

[Research Paper]

## 콘 칼로리미터의 배기 덕트 내부 유동 특성 기초 실험

신연제 · 유우준<sup>\*†</sup>

동양대학교 건축소방안전학과 학부생, \*동양대학교 건축소방안전학과 교수

### Fundamental Experiment on the Flow Characteristics inside the Exhaust Duct of Cone Calorimeter

Yeon Je Shin · Woo Jun You<sup>\*†</sup>

Undergraduate Student, Dept. of Fire Architecture & Fire Safety, Dong Yang Univ.,

\*Professor, Dept. of Fire Architecture & Fire Safety, Dong Yang Univ.

(Received May 9, 2019; Revised July 24, 2019; Accepted July 26, 2019)

#### 요 약

본 연구에서는 콘 칼로리미터의 발열량 산출 값에 대한 신뢰성 평가를 위한 기초 연구로 산소소모지수법의 주요 인자인 질량유량에 관한 측정 불확도 관계식을 분석하였다. 본 연구에서 사용한 콘 칼로리미터의 덕트는 길이가 5 m이고 직경이 0.2 m로 내부가 완전히 빈 공간인 경우와 기공의 직경이 3 mm인 격자망 그리고 기공의 직경 10 mm와 기공률 0.76인 허니컴 형상의 덕트를 각각 제작하였다. 덕트 내부로 유입되는 질량유량을 산출하기 위해서 양방향 차압계와 온도센서를 유동의 수직방향으로 균일한 위치에 4개씩 설치하였으며, 레이놀즈 수 증가에 따른 속도구배와 유동의 섭동을 측정하였다. 그 결과 흡입용량이 증가할수록 난류강도에 비례하여 세 가지 형상 모두 속도구배가 증가하였으며, 95% 신뢰수준에서 질량유량에 대한 확장 불확도의 편차는 완전히 빈 공간, 격자망( $d_p = 3$  mm) 그리고 허니컴( $d_p = 10$  mm,  $\epsilon = 0.76$ ) 순으로 낮게 나타났다. 주목할 만한 점으로는 송풍기의 흡입용량이 가장 높은 조건일 때 격자망( $d_p = 3$  mm)이 허니컴( $d_p = 10$  mm,  $\epsilon = 0.76$ ) 형상에 비해서 흡입용량의 저항성은 높는데 비해서 질량유량의 확장불확도는 오히려 증가하였으며, 본 연구의 결과는 콘 칼로리미터의 덕트 내부 유동 안정성 향상을 위한 설계 자료의 활용이 가능할 것으로 판단된다.

#### ABSTRACT

In this study, the mass flow rate of the heat release rate equation, which is the major factor of the oxygen consumption method, was analyzed for the fundamental investigation of the cone-calorimeter (5 m length and 0.3 m diameter). The shapes of a completely empty inside, 3 mm pore diameter mesh and pore diameter 10 mm honeycomb with 0.76 porosity were constructed using the cone-calorimeter. To calculate the mass flow rate, four bi-directional probes and thermocouples were installed in a uniform position in the vertical direction of flow. The velocity gradient and flow perturbation were measured from the increase in Reynolds number. As the flow capacity increased, the speed gradient increased in all three shapes relative to the turbulence intensity. In addition, the deviation of extended uncertainty to the mass flow was completely low in the order of empty space, mesh ( $d_p = 3$  mm) and honeycomb ( $d_p = 10$  mm and  $\epsilon = 0.76$ ) at the 95% confidence level. The results can be used in designs to improve the flow stability of the cone calorimeter.

**Keywords :** Duct shape factor, Cone calorimeter, Mass loss late, Heat release rate, Uncertainty

#### 1. 서 론

콘 칼로리미터(Cone-calorimeter)에서 일반적으로 사용하고 있는 발열량 산출법은 연소과정에서 소모되는 산소의

양과 덕트 내부 연소가스의 질량유량 등에 의해서 산출되는 값이기 때문에 측정 인자들의 오차가 발생하는 경우 발열량의 편차는 증가하게 된다<sup>(1-10)</sup>. 실규모급 화재 실험에서 발열량의 신뢰성이 확보되지 않은 상태로 화재 현상을 분

<sup>†</sup> Corresponding Author, E-Mail: [wjyou@dyu.ac.kr](mailto:wjyou@dyu.ac.kr). TEL: +82-54-630-1207, FAX: +82-54-630-1371

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

석하게 되면 연구 결과의 타당성을 확보할 수 없을 뿐만 아니라 가연물의 화재 특성에 관한 잘못된 기초 자료가 구축되어 성능위주 설계 등과 같은 응용분야에서의 활용성이 낮아질 수 있다<sup>(4,10)</sup>. 이러한 이유로 신뢰성 있는 발열량 산출에 관한 연구는 국내뿐만 아니라 국외에서도 매우 중요한 연구 중 하나로 인식되고 있다<sup>(1-11)</sup>.

발열량 산출의 신뢰성 분석에 관한 국내 연구 사례로 Bryant 등<sup>(4)</sup>은 NIST의 3 MW급 Large Scale Calorimeter에 대하여 산소소모법을 이용하여 발열량 산출 및 계측 장비 구성에 대해 상세한 기술과 불확도 인자에 대하여 분석하였으며, Babrauskas 등<sup>(1)</sup>은 콘 칼로리미터를 통한 발열량 측정 기술의 중요성 및 유해 가스의 예측을 위한 주요 인자를 분석하였다. 특히, NIST 연구 보고서에 의하면 칼로리미터를 통한 발열량 산출시 불확도가 가장 크게 발생하는 주요 인자는 질량유량과 산소소모계수임을 분석한 바 있다<sup>(4)</sup>. 이 중에서도 질량유량의 경우 덕트 내부에서 유동이 완전히 발달되지 않은 상태에서 계측 되는 경우 속도구배(Velocity gradient)와 압력섭동(Fluctuation)에 의하여 유동의 안정성이 감소한다. 질량유량의 불확도를 증가시키는 주요 인자는 덕트 내부에서의 유속의 섭동과 속도구배이며 유동 안정성을 고려해서 콘 칼로리미터 배관의 길이/직경 비를 증가하여 시스템을 구축하게 되면 덕트 내부에서 유동이 완전히 발달될 수 있는 조건이 형성되어 난류 강도에 의한 속도구배와 유동섭동이 감소하기 때문에 질량유량이 안정적으로 계측되어 신뢰성 있는 발열량을 산출할 수 있다<sup>(4)</sup>. 하지만, 실규모급 화재의 발열량을 정확히 측정하기 위해서 콘 칼로리미터의 배관 직경이 증가하게 되면 이에 비례하여 덕트의 길이가 증가하기 때문에 설치공간에 제한이 발생하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 계측 부전단에 오리피스 또는 격자망을 삽입하여 유동이 균질한 상태를 형성해 주는 방법을 적용하고 있지만, 현재까지의 연구사례에서 배기 덕트 내부 형상 조건에 따른 유동특성을 비교 분석한 자료는 매우 부족한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 콘 칼로리미터 설계 시 신뢰성 있는 발열량 산출을 위한 기초 연구 자료를 구축하기 위해서 덕트 내부 형상 변화에 따라서 질량유량의 편차 및 확장 불확도를 산출하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 이론 정리

콘 칼로리미터의 발열량 산출은 산소가 소모되는 정도를 적용하여 Huggett에 의해서 최초 제시되었으며, 탄화수소 계열의 가연물에 대해서 산소 1 kg이 소비되었을 때 발생하는 양은  $(13.1 \pm 0.35)$  MJ로 산소소모지수에 의한 발열량 관계식은 식 (1)과 같다<sup>(2,4)</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  $\dot{Q}$ ,  $\Delta H_{C,O_2}$ ,  $\dot{m}_e$ ,  $\Phi$ ,  $X^o$ ,  $\alpha$  그리고 MW는 발열량(kW), 연소열(kJ/kg), 배기질량유량(kg/s), 산소소모계수, 초기상태물분율, 화학적팽창계수 그리고 분자량을 각각 의미한다. 식 (1)의 발열량 산출값의 신뢰성을 분석하기 위해서는 식 (2)의 확장 불확도(Expanded uncertainty)를 산출해야 한다<sup>(10,13)</sup>.

$$U = k \times u_c \quad (2)$$

여기서  $U$ ,  $k$  그리고  $u_c$ 는 각각 확장 불확도, 수렴인자(Coverage factor) 그리고 합성 불확도(Combined uncertainty)를 의미한다. 산출하고자 하는 주요 값(y)의 수학적 모델에 대한 주요 인자( $x_i$ )의 관계가  $y = (x_1, x_2, x_3, \dots)$ 의 관계를 갖고 있을 때  $u_c$ 는 식 (3)과 같은 관계를 갖고 있다<sup>(10,13)</sup>.

$$\frac{u_c}{y} = \sqrt{\sum_{i=1}^n s_i^2 \left( \frac{u_i}{x_i} \right)^2} \quad (3)$$

여기서 소문자  $s_i$ 는 감응계수 또는 민감도 계수(Sensitivity coefficient)를 의미하며 감응계수란 입력량의 추정값의 값이 변할 때 출력량의 추정값 y가 얼마나 변하는가를 나타낸다. 측정량에 대한 최종 결과의 편미분으로 정의되며 실험적으로 결정될 수도 있다<sup>(10,13)</sup>.  $u_i$ 는 식(3)~(6)의 반복시험에 의한 A-Type 평가와 계측장비의 분해능, 교정오차 및 식 (6)의 감응계수 등에 의한 B-Type 평가에 의해서 산출할 수 있다. 콘 칼로리미터의 불확도 산출은 기존 참고문헌<sup>(10,13)</sup>에서 상세히 기술되어 있으므로 별도의 언급은 생략하였다.

$$X_{avg} = \sqrt{\sum_{i=1}^n X_i / n} \quad (4)$$

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{avg})^2}{(n-1)}} \quad (5)$$

$$v = n - 1 \quad (6)$$

본 연구에서는 콘 칼로리미터 배기 덕트의 유동 안정성을 향상시키기 위해서 식 (1)의 질량유량( $\dot{m}_e = \rho AU$ )에 관한 신뢰성 분석을 수행하고자 한다. 질량유량은 덕트 내부의 유동의 수직방향 단면적(A)과 평균유속(U) 그리고 밀도( $\rho$ )에 의해서 구할 수 있으며, 이상기체의 상태방정식과 베르누이정리(Berrounili theorem)에 의해서 식 (7)과 같이 정리할 수 있다.

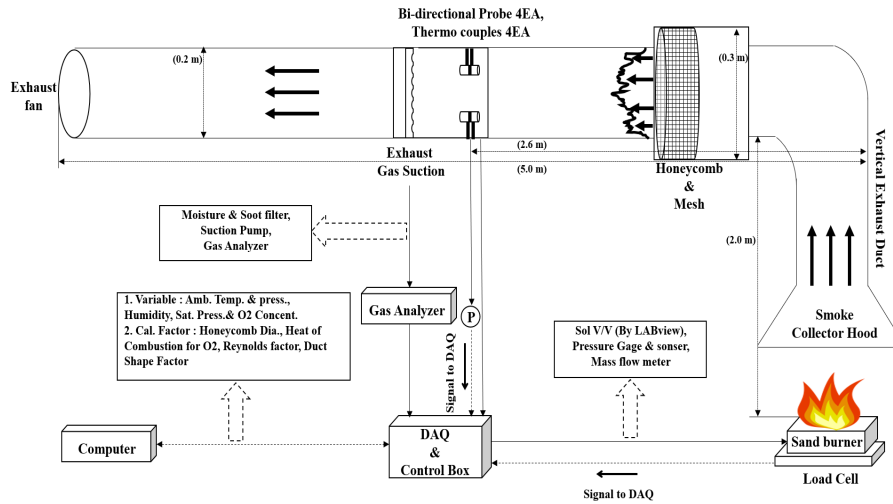


Figure 1. Schematic diagram of the experiment on the flow characteristics inside the exhaust duct of cone calorimeter.

$$\dot{m}_e = C \sqrt{\frac{\Delta P}{T_e}} \quad (7)$$

여기서  $C$ ,  $\Delta P$  그리고  $T_e$ 는 각각 덕트 내부 오리피스 상수, 덕트 내부의 차압( $\rho_e$ )과 온도(K)를 의미하며, 양방향 (Bi-directional probe) 유속계에 의해서 덕트 내부 차압은 식 (8)과 같다.

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho_e [f(Re) V_c]^2 \quad (8)$$

여기서,  $f(Re)$ 와  $V_c$ 는 각각 레이놀즈 수정계수와 덕트 중심에서의 유속(m/s)을 의미하며, 레이놀즈 수가 3,800 이상인 경우  $f(Re)$ 가 1.08로 가정할 수 있기 때문에 평균속도에 대한 덕트 중심부의 비를 의미하는 형상인자( $k_s$ )를 상수로 가정한 경우 질량유량의 관계식은 식 (9)와 같다<sup>(2,4)</sup>.

$$\dot{m}_e = 26.5 \frac{A \times k_c}{1.08} \sqrt{\frac{\Delta P}{T_e}} \quad (9)$$

여기서 26.5는 대기의 밀도와 온도가 표준 상태인 값을 고려하여 계산한 상수이며, 덕트 단면적과 형상인자 $\Delta P$ 와  $T_e$ 를 제외한 덕트 단면적과 형상인자가 모두 상수인 것을 확인할 수 있다. 따라서 식 (9)에 의해서 N회 반복시험으로부터 식(3)~(5)에 의해서 A-Type 불확도를 산출할 수 있으며, 질량유량에 대한 B-Type 평가의 감응 계수는 식 (10), (11)과 같이 구할 수 있다.

$$s_p = \left( \frac{\partial \dot{m}_e}{\partial \Delta P} \right)_{T_e = const} = 0.5 \times 26.5 \times \frac{A \times k_c}{1.08} \times (\Delta P T_e)^{-0.5} \quad (10)$$

$$s_T = \left( \frac{\partial \dot{m}_e}{\partial T_e} \right)_{\Delta P = const} = -0.5 \times 26.5 \times \frac{A \times k_c}{1.08} \times \Delta P^{0.5} T_e^{-1.5} \quad (11)$$

합성표준불확도는 덕트 내부 차압과 온도에 대해서 반복 시험, 센서의 분해능 각각의 표준불확도( $u_i$ , where  $i = 1 \sim 6$ )를 고려하여 식 (12)와 같이 산출할 수 있다. 유효자유도는 식 (13)에 따라서 유효자유도를 산출하며, 최종 신뢰수준 95%의 유효자유도에 따른 수렴인자로 확장불확도(U)를 식 (2)와 같이 산출할 수 있다.

$$u_c^2 = s_T^2 [u_1^2 + u_2^2 + u_3^2] + s_p^2 [u_4^2 + u_5^2 + u_6^2] \quad (12)$$

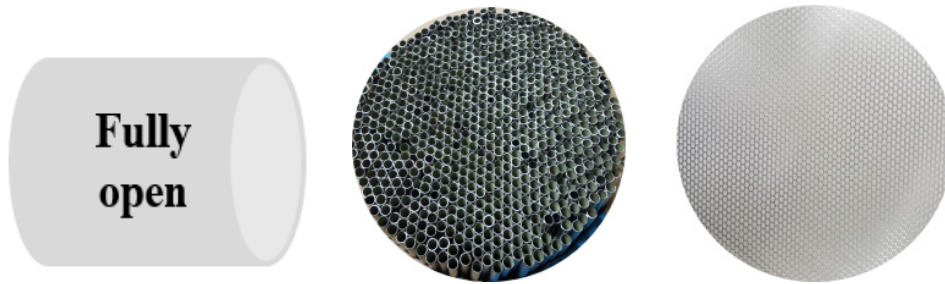
$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} \quad (13)$$

## 2.2 실험장치 구성 및 실험조건

실험장치 구성은 Figure1과 같으며 구조는 포집후드, 덕트, 덕트형상(Honeycomb & mesh), 주요 계측부, 가스포집장치 그리고 제어 및 분석 장비로 구성되어 있다. 그림에서 보듯이 배기 덕트는 연소 생성물을 포집하기 위해서 아연도금철판으로 제작 하였으며, 덕트 직경과 길이는 각각 0.2 m와 5.0 m로 구성하였다. 배기 덕트 내부의 유속과 온도를 측정하기 위해서 덕트 흡입부에서 2.6 m 이격된 곳에 유동의 수직 방향으로 4개의 열전대(K-type)와 양방향유속계 (Bi-directional probe)를 설치하여 설치각도에 따른 측정오차를 최소화 하였다<sup>(14)</sup>. 또한 산소농도측정을 위해 교차형 다공성 가스포집배관을 설치하였다. 본 연구에서 사용한 콘 칼로리미터의 계측장비 주요 사양은 Table 1과 같다. 콘 칼로리미터의 덕트 내부 형상 변화에 따른 유동 특성을 분석하기 위해서 내부가 완전히 빈 공간인 경우와 격자망 그리고 허니컴 형상을 제작하였으며, Figure 2와 Table 2는 각각의 형상에 관한 그림과 규격을 나타내었다.

**Table 1.** Specification of the Experiment Apparatus

Measurement	Specification
Duct Temperature	K-Type Wire, Range : -200~1,000 °C
DAQ	Voltage: 20 mV to 100 V, 1-5 V F.S., Chncls: 20 ch, Accuracy: ± 0.1%
Duct Size & Blower	Length: 5 m, Diameter: 0.2 m, Fan capacity: 3 hp
O <sub>2</sub> Analyzer	Output : 4~20 mA , Measurement Range : 2~100% v/v O <sub>2</sub> , Model : OXYMAT 61
Pressure Sensor	Output : 0~10 V, Range : 1250 Pa, Model : MS-311
Mass Flow Controller	Fuel: CH <sub>4</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> , Output : 0~5 VDC, Range : 200 LPM , Model : TSC-145
Pressure Transmitter	Fuel : CH <sub>4</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> , Output : 0~20 mA, Range : 0~20 bar, Model : PSC-E-B-A-P-G

**Figure 2.** A picture of duct shape (fully open, honeycomb and mesh).**Table 2.** Specification of the Test Samples (None, Honeycomb and Mesh) for the Expanded Uncertainty of Mass Flow Rate Inside the Exhaust Duct

Type	Pore Diameter, $d_p$ [mm]	Porosity, $\epsilon$ [-]	Pitch Length [mm]	Length [mm]
Honeycomb	10	78%	1	200
Mesh	3	N/A	1	N/A
None	N/A	N/A	N/A	N/A

### 2.3 실험 결과 및 분석

Figure 3은 콘 칼로리미터 계측부 전단 덕트 내부의 형상이 완전히 빈 공간, 허니컴( $d_p = 10$  mm,  $\epsilon = 0.76$ ) 그리고 격자망( $d_p = 3$  mm) 일 때 송풍기의 흡입용량 변화에 따른 식 (8)의 차압을 측정된 결과이다. 동일한 흡입용량 조건에서 반복시험에 대한 압력 섭동의 편차를 고려하기 위해서 시간 변화량에 따른 최대 및 최소 값을 고려하여 평균 차압과 표준 편차를 산출하였다. 그 결과 세 가지 형상 모두에 대해서 송풍기의 흡입용량이 증가할수록 난류강도에 비례하여 차압의 편차가 증가한 것을 확인할 수 있다. 특히, 흡입용량 2.24 kW인 조건에서 덕트 내부가 빈 공간인 경우 양방향 유속계의 평균 차압은 180.27 Pa이고 최대 편차는 ± 8.36%로 나타났으며, 허니컴( $d_p = 10$  mm,  $\epsilon = 0.76$ )을 삽입한 경우 평균 차압은 161.25 Pa이고 최대 편차는 ± 4.71%, 그리고 격자망( $d_p = 3$  mm)의 평균 차압은 153.85 Pa이고 최대 편차는 ± 8.05% 정도로 나타났다. 이러한 결과는 동일한 흡입 용량 조건에서 완전히 빈 공간의 경우 양방향 유속계의 평균 차압이 가장 높기 때문에 송풍기의 효율이

가장 높게 나타난 것을 확인할 수 있다. 하지만, 허니컴( $d_p = 10$  mm,  $\epsilon = 0.76$ )의 경우 차압의 편차가 가장 작기 때문에 식 (1)로부터 질량유량을 제외한 다른 매개 변수가 동일한 경우 발열량 산출값이 가장 안정적인 값을 갖게 되는 것을 예측할 수 있다. 덕트 질량유량에 의한 발열량 산출값의 신뢰성을 분석하기 위해서 Figure 3의 송풍기 용량 각각의 조건에 대해서 식 (2)~(6)의 B-Type 불확도를 산출하여 식 (10)~(13)의 민감도와 표준합성불확도 그리고 유효자유도에 의한 확장불확도를 산출하였으며, 각각의 결과를 Table 3에 나타내었다.

Figure 4는 Table 3의 결과를 이용하여 콘 칼로리미터의 계측기 전단 덕트 내부의 형상이 완전히 빈 공간, 허니컴( $d_p = 10$  mm,  $\epsilon = 0.76$ ) 그리고 격자망( $d_p = 3$  mm) 일 때 송풍기의 흡입용량이 가장 높은 2.24 kW에 대해서 평균 질량유량( $\dot{m}$ )에 대한 확장불확도( $U$ )의 크기를 나타낸 결과이다. 그림에서 보듯이 허니컴 형상의 경우 95% 신뢰수준에서 유효자유도는 3.97로 산출되어  $\dot{m} = 0.57$  kg/s이고  $U = \pm 0.02$  kg/s로 가장 낮게 나타났으며, 격자망( $d_p = 3$  mm)은

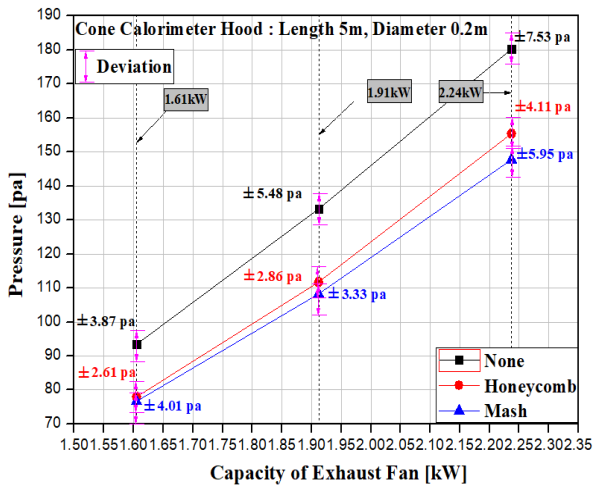


Figure 3. The experiment results of differential pressure of duct VS capacity of exhaust fan.

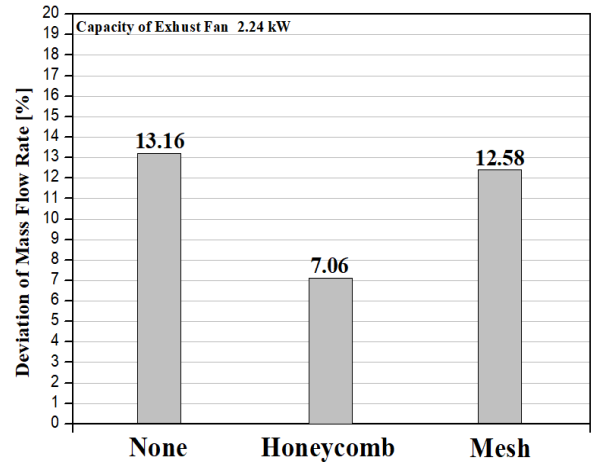


Figure 4. The results of mass flow deviation for none, honeycomb and mesh.

Table 3. The Results of Experiment and Expanded Uncertainty of Mass Flow Rate for Exhaust Duct Shape of None, Honeycomb and Mesh

Case	None			Honeycomb			Mesh		
	1.61	1.91	2.24	1.61	1.91	2.24	1.61	1.91	2.24
Inverter Setting [kW]	1.61	1.91	2.24	1.61	1.91	2.24	1.61	1.91	2.24
P.avg [Pa]	93.43	133.25	180.07	77.98	111.73	157.83	76.62	108.24	147.76
P.Deviation [Pa]	7.75	10.95	15.07	5.22	5.72	7.43	8.02	6.65	11.9
Temp.avg [°C]	20.42	20.64	18.89	21.77	21.57	16.95	22.15	21.89	21.56
Temp.Deviation [°C]	0.53	0.40	0.43	0.33	0.25	0.23	0.30	0.25	0.3
Exhaust Vlocity [m/s]	11.56	13.81	16.01	10.58	12.67	14.93	10.50	12.47	14.56
Mass Flow Rate.avg [kg/s]	0.44	0.52	0.61	0.40	0.48	0.57	0.39	0.47	0.55
Sensitivity, $S_p$ and $S_T$	0.0023 -0.0007	0.0020 -0.0009	0.0016 -0.0010	0.0025 -0.0007	0.0021 -0.0008	0.0018 -0.0010	0.0026 -0.0007	0.0022 0.0008	0.0018 -0.0010
Combined Standard Uncertainty, $u_c$	0.0096	0.0111	0.0129	0.0076	0.0068	0.0072	0.0109	0.0078	0.0113
Effective Degrees of Freedom, $v_{eff}$	3.89	3.43	3.23	5.11	4.72	3.97	3.83	4.23	3.36
Coverage Factor, k	2.824	3.007	3.09	2.45	2.63	2.79	2.85	2.731	3.034
Extended Uncertainty, U	± 0.027	± 0.033	± 0.040	± 0.019	± 0.018	± 0.020	± 0.031	± 0.021	± 0.034
Mass Flow.Deviation [%]	12.51	12.79	13.16	9.37	7.55	7.06	15.85	9.15	12.58

$\dot{m} = 0.55 \text{ kg/s}$ 이고  $U = \pm 0.034 \text{ kg/s}$  그리고 완전히 빈 공간은  $\dot{m} = 0.61 \text{ kg/s}$ 이고  $U = \pm 0.04 \text{ kg/s}$ 로 산출되었다. 주목할 만 한 점으로는 격자망( $d_p = 3 \text{ mm}$ )의 경우 완전히 빈 공간에 비해서 차압의 편차는 허니컴( $d_p = 10 \text{ mm}$ ,  $\epsilon = 0.76$ ) 형상에 비해서 더욱 높게 나타났지만 질량유량의 확장 불확도는 허니컴 형상이 가장 낮은 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 격자망 기공의 크기가  $3 \text{ mm}$ 로 허니컴 형상의 기공의 크기  $10 \text{ mm}$ 에 비해서 매우 작기 때문에 유동의 저항을 크게 받았기 때문이며, 허니컴 형상의 경우 유동방향으로 길이가  $0.2 \text{ m}$ 로 직경에 비해서 20배 정도 길이가 증가하여 각각의 기공을 지나면서 유동이 안정화되어 차압

의 편차는 감소한 것으로 판단된다. 즉, 본 연구에서 사용한 덕트 형상의 경우 격자망( $d_p = 3 \text{ mm}$ )이 허니컴( $d_p = 10 \text{ mm}$ ,  $\epsilon = 0.76$ ) 형상에 비해서 흡입용량의 저항성은 높게 비해서 유동의 편차는 오히려 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 이러한 결과는 콘 칼로리미터 배기 덕트의 유동안정성을 고려하기 위해서 효율성 있는 형상인자의 선정이 중요한 것으로 사료된다.

### 3. 결론

본 연구에서는 콘 칼로리미터의 발열량 산출 값에 대한

신뢰성 평가를 위해서 산소소모지수법의 주요 인자인 질량 유량에 관한 측정 불확도 관계식을 분석하였다. 이를 위해서 길이가 5 m이고 직경이 0.2 m인 덕트에 대해서 내부가 완전히 빈 공간인 경우와 허니컴( $d_p = 10$  mm,  $\epsilon = 0.76$ ) 그리고 격자망( $d_p = 3$  mm)을 제작하여 각각에 대해서 질량유량에 관한 측정 불확도 관계식을 분석하였으며 다음과 같은 결과를 도출하였다.

첫째, 덕트 내부의 흡입 용량이 증가할수록 난류강도에 비례하여 세 가지 형상 모두 양방향 유속계 차압의 편차가 증가하였으며, 동일한 흡입 용량 조건에서 차압의 편차는 허니컴( $d_p = 10$  mm,  $\epsilon = 0.76$ )이  $\pm 4.71\%$  정도로 가장 낮기 때문에 질량유량을 제외한 다른 매개 변수가 동일한 경우 발열량 산출값이 가장 안정적일 것으로 판단된다.

둘째, 덕트 질량유량에 의한 발열량 산출값의 신뢰성을 분석하기 위해서 송풍기 용량 각각의 조건에 대해서 확장 불확도를 산출하였으며, 그 결과 95% 신뢰수준에서 확장 불확도의 편차는 완전히 빈 공간, 격자망( $d_p = 3$  mm) 그리고 허니컴( $d_p = 10$  mm,  $\epsilon = 0.76$ ) 순으로 낮게 나타났다.

셋째, 송풍기의 흡입용량이 가장 높은 2.24 kW 조건일 때 질량유량의 최대 편차와 확장불확도를 분석한 결과 격자망( $d_p = 3$  mm)이 허니컴( $d_p = 10$  mm,  $\epsilon = 0.76$ ) 형상에 비해서 흡입용량의 저항성은 높는데 비해서 질량유량의 확장불확도는 오히려 증가하였으며, 이러한 결과는 큰 칼로리미터 배기 덕트의 유동안정성을 고려하기 위해서 효율성 있는 형상인자의 선정이 중요한 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 소방청 소방대응력 향상을 위한 연구개발서(2018\_NFA002-008-01010000-2018)의 지원을 받아 수행되었으며 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. W. J. You, D. G. Nam, M. C. Youm, S. C. Kim and H. S. Ryou, "Analysis of Heat Release Rate with Various Diameter of Heptane Pool Fire Using Large Scale Cone Calorimeter", *Fire Science and Engineering*, Vol. 28, No. 5, pp. 1-7 (2014).
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. 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 Megawatt Quantitative Heat Release Rate Facility", *NIST Special Publication 1007* (2003).
5. A. Hamins, J. C. Yang and T. Kashiwagi, "A Global Model for Predicting the Burning Rates of Liquid Pool Fires", *NISTIR 6381* (2000).
6. D. W. Stroup, L. A. Delauter, J. Lee and G. Roadarmel, "Large Fire Reseach Facility (Building 205) Exhaust Hood Heat Release Rate Measurement System", *NISTIR 6509* (1999).
7. W. K. Chow and S. S. Han, "Heat Release Rate Calculation in Oxygen Consumption Calorimetry", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, pp. 304-310 (2010).
8. E. J. Lee, "Design of Large Cone Calorimeter for the Fire Study", *Transaction of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 20, No. 4, pp. 65-71 (2006).
9. 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. 28-33 (2010).
10. J. Axelsson, P. Anderson, A. Lonnermark, P. V. Hees and I. Wetterlund, "Uncertainties in Measuring Heat and Smoke Release Rate in the Room/Corner Test and the SBI", *SP Report 2001:04*, Boras (2001).
11. 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).
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. International Organization for Standardization, "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement", 1<sup>st</sup> ed., Geneva (1993).
14. B. J. McCaffrey and G. Heskestad, "A Robust Bidirectional Low-Velocity Probe for Flame and Fire Application", *Combustion and Flame*, Vol. 26, No. 1, pp. 125-127, (1976).