

고성능 분체 혼화재 및 조기강도형 알칼리프리계 급결제를 사용한 고성능 습식 슛크리트 공법

High performance wet-mix shotcrete using alkali-free accelerator and HPA for early and high stabilization of tunnel



최명식 Myeong-Sik, Choi
실크로드티앤디 상무
E : terminator@silkroadcnt.co.kr



장수호 Soo-Ho, Chang
한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실 연구위원
E : sooho@kict.re.kr



이보형 Bo-Hyeong, Lee
두산건설 기술연구소 차장
E : bhlee44@doosan.com

1. 개발배경

고성능 슛크리트(high-performance shotcrete)는 고강도와 고내구성의 슛크리트를 의미하며, 취약한 지반조건에서 터널의 안정성 확보, 대단면 터널의 경제적 시공과 싱글셸터널(Single-shell tunnel)의 적용 등을 위하여 전 세계적으로 그 적용이 증대되고 있다. 하지만 선진국과 비교할 때 우리나라의 고성능 슛크리트 기술은 상대적으로 부족한 실정이며, 특히 고성능 슛크리트에 필수적으로 사용되고 있는 실리카폼(silica fume) 등과 같은 핵심 재료들을 수입에 의존해야 하는 상황이었다. 따라서 본 기술에서는 고성능 슛크리트의 핵심 재료를 국산화하고 선진국 수준 이상의 성능을 발현하면서도 외국재료 대비 슛크리트의 경제성을 향상시키는데 목표를 두어 기술개발을 실시하였다.

2. 특징 및 장점

2.1 기존기술과의 차별성

표 1에서 보이는 것과 같이 분체 혼화재를 사용하여 실리카폼 사용량을 50%이상 절감하고 실리카폼 대비 높은 조기강도를 확보하였으며, 조기-장기 고강도형 알칼리프리계 급결제를 사용하여 응결시간을 촉진시키고 알칼리 함량을 1%이하로 낮춰 장기강도 및 친환경성을 증대시켰다. 그리고 고성능 감수

제를 사용하여 슬럼프와 W/B를 낮춰 작업성을 향상시키고 강도를 증진시켰다.

2.2 고성능 분체 혼화재의 특징

고성능 분체 혼화재는 그림 1과 같이 OPC, 실리카폼, 플라이애쉬가 갖고 있는 재령에 따른 강도증진 피크와는 달리 초기, 중기, 장기에 모두 강도 발현이 가능하다. 포졸란 물질인 실리카폼과 플라이애쉬는 초기에 강도발현을 하지 못하기 때문에 칼슘실포알루미네이트(CSA)를 첨가하여 초기에 강도를 발현시키고 7일 이후 포졸란 반응으로 인한 구조체의 치밀화를 통해 중·장기 강도의 발현이 가능하고 공극을 감소시켜 가용성분 및 침입수 성분의 이동을 억제하여 백화현상을 최소화 할 수 있다.

2.3 고강도형 알칼리프리계 급결제의 특징

한국도로공사 및 철도시설공단에서 제정한 규정에 따르면 알칼리프리계 급결제란 액상, 분말과 같이 제품의 성상과는 관계없이 등가알칼리량(전 알칼리 함량)이 1%이하인 제품을 뜻한다. 여기서 말하는 등가알칼리량은 주요 알칼

리 성분인 Na₂O와 K₂O의 화학적 몰 비로 계산되는 알칼리량으로 식 1과 같다.

$$Na_2O_{eq.} = Na_2O + 0.658 \times K_2O \dots\dots\dots (1)$$

국내에서 사용되는 급결제는 알칼리 함량에 따른 분류, 성상에 따른 분류로 나눌 수 있다. 알칼리 함량에 따른 분류는 알칼리계, 알칼리프리계로 분류하고, 성상에 따른 분류

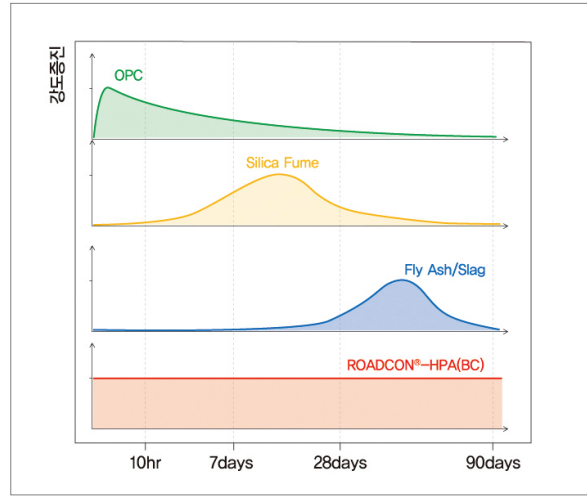


그림 1. 재료별 재령에 따른 강도증진

[표 1] 기존기술과의 차별성

기존기술		신기술		
일반강도	외국 고강도	구현기술	특성	
시멘트, 골재 강섬유	시멘트, 골재 강섬유	시멘트, 골재 강섬유	-	-
-	실리카폼	분체혼화재	플라이애쉬	실리카폼 사용량 50% 이상 절감
-	실리카폼	분체혼화재	CSA	실리카폼 대비 높은 조기강도 확보
알루미네이트 시멘트광물계 급결제	알칼리프리계 급결제	조기-장기 고강도형 알칼리프리계 급결제	비정질 수산화알루미늄	응결 촉진 (3시간 1MPa이상)
알루미네이트 시멘트광물계 급결제	알칼리프리계 급결제	조기-장기 고강도형 알칼리프리계 급결제	알칼리함량	14%이상 (기준) / 1%이하 (신기술) → 장기강도 향상
유동화제 (나프탈렌계)	고성능 감수제 (폴리카르본산계)	고성능 감수제 (폴리카르본산계)	슬럼프	10cm (일반) / 20cm (신기술) → 작업성 향상
유동화제 (나프탈렌계)	고성능 감수제 (폴리카르본산계)	고성능 감수제 (폴리카르본산계)	W/B	45% (일반) / 38% (신기술)

는 액상과 분말 급결제로 분류가 가능하다. 표 2와 같이 알루미네이트계, 시멘트광물계(국내)는 알칼리계 급결제로 각각 알칼리 함량이 18~20%, 12~14%로 강알칼리성의 용출수가 발생되나 알칼리프리계 급결제는 알칼리 함량이 1%이하의 급결제로 인한 용출수의 발생이 거의 없다. 급결제 종류에 따른 숯크리트 중 급결제에서 유입되는 알칼리 양을 표 3과 그림 2에 도식화 하였다. 또한, 기존 알칼리계 급결제보다 높은 압축강도(재령 28일 35MPa 이상)발현에 유리하고 알칼리-골재반응이나 숯크리트의 백화현상 등을 최소화하는데 기여한다.

3. 성능 검증

다양한 조건에 대한 시험타설과 실내실험 등을 통해 고성능 숯크리트의 성능을 평가·검증(공인인증시험기관 의뢰)하였고, 그 결과 실리카폼을 혼입한 숯크리트 대비

동등 이상의 역학적 성능을 발현하였고 내구성능 측면에서는 본 기술이 실리카폼을 혼입한 숯크리트보다 우수한 성능을 발현하였다. 서울시에 위치한 ○○터널 시공현장에 적용한 결과는 표 4과 같이, 본 기술에서 목표로 설정한 역학적 성능 목표들을 무난히 달성하였다. 또한 리바운드율도 7% 이하로 측정되어 부착성이 좋은 고성능 숯

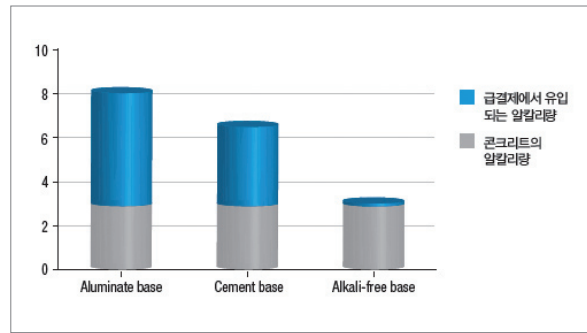


그림 2. 숯크리트 중에 유입되는 알칼리 량

[표 2] 국내 급결제 종류에 따른 특성

구 분		알루미네이트계	시멘트광물계(국내)	알칼리프리계
성상에 따른 구분		액상	분말	액상, 분말
알칼리 함량에 따른 구분		알칼리계		알칼리프리계
알칼리함량(Na ₂ O+0.658×K ₂ O)		18~20%	12~14%	1% 이하
알칼리-골재반응		있음		거의 없음
환경 영향	용출수	강알칼리성 용출수 (알칼리함량 18~20%)	강알칼리성 용출수 (알칼리함량 12~14%)	거의 없음
	BOD/COD	유기화합물이 첨가되지 않아 거의 영향 없음		

[표 3] 숯크리트 중 급결제에서 유입되는 알칼리 량

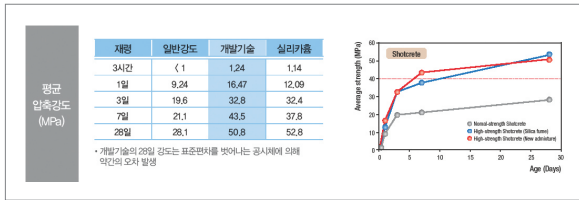
급결제 종류	사용량 (C×%)	알칼리량 (kg/m³)
Aluminat base	5	5.14
Alkali-free base	8	0.02
Cement base (국내 A사)	5	3.39

※ 숯크리트 m³당 단위 시멘트량 480kg

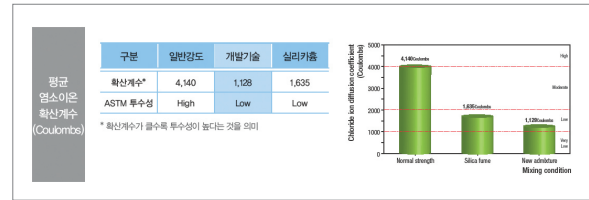
(김진철 외 2인, 한국콘크리트학회, 2002)

크리트에 의해 리바운드 저감도 가능한 것으로 나타났다. 이상과 같은 다양한 조건에 대한 시험타설과 실내시험 등을 통해 그림 3과 같이 고성능 숏크리트의 성능을 평가·검증하였을 뿐만 아니라, 터널의 크기와 지반조건에 따른 수치해석, 숏크리트의 경화특성을 고려한 지반-지보 상호작용 해석 및 실험형 파괴실험을 통해 고성능 숏크리트의 뛰어난 구조적 안정성을 확인하였다. 특히, 동일한 조건에서 고성능 숏크리트의 설계두께가 일반강

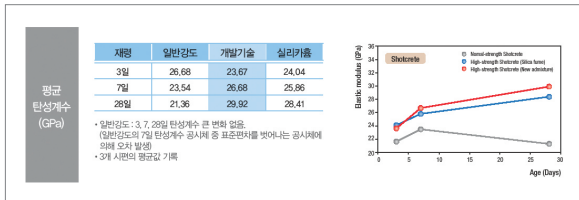
도 숏크리트의 60~80% 수준으로 축소되어도 일반강도 숏크리트와 동일한 안정성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. VE분석 결과에서도 고성능 숏크리트의 가치가 높게 평가되며 장기내구성(내구수명)과 리바운드(약 7%)까지 고려하면 경제성이 더욱 우수하다. 하지만 아직까지 우리나라에서 고성능 숏크리트에 의해 숏크리트 두께 절감을 도모하기 위해서 관련 검증연구와 설계기준·시방의 개정 등의 추가적인 노력이 필요할 것으로 판단된다.



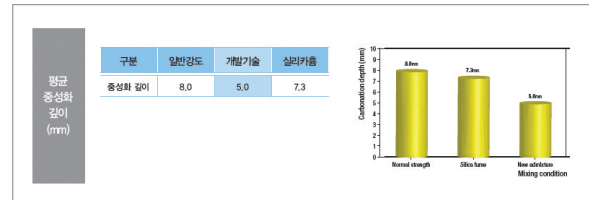
(a) 평균 압축강도



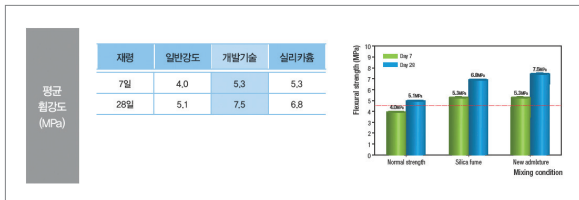
(d) 평균 염소이온확산계수



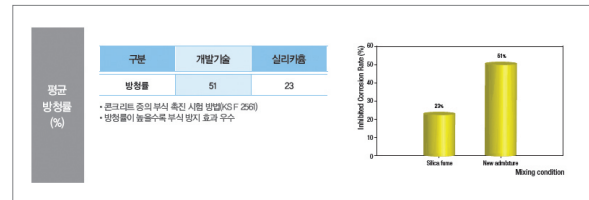
(b) 평균 탄성계수



(e) 평균 중성화 깊이



(c) 평균 휨강도



(f) 평균 방청률

그림 3. 고성능 숏크리트의 역학 및 내구성능 평가결과

[표 4] ○○터널 적용결과(예)

점검항목	기술목표	적용결과	시험방법
3시간 강도	1 MPa 이상	평균 1.69 MPa	공기압식 핀 관입시험
28일 강도	40 MPa 이상	평균 54 MPa	공인인증시험기관
리바운드율	8% 이하	7% 이하	현장 계량

4. 활용실적

본 기술은 현재까지 주로 붕괴·붕락 구간이나 단층대 등과 같은 취약 지반조건에 주로 적용되어 터널의 초기 안정성을 확보하는데 기여하였다. 최근에는 ○○싱글셀 방호시설, A사 싱글셀 화약 저장고, 화도-양평간 도로 현장과 같이 고강도 숏크리트에 의한 콘크리트 라이닝의 생략, 싱글셀 암반공동 및 연약지반 보강을 위한 고강도 등이 설계되고 있는 상황으로서 앞으로는 본 기술의 활용도가 더욱 높아질 것으로 예상된다. 또한 해저터널과 같이 숏크리트의 내염해성이 요구되는 특수시공 조건에서도 적용이 유망할 것으로 기대된다.

5. 결론

본 기술은 고성능 숏크리트에 요구되는 제반 특성들을 고려하여 새롭게 개발한 재료들을 활용하여, 선진국 수준의 고성능 숏크리트를 적용할 수 있는 핵심 기술을 제시하였다는 의의가 있다고 할 수 있다. 특히, 기술적으로

는 싱글셀 터널을 설계·시공 할 수 있는 핵심기술의 기반을 제공하고 터널의 붕괴 및 붕락사고를 방지하기 위한 고안정 기술을 제공하여 전세계적으로 이루어지고 있는 터널 지보재 고성능화에 부합하는 기술을 확보하였고, 경제적·산업적인 측면에서는 핵심 재료들을 국산화하여 경제성을 제고하였으며, 시공성이나 내구성 측면에서도 우수한 성능을 발휘하였다. 현재까지 대규모 붕괴·붕락 사고가 발생한 구간을 안전하게 시공하기 위한 목적이나 단층대 등이 존재하는 취약 지반조건에서의 고안정 대책공법으로 적용되어 왔다. 하지만 최근 들어 사갱이나 양호한 암반조건 터널에서 콘크리트 라이닝을 생략하는 대신 고성능 숏크리트로 대체하고자 하는 검토들이 이루어지고 있으며, 높은 수준의 안전성과 내구성이 요구되는 지중 굴착식 해저터널이 건설되고 있는 상황으로서 앞으로도 본 기술의 활용성이 더욱 높아질 것으로 예상된다. 앞으로도 본 기술보다 성능이 더욱 우수하고 경제적인 고성능 숏크리트 기술들이 지속적으로 개발되기를 기대해본다.

[표 5] 강남순환 도시고속도로 제 6공구 (신림 2터널) 적용 내용 및 결과

적용 내용	주요 결과
<ul style="list-style-type: none"> 현장 실적용 (총 200m) 적용시기 : 2010년 3월~6월 적용구간 : 낙반 발생 구간의 초기안정성 확보 	<ul style="list-style-type: none"> 낙반 발생 구간의 초기안정성 확보 일반강도 숏크리트 대비 탁월한 시공성 재령 28일 압축강도 40MPa 이상

[표 6] 수도권 고속철도 (수서-평택) 제 4공구 적용 내용 및 결과

적용 내용	주요 결과
<ul style="list-style-type: none"> 현장 실적용 (총 2,300m) 적용시기 : 2012년 5~ 적용구간 : 신갈단층대, 신갈저수지 통과구간 	<ul style="list-style-type: none"> 초기강도 발현을 통한 터널의 초기변위 억제 재령 28일 압축강도 40MPa 이상

[표 7] 기타 시공 실적

기타	
<ul style="list-style-type: none"> 신분당선 3공구 시험시공 : 고성능 숏크리트의 성능평가 (2008.04) ○○고속철도 ○○-○ 공구 (대규모 낙반 발생 구간) 	<ul style="list-style-type: none"> 국도 1호선 우회도로 같은터널 보령-태안 해저터널 (2010.07 내염해성 확보 목적)