

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



**배규진**  
한국건설기술연구원  
Geo-인프라연구실  
선임연구위원



**장수호**  
한국건설기술연구원  
Geo-인프라연구실  
연구위원



**최순욱**  
한국건설기술연구원  
Geo-인프라연구실  
전임연구위원



**최명식**  
실크로드티앤디  
상무



**채종길**  
두산건설  
과장



**이보형**  
두산건설  
차장

## 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. 이러한 배경에서 우리나라에서도 터널설계기준(2007), 터널표준시방서(2009) 및 콘크리트표준시방서(2009)에 고강도 슛크리트

에 대한 내용이 신설되기에 이르렀다(표 1). 특히, 터널설계기준(2007)에서 규정하고 있는 고강도 슛크리트의 적용 분야는 다음과 같다.

- ① 콘크리트라이닝을 설치하지 않는 경우
- ② 터널의 조기 안정화가 요구되는 경우
- ③ 장기내구성이 요구되는 목적구조물로서 활용되는 경우
- ④ 대단면 터널에서 슛크리트 두께 축소를 목적으로 하는 경우
- ⑤ 안전성, 시공성, 경제성 향상을 목적으로 하는 경우

표 1. 고강도 슛크리트의 압축강도 기준 (일반강도 슛크리트: 재령 28일 21 MPa 이상)

재령	터널표준시방서(2009)/터널설계기준(2007)	콘크리트표준시방서(2009)
3시간	-	1~3 MPa 이상
1일	10 MPa 이상	5~10 MPa 이상
28일	35 MPa 이상	35 MPa 이상

하지만 선진국과 비교할 때 우리나라의 고성능 쏿크리트 기술은 상대적으로 부족한 실정이며, 특히 고성능 쏿크리트에 필수적으로 사용되고 있는 실리카폼(silica fume) 등과 같은 핵심 재료들을 수입에 의존해야 하는 상황이었다.

따라서 본 기술에서는 고성능 쏿크리트의 핵심 재료를 국산화하고 선진국 수준 이상의 성능을 발현하면서도 외국재료 대비 쏿크리트의 경제성을 향상시키는데 목표를 두어 기술개발을 실시하였다. 특히, 본 기술은 국토해양 R&D사업인 “IT 및 신소재를 활용한 급속안정화 터널 시공기술 개발(주관연구기관: 한국건설기술연구원, 연구단장: 배규진)”의 일환으로 2005년 6월부터 2010년 6월까지 5년간의 연구를 통해 개발된 것이다.

## 2. 개발목표

본 기술의 핵심 기술은 크게 ① 물/시멘트비(W/C)를 낮추면서도 작업성을 유지하는 재료 및 배합 기술, ② 조기강도와 장기강도 발현에 유리한 알칼리프리계(alkali-free) 급결제, ③ 실리카폼을 대체하기 위한 미분말 분체 혼화재 등으로 구분할 수 있다(그림 1).

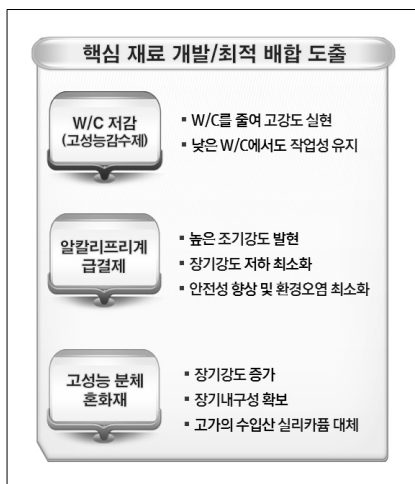


그림 1. 핵심 기술의 개요와 목표

성능 측면에서의 목표로는 ① 3시간 압축강도 1 MPa 이상, ② 28일 압축강도 40 MPa 이상, ③ 외국산 재료 대비 고성능 쏿크리트 재료단가 10%이상 절감, ④ 작업자의 안전 확보, ⑤ 친환경성에의 기여 등이다.

## 3. 기술의 구성

본 기술에서는 실리카폼을 대체하면서 실리카폼을 혼합한 쏿크리트와 동등 이상의 성능을 발현할 수 있도록 새롭게 개발한 고성능 분체 혼화재를 시멘트 중량의 5%를 치환하여 적용하게 된다. 이때 저가의 산업부산물인 플라이애쉬(fly-ash)를 50% 이상 사용하여 경제성을 향상시켰고, 플라이애쉬의 단점 중의 하나인 조기강도 발현 저하 문제를 해결하기 위하여 칼슘설포알루미네이트(CSA) 등과 같은 재료를 혼합하여 응결과 경화를 촉진하였다. 또한 응결 촉진과 내구성 향상에 기여할 수 있는 초미립자 재료를 첨가하여 고성능 발현이 가능하도록 하였다.

조기~장기강도형 알칼리프리계 급결제는 pH가 2.5~8 이고 등가 알칼리함량이 1% 이하로서, 장기강도 발현에도 유리하고 알칼리-골재 반응이나 쏿크리트의 백화현상 등을 최소화하는데 기여할 수 있다.

고성능 쏿크리트의 특성을 고려하여 개발한 폴리카르본산계 고성능감수제(Polycarboxylate superplasticizer)는 약 1시간 정도의 쏿크리트 작업시간을 고려하고, W/C 비가 낮은 콘크리트의 점성을 완화하고 슬럼프를 20cm까지 향상시켰으며, 미분말 분체 혼화재의 분산성을 극대화하여 쏿크리트 타설장비의 부하를 최소화하였다.

이상의 3가지 신재료를 사용하는 본 기술의 기본배합은 표 2와 같다. 이때 미분말 분체 혼화재로 시멘트 사용량의 5%를 치환하며, W/B(물/바인더)비를 40% 이하로 적용하기 위해서 5~8kg/m<sup>3</sup>의 단위중량으로 개발한 고성능감수제를 사용하고, 시멘트 사용량의 8%로 개발한 알칼리프리계 급결제를 사용하는 것을 기본으로 한다. 기타

표 2. 고성능 슛크리트의 기본 배합조건

W/B (%)	S/a (%)	단위중량(kg/m <sup>3</sup> )							G <sub>max</sub> (mm)	급결제 (%)
		W	C	분체 혼화재	S	G	고성능 감수제	강섬유		
35~40	55~70	183	456	24	1,127	603	5~8	40	< 13	C×8%

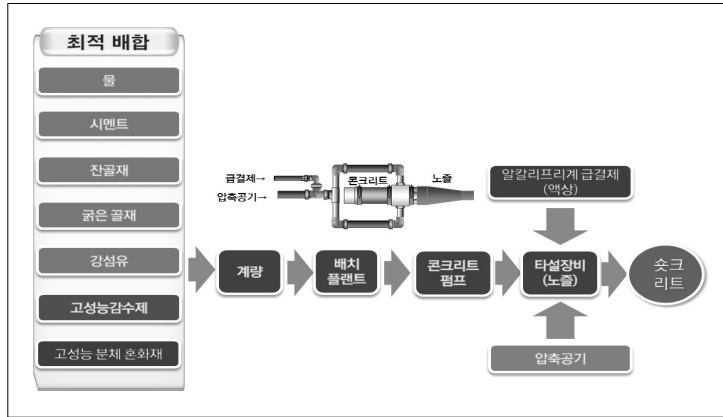


그림 2. 고성능 슛크리트의 구성 및 시공순서

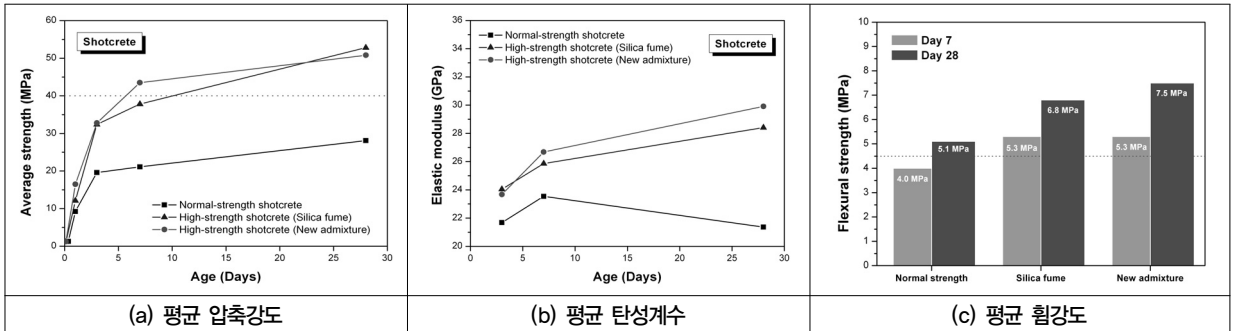


그림 3. 고성능 슛크리트의 역학적 성능평가 결과(예)

재료들, 시공방법 및 슛크리트 타설장비는 현행의 일반 습식 슛크리트와 동일하다(그림 2).

#### 4. 성능 검증

다양한 조건에 대한 시험타설과 실내실험 등을 통해 고

성능 슛크리트의 성능을 평가·검증하였고, 그 결과 실리카폼을 혼입한 슛크리트 대비 동등 이상의 역학적 성능을 발휘하였다(그림 3). 내구성 측면에서는 본 기술이 실리카폼을 혼입한 슛크리트 보다도 우수한 성능을 발휘하였다(그림 4). 특히, 투수성의 척도가 되는 염소이온확산계수의 경우, 본 기술은 실리카폼을 혼입한 슛크리트와 마찬가지로 ‘낮은(low)’ 수준의 투수성을 가지는 것으로

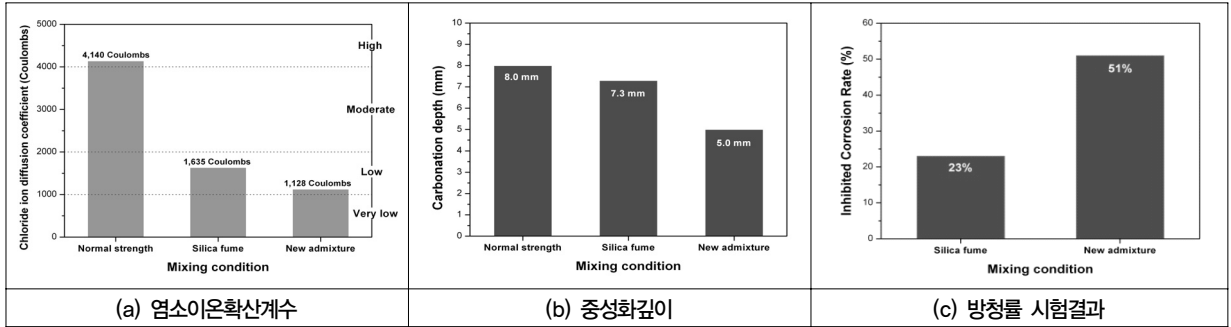


그림 4. 고성능 슛크리트의 내구성능 평가결과(예)

표 3. OO터널 적용결과(예)

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

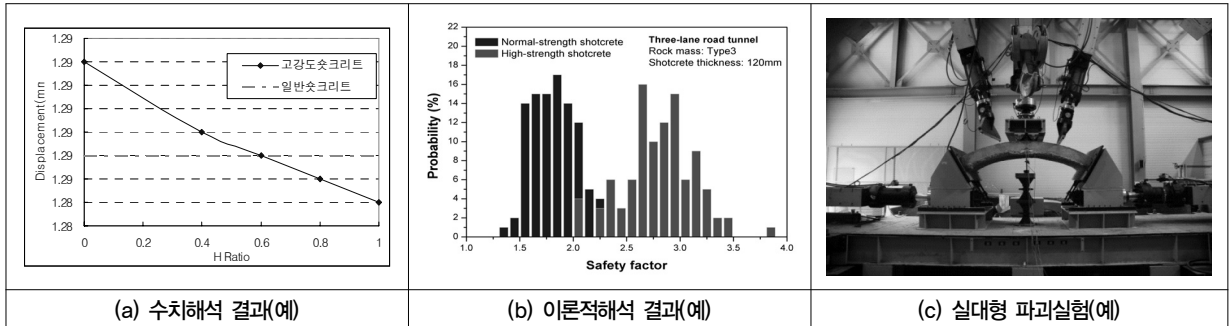


그림 5. 고성능 슛크리트의 구조안정성 평가결과(예)

평가되었으나 염소이온확산계수의 절대적인 값 자체가 보다 낮음을 확인하였다(그림 4a). 또한 염해에 대한 내구성의 척도로 고려할 수 있는 방청률 시험결과에서도 본 기술의 방청율이 실리카폼을 혼입한 경우와 비교할 때 2 배 이상 크게 나타났다(그림 4c).

서울시에 위치한 OO터널 시공현장에 적용한 결과는 표 3과 같이, 본 기술에서 목표로 설정한 역학적 성능목표들을 무난히 달성하였다. 또한 리바운드율도 7% 이하로 측정되어 부착성이 좋은 고성능 슛크리트에 의해 리바

운드 저감도 가능한 것으로 나타났다.

이상과 같은 다양한 조건에 대한 시험타설과 실내시험 등을 통해 고성능 슛크리트의 성능을 평가·검증하였을 뿐만 아니라, 터널의 크기와 지반조건에 따른 수치해석, 슛크리트의 경화특성을 고려한 지반-지보 상호작용 해석 및 실험 파괴실험을 통해 고성능 슛크리트의 뛰어난 구조적 안정성을 확인하였다(그림 5). 특히, 동일한 조건에서 고성능 슛크리트의 설계두께가 일반강도 슛크리트의 60~80% 수준으로 축소되어도 일반강도 슛크리트와 동일

표 4. 본 기술의 주요 시공실적

현장	A현장(철도터널)	B현장(도로터널)	C현장(철도터널)
적용 구간	붕괴·붕락 구간	붕괴·붕락 구간	단층대/인근 저수지
적용 장면			

한 안정성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 이는 일본의 제2동명·명신고속도로 대단면 터널에서 고강도 슛크리트를 적용한 결과와 일치한다. 하지만 아직까지 우리나라에서 고성능 슛크리트에 의해 슛크리트 두께 절감을 도모하기 위해서 관련 검증연구와 설계기준·시방의 개정 등의 추가적인 노력이 필요할 것으로 판단된다.

## 5. 활용실적

본 기술은 현재까지 주로 붕괴·붕락 구간이나 단층대 등과 같은 취약 지반조건에 주로 적용되어 터널의 조기 안정성을 확보하는데 기여하였다(표 4). 최근에는 고강도 슛크리트에 의한 콘크리트 라이닝의 생략, 싱글셀 암반공동 등이 설계·검토되고 있는 상황으로서 본 기술의 활용도가 더욱 높아질 것으로 예상된다. 또한 해저터널과 같이 슛크리트의 내염해성이 요구되는 특수시공 조건에서도 적용이 유망할 것으로 기대된다.

## 6. 결론

본 기술은 고성능 슛크리트에 요구되는 제반 특성들을 고려하여 새롭게 개발한 재료들을 활용하여, 선진국 수준의 고성능 슛크리트를 적용할 수 있는 핵심 기술을 제시하였다는 의의가 있다고 할 수 있다. 특히, 핵심 재료들을 국산화하여 경제성을 제고하였으며, 시공성이나 내구성 측면에서도 우수한 성능을 발휘하였다.

본 기술은 현재까지 대규모 붕괴·붕락 사고가 발생한 구간을 안전하게 시공하기 위한 목적이나 단층대 등이 존재하는 취약 지반조건에서의 고안전 대책공법으로 적용되어 왔다. 하지만 최근 들어 사갱이나 양호한 암반조건인 터널에서 콘크리트 라이닝을 생략하는 대신 고성능 슛크리트로 대체하고자 하는 검토들이 이루어지고 있으며, 높은 수준의 안전성과 내구성이 요구되는 지중굴착식 해저터널이 건설되고 있는 상황으로서 앞으로도 본 기술의 활용성이 더욱 높아질 것으로 예상된다. 앞으로도 본 기술보다 성능이 더욱 우수하고 경제적인 고성능 슛크리트 기술들이 지속적으로 개발되기를 기대해본다.