P-23

침매터널 내화설계에 관한 조사 분석적 연구

이영재 · 김흥열 · 신현준 · 김형준**
한국건설기술연구원 · ** (주)종합건축사사무소 광일건축

An Examining and Analyzing Study on the Fire Resistance Design for Immersed Tunnels

Lee, Young Jae · Kim, Heung Youl · Shin, Hyun Jun · Kim, Hyung Jun**
Korea Institute of Construction Technology · ** Kwang Il Architecture Co. Ltd

요 약

Recently, Busan-Geoje fixed Link Immersed Tunnel and the Tokyo Port Waterway 2 Submarine Tunnel have been constructing. Furthermore it was mentioned to construct an immersed tunnel from Korea to Japan. As a result, it is expected that the demand to use the immersed tunnel will be increased. However, if a fire occurs in the immersed tunnels, it will damage tunnel elements and not save human lives more seriously than normal tunnels on the ground because of the absence of exits as well as closing structure of the immersed tunnels. In fact, the fire accident in the Eurotunnel which connects between France and the Unite Kingdom through the immersed tunnel had occurred twice in 1996 and 2008, and the inner surface of the tunnel got damaged such as concrete popout and structural damage. As a result, not only economic injury but enormous expense to repair and reinforce the tunnel were derived because of the suspension of traffic after the fire happened. Now, from the examining and analyzing study on the fire resistance of immersed tunnels in developed countries and Busan-Geoje fixed Link Immersed Tunnel, we suggest the establishment method of fire resistance to insure the fire safety of immersed tunnel.

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 자동차에 의한 물류교통의 증가에 따라 국내외에서 많은 터널 화재사고가 보고되고 있다. 토목 구조물 중에서도 지중에 시공되는 터널 구조물은 이용공간이 폐쇄되어 있으므로 소화활동이 곤란하고, 화재사고 피해는 커지기 쉬우며, 화재 후의 보수 보강 또한 곤란한 실정이다. 또한 최근 일본 도쿄항로 제2 해저터널(2001)과 부산-거제간 침매터널 등이 건설되고 있는 추세이며, 한-일 간 해저연결 침매터널건설에 관한 이슈도 제시되고

있는 실정이다. 외부에 노출된 교량, 댐 등과 같은 대표적인 토목 구조물과는 달리 침매터널에서의 화재발생시 일반 도로터널화재에 비해 폐쇄성 및 대피로 부재로 인해 대형인명피해로 귀결될 수 있는 위험성이 상존하고 있다. 실제 영국과 프랑스를 연결하고 있는 유로터널의 경우 2번(1996년, 2008년)의 화재가 발생하여 구조물손상 및 폭렬현상이 유발되었고, 이로 인해 화재 후 터널통행 금지로 인한 경제적 손실 및 막대한 보수·보강비용이 파생되었다.

터널 내화관련 최고의 기술을 보유한 유럽에서는 이미 오래전부터 터널의 화재 안전성을 중요시하여 이에 대한 연구 개발이 진행되고 있으며 가까운 일본에서도 터널 방재 개념으로 화재안전시설에 대한 관심과 함께 터널 콘크리트의 화재 안전성에 대한 보고서를 발간하는 등 전 세계적으로 터널 내화성능에 대한 관심이 고조되고 있는 상황이다. 따라서 본 연구에서는 선진외국의 침매터널의 내화설계현황과 국내 부산-거제간 내화시방기술에 관한 조사 및 분석을 통해 침매터널의 화재안전을 확보할 수 있는 내화설계 확립방향을 제안하고자 한다.

표 1. 국외의 대표적인 터널 화재사고 현황

터널명	발생년도	복구기간	피해금액(US$)
Channel tunnel (Euro tunnel)	1996	6달	350 million US$
Mont Blanc tunnel	1999	3년	273 million US$
Tauern tunnel	1999	3년	6 million US$
Cotthard tunnel	2001	2년	25 million US$

2. 최근 발생된 국내외 터널 화재사고 사례

2.1 해외 터널 화재사고

최근 유럽을 시작으로 각국에 있어 침매터널을 포함하여 장대터널에서의 화재사고가 발생하여 그 피해가 보고되고 있다. 1999년 3월 프랑스~이탈리아의 Mont Blanc 터널, 동년 5월 오스트리아의 Tauern터널, 최근 2008년 9월에 발생한 영국과 프랑스를 연결하는 Euro터널에서 부상자가 14명을 발생시키는 등 대규모 화재가 발생하였다. Mont Blanc 터널(사망 41명)화재의 경우 천정부의 심각한 손상이 약 900m 구간에 영향을 미쳤으며, Tauern터널(사망 11명)에서는 약 250m 구간에서 천정부의 철근 콘크리트가 폭렬로 인해 탈락, 장기간 터널의 사용이 중지되어 경제적인 면에 상당한 영향을 미쳤으며 사고가 발생된 대부분 터널에서 내부 온도가 1,000℃ 이상에 달하였다고 보고하고 있다. 표 1은 국외의 대표적인 터널 화재사고 현황을 나타내고 있다.

2.2 대구지하철 중앙로역 화재사고

대구지하철 1호선 중앙로역 화재사고는 2003년 2월 대구 지하철 1호선 중앙로역 하행선 전동차의 객차내 방화로 발생하였고, 이어서 진입한 상행선 전동차로 화재가 확산되면

서 화재가 더욱 커져 사망 192명, 실종 21명, 추정 손실액 570억원이 발생한 대형 터널 화재사고였다. 주요 손상으로는 박리, 박락, 철근노출, 횡방향 균열 등이 조사되었다. 이러한 손상과 더불어 슬래브 부분에서의 폭렬된 깊이는 평균 100mm 내외로 확인되었다. 또한 화재로 인한 콘크리트 라이닝의 수열온도는 전소된 선로상부의 슬래브에서는 최소 1,000℃ 이상의 고온이 발생하였으며, 그 외의 선로 부분에서는 500~1,000℃정도, 승강장 부분에서는 200~500℃의 고온이 수열된 것으로 분석되었다.

3. 침매터널에서의 내화 대책

3.1 내화의 필요성

터널 화재에서의 안전은 인명에 대한 안전과 구조물에 대한 안전 모두를 적용해야 한다. 터널 화재에 대한 안전 설계에서는 일반적으로 인명의 안전에 더 높은 가치를 두어왔고, 구조물에 대한 안전의 경우는 단순히 경제적인 관점으로 고려되어 왔다. 그러나 화재시 구조물의 상태 보전은 여러 면에서 인명에 영향을 준다. 일반적으로 화재 발생에 따라 먼저 터널을 이용하는 사람들에 의하여 화재의 연기와 열 등이 감지되고, 사람들이 대부분 대피한 다음 콘크리트의 탈락이 발생하는 것이라고 인식되고 있다. 그러나 이와 같은 인식은 매우 위험한 결과를 초래할 수 있고 재정적, 사회적 및 경제적인 영향을 발생시킨다.

3.2 일본의 도로터널 내화기준

터널 화재에 따른 구조적인 거동은 여러 가지 인자에 따라 매우 달라질 수 있는 화재의 특성을 지니고 있다. 터널의 화재안전성 확보를 위한 최선의 방책은 터널화재시 구조체의 성능을 보호하기 위한 내화설계를 하고 요구사항을 만족하는 내화 대책이 이루어져야 한다. 터널화재안전을 확보하기 위하여 콘크리트 구조체를 보호하기 위한 다수의 내화자재가 제조되고 있으므로 각 자재의 표준시공방법에 따라 부착하여 내화성능을 적합하게 발현할 수 있게 해야 한다. 표 2는 침매터널에 사용되는 재료의 내화온도를 나타내며 표 3은 내화 코팅재료의 성능필요조건을 보여준다.

앵커 볼트를 사용하여 콘크리트 표면에 직접 내화코팅보드를 설치하였다. 각각의 보드에 사용되는 앵커볼트의 개수와 볼트의 설계강도는 판의 무게와 차량의 이동에 의해 생성되는 공기량에 의해 계산된다. 볼트는 노출된 기후에도 부식성이 없으며 내열성 및 콘크리트 터널 요소의 본체와 동일하게 사용된 USU 316볼트를 사용하였다. 또한 엇갈림배열과 비엇갈림배열의 2가지 내화 코팅 보드시공방법이 있는데 도쿄 제 2 침매터널에서는 엇갈림배열을 사용하였다.

또한 플렉서블 조인트에서도 내화코팅작업이 선행되어야 한다. 하지만 내화성과 지진 또는 온도변화에 의해 발생되는 조인트의 길이변화 등의 문제점이 발생된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 공기층에 세라믹 피복(두께=100mm) 구조를 채택하였고 구성요소의 온도와 관련하여 열전달 분석을 통하여 충족된 온도 요구사항이 확정되었다. 내화 코팅이 된 보드의 슬라이딩 메커니즘에서 조인트의 흡수율은 수축 및 팽창 90mm로 하였다.

표 2. 침매터널에 사용되는 재료의 내화온도[4)]

재료		특성	한계온도	온도특성
콘크리트		설계강도 39MPa	350	강도는 350~500℃사이에서 급격하게 감소한다. (650~700℃에서 강도의 절반까지 감소한다.)
강재		End steel shell SS400	300	강도는 300~400℃사이에서 급격하게 감소한다. (재료의 녹는점은 대략1,500℃이다.)
PC 케이블		SEEE-F 270 PC 케이블	150	강도는 150℃에서 급격하게 감소한다. (350~450℃에서 강도의 절반까지 감소한다.)
고무	천연 고무	GINA 타입 고무 가스켓 (경도=40°)	70	고무는 70℃에서 열화 되기 시작한다. (90~100℃에서 고무를 가공할 수 있다. 가공이 가능한 최대온도는 130℃이다.)
	합성 고무	2차 워터스톱 고무 (경도=60°)	75	고무자체의 탄성을 갖기 위한 최대온도는 75℃이다. (120~130℃ 범위에서는 여전히 작업성을 갖는다. 가공이 가능한 최대온도는 160℃이다.)

표 3. 내화코팅에 대한 성능요구조건

항 목	요 구 조 건
내 화	- 화재 온도에 노출될 때 내화성능한계 이하로 해저터널의 부재와 구성요소의 온도를 유지할 수 있어야 한다.
안 전	- 유독가스를 생성하거나 2차 참사를 발생하지 않아야 한다. - 손상을 입지 않아야 하며 차량 충돌 또는 파열로 인한 암석이나 석재의 파편으로 인한 충격으로 떨어져나가지 않아야 한다.
내 구 성	- 터널 내부의 온도, 습기, 배기가스에 의하여 황폐화 되는 것은 허용된 범위 안에 존재해야 한다.
유 지 성	- 유지가 쉬어야 한다. - 부분적인 교체가 쉬어야 한다.
워커빌리티	- 월등한 워커빌리티를 가져야 한다. (무게, 처리 과정 등)
외 관	- 아름다운 표면을 가져야 한다.

3.3 싱가포르의 침매터널 내화기준

지금 싱가포르에 있는 모든 터널과 침매터널의 도로는 화재가 발생한 후 4시간동안 견딜 수 있도록 한 내화설계와 중요터널구역 보호용 화재패널 시스템을 강화시킨 화재보호 시스템 설치 등 침매터널의 화재에 대하여 강도 높은 규정을 제시한다. 싱가폴의 침매너털 내화기준을 설정하기 위해 RWS 시간-온도 곡선을 사용하는 데 이 곡선은 모든 침매터널의 천장, 터널 벽위 25% 부분을 보호하는데 사용한다. 내화 시스템에 사용되는 재료는 BS 476:Part 4의 규정에 따라 불연성이어야 하고, 표면에서의 화재확장에 대하여 BS 476:Part 7에 따라 1등급이 되어야 한다. 콘크리트와 내화시스템 인터페이스의 온도는 380℃를 넘지 않아야 하며 보강된 부위의 아래에서는 250℃를 넘지 않아야 한다.

중요터널에서 강화된 구조체 면적과 단면 부위에 증가된 구조적 화재 보호로써 내화 패널 시스템을 사용한다. 터널구조콘크리트와 철근보호에 사용되는 내화성 패널소재는 표 4와 같은 물리적 특성을 가져야한다.

표 4. 싱가포르 침매터널에 사용되는 내화재료의 특성

특성	서술	특성	서술
재료특성	DIN 4102와 BS476:part4에 의거한 비연소물질	화재표면확산	1등급(BS476:part7)
비중	900kg/m^3	열전도성	20℃에서 0.17W/mK
단열성	25mm 패널 -0.143m^2K/W	오차길이	3,000×1,200×27mm 보드
흡수성	최대 0.55a/cm3		길이&폭: ±0.5mm
함수량	기건상태측정 7%정도		시점: 대각선방향 ±1mm
열전달계수 k	25mm 패널-3.20W/m^2K		두께: ±0.5mm

보드의 내화성, 고정볼트의 지름 및 길이, 콘크리트와의 정착깊이, 그리고 조인트와 가장자리의 실링 등은 RWS 시간-온도 곡선에 따라 실험된다. 실험에서는 풀사이즈 보드를 사용한다. 내화보드보호시스템은 RWS에 의거하여 최소 120분간 1,350℃를 견뎌야 하며 콘크리트와 보드인터페이스의 최대온도 380℃, 보강된 콘크리트 커버 위 온도는 최대 250℃를 견뎌야 한다.

3.4 국내의 침매터널 내화기준

국내에서도 최초로 부산-거재간 침매터널을 시공하고 있다. 그러나 국내에서는 침매터널에 대한 내화규정이 아직 전무한 상태이기 때문에 유럽의 BS 476-4:1704와 ISO 2859-1:1999의 규정을 따르고 있고, 부산-거재간 침매터널에 사용되는 재료의 내화특성에 대한 설명은 표 5와 같다.

표 5. 부산-거재간 침매터널에 사용되는 내화재료의 특성[5)]

항목	요구조건
BS 476:4	◦ 위 항목에 적합한 불연소성 재료
압축강도	◦ 최소 7.5N/mm^2
기타	◦ 습윤환경에 대한 내구성을 가질 것
	◦ 내식성을 가질 것
	◦ 표면이 구별가능하고 일정한 색상을 가질 것

내화자재의 설치시 가장 중요한 내화성능을 확보하기 위해서는 내화보드와 콘크리트 구조체와의 부착강도를 일정하게 유지하여야 하며, 화재 발생시 발생할 수 있는 유독성가스 방출량 및 시공성, 기수저항력 등을 고려한 요구 성능이 정립되어야 할 필요성이 있으므로, 이와 관련한 성능기준은 다음과 같다.

(1) 보드는 익스팬션 조인트와 일치하도록 가장자리에 위치하게 시공한다. 익스팬션 조인

트에서 조인트 두께의 변형에 대비하여 겹쳐지도록 시공한다.
(2) 콘크리트 타설 전에 거푸집에 고정시키는 보드는 굳지 않은 콘크리트나 물에 영향을 받지 않도록 조치를 취해야 한다.
(3) 브래킷 같은 내식성이 강한 정착물은 플레이트를 통과하여 콘크리트에 고정해야 한다.
(4) 사용되는 내화재료가 스프레이 형식이고 시공두께가 30mm를 초과하는 경우에는 콘크리트 구조체에 스틸메쉬로 보강한다. 스틸메쉬는 스테인리스 재질로 50×50×1.5mm를 사용한다.
(5) 내화재료의 최대 허용 두께는 40mm를 초과하지 않도록 한다.
(6) 허용오차는 두께 ±1mm이내, 길이와 폭 ±2mm 이내, 보와 보드간의 최대 간격은 2mm이다.

4. 결 론

침매터널의 화재안전을 확보하기 위해서는 터널조건에 따른 내화성능을 평가하고 화재손상범위를 규명하여 침매터널 구조물의 설계단계에서 내화성능을 확보해야 한다. 이를 통하여 구조물의 붕괴에 대한 안전성을 증가시키고 소방 및 구조 요원들에게 화재진압 시간을 제공할 수 있다. 화재선진국에서는 이미 침해터널에의 보호를 위한 지침과 규정이 제정되어 있으며 국제적인 침매터널 내화설계지침이 제정되는 추세이므로, 국내에 시공되는 침매터널의 화재안전성 확보를 위한 지침을 국내현실에 적합하게 수정하여 제시되어야 한다. 이러한 지침들은 기존 터널 및 신설되는 침매터널공사의 화재안전 확보를 위한 선진화된 내화설계 및 기술적 자료로 제공될 수 있고, 침매터널의 화재안전을 확보할 수 있는 경제적인 내화설계 확립방향을 제시할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부의 2003 건설핵심기술연구개발사업인 “지하공간 환경개선 및 방재기술 연구개발-지하생활공간 방재기술 개발(과제번호: C03-02)” 연구사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 최욱, 윤태국, 안상로, 최연왕, 김경환, (2006). “터널 화재사례 중심으로 본 내화처리 기술” 한국콘크리트학회지 제18권 6호
2. 박해균, 조남섭, 원종필, 김장호, 임윤묵, 이명섭, (2007). “시멘트계 재료를 이용한 터널 콘크리트 내화 공법 개발” 한국콘크리트학회지 제19권 3호
3. L.C.F. Ingerslev. (2005). "Considerations and strategies behind the design and construction requirements of the Istanbul Strait immersed tunnel" Tunnelling and Underground Space Technology 20
4. Koichiro, O., Toshiaki, Y., Hirobumi, I. and Takeshi, A., (2001). "Fire-Resistant Design of Tokyo Port Waterway 2 Submarine Tunnel (Immersed Tunnel) and Its Implementation" Tunnels and Underground Vol.32 No.9
5. Daewoo Eng.&Con. Co. Ltd. (2006). "Busan-Geoje Fixed Link Immersed Tunnel" Technical Specification for fire insulation