

콘칼로리미터를 이용한 자동차 내장재의 열적 특성

김영탁 · 김해림* · 박영주* · 이해평**

강원대학교 산업과학대학원, 강원대학교 방재전문대학원*, 강원대학교 소방방재학부**

Thermal Characteristics Of Car Interior Materials Using Cone Calorimeter

Kim, Young Tak · Kim, Hae Rim* · Park, Young Joo* · Lee, Hae Pyeong**

Graduate School of Industry Science, Kangwon National University

Professional Graduate School of Disaster Prevention, Kangwon National University*

School of Fire & Disaster Prevention, Kangwon National University**

요 약

FMVSS 302 수평 연소 시험법을 통과한 자동차 내장재의 열적 특성을 평가하기 위해서 콘칼로리미터를 이용하여 시험을 수행하였다. 화재 위험과 관련된 착화시간(time to ignition), 열방출률(heat release rate), 질량감소율(specific mass loss rate), 감쇠계수(extinction coefficient) 그리고 연기요소(smoke factor)와 같은 여러 가지 요소들을 분석하였다. 최대 열방출률값은 시험편에 따라 232~635kW/m²으로 큰 편차를 보였으며, 연기요소 또한 99~551MW/m²로 큰 편차를 보였다. 보조매트의 최대 열방출률은 다른 시험편에 비해서 상대적으로 낮은 값을 보였지만, 총연기 발생이 다른 시험편에 비해서 상당히 높았다. 따라서 최대 열방출률과 총 연기발생을 함께 고려한 연기요소값은 상대적으로 다른 시험편에 비해서 높게 나타났다.

1. 서 론

자동차에서의 화재 발생 정도는 건축물 및 철도차량 등에 비해 상대적으로 낮기 때문에 현재 내장재에 대한 난연 평가 기준은 엄격하지 않다. 건축물 및 철도차량 등의 내장재에 대한 난연 평가 기준도 이천냉동물류창고 화재, 대구 지하철 화재 등 대형화재 발생 후, 점점 엄격해졌다. 이러한 사실들을 바탕으로 자동차 내장재 역시 화재 발생 빈도는 상대적으로 낮지만, 화재 발생 후에는 구획화재의 특성상 화재의 확산 속도는 더 빠르기 때문에 대형 화재 예방 차원에서 난연 평가 기준을 좀 더 엄격히 해 둘 필요가 있을 것이다. 현재 자동차 내장재에 대해 적용되고 있는 난연 평가는 국내뿐 아니라 국외에서도 Federal Motor Vehicle Safety Standard, Part 302(FMVSS 302)에 따라 화염의 직접 접점에 의한 수평 연소 속도 측정법만이 적용되고 있다. 국내와 국외 경우 모두 각 자동차 제

조사별 난연 평가 기준을 FMVSS 302 시험방법의 결과값의 정도 차이로만 정하고 있다. 기타 다른 난연평가 시험방법은 제시하고 있지 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 이 수평법 시험을 통과한 즉, 현재 자동차의 내장재로 적용되고 있는 제품을 대상으로 콘칼로리미터를 이용하여 열방출특성 및 연기발생특성 등을 분석함으로써 보다 합리적이고 안전한 난연 평가를 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험 대상

실험에 사용한 시험편들은 자동차의 내부를 구성하고 있는 플로우매트, 보조매트, 헤드라이닝 그리고 시트이다. 각 시험편들은 난연 평가 시험방법인 수평연소시험법을 통과한 제품들로서, 각각 구성성분에 따라 구분했으며, 시험편의 두께는 실제 자동차에 적용되는 두께로 사용하였다. 표1에 이번 시험에 사용된 시험편들의 정보를 정리하였다.

표 1. 시험편 구분

구분	재질		두께 (mm)
	확인	구성성분	
보조매트 (Auxiliary Mat)	A1	Rubber(SR)	6
	A2	PE+PVC	6
	A3	PVC	6
플로우매트 (Floor Mat)	B1	Carpet+PE+PVC	6
	B2	Nylon+PE	6
	B3	Nylon+PE+EVA	6
헤드라이닝 (Head lining)	C1	PET+Paper	6
	C2	PVC leather+PUR	6
	C3	PVC sheet+PUR	6
시트 (Seat)	D1	Fabric+PUR	8
	D2	PVC sheet+PUR	8
	D3	PVC leather+PUR	8

2.2 실험 방법

2.2.1 열방출 특성

자동차에 사용되고 있는 내장재의 열방출 특성을 알아보기 위해서 국제규격 ISO 5660 을 만족하는 영국 FTT사의 Dual Cone Calorimeter를 사용하였다. 콘칼로리미터 방법은 물질이 연소될 때, 발생하는 열방출률은 산소1kg이 소비되면 약 13.1MJ의 열이 발생하는 원리로 계산된다.¹⁾ 여기에, 일산화탄소 및 이산화탄소의 발생을 첨가하여 불완전연소를 고려한 좀 더 정확한 열방출률 계산을 할 수 있으며, 식 (1)과 같이 계산된다.

$$\dot{q} = 1.10 \left(\frac{\Delta h_c}{r_o} \right) X_{O_2}^a \left[\frac{\phi - 0.172(1 - \phi) X_{CO} / X_{O_2}}{(1 - \phi) + 1.105 \phi} \right] \dot{m}_e \quad (1)$$

여기서, 산소소비계수 ϕ 는 식 (2)를 통해서 구해진다.

$$\phi = \frac{X_Q^0(1 - X_{CO} - X_{CO}) - X_Q(1 - X_{CO}^0)}{X_Q^0(1 - X_{CO} - X_{CO} - X_Q)} \quad (2)$$

우선 실험하기에 앞서 각 분석기의 교정을 수행 한다. 차압계, 질량유속계, 가스(산소, 일산화탄소, 이산화탄소) 분석기, 로드 셀, 연기측정 시스템 등에 대해서 측정 기준이 되는 Zero 및 Span 값을 설정하는 교정을 실시한다. 각 분석기의 교정 수행 후, 열량을 알고 있는 메탄가스를 점화시켜 오리피스 상수 C를 결정한다. 최종적으로 연소 시 발생하는 검댕을 제거할 수 있는 필터와 수분을 제거할 수 있는 1차 수분트랩과 2차 수분제거제를 점검한 후 시험을 진행한다. 실험을 진행할 때, 가장 주의해야할 사항은 수분트랩의 과냉이나 시편에 연소에 의한 검댕의 발생으로 인한 필터의 막힘 등의 원인으로 가스분석기로의 가스유량이 변하지 않아야 한다는 것이다.

이번 실험에 사용된 콘히터에서 발생하는 복사열의 강도는 50kW/m^2 이며 Pyrolysis gas를 점화하기 위해서 Spark igniter를 사용하였으며, 모든 시편에 대해서 동일하게 시편 홀더의 Retainer frame을 적용하였다.

로드셀을 이용한 질량감소율 역시 열방출 시험과 동시에 실시간으로 측정하였다. 질량 감소율의 측정은 유효연소열을 알고 있는 단일물질의 경우 유효연소열과 질량감소율의 곱으로 열방출률을 계산할 수 있기 때문에 열방출 특성에 큰 영향을 미치는 요소이다. 이 질량감소율은 식(3)~(7)에 의해서 계산하였으며, 연소 면적에 대한 질량감소율을 알아보기 위해서 계산되어진 질량감소율을 시험편의 연소면적으로 나누어주었다.

첫 번째 스캔($i=0$):

$$- [m]_{i=0} \cdot = \frac{25m_0 - 48m_1 + 36m_2 - 16m_3 + 3m_4}{12\Delta t} \quad (3)$$

두 번째 스캔($i=1$):

$$- [m]_{i=1} \cdot = \frac{3m_0 + 10m_1 - 18m_2 + 6m_3 - m_4}{12\Delta t} \quad (4)$$

$1 < i < n-1$ 번째 스캔(n =총 스캔 횟수):

$$- [m]_i \cdot = \frac{-m_{i-2} + 8m_{i-1} - 8m_{i+1} + m_{i+2}}{12\Delta t} \quad (5)$$

마지막에서 두 번째 스캔($i=n-1$)

$$- [m]_{i=n-1} \cdot = \frac{-3m_n - 10m_{n-1} + 8m_{n-2} - 6m_{n-3} + m_{n-4}}{12\Delta t} \quad (6)$$

마지막 스캔($i=n$)

$$- [m]_{i=n} \cdot = \frac{-25m_n + 48m_{n-1} - 36m_{n-2} + 16m_{n-3} - 3m_{n-4}}{12\Delta t} \quad (7)$$

여기서, \dot{m} : 시편의 질량 감소율, g/s

Δt : 샘플링시간 간격, s

2.2.2 연기발생 특성

자동차에 사용되고 있는 내장재의 연기발생 특성을 알아보기 위해서 국제규격 ISO 5660-2를 만족하는 연기 측정시스템을 영국 FTT사의 Dual Cone Calorimeter에 장착하여 시험을 수행하였다. 열방출 특성과 동시에 연기 발생 특성을 실시간으로 측정하였다. 감쇠 계수(Extinction Coefficient, 1/m)를 식 (8)에 의해서 계산하였으며²⁾, 열방출률과 연기발생을 동시에 고려한 새로운 화재요소인 연기요소(Smoke Factor, MW/m²)는 최대열방출률과 총연기발생을 곱한 값으로 계산하였다(식9).³⁾

$$k = \ln(I_0/I)L^{-1} \quad (8)$$

$$SmkFct = pkHRR * TSR \quad (9)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 열방출 특성

ISO5660-1 시험방법에 따라 분석한 열방출 특성에 관한 시험 데이터를 표 2에 정리하였다.

표 2. 열방출특성

구분	재질		TTI (s)	pk HRR (kW/m ²)	Time to pk HRR (s)	pk MLR (g/s·m ²)	Time to pk HRR (s)	THR (MJ/m ²)
	확인	구성성분						
보조매트 (Auxiliary Mat)	A1	Rubber(SR)	8	232.5	80	17.6	55	81.1
	A2	PE+PVC	9	363.8	40	34.4	30	32.0
	A3	PVC	24	241.0	40	26.6	30	36.1
플로우매트 (Floor Mat)	B1	Carpet+PE+PVC	14	496.3	40	30.6	30	23.9
	B2	Nylon+PE	27	635.4	50	26.5	45	37.1
	B3	Nylon+PE+EVA	24	585.8	70	30.0	40	26.6
헤드라이닝 (Head lining)	C1	PET+Paper	6	456.3	25	30.2	15	28.7
	C2	PVC leather+PUR	5	394.2	35	27.0	30	30.8
	C3	PVC sheet+PUR	7	408.6	30	32.5	25	32.9
시트 (Seat)	D1	Fabric+PUR	2	478.8	30	10.7	35	14.1
	D2	PVC sheet+PUR	2	352.5	25	23.9	10	15.7
	D3	PVC leather+PUR	2	350.5	15	31.3	5	11.9

3.1.1 Time To Ignition(s)

착화시간(TTI, s)은 복사열에 노출된 시험편이 스파크 점화기에 의해 착화되어 지속적인 불꽃, 즉 10초 이상 불꽃이 유지되었을 때의 그 시작시간을 의미한다. 각 재질별로 착화시간을 관찰했을 때, 시트를 구성하는 재질은 PVC 성분에서 가장 빠른 2초의 착화시간

을 보였다. 플로우매트의 경우가 상대적으로 가장 긴 착화시간을 보인 것을 확인할 수 있었다. 착화시간이 짧을수록 화재 상황에 노출되었을 때, 화재가 빠르게 시작될 수 있음을 의미한다. 각 시험편에 대한 착화시간의 그래프를 위험성을 쉽게 확인하기 위해서 역수를 취해 그림 1에 나타내었다.

3.1.1 Heat Release Rate(kW/m²)

열방출률(HRR, kW/m²)의 경우 Nylon+PE 재질로 된 플로우매트에서 가장 높은 635.4kW/m²의 값을 보였으며, 반대로 Rubber로 구성된 보조매트에서 가장 낮은 232.5kW/m²의 값을 보였다. Nylon+PE로 구성된 플로우매트의 경우는 상대적으로 가장 늦게 착화되었지만 열방출률의 경우는 그와 반대로 가장 크게 나타났다. 이는 상대적으로 착화되기까지의 시간은 길지만 착화 후에는 다른 제품들에 비해 화재가 빨리 진행된다는 것을 예측할 수 있다. Rubber로 구성된 보조매트의 경우는 상대적으로 가장 낮은 열방출률을 보이고 있지만, 동일 시간 동안의 총열방출률(THR, MJ/m²)은 81.1MJ/m²으로 가장 크게 나타났다. 이는 화재가 급격하지는 않지만 지속적으로 진행됨을 예측할 수 있다.

50kW/m²의 외부 복사열 하에서 진행된 위 시험편들의 최대 열방출률은 Rubber로 구성된 보조매트, Nylon+PE+EVA로 구성된 플로우매트를 제외하고 모두 1분 이하에서 최대 열방출률을 보였다. 이는 화재 발생 초기의 확산 속도가 큼을 예측할 수 있다.

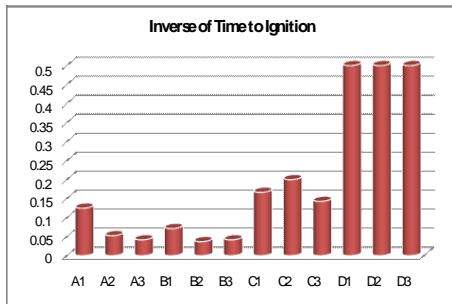


그림 1. 착화시간의 역수(1/TTI)

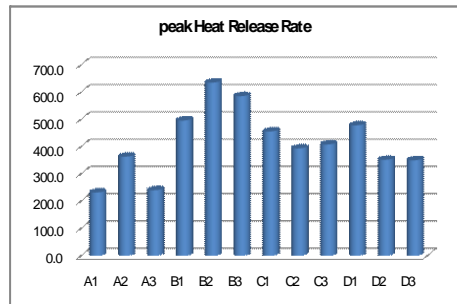


그림 2. 최대열방출률(pk HRR)

3.1.2 Specific Mass Loss Rate(g/s.m²)

질량감소율(MLR, g/s.m²)의 측정은 연소 시 발생하는 열방출률 측정을 가능케한다. 유효연소열을 알고 있는 단일물질의 경우 연소 시 발생하는 열방출률은 측정된 질량감소율에 유효연소열을 곱함으로써 구할 수 있다. 따라서 이 질량감소율의 경우도 화재의 확산속도 및 화재 크기를 가늠할 수 있는 요소로 사용될 수 있다. 측정된 데이터들을 확인해보면 질량감소율이 큰 시험편이 상대적으로 열방출률이 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 열방출률 데이터들과 마찬가지로 모두 60초 이전에 최대 질량 감소율을 보임을 알 수 있다.

3.2 연기발생 특성

ISO 5660-2에 의해 측정 계산된 데이터를 표 3에 정리하였다.

표 3. 연기발생특성

구분	재질		peak Ext. Coeff. (1/m)	TSR ₂ (m ² /m ²)	SmkFct (MW/m ²)
	확인	구성성분			
보조매트 (Auxiliary Matt)	A1	Rubber(SR)	10.2	2106.6	489.7
	A2	PE+PVC	3.3	1515.5	551.3
	A3	PVC	9.5	1932.6	465.7
플로우매트 (Floor Matt)	B1	Carpet+PE+PVC	7.4	709.8	352.3
	B2	Nylon+PE	2.9	193.5	129.9
	B3	Nylon+PE+EVA	3.3	344.7	201.9
헤드라이닝 (Head lining)	C1	PET+Paper	2.2	217.8	99.4
	C2	PVC leather+PUR	4.9	782.7	308.6
	C3	PVC sheet+PUR	5.3	794.5	324.6
시트 (Seat)	D1	Fabric+PUR	4.2	305.1	146.1
	D2	PVC sheet+PUR	8.5	551.0	194.2
	D3	PVC leather+PUR	7.4	498.9	174.9

3.1.1 Extinction Coefficient(1/m)

감쇠계수(Ext. Coeff., 1/m)는 화재 발생 시 연기에 의한 시야 확보면에서 매우 중요한 데이터이다. 이 값이 1이상은 거의 앞이 보이지 않을 정도를 의미한다. 또한 10이상은 화재의 최성기에 발생하는 현상으로 유도등 조차 보이지 않음을 의미한다. 모든 시험편에 대해서 측정된 감쇠계수값은 최소 2.2(헤드라이닝:PET+Paper)에서 최대 10.2(보조매트:Rubber)까지 값을 보이고 있다. 이는 화재가 발생하면 연기로 인해 앞이 보이지 않아 대피할 수 없는 상황을 초래함을 의미한다.

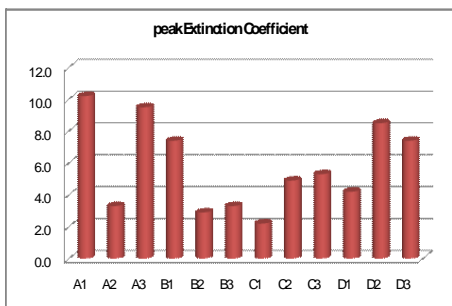


그림 5. 최대 감쇠계수(pk Ext.Coeff.)

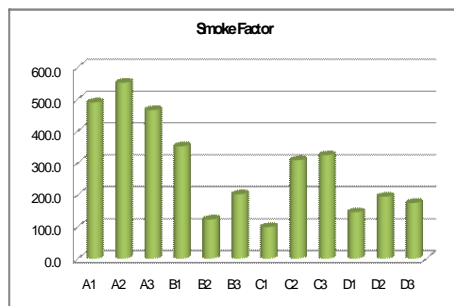


그림 6. 연기요소(SmkFct)

3.1.1 Smoke Factor(MW/m²)

연기요소(SmkFct, MW/m²)는 ISO 5660-1에 의해 측정 계산된 최대 열방출률과 ISO5660-2에 의해 측정 계산된 총연기발생의 곱으로 계산된 요소로서, 실물 화재 시험에

서 연기의 발생정도를 알 수 있는 지표로 보여지고 있다.³⁾

PE+PVC로 구성된 보조매트가 551.3MW/m²으로 가장 큰 값을 보이고 있으며, 이와 반대로 PET+Paper로 구성된 헤드라이닝은 99.4MW/m²으로 가장 작은 값을 보이고 있다.

4. 결 론

자동차를 구성하고 있는 내장재를 각 부분별 구성성분에 따른 열적 특성을 알아보기 위해서 ISO5660-1 열방출 시험과 ISO5660-2 연기발생 시험을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 착화시간은 각 구성성분별로 2~27초로 많은 차이를 보이고 있으나, 모두 30초 이전에 빠르게 착화되는 것을 알 수 있다. 시트의 경우는 두께가 다른 시험편들과 비슷한 정도지만, PVC 뒷면에 붙어있는 PUR 폼의 두께가 약 90%정도 되고 외부에 노출된 PVC의 두께는 1mm미만이기 때문에 다른 부분의 PVC 재질에 비해서 빠른 착화시간을 보인 것으로 사료된다.
- 2) 열방출률은 각 구성성분에 따라서 232~635kW/m²의 값을 보여 각 편차가 큼을 알 수 있었다. Rubber로 구성된 보조매트의 경우는 최대 열방출률이 232kW/m²으로 가장 낮은 값을 보이고 있으나 동일 시간 동안의 총열방출은 가장 큰 81.1MJ/m²을 보이고 있다. 화재 발생 후 연소가 지속적으로 진행됨을 의미한다.
- 3) 감쇠계수 결과는 최소 2.2m⁻¹에서 최대 10.2m⁻¹값을 보여 큰 차이를 보이고 있다. 특히 rubber로 구성된 보조매트에서 가장 큰 값을 보이고 있다. 시험편 모두 화재 발생 후 거의 앞을 볼 수 없는 상황에 놓여지게 되므로 대피를 위한 시야확보가 어려움을 알 수 있다.
- 4) 열방출과 연기발생을 동시에 감안한 연기요소값 역시 99~551MW/m²으로 큰 차이를 보이고 있으며, 특히 보조매트에서 큰 값을 보이고 있다. 보조매트의 경우 최대 열방출률은 다른 시험편에 비해 상대적으로 작은 값을 보이고 있는 반면 엄청난 양의 연기를 발생한다는 것을 알 수 있다.

참고문헌

1. ISO 5660-1:2002. Reaction-to-fire tests-Heat release, smoke production and mass loss rate-Part 1: Heat release rate(cone calorimeter method).
2. ISO 5660-2:2002. Reaction-to-fire tests-Heat release, smoke production and mass loss rate-Part 2: Smoke production rate(dynamic measurement).
3. V. Babrauskas, S.J. Grayson. "Heat Release in Fires"
4. KS F ISO 5660-2:2006. 연소성시험-열방출, 연기발생 및 질량감소율-제2부:연기 발생율(동적 측정)