

고강도 슛크리트의 품질평가와 복합열화시험을 통한 장기내구성 검토

An Investigation on the Quality of High-Strength Shotcrete and the Long Term Durability using Combined Deterioration Test

마상준¹⁾, Sang-Joon Ma, 김동민²⁾, Dong-Min Kim, 최재석³⁾, Jae-Seok Choi, 안경철⁴⁾, Kyung-Chul Ahn, 김선명⁵⁾, Sun-Myung Kim, 고진곤⁶⁾, Jin-Kon Ko

- 1) 한국건설기술연구원 지반연구부 수석연구원, Research Fellow, Geotechnical Engineering Research Dept., Korea Institute of Construction Technology.
- 2) 한국건설기술연구원 지반연구부 연구원, Researcher, Geotechnical Engineering Research Dept., Korea Institute of Construction Technology.
- 3) 한국건설자재시험연구원 내후성시험평가센터 선임연구원, Senior Researcher, Weathering Test & Evaluation Center, Korea Institute of Construction Materials.
- 4) (주)테조엔지니어링 지반사업부 상무, Executive Director, Geotechnical/Tunnel Engineering Dept., TESO Engineering Co., Ltd.
- 5) (주)바우컨설턴트 차장, Vice-mangaer, Bau consultant Co., Ltd.
- 6) 한국석유공사 제2건설사무소 사무소장, Chief Of Construction Office, Construction Office II, Korea National Oil Corporation.

SYNOPSIS : In this study, Field test was performed using high-quality additions and accelerators to obtain the improvement of the strength on domestic shotcrete and quality test based on EFNARC was performed. In addition, Deterioration test that 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 field test, a promotion ratio of early strength is 90~97% in case of using alkali-free accelerators. And a compressive strength of shotcrete using Micro-silica fume was 45.2~55.8MPa and the flexible strength was 5.01~6.66MPa, so a promotion ratio of strength was 37~79%, 17~61% respectively. It was showed that increment effect of strength by the Micro-silica fume replacement of 7.5~10% for cement mass was remarkable. It was also realized that application of Micro-silica fume to shotcrete reduced deterioration and improved a long-term durability of shotcrete.

Key words : High-strength shotcrete, Accelerators, Additions, Micro-Silica fume, Combined deterioration test

1. 서론

국내 슛크리트 관련기술은 많은 발전을 이루어 왔으나 아직까지 국가적인 제도의 미비, 재료 단가의 부담 및 시공현장에서의 의식 부족 등으로 선진국에 비해 낮은 수준이다. 국외의 경우 고강도, 고내구성의 슛크리트 기술을 바탕으로 39.2~58.8MPa에 이르는 고강도 슛크리트 시공이 가능하여 2차 라이닝의 대체나 장기내구성의 확보가 충분히 가능한 반면, 국내의 경우 설계기준강도가 20.6MPa 내외로 낮은 편이며 장기강도 저하로 인한 유지보수 비용이 막대하게 소요되고 있다. 슛크리트는 시공 후 지하수 유입에 의한 건습반복, 겨울철의 동결융해 및 대기환경에 의한 탄산화 작용 등과 같은 복합적인 열화작용

을 받게 된다. 따라서 장기적인 슛크리트의 내구성 검토를 위해서는 복합적 환경조건을 고려한 열화특성을 파악할 필요가 있다.

본 연구에서는 국내 슛크리트의 강도증진과 장기내구성 향상을 위해 고강도 슛크리트 타설 실험을 실시하였고, 고강도 슛크리트의 개발 및 적용이 활발한 유럽의 품질규정(EFNARC, 1996)에 의거하여 품질평가를 수행하였다. 현장실험은 고품질의 혼화재와 급결제를 적용하여 고강도 슛크리트를 지향하였고, 슛크리트의 강도증진과 품질 향상에 미치는 혼화재와 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.

2. 슛크리트 품질기준 고찰

국내 슛크리트 강도기준에는 터널표준시방서(건교부, 1999), 터널설계기준(건교부, 1999), 터널지보공 관련품질기준개정(도로공사, 2002) 등이 있고, 표 1은 국내 슛크리트 강도기준을 나타낸 것이다. 유럽통합규격에서는 슛크리트 압축강도와 휨강도를 표 2, 표 3과 같이 등급화하여 규정하고 있는데(EFNARC, 1996), 국내 강도기준에 비해 다소 높은 수준이며 고품질 혼화재와 고성능 급결제를 사용하여 고강도 슛크리트의 시공이 일반적이다.

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

구분	강 섬유		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	20.6 ¹⁾	3.06
한국도로공사	68.6	40~100	2.94	4.5	9.8	19.6	17 ²⁾	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

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

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 4는 유럽통합규격에서 각 잔류강도등급 사이의 경계를 정의하는 4개의 좌표에 대해 나타낸 것인데, 1등급을 제외한 어떠한 경우도 그 다음 낮은 등급으로 떨어지는 응력/처짐 곡선을 가져서는 안 되게

규정하고 있다(EFNARC, 1996). 그러나 실제적으로 응력/처짐 곡선은 한 등급에만 위치하지 않고 다른 등급으로 떨어지는 경우가 대부분이며, 이러한 경우 잔류강도등급 판단이 난해한 단점이 있다. 유럽통합 규격 개선을 위한 prEN 14487-1 코드에서는 표 5를 이용한 새로운 잔류강도등급을 정의하였다. D2S2 등급은 중앙점 처짐 0.5, 1.0 그리고 2.0mm에서 휨강도가 최소 2.0MPa 이상인 것을 의미한다(EFNARC, 2002). 새로운 잔류강도등급은 응력/처짐 곡선이 다른 등급으로 떨어지는 경우에도 각 처짐 구간별로 강도등급이 결정되므로 세분화되고 구체적인 평가가 가능하다. 그러나 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.

표 5. 슛크리트 잔류강도등급의 정의(prEN 14487-1, 2002)

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				

3. 1차 현장실험

3.1 현장실험 개요

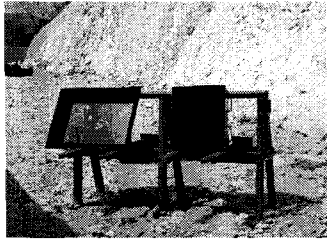
1차 현장실험에서는 급결제와 혼화제의 종류와 투입량을 변화시킨 8가지 배합에 대해 실험을 수행하였는데, 표 6은 1차 현장실험의 배합표를 나타낸 것이다. 급결제는 기존 알칼리성 급결제가 가지고 있는 장기강도 저하 및 인체에 유해한 단점을 보완할 수 있어, 최근 유럽 및 일본 등을 중심으로 사용빈도가 높아지고 있는 알칼리프리카를 적용하였다. 그리고 비교실험을 위해 실리카이트계와 알루미늄이트계 급결제를 실험변수로 추가하였다. 국내 품질기준의 급결제 혼입량은 5~12%이며 현장상황 및 타설조건에 따라 차이가 있으므로, 기존 연구들을 참고하여 혼입량은 실리카이트계 10%, 알루미늄이트계 5%, 알칼리프리카 7%로 결정하였다(이상필 등, 2004 ; 류중현 등, 2005). 혼화제로는 국외에서 많이 적용되고 있는 실리카 흡을 사용하였다. 실리카 흡은 초미립분말로서 조기재령에서 포졸란 반응이 발생하고 반발물을 적게 하는 특성이 있고, 슛크리트의 내동해성 향상과 투수계수 감소로 장기내구성을 향상시키는 작용을 한다(이상필 등, 2004). 본 실험에서는 실리카 흡 치환량을 시멘트량의 5, 10% 두 가지로 변화시켜

표 6. 1차 현장실험 배합표

구분 ¹⁾	W/B (%)	Gmax (mm)	S/a (%)	단위량 (kg/m ³)						
				Water	Cement	잔골재	굵은골재	급결제	강섬유	실리카흡
1 SL-N	45	13	65	215	1030	555	33.6	0	-	
2 SL-R							480	(실리카이트계 : 10%)	40(∅0.5×30mm)	-
3 AL-N								24	0	-
4 AL-R							456	(알루미늄이트계 : 5%)	40(∅0.5×30mm)	-
5 AF-S5-N								31.92 (알칼리프리카 : 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:실리카이트, AL:알루미늄이트, AF:알칼리프리카, S5, S10:실리카 흡 치환율 5, 10%, N:강섬유 무보강 R:강섬유 보강, W/B:물 바인더(시멘트+혼화제)비, Gmax:골재최대치수, S/a:잔골재율

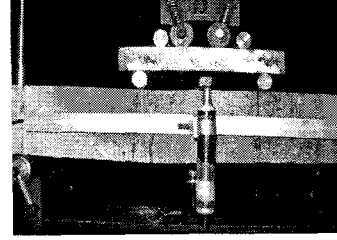
실험을 수행하였다. 강섬유 혼입량은 국내의 품질기준에 차이가 있으므로 기존연구(한국도로공사, 2001)를 참고하여 40kg/m³을 혼입하였고, Ø0.5×30mm의 변형형을 사용하였다. 슛크리트 타설실험에서 실험결과에 영향을 미치는 변수에는 혼화재와 급결제뿐만 아니라 골재상태, 편광석 비율, 골재최대치수 등이 있는데, 이 모든 변수를 고려하여 현장실험을 수행하기에는 많은 제약이 있다. 본 실험은 슛크리트의 고강도화에 미치는 혼화재와 급결제의 영향 파악을 주요 목적으로 하였기 때문에, 골재 특성에 의한 영향은 실험에서 제외하였고 현장에서 사용하고 있는 일반적인 골재를 이용하였다. 골재최대치수는 13mm, 잔골재율은 65%로 배합을 결정하였고 그림 1은 1차 실험 모습을 보여주고 있다.



(a) 코어 및 빔 시편 채취용 몰드



(b) 몰드 솟팅 모습



(c) 빔 공시체의 휨인성시험

그림 1. 1차 현장실험 모습

3.2 현장실험 결과

그림 2는 배합비에 따른 재령별 압축강도를 나타낸 것인데, 재령이 증가할수록 알칼리프리계, 알루미늄이트계, 실리카이트계 급결제의 순으로 강도가 크게 증가하였다. 특히, 실리카 함으로 치환한 배합의 경우 재령 1일, 3일 강도에서는 치환하지 않은 배합과 큰 차이를 보이지 않았지만, 28일에서는 압축강도가 45.2~52.3MPa로 나타나 치환하지 않은 배합에 비해 37~79%정도 강도 증진효과가 나타났다.

그림 3는 배합비에 따른 재령별 압축강도의 증진율을 나타낸 것인데, 알칼리프리계 급결제를 사용한 경우 초기강도 증진율이 90~97%로 가장 높았고, 알루미늄이트계의 경우는 83~85%, 실리카이트계의 경우는 36~61%로 나타났다. 이 결과로 알칼리프리계 급결제의 초기강도 증진효과를 확인할 수 있었다.

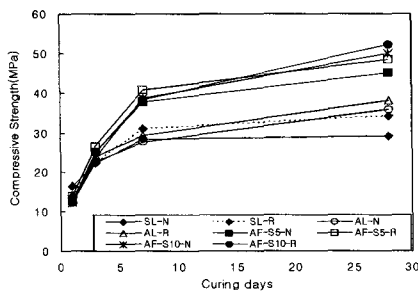


그림 2. 재령별 압축강도

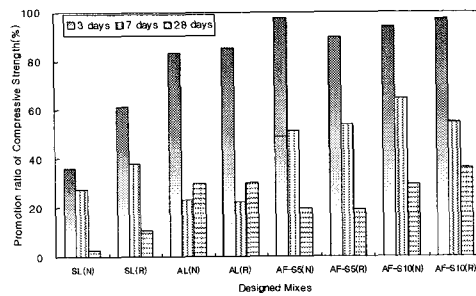
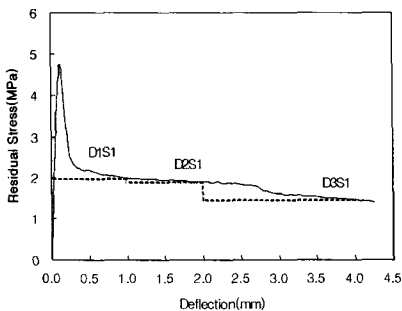
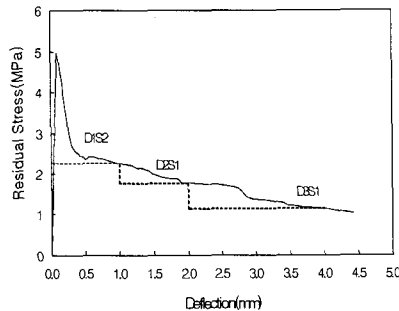


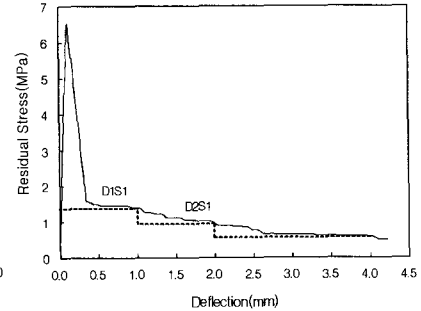
그림 3. 재령별 압축강도 증진율



(a) SL-R



(b) AL-R



(c) AF-S10-R

그림 4. 1차 현장실험의 휨인성 시험결과

그림 4와 표 7은 각 배합의 휨강도와 잔류강도등급을 나타낸 것이다. AF-S10-R 배합의 경우 휨강도는 6.56MPa로 국내 품질기준들 보다 50%이상 크게 나타났지만, 휨인성 등급은 AL-R이 D1S2, D2S1, D3S1으로 가장 양호하게 나타났다. 반면 AF-S10-R은 D1S1 등급만을 보여 다른 배합에 비해 낮게 평가되었는데, 강섬유의 불균질한 분포 또는 빔 시편 가공상의 문제로 인해 나타난 결과로 판단된다. AF-S5-R 배합은 휨인성 등급이 나타나지 않았다.

표 7. 각 배합의 휨인성 시험 결과

배합	최대 휨강도	휨인성 등급	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	-	-	-

4. 2차 현장실험

4.1 현장실험 개요

2차 현장실험에서는 알루미늄네이트계와 알칼리프리카계 급결제를 각각 5%, 7%씩 적용하였고, 1차 실험에서 강도증진 효과가 미비한 실리카이트계 급결제는 배합에서 제외하였다. 실리카 함은 각각 0, 5, 7.5, 10%씩 치환하였다. 골재최대치수, 잔골재율, 강섬유 규격 및 혼입량은 1차 실험과 동일한 조건으로 실험을 수행하였고 표 8은 2차 실험의 배합표를 나타낸 것이다.

표 8. 2차 현장실험 배합표

구분 ¹⁾	W/B (%)	Gmax (mm)	S/a (%)	단위량 (kg/m ³)						
				Water	Cement	잔골재	굵은 골재	급결제	강섬유	실리카 함
1	45.7	13	67	210	430	1050	515	21.5 (알루미늄네이트계 : 5%)	40(∅0.5×30mm)	0(0%)
2										21.5(5%)
3										32.3(7.5%)
4										43.0(10%)
5								30.1 (알칼리프리카계 : 7%)		0(0%)
6										21.5(5%)
7										32.3(7.5%)
8										43.0(10%)

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

4.2 현장실험 결과

그림 5와 6은 급결제 별로 실리카 함 치환율에 따른 숏크리트 재령별 압축강도를 나타낸 것이다. 알루미늄네이트계 급결제를 사용한 경우 재령 1일, 3일까지는 압축강도 차이가 크지 않지만, 재령 3일 이

후부터는 실리카 흙에 의한 강도증진 효과로 인해 치환율에 따라 강도 차이가 크게 나타났다. 재령 28일인 경우 실리카 흙 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 4.5~14.0MPa까지 강도 차이가 나타났다. 알칼리프리게 급결제를 사용한 경우에는 재령 28일에 실리카 흙 치환율 0%일 때 압축강도가 38.5MPa, 5%일 때 47.9MPa, 7.5%일 때 55.8MPa, 10%일 때 45.8MPa로 나타나 치환율에 따라 7.9~27.8MPa까지 강도 차이가 발생하였다. 또한, 알루미늄이트계를 사용한 경우에는 실리카 흙 치환율 10%일 때 가장 양호한 결과가 나타났고, 알칼리프리게의 경우에는 치환율 7.5%에서 가장 좋은 결과를 보여, 실리카 흙 치환율이 7.5~10%일 때 충분히 강도증진 효과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 그림 7은 알루미늄이트계 급결제와 알칼리프리게 급결제 차이에 따른 재령별 압축강도를 나타낸 것이다. 동일 실리카 흙 혼입량일 때 알칼리프리게 급결제를 사용한 경우가 알루미늄이트계를 사용한 경우보다 재령 28일에서 압축강도가 23.2~70.9% 정도 더 크게 나타나 알칼리프리게 급결제의 강도증진 효과를 확인할 수 있었다.

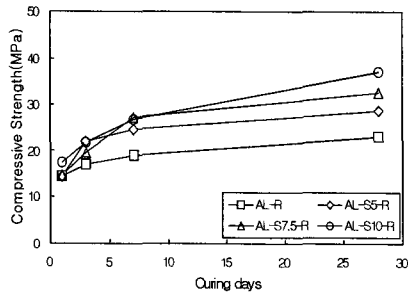


그림 5. 실리카 흙 치환율에 따른 재령별 압축강도(알루미늄이트계)

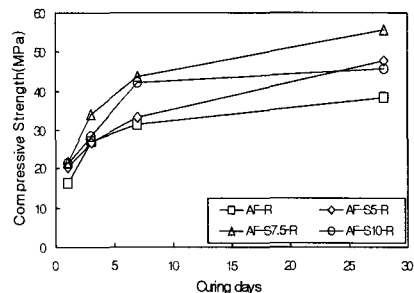
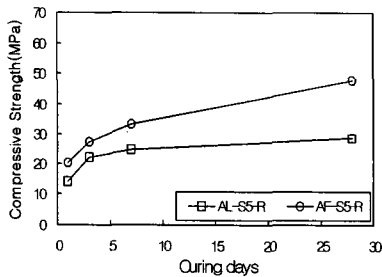
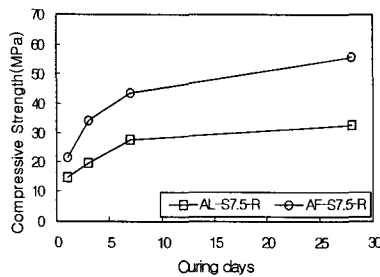


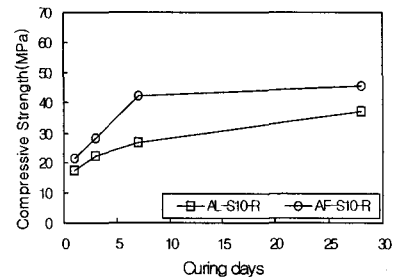
그림 6. 실리카 흙 치환율에 따른 재령별 압축강도(알칼리프리게)



(a) 실리카 흙 5%



(b) 실리카 흙 7.5%



(c) 실리카 흙 10%

그림 7. 급결제 종류에 따른 압축강도

5. 고강도 슛크리트 품질평가

5.1 압축강도 평가

그림 8은 1, 2차 현장실험을 통해 얻은 결과를 압축강도가 작은 순서부터 정렬해서 도시하고 각 공시체의 실리카 흙 혼입량을 나타낸 것이다. 그리고 한국도로공사(20MPa), JCI(30MPa), 오스트리아 J1기준(38MPa) 및 EFNARC(표 2)의 압축강도 기준을 선으로 도시하여 비교하였다. 실험결과 모두는 국내 압축강도 기준은 만족하였지만 몇 가지 경우는 국외의 고강도 기준에는 만족하지 못하였다. 특히, 알루미늄이트계와 실리카이트계 급결제를 사용한 경우에는 고강도 슛크리트 시공이 일반화되어 있는 유럽강도기준에 모두가 만족하지 못하여, 급결제의 개선 없이는 국내에서도 고강도 슛크리트의 개발 및 적용이 어려운 것으로 나타났다. 혼화제의 영향을 살펴보면 유럽의 고강도 기준을 상회하는 결과들은 모두가 5~10%의 실리카 흙을 혼입한 배합으로 나타났다. 특히, 7.5% 이상 혼입한 경우는 유럽통합규격에서 가장 높은 압축강도 등급인 C48/60을 충분히 만족시키는 좋은 결과를 보여, 국내에서도 고품질 혼

화재의 적용을 통해 고강도 숏크리트 개발이 충분히 가능할 것으로 판단된다.

5.2 휨강도 평가

그림 9는 1, 2차 현장실험을 통해 얻은 결과를 휨강도가 작은 순서부터 정렬해서 도시하고 각 공시체의 실리카 흙 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 흙을 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 혼화제의 적용을 통해 숏크리트 휨강도를 효과적으로 증진시킬 수 있는 것으로 나타났다. 급결제 종류에 따른 강도증진 효과의 경향은 명확하게는 나타났지 않았지만, 알칼리프리게 급결제를 사용한 대부분의 경우에서 다른 급결제에 비해 휨강도가 크게 나타났다.

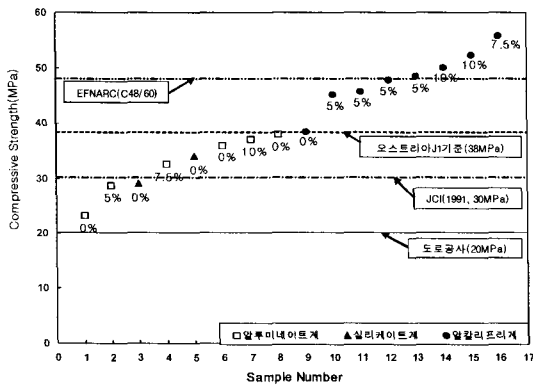


그림 8. 급결제 종류와 실리카 흙 혼입량에 따른 압축강도 분포

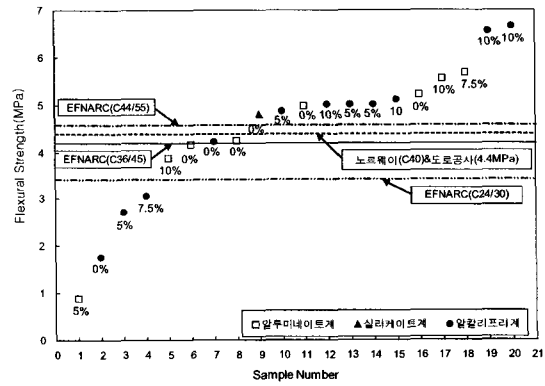


그림 9. 급결제 종류와 실리카 흙 혼입량에 따른 휨강도 분포

6. 복합열화시험을 통한 장기내구성 평가

6.1 복합열화시험 개요

실제 환경에서 동결융해 반복과 탄산화는 동시에 작용하지만, 본 연구에서는 상호 영향을 파악하기 위해 그림 10에서 보는 바와 같이 건습반복, 동결융해 및 탄산화 등 각각의 단일 열화인자를 진행한 후, 다른 열화요인을 작용시켰다. 먼저 28일 동안 수중양생하고 시험시까지 기건양생된 공시체의 압축강도를 재령 3, 7, 28, 90, 150일에서 측정하였고 재령 28일까지 표준양생된 시편에 대해 각각 동결융해와 촉진탄산화를 실시하였다. 실험 A에서는 재령 28일 공시체에 대해 수중침지 1주와 기건양생 1주를 1Cycle로 하여 5주, 25주 동안 반복적으로 건습반복을 하였다. 이어서 동결융해를 0, 30, 90, 150, 210, 300Cycle 까지 반복하였다. 실험 B에서는 표준양생된 시편을 15주 동안 촉진탄산화(CO₂ 농도 5%, 온도 20±2℃, 상대습도 60±3%) 시켰고 탄산화된 숏크리트에 대해 300Cycle까지 동결융해반복을 실시하였다.

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

그림 10. 각 실험별 순서도

복합열화시험에 사용된 공시체의 배합비는 표 9와 같다. 강섬유로 보강하지 않는 일반콘크리트(Plain Type), 강섬유를 보강하고 혼화재를 첨가하지 않는 숏크리트(NA Type), 실리카 흙을 첨가한 숏크리트(SF Type) 및 플라이애쉬를 첨가한 숏크리트(FA Type)를 제작하였다. 공시체의 크기는 단면 100×100×400mm의 각주형과 ø100×200mm의 원주형으로 제작하였다.

표 9. 복합열화시험 공시체의 배합비

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

주 1) Silica Fume 치환량 : 10%/C(wt%)

2) Fly Ash 치환량 : 15%/C(wt%)

6.2 실험결과

6.2.1 혼화재료에 따른 압축강도

혼화재 치환에 따른 공시체별 압축강도는 그림 11(a)와 같다. 재령 7일에서는 24~28MPa, 재령 90일에서는 39~46MPa, 재령 150일에서는 41~49MPa를 나타내 혼화재 치환에 따른 강도증진효과는 재령 28일에서부터 서서히 증가하는 경향을 나타내고 있었다. 특히, 일반콘크리트에 비해 실리카 흙을 첨가한 숏크리트의 강도가 2~5MPa 정도 더 크게 나타났다.

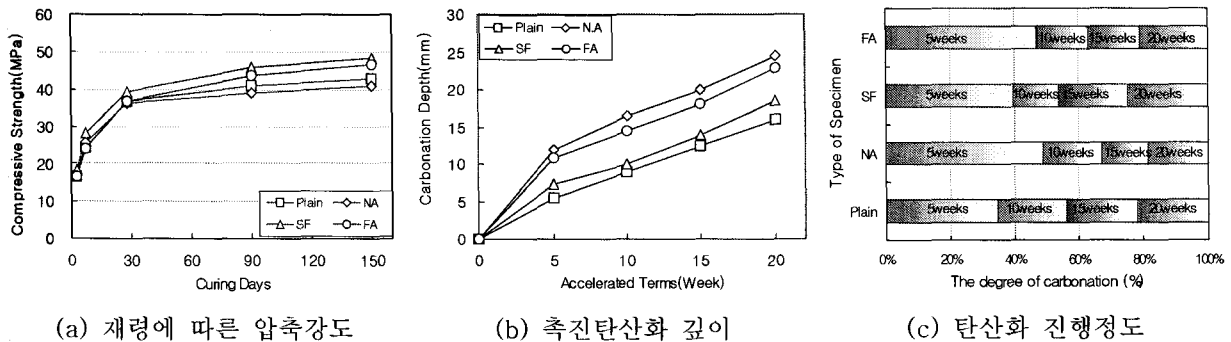


그림 11. 복합열화시험 결과

6.3.2 촉진탄산화

수중양생 28일 후 CO₂농도 5%, 온도 20±2℃, 상대습도 60±3%에서 촉진열화시킨 숏크리트의 촉진탄산화 측정결과와 탄산화율의 진행 정도는 그림 11(b), (c)와 같다. 촉진탄산화 노출기간 15주에서의 탄산화 깊이는 Plain Type이 12.5mm로 가장 적게 나타났으며, NA Type이 20mm로 가장 크게 나타났다. 반면, SF Type은 다른 숏크리트에 비해 모든 기간에서 탄산화 깊이가 가장 적게 나타나 실리카 흙의 혼입이 숏크리트 열화방지에도 효과적임을 알 수 있었다. 탄산화 진행정도에서는 NA, SF, FA Type의 5주 이내의 초기 탄산화 진행율이 Plain Type에 비해 큰 것으로 나타났다. 강섬유를 혼입한 숏크리트는 강섬유와 콘크리트의 부착면에 생성되는 외부와 내부를 연결하는 미세균열과 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 있었다.

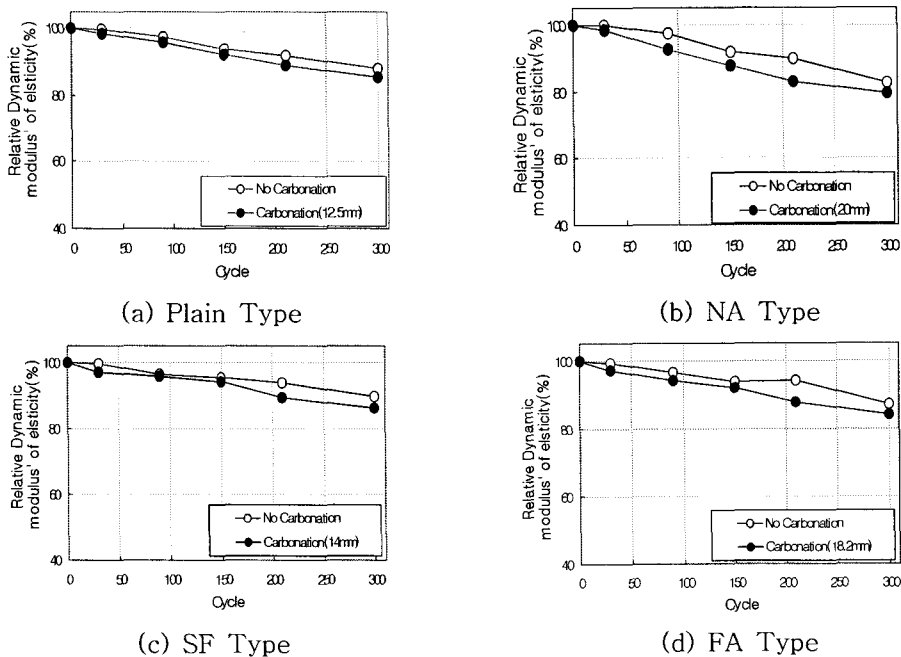
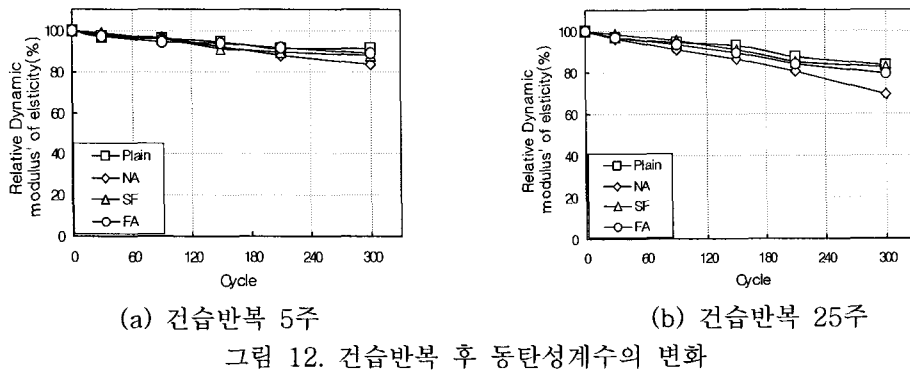
6.4 복합열화에 따른 장기내구성

6.4.1 건습반복이 동결응해에 미치는 영향

반복적인 건습작용을 받은 숯크리트의 동결응해 반복에 따른 동탄성계수 특성은 그림 12와 같다. 건습반복 5주에 의한 영향은 극히 적은 것으로 나타났고 건습반복 25주에 의한 영향은 Plain, SF, FA, NA Type이 각각 6.2%, 7.6%, 9.1%, 15.8% 감소하는 것으로 나타났다. 이와 같은 현상은 반복적인 건습작용이 숯크리트에 포함된 강섬유의 부식 및 팽창작용을 유도함으로써 강섬유와 숯크리트의 부착면에 생성되는 미세균열이나 열린공극이 증가하였기 때문인 것으로 판단된다.

6.4.2 탄산화가 동결응해에 미치는 영향

탄산화된 숯크리트의 동결응해 반복시 상대동탄성계수의 변화는 그림 13과 같다. 동결응해반복 300 Cycle 종료 시의 상대동탄성계수는 Plain, NA, SF, FA Type이 각각 3.6, 3.3, 2.8, 2.9% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 실리카 함을 혼입한 SF Type이 가장 적게 감소했지만, 공시체 종류에 관계없이 탄산화가 진행된 경우와 진행되지 않은 경우의 동결응해 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 슛크리트의 장기내구성을 평가하였다. 종합적인 연구요약 및 결론은 다음과 같다.

- (1) 현장실험 결과 실리카 흙을 혼입한 슛크리트는 압축강도가 45.2~55.8MPa, 휨강도가 5.01~6.66MPa로 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) 알칼리프리계 급결제를 사용한 배합의 초기강도 증진율이 90~97%로 가장 높았고 알루미네이트계의 경우는 83~85%, 실리케이트계의 경우는 36~61%로 나타나, 초기강도 증진에 알칼리프리계 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 견습반복 후 동결융해를 받게 되면 반복적인 견습작용이 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)bauer컨설턴트 및 Elkem Material ASA에서 지원한 “스�크리트 장기 내구성 평가 및 제기준 제정연구”사업으로 수행된 것으로 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부(1999), 터널설계기준
2. 김재동, 김덕영(2000), “강섬유보강 슛크리트의 휨인성 평가방법 연구”, 터널과 지하공간, 제10권, 제3호, pp.196~210.
3. 류종현, 안태송, 이상돈, 한승환(2005), “강섬유보강 슛크리트의 품질기준 검토”, 한국터널공학회 학술발표회 논문집, pp.142~174.
4. 이상필, 이상돈, 김동현, 한승환, 김진철(2004), “배합개선을 통한 영구지보 개념의 고성능 슛크리트 개발”, 대한토목학회 정기학술발표회 논문집, pp.201~216.
5. 한국도로공사 도로연구소(2001), 강섬유보강 슛크리트의 성능향상 및 품질기준 정립(II)
6. Austrian Concrete Society(1990), *Guideline on shotcrete*
7. EFNARC(1996), *European Specification for Sprayed Concrete*
8. EFNARC(2002), *Draft EN 14488 : Part 7 Testing Sprayed pART 7 : Fiber content of reinforced concrete*
9. JIS A 1127(2001), *Methods of test for dynamic modulus of elasticity, rigidity and Poisson's ratio of concrete by resonance vibration*
10. JIS A 1153(2003), *Method of accelerated carbonation test for concrete*
11. Norwegian Tunneling Society & Norwegian Rock Mechanics Group(1999), *Sprayed Concrete for Rock Support-Technical Specification, Guideline and Test methods*