

# 콘크리트 터널 및 지하구조물의 화재 피해사례 및 손상평가

Fire Cases and Damage Evaluations in Fire of Tunnels and Underground Structures



심재원\*  
Jae-Won Shim



김낙영\*\*  
Nag-Young Kim



유병옥\*\*\*  
Byung-Ok You



박영호\*\*\*\*  
Young-Ho Park

## 1. 서론

도로 신규투자자 억제되면서 지하고속도로 등에 대한 논의가 식었지만 국토해양부는 첨단 지하도로 건설에 대비해 '대심도 도로설계기준'을 신설할 계획을 밝혔다. 이는 들어 계속되는 신도시 개발로 서울 및 수도권외의 교통 혼잡이최근 급증함에 따라 미국 Big-Dig, 프랑스 A86 도로터널처럼 지정체 해소 및 도시근교의 연결을 목적으로 하는 주요도로의 지하화계획에 체계적으로 대비하기 위한 것으로 보인다. 그러나 최근 교통량 증가, 설계속도의 상향조정 및 지하도로망의 장대화로 방재기준이 지속적으로 강화되고 있는 고속도로 터널에서도 사고와 화재피해는 증가하고 있다<그림 1>. 게다가 접근성이 더욱 떨어지는 지하 수십 미터 공간의 방재문제는 2003년 대구지하철화재나 1999년 이탈리아-프랑스를 연결하는 Mont-Blanc 터널화재사과의 경험에서도 확인되었다.

본 고에서는 인명보호와 구조물보호라는 방재의 큰 두 축 가

운데 터널 화재발생으로 인한 인명피해보다는 터널구조물 자체 피해에 초점을 맞춰 실제 화재 발생 시의 터널의 화재특성, 화재 피해사례 및 화재규모에 따른 화재피해영향을 소개하고자 한다.

## 2. 터널 내의 화재특성

화재의 발생온도와 지속시간은 연소하는 차량, 적재화물, 소화제에 따라 크게 다르다. 최근 20년간 터널과 지하공간에서 발생 가능한 화재형태를 알아내기 위한 수많은 연구와 실제 폐 터널이나 실험실에서 진행된 실험에서 이와 관련된 많은 데이터를 확보하게 되었다. 그 가운데 차량화재에 의한 열출력은 보통 승용차 1대는 5 MW, 버스 1대는 20 MW, 유조트럭은 100 ~ 200 MW 정도임을 확인하였다<표 1>. 또한 화재 실험에 의하여 얻어진 터널 내의 온도분포상황과 발생온도와 지속시간의 관계는 <그림 2, 3>과 같다.

터널의 경우, 공간규모, 환기유무, 화재장소 등에 따라 발생 온도 등은 다르지만 천정부나 측벽상부가 고온이 된다. 이와 관련해 여러 가지 조건에 대한 터널 콘크리트의 온도-시간 설계곡선이 <그림 4>와 같이 제안되고 있다. 건축물에 적용되던 ISO834곡선도 터널에 제안되고, 대형 유조차(45,000 l 급) 화재를 모사하여 60분만에 최고온도가 1,350℃에 달하는 가장 엄격한 규정 RWS곡선(2시간 지속; 300 MW 규모)이 내화재에 대한 평가에 사용되고 있다. RWS의 화재 쇠퇴기를 보완한 독일의 RABT곡선(시동 5분, 최고온도 1,200℃, 지속시간 60

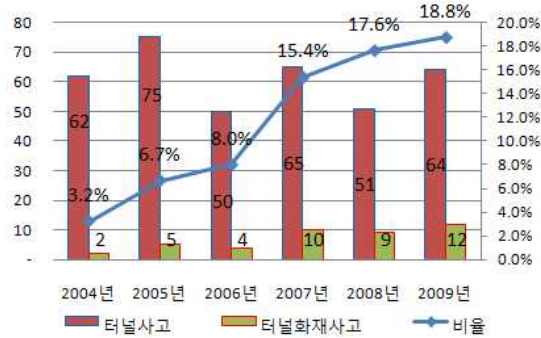


그림 1. 고속도로 터널사고 및 화재건수(한국도로공사)

표 1. 전형적인 차량의 설계화재강도<sup>1)</sup>

차량 종류	지속시간	열방출율 (MW)	에너지 (GJ)	최대온도 (℃)
승용차	45 min.	2 ~ 5	5 ~ 12	400 ~ 500
버스	1 hour	15 ~ 20	50	700 ~ 800
트럭	1.5 hour	20 ~ 30	150	1,000 ~ 1,200
유조차 (30,000 l)	2 ~ 3 hour	100 ~ 200	1,000	1,200 ~ 1,400

\* 정회원, 한국도로공사 도로교통연구원 건설기반연구실 책임연구원  
this2pass@naver.com  
\*\* 정회원, 한국도로공사 도로교통연구원 건설기반연구실 수석연구원  
\*\*\* 정회원, 한국도로공사 도로교통연구원 건설기반연구실 수석연구원  
\*\*\*\* 한국도로공사 도로교통연구원 건설기반연구실 연구실장

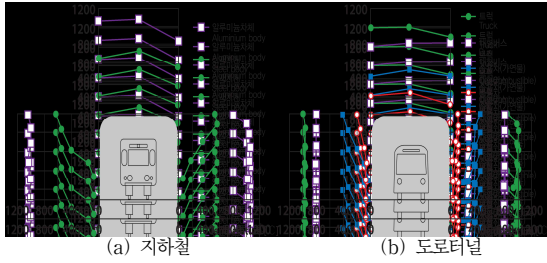


그림 2. 화재 시 터널내의 온도분포<sup>2)</sup>

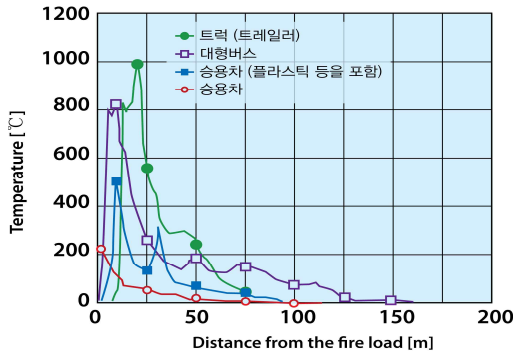


그림 3. 발생온도와 시간과의 관계<sup>3)</sup>

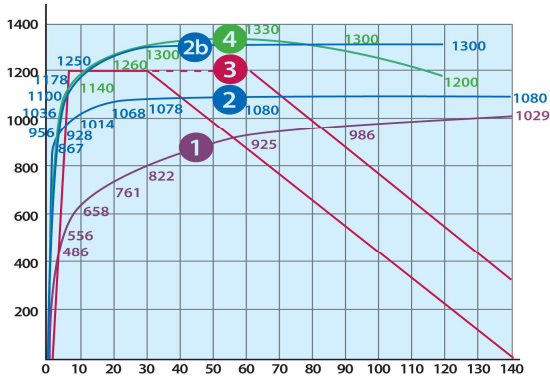


그림 4. 온도-시간 설계곡선<sup>1)4)</sup>

분)이 있으며, 그 외에 가혹한 터널화재를 모사하기 위해 열유속 345 kW/m<sup>2</sup> 열하중을 재현하는 Hydrocarbon modified 곡선이 사용되기도 한다<sup>5, 6, 7)</sup>.

화재발생시 콘크리트의 피복두께 이상으로 폭렬이 발생하면 보강근에 직접적으로 고온이 전달되어 구조성능에 치명적인 문제점을 발생시킬 수 있기 때문에 미국과 유럽에서는 30 ~ 240분까지의 화재지속시간을 기준으로 부재 깊이별 온도분포를 제시하고

주1) ① ISO834:  $T[°C] = 20 + 345 \log(st + 1)$ , ② Hydrocarbon곡선  
 ② HC Modified  
 $T[°C] = 20 + 1280(1 - 0.325e^{-0.167t[min]} - 0.675 \cdot e^{-2.5 \cdot t[min]})$   
 ③ RABT 곡선 ④ RWS 곡선

<그림 5>, 온도별로 저하된 콘크리트 압축강도 및 철근 항복강도를 고려하여 내화설계를 실시하고 있다<그림 6 ~ 8><sup>6)</sup>.

### 3. 터널화재로 인한 구조물 손상사례

1996년 Euro 터널(50.5 km) 프랑스 터미널 측에서 대형수송차(HGV)와 운전자들의 상차를 마치고 터널 입구로 진입하던

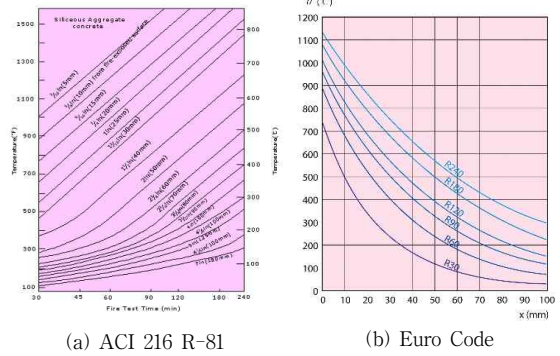


그림 5. 온도 프로파일(슬래브/벽체)

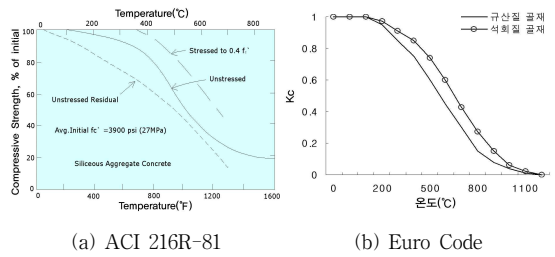


그림 6. 온도별 콘크리트 압축강도감소계수(K<sub>c</sub>)

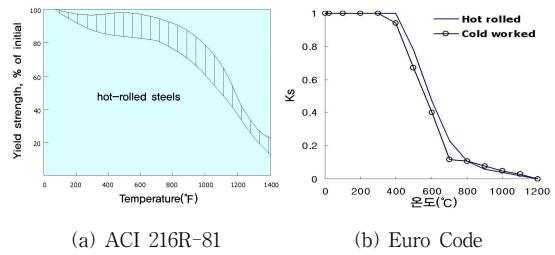


그림 7. 온도별 철근 항복강도감소계수(K<sub>y</sub>)

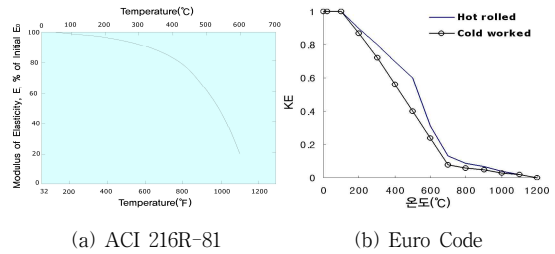


그림 8. 온도별 철근 탄성계수 감소계수(K<sub>E</sub>)

표 2. 대형 터널화재 사고<sup>1, 8, 9)</sup>

터널명, 년도	길이 (단면적)	화재 진화	최장기 지속	화재규모 (최대규모)	추정 에너지	화재피해	최고온도	복구비용	복구기간	비고
Channel, 1996	50.5 km (45 m <sup>2</sup> )	7 h	2.5 h	350 MW	2200 GJ	400 mm 폭렬 50 m 손상	1,100°C+ α	\$350 M (4,200억원)	6개월	-
Mont-Blanc, 1999	11.6 km (50 m <sup>2</sup> )	56 h	9 ~ 13 h	30 ~ 50 MW (75 ~ 100 MW)	6000 ~ 9000 GJ	400 mm 폭렬 900 m 손상	1,300°C+ α	\$273 M (3,276억원)	3년	39명 사망
Tauern, 1999	6.4 km (45 m <sup>2</sup> )	16 h	7 ~ 10 h	120 MW	4000 ~ 4500 GJ	350 mm 폭렬 500 m 손상	1,000°C+ α	\$6 M (72억원)	3개월	12명 사망
Gotthard, 2001	16.9 km (41 m <sup>2</sup> )	48 h	3 ~ 4 h	120 ~ 200 MW	2000 ~ 3000 GJ	350 mm 폭렬 700 m 손상	1,000°C+ α	\$26 M (312억원)	2개월	11명 사망
Daegu St., 2003	172 m (60.5 m <sup>2</sup> )	3 h	-	100 MW	-	120 mm 폭렬 100 m 손상	1,000°C+ α	\$47.5 M (570억원)	10개월	192명 사망
Dal-sung, 2005	993 m (88 m <sup>2</sup> )	2 h	1 h	20 MW	72 GJ	망상균열 300 m 손상	700°C+ α	\$1.5 M (18억원)	8개월	미사일 추진체 폭발

중에 화재가 시작되었다. 화재로 인한 사망자는 없었지만 7명이 연기질식으로 병원에서 이송되었고, 기관차와 10대의 대형수송차를 태우고 1 km 구간의 터널에 손상을 입혔다. 전체 복구와 4,200억 원(\$350 M)의 비용과 6개월의 복구기간이 소요되어 터널 사상 최악의 경제적 손실로 기록되고 있다.



(a) Channel



(b) Mont-Blanc 터널



(c) Gotthard 터널

사진 1. 해외터널화재 피해사례

1999년 프랑스와 이탈리아를 연결하는 Mont-Blanc 터널(11.6 km)에서 벨기에 화물트럭 하부에서 발생한 불이 밀가루와 마아가린을 싣고 가던 트럭으로 옮겨 붙어 33대의 차량이 전소하고 39명이 사망하는 참사가 발생했다. 발생한 화재는 최대 규모 약 75 ~ 100 MW급으로, 화염온도가 약 1,300°C까지 상승한 것으로 추정되며 소방대의 접근이 어려워 56시간이나 화재를 진압하지 못해 900 m구간의 터널구조물이 손상되었고, 최대 400 mm에 달하는 폭렬이 발생하였다. 복구비용으로 3,276억 원(\$273 M)이 투입되는 경제적 피해를 입었고, 복구하는데 무려 3년이라는 시간이 필요했다.

2001년 스위스 Gotthard 터널(16.9 km)에서 2대의 트럭이 충돌하면서 11명이 사망하고 다수의 부상자가 나온 화재가 발생했다. 발생한 화재는 최대규모 약 120 ~ 200 MW급으로, 화염온도가 약 1,000°C 이상 상승한 것으로 추정되며 소방대의 접근이 어려워 48시간이나 화재를 진압하지 못해 700 m 구간의 터널구조물이 손상되었고, 최대 350 mm에 달하는 폭렬이 발생하였다. 이 사고로 약 312억 원의 복구비용과 2개월의 복구기간이 소요되었다<사진 1>.

2003년 대구 도시철도 1호선 중앙로역에 정차 중이던 열차(제1079) 내에서 방화로 인해 차량 12량(제1080열차 포함)과 192명이 사망하고 148명의 부상자가 나온 참사가 발생했다. 발

생한 화재는 최대규모 약 100 MW급으로, 화염온도가 약 1,000°C 이상 상승한 것으로 추정되며 3시간 만에 화재를 진압하여 100 m 구간의 구조물이 손상되었고, 최대 120 mm에 달하는 폭렬이 발생하였다. 이 사고로 약 570억 원의 복구비용과 10개월의 복구기간이 소요되었다.

2005년 구마고속도로 달성2터널(990 m)에서 나이키 미사일 추진체를 운반하던 15톤 트럭에서 화재가 발생했다. 이 사고로 상하행선 연결통로 철제셔터가 날아갔으며 연기와 분진 등으로 사고발생 한 시간 만에야 화재를 진압할 수 있어 100 m구간에서 라이닝 균열 및 포장이 파손되었으며 최대 40 mm 폭렬이 발생하여 약 18억 원의 비용과 8개월의 복구기간이 소요되었다<사진 2>.

#### 4. 터널 내 차량별 화재영향

전술한 터널 고온특성 및 화재사례로 판단해 불 때 화재손상



(a) 대구지하철



(b) 달성2터널

사진 2. 국내터널화재 피해사례

정도는 화재규모별로 차이가 있다. 따라서 차량화재로 인한 CFD(computational fluid dynamics)해석은 터널 콘크리트 피복두께와 예상화재규모에 따른 내화시공 여부 등 안전지침 및 내화대책을 세우는데 있어 중요한 정보가 된다. 다음은 미국표준기술연구소(NIST)에서 제작한 CFD 화재해석 프로그램인 FDS(Fire Dynamics Simulator)<sup>10)</sup>와 국의 내화설계기준을 이용한 터널 내 화재규모별 화재해석 및 손상정도 분석결과이다 <그림 9, 10>.

#### 4.1 터널 통행 차량별 화재시나리오

터널을 통행하는 차량은 승용차(5 MW), 트럭(25 MW) 및 유조차(150 MW)를 대상으로 하였고, 양방향 2차선 기준으로 폭 8 m, 높이 5.5m의 개착식 터널을 모사하기 위해 45 m 연장의 중앙 편측에서 각 차량의 화재규모별로 화재해석을 수행하여 화재 지속에 따른 터널 내 콘크리트면의 영향을 확인하였다<표 3>.

최대온도는 예상대로 유조차 화재 위치의 천정부에서 약 1,100°C로 나타났다<그림 11>. 벽체의 경우도 최대 약 1,000°C 이상까지 상승하였으나 대부분의 콘크리트 피복 안쪽 부위는 <표 3>과 같이 30분 기준으로 약 25~300°C까지 상승하여 국제터널협회(ITA; International Tunnel Association)에서 추천하는 구조용 터널콘크리트 임계온도 380°C를 하회하여

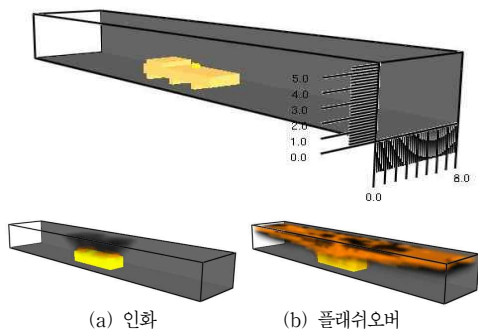


그림 9. 터널모델 및 화재 모식도

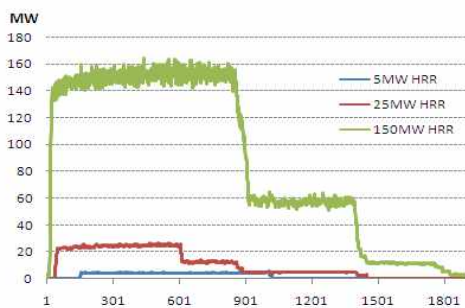


그림 10. 차량별 열방출률 곡선(CFD해석)

표 3. 터널화재 해석결과(최고값 기준)

화재규모	소형차	트럭	유조차	비고
천정부	63°C	900°C	1,100°C	-
측부	25°C	197°C	300°C	최대값
최상기 지속 에너지	600°C	550°C	1000°C	최대값
	35°C	117°C	250°C	철근위치
최상기 지속 에너지	약 15분	약 20분	약 30분	-
에너지	3.5 GJ	21 GJ	163 GJ	-

화해가 적은 것으로 보이지만 폭발이 고려되면 보다 가혹한 결과가 예상되어 대규모 화재는 터널연장, 최상기 지속시간 및 폭발특성을 고려한 자세한 해석이 필요한 것으로 판단된다.

#### 4.2 내화설계에 기초한 터널 차량별 화재손상분석

ACI 및 유럽코드의 온도 프로파일 상의 피복 50 mm 해당 온도 120°C, ITA 임계온도 380°C 및 콘크리트 중성화 시동온도 500°C에 대한 손상도 수준을 CFD 해석상의 최대 손상도와 비교하였다<표 4>. ITA 임계온도는 철근 항복강도와 탄성계수를 각각 88~100%, 70~85%까지 허용하는 것으로 ASTM의 철근 허용온도(538°C 이내)보다 훨씬 보수적임을 알 수 있다.

CFD 해석의 콘크리트 손상도에 비해 철근이 양호하게 나타난 것은 폭발을 고려할 수 없기 때문이다. 승용차의 경우를 빼고는 콘크리트가 완전히 손상된 것이므로 터널조건에서는 ACI나 유럽기준보다 훨씬 더 가혹한 조건에 대해 내화설계 개념을 도입해야 함을 확인할 수 있으며, 안전이 확보되지 않는 경우는 <표 4>와 같은 내화재료의 도입도 바람직할 것으로 판단된다.

### 5. 결론

대심도 지하공간에서 대형 화재사고가 발생할 경우, 인명피해는 물론 화재하중에 의한 구조부재의 응력저하 및 폭발 등의 피

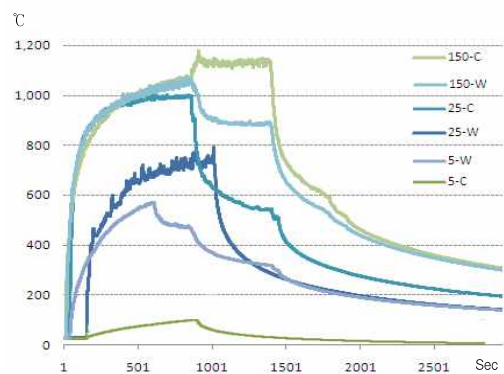



그림 11. 차량별 최대 수열온도(CFD해석)

해는 필연적일 것으로 판단된다. 또한 장시간의 복구 기간과 비용 소모가 예상되어 사회·경제 전반에 미치는 영향은 엄청날 것이다. 특히 터널과 같이 갇힌 공간의 화재는 일반화재와 달리 급격한 초기온도 상승으로 최고 1,300°C 정도에까지 도달할 수 있으므로 쉘터터널, 복개터널 및 침매터널과 같은 구조터널 등에는 별도의 내화대책을 강구할 필요가 있다.

앞서 언급했던 것처럼 교통량 증가, 설계속도의 상향조정 및 장대터널의 증가로 현 시점에서의 터널이나 지하공간은 편리한 도로망이지만 동시에 큰 위험이 내재하고 있는 인프라이다. 국토면적이 상대적으로 적고 산지가 70%나 차지하는 국내의 여건에서는 지하공간의 활용은 피할 수 없는 선택이지만 이 공간의 활용을 위해서는 인명피해와 직결되는 소화설비, 제연시스템, 비상시설 등은 물론 방재의 또 다른 축인 구조체 자체에 대한 적극적인 내화대책도 간과할 수 없는 설계요소임을 다시 한번 언급하고자 한다. 

### 참고문헌

1. Ministry of Interior & Transportation & housing (France), Task Force for Technical Investigation of the 24 March 1999 Fire in the Mont-Blanc Vehicular Tunnel, 1994.
2. Sándor Fehérvári, Characteristics of tunnel fires, Concrete Structure, 2008, pp. 56 ~ 60.
3. 清宮 理, 耐火技術と コンクリート-土木-, JCI, Vol. 45, No. 9, 2007, pp. 8 ~ 13.
4. 박해균, 전상은, 이명섭, '터널 구조물의 내화 기술', 한국콘크리트학회지, Vol. 17, No. 5, 2005, pp. 76 ~ 80.
5. 원종필, 최민정, 장창일, 이상우, '도로터널내 화재에 따른 터널구조체의 안정성 평가를 위한 시간-온도곡선의 적용', 대한토목학회 논문집, Vol. 29, No. 5A, 2009, pp. 551 ~ 555.
6. CEB-FIP State-of-art report, Fire design of concrete structures-materials, structures and modelling, Vol. 38, 2007.
7. Ingason, H., Gustavsson, S., and Dahlberg, M., Heat release rate measurements in tunnel fires, SP report 1994:08, SP report 1994:08, SP Swedish National Testing and Research Institute, Boras, Sweden, 1994.
8. Kaundinya, I., Protection of road tunnel linings in cases of fire, Federal Highway Research Institute of Germany, pp. 1 ~ 9.
9. PIARC, Fire and smoke control in road tunnels, Report of the WG 6 of the Road Tunnels Committee, 1999.
10. McGrattan, K.B., Klein, B.W., Hostikka, S. and Floyd, J.E., Fire Dynamics Simulator(Ver. 5) User's Guide, NIST, 2007.

표 4. 내화설계에 기초한 차량화재별 모재 강도감소

구분		콘크리트 압축강도(MPa)	철근 항복강도(MPa)	철근 탄성계수(MPa)	
일반		24.0	300	200,000	
ACI	120°C	23.8(99%)	276(92%)	196,000(98%)	
	380°C	21.1(88%)	264(88%)	170,000(85%)	
	500°C	14.4(60%)	222(74%)	120,000(60%)	
	800°C	Fail	Fail	Fail	
Euro Code	120°C	23.8(99%)	300(100%)	196,000(98%)	
	380°C	19.7(82%)	300(100%)	140,000(70%)	
	500°C	16.3(68%)	240(80%)	120,000(60%)	
	800°C	Fail	Fail	Fail	
CFD 최대	소형차	ACI	14.4(60%)	285(95%)	200,000(100%)
		Euro Code	13.2(55%)	300(100%)	200,000(100%)
	트럭	ACI	Fail	270(90%)	190,000(95%)
		Euro Code	Fail	300(100%)	180,000(90%)
	유조차	ACI	Fail	270(90%)	180,000(90%)
		Euro Code	Fail	300(100%)	160,000(80%)

표 5. 내화재료 내화실험 결과(자료 : 건설기술연구원)

피복	폭렬깊이(mm)	내화성능(분)	최대온도(10 mm)
미적용	25 mm	9	1,011°C
보드A(19 mm)	0 mm	120	243°C
보드B(25 mm)	0 mm	120	296°C
물탈(32 mm)	0 mm	120	137°C

담당 편집위원 :  
정해문(한국도로공사) haimoon@ex.co.kr