

A-06

주거공간 주요 가연물의 화재 발열량 특성

최준석, 최병일, 장용재, 한용식, 김명배
한국기계연구원 열유체공정기술연구부

Heat Release Rates of Principal Fire Sources in Living Space

J. S. Choi, B. I. Choi, Y. J. Jang, Y. S. Han, M. B. KIM
Thermo-Fluid Systems Department,
Korea Institute of Machinery and Materials

1. 서 론

화재는 다양한 복합가연물의 연소현상으로 이해될 수 있으며, 다양한 가연물의 연소시 발생하는 열, 연기 및 유해가스 및 가연물의 연소상태는 화재피해에 직접적으로 영향을 미친다. 다양한 복합 가연물에 대한 연소실험을 통한 연소 발열량, 유해가스 발생자료 및 이의 저감 기술은 화재의 크기, 화재 성장, 피난 가능시간, 효과적인 화재진압 등의 화재안전 설계를 위한 원천 기술이다. 그러나 이에 대한 관련 국내 연구는 미미한 실정이며 주로 외국의 자료를 인용하는 수준이다. 그러나 국내 복합가연물의 성상이 생활환경의 차이에 따라 외국과 상이하므로 외국 자료를 그대로 사용하는 데에는 원천적인 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 다양한 복합 가연물에서 발생하는 발열량, 연기 및 유해가스를 계측하기 위한 기술과 실험설비를 구축하고 이를 활용하여 실물 연소실험을 수행함으로써 국내실정에 적합한 다양한 가연물에 대한 연소특성 자료 확보하고자 하였다.

2. 산소소모법에 의한 발열량 측정

가연물이 연소과정에서 방출하는 발열량은 산소 소모법(Oxygen Consumption Principle)^{1,2)}을 적용하여 측정할 수 있다. 산소 소모법은 일상에서 주로 경험되는 가연물이 연소할 때 소모되는 산소의 단위당 발생 열량은 넓은 범위에서 근사적으로 같다는 가정에 근거를 두고 있다. 가연물이 연소할 때 실험장치의 배기가스 배출관을 지나는 유량과 가스농도(O₂, CO, CO₂)를 계측하여 다음식 (1), (2)와 같이 가연물의 발열량을 측정 할 수 있다.³⁾

식 (1)은 배기가스에서 CO₂와 CO성분을 제거한 상태에서 O₂를 측정할 경우 적용 되는 식이며 식 (2)는 O₂, CO₂와 CO를 측정하는 경우 적용된다.

$$\dot{q} = \left(\frac{\Delta h_c}{r_o} \right) (1.10) C \sqrt{\frac{\Delta p}{T_e}} \frac{X_{O_2}^o - X_{O_2}}{1.105 - 1.5X_{O_2}} \quad \text{-----(1)}$$

$$\dot{q} = 1.1 \left(\frac{\Delta h_c}{r_o} \right) X_{O_2}^a \left(\frac{\phi - 0.172(1-\phi)X_{CO}/X_{O_2}}{(1-\phi) + 1.105\phi} \right) C \sqrt{\frac{\Delta p}{T_e}} \quad \text{-----}(2)$$

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

위 식에서 $\frac{\Delta h_c}{r_o}$ 는 소모되는 산소 g당 발열량으로 일반적으로 가연물에 대해 13.1×10^3 kJ/kg을 사용하며 $X_{CO_2}^o$ 는 초기의 CO₂ 농도를 나타내고 X_{CO_2} , X_{CO} 는 실험중 측정된 CO₂와 CO의 농도를 각각 나타낸다. T_e , Δp 는 가스온도와 차압을 나타내며 C는 유량측정장치의 보정계수를 나타낸다. 가연물의 발열량 측정을 위해서는 실험 전에 발열량이 알려진 가연물에 대한 실험을 수행하여 측정시스템에 대한 보정실험을 수행하여 보정 계수를 결정 하여야 하며 다음 식 (3)에 의해 보정계수를 결정 한다.

$$C = \frac{\dot{q}_b}{(12.54 \times 10^3)(1.10)} \sqrt{\frac{T_e}{\Delta p} \frac{1.105 - 1.5X_{O_2}}{X_{O_2}^o - X_{O_2}}} \quad \text{-----}(3)$$

3. 실험 연소실험 장치 및 실험 방법

그림 1은 본 연구에서 가연물의 발열량 측정을 위해 산소소모법을 적용하여 구성된 실험 연소실험장치의 구성도를 실험에 사용된 점화용 버너와 함께 나타낸다. 실험장치는 NIST, NRC등 외국기관설비와 ISO5660등 관련된 국제규격을 검토하여 설계제작 하였으며 연소실험대상 가연물이 위치할 시험편 설치대와 후드를 포함한 연소가스 배기시스템, 유속측정 시스템, 가스분석 시스템, 촬영장치, 점화장치 및 데이터 처리시스템으로 구성 하였다. 시험편 설치대는 연소되어 감소되는 중량의 실시간 계측을 위한 중량계측 시스템이 내장되었으며, 실험 중 열에 의한 손상을 방지하도록 하였다.

시험편 설치대에는 실험 중 실시간으로 가연물의 연소량을 계측하기 위하여 로드셀을 설치하였으며 연소열 및 연소 부산물에 의한 손상을 방지하기 위하여 단열보호 장치를 함께 설치하였다. 배기 시스템은 단면적 3m×3m의 단면적을 가지는 후드와 직경 700mm인 배기가스 배출용 직관부, 인버터를 이용한 가변 배기송풍기로 구성되어 있다. 직관부에는 가스분석을 위한 가스 추출장치와 배기가스 유량측정을 위한 차압식 유량측정장치를 설치 하였다. 배기가스는 가스분석기에서 O₂와 CO가 측정되고 적외선 방식이 요구되는 CO₂는 별도의 적외선방식 분석 장치를 설치하여 측정 한다. 또한 유량측정에 필요한 차압은 정밀 차압계를 이용하여 측정 하였다. 가연물의 점화를 위해 그림 1(b)에 나타난 바와 같이 ASTM E1357에서 요구하는 사각버너를 제작하여 실험 시 점화 원으로 사용 하여 점화열량을 일정하게 유지 하도록 하여 점화방법에 따른 실험 오차를 줄이도록 하였다.

주거용 주택의 화재를 고려하여 실험 가연물로는 일반 아파트의 가정용 가구류(소파, 장롱, 싱크대, 책상, 출입문)를 대상으로 연소실험을 수행하고, 연소특성을 나타내는 착화

소요시간, 연소상태가 최고조에 달하는 연소최성기, 실험가구류의 연소 중 질량 감소율, 발열량, 배기온도, 배기가스 중 O₂, CO 및 CO₂ 농도들을 측정, 분석하였다.

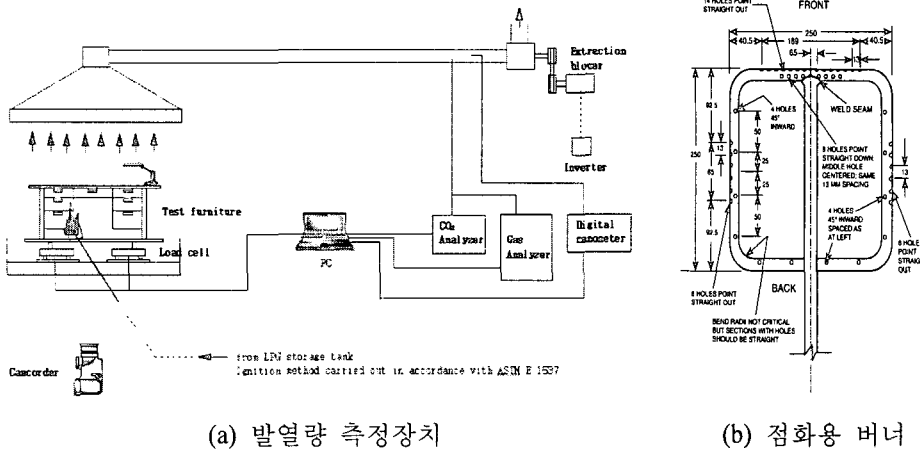


그림 1. 가연물 연소실험장치 구성도

4. 실험 연소실험결과

본 연구에서 실험된 주요 가정용 가구류에 대한 제원과 실험결과를 요약하면 다음 표 1과 같다.

표 1. 가정용 가구류 연소실험결과 요약

| 품명 | 제원 | 주요결과 |
|-----|--|--|
| 소파 | <ul style="list-style-type: none"> - 종류 : 1인용 - 재질 : 표면 인조가죽 - 중량 : 17.4kg - 크기 : 950×930×850 mm - 점화위치 : 전면 하단 중앙 | <ul style="list-style-type: none"> - 착화소요시간 : 11 sec - 최고점 시간 : 착화 후 3분 - 최대 화염높이 : 2m - 계속적인 화재 확대 - 최대발열량 : 1590kw |
| 장롱 | <ul style="list-style-type: none"> - 종류 : 문 2짝, 하단서랍 2개 - 재질 : 목재, 표면 도장 - 중량 : 장롱 57kg, 의류 1.4kg, 이불2채, 베개3개- 15.57kg - 크기 : 900×620×1830mm | <ul style="list-style-type: none"> - 착화소요시간 : 16분 - 최고점 시간 : 착화 후 14분 - 착화가 어렵지만 순간적 연소확대 - 주택화재 확대에 크게 기여예상 - 최대발열량 : 2900kw |
| 싱크대 | <ul style="list-style-type: none"> - 종류 : 목재 싱크대, 표면도장 - 중량 : 주방용 그릇류 : 3kg, 총중량 : 31kg - 크기 : 600×600×700mm | <ul style="list-style-type: none"> - 착화소요시간 : 20분 - 최고점 시간 : 착화 후 8분 - 착화가 일어난 후에는 내부의 그릇류와 함께 격렬하게 연소 - 최대발열량 : 440kw |
| 책상 | <ul style="list-style-type: none"> - 재질 : 목재, 표면 도장 - 중량 : 책상 - 27.8kg, 책꽂이 - 7.2kg, 도서류 - 25kg - 크기 : 책상 970×600×750mm, 책꽂이 - 970×300×400mm | <ul style="list-style-type: none"> - 점화소요시간 : 190초 - * 하단부 서랍 열어둠 - 최고점 시간 : 점화 후 9분 - 최대발열량 : 920 kw |
| 출입문 | <ul style="list-style-type: none"> - 종류 : 문틀, - 재질 : 목재, 표면 도장 - 크기 : 1100×2200mm | <ul style="list-style-type: none"> - 점화소요시간 : 25분 - 최고점 시간 : * - 3분연소후 자연 소화 |

그림 2는 가정용 소파에 대한 연소실험 결과를 나타낸다. 소파의 점화 소요시간은 11초로 아주 빠른 시간에 점화되는 것으로 나타나 집 내부에 화원이 있는 경우 화재 위험성이 매우 높은 것으로 확인 되었다. 그림 3.1(a), (b)는 점화 초기의 연소상태와 연소가 최고로 진행된 시점의 연소상태(최성기 상태)를 나타냈으며, 이 때의 화염높이는 약 2m 정도로 관측되었다. 그림 3.1(c)는 연소 실험 중 질량 감소를 측정된 결과로 연소 초기에는 질량 감소율이 적지만 서서히 증가하여 3분 정도 경과한 시점에서 최대 0.15kg/s 로 나타났다. 400초 정도 경과하여 질량이 급격히 줄어드는데, 이 것은 소파의 연소 구성물이 질량 측정장치 외부로 떨어져 나간데 원인이 있다. 그림 3.1(d)는 연소 생성물 측정 결과를 토대로 발열량을 측정된 결과로 O₂ 농도만을 사용한 결과와 O₂, CO₂, CO 농도를 이용한 결과를 비교하여 나타내고 있다. O₂ 농도만을 사용하였을 때 최대 발열량은 1,800kw, O₂, CO₂, CO 농도를 사용하였을 경우에는 1590kw로 약 13% 정도의 차이가 발생하고 있어 CO₂와 CO를 제거하지 않고 O₂만을 사용하여 발열량을 측정하는 경우 발열량이 실제보다 더 높게 나타날 수 있다.

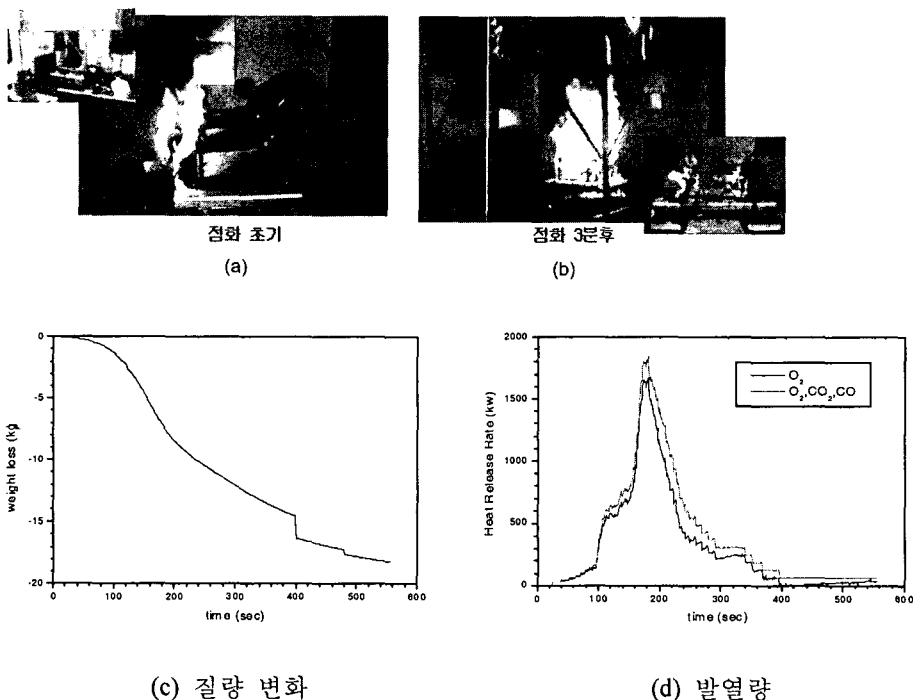


그림 2. 소파의 연소실험 결과

그림 3은 가정용 장롱에 대한 연소실험 결과를 나타낸다. 실험용 장롱은 점화버너에 의한 점화 소요시간은 16분으로 집 내부에 화원이 있는 경우 그로부터 화염의 전파가 쉽사리 이루어지지 않는 것으로 나타났는데, 이는 화염에 쉽게 착화되지 않는 도료 등의 연소 과정이 선행되기 때문인 것으로 생각된다. 그림 3(a), (b)는 점화 초기의 연소상태와 연소

가 최고로 진행된 시점의 연소상태(최성기 상태)를 나타낸 것으로 초기의 착화는 쉽지 않지만 일단 착화가 이루어진 후에는 장롱 내부의 섬유류와 함께 연소되어 매우 극렬한 상태의 연소가 이루어져 아파트 및 주택화재의 경우 순식간에 주위로의 화재 전파를 일으킬 수 있는 요소인 것으로 나타났다. 그림 3(c)는 연소 실험 중 발열량을 측정된 결과로서, 점화용 화염을 접촉한 약 14분 후에 최성기 상태가 나타났으며, 이 때의 최고 발열량은 2,900kw이다.

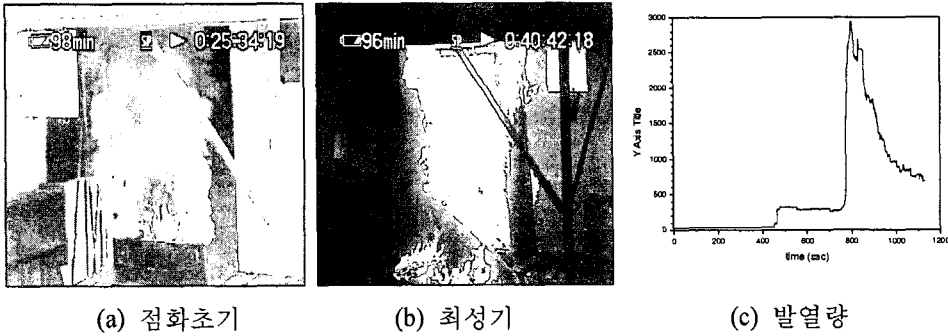


그림 3. 장롱의 연소실험 결과

싱크대는 그 착화성능을 알아보기 위하여 모든 문을 폐쇄한 상태에서 실험한 결과 착화하는데 약 20분의 시간이 소요되었다. 그러나 착화가 일어난 뒤에는 내부의 그릇류와 함께 격렬하게 연소되었으며 최성기는 착화 후 약 8분이 지나서 나타났으며 이때 발열량은 440 kw로 나타났다.

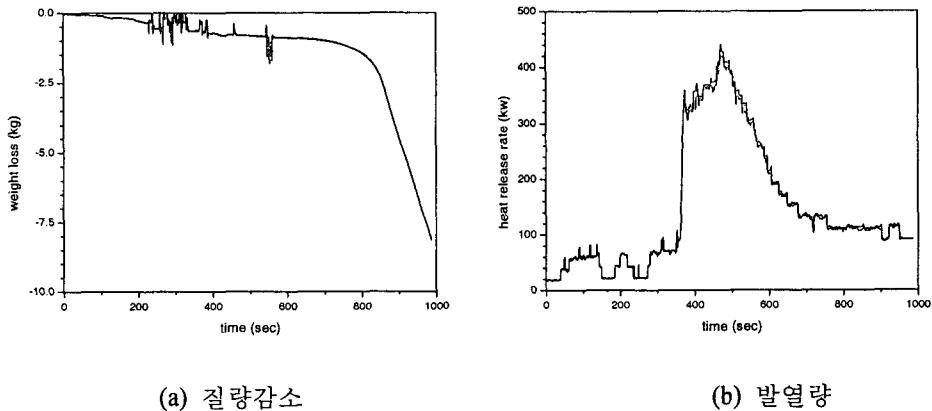
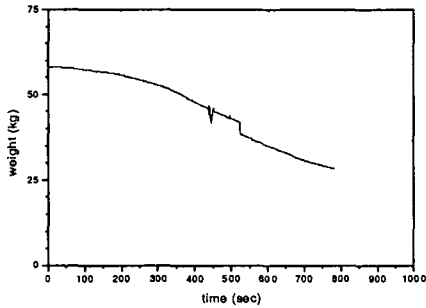


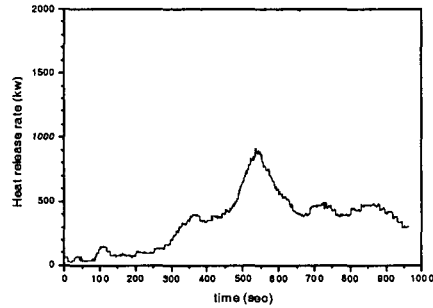
그림 4. 싱크대의 연소실험결과

책상의 연소실험은 책꽂이와 도서류를 포함하여 이루어졌으며, 책상 위와 서랍 내부, 또한 책꽂이에는 총 7.2kg의 각종 도서류를 분산 배치하였다. 점화 방법에 있어서 앞서 실험한 장롱과 문틀 및 문짝에서 나타난 점화의 어려움을 고려하여 보다 쉽게 점화가 이루어질 수 있도록 책상의 하단부 서랍 한개를 약간 열어놓고 그 서랍의 하단부에 점화버

너의 불꽃을 접촉시키는 방법으로 하여 3분 10초 만에 착화되도록 하였다. 그림 5 (a), (b)는 책상의 연소 실험 중 측정된 질량감소와 발열량을 나타낸 결과이다. 그림 5 (b)에서 알 수 있듯이 연소의 최성기는 착화 후 9분 정도에 나타났으며, 발열량의 최대 값은 920kw이다.



(a) 질량 감소량



(b) 발열량

그림 5. 책상의 연소실험 결과

출입문의 연소는 도포된 페인트 및 니스 등의 도료가 선행적으로 연소된 후 목재에 연소가 전파되는 과정으로 인하여 극렬한 연소는 이루어지지 않는다는 것을 확인할 수 있었으며, 착화 후 일정시간(약 3분)이 지나 자연적으로 소화되었다.

5. 결 론

산소소모법을 적용한 실물 연소실험시스템이 구축 되었으며 외국과는 성상에서 차이가 있는 다양한 국내가연물에 대한 실물 연소실험이 가능하게 되었다. 이를 이용하여 국내의 대표적인 주거형태인 아파트에서 화재가 발생하는 경우 화재 확대 및 피해에 크게 영향을 미치는 대표적 가연물인 가정용 가구류에 대한 실물 연소실험을 수행하였으며 확보된 연소특성 및 발열량자료는 화재 확대, 화재규모 예측등에 직접적으로 활용될 수 있으며, 향후 보다 다양한 가연물에 대한 실험 및 분석결과를 전산 자료화 하여 화재안전 설계에 필요한 기술 자료를 제공할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Hinkley, P., H. Wraight, and A. Wadley, "Rates of Heat Output and Heat Transfer in the Fire Propagation Test", Fire Research Note No. 709, Fire Research Station, England (1968)
2. Hugget, W., "Estimation of the Rate of Heat Release by Means of Oxygen Consumption", J. of Fire and Flammability, Vol. 12, pp. 61-65 (1980)
3. Parker, W., "Calculation of the Heat Release Rate by Oxygen Consumption for Various Applications, J. of Fire Sciences, Vol. 2, pp. 380-395 (1984)