⁾, 본 연구에서는 30개로 설정하였다. 해집합으로 표현되는 세대는 알고리즘이 진행되면서 각각의 개체가 우성으로 향상되고, 수렴조건에 도달하면 반복이 종료된다. 본 연구에서는 다섯 세대 이상 같은 최적 개체를 반복하거나 최대 100세대까지 도달하면 알고리즘이 종료되도록 설정하였다. 한 세대가 반복 연산되는 알고리즘 안의 연산자들은 기존에 많이 사용하는 방식으로 선정하였다.

선택 : Tournament Selection

교배 : Uniform Crossover (확률 100%)

돌연변이 : 비트 단위 (확률 2%)

유전 알고리즘에 적용된 설계변수는 앞서 선정한 변수의 제약범위 안에서 2진수로 표현하기 용이하도록 2의 배수로 분할하였다. PV 면적비는 2^6 개, 천창 면적비는 2^7 개, 지붕 단열재 두께는 2^3 개의 대안을 가지면서 한 개체가 갖는 비트 수는 16개가 되고, 세 가지 설계변수가 가질 수 있는 조합의 수는 65536가지 ($2^6 * 2^7 * 2^3$) 이다.

42) 서원준, Op.cit.

5.3 유전 알고리즘에 의한 최적화

대상건물에서 에너지 절약요소들을 적용했을 때 설계변수와 제약조건, 그리고 목적함수를 작성한 것을 토대로 MATLAB에서 유전 알고리즘을 이용하여 비용최적화를 실시하였다(3.2장 참조). 또한, 동일한 방식으로 에너지 최적화 모델을 도출하여 비용 최적화모델과 비교하였다. (여기에서 에너지 최적화모델이란 에너지를 가장 적게 소비하는 모델을 말하며, 비용 최적화모델은 총 비용이 가장 적게 드는 모델을 말한다.) MATLAB과 EnergyPlus 프로그램 간 연동을 위해 작성한 M-script의 실제 모습은 (Fig.5.1)과 같다.

```

1 % Main function.
2
3 clear;
4 clc;
5
6 plant_objective_function; % Function to get plant variable.
7 plant_pop_initialize; % Generate initial population.
8
9
10 for gen=1:100
11     plant_fit_eval; % Fitness evaluation
12
13     plant_selection_father; % Selection of father
14     plant_selection_mother; % Selection of mother
15     plant_crossover; % Recombination
16     plant_mutation; % Mutation
17
18
19     pop_old=pop_new; % Copy new population into old population.
20
21     savefit(gen)=max(fitness); % Save maximum fitness of each generation.
22     saveavg(aen)=sum(fitness)/100; % Save average fitness of each generation.
23     disp(gen);
24 end
25 genlog=1:100;
26 plot(genlog,savefit_genlog,saveavg);
27 h=legend('Maximum fitness of each generation',2);
28 set(h,'interpreter','none');
29
% plant_fit_eval.m
1 % fitness
2
3 for cho=1:30
4     var_p(cho,1)=bin2dec(num2str(pop_old{1,cho}(1,1:6)))+1;
5     var_p(cho,2)=bin2dec(num2str(pop_old{1,cho}(1,7:13)))+2+5.5197;
6     var_p(cho,3)=bin2dec(num2str(pop_old{1,cho}(1,14:16)))+0.03+0.05;
7 end
8
9 fid=fopen('plant1-12.txt','w');
10 fid0=textscan(fid,'%s','delimiter','\n');
11
12 formatSpec='%d, ';
13 str1=sprintf(formatSpec, var_p(1,1));
14 str12=sprintf(formatSpec, var_p(1,2));
15 str13=sprintf(formatSpec, var_p(1,3));
16 str21=sprintf(formatSpec, var_p(2,1));
17 str22=sprintf(formatSpec, var_p(2,2));
18 str23=sprintf(formatSpec, var_p(2,3));
19 str31=sprintf(formatSpec, var_p(3,1));
20 str32=sprintf(formatSpec, var_p(3,2));
21 str33=sprintf(formatSpec, var_p(3,3));
22 str41=sprintf(formatSpec, var_p(4,1));
23 str42=sprintf(formatSpec, var_p(4,2));
24 str43=sprintf(formatSpec, var_p(4,3));
25 str51=sprintf(formatSpec, var_p(5,1));
26 str52=sprintf(formatSpec, var_p(5,2));
27 str53=sprintf(formatSpec, var_p(5,3));
28 str61=sprintf(formatSpec, var_p(6,1));
29 str62=sprintf(formatSpec, var_p(6,2));
30 str63=sprintf(formatSpec, var_p(6,3));
31 str71=sprintf(formatSpec, var_p(7,1));
32 str72=sprintf(formatSpec, var_p(7,2));
33 str73=sprintf(formatSpec, var_p(7,3));
34 str81=sprintf(formatSpec, var_p(8,1));
35 str82=sprintf(formatSpec, var_p(8,2));
36 str83=sprintf(formatSpec, var_p(8,3));
37 str91=sprintf(formatSpec, var_p(9,1));
    
```

(Fig.5.1) 작성 된 M-Script 일부

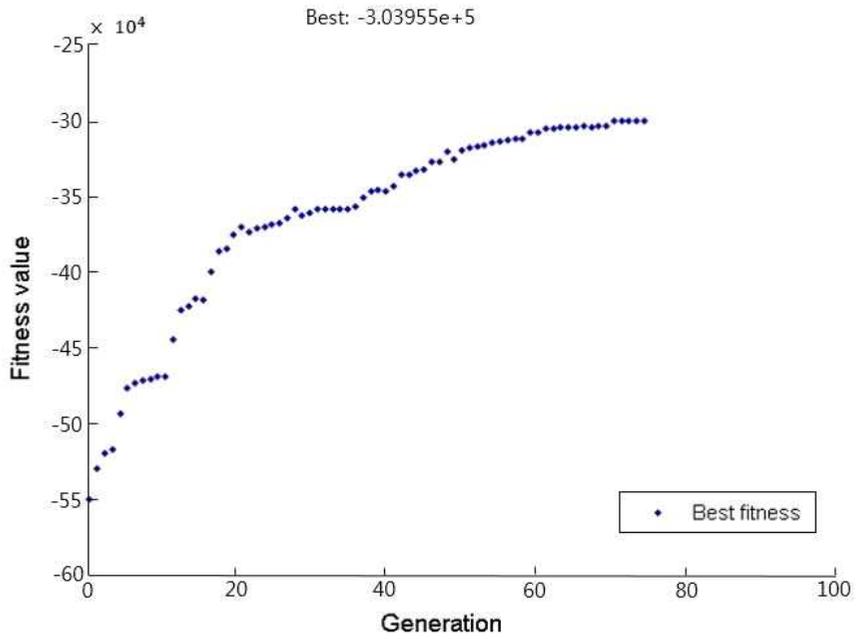
5.3.1 적합도

유전 알고리즘에서는 적합도가 높을수록 적합하다고 판단하나, 본 연구의 목적함수인 비용은 최소화되어야 하므로 적합도 함수는 <식 5.7>과 같이 목적함수에 음의 값을 취하였다.

$$\text{Fitness Value(적합도 함수값)} = -(\text{목적함수 값}) \quad \text{<식 5.7>}$$

유전 알고리즘을 실행시키면 세대가 진행됨에 따라 최대 적합도를 가지는 개체가 얼마의 적합도 값을 가지는지 표시한다. 세대가 진행될수록 전반적으로 최대 적합도는 상승하는 추세를 보이다 74세대에서 진화가 완료되었다 (Fig.5.2). 초중반에는 비교적 빠른 진화를 나타내다 후반부로 갈수록 수렴속도가 줄어드는 것을 볼 수 있었다. 이는 해집단이 전체적으로 좋은 품질의 유전자를 가지고 있어서 선택에 있어 거의 균등한 확률로 부모 세대의 개체를 선택하고 부족한 개체를 찾아 보완하는데 시간이 걸리기 때문이며, 간혹 변이에 의해 양질의 유전자가 오히려 낮은 품질로 바뀌는 경우가 발생하기도 하기 때문이다.⁴³⁾

43) Data Analysis for Investment & Control, <http://nerve.tistory.com/130>, Matlab을 이용한 유전 알고리즘 예제 참조



(Fig.5.2) 세대(Generation)의 진행에 따른 최대 적합도(비용최적화)

5.3.2 최적화 결과

(1) 에너지 최적화 결과

비용을 고려하지 않은 에너지 최적화의 결과, PV패널 면적비()가 65%, 천창 면적비(x_2)가 17.8%, 지붕단열재 두께(x_3)가 0.26m인 모델이 최소의 에너지를 소비하며, 그 때의 에너지 소비량은 1,465,157kWh였다.

(2) 비용 최적화 결과

에너지 절약을 고려한 비용 최적화의 결과, PV패널 면적비(x_1)가 1%, 천창 면적비(x_2)가 17.8%, 지붕단열재 두께(x_3)가 0.26m인 모델이 최소의 생애주기 비용을 가지며, 그 때의 비용은 30억 3955만원이었다.

5.3.3 에너지 최적화 모델과 비용 최적화 모델의 비교 분석

본 연구는 에너지 절약적인 설계에서 비용 최적화를 도출하는 방법론을 제시하는데 그 목적이 있으나, 에너지 최적화모델과의 비교를 통해 비용 최적화모델의 중요성을 보이고자 하였다.

(1) 최적조합 변수별 비교분석

가) PV 패널 면적비(x_1)

PV 패널 면적비의 변수 범위 $< \leq 0.65$ 안에서 에너지만 고려한 때는 최대(65%)로, 에너지와 비용을 함께 고려할 때는 최소(1%)로 사용하는 것을 볼 수 있다. 이는 에너지 절약만 고려할 때는 자체 에너지를 가장 많이 생산할 수 있도록 PV 패널 면적비를 가장 크게 하는 것이 좋지만, 비용까지 고려했을 때는 생산 에너지로 절약된 운영비용보다 큰 초기투자비로 인해 PV 패널 면적비가 가장 작아야 최적화 모델이 된다. 건물의 내용연수 20년 안에서

는 PV 패널이 비용적 측면에서 회수기간을 다하지 못한 것으로 판단된다.

나) 천창 면적비()

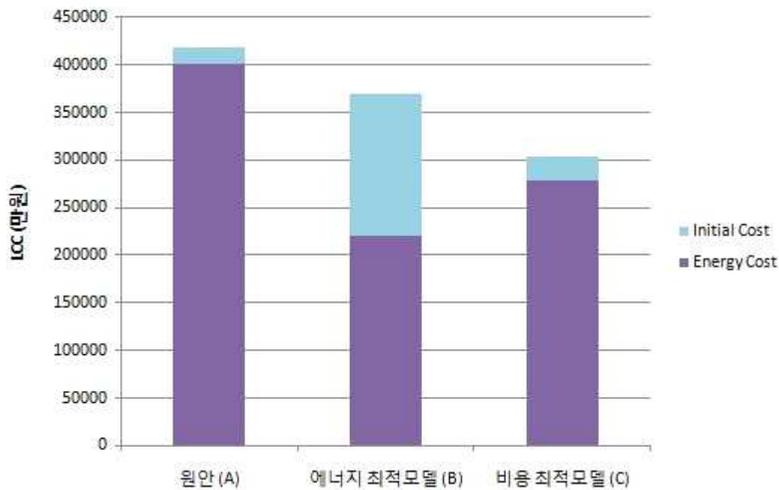
천창 면적비는 변수 범위 $< \leq 0.85$ 안에서 에너지만 고려한 최적화모델과 에너지와 비용을 함께 고려한 최적화모델이 동일한 값(17.8%)을 보였다. 에너지 절약 측면에서 일년내내 자연채광으로 평균 300lux를 확보할 수 있는 천창 면적이라면 조명에너지를 절약하는데 충분하며, 그 이상으로 천창 면적비가 커질 경우에 냉난방 에너지에 손실을 초래되기 때문에, 그 적정 천창 면적비는 17.8%인 것으로 나타났다. 비용적 측면에서도 동일한 결과를 보이는 것은 천창 면적비를 17.8%보다 더 줄여서 초기투자비를 낮추는 것보다 에너지 최적화모델에서의 운영비용 절감이 더 큰 것으로 판단된다.

다) 지붕 단열재 두께(X_3)

지붕 단열재 두께는 변수 범위 $0.05 < X_3 \leq 0.26$ 안에서 에너지만 고려한 최적화모델과 에너지와 비용을 함께 고려한 최적화모델이 동일한 값(0.26m)을 보였다. 에너지 절약적인 측면에서는 지붕 단열재 두께는 두꺼울수록 냉난방 에너지를 줄일 수 있기 때문에 범위 내 최대값에서 에너지 최적화모델이 된다. 비용적인 측면을 고려했을 때 천창 면적비와 마찬가지로 범위 내 최대값을 갖는 것이 초기투자비를 낮추는 것보다 에너지 절약으로 인한 운영비용 절감이 더 큰 것으로 판단된다.

(2) LCC 결과 비교분석

원안(A), 에너지 최적화모델(B), 비용 최적화모델(C)의 LCC를 계산하여 비교한 결과, 에너지 비용은 $A > C > B$ 순이었지만 LCC를 기준으로 보면 총 비용은 $A > B > C$ 순으로 나타났다. 에너지 최적화모델은 비용 최적화모델에 비해 에너지는 최대로 절약할 수 있지만 비용은 고려하지 않았기 때문에 초기 투자비가 상대적으로 커서 총 비용(LCC)은 원안 대비 11.5% 절감하는데 그쳤다. 반면 비용 최적화모델은 에너지 최적화모델에 비해 상대적으로 적은 에너지를 절약시켰지만 초기투자비가 크게 늘지 않았기 때문에 총 비용(LCC)은 원안 대비 27.3%를 절감하였다. (Fig.5.3)



(Fig.5.3) 대안 간 생애주기비용 비교

사례연구를 통한 결과를 정리하면 <Table 5.5>와 같다.

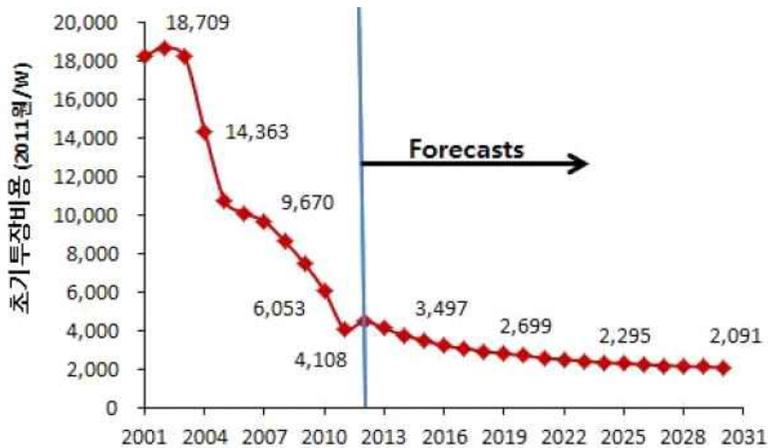
<Table 5.6> 사례연구 결과

대안	변수			LCC(원)	LCC 절감량 (원안대비)
	(%)	X_2 (%)	X_3 (m)		
원안	0	0	0.05	4,182,586,000	-
에너지 최적화모델	65	17.8	0.26	3,699,227,000	11.5%
비용 최적화모델	1	17.8	0.26	3,039,549,000	27.3%

5.4 PV 패널의 초기투자비용에 따른 비용 최적화 모델

본 연구의 비용최적화 모델에서는 PV 패널을 사용하지 않는 것이 가장 적은 생애주기비용을 요구한다. 그러나 기술의 발전으로 PV 패널의 비용은 감소되어 왔고, 향후 가격은 점차 하락할 것으로 예상된다. 비록 현재의 기술로는 비용 최적화 모델에 적합하지 않다 하더라도, PV 패널의 가격 추이 및 예측 비용을 기반으로 PV 패널이 비용최적화 모델에 도입될 수 있는 단가를 예측할 수 있다.

앞서 작성한 비용최적화 모델에 PV 패널의 가격을 네번째 변수인 X_4 로 지정하고, X_4 의 범위를 2011년도(와트(W) 당 4108원)의 가격부터 2030년도(와트 당 2091원)의 예측 비용까지로 지정하였다. 기존에 적용한 PV 패널은 2013년도의 가격대였지만, 2011년도에 비해 2012년도에 가격이 소폭 증가한 점을 고려하여 2011년~2030년을 범위로 선정하였다.(Fig.5.4)⁴⁴⁾ 참고)



(Fig.5.4) PV 패널의 가격 추이(~2002년) 및 예측자료

44) 정윤경, 태양광 산업 및 모듈가격 전망과 대내외 대응전략 연구, 에너지경제연구원, 2013

비용 최적화 결과, PV 패널이 와트 당 2317원(약 21만원/m²)이 되는 2024년경에는 PV 패널 면적비가 5%일 때가 비용 최적화 모델이 되며, 그 시점을 지나면 이후에는 PV 패널 면적비가 증가할수록 생애주기비용은 최소가 된다.

<Table 5.7> PV 가격 변동을 고려한 사례연구 결과 (2024년경 예측)

대안	변수				LCC(원)	LCC 절감량 (원안대비)
	(%)	X ₂ (%)	X ₃ (m)	X ₄ (원)		
비용 최적화모델	5	17.8	0.26	2317	2,987,940,000	28.5%

그러나 에너지 비용의 현가를 산정함에 있어 에너지 비용의 상승률은 일반 물가 상승률과는 차이가 있기 때문에 이를 연구에 반영한다면 PV 패널은 비용최적화모델에 더 빠른 시기에 도입할 수 있을 것으로 판단된다.

제 6 장 결론

본 연구는 초기설계단계에서 에너지 절약 기법을 적용하는데 있어 LCC 차원의 경제성 분석을 통해 최적화모형을 도출할 수 있도록 최적화 기법을 사용하는 방법을 제안하였다. 최적화 기법의 종류와 건물에서의 최적화 연구 사례들을 고찰하여 최적화 기법을 선정하였고, 건물 에너지시뮬레이션 결과를 LCC 수준으로 비용화 하였다. 에너지와 비용을 모두 고려하기 때문에 에너지 시뮬레이션과 비용최적화를 진행하는 도구 간 Co-simulation을 구성하였다. 에너지 절약기법과 유전 알고리즘을 기반으로 비용최적화 Process를 제시하였고, 모델의 이해를 돕기 위해 한 공장건물을 대상으로 사례연구를 실시하여 에너지 절약을 고려한 비용최적화모형을 도출하였다.

비용최적화모형을 도출하는 과정 및 사례연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 최적화 기법의 선정

최적화 기법은 제약 조건 안에서 최적의 결과를 찾아주는 과정으로서 그 종류가 많아 해결하려는 문제의 성격에 따라 적합한 기법을 선정하는 것이 중요하다. 건물 에너지와 비용에 대한 최적화 문제들이 가진 불연속성과 비선형성을 가지고 있기 때문에 기존 연구들에서도 많이 사용하고 있는 유전 알고리즘을 본 연구에 사용하였다.

(2) LCC 분석

기존의 에너지 최적화모형은 건물 에너지 소비량을 최대한 감소시켜주는 반면, 과도한 초기투자비가 요구되거나 비용대비 에너지 절감량이 적어 이윤을 추구하는 투자자들이 합리적인 의사결정을 하는데 어려움을 주었다. 이를 위해 LCC 개념의 경제성 분석을 도입하여 초기투자비와 에너지 비용을 현재 가치로 환산하여 에너지 영향 요소들의 적용 수준을 결정하고자 하였다. 기

존 LCC 분석 문헌들을 참고하여 필요한 가정 및 가격 Data를 수집하여 원 단위의 비용화가 가능하게 하였다.

(3) 건물 에너지와 비용 최적화 프로그램의 연동

최적 설계변수 조합을 결정하는 데 있어 변수조합에 따른 에너지 소비량을 수식화 하는 과정은 쉽지 않기 때문에 건물에너지 해석프로그램(EnergyPlus)을 이용하여 그 결과를 최적 알고리즘을 계산하는 도구(MATLAB)에 반영하였다. 두 프로그램 간 연동(Co-simulation)이 가능하도록 MATLAB에서 유전 알고리즘을 실시하여 생성된 변수 조합을 에너지 시뮬레이션(EnergyPlus)에 입력하고, 에너지 시뮬레이션의 결과를 불러들이는 파일(M-script)을 작성하였다. M-script를 작성하여 에너지 시뮬레이션과 자동적으로 결과값이 상호 교환되며, MATLAB 안에서는 최적화 알고리즘이 반복 수행되면서 단시간에 최적조합이 도출되도록 하였다.

(4) 비용 최적화 프로세스 제시 및 사례연구 설계

에너지 절약적인 설계 시 비용 최적화를 적용하기 위한 프로세스를 제시하였다. 이 프로세스의 적용방법을 구체적으로 보여주기 위해 기존에 많이 다루지지 않았으나 에너지 다소비 건물인 공장건물을 대상건물로 선정하여 비용 최적화를 실시하였다. 대상건물의 특성을 반영하여 PV패널, 천창, 지붕단열 성능 향상, 조명의 디밍제어 등을 에너지 절약 요소로 반영하였고, 그 중 PV 면적비(x_1), 천창 면적비(x_2), 지붕 단열재 두께(x_3)를 설계 변수로 선정하였다.

(5) 사례연구 결과 I (최적 변수조합)

본 연구의 결과로 비용 최적화모델의 도출 뿐 아니라, 추가적으로 에너지 최적화모델도 도출하여 변수조합의 차이와 원안 대비 LCC 절감량도 비교하였다.

도출된 비용 최적화모델은 $x_1=1\%$, $x_2=17.8\%$, $x_3=0.26m$ 의 변수조합을 가질 때였으며, 에너지 최적화모델의 변수조합인 $x_1=65\%$, $x_2=17.8\%$, $x_3=0.26m$

와는 에서만 차이를 보였다. 변수 x_1 으로 표기되는 PV 면적비는 에너지 절감량에 비해 초기투자비가 많이 요구되므로 본 대상건물의 내용연수 안에서 비용 최적화모델에는 적합하지 않은 설계변수인 것으로 나타났다. 반면 나머지 변수인 x_2 , x_3 는 에너지와 비용 최적화모델에서 모두 일치하는 것으로 보아 천창 면적비와 지붕 단열재 두께는 초기투자비에 비해 에너지 절감에 더 많은 영향을 미치는 설계변수인 것으로 판단된다. 이와 같이 에너지 절감량보다 초기투자비에 더 민감한 변수들이 포함된 변수조합에 있어 비용을 고려하는 경우, 에너지 최적화모델과 차이가 있기 때문에 비용 최적화모델이 필요하다.

(6) 사례연구 결과Ⅱ (LCC 비교)

원안을 대안A로, 에너지 최적화모델과 비용 최적화모델을 각각 대안 B,C로 두고 LCC를 분석했을 때 에너지 비용부분은 $A > C > B$ 로 나타났고, 총 LCC는 $A > B > C$ 로 나타났다. 에너지 최적화모델은 비용 최적화모델 대비 에너지 소비량은 많이 감소시키지만, 초기투자비가 많이 늘어나 원안대비 11.7%의 LCC 감소를 보였다. 비용 최적화모델은 에너지 최적화모델 대비 에너지 소비량의 감소는 적었지만, 초기투자비가 소폭 증가하면서 원안대비 27.3%의 LCC 감소를 보였다. LCC 측면에서 보면 에너지 최적화모델에 비해 비용 최적화모델이 더 경제적임을 알 수 있다.

(7) 사례연구 결과Ⅲ (PV 패널 단가 하락에 따른 경제성 평가)

앞서 도출한 비용 최적화모델에서는 PV 패널은 적합하지 않은 것으로 판단되었으나, 기술력의 향상에 따라 PV 패널의 단가가 점점 낮아지는 것을 고려하여 PV 패널의 단가를 변수 x_4 로 추가하여 비용 최적화를 진행하였다. 그 결과, 2024년도의 PV 패널 가격으로 예상되는 와트 당 2317원(약 21만원/m²) 일 때, PV 패널은 남쪽 지붕면적의 5%를 사용하는 것이 비용최적화모델에 적합하며, 단가가 더 떨어질수록 PV 패널 면적비가 높을수록 LCC는 적게 든다. 즉, 2024년도 이후로는 PV패널 단가의 하락으로 비용최적화모델에 5% 이상 도입할 수 있을 것으로 예상되며, 에너지비용의 상승률을 감안한다면

그 시기는 더 빨리 올 것으로 판단된다.

본 연구는 에너지 절약적인 설계 시 비용최적화모델을 도출하는 방법을 제시하였다. 공장건물을 대상으로 사례연구를 실시하였고, 에너지 최적화모델과 비용 최적화모델을 함께 도출하여 비교분석 후 비용 최적화모델의 필요성을 제시 하였다. 본 연구 결과인 최적화 기법을 사용한 비용최적화모델을 초기 설계단계에 도입한다면, 수많은 설계변수 조합의 페러매틱(Parametric) 시뮬레이션을 직접 수행하지 않고도, 단시간에 에너지와 비용을 모두 고려한 최적의 모델을 도출할 수 있다. 그리고 비용 최적화모델은 에너지 소비량 절감에만 중점을 둔 에너지 최적화모델이 가진 경제성 문제에 대해 좋은 대안이 될 수 있다. 또한 경제성을 고려하는 투자자에게 비용 최적화모델이 제시된다면, 에너지 절약설계가 건물 생애주기관점에서 합리적인 대안으로 인식될 수 있을 것이다. 그러나 LCC 자체가 많은 가정을 전제하고 있고, 비용데이터도 한정적인 항목들을 통계처리 한 자료이기에 정확한 비용 산출이 어렵다는 한계를 가지고 있다. 따라서 정확한 비용 예측보다는, 설계 초기단계에서 쉽고 빠르게 비용을 최소화 시키는 에너지 절약 변수조합을 찾도록 건물 에너지절약에 있어 경제성과 최적화에 대한 연구가 더 이루어져야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

<국내문헌>

1. 국토교통부, 건축물의 에너지절약 설계기준, 별표1 지역별 건축물 부위의 열관류율표(남부지역 기준)
2. 국토해양부, 「주택건설기준 등에 관한 규정」 제59조제3항 및 제59조의 2 제 3항, 2012
3. 김정환, LCA 및 LCC 기법을 이용한 태양광 및 풍력 발전의 환경·경제적 편익 분석, 석사학위논문, 건국대학교 대학원, 2012.8
4. 김영진, 유전자 알고리즘, 파레토 최적, 환기 시뮬레이션을 통합한 환기 시스템 최적설계, 석사학위논문, 성균관대학교 대학원, 2008.12
5. 김종민, 건축물의 단열설계에 관한 연구, 삼척대학교 석사학위논문, 2005
6. 김지은, 개방형 BIM기반 건물에너지 성능평가를 위한 시범객체라이브러리 체계 및 활용시나리오 구축 : OBES 시스템에서의 건물객체속성의 상호운용성 구현을 대상으로, 경희대학교 석사학위논문, 2012
7. 김창성 외2, 톱날형 천장을 이용한 전시공간의 자연채광 성능 평가 기법에 관한 연구, 대한건축학회 논문집 : 계획계, 16(11), 2000
8. 문병로, 쉽게 배우는 유전 알고리즘 : 진화적 접근법, 한빛미디어, 2008
9. 박한영 외3 옮김(원저: Singiresu S. RAO), 공학최적화 : 이론과 실제, 홍릉 과학출판사, 2011
10. 법인세법 시행규칙 별표5 제 3호, 2011.6
11. 산업통상자원부, 2015년도 신·재생에너지보급 - 건물지원사업, 2015
12. 서원준, 건물 에너지에 대한 발견적 해법과 메타 발견적 해법 최적화, 석사학위논문, 성균관대학교 대학원, 2011
13. 어승희 외 3, 강원대학교 내 PV 모듈 설치를 위한 적정부지 선정 및 연간에너지 생산량 예측, 강원 농업생명환경연구 25(2) : 37-45

14. 어영구 역, MATLAB 프로그래밍 응용, 도서출판 아진, 2007
15. 엄성윤, 자동차 생산공장의 배치계획에 관한 연구, 한양대학교 석사학위 논문, 2000
16. 엄윤숙, 친환경 공동주택 요소기술의 경제성평가에 관한 연구, 중앙대학교 석사학위논문, 2008
17. 오세민, BIM 기반 시뮬레이션 모델과 유전 알고리즘, 파레토 최적을 이용한 건축 디자인 최적화, 성균관대학교 대학원, 석사논문, 2011
18. 우지환, 환경부하 및 경제성을 고려한 공동주택의 전생애 친환경 최적설계 평가 시스템 개발에 관한 연구, 박사학위논문, 한양대학교 대학원, 2011,2
19. 원중서, 건물의 에너지 성능과 비용 최적화를 위한 수리모델에 관한 연구, 박사학위논문, 연세대학교 대학원, 2003.6
20. 유정수, 자연채광의 건축설계 적용기법 및 과정에 관한 연구, 건국대학교, 석사학위논문, 2001
21. 윤종호 외, 공동주택의 태양광시스템 적용성 평가를 위한 전기부하 매칭 해석연구, 한국태양에너지학회 춘계학술발표회 논문집, 2008. 04
22. 이경희, 건축환경계획, 문운당, 1996
23. 이길진, 공장건축의 유형에 따른 조립식샌드위치패널의 단열재 선정에 관한 연구, 석사학위논문, 연세대학교 공학대학원, 2010.6
24. 이승우, LCC 기법을 적용한 현대한옥주택과 공동주택(아파트)의 경제성 비교분석, 석사학위논문, 서울과학기술대학교 산업대학원, 2013.2
25. 이승환, 환경친화형 PV시스템의 건축물 적용기법 및 활성화방안에 관한 연구, 경희대학교 석사학위논문, 2002
26. 이종식, 공동주택 건축기술요소의 친환경 성능평가에 관한 연구, 중앙대학교 석사학위논문, 2009
27. 이충식, BIPV의 한국 산업용 건물 지붕 적용에 따른 효과분석 연구, 석사학위논문, 세명대학교 대학원, 2008.12
28. 정종립, LCC 분석에 의한 고층건물설비시스템의 대안평가에 관한 연구, 연세대학교 박사학위논문, 2002. 6.

29. 채민수, 공장건물의 에너지 절약 계획에 관한 연구 : 자동차공장을 중심으로, 석사학위논문, 중앙대학교 대학원, 2011.2
30. 토지주택공사. (1986). “공동주택의 노후화 실태조사”, p. 9

<국외문헌>

1. Back, T., Evolutionary algorithms in theory and practice, Oxford University Press, 1996
2. CIBSE, CIBSE Guide Volume A, Chartered Institution of Building Services Engineers, Washington, DC, 1986
3. Galayda, J.,Yudelson, J. Inside Going Green: The little green book of corporate sustainability. 2009.
4. Ooka, R., Komamura, K., Optimal design method for building energy systems using genetic algorithms, Building and Environment 44, pp.1538-1544, 2009
5. Panos Y. Papalambros and Douglas J. Wilde, Principles of Optimal Design modeling and Computation second edition, Cambridge University Press, 2010
6. Shear Mel A. (1983). "Handbook of Building Maintenance Management Reston Publishing Company" p. 5
7. Torres, S. L., Sakamoto, Y., Facade design optimization for daylight with a simple genetic algorithm, Proceedings of Building Simulation 2007, pp.1162-1167, 2007
8. Wright, J. Loosemore, H. Farmani, R. Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm. Energy Build. 2002, 34, 959 - 972.
9. ASHRAE, 2009 ASHRAE Handbook : Fundamentals, Chapter 18, Nonresidential Cooling and Heating Load Calculations

<Web Site>

1. 기상청, http://www.kma.go.kr/weather/climate/average_regional04.jsp
2. 한국물가자료, <http://www.kpi.or.kr/www/>
3. 한국은행 경제통계시스템, <https://ecos.bok.or.kr/>
4. 한전사이버지점, <http://cyber.kepco.co.kr/>
5. ASE 300-DFG/50 모델정보, <http://www.affordable-solar.com>
6. Data Analysis for Investment & Control, <http://nerve.tistory.com/130>
7. EnergyPlus Support Forum, EnergyPlus Support Group,
http://tech.groups.yahoo.com/group/EnergyPlus_Support, 2010
8. MATLAB in Use, <http://www.matlabinuse.com/>
9. KOSIS 국가통계포털, <https://kosis.kr/>

국 문 초 록

에너지 절약을 고려한 비용최적화 모델 개발에 관한 연구 - 공장건물을 중심으로

김 혜 연

건축학과 건축 환경 계획 전공

중앙대학교 대학원

지도교수: 이 언 구, 박 진 철

본 연구는 초기설계단계에서 에너지 절약 기법을 적용하는데 있어 LCC 차원의 경제성 분석을 통해 최적화모델을 도출할 수 있도록 최적화 기법을 사용하는 방법을 제안하였다. 문헌고찰 및 기존 연구들을 통해 적합한 최적화 기법과 LCC분석법을 선정하였고, 에너지 시뮬레이션(EnergyPlus)과 최적화할 연산 프로그램(MATLAB)의 Co-simulation을 통해 최적화가 가능하도록 설정하였다. 이를 기반으로 가장 작은 생애주기비용이 예측되는 비용 최적화 모델이 도출되는 프로세스를 제시하였다.

모델의 이해를 돕기 위해 한 공장건물을 대상으로 사례연구를 실시하여 에너지 절약을 고려한 비용 최적화모델을 도출하였다. 또한 에너지를 가장 적게 쓰는 에너지 최적화모델도 도출하여 비용 최적화모델의 필요성을 제시하였다.

비용최적화모델을 도출하는 과정 및 사례연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 최적화 기법의 선정

최적화 기법은 문제의 성격에 따라 적합한 기법을 선정하는 것이 중요하다. 건물 에너지와 비용에 대한 최적화 문제들이 가진 불연속성과 비선형성에도 해를 찾을 수 있는 유전 알고리즘을 본 연구에 사용하였다.

(2) LCC 분석

LCC 개념의 경제성 분석을 도입하여 초기투자비와 에너지 비용을 현재가치로 환산하여 에너지 영향 요소들의 적용 수준을 결정하고자 하였다. 기존 LCC 분석 문헌들을 참고하여 원 단위의 비용화가 가능하게 하였다.

(3) 건물 에너지와 비용 최적화 프로그램의 연동 (Co-simulation)

MATLAB에서 최적 설계변수 조합을 결정하기 위해 에너지 계산부분만 건물에너지 해석프로그램(EnergyPlus)을 이용하였다. M-script를 통해 자동적으로 연동되어 MATLAB에서 최적화가 진행되고, 단시간에 비용 최적조합이 도출된다.

(4) 비용 최적화 프로세스 제시 및 사례연구 설계

에너지 절약적인 설계 시 비용 최적화를 적용하기 위한 프로세스를 제시하였다. 공장건물을 대상건물로 선정하여 비용 최적화 사례연구를 실시하였다. 대상건물의 특성을 반영하여 PV패널, 천창, 지붕단열성능 향상, 조명의 디밍 제어 등을 에너지 절약 요소로 적용하였고, 그 중 PV 면적비(), 천창 면적비(x_2), 지붕 단열재 두께(x_3)를 설계 변수로 선정하였다.

(5) 사례연구 결과 (최적 변수조합)

도출된 비용 최적화모델은 $x_1=1\%$, $x_2=17.8\%$, $x_3=0.26m$ 의 변수조합을 가질 때였으며, 에너지 최적화모델의 변수조합인 $x_1=65\%$, $x_2=17.8\%$, $x_3=0.26m$ 와는 x_1 에서만 차이를 보였다. x_1 과 같이 에너지 절감량보다 초기투자비에 더 민감한 변수들이 포함된 변수조합은 에너지 최적화모델과 차이가 있기 때문에 비용 최적화모델이 필요하다.

(6) 사례연구 결과 (LCC 비교)

에너지 최적화모델은 원안대비 11.7%, 비용 최적화모델은 에너지 최적화모델은 원안대비 27.3%의 LCC 감소를 보였다. LCC 측면에서 보면 에너지 최적화모델에 비해 비용 최적화모델이 더 경제적임을 알 수 있다.

(7) 사례연구 결과Ⅲ (PV 패널 단가 하락에 따른 경제성 평가)

기술력의 향상에 따라 PV 패널의 단가가 점점 낮아지는 것을 고려하여 PV 패널의 단가를 변수 로 추가하여 비용 최적화를 진행하였다. 그 결과, PV 패널 단가가 와트 당 2317원(약 21만원/m²)까지 떨어지는 2024년 이후에는 비용최적화모델에 PV 패널을 5% 이상 도입할 수 있을 것으로 예상되며, 에너지비용의 상승률을 감안한다면 그 시기는 더 빨리 올 것으로 판단된다.

본 연구 결과인 최적화 기법을 사용한 비용최적화모델을 초기설계단계에 도입한다면, 수많은 설계변수 조합의 패러매틱(Parametric) 시뮬레이션을 직접 수행하지 않고도, 단시간에 에너지와 비용을 모두 고려한 최적의 모델을 도출할 수 있다. 비용 최적화모델은 에너지 소비량 절감에만 중점을 둔 에너지 최적화모델이 가진 경제성 문제에 대해 좋은 대안이 될 수 있다. 또한 경제성을 고려하는 투자자에게 비용 최적화모델이 제시된다면, 에너지 절약설계가 건물 생애주기관점에서 합리적인 대안으로 인식될 수 있을 것이다.

그러나 LCC 자체가 가정과 통계적 비용 데이터를 사용하기에 정확한 비용 산출에는 한계를 가지고 있다. 따라서 정확한 비용 예측보다는, 설계 초기단계에서 쉽고 빠르게 비용을 최소화 시키는 에너지 절약 변수조합을 찾을 수 있도록 향후 연구가 필요하다.

ABSTRACT

A Study on Development of Cost Optimal and Energy Saving Building Model : focused on Industrial Building

Kim, Hye-yeon

Department of Architecture

The Graduate School of Chung-Ang University

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

and by Prof. Park, Jin-Chul, Ph.D

This study proposes the way of making the cost optimal model in energy-saving design at the early-design stage by using optimization technique. This study determined suitable optimization technique and LCC(Life Cycle Cost) analysis method through the literature review and earlier studies. Moreover, this study set to be optimized by co-simulation between energy simulation(EnergyPlus) and calculation program(MATLAB). Based on this, the process of cost-optimal model which is expected minimum LCC was presented.

The case study which was planned to help understanding of the model presented the cost-optimal model considering energy-saving at buildings. In addition, it presented the energy-optimal model which is expected minimum energy consumption to suggest the need of the cost-optimal model.

Here is the summary of the process to get the cost-optimal model and the result of the case study.

(1) Choosing a optimization technique

It is important to choose suitable optimization technique according to the character of optimization problem. The Genetic Algorithm(GA), is used in this study, is good for discontinuous and nonlinear optimization problem of building energy and cost.

(2) LCC analysis

After initial cost and energy cost(operation cost) were converted to present value for economic evaluation(LCC), the level of energy effective factors can be decided. Cost data(won unit) for LCC are prepared based on previous LCC analysis studies.

(3) Co-simulation between building energy simulation program and cost optimization program

This study used building energy simulation program(EnergyPlus) in calculation of building energy to decide optimal combination of design variables. Optimization operated in MATLAB interlocking EnergyPlus automatically by M-script and the cost-optimal model presents in a short time thanks to M-script.

(4) Process of the cost-optimal model and setting of case study

The process of the cost-optimal model in energy-saving design was presented. Then, this process was applied to a typical plant building(Case study to get the cost-optimal model). PV(Photovoltaic) panel, skylight, improvement of performance of roof insulation, and dimming control of lights were applied as energy-saving factors. Among energy-saving

factors, PV panel area ratio(), skylight area ratio(X_2), and the thickness of roof insulation(X_3) were selected as design variables.

(5) The result I of the case study (the optimal combination of design variable)

The cost-optimal model was appeared when the combination of design variable was $X_1=1\%$, $X_2=17.8\%$, $X_3=0.26m$. The energy-optimal model was appeared when the combination of design variable was $X_1=65\%$, $X_2=17.8\%$, $X_3=0.26m$. There is the different result of the combination of design variable between the cost-optimal model and the energy-optimal model because of variable X_1 having high initial cost. Therefore, the cost-optimal model is needed.

(6) The resultII of the case study (comparison of LCC)

The energy-optimal model can decrease 11.7%, the cost-optimal model can do 27.3% of LCC from original building. It showed that the cost-optimal model is more economical than the energy-optimal model in terms of LCC.

(7) The resultIII of the case study (Economy evaluation according to the depreciation in the price of PV panel)

According to the depreciation in the price of PV panel, cost-optimization was operated with the price of PV panel as the variable X_4 . As a result, PV panel would be used above 5% on the south roof when the price of PV panel is under 2317won/W, after 2024 and if the increase rate of energy cost is considered, the time will be sooner than 2024.

If the cost-optimal model by optimization technique in this study should be applied at the early-design stage, lots of parametric simulation about all combination wouldn't needed and the cost-optimal model with energy-saving would presented in a short time. The cost-optimal model in

this study will be a great alternative to the economical problem of the energy-optimal model. In addition, energy-saving design itself will be a reasonable alternative to investors who is considering economics when they check LCC of the design.

However, there are limits to get correct LCC due to many assumptions and statistical cost data. Therefore, it is more needed to study for finding the optimal combination of energy-saving design variable in a short time at the early-design stage than finding more correct expectation value of LCC.

Keyword : Cost-optimal model, Genetic Algorithm(GA), Life Cycle Cost(LCC), Co-simulation, Plant building