

철도차량용 고무바닥재의 연기발생에 관한 실험적 연구

박영주[†]

강원대학교 소방방재학부

(2018. 5. 25. 접수 / 2018. 7. 16. 수정 / 2018. 8. 16. 채택)

An Experimental Study on Smoke Generation of Rubber Floor for Railway Vehicle

Young Ju Park[†]

Department of Fire & Emergency Management, Kangwon National University

(Received May 25, 2018 / Revised July 16, 2018 / Accepted August 16, 2018)

Abstract : In this study, we have performed the Cone Calorimeter test and Smoke density test in accordance with ISO 5660-1 and ASTM E662 respectively to check the smoke production characteristics of rubber flooring materials for railway vehicle. Early in the ASTM E662 test, more smoke was produced in the flame mode test than non-flame mode test, but later more smoke was produced in non-flame mode test. The correlation(R^2) between TSR(Total Smoke Release) by ISO 5660-1 and Ds(Specific Optical Density) by ASTM E662 Flame mode was 0.782. The R^2 between TSR by ISO 5660-1 and Ds by ASTM E662 Non-flame was 0.930.

Key Words : total smoke release, smoke density, smoke production, cone calorimeter

1. 서론

화재가 발생하게 되면 재산피해뿐만 아니라 큰 인명피해를 초래한다. 화재발생 시 가연물 연소에 의해 발생하는 연기와 유독 가스가 인명피해를 일으키는 주요 원인으로 보고되어 있다¹⁾.

국가화재정보센터(National Fire Data System)에 따르면 화재발생에 따른 인명피해의 가장 큰 원인이 연기 및 유독가스에 의한 사망이다. 2017년 전체 발생한 44,178건의 화재에서 발생한 사망자 수는 2,197명으로 그 중 연기, 유독가스 흡입으로 인한 사망자 수는 665명으로 전체 30.27%, 화상으로 인한 사망자 수는 282명으로 12.84%를 차지하고 있다. 이 두 가지 사망 원인을 합해보면 전체 사망자의 43.11%로 아주 높은 비율을 차지한다.

2003년 대구지하철 화재 시 연기 및 유독가스에 의한 질식사로 192명의 사망자가 발생하여 국내 단일화재사고로 큰 인명사고를 낸 사건 중 하나로 기록되어 있다.

화재가 발생하여 다량의 연기가 발생하게 되면 빛의

투과가 저하되어 화재환경에서의 피난활동 및 소화활동에 커다란 장애를 초래하여 큰 인명피해가 발생하게 된다²⁾. 또한, 화염은 화재가 발생한 특정구역에 제한되어 진행되는 반면 연기는 그 인접한 공간뿐만 아니라 멀리 멀리 떨어진 구역까지 확산되기 때문에 열보다 연기에 의한 노출이 쉽게 이루어져 인명피해가 커지게 된다³⁾.

따라서, 건축물, 차량 등 다양한 산업분야에서 여러 가지 재료에 대해 연기발생에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다. 기존 연구결과에 따르면 스펀지형 흡음재의 연기발생은 국제해사기구 화재시험절차 성능기준과 비교했을 때, 격벽, 내무 마감 재료 및 천장재로 부적합한 것으로 나타났으며, 건축물 외장재인 우레탄 폼과 창호 전용 접착제의 경우 높은 연기밀도가 발생하여 화재 시 시야확보에 어려움을 줄 것으로 나타났다^{4,6)}.

국내철도차량기술기준은 연기발생과 유독가스에 대한 안전기준을 포함하고 있으며, 이러한 기준을 철도차량제작에 사용되는 모든 제품에 대해 적용하고 있다. 또한, 유럽의 철도차량안전기준에도 동일하게 적용되고 있다^{7,8)}.

[†] Corresponding Author : Young Ju Park, Tel : +82-33-540-3147, E-mail : yjpolymer@kangwon.ac.kr

Dept. of Fire & Emergency Management, Kangwon National University, Samcheok 2nd Campus, 346 Hwangjo-gil, Dogye-eup, Samcheok-si, Gangwon-do 25949, Korea

따라서, 본 연구에서는 ISO 5660-1과 ASTM E662 시험방법을 적용하여 국내 철도차량에 사용되는 고무바닥재의 연기발생특성을 측정하고 위험성을 분석하였다. 또한 ISO 5660-1의 동적연기발생과 ASTM E662의 정적연기발생의 상관관계를 분석하여 효율적인 성능평가 기준을 적용할 수 있는 기초 자료로 활용하고자 한다.

2. 시험

2.1 시험재료

본 연구에 사용한 시험재료는 실제 철도차량 제작사에 납품되어 제작에 사용되는 철도차량용 고무바닥재 9종을 사용하였다. 시험에 사용된 고무바닥재의 두께는 모두 3 mm로 동일하였으며 Fig. 1에 시험재료의 사진을 표시하였다.

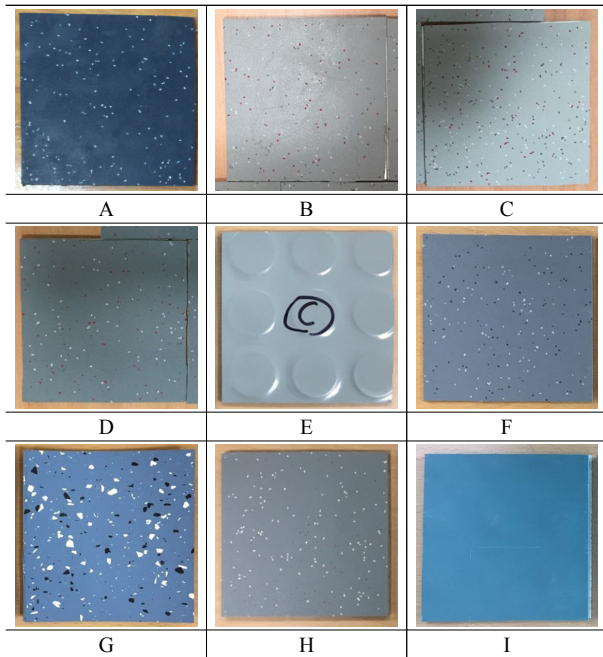


Fig. 1. Test samples.

2.2 시험방법

철도차량용 고무바닥재의 연기발생 특성을 분석하기 위하여 ISO 5660-1(2015) 규격을 만족하는 영국 Fire Testing Technology Ltd.사의 콘칼로리미터와 ASTM E662(17a) 규격을 만족하는 한국 (주)페스텍 사의 연기 밀도시험기를 사용하였다. Fig. 2와 3에는 시험장치의 개략도를 나타내었으며, Table 1에는 콘칼로리미터 시험조건을 제시하였고, Table 2에는 연기밀도의 시험조건을 제시하였다.

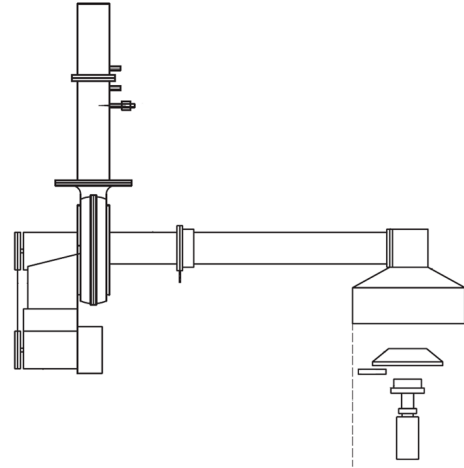


Fig. 2. Schematic diagram of ISO 5660-1.

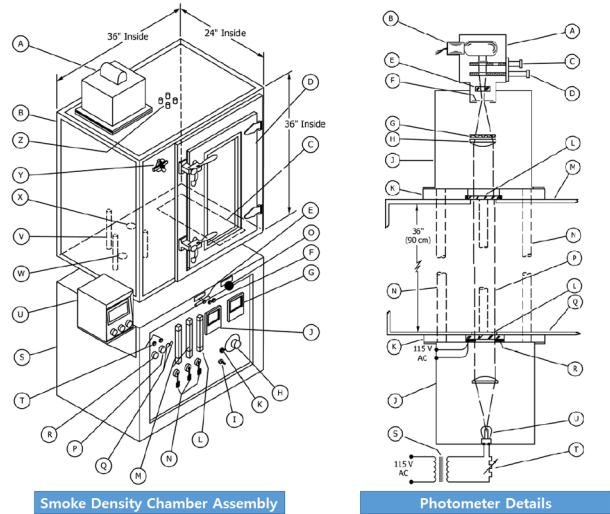


Fig. 3. Schematic diagram of ASTM E662.

Table 1. Test conditions of ISO 5660-1

Conditions	Specification
Heat flux, kW/m ²	25
Exhaust flow rate, m ³ /s	0.024
Specimen surface area, cm ²	88.4
Scan interval, s	2
Test orientation	Horizontal
Specimen size, mm	100 × 100

Table 2. Test conditions of ASTM E662

Conditions	Specification
Irradiance, kW/m ²	25
Test mode	Flame & Non-flame
Test orientation	Vertical
Specimen size, mm	76 × 76

2.2.1 ISO 5660-1 콘칼로리미터 실험

콘칼로리미터를 이용한 연기발생량 측정은 철도차량 기술기준에서 제시하고 있는 철도차량용 고무바닥재의 열방출률 측정의 방법과 동일하게 외부복사열 25 kW/m²를 적용하여 실시하였다.

ISO 5660-1 규격의 콘칼로리미터 시험법을 이용한 연기발생특성은 일반적으로 연소생성물을 투과하는 빛의 세기가 거리에 따라 지수 함수 곱으로 감소한다는 것을 기초로 하고 있으며 시험방법에서는 헬륨-네온 광과 실리콘 광다이오드를 사용하여 측정한다. 즉, 빛의 투과율법을 이용한 총연기발생량은 시간에 따른 연기발생량을 시험편의 노출면적으로 나누어 단위면적당 총연기발생으로 표시하며 식(1)에 의해 계산된다⁹⁾.

$$S_A = A^{-1} \sum_{i=s}^{i=f} \dot{V}_s k \Delta t \tag{1}$$

- S_A : 단위 면적당 총연기 발생량(m²·m²)
- A : 시료의 노출면적(0.008 84 m²)
- \dot{V}_s : 연기의 체적 유량률(m³·s⁻¹)
- k : 감쇠계수(m⁻¹)

2.2.2 ASTM E662 연기밀도 시험

ASTM E662 시험방법에 의한 연기밀도시험은 2.5 W/cm²의 복사 가열기에 수직으로 노출된 시험편에서 발생하는 연기에 의해 수직 광경로(light path)를 가진 측광계를 사용하여 연기의 발생에 따라 변화하는 광전송을 측정한다. 이와 동시에 측정된 광투과도를 이용하여 생성된 연기밀도를 계산한다¹⁰⁾.

ASTM E662 시험규격에서 제시하고 있는 시험방법은 시험편에 복사열만 노출시키는 Non-flame 방식과 복사열과 동시에 6개의 튜브로 구성되어 있는 버너를 적용하는 Flame 방식 등 2가지로 구성되어 있다. 본 연구에서는 두 가지 방식을 모두 적용하여 시험을 실시하였다.

연기밀도는 식(2)에 의해 계산된다.

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

- D_s : 연기밀도
- G : V/AL , 132
- V : 시험 챔버의 체적, m³
- A : 시험편의 노출 면적, m²
- L : 광 경로의 길이
- T : 투과율, %

3. 결과 및 고찰

3.1 ISO5660-1 콘칼로리미터 시험 결과

ISO 5660-1 콘칼로리미터 시험에 따른 단위면적당 총연기발생량(Total Smoke Release) 결과는 Table 3과 Fig. 4에 나타내었다. 총연기방출량(Total Smoke Release)은 시간에 따른 누적 값으로 표현하기 때문에 Fig. 4에 나타난 바와 같이 시간이 지날수록 총연기방출량은 증가하는 모습을 보이다가 더 이상 연기가 발생하지 않아 일정한 값을 유지하는 것으로 나타났다.

모든 샘플에서 초기 60초 동안은 거의 연기가 발생하지 않는 모습을 보였고, 그 이후 샘플별 편차는 있지만 약 4분~5분 시간 동안 연기발생이 급격하게 증가하는 것으로 나타났다.

철도차량기술기준에서는 1.5분 및 4분 시간에서 연기밀도 값을 적용하고 있는데 시험에 사용한 샘플 모두 철도차량기술기준의 1.5분 및 4분 시간에서 연기발생이 적음을 확인할 수 있었다.

Table 3. Test results of ISO 5660-1 cone calorimeter test

Test samples	TSR (1.5min)	TSR (4.0min)	TSR (10min)	TSR (max)
A	1.2	422.4	702.4	706.5
B	1.5	384.6	626.6	628.2
C	1.0	386.8	700.8	709.8
D	1.0	344.1	663.8	677.7
E	0.8	152.4	814.5	816.2
F	0.2	50.2	865.6	865.6
G	0.2	48.0	235.6	456.2
H	0.9	479.3	678.8	679.0
I	0.8	430.0	764.4	776.7

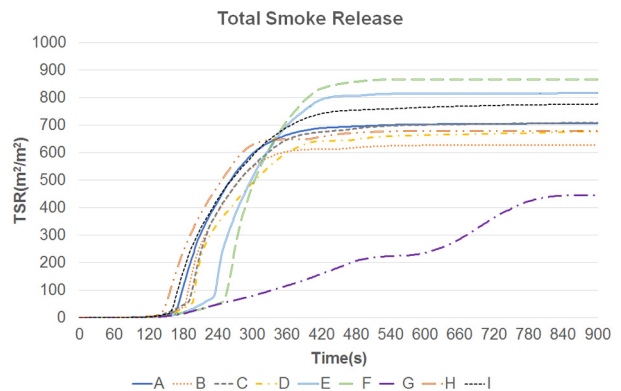


Fig. 4. Total smoke release.

3.2 ASTM E662 연기밀도 시험 결과

ASTM E662의 Flame 방식과 Non-flame 방식의 연기

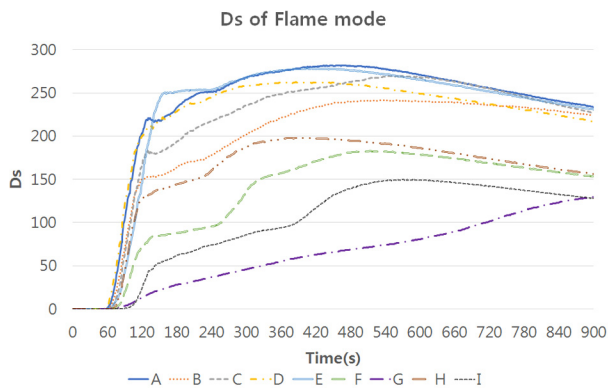


Fig. 5. Specific optical density of flame mode.

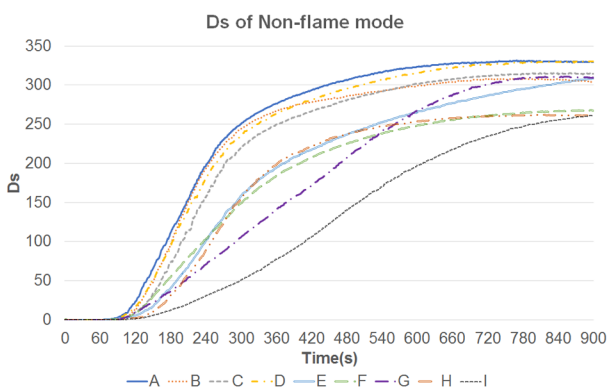


Fig. 6. Specific optical density of Non-flame mode.

밀도 시험 결과는 Fig. 5와 Fig. 6에 나타난 바와 같이 각각 시험시작 후 초기인 약 60초~80초 사이의 시간에서는 모든 샘플에서 연기가 거의 발생하지 않는 것으로 나타났으며, 80초 이후 시료 표면에서 연소가 진행되면서 연기가 발생하기 시작하여 연기밀도 값은 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다.

ISO 5660-1 시험의 총연기방출량과는 다르게 연기밀도(Ds)가 최대 값에 다다른 이후 감소하는 이유는 일정크기의 챔버 안에 연기를 가두어 시험하는 정적인 연기 발생측정 방법이기 때문에 연기알갱이들이 챔버 내의 벽면에 흡착되어 더 이상 광투과도에 영향을 미치지 못하기 때문에 기인한 것으로 사료된다.

철도차량 기술기준에서 규정하고 있는 바닥재의 연기밀도 합격기준은 위험등급[4]에서 $Ds(1.5min) \leq 100$, $Ds(4.0min) \leq 200$ 이다.

본 연구에서 실험한 9종의 고무바닥재의 경우 Flame 방식에서는 $Ds(1.5min)$ 에서 연기밀도값이 Fig. 7 및 Table 4, 5에서와 같이 2종(A,D)이 각각 100을 초과하는 103과 120의 결과로 나타났으며, 나머지 7종은 100 이하의 값으로 나타났다. 또한, Non-flame 방식에서는 9종의 샘플 모두 10 이하의 아주 낮은 값으로 나타났다.

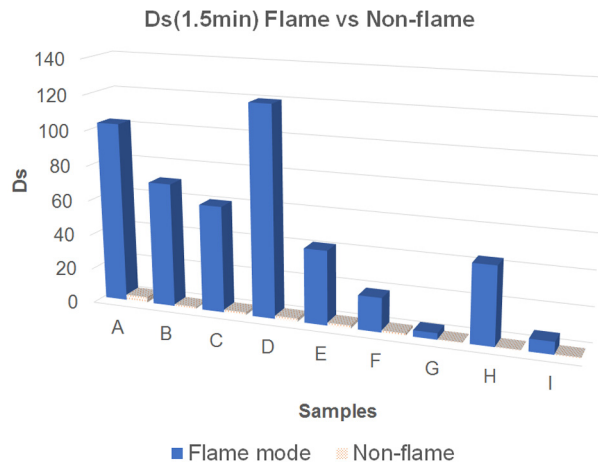


Fig. 7. Ds(1.5min) of flame and Non-flame mode.

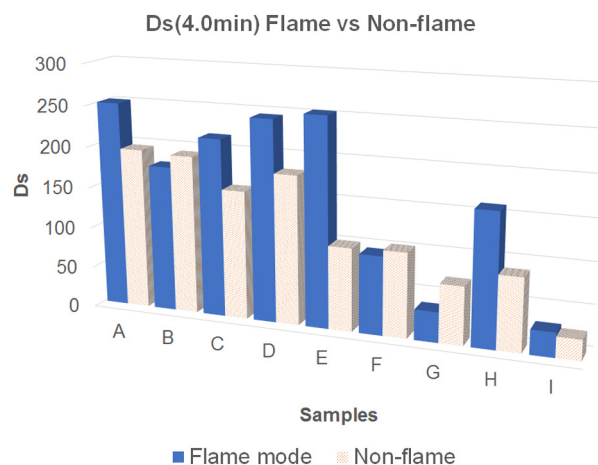


Fig. 8. Ds(4.0min) of flame and Non-flame mode.

$Ds(4.0min)$ 에서는 4종(A,C,D,E)이 각각 200을 초과하는 약 253, 217, 245, 254의 결과로 나타났으며, 나머지 4종은 200 이하의 결과 값을 보였다(Fig. 8, Table 4, Table 5). Non-flame 방식에서는 9종의 샘플 모두 200 이하의 결과 값을 보이는 것으로 나타났다.

Flame 방식과 Non-flame 방식의 결과 값을 비교해보면 시험 시작 후 1.5분에서의 연기밀도($Ds(1.5min)$)의 경우는 Flame 방식이 월등히 높은 값을 보이는 것으로 나타났다. 시험시작 후 4분에서의 연기밀도($Ds(4.0 min)$)는 총 9종 중 6종의 샘플이 Flame 방식에서 더 높은 연기밀도 값을 갖는 것으로 나타났다. $Ds(10min)$ 와 최대연기밀도(Dm)의 경우를 살펴보면, 9종 모든 샘플이 Non-flame 방식에서 좀 더 많은 연기가 발생하는 것으로 나타남을 확인할 수 있었다(Fig. 9, Fig. 10).

일반적으로 목재가 연소할 경우에는 유염연소가 무염연소 보다 발생하는 연기의 양이 적다고 알려져 있지만 플라스틱의 경우에는 이와 같이 일반화시킬 수

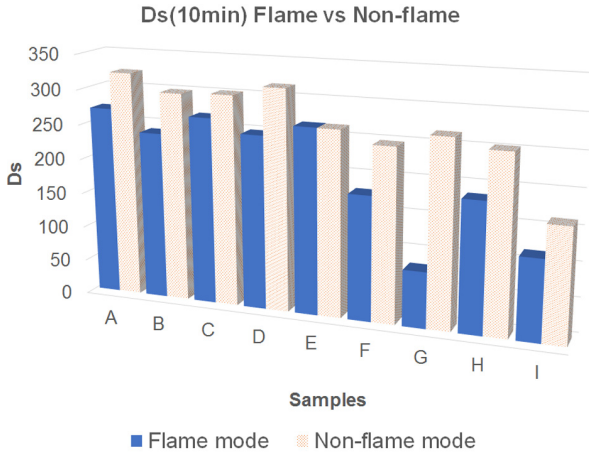


Fig. 9. Ds(10min) of flame and Non-flame mode.

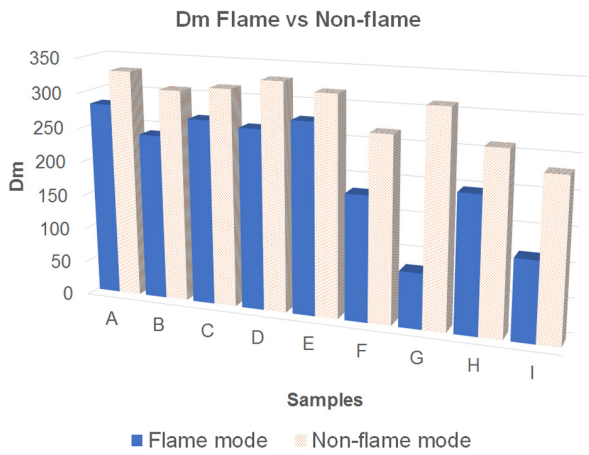


Fig. 10. Dm of flame and Non-flame mode.

없으며 연기의 양은 경우에 따라 다르다¹¹⁾.

동일 시험편에 대해 Non-flame 방식의 연기밀도 값이 Flame 방식 연기밀도 값을 초과하는 시간은 최소 145초에서 최대 601초인 것으로 나타났다.

이러한 결과는 Flame 방식에서 연소가 빨리 진행되어 시험 초기에 연기발생이 빠르게 진행되지만 시간이

Table 4. Ds of ASTM E662 flame mode test

Test samples	Ds(1.5min)	Ds(4.0min)	Ds(10min)	Dm
A	103.0	251.3	271.0	282.0
B	71.1	178.0	240.3	241.7
C	61.1	217.1	268.0	269.6
D	120.2	245.2	249.3	262.4
E	42.4	253.8	265.8	278.3
F	19.5	95.7	178.7	182.7
G	3.6	36.8	80.4	80.7
H	44.4	161.3	186.1	198.0
I	7.0	29.8	116.2	116.4

Table 5. Ds of ASTM E662 Non-flame mode test

Test samples	Ds(1.5min)	Ds(4.0min)	Ds(10min)	Dm
A	3.1	196.3	323.6	331.5
B	0.9	193.3	299.4	308.4
C	1.4	156.7	302.0	315.6
D	1.8	181.5	316.2	330.8
E	1.6	101.4	265.4	318.5
F	1.2	103.2	248.3	268.7
G	0.2	70.7	266.8	311.1
H	0.2	88.9	253.7	261.9
I	0.4	25.2	163.1	233.2

경과 할수록 Non-flame 방식에서 더 많은 연기가 발생함으로 인해 연기밀도 값이 더 높게 나타난 것으로 사료된다.

3.3 ISO5660-1 과 ASTM E662의 상관관계분석

철도차량용 고무바닥재 9종에 대해 각각 ISO 5660-1의 단위면적당 총연기발생량과 ASTM E662(Flame & Non-flame)의 연기밀도 시험분석을 수행하여 각 시험재료별 두 가지 시험방법의 결과에 대한 상관관계를 분석하였다(Table 6).

Table 6. Correlation(R²) between TSR by ISO5660-1 and Ds by ASTM E662

Test samples	R ² between TSR and flame mode Ds	R ² between TSR and Non-flame mode Ds
A	0.631	0.979
B	0.712	0.969
C	0.691	0.982
D	0.731	0.970
E	0.867	0.884
F	0.823	0.926
G	0.909	0.989
H	0.771	0.908
I	0.907	0.765
Average	0.782	0.930

ISO 5660-1에 의한 단위면적당 총연기발생량(TSR, Total Smoke Release)과 ASTM E662에 의한 연기밀도값과의 상관관계를 엑셀의 추세선으로 분석한 결과 TSR과 Flame 방식의 Ds와의 상관관계는 결정계수(R²)는 0.631~0.909로 평균 0.767로 확인되었으며, TSR과 Non-flame 방식의 Ds의 경우 결정계수(R²)는 0.765~0.989로 평균 0.930으로 확인되어 상관관계가 높음을 확인할 수 있었다.

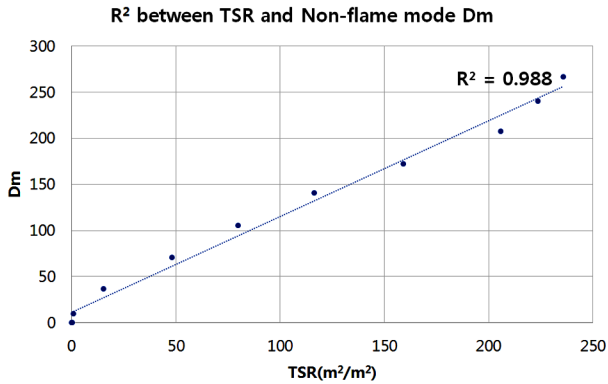


Fig. 11. R2 between TSR and Non-flame mode dm of sample G.

특히, Fig. 11에 나타난 바와 같이 Sample G의 경우 ASTM E 662 Non-flame 방식은 약 99%로 나타나 상관관계가 매우 높은 것을 확인할 수 있었다. 결정계수 R^2 값은 추세선의 예상 값이 실제 데이터와 일치하는 정도를 나타내며, 1에 가까울수록 상관관계가 높음을 의미한다.

ISO 5660-1에 의한 TSR의 경우 복사열에 의한 연소로 인한 연기발생을 측정하면서 착화기(Igniter)를 사용하지만 직접접염 방식이 아니기 때문에, ASTM E662에 의한 Flame 방식의 Ds값 보다는 Non-flame 방식의 Ds값과의 상관관계가 훨씬 더 좋은 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 철도차량용 고무바닥재의 연기발생 특성을 분석하기 위해 ISO 5660-1 콘칼로리미터 시험과 ASTM E662 연기밀도 시험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 철도차량용 고무바닥재의 ASTM E662에 의한 연기밀도 결과값 확인결과, 초기에는 외부복사열 및 직접접염에 의한 Flame 방식에서 많은 연기가 발생하지만 시간이 지날수록 Non-flame 방식에서 많은 연기가 발생함을 확인할 수 있었다.

2) ISO 5660-1에 의한 단위면적당 총연기발생(Total Smoke Release)은 ASTM E662 연기밀도(Ds)를 엑셀의 추세선으로 분석한 결과 결정계수(R^2)가 Flame 방식과 Non-flame 방식이 각각 평균 0.782와 0.930으로 나타나 상관관계가 높음을 확인할 수 있었다. 이는 ISO 5660-1의 시험방법이 직접접염에 의한 방식이 아니기 때문에, ASTM E662의 Non-flame 방식이 좀 더 상관관계가 높은 것으로 판단된다.

Acknowledgements: “This research was supported by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of South Korea (NRF) funded by the Ministry of Education.(No.2016R1D1A1B02008374)”

References

- 1) National Fire Data System, “Fire Status Statistical, <http://www.nfds.go.kr/rdPage.jsf#>”
- 2) B. W. Shin, Y. H. Song, D. H. Rie and K. S. Chung, “A Study on the Analysis of Smoke Density Characteristics for Wood-Plastic Composites”, Journal of Korean Institute of Fire Sci. & Eng. Vol. 25, No. 3, pp.119-124, 2011.
- 3) S. R. Bae, K. C. Ro, G. H. Ko and H. S. Ryou, “Numerical Analysis of Smoke Control for High-rise Building Considering with the ENthalpy Equation”, Journal of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol. 24, No. 4, pp.27-32, 2010.
- 4) J.Y. Song, S. H. Sa, J. W. Nam, J. P. Kim, J. T. Park and D. H. Lee, “A Study on Combustion Characteristics of Sponge Type Sound-absorbing Materials”, Journal of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol. 25, No. 3, pp.20-27, 2011.
- 5) Y. J. Park, W. J. Kim, H. P. Lee, J. Y. Yu and Y. S. Yang, “A Study on the Characteristics of Smoke Release for Architectural Surface Materials and Architectural Adhesives”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 29, No. 1, pp.21-24, 2014.
- 6) Y. J. Park and Y. T. Kim, “A Study on the Fire Risk Comparison of Building Flooring Materials by External Heat Flux”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 32, No. 5, pp.20-25, 2017.
- 7) Ministry Of Land, Infrastructure and Transport Notice No.2017-595, “Railway Vehicles Technical Standards”
- 8) EN 45545-2, “Fire Protection of Railway Vehicles - Part 2: Requirement for Fire Behaviors of Materials and Components”, 2013.
- 9) ISO 5660-1, “Reaction to fire tests - Heat Release, Release Rate(cone calorimeter method) and Smoke Production Rate(dynamic measurement)”, 2015.
- 10) ASTM E662. “Standard Test Method for Specific Optical Density of Smoke Generated by Solid Materials”, 17a.
- 11) KS M ISO 5659-1, “Plastics-Smoke Generation - Part 1: Guidance on Optical-density Testing”, 2002.