

## 연기밀도 시험의 불확도 요인에 대한 연구

이덕희, 이철규, 정우성, 김선옥  
한국철도기술연구원

### Study on the Factors of Uncertainty for the Optical Smoke Density

Duck-Hee Lee, Cheul-Kyu Lee, Woo-Sung Jung, Sun-Ok Kim  
Korea Railroad Research Institute

#### 1. 서론

기초재료의 화재특성 평가에서 주요 평가지표가 되고 있는 연기발생량 시험의 경우 다른 시험에 비하여 연소 과정이 가지는 재현성의 부족으로 시험소간 또는 시편 간의 측정값 산포가 커서 보다 정밀한 측정값 확보를 위해 많은 노력이 요구되고 있다. 연기밀도 시험의 대표적 사례인 ASTM E 662 규정에 의하면 3회 측정한 연기밀도 값 중 최대값이 최소값의 150% 이내에 들면 유효한 시험으로 인정하도록 하고 있으며 유효한 범위를 벗어날 경우 3회 시험을 추가하여 총 6회 측정값으로 평균을 보고하도록 요구하고 있다. 이는 일반적으로 평균값의 10 % 내외의 산포를 유효한 시험이라고 판단하는 다른 시험들에 비하여 화재시험이 가지는 상당한 범위의 편차를 인정하고 있는 것이다.

측정값에서 나타나는 산포는 평균값에 대한 불확도 표시에 반영되어야 한다. 최근 대구 지하철 화재사고 이후 개정 예고되는 도시철도차량 화재안전기준은 ASTM E 662법에 의한 연기밀도 평가를 추진하고 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 측정값을 통하여 합부 판정을 하여야 할 경우에는 불확도 범위내에서 합부 판정을 피하여야 하는 것이 합리적이므로 시험소에서는 불확도 값을 최소화 하려고 노력하여야 하며, 제작사는 연기밀도 시험소의 불확도 범위를 초과하는 성능을 확보하여야 할 것이다. 본 연구에서는 연기밀도 측정값에 영향을 줄 수 있는 기본 요소를 파악하고 각 요소의 변화에 따른 연기밀도 값의 변화를 조사하여 연기 시험에 대한 불확도 산출의 기초 자료를 확보하고 불확도를 효과적으로 줄일 수 있는 인자를 파악하고자 하는 것이다. 다만 측정값의 결정요인 중 시편의 비균질성에 의한 요소와 시험자의 숙련도 편차 등에 관한 항목은 제외 하였고 시험규정에 의하여 명확하게 고정되지 않는 요소와 시험방법상에 내포될 수 있는 차이에 대하여만 조사하였다. 또한 시편의 두께와 배면재의 두께 및 종류에 의한 시험값의 변화를 참고 자료로 조사하였고, 연소방법에 대하여는 ISO 5659 및 ASTM E 662 시험의 시험결과를 비교하여 정리하였다.

## 2. 본 문

### 2.1 연기밀도 시험법과 불확도 개념

연기밀도를 평가하는 방법은 연기상자법과 배기관법으로 구분되며, BS 6853(영국 철도 차량 화재안전규정)과 KS F 2271의 연기포집상자 및 본 연구에서 사용한 ISO 5659 및 ASTM E 662 등이 연기상자 방법에 해당한다면, ISO 5660의 콘칼로리미터나 ISO 9705(Room Corner Test), SBI(Single Burning Item)등은 연소가스의 배기관에서 연기를 평가하는 방법으로 분류될 수 있다. 챔버법은 주로 소형시편에 적용되며 시험의 재현성 등에서 유리한 장점이 있고, 배기관법은 외기에 노출시킨 상태에서 연소시키므로 시간에 따라 실제 화재와 연관성 있는 특성을 조사할 수 있으며 유량계산을 통하여 총량평가를 할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 하지만 어떤 경우에도 연기밀도시험법은 그림1과 같이 광원과 광량 감지기 사이에 연기가 통과하는 공간을 두어 연기에 의해서 차단되는 광투과율을 측정하는 방법을 이용한다. 본 연구에서 사용한 연기상자는 ISO/TC 61의 ISO 5659-2(Determination of optical density by a single-chamber test)와 ASTM E 662(Standard Test Method for Specific Optical Density of Smoke Generated by Solid Materials) 기준에 따른 NBS(National Bureau of Standards) 연기상자(Smoke Box)다. 시편은 75mm×75mm의 넓이를 가지며 두께는 형상에 따라 차이가 있다. 연기밀도(Specific Smoke Density:  $D_s$ ) 평가방법은 연기상자의 형상으로부터 결정되는 상수 G값과 PM(photo multiplier) 튜브에서 감지되는 투과율 T 및 필터조건에 의해서 결정된다. 연기밀도 계산식은 다음과 같다.

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

G = V/(A×L) (V: volume of the Chamber, A: specimen surface area, L: light pass length)  
 T = transmittance of light, F = the density of the filter or 0 (depend on filter condition)

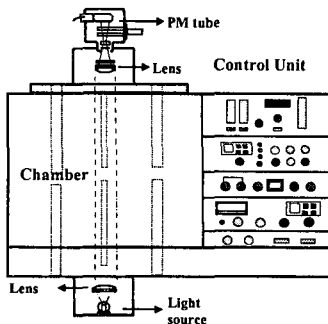


그림1. 연기밀도시험기의 구성도.

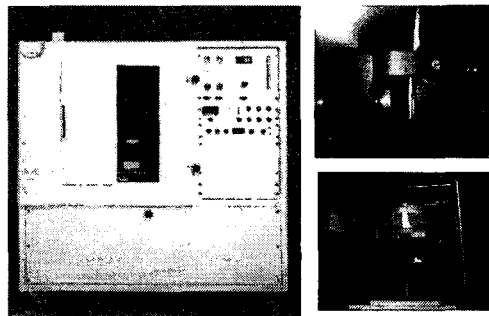


그림2. ASTM E 662(상), ISO 5659(하).

과거에는 참값의 추정범위를 불확도로 표현하였다고 한다. 그러나 최근의 불확도에 대한 정의는 측정값을 합리적으로 추정된 값들의 분산 파라미터 정도로 표현된다. 한정된

측정에 사용되는 개념으로서의 불확도와 무한대 반복측정을 가정하는 참값으로부터 파생된 오차의 개념을 구분하기 위하여 다소 모호한 표현을 사용하는 것을 감수한 것이다. 어떠한 간에 합리적인 불확도의 추정을 위하여 위의 연기밀도 계산식을 분석하여야 할 것이다. 동일한 시험장비로부터 측정된 값에 대해서는 상자의 크기와 관련된 G값은 고정된 상수 값으로 이해되어야 한다. 투과율(T)에 영향을 주는 요소들에 대하여는 요인별 분석이 필요하다. 투과율에 영향을 줄 수 있는 설비요소는 다음과 같다.

## 2.2 시험설비 요인에 따른 연기밀도(Ds) 변화

여러 시험편차 요인 중에서도 챔버 압력의 차이에 의한 변화, 복사열의 크기에 따른 영향에 관하여 조사하였으며 과일렛 불꽃이 있는 경우에는 불꽃 크기에 의한 영향을 조사하였다. 이 절에서는 국내 전동차에 사용되고 있는 A사의 난연성 불포화폴리에스터 FRP 내장판을 시편으로 활용하였다.

### 2.2.1 연기상자의 압력에 따른 변화

연기상자 시험이 완전히 닫힌계로 이해되고 있는 경우도 있으나 대부분의 연기상자는 특정하게 설정된 압력을 유지하고 있을 뿐 발생하는 대부분의 연소가스를 상자 밖으로 배출하도록 설계되어 있다. ASTM E 662의 경우 시험규격에 의하면 상자의 압력은 배출부의 튜브 끝단을 물속에 100mm 만큼 잠기게 하도록 하고 있다. 이를 기압으로 환산하면 토리첼리의 실험으로부터 1기압의 물기둥은 76mm Hg이며 물로 환산하면 1033mm에 해당하므로 연기상자의 압력을 1133mm에 물기둥으로 이해하면 시험 중 상자내의 압력은 1.097 기압, 즉 약 1.1기압으로 계산된다. 연기시험에서 챔버내의 압력을 모니터 하도록 하고 있으나 이는 챔버의 잠김 상태를 확인하는데 더 큰 목적을 가지고 있다. 장기간의 시험으로 인하여 압력통 내의 물이 일부 배출되거나 또는 튜브의 잠김 깊이가 정밀하게 100mm를 맞추기 어렵고, 챔버내로의 물의 역류는 상자압력을 변하게 할 수 있으며, 무엇보다도 부식성 연소가스로 상자의 기밀성이 점차 손상되는 것에 의하여 연기상자의 압력은 약간씩 변화될 수 있다. 이러한 압력변화에 따라 변화될 수 있는 시험값의 특성을 UP FRP 내장판 시험을 통하여 살펴보았다.

표 1. 상자압력에 따른 Ds 변화 사례

구 분	Ds (1.5min)	Ds (4.0min)	Ds (max)
1 기압	9.84	101.4	187.9
1.05 기압	15.7	116.2	206.4
1.1 기압	15.9	116.9	230.6

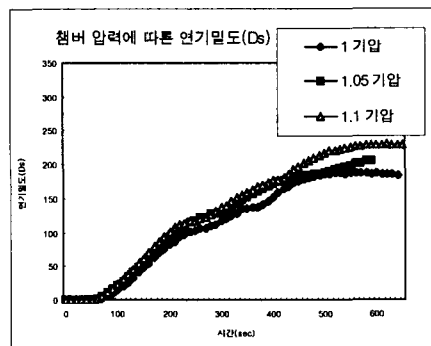


그림 3 상자압력에 따른 Ds 특성

시험결과 철도규격에서 평가하는 1.5분과 4분값 및  $D_s(max)$  값에 대하여 1.5분 값의 경우는 약 50%, 4분 값의 경우 15%, 최대값의 경우는 22% 정도의 차이가 발생함을 알 수 있었다.

**2.2.2 파일럿 불꽃크기에 의한 변화**

연기시험에서 주요한 시험편차 요인으로 주목받고 있는 것은 파일럿 불꽃의 크기다. 특히 고무류나 PVC 제품과 같이 연소할 때 부풀어오르는 특성이 있는 경우는 불꽃의 크기나 불꽃과의 거리가 많은 영향을 주고 있음을 확인할 수 있었다. 파일럿 플래임을 가하지 않는 Non-Flaming 시험과 50cm<sup>3</sup>/min 프로판가스와 500cm<sup>3</sup>/min의 공기를 주입하는 Flaming 시험의 중간치로 25cm<sup>3</sup>/min 프로판가스와 250cm<sup>3</sup>/min 공기를 넣은 경우의 1/2 Flaming 시험을 수행하여 그 결과를 표3과 그림4에 나타내었다. 이 시험은 시험편의 특성에 따라 많은 영향을 받는데 이 시험에 사용된 UP FRP 내장판의 경우 4분에서의 1/2 Flaming 시험값은 Flaming 시험값의 65%  $D_s(max)$  값은 84% 수준의 연기밀도를 나타내었다.

표 2 불꽃크기에 의한  $D_s$  사례

구 분	$D_s$ (1.5min)	$D_s$ (4.0min)	$D_s$ (max)
Non-Flaming	0.25	8.83	16.9
1/2-Flaming	1.73	75.8	193.9
Flaming	15.9	116.9	229.7

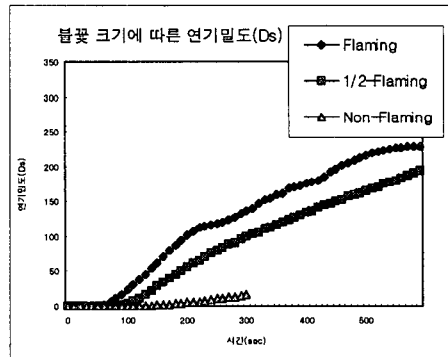


그림 4 불꽃 크기에 따른  $D_s$  특성

**2.2.3 복사열의 차이에 의한 변화**

ASTM E 662 시험의 복사열 조건은 25kW/m<sup>2</sup>이다. 복사열원은 그림2의 우측 상단에 나타난 전기로를 사용하지만 전기로의 온도보다는 교정된 플럭스미터로 복사열 조건을 설정하도록 한다. 이는 복사열 조건이 연소과정의 매우 중요한 결정인자이기 때문이다. 우선 라디오미터에 의한 B형 불확도가 포함되어야 할 것이다. 또한 전기로의 기기 한계로 인하여 설정된 온도를 유지하지 못하여 플럭스 고정에 미치는 영향 요인이 포함되어야 한다. 초기 플럭스과 시험 중 측정된 플럭스는 처음 값을 그대로 유지하고 있지 않는 것이 일반적이다. 따라서 시험규격에서도 ±0.5kW/m<sup>2</sup> 정도의 오차범위를 인정하고 있다. 이를 평가하기 위하여 24, 25, 26 kW/m<sup>2</sup>에 해당하는 온도조건으로 시험기를 연기밀도 시험을 수행하였다. 각 시험결과는 표 4와 그림 5에 나타내었다. 시험결과 1.5분에서의 연기밀도 측정값의 차이는 최소값의 약 93% 수준으로 나타난 반면, 4분값은 21%, 최대값은 25% 정도의 수준으로 나타나 복사열 조건의 설정이 초기연소조건에 미치는 영향이 상대적으로 매우 큰 것을 확인할 수 있었다.

표 3 복사열에 따른 Ds 사례

구 분	Ds (1.5min)	Ds (4.0min)	Ds (max)
24 kW/m <sup>2</sup>	10.8	99.4	184.9
25 kW/m <sup>2</sup>	15.9	116.9	229.7
26 kW/m <sup>2</sup>	20.9	120.2	198.6

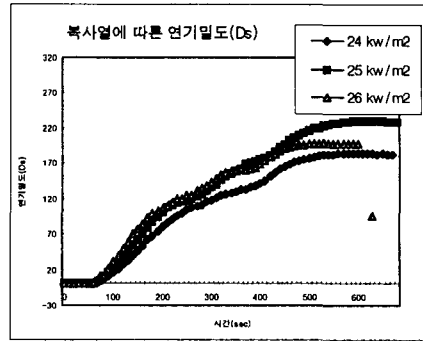


그림 5 복사열에 따른 Ds 특성

### 2.3 연소방법에 따른 연기밀도(Ds) 특성

그림2에 나타내었듯이 ASTM E 662법과 ISO 5659법의 가장 큰 차이는 전기로의 열복사방향에 따라 시편의 연소형태가 수직형과 수평형으로 구분되는 데 있다. 수평연소와 수직연소에 특성에 따른 FRP 복합재의 연기 발생량을 평가하기 위하여 같은 시편에 대하여 25kW/m<sup>2</sup>-Flaming 조건에서 비교시험을 실시하고 시험결과를 아래 표와 그래프에 나타내었다. 바닥재와 페놀 내장판 시편에 대하여 시험하여 본 결과 초기에는 수직연소가 진행이 빠른 것으로 나타났으나, 점차 수평연소의 연기발생량이 많아져서 ASTM E 662 방법에 의하여 발생하는 연기량을 추월하는 것을 알 수 있었다. 초기 수직연소의 Ds 값이 일찍 높아지는 이유는 수직연소에 의한 불꽃점화가 빨리 시작되는 것을 반영하며, 점차 수평연소의 연기가 추월하는 것은 수평연소에서 상대적으로 많은 연기를 동반하는 불완전연소가 진행되고 있음을 추정하게 한다.

표 4 시험방법의 차이에 따른 연기밀도(Ds) 시험값 사례(바닥재)

구 분	Ds(1.5min)	Ds(4.0min)	Ds(max)
ASTM E 662	72.4	325.5	358.4
ISO 5659-2	39.4	461.6	469.7

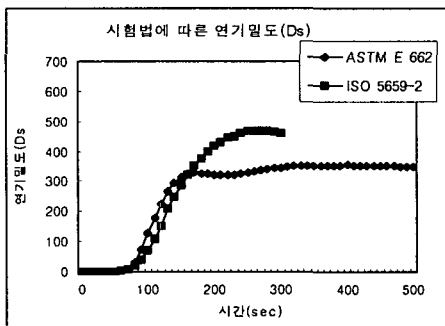


그림 6 시험법에 따른 바닥재 연기

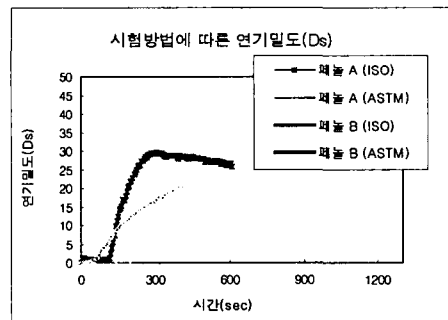


그림 7 시험법에 따른 내장판 연기

2.4 배면재료 및 시편의 두께에 따른 연기밀도(Ds) 특성

바닥재의 경우 배면재료의 부착여부 및 부착재료에 따라 연기밀도 특성이 다르게 나타남을 확인할 수 있었다. 그림8에 나타난 바와 같이 배면재료가 없을 경우의 연기밀도가 가장 빠르게 상승하며 가장 높은 값을 나타내었다. 반면 두꺼운 배면을 사용할수록 더 낮은 값을 나타냄을 확인할 수 있었다. 철도차량의 바닥재 하부에 사용되는 유니텍스(시멘트 및 수지 혼합물)와 알루미늄의 경우는 전도도가 달라 연기발생이 중간에 역전되는 것을 관찰할 수 있었다. 이와 같이 배면재료를 부착하면 열전도 현상에 의하여 바닥재의 점화 및 연소를 지연시키는 효과가 있는 것으로 평가되었다. 따라서 바닥재의 사용기준을 제정할 경우는 시험편에 대한 배면재의 규정도 병행하여 표기하여야 할 것으로 판단된다.

표 5 배면재료에 따른 연기밀도(Ds) 시험값 사례(바닥재)

구 분	Ds(1.5min)	Ds(4.0min)	Ds(max)
배면 없음	175.7	500.9	509.2
1mm-알루미늄	134.3	350.2	380.8
3mm-알루미늄	118.6	311.3	323.3
5mm-유니텍스	72.4	325.4	354.1

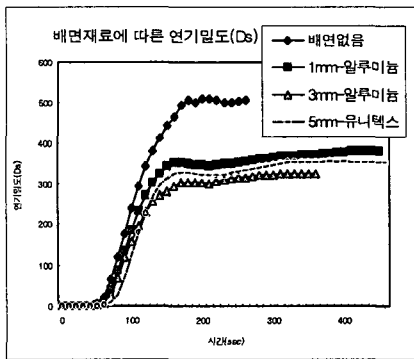


그림 8 배면재료에 따른 연기특성

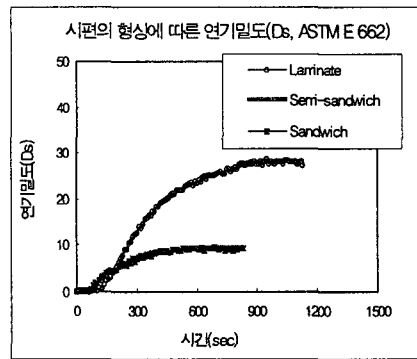


그림 9 시편형상에 따른 연기특성

형상에 따른 페놀 내장판 연기 특성시험을 위하여 동일한 페놀 수지로 판형(laminate)과 샌드위치 및 부분 샌드위치(semi-sandwich)형으로 시편을 제작하여 연기밀도 특성 시험을 수행하였다. 샌드위치형은 FRP 판재 사이에 벌집구조(Nomex honeycomb)를 삽입한 형상으로 시험결과 착화 및 연소가 먼저 진행하였으나 화염과 접촉하는 판재의 수지연소가 일찍 종결되며 연기밀도는 가장 낮았고 일반 판형이 가장 높게 나타났다. 이와 같은 결과는 화염에 노출되는 FRP 판재의 두께에 의한 특성을 보여준다. 샌드위치 구조는 벌집구조가 중심부에 삽입되면서 화염에 접촉된 1mm 두께의 판재만 연소되고 뒷면은 연소되지 않는 특성이 나타나면서 2.5mm 두께의 단층판이 연소하는 경우에 비하여 연기발생이 적어지게

되었다. 그러나 화염이 일찍 발생하고 빠르게 진행하므로 착화성 및 표면 화염전파 측면에서는 불리한 것으로 보인다.

### 3. 고찰

연기상자를 이용한 연기밀도 평가방법 중 ASTM E 662 방법의 몇가지 시험편차 요인에 대하여 동일 시편을 사용하여 시험을 수행하였다. 각 요인별 시험결과를 나타내고 원인을 추정하여 보았다. 시험기의 설정과 관련하여서는 연기상자 압력, 불꽃의 크기, 복사열의 오차 등을 조사하였는데 이 중 압력에 의한 차이는 매우 미약할 것으로 추정되는 반면 불꽃이나 복사열의 설정값에 의한 영향은 특히 초기 조건에서 매우 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 연소방법에 의한 바닥재와 내장판의 시험에서는 초기에 수직법의 연소가 빨리 진행되어 높은 연기밀도 특성을 나타내는 반면 점차 수평법에 의한 연기발생량이 더 많이 지는 것을 확인할 수 있었다. 이 때 연기상자가 완전히 닫힌 상자가 아니므로 연기발생량의 총량적인 평가로 결부되지 않는다는 사실을 주의하여야 할 것이다. 페놀 FRP 내장판의 경우 일반 판형과 부분 샌드위치 및 샌드위치형의 연기밀도는 샌드위치형의 연기발생량이 더 적게 나타났다. 바닥재의 알루미늄 배면재료가 두꺼울수록 초기 연소 지연효과에 의한 저밀도 특성이 나타났으며 5mm의 유니텍스 배면재를 사용할 경우는 3mm의 알루미늄판을 사용한 경우와 유사한 특성을 나타냈다. 바닥재의 시험기준을 정할 경우는 배면재의 재질 및 두께에 관한 규정도 병기하여야 할 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. ISO 5659-2, "Determination of optical density by a single-chamber test"
2. ASTM E 662, "Standard Test Method for Specific Optical Density of Smoke Generated by Solid Materials"
3. NFPA 130, "Fixed Guideway Transit System"
4. BS 6853, "Code of practice for fire precautions in the design and construction of passenger carrying trains"