

실대형화재평가장치의 개발 및 안정화에 관한 연구 The Study of Development and Calibration for the Real Scale Fire Test Facility

유용호[†] · 김흥열 · 신현준

Yong-Ho Yoo[†] · Heung-Youl Kim · Hyun-Jun Shin

한국건설기술연구원 화재설비연구부
(2007. 6. 14. 접수/2007. 12. 4. 채택)

요 약

최근 화재와 관련된 연구가 활발해지면서 축소모형실험 등을 통한 연구가 진행되어 왔다. 그러나 실물 화재 실험과의 직접적인 상관관계를 설명하기에는 충분하지 못하기 때문에 실물화재에 대한 관심이 증가되어 왔다. 따라서 본 연구에서는 산소소모율법을 적용한 10 MW급 라지스케일로리미터를 개발하였으며, 헵탄 풀 화재를 이용한 발열량 보정을 수행하였다. 그 결과 신뢰성 높은 보정결과를 얻었으며, 보다 진보적인 실물화재연구에 적용할 수 있음을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

The reduced scale fire test provides basic data but it is not enough to analysis real fire problem directly because there is no exact analogy theory between a real fire and the reduced scale model. Therefore, we have developed the 10 MW large scale calorimeter in order to real scale fire test. This advanced large scale calorimeter used for physical properties such as a heat release rate, based upon consumption of O₂ method. Using the heptane pool fire, we carried out the calibration in order to evaluation for heat release rate. It is approve that this facility has the reliability and it is capable of applying to the advance fire research in the future.

Keywords : Real scale fire test, Large scale calorimeter, Heat release rate, Consumption of O₂

1. 서 론

우리나라는 해마다 크고 작은 화재를 끊임없이 경험하고 있다. 대표적인 대형화재로서는 대연각호텔('71), 씨랜드 수련원화재('99), 인현동 호프집화재('99)등을 비롯하여 대구지하철 화재사고('03), 홍지문터널화재('03), 달성터널화재('05) 등 각종 지하공간 시설물에서의 화재도 큰 사회적 이슈로 다가오고 있다. 그러나 우리나라의 화재안전분야의 기술은 선진국의 50%~60% 수준으로 4년 이상의 격차를 보이고 있는 것으로 평가되었다. 화재감지, 소방, 내화재료, 종합모니터링 및 통합관리 등 요소기술 뿐만 아니라 종합안전성 평가기술인 실물실험기술 격차는 더욱 커다란 격차를 보이고 있다. 특히, 최근의 대형화재사고에서 보여준 바와 같이

아직까지 화재안전의 후진성을 벗어나지 못하고 있는 우리나라로서는 복지사회를 지향하고 있는 현실점에서 화재안전 확보는 가장 중점을 두어 해결해야 할 현안이다.¹⁾

화재위험을 종합적으로 평가하기 위해서는 열방출율(Heat release rate, HRR), 연기발생량, 유해가스과 같은 화재 특성을 모두 고려하여야 한다. 최근 국내에서도 Lab용 콘칼로리미터를 사용하여 각각의 구성 재료에 대해서 열방출율이라는 공학적이면서 실용적인 지표를 도입한 ISO 시험방법을 도입하고 있다. 그러나 콘칼로리미터를 이용한 연소성능 시험방법은 소형 재료(10×10 cm)에 대해서는 시험결과의 객관성 및 공정성, 시험방법의 국제화에 부합되고는 있지만 실질적인 실규모의 화재안전성능을 평가하기에는 상당히 미흡한 실정이기 때문에 합리적인 화재안전성능 기준이 제시하지는 못한다. 따라서 건축물의 용도, 규모 및 화재위험도

[†]E-mail: yhyoo@kict.re.kr

의 등급 분류에 따라 화재안전성을 확보하기 위해서는 Dual Cone Calorimeter(재료) - Room Corner Tester/ Single Burning Item - Large Scale Calorimeter(실물) 평가기를 통해 화재안전성 등급 분류 기준을 설정하여 건축물 실내설비의 용도, 규모 및 화재위험도의 등급 분류에 따라 화재안전성을 확보한 종합적인 화재안전성 평가를 실시하여야 한다. 본 연구는 건축물 및 차량의 실물구조를 대상으로 화재시 연기/독성 평가 및 발열량 평가가 가능한 실험형 화재 평가 장치 및 시스템의 개발하고 성능을 평가함으로써 국내 화재 안전 연구를 위한 기틀을 마련하고자 하였다.

2. 라지스케일로리미터 (Large Scale Calorimeter)

라지스케일칼로리미터에서 측정되는 가장 기본적인 물리량은 열방출율이다. 화학조성이 알려져 있지 않은 재료의 화재시 열량의 측정을 위한 기본원리는 순 연소열량은 연소에 필요한 산소의 양에 비례한다는 점을 기초로 산소 1 kg이 소모될 때 13.1 MJ/kg의 열량을 발생한다는 기본원리에서 시작되며, 산소농도와 배출가스유량 등을 측정하여 아래의 식 (1)~식 (5)까지의 4단계를 걸쳐 계산할 수 있다.³⁾ 측정요소로서는 열방출율(heat release rate), 산소(O₂) 및 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂)의 소모 및 생산량 측정(consumption of O₂, CO and CO₂)이 가장 기본적인 물리량이고 그 외 부수적으로 열유속이나 특정 가스농도를 선택적으로 사용한다. Figure 1에 개발된 라지스케일로리미터의 전체적인 구성을 보이고 있다.

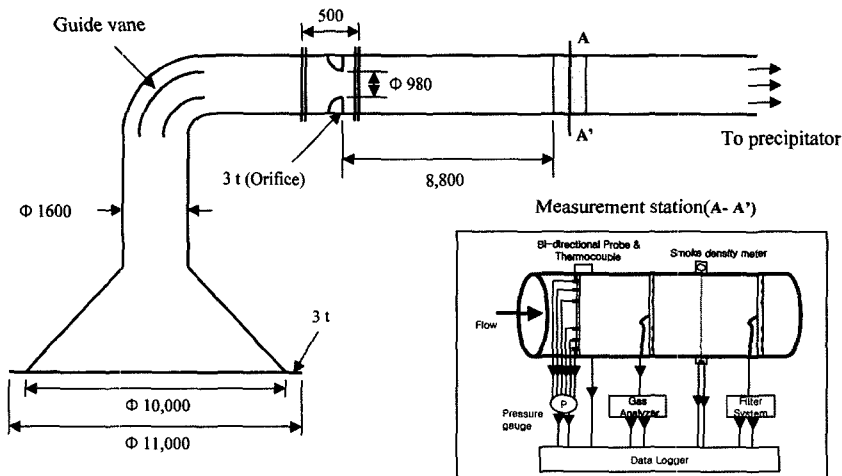


Figure 1. Schematic of large scale calorimeter.

1st. step : Calculated \dot{m}_e

$$\dot{m}_e = 26.54 \frac{Ak_c}{f(Re)\sqrt{T_e}} \sqrt{\Delta P} \quad (1)$$

2nd. step : Obtain the moisture content

$$X_{H_2O}^0 = \frac{RHP_s(T_a)}{100 P_a} \quad (2)$$

$$M_a = M_{dry}(1 - X_{H_2O}^0) + M_{H_2O} X_{H_2O}^0 \quad (3)$$

3rd. step : Calculate Φ

$$\Phi = \frac{X_{O_2}^A(1 - X_{CO_2}^A - X_{CO}^A) - X_{O_2}^A(1 - X_{CO_2}^A)}{(1 - X_{O_2}^A - X_{CO_2}^A - X_{CO}^A)X_{O_2}^A} \quad (4)$$

4th. step : Calculate

$$\dot{q} = \left[E\Phi - (E_{CO} - E) \frac{1 - \Phi X_{CO}^A}{2 X_{O_2}^A} \right] \frac{\dot{m}_e}{1 + \Phi(\alpha - 1)} \frac{M_{O_2}}{M_a} (1 - X_{H_2O}^0) X_{O_2}^A \quad (5)$$

2.1 후드 및 덕트시스템

일반적으로 후드의 설계에서 가장 중요한 점은 크게 두 가지라 할 수 있다. 하나는 후드의 형상이고 다른 하나는 후드의 크기이다. 원형 후드의 경우 사각형 모형의 후드에 비해 후드 가장자리에서 발생될 수 있는 와동(vortex)의 효과를 최소화할 수 있는 장점을 가지고 있으므로 Figure 2와 같이 원형 후드를 채택하였으며, 높낮이를 조절하도록 하여 실험 대상체의 연소특성에 맞추어 실험이 가능하도록 하였다.⁴⁾ 또한, 덕트의 길이를 충분히 길게 하고 균일유속장치를 부착하여 연

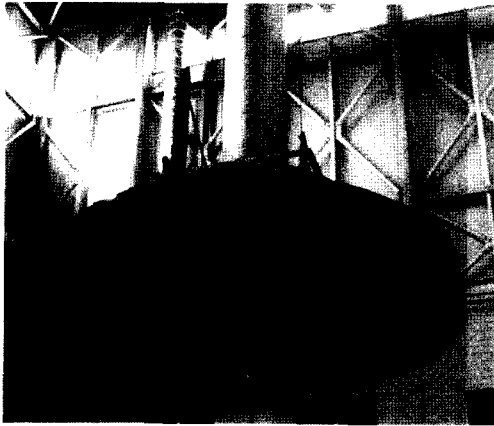


Figure 2. Hood & duct system.

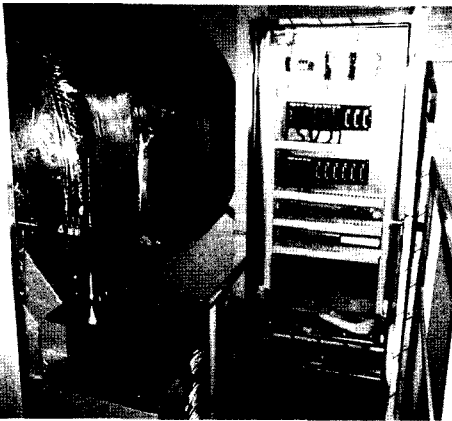


Figure 3. Measuring station.

소가스가 완전 발달할 수 있도록 하였다.⁵⁾ Figure 3은 덕트에 설치된 측정부를 나타내고 있으며, 유량측정을 위한 차압 프로브, 열전대, 십자형 가스포집설치 및 연기밀도측정 장치가 설치되어 있다. 측정된 데이터는 측정부에 설치된 필드포인트에서 수집하여 실시간으로 제어실로 송출시켜 측정값을 저장한다.

2.2 측정요소의 구성

측정요소는 유속 및 온도, 가스농도, 연기밀도 측정 등 크게 3가지로 나눌 수 있으며, 실험기기의 제어 및 측정데이터를 처리할 수 있는 프로그램을 포함하였다.

2.2.1 유속 및 온도

덕트시스템에서 가장 중요한 설계 변수인 흡기 유량은 Heskestad의 플룸 이론을 이용하였으며, 헵탄 풀화염 10 MW를 기준으로 계산하여 50 kg/sec를 적용하였다.⁵⁾ 덕트를 통과하는 유속의 측정은 피토투브 등을 이

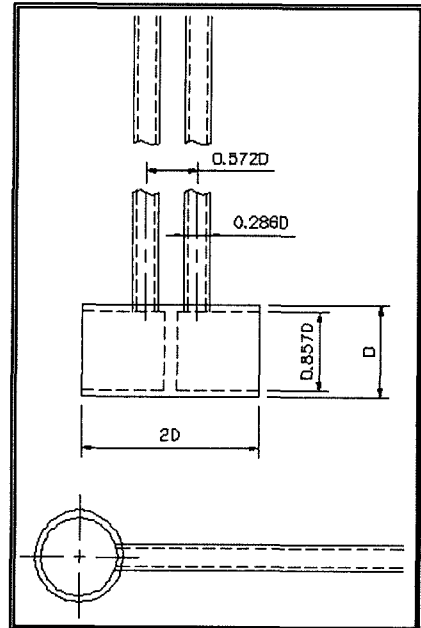


Figure 4. Bi-directional velocity probe.

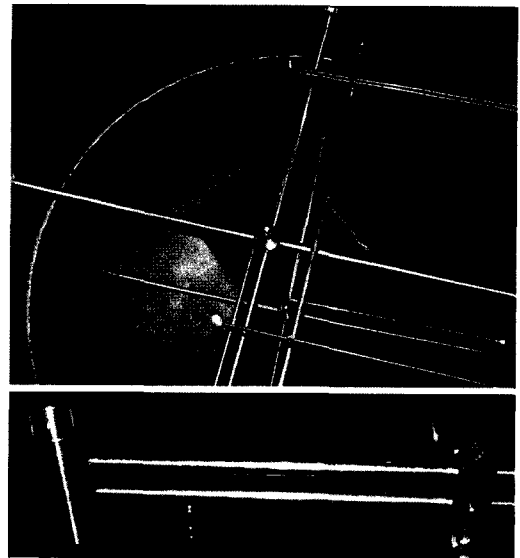


Figure 5. Gas sampling hole & Probe (detail).

용하는 것이 가장 기본적이지만 연소가스내의 입자 등에 의한 막힘이 발생할 수 있으므로 Bi-directional velocity probe⁶⁾를 사용하는 것이 타당하다. 이 측정기기는 일반적인 오리피스와 같은 형태로서 오리피스 양단의 압력 차이를 측정하여 유속을 결정할 수 있으며, Figure 4에 나타내었다. Figure 5에서 보이는 바와

같이 총 6개의 Bi-directional velocity probe⁷⁾가 Log-Tehebycheff 방법⁸⁾에 의하여 설치되었으며, 그 주변에 온도에 따라 물질의 밀도가 달라지므로 밀도를 보정하기 위한 유체의 온도용 열전대(Bi-shielded Thermocouple)를 삽입하였다.

2.2.2 가스 포집 및 분석

전술한 바와 같이 열방출율을 계산하기 위해서는 O₂의 농도가 필요하고, 연소가스의 특성을 파악하기 위해서는 기본적으로 CO₂ 및 CO 가스 분석이 필요하다. 가스의 포집부는 기존 O형에서 탈피하여 십자형으로 제작하였으며, Figure 5에 보이는 바와 같이 soot에 의한 막힘 현상을 방지하기 위해 흐름의 반대방향에 홀을 설계하였다. 포집된 가스를 응축 등에 의해서 변형시키지 않고 불순물을 제거하여 순수한 가스를 가스 분석기로 보내 주기 위하여 포집가스를 3°C 이하로 온도를 낮추어 수증기 응결을 이용해 수분을 제거하기 위한 Cold Trap을 사용하였고, 분석기로 가스가 공급되기 직전에 한번 더 수분을 제거하였다. 또한, 가스흡입구(덕트)에서 전처리장치까지는 상온에서 150°C까지 샘플링가스의 온도를 유지할 수 있는 Temperature controlled line을 설치하였으며, 매연제거용 필터를 전체 포집라인과 각 가스분석기 전단에 설치하여 분석기로의 매연입자 유입을 방지하였다. 분석에 적용된 가스분석기의 사양은 Table 1과 같다. 가스 분석기의 분해능은 산소(0~25%), 일산화탄소(0~1%), 이산화탄소(0~10%)의 측정범위를 갖고 있으며, 각각의 분석기 센서는 산소 Paramagnetic, 일산화/이산화탄소 NDIR 타입이 장착되어 있으며, 빠른 응답 특성을 갖기 위한 BY-PASS가 달려 있다. Flow 또는 Pressure Driven Control 중 산소측정 중 압력보정 및 자동제어가 가능하다. 시정수(time constant)는 장비의 초기 내장값(default value)인 0초를 적용하여 분석하였다.

Table 1. Gas analyzer (detail)

Gas Measured	O ₂	CO/CO ₂
Technology	Paramagnetic	Infrared
Intrinsic error (accuracy)	<0.02%	0.1 ppm (V)
Linearity	<0.05%	0.1 ppm (V)
Repeatability	<0.02%	0.1 ppm (V)
Response time	<12 sec	<20 sec
Sample flow rate	200 ml/min	2000 ml/min
Zero drift/week	<0.01%	0.2 ppm (V)
Span drift/week	<0.02%	2% of reading

2.2.3 연기밀도

연기밀도 측정을 위해서는 일반적으로 포토셀(photo cell)과 He-Ne 레이저 시스템을 이용하여 제작한다. 광원은 흔히 할로겐램프를 사용하지만 덕트의 직경을 고려하여 보다 직진성이 뛰어나고 감쇄율이 적은 레이저를 사용하였다. 레이저 광원은 빔 스플리터를 이용하여 두개의 광원으로 나누어 한 개의 광원은 기준 값을 위해 사용하고, 다른 하나의 광원은 연기밀도 측정을 위해 조사시키며, 연기밀도는 레이저 감쇄법을 이용하여 측정된다.

2.2.4 데이터 처리시스템

각종 측정 기기에서 얻은 데이터로서 열방출율, 연기밀도, 가스농도 등을 계산하고 기록하기 위해서는 데이터 처리 시스템과 MFC의 작동이나 여러 전기적 solenoid valve를 개폐하는 목적의 측정부 시스템을 제어 프로그램으로 분리하여 작성하였다. Data Acquisition System은 National Instrument(NI)의 하드웨어와 소프트웨어는 NI사의 LabVIEW를 사용하여 작성하였다.

3. 질량유속 검증

산소소모율에 의한 발열량의 측정시 가장 중요한 부분이 바로 유량 측정이다. 전술한 바와 같이 화재실험시 발생되는 열기류의 흐름에는 매연(soot)을 포함하여 타르(tar)등 고체와 액상의 입자들이 다량 존재하므로 Bi-directional probe를 사용한다. 따라서 본 연구에서는 발열량의 정확한 계측에 가장 기본이 되는 유량 측정을 검증하고자 측정지점에 설치되어 있는 Bi-directional probe와 이를 검증하기 위한 실험을 실시하였으며,⁹⁾ 측

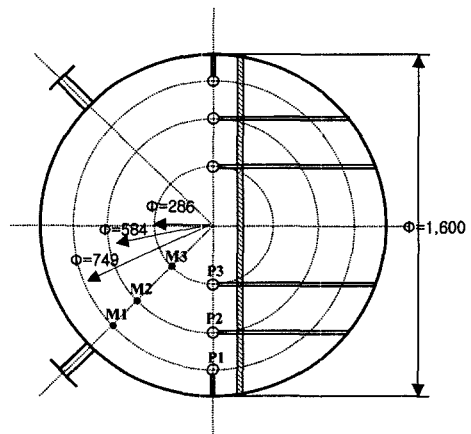


Figure 6. Cross section of duct in measuring part.

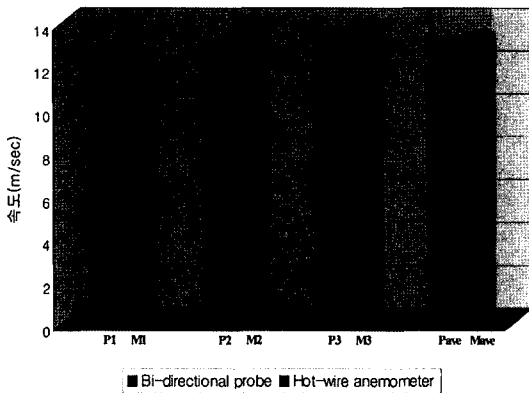


Figure 7. Comparison of flow rate in duct.

정 지점은 Figure 6과 같다. 라지스케일칼로리미터에서는 $Re > 3800$ 이므로 McCaffrey와 Heskestad에 의한 실험식에 제안한 1.08을 적용하였다.⁶⁾

- for $40 < Re < 3800$

$$f(Re) = \frac{(2\Delta p/\rho)^{1/2}}{V} = 1.533 - 1.366 \times 10^{-3} Re + 1.688 \times 10^{-6} Re^2 - 9.706 \times 10^{-10} Re^3 + 2.555 \times 10^{-13} Re^4 - 2.484 \times 10^{-17} Re^5$$

- for $Re > 3800$

$$f(Re) = \frac{(2\Delta p/\rho)^{1/2}}{V} = 1.08 \quad (6)$$

측정에 사용된 열선유속계는 공인인증기관의 교정을 필요하였으며, 교정조건과 동일한 상온 대기압 조건에서 측정하여 결과를 비교하였다. 측정결과는 Figure 7에 도시하였다. Bi-directional probe에 의한 측정치는 12.56~13.36 m/sec의 범위 값을 나타내었으며, 열선유속계에 의한 측정치는 12.13~13.80 m/sec의 측정치를 나타내었다. 두 측정값의 평균값을 비교해 보면 12.91 m/sec와 13.23 m/sec를 나타내어 그 차이는 0.32 m/sec 정도로 매우 작은 오차를 보였으며, Bi-directional probe를 통한 유량의 측정이 비교적 잘 이루어지고 있음을 확인할 수 있다.

4. 캘리브레이션

개발된 라지스케일칼로리미터의 정확성을 확보하기 위해서는 발열량을 이미 알고 있는 물질을 연소시켜 측정치와 비교함으로써 오차율을 감소시켜 나가야 한다. 일반적으로 화재는 다양한 종류의 가연물에 의해서 발생하기 때문에 그 기준을 결정하기는 매우 어렵

다. 따라서 물리적인 특성과 연소상태에 대한 연구가 비교적 많이 이루어져 있는 액체연료를 이용한 풀화염(pool fire)을 기준으로 하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 일반적이고 가장 대표적인 유류화재를 모사할 수 있는 풀버너를 제작하여 보정 실험에 적용하였으며, 향후에는 보다 간편하게 보정을 할 수 있는 멀티 제트 분사 방식의 가스버너를 자체 제작하여 이용할 계획이다. 본 연구에서는 일반적으로 많이 적용되고 있는 풀화염의 발열량 계산식인 식 (7)을 이용하여 계산된 발열량과 측정된 발열량을 비교하였다. 액체 연료는 헵탄을 이용하였으며, 연료의 연소효율(combustion efficiency)은 0.7을 고려하였다.¹⁰⁾ 화원의 직경에 따른 풀화염의 발열량은 Table 2와 같다.

$$\dot{Q} = Hc\dot{m}''A \quad (7)$$

여기서, \dot{m}'' : 휘발성물질의 질량소모율($kg/m^2 \text{ sec}$)

Table 2. HRR of pool fire (for heptane)

Diameter (m)	HRR (kW)
1.0	1,650
2.0	8,800

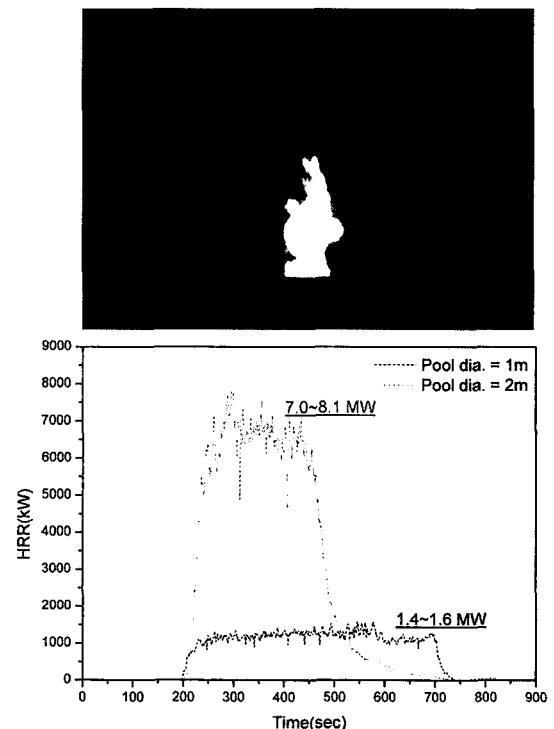


Figure 8. Results of HRR for the heptane pool fire.

Hc : 휘발성물질의 연소열(MJ/kg)
 A : 화원단면적

발열량 측정 결과를 Figure 8에 나타내었다. 직경 1m의 폴화재의 경우 점화후 수초 만에 1,400 kW 이룬 발열량은 최고 1,600 kW 정도의 발열량이 측정되었다. 직경 2m의 폴화재의 경우 역시 7,000~8,100 kW의 발열량이 측정되었다. 이는 계산식에 의한 기대치 1,650 kW와 8,800 kW와 비교하여 볼 때, 10% 이내의 오차범위에 속하는 값으로 매우 안정적인 실험결과를 얻을 수 있음을 보여준다. 향후 반복적인 폴화염 실험과 대형 가스버너를 제작하여 보다 정밀한 캘리브레이션 실험을 수행할 계획에 있으며, 이를 통하여 국내 순수 기술로 자체 개발된 라지스케일칼로리미터의 안정된 성능을 발휘가 가능할 것으로 기대된다.

5. 목재 팻릿 실험

목재 팻릿을 이용하여 발열량을 측정된 기존 연구결과를 기본으로 동일한 방식으로 목재를 적재하여 발열량을 측정·비교하여 보았다. 소화시험용 목재 팻릿은 규칙적으로 쌓아 올린 3차원 막대배열을 의미하며 비교적 오랜 기간 동안 연구 되어왔으므로, 이중 Krasner 등¹¹⁾이 실험을 통해 구한 전형적인 열방출률 곡선을 모사하였다. 적재 방식 및 연소측정 결과는 Figure 9과 Figure 10에 나타내었다.

측정 결과는 Figure 11이 도시하였다. 선행 연구결과

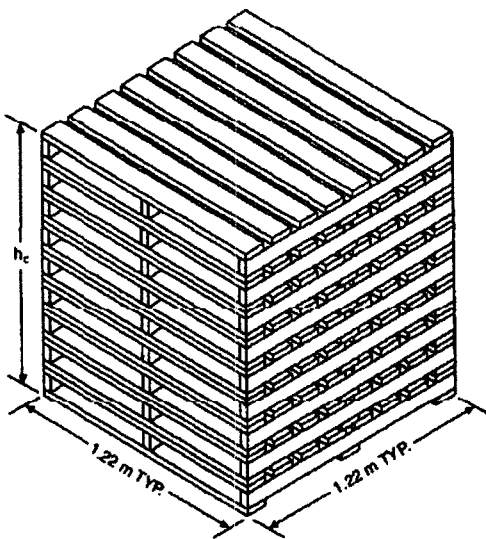


Figure 9. Wood pallet (hc = .2 m).

(Figure 10)에서 보이는 열방출율이 3,500 kW 정도를 나타내는 반면 실험을 통하여 얻어진 열방출율은 3,000~3,300 kW 범위의 값을 나타내었다. 이러한 오차의 원인은 실험실의 환기조건, 목재의 건습 정도등 주

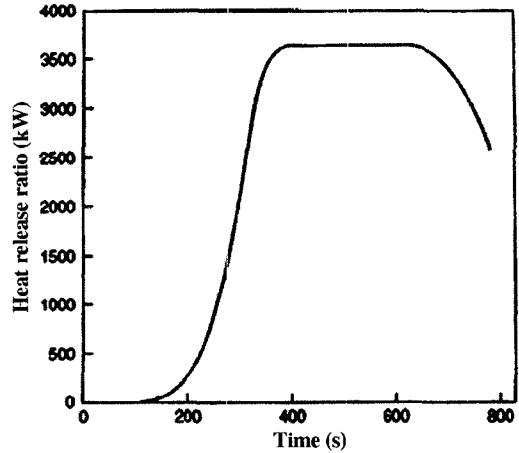


Figure 10. Test results (by Krasner).

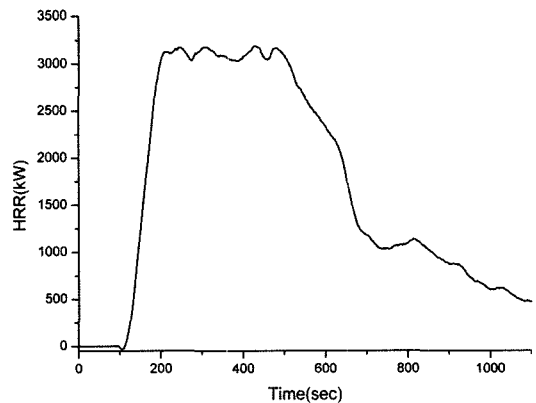
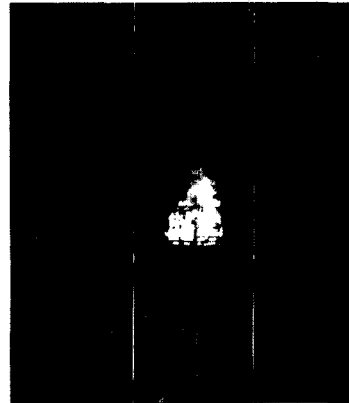


Figure 11. Test results for wood pallets.

위환경 변화에 따른 경계조건의 차이에 의한 것으로 판단된다.

6. 결론 및 논의

지금까지 화재와 관련된 연구는 그 화재현상이 복잡하고 영향 인자들의 무차원화가 불가능하기 때문에 축소모형실험을 수행하여 결과를 도출하기에는 많은 한계를 가지고 있었다. 이를 위하여 본 연구를 수행하여 얻어낸 결론을 정리하면 아래와 같다.

1) 10 MW 규모의 실대형 화재실험을 수행할 수 대 규모 화재평가장치를 순수 국내의 기술력으로 국내 최초로 개발하였으며, 헵탄 풀화염을 이용한 열방출을 캘리브레이션 결과 10% 이내의 오차를 나타내었다.

2) 선행된 목재 펠릿을 이용한 발열량 비교 실험에서도 선행 연구결과에서 보이는 열방출율이 3,500 kW 와 유사한 3,000~3,300 kW 범위의 값을 나타냄으로서 열방출을 측정에 대한 안정화가 충분히 이루어 졌음을 확인하였다.

3) 현재 한국건설기술연구원의 화재전문실험동에서는 개발된 장비를 이용하여 새로이 개발된 난연 합판의 비교성능실험, 자동차의 발화원 추정 및 차량 전소 등 다양한 아이템의 실물화재실험을 활발히 수행하고 있으며, 이러한 라지스케일칼로리미터의 지속적인 안정화 실험과 수많은 실물실험을 수행하여 국내 건축물들의 연소 및 내화특성 데이터베이스를 구축한다면 화재확대 방지 기술 개발등 국내의 성능기반 화재안전 기술 개발을 보다 앞당길 수 있는 초석이 될 수 있을 것이다.

4) 또한, 이러한 국내 기술력은 현재 계획 중인 철도 차량의 실대형 화재실험 평가 장치의 개발에 직접적으로 적용할 수 있으며, 국내 철도의 화재 안전 대책 수립에 많은 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 철도종합안전기술개발사업 “철도화재 안전성능 평가 및 사고 방지기술 개발 - 차량 화재 실대형 시험평가 장치 및 시스템 개발”의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

기호설명

A : Cross-sectional area of the duct (m²)
f(Re): Reynolds number correction

E : heat release per O₂ consumed (13.1 MJ/kg of O₂)
E_{CO} : Net heat release per unit mass of O₂ consumed for combustion of CO to CO₂ (≈17.6 MJ/kg of O₂)
k_c : Velocity profile shape factor (Dimensionless)
ṁ_e : Mass flow rate in the duct (kg/sec)
M_a : Molecular weight of incoming air (kg/kmol)
M_{dry} : Molecular weight of dry air (≈29 kg/kmol)
M_{H₂O} : Molecular weight of H₂O (≈18 kg/kmol)
M_{O₂} : Molecular weight of O₂ (≈32 kg/kmol)
RH : Relative humidity (%)
p_a : Air pressure (Pa)
P_s(T_a): Saturation pressure of water vapor at T_a (Pa)
T_a : Air temperature (K)
T_e : Gas temperature at the orifice plate (K)
X_{O₂}^o : Measured mole fraction of O₂ in the incoming air (Dimensionless)
X_{CO₂}^o : Measured mole fraction of CO₂ in the incoming air (Dimensionless)
X_{CO}^o : Measured mole fraction of CO in the incoming air (Dimensionless)
X_{O₂}^A : Measured mole fraction of O₂ in the exhaust gases (Dimensionless)
X_{CO₂}^A : Measured mole fraction of CO₂ in the exhaust gases (Dimensionless)
X_{CO}^A : Measured mole fraction of CO in the exhaust gases (Dimensionless)
X_{H₂O}^o : Mole fraction of H₂O in the incoming air (Dimensionless)
α : Complete combustion of pure carbon in dry air results in α = 1. If the fuel is pure hydrogen, α is equal to 1.21. A recommended average value for α is 1.105, which is correct for methane.
ΔP : Pressure drop across the orifice plate (Pa)

참고문헌

1. 신현준, “화재안전기술의 선진화를 향한 거보”, 건설기술정보, pp.1-5(2004).
2. M. Dahlberg, “The SP Industry Calorimeter for rate of Heat Release Measurements up to 10 MW”, SP Report(1992).
3. V. Babrauskas and S. J. Grayson, “Heat Release in Fires”, Elsevier(1992).
4. G. Heskestad, “A Fire Products Collector for

- Calorimeter into the MW Range”, FM Technical Report(1981).
5. 이의주, “화재연구를 위한 대형콘칼로리미터의 설계”, 한국화재소방학회논문지, Vol.20, No.4, pp.65-71 (2006).
 6. B. J. McCaffrey and G. Heskestad, “Robust Bidirectional Low-Velocity Probe for Flame and Fire Application”, Combust. Flame, Vol.26, No.1, pp.125-127(1976).
 7. NIST, “The NIST 3 Megawatt Quantitative Heat Release Rate Facility - Description and Procedures”, NIST Report(2004).
 8. ASHRAE, “1993 ASHRAE HANDBOOK - FUNDAMENTALS(1-P Edition)”(1993).
 9. 유용호, 김홍열, 신현준, 류상훈, “실물화재실험을 위한 라지콘칼로리미터의 개발”, 한국화재소방학회 2007 춘계학술발표대회 논문집(2007).
 10. Björn Karlsson, James G. Quintiere, “Enclosure Fire Dynamics”(2000).
 11. 한국화재보험협회, “SFPE 방화공학 핸드북”(2005).