J of Korean Tunn Undergr Sp Assoc 16(2)135-148(2014)
http://dx.doi.org/10.9711/KTAJ.2014.16.2.135
eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 사용한 숏크리트의 장기강도 평가

원종필[1]* · 황언종[2] · 이수진[3] · 이재호[2] · 장석부[4]

[1]정회원, 건국대학교 사회환경시스템공학과 교수
[2]비회원, 건국대학교 사회환경시스템공학과 석사과정
[3]비회원, 건국대학교 사회환경시스템공학과 박사 후 연구원
[4]정회원, 삼성물산 건설부문 지하토목팀 부장

Long-term strength of shotcrete with improved $C_{12}A_7$ based mineral accelerator

Jong-Pil Won[1]*, Un-Jong Hwang[2], Su-Jin Lee[3], Jae-Ho Lee[2], Seok-Bu Jang[4]

[1]Professor, Dept. of Civil Environmental System Engineering, Konkuk Univ.
[2]Graduate Student, Dept. of Civil Environmental System Engineering, Konkuk Univ.
[3]Post Doc. Researcher, Dept. of Civil Environmental System Engineering, Konkuk Univ.
[4]General Manager, Samsung C&T Corporation Eng. & Con. Group

ABSTRACT: This study was performed to evaluate the performance about Improved $C_{12}A_7$ based mineral accelerator (ICM) increased in initial and long-term strength. ICM was developed to overcome the long-term strength decrease in existing accelerator. To evaluate the performance of ICM according to addition rate, setting time, compressive strength, and flexural strength tests were conducted in laboratory. In results, initial setting time was slower, final setting time was faster than existing $C_{12}A_7$ based mineral accelerator (CM) when usage of ICM 6%. In compressive and flexural strength, existing CM was higher than ICM at 3hours and 1day. After 7days, strength of shotcrete using ICM was increased. Rebound test, compressive strength and flexural strength test with optimum addition rate through the laboratory test were conducted in field. Field experiment results were the same as laboratory test. Long-term strength performance of ICM was superior to existing accelerator.

Keywords: Admixture, $C_{12}A_7$ mineral based accelerator, Long-term Strength, Shotcrete

초 록: 본 연구에서는 숏크리트의 품질을 안정적으로 만들기 위해 초기 및 장기강도성능을 향상시킨 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제의 성능 평가를 실시하였다. 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제는 기존 급결제들이 가지고 있는 장기강도 저하를 극복하고자 개발되었다. 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제의 혼입량에 따른 성능을 평가하기 위해 실내에서 응결시간, 압축강도 및 휨강도를 실시하였다. 실험결과 응결시간은 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 6%이상 사용하였을 때 기존 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제에 비해 초결은 느리지만 종결은 빠르게 나타났다. 압축강도 및 휨강도는 기존의 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제가 초기재령 3시간, 1일에서는 높게 나타났지만 7일 이후로 갈수록 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 사용한 숏크리트의 강도가 증가하였다. 또한 실내실험에서 도출된 최적혼입률을 적용하여 현장 적용성을 평가하였다. 현장실험으로는 리바운드, 압축강도 및 휨강도를 실시하였다. 현장실험 결과 실내실험과 같이 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 사용한 숏크리트의 장기강도성능이 우수하게 나타났다.

주요어: 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제, 숏크리트, 장기강도, 혼화재

***Corresponding author:** Jong-Pil Won
E-mail: jpwon@konkuk.ac.kr

Received February 5, 2014; **Revised** February 20, 2014; **Accepted** February 28, 2014

Copyright ⓒ2014, Korean Tunnelling and Underground Space Association

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativescommons.org/license/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

숏크리트는 공기압을 이용하여 콘크리트를 굴착면에 뿜어 붙여지는 것을 말하며 현재까지 많은 연구를 통해 재료 및 시공상의 문제점들을 해결해 가고 있다(Morgan et. al., 1991; Park et. al., 2008).

현재 국내에서 사용되고 있는 숏크리트용 급결제는 크게 액상형 급결제와 분말형 급결제로 나뉘며, 액상형 급결제로는 알루미네이트계와 알칼리프리계 급결제가 있고 분말형 급결제로는 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제가 있다(Won et. al., 2007). 과거에 주로 사용하던 실리케이트계 급결제의 경우는 피부 화상 및 독성이 인체에 축적되는 문제와 급결제가 용출되어 지하수를 오염시키는 문제로 인하여 현재에는 거의 사용되지 않고 있다. 알루미네이트 급결제의 경우 초기강도는 높지만 재령 28일의 강도가 급결제를 사용하지 않은 플레인 숏크리트와 비교할 때 30～50%의 수준으로 저하되는 문제가 있다(Won et al, 2007). 내구성능에서도 문제가 되고 있으나 현장에서는 저가인 이유로 많이 사용하고 있다(Won et. al., 2007; Lee et. al., 2007). 알칼리프리계 급결제의 경우 장기강도와 내구성이 우수한 성능을 갖고 있지만 초기응결이 다소 늦어 초기 급결력이 필요한 용수부위 등에서는 사용이 제한적이다. 이를 해결하기 위해 적정사용량 이상을 사용하고 있는데 이 경우 초기응결은 빠르지만 장기강도에 악영향을 주는 것으로 나타났다(ACI, 1995). 이런 초기응결문제를 극복하기 위해 최근에 칼슘 설포 알루미네이트(calcium sulfo aluminate, CSA) 등과 같은 재료를 혼입하여 만든 분체혼화재를 혼합하여 초기강도 및 장기강도를 향상시키는 공법이 개발되어 사용되어지고 있기도 하다(Sung, 2005; Won et. al., 2013).

$C_{12}A_7$계 광물계 급결제는 1980년대 초반 일본에서 개발되었으며 현재는 일본 내 숏크리트 급결제시장의 90%정도가 사용하고 있다(Park et. al., 2002). 국내에서는 2000년대부터 독자적인 수냉법으로 성능을 높인 비정질 $C_{12}A_7$을 주성분으로 개발되어 2004년부터 현장에 본격적으로 사용되기 시작하여 기존의 급결제를 대체하여 많이 사용되고 있다(Park et. al., 2002; Park et. al., 2004). $C_{12}A_7$계 광물계 급결제는 시멘트 광물의 일종인 비정질 $C_{12}A_7$이 주성분으로서 시멘트와 반응 시 에트린자이트(ettringite)를 급속히 형성하여 급결성능이 우수하다. $C_{12}A_7$계 광물계 급결제의 경우 초기 급결력이 우수하여 용수부위 시공에 유리하며, 리바운드율이 낮아 재료비용의 감소를 가져오고 있다. 또한 현재 사용되고 있는 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제가 다른 급결제보다 장기강도 발현성능 및 내구성능에서 우수한 성능이 있다고 보고되고 있다(Park et. al., 2004; Wo et. al., 2005).

본 연구에서는 현재 숏크리트에서 문제점으로 제기되고 있는 초기강도 기준을 만족하면서도 장기강도 저하 문제를 최소화시키기 위하여 개발된 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 사용한 숏크리트의 성능을 평가하였다. 성능평가는 실내실험을 통해 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제의 최적혼입률을 도출하고자 하였으며 실내실험을 통해 도출된 최적혼입률을 가지고 현장에서도 실내실험과 같은 성능을 나타내는지를 알아보기 위하여 실시하였다.

2. 실내 실험

2.1 실험재료

2.1.1 시멘트 및 골재

실험에 사용된 시멘트는 KS L 5201에 적합한 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 물리적 특성은 Table 1과 같다. 굵은골재 비중은 2.69, 최대치수 10 mm인 쇄석을 사용하였고 잔골재는 비중 2.59의 KS 입도표준 범위를 만족하는 조립률 2.92의 세척사를 사용하였다. Fig. 1은 연구에 사용된 잔골재의 입도곡선을 나타내었다.

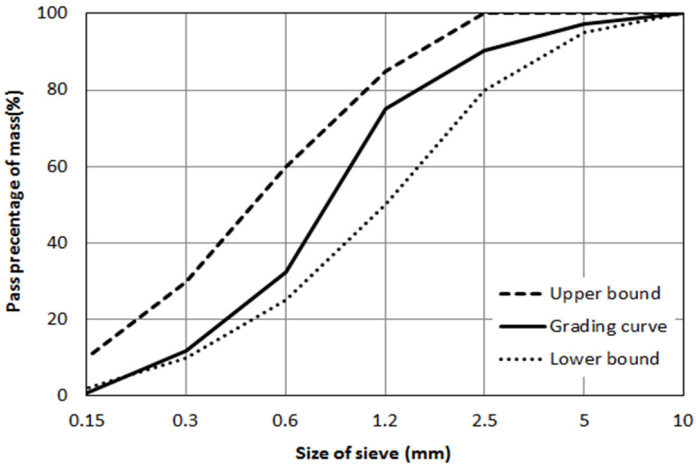

Fig. 1. Grading curve of used fine aggregate

Table 1. Properties of cement

Fineness (cm^2/g)	Specific gravity	Stability (%)	Setting time		Compressive strength (MPa)		
			Initial (min)	Final (hr)	3 days	7 days	28 days
3,300	3.15	0.08	200	5:30	30	42	58

2.1.2 급결제

본 연구에서 사용된 급결제는 개발된 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 사용하였다. Table 2는 실험에 사용된 급결제의 기본 물성이며 화학성분은 Table 3에 나타났다. 비교를 위해 기존에 사용되던 $C_{12}A_7$ 광물계 급결제를 사용하여 평가하였다.

개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제는 기존의 시멘트 광물계의 성능을 업그레이드하여 개발된 급결제이다. 기본적으로 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제의 주성분은 기존 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제와 동일한 칼슘알루미네이트 광물로 구성되며 추가적으로 재료들을 첨가하여 제조되었다. 첨가된 재료들로는 시멘트와의 반응 시 장기적으로 강도 증진 및 내구성을 향상시키는 CSA, 경화를 촉진시키는 경화촉진제, 후기 경화속도와 압축강도를 증진시키는 무수석고를 첨가하였다. 또한 조직을 치밀화하여 장기 강도 증진과 내화학성과 내해수성을 증진시키는 고로슬래그 미분말이 첨가되었다.

CSA는 $CaSO_4 \cdot 2H_2$와 Free CaO를 만나 수화 초기에 에트린자이트를 급격히 형성시켜 시멘트 중에 있는 $Ca(OH)_2$을 최소화시킴으로써 공극을 최소화하여 장기강도 및 내구성이 향상되는 장점을 가지고 있다. Fig. 2는 CSA의 수화반응 과정을 나타낸 것이다(ACI, 1995).

개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제에 첨가된 고로슬래그 미분말은 콘크리트 혼화재로서 널리 사용되고 있는 재료이다. 고로슬래그는 포졸란 반응으로 장기강도 증진에 탁월한 효과를 나타낸다(Won et. al., 2007; Bae et. al., 2012). 또한 고로슬래그 미분말을 혼입한 콘크리트의 경우 시멘트 수화과정에서 발생하는 칼슘수산화물 등의 알칼리 슬래그가 반응하면서 콘크리트의 공극구조가 바뀌게 되면서 공극의 크기가 감소하여 투수성도 감소하게 된다. 그래서 내화학성 및 내해수성이 우수하게 된다.

무수석고는 주로 C_3A, $3CaOAl_2O_3$과 반응에 의해 생성되는 에트린자이트에 의해 응결을 조절하는 작용

을 한다고 알려져 왔다(Bae et. al., 2012). 석고의 응결 조절 효과 메커니즘은 C_3A의 입자표면에 에트린자이트의 층이 형성된다. 그리고 이 층이 C_3A의 다음 수화를 지연시켜 시멘트의 응결이 주로 C_3S, C_2S들의 수화에 의해 일어나도록 한다. 즉 에트린자이트의 생성은 시멘트의 주요한 수경성 화합물인 C-S-H겔의 생성을 촉진한다. 또한 시멘트 조성에 있어서 CaO-Al_2O_3-SO_3 3성분 중 각각의 성분 함량 비에 의한 특성의 변화에도 중요한 역할을 한다고 알려져 있다. 에트린자이트가 시멘트 경화체의 조직이 형성되기 전에 생성되었을 경우에는 급결성을 나타낸다. 그리고 시멘트 경화체의 조직이 형성되는 시기에 에트린자이트의 생성이 집중적으로 일어나면 경화체의 고강도화에 기여하게 된다.

2.2 배합설계

개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제의 성능을 평가하기 위하여 예비시험을 거쳐 Table 4와 같은 배합설계를 실시하였다. 설계강도는 현장에서 요구되는 30 MPa 배합에 대해 실시하였고 목표 슬럼프는 120±20 mm, 공기량은 4±1%로 고정하였다. 목표 슬럼프를 맞추기 위해 폴리카본산계 유동화제를 첨가하였다. 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제는 5, 5.5, 6, 7, 8%의 혼입률을 변수로 두고 실험을 실시하였다. 비교를 위하여 기존 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제의 최적사용량 5%를 사용하여 실시하였다. 배합의 구분은 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제의 경우 CM, 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제의 경우 ICM으로 하였고 각 혼입률을 숫자로 나타내었다.

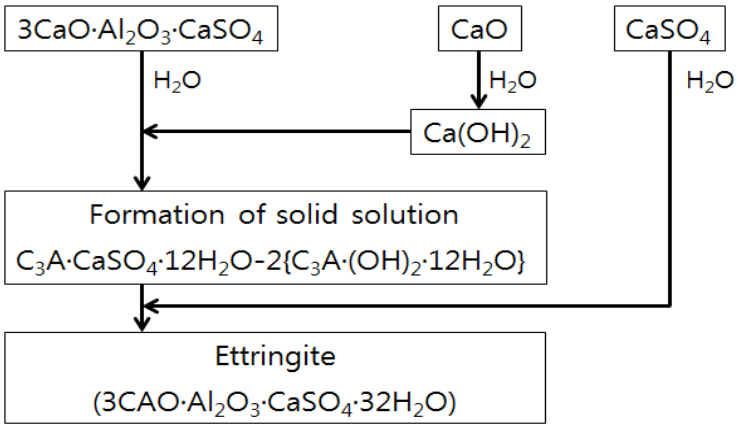

Fig. 2. Hydration process of CSA (ACI, 1995)

Table 2. Properties of accelerator

Accelerator	component	Type	Specific gravity	Volumetric specific gravity	pH
Improved $C_{12}A_7$ based mineral accelerator	$C_{12}A_7$	gray color powder	2.78	0.62	11.65

Table 3. Chemical components of accelerator

Accelerator	CaO	Al_2O_3	Na_2O	SO_3
Improved $C_{12}A_7$ based mineral accelerator	40.06	32.30	1.69	16.71
$C_{12}A_7$ based mineral accelerator	40.14	29.57	12.59	0.94

Table 4. Mix proportion

Type	Gmax	W/C (%)	S/a (%)	Unit Weight (kg/m^3)					AD* (C×%)
				W	C	S	G	Accelerator (C×%)	
Plain	10	45	60	216	480	912	631	-	0.2
CM								5	
ICM								5	
								5.5	
								6	
								7	
								8	

*Polycarboxylate superplasticizer

2.3 실험방법

2.3.1 응결시간

급결제를 사용한 숏크리트의 응결시간 시험은 KS F 2436에 「관입 저항침에 의한 콘크리트의 응결시간」 시험방법에 따라 실시하였다. 급결제를 사용한 콘크리트의 경우 보통의 콘크리트와 달리 매우 빠르게 응결되므로 경화되지 않은 콘크리트를 체로 칠 수 있는 시간적 여유가 없어 굵은 골재를 제외한 모르타르 시험편을 KCI SC-102 규준에 따라 만들어 2회 반복 실시하였다.

2.3.2 압축강도

압축강도 시험은「KS F 2405 콘크리트 압축강도 시험방법」에 의하여 재령 1, 7, 28일에 실시하였다. Ø100 × 200 mm의 실린더형 시험편을 재령별 3개씩 제작하였으며 2회 반복하여 실시하였다. 제작된 시험편은 온도 23 ± 2℃, 상대습도 50%의 항온항습실에서 1일 양생 후 23 ± 2℃의 항온의 수조에서 소요의 재령까지 양생하여 실험을 실시하였다. 재령 3시간의 시험편은 제작 후 20℃의 상온에 놓아둔 후 실험을 실시하였다.

2.3.3 휨강도

개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 사용한 숏크리트의 휨성능을 평가하기 위하여 KS F 2408「콘크리트 휨강도 시험방법」에 의하여 실시하였다. 100 × 100 × 400 mm의 각주형 시험편을 재령 1, 28일에 각각 2개씩 제작하였고 제작된 시험편은 온도 23 ± 2℃, 상대습도 50%의 항온항습실에서 1일 양생 후 온도 23 ± 2℃ 항온의 수중에서 소요의 재령까지 양생하여 실험을 실시하였다.

3. 실험결과

3.1 응결시간

KS F 2436 「관입 저항침에 의한 콘크리트의 응결시간 시험」에 따라 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제의 급결성능(응결시간)을 측정한 시험결과는 Fig. 3에 나타내었다. 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 첨가한 모르타르의 경우 급결제의 사용량이 증가할수록 초결, 종결 모두 빠르게 진행되었다. 기존 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제와 비교했을 때 6, 7, 8%에서 종결이 더 빠르게 나타나는 경향이 나타났다. 모든 급결제에서 대체적으로 5분 이내에 초결이 이루어져 한국콘크리트학회 기준(KCI SC-102) “숏크리트용 급결제 품질규격”을 만족하였고 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제의 경우 사용량 5%를 제외한 나머지 배합의 종결이 품질기준인 15분을 만족하는 것으로 나타났다.

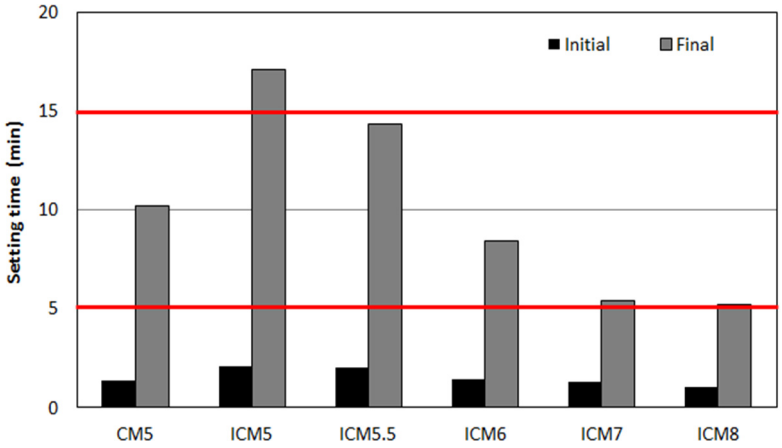

Fig. 3. Setting time with accelerator

3.2 압축강도

개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 사용한 숏크리트의 압축강도 실험결과는 Fig. 4에 나타내었다. 급결제 종류 및 혼입률에 따른 재령별 압축강도 실험 결과 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 사용한 경우 3시간 및 1일 강도에서는 플레인 숏크리트 보다는 높은 강도를 보였지만 기존 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제 보다는 낮은 압축강도 결과를 보였다. 그러나 재령 7일 이후 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 사용한 배합의 압축강도는 기존 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 사용한 배합보다 높은 강도를 나타냈다. Table 5와 같이 플레인 숏크리트 대비 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제 6%를 적용한 재령 28일 압축강도는 23% 감소하였으며, 기존 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제는 35% 감소하였다. Table 6에서는 가장 성능이 우수한 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제 6%를 사용한 숏크리트의 압축강도를 기존 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 적용한 숏크리트의 압축강도와 재령별로 비교하였다. 그 결과 3시간과 1일에서는 각각 약 27%, 4% 감소하였지만 7일에서는 약 14%, 28일에서는 약 20% 증가하는 결과를 나타내 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제의 장기성능이 우수하게 나타났다. 이

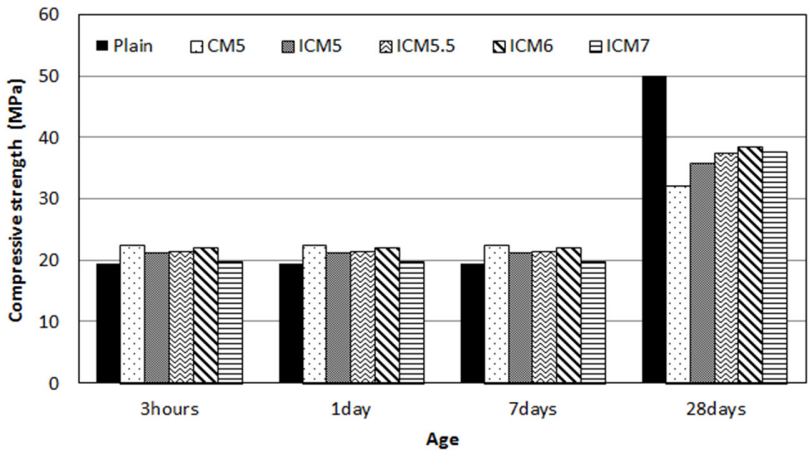

Fig. 4. Shotcrete compressive strength with accelerator

Table 5. Shotcrete compressive strength compared with plain shotcrete (%)

Age \ Accelerator	CM5	ICM6
1day	118	115
7days	76	87
28days	65	77

Table 6. Compressive strength of ICM compared with CM5 (%)

Age \ Accelerator	ICM5	ICM5.5	ICM6	ICM7	ICM8
3hours	62	67	73	65	58
1day	95	95	96	88	86
7days	110	112	114	108	108
28days	111	117	120	117	105

는 기존 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제와 달리 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제에 첨가된 칼슘 설포 알루미네이트 광물, 고로슬래그 미분말, 무수석고에 의해 장기강도가 향상된 것으로 판단된다.

3.3 휨강도

개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 사용한 숏크리트의 배합별 휨강도 시험결과를 Fig. 5에 나타내었다. 압축강도 결과와 마찬가지로 휨강도 역시 재령 1일에서는 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 사용한 배합이 기존 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 사용한 배합보다 낮게 나타났다. 하지만 재령28일의 경우 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 사용한 배합이 기존 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 사용한 배합보다 높은 값을 나타내었다. 그러나 급결제 혼입률이 6% 이상인 경우 재령이 지날수록 강도가 감소하는 것을 볼 수 있다. Table 7은 플레인 숏크리트의 재령 28일 휨강도와 비교하여 나타낸 것으로 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제 6%를 적용한 경우 12%, 기존 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 적용한

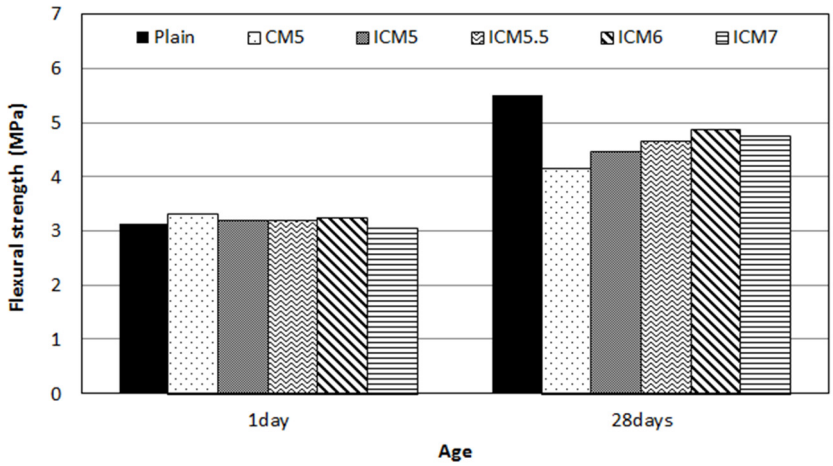

Fig. 5. Shotcrete flexural strength with accelerator

Table 7. Shotcrete flexural strength compared with plain shotcrete (%)

Age \ Accelerator	CM5	ICM6
1day	106	104
28days	75	88

Table 8. Flexural strength of ICM compared with CM5 (%)

Age \ Accelerator	ICM5	ICM5.5	ICM6	ICM7	ICM8
1day	96	96	98	91	79
28days	108	112	117	114	109

숏크리트는 약 25% 감소하였다. Table 8과 같이 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 6% 사용한 배합과 기존 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 5% 사용한 배합과 비교하면 재령 1일에서는 약 2% 감소하였지만 28일에서는 약 17% 증가하는 결과를 나타냈다.

4. 현장실험

개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 사용한 숏크리트의 실내실험에서 응결시간, 압축강도 및 휨강도를 통해 가장 우수한 성능을 보인 혼입률 6%를 최적혼입률로 도출하여 현장에서의 적용성을 평가하기 위하여 현장실험을 실시하였다.

4.1 실험재료

4.1.1 시멘트 및 골재

개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 사용한 숏크리트의 성능 평가에 사용된 시멘트는 KS L 5201에 적합한 S사의 1종 시멘트를 사용하였으며 물리적 특성은 실내실험과 같다. 굵은골재는 비중 2.64, 최대치수 10 mm인 쇄석을 사용하였고 잔골재는 비중이 2.60, 조립률 2.97의 자연사를 사용하였으며 Fig. 6.에 입도분포를 나타내었다. 또한 길이 30 mm, 직경 0.5 mm, 형상

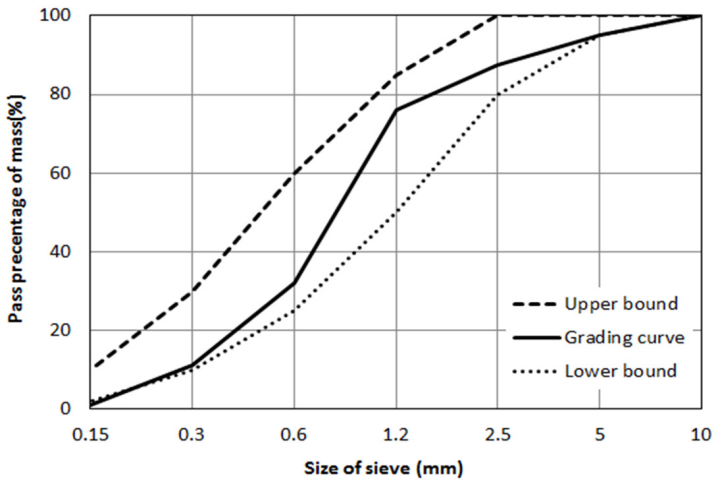

Fig. 6. Grading curve of fine aggregate for field test

비가 60인 hooked end type 강섬유를 사용하였다.

4.1.2 급결제

현장에서 사용한 급결제는 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제이며 비교를 위하여 기존 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제 및 액상 알루미네이트계 급결제를 사용하였다.

4.1.3 배합설계

실내실험을 바탕으로 도출된 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제의 최적혼입률인 6%, 기존 $C_{12}A_7$계광물계 급결제 5% 및 액상 알루미네이트 6%를 현장실험에 적용하였다. 성능평가는 현장에서 사용되고 있는 배합에 급결제를 변수로 하여 실시하였고 현장배합표는 Table 9에 제시하였다. 현장에서 사용하고 있는 골재의 경우 함수비가 7～8% 정도로 높아 실내시험을 통해 도출한 배합적용시 숏크리트를 뿜어붙이는데 문제가 발생하였다. 따라서 현장함수비를 고려하여 보정된 배합의 슬럼프는 100～170 mm, 공기량 2.3～2.5%로 측정되었다. 배합의 구분은 기존 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제의 경우 CM, 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제의 경우 ICM, 액상 알루미네이트 급결제는 AL로 표시하였다.

4.2 실험방법

4.2.1 리바운드

급결제별 리바운드를 평가하기 위하여 $2m^3$의 숏크리트를 천창과 벽면에 타설하여 반발되는 재료를 수거하여 무게를 측정하여 숏크리트 총 무게에 대한 백분율로 리바운드율을 측정하였다. 아래의 식 (1)은

Fig. 7. Shoot the shotcrete

Table 9. Mix proportion for field test

Type	Gmax (mm)	W/C (%)	S/a (%)	Unit Weight (kg/m^2)					AD* (C×%)	SF+ (kg/m^3)
				W	C	S	G	Accelerator (C × %)		
Plain	10	41.9	60	201	480	962	660	-	0.2	40
CM								5		
ICM								6		
AL								6		

*polycarboxylate superplasticizer
+steel fiber

리바운드율을 구하는 식이고 Fig. 7은 리바운드율을 구하기 위해 현장에서 타설하는 모습이다.

$$\frac{\text{반발재의 중량}}{\text{숏크리트재료의 총중량}} \times 100 = \text{리바운드율}(\%) \quad (1)$$

4.2.2 압축강도

개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 사용한 숏크리트의 현장적용성을 평가하기 위한 압축강도 시험은 KS F 2405「콘크리트 압축강도 시험방법」에 의해서 실시하였다. 대형 판에 숏크리트를 타설한 뒤 재령 3시간, 1일, 7일, 28일 별로 코어를 3개씩 채취하여 압축강도 시험을 실시하였다. 하지만 재령 3시간과 1일의 경우 숏크리트가 경화가 되지 않은 상태에서 코어채취를 하게 되면 미세한 균열의 발생으로 인해 강도에 영향을 미치므로 KS F 2413「휨강도 시험한 공시체로 콘크리트의 압축강도를 시험하는 방법」에 의하여 재령 3시간 및 1일 압축강도를 측정하였다. 제작된 시험편은 23 ± 2℃의 항온의 수조에서 소요의 재령까지 양생하여 실험을 실시하였다.

4.2.3 휨강도

개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 사용한 숏크리트의 휨강도를 평가하기 위하여 KS F 2408「콘크리트 휨강도 시험방법」에 의하여 실시하였다. 크기 150 × 150 × 550 mm 각주형 시험편은 1일, 28일에 대하여 3개씩 제작하였고 제작된 시험편은 온도 23 ± 2℃ 항온의 수조에서 소요의 재령까지 양생하여 실험을 실시하였다.

5. 현장실험 결과

5.1 리바운드

급결제 종류에 따른 숏크리트의 리바운드율을 비교·분석하기 위하여 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제 기존 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제 및 액상 알루미네이트계 급결제를 사용한 숏크리트의 리바운드 실험을 실시하였고 Fig. 8에 그 결과를 나타내었다. Fig. 8과 같이 기존 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 사용한 숏크리트의 리바운드율이 가장 낮고 액상 알루미네이트 급결제의 리바운드율이 가장 높게 나타났다. 특히 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 사용한 숏크리트의 경우 타설 당시 다른 급결제의 리바운드 실험환경과 달리 용수 부위가 많음에도 불구하고 알루미네이트 급결제에 비해 리바운드율이 낮고 기존 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제와 유사한 수준의 리바운드율을 나타내었다.

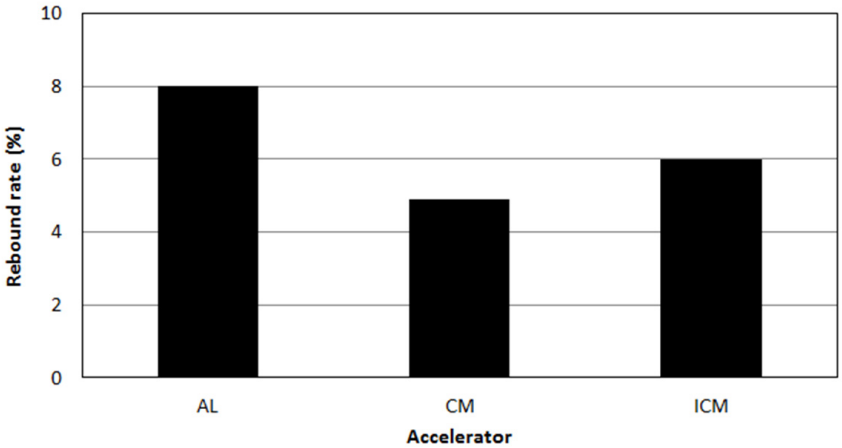

Fig. 8. Rebound rate with accelerator

5.2 압축강도

개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 사용한 숏크리트의 압축강도 결과를 Fig. 9에 나타냈다. 실험결과 기존 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 사용한 숏크리트의 압축강도가 재령 1일까지는 우수하게 나타나 실내실험과 비슷한 경향을 나타내었다. 하지만 7일 이후 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 사용한 숏크리트의 압축강

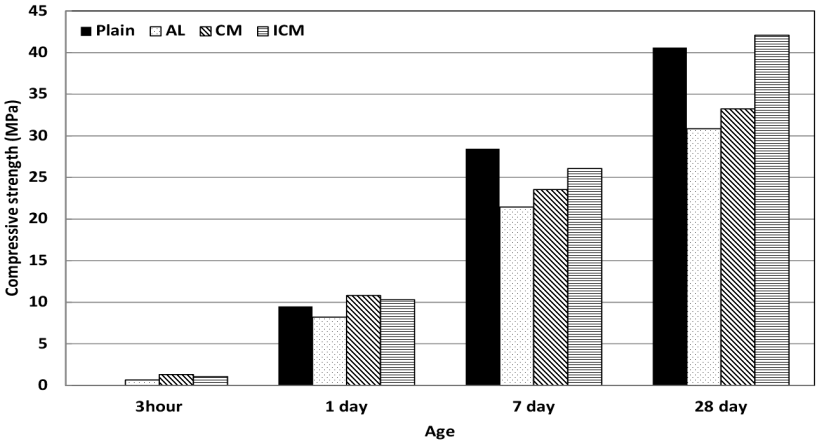

Fig. 9. Flexural strength for field test with accelerator

Table 10. Compressive strength for field test compared with plain shotcrete (%)

Age \ Accelerator	AL	CM	ICM
1day	86	114	109
7days	75	83	92
28days	76	82	104

Table 11. Compressive strength of ICM for field test compared with CM5 (%)

Age \ Accelerator	ICM
3hours	89
1day	96
7days	111
28days	127

Table 12. Compressive strength of ICM for field test compared with AL (%)

Age \ Accelerator	ICM
3hours	177
1day	127
7days	122
28days	136

도보다 낮아지는 경향을 보였다. 액상 알루미네이트계 급결제를 사용한 숏크리트의 압축강도가 가장 낮은 결과를 보여 주었다. Table 10과 같이 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 적용한 숏크리트의 재령 28일 압축강도는 실내실험과 달리 플레인 숏크리트 압축강도 대비 약 4% 증가하였다. 이는 실내시험의 경우 급결제를 사용한 숏크리트의 시험편을 제작하는데 있어 빠른 초결로 인해 가사시간이 매우 짧아 충분한 다짐을 하기가 어려운 반면 현장의 경우 가사시간 이내에 고압으로 뿜어붙이므로 실내시험에 비해 충분히 밀실한 시험편이 제작되었기 때문으로 판단된다. 기존 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제와 액상 알루미네이트 급결제를 사용한 숏크리트의 압축강도는 플레인 숏크리트 재령 28일 대비 각각 약 18%, 24% 강도 감소를 나타냈다. 또한 Table 11과 같이 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제의 강도와 기존 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제의 강도를 비교하면 재령 3시간일 때 약 11%, 재령 1일일 때 약 4% 감소하였다. 하지만 재령 7 및 28일일 때는 각각 약 11% 및 27% 증가하였다. 표 12와 같이 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제의 강도와 액상 알루미네이트 급결제를 사용한 숏크리트를 비교하면 재령 3시간, 1일, 7일, 28일에서 77%, 27%, 22%, 36% 강도가 증가하여 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제의 초기 및 장기강도 성능이 우수하다고 판단된다.

5.3 휨강도

개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 사용한 숏크리트의 휨강도 시험 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 휨강도 역시 압축강도와 비슷하게 초기강도는 기존 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 사용한 숏크리트가 높게 나타났지만 장기재령으로 갈수록 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 사용한 숏크리트의 강도가 우수하게 나타났다. Table 13과 같이 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 사용한 재령 28일 휨강도는 플레인 숏크리트 재령 28일 휨강도 대비 약 5% 감소하였다. 그리고 기존

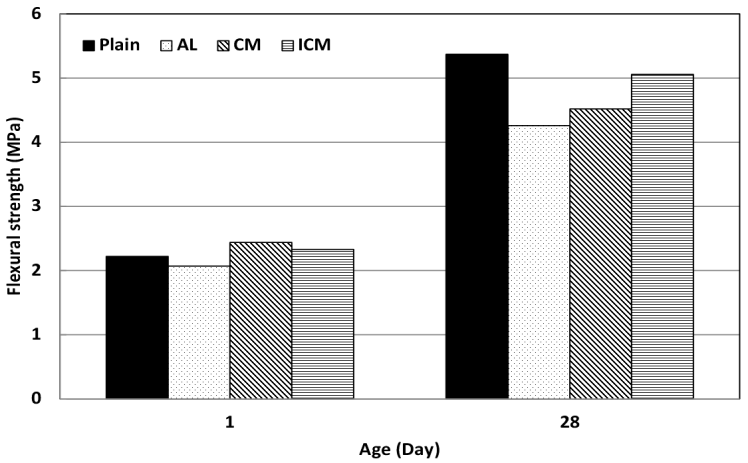

Fig. 10. Flexural strength for field test with accelerator

Table 13. Flexural strength for field test compared with plain shotcrete (%)

Age \ Accelerator	AL	CM	ICM
1day	93	110	105
28days	80	85	95

Table 14. Flexural strength of ICM for field test compared with CM (%)

Age \ Accelerator	ICM
1day	95
28days	112

Table 15. Flexural strength of ICM for field test compared with AL (%)

Age \ Accelerator	ICM
1day	113
28days	119

$C_{12}A_7$계 광물계 급결제와 액상 알루미네이트 급결제를 사용한 재령 28일 휨강도는 플레인 숏크리트 재령 28일 휨강도 대비 각각 약 15%, 20% 강도 감소를 보였다. 또한 Table 14와 같이 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 사용한 휨강도는 기존 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 사용한 휨강도 대비 재령 1일에서는 5% 감소하였지만 재령 28일에서는 약 12% 증가하였다. 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 사용한 휨강도를 액상 알루미네이트 급결제를 사용한 휨강도와 비교해 보면 재령 1일, 28일에서 각각 약 13%, 19% 증가하는 것으로 나타났다(Table 15).

6. 결 론

본 연구에서는 숏크리트의 고성능화를 위해 개발된 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결재를 사용한 숏크리트의 성능을 평가하기 위해 실내실험을 실시하였다. 또한 실내실험에서 도출한 최적혼입률을 사용하여 현장적용성을 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 급결제별 응결시간 시험 결과 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 6% 이상 사용한 모르타르의 경우 기존 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제에 비해 종결이 더 빠르게 나타났다.
2. 압축강도 및 휨강도 시험결과 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 사용한 숏크리트의 경우 초기재령에서 플레인 숏크리트 보다 약간 높은 강도를 보였으나 기존 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제 보다는 낮은 결과를 보였다. 하지만 재령 7일 이후 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 사용한 배합의 강도가 증가하여 장기강도의 우수성을 나타냈으며 혼입률이 6%일 때 가장 좋은 성능을 보였다.
3. 현장에서 실시한 급결제별 리바운드 실험결과 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 사용한 숏크리트의 경우 타설당시 용수가 발생했음에도 불구하고 기존 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 사용한 숏크리트의 리바운드율과 유사한 것으로 나타나 초기 급결성능이 우수하다고 판단할 수 있다.
4. 현장적용 압축강도 및 휨강도 실험 결과 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 사용한 숏크리트의 경우 실내실험과 같이 초기강도는 기존 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제에 비해 낮게 나타났지만 장기재령으로 갈수록 강도가 증가하는 경향이 나타났다.
5. 실내 및 현장 적용한 실험결과들을 종합해 볼 때 개량형 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제를 적용한 숏크리트의 경우 기존 $C_{12}A_7$계 광물계 급결제보다 장기강도가 더욱 증가하였다. 따라서 기존 급결제의 장기강도 성능을 개선시켜 숏크리트의 품질을 한층 더 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 삼성물산(주) 및 (주)유니온의 지원을 받아서 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

References

1. Park, H.G., Lee, M.S., Kim, J.K., An, B.J. (2002), “Development of high performance shotcrete for permanent shotcrete tunnel lining (I : Application of new type accelerator for high strength shotcrete)”, Proceeding of Korea Concrete Institute, Vol. 14, pp. 1023-1030.
2. Park, H.G., Lee, M.S., Won, J.P., Kim, J.K. (2004), “Performance of wet-mixed shotcrete with powder types cement mineral accelerator”, Journal of Korea Society of Civil Engineer, Vol. 24, No. 1C, pp. 65-69.
3. Won, J,P., Sung, S.K., Park, H.G., Lee, M.S. (2005), “Durability characteristics of shotcrete with $C_{12}A_7$ mineral based accelerator”, Journal of Korea Society of Civil Engineer, Vol. 25, No. 3C, pp. 235-240.
4. Won, J.P., Kim, H.H., Lee, S,W., Kim, W.J., Jang, C.I. (2007), “Engineering properties of high performance shotcrete for permanent support apply large size underground space”, Proceeding of Korea Concrete Institute, Vol. 19, No. 1, pp. 569-572.
5. Lee, S.P., Ryu, J.H., Lee, S.D., Jeon, S.W., Lee, S.I. (2007), “Performance improvement and durability evaluation of shotcrete for permanent tunnel support”, Tunnel & Underground Space, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 17, No. 4, pp. 266-284.
6. Bae, G.J., Jang, S.H., Choi, S.W., Choi, M.S., Chae, J.G., Lee, B.H. (2012), “High performance wet-mix shotcrete using alkali-free accelerator and HPA for early and high stabilization of tunnel”, Nature, Tunnel & Underground Space, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 14, No. 6, pp. 59-63.
7. Sung, S.K. (2005), “Performance of shotcrete with $C_{12}A_7$ mineral based accelerator”, Master thesis, Konkuk University.
8. ACI Committee 506 (1995), “Specification for materials, proportioning and application of shotcrete”, ACI 506.2-90.
9. Morgan, D.R., Wolsiefer, J.T. (1991), “Silica fume in shotcrete”, Proceeding of the CANMET/ACI International Workshop, Washington, D.C., USA, April 1991, pp. 2-19.
10. Park, H.G., Sung, S.,K., Park, C.G., Won, J.P. (2008), “Influence of a $C_{12}A_7$ mineral-based accelerator on the strength and durability of shotcrete”, Cement and Concrete Research, Vol. 38, No. 3, pp. 379-385.
11. Won, J.P., Hwang, U.J., Kim, C.G., Lee, S.J. (2013), “Mechanical performance of shotcrete made with high-strength cement-based accelerator”, Construction and Building Material, Vol. 49, pp. 175-183.