

# 고로슬래그미분말 및 플라이애쉬를 사용한 고유동콘크리트의 특성에 관한 연구

## Properties of Self-Compacting Concrete Using Ground Granulated Blast Furnace Slag and Fly ash

김 은 겸\*      박 천 세\*\*      최 재 진\*\*\*      전 찬 기\*\*\*\*      이 호 석\*\*\*\*\*  
Kim, Eun-Kyum      Park, Chun-Se      Choi, Jae-Jin      Jeon, Chan-Ki      Lee, Ho-Suk

### ABSTRACT

In this research, the physical properties of self compacting concrete using ground granulated blast furnace slag and fly ash as a part of cement were investigated. Concrete using ground granulated blast furnace slag and fly ash was prepared with various ground granulated blast furnace slag(30~50 volume %) and fly ash(10~20 volume %) replacement for cement. The effect of each of the materials, which have effects on self compacting concrete made by the basic mix proportion used granulated blast furnace slag and fly ash after hardening, has been checked. The workability, flowing characteristics, resistance of segregation of materials, air content, and compressive strength of concrete using ground granulated blast furnace slag and fly ash were tested and the results were compared with those of ordinary portland cement concrete. In the experiment, we acquired satisfactory results at the point of flowing characteristics and strengths of concrete using ground granulated blast furnace and slag fly ash within the replacement ratio of 65%

### 1. 서론

고유동콘크리트는 자기충전성 및 재료분리저항성을 가진 콘크리트로서 진동에 의한 다짐이 필요없이 자중에 의해 거푸집 저면까지 충전되는 특징을 가진다. 이런 고유동콘크리트는 기존 콘크리트의 단점인 치기높이 제한 및 복잡한 단면의 타설 제한등의 문제점을 해결할 수 있다. 기존 연구의 대부분은 유동시 재료분리 저항성을 얻는 방법에 따라 증점제를 첨가한 증점제 분체량을 증가시킨 분체계 및 이들 양자를 병용한 병용계 등으로 구분된다. 이 가운데 분체량을 증가시켜 물분체비를 작게 한 분체계에서 콘크리트의 유동성과 재료분리 저항성에 효과적인 고로슬래그미분말 및 플라이애쉬를 사용하는 예는 많지만 이들 분체의 사용율에 따른 고유동콘크리트의 내구성에 대한 연구는 아직 미흡하다.

본 연구에서는 고유동콘크리트를 공장제품의 생산에 이용하기 위한 연구로서 岡村 甫 등에 의해 제안된 방법<sup>(1)</sup>에 따라 콘크리트의 배합을 정하고 고로슬래그미분말 및 플라이애쉬를 사용한 고유동콘크리트의 특성 및 내구성에 대하여 고찰하였다.

\* 정회원, 서울산업대학교 토목공학과 교수  
\*\* 정회원, 서울산업대학교 토목공학과 대학원  
\*\*\* 정회원, 천안공업대 토목과 교수  
\*\*\*\* 정회원, 인천전문대 토목과 교수  
\*\*\*\*\* 정회원, (주)토암산업 부사장

## 2. 실험방법

### 2.1 사용재료

#### 2.1.1 결합재

시멘트는 S사에서 생산한 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 고로슬래그미분말(표 및 그림에서는 슬래그로 표기함)은 비중 2.92, 분말도 4,500cm<sup>2</sup>/g, 플라이애쉬는 비중 2.26, 분말도 3,228cm<sup>2</sup>/g으로 각각의 화학성분은 표 1과 같다. 전체 분체량에 대한 부피비는 표 2에 나타난 바와 같이 고로슬래그미분말의 경우(2성분계) 30, 40, 50%, 고로슬래그미분말 및 플라이애쉬를 병용한 경우(3성분계)에는 10, 15, 20%이다.

표 1 시멘트와 고로슬래그미분말 플라이 애쉬의 물리·화학적 성질

결합재	화학조성(%)										물리적성질	
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	비중	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)
시멘트	20.36	5.77	-	-	2.84	64.33	2.05	-	2.51	1.30	3.15	3,200
슬래그	35.10	14.55	1.12	0.35	0.42	42.65	6.33	0.19	-	0.41	2.92	4,500
플라이애쉬	60.64	20.78	0.77	0.5	7.4	1.78	0.53	0.19	-	1.0	2.26	3228

표 2 고로슬래그 미분말 사용률 및 플라이 애쉬 치환율

	시험체명	슬래그 치환율 (%)	플라이애쉬 치환율 (%)		시험체명	슬래그 치환율 (%)	플라이애쉬 치환율 (%)
	2성분계	B0-F0	0		0	3성분계	B30-F10
B30-F0		30	0	B30-F15	30		15
				B30-F20	30		20
				B40-F10	40		10
B40-F0	40	0	B40-F15	40	15		
			B40-F20	40	20		
B50-F0	50	0	B50-F10	50	10		
			B50-F15	50	15		
			B50-F20	50	20		

#### 2.1.2 골재 및 화학혼화제

잔골재는 비중 2.59, 흡수율 1.18%, 조립률 2.64의 강모래를 사용하였고, 굵은골재는 최대치수 20mm, 비중 2.68, 흡수율 0.50%, 실적률 60%, 조립률 6.70의 부순돌을 사용하였다.

화학혼화제로서는 비중 1.03의 폴리카본산계 고성능감수제와 AE제를 사용하였다.

## 2.2 실험방법

### 2.2.1 시멘트풀의 플로우 실험

구속수비를 구하기 위해 시멘트풀의 플로우실험을 실시하였다. 물-시멘트 용적비는 1.1, 1.2, 1.3 및 1.4로 하였으며, 이 때 물과 시멘트풀의 합은 1ℓ가 되도록하여 잘 혼합하였다. 플로우시험에서는 플로우 테이블 대신에 유리판을 사용하였으며, 낙하운동을 주지 않고 플로우콘을 빼낸 후 서로 직교하는 2 방향의 지름을 측정하여 그 평균치로부터 플로우값을 구하였다. 이 시험에 사용된 플로우콘의 규격은 JIS R 5201(시멘트의 물리실험방법)이 정하는 바에 따랐다. 이 시험결과로부터 시멘트풀의 상대 플로우 면적비( $\Gamma_p$ )를 식(1)에 의해 계산하였으며, 이 값과 물-시멘트 용적비와의 관계로부터 절편값을 구하여 시멘트 구속수비로 하였다.(그림 1 참조)

$$\Gamma_p = \frac{\pi(F_p/2)^2 - \pi(F_o/2)^2}{\pi(F_o/2)^2} = (F_p/F_o)^2 - 1 \quad \text{----- (1)}$$

여기서,  $F_p$  : 시멘트풀의 플로우값(mm),  $F_o$  : 플로우콘 밑면의 지름(100mm)

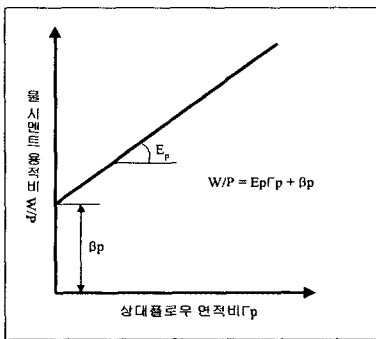


그림 1 상대플로우 면적비와 물-시멘트 용적비의 관계

### 2.2.2 모르타르실험

모르타르 실험에서는 모르타르 플로우시험과 V형로드 시험을 실시하였으며, 이로부터 물-시멘트 용적비를 구하였다. 콘크리트 배합설계에서 물-시멘트 용적비(물-결합재 용적비)는 시멘트 구속수비에  $K_b = 0.8 \sim 0.9$ 를 곱한 식(2)로부터 산정하였으며, 잔골재 용적비를 0.4로 하여 고성능감수제의 첨가량을 변화시켜 가면서 플로우 실험 및 V형로드 의한 유하실험을 실시하였다. 모르타르 플로우 면적비를 구하는 식은 시멘트풀의 상대 플로우 면적비( $\Gamma_m$ ) 식(1)과 동일하며, 상대 유하속도비( $R_m$ )는 식(3)과 같이 유하실험에서 구한 유하시간(초)의 역수를 10배한 값으로 정의한다.

$$W/C(W/B) = K_b \times \beta_p \quad \text{--- (2)} \quad R_m = 10/T_r \quad \text{--- (3)}$$

한편, 모르타르 실험에서 목표로 하는 상대 플로우 면적비와 상대 유하속도비의 평균값은 기존의 연구<sup>(1)</sup>에서 최적치로 제시된 값인  $\Gamma_m = 5 \pm 0.5$  및  $R_m = 1 \pm 0.1$ 의 범위에 들도록 하였다.

### 2.2.3 콘크리트실험

콘크리트 배합에서 물-시멘트 용적비는 모르타르의 상대 플로우 면적비와 상대 유하속도비와의 관계로부터 상대플로우 면적비가 5에 대응하고 또 상대 유하 속도비가 0.9~1.1의 범위에 만족하도록 정하였다. 고유동콘크리트 속에서의 굵은골재 용적은 공기량을 뺀 콘크리트에 굵은골재의 실적률을 곱한 값의 50%로 하였다. 즉,  $G = 0.5 G_{lim}(1 - A)$ 이다. 고성능감수제 및 AE제의 사용량은 슬럼프 플로우 값 및 공기량이 각각  $65 \pm 5$ cm 및  $5 \pm 0.5\%$ 가 되도록 정하였다.

콘크리트의 혼합은 팬형 믹서를 사용하고 시멘트와 잔골재를 30초 혼합한 후 물을 투입하여 90초 혼합하고 여기에 고성능감수제, AE제 및 굵은골재를 투입하여 90초 혼합하는 순서로 진행하였다. 혼합이 완료된 콘크리트에 대하여 슬럼프 플로우, 공기량 및 압축강도 실험은 KS 기준에 따랐으며, V형로드 유하실험, 상자형 용기를 사용한 간극 통과성 실험은 일본토목학회의 고유동콘크리트 시공지침에 따랐다.

### 2.2.4 동결융해 저항성 실험

2성분계 및 3성분계 고유동콘크리트의 동결융해저항성을 평가하기 위한 실험은 KS F 2456 에 준하

여 실시하였으며 상대동탄성계수가 60%이하가 되거나 동결융해 사이클 300회에서 실험을 종료하였다. 이 때의 소정의 사이클별로 공시체의 상대동탄성계수의 변화 및 중량변화를 측정하여 내동해성을 평가하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 고로슬래그미분말 및 플라이애쉬 사용률이 시멘트의 구속수비에 미치는 영향

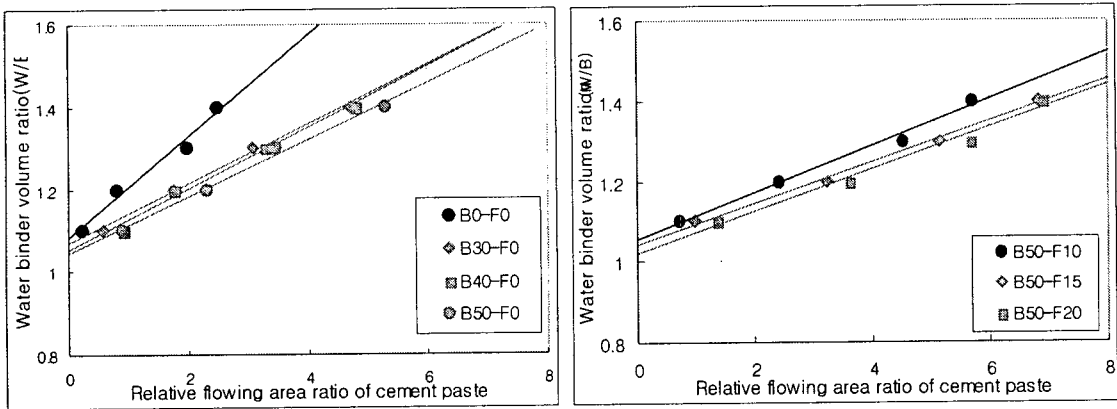


그림 2 2성분계 및 3성분계의 물-시멘트 용적비와 상대플로우 면적비의 관계

그림 2는 물-시멘트 용적비 1.1, 1.2, 1.3 및 1.4에 대한 시멘트풀의 플로우실험 결과를 나타낸 것이다. 결합재로서 시멘트만을 사용한 경우, 구속수비는 1.08을 나타내었으며, 고로슬래그미분말을 사용한 2성분계에서의 구속수비는 0.01~0.02 정도 감소하였고 고로슬래그미분말 및 플라이애쉬를 사용한 3성분계의 구속수비는 0.01~0.03 정도 감소한 것으로 나타났다. 시멘트의 구속수비가 크다는 것은 시멘트가 페이스트의 유동에 기여하지 않고 분체에 의해 구속되는 수량이 많다는 것을 의미하므로, 결합재로서 시멘트만을 사용하는 것 보다는 2성분계나 3성분계를 사용하는 것이 페이스트의 유동성을 증진시키는 데 효과가 있음을 알 수 있다.

#### 3.2 물-시멘트 용적비의 산정

그림 3은 고유동콘크리트의 적절한 물-시멘트 용적비를 구하기 위한 모르타르의 상대 플로우 면적비와 상대 유하속도비와의 관계를 나타낸 것이며, 그림 안에 제시되어 있는 값들은 물-시멘트 용적비를 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 상대 플로우 면적비 5 및 상대 유하속도비  $1 \pm 0.1$ 에 해당되는 물-시멘트 용적비를 구해 보면, 시멘트만을 사용한 경우에는 0.83이며, 2성분계는 0.81~0.84, 3성분계에서는 0.85~0.92의 범위로 나타났다.

또한, 이 그림에서 물-결합재 용적비가 증가하면 상대 유하속도도 증가되지만 고성능감수제를 첨가하여 플로우 면적을 증가시킬 경우는 유하속도가 그다지 증가하지 않는 것을 알 수 있다. 즉 물과 고성능감수제의 역할이 다르기 때문에 이들을 합리적인 방법에 의해 조합하면 모르타르에 적당한 변형성과 점성을 양립시킬 수 있게 되어 고유동콘크리트의 실현이 가능하게 된다는 것을 알 수 있다.

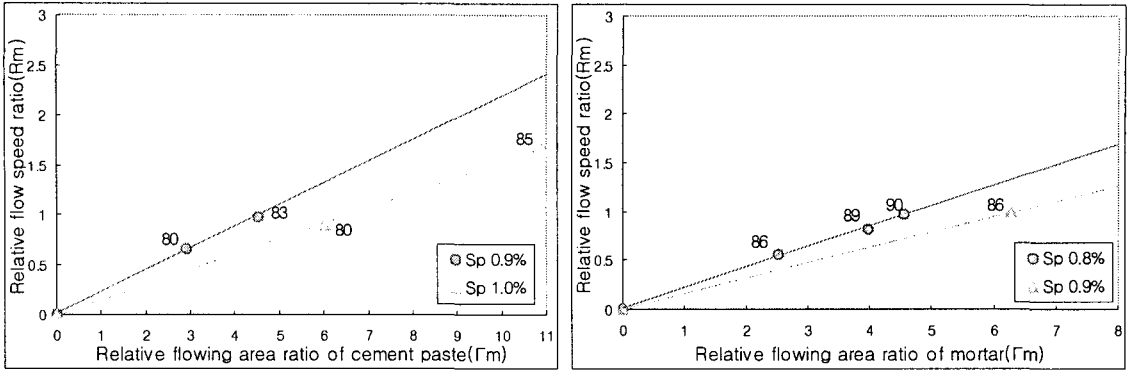


그림 3 2성분계(B50-F0/좌) 및 3성분계(B50-F20/우)의 상대플로우면적비와 상대유하속도비의 관계

### 3.3 고유동 콘크리트의 물성

표 3은 고로슬래그미분말 및 플라이애쉬 치환율에 따른 고유동콘크리트의 배합 및 굳지 않은 콘크리트의 유동성과 재료분리저항성에 대한 실험결과이다. 이 표에서 나타난 바와 같이 슬럼프플로우 및 공기량은 목표값인  $65 \pm 5\text{cm}$  및  $5 \pm 0.5$ 의 범위에 있다. 일반적으로 V형로드로부터 얻은 유하시간은 10~20초의 범위가 적정하며, 상자형 충전성 실험장치를 사용한 콘크리트의 높이차 실험은 5cm 정도 이하이면 간극 통과성이 유효한 것으로 평가한다. 본 실험에 있어서 2성분계 및 3성분계의 고유동콘크리트의 슬럼프플로우, V형로드 유하시간, 간극 통과성 실험결과 모두 위의 조건을 만족하는 것으로 나타나 양호한 결과를 얻었다.

그림 4로부터 2성분계의 압축강도는 3성분계에 비해 조기강도 발현이 현저하며, 3성분계의 91일 장기강도는 2성분계의 압축강도에 근접하고 있음을 알 수 있다. 특히, 분체 치환율이 70%(B50-F20)인 시험체의 장기압축강도는  $150\text{kgf/cm}^2$ 로서 매우 낮은 값을 나타내어 포졸란 반응에 의한 강도증진이 충분히 발휘되고 있지 않은 것으로 보인다. 본 실험에서는 혼화재 치환율이 증가함에 따라 압축강도 증진현상은 감소하고 있으나, 치환율이 65% 이내에서는 공장제품 생산에 필요한 충분한 강도가 발현되고 있음을 확인할 수 있었다.

표 3 고유동 콘크리트의 배합 및 물성실험결과

	시험체명	물/결합재 용적비 ( $V_w/V_p$ )	단위재료량 ( $\text{kg/m}^3$ )								실험결과			
			물	시멘트	슬래그	플라이애쉬	잔골재	굵은골재	고성능감수제	AE제	슬럼프플로우 (cm)	공기량 (%)	유하시간 (초)	높이차 <sup>1)</sup> (cm)
2 성분계	B0-F0	0.83	184	687	-	-	702	764	13.1	0.045	69.2	5.5	11.4	0.9
	B30-F0	0.82	180	483	192	-	702	764	8.1	0.061	68.4	5.1	14.1	1.2
	B40-F0	0.81	181	416	257	-	702	764	6.7	0.054	63.8	4.6	16.7	1.5
	B50-F0	0.83	184	343	318	-	702	764	5.9	0.053	68.5	5.6	12.9	2.6
3 성분계	B30-F10	0.92	191	393	182	47	702	764	6.8	0.075	63.7	5.5	19.5	3.8
	B30-F15	0.90	189	364	184	71	702	764	6.2	0.074	63.0	5.1	17.3	2.0
	B30-F20	0.91	190	329	183	95	702	764	5.5	0.091	67.2	4.3	17.9	2.8
	B40-F10	0.90	188	332	247	48	702	764	5.6	0.056	67.9	4.5	13.3	2.8
	B40-F15	0.85	183	306	252	73	702	764	5.7	0.069	64.0	4.5	21.0	3.0
	B40-F20	0.87	186	269	249	96	702	764	5.5	0.098	60.1	5.0	16.0	1.0
	B50-F10	0.86	184	271	314	49	702	764	5.7	0.063	67.3	5.5	18.2	1.0
	B50-F15	0.88	187	234	310	72	702	764	5.2	0.074	72.0	4.8	16.4	0.7
B50-F20	0.90	189	199	307	95	702	764	4.8	0.102	67.6	4.8	19.2	1.0	

주 1) 상자형 장치를 사용한 간극 통과성 실험에서의 콘크리트 높이차

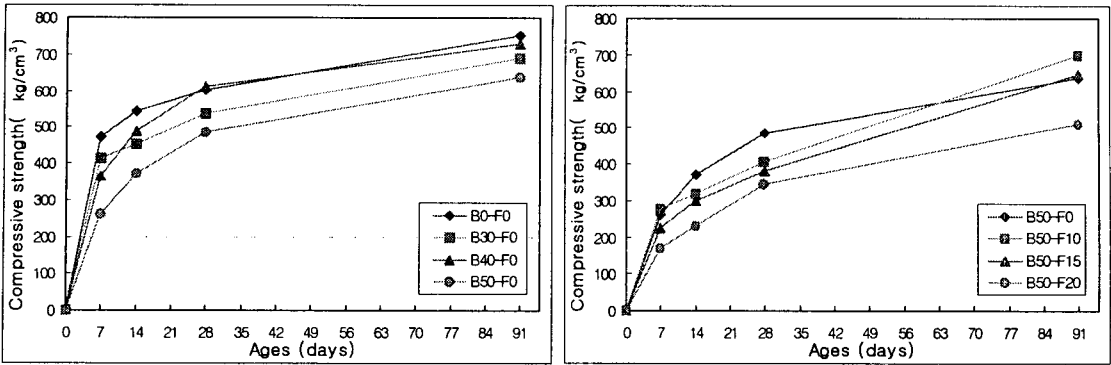


그림 4 2성분계(좌) 와 3성분계(우)의 압축강도

### 3.4 고유동콘크리트의 동결융해저항성

고유동콘크리트는 AE제를 사용하여 목표 공기량  $5 \pm 0.5\%$  로 한 결과 2성분계 및 3성분계 모두 내구성지수는 80%이상으로서 동결융해저항성 높은 것으로 나타났다. 특히 3성분계에서 플라이애쉬의 사용량이 증가함에 따라 동탄성계수가 낮아지고 있는 현상은 AE제가 플라이애쉬의 미연소탄 등에 흡착되어 소정의 AE공기량이 연행되지 않았기 때문으로 판단된다.

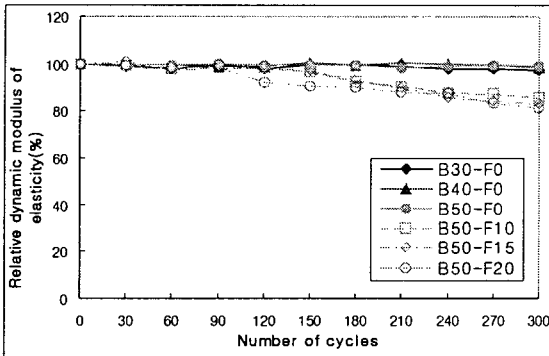


그림 5 2성분계 및 3성분계의 상대동탄성계수

한 내구성지수는 모두 80%이상으로서 동해저항성이 높은 것으로 나타났다.

## 4. 결론

1. 시멘트만을 사용하였을 때 시멘트의 구속수비는 1.08, 2성분계의 경우는 0.01~0.02, 3성분계에서는 0.01~0.03정도 감소하였다.
2. 고유동콘크리트의 적정 물시멘트 용적비는 시멘트만을 사용한 경우 0.83이었고, 2성분계는 0.81~0.83, 3성분계에서는 0.85~0.92정도의 범위로 나타났다.
3. 고유동콘크리트의 공장제품생간에 적용할 경우, 고로슬래그미분말 및 플라이애쉬 치환율은 30~65% 정도가 적절한 것으로 판단되었다.
4. 고유동콘크리트의 동결융해저항성 시험에 의

## 참고문헌

1. 小澤一雅, 前川宏一, 岡村 甫, “하이퍼폼스콘크리트의開發”, 콘크리트工學年次論文報告集, Vol. 11, No. 1, pp.699~704. 1989. 6.
2. 土木學會, 高流動콘크리트施工指針, 1998.
3. 綠川猛彦, 丸山久一, “粉体の拘束水に及ぼす粒子形状の影響”, 콘크리트工學年次論文報告集, Vol. 17, NO. 1, 1995, pp.123~128.
4. 최재진, 김은겸, 박천세, 전찬기, 이호석, “고로슬래그미분말을 사용한 고유동콘크리트의 특성”, 한국콘크리트 학회 학술발표회 논문집 제14권 2호 2002. 11. pp.579~584.