

# 무시멘트 알칼리 활성화 고로슬래그 콘크리트의 배합에 따른 재료 역학적 특성

## Synthesis and Mechanical Properties of Alkali-Activated Slag Concretes

송진규\*      이강석\*\*      한선애\*\*\*      김용인\*\*\*  
Song, Jin Kyu      Lee, Kang Seok      Han, Sun Ae      Kim, Young In

### ABSTRACT

The purpose of this study is to estimate basic mechanical properties of alkali-activated concretes based on GGBS(Ground Granulated Blast Furnace Slag). In this study, various mix ratios of alkali activated concretes based on sodium silicate and GGBS were set to evaluate concrete's compressive strengths and strains on the basis of results of existing alkali-activated cements and preliminary concrete tests, which were already performed by authors [Ref. 1]. Compressive strengths of concretes of ages 1, 3, 7, 28, 56 and 91 days were tested and investigated, respectively, and at early ages (< 7days) alkali-activated slag concrete (AASC) showed a high strength development, compared to that of Ordinary Portland Cement (OPC). A compressive strengths of AASC at age-3days range between 18 and 24 MPa, while those of OPC range 12 and 15 MPa. The stress-strain curve after maximum stress, on the other hand, is approximately reached at a compressive strain between 0.002 and 0.0025, which mechanical property is very similar to that of OPC.

### 요약

본 연구에서는 시멘트의 대체재로써 고로슬래그를 사용한 무시멘트 알칼리 활성화 고로슬래그 콘크리트의 배합에 따른 기본적인 역학적 특성에 대해 파악하였다. 압축강도에 영향을 줄 수 있는 변수를 기존의 모르타르 연구 및 예비 실험을 통해 설정한 후 배합하여 1, 3, 7, 28, 56, 91일의 압축강도를 측정하였다. 압축강도 실험에서 알칼리 활성화 고로슬래그 콘크리트는 OPC(보통 포틀랜드 시멘트) 콘크리트에 비해 초기 강도가 빠르게 발현되었으며, 특히 1, 3일 강도는 OPC 콘크리트보다 약 1.5~3배 정도 높게 나타났다. 응력-변형률 관계에서는 알칼리 활성화 고로슬래그 콘크리트는 최대 응력 이후에 변형률이 0.0020~0.0025에서 콘크리트의 파괴가 급격히 발생하였으며, 규산나트륨을 많이 첨가한 경우 고강도 콘크리트처럼 취성적 파괴를 보였다.

\* 정회원, 전남대학교, 건축학부, 부교수

\*\* 정회원, 전남대학교, 건축학부, 조교수

\*\*\* 정회원, 전남대학교, 건축공학과, 석사과정

## 1. 서 론

2005년 교토의정서가 공식 발효됨에 따라 의정서에 가입한 국가들을 중심으로 이산화탄소를 비롯한 온실가스를 의무적으로 감축하도록 하고 있다. 온실가스로 인한 기후변화 문제는 이미 전 세계의 모든 국가에 심각한 위협이 되고 있으며, 온실가스 배출 감축과 관련된 배출권 거래제 등이 거론되면서 이 문제는 환경적 문제뿐만 아니라 경제적 문제와도 직결되고 있다.

한편, 콘크리트는 주요 건설재료로서 현대 건축문화 발전에 큰 기여를 하였다. 그러나 콘크리트의 접착제 역할을 하는 시멘트는 그 소성과정에 있어서 1300℃이상의 막대한 에너지가 소비될 뿐만 아니라 온실가스의 주범인 이산화탄소를 다량으로 배출하고 있다. 따라서 국내외의 콘크리트 제조업체들은 이러한 문제를 인식하고 시멘트의 대체제로 활용 가능한 제품 개발에 노력하고 있다.

본 연구에서는 시멘트가 아닌 고로슬래그(Ground Granulated Blast furnace Slag, GGBS)를 원재료(Source material, SM)로 사용한 무시멘트 알칼리 활성화 콘크리트를 OPC(보통포틀랜드시멘트)콘크리트의 대체제로 활용하기 위한 기본적인 재료 특성에 대하여 검토하였다.

## 2. 사용재료 및 배합

### 2.1 사용재료

고로슬래그는 용광로에서 선철의 생산과정 중에 발생하는 산업부산물로서 실험에서는 국내산 고로슬래그 미분말 3종을 사용하였다. 또한 고로슬래그는 잠재수경성으로 그 자체로는 강도발현이 어렵기 때문에 반응을 활성화시키기 위하여 규산나트륨을 첨가하였다. 실험에 사용한 각 재료의 화학성분 및 물리적 특성은 표 1과 같다.

표 1 사용 재료의 화학성분 및 물리적 특성

재료명	MgO (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	SO <sub>3</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)	CaO (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	MnO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	LOI* (%)	비중	비표면적 (cm <sup>2</sup> /g)
고로슬래그	4.38	13.8	34.7	0.95	0.48	44.6	0.74	0.24	0.11	-	-	2.93	4000
규산나트륨	-	-	45.72	-	-	-	-	-	-	50.29	3.99	-	-

### 2.2 배합 및 공시체 제작

압축강도에 영향을 줄 수 있는 배합변수는 기존의 모르타, 콘크리트 연구<sup>1),2)</sup> 및 예비실험을 통하여 선정된 후 표 2의 배합비에 따라 본 실험을 실시하였다. 초기 재료분리와 시간경과에 따른 유동성 손실을 고려하여 규산나트륨량에 따라 물바인더(W/B)비를 조절하였다. 콘크리트는 KS F 2425에 따라 60ℓ 용량의 콘크리트 강제식 믹서에 배합한 후 φ10cm × 20cm의 원주형 공시체에 재령별로 각각 3개씩 제작하였으며, 21±3℃의 상온에서 양생하였다.

표 2 실험 배합비

Name	SM	W/B(W/C)	Na <sub>2</sub> O/SM	Name	SM	W/B	Na <sub>2</sub> O/SM
C1	OPC	50	-	G5	GGBS	50	0.18
C2	OPC	55	-	G6	GGBS	55	0.18
G1	GGBS	40	0.12	G7	GGBS	60	0.18
G2	GGBS	50	0.12	G8	GGBS	55	0.22
G3	GGBS	55	0.12	G9	GGBS	60	0.22
G4	GGBS	60	0.12	여기서 C, G는 원재료의 약자			

### 3. 실험 결과

#### 3.1 압축강도

KS F 2405 콘크리트 압축강도 시험방법에 따라 1, 3, 7, 28, 56, 91일 강도를 측정하였으며 그 결과는 표 3과 같다. 압축강도는 공시체 몰드의 크기를 고려하여 강도보정계수 0.97<sup>3)</sup>을 사용하였고 측정된 3개의 데이터의 평균값을 사용하였다.

그림 1에서 보면 알칼리 활성 고로슬래그 콘크리트는 OPC 콘크리트에 비해 초기 강도 발현이 빠르다. 특히 1, 3일 압축강도는 OPC 콘크리트보다 약 1.5~3배 정도 높았으며, 7일 이후에는 원재료에 대한 Na<sub>2</sub>O비(Na<sub>2</sub>O/SM)가 0.18일 때 OPC 콘크리트보다 압축강도가 높았다.

표 3 압축강도 실험결과(MPa)

실험체명	1일 강도	3일 강도	7일 강도	28일 강도	56일 강도	91일 강도
C1	6.00	12.76	20.70	29.11	31.59	32.56
C2	6.16	14.46	21.61	29.85	32.40	33.39
G1	19.77	23.37	27.39	27.26	29.94	32.49
G2	9.52	18.08	19.68	21.05	23.59	26.83
G3	14.91	17.86	20.01	19.12	22.07	23.19
G4	23.42	26.51	27.35	32.26	36.39	43.53
G5	17.69	23.57	25.97	27.44	33.99	26.36
G6	16.86	21.63	21.88	25.08	28.59	31.00
G7	14.57	17.37	19.26	22.46	27.09	27.41
G8	20.90	20.43	22.73	24.31	27.11	36.19
G9	18.45	22.28	23.26	25.90	28.09	30.72

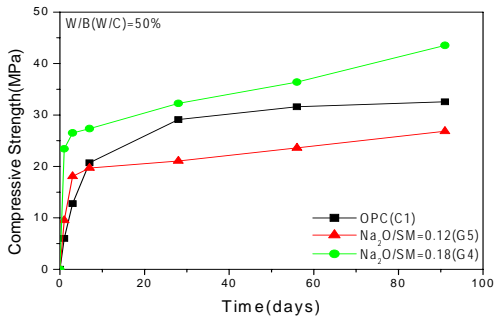


그림 1 원재료에 따른 압축강도

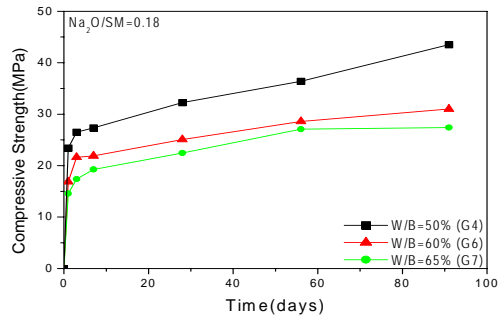


그림 2 W/B에 따른 압축강도

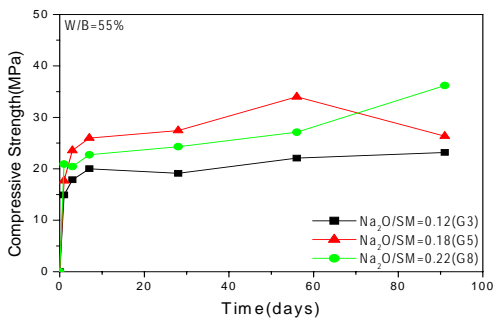


그림 3 Na<sub>2</sub>O/SM에 따른 압축강도

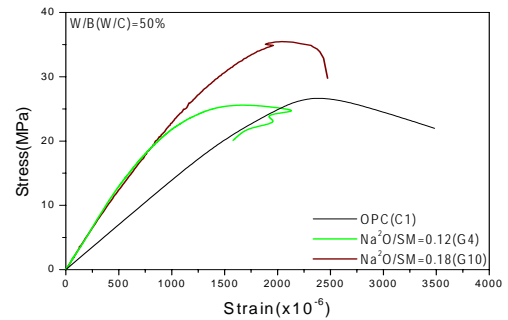


그림 4. 응력-변형률 그래프

그림 2에서 알칼리 활성 콘크리트는 W/B비가 적을수록 압축강도가 크게 나타났으며, W/B비가 50%가 60%에 비해 7일 강도는 약 1.25배, 91일 강도는 약 1.4배 정도 크다. 그림 3의 Na<sub>2</sub>O/SM에 따른 압축강도를 보면 1일 강도에서는 Na<sub>2</sub>O/SM가 클수록 높게 나타났으나 그 관계가 장기강도까지 이어지지 않았다.

### 3.2 응력-변형률 관계

그림 4는 재령 28일에서 동일 W/B(또는 W/C)의 알칼리 활성화 고로슬래그 콘크리트와 OPC 콘크리트의 응력-변형률 관계이다. 알칼리 활성화 고로슬래그 콘크리트는 초기 기울기 값, 즉 접선 탄성계수값이 컸으며, 변형률이 0.0020~0.0025에서 콘크리트의 파괴가 발생하였다. 특히  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SM}$ 량이 많을수록 파괴형태가 최대 응력 이후 급격한 파괴형태를 보였는데, 이는 일반적인 고강도 콘크리트의 취성적인 파괴와 유사하다.

## 4. 결론

무시멘트 알칼리 활성화 고로슬래그 콘크리트의 배합에 따른 기본적인 역학적 특성에 대해 실험적으로 검토한 결론은 다음과 같다.

- 1) 알칼리 활성화 고로슬래그 콘크리트는 W/B비가 적을수록 압축강도가 컸으며, W/B비가 50%가 60%에 비해 7일 강도는 약 1.25배, 91일 강도는 약 1.4배 정도 크게 나왔다.  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SM}$ 에 따른 압축강도에서는 1일 강도는  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SM}$ 가 클수록 높았으나 그 관계가 장기강도까지 이어지지 않으므로 규산나트륨의 적절한 첨가량이 요구된다.
- 2) 알칼리 활성화 고로슬래그 콘크리트는 OPC 콘크리트에 비해 초기 강도 발현이 빠르며, 특히 1, 3일 강도는 약 1.5~3배 정도 높았다. 응력-변형률 곡선에서 알칼리 활성화 고로슬래그 콘크리트는 OPC 콘크리트에 비해 초기 기울기 값, 즉 접선탄성계수값이 컸으며, 변형률이 0.0020~0.0025에서 콘크리트의 파괴가 발생하였다. 특히,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SM}$ 량이 많을수록 파괴형태가 최대 응력 이후 급격한 파괴형태를 보였는데, 이는 일반적인 고강도 콘크리트의 취성적인 파괴와 유사하기 때문에 추후 구조재료 활용하기 위해 이에 대한 검토가 필요하다.
- 3) 알칼리 활성화 고로슬래그 콘크리트는 조기 강도 발현, 우수한 압축강도 등을 나타내었으나 향후 구조재료로서 활용하기 위해서는 응결, 경화 매커니즘, 알칼리 골재 반응 등에 대해서 추가적 연구가 필요하다고 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 2008년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(지방연구중심대학육성사업/바이오하우징연구사업단).

## 참고문헌

1. 양근혁, 송진규, “알칼리 활성화를 이용한 무시멘트 콘크리트의 구조 성능 및 적용”, 한국콘크리트학회지, 제19권, 제2호, 2007, pp.42-48
2. 이영재, 지남용, 김재훈, “알칼리 활성화 슬래그 콘크리트의 적용에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회논문집, 제23권, 제2호, 2007, pp.99-106
3. 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준 해설, 2007, 기문당