[Research Paper]

ISO 5660 기준에 따른 콘 히터 스케일이 복사 열유속의 공간 균일성에 미치는 영향

류상훈 · 문선여* · 황철홍**†

인천대학교 안전공학과 대학원생, *대전대학교 방재학과 대학원생, **대전대학교 소방방재학과 교수

Effect of the Cone Heater Scale Compliant with the ISO 5660 Standard on Spatial Uniformity of Radiant Heat Flux

Sanghoon Ryu · Sun-Yeo Mun* · Cheol-Hong Hwang**†

Graduate Student, Dept. of Safety Engineering, Incheon National University,

*Graduate Student, Dept. of Disaster Prevention, Daejeon University,

**Professor, Dept. of Fire and Disaster Prevention, Daejeon University

(Received October 13, 2020; Revised October 16, 2020; Accepted October 16, 2020)

요 약

Bench scale 장치인 콘 칼로리미터를 통해 측정되는 질량감소율, 열발생률 및 총발열량과 같은 중요 물리량은 주로 단위 면적당의 값으로 활용된다. 따라서 콘 히터에서 시편으로 공급되는 복사 열유속의 균일성은 측정 결과의 타당성 측면에서 매우 중요하다. 본 연구에서는 ISO 5660에 근거한 콘 칼로리미터에 적용되는 콘 히터를 대상으로 시편 표면의 위치에서 복사 열유속의 균일성이 평가되었다. ISO 5660-1에 근거한 Normal cone heater (NCH)는 중앙을 기준으로 5 cm × 5 cm 영역에서의 ± 2% 이내의 균일성은 충족되지만, 시편의 모서리에 해당되는 위치에서 약 13%의 큰 편차를 갖는다. 또한 NCH의 사용 기간은 복사 열유속의 분포에 큰 영향을 주지 않는다. 반면에 ISO/TC 5660-4에 근거한 Large cone heater (LCH)는 시편의 전체 표면적(10 cm × 10 cm 영역)에 상당히 균일한 복사 열유속을 공급할 수 있음이 확인되었다.

ABSTRACT

Physical quantities such as mass loss rate, heat release rate, and total heat release are often measured through a cone calorimeter (a representative bench-scale apparatus) and are primarily considered as values per unit area. Hence, the uniformity of radiant heat flux supplied by the cone heater to the specimen is very important with respect to the measurement results' validity. In this study, on the basis of the ISO 5660 standard, the uniformity of radiant heat flux at the specimen surface was evaluated for the cone heaters used with the cone calorimeter. It is observed that a normal cone heater (NCH) compliant with the ISO 5660-1 standard satisfies the requirement of uniformity within a range of ± 2% in the central 5 cm × 5 cm area, but it has a large deviation of approximately 13% at the position corresponding to the edge of the specimen. In addition, the duration of NCH usage does not significantly affect the distribution of radiant heat flux. Furthermore, it is observed that a large cone heater compliant with the ISO/TC 5660-4 standard can supply moderately-uniform radiant heat flux over the entire surface area (10 cm × 10 cm) of the specimen.

Keywords : ISO 5660, Cone calorimeter, Cone heater, Radiant heat flux, Uniformity

1. 서 론

국제표준화기구의 ISO 5660에 근거한 콘 칼로리미터 (Cone calorimeter)^(1,2)는 개방된 공간에서 고체 가연물의 난

연성(Flame-retardant) 평가 및 연소물성의 측정을 위해 널리 사용되며, 화재안전 분야에서 중요한 Bench scale 장치로 인식되고 있다^(3,4). 콘 칼로리미터에서 가연물의 점화를 위해 복사 열유속을 공급하는 콘 히터(Cone heater)는 스케

† Corresponding Author, TEL: +82-42-280-2592, FAX: +82-42-280-2596, E-Mail: chehwang@dju.ac.kr

© 2020 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

일에 따라 2종류가 ISO 5660에 제시되어 있다. 일반적으로 적용되고 있는 ISO 5660-1⁽¹⁾의 콘 히터와는 다르게, ISO/TC 5660-4⁽²⁾에는 가연성(Combustibility)이 낮은 가연물의 열발생률을 측정하기 위하여, 보다 큰 스케일의 콘 히터가 적용되었다. 이들 콘 칼로리미터를 활용하여 제어된 복사 열유속(Radiant heat flux) 조건 하에서 파일럿 점화(Pilot ignition) 또는 자기착화(Auto-ignition)에 의한 질량감소율(Mass loss rate), 점화시간(Ignition time), 연소열(Heat of combustion), 열 및 연기의 발생률(Rate of heat release and smoke production) 그리고 다양한 연소생성물이 측정될 수 있다. 이들 정보는 열분해(Pyrolysis), 가연성(Flammability) 및 화재확산(Fire spread) 등과 관련된 다양한 화재 위험성을 평가하는데 활용되고 있다. 비록 제한된 크기의 시편(Specimen)을 통해 얻어진 가연물의 화재특성을 실규모 화재현상에 적용하는 데는 상당한 주의가 요구되지만, 제어된 화재의 열적환경에서 가연물의 단위 면적당 열 및 화학적 특성을 이해하는데 유용한 정보를 제공하고 있다⁽⁵⁾. 이 시험법에서 화염으로부터 가연물에 공급되는 열적 환경은 절단된(Truncated) 콘 형상(Frustum)을 갖는 전열 히터로부터 특정 높이에 위치한 시편으로 입사되는 복사 열유속(Incident or external heat flux)에 의해 모사될 수 있다.

콘 히터를 통해 시편에 입사되는 복사 열유속은 특정 가연물의 열분해 및 연소물성의 큰 변화를 가져오는 가장 중요한 기본적인 제어변수이다. 단위 면적에 따른 에너지의 공급률을 의미하는 복사 열유속(kW/m^2)의 정의를 고려할 때, 열유속에 따른 화재현상의 정량적 특성화에는 시편에 균일한 열유속이 공급된다는 가정이 포함되어 있다. 그 결과 콘 칼로리미터를 활용한 대부분의 선행연구에서 질량감소율($\text{kg/s}\cdot\text{m}^2$), 열발생률(kW/m^2), 총발열량(kJ/m^2)은 단위 면적당의 값으로 표현되고 있다^(4,6,7). 그러나 Wilson 등⁽⁸⁾의 연구결과를 살펴보면, ISO 5660-1에 근거한 콘 히터에서 시편으로 입사되는 복사 열유속의 이론적 해석을 통해, 시편 중앙을 기준으로 가장자리(Edge) 및 모서리(Corner)의 열유속은 각각 2.6%와 15.9%로서 상당한 차이가 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 실험을 통해 재확인 되었으며, 이론과 실험의 정량적 차이는 콘 히터를 구성하는 전열선의 표면온도의 차이, 주위 장치로 인한 복사열의 피드백 그리고 대류열에 의한 복사 열유속의 측정 오차에 의해 발생할 수 있다고 언급하였다. 또한 Boulet 등⁽⁹⁾은 콘칼로리미터를 이용한 Polywood의 열분해 과정에서 콘 히터의 방사율(Emissivity)과 시편의 흡수율(Absorptivity)의 불균일 또는 이들의 온도에 따른 변화로 인하여 실제 가연물에 공급되는 복사 열유속의 변화가 발생할 수 있음을 보고하였다. 결과적으로 ISO 5660-1에 근거한 콘 히터가 적용되었을 때, 10 cm × 10 cm 크기의 시편에 공급된 복사 열유속은 공간적으로 균일하지 않음을 선행연구를 통해 확인할 수 있다.

콘 칼로리미터의 구체적인 시험절차가 제시된 ISO 5660^(1,2)에는 시편 중앙을 기준으로 5 cm × 5 cm의 영역에서 복사

열유속의 균일성이 $\pm 2\%$ 이하가 되도록 명시되어 있다. 그러나 일반적으로 시편 중앙에 위치한 열유속계(Heat flux gauge)를 기준으로 열유속을 보정(Calibration)하고 있으며, 공간 균일도에 대한 구체적인 보정 방법 및 대안은 부재한 상황이다. 물론 열분해 또는 화재지속시간 동안에 가연물의 용융 또는 부풀어 오르는 현상으로 인하여 시편 표면의 복사 열유속의 균일성은 본질적으로 확보되기 어렵다. 또한 시편의 가장자리에 부착되어 주기적인 거동을 갖는 비예혼합화염은 시편에 공급되는 복사 열유속 분포를 더욱 복잡하게 하는 원인이 될 수 있다. 그러나 이러한 원인들은 가연물 또는 제어된 복사 열유속에 의해 큰 영향을 받으며, 실험을 통해 직접 확인되어야 하는 화재현상으로 분류될 수 있다. 따라서 콘 칼로리미터 시험에서 가장 기본적인 제어변수인 콘 히터로부터 공급되는 복사 열유속의 균일성은 우선적으로 확보되어야 하며, 단위 면적에 의해 제시되는 측정 물리량들의 정확한 활용을 위하여 매우 중요하다.

본 연구의 궁극적인 목적은 ISO 5660에 근거한 콘 히터가 적용되었을 때, 시편의 복사 열유속 균일성이 질량감소율, 점화시간, 연소열, 열 및 연기의 발생률 등에 미치는 영향을 검토하는 것이다. 이를 위한 단계적 접근으로서 본 논문에서는 ISO 5660에 제시된 콘 히터의 복사 열유속의 균일성을 실험을 통해 직접 확인하였다. 이때 콘 히터의 사용 기간에 따라 전열선의 노화 및 오염 등으로 인하여 발열능이 변화될 수 있음을 고려하여, 사용 기간이 다른 ISO 5660-1⁽¹⁾에 근거한 3개의 콘 히터가 검토되었다. 또한 보다 큰 스케일을 갖는 ISO/TC 5660-4⁽²⁾에 근거한 1개의 콘 히터가 추가적으로 검토되었다. 이러한 연구결과는 ISO 5660에 근거한 콘 칼로리미터 결과의 해석에 활용될 수 있으며, 화재 시뮬레이션에서 화원의 정보로 활용되는 단위 면적당 질량감소율 또는 열발생률의 활용 시에 상당한 주의가 요구됨을 확인하는데 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

2. 실험방법 및 조건

Figure 1(a)는 콘 칼로리미터(ISO 5660-1)에 포함된 콘 히터의 사진이며, 시편 홀더의 위치에 복사 열유속의 분포를 측정하기 위한 Positioning grid가 설치되었다. Figure 1(b)는 ISO 5660-1에 근거하여 콘 히터 내부의 나선형으로 분포되어 있는 전열선의 형상 및 내부 계략도를 도시한 것이다. 콘 형상의 상부가 절단된 절두체(Frustum)의 형상을 갖고 있으며, 콘 히터 내부를 기준으로 상부 및 하부의 직경은 각각 80 mm와 160 mm이다. 이때 시편의 표면 또는 복사 열유속의 측정 위치는 표준시험 기준에 따라 콘 히터 바닥면에서 25 mm의 간격을 갖는다. 일반적으로 Bench scale의 Cone calorimeter는 ISO 5660-1에 근거하기 때문에, 이 콘 히터를 Normal cone heater (NCH)로 표기되었다. Figure 1(c)는 ISO/TC 5660-4에 근거한 콘 히터 내부의 형상을 도시한 것으로, Large cone heater (LCH)로 표기되었다. 가연성이

Figure 1. Photo of cone heater, and schematic diagrams of normal (NCH) and large cone heater (LCH) based on ISO 5660-1 and ISO/TC 5660-4, respectively.

낮은 가연물의 열발생률을 측정하기 위한 목적에 따라 NCH에 적용된 동일한 직경 및 성능의 전열선이 적용되었으나, 적용된 전열선의 길이는 NCH에 비해 약 3배에 해당된다. 그 결과 상부 및 하부의 직경은 각각 145 mm와 378 mm이다. 또한 히터 바닥면과 시편 표면과의 간격은 NCH와 동일하게 25 mm가 적용되었다. 참고로 열에 노출될 때 부풀어 오르거나 변형이 되는 가연물의 경우에 콘 히터 바닥면과 시편 표면과의 간격은 60 mm가 적용될 수 있다. 그러나 이 수직 높이에 따라 복사 열유속의 균일성은 변화될 수 있기 때문에(8,10), 본 연구에서 복사 열유속의 균일성은 고정된 25 mm의 높이에서 검토되었다. 본 연구에 적용된 콘 히터들은 FESTECo., Ltd⁽¹¹⁾에 의해 제작되었다.

Figure 2는 시편 표면의 위치에서 콘 히터에 의해 입사되는 복사 열유속의 분포를 측정하기 위한 Positioning grid의 계략도이다. ISO 5660에 근거한 표준 시편의 크기인 10 cm × 10 cm의 면적을 고려하여, 시편의 가장자리 및 모서리의 측정위치가 포함되도록 제작되었다. 열유속 측정을 위한 Schmidt-Boelter gauge (Medtherm GTW-10-32-485A)가 고정될 수 있도록 직경 1.3 cm를 갖는 25개의 홀이 균일한 간격으로 적용되었다. 복사 열유속의 2차원 분포는 중앙을 기준으로 x와 y축에 의해 표현되었으며, 열유속의 측대칭 분포를 고려하여 각 홀의 반경(r)이 추가로 도시되었다.

Figure 2. Schematic diagram of a positioning grid for measuring the distribution of radiant heat flux at a location corresponding to the surface of the specimen.

Figure 3. A steady-state period for time averaging and time-averaged radiant heat flux at the center through calibration.

Figure 3(a)는 복사 열유속의 시간 평균을 위한 구간을 결정하기 위하여, NCH를 대상으로 Positioning grid의 중앙에서 측정된 시간에 따른 복사 열유속을 도시한 것이다. 콘

Figure 4. Distribution of radiant heat flux according to irradiance level at the position corresponding to the surface of the specimen for the case of NCH-A.

히터로부터 공급되는 복사 열유속은 10, 25 및 50 kW/m²이 검토되었다. 콘 히터가 작동되는 시간(0 s)을 기준으로 약 400 s 이후에 정상상태에 도달함을 볼 수 있다. 따라서 충분한 정상상태가 확보된 600 s에서 1,200 s 까지의 시간 평균값이 제시되었다. Figure 3(b)는 복사 열유속의 보정에 대한 검증 결과로서, NCHs와 LCH를 대상으로 제어된 열유속 조건인 10, 25, 50 kW/m²이 정확하게 측정되고 있음을 보여주고 있다. 평균값의 심볼에 표기된 수직 에러바는 표준편차를 의미한다. 고려된 3개의 NCH는 3개의 연구기관에 개별적으로 설치된 것으로서, NCH-A는 제작 직후에 처음 사용되었으며, NCH-B와 C는 각각 약 3년과 6년 동안 실험에 사용된 것이다. 비록 정확한 사용 시간을 산출할 수는 없지만, 콘 히터의 사용 기간에 따른 전열선의 위치 및 방사율의 변형 그리고 연소 생성물에 의한 오염 등에 의한 복사 열유속의 균일성에 미치는 영향을 검토하기 위하여 고려되었다. 즉, 콘 히터의 제작 단계에서 표준 시험기준에 따라 시편 중앙을 기준으로 5 cm × 5 cm의 영역에서 2% 이하의 복사 열유속의 불균일성이 확보되더라도, 사용 기간에 따른 열유속의 공간분포에 대한 정량적 변화를 확인하기 위한 실용적 접근이라 할 수 있다. 모든 측정은 동일한 조건에서 3회 이상 반복되었으며, 평균 및 표준편차가 제시되었다.

3. 결과 및 고찰

Figure 4는 ISO 5660-1에 근거한 콘 히터(NCH-A)에서 입사되는 복사 열유속에 따른 시편 표면의 위치에서 측정된 열유속의 분포를 도시한 것이다. 먼저 입사되는 복사 열유속이 10 kW/m²인 Figure 4(a)를 살펴보면, 중앙에서는 10.1 kW/m²의 열유속이 측정되었다. Figure 3(b)에서 언급된 바와 같이 중앙에 위치한 열유속계를 기준으로 보정한 결과로서, 시간 평균 과정에서 1%의 오차가 발생되었다. 중앙에 근접한 Positioning grids의 위치에는 9.7 ~ 10.1 kW/m²

의 상당히 균일한 열유속 분포를 보이고 있다. 10 cm 크기의 시편 가장자리에서 열유속은 상당히 낮은 값을 보이고 있으며, 특히 모서리 위치에서 6.2 ~ 7.0 kW/m²의 매우 낮은 측정결과를 갖는다. 이러한 열유속의 분포는 Figure 2에 제시된 바와 같이 중앙을 기준으로 반경방향의 길이에 영향을 받는 점대칭(Point symmetry) 구조임을 확인할 수 있다. 원형 단면의 콘히터가 적용되었음을 고려할 때, 점대칭 구조의 열유속 분포는 충분히 예상될 수 있지만, ISO 5660-1에 제시된 콘 형상 및 형상계수(Configuration factor 또는 View factor)는 시편의 전체 표면에 균일한 열유속을 공급하지 못함을 재확인할 수 있다^(8,12). 입사되는 복사 열유속이 25 kW/m²와 50 kW/m²의 조건에서도 중앙과 중앙에 근접한 영역에서는 비교적 균일한 열유속 분포를 갖고 있으나, 가장자리와 모서리는 상당히 낮은 열유속 분포를 보이고 있다.

Figure 5는 ISO/TC 5660-4에 근거한 콘 히터(LCH)가 적용되었을 때 시편 표면의 위치에서 열유속의 분포를 도시한 것이다. Figure 1(c)에 제시된 바와 같이, NCH에 비해 큰 스케일을 갖는 LCH는 시편 표면의 위치에서 열유속 분포의 상당한 차이를 보이고 있다. 입사되는 복사 열유속이 10 kW/m²의 결과를 살펴보면, 중앙을 포함한 근접한 위치에서 열유속은 비교적 균일한 분포를 보이는 있다. 그러나 NCH의 결과와는 반대로 가장자리와 모서리 위치에서는 보다 큰 열유속 분포를 갖는다. 본 연구에서는 적용된 콘 히터의 형상계수에 대한 검토가 수행되지 않았으나, NCH에 비하여 LCH는 증가된 콘 히터의 스케일로 인하여 10 cm 크기의 시편 표면에서 상대적으로 균일한 열유속 분포가 확인되었다. 입사되는 복사 열유속이 25 kW/m²와 50 kW/m²의 조건에서도 10 kW/m²의 결과와 유사한 열유속 분포를 볼 수 있다. 다만, 입사되는 복사 열유속 증가될수록 중앙을 기준으로 가장자리와 모서리의 열유속 차이가 감소되어, 시편 표면에서 열유속의 균일성이 다소 개선되었음을 정성적으로 확인할 수 있다. 또한 복사 열유속의 분포가 NCH와 유사하게 점대칭 구조를 갖고 있음을 알 수 있다.

Figure 5. Distribution of radiant heat flux according to irradiance level at the position corresponding to the surface of the specimen for the case of LCH.

Figure 6. Radial distribution of radiant heat flux according to irradiance level for the cases of NCHs and LCH.

Figure 6은 NCHs와 LCH에 대하여 입사되는 복사 열유속에 따라 중앙을 기준으로 반경방향의 길이에 따른 열유속 분포를 도시한 것이다. Figure 2에 제시된 바와 같이 Positioning

grid의 25개 홀은 중앙을 포함하여 총 6개의 반경 길이로 분류될 수 있다. 동일 반경에서 측정된 열유속들은 단순 평균값으로 표현되었으며, 표준편차는 수직 Error bar로 표기

Figure 7. Deviations of spatial average from radiant heat flux measured at center according to irradiance level for the cases of NCHs and LCH.

되었다. 또한 반경 길이에 따른 열유속 변화를 확인하기 위하여 추가로 도식된 3차원 다차항 곡선(Curve fitting)이 도식되었으나, 반경 방향의 열유속 분포에 대한 물리적 현상을 의미하지 않는다. 입사되는 복사 열유속이 10 kW/m^2 의 경우, NCHs는 반경 길이 증가에 따라 열유속이 점차적으로 감소되고 있음을 볼 수 있다. 또한 반경 길이의 증가에 따라 평균에 의한 표준편차는 급격하게 증가됨을 동시에 확인할 수 있다. 사용 기간에 따른 NCHs의 평균 열유속 분포는 유사하지만, 표준편차는 사용 기간이 변화됨에 따라 정량적 차이가 있는 것으로 확인된다. Figure 5에서 언급된 바와 같이, LCH의 경우에는 반경 길이 증가에 따라 열유속은 오히려 증가되고 있음을 재확인할 수 있다. 시편 표면의 열유속 분포는 ISO 5660 기준과 시편의 크기의 관점에서 평가될 수 있다. 구체적으로 중앙을 기준으로 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 의 영역에서 2% 이하의 복사 열유속의 불균일성을 요구하는 ISO 5660 기준과 시편 크기인 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 의 영역을 구분하여 살펴보자. 중앙을 기준으로 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 의 영역에 해당되는 $0.0 \text{ cm} \leq r \leq 3.5 \text{ cm}$ 에서는 유사한 열유속이 측정되었지만, 시편 표면의 가장자리 및 모서리에 해당되는 $5.0 \text{ cm} \leq r \leq 7.1 \text{ cm}$ 에서는 열유속의 큰 변화로 인하여 균일성이 크게 감소되었음을 재확인할 수 있다. 입사되는 복사 열유속이 25 kW/m^2 와 50 kW/m^2 의 조건에서, NCH에 비해 반경 길이에 따른 LCH의 균일성이 비교적 높음을 제외하고 10 kW/m^2 의 결과와 유사한 열유속 분포를 볼 수 있다.

NCHs와 LCH에 대하여 시편 표면에서 복사 열유속의 공간 균일성을 정량적으로 평가하기 위하여, Figure 7은 중앙으로부터 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 와 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 영역에서의 공간 평균에 의한 편차를 도식한 것이다. 공간 평균에 의한 편차는 중앙에서 측정된 열유속을 기준으로 산출되었다. Figure 7(a)에 제시된 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 영역에서의 공간 평균의 편차를 살

펴보면, 3개의 NCHs는 모두 ISO 5660에서 요구하는 $\pm 2\%$ 범위 내의 균일성이 확인된다. 구체적으로 본 연구를 위해 처음 사용된 NCH-A의 경우, 낮은 열유속(10 kW/m^2)에서 -2%에 근접한 편차를 보이고 있으며, 열유속이 증가됨에 따라 균일성은 점차 증가됨을 볼 수 있다. 사용 기간이 약 3년 및 6년에 해당되는 NCH-B와 NCH-C의 경우에도 열유속에 따른 정량적 차이가 다소 발생되지만, ISO 5660에서 요구되는 균일성의 기준은 모두 충족하고 있다. LCH의 경우에도 유사하게 $\pm 2\%$ 범위 내의 균일성이 확인된다. 다만, 25 kW/m^2 의 조건에만 유일하게 약 +1%의 편차가 확인되었다. $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 영역에서의 공간 평균의 편차(Figure 7(b))를 살펴보면, 고려된 NCHs는 입사 열유속에 상관없이 모두 $\pm 2\%$ 를 초과하고 있으며, 사용 기간에 상관없이 10 kW/m^2 에서 약 13%의 편차를 보여주고 있다. 반면에 LCH의 경우에는 10 kW/m^2 에서 약 5%의 편차를 보이며, 증가된 입사 열유속 조건($25, 50 \text{ kW/m}^2$)에서는 +2%의 매우 작은 공간 편차를 갖는다.

결론적으로 ISO 5660에서 요구되며 초기장치 제작 과정에서 확인된 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 영역에서의 $\pm 2\%$ 이내의 균일성은 사용 기간에 상관없이 검토된 3개의 NCHs와 LCH 모두 충족되고 있음을 알 수 있다. 그러나 시편의 크기에 해당되는 영역($10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$)에서는 NCHs는 약 13%의 편차를 보이며, 낮은 입사 열유속의 조건에서 더 낮은 균일성이 확인되었다. 반면에 LCH는 2~5%의 공간 평균에 대한 오차를 갖고 있으며, NCH에 비해 상당히 우수한 복사 열유속의 균일성이 확인되었다. 따라서 가연성이 낮은 가연물의 열발생률을 측정하기 위해 제안된 LCH (ISO/TC 5660-4)를 NCH (ISO 5660-1)로 대신하여 사용한다면, 단위 면적당으로 표현되는 주요 측정값(질량감소율, 열발생률, 총발열량)의 보다 정확한 활용에 유용할 것으로 기대된다. 시편에 입사되는 복사 열유속의 균일성에 따른 측정값들의 정량적

차이는 향후 연구에서 수행될 예정이다.

4. 결 론

화재위험성 평가 및 화재시뮬레이션의 입력조건으로 활용되는 다양한 가연물의 질량감소율, 열발생률 및 총발열량은 대표적인 Bench scale 장치인 콘 칼로리미터를 통해 측정된다. 그러나 이들 주요 물리량이 단위 면적당의 값으로 활용됨을 고려할 때, 콘 히터를 통해 시편 표면에 입사되는 복사 열유속의 균일성은 측정결과와 타당성 측면에서 매우 중요하다. 이에 본 연구에서는 ISO 5660에 근거한 콘 칼로리미터에 적용되는 콘 히터를 대상으로 시편 표면의 위치에서 복사 열유속의 균일성이 평가되었다.

ISO 5660-1에 근거한 NCHs의 경우 시편 중앙에서 가장 높은 복사 열유속을 갖으며, 반경방향의 길이가 증가됨에 따라 열유속의 균일성은 감소됨을 확인하였다. 구체적으로 ISO 5660에서 요구되며 초기장치 제작 과정에서 확인된 5 cm × 5 cm 영역에서의 ± 2% 이내의 균일성은 충족되지만, 시편의 모서리에 해당되는 위치에서 약 13%의 큰 편차를 갖는다. 공간에 대한 복사 열유속의 분포는 중앙을 기준으로 반경방향의 거리에 대한 결과를 통해 명확히 확인되었다. 콘 히터의 사용 기간에 따라 전열선의 변형, 방사율 및 전열성능의 변화가 발생할 수 있음에도, 고려된 3개의 NCHs에 대한 복사 열유속의 균일성은 비교적 유사하게 확인되었다. 또한 낮은 입사 열유속의 조건에서 복사 열유속의 균일성이 더욱 감소되었다.

가연성이 낮은 가연물의 열발생률을 측정하기 위해 제안된 ISO/TC 5660-4에 근거한 LCH는 5 cm × 5 cm 영역에서의 ± 2% 이내의 균일성을 충족하며, 동시에 시편의 전체 표면적(10 cm × 10 cm 영역)에 비교적 우수한 복사 열유속의 균일성이 제공됨이 확인되었다. 정량적으로 10 kW/m²에서는 약 5%의 공간 평균 편차를 갖지만, 비교적 높은 열유속 조건에서는 2% 이내의 균일성을 보이고 있다. 따라서 LCH가 NCH를 대체하여 사용된다면 단위 면적당으로 표현되는 주요 측정값(질량감소율, 열발생률 및 총발열량)의 보다 정확한 활용에 유용할 것으로 기대된다. 시편에 입사되는 복사 열유속의 균일성에 따른 측정값들의 정량적 차이는 향후 연구에서 수행될 예정이다.

References

1. 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, Geneva, Switzerland (2015).
2. ISO/TC 5660-4:2016, "Reaction-To-Fire Tests - Heat Release, Smoke Production and Mass Loss Rate - Part 4: Measurement of Low Levels of Heat Release", International Standards Organization, Geneva, Switzerland (2015).
3. M. J. Scudamore, P. J. Briggs and F. H. Prager, "Cone Calorimetry - A Review of Tests Carried out on Plastics for the Association of Plastic Manufactures in Europe", Fire and Materials, Vol. 15, No. 2, pp. 65-84 (1991).
4. B. Scharrel and T. R. Hull, "Development of Fire-Retarded Materials - Interpretation of Cone Calorimeter Data", Fire and Materials, Vol. 31, No. 5, pp. 65-84 (2007).
5. B. Scharrel, M. Bartholmai and U. Knoll, "Some Comments on the Use of Cone Calorimeter Data", Polymer Degradation and Stability, Vol. 88, No. 3, pp. 540-547 (2005).
6. B. T. Rhodes and J. G. Quintiere, "Burning Rate and Flame Heat Flux for PMMA in a Cone Calorimeter", Fire Safety Journal, Vol. 26, pp. 221-240 (1996).
7. G. T. Linteris, "Numerical Simulations of Polymer Pyrolysis Rate: Effect of Property Variations", Fire and Materials, Vol. 35, pp. 463-480 (2011).
8. M. T. Wilson, B. Z. Dlugogorski and E. M. Kennedy, "Uniformity of Radiant Heat Fluxes in Cone Calorimeter", Fire Safety Science-Proceedings of the Seventh International Symposium, pp. 815-827 (2003).
9. P. Boulet, G. Parent, Z. Acem, T. Rogaume, T. Fateh, J. Zaida and F. Richard, "Characterization of the Radiative Exchanges When Using a Cone Calorimeter for the Study of the Plywood Pyrolysis", Fire Safety Journal, Vol. 51, pp. 53-60 (2012).
10. Y. Lizhong, Z. Yupeng, W. Yafei, D. Jiakun, D. Zhihua and Z. Xiaodong, "Autoignition of Solid Combustibles Subjected to a Uniform Incident Heat Flux: The Effect of Distance from the Radiation Source", Combustion and Flame, Vol. 158, pp. 1015-1017 (2011).
11. FESTECo., Ltd, Webpage, <http://festi.co.kr/>, Accessed October 5 (2020).
12. S. Kang, S. Choi and J. Y. Choi, "View factor in cone calorimeter testing", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 93, pp. 217-227 (2016).