

## 화재로 인한 지하구조물 손상 관련 기술동향 분석

장수호<sup>1)</sup>, 최순욱<sup>2)\*</sup>, 이규필<sup>3)</sup>, 배규진<sup>4)</sup>

### Recent Issues in the Fire-Induced Damage to Underground Structures

Soo-Ho Chang, Soon-Wook Choi, Gyu-Phil Lee and Gyu-Jin Bae

#### 1. 서 론

2003년 2월 대구지하철 화재가 발생한 이후 국내에서도 지하공간에서의 화재에 대한 관심이 부쩍 높아졌다. 대구지하철 중앙로역 화재사고는 사망 197명, 부상 146명이라는 막대한 인명피해와 차량전소, 전기시설, 통신설비, 지하역사 구조물 피해 및 11월말까지 운행중단 등으로 인하여 약 1,000억원의 경제적 피해를 발생시켜 재난을 사전에 예방하고 재난에 의한 피해를 최소화 할 수 있는 규정 및 시스템 확립이 필요함을 절실히 느끼게 하였다. 유럽이나 일본과 같이 터널이 잘 발달되어 있는 지역에서는 지하공간에서의 화재에 대한 관심이 높고 연구가 많이 진행되어 있는 상태이지만, 국내에서는 지하공간의 활용도가 높음에도 불구하고 화재에 대한 대비가 선진국에 비해 부족한 실정이다. 본고에서는 각 국의 지하공간에서의 화재발생동향을 살펴보고, 지하공간 화재 대응기술의 발전 동향과 관련 모의 화재실험 결과를 간략히 소개하였다.

#### 2. 터널 화재발생 동향

##### 2.1 국내동향

2003년에 발생한 대구지하철 참사를 계기로 국내에서도 지하구조물의 내화대책에 관한 관심이 높아지고 있다. 대구지하철사고 이전에도 국내의 터널 내 화재사례는 다수 있었지만 대부분 경미한 사고로서 일시적인 통행제한 등의 조치로 마무리 되었다. 그러나 대구 지

하철 참사의 경우는 사망 197명, 부상 146명, 실종 286명의 인명 피해와 8개월간의 보수·보강에 의하여 약 1000억원의 경제적인 피해가 발생하면서 지하구조물에서의 화재피해가 심각한 문제임을 인식하게 하였다. 대구지하철 1호선 중앙로역 전동차 화재사고의 피해상황을 살펴보면 Fig. 1과 같이 전동차에서 발생한 화재는 전동차가 정거한 구간을 중심으로 폭렬로 인한 박리, 철근노출, 망상균열 등의 현상이 발생하였고 본 선구간에도 화재로 인한 그늘음이 환기구까지 발생되었다.

화재사고 발생이후의 현장정밀조사에 의하면 전동차량이 위치한 선로위의 슬래브는 최고 1000℃ 이상의 열을 받은 것으로 추정되고 있으며, 그 외 선로위의 슬래브는 전체적으로 500~1000℃ 정도의 열을 받은 것으로 추정하고 있다 (대구지하철공사, 2003). 이와 같은 조사내용은 국내에서도 지하구조물의 내화대책 수립이 필요하며 선진국에서 적용되고 있는 화재시나리오인 RABT(Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln) 곡선 및 RWS(Rijkswaterstraat) 곡선과 같은 지하공간 화재시의 온도이력을 국내 실정에 맞게 도입할 필요가 있음을 말해주고 있다.

현재 국내의 내화 관련 설계기준을 살펴보면, 콘크리트 구조설계기준 (한국콘크리트학회, 2003)에서는 “화열의 온도, 지속시간, 사용골재의 성질 등을 고려하여 콘크리트의 피복두께를 결정하여야 하며, 슬래브의 경우 30 mm 이상, 기둥 및 보의 경우에 50 mm 이상을 철근의 피복두께로 하여야 한다”고 제시하고 있다. 또한 내화구조의 지정 및 관리기준에서는 건축물의 벽, 기둥, 바닥 또는 지붕의 화재 시 가열에 대하여 부재별로 정해진 시간 이상을 견딜 수 있는 내화구조로 하여야 한다고 규정되어 있다. 그러나 내화에 필요한 피복두께는 화열의 온도, 지속시간, 사용골재 등을 고려하

<sup>1)</sup> 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구부 선임연구원

<sup>2)</sup> 한국건설기술연구원 지반연구부 연구원

<sup>3)</sup> 한국건설기술연구원 지반연구부 연구원

<sup>4)</sup> 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구부 연구부장/연구위원

\* 교신저자 : soonugi@kict.re.kr

접수일: 2005년 1월 11일

심사 완료일: 2005년 2월 23일



(a) Thermal cracking



(b) Concrete exfoliation and exposure of reinforcing bars

Fig. 1. Severe fire-induced damage to underground structures (Daegu Metropolitan subway)

여 정하는 것으로써, 부재별로 피복두께를 설정하여야 하며 이에 따른 구체적인 피복두께의 계산방법을 제시

하여야 하나 이에 대한 연구가 아직 미흡한 실정이다.

2.2 국외동향

지하공간에서의 화재는 폐쇄된 공간특성상 많은 인명 및 경제적 피해를 야기하는 대형 참사로 이어진 경우가 많기 때문에 최근 들어 유럽을 중심으로 국제적인 기술적 관심사로 인식되고 있다. 프랑스, 영국, 일본, 미국, 캐나다 등 세계의 여러 지역에서 엄청난 인적 및 물적 피해를 발생시킨 심각한 사고들이 보고 되고 있다. 이러한 사고들은 지하공간에서 좀 더 효과적이고 안전한 피난과 구조를 요구하게 하였고, 화재에 대한 지하구조물의 대응설계 기술을 요구하고 있다. Haack(1998)은 터널 내 대형화재는 터널을 이용하는 운송수단 뿐만 아니라 터널 내 시설에도 심각한 손상을 주며, 이러한 손상은 고온과 유독 연소가스 등에 의해 발생한다고 지적하였다. 또한 발생한 화재가 비록 터널에 구조적인 위협을 주지 않을 지라도 일정기간 동안 터널의 이용성을 감소시킬 수 있다고 하였다. 즉 화재 후 터널 보수에 소요되는 시간은 몇 주 또는 몇 달이 걸릴 수 있으며 대도시의 경우 이러한 보수기간동안 터널을 이용하는 시민들은 상당한 불편을 겪게 된다는 점에서 구조적 손상이 발생하지 않은 경우에도 터널 내 화재를 과소평가할 수 없다고 지적하였다. Table 1은 국외 지하구조물의 대형 화재발생사고 현황을 정리한 것이다.

1999년 몽블랑 터널화재 이전에는 많은 사람들이 현대의 터널이 화재에 대한 충분한 안전을 확보하고 있다고 생각하였다. 그러나 몽블랑 터널화재는 39명의 사망자를 냈고 사람들에게 터널에서의 화재는 재앙으로 다가옴을 현실로 느끼게 하였다(Fig. 2).

몽블랑 터널화재가 발생한 후 두 달이 지난 다음, 오스트리아의 타우른 터널에서 차량충돌에 의해 12명의

Table 1. Representative tunnel fire accidents in foreign countries

Tunnel name	Year	Rehabilitation period	The amount of damage (US\$)
Nipponzaka tunnel	1979	2 months	33 million US\$ (Only rehabilitation cost)
Channel tunnel (Euro tunnel)	1996	6 months	350 million US\$
Mont Blanc tunnel	1999	3 years	27 million US\$ (Initial repair cost) 273 millionUS\$ (Total rehabilitation cost)
Tauern tunnel	1999	3 months	6 million US\$ (Rehabilitation cost)
Gotthard tunnel	2001	2 months	25 million US\$ (Rehabilitation cost)

사망자가 발생하였고, 오스트리아의 카프룬에서 150명의 사망자가 발생하였다. 이러한 사고 이후 계속되는 유럽의 터널화재안전에 대한 노력에도 불구하고 2001년 고타드 터널(Fig. 3)에서 두 대의 중차량 충돌이 원인이 되어 11명의 사망자와 250 m의 터널라이닝이 붕괴되는 대형 터널화재사고가 발생하였다. Carvel(2002)은 유럽에서는 이미 터널내의 화재에 대한 연구를 계속적으로 수행해온 상태이며 터널 내에서의 화재와 연기 거동에 대한 실험적 연구가 충분하다고 판단하고 있으나, 이와 같이 계속적으로 터널내 대형화재가 발생하는 원인은 기 시공된 터널의 화재안전능력이 현재의 유럽

기준에 부합되지 못하였기 때문인 것으로 지적하였다.

일반적으로 도로터널은 철도터널에 비해 교통량이 많기 때문에 터널 내 사고빈도와 화재발생위험이 높다. Fig. 4는 1949년부터 2001년까지의 해외에서 발생한 총 35건의 화재를 10년 단위로 나타낸 것이며, Fig. 5는 1991년부터 2000년까지 일본에서의 도로터널과 철도터널 화재사고 건수의 변화를 나타낸 것이다. 두 자료 모두에서 도로터널 내 화재가 전체 터널 화재의 대부분을 차지하고 있으며, 매년 화재사고가 증가 추세에 있다는 것을 확인할 수 있다(日本コン크리트工学協會, 2003).

또한 국외에서 발생한 터널화재의 원인을 분석한 결과 Fig. 6과 같이 터널 내 차량충돌이 주요 요인인 것으로 나타났다(日本コン크리트工学協會, 2003).

독일의 STUVA(Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V.)에서는 도로터널의 경우 화재의 원인을 차량결함, 차량충돌사고 또는 운전자나 차량유지관리의 문제로 보고하고 있으며, 일본에서는 Table 2



Fig. 2. Burnt out lorry in the Mont Blanc tunnel(after Haack, 2004)



Fig. 3. Sectionally collapsed false ceiling in the Gotthard tunnel(after Haack, 2004)

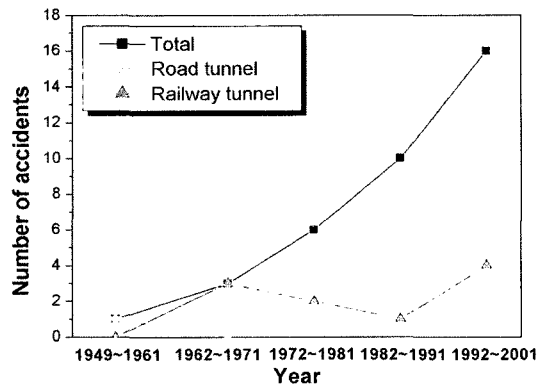


Fig. 4. Trend of tunnel fire accidents in foreign countries (except Japan)

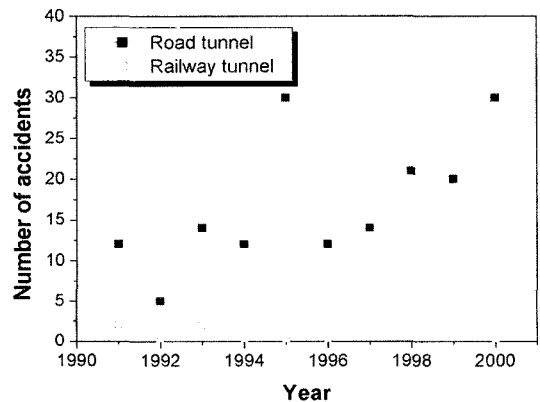


Fig. 5. Trend of tunnel fire accidents in Japan

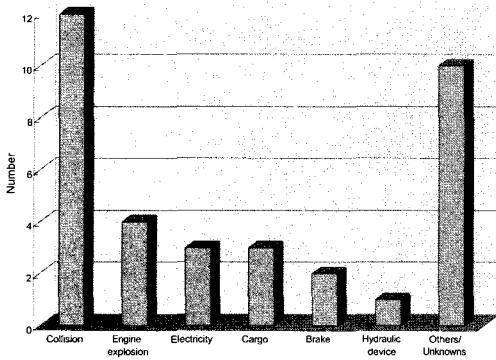


Fig. 6. Distribution of fire accident origins in tunnels

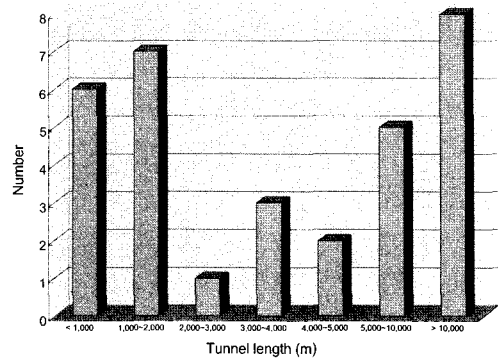


Fig. 7. Classification of fire accidents in tunnels by tunnel length

와 Table 3과 같이 철도터널과 도로터널에서의 차종 원 인별 화재발생 상황을 보고하고 있다. 도로터널(日本火災學會, 1997)에서는 차량간의 충돌과 배기관 접촉 및 전기배선이 주요한 화재원인으로 작용하였고, 철도터널(栗岡均, 1998)에서는 전기시설의 문제와 방화가 주요한 화재원인으로 작용하였다.

위의 국외 35건의 터널 화재사례에 대해 터널 연장별로 분석해보면 Fig. 7과 같이 장대터널일수록 터널 개소에 비하여 화재발생 건수가 많았으며, 일본에서도 Table 4와 같이 2 km 이상의 장대터널에서 화재사고 발생확률이 증가하는 것으로 보고 되었다(日本火災學會, 1997). 이상의 분석결과로부터 특히 장대 도로터널의 경우에 터널 내 화재에 대비한 기술적 대응이 시급하다는 것을 확인할 수 있다.

Table 4. Fire accident frequency in tunnels with different lengths in Japan

Tunnel length	No. of tunnel, A	No. of fire accident, B	Frequency (=B/(years×A))
< 2 km	-	100	-
2~3 km	80	16	0.0105
3~4 km	37	7	0.01
> 4 km	16	23	0.076

### 3. 국외의 지하공간 화재관련 기술발전 동향

#### 3.1 유럽

##### 3.1.1 EUREKA 프로젝트

유럽에서는 1965년에 스위스 Offenegg에 위치한 철

Table 2. Summary of fire accidents in Japanese road tunnels(1977~1994)

Car type \ Origin	Exhaust pipe	Collision	Electric wire	Fuel leakage	Tobacco	Brake overheat	Others	Unknowns	Total
Truck	22	5	6	7	10	3	19	7	79
Passenger car	4	16	15	8	-	-	10	4	57
Two-wheeled vehicle	-	3	1	2	-	-	-	-	6
Unknowns	-	1	1	-	1	-	1	-	4
Total	26	25	23	17	11	3	30	11	146

Table 3. Summary of fire accidents in Japanese railway tunnels (1977~1994)

Item	Incendiaris m	Insulation inferiority	Short circuit	Bridging fault	Electric leakage	Spark	Heat	Tobacco	Others	Total
Train	6	5	2	1	1	5	0	0	0	20
Facility	0	1	0	0	2	1	1	1	2	8
Total	6	6	2	1	3	6	1	1	2	28

도 페터널에서 첫 터널화재실험이 수행되었다. 이 실험에서는 자연환기, 횡류식, 종류식 등 3가지 환기방식에 따른 화염의 발달과 연기의 이동을 조사하였고, 또한 스프링클러의 배치에 대해서도 조사되었다. 1976년 오스트리아 Zwenberg 터널에서 이와 유사한 터널화재실험이 수행되었다. 이 두 가지 실험은 휘발유를 사용하여 화재를 모사하였고, 이 실험으로부터 역학적 환기방식에 대한 중요한 정보를 획득할 수 있었다. 1990년대에는 EUREKA EU499 "Firetun"이라는 대규모의 화재실험이 노르웨이 북쪽의 단선 페터널에서 차량, 중차량, 열차 객차, 지하철 객차 등과 같이 실제 터널의 화재발생요소에 대하여 수행되었다. 이 프로젝트에는 약 천만 달러의 비용이 소요되었으며, 오스트리아, 핀란드, 프랑스, 이탈리아, 노르웨이, 스웨덴, 스위스, 영국, 독일의 기관으로부터 재원을 확보하였다. EUREKA 프로젝트는 독일이 주도적으로 이끌었으며, 21개 화재실험이 각국의 엔지니어와 과학자들에 의해 노르웨이의 Hammerfest 터널에서 수행되었다. 기타 부수적인 실험들이 각국의 실험실에서 수행되었으며, 유럽의 몇 개 터널에서 Hammerfest 터널결과에 대한 보완실험이 실시되었다 (Carvel, 2002).

EUREKA 프로젝트의 목적은 지하구조물에서 화재사고가 발생하였을 경우, 최적의 인적·물적 보호를 위한 방법을 조사하는 것으로, 다음과 같은 5가지의 주제를 가지고 있다 (Haack, 1998).

#### ① 화재현상파악

터널 내에서 화재가 발생하였을 경우, 터널내의 온도 및 연소가스의 시간별·공간별 분포와 연소율, 화재확산속도, 공기와 가스 배출량 등을 파악하는 기초단계의 화재실험연구를 수행.

#### ② 피난, 구조, 소화관련

①의 화재현상파악과 인과관계로 조사되는 사항으로 화재발생시 화재경보시스템의 기능파악과 비상조명장치와 피난유도시스템, 전체적인 소화시설의 효능을 조사하고 소방대 및 구조대와 사고통제센터사이의 의사소통가능성에 대한 평가와 관련된 연구를 수행.

#### ③ 화재에 의한 주변 구조물의 영향

터널구조물로부터 배면암반까지 화재에 의한 열전달을 파악하고, 시간-온도곡선과 터널지보시스템에 미치는 영향을 연구.

#### ④ 구조물의 보수보강

화재에 의한 구조물의 손상과 잔류구조물의 지보거동을 파악하고 보수/보강의 가능성과 소요 시간을 파악하는 연구.

#### ⑤ 이론의 축적

상기 4가지 사항을 종합하여 터널내 화재발생시 에너지와 구조물사이의 열적 균형에 대한 기초이론을 향상시키고 유럽 등지에서 사용되고 있는 heat balance model의 타당성을 조사. 또한 기존 모델을 수정, 재개발하여 최적의 heat balance model과 프로그램을 확립하고 화재 사고시 구조물에 작용하는 지보하중추정에 대한 연구를 수행.

### 3.1.2 5<sup>th</sup> Framework 프로그램

지난 10년 동안 유럽의 터널에서는 다수의 화재가 발생하였고 이 화재는 심각한 인명피해와 구조물 손상을 가져왔다. 이러한 피해가 발생하자 유럽각국에서는 화재안전에 대한 터널설계 및 유지관리, 시설기준의 부적합성에 관심을 가지게 되었다. EU(유럽공동체)는 기 설치되어 있는 유럽지역 터널의 안전성을 업그레이드하고 터널설계와 운용을 위한 기준 및 지침을 향상시키기 위하여 터널안전에 대한 광범위한 재검토를 실시하였다. EU의 5<sup>th</sup> Framework 프로그램에는 7개의 다국적 프로젝트가 포함되어 있으며, 이 프로젝트들에는 40개 이상의 기관이 참여하고 있다. 이 다국적 프로젝트들 중 5개는 유럽 위원회(European Commission)에 의해 2001년도에 시작되었고 나머지 2개 프로젝트는 2002년도와 2003년도에 시작되었다. 이 프로젝트들 중 2개는 터널 안전문제에 관한 가이드라인을 만드는 것으로, 그 중 하나는 FIT(Fires In Tunnels)프로젝트로서 수집된 데이터를 분석하고 데이터베이스화하여 터널에서 발생하는 실제화재와 관련된 안전문제에 관한 가이드라인을 만드는 것이다. 다른 하나는 Safe T(Safety in Tunnels)프로젝트로서 융합된 유럽의 화재안전가이드라인을 만들어 화재예방과 원인을 포함한 터널안전문제를 다루는 것이다. 다음은 7개의 다국적 프로그램을 간단히 설명한 것이다. (Khoury, 2003).

#### ① FIT(Fires In Tunnels) 프로젝트

2001년 3월에 시작되어 4년간 진행 중인 FIT프로젝트는 벨기에의 BBRI(Belgian Building Research Institute)에 의해 조직되었으며, 12개 국가의 33개 기관으로 구성되어 있다. FIT프로젝트의 목적은 터널에서의 화재안전관련 데이터 네트워킹을 수립하는 것으로, 수집되는 데이터는 화재안전설계에 관한 가이드라인과 화재대응관리에 대한 최근의 연구내용에 관한 사항이다.

#### ② DARTS(Durable and Reliable Tunnels Structures) 프로젝트

DARTS는 2001년 3월에 시작되어 3년간 진행되는 프로젝트로서 덴마크의 COWI Consulting Engineers AS가 주체이며, 8개의 기관으로 구성되어 있다. DARTS

프로젝트의 목적은 각 개별 터널에 대하여 주변 환경조건, 기술 수준, 안전예방, 터널 내구연수 등을 고려하여 최적 비용의 터널형식 및 시공과정의 선택을 위한 운용 방법과 관련 기법을 개발하는 것이다. DARTS는 주로 새로 건설하는 터널에 초점이 맞춰져 있으나 기 건설된 터널의 업그레이드시에 사용할 수 있는 방법 또한 고려하고 있다.

### ③ Safe Tunnel 프로젝트

Safe Tunnel은 2001년 9월에 시작되어 3년간 9개 기관이 참여하였다. 이탈리아의 Centro Ricerche FIAT가 주체이며, 예방안전수단을 통하여 도로터널에서 사고의 수를 감소시키기 위한 목적으로 수행되었다. 주된 초점은 터널 내에 화재발생위험이 있는 운송수단을 감지하고 통제하며, 터널 내에서의 속도조절을 통하여 터널내의 화재사고를 줄이는 것이다.

### ④ SIRTAKI(Safety Improvement in Road&rail Tunnels using Advanced ICT and Knowledge Intensive dss) 프로젝트

SIRTAKI는 진보된 정보기술과 지식을 통하여 도로나 철도터널에서 안전성을 향상시키기 위하여 시행되었다. 2001년 9월에 시작되었으며, 3년간 수행된 이 프로젝트는 스페인의 ETRA Group이 주체가 되어 유럽의 12개 기관이 컨소시엄형태로 구성되었다. 주 목적은 안전 및 긴급상황과 관련하여 전체 네트워크 유지관리를 위한 통합된 진보적인 터널유지관리 시스템을 개발하는 것이다.

### ⑤ Virtual Fires 프로젝트

Virtual Fires는 2001년 11월에 시작되어 5개국 8개 기관이 3년간 수행한 프로젝트이다. 오스트리아의 Institute for Structural Analysis가 주체이며, 터널내에서 화재가 발생했을 경우 화재의 효과적인 소화를 위하여 컴퓨터에 의해 가상(virtual)환경을 설정하고 소방관들에게 훈련을 시키는 모의 장치를 개발하는 것이 주 목적이다. 이 프로젝트는 페터널에서 연료를 태워 실시하는 실제 화재소화훈련의 대안으로서 저비용이고 환경친화적인 장점이 있다.

### ⑥ UPTUN(Upgrading existing Tunnels) 프로젝트

UPTUN은 기 시공된 터널의 화재안전을 위하여 효과적이고 지속가능하며 혁신적인 업그레이드 방법을 모색하는 프로젝트로서, EU 13개국 41개 기관 및 기타 3개국이 함께 연구개발하는 프로젝트이다. UPTUN은 네덜란드의 TNO(Netherlands Organisation for Applied Scientific Research)와 이탈리아의 ENEA(Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente)가 주체가 되어 2002년 9월에 시작되었으며 4년간 수행될 예정이

다. EU의 5<sup>th</sup> Framework 프로그램 아래에서 진행되는 터널안전분야 프로젝트 중 가장 규모가 크다.

### ⑦ Safe T(Safety in Tunnels)

네덜란드 TNO가 주체로 수행하는 Safety in Tunnels는 'Safe T'라고도 불리며, 2003년에 시작되어 3년간 수행된다. 이 프로젝트는 EU가 재원을 지원하고 있는 5<sup>th</sup> Framework의 프로젝트들로부터 얻어진 연구결과 가운데, 유지관리와 화재소화에 초점을 맞춰 유럽의 터널화재안전에 대한 가이드라인의 밑그림을 만드는 게 주목적이다.

위의 7개 다국적 프로젝트가 시작된 이후, 2003년 3월에 독일의 STUVA를 중심으로 터널에서의 화재에 관한 강력하고 통일성이 있는 네트워크를 구성하기 위한 컨소시엄이 EU에 제출되었다. 이 컨소시엄은 6<sup>th</sup> Framework 프로그램의 부분으로 차후에 자체 재원확보가 가능하고 다른 분야에 까지 적용될 수 있다. 이 컨소시엄은 필요한 실험크기의 화재실험시설을 개발하는 목적도 가지고 있으며, 제안이 EU에 의해 승인이 되면 이 분야에서의 중복투자를 막을 수 있고 지속적으로 5<sup>th</sup> Framework 프로그램을 진행시킬 수 있게 된다.

## 3.2 미국 및 일본의 기술동향

북미지역은 지형적인 영향으로 유럽에 비해 터널의 의존도가 낮은 관계로 유럽만큼 터널내의 화재에 대한 연구가 활발히 수행되고 있지 않다. 북미지역의 가장 큰 터널내 화재연구는 유럽의 EUREKA 프로젝트와 같은 시기에 수행한 MTFVTP(Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program)이 있다. MTFVTP는 버지니아주의 2차선 페터널에서 모든 시험이 수행되었고 미연방 고속도로공단과 메사추세츠주로부터 재정지원을 받았다. 이 프로젝트에 소요된 비용은 약 4천만 달러이며 화재강도가 10, 20, 50 및 100 MW일 경우 연기제어를 시행할 때 자연환기, 반횡류식, 횡류식 및 종류식 환기 방식에 따른 연기제어능력의 조사에 중점을 두었으며, 스프링클러 시스템에 대한 실험이 실시되었다. MTFVTP는 터널화재상황에서 연기의 거동과 조절에 대한 지식을 축적할 수 있었으나 유럽의 EUREKA 프로젝트와 같이 터널내의 차량과 같은 화재하중에 따른 거동과 관련된 데이터는 많이 얻지 못하였다(Carvel, 2002).

미국의 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서는 고온에서의 일반강도콘크리트(NSC)와 고강도콘크리트(HPC)의 역학적 특성과 폭발특성에 대한 연구를 수행하였고 배합비와 혼화제 함유에 따른 콘크리트의 특성에 대한 연구를 실시하였다(NIST, 2000).

일본은 유럽과 같이 터널이 많은 지역으로 터널안전

에 대한 관심이 높다. Table 5는 일본의 대표적인 터널 화재실험 사례이다(日本コン크리트工学協會, 2002).

일본은 터널의 내화설계에 대한 구체적인 기준을 세워놓고 있으며 지하철 전동차의 내장제도 내화재료로 바꾸는 등 터널 화재안전에 대한 상당한 연구가 진행되었다. 일본의 내화설계는 내진설계에 비해 기술수준이 미흡하지만 다음의 3가지 단계에 따라 수행된다(Fig. 8).

- ① 지하공간에서의 화재사고 사례의 수집과 분석
- ② 내화설계의 대상과 해당 구조체에서 발생할 것으로 예상되는 화재규모와 발생확률 등의 예측분석
- ③ 화재규모와 내화수준(화재 후 구조체의 강도열화

등)의 설정

#### 4. 모형화재실험

##### 4.1 화재시나리오

Khoury(2002)는 화재에 의한 구조물의 영향은 구조물에 작용한 화재의 특성에 좌우된다고 하였다. 이러한 화재의 특성은 구조물 표면에 작용한 화재의 시간-온도 곡선으로 표현될 수 있으며, 발생한 화재의 주요한 특성은 다음의 4가지 사항으로 정리할 수 있다.

- ① 가열속도(heating rate) : 가열속도는 시간에 따라

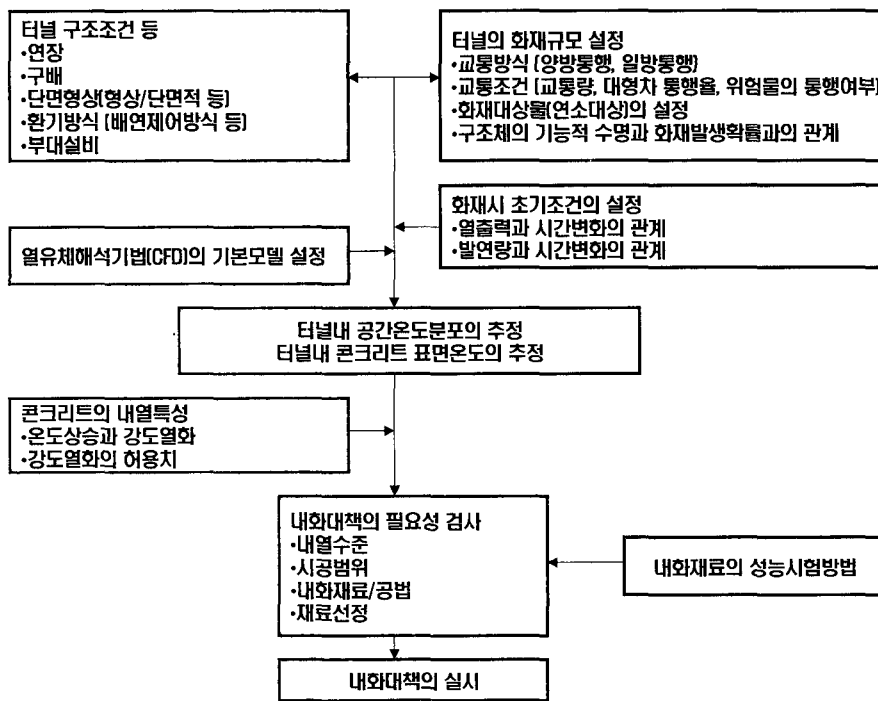


Fig. 8. A basic procedure to determine a fire-protection level of a tunnel

Table 5. Representative tunnel fire tests in Japan

Organization	Testing site	Testing date	Tunnel length	Testing object	Specimen
Building Research Institute	Building Research Institute	-	-	Furnace	PC concrete plate
Japan Highway Public Corporation	中國道加計東tunnel	1983.1.19~1.24	3,277m	Two-lane road tunnel	Main tunnel
Tokyo Fire Department	首都高麗 三宅坂IC	1964.7.21	1,370m	Two-lane road tunnel	Main tunnel
Japan Highway Public Corporation	第2東名清水 第3tunnel	2001.2.28~3.8	1,119m	Three-lane road tunnel	Main tunnel

온도가 상승하는 비율을 말하며 콘크리트의 온도, 함수량 및 공급압에 의해 영향을 받는다.

- ② 최대온도 : 콘크리트의 물리·화학적 특성에 의해 영향을 받는다.
- ③ 화재지속시간
- ④ 냉각시간

터널은 폐쇄된 구조적인 특징에 의해 건축구조물에서 발생한 화재와 달리 더 높은 온도에 도달할 수 있다. 또한 소방대와 소방설비의 접근이 어렵기 때문에 화재가 더 오래 지속되는 특징을 가지고 있다. 따라서 건축구조물에 적용되는 일반적인 화재곡선과 다른 시나리오의 시간-온도곡선을 사용하여야 한다.

Fig. 9는 각 국의 화재 시 시간-온도곡선을 나타낸 것이다. 많은 화재곡선 중 가장 최악의 조건을 고려한 화재곡선은 네덜란드의 RWS hydrocarbon 곡선이다. 이 곡선은 5분에 1,100℃에 도달되어 60분 후에 1,350℃에 이르게 된다. 5분에 556℃에 도달하여 30분후에 822℃에 이르는 ISO 834 곡선은 터널에서 소형화재가 발생하였을 경우 사용하게 되며, 5분에 1,200℃에 도달되어 30~90분 동안 1,200℃를 유지한 후 110분 동안 냉각되는 RABT곡선은 실제 터널에서의 화재와 가장 유사한 형태의 화재곡선이다.

국제상설도로회의(PIARC)에서는 터널에서 화재가 발생하였을 경우 다음과 같이 차량 등의 연소물질에 따라 터널의 천단부와 측벽부의 최대온도(화염이 천정부나 벽면에 닿을 경우)를 제시하고 있다(ITA WG-6, 2004).

- ① 소형차: 400℃
- ② 버스, 소형화물차: 700℃
- ③ 연소물질을 실은 대형화물차: 1,000℃
- ④ 휘발유 실은 유조차(일반): 1,200℃
- ⑤ 휘발유 실은 유조차(특수): 1,400℃

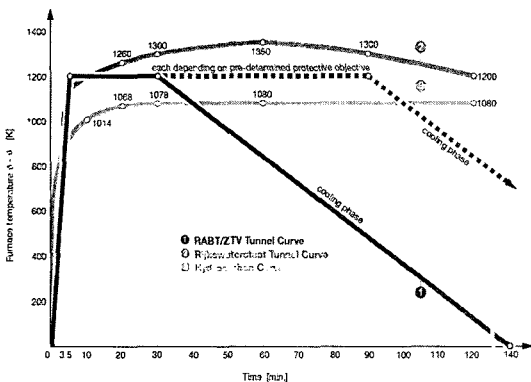


Fig. 9. Representative fire scenarios used in Europe

#### 4.2 국내 모형화재실험

박해균 등(2003)은 쉘터터널에 사용되는 세그먼트 라이닝을 대상으로 내화성능실험을 국내에서 처음으로 수행하였다. 하지만 국내에 RABT 곡선을 모사할 수 있는 실험장비가 없는 관계로 일본에서 실험을 수행하였다. 이 연구에서는 화재 시 세그먼트의 내화성능을 알아보기 위하여 폴리프로필렌 섬유 혼입유무(무혼입 및 1.0 kg/m<sup>3</sup>)에 따라 2개의 시편(폭: 700 mm, 길이: 1,400 mm, 두께: 220 mm)을 제작하였고, 지반하중을 고려하기 위하여 6.5 MPa의 축력을 시험체에 작용시켰다. 시험체 및 폴리프로필렌 섬유의 특성은 다음의 Table 6과 같다.

Table 6. Characteristics of the specimen and the polypropylene fiber used in fire tests of concrete segments

Standard strength of concrete segments		24MPa
Polypropylene fiber	Specific gravity	0.91
	Melting point	160℃
	Length	20 mm
	Diameter	48 μm

이 실험에서는 독일의 RABT곡선을 화재시나리오로 적용하였으며, 최대온도 지속시간은 60분으로 설정하였다. 폴리프로필렌을 첨가하지 않은 시편에서는 가열 17분 만에 폭렬로 인하여 실험이 중단되었고, 1.0 kg/m<sup>3</sup>의 폴리프로필렌 섬유를 혼입한 시편에서는 170분간의 가열시간 동안 일부 구간에서 약 5 mm 정도의 폭렬에 의한 손상을 나타냈다. 이 실험을 통하여 터널 콘크리트의 내화성능 향상을 위하여 폴리프로필렌 섬유의 혼입이 효과적이라는 사실을 확인하였다. 이는 폴리프로필렌 섬유가 고온에서 용해되면서 내부의 수증기가 콘크리트 내부의 공극을 따라 외부로 배출되면서 폭렬을 완화시켰기 때문인 것으로 지적하였다.

#### 4.3 HOCHTIEF의 모형화재실험

터널에서 내화대책으로 사용되고 있는 판넬(fire protection panels)과 외장재(fire protection facings)는 터널 안에서의 진동과 습기의 영향으로 유지보수가 어려운 단점을 가지고 있다. 이와 같은 문제로 인하여 내화 콘크리트를 만들려는 노력이 수행되었고 독일의 HOCHTIEF에서는 iBMB(Institute für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz)와 공동으로 합성섬유(synthetic fibres)와 특수골재(special aggregate)를 사용한 화재저항 콘



크리트를 개발하였다. 터널에서의 화재는 터널라이닝에 폭발을 발생시키고 이 폭발은 구조체에 다양한 손상 메커니즘을 일으킨다. 이러한 손상 메커니즘은 작업하중 (working loads)과 열에 의한 변형사이의 상호작용에 의해 발생하며 크게 열-수리적(thermo-hydraulic) 과정과 열-역학적(thermo-mechanical) 과정으로 나타난다.

열-수리적 과정은 화재에 의해 콘크리트 온도가 상승하여 내부의 수증기가 이동하게 되고 화재면으로부터 일정한 거리에 떨어진 콘크리트 내부지점에서 포화되어 수증기가 더이상 이동하지 못하게 되면 콘크리트 단면이 박락되는 과정이다. 열-역학적 과정은 열에 의해서 콘크리트 내부에 있던 골재가 압축에 따라 팽창하고, 시멘트는 건조된 후 화학적 변화에 의해 수축되면서 변형이 발생하는 과정을 말한다.

HOCHTIEF에서는 내화콘크리트 개발의 첫 단계로써 열-수리적 과정을 방지하기 위하여 약 160℃에서 녹는 합성섬유를 사용하였다. 즉, 콘크리트가 열을 받아서 160℃이상이 되면 섬유가 녹아서 콘크리트 내부에 미세한 모세관 공극을 형성시켜 수증기가 움직일 수 있는 통로를 형성시켜주는 방법을 사용하였다.

HOCHTIEF에서는 Fig. 10과 같은 시험편을 사용하여 화재 거동시험을 실시하였다. 독일의 RABT곡선을 적용하였고, 50개 이상의 시험편에 대하여 콘크리트 배합, 보강재 배열, 골재의 종류, 화재 노출면의 크기 및 재하하중 등의 5가지 사항을 시험변수로 고려하여 실험을 수행하였다(Dorgarten et. al., 2004).

화재실험결과, 합성섬유량이 폭발에 가장 큰 영향을

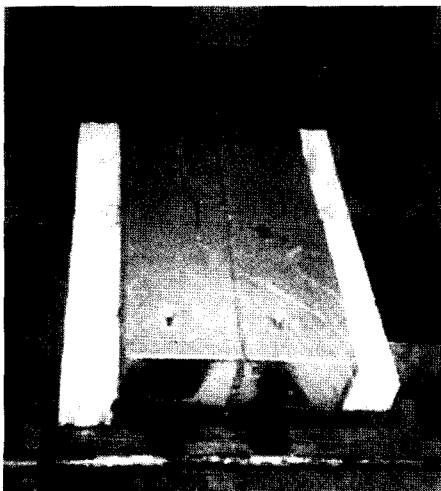


Fig. 10. Test specimen on top of a fire chamber in HOCHTIEF

미치는 것으로 나타났으며, 강도가 높을수록 모세관 공극적이 작게 나타났다. 이것은 강도가 높고 밀도가 클수록 섬유량을 증가시켜야 한다는 것을 의미한다. Fig. 11은 사용된 섬유량에 따른 폭발의 깊이를 나타낸 것이다.

HOCHTIEF에서는 사전 이론 연구를 통하여 화재 이전과 화재 발생 동안 터널 라이닝에 작용하는 실제 응력상태를 규명하였고, 지반하중과 지하수압을 고려할 수 있도록 외부 유압축을 사용하여 실물크기의 아치형 프리캐스트 세그먼트를 대상으로 Fig. 12와 같이 독일 TU Braunschweig의 실내 실물크기 화재시험장치를 사용하여 실험을 수행하였다.

실험결과, Fig. 13과 같이 열하중은 사용된 시간-온도 곡선인 RABT곡선과 잘 부합되는 것으로 나타났다. 또한 Fig. 14와 같이 피복두께가 6 cm 일 때 최대온도가 365℃로서 영구변형을 일으키는 한계온도 이하인 것으로 나타났다.

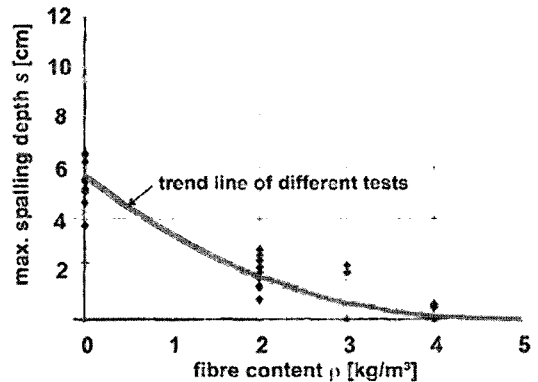


Fig. 11. Maximum spalling depth depending on fibre content

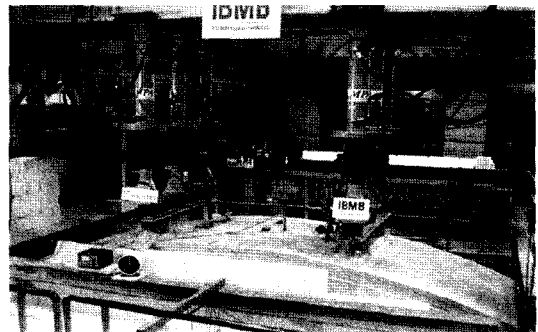


Fig. 12. Full-scale fire test with recently developed fire proof concrete at the TU Braunschweig, Germany

실내 실물크기 실험에 사용된 재하하중은 21 N/mm<sup>2</sup>이었으며, 세그먼트의 파괴 징후는 보이지 않았고 폭렬은 발생하지 않았다. 표면일부를 제외하고 35 MPa 이상의 압축강도가 얻어졌고 중성화된 깊이는 약 2 cm로 나타났다.

**4.4 일본 교토대학교의 모형화재실험**

일본 교토대학교에서는 현재 설터널에 널리 사용되고 있는 RC세그먼트를 합성 세그먼트(composite segment)로 변경할 경우 굴착단면의 감소로 인한 장점을 확보할 수 있으므로, Fig. 15와 같은 합성 세그먼트를 대상으로 화재시 세그먼트와 조인트부의 강도저하, 콘크리트와 강재의 특성의 변화, 콘크리트내의 온도분포 및 다양한 내화재료의 효과를 파악하기 위한 실험을 수행하였다 (Yasuda et al., 2004).

시험편은 2개의 합성 세그먼트를 횡방향으로 연결하여 제작하였고 시험편에는 tendon을 사용하여 프리스트레스를 가하였다. 8개의 tendon에 긴장력을 550 kN으로 가하여 세그먼트에 11.7 MPa의 프리스트레스를

주었다. 세그먼트의 크기는 길이 2.5 m, 폭 1.5 m, 두께 0.25 m이며, 시험동안 시험편 표면을 비디오카메라로 관찰하였다. 시험의 온도를 측정하기 위하여 세그먼트의 깊이 방향으로 50 mm 간격마다 콘크리트, 강재 거더(girder) 및 조인트부에 열전대(thermocouple)를 설치하였다. 시험 가열로의 크기는 길이 4 m, 폭 4 m, 높이 3 m이며 Fig. 16과 같다.

실험은 독일의 RABT곡선에 따라 수행되었으며, 실험결과 내화대책을 사용하지 않은 경우에는 Fig. 17과 같이 폭렬이 최대 60.2 mm까지 발생하였고 보강 bar가 노출되었으며 수밀용 실링재(sealing material)가 전소되었다.

Fig. 18은 내화대책을 하지 않은 시험편의 표면온도를 측정한 것이다. 가열로내의 온도가 800℃에 도달했을 때 세그먼트의 표면에서 폭렬이 발생하였으며, 그 후 약 10분 동안 폭렬이 계속되었다는 것을 알 수 있다. 또한 폭렬이 발생하는 동안 가열로내의 온도는 계획된 RABT곡선의 온도보다 낮다는 것을 알 수 있다.

내화대책을 실시한 경우에는 폭렬은 발생하지 않았으

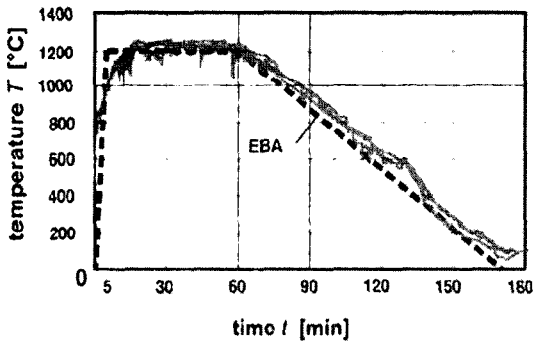


Fig. 13. Temperature in the fire chamber during a test

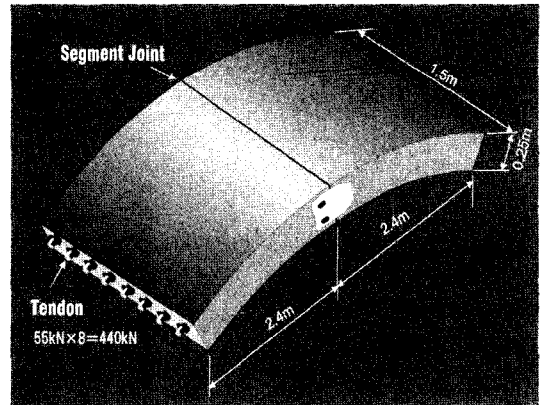


Fig. 15. Test specimen of composite segment

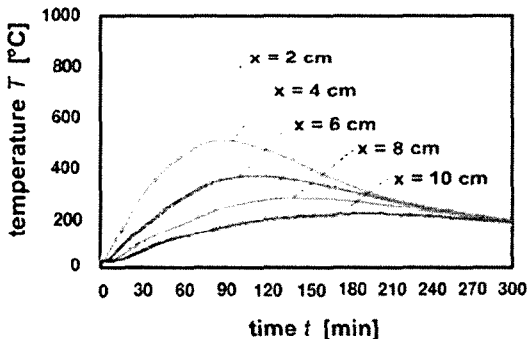


Fig. 14. Temperature distribution in the concrete cross section

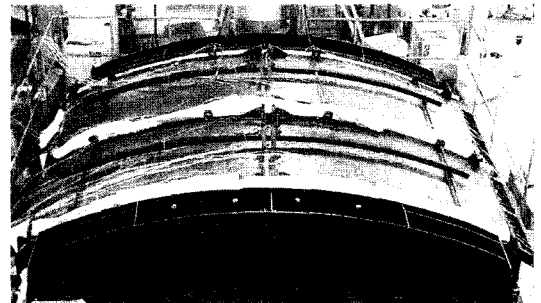


Fig. 16. Composite segment installed in a large-scale furnace

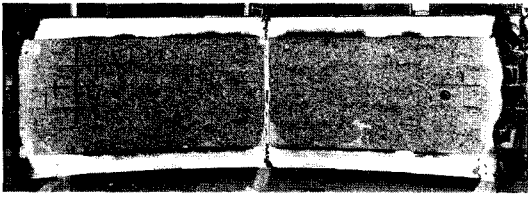


Fig. 17. Spalled surface of the segment without fire protection

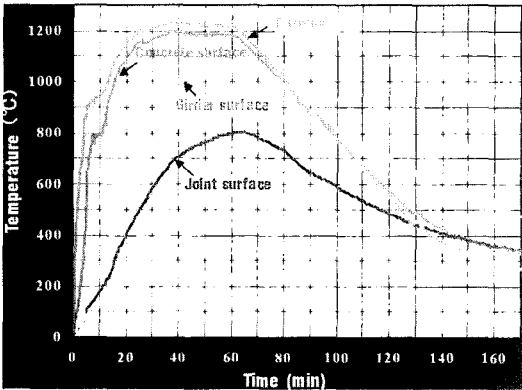


Fig. 18. Surface temperature of the unprotected specimen

며, 보드(board)타입의 내화재를 사용한 경우에는 냉각되는 동안 보드에 균열이 발생하였다. 반면 실리카 섬유(silica fiber) 타입의 경우 금속 프레임과 플레이트에서 약간의 변형이 발생하였고, 스프레이 모르타르(spray mortar) 타입에서는 미소균열과 약간의 탈색을 제외하고는 손상이 발생하지 않았다. Fig. 19는 내화재를 사용한 시험편의 표면온도를 나타낸 것이다. 열전도율의 차이로 인하여 콘크리트와 조인트 금속재의 온도분포가 다르게 나타났다.

화재실험 후 시험편으로부터 코어를 채취하여 압축시험과 중성화 깊이측정을 실시하였다. 내화재를 사용한

세그먼트는 압축강도 및 탄성계수의 변화가 발생하지 않았으나, 내화재를 사용하지 않은 세그먼트의 경우는 압축강도가 약 50% 감소하였고 탄성계수는 25%수준으로 감소되었다. Fig. 20은 화재실험 후 수행한 압축강도와 탄성계수의 변화를 나타낸 것이다.

Fig. 21은 화재실험 후 채취된 코어로부터 측정된 탄화를 나타낸 것이다. 약 500°C이상의 온도에서 중성화가 발생하였으며, 이때의 중성화 깊이는 가열면으로부터 약 50 mm이다.

### 5. 결론

터널 화재에 관한 국외의 연구는 지형적으로 터널이 많이 분포된 유럽지역을 중심으로 광범위하고 다양하게 수행되고 있다. 유럽지역의 연구는 1990년대에 화재현상과약, 화재시의 피난과 구조, 화재에 의한 주변 구조물의 손상, 보수·보강 등 터널에서 화재가 발생하였

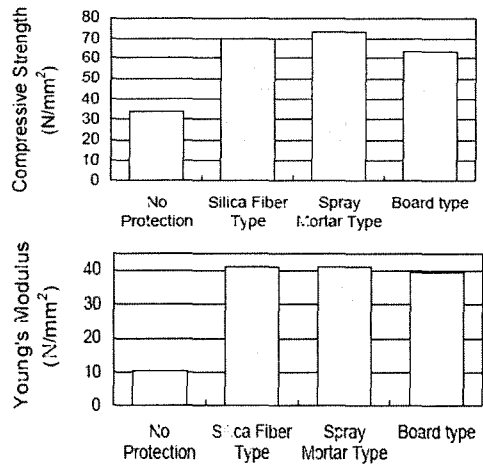


Fig. 20. Compressive strength and Young's modulus of the concrete after the heating

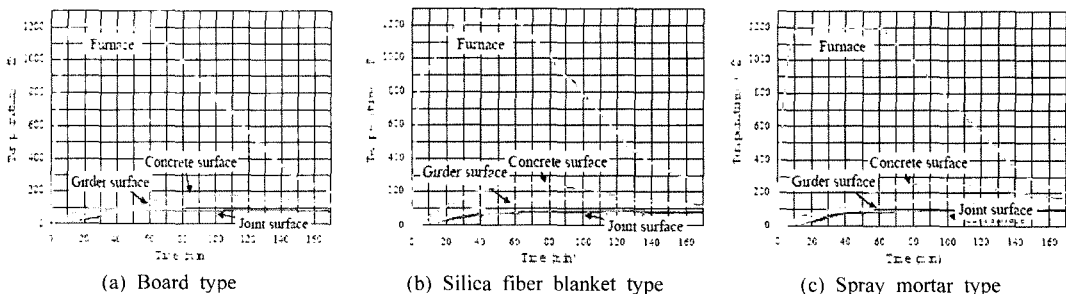


Fig. 19. Surface temperature of the protected specimen

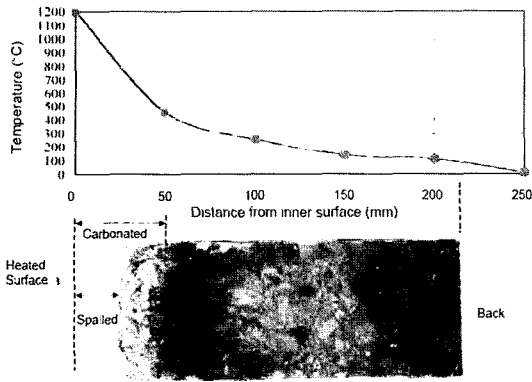


Fig. 21. Carbonation of the concrete by the heating

을 경우에 최적의 인적, 물적 보호를 위한 방법을 연구한 EUREKA 프로젝트를 시작으로 많은 연구가 수행되어 현재 FIT, UPTUN 등과 같은 터널화재에 관한 종합적인 프로젝트를 수행하여 최종적으로 통합된 유럽의 화재안전 가이드라인을 만들고 있다. 또한 자체 재원확보를 위한 프로그램을 제안하고 수행하여 유럽내의 화재안전연구에 대한 중복투자를 막고 지속적으로 연구를 계속할 수 있는 방안을 추진하고 있다.

미국은 MTFVTP 프로그램 이후 터널화재안전에 대한 연구가 진행되지 않고 있으며, 주로 빌딩과 같은 지상에서의 화재와 연관된 폭발연구가 많이 발표되고 있다. 일본은 유럽과 마찬가지로 비교적 산악지형이 많아 터널안전에 관한 연구가 많이 진행되고 있다. 일본은 터널의 내화설계에 대한 구체적인 기준을 세웠으며, 내화재에 대한 연구도 상당히 진행된 상태이다.

지금까지의 연구결과를 살펴보면 EUREKA 프로젝트에서는 다양한 터널라이닝에 대한 연구를 수행하였으나 최근의 연구결과를 보면 대부분의 연구가 Shield TBM 터널의 세그먼트 라이닝에 집중되어 발표되고 있다. 따라서 NATM 터널, 침매터널, 복개터널 및 싱글셀 터널 등과 같이 지하구조물의 종류 및 특성에 따른 화재로 인한 지하구조물의 재해손상평가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

국제적으로 많은 모의 화재실험들이 수행되고 있으나 화재실험시 가장 근간이 되는 화재온도이력곡선에 대한 국제적인 기준이 확립되어 있지 않으며, 표준화된 모형화재 실험법과 실험장비가 제시되지 않고 있다.

현재까지 지하구조물 시공재료의 폭발특성에 대한 연구는 단지 콘크리트의 재료적인 측면만이 주로 고려되었다. 최근 들어 독일의 HOCHTIEF와 일본의 교토대학교에서 수행된 화재실험과 같이 지반하중을 고려한 연구 및 지반과 지하구조물의 상호작용을 고려하는 연

구가 필요하다. 이를 위해서 모의 화재실험 시 지반과 지하구조물의 상호작용을 고려할 수 있는 요소기술에 대한 연구가 필요하다.

현재 화재시 터널의 구조물에 가장 큰 영향을 미치는 폭발에 대한 대처방법으로 폴리프로필렌 섬유가 대두되고 있으나, 변위나 처짐 등의 변형이 억제되어야 하는 폐합된 지하구조물에서 폴리프로필렌 섬유의 적용 가능성에 대한 의문이 제기된 바 있다(Hertz, 2003).

지하구조물의 내구성과 안정성 측면에서 고성능 콘크리트를 개발하여 적용하여야 하나 고강도/고내구성 콘크리트 일수록 폭발과 같은 화재손상에 취약한 단점을 가지고 있다. 따라서 콘크리트의 내화성을 높이기 위한 합성섬유나 특수골재 등의 적용성 평가연구와 지하구조물의 내구성, 안정성 및 화재 시 재해최소화를 고려한 최적 설계기법의 개발이 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부 건설핵심연구개발사업인 “지하공간 환경조성 및 방재기술 개발 - 지하구조물 재해손상 대응기술 개발”의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 대구지하철공사, 2003, 대구지하철 1호선 중앙로역 정밀안전진단보고서.
2. 박해균, 이승복, 이명섭, 김재권, 2003, 터널 화재에서의 콘크리트 내화대책, 한국도시방재학회지, 제3권, 제2호, 65-69.
3. 박해균, 이승복, 이명섭, 김재권, 2003, 쉴드터널 콘크리트 세그먼트의 내화특성 연구, 2003년도 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 4801-4804.
4. 한국콘크리트학회, 2003, 콘크리트 구조설계기준 해설.
5. 栗岡均, 1998, トンネル火災事故と今後の課題, 火災, 48.5, 5-10.
6. 日本コンクリート工學協會, 2003, 콘크리트構造物의 火災安全性研究委員會 報告書.
7. 日本火災學會, 1997, 火災便覽 第3版, 共立出版.
8. Carvel, R., 2002, The history and future of fire tests, Tunnels & Tunnelling International, November 2002, 34-35.
9. Dorgarten, H.W., Balthaus, H., Dahl, J. and Billig, B., 2004, Fire-resistant Tunnel Construction: Results of Fire Behaviour Tests and Criteria of Application, Proc. of ITA-AITES 2004, Paper No. B06
10. Haack, A., 1998, Fire Protection in Traffic Tunnels: General Aspects and Results of the EUREKA Project, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 13, No. 4, 377-381.
11. Haack, A., 2004, Latest Achievement and Perspectives in Tunnel Safety, Proc. of ITA-AITES 2004, Paper No.

A01.

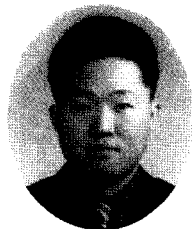
- 12. Hertz, K.D., 2003, Limits of spalling of fire-exposed concrete, Fire Safety Journal, Vol. 38, 103-116.
- 13. ITA WG-6, 2004, GUIDELINES FOR STRUCTURAL FIRE RESISTANCE FOR ROAD TUNNELS.
- 14. Khoury, G.A., 2003, EU tunnel fire safety action, Tunnels & Tunnelling International, April 2003, 20-23.
- 15. NIST, 2000, FIFTEENTH MEETING OF THE UJNR PANEL ON FIRE RESEARCH AND SAFETY, March 1-7, 2000, Vol. 2, NISTIR 6588.
- 16. Yasuda, F., Ono, K. and Otsuka T., 2004, Fire Protection for TBM Shield Tunnel Lining, Proc. of ITA-AITES 2004, Paper No. B09.

**장 수 호**



1996년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
1998년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학석사  
2002년 서울대학교 대학원  
지구환경시스템공학부 공학박사  
Tel: 031-910-0661  
E-mail: sooho@kict.re.kr  
현재 한국건설기술연구원 지반연구부  
선임연구원

**최 순 욱**



1997년 건국대학교 공과대학 토목공학과  
공학사  
2004년 연세대학교 공학대학원 공학석사  
  
Tel: 031-910-0243  
E-mail: soonugi@kict.re.kr  
현재 한국건설기술연구원 지반연구부  
연구원

**이 규 필**



1994년 한양대학교 공과대학 토목공학과  
공학사  
1997년 한양대학교 대학원 토목공학과  
공학석사  
2004년 한양대학교 대학원 토목공학과  
공학박사  
Tel: 031-910-0522  
E-mail: freely@kict.re.kr  
현재 한국건설기술연구원 지반연구부  
연구원

**배 규 진**



1980년 국립경북대학교 농공학과  
공학사  
1982년 연세대학교 대학원 토목공학과  
공학석사  
1990년 연세대학교 대학원 토목공학과  
공학박사  
Tel: 031-910-0212  
E-mail: gjbae@kict.re.kr  
현재 한국건설기술연구원 지반연구부  
연구부장/연구위원