



현장타설 슛크리트의 역학적 성능 평가 및 복합열화시험을 통한 장기내구성 평가

마상준^{1)*} · 장필성¹⁾ · 김동민¹⁾ · 최재석²⁾

¹⁾한국건설기술연구원 국토지반연구부 ²⁾한국건설자재시험연구원 신뢰성평가센터

Evaluation of the Mechanical Properties of Field-Cast Shotcrete and Long-Term Durability by Combined Deterioration Test

Sang-Joon Ma^{1)*}, Phil-Sung Jang¹⁾, Dong-Min Kim¹⁾, and Jae-Seok, Choi²⁾

¹⁾Geotechnical Engineering Research Dept., KICT, Goyang 411-712, Korea

²⁾Reliability Assessment Center, KICM, Gunpo 405-010, Korea

ABSTRACT Recently, tunnels are increasingly constructed in this country with the increased construction of highways, high-speed railways and subways. Shotcrete is one of the major processes in the tunnel construction. Many problems, however, exist in the current shotcrete practice. The purpose of the study is, therefore, to explore the troubles in the current shotcreting practice, and to develop high-quality silica fume shotcrete. For the purpose of security a long-term durability of shotcrete, this study conducted combined deterioration tests. In this study, a combined deterioration test in consideration of a variety of deterioration factors were proceeded. Especially, micro-silica fume that was used frequently in overseas because of a outstanding strength-promotion effect was applied to combined deterioration test, and a long-term durability of shotcrete was investigated according to additions mixing. As a result of test, the shotcrete mixed Micro-silica fume showed a good deterioration quality compared with the other mixes. And it shows that the Micro-silica fume has an outstanding strength-promotion effect and is effective to secure a long-term durability of shotcrete by means of decreasing a deterioration caused by steel fiber mixed.

Keywords long-term durability, deterioration factor, micro-silica fume, additions, shotcrete

1. 서 론

최근 들어 사회기반 시설의 확충 및 급속한 경제성장으로 인해 국토 이용의 효율성을 위하여 터널 및 지하공간 건설 공사가 증가하고 있으며 터널 및 지하공간의 건설시 주요 지보재로 사용되고 있는 슛크리트 공법 역시 적용이 확대되고 있다. 또한 급결제의 사용으로 인해 강도저하 등의 슛크리트가 갖고 있는 문제점을 해결하고 고강도, 고내구성 등 슛크리트의 전반적인 품질 향상을 위하여 실리카폼 및 고로슬래그 등의 혼화재료를 혼입하여 슛크리트의 성능을 개선시키고자 하는 연구들이 진행되고 있다^{1,3)}.

스�크리트는 시공 후 지하수의 유입에 의한 건습 반복작용, 겨울철 일교차에 의한 동결융해, 터널 내의 대기환경에 의한 탄산화 작용 등과 같은 복합적인 열화 작용을 받게 된다. 또한 터널공법의 발전에 따른 신공법 적용에 있어서도 슛크리트의 복합열화는 매우 중요한 요

인이 된다²⁾. 현재 시공 및 적용성 검토의 사례가 증가하고 있는 싱글셀 및 PCL 공법과 같은 신공법에서는 슛크리트 면이 터널 내 대기에 직접적으로 노출되게 되므로 슛크리트의 탄산화 및 복합열화의 가능성은 현재의 NATM 공법에 비해 커지게 된다³⁾. 따라서 기존의 슛크리트가 신공법에 확대적용되거나 장기적인 안정성이 고려되어야 할 터널공사의 내구성 검토를 위해서는 복합적 환경조건을 고려한 열화 특성을 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 충분하게 이루어지지 않고 있다⁴⁾. 따라서 슛크리트의 장기내구성 및 안정성 평가를 위해서는 복합적인 환경에서의 열화인자에 대한 슛크리트 저항 특성을 파악하는 것이 무엇보다도 중요하다.

본 연구의 목적은 국내 슛크리트의 역학적 성능 및 장기 내구성능이 향상된 고품질 슛크리트의 개발이다. 슛크리트의 강도증진 방안으로 실리카폼을 혼입하여 현장

*Corresponding author E-mail : sjma@kict.re.kr
Received June 5, 2006, Accepted December 8, 2006
©2007 by Korea Concrete Institute

타설 시험을 수행하였다. 또한 고성능 급결제인 알루미늄 나이트게 급결제와 알칼리프리계 급결제를 적용하여 쏫크리트의 강도 증진과 품질 향상에 미치는 급결제와 혼화재의 영향을 파악하였다.

현장타설 시험을 통해 가장 우수한 성능을 보인 급결제의 종류 및 실리카폼의 혼입량을 도출하였다. 도출된 최적 배합비를 복합열화시험의 기본배합으로 사용하여 견습 반복, 동결융해 및 탄산화의 단독 열화 요인이 쏫크리트 장기 내구성에 미치는 영향에 대해 정량적으로 파악하였다. 또한 복합적인 환경하에서의 쏫크리트의 내구성능을 평가하기 위하여 견습 반복을 받은 쏫크리트의 동결융해 저항특성, 동결융해 반복을 받은 쏫크리트의 탄산화 진행 및 탄산화 된 쏫크리트의 동결융해저항성에 대한 평가를 수행하였다.

2. 현장타설 시험을 통한 역학적 성능 평가

2.1 쏫크리트 배합

현장 시험은 2005년 6월 B건설의 현장의 터널 갱구 사면에서 실시하였으며, 쏫크리트용 타설시험 몰드에 타설한 뒤 코어를 채취하여 시험에 사용하였다. 현장 시험에서는 급결제와 혼화재의 종류 및 투입량을 변화시킨 8가지 배합에 대해 시험을 수행하였는데, Table 1은 현장 시험에서 고려한 시험 요소에 대해 나타난 것이다.

알칼리프리계 급결제 혼입량은 현장 시험에서 가장 효과가 양호했던 7%를 적용하였고 알루미늄 나이트게 급결제는 5%를 적용하였다. 현장시험과 내구성시험에서 사용된 실리카폼은 동일한 제품이며 물리적 특징은 Table 5

Table 1 Factors and levels of mixing

Type	Accelerators	Additives Silica Fume
Factors	Aluminate 5% Alkali-free 7%	0, 5, 7.5, 10%
Levels	2	4
Marks	AL, AF	No marks, S5, S7.5, S10

Table 2 Mixture proportion of field-cast shotcrete

Type ¹⁾	W/B (%)	Gmax (mm)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)							
				Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	Accelerators	Steel fiber	Silica fume	
1	AL5-R	45.7	13	67	210	430	1,050	515	21.5 (Aluminate : 5%)	40 (Ø0.5×30 mm)	0(0%)
2	AL5-S5-R										21.5(5%)
3	AL5-S7.5-R										32.3(7.5%)
4	AL5-S10-R										43.0(10%)
5	AF7-R								30.1 (Alkali-free : 7%)		0(0%)
6	AF7-S5-R										21.5(5%)
7	AF7-S7.5-R										32.3(7.5%)
8	AF7-S10-R										43.0(10%)

¹⁾AL5: aluminate 5%, AF7: alkali-free 7%, S5, S7.5, S10: silica fume 5, 7.5, 10%, R: reinforced steel fiber

에 나타나 있다. 실리카폼의 치환율은 급결제 종류에 따라 0, 5, 7.5, 10%씩 치환하였다.

골재는 현장에서 합수율 및 토립분 관리가 잘 이루어진 골재를 그대로 사용하였다. 굵은골재의 최대치수는 13 mm를 사용하였으며, 잔골재율은 67%로 현장에서 적용되고 있는 일반적인 골재를 사용하였다. 현장시험 뿐만 아니라 내구성시험에서도 동일한 골재 및 잔골재율을 적용하였다. 강섬유는 모든 배합에 혼입하였으며, 규격은 Ø0.5×30 mm이며 혼입량은 40 kg/m³으로 번들형을 사용하였다. 그리고 B/P에서의 모르타르 슬럼프는 10~12 cm를 목표로 하여 배합하였고 쏫크리트 현장타설 배합표는 Table 2와 같다.

2.2 쏫크리트 시험 항목

현장시험은 Table 3의 시험 항목에 따라 실시하였다. 압축강도 및 휨강도 공시체를 채취하기 위하여 쏫크리트용 타설시험 몰드를 제작하여 현장에서 쏫크리트를 타설한 뒤 1일 양생 후 실험실로 이동하여 표준양생을 실시하였다. 압축강도는 양생 1, 3, 7, 28일마다 각 배합별로 Ø100×200 mm 크기의 시편을 채취하여 측정하였다. 휨강도 시험은 유럽통합규격(EFNARC)에 따라 7일 양생 후 빔 공시체를 75×125×600 mm 크기로 절단하였고 28일 양생 후 삼등분점 재하시험(flexural testing with third-point loading)을 실시하였다⁵⁾.

Table 3 The subjects for test of field-cast shotcrete

Subjects	Testing method
Compressive strength (1, 3, 7, 28days)	·KS F 2405 Method of test for compressive strength of concrete -Specimens size : Ø100×200 mm ·KS F 2412 Testing method for measuring length of drilled concrete cores
Flexural strength (28days)	·EFNARC - Specimens size: 75×125×600 mm - Loading rate: central point deflection 0~0.5 mm → 0.25±0.05 mm/min, central point deflection 0.51~4.0 mm → 1.0 mm/min

2.3 현장타설 슛크리트의 시험 결과

2.3.1 압축강도

Fig. 1은 현장타설 시험의 8가지 배합에 대한 재령별 압축강도를 나타낸 것이다.

재령 28일 압축강도는 AF7-S7.5-R 배합이 55.8 MPa로서 가장 크게 나타났는데 국내 슛크리트 품질기준의 2배가 넘는 강도 발현을 보였으며, 실리카폼을 혼입하지 않은 AF7-R 배합에 비해 45% 이상 강도증진 효과가 나타났다. 반면, AL5-R 배합은 23.1 MPa로 가장 작게 나타났지만 국내 품질기준인 20 MPa에는 만족시키는 결과를 보였다.

Fig. 1에서 알칼리프리계 급결제를 사용하고 실리카폼을 혼입한 AF7-S5-R, AF7-S7.5-R 및 AF7-S10-R 배합은 재령 1일에서 모두가 20 MPa를 넘는 강도발현을 보여, 국내 품질기준의 재령 28일 압축강도 기준을 충분히 만족시켰다. 이러한 결과는 실리카폼과 알칼리프리계 급결제를 사용함으로써 터널 발파 후 초기 변위를 억제하는 1차 지보재로서의 역할을 담당하는 슛크리트의 성능을 더욱 향상시킬 수 있음을 보여준다. 반면, 알루미늄계 급결제를 사용한 배합의 경우 실리카폼을 사용한 경우라도 재령 1일에서 14~17 MPa를 나타내어 약 20~40%의 차이를 보였다. 종합해 보면 실리카폼 혼입률이 높을수록 압축강도 발현이 대체적으로 우수하였으며 알루미늄계 급결제 보다 알칼리프리계 급결제가 초기 강도 및 장기 강도가 우수하게 나타났다.

2.3.2 휨강도

재령 28일 휨강도는 AL-S10 배합이 5.56 MPa로 가장 크게 나타났고 그 다음으로는 AF-S7.5 배합이 5.52 MPa로 나타났다. Fig. 2에서 보듯이 급결제에 의한 휨강도 경향은 나타나지 않았으며 실리카폼 혼입률이 증가할수록 역학적 성상이 우수해짐을 알 수 있었다. 알루미늄계 급결제를 사용한 슛크리트에서는 실리카폼 치환율 10%에서 가장 큰 휨강도를 보였으며 알칼리프리계 급결제를 사용한 슛크리트에서는 실리카폼 7.5% 혼입률에서 가장 큰 휨강도를 보였다.

결과를 종합하여 보면, 슛크리트 현장타설 시험 결과

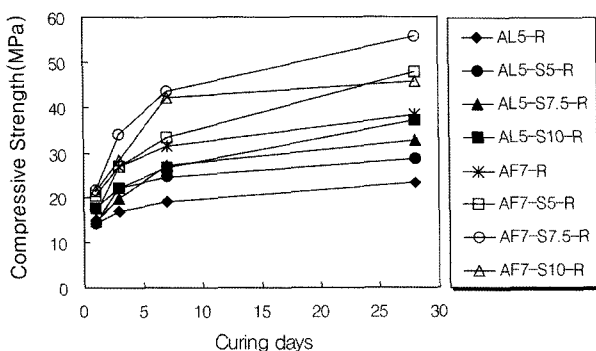


Fig. 1 Compressive strength of shotcrete with accelerator and silica fume

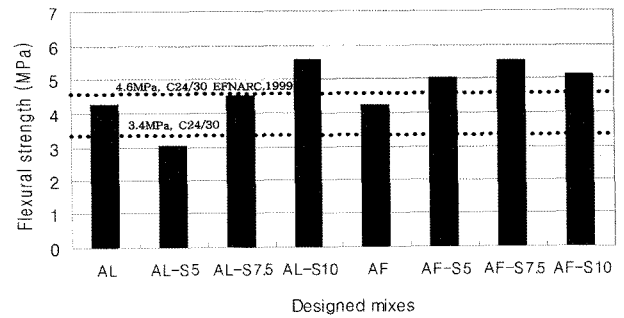


Fig. 2 Flexural strength of shotcrete with accelerator and silica fume

알루미늄계 급결제 보다 알칼리프리계 급결제를 사용하였을 때 슛크리트의 중요 요소인 초기강도 확보 및 장기강도 발현이 우수하였다. 또한 실리카폼 혼입률에 따른 역학적 성능을 분석해보면 압축강도와 휨강도 모두 실리카폼 치환율 7.5~10%일 때 충분한 강도증진 효과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

3. 열화 시험을 통한 슛크리트 내구성 평가

압축강도 및 휨강도의 우수한 발현은 슛크리트 매트릭스의 치밀함을 간접적으로 파악할 수 있는 인자로서 우수한 내구성 확보를 예상 할 수 있다. 따라서 현장 시험에서 가장 우수한 성능을 보인 실리카폼 10%를 치환한 배합비와 혼화제로 많이 쓰이는 플라이애쉬 15%를 치환한 배합설계를 가지고 단독 열화 시험 및 복합 열화 시험을 실시하여 장기 내구성 평가를 실시하였다.

3.1 사용 재료

혼화제로서 사용된 플라이애쉬는 당진화력발전소에서 생산되어 정제된 것을 사용하였고, 물리적 성질 및 화학적 성질은 Table 4와 같다. 그리고 실리카폼은 노르웨이 E사의 Micro Silica 940 U를 사용하였으며, 물리적 성질 및 화학적 성질은 Table 5와 같다. 강섬유는 Ø0.5×30 mm 규격의 번들형을 사용하였다.

모든 시험에 있어서 복합열화작용을 받는 공시체의 크기는 100×100×400 mm의 각주형으로 제작하였고, 압축강도 공시체는 Ø100×200 mm의 원주형 공시체를 이용하였다.

3.2 시험 계획

3.2.1 단독 열화 시험

단독 열화 시험으로는 동결융해저항성, 촉진탄산화 시험을 실시하였으며 기본적인 물성 평가를 위하여 압축강

Table 4 Physical and chemical properties of fly ash

Specific gravity(t/m ³)	Blaine (cm ² /g)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	LOI (%)
2.20	3,650	51.0	24.1	10.5	3.7

Table 5 Physical and chemical properties of silica fume

Chemical composition (%)						Average particle size(μm)	Specific surface area(m^2/g)	Specific gravity
SiO ₂	C	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Water			
92	1.2	2.4	1.3	1.2	0.1	8.94	22	2.1

도 측정도 실시하였다. Table 6은 열화시험 결과 분석을 위한 시험 항목과 평가 방법을 나타낸 것이다⁶⁾.

췌크리트의 동결융해저항성 시험은 KS F 2456(급속 동결융해에 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. 동결융해 시험 이후의 내구성 평가는 일정한 주기로 동결융해 작용을 받은 시험체의 상대동탄성계수를 측정하였고, 수분의 팽창균열 및 파괴에 의한 질량 감소율을 측정하여 평가하였다. Fig. 3은 동결융해 시험 모습을 나타낸 것이다.

췌크리트의 내구성 평가 방법 중의 하나인 촉진탄산화 시험은 췌크리트 공시체를 JIS A 1153의 시험 방법에 따라 촉진열화 시키고, KS F 2596에 준하여 5주 간격으로 20주까지 측정하였다. 시험체는 재령 1일에 탈형하여 수중상태에서 4주간 양생을 실시하였다. 표준양생 후 온도 20 ± 2 , 상대습도 $60\pm 3\%$, CO₂ 농도 $5\pm 0.2\%$ 의 조건으로 촉진탄산화 시험을 실시하였는데, 시험체 주변의 환경조건을 균등하게 하기 위하여 시험체 간격을 2 이상으로 하고 시험체의 측면이 수직이 되도록 배치하였다. 촉진탄산화의 측정은 소정의 재령이 경과한 시점에서 시험체를 장변 방향과 직각으로 절단한 후, 1%의 페놀프탈레인 용액을 분사하고 모르타르 표면에서 착색부분까지의

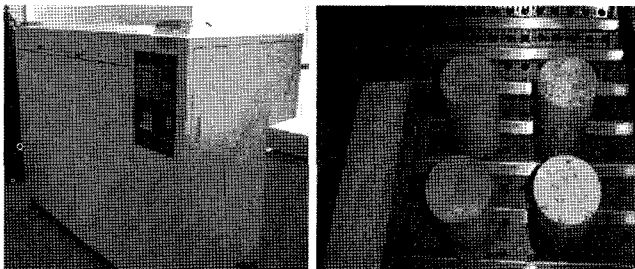


Fig. 3 Freezing and thawing test

Table 6 Factors and methods of tests

Subjects		Testing methods
Compressive strength		KS F 2405 - Method of test for compressive strength of concrete (3, 7, 28, 90, 150 curing days)
Freezing and thawing resistance	Dynamic modulus of elasticity	KS F 2456 - Testing method for resistance of concrete rapid freezing and thawing KS F 2437 - Testing method for dynamic modulus of elasticity (until 300 cycle)
	Mass reduction rate	until 300 cycle
Accelerated carbonation		KS F 2584 - Standard test method for accelerated carbonation of concrete KS F 2596 - Method for measuring carbonation depth of concrete

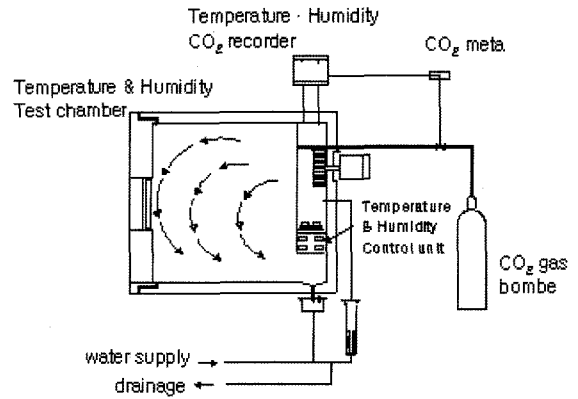


Fig. 4 Accelerated carbonation test facility

거리를 1측면 당 3개소씩 계측하여 평균한 값을 탄산화 깊이로 판정하였다. Fig. 4는 촉진탄산화시험 장치의 개요도를 나타낸 것이다.

3.2.2 복합 열화 시험

췌크리트가 타설된 실제 환경에서 동결융해 반복과 탄산화는 동시에 작용하지만, 본 연구에서는 상호 영향을 파악하기 위해 열화 작용의 부여 방법을 단순화 하는 것이 필요할 것으로 판단되었다. 동결융해 반복 후 건조 작용의 영향 및 반복적인 건조와 탄산화 간의 상호 작용하는 영향은 다소 미소하다고 판단하여 시험 요소에서 고려하지 않았다. 따라서 Table 7과 Fig. 5에서 보는 바와 같이 건조반복, 촉진탄산화 및 동결융해 중 각각의 단일 열화인자를 진행 한 후 다른 열화 요인을 적용시켰다.

Test A에서는 재령 28일된 공시체에 대해 수중양생 1주와 기건양생 1주를 1cycle로 하여 각각 5주, 25주 동안 건조 반복시켰다. 이어서 동결융해를 0, 30, 90, 150, 210, 300 cycle 까지 실시하였다.

Test B에서는 표준양생된 시편을 15주 동안 촉진탄산

Table 7 Outline of combined deterioration test

Type	Contents
Test A	Cyclic freezing and thawing after repeat of immersing and drying
Test B	Cyclic freezing and thawing after accelerated carbonation for 15 weeks
Test C	Accelerated carbonation after cyclic freezing and thawing

Test A	Standard Curing	Repeat of immersing and drying (5, 25weeks)	Cyclic freezing and thawing (0,30,90,150,210, 300cycle)
Test B	Standard Curing	Accelerated carbonation (15weeks)	Cyclic freezing and thawing (0,30,90,150,210, 300cycle)
Test C	Standard Curing	Cyclic freezing and thawing (0,30,90,150,210, 300cycle)	Accelerated carbonation (15weeks)

Fig. 5 Flow chart of combined deterioration test

화(CO₂농도 5%, 온도 20±2, 상대습도 60±3%) 시키고 탄산화된 슛크리트에 대하여 Test A와 같은 간격으로 300 cycle까지 동결융해시험을 실시하였다.

Test C에서는 표준양생된 공시체를 300 cycle 까지 동결융해한 후 15주 동안 촉진탄산화 시험을 실시하였다.

3.3 배합설계

현장 시험에서 가장 우수한 성능을 보인 실리카폼 10%를 치환한 배합비와 혼화재료로 많이 쓰이는 플라이애쉬 15%를 치환한 배합설계를 가지고 단독열화 시험 및 복합열화 시험을 실시하여 장기 내구성 평가를 실시하였다.

내구성 시험은 급결제를 혼입하지 않으며 플라이애쉬 및 실리카폼이 혼입됨으로서 현장배합비로는 유동 특성이 시험에 적정하지 않았다. 따라서 적정한 슬럼프 값을 얻기 위하여 W/B와 잔골재율을 재조정하였으며, 강도에 영향을 주지 않는 범위내에서 유동화재를 혼입하였다. 조정된 슛크리트의 배합비는 Table 8과 같다.

공시체 종류는 일반 콘크리트와 슛크리트의 열화 특성을 비교하기 위해 강섬유로 보강하지 않는 일반 콘크리트(plain type), 강섬유를 보강하고 혼화재를 첨가하지 않는 슛크리트(NA type), 실리카폼을 첨가한 슛크리트(SF Type) 및 플라이애쉬를 첨가한 슛크리트(FA type)로 결정하였다.

복합열화를 실시한 공시체의 압축강도, 동탄성계수, 질량감소를 및 촉진탄산화 등을 Table 6에 명시된 표준 시험 방법에 의거하여 측정하였다.

4. 시험 결과

4.1 단독 열화인자에 의한 슛크리트 장기 내구성 평가

4.1.1 혼화재에 따른 압축강도

혼화재 치환에 따른 공시체 종류별 압축강도는 Fig. 6 과 같다. 재령 7일에서 24~28 MPa, 재령 90일에서 39~46 MPa, 재령 150일에서 41~49 MPa로 나타나 혼화재 치환에 따른 강도증진효과는 재령 28일에서부터 서서히 증가하는 경향을 나타내고 있었다. 특히, 실리카폼을 치환한 슛크리트의 압축강도는 일반 콘크리트에 비해 재령 28일에서 8.9%, 재령 90일에서 19.2%, 재령 150일에서 18.2% 더 크게 나타났다. 반면, 혼화재를 치환하지 않은 슛크리트는 일반 콘크리트 보다 압축강도가 더 낮게 나타났다.

4.1.2 동결융해에 대한 저항

Fig. 7은 동결융해에 의한 상대동탄성계수의 감소를 나타낸 것이다. SF 배합의 상대동탄성계수는 300 cycle에서 82%로 가장 크게 나타났고, 다음으로 Plain 배합이 78%로 나타났다. 특히, 혼화재를 치환하지 않은 NA 배합은 동결융해 300 cycle에서 68.1%로 다른 배합에 비해 상대동탄성계수 감소가 가장 크게 나타났다. 콘크리트의 동결융해저항 성능은 시멘트 콘크리트 내의 기포에 의해 결정되는데, 공기 연행제를 사용하지 않은 슛크리트의 경우 동결융해에 상당히 취약한 것으로 알려져 있다. 반면, SF 배합은 Plain 배합보다 상대동탄성계수가 더 크게 나타났다.

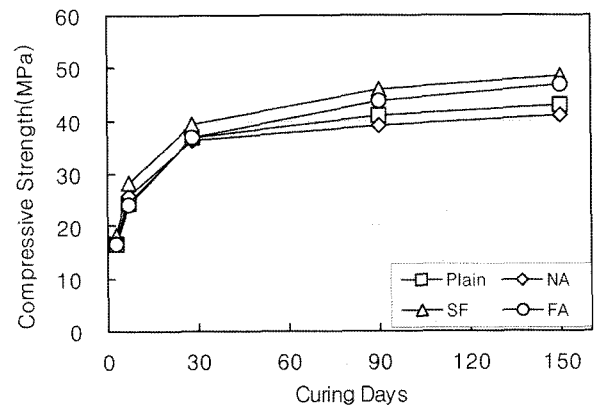


Fig. 6 Compressive strength of shotcrete with admixtures

Table 8 Mixture proportions of combined deterioration tests

Type	W/B (%)	G _{max} (mm)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)							
				Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	Steel fiber	Additives		Super plasticizers
									SF ¹⁾	FA ²⁾	
Plain	47.8	13	67	220	460	1,030	505	-	-	-	2.02
N					460			40.0	-	-	
SF					414			40.0	46	-	
FA					391			40.0	-	69	

¹⁾Silica fume: 10%/C(wt%) ²⁾Fly ash: 15%/C(wt%)

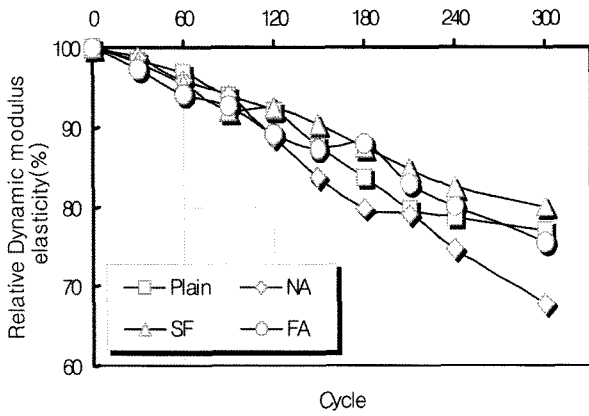


Fig. 7 Freezing-thawing cycle and relative dynamic modulus of elasticity

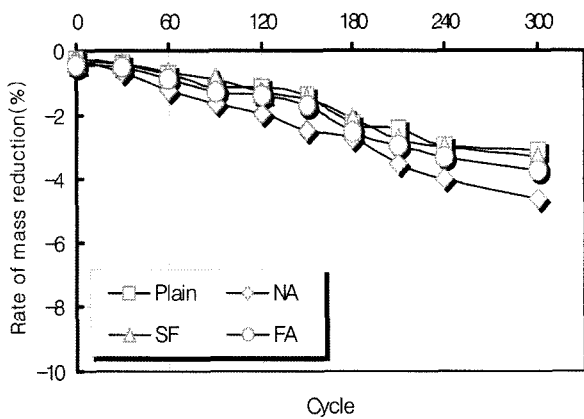


Fig. 8 Freezing-thawing cycle and weight reduction ratio

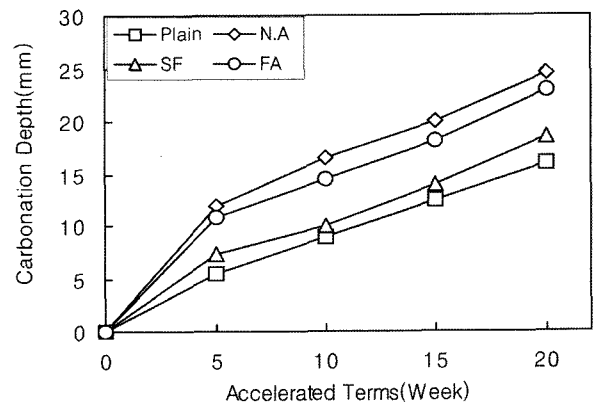
는데, 혼화재로 치환한 실리카폼이 강도증진 효과와 함께 강섬유 혼입에 의한 열화현상을 최소한으로 감소시키는 역할을 한 것으로 판단된다.

Fig. 8은 동결융해에 의한 질량감소율을 나타낸 것인데, 상대동탄성계수와 동일하게 NA 배합의 감소율이 4.63%로 가장 크게 나타났다. 그리고 Plain 배합의 감소율은 3.1%로 가장 작았고, 다음으로 SF 배합의 감소율이 3.3%로 나타났다.

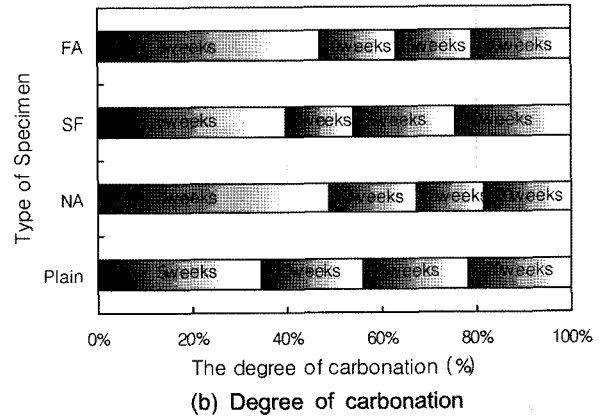
4.1.3 탄산화에 대한 저항

Fig. 9는 수중양생 28일 후 CO₂ 농도 5±0.2%, 온도 20±2, 상대습도 60±3%에서 촉진탄산화시킨 공시체의 촉진탄산화 깊이와 탄산화 진행 정도를 나타낸 것이다.

촉진탄산화 노출기간 15주에서 탄산화 깊이는 Plain 배합이 12.5 mm로 가장 적게 나타났으며, NA 배합이 20 mm로 가장 크게 나타났다. 이러한 결과는 앞에서 살펴본 동결융해저항성과 동일하게 강섬유의 혼입으로 인해 생성되는 미세균열과 공극의 영향 때문인 것으로 판단된다. SF 배합은 Plain 배합을 제외한 슛크리트 배합 중에서 탄산화 깊이가 모든 기간에서 가장 적게 나타났는데, 혼화재를 치환한 슛크리트의 경우에는 치환하지 않은 경우에 비해 탄산화 작용에 대한 저항성이 더 크음을 알 수 있다.



(a) Carbonation depth



(b) Degree of carbonation

Fig. 9 Carbonation depth and degree of carbonation

Fig. 9(b)의 탄산화 진행정도는 촉진 노출 기간 초기에 가장 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

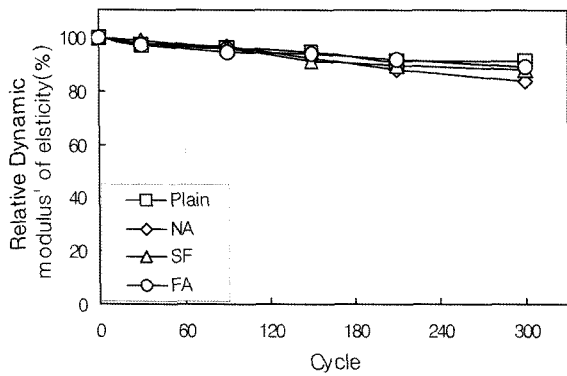
Plain 배합의 진행률이 36%로 가장 낮았고, 다음으로 SF 배합이 39%, FA 배합이 47%, NA 배합이 49%로 가장 크게 나타났다. 또한 초기재령에 비해 중장기 재령에서 탄산화 진행 정도가 상당히 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 탄산화 작용으로 생성된 CaCO₃의 충전작용 때문인 것으로 판단된다.

동결융해와 탄산화에 대한 저항성을 통해 강섬유를 혼입한 슛크리트는 일반 콘크리트에 비해 열화의 가능성은 높지만, 고품질 혼화재를 사용함으로써 강도 증진과 함께 열화 감소 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

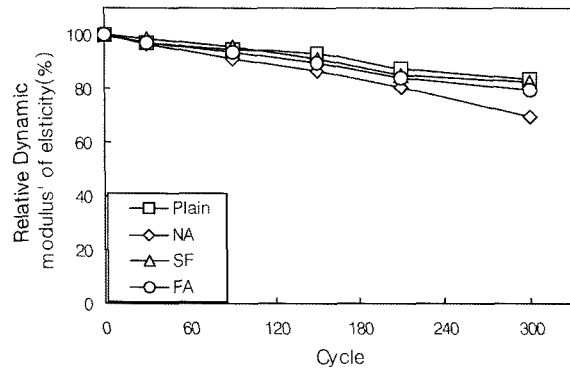
4.2. 복합열화 인자에 의한 슛크리트 장기 내구성 평가

4.2.1 건설 반복이 동결융해에 미치는 영향(Test A)

반복적인 건설 작용을 받은 슛크리트가 동결융해 반복을 받을 때 상대동탄성계수의 변화는 Fig. 10과 같다. 건설 반복 5주 후 동결융해 300 cycle에서의 상대동탄성계수는 NA 배합이 69.6%로써 가장 작게 나타났고, SF 배합이 77.1%, FA 배합이 79.4%, Plain 배합이 82.9%로 건설 반복을 받지 않고 동결융해만을 받은 상대동탄성계수 변화와 비슷한 경향을 보였다. 즉, 적은 기간 동안의 건설 반복이 동결융해저항 성능에 미치는 영향은 전체적으로 미비한 것으로 나타났다.



(a) Repeat of immersing and drying for 5 weeks



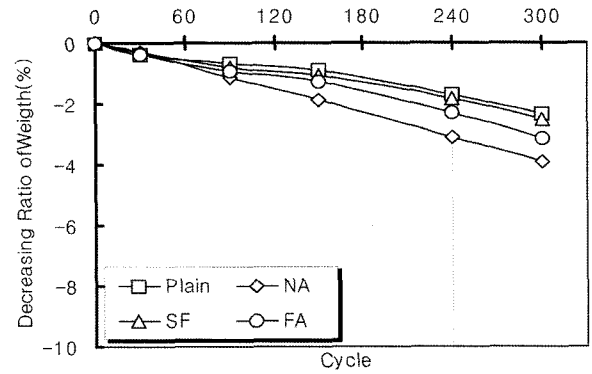
(b) Repeat of immersing and drying for 25 weeks

Fig. 10 Relative dynamic modulus of elasticity under cyclic wet-dry and freezing-thawing

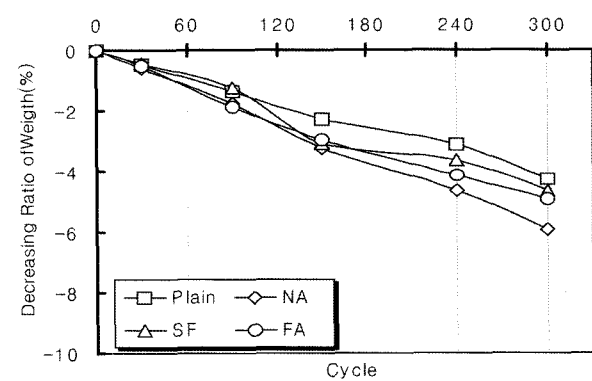
반면, 25주 동안 건습 반복을 받은 숯크리트의 상대동탄성계수는 건습 반복을 받지 않은 경우와 다른 특성을 보였는데, NA 배합이 48.6%로 가장 작게 나타났고, FA 배합이 63.0%, SF 배합이 67.9%, Plain 배합이 69.8%로 나타났다. 특히, 건습 반복 기간이 길어질수록 강섬유를 혼입하고 혼화재를 치환하지 않는 숯크리트의 상대동탄성계수는 비교적 낮게 나타났는데, 플라이애쉬를 치환한 숯크리트보다 실리카폼을 치환한 숯크리트가 열화 현상에 대한 저항성이 더 큰 것으로 나타났다.

본 시험에서는 중·장기, 재령에서 건습 반복이 동결융해에 미치는 영향은 혼화재 치환 여부, 혼화재 종류 및 강섬유의 혼입 여부 등에 따라 차이가 크을 수 있었다. 즉, 반복적인 건습 작용이 숯크리트에 포함된 강섬유의 부식과 팽창 작용을 유도함으로써, 강섬유와 숯크리트의 부착면에 발생하는 미세균열 또는 공극을 증가시켰기 때문으로 판단된다. 그러나 고품질 혼화재를 사용함으로써 이러한 현상을 줄일 수 있을 것으로 판단된다³⁾.

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. Fig. 11은 반복적인 건습 작용과 동결융해작용을 받은 공시체의 질량 감소율 특성을 나타낸 것이다. 건습 반복 5주 후의 공시체는 동결융해 150 cycle 이후부터 질량 감소 현상이 뚜렷하게 나타나기 시작하였다. 300 cycle에서는 Plain 배합의 질량 감소율이 2.3%, SF 배합이 2.5%, FA 배합이 3.1% 및 NA 배합이 3.9%



(a) Repeat of immersing and drying for 5 weeks



(b) Repeat of immersing and drying for 25 weeks

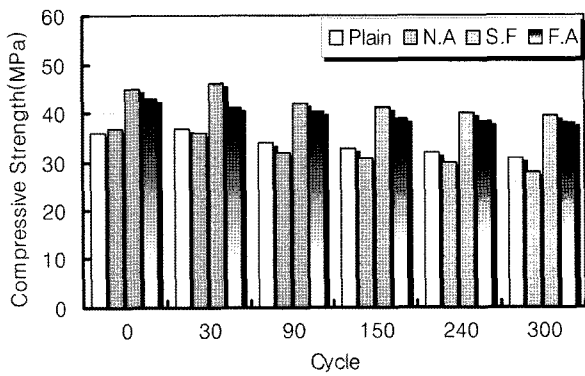
Fig. 11 Weight reduction ratio under cyclic wet-dry and freezing-thawing

로 나타났고, 강섬유를 혼입하고 혼화재를 치환하지 않은 NA 배합의 질량 감소가 가장 크게 나타났다. 혼화재를 치환하지 않았으나 Plain 배합은 강섬유 혼입으로 인한 미세균열과 공극이 발생하지 않았기 때문에 가장 양호한 결과가 나타난 것으로 판단된다⁷⁾.

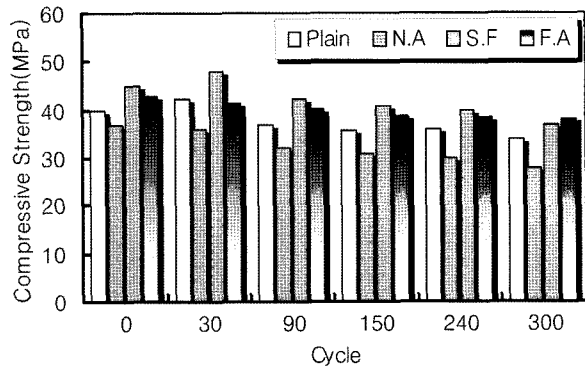
건습 반복 25주 후의 질량 감소율도 5주 후의 결과와 유사한 경향을 보였는데 건습 반복 기간이 길어지면서 질량 감소율도 증가하였다. 300 cycle에서 Plain 배합이 4.3%, SF 배합이 4.7%, FA 배합이 4.9% 및 NA 배합이 6.0%로 나타났고, 실리카폼의 치환을 통해 기존 숯크리트보다 효과적인 열화 현상 감소를 확인할 수 있었다.

Fig. 12는 반복적인 건습 작용과 동결융해 작용을 받은 공시체의 압축강도를 나타낸 것인데, 건습 반복 후 동결융해 cycle이 증가할수록 압축강도가 감소하였다. 건습 반복 5주 후의 최초 압축강도는 실리카폼을 치환한 SF 배합이 가장 크게 나타났고, NA 배합도 Plain 배합보다 더 크게 나타났다. 그러나 동결융해 300 cycle 후에는 NA 배합이 Plain 배합보다 압축강도가 더 작게 나타나, 혼화재 치환 없이 강섬유를 혼입한 숯크리트의 내구성 저하를 보였다.

건습 반복 25주 후의 최초 압축강도는 NA 배합이 가장 작게 나타났는데, 장기간의 반복적인 건습 작용으로 강섬유만을 혼입한 NA 배합의 내구성이 Plain 배합에 비해 많이 저하되었음을 보여준다. 특히, NA 배합은 건습 반복 및 동결융해 작용으로 강섬유 부식이 심화되었고, 숯크리트 표면의 부스러짐도 증가하여 외관상으로도 가



(a) Repeat of immersing and drying for 5 weeks



(b) Repeat of immersing and drying for 25 weeks

Fig. 12 Compressive strength under cyclic wet-dry and freezing-thawing

장 좋지 않은 결과를 보였다. 반면, SF 및 FA 배합은 건습 반복 25주와 동결융해 300 cycle 후에는 30 MPa 이상의 고강도를 유지하는 좋은 결과를 보였다.

반복적인 건습 작용과 동결융해를 받은 쏫크리트의 상

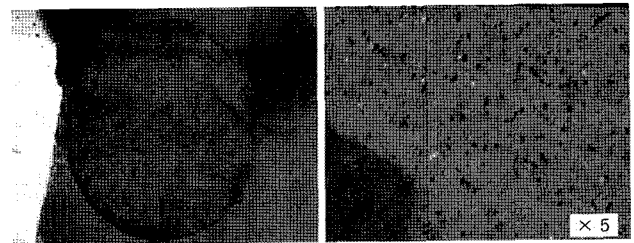


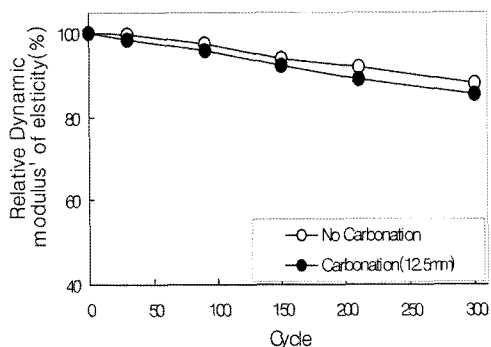
Fig. 13 Specimens after 25 weeks of cyclic wet-dry

대동탄성계수, 질량 감소율 및 압축강도의 변화를 통해 쏫크리트 장기내구성 확보를 위해서는 고품질 혼화재의 사용이 반드시 필요할 것으로 판단된다⁸⁾. Fig. 13은 건습 반복 25주의 공시체 모습을 나타낸 것이다. 공시체 단면을 확대한 그림에서 건습 반복으로 인해 강섬유가 심하게 부식된 것을 확인할 수 있다.

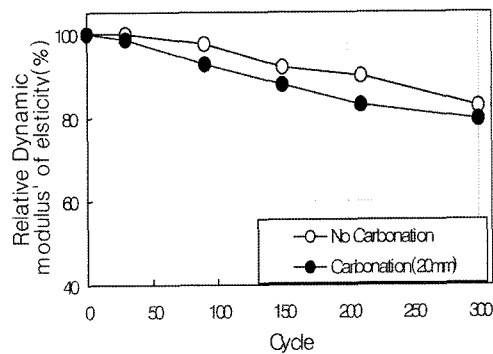
4.2.2 탄산화가 동결융해에 미치는 영향(Test B)

Fig. 14는 탄산화된 쏫크리트의 동결융해 반복시 상대동탄성계수의 변화를 나타낸 것인데, 탄산화 전의 쏫크리트와 탄산화 후의 쏫크리트를 300 cycle까지 동결융해 반복한 결과이다.

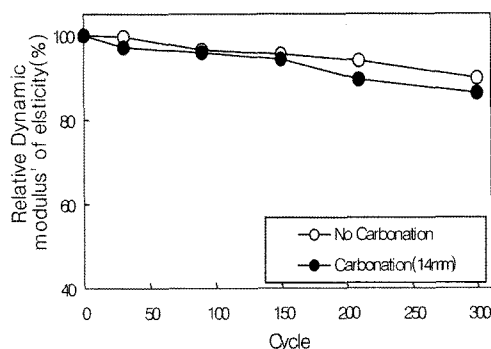
탄산화가 진행된 쏫크리트의 상대동탄성계수는 NA 배합이 300 cycle에서 63.1%로 가장 작게 나타났고, FA 배합이 71.2%, Plain 배합이 72.9%, SF 배합이 74.6%로 가장 우수하게 나타났다. 탄산화가 진행되지 않은 쏫크리트에 비해 탄산화가 진행된 쏫크리트의 동결융해 300 cycle에서의 상대동탄성계수는 Plain, NA, FA, SF 배합이 각각 2.8, 3.3, 2.9, 3.5% 감소하는 것으로 나타났다.



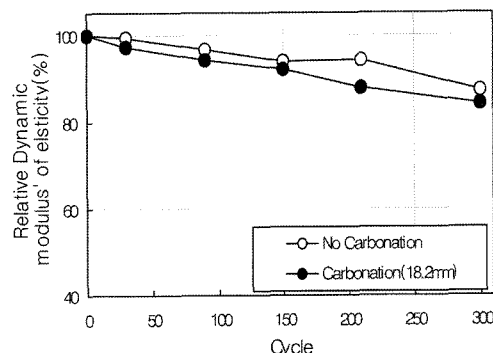
(a) Plain type



(b) NA type



(c) SF type



(d) FA type

Fig. 14 Relative dynamic modulus of elasticity under carbonation

혼화재의 종류에 관계없이 탄산화가 진행된 경우와 진행되지 않은 경우의 동결융해반복에 의한 상대동탄성계수의 차이는 극히 적게 나타났다.

Fig. 15는 탄산화된 슛크리트의 동결융해 반복시 질량 감소율의 변화를 나타낸 것이다. 동결융해 300 cycle의 질량 감소율을 살펴보면, NA 배합이 5.7%로 가장 크게 나타났고, FA 배합이 4.7%, SF 배합이 4.4%, Plain 배합이 4.0%로 나타나, 탄산화되지 않은 경우에 비해 질량감소가 조금 더 발생하였다. 이러한 결과는 촉진탄산화 작용으로 인해 동결융해에 가장 큰 영향을 미치는 미세공극이 충전되고 감소됨으로서, 탄산화되지 않은 슛크리트의 질량보다 촉진 탄산화된 슛크리트의 질량이 더 감소된 것으로 판단된다. 그리고 슛크리트 배합 중에서는 실리카폼을 혼입한 SF 배합의 질량 감소율이 가장 적게 나타났다.

4.2.3 동결융해 반복이 촉진 탄산화에 미치는 영향(Test C)

Fig. 16은 동결융해반복 후 공시체를 촉진탄산화 시킨 경우 질량 감소율과 탄산화 깊이를 나타낸 것이다. 동결융해반복 후 탄산화 깊이는 동결융해 반복을 받지 않은 경우에 비해 건습 반복 5주에서 최대 36%, 건습 반복 10주에서 최대 84% 이상 증가하였다. 건습 반복이 적은 경우 즉, 슛크리트의 지하수 노출이 적은 경우에는 동결융해반복 횟수가 증가하여도 탄산화 깊이는 크게 증가하지 않았지만, 장기간 건습 반복에 노출된 경우에는 탄산화 깊이도 현저하게 증가하였다. 또한, 건습 반복 횟수가 많아질수록 시험 배합의 질량 감소율과 탄산화 깊이는 비례하여 증가하였는데, 실리카폼을 치환한 슛크리트 배합

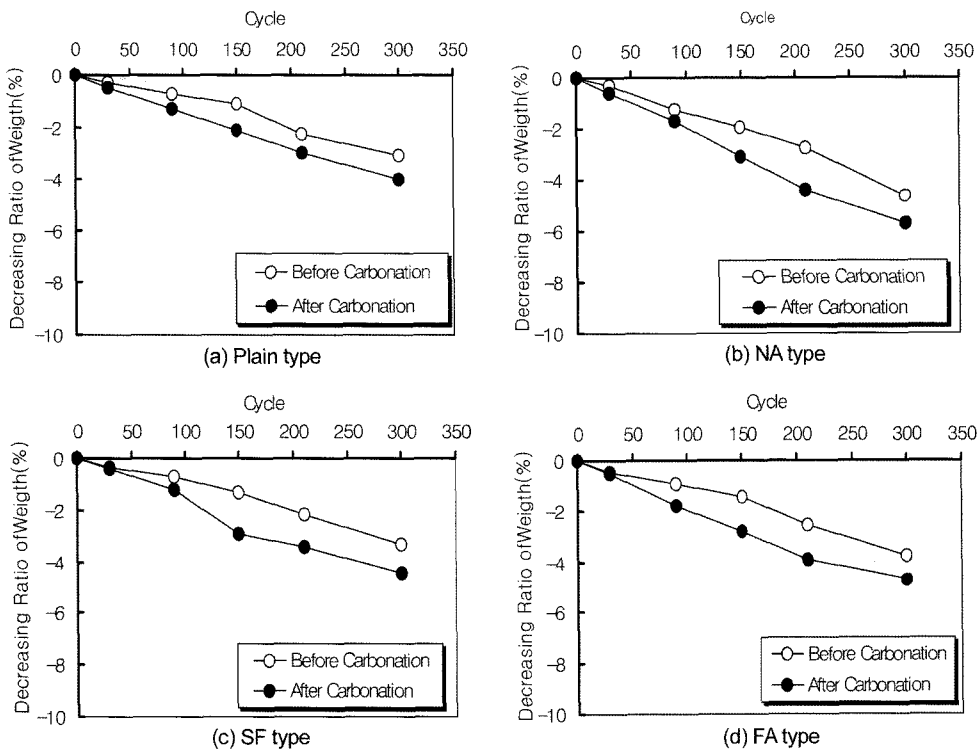


Fig. 15 Weight reduction ratio under carbonation

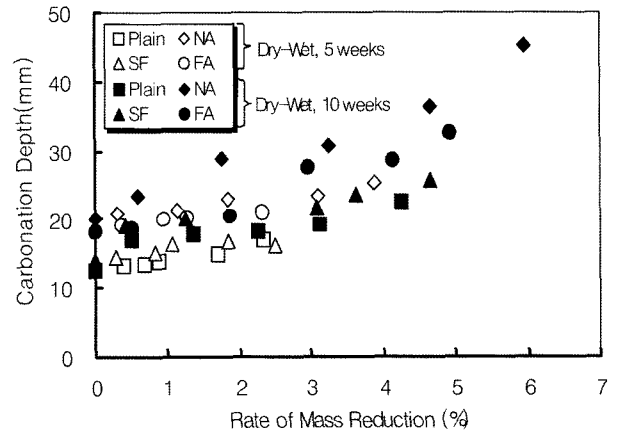


Fig.16 Weight reduction ratio and relative dynamic modulus of elasticity under freezing-thawing

의 경우 다른 슛크리트 배합에 비해 가장 양호한 결과를 나타내었다.

5. 결 론

본 연구에서는 현장타설 슛크리트의 성능 평가를 통해 우수한 배합을 선정하여 터널 내 슛크리트의 내구성 저하를 유발하는 요인들의 열화 특성에 대해 살펴보고, 다양한 열화인자에 의해 변화되는 슛크리트의 장기 내구 특성을 파악하기 위해 복합 열화 시험을 수행하였다. 건습 반복, 동결융해 및 탄산화 등의 열화 인자를 복합적으로 적용한 시험에서는 혼화재에 따른 슛크리트의 장기 내구특성을 평가하였다. 본 연구의 종합적인 요약 및 결

론은 다음과 같다.

- 1) 현장타설 슛크리트 압축강도 시험 결과, 실리카폼 혼입률이 높을수록 압축강도 발현이 대체적으로 우수하였으며 알루미늄이테계 급결제 보다 알칼리 프리계 급결제가 초기강도 및 장기 강도가 우수하게 나타났다.
- 2) 급결제에 의한 휨강도 경향은 나타나지 않았으며 실리카폼 혼입률이 증가할수록 휨강도가 증가함을 알 수 있었다. 알루미늄이테계 급결제를 사용한 슛크리트에서는 실리카폼 치환율 10%에서 가장 큰 휨강도를 보였으며 알칼리프리계 급결제를 사용한 슛크리트에서는 실리카폼 7.5% 혼입률에서 가장 큰 휨강도를 보였다.
- 3) 실리카폼을 혼입한 슛크리트의 동결융해에 의한 상대동탄성계수, 질량 감소율 및 축진 탄산화 시험 결과 다른 슛크리트 배합에 비해 가장 양호한 결과를 나타내어, 실리카폼이 강도증진 효과와 함께 강섬유 혼입에 의한 열화 현상을 최소한으로 감소시켜 슛크리트의 장기내구성을 확보하는데 효과가 있음을 알 수 있었다.
- 4) 건습 반복을 받은 슛크리트가 동결융해 반복을 받을 경우 상대동탄성계수는 강섬유만 혼입한 배합이 48.6%, 플라이애쉬를 치환한 배합이 63.0%, 실리카폼을 치환한 배합이 67.9%로 나타났고, 질량 감소율은 강섬유만 혼입한 배합이 6.0%, 플라이애쉬를 치환한 배합이 4.9%, 실리카폼을 치환한 배합이 4.7%로 나타나 실리카폼을 혼입한 슛크리트가 가장 양호한 결과를 보였다.
- 5) 터널 내 슛크리트가 지하수 노출이 많아서 장기간의 동결융해와 건습 반복을 받은 경우에는 슛크리

트의 탄산화 깊이는 현저하게 증가하게 된다. 또한, 건습 반복 횟수가 많아질수록 탄산화 깊이와 질량 감소율은 비례하여 증가하게 되는데, 실리카폼을 치환한 슛크리트는 이에 대한 열화저항성능이 우수한 것으로 나타났다.

- 6) 복합 열화 시험 결과를 통해 국내 슛크리트의 강도 증진과 장기 내구성 확보를 위해서는 실리카폼과 같은 고품질 혼화재의 사용이 필요할 것으로 판단 된다.

참고문헌

1. 정형식, “스�크리트의 내구성과 품질관리”, 한국터널공학회 학술발표회 논문집, Vol.4, No.2, 2002, pp.37~52.
2. Inoue, Hiromi, Kanari, Katsuhiko, Ishiguchi, Masami, Miyata, “Shohiko Study on characteristics of strengths and durability of shotcrete for tunnel lining”, *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol.8, No.391, 1988, pp.46~55.
3. 마상준, 김동민, “스�크리트 장기내구성 평가 및 제기준 제정 연구”, 한국건설기술연구원, 2005, pp.79~93.
4. Thomas R. Kuesel and John. O.Bickel., *Tunnel Engineering Handbook*, Second Edition, CHAPMAN & HALL, 1996, pp.80~97.
5. EFNARC, *European Specification for Sprayed Concrete*, EFNARC, 1999, pp.6~20.
6. Litvin, A. and Shideler, J., *Laboratory Study of Shotcrete*, ACI Special Publication, SP-4, USA, 1966, pp.165~184.
7. Morgan, Dudley R., Kirkness, and Andrew J., McAskill, “Freeze-thaw durability of wet-mix and dry-mix shotcretes with silica fume and steel fibers”, *Cement Concrete and Aggregates*, Vol.10, No.2, 1988, pp.96~102.
8. Hills, D. L., *Site-produced Sprayed Concrete*, *Concrete* 16, 1982, pp.44~50.

요 약 최근들어 고속도로, 고속철도, 지하철도의 건설이 증가하면서 터널의 건설도 늘어나고 있는 추세이다. 이러한 터널 공사에서 필수적으로 따르는 것이 슛크리트 공정이며 이러한 슛크리트의 시공은 앞으로도 더욱 증가할 추세에 있다. 그러나 슛크리트의 광범위한 시공에도 불구하고 여러 가지 문제점을 내포하고 있는 것이 사실이다. 따라서 본 연구에서는 우리나라 현행 슛크리트의 현황과 문제점을 분석하고, 고품질의 슛크리트 시공을 위하여 실리카폼 슛크리트의 성능 및 적용성에 대해 분석하였다. 또한 슛크리트의 장기적인 안정성 확보를 위해서는 복합적인 환경조건을 고려한 열화 특성을 파악할 필요가 있다. 본 연구에서는 건습 반복, 동결융해 및 탄산화 등의 열화 인자를 복합적으로 적용한 열화 시험을 수행하였다. 특히, 우수한 강도 증진 효과로 국외에서 많이 사용되고 있는 실리카폼을 적용하여 혼화재 치환에 따른 슛크리트의 장기 내구 특성을 평가하였다. 복합 열화 시험 결과 실리카폼을 혼입한 슛크리트는 다른 배합에 비해 가장 양호한 결과를 나타냈고, 실리카폼은 강도 증진 효과와 함께 강섬유 혼입에 의한 열화 현상을 최소한으로 감소시켜 슛크리트의 장기 내구성을 확보하는데 효과가 있었다.

핵심용어 장기 내구성, 열화인자, 마이크로 실리카폼, 혼화재, 슛크리트