

철도차량 바닥재 연기밀도 측정의 영향인자분석

권태순^{1*}, 이덕희¹, 박원희²

¹한국철도기술연구원 철도안전연구실

²과학기술연합대학원대학교 철도시스템공학

Influence factor analysis on the measurement of smoke density from floor materials in rolling stock

Tae-Soon Kwon^{1*}, Duck-Hee Lee¹, Won-Hee Park^{1,2}

¹Railroad Safety Research Division, Korea Railroad Research Institute

²Railway System Engineering, University of Science and Technology

요약 본 연구에서는 철도차량 내장재 화재성능평가기준 중 연기밀도 측정에서 주요 인자들의 영향을 합성고무바닥재를 이용하여 분석 및 검토하였다. 밀폐된 공간에서 운영되는 철도차량의 특성 상, 객실 내부에서 화재 발생 시에 연기로 인해 막대한 인명피해가 발생할 수 있다. 따라서 국내·외의 철도운영국가에서는 내장재의 연기 발생량을 엄격하게 규제하고 있으며, 이를 위해 내장재의 화재성능평가에 있어 연기밀도의 정확한 측정이 요구된다. 연기밀도의 측정에 있어 주요 영향인자로 시료 고유의 균질도, 장비를 이용한 조건 및 측정의 편차 그리고 장비를 운용·관리하는 환경의 영향을 꼽을 수 있다. 각 인자별 연기밀도에 영향도를 확인하기 위하여 불확도 추정에 따른 기여율 분석을 수행하였다. 그 결과, 광센서(PM tube)를 이용한 투과율 측정편차의 기여율이 약 86 %로 연기밀도 측정의 대표 영향인자임을 확인할 수 있었다. 그리고 높은 균질도를 가지는 시료를 대상으로 한 연기밀도 측정에서는 그 외 영향인자(시료연소용 복사열 조건($\pm 0.5 \text{ kW/m}^2$) 및 장비의 운용·관리 환경)의 기여율이 약 11 %로 낮음을 확인할 수 있었다.

Abstract In this study, we investigated the effect of factors that influence the measurement of smoke density using synthetic rubber flooring. The characteristics of rolling stock in an enclosed environment can cause enormous loss of life by smoke inhalation during fires inside passenger cars. The amount of smoke generation from interior materials for rolling stock is strictly restricted domestically and in other countries. Precise measurement of smoke density is therefore required to assess the fire performance of interior materials. Major factors that influence the measurement of smoke density include the uniformity of the specimen, the variations in conditions and instruments, and the operational and maintenance environment of the instruments. The contribution of factors was analyzed by estimating the uncertainty to investigate the contribution ratios of the major factors. The results show a contribution ratio of about 86% for the variation from the measurement of light transmission using a photomultiplier tube. Thus, this factor was the most representative for the measurement of smoke density. The contribution ratio of the other factors was low at about 11%, including irradiant flux conditions ($\pm 0.5 \text{ kW/m}^2$) and the influence of the operational and maintenance environment of the instrument. These results were obtained using specimens with high uniformity.

Keywords : floor materials, influence factor analysis, rolling stock, smoke density, uncertainty estimation

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Tae-Soon Kwon (Korea Railroad Research Institute)

Tel: +82-31-460-5570 email: klez@krii.re.kr

Received August 2, 2016

Revised September 9, 2016

Accepted November 10, 2016

Published November 30, 2016

1. 서론

대중교통수단인 철도의 경우, 화재사고가 발생하면 막대한 인명피해로 이어질 가능성이 높아 이를 방지하기 위해 난연성을 가진 내·외장재를 철도차량에 적용하도록 하고 있다. 국내외 관련규정을 보면 크게 발열량, 연기밀도 및 유독성과 화염진파성을 통해 제품의 난연성을 평가·규제하고 있다 [1,2]. 일반적으로 화재사고의 발생 시에 화염에 의한 직접적인 사망보다는 발생된 연기에 의한 호흡곤란 및 질식에 의한 피해가 더 큰 것으로 보고 있다. 실례로 2014년에 발생한 고양버스터미널 화재사고의 경우 대다수의 인명피해가 밀폐된 지하공간 내에서 연기에 의한 질식이었다. 지하 및 지상터널 등 밀폐된 공간에서 차량운용이 잦은 철도의 경우, 불완전연소에 의해 유독한 화재연기가 보다 많이 발생하기 때문에 철저한 대비가 요구되며 Table 1과 같이 각 국가별로 고유의 철도차량 안전기준 및 규정 등을 운용하고 있다 [3].

Table 1. Regulations for fire protection of railway vehicles

Nations	Regulations
EU	EN 45545 (Railway applications - Fire protection on railway vehicles)
U.S.	NFPA 130 (Standard for fixed guideway transit and passenger rail systems)
Korea	Technical specifications for railway vehicles

철도차량의 경우, 국내외 모두 화재사고 초기에 승객들의 안전한 대피시간 확보를 위해 주요 내·외장재의 연기발생량을 일정수준 이하로 Table 2와 같이 규제하고 있다. 보다 자세히 보면 EU에서는 ISO 5659-2 규격을 기반으로 내장재의 특성에 따라 25 kW/m² 또는 50 kW/m² 복사열 조건에서 연기밀도 발생량 최대치 (D_{smax}), 연기발생 후 4분 경과값(Ds(4)) 또는 VOF₄ 등을 통해 그 발생량을 규제하고 있다 [2,4].

$$VOF_4 = [D_s(1) + D_s(2) + D_s(3) + D_s(4)]/2 \quad (1)$$

(VOF₄ : 측정 후 4분까지의 누적 연기밀도,

D_s(i) : i분 경과 후 연기밀도)

국내에서는 북미 ASTM E662 규격을 기반으로 하여 화재발생 시에 승객의 초기대피성 확보를 위해 내·외장재 별로 25 kW/m² 복사열 조건에서 연기발생 후 1.5분 (Ds(1.5)), 4분(Ds(4)) 및 10분(Ds(10)) 경과 후 연기밀도를 규제하고 있다 [1,5].

Table 2. Smoke density criteria for representative interior materials of railway vehicles (Highest regulation level) [1,2]

Categories	EU		Korea	
	Interior panel	Ds(4)	≤ 150	Ds(1.5)
VOF ₄		≤ 300	Ds(4)	≤ 100
Floor materials	D _{smax}	≤ 150	Ds(10)	≤ 200
			Ds(1.5)	≤ 100
			Ds(4)	≤ 200

현재 연기밀도 측정에는 밀폐공간 내의 시료연소로 발생된 연기에 의한 빛 투과율 감소를 통한 산출법이 널리 사용되고 있다. 이와 관련하여 기존 방식인 중량측정법과 비교, 기기 설계, 사용과장범위 및 연기유형의 영향 등 주로 측정기기에 초점을 맞춘 연구가 진행되었으며 실제 측정에서 영향인자에 대한 연구는 미흡한 상황이다 [6-8]. 철도차량 주요 내·외장재가 엄격한 기준으로 규제되고 있고 연기밀도의 측정이 특정제품의 적합 여부 판정에 중요한 수단이 됨으로 보다 정확하게 이루어질 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 대표적인 철도차량 내장재의 하나인 합성고무바닥재를 대상으로 연기밀도 측정에 영향을 끼치는 주요인자의 영향을 불확도 추정방식을 통해 살펴본다 연기밀도 측정의 수행도 향상에 기여하고자 한다.

2. 본론

2.1 연기밀도 실험방법

실험대상으로 두께 3 mm의 합성고무바닥재를 선정하였다. 연기밀도 측정을 위해 시료는 가로 및 세로 76 mm 크기로 재단하였다. 연기밀도 측정은 ASTM E 662 규격에 기반한 4개의 연기밀도시험기(FTT-UK 및 Festec-Korea)를 사용하였으며, 914 mm (H) × 914 mm (W) × 610 mm (D)의 밀폐된 공간 내에서 Fig. 1과 같이 시료표면에 25 kW/m²의 복사열을 가하며 연기를 발생시켜 그에 따른

빛 투과율 감소율로 수식 (2)를 통해 연기밀도를 측정하였다.

$$D_s = 1321 \log_{10} \left(\frac{100}{T} \right) \quad (2)$$

(Ds : Smoke density, T : Transmission(투과율))



Fig. 1. Photograph on combustion of floor material

2.2 연기밀도 측정영향인자 분석

연기밀도 측정결과에 Table 3과 같이 여러 인자들이 영향을 끼칠 수 있으나 크게 시료 고유의 균질도, 그리고 측정기의 고유편차에 의한 것과 장비를 운용·관리하는 환경으로 구분할 수 있다.

Table 3. Influence factors on measurement of smoke density

Classification	Influence factors
Specimen	Uniformity of specimen
Measuring Instrument	Radiant flux Photomultiplier tube
Environment	Environment (Maintenance & operation)

먼저 시료가 특정 생산공정을 통해 제조되는데 그 과정에서 공정관리정도에 따라 세부재료의 혼합 및 반응정도 등에 차이가 있어 시료의 균질도 차이가 연기밀도 측정결과에 영향을 끼치는 인자가 될 수 있다. 두 번째로 실험기에서 사용되는 실험조건 및 측정방식이 주요 영향인자가 될 수 있는데, 시료에 25 kW/m²의 복사열을 가하는 전기로(Radiant heat furnace)에서 발생하는 복사열 편차와 발생된 연기에 의한 투과율 감소를 측정하는 광센서(Photomultiplier tube)에 의한 편차를 주요 항목으로 들 수 있다. 마지막으로 실험기기를 운용 및 관리하는 환경이 실험기기에 끼치는 영향을 꼽을 수 있다.

2.2.1 시료 균질도의 영향

본 연구에서 사용한 합성고무바닥재가 동일 재료, 조성 및 공정을 통해 제조되었음에도 어느 정도 차이를 가지는지 확인하기 위해 실험을 수행하였다. 균질도 확인을 위해 랜덤샘플링으로 4회에 걸쳐 회당 3개 시료를 샘플링한 후 동일 실험기기 및 실험자 조건에서 그 최대연기밀도를 측정하였다 (Table 4).

Table 4. Maximum smoke density of floor material to confirm the uniformity of specimen

No.	1 set	2 set	3 set	4 set
1	243	244	240	222
2	237	235	236	238
3	240	238	246	236

바닥재 시료로 측정된 연기밀도 결과의 균질도를 확인하기 위해 일원배치법(one-way ANOVA)에 의한 분산분석(유의수준 5%)를 수행하였다. 그 결과, Table 5와 같이 F-value(1.464)가 F-critical(4.066)보다 낮으며 P-value(0.296)이 0.05보다 큰 것으로 나타났다. 즉, 12개 바닥재 시료에 의한 최대연기밀도 측정결과에 큰 차이가 없는 균질도가 높은 시료로 판단된다. 그러나 유의수준 5%의 분산분석에서 균질한 시료로 판단됨에도 평균값(238) 대비 -16.0(6.7%)에서 +8.1(3.4%)의 연기밀도 편차를 보이고 있다.

Table 5. Results of variance analysis by one-way ANOVA

Variance source	SS	df	MS	F-value	P-value	F-critical
Between groups	144.3	3	48.1	1.464	0.296	4.066
Within groups	262.6	8	32.8			
Total	406.9	11				

SS : Sum of squares, df : Degree of freedom, MS : Mean square

2.2.2 측정기기에 의한 영향

연기밀도 측정기에서 발생가능한 영향인자로 크게 복사열을 조사하는 전기로(Radiant heat furnace) 및 빛 투과율을 측정하는 광센서(Photomultiplier tube, PM tube)를 꼽을 수 있다. 먼저 전기로의 경우, 연기밀도 시험규격인 ASTM E 662에서 25 kW/m² 복사열을 ± 0.5

kW/m^2 이내로 유지하는 것을 요구하고 있다 [5]. 이에 복사열을 24.5 kW/m^2 에서 25.5 kW/m^2 까지 0.25 kW/m^2 씩 변화시키며 최대연기밀도를 측정하였다. 그 결과 Fig. 2와 같이 복사열 변화에 의해 25 kW/m^2 에서 측정값 대비 $-11.0(4.7\%)$ 에서 $+8.0(3.4\%)$ 의 연기밀도 편차를 보이고 있다.

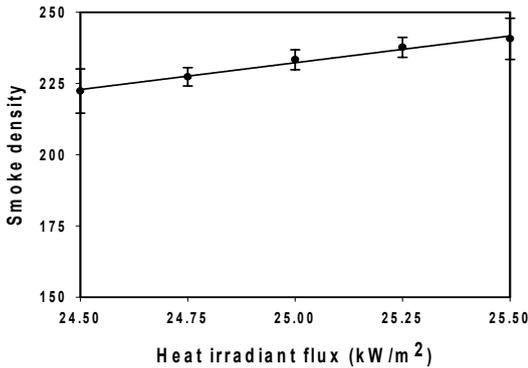


Fig. 2. Variation of smoke density due to the change of radiant flux from 24.5 kW/m^2 to 25.5 kW/m^2

다음으로 PM tube에 의한 영향을 살펴보기 위해 일정 투과율을 가지고 있는 ND(Neutral density) filter (Kodak, Japan)를 교정 후 사용하여 PM tube의 측정 편차를 확인하였다. Fig. 3에서와 같이 기준 투과율 대비 2.5%~7.6%의 차이를 보이고 있는 것으로 나타났으며, 수식 (2)를 이용하여 투과율 차이에 따른 연기밀도에의 영향을 보면 평균 7%의 편차가 발생하는 것으로 나타났다.

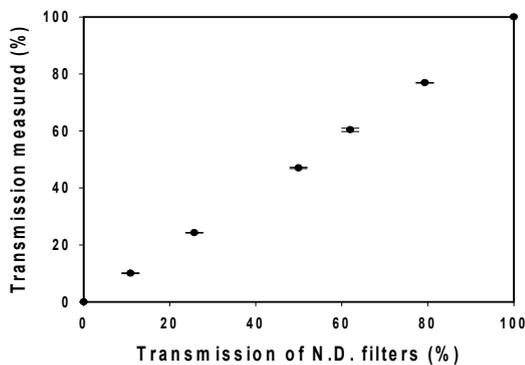


Fig. 3. Calibration of PM tube using N.D. filters

2.2.3 운용환경에 의한 영향

실험기기 관리 및 사용환경의 차이가 측정결과에 영향을 끼칠 수 있다. 이를 확인하기 위해 다른 장소에서 운용 중인 4개의 연기밀도시험기를 이용하여 합성고무 바닥재의 연기밀도를 각 3회씩 측정하였다. Table 6의 측정기기 별 결과의 차이를 확인하기 위하여 일원배치법 (one-way ANOVA)에 의한 분산분석(유의수준 5%)를 수행하였다.

Table 6. Maximum smoke density measured by 4 different smoke density chambers

No.	A chamber	B chamber	C chamber	D chamber
1	223	216	237	222
2	237	228	238	238
3	236	221	224	236

그 결과, Table 7과 같이 F-value(1.468)가 F-critical (4.066)보다 낮으며 P-value(0.295)이 0.05보다 큰 것으로 나타나 4개 기기를 이용한 측정결과에 큰 차이가 없었다. 최대연기밀도 평균값(230)을 기준으로 한 편차에서는 $-15.9(6.9\%)$ 에서 $+14.9(6.5\%)$ 의 연기밀도 편차를 확인할 수 있었다.

Table 7. Results of variance analysis by one-way ANOVA

Variance source	SS	df	MS	F-value	P-value	F-critical
Between groups	258	3	86	1.468	0.295	4.066
Within groups	468.7	8	58.6			
Total	726.7	11				

SS : Sum of squares, df : Degree of freedom, MS: Mean square

2.2.4 불확도 추정에 의한 영향도 분석

실험한 영향인자들이 측정결과에 끼치는 영향 정도를 확인하기 위하여 최대연기밀도의 불확도를 GUM(Guide to the expression of uncertainty in measurement) 가이드 및 관련규정에 따라 산출하여 분석하였다 [9,10]. 시료균질도($u_{unif.}$), 복사열($u_{rad.}$) 및 운용환경($u_{env.}$)에 의한 불확도는 A형 불확도로 분류하여 수식 (3)에 따라 산출하였다.

$$u_A = \frac{\sigma}{\sqrt{n-1}} \quad (3)$$

(u_A : A형 표준불확도,

σ : n회 측정결과의 표준편차)

PM tube의 투과율 측정편차는 연기밀도 측정결과에 평균 7%의 편차를 발생하며, PM tube를 이용한 투과율 측정은 실제 연기밀도 발생상황에서 측정한 결과가 아님으로 직사각형 분포를 가진 B형 불확도로 분류하여 수식 (4)에 따른 불확도($u_{trans.}$)를 산출하였다.

$$u_{trans} = \frac{Ds_{max} \times d}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

($u_{trans.}$: 투과율측정의 표준불확도,

Ds_{max} : 측정최대연기밀도, d : PM tube 투과율에 의한 편차)

불확도의 산출 및 그에 따른 영향도 분석에 사용되는 감도계수(sensitivity coefficient)는 수식 (5)와 같이 편미분으로 정의되나 실험적으로 결정될 수도 있다. 본 연구에서는 실험적 결과로 불확도를 추정하여 각 인자별 간섭이 없는 것으로 보고 Table 8과 같이 감도계수를 1로 하였다.

$$C_i = \frac{\partial f(x)}{\partial x_i} \quad (5)$$

(C_i : i인자의 감도계수, x_i : 입력량,

$f(x)$: 입력량의 함수관계식)

산출된 각 인자별 불확도로 수식 (6)을 이용하여 그 기여율을 Table 8과 같이 산출하였다. 그 결과 연기밀도 측정에 가장 중요한 영향을 끼치는 것은연기발생량에 따른 투과율 측정의 정확도로 확인되었다.

$$\text{인자(i)의 기여율(\%)} = \frac{(C_i \times u_i)^2}{\sum_i (C_i \times u_i)^2} \quad (6)$$

(C_i : i인자의 감도계수, u_i : i인자의 표준불확도)

Table 8. Summary of uncertainty calculated

Source of uncertainty	Sensitivity coefficient (C_i)	standard uncertainty (u_i)	Contribution (%)
Uniformity of specimen	1	1.83 ($u_{unif.}$)	3.3
Radiant flux	1	2.22 ($u_{rad.}$)	4.9
PM tube (Transmission)	1	9.30 ($u_{trans.}$)	85.8
Environment (operation & maintenance)	1	2.45 ($u_{env.}$)	6.0

3. 결론

본 연구에서는 철도차량 내·외장재 화재성능평가기준 중의 하나인 연기밀도 측정에서 주요인자들의 영향을 합성고무바닥재를 이용하여 분석하였다. 연기밀도 측정에 영향을 주는 주요인자로 시료 고유의 균질도, 장비의 사용조건 및 측정의 편차(복사열 및 투과율)와 장비를 운용·관리하는 환경의 영향 등이 있다. 인자들의 기여율 분석결과 그 영향도가 PM tube에 의한 투과율 측정, 장비 운용·관리 환경의 영향, 복사열 허용조건 그리고 시료고유의 균질도 순으로 나타났다. 그 중 투과율 측정편차의 기여도가 약 86%로 가장 영향도가 높아 PM tube의 투과율 측정편차를 줄이는 것이 연기밀도의 정확한 측정을 위해 요구된다. 그리고 균질도(유의수준 5%)가 높은 시료를 대상으로 복사열의 허용범위($\pm 0.5 \text{ kW/m}^2$) 내에서 규격(ASTM E 662)에 따라 관리·운용 중인 다른 측정기로 시료의 연기밀도를 측정하는 것은 그 결과에 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

References

- [1] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Technical specifications for railway vehicles, 2016.
- [2] British Standards Institution, Railway applications - Fire protection on railway vehicles : Part 2: Requirements for fire behaviour of materials and components (BS EN 45545-2), 2013.
- [3] T. S. Kwon, W. H. Park, "The Study on the Operation of Fire Fighting Vehicle for a Long Railway Tunnel", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, vol. 17, no. 5, pp. 516-521, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.5.516>

- [4] International Organization for Standardization, Plastics - Smoke generation - Part 2: Determination of optical density by a single-chamber test (ISO 5659-2), 2012.
- [5] American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Specific Optical Density of Smoke Generated by Solid Materials (ASTM E662), 2015.
- [6] M. Y. Choi, G. W. Mulholand, A. Hamins, T. Kashiwagi, "Comparison of the Soot Volume Fraction using Gravimetric and Light Extinction Technique", *Combustion and Flame*, vol. 102, no. 1-2, pp. 161-169, 1995.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0010-2180\(94\)00282-W](http://dx.doi.org/10.1016/0010-2180(94)00282-W)
- [7] G. W. Mulholand, E. L. Johnsson, M. G. Fernandez, D. A. Shear, "Design and Testing of a New Smoke Concentration Meter", *Fire and Materials*, vol. 24, no. 5, pp. 231-243, 2000.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1002/1099-1018\(200009/10\)24:5<3.3.CO:2-E](http://dx.doi.org/10.1002/1099-1018(200009/10)24:5<3.3.CO:2-E)
- [8] J. Tissot, M. Talbaut, J. Yon, A. Coppalle, A. Bescond, "Spectral Study of the Smoke Optical Density in Non-flaming Condition", *Procedia Engineering*, vol. 62, pp. 821-828, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.131>
- [9] International Organization for Standardization, Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM), 1995.
- [10] Korea Laboratory Accreditation Scheme, Guide to the estimation and expression in measurement, 2016.

권 태 순(Tae-soon Kwon)

[정회원]



- 2002년 8월 : 카이스트 화학공학과 (공학석사)
- 2006년 8월 : 카이스트 생명화학공학과 (공학박사)
- 2006년 9월 ~ 2007년 11월 : 한국 에너지기술연구원 선임연구원
- 2007년 11월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

화재안전, 환경공학

이 덕 희(Duck-Hee Lee)

[정회원]



- 1996년 8월 : 연세대학교 물리학과 (이학 석사)
- 2016년 8월 : 연세대학교 기계공학과 (공학박사)
- 1997년 9월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원
- 2014년 5월 ~ 2015년 4월 : 캐나다 Carleton Univ. 방문연구원

<관심분야>

화재안전, 환경소음

박 원 희(Won-Hee Park)

[정회원]



- 2000년 2월 : 중앙대학교 기계공학과 (기계공학석사)
- 2004년 2월 : 중앙대학교 기계공학과 (기계공학박사)
- 2004년 3월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원
- 2009년 6월 ~ 2009년 12월 : 호주 Victoria Univ. 연구원

<관심분야>

철도 열유체, 화재안전