

## 내화천장구조 재료의 고온 열특성 실험 연구

여인환 · 조범연 · 민병렬 · 김흥열

한국건설기술연구원

### Experimental Study on the Thermal Properties of Materials for Fire Resistant Ceiling Structure at High Temperature

Yeo, In-Hwan · Cho, Bum-Yean · Min Byung-Yeol · Kim, Heung-Youl

Korea Institute of construction Technology

#### 요 약

이 연구에서는 내화천장구조 재료의 고온 열특성을 파악하여, 건축물 화재시 천장구조에 대한 보다 정확한 화재성상예측을 위한 실험적 자료로 제시하고자 한다. 건축물의 화재성상 예측은 내화설계 시 반드시 필요하며, 화재성상예측을 위해서는 화재하중, 작용외력, 안전계수 및 설계용 정수의 합리적인 설정이 중요하다. 화재하중 및 작용외력 등은 건축물의 부재가 지니는 하중조건에 대한 화재시의 부재 안정성 예측에 관계되는 부분이며, 설계 시 필요한 데이터 중 내화천장구조 재료의 고온 열특성 값은 화재발생 구획의 화재온도가 주요 구조부재에 전달되는 정도를 예측할 수 있는 인자로 볼 수 있다. 따라서 내화천장구조 재료의 고온 열특성 값 설정은 화재발생 공간의 온도범위(20~1000℃)에 걸쳐 평가 및 분석되어야만 정확하고 신뢰성 있는 화재발생 예상 공간의 부재 온도 및 안전성 분석이 가능하다.

이에 국내 건축구조물에 사용되고 있는 대표적인 내화피복재료인 방화석고보드, 텍스, 암면에 대해서 20℃~900℃까지의 열전도율을 측정하였다. 실험결과 방화석고보드와 텍스의 경우 약 0.15 W/m·K까지 일정하게 증가하였다. 암면의 경우 약 700℃까지는 방화석고보드나 텍스에 비해 열전도율이 낮게 나타났지만, 800℃ 지점부터 용융 및 탄화가 진행되면서 열전도율이 급격히 상승하는 것으로 나타났다.

#### 1. 서 론

건축물의 대형화 및 고층화 경향에 따라 철골조 건축물의 수요가 계속되어 왔으며, 고온에 취약한 강재의 화재안전성 확보를 위해 철골조 건축물에 적용되는 내화피복재의 개발과 시공도 증가되어 왔다. 이러한 내화피복재료는 시공방법과 형태 등에 따라 건식 및 습식으로 크게 분류할 수 있으며, 화재시 철골구조부재의 내력저하를 효과적으로 방어할 수 있는 수단으로 지속적인 진화가 이어질 것으로 전망된다. 이와 더불어 최근 건축디자인의 다양화와 사용재료 및 시공기술의 첨단화, 복합화에 따라 내화피복 수단도 다변화 할 필요성이 제

기되고 있기도 하다. 내화피복재의 시공은 작업자의 숙련도에 따라 시공 편차가 발생할 가능성이 있고, 시간경과에 따른 내구성 확보 및 유지관리 등과 같은 문제점이 제시됨에 따라 이를 보완할 수 있는 방법이 검토되고 있다. 한편으로는 문제점을 대체할 수 있는 새로운 구조 및 공법의 개발이 필요하다고도 할 수 있다. 특히 내화천장구조의 경우에는 건축물의 바닥 하부에 설치되는 천장이 일정 시간의 내화성능을 확보하도록 하여 바닥 및 보에 대한 내화피복을 경감하거나 생략하도록 할 수 있다. 이에 비교적 경량으로 대규모 공간에 대한 시공이 가능하고 시공·유지관리의 편의성 확보, 공사기간의 단축 등으로 인해 공사비용의 절감이 가능해 진다. 이처럼 천장구조의 내화설계는 화재시 건축물의 바닥 및 보와 같은 주요 구조부재에 대한 내화성능을 확보하고 주요 구조부재의 내화피복을 경감하거나 생략하여 건축의 생산성을 향상시키기 위한 유용한 대안으로 검토가 가능하다. 내화설계시 국내에서는 주로 사양적 내화구조기준을 활용하고 있다. 하지만 미국, 영국, 스웨덴, 일본을 비롯한 선진각국에서는 사양적 내화구조기준과 동시에 건축물의 형태와 특성을 고려한 실내 가연물의 종류와 양, 화재실의 규모, 하재하중에 의한 건축물의 내화성능을 설정하고 내화성능에 적합한 구조 및 부재를 선정하기 위하여 재료의 열특성, 열전도 정수, 구조재료의 기계적 성질 등을 평가·적용하는 성능적 내화설계법을 활용하고 있다.

이에 국내에서도 성능적 내화설계를 위한 하재하중, 작용외력, 안전계수 및 설계용 정수 등의 설정이 필요할 것이다. 화재하중 및 작용외력 등은 건축물의 부재가 지니는 하중조건에 대한 화재시의 부재 안정성 예측에 관계되는 부분이며, 설계 시 필요한 데이터 중 내화천장구조 재료의 고온 열특성 값은 화재발생 구획의 화재온도가 주요 구조부재에 전달되는 정도를 예측할 수 있는 인자로 볼 수 있다. 따라서 내화천장구조 재료의 고온 열특성 값 설정은 화재발생 공간의 온도범위(20~1000℃)에 걸쳐 평가 및 분석되어야만 정확하고 신뢰성 있는 화재발생 예상 공간의 부재 온도 및 안전성 분석이 가능하다. 이에 본 연구에서는 내화천장구조 재료의 고온 열특성을 파악하여, 천장구조의 내화설계 시 활용할 수 있는 실험적 자료로 제시하고자 한다.

## 2. 고온 시 재료의 열전도율 측정방법

재료의 열전도율 측정 원리는 크게 정상상태 측정법과 비정상 열선법 그리고 레이저 플래시법으로 나눌 수 있다. 정상상태 측정법은 재료의 두 표면사이의 온도 차이를 일정하게 유지하도록 하는데 필요한 열유속을 측정하여 열전도도를 구하는 방법이다. 기체 상태나 액체상태의 유체의 열전도도 측정을 위해 많이 사용되는 비정상 열선법은 매우 가는 금속선에 전류를 흘려서 시간에 따른 금속선의 온도상승이 금속선 주위에 있는 시료에 따라 결정되는 것을 이용하여 열전도율을 측정하는 방식이다. 레이저 플래시법은 일정 온도에서 재료(고체, 액체 또는 분말 등)의 열확산을 측정하는 분석법이다. 이 방법은 측정 시료에 대한 제약이 없어 얇은 박판부터 고분자, 세라믹, 금속은 물론 액체, 분말 상태의 시료까지 다양한 크기 및 재질의 재료 분석에 사용할 수 있다.

한국 산업 규격(KS)에서는 정상상태 측정법, 비정상 열선법, 레이저 플래시법 각각의 측정방법에 대한 기준을 정하고 있다. 국외의 열전도율 측정 방식 역시 KS 열전도율 측정방식과 크게 다르지 않다. ISO는 국제표준기관들 중 가장 규모가 크고 산업 전반과 서비스에 관한 국제 표준 제정을 담당하며, 국내 KS 열전도율 표준 역시 ISO 열전도율 표

준에 근거하여 제정되어 있다. ASTM에서 규정하고 있는 열전도율 관련 규정 또한 ISO와 크게 다르지 않다. 따라서 열전도율의 측정방법이 국제적으로 통합되어 있다고 볼 수 있으며, 표 1은 국내·외 열전도율 측정규정 측정원리별로 구분한 것이다.

**표 1. 국내외 열전도율 측정규정**

측정원리		관련 규정		
		국내	미국	국제
정상상태 측정법	평판직접법	KS L 9016	ASTM C 177	ISO 8302
		KS F 2463	ASTM E 2584	
	평판열류계법	KS L 9016	ASTM C 518	ISO 8301
비정상 열선법		KS L 3306	ASTM C 1113	ISO 8894
레이저 플래시법		KS L 1604	ASTM E 1461	ISO 18755

### 3. 천장재 고온 열전도율 시험

#### 3.1 개요

성능적 내화천장설계 시 적합한 천장부재를 선정하고, 다양한 천장구성별 내화성능 시뮬레이션 평가를 위한 DB를 구축하여 내화천장구조 표준화를 위한 기초자료를 제시하고자 천장재에 대한 고온 열전도율 시험을 실시하였다.

시험은 내화천장구조에 적용될 대표적인 재료인 방화석고보드, 천장텍스(석고시멘트판), 암면(미네랄울)을 대상으로 상온에서 1000℃까지 가열하면서 열전도율 실험을 실시하였다. 방화석고보드, 텍스, 암면의 열전도율 시험편은 고온열전도율시험기(FireLine™ 1000, ANTER사 제품) 규격에 맞게 150×150×6mm의 크기로 제작하였다.

**표 2. 시험인자 및 수준**

시험인자	수준	수준
재료	방화석고보드, 천장텍스, 암면	3
온도	R.T.~1,000℃	-

#### 3.2 시험 방법

내화천장구조 재료의 고온 열전도율을 측정하기 위하여 정상상태 측정법인 ASTM E 2584-10 : Standard Practice for Thermal Conductivity of Materials Using a Thermal Capacitance(Slug) Calorimeter」 9에 의한 방법을 사용하였다. ASTM E 2584의 시험방법에서는 칼로리미터를 이용하여 측정하고자 하는 시험편의 외부 표면에 열을 가하면 시험편을 통해서 열이 열전도가 좋은 금속판으로 전달되며, 이때 전달된 금속판의 온도상승을 이용해 시험편의 열전도율 측정하게 된다. 시험장비 제원은 표 3과 같다.

표 3. 시험장비 제원(FireLine™ 1000)

구 분	사 양
온도 측정범위	25 ~ 1000 °C
열전도율 측정범위	0.03 ~ 1.0 W/mK
가열 조건	2 °C/minute

### 3.3 시험 결과

#### (1) 방화석고보드

방화석고보드의 열전도율 시험결과 그림 1과 같이 상온에서 약 1000°C까지 열전도율은 온도가 증가함에 따라 비례하여 최대 0.1339 W/m·K까지 증가하는 현상을 보이고 있으며, 100~250°C 사이에서 수분이 증발하면서 증가율이 약간 감소하는 경향을 나타냈다. 방화석고보드의 다중회귀분석은 상온에서 약 1000°C까지의 열전도율 데이터를 사용하여 온도 ( $T$ )를 독립변수로, 온도에 따른 열전도율( $\lambda$ )은 종속변수로 놓고 다중회귀분석을 실시한 결과 온도 변화에 따른 열전도율 추정식은 식 1과 같으며, 결정계수( $R^2$ )가 0.9852로 매우 높은 유의도가 있는 것으로 나타났다. 사진 1은 열전도율 시험 후 방화석고보드이다.

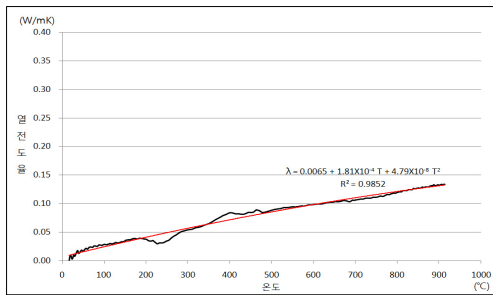


그림 1. 방화석고보드의 온도에 따른 열전도율      사진 1. 열전도율 시험 후 방화석고보드

$$\lambda = 0.0065 + 1.81 \times 10^{-4} T + 4.79 \times 10^{-8} T^2 \dots \dots \dots \text{식 1.}$$

$$R^2 = 0.9852$$

#### (2) 텍스(석고 시멘트판)

텍스의 열전도율 실험결과 그림 2에서와 같이 상온에서 약 1000°C까지 열전도율은 온도가 증가함에 따라 비례하여 최대 0.1575 W/m·K까지 증가하는 현상을 보이고 있으며, 100~250°C 사이에서 수분이 증발하면서 증가율이 약간 감소하는 경향을 나타냈다. 텍스의 다중회귀분석은 상온에서 약 1000°C까지의 열전도율 데이터를 사용하여 온도 ( $T$ )를 독립변수로, 온도에 따른 열전도율( $\lambda$ )은 종속변수로 놓고 다중회귀분석을 실시한 결과 온도 변화에 따른 열전도율 추정식은 식 2와 같으며, 결정계수( $R^2$ )가 0.9677로 매우 높은 유의도가 있는 것으로 나타났다. 사진 2는 열전도율 시험 후 텍스이다.

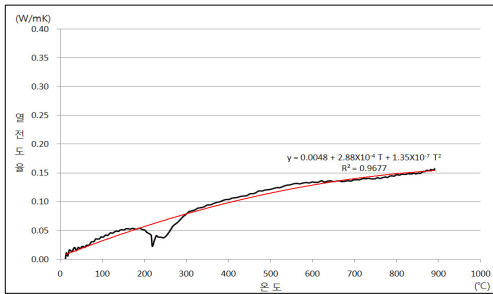


그림 2. 텍스(석고 시멘트판)의 온도에 따른 열전도율 사진 2. 열전도율 시험 후 텍스  
 $\lambda = 0.0048 + 2.88 \times 10^{-4} T + 1.35 \times 10^{-7} T^2 \dots\dots\dots$ 식 2.  
 $R^2 = 0.9677$

(3) 압면(Mineral wool)

압면의 열전도율 실험결과 그림 3과 같이 상온에서 약 1000℃까지 열전도율은 온도가 증가함에 따라 비례하여 최대 0.3044 W/m·K까지 증가하였으며, 약 800℃까지 일정한 속도로 열전도율이 상승하다가 800℃이후 급격한 증가율을 보였고, 이후 0.3000 W/m·K 이후에는 일정한 값을 나타냈다. 이는 압면보드의 형상이 다른 재료에 비해 비교적 유연하고 800℃ 지점부터 용융 및 탄화가 급격히 진행된데 기인한 것으로 판단된다. 압면의 다중회귀 분석은 상온에서 약 1000℃까지의 열전도율 데이터를 사용하여 온도(T)를 독립변수로, 온도에 따른 열전도율( $\lambda$ )은 종속변수로 놓고 다중회귀분석을 실시한 결과 온도 변화에 따른 열전도율 추정식은 식 3과 같으며, 결정계수( $R^2$ )가 0.8881로 방화석고보드나 텍스에 비해 다소 낮은 유의도가 있는 것으로 나타났다. 사진 3은 열전도율 시험 후 압면이다.

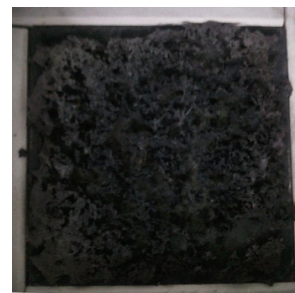
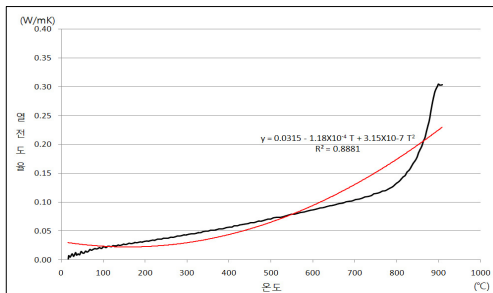


그림 3. 압면(Mineral wool)의 온도에 따른 열전도율 사진 3. 열전도율 시험 후 압면  
 $\lambda = 0.0315 + 1.18 \times 10^{-4} T + 3.15 \times 10^{-7} T^2 \dots\dots\dots$ 식 3.  
 $R^2 = 0.8881$

4. 결 론

내화천장구조 재료의 고온 열특성을 파악하여, 건축물 화재시 천장구조에 대한 보다 정확한 화재성상예측을 위한 실험적 자료 제시를 목적으로 내화천장구조 재료에 대한 고온 열전

도열 시험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 방화석고보드의 열전도율 시험결과, 상온에서 약 1000℃까지 열전도율은 온도가 증가함에 따라 비례하여 최대 0.1339 W/m·K까지 증가하는 현상을 보이고 있으며, 100~250℃ 사이에서 수분이 증발하면서 증가율이 약간 감소하는 경향을 나타냈다. 또한 온도( $T$ )를 독립변수로, 온도에 따른 열전도율( $\lambda$ )은 종속변수로 놓고 다중회귀분석을 실시한 결과 상온에서 약 1000℃까지의 열전도율 결정계수( $R^2$ )는 0.9852로 매우 높은 유의도가 있는 것으로 나타났다.

(2) 텍스의 열전도율 실험결과, 상온에서 약 1000℃까지 열전도율은 온도가 증가함에 따라 비례하여 최대 0.1575 W/m·K까지 증가하는 현상을 보이고 있으며, 100~250℃ 사이에서 수분이 증발하면서 증가율이 약간 감소하는 경향을 나타냈다. 또한 온도( $T$ )를 독립변수로, 온도에 따른 열전도율( $\lambda$ )은 종속변수로 놓고 다중회귀분석을 실시한 결과 상온에서 약 1000℃까지의 열전도율 결정계수( $R^2$ )는 0.9677로 매우 높은 유의도가 있는 것으로 나타났다.

(3) 암면의 열전도율 실험결과, 상온에서 약 1000℃까지 열전도율은 온도가 증가함에 따라 비례하여 최대 0.3044 W/m·K까지 증가하였으며, 약 800℃까지 일정한 속도로 열전도율이 상승하다가 800℃이후 급격한 증가율을 보였고, 이후 0.3000 W/m·K 이후에는 일정한 값을 나타냈다. 이는 암면보드의 형상이 다른 재료에 비해 비교적 유연하고 800℃ 지점부터 용융 및 탄화가 급격히 진행되는데 기인한 것으로 판단된다. 또한 암면의 열전도율 결정계수( $R^2$ )는 0.8881로 방화석고보드나 텍스에 비해 다소 낮은 유의도가 있는 것으로 나타났다.

### 감사의 글

이 연구는 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 지원 하에 수행되는 국가 R&D사업인 “내화천장구조 표준화” 과제와 관련한 연구에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 건축물 내화설계 데이터베이스 구축, 한국건설기술연구원, 2001.
2. 포항산업과학연구원·한국건설기술연구원: 강제 단면형상계수 설정 및 내화피복기준에 관한 연구, 2000. 12.
3. 日本建築センター: 建築物の総合防火設計法, 第4卷耐火設計法, 1986.
4. 遊佐秀逸, “構造耐火性能とその評価”, 建設省建築研究所, 1998. 10.
5. 建設省建築研究所, “防・耐火性能評価技術の開発”, 1996.
6. Andrew H. Buchanan, Structural Design for Fire Safety, John Wiley & Sons Ltd, 2002.
7. ASTM E 2584-10 「Standard Practice for Thermal Conductivity of Materials Using a Thermal Capacitance (Slug) Calorimeter」
8. William D. Callister, Jr. Materials Science and Engineering : An Introduction, John Wiley & Sons, Inc. 2006.
9. John A. Purkiss, “Fire Safety Engineering Design of Structures”, Butterworth - Heinemann, 1996.