

# 대심도터널 화재 안전 설계를 위한 승용차의 열방출률 및 화재전파 특성에 관한 연구

유용호<sup>1\*</sup>, 권오상<sup>2</sup>

## A study on the HRR and fire propagation phenomena for the fire safety design of deep road tunnel

Yong-Ho Yoo, Oh-Sang Kweon

**Abstract** The study performed an actual fire experiment in order to propose the heat release rate of automobile that is the most basic architectural element for the fire safety design in a tunnel, whose importance has been recognized as the underground traffic tunnels are planned in Korean metropolitan cities. The heat release rate of a van is measured by the large scale calorimeter, in which the law of oxygen consumption is applied, and the fire expansion characteristics in a tunnel by placing two passenger cars nearby one another in the tunnel. As the results, the heat release rate of the van was revealed to be 5.9 MW, and carbon monoxide was emitted 482 ppm at a maximum. In case of two passenger car experiment for the fire expansion characteristics, the adjacent car was ignited about 3 minutes 30 seconds after the fire occurrence, and the complete fire was developed after 15 minutes. The maximum heat release was 9 MW. The results from the actual fire experiment can be an important input data for future quantitative analysis as well as an element applicable to a tunnel disaster preventive equipment design.

**Keywords:** Real scale fire test, large scale calorimeter, fire, tunnel, heat release rate

**요 지** 본 연구에서는 최근 국내 도심지 대심도 지하교통터널 계획과 함께 중요성이 대두되고 있는 터널내 화재 안전 설계에 가장 기본적인 설계 요소인 자동차의 열방출률을 제시하고자 실험화재실험을 실시하였다. 산소소모율법을 적용한 라지스케일칼로리미터를 이용하여 승합차의 열방출률을 측정하였으며, 또한 두 대의 승용차를 인접시켜 터널 정체시 화재 전파 특성을 파악 하였다. 그 결과 승합차의 최대 열방출률은 5.9 MW를 나타내었으며, 일산화탄소는 최대 482 ppm이 방출되었다. 두 대의 승용차의 화재 전파 특성 실험의 경우 화재 발생 후 약 3분 30초 경과부터 인접 승용차에 화재 전파가 시작되어, 15분 경과 후에는 완전한 화재로 발달하였다. 최대 발열량은 9 MW를 나타내었다. 이러한 실험화재실험에서 얻어 낸 결과는 향후 수치해석시 중요한 입력 자료로 이용됨과 동시에 터널의 방재설비 설계에 유용하게 적용 될 수 있을 것이다.

**주요어:** 실험화재실험, 대형칼로리미터, 터널, 화재, 열방출률

### 1. 서 론

급격한 도시화와 산업화로 인하여 증가된 자동차는 산업 현장에서 뿐 아니라 국민 모두에게 없어서는 안 될 생활 필수품이 되었으나 자동차와 관련된 화재사고는 매년 끊이지 않고 발생하고 있다. 소방 통계에 따르면 최근 3년간 자동차와 관련된 화재사고는 매년 약 6,000여 건에 달하고 있으며, 표 1에 보이는 바와 같이 2008년의 경우 차량 화재로 인한 인명피해가 246명(사망 66명, 부상 180)에 이르는 것으로 분석 되고 있다(소

방방재청 국가화재정보시스템 통계자료, 2008).

특히 서울시에서는 교통 체증이 도시경쟁력을 저해하는 주요 요인이라고 판단하고, 도로교통 환경개선을 통한 도시경쟁력 제고를 위하여 지하도로 건설 계획을 수립하였다. 즉, 서울시내 주요 간선도로 하부 수십 미터(m) 지하에 프랑스 A86 도로터널(윤성욱과 조형제, 2009), 말레이시아 스마트(Smart) 도로 터널 등과 같은 소형차 전용 지하도로 건설을 계획 중에 있다.

이러한 도로 터널에서의 화재 사고는 대부분이 전기 결함이나 엔진 결함, 충돌사고등에 의하여 발생하고 있으며(김효규와 이창우, 2004), 도심지 터널의 밀폐된 공간 특성상 급격한 화재 전파와 연기 배출의 어려움이 예상된다. 따라서 이에 대한 안전 대응 기술 확보가 시

<sup>1</sup>한국건설기술연구원 수석연구원

<sup>2</sup>한국건설기술연구원 연구원

\*교신저자: 유용호 (E-mail: yhyoo@kict.re.kr)

**표 1. 차량화재에 의한 인명피해 현황(단위: 명)**

구 분	계	주 거	비주거	차량	위험물· 가스제조소등	철도·선박 항공기등	임 야	기 타
2008	2,716	1,136	1,093	246	18	13	107	103
사망/부상	468/2,248	220/916	143/950	66/180	1/17	3/10	24/83	11/92
2007	2,459	1,066	984	154	19	13	93	130
사망/부상	424/2,035	233/833	104/880	50/104	1/18	3/10	19/74	14/116

급한 현안으로 대두되고 있다. 이에 본 연구에서는 도심지 승용차 전용 터널과 같이 차량이 밀집되어 있는 장소에서의 화재 위험성 평가를 위하여 승용차를 대상으로 실물화재실험을 실시하였다. 실험은 승용차 전용도로라는 특수성을 감안하여 소형자동차와 승합차를 대상으로 하였으며, 화재로 인한 연소 시 차량의 발열량을 측정하고 인접한 옆 차량으로의 화재 전이 특성을 파악하기 위한 실험을 병행하여 실시하였다.

## 2. 터널화재 및 차량의 열방출률

### 2.1 터널화재

터널과 같이 밀폐된 공간에서의 화재시 대량의 연기가 발생하는 것은 터널내부 공간에 산소의 공급이 한정되어 불완전연소가 되는 경우가 많기 때문이며, 발생한 연기는 터널내부에 갇혀 있기 때문에 쉽게 외부 대기 속에 확산되지 않는 경우가 많다. 이러한 연기는 승객들의 질식사的主要原因이 된다. 터널 화재 시 출화점에서 발생한 연기가 열에 의한 부력을 얻어 천장면에 이르러 천장기류(ceiling jet)를 형성하여 터널 길이 방향으로 퍼지고 이후 연기층이 발달하여 하강함에 따라 터널 내부에 가득 차게 되어 피난을 저해하는 중요 장애요인으로 작용한다. 연기로 인한 시각적인 장애는 주로 연기속의 주성분인 탄소입자로 인하여 광선이 차단되어 피난 유도표지나 출입구를 찾기 어렵게 되는 경우이며, 또한 연기로 인한 눈의 기능 장애도 일으키게 된다.

터널에서의 화재사고 발생 시 화염은 고온의 가벼운 가스이기 때문에 터널 천장부에 다다른 후에 터널길이 방향으로 진행하게 되며, 이 경우 터널 직경의 5~10배 정도의 상당한 거리까지 확장될 수 있다. 천장부에서 터널 길이 방향으로 진행되는 화염과 공기와의 혼합과정

은 화염이 터널 천장 방향으로 진행할 때보다 상당히 느린 속도로 진행되며, 이후 확장과정에서 무거운 가스 위에 가벼운 가스가 층을 이루어 안정화된 상태를 이루게 된다. 이때 난류와류(turbulent eddies)는 부력에 의해 약해지게 되고 혼합되는 공기량도 상당히 감소하게 되며, 더욱이 터널 길이 방향으로의 화염 혼합과정은 화염의 한 쪽 면에 걸쳐서 이루어진다. 뜨거운 스모그 연소산물의 유동의 경우 천장아래에서 층을 이루면서 공기와 혼합되지 않고 긴 거리까지 진행할 수 있으므로 적절한 설비장치를 통해 이 층으로부터 매연을 직접 배출시켜야 한다. 몽블랑 터널 화재사고 및 홍지문 터널 화재사고 등 지난 10여 년간 발생한 터널 화재 사고들에서 나타난 바와 같이 차량의 연소로 인한 열과 연소물질의 대부분이 터널 입구 쪽으로 이동하여 정체되어 있는 차량과 대피하려는 사람에게 상당히 위험한 환경을 유발시켜 많은 인명피해가 발생하였다. 이렇듯 터널에서의 화재 사고는 확률적인 면에서 그리 많지 않지만, 화재 사고 발생 시 터널 내의 연기 확산 속도가 매우 빠르고, 대피가 쉽지 않으며, 화재 사고 이후에도 터널 내의 상황파악이 용이하지 않아 차량들의 터널 내부로의 진입이 계속적으로 이루어져 대형재난사고로 이루어질 수 있으므로 이에 대비하기 위한 요소 기술 개발이 절실하다.

### 2.2 차량의 열방출률

차량종별 화재강도는 터널내 방재설비 설계를 위하여 가장 기본적인 인자이며, 특히 정량적 화재위험도 분석을 위한 결정인자가 된다. 국외의 화재강도를 파악하기 위한 대표적인 실물실험은 EUREKA 499 -FIRETUN 실험으로 이 실험은 1990년에서 1993년에 걸쳐 수행되었으며, 승용차, 열차, 지하철 차량, 화물차에 대한 실물화재실험을 실시하여 화재강도 및 화재지연시간에 대한

데이터를 얻고 있다(EUREKA-Project EU 499; Firetun, 1995). 또한 Offenegg 터널의 실험(Heater, 1994)에서는 화재강도에 대한 직접적인 측정은 수행되지 않았지만, 터널내 온도가 최대 1,200℃까지 상승하는 것으로 보고되고 있다. 최근의 화재실험은 2003년 노르웨이의 Runehamar 터널(연장 1,600 m, 폭 9 m, 높이 6 m, 경사도 1~3%)에서 수행되었으며, 이 실험은 Semi-trailer 차량에 적재물 종류를 변화시켜서 4가지 종류의 화물에 대해서 실험을 수행하여 실험조건에서 화재강도는 70~203 MW, 최고온도는 1,250~1,365℃로 나타났다 (Lönnemark and Ingason, 2005). 표 2에는 국외 실험결과를 기초로 하여 정리된 각종 설계자료 및 PIARC에서 제시된 화재강도를 정리하였다. 표 2에 제시된 바와 같이 승용차에 대한 화재강도는 2.5~5 MW 정도이며, 대형차의 화재강도는 15~30 MW까지 폭넓게 분포하고 있음을 알 수 있다. 또한, 국내에서는 한국건설기술연구원에 의하여 개발된 실대형 화재 평가 장치를 이용하여 승용차를 대상으로 화재강도를 측정하기 위한 실험이 실시된 바 있으며 그 결과는 4장에 기술된 바와 같이 2.4~3.4 MW 범위의 발열량을 나타내었다(유용호 등, 2007). 이와 같이 승용차 전용터널에서 통행이 가능한 승용차와 더불어 국내에 부재되어 있는 승합차 발열량

을 파악하기 위한 실험실험은 기본적인 방재계획 수립에 기본 인자로서 적용 될 수 있을 것이다.

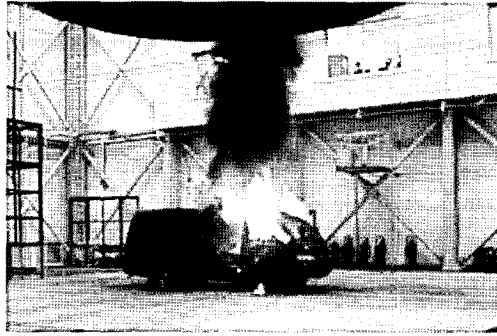
### 3. 실험방법 및 장치

#### 3.1 실험 방법

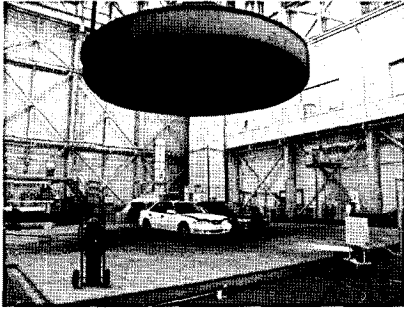
차량의 화재평가 실험은 10MW급 규모의 라지스케일 칼로리미터에서 실시하였으며(유용호 등, 2008), 측정 대상은 산소소모율법(consumption of O<sub>2</sub>)을 적용한 열방출률(HRR, heat release rate)을 기본적인 측정대상으로 하였다. 실험은 중형 승용차를 40 cm 간격으로 나란히 배치한 상태에서 화재 발생시 차량의 발열량 측정과 동시에 인접된 곳에 주차되어 있는 차량으로 화재가 전이되는 과정을 파악하였다. 그림 1 (a)는 승합차의 열방출률 측정 실험 사진이며, 그림 1 (b)는 승용차의 화재 확산 실험의 승용차 배치 및 승용차 내외부에 설치된 열전대위치를 나타내고 있다. 화재는 좌측의 승용차 내부 앞시트에서 발생된 것으로 가정하였으며 발생된 차량의 앞 창문을 50% 개방하였고, 인접차량은 밀폐된 조건으로 실험을 진행하였다.

표 2. 차량 열방출량 예시(PIARC, 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)



(a) 승합차 실물화재실험



(b) 승용차 실물화재실험 및 열전대 설치(●: 열전대)

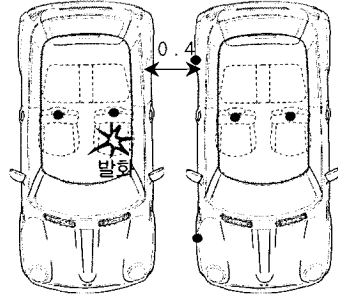


그림 1. 실대형화재평가장치 및 실험화재실험 사진

### 3.2 실험 장치(Large scale calorimeter)

화재평가지기 가장 기본적인 물리량은 열방출률이다. 일반적으로 화학조성이 알려져 있지 않은 재료의 열방출률 측정은 “순 연소열량은 연소에 필요한 산소의 양에 비례한다”는 것을 기초로 하고 있으며, 연소시 소모되는 산소 1 kg 당 13.1 MJ의 열량이 발생한다는 기본원리로부터 계산된다. 이를 위하여 연소시 발생하는 산소농도와 배출가스유량 등을 측정하여 식 (1)과 식 (2)에 의하여 계산할 수 있다 (Babrauskas and Grayson, 1992).

$$\dot{q} = [E\Phi - (E_{CO} - E) \frac{1-\Phi}{2} \frac{X_{CO}^A}{X_{O_2}^A}]$$

$$\frac{\dot{m}_e}{1+\Phi(\alpha-1)} \frac{M_{O_2}}{M_n} (1 - X_{H_2O}^e) X_{O_2}^{A''} \quad (1)$$

$M_{O_2}$ : Molecular weight of  $O_2$  ( $\approx 32\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$ )  
 $M_n$ : 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 ( $\text{kg} \cdot \text{sec}^{-1}$ )

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

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

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

$X_{CO}^{A''}$ : 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

## 4. 실험결과

### 4.1 소형 승용차 및 승합차의 발열량

그림 2는 선행 연구에서 수행된 승용차의 화재강도를 나타낸다(유용호 외, 2007). 그림 2 (a)는 엔진룸에서 화재가 발생하는 시나리오에 의한 화재실험결과로 최대화재강도는 2.4 MW 정도로 나타나고 있으며, 화재가 아주 완만하게 성장하는 것으로 나타났다. 특히, 이 경우 엔진룸에서 화재가 어느 정도 성장하여 1.2 MW 정도에 도달한 이후에 화재강도가 감소되다가 다시 증가하는 경향을 보이는데 이는 엔진룸과 승용차 내부가 분리되어 엔진룸에서 승용차내부로 화재가 확산될 때 나타난 현상이다.

또한 그림 2 (b)는 창문을 열어놓은 상태에서 승용차 내부 운전석에서 화재가 발생하는 시나리오에 의한 실험을 수행한 결과이다. 그림에서 화재강도는 화재초기 약 3분 이내에 급격하게 증가하여 플래시오버 상태에 도달한 후 약 25분간 지속되는 것으로 나타났다. 이 경우 최대화재강도는 3.4 MW 정도로서 국외에서 선행된 소형자동차의 열방출률 측정결과(3~5MW) 및 PIARC의 도로터널 방재설계시 소형차 기준 화재강도와 비교

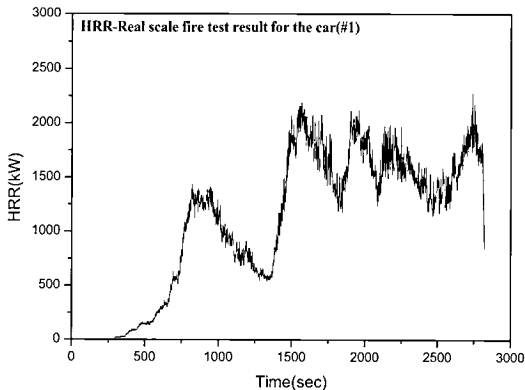
하여 볼 때 매우 근사한 수치임을 확인할 수 있다. 국내 터널에서 실시된 실물차량화재실험 결과에서 얻어진 열방출률도 본 실험을 통하여 얻어진 결과 범위와 동일한 결과를 나타냈다.

그림 3은 2회에 걸쳐 실시한 승합차(12인승)화재시 화재강도를 나타낸 것으로 화재는 운전석에서 최초에 발화하는 조건으로 설정 하였다. 두 번의 실험 결과 모두 화재는 발화 초기부터 급격하게 성장하여 5분 이내에 최대화재강도 나타내었으며, 이후 서서히 감소하는 것으로 나타났다. 최대발열량(peak HRR)은 5.2 MW와 5.9 MW로 나타났으며, 최대일산화탄소농도는 482 ppm 이었다.

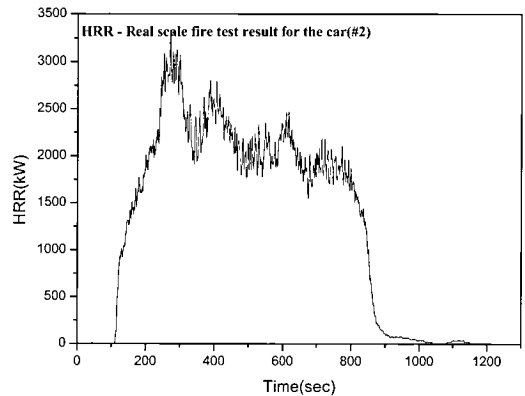
결론적으로 표 3에 정리된 바와 같이 소형승용차 및 승합차의 발열량은 2.5~5.9 MW 범위에서 측정 되었으며, 이는 승용차 전용 터널의 경우 현재 적용되고 있는 “도로터널 방재시설 설치 및 관리 지침”에서 제시하고 있는 설계 화재 강도 20 MW(국토해양부, 2009)의 30% 이내의 화재강도임을 알 수 있다. 그러나, 복층 구조의 설계 계획으로 인한 단면적 감소와 이에 따른 불완전 연소는 유독가스 및 연기 발생량의 증가를 유발할 것으로 예상되므로, 이에 대비 할 수 있는 후속 연구를 통하여 설계 화재강도에 대한 재정립이 필요할 것으로 판단 된다.

### 4.2 차량의 화재전파 특성

화재 발생시 시간 경과에 따른 화재의 성장 및 확산을

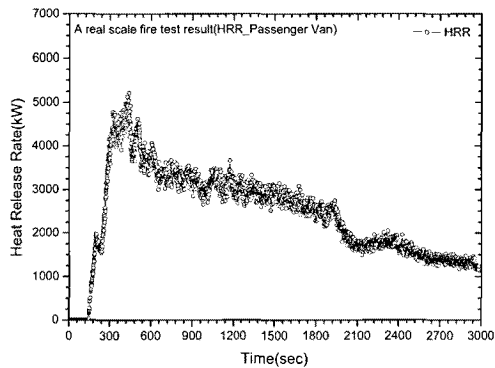


(a) 엔진룸 발화

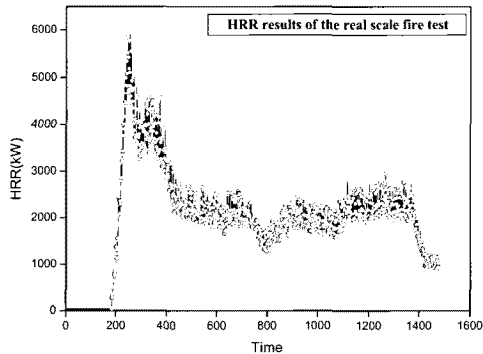


(b) 차량내부 발화

그림 2. 실물차량(승용차) 화재 실험결과 (유용호 외, 2007)



(a) 승합차(1차 실험)



(b) 승합차(2차 실험)

그림 3. 실물차량 화재 실험결과(열방출율)

표 3. 승용차와 승합차의 총발열량 측정 결과

	Passenger car 1	Passenger car 2	Passenger van 1	Passenger van 2
HRR_max.	2.4 MW	3.4 MW	5.2 MW	5.9 MW

경과 시간	내용	사진	경과 시간	내용	사진
0:00	점화		5분 30초	승용차2 뒷창문 화재전파	
1분	승용차1 창문 출화		9분 30초	승용차2 차량 내부 화재전파 (앞시트/차량천정)	
3분 30초	승용차2 화재전이 (백미러)		13분 10초	승용차2 모든 유리 창문으로 출화	

그림 4. 시간 경과에 따른 차량의 화재 전이

그림 4에 정리하였다. 승용차 1의 내부 앞좌석에서 발화가 일어난 후 약 1분이 경과하면서 창문을 통한 출화가 시작되었으며, 3분 30초 경과후 양측 창문 출화를 시작

으로 승용차 2의 백미러에 화재가 확산되기 시작하였다. 이후 9분 30초가 경과하면서 승용차 2의 차량 내부 좌석으로 화재가 확산되었으며, 경과시간 30분경이 되었을

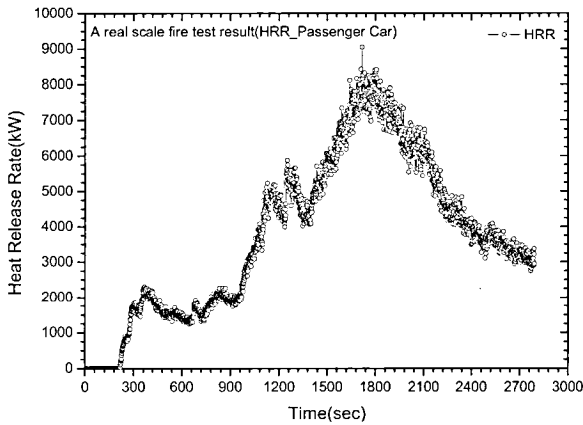


그림 5. 실험결과(발열량)

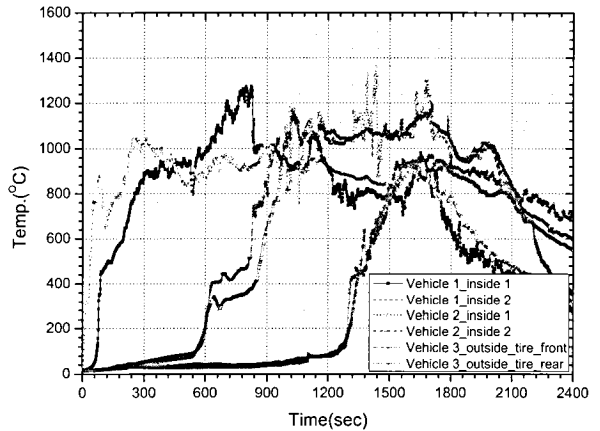
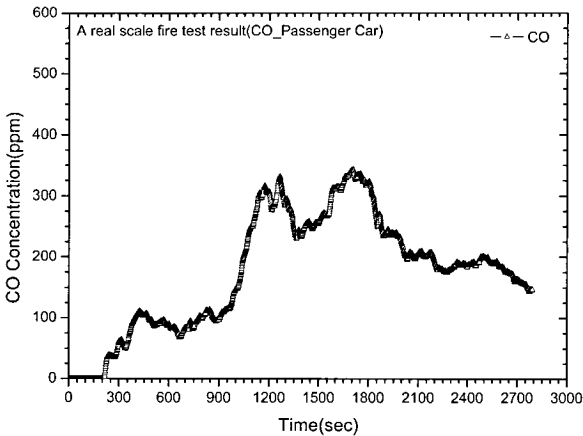
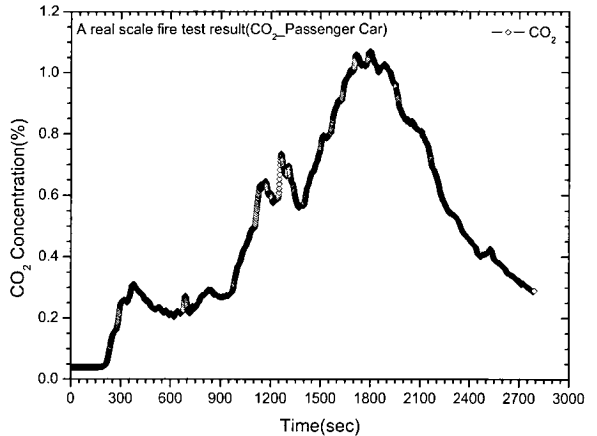


그림 6. 실험결과(내외부 온도)



(a) 일산화탄소 농도



(b) 이산화탄소 농도

그림 7. 실험결과(일산화탄소 및 이산화탄소)

때 화재는 최성기에 다다르게 되었다. 즉, 차량의 화재시 차량의 창문 출화를 시작으로 바로 인근 차량에 전이가 일어나며 이후 급격하게 화재가 성장할 것으로 평가되었다.

발열량, 일산화탄소, 이산화탄소 농도 및 차량 내외부 온도 측정 결과는 그림 5~그림 7에 도시하였다. 발열량의 경우 승용차 2로 화재가 전이되는 시점부터 2 MW 이상을 나타내었으며 15분이 경과하면서부터 급격히 성장하여 최고 9 MW의 열방출률을 나타내었다. 이는 기존의 연구에서 실시한 동종 승용차 화재시에 보였던 3.4 MW보다 약 2.5배 이상으로 화재 위험성이 매우 높은

것으로 평가 되었다. 온도측정 결과 처음 화재가 발생된 승용차 1의 내부 온도는 화재 발생 직후부터 800°C 이상을 나타내었으며 이후 화재가 성장기를 거쳐 쇠퇴기에 이를 때까지 1,000°C 이상을 나타낸다. 승용차 2의 경우 백미터로 화재가 전이되어 차량 내부로 화재가 확산되는 9분 30초경에 이르렀을 때 급격히 온도가 상승하기 시작하였으며 이후 화재 성장에 맞추어 고온의 내부 온도 분포를 보였다.

유해가스의 경우 발열량과 유사한 성장과정을 나타내었으며, 특히 유독성이 강한 일산화탄소의 경우 평균 189 ppm, 최대 343 ppm으로 측정되어 허용농도 100 ppm

을 초과하는 것으로 평가 되었다. 이산화탄소의 최대 농도 역시 대기중 이산화탄소 농도 0.03%보다 37배 높은 최대 1.1 %를 측정되어 화재시 재실자들의 질식에 대한 대비가 필요한 것으로 예상되었다.

## 5. 결론 및 논의

본 연구는 승용차 전용 대심도 터널의 정량적 위험성 평가시 기본 자료로 요구되는 차량의 열방출률 DB 확보를 위하여 승용차를 대상으로 실물 화재실험을 실시하였으며 이를 통하여 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

1. 승용차와 승합차의 최대 발열량은 현재 적용되고 있는 설계 화재 강도 20 MW의 30% 정도인 2.5~6.0 MW 로 측정되었으며, 복층 구조의 설계 계획으로 인한 단면적 감소와 이로 인하여 예상되는 유독가스 및 연기 발생량 증가에 대비 할 수 있는 후속 연구를 통하여 설계 화재강도에 대한 재정립이 필요함을 확인하였다.
2. 승용차 내부 앞좌석에서 발화가 일어난 후 약 1분 경과후 창문을 통한 출화가 시작되었으며, 3분 30초 경과후 양측 창문 출화를 시작으로 인접 차량의 백미러에 화재가 전이되기 시작하여 이후 급격하게 화재가 성장함을 확인하였다.
3. 인접 차량으로 화재전이 실험의 경우 발열량은 화재가 전이되는 시점부터 2 MW이상을 나타내었으며 15분이 경과하면서부터 급격히 성장하여 최고 9 MW의 열방출률을 나타내었다. 이는 기존의 연구에서 실시한 동종 승용차 화재시에 보였던 발열량보다 약 2.5 배 이상 높은 값으로 화재 위험성이 매우 크다는 것을 판단되었다.
4. 대심도 터널에서의 화재 발생 초기에 가연 공간에서 화재의 진화가 이루어지지 않으면 약 4분 내에 다른 차량으로의 화재 전파가 우려 되며, 공간의 특성상 화재가 성장한 이후에는 소방대원들의 진입조차 어

려울 것으로 예상되므로 신속한 초기 대응이 필요함을 확인하였다.

## 감사의 글

본 연구는 2010 한국건설기술연구원 주요사업 “표준 화재모델에 따른 화재확대방지 및 피난 안전설계기술개발”의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Lönnermark, A., Ingason, H. (2005), “Gas temperatures in heavy goods vehicle fires in tunnels”, Fire Safety Journal, Vol. 40, pp. 506-527.
2. EUREKA-Project EU 499; Firetun (1995), “Fire in Transport Tunnels: Report on Full Scale Tests”, Studiengesellschaft Stahlanwendung eV. D-40213 Dusseldorf.
3. Heater, A., 1994, “Fire tests in the Ofenegg-tunnel in 1965”, Proc. of the Int. Conf. on Fires in Tunnels, Boras, Sweden, pp. 195-214.
4. PIARC, 1999, “Fire and smoke control in road tunnels”.
5. Babrauskas, V., Grayson, S.J. (1992), Heat Release in Fires, Elsevier.
6. 국토해양부 (2009), “도로터널 방재시설 설치 및 관리 지침”.
7. 김효규, 이창우 (2004), “국내 도로터널내 발생 교통사고, 화재사고 및 터널특성에 관한 연구”, 터널기술, 제6권, 제3호, pp. 199-211.
8. 소방방재청 국가화재정보시스템 통계자료, <http://nfd.go.kr>.
9. 유용호, 김흥열, 신현준 (2007), “대형칼로리미터를 이용한 차량 화재특성에 관한 연구”, 터널기술, 제9권 제4호, pp. 343-350.
10. 유용호, 김흥열, 신현준 (2008), “실대형화재평가장치의 개발 및 안전화에 관한 연구”, 한국화재소방학회논문지, 제22권 제1호, pp. 37-44.
11. 윤성욱, 조형제 (2009), “A86 Duplex 터널 방재시설에 대한 분석”, 터널기술, 제11권 제4호, pp. 76-85.

접수일(2010.6.16), 수정일(2010.7.16), 게재확정일(2010.7.28)