

고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 역학적 특성에 관한 연구

Effect of Blast-Furnace Slag Powder on the Mechanical Properties of Hardened Concrete

김형래^{*} 최진만^{*} 임정수^{*} 김상규^{**}
Kim, Hyung Rae Choi, Jin Man Lim, Jung Soo Kim, Sang Kyu
변승호^{***} 윤철현^{***} 최현국^{***}
Byun, Seung Ho Yun, Chel Hyun Choi, Hyun Kuk

ABSTRACT

This experimental study was carried out to estimate the effects of mixing dosage rate and blaine on the mechanical properties of concrete admixed with ground granulated blast-furnace slag(BFS) powder. According to the test results, compressive strength of concrete admixed with slag not more than 35% was at least 80% of compressive strength of OPC concrete at 3 days age, and much bigger than that of OPC concrete at 28 days age. Consequently, in order to apply the BFS to the concrete for building structures, optimal method for reducing the drying shrinkage of BFS concrete is demanded, and rigorous construction management should be followed.

1. 서론

고로슬래그는 잠재수경성으로 인해 미분말 또는 혼합시멘트로서 콘크리트에 사용될 경우 2차적인 수화물의 생성에 따른 장기강도의 증진과 콘크리트 내부조직의 치밀화 등이 가능하다는 장점이 있다. 일본의 경우 '97년 기준으로 연간 고로슬래그 생산량의 66%에 이르는 1,544만 톤이 콘크리트에 사용되었으며, 국내에서도 주로 도로의 기층재료로서 매립시키던 기존의 방식을 탈피하여 콘크리트용 혼화재로서 활용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며 일부 현장에서 이미 적용되고 있다.

한편, 고로슬래그를 사용한 콘크리트를 건축물의 구조체에 적용하는 경우 선결되어야 할 문제점으로 는 조기강도의 저하, 초기 건조수축 및 콘크리트의 중성화 등을 들 수 있으며, 기존의 보통포틀랜드시멘트와 동등이상의 성능을 발휘시키기 위해서는 재료적인 측면의 성능향상 뿐만 아니라 거푸집 탈형 시기 및 초기양생 등의 현장관리방안이 고려되어야 할 것이다.

또한, 고로슬래그 시멘트에 대한 국내규격이 이미 제정되어 있을 뿐만 아니라, 일본, 미국 등에서 수행된 다양한 연구결과¹⁾²⁾⁴⁾를 통하여 고로슬래그를 사용함에 따른 장점 등이 널리 알려져 있음에도 불구하고 국내에서 아직 그 사용실적이 극히 한정되어 있는 것은 건설관련 종사자들의 인식부족에 기인

* 정회원, 대한주택공사 주택연구소 연구원

** 정회원, 대한주택공사 주택연구소 책임연구원, 공박

*** 정회원, 성신양회공업(주) 기술연구소 연구원

**** 정회원, 성신양회공업(주) 기술연구소 선임연구원, 공박

하는 바가 크며, 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트가 이미 적용되고 있는 건설현장일지라도 고로슬래그의 특성을 고려한 적절한 품질관리지침이 미비한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 적정배합도출, 공동주택 구조체에의 적용방안수립, 현장품질관리지침 작성을 목표로 고로슬래그의 치환율 및 분말도에 따른 수화반응 등의 화학적 특성을 토대로 압축강도, 탄성계수, 건조수축 등의 역학적 특성을 검토하는데 그 목적이 있다.

2. 실험

2.1 실험개요

본 실험에서는 주로 공동주택의 구조체를 대상으로 하여 콘크리트의 물결합재비를 설정하였으며, 고로슬래그 미분말의 치환율 및 분말도에 따른 경화콘크리트의 물성변화 검토를 위한 실험인자 및 수준은 표 1과 같다.

표 1 실험인자 및 수준

실험인자	실험수준	수준수
물결합재비(%)	35, 45, 50, 60	4
치환율 (%)	0, 15, 25, 35, 45	5
분말도(cm ² /g)	4000, 6000, 8000 (4375*, 5962*, 8070*)	3

주) (*)안의 * 표시된 값은 전체 분말도 값임

2.2 사용재료 및 시험체 제작

콘크리트 제조를 위한 결합재로서 시멘트는 국내 3사의 보통포틀랜드시멘트(이하 OPC라 함)를 혼합하여 사용하였으며, 경북 포항산 고로슬래그를 분말도 4000, 6000, 8000cm²/g으로 미분쇄(이하 BFS라 함)한 후 BFS의 분말도 및 치환율 별로 SO₃함량이 전체 결합재 중량의 2.0, 2.5, 3.0%가 되도록 천연 무수석고를 첨가하여 본 실험에 앞서 V형 믹서를 이용해 혼합하였다. 실험에 사용된 결합재의 기초 물성 및 화학성분은 표 2와 같다.

표 2 사용된 결합재의 기초물성 및 화학조성

구 분	화 학 조 성							분말도 (cm ² /g)	비중	안정도 (%)	응결시간 (h·m)		압축강도 (kgf/cm ²)	
	lg loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃				초결	중결	7일	28일
보통포틀랜드시멘트(OPC)	1.37	21.91	6.29	3.02	61.73	2.86	2.26	3421	3.14	0.03	4:15	7:25	319	401
고로슬래그 미분말(BFS)	-0.85	34.81	16.19	0.47	41.25	8.05	0.16	4375 5962 8070	2.91	-	-	-	78* 115* 144*	114* 137* 152*
천연 무수석고	1.22	1.92	1.06	0.23	39.51	-	53.08	6012	2.80	-	-	-	-	-

주) * 표시된 값은 고로슬래그 미분말의 분말도별로 재령 7일과 28일의 활성도 지수를 나타낸 것임

한편, 굵은 골재는 비중 2.68, 흡수율 0.67%, 최대크기 25mm, 조립률 6.78의 부순돌을 사용하였으며, 잔골재는 세척사로서 비중 2.58, 흡수율 1.12%, 조립률 2.99였다. 사용된 혼화제는 AE제, 나프탈렌계 감수제 및 고성능감수제로서 표준량 사용을 원칙으로 하였다.

콘크리트의 비비기 순서는 잔골재와 결합재를 우선 투입하여 건비빔하고 굵은 골재를 투입하여 추가 건비빔한 후, 혼화제를 물에 섞어 투입하였다. 콘크리트 시험체는 $\phi 10 \times 20$ cm의 압축강도 및 탄성계수 측정용 원주시험체와 $10 \times 10 \times 40$ cm의 건조수축 측정용 각주시험체로 구분하여 제작되었다.

2.3 실험내용 및 방법

BFS를 치환한 시멘트 페이스트의 반응속도는 近藤 등³⁾에 의해 제안된 살리실산(Salicylic acid, C₇H₆O₃)아세톤·메탄올의 선택용해법에 의해 산출하였다. 콘크리트의 압축강도 및 탄성계수 측정용 시험체는 소요재령까지 20±3℃의 수중에서 양생하였다. 콘크리트의 건조수축은 KS F 2424의 컨택트 게이지법에 준하여 측정하였다. 시험체는 재령 7일까지 수중양생하고 이 시점의 측정값을 기준으로 하여 건조수축률을 산출하였으며, 그 이후에는 20±1℃, RH 60±5%의 항온항습조건으로 양생하였다.

3. 결과 및 고찰

표 3 BFS를 사용한 콘크리트의 압축강도 측정결과

W/C+BFS (%)	분말도 (cm ² /g)	치환율 (%)	압축강도 (kgf/cm ²)			CPC에 대한 압축강도비			K강도 (kgf/cm ²)	F28/K	W/C+BFS (%)	분말도 (cm ² /g)	치환율 (%)	압축강도 (kgf/cm ²)			CPC에 대한 압축강도비			K강도 (kgf/cm ²)	F28/K				
			3일	7일	28일	3일	7일	28일						3일	7일	28일	3일	7일	28일						
35	CPC	0	285	378	468	1.000	1.000	1.000	400	1.170	45	CPC	0	182	250	331	1.000	1.000	1.000	400	0.828				
		4000	15	263	373	439	0.923	0.965	0.938	424			1.034	4000	15	172	239	341	0.944	0.956	1.029	424	0.804		
			25	265	371	458	0.931	0.960	0.978	409			1.118		25	154	223	338	0.842	0.890	1.019	409	0.825		
			35	272	383	478	0.953	1.011	1.023	425			1.126		35	148	208	338	0.813	0.830	1.020	425	0.795		
			45	197	313	482	0.692	0.828	1.030	418			1.152		45	128	196	341	0.704	0.782	1.028	418	0.815		
	6000	15	300	428	493	1.052	1.130	1.067	434	1.078		6000	15	186	257	364	1.020	1.028	1.097	434	0.837				
		25	315	431	524	1.107	1.138	1.121	461	1.138			25	190	274	405	1.040	1.095	1.223	461	0.800				
		35	298	432	526	1.046	1.142	1.124	461	1.140			35	194	281	426	1.064	1.125	1.287	461	0.924				
		45	258	392	528	0.905	1.035	1.128	479	1.101			45	176	279	429	0.962	1.114	1.295	479	0.895				
	8000	15	349	448	527	1.224	1.185	1.126	472	1.117		8000	15	211	288	404	1.154	1.151	1.219	472	0.856				
		25	332	441	522	1.166	1.166	1.117	487	1.072			25	230	326	437	1.260	1.302	1.319	487	0.886				
		35	334	447	549	1.173	1.183	1.173	535	1.025			35	232	340	468	1.270	1.359	1.413	535	0.875				
		45	346	473	576	1.214	1.250	1.231	562	1.026			45	228	347	463	1.248	1.365	1.397	562	0.824				
	50	CPC	0	148	202	305	1.000	1.000	1.000	400		0.782	60	CPC	0	116	151	227	1.000	1.000	1.000	400	0.567		
			4000	15	143	214	308	0.964	1.060	1.012		424			0.727	4000	15	105	150	241	0.906	0.922	1.064	424	0.568
				25	132	190	304	0.891	0.943	0.997		409			0.742		25	92	138	235	0.799	0.859	1.037	409	0.574
				35	115	163	317	0.777	0.905	1.039		425			0.745		35	81	122	229	0.702	0.757	1.012	425	0.540
				45	96	159	294	0.646	0.790	0.965		418			0.703		45	86	104	236	0.572	0.676	1.042	418	0.565
6000		15	144	225	328	0.975	1.114	1.077	434	0.756	6000	15		106	152	244	0.917	0.941	1.075	434	0.562				
		25	150	227	351	1.013	1.124	1.153	461	0.782		25		101	145	240	0.876	0.919	1.061	461	0.522				
		35	140	224	351	0.944	1.108	1.151	461	0.781		35		95	146	253	0.824	0.904	1.114	461	0.548				
		45	130	216	346	0.879	1.072	1.134	479	0.721		45		92	141	268	0.793	0.877	1.183	479	0.559				

3.1 압축강도

3.1.1 모르터의 압축강도

그림 1은 SO₃함량 및 BFS의 분말도에 따른 BFS혼입 모르터의 압축강도 경시변화를 나타낸 것이다. 모르터의 압축강도는 BFS의 분말도가 클수록 높게 나타나며, 분말도 4000의 경우 재령 7일까지는 치환율이 낮을수록 압축강도가 높지만 재령 28일 이후에는 치환율이 높을수록 압축강도가 커지는 것을 알 수 있다.

또한, 분말도가 커짐에 따라 거의 모든 재령에서 치환율에 비례하여 압축강도가 높게 나타났다. 한편, SO₃함량이 클수록 초기재령에서 다소 높은 강도를 나타냈으나 재령 28일 이후에는 SO₃함량 2.5%에서 압축강도 증진이 다소 큰 것을 알 수 있다. 이는 SO₃의 함량이 많을수록 초기강도를 좌우하는 C₃A의 수화에 의한 에트링가이트의 생성량이 많아지기 때문인 것으로 판단된다. 그러나, 전반적으로 본 실험에서 대상으로 한 SO₃함량 2.0~3.0% 범위에서의 모르터의 압축강도 차이는 크지 않음을 알 수 있으며, BFS의 치환율 및 분말도 변화에 따른 강도발현성상에 대해서는 경화체의 수화생성물 및 BFS의 반응을 등과 연관시켜 검토하는 것이 요구된다.

3.1.2 콘크리트의 압축강도

BFS의 사용에 따른 콘크리트 압축강도실험은 SO₃함량이 2.5%인 경우만을 대상으로 하였으며, BFS의 치환율 및 분말도, 결합재물비((C+BFS)/W)에 따른 콘크리트의 압축강도는 그림 2 및 그림 3과 같다. 그림 2에 나타난 콘크리트의 압축강도 발현성상은 모르터의 경우와 동일한 경향을 나타내고 있으며, 치환율별 결합재의 K강도와 콘크리트의 28일 압축강도로부터 구한 F₂₈/K와 결합재물비의 관계로부터 결합재의 K강도에 의해 배합강도 결정을 위한 결합재물비의 산출이 가능할 것으로 판단된다. 그

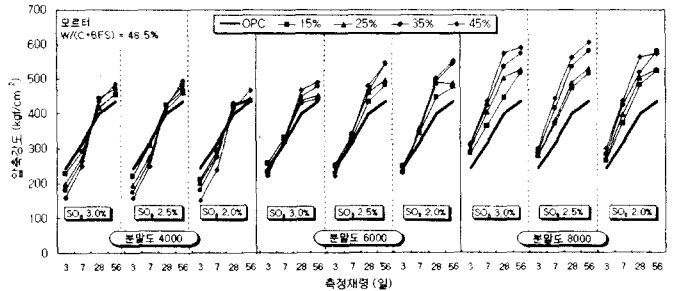


그림 1 SO₃함량, 분말도 및 치환율별 재령에 따른 모르터의 압축강도

림 3에서 동일한 F_{28}/K 를 얻기 위한 결합재물비는 OPC가 다소 작은 것으로 나타났으나, 표 3에서 알 수 있듯이 BFS를 사용한 경우의 K강도가 훨씬 크므로 실제로 BFS 사용시 동일 배합강도를 얻기 위한 물결합재비가 증가함을 의미한다.

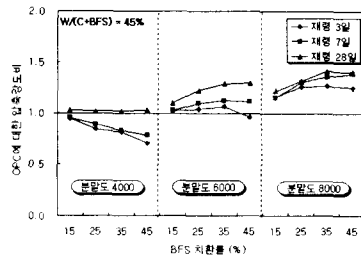


그림 2 BFS 콘크리트의 압축강도

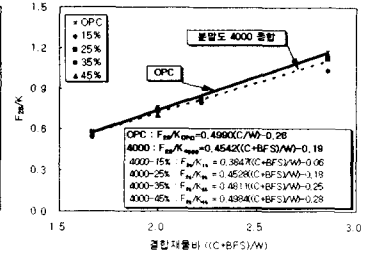


그림 3 결합재물비와 F_{28}/K 의 관계

3.2 탄성계수

BFS를 사용한 콘크리트의 압축강도와 탄성계수의 관계는 그림 4와 같으며, 콘크리트 표준시방서에 제시된 관계식과 거의 일치하고 있어 BFS를 사용한 경우 OPC의 경우와 동일하게 고려하는 것이 가능하다.

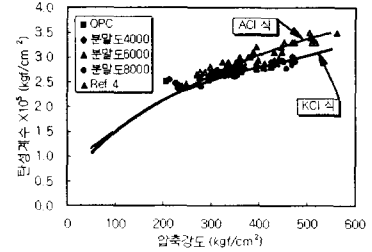


그림 4 압축강도와 탄성계수

3.3 건조수축

그림 5는 측정재령 4주까지의 콘크리트의 건조수축률을 나타낸 것으로서 전반적으로 BFS를 사용한 콘크리트의 건조수축률이 OPC에 비하여 크게 나타나고 있다. 특히, 분말도에 따른 건조수축률의 경우 3주까지는 분말도 4000의 경우가 분말도 6000보다 더 작은 것으로 나타났으나 4주에는 모든 치환율에서 분말도 4000의 경우가 큰 것으로 나타났다.

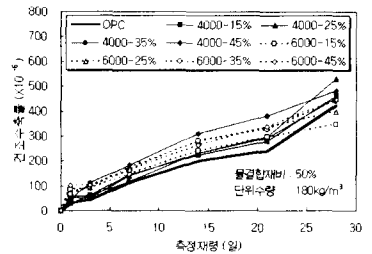


그림 5 콘크리트의 건조수축

4. 결론

분말도 4000인 고로슬래그를 사용할 경우 치환율에 관계없이 OPC에 비해 7일까지의 초기 압축강도가 낮게 나타났으나, 대부분의 물결합재비에서 고로슬래그를 35%까지 치환한 콘크리트의 재령 3일 압축강도가 OPC를 사용한 콘크리트의 80%이상이었으며 재령 28일의 압축강도는 OPC 콘크리트를 상회하고 있어 엄격한 현장품질관리하에서 지속적인 초기양생이 가능한 부위를 대상으로 일반 건축물에서의 적용이 가능할 것으로 판단된다. 한편, 초기재령에서 고로슬래그를 사용한 콘크리트의 건조수축률이 OPC의 경우보다 다소 크게 나타나 이의 저감을 위한 적정 석고침가량에 대한 검토와 적절한 현장시공관리방안이 마련되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 포항종합제철(주)의 연구비지원에 의해 수행중인 연구결과와 일부로서, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) ACI Committee 226, "Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete", ACI 226.1R-87
- 2) 全國生コンクリート工業組合聯合會, 高爐スラグ微粉末使用コンクリート製造マニュアル-標準化に向けて, 1998.10
- 3) 近藤連一, 大澤榮也, "高爐水砕スラグの定量およびセメント中のスラグの水和反應速度に関する研究", 日本窯業協會誌, 77[2], pp. 39-46, 1969
- 4) 신성우 외 5인, "高爐슬래그微粉末 混入 콘크리트의 配合設計 方法에 관한 研究", 한국콘크리트학회 1999년도 봄 학술발표회 논문집, 1999. 5., pp. 625-630