화재시나리오에 따른 복층터널 중간슬래브의 화재손상도 평가

Fire-Damage Assessment of Middle Slab in Double-Deck Tunnels According to Fire Scenario

조규환* · 안재권** · 안재홍*** · 여인환****

Cho, Gyuhan*, Ahn, Jaekwon**, An, Jaehong***, and Yeo, Inhwan****

Abstract

The diagnosis of fire damage on structural members should be objective and reliable because it is the key criterion for selecting the proper repair/rehabilitation method. In this study, the fire damage of the middle slab in a double-deck tunnel is analyzed according to the fire scenario, to identify the seriousness of the fire on the structural members of the tunnel. The experiment demonstrated that the RWS fire scenario, under the assumption that the fire was caused by an oil tanker in a tunnel, has two to three times higher falling rate of the concrete cover as compared with the ISO fire scenario. In addition, in the former fire scenario, the temperature of the specimen exceeded the ITA-recommended limiting temperatures of materials (Concrete: 380 °C, Reinforcement: 250 °C). Furthermore, the experimental investigation on the load-bearing capacity of fire-exposed slabs showed that their initial flexural stiffness and maximum resistance significantly deteriorated after experiencing the fire. This result indicates that it is urgent to prepare measures in the system and research sector for the tunnel-fire-resistance design.

Key words : Fire Scenario, Tunnel, Middle Slab in Double-deck Tunnel, Fire Damage

요 지

구조부재 손상도에 대한 진단은 적절한 보수/보강공법 선택을 위한 판단의 기준이 되므로 객관적이면서도 신뢰도가 높아야 한다. 본 연구에서는 화재시나리오에 따른 복층터널 중간슬래브의 손상도를 분석하여, 화재가 터널 구조부재에 미치는 심각성을 확인하고자 하였다. 실험 결과, 터널 내 유조차량 화재를 가정하고 있는 RWS 화재시나리오가 ISO 화재시나리오에 비해 콘크리트 박락이 약 2~3배 이상 높은 것으로 나타났으며, 실험체 온도 또한 ITA에서 권장하고 있는 재료별 한계온도(콘크리트 380 °C, 철근 250 °C)를 모두 초과하는 것으로 나타났다. 또한 화재 노출된 슬래브의 내력 변화를 검토한 결과, 초기강성 및 최대내력이 노출 전 슬래브에 비해 상당히 저하됨을 확인한 바, 터널 내화설계에 대한 제도 및 연구 부문에서의 대책 마련이 시급한 것으로 사료된다.

핵심용어 : 화재시나리오, 터널, 복층터널 중간슬래브, 화재손상도

1. 서 론

최근 증가하는 대도시권 교통 부하와 더불어 포화되고 있는 지상공간을 해결하기 위한 방안으로, 대도시권의 혁신

적인 교통망 구축을 위한 안전하고, 쾌적하며, 공기/공비를 절감할 수 있는 대심도 복층터널의 필요성이 제기되고 있다. 우리나라에서는 아직 건설된 적 없는 대심도 복층터널은 최첨단 설계 및 시공기술의 개발과 도입이 우선시 될지

*정회원, 한국건설기술연구원 화재안전연구소 수석연구원(E-mail: jgh1023@kict.re.kr)

Member, Senior Researcher, Department of Fire Safety Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

**정회원, 한국건설기술연구원 화재안전연구소 수석연구원

Member, Senior Researcher, Department of Fire Safety Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

***정회원, 한국건설기술연구원 화재안전연구소 수석연구원

Member, Senior Researcher, Department of Fire Safety Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

****교신저자, 정회원, 한국건설기술연구원 화재안전연구소 연구위원(Tel: +82-31-369-0514, Fax: +82-31-369-0670, E-mail: yeo@kict.re.kr)

Corresponding Author, Member, Research Fellow, Department of Fire Safety Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

모르나 터널이라는 특수공간에서의 잠재적 재해요인에 대한 사용자 및 구조물의 안전성 또한 반드시 고려하지 않을 수가 없다. 그러나 현재, 복층터널과 관련한 국내 기술동향들을 살펴보면 선진국의 복층터널 기술을 따라가기 위한 추격형 전략/정책으로서 설계/시공기술에만 관심이 편중되어 있는 상황이며 안전성을 확보, 증진하기 위한 노력에 대해서는 자칫 소홀한 감이 없지 않다. 하지만 어떤 건설 분야에서든지 기능성, 내구성, 안전성의 이 3가지 요소는 반드시 만족되어야만 하는 요소들이다.

전 세계적으로 터널과 관련한 대표적인 화재사건을 보면 몽블랑과 유로 터널 화재사고를 들 수 있다. 몽블랑 터널에서는 1999년 이탈리아 방향으로 이동하던 트럭에서 엔진과열로 추정되는 화재로 인해 승용차 9대와 트럭 25대가 소실되는 대형 화재사고로 확산되었다. 무려 53시간 동안 화재가 지속되었으며, 39명의 인명피해가 발생하였다. 당시, 화재사고 현장의 최고온도는 1,000 °C 이상을 상회한 것으로 추정되었으며, 천장부 세그먼트가 고온 폭발로 인해 심각한 구조적인 손상을 입은 것으로 보고되었다(Kim et al., 2010). 유로터널의 경우, 1996년, 2006년, 2008년에 걸쳐 총 세 번의 화재사고가 발생하였다. 첫 번째 발생한 화재는 터널 라이닝의 폭발 등에 의한 구조물 보수/보강 비용만 약 2억 유로가 소요되었으며 이는 터널 설계/시공 당시 내화공법 비용이었던 2천만 유로의 약 10배에 해당되는 금액이었다(Park et al., 2010; Cho et al., 2014).

이처럼 터널에서의 화재는 일반 건축물에서 고려되고 있는 화재시나리오에 비해 차량 화재/폭발 등의 가능성을 내포하고 있어 안전성 확보를 위해서는 적극적인 예방 및 대응이 필요하나 안타깝게도 우리나라의 경우 이와 관련한 제도, 기준 등이 매우 부족한 실정이다. 우리나라는 2018년을 기준으로 전국에 약 2,500여 개의 터널이 있음에도 불구하고 터널 구조부재에 대한 내화설계지침이 마련되어 있지 않아 화재 발생 시 구조물 붕괴에 대한 우려를 항상 낳고 있다. 특히, 지하공간 활용도 향상 정책에 발맞춰 점진적으로 늘어

날 대심도 복층터널의 경우, 중간슬래브에 대한 내화설계 및 내화성능평가 시험방법이 필요할 것으로 예상되나 이와 관련한 국내 규정이 없어 산, 관, 학, 연간의 적극적인 연계 논의를 통한 대응 마련이 그 무엇보다도 필요한 시기이다.

따라서 본 연구에서는 ISO 및 RWS 화재시나리오에 따른 복층터널 중간슬래브의 화재손상도를 분석함과 동시에 실제 구조부재의 내력저하 정도 확인을 통해 터널 구조부재 내화설계의 필요성을 확인하고자 한다. 본 연구결과는 화재로 인한 재료 및 구조적 손상에 따른 최적 보수/보강공법을 선정하기 위한 판단기준으로 활용함과 동시에 터널 내화설계 지침 및 기술 기준 등을 제정하는데 근거자료로서 도움이 되길 희망한다.

2. 화재시나리오

국내의 경우, 터널 내화설계에 관한 지침이 존재하지 않아 일반 건축물에서 사용하고 있는 내화설계를 토목구조물인 터널에도 적용하고 있으며, 내화성능을 판단할 수 있는 정식 시험방법 또한 제정되어 있지 않은 상황이다. 그러나 국외의 경우, European Federation of Producer and Applicators of Specialist Product for Structures (EFNARC)의 시험방법을 내화성능 평가 시험방법으로 다수 적용하고 있다(EFNARC, 2006). EFNARC의 시험방법은 실물 화재시험을 기반으로 국제적으로 규정된 것으로서 RWS, RABT (train), ISO, HC, MHC 등 7가지의 화재시나리오를 제시하고 있다.

그중 RWS 화재시나리오는 1979년 네덜란드의 TNO에 의해 수행된 실험 결과에 의한 것으로서 연료나 석유를 채운 유조차량에 화재가 발생한 경우 300 MW의 화재하중이 120분 동안 지속되는 상황을 감안한 시나리오이다. 유조차량 외에도 터널을 통과하는 차량은 그 종류가 다양하며 화재 시 발열량이 달라 구조부재에 미치는 화재하중의 차이가 많다. Table 1은 차종에 따른 발열량을 나타낸 것이며 (Lacroix, 1998; Cheong et al., 2008; Tarada, 2011; Nakahori

Table 1. Study on the Domestic and Foreign of Heat Release Rate by Vehicle Types

Vehicle types	Peak fire heat release rate [MW]					
	Euro transport	NFPA 502	BD 78/99	PIARC	Ministry of Land, Infrastructure, and Transport	Real scale test
Passenger car	5 ~ 10	5	5	2 ~ 5	5 ~ 10	6
Light duty vehicle	15	-	15	15	-	-
Coach, Bus	20	20	20	20	20	-
Lorry, heavy-goods vehicle up to 25 tones	30 ~ 50	20 ~ 30	-	20 ~ 30	30	-
Heavy-goods vehicle, typically 25-50 tones	70 ~ 150	-	30 ~ 100	-	100	-
Petrol tanker	200 ~ 300	100	-	-	-	200

et al., 2014; NFPA 502, 2014; MOLIT, 2015), Fig. 1은 대표적인 화재시나리오들을 나타낸 것이다.

Fig. 1. Fire Scenario (Time-temperature Curve)

한편, 구조부재의 화재 손상도를 판단하는 기준으로서, International Tunneling Association (ITA)에서는 콘크리트 라이닝의 재료별 한계온도를 콘크리트 380 °C, 철근 250 °C로 권장하고 있다(ITA, 2004). 콘크리트의 경우, 열용량이 크기 때문에 화재를 진압한 뒤에도 콘크리트 내부 온도가

지속적으로 상승하며, 콘크리트 온도가 380 °C가 되는 시점에서 압축강도가 큰 폭으로 떨어지기 때문에 한계온도를 380 °C로 제한하고 있다. 철근의 경우 250 °C에서 강도가 급격히 감소하는 것은 아니지만, 처짐이 발생할 가능성이 있고 이 처짐은 영구적인 처짐으로 발전되어 회복될 가능성이 적기 때문에 철근의 한계온도를 250 °C로서 제한하고 있다.

3. 실험개요

본 연구에서는 화재시나리오에 따른 중간슬래브의 박락 정도(단면 손실)와 깊이별 온도 분석을 통해 내화성능을 평가함과 동시에 화재노출 구조부재의 잔존 구조내력을 종합적으로 분석하여 정량적 손상도를 확인하고자 한다. Table 2는 실험인자 및 수준을 정리한 것이다.

3.1 실험체

내화성능과 구조내력 확인을 위한 중간슬래브 실험체의 콘크리트 강도는 28일 압축강도 30 MPa, 60 MPa를 목표로 실측한 결과, 공시체 3개 평균값으로 각각 28.8 MPa 59.6 MPa이 측정되었다. Table 3은 중간슬래브 실험체의 콘크리트 배합을 나타낸 것이다.

Table 2. Experimental Conditions

Fire scenario	Concrete	Fire exposure time (min)	Criteria for fire damage and resistance assessment	
			Temperature & Concrete falling	Load-bearing capacity
ISO	Normal strength (N) 30MPa	30	N-ISO-30	-
		60	N-ISO-60	-
		120	N-ISO-120	-
	High strength (H) 60MPa	0	-	H-ISO-0-S
		30	H-ISO-30	-
		60	H-ISO-60	H-ISO-60-S
RWS	Normal strength (N) 30MPa	120	H-ISO-120	H-ISO-120-S
	Normal strength (N) 30MPa	30	N-RWS-30	-
		60	N-RWS-60	-
		120	N-RWS-120	-
	High strength (H) 60MPa	30	H-RWS-30	-
		60	H-RWS-60	-
		120	H-RWS-120	-

Table 3. Concrete Mixing

Specimens	Strength (MPa)	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)					
				Cement	Water	Sand	Gravel (25 mm)	AD	
N	30	37.7	40.6	500	189	707	1033	2.45	0.49%
H	60	29.0	40.1	620	180	625	935	8.06	1.30%

Fig. 2는 내화성능과 구조내력 확인을 위한 중간슬래브 실험체의 상세도면을 나타낸 것이다. EFNARC에서 제시하고 있는 내화성능 평가 시험 기준에서는 실험체의 크기가 최소 600×600 mm, 두께 200±50 mm이며, 가열면적은 최소 400×400 mm로 규정하고 있다. 따라서 상기 기준에 의거하여 내화성능 평가용 중간슬래브를 1,800×1,800×200 mm로 제작하였다. 한편, 고온에 노출된 후의 구조내력을 평가하기 위한 중간슬래브 실험체는 8,200×1,000×350 mm로 제작하였다.

3.2 내화/내력성능 평가

화재시나리오는 ISO 834-1 및 KS F 2257-1에서 제시하고 있는 일반 건축물에서의 화재를 가정한 ISO 화재시나리오와 현존하는 가혹한 환경을 가정한 RWS 화재시나리오(유조차량의 화재를 가정)를 적용하였으며 30분, 60분, 120분의 노출시간을 적용하였다. 노출시간을 구분한 이유로는 터널 화재시나리오(시간-온도곡선)는 터널 내 화재 시 차량 폭발 등의 가능성을 내포하고 있는 시나리오로서 화재 시 초기 온도상승이 매우 급격하고 이는 중간슬래브에 지배적인 영향을 미친다는 가정하에서 시나리오에 노출되는 시간별로 중간슬래브의 손상도를 관찰하기 위함이다. 내화성능의 판단은 중간슬래브의 박락 정도와 온도 분석을 통해 실시하였으며, 잔존 구조내력의 판단은 하중-처짐 관계의 분석을

토대로 실시하였다.

중간슬래브 실험체의 깊이별 온도분포를 확인하기 위한 열전대(K-type)의 설치는 가열면으로부터 40, 65, 75 mm 깊이에 설치하였다. 콘크리트와 철근은 재료적인 열적특성의 차이가 있으나 가혹한 화재시나리오에 노출되는 조건에서는 그 결과의 차이가 미미할 것으로 가정하여, 깊이별 온도측정 과정에서는 고려하지 않았다. 화재노출 시간에 따른 깊이별 온도는 데이터로그를 사용해 측정하였으며 측정된 데이터는 동일한 깊이에 있는 지점 값을 평균하였다.

폭렬특성은 실험 종료 후 육안관찰을 실시하여 박락된 정도와 철근 노출여부를 관찰하였으며, 이를 정량화하기 위해 박락된 깊이를 실측하였다. 폭렬깊이는 실험체의 가열면에 가로, 세로 방향 50 mm간격의 격자를 만들어 그 교점에서의 박락깊이를 측정하였으며, 실측한 격자 교점 박락깊이를 Extrapolation을 통한 3차원 그래프로 가시화하였고, Mathematics Analysis 프로그램을 사용하여 박락된 부피 (Volume Integrate)를 계산하였다. 손상도는 기존 비손상 중간슬래브의 전체 부피에서 박락된 부피를 백분율로 나타내었다.

마지막으로 고온에 노출된 이후 중간슬래브의 잔존내력을 평가하는 실험에서는 슬래브 중앙부를 Universal Testing Machine (UTM)으로 가력하여 하중 증가에 따른 중앙부 처짐 변화를 관측하고 최대내력을 확인하였다.

(a) Middle-Slab Specimen for Fire Resistance Assessment without Loading

(b) Middle-Slab Specimen for Assessment of Load-bearing Capacity after Fire

Fig. 2. Middle-Slab Specimens in Double-deck Tunnel

4. 결과 및 분석

Fig. 3은 화재시나리오에 따른 중간슬래브의 깊이별 온도 분포를 나타낸 것이다. ISO 화재시나리오에 30분, 60분간 노출된 중간슬래브는 ITA에서 권장하고 있는 한계온도(철근 250 °C, 콘크리트 380 °C)를 초과하지는 않았으나 120분에서는 결과적으로 초과되는 것을 확인하였다. 반면, RWS 화재시나리오에 노출된 중간슬래브의 경우, RWS가 갖는 급격한 초기 온도상승으로 인해 30분이 경과하기 전에 한계 온도를 초과하는 것으로 나타났다. 다만, 실험과정에서 60 MPa의 고강도 콘크리트를 사용한 대부분의 중간슬래브 실험체는 가열면 콘크리트의 박락으로 인한 매립된 열전대의 문제로 실시간 온도데이터를 확보하는데 실패하였다.

Fig. 4는 화재시나리오에 따른 중간슬래브의 박락 정도를 나타낸 것이다. ISO 화재시나리오에 노출시킨 일반강도 콘크리트 사용 중간슬래브는, 60분까지는 박락이 일부 발생하였으나 120분 결과에서는 철근 및 강연선이 노출되었으며 실험체 전체에 걸쳐 심각한 균열이 발생된 것으로 보아 구조부재로서의 기능을 상실한 것으로 판단하였다. 다만 30분에서의 단면손실 결과와 120분에서의 단면손실의 결과 비교를 통해 노출시간에 따른 단면손실 정도의 비례적인 경향을 확인할 수 있었다. 그러나 ISO와 달리 RWS의 경우, 초기부터 대량의 박락이 발생되었으며 심각한 부재 손상으

로 인해 노출시간에 따른 경향을 확인할 수 없었다. 이는 노출시간에 따른 영향을 논하기에 앞서 RWS 화재시나리오가 가지는 화재노출 후 초기 5분간의 급격한 온도 상승속도에 의한 영향이 더 큰 것으로 판단된다. RWS 화재시나리오는 유조차량 화재의 상황을 가정하고 있는 것으로서 이를 고려해 볼 때, 터널에서 발생하는 화재는 신속 진압을 위한 소방시설 측면의 초동대응이 매우 중요할 것으로 생각되며, 구조부재 측면에서는 내화공법의 적용이 반드시 선제적으로 수반되어야 할 것으로 사료된다. 특히, 고강도 콘크리트를 사용한 중간슬래브의 경우, ISO 화재시나리오에서나 RWS 화재시나리오에서나 일반강도 콘크리트에 비해 박락, 폭렬에 따른 파단이 더욱 직접적으로 발생하는 것으로 확인되므로 고강도 콘크리트가 갖는 폭렬현상에 대한 예방과 더불어 화재 후 복구를 위한 교체 및 보수/보강 실효성에 대한 종합적인 논의가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

Table 4는 ITA에서 권장하고 있는 콘크리트 및 철근의 한계온도와 단면손실 정도를 기준으로 열적손상을 비교한 것이다. 온도 상승과 폭렬에 의한 단면손실은 상호간에 상관성이 높은 것으로 판단되며, 특히 중간슬래브 단면 하부에는 인장용 철근 및 프리스트레스를 위한 PS강선이 위치하므로 화재를 대비한 적정 피복두께 및 2차 내화피복재(내화보드 및 내화뿔칠)의 적용이 반드시 필요할 것으로 사료된다.

Fig. 3. Temperature of Middle-Slab Specimens according to Fire Scenario

Fig. 4. Concrete Falling Rate of Middle-Slab Specimens according to Fire Scenario

Table 4. Fire Damage Assessment of Middle-Slab Specimen

Specimen	Concrete falling rate (%)
N-ISO-30	0.00
N-ISO-60	4.00
N-ISO-120	Fail
N-RWS-30	10.21
N-RWS-60	11.17
N-RWS-120	Fail
H-ISO-30	10.79
H-ISO-60	Fail
H-ISO-120	Fail
H-RWS-30	Fail
H-RWS-60	Fail
H-RWS-120	Fail

※ When all three conditions were satisfied, it was judged as failure.

- ① Rebar exposed by cover concrete falling.
- ② Serious cracks occur throughout the specimen.
- ③ Failure to acquire temperature data due to damage of thermocouple.

Fig. 5는 화재에 노출된 이후 중간슬래브의 구조적 성능 변화를 확인하기 위하여, 화재에 노출되지 않은 실험체(H-ISO-0-S)와 ISO 화재시나리오(60분, 120분)에 따라 화재 손상이 발생한 실험체들(H-ISO-60-S, H-ISO-120-S)간의 하

중-처짐 관계를 비교한 것이다. 화재에 노출되지 않은 중간슬래브 실험체는 하부 콘크리트의 균열 확산으로 인한 강성저하가 본격적으로 유도되기 전까지는 선형적인 거동을 나타내었다가, 이후 저감된 강성을 기준으로 처짐이 증가하는 이선형(bilinear)적인 거동 양상을 나타내었다. 이에 반해 화재에 노출되었던 중간슬래브 실험체의 경우 이미 하부 콘크리트의 탈락이 발생한 상태이므로, 가력초기부터 저감된 강성을 기준으로 하중 증가에 따른 처짐이 발생하였다. 특히, 비손상 중간슬래브의 균열 발생 이후 저감된 강성이 화재 손상을 입은 중간슬래브의 강성과 유사하다는 점과 화재노출 유무와 무관하게 이들의 최대처짐량이 70~80 mm로 큰 차이가 없었다는 점은 주목할 만하다.

Fig. 5. Load-deflection Relationship of Middle Slab after Fire Exposure

Fig. 5에서의 중간슬래브 실험체들간 최대내력을 비교해 보면, 화재노출된 실험체가 비노출 실험체 대비 약 45~60 % 정도 내력이 저하된 것으로 확인되었다. 더불어 일반적 예상과 달리 화재노출시간이 짧았던 실험체(60분)와 화재노출시간이 긴 실험체(120분)의 최대내력이 작지만 역전되어 나타났는데, 이는 ISO 화재시나리오조차 노출 초기의 온도 변화가 상당히 빠르고 중간슬래브와 같은 구조체에 미치는 초기 영향이 손상 유도에 지배적이기 때문인 것으로 사료되며, 다양한 변수 실험 연구를 통해 이에 대해 추가적으로 확인할 필요가 있다고 판단된다. 또한, 보다 가혹한 RWS 화재시나리오가 아닌 ISO 화재시나리오에 노출시켰음에도 불구하고 슬래브 구조내력의 상당한 저하가 발생한 점은 터널 중간슬래브뿐만 아니라 라이닝, 세그먼트 등을 포함한 터널 구조부재의 내화설계지침이 반드시 제정될 필요가 있음을 상기시킨다.

화재피해를 입은 구조부재의 손상도 평가는 안전성과 관련하여 구조물의 재사용, 철거 및 보수 등, 화재 후 조치의 기준이 되므로 신뢰성이 높으며 객관적이어야 한다. 하지만 화재 후 구조부재의 구조내력은 당시 화재상황 및 사용된 구조, 재료의 특성에 따라 크게 좌우되므로, 다양한 관점 및 방식의 손상도 평가를 토대로 종합적인 손상도를 진단해야 할 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 화재시나리오에 따른 복층터널 중간슬래브 실험체의 깊이별 온도분포, 콘크리트 박락 정도, 잔존 구조내력 확인을 통해 그 손상도를 평가하였다. 결론은 다음과 같다.

- (1) ITA에서 권장하고 있는 한계온도(철근 250 °C, 콘크리트 380 °C)를 기준으로 실험체의 손상도를 평가한 결과, ISO 및 RWS 화재시나리오에 노출된 실험체 모두 한계온도를 초과하는 것으로 나타났다. 특히 RWS의 경우, 30분 만에 한계온도를 초과하는 것으로 나타나 터널에서 발생할 수 있는 다양한 화재시나리오를 고려한 내화설계가 필요할 것으로 사료된다.
- (2) 콘크리트 박락 정도에 따른 손상도를 평가한 결과, RWS 화재시나리오에 노출된 실험체가 ISO에 비해 약 2~3배 이상 높은 것으로 나타났다. 특히 RWS에 노출된 실험체의 경우, ISO와 달리 짧은 노출시간에도 많은 박락을 보였는데 이는 RWS가 갖는 초기 급격한 온도 상승속도가 콘크리트의 박락에 지배적인 영향을 미치고 있는 것으로 보이는 바, 차량 화재로 인한 폭발 등의 시나리오를 대비한 내화설계뿐만 아니라 초동 진압을 위한 소방대응 또한 필요할 것으로 사료된다.

- (3) 화재 노출면의 콘크리트 박락은 슬래브 단면하부에 위치한 철근과 강연선의 온도를 급속히 상승시키는 원인이 되므로, 피복두께를 늘리는 방법 또는 내화성이 높은 섬유혼입 콘크리트 또는 내화보드, 내화도료/뿔칠 적용 등의 대응이 필요하다. 특히, 일반강도에 비해 고강도 콘크리트를 사용한 중간슬래브의 경우, 노출되는 화재시나리오 종류와는 상관없이 파단에 이르는 것으로 나타나 고강도 콘크리트를 사용한 구조부재의 경우, 내화성능 확보를 위한 적극적인 대책 마련이 중요하다.
- (4) 본 연구결과에 의하면, 중간슬래브의 화재손상도는 화재시나리오의 종류 및 재료의 강도 등에 직접적인 영향을 받는 것으로 사료되며, ISO 화재시나리오(60분, 120분)에 노출될 경우 슬래브의 잔존내력은 노출 전 대비 약 60 % 이하인 것으로 나타났다. 따라서, 화재 후 중간슬래브 손상도 진단의 경우, 깊이별 온도와 박락 정도와 같은 육안 관찰 결과와 함께 재료의 화학적 변화와 슬래브의 잔존 구조내력 검토 등의 복합적 진단을 통해 객관적이고 종합적인 평가가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

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

References

- Cheong, M.K., Spearpoint, M.J., and Fleischmann, C.M. (2008). Design fires for vehicles in road tunnels. *Proceedings of 7th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Method*, Auckland, New Zealand, pp. 229-240.
- Cho, B.Y., Kim, H.Y., Kim, H.J., Kwon, I.K., and Won, J.P. (2014). An experimental study on the temperature behavior characteristics of the concrete segment. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 14, No. 1, pp. 43-48.
- International Tunnelling Association (ITA). (2004). *Guidelines for structural fire resistance for road tunnels*. ITA Working Group No. 6.
- European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete (EFNARC). (2006). *Specification and guidelines for testing of passive fire protection for concrete tunnels linings*.

- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2015). *Guidelines for the installation and management of road tunnel disasters*. Regulations No. 112 (effective from 2015.08.20).
- Kim, H.J., Kim, H.Y., Park, K.H., Ahn, C.S., and Kwon, K.H. (2010). An experimental study on the thermal property of concrete under the load ratio condition in fire. *Fire Science and Engineering*, Vol. 24, No. 3, pp.145-151.
- Lacroix, D. (1998). The new PIARC report on fire and smoke control in road tunnels. *Proceedings of the 3rd International Conference on Safety in road and rail tunnels*, Nice, France, pp. 185-197.
- Nakahori, I., Sakaguchi, T., Nakano, A., Mitani, A., and Vardy, A.E. (2014). Real-time estimation of heat release rates in tunnel fires. *Proceedings of 7th International Conference Tunnel Safety and Ventilation: New developments in Tunnel Safety*, Graz, Austria, pp. 65-74.
- NFPA 502. (2014). *Standard for road, tunnels, bridges, and other limited access highways*. National Fire Protection Association.
- Park, K.H., Kim, H.Y., and Kim, H.J. (2010). A study on the effective method of fire protection technology in railway tunnel fire. *Fire Science and Engineering*, Vol. 24, No. 4, pp. 86-91.
- Tarada, F. (2011). Fires in tunnels: Can the risks be designed out? *Eurotransport Magazine*, Vol. 9, No. 4, pp. 46-49.

Received	■	July 23, 2019
Revised	■	July 25, 2019
Accepted	■	July 30, 2019