

환경친화형 섬유질 단열재의 열성능 실험연구

A Study on the Thermal Conductivity of Environment-Friendly Cellulose Insulation

○ 권 영 철*, 유 형 규**, 이 언 구***

Kwon, Young Cheol Yu, Hyung Kyu Rhee, Eon Ku

Abstract

Cellulose insulation for use in building applications is primarily manufactured from recycled newsprint or cardboard using shredders and fiberizers. Cellulose insulation as a product is about 80 wt.% cellulosic fiber and 20 wt.% chemicals, most of which are fire retardants such as boric acid and ammonium sulfate. It was introduced into Korea in the 1980s when several small companies started production. The cellulose industry in Korea is in an early stage of development with current production of about 1000 tons a year. On the other hand, in North America, cellulose insulation has been used since the 1940s and many studies have been done to improve its physical properties and performance. About 750,000 tons of paper has been recycled as cellulose insulation annually for the past two years in the U.S. That would imply a production volume of about 940,000 tons of cellulose insulation per year. For broader use of cellulose insulation in buildings in Korea, it is necessary to establish its thermal performance. To this end, the effect of density and temperature on the thermal conductivity of loose-fill cellulose insulation manufactured in Korea and U.S. was recently studied.

키 워 드 : 섬유질, 단열재, 열전도율
Keywords : Cellulose, Insulation, Thermal Conductivity

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

정부는 2001년 1월 16일자로 건축물에 대한 에너지소비를 줄이기 위해 신축건축물에 대한 단열기준을 대폭 강화했다.¹⁾ 국내에서는 건물외피 단열을 위해 스티로폼, 우레탄폼, 유리면, 암면 등이 주로 사용되고 있다. 미국을 위시한 여러 나라에서는 이 외에도 섬유질 단열재가 활발히 보급되고 있다.²⁾

건물의 단열재로 사용되고 있는 섬유질 단열재는 주로 분쇄기와 섬유화 장치를 이용하여 신문지와 판지로부터 생산해 내며, 한국에 도입된 것은 몇몇 중소기업이 생산하기 시작한 1980년대이다. 한국에서의 섬유질 단열재 산업은 초기단계로 연간 1,000톤 정도를 생산하고 있다.³⁾ 현재의 단열재 시장 점유율은 약 0.3%를 차지하고 있다. 국내 단열재 시장의 약 71%를 스티로폼, 우레탄 등의 유기단열재가 차지하고 있고, 나머지 29%는 유리섬유, 암면과 같은 무기질 단열재가 점유하고 있다.⁴⁾ 반면, 북미의 경우, 1940년대부터 섬유질 단열재가 사용되어 왔으며, 단열재의 물성향상과 적용확대에 관한 많은 연구가 이루어져 왔다. 미국의 경우 최근 2년간 매년 약 750,000톤의

종이가 섬유질단열재로 재활용되고 있는 데, 이는 연간 약 940,000톤의 섬유질 단열재가 생산되고 있음을 의미하는 것이다. 시장점유율은 주거용 건물의 8-10%, 상업용 분사식 단열재 시장의 20-25%를 차지하고 있다.⁵⁾

섬유질단열재가 국내 건축물에 보다 폭넓게 사용되기 위해서는 단열재로서의 단열성능을 검증할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 국내에서 생산되는 섬유질 단열재에 대한 열성능 실험을 하였다.

1.2 섬유질 단열재의 생산

섬유질 단열재는 주로 폐 신문지와 판지로부터 만들어진다. 섬유질 단열재는 중량의 80%가 섬유질이며 20%는 화학제품으로 대부분이 내화제로 되어 있다.⁶⁾

전형적인 섬유질 생산 공장에는 대량의 폐지를 저장, 운송하고, 절단, 분쇄, 화학약품 첨가 및 포장 설비를 갖추고 있다. 종이처리와 가루 형태의 내화제를 첨가하는 과정에서 상당한 량의 먼지가 발생할 수 있으므로, 현대식 섬유질 생산 공장에는 먼지를 집진하는 장치도 있다

내화제는 보통 분쇄나 섬유화 공정 전에 종이흐름 속으로 계량 투입된다. 이렇게 함으로써 종이와 건조한 화학첨가제가 서로 잘 섞이도록 하는 것이다. 어떤 경우에는 액체성 화학첨가제가 사용되기도 한다. 액체성 내화제를 사용할 경우에는 출하를 위한 포장단계에서 단열재를 건조시키는 공정이 도입되어야 한다.

* 정희원, 한라대학교 건축토목공학부 조교수, 공학박사

** 정희원, 중앙대학교 대학원 건축학과, 박사과정

*** 정희원, 중앙대학교 건축학과 교수, 건축학박사

1.3 섬유질 단열재의 건축적인 활용

섬유질 단열재는 주로 다음과 같은 몇 가지 형태로 사용된다. 다락공간 단열에 사용되는 공기분사식, 소량의 물을 사용하여 중공벽에 분사하는 형식, 건식 벽체 중공 단열, 그리고 상업용 건물의 벽체와 천정에 사용되는 습식 스프레이 방식 등이 있다. 천정단열에 사용되는 제품에는 전통적으로 사용되던 건식 공기분사식 단열재와 '안정된' 제품을 만들고 침적을 최소화하기 위해 접착제를 사용하는 단열재가 있다. 안정화된 제품은 접착성능을 돕기 위해 물을 사용하거나 접착제를 포함한 수용액을 사용하여 현장에 시공된다. 벽체에 시공되는 섬유질 단열재는 보통 단열재가 기계적으로 벽체에 안정되도록 하고 동시에 침적되는 것을 막기 위해 수용성 접착제를 포함한 분사식을 쓴다.

2. 섬유질 단열재의 열성능 실험

1) 열성능 실험 개요

본 연구에서는 ASTM C 518⁷⁾에 따라 제작된 Lasercomp FOX405와 FOX600모형을 이용하여 단열재의 열전도율을 실험하였다.

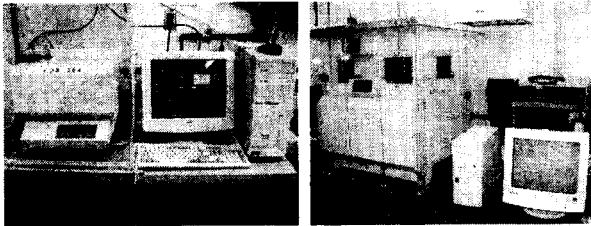


그림 1. 열전도율 측정장비

측정방법은 평판 열류계법으로 시험체를 통과하는 열류량을 열류계를 사용하여 측정하고, 그때의 시험체 온도차를 측정하여 열전도율을 측정하는 것이다. 고온측과 저온측 모두 가로세로 7.5cm의 열류계가 부착되어 있는 2매 열류계방식을 사용하였다.

열전도율 교정판은 고밀도의 유리섬유판인 SRM 1450b⁸⁾을 사용하였다.

시편의 평균온도는 ASTM C 1058-97⁹⁾의 건물의피용 단열재의 열성능 평가에서 지정한 4°C, 10°C, 24°C, 38°C, 43°C를 포함하고 17°C와 31°C를 추가하여 평균실험온도를 설정하였다.

열전도율 측정용 시편은 ASTM C 518에 따라 측정하기 전에 기온 21±1°C, 습도 50±5%로 공기조화가 되고 있는 실험실에 적어도 24시간 이상 둔 다음 시편의 중량을 측정하여 흡습을 변화에 따른 중량변화가 1%범위 이내에 들어온 다음 측정에 이용되었다.

본 연구에서는 공기분사식 섬유질 단열재의 열전도율을 종합평가하기 위해 시편의 평균온도, 시편의 밀도, 시편의 두께, 내화재 함유량 등을 변수로 열전도율을 측정하였으며, 공기분사식 유리섬유와 단열성능을 비교하기

위해 유리섬유와 섬유질 단열재의 열전도율 실험을 실시하였다. 그리고 국내에서 생산되는 섬유질단열재와 미국에서 생산되는 섬유질 단열재의 열전도율도 비교 실험하였다.

2) 열전도율 실험 결과

① 시편의 평균온도와 열전도율

섬유질 단열재의 열전도율은 온도에 비례하며, 열전도율(λ)과 온도(t)와의 관계는 다음과 같았다.

$$\lambda = 0.02976 + 0.0001195t \quad (R^2 = 99.96\%)$$

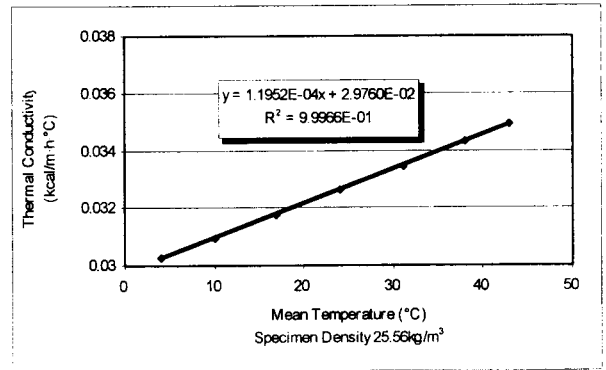


그림 2. 온도에 따른 열전도율

② 시편의 밀도와 열전도율

섬유질 단열재는 특정밀도를 중심으로 밀도가 작거나 클 경우 열전도율이 커지는 것을 알 수 있다.

표 1. 밀도에 따른 열전도율 (단위: kcal/m·h·°C)

온도(°C) \ 밀도	25.56kg/m ³	33.58kg/m ³	36.14kg/m ³
4.0	0.0303	0.0305	0.0307
10.0	0.0310	0.0311	0.0313
17.0	0.0318	0.0318	0.0320
24.0	0.0326	0.0326	0.0328
31.0	0.0334	0.0333	0.0335
38.0	0.0343	0.0341	0.0343
43.0	0.0349	0.0347	0.0349

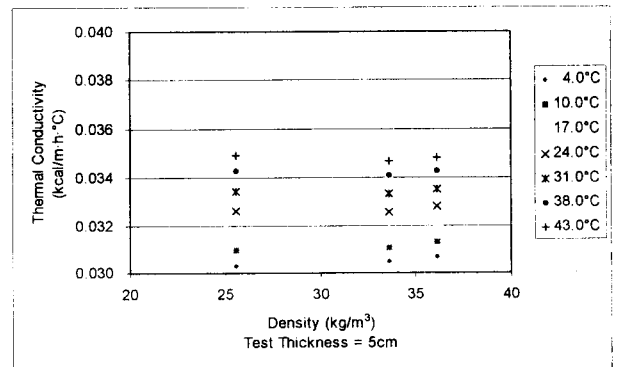


그림 3. 밀도에 따른 열전도율

③ 시편의 두께와 열전도율

밀도가 25.23kg/m³인 시편의 평균온도 24℃에서의 두께에 따른 열전도율실험을 한 결과, 9개의 실험결과가 모두 0.033kcal/m·h·℃전후로 나타났으며, 두께에 따른 열전도율 실험결과는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

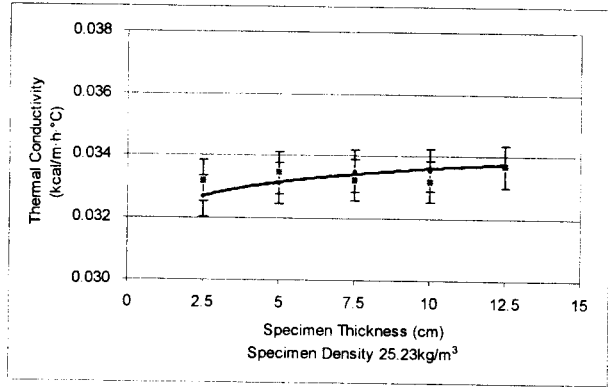


그림 4. 시편두께에 따른 열전도율

④ 내화재 함유량과 열전도율

내화재 함유량에 따른 섬유질 단열재의 열전도율은 내화재가 전혀 포함되어 있지 않은 경우에 비해 오히려 내화재를 함유하고 있을 경우에 열전도율이 더 낮은 것으로 나타났다.

표 2. 내화재 비율에 따른 열전도율 (단위: kcal/m·h·°C)

온도(℃)	내화재 비율					
	0%	5%	10%	15%	22.5%	25%
4.0	0.0320	0.0315	0.0316	0.0315	0.0315	0.0315
10.0	0.0327	0.0322	0.0323	0.0322	0.0322	0.0322
17.0	0.0335	0.0331	0.0331	0.0331	0.0330	0.0331
24.0	0.0344	0.0340	0.0341	0.0341	0.0339	0.0340
31.0	0.0353	0.0348	0.0349	0.0349	0.0347	0.0348
38.0	0.0362	0.0357	0.0358	0.0358	0.0356	0.0357
43.0	0.0369	0.0364	0.0364	0.0365	0.0363	0.0364

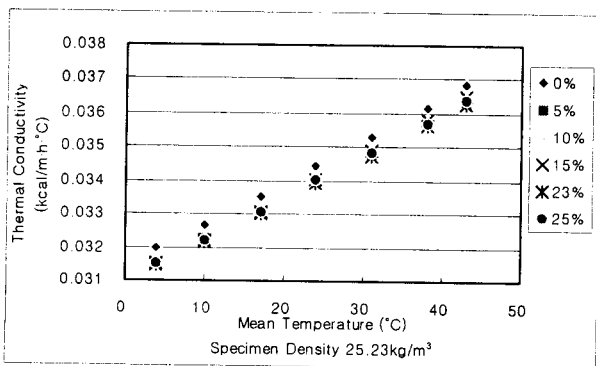


그림 5. 내화재 비율에 따른 열전도율

⑤ 유리섬유와 열전도율 비교

분사식 섬유질 단열재는 현재 사용되고 있는 분사식 유리섬유에 비해 측정 온도에 따라 약 25 - 43% 열전도율이 낮은 것으로 나타났다. 이는 유리섬유에 비해 밀도가 높아, 단열재를 통한 공기의 흐름이 차단될 수 있기 때문이다.

표 3. 섬유질 단열재와 유리섬유 비교 (단위: kcal/m·h·°C)

온도(℃)	종류	섬유질 단열재	유리섬유	편차
4.0		0.0307	0.0387	-26.1%
10.0		0.0313	0.0402	-28.3%
17.0		0.0320	0.0420	-31.1%
24.0		0.0328	0.0439	-33.8%
31.0		0.0335	0.0459	-37.0%
38.0		0.0343	0.0481	-40.2%
43.0		0.0349	0.0497	-42.7%

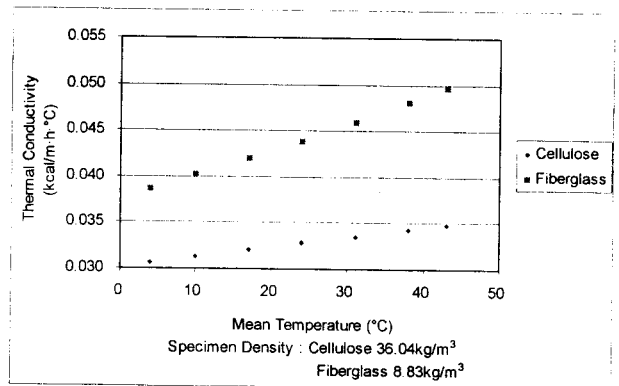


그림 6. 섬유질 단열재와 유리섬유 비교

⑥ 미국 섬유질 단열재와의 열전도율 비교

미국의 섬유질 단열재에 비해 국내의 섬유질 단열재가 약 5.1% 정도 열전도율이 높게 나타났다. 이러한 결과는 섬유질 단열재의 주재료인 신문지의 섬유화 과정과 원지의 섬유질 함유비율 차이에서 기인한 결과일 수 있다.

표 4. 한국과 미국 섬유질 단열재 비교 (단위: kcal/m·h·°C)

온도(℃)	구분	한국	미국	편차
4.0		0.0320	0.0303	5.3%
10.0		0.0327	0.0310	5.2%
17.0		0.0335	0.0318	5.1%
24.0		0.0344	0.0326	5.1%
31.0		0.0353	0.0335	5.1%
38.0		0.0362	0.0344	5.1%
43.0		0.0369	0.0350	5.2%

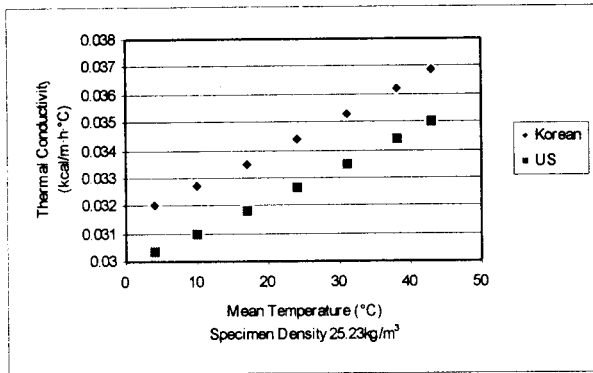


그림 7. 한국과 미국 섬유질 단열재 비교

5. 결론

미국을 포함한 선진국에서 널리 이용하고 있으나 국내에서는 거의 활용되지 않고 있는 환경친화형 섬유질 단열재의 열성능 실험에 관한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 폐 신문지나 판지로부터 만들어지는 섬유질 단열재는 건물의 외피 단열에 효과적으로 이용될 수 있으며, 건물의 효과적인 단열은 물론 폐기물의 재활용 효과도 있어 적극적인 개발 및 활용이 요구된다.
2. 내화, 불연, 방충을 위한 첨가제로는 봉산, 봉사 및 황산암모늄 등이 사용된다.
3. 섬유질 단열재는 내재에너지가 작고, 화재시 불에 타지 않아 유독가스 발생이 없으며, 낮은 열전도율로 인한 건물의 에너지절약은 물론 폐기물 감축에도 기여하고 있어 환경친화적인 건축자재라 할 수 있다.
4. 섬유질 단열재의 열전도율은 온도에 비례하며, 열전도율(λ)과 온도(t)와의 관계는 $\lambda = 0.02976 + 0.0001195t$ 와 같았다.
5. 섬유질 단열재의 열전도율은 시편의 평균온도 4 - 43°C에서 0.030 - 0.035kcal/m·h·°C로 나타났으며, 20°C에서는 0.032kcal/m·h·°C로 강화된 건축물 단열 규정상의 단열재 등급분류상 섬유질 단열재는 「나」 등급에 속하는 것으로 나타났다.
6. 분사식 섬유질 단열재가 현재 사용되고 있는 분사식 유리섬유에 비해 측정 온도에 따라 약 25 - 43% 열전도율이 낮은 것으로 나타났다.

참고 및 인용문헌

- 1) 건설교통부, “건축물 설비기준규칙개정”, 건설교통부, 2001. 1.
- 2) 이연구 외, “환경친화형 복합단열벽체에 적용가능한 친환경 단열재에 관한 연구의 중간보고서”, 중앙대학교 미래기술연구소, 2001. 9
- 3) 유형규, 권영철, 이연구, “폐지를 이용한 섬유질 단열재의 활용에 관한 연구”, 대한건축학회 2001년 춘계 학술발표대회 논문집 21권 1호, 2001, pp.100-106.
- 4) 주택문화사 출판부, “주택건축자재백과”, 주택문화사, 2000. 1.
- 5) Lea, Dan, Private Communication, Cellulose Insulation Manufacturers Association, Dayton, Ohio, Sept. 27, 2002.
- 6) Yarbrough, D.W. and K.E. Wilkes, “Thermal Properties and Use of Cellulosic Insulation Produced from Recycled Paper”, Conf. on Use of Recycled Wood and Paper in Buildings Applications, Madison, WI, USDA Forest Service, Forest Products Society, Proc. No 7286, Forest Products Society, Sept. 9-11, 1996, pp.108-114.
- 7) ASTM C 518-98, “Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus”, 2001 Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.06, 2001, pp.174-185.
- 8) SRM 1450b, Standard Reference Materials Fibrous Glass Board, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards(now National Institute of Science and Technology), See Hust, J.G., “Glass Fiberboard SRM for Thermal Resistance,” NBS SP 260-98, 1985.
- 9) ASTM C 1058-97, “Standard Practice for Selecting Temperatures for Evaluating and Reporting Thermal Properties of Thermal Insulation”, 2001 Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.06, 2001.
- 10) University of Colorado Denver, “Cellulose Insulation : Naturally Better Thermal Protection”, Brochure in Adobe PDF.
- 11) ASTM C 739-00, “Standard Specification for Cellulosic Fiber (Wood-Base) Loose-Fill Thermal Insulation”, 2001 Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.06, 2002, pp.362-372.
- 12) ASTM C 1497-01, “Standard Specification for Cellulosic Fiber Stabilized Thermal Insulation”, 2001 Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.06, 2002, pp.849-852.
- 13) ASTM C 1149-97, “Standard Specification for Self-Supported Spray Applied Cellulosic Thermal Insulation”, 2001 Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.06, 2002, pp.630-637.