

## 현장실험과 복합열화시험을 통한 고강도 슛크리트의 장기내구성 검토

### An Investigation on the Long Term Durability of High-strength Shotcrete Using Field and Combined Deterioration Test

마 상 준<sup>1</sup> Ma, Sang-Joon

김 동 민<sup>2</sup> Kim, Dong-Min

최 재 석<sup>3</sup> Choi, Jae-Seok

안 경 철<sup>4</sup> Ahn, Kyung-Chul

김 선 명<sup>5</sup> Kim, Sun-Myung

#### Abstract

Domestic practices in shotcrete use have developed in many respects even now, but it still has issues about material, construction, quality standard and so on. In overseas, the construction using high strength shotcrete with 39.2~58.8 MPa of compressive strength is becoming common based on the shotcrete technology of high strength and durability. However, domestic shotcrete design strength is low at around 20.6 MPa of compressive strength and a long term durability is also insufficient. In this paper, field tests using high-quality additives and accelerators were performed to obtain the improvement of shotcrete strength and EFNARC standard was used to evaluate the field test results. In addition, deterioration test combined with the freezing-thawing and carbonation was also performed in order to investigate a long-term durability of high-strength shotcrete. As a result of the field test, the promotion ratio of early strength was 90~97% in case of using alkali-free accelerators. And the compressive strength of the shotcrete using Micro-silica fume was 45.2~55.8 MPa and flexible strength was 5.01~6.66 MPa, so the promotion ratio of strength was 37~79% and 17~61% respectively. The promotion effect of strength by silica fume additives ratio of 7.5~10% for cement mass was much superior to the other cases. It was especially examined that using Micro-silica fume reduced deterioration due to mixed steel fiber and improved a long-term durability of shotcrete.

#### 요 지

국내 슛크리트 관련 기술들은 지금까지 많은 발전을 이루어 왔으나 재료, 시공 및 관련 품질규격 등에서 여전히 문제들을 가지고 있다. 국외의 경우 39.2~58.8MPa에 이르는 고강도 슛크리트 시공이 가능하여 터널에서 2차 라이닝의 대체나 장기내구성의 확보가 충분히 가능한 반면, 국내의 경우 설계강도가 20.6MPa 내외로 낮은 편이며 장기내구성도 신뢰하지 못하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 국내 슛크리트의 강도 증진을 위해 고품질 혼화재와 고성능 급결제를 적용한 현장실험을 실시하였고, 유럽통합규격(EFNARC)에 의거하여 품질평가를 수행하였다. 또한, 탄산화와 동결융해의 복합인자에 의한 열화시험을 수행하여 고강도 슛크리트의 장기내구성을 평가하였다. 실험결과 알칼리 프리계 급결제를 사용한 경우 초기강도 증진율이 90~97%로 가장 높게 나타났고, 실리카 흙을 혼입한 슛크리트의 압축강도는 45.2~55.8MPa, 휨강도는 5.01~6.66MPa로 혼입하지 않은 경우에 비해 각각 37~79%, 17~61%의 강도 증진 효과가 나타났다. 또한, 실리카 흙 치환율이 7.5~10%일 때 강도증진 효과가 가장 우수한 것으로 나타났다. 특히, 실리카 흙의 치환은 강섬유 혼입에 의한 슛크리트의 열화현상을 최소한으로 감소시켜, 슛크리트의 장기내구성을 확보하는데 효과가 있음을 알 수 있었다.

**Keywords :** Accelerators, Additives, Combined deterioration test, High-strength shotcrete, Micro-silica fume

1 정희원, 한국건설기술연구원 국토지반연구부 수석연구원 (Member, Research Fellow, Geotechnical Eng. Research Dept., KICT)

2 정희원, 한국건설기술연구원 국토지반연구부 연구원 (Member, Researcher, Geotechnical Eng. Research Dept., KICT, dmkim@kict.re.kr, 교신저자)

3 한국전자제시험연구원 신뢰성평가센터 선임연구원 (Senior Researcher, Reliability Evaluation Center, KICM)

4 정희원, (주)테조엔지니어링 지반사업부 상무 (Member, Executive Director, Geotechnical/Tunnel Engineering Dept., TESO Eng. Co., Ltd.)

5 정희원, (주)바우컨설턴트 차장 (Member, Vice-manager, Bau consultant Co., Ltd.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

# 1. 서론

1970년대 중반이후 지하철 건설로 인한 지하공간의 활용과 도로, 철도 등의 건설로 인해 대단면 터널공사가 활발하게 이루어졌고, 이와 연계되어 슛크리트 관련 기술도 많은 발전을 이루었다. 그러나 국내 슛크리트 관련 기술은 국가적인 제도의 미비와 재료 단가의 부담 및 시공현장에서의 의식 부족 등으로 선진국에 비해 아직까지 낮은 수준이다. 국외의 경우는 고강도, 고내구성 및 고인성 등의 슛크리트 기술을 바탕으로 압축강도가 39.2~58.8MPa에 이르는 고강도 슛크리트 시공이 가능하여 터널에서 2차 라이닝의 대체나 장기내구성의 확보가 충분히 가능한 반면, 국내의 경우는 최소한의 품질기준이라고 할 수 있는 KS규격에서도 슛크리트를 비롯한 터널용 재료에 대한 규정이 거의 없는 실정이다. 또한, 슛크리트를 단순히 보조 지보재로서만 인식하고 설계기준강도도 20.6MPa 내외로 낮은 편이며, 장기 강도 저하로 인한 유지보수 비용의 막대한 증가를 초래하고 있는 상황이다(마상준 등, 2005).

국내에서 주로 적용되고 있는 슛크리트 품질규정은 일본 및 미국의 규정을 참고하여 사용되고 있는데, 이러한 품질규정은 유럽의 고강도 슛크리트 기준과 비교하여 아직까지 낮은 수준이다. 특히, 최근 연구가 활발히 진행되고 있는 싱글셀 터널 공법에서는 슛크리트의 고강도 품질이 중요한 요소이며, 세계적으로도 고강도 슛크리트의 적용을 통해서 구조물의 안정성을 추구하고 경제적인 효과를 얻고자 하는 것이 일반적인 추세이다. 또한, 슛크리트 구조물은 시공 후 지하수의 유입에 의한 건습반복작용, 겨울철 일교차에 의한 동결융해, 터널 내의 대기환경에 의한 탄산화 작용 등과 같은 복합적인 열화작용을 받게 된다. 따라서 장기적인 안정성이 고려되어야 할 슛크리트의 내구성 검토를 위해서는 복합적 환경조건을 고려한 열화특성을 파악할 필요가 있다. 콘크리트의 복합열화에 대한 연구는 현재까지 많이 수행

되어 왔으나 슛크리트의 내구성에 관한 연구는 Morgan & Andrew(1988), Steven & William(1992) 등에 의해 단일 열화인자에 의한 연구만 다수 진행되었을 뿐, 동결융해작용과 탄산화와 같은 복합적인 열화에 대한 검토는 아직까지 충분하게 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 국내 슛크리트의 강도 증진과 장기 내구성 향상을 위한 방안을 모색하기 위해 고강도 슛크리트 타설 실험을 실시하였고, 고강도 슛크리트의 개발 및 적용이 활발한 유럽의 품질규정(EFNARC, 2005)에 의거하여 품질평가를 수행하였다. 현장실험은 고품질의 혼화재와 급결제를 적용하여 고강도 슛크리트를 지향하였고, 슛크리트의 강도 증진과 품질 향상에 미치는 혼화재 및 급결제의 영향을 파악하고자 하였다. 또한, 건습반복, 동결융해 및 탄산화의 복합열화요인이 슛크리트의 장기 내구성에 미치는 영향에 대해 정량적으로 파악하고, 향후 슛크리트의 열화 예측에 있어 기초 데이터로 활용하기 위해 복합열화시험을 수행하였다. 시험을 통해 건습반복을 받은 슛크리트 및 탄산화된 슛크리트의 동결융해저항 특성을 검토하였다.

## 2. 슛크리트 품질기준

### 2.1 슛크리트 강도기준

국내에서 일반적으로 사용되고 있는 슛크리트 강도 기준에는 터널표준시방서(건교부, 1999), 터널설계기준(건교부, 1999), 도로설계요령(한국도로공사, 2002) 등이 있다. 표 1은 국내 슛크리트 강도기준을 나타낸 것인데, 국내에서는 재령 1일 압축강도가 9.8MPa 이상, 재령 28일 압축강도가 20.6MPa 이상 되도록 배합할 것을 규정하고 있다.

유럽통합규격(EFNARC, 1996)에서는 슛크리트 압축강도를 표 2와 같이 등급화하여 규정하고 있으며, 현장 코어 채취의 영향을 고려하기 위해 압축강도 감소지수

표 1. 국내 슛크리트 품질규정(한국고속철도공단, 1998 ; 한국도로공사, 2002)

구분	강 섬유		강섬유보강 슛크리트 (MPa)					
	인장강도 (MPa)	형상비 (%)	휨강도		압축강도		코어압축강도	등가휨강도
			3일	28일	1일	28일	28일	28일
한국고속철도공단	68.6	60~80	2.94	4.5	9.8	20.6	20.6 <sup>1)</sup>	3.06
한국도로공사	68.6	40~100	2.94	4.5	9.8	19.6	17 <sup>2)</sup>	3.06

주 1) 코어 3개의 평균강도는 설계강도의 85% 이상이어야 하고, 각각의 코어강도는 75% 이상.

2) Steel Fiber 미사용 슛크리트 구간

표 2. 슛크리트 압축강도 등급 및 현장강도 기준(EFNARC, 1996)

구분		강도 등급 및 강도기준(MPa)						
		C24/30	C28/35	C32/40	C36/45	C40/50	C44/55	C48/56
압축강도등급	원통형 공시체	24	28	32	36	40	44	48
	입방형 공시체	30	35	40	45	50	55	56
현장강도기준	코어강도(28일)	20.5	24	27	30.5	34	37.5	41

표 3. 슛크리트 휨강도 등급(EFNARC, 1996)

구분	강도 등급 및 최소 휨강도 기준(MPa)		
	C24/30	C36/45	C44/55
빔 휨강도	3.4	4.2	4.6

비고 1) 3개의 빔 공시체의 휨강도 시험 평균이 최소 휨강도 이상이어야 한다.  
 2) 모든 빔 공시체의 휨강도는 휨강도 기준의 75%보다 작아서는 안된다.

표 4. 슛크리트 잔류강도등급 기준(EFNARC, 1996)

Deformation class	Beam deflection(mm)	Residual stress(MPa) for strength class			
		1	2	3	4
	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5
Low	1	1.3	2.3	3.3	4.3
Normal	2	1.0	2.0	3.0	4.0
High	4	0.5	1.5	2.5	3.5

표 5. 슛크리트 잔류강도등급 평가방법의 개선(EN 14487-1, 2005)

Deformation range		Strength level(Minimum strength, MPa)			
	Deflection(mm)	S1	S2	S3	S4
D1	0.5~1.0	1	2	3	4
D2	0.5~2.0				
D3	0.5~4.0				

0.85를 곱한 현장강도 기준을 제시하고 있다.

표 3은 슛크리트 휨강도 등급을 나타낸 것인데 휨강도는 최초의 최대 하중에서 등가 최대 탄성인장응력으로 정의된다.

유럽통합규격의 강도기준은 국내 강도기준에 비해 다소 높은 수준이며, 고품질 혼화재와 고성능 급결제를 사용하여 고강도 슛크리트의 사용이 일반적인 추세이다.

## 2.2 슛크리트 휨인성 기준

스�크리트 품질기준에는 콘크리트에 적용되고 있는 일반적인 항목들에 더하여 휨인성 기준을 규정하고 있다. 유럽통합규격에서는 강섬유보강 슛크리트의 휨인성에 대해서 빔 시험에 의한 잔류강도등급과 플레이트 시험에 의한 에너지흡수 등급으로 구분하여 규정하고 있다.

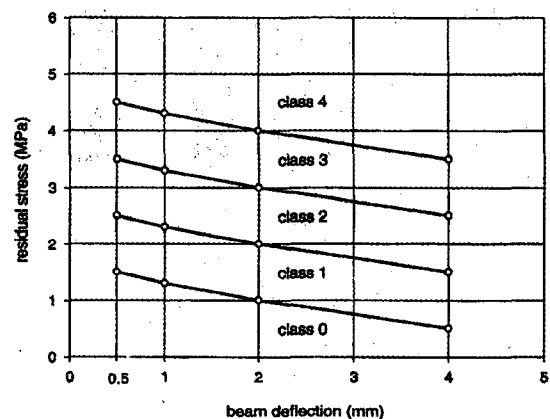


그림 1. 슛크리트 잔류강도등급(EFNARC, 1996)

표 4와 그림 1은 각 잔류강도등급 사이의 경계를 정의하는 4개의 좌표에 대해 나타낸 것인데, 1등급을 제외한 다른 등급은 다음 낮은 등급으로 떨어지는 응력/처짐 곡

선을 나타내서는 안되게 규정하고 있다. 그러나 실제 범 시험 결과 응력/처짐 곡선을 도시해 보면 한 등급에만 위치하지 않고 다른 등급으로 떨어지는 경우가 대부분이며, 이러한 경우 평가자의 주관적인 판단에 의해 잔류 강도등급이 결정되는 단점이 있다.

유럽통합규격 개선을 위한 EN 14487-1 코드에서는 표 5를 이용한 새로운 잔류강도등급을 정의하였다. 범 시험은 동일하게 이루어지며 D2S2 등급은 중앙점 처짐 0.5, 1.0, 2.0mm에서 휨강도가 최소 2.0MPa 이상인 것을 의미한다. 새로운 잔류강도등급은 응력/처짐 곡선이 다른 등급으로 떨어지는 경우에도 각 처짐 구간별로(D1, D2, D3) 강도등급이 결정되므로 세분화되고 구체적인 평가가 가능하며, 평가자의 주관적인 판단이 영향을 미치지 않는 장점이 있다. 그러나 유럽통합규격의 잔류강도등급은 중앙점 변위 0.5mm 이후의 구간에서 획득한 결과만을 사용하기 때문에, 0.5mm 이내의 구간에서 높은 강도를 발현하는 슛크리트의 경우 이를 정확하게 반영하지 못하는 단점을 여전히 가지고 있다.

### 3. 1차 현장시험

#### 3.1 현장시험 개요

1차 현장시험에서는 급결제와 혼화재의 종류와 투입량을 변화시킨 8가지 배합에 대해 시험을 수행하였는데, 표 6은 1차 현장시험에서 고려한 실험요소에 대해 나타낸 것이다.

급결제는 기존 알칼리성 급결제가 가지고 있는 장기 강도 저하 및 인체에 유해한 단점을 보완할 수 있어, 최근 유럽 및 일본 등을 중심으로 사용빈도가 높아지고 있는 알칼리 프리계를 적용하였다. 그리고 비교시험을 위해 실리케이이트계와 알루미늄이이트계 급결제를 실험변

수로 추가하였다. 급결제 혼입량에 대한 기존 연구로는 이상필 등(2004)이 5, 8, 10%를 적용하여 시험을 수행하였고, 류종현 등(2005)은 급결제 종류별로 5, 12%를 혼입하여 연구를 수행한 바가 있다. 현재 국내에서 일반적으로 적용되고 있는 급결제 혼입량은 5~12%이며(한국도로공사, 2001), 현장 상황이나 타설 조건에 따라 차이가 있으므로 기존에 발표된 연구들을 참고하여 실리케이이트계 10%, 알루미늄이이트계 5%, 알칼리 프리계 7%로 결정하였다.

혼화재로는 유럽에서 많이 적용되고 있는 실리카 흙을 사용하였다. 실리카 흙은 초미립분말로서 조기재령에서 포졸란 반응이 발생하고 슛크리트의 유동성을 좋게 하는 특성이 있다. 또한, 점도를 향상시켜 반발물을 작게 하며 배합설계시 급결제 사용량을 줄여서 슛크리트의 품질을 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 특히, 슛크리트 내의 공극 형성에 의한 내동해성 향상과 투수계수 감소로 슛크리트의 장기 내구성을 향상시키는 작용을 한다(이상필 등, 2004). 실리카 흙 치환량에 대한 기존 연구로는 이상필 등(2004)이 4, 7, 10%를 적용하여 시험을 수행하였고, 문한영 등(1993)은 혼입량 10, 20%를 콘크리트에 적용하여 혼입량과 강도증진이 비례한다고 하였다. 또한, 박승범 등(1997)은 10, 15, 20%를 적용한 시험을 수행한 바가 있다.

본 실험에서는 실리카 흙 치환량을 시멘트량의 5, 10%로 변화시켜 시험을 수행하였다. 표 7은 현장시험에 사용된 실리카 흙의 화학조성 및 물리적 특성을 나타낸 것이다.

강섬유보강 슛크리트의 잔류강도등급을 평가하기 위해 배합별로 강섬유를 보강한 경우와 보강하지 않은 경우를 변수로 설정하였다. 강섬유의 국내외 혼입량 기준이 각기 다르기 때문에 기존 연구내용(한국도로공사, 2001)을 참고하고, 건설현장에서 일반적으로 적용되고

표 6. 1차 현장시험 요소

구분	급결제	강섬유	혼화재
인자	실리케이이트계, 알루미늄이이트계, 알칼리 프리계	보강, 무보강	실리카 흙 5, 10% 치환
수준	3	2	2
기호	SL, AL, AF	R, N	S5, S10

표 7. 실리카 흙의 화학조성 및 물리적 특성

구분	SiO <sub>2</sub>	C	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	수분함량	lg.loss	비표면적	비중
함량(%)	92	1.2	2.4	1.3	0.1	1.2	0.4	0.1	1.3	22m <sup>2</sup> /g	2.1

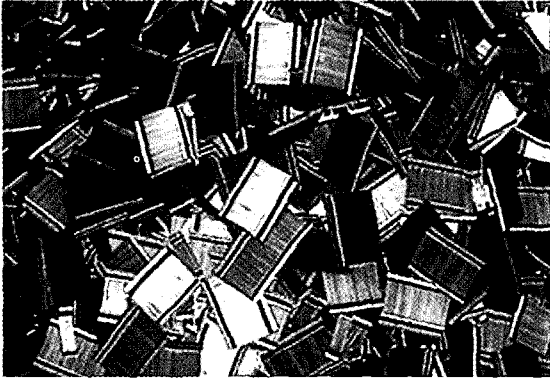
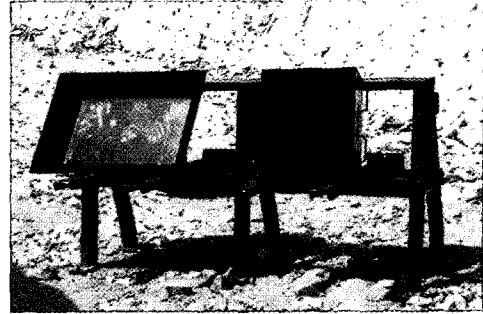


그림 2. 현장실험에 사용된 변들형 강섬유

있는 40kg/m<sup>3</sup>을 혼입하였다. 강섬유 규격은  $\varnothing 0.5 \times 30$  mm이며 그림 2는 현장실험에 사용된 변들형 강섬유의 모습을 나타낸 것이다.

숏크리트 타설실험에서 실험결과에 영향을 미치는 변수에는 혼화재 및 급결제뿐만 아니라 골재의 품질상태, 수분상태, 파쇄상태, 최대치수, 편장성 비율, 강섬유 종류 및 B/P의 여건 등 여러 가지가 있다. 이 모든 변수를 고려하여 현장실험을 수행하기에는 많은 제약이 있다. 본 현장실험에서는 숏크리트의 고강도화에 미치는 혼화재와 급결제의 영향 파악을 주요 목적으로 수행되었기 때문에, 골재 특성에 의한 영향은 실험에서 제외하였고 골재는 현장에서 사용하고 있는 일반적인 골재를 사용하였다. 골재의 최대치수는 13mm, 잔골재율은 65%로 배합을 결정하였다.

표 8은 1차 현장실험의 배합표를 나타낸 것이고, 그림 3은 1차 현장실험 모습을 보여주고 있다.



(a) 코어 및 빔 시편 채취용 몰드



(b) 몰드 스틱 장면

그림 3. 1차 현장실험 모습

### 3.2 현장실험 결과

현장실험 결과는 표 9의 시험항목에 따라 측정되었다. 압축강도는 재령 1, 3, 7, 28일 마다 각 배합별로  $\varnothing 100 \times 200$ mm 크기의 코어를 측정하였다. 휨강도 및 휨인성의 측정은 유럽통합규격에 따라 28일 양생 후 빔 공시체를 75×125×600mm 크기로 절단하여 삼등분점재 하시험을 실시하였다. 빔 공시체의 절단은 타설 후 7일

표 8. 1차 현장실험 배합표

구분 <sup>1)</sup>	W/B (%)	Gmax (mm)	S/a (%)	단위량(kg/m <sup>3</sup> )							
				Water	Cement	잔골재	굵은골재	급결제	강섬유	실리카 흙	
1	SL-N	45	13	65	215	480	1030	555	33.6 (실리케이트계 : 10%)	0	—
2	SL-R									40( $\varnothing 0.5 \times 30$ mm)	—
3	AL-N								24 (알루미늄계 : 5%)	0	—
4	AL-R									40( $\varnothing 0.5 \times 30$ mm)	—
5	AF-S5-N								31.92 (알칼리 프리계 : 7%)	0	24(5%)
6	AF-S5-R									40( $\varnothing 0.5 \times 30$ mm)	24(5%)
7	AF-S10-N									0	48(10%)
8	AF-S10-R									40( $\varnothing 0.5 \times 30$ mm)	48(10%)

주) SL:실리케이트, AL:알루미늄계, AF:알칼리 프리, S5, S10:실리카 흙 치환율 5, 10%, N:강섬유 무보강  
R:강섬유 보강, W/B:물 바인더(시멘트+혼화재)비, Gmax:골재 최대치수, S/a:잔골재율

표 9. 현장실험 시험항목

시험항목	관련 시험방법 규격
압축강도 측정 (1, 3, 7, 28일)	○ KS F 2405 콘크리트 압축강도 시험방법 (시편크기 : Ø100×200mm) ○ KS F 2412 콘크리트 코어의 길이 측정 시험방법
휨강도 및 휨인성 측정 (28일)	○ 유럽통합기준(EFNARC) · 시편크기 : 75×125×600mm · 재하속도 : 중앙점 처짐 0~0.5mm까지는 0.25±0.05mm/min, 중앙점 처짐 0.51~4.0mm에서는 1.0mm/min

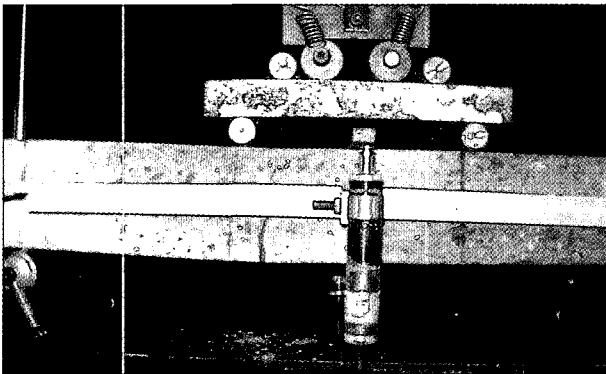


그림 4. 빔 공시체의 휨인성 시험

경과 후에 실시하였는데, 대형 몰드를 운반하고 절단하는 과정에서 외부충격이 가해져 빔 공시체에 균열이 발생하는 경우도 있었다. 그림 4는 빔 공시체의 휨인성 시험 모습을 나타낸 것이다.

### 3.2.1 압축강도

그림 5는 배합비에 따른 재령별 압축강도를 나타낸 것인데, 재령이 증가할수록 알칼리 프리계, 알루미늄이 트계, 실리케이트계 급결제의 순으로 강도가 크게 증가하였다. 특히, 실리카 흡을 치환한 배합의 경우는 재령 28일 압축강도가 45.2~52.3MPa로 나타나 치환하지 않은 배합에 비해 37~79% 정도 강도증진 효과가 나타났다.

그림 6은 배합비에 따른 재령별 압축강도의 증진율을 나타낸 것이다. 알칼리 프리계 급결제를 사용한 경우 초기강도 증진율이 90~97%로 가장 높았고, 다음으로 알루미늄이 트계 급결제를 사용한 경우가 83~85%, 실리케이트계 급결제를 사용한 경우가 36~61%로 나타났다. 이러한 결과는 알칼리 프리계 급결제의 초기강도 증진과 실리카 흡의 치환으로 인한 내구성 증진이 복합적으로 작용하여 나타난 것으로 판단된다.

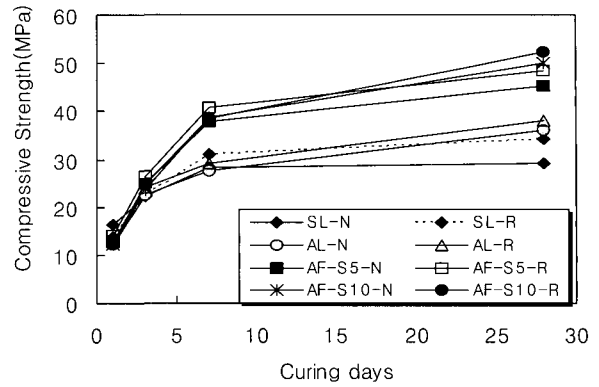


그림 5. 재령별 압축강도

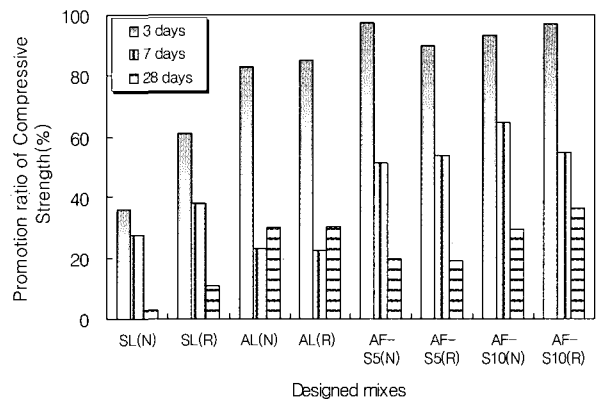


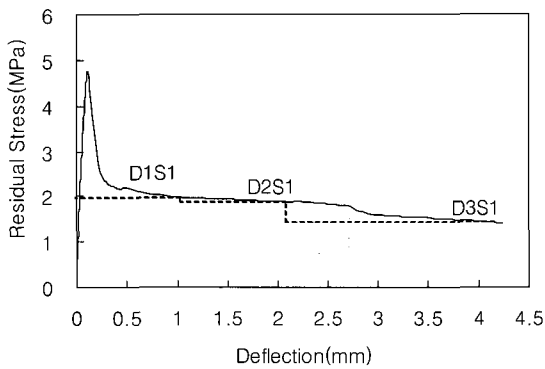
그림 6. 재령별 압축강도 증진율

### 3.2.2 휨강도 및 잔류강도등급

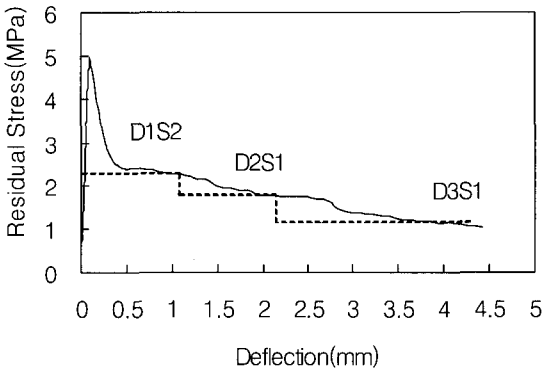
본 연구에서는 쏿크리트의 휨강도 및 휨인성을 유럽통합규격(표 5)에 의해 평가하였다. 표 10과 그림 7은 각 배합의 휨인성 등급을 나타낸 것이다. AF-S10-R 배합의 경우 휨강도는 6.56MPa로 국내 품질기준들 보다 50%이상 크게 나타났지만, 휨인성 등급은 AL-R이 DIS2, D2S1, D3S1으로 가장 양호하게 나타났다. 반면, AF-S10-R은 DIS1 등급만을 보여 다른 배합에 비해 낮게 평가되었다. 휨인성은 균열의 생성 및 발달에 대한 재료의 내성을 의미하는 것으로 강섬유에 의해 결정되는 요소인데, AF-S10-R 배합이 다른 배합에 비해 낮은 휨인성 등급을 보이는 것은 강섬유의 불균질한 분포 또는 빔 시편 가공상의 문제인 것으로 판단된다. 특히, 대형몰드의 적재, 하차, 운반 및 절단시에 가해지는 외부충격으로 인해 쏿크리트 시편에 많은 균열이 발생되었는데, AF-S10-R 배합의 경우 이러한 문제가 두드러지게 나타나 휨인성에 영향을 미친 것으로 판단된다.

표 10. 1차 현장시험의 휨강도와 잔류강도등급

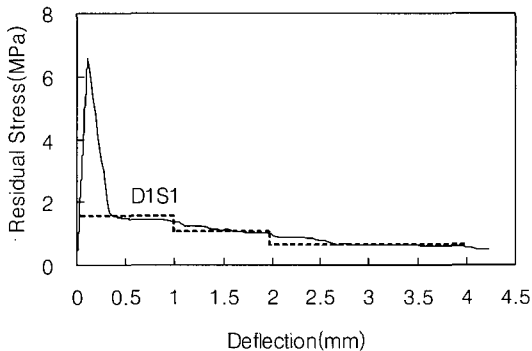
배합	최대 휨강도	휨인성 등급	Level					
			Deflection(mm)	S1	S2	S3	S4	
SL-R	4.81 MPa	D1S1, D2S1, D3S1	D1	0.5~1.0	1.98	-	-	-
			D2	0.5~2.0	1.87	-	-	-
			D3	0.5~4.0	1.38	-	-	-
AL-R	4.99 MPa	D1S2, D2S1, D3S1	D1	0.5~1.0	-	2.25	-	-
			D2	0.5~2.0	1.76	-	-	-
			D3	0.5~4.0	1.12	-	-	-
AF-S10-R	6.56 MPa	D1S1	D1	0.5~1.0	1.37	-	-	-
			D2	0.5~2.0	0.91	-	-	-
			D3	0.5~4.0	0.57	-	-	-



(a) SL-R



(b) AL-R



(c) AF-S10-R

그림 7. 1차 현장시험의 휨인성 시험결과

## 4. 2차 현장시험

### 4.1 현장시험 개요

2차 현장시험에서는 1차 시험결과를 바탕으로 급결제와 혼화재의 종류 및 투입량을 변화시킨 8가지 배합에 대해 시험을 수행하였다. 본 시험에서는 알루미늄이트계와 알칼리 프리계 급결제를 각각 5%, 7%씩 적용하였고, 1차 시험결과에서 강도증진 효과가 미비한 실리카계 급결제는 배합에서 제외하였다. 실리카 흡은 각 급결제에 따라 5, 7.5, 10%씩 치환하였고 골재 최대 치수는 13mm, 잔골재율은 65%로 현장에서 적용되고 있는 일반적인 골재를 사용하였다.

강섬유 규격은  $\varnothing 0.5 \times 30\text{mm}$ 이며 혼입량은  $40\text{kg/m}^3$ 으로 1차 시험과 동일한 변형형을 사용하였다. 표 11은 2차 시험 배합을 나타낸 것이고 그림 8은 시험 모습을 보여주고 있다.

### 4.2 현장시험 결과

#### 4.2.1 압축강도

그림 9와 10은 급결제 별로 실리카 흡 치환율에 따른 슛크리트 재령별 압축강도를 나타낸 것이다. 알루미늄이트계 급결제를 사용한 경우 재령 1, 3일까지는 압축강도 차이가 크지 않지만, 재령 3일 이후부터는 실리카 흡에 의한 강도증진 효과로 인해 치환율에 따라 강도 차이가 크게 나타났다. 재령 28일인 경우 실리카 흡 치환율이 0%일 때 압축강도가 23.1MPa, 5%일 때 28.8MPa, 7.5%일 때 32.6MPa, 10%일 때 37.1MPa로 나타나 치환율에 따라 5.7~14.0MPa까지 강도 차이가 발생하였다.

표 11. 2차 현장실험 배합표

구분 <sup>1)</sup>	W/B (%)	Gmax (mm)	S/a (%)	단위량(kg/m <sup>3</sup> )							
				Water	Cement	잔골재	굵은골재	급결제	보강섬유	실리카 흙	
1	AL-R	45.7	13	67	210	430	1050	515	21.5 (알루미늄네이트계 : 5%)	40(∅0.5×30mm)	0(0%)
2	AL-S5-R										21.5(5%)
3	AL-S7.5-R										32.3(7.5%)
4	AL-S10-R										43.0(10%)
5	AF-R								30.1 (알칼리 프리계 : 7%)	40(∅0.5×30mm)	0(0%)
6	AF-S5-R										21.5(5%)
7	AF-S7.5-R										32.3(7.5%)
8	AF-S10-R										43.0(10%)

주) AL:알루미늄네이트, AF:알칼리 프리, S5, S7.5, S10:실리카 흙 치환율 5, 7.5, 10%, R:강섬유 보강  
W/B:물 바인더(시멘트+혼화제)비, Gmax:골재최대치수, S/a:잔골재율



(a) 코어 및 빔 시편 채취용 몰드



(b) 몰드 스틱 장면

그림 8. 2차 현장실험 모습

알칼리 프리계 급결제를 사용한 경우에도 비슷한 경향을 보이고 있는데, 재령 28일인 경우 실리카 흙 치환율 0%일 때 압축강도가 35.5MPa, 5%일 때 47.9MPa, 7.5%일 때 55.8 MPa, 10%일 때 45.8MPa로 나타나 치환율에 따라 10.3~17.3MPa까지 강도 차이가 발생하였다.

실험결과 실리카 흙의 치환에 의한 슛크리트 강도증진 효과는 충분히 확인할 수 있었지만, 각 배합에서 가장 효과적인 실리카 흙 치환율은 급결제에 따라 다른 결과를 보였다. 알루미늄네이트계 급결제를 사용한 경우에는 치환율 10%일 때 가장 양호한 결과가 나타났고, 알칼리 프리계 급결제의 경우에는 치환율 7.5%에서 가장 좋은 결과를 보였다. 이러한 차이는 슛크리트의 강도

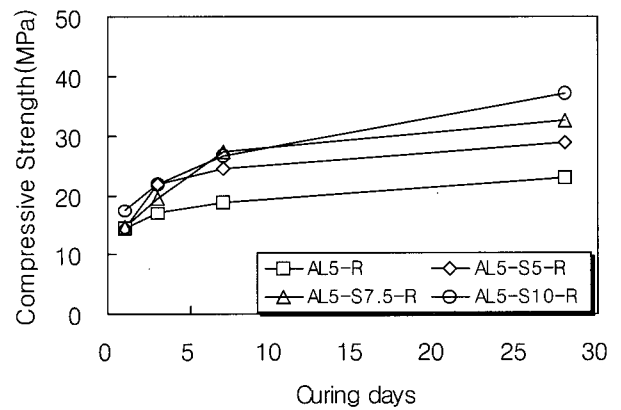


그림 9. 실리카 흙 치환율에 따른 재령별 압축강도(알루미늄네이트계)

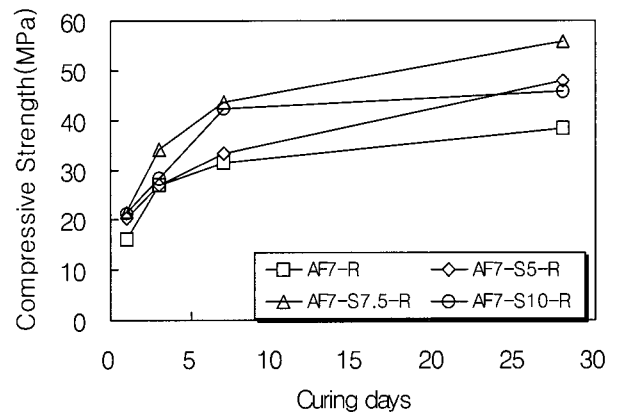


그림 10. 실리카 흙 치환율에 따른 재령별 압축강도(알칼리 프리계)

발현에 영향을 주는 요인이 혼화제 및 급결제뿐만 아니라 골재품질, 타설장비, 현장여건 및 현장관리 등 다른 많은 요소에 의해 영향을 받기 때문이며, 실리카 흙 치환율이 7.5~10% 범위에서는 충분히 슛크리트의 강도증진 효과를 얻을 수 있는 것으로 판단된다.



그림 11은 알루미늄이테계 급결제와 알칼리 프리계 급결제 차이에 따른 재령별 압축강도를 나타낸 것이다. 실리카 흡의 치환율이 동일할 때 알칼리 프리계 급결제를 사용한 숏크리트의 압축강도가 알루미늄이테계를 사용한 경우보다 재령 28일에서 23.2~70.9% 정도 더 크게 나타났다. 알칼리 프리계 급결제의 특성 중 하나는 숏크리트의 장기강도 저하를 막는 것으로 실리카 흡에 의한 강도증진이 효과적으로 발휘될 수 있도록 상호작용할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4.2.2 휨강도 및 잔류강도등급

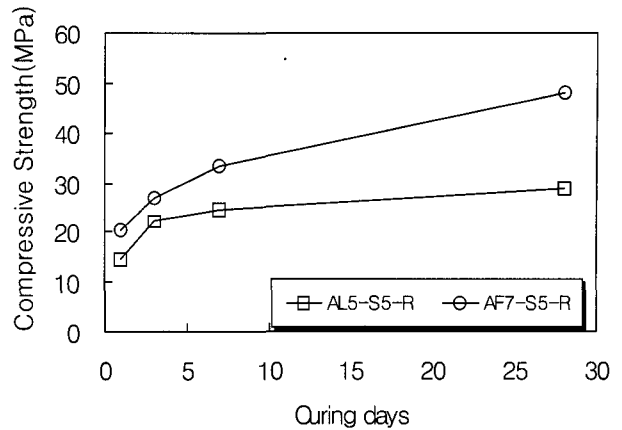
표 12와 그림 12는 2차 현장시험의 8가지 배합에 대한 휨강도와 잔류강도등급을 나타낸 것이다. 2번 배합은 시공 중 강섬유의 막힘 현상과 타설 후 공시체 제작상의 문제로 시험이 제대로 수행되지 못하여 잔류강도등급을 평가하지 못하였다.

휨강도는 3, 4, 6, 8번 배합이 5MPa 이상으로 양호한 결과를 나타냈는데, 각 배합은 7.5%, 10%, 5%, 10%의 실리카 흡을 혼입한 배합이었다. 잔류강도등급은 1번 배합이 D1S2, D2S2, D3S2로 가장 고른 등급분포를 보였고, 3번 배합이 D1S3, D2S2, D3S1으로 가장 크게 나타났다. 강섬유에 의해 좌우되는 잔류강도등급이 배합마다 각각 차이를 나타내는 것은 강섬유 분포의 차이와 빔 시험시의 오차라고 판단된다.

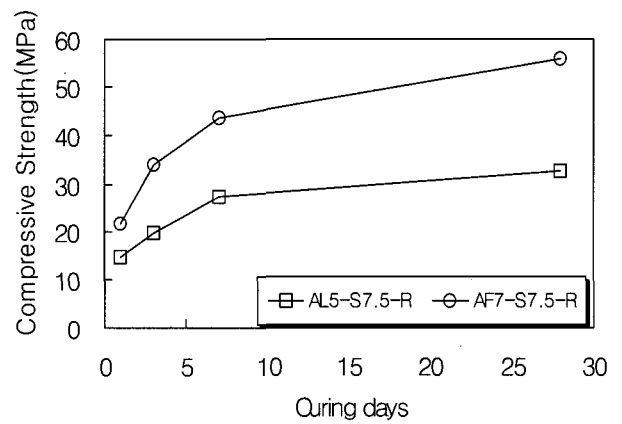
### 5. 고강도 숏크리트 품질 평가

#### 5.1 압축강도 평가

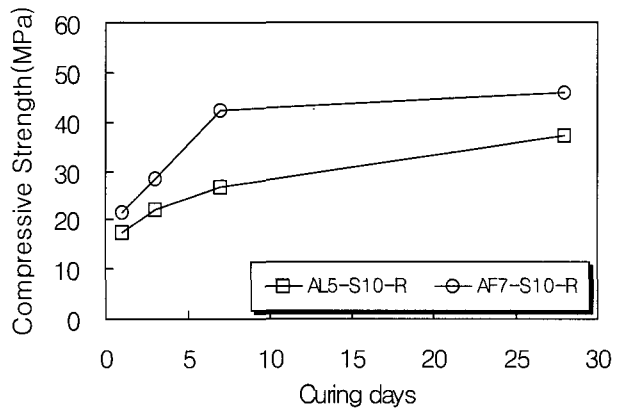
그림 13은 1, 2차 현장시험을 통해 얻은 결과를 압축강도가 작은 순서부터 정렬해서 도시하고 각 공시체의 실리카 흡 혼입량을 나타낸 것이다. 그리고 한국도로공사(20MPa), JCI(30MPa), 오스트리아 J1 기준(38MPa) 및 EFNARC(표 2)의 압축강도 기준을 선으로 도시하여 비교하였다. 실험결과 모두는 국내 압축강도 기준은 만족하였지만 몇 가지 경우에서 국외 고강도 기준에는 만족하지 못하였다. 특히, 알루미늄이테계와 실리케이테계 급결제를 사용한 경우에는 싱글 셀 공법과 같은 무라 이닝 터널공법이 실용화되고 있는 유럽의 강도기준에 모두가 만족하지 못하였다. 국내에서도 급결제의 개선 없이는 고강도 숏크리트의 개발 및 적용이 어려울 것으로 판단된다.



(a) 실리카 흡 5%



(b) 실리카 흡 7.5%



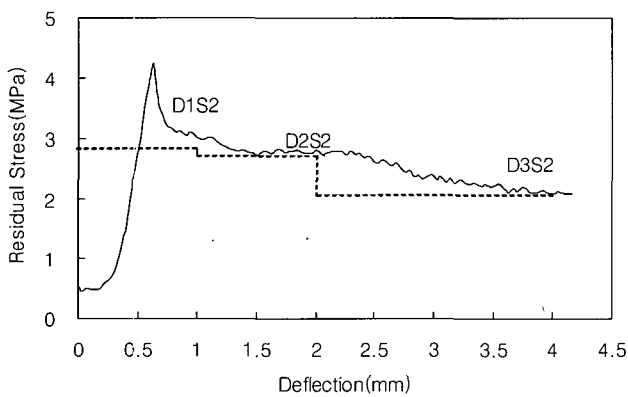
(c) 실리카 흡 10%

그림 11. 급결제 종류에 따른 압축강도

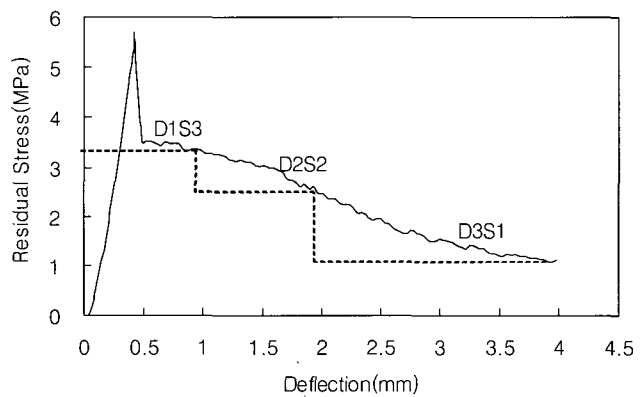
혼화재의 영향을 살펴보면 유럽의 고강도 기준을 상회하는 결과들은 모두가 5~10%의 실리카 흡을 혼입한 배합으로 나타났다. 특히, 7.5% 이상 혼입한 경우는 유럽통합규격에서 가장 높은 등급인 C48/60을 충분히 만족시키는 좋은 결과를 보여, 국내 고강도 숏크리트 개발을 위해서는 고품질 혼화재의 사용이 필수적임을 알 수 있다.

표 12. 2차 현장실험의 휨강도와 잔류강도등급

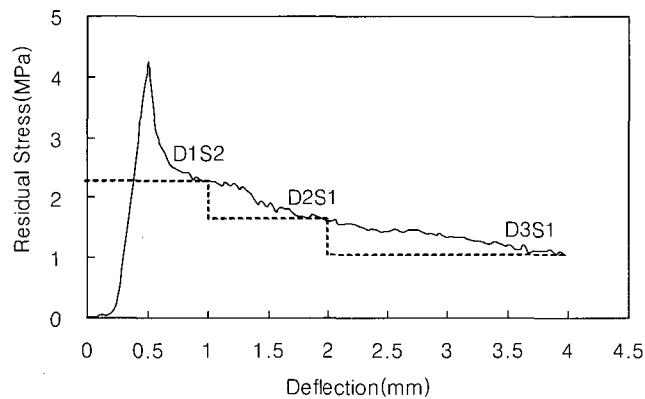
번호	배합	최대휨강도	잔류강도등급	Level					
				Deflection(mm)	S1	S2	S3	S4	
1	AL-R	4.24 MPa	D1S2, D2S2, D3S2	D1	0.5~1.0	-	2.97	-	-
				D2	0.5~2.0	-	2.73	-	-
				D3	0.5~4.0	-	2.08	-	-
2	AL-S5-R	0.89 MPa	없음	D1	0.5~1.0	0.69	-	-	-
				D2	0.5~2.0	0.27	-	-	-
				D3	0.5~4.0	0.12	-	-	-
3	AL-S7.5-R	5.67 MPa	D1S3, D2S2, D3S1	D1	0.5~1.0	-	-	3.29	-
				D2	0.5~2.0	-	2.41	-	-
				D3	0.5~4.0	1.06	-	-	-
4	AL-S10-R	5.56 MPa	D1S2, D2S1	D1	0.5~1.0	-	2.97	-	-
				D2	0.5~2.0	1.67	-	-	-
				D3	0.5~4.0	0.63	-	-	-
5	AF-R	4.23 MPa	D1S2, D2S1, D3S1	D1	0.5~1.0	-	2.28	-	-
				D2	0.5~2.0	1.61	-	-	-
				D3	0.5~4.0	1.04	-	-	-
6	AF-S5-R	5.01 MPa	D1S2, D2S1	D1	0.5~1.0	-	2.33	-	-
				D2	0.5~2.0	1.63	-	-	-
				D3	0.5~4.0	0.70	-	-	-
7	AF-S7.5-R	3.06 MPa	D1S2, D2S1	D1	0.5~1.0	-	2.05	-	-
				D2	0.5~2.0	1.02	-	-	-
				D3	0.5~4.0	0.14	-	-	-
8	AF-S10-R	5.12 MPa	D1S2	D1	0.5~1.0	-	2.19	-	-
				D2	0.5~2.0	0.85	-	-	-
				D3	0.5~4.0	0.24	-	-	-



(a) AL-R



(b) AL-S7.5-R



(c) AF-R

그림 12. 2차 현장실험의 휨인성 시험결과

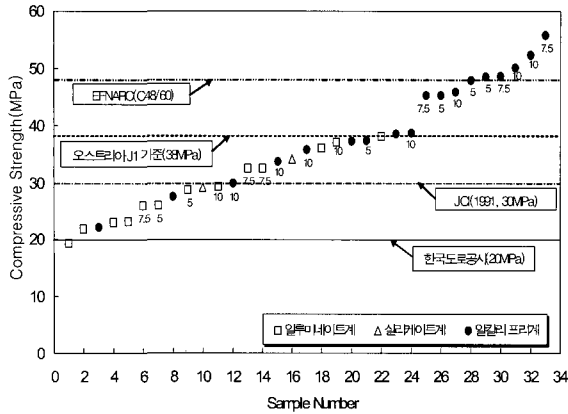


그림 13. 급결제 종류와 실리카 흡 혼입량에 따른 압축강도 분포

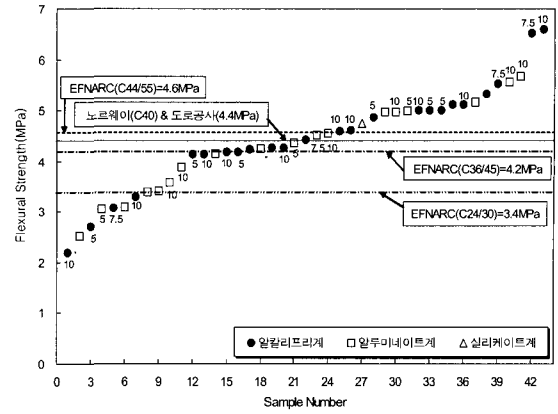


그림 14. 실리카 흡 혼입량에 따른 공시체의 휨강도 분포

표 13. 복합열화시험 개요

실험 순서	실험 내용
실험 A	반복적인 건습작용을 받은 숯크리트의 동결융해저항성 파악
실험 B	15주 동안 표면부위가 탄산화된 숯크리트의 동결융해저항성 파악

실험 A	표준양생	건습반복 (5, 25weeks)	동결융해반복 (0, 30, 90, 150, 210, 300cycle)
실험 B	표준양생	촉진 탄산화 (15weeks)	동결융해반복 (0, 30, 90, 150, 210, 300cycle)

그림 15. 각 실험별 순서도

## 5.2 휨강도 평가

그림 14는 1, 2차 현장실험을 통해 얻은 결과를 휨강도가 작은 순서부터 정렬해서 도시하고 각 공시체의 실리카 흡 혼입량을 나타낸 것이다. 그리고 한국도로공사(4.4MPa), 노르웨이 C40(4.4MPa) 및 EFNARC(표 3)의 휨강도 기준을 선으로 도시하여 비교하였다.

유럽통합규격의 C44/55 등급과 도로공사기준을 상회하는 결과들은 5~10%의 실리카 흡을 혼입한 공시체로 나타났지만, 몇몇 경우에는 국내 기준을 만족하지 못하는 결과를 보였다. 그러나 혼입량 0%일 때와 비교했을 때 최소 17%에서 최고 61%까지의 휨강도 증진을 확인할 수 있었고, 고품질 혼화재의 적용을 통해 숯크리트 휨강도를 효과적으로 증진시킬 수 있는 것으로 나타났다.

급결제 종류에 따른 강도증진 효과의 경향은 명확하게는 나타났지 않았지만, 알칼리 프리계 급결제를 사용한 대부분의 경우에서 다른 급결제에 비해 휨강도가 크게 나타났다.

용하지만, 본 연구에서는 상호 영향을 파악하기 위해 열화작용의 부여 방법을 단순화 하는 것이 필요할 것으로 판단되었다.

따라서 표 13과 그림 15에서 보는 바와 같이 건습반복, 동결융해 또는 탄산화중 각각의 단일 열화 인자를 진행 한 후, 다른 열화요인을 작용시켰다.

먼저 28일 동안 수중양생하고 시험시까지 기건양생된 공시체의 압축강도를 재령 3, 7, 28, 90, 150일에서 측정하였고 재령 28일까지 표준양생된 시편에 대하여 각각 동결융해저항과 촉진탄산화 시험을 실시하였다.

실험 A에서는 재령 28일된 공시체에 대하여 수중침지 1주와 기건양생 1주를 1cycle로 하여 각각 5주, 25주 동안 반복적으로 건습반복을 시켰다. 이어서 동결융해 시험을 0, 30, 90, 150, 210, 300cycle까지 시행하였다. 그리고 실험 B에서는 표준양생된 시편을 15주 동안 촉진탄산화 시험(CO<sub>2</sub> 농도 5%, 온도20±2℃, 상대습도 60±3%)을 시행하고 탄산화된 숯크리트에 대하여 300cycle까지 동결융해시험을 실시하였다.

## 6. 복합열화시험을 통한 장기내구성 평가

### 6.1 복합열화시험 개요

실제 환경에서 동결융해반복과 탄산화는 동시에 작

### 6.2 공시체 배합

복합열화시험에 사용된 공시체의 배합비는 표 14와 같다. 공시체 종류는 일반 콘크리트와 숯크리트의 내구 특성을 비교하기 위해 강섬유로 보강하지 않는 일반콘

표 14. 복합열화시험 공시체의 배합비

구분	W/B (%)	G <sub>max</sub> (mm)	S/a (%)	단위량 (kg/m <sup>3</sup> )							
				물	시멘트	잔골재	굵은골재	강섬유	혼화재		유동화제
									SF <sup>1)</sup>	FA <sup>2)</sup>	
Plain	47.8	13	67%	220	460	1030	505	—	—	—	2.02
N.A					460			40.0	—	—	
S.F					414			40.0	46	—	
F.A					391			40.0	—	69	

주 1) Silica Fume 치환량 : 10%/C(wt%)

2) Fly Ash 치환량 : 15%/C(wt%)

표 15. 실험항목 및 평가방법

실험항목		실험방법
압축강도		재령 3, 7, 28, 90, 150일에서 KS F 2405에 따라 실시
등결음해저항성	동탄성계수	KS F 2456에 따라 촉진열화를 실시하고 3시간을 1cycle로 하여 30cycle 또는 60cycle씩 300cycle 까지 KS F 2437에 따라 측정
	질량감소율	JIS A 1127에 따라 30cycle 또는 60cycle씩 300cycle 까지 측정
촉진 탄산화		JIS A 1153에 따라 촉진열화를 실시하고 KS F 2596에 따라 5주씩 20주까지 측정

크리트(Plain type), 강섬유를 보강하고 혼화재를 첨가하지 않는 슛크리트(N.A type), 실리카 흙을 첨가한 슛크리트(S.F type) 및 플라이 애쉬를 첨가한 슛크리트(F.A type)로 결정하였다.

모든 실험에 있어서 복합열화작용을 받는 공시체의 크기는 단면 100×100mm, 길이 400mm의 각주형으로 제작하였고, 압축강도 공시체는 직경 100mm, 길이 200mm의 원주형 공시체를 이용하였다.

그림 16은 복합열화시험 중인 공시체의 모습을 나타낸 것이다.

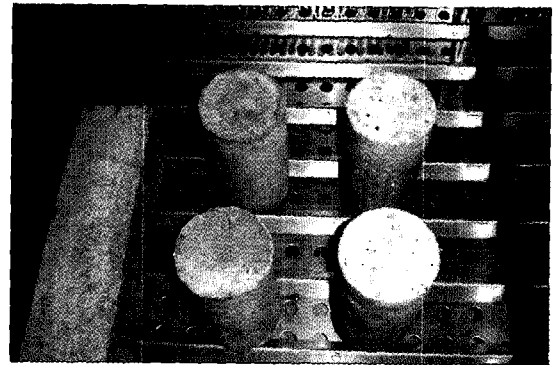


그림 16 복합열화시험 중인 공시체

### 6.3 실험항목

실험항목은 표 15에서 보는바와 같이 표준시험방법에 의거하여 압축강도, 동탄성계수, 질량변화, 탄산화 깊이 등을 측정하였다.

### 6.4 실험결과

#### 6.4.1 혼화재료에 따른 압축강도

혼화재 치환에 따른 공시체 종류별 압축강도는 그림 17과 같다. 재령 7일에서는 24~28MPa, 재령 90일에서는 39~46MPa, 재령 150일에서는 41~49MPa을 나타내 혼화재 치환에 따른 강도증진효과는 재령 28일에서부터 서서히 증가하는 경향을 나타내고 있었다. 특히, 일반 콘크리트에 비해 실리카 흙을 첨가한 슛크리트의 강도가 2~5MPa 정도 더 크게 나타났다.

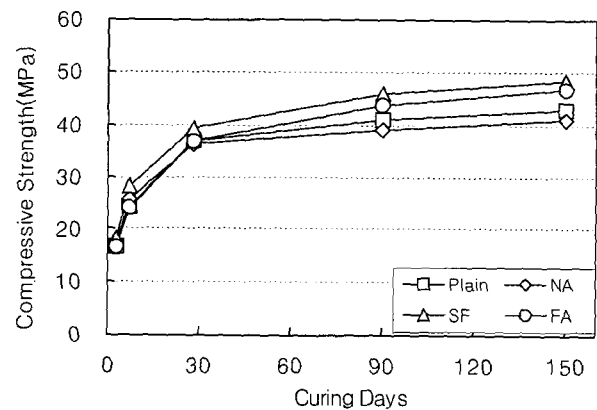
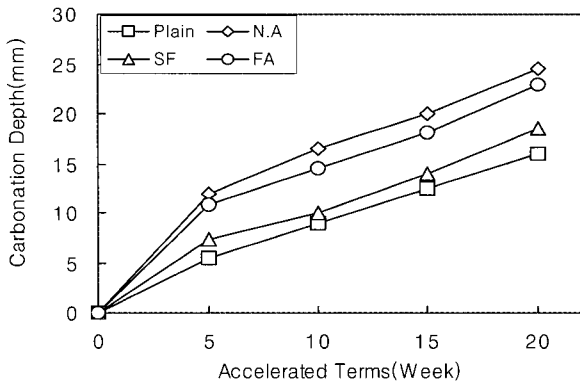


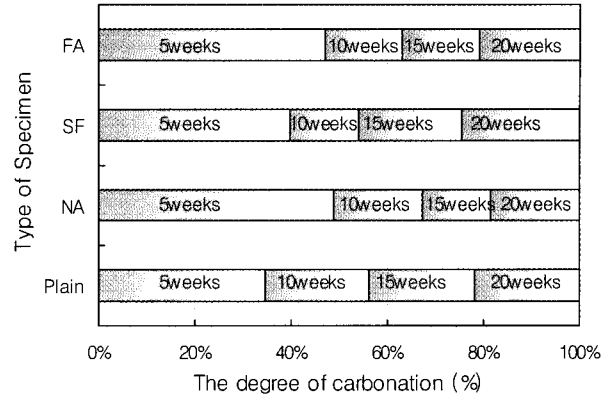
그림 17. 재령에 따른 공시체의 압축강도

#### 6.4.2 촉진탄산화

수중양생 28일 후 CO<sub>2</sub> 농도 5%, 온도 20±2°C, 상대습도 60±3%에서 촉진열화 시킨 슛크리트의 촉진탄산화 측정결과와 탄산화율의 진행 정도를 그림 18에 나타내었다.

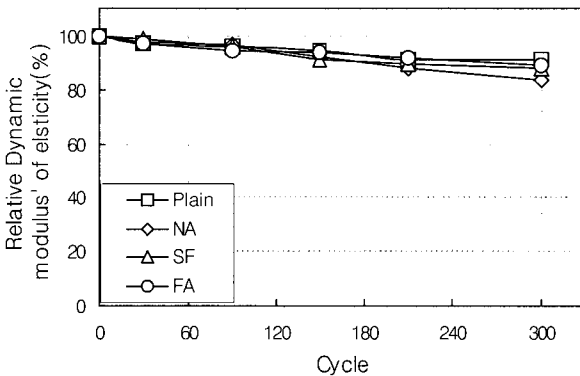


(a) 촉진탄산화 깊이

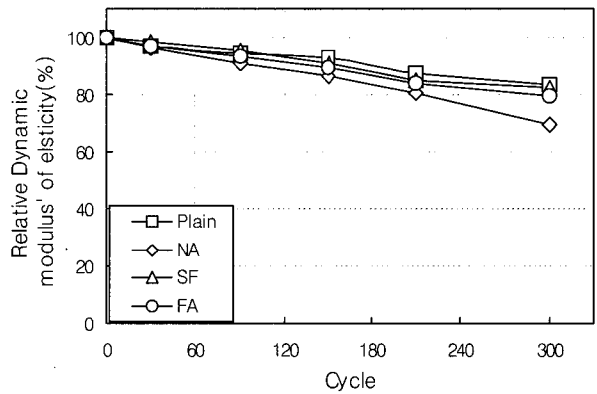


(b) 탄산화 진행정도

그림 18. 촉진탄산화에 의한 탄산화 깊이 및 진행정도



(a) 건습반복 5주



(b) 건습반복 25주

그림 19. 건습반복 후 동탄성계수의 변화

촉진탄산화 노출기간 15주에서의 탄산화 깊이는 Plain type이 12.5mm로 가장 적게 나타났으며 N.A type이 20mm로 가장 크게 나타났다. 반면, S.F type은 다른 숏크리트에 비해 모든 기간에서 탄산화 깊이가 가장 적게 나타나, 실리카 흙의 혼입이 숏크리트 열화방지도도 효과적임을 알 수 있었다.

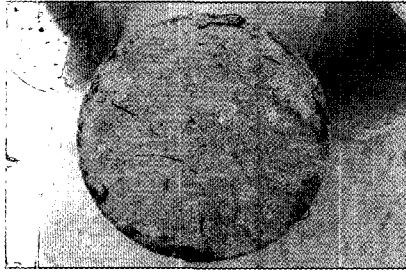
탄산화 진행정도에서는 N.A, S.F, F.A type의 5주 이내의 초기 탄산화 진행율이 Plain type에 비하여 큰 것으로 나타났다. 강섬유를 혼입한 숏크리트는 강섬유와 콘크리트의 부착면에 생성되는, 외부와 내부를 연결하는 미세 균열과 공극들로 인해 일반 콘크리트에 비해 열화 가능성이 높은 것으로 판단된다. 탄산화 진행정도에서도 실리카 흙을 혼입한 숏크리트가 다른 조건에 비해 열화에 대한 저항성이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

## 6.5 복합열화에 따른 장기내구성

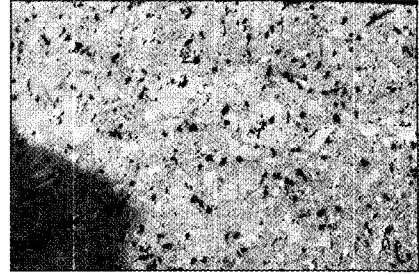
### 6.5.1 건습반복이 동결융해에 미치는 영향

반복적인 건습작용을 받은 숏크리트의 동결융해 반복에 따른 동탄성계수 특성은 그림 19와 같다. 건습반복 5주에 의한 영향은 극히 적은 것으로 나타났고 건습반복 25주에 의한 영향은 Plain, S.F, F.A, N.A type이 각각 6.2%, 7.6%, 9.1%, 15.8% 감소하는 것으로 나타났다. 이와 같은 현상은 반복적인 건습작용이 숏크리트에 포함된 강섬유의 부식 및 팽창작용을 유도함으로써 강섬유와 숏크리트의 부착면에 생성되는 미세균열이나 공극이 증가하였기 때문인 것으로 판단된다.

그림 20은 건습반복 25주의 공시체 모습을 나타낸 것이다. 공시체 단면을 확대한 그림에서 건습반복으로 인해 강섬유가 심하게 부식된 것을 확인할 수 있었다.

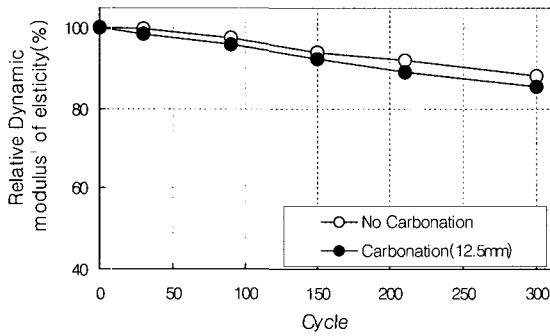


(a) 건습반복 후 압축형 공시체의 모습

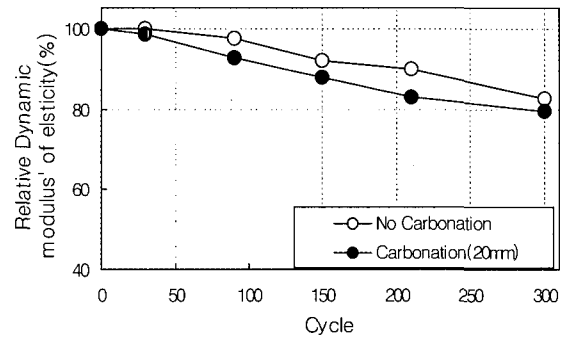


(a) 공시체 단면의 확대 모습

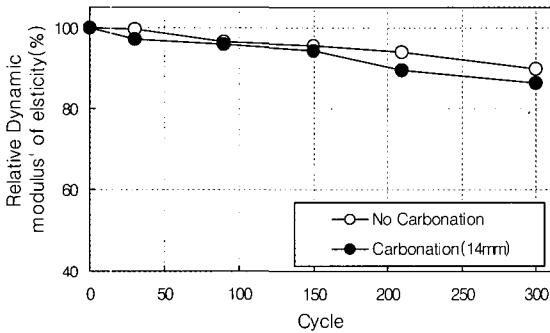
그림 20. 건습반복 후 공시체의 모습



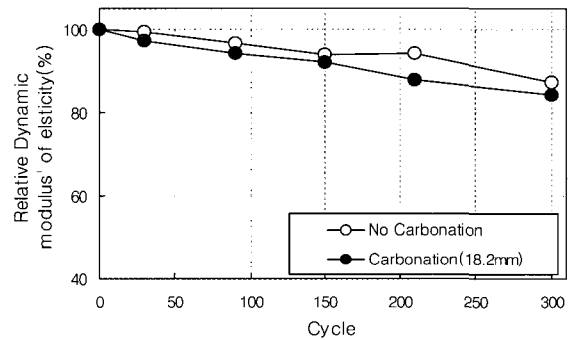
(a) Plain type



(b) N.A type



(c) S.F Type



(d) F.A type

그림 21. 탄산화된 숯크리트의 상대동탄성계수

### 6.5.2 탄산화가 동결융해에 미치는 영향

탄산화된 숯크리트의 동결융해시험시의 상대동탄성 계수의 변화는 그림 21과 같다. 탄산화가 진행되지 않은 숯크리트에 비해 탄산화가 진행된 숯크리트의 동결융해반복 300 cycle 종료 시의 상대동탄성계수는 Plain, N.A, S.F, F.A type이 각각 3.6, 3.3, 2.8, 2.9% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 실리카 흡을 혼입한 S.F type이 가장 적게 감소했지만, 공시체 종류에 관계없이 탄산화가 진행된 경우와 진행되지 않은 경우의 동결융해 반복에 의한 상대동탄성계수 변화의 차이는 극히 적게 나타났다.

## 7. 결론

본 연구에서는 고품질 혼화재와 고성능 급결제를 적용한 현장실험을 실시하였고, 유럽통합규격에 의해 품질 평가를 실시하였다. 또한, 복합열화시험을 통해 고강도 숯크리트의 장기내구성을 평가하였다. 종합적인 연구요약 및 결론은 다음과 같다.

- (1) 현장실험 결과 실리카 흡을 혼입한 숯크리트는 압축강도가 45.2~55.8MPa, 휨강도가 5.01~6.56MPa로 혼입하지 않은 배합에 비해 각각 37~79%, 17~

61%의 강도증진 효과가 나타났고, 실리카 흙 치환율은 7.5~10%일 때 강도증진 효과가 가장 우수한 것으로 나타났다.

- (2) 알칼리 프리계 급결제를 사용한 배합의 초기강도 증진율이 90~97%로 가장 높았고 알루미늄이트계의 경우는 83~85%, 실리게이트계의 경우는 36~61%로 나타나, 초기강도 증진효과에 알칼리 프리계 급결제가 효과적임을 알 수 있었다.
- (3) 실리카 흙을 혼입한 슛크리트의 탄산화 깊이 및 진행도는 혼입하지 않은 슛크리트에 비해 모든 기간에서 가장 적게 나타나, 실리카 흙의 혼입이 슛크리트 열화방지에도 효과적임을 알 수 있었다.
- (4) 강섬유보강 슛크리트가 진습반복 후 동결융해를 받게 되면 반복적인 진습작용이 강섬유의 부식 및 팽창을 유발하게 된다. 또한, 강섬유와 슛크리트 부착면에 미세균열이나 열린 공극을 증가시키게 되는데, 고품질 혼화재의 사용으로 열화 방지 및 감소가 가능할 것으로 판단된다.
- (5) 현장실험과 복합열화시험 결과를 통해 고강도 슛크리트의 개발 및 국내 적용을 위해서는 알칼리프리계 급결제와 실리카 흙과 같은 고품질 혼화재의 사용이 필요할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 (주)대우건설, (주)리폼시스템, (주)태조엔지니어링, (주)바우컨설팅트 및 Elkem Material ASA에서 지원한 “스�크리트 장기 내구성 평가 및 제기준 제정 연구” 사업으로 수행된 것으로 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. 건설교통부 (1999), *터널설계기준*.
2. 건설교통부 (1999), *터널표준시방서*.
3. 김재동, 김덕영 (2000), “강섬유보강 슛크리트의 휨인성 평가방법 연구”, *터널과 지하공간*, 제10권, 제3호, pp.196-210.
4. 류중현, 안태송, 이상돈, 한승환 (2005), “강섬유보강 슛크리트의 품질기준 검토”, *한국터널공학회 학술발표회 논문집*, pp.142-174.
5. 마상준, 최재석, 김동민, 김재신 (2005), “고성능 슛크리트 적용 가능성 파악을 위한 슛크리트 품질특성 검토”, *한국터널공학회 학술발표회 논문집*, pp.131-133.
6. 문한영, 문대중 (1993), “실리카 흙 혼합 콘크리트의 고강도화에 대한 기초적 연구”, *대한토목학회 학술발표회 논문집*, pp.323-326.
7. 박승범, 오광진, 최인혁, 권혁준 (1997), “실리카 흙을 혼입한 강섬유보강 콘크리트의 내해수성 시험”, *대한토목학회 학술발표회 논문집*, pp.359-362.
8. 이상필, 이상돈, 김동현, 한승환, 김진철 (2004), “배합개선을 통한 영구지보 개념의 고성능 슛크리트 개발”, *대한토목학회 학술발표회 논문집*, pp.201-216.
9. 한국고속철도공단 (1998), *강섬유보강스�크리트 고속철도 노반공사 공시시방서(안)*.
10. 한국도로공사 도로연구소 (2001), *강섬유보강 슛크리트의 성능 향상 및 품질기준 정립(II)*.
11. 한국도로공사 (2002), *도로설계요령*.
12. Austrian Concrete Society (1990), *Guideline on shotcrete*.
13. EFNARC (1996), *European Specification for Sprayed Concrete*.
14. EFNARC (2005), *Draft EN 14488: Testing Sprayed shotcrete pART 7: Fiber content of reinforced concrete*.
15. KS F 2596 (2003), *Method for measuring carbonation depth of concrete*.
16. Morgan, D. R., and Andrew, J. (1988), “Freeze-thaw durability of wet-mix and dry-mix shotcretes with silica fume and steel fibers”, *Cement Concrete and Aggregates*, Vol.10, No.2, pp.96-102.
17. Norwegian Tunneling Society & Norwegian Rock Mechanics Group (1999), *Sprayed Concrete for Rock Support-Technical Specification, Guideline and Test methods*.
18. Steven, H., and William, J. (1992), “Durability of dry-mix shotcrete containing rapid-set accelerators” *ACI Materials Journal*, Vol.89, No.3, pp.259-262.
19. JCI (1991), *キャッピングを必要としない圧縮強度試験用供試体の作り方及び試験方法*, JCI-SE5.

(접수일자 2006. 4. 19, 심사완료일 2006. 9. 14)