

고품질 슛크리트 개발을 위한 새로운 급결제 적용

Application of New Type Accelerator for High Quality Shotcrete



박해균*
Park, Hae-Geun



이명섭*
Lee, Myeong-Sub



김재권*
Kim, Jea-Kwon



정명근*
Jung, Myung-Keun

Abstract

From the early 1980's, the New Austrian Tunnelling Method (NATM) has been developed as one of the standard tunnelling methods in Korea. Approximately 10 years ago, wet-mix shotcrete with sodium silicate (waterglass) accelerator was introduced and widely used to tunnel lining and underground support. However, this accelerator had some disadvantages due to the decrease of long-term strength compared to plain concrete (without accelerator) and low quality of the hardened shotcrete. In order to compensate for these disadvantages, recently developed alkali-free accelerator has been successfully demonstrated in numerous projects and applications as a new material to make tunnels more durable and safer. An experimental investigation was carried out in order to verify the strength behavior of wet-mix Steel Fiber Reinforced Shotcrete (SFERS) with alkali-free accelerator. Compressive strength, flexural strength, and flexural toughness were measured by testing specimens extracted from the shotcrete panels. From the results, wet-mix SFERS with alkali-free accelerator exhibited excellent strength improvement compared to the conventional shotcrete accelerator.

Keywords: Steel Fiber Reinforced Shotcrete, Accelerator, Permanent Shotcrete Lining

*1 삼성물산(주) 건설부문 토목기술팀 과장, 공학박사

*2 삼성물산(주) 건설부문 토목기술팀 부장, 토목구조기술사

*3 삼성물산(주) 건설부문 토목기술팀장 상무, 토질 및 기초기술사

*4 (주)에스코컨설턴트 상무, 토목구조기술사

요 지

1980년 초 서울지하철 건설공사를 계기로 국내의 터널공사에 NATM(New Austrian Tunnelling Method)공법이 적용되고 있다. 하지만, 주시보재의 하나인 슛크리트 기술은 NATM공법이 국내에 들어온 초기의 기술력을 아직 답습하고 있는 상태로 다량의 리바운드 발생하고, 노즐맨의 경험이나 기량등에 의존하는 경우가 많아 비용절감 및 시공능률 향상을 위한 개선이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 본 논문에서는 슛크리트 품질확보에 중요한 위치를 차지하고 있는 급결제(Accelerator)를 주변수로 강섬유보강 슛크리트(SFRS)에 대한 모형시험을 실시하여 고품질 슛크리트에의 적용 가능성을 검토하였다. 모형시험(압축강도, 휨강도, 휨인성)결과, Alkali-free 액상급결제를 사용한 슛크리트를 통해 고강도 발현을 위한 고가의 혼화제를 사용하지 않고서도 고품질의 고강도 슛크리트 개발 가능성을 확인할 수 있었으며, Single-Shell Lining 터널 등 Permanent Shotcrete Lining이라는 새로운 개념의 터널 지보 시스템 구축을 위한 요소기술로 그 적용이 확대될 것으로 판단된다.

주요어: 강섬유보강 슛크리트(SFRS), 급결제, 영구 슛크리트 라이닝

1. 서론

경제적인 진보와 함께 도로, 철도, 수로 등의 많은 터널이 국내에서 건설되어 왔으며, 사회간접자본의 투자 확대에 따른 다양한 터널 건설 수요도 향후 지속적으로 증가할 것으로 예상된다. 특히, 최근에 와서는 터널의 대단면화 및 장대터널에 대한 요구와 함께 보다 안전하고 경제적인 터널 건설을 위한 관심과 실용화를 위한 다양한 검토가 이루어지고 있다. 국내에서는 1980년 초 서울지하철 3,4호선 건설공사를 계기로 터널공사에 NATM(New Austrian Tunnelling Method)공법을 적용하고 있다. NATM 공법은 암반 굴착 직후 원지반의 지지능력을 최대한으로 활용하면서 슛크리트(Shotcrete, Sprayed Concrete)와 록볼트(Rock-bolt)를 주시보재로 터널의 안정성을 유지시키는 공법이다. 이 중 슛크리트는 일반 현장타설 콘크리트와는 달리 초기강도 확보를 위해 급결제(Accelerator)를 사용하며, 거푸집 없이 슛크리트 장비를 사용하여 굴착된 원지반에 높은 공기압으로 뿜어 붙여지는 콘크리트로서 지반의 이완을 방지하여 원지반의 강도를 유지하고, 콘크리트 아치로서 하중을 분담하는 기능을 수행하며, 초기강도 확보, 굴착면과의 부착성 및 리바운드와 분진의 발생을 최소화하는 성능을 함께 보유해야 한다.

하지만, 국내의 슛크리트 기술은 NATM공법이 국내에 들어온 초기의 기술력을 아직 답습하고 있는 상태로 다량의 리바운드가 발생하고, 노즐맨의 경험이나 기량등에 의존하는 경우가 많아 비용절감 및 시공능률 향상을 위한 개선이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 또한, 슛크리트 품질은 사용되는 재료나 배합, 각종 시공조건 및 시공방법 등의 영향을 받고 있으나, 각 시공 프로세스상에서 발생하는 문제점을 해결하기 위한 시스템 구축이 아직 미비한 상태이며 특히, 막장 근방의 분진농도 기준치를 정하여 엄격한 시공 및 환경관리를 실시하고 있는 선진외국과 비교했을 때 개선 및 보완되어야 할 사항이 많은 분야로 판단된다.

특히, 최근에는 2차 지보재인 현장타설 콘크리트 라이닝의 균열 발생에 따른 유지관리 비용 증가와 함께 국내의 지반 특성과 비슷한 노르웨이 등 북유럽의 배수형 터널의 경우 콘크리트 라이닝을 구조체보다는 마감재 형태로 많이 사용하여 슛크리트를 영구 지보개념으로 설계, 시공하는 사례가 점차 증가되고 있는 실정이다. 따라서, 콘크리트 라이닝에 대한 인식 변화와 함께 1차 지보재인 슛크리트의 고품질 및 고성능화는 기존의 콘크리트 라이닝을 대신해서 슛크리트로 최종 마감처리를 하는 Single-Shell Lining 터널, P.C.L터널 등 영구지보를 위한 슛크리트(Permanent Shotcrete Lining)라는 새로운

개념의 터널 지보시스템 구축을 위해 선행되어야 할 필수 요소기술로 향후 터널 설계와 시공에 있어 중요한 위치를 차지할 것으로 판단된다. 이러한 시대적 요구에 따라 우수한 성능으로 기존 슛크리트가 가지는 품질을 개선하고 리바운드 저감과 함께 터널의 건설 및 유지관리비용 절감 등 생애주기비용(Life Cycle Cost)에 효과적인 고품질의 고강도 슛크리트의 개발이 절실히 요구되고 있다.

2. 고품질 슛크리트

2.1 고품질 슛크리트 필요성

최근 사용이 증가하고 있는 3차선 이상의 대단면 터널 시공에서는 지금보다 더 큰 편평한 단면에서 굴삭되기 때문에 굴삭 후의 지반 안정성이 떨어질 확률이 높아지게 되는데, 이러한 단점을 보완하기 위해서는 조기에 지반을 안정화 시킬 수 있도록 초기에 강도를 확보할 수 있는 고강도 슛크리트의 시공이 요구되고 있다. 또한, 대단면 터널공사의 경우 슛크리트 두께가 두꺼워지면 그 수량이 증가하여 터널 건설비용의 증가로 이어지기 때문에 슛크리트 강도를 증가시켜 타설 두께를 줄임으로써 공사비 절감을 유도할 필요가 있다. 따라서, 고강도 슛크리트를 사용할 경우 슛크리트 타설 두께를 저감 시키고 이에 따른 굴삭 단면적과 슛크리트 타설 시간의 감소와 함께 향상된 시공Cycle을 통해 터널 건설 경비절감을 유도할 수 있는 경제적인 시공이 가능할 것으로 판단된다. 또한, 단층 파쇄대, 연약지대, 용수가 많은 부분 등 큰 변형의 발생이 예상되는 지반에 대해서도 고강도 슛크리트의 높은 탄성계수로 슛크리트의 강성을 높여 초기의 처짐을 억제하고, 고강도 슛크리트의 치밀한 내부조직과 향상된 부착성능을 통해 리바운드의 저감을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

한편, 최근 완공된 세계 최장의 도로터널인 Laerdal 터

널(24.5km, Norway) 등 Permanent Shotcrete Lining 시스템을 적용한 Single-Shell Lining 터널에 많은 관심이 집중되고 있으며, 이러한 새로운 개념의 터널 지보시스템 적용을 위해서는 지보재인 슛크리트의 내구성(Durability)이 중요한 문제로 떠오르게 된다. 미국콘크리트학회(ACI) 201 Committee에 의하면 내구성이란 기상작용, 화학적 반응, 침식, 그 외에 다른 성능저하의 과정들에 대한 저항성을 의미하며 구조물의 사용기간과 연결시켜 생각할 수 있는 즉, 일정 환경에 노출되어 원래의 형태와 품질을 장기간 유지, 확보할 수 있는 콘크리트로 규정하고 있다. 따라서, Permanent Shotcrete Lining의 도입을 위해서는 슛크리트의 고내구성화 또한 중요한 요소로 작용할 것으로 판단된다. 고품질 슛크리트의 정의를 정확하게 규정하기는 힘들지만, 기존의 슛크리트가 보유하고 있는 단점을 해소하고 장기강도 확보와 내구성능(중성화, 동결융해, 화학 및 염해 등)향상 및 리바운드와 분진을 저감할 수 있는 환경 친화적인 슛크리트의 의미가기도 하다.

2.2 고품질 슛크리트 배합

습식 슛크리트(Wet-mix shotcrete)를 구성하는 재료의 물성 자체는 일반 콘크리트와 동일하기 때문에 고품질의 고강도 슛크리트를 개발하기 위해서는 급결제(Accelerator)를 첨가하지 않은 Base Concrete의 강도를 높일 필요가 있으며, 그 방법으로는 고강도 콘크리트를 제작하기 위한 기존의 콘크리트 배합방법, 예를 들면 시멘트량의 증가나 실리카흄(Silica fume) 등의 고강도 발현을 위한 혼화제 첨가와 함께 시공성 향상을 위한 고성능감수제(Superplasticizer) 등의 적용이 가능하다. 하지만, 전술한 바와 같이 슛크리트에서는 일반 콘크리트와는 다른 타설방법(압축공기에 의한 뿔머리 부침)과 초기강도 및 부착력 향상을 위한 급결제를 사용하기 때문에 고품질의 슛크리트 개발을 위해서는 다음의 사항이 추가적으로

고려되어야 할 것이다.

- 1) 기존의 범용 급결제를 사용할 경우, 장기강도의 향상이 기대되지 않기 때문에 급결제를 첨가하지 않은 Base Concrete의 강도 발현에 손상을 주지 않는 급결제의 선정이 중요하며, 유럽기준에 나타나는 것처럼 환경 친화적인 급결제의 사용이 요구된다.
- 2) 실시공에서 충분한 시공성이 확보 가능한 배합이어야 한다. 여기서 말하는 시공성은 슛크리트 속도, 리바운드, 펌프압송 등의 관점에서 종합적으로 평가한 것을 말하며, 이를 위해서는 배합 및 현장 상황에 적합한 타설 장비의 선택이 중요하다.
- 3) 기존의 슛크리트 공사비보다 상승되지 말아야 한다. 이것은 고품질 슛크리트 제조를 위해 사용되는 주요 재료의 단가는 기존 재료의 단가보다 다소 비싸다 할지라도 슛크리트의 고강도화에 따른 타설두께 감소, 타설시간 감소, 부착력 향상으로 버력처리비용 절감 등 터널 전체공사비의 증가로 이어져서는 안된다는 의미이다.

3. 급결제 (Accelerator)

NATM터널에서 슛크리트는 중요한 지보재로서 무엇보다도 초기강도 확보와 리바운드 저감, 지반의 이완을 초기에 억제하기 위해 급결제(Accelerator)를 사용하고 있다. 이 급결제는 슛크리트의 초기강도 뿐만 아니라 장기강도 발현과 내구성, 슛크리트 두께까지 영향을 미치고 있어 슛크리트 배합에 사용되는 타 혼화제와 비교했을 때 그 중요성이 강조되는 재료이다. 국내 콘크리트 표준시방서(99, 시공편)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, 리

바운드를 최소화하여 암반에 견고하게 부착할 수 있고 인체에 유해한 영향이 없는 제품이어야 한다. 또한, 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.

일반적으로 급결제의 첨가율이 증가할수록 강도비(Shotcrete/Base concrete)는 저하하는 경향이 있어 슛크리트의 품질 변동을 억제하기 위해서는 급결제 첨가량의 관리가 중요하다. 지금까지의 연구 결과에 의하면 기존의 범용 급결제를 사용한 슛크리트의 장기강도는 급결제를 넣지 않은 Base Concrete와 비교했을 때 20 ~ 40%정도의 압축강도 저하와 급결제 첨가량이 증가할수록 강도 저하가 점점 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 급결제 pH가 13~15의 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 시공 현장 외부로 배출되어 용해수가 주변 환경을 오염시키는 것으로 알려져 있다. 한편, 시공면에 있어서는 타설 시 급결제 조절이 힘들어 일부 구간이 고농도화 되어 강도 발현에 영향을 미치는 등 아직까지 해결되어야 할 문제점들이 상당히 많이 남아있다.

따라서, 요구되는 초기강도 확보와 함께 장기강도 발현에 손상을 주지 않으면서 작업자에 대한 피해나 주변 환경에 나쁜 영향을 미치지 않는 환경 친화적인 급결제의 사용이 요구되고 있으며, 최근에는 약한 염기성(pH 1~3)의 새로운 급결제가 개발되어 이에 대한 성능평가 및 시험공이 선진외국에서 활발히 이루어지고 있다. 이 가운데 1990년대 중반 유럽에서 개발된 Alkali-free 액상급결제는 현재 몇 가지 종류의 제품이 생산되고 있으며, 그

성능에 있어서도 기존의 급결제가 가지고 있는 단점을 보완하고 작업자의 안전을 확보하는 환경 친화적인 제품으로 인정 받고 있다. 최근 일본에서도 일본 국내에서 생산되는 시멘트의 특성에 맞추어 4개 종류의 Alkali-free 급결제가 생산되고 있으며, 시험시공도 활발히 진행 중에 있다. 국내에서도 2~3종류의 Alkali-free 또는 약염기성 급결제가 생산되고 있으며 죽령터널의 일부구간에서 적용된 사례는 있으나 터널 전구간에 적용한 사례는 아직 전무한 것으로 알고 있다.

따라서, 본 논문에서는 슛크리트 품질확보에 중요한 위치를 차지하고 있는 급결제를 변수로 모형시험을 실시하여 실리카흙 등의 고강도 발현을 위한 고가의 혼화제를 사용하지 않고서도 슛크리트의 품질향상과 함께 시공성과 경제성을 동시에 확보할 수 있는 고품질의 슛크리트 개발 가능성을 확인하는데 주목적을 두었으며, 실험 결과를 통해 향후 Single-shell Lining 터널등 Permanent Shotcrete Lining 적용을 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

4. 모형시험개요

4.1 개요

Alkali-free 급결제와 물유리계 급결제(Sodium Silicate)를 주요 변수로 습식 강섬유보강 슛크리트(Steel Fiber Reinforced Shotcrete, SFRS)에 대한 모형시험을 실시하였으며, 제작된 공시체에 대해 압축강도, 휨강도, 등가휨강도 및 휨인성계수를 평가하여 그 성능을 비교 분석하였다.

표 1. 슛크리트 배합설계

G _{max} (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	S/a (%)	Air (%)	Unit Weight (kgf/m ³)					accelerator (C x %)	superplasticizer (C x %)
					W	C	S	G	Steel Fiber		
13	13	41	65	4.0	198	480	1035	593	40	7.0 10.0	1.0

4.2 사용재료

시멘트는 KS L 5201에 적합한 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 비중은 3.15였다. 골재는 경북 경산지역에서 생산되는 13mm 조골재(비중 2.63)와 세골재(비중 2.59)를 사용하였고, 강섬유는 섬유 길이에 대한 직경의 비인 형상계수 60(φ0.5x 30mm)의 Hook & bundle type (비중 7.85)의 제품을 사용하였다. 급결제는 국내 시판중인 M사의 Alkali-free 급결제(비중 1.40)와 현재 국내에서 가장 많이 사용되고 있는 물유리계 급결제(Sodium Silicate)를 사용하였다. 또한, 타설시 작업환경 확보와 슬럼프 조절을 목적으로 폴리카르복실계 고성능 감수제(Superplasticizer)를 사용하였다.

4.3 배합설계

현장의 배치 플랜트를 이용하여 물(고성능감수제 희석), 골재, 시멘트, 강섬유를 자동 계량하여 혼합하였으며, 고강도 슛크리트 배합의 경우 낮은 물-시멘트비로 골재의 표면수 변동에 따른 단위수량의 영향이 크기 때문에 현장 배합을 위해 사용 골재에 대해서는 표면수 보정을 실시하였다. 배합이 완료된 콘크리트는 레미콘 트럭을 이용하여 슛크리트 타설 장소까지 운반하였다. 본 시험에 사용된 재료의 배합을 표1에 나타냈으며, 급결제 사용량은 Alkali-free의 경우 시멘트량의 7.0%, Sodium Silicate는 시멘트량의 10%를 각각 사용하였다.

4.4 슛크리트 타설 및 양생



사진 1. 슛크리트 장비(Meyco Suprema)



사진 2. 노즐 및 반송관



사진 3. 슛크리팅 작업



사진 4. 코아 채취

스�크리트 타설을 위해 더블 피스톤 펌프 압송방식(Meyco Suprema)(사진 1)의 슛크리트 장비와 23.3m³/min 용량의 에어 컴프레서를 사용하였다. 배치플랜트에서 제조되어 레미콘 트럭으로 운반된 콘크리트는 슛크리트 장비에 부착된 콘에 부어져 직경 ϕ 65mm, 길이 25m의 콘크리트 반송관을 통해 시간당 5~6m³로 압송되었다. 급결제는 급결제 운송관(직경 ϕ 25mm)을 통해 노즐(직경 ϕ 40mm) 약 1.5m 후방에서 첨가되었으며, 첨가량은 슛크리트 장비의 디지털 계기판을 통해 자동으로 조절하였다(사진 2). 토출되는 슛크리트의 배합이 안정된 상태가 된 후 노즐 선단과 패널과의 거리를 약 1.5m 정도 이격하여 노즐맨에 의한 핸드스프레이를 실시하였다(사진 3).

시험시편 채취를 위해 강제 패널(100×100×10cm)과 빔 몰드(15×15×53cm)를 설치하여 타설 하였다. 타설 후 인력에 의한 패널 이동이 힘들어 트럭 크레인을 사용하여 타설이 완료된 패널을 이동하였으며, 이동 후 타설면의 정리와 함께 직사광선이나 바람에 의한 수분 증발을 억제하기 위하여 양생포를 덮어 습윤 양생을 실시하였다. 타설 다음 날, 강제 패널을 거꾸로 눕혀 사진 4에서 보는 바와 같이 강도시험을 위한 코아를 채취하였다.

4.5 시험항목 및 방법

4.5.1 프레쉬 콘크리트 재료시험

강도 시험용 패널에 타설 하기 전 배치플랜트에서 생산



사진 5. 슬럼프 측정



사진 6. 공기량 측정

된 base concrete에 대한 슬럼프 경시 변화를 알아보기 위해 KS F 2402규정에 의한 콘크리트 슬럼프 실험 (13cm)과 KS F 2421의 공기실 압력방법에 의한 공기량 측정시험(4%)을 실시하였으며, 타설 전 콘크리트의 온도 측정(18℃)을 실시하였다.

4.5.2 압축강도 및 탄성계수 측정

압축강도 시험용 공시체는 타설 1일 후 코어보링머신(Core boring machine)을 이용하여 $\phi 100\text{mm}$ 의 코어 공시체를 채취 하였으며, 시간에 따른 강도발현 상태를 파악하기 위해 일자별로 3개의 공시체를 제작하여 1일, 3일, 7일, 24일 강도시험을 수행하였다. 공시체의 높이는 타설 후 면처리를 하였으나, 일정한 높이로 얻기가 힘들어 시험 전 채취된 공시체 높이를 측정하여 ASTM C42-99 규정에 의거 코어 지름에 대한 공시체의 높이(숏크리트 두께)에 따라 강도 보정을 실시하였다. 콘크리트의 압축강도 시험은 KSF 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법)에 의해 실시하였으며, 100tonf 용량의 UTM을 사용하여 측정하였다. 또한, 설계에 적용될 탄성계수의 적정성 검토를 위해 사진7과 같이 콘크리트용 스트레인 게이

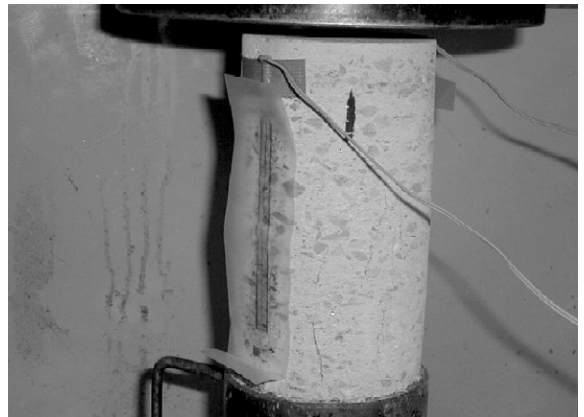


사진 7. 압축강도 및 탄성계수 측정

지를 부착하여 탄성계수를 측정하였다.

4.5.3 휨강도(Flexural Strength) 및 등가휨강도(Equivalent Flexural Strength) 평가

휨강도 측정을 위해 강재 몰드(15×15×53cm)를 사용하여 숏크리팅 한 후 15×15×45cm로 커팅하여 KS F 2408 (콘크리트의 휨강도 시험방법)규정에 의거 3등분점재하법을 이용하여 1일, 3일, 28일 강도 측정을 수행하였

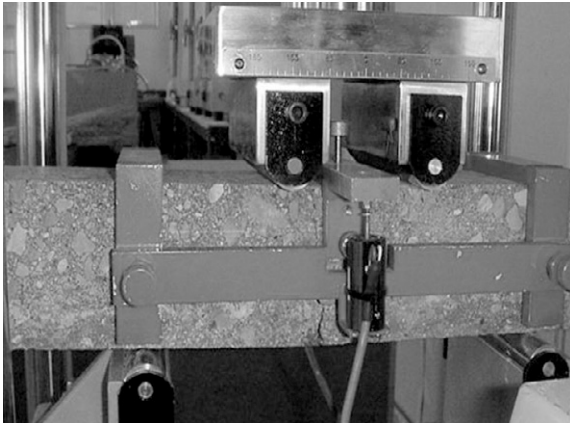


사진 8. 휨인성 시험

다. 또한, 휨인성 시험(사진 8)은 시험 여건 상 휨강도 시편과 동일한 치수를 이용하여 재령28일의 등가휨강도(등가휨강도)를 측정하였다. 처짐 측정을 위해 LVDT (Linear Voltage Displacement Transducer)를 보의 중앙부에 설치하였으며 재하점의 처짐이 전체 스패의 1/150(=3.0mm)로 될 때까지의 하중-처짐 곡선 아래 면

적(Tb)을 이용하여 휨인성계수를 산정하였다.

5. 모형시험 결과 및 분석

국내 터널표준시방서(1999)에서는 숏크리트의 압축강도 및 휨강도는 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. 본 논문에서는 고강도 숏크리트 개발이라는 차원에서 특정 설계기준강도를 설정하지 않았지만, 터널 표준시방서에 규정된 숏크리트 강도 규정(재령1일 강도 100kgf/cm²이상, 재령 28일 강도 180kgf/cm²이상)과 한국도로공사에서 규정한 강섬유보강 숏크리트의 28일 휨강도 45kgf/cm²(등가휨강도 30.6kgf/cm²(휨인성계수 68%))를 근거로 결과치에 대한 비교 분석을 실시하였다. 본 모형 시험간 실시한 압축

표 2. 강도시험결과

재령	Alkali-free (kgf/cm ²)				물유리계 (kgf/cm ²)			
	압축강도	탄성계수	휨강도	등가휨강도	압축강도	탄성계수	휨강도	등가휨강도
1일	149	120890	37	-	125	74470	30	-
3일	256	189730	52	-	156	100450	43	-
7일	306	247340	-	-	212	139130	-	-
28일	418	296800	73	43	257	188200	67	33

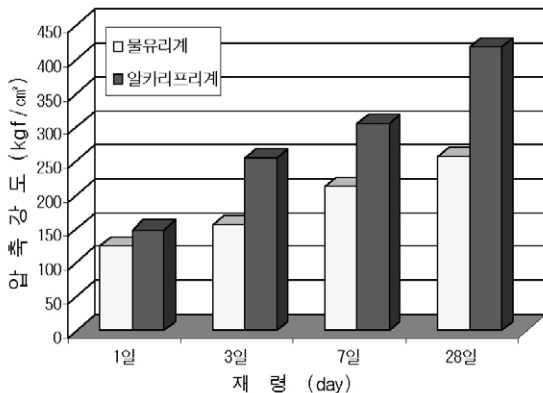


그림 1. 압축강도 시험 결과

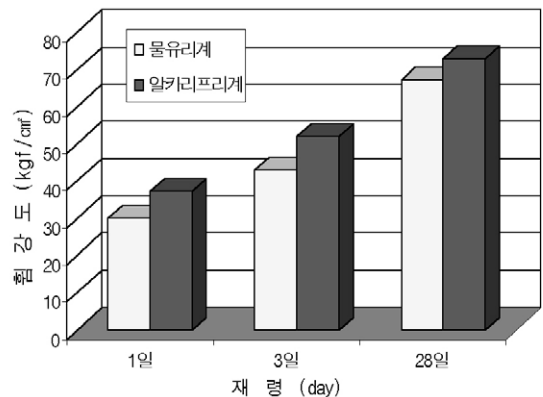


그림 2. 휨강도 시험 결과

강도, 휨강도, 결과를 표 2와 그림 1~2에 나타내었다.

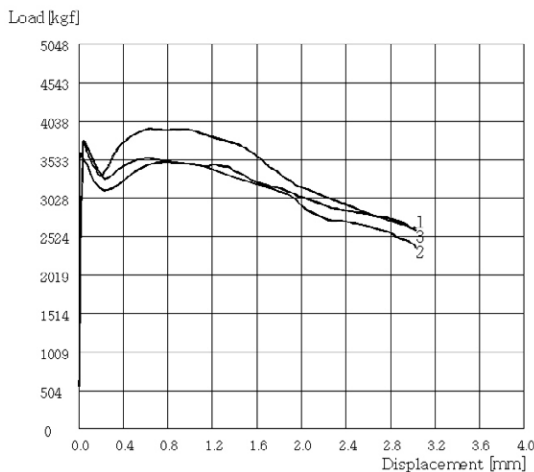
표 2를 통해 알 수 있듯이 Alkali-free 액상급결제를 사용한 숯크리트는 현재 국내 터널공사에 가장 많이 사용되고 있는 물유리계 액상급결제를 사용한 숯크리트보다 압축강도(28일 기준:62%향상), 휨강도(10%향상), 등가휨강도(30%향상) 등 전 시험에 걸쳐 전체적으로 우수한 강도 발현을 보였다. 특히, 초기재령에서의 압축강도 변화를 살펴볼 때 모두 1일 압축강도100kgf/cm²을 확보하였으나, Alkali-free 급결제 숯크리트의 경우에는 재령1일과 3일 사이에 물유리계 숯크리트의 2배가 넘는 42%의 강도 증진을 보여 초기강도 및 조기강성 확보에 유리하게

작용할 것으로 판단된다. 또한, 재령28일 압축강도가 시방 규정의 2.3배인 418kgf/cm²을 보여 실 터널구간에 타설 했을 때 예상되는 강도 저감을 고려하더라도 외국에서 규정하는 고강도 숯크리트의 품질기준에 근접할 수 있을 것으로 판단된다.

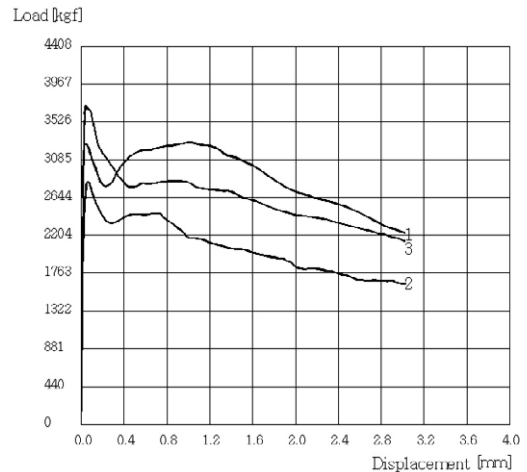
휨강도 및 휨인성 시험에서도 도로공사기준인 45kgf/cm²(휨강도)와 30.6kgf/cm²(등가휨강도)을 만족하는 것으로 나타났다. 표 3 및 그림 3에서 보는 바와 같이 휨인성 시험에서는 급결제 종류에 관계없이 3개 시편 모두 인성계수를 68%를 초과하였고, 그 중 1개의 시편이 계수를 85% 를 확보하였으나, 전반적인 성능 및 품질향상에 있

표 3. 휨인성 시험 결과

종류	시편	최대하중	Peak 변위	최대 변위	휨강도	Tb면적	등가휨강도	휨인성계수
		(kgf)	(mm)	(mm)	(kgf/cm ²)	(kgf -cm)	(kgf/cm ²)	(%)
물유리	1	3310	0.052	3.0	43.9	862	38.3	87.2
	2	2840	0.073	3.0	37.4	617	27.4	73.2
	3	3740	0.054	3.0	49.5	789	35.1	70.8
	평균	3290	0.060	3.0	43.6	756	33.6	77.1
Alkali-free	1	3790	0.066	3.0	48.8	954	42.4	86.9
	2	3630	0.030	3.0	42.6	927	41.2	96.8
	3	3940	0.638	3.0	49.7	1017	45.2	91.0
	평균	3790	0.245	3.0	47.0	966	42.9	91.6



(a) Alkali-free 급결제



(b) 물유리계 급결제

그림 3. 휨 인성 시험 결과

어서는 Alkali-free 급결제를 사용한 시편이 우수한 것으로 나타났다. 특히, 초기균열발생 이후의 강도회복 능력이 뛰어나 Alkali-free 급결제 시편 3번의 경우는 초기 균열발생 하중보다 더 큰 하중에서 최대하중이 얻음으로써 점진적인 연성파괴와 에너지 흡수능력을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 한편, 표 3에서 T_b의 면적은 처짐이 전체 스패의 1/150 (=3.0mm)로 될 때까지의 하중-처짐 곡선 아래 면적을 의미한다.

6. 설계 적용

실 터널에 숏크리트링 한 후 채취된 코아의 강도는 원지반과의 부착문제, 시공상태, 장비문제, 기온이나 습도 등 타설 당일의 환경적인 영향으로 본 시험과 같이 몰드에서 채취된 숏크리트 강도와 비교했을 때 강도의 저감이 예상되며, 강도의 저감은 동시에 탄성계수의 저감으로 이어지게 된다. 따라서, 본 연구에서는 20%의 강도저감을 고려하여 시험에서 구한 탄성계수의 80%를 적용한 보정 탄성계수를 구하여 비교 검토 하였다. 그림 4에 나타난 바와 같이 Alkali-free급결제를 사용한 공시체의 보정 탄성계수는 전 재령에 걸쳐 현재 설계에 적용중인 탄성계수치를 만족하는 것으로 나타나 초기의 높은 탄성계수로

인한 강성의 증가로 지반의 이완과 처짐을 조기에 억제할 수 있을 것으로 사료된다.

한편, 숏크리트를 고강도화 할 경우 설계두께의 저감이 기대되며, 설계두께를 얇게 하기 위해 균일한 변위가 발생하는 지반에 대해서는 축강성(탄성계수E x 단면적A)을 일정하게 한다는 가정이 성립될 수 있다. 숏크리트의 고강도화에 의해 탄성계수가 커지면 단면적을 줄일 수 있으며, 콘크리트의 탄성계수가 압축강도의 평방근에 비례해서 증가한다는 실험식을 적용한다면 숏크리트의 두께는 압축강도의 평방근에 비례해서 감소되므로 향후 단면 감소에 따른 경제적인 터널 설계로의 접근도 가능할 것으로 판단된다.

7. 결론

작업 여건상 충분한 시험체를 제작하지 못하였고, 리바운드량과 분진측정, 암반과의 부착성능 및 터널 전체 시스템에 미치는 영향 등 고려되지 못한 부분이 많아 절대적인 평가를 내리기에는 무리가 따를 것으로 판단되지만, 본 모형시험을 통해 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) Alkali-free 급결제를 사용한 습식 강섬유보강 숏크리트는 물유리계 액상급결제를 사용한 숏크리트보다 압축강도는62%, 휨강도는10%, 등가휨강도는 30%의 향상을 보였다. 또한, 현재 설계에 적용되는 탄성계수를 상회하는 수치를 확보함으로써 향후 보다 합리적인 터널설계를 유도할 수 있을 것으로 사료된다.
- 2) Alkali-free급결제의 사용으로 작업자 보호는 물론 실리카 흡 등 고강도 발현을 위한 고가의 혼화제를 사용하지 않고서도 고품질의 고강도 숏크리트를 확보할 수 있을 것으로 사료되며, 현재 국내에서 사용중인 숏크리트 장비의 대부분이 습식장비인 것을 고

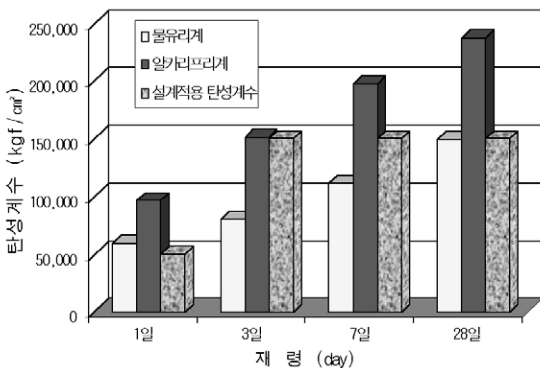


그림 4. 탄성계수 비교

려했을 때 액상급결제의 적용은 시공성 및 장비면에서도 경쟁력이 있을 것으로 판단된다.

향후 계획

고품질 슛크리트는 Single-Shell Lining 터널 등 Permanent Shotcrete Lining구축을 위해 선행되어야 할 필수 요소기술중의 하나로 최근 그 관심이 증대되고 있다. 이러한 시점에서 당사에서는 강도(Strength)와 내구성(Durability)이 향상된 고품질의 고성능 슛크리트의 개발을 위해 금년부터 한국건설기술연구원(KICT)과 공동연구를 진행할 예정이며, 본 연구의 성과에 대해서는 학회지를 통해 지속적으로 소개할 예정이다.

감사의 글

본 연구를 수행하는 과정에 있어 많은 도움을 주신 삼성물산(주) 건설부문 이승복 차장님, 오성무 과장님, 그리고 모형시험을 실시하는데 많은 협조를 아끼지 않으신 코리아마스터빌더스(주) 기술연구소 최명식 선임연구원께 감사를 표하는 바이다.

참고문헌

- 1) 건설교통부(1999), "터널표준시방서"
- 2) 건설교통부(1999), "콘크리트표준시방서"
- 3) ACI (1995), "Specification for Shotcrete -Reported by ACI Committee 506"
- 4) EFNARC (1996), "European Specification for Sprayed Concrete"
- 5) (社)日本トンネル技術協會(1996), "トンネルの吹付けコンクリート"
- 6) Morgan, D. R., (1991), "High early Strength Blended-Cement Wet-Mix Shotcrete," Concrete International, V. 13, No. 5, May, pp.35~39.
- 7) 松浦ほか(1999), "アルカリフリー液體急結劑を使用した高強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 pp.972~973.
- 8) 杉山ほか (1997), "各種材料を用いる高強度吹付けコンクリートの諸物性に關する研究," 콘크리트工學年次論文報告書, Vol. 19, No. 1, pp.1423~1428.
- 9) 室充ほか (2001), "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, 第32卷1, pp.25~31.
- 10) Professor Koichi ONO (Univ. of Kyoto, ITA W.G12 Shotcrete Use. Vice animateur)와의 Private Communication