

# 실리카 흡을 혼입한 슛크리트의 강도증진과 장기내구특성에 관한 실험적 연구

## Experimental Study on the Strength Improvement and the Long Term Durability of Shotcrete mixed Micro-Silica Fume

마상준\*<sup>1</sup>, 김동민<sup>2</sup>, 장필성<sup>3</sup>, 최재석<sup>4</sup>

Ma, Sang-Joon · Kim, Dong-Min · Jang, Phil-Sung · Choi, Jae-Seok

### Abstract

In this study, field test was performed to investigate the strength-improvement effect of shotcrete mixed Micro-silica fume and shotcrete quality was estimated by EFNARC standard. Deterioration test combined the Freezing-thawing and Carbonation was also performed in order to investigate a long-term durability of high-strength shotcrete. As a result of test, the compressive strength of shotcrete using Micro-silica fume was 45.2~55.8MPa and flexible strength was 5.01~6.66MPa, so a promotion ratio of strength was 37~79%, 17~61% respectively. And the strength-improvement effect of strength by silica fume addition ratio of 7.5~10% for cement mass was more superior to the others. Due to relative dynamic modulus, mass decrease rate and carbonation progress of shotcrete mixed Micro-silica fume, it was especially realized that Micro-silica fume reduced deterioration caused by steel fiber and improved a long-term durability of shotcrete.

**Keywords:** Micro-silica fume, high-strength shotcrete, EFNARC, combined deterioration, long-term durability

### 요 지

본 연구에서는 실리카 흡을 혼합한 슛크리트의 강도증진 효과를 파악하기 위해 현장실험을 실시하였고, 유럽통합규격(EFNARC)에 의거하여 품질평가를 수행하였다. 그리고 탄산화와 동결융해의 복합인자에 의한 열화시험을 수행하여 고강도 슛크리트의 장기내구성을 평가하였다. 실험결과 실리카 흡을 혼입한 슛크리트의 압축강도는 45.2~55.8MPa, 휨강도는 5.01~6.66MPa로 혼입하지 않은 경우에 비해 각각 37~79%, 17~61%의 강도증진 효과가 나타났고, 실리카 흡 치환율이 7.5~10%일 때 강도증진 효과가 가장 우수한 것으로 나타났다. 또한, 실리카 흡을 치환한 슛크리트의 상대동탄성계수, 질량감소율 및 탄산화 진행율 등을 측정된 결과, 실리카 흡이 강섬유 혼입에 의한 슛크리트의 열화현상을 최소한으로 감소시켜, 슛크리트의 장기내구성을 확보하는데 효과가 있음을 알 수 있었다.

**주요어:** 실리카 흡, 고강도 슛크리트, 유럽통합규격, 복합열화, 장기내구성

\*1 정회원 한국건설기술연구원 지반연구부 수석연구원 (E-mail : sjma@kict.re.kr)

2 한국건설기술연구원 지반연구부 연구원

3 한국건설기술연구원 지반연구부 연구원

4 한국건설자재시험연구원 신뢰성평가센터 선임연구원

# 1. 서론

1970년대 중반이후 지하철 건설로 인한 지하공간의 활용과 도로 및 철도 등의 건설로 인해 대단면 터널공사가 활발하게 이루어졌고, 이와 연계되어 슛크리트 관련 기술도 상당한 발전을 이루었다. 국외의 경우에는 고품질 혼화재와 고성능 급결제를 적용한 고강도 및 고내구성의 슛크리트 기술을 바탕으로 39.2~58.8MPa에 이르는 고강도 슛크리트 시공이 가능하며, 영구 슛크리트 라이닝 개념을 적용한 싱글셀 터널이나 PCL 터널의 건설이 꾸준히 증가하고 있다. 반면, 국내의 경우는 슛크리트 품질과 재료에 관련된 규정들이 미비하고, 슛크리트를 보조 지보재로서만 인식하여 설계강도도 20.6MPa 내외로 낮은 편이다. 또한, 국가적인 제도의 뒷받침 미비, 품질 기준의 영향력 부족, 재료 단가에 대한 시공사의 부담 및 시공현장에서의 의식 부족 등으로 아직까지 고품질 혼화재나 고성능 급결제에 대한 사용이 매우 부족한 실정이다(마상준, 2005).

스�크리트는 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. 국외에서는 콘크리트의 복합열화에 대한 연구가 현재까지 많이 수행되어 왔으나 Durand & Beonit(1993), Steven H.(1992), Morgan & Dudley R.(1988) 등에 의해 단일 열화인자에 의한 연구만 다수 진행되었을 뿐, 동결융해작용과 탄산화와 같은 복합적인 열화에 대한 검토는 아직까지 충

분하게 이루어지지 않고 있다.

따라서 슛크리트의 장기내구성 및 안정성 평가를 위해서는 복합적인 환경에서의 열화인자에 대한 슛크리트 저항 특성을 파악하는 것이 무엇보다도 중요하다.

본 연구에서는 국내 슛크리트의 강도증진 방안을 마련하기 위해 실리카 흙 혼화재와 알칼리 프리계 급결제를 적용한 슛크리트의 현장타설 실험을 수행하였는데, 슛크리트의 강도와 품질 향상에 미치는 혼화재와 급결제의 영향을 파악하고자 하였다. 그리고 현장실험 결과는 유럽품질규격(EFNARC, 1996)에 의거하여 품질평가를 수행하였다. 이와 함께 건습반복, 동결융해 및 탄산화의 복합열화요인이 슛크리트 장기내구성에 미치는 영향에 대해 정량적으로 파악하고, 향후 슛크리트의 열화 예측에 있어 기초 데이터로 활용하기 위해 복합열화시험을 수행하였다.

## 2. 슛크리트 품질기준

### 2.1 강도기준

표 1은 국내에서 적용되고 있는 슛크리트 강도기준을 나타낸 것이다. 국내에서는 일반적으로 재령 28일 압축강도가 20.6MPa 이상 되도록 배합할 것을 규정하고 있다(건교부, 1999). 표 2와 표 3은 유럽통합규격의 슛크리트 강도기준을 나타낸 것인데 등급화하여 규정하고 있으며, 실리카 흙과 알칼리 프리계 급결제의 사용이 일반적인 유럽통합규격의 강도기준은 국내 강도기준에 비해 다소 높은 수준을 보여주고 있다.

표 1. 국내 슛크리트 품질규정(한국고속철도공단, 1998 ; 한국도로공사, 2001)

구 분	강섬유		강섬유보강 슛크리트 (MPa)					
	인장강도 (MPa)	형상비 (%)	휨강도		압축강도		코어압축강도 (28일)	등가휨강도 (28일)
			3일	28일	1일	28일		
한국고속철도공단	68.6	60~80	2.94	4.5	9.8	20.6	20.61)	3.06
한국도로공사	68.6	40~100	2.94	4.5	9.8	19.6	172)	3.06

주 1) 코아 3개의 평균강도는 설계강도의 85% 이상이어야 하고, 각각의 코아강도는 75% 이상  
 2) Steel Fiber 미사용 슛크리트 구간

표 2. 숏크리트 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. 숏크리트 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 휨강도와 같거나 이상이어야 한다.  
 2) 1개의 빔 공시체의 휨강도도 최소 휨강도의 75%보다 작아서는 안된다.

표 4. 숏크리트 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

## 2.2 휨인성 기준

숏크리트 품질기준에는 콘크리트에 적용되고 있는 일반적인 항목들에 대하여 휨인성 기준을 규정하고 있는데, 인성이란 균열의 생성 및 발달에 대한 재료의 내성을 의미하는 것으로 그 값이 클수록 균열에 대한 저항이 큰 것을 의미한다.

표 4는 유럽통합규격에서 휨인성을 평가하는 방법의 하나인 잔류강도등급을 나타낸 것인데, 각 등급 사이의 경계를 정의하는 4개의 좌표에 대해 보여주고 있다.

표 5는 유럽통합규격의 개선을 위한 EN 14488 코드의 새로운 잔류강도등급을 나타낸 것이다. 빔 시험은 동일하게 이루어지며 D2S2 등급의 경우 중앙점 처짐 0.5, 1.0, 2.0mm에서 휨강도가 최소 2.0MPa 이상인 것을 의미한다.

## 3. 1차 현장실험

### 3.1 현장실험 개요

급결제는 기존 알칼리성 급결제가 가지고 있는 장기강도 저하나 인체에 유해한 단점을 보완할 수 있어 최근 유럽 및 일본 등을 중심으로 사용빈도가 높아지고 있는 알칼리 프리계를 적용하였고, 비교 평가를 위해 실리카이트계와 알루미늄이트계 급결제도 실험요소로 추가하였다.

실리카 흙은 초미립분말로서 조기재령에서 포졸란 반응이 발생하고 숏크리트의 유동성을 좋게 하는 특성이 있다. 또한, 공극 형성에 의한 내동해성 향상과 투수계수 감소로 숏크리트의 장기내구성을 향상시키는 작용을 한다(이상필 등, 2004). 본 실험에서는 실리카 흙 치환량을 시멘트량의 5, 10%로 결정하였다.

표 5. 슛크리트 잔류강도등급의 정의(EN 14488, 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				

표 6. 1차 현장실험 배합표

구분1)	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	1030	555	33.6 (실리케이트계 : 10%)	0	—
2	SL-R								40(∅0.5×30mm)	—
3	AL-N							24 (알루미늄이트계 : 5%)	0	—
4	AL-R								40(∅0.5×30mm)	—
5	AF-S5-N							31.92 (알칼리프리계 : 7%)	0	24(5%)
6	AF-S5-R								40(∅0.5×30mm)	24(5%)
7	AF-S10-N								0	48(10%)
8	AF-S10-R								40(∅0.5×30mm)	48(10%)

주) SL:실리케이트, AL:알루미늄이트, AF:알칼리프리, S5, S10:실리카 흙 치환율 5, 10%, N:강섬유 무보강 R:강섬유 보강, W/B:물 바인더(시멘트+혼화제)비, Gmax:골재최대치수, S/a:잔골재율

스�크리트의 잔류강도등급을 평가하기 위해 배합별로 강섬유를 보강한 경우와 보강하지 않은 경우를 고려하였다. 강섬유의 국내의 혼입량 기준이 각기 다르기 때문에 기존 연구내용(한국도로공사, 2001)을 참고하여, 건설 현장에서 일반적으로 적용되고 있는 40kg/m<sup>3</sup>를 혼입하였고 강섬유 규격은 ∅0.5×30mm이다.

스�크리트 타설실험에서 결과에 영향을 미치는 변수로는 혼화제 및 급결제뿐만 아니라 골재의 수분상태, 파쇄상태, 골재최대치수, 타설장비, 강섬유 종류 및 B/P의 여건 등 많은 변수가 있다. 이 모든 변수를 고려하여 현장실험을 수행하기에는 현실적으로는 많은 제약이 있다. 본 실험은 슛크리트 강도증진에 미치는 혼화제와 급결제의 영향 파악을 목적으로 하였기 때문에, 골재 특성에 의한 영향은 실험에서 제외하였고 골재는 현장에서 사용하고 있는 일반적인 골재를 사용하였다. 골재최대치수는

13mm, 잔골재율은 65%로 결정하였다. 표 6은 1차 현장 실험 배합을 나타낸 것이고, 그림 1은 1차 현장실험 모습을 보여주고 있다.

### 3.2 현장실험 결과

압축강도는 재령 1, 3, 7, 28일 마다 각 배합별로 ∅100×200mm의 코어를 측정하였다. 휨강도 및 휨인성의 측정은 유럽통합규격에 따라 28일 양생 후 빔 공시체를 75×125×600mm 크기로 절단하여 삼분점재하시험을 실시하였다. 빔 공시체의 절단은 타설 후 7일 경과 후에 실시하였는데, 대형 몰드를 운반하고 절단하는 과정에서 외부충격이 가해져 빔 공시체에 균열이 발생하는 경우도 있었다. 그림 2는 빔 공시체의 휨인성 시험 모습을 나타낸 것이다.



그림 1. 1차 현장실험 모습

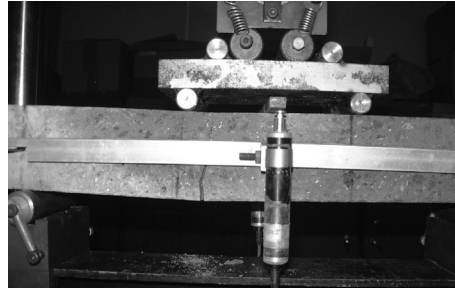


그림 2. 빔 공시체의 휨인성 시험

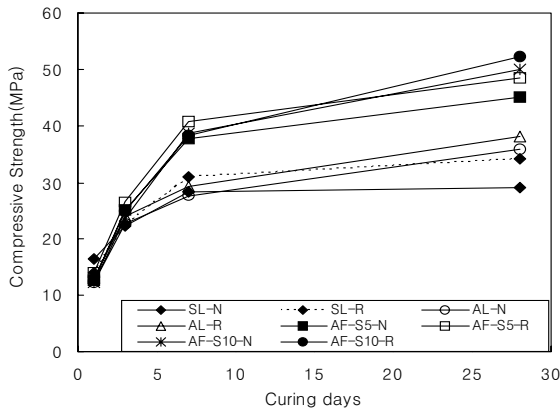


그림 3. 재령별 압축강도

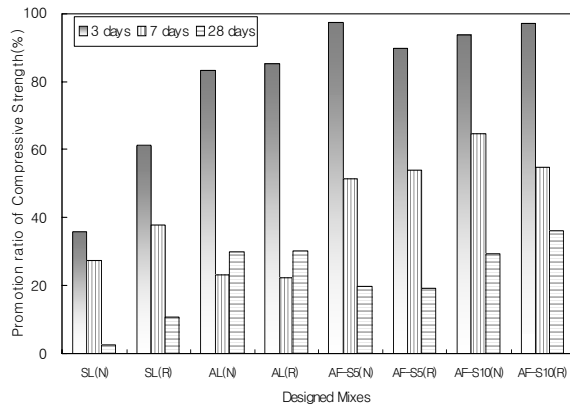


그림 4. 재령별 압축강도 증진율

### 3.2.1 압축강도

그림 3은 배합비에 따른 재령별 압축강도를 나타낸 것인데, 재령이 증가할수록 알칼리 프리계, 알루미늄이트계, 실리케이트계 급결제의 순으로 강도가 증가하였다. 특히, 실리카 흡을 치환한 배합의 경우는 재령 28일 압축강도가 45.2~52.3 MPa로 나타나 치환하지 않은 배합에 비해 37~79% 정도 강도증진 효과가 나타났다.

그림 4는 배합비에 따른 재령별 압축강도의 증진율을 나타낸 것이다. 알칼리 프리계 급결제를 사용한 경우 초기강도 증진율이 90~97%로 가장 높았고, 다음으로 알루미늄이트계 급결제를 사용한 경우가 83~85%, 실리케이트계 급결제를 사용한 경우가 36~61%로 나타났다. 이러한 결과는 알칼리 프리계 급결제의 초기강도 증

진과 실리카 흡의 치환으로 인한 내구성 증진이 복합적으로 작용하여 나타난 것으로 판단된다.

### 3.2.2 휨강도 및 잔류강도등급

표 7과 그림 5는 각 배합에 따른 잔류강도 등급을 나타낸 것이다. AF-S10-R 배합의 휨강도는 6.56MPa로 국내 품질기준들 보다 50%이상 크게 나타났지만, 잔류강도 등급은 AL-R 배합이 D1S2, D2S1, D3S1으로 가장 양호하게 나타났다. 반면 AF-S10-R은 D1S1 등급만을 보여 다른 배합에 비해 낮게 평가되었다. 동일한 강섬유를 사용한 AF-S10-R 배합이 다른 배합에 비해 낮은 잔류강도 등급을 보이는 것은 강섬유의 불균질한 분포 또는 빔 시편 가공상의 문제인 것으로 판단된다.

표 7. 1차 현장실험 배합의 잔류강도등급

배합	최대 힘강도	잔류강도등급	Level		S1	S2	S3	S4
			Deflection					
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	-	-	-

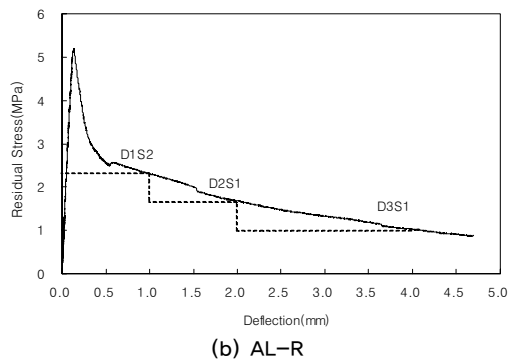
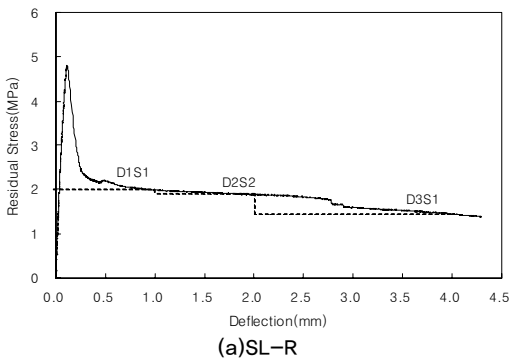


그림 5. 1차 현장실험의 휨인성 시험결과

## 4. 2차 현장실험

### 4.1 현장실험 개요

2차 현장실험에서는 1차 실험결과를 바탕으로 급결제와 혼화재의 종류 및 투입량을 변화시킨 8가지 배합에

대해 실험을 수행하였다. 급결제는 알루미늄네이트계와 알칼리 프리계를 각각 5%, 7%씩 투입하였고, 실리카 흡배합에 따라 5, 7.5, 10%씩 치환하였다. 그리고 골재 및 강섬유는 1차 현장실험에서와 동일한 것을 사용하였다. 표 8은 2차 현장실험 배합을 나타낸 것이고 그림 6은 현장실험 모습을 보여주고 있다.

### 4.2 현장실험 결과

#### 4.2.1 압축강도

그림 7과 8은 급결제 별로 실리카 흡 치환율에 따른 슛크리트 재령별 압축강도를 나타낸 것이다.

알루미늄네이트계 급결제를 사용한 경우 재령 28일에서 실리카 흡 치환율이 0%일 때 23.1MPa, 5%일 때 28.8MPa, 7.5%일 때 32.6MPa, 10%일 때 37.1MPa로 나타나 치환율에 따라 4.5~14.0MPa 까지 강도 차이가 발생하였다. 알칼리 프리계 급결제를 사용한 경우 재령 28일에서 실리카 흡 치환율이 0%일 때 38.5MPa, 5%일 때 47.9MPa, 7.5%일 때 55.8 MPa, 10%일 때 45.8MPa로 나타나 치환율에 따라 7.9~27.8MPa 까지 강도 차이가 발생하였다. 실험 결과 실리카 흡의 치환에 의한 슛크리트 강도증진 효과는 충분히 확인할 수 있었는데, 가장 효과적인 실리카 흡 치환율은 급결제에 따라 다르게 나타났다. 알루미늄네이트계 급결제의 경우에는 치환율 10%일 때 가장 양호한 결과가 나타났고, 알칼리 프리계 급결제의 경우에는 치환율 7.5%에서 가장 좋은 결과를 보였다. 이러한 차이는 슛크리트의 강도증진이

표 8. 2차 현장실험 배합표

구분1)	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 (알루미늄계 : 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 (알칼리프리계 : 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:알루미늄계, AF:알칼리프리, 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



그림 6. 2차 현장실험 모습

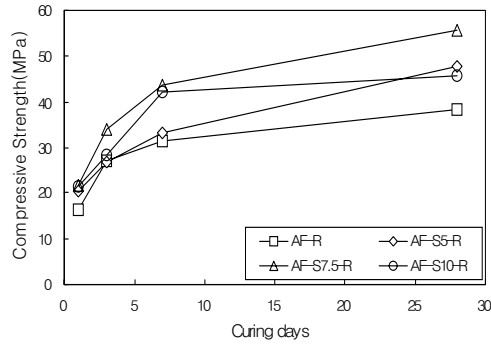


그림 8. 실리카 흙 치환율에 따른 재령별 압축강도(알칼리 프리계)

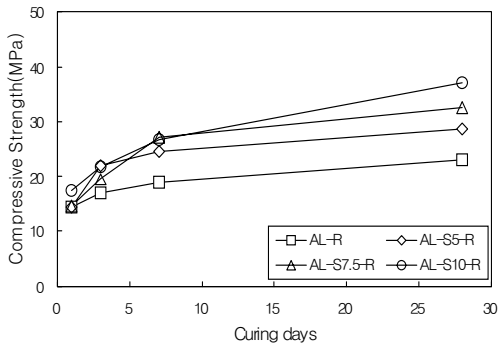
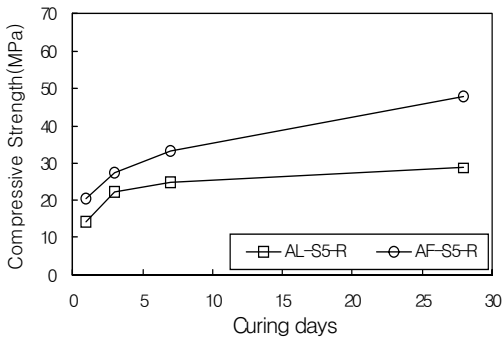


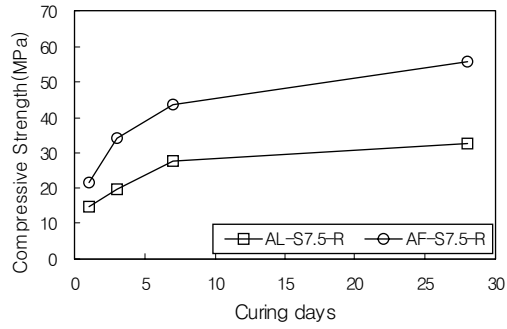
그림 7. 실리카 흙 치환율에 따른 재령별 압축강도 (알루미늄계)

혼화제 사용과 함께 골재 최대치수, 골재 품질, 슬럼프 차이, 타설장비 등 많은 요소에 의해 영향을 받기 때문이며, 실리카 흙 치환율이 7.5~10%일 때 충분히 강도증진 효과를 얻을 수 있는 것으로 판단된다.

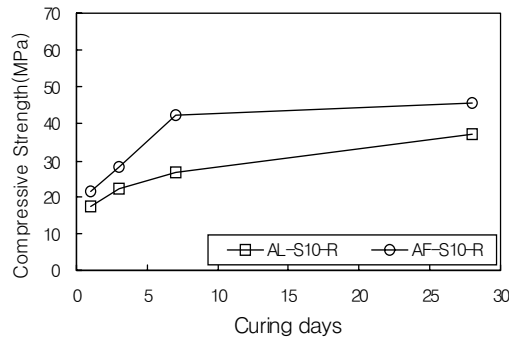
그림 9는 급결제 종류별 숏크리트 압축강도를 나타낸 것이다. 동일 실리카 흙 혼입량일 때 알칼리 프리계 급결제를 사용한 경우가 알루미늄계를 사용한 경우보다 재령 28일에서 23.2~70.9% 정도 압축강도가 더 크게 나타났다.



(a) 실리카 함 5%



(b) 실리카 함 7.5%



(c) 실리카 함 10%

그림 9. 급결제 종류에 따른 압축강도

#### 4.2.2 휨강도 및 잔류강도등급

표 9와 그림 10은 2차 현장실험 배합의 휨강도와 잔류강도등급을 나타낸 것이다. AL-S5-R 배합은 시공 중 강섬유의 막힘 현상과 타설 후 공시체 제작상의 문제로 시험이 제대로 수행되지 못하여 잔류강도등급을 평가하지 못하였다.

휨강도는 2, 3, 5, 7번 배합이 5MPa 이상으로 양호한 결과를 나타냈는데, 이들 배합은 7.5%, 10%, 5%, 10%의 실리카 함을 치환한 배합이었다. 잔류강도등급은 1번 배합이 D1S2, D2S2, D3S2로 가장 고른 분포를 보였고, 2번 배합이 D1S3, D2S2, D3S1으로 가장 크게 나타났다.

## 5. 고강도 슛크리트 품질평가

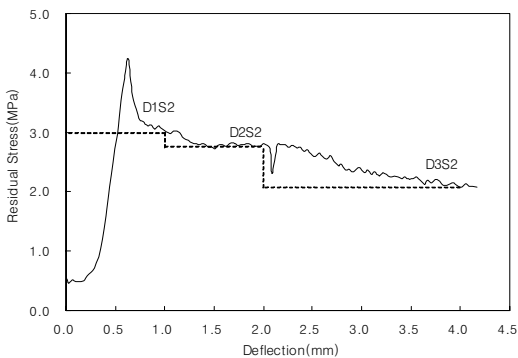
### 5.1 압축강도

그림 11은 1, 2차 현장실험을 통해 얻은 결과를 압축강도가 작은 순서부터 정렬해서 도시하고 각 공시체의 실리카 함 혼입량을 나타낸 것이다. 그리고 한국도로공사(20MPa), JCI(30MPa), 오스트리아 J1기준(38MPa) 및 유럽통합규격(표 2)의 압축강도 기준을 선으로 도시하여 비교하였다. 실험결과 모두는 국내 압축강도 기준은 만족하였지만 몇 가지 경우에서 국외의 고강도 기준에는 만족하지 못하는 경우가 있었다. 특히, 알루미늄이트계와 실리케이트계 급결제를 사용한 경우에는 싱글셀 터널공법이 실용화되고 있는 유럽의 고강도기준에 모두가 만족하지 못하여, 급결제의 개선 없이는 국내에서도

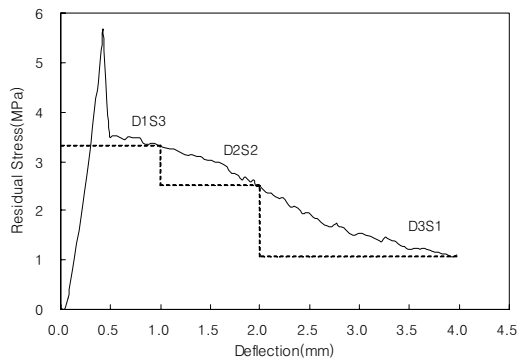


표 9. 2차 현장실험 배합의 휨강도와 잔류강도등급

번호	배합	최대 휨강도	잔류강도등급	Level		S1	S2	S3	S4
				Deflection					
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-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	-	-	-
3	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	-	-	-
4	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	-	-	-
5	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	-	-	-
6	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	-	-	-
7	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

그림 10. 2차 현장실험의 휨인성 시험 결과

고강도 숯크리트의 개발 및 적용이 어려운 것으로 나타났다. 그리고 유럽의 고강도 기준을 상회하는 결과들은 모두 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, 국내에서도 고품질 혼화재의 적용을 통해 고강도

숯크리트 개발이 충분히 가능할 것으로 판단된다.

## 5.2 휨강도

그림 12는 1, 2차 현장실험을 통해 얻은 결과를 휨강도가 작은 순서부터 정렬해서 도시하고 각 공시체의 실리

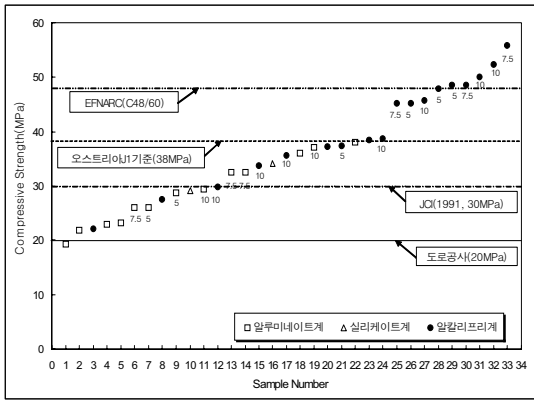


그림 11. 급결제와 실리카 흡 혼입량에 따른 압축강도 분포

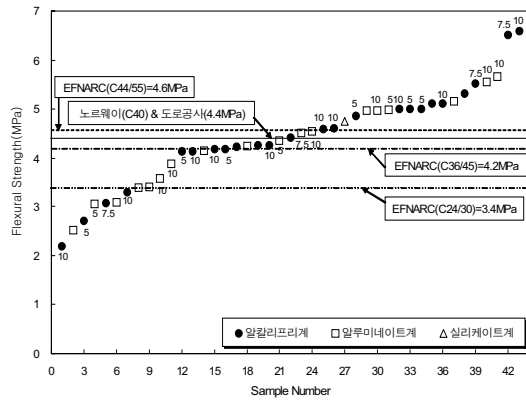


그림 12. 급결제와 실리카 흡 혼입량에 따른 휨강도 분포

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

그림 13. 복합열화시험의 실험별 순서도

표 10. 복합열화시험 개요

구분	실험 내용
실험 A	반복적인 건습작용을 받은 슛크리트의 동결융해 저항성 파악
실험 B	15주 동안 표면부위가 탄산화된 슛크리트의 동결융해저항 파악
실험 C	동결융해작용을 받은 슛크리트의 탄산화 저항성 파악

카 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 17%~61%까지의 휨강도 증진을 확인할 수 있었고, 고품질 혼화재의 적용을 통해 슛크리트 휨강도를 증진시킬 수 있는 것으로 나타났다. 급결제 종류에 따른 강도증진 효과의 경향은 명확하게 나타나지는 않았지만, 알칼리 프리계 급결제를 사용한 대부분의 경우에서 다른 급결제에 비해 휨강도가 크게 나타났다.

## 6. 복합열화시험을 통한 장기

### 내구성 평가

#### 6.1 복합열화시험 개요

실제 환경에서 동결융해와 탄산화는 동시에 작용하지만, 본 연구에서는 상호 영향을 파악하기 위해 열화작용의 부여 방법을 단순화 하는 것이 필요할 것으로 판단되었다. 따라서 표 10과 그림 13에서 보는 바와 같이 건습반복, 촉진탄산화 및 동결융해 중 각각의 단일 열화인자를 진행시킨 후 다른 열화요인을 적용시켰다.

실험 A에서는 재령 28일된 공시체에 대해 수중양생 1주와 기건양생 1주를 1cycle로 하여 각각 5주, 25주 동안 반복적으로 건습반복을 시켰다. 이어서 동결융해를

0, 30, 90, 150, 210, 300cycle 까지 실시하였다.

실험 B에서는 표준양생된 시편을 15주 동안 촉진탄산화 시험(CO<sub>2</sub> 농도 5±0.2%, 온도 20±2°C, 상대습도 60±3%)을 시행하고 탄산화된 숯크리트에 대하여 실험 A와 같은 간격으로 300cycle 까지 동결융해를 실시하였다.

실험 C에서는 표준양생된 공시체를 300cycle 까지 동결융해한 후 15주 동안 촉진탄산화를 실시하였다.

## 6.2 숯크리트 배합

복합열화시험에 사용된 공시체의 배합비는 표 11과 같다. 공시체는 배합에 따라 4 종류로 구분하였는데 강섬유로 보강하지 않는 일반콘크리트(Plain Type), 강섬유를 보강하고 혼화재를 첨가하지 않는 숯크리트(N.A Type), 실리카 흡을 첨가한 숯크리트(S.F Type) 및 플라이 애쉬를 첨가한 숯크리트(F.A Type)로 결정하였다.

모든 실험에 있어서 복합열화작용을 받는 공시체의 크기는 100×100×400mm의 각주형으로 제작하였고, 압축강도 공시체는 Ø100×200mm의 원주형 공시체를 이

용하였다.

표 12는 복합열화시험 결과 분석을 위한 실험항목과 평가방법을 나타낸 것이다. 복합열화를 실시한 공시체의 압축강도, 동탄성계수, 질량감소를 및 촉진탄산화 등을 표준시험방법에 의거하여 측정하였다.

숯크리트의 동결융해 작용에 따른 성능저하 및 내구성을 측정하기위해 KS F 2456(급속동결융해에 대한 콘크리트의 저항 시험법) 및 ASTM C 666(Resistance of concrete to rapid freezing and thawing)에 준하여 시험을 실시하였다. 시험체를 2주간 수중양생 시킨 후 동결융해시험 장치를 사용하여, 기중동결 및 수중융해 조건으로 시험체에 간극수의 빙점 이하의 온도와 빙점 이상의 온도를 주기적으로 가하였다.

동결융해시험 이후의 내구성 평가는 일정한 주기로 동결융해작용을 받은 시험체의 상대동탄성계수를 측정하였고, 수분의 팽창균열 및 파괴에 의한 질량감소를 측정하여 평가하였다.

숯크리트 내구성 평가방법 중의 하나인 촉진탄산화시험은 숯크리트 공시체를 KS F 2584(콘크리트의 촉진탄산화 시험방법)에 따라 촉진열화 시키고, KS F 2596

표 11. 복합열화시험 공시체의 배합비

구분	W/B (%)	Gmax (mm)	S/a (%)	단위량 (kg/m <sup>3</sup> )							
				물	시멘트	잔골재	굵은골재	강섬유	혼화재		유동화제
									SF1)	FA2)	
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 12. 시험항목 및 평가방법

실험항목		실험방법
압축강도		재령 3, 7, 28, 90, 150일에서 KS F 2405에 따라 실시
동결융해저항성	동탄성계수	KS F 2456에 따라 촉진열화를 실시하고 3시간을 1 cycle로 하여 30 cycle 또는 60 cycle씩 300 cycle 까지 KS F 2437에 따라 측정
	질량감소율	30 cycle 또는 60 cycle씩 300 cycle 까지 측정
촉진탄산화		KS F 2584에 따라 촉진열화를 실시하고 KS F 2596에 따라 5주씩 20주까지 측정

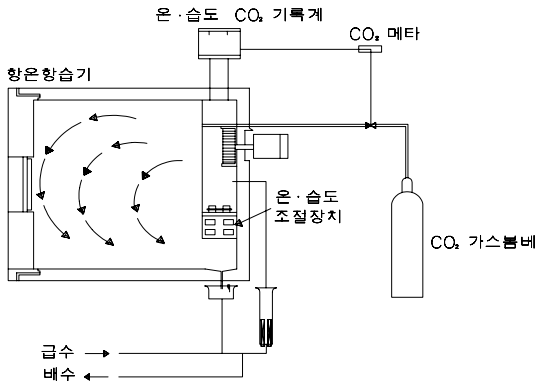


그림 14 촉진탄산화시험 장치 개요도

(콘크리트 탄산화깊이 측정방법)에 준하여 5주 간격으로 20주까지 측정하였다. 시험체는 재령 1일에 탈형하여 수 중상태에서 4주간 양생을 실시하였다. 표준양생 후 온도 20±2℃, 상대습도 60±3%, CO<sub>2</sub> 농도 5±0.2%의 조건으로 촉진탄산화시험을 실시하였는데, 시험체 주변의 환경조건을 균등하게 하기 위하여 시험체 간격을 2cm 이상으로 하고 시험체의 측면이 수직이 되도록 배치하였다.

촉진탄산화의 측정은 소정의 재령이 경과한 시점에서 시험체를 장변방향과 직각으로 절단한 후, 1%의 페놀프탈레인 용액을 분사하고 공시체 표면에서 착색부분까지의 거리를 1측면당 3개소씩 계측하여 평균한 값을 탄산화 깊이로 판정하였다. 그림 14는 촉진탄산화시험 장치의 개요도를 나타낸 것이다.

### 6.3 단일열화에 따른 장기내구특성

#### 6.3.1 혼화재료에 따른 압축강도

혼화재 치환에 따른 공시체 종류별 압축강도는 그림 15와 같다. 재령 7일에서는 24~28MPa, 재령 90일에서는 39~46MPa, 재령 150일에서는 41~49MPa로 나타나 혼화재 치환에 따른 강도증진 효과는 재령 28일에서부터 서서히 증가하는 경향을 나타내고 있었다. 특히, 일반 콘크리트에 비해 실리카 흡을 첨가한 숏크리트의 강도가 2~5MPa 정도 더 크게 나타났다.

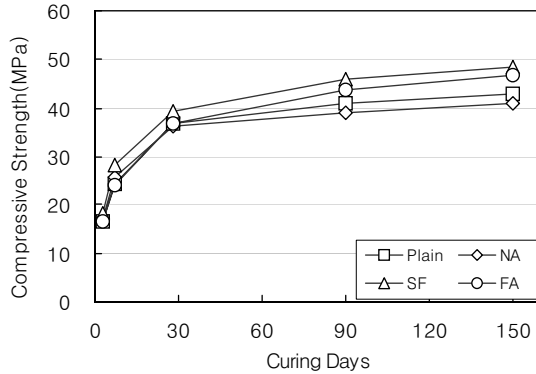


그림 15. 재령에 따른 공시체의 압축강도

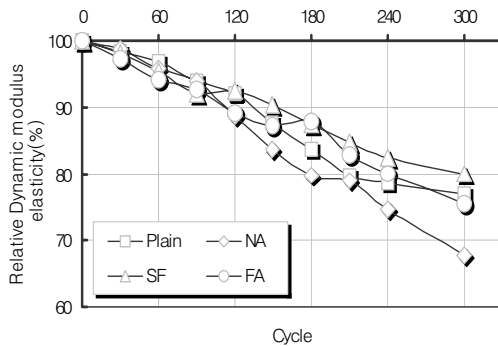


그림 16. 동결융해에 의한 상대동탄성계수

#### 6.3.2 동결융해 저항성

그림 16은 동결융해에 의한 상대동탄성계수 감소를 나타낸 것이다. S,F 배합의 상대동탄성계수는 300cycle에서 82%로 가장 크게 나타났고, 다음으로 Plain 배합이 78%로 나타났다. 특히, 혼화재를 치환하지 않은 N,A 배합은 동결융해 300cycle에서 68.1%로 다른 배합에 비해 상대동탄성계수 감소율이 가장 크게 나타났다. Plain 배합과 비교할 때 N,A 및 F,A 배합은 혼입된 강섬유와 시멘트 페이스트 부착면 사이에 미세균열이나 공극이 생성되게 되고, 이러한 균열과 공극이 외부와 내부 공기의 연결통로 역할을 하여 강섬유의 부식을 가속화하는 것으로 판단된다. 반면, S,F 배합은 혼화재로 치환한 실리카 흡이 강도증진 효과와 함께 강섬유 혼입에 의

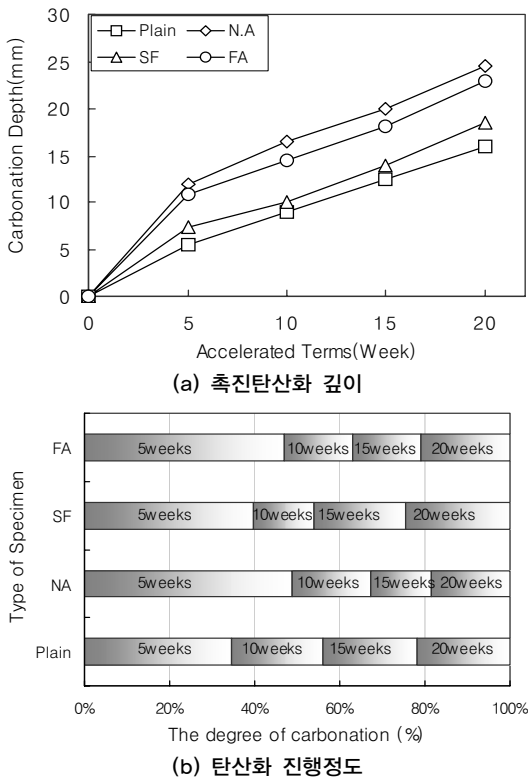


그림 17. 축진탄산화에 의한 탄산화깊이 및 진행정도

한 열화현상을 최소한으로 감소시키는 역할을 한 것으로 판단된다.

### 6.3.3 탄산화 저항성

그림 17은 수중양생 28일 후 CO<sub>2</sub> 농도 5±0.2%, 온도 20±2℃, 상대습도 60±3%에서 축진열화시킨 공시체의 축진탄산화 측정결과와 탄산화 진행정도를 나타낸 것이다.

축진탄산화 노출기간 15주에서 탄산화 깊이는 Plain 배합이 12.5mm로 가장 적게 나타났고 N.A 배합이 20mm로 가장 크게 나타났다. S.F 배합은 13.5mm로 숯크리트 배합 중에서는 가장 양호한 결과를 보여 실리카 흙의 혼입이 숯크리트 열화방지에도 효과적임을 알 수 있었다.

5주 이내의 초기 탄산화 진행정도는 N.A 배합이 가장

크게 나타났고, S.F 배합은 Plain 배합에는 미치지 못했지만 숯크리트 배합 중에서는 가장 작게 나타났다. 숯크리트는 일반 콘크리트에 비해 열화 가능성이 높은 것으로 나타났지만, 실리카 흙을 혼입한 숯크리트가 다른 조건에 비해 열화에 대한 저항성이 크다는 것을 알 수 있다.

그림 17(b)에 나타난 탄산화 진행정도는 축진노출기간 초기에 가장 크게 영향을 받는 것으로 나타났는데, 초기에 비해 중장기 재령에서 탄산화 진행정도가 낮아지는 것은 탄산화 작용으로 생성된 CaCO<sub>3</sub>의 축진작용 때문인 것으로 판단된다.

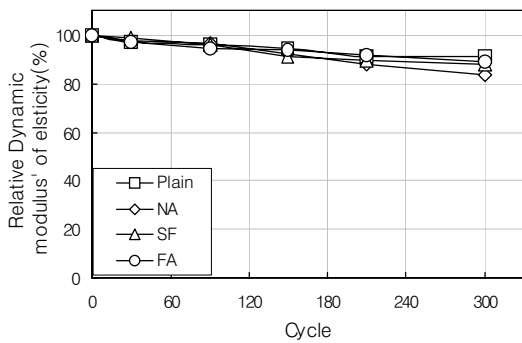
동결융해와 탄산화에 대한 저항성을 통해 강섬유를 혼입한 숯크리트는 일반 콘크리트에 비해 열화의 가능성은 높지만, 실리카 흙과 같은 고품질 혼화재를 사용함으로써 강도증진과 함께 열화 감소효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

## 6.4 복합열화에 따른 장기내구특성

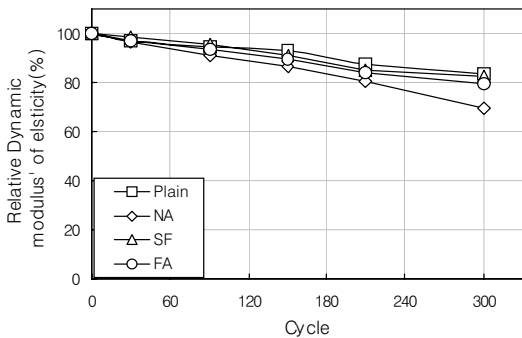
### 6.4.1 건습반복이 동결융해에 미치는 영향

반복적인 건습작용을 받은 숯크리트의 동결융해 반복에 따른 동탄성계수 특성은 그림 18과 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. 특히, 건습반복 기간이 길어질수록 강섬유를 혼입하고 혼화재를 치환하지 않은 숯크리트의 상대동탄성계수는 비교적 낮게 나타났는데, 플라이 애쉬를 치환한 숯크리트보다 실리카 흙을 치환한 숯크리트가 열화에 대한 저항성이 더 큰 것으로 나타났다. 즉, 중·장기 재령에서 건습반복이 동결융해에 미치는 영향은 혼화재 치환 여부, 혼화재 종류 및 강섬유 혼입 여부 등에 따라 차이가 클 수 있다.

기온 급강하에 의한 동결은 공시체 내부에 존재하는 수분의 체적팽창(약 1.5~2배)을 초래하여, 공시체의 균열과 부스러짐을 발생시키기 때문에 공시체의 질량은 일반적으로 감소하게 된다. 그림 19는 반복적인 건습작용과 동결융해 작용을 받은 공시체의 질량감소율 특성을 나타낸 것이다. 건습반복 5주 후의 공시체는 동결융해 150cycle 이후부터 질량 감소현상이 뚜렷하게 나타나기

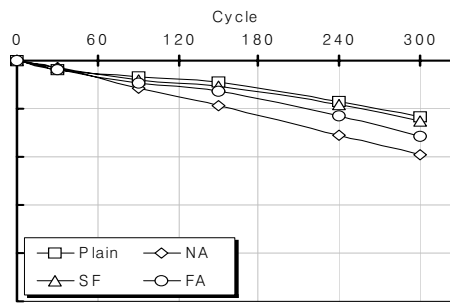


(a) 건습반복 5주

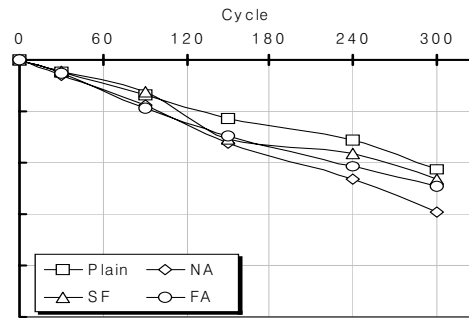


(b) 건습반복 25주

그림 18. 건습반복 후 상대동탄성계수의 변화



(a) 건습반복 5주



(b) 건습반복 25주

그림 19. 건습반복 후 질량감소를

시작하였다. 300cycle에서는 Plain 배합의 질량감소율이 2.3%, S.F 배합이 2.5%, F.A 배합이 3.1% 및 N.A 배합이 3.9%로 나타났고, 강섬유를 혼입하고 혼화재를 치환하지 않은 N.A 배합이 질량 감소가 가장 크게 나타났다. 혼화재를 치환하지 않았으나 Plain 배합은 강섬유 혼입으로 인한 미세균열과 공극이 발생하지 않았기 때문에 가장 양호한 결과가 나타난 것으로 판단된다.

건습반복 25주 후에는 건습반복 기간이 길어지면서 질량감소율도 증가하였다. 300cycle에서 Plain 배합이 4.3%, S.F 배합이 4.7%, F.A 배합이 4.9% 및 N.A 배합이 6.0%로 나타났는데, 실리카 흙의 치환을 통해 기존 숯크리트보다 효과적으로 열화현상을 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

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

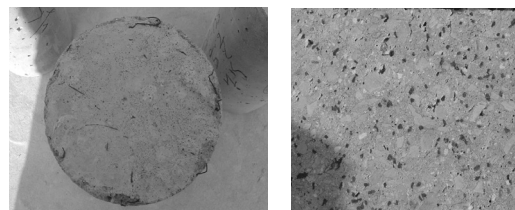


그림 20. 건습반복 후 공시체의 모습(N.A Type)

#### 6.4.2 탄산화가 동결융해에 미치는 영향

탄산화된 숯크리트의 동결융해 반복시 상대동탄성계수의 변화는 그림 21과 같다. 탄산화가 진행된 숯크리트의 상대동탄성계수는 N.A 배합이 300cycle에서 79.4%로 가장 작게 나타났고, F.A 배합이 84.4%, Plain 배합이 85.4%, S.F 배합이 86.4%로 가장 우수하게 나타났다. 탄산화가 진행되지 않은 숯크리트에 비해 탄산화가

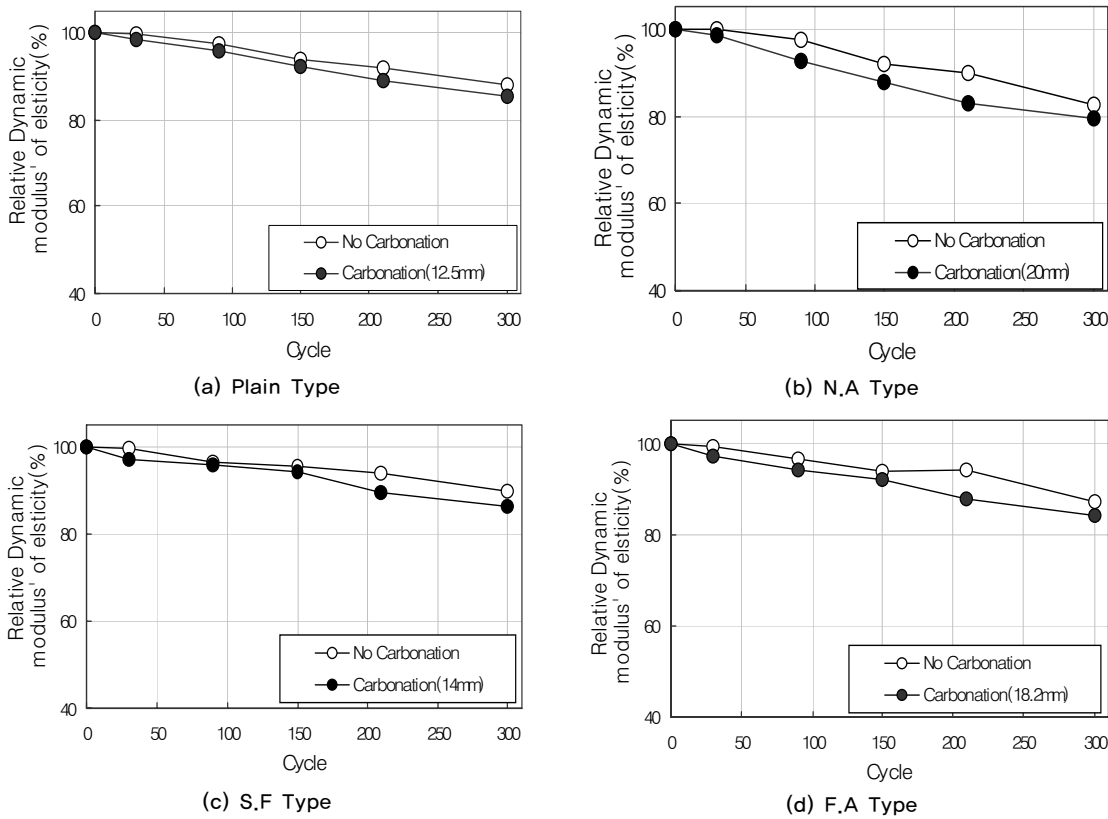


그림 21. 탄산화된 숯크리트의 상대동탄성계수

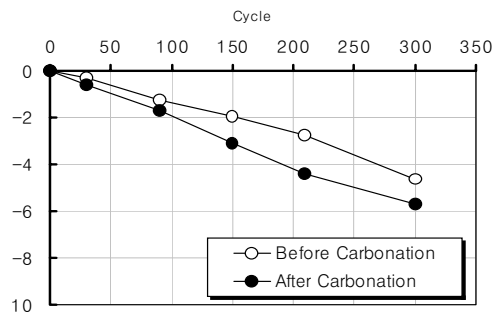
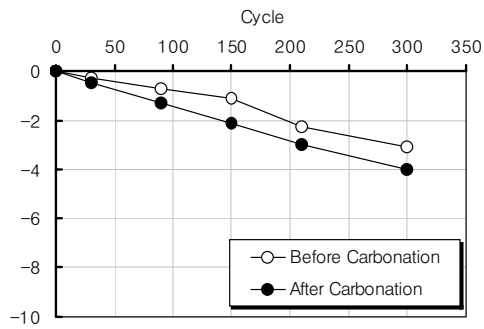
진행된 숯크리트의 동결융해반복 300Cycle의 상대동탄성계수는 Plain, N.A, F.A, S.F 배합이 각각 3.6, 3.3, 2.9, 2.8% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 실리카 흡을 혼입한 S.F 배합이 가장 적게 감소했지만, 공시체 종류에 관계없이 탄산화가 진행된 경우와 진행되지 않은 경우의 동결융해반복에 의한 상대동탄성계수 차이는 극히 적게 나타났다.

그림 22는 탄산화된 숯크리트의 동결융해 반복시 질량 감소율의 변화를 나타낸 것이다. 동결융해300cycle에서의 질량감소율을 살펴보면, N.A 배합이 5.7%로 가장 크게 나타났고, F.A 배합이 4.7%, S.F 배합이 4.4%, Plain 배합이 4.0%로 나타나, 탄산화되지 않은 경우에 비해 질량감소가 조금 더 발생하였다. 이러한 결과는 탄산화 작용으로 인해 동결융해에 가장 큰 영향을 미치는

미세공극이 충전되고 감소됨으로서, 탄산화되지 않은 숯크리트의 질량보다 탄산화된 숯크리트의 질량이 더 감소된 것으로 판단된다. 그리고 숯크리트 배합 중에서는 실리카 흡을 혼입한 S.F 배합의 질량감소율이 가장 적게 나타났다.

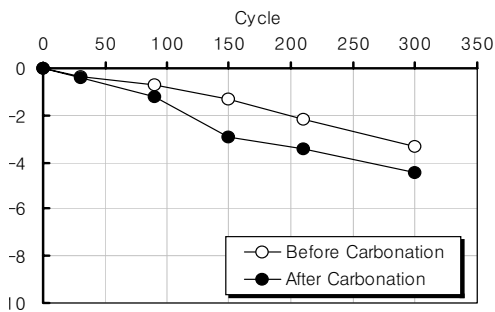
#### 6.4.3 동결융해반복이 촉진탄산화에 미치는 영향

그림 23은 동결융해반복 후 공시체를 촉진탄산화시킨 경우 질량감소율과 탄산화 깊이를 나타낸 것이다. 동결융해반복 후 탄산화 깊이는 동결융해반복을 받지 않은 경우에 비해 건습반복 5주에 최대 36%, 건습반복 10주에 최대 84% 이상 증가하였다. 건습반복이 적은 경우 즉, 숯크리트의 지하수 노출이 적은 경우에는 동결융해반복 횟수가 증가하여도 탄산화 깊이는 크게 증가하지

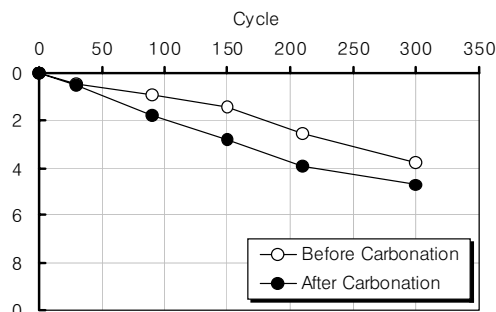


(a) Plain Type

(b) N.A Type



(c) S.F Type



(d) F.A Type

그림 22 탄산화된 숯크리트의 질량감소율

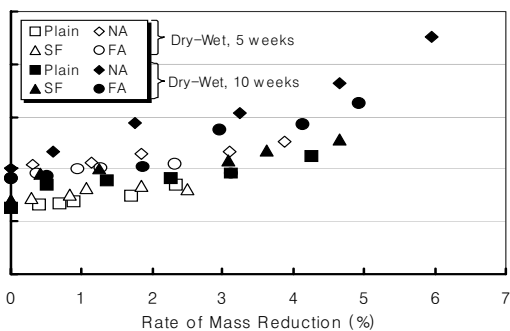


그림 23. 동결융해반복 후 질량감소율과 탄산화 깊이

않았지만, 장기간 건습반복에 노출된 경우에는 탄산화 깊이도 현저하게 증가하였다. 또한, 건습반복 횟수가 많아질수록 시험 배합의 질량감소율과 탄산화 깊이는 비례하여 증가하였는데, 실리카 흡을 치환한 숯크리트 배합

의 경우 다른 숯크리트 배합에 비해 가장 양호한 결과를 나타내었다.

## 7. 결론

본 연구에서는 국내 숯크리트의 강도증진을 위해 실리카 흡과 알칼리 프리계 급결제를 적용한 숯크리트의 현장실험을 실시하였고, 유럽통합규격에 의해 품질 평가를 실시하였다. 또한, 복합열화시험을 통해 실리카 흡을 혼입한 숯크리트의 장기내구특성을 평가하였다. 종합적인 연구요약 및 결론은 다음과 같다.

1. 알칼리 프리계 급결제를 사용한 숯크리트 배합의 초기강도 증진율은 90~97%로 가장 높게 나타났고, 알루미늄네이트계의 경우는 83~85%, 실리케이트계의 경우는 36~61%로 나타나 알칼리 프리계 급결



제가 슛크리트 초기강도 증진에 효과적임을 알 수 있었다.

2. 실리카 흡을 혼입한 슛크리트 배합은 혼입하지 않은 경우와 비교하여 알루미네이트계 급결제를 사용했을 때는 4.5~14.0MPa, 알칼리 프리계 급결제를 사용했을 때는 7.9~27.8MPa 까지 강도증진을 나타내었다. 또한, 실리카 흡 치환율은 7.5~10%일 때 강도증진 효과가 가장 우수한 것으로 나타났다.
3. 실리카 흡을 혼입한 슛크리트의 동결융해에 의한 상대동탄성계수는 300cycle에서 82%로 가장 크게 나타났고, 탄산화 깊이는 노출기간 15주에서 13.5 mm로 슛크리트 배합 중에서 가장 양호한 결과를 보여 실리카 흡의 혼입이 슛크리트 열화방지도 효과적임을 알 수 있었다.
4. 25주 동안 건습반복을 받은 슛크리트가 300 cycle의 동결융해반복을 받을 경우 상대동탄성계수는 강섬유만 혼입한 배합이 48.6%, 플라이 애쉬 혼입 배합이 63.0%, 실리카 흡 혼입 배합이 67.9%로 나타났고, 질량감소율은 강섬유만 혼입한 배합이 6.0%, 플라이 애쉬 혼입 배합이 4.9%, 실리카 흡 혼입 배합이 4.7%로 나타나 실리카 흡 슛크리트가 가장 양호한 결과를 나타내었다.
5. 강섬유보강 슛크리트가 건습반복 후 동결융해를 받게 되면 반복적인 건습작용이 강섬유의 부식 및 팽창을 유발하게 된다. 또한, 강섬유와 슛크리트 부착면에 미세균열이나 열린 공극을 증가시키게 되는데, 실리카 흡을 치환함으로써 슛크리트 열화방지 및 감소가 가능할 것으로 판단된다.
6. 현장실험과 복합열화시험 결과를 통해 국내 슛크리트의 강도증진 및 품질향상을 위해서는 알칼리 프리계 급결제와 실리카 흡과 같은 고품질 혼화재의 사용이 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

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

## 참고문헌

1. 건설교통부(1999), “터널설계기준”.
2. 건설교통부(1999), “터널표준시방서”.
3. 김재동, 김덕영(2000), “강섬유 보강 슛크리트의 휨인성 평가 방법 연구”, 터널과 지하공간, 제10권, 3호, pp. 196-210.
4. 류종현, 안태송, 이상돈, 한승환(2005), “강섬유 보강 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. 이상필, 이상돈, 김동현, 한승환, 김진철(2004), “배합 개선을 통한 영구지보 개념의 고성능 슛크리트 개발”, 대한토목학회 정기학술발표회 논문집, pp.201-216.
7. 한국도로공사 도로연구소(2001), “강섬유보강 슛크리트의 성능향상 및 품질기준 정립(II)”.
8. Austrian Concrete Society(1990), “Guideline on shotcrete”.
9. ASTM(1986), “Standard test method for Flexural toughness First-crack strength of Fiber-Reinforced Concrete(Using Beam with Third-point Loading)”, Annual Book of ASTM Standards, ASTM-C1018-94b.
10. EFNARC(1996), “European Specification for Sprayed Concrete”.
11. EFNARC(2005), “Draft EN 14488 : Part 7 Testing Sprayed shotcrete pART 7 : Fiber content of reinforced concrete”.
12. Norwegian Tunneling Society & Norwegian Rock Mechanics Group(1999), “Sprayed Concrete for Rock Support-Technical Specification, Guideline and Test methods”.



**마상준**

한국건설기술연구원 국토지반연구부  
수석연구원  
sjma@kict.re.kr



**김동민**

한국건설기술연구원 국토지반연구부  
연구원  
dmkim@kict.re.kr



**장필성**

한국건설기술연구원 국토지반연구부  
연구원  
psjang@kict.re.kr



**최재석**

한국건설자재시험연구원 신뢰성평가  
센터 선임연구원  
jschoi@kicm.re.kr