

-shotcrete 품질에 미치는 재료 및 시공 조건의 영향

Effect of Materials and Construction Conditions on Shotcrete Quality

현석훈* · 한기석

〈쌍용 중앙연구소 신제품개발실〉

1. 서론

-shotcrete는 地盤의 補強 및 支保用으로써 NATM 공법에 필수 불가결한 재료이다. 최근에는 암반굴착의 요철면에 의한 응력집중이 발생하는 것을 방지하고 터널 굴진속도를 빠르게 하기 위해 고가의 TBM (Tunnel Boring Machine) 장비에 의한 터널 시공이 국내에 도입되고 있다. 그러나 TBM에 의한 암반굴진이라 하여도 암반의 전리된 부분이나 연암 지역이 나타나면 -shotcrete에 의한 지반보강을 해야하는 곳이 발생하게 되는데, 지반보강을 하기위해 -shotcrete 시공과 병행 작업을 하는 경우에는 TBM에 의한 굴진작업이 지장을 받는 경우가 종종 발생한다. 따라서 -shotcrete 작업의 효율성을 향상시키는 것이 TBM 터널시공의 중요한 관리 항목이 된다.

-shotcrete의 최적의 효율화는 NATM이나 TBM 모두 절실한 문제점으로 지적되고 있으며, 효율적인 -shotcrete 시공을 위해서는 -shotcrete 재료조건, 배합 및 시공여건, 노즐맨의 능력 등이 조화를 이루어야 한다.

본 연구에서는 -shotcrete의 재료조건과 배합 및 시공여건을 중심으로 실험실적으로 최적조건을 검토하였고 그 결과에 의해 쌍용의 동해 석회석광산 TBM 터널공사에 적용실험을 실시하였으며, 현장적용 실험시에 노즐맨을 동일한 사람으로 실시하여 노즐맨의 영향을 검토 대상에서 제외하였다. 특히 -shotcrete 재료조건에서는 새로운 급결제 합성 및 급결 메카니즘 규명과 시멘트와 급결제 Type에 의한 영향을 중점적으로 취급하였으며, 아울러 시멘트 장기보관 유통상에서 발생하는 시멘트 풍화에 의한 영향을 검토 하였다. -shotcrete 배합측면에서는 W/C 변화, -shotcrete 시공에서는 저온 시공측면에서의 영향을 검토하였다.

2. 실험방법

2.1. -shotcrete용 급결제 제조

급결성 광물로 알려진 Calcium Aluminate 광물³⁾ ($12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$)과 Sodium Calcium Aluminate 광물^{4, 5, 6)} [$\text{Na}_4\text{Ca}_3(\text{AlO}_2)_{10}$] 합성에 사용한 원료원으로써 CaO원은 석회석, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 를 사용하였고, Na₂O원은 Na₂CO₃를 사용하였으며, Al₂O₃원으로는 부산물 Al₂O₃와 Al(OH)₃, NaAlO₂의 1급 시약을 사용하였다. 이소성(易燒成)성 원료는 CaSO₄를 이용하였으며, 사용 원료의 화학 조성은 Table 1과 같다.

Table 1. 사용 원료의 화학 조성

화 학 조 성(wt%)					
원료원	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Ig. loss
석회석 원료	3.3	0.3	0.1	54.6	41.6
Al ₂ O ₃ 원료	2.5	90.0	tr	0.1	7.4

적정한 원료의 조합비를 변화시키고, 소성온도는 1300~1450℃ 범위에서 변화 시켰으며, 소성시간은 15~60분 범위에서 변화 시켜가면서 전기로에서 소성하여 공기 중 냉각하였다.

-shotcrete용 급결제 제조는 급결의 상승효과와 장기 강도 향상, 수축저감 및 저온에서 급결성 발현을 목표로 하여 여러 급결성 원료원을 조합하여 제조하였으며 본 연구의 -shotcrete용 급결제로 사용하였다.

2.2. 급결제 메카니즘 실험

-shotcrete용 급결제가 첨가된 시멘트의 수화물 조직

을 관찰하기 위하여 시멘트 중량비로 급결제를 10% 첨가하고 W/C비 60% 조건으로 물을 혼합한 다음 1, 5, 10, 15, 30분 수화정지후 XRD, SEM 관찰을 하였다. 비교 관찰을 위해 급결제를 첨가하지 않은 시멘트의 10분, 30분, 1시간, 3시간 수화정지후 SEM 관찰을 하였다.

2.3. 숏크리트 재료 및 배합, 시공조건 변화 실험

숏크리트 재료 및 배합, 시공조건 변화 실험에 사용한 몰탈 응결 측정방법은 일본 토목학회 기준(숏크리트용 급결제 품질 규격(안) : JSCE-1986)의 실험방법에 따라 실험했으며 그 실험방법은 W/C(%) : 50%, Cement : Sand=1 : 3이다.

몰탈 응결 실험은 ASTM C403(관입 저항법에 의한 콘크리트의 응결시간 측정방법) 의해 실험을 했으며, Proctor 관입저항 시험기를 사용했다.

몰탈 혼합 및 제작방법은 JSCE-1986 방법에 의해, 시멘트와 잔골재를 15초간 건식혼합후 급결제를 투입후 10초간 혼합한 후에 혼합수를 첨가하면서 15초간 혼합한다. 몰드제작은 몰드에 넣고 신속하게 15~20초간 몰탈압축강도 다짐봉으로 다지고 윗면을 고른 다음 Proctor 응결실험을 하였다.

급결제 첨가량은 시멘트 중량에 5, 8wt%로 하였다.

사용시멘트는 S사 Type I 보통시멘트, Type III 조강시멘트, Slag 시멘트를 사용하였다.

시멘트 풍화도에 의한 실험은, 임의로 시멘트를 공기중에 노출시켜 Ig.loss 4.0% 되게 풍화시킨 것과 비닐로 밀봉 차단하여 보관한 신선한 동일 시멘트(Ig.loss 1.5%)와 비교 실험을 하였다.

급결제는 5종류를 실험했으며, W/C는 배합수량만 추가하는 것으로 하여 50%, 55%로 하였다.

배합수의 온도는 20℃, 0℃로 하였다.

2.4. TBM 현장 숏크리트 재료 적용 실험

TBM 장비에 의해 터널 굴진중인 S사 석회석 광산 터널(ϕ 4.5m×11.8km) 숏크리트 공사에 시멘트 Type과 급결제 종류에 의한 현장 적용 실험을 실시하였다.

사용한 숏크리트 배합 조건은 현장 작업성과 문헌¹⁾을 참고로 하여 최적 배합으로 판단되는 Table 2와 같은 조건으로 정하였다.

배합에 사용한 건식 믹서는 Screw식 6m³ 믹서를 사용했으며 숏크리트 장비는 알리바 건식 장비를 사

Table 2. 숏크리트 배합

W/C (%)	S/A (%)	Cement (kg/m ³)	조골재 크기 (mm)	급결제 첨가량 (CXwt%)	골재 비중	잔골재	조골재
50	60	400	13	5	2.60	2.68	

용하였다.

리마운드 측정 방법은 91cm×182cm 합판의 182cm 면을 터널 밑 부분에 놓고 합판 위에 떨어진 콘크리트량의 무게를 측정하였다.

숏크리팅은 터널 측벽 부분 높이 3m, 숏크리트 두께 10cm(Wire Mesh에서 터널안쪽) 되도록 뺐어 부쳤다. 숏크리트 두께 10cm의 판정 기준은, 강제 Arch 보강재 두께 및 보강재에 길이 10cm의 철근을 용접하여 철근 끝부분 까지 숏크리팅을 하는 것으로 두께를 판정하였다. Wire Mesh 설치 및 부분(터널 굴착 요철면과 Wire Mesh 설치 사이)의 숏크리트 타설량은 비교 대상 조건들이 동일 하다고 간주하여 1cm 두께 만큼 숏크리팅이 되었다고 간주하였고, 면적으로 숏크리트량을 계산하였다.

숏크리트 강도는 7일, 28일 후에 Core를 각각의 재령에서 3개씩 채취하여 강도를 측정하였으며 공시체 크기는 직경 10cm, 높이 10cm 되도록 Cutting 하였고, 공시체 크기에 의한 보정을 하여 강도를 산출하였다.

3. 실험결과

3.1. 숏크리트용 급결제 제조

시중에서 일반적으로 사용되는 급결제는 무기염계를 적정한 비율로 혼합하여 사용하고 있으며, 12CaO·7Al₂O₃의 자체 수경성을 갖고 있는 Calcium Aluminate계³⁾를 사용하기도 하며, Sodium Calcium Aluminate 광물도 특허^{5, 6)} 상에서 나타나고 있다.

Fig. 1은 제조된 클링커의 XRD Peak이며, 여기서 급결성이 뛰어난 12CaO·7Al₂O₃ 광물과 Sodium Calcium Aluminate⁴⁾ Peak를 확인 할 수가 있었다.

숏크리트용 급결제 제조는 급결성의 상승효과와 장기강도 향상, 수축저감, W/C 변화에 의한 급결성 변동 최소화 및 저온에서 급결성 저하폭 감소를 목적으로 여러 급결원료를 조합하여 급결제의 최적 조건을 선정하였다.

Fig. 1. XRD Patterns of Clinker

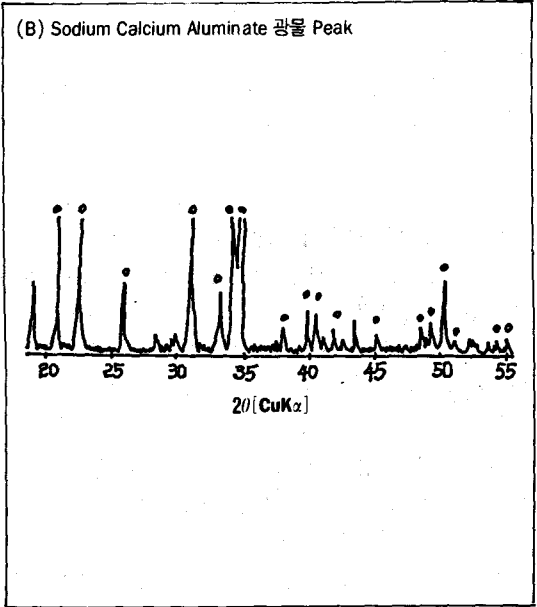
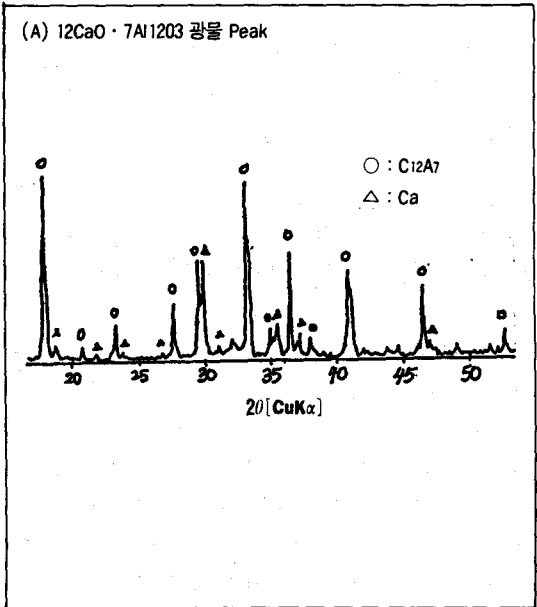


Fig. 2. SEM Micrographs of Hydrates of Cement

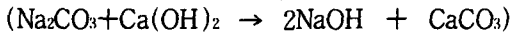


3.2. 급결 메카니즘

현재 사용되는 급결제로서는 물유리계, 무기염계, 시멘트 광물계로 구분할 수 있다. 물유리($\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$) 계는 물유리의 SiO_2 와 시멘트의 CaO 와 반응하여 비정질 C-S-H가 급속히 생성하여 즉시 Gel화 되어 응고하며, 경화후의 수축이 너무 커서 슛크리트용 급결제로 이용하는데 보완이 필요하다.

대표적인 무기염계 급결제로서 탄산소다(Na_2CO_3)와 알루미늄산소다(NaAlO_2)는 다음과 같은 화학 반응식에 의해 급결을 일으킨다고 알려져 있다.^{7,8)}

(Na_2CO_3)는 다음과 같은 화학 반응식처럼



$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 를 난용성 CaCO_3 로 전이 시키고, 이 반응에서 생성되는 NaOH 가 시멘트의 수화를 촉진하여 급결을 일으킨다.

또 하나의 무기염계 급결제인 NaAlO_2 는 물과 접촉하면 빠르게 $\text{Al}(\text{OH})_3$, NaOH 로 가수분해하며 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 는 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 다음과 같이 화학 반응하여 $\text{Al}(\text{OH})_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 를 생성하여 시멘트를 급결 시킨다.

위의 화학 급결 메카니즘에서 알 수 있듯이 무기염계 급결제는 자체 수경성을 갖고 있지 못하기 때문에 시멘트 반응성에 의존할 수밖에 없다.

이와 같은 문제점을 최소화하기 위해 자체 수경성을 갖고 있는 시멘트 광물계를 슛크리트용 급결제로 사용하고 있다.³⁾ 시멘트계 급결제로서 대표적으로 $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$, Sodium Calcium Aluminate 광물계가 있다.

Fig. 2의 SEM 사진에서 보여 주듯이 급결제를 첨가한 시멘트의 수화물 조직은 시멘트 단독의 수화물 조직과는 다른 형태를 보여주고 있다. 즉 급결제와 시멘트와의 수화반응으로 생성된 CAH계 수화물 및 CSH계 gel 조직과, Ettringite 수화물 또는 유사(類似) Ettringite 수화물로 여겨지는 가나다란 섬유상의 수화물이 서로 엮여서 급결 및 강도 발현을 일으킨다고 볼 수 있다.

한편, Fig. 3에 나타난것 처럼 급결제를 시멘트에 10wt% 첨가하여 W/C : 60% 조건에서 시간경과에 따른 시멘트 페이스트 수화정지 XRD Peak에서는 15분 경과까지 어떠한 형태의 수화물 결정 Peak 생성도 관찰할 수가 없었으나 SEM 상에서는 관찰된 섬유상의 수화물은, 시멘트 급결시 나타날 수 있는 유사(類似) Ettringite¹²⁾ (분자식 : $\text{CA} \cdot 3\text{CaCO}_3$

Fig. 3. XRD Patterns of Hydrates of Cement

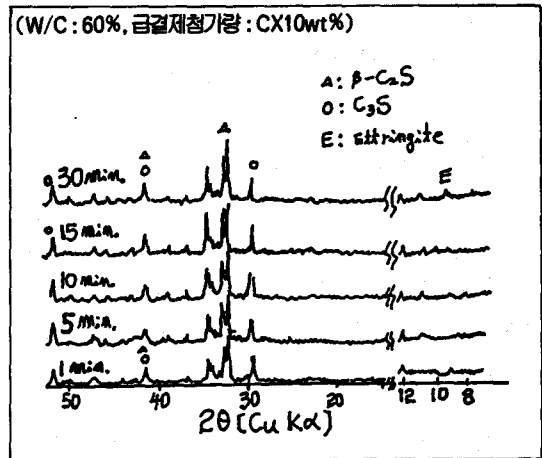
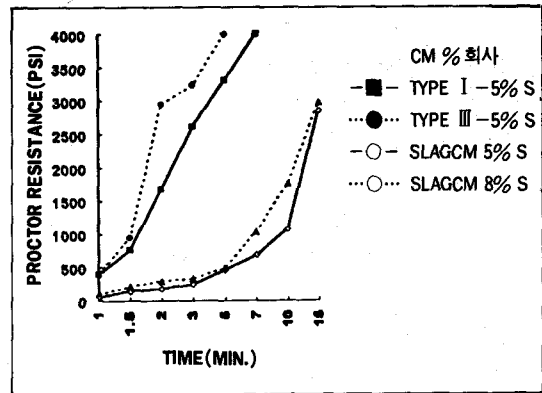


Fig. 4. 시멘트 Type에 의한 급결성



$\cdot 31\text{H}_2\text{O}$, d 값 : 9.5, 2θ : 9.3°)나 Ettringite (분자식 : $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$, d 값 : 9.73, 2θ : 9.08°)의 결정으로 여겨진다.

이와같은 섬유상의 수화물이 장기적으로 물성에 어떠한 영향을 미치는 가는 검토되어야 할 사항이다.

3.3. 슛크리트 재료 및 배합, 시공 조건에 의한 실험 실적 결과

3.3.1. 시멘트 Type에 의한 급결성

Fig. 4의 시멘트 Type에 의한 몰탈 Proctor 응결 결과에서 보면 Type III 조강시멘트의 급결성이 뛰어나며, 슬래그 시멘트의 급결성은 현저히 늦어지고 있음을 보여 주고 있다. 초기 반응성이 늦은 슬래그 시멘트의 경우 급결제의 첨가량은 많게 하여도 급결성이 빨라지지 않으며 특히 자립강도¹³⁾(1000PSI) 도달 시간이 늦어지기 때문에 슛크리트에 의한 터널면 부착후에 콘크리트 자중에 의한 탈락이 발생될 여지가 있다.

3.3.2 풍화 시멘트에 의한 급결성

Fig. 5는 몰탈에서 풍화 시멘트의 급결성저하 실험인데, 풍화 시멘트에서는 신선한 시멘트에 비해 급결성이 크게 떨어지는 것을 보여주며 급결제량을 증량하여도 급결성이 빨라지지 않는 것으로 보아 쏫크리트에서 신선한 시멘트 사용이 가장 중요한 인자가 된다. 이러한 이유는 앞의 급결 메카니즘에서 지적 했듯이 시멘트 성분중에 급결제와 반응하여 가장 급결을 빨리 일으킬 수 있는 C_3A , C_3S 등이 우선적으로 풍화 되어 초기 반응성이 떨어지기 때문이다.

3.3.3 급결제 종류 및 W/C 변화

Fig. 6의 결과에서 알 수 있듯이 급결제 제조회사에 따라 급결성의 차이가 매우 크며 특히 W/C가 높아졌을 때 급결성이 크게 떨어지기 때문에 사용시 품질확인이 필요하다.

Fig. 7은 W/C 변화에 따른 몰탈 응결을 측정 한 것으로 W/C가 50%에서 55%로 커졌을 때, 응결은 현저히 떨어지고 있으며 급결제를 8wt%로 증량하여도 급결성이 좋아지지 않기 때문에, 쏫크리트에서 단위수량 관리가 중요하며 W/C가 커졌을 때 급결성 저하가 적은 급결제 선택이 요구된다.

3.3.4. 저온에서의 급결성

Fig. 8은 W/C : 50% 몰탈에서 20°C 물과 0°C 물을 혼합수로 사용 했을 때 급결성이 현저히 떨어져서 5분 경과후에도 자립강도(1000PSI)에 도달되지 않아서 쏫크리트 자중에 의한 탈락율이 많아질 수 있으며, 급결제를 증량하여도 급결효과는 미미한 급결제가 많다.¹¹⁾

이것은 앞서 언급했듯이 쏫크리트의 급결성은 시멘트 반응성에 의존하기 때문에 저온에서의 쏫크리트 시공은 반응성이 높은 시멘트에 의한 방법이 바람직하다.

3.4 TMB 현장 쏫크리트 재료 적용 실험 결과

3.4.1 시멘트 Type에 의한 현장 쏫크리트 적용

Table 3은 Type I 보통 시멘트와 Type III 조강 시멘트의 리바운드량 및 core 강도 비교 실험결과로서 Type III 조강시멘트의 경우는 Fig. 4의 결과처럼 시멘트 반응성에 의해서 응결이 빨라져서 리바운드량을 감소 시킬수가 있으며, 또한 시멘트 분말도가 높아 쏫크리트의 부착력과 치밀도가 있기 때문에 리바운드량이 감소되고 Core 강도가 높게 나타난 것으로

Fig. 5. 시멘트 풍화에 따른 급결성

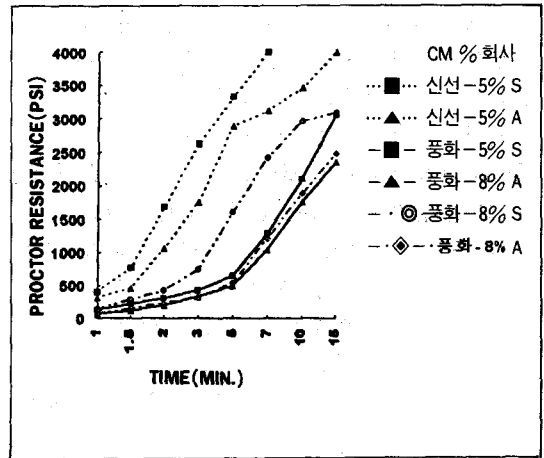


Fig. 6. 급결제 종류에 의한 몰탈 Proctor 관입 실험(W/C : 55%)

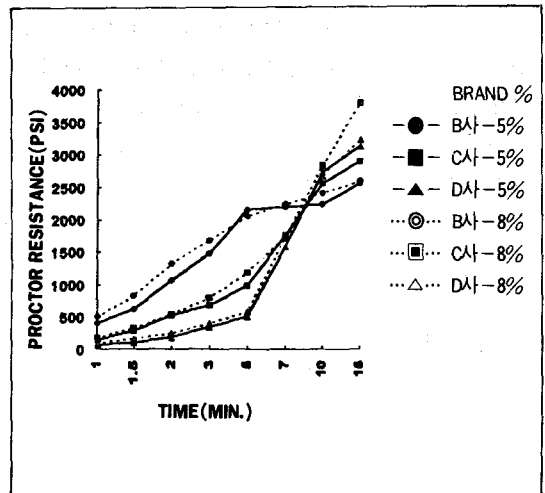


Fig. 7. W/C 변화와 급결제 종류 및 첨가량에 의한 몰탈 Proctor 관입 실험

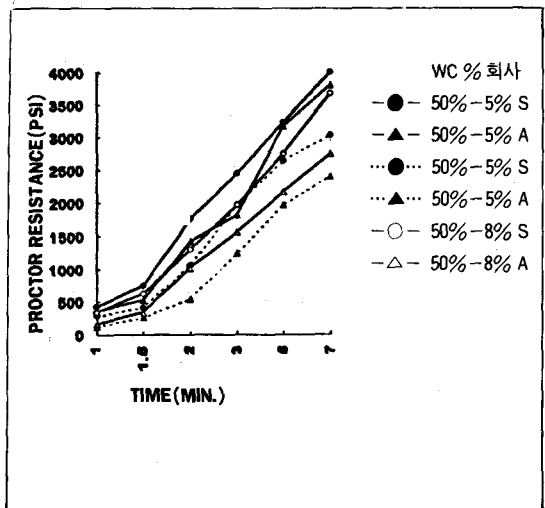


Fig. 8. 저온에서 급결성 저하와 급결제 종류 및 첨가량과의 관계

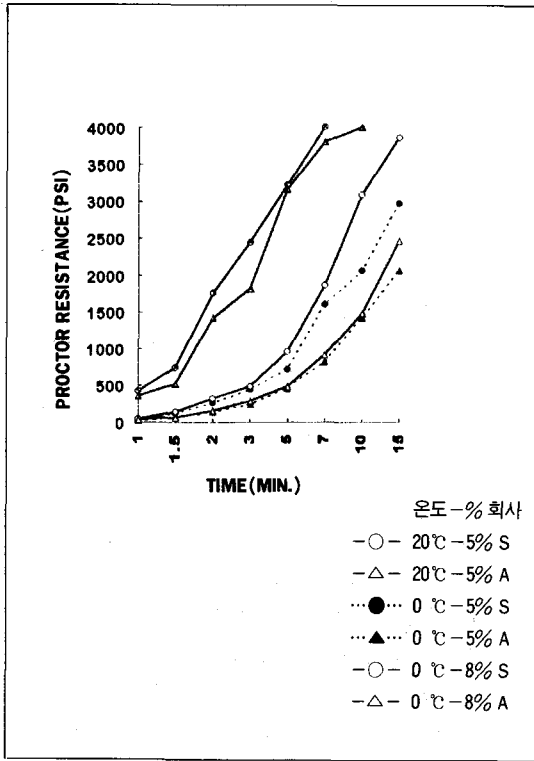


Table 3. 시멘트 Type과 급결제 종류에 의한 리바운드량 및 Core 강도 결과

시멘트 타입	급결제 종류	리바운드 량(wt %)	Core 압축강도(kg/cm ²)	
			7일	28일
TYPE I	A 사	25	180	202
	S 사	23	174	221
TYPE III	S 사	17	205	257

Table 4. 숏크리트 1M³ 재료 비용

(단위 : 원)

구분	단가	TYPE I 사용	TYPE III 사용		비고
			1.3배	1.5배	
시멘트	50원 /kg	20,000	26,000	30,000	TYPE III 의 가격은
모래	15,000 원 /M ³	9,844	9,844	9,844	TYPE I 의 1.3배,
자갈	18,000 원 /M ³	8,123	8,123	8,123	1.5배로 계산
급결제	450 원 /kg	9,000	9,000	9,000	
합계	-	46,967	52,967	56,967	

생각된다.

숏크리트의 시공에서 리바운드와 급결성의 상관관계는 급결제의 첨가를 많게해서 인위적으로 응결을 빠르게 한다고 리바운드량이 줄어드는 것이 아니라 오히려 적정 첨가량 이상에서는 리바운드량이 늘어나고²⁾ 분진발생이 많아지기 때문에, 외국의 숏크리트 시공 사례에서는 반응성이 높은 시멘트를 사용하여 리바운드량을 줄이고 숏크리트 강도를 향상시키는 방향으로 연구가 진행되고 있다.

한편, 실리카폼을 시멘트에 미리 첨가하거나 숏크리트 혼합시에 넣는 방법으로 실리카폼의 미립자 효과에 의한 숏크리트의 부착력을 높혀서 리바운드량을 감소시키는 연구^{1, 10)}가 활발하게 진행되고 있다. 그러나 외국에서는 부산물인 실리카폼이 아주 낮은 가격이기 때문에 가능한 방법이지만, 한국에서는 실리카폼이 시멘트의 7배 이상 가격으로써 수입단가가 비싸며 미세한 분말로써 보관 및 혼합관리가 용이하지 않기 때문에 상업적인 측면에서는 현재까지는 시멘트의 분말도를 높혀서 부착력과 반응성을 향상시키는 방법이 효율적인 숏크리트 시공방법이라고 판단된다.

3.4.2. 시멘트 TYPE에 의한 숏크리트 시공의 경제성 검토

Table 4는 Table 2의 본 실험에서 사용한 숏크리트 배합에 의해 TYPE I 시멘트와 TYPE III 시멘트를 사용했을 때, 숏크리트 1m³의 재료비를 산출한 것으로 TYPE III 시멘트 가격을 TYPE I의 1.3배, 1.5배로 하여 재료비를 산출하였다.

Table 5는 TYPE I 시멘트와 TYPE III 시멘트를 사용했을 때, Table 3의 측정된 리바운드량을 감안하여 숏크리트 시공시의 공사비를 산출한 것이다.

TYPE III 시멘트를 사용하면 재료비 가격이 상승하지만 리바운드가 감소되어 버려 처리 비용이 감소되고 작업 효율이 향상 되기 때문에 勞務비용과 裝備비용이 절감된다. 따라서 Table 5의 결과에서 보여 주듯이 현재 생산되는 S사 TYPE III 시멘트를 TYPE I 시멘트 대신 사용할 때 숏크리트 시공시의 공사비는 약간 상승하나 숏크리트 품질이 향상되는 것을 감안하여 충분한 경제성을 갖는다.

그러나 1.5배 가격 수준에서는 숏크리트 작업환경, 작업 효율 및 숏크리트 품질 등을 종합적으로 판단해 볼때 경제성은 떨어지나 점차적으로 건설 현장에서 작업 환경을 중요시하는 분위기 이므로 TYPE III 시멘트 적용을 고려해 볼 만하다고 생각 되며 좀 더 검

토 해 볼 만한 사항이다.

3.4.3. 급결제 종류에 의한 현장 슛크리트 적용

Table 3의 급결제 종류에 의한 Core 강도 결과를 보면, 단순히 시멘트를 급결시키는 효과만 있는 급결제의 경우는 7일에서 28일 강도 상승율이 적기 때문에 장기강도 발현에 대한 보완 대책이 필요하다.

4. 결론

- 1) 급결제에 의한 시멘트의 급결 메카니즘은 일반적인 시멘트 급결과는 다르며 비정질 gel 형태의 수화물에 의해 급결이 일어난다.
- 2) 급결성은 시멘트 반응성에 절대적으로 의존하며 슛크리트 시공시 신선한 시멘트 사용이 중요하다.
- 3) W/C가 상승하면 급결성이 크게 떨어지기 때문에 슛크리트 시공시 단위수량 관리가 중요하며 W/C 상승에 따라 급결성 저하폭이 적은 급결제 선택이 중요하다.
- 4) 저온에서 슛크리트 시공시 급결성이 현저히 떨어지며 급결제에 의한 급결성 회복은 급결제에 따라 차이가 많고 한계가 있기 때문에 저온에서 시공은 반응성이 높은 시멘트 사용이 바람직하다.
- 5) 분말도가 높고 초기 반응성이 좋은 시멘트는 슛크리트의 부착력이 높아 리바운드량 감소와 강도 발현에 유리하다.

<참고문헌>

1. 오병환外, "실리카흙 및 강섬유 보강 슛크리트의 실험적 연구", 콘크리트학술발표집, 1992, 제4권, 2호, pp.119-124
2. 안상기, "스�크리트의 리바운드 감소에 대한 재료개발 연구실험", 콘크리트 학회지, Vol. 5, No.1, 1993. 3, pp.54-61.
3. 中寸敏夫, "トンネルの吹付けコンクリート", 콘크리트工學, VOL, 31, No.3, 1993. 3, pp. 56-60
4. JCPDS* 2-1003, "Sodium Calcium Aluminate [Na₄Ca₃(AlO₂)₁₀]"

Table 5. 슛크리트 시공 단가표

(원/ M³)

	TYPE I 사용		TYPE III 사용	
			1.3배	1.5배
리바운드량 (%)	0%	23%	17%	17%
재료비	46,967	57,770	61,972	66,652
인건비	31,193	38,430	36,992	36,992
장비비	24,906	30,685	29,536	29,536
버력처리비	0	3,248	2,603	2,603
합 계	103,066	130,133	131,103	135,783

5. 遠藤秀紀, "吹付けコンクリート用急結劑", 公開特許公報(A), 平 4-55351
6. 遠藤秀紀, "セメント用凝結硬化促進材", 公開特許公報(A), 平2-258659
7. 能町安, "急結劑", 콘크리트 工學, Vol 26, March 1988, pp.65-70
8. Raymond J. Schutz, "Properties of Shotcrete Admixtures", Shotcrete for Ground Support, ACI Publication SP-54, pp. 45-58.
9. F. E. Valencia, "Evaluation of Shotcrete Application Under Field Conditions", Shotcrete for Ground Support, ACI Publication SP-54, pp. 115-148
10. John Wolsiefer, and D. R. Morgan, "Silica Fume in Shotcrete", Concrete International, April 1993, pp.34-39.
11. 中原康, "吹付けコンクリートにおける材料の現状と問題点", 콘크리트工學, Vol. 19, 19, No.4, April 1981, pp.20-28
12. л. г. шпыНОВА, "ТАМПОНАЖНЫЕ РАСТВОРЫ НА ОСНОВЕ ЁЗГИПСОВОГО ПОРТАНДЦЕМЕНТА", Це м е и т No.5, pp.9-11(СССР)
13. 田中一成, "トンネル補修用急硬性 콘크리트의特性", 콘크리트工學 年次論文報告集, Vol. 15, No.1, 1993. pp.865-868.