

국내 최장대 도로터널(인제터널)의 시멘트광물계 급결제 적용사례



김희철
(주)대우건설
14공구
현장소장



김대형
(주)대우건설
14공구
품질시험실장



조남섭
(주)유니온
연구소장 상무



김관일
(주)유니온
연구소 차장

1. 서론

서울양양고속국도는 서울~동홍천(78.5km)구간은 2009년 10월에 개통되었고 현재 동홍천~양양구간(71.7km)이 2015년 12월 개통을 목표로 시공 중에 있다.

서울~양양고속국도가 준공되면 서울과 양양간 운행 소요시간은 종전의 3시간 30분에서 1시간 30분으로 단축

되며 동해고속국도, 당진~영덕간 고속국도와 연계되어 앞으로 동서, 남북축 간 균형적인 지역발전을 이루는데 크게 기여할 것이다.

이중 동홍천~양양 14공구는 강원도 인제군 기린면 진동리에서 양양군 서면 서림리까지의 구간으로 국내 최장대 도로터널이며 세계 11위인 인제터널(10.96km)과 서림 1, 2터널 그리고 소교량 6개소를 포함하고 있다.



그림 1. 위치도

특히 인제터널은 장대터널로서 환기 및 방재가 더욱 중요하여 설계 시부터 세밀한 검토가 이루어졌다. 비상시를 대비한 방재설비로서 화재 시 화재구간을 자동 인지하여 소화할 수 있는 물 분무 설비가 전 구간에 계획되었으며, 57개의 피난연락경이 설계기준보다 짧게 200m 이내로 설치가 되어 신속한 대피가 가능토록 배려하였다. 이 밖에도 졸음방지로 주행안전성을 향상시키기 위해 100m 구간 4개 구간에 특수경관 조명을 계획하였다.

본 고에서는 당 현장의 주요 친환경 설계에 반영된 고성능 숏크리트 재료인 시멘트광물계 급결제를 사용함에 있어 그동안의 품질성능, 시공성, 환경영향성, 경제성에 대하여 중점을 두어 소개하고자 한다.

2. 시멘트광물계 급결제

2.1 개요

숏크리트는 뿔어 붙이는 특성으로 지반에 부착하여 급격히 경화하는 특성과 함께 조기에 강도를 발현하여 후속 작업을 신속히 진행할 수 있도록 하고 장기적으로 안정한 강도를 발휘하여 영구적으로 1차 지보재료로서의 역할을 하여야 한다. 그러나 급결제의 품질과 콘크리트의 제반여건에 따라 무더기 붕락에 의한 리바운드 증가 및 작업능률의 저하 등 품질관리가 매우 까다롭고 국내 대부분의 현장에서 급결제를 과다하게 사용하여 초기강도가 낮고 장기강도가 감소되는 문제가 있다. 특히 환경문제에 있어서는 선진국가에서는 환경에 유해한 급결제의 사용을 금지하고 있으나 아직도 이러한 급결제가 보편적으로 사용되고 있는 국내현실은 세계적 흐름에 뒤쳐져있다 할 수 있다.

시멘트광물계 급결제의 가장 큰 특징은 급결력이 우수하여 단층파쇄대 등 연약지반, 깊은 여굴 시공, 차수효과가 탁월하며 또한 초기강도가 높아 무더기 붕락 억제로 터널 안정성에 매우 유리하며, 급결제 변동량에 따른 강

도변화가 적고 장기강도 손실이 극히 적다는 점이다. 또한 종래의 약품계통이 아닌 시멘트계 이므로 강재부식 및 인체 유해성이 적고, 급결제 사용량 및 리바운드량이 적어 페콘크리트량 저감 등 비용 절감은 물론 환경오염을 최소화할 수 있다.

2.2 수화 메카니즘 및 미세구조 관찰

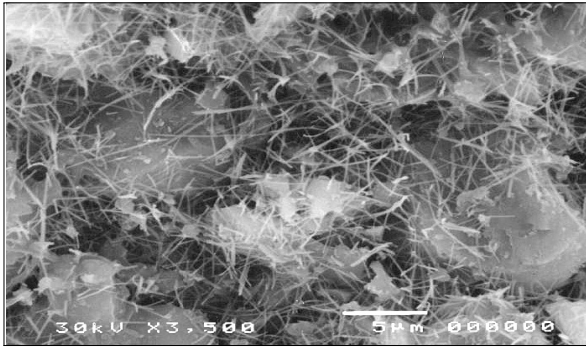
시멘트광물계 급결제는 가장 급결력이 뛰어난 $C_{12}A_7$ 계(칼슘알루미네이트)를 주재료로 하며 시멘트와 결합 시 결정질보다는 비정질의 상태일 때 더 급결력이 우수하다.

$C_{12}A_7$ 은 수화하면 C_2AH_3 과 C_4AH_x (x 는 19 또는 13)의 혼합물을 생성시키며, Card house상 구조를 형성하지만 시멘트와 혼합하면 시멘트 중의 $Ca(OH)_2$ 및 $CaSO_4$ 와 반응하여 급속히 에트린자이트($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$)의 침상결정을 생성시켜 급결하게 된다. 수화초기에 형성된 침상형 에트린자이트는 시멘트의 수화를 저해하지 않으므로 초기강도가 높고 장기적으로 안정된 강도를 나타낸다.

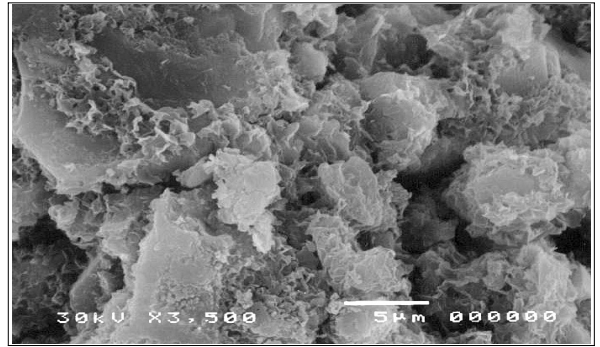
시멘트광물계와 알루미네이트계 급결제의 미세구조는 그림 2와 같다. 시멘트광물계는 재령 1시간에 이미 침상의 에트린자이트가 거미줄처럼 생성되어 시멘트 입자들을 결합하고 있는 것을 알 수 있으며, 재령 1일에는 시멘트 입자가 수화되면서 생성된 C-S-H겔이 성장하여 에트린자이트와 엉켜 치밀화 되고 있음을 알 수 있다.

알루미네이트계 급결제의 초기 수화물은 $Ca(OH)_2$ 와 반응하여 생성된 C_3AH_6 와 $NaAlO_2$ (소듐알루미네이트)의 가수분해시 나타나는 $Al(OH)_3$ 및 $NaOH$ 의 자극에 의해 생성된 C-S-H겔이 혼재된 것으로 추측되는 물질이 시멘트 입자에 덮히고 있는 것이 관찰되며 재령 1일에는 미반응 시멘트 입자가 전혀 보이지 않고 C-S-H겔로 완전히 덮힌 형태를 보이고 있다.

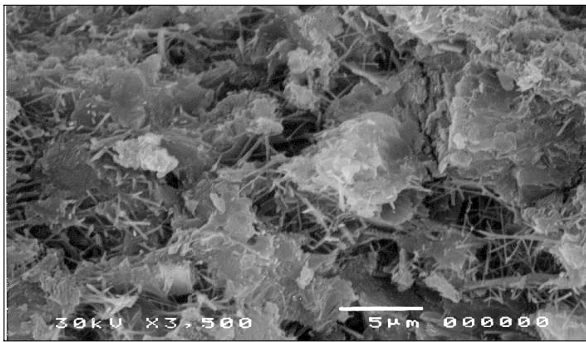
이러한 구조는 미반응 시멘트 입자와 물이 접촉하는 것을 방해하여 장기적인 수화를 방해하게 되며, 이는 장기



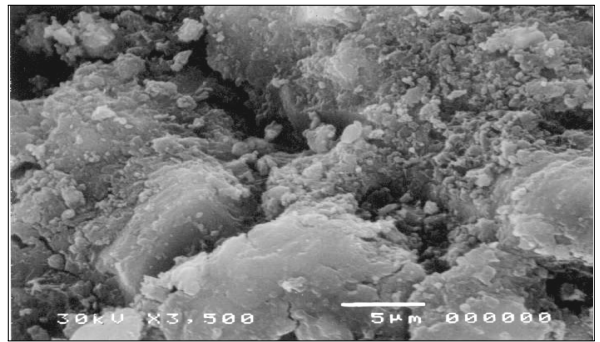
(a) 시멘트광물계 재령1시간



(b) 알루미늄네이트계 재령1시간



(c) 시멘트광물계 재령1일



(d) 알루미늄네이트계 재령1일

그림 2. 급결제 종류에 따른 재령별 수화물의 미세구조

강도 저하의 원인이 된다.

2.3 시공시스템

그림 3은 시멘트광물계 급결제를 사용하는 복합 에어 인젝션 시스템으로 구성된 습식타설 장비로서 일본에서 시멘트광물계 급결제를 시공하는 장비는 국내 시공여건에 맞지 않기 때문에 복합 에어인젝션 시스템을 쏫트 차량에 장착한 전용장비를 개발하였다. 이 장비는 콘크리트 부유 및 노즐에서의 가속을 위한 에어인젝션링과 분말공급장치 및 급결제 투입을 위한 Y자관으로 구성되어 있으며 각 압축공기의 압력을 조절하여 피스톤 펌프식 장비의 단점인 맥동현상을 극소화하였다.

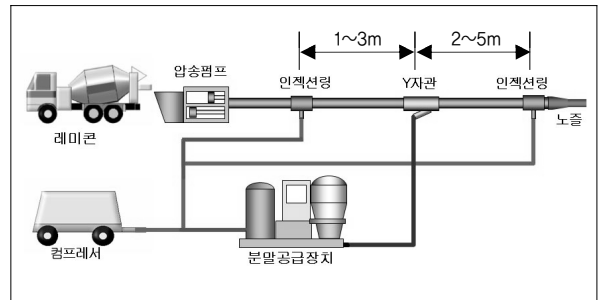


그림 3. 시멘트광물계 습식 쏫트리트 복합 에어인젝션 시스템 구조

급결제는 분말공급장치에서 압축공기와 함께 Y자관으로 공급되며 콘크리트는 후단 인젝션링에서 부유되고 전단 인젝션링에서 가속됨으로서 Y자관에 걸리는 압력이 감소되어 급결제 투입이 원활하도록 하였고 Y자관과 노즐 사

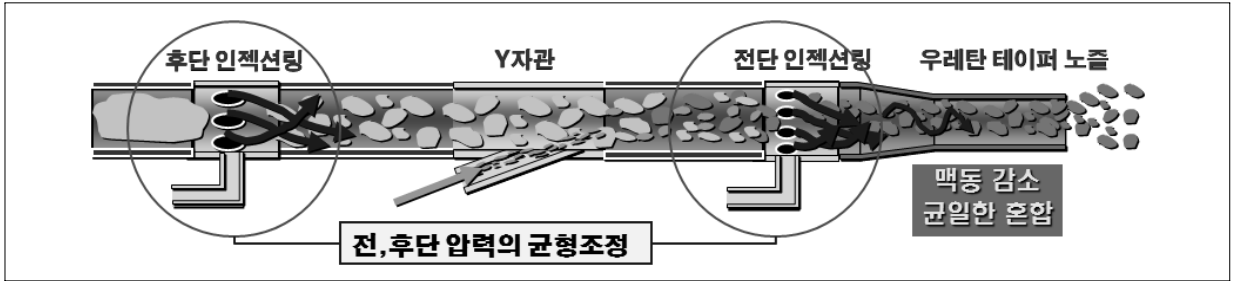


그림 4. 시멘트광물계 재료 흐름도

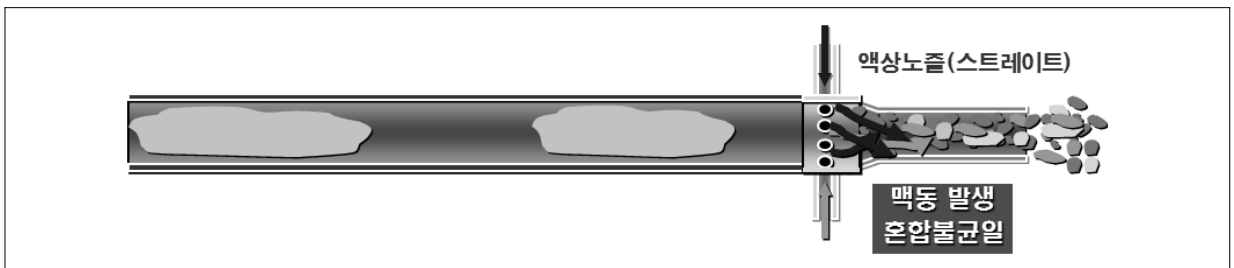


그림 5. 액상형 재료 흐름도

표 1. 급결제별 응결시간(급결제 5% 사용)

구 분	초결(분:초)	종결(분:초)
알루미늄에이트계	4:43	37:09
알칼리프리게	7:45	16:00
시멘트광물계	2:37	4:32

※ 국내 터널시방기준 : 초결 5분 이내, 종결 15분 이내

이의 재료호스 내에서 와류에 의해 균일하게 혼합되어 분사되므로 품질의 내구성과 작업능률을 향상시킬 수 있다.

2.4 응결시간 및 급결제 적정 사용량

응결특성은 급결제의 사용량, 숏크리트의 차수 및 부착 성능에 주요인자로 작용하며, KS F 2436을 기준으로 KCI-SC-102 부속서 “관입저항에 따른 모르타의 응결시간 측정방법”에 따라 시멘트 : 세골재의 비를 1:3으로 하여 모르타를 만들어 그림 6의 프록터 관입시험기로 실내 시험을 실시하여 초결 및 종결을 각각 측정하였다.



그림 6. 핀 관입시험 장치

급결제 종류별 사용량에 따른 응결특성을 보면 표 1과 같이 알루미늄에이트계, 알칼리프리게 급결제는 응결시간이 과다하게 지연되는 것으로 측정되어 KCI-SC-102 기준치인 초결 5분 이내, 종결 15분 이내의 규정에 만족하

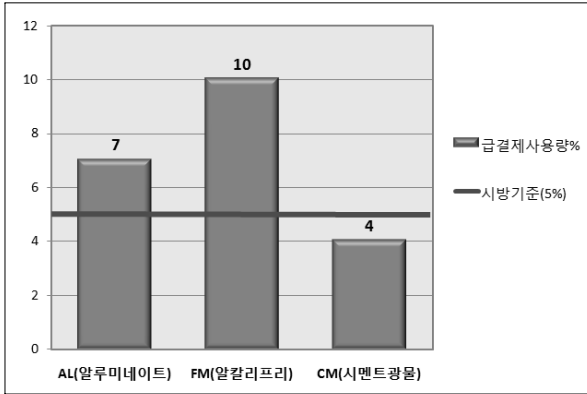


그림 7. 급결제 종류별 사용량
(자료 : 한국도로공사, 지하공간건설기술연구단)

지 못하고, 시멘트광물계 급결제는 적은 사용량으로도 초결과 종결을 만족하는 것으로 측정되어 응결특성이 우수한 것으로 판단된다.

급결제 종류별 사용량은 그림 7과 같다. 일반적으로 국내 시방기준에 의하면 시멘트 대비 5%로 되어 있으나 실제 현장에서는 응결시간이 느린 급결제의 경우 사용량이 시방기준을 만족하지 못하기 때문에 이로 인해 급결제 과다 사용으로 장기강도 저하가 발생하고 있다.

2.5 연약지반시공 및 차수효과

인위적으로 파이프 라인에 구멍을 뚫어 유속이 빠른 용수에 지수성능 및 차수효과를 시험한 결과 그림 8과 같이 급결력이 우수해 빠른 지수 및 탁월한 차수효과 및 일회 몰아붙이기 타설 두께가 40~80cm 정도로 깊어 시공성 측면에서도 매우 우수한 것으로 나타났다.

표 2. 급결제별 분진농도

구 분	분진농도(mg/m ³)		측정방법
	DATA	평균	
기준치	3.0mg/m ³ 이하		터널 굴착거리가 50m 이상인 지점 (막장 후방 50m)
알루미늄네이트계	1.12 / 1.71	1.42	
시멘트 광물계	0.95 / 0.83	0.89	

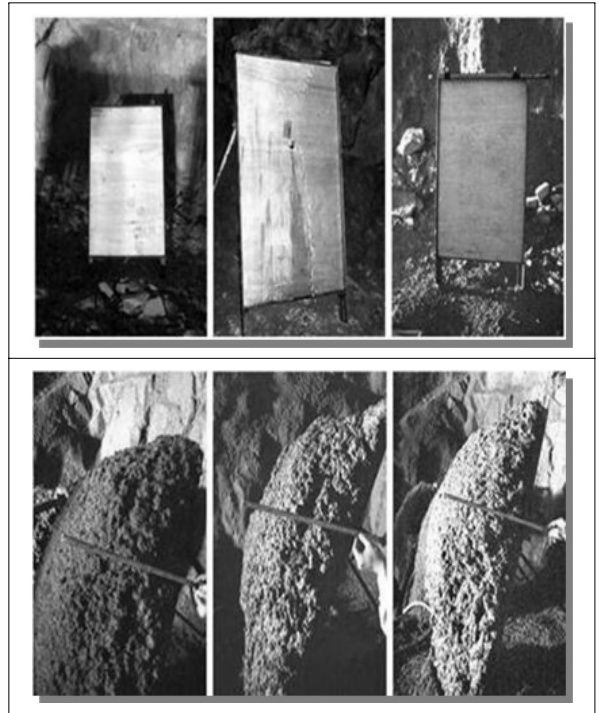


그림 8. 시멘트광물계 용수부위 타설 사진

2.6 환경성

숏크리트 작업시 급결제의 분진은 노즐에서의 혼합이 잘되지 않거나 펌프압송식 장비를 사용할 때 펌프의 작동 교대 순간에 콘크리트의 이송압력이 저하되는 맥동현상이 발생하게 되는데 이때 급결제가 농후하게 혼입되며 발생하게 된다. 시멘트광물계 급결제는 전술한 내용과 같이 시공시스템의 개선을 통해 급결제가 젖은 콘크리트와 사전에 혼합하여 펌핑됨으로써 표 2의 결과와 같이 분진이



그림 9. 분진농도 측정사진

표 3. 현장 슛크리트 배합표

구 분	G _{max} (mm)	슬럼프 (cm)	W/C (%)	S/a (%)	단위재료량 (kg/m ³)				유동 화제 (kg)	강섬유 (kg)	급결제 (C×%) 광물계/액상
					W	C	S	G			
일반	10	10	38.3	60.3	180	470	991	652	4.70	-	5.0/8.0
강섬유 보강	10	10	37.3	60.2	177	474	993	656	4.74	40.0	5.0/8.0

적게 발생됨을 알 수 있다.

3. 현장 슛크리트 강도, 반발율

3.1 강도

본 현장의 슛크리트에 대한 강도시험결과를 종합하면 표 3, 그림 10, 그림 11과 같다. 휨강도는 “콘크리트 휨강도 시험방법(KS F 2408)”에 의해 1일, 28일 재령에서 각각 3개의 공시체를 측정하여 평균값을 구하였고 코어강도는 타설 후 28일이 경과된 부위에서 코어채취기로 Φ100 mm의 코어를 3개씩 채취하고 KS F 2405 「콘크리트 압축강도 시험방법」에 의하여 시험하여 평균치로 표시하였다.

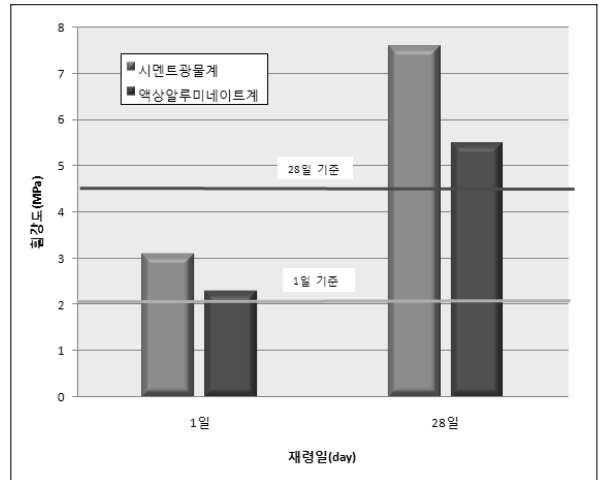


그림 10. 급결제 종류 및 재령별 휨강도

상기 결과로 보면 알루미늄미네이트 급결제는 품질기준을 충족시키기 어려운 것이 일반적이지만 시멘트광물계 급

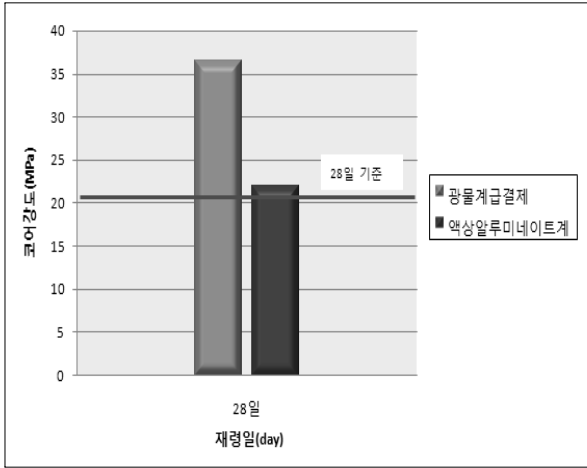


그림 11. 급결제 종류에 따른 압축강도(재령 28일, 코어기준)

결제는 모든 항목에서 품질기준치를 훨씬 상회하는 안정된 물성을 나타내는 것을 알 수 있고, 1일 강도는 3.1N/mm²으로 초기강도 발현이 매우 빠르고, 28일 휨강도는 기준치의 1.7배, 코어강도는 기준치의 1.8배 이상 높음으로 나타나 탁월한 고강도를 나타내고 있다.

3.2 현장 슛크리트 반발율(리바운드)

본 현장에서 반발율 성능을 평가하기 위하여 바닥에 수거용 시트를 깔고 슛크리트를 천단 및 벽체에 타설한 후 바닥에 떨어지는 재료를 수거하여 다음의 식에 의해 반발율을 측정하였으며 그 결과를 표 4에 나타내었다.

$$\text{반발율}(\%) = \frac{W_r}{W_t} \times 100$$

여기서, W_r = 반발재료의 전중량

W_t = 사용재료의 전중량

본 현장의 시멘트광물계 급결제 반발율은 9.45%로써 13.9%(도로공사 22개 현장측정 평균치)의 리바운드가 발

표 4. 리바운드 실측정치(1m³ 측정)

구 분	측정치(kg)	
	1회차	2회차
사용재료의 전중량(kg)	2,359.5	2,359.5
반발재료의 전중량(kg)	215.6	230.5
반발율 (%)	9.1	9.8
	평균 : 9.45	

표 5. 알루미늄네이트계와 시멘트 광물계 급결제 사용공법의 경제성 비교 (유통단가)

구 분	시멘트 광물계	알루미늄네이트계	비 고
실제 부착된 슛크리트량 (m ³)	56,998	56,998	
리바운드량 (m ³)	5,948	9,433	
전체 슛크리트 생산량 (m ³)	62,946	66,431	
스�크리트 재료비(만원)	545,650	613,993	▼ 68,343
페콘크리트 처리비용(만원)	83,762	132,833	▼ 49,071
절감액(만원)	▼117,414		19.12% 절감

* 2011. 09. 30 기준으로 본 현장 슛크리트 총 생산량은 62,946(m³)이며, 급결제 사용량은 시멘트의 3.87% 임.

* 알루미늄네이트계 액상급결제 적용 시 리바운드는 도로공사제시 평균data인 13.9%를 적용하였으며, 사용량은 8%임.

생하고 있는 알루미늄네이트계 급결제에 비해 큰 차이를 보이고 있어 이는 시멘트광물계 급결제의 슛크리트의 부착 성능 및 우수한 응결특성으로 리바운드 저감 효과가 있는 것으로 나타났다.

4. 경제성

본 현장에서 경제성을 평가하기 위하여 2011년 9월 말까지의 시공기준으로 슛크리트에 관련된 비용을 실제 데이터에 근거하여 계산한 결과 표 5와 같이 시멘트광물계 급결제는 리바운드 손실 감소 및 이에 따른 슛크리트 반발제인 페콘크리트 처리 비용 등 알루미늄네이트계에 비해

약 19%의 비용 절감 효과로 경제성이 매우 우수한 것으로 나타났다.

5. 맺음말

국내 대표적인 장대터널인 본 인제터널 시공현장에서 적용하고 있는 환경친화형 고성능시멘트광물계 급결제에 대해 현재 국내에서 보편적으로 사용되고 있는 알루미늄에이트계 급결제와의 실내 및 실제 시공결과에서 얻어진 결과로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 모르타르 응결시간 시험결과 시멘트광물계는 4%만 사용하여도 KCI-SC -102 규격(초결 5분이내, 종결 15분이내)에 적합하여 급결 성능이 매우 뛰어난 것으로 평가되었고 이로 인한 효과로 단층파쇄대, 용수 부위, 깊은 여굴에 대한 무더기 붕락이 거의 없이 타설 작업이 가능하였으며, 특히 초기강도 발현이 매우 우수하여 터널 안정성 확보는 물론 작업능률 및 시공성이 탁월하였다.
- 2) 압축강도 시험결과(28일 코어기준)에서 시멘트광물계

는 36.8N/mm^2 로 고강도를 발현하는 등 현장시험 결과 모든 항목에서 품질기준치를 훨씬 상회하는 안정된 물성을 나타내었으며, 고강도를 발휘하여 터널 내구성이 향상되는 것으로 나타났다.

- 3) 시멘트광물계 급결제를 사용한 쏿크리트의 반발율(리바운드)은 평균 9.45%로 반발율이 13.9%인 알루미늄에이트계 급결제에 비해 부착성능이 우수하였으며 급결제 사용량 및 리바운드 저감을 포함한 재료비 절감과 이로 인한 페콘크리트 처리 비용까지 총 19%의 비용 절감 효과로 경제성이 매우 우수한 것으로 나타났다.
- 4) 기존의 알루미늄에이트계 급결제는 피부 부식, 호흡기 손상 등의 독성이 강하고 강알칼리성의 침출수로 인한 환경오염이 문제가 되고 있으나 시멘트광물계 급결제는 저 자극성이고 시공시의 분진이 매우 적으며 분말이어서 즉시 경화되기 때문에 침출이 거의 없으므로 환경오염이 극히 적은 것으로 나타났다.
- 5) 물리성능, 시공/경제성 및 환경성 등 전반적인 측면에서 시멘트광물계 급결제의 품질성능이 우수한 것으로 나타났으며, 국내 최장대 도로터널인 인제터널(10.96km)의 안정적인고 성공적인 완공에 일조한다고 할 수 있겠다.