

[Research Paper]

케이블의 난연성능에 따른 복사 열유속이 연소물성에 미치는 영향

문선여 · 황철홍^{*†}

대전대학교 대학원 방재학과 대학원생, *대전대학교 소방방재학과 교수

Influence of Radiant Heat Flux on Combustion Properties of Flame Retardant Cable

Sun-Yeo Mun · Cheol-Hong Hwang^{*†}

Graduate Student, Dept. of Disaster Prevention, Daejeon University

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

(Received March 25, 2019; Revised May 19, 2019; Accepted May 20, 2019)

요 약

다층-다성분 난연성 케이블의 화재시뮬레이션에서 요구되는 연소물성이 콘 칼로리미터를 통해 측정되었다. 난연성 케이블의 주요 재질에 따른 CO 및 Soot yields 그리고 연소열이 검토되었다. 케이블의 난연성능이 우수한 TFR-8 (고난연성 PCV 및 XLPE 첨가), TFR-CVV-SB(고난연성 PCV 및 일반 PVC로 구성) 및 VCTF가 각각 대상으로 고려되었다. 주요 결과로서, 난연성케이블인 TFR-8과 TFR-CVV-SB는 입사 복사열유속이 25 kW/m²에서 50 kW/m²으로 증가됨에 따라 CO yield(y_{CO})는 각각 23% 와 16% 증가한다. 반면에 VCTF의 CO yield는 복사 열유속의 변화에 큰 영향을 받지 않는다. 마지막으로 Soot yield 및 연소열은 시스의 재질(난연성능)이 강화될수록 복사 열유속에 의한 차이가 증가됨이 확인되었다. 따라서 다양한 열유속이 공존하는 화재환경에서 난연성 케이블의 연소물성의 적용에는 상당한 주의가 요구된다.

ABSTRACT

The combustion properties required for fire simulations of multi-layer, multi-component flame retardant cables were measured using a cone calorimeter. The CO and soot yields combustion efficiencies of the flame retardant cables were investigated. TFR-8 (flame retardant PCV and XLPE added), TFR-CVV-SB (flame retardant PCV and general PVC), and VCTF, which are excellent in the flame retardancy of cables, were considered. As the main result, the CO yield (y_{CO}) of the TFR-8 and TFR-CVV-SB flame retardant cables increased by 23% and 16%, respectively, with increasing incident radiation heat flux from 25 kW/m² to 50 kW/m². On the other hand, the CO yield of VCTF was not influenced significantly by the changes in radiant heat flux. Finally, the soot yield and combustion efficiency increased as the sheath material (flame retardant performance) was strengthened. Therefore, in a fire environment where various heat fluxes coexist, attention should be paid to the top of the application of the combustion property of the flame retardant cable.

Keywords : Cone calorimeter (ISO-5660-1), Flame retardant cable, Heat flux, Combustion properties

1. 서 론

고도의 산업화와 다양한 유형의 대형화 및 복합건축물의 발달로 인하여, 모든 건축물에 사용되는 전기시설물의 케이블 화재에 대한 중요성이 높아지고 있다. 최근 4년간(2015년 1월~2018년 12월) 국내에서 발생한 화재 중 부주

의에 의한 화재를 제외하면, 약 52.3%가 전기화재로 상당한 비율을 차지하고 있다⁽¹⁾. 케이블은 과전류, 단락 및 누전에 의해 자체 발화원으로 작용하며, 케이블 트레이를 통하여 대형화재로 확산 될 수도 있다⁽²⁾. 따라서 케이블 화재 방지대책을 위한 안전설비 및 케이블 화재예측은 매우 중요하다.

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

© 2019 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

케이블 화재예측 및 안전성 평가를 위하여, 미국 원자력 규제 위원회(NRC)와 전력연구소(EPRI)를 중심으로 케이블 화재와 관련된 시나리오에 대한 화재모델링 적용 및 검증 지침서를 제시하였다^(3,4). 또한 Niu 등⁽⁵⁾은 케이블 화재시물레이션을 통하여 케이블 터널 화재의 위험성 평가 및 화재 특성을 분석하였다. 그러나 제시된 화재 시나리오 및 선행 연구자들의 화재모델링의 결과를 통해 실질적인 다양한 화재조건이 반영된 케이블 화재의 위험성을 평가는 어렵다.

케이블은 사용용도 및 구성요소에 따라 케이블 화재확산에 큰 영향을 미친다. 케이블의 난연성분을 검증하기 위한 국제적 표준기준은 다양하며 점점 강화되고 있는 추세이다⁽⁶⁻⁸⁾. 그러나 대형실험은 시간 및 비용이 많이 소요된다는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 많은 연구자들은 실험실 규모의 축소실험(Small-scale lab test)인 Cone calorimeter⁽⁹⁻¹³⁾와 최근에는 Microscale calorimeter (MCC)⁽¹⁴⁻¹⁶⁾를 통하여 케이블의 화재특성을 분석하고 있다.

케이블의 화재특성에 관한 연구결과를 살펴보면, Luche 등⁽¹⁷⁾은 ISO-5660-1 콘 칼로리미터⁽¹⁸⁾를 이용하여 복사열유속 변화에 따른 케이블의 화재특성을 분석하였다. 그러나 Polyethylene (PE) 재질로 구성된 케이블 한 종류에 대한 분석이 이루어졌다. Yang 등⁽¹⁶⁾은 케이블의 재질 및 구성이 다른 8종류의 케이블에 대한 MCC 실험을 통해 화재특성 분석이 이루어졌으며, 케이블의 성분에 따른 차이를 확인할 수 있었다. SFPE handbook⁽¹⁹⁾에는 복사열유속 50 kW/m²에서 측정된 케이블 재질에 따른 정보를 제공하고 있다. 그러나 실제화재현상은 다양한 복사열유속이 존재하며, 이에 대한 화재특성을 분석하기 위한 복사열유속에 따른 정보는 제공되지 않고 있다.

이러한 배경하에 본 연구에서는 케이블의 난연성능에 따른 복사열유속의 변화가 연소물성에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 선정된 케이블을 대상으로 ISO 5660-1 기준으로 제작되어진 콘 칼로리미터를 이용하여 실험이 수행되었다. 케이블이 시료홀더에 배열될 경우 케이블의 종류에 따라서 서로 다른 곡률을 가진다. 곡률 차이로 인하여, 콘 히터에서 방출되는 복사열유속에 노출되는 케이블 표면적의 차이가 연소물성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 케이블 시스의 형상변화를 통해 확인하였다. 또한 난연성케이블에 따른 비교를 위하여, IEEE-383⁽⁷⁾을 통과하였으며 난연성분이 우수한 내화케이블 (TFR-8), 동편조 차폐 제어용 케이블(TFR-CVV-SB)인 난연성 케이블과 추가적으로 PVC로 구성되어 열에 취약한 염화비닐 절연케이블(VCTF)가 검토되었다. 선정된 케이블의 연소물성(CO, Soot yields, 열 발생률 및 연소열)을 측정하여, 25 kW/m² 및 50 kW/m²의 복사열유속에 따른 차이를 비교·분석하였다. 또한 본 연구에서 측정된 연소물성은 케이블 화재시물레이션을 위한 DB로 제공될 수 있을 것으로 판단된다.

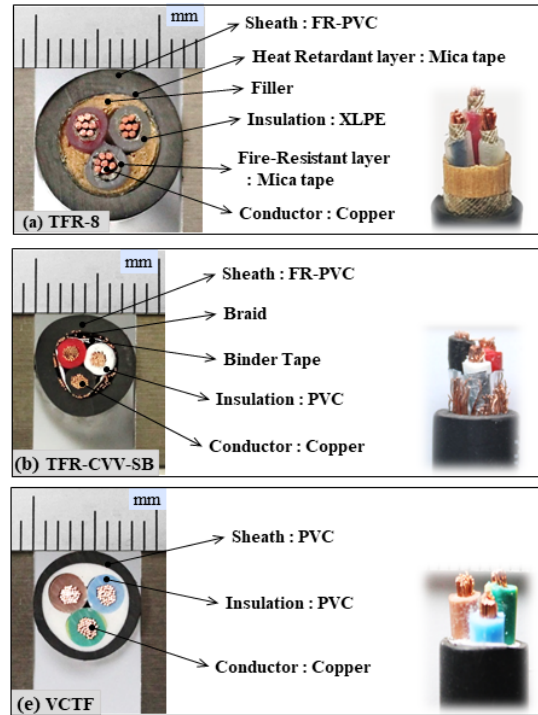


Figure 1. Cross-section image and description of multi-component flame retardant cables.

2. 실험방법 및 조건

2.1 난연성 케이블의 시편의 선정

Figure 1은 다층·다성분의 난연성 케이블의 구성 및 단면 사진을 도시한 것이다. Figures 1(a)와 (b)는 내화 케이블(TFR-8)과 동편조 차폐 제어용 케이블(TFR-CVV-SB)로 IEEE-383⁽⁷⁾ 난연성 케이블 시험을 통과하였으며, 난연성 케이블과의 비교를 위하여 Figure 1(c)에 도시된 염화비닐 절연케이블(VCTF)이 선정되었다. 소방용 내화케이블인 TFR-8은 도체(Conductor), XLPE 소재의 절연체(Insulation), 개재물(Filler), 절연테이프(Mica tape) 그리고 고난연성 PVC 재질의 시스(Sheath)로 구성되어 있다. 제어용 케이블인 TFR-CVV-SB는 도체, PVC 소재의 절연체, 테이프(Binder tape), 구리 소재의 차폐(Braid) 그리고 고난연성 PVC 재질의 시스로 구성되어 있다. 마지막으로 VCTF 케이블은 도체, PVC 소재의 절연체와 시스로 구성되어 있으며, 선정된 케이블은 모두 1.5 mm² × 3 C로 동일한 규격을 갖는다.

2.2 콘 칼로리미터 시험

난연성 케이블의 복사열유속에 따른 연소물성을 측정하기 위하여, 개방형 콘 칼로리미터를 이용하였다. Figure 2는 ISO-5660-1⁽¹⁸⁾ 표준 시험장치 기준에 근거하여 제작된 개방형 콘 칼로리미터를 도시한 것이다. 덕트의 흡입 유량은 24 L/s로 유지하였으며, 콘 히터와 시편 표면까지의 거리는 25 mm로 고정하였다. 표준시험기준⁽¹⁸⁾에 제시되어진 시편의

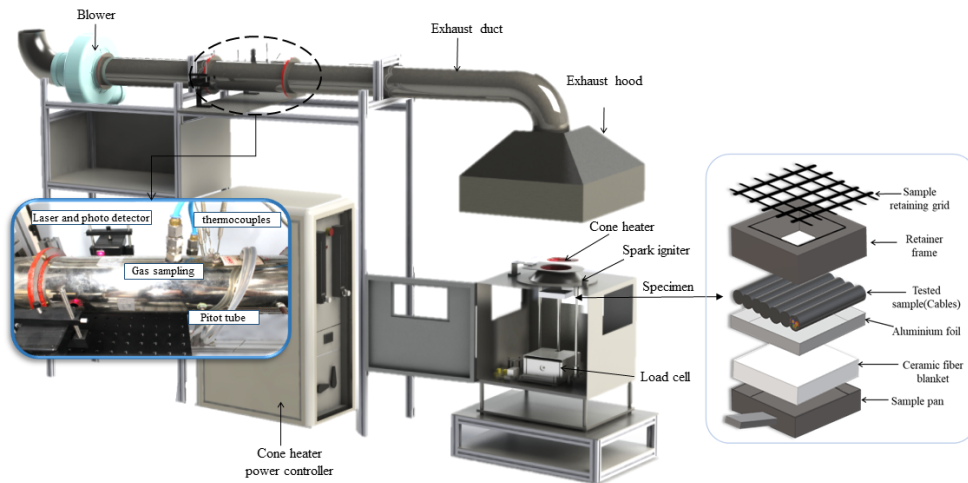


Figure 2. Schematic of open cone calorimeter based on ISO 5660-1 standard.

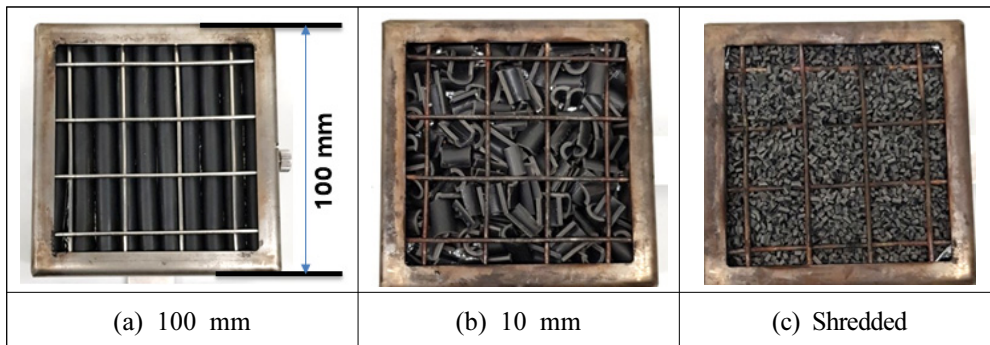


Figure 3. Photograph of shape change in cable sheath.

지속적인 연소에 필요한 복사열유속 조건에서 낮은 열 침투 상황과 플래시오버 상황⁽²⁰⁾에 해당되는 25 와 50 kW/m²의 두 조건이 적용되었다. 점화방식은 전기점화장치에 의한 스파크 점화(Spark ignition)가 적용되었다. 가연물의 질량감소율은 로드셀(Load cell)을 통해 측정되었으며, 열발생률(HRR)은 산소소모법(Oxygen consumption method)⁽²¹⁾에 의해 측정되었다. 시편의 표면은 100 mm × 100 mm의 정사각형이며, 시편의 아랫면에는 알루미늄 호일과 단열재를 이용하여 바닥으로의 열전달을 최소화하였다. 시편의 길이는 100 mm로 동일하게 적용되었으며, 케이블의 특성에 따라서 다층-다성분으로 다양하게 구성된 TFR-8, TFR-CVV-SB 및 VCTF의 두께는 각각 12 mm, 8 mm 와 9 mm이다. 실험은 총 3회 이상 반복진행 되었다.

2.3 케이블 절연체의 형상 변화

본 연구에서 검토된 TFR-8, TFR-CVV-SB 및 VCTF는 사용용도에 따라 난연성분, 구성물질 및 케이블의 직경이 서로 다르다. 케이블을 100 mm × 100 mm의 정사각형 시료홀더에 배열 할 경우 시료표면은 케이블 종류에 따라 서로

다른 곡률을 보인다. 이때, 곡률에 의한 차이로 인해 콘 히터에서 방출되는 복사열에 노출되는 실제 표면적에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 케이블의 시스의 형상 변화를 통하여 케이블이 실제 복사열에 노출된 표면적의 차이에 따른 화재특성(열발생률, 질량감소율, 연소열, CO 및 Soot yield)을 확인하였다. Figure 3은 케이블의 도체, 절연체 및 테이프를 제외한 PVC 시스의 외형변화를 통해 시료홀더에 배열한 사진이 제시되었다. Figures 3(a)~(c)를 살펴보면, 시스의 외형변화를 각 100 mm, 10 mm 및 잘게 조각(Shredded)내어 콘히터에서 방출되는 복사열에 노출되는 표면적에 변화를 주었다. 각 시료의 질량은 87 g으로 동일하며, 복사열유속은 50 kW/m²을 적용하였다.

2.4 화재특성 변수 산출

케이블의 점화 이후, 로드셀을 통하여 측정된 시간변화(Δt)에 따른 가연물의 질량 변화(Δm_f), 그리고 배기 후드에서 실시간으로 측정된, 온도(혼합기의 밀도), 체적 및 질량유량 및 연소생성물의 농도 등을 통해 발열량이 산출되었다⁽²¹⁾. 이때 발열량은 식(1)에서와 같이 정의된다.

$$\dot{q} = \Delta H_{c,o_2} \frac{\Phi}{1 + \Phi(\alpha - 1)} \dot{m}_e \frac{MW_{o_2}}{MW_{air}} (1 - X_{H_2O}^0 - X_{CO_2}^0) X_{O_2}^{A_0} \quad (1)$$

여기서, $\Delta H_{c,o_2}$ 는 산소의 단위질량당 방출 열에너지(kJ/kg), Φ 는 산소소모지수, \dot{m}_e 는 배기가스의 질량유량(kg/s), α 는 연소팽창계수를 의미하며, 1.105가 적용되었다. X_i 는 i 화학종의 체적분율을 의미하며, 상첨자 0은 대기중의 기준값을 의미한다. MW_i 는 i 화학종의 분자량을(g/mol) 의미한다.

CO의 체적분율(X_{CO})을 통해 CO yield가 산출되었으며 식(2)에서와 같이 t_1 에서 t_2 까지의 시간구간 동안 평균된 CO의 질량유량($\overline{\dot{m}_{CO}}$)과 가연물의 질량 감소율($\overline{\dot{m}_f}$)의 비로 표현되었다. $\overline{\dot{m}_f}$ 는 시간구간 동안의 질량 변화(Δm_f)를 통해 식(3)과 같이 산출되었으며, $\overline{\dot{m}_{CO}}$ 는 식(4)로 표현되었다.

$$y_{CO} = \overline{\dot{m}_{CO}} / \overline{\dot{m}_f} \quad (2)$$

$$\overline{\dot{m}_f} = \Delta m_f / (t_2 - t_1) \quad (3)$$

$$\overline{\dot{m}_{CO}} = \int_{t_1}^{t_2} Y_{CO}(t) \dot{m}_e(t) dt / (t_2 - t_1) \quad (4)$$

여기서, Y_{CO} 는 CO의 질량분율을 의미하며, $X_{CO} MW_{CO} / MW_{air}$ 에 의해 환산되었다. \dot{m}_e 는 배기 덕트 내의 질량유량을 의미하며, $\rho_e A_D V_D$ 를 통해 계산되었다. 참고로 MW , A_D 및 V_D 는 각각 분자량, 배기 덕트의 면적 및 평균 유속을 나타낸다.

Soot yield는 Bouguer's 법칙에 의해 광소멸 상수(Light extinction coefficient, k)는 광경로 거리(L)과 투과율에 대하여 식(5)와 같이 정의된다⁽²²⁾.

$$k(t) = -\ln(I(t)/I_0) / L \quad (5)$$

여기서 I_0 와 I 는 점화 전과 후의 광 수광부의 신호 강도(Voltage)를 의미한다. 이때 연기의 질량농도(m_{soot})는 식(6)과 같다. k_m 은 질량비 광소멸계수(Mass specific extinction coefficient)로서 탄화수소계열 경우 8.4의 값을 갖는다고 알려져 있다⁽²³⁾. 이후 연기의 질량유량(\dot{m}_{soot})은 식(7)과 같이

덕트 내부의 체적유량(\dot{V}_e)의 곱으로 표현된다. 결과적으로 Soot yield (y_{soot})는 식(8)에 의해 산출되었다.

$$m_{soot}(t) = k(t) / k_m \quad (6)$$

$$\dot{m}_{soot}(t) = m_{soot}(t) \dot{V}_e(t) \quad (7)$$

$$y_{soot} = \overline{\dot{m}_{soot}} / \overline{\dot{m}_f} = \left(\int_{t_1}^{t_2} \dot{m}_{soot}(t) dt / (t_2 - t_1) \right) / \overline{\dot{m}_f} \quad (8)$$

연소열은 측정된 발열량(\dot{q})과 연료의 시간변화에 따른 질량변화(Δm_f)로 표현되며, 최종적으로 식(9)를 통하여 산출되었다.

$$\Delta H_{c,eff} = \frac{\dot{q}}{\dot{m}_f} \quad (9)$$

3. 결과 및 검토

Figure 4는 동일한 질량의 PVC 시스의외형에 변화를 준 시료를 대상으로 50 kW/m²의 복사열 조건에서, 시간에 따른 열발생률과 질량감소율을 도시한 것이다. Figure 4(a)의 시스 외형변화에 대한 시간에 따른 열발생률을 살펴보면, 복사열에 가장 넓은 면적으로 노출되어있는 Shredded 모양의 시스가 먼저 점화되었다. 최대 열발생률은 2.39 kW에 도달하였으며, 다른 조건들에 비해 가장 높은 열발생률이 측정되었다. 시스의 길이가 100 mm와 10 mm로 변화된 조건의 점화시간 및 화재지속시간은 유사한 것을 확인 할 수 있다. Figures 4(b)는 평균열발생률(meanHRR), 최대열발생률(maxHRR) 및 총 열발생률(THR)을 도시하였다. Figures 4(c)는 평균질량감소율(meanMLR), 최대질량감소율(maxMLR) 및 총 질량감소율(TML)을 도시한 것이다. 그 결과 Figures 4(b), 4(c)에 도시된 열발생률과 질량감소율은 유사한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. Shredded의 조건에서 가장 높은 열발생률이 측정되었으나, 화재지속시간이 가장 짧게 나타났다. 따라서 시간에 따른 열발생률의 면적적분을 통해 산출된

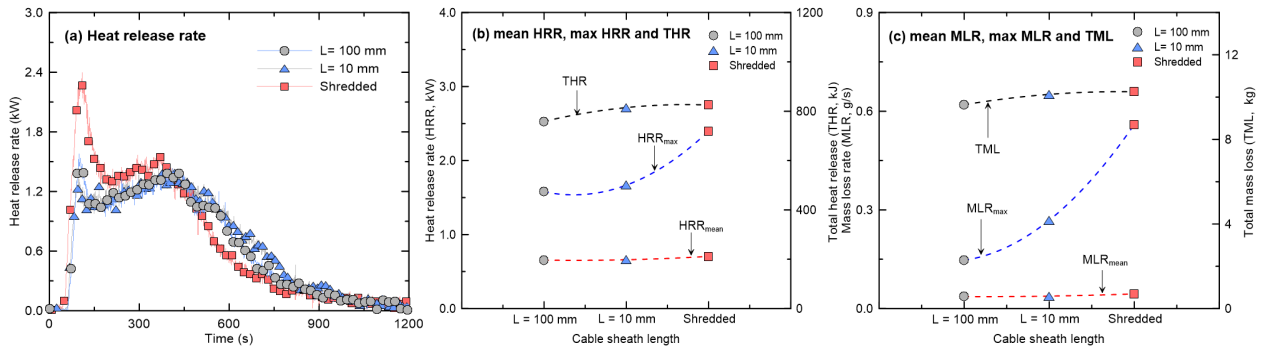


Figure 4. Comparisons of heat release rate and mass loss rates for the cable sheath shape.

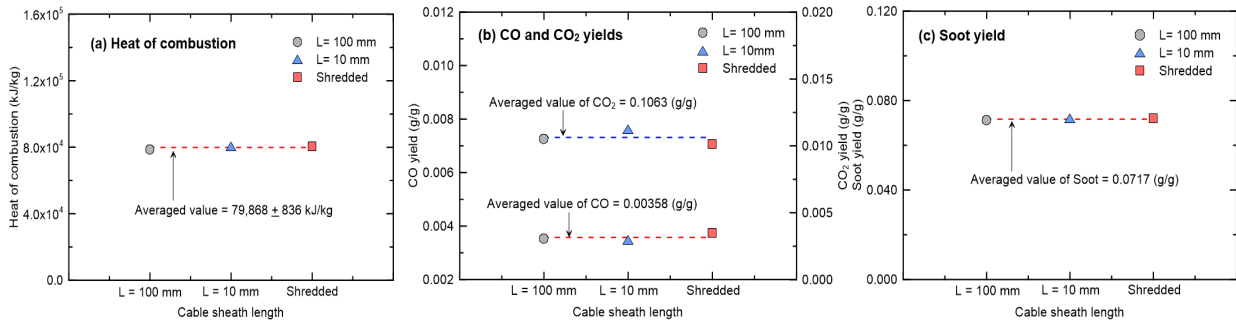


Figure 5. Comparisons of heat of combustion, CO, CO₂ and Soot yields for the cable sheath shape.

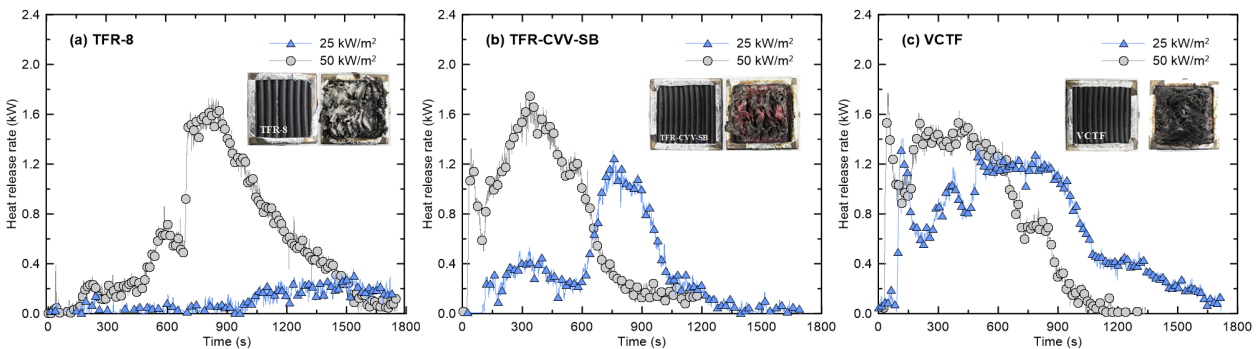


Figure 6. Comparisons of heat release rate for TFR-8, TFR-CVV-SB and VCTF at 25 and 50 kW/m².

평균값 및 총 열량을 살펴보면, 케이블 시스의 형상변화에 따라 열발생률은 큰 차이가 없는 것을 확인 할 수 있다.

Figure 5는 Figure 4와 동일한 조건에서 측정되어진 연소열, CO, CO₂ 및 Soot yields를 비교·도시 한 것이다. Figures 5(a)~(c)를 살펴보면, 점화 이후에 측정된 연소열, CO, CO₂ 및 Soot yields는 모든 조건에서 유사한 값이 나타났다. 결과적으로 동일한 재질 및 질량이 고려된 케이블 시스의 길이 변화 즉 형상의 변화로 인하여, 본 실험에 적용된 높은 열유속 조건(50 kW/m²)에 노출되는 실제 표면적의 차이로 초기 점화시간 및 화재 지속시간에 다소 차이가 발생된 것을 확인 할 수 있다. 그러나 점화이후에 측정되는 열발생률, 연소열 및 화학종의 생성물에는 큰 영향을 미치지 않음을 확인 할 수 있다.

Figure 6은 본 연구에 선정된 난연성 케이블에 대하여, 시간 변화에 따른 열발생률을 도시한 것이다. Figure 6(a)는 내화케이블(TFR-8)의 열발생률을 도시한 것이다. 시스는 고난연 PVC, 절연체는 XLPE의 재질로 구성되어있는 TFR-8 케이블은 복사열유속 25 kW/m²의 조건에서 열분해 반응은 이루어 졌으나, 점화는 발생되지 않았다. 전기불꽃장치를 이용하여 복사열유속의 공급과 동시에 스파크를 적용함에도 불구하고, TFR-8케이블은 높은 열유속 조건인 50 kW/m²가 공급된 시간(t = 0 s) 이후로 약 600 s에 점화가 발생하는 것을 확인할 수 있다. Figure 6(b)의 제어용 케이블의 복사열유속에 따른 최대 열발생률을 살펴보면, 낮은 열유속조건(25 kW/m²)과 높은 열유속조건(50 kW/m²)에서 최

대 열발생률에 도달시간은 각각 754 s 와 337 s로 측정되었다. 즉, 큰 히터에서 방출되는 복사열 유속의 증가에 함에 따라 최대 열발생률의 도달시간이 단축되는 것으로 확인되었다. Figure 6(b)와 Figure 6(c)의 25 kW/m² 조건에서 난연성 제어케이블(TFR-CVV-SB)과 염화비닐 절연케이블(VCTF)의 점화시간은 각각 109 s와 90 s로 큰 차이를 보이지 않지만, 최대 열발생률에 도달하는 시간은 각각 754 s 와 120 s로 큰 차이를 나타낸다. 50 kW/m²에서 난연성 케이블의 최대 열발생률은 각각 1.74 kw 와 1.77 kw로 유사하게 측정되었다. 그러나 TFR-CVV-SB 케이블의 경우 순간으로 높은 열발생률이 측정되었으며, VCTF 케이블은 200 s~600 s 동안 높은 열발생률이 유지되는 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 케이블을 구성하는 물질 및 두께는 복사열유속에 따른 케이블의 점화시간, 최대 열발생률의 도달시간 및 화재지속시간에 상당한 영향을 미치게 된다.

Figure 7은 콘 칼로미터에서 가해지는 25와 50 kW/m²의 복사열유속에 따른 케이블 종류별 CO(y_{CO}) 및 Soot yield (y_{soot})를 비교·도시한 것이다. 총 3회 이상 반복된 실험을 통하여 측정된, y_{CO} 및 y_{soot} 의 평균값은 그림에 삽입되었다. Figure 7(a)에 난연성케이블인 TFR-8과 TFR-CVV-SB은 복사열유속이 증가함에 따라 y_{CO} 가 각각 23%, 16% 증가되었다. VCTF 케이블은 복사열유속에 따라 정량적으로 y_{CO} 의 큰 차이가 발생되지 않는다. 수직 에러바를 통해 제시되어진 표준편차를 살펴보면, TFR-8의 낮은 복사열유속(25 kW/m²) 조건에서의 편차가 비교적 크게 측정되었다. 이는 반복실험

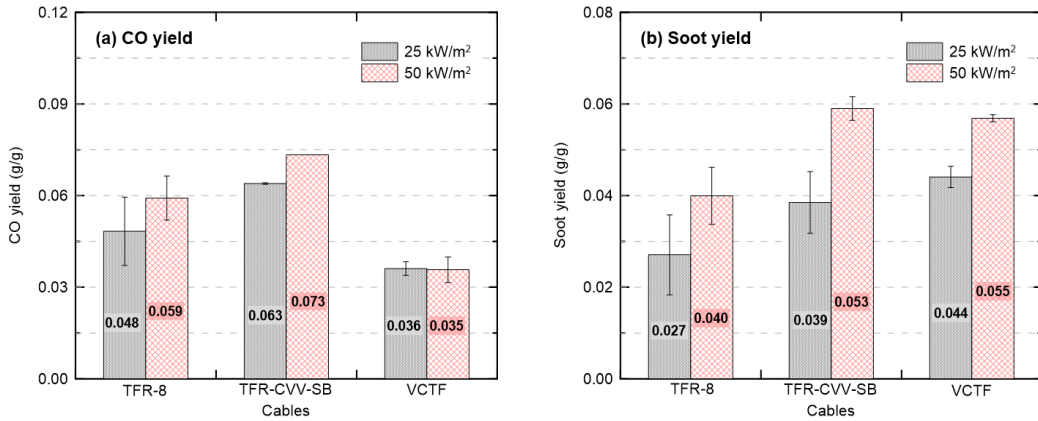


Figure 7. Comparisons of CO and Soot yields for TFR-8, TFR-CVV-SB and VCTF at 25 and 50 kW/m².

을 통하여 측정되었으며, 선정된 케이블 중 다양한 구조로 구성되어있으며, 직경이 가장 큰 TFR-8 케이블의 열분해 및 유연 연소가 간헐적으로 발생되어 나타난 것으로 판단된다. y_{soot} 의 생성특성에 요구되는 고온과 체류시간을 고려할 경우, Figure 7(b)에서 높은 복사열 유속이 낮은 복사열유속에 비해 y_{soot} 가 높게 나타났다. TFR-8과 TFR-CVV-SB의 y_{soot} 는 25 kW/m²의 조건보다 50 kW/m²에서 각각 48%와 36% 더 높게 측정되었다. 또한 VCTF의 y_{soot} 는 25% 높게 나타났다. 복사열유속의 증가에 따른 y_{soot} 의 증가율은 TFR-8 > TFR-CVV-SB > VCTF 순서로 나타났으며, 일반 PVC 재질의 VCTF 보다 난연성 케이블이 복사열에 따라 더 많은 차이를 보이고 있다. 케이블의 종류에 따른 y_{soot} 를 살펴보면, 일반 PVC 재질로 구성되어있는 VCTF 케이블은 고난연 PVC 및 XLPE의 난연성 시스로 구성된 TFR-CVV-SB와 TFR-8 케이블에 비해 높은 y_{soot} 를 나타내고 있다. 결론적으로 난연성케이블의 CO yield 및 Soot yield는 표면방사율에 의해 큰 영향을 받는다.

케이블의 표면에 방사되는 복사열유속에 따라 연소되는 양을 비교하기 위하여 Figure 8에 나타내었다. 연소열은 상대적으로 난연성 성분이 낮은 VCTF, TFR-CVV-SB 및 TFR-8 순서로 높게 나타났다. 먼저 난연성분이 가장 높은 내화케이블(TFR-8)의 복사유속에 따른 연소열의 차이를 살펴보면, 높은 복사열유속 (50 kW/m²)에서의 연소열은 점화가 이루어지지 않은 낮은 복사열유속(25 kW/m²)에 비해 약 4.2배 높게 나타났다. 제어용 케이블(TFR-CVV-SB)과 염화비닐 절연케이블(VCTF)의 열유속에 따른 연소열 차이는 각각 1.3배 및 1.0 배로 높은 복사열유속에서의 연소열이 더 높은 것을 확인할 수 있다. VCTF 일반 케이블의 경우 방사되는 복사열유속에 따른 연소열의 변화는 크지 않으나, 난연성케이블의 경우 연소열의 변화가 크게 나타났다. 결과적으로 케이블의 두께 및 난연성분은 최대 열발생률에 따라 화재시물레이션에서 연소반응에 영향을 미치는 주요인자인 y_{CO} , y_{soot} 및 연소열 등에 상당한 영향을 미치는 것으로 판단된다.

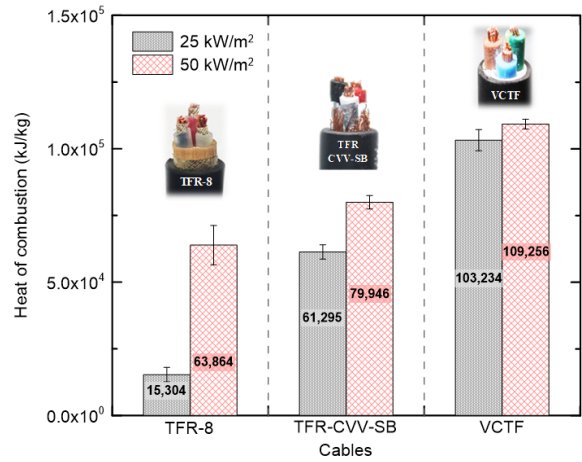


Figure 8. Comparisons of heat of combustion for TFR-8, TFR-CVV-SB and VCTF at 25 and 50 kW/m².

4. 결 론

다층·다성분 난연성 케이블의 화재시물레이션에서 요구되는 연소물성이 복사열유속에 따른 차이를 확인하기 위하여, 콘 칼로리미터를 이용하여 실험이 수행되었다. 난연성 케이블인 TFR-8(내화) 및 TFR-CVV-SB(제어용난연성)케이블과 난연성케이블과의 비교를 위하여 VCTV(일반비닐절연)케이블이 검토되었다. 주요 결과는 다음과 같다.

케이블 시스의 형상이 100 mm, 10 mm 및 Shredded로 실제 복사열에 노출되는 표면적의 차이는 초기 점화시간, 화재지속시간 및 최대 열발생률에 차이가 발생되었다. 그러나 점화가 이루어진 다음에 측정되는 연소물성에 큰 영향을 주지 않음을 확인하였다.

낮은 복사열유속 조건(25 kW/m²)에서 점화가 이루어지지 않은 내화케이블을 제외하고, 복사열유속에 따라 TFR-CVV-SB 및 VCTF의 최대 열발생률은 유사하게 나타났다. 그러나 난연성분에 따라 점화발생시간 및 화재지속시간에 영향을 미치는 것이 확인되었다.

난연성케이블인 TFR-8과 TFR-CVV-SB는 복사열유속이 증가함에 따라 y_{CO} 가 각 23%, 16% 증가되었으며, VCTF 케이블은 복사열유속에 따라 정량적으로 큰 변화가 없다. 복사열유속의 증가에 따른 y_{soot} 의 증가율은 TFR-8 > TFR-CVV-SB > VCTF 순서로 나타났다. 또한 TFR-8, TFR-CVV-SB 및 VCTF의 연소열은 복사열유속의 증가함에 따라 각각 4.2배, 1.3배 및 1.0배로 연소열이 증가되었다. 위 결과로부터, 복사열유속의 변화에 따른 차이는 난연성케이블의 CO 및 Soot yield와 연소열에 상당한 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 이러한 결과를 고려할 때, 다양한 열유속이 공존하는 화재환경에서는 난연성 케이블의 연소물성의 적용에는 상당한 주의가 요구된다.

후 기

본 연구는 2018년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2018M2A8A4013721).

References

1. Ministry of Public Safety and Security, "National Fire Information Center E-Fire Statistics" (2019).
2. A. C. Fernandez-Pello, H. K. Hasegawa, K. Staggs, A. E. Lipska-Quinn and N. J. Alvares, "A Study of the Fire Performance of Electrical Cables", Proceedings of the International Symposium, International Association for Fire Safety Science, pp. 237-247 (2006).
3. NRC and EPRI, "Nuclear Power Plant Fire Modeling Analysis Guidelines", NUREG-1934 and EPRI 1023259, Final Report (2012).
4. NRC and EPRI, "Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Application", NUREG-1824 and EPRI 1011999, Final Report (2007).
5. Y. Niu and W. Li, "Simulation Study on Value of Cable Fire in the Cable Tunnel", Journal of Procedia Engineering, Vol. 43, pp. 569-573 (2012).
6. IEEE Power Engineering Society, "IEEE Standard for Qualifying Class 1E Electric Cables and Field Splices for Nuclear Power Generating stations", IEEE Std 383 (1974).
7. IEEE Power Engineering Society, "IEEE Standard for Qualifying Class 1E Electric Cables and Field Splices for Nuclear Power Generating stations", IEEE Std 383 (2003).
8. IEEE Power Engineering Society, "Standard for Flame Testing of Cables for Use in Cable Tray in Industrial and Commercial Occupancies", IEEE Std 1202 (1991).
9. E. Braun, J. R. Shields and R. H. Harris, "Flammability Characteristics of Electrical Cables Using the Cone Calorimeter", NIST Rep. NISTIR 88 (1989).
10. M. A. Barnes, P. J. Briggs, M. M. Hirschler, A. F. Matheson and T. J. O'Neill, "A Comparative Study of the Fire Performance of Halogenated and Non-halogenated Materials for Cable Applications. Part I Tests on Materials and Insulated Wires", Journal of Fire and Materials, Vol. 20, pp. 1-16 (1996).
11. M. A. Barnes, P. J. Briggs, M. M. Hirschler, A. F. Matheson and T. J. O'Neill, "A Comparative Study of the Fire Performance of Halogenated and Non-halogenated Materials for Cable Applications. Part II Tests on Cable", Journal of Fire and Materials, Vol. 20, pp. 17-37 (1996).
12. A. Matala and S. Hostikka, "Probabilistic Simulation of Cable Performance and Water Based Protection in Cable Tunnel Fires", Journal of Nuclear Engineering and Design, Vol. 241, pp. 5263-5274 (2011).
13. R. Meinier, R. Sonnier, P. Zavaleta, S. Suard and L. Ferry, "Fire Behavior of Halogen-free Flame Retardant Electrical Cables with the Cone Calorimeter", Journal of Hazard Materials, Vol. 342, pp. 306-316 (2018).
14. R. Sonnier, A. Viretto, A. Taguet and J.-M. Lopez-Cuesta, "Influence of the Morphology on the Fire Behavior of a Polycarbonate/poly(butylene terephthalate) Blend", Journal of Applied Polymer Science, Vol. 125, pp. 3148-3158 (2012).
15. Q. Xie, H. Zhang and L. Tong, "Experimental Study on the Fire Protection Properties of PVC Sheath for Old and New Cables", Journal of Hazard Materials, Vol. 179, pp. 373-381 (2010).
16. H. Yang, Q. Fu, X. Cheng, R. K. K. Yue and H. Zhang, "Investigation of the Flammability of Different Cables using Pyrolysis Combustion Flow Calorimeter", Journal of Procedia Engineering, Vol. 62, pp. 778-785 (2013).
17. J. Luche, E. Mathis, T. Rogaume, F. Richard and E. Guillaume, "High-density Polyethylene Thermal Degradation and Gaseous Compound Evolution in a Cone Calorimeter", Journal of Fire Safety, Vol. 54, pp. 24-35 (2012).
18. ISO 5660-1, "Rate of Heat Release of Building Products (Cone Calorimeter)", International Standards Organization, Geneva, Switzerland (1992).
19. P. J. DiNunno, D. Drysdale, C. L. Beyler, W. D. Walton, L. P. Richard, J. R. Hall and J. M. Watts, "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (Third Edition)", National Fire Protection Association, Society of Fire Protection Engineers (2002).
20. V. Babrauskas, "Development of the Cone Calorimeter. A bench-scale Heat Release Rate Apparatus based on Oxygen Consumption", Journal of Fire and Materials, Vol. 8, pp. 81-95 (1984).

21. R. A. Bryant, T. J. Ohlemiller, E. L. Johnsson, A. Hamins, B. S. Grove, W. F. Guthrie, A. Maranghides and G. W. Mulholland, "The NIST 3MW Quantitative Heat Release Rate Facility-Description and Procedure", NISTIR-7052, (2004).
22. K. K-Höinghaus and J. B. Jeffries, "Applied Combustion Diagnostics", Combustion: An International Series, Taylor & Francis, New York (2002).
23. G. W. Mulholland, "Smoke Production and Properties", SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd Ed., Section 2, Chapter 13, NFPA, US (2002).