

분말형 자극제를 이용한 고로슬래그미분말 혼입 시멘트 모르타르의 조기 압축강도 향상에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Early Compressive Strength Improvement of Cement Mortar Mixed with Blast Furnace Slag using Powdered Stimulants

이 강 진* 김 진 형** 박 기 봉*** 이 한 승****
Lee, Kang Jin Kim, Jin Hyoung Park, Ki Bong Lee, Han Seung

Abstract

Based on previous research and existing literature, this study examines the development of admixture, which increases the early concrete strength (1 and 3 day) by mixing blast furnace slag cement and concrete stimulant. The research on early strength development of concrete is necessary in dealing with the drawbacks of slow early strength concrete on site and to shorten the construction time. The study confirmed that when a high alkaline mortar mixture is mixed with blast furnace slag, the early strength of admixture exceeds that of ordinary portland cement (OPC). The use of calcium chloride (CaCl₂) promotes hydration of cement at low temperature and show similar strength as the blast furnace slag admixture. Although calcium chloride seems economically advantageous, it causes steel corrosion and its use in concrete should be further studied in-depth.

키워드 : 고로슬래그미분말, 알칼리 자극제, 조기 압축강도, 시멘트모르타르
Keywords : Blast Furnace Slag Powder, Alkali Accelerator, Early Compressive Strength, Cement Mortar

1. 서 론

최근에는 건설산업의 경제성 향상을 목적으로 건설공사 기간의 단축을 통한 건설비용 절감을 위해 콘크리트 배합에서는 필요이상의 강도를 갖는 콘크리트를 적용하거나 콘크리트의 배합을 최적화하는 연구가 이루어지고 있다. 또한, 건축 골조공사에서 매우 중요한 거푸집 탈형 시기를 앞당기려는 목적으로 콘크리트 조기강도 발현에 관한 연구가 중요한 과제로 대두되고 있다¹⁾. 그러나, 건축 골조공사의 경제성을 목적으로 한 고로슬래그미분말 등의 산업부산물 사용은 콘크리트의 조기강도, 특히, 재령 1일 및 3일에서 낮은 강도발현을 나타내기 때문에 조기재령에서의 강도향상을 목표로 하는 고로슬래그미분말(Blast Furnace Slag 이하 BFS라 함.) 혼입 콘크리트의 개발 연구는 매우 중요하다고 하겠다.²⁾ 이러한, 고로슬래그미분말은 보통 포틀랜드(Ordinary Portland Cement 이하 OPC라 함.)과 비교하여 수화열이 낮고, 장기강도가 높으며, 내화학적이 우수한 품질적인 장점이 있다. 또한,

BFS 생산 소요 에너지는 OPC와 비교하여 매우 작을 뿐만 아니라 CO₂ 원단위도 매우 적기 때문에 탄소저감형 사회에서도 매우 적합한 콘크리트용 혼화재료로 판단된다. 현재, 우리나라에서 사용되고 있는 고로슬래그미분말은 혼화재료로서의 질량 치환율이 레미콘공장에서는 약 20~30%를 차지하고 있으며, 고로슬래그시멘트형태로는 약 40%를 포함하고 있다. 주로, 고로슬래그미분말을 혼입한 콘크리트는 장기재령의 강도확보나 내구성 확보를 위해 토목용으로 사용되고 있는 실정이다. 그러나, 건축용 콘크리트로서의 사용은 조기강도 발현문제점으로 인해 건축물의 기초 등에 한정되어 사용되는 측면이 많기 때문에 이를 건축 구조체에 사용하기 위해서는 조기강도 향상, 특히, 재령 1일 및 3일에서 OPC만을 사용한 콘크리트와 동등 이상의 강도발현을 내는 것이 매우 중요하다.³⁾

표 1에 나타난 것과 같이 고로슬래그미분말을 콘크리트용 혼화재료로서 사용하거나 고로시멘트로 사용한 콘크리트의 조기강도 향상에 관한 기존 연구를 살펴보면 주로 재령 3일 및 7일의 압축강도 향상을 대상으로 하고 있다. 또한, 조기강도 향상방법은 석고, 소석회, 석회석 등의 자극제 사용에 의한 고로슬래그미분말의 잠재수경성을 촉진하는 방법, 고로슬래그미분말의 분말도를 20,000 cm²/g으로 고분말화하여 반응성을 높이는 방법, CSA계 혼화제를 사용하여 에트린자이트의 생성을 촉진하는 방

* 주저자, 영진글로벌(주) 기술연구소 소장 (lkjmono@hanmail.net)
** 한양대학교 대학원 석·박 통합과정 (bestkjh007@naver.com)
*** 강원대학교 건축공학과 부교수 (kbpark@kangwon.ac.kr)
**** 교신저자, 한양대학교 ERICA 건축학부, 교수 (ercleehs@hanyang.ac.kr)

법, 조강형 폴리카르보나트의 혼화제를 사용하는 방법 등이 연구되고 있으나, 재령 1일에서의 조기강도 향상에 관한 연구는 거의 전무한 실정이다. 한편, 표 2에 나타난 것과 같이 시멘트를 전혀 사용하지 않고 바이너로서 고로슬래그미분말을 100% 사용하고 자극제로서 수산화나트륨, 규산나트륨, 탄산나트륨, 황산나트륨 등의 알칼리자극제를 혼입하는 지오폴리머에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 이것은 시멘트에 고로슬래그미분말을 혼화제로서 사용하여 제조하는 콘크리트의 조기강도향상에 관한 연구와는 차별화되며, 이의 메커니즘을 이용하여 고로슬래그미분말 혼입 콘크리트의 조기강도향상을 도모할 수 있을 것이라고 판단된다.

이상의 배경으로, 본 연구는 건축구조체의 조기탈형을 통한 공사기간 단축을 위하여, 고로슬래그미분말을 혼화제로서 사용한 모르타르를 대상으로 재령 1일 및 3일에서 OPC 100%를 사용한 모르타르와 동등이상의 압축강도를 발현하는 분말형 조강혼화제를 개발하는 것을 목적으로 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 기존 연구와 달리 각각 고로슬래그미분말 및 시멘트를 자극시켜 강도를 발현하는 분말형 자극제의 선정 실험을 실시하고 이중에서 최적의 분말형 자극제를 선정하여 고로슬래그미분말 혼입 모르타르의 압축강도 발현 실험을 실시하였다.

표 1. BFS 혼입 콘크리트의 조기강도 향상 기존 연구

번호	연구목적	재령 (일)	BFS 치환율(%)	자극제 종류 (치환율 %)	W/C (%)
1 ⁴⁾	무기계 자극제의 첨가가 고로슬래그시멘트의 압축강도 및 세공구조에 미치는 영향	3,7, 28, 56, 90	30, 50, 70	소석회 (0.5) 석회석 (2.5) 무수석고 (2.5)	50
2 ⁵⁾	서냉고로슬래그 고미분말을 사용한 콘크리트의 압축강도 발현특성에 관한연구	3,7, 28	20, 30, 40	소석회 (2,4,6,8)	45
3 ⁶⁾	CSA에 의한 콘크리트의 초기품질향상에 관한 연구	3,7, 28	35	CSA (0.5,1,1.5)	35, 45
4 ⁷⁾	40℃ 온수양생을 이용한 초고강도 콘크리트의 조기강도 예측에 관한 연구	3,5, 7,28	10, 20, 30, 40	SP (0.7,1,3,3.6)	19, 23.5, 32
5 ⁸⁾	배합설계 조건에 따른 고성능콘크리트의 조기강도발현 특성에 관한 연구	2	10	PC계 AE감수제	33

표 2. BFS 100% 활용 지오폴리머콘크리트 기존 연구

번호	연구목적	재령 (일)	BFS 치환율(%)	자극제 종류 (치환율 %)	W/C (%)
1 ⁹⁾	고로슬래그와 나트륨계열 활성화제를 이용한 무시멘트 모르타르의 특성	3,7,28	100	수산화나트륨(4) 규산나트륨(5) 탄산나트륨(5) 황산나트륨(6)	50
2 ¹⁰⁾	알칼리 자극에 의한 고로슬래그 경화체의 기초 특성	3,7,28	100	수산화나트륨 (1,3,5,7,9)	50
3 ¹¹⁾	알칼리자극제를 이용한 비소성 시멘트 모르타르의 압축강도 개선	3,7,28	100	SL(1,4,5) 수산화 나트륨 (2,4,8,12)	50
4 ¹²⁾	규산나트륨을 자극제로 사용한 알칼리 활성화 슬래그 경화체의 특성	3,7, 28, 56	100	규산나트륨 (3,5,7,10,)	50

2. 실험

2.1 실험계획

본 연구에서는 그림 1에 나타난 바와 같이 기존 연구와 달리 고로슬래그미분말을 자극시키는 분말형 자극제의 선정 실험(Series I), 시멘트를 자극시키는 분말형 자극제의 선정 실험(Series II)을 실시 한 후에, 최적의 자극제를 선정하고 이를 활용하여 고로슬래그미분말 혼입 모르타르의 조기강도 향상을 위한 분말형 자극제 선정 실험(Series III)을 실시하였다. 표 3~5에 각 Series별로 배합표를 나타낸다.

Series I의 조기강도 혼화제로서 고로슬래그미분말에 조기강도 향상에 유효한 NaOH, Ca(OH)₂, 소석회, Na₂SiO₃, Na₂CO₃을 일정비율로 치환하였다. Series I에서 BFS 100% 치환한 모르타르와 BFS에 대한 분말형 자극제를 치환율을 달리하여 강도 발현이 좋은 자극제를 찾기 위해 NaOH과 Ca(OH)₂, 소석회는 각각 5%, 10%, 20%로 설정하였고, Na₂SiO₃는 5%, 7%, 10%, Na₂CO₃는 3%, 7%, 10%로 치환하였다.

Series II에서는 시멘트 조기강도 향상에 효과가 있는 NaSCN, Ca(NO₃)₂, Na₂S₂O₃, TEA, CaCl₂을 일정비율로 치환하여 실험을 실시하였다. Series II는 OPC 100% 기준으로 NaSCN은 2%, 6%, 10% 치환하고, Ca(NO₃)₂는 1%, 3%, 5%, Na₂S₂O₃는 2%, 6%, 10%, TEA은 0.02%, 0.05%, 0.1% 마지막으로 CaCl₂는 0.5%, 1%, 2%로 하여 OPC에 강도 발현이 좋은 자극제와 함유율을 찾기 위해 치환율을 달리하였다.

Series III에서는 Series I 과 Series II를 먼진 실험을 실시하여 BFS와 OPC에 대하여 조기강도 발현율이 가장 좋은 분말형 자극제를 선정하여 실험을 실시하였으며, 최적의 배합을 찾기 위해 OPC 100%와 OPC(80%)+BFS(20%)를 기준으로 하여 CaCl₂와 NaSCN, TEA는 OPC에 대하여 치환하고, Ca(OH)₂, NaOH, 소석회는 BFS 20%에 대하여 치환하였다.

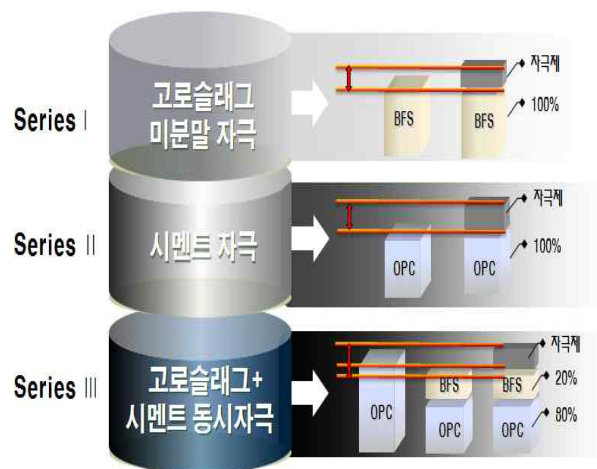


그림 1. Series별 자극제 사용

표 3. Series I - 고로슬래그미분말(BFS) 자극제 선정 실험 배합표

NO	기호	W/B (%)	질량비율(%)						단위질량(g)						S	W
			BFS	NaOH	Ca(OH) ₂	소석회	Na ₂ SiO ₃	Na ₂ CO ₃	BFS	NaOH	Ca(OH) ₂	소석회	Na ₂ SiO ₃	Na ₂ CO ₃		
1	BN1	50	95	5	-	-	-	-	427.5	22.5	-	-	-	-	1350	225
			90	10	-	-	-	-	405	45	-	-	-	-		
			80	20	-	-	-	-	360	90	-	-	-	-		
2	BC1		95	-	5	-	-	-	427.5	-	22.5	-	-	-		
			90	-	10	-	-	-	405	-	45	-	-	-		
			80	-	20	-	-	-	360	-	90	-	-	-		
3	BC2		95	-	-	5	-	-	427.5	-	-	22.5	-	-		
			90	-	-	10	-	-	405	-	-	45	-	-		
			80	-	-	20	-	-	360	-	-	90	-	-		
4	BN2		95	-	-	-	5	-	427.5	-	-	-	22.5	-		
			93	-	-	-	7	-	418.5	-	-	-	31.5	-		
			90	-	-	-	10	-	405	-	-	-	45	-		
5	BN3		97	-	-	-	-	3	436.5	-	-	-	-	13.5		
			93	-	-	-	-	7	418.5	-	-	-	-	31.5		
			90	-	-	-	-	10	405	-	-	-	-	45		

표 4. Series II - 시멘트(OPC) 자극제 선정 실험 배합표

NO	기호	W/B (%)	질량비율(%)						단위질량(g)						S	W
			OPC	NaSCN	Ca(NO ₃) ₂	Na ₂ S ₂ O ₃	TEA	CaCl ₂	OPC	NaSCN	Ca(NO ₃) ₂	Na ₂ S ₂ O ₃	TEA	CaCl ₂		
1	OPC	50	100	-	-	-	-	-	450	-	-	-	-	-	1350	225
2	ON1		98	2	-	-	-	-	441	9	-	-	-	-		
			94	6	-	-	-	-	423	27	-	-	-	-		
			90	10	-	-	-	-	405	45	-	-	-	-		
3	OC1		99	-	1	-	-	-	445.5	-	4.5	-	-	-		
			97	-	3	-	-	-	436.5	-	13.5	-	-	-		
			95	-	5	-	-	-	427.5	-	22.5	-	-	-		
4	ON2		98	-	-	2	-	-	441	-	-	9	-	-		
			94	-	-	6	-	-	423	-	-	27	-	-		
			90	-	-	10	-	-	405	-	-	45	-	-		
5	OT		99.98	-	-	-	0.02	-	449.91	-	-	-	0.09	-		
			99.95	-	-	-	0.05	-	449.775	-	-	-	0.225	-		
			99	-	-	-	0.1	-	445.5	-	-	-	4.5	-		
6	OC2		99.5	-	-	-	-	0.5	447.75	-	-	-	-	2.25		
			99	-	-	-	-	1	445.5	-	-	-	-	4.5		
		98	-	-	-	-	2	441	-	-	-	-	9			

표 5. Series III 고로슬래그미분말 혼입 시멘트 모르타르 실험 배합표

NO	기호	W/B (%)	질량비율(%)							단위질량(g)							S	W		
			OPC	BFS	NaOH	Ca(OH) ₂	소석회	NaSCN	TEA	CaCl ₂	OPC	BFS	NaOH	Ca(OH) ₂	소석회	NaSCN			TEA	CaCl ₂
1	OPC	50	100	-	-	-	-	-	-	450	-	-	-	-	-	-	-	1350	225	
2	OB		80	20	-	-	-	-	-	360	90	-	-	-	-	-	-			
3	OBNN		78.4	19	1	-	-	1.6	-	352.8	85.5	4.5	-	-	7.2	-	-			
4	OBCN1		78.4	19	-	1	-	1.6	-	352.8	85.5	-	4.5	-	7.2	-	-			
5	OBCN2		78.4	16	-	-	4	1.6	-	352.8	72	-	-	18	7.2	-	-			
6	OBNT		79.984	19	1	-	-	-	0.016	-	359.928	85.5	4.5	-	-	-	0.072			-
7	OBCT1		79.984	19	-	1	-	-	0.016	-	359.928	85.5	-	4.5	-	-	0.072			-
8	OBCT2		79.984	16	-	-	4	-	0.016	-	359.928	72	-	-	18	-	0.072			-
9	OBNC		79.92	19	1	-	-	-	0.08	-	356.4	85.5	4.5	-	-	-	-			3.6
10	OBCC1		79.92	19	-	1	-	-	-	0.08	356.4	85.5	-	4.5	-	-	-			3.6
11	OBCC2		79.92	16	-	-	4	-	-	0.08	356.4	72	-	-	18	-	-			3.6

2.2 사용 재료

1) 고로슬래그미분말

고로슬래그미분말은 KS F 2563 콘크리트용 고로슬래그미분말 규정을 만족하는 국내 A사의 고로슬래그미분말 3종을 사용하였다. 고로슬래그미분말의 분말도는 4,241 (cm²/g) 이었으며, 밀도는 2.90(g/cm³), 염기도는 1.80 이었고, 그 물리·화학 특성은 표 6과 같다.

표 6. 고로슬래그미분말의 물리·화학적 특성

시료	화합성분				밀도 (g/cm ³)	비표면적 (cm ² /g)
	MgO	SO ₃	강열감량	염화물 이온		
KS F 2563 BFS 3종 규격	10.0 % 이하	4.0 % 이하	3.0 % 이하	0.02 % 이하	2.80 이상	4,000 ~ 6,000
본 실험 사용 BFS 특성 값	5.37	1.01	0.43	0.004	2.90	4,241

2) 시멘트

보통포틀랜드시멘트(OPC)는 국내 B사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 물리적 특성은 표 7과 같다.

표 7. 시멘트의 물리적 특성

구분	비표면적 (cm ² /g)	초 결 (분)	중 결 (시간)	안정도 (%)	압축강도(MPa)		
					3일	7일	28일
KS 규격	2,800 이상	60 이상	10 이하	0.8 이하	12.5 이상	22.5 이상	42.5 이상
실험값	3,300	200	5.5	0.08	30	42	58

3) 잔골재

잔골재는 KS F 4009 규정에 적합한 세척사를 사용하였으며,

그 물리적 특성은 표 8과 같다.

표 8. 잔골재의 물리적 특성

밀도(g/cm ³)		흡수율 (%)	조립률 (F.M)
절건	기건		
2.60	2.61	0.50	2.81

4) 조기강도 향상을 위한 혼입 자극제 종류

모르타르내의 OH⁻ 농도가 높으면 고로슬래그미분말의 잠재수경성 및 시멘트수화반응을 촉진하기 때문에 각 시리즈 별로 기존 문헌을 참고하여 표 9와 같이 알칼리 자극제를 종류 및 사용량을 선정하였으며, TEA를 제외하고는 전부 분말형 자극제를 사용하였다.

표 9. 조기강도 향상용 적용 자극제의 종류 및 성상

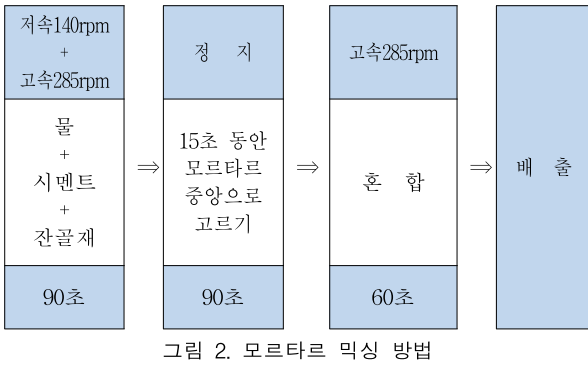
항목	사용 자극제	성상
Series I (BFS 자극제)	Na(OH) ₂	White powder
	Ca(OH) ₂	
	Calcium Hydroxide	
	Na ₂ SiO ₃	
	Na ₂ CO ₃	
Series II (OPC 자극제)	NaSCN	White powder
	Ca(NO ₃) ₂	
	Na ₂ S ₂ O ₃	
	CaCl ₂	
	TEA (Tri Ethanol Amine)	Liquefied
Series III (BFS+OPC 자극제)	NaOH	White powder
	Ca(OH) ₂	
	Calcium Hydroxide	
	NaSCN	
	CaCl ₂	Liquefied
TEA		

표 10. 각 Series의 재령별 압축강도 실험 결과

Series I (BFS 자극)			Series II (OPC 자극)			Series III (OPC+BFS 자극)		
Compressive Strength (MPa)								
BFS	1day	3day	OPC	1day	3day	OPC+BFS	1day	3day
BN1-5%	4.6	12.2	OPC-100%	3.5	21.3	OPC(100%)	10.4	25.6
BN1-10%	4.3	9.8	ON1-2%	4.3	24.3	OB(OPC80% + BFS20%)	8.2	21.7
BN1-20%	3.6	6.3	ON1-6%	2.3	18.3	OBNN	7.3	15.1
BC1-5%	1.1	3.5	ON1-10%	0.8	10.9	OBCN1	10	27.9
BC1-10%	0.9	3.1	OC1-1%	3.6	18.1	OBCN2	9.9	25.5
BC1-20%	0.6	3.1	OC1-3%	1.8	17.6	OBNT	8.6	16.3
BC2-5%	1.1	3.4	OC1-5%	2.2	21	OBCT1	9.4	23.6
BC2-10%	1.2	3.4	ON2-2%	3.1	19.8	OBCT2	9.7	20.2
BC2-20%	1.2	3.6	ON2-6%	3.3	15.1	OBNC	10.4	23.8
BN2-5%	0.5	0.6	ON2-10%	2.2	9.9	OBCC1	10.1	28.6
BN2-7%	0.4	0.6	OT-0.02%	4.2	23.1	OBCC2	9.1	25.5
BN2-10%	0.7	1.1	OT-0.05%	2.9	19.8			
BN3-3%	0	0.4	OT-0.1%	1.5	20			
BN3-7%	0	0.6	OC2-0.5%	3.8	19.4			
BN3-10%	0.2	0.8	OC2-1%	4.4	21.5			
			OC2-2%	6.8	16.5			

2.3 실험방법 및 측정항목

Series I (BFS 100% 질량), Series II (OPC 100% 질량) 및 Series III (OPC 80% 질량, BFS 20% 질량) 배합에서 각 바인더(BFS, OPC, OPC+BFS)와 잔골재의 중량 비율은 1:3으로 하였으며, 물바인더비(W/B)는 50%로 고정하였다. 모르타르 배합용량은 40mm×40mm×160mm 각 주 3개에 맞추어 바인더 450g, 잔골재 1350g, 물 225g을 사용하였다. 또한, 모르타르 믹싱은 KS L ISO 679에 따라 그림 2와 같은 방법으로 실시하였다.



양생방법은 그림 3과 같이 실험 재령 까지 20°C 상온에서 밀봉양생을 실시하였다. 압축강도 시험 재령은 Series I, Series II, Series III에서 각각 재령 1일 및 재령 3일에서 실시하였으며 각 재령별 3개의 압축강도 평균값을 압축강도로 하였다. 또한, 조기강도 자극제가 모르타르의 플로우에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, Series III에서만 KS L 5111에 규정하는 플로테이블, 플로우 콘 및 다짐봉을 사용하여 타격플로우 시험을 실시하였다.



(a) 밀봉양생 (b) 테이블 플로우 (c) 압축강도
그림 3. 실험 광경

3. 실험결과

표 10은 각 Series별로 재령별 압축강도 실험 결과를 나타낸다.

3.1 Series I (BFS 조기강도 향상 실험)

그림 4는 바인더로서 고로슬래그미분말 100%를 사용하고 자극제로서 NaOH, Ca(OH)₂ 소석회(Calcium Hydroxide)를 사용한 모르타르의 재령 1일과 3일의 압축강도를 나타낸 것이다. 재령 1일 및 3일 강도가 가장 높게 나타난 것은 NaOH이며 혼입율에 따라 차이가 나지만 Ca(OH)₂나 소석회와 비교하여 약 2~4배

의 높은 강도를 나타냈다. 이것은 NaOH가 용해도가 높아 pH가 상대적으로 매우 높기 때문에 고로슬래그미분말 자극제로서의 효율이 더 높기 때문이라고 판단된다. 또한, NaOH의 혼입율이 증가할수록 재령에 관계없이 압축강도가 저하하는 현상이 나타나는데 이는 혼입을 증가로 인한 높은 발열반응으로 강도가 감소하는 것으로 사료된다.¹³⁾ 따라서, 고로슬래그미분말 자극제로서는 NaOH가 가장 적합하였으며, 혼입율은 약 5%가 적당한 것으로 사료된다. 또한, 강도발현 성능은 낮지만 Ca(OH)₂ 5%, 소석회 20%의 경우도 고로슬래그미분말의 자극제로 사용이 가능하다고 판단된다.

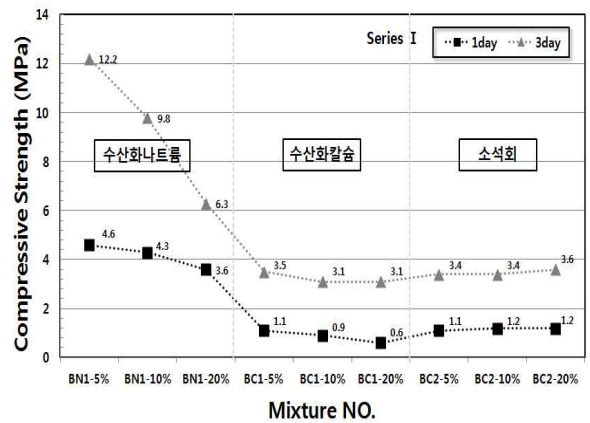


그림 4. Series I 재령 1, 3일 압축강도 (BFS 자극)

한편, 그림 5와 같이 Na₂SiO₃와 Na₂CO₃의 강도발현은 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 기존 연구¹²⁾에서 알칼리 활성화 슬래그 수화 과정에서 ASH₆피막을 알칼리 자극제인 OH⁻이온이 고로슬래그 입자표면에 흡착되면서 ASH₆ 피막을 파괴시켜, 입자내부에 포위되어 있던 Ca²⁺, Mg²⁺, Al³⁺등과 같은 수경성이온이 용출됨으로서 그 반응으로 인한 수화반응이 확산되어 BFS에 자극제로써의 역할을 할 수 있을 거라는 기대와 달리 재령 1일과 3일에서 강도발현이 진행되지 않은 것은 본 실험의 양생방법이 밀봉양생으로 수중양생과 비교하여 OH⁻이온 용출이 적었기 때문으로 판단된다.

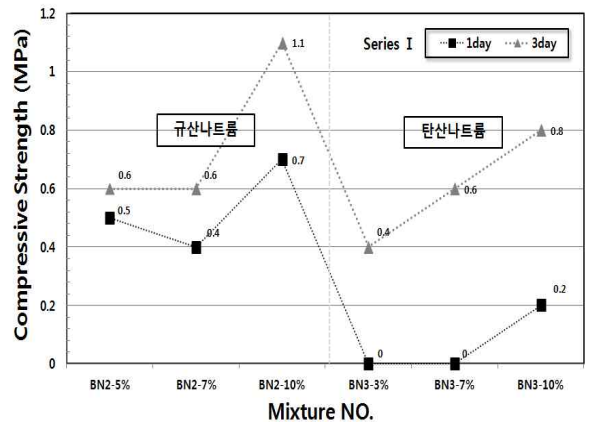


그림 5. Series I 재령 1, 3일 압축강도 (BFS 자극)

3.2 Series II (OPC 조기강도 향상 실험)

그림 6과 7은 바인더로서 보통포틀랜드시멘트(OPC) 100%를 사용하고 자극제로서 티오안산나트륨(NaSCN), 아질산칼슘(Ca(NO₃)₂), 티오황산나트륨(Na₂S₂O₃), 트리에탄올아민(TEA) 및 염화칼슘(CaCl₂)을 사용한 모르타르의 재령 1일과 3일의 압축강도를 나타낸 것이다. OPC 100%를 사용한 경우의 압축강도와 비교하여 재령 1일 및 3일에서 동등 이상의 압축강도를 나타낸 것은 시멘트 중량 비율로 NaSCN 2% 혼입, TEA 0.02% 혼입, CaCl₂ 1% 혼입으로 나타났다. 특히, 재령 1일의 압축강도를 향상시키기 위해서는 NaSCN, TEA, CaCl₂가 매우 유효한 자극제로 나타났다.

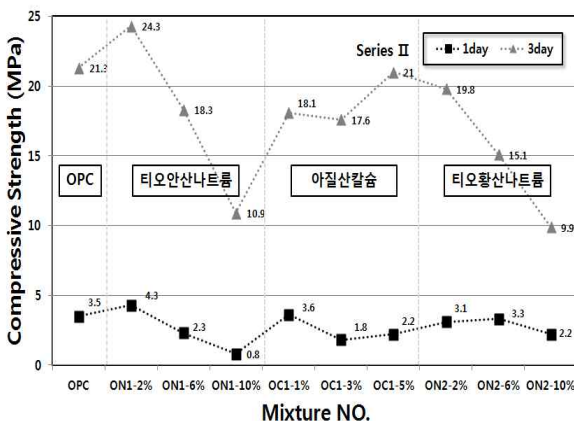


그림 6. Series II 재령 1, 3일 압축강도 (OPC 자극)

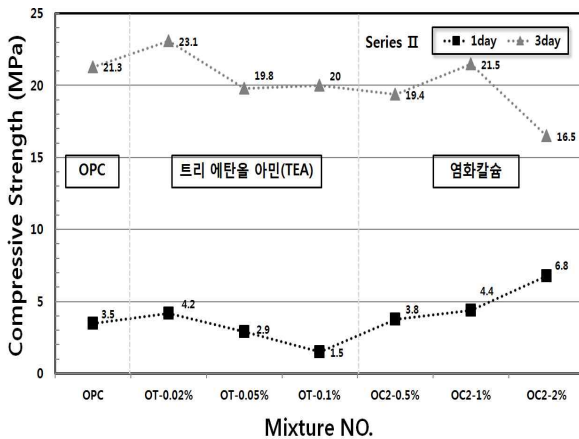


그림 7. Series II 재령 1, 3일 압축강도 (OPC 자극)

3.3 Series III (OPC+BFS 조기강도 향상 실험)

그림 8은 보통포틀랜드시멘트(OPC)를 질량으로 80%, 고로슬래그미분말(BFS)을 질량으로 20% 혼합한 바인더에 대하여, Series I의 BFS 분말형 자극제로서 선정된 NaOH, Ca(OH)₂, 소석회(Calcium Hydroxide)를 고로슬래그미분말 질량비율로 각각 5%, 5%, 20% 혼입하고 Series II의 OPC 분말형 자극제로서 선정된 NaSCN, TEA 및 CaCl₂를 각각 OPC 중량의 2%, 0.02%, 1% 혼입

한 경우의 시멘트모르타르 재령 1일과 3일의 압축강도를 나타낸 것이다. OPC 100%를 사용한 경우와 비교하여 BFS를 20% 치환한 경우 재령 1일에서는 약 21.2% 강도저하, 재령 3일에서는 15.3% 강도저하가 발생되어 특히 BFS 혼입에 의하여 재령 1일에서의 압축강도 저하가 크게 나타나 재령 1일에서의 압축강도 향상이 매우 중요한 것을 알 수 있었다. 한편, 재령 1일 및 3일에서 OPC 100%를 사용한 경우의 압축강도와 동등 이상으로 압축강도가 발현되는 배합은 OBCN1(OPC 78.4% + BFS 19% + Ca(OH)₂ 1% + NaSCN 1.6%), OBNC(OPC 79.92% + BFS 19% + NaOH 1% + CaCl₂ 0.08%), OBCC1(OPC 79.92% + BFS 19% + Ca(OH)₂ 1% + CaCl₂ 0.08%)으로 나타났다. 따라서, BFS를 혼입한 시멘트모르타르의 경우에도, BFS를 자극시켜 압축강도를 향상하기 위해서는 NaOH의 사용이 매우 유효하다고 판단되며, 보통포틀랜드시멘트를 자극시키기 위해서는 NaSCN과 CaCl₂의 사용이 매우 유효하다고 판단된다. 특히, CaCl₂와 같이 사용한 배합에서는 Ca(OH)₂, NaOH, 소석회 모두 OPC 100% 사용한 것 보다 재령 1일 및 3일강도가 높게 나타났다. 이는 CaCl₂가 시멘트를 자극하여 조기강도가 향상되는 효과가 크기 때문으로 판단되나 CaCl₂사용에 따른 과도한 염소이온은 철근부식의 원인으로 되기 때문에 그 사용량에 있어 주의 할 필요가 있다고 판단된다. 또한, Ca(OH)₂를 사용한 경우도 조기 압축강도 발현이 높게 나와 초기 재령에서 모르타르의 pH를 높여 수화반응을 촉진시킨 것으로 판단된다.

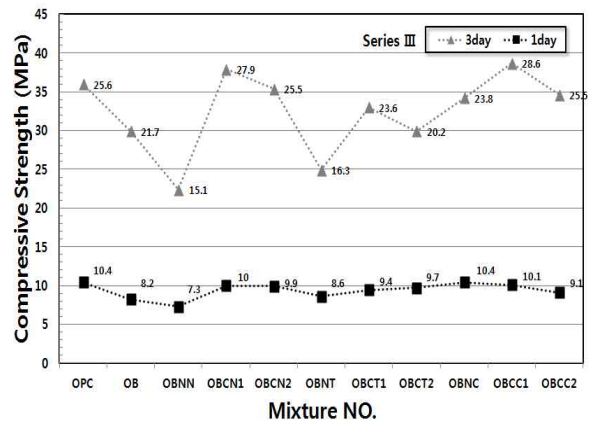


그림 8. Series III 재령 1, 3일 압축강도 (OPC+BFS 자극)

한편, 그림 9는 OPC, BFS, 자극제의 사용량을 3축으로 하여 재령 1일 압축강도 실험결과를 활용하여 Matlab Program으로 강도분포를 나타낸 것이다. OPC 100%와 비교하여 BFS의 치환율이 작고 분말형 자극제의 사용량이 큰 것이 압축강도가 동등이상인 것을 알 수 있다. 그러나, 그림 10과 같이 재령 3일의 강도분포를 살펴보면 BFS의 사용량이 20%라도 자극제의 적정 선정과 함께 그 사용량을 높이면 OPC 100%와 비교하여 압축강도가 동등이상으로 나타나는 것을 알 수 있어, BFS 혼입에 의한 조기강도 저하를 자극제로 조절이 가능하다고 판단된다.

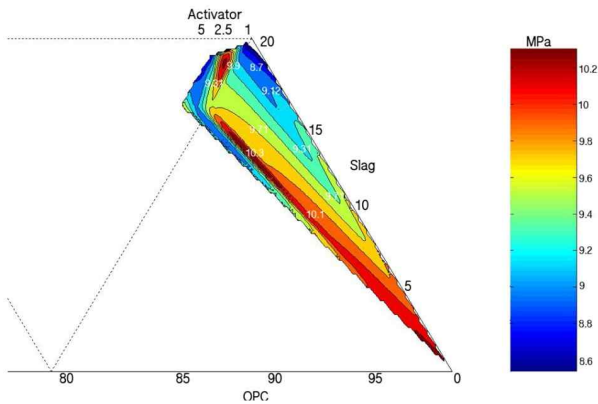


그림 9. SeriesIII 재령 1일 압축강도 분포

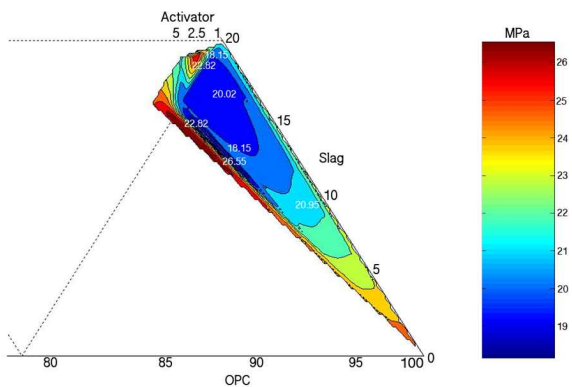


그림 10. SeriesIII 재령 3일 압축강도 분포

그림 11은 OPC만을 사용한 시험체의 압축강도를 각 재령에서 1로 한 경우, 각 배합에서 압축강도를 활성화도지수로 표현한 것이다. BFS 20% 혼입으로 압축강도 활성화도지수는 약 0.78~0.85로 저하되는 것을 알 수 있다. 그러나, OBNC1, OBNC, OBCC1의 배합에서의 압축강도 활성화도지수는 0.93~1.12로 나타나 OPC만을 사용한 것과 비교하여 동등 이상 압축강도를 나타내는 것을 알 수 있다. 특히, 재령 1일과 3일에서의 활성화도지수가 동일 배합에서도 차이가 나는 것을 고려해 보면 재령 1일에서의 압축강도 향상에 초점을 맞추는 연구가 BFS 치환율 변화에 따라 중점적으로 추진되어야 한다고 판단된다.

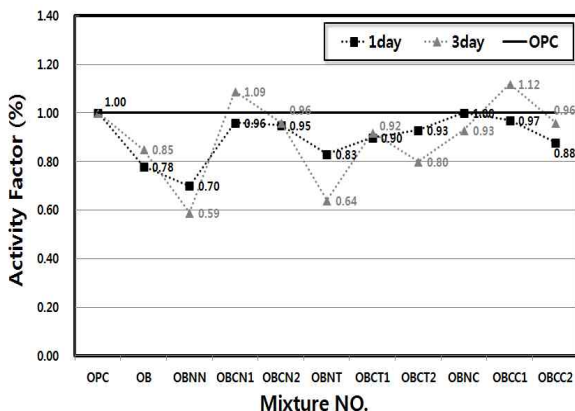


그림 11. OPC 100% 비교 각 배합별 활성화도지수 (SeriesIII)

그림 12는 Series III 실험에서 각 배합별 시멘트모르타르의 타격 Flow값을 나타낸 것이다. OPC 100%를 사용한 경우의 Flow값은 195mm를 나타내었으며, OBNC (OPC 79.92% + BFS 19% + NaOH 1% + CaCl₂ 0.08%)에서 210mm로 OPC 100% 보다 큰 Flow를 나타낸 것이외에 모든 타 배합에서는 Flow가 168mm~190mm로 OPC 100%와 비교하여 약 3%~14%로 저하되었다. 이러한 원인은 알칼리자극제에 의한 발열반응으로 모르타르의 유동성이 저하되었기 때문으로 판단된다. 따라서, BFS 혼입 시멘트모르타르의 조기강도 향상을 위해서는 재령 1일 및 3일의 압축강도 향상뿐만이 아니라 금후, 응결 및 Flow값의 경시변화 등 Fresh상태에서의 시공성을 고려한 연구가 추가되어야 할 것으로 판단된다.

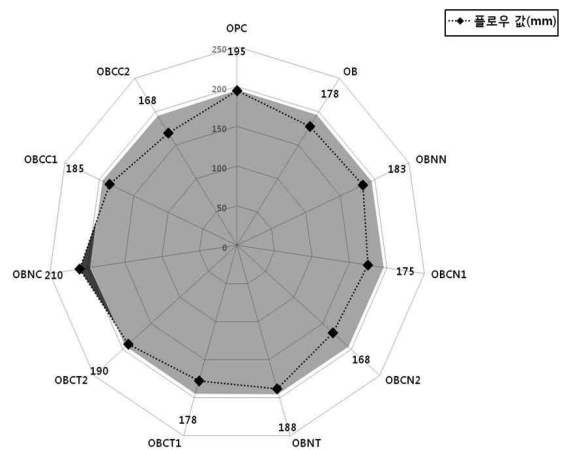


그림 12. 각 배합별 모르타르의 타격 Flow값 (mm) Series III

4. 결론

고로슬래그미분말 혼입 콘크리트의 재령 1일 및 3일의 조기재령 압축강도를 높여 아파트와 같은 건축구조물 골조의 거푸집공사 조기 탈형을 통한 공사기간 단축은 건설 생산성 향상을 위하여 매우 중요한 과제이다. 본 연구에서는 우선 모르타르레벨에서 분말형 조강혼화제를 선정하기 위하여 기존 연구와 달리 각각 고로슬래그미분말 및 시멘트를 자극시켜 강도를 발현하는 분말형 자극제 선정 실험을 실시하였다. 그 후, 앞선 실험에서 자극제로서 최적 분말형 혼화제를 활용하여 고로슬래그미분말 혼입 시멘트모르타르의 압축강도 발현 실험을 실시하여 고로슬래그미분말 혼입 시멘트모르타르의 재령 1일 및 3일 압축강도가 OPC 100%를 사용한 시멘트모르타르와 동등 이상의 압축강도를 발현하도록 하는 분말형 조강혼화제 개발에 관한 기초적 실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 고로슬래그미분말 조기강도향상을 위한 분말형 자극제 선정 실험(Series I) 결과, 재령 1일 및 3일 강도가 가장 높게 나타난 것은 NaOH로서 혼입율을 5%이며, 이는 NaOH가 용해도가 높아 pH가 상대적으로 매우 높아 고로

슬래그미분말 자극 효율이 더 높기 때문이라고 판단된다.

2) 보통포틀랜드시멘트 조기강도향상을 위한 분말형 자극제 선정 실험(Series II) 결과, OPC 100%를 사용한 경우의 압축강도와 비교하여 재령 1일 및 3일에서 동등 이상의 압축강도를 나타낸 것은 시멘트 중량비율로 NaSCN 2% 혼입, TEA 0.02% 혼입, CaCl₂ 1% 혼입으로 나타났다.

3) 고로슬래그미분말 혼입 시멘트모르타르의 조기강도 향상 실험(Series III) 결과, BFS를 혼입한 시멘트모르타르의 경우에도, BFS를 자극시켜 압축강도를 향상하기 위해서는 NaOH의 사용이 매우 유효하다고 판단되며, 보통포틀랜드시멘트를 자극시키기 위해서는 NaSCN과 CaCl₂의 사용이 매우 유효하다고 판단된다.

4) BFS 20% 혼입으로 압축강도 활성화도지수는 약 0.78~0.85로 저하되나, OBCN1, OBNC, OBCC1의 활성화도지수는 0.93~1.12로 나타나 OPC만을 사용한 것과 비교하여 동등 이상 압축강도를 나타내는 것을 알 수 있었다. 특히, 재령 1일과 3일에서의 활성화도지수가 동일 배합에서도 차이가 나는 것을 감안하면 재령 1일에서의 압축강도 향상에 초점을 맞추는 연구가 급후, BFS 치환율 변화에 따라 추진되어야 한다고 판단된다.

5) 각 배합별 시멘트모르타르의 타격 Flow값은 OPC 100%와 비교하여 약 3%~14% 저하되었으며, 이러한 원인은 알칼리자극제에 의한 발열반응으로 모르타르의 유동성이 저하되었기 때문으로 판단되므로, 급후, BFS 혼입 시멘트모르타르의 조기강도향상을 위해서는 재령 1일 및 3일의 압축강도 향상뿐만이 아니라 급후, 응결 및 Flow값의 경시변화 등 Fresh상태에서의 시공성을 고려한 연구가 추가되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2011년도 국토해양부 첨단도시개발사업 (과제번호: 11첨단도시C06)의 연구비 지원에 의한 결과의 일부이며, 또한 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 20120000740).

참고문헌

1. 이상수 외 2명 “사용재료 및 양생조건에 따른 콘크리트의 조기강도발현 특성에 관한 실험적 연구” 한국 콘크리트학회 논문집 제20권 제6호 통권108호, 2008년 12월 pp.721~729
2. 김무한 외 4명 “고로슬래그미분말을 대량 활용한 콘크리트의 공학적 특성 및 내구특성에 관한 실험적 연구” 대한건축학회 논문집 구조계 제23권 제3호, 2007년 3월 pp.61~68
3. 오병환 “고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 특성 및 사용시 유의사항” 한국 시멘트협회, 2003년 161 28-37 ISSN 1481-5311
4. 박용모 외 2명 “무기계 자극제의 첨가가 고로슬래그 시멘트의 압축강도 및 세공구조에 미치는 영향” 대한건축학회지 제17권 제9호, 2001년 9월 pp.143~150
5. 임남기 “서냉고로슬래그 고미분말을 사용한 콘크리트의 압축강도 발현특성에 관한 연구” 대한건축학회논문집 구조계 20권

- 3호(통권185호) 2004년 3월
6. 한천구 외 3명 “CSA에 의한 혼화제 사용 콘크리트의 초기품질 향상” 대한건축학회논문집 구조계 22권 4호(통권210호) 2006년 4월
7. 이종석 외 5명 “40℃ 온수양생을 이용한 초고강도 콘크리트의 조기 강도 예측에 관한 연구” 대한건축학회 춘계학술발표대회 논문집 구조계 제31권 제1호(통권 제 55집) 2011년 4월
8. 최성우 외 3명 “배합설계 조건에 따른 고성능 콘크리트의 조기강도 발현특성에 관한 연구” 한국콘크리트학회 춘계학술대회 제21권 1호, 2009년
9. 송진규 외 3명 “고로슬래그와 나트륨계열 활성화제를 이용한 무시멘트 모르타르의 특성” 대한건축학회논문집 구조계 제26권 제 6호, 2010년 6월 pp.61~68
10. 조민철 외 4명 “알칼리 자극에 의한 고로슬래그 경화체의 기초 특성” 대한건축학회 학술발표 논문집 제22권 제1호, 2002년 4월 pp. 257~260
11. 이화영 외 4명 “알칼리 자극제를 이용한 비소성 시멘트 모르타르의 압축강도 개선” 대한건축학회 학술발표대회 논문집 제 26권 제 1호, 2006년 10월
12. 안양진 외 3명 “규산나트륨(Sodium Silicate)을 자극제로 사용한 알칼리 활성화 슬래그 경화체의 특성” 대한건축학회 학술발표대회 논문집 제26권 제1호, 2006년 10월 pp. 341~344
13. 이상수 “알칼리 자극제를 사용한 무시멘트계 친환경 무기복합체의 유동특성 및 강도특성 연구” 대한건축학회논문집 구조계 제26권 제5호, 2010년 5월
14. 이종규 외 4명 “시멘트의 고강도 발현을 위한 수화 제어형 혼화제 개발” 요업(세라믹)기술원, 2007년 7월
15. 소양섭 외 3명 “자극제 종류에 따른 고로슬래그 시멘트 모르타르의 특성” 대한건축학회논문집 구조계 18권 5호, 2002년 5월 pp.65~72
16. 임명관 외 2명 “고로슬래그의 분말도 및 재생 잔골재 치환율에 따른 모르타르의 강도 및 내구적 특성에 관한 연구” 대한건축학회논문집 구조계 제23권 제10호, 2007년 10월 pp.91~98
17. 유장원 외 5명 “콘크리트 조기강도 향상을 위한 고로슬래그 미분말의 사용에 관한 실험적 연구” 춘계학술발표대회 논문집 통권 제16호, 2009년
18. 허권 외 2명 “급결제를 혼합한 시멘트페이스트의 응결시간에 관한 실험적 연구” 한국콘크리트학회 논문집 제17권 6호, 2005년
19. 천병식 외 3명 “시멘트 수화지연제가 규산나트륨-시멘트 그라우트 초기강도에 미치는 영향에 관한 연구” 한국지반공학회, 2005년 pp.453~460
20. Hyung-Seok kim. “Activation of Ground Granulated Blast Furnace Slag Cement by Calcined Alunite” Materials Transactions, Vol. 52, No.2, 2011
21. Fathollah Saiedi, “The effect of chemical activators on early strength of ordinary Portland cement-slag mortars” Construction and Building Materials 24 (2010) 1944-1951
22. F.Bellmann, “Acrivation of balast furnace slag by a new method” Cement and Concrete Research 39 (2009) 644-650
23. A. Darquennes, “Early age deformations of concrete with high content of mineral additions” Construction and Building Materials 25 (2011) 1836-1847

투고(접수)일자: 2012년 2월 9일
 수정일자: (1차) 2012년 4월 12일
 (2차) 2012년 4월 30일
 (3차) 2012년 6월 5일
 게재확정일자: 2012년 6월 7일