

대형칼로리미터를 이용한 차량 화재 특성에 관한 연구

유용호^{1*}, 김흥열², 신현준³

A study on the vehicle fire property using the large scale calorimeter

Yong-Ho Yoo, Heung-Youl Kim, Hyun-Jun Shin

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 large scale calorimeter in order to the 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 this large scale calorimeter, we carried out the real scale vehicle fire test in order to evaluation for heat release rate. We obtained the calculated result for HRR 2.3~3.4 MW and this result is very similar to the PIARC candidate HRR. 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, Fire, Tunnel, Heat release rate

요 지 터널 화재와 관련된 축소모형실험연구는 기본적인 데이터는 제공할 수 있지만, 축소모형과 실물화재간의 정확한 이론적 상사관계가 정립되어 있지 않기 때문에 실물화재에 대한 직접적인 분석을 하기에는 어려움이 따른다. 이에 산소소모율법을 적용하여 열방출율과 같은 물리량의 측정이 가능한 실물화재실험장치인 대형칼로리미터를 개발하였다. 이를 이용하여 차량의 화재시 열방출율을 측정하기 위한 실물실험을 실시하였으며, 그 결과 차량의 열방출율은 2.3~3.4 MW로 측정되었다. 이는 PIARC에서 권고하는 차량의 열방출율과 유사한 범위로서 개발된 실물화재평가장치의 신뢰성을 확인할 수 있음은 물론이고 향후 관련 연구에 매우 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

주요어: 실물화재실험, 대형칼로리미터, 터널, 화재, 열방출율

1. 서 론

최근 10년 내에 유럽에서 발생한 몽블랑(Mont Blanc), 고타드(Gotthard), 타우인(Tauern) 터널의 화재참사와 국내 홍지문터널, 달성터널의 사고이후 터널내 화재사고의 위험성에 대해서 새롭게 인식하게 되면서 국내 및 세계 각국은 터널의 방재시설 설계 자료의 확보 및 관련 연구가 활발히 진행되고 있다(Duffe & Marec, 1999; Henke, 1999). 특히, 방재시설의 설계에 대한 신뢰성 확보 및 효율적인 운영을 위해서 시뮬레이션(유용호 외, 2006a), 축소모형실험 등(유용호 외, 2006b) 다양한 영역에서 많은 연구를 진행하고 있다. 그러나 터널 화재 연구의 가장 기본이라고 할 수 있는 국내 차량에 대한 화재특성에 대한 연구는 매우 미미한 수준이다. 일반적으로 화재위험을 종합적으로 평가하기 위해서는 열발생

율, 연기발생량, 유해가스와 같은 화재 특성을 모두 고려하여야 하며 그림 1에서 보는 바와 같이 3단계의 과정을 거쳐야 한다(Dahlberg, 1992). 최근 국내에서도 콘칼로리미터를 사용하여 각각의 구성 재료에 대해서 열방출율(Heat Release Rate, HRR)이라는 공학적인 지표를 도입하고 있으나 실규모의 화재안전성능을 평가하기에는 상당히 미흡한 실정이기 때문에 합리적인 화재안전 성능 기준이 제시되지 못하고 있으며 관련 연구가 매우 시급한 실정이다.

본 연구에서는 국내에서 최초로 개발된 화재시 연기 및 발열량 평가가 가능한 실대형 화재 평가 장치를 이용한 실물화재 실험을 실시하였다. 국내에서 제작된 차량을 대상으로 두 가지의 화재원을 가정하여 실험하였으며, 엔진룸 발화인 경우와 차량 내부에서의 발화인 경우에 대하여 차량이 전소되는 시간 및 발열량등 화재 특성을 평가/분석하였다. 일반적으로 터널에서의 화재는 대부분이 환기지배형 화재가 우세할 것이므로 대형 실험동에서의 화재와는 연소가스발생량등 연소패턴에서 다소의 차이가 있을 수 있겠으나, 터널 화재안전 연구에서

¹한국건설기술연구원 선임연구원

²한국건설기술연구원 선임연구원

³한국건설기술연구원 책임연구원

*교신지자: 유용호 (yhyoo@kict.re.kr)

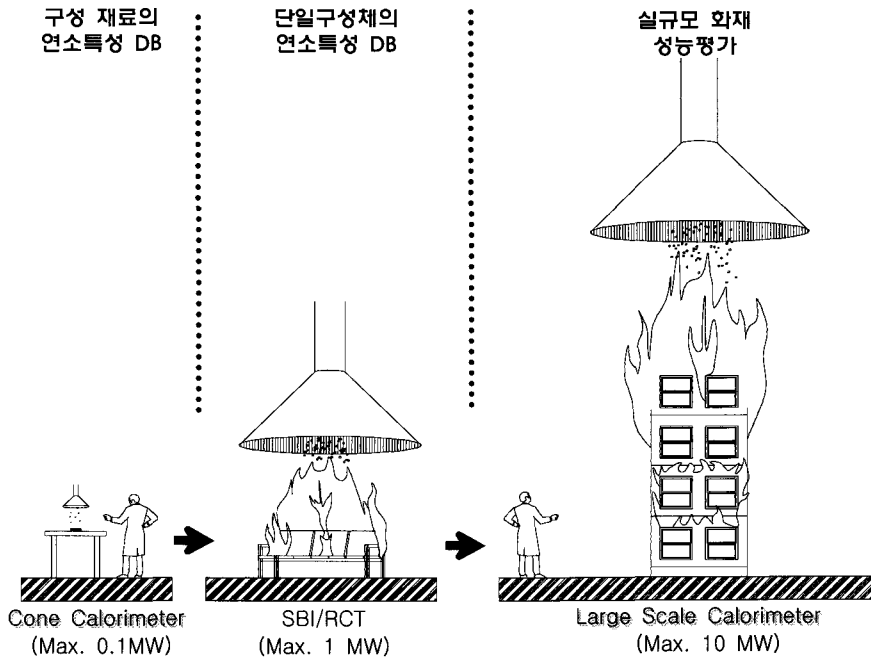


그림 1. 화재안전 등급분류를 위한 평가 단계

가장 기본이 되는 열방출율에 대한 분석은 터널 화재 안전 연구를 위하여 매우 중요한 정보가 될 것이다.

2. 터널화재 특성분석

도로터널에서는 화재발생시 터널이용자의 안전을 확보하고 신속한 소화 및 구조 활동을 위해서 화염과 연기의 역류를 제압할 수 있는 터널임계풍속(tunnel critical velocity)의 결정과 이를 실현하기 위한 제연설비설계가 화재대응설계의 핵심이라고 할 수 있으며(Wu & Baker, 2000), 현재 국내에서는 국외의 연구결과를 바탕으로 한 근사적 설계기법을 채택하고 있다. 이러한 국외의준도를 탈피하고 도로터널의 설계조건에 부합하는 성능적(performance based) 건설을 지향하기 위해서 국내에서도 기초적인 도로터널 화재대형실험이 수행되고 있으며, 화원의 종류에 따라 열적 모델(thermal model), 등온기체 모델(isothermal model) 그리고 수력학적 모델(hydraulic model)등이 수행되어 왔다. 또한 최근 빠른 속도로 발전하고 있는 컴퓨터 이용 엔지니어링(CAE, Computer-

Aided Engineering) 기반 열유동 수치모사 기술을 도로 터널 화재공학 분야에 적용하고자 하는 시도가 이루어지고 있다. 이러한 화재연구에서 가장 중요하고 기본이 되는 물리량은 열방출율로서 화재의 전파, 온도상승 및 연기생성량등 모든 화재에 의해 유발되는 문제와 선형적인 비례관계를 나타내지는 않지만 서로 밀접한 관계를 가지고 있다. 터널화재 연구의 경우 표 1에 제시된 바와 같이 차량별 화재규모를 국내의 차량의 차별성이 있음에도 불구하고 국내의 연구에 그대로 적용하여 왔다. 따라서 보다 정확한 터널화재 안전설계를 위해서 모든 화재연구의 기본이 되는 차량의 화재규모를 정확하게 파악하는 것이 핵심적인 요소가 될 것이다.

3. 연구내용

3.1 대형칼로리미터(Large Scale Calorimeter) 개발

대형칼로리미터에서 측정되는 가장 기본적인 물리량은 열방출률이다. 화학조성이 알려져 있지 않은 재료의

표 1. 차량의 열방출율 예시 (Haack & Stuva, 1999)

Fire category	Heat Release Rates [MW]						
	Recommendations by institutions				Fire tests		Expert report
	PIARC Brussels 1987	RABT (D) 1994	CETU (F) proposals 1996/1997	NFPA 502 (USA) 1998	EUREKA research real fires	Memorial adopted fire sizes	Oresund- tunnel 1994
passenger car	5	-	2.5	5	1.5 - 2	-	2.5
passenger car (large)	-	-	5	-	-	-	-
passenger car (plastic)	-	-	-	-	5 - 6	-	-
1 van	-	-	15	-	-	-	-
1 public bus	-	-	-	-	29 - 34	-	-
1 bus or 1 lorry (freight or lorry not hazardous)	20	20 - 30	20	20	-	20	15
heavy goods vehicle	-	-	30	-	100 - 130	-	-
petrol/gasoline tanker with a leak	100	50 - 100	200	100	-	-	120 (LPG: up to 150)

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 식 (1)과 식 (2)에 의하여 계산할 수 있다(Babrauskas & Grayson, 1992).

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

여기서,

- M_{O_2} : Molecular weight of O_2 ($\approx 32 \text{ kg}\cdot\text{kmol}^{-1}$)
- M_a : Molecular weight of incoming air ($\text{kg}\cdot\text{kmol}^{-1}$)
- E : heat release per O_2 consumed ($13.1 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ of O_2)
- E_{CO} : Net heat release per unit mass of O_2 consumed for combustion of CO to CO_2 ($\approx 17.6 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ of O_2)
- \dot{m}_e : Mass flow rate in the duct ($\text{kg}\cdot\text{sec}^{-1}$)

$$\phi = \frac{X_{O_2}^{A^o}(1 - X_{CO_2}^A - X_{CO}^A) - X_{O_2}^A(1 - X_{CO_2}^{A^o})}{(1 - X_{O_2}^A - X_{CO_2}^A - X_{CO}^A)X_{O_2}^{A^o}} \quad (2)$$

$X_{O_2}^{A^o}$: Measured mole fraction of O_2 in the incoming air

$X_{CO_2}^{A^o}$: Measured mole fraction of CO_2 in the incoming air

$X_{CO}^{A^o}$: Measured mole fraction of CO in the incoming air

$X_{O_2}^A$: Measured mole fraction of O_2 in the exhaust gases

$X_{CO_2}^A$: Measured mole fraction of CO_2 in the exhaust gases

X_{CO}^A : Measured mole fraction of CO in the exhaust gases

측정요소로서는 열방출율, 산소 및 일산화탄소, 이산화탄소의 소모 및 생산량 측정(consumption of O_2 , CO and CO_2)이 가장 기본적인 물리량이고 그 외 부수적으로 열 유속이나 특정 가스농도를 선택적으로 사용한다(유용호 외, 2007).

그림 2에 개발된 대형칼로리미터의 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 발생될 수 있는 와동(vortex)의 효과를 최소화할 수 있는 장점을 가지고 있으므로 원형 후드를 채택하였으며, 높낮이를 조절하도록

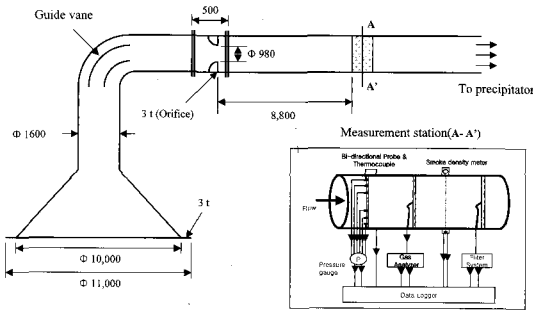


그림 2. 대형칼로리미터 구성도

록 하여 연소실험 대상체의 품류 특성에 맞추어 실험이 가능하도록 하였다. 또한, 덕트의 길이를 충분히 길게 하고 균일유속장치를 부착하여 연소가스가 완전 발달할 수 있도록 하였다(이의주, 2006). 측정 덕트에는 유량 측정을 위한 차압 프로브, 열전대, 십자형 가스포집설치 및 연기밀도측정 장치가 설치되어 있다. 덕트를 통과하는 유속의 측정은 피토투브 등을 이용하는 것이 가장 기본적인지만 연소가스내의 입자 등에 의한 막힘이 발생할 수 있으므로 Bi-directional velocity probe를 사용하였으며, 총 6개의 Bi-directional velocity probe가 Log-Tehebycheff 방법에 의하여 설치되었다.

산소소모율에 의한 발열량의 측정시 가장 중요한 부분이 바로 유량 측정이다. Bi-directional velocity probe에 의해 측정된 차압과 관내 레이놀즈수와의 관계식은 식 (3)과 같으며, 본 연구에서 개발된 대형칼로리미터에서는 $Re > 3800$ 이므로 McCaffrey와 Heskestad(1976)에 의한 실험식에 제안한 1.08을 적용하였다.

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

또한, 가스의 포집부는 기존 O형에서 탈피하여 십자형으로 제작하였으며, soot에 인한 막힘 현상을 방지하기 위해 흐름의 반대방향에 흡을 설계하였다. 포집된 가스를 응축 등에 의해서 변형시키지 않고 불순물을 제거하여 순수한 가스를 가스분석기로 보내 주기 위하여 포집가스를 3°C 이하로 온도를 낮추어 수증기 응결을 이용해 수분을 제거하기 위한 cold trap을 사용하였고, 분석기로 가스가 공급되기 직전에 한 번 더 수분을 제거하였다. 또한, 가스흡입구(덕트)에서 전처리장치까지는 상온

에서 150°C까지 샘플링가스의 온도를 유지할 수 있는 temperature controlled line을 설치하였으며, 매연제거용 필터를 전체 포집라인과 각 가스분석기 전단에 설치하여 분석기로의 매연입자 유입을 방지하였다.

3.2 실물차량화재실험

실험시 안전상의 문제를 고려하여 차량의 연료는 모두 제거한 후 화재실험을 수행하였으며, 실험절차는 표 2와 같다. 차량의 엔진룸에서 화재가 발생하는 경우와 차량 내부 뒷좌석에서 화재가 발생하는 경우로 각각 화재발생지점을 구분하여 실험을 진행하였다. 그림은 실제 실험이 실시되는 모습을 보여주고 있다. 화재로 인하여 발생하는 열유량 및 연기는 상부에 설치된 후드를 통하여 모두 포집되며 상부에 설치된 측정 장치를 통하여 분석되어진다. 측정 대상은 가장 기본적인 화재특성인 열방출율과 유독가스 발생량, 그리고 차량의 전소시간을 측정하였다.

4. 연구결과

그림 3은 실물차량 화재 실험장면을 보여주고 있으며, 그림 4와 그림 5에 실험결과를 나타내었다.

열방출율의 경우 차량 1은 최대 약 2.3 MW, 차량 2는 3.4 MW를 나타내었다. 이 결과는 국외에서 선행된 소형자동차의 열방출율 측정결과(3~5 MW) 및 PIARC의 도로터널 방재설계시 소형차 기준 화재강도와 비교하여 볼 때 매우 근사한 수치임을 확인할 수 있다. 국내 터널에서 실시된 실물차량화재실험 결과에서 얻어진 열방출율도 본 실험을 통하여 얻어진 결과 범위와 동일하다. 또한, 일산화탄소는 105~127 ppm이 검출되었다. 전술한 바와 같이 HRR과 이산화탄소, 일산화탄소등 발생 유해가스의 변화 추이는 거의 유사한 경향을 보인다.

일반적으로 화재에 의한 발열량 측정시 대류에 의한 부분과 복사로 주위에 전달되는 양의 비율을 60~80% 정도로 결정하고 있다. 표 3에는 이를 고려한 대류에 의한 열량의 평균과 최고치, 그리고 복사까지를 고려한 최대 발열량을 나타내었다. 대류에 의한 부분을 70%로 가정할 경우 차량의 최대 발열량은 3.4~4.9 MW에 이르게 될 것으로 예상되며, 인체에 치명적인 일산화탄소도 터널의 한계허용치를 상회하는 많은 양이 발생되어 질

표 2. 차량실물화재실험 조건

실험차량	차량1 (엔진룸 발화)	차량2 (차량내부발화)
실험절차	엔진룸에서의 발화를 가정하여 차량의 전소시까지 실험	차량 내부(뒷좌석)에서의 발화를 가정하여 차량의 전소시까지 실험
측정항목	<ul style="list-style-type: none"> • 열방출율 • CO, CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> • 열방출율 • CO, CO₂

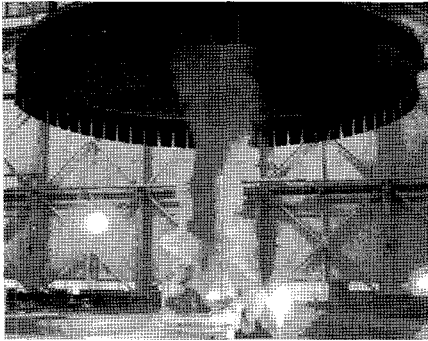
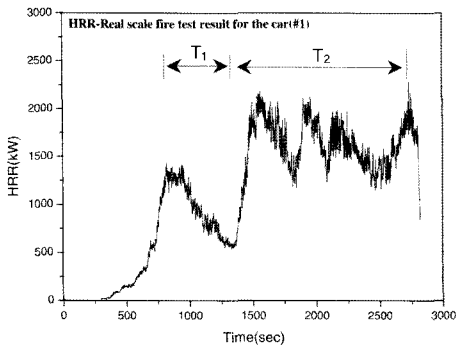
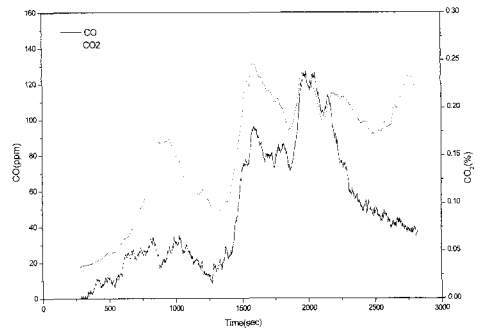


그림 3. 실물차량화재실험사진

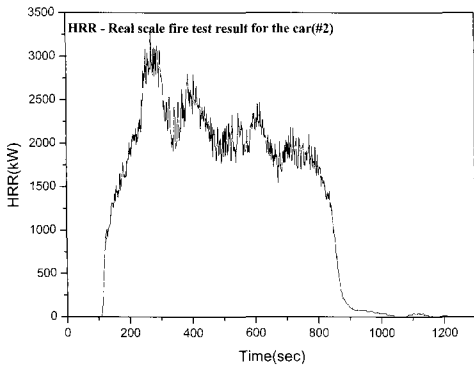


a. 열방출율 측정결과

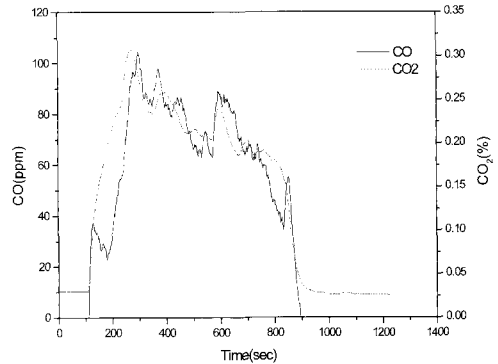


b. CO & CO₂ 측정결과

그림 4. 실물차량화재실험결과 (엔진룸 발화)



a. 열방출율 측정결과



b. CO & CO₂ 측정결과

그림 5. 실물차량화재실험결과 (차량내부 발화)

표 3. 총발열량 및 가스발생량 결과 (HRR, CO, CO₂)

	차량1 (엔진룸 발화)	차량2 (차량내부발화)
HRR_convection_max.	2,366 kW	3,431 kW
HRR_convection_ave.	1,070 kW	1,459 kW
HRR_total_max.	3,380 kW	4,901 kW
CO_max	127 ppm	105 ppm
CO ₂ _max	0.25%	0.31%

단, HRR total = 0.7·HRR_convection (Karlsson & Quintiere, 2000)
 (70%의 열이 대류항으로 방출되고 나머지 30%는 복사열로 주위로 전달됨을 가정)

것이다. 또한 차량의 전소 시간을 비교하여 보면, 차량의 1의 경우 40여분이 소요된 반면 차량 2는 20여분이 소요되었다. 특히, 엔진룸에서 발화가 이루어진 경우 차량내부로 화염이 전이되기 이전 구간(T₁)에서 약 15분 여간 화재가 진행되다가 차량 내부로 전파가 된 이후(T₂)에 최대열방출율을 기록하며 25여 분간 화재가 지속적으로 진행되었다. 두 경우 전소시간과 열방출율의 차이는 차량 창문의 개폐정도에 의한 내부로의 산소공급량의 차이에 의한 것으로 판단된다. 따라서 터널 화재 연구를 위한 국내 자동차의 열방출율 기준을 설정할 경우 차량의 종류 및 내장재 등에 따른 분류와 함께 발화 지점과 창문의 개폐여부에 대한 심도 깊은 논의를 통하여 객관적인 실험절차의 확립이 보다 중요함을 알 수 있다.

5. 결론 및 논의

본 연구에서는 국내에서 최초로 개발된 실대형 화재 평가 장치를 이용하여 국내에서 제작된 차량을 대상으로 두 가지의 화재원을 가정하여 실물화재 실험을 실시하였으며, 이를 통하여 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 화재는 그 현상이 복잡하고 영향 인자들의 무차원 화가 불가능하기 때문에 축소모형실험을 통한 연구에는 많은 한계가 있다. 이를 위하여 순수 국내 기술로 개발된 대형칼로리미터는 이러한 기존의 한계점을 극복하는데 큰 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.
- 2) 차량의 실물화재결과 국내 소형차의 열방출율은 2.3 MW~3.4MW 정도로 측정되었으며, 발화지

점과 창문의 개폐정도에 의존적임을 알 수 있었다. 따라서 추후의 지속적인 논의를 통하여 차량의 열방출율 기준을 결정하기 위해서는 객관적인 실험 절차의 확립이 선행되어야 할 것이다.

- 3) 이러한 국내 기술력은 현재 계획 중인 철도차량의 실대형 화재실험 평가 장치의 개발에 직접적으로 적용할 예정이며, 이를 통한 국내 철도의 화재 안전 대책 수립에 많은 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

국내 최초이자 순수 국산기술로 개발된 10MW급 대형칼로리미터는 선진각국의 경우에도 특정한 설치기준 및 규정이 없기 때문에 각국의 실물 화재실험 용도, 실험 대상체의 종류, 경제적 여건 등을 고려하여 설치, 운영하고 있다. 또한, 화재 선진국의 대표적인 화재실험연구동에 설치되어 있는 대형칼로리미터는 기기의 종류, 설치방법, 설치조건 및 측정 장치 등이 거의 유사한 조건으로 이루어져 있으므로, 현재 개발된 화재실험동의 10MW급 대형칼로리미터를 선진각국과 활용성, 설치조건 및 운전 등에 있어서 동등한 기술수준임을 입증하기 위한 국제연구 등이 매우 중요할 것이다. 즉, 화재 관련 선진 연구기관과의 기술협력체계 구축 및 대형칼로리미터를 통한 화재안전 시험방법·기준 및 운영 절차 확립함과 동시에 국제 연구 교류를 통한 실대형 화재안전 평가시스템과 상호 비교 실험 추진함으로써 I선진 화재관련 실험법 및 인증체계를 구성해야 할 것이다. 아울러, 본 장비를 활용하여 차량, 건축물 등의 실물화재실험을 지속적으로 시행하여 이들의 연소/내화 DB가 구축되어진다면 성능설계 기반 국내화재안전기술 개발에 크게 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 첨단도시개발사업 지하공간 환경개선 및 방재기술개발 연구과제('03~08') 지하생활공간 방재기술 개발 연구결과의 일부입니다.

참고문헌

1. 유용호, 김흥열, 신현준, 류상훈 (2007), "실물화재실험을 위한 라지스케일 칼로리미터의 개발", 한국화재소방학회 2007 춘계학술발표대회 논문집
2. 유용호, 이의주, 신현준, 신한철 (2006a), "터널화재시 부분배연설비의 운영방안을 위한 수치해석적 연구", 한국화재소방학회지, 제20권 제2호, pp. 72-79.
3. 유용호, 이의주, 신현준, 신한철, 윤영훈 (2006b), "터널화재시 부분배연설비에 의한 배연효율 향상에 관한 연구", 터널기술, 제8권 제1호, pp. 53-63.
4. 이의주 (2006), "화재연구를 위한 대형콘칼로리미터의 설계", 한국화재소방학회논문지, 제20권 제4호, pp. 65-71.
5. Haack, A., Stuva W.M. (1999), "Ventilation for fire and smoke control:Recommend design fires", PIARC Committee on Road Tunnels WG NO. 6.
6. Henke, A. (1999), "Learning from real events - Dealing with truck fires in ST Gotthard Road Tunnel", Proceedings of the First International Conference on Tunnel Fires and One Day Seminar on Escape from Tunnels, Lyon, France, pp. 369-378.
7. McCaffrey, B.J., Heskestad, G. (1976), "Robust bidirectional low-velocity probe for flame and fire application", Combust. Flame, Vol. 26, No. 1, 125-127.
8. Karlsson, B., Quintiere, B.G. (2000), "Enclosure fire dynamics", CRC Press.
9. Dahlberg, M. (1992), "The SP industry calorimeter for rate of heat release measurements up to 10 MW, SP REPORT 1992:43, pp. 6.
10. Duffe, P., Marec, M. (1999), "Rapport de la mission administrative d'enquete technique sur l'incendie survenu le 24 mars 1999 au tunnel routier du Mont Blanc".
11. Babrauskas, V., Granson, S.J. (1992), "Heat release in fires", Elsevier, pp. 331-44.
12. Wu, Y., Bakar, M.Z.A. (2000), "Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems-A study of the critical velocity", Fire Safety Journal, Vol. 35, pp. 363-390.



유용호

한국건설기술연구원
선임연구원

E-mail: yhyoo@kict.re.kr



김흥열

한국건설기술연구원
선임연구원

E-mail: hykim@kict.re.kr



신현준

한국건설기술연구원
책임연구원

E-mail: hjshim@kict.re.kr