액체 연료의 열발생율 측정에 관한 실험적 연구

Experiments on the Measurements of heat release rate of liquid fuels

한용식*, 김명배*, 최준석*

Han, Yong-Shik*, Kim, Myung-Bae*, Choi, Jun-Seok*

1. 서론

화재를 특성화하기 위해 사용될 수 있는 가장 중요한 변수는 시간에 따른 화재로부터의 에너지 발생율이다. 이것은 화재의 크기, 화재 성장률, 진압 및 피난에 필요한 가능시간, 효과적인 진압행위를 결정하는 척도 등을 제공한다. 최근에 화재 성장률 예측을 위한 수학적 모델들이 많이 개발되고 있다. 그러나 화재 시에 연소하는 물질들이 단일의 조성이 아닌 복합적인 재료로 구성되어 있기 때문에 모델링에 적용하기에는 곤란한 문제들이 많이 나타나고 있다. 이러한 어려움 때문에 재료의 연소특성과 화재 시스템들의 특성을 구체화하기 위한 대형의 열발생율 측정들을 위한 연구들이 수행되고 있다.[1]

열발생율을 측정하기 위한 방법으로 산소 소모법에 의한 열발생율 측정방법을 사용하고 있다.[1] 소위 산소 소모 열량 계산법이라 불려지는 열발생율의 측정방법은 "화재에서 주로 경험되어지는 유기연료들의 소모된 산소단위당 발생된 열은 폭넓은 범위에 걸쳐 근사적으로 같다"는 원리에 기초하고 있다. 따라서 화재에서 열발생율은 화재시스템을 흐르는 공기유량과 배기가스중의 가스농도 (O_2, CO_2, CO)의 측정에 의해 결정될 수 있다. 이 방법의 정확성은 이들 측정값의 정확성과 가정된 산소소모법의 유용성에 의존된다.

본 연구에서는 산소 소모법에 의한 열발생율 측정장치를 규정하고 있는 ASTM(E 1354-94)[2]에 따라 장치를 제작하였으며, 액체 연료의 화재 발열량 측정에 적용시켰다. 실험 결과로써 메탄올과 에탄올 및 가솔린에 대한 열발생율을 얻었으며, 배기가스 농도 측정방법에 따른 결과들을 비교검토 하였다.

2. 이론적 배경

열발생율의 측정은 전통적으로 시스템에 의해 잃어버린 측정 가능열(sensible heat)의 에너지 평형을 기초로 얻어진다. 실험실 규모의 실험에서는 다양한 계측장비의 사용과 실험의 전 범위에 걸친 측정된 결과들의 종합을 필요로 하고 있으며, 간혹 정확한 결과를 얻지 못하는 경우도 있다.

화재 시에 통상적으로 포함되는 유기연료들의 소모된 산소의 g당 13.1kJ의 열량을 발생시키는 것으로 알려져 있으며, 실험방법의 정확성도 검정되어져 있다.[1,3]

열발생율(heat release rate) 측정에서의

* 한국기계연구원 환경설비연구부

산소 소모법 기법은 작은 크기의 실험실 규모에서부터 매우 큰 규모의 화재실험까지 넓은 범위에 걸쳐 적용되고 있으며, 미국 FMRC에서의 화재규모 산정에도 이 방법을 사용하고 있다. 특히 미국의 ASTM(E 1354-94)[2]에서는 이를 규정하고 있으며, 세계 표준화기구(ISO 5660-1 : 건축제품의 열방출율 시험법) 역시 이 방법을 채택하고 있다.

식(1)과 식(2)은 ASTM의 산소소모법에 의한 열발생율의 환산식이다. 식(1)은 배기가스 중에 산소농도 만을 측정할 경우이고, 식(2)은 배기가스 중의 산소, CO 및 CO_2의 농도를 측정 할 경우의 적용 식으로 연료의 미연에 대한 수정 식이다.

$$\dot{Q}(t) = \left(\frac{\Delta h_c}{r_o}\right)(1.10)C\sqrt{\frac{\Delta P}{T_e}} \cdot \frac{(X_{O_2}^0 - X_{O_2}(t))}{1.105 - 1.5X_{O_2}(t)} \qquad (1)$$

여기서 $\left(\frac{\Delta h_c}{r_o}\right) = 13.1 kJ/g$ 이며,

C는 검정상수(calibration constant)이다. 또한 ΔP는 오리피스 양단의 압력차이며, T_e는 배기가스 온도이다. 여기서 위첨자 ^{0}은 연소 전의 상태를 표시한다.

$$\dot{Q} = 1.10\left(\frac{\Delta h_c}{r_o}\right) X_{O_2}^0 \cdot \left[\frac{\varphi - 0.172(1-\varphi)\frac{X_{CO}}{X_{CO_2}}}{(1-\varphi)+1.105\varphi}\right] \cdot \dot{m}_e \qquad (2)$$

여기서 $\dot{m}_e = C\sqrt{\frac{\Delta P}{T_e}}$ 이며, φ는

$$\varphi = \frac{X_{O_2}^0(1 - X_{CO_2} - X_{CO}) - X_{O_2}}{X_{O_2}^0(1 - X_{CO_2} - X_{CO} - X_{O_2})}$$

3. 실험장치 및 실험방법

그림.1은 산소 소모법에 의한 열발생율을 측정하기 위한 장치의 개략도이다. 유량의 계측은 오리피스 양단의 차압과 온도에 의해 얻어지게 된다. 농도를 측정하기 위한 배기가스의 샘플 채취는 진공펌프에 의해 수행되며, 흡입된 시료 중에 포함된 수분을 제거하기 위해 2℃의 냉동기를 거쳐 가스분석기로 들어간다. 농도 측정에 사용된 O_2 가스 분석기는 ASTM에서 권장하고 있는 상자성 방식(paramagnetic type)이고, CO_2, CO 가스 분석기는 적외선 방식이다. 실험장치의 설계는 ASTM[2]을 기준으로 설계하였다.

실험장치의 검정(calibration)과 검정 계수를 얻기 위해서는 기존에 열발생율이 알려진 화원이 필요하다. ASTM에서는 메탄 버너을 사용하고 있으나, 본 연구에서는 직경이 150mm인 pool인 메탄올 pool fire를 화원으로 사용하였다. 메탄올에 대한 물성치와 연소 효율 등은 관련 문헌[4,5]의 것을 사용하였고, Table 1에 나타내었다.

실험결과의 정확성은 앞에서도 언급된 바와 같이 산소농도 측정의 정확성에 의존된다. 측정된 배기가스 유량에는 연소생성물뿐 만 아니라 연소가스를 희석시키는 주위 공기도 포함되어 있으나 원리적으로는 측정값에 아무런 영향을 주지 않는다. 그러나 너무 많이 흡입될 경우에는 정밀한 산소농도의 측정이 어렵기 때문에 적정량의 공기가 흡입될 수 있도록 예비실험이 필요하게 된다.

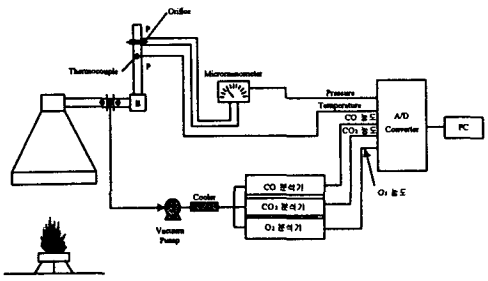

그림.1 화재 발열량 측정 장치의 개략도

Table 1 각 연료의 물성치 및 실험결과[4,5]

Item \ Fuel	Methanol	Ethanol	Gasoline
Mass (kg)	0.40904	0.40901	0.37508
Heat of combustion (kJ/kg)	19845.43	26795.52	-
Latent heat (kJ/kg)	1101	837	-
Gross Heat (kJ)	7667.22	10617.29	-
Measured heat (kJ)	7207.2	9598.8	15672.8
Efficiency of combustion(%)	94	90	-
Average of heat (kJ/sec)	3.47	4.70	12.45

추출된 일정량의 시료에 대해 연속적으로 가스농도가 측정되어 PC에 저장된다. 추출된 시료는 가스농도 분석기에 유입되기 전에 여과, 냉각, 건조의 과정을 거친다. 이때 측정되는 가스들의 종류에 따라 전처리 과정에 약간의 변화가 있어야 된다. 즉 산소 가스 농도만 측정할 경우에는 CO_2와 CO의 가스를 배기가스 성분 중에서 제거시켜야 한다. 반면에 CO_2와 CO농도 분석기가 있는 경우에는 이들 가스들의 농도를 동시에 측정해야 된다.

장비의 검정방법에서 우선 연소효율이 알려진[5] 메탄올에 대한 가스농도가 측정되고, 이것으로부터 전체 발열량과 연소효율을 고려한 검정상수가 구해지게 된다. 이것을 에탄올과 가솔린의 실험에서 얻어진 가스농도의 열량 환산에 사용된다. 이때 주의해야할 사항으로 각 실험을 통하여 배기 가스 량을 일정하게 유지해야 된다는 것이다. 즉 유량이 달라지게 되면 검정상수의 값이 바뀌게 되기 때문이다.

4. 실험결과 및 토의

그림.2는 메탄올을 기준으로 구한 검정상수를 이용하여 측정된 에탄올과 가솔린의 화재하중 곡선이다. 시간에 따른 발열량 곡선을 적분함으로써 연소에 의해 생성된 열량을 계산할 수 있게 된다. 본 연구에서는 Trapezoidal method를 사용하여 적분하였다.

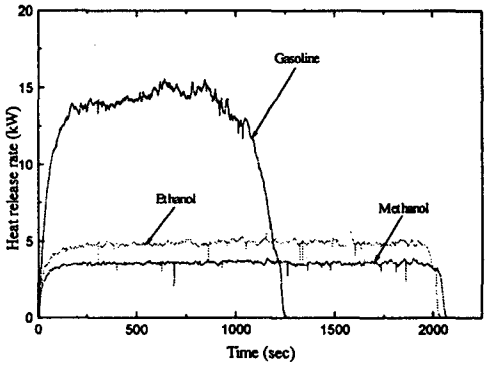

그림.2 각 액체 연료의 발열량 곡선

그림에서 알 수 있듯이, 메탄올의 경우 연소가 이루어지는 동안 거의 일정한 열발생율을 가지는 것을 보여주고 있다. 이 사실을 기초로 하여 본 연구에서는 장치의 검정을 물성치가 비교적 잘 알려진 메탄올을 사용하게 되었다.

에탄올의 연소 경향은 메탄올의 경우와 매우 유사하며, 시간에 따라 거이 일정하다. 그러나 연료가 가솔린의 경우에는 시간에 따른 변동이 관찰되고 있다. 이러한 경향의 원인으로 여러 가지를 생각할 수 있다. 가솔린이 여러 물질을 혼합한 것으로, 혼합된 물질의 물리적 성질의 차이가 많이 가질 수 있다. 또한 가솔린의 발열량이 크기 때문에 연료 pool의 온도변화가 크기 때문일 가능성도 있다.

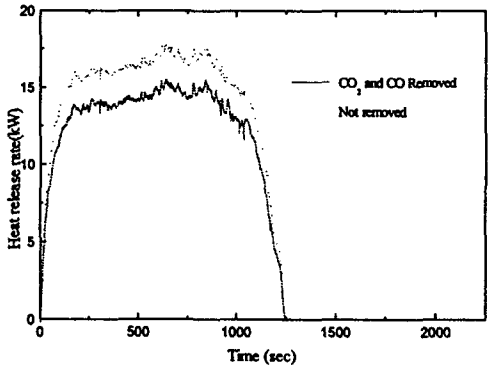

그림.3 CO_2와 CO가스의 제거가 발열량 곡선에 미치는 영향

그림.3은 산소 소모법에 의한 발열량 측정에서 배기가스 농도 중에 산소만을 측정한 경우와 배기가스 중에 CO_2와 CO가스를 제거한 후에 측정된 산소농도를 가지고 발열량을 구하였을 때의 차이를 보여주고 있다. 산소 소모법에서는 산소농도 만을 측정하여 발열량을 산정하는 경우에는 배기가스 중에 CO_2와 CO가스를 제거한 후에 측정하여야 한다고 규정되어 있다. 그림에서 알 수 있듯이 CO_2와 CO가스를 제거하지 않았을 경우 15%정도가 과도하게 계산된 결과를 얻었다. 산소농도 만을 측정하여 화재발열량 곡선을 구할 경우 CO_2와 CO가스를 배기가스 중에서 제거하기 위한 적절한 조치를 취하여야 한다.

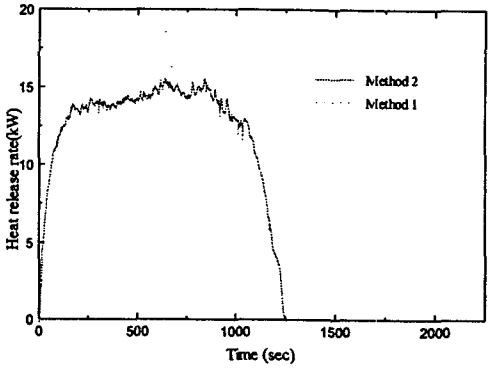

그림.4 환산방식에 따른 발열량곡선의 변화

그림.4는 배기가스 중에 CO_2와 CO가스를 제거한 후에 측정된 산소농도 만을 사용하여 구한 발열량곡선(Method 1)과 배기가스 중에 산소뿐만 아니라 CO_2와 CO가스의 농도를 측정하여 구한 발열량 곡선(Method 2)의 차이를 보여주고 있다.

두 가지 방법으로 구한 발열량 곡선이 거이 일치하고 있음을 알 수 있다. 앞서 언급된 식 (1)은 산소농도 만을 측정한 경우의

발열량 환산 식이며, 식(2)이 산소, CO_2와 CO가스의 농도를 측정하여 발열량을 구하는 식이다. 따라서 산소농도와 CO_2와 CO를 동시에 측정 한 후에 두 개의 환산식 중 어느 것을 사용하여도 거의 같은 결과를 얻을 수 있을 것이다.

5. 결론

액체연료의 열발생율을 산소 소모법에 의해 측정하였다. 산소 소모법은 소모된 산소 단위 질량당 발생된 열량은 근사적으로 같다는 원리에 기초하고 있다. 산소농도의 측정은 상자성방식의 가스 분석기를 사용하였고, CO_2 및 CO가스 농도는 적외선 방식의 분석기를 사용하였다.

배기가스의 체적유량은 배기덕트 내에 설치된 유량 오리피스 양단의 차압과 온도로써 환산하였다. 농도 측정방법에 따른 결과들을 비교 검토하였다.

이들의 결과들로부터 산소소모법의 방법론을 검토하였으며, 이를 바탕으로 화재하중의 정량화에 도움이 될 것으로 생각된다.

■참고문헌

1. W. J. Parker " Calculations of the Heat Release Rate by Oxygen Consumption for Various Applications", NBSIR 81-2427-1 보고서, 1982. 2 : 미국 표준국 보고서

2. ASTM E 1354-94 : Standard Test Method for Heat and Visible Smoke Release Rates for Materials and Products Using an Oxygen Consumption Calorimeter : 미국 ASTM 시험기준

3. C. Huggett, " Estimation of rate of Heat Release by Means of Oxygen Consumption Measurements ", Fire and Materials, vol. 4, 1980, pp. 61-65

4. A. M. Kanury, Introduction to Combustion Phenomena, Gordon and Breach, 1977.

5. C. C. Ndubizu etal. " A model of Freely Burning Pool Fires", Combustion Science and Technology, vol. 31, 1983, pp. 233-247.