

복합 에어인젝션 시스템으로 구성된 타설장비를 이용한 습식 숏크리트 공법소개

사회기반시설 확충 및 국토이용의 효율성을 위하여 최근 증가되고 있는 터널 및 지하공간의 공사에는 굴착후 원지반에 숏크리트를 뿜어붙여 안정화시키며 시공하는 NATM(New Australian Tunneling Method) 공법이 주로 사용되고 있다.

1 개요

사회기반시설 확충 및 국토이용의 효율성을 위하여 최근 증가되고 있는 터널 및 지하공간의 공사에는 굴착후 원지반에 숏크리트를 뿜어붙여 안정화시키며 시공하는 NATM(New Australian Tunneling Method) 공법이 주로 사용되고 있다.

숏크리트는 굴착 후 원지반을 강지보, 록볼트 등으로 보강하고 그 위에 콘크리트를 뿜어붙여 안정화하는 공법으로서 고속 시공이 가능한 로봇 장비를 이용하여 콘크리트에 응결시간을 단축시키기 위한 급결제를 혼합하여 압축공기로 원지반에 분사한다.

국내에 사용되고 있는 기존의 액상급결제들을 이용한 숏크리트 공법들은 초기 응결속도가 느리기 때문에 리바운드(리바운드)가 많아 재료손실이 크고 장기강도가 저하되어 내구성을 기대할 수 없으며 강알칼리성 물질을 사용하여 피부부식이나 체내 축적으로 인해 작업자의 건강을 해칠 뿐 아니라 버력 및 침출수에 의한 환경오염을 가중시키는 등의 많은 문제점이 대두되

어 왔다.

이러한 문제의 해결을 위하여 일본에서 사용되고 있는 시멘트 광물계 급결제와 유럽에서 많이 사용하고 있는 알칼리프리 급결제를 국내 시공에 적용하려는 연구가 수년전부터 진행되어 왔으나 재료, 시공속도, 시공환경 등의 국내 시공여건의 차이로 인하여 많은 시행착오를 겪고 있다.

이에 따라 인체에 유해하고 품질이 저하되는 종래의 강알칼리성 급결제를 인체에 해가 적고 친환경적이며 내구성이 우수하게 발현되는 급결제로 대체하기 위해 시멘트 광물의 일종인 비정질 C₁₂A₇을 주성분으로 하는 분말형 시멘트 광물계 급결제를 개발하였고 국내시공여건에 적합한 시공 장비시스템 및 시공기술을 개발하여 종래의 급결제가 가지고 있는 문제점인 내구성 저하, 리바운드(리바운드)다, 환경문제 등을 획기적으로 개선하고자 하였다.

본 고에서는 이렇게 개발된 급결제를 당사가 시공중인 청원~상주 2공구 노현터널 현장에 적용한 사례를 소개하고자 한다.

2 시멘트 광물계급결제 및 시공시스템

2-1. 일본의 시멘트 광물계 급결제 현황

일본에서는 이미 1980년대부터 숏크리트의 고품질화와 작업환경의 개선을 위하여 실리케이트계 및 알루미늄이테계 액상급결제의 사용을 지양하고 시멘트 광물의 일종인 칼슘알루미늄이테를 주성분으로 하는 시멘트광물계 분말형 급결제를 적용하기 시작하여 현재에는 약 80% 이상의 현장에서 적용되고 있다.

시멘트 광물계 급결제의 개발은 주로 칼슘알루미늄이테 광물의 주용도인 알루미늄시멘트를 생산하고 있는 DENKA사에 의해 주도되어 왔으며 비정질 C₁₂A₇을 주체로 하는 급결제가 가장 많이 사용되고 C₁₂A₇ 광물의 유사광물인 C₁₁A₇·CaF₂나 응결특성 보다는 고강도를 목적으로 한 C₄A₃S 광물계 급결제도 실용화 되어 있다.

시멘트 광물계 급결제는 응결이 빠르고 응수에 강하여 풍화압과 응수가 많은 일본의 터널시공조건에 적합한 것으로 알려지고 있는데 시공여건이 일본과 유사한 국내에도 이와 같은 시멘트 광물계 급결제가 적합할 것으로 판단되어 많은 연구개발 시도가 있었다.

2-2. 수냉 비정질 C₁₂A₇계 시멘트 광물계 급결제

시멘트 광물계 급결제의 주성분인 칼슘알루미늄이테 광물 중 성능이 가장 우수한 것은 비정질화된 C₁₂A₇으로 알려져 있는데 본 신기술에서는 제조과정에서 고온으로 용융된 C₁₂A₇을 급결할 때에 공기중에서 냉각하는 일본의 선행기술과는 달리 물을 사용하여 수냉함으로써 선행제품보다 성능이 월등한 급결제를 개발하였다.

본 신기술의 급결제는 시멘트 광물을 주성분으로 하기 때문에 자극성 및 환경오염이 적으며 시멘트의 초기 수화시 생성되는 수화물인 에트리자이트를 다량 생성시킴으로써 콘크리트를 신속히 응결시켜 부착된 숏크리트의 탈락이 방지되므로 리바운드가 현저히 감소되고 장기적으로 시멘트의 수화를 방해하지 않기 때문에 고강도가 발현된다. 또한 응결이 빠르며 신속히 수화물이 생성되기 때문에 시멘트량에 대해 7~8%를 사용하고 있는 일본의 급결제보다 월등히 적은 4~6%의 소량으로도 우수한 부착력을 발휘하며 응수부위에서도 지수능력을 발휘할 뿐만 아니라 한번에 타설할 수 있는 두께가 크기 때문에 시공성이 향상되어 리바운드 절감으로 인한 비용절감과 함께 공기가 단축되는 경제적인 효과가 있다.

■ 표 1. 급결제별 특성비교

구분	실리케이트계 급결제	알루미늄이테계 급결제	시멘트 광물계 급결제
인체영향 및 환경오염	* pH11-13(강알칼리) * 호흡시 체내 축적 * 장기적 용탈발생	* pH14 (강알칼리) * 피부 화상 및 부식 * 강염기성 용출수	* pH10-12(약알칼리) * 저자극성 * 환경오염 적음
품질특성 및 시공성	* 초기, 장기강도 저하 * 장기용탈 심함	* 초기 장기강도 저하 * 시멘트 특성, 슬럼프에 민감	* 초기 및 장기강도 우수 * 재료특성에 둔감하여 품질관리 용이 * 응수부위 타설 용이
안전성 및 내구성	* 초기강도가 낮아 작업 안전성 불량 * 장기적 내구성 저하	* 초기강도가 낮아 작업 안전성 불량 * 장기적 내구성 저하	* 초기강도가 높아 작업 안전성 우수 * 장기적 내구성 우수
경제성	* 급결제 사용량 12-15% * 리바운드 많음	* 급결제 사용량 7-10% * 리바운드 많음	* 급결제 사용량 4-6% * 리바운드 적음 * 공기단축 및 비용절감

2-3. 시공 시스템(복합 에어인젝션 시스템)

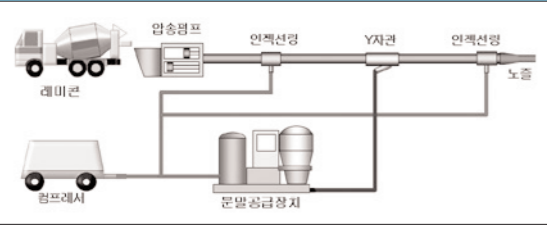
본 신기술의 시멘트 광물계 급결제는 분말상이므로 기존의 액상급결제를 사용하는 숏크리트 장비로는 시공이 불가능하며 분말급결제를 정량적으로 이송하여 혼합하는 분말공급시스템이 필요하다. 시멘트 광물계 급결제가 보편화 되어 있는 일본의 시공장비 도입을 검토하였으나 시공속도가 국내터널의 절반 정도로서 낮은 속도로 정밀시공을 하는 일본장비의 특성상 시공속도가 빠른 국내에는 적용이 불가능하였으며 국내 시공여건에 적합한 시공시스템의 개발이 필요하였다.

본 신기술의 시공장비 시스템은 <그림1> 및 <그림2>와 같이 분말을 정량적으로 공급하는 분말공급장치를 사용하고 콘크리트에 급결제를 투입하는 Y자관의 전, 후단에 <그림3>과 같은 공기 투입 및 와류형성이 가능하도록 신개발품인 인젝션링을 결합하여 Y자관에 걸리는 압력을 감소시킴으로써 대량타설 조건에서도 급결제의 투입과 혼합이 용이하도록 하였다. 이 장비는 각 부분의 압력을 조정함으로써 기존 숏크리트 장비의 문제점인 맥동현상을 현저히 감소시켜 균일한 숏크리트 시공 및 품질을 유지할 수 있다. 또한 장비시스템의 국산화와 함께 기존의 숏크리트 장비를 개조하여 액상급결제와 겸용으로 사용할 수 있어 적용상의 호환성을 높인 것이 특징이다.

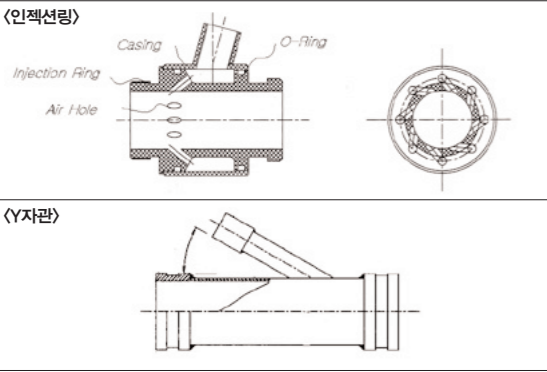
■ 그림 1. 시공장비



■ 그림 2. 시공시스템



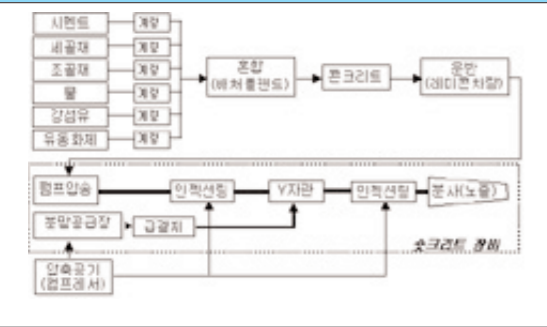
■ 그림 3. 시공시스템의 인젝션링 및 Y자관



2-4. 시공방법

컴프레서 및 시공장비를 이동하여 준비하고 압축공기의 압력을 조절하여 최적조건으로 한 후 시공현장의 배척플랜트에서 생산한 레미콘을 시공장비에 투입하고 펌프를 작동시킨 다음 급결제 투입밸브를 열고 노즐로부터 슛크리트를 분사한다.

■ 그림 4. 시멘트 광물계 습식 슛크리트 시공 흐름도



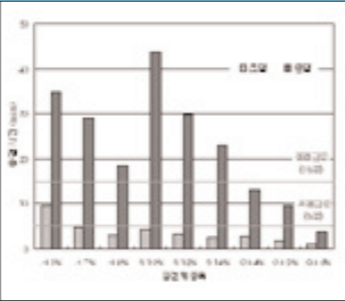
3 급결제 및 슛크리트의 품질 및 성능

3-1. 응결 및 강도특성

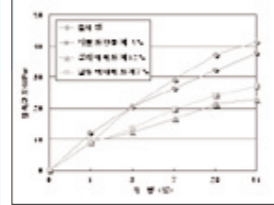
시멘트 광물계 급결제는 응결특성이 타 급결제에 비해 탁월하여 <그림 5>와 같이 초결 종결 모두 콘크리트학회의 표준시방서에 의한 중 물탈관입저항에 의한 응결시험 기준(KCI-SC-102)을 유일하게 만족하며 슛크리트의 압축강도 및 휨강도 특

성에 있어서도 타 급결제 보다 월등하게 높게 나타나고 있다. 특히 28일 강도에 있어서 기존의 액상 급결제들은 플레인 강도의 50~60% 밖에 발휘하지 못하는 데 반해서 시멘트 광물계 급결제는 플레인 강도의 80~90%에 달하는 고강도 특성을 나타내어 급결제의 대표적 단점인 장기강도 저하의 문제가 획기적으로 개선되었다.

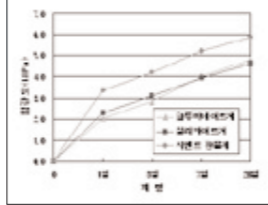
■ 그림 5. 급결제별 응결시간의 비교



■ 그림 6. 급결제별 슛크리트 압축강도 비교



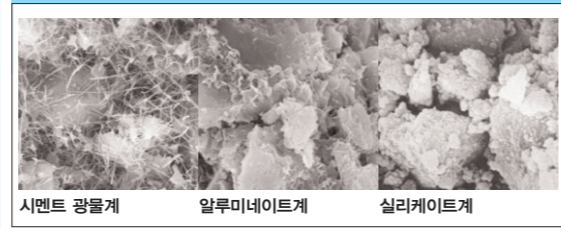
■ 그림 7. 급결제별 슛크리트 휨강도 비교



3-2. 급결제별 수화물의 비교

<그림 8>의 SEM에 의한 수화물의 구조를 보면 알루미늄이테계와 실리케이이트계에서는 겔상 물질이 시멘트 입자를 피복하고 있는 것으로 나타나고 있는데 이러한 구조는 미반응 시멘트 입자와 물이 접촉하는 것을 방해하여 장기적인 수화를 방해하여 장기강도 저하가 발생하는 원인이 된다. 반면에 시멘트 광물계는 침상의 에트리나이트 결정이 시멘트 입자를 그물과 같이 입체적으로 결합하고 있으며 시멘트 입자 표면에 공극을 유지시켜 장기적으로 수화반응이 원활하게 일어날 수 있는 구조를 보이고 있다. 이러한 현상은 압축강도의 시험 결과에서 나타난 것과 같이 초기강도가 높고 장기재령으로 갈수록 시멘트 광물계가 고강도를 발휘하게 되는 근본 원인으로 설명할 수 있다.

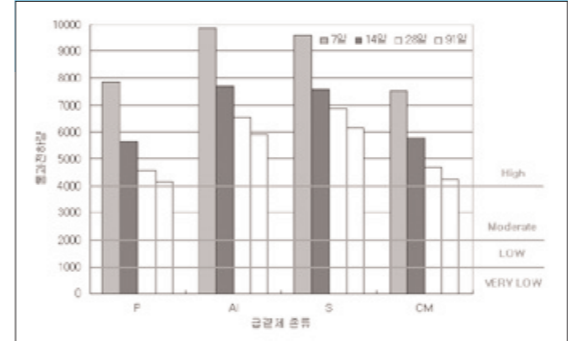
■ 그림 8. 급결제별 수화물(1시간 경과)의 SEM사진(3500배)



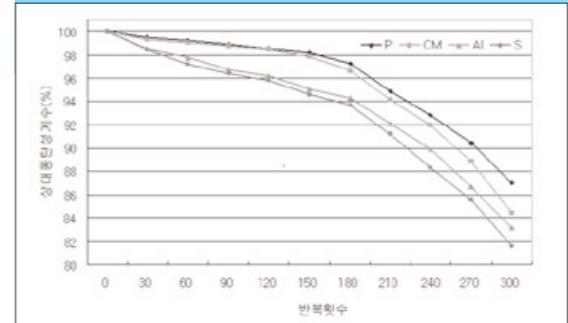
3-3. 내구성의 비교

장기 내구성의 비교를 위하여 <그림 9>, <그림 10> 및 <표2>과 같이 투수성, 동결융해 저항성 및 중성화 특성을 비교하였다. 시멘트 광물계 급결제는 모든 항목에서 기존의 액상 급결제 보다 우수한 특성을 보이고 있는데 이는 수화시 발생된 에트리나이트 결정 및 장기적인 원활한 수화반응으로 인해 슛크리트 조직이 치밀화 되었기 때문이다. 따라서 시멘트 광물계 급결제를 사용한 슛크리트는 단기적 지보역할로 한정된 기존의 슛크리트의 개념에서 탈피하여 영구적 지보의 역할이 가능하여 최근 연구가 가속되고 있는 상굴셀 개념의 터널에 적용할 경우 우수한 특성을 발휘할 수 있을 것으로 판단된다.

■ 그림 9. 급결제별 투수성(염소이온 통과전하량)



■ 그림 10. 급결제별 동결융해 저항성(상대동탄성계수)



■ 표 2. 급결제별 중성화 특성

급결제	구 분	90일 경과 후의 중성화 깊이(mm)	
		Batch	Mean
알루미늄이테계		5.0	5.0
실리케이이트계		5.0	4.0
시멘트광물계		3.0	2.0

* 중성화 촉진 조건 - 이산화탄소농도 10%, 온도 50°C, 습도 50%

3-4. 시공성

1) 리바운드

본 신기술의 시멘트 광물계 급결제는 응결이 매우 빠르고 부착성이 우수하기 때문에 타 급결제에 비하여 리바운드가 현저히

적은 것이 특징이다. 리바운드는 현장여건 및 재료배합상태에 따라 차이가 있으나 조건이 양호할 경우 리바운드량이 약 10% 정도로 매우 양호한 결과를 보이며 조결제의 크기를 10mm로 할 경우 5%까지도 가능하므로 리바운드로 인한 콘크리트의 손실을 대폭 저감할 수 있어 경제성이 우수할 뿐만 아니라 시공이 원활하여 공기단축의 효과도 예상된다.

■ 표 3. 급결제별 리바운드 비교

구 분	알루미늄이테계	실리케이이트계	시멘트광물계	비 고
리바운드량	13~18%	15~20%	8~13%	

2) 분진비교

시멘트 광물계 급결제는 분말상으로서 슛크리트 작업시 분진이 많을 것으로 예상되고 있으나 본 신기술의 시공장비는 급결제의 혼합효과를 높이고 콘크리트 압송 피스톤의 교대시 발생하는 맥동을 현저히 완화시켜 균일한 분무상태를 유지하도록 하고 있어 분진이 많이 발생하지 않으며, 기존의 액상급결제의 경우보다 분진발생이 오히려 적은 것으로 나타나고 있다.

■ 표 4. 분진농도 시험결과

급결제	측정값	측정 시간(분)	분진농도 (mg/m³)	시험방법
알루미늄이테계	2603	3	1.12	- 측정위치 : 막장 후방 50m - 사용급결제 : 시멘트 광물계 급결제 - 측정기기 * Model : Digital Dust Indicator P-5H * 제작사 : 일본 Sibata Scientific echnology LTD.
	3977		1.71	
시멘트 광물계	2603	3	1.12	- 측정위치 : 막장 후방 50m - 사용급결제 : 시멘트 광물계 급결제 - 측정기기 * Model : Digital Dust Indicator P-5H * 제작사 : 일본 Sibata Scientific echnology LTD.
	2759		1.19	
	2388	3	1.02	
	2710		1.17	

3) 부착성

시멘트 광물계 급결제를 사용한 슛크리트는 빠른 응결특성으로 인해 암반에 부착된 후 신속히 경화하여 슛크리트의 자중으로 인해 처짐이 발생하거나 박리되지 않으며 한번에 30cm 이상의 두께로 부착이 가능하다. 따라서 슛크리트의 시공성이 매우 우수하며 특히 암반이 불량하여 슛크리트의 두께를 크게 해야 하거나 여굴이 발생할 경우 탁월한 성능을 발휘한다.

■ 그림 11. 측벽부 및 천정부의 여굴의 시공



일반적으로 기존의 응결이 느린 액상급결제로는 수회로 나누어 처음 일정두께로 시공한 것이 응결된 후 다시 시공하는 번거로운 과정을 반복해야 하므로 공기가 지연되는 문제가 발생하나 시멘트광물계 급결제는 응결이 빠르기 때문에 1m 정도의 여굴도 한번에 마무리가 가능하여 작업이 빠르고 효율적인 장점이 있다.

4) 용수부위 시공성

시멘트 광물계 급결제는 응결이 빠르고 내수성이 있는 에트린자이트 수화물이 수 분 만에 급속히 생성되기 때문에 다수의 용수가 발생하는 암반의 시공에서 탁월한 시공성을 발휘한다. 용수에 대한 지수성과 시공효과를 파악하기 위해 모형 판넬(800×1,200mm)의 모형 판넬을 제작하고 건조조건, 용수분출조건, 용수가 판넬 전체를 적시는 조건의 3조건으로 모델링하여 슛크리트를 판넬에 타설하였으며 그 결과는 <표 5>와 같다. 이때 시멘트광물계 급결제 투입량을 5%로 하고 시공조건과 동일하게 시공속도를 15m³/hr로 하여 각각의 판넬에 약 1분간 분사하였다. 용수부 타설 시험 결과 분당 40 l의 압력수 또는 흐르는 용수 조건에서도 부착상태가 양호하였고 지수효과도 우수하였다.

■ 표 5. 용수 시공성 및 지수효과 시험결과

구 분	비용수 조건	용수조건	
조건	건조상태	분당40l의 압력수 분출	분당40l의 용수가 흐르는 판넬
스프리트 상태	정상타설	초기 약 5초간은 물이 분출되었으나 즉시 지수가 되며 정상 타설됨	부착상태가 양호하여 흘러내림 없이 정상 타설됨
스프리트 두께	45cm	40cm	40cm

3-5. 장기용탈 및 환경오염에 대한 평가

1) 장기용탈

스프리트의 장기 용탈은 장기적으로 지하수 등의 침출수에 의해 경화된 슛크리트 중의 반응되지 못한 시멘트나 급결제의 가용성성분 등이 재용해되어 용출되는 현상으로서 지하수를 오염시킬 뿐만 아니라 슛크리트의 강도를 저하시켜 내구성의 저하를 유발한다. 특히 실리케이트계 급결제는 초기 급결시 시멘트와의 수화물에 의해 응결되는 것이 아니고 물유리 자체가 알칼리의 자극에 의해 결화되는 이른바 '풀효과'에 의해 시멘트 입자들을 풀로 붙인 것과 유사한 상태로 경화되기 때문에 장기적으로 결상 물질이 지하수에 용해되어 용출되며 공기 중의 이산화탄소와 반응하여 탄산염을 형성함으로써 백탁이나 배수구 막힘이 발생하기도 한다.

알루미늄에이트계에서도 급결제를 과다 사용하는 경우 장기적

수화상태가 불량하게 되어 미반응 시멘트 입자가 많아지므로 침출수에 의해 용출이 심해질 수 있다.

시멘트 광물이 주성분인 시멘트 광물계 급결제는 수화시 에트린자이트라는 수화물이 생성되고 장기적으로 안정화된 C-S-H Gel이 공극을 메워주어 경화되기 때문에 물에 잘 용해되지 않으며 급결제가 농후하게 혼합되더라도 급결제 자체가 물과 반응하여 내수성이 강한 C3AH6 또는 에트린자이트 등의 시멘트 수화물로 변화하므로 용탈현상을 억제할 수 있다.

2) 인체영향 및 환경오염에 대한 평가

급결제의 가장 큰 문제는 인체유해성과 환경오염이라고 할 수 있다. 기존의 액상급결제는 인체에 유해한 성분들로 제조되었기 때문에 작업자의 건강에 심각한 문제를 야기한다. 실리케이트계에 있어서는 호흡시 폐포 내에 실리카 성분이 축적되어 규폐증을 유발할 수 있으며 알루미늄에이트계는 가성소다가 유리되어 피부나 점막에 심각한 화상을 유발한다. 또한 이들 액상급결제들은 응결이 느리고 리바운드가 많아 버력의 처리량이 많아지고 또한 급결제 자체가 강알칼리로서 물에 녹기 때문에 토양이나 수질의 오염을 심화시키는 문제가 있다.

시멘트 광물계 급결제는 시멘트 광물의 일종인 칼슘알루미늄에이트 광물로서 자극성이 적어 인체에 시멘트와 유사한 정도의 영향을 주기 때문에 작업자의 건강에 유리하며 리바운드가 적어 버력의 처리량이 적을 뿐만 아니라 급결제 자체가 물과 신속히 반응하여 불용성으로 되므로 기존의 액상 급결제에 비해 토양이나 수질에 대한 오염이 훨씬 적다.

■ 표 6. 각 급결제별 환경에 대한 영향의 상대 평가

(범례 : ●매우심함 ◎심함 ○보통 △적음 ×없음)

구 분		시멘트광물계	알루미늄에이트계	실리케이트계
분진	자극성	△	●	◎
	체내축적	△	△	●
토양오염		△	○	◎
수질오염		△	○	◎
특 징	저 자극성		강 부식성	자극성
	저 리바운드		고 리바운드	고 리바운드
	응결빠름		응결느림	응결느림
	초기강도 높음		초기강도 낮음	초기강도 낮음
	소량사용		다량사용	다량사용
	(4-6%)	(5-8%)	(10% 이상)	

4 건설공사 활용 실적

본 기술은 능동터널 및 무거터널에서 시험시공을 시작으로 거가대교 접속도로 제2터널 본시공에 적용하여 경상남도 우수시공사로 지정되는 등 성공리에 시공이 완료되었으며, 현재 소양강댐 보조여수로 터널, 여수-여천 철도터널, 청원-상주간 고속도로 노현터널, 부산 신항만 배후철도공사, 거가대교 접속도로 제1터널 등에 시공이 진행되고 있다.

또한 경주-감포 4차선 확장 공사, 인천공항철도 2단계공사 전 구간, 화계사-보승사 국도 공사 등 다수의 현장에 설계 반영되어 시공예정이며 슛크리트의 품질과 환경적 요인으로 인해 기존의 급결제의 대체가 촉진되고 있어 본 기술의 활용이 지속적으로 증가될 것으로 기대되고 있다. ■

■ 그림 12. 시멘트 광물계 급결제 적용현장



능동터널(A건설)



소양강 보조여수로 터널(A건설)



거가대교 접속도로 제2터널(B건설)



부산 신항만 배후철도 터널(A건설)



여수-여천 철도터널(C건설)



청원-상주간고속도로 노현터널(쌍용건설)