콘칼로리미터에서 열전달이 질량측정 장치에 미치는 영향에 관한 연구

Effect of Heat Transfer on Weighing Devices in Cone Calorimeter

류상훈* · 장범찬** · 이동호***

Ryu, Sanghoon*, Jang, Beomchan**, and Rie, Dongho***

Abstract

A cone calorimeter for measuring fire properties is an equipment that radiates a constant radiant heat flux rate to the specimen and calculates the heat release rate by measuring oxygen consumption. It has been used mainly for the pyrolysis phenomenon of specimen-sized solid materials. However, in contrast to other measurement devices, the test methods of the relevant standards do not mention in detail the calibration methods or precautions for the effects of heat transfer on the weighing devices in a high-temperature fire environment with a conical heater. In this study, the heat transfer blockage confirmed improvement of the effective heat of 70%, combustion rate of 76%, heat release rate of 50%, smoke production rate of 34%, and other items. Improvements are proposed to produce more-accurate test results.

Key words : Cone Calorimeter, Weighing Device, Mass Loss Rate, Heat Release Rate, Smoke Production Rate

요 지

화재물성 측정을 위한 콘칼로리미터(Cone calorimeter)는 일정한 복사열유속을 시편에 방사하여 발화시키고 산소소모량을 측정하여 열방출률을 산출하는 장비로서 시편단위 크기의 고체 재료 열분해 반응 시험에 주로 이용되어 왔다. 그러나 관련 규격의 시험방법에는 다른 측정 장치들에 비해 원추형히터 하의 고온의 화재환경에서 로드셀에 미치는 열전달이 질량측정에 미치는 영향에 대해서는 자세히 언급되어 있지 않아 그 열전달 차단이 그렇지 않은 경우에 비해 70%의 질량감소율, 81%의 유효연소율, 50%의 열방출률, 34%의 연기발생률 및 그 외 개선효과를 통해 그 영향성을 확인 하였고 보다 정확한 시험결과를 도출하기 위한 개선 대책을 제안 한다.

핵심용어 : 콘칼로리미터, 질량측정, 질량감소율, 열방출률, 연기발생률

1. 서 론

국제적 시험 기준인 ISO 5660-1 (2015)과 ASTM E 1354-17 (2017)에 근거한 콘칼로리미터(Cone calorimeter)는 개방된 공간에서 화염 또는 주위 고온영역으로부터 입사되는 복사 열유속(Radiant heat flux)에 의한 고체 가연물의 난연(Flame-retardant) 평가 및 연소물성 측정을 위해 가장 널리 사용되고 있다(Scudamore et al., 1991; Schartel and Hull,

2007). 비록 콘칼로리미터에서 적용되는 제한된 면적의 시편을 통해 산출된 점화 및 연소특성은 실규모 화재실험결과와는 정량적인 차이를 가질 수 있지만, 제어된 열적환경에서 가연물의 단위 면적당 열 및 화학적 특성을 이해하는데 매우 유용하게 활용되고 있다(Schartel et al., 2005). 일반적으로 콘칼로리미터를 활용하여 얻을 수 있는 대표적인 측정값으로는 입사되는 복사 열유속에 따른 점화시간, 단위 면적당 열방출률(Heat Release Rate, HRR) 및 질량 감소율(Mass

*정회원, 인천대학교 안전공학과 박사과정(E-mail: shryu@festec.co.kr)

Member, Ph.D. Candidate, Department of Safety Engineering, Incheon National University

**학생회원, 인천대학교 안전공학과 학부과정

Student Member, Undergraduate Student, Department of Safety Engineering, Incheon National University

***교신저자, 정회원, 인천대학교 소방방재연구센터 교수(Tel: +82-32-835-8293, Fax: +82-32-823-4749, E-mail: riedh@inu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Fire Disaster Prevention Research Center Incheon National University

Loss Rate, MLR), 연소생성물 그리고 연기 생성을 등이다. 이들 중에서 산소소모율(Oxygen consumption rate)에 근거한 열발출률 측정에는 산소소모계수 등을 포함하여 보다 정확한 HRR 측정을 위해 많은 연구들이 수행되고 있다(Dlugogorski et al., 1994; Chow and Han, 2011). 또한 광소멸법(Light extinction method)를 활용한 연기농도의 측정에서도 가연물 및 연소조건에 따른 광소멸계수(Light extinction method)이 도출을 포함하여 보다 정확한 연기농도 또는 발생량 산출을 위하여 지속적인 연구가 이루어지고 있다(Mulholland and Croarkin, 2000; Widmann et al., 2005). 그러나 가연성 기체의 공급량과 직접적으로 연관될 수 있는 가연물의 질량감소율(Mass Loss Rate, MLR; $g \cdot m^2/s$) 측정은 단순 원리의 로드셀(Load cell)이 적용됨에 따라 콘칼로리미터의 개선을 위해 크게 관심을 받지 못하고 있다. 즉, 콘칼로리미터를 활용한 고온의 화재환경에서 로드셀을 통해 산출되는 질량 감소율의 측정 정확도 개선에 관한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다. MLR을 측정하는데 적용되는 로드셀은 탄성체에 하중이 작용될 때 발생하는 변형량(Deformation)을 저항변화로 측정하는 스트레인 게이지(Strain gauge)를 통해 무게 또는 질량의 변화를 감지할 수 있는 센서(Fig. 2 참조)이다. 스트레인 게이지는 민감도가 좋고 변형량에 따른 저항변화의 선형성이 우수하다는 장점을 갖고 있으나, 스트레인 게이지의 저항 및 민감도 역시 온도에 의해 변화되어 상당한 측정오차를 가져올 수 있다. 특히 콘칼로리미터와 같이 높은 온도의 열적 환경에서 로드셀의 측정오차는 더욱 중요하게 고려되어야 한다고 알려져 있다(En Un and Simakov, 1993). 그럼에도 관련 규격의 시험방법인 KS F ISO 5660-1 (2003)의 11.2.5절과 ASTM E 1354-04 (2004)의 11.4절에는 ‘시험 시간 동안 질량 측정 장치(Figs. 1~2 참조)의 상부에 열차단 장치(예: 내화 섬유판을 깠 빈 시편 홀더 또는 수랭식 복사열 차단장치)를 놓아서 과도한 열이 질량 측정 장치에 전달되지 않도록 한다’라는 언급 외에는 콘(원추형) 복사열 전기히터에 의해 열전달(Heat transfer) 즉, 그 전기히터 하에서 생성되는 열복사(Thermal radiation)와 열대류(Thermal convection)에 의해 기인한 금속재질의 시편 지지대와 로드셀 간의 열전도(Thermal conduction) 및 로드셀 박스 내부의 기체 온도상승에 의한 열대류가 이 질량감소 측정 및 그 외 시험결과에 미치는 영향에 대해서는 언급되어 있지 않고 있어 이러한 MLR의 부정확한 측정은 결과적으로 가연물의 연소물성의 부정확한 측정과 직접적으로 연관된다.

예를 들어 시간에 따른 열에너지의 방출율인 HRR (kJ/s)을 MLR (kg/s)로 제함으로서 표현되는 유효 연소열(Effect heat of combustion, kJ/kg)의 부정확한 정보를 가져올 수 있다. 유효 연소율은 측정된 질량 감소율과의 곱을 통해 HRR로 환산될 수 있으며, 화재시뮬레이션에서 화원 정보로 직접 활용되고 있다(Mun et al., 2013). 또한 MLR의 부정확한 측정은 연료 1 kg/s의 소모율에 대한 연소 생성물의 생성물

(kg/s)로 표현되는 CO, CO₂ 및 Soot yield (kg/kg)의 오차를 가져올 수 있다(Mun et al., 2019). 이 외에도 피난 및 난연성 평가에서 MLR의 정보가 활용되는 연기지수로서, 연기의 감쇠면적(Extinction area of smoke, m^2/s)과 연기의 생성과 연관된 시편의 MLR (kg/s)의 비로 표현되는 비감쇠면적(Specific extinction area, m^2/kg)이 있다(Jin and Chung, 2020). 따라서 MLR의 정확한 측정은 가연물의 기초 연소물성 뿐만 아니라 재료의 난연성 및 피난 안전성 평가의 신뢰성에 강화에 매우 중요함을 충분히 인지할 수 있다. 따라서 이러한 배경 하에 본 연구에서는 콘칼로리미터에 적용된 고온의 화재환경에서 로드셀에 미치는 열전달이 질량측정 및 연관된 시험 결과인 유효 연소열(Effect heat of combustion, kJ/kg), 연기의 감쇠면적(Extinction area of smoke, m^2/s)에 따른 연기발생률(Smoke Production Rate, m^2/s)에 어떠한 영향을 주는지 고찰해 보고 그 개선 방향을 제시 한다.

Fig. 1. Configuration of the Weighing Device Mentioned in ASTM E 1354-04 (Fig. 3 Exploded View)

Fig. 2. Composition Element & Principle of the Load Cell

2. 본 론

앞서 언급된 콘칼로리미터에 적용된 고온의 화재환경에서 콘(원추형) 히터에 의한 복사열이 질량측정에 미치는 영향을 확인하기 위해서 대표적인 시험조건인 50 kw/m^2 의 복사열(Irradiance) 하에서 앞서 언급된 스트레인 게이지 타입 로드셀(Fig 5, 녹색 점선, AND사 제품, 모델: LCB03K006M, Capacity: 6 kgf)이 제시하는 보정 온도 범위(Compensated temperature range)인 $-10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 를 만족하는지 확인하여 그 초과

여부에 따른 측정오차가 이 질량감소 측정 및 그 외 시험결과에 미치는 영향을 예상하기 위하여 다음 그림과 같이 앞선 서론에서 언급한 콘(원추형) 히터 하에서 금속재질의 시험 지지대와 로드셀 간의 열전도에 의한 영향과 로드셀 박스 내부의 기체 온도상승에 의한 열대류에 의한 영향을 확인하기 위해 Fig. 3과 같이 50 kW/m²의 복사열하에서 시험 지지대의 표면온도(Surface temp.)와 질량측정장치 박스 내부의 기체온도(Gas temp.)를 사전 실험을 통해 확인 하였다.

Fig. 3. Experimental Photos to Identify Thermal Effects on the Weighing Device without Refractory Fiber (a) and with Refractory Fiber (b)

그 결과 다음 그래프(Fig. 4)와 같이 열전도에 의한 표면온도 및 열대류에 의한 기체온도 모두 로드셀이 제시하고 있는 온도범위 40 °C를 초과하였으며, Fig. 3(a) 질량측정장치 상부를 내화섬유로 덮지 않은 경우 히터 작동 초기에는 표면온도가 높지만 약 200초 이후에 질량측정장치 내부의 기체온도가 더 높게 측정되고 대부분의 시험자가 히터 복사열 및 실험 중 발생하는 이물질로부터 보호하기 위한 Fig. 3(b)의 경우 표면온도 및 기체온도 모두 Fig. 3(a) 보다 높게 측정되는 사실을 확인 할 수 있었다.

Fig. 4. The Thermal Effects Graphs of the Weighing Device without Refractory Fiber (Exp. 1) and with Refractory Fiber (Exp. 2)

이러한 결과는 서론에서 전제한 로드셀에 사용되는 스트레인 게이지가 가지는 단점인 온도 변화에 따른 질량측정오차, 즉 측정 정밀도(Accuracy)에 문제가 있음을 확인해 ‘콘칼로리미터에서 열전달이 질량측정 장치에 미치는 영향에 관한 연구’의 필요성을 확인 할 수 있었다.

따라서 이러한 전제들로 Fig. 5와 같이 열전도 차단을 위한 시험편이 거치되는 지지대 사이(Fig. 5 붉은색 점선)와 열대류 차단을 위한 로드셀이 위치하는 질량측정장치 상부의 상부면(Fig. 5 파란색 점선)에 열전달 차단을 위한 내화재(Refractory fiber)를 놓아 Table 1과 같이 시험조건 첫 번째(Condition I)는 각각의 열전달 차단 내화재 모두를 제거해 열전도 및 열대류가 로드셀에 의한 질량 측정에 최대한 영향을 주도록 시험조건을 설정하고 두 번째(Condition II)의 경우, 콘(원추형) 히터로부터 생성되는 복사열에 의한 간접적 열대류에 의한 질량측정장치 내부 기체온도 상승이 로드셀에 미치는 영향을 확인 할 수 있도록 복사열 차단재(Radiation shield)를 질량측정장치 상부에 설치하는 조건을 설정 하였으며, 세 번째(Condition III)는 금속 재질의 시험편 지지대에 의한 직접적 열전도가 로드셀에 미치는 영향을 확인 할 수 있도록 시험편 홀더와 로드셀 지지대 사이의 열전달 차단 내화재를 삽입해 관련 규격에서 제시된 시험방법으로 구성해 세조건 모두 다른 조건하에서 열전달이 질량측정 장치에 미치는 그 영향성을 하기에 제시한 질량감소율이 적용된 콘칼로리미터 시험결과 값들을 비교하여 확인하고자 한다.

Fig. 5. Composition of Weighing Device for the Implementation of Heat Transfer Test Conditions

Table 1. Heat Transfer Test Conditions I ~ III

	Upper Isolation (Red dotted line)	Lower Covering (Blue dotted line)
Condition I	×	×
Condition II	×	○
Condition III	○	×

이러한 질량감소율(MLR, $g \cdot m^2/s$)은 측정된 각 시간 간격에서의 질량 손실을 계산하기 위한 식으로는 하기와 같이 5점 미분식(Five-point numerical differentiation equations)과 유효한 연소 기간 동안의 질량 감소율을 구하기 위해 총 질량 감소가 10 ~ 90%에 도달하는 시간을 알아내 다음 Eq. (1)에 의해 계산하여 그 영향성을 확인하였으며, 더불어 그 외의 실험결과에 미치는 영향성 또한 확인하기 위하여 질량감소율과 상관성을 가지는 유효연소열(Effective heat of combustion, MJ/kg) 계산식 Eq. (2), 연기감쇠면적(Extinction area of smoke, m^2/s) 계산식 Eq. (3)에 따른 연기발생률(Smoke Production Rate, m^2/s) 계산식 Eq. (4)에 어떠한 영향을 미치는 지도 살펴보았다.

첫 번째 스캔($i = 0$):

$$-\dot{m}_{i=0} = \frac{25m_0 - 48m_1 + 36m_2 - 16m_3 + 3m_4}{12\Delta t}$$

두 번째 스캔($i = 1$):

$$-\dot{m}_{i=1} = \frac{3m_0 + 10m_1 - 18m_2 + 16m_3 - m_4}{12\Delta t}$$

$1 < i < n-1$ 번째 스캔($n =$ 총 스캔 횟수):

$$-\dot{m}_i = \frac{-m_{i-2} + m_{i-1} - 8m_{i+1} + m_{i+2}}{12\Delta t}$$

마지막에서 두 번째 스캔($i = n-1$):

$$-\dot{m}_{i=n-1} = \frac{-3m_n - 10m_{n-1} + 18m_{n-2} - 6m_{n-3} + m_{n-4}}{12\Delta t}$$

마지막 스캔($i = n$):

$$-\dot{m}_{i=n} = \frac{-m_n + 48m_{n-1} - 36m_{n-2} + 16m_{n-3} - 3m_{n-4}}{12\Delta t}$$

여기에서 $-\dot{m}$ 은 5점수치미분식을 이용한 질량감소율이

며, $\dot{m}$ 은 시편질량감소(g/s), Δt 는 샘플링시간간격(s)를 의미해 이렇게 계산된 $-\dot{m}$ 은 유효연소율 계산에 이용되며, 연소 기간 동안의 질량감소율(총 질량 감소가 10 ~ 90%에 도달하는 시간)은 Eq. (1)로 최종 계산한다.

$$MLR = m_{A,10-90} = \frac{m_{t_{10}} - m_{t_{90}}}{t_{90} - t_{10}} \cdot \frac{1}{A_s} \quad (1)$$

여기에서 A_s 는 초기에 노출된 시편의 표면적(m^2)이다.

또한 서론에서 제시한 열에너지의 방출률인 HRR (kJ/s)을 MLR (kg/s)로 제함으로서 표현되는 다음 식 유효연소열(KS F ISO 5660-1: 2003. 부속서 C 참조) 계산식 Eq. (2) 및 연기감쇠면적(Extinction area of smoke, m^2/s) 계산식 Eq. (3)에 따른 연기발생률(Babrauskas and Grayson, 1995) 계산식 Eq. (4),

$$\dot{q} = E \left[\frac{X_{O_2}^A - X_{O_2}^A}{1 - X_{O_2}^A} \right] \dot{m}_a \frac{M_{O_2}}{M_a} (1 - X_{H_2O}^O - X_{CO_2}^O) \quad (2)$$

$$\Delta h_{c,eff} = \frac{\dot{q}(t)}{-\dot{m}} \quad (2)$$

여기에서 $\Delta h_{c,eff}$ 는 유효연소열, $\dot{q}(t)$ 는 단위면적당 열방출율(Heat Release Rate, kW/m^2), $-\dot{m}$ 앞서 언급된 5점 수치미분식을 이용한 질량감소율을 의미하며, 화재 모델에 연기 데이터를 적용하기 위해 때로는 기기 흐름 조건 및 시료 질량과 무관하게 시료의 단위 질량 손실당 연기 수율 측면에서 데이터를 레포트하는 것이 바람직하다. 이를 위해 특정 소멸 면적은 해당 연기 생산과 관련된 시료의 대량 손실 대비 연기 소멸 영역의 비율로 정의 된다(ISO 5660-1, 2015, Annex A).

$$\sigma = \kappa \dot{V}_s \Delta m^{-1} t \quad (3)$$

여기서 σ 는 킬로그램당 평방미터 단위의 특정 소멸 지역(Specific extinction area), κ 는 미터당 표현된 소멸 계수(Extinction coefficient) $k = (I/L) \ln(I_0/I)$, $\dot{V}_s$ 는 특정 기간의 측정 지점에서의 매연 체적 유량(초당 세제곱 미터), Δm 은 특정 기간 동안 킬로그램 단위의 질량 손실, t 는 Δm 에 대한 시간(초)이다.

$$SPR(Smoke Production Rate, m^2/s) \quad (4)$$

$$= k \dot{V}_s / \dot{m}(MLR)$$

$$= yield \times \dot{m}(MLR) = \frac{yield(kg/kg)}{\Delta h_c(MJ/kg)} \times \dot{q}(t)$$

여기에서 yield는 [(kg × produced)/(kg specimen mass lost)]

를 의미하며 시험결과 중 이산화탄소 수율(Carbon dioxide yield)을 활용하여 앞서 언급된 각각의 측정 항목들과의 상관성을 통해 고온의 화재환경에서 콘칼로리미터에 적용된 로드셀에 미치는 열전달이 질량측정에 어떠한 영향을 끼치는지를 확인 하였다.

2.1 실험 방법

먼저 앞서 제시된 세가지 조건(Table 1, Condition I ~ III)을 통해 질량 감소율을 비교 분석하기 위하여 콘칼로리미터(FESTEC Int'l Co., Ltd. FT-CC-105)를 사용하여 KS F ISO 5660-1 (2003), 10.1.2절에 규정된 시험조건에 따라 콘(원추형) 히터의 50 kW/m^2 의 복사열(Irradiance)하에서 표준물질인 흑색의 Poly methyl methacrylate (PMMA) 밀도 1.19 g/cm^3 , 두께 18 mm (Table 2, Fig. 6)를 사용하여 비교 시험(Fig. 7)을 실시하였으며, 본 시험의 신뢰성을 검증하기 위하여 50 kW/m^2 의 복사열하에서 KS F ISO 5660-1 (2003), 6.1절에 언급된 ‘복사열은 노출된 시편 표면의 중앙 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 면적 내에서 측정 하였을 때 $\pm 2\%$ 이내로 균일 여부(Fig. 8)를 6.12절에 언급된 측정 범위가 $100 \pm 10 \text{ kW/m}^2$ 인 Schmidt-Boelter (thermopile) 타입을 사용하여 같은 위치에서 각각 3회씩 측정(Figs. 8 ~ 9)하였다.

Table 2. PMMA Information by Conditions

Condition	No.	Mass [g]	Ignition time (s)
I	PMMA 1	221.72	17
	PMMA 2	205.63	17
	PMMA 3	207.78	17
II	PMMA 4	216.96	18
	PMMA 5	209.71	19
	PMMA 6	219.40	18
III	PMMA 7	221.12	17
	PMMA 8	217.78	18
	PMMA 9	220.27	18

Fig. 6. PMMA before (a) and after (b) Testing

Fig. 7. Experimental Photos for Cone Calorimeter (FESTEC Int'l Co. Ltd., FT-CC-105)

Fig. 8. Measurement of Uniform Irradiance within $\pm 2\%$ of the Specimen Surface Exposed 50 mm by 50 mm Area

Fig. 9. The Frame for Measuring Uniform Irradiance (left) and Measuring Figure of the Irradiance

이러한 사전 실험을 통해 측정기준점 중앙(13번)과 면적 내 9곳과 비교하여 다음과 같은 결과(Table 3)를 얻어 평균 -0.57% 로 $\pm 2\%$ 이내로 해당 시험 규격에서 전제하는 시험편에 가해지는 복사열의 균일함을 확인 할 수 있었고 앞서 언급된 표준 시료인 PMMA를 사용한 점화시간(Ignition time)을 Table 2와 같이 측정하여 기준 $20 \pm 3 \text{ s}$ 내임을 확인 할 수 있었고 평균 점화시간이 17.7초로 점화시간 산란율 $\pm 10\%$ (Babrauskas and Grayson, 1995)이내 임을 확인 할 수 있어 본 연구에 사용된 실험의 결과 값을 신뢰성을 전제 할 수 있었다.

Table 3. Test Results for Irradiance within an Area of 50 mm × 50 mm in the Center of the Specimen Surface

Position no	7	8	9
1th irradiance (kW/m ²)	48.2	49.9	50.1
2nd irradiance (kW/m ²)	48	50	50.3
3rd irradiance (kW/m ²)	48.2	50.1	49.8
Avg. irradiance (kW/m ²)	48.13	50	50.07
Deviation (%)	(3.9)	(0.2)	(0.1)
Position no	12	13	14
1th irradiance (kW/m ²)	49.6	49.9	50.2
2nd irradiance (kW/m ²)	49.3	50.2	50.7
3rd irradiance (kW/m ²)	49.2	50.2	50.6
Avg. irradiance (kW/m ²)	49.37	50.1	50.5
Deviation (%)	(1.5)	-	0.8
Position no	17	18	19
1th irradiance	50.1	50.3	50.3
2nd irradiance	50.1	49.9	50.5
3rd irradiance	50.3	49.8	50.3
Avg. irradiance	50.17	50	50.37
Deviation (%)	0.1	(0.2)	0.5

2.2 실험 결과 및 고찰

2.2.1 질량감소율(Mass Loss Rate, MLR)

먼저 앞서 제시한 5점 미분식으로 각기 다른 열전달 세 가지 조건이 질량측정에 미치는 영향을 살펴보기 위해 표준 시료인 PMMA를 사용하여 Table 4 및 그래프(Figs. 10 ~ 11)와 같이 질량손실 및 그 MLR을 측정해 각 조건의 평균 MLR 대비 표준 편차(s, Eq. (5))와 그렇게 구해진 Condition I의 표준편차 값을 기준으로 그 차이만큼 개선율(i, Eq. (6))을 백분율(%)로 표(Table 5)와 같이 표시 하였다.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (5)$$

$$i = \frac{S.dev' (Con'.I) - S.dev' (Con'.(n))}{S.dev' (Con'.I)} \times 100 (\%) \quad (6)$$

그 결과를 살펴보면 파란색, 회색 그리고 주황색은 각각 시험조건 Condition I, II 및 III를 나타내며, 그 그래프 중 주황색의 Condition III가 질량감소 및 MLR 그래프인 에서 다른 결과에 비해 직선에 가깝고 편차가 안정적임을 직관적으로 확인 할 수 있었으며, Table 5의 결과는 Condition III 시험조건인 열전도(Heat transfer) 차단을 위한 금속 재질의 시험편 지지대 사이의 열전달 차단 조건이 가장 안정적인

질량측정 편차 값을 보였으며, 그 측정 개선율은 열전달이 차단되지 않은 조건(Condition I)에 비해 약 70%의 개선 효과를 확인 할 수 있었다.

Table 4. The Test Results of Mass Lost and Mass Loss Rate in Conditions I ~ III

Condition	No.	Mass (g)	Mass Lost (g)	Mass Loss Rate (g•m ² /s)
I	PMMA 1	221.72	219.54	22.94
	PMMA 2	205.63	201.36	24.50
	PMMA 3	207.78	206.26	24.08
II	PMMA 4	216.96	214.02	24.82
	PMMA 5	209.71	206.02	27.42
	PMMA 6	219.40	219.1	24.47
III	PMMA 7	221.12	218.44	25.32
	PMMA 8	217.78	216.56	25.38
	PMMA 9	220.27	219.94	25.74

Fig. 10. The Average Graphs of Mass Lost for Conditions I ~ III

Fig. 11. The Average Graphs of Mass Loss Rate for Conditions I ~ III

Table 5. The Standard Deviations and Improvement of Mass Loss Rate in Conditions I ~ III

Condition	Avg. mass loss rate ($\text{g}\cdot\text{m}^2/\text{s}$)	Standard deviation	Improvement (%)
I	23.84	0.81	-
II	25.57	1.61	(99)
III	25.48	0.24	70

그러나 앞선 사전실험에서 예상된 바와 같이 두 번째 시험 조건인 Condition II의 질량측정장치 상부에 복사열 차단재가 설치된 경우, 내부 온도상승에 의해 그렇지 않은 경우인 Condition I 보다 오히려 불안정한 질량측정 편차 값을 보였으며, 그 측정 개선율은 오히려 악조건에 비해 약 -99%로 오히려 악화되어 열포화에 의한 질량측정장치 내부 기체온도 상승은 로드셀의 변형량 저항변화에 영향을 주어 질량측정에 오히려 악영향을 끼친다는 사실을 확인 할 수 있었다.

2.2.2 유효 연소열(Effective Heat of Combustion, EHC)

서론에서 언급된 고온의 열전달이 질량측정 외에 어떤 영향을 미치는지를 살펴보기 위해 연관 시험 결과인 유효 연소열(Effective Heat of Combustion, EHC; kJ/kg)은 계산식 Eq. (2)에 의해 각 조건의 평균 열방출율Heat Release Rate, HRR)과 EHC 결과 값을 Table 6과 같이 정리하였고 앞선 MLR 시험결과와 마찬가지로 각각의 표준 편차를 및 그 개선율을 백분율(%) Tables 7 ~ 8과 같이 정리하였다.

Table 6. The Results of Heat Release Rate and Effective Heat of Combustion in Conditions I ~ III

Condition	No.	Heat release rate (kW/m^2)	Effective heat of combustion (MJ/kg)
I	PMMA 1	474.3	5.26
	PMMA 2	498.9	18.46
	PMMA 3	500.2	17.10
II	PMMA 4	503.47	8.90
	PMMA 5	557.03	8.03
	PMMA 6	504.93	16.76
III	PMMA 7	463.48	22.95
	PMMA 8	469.92	25.64
	PMMA 9	477.98	22.38

Table 7. The Standard Deviations and Improvement of Heat Release Rate in Conditions I ~ III

Condition	Avg. Heat release rate (kW/m^2)	Standard deviation	Improvement (%)
I	491.1	14.59	-
II	521.8	30.49	(109)
III	470.5	7.26	50

Fig. 12. The Average Graphs of Heat Release Rate for Conditions I

Fig. 13. The Average Graphs of Heat Release Rate for Conditions II

Fig. 14. The Average Graphs of Heat Release Rate for Conditions III

Table 8. The Standard Deviations and Improvement of Effective Heat of Combustion in Conditions I ~ III

Condition	Avg. Effective heat of comb' (MJ/kg)	Standard deviation	Improvement (%)
I	13.60	9.19	-
II	11.23	4.80	47
III	23.65	1.74	81

Fig. 15. The Average Graphs of Effective Heat of Combustion for Conditions I ~ III

각 조건별 3회씩 시험한 평균 HRR 그래프(Figs. 12 ~ 14)와 평균 EHC 결과 값(Fig. 15)을 살펴보면 앞선 MLR 시험결과 값과 유사하게 Condition III가 다른 조건에 비해 가장 편차가 적음을 그래프와 Table 8의 편차 결과를 통해 확인 할 수 있었으며 MLR 시험결과와 마찬가지로 Condition III 시험조건인 금속 재질의 시험편 지지대 사이의 열전달 차단 즉, 열전도 차단조건이 EHC 결과 값이 그렇지 않은 경우에 비해 최대 약 76%의 개선 효과를 보여 줌으로서 EHC가 고온의 환경에 노출된 질량측정장치 오류에 의해 부정확한 정보를 가져올 수 있음을 재차 확인함으로써 열전달이 미치는 또 다른 영향성을 확인하였다. 그러나 계산식 Eq. (3)의 $\dot{q}(t)$ HRR의 경우 Conditions I에 비해 Condition III가 열차단에 의해 측정결과가 약 50% 개선되는 효과 (Table 7)를 나타냈지만 Condition II의 시험결과가 MLR 결과와 유사한 경향을 띠어 질량측정장치 내 열포화에 의한 로드셀의 변형량 저장변화에 영향을 주어 Conditions I에 비해 오히려 질량 측정 장치의 성능이 저하 된다는 사실 또한 재차 확인해, 서론에서 전제 한 시간에 따른 열에너지 HRR과 MLR의 제한으로 표현되는 EHC 계산식 Eq. (3)이 이러한 경향을 띠지 않아 다음 고찰할 이산화탄소 수율 (Carbon Dioxide Yield), 연기감쇠면적(Extinction area of smoke) 및 연기발생률(Smoke Production Rate) 결과들을

통해 이러한 경향의 연관성 살펴보았다.

2.2.3 연기발생률(Smoke Production Rate, SPR)

서론에서 언급된 MLR의 부정확한 측정은 연료 1 kg/s의 소모율에 대한 연소 생성물의 생성률(kg/s)로 표현되는 CO, CO₂ 및 Soot yield (kg/kg)의 오차를 가져올 수 있으며, 이러한 정보가 활용되는 연기지수로서, 연기의 감쇠면적(Extinction area of smoke, m²/s)과 연기의 생성과 연관된 시편의 MLR (kg/s)의 비로 표현되는 비감쇠면적(Specific extinction area, m²/kg)이 있어 고온의 열전달이 질량측정 외에 또 다른 어떠한 영향을 미치는지를 살펴볼 수 있는 연관 시험 결과인 연기발생률(Smoke Production Rate, SPR; m²/s)의 시험결과 값을 연기감쇠면적 계산식 Eq. (4)와 연기발생률 계산식 Eq. (5)를 통해 Table 9와 같이 살펴보았다. 앞선 2.2.1의 MLR과 2.2.2의 EHC의 시험결과와 HRR값과 마찬가지로 직접적인 연소에 의한 부산물인 이산화탄소 수율(Carbon dioxide yield)의 경우 앞서 보인 시험결과와 마찬가지로 다음 그래프(Fig. 16)를 통해 편차 감소, 개선율(Table 10) Condition II의 경우 약 35%, Condition III의 경우 83% 개선율을 앞서 계산 했던 EHC와 유사한 경향을 확인 할 수 있었으며 이는 고온의 열전달에 의한 부정확한 질량측정이 미치는 또 다른 영향성을 재차 확인하였다.

Table 9. The Test Results of Specific Extinction Area, Carbon Dioxide Yield and Smoke Production Rate in Conditions I ~ III

Condition	No.	Carbon dioxide yield (kg/kg)	Specific extinction area (m ² /kg)	Smoke Production Rate (m ² /s)
I	PMMA 1	0.44	75.26	67.8
	PMMA 2	1.54	212.84	59.6
	PMMA 3	1.44	290.13	60.9
II	PMMA 4	0.74	108.82	61.4
	PMMA 5	0.7	149.62	56.8
	PMMA 6	1.4	222.97	63.9
III	PMMA 7	2.06	432.35	49.3
	PMMA 8	2.2	352.82	47.2
	PMMA 9	1.93	316.02	43.6

Table 10. The Standard Deviation of Carbon Dioxide Yield in Conditions I ~ III

Condition	Avg. Carbon dioxide yield (kg/kg)	Standard deviation	Improvement (%)
I	1.14	0.6	-
II	0.95	0.39	35
III	2.06	0.1	83

그러나 그 외의 연기감쇠면적(Fig. 17) 및 연기발생률 결과(Figs. 18~20)는 앞선 EHC 결과와 마찬가지로 모두 Conditions I 에 비해 Condition III가 열전도 차단에 의한 개선 효과가 각각 45%, 34% (Tables 11~12)를 나타냈지만 MLR과 HRR과 같이 Condition II의 측정결과가 악화되는 경향은 보이지 않았다. 이는 연소현상에서 계산식 Eq. (3)의 열방출율과 계산식 Eq. (5)의 생성물의 양과 시험편의 무게손실의 제함으로 만들어지는 이산화탄소 수율은 연소에 의한 직접적인 부산물들로 질량측정이 계산식에 직접적인 영향을 주지만, Eq. (5)와 같이 연기발생률의 경우 이미 질량감소율이 반영된 유효연소율 및 이산화탄소 수율이 반영된 열방출율의 곱으로 측정되고 광소멸법(Light extinction method)을 활용한 연기농도의 측정에는 κ 값 미터당 표현된 소멸 계수(extinction coefficient)의 측정을 위한 장치의 정밀도 또한 연관되어 질량 감측정의 직접적인 영향 주는 MLR과 HRR과의 결과와는 또 다른 경향임을 확인 할 수 있었다.

Fig. 16. The Average Graphs of Carbon Dioxide Yield for Conditions I ~ III

Fig. 17. The Average Graphs of Specific Extinction Area for Conditions I ~ III

Fig. 18. The Average Graphs of Smoke Production Rate for Conditions I

Fig. 19. The Average Graphs of Smoke Production Rate for Conditions II

Fig. 20. The Average Graphs of Smoke Production Rate for Conditions III

Table 11. The Standard Deviation of Specific Extinction Area in Conditions I ~ III

Condition	Avg. Specific extinction area (m ² /kg)	Standard deviation	Improvement (%)
I	192.7	108.84	-
II	160.47	57.84	47
III	367.1	59.46	45

Table 12. The Standard Deviation of Smoke Production Rate in Conditions I ~ III

Condition	Avg. Smoke Production Rate (m ² /s)	Standard deviation	Improvement (%)
I	62.8	4.4	-
II	60.7	3.93	11
III	46.7	2.89	34

2.3 연구 결과 및 제언

이러한 시험결과는 고온의 화재환경인 콘(원추형)형태의 복사열 전기히터하에서 금속재질의 시편 지지대와 로드셀 간의 열전도(Thermal conduction) 및 로드셀 박스 내부의 기체 온도상승에 의한 열대류(Thermal convection) 각각의 열전달(Heat transfer)이 콘칼로리미터에서 질량측정 및 그 외 시험결과에 어떠한 영향을 미치는지를 본 연구를 통해 확인하였다. 따라서 정확성이 향상된 질량측정 결과를 얻기 위해선 현재 대부분의 시험자가 관련 시험규격에 언급된 질량측정 장치 성능개선 및 보호를 목적으로 질량측정장치 상부에 사용하고 있는 열전달 차단을 위한 칼슘실리케이트 보드 및 내화섬유(Fig. 21 참조)를 사용하는 대신, 본 연구를 통해 Fig. 22와 같이 수냉식 복사열 차단 장치(푸른색 점선)와 로드셀과 시험편지지대의 연결 볼트(붉은색 점선)를 부도체를 사용함으로써 질량측정 값의 영향을 받는 대부분의 콘칼로리미터 시험결과에의 정확성을 향상시킬 수 있다는 사실을 확인 할 수 있어 콘칼로리미터 시험방법의 개선이 시급함을 확인 할 수 있었고 보다 정확성이 향상된 화재반응 해석을 위해 열전도, 열대류 각각 및 두 가지 모두가 본 연구에서 제시한 조건 보다 열전달 차단 조건이 향상되었을 때 그 개선에 따른 질량측정장치의 정확도 향상 및 다양한 재료의 연소 시 유기물과 무기물 가연물의 탄화 조건에 질량측정이 미치는 영향 대한 추가 연구의 필요성을 확인 할 수 있었다. 더불어 앞선 그래프(Fig. 23)에서 보듯이 Condition I에 비해 Condition III의 평균 열방출율(붉은색) 값과 평균 연기발생률(주황색) 값의 그래프는 편차가 적고 경향이 유사하다는 점은 열방출율과 연기발생률이 정량적으로 비례한다는 점을 선행 연구인 ‘열방출율과 연기발생률

의 상관성 연구(Ryu et al., 2010)’에서와 같이 다시 한 번 확인 할 수 있어 이는 정확성이 향상된 질량측정과 정확성이 향상된 소멸 계수(Extinction coefficient) $k = (I/L) \ln(I_0/I)$ 에 의한 연기의 감쇠면적(Extinction area of smoke) 측정만으로도 산소소모율법(Oxygen consumption rate)을 사용하지 않고 화재에너지 크기인 발열량 예측이 가능한 기법을 개발 가능성 또한 확인 할 수 있었다.

Fig. 21. A Picture of an Application of Refractory Fiber at the Top of the Weighing Device that Causes Thermal Saturation

Fig. 22. Estimated Composition of Weighing Device with Water-Cooled Radiant Heat Blocking Plate

Fig. 23. Comparison Graphs of Heat Release Rate and Smoke Production Rate in Conditions I & III

3. 결 론

본 논문은 화재물성 측정을 위한 콘칼로리미터 관련 시험규격은 다른 측정 장치들에 비해 콘(원추형) 히터 하에서 고온의 화재환경에 노출되었을 때 열전달이 질량측정에 미치는 영향에 대해서는 자세히 언급되어 있지 않아 열전도(Thermal conduction) 및 열대류(Thermal convection)가 콘칼로리미터에서 질량측정 및 그 외 시험결과에 어떠한 영향을 미치는지를 확인하였고 금속 재질의 시험편 지지대와 로드셀 사이의 그 열전도 차단(Condition III) 조건이,

그렇지 않은 경우(Conditions I)에 비해 70%의 질량감소율(MLR), 81%의 유효연소율(EHC), 50%의 열방출률(HRR), 83%의 이산화탄소 수율(CDY), 45%의 연기감쇠면적(SEA) 및 34%의 연기발생률(SPR)을 개선시키는 효과를 확인 할 수 있어 ‘고온의 열전달에 의한 부정확한 질량측정이 얼마나 콘칼로리미터 시험 결과에 얼마나 영향을 미치는가?’에 대한 영향을 본 연구를 통해 확인하였다(Table 13). 이는 향후 콘칼로리미터를 활용한 정확성이 향상된 화재반응 해석 및 효율적인 화재시험을 위한 추가 연구의 필요성을 확인할 수 있었다.

Table 13. The Test Results of Mass Loss Rate, Heat Release Rate, Effective Heat of Combustion, Carbon Dioxide Yield, Specific Extinction Area and Smoke Production Rate

Condition	I			II			III		
Specimen No.	PMMA 1	PMMA 2	PMMA 3	PMMA 4	PMMA 5	PMMA 9	PMMA 7	PMMA 8	PMMA 9
Ignition time (s)	17	17	17	18	19	18	17	18	18
End of test time (s)	993	874	886	904	900	916	901	881	875
Mass [g]	221.72	205.63	207.78	216.96	216.96	219.40	221.12	217.78	220.27
Mass Lost (g)	219.54	201.36	206.26	214.02	206.02	219.1	221.12	217.78	219.94
Mass Loss Rate ($\text{g}\cdot\text{m}^2/\text{s}$)	22.94	24.50	24.08	24.82	27.42	24.47	25.32	25.38	25.74
Avg. mass loss rate ($\text{g}\cdot\text{m}^2/\text{s}$)	23.84			25.57			25.48		
Standard deviation	0.81			1.61			0.24		
Improvement (%)	-			(99)			70		
Heat release rate (kW/m^2)	474.3	498.9	500.2	503.47	557.03	504.93	463.48	469.92	477.98
Total heat release rate (MJ/m^2)	462.4	427.1	434.2	445.6	490.2	452.9	409.2	405.1	409.1
Avg. Heat release rate (kW/m^2)	491.1			521.8			470.5		
Standard deviation	14.59			30.49			7.26		
Improvement (%)	-			(108)			50		
Effective heat of combustion (MJ/kg)	5.26	18.46	17.1	8.9	8.03	16.76	22.95	25.64	22.38
Avg. Effective heat of comb' (MJ/kg)	13.60			11.23			23.65		
Standard deviation	9.19			4.8			1.74		
Improvement (%)	-			47			81		
Carbon dioxide yield (kg/kg)	0.44	1.54	1.44	0.74	0.7	1.4	2.06	2.2	1.93
Avg. Carbon dioxide yield (kg/kg)	1.14			0.95			2.06		
Standard deviation	0.6			0.39			0.1		
Improvement (%)	-			35			83		
Specific extinction area (m^2/kg)	75.26	212.84	290.13	108.82	149.62	222.97	432.35	352.82	316.02
Avg. Specific extinction area (m^2/kg)	192.7			160.47			367.1		
Standard deviation	108.84			57.84			59.46		
Improvement (%)	-			47			45		
Smoke Production Rate (m^2/s)	67.8	59.6	60.9	61.4	56.8	63.9	49.3	47.2	43.6
Avg. Smoke Production Rate (m^2/s)	62.8			60.7			46.7		
Standard deviation	4.4			3.93			2.89		
Improvement (%)	-			11			34		

References

- ASTM E 1354-04. (2004). *Standard test method for heat and visible smoke release rates for materials and products using an oxygen consumption calorimeter*. ASTM International.
- ASTM E1354-17. (2017). *Standard test method for heat and visible smoke release rates for materials and products using an oxygen consumption calorimeter*. ASTM International.
- Babrauskas, V., and Grayson, S.J. (Eds.). (1995). *Heat release in fires*. London, UK: E & FN Spon.
- Chow, W.K., and Han, S.S. (2010). Heat release rate calculation in oxygen consumption calorimetry. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, No. 2-3, pp. 304-310.
- Dlugogorski, B.Z., Mawhinney, J.R., and Huu Duc, V. (1994). The measurement of heat release rates by oxygen consumption calorimetry in fires under suppression. *Fire Safety Science – Proceedings of the Fourth International Symposium*, pp. 877-888.
- En Un, C., and Simakov, S.R. (1993). Method of temperature error compensation in strain transducers. *Measurement Techniques*, Vol. 36, pp. 781-783.
- Hopkins Jr., D. (1995). *Predicting the ignition time and burning rate of thermoplastics in the cone calorimeter*. NIST-GCR-95-677, National Technical Information Service.
- ISO 5660-1. (1993). *Fire tests – Reaction to fire – Part 1: Rate of heat release from building products (Cone calorimeter method)*. International Organization for Standardization.
- ISO 5660-1. (2015). *Reaction-to-fire tests – Heat release, smoke production and mass loss rate – Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method) and smoke production rate (dynamic measurement)*. International Standards Organization.
- Jin, E., and Chung, Y.J. (2020). Smoke hazard assessment of cypress wood coated with boron/silicon sol compounds. *Fire Science and Engineering*, Vol. 34, No. 1, pp. 1-10.
- KS F ISO 5660-1. (2003). *Reaction to fire test – Heat release, smoke production and mass loss rate – Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method) and smoke production rate (dynamic measurement)*. Appendix C.
- Lautenberger, C., McAllister, S., Rich, D., and Fernandez-Pello, C. (2007). Effect of environmental variables on flame spread rates in microgravity. *Proceedings of 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, NV, AIAA Paper 2007-383.
- Lautenberger, C., Zhou, Y.Y., and Fernandez-Pello, A.C. (2005). Numerical modeling of convective effects on piloted ignition of composite materials. *Combustion Science and Technology*, Vol. 177, pp. 1231-1252.
- McGrattan, K. (2006). *Fire dynamics simulator (Version 4) technical reference guide*. NIST Special Publication 1018-4.
- Mulholland, G.W., and Croarkin, C. (2000). Specific extinction coefficient of flame generated smoke. *Fire and Materials*, Vol. 24, No. 5, pp. 227-230.
- Mun, S.Y., Hwang, C.H., and Kim, S.C. (2019). CO and soot yields of wood combustibles for a kitchen fire simulation. *Fire Science and Engineering*, Vol. 33, No. 1, pp. 76-84.
- Mun, S.Y., Park, C.H., Hwang, C.H., and Park, S.H. (2013). Effects of the geometry and location of an vertical opening on the fire characteristics in the under-ventilated compartment fire. *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 27, No. 3, pp. 20-29.
- Park, W.-H., and Yoon, K.-B. (2013). Measurement of radiative heat flux using plate thermometer. *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 37, No. 1, pp. 95-98.
- Ryu, S.-H., Yoo, Y.-H., and Rie, D.-H. (2010). The study of a correlation between heat release and smoke production by using oxygen consumption calorimeter up to 10 MW facility. *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 24, No. 3, pp. 58-65.
- Schartel, B., and Hull, T.R. (2007). Development of fire-retarded materials – Interpretation of cone calorimeter data. *Fire and Materials*, Vol. 31, No. 5, pp. 327-354.
- Schartel, B., Bartholmai, M., and Knoll, U. (2005). Some comments on the use of cone calorimeter data. *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 88, No. 3, pp. 540-547.
- Scudamore, M.J., Briggs, P.J., and Prager, F.H. (1991). Cone calorimetry – A review of tests carried out on plastics for the association of plastic manufacturers in Europe. *Fire and Materials*, Vol. 15, No. 2, pp. 65-84.
- Widmann, J.F., Duchez, J., Yang, J.C., Conny, J.M., and Mulholland, G.W. (2005). Measurement of the optical extinction coefficient of combustion-generated aerosol. *Journal of Aerosol Science*, Vol. 36, No. 2, pp. 283-289.

Received	August 11, 2020
Revised	August 13, 2020
Accepted	September 21, 2020