

도로터널내 화재에 따른 터널구조체의 안정성 평가를 위한 시간-온도곡선의 적용

Applied Time-Temperature Curve for Safety Evaluation in the Road Tunnel by Fire

원종필* · 최민정** · 장창일*** · 이상우***

Won, Jong-Pil · Choi, Min-Jung · Jang, Chang-Il · Lee, Sang-Woo

Abstract

This study is performed to apply a standard to evaluate fire protection assessment for tunnel structures when a fire breaks out in the road tunnel. Recently, a number of road tunnels have been rapidly increased and fire risk also multiplied according to extend tunnel length, due to natural features and environmentally-friendly road construction in Korea. But we have not yet been prescribed appropriate time-temperature curve for tunnel fire. Therefore, we presented fire design model and investigated time-temperature curve proposed by a foreign country considering traffic, a kinds of vehicles which are a basis of heat rate. At the end, Hydrocarbon modified curve applied as design fire model by using numerical analysis and presented design fire model and examined the effects of tunnel structures.

Keywords : Tunnel fire, heat rate, time-temperature curve, fire design model, road tunnel

요 지

본 연구는 도로터널 내 화재시 콘크리트 구조체의 내화성능을 평가하기 위한 기준을 제시하고자 실시하였다. 현재 국내에서는 지형특성 및 환경친화적인 도로건설로 도로 터널의 수가 빠른 속도로 증가하며, 터널연장이 길어짐에 따라 터널 내 화재사고가 갈수록 높아지고 있는 상황이다. 하지만 우리나라에서는 터널 화재에 대한 적합한 시간-온도 곡선을 규정하지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 국내 도로의 통행량, 차량 종류등을 고려한 열방출율을 기초로 외국에서 제시된 시간-온도 곡선을 검토해 보았으며 적합한 설계화재 모델을 적용하였다. 또한 적용된 도로터널의 설계화재모델에 따른 수치 해석을 통하여 터널 구조체의 화재시 성능을 검토하였다.

핵심용어 : 터널화재, 열방출율, 시간-온도곡선, 내화설계모델, 도로터널

1. 서 론

최근 교통량이 증가함에 따라 장대터널과 지하구조물의 증가로 인한 터널에서의 대형화재가 빈번하게 발생하고 있다. 여러 형식의 구조물 중에서 터널 구조물의 경우 지중에 시공되어 공간이 폐쇄되어 있으므로 화재가 발생하면 진압, 대피 등이 어려워 대참사로 이어질 가능성이 높다. 또한 구조체의 손상과 더불어 인명피해 뿐만 아니라 사회기반시설인 교통망을 장기간 끊어놓게 되어 사회적인 영향이 매우 크다고 할 수 있다. 이러한 현상은 콘크리트가 고강도화 될수록 그 피해 정도가 심각해 진다. 영국과 프랑스의 해협을 횡단하는 영·불 해협 터널(Euro Tunnel) 및 이탈리아의 Mont-Blanc 터널의 대형화재는 해당국에 수많은 인명피해와 구조체의 손상으로 인하여 물적·인적자원의 막대한 경제적 비

용손실을 초래하였다(장수호 등 2007).

이런 재해로부터 인명피해와 재산을 보호하기 위해 많은 연구들이 20세기 후반에 유럽과 미국, 일본에서 있었다. 일본에서는 터널 화재에 대한 경각심이 높아져 이미 여러 터널에 있어 내화 공법을 채택 또는 시공에 적용하고 있다(박경환, 2005; 박해균 등, 2006). 국내에서는 급속한 경제성장과 더불어 1960년대부터 국토의 균형적인 발전에 따라 도로망이 확충되었다. 특히 전 국토의 70% 이상이 산지로 이루어진 우리나라는 터널 건설이 늘어나면서 터널화재가 곳곳에서 발생하였다. 2000년대 이후 대표적인 화재를 살펴보면 2001년에 터널내 11중 연쇄 충돌사고가 발생한 마성터널의 화재사고와 2003년의 홍지문터널의 25인승 미니버스가 승용차 추돌화재로 인하여 약 1시간 정도의 화재로 인해서 2시간 40분 동안 교통통제가 있었다. 2005년의 구마고속국도의

*정회원 · 교신저자 · 건국대학교 사회환경시스템공학과 교수 (E-mail : jpwon@konkuk.ac.kr)

**건국대학교 대학원

***정회원 · 건국대학교 대학원

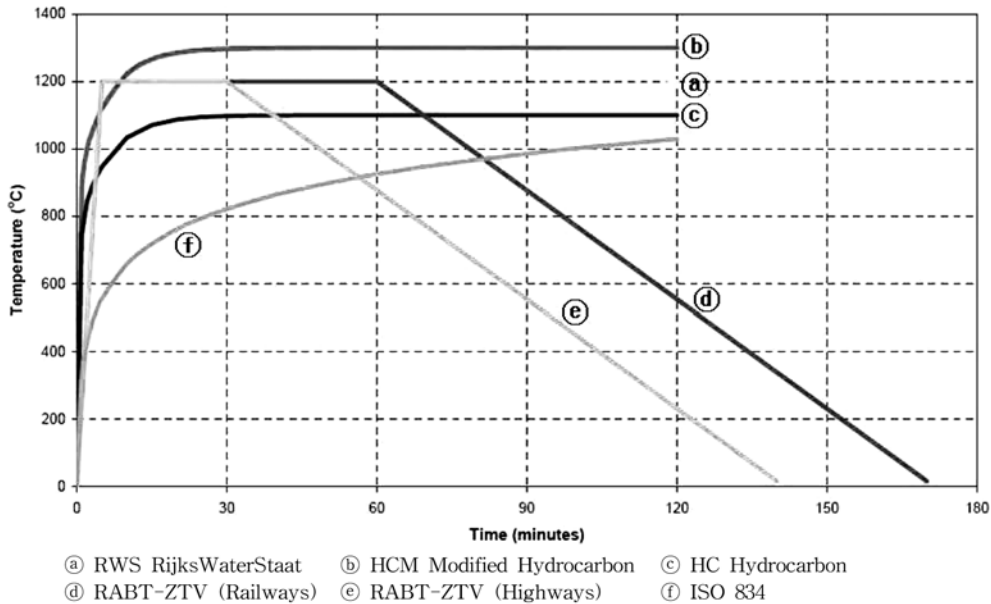


그림 1. 표준시간-온도곡선(유지오 등 2002; Ingason *et al.*, 1994)

달성터널 화재로 인하여 터널화재에 대한 안전성 확보에 대하여 새롭게 인식하기 시작하였다(유지오 등 2002).

이에 따라 국토해양부에서는 도로터널 방재설비 설계지침의 방재대책을 제정하고 있어 터널 연장, 교통량 및 화재발생 가능성 등을 종합적으로 고려한 위험도 분석이나 모의 화재시험을 통한 터널구조체에 대한 내화대책공법 및 내화재료 등에 관한 연구가 이루어지고 있으며 화재에 대한 영향을 고려한 터널 및 지하공간의 설계 및 시공이 요구되고 있다. 하지만 이러한 요구사항에도 불구하고 우리나라는 터널 화재에 따른 터널 구조체의 안정성 확보를 고려한 적합한 시간-온도 곡선을 규정하지 못하고 있는 실정이다. 건축구조물의 내화성능 평가는 ISO 834 표준시간-온도곡선에 의해 규정되어 실시·평가되고 있지만 도로터널에서의 실제 위험성을 적절히 수용하지 못할 수 있다고 할 수 있다(임경국, 윤성배, 2007).

따라서 본 연구는 도로터널 내에서 화재시 터널구조체의 내화성능을 평가하기 위한 국내의 표준 기준을 제시하고자 실시하였다. 이에 따라 국내 도로 터널의 차량별 통행량, 차량 종류 등을 고려한 열방출율과 외국에서 제시된 표준시간-온도 곡선을 검토한 후 측정된 최고온도와 화재지속시간에 기초하여 표준시간-온도곡선에 의한 내화성능평가 설계화재 모델을 적용제시하였다.

2. 도로터널 화재의 특성

도로터널에서의 트럭, 유조차나 폭발물 탑재 차량 등 운반물의 다양화와 터널 통과 차량의 대형화, 터널내 차량충돌 사고 빈발 등 터널 내부에서의 대형화재 위험성이 급증되고 있다. 터널화재가 발생할 경우 터널내부는 외부와의 통로가 한정되고 고립된 공간특성을 가지기 때문에 화재로부터 콘크리트 구조물이 고온에 노출될 경우 콘크리트가 폭발을 발생하여 인명 및 구조물의 피해를 일으켜 심각한 문제를 야기할 수 있다(Haak, 1998; Peng *et al.*, 2006). 터널에서 발생하는 화재의 최고온도와 최고온도 도달시간, 지속시간

등은 화재의 상황에 따라 크게 달라지지만 그림 1과 같이 터널 화재시 시간-온도와의 관계를 나타내는 기준으로 나눌 수 있다(Det Norske Veritas, 2008; Ingason *et al.*, 1994). 그림 1에서와 같이 화재시 시간-온도 표준곡선으로 사용되는 곡선들에 대한 특성을 살펴보면 다음과 같다. ①의 RWS (Rijkswaterstaat) 곡선은 터널 화재 시간-온도곡선으로서 45,000 l급 대형 유류탱크로리의 화재시를 상정한 것으로서 화재 발생 후 60분만에 최고온도가 1,350°C에 달하는 가장 엄격한 규정이다. ②의 Hydrocarbon modified 곡선은 hydrocarbon 곡선으로부터 곡선의 온도를 약 200°C 상향 조정한 시간-온도곡선이며 ③의 Hydrocarbon 곡선은 유류에 의한 화재를 가정한 것이다. ④와 ⑤의 RABT 곡선은 독일의 도로터널 설비 및 운용에 관한 지침에 적용되고 있는 것으로 화재 발생 후 5분만에 1,200°C까지 온도가 급상승하여 60분간 지속된다. 이 곡선은 열차와 자동차에 따라 적용하는 곡선이 다른데 자동차의 경우 열차보다 가열시간이 30분 더 짧은 특징을 가지고 있다(장수호 등 2007; Det Norske Veritas, 1998). ⑥는 ISO 834 곡선이며, 주로 건축구조물의 내화기준에 적용된다.

2.1 도로터널내 화재시의 화재강도에 대한 기준 비교

세계 여러나라에서는 도로터널화재에 관련된 안전지침을 국가기준으로 제정하고 운영하고 있다. 그 중 도로터널내 화재시 화재강도에 대하여 살펴보면 다음과 같다.

미국의 도로터널 기준에서 요구하고 있는 도로터널의 화재강도와 연기발생량은 표 1과 같다. 이 기준은 PIARC 1995년 보고서에 기초하고 있다(유지오 등 2002). 즉 차량종류에

표 1. 전형적인 차량의 설계화재강도(유지오 등 2002)

차량 종류	가솔린 pool 크기 (m ²)	열방출율 (MW)	연기발생량 (m ³ /s)	최대온도 (°C)
승용차	2	5	20	400
Bus/Truck	8	20	60	700
가솔린탱커	30	100	100	1,000

표 2. 프랑스 도로터널의 설계화재강도(Koichi, 2002)

화물 (km/day&tube)	화재 용량 (MW)	300에서의 배기가스의 양 (m ³ /s)
~4,000	30MW	80 m ³ /s
>4,000	50MW	120 m ³ /s
>6,000	100MW	200 m ³ /s

표 3. 우리나라 도로터널 설계화재강도(국토해양부, 2007; 유지오 등 2002)

적용 차종	승용차	버스	트럭	화물차
화재강도 [MW]	5이하	20	30	100

따른 화재 강도를 달리하여 화재에 대한 도로터널설계에 적절히 반영하고 있다.

프랑스 도로터널의 설계기준에서는 기본적으로 CETU 2002에 언급되어 있으며 표 2와 같다(Koichi, 2002). 이 기준의 사용은 교통량이 적은 터널, 도심터널이 주로 사용된다. 또한 경제적으로 합리적인 설계를 위한 특수규정을 제정해야 한다고 명시하고 있다.

국내에서는 국토해양부 도로터널 방재설비 설치지침에서 요구하고 있는 설계화재에 대한 규정을 제정하였는데 이 지침에서는 설계화재강도를 20MW로 하고 있다. 또한 화재강도가 설계화재강도보다 증가할 것으로 예상하여 설계화재 강도를 높게 설정하고자 하는 경우에는 위험도분석을 수행하여 시행하도록 요구하고 있다(국토해양부, 2007; 유지오 등 2002). 표 3은 국토해양부의 도로터널 설계화재강도를 정리하였다.

3. 국내 도로터널 차량통행 현황 및 적정 시간-온도 곡선 설계모델

표 4는 2006년도와 2007년도의 국내 고속국도와 일반국도의 차종별 구성비를 나타내고 있으며 이를 토대로 터널을 통과하는 차량의 평균혼입비율들을 예상할 수 있다(국토해양부, 2007). 고속국도에서는 버스와 화물차의 비율이 높고 일반국도에서는 화물차의 구성비율이 높은 것을 보여준다. 도로터널내 화재는 발생 후 약 5분만에 최고온도 부근까지 급격히 온도가 상승하며, 화재의 지속시간은 PIARC에서 제안 하듯이 상대적으로 높은 화재규모로 계획되는 터널은 화재 지속시간이 약 120분 정도로 간주된다(Magret and Vauquelin, 2000). 승용차나 소형차량 같은 경우는 최대열방출율이 약 2.5~5MW(400~500°C)를 나타내며 이것은 ISO 834의 시간-온도곡선의 기준과 비슷하지만 건물의 화재하중에 기초한 열방출율을 토대로 설계된 시간-곡선으로 터널과 같은 지하 구조물의 화재에는 미흡하다. 유류 등과 같은 위험물질을 수송하는 차량등의 구성비율의 증가와 이에 대한 제한이 미흡한 국내 터널의 경우 그 수송물질에 따라서 화재 발생 후 심한 경우 약 1000~1200°C까지 온도가 상승하게 되며 2시간 이상 지속하게 된다(Haukur and Anders, 2005). 이에 도로터널의 차량통행류와 터널사고빈도수를 고려해보면 승용차의 비율이 많지만 화물차의 경우 주행거리에 비해 구성비율이 높고 그 수가 증가함에 따라 연소물질에 따라 다소 차

표 4. 종류별 차량에 따른 일평균 교통량(국토해양부, 2007; 박해균 등, 2006)

구분	2006년		2007년		증감률 (%)
	교통량 (대/일)	구성비 (%)	교통량 (대/일)	구성비 (%)	
승용차	8,013	66.5	8,238	66.6	2.8
버스	428	3.6	433	3.5	1.2
화물차	3,605	29.9	3,702	29.9	2.7
계	12,046	100.0	12,373	100.0	2.7

이는 있겠지만 처음 5분 이내에 약100MW(1000~1200°C) 정도의 열방출율을 내며 약 2시간 이상 지속되는 것을 볼 수 있었다. 하지만 국내에서는 보통화물차와 대형화물차에 비해서 폴 트레일러의 비율은 극히 적기 때문에 5~300MW의 열방출율을 나타내는 RABT와 RWS의 설계는 터널설계시 과잉설계로 사료된다. RWS 곡선의 경우 최고온도가 약 1,380°C까지 상승하며 약 200~300MW의 열방출율을 나타내는 폴트레일러나 석유차량에 적용하는 곡선으로써 도로터널 설계시 그 적용에 있어서 과잉설계로 판단되며 RABT 곡선도 마찬가지로 2시간 이상 지속되는 표준시간-온도곡선으로 도로터널 화재형태에는 맞지 않는 곡선으로 판단된다. 따라서 국내도로터널의 경우 표준시간-온도 곡선으로 보통화물차량의 비중을 고려하여 100MW 정도의 열방출율을 나타내며 5분 이내에 약 1200°C 가량 상승하여 120분간 지속되는 Hydrocarbon modified 곡선이 가장 적합하다고 할 수 있다.

4. 수치해석에 의한 화재시 도로터널내 콘크리트의 온도분포

4.1 수치해석 방법

도로터널내 화재시 구조체의 온도분포를 예측하기 위하여 수치해석을 실시하였다. 수치해석은 상용 유한요소프로그램인 Visual FEA를 사용하였으며 Modified hydrocarbon 곡선의 모델링을 위하여 그림 2와 같은 단면형상을 사용하여 온도분포해석을 실시하였다(Visual FEA).

4.2 수치해석 결과

일반적으로 콘크리트 구조물에서 화재가 발생할 경우 콘크리트 구조물은 고온에 노출되며 화재피해가 발생하게 되는

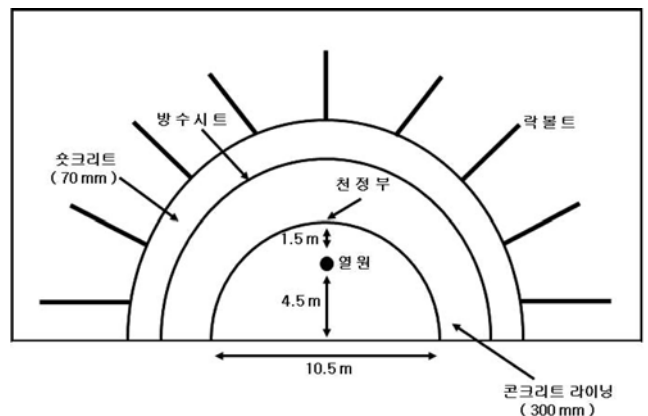


그림 2. 도로터널구조

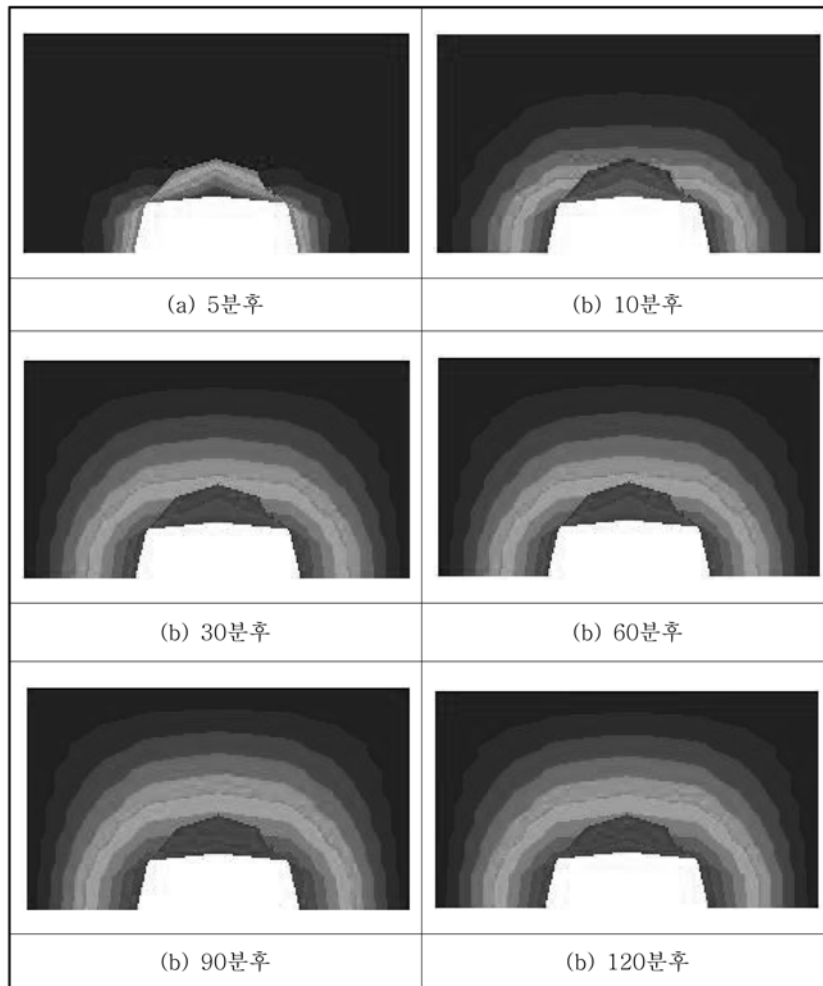


그림 3. 도로터널 설계제안모델 적용에 따른 터널온도분포변화

데 노출된 화재의 강도에 따라 화재피해의 내용이 달라지게 된다. 일반적으로 100°C 이상에서는 콘크리트 내부의 자유 공극수가 방출되는데 100~200°C에서는 물리적 흡착수가 방출되어 이들이 분리되고 소실됨에 따라 콘크리트 중의 시멘

트 수화물이 수축하기 시작한다. 190~250°C의 온도에서는 콘크리트의 박리 및 폭발현상이 발생하며 300°C 이상의 온도에 노출될 경우 화학적으로 변질되며 450~550°C에서는 콘크리트의 주성분인 수산화칼슘이 열에 의해 분해되어 중

표 5. 수치해석을 통한 도로터널 천정부 구조체의 내부온도

시간 (분)	가열온도 (°C)	천정부온도 (°C)	열원으로부터의 거리					암반부 온도(°C)
			100 mm (°C)	200 mm (°C)	300 mm (°C)	340 mm (°C)	370 mm (°C)	
0:00	0	0	0	0	0	0	0	0
0:05	870	521.2	512.6	508.3	501.8	486.3	353.3	281.6
0:10	1200	623.4	553.1	543.5	527.9	516.5	384.2	287.6
0:20	1250	654.9	601.6	557.3	550.6	512.4	423.7	284.6
0:30	1290	793.0	726.2	697.2	552.5	515.7	431.5	292.3
0:40	1300	905.7	835.2	781.2	667.3	619.6	409.3	294.2
0:50	1300	924.8	857.3	740.8	682.9	648.3	412.2	301.6
1:00	1300	956.2	883.4	762.8	689.9	659.3	417.3	310.8
1:10	1300	964.3	904.3	829.1	689.4	670.1	428.2	328.7
1:20	1300	990.6	924.6	837.8	726.1	701.6	534.2	344.8
1:30	1300	1003.8	943.7	866.8	760.4	718.3	547.6	350.4
1:40	1300	1012.8	973.3	899.0	786.9	729.4	551.9	352.6
1:50	1300	1080.7	1043.7	951.9	803.9	731.9	568.3	352.1
2:00	1300	1092.2	1058.1	986.7	808.8	733.4	570.2	352.3

성화 현상이 발생하게 된다. 이후 탈수진행이 빨라지며 약 600°C 이상에서는 탄산칼슘의 분해와 함께 시멘트 페이스트의 완전한 탈수가 일어나 콘크리트가 구조적인 기능을 완전히 상실하는 것으로 알려져 있다(Peng *et al.*, 2006).

해석시작 후 시간이 경과하면서 구조체 표면온도와 내부 부근의 온도가 점차 증가하는 현상을 보였다. 그림 3과 같이 5분 경과후 노란색으로 나타난 터널 천정부의 표면온도는 약 521.2°C까지 상승하여 콘크리트의 폭렬을 일으킬 수 있는 온도를 초과하였다. 10분 후에는 600°C 이상 온도가 올라가게 되어 붉은 색으로 나타나며 약 623.4°C, 90분 후에는 약 1003.8°C를 나타내었다. 콘크리트라이닝(두께 300 mm)의 천정부로부터 내부로 100 mm지점에서는 20분 후에 약 600°C에 도달하였다. 또한 콘크리트 라이닝의 200 mm, 300 mm 지점도 화재시작 20분 후 약 5분 간격으로 650°C에 도달하여 콘크리트라이닝 천정부근에서의 폭렬은 화재발생 후 5분 이내에 모두 발생하며 화재로 인한 피해 가능성을 예측할 수 있었다. 방수층의 고온 노출시 녹는점은 150°C이고 락볼트의 녹는점은 약 500~600°C이므로 방수층의 경우 화재 발생시 초기 5분 이내에 녹기 시작할 것이며 락볼트는 암반부근의 온도가 300°C 이하로 추정되므로 화재의 영향에는 노출되지 않을 것이다. 터널내부로 들어갈수록 화재의 영향을 적게 받게 되는데 슛크리트의 경우 터널천정부에서 340 mm 떨어진 지점은 약 15분 후에 역학적인 기능을 상실하게 되는 임계온도인 600°C에 도달하게 되며 슛크리트가 터널화재시 기능을 상실하게 되어 구조적으로 큰 문제점을 내포한다고 볼 수 있다. 따라서 이에 맞는 적절한 내화 대책이 요구된다.

그림 3과 표 5는 도로터널 설계제안모델 적용시 시간에 따른 터널온도분포를 나타낸다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내 도로의 통행량, 차량 종류등을 고려한 열방출율을 기초로 하여 외국에서 제시된 시간-온도 곡선을 검토하여 우리나라 실정에 적합한 설계화재 모델을 적용하였다. 또한 적용된 도로터널의 설계화재모델에 따른 수치해석을 통하여 터널 구조체의 화재에 따른 구조체의 성능을 검토한 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 터널내 승용차나 소형차량 같은 경우는 ISO 834의 시간-온도곡선의 기준을 초과하지는 않지만 유류와 같은 위험 물질을 수송하는 차량은 그 수송물질에 따라서 약 1000~1200°C까지 온도가 상승하게 된다. 이에 도로터널의 차량통행류와 터널사고빈도수와 국도에서는 화물차의 구성 비율이 주행거리에 비해 구성 비율이 높아 도로 터널설계시에는 LPG차량이나 화물수송차량 등을 대상으로 고려한 결과 Modified hydrocarbon 곡선이 국내 도로터널 화재시의 설계화재곡선으로 가장 적합하다고 할 수 있다.
2. 수치해석을 통하여 도로터널내부 온도분포를 측정하기 위하여 천정부의 콘크리트라이닝부분을 100 mm 간격으로 3 등분하였고, 슛크리트 부분은 천정부로부터 약 330 mm,

370 mm 떨어진 곳에서 각각의 온도분포를 측정하였다. 제안된 표준시간-온도곡선을 적용하였을 때 시간이 경과함에 따라 표면온도와 터널내구조체 부근의 온도가 점차 증가하는 현상을 보였다.

3. 콘크리트라이닝과 슛크리트는 약 600°C의 온도에서 기능을 상실하게 되는데 화재발생후 20~40분 안에 이 온도에 도달하게 된다. 그러므로 그에 알맞은 내화 대책을 도입하여 콘크리트라이닝과 슛크리트 부근이 최대 600°C에 노출되지 않도록 내화대책을 수립하는 것이 필요할 것이다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(04핵심기술C01)의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

- 국토해양부(2007) 주요통계.
- 박경환(2005) 터널화재 설계강도 기준 및 영향요인에 관한 연구, 석사학위논문, 서울시립대학교, pp. 1-7.
- 박해균, 원종필, 장수호(2006) 최근 터널 콘크리트 내화대책 연구동향, 한국구조물진단학회논문집, 한국구조물진단학회, 제10권 제6호, pp. 22-32.
- 유지오, 김윤선, 김치경, 이동호(2002) 터널사고 조사연구, pp. 191-196.
- 장수호, 최순욱, 권종욱, 김상환, 배규진(2007) 화재 후 터널구조물 시공재료의 역학적 특성변화, 한국터널공학회 논문집, 한국터널공학회, 제9권 제2호, pp. 157-169.
- 임경국, 윤성배(2007) 도로터널 화재에 안전한가?, 터널공학회 일반기사, 한국터널공학회, pp. 131-139.
- Det Norske Veritas, ERS (1998) Transport of Dangerous Goods Through Road Tunnels, Technical Report of Mission 1, 2, Paris OECD and PIARC.
- Ingason, H., Gustavsson, S., and Dahlberg, M. (1994) Heat release rate measurements in tunnel fires, SP report 1994:08, SP Swedish National Testing and Research Institute, Boras, Sweden.
- PIARC (1999) Fire and smoke control in road tunnels, Report of the WG 6 of the Road Tunnels Committee of the PIARC.
- Haak, A. (1998) Fire Protection in Traffic Tunnels, General Aspects and Results of the EUREKA Project, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 13, No. 3, pp. 377-381.
- Koichi, Ono (2002) Fire safety to concrete structure, Concrete Journal, Vol. 30, No. 7, pp. 10-15.
- Magret, O. and Vauquelin, O. (2000) A model to evaluate tunnel fire characteristics, Fire Safety Journal, Vol. 34, No. 4, pp. 393-401.
- Haukur Ingason and Anders Lönnermark (2005) Heat release rates from heavy goods vehicle trailer fires in tunnels, Fire safety journal 40, pp. 646-668.
- Peng, GF., Yang, W.W., Liu, Y.F., Bian, S.H., and Zaho, L.H. (2006) Explosive spalling and residual mechanical properties of fiber-toughened high-performance concrete subjected to high temperatures, Cement & Concrete Research, Available online 26, pp. 1-5.
- Visual FEA, (주)사이텍이엔씨, www.sy-tec.co.kr, 서울 광진구 자양동 796.

(접수일: 2009.3.18/심사일: 2009.4.29/심사완료일: 2009.6.24)