

시멘트 광물계 분말 급결제의 현장적용 성과



조남섭
(주)유니온
부설연구소 부소장



조 현
쌍용건설(주)
토목기술부/부장

1. 서론

터널공사에서 주로 사용되는 NATM공법은 강재지보, 록볼트와 함께 숏크리트를 지보재로 사용하여 터널의 안전성을 유지시키는 공법으로서 숏크리트의 성능은 시공 조건이나 재료여건에 따라 많은 차이가 있으나 숏크리트의 기본성능인 급결성을 부여하는 급결제의 영향이 절대적인 것으로 나타나고 있다.

급결제는 대부분 초기 부착성을 높이기 위해 급결성이 부여되는 대신에 원 콘크리트의 강도를 크게 저하시키는 것이 일반적이며 시공조건에 매우 민감하여 콘크리트의 슬럼프나 재료상태 및 재료배합 여건 등의 현장여건에 따라 숏크리트의 성능이 크게 차이가 나기 때문에 매우 세심한 관리를 필요로 하고 있다.

또한 급결제를 소량 사용하면 부착성이 약하여 리바운드량이 많아 재료손실이 커지며 다량 사용하면 리바운드가 줄고 시공성이 좋아지나 장기강도가 너무 저하되어 터널안정성에 악영향을 주는 양면성으로 인해 숏크리트

를 사용하는 터널현장에서는 가장 해결하기 어려운 문제 중의 하나로 대두되고 있다. 특히 강알칼리로서 환경오염과 작업자의 피부화상 등의 문제와 함께 장기강도의 저하가 나타나는 알루미네이트계 급결제를 주로 사용하고 있는 국내 대부분의 현장에서는 숏크리트 품질의 불균일과 함께 리바운드 과다로 재료비가 증가되고 버력처리 및 강알칼리성 용출수로 인한 환경오염이 가중되는 문제를 겪어왔다.

이러한 문제들을 극복할 수 있는 새로운 급결제에 대한 연구가 수년전부터 본격화되어 시멘트광물계 및 알칼리 급결제가 개발되었으며 여러 현장에 적용이 시도되고 있고 특히 시멘트 광물계 급결제는 다수의 현장에서 그 성능이 입증된 신공법으로서 분말형 급결제를 습식시공에 적용하기 위한 특별히 개량된 장비를 적용하여 숏크리트의 품질이 현저히 높아지고 환경오염 및 인체에 대한 영향이 적은 장점으로 인해 많은 관심이 집중되고 있다.

시공현장인 노현터널은 청원-상주간 고속도로 2공구인 충북 청원군에 위치한 터널로서 기존 액상급결제를 사용한 숏크리트의 문제점을 개선하고 리바운드가 보다

적은 진보된 슛크리트 공법을 적용하고자 새로이 개발된 급결제들에 대한 검토를 진행한 결과 여러 현장에서 성능이 입증된 시멘트광물계 급결제의 사용이 적합하다고 판단되어 고속도로 터널에서는 처음으로 시멘트광물계 급결제를 적용하게 되었다. 당 현장에서는 시멘트광물계 급결제의 적용으로 인해 슛크리트의 품질향상 및 환경오염의 최소화는 물론 리바운드의 현저한 감소로 경제적 절감효과를 가져오게 되었으며 한국도로공사 2005년 상반기 품질·환경관리 개선사례로 선정되었다.

2. 현장 소개

■공사명 :

청원~상주간 고속도로공사 제2공구(노현터널)



그림 1. 노현터널 전경 및 슛크리트 시공장면

■사업개요 :

청주방향 STA. 12+561~ 942 (381M)

상주방향 STA. 12+564 ~ 959 (395M)

■발주처

한국도로공사

■시공회사

쌍용건설(주)

3. 시멘트광물계 급결제

시멘트 광물계 급결제는 시멘트 광물의 일종인 칼슘알루미네이트 광물이 포틀랜드 시멘트와 반응하면 급결이 되는 원리를 이용한 것으로 시멘트와 유사한 색상을 띤 분말형 급결제로서 일본에서는 이미 1980년대부터 슛크리트의 고품질화와 작업환경의 개선을 위하여 실리케이트계 및 알루미네이트계 액상급결제의 사용을 줄이고 시멘트 광물의 일종인 칼슘알루미네이트를 주성분으로 하는 시멘트광물계 분말형 급결제의 적용을 확대하였으며 현재에는 약 80% 이상의 현장에서 적용되고 있다. 국내에서는 신기술 제441호로 지정된 수냉 비정질 $C_{12}A_7$ 계 시멘트광물계 급결제가 개발되어 사용되고 있는데 수냉으로 제조한 비정질광물을 주원료로 하여 일본의 시멘트광물계 급결제보다 월등한 물성을 나타내는 것으로 알려져 있다.

시멘트 광물계 급결제는 칼슘알루미네이트 광물로서 CA , C_3A , $C_4A_3\tilde{S}$ 또는 $C_{12}A_7$ 을 이용하거나 소성 명반석 등의 다양한 칼슘알루미네이트 광물을 적용할 수 있으나 비정질 $C_{12}A_7$ 을 주성분으로 하는 급결제가 성능이 가장 우수한 것으로 알려져 있으며 장기강도의 저하가 적을 뿐 아니라 초기 급결성이 탁월하고 연약지만, 풍화암이나 용수가 많은 터널에서도 효과적인 시공이 가능하여 일본에서 가장 널리 사용되고 있다. 국내의 터널시공조건도 풍화암이나 용수가 발생하는 경우가 많아 일본과 유사한 시공조건을 가지고 있어서 시멘트광물계 급결제가 적합할 것으로 판단된다.

4. 재료시험 (실내시험)

4.1 시험 개요

시멘트 광물계 급결제의 성능비교를 위하여 실험실에서 기존의 알루미늄이트계 급결제와 응결시험 및 강도시험을 비교 실시하였다.

4.2 급결제의 성능비교 결과

4.2.1 응결시간

급결제의 응결성능을 비교하기 위해 KS F 2436을 바탕으로 KCI-SC-102 부속서 “관입저항에 따른 모르터의 응결시간 측정방법”에 따라 시멘트 : 세골재 (1:3)의 모르터를 만들어 프록터 관입시험기로 시험하였다.

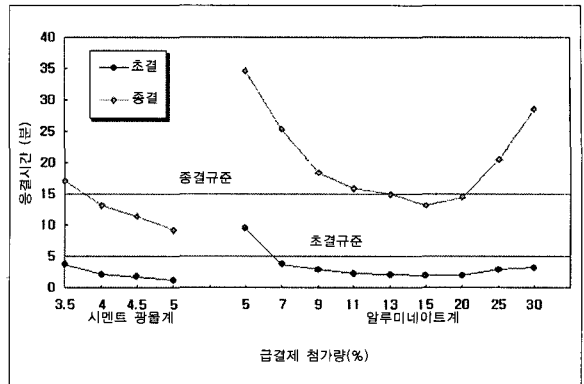


그림 2. 급결제별 및 첨가량별 모르터의 응결시간

급결제 사용량에 따른 급결성능을 보면 알루미늄이트계 급결제는 15% 정도에서 콘크리트학회 기준치인 초결 5분 이내, 종결 15분 이내의 규정을 만족시키고 있으나 시멘트 광물계 급결제는 4%에서 초결과 종결을 만족하는 것으로 측정되었다.

표 1. 슛크리트 실내시험 배합표

G _{max} (mm)	슬럼프 (cm)	W/C (%)	S/a (%)	단위재료량(kg/m ³)				급결제 (%)	유동화제 (%)
				W	C	S	G		
13	12±2.5	48	65	227.52	474	1013	555	C×8 (AI)* C×5 (CM)**	C×1.0

*(AI): 알루미늄이트계, **(CM): 시멘트광물계

표 2. 슛크리트 압축강도 시험결과(φ10×20cm 실린더형 공시체)

구 분	압축강도(kgf/cm ²) 비교				급결제 사용량 (Cement × %)
	1 일	3 일	7 일	28 일	
급결제무첨가	6.78	21.70	29.56	37.12	-
시멘트광물계	10.41	21.01	21.70	28.97	5
알루미늄이트계	5.01	12.41	14.87	18.63	8

표 3. 슛크리트 휨강도 시험결과(10×10×30cm 빗형 공시체)

구분	휨강도(kgf/cm ²) 비교			급결제 사용량 (Cement × %)
	1 일	3 일	28 일	
급결제무첨가	1.37	4.62	5.89	-
시멘트광물계	2.65	4.52	5.70	5
알루미늄이트계	1.77	3.93	5.20	8

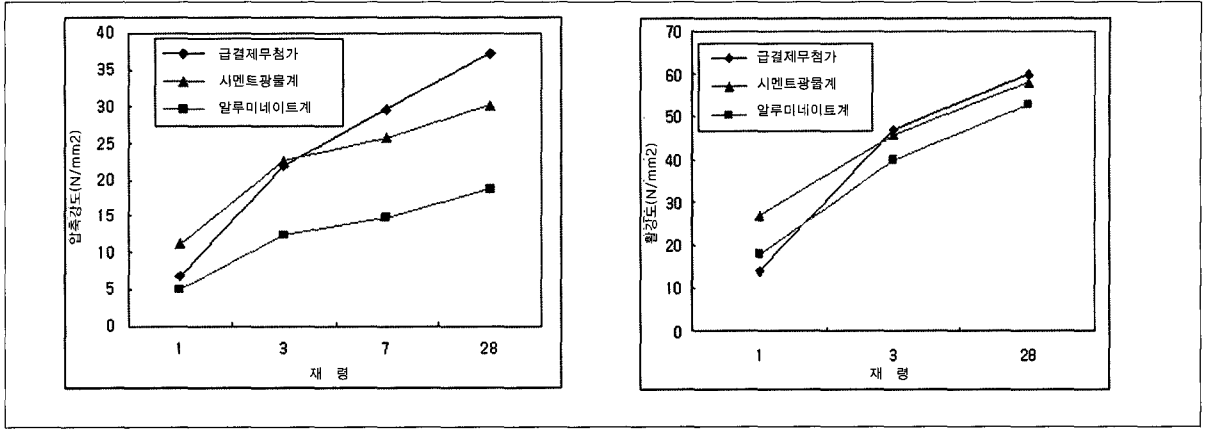


그림 3. 압축강도 및 휨강도 시험결과

4.2.2 강도시험(압축 · 휨강도)

실린더형 공시체의 압축강도 시험은 "콘크리트 압축강도 시험 방법(KS F 2405)"에 따라 시험하였고 빔형 공시체의 휨강도시험은 "콘크리트 휨강도 시험방법(KS F 2408)"에 준하여 수행하였다. 급결제의 혼합량은 실제 현장에서 안정 타설이 가능한 함량을 기준으로 시멘트광물계는 5%, 알루미늄이트계는 8%로 하였다.

표2, 표3 및 그림3에 나타난 강도시험결과를 보면 모든 면에서 시멘트광물계가 높게 나타나고 있으며 특히 압축강도에서 보면 알루미늄이트계는 초기강도가 낮아서 1일강도가 급결제무첨가콘크리트(Plain Concrete)의 73.9%로 급결제무첨가콘크리트(Plain Concrete)보다도 낮게 나타

났으나 시멘트광물계는 1일강도에서 플레인 대비 166%의 고강도를 나타내었으며 장기적으로는 알루미늄이트계가 플레인 대비 50.2%의 낮은 강도를 나타내어 강도저하가 심하게 나타나나 시멘트 광물계는 플레인 대비 81.5%로서 강도저하가 훨씬 적게 나타나고 있다.

5. 현장 숏크리트 시험

5.1 현장 숏크리트 품질시험 결과

본 현장의 2005년도 숏크리트의 현장시험결과를 종합하면 표 5와 같다. 휨강도는 "콘크리트 휨강도 시험방법

표 4. 현장 숏크리트 배합표

G _{max} (mm)	슬럼프 (cm)	W/C (%)	S/a (%)	단위재료량 (kg/m³)				유동화제 (kg)	강섬유 (kg)	급결제 (C×%)
				W	C	S	G			
10	10	42.7	60.0	201	471	953	640	4.71	43.0	5.0

표 5. 현장 시험결과 (2005년 품질시험 평균치)

구분	휨강도 (N/mm²)		Core강도 (N/mm²) 28일	강섬유 혼입율 (%)	휨인성 (%)
	1 일	3 일			
품질기준	2.06 이상	4.41 이상	19.6 이상	90 이상	68 이상
시멘트광물계	2.9	5.6	25.2	93.9	75.67

(KS F 2408)"에 의해 1일, 28일 재령에서 각각 3개의 공시체를 측정하여 평균값을 구하였고 코어강도는 타설후 28일이 경과된 부위에서 코어채취기로 $\phi 100\text{mm}$ 의 코어를 3개씩 채취하고 KS F 2405 「콘크리트 압축강도 시험방법」에 의하여 시험하여 평균치로 표시하였다. 또한 강섬유 혼입량을 측정하기 위해 압축강도를 측정후의 코어시편을 완전분쇄, 자석을 이용하여 강섬유를 모아 무게를 측정하였으며 "강섬유보강 슛크리트 시공 및 품질관리 지침"(한국도로공사, 1997) 및 "터널 슛크리트 품질기준 개선" 지침(한국도로공사, 2003. 11. 3)에 따라 휨인성 시험을 실시하였다.

이 결과로 보면 알루미늄네이트 급결제는 품질기준을 충족시키기 어려운 것이 일반적이지만 시멘트광물계 급결제는 모든 항목에서 품질기준치를 훨씬 상회하는 안정된 물성을 나타내는 것을 알 수 있다.

5.2 리바운드 시험

본 현장에서 리바운드 성능을 평가하기 위하여 바닥에 시트를 깔고 $5\sim 6\text{m}^2$ 의 슛크리트를 천장 및 벽면에 타설한 후 바닥에 떨어지는 재료를 수거하여 다음의 식에 의해

표 6. 리바운드 실측치

구분	1	2	3	4	5	평균
시멘트광물계	7.2%	6.9%	7.1%	6.1%	6.4%	6.8%

리바운드율을 측정하였으며 그 결과를 표6에 나타내었다.

$$\text{리바운드율(\%)} = \frac{W_{\gamma}}{W_{\gamma} + W_{\omega}} \times 100$$

여기서, W_{γ} = 리바운드 된 재료중량

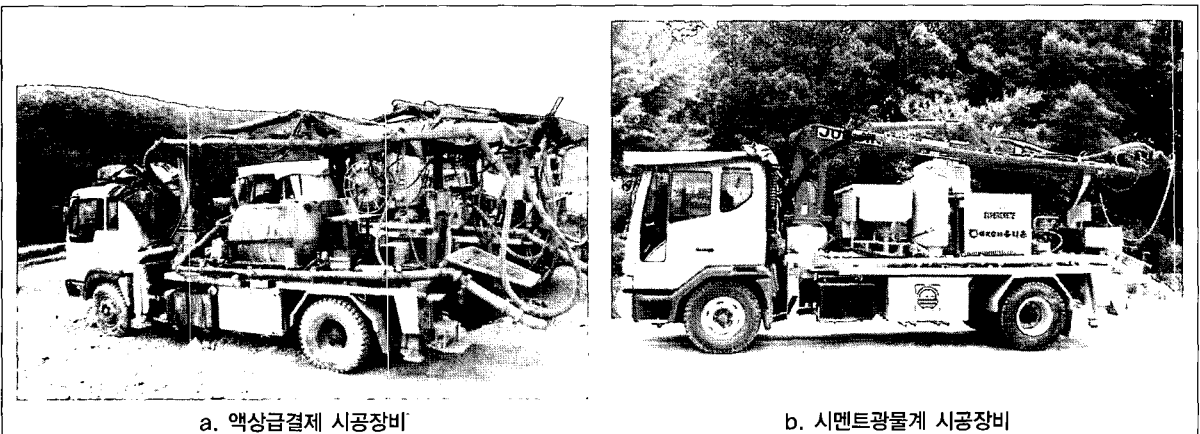
W_{ω} = 벽에 뿜어 붙여진 재료중량

이 결과로 볼 때 시멘트광물계 급결제를 사용한 슛크리트는 통상 15% 이상의 리바운드가 발생하고 있는 알루미늄네이트계 급결제에 비해 약 절반정도의 리바운드량을 보이고 있어 부착성이 뛰어난 것으로 평가된다.

6. 시공성 및 경제성

6.1 시공시스템의 비교

그림 4는 일반 액상급결제 시공용 장비와 본 시공현장에서 사용된 분말급결제 시공장비를 비교한 것으로서 액



a. 액상급결제 시공장비

b. 시멘트광물계 시공장비

그림 4. 시공장비의 비교

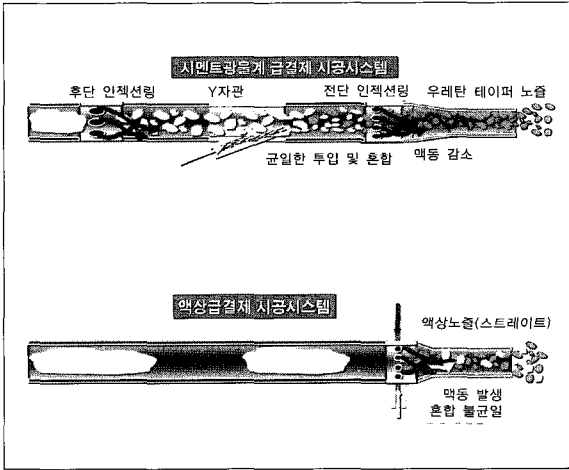


그림 5. 시공시스템의 원리 및 재료흐름의 비교

상장비의 급결제 탱크를 제거하고 그 공간에 분말급공시스템을 장착하여 개조한 것이 특징이다.

액상급결제 장비는 그림 5와 같이 노즐 직전에 액상노즐을 통하여 급결제와 압축공기를 투입하여 교반 즉시 분사하는 단순한 구조로서 콘크리트 펌프의 피스톤 교대 작동시 재료의 풀림이 발생하여 급결제만 분사되는 맥동 현상이 발생하는 것이 일반적이다. 그러나 시멘트광물계 장비는 압축공기 투입을 위한 두개의 인젝션링과 급결제 투입을 위한 Y자관으로 구성되어 전, 후단의 압축공기의 압력을 제어함으로써 맥동현상이 없이 균일한 재료흐름이 되도록 하고 Y자관에 연결된 연장호스와 인젝션링,

도로공사에서 추천하고 있는 우레탄 테이퍼노즐에서 3 단계로 혼합이 되기 때문에 슛크리트의 분사상태와 품질이 균일한 장점이 있다.

6.2 시공성

본 현장에서 시멘트광물계 급결제를 사용한 결과 맥동 현상이 거의 발생하지 않고 균일한 타설이 진행되었으며 응결이 빠르기 때문에 한 번에 두께를 많이 할 수 있어 시공능률이 향상되며 용수부위에서도 정상적인 타설이 가능하였다.

6.3 작업환경 및 환경오염

알루미늄에이트계 급결제는 방진마스크를 착용하고도 현기증, 구토증세, 피부 부식등 인체 유해성을 체험했으나 시멘트광물계 급결제를 적용한 본 현장에서는 일반 마스크 착용만으로도 장시간 부담 없이 터널 내 작업이 가능할 정도로 자극성이 적었으며 마스크를 착용하지 않아도 견딜 수 있을 만큼 분진이 적게 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

또한 리바운드가 극히 적어서 폐콘크리트의 처리량을 줄일 수 있었으며 이로 인해 환경오염도 줄어드는 효과가 있는 것으로 판단된다.

표 7. 알루미늄에이트계와 시멘트 광물계 급결제사용공법의 경제성 비교(유통단가 기준)

구분	알루미늄에이트계	시멘트 광물계
실제 부착된 슛크리트량 (m ³)	7,275	7,275
리바운드량 (m ³)	1,184	531
전체 슛크리트 사용량 (m ³)	8,459	7,806
스�크리트 재료비(만원)	93,559	88,921
폐콘크리트 처리비용(만원)	5,446	2,442
스�크리트 추가에 따른 B/P장손실액(만원)	1,074	-
실투입원가(만원)	100,079	91,369
절감액(만원)		8,710

6.4 경제성 비교

본 현장에서 시공 완료 후 쏿크리트에 관련된 비용을 실제 데이터에 근거하여 계산한 결과 표 7과 같이 시멘트 광물계는 리바운드 손실감소 및 이에 따른 버력처리, B/P장 비용 등의 절감효과가 크기 때문에 알루미늄계에 비해 8,710만원이 절감되어 약 8.7%의 비용절감 효과가 있는 것으로 나타났다.

7. 결론

본 노현터널에서 시멘트광물계 급결제를 적용하기 위하여 현재 국내에서 보편적으로 사용되고 있는 알루미늄계 급결제와 실내에서 비교 시험한 결과와 실제 시공에 적용하여 산출된 각종 시험결과 및 비용계산 결과로 다음과 같은 결론을 얻었다.

■ 모르타르 응결시간 시험결과 시멘트광물계는 4%만 사용하더라도 KCI-SC-102 규격(초결5분 이내, 종결15분 이내)에 적합하였으나 알루미늄계의 경우는 응결이 너무 느려서 15%를 사용하여야 규격을 만족하였다.

■ 압축강도 시험결과에서 알루미늄계는 1일강도가 급결제무첨가콘크리트(Plain Concrete)의 73.9%로 급결제무첨가콘크리트보다도 낮게 나타났으나 시멘트광물계는 플레인 대비 166%의 고강도를 나타내었으며 28일 강도에서는 알루미늄계가 플레인 대비 50.2%의 낮은 강도를 나타내는 반면에 시멘트 광물계는 플레인 대

비 81.5%로서 고강도를 발현하였다.

■ 시멘트광물계 급결제는 분말급결제를 사용할 수 있는 별도의 전용장비를 사용하여야 하는 문제가 있으나 기존 장비를 개조할 수 있어 호환성이 있는 것으로 판단되며 기존의 액상장비에 비해 백동현상이 거의 없고 쏿크리트의 품질이 균일하여 시공성이 향상되는 것으로 나타났다.

■ 현장 품질시험 결과 알루미늄계 급결제는 품질기준을 충족시키기 어려운 것이 일반적이지만 시멘트광물계 급결제는 모든 항목에서 품질기준치를 훨씬 상회하는 안정된 물성을 나타내었다.

■ 시멘트광물계 급결제를 사용한 쏿크리트는 부착성이 우수하여 리바운드가 평균 6.8%로서 일반적으로 리바운드가 15%이상인 알루미늄계에 비해 절반정도로 나타났다.

■ 시공전체의 쏿크리트량 평가결과 알루미늄계에 비해 653m³(약 7.7%)의 쏿크리트가 절감되었으며 버력처리, B/P장 비용 등을 감안하면 알루미늄계에 비해 총 8,710만원이 절감되어 약 8.7%의 비용절감 효과가 있는 것으로 나타났다.

■ 시멘트광물계 급결제는 자극성이 적어 인체에 해가 적을 뿐 아니라 리바운드가 적어 버력처리로 인한 환경오염을 줄일 수 있는 것으로 판단된다.