

고로슬래그미분말을 사용한 고유동콘크리트의 특성

Properties of Self Compacting Concrete Using Ground Granulated Blast Furnace Slag

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

ABSTRACT

In this research, the physical properties of self compacting concrete using ground granulated blast furnace slag as a part of cement were investigated. Concrete using ground granulated blast furnace slag was prepared with various ground granulated blast furnace slag replacement(20~80 volume %) for cement and the quantities of coarse aggregate in concrete were 50%, 55% and 60% of ratio of absolute volume of coarse aggregate. The workability, flowing characteristics, air content and compressive strength of concrete using ground granulated blast furnace slag 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 slag within the replacement ratio of 60% and the optimum quantity of coarse aggregate in concrete was found to be 50%~ 55% of ratio of absolute volume of coarse aggregate.

1. 서론

고유동콘크리트는 높은 변형성과 분리저항성에 의해 자기충진성을 갖는 콘크리트로서 외부에서 힘을 전혀 가하지 않거나 또는 아주 작은 힘만으로 재료분리 없이 거푸집 구석구석까지 충전되는 특징을 가진다. 이러한 고유동콘크리트의 사용에 의해 다짐을 하지 않아도 된다면 시공방법의 영향을 받지 않고 신뢰성이 높은 구조물을 만들 수 있을 뿐 아니라 1회치기 높이의 제한, 다짐작업을 위한 발판, 박스단면에서 밀면과 벽체 부분의 분할 치기 등의 제약을 받지 않게 되고, 鋼콘크리트 샌드위치 합성 구조 등의 새로운 구조형식도 용이하게 시공할 수 있어 많은 이점을 가질 수 있다.

본 연구는 고유동콘크리트를 콘크리트 공장제품의 생산에 이용하기 위한 기초적 연구로서 岡村 甫 등에 의해 제안된 방법⁽¹⁾에 따라 콘크리트의 배합을 정하고 시멘트의 일부를 고로슬래그미분말로 대체한 분체계의 고유동콘크리트의 특성 및 적정 굵은골재량에 대하여 고찰하였다.

* 정회원, 서울산업대학교 토목공학과 교수

** 학생회원, 서울산업대학교 토목공학과 대학원

*** 정회원, 인천전문대학 토목과 교수

**** 정회원, (주)토암산업 부사장

***** 정회원, 천안공업대학 토목과 교수

2. 실험방법

2.1 사용재료

2.1.1 시멘트 및 고로슬래그미분말

시멘트는 H사에서 생산한 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 고로슬래그미분말(표 및 그림에서 슬래그로 표기함)은 비중 2.90, 분말도 4,500cm²/g으로 각각의 화학성분은 표 1과 같다. 모든 실험에서 고로슬래그미분말은 전체 분체량에 대한 부피비로 0, 20, 40, 60 및 80%를 사용하였다.

표 1 시멘트와 고로슬래그미분말의 화학성분

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	SO ₃	K ₂ O
시멘트	20.36	5.77	-	-	2.84	64.33	2.05	-	2.51	1.30
슬래그	35.10	14.55	1.12	0.35	0.42	42.65	6.33	0.19	-	0.41

2.1.2 골재

잔골재는 비중 2.59, 흡수율 1.18%, 조립률 2.46의 강모래를 사용하고, 굵은골재는 최대치수 20mm, 비중 2.70, 흡수율 0.50%, 실적률 60%, 조립률 6.70의 부순돌을 사용하였다.

2.1.3 화학혼화제

화학혼화제로는 비중 1.03의 폴리카르본산계의 고성능감수제와 AE제를 사용하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 시멘트풀실험

(1) 플로우값 측정

모르타르 믹서를 사용하여 물-시멘트 용적비 1.1, 1.2, 1.3 및 1.4의 시멘트풀을 1리터 혼합한 후 플로우실험을 하였다. 혼합방법은 시멘트와 고로슬래그미분말 및 1차수(시멘트 표준반죽질기 수량의 1.1 배)를 믹서 용기에 넣고 저속으로 60초 혼합한 후 고속으로 60초 동안 혼합하였다. 그리고 나머지 2차수를 투입하여 저속으로 60초 혼합한 후 잠시 멈추고 용기 내의 시멘트풀을 긁어내린 다음 다시 저속으로 60초 혼합하는 순서로 진행하였다. 플로우실험은 플로우 테이블 대신에 수평으로 설치한 아크릴 판 위에서 낙하운동을 주지 않고 플로우 콘을 빼낸 후 2방향의 지름을 측정하여 평균치를 구하였고, 그 외에는 JIS R 5201(시멘트의 물리실험방법)이 정하는 바에 따랐다.

(2) 시멘트의 구속수비 산출

시멘트풀의 상대플로우면적비(Γ_p)를 식(1)에 의해 계산하였으며, 상대플로우면적비와 물-시멘트 용적비와를 직선회귀하여 직선의 절편값을 구하고 이것을 시멘트의 구속수비라 하였다. (그림 1 참조)

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

여기서, F_p : 시멘트풀의 플로우값(mm)

F_o : 플로우콘 밀면의 지름(100mm)

2.2.2 모르타르실험

물-시멘트 용적비를 (1)에서 구한 시멘트의 구속수비의 0.80~0.90배의 범위로 적당히 설정하고 잔골재 용적비를 0.40으로 한 모르타르에 대하여 고성능감수제의 첨가량을 변화시켜 플로우실험 및 V형 깔때기에 의한 유하실험을 하였다.

혼합은 모르타르 므서를 사용하여 잔골재 및 시멘트를 건비비한 후 1차수를 투입하고 저속으로 60초 혼합한 후 다시 저속으로 60초 혼합하였다. 그리고 나머지 2차수와 고성능감수제를 투입하여 저속으로 60초 혼합한 후 다시 저속으로 60초 혼합하는 순서로 1.5리터의 모르타르를 혼합하였다. 모르타르의 플로우실험은 (1)의 시멘트풀의 경우와 같은 방법으로 실시하고 모르타르의 상대플로우면적비를 구하였다. 그리고 그림 2의 장치를 사용하여 모르타르의 유하실험을 실시하여 유하시간(초)의 역수를 10

배한 값으로 정의한 모르타르의 상대유하속도비를 구하였다.

2.2.3 콘크리트실험

2.2.2의 실험으로 구한 모르타르의 상대플로우면적비와 상대유하속도비와의 관계로부터 상대플로우면적비 5에 대응하는 상대로드 속도비가 0.9~1.1의 범위에 드는 물-시멘트 용적비를 콘크리트의 배합에서의 물-시멘트 용적비로 하였다.

굵은골용적의, 공기를 뺀 콘크리트 용적에 대한 비율은 사용하는 굵은골재 실적물의 50%, 55% 및 60%로 하였다. 그리고 고성능감수제 및 AE제의 사용량은 슬럼프플로우값 $65 \pm 5\text{cm}$ 및 공기량 $5 \pm 0.5\%$ 이 되는 양으로 정하였다. 콘크리트의 혼합은 팬형 므서를 사용하고 시멘트와 잔골재를 30초 혼합한 후 물을 투입하여 90초 혼합하고 여기에 고성능감수제, AE제 및 굵은골재를 투입하여 90초 혼합하는 순서로 진행하였다. 혼합을 끝낸 콘크리트에 대하여 슬럼프플로우, 공기량, V형 깔때기 유하실험(그림 3참조), 상자형 용기를 사용한 간극통과성실험(장해R2, 참고문헌 2 참조)을 실시하고 압축강도 및 인장강도 실험을 위한 공시체를 제작하였다. 이때 V형 깔때기 유하실험에 있어서는 용기에 콘크리트를 채우고 상부로부터 콘크리트가 장치를 통과하여 아래가 보이는 순간까지의 시간을 측정하는 방법으로 유하시간(초)을 측정하였다.

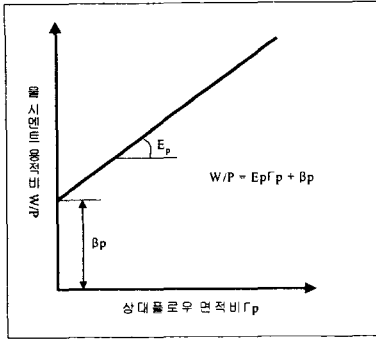


그림 1 상대플로우 면적비와 물-시멘트 용적비의 관계

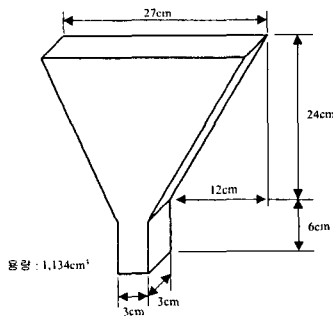


그림 2 모르타르용 V형 깔때기 유하실험장치

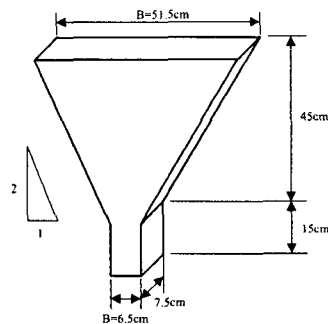


그림 3 콘크리트용 V형 깔때기 유하실험장치

3. 실험결과 및 고찰

3.1 고로슬래그미분말 치환량이 시멘트의 구속수비(β_p)에 미치는 영향

그림 4는 시멘트의 구속수비를 구하기 위해 물-시멘트 용적비를 1.1, 1.2, 1.3 및 1.4로 한 시멘트풀을 만들어 플로우실험을 하여 얻은 결과이다.

이 그림에서 시멘트만을 사용하였을 때의 구속수비는 1.08이었으며, 고로슬래그미분말의 치환율이 20% 증가할 때마다 구속수비는 0.02~0.04씩 감소하는 것으로 나타났다. 시멘트의 구속수비가 크다는 것은 유동성에 기여하지 못하고 결합재에 흡수되는 수량이 크다는 것을 의미하므로⁽³⁾ 고로슬래그미분말의 치환량이 증가되면 결합재에 흡수되는 수량이 작아져 유동성을 개선시키는 것으로 판단된다.

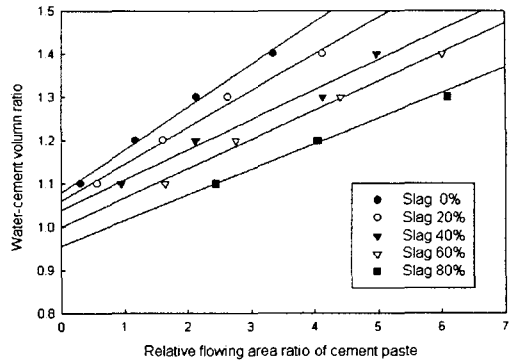


그림 4 물-시멘트 용적비와 상대플로우면적비의 관계

3.2 적정 물-시멘트 용적비

岡村 甫 등은⁽¹⁾ 모르타르의 상대플로우면적비가 5일 때 상대유하속도비가 0.9~1.1의 범위에 드는 물-시멘트 용적비를 콘크리트의 배합에서의 물-시멘트 용적비로 하도록 추천하며 또 상대플로우면적비 5에 대응하는 상대유하속도비가 0.9 이하인 경우에는 물-시멘트 용적비를 크게 하고 1.1 이상의 경우에는 물-시멘트 용적비를 작게 하도록 제안하고 있다.

그림 5는 고유동 콘크리트의 적정 물-시멘트 용적비를 구하기 위하여 모르타르의 상대플로우면적비와 상대유하속도비와의 관계를 실험한 결과의 일부이다. 이 그림에서 ()속의 값은 분체에 대한 고성능감수제의 증량 백분율을 나타낸다. 이 실험결과로부터 적정 물-시멘트 용적비를 구하면 시멘트만을 사용한 경우는 0.81(=0.75 β_p)이며, 고로슬래그미분말을 20, 40, 60 및 80% 대체 사용한 경우는 각각 0.80, 0.83, 0.85 및 0.84로 나타나 적정 물-시멘트 용적비는 0.80~0.85의 범위로 나타났다.

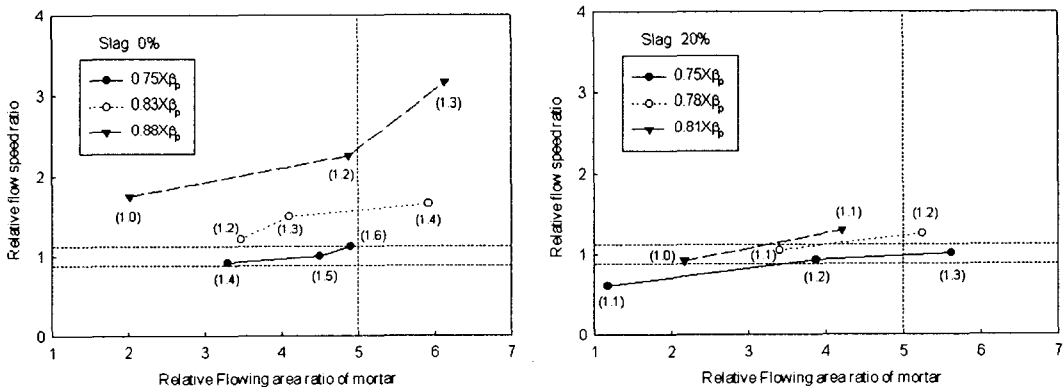


그림 5 모르타르의 상대플로우면적비와 상대유하속도비의 관계

3.3 고유동콘크리트의 물성

표 2는 고로슬래그미분말의 대체율에 따른 고유동콘크리트의 배합 및 굳지 않은 콘크리트의 실험 결과이다. 이때 전체 콘크리트 부피 중 굵은골재의 부피는 굵은골재 실적률(60%)의 50%, 55% 및 60%로 하였다. 이 표에 나타난 바와 같이 슬럼프플로우 및 공기량은 대체로 목표로 하는 65±5cm 및 5±0.5%의 범위에 있었다.

일반적인 경우 V형 깔때기 유하실험으로부터 얻은 유하시간은 10~20초의 범위가 적정하며, 상자형 실험장치를 사용한 콘크리트 높이차 실험에서 그 값이 5cm 정도 이하이면 간극통과성이 양호한 것으로 평가한다. 표 2에서는 고유동콘크리트의 배합을 정할 때 콘크리트 속에서 굵은골재의 부피를 그 실적률의 50% 및 55%로 한 경우 고로슬래그미분말의 대체율에 관계없이 V형 깔때기 유하시간과 상자형 실험장치에 의한 간극통과성 실험결과가 모두 양호하게 나타났다.

그러나 굵은골재의 부피를 그 실적률의 60%로 한 경우는 V형 깔때기 유하시간이 길어지고 간극통과성도 양호하지 않은 것으로 나타났다. 따라서 이러한 결과를 종합해 볼 때 콘크리트 속에서 굵은골재의 부피는 그 골재의 실적률의 50~55%의 범위에서 정하는 것이 바람직하다고 판단된다.

그림 6은 콘크리트 속에서 굵은골재의 부피를 그 실적률의 50%, 55% 및 60%로 한 경우의 재령 7일과 28일의 압축강도를 실험한 결과이며, 그림 7은 재령 28일의 인장강도를 실험한 결과이다.

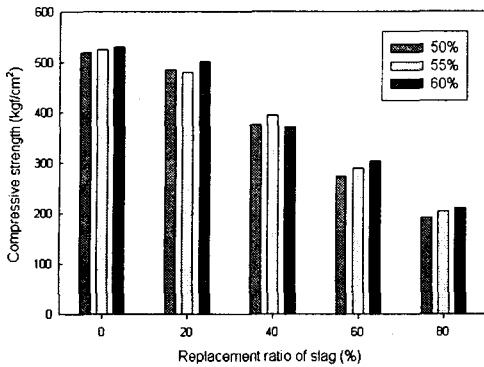
본 실험에서는 굵은골재량의 변화가 고유동콘크리트의 강도에 미치는 영향은 거의 나타나지 않았다. 그리고 고로슬래그미분말의 대체율이 증가하는데 따라서는 압축강도가 감소하는 경향이 있으나 대체율 60% 이내에서는 콘크리트 공장제품의 생산에 필요한 충분한 강도가 발현됨을 확인할 수 있었다.

표 2 고유동 콘크리트의 배합 및 물성실험결과

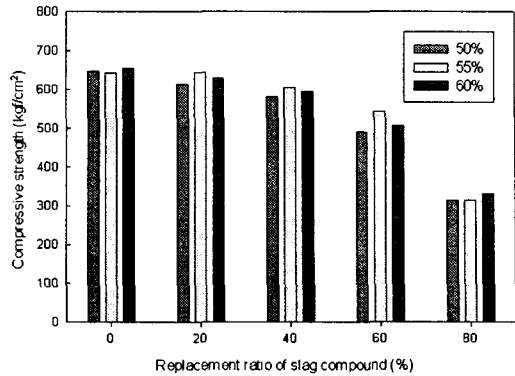
배합 No	슬래그 대체율 (%)	굵은골재량 ¹⁾ (%)	단위재료량 (kgf/m ³)							실험결과			
			물	시멘트	슬래그	잔골재	굵은골재	고성능감수제	AE제	슬럼프플로우 (cm)	공기량 (%)	유하시간 (초)	높이차 ²⁾ (cm)
1	0	50	179	694	-	689	770	11.80	0.139	65.0	4.7	11.8	4.2
2		55	171	665	-	659	846	11.50	0.133	67.4	5.4	12.5	5.5
3		60	163	635	-	630	923	11.11	0.127	65.3	4.5	21.9	15.0
4	20	50	177	547	137	689	770	8.20	0.123	69.0	5.0	13.9	5.0
5		55	169	528	132	659	846	8.25	0.119	64.1	5.6	14.3	6.0
6		60	162	504	126	630	923	7.88	0.113	62.3	4.4	24.8	25.0
7	40	50	181	399	266	689	770	5.65	0.106	63.0	5.6	19.3	4.5
8		55	173	382	255	659	846	6.05	0.102	70.6	4.4	19.4	4.0
9		60	166	365	243	630	923	5.66	0.097	58.4	5.2	17.5	20.0
10	60	50	183	260	389	689	770	4.09	0.078	62.0	5.6	10.5	4.5
11		55	175	248	373	659	846	4.35	0.075	65.0	4.5	16.6	10.0
12		60	168	237	356	630	923	4.25	0.071	63.5	4.3	26.6	33.5
13	80	50	183	128	513	689	770	2.78	0.061	60.0	5.6	8.5	5.5
14		55	175	123	491	659	846	3.27	0.059	58.5	5.7	14.4	12.0
15		60	167	117	469	630	923	3.20	0.057	60.6	4.2	36.5	34.2

주 1) 굵은골재의 실적률에 대한 비율

2) 상자형 장치를 사용한 간극통과성 실험에서의 콘크리트 높이차



(a) 재령 7일



(b) 재령 28일

그림 6 굵은골재 사용량에 따른 압축강도 실험결과

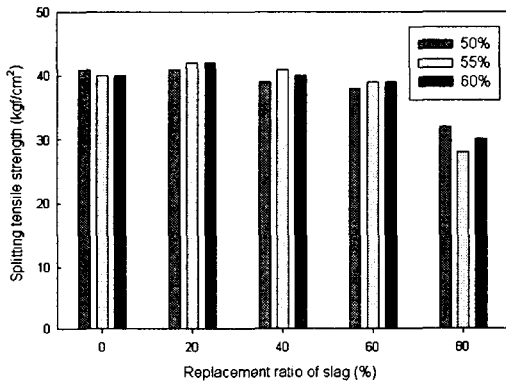


그림 7 굵은골재 사용량에 따른 인장강도 실험결과

4. 결론

1. 시멘트만을 사용하였을 때의 시멘트의 구속 수비는 1.08이었으며, 고로슬래그미분말의 치환율이 20% 증가할 때마다 그 값은 0.02~0.04씩 감소하였다.
2. 고유동콘크리트의 적정 물-시멘트 용적비는 시멘트만을 사용한 경우는 0.81이었고, 고로슬래그미분말을 20~80% 대체 사용한 경우는 0.80~0.85의 범위로 나타났다.
3. 고유동콘크리트 속에서 굵은골재의 부피는 그 골재의 실적률의 50%~55%의 범위가 적정한 것으로 판단되었다.

참고문헌

1. 小澤一雅, 前川宏一, 岡村 甫, “하이퍼퍼포먼스콘크리트의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.