

## 시멘트계 재료를 이용한 터널 콘크리트 내화 공법 개발

Development of Tunnel Concrete Fire-Proofing Method Using Cement-Based Material



박해균\*  
Hae-Geun Park



조남섭\*\*  
Nam-Sup Cho



원종필\*\*\*  
Jong-Pil Won



김장호\*\*\*\*  
Jang-Ho Kim



임윤묵\*\*\*\*  
Yun-Mook Lim



이명섭\*\*\*\*\*  
Myeong-Sub Lee

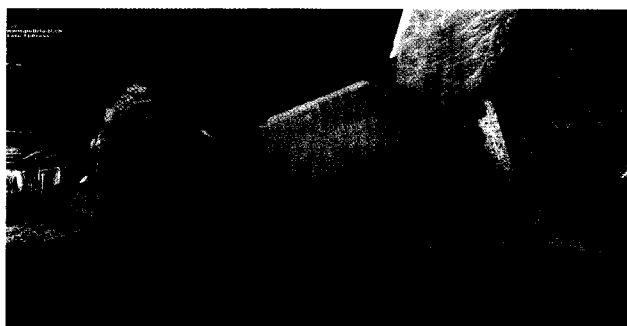
### 1. 서 론

최근 대규모 교통(도로, 철도)터널 화재가 세계 각지에서 발생하여 인명피해는 물론 사회적 손실 또한 무시할 수 없을 만큼 방대해 지고 있으며 국내에서도 대구지하철, 서울지하철 7호선, 그리고 구마고속도로의 달성2터널 등 <그림 1>에서 보는 것과 같이 터널 화재사고가 최근 빈번히 발생하고 있어 이에 대한 관심이 고조되고 있다. 일반적으로 건축 구조물에 적용하고 있는 내화규정(ISO 834곡선) 및 개념(고강도 콘크리트의 내화대책)과 터널 구조물에 적용되는 내화개념(일반강도 콘크리트에서 급격한 온도상승 조건의 내화대책)은 상당히 다르다. 외부에 노출된 교량, 댐 등과 같은 대표적인 토목 구조물과는 달리 폐쇄된 공간인 터널에서 화재가 발생할 경우, 터널 형식 및 종류에 따라 터널 붕괴라는 대형 참사로 이어질 가능성이 높으며, 최근 10 km 이상의 장대터널 시공이 점차 증가하고 있는 시점에서 화재 시 터널 콘크리트 구조체의 손상에 의한 사회간접자본의 피해와 교통지연 등 장기간 복구에 따른 경제적 손실 역시 더욱 현실적으로 나타나고 있다.

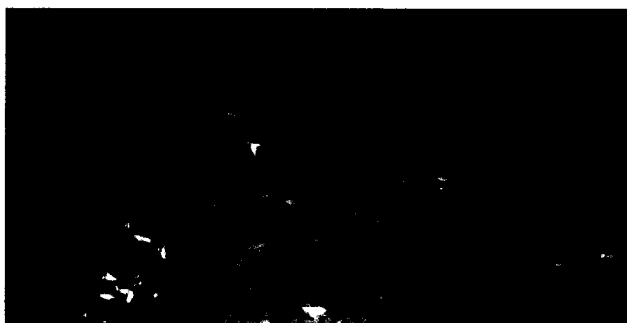
터널 내화관련 최고의 기술을 보유한 유럽에서는 이미 오래 전부터 터널의 화재 안전성을 중요시하여 이에 대한 연구 개발이 진행되고 있으며, 가까운 일본에서도 터널 방재 개념으로 화재안전시설에 대한 관심과 함께 터널 콘크리트의 화재 안전성에 대한 보고서를 발간하는 등 전 세계적으로 터널 내화성능에 대한 관심이 고조되고 있는 상황이다. 따라서 본고에서는 2004년부터 개발을 시작, 최소 30 ~ 40 mm의 시공으로 유럽의 대표적인 터널 화재온도곡선인 독일의 RABT규정(최고온도



(a) Euro 터널(1996)



(b) Gotthard 터널(2001)



(c) 달성2터널(2005)

그림 1. 국·내외에서 발생된 터널 화재 사고

\* 정회원, 삼성물산(주)건설부문 토목사업본부 토목ENG팀 차장  
hgpark68@samsung.com

\*\* (주)유니온 기술연구소 소장

\*\*\* 정회원, 건국대학교 사회환경시스템공학부 교수

\*\*\*\* 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수

\*\*\*\*\* 정회원, 삼성물산(주)건설부문 토목사업본부 토목ENG팀 부장

표 1. 국외의 대표적인 터널 화재사고 현황

터널명	발생 년도	복구기간	피해금액 (US\$)
Nipponzaka tunnel	1979	2달	33 million US\$ (only rehabilitation cost)
Channel tunnel (Euro tunnel)	1996	6달	350 million US\$
Mont Blanc tunnel	1999	3년	273 million US\$ (total rehabilitation cost)
Tauern tunnel	1999	3년	6 million US\$ (rehabilitation cost)
Gotthard tunnel	2001	2년	25 million US\$ (rehabilitation cost)

: 가열 5분에 1,200℃, 최고온도 지속시간 : 55분 이상)을 만족하는 새로운 터널 콘크리트 내화용 spray공법에 대해 간략하게 소개하고자 한다.

2. 최근 발생한 국내의 터널 화재사고 사례

최근 유럽을 시작으로 각국에 있어 장대터널에서의 화재사고가 발생하여 그 피해가 보고되고 있다. 1999년 3월 프랑스-이탈리아의 Mont blanc터널, 동년 5월 오스트리아의 Tauern터널, 2000년 11월 오스트리아의 Kaprun터널, 2001년 10월 스위스의 Gotthard터널 등 대규모 화재가 발생하였다. Mont blanc 터널(사망 : 41명)화재의 경우 천정부의 심각한 손상이 약 900 m 구간에 영향을 미쳤으며, Tauern터널(사망 : 12명)에서는 손상부분만 약 1.5 km 이상 이었고, Gotthard터널(사망 : 11명)에서는 약 250 m 구간에서 천정부의 철근 콘크리트가 폭발로 인해 탈락, 장기간 터널의 사용이 중지되어 경제적인 면에 상당한 영향을 미쳤으며 사고가 발생한 대부분 터널에서 내부 온도가 1,000℃ 이상에 달하였다고 보고하고 있다. 국내에서도 2002년 12월 무안 3터널, 2003년 6월 서울 홍지문 터널, 2003년 2월 대구 지하철, 2005년 1월 서울 지하철 7호선 온수역 유치선 터널, 그리고

표 2. 개발 터널 내화재료의 목표 물성

구분	기존제품	목표물성
압축강도(MPa)	7	20 이상
휨 강도(MPa)	2	4 이상
부착강도	-	1 이상
Heat resistance(1,200℃)	양호	양호
Initial set(hrs:min)	30분	5분 이내
길이변화율	±1.5%	±1.5%

2005년 11월 구마고속도로 달성2터널 등 화재에 따른 터널의 안전성에 대한 대책이 시급히 요구되고 있다.

3. Bottom ash를 이용한 터널 콘크리트 내화용 Spray공법

3.1 터널 콘크리트 전용 내화재료 개발

2004년부터 2년간 자체 기술개발과제로 “내화용 터널 콘크리트 라이닝 시스템 개발”을 위한 연구를 수행하였다. 본 과제는 국내 터널 환경에 적합한 시멘트계 내화재료를 개발하고 개발된 내화재료를 spray공법을 통해 적용하는 것을 목표로 개발을 수행하였다. 우선 시멘트계 스프레이용 내화재료 개발을 위해 유럽, 일본 등에서 사용실적이 우수한 외국 2개사의 기존 기성 제품을 입수하여 성분분석을 실시하였다. 성분 분석을 통해 국내 자체 생산이 가능한 내화골재 및 섬유 등 배합의 주요 구성 성분들을 확인하였으며, 성능 면에서도 기존 노후터널에서도 사용이 가능하도록 보수 + 내화(단열) 성능을 동시에 만족시킬 수 있는 재료 개발을 목표로 하였다. 일반적으로 콘크리트 보수에 사용되는 모르타르는 고강도이며, 내화에 사용되는 모르타르는 고단열성이 요구되는데 고단열성을 갖기 위해서는 강도는 낮아지는 것이 일반적이며, 사전 입수한 외국 제품 역시 28일 압축강도가 10 MPa 이하의 아주 낮은 값들이었다.

금번 새롭게 개발된 터널 콘크리트 전용 시멘트계 내화재료는 내화성능과 터널 내부의 풍압에 견딜 수 있도록 강도 증가 요구에 따라서 개발되었다. 주재료로는 시멘트, 내화골재, PP (polypropylene)섬유로 구성 되어 있다. 혼합된 PP섬유는 고온으로 인한 폭발 현상을 효과적으로 방지하며, 내화골재로 사용된 다공성의 bottom ash는 단열성능과 강도가 우수하며, 특히 화력발전소의 폐기물로 나오는 재활용 재료로 환경보호 차원에서 매우 유용한 재료이다. 본 재료의 재료비는 시멘트 : 골재비 = 1:1.5, 섬유 혼입율은 0.25%이며, 부착성능 강화를 위하여 1%의 급결제를 첨가 하였다. 비빔 시 물/내화용 재료의 비는 0.395이다. 현장에서 간편하게 배합·시공이 가능한 프리믹스 타입으로 spray방식이 가능하도록 개발되었다. 터널 콘크리트

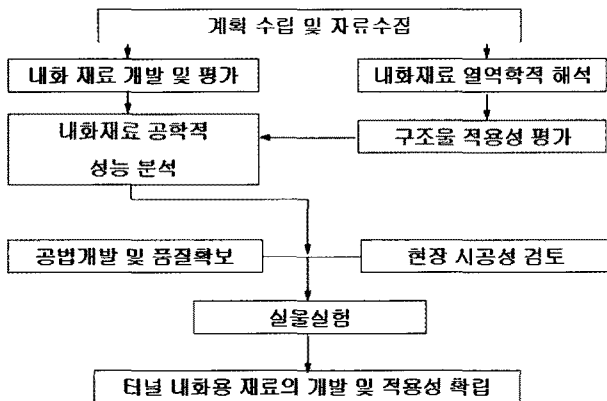
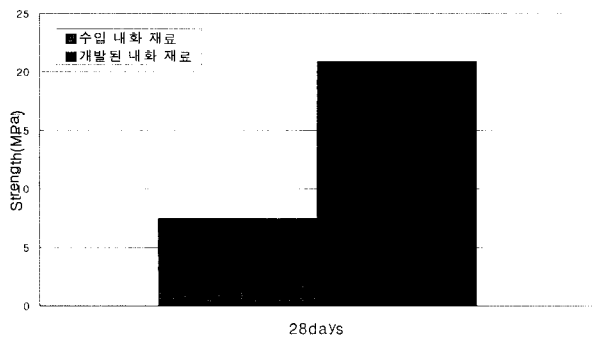
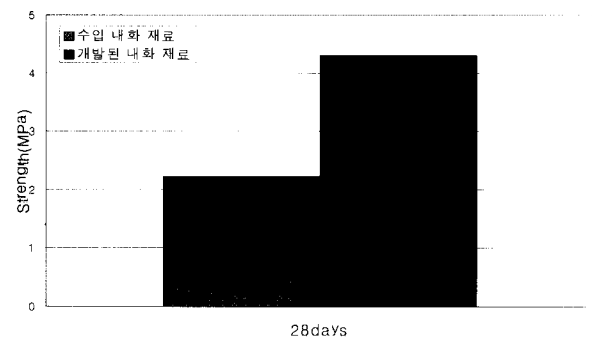


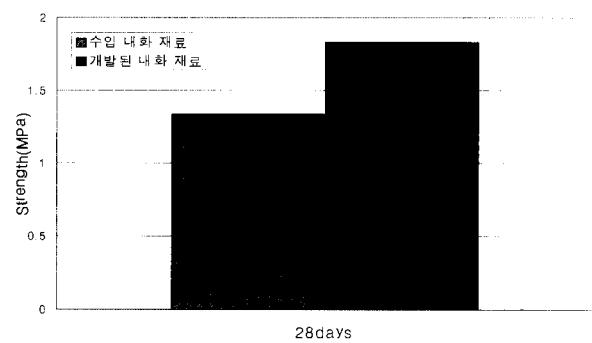
그림 2. 기술개발 목표 및 추진방법



(a) 압축강도 비교



(b) 휨강도 비교



(c) 부착강도 비교

그림 3. 개발된 터널 콘크리트 전용 내화재료의 강도 특성

전용 내화재료 개발을 위해 3단계의 연구단계를 거쳐 개발을 하였는데 우선, 첫 번째 과정은 서로 다른 종류의 재료를 이용하여 내화시험을 실시한 후 기본 배합비를 결정하는 것이다. 두 번째 과정으로 기본 배합비의 성능을 평가하기 위하여 내화특성 시험을 실시하였고, 세 번째 과정으로 내화용 시멘트계 재료의 성능을 목표성능 및 기존 상용제품과 비교하였다. 내화성 및 고강도를 위주로 하여 다양한 조성의 시작품을 제작하고 시험을 통하여 내화용 시멘트계 재료가 목표 값을 만족하는 각 원재료의 조성의 범위를 규명하였으며, 시험결과에서 나타나는 단점을 보완하기 위하여 다시 시작 단계로부터의 수정 연구를 반복한 끝에 최적 배합을 완성하게 되었다.

연구결과, 새로이 개발된 스프레이용 내화재료 및 기존 유럽의

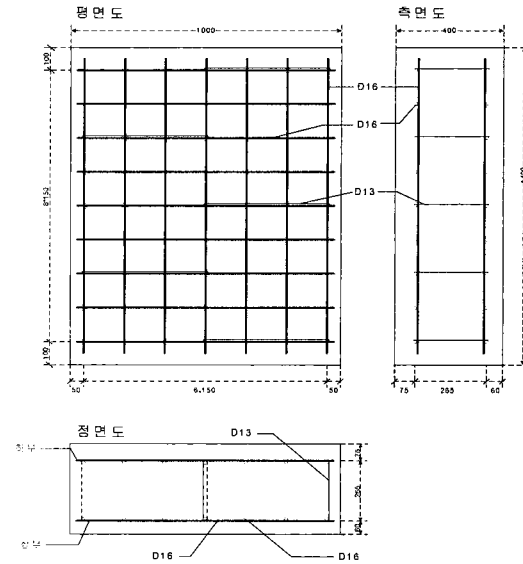


그림 4. 내화 실험체의 철근 배근도

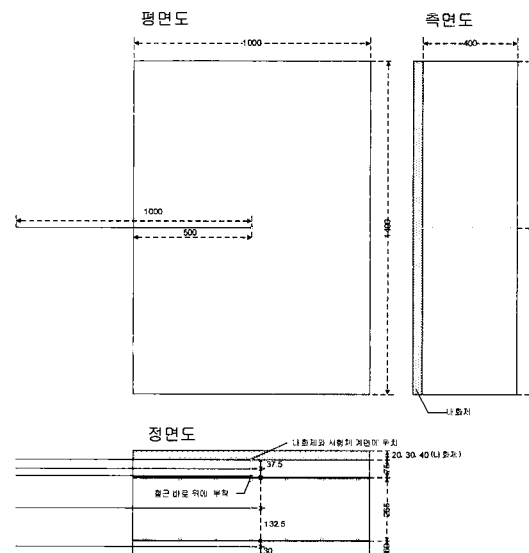
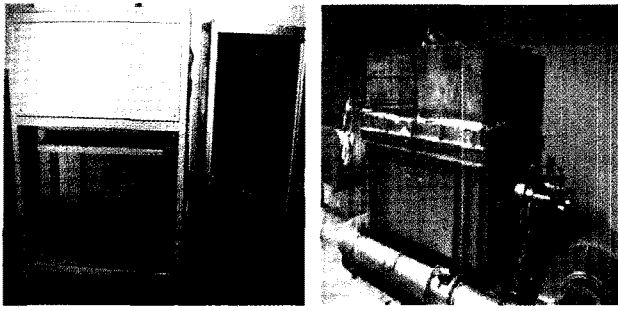


그림 5. 온도 측정용 열전대 위치

내화재료 모두 화재에 의한 폭렬이 발생하지 않았으나, 개발된 내화용 시멘트계 재료는 밀도가 크면서도 단열성이 우수한 골재를 사용하여 우수한 압축강도, 휨강도 및 부착강도를 보여주었다. 현재 유럽에서 사용되고 있는 내화재료와의 강도비교 결과, 유럽 제품은 28일 재령에서 압축강도 7.5 MPa, 휨강도 2.2 MPa, 부착강도 1.3 MPa인 반면 새로 개발된 내화재료는 압축강도 21 MPa, 휨강도 4.3 MPa, 부착강도 1.8 MPa의 좋은 성능을 보였다. 다공성의 bottom ash와 PP fiber의 사용으로 내화성능의 측면에서도 좋은 성능을 기대할 수 있다고 판단된다. 따라서 금번 새로이 개발한 터널 콘크리트 전용 내화재료는 기존 유럽 제품보다 2 배 정도 높은 20 MPa 이상의 압축강도와 휨강도 및 부착강도



(a) 내화재료 개발을 위한 실내실험 (b) 최적피복두께 산정을 위한 실물실험

그림 6. 내화실험 사진

를 확보할 수 있었다. 그 외의 내화재료에 필요한 관련 재료실험(잔존강도, 관입저항, 길이변화, 염소이온침투시험 등)을 통해 기존의 유럽제품과 동등 이상의 성능을 확인할 수 있었다.

### 3.2 실물모형실험

일반적인 NATM터널 라이닝을 기본으로 시편은 1400 mm × 1000 mm × 400 mm 크기의 panel로 주철근 D16, 띠철근 D13으로 보강하여 제작하였다. 터널 라이닝의 내부온도를 확인하기 위하여 타설시 K-type의 시즈열전대(sheathed thermocouple)를 지정된 위치에 삽입하였다.

내화재의 두께에 따른 시편 내부의 온도 분포를 알아보기 위하여 내화재가 없는 시편을 control시편으로 하여 내화재를 20 mm, 30 mm, 40 mm 두께로 코팅하였다.

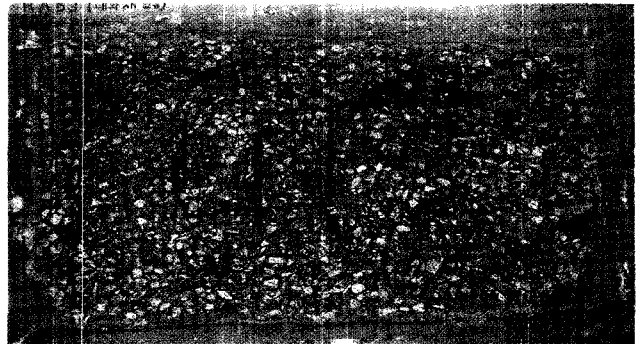
내화재의 부착성능 향상을 위해 시편에 강철 와이어 메쉬를 고정된 후 내화재를 시공하였다. 개발된 시멘트계 내화재료의 최적 시공두께 평가를 위해 다양한 화재-온도곡선(ISO 834, RWS, RABT)을 이용하여 터널 콘크리트 라이닝에 대한 실물모형실험을 실시하였으며, 그 결과 독일의 RABT 온도곡선 하에서 내화재료 두께 약 30 ~ 40 mm의 시공만으로 콘크리트 및 철근의 온도를 200°C 이하로 유지함으로써 터널 콘크리트 구조물을 화재로부터 충분히 예방할 수 있다는 결론을 도출할 수 있었다.

### 3.3 터널 콘크리트 내화용 Spray장비

새로 개발된 터널 전용 내화재료의 시공은 현재 유럽 등지에서 사용되고 있는 spray방식을 채택 하였으며, 일반적으로 규모가 작은 지하철 등에서는 hand spray 형식을, 터널과 같은 대단면의 경우에는 아래 그림에 나타낸 것과 같이 대용량 spray장비를 도입, 시공할 예정이다. <그림 10>의 레이저를 장착한 터널 내화용 타설 장비는 시공 오차 약 ±4 mm 정도의 정

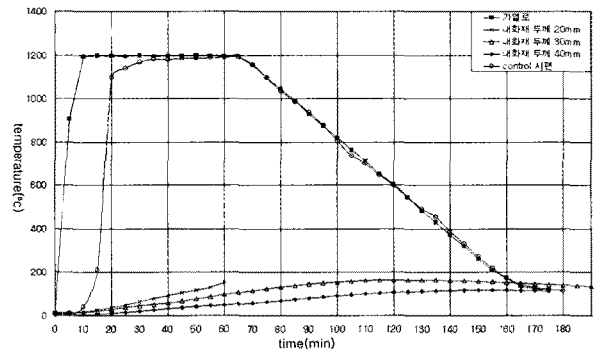


(b) 40 mm 내화 피복

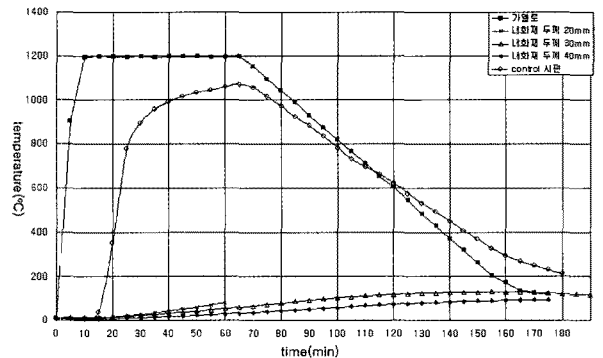


(a) control 시편(내화재료 무도포)

그림 7. 실물 내화실험 결과



(c) 내화재 두께별 피복중앙 온도



(d) 내화재 두께별 철근표면 온도

그림 8. 내화재 두께별 온도분포 결과(RABT곡선 사용)



그림 9. 터널 콘크리트 내화용 spray공법 시공 장면

밀 시공이 가능하여 열차 및 차량 주행 간 발생하는 풍압으로부터 내화재료의 손상을 최소화 할 수 있게 제작되었다.

#### 4. 결 론

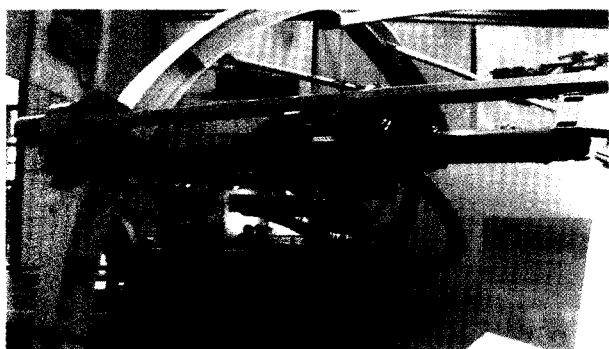
터널에서 대규모 화재사고가 발생할 경우, 인명 피해는 물론 온도상승에 따른 터널 구조부재의 응력저하 및 폭열로 인한 손상이 필연적으로 발생되며 더욱이 피해 복구까지의 장시간이 소요되어 사회적, 경제적으로 미치는 영향이 상당히 크다고 할 수 있다. 터널에서 발생하는 화재 온도는 일반화재와 달리 초기

에 1,000℃ 이상으로 급격히 온도가 상승하고, 특히 구조부재인 셸드터널, 복개터널, 침매터널의 라이닝 콘크리트의 경우 특별한 내화대책을 강구하지 않는다면 국부적인 화재 발생으로 인해 터널 붕괴로 이어지는 위험이 잔존하는 것을 알 수 있다. 현재 유럽 등에서는 터널 화재 실험실험을 포함한 250억원 규모의 대형 터널방재 프로젝트(UPTUN, Safe-T 등)를 진행하는 등 적극적인 연구가 진행 중에 있으며 국내에서도 산·학·연을 중심으로 활발한 연구가 진행 중인 것으로 알고 있다.

금번 새로이 개발된 시멘트계 터널 콘크리트 내화재료는 유럽에서 사용 중인 기존 내화제품보다 우수한 내화성능을 확인하였으며, 유럽의 대표적인 온도규정의 하나인 독일의 RABT 온도 조건하(최고온도 : 가열 5분에 1,200℃, 최고온도 지속시간 : 55분 이상)에서 충분히 견딜 수 있는 성능을 확보함으로써 터널 콘크리트의 내화성능 향상뿐만 아니라 화력발전소에서 나오는 폐기물의 감소로 환경적인 측면에서도 더욱 효과적일 것으로 판단된다. 현재 터널 콘크리트 내화 기술관련 상당한 기술 know-how를 보유한 스위스의 UGC BASF 회사와 자동화 및 정밀 시공에 대한 추가적인 공법 협의를 진행하고 있으며, 각사에서 독자적으로 개발된 터널 내화기술에 대한 글로벌 적용을 위해 지속적인 기술 협력을 추진할 계획이다. □

#### 참고문헌

1. 삼성물산(주), "내화용 터널 콘크리트 라이닝 시스템 개발 및 적용", 최종 연구성과 보고서, 2006. 4.
2. 원종필, 최석원, 박찬기, 박해균, "터널 내화용 시멘트계 재료의 개발 및 성능평가", 대한토목학회 논문집, Vol.26, No.4C, 2006. 7, pp. 265 ~ 273.
3. 김장호, 박해균, 원종필, 임윤목 "신개발 시멘트계 내화재료를 코팅한 콘크리트 터널 라이닝의 내화성능에 관한 연구", 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 2006. 10, pp. 1569 ~ 1572.
4. Jang-Ho Jay Kim, Hae-Geun Park, Jong-Pil Won, Yun-Mook Lim, "Bottom Ash Recycled Material Used Cementitious Fire Protection Coating Applied Concrete Tunnel Lining Behavior Under RABT Fire Loading", 2nd ACF CONFERENCE, NOV, 2006, pp. 6 ~ 15.
5. 박해균, 이승복, 이명섭, 김재권, "터널 콘크리트 구조물의 내화설계 Approach 및 내화대책공법", 한국터널공학회 학회지 Vol.5, No.3, 2003. 9, pp. 64 ~ 71.
6. 박해균, 원종필, 김장호, 임윤목, "폴리프로필렌 섬유 혼입 셸드터널 콘크리트 라이닝의 내화성능 평가", 대한토목학회 논문집, Vol.25, No.3C, 2005. 5, pp. 227 ~ 233.



(a) Shield 터널 전용



(b) NATM 터널 전용

그림 10. 터널 내화용 spray 자동화 장비