

-shotcrete의 조기강도에 대한 실험적 연구

송용수¹, 류중현², 임희대^{3*}

An experimental study on early strength of shotcrete

Yong-Su Song, Jong-Hyun Ryu, Heui-Dae Lim

Abstract As there are increasing number of tunneling works these days, shotcrete is used as primary supports in order to secure the stability of tunnels. The quality of shotcrete has a direct influence on tunnels, because it is a primary support which secures the stability of completed tunnels as well as the stability of tunnels under excavation. Especially in case that ordinary shotcrete is used under weak rock conditions or at water gushing sections, more shotcrete is needed and rebound ratio increases. As a result, it is hard to keep economic feasibility. In addition to it, in subway construction, there are cases of separated excavation and it may have a bad influence on construction period or quality. Therefore, in this study, we are going to evaluate the early strength of powder type accelerator.

Keywords: Weak rock, early strength, powder accelerator

요 지 최근 터널 공사의 급증에 따라 터널의 안정성을 확보하기 위한 주지보재로 shotcrete를 타설하고 있다. shotcrete는 굴착 중 터널의 안정성 뿐만 아니라 시공완료 후의 터널 안정성에도 중요한 역할을 하므로 shotcrete의 품질이 터널에 직접적인 영향을 미치게 된다. 특히 연약암반조건이나 용수부에서는 일반적인 급결제를 사용할 경우 shotcrete 타설량과 리바운드량이 증가하게 되어 경제성을 확보하기 어렵다. 또한 지하철 공사 시에는 분리굴착으로 시공하는 경우가 있어 공사기간이나 품질에 악영향을 줄 수 있다. 따라서 본 연구에서는 연약암반 터널공사에서 공기 및 공사비를 절감하고, 안정성을 확보할 수 있도록 급결성능을 강화시키고, 초기 압축강도 및 장기 압축강도를 확보할 수 있도록 조강형 및 알카리프리형 분말급결제의 성능을 평가하고자 한다.

주요어: 연약지반, 조기강도, 분말급결제

1. 서 론

강섬유 보강 shotcrete는 록볼트와 함께 굴착중인 터널의 안정성 뿐만 아니라 시공완료 후의 터널 안정성을 확보해주는 주지보재이므로 shotcrete의 품질이 터널 안정성에 직접적인 영향을 미치게 된다.

shotcrete의 부착성을 높이고 타설 후 초기에 강도가 발현될 수 있도록 사용하는 급결제에도 여러 가지 문제점이 노출되고 있는데, 현장에서의 지나친 가격경쟁으로 인하여 품질이 낮은 급결제가 공급되어도 급결제 품질에 대한 기준이 정해져 있지 않아 실질적인 관리가 이루어지지 않기 때문에 shotcrete의 지보성능이 저하되는 주요 원인이 되고 있다. 뿐만 아니라 현재 터널현장에서는 shotcrete의 성능이나 품질보다는 타설시 반발되

어 떨어지는 양(rebound)을 줄이기 위해 당초 시방에 제시되어 있는 표준량보다 훨씬 많은 급결제를 사용하고 있어 장기적으로 shotcrete의 강도가 크게 저하될 가능성을 내포하고 있다. 최근에 사용되는 급결제 종류는 알루미네이트계, 알칼리-프리계, 시멘트 광물계 급결제가 사용되고 있는데, 이중 시멘트 광물계는 분말형으로 일본에서 개발된 제품에 대하여 국내 실정에 맞도록 재개발되어 사용되고 있다(한국도로공사, 2001).

일본에서 시멘트광물계 급결제가 선호되고 있는 것은 연약지반, 풍화암이나 용수가 많은 일본의 터널에는 액상급결제 보다는 응결이 빠르고 조강성이 뛰어난 시멘트광물계 분말형 급결제가 더 효과적이었기 때문이다. 국내에서도 풍화암이나 용수가 많이 발생하는 경우에는 액상형 급결제 보다는 시멘트 광물계 급결제와 같은 분말형 급결제가 더 적합할 수 있다(김용하, 2003).

시멘트 광물계 급결제의 개발은 주로 칼슘알루미네이트 광물의 주용도인 알루미나시멘트를 생산하고 있는

¹지오텍 엔지니어링 대표이사

²GS건설 기술연구소 선임연구원

³충남대학교 토목공학과 교수

*교신저자: 임희대 (E-mail: ruywin@naver.com)

일본에서 개발이 주도되어 왔으며 1980년대에 칼슘알루미네이트 광물로서 CA, C₃A 또는 C₁₂A₇을 이용하거나 소성 명반석을 주체로 하는 급결제가 개발되었으며 지속적인 개량을 거쳐 1990년대에는 비정질 C₁₂A₇을 주체로 하는 급결제로 발전되었다. 이와 함께 Taiheiyo Material(구 오노다 시멘트)사에서는 할로젠원소로 C₁₂A₇ 광물을 안정화시킨 C₁₁A₇·CaF₂계 광물을 응용한 제품을 개발하여 실용화하였으며 응결특성 보다는 고강도 숏크리트를 목적으로 C₄A₃S 광물을 주체로 한 급결제도 실용화 되어 있다.(한국도로공사, 2001)

터널 굴착 공사 중 연약암반이나 용수부에서는 일반적인 액상형 급결제를 사용하여 타설할 경우 많은 양의 숏크리트가 시공되고, 리바운드율도 높아 손실량으로 인한 경제성 확보가 어렵다. 또한 연약암반의 경우 분리굴착을 통하여 시공하는 경우가 있어 공사기간이나 품질에 악영향을 줄 수 있다(박해균, 2002).

따라서 초기에 급결성능을 강화시키고, 장기적으로 압축강도가 안정적으로 발현될 수 있는 재료 및 공법을 적용하는 새로운 시도가 필요할 것이다.

본 연구에서는 이러한 숏크리트용 급결제에 대하여 최근 동향 및 연약지반에 대한 굴착 시 초기에 터널 안정성을 확보 할 수 있는 분말형 급결제에 대하여 성능을 평가하고자 한다.

2. 급결제의 국내의 품질기준

국내외에서 사용되고 있는 급결제 종류는 표 1과 같이 크게 분말형과 액상형으로 나눌 수 있으며, 액상의 경우

표 1. 급결제의 종류별 개발 현황

Type		Main component	Market
분말	Inorganic salt (IO)	Aluminate, carbonate, silicate with alkaline metal	1960년대
	Cementitious mineral (CA, CSA)	CaO-Al ₂ O ₃ , CaO-SO ₃ -Al ₂ O ₃	1980년대(일본)
액상	Alkaline	Aluminate, carbonate, silicate with alkaline metal	1960년대
	Acid	Aluminate-sulfate	1990년대(유럽)

다시 알칼리 금속 이온을 주성분으로 하는 형태와 알칼리 금속이온 사용을 억제한 알칼리-프리형의 급결제로 나눌 수 있다. 분말형태의 경우에 최근 일본에서는 알칼리-프리형 급결제가 사용되고 있다.(류중현, 2005)

2.1 급결제 물성평가

숏크리트용 급결제의 품질을 평가하는 항목으로는 응결시간, 장기-단기 강도, 고형분, 비중, pH, 알칼리 함유량 등을 들 수 있다. 이러한 항목중에 국내에서는 응결시간과 압축강도에 대해서는 규정하고 있으나, 비중, pH 등과 같은 급결제 자체의 물성에 대해서는 규정하고 있지 않다. 유럽통합규격에서는 숏크리트용 혼화재료에 대하여 균질성, 색채, 유효성분, pH 및 철근 부식성에 대하여 표 2와 같은 일반시방규격을 포괄적으로 규정하고 있다. 이중에서 숏크리트용 급결제의 물성에 가장 큰 영향을 미칠 수 있는 변수로는 유효성분량, 비중 및 고형분을 생각할 수 있다. 따라서 현장에 반입되는 숏크리

표 2. 숏크리트용 혼화제의 일반시방(유럽통합규격)

항목	시험 방법	품질규격
균질성	Visual	재료분리는 제조자가 제시한 한계를 넘어서는 안 됨.
색채	Visual	제조자가 제시한 색채의 설명과 유사하고 균일.
유효성분	EN 480-6	제조자에 의해 제시된 표준스펙트럼과 비교하여 유효성분에 대한 Infrared spectra는 변화가 없어야 함.
상대밀도	ISO 758	D± 0.03, D>1.10 D± 0.02, D<1.10
고형분	EN 480-8	0.95T<X<1.05T, T>20% 0.90T<X<1.0T, T<20% T : 제조자가 제시된 값 X : 고형분량 실험값
pH	ISO 4316	제조자가 제시된 값의 ± 1 또는 제조자가 제시한 범위 내
총 염화물량	ISO 1158	제조자가 제시한 값 이내 또는 중량비 0.1% 미만
수용성 염화물량	EN 480-10	제조자가 제시한 값 이내 또는 중량비 0.1% 미만
알칼리 총량	EN 480-12	제조자가 제시한 값 이내
부식	-	콘크리트 중의 철근부식에 악영향이 없을 것

트용 급결제의 품질관리 항목 중, 유효성분량의 경우에는 적외선 분광실험기(infrared spectra)를 필요하기 때문에 파악하기 힘들고, 국내에서는 비중과 고형분을 활용하여 급결제 물성을 파악할 수 있을 것으로 본다.

2.2 급결제 응결시간

급결제의 응결기간을 측정하는 방법에 대하여 표 3에 정리하였다. 일본과 국내 콘크리트학회에서 규정하고 있는 관입저항 방식과 터널 시방서(건설교통부, 2009), 미국 콘크리트 학회(America Concrete Institute, 1997)에서 규정하고 있는 Gillmore 방식, 유럽 통합규격(EFNARC, 1996)에서 규정하고 있는 Vicat 방식이다. 국내와 미국, 일본에서는 응결시간 기준을 초결을 5분 이내, 종결을 15~20분 이내로 규정하고 있지만, 유럽에서는 종결을 60분 이내로 규정하고 있다(류종현, 2005).

2.3 급결제 압축강도

숏크리트용 급결제의 품질관리를 위한 압축강도 규격

표 3. 급결제 혼합 페이스트 및 모르타르 응결시간

규격	JSCC KCI	터널표준 시방서	ACI		EFNARC
		KS L 5103	ASTM 1141	ASTM 1398	BS 196-3
배합	W/C:0.5 S/C:3.0	표준주도	W/C :0.24~0.3	W/C:0.35 S/C:2.0	W/C:0.35
시험 방법	Proctor (Mortar)	Gillmore	Gillmore	Gillmore	Vicat
초결/ 종결	5 min/ 15 min	1~5 min/ 12~20 min	3 min/ 12 min	-	10 min/ 60 min

* W/C : 물-시멘트비, S/C=모래-시멘트비

표 4. 숏크리트용 급결제의 품질기준(압축강도)

규격명	압축강도 규정	비고
KCI SC 102 JSCC 1986	12시간 : 1 MPa 이상 24시간 : 9.8 MPa 이상 28일 : Plain 대비 75% 이상	모르타르 (5×5×5 cm)
터널 시방서	1일 : 9.8 MPa 이상 28일 : 19.6 MPa 이상	실린더 공시체 강도
한국도로공사 전문시방서	1일 : 9.8 MPa 이상 28일 : 19.6 MPa 이상	일반 숏크리트 (공시체 강도)
EFNARC	28일 : Plain 대비 75% 이상 90일 : Plain 28일 강도 이상	숏크리트 코어강도

은 표 4에서와 같이 규정하고 있다.

한국콘크리트학회 기준(KCI SC 102, 1999)은 일본 토목학회와 동일하게, 모르타르에 대한 응결시간으로 규정하고 있으며, 터널 시방서나 한국도로공사 전문시방서, EFNARC에서는 코어나 공시체 강도로 규정하고 있다. 그러나 숏크리트 압축강도는 급결제 자체의 품질 뿐만 아니라 콘크리트 배합, 펌핑방법, 타설속도, 작업원의 숙련도 등 여러 가지 요인에 의하여 좌우되기 때문에 급결제의 품질특성만을 파악하기는 어렵다고 판단되어 진다.

3. 실험 내용

3.1 조기강도를 위한 분말형 급결제

본 연구에 사용되는 급결제는 표 5와 같이 일본에서 개발한 제품으로 조강형인 Type-A와 알칼리-프리제인 Type-B 제품을 사용하였다.

Type-A는 일본 내에서도 일반적으로 사용되고 있는 제품으로서 3시간 이내에 3 MPa 이상 발현할 수 있도록 고안되어 개발된 분말형 급결제이며, 숏크리트 배합 시에는 조강 고강도 발현형 혼합재인 첨가제를 사용하였다.

Type-B는 알칼리-프리제의 분말급결제로 개발 회사의 매뉴얼에는 조강 고강도 발현형 혼합제를 넣지 않는 것으로 나타내고 있다.

3.2 급결제 응결시간 평가

응결시간 측정은 한국콘크리트 학회에서 제시한 “숏크리트용 급결제 품질기준”인 KCI-SC-102 기준에 따라 수행하였다. 표 6은 KCI-SC-102 기준에 대한 초결

표 5. 사용 재료에 대한 특징

	형태	비중	표준사용량	특징
Type-A	백색 분말	2.8	C× 7~15%	조강형
첨가제	백색 분말	2.6	C× 7~15%	고성능 분말 혼화제
Type-B	백색 분말	2.8	C× 7~15%	알칼리 프리형

표 6. KCI-SC-102기준의 응결시간 기준

관입 저항치	초결 (MPa)	종결 (MPa)	기준	
			초결	종결
	0.4	29	5분	15분

과 종결에 대한 기준이다.

표 7에는 본 연구에서 수행한 응결시간 측정시험에 대한 변수에 대하여 정리한 것이다.

응결시간 측정은 급결제만 투입한 경우와 첨가제를 포함한 상태로 나누어서 실험을 수행하였다.

Type-A의 첨가율 5%와 Type-B와 첨가제를 5% 첨가한 배합의 경우, 예비실험에서 초결과 종결이 20분 이상, 1시간 이상으로 나타나 본 결과 분석에서 제외시켰다. 이 두가지 경우에 대한 원인에 대해서는 향후 추가적인 실험을 통하여 응결특성을 분석할 필요가 있을 것으로 보여진다.

표 7. 응결시간 측정을 위한 변수 선정

종류	첨가율 (C × %)	첨가제 (C × %)	배합
Type-A	7	0	S/C=1/3, W/C=50%
	10		
	5	5	
	7	7	
	10	10	
Type-B	5	0	
	7		
	10		
	7	7	
	10	10	

표 8. 압축강도 측정을 위한 변수 선정

급결제 종류	첨가율 (C× %)	첨가제 (C× %)	배합	재령
Type-A	0	0	S/C=1/3, W/C=50%	30분, 1시간, 3시간, 24시간, 3일, 7일, 28일, 91일 강도 측정
	5	5		
	7	7		
	10	10		
Type-B	0	0		
	5	5		
	7	7		
알칼리-프리(액상)	10	-		30분, 1시간, 3시간, 24시간 강도 측정
	국내 분말 급결제	10		

3.3 급결제 압축강도 평가

모르타르 압축강도 실험에 이용한 변수는 표 8과 같이, 조강 고강도 발현용 혼합재인 첨가제를 혼합한 경우와 아닌 경우를 나누어서 비교하였다. 또한 본 실험에서 24시간 이내 강도발현특성을 파악하기 위하여 30분, 1시간, 3시간, 24시간에 대한 시편을 제작하고, 장기강도를 파악하기 위하여 3, 7, 28, 91일 시편을 제작하여 분석하였다. 또한 국내에서 사용되고 있는 급결제와의 초기강도를 비교하기 위하여 액상형 알칼리-프리계 및 분말형 급결제에 대하여 비교시험을 수행하였다. 모르타르 압축강도 실험은 KCI와 KS에 나타나 있는 실험법에 따라 4×4×4 cm의 몰드를 사용하였으며, W/C=50%, S/C=1:3 배합으로 수행하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 응결시간 실험결과

그림 1~4는 Type-A와 Type-B에 대한 응결시간을 측정된 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 그림 1과 2에 나타난 결과를 살펴보면, Type-A의 경우 첨가제를 혼합하지 않을 경우, 조강성이 나타나지 않았으나, 첨가제를 혼합하면 빠른 조강성을 나타내었다. 그러나 Type-B의 경우 그림 3~4에서 보듯이, 첨가제를 혼합이 응결시간에 큰 영향을 주지 않은 것으로 나타났다. 따라서 조강형 첨가제는 Type-A를 사용하는 배합 경우에 조강성을 발휘할 수 있는 것으로 볼 수 있으나, Type-B는 응결에

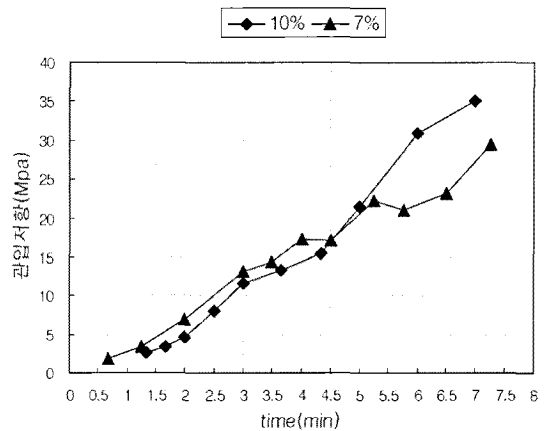


그림 1. Type-A에 대한 응결시간

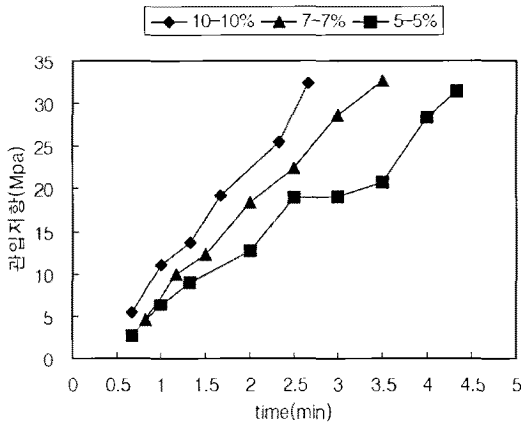


그림 2. Type-A와 첨가제 혼합 배합에 대한 응결시간

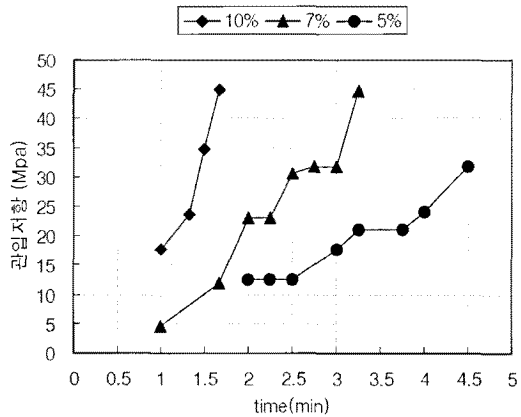


그림 3. Type-B에 대한 응결시간

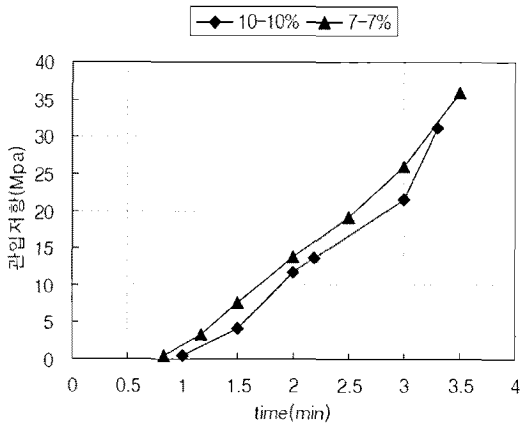


그림 4. Type-B와 첨가제 혼합 배합에 대한 응결시간

표 9. 응결시간 측정결과

급결제 종류	첨가율 (C×%)	첨가제	초 결 (분 : 초)	종 결 (분 : 초)
Type-A	7	0	1분 이내	7 : 15
	10		1분 이내	5 : 40
	5	5	1분 이내	4 : 00
	7	7	1분 이내	3 : 00
	10	10	1분 이내	2 : 30
Type-B	5	0	1 : 10	4 : 15
	7		1분 이내	2 : 25
	10		1분 이내	1 : 20
	7	7	1 : 10	3 : 20
	10	10	1 : 00	3 : 00

주는 영향이 크지 않다는 것을 알 수 있었다. 이는 첨가제가 급결제의 빠른 분산과 Type-A에 포함되어 있는 C₁₂A₇의 반응을 촉진시키는 역할을 하는 반면, Type-B는 알칼리-프리계로서 주성분이 알루미늄 계열이 아니므로 반응이 나타나지 않은 것으로 판단되어진다.

표 9를 살펴보면, Type-A나 Type-B의 경우 급결제 사용량이 늘어남에 따라 초결은 비슷하지만, 종결이 빠르게 나타나는 것을 알 수 있다. 이처럼 사용량에 따른 응결시간 빠르게 나타난 것은 급결제의 촉진 반응물질이 시멘트 입자를 둘러 싸는 시간이 지나고 나면, 빠르게 시멘트와 반응하여 초기수화반응을 촉진하기 때문에 사용량에 따라 응결시간이 빠른 것으로 판단되어진다 (김진철, 2004).

4.2 압축강도 실험결과

그림 5와 6에서 모르타르 압축강도 실험결과를 살펴보면, 1일강도가 Type-B는 급결제 자체만으로 10 MPa를 넘고 있으나, Type-A는 급결제 자체만으로는 넘지 않고 첨가제 혼입한 경우 나타나기 때문에 Type-A는 빠른 응결과 조기강도를 확보하기 위해서는 조강형 고강도 첨가제가 필요할 것으로 본다.

Type-B는 응결실험결과와 압축강도 실험결과에 나타나듯이 첨가제 혼입이 급결제와 강도발현에 큰 도움이 되지 않으며, 오히려 급결제 자체만으로 사용하는 것이 조강성과 장단기 강도확보에 유리할 것으로 보여진다. 또한 28일 강도에서는 Type-B와 Type-A가 모두

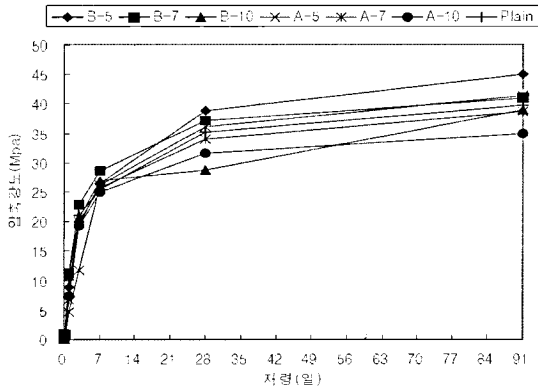


그림 5. 급결제에 대한 압축강도

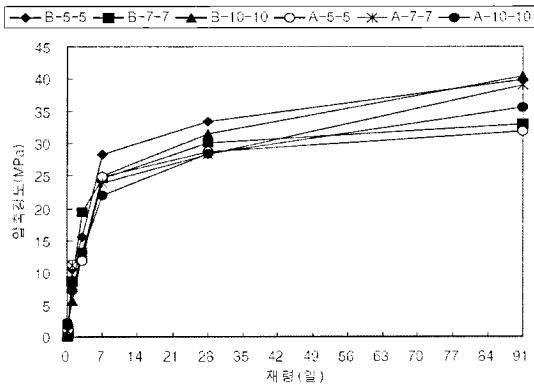


그림 6. 급결제와 첨가제 혼합 배합에 대한 압축강도
* B-5-5 : B(급결제 Type)-5(급결제 첨가율)-5(첨가제 첨가율)

30 MPa 이상 발현되는 것으로 나타났으며, 91일 장기 강도에서도 사용량에 따라 35~45 MPa 이상 발현되는 것으로 나타나 장기강도에 대한 급결제 사용량에 대한 영향이 적은 것으로 판단되어 진다.

표 10은 압축강도 시험결과를 나타낸 것이다. 이를 살펴보면, 첨가제를 첨가한 경우 장기강도가 첨가량에 따라 증진되는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 첨가제에 유동화제가 분말형태로 포함되어 있어 급결제의 시멘트 입자의 분산성이 높아 강도에 유리한 것으로 판단되어 진다. 그러나 첨가제를 사용하지 않은 경우에는 장기강도가 사용량 증가에 따라 약 15% 정도 감소되는 것을 확인할 수 있었다.

표 10. 응결시간 측정결과

급결제	첨가율 (%)	압축강도(MPa)							
		30분	1시간	3시간	1일	3일	7일	28일	91일
A	5	0.9	1.0	1.0	11.2	11.8	24.9	28.7	31.9
	7	-	1.0	1.0	11.2	13.2	24.0	28.4	39.1
	10	2.2	2.1	1.7	7.3	13.2	22.1	28.5	40.4
B	5	-	-	-	10.6	15.5	28.4	33.4	39.9
	7	-	1.1	0.6	8.6	19.4	24.7	30.1	33.0
	10	0.6	1.8	2.3	5.7	12.9	25.1	31.6	40.4
A	5	-	-	-	4.66	11.8	26.3	36.1	41.4
	7	-	0.64	0.76	6.85	20.0	25.8	34.1	38.7
	10	-	0.65	0.96	7.36	19.3	25.0	31.7	34.9
B	5	-	-	-	8.8	19.5	26.5	38.8	45.1
	7	-	0.9	0.8	11.3	22.9	28.6	37.1	40.9
10	-	-	0.9	10.8	20.6	27.0	28.7	39.0	
일반	-	-	-	-	7.22	21.1	25.5	35.3	39.7

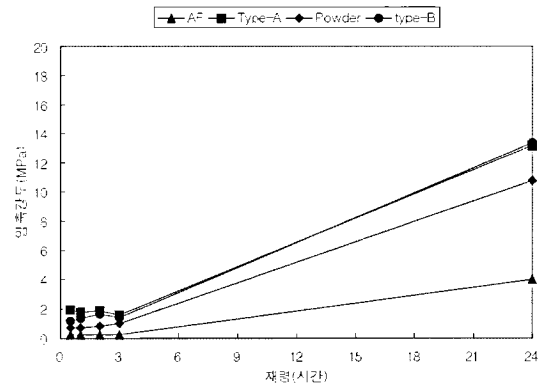


그림 7. 급결제와 첨가제 혼합 배합에 대한 압축강도

4.3 초기압축강도 분석

초기압축강도 특성을 국내 급결제와 비교분석하기 위하여 국내 분말형 급결제와 액상형 알칼리-프리계형 급결제를 사용하였다. 분말형 급결제와 액상형 급결제 사용량은 조강성을 확인하기 위하여 시멘트량의 10%를 사용하였다.

그림 7은 초기강도를 측정된 결과를 나타낸 것이다. 24시간 이내의 압축강도 실험결과를 살펴보면, Type-A, B 모두 24시간 이내에 10 MPa 이상을 발현하였으며,

표 11. 급결제를 투입한 배합의 초기 압축강도 결과

급결제		압축강도 MPa(시간)				
TYPE	사용량 (C× %)	0.5	1	2	3	24
B	10	1.19	1.37	1.67	1.43	13.33
A	10	1.97	1.75	1.86	1.58	13.18
국내분말	10	0.73	0.72	0.85	0.98	10.79
알칼리프리 (액상)	10	0.25	0.25	0.25	0.25	4.00

국내 분말형 급결제도 역시 10 MPa를 발현하였다. 그러나 알칼리-프리계 액상급결제는 24시간에 4 MPa만이 발현되는 것으로 나타나 조기강도 측정결과 분말형 급결제보다 작게 나타났다.

표 11에서 보듯이, 배합 후 3시간에 대해서도 Type-A와 B는 국내 급결제 대비 약 50% 이상 강도가 더 발현되는 것으로 나타나 연약암반에 사용 시, 초기 안정성을 확보에 유리할 것으로 판단되어 진다.

5. 모형터널을 이용한 Mock-up 실험

Mock-up 실험은 국내에서 수행한 결과를 이용하여 일본 제조회사에 있는 모형터널 실험장에서 수행하였다. Mock-up 실험에서는 급결제의 초기 고강도 발현이 되는 지와 조강성을 파악하기 위한 실험방법을 확인하고, 또한 쏿크리트 장비로 시공하는 모습을 확인하여 시공성 및 적용성을 평가하는 것이다. 표 12은 모형터널의 형식에 대한 것이며, 그림 8은 모형터널 전경을 나타낸 것이다.

Mock-up 실험에서 사용한 콘크리트 배합은 표 13과 같이 일본에서 사용되는 표준배합을 현장 배합으로 수정하여 수행하였다. 또한 쏿크리트 배합 재료는 일본 현지에서 사용하고 있는 재료를 선정하여 활용하였다. 국내 배합에 비해 일본에서는 S/a가 60%이며, 굵은 골재 최대치수가 13 mm인 것을 사용하고 있다.

5.1 실험내용 및 실험방법

초기 강도를 확인하기 위해서 일본에서 실시하고 있는 시험방법인 ASTM C 900 인 “Standard Test Method for Pullout Strength of Hardened Concrete”를 적용하였다. 그림 9는 Pull-out 시험체이며, 그림 10은 Pull-out

표 12. Mock-up tunnel 에 대한 형식

Item	Type	Size, Capacity
모의터널	-	Width:5.2 m, Height:4.4 m, L=20 m
타설장비	MACR-2000	Extendable length:2.0 m Radius of spraying:5.7 m
급결제 공급장치	NATMCRETE PAV 250V	Tank volume :280 liter Transportation ability :1-8 kg/min
콘크리트 펌프	MKW-25SNT	Spraying capacity : 5-25 m ³ /h

Photo-1 Mockup tunnel

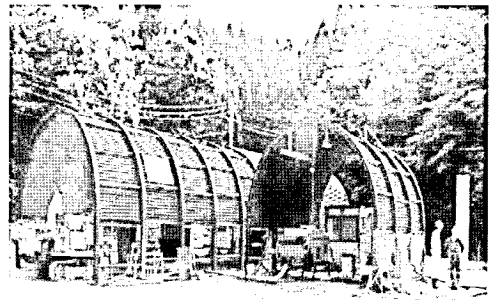


그림 8. Mock-up tunnel 전경

표 13. 콘크리트 배합 설계

CASE	단위수량(kg/m ³)					급결제.
	W	C	S	G	첨가재	
1	188	470	1010	687	-	Type-B 47(C× 10%)
2	188	470	983	668	47	Type-A 47(C× 10%)

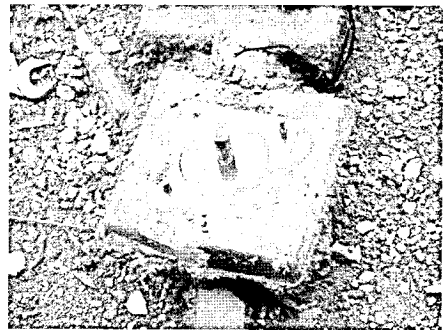


그림 9. pull-out 실험체

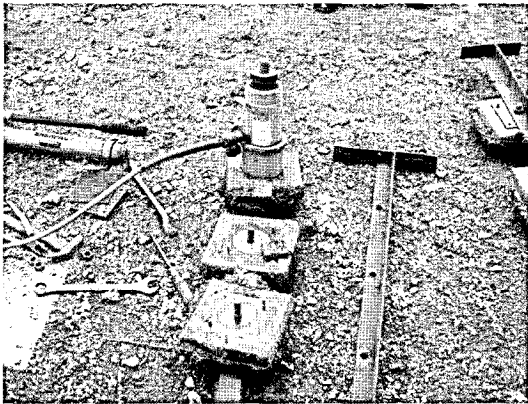


그림 10. Pull-out 실험 장면

표 14. 모의 실험에서 수행한 실험항목 및 실험방법

실험항목		실험방법	일정
Fresh concrete	Slump	JIS A 1101	배합 시마다
	공기량	JIS A 1128	
	콘크리트 온도	현장 측정	
Base concrete	압축강도	JIS A 1108 (20°C 양생)	7일 및 28일
Shotcrete	워커빌리티	부착정도 육안확인	타설 시 마다
	초기압축강도 (Pull-out)	ASTM C 900 JSCE-G 566	10, 30분, 1, 2, 3, 6, 24 시간 측정
	코아 압축강도	JSCE - F 552, 561, JIS A1108	7일 및 28일

시험을 하는 장면이다. 콘크리트에 대한 물성을 현장에서 직접 확인하였다. 표 14는 실험 내용 및 방법에 대하여 나타내었다.

5.2 실험결과

(1) 콘크리트 물성실험결과

표 15는 콘크리트 물성에 대한 측정결과이다. 배합 특성상 슬럼프가 약 21±3.5 cm 이내로 워커빌리티나 유동성은 충분한 것으로 나타났다.

(2) 리바운드율 측정결과

표 16은 리바운드율을 측정하기 위한 시험 결과이다. 리

표 15. 생산 직후 콘크리트 물성

Case	Slump (cm)	Air content (%)	콘크리트온도 (°C)	외기온도 (°C)
1	21.5	5.5	26	24.6
2	24.5	1.5	27	24.6

표 16. 모의실험에서 수행한 리바운드율 측정결과

Case	타설 시간 (분:초)	콘크리트 체적(m ³)	숏크리트 무게(kg)	리바운드 무게(kg)	리바운드율 (%)
1	6:56	1.16	2732	419	15.3
2	1:18	0.22	518	97	18.7

표 17. 재령 초기 숏크리트 압축강도 측정 결과

Case	Compressive strength (N/mm ²)					
	10 min	30 min	1 hr.	3 hr.	6 hr.	1 day
1	2.57	3.20	3.78	8.24	9.71	26.6
2	3.47	3.81	4.17	10.3	12.3	31.5

바운드율 측정결과, Case 1이 약 15%정도 리바운드 되었으며, Type-A가 약 18.7% 정도 되었다. 일본의 경우 굵은 골재 최대치수가 국내에 비해 크고, 잔골재율이 60%에 이르기 때문에 리바운드가 높아진 것으로 판단되어진다. 또한 Case 1은 이미 기존에 타설된 벽면에 타설을 하였으며, Case 2는 모형터널의 철재에 직접 타설을 하여 타설면의 거칠기가 서로 다르기 때문에 리바운드량의 차이가 나타난 것으로 판단되어진다. 그러나 일반적으로 리바운드 측정결과에 대해서는 국내에서도 시공 즉 숏크리트 타설장비 및 타설자의 경험에 많이 좌우되는 것으로 나타나고 있어(안상기, 1993) 국내 시공 시 확인이 필요할 것으로 본다.

(3) 초기 압축강도 실험 결과

표 17에서 Pull-out 시험을 통하여 측정한 초기 숏크리트 강도는 10분에 2.6~3.5 MPa이 발현되어 초기에 강도확보가 가능한 것으로 나타났으며, 3~6시간 사이에 10 MPa 이상 발현되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 24시간 강도가 기준치인 10 MPa을 260~300% 이상 발현되었다. 일본배합과 재료를 활용한 실험이라 할지라도 국내의 연약지반에 초기 터널의 안정성을 확보하는 데 유리할 것이라 판단한다.

특히, Case 2에 사용한 급결제는 첨가제에 의하여 초기 강도를 발현하고 장기강도를 나타내기 때문에 연약지반이라는 특수한 환경의 터널에 적합한 재료라 판단한다.

(4) 압축강도 실험결과

표 18에서 콘크리트 압축강도를 살펴보면 7일에 고강도인 45 MPa을 상회하는 결과를 나타내고 있으며, 쏿크리트 코어 압축강도 역시 7일에 평균 39~43 MPa을 나타내고 있다. 28일에서는 콘크리트는 약 60~70 MPa을 나타내고, 쏿크리트는 약 50~55 MPa 이상 발현되는 것을 확인할 수 있었다. 쏿크리트 강도가 높은 것은 콘크리트의 배합강도가 기본적으로 60~70 MPa을 발현되는 상황이기 때문에 쏿크리트 강도도 높게 나타나는 것으로 보인다.

그림 11를 살펴보면, Type-B 보다 Type-A가 28일 강도가 약 15% 정도 높게 나타났다. Case 1,2 모두 28일 강도가 45 MPa을 상회하는 결과를 나타내기 때문에 고강도를 실현할 수 있을 것으로 판단한다. 또한 강도가 재령 6시간 이후 급격하게 발현되기 때문에 터널 안정성을 초기에 확보할 수 있다고 볼 수 있다.

표 18. 쏿크리트 압축강도 측정 결과

Case	Shotcrete (N/mm ²)		Concrete (N/mm ²)	
	7 day	28 day	7 day	28 day
1	38.6	49.9	48.4	59.3
2	43.1	55.8	55.6	68.4

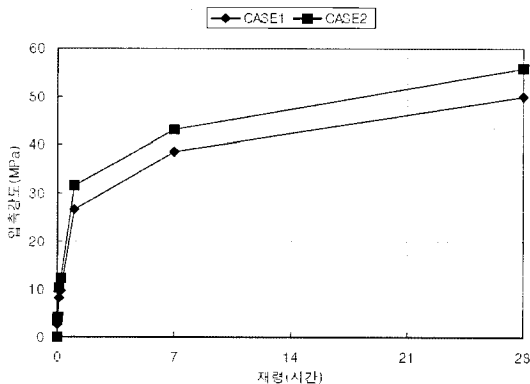


그림 11. 쏿크리트 코어 압축강도 실험 결과

6. 결 론

쏿크리트 조기강도 발현에 대하여 실험적 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

1. 응결시간 측정결과, 첨가제의 경우 Type-A를 사용하는 배합 경우에 조강성을 발휘할 수 있는 것으로 볼 수 있으며, Type-B는 자체만으로도 빠른 응결을 나타냈다. 또한 KCI 규준에 나타나 있는 응결시간 기준치인 초결 5분 이내, 종결 15분 이내에 대한 기준을 모두 만족하는 것으로 나타났다.
2. 모르타르 압축강도 측정결과, 국내 강도 기준을 만족하였다. 특히 Type-A는 조강성 및 장단기 강도확보를 위해서는 첨가제를 혼합하여야 하는 것으로 나타났으며, Type-B는 응결실험결과와 압축강도 실험결과에 나타나듯이 첨가제 혼합이 급결성과 강도발현에 큰 도움이 되지 않으며, 오히려 급결제 자체만으로 사용하는 것이 조강성과 장단기 강도가 우수한 것으로 나타났다.
3. Mock-up 실험을 분석해 보면, 국내에서 수행하지 않는 초기 강도를 Pull-out 실험을 통하여 초기강도를 측정하였으며, 타설 후 재령 초기인 30분 이내에 3 MPa을 확보할 수 있었다. 또한 1일에 26.7~31.5 MPa이 발현되어 초기강도 확보가 가능하였다. 또한 장기적인 강도도 28일에 고강도인 45 MPa 이상 발현되어 장단기 강도발현에 우수한 성능을 나타냄을 확인하였다.
4. 국내 터널 공사에 적용성을 살펴보면, 초기 응결이 빠르고 초기에 높은 강도를 발현하는 Type-A의 경우에는 지하철과 같은 도심지의 연약지반에 적용할 때 우수한 성능을 발휘할 것이라 판단한다. 또한 Type-B는 국내 급결제 중 알칼리-프리제에 대한 인식이 높아지고 있어 일반적인 터널 공사에 적용될 가능성이 높을 것이다.

따라서, 국내 터널 설계 시, 알칼리 프리제라는 장점과 분말급결제의 장점을 활용하고 연약지반에 대해서는 조강형 급결제를 적용함으로써 굴착방법개선 등을 통하여 공사기간이나 경제성을 확보할 수 있도록 하는 방안이나 공법을 개발하는 것이 필요할 것으로 판단되어 진다.

참고문헌

1. 박해균(2002), “고품질 슛크리트 개발을 위한 새로운 급결제 적용”, 한국터널공학회 논문집, 제4권 1호, pp. 45~55.
2. 김용하(2003), “분말형 시멘트 광물계 급결제를 사용한 습식 슛크리트 시공사례 연구”, 한국터널공학회 학술발표회 논문집, pp. 43~49.
3. 류종현(2005), “강섬유 보강 슛크리트의 품질기준 검토”, 한국터널공학회 학술발표회 논문집, pp. 142~174.
4. 건설교통부(2009), “터널표준시방서”, (사)한국터널공학회.
5. KCI-SC 102(1999), “스�크리트용 급결제 품질규격”, 콘크리트 표준시방서, 한국콘크리트학회.
6. 김진철(2004), “스�크리트용 급결제를 첨가한 시멘트 모르타르의 응결 및 강도특성”, 한국콘크리트학회 논문집, 제5권 1호, pp. 70~78.
7. 안상기(1993), “스�크리트의 리바운드 감소에 대한 재료 개발 연구시험”, 한국콘크리트 학회지, 제5권 1호, pp. 54~61.
8. EFNARC(1996), European Specification for Sprayed Concrete
9. 한국도로공사(2001) “강섬유보강 슛크리트의 성능향상 및 품질기준 정립(Ⅱ)”, 한국도로공사
10. KS L 5103(1996), “길모아 침에 의한 시멘트의 응결시간 시험방법”, 한국표준협회
11. JSCE D 102(1986), “吹付けコンクリート用 急結劑 品質規格”, JSCE, pp. 146~149.
12. ASTM C 1141(1995), “Standard Specification for Admixture for Shotcrete”, ASTM
13. ASTM C 1398(1998), “Standard Test Method for Laboratory Determination of Time Setting Hydraulic Cement Mortars Containing Additives for Shotcrete by the Use of Gillmore Needles”, ASTM
14. ACI(1997), “Fiber Reinforced Concrete”, ACI Committee 506

접수일(2010.4.13), 수정일(2010.4.20), 게재확정일(2010.7.13)