

시멘트 광물계 및 액상 급결제를 사용한 숏크리트의 특성비교

김상현* · 김준우 · 현경훈 · 조남섭 · 김길환

<(주)유니온 부설연구소>

1. 서론

숏크리트는 터널굴착시 지반을 고착하고 후속작업을 진행할 수 있도록 하는 1차 지보재로서의 역할을 수행하도록 콘크리트에 급결제를 혼합하여 발파된 지반에 뿜어 붙이는 것으로서 부착된 후 신속히 경화하여 콘크리트 라이닝을 형성하여야 한다. 숏크리트에 첨가하는 급결제는 강알칼리인 액상 소듐실리케이트계(이하 실리케이트계)와 액상 소듐알루미늄네이트계(이하 알루미늄네이트계)가 주로 사용되고 있는데 이들 액상급결제는 재료의 리바운드량이 많고 과도한 양을 사용하게 되어 숏크리트의 장기강도 저하와 함께 인체 유해성 및 환경오염의 문제를 안고 있다. “건교부 콘크리트 시방서”와 “터널표준시방서”에서는 바람직한 급결제의 성능으로 콘크리트의 응결·경화를 촉진시키고 최종강도저하가 작으며 작업원의 피해가 적고, 장기간의 강도증진을 해치지 않는 것으로 정의하고 있다. 선진유럽국가 및 일본에서는 오래 전부터 이러한 환경 및 인체에 유해한 급결제의 사용을 규제하여 왔으며 알칼리프리계 또는 시멘트광물계 급결제와 같은 친환경적이고 인체에 해가 적으며 성능이 우수한 급결제의 사용이 보편화되어 있다.

이러한 추세에 따라 국내에서도 수년 전부터 친환경적이고 고성능인 급결제에 대한 활발한 연구의 진행 및 현장적용이 시도되어왔으나 알칼리프리계 급결제는 유럽과의 재료 및 시공환경 차이로 인해 지속적인 개선이 요구되고 있으며 시멘트광물계 급결제는 지하철, 소형터널 등의 건식공법에서는 이미 보편화되어 있으나 도로터널, 철도터널 등 대형터널의 습식공법에서는 분말공급장치를 기존 액상급결제 장비에 접목 해야하는 기술상의 난점으로 인해 본격적인 적용이 늦어지게 되었다.

시멘트광물계 급결제는 국내와 시공환경이 유사한 일본에서 보편화되어 있고 기존 액상급결제에 비해 급결성이 우수하여 지하수가 용출되어 나오는 용수부위에 지수효과가 뛰어난 것으로 알려져 있으며 장기강도가 우수하고 저자극성인 특징으로 인해 풍화지반 및 지하수 용출이 많은 국내 시공현장에도 적합할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 시멘트광물계 급결제의 습식 시공시 물성을 확인하기 위하여 기존의 실리케이트계 및 알루미늄네이트계 급결제를 병용하여 실험실적 시험과 실제 현장에서 시공장비를 이용한 타설시험을 진행하였다.

2. 시멘트광물계 급결제

시멘트광물계 급결제는 Calcium Aluminate광물을 사용하는 급결제로서 일본에서 개발되어 1980년대 이후부터 사용하기 시작하여 현재에는 80%이상을 점유하고 있다. 광물계 급결제 중 가장 급결력이 뛰어난 것은 $C_{12}A_7$ 계로서 결정질보다는 비정질의 상태일 때 더 급결력이 우수하므로 $C_{12}A_7$ 의 제조시 용융물을 급속 냉각하여 비정질화 하는 방법으로 제조하고 있다.

$C_{12}A_7$ 은 수화하면 C_2AH_3 과 C_4AH_x (x는 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 에트린자이트는 시멘트의 수화를 저해하지 않으므로 장기적으로 안정된 강도를 나타낸다. 광물계 급결제는 인체에 대한 영향과 환경오염의 정도가 시멘트와 유사한 정도이며 분말이므로 콘크리트의

슬럼프 변화에 둔감하여 현장에서의 쏫크리트 품질관리가 용이한 장점을 가지고 있다.

시멘트광물계 급결제는 분말상이므로 국내의 기존 습식장비로는 타설할 수 없으며 별도의 분말 공급장치를 사용하여 Y자관으로 연결하여 시공한다.

본 연구에 사용된 급결제는 C₁₂A₇조성의 용융물을 물을 포함한 고압의 공기로 급냉하여 Glass상의 Bead를 만들고 이것을 불밀에서 분쇄한 비정질 C₁₂A₇분말을 주성분으로 하여 알칼리 탄산염 및 석고를 첨가하여 제조하였다.

3. 시험

3.1 개요

알루미네이트계(SA), 실리케이트계(SS) 및 시멘트광물계 급결제(CM)를 사용하여 실내에서 모르타르 응결시험과 압축강도시험 및 콘크리트 강도와 휨인성 시험을 실시하였으며 현장시공시 물성 확인을 위하여 강도, 휨인성 및 리바운드율 측정시험을 실시하였다.

3.2 사용재료

시멘트는 KS L 5201에 적합한 1종 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였고 세골재는 비중 2.598, 조립율이 2.8, 조골재는 비중 2.694, 최대입경 13mm이하인 것을 사용하였다. 급결제는 분말형인 시멘트광물계 급결제와 두 종류의 액상급결제(알루미네이트계, 실리케이트계)를 사용하였으며 유동화제는 S사의 나프탈렌계를 사용하였다. 강섬유는 직경의 비인 형상계수가 60($\phi 0.5 \times 30\text{mm}$)이고 비중이 7.89인 hook & bundle type을 사용하였다.

3.3 배합설계

한국도로공사 시방기준인 1, 3, 28일 휨강도 21, 30, 45kgf/cm²를 기준으로 단위시멘트량(460kg/m³), 잔골재율(68%) 및 강섬유량(45kg/m³)을 결정하고 쏫크리트 타설에 적절한 슬럼프인 10±2cm로 맞추기 위해 w/c 및 유동화제량을 변화하여 배합설계하였으며 그 결과를 Table.1에 나타내었다.

Table.1 Mix proportion of shotcrete

Slump (cm)	w/c (%)	S/a (%)	Unit Weight (kg/m ³)					cement × %	
			W	C	S	G	steel fiber	super plasticizer	accelerator
10±2	45	68	207	460	1099	536	45	0.7	-

3.4 시험항목 및 방법

3.4.1 공시체 제작

실내시험에서 급결제가 첨가된 공시체의 제작은 콘크리트 믹서기로 시멘트, 골재(세골재, 조골재), 물을 혼합한 후 적정량을 계량하여 급결제를 투입하고 혼합 후 즉시 몰드에 충전하여 Cylinder형(10×20cm)과 Beam형(10×10×35cm)을 제작하였다.

한편 현장시험에서 공시체 제작은 시공장비를 이용하여 Beam mold(15×15×55cm)에 직접 슷크리트를 분사하는 방법으로 하였다. 시공장비는 당사의 광물계급결제 전용장비를 사용하였으며 실제 시공조건과 동일한 시간당 15~18m³의 타설속도로 슷크리트를 분사하였다.

3.3.2 모르타르 응결시간 및 압축강도시험

현재 국내에 급결제를 첨가한 모르타르 응결시간 및 압축강도규격은 한국콘크리트학회 제규준(안) “스�크리트용 급결제 품질규격(KCI-SC-102)” 외에는 이렇다할 규격이 없는 실정이다. 따라서 모르타르 응결시간은 KCI-SC-102 부속서 “관입저항에 따른 모르타르의 응결시간 측정방법”에 따라 프록터 관입시험기(흥진정밀, HJ-3170)로 시험하였다.

압축강도시험은 KCI-SC-102에 준하여 공시체를 제작하였으며 “수경성 모르타르의 압축강도 시험방법(KS L 5105)”에 따라 압축강도를 측정하였다.

3.3.3 콘크리트 압축 및 휨강도시험

Cylinder mold로 제작한 공시체의 압축강도 시험은 “콘크리트 압축강도 시험 방법(KS F 2405)”에 따라 시험하였고 Beam형 공시체의 압축강도는 “휨강도 시험용 공시체의 일부분을 사용하는 콘크리트의 압축강도 시험방법(KS F 2413)”에 의하여 시행하였다. Beam형 공시체의 휨강도시험은 “콘크리트 휨강도 시험방법(KS F 2408)”에 준하여 수행하였고, 휨인성시험은 한국도로공사에서 제시한 보시편에 대한 휨인성시험방법에 따라 시험하였다.

3.3.4 리바운드율 측정시험

바닥에 시트를 깔고 슷크리트 발파면(천정 및 측벽)에 타설하면서 리바운드율을 측정하였다. 1회 측정시 타설량은 2m²로 하였으며 3회 반복하여 시험하였다.

$$\text{리바운드율(\%)} = \frac{\text{리바운드 중량}}{\text{스�크리트된 재료 총중량}} \times 100 = \frac{W_s}{W_s + W_w} \times 100$$

여기서 W_s = 리바운드된 재료 중량

W_w = 벽에 뿜어 붙여진 재료의 중량

3.3.5 미세구조관찰

물시멘트비(w/c)를 0.3, 급결제 첨가량을 시멘트광물계 5%, 알루미늄이트계 5%, 실리케이이트계 10%로 하여 시편을 제작하고 일정시간 양생 후 아세톤에서 수화를 정지시켜 진공 건조한 다음 그 파단면을 주사전자현미경(JEOL, JSM-5400)으로 관찰하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 실내시험

4.1.1 모르타르 응결시간

Fig.1,2는 각 급결제별로 첨가량을 변화하여 응결시간을 측정한 결과로 권장량(CM 5%, SS 10%, SA 5%) 사용시 시멘트광물계만 KCI-SC-102 규격(초결5분 이내, 종결15분 이내)을 만족하였으며 알루미늄이트계의 경우는 7%이상 사용시 규격을 만족하였다. 이에 반해 실리케이이트계는 초결은

매우 빠르지만 사용량을 증가하여도 종결이 규격을 만족하지 못하였다.

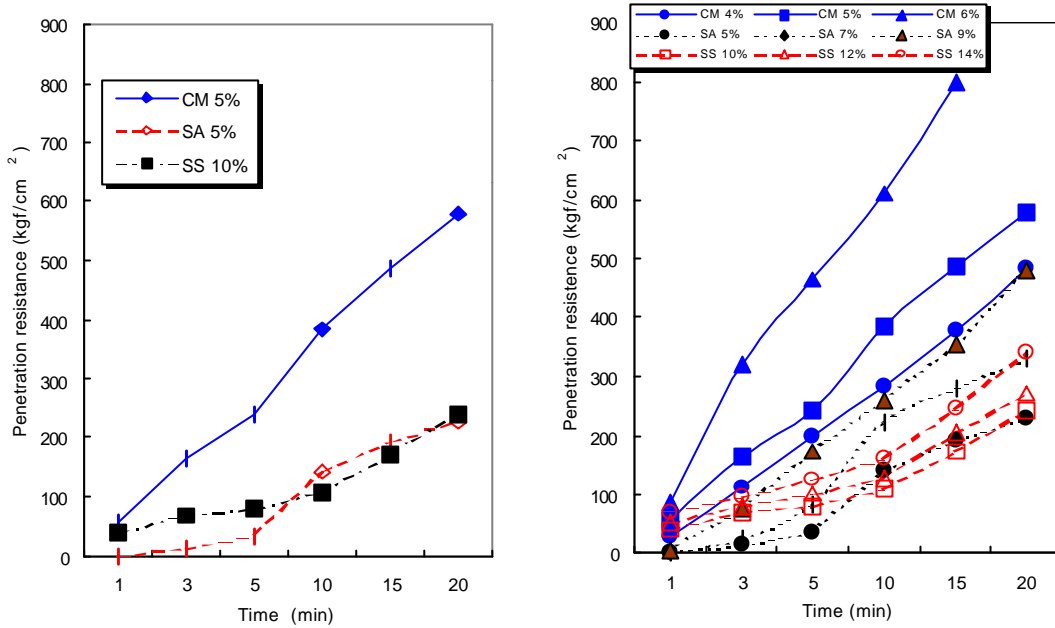


Fig.1 Proctor penetration resistance of mortar according to accelerator type

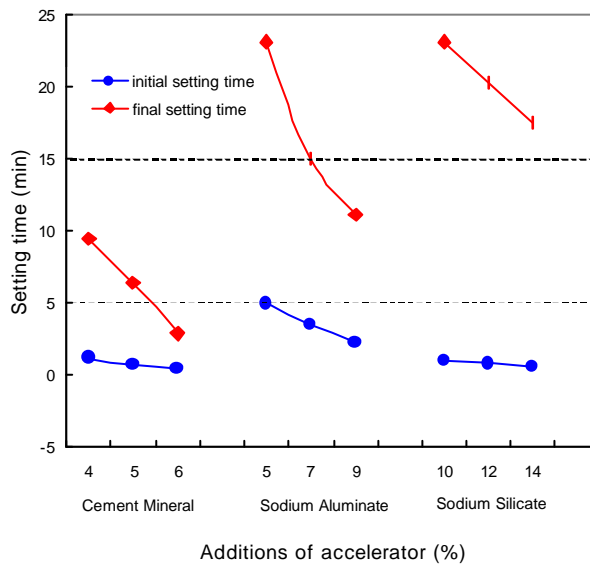


Fig.2 Setting time of mortar according to accelerator type

이와 같은 응결시간의 차이는 쏫크리트의 리바운드율 및 시공성과 관련이 있는 것으로 사료되며 초결이 빠르다는 것은 초기 부착력이 우수해 그 만큼 리바운드에 의한 재료의 손실이 적고 또한 용수부위에 강하고 한 번에 두꺼운 시공이 가능하다는 것을 의미하며 종결이 빠르다는 것은 부착된 재료가 재료 자체의 하중에 의해 떨어지는 무더기탈락현상의 발생율이 적다는 것을 의미한다. 따라서 시멘트광물계의 경우 초·종결시간이 빨라 실제 시공에서 리바운드율이 적을 뿐아니라 국내현장 적용이 용이할 것으로 판단된다.

4.1.2 압축 · 휨강도 및 휨인성계수를

각 급결제별로 권장 사용량을 첨가하여 제조한 모르타르 압축강도는 Fig.3과 같다. KCI-SC-102에 의하면 재령 12시간 10kgf/cm²이상, 1일 90kgf/cm²이상, 28일에 Plain의 75%이상으로 규정하고 있다. 모든 급결제가 12시간 및 1일 규격은 만족하나 재령 28일 강도의 경우 실리케이트계 및 알루미늄이트계가 각각 Plain 강도의 53.6%, 59.4%로 규격을 만족하지 못하였으며 시멘트광물계가 Plain 강도의 83.4%로 규격을 만족하였다. 또한 장기강도 측면에도 시멘트광물계의 경우는 재령 90일 강도가 재령 28일 강도에 비해 22.4%증진한데 반해 실리케이트계 및 알루미늄이트계의 경우는 강도증진이 각각 1.6%, 3.6%로 매우 미약하였다.

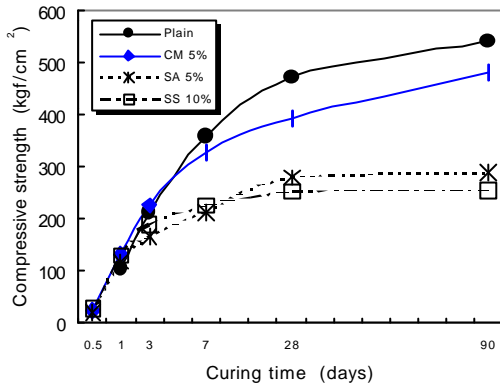


Fig.3 Compressive strength of mortar according to accelerator type

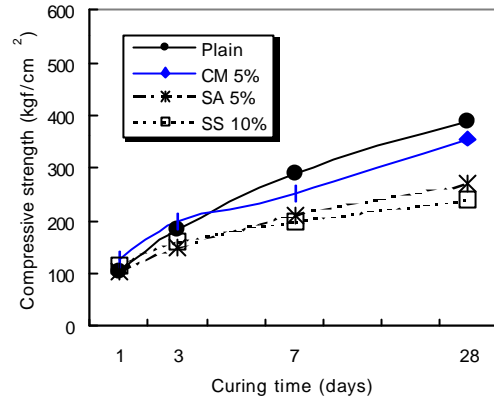


Fig.4 Compressive strength of concrete according to accelerator type

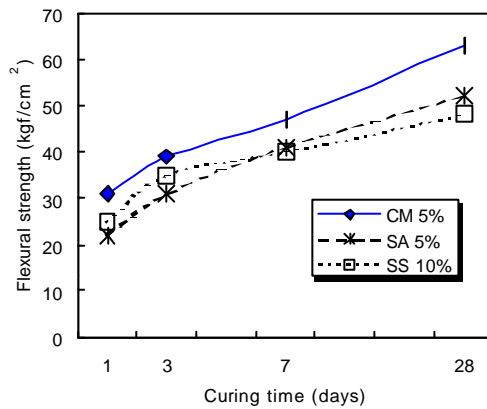


Fig.5 Flexural strength of concrete according to accelerator type (10×10×35cm Beam type specimen)

Fig.4는 Table.1 의 배합표에 따라 실내에서 급결제를 첨가하여 제작한 공시체의 압축강도 시험 결과이다.

모르타르 압축강도와 마찬가지로 시멘트광물계가 가장 우수하였으며 재령 1일에 실리케이트계 및 알루미늄이트계에 비해 10.3%, 21.9%, 재령 28일에는 48.3%, 31.9% 강도증진을 나타내었다.

급결제의 종류에 따른 콘크리트 휨강도 측정결과를 Fig.5에 나타내었다. 모르타르 및 콘크리트 압축강도와 마찬가지로 시멘트광물계를 첨가한 콘크리트의 휨강도가 가장 우수하였다.

한편 시멘트광물계는 재령 28일에 등가휨강도 44.1kgf/cm², 휨인성계수를 70%로 한국도로공사의 규격인 30.6kgf/cm²이상, 68%이상을 만족하였다.

4.1.4 미세구조

Fig.6 에 시멘트광물계 및 두 액상급결제의 미세구조를 나타내었다. 시멘트광물계는 재령 1시간에 이미 침상의 에트린자이트가 거미줄처럼 생성되어 시멘트 입자들을 결합하고 있는 것을 알 수

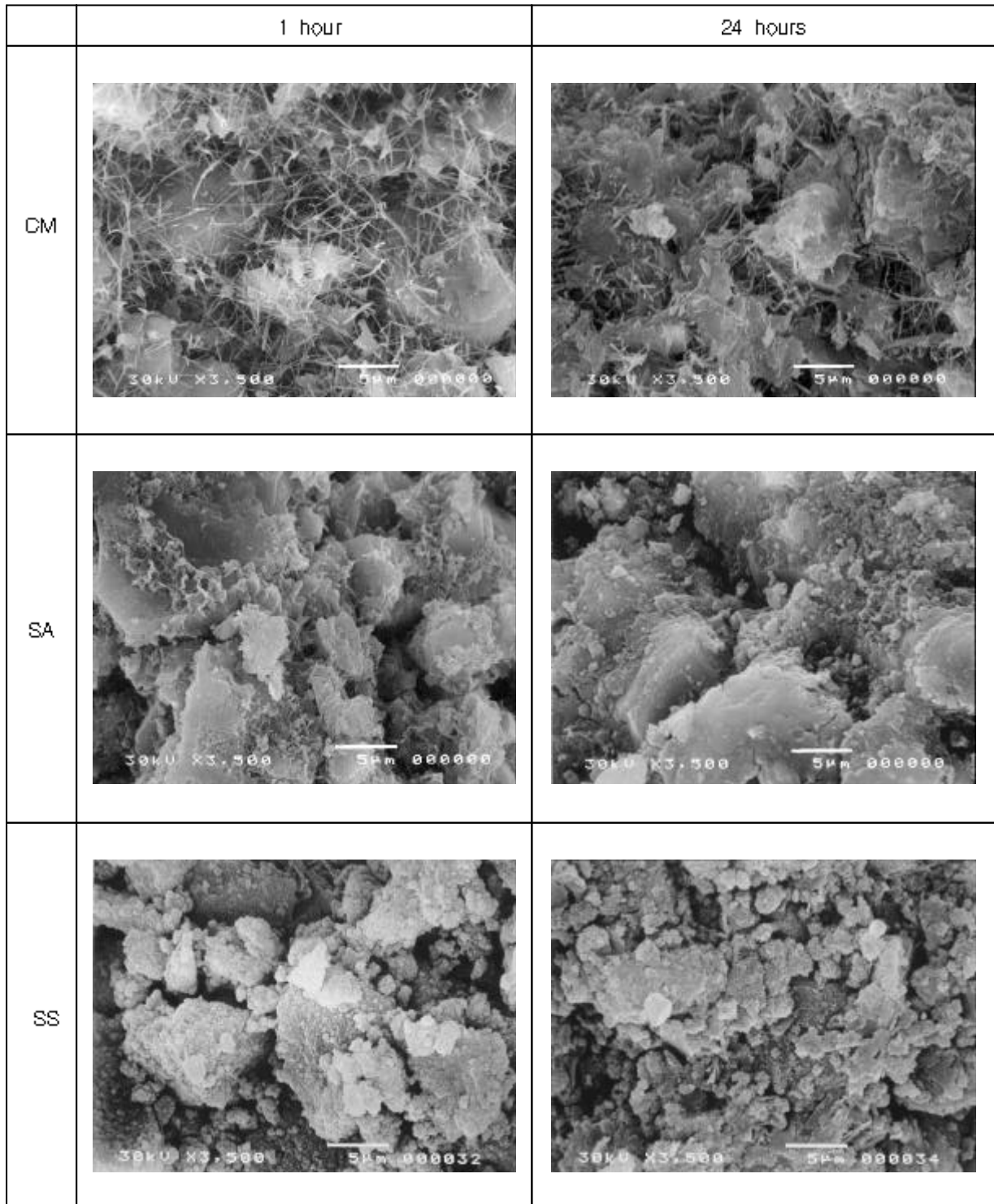


Fig.6 SEM photographs according to accelerator type

있으며 재령 1일에는 시멘트 입자가 수화되면서 생성된 CSH겔이 성장하여 에트린자이트와 엉켜 치밀화 되고 있음을 알 수 있다.

알루미늄이트계 급결제의 초기 수화물은 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 반응하여 생성된 $\text{C}_3\text{A}\text{H}_6$ 와 NaAlO_2 (소듐알루미늄이트)의 가수분해시 나타나는 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 및 NaOH 의 자극에 의해 생성된 CSH겔이 혼재된 것으로 추측되는 물질이 시멘트 입자에 덮히고 있는 것이 관찰되며 재령 1일에는 미반응 시멘트 입자가 전혀 보이지 않고 CSH겔로 완전히 덮힌 형태를 보이고 있다.

실리케이트계는 초기 응결조직을 보면 시멘트 입자나 수화물은 보이지 않고 풀효과(gluing effect)에 의해 생성된 겔상 물질로 시멘트 입자가 덮여 있는 상태로 되었으며 재령 1일에도 특별한 수화물은 관찰되지 않고 단순히 CSH겔이 덩어리 형태로 뭉쳐 있는 것을 알 수 있다.

알루미늄이트계와 실리케이트계에서는 공통적으로 CSH 겔이 시멘트 입자를 피복하고 있는 것으로 나타나고 있는데 이러한 구조는 미반응 시멘트 입자와 물이 접촉하는 것을 방해하여 장기적인 수화를 방해하게 되며 장기강도 저하의 원인으로 생각된다.

4.2 현장시공

4.2.1 슛크리트 시공장비

슛크리트 시공 시스템 및 장비사진을 Fig.7, 8에 나타내었다. 광물계급결제는 분말상이므로 분말을 압축공기에 의해 정량적으로 이송할 수 있는 분말공급장치를 사용한다. 금번 시험에 사용된 장비는 일본Plibrico사의 Q-gun을 푸즈마스터(Putzmeister)사의 습식 장비에 결합하여 Y자관으로 급결제를 레미콘에 투입하는 방식으로서 기존의 액상장비를 개조한 것이다. 이 장비는 국내의 대부분의 장비와 같은 Double piston 압송방식으로서 시간당 최대 20m^2 의 속도로 시공할 수 있다.

분말공급장치에서 압축공기에 부유된 시멘트광물계 급결제는 Y자관에서 레미콘에 첨가되며 레미콘과의 혼합은 노즐에 이르기까지 호스 내에서 이루어진다.

Fig.9는 시멘트광물계 급결제의 현장시공장면이다.

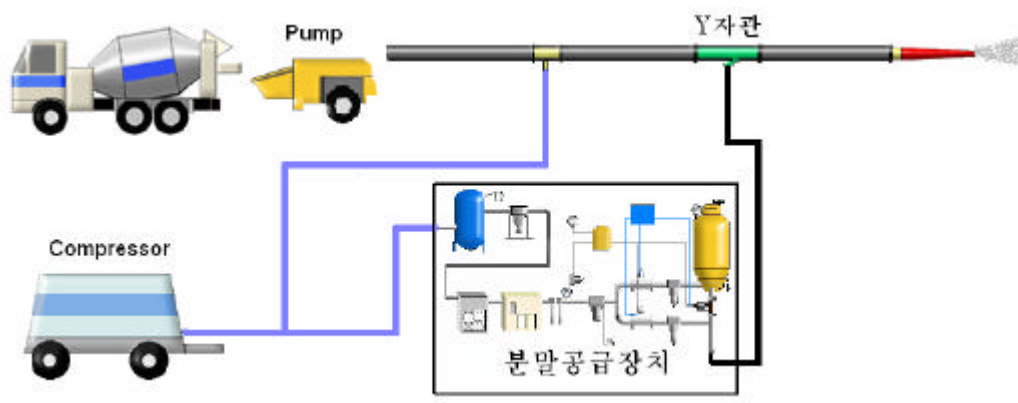


Fig.7 Shotcrete system using cement mineral type accelerator



Fig.8 Shotcrete equipment using cement mineral type accelerator



Fig.9 Shotcrete construction using cement mineral type accelerator

4.2.2 압축 · 휨강도 및 휨인성계수

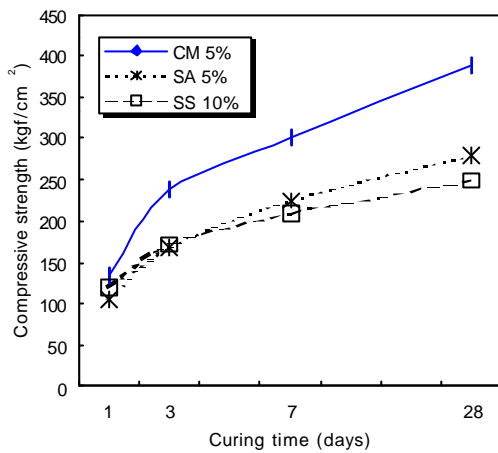
실리케이트계, 알루미늄이트계 및 시멘트광물계 급결제의 현장시공시 압축강도 결과를 Table.2 및 Fig.10 (a)에 나타내었다. 압축강도의 경우 과거 여러 문헌에서 알려진 바와 같이 실리케이트계의 경우는 장기강도증진이 미미하여 알루미늄이트보다 단기(1,3일)강도는 14.3%, 2.4% 높지만 장기강도(7, 28일)는 7.1%, 12% 낮은 것을 알 수 있다.

시멘트광물계의 경우는 실내시험에서와 마찬가지로 단기 및 장기강도가 실리케이트계 및 알루미늄이트계에 비해 재령 1일에 12.5%, 28.6%, 재령 28일에 55.6%, 38.9%강도증진을 나타내었다.

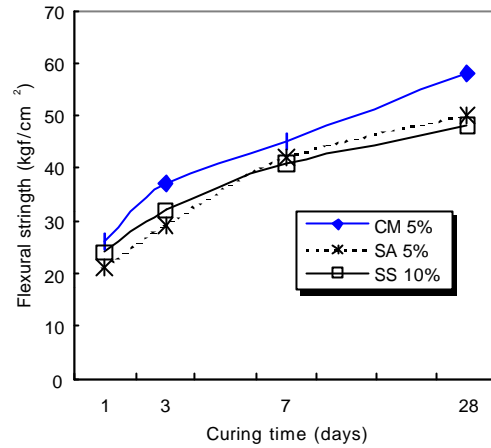
휨강도시험결과를 Table.2 및 Fig.10 (b)에 나타내었다. 압축강도와 마찬가지로 시멘트광물계가 가장 우수하였으며 실내시험과 유사한 결과를 얻었다. 또한 시멘트광물계의 경우 재령 28일에 등가휨강도 41.8kgf/cm², 휨인성계수를 72%로 한국도로공사의 규격인 30.6kgf/cm²이상, 68%이상을 만족하였다.

Table.2 Compressive and flexural strength of concrete

	Compressive strength(kgf/cm ²)				Flexural strength(kgf/cm ²)			
	1 day	3 days	7 days	28 days	1 day	3 days	7 days	28 days
CM 5%	135	238	301	389	26	37	45	58
SS 10%	120	172	210	250	24	32	41	48
SA 5%	105	168	225	280	21	29	42	50



(a) Compressive strength



(b) Flexural strength

Fig.10 Strength of concrete according to accelerator type
(10×10×55cm Beam type specimen)

4.2.3 리바운드율

Table.3은 국내 여러 현장에서 시멘트광물계 급결제와 두 종류의 액상급결제를 사용한 숏크리트의 리바운드율을 측정된 결과이다. 시멘트광물계가 다른 두 액상급결제에 비해 리바운드율이 작은 것을 알 수 있다. 이는 앞의 3.1.1항에 언급한 응결시간에 관련이 있는 것으로 사료된다.

실리케이트계의 경우는 초결은 빠르나 종결이 느려 무더기 탈락에 의한 리바운드가 많이 발생되었고 알루미늄계계의 경우는 초결이 느리기 때문에 초기 부착력이 나빠 리바운드가 많이 발생되었다고 사료되며 반면 시멘트광물계는 두 종류의 액상급결제에 비해 초·종결시간 빨라 리바운드가 적게 발생된 것으로 판단된다.

Table.3 Rebound ratio according to accelerator type

	CM 4~6%	SA 5~8%	SS 10~14%
Rebound ratio (%)	11~14	15~18	17~20

5. 결론

본 연구에서는 시멘트광물계 급결제의 물리적 특성 및 시공성을 파악하고자 현재 국내에서 보편적으로 사용되고 있는 실리케이트계 및 알루미늄계 급결제와 실내 및 현장에서 비교시험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 모르타르 응결시간 시험결과 권장량(CM 5%, SS 10%, SA 5%) 사용시 시멘트광물계만 KCI-SC-102 규격(초결5분 이내, 종결15분 이내)에 적합하였다.

(2) 모르타르 압축강도 시험결과 모든 급결제가 재령 12시간 및 1일 규격에는 적합하였으나 재령 28일 강도는 시멘트광물계만이 Plain 강도의 83.4%로 규격에 적합하였다.

(3) 콘트리트 압축강도는 시멘트광물계가 가장 우수하였으며 실내시험과 현장시험의 경향성이 거의 유사하였다.

(4) 콘트리트 휨강도는 시멘트광물계를 첨가한 콘크리트의 휨강도가 가장 우수하였으며 재령 28일에 등가휨강도 및 휨인성계수율이 실내시험(44.1kgf/cm^2 , 70%) 및 현장시험(41.8kgf/cm^2 , 72%)에서 한국도로공사의 규격인 30.6kgf/cm^2 이상, 68%이상을 만족하였다.

(5) 각 급결제를 첨가한 경화체의 미세구조는 시멘트광물계의 경우 재령 1시간에 이미 많은 양의 에트린자이트가 생성되어 재령 1일에는 시멘트 입자가 수화되면서 생성된 CSH겔과 에트린자이트가 엉켜 치밀화 되고 있으나 알루미늄계는 CSH겔이 시멘트 입자를 피복하고 있으며 실리케이트계의 경우도 풀효과(gluing effect)에 의해 생성된 겔상 물질로 시멘트 입자가 덮여 있음을 알 수 있었다.

(6) 시멘트광물계의 리바운드율은 11~14%로 알루미늄계 15~18% 및 실리케이트계 17~20%에 비해 우수하였다.

참고문헌

1. 건설교통부, "콘크리트 표준시방서", (1999)
2. 건설교통부, "터널 표준시방서", (1999)
3. Norwegian Concrete Association, "Sprayed Concrete for Rock Support" (1993)
4. 한국콘크리트학회 제규준(안), "숏크리트용 급결제 품질규격(KCI-SI-102)" pp482~487
5. 岡田 喬, "山岳トンネルの新技術(14)" トンネルと地下, 第19巻5號, pp401~414 (1998)
6. 酒井芳文ほか, "高性能吹付コンクリートシステムを用いた施工実験", 콘크리트工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, p1435~1440 (1997)
7. 中原 康, "吹付コンクリートにおける材料の現況と問題點", 콘크리트工学, Vol.19, No.4, pp20~28, (1981)
8. 室充ほか, "新しい急結剤を用いた吹付コンクリートの試験施工", トンネルと地下, pp25~31(2001)
9. S.Teramuta, Y.Matsunaga, K.Hiramo et. al., "Accelerator for Shotcrete Based Amorphous Calcium Aluminate", Engineering Foundation Conference on SHOTCRETE FOR UNDERGROUND SUPPORT at Niagara on the Lake, Canada, Vol.4, 9, (1993)