

# 영구 슛크리트 터널 라이닝 구축을 위한 고성능 슛크리트 개발( I ) - Alkali Free 급결제 적용성 검토 -

- Development of High Performance Shotcrete for Permanent Shotcrete Tunnel Linings( I ) -



박해균\*

Park, Hae Geun



이명섭\*\*

Lee, Myeong Sub



김재권\*\*\*

Kim, Jea Kwon

## 1. 서론

경제적인 진보와 함께 많은 터널이 국내에서 건설되었으며, 사회간접자본의 투자 확대에 따른 다양한 터널 건설 수요도 향후 지속적으로 증가할 것으로 예상된다. 특히, 전 국토의 70% 이상이 산악인 현실을 고려할 때 국내의 도로 및 철도는 필연적으로 터널구간이 많이 발생하며, 최근에는 직선화 및 고속화로 인해 대단면 장대터널의 비율이 점차 증가하는 추세로 보다 안전하고 경제적인 터널 건설을 위한 다양한 검토가 이루어지고 있다.

1980년 초 서울지하철 3, 4호선 건설 공사를 계기로 적용하게 된 NATM(New Austrian Tunnelling Method)공법은 암반 굴착 직후 원지반의 지지능력을 최대한으로 활용하면서 슛크리트(shotcrete, sprayed concrete)와 록볼트 등을 주지보재로 터널의 안정성을 유지시키는 공법이다. 이 중 슛크리트는 거푸집이 필요 없이 슛크리트 장비를 사용하여 굴착된 원지

반에 공기압으로 뿜어 붙여지는 콘크리트로서 지반의 이완을 방지하여 원지반의 강도를 유지하고, 콘크리트 아치로서 하중을 분담하는 역할을 한다. 또한, 조기강도 확보, 굴착 암반과의 부착성 향상, 리바운드와 분진 발생을 최소화하는 기능이 함께 요구된다. 그러나 국내의 슛크리트 기술은 NATM공법이 국내에 들어온 초기의 기술력을 답습하고 있는 상태로 다량의 리바운드가 발생하고, 노즐맨의 경험이나 기량 등에 의존하는 경우가 많아 비용절감 및 시공능률 향상을 위한 개선이 절실히 요구되고 있다.

또한, 슛크리트 품질은 사용되는 재료나 배합, 각종 시공조건 및 타설방법 등에 영향을 받고 있으나, 터널 시공 각 공정마다 발생하는 문제점을 해결하기 위한 시스템 구축이 아직 미비한 상태이며 특히, 막장근방의 분진농도를 법률로 정하여 엄격한 시공 및 환경관리를 실시하고 있는 선진외국과 비교했을 때 개선 및 보완되어야 할 사항이 많은 요소기술 분야로 판단된다.

## 2. 고성능 슛크리트 개발 필요성

전술한 바와 같이 국내 대표적인 터널 굴착공법으로 적용되고 있는 NATM공법은 원지반의 지지능력을 최대한으로 활용하면서 1차 지보재(스�크리트, 록볼트 등)로 터널의 안정성을 유지시키는 원리를 따르고 있다. 1차 지보재에 의해 지반변위를 완전히 수렴시킨 후 2차로 시공되는 현장타설 콘크리트 라이닝은 터널의 장기적 안전을 증대, 주변지반으로부터의 누수침투와 동해방지, 동력선, 조명, 환기팬 등의 갱내설비, 갱내미관 향상, 조명능률 향상 등을 기본 역할로 하며 도입 초기에는 주로 미관 등의 비구조적인 역할로 사용되었으나, 최근 장기적인 지반이완, 배수기능 저하에 따른 잔류수압 등 불확실한 요소에 대한 안전율을 증가시킨다는 개념으로 설계 시공되고 있다.

그러나 국내의 경우 아직까지 콘크리트 라이닝의 명확한 설치 기준과 목적이 확립되지 않은 상태이며 암반의 종류 및 특성과 무관하게 전 구간에 걸쳐 콘크리트 라이닝의 시공이 의무화되고 있다. 특히 라이닝 균열 및 품질관리, 현장타설 시 공기 지연 등 다수의 문제점이 지적되고 있는

\* 정희원, 삼성물산(주) 건설부문 토목사업본부 토목기술팀 과장 (hgpark68@samsung.com)

\*\* 정희원, 삼성물산(주) 건설부문 토목사업본부 토목기술팀 부장

\*\*\* 삼성물산(주) 건설부문 토목사업본부 토목기술팀장 상무

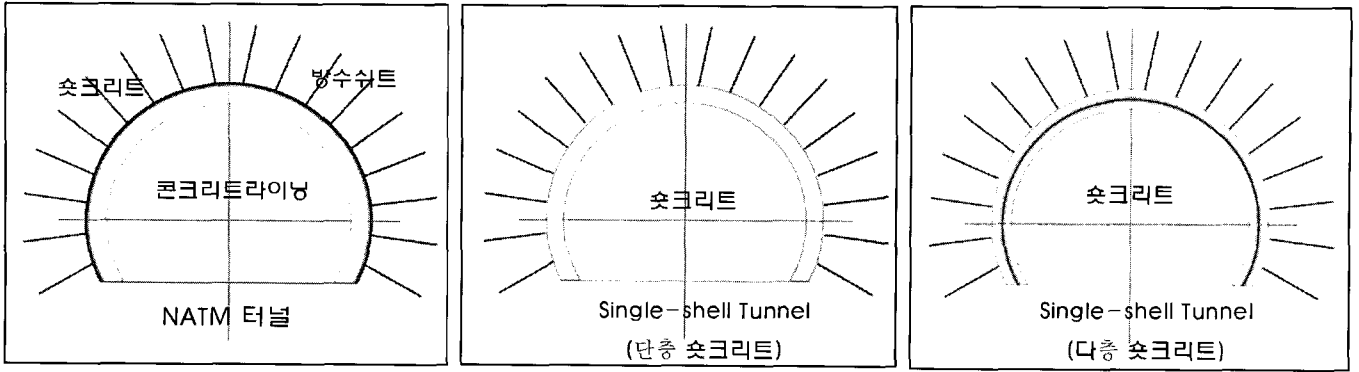


그림 1. NATM 터널과 Single-shell 터널

시점에서 연약한 지반의 토사터널이 아닌 양호한 암반의 배수형식의 터널(주변 지반 내에 존재하는 지하수를 터널내의 배수 시스템을 통해 모두 배출시키는 개념으로 수압의 영향을 라이닝 설계에 고려하지 않음)에 까지 두꺼운 콘크리트 라이닝의 시공이 필요한가 라는 의문과 함께 라이닝에 대한 새로운 인식 변화가 요구되며 합리적인 근거를 바탕으로 굴착 암반의 특성에 부합된 기능성 라이닝의 적용이 검토되어야 할 것으로 판단된다.

국내의 양호한 경암 특성과 유사한 북유럽의 노르웨이를 살펴보면, 1995년 그 동안의 경험을 바탕으로 내부라이닝 설계지침을 정하였는데 총 850여 개의 도로터널 중 약 3% 정도가 현장타설 콘크리트 라이닝이며, 나머지 대부분이 경량판넬과 다른 콘크리트계 제품과의 조합 형태로 구성된 라이닝이다. 최근에는 측벽에만 프리캐스트 콘크리트로 하고 천단부에는 폴리에틸렌메트와 그 위에 방화용으로 타설되는 슛크리트로 구성된 수형 Ekeberg형 내부라이닝이 주로 적용되고 있다. 이러한 시공은 최근 세계적인 도로터널 추세인 배수형 터널에서 양질의 암반 특성을 살린 영구 슛크리트 라이닝(permanent shotcrete lining) 개념의 경제적인 공법으로 슛크리트 등 1차 지보재의 고품질을 전제로 2차로 시공되는 콘크리트 라이닝을 프리캐스트 세그먼트로 대체하여 시공하는 NMT (Norwegian Method of Tunnelling)공법과 내부 라이닝을 완전히 생략하고 단층 또는 다층의 고성능 슛크리트(high performance shotcrete)로 대체하

여 최종 마감을 하는 Single-Shell Tunnel 등이 대표적인 공법이다. 그 예로 2001년 개통된 세계최장 도로터널인 Laerdal Tunnel (24.5 km), 세계최장의 해저도로터널인 Oslo Fjord Tunnel(7.23 km), 그리고 철도터널인 Romeriksporten Tunnel(13.9 km) 등이 있으며, 유명한 Gjoevik Olympic Mountain Hall 등 지하시설 구조물까지 동일한 개념의 공법이 적용되었는데, 이러한 시공법을 적용하기 위해서는 전문화된 기술개발이 필수 선결 조건이다.

〈표 1〉은 전 세계 십여 개국에서 시공된 150여 개의 영구 슛크리트 라이닝 터널<sup>1)</sup> 중 대표적인 터널을 나타낸 것으로 28일 슛크리트 압축강도가 대부분 40 MPa 정도이다. 〈그림 2〉는 Oslo와 Bergen을 연결하는 single-shell 형식의 세계 최장 도로터널인 Laerdal Tunnel<sup>2)</sup>로 2차 콘크리트 라이닝을 생략하는 대신 1차층(지보층), 2차층(지보 보강층), 3차층(피복층)의 3개 층을 고성능 슛크리트를 사용하여 지보를 형성하였으며 지반상태나 터널기능의 요구에 맞게 각층의 슛크리트 물성을 변화시켜 시공하였다.

고성능 슛크리트가 요구되는 또 하나의

표 1. 영구 슛크리트 라이닝 터널(MPa)

국 가	이 름	형 태	시공 연도	28일 압축강도
Canada	BC Rail	Railway	1988	40 MPa
Sweden	Lundby	Road	1998	40 MPa
Switzerland	Verenia	Railway	1999	40 MPa
Switzerland	Disentiser	Railway	1999	47 MPa
Norway	Laerdal	Road	2001	42 MPa

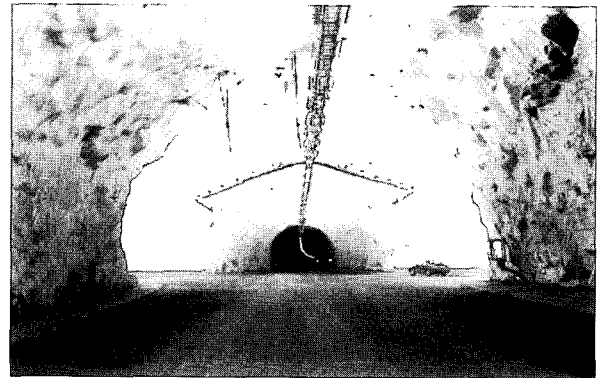


그림 2. Single-shell 형식의 세계 최장 도로 터널 (Laerdal Tunnel, Norway, 24.5km)

이유로, 최근 3차선 이상의 대단면 터널의 시공이 점차 증가하고 있기 때문이다. 대단면 터널에서는 지금보다 더 큰 편평한 단면에서 굴착되기 때문에 지반 안정성이 떨어질 확률이 높아지는데 이러한 단점을 보완하기 위해서는 조기에 지반을 안정화시킬 수 있도록 초기강도 확보와 부착력 향상에 유리한 슛크리트 개발이 요구된다. 즉, 슛크리트 두께가 두꺼워지면 그 수량이 증가하여 터널 건설비용의 증가로 이어지기 때문에 슛크리트 강도를 증가시켜 타설 두께를 줄임으로써 공사비 절감을 유도할 필요가 있다. 특히, 단층 파쇄대, 연약지대, 용수 부분 등 지반의 변형이 예상되

는 부분에 대해서도 높은 탄성계수로 슛크리트의 초기 강성을 높여 지반 변위를 조기에 억제시켜 시공 사이클을 향상시키고, 치밀한 내부조직과 우수한 부착성능을 통해 리바운드 저감을 기대할 수 있는 고성능 슛크리트의 개발이 요구된다. 따라서 콘크리트 라이닝에 대한 인식 변화와 함께 1차 지보재인 슛크리트의 고성능화(고강도, 고내구성, 고시공성)는 Single-Shell, NMT 등 영구 슛크리트 라이닝 터널이라는 신 개념의 터널 건설과 최근 그 수요가 증가하고 있는 대단면 터널 시공에 선결되어야 할 필수적인 요소기술로 그 중요성이 강조되고 있다.

### 3. 급결제

스�크리트 시공에 있어서는 일반 현장타설 콘크리트와는 달리 초기강도 확보와 리바운드 저감, 지반의 이완을 조기에 억제하기 위해 급결제(accelerator)를 사용하고 있다. 이 급결제는 슛크리트의 초기강도뿐만 아니라 장기강도 발현과 내구성, 슛크리트 두께 등에 영향을 미치고 있어 배합에 사용되는 다른 혼화재와 비교했을 때 그 중요성이 강조되는 재료적 요소이다. 건설교통부 콘크리트 표준시방서<sup>3)</sup>와 터널표준시방서<sup>4)</sup>에서는 바람직한 급결제의 성능으로 콘크리트의 응결, 경화를 촉진시키고, 최종강도의 저하가 작으며, 작업원의 피해가 적고, 장기간의 강도증진을 해치지 않는 것으로 정의하고 있다. 이와 같이 급결제는 필요한 초기강도 확보와 함께 장기강도에 악영향이 없고, 리바운드를 최소화하여 암반에 견고하게 부착할 수 있고 인체에 무해한 제품이어야 한다.

사용량은 급결제 종류에 따라 적정 사용량을 제시하고 있으며 일반적으로 시멘트 중량의 5 ~ 10% 이내를 표준으로 기온, 지반조건, 용수 부분, 단층 파쇄대 등 특수 구간에 따라 증감 할 수 있도록 하고 있다. 그러나 지금까지의 연구결과에 의하면 기존의 범용 급결제를 사용한 슛크리트의 장기강도는 급결제를 넣지 않은 base

concrete와 비교했을 때 20 ~ 40% 정도의 압축강도 저하와 급결제 첨가량이 증가할수록 강도 저하도 커진다는 것을 확인할 수 있었고, 조기 급결에 따른 장기강도의 저하와 다량의 리바운드로 설계에서 요구되는 기준강도를 만족하지 못하는 경우가 시공 현장에서 자주 발생되고 있는 실정이다. 또한 대부분의 급결제가 강한 염기성으로 일부 제품의 경우에는 강한 자극성 때문에 작업자의 안전(피부화상 등)에 직접적인 영향을 미치고 있으며 특히, 석회암 지반으로 토질 자체가 염기성인 경우에는 배수구를 통해 시공현장 외부로 배출되어 용해수가 주변 환경을 오염시키는 것으로 알려져 있다.

현재 국내에서 사용되고 있는 급결제 종류는 약 4가지로 실리케이트(몰유리계), 알루미네이트, 시멘트 광물계, alkali free계로 요약할 수 있다. 실리케이트계는 시멘트와의 수화반응에 직접 관여하지 않아 사용되는 시멘트 특성과 무관하게 사용할 수 있고, 슛크리팅 후 겔(gel)화 시간이 빨라 1회 타설 두께를 크게 할 수 있다는 장점 때문에 현재 국내 전체 사용량의 70 ~ 80%를 차지하고 있다. 하지만 사용량 증가에 따른 장기강도 저하와 급결에 사용되지 않은 잉여분의 배출에 따른 환경오염, 작업간 체내 흡수시 체외 배출이 힘든 관계로 오스트리아에서는 그 사용량을 제한하는 등의 단점을 가지고 있다. Morch<sup>5)</sup> 등은 습식 슛크리트의 내구성에 미치는 몰유리계 급결제의 영향을 실험으로 검토하였는데 몰-시멘트비 42%, 실리카 폼과 강섬유를 사용한 배합에서 10 l/m<sup>3</sup> 정도의 급결제가 첨가되면 강도 저하는 보이지 않았지만 2 ~ 3배 정도가 되면 첨가량에 비례해서 강도 저감을 확인할 수 있었고, 내동해성, 수밀성이 저하한다고 보고하였다.

알루미네이트계는 현재 세계적으로 가장 많이 사용되고 있는 급결제로 시멘트 수화반응을 촉진시켜 급결효과를 나타내며 실리케이트보다 우수한 장기강도의 발현이 가능하지만, 사용량이 초과하면 내구성 및 장기강도를 급격히 감소시키고 겔(gel)화

시간이 약간 느리며 pH 11 ~ 14의 강한 염기성으로 작업자의 화상을 일으켜 프랑스, 노르웨이 등 유럽의 일부 국가에서는 사용을 금지하고 있다.

한편, 최근 건설 환경에 대한 관심증대로 요구되는 조기강도 확보와 함께 장기강도 발현에 손상을 주지 않는 환경 친화적인 새로운 급결제가 개발되어 이에 대한 성능평가 및 시험시공이 활발히 진행되고 있다. 그 대표적인 제품으로 일본에서 개발된 시멘트 광물계(칼슘 알루미네이트)급결제와 유럽에서 개발된 alkali free 급결제가 있다. 일본에서는 1960년대부터 강알칼리의 액상형 급결제를 사용해 왔으며, 그 후 시멘트 광물계의 분말형 급결제가 개발되어 1980년대부터 분말형 급결제에 대한 사용 비율이 점점 증가하여 현재 일본 슛크리트 급결제 시장의 90% 이상을 차지하고 있다. 최근에는 기존 시멘트 광물계보다 우수한 성능의 고강도용 시멘트 광물계(칼슘 설포 알루미네이트) 급결제가 개발되어 적용되고 있다. 시멘트 광물계 급결제의 가장 큰 특징은 급결력이 강하기 때문에 용수부위에서 슛크리트 타설이 용이하며 장기강도의 손실이 극히 적다는 점이다. 이러한 장점은 리바운드량의 감소와 함께 장기 강도를 높이기 위해 시멘트량을 절감할 수 있다. 또한 시멘트와 유사한 자극성 및 pH 특성을 보이고 있어 환경오염 및 유해성이 적으며 분말이므로 콘크리트의 슬럼프 변화에 둔감하여 현장에서의 슛크리트 품질관리가 용이한 장점을 가지고 있다. 하지만, 습식 슛크리트 장비에서는 별도의 분말형 급결제 제공장치를 설치해야 하고, 국내에는 관련 규정이 없지만 일본의 경우 법률로 분진발생을 엄격히 규제(막장 전방 50m 기준 3.0 mg/m<sup>3</sup>)하는 등 분말형 급결제 사용에 따른 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단된다. 현재 국내에서는 비정질 C<sub>12</sub>A<sub>7</sub>을 주성분으로 하는 시멘트 광물계 급결제가 개발되어 이미 건설 시공현장에서는 상용화되어 있으며, 습식공법에서는 1여 년간의 시행착오를 거쳐 현재 경남의 N터널에 국내 최초로 순

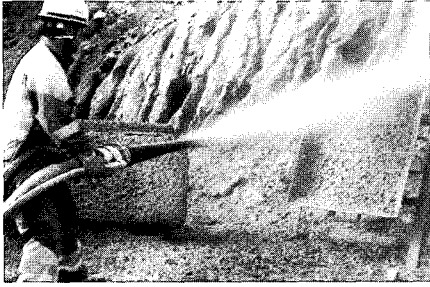


그림 3. 슛크리트 분사

조롭게 적용되고 있다.

한편, 1990년대 중반 유럽에서 개발된 alkali free 액상형 급결제는 현재 MBT, MAPEI, RESCON, SIKA 등의 메이커에서 생산되고 있으며, 그 성능에 있어서도 기존의 급결제가 가지고 있는 단점을 보완하고 고강도 발현 및 작업자의 안전을 확보하는 환경 친화적인 제품으로 각광받고 있다. 이러한 이유로 European Specification for Sprayed Concrete<sup>6)</sup>에서는 영구부재로서의 슛크리트에 low alkali 또는 alkali free 급결제 사용을 적극 추천하고 있다. Erlien<sup>7)</sup>은 실제 터널 적용 시험에서 alkali free 급결제를 사용한 슛크리트의 장기강도를 검토하였는데, 타설 2년 후의 강도(54 MPa)는 28일(40.3 MPa)보다 약 35% 증가를 확인할 수 있었다고 보고하였다. 부착력 향상에 따른 1회 타설 두께 증가와 높은 초기 강도 발현으로 물유리계 급결제에서 alkali free 급결제로 변경하여 사용한 노르웨이의 해상 도로터널인 North Cape Tunnel<sup>8)</sup> (6.8 km, 1999년 완공), Laerdal Tunnel(24.5 km, 2001년 완공), 그리고 현재 시공 중인 일본의 安坂山 터널<sup>9)</sup>, 島田 터널<sup>10)</sup> 등 해외의 경우 그 사용 실적이 점점 증가하는 추세이다. 국내에서도 2~3종류의 alkali free 급결제가 생산되고 있으며 국내 J터널 등 일부 구간에서 적용되었으나 시공실적이 거의

없으며, 비교적 높은 단가(실리카이트의 2~3배)와 급결제 탱크, 압송펌프, 압송관 등에 대해서는 부식방지를 위한 재료의 사용이 요구되는 단점이 있다. 한편, 노르웨이 도로국(NPRA)에서는 상품화된 여러 종류의 alkali free 급결제에 대한 full scale test를 실시하였는데 일부 제품의 경우 용수부위에서 초기강도의 발현이 다소 늦어진다고 보고<sup>11)</sup>하고 있다.

따라서 본고에서는 슛크리트 품질 확보에 중요한 위치를 차지하고 있는 급결제를 변수로 모형시험을 실시하여 실리카 폼 등 고강도 발현을 위한 고가의 혼화재를 사용하지 않고서도 품질향상과 함께 시공성과 경제성을 동시에 확보할 수 있는 고성능 슛크리트 개발 가능성을 확인하는데 주목적을 두었으며, single-shell tunnel 등 신개념의 영구 슛크리트 라이닝 터널에 대한 성공적인 국내 적용을 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

## 4. 모형 시험

### 4.1 개요

물유리계 급결제와 alkali free 급결제를 주요 변수로 습식 강섬유보강 슛크리트(Steel Fiber Reinforced Shotcrete, SFRS)에 대한 모형시험을 실시하였으며, 제작된 공시체에 대해 압축강도, 휨강도, 휨인성을 평가하여 그 성능을 비교 분석하였다.

### 4.2 사용재료

시멘트는 KS L 5201에 적합한 보통 포틀랜드 시멘트(비중 3.15)를 사용하였고, 골재는 경북 경산지역에서 생산되는 13mm 조골재(비중 2.63)와 세골재(비중 2.59)를, 강섬유는 섬유 길이에 대한

직경의 비인 형상계수 60( $\phi$  0.5 × 30 mm)의 hook & bundle type(비중 7.85)의 제품을 사용하였다. 급결제는 국내 M사의 alkali free 급결제(비중 1.40)와 현재 국내에서 가장 많이 사용되고 있는 물유리계 급결제(비중 1.36)를 사용하였다. 또한, 타설시 작업성 확보와 슬럼프 조절을 목적으로 폴리카르복실계 고성능감수제를 사용하였다.

### 4.3 배합설계

현장의 배치 플랜트를 이용하여 물, 골재, 시멘트, 강섬유를 자동 계량하여 혼합하였으며, 골재의 표면수 변동에 따른 단위수량의 영향을 고려하여 사용 골재에 대해서는 표면수 보정을 실시하였다. 본 시험에 사용된 재료의 배합을 <표 2>에 나타냈으며, 급결제 사용량은 alkali free의 경우 시멘트량의 7.0%, 물유리계는 10.0%를 각각 사용하였다.

### 4.4 슛크리트 타설 및 양생

스�크리트 타설을 위해 더블 피스톤 펌프 압송방식의 슛크리트 장비(meyco suprema)와 23.3 m<sup>3</sup>/min 용량의 컴프레서(compressor)를 사용하였다. 현장 배치 플랜트에서 제조되어 믹서 트럭으로 운반된 콘크리트는 Suprema 장비의 호퍼(hopper)에 부어져 직경  $\phi$  65 mm, 길이 25 m의 콘크리트 반송관을 통해 시간당 5~6 m<sup>3</sup>로 압송되었다.

급결제는 급결제 운송관(직경  $\phi$  25 mm)을 통해 노즐(직경  $\phi$  40 mm) 약 50 cm 후방에서 첨가되었으며, 첨가량은 장비의 디지털 계기판을 통해 자동으로 조절하였다.

토출되는 슛크리트의 배합이 안정된 상태가 된 후 노즐 선단과 패널과의 거리를

표 2. Mix proportion of shotcrete

G <sub>max</sub> (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	S/a (%)	Air (%)	Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )					accelerator (C × %)	superplasti-cizer (C × %)
					W	C	S	G	Steel Fiber		
13	14	41	65	4.0	198	480	1035	593	40	7.0 (AF) 10.0 (W)	1.0

약 1.2m 정도 이격하여 노즐만에 의한 핸드 스프레이를 실시하였다. 공시체 채취를 위해 강제패널(100 × 100 × 10 cm)과 빔몰드(15 × 15 × 53 cm)를 설치하여 타설하였다. 타설 후 인력에 의한 패널 이동이 불가능하여 트럭 크레인을 사용하여 타설이 완료된 패널을 운반하였으며, 운반 후 타설면의 정리와 함께 직사광선이나 바람에 의한 수분 증발을 억제하기 위하여 양생포를 덮어 습윤양생을 실시하였다.

#### 4.5 시험항목 및 방법

##### 4.5.1 굳지 않은 콘크리트시험

현장 배치플랜트에서 생산된 base concrete에 대한 슬럼프 경시 변화를 알아보기 위해 KS F 2402 규정에 의한 콘크리트 슬럼프 실험과 KS F 2421의 공기실 압력방법에 의한 공기량 측정시험을 실시하였으며, 타설 전 콘크리트의 온도측정을 실시하였다.

##### 4.5.2 압축강도시험

압축강도 시험용 공시체는 타설 후 코어보링머신(core boring machine)을 이용하여 Ø 100 mm의 코어 공시체를 채취하였으며, 시간에 따른 강도발현 상태를 파악하기 위해 일자별로 3개의 공시체를 제작하여 1일, 3일, 7일, 28일 강도시험을 수행하였다. 공시체의 높이는 타설 후 면처리를 하였으나, 일정한 높이로 연기가 힘들어 시험 전 채취된 공시체 높이를 측

정하여 KS F 2422(콘크리트에서 절취한 코어 및 보의 강도시험 방법) 규정에 의거 강도 보정을 실시하였다. 콘크리트의 압축강도 시험은 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법)에 의해 실시하였다. 참고로, 건설교통부 터널표준시방서에서는 숏크리트의 압축강도는 1회 시험 당 3개의 시료를 채취하여 2개 이상은 설계강도 이상이어야 하며, 1개 이상이 설계강도의 85% 보다 작아서는 안되며, 3개의 평균강도는 설계강도 이상이 되어야 한다고 규정하고 있다. 또한 압축강도는 재령 1일 100 kgf/cm<sup>2</sup> 이상, 재령 28일 강도 180 kgf/cm<sup>2</sup> 이상으로 하고 있으며, 최근에는 210 kgf/cm<sup>2</sup> 이상을 적용하는 현장이 증가하고 있는 추세이다.

##### 4.5.3 휨강도 및 휨인성시험

휨강도 측정을 위해 강제 몰드(15 × 15 × 53 cm)를 사용하여 숏크리팅 한 후 KS F 2408(콘크리트의 휨강도 시험방법) 규정에 의거 1일, 3일, 28일 강도 측정을 실시하였다. 또한 휨인성시험은 JIS-SF4 규정에 의거 시간길이 45 cm의 3등분점 채취 방법으로 재령 28일의 휨인성을 평가하였으며, 휨인성에 사용된 공시체는 시험 여건상 휨강도와 동일한 치수를 사용하였다. 처짐 측정을 위해 LVDT를 보의 중앙에 설치하였으며, 등가휨강도(equivalent flexural strength,  $f_e$ )는 식(1)을 통해 처짐( $\delta$ )이 시간( $l$ )의 1/150(= 3.0 mm)이 될 때까지 하중-처짐 곡선 아래 면적( $T_b$ )을 구해 산정

하였다.

$$f_e = (T_b / \delta_{150}) \times (l / bh^2) \quad (1)$$

참고로 한국도로공사에서 강섬유보강 숏크리트의 28일 휨강도를 45 kgf/cm<sup>2</sup>, 등가휨강도를 30.6 kgf/cm<sup>2</sup>(휨인성계수 68%) 이상으로 규정하고 있다.

#### 5. 모형시험 결과 및 분석

압축강도, 휨강도 및 휨인성 시험 결과를 각각 (그림 4~5)에 나타내었다. 전체적으로 볼 때 alkali free 급결제를 사용한 숏크리트는 현재 국내 터널공사에 가장 많이 사용되고 있는 물유리계 숏크리트보다 압축강도, 휨강도, 휨인성 시험에서 우수한 강도를 발현하였다.

먼저, 압축강도 결과를 살펴보면 급결제 종류에 관계없이 1일 압축강도 100 kgf/cm<sup>2</sup>을 확보하였으나, alkali free 숏크리트의 경우 물유리계 보다 재령 1일에 19%, 3일에 64%의 강도 증진을 보임으로써 초기강도 및 강성 확보로 지반의 이완을 방지하고, 조기 부착력 향상으로 연약 지대나 용수부분의 지보에 유리하게 작용할 것으로 사료된다. 또한 재령 28일에는 물유리계보다 63% 향상된 418 kgf/cm<sup>2</sup>을 보여 범용 급결제가 가지는 장기강도의 저감이라는 단점을 극복하고, 고강도 숏크리트 시공으로 숏크리트 지보두께를 감소시킴으로써 굴착단면적 감소,

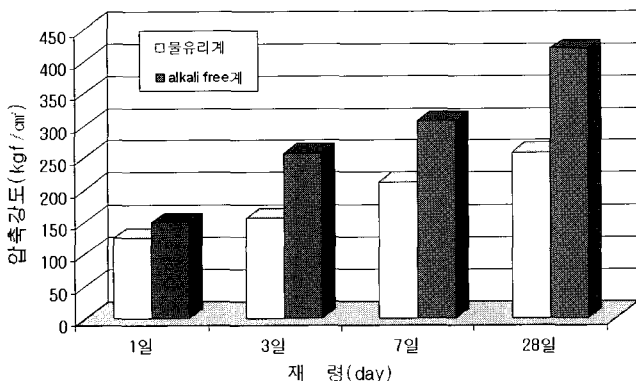


그림 4. 압축강도 시험 결과

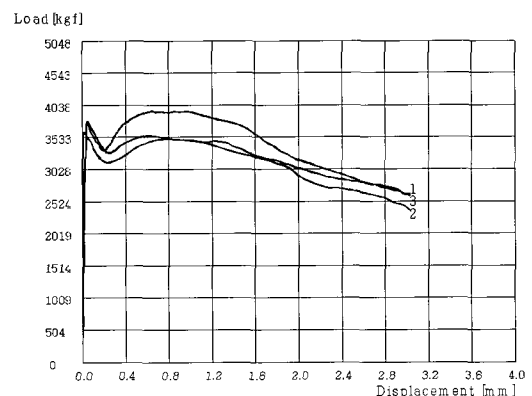


그림 5. 휨인성 시험 결과(alkali free)

표 3. 휨인성 시험 결과

종류	시편	최대하중 (kgf)	Peak 변위 (mm)	휨강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	T <sub>b</sub> 면적 (kgf-cm)	등가휨강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	휨인성계수 (%)
물유리계	1	3310	0.052	44.1	862	38.3	86.8
	2	2840	0.073	37.8	617	27.4	72.5
	3	3740	0.054	49.8	789	35.1	70.5
	평균	3290	0.060	43.9	756	33.6	76.6
alkali free계	1	3790	0.066	50.5	954	42.4	84.0
	2	3630	0.030	48.4	927	41.2	85.1
	3	3940	0.638	52.5	1017	45.2	86.1
	평균	3790	0.245	50.4	966	42.9	85.1

표 4. 용수부 부착성능시험 배합

Cement	G <sub>max</sub> (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	S/a (%)	Air (%)	Unit Weight (kgf/m <sup>3</sup> )					accelerator (%)	superplasticizer (%)
						W	C	S	G	steel fiber		
조강시멘트	13	12	43	64	2.5	181	420	1102	618	40	7.0	1.0
보통시멘트		13		65		207	480	1026	579			

타설시간 절감, 리바운드, 버력처리 등 터널 시공 전 사이클에 걸쳐 공사비 절감을 유도할 수 있을 것으로 사료된다. 참고로, 국내에는 아직 고강도 슛크리트에 대한 기준과 이에 대한 설계치침 등이 전무한 상태이지만, 슛크리트 시공간 압박으로부터의 용수, 압박과의 부착성 등의 원인에 의해 발생될 것으로 예상되는 강도 손실을 고려하더라도 일본도로공단에서 규정하는 있는 고강도 슛크리트의 품질기준<sup>12)</sup>(28일 강도 : 360 kgf/cm<sup>2</sup>)에 근접할 수 있을 것으로 사료된다.

휨인성시험에서는 급결제 종류와 무관하게 도로공사에서 규정한 30.6 kgf/cm<sup>2</sup> (등가휨강도) 및 인성계수를 68%를 만족하였으며, 재령 28일 기준으로 28% 향

상된 결과를 보였다. <그림 5>에서 보는 바와 같이 alkali free 슛크리트는 균열 발생 하중이 물유리계 슛크리트보다 컸으며, 균열 발생 이후에도 점진적으로 하중이 저하되는 양상을 보여 균열 이후 급격한 강도 저하와 품질변동을 보인 물유리계 슛크리트와 비교했을 때 에너지 흡수 능력의 향상을 통한 슛크리트의 연성거동을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

### 6. 용수부에서의 슛크리트 부착성능 평가

실제 터널 굴착 시에는 지하수의 유출로 많은 용수(湧水)가 굴착면을 통해 배출되는데 이에 대한 적절한 배수 및 방수 조

치를 취하지 못할 경우에는 지보재로 타설되는 슛크리트 품질확보에 상당한 어려움이 발생하게 된다. 다시 말해, 압박 굴착 시 발생하는 용수부분에 타설할 경우 콘크리트의 물-시멘트비를 증가시켜 강도저하와 함께 굴착면과의 부착성능이 저하되어 굴착된 지반변위의 수렴을 지연시키는 원인이 되고, 아울러 다량

의 리바운드로 터널 전체 시공 공정에까지 영향을 미치게 된다. 또한, 수화작용이 완료된 슛크리트가 용출수에 의해 침식될 경우에는 슛크리트의 품질 저하와 함께 터널 배수관을 막아 터널 방수 및 배수 시스템에까지 영향을 미치기도 한다. 공사비 절감을 위해 대부분 1차 슛크리트만 시공하는 노르웨이 등 북유럽 국가의 경우도 용수(누수)로 인한 하자 사례가 자주 발견되는 것으로 보고되고 있다. 따라서 3종 조강 포틀랜드 시멘트와 alkali free 급결제와의 조합을 통해 용수부 부착성능 시험을 실시하여 그 성능을 고찰하였다.

#### 6.1 부착성능시험 결과

용수부 부착성능 평가를 위해 아래 사진에서 보는 바와 같이 강제 판넬(100 × 100 cm)을 제작하였다. 판넬 전면 상단부에 Ø 20 mm 정도의 유공 송수호스를 설치하여 분당 약 20ℓ 속도로 분사하였으며, 슛크리트 타설부에 직접 배출되는 용출수를 묘사하기 위해 판넬 중심부에 Ø 10 mm의 구멍을 만들어 같은 속도로 물을 배출시켰다. 슛크리트 타설은 판넬 전면에서 약 1 m 정도 떨어진 곳에서 실시했으며, 슛크리트 타설시간을 2 ~ 3분으로 고정하여 일정 속도로 슛크리트의 부착성능을 평가하였다. 시험결과, 보통 포틀

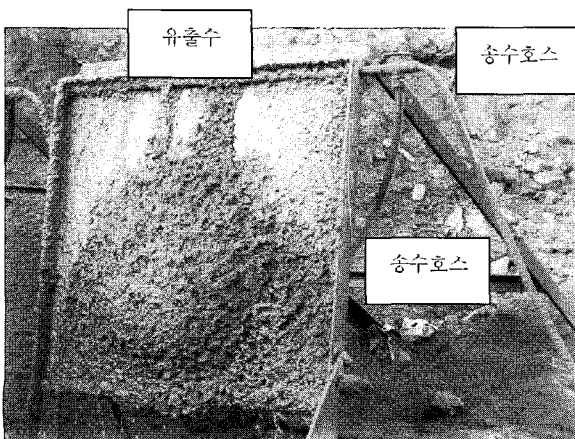


그림 6. 용수부 부착성능시험

랜드 시멘트를 사용한 경우보다 20% 이상의 높은 부착두께를 확보함으로써, 단층 파쇄대나 심한 누수부분 등 연약한 암반상태에서 조기강도 및 부착강도 확보에 유리할 것으로 사료된다.

### 7. 토 의

실제 터널에 타설된 후 채취된 숏크리트의 코어 강도는 원지반과의 부착문제, 시공상태, 코어 장비의 진동에 따른 미세 균열 발생, 기온이나 습도 등 여러 가지 영향으로 실험터 강도와 비교했을 때 강도의 저감이 발생하게 된다. ACI Specification for Shotcrete(quality assurance)<sup>13)</sup>에서는 코어링 작업이나 커팅 과정에서의 강도손실을 약 15%(원주형 공시체 강도 대비) 보고 있다. 이러한 점을 고려하여 본 연구에서는 전 재령에 걸쳐 20%의 강도손실을 고려하여 압축강도시험에서 구한 탄성계수의 80%를 적용한 보정 탄성계수를 산정하여 비교 검토하였다. (그림 7)에 나타낸 바와 같이 alkali free 급결제를 사용한 공시체의 보정 탄성계수는 전 재령에 걸쳐 높은 수치를 보여 초기의 높은 탄성계수로 인한 강성 증가로 지반의 이완과 변위를 조기에 억제하는데 유리하게 작용할 것으로 사료된다. 또한, 현업의 터널 시공단계별 해석에 일반적으로 사용되고 있는 탄성계수(연화 숏크리트: 5만 kgf/cm<sup>2</sup>, 경화 숏크리트: 15만 kgf/cm<sup>2</sup>)와 비교했을 때 충분히 기준치를 확보하고 있는 것으로 나타났다.

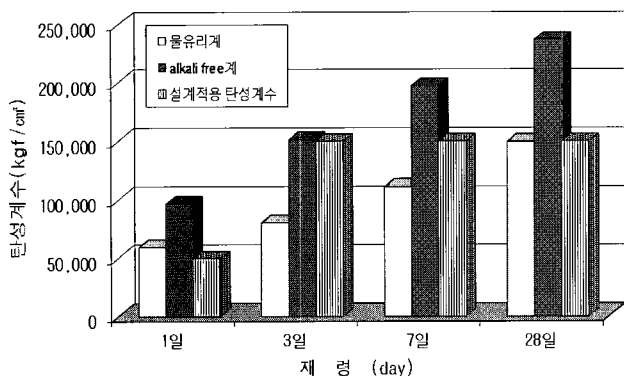


그림 7. 숏크리트의 탄성계수 비교

하지만 보다 합리적인 터널 지보설계를 위해서는 탄성계수 등 해석에 사용되는 입력물성치 산정에 보다 많은 연구가 필요할 것으로 사료된다.

한편, 숏크리트를 고강도화 할 경우 설계두께의 저감이 기대되며, 설계두께를 얇게 하기 위해 균일한 변위가 발생하는 지반에 대해서는 축강성(탄성계수 E × 단면적 A)을 일정하게 한다는 가정이 성립될 수 있다. 숏크리트의 고강도화에 의해 탄성계수가 커지면 단면적을 줄일 수 있으며, 콘크리트의 탄성계수가 압축강도의 평방근에 비례해서 증가한다는 기존식을 적용한다면 숏크리트의 두께는 압축강도의 평방근에 비례해서 감소되므로 향후 단면 감소에 따른 경제적인 터널 설계에의 접근도 가능할 것으로 사료되는바 이에 대한 추가적인 검토도 필요할 것으로 판단된다.

### 8. 결 론

최근 세계적인 도로 터널의 설계를 보면 산악터널에서 지하수의 수압에 대한 영향을 고려하지 않고 완전 배수 형식으로 설계를 하고 있다. 또한, 국내 터널설계기준에서도 수압의 영향을 고려하지 않는 배수형 터널설계를 기준으로 하는 등 양질 암반에서 콘크리트 라이닝의 기능이 점차 구조적인 역할에서 마감기능의 개념으로 변화되어야 한다는 인식이 확산되고 있다.

이러한 시점에서 국내 산악지형의 견고하고 양질의 암반조건을 고려할 때, 터널 지보패턴의 간소화와 내부 라이닝의 기능

화/간략화 등으로 공기 단축과 건설 경비를 최소화할 수 있는 영구지보 개념의 터널(NMT, Single-Shell Tunnel 등) 건설이 국내에서도 요구되고 있으며, 이러한 터널건설의 성패는 고성능 숏크리트의 기술 확보와 직접적인 관계가 있다고 할 수 있

다. 국내 실정에 적합한 영구터널 지보시스템 개발을 목적으로 실시한 금번 기초실험의 결론을 다음과 같이 정리하였다.

1) alkali free 급결제를 사용한 숏크리트는 현재 국내 터널공사에 가장 많이 사용되고 있는 물유리계 숏크리트보다 압축강도, 휨강도, 휨인성 시험에서 우수한 강도를 발현하였는데 본 실험조건에서 압축강도는 63%(재령 28일 압축강도 418 kgf/cm<sup>2</sup>), 휨강도는 9%, 등가휨강도는 28%가 각각 향상 되었다.

2) 휨인성 시험결과, alkali free 숏크리트는 균열 발생 하중이 물유리계 숏크리트보다 높았으며, 균열 발생 이후에도 점진적인 하중 저하로 균열 이후 급격한 강도 저하와 품질변동을 보인 물유리계 숏크리트와 비교했을 때 에너지 흡수 능력의 향상을 통한 숏크리트의 연성거동을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

3) alkali free 액상급결제의 사용으로 고강도 숏크리트 개발 가능성을 확인할 수 있었으며, 국내 사용중인 숏크리트 장비의 대부분이 습식인 점을 고려했을 때 액상급결제의 적용은 장비 운용 및 시공성 면에서 유리하게 작용할 것으로 사료된다.

4) 조강시멘트와 조합하여 실시한 용수부 부착성능시험에서도 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 경우보다 20% 이상 높은 부착두께를 얻어, 향후 용수부분, 단층 파쇄대, 연약지반 및 편평대단면 터널에서 향상된 초기강도로 지반이완을 조기에 억제하고 1회 타설시 높은 타설두께를 확보함으로써 시공성 및 안정성 확보에 효과적일 것으로 사료된다.

5) 향후, 급결제 조합에 따른 강도 발현특성과 1일 이전의 초기강도 평가, 리바운드, 분진, 장기내구성, 건조수축, 온도영향, 장비의 펌핑성능 및 해석에 사용되는 탄성계수 등 물성치 산정에 대한 추가 검

토가 요구된다.

### 감사의 글

본 모형시험을 실시하는데 많은 협조를 주신 최명식님께 감사를 표하는 바이다. □

### 참고문헌

1. ITA Working group 12. Shotcrete use paper, "Lists of Permanent shotcrete lining tunnel", 2002.
2. NPRA, "Publishment on Laerdal Tunnel, the world's longest road tunnel".
3. 콘크리트 표준시방서, 건설교통부, 1999.
4. 터널 표준시방서, 건설교통부, 1999.
5. Morch, A., "Production of Steel Fiber Reinforced Sprayed concrete and Influence of Setting Accelerator Dosage on Durability", Production Methods and workability of Concrete, 1996.

6. EFNARC, "European Specification for Sprayed Concrete", 1996.
7. Erlien, O., "On Site Experiences with Alkali free Shotcrete Accelerators in Norway," International Symposium on Sprayed Concrete, Norway, 1999, pp.227~236.
8. Knut F. Garshol., "How to use Wet Mix Shotcrete Technology for Single Shell Permanent Shotcrete Tunnel Linings", 8th Shotcrete for Underground Support, Brazil, 1999, pp.46~56.
9. 室充ほか, "新しい急結劑を用いた吹付けコンクリートの試験施工", トンネルと地下, 2001, pp.25~31.
10. 松浦ほか, "アルカリフリー液體急結劑を使用した高强度コンクリートの吹付け實驗", 土木學會第54回年次學術講演會, 1999, pp.972~973.
11. E.Grov., "Active Design in Civil Tunnelling with Sprayed Concrete as a Permanent", International Conference on Engineering Develop

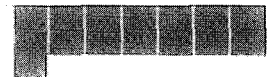
- ments in Shotcrete, Australia, 2001, pp.123~133.
12. Koichi, ONO., "Shotcrete Use in Tunnelling Works in Japan," 9th Shotcrete for Underground Support, Japan, 2002, pp.30~39.
13. Reported by ACI Committee 506, "Specification for Shotcrete", 1995.
14. (社)日本 トンネル技術協會, "トンネルの吹付けコンクリート", 1996.
15. 日本 Geo-Front 研究會, "single-shell 適用に関する検討報告書", 1997.
16. 박해균, 이명섭, 김재권, 안병제, "Permanent Shotcrete Tunnel Lining 구축을 위한 고성능 슛크리트 개발(Ⅰ)", 한국콘크리트학회(KCI) 봄학술 발표회 논문집, Vol.14, No.1, 건설업체 기술발표회, 2002. 5.
17. 박해균, 이명섭, 김재권, 안병제, "Permanent Shotcrete Tunnel Lining 구축을 위한 고성능 슛크리트 개발(Ⅱ)", 한국콘크리트학회(KCI) 봄학술 발표회 논문집, Vol.14, No.2, 건설업체 기술발표회, 2002. 11.

## "건설공사 클레임과 분쟁실무"

### ◆ 소개

이 책은 우리나라에서 막상 클레임을 청구하고 싶어도 그에 대한 전문적인 안내서가 없는 일을 감안하여, 이에 대한 절차와 대응방안 등을 정리하여 실무에 활용토록 하는데 목적이 있다. 1편에서는 이론적인 측면을 다루었고, 2편에서는 건설공사의 분쟁처리 사례들을 국가별로 정리하여 실제로 발생된 분쟁이 어떤 절차를 거쳐 진행되고 해결되어 왔는지를 판단할 수 있는 잣대가 될 수 있을 것이다.

- 제 목 : 건설공사 클레임과 분쟁실무
- 출판사 : 기문당
- 페이지 : 478쪽(B5)
- ISBN : 89-7086-519-5
- 저 자 : 남진권
- 출판일 : 2003년 4월
- 정 가 : 20,000원



### 건설공사 클레임과 분쟁실무

남진권 著

기문당