

# 복층터널내 화재특성에 대한 실험적 연구

박진욱 · 유용호<sup>†</sup> · 김휘성 · 박병직

한국건설기술연구원 화재안전연구소

## Experimental Study on the Fire Behavior in Double Deck Tunnel

Jin-Ouk Park · Yong-Ho Yoo<sup>†</sup> · Hwi-Seung Kim · Byoung-Jik Park

Fire Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

(Received March 4, 2016; Revised April 14, 2016; Accepted April 18, 2016)

### 요 약

최근 도시의 거대화 및 과밀화의 영향으로 교통정체가 심해지고, 이로 인한 경제적 손실이 막대하게 증가하고 있는 실정이다. 따라서 대도시 공간의 효율적인 활용 방안으로 현재 국내의 도심지 터널이 복층터널로 계획되고 운영되는 추세이다. 그러나 복층터널의 경우 층고의 감소로 인해 터널 내부에서의 차량 화재시 일반 도로터널에 비해 더 많은 양의 연기 및 검댕이 발생될 것으로 예측되기 때문에 기존의 일반 도로터널을 대상으로 구축된 설계화재강도나 연기발생량을 적용하여 설계하고 운영하는 것은 바람직하지 않다. 따라서 본 연구에서는 복층터널 설계시 유용한 설계화재곡선 제시를 위한 연구의 일환으로 실규모 차량화재실험을 수행하여 복층터널내 화재 특성 데이터를 획득하고 분석하였다. 실험은 승용차 1대의 화재상황과 2대의 화재상황, 두 가지 상황을 구현하여 수행하였으며, 실험 결과로부터 화재강도는 승용차 1대에서는 최대 2.4 MW, 승용차 2대에서는 최대 3.5 MW가 나타났다.

### ABSTRACT

In the wake of expanding and overpopulating urban areas, traffic congestion has been worsening increasingly, causing huge economic losses. In a bid to effectively use the space of metropolitan areas, the construction and operation of a double deck tunnel has been on the rise. On the other hand, a lower height of a double deck tunnel is expected to generate more smoke and soot in a fire than other usual tunnels. Therefore, it is undesirable to apply the standard for fire intensity or smoke generation, which were designed for existing road tunnels. A part of an effort to propose a design fire curve that is useful for double deck tunnel, is intended to obtain and analyze the fire characteristics in a double deck tunnel through a real scale fire test. The test was conducted according to the fire scenario with one passenger car and two passenger cars; the monitored fire intensity was a maximum of 2.4 MW and 3.5 MW, respectively.

**Keywords :** Double deck tunnel, Heat release rate, Real scale fire test

## 1. 서 론

서울 및 수도권에서 교통 집중과 정체로 인해 연간 수조원의 경제적 손실이 발생되고 있으며, 그 손실량은 매년 증가하고 있는 추세이다. 이러한 문제의 해결방안으로 유럽 등 선진국에서는 대도시 교통체증을 해소함과 동시에 지상 녹지공간 확보를 위한 도심지 대심도 지하도로 건설을 진행하고 있으며, 동시에 프랑스 A86 East 터널과 중국 Fuxing 터널 그리고 말레이시아의 SMART 터널 등과 같이 지하도로를 복층터널로 건설함으로써 굴착단면적 최소화 및 시공성 개선 등의 종합적인 이점을 가지게 되어 경제성, 안정성 및 시공성이 우수한 선진 지하도로 계획을

수립하고 있다<sup>(1)</sup>. 이에 따라 현재 국내에서도 여러 지하도로 및 도로터널을 대심도 복층터널 적용이 검토되고 있다.

터널은 반밀폐구조라는 특수성으로 인해 터널내에서 화재가 발생할 경우, 기류의 확산이 제한되어 화재연기로 인해 가시거리가 감소하게 되고, 유독성 가스의 확산 및 공기 온도의 급격한 상승 그리고 산소농도의 감소를 초래하여 통행자의 생명을 위협할 뿐만 아니라 구조물이나 각종설비 및 차량의 손상을 유발하는 치명적 문제점을 가진다<sup>(1,2)</sup>. 복층터널의 경우에는 일반도로터널에 비해 층고가 낮은 구조적 특수성으로 인해 화재시 발생하는 위험성은 더 크게 나타나며, 화재 특성 또한 일반도로터널과 상이하게 발생될 것이다. 또한, 복층터널은 일반적으로 상층부와 하층

<sup>†</sup>Corresponding Author, E-Mail: yhyoo@kict.re.kr  
TEL: +82-31-369-0516, FAX: +82-31-369-0540

ISSN: 1738-7167  
DOI: http://dx.doi.org/10.7731/KIFSE.2016.30.2.075

부 두 개의 도로로 운영되는데, 만약 하층부에서 화재가 발생할 시 상층부가 정상적으로 운용될 수 있도록 화재에 수시간을 버틸 수 있는 특수 내화소재 슬래브가 설치되어야 한다. 그러나 아직 복층터널 안전설계에 대한 연구는 국외에서도 아직 정립되어 있지 않고, 국내에서는 전무한 실정이다. 만약 일반적으로 터널설계시 적용되는 일반도로 터널 설계기준을 바탕으로 복층터널이 설계된다면, 축소 설계되어 안전성에 문제가 발생하거나 과설계되어 공사비가 상당히 증가할 수 있는 문제점이 초래될 것이다. 따라서, 복층터널의 안전설계를 위해 화재 발생시 위험도를 줄이기 위한 연구가 반드시 수행되어야 하며, 이는 터널내 화재사고의 주된 화원이 되는 차량화재의 규모나 특성에 기초하여 타당하다고 할 수 있다<sup>(3)</sup>. 그런 이유로 본 연구에서는 복층터널 내 화재시 최적 제·배연을 위한 대배기구 시스템 및 내화 성능 향상 기술 개발을 위한 선행연구의 일환으로 복층터널내 실규모 차량화재실험을 수행하여 발생하는 화재특성을 분석하였으며, 그 결과로부터 열방출율, 연기발생량, CO, CO<sub>2</sub>, 온도 등을 측정하여 복층터널내 화재특성 DB 구축을 위한 기초 데이터를 획득 하였다.

## 2. 국내외 도로터널 설계화재강도

터널에서 차량화재가 발생하는 경우, 차종별 화재강도 및 연소생성물질의 양은 연소상태에 따라서 차이가 많이

발생하게 되지만 각국에서는 터널 설계 및 건설시 안전설계의 기반으로 하기 위해 기준을 규정하고 지키고 있다. 국내의 경우, 차종별 화재강도 및 연기발생량, CO 발생량을 “Fire and safety in road tunnel, PIARC”에 제시되어 있는 값을 기준으로 적용한다. 따라서, Table 1과 같이 국내에 적용되는 설계화재강도는 20 MW이며, 연기발생량은 80 m<sup>3</sup>/s을 기준으로 하고 있다.

미국의 경우 차종별로 화재강도와 연기발생량을 제시하고 있으며, 설계화재강도에 대한 언급은 없으나 횡류환기 방식의 설계를 위한 연기배출풍량 기준을 20 MW로 제시하고 있다. 독일의 경우에는 대형차의 통과 댓수에 따라 구분하고 있으며, 30~100 MW를 설계화재강도로 하고 있다. 영국의 경우에는 터널연장과 도로구분에 따라서 20, 50 MW를 차등적용하고 있는 특징을 보이고 있다. 일본의 경우, 방재시설설계기준에 설계화재강도를 명시하고 있지는 않으나 20 MW를 일반적으로 적용하고 있다<sup>(4,5)</sup>.

## 3. 실규모 차량화재실험

### 3.1 실험개요

본 연구에서는 복층터널 설계시 적합한 설계화재곡선 제시를 위해 복층터널 구조체를 제작하여 실제 복층터널에서 발생하는 차량화재를 모사하여 화재 실험을 수행하였다. 먼저, 일반도로 터널과는 달리 층고가 낮은 복층터

Table 1. Heat Release Rate and Smoke Production Rate<sup>(2,4,5)</sup>

Classification	Heat release rate (MW) & smoke production rate (m <sup>3</sup> /s)				
Domestic (Guideline for road tunnel disaster prevention facilities)	Heat release rate: 20, Smoke production rate: 80				
USA (NFPA 502)	Category	Passenger car	Bus/truck	Tank lorry	
	Heat release rate	About 5	About 20	About 100	
	Smoke production rate	20	60	100~200	
Germany (RABT 2002)	- Defined depending on number of heavy vehicle				
	No of heavy vehicle (car · km/day · tube)	4000 or less	4000~6000	6000 or more	
	Heat release rate	30	50	100	
	Smoke production rate	80	120	200	
France (CETU 2002)	- Heat release rate is estimated at 30 MW of which 1/3 is considered heat radiation loss. smoke production rate is estimated at 80 m <sup>3</sup> /s.				
UK (BD7899C)	Tunnel length	Heat release rate			
		Motorway	Urban major route	Rural major route	Urban major route
	> 2000	50	50	20	20
	< 2000	50	20	20	20
	- No standard for smoke production rate				
Japan	- No standard - Generally, Heat release rate is estimated at 20 MW				

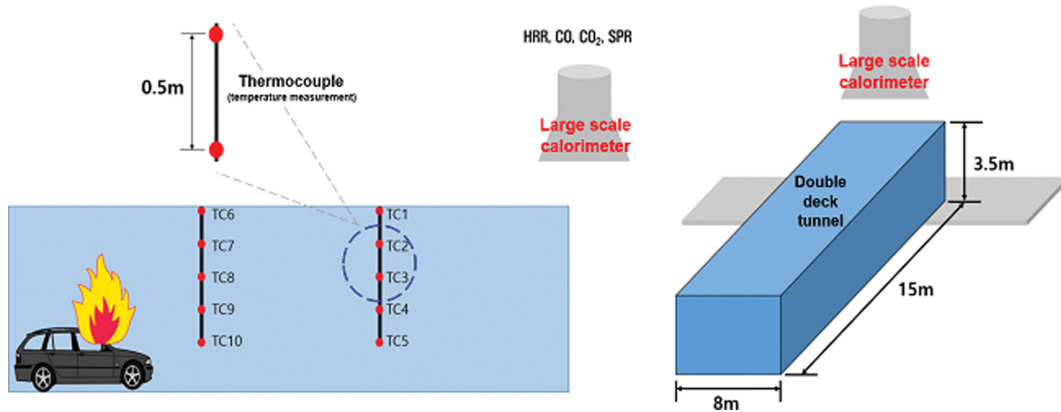


Figure 1. Schematic diagram of vehicle fire test.



Figure 2. Real scale vehicle fire test devices.

널의 구조적 특성을 모사하기 위해 Figure 1에서 나타낸 바와 같이 높이 3.5 m, 넓이 8 m, 길이 15 m의 제원으로 구조체를 제작하였다. Figure 2의 사진과 같이 구조체는 한쪽만 열려있는 형태로 발생한 연기가 제연될 수 있도록 열린 끝단 바로 위에 집진설비를 위치시켰고, 화원이 되는 자동차는 터널 구조체의 닫힌 끝단에 위치시켰다.

실험에 사용된 집진설비는 최대 용량 10 MW로, 제연되는 공기를 포집하여 광센서 및 가스분석기를 통해 열방출율(Heat release rate), 연기발생량(Smoke production rate), CO, CO<sub>2</sub> 등의 데이터를 측정한다. 또한, Figure 1의 구조체 내부 개략도에서 나타낸 것과 같이 열전대를 구조체의 닫힌 끝단으로부터 거리 5 m 간격으로 천장에서 높이 0.5 m 간격으로 5개씩 총 10개를 설치하여 내부 온도 변화를 측정하였다. 여기서, 열전대는 K-type을 사용하였다.

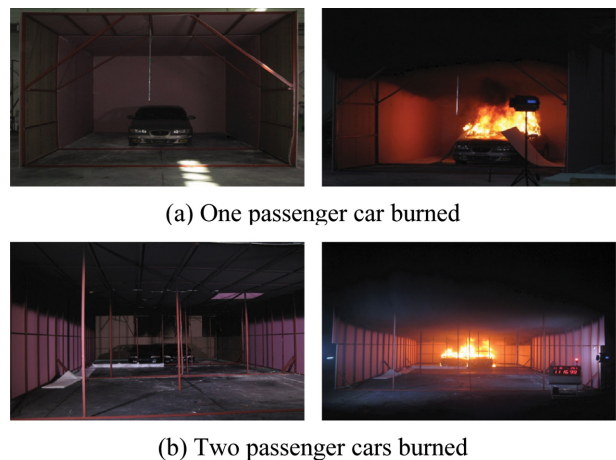


Figure 3. Real scale vehicle fire test.

### 3.2 실험방법

차량화재실험에 화원이 되는 자동차는 2,000 cc급 중형 자동차로 총 3대를 사용하였다. 실험은 총 두가지 경우로 수행되었는데, 첫 번째는 Figure 3의 (a)와 같이 운행 중 차체 결함에 의해 승용차 한 대에서 화재가 발생하는 경우와 두 번째는 Figure 3의 (b)와 같이 운행 중 두 대의 승용차가 충돌한 후 발생하는 화재를 구현하였다. 그러나 구성한 상황과 동일하게 실험에서 발화시키는 것은 현실적으로 한계가 있기 때문에 두 가지 경우 모두 조수석 시트를 찢고 작은 솜뭉치를 넣어 점화시켰다. 그리고 안전을 위해

차량의 창문을 모두 열어둔 상태로 실험을 진행하였으며, 폭발의 위험이 있는 배터리 및 연료통의 연료, 타이어의 공기 등을 모두 제거하였다. 실험은 착화 후 약 40분간 진행하였으며, 화재가 최전성기를 지나 하향세를 보이기 시작하고 난 후 약 20분이 지났을 시점에 소화시켰다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 열방출율 및 연기발생량

본 연구에서 수행된 실험에서는 승용차 1대가 연소되는

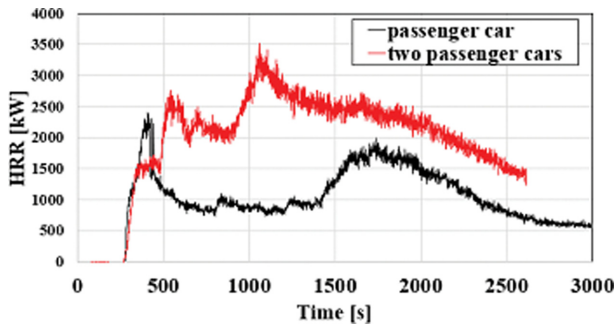


Figure 4. Results of heat releases rate.

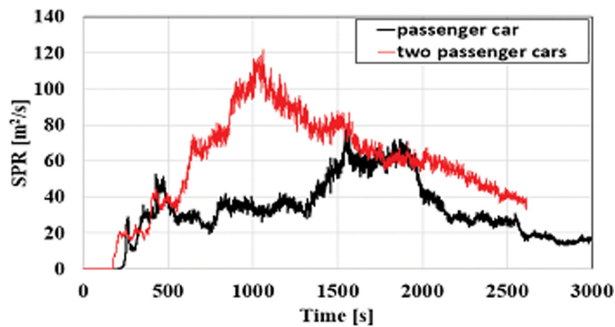


Figure 5. Results of smoke production rate.

경우와 승용차 2대가 연소되는 두 가지 경우를 구현하였으며, 화재의 크기를 나타내는 가장 기본적인 물리량인 열방출율(HRR)과 터널화재에서 가장 큰 위험요소라 할 수 있는 연기발생량(SPR)을 측정하여 화재규모를 판단하고자 하였으며, 그 결과를 Figure 4와 Figure 5에 도시하였다.

먼저, 승용차 1대 화재의 경우 착화 후 차량 시트 내장재가 연소되며 발열량이 급격하게 상승한다. 이후 차량의 천장부로 화재가 확대되어 100초가 경과된 시점에서 최대 발열량 2.4 MW가 발생되고, 약 1200초간 하향세를 보이다가 엔진룸으로 화재가 확대된 후 발열량이 2.0 MW까지 재상승한 후 소화로 이어진다.

승용차 2대의 화재에서는 승용차 1대의 화재와 같이 착화 후 차량의 시트 내장재가 연소되어 발열량이 급격히 상승하고, 천장부로 화재가 확대되어 250초가 경과되면 발열량이 2.7 MW까지 발생되고, 소강상태를 보이다 약 700초가 경과되는 시점에 옆 차량 측면부로 화재가 확산되어 다시 열방출율이 상승하게 된다. 옆 차량의 천장부까지 화재가 확산된 시점에 최대 발열량 3.5 MW가 발생된다. 두 가지 경우 모두 일반적으로 보고되고 있는 중형 자동차의 최대 발열량 3 MW~5 MW<sup>(6,7)</sup>에 비해 낮게 나타났다.

연기발생량은 승용차 1대의 경우 시트 내장재가 연소될 때 52 m<sup>2</sup>/s까지 급격하게 증가하고 약 1200초가 되는 시점에 다시 증가하여 최대 연기발생량 73 m<sup>2</sup>/s가 발생된다. 시트 내장재 및 천장부가 연소될 때 최대 발열량이 나타나는 것과는 달리 엔진룸이 연소될 때 더 많은 연기가 발생되고 있다. 이것은 시트 내장재 및 천장부에 비해 엔진룸

의 구성품에서 불완전연소가 다량 발생한다는 것을 의미한다.

승용차 2대의 경우 연기발생량은 착화 시점부터 선형적으로 증가하다 760초가 경과되면 최대 연기발생량 120 m<sup>2</sup>/s 발생되고, 이후 소화시점까지 서서히 감소한다. 승용차 1대의 결과와 비교해 보면 최대 연기발생량 발생 과정이 상이하게 나타나는데 승용차 2대의 경우 화재확산이 상대적으로 빠르게 진행되어 시트 내장재와 엔진룸이 동시에 연소되고 있기 때문에 나타나는 현상이라 판단된다.

#### 4.2 CO, CO<sub>2</sub> 및 온도 측정 결과

화재시 발생하는 유독가스 중 인체에 가장 치명적이라 할 수 있는 일산화탄소와 이산화탄소 농도를 측정하여 Figure 6과 Figure 7에 도시하였다. 일산화탄소 농도는 승용차 1대와 2대의 경우 각각 최고 140 ppm과 260 ppm으로 측정되었고, 이산화탄소 농도는 최고 0.35%와 0.64%를 나타내었다. 일산화탄소 장기간 허용 농도(100 ppm) 수준까지 이르는데 걸린 시간은 승용차 1대의 경우, 1240초가 소요되었고, 승용차 2대의 경우 250초가 소요되었다.

Figure 8에는 승용차 2대를 연소시킬 경우 발생하는 터널 내부 온도 변화를 측정한 결과를 나타낸 것으로 착화 후 약 30초 동안 온도가 급격히 상승하여 화원인 차량으로부터 약 2.5 m 떨어진 지점의 천장부(TC6) 온도가 260°C까지 상승한다. 이후 약 200초가량 소강상태를 보이다 다시 400°C까지 상승한다. 이것은 전술했던 열방출율 결과와

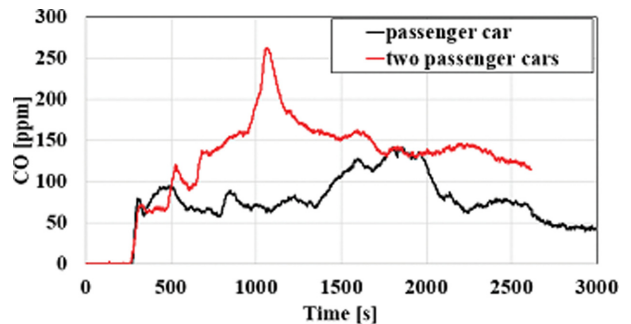


Figure 6. Results of carbon monoxide.

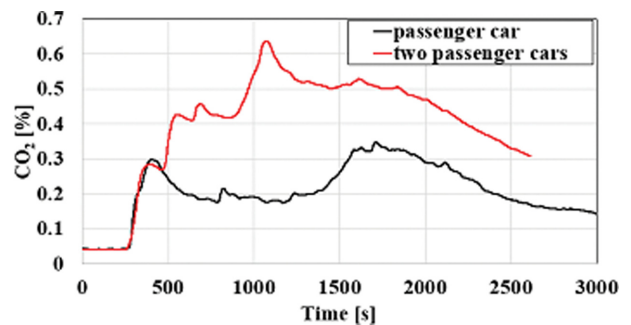


Figure 7. Results of carbon dioxide.



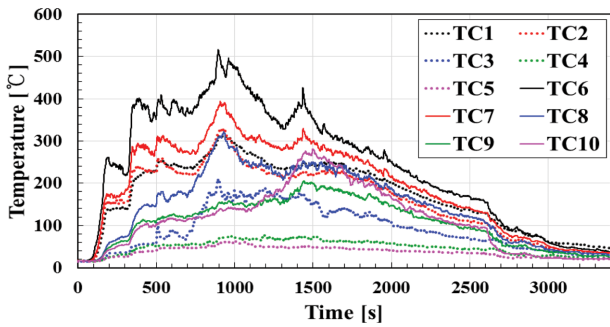


Figure 8. Results of temperature for two passenger cars burned in tunnel.

같이 착화된 차량의 시트내장재와 천장부를 태우던 화염이 옆 차량의 옆면부를 통해 화재가 확대되며 나타나는 현상이라 판단된다. 화재는 900초가 되는 시점에 옆차량의 천장부까지 확대되고 터널 내부 온도는 최대 520°C까지 상승한 후 서서히 감소한다. 화원과 인접해 있는 TC6~10에서는 설치된 높이에 상관없이 전술한 것과 유사한 경향으로 최대온도 범위 260°C~520°C를 나타냈고, 화원으로부터 약 5 m 떨어진 거리에 설치된 TC1~5에서는 최대온도 범위 330°C~75°C가 발생되었다. 여기서, 상대적으로 터널의 상층부에 위치한 TC1, 2, 3는 규모의 차이는 있으나 화원과 인접한 곳에 설치된 열전대의 온도변화와 같은 경향의 온도 변화가 나타나지만 하층부 즉, 지상으로부터 높이 1.5 m, 2 m 위치에 설치된 TC 4, 5의 온도는 최고 75°C가 발생되고, 착화부터 소화시점까지 완만한 곡선을 나타낸다. 이 결과로부터 터널내에서 발생하는 연층하강 현상에 대해 분석할 수 있다. 터널 내 연층은 천장부부터

TC 3이 설치되어 있는 위치까지 약 1.5 m 두께로 형성되고 있으며, 이 결과는 아래의 Figure 9에 나타낸 실제 실험 사진에서도 거시적으로 확인할 수 있다. 그러나 이 결과는 복층터널 구조체가 15 m임을 감안하면, 실제 연기거동 거리가 10 m 밖에 되지 않는 한계점을 가진다. 따라서, 본 실험에서 얻어진 실측 데이터가 반영된 수치해석적 연구를 통해 실제 길이의 복층터널 공간에서 발생하는 연층하강현상에 대한 해석이 반드시 필요할 것으로 판단된다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 복층터널 내 대배기구 시스템 및 중간 슬래브 내화 성능 향상 기술 개발을 위한 선행연구의 일환으로 복층터널 내 차량화재를 구현한 실규모 차량화재실험을 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 열방출율은 승용차 1대와 2대 각각 최대 발열량 2.4 MW와 3.5 MW가 발생되며, 최대 연기발생량은 각각 73 m<sup>2</sup>/s와 120 m<sup>2</sup>/s가 나타났다. 열방출율은 일반적으로 보고되고 있는 중형 자동차의 발열량인 3 MW~5 MW에 비해 낮게 발생되었다.
- 유독가스농도인 일산화탄소는 승용차 1대와 2대, 각각 최대 140 ppm과 260 ppm이 발생되었으며, 이산화탄소는 각각 0.35%와 0.65%가 나타났다. 터널이 아닌 개방형 중형승용차 연소실험(일산화탄소 130 ppm, 이산화탄소 0.25%)과 비교하면 높은 수치가 측정되었으며, 이러한 현상은 긴 연장으로 인해 반밀폐구조의 특성을 가진 실제 터널에서는 더욱 심해질 것으로 예상된다.
- 내부 온도는 화원과 인접한 천장부에서 착화 후 약



(a) 300 sec after ignition



(b) 600 sec after ignition



(c) 900 sec after ignition

Figure 9. Smoke spreading in double deck tunnel.

900초가 되는 시점에 최고 520 °C까지 상승하였고, 반면에 화원과 약 5 m가 떨어지고, 천장부로부터 2 m 떨어진 지점에서는 최고 75 °C로 비교적 낮은 온도가 측정된다. 이 결과로부터 터널내 연층 두께가 약 1.5 m임을 예측할 수 있으며, 점화시부터 소화시까지 그 이상의 연층하강은 발생하지 않았다. 그러나 복층터널 구조체 규모의 한계점으로 인해 연기거동 거리가 10 m 밖에 되지 않음을 감안하면, 추후 실제 터널연장을 모사할 수 있는 수치해석적 연구와 병행하여 결과를 분석할 필요가 있다고 판단된다.

본문에서 제시한 실험은 국내에서는 유일하게 복층터널을 구현하여 수행한 차량화재실험으로 복층터널내 화재특성 DB 구축을 목적으로 수행되었으며, 일반적으로 층고가 낮아 소형 화물차까지 통행이 가능하다고 추측한다면, 추후 승합차 및 소형화물차 화재의 추가적인 실험을 통해 복층터널에 적합한 설계화재곡선을 제시할 수 있는 유용한 기초 연구 자료가 될 것이라 판단된다.

## 후 기

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2014년 건설기술연구사업의 ‘대심도 복층터널 설계 및 시공 기술 개발(14SCIP-B088624-01)’ 연구단을 통해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

## References

1. J. O. Yoo, H. J. Shin and C. H. Nam, “The Study of Ventilation System During Fire in Road Tunnel with Bi-directional or Congested Unidirectional Traffic”, Proc. Summer Conference of the Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, pp. 474-479 (2008).
2. Y. J. Ko, “A Study of the Heat Release Rate of Tunnel Fires and the Interaction between Suppression and Longitudinal Air Flows in Tunnels”, Ottawa-Carleton Institute of Civil and Environmental Engineering, Ottawa, Canada (2011).
3. H. G. Kim and C. W. Lee, “A Study on the Relationship Among Traffic Accidents, Fire Occurrences and Tunnel Characteristics in Local Road Tunnels”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 6, No. 3, pp. 199-211 (2004).
4. J. O. Yoo, “A Study on the Introduction of Road Tunnel Ventilation System Design and Management Plan”, Journal of KOSHAM, Vol. 10, No. 3, pp. 43-50 (2010).
5. A. Haack, “Ventilation for Fire and Smoke Control: Recommended Design Fires”, 99 PIARC CD Reports.
6. M. K. Cheong, M. J. Spearpoint and C. M. Fleischmann, “Design Fires for Vehicles in Road Tunnels”, Proceedings of the International Symposium, 7th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods, pp. 229-240 (2008).
7. I. Haukur and L. Anders, “Recent Achievement Regarding Measuring of Time-Heat and Time-Temperature Development in Tunnels”, Proceedings of the International Symposium, Safe & Reliable Tunnels. Innovative European Achievements, pp. 87-96 (2004).