

국내 섬유질 단열재의 내화재 배합비에 따른 내화성능 실험

An Experimental Study on the Fire Resistance of Korean Cellulose Insulation according to the Rate of Fire Retardant

○ 유형규*, 권영철**, 이연구***
Yu, Hyung Kyu Kwon, Young Cheol Rhee, Eon Ku

Abstract

Cellulose insulation is primarily manufactured from recycled newsprint or cardboard using shredders and fiberizers. Despite of its environmental friendliness and high thermal resistivity, its domestic use has not much increased because of the prejudice that paper can easily burn. However, the 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 is required to secure its fire safety for more consumption as a building insulation in Korea. Therefore, this study investigates the fire resistance of Korean cellulose insulation according to the rate of fire retardant and finally presents the optimum rate of fire retardant in cellulose as building insulation.

The fire safety test was conducted according to the ASTM C 1485-00. The test results indicate that above 18 wt% of fire retardant is necessary to secure the fire safety of cellulose insulation.

키워드 : 폐지, 재활용, 섬유질, 단열재, 내화성능, 붕산

Keywords : Recycled paper, Recycling, Cellulose, Insulation, Fire resistance, Boric Acid

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

2003년 2월에 일어난 대구 지하철 방화 사건은 만성적인 안전의식부족, 부적절한 방재 대책, 배연 및 스프링클러와 같은 소방시설 부족에서 그 원인을 찾을 수 있다. 특히, 지하철 내부가 규정된 난연 성능을 갖추지 못한 재료로 시공이 되어 그 피해 규모를 키우는 결과를 초래하였다. 지하 또는 지상에 건설되는 모든 건축물은 화재의 위험에서 완전히 자유로울 수 없으며, 따라서 각 재료에 대한 난연성에 더욱 많은 관심과 연구가 필요하게 되었다.

섬유질 단열재의 원료는 폐신문지 또는 폐지로 만들어진다. 일반적으로 종이는 불에 타기 쉽다는 인식 때문에, 섬유질 단열재의 환경적, 열적 우수성에도 불구하고 그 사용이 늘어나고 있지 않는 현실이다.

따라서 본 연구에서는 섬유질 단열재와 관련한 국내외 문헌을 고찰하고 실험을 통해 국내에서 생산되고 있는 섬유질 단열재의 내화재 배합비에 따른 내화성능을 비교·측정함으로써, 섬유질 단열재의 내화성능을 향상시키고자 한다.

1.2 국외 연구현황

1982년 Yarbrough 연구팀에서는 51개 물질에 대한 실험을 통해 내화재로 쓰일 수 있는 9개의 화학물질을 밝혀 냈다. 당시 제조된 섬유질 단열재의 절반 이상이 소비자 제품 안전 위원회(CPSC)에서 실시하는 화재 안전 시

험에서 불합격될 정도로 내화 성능이 좋지 못하여 절반 이상이 연기나 연소열이 기준치 이상으로 발생했다. 흔히 사용되는 내화재는 붕산, 붕사, 황산암모늄 그리고 이중 수소인산암모늄으로 밝혀졌다. 이 화학물질들은 섬유질 단열재의 내화재로 쓰이고 있다. Day연구팀¹⁾에서는 1987년 내연 연소에 관한 중요한 연구결과를 발표했다. 주로 방화제로 사용되던 화학물질을 평가하여 내연성을 함께 갖출 수 있는 방화제의 적정량을 제안했다. 내화성능의 지속성에 관한 의문이 1970년대와 80년대에 제기되어, 의문을 풀기 위한 연구가 시작되었다. Chiou와 Yarbrough²⁾는 내화재에 관한 기존 자료를 검토하여 시간이 지남에 따라 내화성능이 떨어지는 경우는 거의 없다고 결론지었다. Chiou와 Yarbrough³⁾는 또한 붕산과 붕사의 승화율에 관한 실험실연구 결과를 발표하였는데, 승화량은 너무나 미미하므로 신경 쓸 필요가 없다는 결론을 내렸다. Ferm과 Shen⁴⁾은 주거용 건물의 다락에 시공된 섬유질 단열재에 사용된 붕산과 붕사의 영속성에 관한 8년간의 현장 조사연구 결과를 발표하여, 단열재 시공 후 붕사는 계속 존재하는 것을 확인하였다.

1) Day, M., T. Suprunchuk, and D. M. Wiles, "A Combustibility Study of Cellulosic Insulation", Journal of Thermal Insulation 3, 260-224, 1987.

2) Chiou, N., and D. W. Yarbrough, "Fire Retardants in Cellulosic Insulation", Journal of Thermal Insulation 10, 41-78, 1994.

3) Chiou, N., and D. W. Yarbrough, "Permanency of Boric Acid used as a Fire Retardant in Cellulosic Insulation", Energy and Buildings 14 351-361, 1990.

4) Ferm, D. J., and K. K. Shen, "Study of the Permanency of Borates in Cellulosic Insulation", Proceedings of the International Conference on Thermal Insulation 10 41-78, 1994.

* 정회원, 중앙대학교 대학원 건축학과, 박사과정

** 정회원, 한라대학교 건축토목공학부 조교수, 공학박사

*** 정회원, 중앙대학교 건축학과 교수, 건축학박사

1.3 내화재 종류

섬유질 단열재의 내화제로 사용되는 재료는 붕산 (Boric Acid; H_3BO_3), 붕사 (Borax; $Na_2B_4O_7$), 황산암모늄 (Ammonium Sulfate; $(NH_4)_2SO_4$), 이중수소인산암모늄 ($(NH_4)_2HPO_4$)이며, 국내 섬유질 단열재 생산업체인 셀파에서는 내화재로서 붕산을 사용하고 있다.

붕산의 종류는 오르토 붕산 (H_3BO_3), 메타붕산 (HBO_2), 사붕산 ($H_2B_4O_7$)을 총칭하며, 일반적인 경우 붕산이라 하면 오르토 붕산을 말한다. 무색투명하거나 또는 백색 광택을 가진 인편상의 결정이고, 냄새는 없으며, 특유한 맛이 약간 난다. 녹는점은 $184\sim 186^\circ C$, 비중은 1.49이다. 방부제, 소독제의 약품, 광학유리, 유약원료, 비누 향료, 도료 등에 사용된다.

2. 내화성능 실험방법

2.1 실험 개요

국내의 최대 섬유질단열재 생산업체인 셀파산업과 미국의 생산업체인 Nuwool, Energy Control, Advanced Fiber와 미국섬유질단열재 생산자협회(CIMA) 그리고 30여년간 섬유질 단열재를 연구해오고 있는 Oak Ridge 국립연구소(ORNL)에서 얻은 내화성능실험 결과를 종합해보면, 섬유질단열재의 내화성능은 내화재의 첨가비율에 따라 달라지는 것으로 조사되었다.

미국의 Oak Ridge 국립연구소의 Yarbrough 박사의 연구결과에 따르면, 섬유질단열재의 내화성능은 내화재의 입자크기를 얼마로 하느냐에 따라 내화성능이 크게 차이가 나는 것으로 알려져 있다. 내화재의 입자가 작을수록 섬유질 도포면적이 증가하여 내화성능이 증가되나 너무 지나치게 작을 경우, 공기 중으로 비산하는 문제점이 있으므로 적정크기로 분쇄·혼합하는 기술이 요구된다. 미국의 최대 섬유질단열재 생산 공장인 Nuwool의 경우, 미소입자의 비산을 막기 위해 내화재를 수증기와 함께 도포 하는 공정을 가지고 있기도 하다.

단, 공장에 설치된 분쇄기는 Nuwool, Energy Control과 같은 미국 내 섬유질 단열재 생산 공장에서 사용되고 있는 내화재 크기를 미세하게 분쇄 가능한 것이므로 입자크기에 따른 실험은 제외하기로 한다.

섬유질 단열재의 내화성능을 실험하는 방법에는 ASTM C-739, ASTM C 1485-00, 그리고 Veri-Flux "100" 등이 있다. 이들은 모두 테스트 챔버를 구성하고 챔버 내의 점층적 복사 열 에너지 환경 안에서 발화원에 놓여진 노출 다락 바닥 단열의 임계복사속을 측정하는 것으로 챔버의 사이즈에서 약간의 차이를 보이며, 거의 유사하다.

본 연구에서는 ASTM C 1485-00의 실험 방법에 따라 실험 챔버를 구성하고 실험을 실시하였다. 테스트 시료는 다락 바닥 단열재로 사용 가능한 모든 것이 될 수 있으나, 복사 열 에너지 환경 또는 발화원에 노출되었을 경우 녹거나 뒤틀리는 것에는 적용하지 않는다.

테스트 방법은 섬유질 단열재에 불꽃이 점화되어 진행

하다가 불꽃이 꺼지는 지점의 거리를 측정하여 임계복사속을 알아낸다. 이를 통해 노출 상태의 다락 바닥 단열재의 상대적인 화재 시험반응 표준 분류 방법을 제시한다. 단열재에 가해지는 열복사의 복사속 시뮬레이션 수준은 태양과 다락 공간에서 흔하게 일어날 수 있는 열원이나 발화원에 의해 가열된 지붕재로부터 노출 상태의 다락 단열재 표면에 영향을 주는 정도이다. 이 실험은 통제된 환경 하에서 열과 화염에 의한 재료, 제품 또는 그 구성품의 반응을 측정하고 설명하는 것이며, 실제 상황에서 재료, 제품 또는 그 구성품의 화재 또는 화재 위험성에 필요한 모든 요소를 통합하는 것은 아니다.

2.2 실험 내용

테스트를 위한 실험 챔버의 도면 및 외관은 그림 1과 그림 2와 같다. 그림 3은 임계복사속 측정 장비를 설치한 모습을 보여준다.

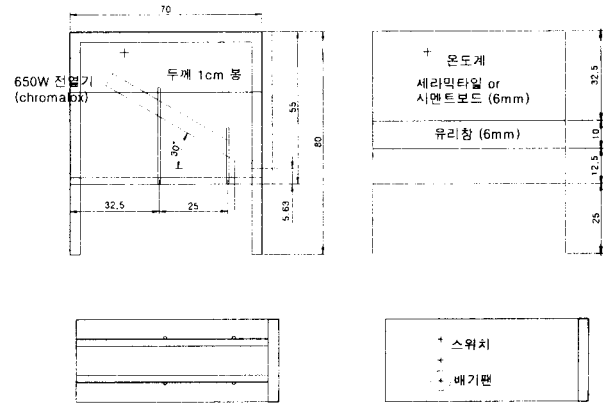


그림 1. 실험 챔버 구성 도면

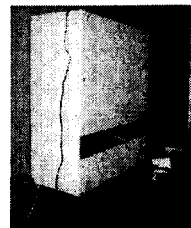


그림 2. 실험 챔버



그림 3. EKO의 DATA Logger

수평으로 설치된 단열재 시료는 30° 경사로 설치된 전기 복사 판넬에서 나오는 열에 노출되어 있다. 짧은 시간동안 예열을 한 후에 시료의 가장 뜨거운 끝부분을 작은 불꽃을 내는 기구 (토치 또는 라이터)를 이용하여 불을 붙인다. 불이 시작된 부분부터 연소가 끝난 지점까지 거리를 측정하고, 이미 준비된 Calibration curve를 이용하여 W/cm^2 로 변환한 임계복사속으로 나타낸다. 섬유질 단열재로서의 내화성능을 갖추기 위해서는 임계복사속이 최소 $0.12W/cm^2$ 또는 그 이상이 되어야 한다⁵⁾.

5) A Comparison of Gas and Electric Radiant Panels for Measuring the Flammability of Loose-Fill Cellulose Insulation, Journal of Thermal Insulation, Vol. 13, p. 13, 1989. 7

3. 내화성능 실험

3.1 시료 준비

섬유질 단열재 내화성능 실험에 사용될 시료를 준비하기 위하여 국내 섬유질 단열재 생산 공장을 방문하였다. 국내 섬유질 단열재 생산 공장에서는 내화재로 러시아산 붕산 (Boric Acid; H_3BO_3)을 사용하고 있다.

그림 4는 거친 입자크기의 내화재를 분쇄기로 투입하기 위한 장치를 보여주며, 그림 5는 투입된 내화재를 미세하게 분쇄하여 폐지와 혼합되는 장치로 운송하는 장치를 보여주고, 그림 6은 분쇄된 폐지와 미분된 내화재를 혼합하여 골고루 섞이도록 하여 최종 포장기까지 연결시켜주는 장치를 보여준다.

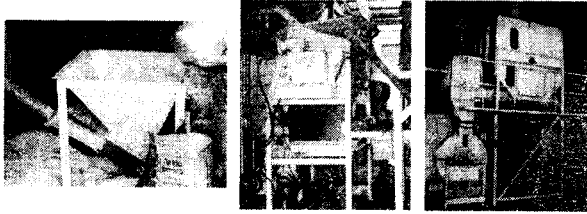


그림 4. 내화재 투입기 그림 5. 내화재 분쇄기 그림 6. 내화재와 폐지 혼합장치

내화재 분쇄기는 투입되는 내화재의 양을 rpm 단위로 10에서 300까지 조절 가능하도록 되어 있다. 현장에서는 내화재의 경우 130rpm의 속도로 투입하고 있고, 폐지는 분당 28.8kg의 속도로 투입되고 있다. 내화재 투입장치의 회전속도에 따른 내화재 배합비를 알아보았다.

우선 다양한 배합비의 서로 다른 실험용 섬유질 단열재를 제조하기 위해 60, 70, 80, 90, 100, 150, 200rpm의 속도로 투입되는 내화재의 무게를 1분 동안 3회 측정하여 평균하였다. 그 결과 회전 속도별 분당 내화재 투입량을 알아내고, 분당 폐지의 투입량자료를 이용하여 내화재 배합비를 구하였으며, 그 결과는 표 1과 같다. 이를 근거로 60rpm의 속도에서는 약 4.8%의 비율로, 현장에서 사용하는 130rpm 속도에서는 약 13%의 배합비로 내화재가 혼합되고 있음을 알 수 있었다.

표 1. 내화재 투입속도에 따른 내화재 배합비

내화재투입속도 (rpm)	붕산 (kg/m)	폐지 (kg/m)	내화재배합비 (%)
60	1.464	28.8	4.8%
70	1.867	28.8	6.1%
80	2.327	28.8	7.5%
90	2.727	28.8	8.6%
100	3.157	28.8	9.9%
150	5.157	28.8	15.2%
200	7.237	28.8	20.1%

현장에서는 13%의 비율로 내화재가 투입되고 있지만 내화재 배합비에 따른 내화성능을 파악하기 위하여 내화재투입속도를 조절하여 5%부터 2.5%씩 증가시켜 22.5%까지 총 8개의 샘플을 준비하였다. 배합비에 따라 준비된 시료는 섬유질 단열재 설치용 블로어 등을 이용하여 부풀린 상태에서, 높이가 10cm를 넘지 않고 윗부분이 자유롭게 공기가 통하도록 노출되도록 하여 온도 $21 \pm 2^\circ C$,

상대습도 $50 \pm 5\%$ 상태로 보관하였다.

3.2 챔버 보정 및 표준화 작업

열원으로부터의 복사속을 측정하기 위하여 일본 EKO INSTRUMENTS 사의 Heat Flow Sensor MF-140 타입을 이용하여 10cm 간격으로 가시료 보정용 판 (Dummy Specimen Calibration Board)에서 복사속을 측정하였다. 여기서 가시료 보정용 판은 $5 \times 60 \times 15$ cm 크기의 시멘트 보드로 구성된 판넬로 10cm 간격으로 복사속을 측정할 수 있도록 하였다.

챔버 내 복사 가열 판넬을 깨끗하게 닦은 후, 복사 판넬의 스위치를 켜고 약 1시간 동안 챔버 안의 온도가 안정될 때까지 놓아두었다. 안정온도는 가열 판넬 상부에서 $49 \pm 5^\circ C$ 이다. 챔버 안에 가시료 보정용 판을 넣은 후 30초 동안 예열하였다. 복사속 측정기를 가시료 10cm 지점에 넣은 후 측정값이 안정되면 소수점 셋째자리까지 기록하였다. 20cm, 30cm, 40cm, 50cm 지점에서 같은 방법으로 측정한 후, 이를 그래프용지에 표시하여 Calibration curve를 작성하였다. 이는 챔버 내에서 단열재를 연소한 후 연소된 길이를 측정하여 임계복사속으로 변환하는데 사용되었다. 작성된 Calibration curve는 그림 7과 같다.

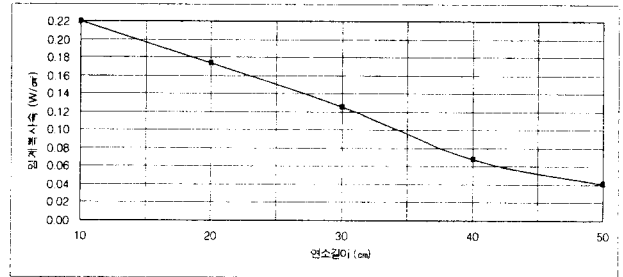


그림 7. Calibration curve

Calibration curve 작성 후 실험 순서는 다음과 같다. 실험 챔버의 열원 및 팬을 약 1시간 동안 가동시켜 챔버의 온도가 $49 \pm 5^\circ C$ 의 범위에 있도록 하고 온도를 기록한다. 준비해 놓은 시료를 트레이에 넘칠 때까지 부어넣고 쇠자 등을 이용하여 윗면을 고르게 한다. 트레이에 담긴 시료는 테스트를 시행할 공간의 상온에서 약 10분 동안 안정되도록 놓아둔다. 트레이에 담긴 시료를 챔버에 넣고 약 3분 동안 놓아둔 후, 챔버 내의 시료에 토치 등과 같은 적절한 점화원을 이용하여 점화한다. 불꽃이 소멸될 때까지 타도록 놓아두고, 트레이를 꺼내어 불꽃을 점화한 부분에서 시료가 타들어간 부분의 길이를 기록한다. 각 시료 당 세 번씩 테스트한다. 그림 8에서 그림 10은 실험 준비 과정을 보여준다.

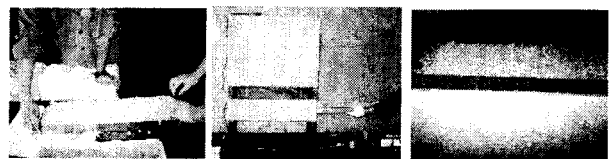


그림 8. 트레이에 시료 담기 그림 9. 트레이(시료) 삽입 그림 10. 챔버 내 설치된 시료

3.3 실험결과

그림 11은 챔버 내에서 시료가 연소하고 있는 모습을 보여 준다. 각 시료 당 3회씩 실험하고 그림 12와 같이 발화점에서부터 타 들어간 길이를 측정한 데이터를 표 2에 나타내었다. 또한 그림 13에 내화재 배합비에 따른 연소길이와 임계 복사속을 나타내었다.

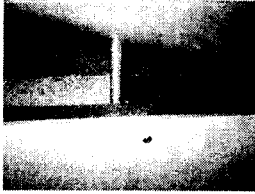


그림 11. 연소과정

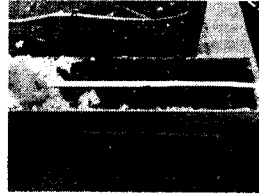


그림 12. 연소 길이 측정

표 2. 연소 실험 데이터

내화재배합비 (%)	연소길이 (cm) (3회평균)	임계복사속 (W/cm ²)	챔버온도(°C) (3회평균)
5.0 %	51.00	0.040	54.0
7.5 %	42.67	0.059	51.7
10.0 %	39.67	0.069	54.8
12.5 %	37.00	0.078	54.6
15.0 %	29.33	0.102	52.3
17.5 %	27.67	0.110	54.7
20.0 %	24.33	0.143	56.8
22.5 %	15.33	0.182	54.9

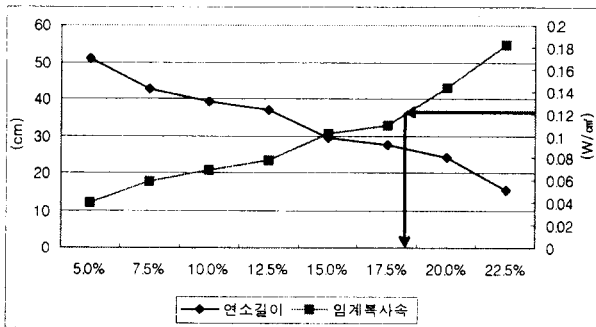


그림 13. 내화재 배합비에 따른 섬유질 단열재의 연소길이 및 임계복사속

실험 결과 섬유질 단열재로서의 내화성능을 갖추기 위한 임계복사속이 0.12W/cm² 또는 그 이상을 만족하는 내화재 배합비는 약 18%로 나타났다.

표 3. 내화재 배합비에 따른 섬유질 단열재 생산 가격

총무게 (kg)	페신문지 무게 (kg)	Boric Acid (kg)	내화재 배합비(%)	비용 (원)
12	9.3	2.7	22.5	3744
12	9.6	2.4	20.0	3528
12	9.9	2.1	17.5	3312
12	10.2	1.8	15.0	3096
12	10.5	1.5	12.5	2880
12	10.8	1.2	10.0	2664
12	11.1	0.9	7.5	2448
12	11.4	0.6	5.0	2232

*페신문지 150원/kg, Boric Acid 870원/kg (2002년 현재)

표 3은 페지와 내화재 배합비에 따른 섬유질 단열재의

생산 가격으로 내화재를 현재의 13%에서 18%로 늘릴 경우 생산 가격은 약 15% 증가하게 된다. 하지만 내화성능이 확보된 믿을 수 있는 환경친화형 단열재라는 프리미엄을 생각한다면 이 정도의 생산비 증가는 당연히 감수해야 할 것이다.

4. 결론

- 1) 섬유질 단열재의 내화성능은 내화재 배합비가 증가함에 따라 거의 정비례하여 증가하는 것으로 나타났다.
- 2) 국내에서 생산되는 섬유질 단열재는 내화재로 봉산(Boric Acid)을 사용하고 있었으며, 미국의 내화성능기준에 부합하는 임계복사속 0.12W/cm²을 만족하는 내화재 배합비는 18% 이상이 되어야 하는 것으로 나타났다.
- 3) 따라서, 현재 국내에서 생산하고 있는 섬유질 단열재가 내화성능을 갖추기 위해서는 내화재 배합비율을 현재의 13%에서 18%로 늘려야 한다.
- 4) 섬유질 단열재의 내화성능을 확보, 유지하기 위해서는 생산단계에서 꾸준한 정기적인 내화성능실험이 이루어져야 한다.

참고 및 인용문헌

1. ASTM C 1485-00 "Critical Radiant Flux of Exposed Attic Floor Insulation Using an Electric Radiant Heat Energy Source", 2000 Annual Book of ASTM Standards, Vol. 4, 2000. 6
2. ASTM C739, "Standard Specification for Cellulosic Fiber(Wood-Base) Loose-Fill Thermal Insulation", 1995 Annual Book of ASTM Standards, Vol. 4, 1995. 6, p.344.
3. The Use of Boron Products in Cellulose Insulation, Journal of Thermal Insulation, Vol. 2, 1979. 4
4. A Study of Boron Additives in Cellulose Insulation, Journal of Thermal Insulation, Vol. 4, 1981. 4
5. Round Robin Fire Safety Tests on Cellulose Insulation, Journal of Thermal Insulation, Vol. 10, 1986. 7
6. Round Robin Fire Safety Tests on Cellulose Insulation Testing Program: Round 2, Journal of Thermal Insulation, Vol. 11, 1987. 7
7. A Comparison of Gas and Electric Radiant Panels for Measuring the Flammability of Loose-Fill Cellulose Insulation, Journal of Thermal Insulation, Vol. 13, 1989. 7
8. Consumer Product Safety Commission, "Interim Safety Standard for Cellulose Insulation: Cellulose Insulation Labeling and Requirement", 44 FR 39938, 16CFR Part 1209 (1979) also General Services Administration Specification HH-I-515d.
9. Day, M., T. Suprunchuk, and D. M. Wiles, "A Combustibility Study of Cellulosic Insulation", Journal of Thermal Insulation 3, 260-224, 1987.
10. <http://www.cellulose.com/English/news-sept99.htm>
11. 셀파산업, "셀파, 리스톤", 셀파산업주식회사, 2000
12. CIMA(Cellulose Insulation Manufacturer's Association), http://www.cellulose.org/cellulose_reports.html