

# 헵탄의 화원 직경 변화를 고려한 대형콘칼로리미터의 발열량 측정 결과 분석

유우준<sup>\*,\*\*\*</sup> · 남동군<sup>\*</sup> · 염문천<sup>\*</sup> · 김성찬<sup>\*\*</sup> · 유홍선<sup>\*\*\*†</sup>

<sup>\*</sup>한국소방산업기술원, <sup>\*\*</sup>경일대학교 대학원, <sup>\*\*\*</sup>중앙대학교 대학원

## Analysis of Heat Release Rate with Various Diameter of Heptane Pool Fire Using Large Scale Cone Calorimeter

Woo Jun You<sup>\*,\*\*\*</sup> · Dong-Gun Nam<sup>\*</sup> · Moon Cheon Youm<sup>\*</sup> ·  
Sung-Chan Kim<sup>\*\*</sup> · Hong-Sun Ryou<sup>\*\*\*†</sup>

<sup>\*</sup>Korea Fire Institute of Industrial & Technology

<sup>\*\*</sup>Dept. of Fire Safety Kyungil University

<sup>\*\*\*</sup>Dept. of Mechanical Engineering Chung-Ang University

(Received May 8, 2014; Revised August 22, 2014; Accepted October 17, 2014)

### 요 약

본 연구에서는 대형 콘 칼로리미터(large scale cone calorimeter, LSC)를 사용하여 헵탄 풀 화재(pool fire) 실험에서 화원의 직경 변화에 따른 발열량(HRR) 측정 결과를 정량적으로 분석하였다. 발열량에 중요한 영향을 미치는 연소율(burning rate)은 A. Hamins의 연구 자료에서 제시한 모델링 곡선과 비교하여 정확성을 검증하였으며, 산소 소모법에 의한 연소효율(combustion efficiency)은 이론발열량에 비해서 91% 정도로 J. Gore이 제시한 헵탄의 연소효율 92%와 유사한 것을 확인하였다. 엔탈피소모법에 의한 열손실은 전체 발열량의 54% 정도로 측정부에서 대류 발열량으로 측정되었으며, 본 연구 결과는 화재실험에서 발열량 측정값의 신뢰성 분석(reliability analysis)을 위한 기초 연구 자료로 활용하는데 유용한 정보가 될 것으로 사료된다.

### ABSTRACT

The present study has been conducted to analyse the effects of various pool diameters on the measurement of heat release rate (HRR) of heptane fire using large scale cone calorimeter (LSC). The burning rate which is the major parameter for HRR compared with the previous model suggested by A. Hamins. The combustion efficiency for heptane by oxygen consumption method is about 91%, which is almost same with the previous results of 92% suggested by J. Gore. The convective HRR by enthalpy consumption method was 54% lower than HRR by oxygen consumption method. This results are practical use for establishing the reliability of heat release rate for fire experiment.

**Keywords :** Large scale cone calorimeter, Heat release rate, Oxygen consumption method, Convective heat transfer, Combustion efficiency, Reliability analysis

## 1. 서 론

대형 콘 칼로리미터(large scale cone calorimeter, LSC)는 실규모 화재로부터 방출되는 발열량을 측정하고 화재 현상을 실험적으로 분석하기 위해서 구축된 장비이다<sup>(1-4)</sup>. 발열량은 화재 규모에 따라서 보통 100~10<sup>8</sup> W 이상까지 매우 폭넓은 크기를 갖지만<sup>(1-6)</sup>, 화재 강도가 증가할수록 가연물과 산화제가 혼합되는 화재 특성이 환경 인자나 주변 요소에 따라서 달라질 수 있기 때문에 발열량을 정량화하는 것은 매우 어려운 과정으로 인식되고 있다<sup>(1-3)</sup>. 그럼

에도 불구하고 국외에서는 보통 5 MW 이상의 열량을 측정할 수 있는 LSC를 25년 전부터 개발하여 왔으며<sup>(4)</sup>, FDS, CFAST 등과 같은 해석 모델의 결과를 검증하는 등 LSC의 활용성은 앞으로 더욱 증가할 것으로 판단된다.

이러한 실규모급 화재에서 발열량을 산출하는 방법은 가연물의 질량 감소율을 이용한 질량 소모법(mass loss rate)이외에 엔탈피 상승법(sensible enthalpy rise method) 그리고 산소 소모법(oxygen consumption method) 등이 있다<sup>(2-8)</sup>. 이 중에서 질량 소모법은 단일 가연물에 대해서 비교적 손쉽게 발열량을 평가할 수 있지만, 복합 물성인

<sup>†</sup>Corresponding Author, E-Mail: cfdmec@cau.ac.kr  
TEL: +82-2-820-5280, FAX: +82-2-813-3669

ISSN: 1738-7167  
DOI: <http://dx.doi.org/10.7731/KIFSE.2014.28.5.001>

가연물의 발열량을 정량화하는데 한계가 있다. 엔탈피 상승법은 시스템의 규모가 증가할수록 열손실로 인한 측정 오차가 발생하기 때문에 열손실(heat loss)에 대한 보정이 있어야만 화재발열량의 평가방법으로 적용될 수 있다<sup>(2,3)</sup>. 현재, LSC에서 사용하고 있는 산소 소모법은 실험규모 크기의 개방형 화재실험에 적합하고 연소생성물의 화학적 조성에 근거해서 발열량을 산출하므로 가연물의 종류에 제한을 받지 않는 장점을 갖고 있다<sup>(2)</sup>. 하지만, 배기 덕트로 흡입하는 질량유량, 온도, 산소소모계수 등을 정확하게 측정해야만 발열량 산출 값의 신뢰성을 확보할 수 있으므로 장비가 구축된 이후 우선적으로 안정성 작업이 선행되어야 한다. Bryant<sup>(9,10)</sup> 등은 산소 소모법에 의한 발열량 산출 관계식의 유도과정과 계측장비 구성에 관한 내용을 상세히 기술하여 NIST의 3 MW급 콘 칼로리미터에 대해서 신뢰성 분석에 관한 연구를 수행하였으며, 그 결과 측정불확도가 11.5% 정도로 평가한 바 있다. 김성찬 등은 NIST의 1 MW 콘칼로리미터의 신뢰성 향상을 위해서 배기 덕트의 형태에 따른 위치별 유동 특성과 발열량 산정변수를 해석하여 효율적인 설계 방법에 관한 연구를 수행하였으며, 그 결과 측정 불확도를 10% 이내로 향상시킨 연구를 수행하였다<sup>(2,3)</sup>. 특히, 규모가 큰 화재 실험은 발화원의 위치, 가연물의 종류, 산화제 유입조건과 환경 변수 등에 따라서

화재 현상을 재현하기 어렵기 때문에 발열량 측정의 안정성 확보에 관한 연구가 선행되지 않는 경우 단 한 번의 실험으로 산출 결과를 보장할 수 없게 된다. 따라서 본 연구에서는 LSC의 발열량 측정값의 신뢰성 확보를 위한 기초 연구로 헵탄 풀화재 실험에서 화원의 직경 변화를 고려한 발열량 측정 결과를 분석하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 실험장치 구성

Figure 1은 LSC의 구조로 연소실험대, 로드셀, 연소가스 포집 후드, 덕트, 집진설비, 가스포집장치, 후처리장치, 제어 및 계측장비로 구성되어 있다. 연소 생성물을 포집하는 후드 직경 10 m, 덕트 직경 1.6 m 그리고 배기 덕트의 직선길이 26 m로 배기 덕트에서 유속과 온도를 측정하기 위해서 유동의 흐름방향에 대해서 수직으로 6개 지점에 양방향 유속계(bi-directional velocity probe)와 열전대(K-type)를 설치하였다. 화재실험이 진행되면 가연물에서 발생된 연소생성물과 주변의 공기가 후드로 유입되고 수평 덕트를 통해서 집진설비로 빠져나가게 된다. 이와 동시에 별도의 흡입 펌프에 의해서 연소생성물이 후처리 장치로 유입되어 수분과 그을음(soot)이 전처리 되고 산소, 일산화

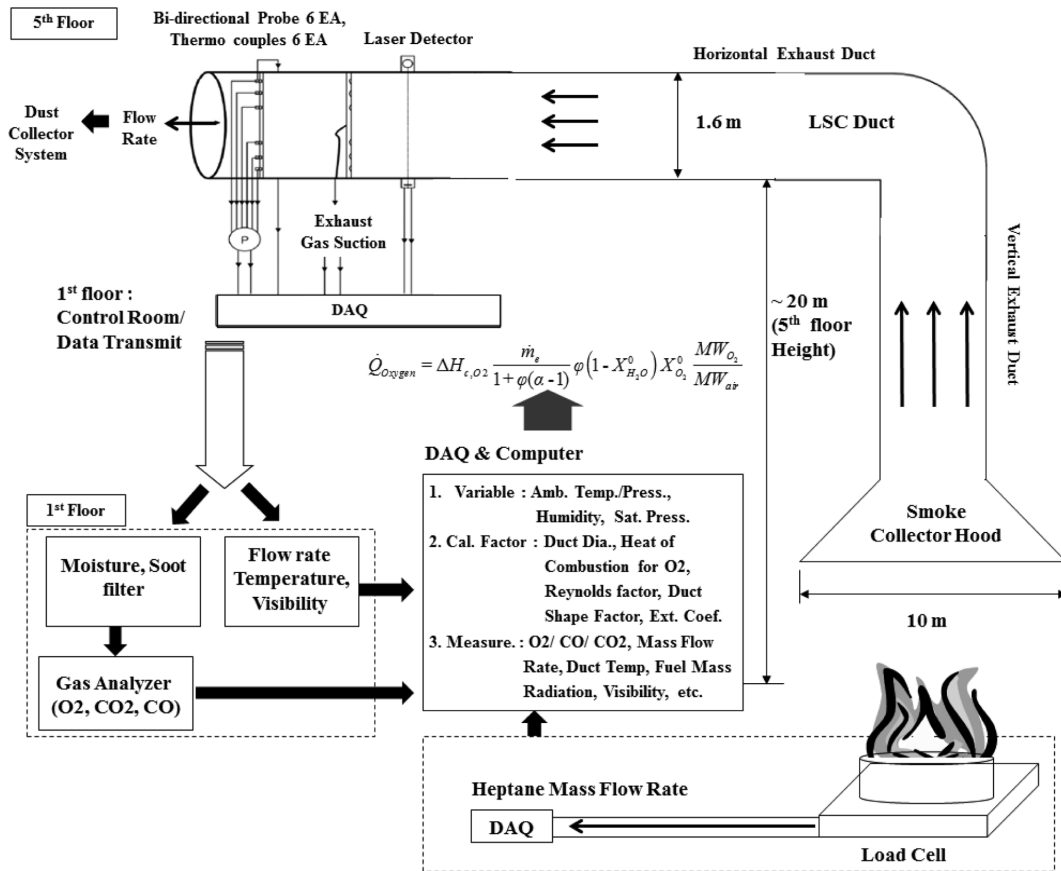


Figure 1. Schematic diagram of heptane pool fire using LSC.

**Table 1.** Specification of Experiment Apparatus

Measurement	Specification
Duct differential pressure Pressure	Output: 4~20 mA, Range: 0~1245 Pa Model: PADT-D1000 Pa
Duct Temperature	K-Type Wire, Range: -200~1,000 °C
Gas Analyzer	Output: 4~20 mA, Range: O <sub>2</sub> 20.95%, CO <sub>2</sub> 8%, CO 0.8% Model: Servomax 4100
Laser	Output: 0~8.4 mV, Range: 0~100% Model: 25-LHP-213-249
Load Cell	Output: 4~20 mA, Range: 0~3,000 kg Manufacturer: Sartorius
Heat Flux	Plate Type, Range: -200~1,000 °C Model: GTW-10-32-485A
Mass Flow	Output: 4~20 mA, Range: 0~2,500 L/min Model: DPE-S

탄소, 이산화탄소의 농도, 배기 덕트의 질량유량을 측정하도록 구성되어 있는데 배기 덕트로 빠져나가는 연소생성물의 질량유량과 전처리된 연소생성물의 농도를 측정하는 과정에서 시간 차이가 발생하게 되므로 지연시간을 고려해서 발열량을 산출해야 한다.

**2.2 산소 소모법에 의한 발열량 산출 관계**

식 (1)은 산소 소모법에 의한 발열량 산출 관계식을 나타내고 있다<sup>(1-3)</sup>.

$$\dot{Q} = \frac{\Delta H_{c,O_2} \dot{m}_e}{1 + \phi(\alpha - 1)} \phi (1 - X_{H_2O}^o) X_{O_2}^o \frac{MW_{O_2}}{MW_{air}} \quad (1)$$

여기서  $\dot{Q}$ ,  $\Delta H_c$ ,  $\dot{m}_e$ ,  $\phi$ ,  $X^o$ ,  $\alpha$ , 그리고  $MW$ 은 각각 발열량, 연소열, 배기 질량유량, 산소소모계수(oxygen depletion factor), 초기상태의 물분율, 화학적 팽창계수 그리고 분자량을 의미하며 하첨자 O<sub>2</sub>와 air는 산소 그리고 공기를 의미한다. 식 (1)에서  $\Delta H_{c,O_2} = 13.1 \text{ MJ/kg}$ 의 값을 가지며,  $\dot{m}_e$ ,  $X_{H_2O}^o$  그리고  $\phi$ 은 식 (2)~(4)와 같은 관계에 의해서 구할 수 있다<sup>(1,2)</sup>.

$$\phi = \frac{X_{O_2}^o (1 - X_{CO_2} - X_{CO}) - X_{O_2} (1 - X_{CO_2}^o)}{(1 - X_{O_2} - X_{CO_2} - X_{CO}) X_{O_2}^o} \quad (2)$$

$$X_{H_2O}^o = \frac{RH P_s(T_a)}{100 P_a} \quad (3)$$

$$\dot{m}_e = \left( \frac{P_a}{R_a T_c} \right) \frac{A}{k_c f(R_c)} \sqrt{\frac{2P_a}{P_a / (R_a T_d)}} \quad (4)$$

여기서  $f(R_c)$ ,  $k_c$ ,  $RH$ , 그리고  $P_s(T_a)$ 는 각각 레이놀즈 수 정계수, 속도구배 형상 인자, 상대습도 그리고 주위온도에 대한 포화증기압을 의미한다. 또한,  $\alpha$ 는 1.10,  $k_c$ 는 1.0 그리고  $f(R_c)$ 는 1.08을 갖게 되므로 초기 환경조건에 따라서  $RH$ 와  $P_a$ 을 구하여 식 (1)의 발열량을 산출하게 된다. Table

1에 본 연구에서 사용한 계측장비 사양을 나타내었다.

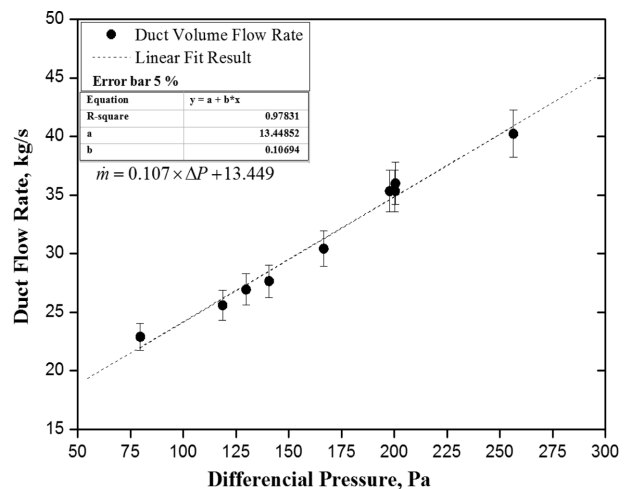
**2.3 발열량 측정 결과 분석**

Figure 2는 배기 덕트로 빠져나가는 연소생성물의 질량유량과 Bi-direction probe에 의한 차압 관계로 본 연구에서 사용한 LSC는 덕트 직경이 1.6 m이며, 차압과 질량유량의 관계는 식 (5)와 같다.

$$\dot{m}_e = 0.107 \times \Delta P_{duct} + 13.449 \quad (5)$$

여기서  $\dot{m}_e$ 와  $\Delta P_{duct}$ 는 LSC 배기 덕트에서의 질량유량과 유속에 의한 차압으로 R-square 0.978인 조건에서 5% 이내의 편차를 갖는다. 식 (5)는 덕트 내부에서의 유동간섭 등으로 레이놀즈 수 3,800 이상에서 유효하며, 본 연구에서 사용한 LSC의 덕트 내부 유동해석을 위한 유용한 자료가 될 것으로 사료된다.

헤파탄의 화원 직경 변화에 따라서 LSC의 산소 소모법을



**Figure 2.** Differential pressure VS. Duct exhaust flow rate.

사용하여 구한 발열량 산출 결과를 Zabetakis와 Burgess<sup>(12)</sup> 등이 제시한 연소 면적 변화를 고려한 발열량( $\dot{Q}_{ideal}$ ) 식 (6)과 비교하여 정확성을 분석하였다.

$$\dot{Q}_{ideal} = m'' \Delta H_c (1 - e^{-k\beta D}) A_{pool} \quad (6)$$

여기서  $m''$ ,  $\Delta H_c$ ,  $k\beta$ ,  $D$  그리고  $A_{pool}$ 는 단위면적당 점근적인 질량감소율( $0.101 \text{ kg/m}^2/\text{s}$ ), 연소열( $44.6 \text{ MJ/kg}$ ), 소멸흡수 계수( $1.1/\text{m}^2$ ), 화원의 직경과 면적을 각각 의미한다. 식 (6)은 이상적인 발열량으로 연료의 연소 특성에 따라서 연소효율(combustion efficiency)의 차이가 발생하며, J. Gore는 헵탄의 경우 연소효율이 92% 정도임을 제시한 바 있다<sup>(13,14)</sup>.

단일 가연물에 대해서 가장 간단하게 발열량을 유추할 수 있는 방법으로는 질량 감소율을 측정 후 연소열을 고려한 질량 소모법으로 식 (7)과 같다.

$$\dot{Q}_{mass} = \dot{m}_f \Delta H_{c,f} \quad (7)$$

여기서,  $\dot{Q}_{mass}$ ,  $\dot{m}_f$  그리고  $\Delta H_{c,f}$ 는 질량 소모법에 의해서 산출한 발열량, 가연물의 연소율(burning rate)과 연소열을 각각 의미한다.

Figure 3은 헵탄 풀화재 실험에서 화원의 직경 변화에 따라서 연료가 소모되는 무게를 측정하여 연소율을 구한 결과이다. 그림에서 보듯이 화원의 직경(D)이 0.87 m, 1.11 m, 1.24 m 그리고 1.44 m인 각각의 경우에 대해서 연료 표면과 산화제가 만나는 면적이 균일하므로 연소율은  $0.032 \text{ kg/s}$ ,  $0.058 \text{ kg/s}$ ,  $0.075 \text{ kg/s}$  그리고  $0.108 \text{ kg/s}$ 로 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 단위면적당 연소율에 해당하는 질량유속은(mass flux)  $0.053 \text{ kg/m}^2/\text{s}$ ,  $0.061 \text{ kg/m}^2/\text{s}$ ,  $0.063 \text{ kg/m}^2/\text{s}$  그리고  $0.066 \text{ kg/m}^2/\text{s}$ 로 나타났다. 동일한 가연물에 대해서 표면 연소 조건임에도 불구하고 질량유속의 크기가 변하는 것은 화원 근처에서의 주요 열전달 메커니즘이 화원의 크기에 따라서 달라지기 때문이다<sup>(14)</sup>.

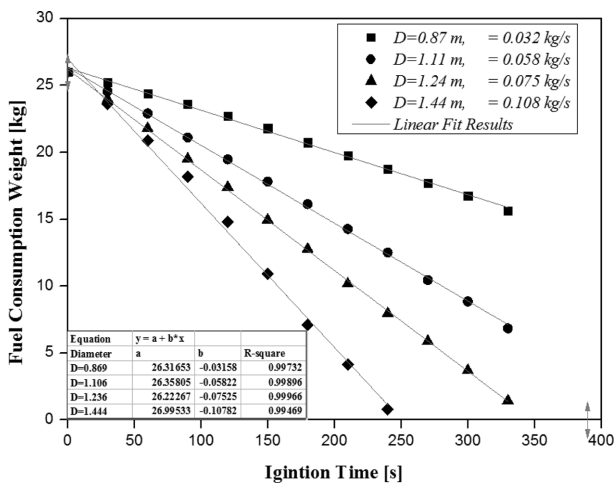


Figure 3. Comparison of burning rate with various diameter of heptane pool fire.

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} \quad (8)$$

여기서  $\dot{Q}_{cond}$ ,  $\dot{Q}_{conv}$  그리고  $\dot{Q}_{rad}$ 는 각각 대류, 전도 그리고 복사에 의한 열량을 나타내며, Hottel<sup>(14,15)</sup> 등의 연구 결과에 따르면 화원의 직경이 작은 경우 대류에 의한 효과가 지배적이고, 화원의 직경이 증가할수록 가연물을 둘러싼 팬으로부터 전도에 의한 효과는 작아지고 복사와 대류가 지배적임을 분석한 바 있다.

Figure 4는 헵탄 풀화재 실험에서 연소율에 관한 A. Hamins<sup>(14)</sup>의 모델링(점선) 결과와 기존 연구자들 및 본 연구에서 질량유속을 측정된 결과이다. 식 (8)에서 풀화재 실험은 화원을 둘러싼 팬에서 전달되는 전도율과 주위 온도에 따른 복사 및 대류 조건이 화재특성에 영향을 미치기 때문에 실험 조건을 표준화 하지 않는 경우 편차가 발생할 것으로 사료된다. 하지만, 그림에서 보듯이 모델링 곡선과 본 연구에서 수행한 질량유속 측정값의 경향성이 일치하

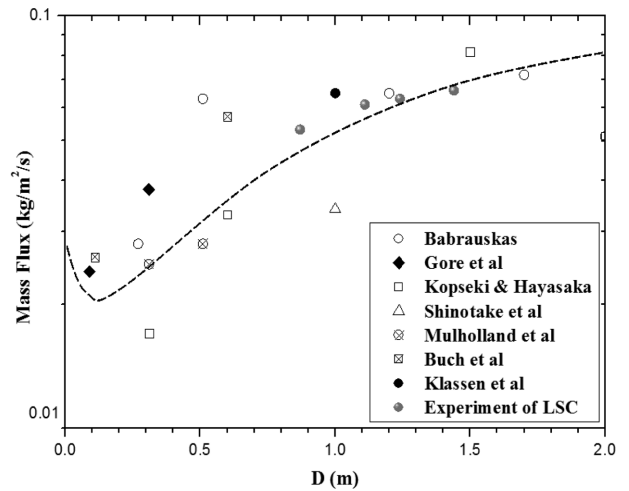


Figure 4. Comparison of previous results of mass flux with various diameter of heptane pool fire.

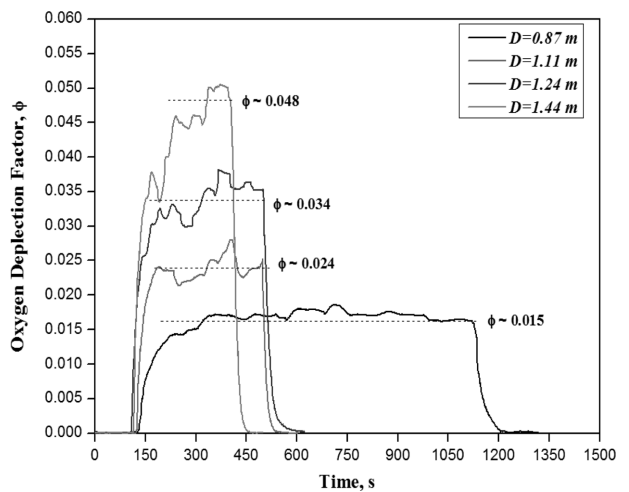


Figure 5. Comparison of oxygen depletion factor with various diameter of heptane pool fire.

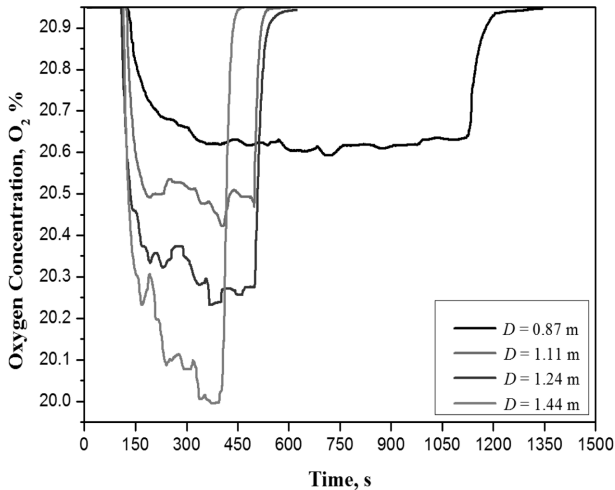


Figure 6. Comparison of oxygen concentration with various diameter of heptane pool fire.

는 것을 확인할 수 있다.

Figure 5는 화원의 직경변화에 따른 식 (2)의 산소소모 계수( $\Phi$ )를 연소시간 증가에 따라서 산출한 결과이다.  $D = 1.11$  m의 경우 연료량이 상대적으로 작아서 직경 1.24 m와 연소시간이 유사하게 나타났으며, 연소시간이 증가할수록 산소소모계수는 정상상태에 도달하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 헵탄 풀화재 실험에서 화원의 직경  $D$ 와  $\Phi$ 의 관계를 선형적으로 가정한 경우 R-square 0.92 정도에서  $\phi = 0.0459 \times D - 0.02808$  (for  $0.88 \text{ m} < D < 1.6 \text{ m}$ )의 관계를 갖는다. 하지만, 산소소모계수는 발열량을 산출하기 위한 주요인자로 화원의 직경 변화를 고려한 일반화된 관계식을 제시하기 위해서는 보다 넓은 범위에서 다양한 가연물의 실험 및 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Figure 6은 헵탄 풀화재 실험에서 화원의 직경변화에 따른 산소 농도를 분석한 결과이다. 그림에서 보듯이 화원의 직경( $D$ )이 증가할수록 산소농도가 낮아지는 것을 확인할 수 있으며, 이는 공기 중의 산소가 가연물과 연소함에 따라서 감소하고 발열량에 비례하여 감소하는 것을 의미한다. 특히, 산소농도의 범위는 20.95%부터 감소하여 최대 19.85%까지 1.10% 정도로 매우 작은 범위에서 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 산소분석기의 측정범위와 분해능을 고려해서 장비를 구축해야 하는 것을 확인할 수 있다.

Figure 7은 배기 덕트의 질량유량, 산소소모계수, 연소가스 농도(산소, 일산화탄소, 이산화탄소) 등을 이용하여 식 (1)의 산소 소모법에 의한 발열량을 산출한 결과이다. 화원의 직경이 증가할수록 산소의 농도가 낮아짐에 따라서 발열량이 증가하게 되고 연료의 유면이 일정하기 때문에 연소시간이 증가할수록 정상상태에 도달하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 화염직경 1.44 m의 경우 연소 초기에 발열량 측정값의 편차가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 이유는 전체 연소시간이 상대적으로 작고 화염의 간

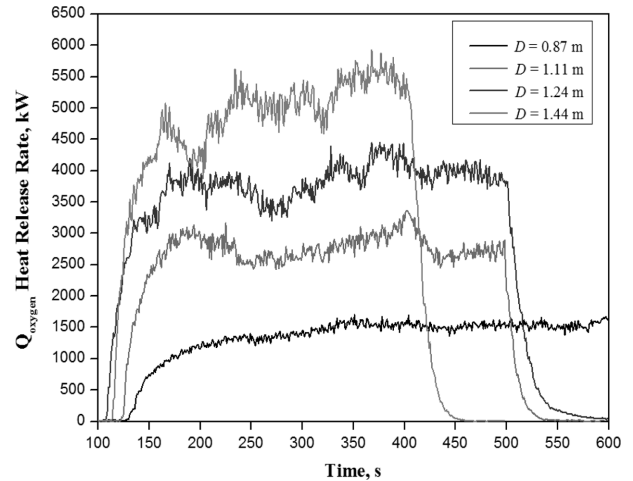


Figure 7. Comparison of HRR with various diameter of heptane pool fire.

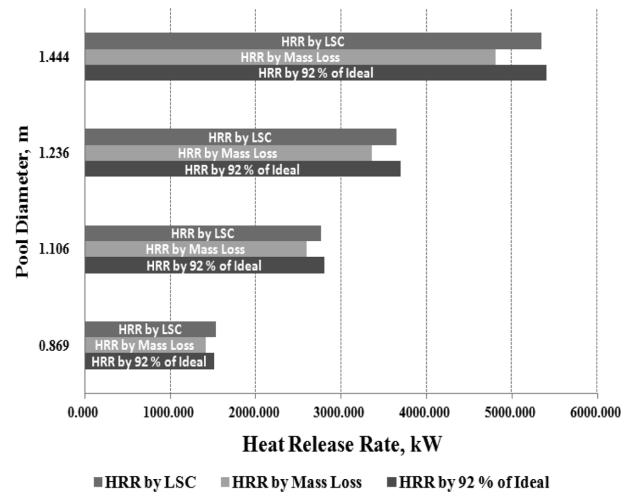
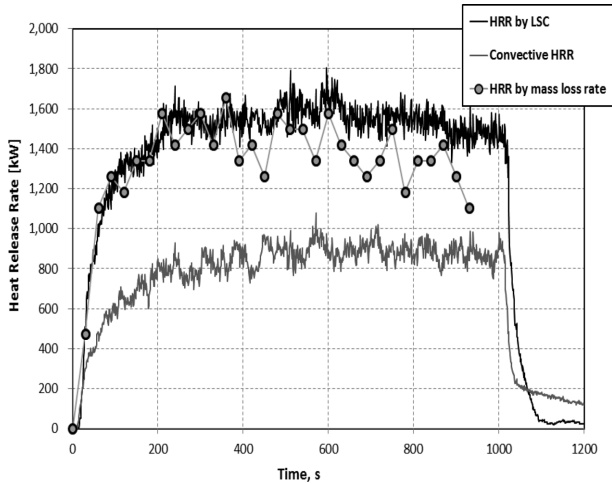


Figure 8. Comparison of HRR using LSC, mass loss rate and 92% of ideal values with various diameter of heptane pool fire.

섭현상 등에 의한 것으로 본 연구에서는 250초 이후의 값을 산술평균하여 분석하였으며, 화원 직경 0.87, 1.11, 1.24 그리고 1.44 m인 각각의 경우에 대해서 LSC의 산소 소모법에 의한 평균 발열량은 1.5 MW, 2.8 MW, 3.6 MW 그리고 5.3 MW 정도인 것을 확인할 수 있다.

Figure 8은 헵탄 풀화재 실험에서 화원 직경변화에 따른 산소 소모지수법, 질량 소모법 그리고 식 (6)의 연소효율 92% ( $\dot{Q}_{ref} = \dot{Q}_{idea} \times 0.92$ )를 고려한 발열량을 분석한 결과이다. 그림에서 보듯이 산소 소모법에 의해서 산출한 발열량은 식 (6)에 비해서 약 91% 정도로 J. Gore이 제시한 헵탄의 연소효율 92%와 매우 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 질량 소모법을 사용한 경우 산소 소모법과는 최대 10% 정도차이가 발생하였는데 정확한 원인을 분석하기 위해서는 보다 다양한 조건에서 실험결과를 분석해야 할



**Figure 9.** Comparison of HRR using LSC, mass loss rate and convective heat transfer.

것으로 판단된다.

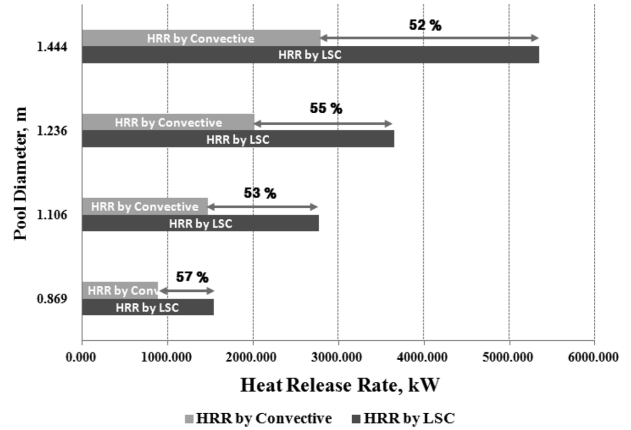
**2.4 대류열 측정결과 분석**

풀화재 실험에서 화원의 직경 변화에 따라서 화재로부터 발생하는 열에너지는 대류, 전도 그리고 복사에 의해서 전달되며, 엔탈피 상승법은 측정점에서 대류에 의한 열에너지를 계측하는 방법으로 식 (9)과 같은 관계식을 사용하였다.

$$\dot{Q}_{conv} = \dot{m}_e C_p \Delta T_e \tag{9}$$

여기서  $\dot{Q}_{conv}$ ,  $C_p$  그리고  $\Delta T_e$ 는 각각 대류열에 의한 발열량, 덕트에서 기체 비열 그리고 덕트 측정부와 대기의 온도차를 각각 의미한다.

Figure 9는 산소 소모법 식(1)에 의한 발열량 산출결과와 질량 소모법 식 (7) 그리고 엔탈피상승법 식 (9)을 비교한 결과이다. 연소가 정상상태를 보이고 있는 200 s~1,000 s 구간에서 LSC의 산소 소모법에 의해서 구한 발열량 식 (1)은 이상적인 발열량 식 (6)의 1.7 MW에 비해서 약 8.8% 정도 낮은 1.55 MW 정도이고, 연료의 질량 감소율을 고려한 식 (7)은 약 10% 낮은 1.4 MW 정도이다. 따라서 J. Gore이 제시한 연소효율 92%인 1.56 MW와 LSC의 산소 소모법에 의한 발열량이 일치하는 것을 확인할 수 있다.



**Figure 10.** Comparison of HRR using LSC and Convective heat transfer with various diameter of heptane pool fire.

하지만, 질량 소모법과는 약 8.9% 정도의 차이를 보이고 있으며, 정확한 원인을 규명하기 위해서는 향후 신뢰성 분석(Reliability analysis)에 관한 연구를 수행해야 할 것으로 판단된다. LSC 덕트 내부의 열손실을 분석하기 위해서 사용한 식 (9)의 대류열은 산소 소모법에 의한 발열량보다 약 57% 낮은 0.88 MW 정도로 0.67 MW의 손실이 발생하였으며, 이는 화원의 복사열손실과 후드, 수직덕트 및 수평덕트 등에서 발생된 것으로 향후 수치해석 기법을 적용하여 각 부분별 열손실을 정량적으로 분석하고자 한다.

Figure 10은 화원의 직경 변화를 고려한 산소 소모법과 대류열에 의한 발열량 측정 결과이다. 그림에서 보듯이 화원의 직경변화와 상관없이 대류열은 산소 소모법에 의한 발열량에 비해서 평균 54% 정도 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 LSC 구조물의 특성으로 동일 가연물에 대해서 총괄 발열량 대비 수직 덕트로 빠져나가는 열량의 비율이 비교적 일정한 것으로 판단된다. 본 연구에서 분석한 헵탄의 화원 직경 변화에 따른 연소면적, 연소율, 질량유속, 발열량 그리고 연소효율 실험 결과를 최종 Table 2에 나타내었다.

**3. 결 론**

본 연구에서는 흡입 덕트의 직경 1.6 m, 직선길이 26 m

**Table 2.** The Experiment Conditions and the Results of Burning Rate, Mass Flux, HRR and Combustion Efficiency of Oxygen Consumption Method

D [m]	A [m <sup>2</sup> ]	$\dot{m}_f$ [kg/s]	$\dot{m}_f''$ [kg/s-m <sup>2</sup> ]	$\dot{Q}_{oxygen}$ [MW]	$\dot{Q}_{mass}$ [MW]	$\dot{Q}_{conv}$ [MW]	$\dot{Q}_{ref}$ [MW]	$\lambda_c$
0.869	0.593	0.032	0.053	1550.40	1412.04	885.26	1512.31	0.912
1.106	0.960	0.058	0.061	2768.32	2596.61	1463.13	2800.94	0.909
1.236	1.199	0.075	0.063	3649.48	3356.15	2016.27	3692.50	0.909
1.444	1.638	0.108	0.066	5343.45	4808.77	2784.05	5403.70	0.910

\*Heat of combustion for heptane,  $\Delta H_{c,f} = 44,600$  kW,  $\dot{Q}_{mass} = \dot{m}_f \Delta H_{c,f}$ .

\*Efficiency,  $\lambda_c = \dot{Q}_{oxygen} / \dot{Q}_{ideal}$ ,  $\dot{Q}_{ref} = \dot{Q}_{ideal} \times 0.92$ .

그리고 후드 직경 10 m로 구성된 LSC를 사용하여 헵탄의 연소면적 변화에 따른 발열량 산출 결과를 분석하였다. 이를 위해서 LSC 덕트의 유량 측정부에서 유속에 의한 차압과 배기 질량유량의 상관관계를 분석하였으며, 발열량에 중요한 영향을 주는 연소율은 NIST의 A. Hamins 연구 자료에서 제시한 모델링 곡선과 기존 연구결과 및 본 연구에서 측정된 연소율을 비교하여 정확성을 확인하였다.

산소 소모법에 의한 헵탄의 연소효율은 91%로 J. Gore 이 제시한 92%와 유사한 결과를 나타내었으며, 질량 소모법과의 차이를 정확히 규명하기 위해서는 향후 신뢰성 분석에 관한 연구를 수행해야 할 것으로 판단된다. 발화원에서 덕트 측정부까지의 열손실을 분석하기 위해서 엔탈피 소모법에 의한 대류열 측정법은 산소 소모법에 의한 발열량 측정값 보다 평균 54% 정도 낮았으며, 이는 화원의 복사열손실과 후드, 수직덕트 및 수평덕트 등에서 발생된 것으로 각 부분별 열손실을 정량화하기 위해서는 수치해석 기법을 적용해야 할 것으로 사료된다.

LSC를 사용한 화재 실험은 발화원의 위치, 가연물의 종류, 산화제 유입조건과 환경 변수 등에 따라서 화재 현상을 재현하기 어렵기 때문에 단일 가연물의 화재강도를 고려하여 열량분석에 관한 연구가 선행되지 않는 경우 단 한번의 실험으로 발열량 산출 결과를 보장할 수 없게 된다. 특히, 고가의 실험 비용과 많은 시간이 소모되는 점을 고려할 때 실험장치의 안정성을 확보하기 위한 연구가 지속적으로 필요하며 본 연구 결과는 화재실험에서 발열량 측정값의 신뢰성 분석을 위한 기초 연구 자료로 활용하는데 유용한 정보가 될 것으로 사료된다.

### 감사의글

본 연구는 소방방재청 차세대핵심소방안전기술개발사업 “NEMA-차세대-2014-52”의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

### References

1. V. Barauskas and R. D. Peacock, “Heat Release Rate: the Single Most Important Variable in Fire Hazard”, *Fire Safety J.*, Vol. 18, pp. 255-272 (1992).
2. S. C. Kim, “Application of Numerical Model for the Effective Design of Large Scale Fire Calorimeter”, *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 24, No. 6, pp. 10-15 (2010).
3. S. C. Kim and M. Bundy, “Numerical Model of a Large-

- Scale Oxygen Consumption Fire Calorimeter”, *J. Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 93, No. 3, pp. 1013-1019 (2008).
4. E. J. Lee, “Design of Large Cone Calorimeter for the Fire Study”, *J. Kor. Inst. Fire Sci. Eng.*, Vol. 20, No. 4, pp. 10-15 (2006).
5. B. I. Choi, Y. S. Han and M. B. Kim, “Heat Release Rate Measurements of Residential Combustibles”, *J. Kor. Inst. Fire Sci. Eng.*, Vol. 22, No. 2, pp. 10-15 (2008).
6. K. C. Noh, C. H. Kim, S. C. Lee and D. H. Lee, “Calculation of Uncertainty in Measuring Heat Release Rate in Room Corner Test”, *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 26, No. 1, pp. 16-22 (2012).
7. W. K. Chow and S. S. Han, “Heat Release Rate Calculation in Oxygen Consumption Calorimetry”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, pp. 304-310 (2011).
8. D. W. Stroup, L. Delauter, J. Lee and G. Roadarmel, “Large Fire Research Facility Exhaust Hood Heat Release Rate Measurement System”, NISTIR 6509 (2000).
9. R. A. Bryant and G. W. Mulholland, “A Guide to Characterizing Heat Release Rate Measurement Uncertainty for Full-scale Fire Tests”, *Fire and Material*, Vol. 32, pp. 121-139 (2008).
10. R. A. Bryant, T. J. Ohlemiller, E. R. Johnsson, A. Hamins, B. S. Grove, G. W. Guthrie, A. Maranghides and G. W. Mulholland, “The NIST 3 MW Quantitative Heat Release Rate Facility-Description and Procedures”, NISTIR 7502 (2004).
11. R. A. Bryant, T. J. Ohnsson, A. Hamins, B. S. Grove, W. F. Guthrie, A. Maranghides and G. W. Mulholland, “The Nist 3 Megawatt Quantitative Heat Release Rate Facility”, NIST Special Publication 1007 (2003).
12. P. J. DiNunno, P. E. Craig and L. Beyler, “SFPE Handbook of Fire Protection Engineering”, 4th Edition, the National Fire Protection Association (2008).
13. A. Hamins, C. Y. Jiann and K. Takashi, “A Global Model for Predicting the Burning Rates of Liquid Pool Fires”, NISTIR 6381 (1999).
14. J. Gore, A. Hamins and T. Kashiwagi, “Fuel Property effects on Burning Rate and Radiative Transfer from Liquid Pool Fire”, 3th Symp. Int on Fire Safety Science, pp. 395-404 (1991).
15. H. C. Hottel, “Certain Law Governing Diffusive Burning of Liquids”, *Fire Research Abstract Reviews*, Vol. 1, pp. 41-44 (1999).