

-shotcrete 구성 재료에 따른 콘크리트 성능에 관한 실험적 연구

김상명¹, 신진용^{2*}, 마상준³, 남관우⁴, 김기호⁵

An experimental study on performance of concrete with constituent materials of shotcrete

Sang-Myung Kim, Jin-Yong Shin, Sang-Jun Ma, Kwan-Woo Nam, Ki-Ho Kim

Abstract The experiment was carried out to investigate the influence of coarse aggregate, admixture, and accelerator on the properties of concrete. As the maximum size of coarse aggregate decreased from 13 mm to 8 mm, fluidity of fresh concrete declined but compressive strength and dynamic modulus of elasticity of hardened concrete increased remarkably. The mechanical properties of concrete substituted silica fume to the plain concrete improved, the compressive strength of that substituted blast furnace slag increased slightly. The hydration reaction and compressive strength of specimen with sodium aluminate type accelerator were high at initial, but specimen with alkali free type accelerator improved largely in 28 days.

Keywords: Shotcrete, silica fume, blast furnace slag, accelerator, maximum size of coarse aggregate

요 지 골재 특성, 혼화제, 그리고 급결제 등이 콘크리트에 미치는 역학적 영향성을 평가하였다. 굵은골재 치수가 13 mm에서 8 mm로 작아질수록 유동 특성은 감소되었으나, 경화 콘크리트의 강도 및 동탄성계수는 크게 증가했다. 실리카흙 치환 적용 시 plain과 비교해 압축 강도 및 동탄성계수가 개선되었고, 고로슬래그 미분말을 적용한 경우 28일 재령에서 압축 강도는 다소 증진되었다. 초기 수화 반응 및 압축 강도는 알루미늄이네이트계 급결제를 적용한 시편이 다소 우수했고, 28일 강도 특성은 알칼리프리계 급결제 적용 시 크게 개선되었다.

주요어: shotcrete, 실리카흙, 고로슬래그 미분말, 급결제, 골재 최대치수

1. 서 론

shotcrete는 굴착 직후 발생하는 원지반의 초기 변위를 제어하고 풍화 방지를 통해 굴착면의 안정을 도모하기 위한 구조물로 최근 들어 구조물의 안정성 및 안전성 개념에서 그 역할이 매우 중요하게 부각되고 있다. 터널 분야에서는 NATM(New Austrian Tunneling Method: 이하 NATM) 공법이 획기적인 공법으로 인정받게 되면서, 대부분의 터널에서 NATM 개념을 기본으로 시공되고 있다(이양규 등, 2004). 재래식 터널공법과 비교하여 NATM 공법의 가장 큰 특징은 지보재로서 steel rib, rock bolt 및 shotcrete를 사용함으로써 지반의 이완을 억제하여 원지반의 지보능력을 최대한 활용한다는 점이다. 1980년대 중반 이후 지하철 건설로 인한 지하공간의

활용과 도로, 철도 등의 건설로 인해 대단면 터널공사가 활발하게 이루어졌고, 이러한 NATM 공법의 도입 및 활용과 연계되어 shotcrete 관련 기술도 상당한 발전을 이루었다(이양규 등, 2004). 그러나 아직까지 국내 shotcrete 관련 기술은 국가적인 제도의 미비와 재료 단가의 부담 및 시공현장에서의 의식 부족 등으로 선진국에 비해 상당히 낮은 수준이다. shotcrete는 다양한 혼합물로 구성된 매우 복잡한 재료로서 성능과 효과에 영향을 미치는 변수들이 많이 있다. 대표적인 것으로 급결제, 혼화제, 보강재 등의 사용재료와 골재품질, 타설장비, 분사각도 및 거리, 타설방법, 양생방법 등을 들 수 있다(Luiz, 1998). 이와 같은 변수들이 shotcrete가 사용된 구조물의 설계연한과 상관성을 가지며, 내구성에도 상당한 영향을 미치게 된다. 특히 국내·외적으로 shotcrete의 고강도화 및 고내구화를 목적으로 적용되고 있는 일반적인 방법은 고품질 혼화제와 고성능 급결제를 사용하는 것이다. 고품질 혼화제로는 shotcrete의 품질을 향상시키고 고강도화와 장기 강도 저하를 방지하는 실리카흙, 플라이애쉬 및 고로슬래그 미분말 등이 적용되고 있고

¹한국건설자재시험연구원 신뢰성평가센터 수석연구원

²한국건설자재시험연구원 신뢰성평가센터 선임연구원

³한국건설기술연구원 지반방재환경연구실 책임연구원

⁴(주)태영건설 상무

⁵충북대학교 신소재공학과 교수

*교신저자: 신진용 (sol-gel@hanmail.net)

(Belie et al., 2005), 고성능 급결제로는 기존 알칼리성 급결제의 장기 강도 저하와 인체 유해성 등의 문제를 해결할 수 있는 알칼리프리계 급결제가 사용되고 있다 (Belie et al., 2005; Paglia et al., 2001). 그러나 국내의 경우 범용적으로 사용되고 있는 고품질 혼화재 및 급결제에 대한 품질 기준의 방향성 및 관련 연구 논문 및 보고서 등이 충분하지 못해 실제 현장에서 많은 어려움이 토로되고 있는 실정이다.

국내 숏크리트에서 골재 최대치수는 8 mm, 10 mm 등으로 각각 규정하고 있는 유럽 및 미국 등 외국과 비교해 다소 높게 설정되어 있어 숏크리트 탈락률이 높은 단점이 지적되고 있다(마상준, 2006). 특히 숏크리트를 구성하는 재료 가운데 골재는 전체 체적의 70~80%를 차지하기 때문에 숏크리트의 작업성, 강도, 탈락률, 그리고 내구성에 큰 영향을 미치며 경제적으로도 매우 중요한 문제로 인식되고 있으나, 골재 최대치수 및 품질에 따른 숏크리트의 역학적 특성에 관한 검토는 아직까지 충분하게 진행되어 있지 않다.

본 연구에서는 숏크리트 구성 재료 중 혼화재, 급결제, 그리고 골재의 최대치수에 따른 역학적 특성 및 안정성 등을 평가하고자 굳지 않은 콘크리트 및 굳은 콘크리트의 기초적인 물성을 조사하였다.

2. 사용 재료 및 실험 방법

2.1 사용 재료

2.1.1 시멘트

본 실험에 사용한 시멘트는 국내산 H사에서 제조된

KS L 5201 규정에 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 시멘트의 물리·화학적 성질 및 광물 조성은 Table 1, 2에 각각 나타내었다.

2.1.2 혼화재

시멘트 대체 혼화재로 실리카흄과 고로 급냉 슬래그를 사용하였으며, 각각 결합재로서 포졸란(pozzolan), 잠재 수경 반응(latent hydraulic reaction)에 의해 콘크리트, 숏크리트의 역학적 특성과 내구성을 개선하는 것으로 알려져 있다.

실리카흄은 노르웨이 E사의 제품을 사용했으며, 고로 급냉 슬래그는 선철 제조 공정 중 부산물로 발생된 것으로 KS F 2563 「콘크리트용 고로슬래그 미분말」의 3종을 사용하여 실험하였으며, 실험에 사용된 각각 혼화재의 물리·화학적 특성과 화학 조성은 Table 3, 4에 각각 나타내었다.

2.1.3 급결제

실험에 사용된 급결제는 알칼리 알루미늄에이트(sodium aluminate)계와 2종의 알칼리 프리(alkali free)계 급결제를 사용하였다. 알루미늄에이트계 액상 급결제는 수산

Table 1. Physical properties of cement

Specific gravity	Fineness (cm ² /g)	Setting time (hr:min)		Compressive strength (MPa)		
		Initial	Final	3d	7d	28d
3.15	3,260	4:10	7:40	21.5	26.6	38.9

Table 2. Chemical and mineral compositions of cement

Chemical Comp. (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ig. loss	Free CaO	Insol.
	21.7	5.3	3.1	62.4	1.6	1.7	0.8	1.0	0.5
Mineral Comp. (%)	LSF	LCF	HM	SM	IM	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
	90	88.6	2.1	2.6	1.7	48	27	12	8

Table 3. Physical and chemical properties of admixtures

Type of admixture	Specific gravity	Fineness (cm ² /g)	Ig. loss	Chloride ion (%)	Activity index (%)		
					7d	28d	91d
Silica fume	2.3	200,000	1.3	0.19	99	-	-
Blast furnace slag	2.9	4,355	0.83	0.008	84	120	123

Table 4. Chemical compositions of admixtures

Type of admixture	Chemical compositions (%)					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
Silica fume	21.7	5.3	3.1	62.4	1.6	1.7
Blast furnace slag	33.5	15.2	0.5	43.9	2.6	2.5

화나트륨(sodium hydroxide; 50% solution in water), 수산화알루미늄(aluminum hydroxide; Al₂O₃ 함량 50~57%)을 사용하여 NaAlO₂의 함량이 40±5 wt.%이며 [Na₂O]/[Al₂O₃] 몰비는 1.30~1.60 수준이었다. 알칼리프리 액상급결제는 황산알루미늄(aluminum sulfate hydrate; 98%), 디에탄올아민(diethanol amine)을 주성분으로 하는 것(AF1)과 황산알루미늄, 공업용 비정질 수산화알루미늄을 주성분(AF2)으로 한 것을 사용하였다. 이들 알칼리프리 액상 급결제의 경우 주요 성분 이외에 첨가제를 포함한다. Table 5는 본 실험에 사용된 급결제의 주성분을 비교한 것이다.

2.1.4 골재

잔골재는 최대치수가 2.5 mm인 양질의 하천사를 사용하였으며 물리적 특성은 Table 6에 나타내었다. 굵은 골재는 동일 석산의 부순 골재를 사용하였으며, 굵은골재 최대치수에 따른 콘크리트의 물성을 조사하기 위해서 본 실험에서는 최대치수가 8, 10, 13 mm 크기인 것을 사용하였다. 굵은골재 최대치수 10, 13 mm의 입도는 KS F 2577 「쏿크리트용 재료」에서 규정하고 있는 입도, 최대치수 8 mm의 경우에는 유럽통합규격(EFNARC, 1996)에서 추천하고 하고 있는 입도에 따라 합성입도를 제어하였고, 물리적 특성은 Table 7에 나타내었다.

2.2 실험 개요 및 방법

2.2.1 실험 개요

쏿크리트 구성 재료의 성능 평가를 위한 실험은 콘크리트 실험과 페이스트 및 모르타르 실험을 병용해 실시하였다.

콘크리트 시험은 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프와 공기량, 경화 콘크리트의 압축강도 및 동탄성계수 평가를 통해 굵은골재의 최대치수, 혼화재의 종류와 치환량에 따른 성능을 검토하였다(Table 8). 페이스트 및 모르타르 시험은 급결제의 종류에 따른 특성을 파악하기 위해

Table 5. The main components and additives of alkali and alkali-free accelerator

Type (symbol)	Main component	Additive
Alkali aluminate	Na ₂ O·Al ₂ O ₃	-
Alkali-free (AF1)	aluminium sulfate, diethanol amine	stabilizer etc.
Alkali-free (AF2)	aluminium sulfate, amorphous aluminium hydroxide	organic acid and derives etc.

Table 6. Physical properties of fine aggregate

Test item		Result
Particle size distribution (percent passing ; %)	10 mm	100
	5 mm	100
	2.5 mm	93
	1.2 mm	78
	0.6 mm	46
	0.3 mm	19
	0.15 mm	8
Fineness modulus		2.57
Soundness index (%)		5.0
Density (g/cm ³)	Surface-Dry	2.54
	Oven-Dry	2.50
Water absorption (%)		1.21
Passing of 0.08 mm Sieve		3.0
Organic impurity (%)		-
Unit volume weight (kg/ℓ)		1.529

Table 7. Physical properties of coarse aggregate with maximum size

Test item	Max. size (mm)			
	8	10	13	
Fineness modulus	5.57	5.94	6.28	
Soundness index (%)	4.0	4.0	5.0	
Density (g/cm ³)	Surface-dry	2.60	2.61	2.72
	Oven-dry	2.59	2.60	2.70
Water absorption (%)	1.47	0.94	0.97	
Passing of 0.08 mm Sieve	1.8	0.6	0.8	
LA abrasion index (%)	23.2	21.3	44.1	
Unit volume weight (kg/ℓ)	1.515	1.532	1.612	
Solid volume percentage (%)	57	60	59	

서 평가하였으며, 평가 항목은 급결제의 응결 시간, 압축 강도, 그리고 X선 회절분석을 통한 수화 특성을 조사하였다(Table 9).

2.2.2 실험 방법

2.2.2.1 콘크리트 시편 제작

Table 10은 본 연구에서 적용된 콘크리트 배합 조건을 나타낸 것으로 조건 Table 10의 ①~③은 굵은골재 최대치수 변화에 의한 콘크리트 물성 변화를 조사하기 위한 배합 조건이다. 또한 조건 ①, ④~⑨는 Plain 대비

Table 8. Scheme on concrete test with max. size of coarse aggregate, type and substitution ratio of mineral admixture

Type	Test item	Testing time
Fresh concrete	Slump	Immediately
	Air content	Immediately
Hardened concrete	Compressive strength	3, 7, 28d
	Dynamic modulus of elasticity	3, 7, 28d

Table 9. Paste and mortar test with type of accelerator

Type	Test item	Testing time
Paste	Setting time	-
	XRD (X-ray diffractometer)	1, 3, 28d
Mortar	Compressive strength	0.5, 1, 3, 7, 28d

Table 10. Mixing proportions of concrete

Specimen	W/B (%)	Gmax (mm)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)							remark	
				W	C	S	G	SF ¹⁾	BFS ²⁾	SP ³⁾		
① 8-Plain	33.7	8	67	155	460	1062	524	-	-	2.3	Evaluation on the max. size of coarse aggregate	
② 10-Plain		10						-	-			
③ 13-Plain		13						-	-			
④ 5-SF		8						437	23		-	Evaluation type and substitution ratio of the mineral admixture
⑤ 10-SF		8						414	46		-	
⑥ 15-SF		8						391	69		-	
⑦ 10-BFS		8						414	-		46	
⑧ 20-BFS		8						368	-		92	
⑨ 30-BFS		8						322	-		138	

¹⁾ SF: silica fume

²⁾ BFS: blast furnace slag

³⁾ SP: superplasticizer (naphthalene sulphonate type)

혼화제의 종류 및 치환량에 따른 콘크리트 특성을 조사하기 위함이다.

콘크리트 시편 제작은 100 l, 250 rpm의 속도로 회전하는 강제식 믹서에 모든 고상 재료를 투입한 후 20~30초간 건비빔 한 후 사용수에 고유동화제를 투입한 후 1분 30초 동안 혼합하여 콘크리트를 제조하였다. 슬럼프 시험은 KS F 2402, 공기량 시험은 KS F 2449, 압축 강도는 KS F 2405, 그리고 동탄성계수는 KS F 2437에 준해 실시하였다.

2.2.2.2 페이스트 및 모르타르 시편 제작

급결제의 종류에 따른 응결시간을 비교하기 위하여 길모어 침에 의한 시멘트 응결 시간 시험 방법인 KS L 5103에 따라 시멘트 페이스트의 응결시간을 측정하였다(물-시멘트비 0.29). 모르타르의 강도발현 특성을 비교하기 위하여 KS L 5105에 준하여 몰탈 시편(50×50×50 mm)을 제작하였다(물-시멘트비 0.485). 급결제는 2속으로 1분간 교반하는 과정 중 30초가 경과한 다음 투입하였으며, 투입 후 30초가 경과한 다음 신속하게 시편을 제작하였다. 제작된 시편은 12시간이 경과한 다음 탈형하였으며, 이후 압축 강도 측정은 강도 측정 시간 30분전까지 20±2℃로 유지되는 수조에서 양생하였다. 급결제는 제조사의 권장량을 적용했으며, 각각 시멘트 질량을 기준으로 하여 알루미늄이트계는 5%, 알칼리프리트계는 7%를 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 골재 최대치수에 의한 영향성

아직 굳지 않은 콘크리트의 물리적 성상은 다음 Fig. 1에서 알 수 있듯이 굽은골재의 크기가 커질수록 슬럼프가 증가하는 경향을 보이고 있고 콘크리트의 콘시스턴스(반죽질기) 측면에서는 동일 단위 수량 및 단위 시멘트 량의 경우 골재의 크기가 작을수록 불리해짐을 알 수 있었다. 이와 같은 현상은 굽은골재 주위의 모르타르 량의 차이에 따른 영향으로 굽은골재 최대치수가 커질수록 비표면적이 상대적으로 적어 잉여 모르타르에 의해 유동성이 증가되어 발생된 현상으로 판단되며, 기존 연구 결과와 잘 일치하였다(김덕현 등, 2004). 반면 연행공기는 굽은골재의 크기가 커질수록 감소하는 경향성을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 연행공기 감소는 슬럼프 증가와 관련성이 있으며, 슬럼프 수치가 높은 경우(보통 15 cm 이상) 공기량이 크게 감소된다는 기존 연구 결과와 동일하였다(김기형 등, 1986).

결과적으로 골재 크기가 커질수록 공기연행체의 함량이 증가되어야 하고, 반대로 골재 최대 크기가 작아질수록 유동화제(감수제)의 첨가량이 높아져야 할 것으로 판단된다.

경화 콘크리트의 압축 강도 및 동탄성계수에 대한 결과는 Fig. 2, 3에 각각 나타내었다. Fig. 2에서 굽은골재의 크기와 압축 강도의 상관관계에 대한 결과, 굽은골재의 크기가 작아질수록 압축강도가 다소 상승되는 경향성을 나타내었다. 이것은 굽은골재의 크기가 감소할수

록 콘크리트의 밀실한 충전이 가능하고 비표면적 증가에 따른 시멘트 페이스트와 골재, 그리고 골간 간의 상호 결합력이 증가된 원인과 함께 단위 용적 당 골재가 차지하고 있는 부피가 높기 때문인 것으로 사료된다.

굽은골재의 크기와 동탄성계수와와의 관계는 Fig. 3에서와 같은 초기 재령(3일)에서는 골재 크기에 따른 영향성이 관찰되지 않았으나, 재령이 경과됨에 따라 골재의 최대 크기가 감소할수록 동탄성계수가 증가되는 경향성을 나타내었다. 이것은 압축 강도 결과 및 증가 원인과 유사하며, 동탄성계수의 증가는 콘크리트 내구 구조의 밀실화 및 견실화에 따른 결과로 사료된다. 따라서 골재의 최대 입자 크기가 사용 가능한 적정 수준 범위에서 작아질수록 역학적 측면에서는 보다 유리한 것으로 판단할 수 있다.

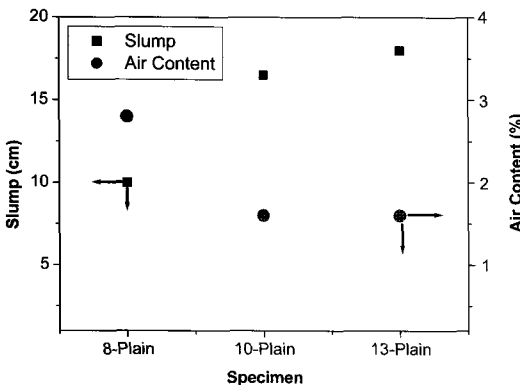


Fig. 1. Variation of slump and entrained air with the max. size of coarse aggregate

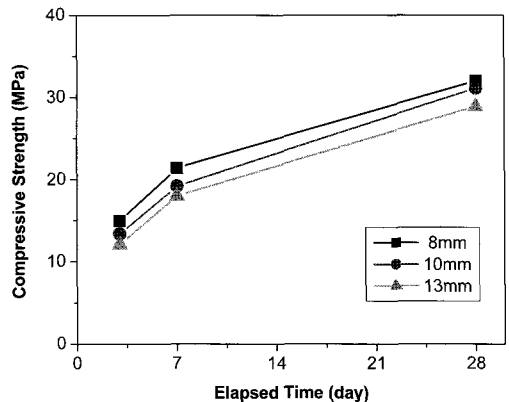


Fig. 2. Compressive strength of concrete specimen with the max. size of coarse aggregate

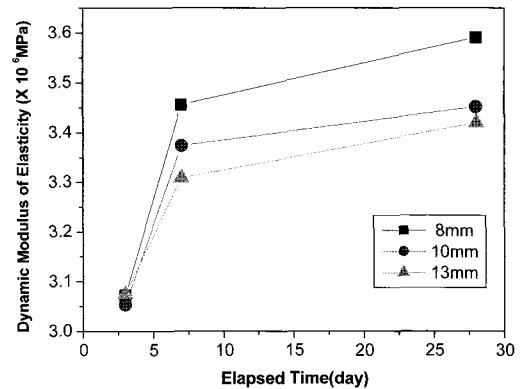


Fig. 3. Dynamic modulus of elasticity of concrete specimen with the max. size of coarse aggregate

결과적으로 굵은골재 최대치수가 작아질수록 초기 굳지 않은 콘크리트에서 유동성 측면에서는 페이스트에 의한 점성 증가에 의해 영향으로 양호하지 못했으나, 반대로 연행 공기량은 점성 증가에 의한 영향으로 증가되었다. 또한 경화 콘크리트에서 골재 최대치수가 작아질수록 강도 증진 효과와 동탄성계수가 증가함으로써 역학적/내구적인 측면에서 유리하게 작용할 것으로 사료된다. 이에 시멘트 치환 혼화재 성능 평가 시험 시 콘크리트 배합에 사용된 골재는 Table 10에 나타난 바와 같이 최대치수를 8 mm인 굵은골재를 사용하였다.

3.2 혼화재의 종류 및 치환량에 따른 영향성

Fig. 4, 5는 혼화재의 종류 및 치환량에 따른 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프 및 공기량의 결과로 고로슬래그

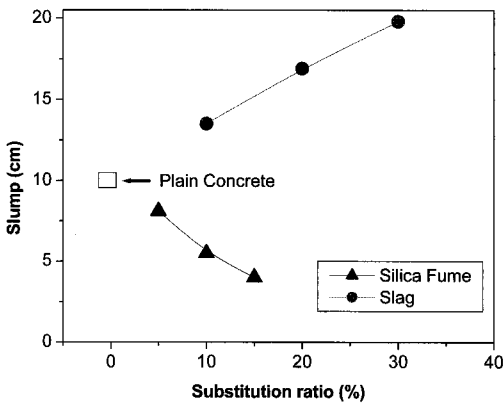


Fig. 4. Variation of slump with the type and substitution ratio of mineral admixture

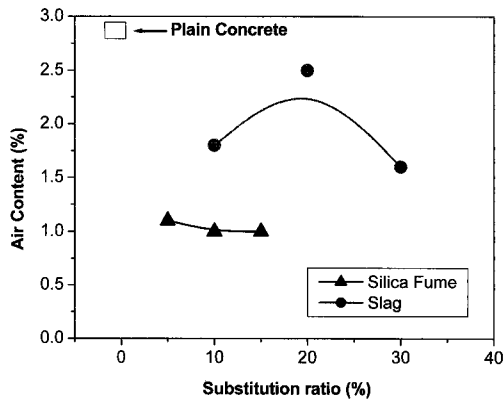


Fig. 5. Variation of entrained air with the type and substitution ratio of mineral admixture

미분말을 치환 사용한 경우 치환량 증가에 따라 초기 수화 반응 지연 및 슬래그의 유리질 표면에 의한 윤활 작용으로 슬럼프 수치는 plain 콘크리트(8-Plain; Table 10 참조)와 비교해 증가하는 경향성을 나타내었다(沼田, 1986). 그러나 실리카흙을 치환 적용한 경우 실리카흙의 높은 비표면적 및 흡수성에 의한 콘크리트의 점성 증가로 유동성은 크게 상실되는 경향성을 나타내었다(Malhotra et al., 1983). 이와 같은 유동성 손실에 의해 동일한 작업성을 얻기 위하여서는 일반적인 plain 콘크리트에서 요구되어지는 것보다 초기 슬럼프가 대략 5 cm 정도 증가되어야만 하는 것으로 보고되고 있다(Jahren, 1983).

plain 콘크리트와 비교해 혼화재를 사용한 굳지 않은 콘크리트의 공기량은 종류 및 치환량에 상관없이 낮아졌다. 혼화재의 치환량이 공기량에 미치는 영향성은 적었지만, 종류에 따라 다소 차이점이 인지되었다. 고로슬래그 미분말 치환에 따른 공기량 감소는 3.1에서 설명된 바와 같이 유동성 개선에 따른 콘크리트의 가스성 증가에 따라 공기 연행 성능이 감소된 것으로 판단된다. 특히 실리카흙 치환 시 공기량 감소 현상은 더욱 분명했으며, 이것은 실리카흙의 높은 비표면적과 발생 과정에서 포함된 미연소 탄소 함유, 그리고 낮은 슬럼프 수치가 기인된 것으로 사료된다(Luiz, 1998; Markus et al., 2001).

혼화재의 종류 및 치환량이 경화 콘크리트 특성에 미치는 영향성을 평가하고자 압축 강도와 동탄성계수 평가를 실시하였다. 압축 강도 측정 및 동탄성계수 측정 결과, 실리카흙의 혼입량 증가에 따라 측정값이 plain 콘크리트 대비 크게 증가되는 경향성을 나타내었다(Fig. 6).

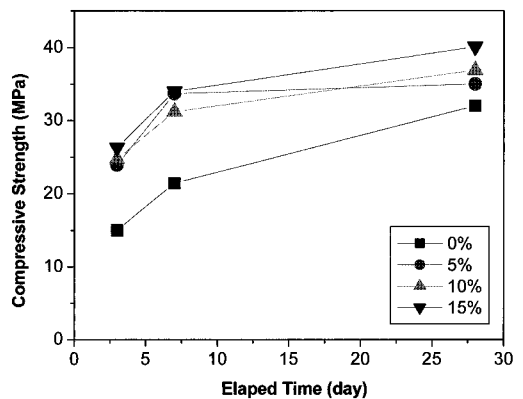


Fig. 6. Compressive strength of concrete specimen with substitution ratio of SF

이것은 실리카흙의 미세한 입자(보통 시멘트 입자 크기의 수백분의 일)의 미세 충전 효과(micro filler effect)와 높은 비표면적에 의한 우수한 중·장기 반응성과 관련이 있다. 고로슬래그 미분말 치환 시(Fig. 7) 초기 재령에서는 치환량이 적을수록 유리했다. 그러나 재령 28일에서는 고로슬래그 미분말의 잠재 수경 반응에 의해 치환량은 크게 중요하지 않았으며, 실리카흙의 강도 개선 효과 보다는 적지만 plain 콘크리트보다는 다소 증진되는 경향성을 나타내었다.

Fig. 8, 9는 실리카흙, 고로슬래그 미분말을 치환한 콘크리트 시편의 재령별 동탄성계수 특성을 나타낸 것이다. 이들 혼화제는 보통 내구성 등 구조의 밀실화에 크게 도움이 되는 것으로 알려져 있으나, 혼화제의 치환을

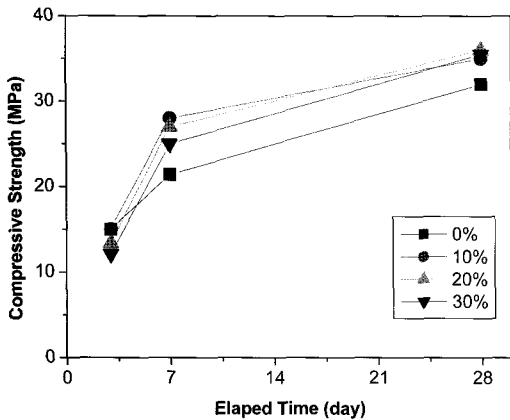


Fig. 7. Compressive strength of concrete specimen with substitution ratio of BFS

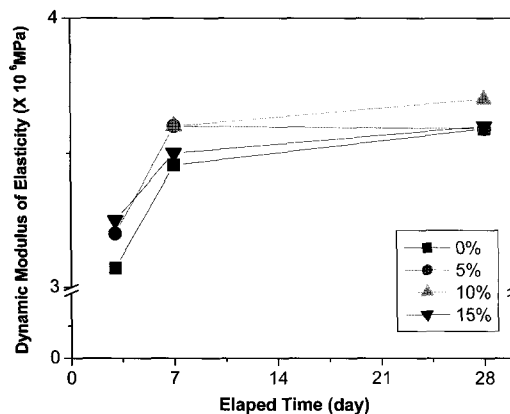


Fig. 8. Dynamic modulus of elasticity of concrete specimen with substitution ratio of SF

변화에 따른 동탄성계수에는 압축 강도 결과에 비해 그 영향성은 크지 않았으며 실리카흙 적용 시 다소 유리한 것을 알 수 있었다. 동탄성계수 특성은 혼화제의 성능보다는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 굵은골재의 최대치수가 콘크리트의 내구성에 미치는 영향성이 보다 지배적인 것으로 판단된다. 하지만 동일 슬럼프를 기준으로 할 때 고로슬래그 미분말의 경우 단위 수량이 일정 수준 감소될 수 있는 여지가 있기 때문에 압축 강도 및 동탄성계수와 같은 역학적 특성 및 내구 특성은 다소 개선될 수 있을 것으로 사료된다.

결론적으로 실리카흙을 사용할 경우와 비교해 고로슬래그 미분말을 숏크리트 및 콘크리트 배합에 적용할 경우 초기 강도 등의 문제는 개선의 여지가 있지만, 단위 수량 감소 또는 슬럼프 개선에 의한 28일 이후 장기 강도 증진 및 내구성 개선, 우수한 경제성(실리카흙 가격의 약 5% 수준) 등을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

3.3 급결제의 종류에 따른 영향성

본 연구에서 사용된 3종의 숏크리트용 액상 급결제의 대한 응결 시간 시험 결과를 Table 11에 나타내었다.

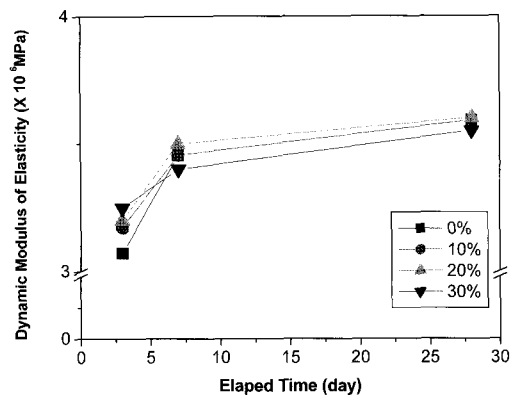


Fig. 9. Dynamic modulus of elasticity of concrete specimen with substitution ratio of BFS

Table 11. Setting time of cement paste with type of accelerator for shotcrete

Type	Setting time (min.: sec.)	
	Initial set	Final set
Alkali aluminate	3:20	6:30
Alkali-free (AF1)	4:10	8:30
Alkali-free (AF2)	2:40	6:10

길모아침을 사용한 응결시간 측정 결과, AF2가 기존의 알루미늄이트계 액상 급결제보다 초결 및 종결이 다소 빠른 경향성을 보였다. AF2 첨가로 인한 빠른 응결 특성은 급결제 중에 존재하는 알루미늄 성분과 풍부한 황산염이 $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3(\text{C}_3\text{A})$ 와 반응하여 다량의 에트링자이트 침상 결정을 반응 초기에 생성했기 때문으로 판단된다(Paglia, 2001). AF1의 응결시간 지연 원인은 급결 원으로 사용된 혼합물들이 용매에 완전 용해되지 않은 채 현탁 상태로 존재하기 때문에 특히 C_3A 와 용액 이온 반응 속도(through solution reaction)가 상대적으로 느리고, 높은 점도로 인하여 급결제와 시멘트와의 혼합 능력이 감소되었기 때문에 것으로 사료된다. Fig. 10에서 알루미늄이트계 급결제를 적용한 시편의 최종 강도는 급결제를 사용하지 않은 plain 또는 알칼리프리게 급결제를 적용한 시편에 비해 약 20~30% 낮은 최종 압축 강도발현 특성을 나타냈다. 알칼리 알루미늄이트계 급결제를 첨가할 경우 압축 강도 저하 현상은 높은 알칼리 함량으로 인해 골재에 함유되어 있는 반응성 실리카와 알칼리-골재 반응으로 시멘트 계의 열화 또는 반응 초기 석고($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$)와의 반응으로 시멘트 그레인(grain) 주위에 에트링자이트 생성을 막고 C_3A 와 급결(flash set) 반응함으로써 시멘트 수화물의 충전성 문제, 그리고 반응 초기 과량의 수산화칼슘 생성으로 강도 발현에 주로 기여하는 C_3S 또는 C_2S 의 수화 반응 생성물인 C-S-H 겔의 성장에 악영향을 초래했기 때문으로 사료된다. 그러나 알칼리프리 급결제의 경우 반응 초기 자체 황산염의 지속적인 공급과 반응 1~2분 단계에서 가소

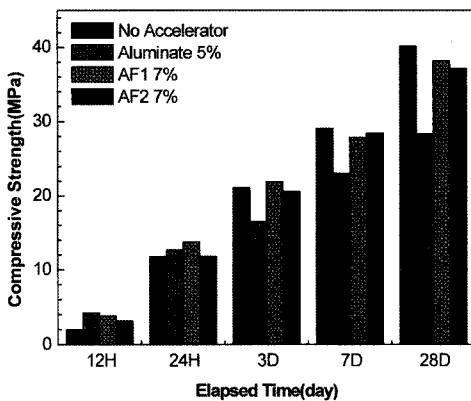


Fig. 10. Compressive strength of concrete specimen with type of accelerator for shotcrete

(plasticity) 상태를 유지하기 때문에 충분한 작업 시간 제공으로 밀실한 충전, 그리고 정상적인 C-S-H 겔의 성장으로 plain과 유사한 7, 28일 압축 강도 결과를 나타낸 것으로 판단된다.

Fig. 11은 페이스트 경화체의 X-ray 회절분석결과이다. 알루미늄이트계와 알칼리프리게 급결제를 사용한

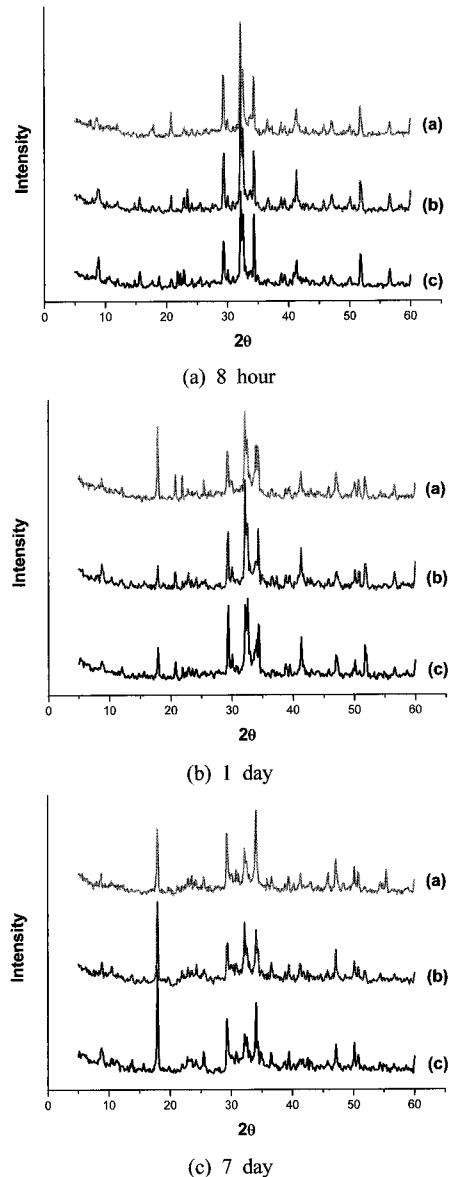


Fig. 11. XRD patterns of cement pastes hydrated for (A) 8hour, (B) 1day, and (C) 7day. [(a) alkali aluminate, (b) AF1, and (c) AF2]

시편 간 가장 큰 차이점은 8시간 및 1일 시편의 분석 결과 중 수산화칼슘에 해당하는 약 18°, 34° 피크(2θ deg.)에 있다. 알칼리프리게 적용 시편의 경우 1일 경과 후에도 수산화칼슘 판상 결정 피크가 크게 발달해 있지 않다. 그러나 에트링자이트 피크(약 9°)는 매우 발달되어 있는 형태를 나타내고 있다. 이와 비교해 알루미늄이 트계 급결제를 사용한 1일 시편에서는 수산화칼슘의 피크가 상대적으로 크게 성장해 있고 에트링자이트도 일부 존재하고 있었다.

그러나 7일 경과된 알칼리프리게 적용 시편에서는 수산화칼슘 피크가 뚜렷하게 관찰된다. 특히 수산화칼슘의 피크 중 약 18° 피크는 AF1과 AF2가 오히려 크게 나타나고 있다. 이에 주로 강도에 기여하는 C-S-H겔은 교착하여 생성되는 (001)면의 Ca(OH)₂ 결정 성장이 상이한 것으로부터 C-S-H겔 성장에도 영향을 초래함으로써 중기 이후 강도 증진에 영향을 미치는 것으로 판단된다(Su et al., 1991).

4. 결 론

골재, 혼화재, 그리고 급결제와 같은 숏크리트 구성 재료가 콘크리트 성능에 미치는 영향성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 굳지 않은 콘크리트에서 골재 최대치수에 따른 시험 결과 굽은골재 치수가 작아질수록 초기 유동성 측면에서는 불리하게 작용했으나, 반대로 연행 공기량은 증가되었다.
2. 경화 콘크리트에서 골재 최대치수가 작아질수록 강도 증진 효과와 동탄성계수가 증가함으로써 역학적/내구 성능이 개선되는 것을 확인할 수 있었다.
3. 고로슬래그 미분말을 치환한 콘크리트의 경우 plain에 비해 유동성은 치환량이 증가함에 따라 크게 개선되는 반면, 실리카흙을 치환한 콘크리트의 경우 치환량 증가에 따라 유동성이 크게 상실되는 경향성을 나타내었다.
4. 실리카흙을 치환 적용한 콘크리트의 경우 plain과 비교해 압축 강도 및 동탄성계수가 개선되었으며, 고로슬래그 미분말을 치환 적용한 콘크리트의 경우 재령 28일에서 압축 강도는 다소 증진되었다.

5. 모르타르의 압축강도 및 수화 생성물 관찰 결과 초기 수화 반응 및 압축 강도는 알루미늄이 트계 급결제를 적용한 시편이 다소 우수했으나, 양생기간이 경과됨에 따라 강도저하가 나타나는 것으로 나타났다. 이와 비교하여 알칼리프리게 급결제는 재령 3일 이후 우수한 강도 발현 특성을 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 2006년도 건설기술혁신사업에서 지원한 “산업부산물의 경제적 재활용과 시공품질 향상을 위한 분말형 레디믹스트(ready-mixed) 숏크리트 개발” 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김기형, 최재진, 문한영 (1986), 레디믹스트 콘크리트의 공기량 손실에 관한 고찰, 대한토목학회 학술발표회 개요집, pp. 37-42.
2. 김덕현, 이상수, 송하영, 김을영 (2004), 굽은골재 최대치수별 굽은골재/잔골재 용적비에 따른 콘크리트의 특성에 관한 실험적 연구, 한국건축시공학회 논문, 제4권 2호, pp. 97-103.
3. 마상준 (2006), 숏크리트 장기 내구성 평가 및 제기준 제정 연구, 한국건설기술연구원.
4. 이양규, 전준태, 김종열 (2004), NATM 터널의 건습식 shotcrete 강도시험에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 제24권 2호, pp. 239-245.
5. 沼田 (1986), *セメント・コンクリート用 混和材料*, 技術書院.
6. De Belie, N., Grosse, C. U., Kurz, J., Reinhardt, H.-W. (2005), Ultrasound monitoring of the influence of different accelerating admixtures and cement types for shotcrete on setting and hardening behaviour, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, Issue 11, pp. 2087-2094
7. Jahren, P. (1983), Use of silica fume in concrete, *Proceedings, CANMET/ACI First International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Other Mineral By-products in Concrete*, Montebello, ed, Malhotra, V. M., SP-79, Vol. 2, pp. 625-642.
8. Luiz, R. P. (1998), Accelerating admixtures for shotcrete, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 20, Issues 2-3, pp. 213-219.
9. Malhotra, V. M., Carrette, G. G. (1983), Silica fume concrete-

- properties, application, and limitations, Concrete International: Design & Construction, Vol. 9, No. 5, pp. 40-46.
10. Markus, P., Wolfgang, K. (2001), Rheology and rebound behaviour of dry-mix shotcrete, Cement and Concrete Research, Vol. 31, Issue 11, pp. 1619-1625.
11. Paglia, C., Wombacher, F., Böhni, H. (2001), The influence of alkali-free and alkaline shotcrete accelerators within cement systems: I. Characterization of the setting behavior, Cement and Concrete Research, Vol. 31, Issue 6, pp. 913-918.
12. Su, Z., Bijen, J. M., Larbi, J. A. (1991), Influence of polymer modification on the hydration of portland cement, Cement and Concrete Research, Vol. 21, Issue 5, pp. 727-736.



김 상 명

한국전자재시험연구원
신뢰성평가센터
수석연구원

E-mail: ksm17025@hanmail.net



신 진 응

한국전자재시험연구원
신뢰성평가센터
선임연구원

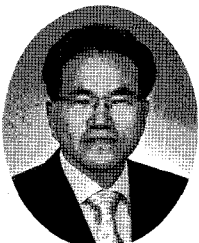
E-mail: sol-gel@hanmail.net



마 상 준

한국건설기술연구원
지반방재환경연구실
책임연구원

E-mail: sjma@kict.re.kr



남 관 우

(주)태영건설
상무

E-mail: namkw@taeyoung.com



김 기 호

충북대학교
신소재공학과
교수

E-mail: kimkh@chungbuk.ac.kr