

**Cone-Calorimeter와 연기밀도챔버를 이용한
고무발포단열재의 연기밀도 비교**
**Smoke Density Comparison of Rubber Foam Insulator
by the test between Cone-Calorimeter
and Smoke Density-Chamber**

조희기* · 이덕희** · 이철규** · 이동우**

Cho, Hee-ki · Lee, Duck-Hee · Lee, Cheul-Kyu · Lee, Dong-Woo

ABSTRACT

Kinds of Sound & Thermal Insulator are being used for materials of railroad vehicles as a barrier of heat and noise. Glass Wool, PE foam, PP foam are such kinds of materials. In case of fire, it shows various combustion properties.

In this study, we compared the Smoke Density of the Rubber Foam Insulator by test between Cone-Calorimeter and Smoke Density-Chamber. The results showed that the Rubber Foam Insulator had an important role in the insulator thickness and the test method, We forecast the smoke density by test between Cone-Calorimeter and Smoke Density-Chamber.

1. 서론

현재 철도차량에는 유리섬유와 폴리에틸렌, 폴리프로필렌 등 여러 종류의 흡음 및 단열재가 사용되고 있으며, 철도차량 외부로부터 소음과 열손실을 차단하는 역할을 하고 있다.

2003년 대구지하철화재사고 이후 도시철도차량안전기준에 의하여 흡음 및 단열재의 화재관련 기준이 대폭 강화되었으며, 최근에는 난연성능이 좋은 유리섬유와 멜라민폼, 난연고무발포폼 등의 사용이 검토되고 있다. 기존의 화재사고에 대한 조사분석 통계에 따르면 화재 발생 시 연기에 의한 피해가 상당량을 차지하고 있어 연기발생량은 화재특성의 주요 평가지표가 되고 있다.

특히, 단열재로 쓰이고 있는 고무발포단열재의 경우 두께에 따라 도시철도차량안전기준에 부합성 여부가 달라지는 특성이 있어 두께에 따른 연기발생량을 평가하였다. 또한 동일한 시편에 대하여 챔버법과 배기관법으로 연기밀도특성 비교 평가하기 위하여 ASTM E 662 규정에 의한 연기밀도 장비의 챔버법과 ISO 5660-2 Part 2 규정의 Cone-Calorimeter에 의한 배기관법을 시험을 통하여

* 책임저자 : 한국철도기술연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원, 정회원

비교 평가 하였다.

2. 재료 및 시험

2.1. 시험재료

연기발생량을 평가하기 위하여 단열재 중 고무발포단열재를 사용하였다. 고무발포단열재는 EPDM과 NBR을 혼합 발포한 것으로 알려진 A사, H사의 2업체의 고무발포단열재를 사용하였다. 고무발포단열재의 두께는 각각 A사(4.0mm, 9.0mm), H사(5.0mm, 15mm, 23mm)로 5종류로 시험하였다.

표 1. 고무발포단열재의 시험 내용

업체	두께(mm)	업체	두께(mm)
A사	4.0	H사	5.0
			15
	9.0		23



그림 1 고무발포단열재

2.2. 시험방법

2.2.1. 연기밀도챔버

영국 FTT사의 연기밀도챔버는 ASTM E 662 규정으로 flaming 모드에서 시험하였다. 연기밀도시험기의 챔버크기는 $914\text{mm} \pm 3\text{mm} \times 914\text{mm} \pm 3\text{mm} \times 610\text{mm} \pm 3\text{mm}$ 로서 밀폐된 방식으로 내부에 복사가열기를 설치하였으며, 복사가열기를 바라보는 수직으로 설치된 중심 38.1mm 반경에 발광수준이 $2.5\text{W}/\text{cm}^2$ 이 발생하도록 하였다. 복사가열기와 시험시편사이(시편 앞 6.0mm)에 버너를 설치하고 공기와 프로판을 각각 500cm/min, 50cm/min으로 불꽃크기를 조절하였다.

시험에 사용된 75mm×75mm 크기의 고무발포단열재는 65.1mm×65.1mm 정도 노출되는 홀더에 고정시킨 후 복사가열기 앞에 설치한다.

시험과 동시에 발생하는 연기의 양을 PM tube 광도측정법으로 투과율을 측정하고 이를 이용하여 연기발생량(D_s)을 계산한다.

$$D_s = G \left(\log \frac{100}{T} + F \right)$$

$$G = \frac{V}{(A \times L)}$$

V : Volume of the chamber

A : Specimen surface area

L : Light pass length

T : Transmittance of light

F : Density of the filter

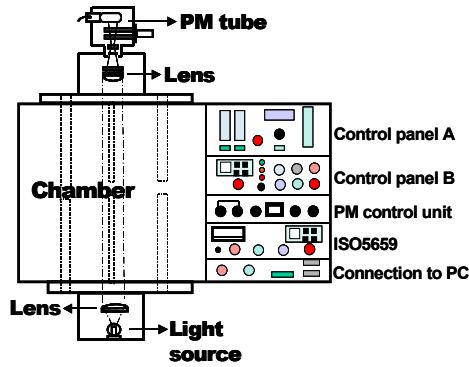


그림 2. 연기밀도챔버 시험기의 구성도



그림 3. 연기밀도챔버 장비 및 복사가열기

2.2.2. Cone-Calorimeter

고무발포단열재의 연기발생량을 측정하기 위하여 영국 FTT사의 dual-Cone Calorimeter를 사용하였으며, ISO 5660-2 Part 2 규정의 시험방법을 따라 시험하였다. Cone-Calorimeter는 시편의 연소에 따른 발열량, 질량감소율, 독성가스(CO, CO₂) 방출량 및 발연량 등을 측정할 수 있다.

시험은 100mm×100mm 크기의 고무발포단열재를 시편홀더에 그릴과 같이 고정시킨 후 weigh cell에 올려놓고, 복사전기히터를 이용하여 5.0W/cm²의 복사열 조건하에서 수행하였다. 시험에서 시편의 열분해가스에 점화하기 위하여 spark igniter를 사용하였다.

배연관내의 레이저빔을 통하여 고무발포단열재의 연소 시 발생하는 연기량을 평가하였다.

$$S_A = S_{A,1} + S_{A,2}$$

$$S_{A,1} = A^{-1} \sum_{i=s}^{i=f} V_s k \Delta t$$

$$S_{A,2} = A^{-1} \sum_{i=s}^{i=f} V_s k \Delta t$$

$$V_s = (m_e T_s)(12.2 \times 10^3 M)^{-1}$$

$$k = \ln(I_0/I)L^{-1}$$

I_0/I : Ratio of incident light to transmitted light

L : Light path length through smoke

k : Linear Napierian absorption coefficient

m_e : Mass flow rate in exhaust duct

T_s : Temperature of the smoke at the point of measurement

M : Molecular mass of the gases flowing through the exhaust duct

A : Exposed surface area of specimen

Δt : Sampling time interval

$S_{A,1}$: Total smoke production per unit area before ignition

$S_{A,2}$: Total smoke production per unit area after ignition

S_A : Total smoke production



그림 4. Cone-Calorimeter 장비

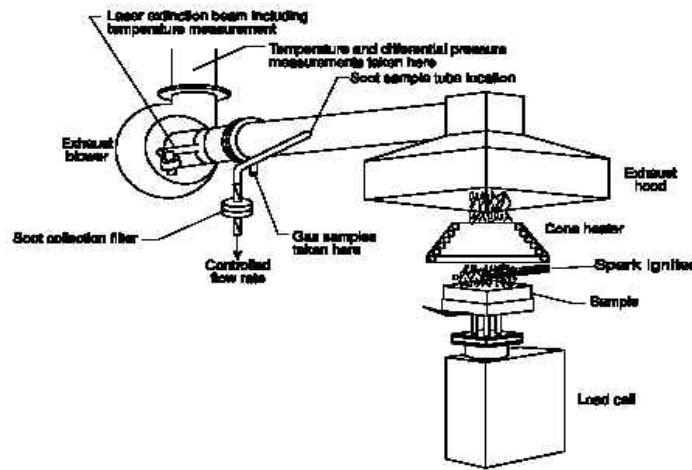


그림 5. Cone-Calorimeter 구성도

3. 결과 및 고찰

3.1. 고무발포단열재의 두께에 따른 연기발생량

연기밀도챔버에서 연기발생량은 표 2와 그림 6에 잘 나타나있다. A사(4.0mm, 9.0mm)의 고무발포 단열재의 연기발생량을 보면 두께가 4.0mm일 때보다 9.0mm에서 연기발생량이 더 높게 나타나는 것을 알 수 있으며, H사(5.0mm, 15mm, 23mm)를 보면 5.0mm보다 23mm에서 연기가 더 많이 발생하는 것을 볼 수 있다. 따라서 연기의 발생량은 고무발포단열재의 두께에 영향을 받는 것을 알 수 있다.

고무발포단열재의 두께가 4.0mm과 5.0mm의 연기발생량과 두께가 9.0mm과 15mm의 연기발생량을 보면 거의 유사한 경향을 보이고 있다. 이는 A사의 고무발포단열재가 더 많이 연기가 발생하는 것으로 제조업체에 따라 즉 조성에 영향을 받는 것으로 알 수 있다.

Cone-Calorimeter를 이용한 고무발포단열재의 연기발생량은 표 2와 그림 7에 나타내었다.

A사(4.0mm, 9.0mm)와 H사(5.0mm, 15mm, 23mm)의 연기발생량을 보면 각각 고무발포단열재의 두께가 각각 9.0mm와 23mm에서 486과 1621로 연기발생량이 23mm에서 높게 나타나는 것을 알 수 있으며, 또한 A사의 고무발포단열재의 연기가 많이 발생하는 것으로 Cone-Calorimeter 시험방법에서도 조성에 따라 연기발생량의 영향을 받는 것으로 알 수 있다.

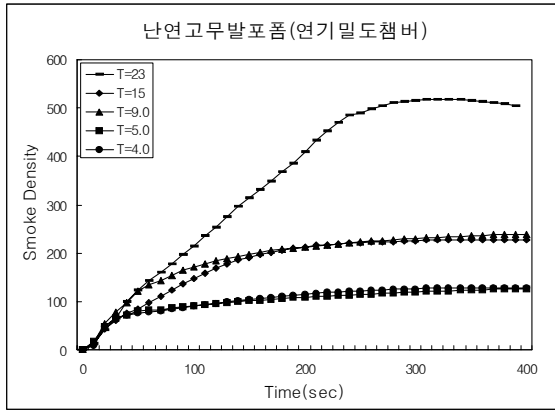


그림 6 연기밀도챔버에서 고무발포단열재 연기발생량

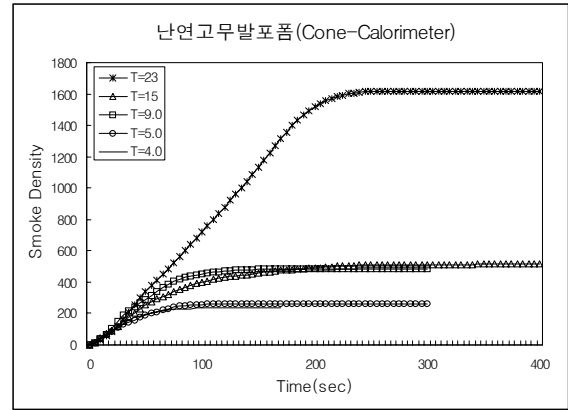


그림 7 Cone-Calorimeter에서 고무발포단열재 연기발생량

3.3. 연기밀도챔버와 Cone-Calorimeter 연기발생량 비교

연기밀도챔버와 Cone-Calorimeter의 연기발생량은 그림 6과 그림 7에서 비교해 보면 유사한 경향을 보이고 있으며, 또한 최대연기발생 도달시간이 비슷하게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 고무발포단열재의 연소특성 영향으로 착화가 가능한 최소 복사열이 넘으면 그 이상의 복사열(연기밀도챔버=2.5W/cm², Cone-Calorimeter=5.0W/cm²)에 의해서는 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

그림 8과 표 2는 연기밀도챔버와 Cone-Calorimeter의 시험방법에 따른 연기발생량을 비교한 것으로 Cone-Calorimeter에서 연기발생량이 더 높게 나타났다. 이는 연기밀도챔버방식에서 챔버내부의 압력과 대기의 압력이 일정하게 유지하기 위하여 챔버내부에서 발생한 연기가 일정압력 이상은 외부로 배출되는 시험방법의 차이와 연기밀도 계산방법에 따른 차이에 기인한 것으로 보인다.

연기밀도챔버와 Cone-Calorimeter의 연기발생량의 상관관계를 비교해보니 고무발포단열재의 두께가 23mm에서는 연기발생량의 차이가 3배 이상 발생했으며, 두께가 4.0mm에서는 2배 정도 차이가 났다. 이는 연기가 많이 발생할수록 연기밀도챔버와 Cone-Calorimeter의 연기발생량 차이가 더 커짐을 알 수 있으며, 이와 같은 상관관계를 이용하여 다음과 같은 회귀식을 추정해 보았다.

$$S_A = 0.0038D_S^2 + 1.0843D_S + 44.864$$

이 회귀식을 통하여 연기밀도챔버와 Cone-Calorimeter 중 한 시험에 대한 최대연기발생량 안다면 다른 시험에 대하여 최대연기발생량을 제한적으로 유추할 수 있을 것이다.

표 2. 난연고무발포폼의 연기발생량 비교

난연고무발포폼 두께(mm)	연기밀도챔버	Cone-Calorimeter
23	518	1621
15	228	515
9.0	236	486
5.0	130	261
4.0	129	235

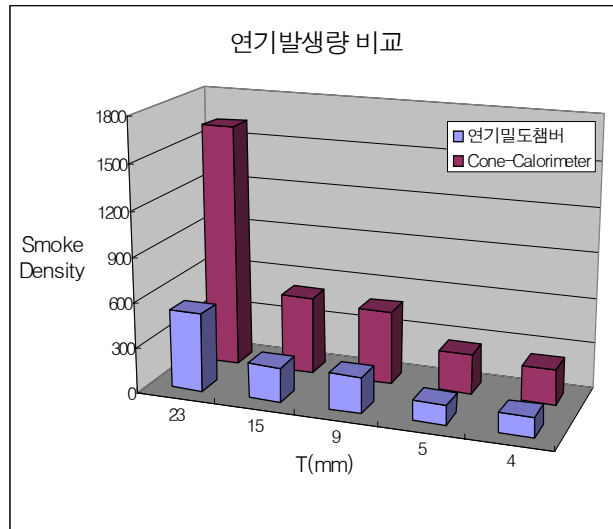


그림 8. 시험방법에 따른 연기발생량 비교

4. 결론

철도차량에는 여러 종류의 흡음 및 단열재가 사용되고 있다. 이중 연기발생량이 많은 고무발포단열재를 이용하였으며, 고무발포단열재의 특성에 따른 영향과 시험방법에 따른 연기밀도발생량을 비교해 보았다. 시험방법은 연기밀도챔버(ASTM E 662)와 Cone-Calorimeter(ISO 5660-2 Part 2) 방법으로 시험하였으며, 연기발생량에 따른 상관관계를 유추해 보았다.

- 난연고무발포폼의 연소특성은 두께에 영향 받으며, 제조방식(조성 비율)에 따라 연소특성이 큰 차이를 보임을 알 수 있다.

- 연기밀도챔버(ASTM E 662)와 Cone-Calorimeter(ISO 5660-2 Part 2) 시험방법에 따른 결과를 보면 고무발포단열재의 연기발생이 시험방법에 상관없이 유사한 경향을 보이고 있으며, Cone-Calorimeter 시험법에서의 연기발생량이 더 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 시험방법과 연기밀도계산방법의 차이로 인한 것인데 각각의 시험방법에 따른 연기발생량을 비교 평가하여 상관관계를 유추하였다.

참고문헌

1. ISO 5660-2 (2002), "Reaction-to-fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate - Part 2:Smoke production rate (dynamic measurement)"
2. ASTM E 662, "Standard Test Method for Specific Optical Density of Smoke Generated by Solid Material."
3. 조희기, 이덕희, 이철규, 백민, 정병철 (2005) Glass fiber cross-Al foil 차단막 두께에 따른 고무발포포단열재 연소특성, 춘계논문집, 한국화재소방학회, pp. 293-298
4. 이근원, 김관용 (2003), "콘칼로리미터를 이용한 플라스틱 단열재의 화재특성", 한국화재소방학회, 제17권, 제1호, pp. 76-83
5. 이덕희, 이철규, 정우성, 김선옥 (2004), "연기밀도 시험의 불확도 요인에 대한 연구", 하계논문집, 한국화재소방학회, pp. 32-38