

구획화재의 출입구를 통한 광학적 연기밀도 측정의 불확실성 해석

김성찬

경일대학교 소방방재학과

Uncertainty Analysis of the Optical Smoke Density Measurement through the Doorway in a Compartment Fire

Sung-Chan Kim

Dept. of Fire Safety, Kyungil Univ.

(Received February 20, 2013; Revised March 26, 2013; Accepted April 5, 2013)

요 약

본 연구는 구획화재의 출입구를 통한 연기밀도를 정량적으로 측정하고 측정기법의 신뢰성을 평가하기 위해 불확실성 해석을 수행한다. 메탄 화재 강도에 따른 축소모형 구획공간의 출입구 상층부를 통해 유출되는 연기 유동에 대해 광소멸 측정을 수행하고 Bouguer's의 법칙을 적용하여 연기밀도를 산정하였다. 광투과율, 경로길이, 질량비광소멸상수에 대하여 연기밀도의 측정 불확실도를 평가하였으며 계산된 연기밀도 측정의 확장불확실도는 20% 정도이며 신뢰수준은 95% 이다. 준정상상태의 화재 발열량에 대하여 출입구에서의 평균 연기밀도를 산정하였으며 구획공간내부의 총괄당량비 증가에 따라 출입구의 연기농도가 선형적으로 증가하는 경향을 보였다.

ABSTRACT

The present study measured the light transmission to quantify the smoke density(smoke mass concentration) through the doorway in a compartment fire and performed the uncertainty analysis to evaluate the reliability of the measurement technique. The optical light extinction method based on Bourguier's law was applied to estimate the smoke density of doorway exhausting smoke flow in upper layer of a compartment for methane gas fires. The measurement uncertainty of the light extinction measurement was evaluated for the light transmittance, path length, and specific mass extinction coefficient and the expanded uncertainty was estimated about 20% with confidence level of 95%. The mean smoke density through the doorway for the methane fire was calculated for quasi-steady fire and the smoke density linearly increased as the GER increased.

Keywords : Smoke density, Light extinction, Compartment fire, Optical smoke density, Soot measurement

1. 서 론

화재위험성을 평가하는 여러 가지 인자들 가운데 연기 밀도(smoke mass concentration, 연기질량 농도)는 연소반응으로 인한 공간내 연기입자의 양을 나타내며 화재 상황에서의 가시거리나 독성에 의한 위험성을 정량화하는데 중요한 변수로 인식된다. 정확한 연기밀도의 측정과 예측은 화재현상을 이해하는데 기여할 뿐만 아니라 건물 내 거주자의 피난계획을 수립하거나 제연설비를 설계하는데 있어서 중요한 요소이며 신속한 화재 감지를 통한 정량적인 실시간 감시시스템 구축의 요소기술로 활용될 수 있다.

연기밀도의 측정은 연기내 연소생성물의 입자를 포집

하고 중량을 계측하여 연기밀도를 산정하는 중량측정법(gravimetric measurement)과 레이저광의 연기 투과율을 계측하여 연기밀도를 산정하는 광소멸 측정법(light extinction measurement)이 널리 이용되고 있다. 중량측정법은 측정장치가 복잡할 뿐만 아니라 필터에 포집된 연기입자의 질량을 직접 측정해야 하기 때문에 수분제거 및 중량계측과 정으로 인해 실시간 측정이 불가능하다. 광소멸 측정법은 질량비 소멸상수(mass specific extinction coefficient)를 알고 있어야 하는 단점이 있지만 레이저와 광학장치의 발달에 따라 실시간 정밀한 측정이 가능하기 때문에 연소공학이나 화재공학 분야의 많은 연구에 활용되고 있다⁽¹⁻⁴⁾.

광학적 연기밀도 측정에 관한 많은 이전 연구의 경우 챔

버 내에서 가연물의 연소 특성 및 독성을 평가하기 위한 연구가 주로 수행되었으며^(5,6) 구획공간내의 연소특성이나 화재조건에 따른 연기밀도의 측정은 제한적으로 수행되었다. 이는 구획화재 특성을 이해하기 위한 다수의 이전 연구에서 주요 측정이 상대적으로 계측이 용이한 온도나 속도, 압력, 열유속등 전통적인 열유동 변수에 대해 이루어져 왔으며 구획공간내의 연기 거동 메커니즘을 이해하기 위한 연구는 상대적으로 적다. 뿐만 아니라 화재측정은 실험규모가 크고 복잡한 물리적 현상으로 인해 측정과정에 발생할 수 있는 오차수준이 다른 응용분야에 비해 상대적으로 높음에도 불구하고 측정기법의 신뢰성을 파악할 수 있는 정량적인 평가가 제공되는 경우는 많지 않다.

본 연구에서는 Bouguer's 법칙을 적용한 광소멸법을 통해 구획공간의 출입구로부터 유출되는 연기밀도를 실시간으로 측정하였으며 측정기법의 신뢰성을 파악하기 위해 광투과율, 광경로길이, 질량비 광소멸상수 등에 대한 측정 불확실성을 평가한다. 정량화된 신뢰성을 가진 연기측정기법을 바탕으로 화재강도에 따른 구획공간 출입구에서의 연기밀도를 측정하여 구획화재 특성을 이해할 뿐만 아니라 화재측정기법을 향상시키는데 기여하고자 한다.

2. 실험

2.1 광소멸 측정

Figure 1은 레이저 광원의 투과율을 이용한 연기밀도 측정장치의 구성을 나타낸다. 실험장치는 크게 광원부와 감지부로 구성되고 광원부는 레이저와 펄스를 생성하는 Chopper, 광분리기, 기준광의 세기를 모니터링하는 광검출기 및 측정부의 경로길이를 정의하기 위해 사용된 원형관으로 구성된다. 광원으로는 9.7 mW의 출력과 657 nm 파장을 갖는 헬륨-네온(He-Ne) 레이저를 사용하였으며 기계식 Chopper를 이용하여 100 Hz의 주파수를 갖는 펄스를 부여하여 배경신호의 영향을 최소화하였다. 레이저 광원의 안정성을 확인하고 기준신호를 얻기 위하여 광분리기

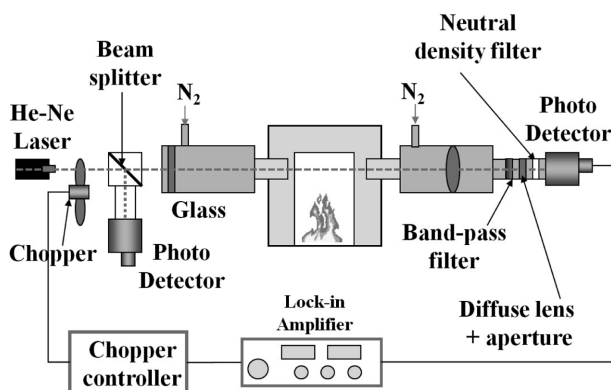


Figure 1. Schematic of the optical smoke density measurement.

(beam splitter)를 설치하였으며 수직방향으로 분리된 빛의 강도는 입사광의 30%이다. 광경로길이(optical path length)를 정의하기 위해 직경 2.5 cm의 스테인레스관을 광원부와 감지부의 끝단에 설치하였으며 관의 내부는 900 ml/min 정도의 질소가스를 공급하여 연소생성물의 유입을 차단하였다.

감지부는 광경로길이를 설정하기 위해 질소를 충전한 스테인레스 스틸관과 광학렌즈부 그리고 투과광의 강도를 측정하기 위한 광검지기(photo detector)로 구성된다. 연기 측정부를 통과한 빛은 650 nm±10 nm의 대역통과필터(band pass filter)를 사용하여 화염이나 주변광의 영향을 배제하고 레이저 광원 파장의 빛만 선택적으로 투과하게 한다. 투과된 광의 강도를 조절하고 빛을 확산시키기 위하여 ND(Neutral density)필터와 조리개 및 확산렌즈를 설치하였다. 광학 렌즈부를 투과한 빛은 350~1100 nm 파장대의 실리콘 광다이오드검출기(silicon photo-diode detector)에 의해 전기적 신호로 바뀌고 Lock-in 증폭기를 이용하여 펄스 광원의 신호를 동기화한 후 증폭하여 신호를 기록한다.

투과율 계측에 의한 연기밀도는 Bouguer's 법칙에 기초하여 산정된다. 연기밀도(m_s)는 연기가 없는 상태에서 투과된 광원의 기준강도(I_0)에 대한 광경로길이(L)인 연기층을 투과한 광원의 강도비로써 다음과 같은 관계를 가진다⁽²⁾.

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-\sigma_s m_s L) \quad (1)$$

여기서, σ_s 는 질량비 광소멸상수(mass specific extinction coefficient)를 나타내며 이 값은 연료의 종류 및 연소상태에 영향을 받는 것으로 알려져 있으나 본 연구에서는 공기 공급이 원활한 상태의 탄화수소계 연료에 대하여 널리 알려진 $8.7 \pm 0.47 \text{ m}^2/\text{g}$ 의 값을 적용한다⁽⁴⁾.

화재실험은 ISO-9795 표준화재실의 40% 축소된 모형 공간(1.46 m×0.98 m×0.98 m)에서 수행되었으며 출입구의 폭은 0.48 m, 높이는 0.81 m이다. 화원은 각 변의 길이가 13 cm인 메탄 가스버너를 이용하였으며 화재강도는 MFC를 통해 공급되는 가스유량을 제어하여 설정된다. 구획화재에서 유출된 연소가스는 한 변의 길이가 3 m인 정사각형 후드를 통해 수집되고 배기 덕트에서 배기가스 농도와 질량유량을 측정하고 산소소모법에 의해 발열량을 산정한다⁽⁷⁾.

2.2 불확실성 해석

일반적으로 불확실성은 측정의 반복성에 기인한 Type A 불확실성과 측정대상 인자들의 불확실성에 기인하는 Type B 불확실성으로 구분되는데 본 연구에서는 연기농도 측정의 반복실험을 수행하지 않았기 때문에 Type B 불확실성에 대해서만 고려한다⁽⁸⁾. 본 연구에서는 연기측정 불확실성에 영향을 미치는 인자로 광원강도비, 광경로길이, 질량비 광소멸상수를 고려한다.

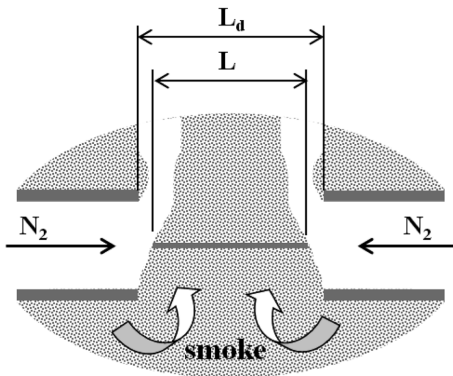


Figure 2. Definition of the optical path length for light extinction measurement.

$$m_s = \frac{\ln(I_o/I)}{\sigma_s L} \quad (2)$$

$$U_{m_s} = U(\ln(I_o/I), L, \sigma_s) \quad (3)$$

개별 인자들에 대한 상대표준불확실도(relative standard uncertainty)를 평가해보면 광경로길이의 경우 Figure 2에서 보는바와 같이 외관상 원형관사이의 거리로 정의할 수 있지만 원형관 내의 가압질소에 의한 유동으로 인해 실제 광경로 길이는 외관상 원형관 사이의 길이보다 짧아진다. 본 연구에서는 연기입자에 의해 산란된 레이저광을 국부 촬영하여 길이를 관측하였고 외관상 경로길이는 평균적으로 0.5 cm 이하로 나타났으며 최대값도 1 cm를 초과하지 않았다. 측정부 길이 24 cm에 대한 광경로 길이의 상대표준불확실도는 8.3 %로 산정된다. 질량비 광소멸상수의 상대불확실도는 앞서 언급한 바와 같이 이전연구에서 알려진 값을 적용하였으며 5.4 %의 상대불확실도를 가진다. 레이저 광의 강도비에 대한 상대표준불확실성은 연기가 없는 조건에서 6분간의 신호를 평균한 기준신호와 투과된 신호비의 표준편차에 의해 계산되며 상대표준불확실도는 0.24 % 이하로 계산되었다. 연기밀도측정에 영향을 미치는 3가지 인자의 민감도상수(sensitivity coefficient)는 각각 다음과 같이 계산된다.

$$S_{\ln(I_o/I)} = \frac{\partial m_s}{\partial \ln(I_o/I)} = \frac{1}{\sigma_s L} = \frac{m_s}{\ln(I_o/I)} \quad (4)$$

$$S_L = \frac{\partial m_s}{\partial L} = -\frac{\ln(I_o/I)}{\sigma_s L^2} = -\frac{m_s}{L} \quad (5)$$

$$S_{\sigma_s} = \frac{\partial m_s}{\partial \sigma_s} = -\frac{\ln(I_o/I)}{\sigma_s^2 L} = -\frac{m_s}{\sigma_s} \quad (6)$$

결합상대불확실도(combined relative uncertainty)는 다음과 같이 계산된다^(8,9).

$$U(m_s) = \sqrt{\sum_{i=1}^N S_{x_i}^2 U^2(x_i)} \quad (7)$$

Table 1. Coverage Factor According to the Confidence Level⁽¹⁰⁾

Level of Confidence [%]	Coverage Factor, k
68.27	1.000
90.00	1.645
95.00	1.960
95.45	2.000
99.00	2.576
99.73	3.000

$$U_R(m_s) = \frac{U(m_s)}{m_s} = \sqrt{\left(\frac{U(\ln(I_o/I))}{\ln(I_o/I)}\right)^2 + \left(\frac{U(\sigma_s)}{\sigma_s}\right)^2 + \left(\frac{U(L)}{L}\right)^2} \quad (8)$$

산정된 측정불확실도의 신뢰수준에 따른 포함인자(coverage factor)는 Table 1과 같고 95 % 신뢰수준의 확장불확실도(expanded uncertainty)는 다음과 같이 계산된다.

$$U_{95}(m_s) = kU_c(m_s) = 1.96U_c(m_s) \quad (9)$$

따라서 본 연구에 적용된 광소멸 측정법의 확장불확실도는 20 % 정도이며 95 % 신뢰수준을 가진다.

3. 결 과

Figure 3은 화재실험 과정동안 측정된 발열량과 화재실 출입구를 통한 연기입자의 밀도를 나타낸다. 준정상상태의 평균 발열량은 180 kW, 270 kW, 420 kW, 80 kW 정도이며 발열량 증가에 따라 출입구를 통해 유출되는 연기밀도는 증가하는데 이는 발열량이 증가함에 따라 구획공간내부의 연료/공기비가 증가하는데 기인한다. 준정상상태의 측정 발열량은 약 5 % 이내의 상대표준편차를 나타내지만

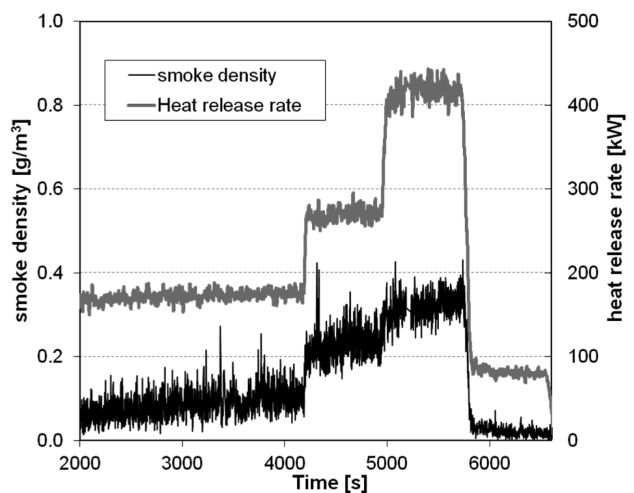


Figure 3. Time history of the heat release rate and the measured smoke density through the doorway.

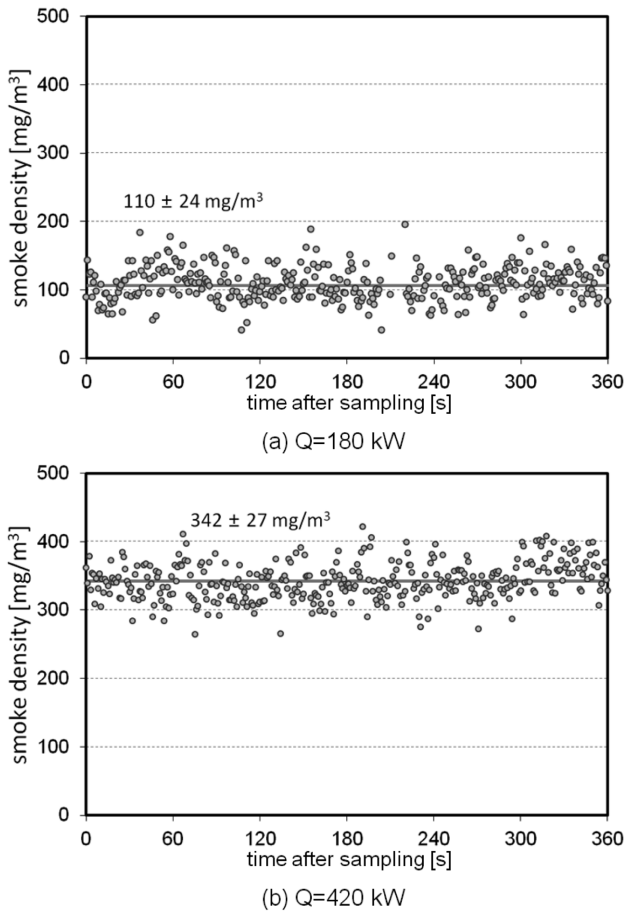


Figure 4. Sampled data of the measured smoke density for calculating the mean and standard deviation.

연기농도의 경우 10~25 %의 상대표준편차를 보였다. 이는 공간내 연기밀도가 출입구를 통한 유동의 영향뿐만 아니라 공간 내에서 연기입자의 생성 및 소멸과정에 영향을 받기 때문인 것으로 생각된다.

Figure 4는 각 발열량 및 연기밀도가 준정상상태에 도달한 이후 평균값을 산정하기 위해 6분간 샘플링된 연기밀도값의 분포와 평균값을 나타낸다. 평균 발열량이 180 kW인 경우 출입구의 상층부를 통해 빠져나가는 연기밀도는 110 mg/m³ 정도이며 420 kW급 화재의 경우 연기밀도는 340 mg/m³ 정도로 측정되었다. 화재 발열량이 증가에 따른 측정된 연기밀도의 상대표준편차를 계산해보면 80 kW의 경우 23.7 %, 180 kW의 경우 21.9 %, 270 kW의 경우 13.3 %, 420 kW의 경우 8.3 %로 나타났다. 특히 270 kW 화재에서 상대표준편차가 크게 감소하는데 이는 공간내의 유입되는 공기에 비해 공급되는 연료량이 많아 공간내부가 연료 과잉상태가 되고 미연연료(unburned fuel)가 공기공급이 원활한 출입구 근처에서 연소반응이 이루어지게 된다. 이로 인해 출화가 시작되어 화원부에서 형성되어 전달되는 부력유동의 영향이 상대적으로 작아지고 화염 내 반응에 의한 연기 입자의 생성/소멸의 영향이 증가하기 때

문인 것으로 판단된다. 따라서 간헐적인 화염출화가 이루어지는 270 kW 화재에 비해 420 kW의 화재의 경우 출입구 상층부에서 지속적인 출화가 이루어지고 상대표준편차는 작게 나타났다.

구획화재의 연소특성에 따른 연기밀도를 비교하기 위하여 본 연구에서는 당량비(GER, Global Equivalent Ratio) 개념을 도입한다⁽¹¹⁾. 구획공간의 출입구를 통해 유입되는 공기의 질량유량은 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{m}_a = KA\sqrt{H_0} \tag{10}$$

여기서 A는 출입구 면적, H₀는 출입구 높이이며 K는 환기상수로 최대 유입량에 대해 0.52를 적용하였다. 연소되는 연료의 질량유량은 발열량과 연료의 연소열에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{Q}}{\Delta H_c} \tag{11}$$

따라서, 각각의 화재조건에 따른 당량비는 다음과 같이 계산된다.

$$GER = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f \gamma_{st}} \tag{12}$$

γ_{st}는 이론공연비(stoichiometric air to fuel ratio)를 나타낸다.

Figure 5는 메탄화재시 당량비에 따른 출입구의 상층부를 통해 유출되는 평균연기밀도를 나타내며 오차막대는 표준편차를 나타낸다. 당량비가 증가함에 따라 연기밀도는 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 화재공간으로부터 유출되는 연기밀도가 공간내의 연소상태에 크게 영향을 받으며 이러한 영향을 정확하게 예측하기 위해서는 화재조건에 따른 연기 입자의 생성/소멸을 고려한 모델

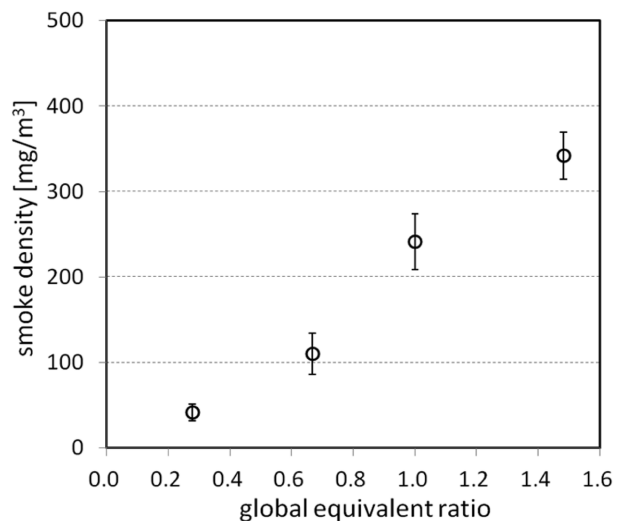


Figure 5. The averaged smoke density as function of global equivalent ratio for methane fire.

이 필요함을 보여준다.

4. 결 론

본 연구는 광소멸법을 적용하여 구획공간의 출입구로부터 유출되는 연기밀도를 실시간으로 측정하고 불확실도 분석을 통해 광투과율, 광경로길이, 질량비 광소멸상수 등의 인자에 대한 측정불확실성을 정량화하였다. 정량화된 연기측정기법을 바탕으로 메탄화재의 환기상태에 따른 구획공간 출입구에서의 연기밀도를 평가하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같이 요약된다.

1) 구획공간의 연기밀도를 측정하는데 있어 실험오차를 최소화하고 측정인자들의 영향을 구분하기 위한 실험장치를 구성하였으며 Bouguer's 법칙을 적용한 연기밀도측정의 정확도는 95 % 신뢰수준에 대해 20 % 정도의 확장불확실도를 갖는 것으로 나타났다.

2) 본 연구에서 측정불확실도에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 광경로길이에 기인하는 것으로 나타났다. 그러나 본 연구의 질량비 광소멸상수는 Mulholland와 Croakin의 연구결과⁽⁴⁾에 따른 값을 적용하였으나 질량비 광소멸상수는 연료 종류 및 연소조건에 따라 영향을 받기 때문에 상대불확실도는 증가할 수 있다⁽³⁾. 그러나 질량비 광소멸상수의 불확실도에 대한 내용은 본 연구의 범위를 벗어나는 부분이며 향후 이에 대한 추가적인 연구를 필요로 한다.

3) 당량비가 1.6 이하인 메탄화재에 대해 당량비가 증가함에 따라 출입구에서의 연기밀도는 선형적으로 증가하는 경향을 보였으며 준정상상태의 화재에 대한 평균연기밀도의 상대표준편차는 출입구를 통한 화염의 출화여부에 따라 큰 차이를 보였다. 연기밀도의 평균값에 대한 상대표준편차는 환기상태에 따라 10~25 % 정도로 나타났다.

본 연구는 화재측정기법의 측정불확실도를 정량화하여 측정의 신뢰성을 확보하는데 기여할 뿐만 아니라 측정기법을 개선하기 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

후 기

이 논문은 2012년도 소방방재청의 차세대핵심소방안전기술개발사업의 지원을 받아 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다(2012-NEMA06-08-0101 0000-2012).

참고문헌

1. M. Y. Choi, G. W. Mulholland, A. Hamins and T. Kashi-

- wagi, "Comparison of the Soot Volume Fraction using Gravimetric and Light Extinction Technique", *Combustion and Flame*, Vol. 102, No. 1-2, pp. 161-169 (1995).
2. G. W. Mulholland, E. L. Johnsson, M. G. Fernandez and D. A. Shear, "Design and Testing of a New Cmoke Concentration Meter", *Fire and Materials*, Vol. 24, No. 5, pp. 231-243 (2000).
3. J. F. Widmann, J. Duchez, J. C. Yang, J. M. Conny and G. W. Mulholland, "Measurement of Optical Extinction Coefficient of Combustion Generated Aerosol", *Journal of Aerosol Science*, Vol. 36, No. 2, pp. 283-289 (2005).
4. G. W. Mulholland and C. Croakin, "Specific Extinction Coefficient Flame Generated Smoke", *Fire and Materials*, Vol. 24, No. 5, pp. 227-230 (2000).
5. B. W. Shin, Y. H. Song, D. H. Rie and K. S. Chung, "A Study on the Analysis of Smoke Density Characteristics for Wood-Plastic Composites", *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 25, No. 3, pp. 119-124 (2011).
6. S. Y. Park, W. S. Lee, H. S. Yeo and H. S. Im, "The Experimental Study for the Smoke Optical Density and Toxic Gases of Sandwich Panel Insulation(Single Chamber Method)", *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 20, No. 4, pp. 26-31 (2006).
7. B. I. Choi, Y. S. Han and M. B. Kim, "Heat Release Rate Measurements of Residential Combustibles Using Oxygen Consumption Method", *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 22, No. 2, pp. 104-107 (2008).
8. B. N. Taylor and C. E. Kuyatt, "Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results", *NIST Technical Note 1297* (1994).
9. S. Bell, "A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement", *Measurement Good Practice Guide No. 11-2*, National Physical Lab. (2001).
10. T. M. Kegel, "Basic Measurement Uncertainty", *71th International School of Hydrocarbon Measurement*, pp. 1-5 (1996).
11. W. M. Pitts, "The Global Equivalent Ratio Concept and the Formmation Mechanism of Carbon-Monoxide in Enclosure Fire", *Progress in ENergy and Combustion Science*, Vol. 21, No. 3, pp. 197-237 (1995).