

고로슬래그시멘트를 사용한 콘크리트 배합설계에 관한 연구

A Study of Concrete Mix Proportioning Design using Blast-furnace Slag Cement

○ 백 광 섭* 차 태 환* 노 재 호** 박 연 동*** 윤 재 환****
Baek, Kwang Sub Cha, Tae Hwan Noh, Jae Ho Park, Yon Dong Yoon, Jai Hwan

ABSTRACT

The purpose of this study is to suggest concrete mix proportioning design using Blast-furnace slag cement. The mix conditions are specified by concrete strength(180~400kg/cm²), slump(15±2cm) and air volume(4.5±1%). From the result of concrete mix proportioning design using Blast-furnace slag cement, unit water content can be reduced by 3~8% comparing with OPC. The relationship between strength at 28 days and cement water ratio is as follow. when blast-furnace slag cement is used : $\sigma_{28} = 304.0C/W - 296.8$. Super-plasticizer have to be used to get a slump of 15cm when water/cement ratio is less than 45%.

1. 서론

최근 산업의 고도화 및 다양화로 인하여 건설 분야에 있어서도 콘크리트 구조물의 대형화, 초고층화, 다기능화한 구조물들이 요구되고 있으며, 이와 더불어 지구의 환경오염 문제가 전 세계의 관심사로 부각되면서 건설분야에서도 환경오염을 줄이기 위한 방안들이 다각도로 모색되고 있는 실정이다.

제철산업의 부산물로 생산되는 고로슬래그는 1,500℃ 정도의 고온의 용융슬래그를 냉각하여 얻어지며, 냉각과정에 따라 서냉슬래그와 급냉슬래그로 구분한다. 이중 용융슬래그를 물에 급냉시켜 분쇄기로 미분쇄하여 만든 것이 수쇄슬래그로 고로슬래그시멘트 제조에 이용된다. 고로슬래그시멘트는 포틀랜드시멘트에 비해 장기강도가 크고 수화발열이 적고 내구성이 우수한 시멘트로 알려져 있으며, 또한 제조시 에너지절감 효과 및 일산화탄소소비량을 억제할 수 있는 이점이 있다. 현재 국내에서도 1978년 전시멘트 생산량의 0.2%(3만 5천톤)를 차지하던 고로슬래그시멘트 생산량이 1994년말에는 7%(350만톤)로 비중이 점차 증가하고 있는 실정이다. 이미 선진국가에서는 산업부산물인 고로슬래그를 이용한 콘크리트 개발에 많은 관심과 함께 지속적인 연구가 이루어지고 있으나 아직까지 우리 나라에서는 이에 대한 연구실적이 부족한 실정이다.

따라서 본 연구는 현재 국내에서 생산되고 있는 고로슬래그시멘트를 사용한 콘크리트 배합설계방법을 제안하고 이를 적극 현장에 활용할 수 있도록 고로슬래그시멘트의 배합설계에 따른 단위수량, 단위시멘트량 및 적정 잔골재율을 실험을 통하여 산출해 내고 이를 기초로 물시멘트비와 강도와의 관계식을 도출함으로써 고로슬래그시멘트를 사용한 콘크리트 제조시 기초자료를 제시하는데 목적이 있다.

2. 실험개요

본 실험은 고로슬래그시멘트를 사용하여 목표슬럼프값 15±2cm, 공기량 4.5±1%로 설정하고 설계기준강도(F_c)를 저강도(180~240kg/cm²), 중간강도(240~300kg/cm²), 고강도(300~400kg/cm²)의 3영역으로 할 때 물시멘트비 변화(63~45%)에 따른 소요 슬럼프값과 공기량을 만족시킬 수 있는 고로슬래그시멘트의 배합설계를 행한다.

2.1 사용재료

1) 시멘트

시멘트는 시중에서 시판되고 있는 고로슬래그시멘트(BFC)와 비교시험을 위해 보통 포틀랜드시멘트(OPC)를 사용했으며 시멘트의 물리적 성질 및 화학적 성분은 다음 표 1 및 표 2와 같다.

* 정희원, 수원대 대학원, 석사과정
** 정희원, 동양중앙연구소 선임연구원
*** 정희원, 동양중앙연구소 선임연구원, 工博
**** 정희원, 수원대 건축공학과 부교수, 工博

표 1. 시멘트의 물리적 성질

종류	비중	블레인 (cm^2/g)	응결시간		모르터 Flow		압축강도	
			초결 (h:m)	종결 (h:m)	W/C	Flow	7일	28일
BFC	3.03	3,730	3:05	7:05	48.5	66.4	293	452
OPC	3.14	3,266	3:20	6:30	48.5	103.8	288	380

표 2. 시멘트의 화학적 성분

성분 종류	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Ig. Loss
BFC	28.4	10.8	48.8	5.5	2.1	1.8	0.48	1.6
OPC	20.8	5.9	62.7	2.8	3.3	2.2	0.85	1.4

2) 골재

본 실험에 사용된 잔골재는 강모래인 공주 금강사를 사용하였으며 굵은골재로는 쇠석을 사용하였다. 골재의 물리적 성질 및 입도시험 결과는 표 3 및 그림 1과 같다.

표 3. 골재의 물리적 성질

종류	최대치수 (mm)	표준비중	조립율	흡수율 (%)
강모래	5	2.57	2.84	1.25
쇠 석	25	2.61	6.86	0.92

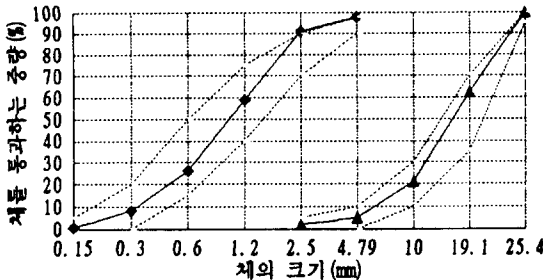


그림 1. 골재의 입도곡선

3) 혼화제 및 AE제

혼화제는 단위수량을 조절하기 위해 D사의 리그닌계 감수제(표준형)를 사용하였으며 물리적 성질은 표 4와 같다. 첨가량은 시멘트중량의 0.3%로 고정하였다. 또한 소요공기량(4.5±1%)을 얻을 수 있도록 예비실험을 통해 적정량의 AE제를 사용하였다.

2.2 배합계획

본 연구의 실험인자로는 표 5에 나타낸 바와 같이 결합재로 BFC 및 OPC 2종류를 사용하여 BFC의 경우 W/C를 7개 수준으로, OPC는 그 중 4개를 선정하여 비교시험을 하였다. 잔골재율은 굵은골재의 단위용적중량이 970~980kg/m³가 되는 범위에서 만족할 만한 작업성을 발휘하도록 최적잔골재율을 결정하였다.

표 4. 감수제의 물리적 성질

비중	고형분(%)	염분(g/cm^3)	pH
1.2	43	0.0112	4

표 5. 배합설계 시험인자

종류	시험인자	수준	
W/C (%)	BFC	63, 60, 57, 54, 51, 48, 45	7
	OPC	63, 57, 51, 45	4
S/A (%)	BFC	43, 45, 47	3
	OPC		

2.3 배합설계 순서

본 실험은 소요 슬럼프와 공기량을 만족시킬 수 있도록 그림 2와 같은 배합설계 순서에 의해 행하였으며 시험배합을 위한 콘크리트 배합표는 표 6과 같다.

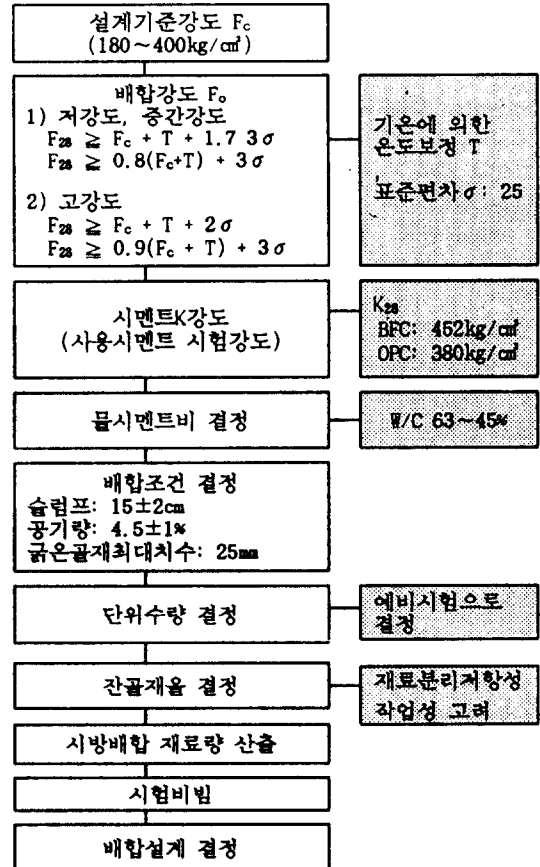


그림 2. 배합설계 순서

표 6. 콘크리트 배합표

결합재종류	W/C (%)	S/A (%)	단위 재료량(kg/m ³)				감수제 사용량 (C×%)
			W	C	S	G	
BFC	63	46.0	183	290	817	976	0.3
	60	47.6	183	305	839	939	
		45.6	183	305	804	976	
		43.6	183	305	774	1013	
	57	45.7	180	316	805	972	
	54	45.0	180	333	787	977	
	51	46.7	180	353	803	938	
		44.7	180	353	774	974	
		42.7	180	353	733	1009	
	48	44.0	180	375	753	975	
45	43.7	177	393	744	976		
OPC	63	45.3	190	302	796	977	
	57	44.8	190	330	783	972	
	51	43.7	190	373	743	972	
	45	41.9	192	426	691	974	

3. 실험방법

3.1 콘크리트 혼합방법

고로시멘트를 이용한 콘크리트를 제조하기 위해 용량 80 l의 강제식 믹서를 사용하였으며 콘크리트 혼합방법은 그림 3과 같다.

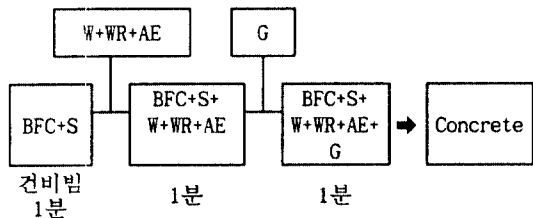


그림 3. 콘크리트 혼합방법

3.2 감도시험

∅10×20cm 원주형 공시체를 각 재령별로 3개씩 제작하여 1일간 기건양생후 탈형하여 23±2℃에서 표준양생한 후 재령 1, 3, 7 및 28일 압축강도를 측정하였다.

3.3 공기량 및 단위용적중량

공기량 측정은 워싱턴형 공기량시험기로 비빔 직후의 공기량을 측정한 후 콘크리트의 단위용적중량을 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 굳지 않은 콘크리트의 특성

4.1.1 단위수량

그림 4는 소요 슬럼프값 15±2cm를 얻기 위해서 고로슬래그시멘트와 보통 포틀랜드시멘트를 사용한 경우의 단위수량을 나타낸 것이다. 고로슬래그시멘트의 경우 감수제첨가량(C×0.3%)을 일정하게 했을 때 동일 슬럼프값을 얻기 위해서는 물시멘트비가 낮을 수록 단위수량도 낮아지는 경향을 보였다. 그러나 보통 포틀랜드시멘트를 사용한 경우 동일 조건에서도 물시멘트비 변화에 따른 단위수량의 변화는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 고로슬래그시멘트의 경우 물시멘트비가 낮을 수록 고로슬래그량이 많아지면서 보통 포틀랜드시멘트만을 사용한 경우보다 감수제의 분산효과가 커지기 때문인 것으로 사료된다.

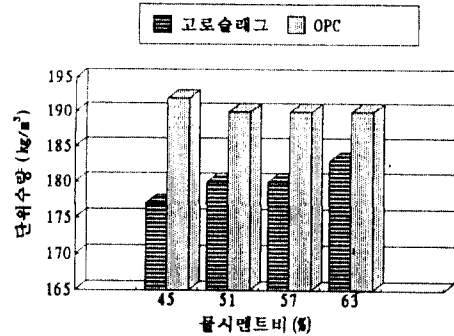


그림 4. 단위수량과 물시멘트비와의 관계

표 7은 보통 포틀랜드시멘트에 대한 고로슬래그시멘트의 단위수량 저감율을 나타낸 것으로 물시멘트비가 낮을 수록 단위수량 저감효과가 커지는 것으로 나타났다. 고로슬래그시멘트를 사용하는 경우 동일 슬럼프를 얻기 위해서는 보통 포틀랜드시멘트만을 사용하는 경우보다 단위수량이 3~8% 가량 감소되는 것으로 나타났다.

표 7. 고로슬래그시멘트의 단위수량 저감율

W/C (%)	시멘트 종류	단위수량 (kg/m ³)	슬럼프 (cm)	단위수량 저감율(%)
63	BFC	183	15.2	96.3
	OPC	190	14.5	100.0
57	BFC	180	14.3	94.7
	OPC	190	14.0	100.0
51	BFC	180	14.8	94.7
	OPC	190	14.6	100.0
45	BFC	177	15.0	92.2
	OPC	192	15.4	100.0

*단위수량저감율(%) = $\frac{\text{고로슬래그시멘트 단위수량}}{\text{포틀랜드시멘트 단위수량}} \times 100$

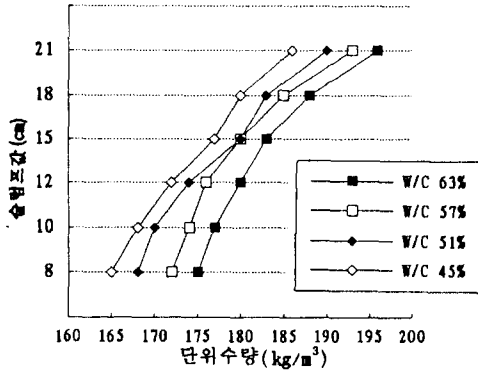


그림 5. 단위수량과 슬럼프와의 관계

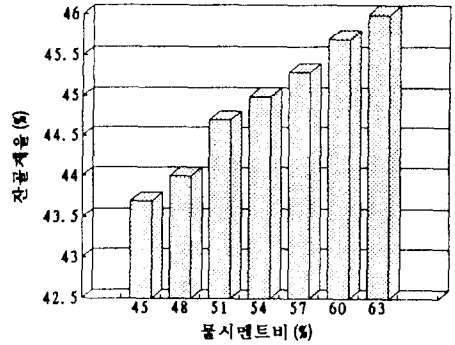


그림 6. 물시멘트비와 잔골재율과의 관계

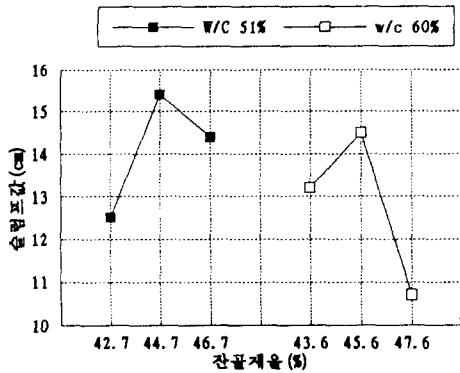


그림 7. 슬럼프와 잔골재율과의 관계

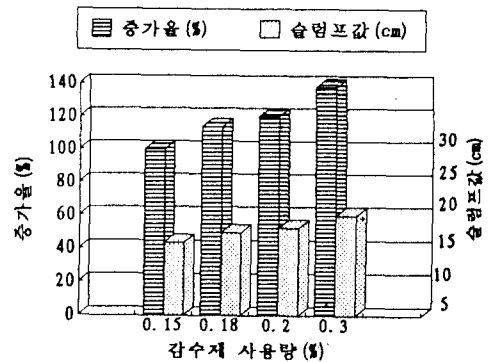


그림 8. 감수제량에 따른 슬럼프값의 변화

4.1.2 슬럼프값

그림 5는 고로슬래그시멘트를 사용한 경우의 단위수량과 슬럼프값의 관계를 나타낸 것으로 W/C비 63~45% 범위에서 슬럼프값 8~21cm를 얻기 위한 단위수량의 범위는 W/C 63%의 경우 175~196kg/m³, W/C 45%의 경우 165~186kg/m³ 정도임을 나타내고 있다. 대략 단위수량 0.87%의 증가는 슬럼프값 1cm의 증가를 가져온다.

4.1.3 물시멘트비와 잔골재율과의 관계

고로슬래그시멘트를 사용한 콘크리트의 물시멘트비와 잔골재율과의 관계를 나타내면 그림 6과 같다. 물시멘트비가 낮아질수록 동일 슬럼프값을 얻기 위한 잔골재율은 점차 감소하는 것으로 나타났다. 또한 그림 7에 나타나듯이 동일 물시멘트비에서 잔골재율을 변화시킬 때 슬럼프값은 증가하다가 일정 수준을 초과하게 되면 다시 감소하는 최적잔골재율이 존재함을 보여주고 있다.

4.1.4 감수제첨가량과 슬럼프와의 관계

그림 8은 물시멘트비 60%의 경우 단위수량 및 잔골재율을 일정하게 하고 감수제첨가량을 증가하여 슬럼프값을 측정하여 나타낸 것이다. 시험 결과 물시멘트비, 단위수량 및 사용골재등 실험조건에 따라 달라지나 첨가량을 0.15~0.3%로 변화할 경우, 첨가량 0.15%를 기준으로 했을 때 슬럼프값 증가율은 각각 14%, 20%, 38%가 증가되는 것으로 나타났다.

4.2 경화콘크리트의 특성

4.2.1 압축강도 발현율

압축강도 발현에 있어서 슬래그시멘트를 사용한 경우 포틀랜드시멘트와 비교하여 재령 1일, 3일 및 7일의 초기 압축강도발현율이 OPC를 사용한 콘크리트의 30~92% 수준으로 초기강도발현이 낮은 것으로 나타났다(그림 9 참조). 한편 고로슬래그시멘트를 사용한 콘크리트의 압축강도를 재령별로 표 8에 나타내었다.

표 8. 고로슬래그시멘트를 이용한 콘크리트 슬럼프 및 압축강도 결과

BFC를 사용한 콘크리트 배합				굳지 않은 상태					경화 상태			
W/C (%)	W (kg/m ³)	s/a (%)	감수제 사용량 (C×%)	AE제 사용량 (C×%)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	단위용적중량 (kg/m ³)	콘크리트 온도 (℃)	압축강도(kg/cm ²)			
									1일	3일	7일	28일
63	183	46.0	0.3	0.005	15.2	5.1	2,303	25.0	25.7	85.0	132	194
60	183	45.6		0.006	16.0	5.0	2,312	24.5	28.0	89.5	135	236
57	180	45.7		0.005	14.3	5.3	2,307	23.0	17.6	92.9	137	207
54	180	45.0		0.007	14.5	5.2	2,313	23.0	23.9	113	159	258
51	180	44.7		0.008	14.8	5.0	2,323	23.0	30.3	121	187	282
48	180	44.0		0.007	15.4	4.6	2,331	24.5	57.7	151	202	350
45	177	43.7		0.005	15.0	4.8	2,339	25.0	66.6	199	235	384

표 9. 경화콘크리트의 $\sigma_d - C/W$ 와 $W/C - \sigma_d$ 의 관계식

재령	$\sigma_d - C/W$ 의 관계식	$W/C - \sigma_d$ 의 관계식
1일	$\sigma_1 = 70.5C/W - 96.4 (R^2=0.73)$	$W/C = 0.16 / (\sigma_1/K + 0.21)$
3일	$\sigma_3 = 174.1C/W - 204.7 (R^2=0.92)$	$W/C = 0.38 / (\sigma_3/K + 0.45)$
7일	$\sigma_7 = 172.2C/W - 153.1 (R^2=0.96)$	$W/C = 0.38 / (\sigma_7/K + 0.34)$
28일	$\sigma_{28} = 304.0C/W - 296.8 (R^2=0.93)$	$W/C = 0.67 / (\sigma_{28}/K + 0.66)$

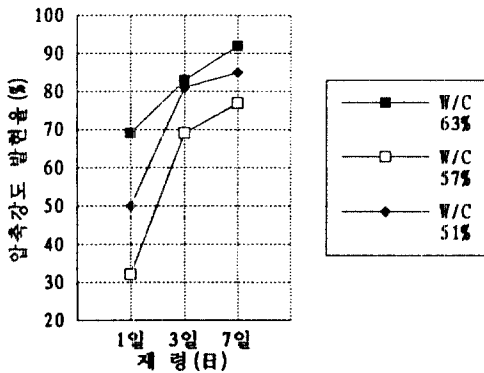


그림 9. 고로시멘트의 압축강도 발현율

4.2.2 $\sigma_d - C/W$ 및 $W/C - \sigma_d$ 관계식

경화 콘크리트의 7일 및 28일 압축강도와 C/W와의 관계를 그림 10에 나타내었으며 이를 다시 W/C로 환산한 식을 표 9에 나타내었다.

4.3 배합설계

표 8 및 표 9를 참조하여 물시멘트비 63~45% 범위내에서 설계기준강도(180~400kg/cm²)를 만족하고 소요 슬럼프값 15±2cm, 공기량 4.5±1%를 발휘하는 고로슬래그시멘트를 사용한 콘크리트의 단위수량, 단위시멘트량 및 잔골재율을 산출하여 보면 표 10과 같다.

배합강도를 결정하기 위해서 레미콘의 표준편

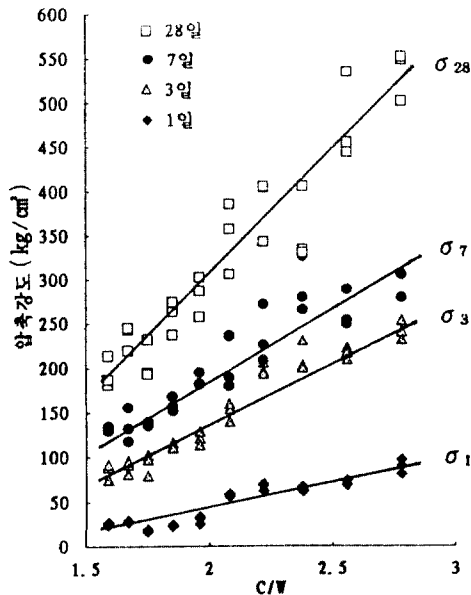


그림 10. 경화콘크리트 $\sigma_d - C/W$

차는 $\sigma = 25 \text{ kg/cm}^2$ 를 적용했으며 표 9의 $W/C - \sigma_d$ 관계식을 이용하여 물시멘트비를 결정하였다. 또한 감수제첨가량은 시멘트량의 0.3%로 고정했으며, AE제첨가량은 실험결과로부터 0.005~0.04% 범위내에서 첨가량을 산정하여 배합량을 계산하였다.

표 10. 고로슬래그시멘트를 사용한 콘크리트의 표준배합설계

F ₂₈ (kg/cm ²)	σ ₂₈ (kg/cm ²)	W/C (%)	S/A (%)	단 위 재 료 량(kg/m ³)				AE제 (g/m ³)	감수제 (g/m ³)	고성능 감수제 (g/m ³)
				W	C	S	G			
180	228	58	45.6	181	312	804	974	19	935	—
210	254	55	45.4	180	328	796	972	20	983	—
240	279	52	44.8	180	345	779	974	24	1,036	—
270	313	50	44.4	180	363	766	971	22	1,090	—
300	350	47	43.8	178	381	750	977	24	1,143	—
350	400	43	47.4	174	401	808	911	128	—	4,012
400	450	40	46.5	174	430	782	913	182	—	3,970

5. 결 론

고로슬래그시멘트를 사용한 콘크리트 배합설계에 관한 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 고로슬래그시멘트를 사용한 콘크리트 배합설계시 동일 슬럼프값을 얻기 위해서는 보통 포틀랜드시멘트를 사용한 콘크리트에 비해 단위수량을 3~8% 정도 감소할 수 있을 것으로 사료된다.
- 2) 고로슬래그시멘트 배합설계시 콘크리트의 물시멘트비가 낮을 수록 동일 슬럼프값을 얻기 위한 단위수량과 잔골재율은 감소한다.
- 3) 감수제첨가량에 따른 슬럼프값의 변화는 실험조건에 따라 다르나 물시멘트비 60%의 경우 동일 조건에서 감수제첨가량을 0.15%에서 1.2, 1.6 및 2배로 증가했을 경우 각각 14%, 20%, 38%의 슬럼프값 증가율을 가져왔다.
- 4) 감수제를 0.3% 사용했을 때 소요 슬럼프값 15 ± 2cm를 얻기 위한 최저 물시멘트비는 감수제의 성능에 따라 차이가 있으나 본 실험에서는 45% 전후였고 그 보다 낮은 경우 고성능감수제를 사용해야 소요 슬럼프값을 얻을 수 있었다.
- 5) 고로슬래그시멘트를 사용한 콘크리트의 압축강도는 보통 포틀랜드시멘트를 사용한 콘크리트에 비해 초기 압축강도 발현율이 60~90% 정도이고 재령이 경과할수록 압축강도 발현율이 높아지는 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 小林一輔 外 2名, “高爐水碎スラグ粉末の混和劑への使用方法に關する研究”, 콘크리트工學, Vol.17, No.5, 1979. 5
2. “高爐セメントを使用するコンクリートの調査設計·施工指針·同解説”, 日本建築學會, 1989
3. “高爐スラグ微粉末を用いたコンクリートの技術の現狀”, 日本建築學會, 1992. 6
4. “건축공사표준시방서”, 대한건축학회, 1994
5. “고로시멘트의 특성과 응용”, 동양중앙연구소, 1995. 5
6. “레미콘 기술교육”, 한국건자재 시험연구원, 1995
7. 김진춘, “슬래그시멘트의 콘크리트 배합설계연구”, 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 제 6권 1호, 1994. 5