

실물화재실험을 위한 라지콘칼로리미터의 개발

유용호, 김홍열, 신현준, 류상훈*

한국건설기술연구원 화재설비연구부, (주)페스텍인터내셔널

Development and of large cone calorimeter for the real scale fire test

Yongho Yoo, Heungyoul Kim, Hyunjun Shin, SangHoon Ryu*

Korea institute of construction technology, *Festec International Co., LTD

1. 서 론

대구지하철 화재사고 등과 같이 시설물에서의 화재로 인한 막대한 인명피해는 새로운 사회적 이슈로 다가오고 있다.¹⁾ 화재위험을 종합적으로 평가하기 위해서는 열발생율, 연기발생량, 유해가스과 같은 화재 특성을 모두 고려하여야 하며, 최근 국내에서도 Lab용 콘칼로리미터를 사용하여 각각의 구성재료에 대해서 열발생율이라는 공학적이고 실용적인 지표를 도입한 ISO 시험방법을 도입하고 있다. 그러나 콘칼로리미터를 이용한 연소성능 시험방법은 소형 재료(10×10cm)에 대해서는 시험결과와 객관성 및 공정성, 시험방법의 국제화에 부합되고는 있지만 실질적인 실규모의 화재안전성을 평가하기에는 상당히 미흡한 실정이기 때문에 합리적인 화재안전성 기준이 제시되지 못하고 있는 실정이다. 따라서 건축물의 용도, 규모 및 화재위험도의 등급 분류에 따라 화재안전성을 확보하기 위해서는 재료-구조-실물 규모의 종합적인 화재안전성 평가를 통해 그 성능이 입증되어야만 화재시 인명 및 재산피해를 최소화할 수 있다. 즉, 국내의 경우도 선진외국과 같이 Dual Cone Calorimeter(재료) - Room Corner Tester / Single Burning Item / ISO 13784-1(축소 실물) - Large Cone Calorimeter(실물) 평가를 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 실대형 화재 평가 장치 및 시스템의 개발과 성능을 평가함을 목적으로 하였다.

2. 라지콘칼로리미터(Large Cone Calorimeter)

라지콘칼로리미터에서 측정되는 가장 기본적인 물리량은 열방출량이다. 화학조성이 알려져 있지 않은 재료의 화재시 열량의 측정을 위한 기본원리는 순 연소열량은 연소에 필요한 산소의 양에 비례한다는 점을 기초로 산소 1kg이 소모될 때 13.1 MJ/kg의 열량을 발생한다는 기본원리에서 시작되며, 산소농도와 배출가스유량 등을 측정하여 계산할 수 있다. 측정요소로서는 열방출율 (Heat release rate), 산소 및 일산화, 이산화탄소의 소모 및 생산량 측정(Consumption of O₂, CO and CO₂)이 가장 기본적인 물리

량이고 그 외 부수적으로 열유속이나 특정 가스농도를 선택적으로 사용한다.²⁾

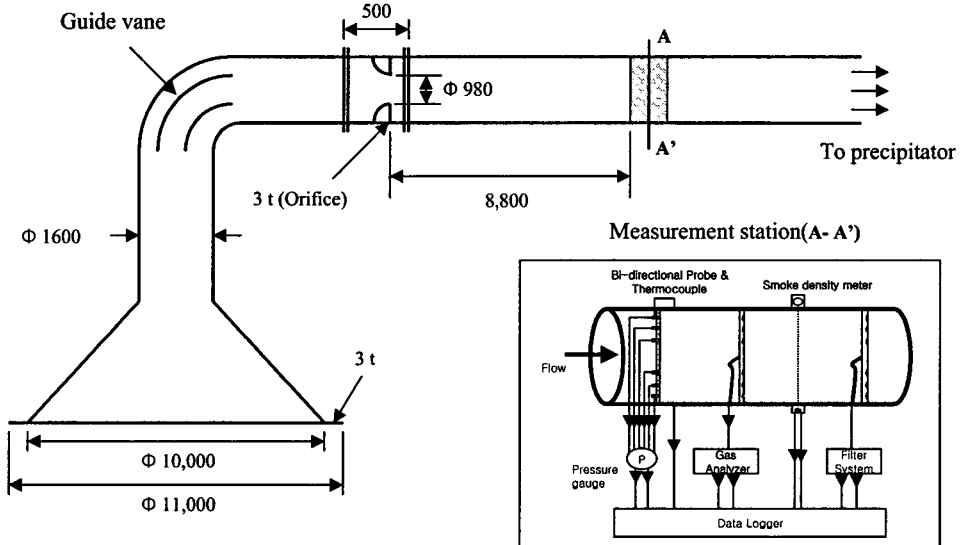


그림 1. 라지콘칼로리미터 구성도

2.1 후드 및 덕트시스템

그림 1에 개발된 라지콘칼로리미터의 구성을 나타내었다. 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 발생할 수 있는 와동(vortex)의 효과를 최소화할 수 있는 장점을 가지고 있으므로 그림 2와 같이 원형 후드를 채택하였으며, 높낮이를 조절하도록 하여 연소실험 대상체의 플룸 특성에 맞추어 실험이 가능하도록 하였다. 또한, 덕트의 길이를 충분히 길게 하고 균일 유속장치를 부착하여 연소가스가 완전 발달 할 수 있도록 하였다.³⁾

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. 측정 덕트에는 유량측정을 위한 차압 프로브, 열전대, 십자형 가스포집설치 및 연기밀도측정 장치가 설치되어 있다.

① 유속 및 온도

덕트를 통과하는 유속의 측정은 피토투브 등을 이용하는 것이 가장 기본적인지만 연소가스내의 입자동에 의한 막힘이 발생할 수 있으므로 Bi-directional velocity probe를 사용하는 것이 타당하다. 이 측정기기는 일반적인 오리피스와 같은 형태로서 오리피스 양단의 압력차이를 측정하여 유속을 결정할 수 있다. 총 6개의 Bi-directional velocity probe가 Log-Tehebycheff 방법에 의하여 설치되었으며, 그 주변에 온도에 따라 물질의 밀도가 달라지므로 밀도를 보정하기 위한 유체의 온도용 열전대(Bi-shielded Thermocouple)를 삽입하였다.

② 가스 포집 및 분석

전술한 바와 같이 열방출율을 계산하기 위해서는 O_2 의 농도가 필요하고, 연소가스의 특성을 파악하기 위해서는 기본적으로 CO_2 및 CO 가스 분석이 필요하다. 가스의 포집부는 기존 O형에서 탈피하여 십자형으로 제작하였으며, Soot에 인한 막힘 현상을 방지하기 위해 흐름의 반대방향에 흡을 설계하였다. 포집된 가스를 응축등에 의해서 변형시키지 않고 불순물을 제거하여 순수한 가스를 가스분석기로 보내 주기 위하여 포집가스를 $3^{\circ}C$ 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 $150^{\circ}C$ 까지 샘플링가스의 온도를 유지할 수 있는 Temperature controlled line을 설치하였으며, 매연제거용 필터를 전체 포집라인과 각 가스분석기 전단에 설치하여 분석기로의 매연입자 유입을 방지하였다.

③ 연기밀도

연기밀도 측정을 위해서는 일반적으로 Photo cell과 He-Ne 레이저 시스템을 이용하여 제작한다. 광원은 흔히 할로겐 램프를 사용하지만 덕트의 직경을 고려하여 보다 직진성이 뛰어나고 감쇄율이 적은 레이저를 사용하였다. 레이저 광원은 빔 스플리터를 이용하여 두개의 광원으로 나누어 한 개의 광원은 기준값을 위해 사용하고, 다른 하나의 광원은 연기밀도 측정을 위해 조사시키며, 연기밀도는 레이저 감쇄법을 이용하여 측정된다.

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 Aquisition System은 National Instrument(NI)의 하드웨어와 소프트웨어는 NI사의 LabVIEW를 사용하여 작성하였다.

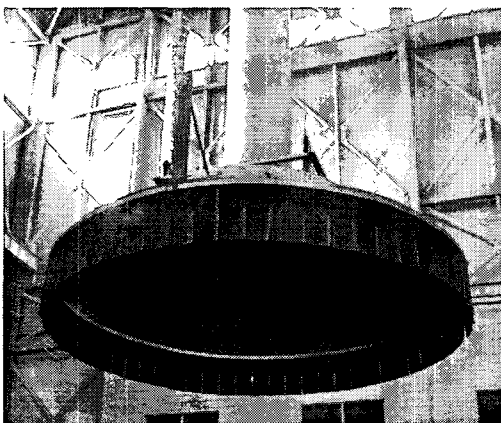


그림 2. 후드 & 덕트 시스템

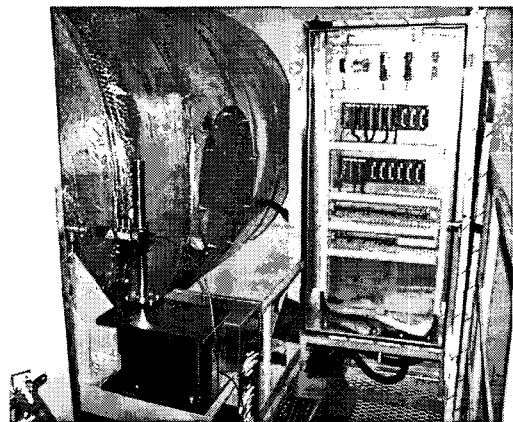


그림 3. Measuring station

3. 질량유속 검증

산소소모율에 의한 발열량의 측정시 가장 중요한 부분이 바로 유량 측정이다. 전술한

바와 같이 화재실험시 발생하는 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, 측정 지점은 그림 4와 같다. 라지콘칼로리미터에서는 $Re > 3800$ 이므로 McCaffrey와 Heskestad에 의한 실험식에 제안한 1.08을 적용하였다.⁴⁾

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

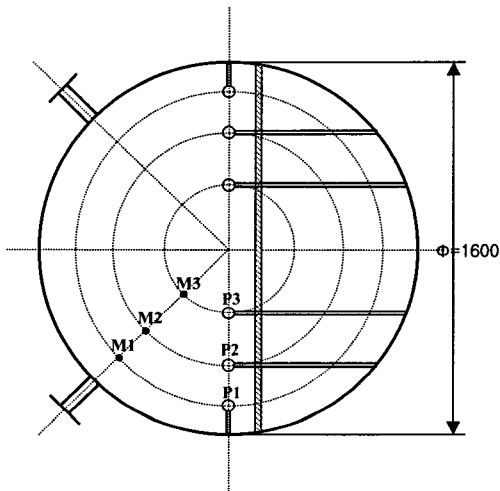


그림 4. 유속 측정 지점의 덕트단면

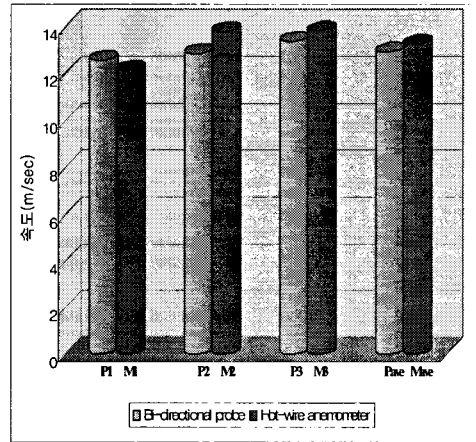


그림 5. 유속 검증 결과

측정결과는 그림 5에 도시하였다. Bi-directional probe에 의한 측정치는 12.56 ~ 13.36 m/sec의 범위 값을 나타내었으며, 열선유속계에 의한 측정치는 12.13 ~ 13.8 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 오차를 보였으며, Bi-directional probe를 통한 유량의 계측이 비교적 잘 이루어지고 있음을 확인 할 수 있다.

4. 발열량 안정화

개발된 라지콘칼로리미터 측정 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 어렵다. 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 적용되

고 있는 풀화염의 발열량 계산식인 식 2를 이용하여 계산된 발열량과 측정된 발열량을 비교하였다.⁵⁾ 액체 연료는 헵탄을 이용하였으며, 연료의 연소효율(combustion efficiency)은 0.7을 고려하였다.⁶⁾ 화원의 직경에 따른 풀화염의 발열량은 표 1과 같다

$$\dot{Q} = Hc \dot{m} A \quad (\text{식 2})$$

여기서, \dot{m} : 휘발성물질의 질량소모율(kg/m² sec)
 Hc : 휘발성물질의 연소열(MJ/kg)
 A : 화원단면적

표 1. 풀화염의 직경 변화에 따른 발열량(헵탄)

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

발열량 측정 결과를 아래의 그림 6에 나타내었다. 직경 1m의 풀화재의 경우 점화후 수초만에 1,400 kW 이른 발열량은 최고 1,600 kW 정도의 발열량이 측정 되었다. 직경 2m의 풀화재의 경우 역시 7,000~8,100 kW의 발열량이 측정 되었다. 이는 계산식에 의한 기대치 1,650 kW와 8,800 kW와 비교 하여 볼 때, 10% 이내의 오차범위에 속하는 값으로 매우 안정적인 실험결과를 얻을 수 있음을 보여준다. 향후 반복적인 풀화염 실험과 대형가스버너를 제작하여 보다 정밀한 캘리브레이션 실험을 수행할 계획에 있으며, 이를 통하여 국내 순수 기술로 자체 개발된 라지콘 칼로리미터의 안정된 성능을 발휘가 가능 할 것으로 기대된다.

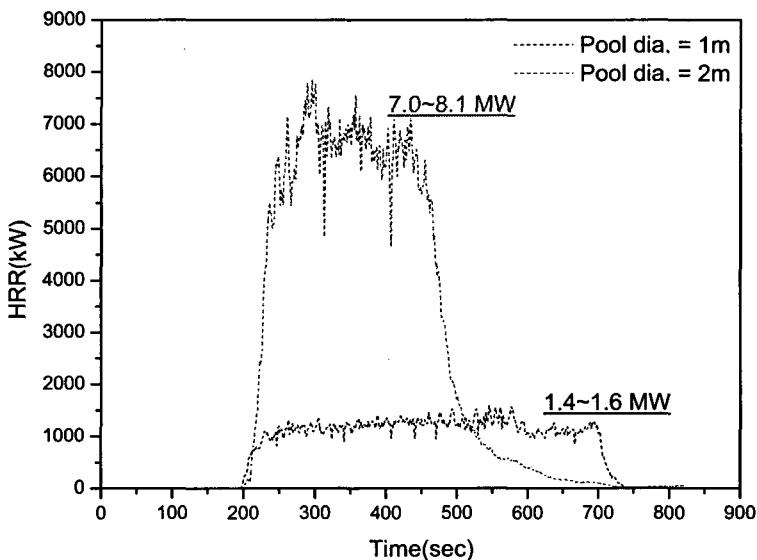


그림 6. 풀화염을 이용한 열방출을 측정 결과

5. 결론 및 논의

화재 연구의 경우 화재현상이 복잡하고 영향 인자들의 무차원화가 불가능하기 때문에 축소모형실험을 통한 연구에는 많은 한계를 가지고 있었다. 본 연구에서는 이러한 부분을 개선할 수 있는 대규모 실물화재실험 장치를 국내의 기술력으로 개발하였으며, 헵탄 풀화염을 이용한 열방출을 캘리브레이션 결과 10% 이내의 오차를 나타내었다. 현재 한국건설기술연구원의 화재전문실험동에서는 개발된 장비를 이용하여 새로이 개발된 난연합판의 비교성능실험, 자동차의 발화원 추정 및 차량 전소등 다양한 아이템의 실물화재실험을 활발히 수행하고 있다. 따라서 라지콘칼로리미터의 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. 또한, 이러한 국내 기술력은 현재 계획중인 철도차량의 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.

참고문헌

1. 백민호, “대구지하철 중앙로역 화재현장 조사와 재난관리 개선방향”, 방재연구지 제5권 제1호, pp.70-85(2003)
2. V. Babrauskas, S.J. Grayson, “Heat Release in Fires”, Elsevier(1992)
3. 이의주, “화재연구를 위한 대형콘칼로리미터의 설계”, 한국화재소방학회논문지, 제20권 제4호, pp65-71(2006)
4. B. J. McCaffrey and G. Heskestad, “Robust Bidirectional Low-Velocity Probe for Flame and Fire Application”, Combust. Flame, Vol. 26, No. 1, 125-127(1976).
5. 한국화재보험협회, “SFPE 방화공학 핸드북”(2005)
6. Björn Karlsson, James G. Quintiere, “Enclosure Fire Dynamics”(2000)