

-shotcrete용 급결제를 첨가한 시멘트 모르타르의 응결 및 강도특성

김진철 ^{1)*} · 류종현 ¹⁾

¹⁾ 한국도로공사 도로교통기술원

(2003년 8월 12일 원고접수, 2004년 1월 30일 심사완료)

Setting Time and Strength Characteristics of Cement Mixtures with Set Accelerating Agent for Shotcrete

Jin-Cheol Kim ^{1)*} and Jong-Hyun Ryu ¹⁾

¹⁾ Highway and Transportation Technology Institute, Korea Highway Corporation, Kyunggi-do, 445-812, Korea

(Received August 12, 2003, Accepted January 30, 2004)

ABSTRACT

Although set accelerating agents are used generally in New Austrian Tunneling Method, the standards for test methods and quality of set accelerating agents are not prescribed domestically. In this study, the proprieties of the various standards and the characteristics of set accelerating agents for shotcrete were evaluated.

The alkali contents of set accelerating agents based on silicate, aluminate and cement were higher than those of alkali-free ones. From the result, it is thought that the quality control of aggregate should be enhanced and that the number of test cycle of alkali-aggregate reaction should be increased.

The setting times of cement paste with set accelerating agents based on silicate and alkali-free ones were different largely with mixing methods. Compressive strength of mortar with set accelerating agents based on silicate, aluminate and cement at one day satisfied the specifications of Korea Concrete Institute. However, the strength ratio compared to control mix at 28 days showed as 50~65% except for the alkali-free set accelerating agents. As a results of setting time and strength test, the establishment of domestic standards that can reflect the characteristics of materials and construction methods of tunnels and that can increase quality of set accelerating agents is required immediately.

Keywords : set accelerating agents, alkali contents, silicate, aluminate, alkali-free, setting time, strength ratio

1. 서 론

우리나라의 고속도로 터널건설에 근간을 이루고 있는 NATM(New Austrian Tunneling Method)은 터널의 굴착직후 shotcrete를 타설하여 낙반방지와 암반변형 및 이완을 조기에 억제하고 암반의 변형에 대한 지보압력을 제공하여 시공 중 뿐만 아니라 시공 후 터널의 안정성을 확보하고 있다. 1983년부터 국내에서 본격적으로 사용된 NATM 시공법은 건식에서 습식시공으로 변화되어 왔으며, 암반하중에 대한 인성 증가를 위하여 강섬유보강 shotcrete가 일반화되면서 시공법과 품질관리 기준에 대한 연구도 활발히 전개되고 있다¹⁻⁴⁾.

shotcrete는 일반적으로 타설압에 의한 반발률을 감소시키고 조기강도를 얻음으로써 암반의 변형을 방지하기 위

하여 시멘트의 응결 및 경화를 촉진시키는 급결제를 사용하고 있다. 급결제는 시멘트의 응결 및 경화속도를 조절하는 혼화제로서 주성분별로 구분하면 무기염계로서 알루미늄이트계($nNa_2O \cdot Al_2O_3$, $nK_2O \cdot Al_2O_3$, $n=1\sim3$) 및 실리케이트계($Na_2O \cdot nSiO_2$, $n=2\sim3$), 알칼리 프리계와 시멘트 광물계 등으로 분류할 수 있다⁵⁻⁷⁾. 실리케이트계 급결제는 아시아와 아프리카 등에서 많이 사용되는 반면, 미주지역에서는 변성실리케이트계가 주로 사용되고 있다. 유럽에서는 응결시간이 빠른 알루미늄이트계 및 알칼리프리계 급결제가 사용되며, 최근에는 작업자의 안전, 환경오염 등의 이유로 알칼리프리계의 사용량이 증가하고 있는 추세이다^{8,9)}. 일본의 경우 터널시공시 용수부(湧水部)가 많기 때문에 응결시간이 매우 빠르고 용수 대응능력이 우수한 급결제가 필요하므로 CA(Calcium Aluminate) 또는 CSA(Calcium Sulphur Aluminate)계를 주성분으로 하는 급결성 시멘트 광물계가 주로 사용되고 있다.

* Corresponding author

Tel : 031-371-3351 Fax : 031-371-3359

E-mail : jckim@freeway.co.kr

국내의 경우 무기염계인 실리케이트, 알루미늄이테계 급결제가 보편적으로 사용되며, 최근에는 급결성 시멘트 광물계, 알칼리프리게 급결제가 출시되어 있는 상황이다.

이와 같이 숏크리트에서 급결제의 사용은 보편화되어 있으나 이에 대한 품질변동 범위, 적정 시험방법 등에 대한 체계적인 연구는 거의 없으며, 품질 및 시험규정도 시방서마다 서로 다르고 제조사 뿐만 아니라 시공자에 따라 적용기준이 다르기 때문에 혼란이 가중되고 있는 실정이다.

일본 토목학회¹⁰⁾, 미국의 ACI¹¹⁾ 및 ASTM¹²⁻¹⁴⁾, 유럽 통합규격(EFNARC, European of Producers and Application of Specialist Products for Structures)¹⁵⁾, 국제 터널협회(ITA, International Tunneling Association)¹⁶⁾ 등과 같이 국외의 경우 터널시공 현황에 적합하도록 나름대로의 품질기준 및 시험규정을 제정하여 숏크리트의 품질향상을 도모하고 있다.

국내에서는 한국 터널공학회에서 제정한 터널시방서¹⁷⁾, 한국콘크리트학회에서 1999년 콘크리트표준시방서 개정과 더불어 급결제 품질기준(안)¹⁸⁾을 마련하였으나 국내 터널시공의 현실을 무시한 채 외국의 기준을 그대로 답습하고 있는 실정이다.

Table 1 Specification of setting time of cement mixtures with SAA

Classifications	W/C	S/C	Setting time(min)		Test methods	
			Initial	Final		
Mortar	KCI SC 102 JSCE D 102	50	3	5	15	Proctor penetration
	ITA	-	-	3~10	9~30	Proctor penetration
Paste	KTA	-	-	1~5	12~20	Gillmore test
	ASTM C 1141	24~30	-	1~3	12	Gillmore test
	EFNARC	35	-	10	60	Vicat test

Table 2 Specification of shotcrete and mortar with SAA

Specifications	Compressive strength (MPa, %)				Test methods
	12 hours	1 day	28 days	90 days	
KCI SC 102 JSCE D 102	≥1.0	≥8.8	≥75 % of control mix	-	Mortar (5×5×5cm)
KTA specification	-	≥9.8	≥17.7	-	Shotcrete (core specimen)
KHC specification ³³⁾	-	≥9.8	≥19.6	-	Shotcrete (core specimen)
EFNARC	-	-	≥75 % of control mix	≥Test mix at 28days	Shotcrete (core specimen)

따라서 본 연구에서는 숏크리트용 급결제에 대한 국내·외 품질기준을 고찰하였으며, 국내 유통중인 급결제에 대한 품질시험과 급결제를 첨가한 시멘트 페이스트 및 모르타르의 응결 및 강도특성을 검토하였다.

2. 숏크리트용 급결제의 품질규정에 대한 고찰

ASTM C 1141에서 숏크리트용 혼화재료 품질에 대한 포괄적인 규정과 급결제(SAA, Set Accelerating Agent)를 첨가한 시멘트 페이스트의 응결시간 및 염소이온 허용함량을 정하고 있다. 우리나라 터널표준시방서(KTA, Korea Tunneling Association)에서도 ASTM과 유사한 규정을 두고 있으나 일본 토목학회 및 한국콘크리트학회에서 제정한 품질규격에서는 모르타르의 관입저항시험에 의한 응결시간 및 압축강도 품질기준을 정하고 있다.

또한 영국 산업규격초안(pr EN 934-5)¹⁹⁾ 및 EFNARC의 경우 비카트 시험장치에 의한 응결시간, 밀도, 고흡분량에 대한 품질기준을 정하고 있다. Table 1 및 2는 각 규격별 숏크리트용 급결제의 응결시간 및 압축강도 기준을 정리한 것이다.

급결제의 품질현황을 알아보기 위하여 국내 유통중인 8개사 14개 제품 시험 성적서의 응결시간 및 압축강도 측정결과를 정리한 것이 Table 3 및 Fig. 1이다. 대부분의 제조사에서는 급결제를 첨가한 시멘트 페이스트의 응결시간 측정방법으로서 길모어 시험장치를 사용하고 있으며, 물-시멘트비는 시멘트의 표준주도(normal consistency) 범위인 23 ~ 30%이었다. 1개사의 경우 물-시멘트 48.5%의 시멘트 모르타르 응결시간을 시멘트 페이스트의 응결시간 측정장치인 길모어 시험으로 측정하였으며, 급결제 첨가량은 실리케이트계 10 ~ 12%, 알루미늄이테계, 알칼리프리게 및 급결성 시멘트 광물계의 경우 5%이었다. 압축강도는 급결제를 첨가한 콘크리트를 대상으로 하였으며, 물-시멘트비는 제조사에 따라 38 ~ 43.2% 이었다.

시험 성적서에 기재된 응결시간을 주성분별로 정리한 Table 3에서 초결시간은 3:44 ± 0:40, 종결시간은 17:53 ± 2:03 으로서 대한터널협회 응결시간 규정을 만족하고 있다. 그러나 길모어 시험장치는 시험자의 주관적 판단에 따라 오차가 크게 나타날 수 있는 시험방법임에도 불구하고 제품별 표준편차가 적은 것은 특기할 만한 사항이며, 이에 대해서는 4.2절에서 고찰하였다.

Fig. 1은 시험 성적서에 기재된 급결제 첨가 콘크리트의 압축강도 평균 및 표준편차를 정리한 것이다. 시험 성적서에 기재된 측정재령은 8시간, 1, 3, 7 및 28일이었으며, 재령 8시간 및 28일 압축강도 평균값은 각각 5.7 및 23 MPa, 표준편차는 각각 0.2 및 0.8 MPa로서 변동계수는 4% 미만을 나타내었다.

Table 3 Setting time of cement paste with SAA (authorized test report)

Classification	Initial setting time(min:sec)	Final setting time(min:sec)	Remark
Aluminate base	3:43±0:46	18:25±1:37	7 companies
Silicate base	3:41±0:37	17:48±1:52	6 companies
Alkali free base	4:30	19:30	1 company
Cement base	3:20	13:30	1 company
Total average	3:44	17:53	-
Standard diviation	0:40	2:03	-

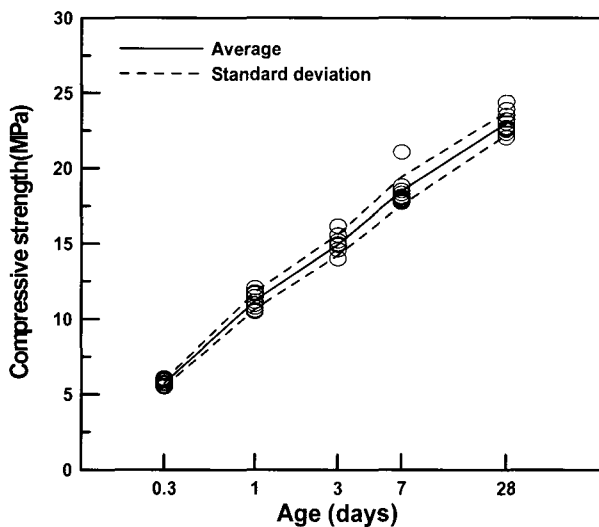


Fig. 1 Compressive strength of concrete with SAA in authorized test results

3. 실험개요

3.1 사용재료

H사 보통 포틀랜드 시멘트, 잔골재는 표준사 및 조립률 2.95의 강모래를 표면건조 포화상태로 사용하였다. 숏크리트용 급결제는 액상의 실리케이이트계(이하 Silicate base, SI), 알루미늄이이트계(이하 Aluminate base, AL), 및 알칼리프리계(이하 Alkali-free base, AF)와 CA(calcium aluminate) 급결성 시멘트광물계(이하 Cement base, CM)를 사용하였다.

3.2 실험방법

3.2.1 밀도, 고형분 함유량 및 pH 측정

액상급결제의 밀도는 KS A 0601²⁰⁾에 따라 500 ml 메스 실린더에 급결제를 넣고 액체 비중계에 지시된 값을 3회

읽어 평균값으로 하였다. 고형분량은 ASTM C 494²¹⁾에 따라 약 4 ml의 급결제를 105 ± 3 °C의 건조로에서 24 ± 0.25 시간 항량시킨 후에 시료의 건조중량을 측정하여 다음 식과 같이 계산하였다. 액상급결제의 pH는 KS M 9185²²⁾에 따라 온도보상 회로가 내장된 유리전극을 사용하여 측정하였다.

$$\text{residue by oven drying (percent by mass)} = \frac{\text{mass of dried residue}}{\text{mass of sample}} \times 100$$

3.2.2 전알칼리량 측정

급결제중의 알칼리 함유량(Na_2O 및 K_2O)은 유도결합 플라즈마 분광기(ICP, Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer)로 측정하였으며, 전알칼리량(R_2O)은 다음 식으로 계산하였다²³⁾.

$$R_2O (\%) = Na_2O + 0.658 K_2O$$

3.2.3 표준주도 및 응결시험

시멘트 페이스트의 물-시멘트비는 표준주도 시험방법에 따라 비카트 시험장치의 직경 10 mm 침이 30초 동안 10 ± 1 mm 관입깊이를 얻을 때의 반죽상태로 하였으며,²⁴⁾ 본 연구에서 사용한 보통포틀랜드 시멘트의 표준주도는 28% 이었다. 길모어 시험장치에 의한 응결시간은 초결침(113.4 ± 0.5 g) 및 종결침(453 ± 0.5 g)을 시멘트 페이스트 위에 놓았을 때, 알아볼 만한 흔적 없이 침을 반치고 있을 때로 정하였다.²⁵⁾ 비카트 시험장치의 경우 직경 1 mm 침으로 25 mm 침입도를 얻었을 때를 초결시간, 침의 흔적이 나타나지 않을 때를 종결시간으로 결정하였다.²⁶⁾ 한편, 급결제를 첨가한 시멘트 모르타르의 응결시간 결정은 한국콘크리트학회규준 부속서에 따라 관입저항 시험장치로 측정하였으며, 모르타르의 관입저항이 3.5 및 27.5 MPa에 도달하는데 소요되는 시간을 각각 초결 및 종결시간으로 하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 급결제 품질

EFNARC에서는 액상 급결제의 밀도, 고형분량, pH 등의 품질기준을 정하고 있으며, 이에 따르면 밀도가 1.10 이상인 경우 표준편차 0.03, 그 이하의 경우 0.02이며, 고형분량 20% 이상에 대해서는 표준편차 5% 이하이면 양호한 품질을 갖는 것으로 판단하고 있다. Table 4는 국내에서 사용중인 6개사 13종 액상급결제의 밀도와 고형분량 측정결과를 정리하였다.

Table 4 Average and standard deviation of density and solid content of SAA

Types	Density (g/cm ³)	Solid content (%)	pH	Remark
Silicate base	1.397±0.0093	44.39±0.84	11.1	6 companies
Aluminate base	1.528±0.0268	47.97±2.06	11.7	7 companies

Table 5 Total alkali content supplied from SAA

Types	Na ₂ O(%)	K ₂ O(%)	R ₂ O(%)	Remark
Silicate base	8.80	0.018	8.81	6 companies
Aluminate base	20.64	0.014	20.61	7 companies
Alkali-free base	0.06	-	0.06	2 companies
Cement base	14.00	0.200	14.14	1 company

이 표에 따르면 액상 급결제의 밀도는 및 고형분량의 평균은 각각 1.468 및 47.5%, 표준편차는 각각 0.066 및 3.48%로 나타났다. 주성분별로 분류하면 알루미늄이트계 급결제의 밀도 및 고형분량이 약간 높게 나타났으나, EFNARC규격을 만족하고 있으며, 실리케이트계 급결제는 제조사별 밀도 및 고형분량의 편차가 매우 낮아 제품간 품질편차가 거의 없을 것으로 판단된다. 또한 Table 4 및 5와 같이 국내 유통중인 6개사 제품의 평균 비중, Na₂O 함유량을 고찰한 결과 KS M 1415²⁷⁾에서 규정하고 있는 3종 액상 규산소다에 해당함을 알 수 있다.

일반적으로 액체의 밀도와 고형분량은 상관성을 가지므로 Fig. 2와 같이 상관성을 고찰하였다. 이 그림에서 액상 급결제의 주성분별로 분류하면 결정계수는 실리케이트계 0.70, 알루미늄이트계 0.62로 나타났으나 실리케이트계 급결제는 1개사 제품을 제외하고 밀도 및 고형분량이 거의 유사한 값을 나타내고 있으며, 알루미늄이트계 급결제의 경우 2개사 제품이 약간 차이를 나타내고 있으며, 이 제품을 제외하면 고형분량의 표준편차가 ±0.75로 크게 감소하였다. 숏크리트용 급결제는 터널벽면의 부착량을 증가시켜 시공성을 향상시키고 조기에 강도를 얻을 목적으로 Na₂O, K₂O와 같은 알칼리성분이 다량 포함되어 있다. 이 성분이 많으면 시멘트 경화체의 초기강도는 빠르게 증가하지만 장기재령에서는 무혼입에 비하여 강도가 낮아진다. 또한 알칼리 성분은 골재중의 반응성 물질과 화학반응에 따라 과도한 팽창을 일으키는 알칼리-골재반응의 원인이 되므로 이 반응을 억제하기 위해서는 반응성 골재를 철저히 배제하고 알칼리 함유량이 낮은 재료의 선정이 중요하다. 그러나 숏크리트 중에 포함된 알칼리 함유량을 제한하는 품질규격은 전무하며 다만, AE제, 감수제와 같은 콘크리트용 화학 혼화제의 품질을 규정한 KS F 2560에서는 콘크리트중의 알칼리 함유량을 3.0 kg/m³ 이하, 시멘트

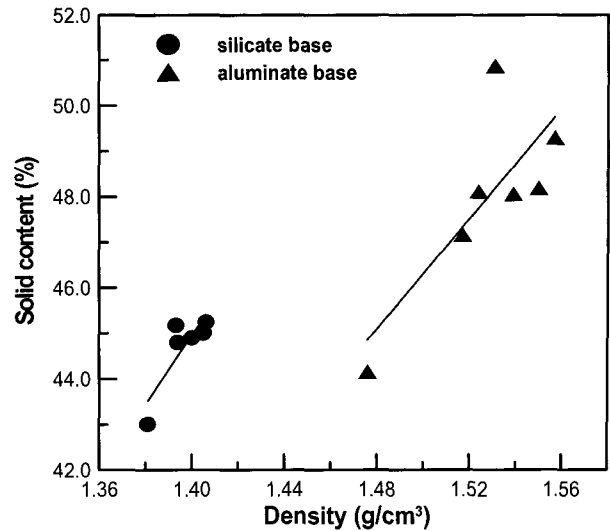


Fig. 2 Relationship between density and solid content of SAA

이외의 재료로부터 유입되는 전알칼리 허용량은 0.5 kg/m³ 이하로 규정하고 있다.²³⁾

Table 5는 숏크리트용 급결제의 주성분에 따른 평균 알칼리 함유량을 정리한 것으로 Na₂O가 대부분이며, K₂O 함유량은 미미하였으며, 알칼리프리계 급결제는 0.06%로서 매우 낮은 결과를 나타내었다. 급결제로부터 숏크리트에 공급되는 알칼리량은 고속도로 공사용 숏크리트 표준배합(단위시멘트량 480 kg/m³)을 기준으로 각 제조사의 추천 사용량인 실리케이트계 12%, 알루미늄이트계 5% 및 급결성 시멘트 광물계 5%사용하였을 때 급결제로부터 유입되는 알칼리함유량은 각각 5.07, 5.14 및 3.39 kg/m³로서 알칼리 함유량이 매우 높은 것을 알 수 있다.

전술한 바와 같이 현행 숏크리트 품질규정에서는 급결제의 알칼리 함유량에 대한 제한 규정이 없으므로 급결제의 종류를 제한할 수 없으나 지방서에 규정된 급결제 최대 사용량을 준수하고, 숏크리트용 골재에 대한 알칼리-골재 반응성 시험을 철저히하고 관리빈도를 높여 반응성 골재의 사용을 최대한 억제함으로써 알칼리-골재 반응에 대비해야 할 것으로 판단된다. 향후 급결제 주성분 및 첨가량에 따른 알칼리-골재 반응성 평가와 같은 추가시험을 통하여 사용가능한 급결제 종류와 사용량에 대한 연구가 시급히 이루어져야 할 것으로 생각된다.

4.2 응결시간

급결제는 숏크리트 타설 직후 리바운드 감소와 굴착된 터널의 암반 이완하중과 변형을 조기에 억제하기 위하여 사용하므로 빠른 강도발현이 요구되므로 전술한 바와 같이 대부분의 품질기준에서는 응결시간을 규정하고 있다. 본 연구에서는 국내에서 자주 인용되고 있는 ASTM,

Table 6 Setting time of cement paste with SAA by Gillmore needle(hr:min:sec)

Types	Dosage (%)	Pre-mixed method		Post-mixed method	
		Initial set	Final set	Initial set	Final set
Silicate base	12	00:37:57	3:26:05	00:04:45	00:19:00
Aluminate base	5	00:01:55	0:08:24	00:03:10	00:10:00
Alkali-free base	5	00:01:12	0:07:54	00:16:30	01:30:40
Cement base	5	00:02:25	0:10:49	00:03:38	00:06:30

EFNARC, KS 및 JSCE 규정을 대상으로 급결제를 첨가한 시멘트 페이스트 및 모르타르의 응결시간을 측정하므로써 시험방법별 차이와 정량적인 시험결과를 얻을 수 있는 시험방법을 도출하고자 하였다.

Table 6은 ASTM 및 터널표준시방서에서 규정하고 있는 급결제 첨가 시멘트 페이스트의 길모어 응결시간을 급결제의 첨가량 및 주성분에 따라 정리한 것이다. 물-시멘트비는 급결제 무혼입 시멘트 페이스트의 표준주도 측정 결과로부터 28%로 정하였으며, 첨가율은 각 제조사 추천 사용량으로 하였다. 이 표에서 알루미늄이트계 및 급결성 시멘트 광물계 급결제는 혼합방법에 따른 차이가 거의 없으며, 터널표준시방서 및 ASTM 규정을 만족하고 있음을 알 수 있다. 그러나 실리케이트계 급결제는 선첨가방법에서 초결 및 종결시간이 각각 38분 및 3시간 26분으로 응결시간이 크게 지연되는 결과를 나타내었으나 후첨가 방법에서는 종결 19분으로 선첨가방법에 비하여 약 10배 빨라지는 결과를 나타내었다. 알칼리프리계 급결제는 실리케이트계 급결제와 달리 후첨가방법에서 오히려 응결시간이 지연되는 결과를 나타내었다.

浮橋²⁸⁾에 따르면 일반적으로 실리케이트계 급결제는 Fig. 3과 같은 분자구조를 이루며, 반응기구는 말단의 Na⁺ 이온과 시멘트 중의 Ca²⁺ 이온의 교환반응으로 급결제 중의 Na⁺이온이 제거되면 규산 실라놀기(Si-OH)사이의 중축합반응이 일어나 3차원 네트워크를 형성하면서 굳어진다고 한다. 따라서 급결제를 후첨가하는 경우에는 이미 생성된 Ca²⁺ 이온과 원활한 반응이 일어나지만, 선첨가하는 경우에는 시멘트 수화반응과 동시에 이온교환반응이 일어나기 때문에 반응이 지연되는 것으로 판단된다. 그러나 알칼리프리계 급결제는 주성분이 다양하므로 첨가방법에 따른 응결시간차이를 규명하기 위해서는 다양한 재료에 대한 추가시험이 필요하다.

길모어 시험장치는 정성적인 평가기준이므로 시험자의 판단기준에 따라 오차가 발생할 수 있다. Fig. 4는 동일 배치에서 제조된 시멘트 페이스트의 응결시간을 4인의 시험자가 동시에 측정하여 변동계수를 정리한 것이다.

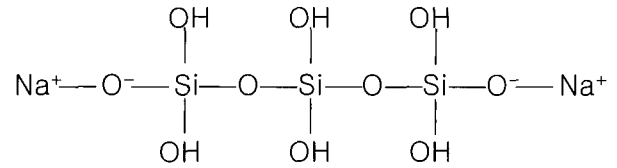


Fig. 3 Molecular structure of SAA of silicate base

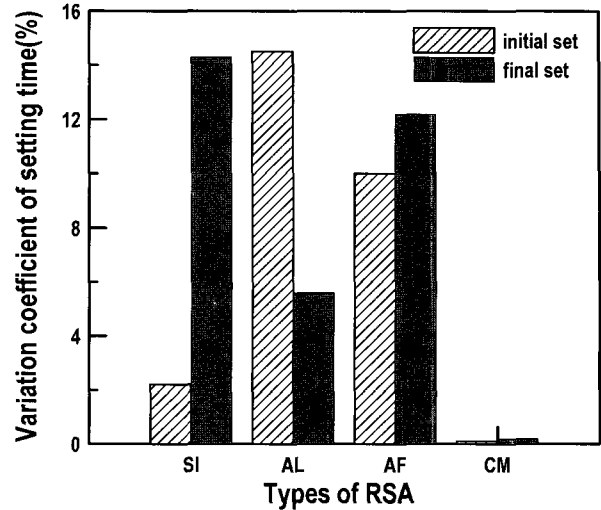


Fig. 4 Variation coefficient of setting time of cement paste with SAA

이 그림에서 응결시간이 매우 빠른 급결성 시멘트 광물계의 경우에는 시험자에 따른 변동계수 변화가 거의 없으나 실리케이트계의 경우 종결, 알루미늄이트계는 초결시간이 약 14% 정도 차이가 있음을 알 수 있다. 또한 알칼리프리계의 경우에도 초결 및 종결시간의 변동계수가 10~12% 범위를 나타냄으로서 시험결과의 신뢰성에 문제가 있음을 알 수 있다.

비카트 시험장치에 의한 응결시간에 대하여 ASTM 및 KS에서는 직경 1mm 응결침이 25mm 관입하는데 소요되는 시간과 흔적이 남지 않을 때를 각각 초결 및 종결시간으로 규정하고 있다. 그러나 EFNARC에서 인용하고 있는 BS 196²⁹⁾에서는 관입깊이 36 및 0.5mm를 각각 초결 및 종결시간을 정하고 있으며, 종결침도 Fig. 5와 같이 시험자의 판단기준을 명확히 제시하고 있다.

Table 7은 비카트 시험장치를 이용한 시멘트 페이스트의 응결시간을 급결제 종류 및 시험규격에 따라 정리한 것으로 급결제는 후첨가 방법으로 하였다. 이 표에서 BS 시험규격의 초결 관입깊이가 한국산업규격보다 크기 때문에 초결시간이 약간 빠르게 나타났으며, 알칼리프리계를 제외하면 10분 이내에 종결을 얻을 수 있었다. 알칼리프리계의 경우 시험규격법에 따른 응결시간의 차이가 크게 나타났으며, 이러한 결과는 종결시간 결정 방법 차이에 따른

것으로 응결시간이 늦은 경우 시험자의 주관적 판단이 배제될 수 있는 BS 시험방법이 합리적인 것으로 생각된다. 또한 길모어 시험결과와 비교하면 알칼리프리계를 제외하고 한국 산업규격에 의한 응결시간이 유사한 결과를 나타내고 있다.

ASTM 및 BS에서는 비카트 시험장치를 이용한 모르타르의 응결시간을 다르게 규정하고 있다. 시험방법의 특징은 응결침 중량이 ASTM C 807³⁰⁾은 400g, BS 408-2³¹⁾은 1,000g이며, 관입깊이는 ASTM의 경우 10mm를 응결시간으로 규정하는 반면, BS는 초결 36mm, 종결 2.5mm로 규정하고 있다. Fig. 6 및 Table 8은 물-시멘트비 48.5%, 잔골재-시멘트비 2.45인 급결제 첨가 시멘트 모르타르의 비카트 시험장치에 의한 응결시간 측정결과를 정리한 것이다.

이 그림에서 급결제를 첨가한 시멘트 모르타르의 비카트 응결시간은 경과시간에 따라 관입깊이가 지수함수적으로 감소하지만 응결침 중량이 600g 차이에도 불구하고 실리케이이트계의 경우 시험방법에 따른 차이가 10분 미만, 알루미늄이이트계 및 급결성 시멘트 광물계와 같이 응결시간이 매우 빠른 급결제는 차이가 거의 없다. 그러나 알칼리프리계의 경우 응결시간이 늦은 관계로 응결침 중량의 영향을 크게 받으므로 ASTM 응결시간이 30분인 반면 BS 응결시간은 크게 늦어짐을 알 수 있다.

급결제의 응결시간을 측정하는 또 하나의 시험방법으로서 일본 토목학회에서는 Procter 관입저항 시험법을 규정하고 있으며, 한국콘크리트학회 기준에서도 동일한 시험방법을 사용하고 있다. 이 시험방법에서는 관입저항 3.5 및 27.5MPa에 도달하는 때를 각각 초결 및 종결시간, 품질기준으로서는 각각 5 및 15분 이내로 정하고 있다.

Table 7 Setting time of cement paste with SAA by Vicat needle(min:sec)

Classification	KS L 5108 (ASTM C 191)		BS 196-3	
	Initial set	Final set	Initial set	Final set
Silicate base	5:38	7:38	1:02	9:32
Aluminate base	3:40	4:55	3:36	5:05
Alkali-free base	11:13	16:46	10:33	39:45
Cement base	3:58	4:33	not measurable	

Table 8 Setting time of cement mortar with SAA by Vicat needle (min:sec)

Classification	ASTM C 807	BS 408-2	
		Initial	Final
Silicate base	39:33	10:42	28:56
Aluminate base	15:19	13:48	18:13
Alkali free base	30:15	106:00	176:40
Cement base	6:30	0:35	5:15

Fig. 7은 급결제 종류별 경과시간에 따른 모르타르의 관입저항을 나타낸 것으로 시험규정에 따라 물-시멘트비 50%, 잔골재-시멘트비 3.0인 모르타르를 제조하였으며, 액상형 급결제는 혼합수에 희석하였으며, 급결성 시멘트 광물계와 같은 분말형 급결제는 시멘트와 건비빔한 후 혼합수를 투입하는 방법으로 제조하였다.

이 그림에서 급결성 시멘트 광물계는 종결시간이 5분 미만으로 매우 빠른 응결시간을 나타내었으며, 알루미늄이이트계는 초결 5분, 종결 50분, 알칼리프리계의 경우 각각 7분 및 15분 정도로서 품질기준보다 약간 늦은 응결시간을 나타내었다. 그러나 실리케이이트계의 경우 초결 약 80분, 종결 약 500분으로서 급결제로 평가할 수 없을 정도로 응결시간이 크게 늦어지는 결과를 보였다. 이는 길모어 응결시간 측정결과에서 고찰한 바와 같이 실리케이이트계 급결제의 반응특성에서 비롯된 것으로 생각된다.

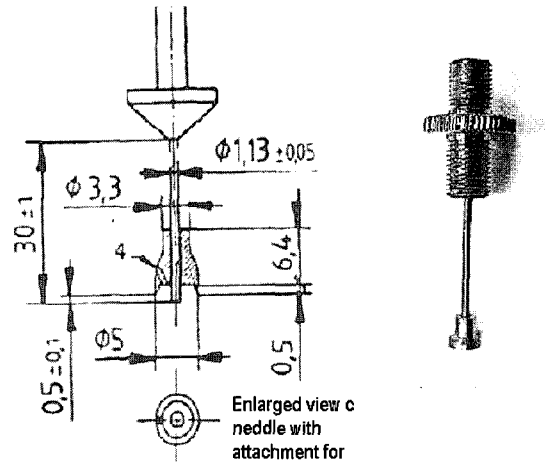


Fig. 5 BS-Vicat test equipment - final needle

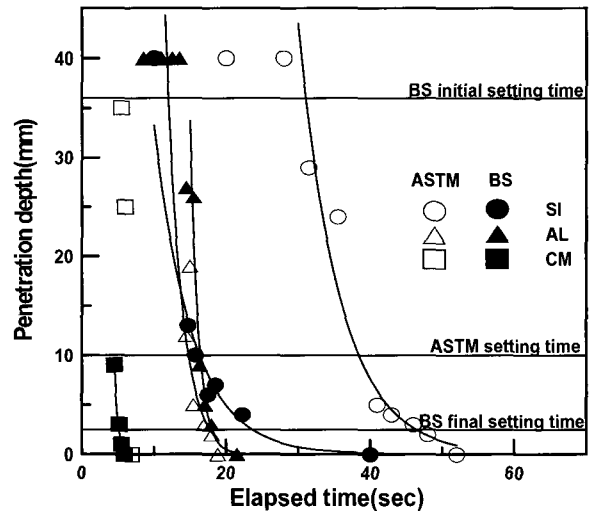


Fig. 6 Setting time of cement mortar with SAA by Vicat needle

일본의 경우 터널시공현장에서 용수부위가 많기 때문에 응결이 매우 빠른 급결성 시멘트 광물계 사용이 보편화되어 있으며, 실리케이트계 급결제 사용도 전무하다. 그러나 우리나라의 경우 실리케이트계 급결제를 사용하는 현장이 많고 대부분의 숏크리트 타설장비가 액상 급결제를 사용하고 있는 실정이다. 한국콘크리트학회 규준에 따라 급결제 품질기준을 적용한다면 대부분의 현장에서 사용하고 있는 액상형 급결제는 품질기준을 만족하지 못하므로 적용성에 큰 문제가 있음을 알 수 있다. 따라서 재료특성과 국내 현실을 반영하면서 동시에 품질향상을 도모할 수 있는 규격제정이 시급히 요망되며, 본 연구 범위에서는 응결 시간의 정량적 평가기준을 제공하고 있는 BS 196 및 BS 408 시험방법에 의한 관리가 합리적인 것으로 판단된다.

4.3 압축강도

숏크리트의 품질을 실내시험에서 재현하는 것은 곤란하므로 Table 2와 같이 대부분의 규준에서는 숏크리트의 재령 1일 이후 코어강도로 품질관리하고 있다. 한국콘크리트학회 규준에서는 급결제 첨가 모르타르의 압축강도에 대하여 재령 12시간 및 1일 강도를 각각 1.0 및 8.8MPa 이상으로 규정함으로써 초기재령에 비중을 두고 있으며, EFNARC에서는 재령 91일 강도기준을 규정하여 숏크리트의 후기 안전성에 큰 비중을 두고 있다.

Fig. 8은 W/C=50%, S/C=3.0 모르타르에 대하여 한국콘크리트학회 품질기준에 따라 제조한 모르타르의 압축강도를 재령 7일까지 정리한 것이다. 이 그림에서 알루미네이트계 및 급결성 시멘트 광물계 급결제가 이 기준을 만족하였으며, 실리케이트계 급결제는 재령 12시간에서는 플레인 모르타르와 유사한 강도를 보였으나 재령 1일 기준을 만족하고 있다. 알칼리프리계 급결제의 경우 재령 3일 강도가 0.3MPa 정도로서 플레인 모르타르의 강도보다 낮은 강도를 나타내으나 재령 7일에서는 약 29MPa로서 다른 급결제 첨가 모르타르의 압축강도를 상회하는 결과를 나타내었다. 그러나 알칼리프리계는 제조사마다 주성분이 일정하지 않으므로 1개 제품의 실험결과로 판단하는 것은 곤란하며, 각 제조사 및 주성분에 따른 추가 실험이 필요할 것으로 사료된다.

한국콘크리트학회 품질기준 및 EFNARC에서는 급결제를 첨가한 모르타르 및 숏크리트의 재령 28일 압축강도는 플레인 대비 75% 이상으로 규정하고 있다. Fig. 9는 재령 28일 압축강도 측정결과를 플레인 모르타르에 대한 강도 비로 정리한 것으로 알칼리프리계 급결제를 첨가한 모르타르의 압축강도비가 85%를 나타낸 반면 다른 급결제의 경우 50~65% 정도를 나타내므로써 급결제 첨가에 따라 시멘트 모르타르의 강도감소가 크게 일어나는 것을 알 수 있다. 이와 같이 알칼리량이 높은 급결제를 첨가함에 따라

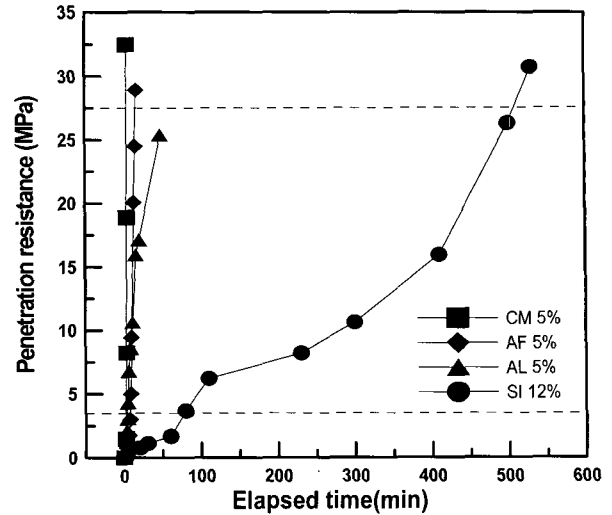


Fig. 7 Setting time of cement mortar with SAA by Procter resistance

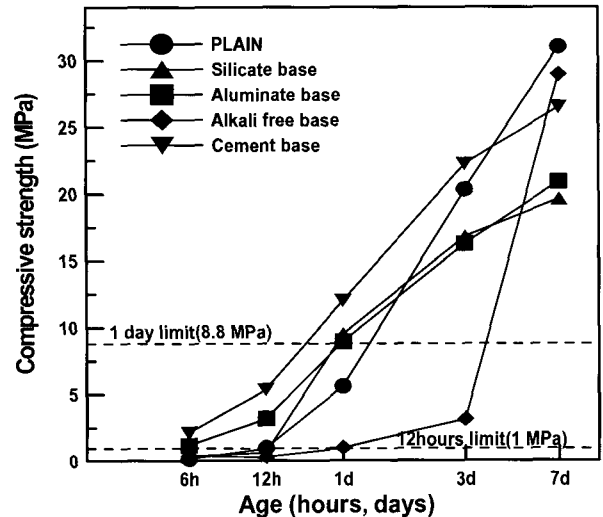


Fig. 8 Compressive strength of cement mortar with SAA

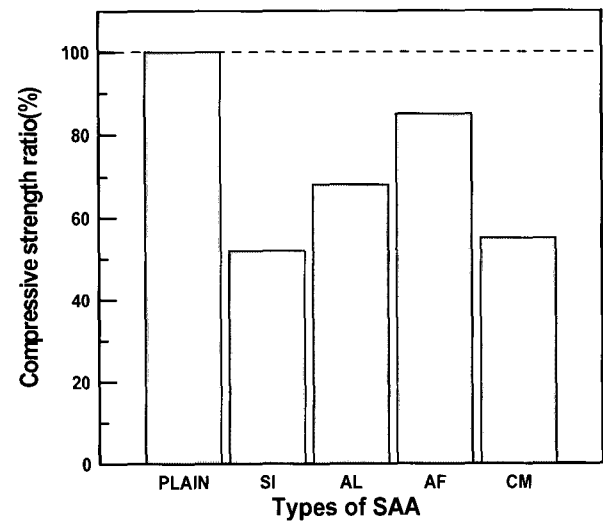


Fig. 9 Compressive strength ratio of cement mortar with SAA at the age of 28days

압축강도가 감소하는 이유에 대하여 Gebler³²⁾ 등은 알칼리 성분과 수산화칼슘(Ca(OH)₂)과 반응하여 시멘트 경화체 중의 수용성 NaOH 양이 증가되거나, 시멘트 중의 알루미늄네이트 성분과의 반응에 의해 생성되는 알루미늄-실리카 겔의 침전을 촉진하여 결과적으로 정상적인 수화를 방해하기 때문에 재령에 따른 강도저하가 크게 일어나는 것으로 보고하였다.

이상의 결과에 따르면 국내 시판중인 급결제의 주성분, 첨가방법에 따라 응결시간 및 압축강도의 품질편차가 크게 발생되므로 일률적인 품질규격의 적용은 곤란한 것으로 생각된다. 특히 급결제의 품질기준으로서 응결 및 압축강도 규정에 대하여 상세하게 나타내고 있는 한국콘크리트학회 품질규준은 일본 토목학회 품질기준을 답습하고 있으나 국내 터널공사와 일본의 현황은 크게 다르므로 국내 현실에 적합하도록 개정하는 것이 바람직한 것으로 생각된다. 다만, 본 연구에서 검토한 내용은 응결 및 강도 특성을 국한적으로 다루었으므로 품질규정 제안에는 시급한 부분이 있다. 향후 급결제 종류 및 사용방법에 따른 수화반응, 물성 및 내구성 평가를 위한 연구가 이루어져야 하며, 이러한 결과를 토대로 급결제의 품질기준이 제정되어야 할 것으로 생각된다.

5. 결 론

- 1) 국내 유통중인 8개사 14제품 급결제의 시험 성적서를 검토한 결과 시험항목으로서는 길모어 시험장치에 의한 시멘트 페이스트 응결시간 및 급결제 첨가 콘크리트의 재령별 압축강도를 측정하고 있으나 시험방법, 배합 등이 제조사 마다 다르고, 특히 길모어 시험장치는 시험자의 주관적 판단에 따라 오차가 크게 발생할 수 있으나 제품별 표준편차가 매우 적은 결과를 나타내었다.
- 2) 국내 유통중인 급결제는 전 알칼리량이 매우 높게 나타나 숏크리트의 알칼리-골재반응에 대한 위험이 심각한 수준임을 알 수 있다. 그러나 현행 규정상 급결제 종류를 제한할 수 없으므로 숏크리트용 골재의 알칼리-골재반응성에 대한 시험 및 관리빈도를 높여 반응성 골재 사용을 철저히 배제하여야 하며, 향후 급결제 주성분 및 첨가량에 따른 알칼리-골재 반응성 평가와 같은 추가연구가 시급히 이루어져야 할 것으로 생각된다.
- 3) 급결제 첨가 시멘트 페이스트 및 모르타르의 응결시험 결과 실리케이트계 및 알칼리프리카계 급결제는 첨가방법에 따라 응결시간이 크게 달라졌으며, 길모어 응결시간보다는 BS 규격에 의한 비카트 시험장치가 정량적으로 응결시간을 결정할 수 있었다. 한국콘크리트학회 품질규준의 관입저항법에 따른 모르타르의 응결시간 측정결과 실리케이트계 급결제의 응결시간이 크게 지

연되었으며, 대부분의 급결제가 이 규준을 만족하지 못하였다.

- 4) 급결제 첨가 모르타르의 재령별 압축강도 측정결과 알칼리 함유량이 높은 실리케이트계, 알루미늄네이트계, 급결성 시멘트 광물계의 재령 1일 강도는 한국콘크리트학회 품질규준을 만족하였으나 알칼리프리카계의 강도발현이 매우 늦어지는 결과를 나타내었다. 그러나 플레인 모르타르 대비 재령 28일 압축강도비는 알칼리프리카계가 85%를 나타낸 반면 다른 급결제의 경우 50~65% 정도로서 급결제 첨가에 따른 강도 감소가 크게 나타났다.
- 5) 국내 시판중인 급결제의 주성분, 첨가방법에 따라 응결 및 압축강도의 품질편차가 크게 발생되므로 일률적인 품질규격의 적용은 곤란하며, 특히 한국콘크리트학회 품질규준은 일본 토목학회 품질기준을 답습하고 있으나 국내 현실과 맞지 않는 품질규격의 개정이 시급히 요망되며, 본 연구결과를 포함하여 향후 급결제 종류 및 사용방법에 따른 수화반응, 물성 및 내구성 평가를 통하여 급결제의 품질 규정이 제정되어야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. 안상기, “숏크리트의 리바운드 감소에 대한 재료개발 연구시험”, 콘크리트학회지, Vol.5, No.1, 1993. 3, pp.54~61.
2. 김진철, 류종현, 안태송, “숏크리트용 급결제의 품질, 응결 및 경화특성”, 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 중앙대학교, Vol.14, No.1, 2002, pp.323~328.
3. 김진철, 류종현, 안태송, “숏크리트용 급결제의 응결시간에 대한 연구”, 대한토목학회 학술발표회 논문집, 부산EXPO, 2002.
4. 김진철, 류종현, 한승환, “숏크리트용 급결제의 품질특성 연구”, 대한토목학회 학술발표회 논문집, 코엑스 인터콘티넨탈호텔, 2001.
5. 현석훈, 한기석, “숏크리트 품질에 미치는 재료 및 시공 조건의 영향”, 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 중앙대학교, Vol.6, NO.1, 1994, pp.227~232.
6. 能町 宏, “急結劑”, コンクリート工學, Vol.26, No.3, 1988. 3, pp.65~70.
7. 中川 晃次, 平野 建吉, “急結劑”, セメント・コンクリート, No.427, 1982. 9, pp.95~100.
8. 한국도로공사 도로교통기술원, “강섬유보강 숏크리트의 성능향상 및 품질기준 정립”, 한국도로공사 도로교통기술원, 2001, pp.11~12
9. SK건설(주) 부설연구소, “숏크리트 급결제”, SK건설(주), 1999, pp 1~3.
10. JSCE D 102, “吹付けコンクリート用急結劑 品質規格”, JSCE, 1986, pp.146~149.

11. ACI Committee 506, "Fiber Reinforced Concrete," American Concrete Institute, USA, 544.1R-96, 1997, pp.3~5.
12. ASTM C 1141, "Standard Specifications for Admixtures for Shotcrete," ASTM, USA, 1995, pp.618~619.
13. ASTM C 1398, "Standard Test Method for Laboratory Determination of Time Setting Hydraulic Cement Mortars Containing Additives for Shotcrete by the Use of Gillmore Needles," ASTM, USA, 1998, pp.697~698.
14. ASTM C 1102, "Standard Test Method for Time of Setting for Portland-Cement Pastes Containing Quick-Setting Accelerating Admixtures for Shotcrete by the Use of Gillmore Needles," ASTM, USA, 1994, pp.587~588.
15. EFNARC, "European Specification for Sprayed Concrete," EFNARC, 1993, pp.24~27.
16. International Tunneling Association, "Shotcrete for Rock Support," Guidelines and Recommendations-A Compilation, International Tunneling Association, 1992, pp.11~12.
17. 한국터널공학회, "터널표준시방서", 한국터널공학회, 1997, pp.41~47.
18. 한국콘크리트학회, "숏크리트용 급결제 품질규격", 콘크리트표준시방서, 한국콘크리트학회, 1999, pp.483~487.
19. BS EN 934-5, "Admixtures for Concrete, Mortar and Grout-Part 5 : Admixtures for sprayed Concrete - Definition, Specifications and Conformity Criteria," British Standard, UK, 1998, pp.3~4.
20. KS A 0601, "액체 비중 측정 방법", 한국표준협회, 2001, pp.1~6.
21. ASTM C 494, "Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete," ASTM, USA, 1999, pp.259~263.
22. KS M 9185, "수질 pH측정 방법", 한국표준협회, 1998, pp.1~3.
23. KS F 2560, "콘크리트용 화학 혼화제", 한국표준협회, 2002, pp.1~21.
24. KS L 5102, "시멘트의 표준주도 시험방법", 한국표준협회, 1972, pp.1~2.
25. KS L 5103, "길모어 침에 의한 시멘트의 응결시간 시험방법", 한국표준협회, 1996, pp.1~2.
26. KS L 5108, "비카트침에 의한 수경성 시멘트의 응결시간 시험방법", 한국표준협회, 1984, pp.1~2.
27. KS M 1415, "액상 규산 나트륨(규산 소다)", 한국표준협회, 2002, pp.1~3.
28. 島田俊介, 木下吉友 "恒久グラウト注入工法". 山海堂, 2000, pp.12~13.
29. BS EN 196-3, "Methods of Testing Cement-Part 3 : Determination of setting time and soundness," British Standard, UK, 1995, pp.3~7.
30. ASTM C 807, "Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement Mortar by Modified Vicat Needle," ASTM, USA, 1999, pp.370~372.
31. BS EN 480-2, "Admixtures for Concrete, Mortar and Grout-Test Methods," British Standard, UK, 1997, pp.3~5.
32. Gebler, S.H., Litvin, A., and Mclean, W.S et al., "Durability of Dry-Mix Shotcrete Containing Rapid-Set Accelerators," *ACI Journal*, Vol 89. No.3 1992, pp.259~262.
33. 한국도로공사, "고속도로공사 전문시방서 터널편", 한국도로공사, 1998, pp.8-14~8-47.

요 약

NATM 시공에서 급결제의 사용은 일반화되어 있으나 품질 및 시험기준의 제정은 미흡한 실정이다. 본 연구는 숏크리트용 급결제에 대한 국내외 품질기준 비교 및 시험을 수행하여 규격의 적정성을 평가하였다.

실리케이트계, 알루미늄이트계 및 시멘트광물계 급결제의 알칼리함유량이 매우 높게 나타나 사용골재의 반응성 평가에 대한 관리 및 시험빈도를 높여야 할 것으로 생각된다. 또한 응결시험결과 BS 시험방법이 정량적인 것으로 판단되었으나, 실리케이트계 및 알칼리프리계 급결제는 첨가방법에 따라 응결시간이 큰 차이를 나타내었다. 압축강도는 실리케이트계, 알루미늄이트계 및 급결성 시멘트 광물계의 재령 1일 강도는 90 kgf/cm^2 이상으로 한국콘크리트학회 규준을 만족하나 플레인 모르타르 강도대비 재령 28일 압축강도비는 알칼리프리계를 제외하고 50 ~ 65% 정도를 나타내었다. 따라서 재료특성 및 국내터널 시공방법 반영과 품질향상을 도모할 수 있는 규격제정이 시급히 요망되었다.

핵심용어 : 급결제, 알칼리 함유량, 실리케이트계, 알루미늄이트, 알칼리프리계, 응결시간, 강도비