

산소소모법을 이용한 주택 가연물 발열량 측정

최병일, 한용식, 오창보, 김명배, 최준석
한국기계연구원 환경에너지기계 연구본부 에너지기계 연구센터

Heat release rate measurements of residential combustibles using oxygen consumption method

Byung-Il Choi, Yong-SHik Han, Chang-Bo Oh, Myung-Bae Kim, Jun-Seok Choi
Korea institute of machinery and materials

1. 서론

최근 들어 세계적으로 확산되고 있는 성능기반 화재안전설계 기준에 따라 인명이 다수 거주하는 대형 소방대상물에서의 소방안전 설계 tool의 개발 필요성이 늘어나고 있다. 우리나라 역시 2009년도부터 “성능위주설계(PBD) 기반 국가 화재안전기준”의 적용이 예정되어 있어 이를 실행할 관련 기술 개발이 필수적이다. 또한 정량적 화재위험성 평가에 의한 화재위험관리가 시작되고 있으며, 화재위험에 대한 사회적 위험통제의 필요성이 대두되고 있다.

성능위주설계의 적용을 위한 가장 중요한 변수는 방호공간별로 시간에 따라 화재로부터 발생하는 열발생률(heat release rate)의 기준을 정하는 것이다. 즉 공간별 표준 화재 시나리오로부터 화재의 크기, 화재 성장률, 연기발생량을 결정하고 이로부터 진압 및 피난에 필요한 가능시간, 효과적인 진압 방법이 결정된다. 그러나 화재 시에 연소하는 물질들이 단일의 조성이 아닌 복합적인 재료들로 구성되어 있기 때문에 모델링을 적용하기에는 곤란한 문제들이 많이 나타나고 있다. 이러한 어려움 때문에 외국의 여러 연구기관들은 가연물별 연소특성을 구체화하기 위해 대형 Cone-calorimeter를 사용한 화재 발생률 측정실험들을 수행하고 있으며 다양한 가연물들에 대한 자료들을 확보하고 있다.¹

국내 대표 가연물들은 생활환경 차이 때문에 외국 자료를 그대로 사용하기에는 원천적으로 한계가 있지만 이를 뒷받침할 만한 국내 연구²는 미미한 실정이며 주로 외국의 자료를 인용하는 수준이다.

따라서 본 연구에서는 가정에서 필수적으로 사용하는 장롱, 냉장고 및 책장에 대한 화재발열량 측정을 수행하였다. 또한 화재공간별 발열량의 차이를 검토하기 위해 실규모의 화재실을 구성하였으며, 실물 연소실험을 수행함으로써 국내실정에 적합한 다양한 가연물에 대한 연소특성 자료 확보하고자 하였다.

2. 실험방법

통상적인 유기 가연물들은 연소시 소모된 산소 1g당 13.1kJ의 열량을 발생시키는 것

으로 알려져 있기 때문에 연소가스 배관을 흐르는 연소가스 유량과 배기가스중의 가스 농도 (O₂, CO₂, CO)의 측정결과로부터 발열량 계측이 가능하다. 이 방법은 전 세계적으로 작은 크기의 실험실 규모에서부터 매우 큰 규모의 화재실험까지 넓은 범위에 걸쳐 적용되고 있다.^{3,4,5}

Fig. 1은 실험에 사용된 산소 소모법^{3,4,5}에 의한 가연물 발열량 측정 장치의 개략도이다. 연소 공간에서 연소하는 가연물의 가스는 상부의 일정크기 후드에 의해 포집되어 배관을 통해 외기로 배출된다. 이때 배관 하류에서 가스분석용 연소가스가 채취되며, 유속과 온도계측이 이루어진다. 계측된 정보들은 PC에서 처리되어 발열량으로 환산된다.

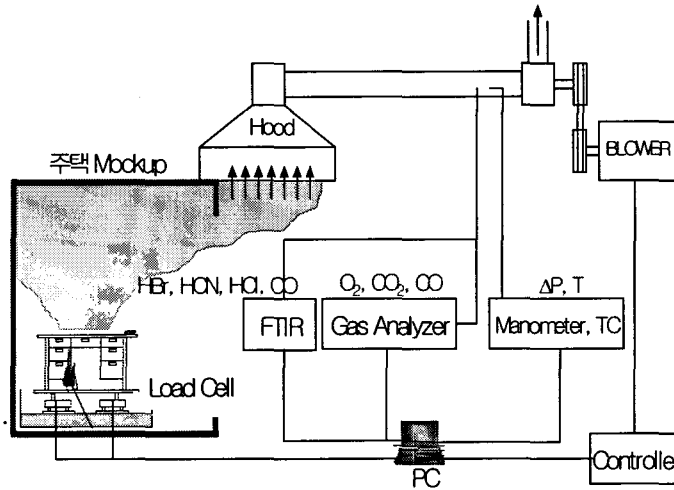


Fig. 1 실험장치 개략도

식(1)과 식(2)는 ASTM⁴의 산소 소모법에 의한 열발생율의 환산식이다. 식(1)은 배기가스 중에 산소농도 만을 측정할 경우 적용되는 식이고, 식(2)은 배기가스 중의 산소, CO 및 CO₂의 농도를 측정 할 경우의 적용 식으로 연료의 불완전연소를 고려한 식이다.

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

여기서 $\left(\frac{\Delta h_c}{r_o}\right) = 13.1 \text{kJ/g}$ 이며, C 는 검정상수(calibration constant)이다. 또한 ΔP 는 오리피스 양단의 압력차이며, T_e 는 배기가스 온도이다. 여기서 위첨자 ⁰는 연소 전의 상태를 표시한다.

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

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

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

연소환경의 변화에 따른 화재 발열량을 계측하기 위해 Fig. 1에 나타난 것과 같이 주택형 Mock-up이 제작되었다. 외장 형태는 산업용 컨테이너이고, 내부는 석고판으로 마감하였다. 공간 크기는 2.4m(W)×3.0m(D)×2.3m(H)이며, 출입문은 0.8m(W)×2.0m(H)로 완전 개방한 상태로 실험하였다.

3. 실험결과

가. 개방공간에서의 화재발열량

Fig. 2는 장롱의 연소과정을 시간에 따라 정리한 사진이다. 사용된 장롱은 일반 가정에서 많이 사용하는 형태의 것으로 전면은 원목으로 된 양쪽 여닫이문이며, 나머지 면은 5mm정도의 얇은 합판으로 제작되었다. 실제 크기는 1,140×700×1,980mm이며, 무게는 75kg이다. 일반 가정에서의 장롱 내부를 모사하기 위해 티셔츠 2벌(0.6kg)과 화학섬유로 된 2채의 이불(4.5kg)을 적체하였다. 이불에 점화가 이루어졌으며, 점화를 위한 별도의 연료는 사용하지 않았다. 장롱의 표준발열량 계측이 목적이기 때문에 장롱내부로 연소에 필요한 공기가 공급될 수 있도록 장롱 문을 30° 개방하였다. 점화 후 화재는 이불 전체로 확산되었고 상부의 옷을 태우면서 장롱 전체로 전파되었다. 이러한 현상은 화재발열량 측정결과와도 잘 일치된다. Fig. 3은 산소 소모법에 의해 측정된 장롱의 화재발열량 곡선을 나타낸다. 점화초기에 화학섬유 이불에 의해 화재가 성장하고 점화 후 2분경과 시점에서 2.0MW 크기를 일정시간 유지한다. 이 시기가 화재가 목재로 된 장롱으로 전파가 되는 시점이며, 목재가 본격적으로 연소하면서 화재가 4.2MW까지 급격하게 성장한다. 원목으로 된 가구의 경우 화재가 전파되는 데는 어느 정도의 시간이 필요하지만 얇은 합판으로 된 장롱의 경우 화재전파에 소요되는 시간이 짧을 뿐만 아니라 넓은 가연물 표면에 동시에 전파되기 때문에 화재크기 역시 매우 크다. 이러한 결과는 책상의 연소결과에서도 잘 나타나고 있다.

Fig. 4는 우레탄 폼을 단열재로 사용한 냉장고의 연소과정을 시간에 따라 정리한 사진이다. 외형이 550×550×1,380mm이고 무게가 48.1kg의 냉장고가 실험에 사용되었다. 화재는 냉장고 뒤편의 압축기에서 화재가 발생한 것으로 가정하였다. 화재초기에는 냉장고의 표면을 따라 화재가 전파되며, 시간의 경과에 따라 내부 단열재로 화재가 전파되면서 화재크기가 성장한다. 이 후 냉장고 전면으로 화재가 전파되는데 최대 1.0MW까지 성장하였다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 점화 후 7분경에 최대화재 크기를 갖는다.

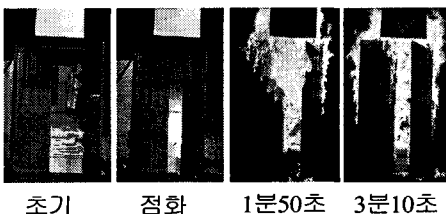


Fig. 2 장롱의 연소사진

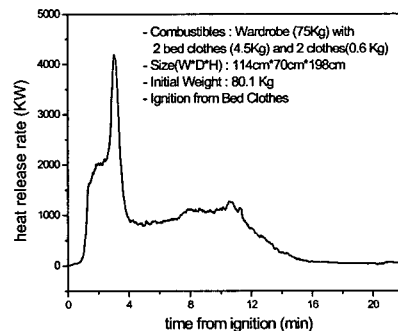


Fig. 3 장롱에 대한 화재발열량 곡선

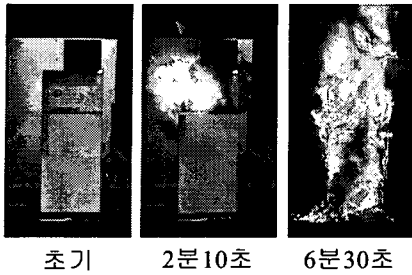


Fig. 4 냉장고의 연소과정

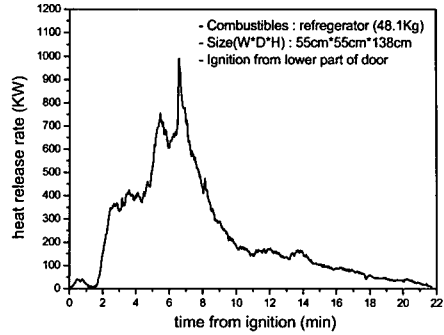


Fig. 5 냉장고에 대한 화재발열량 곡선

Fig. 6은 목재책상이 연소하는 과정을 나타낸 것이다. 외형이 1,200×700×740mm이고 무게가 43.6kg인 개인용 책상이 실험에 사용되었다. 책상의 한쪽은 서랍으로 구성되어 있고 뒤쪽은 합판재질로 되어 있다. 사용된 화재 시나리오는 책상아래의 콘센트에서 점화한 것으로 가정하였다. 화재 초기는 작은 규모로 화재가 전파되어 나가는데 8분이 경과한 후에는 화재가 급격하게 상부로 전파되면서 규모가 커진다. 최대 화재크기는 점화 후 13분 경과한 시각에 0.8MW정도의 값을 가진다. 이후 일정한 크기의 화세를 유지하다가 점차 발열량이 줄어든다.

나. 연소 환경변화에 따른 발열량 변화

가연물이 연소할 때 공급되는 산소는 연소공간의 제약을 많이 받는다. 개방공간에서 연소할 경우 산소가 원활하게 공급되기 때문에 연소현상은 재료의 특성에 의해 결정된다. 이와는 반대로 연소 가연물이 밀폐 혹은 반밀폐공간에서 연소할 경우 산소의 공급이 연소현상에 매우 중요한 역할을 담당하게 된다. 또한 연소 공간 벽면으로부터의 복사열에 의해 가연물이 가열되어 증발 혹은 열해리가 더 활발하게 진행될 것이다. 본 연구에서는 연소공간의 조건에 따른 화재발열량 변화를 관찰하였다. 앞서 기술한 책상과 동일한 책상을 사용하였으며 측정된 화재발열량을 Fig. 8에 나타내었다. Fig.7과 비교 시 화재가 성장하는 기간인 점화 후 13분이 경과까지는 거의 유사한 화재발열량을 가짐을 보여준다. 하지만 최대 성기화재에서는 화재크기에 있어서는 확연한 차이를 보여준다. 개방공간의 경우 14분경과 시에 0.8MW의 규모를 나타내고 있지만 연소 공간 내에서는 16분경과 시에 1.1MW의 크기를 가짐을 볼 수 있다. 이것은 성기 화재 시 주변 벽면으로부터 오는 복사열이 가연물인 목재의 열해리를 촉진한 결과로 사료된다.

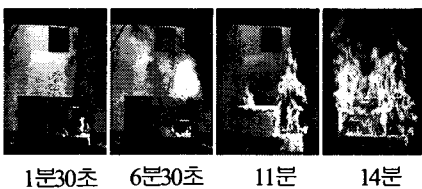


Fig. 6 책상의 연소과정

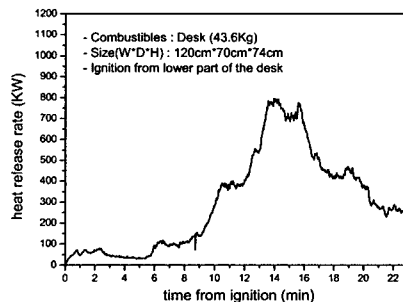


Fig. 7 개방공간 조건에서의 책상의 대한 화재발열량 곡선

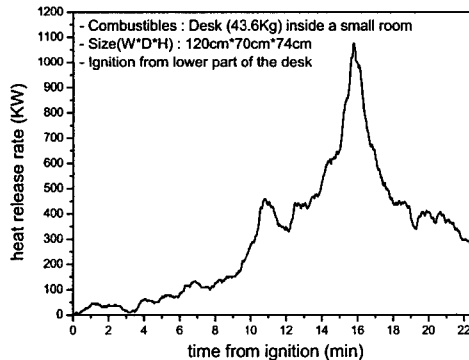


Fig. 8 연소실 Mock-up 내에서의 책상에 대한 화재발열량 곡선

4. 결론

산소 소모법을 이용한 화재발열량 측정 장치를 구성하고 대표적인 주택 가연물인 장롱, 냉장고, 책상에 대하여 화재 발열량을 측정하였다. 발열량 측정 결과 최대 발열량은 각각 장롱 1.0MW, 책상 0.8MW, 장롱 4.2MW로 나타났으며, 특히 냉장고와 장롱의 경우 화재성장속도가 상대적으로 빨라 위험요인이 큰 것으로 나타났다. 또한 가연물의 연소 환경에 따른 화재발열량이 변화하기 때문에 화재발열량 측정을 위한 표준 화재 시나리오의 정립이 필요할 것으로 판단된다.

5. 후기: 본 연구는 소방방재청 인적재난 안전기술개발사업의 지원에 의해 수행되었습니다.

6. 참고문헌

1. R. A. Bryant, "The NIST 3 Megawatt Quantitative Heat Release Rate Facility", NIST SP1007, 2003
2. 한용식, 김명배, 최준석, "산소소모법에 의한 액체 연료의 열발생을 평가", 제12권 제3호, pp33-37, 1998
3. 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
4. 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
5. C. Huggett, "Estimation of rate of Heat Release by Means of Oxygen Consumption Measurements", Fire and Materials, vol. 4, 1980, pp. 61-65