



# 나트륨계 알칼리 활성화제를 사용한 친환경 무기결합재 철근콘크리트 보의 휨성능 평가

하기주<sup>1)</sup> · 김진환<sup>1)</sup> · 장기창<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>경일대학교 건축공학과 <sup>2)</sup>서울북부고속도로(주)

## Evaluation of Flexural Performance of Eco-Friendly Inorganic Binding Material RC Beams Using Sodium Activator

Gee-Joo Ha,<sup>1)</sup> Jin-Hwan Kim,<sup>1)</sup> and Kie-Chang Jang<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Architecture Engineering, Kyungil University, Kyeongsan 712-701, Korea

<sup>2)</sup>Seoul Northern Highway Corporation, Seoul 138-814, Korea

**ABSTRACT** In this study, it was developed eco-friendly inorganic binding material concrete using ground granulated blast furnace slag and alkali activator (water glass, sodium hydroxides). Eight reinforced concrete beam using inorganic binding material concrete were constructed and tested under monotonic loading. The major variables were mixture ratio of alkali activator, type of admixture and admixture. Experimental programs were carried out to improve and evaluate the flexural performance of such test specimens, such as the load-displacement, the failure mode, the maximum load carrying capacity, and ductility capacity. All the specimens were modeled in scale-down size. The eco-friendly concrete using inorganic binding material encouraged alkali activation reaction was rapidly hardening speed and showed possibility as a high strength concrete. Also, the RC beams using new materials showed similar behavior and failed similarly with RC beam used portland cement. It is thought that eco-friendly inorganic binding material concrete can be used with construction material and product as a basic research to replace cement concrete. If there is application to structures in PC member as well as production of 2nd concrete product, it could be improved the productivity and reduction of construction duration etc.

**Keywords** : sodium activator, inorganic binding material, flexural performance, R/C beam

### 1. 서 론

#### 1.1 연구의 목적

국제사회에서 지구온난화 규제 및 방지의 국제협약인 기후변화협약의 구체적 이행 방안으로, 선진국의 온실가스 감축 목표치를 규정한 도쿄의정서(Kyoto protocol)가 2005년 공식 발효되었다. 그 내용에 따르면 2008~2012년 사이에 온실가스 총배출량을 1990년 수준보다 평균 5.2%를 감축하여야 한다. 하지만, 한국은 제3차 당사국총회에서 기후변화협약상 개발도상국으로 분류되어 의무대상국에서 제외되었으나, 몇몇 선진국들은 감축목표 합의를 명분으로 우리나라·멕시코 등이 선진국과 같이 2008년

부터 자발적인 의무부담을 할 것을 요구하고 있다.

그리고 우리나라 정부 국무회의에서 오는 2020년 국가 온실가스 감축 목표를 배출전망치(BAU) 대비 30% 감축으로 최종 결정했다. 여기서 BAU(business as usual)는 특별한 조치를 취하지 않을 경우 배출될 것으로 예상되는 미래 전망치를 나타낸다. 2020년 배출될 온실가스의 총량은 경제성장률, 국제 유가, 에너지 효율 개선 추이 등 온실가스 배출과 관련한 다양한 요소들이 감안되어 있다. 하지만, 최종 결정된 BAU 30%의 감축은 비산업분야의 감축을 위한 것이어서, 산업분야에서의 온실가스 감축도 시급한 실정이다.

알칼리 활성화반응을 유도한 무기결합재는 시멘트 생산단계인 소성공정이 없어 이산화탄소 배출을 절감하고, 산업부산물의 활용으로 에너지 소비절감 및 천연자원 소비 절감의 장점과 높은 초기강도, 낮은 수화열량, 골재와 매트릭스 경계면에서의 높은 저항성, 고내구성(중성화방지, 동결융해 저항성 향상, 화학적 저항성 등)이 우수한

\*Corresponding author E-mail : kkie@naver.com

Received September 26, 2012, Revised October 31, 2012,

Accepted January 4, 2013

©2013 by Korea Concrete Institute

특성을 갖는 것으로 알려져 있어 새로운 경화체로서 연구가 진행될 필요가 있다.<sup>5-17)</sup>

따라서 이 연구에서는 무기결합재 콘크리트의 알칼리 활성화 반응을 유도하기 위한 알칼리 활성화제의 첨가량, 활성화제의 조합에 따른 특성, 혼화제의 종류에 따른 특성을 활용하여 무기결합재 콘크리트 보의 휨강도, 하중-변위, 하중-변형도, 파괴양상, 최대내력 등을 분석함으로써 무기결합재 콘크리트 보의 휨성능을 평가하여 기존 시멘트 콘크리트를 대체할 수 있는 알칼리 활성화 무기결합재 콘크리트 개발을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

## 1.2 연구의 방법 및 절차

이 연구에서는 알칼리 활성화 반응을 유도한 무기결합재 콘크리트를 개발하고, 이를 적용한 철근콘크리트 보의 성능을 평가하기 위하여 국내·외 관련문헌 및 논문을 고찰하여 알칼리 활성화 반응을 유도한 무기결합재 콘크리트에 대한 이론적 고찰 및 역학적 특성을 분석하였다. 그리고 알칼리 활성화 반응을 유도한 무기결합재 콘크리트를 활용하여 철근콘크리트 보의 구조성능을 평가하기 위하여 알칼리 활성화제(수산화나트륨)의 물농도(5M, 9M, 12M), 혼화제(실리카폼, 메타카올린), 물유리(10%, 25%)를 변화시킨 실물크기의 1/4정도인 8개의 축소모델 실험체를 제작하였다. 알칼리 활성화 반응을 유도한 무기결합재 철근콘크리트 보 실험체의 구조성능을 평가하고 실험을 통하여 얻어진 결과를 비교·분석 하였다.

알칼리 활성화 반응을 유도한 무기결합재 콘크리트를 적용한 철근콘크리트 보의 구조성능 및 파괴형태 등을 규명함으로써 기존 시멘트 콘크리트를 대체할 수 있는 무기결합재 콘크리트를 철근콘크리트 보에 적용함으로써 설계 및 건설 구조물에의 적용을 위한 기초적 자료를 제시하고자 한다.

## 2. 친환경 무기결합재 콘크리트의 특성

### 2.1 친환경 무기결합재 콘크리트의 개념

알칼리 활성화체로서 소량의 수산화 나트륨, 액상 규산 나트륨 등이 존재하면 슬래그에 수산화 이온(OH-)을 흡착시켜 유리구조를 파괴하여 이산화규소(SiO<sub>2</sub>), 산화알루미늄(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 산화칼슘(CaO), 산화마그네슘의 용출을 촉진시키기 때문에 액상중의 각 이온농도가 높아져 현저한 수경성을 나타내고 일단 반응이 시작되면 자신이 용출하는 성분 에 의해 용액의 높은 pH를 지속하여 반응은 지속된다.<sup>1)</sup>

결국 고로슬래그의 유리질을 구성하고 있는 불규칙한 -O-Si-O-Al-O-의 3차원 망상구조체의 쇄상결합이 pH12이상의 강알칼리성에 의해 절단되고, 그 망상구조내 들어 있던 칼슘(Ca), 마그네슘(Mg), 알루미늄(Al) 등의 이온이 용출되기 때문에 용출된 각 이온들은 포틀랜드 시멘트와

같이 규산칼슘 수화물이나 알루미늄 칼슘 수화물을 생성하여 경화하게 되는 것이다.<sup>2)</sup>

하지만, 시멘트의 수화반응과 달리 알칼리 활성화반응을 유도한 무기결합재는 사용재료의 종류 및 경화재료에 따라 수화반응의 특성이 달라진다. 또한 알칼리 활성화제의 특성 및 농도에 의해 무기결합재의 수화물, 미세구조 등 여러 가지의 형태요인이 생기게 되므로 정확한 경화메커니즘을 구명하기는 어렵다.

## 2.2 구성재료

무기결합재의 구성으로 주재료와 높은 pH의 알칼리 활성화제가 있다. 주재료는 주로 고로슬래그 미분말, 플라이애쉬 등이 사용되고 있으며, 주재료와 알칼리 활성화제의 종류에 따라 재료적 특성이 달라지게 된다.

또한, 고로슬래그 미분말의 잠재수경성을 활성화시키기 위해서는 반응을 촉진시킬 수 있는 화학촉진제가 필요하게 되며 Alkali 계통과 Sulfate 계통이 고려되고 있으며, Alkali 자극제로는 NaOH, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 등이 있고 Sulfate 자극제는 CaSO<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> 등이 있다.<sup>3)</sup>

알칼리 활성화제의 화학적 특성에 따라 6가지 그룹으로 분류하였다.<sup>4)</sup>

- ① Caustic alkalis : MOH
- ② Non-silicate weak acid salts : M<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, M<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>, M<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, MF 등
- ③ Silicate : M<sub>2</sub>O · nSiO<sub>2</sub>
- ④ Sluminates : M<sub>2</sub>O · nAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- ⑤ Aluminosilicates : M<sub>2</sub>O · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · (2-6)SiO<sub>2</sub>
- ⑥ Non-silicate strong acid salts : M<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

## 3. 친환경 무기결합재 콘크리트 보의 휨성능 실험

### 3.1 실험체의 형태 및 변수

친환경 무기결합재 콘크리트를 활용한 철근콘크리트 보의 휨성능을 평가하고 부재의 역학적 거동 특성을 규명하기 위하여 혼화제 치환 유무 및 종류(실리카폼, 메타카올린), 알칼리 활성화제의 물농도(4M, 5M, 9M, 12M) 및 물유리 첨가율에 따른 휨성능 평가를 위하여 실물크기의 1/4정도인 기본실험체 포함 8개의 축소모델 실험체를 제작하였다.

또한 친환경 무기결합재 보 실험체의 변수는 사전 실험에 의하여 선정을 하였으며, 변수 및 내용은 Table 1과 같고, 실험체의 상세는 Fig. 1에 나타나 있다.

### 3.2 실험체의 제작

이 연구에 실험체는 ACI Building code(318-08) 및 국토부 규준에 따라 철근콘크리트 구조 설계에 의하여 설

**Table 1** Design parameters of test specimens

Specimen	Alkaline activator (%)		Binding material (%)	Admixtures (%)		W/B (%)	Sand percentage (%)	Aggregate/binder
	Water glass	Sodium hydroxide	Blast furnace slag	Silica fume	Metakaolin			
G1N5SW1	25	5M	80	20	-	45	40	4
G1N9SW1		9M	80	20	-			
G1N12SW1		12M	80	20	-			
G1N9W1		9M	100	-	-			
G2N4SW1	10	4M	80	20	-	53	40	4
G2N9MW1		9M	80	-	20			
G2N9SW2		9M	80	20	-			
G2N12SW2		12M	80	20	-			

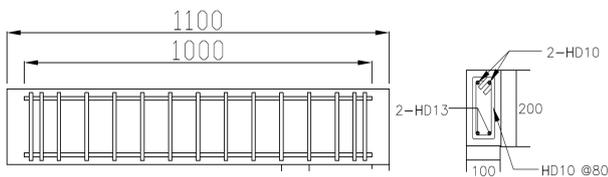
계하였으며, 친환경 무기결합재 콘크리트의 휨성능 평가를 위하여 제작한 실험체는 Fig. 1에 나타낸 바와 같다.

모든 철근콘크리트 보의 단면치수는 100×200(mm), 유효 높이(d=180 mm), 철근량은 최대철근비( $\rho_{max} = 0.0198$ )의 1/2정도로 설계하여 인장철근 2-D10, 스티럽은 D10 (@80 mm), 압축철근 2-D13, 길이 1.1 m, 순스팬길이 1 m 로 제작하였다. 거푸집은 12 mm 내수합판과 30×30(mm) 각재를 사용하여 제작하였으며, 철근조립 시에는 스페이서를 이용하여 피복두께 10 mm가 확보되도록 하였다.

**3.3 사용재료**

**3.3.1 철근**

이 연구의 실험체에 사용된 철근은 국내에서 생산된 SD400의 고강도철근이 사용되었으며, 보의 압축철근과 인장철근에 각각 D10, D13이 배근되었고 스티럽은 D10 이 배근되었다. 그리고 이 실험에 사용된 철근의 재료 특성을 파악하기 위하여 KS B 0801(금속재료 인장시험편 규정)에 따라 시험편을 제작하였으며 KS B 0802의 금속 재료 인장 시험방법에 따라 시험을 하였고 결과는 Table 2 와 같다.



**Fig. 1** Details of test specimen (unit: mm)

**Table 2** Material properties of the reinforcing bar

Bar size	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)
D13	414	600.5	$2.04 \times 10^5$
D10	455	636	$1.95 \times 10^5$

**3.3.2 친환경 무기결합재 콘크리트**

(1) 고로슬래그 미분말

이 연구에서 사용된 고로슬래그 미분말은 KS F 2563 에 품질에 부합되는 H사의 3종으로 분말도(4300 cm<sup>2</sup>/g)인 콘크리트 용 고로슬래그 미분말이다. Table 3은 고로 슬래그 미분말의 화학적 구성성분을 나타내었다.

(2) 실리카폼

실리카폼은 무기결합재 콘크리트의 미세공극 충전효과 및 강도증진 등의 혼화제로서 사용을 하였다. 이 연구에 사용된 실리카폼은 KS F 2567 콘크리트용 실리카폼의 품질에 만족하는 제품으로 화학적 구성성분은 Table 4와 같다.

(3) 메타카올린

메타카올린은 혼화제로서 공극을 충전시켜 치밀한 조직을 갖도록 해주면서 알칼리 성분과 서서히 화합하여 불용성의 화합물을 만들 수 있는 실리카 물질을 포함하고 있다. 분말도는 12000 cm<sup>2</sup>/g이고, 화학적 구성성분은 Table 5와 같다.

**Table 3** Chemical component of blast furnace slag

Type	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	MgO	CaO	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O
Slag	34.7	13.8	0.95	4.38	44.6	0.24	0.11	0.74	0.48

**Table 4** Chemical component of silica fume

Type	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>
Silica fume	94.0	0.3	0.2	0.4	0.3	0.8	0.8	0.35

**Table 5** Chemical component of Metakaolin

Type	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>
Meta kaolin	52.0	40.2	0.4	0.5	1.2	0.6	3.0	0.35

(4) 물유리

무기결합재 콘크리트에서 알칼리 활성화제로 사용되는 물유리는 액상 규산나트륨이라고 하여 가용성 규산염 중 가장 널리 사용되고 있는 화합물이다. 이 연구에서는 Y사의 KS표시 인증제품인 3호를 사용하였으며, 화학적 구성성분은 Table 6과 같다.

(5) 수산화나트륨

알칼리 활성화 반응을 유도하는 알칼리 활성화제로 많이 쓰고 있으며 pH가 12~13의 강알칼리성 성질로 무기결합재 생성에 기인하게 되며, 화학적 구성성분은 Table 7과 같다.

3.3.3 친환경 무기결합재 콘크리트의 강도

각 실험체는 콘크리트 타설과 함께 압축강도용 공시체를 제작하였다. 압축강도 실험용 원주형 공시체는  $\Phi 100 \times 200(\text{mm})$  몰드를 사용하여 KS F 2403에 따라 몰드를 2개 층으로 나누어 윗면적  $700 \text{ mm}^2$ 에 대하여 1회의 비율로 붓다짐하여 제작하였고, 재령 28일까지 기건양생을 실시하였다. 그리고 1000 kN용량의 UTM으로 일방향 압축강도 시험을 하였다. Table 8에 나타난 콘크리트 압축강도는 각각 5개의 공시체의 실험 결과에 대한 평균값이다.

Table 6 Chemical component of water glass

Type	pH	Specific gravity (20°C)	Water insolution ratio (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Mole ratio	Viscosity (20°C)
Water glass	12~13	more than 1.3	less than 0.2	9~10	28~30	less than 0.3	3.1~3.4	more than 100

Table 7 Chemico-physical property of sodium hydroxide

Type	State	Hue	Melting point (°C)	Boiling point (°C)	Vapor pressure (hPa)	Density	Water solutino ratio (g/L)
NaOH	Solid	White	318	1388°C	55	2.13	520

Table 8 Test result of concrete strength

Specimen	Concrete strength (MPa)		
	3 days	7 days	28 days
G1N5SW1	20.3	27.9	38.5
G1N9SW1	12.7	21.5	41.8
G1N12SW1	12.5	19.2	37.4
G1N9W1	11.4	15.5	17.8
G2N4SW1	13.7	18.5	27.5
G2N9MW1	16.2	24.9	36.4
G2N9SW2	8.1	9.6	11.8
G2N12SW2	6.0	8.9	15.8

3.4 실험방법 및 장치

3.4.1 실험방법

이 연구에서의 하중재하는 Fig. 3에서와 같이 유압잭으로 지간 중앙점에서 재하하였다. 재하 하중량을 측정하기 위하여 유압잭에 하중계를 설치하였다. 하중재하는 극한하중에 도달할 때까지 0.5 mm간격으로 변위를 제어하며 가력하였다. 측정기기는 변위계를 사용하여 각 실험체의 지간 중앙의 실험체 하단면에서 각 하중 단계별 하중-처짐량을 측정하였다. 철근과 콘크리트의 변형률 변형률 게이지(strain gauge: 5 mm, 60 mm)를 주철근의 하면과 콘크리트 압축 연단 상면에서 측정하였다. 또한 균열의 폭을 측정하기 위하여 균열 측정자를 사용하였다. 하중, 중앙점변위, 철근 및 콘크리트의 변형률은 동적변형률 측정기와 PC를 사용하여 자동으로 측정하였으며, 균열 폭은 하중단계에 따라 측정하였다.

3.4.2 측정장치의 부착위치

각 실험체의 지간 중앙의 실험체 하단면에서 각 하중 단계별 하중-처짐량을 측정하였다. 압축철근 및 인장철근의 변형은 전기적 변형률 게이지(strain gauge: 5 mm)를



Fig. 2 Test result of concrete strength

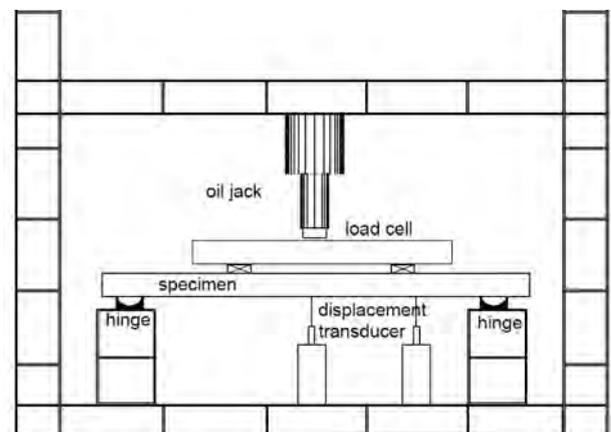


Fig. 3 Test setup of test specimen

압축철근 주근의 중앙부에 1개를 부착하고, 인장철근의 각 주근의 중앙부에 각각 1개씩 부착하여, 하중단계에 따라 측정하였다. 콘크리트의 변형은 전기적 변형률 게이지(60 mm)를 사용하여 지간 중앙위치의 콘크리트 상단면으로부터 10 mm, 90 mm, 150 mm, 190 mm에 게이지를 부착하였다.

#### 4. 친환경 무기결합재 콘크리트 보의 휨성능 평가

##### 4.1 하중-변위특성

실험 결과로 얻은 하중-변위 관계는 Fig. 6(a)~(i)에 나타난 바와 같다. 표준 철근콘크리트 보 실험체 BSS는

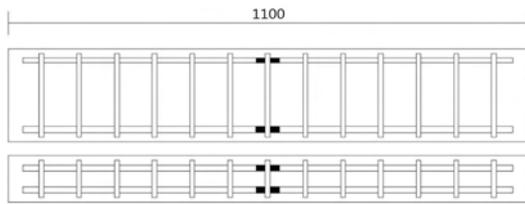


Fig. 4 Location of steel strain gauges (unit: mm)

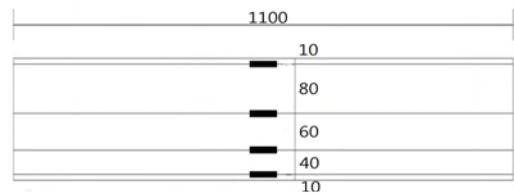


Fig. 5 Location of concrete strain gauges (unit: mm)

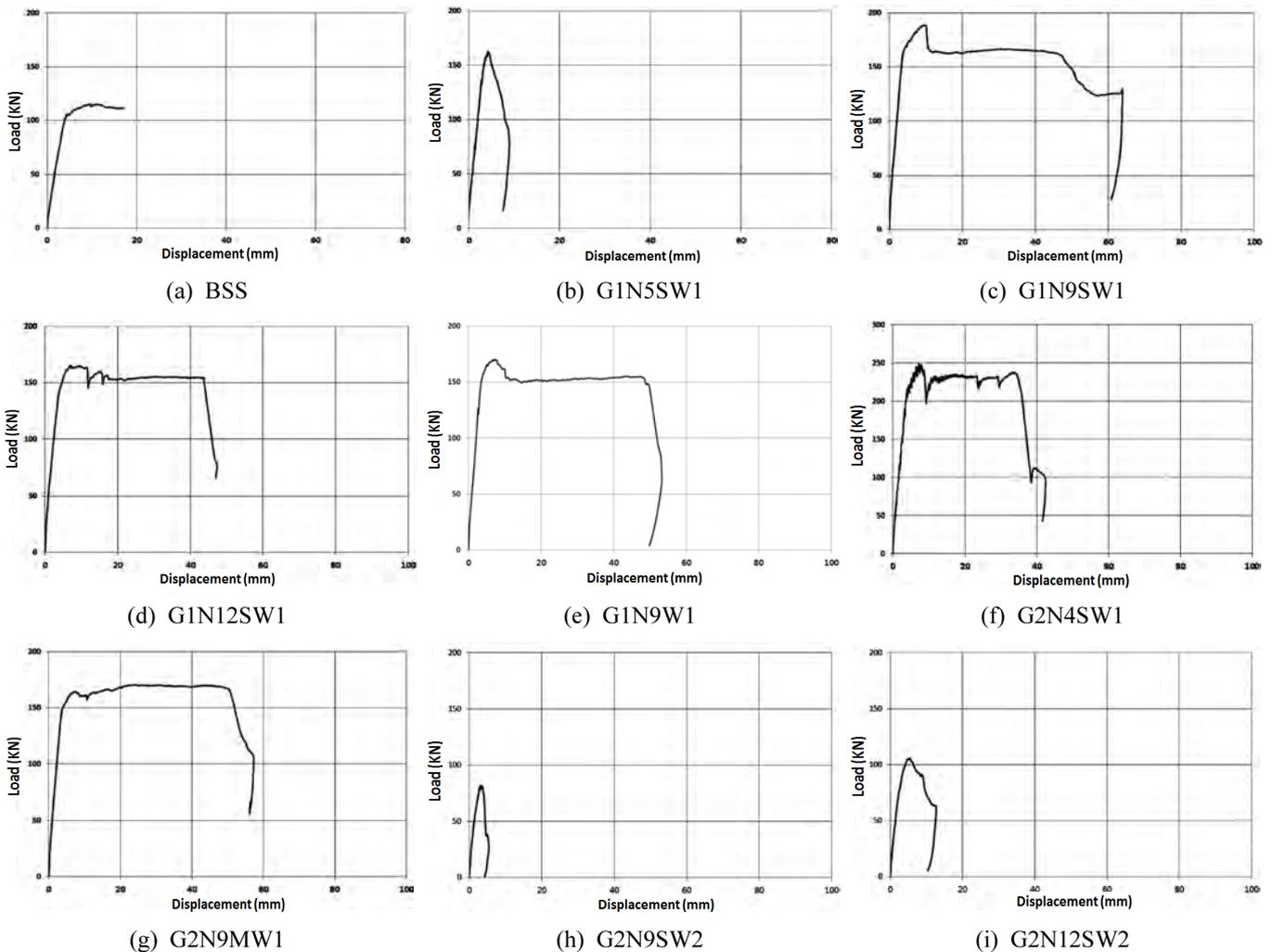


Fig. 6 Load-displacement relationship of specimen

Fig. 6(a)와 같이 철근이 항복한 이후 전형적인 휨인장 파괴를 나타내었다.

각 실험체의 초기균열은 26~46(kN)에서 발생하였으며 최대변위는 3.04~24.19(mm)로 측정되었다. 친환경 무기결합재 콘크리트를 이용한 RC보의 하중-변위 그래프는 Fig. 6(b)~(i)에 나타내었다.

##### 4.2 하중-변형도 특성

각 실험체의 하중재하에 따른 철근 및 콘크리트의 변형도를 측정하기 위하여 철근은 인장, 압축 철근의 중앙부에 철근용 변형률 게이지(S1, S2, S3)를 부착하였고, 콘크리트의 경우 실험체 지간 중앙위치의 콘크리트 상단면

으로부터 10 mm, 90 mm, 150 mm, 190 mm에 콘크리트 용 변형률 게이지(C1, C2, C3, C4)를 부착하여 실험중 하중재하 단계별 철근 및 콘크리트의 변형도를 분석하여 하중재하 단계별 전단성능 평가 및 항복여부를 검토하였다. Fig. 7(a)~(i)에서와 같이 하중 증가에 따른 인장 철근

의 변형도 변화에서 알 수 있듯이 극한하중 가력시 모든 실험체에서 보의 중앙부 인장철근에 부착한 철근의 변형도가 항복변형도를 초과하는 것으로 나타났다. 이는 실험체의 설계개념인 인장철근의 항복으로 인한 파괴형태를 보여주고 있다.

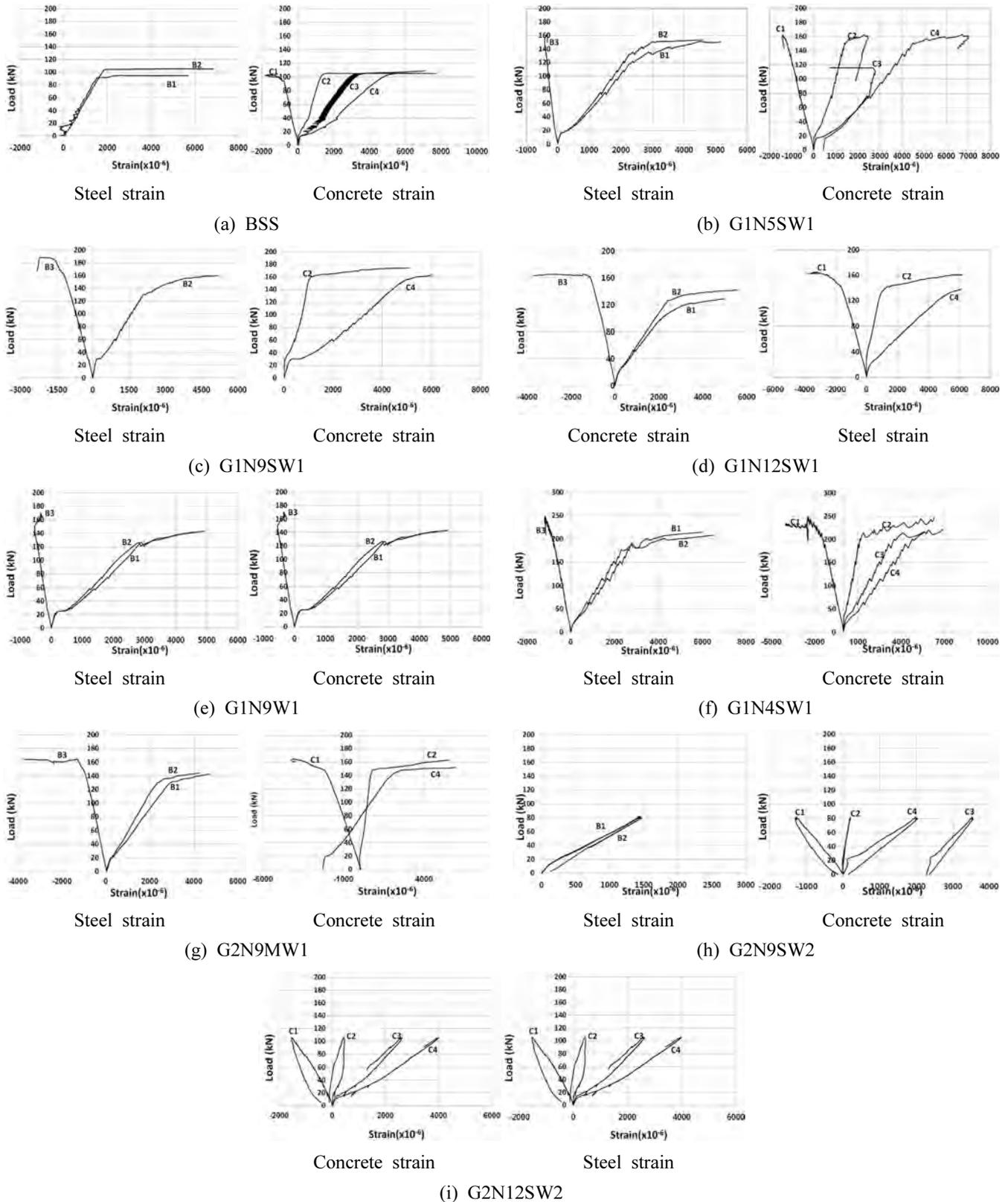


Fig. 7 Load-displacement relationship of specimen

### 4.3 파괴형태

친환경 무기결합재 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 보의 파괴형태를 파악하기 위하여, 각 실험체를 파괴시까지 가력하여 각 하중단계에 따른 균열 진전상황을 분석하였다.

친환경 무기결합재 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 보는 전반적으로 기존 시멘트 콘크리트와 유사한 파괴양상을 보였다. 가력시 인장철근의 항복에 의한 전형적인

휨인장 파괴를 나타내었으며, 하중이 점점 증가하여 극한하중 작용시에는 휨인장 파괴와 함께 사인장 균열이 발생하였다. 각 실험체의 균열도 및 최종 파괴형태는 Fig. 8(a)~(i)에서 나타내고 있다.

### 4.4 최대내력 특성

표준실험체(BSS)의 최대내력은 114.7 kN으로 나타났다. 한편 친환경 무기결합재 콘크리트를 이용한 철근콘크리트

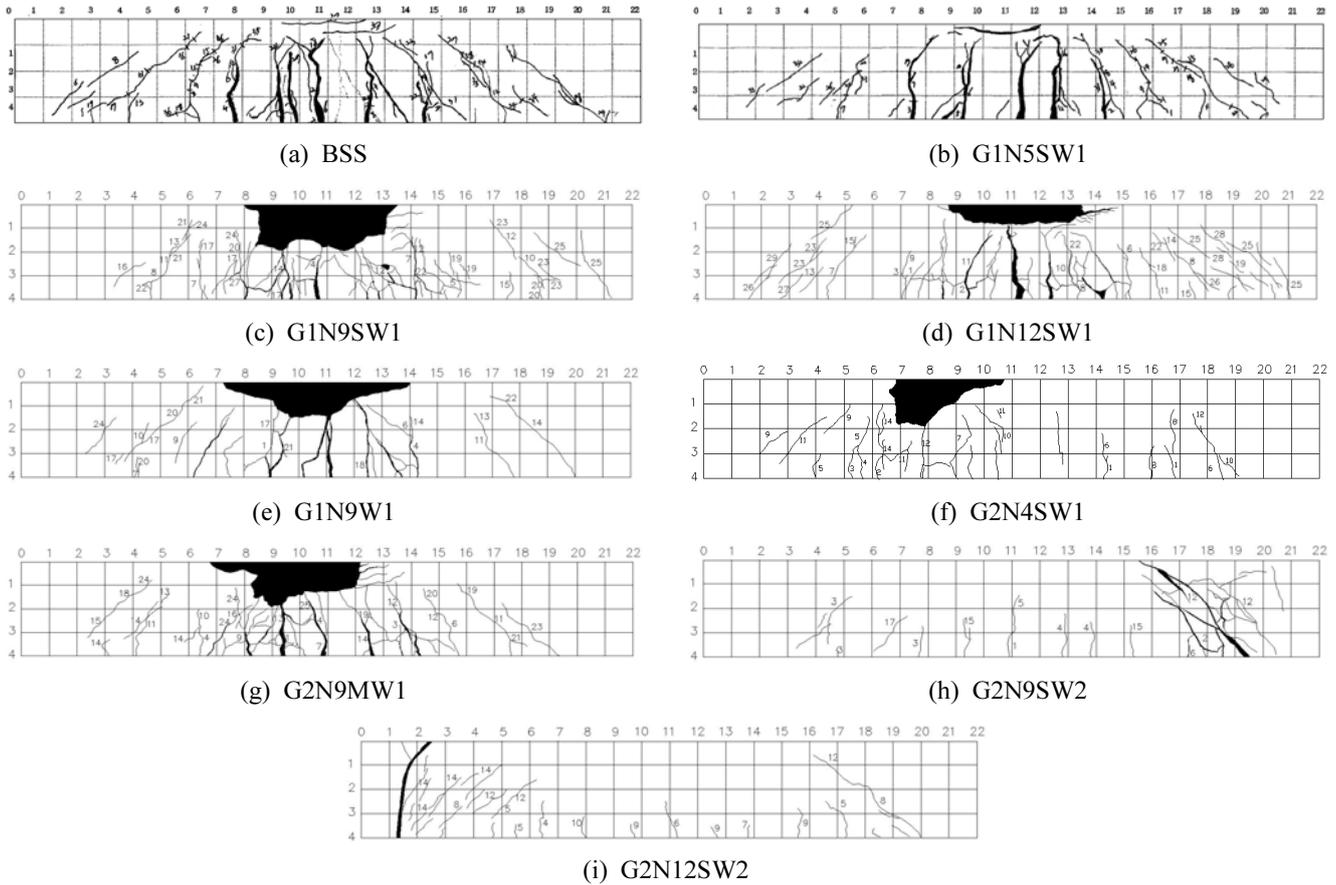


Fig. 8 Crack pattern and failure mode of each specimen

Table 9 Comparison of the load-carrying capacity ratio for each specimen

CASE(i)	Specimen	Maximum strength (kN)	Strength ratio (CASEi)/CASE0)
0	BSS	114.7	1
1	G1N5SW1	162.6	1.41
2	G1N9SW1	188.5	1.64
3	G1N12SW1	165.1	1.44
4	G1N9W1	170.2	1.48
5	G2N4SW1	248.9	2.17
6	G2N9MW1	170.6	1.48
7	G2N9SW2	81.8	0.77
8	G2N12SW2	105.8	0.92

Table 10 Comparison of displacement ductility for each specimen

Specimen	$\delta_y$ (mm)	$P_y$ (kN)	$\delta_u$ (mm)	$P_u$ (kN)	$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y}$
BSS	4.21	86.25	-	92	-
G1N5SW1	3.21	121.95	6.52	130.8	2.03
G1N9SW1	4.09	141.37	49.32	150.8	12.49
G1N12SW1	4.21	123.83	44.58	132.08	10.59
G1N9W1	3.81	127.65	50.3	136.16	13.21
G2N4SW1	4.27	186.68	35.9	199.12	8.41
G2N9MW1	4.00	127.95	52.92	136.48	13.23
G2N9SW2	2.46	61.35	4.15	65.44	1.69
G2N12SW2	3.54	79.35	9.22	84.64	2.6

트 보 실험체는 최대내력이 248.9 kN으로 나타났으며 표준실험체에 비하여 내력이 상승되었다.

각 실험체의 내력 비교를 통하여 친환경 무기결합재 콘크리트를 이용한 철근콘크리트 보 실험체가 보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트를 사용한 보 실험체보다 최대 2.17배 상회하고 있음을 알 수 있다. 그리고 W/B가 45%인 실험체가 W/B 53%의 실험체보다 약 30~70%정도의 최대내력 향상효과가 있는 것으로 나타났다.

Table 9는 각 실험체의 최대내력과 표준실험체(BSS)에 대한 각 실험체의 최대내력의 비(CASE I/CASE 0)를 분석한 것이다.

#### 4.5 연성능력

이 연구에서의 연성능력은 항복변위에 대한 변위연성비( $\mu = \delta_u / \delta_y$ )로 정의하였으며, 부재항복시( $\delta_y$ )의 처짐량을 기준으로 하여 부재 최대하중시의 변위와 최대하중 이후의 최대하중의 80%에서의 변위( $\delta_u$ )를 이용하여 평가하였다.

각 실험체의 연성능력은 Table 10에 나타났다. 실험체 G2N9MW1이 연성비가 13.23으로 가장 우수한 연성능력을 보였다. W/B 45%인 실험체 G1N9SW1, G1N12SW1가 W/B 53%인 실험체 G2N9SW2, G2N12SW2보다 4.06~7.39배로 우수한 연성능력을 나타냈고, W/B가 증가할수록 연성능력이 감소하였다. 알칼리 활성화제가 증가하면 연성능력이 향상되었지만, 12M이 함유된 실험체 G1N12SW1은 G1N9SW1보다 감소하였다.

### 5. 결 론

이 연구에서는 산업부산물인 고로슬래그 미분말과 알칼리 활성화제(물유리, 수산화나트륨)를 사용하여 친환경 무기결합재 콘크리트를 개발하였다. 또한, 이를 활용하여 철근콘크리트 보에 적용하여 휨성능 평가를 하였다. 주요변수는 W/B, 알칼리 활성화제의 혼입비율, 혼화제의 종류 및 혼입유무 등이며, 총 8개의 실험체를 제작하였으며, 재료 및 구조성능 평가를 위한 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 친환경 무기결합재 콘크리트는 초기 알칼리 활성화 반응에 의하여 재령 7일까지 강도가 급격히 발전되며, 재령 28일 강도의 최대 85% 강도가 발전되는 것으로 나타났다. 또한, 재령 7일 이후 고로슬래그 미분말의 잠재수경성에 의하여 지속적인 강도 증진 현상을 나타내었다.
- 2) 친환경 무기결합재 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 보는 전반적으로 휨 또는 휨-전단에 의하여 파괴되었다. 또한 물유리가 25%가 혼입된 실험체의 강도 10%혼입된 실험체보다 강도가 높게 나타났다. 하지만, 혼입률 증가에 따른 초기 급결현상으로 적

정량의 물유리의 혼입이 필요할 것으로 사료된다.

- 3) 혼화제의 종류 및 치환유무에서 혼화제를 혼입한 실험체가 혼화제를 혼입하지 않은 실험체보다 최대내력이 약 15%가 상회하는 결과를 보여주었으며, 혼화제의 종류(실리카폼, 메타카올린)에 따른 비교에서 실리카폼을 혼입한 실험체가 최대내력이 더 높은 것으로 나타났다. 이는 혼화제인 실리카폼의 화학성분 중 알칼리 활성화 반응에서 결합성분인 SiO<sub>2</sub>가 메타카올린보다 상대적으로 많은 양을 함유하고 있어 결합재의 생성에 기인한 것으로 나타났다.
- 4) W/B가 45%인 실험체에서는 안정적인 거동을 보였으며, 충분한 재령 28일 강도와 최대내력을 나타내었으나 W/B가 높은 53% 실험체에서는 무기결합재 콘크리트의 알칼리 활성화반응이 제대로 발생되지 않아 낮은 강도로 인해 실험중 하중 가력시 보의 지점부분이 취성적으로 파괴되는 양상을 보였다. 이는 무기결합재 제조시 W/B가 중요하게 고려해야 할 사항으로 판단된다.
- 5) 친환경 무기결합재 콘크리트는 시멘트 콘크리트에 비해 빠른 경화속도와 높은 강도를 발전하였다. 또한 적정량의 알칼리 활성화제가 혼입된 실험체는 OPC콘크리트 RC보와 유사한 거동과 파괴양상을 보여주었으며, 향후 지속적인 연구와 개발을 통하여 최적의 배합비를 도출한다면 건설소재 및 재료 분야에 시멘트를 대체하여 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

### 감사의 글

이 논문은 2012년도 중소기업청과 경일대학교 교내연구비 지원에 의한 결과의 일부임(과제번호 : C001609).

### References

1. Kim, B. J., "Properties of Tensile Strength of Non-Cement Concrete Using GGBS Binder Activated by Sodium Silicate," Department of Architectural Engineering Graduate Schol Chonnam National University, 2010, pp. 12-13.
2. Lee, H. S., "Experimental Study on Strength Properties of Alkali Activated Slag Mortars with Different Activator Type and Curing Temperature," Department of Architectural Engineering Graduate School of the Hanyang University, 2006, 25 pp.
3. Lee, K. P., Do, Y. S, Lee, S. S., and Song, H. Y., "A Study on Optimum Mixing Derivation of the Environment-Friendly High Performance Geopolymer Paste," *Proceedings of the Korea Institute of Building Construction*, Vol. 9, No. 2, 2009, pp. 107-110.
4. Lee, H. Y., Jang, H. S., So, S. Y., and So, Y. S., "The Improvement of Compressive Strength of Non-Sintered Cement Mortar with Alkali Activator," *Proceedings of*

- the Architectural Institute of Korea*, Vol. 26, No. 1, 2006, pp. 677-680.
5. Jung, S. J., Chu, Y. S., and Lee, J. K., "Development of the Inorganic Which Uses the Fly-Ash and Meta-Kaolin," *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 17, No. 2, 2005, pp. 433-436.
  6. Jung, S. J., Chu, Y. S., and Lee, J. K., "Development of Manufacturing Technology of Non-Sintered Inorganic Using Alkali-Activated Fly-Ash," *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 17, No. 2, 2005, pp. 753-756.
  7. Gweok, G. H., Jee, N. Y., and Yoon, S. C., "The Experimental Study on The Practical Use of Secondary Product of Concrete Contained Alkali-Activated Slag," *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 23, No. 1, 2007, pp. 121-128.
  8. Seo, M. D., "A Study on the Environment Materials Development Using Geopolymer," Department of Materials Engineering, Graduate School of Paichai University Daejeon, Korea, 2008, pp. 1-7.
  9. Yang, K. H. and Song, J. G., "The Properties and Applications of Alkali-Activated Concrete with No Cement," *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 19, No. 2, 2007, pp. 42-48.
  10. Son, S. G., Lee, J. H., Lee, S. H., and Kim, Y. D., "Low Temperature Synthesis of Forsterite Powders by the Geopolymer Technique," *Journal of the Korean Ceramic Society*, Vol. 46, No. 3, 2009, pp. 242-248.
  11. Roy, D. M., "Alkali-Acrinated Cements: Opportunites and Challenges," *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No. 2, 1999, pp. 249-254. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00093-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00093-3))
  12. Glukhovskiy, V. D., Rostovskaya, G. S., and Rumyna, G. V., "High Strength Slag-Alkali Cement," *7th International Congress on the Chemistry of Cements*, Paris. 1980, pp. 164-168.
  13. Hardjito, D. and Fung, S. S., "Fly Ash-Based Geopolymer Mortar Incorporating Bottom Ash," *Modern Applied Science*, Vol. 4, No. 1, 2010, pp. 44-52.
  14. Skvara, F., Kopecky, L., Myskova, L., V Smilauer, Alberovska, L., and Vinssova, L., "Aluminosilicate Polymers-Influence of Elevated Temperatures, Efflorescence," *Institute of Chemical Technology in Prague*, Vol. 53, No. 4, 2009, pp. 276-282.
  15. Nugteren, H. W., Bustelaar-Orthieb, V. C. L., and Izquierdo, M., "High Strength Geopolymers Produced from Coal Comustion Fly Ash," *Global Nest Journal*, Vol. 11, No. 2, pp. 155-161.
  16. Kumar, S., Kumar, R., and Mehrotra, S. P., "Influence of Granulated Blast Furnace Slag on the Reaction, Structure and Properties of Fly Ash Based Geopolymer," *Journal of Materials Science*, Vol. 45, No. 3, 2009, pp. 607-615.
  17. Hou, Y., Wang, D., Zhou, W., Lu, H., and Wang, L., "Effect of Activator and Curing Mode on Fly Ash-Based Geopolymers," *Journal of Wuhan University of Technology-Mater*, Vol. 24, No. 5, 2009, pp. 711-715.

**요 약** 이 연구에서는 산업부산물인 고로슬래그 미분말과 알칼리 활성화제(물유리, 수산화나트륨)를 사용하였다. 또한, 이를 활용하여 철근콘크리트 보에 적용하여 휨성능 평가를 하였다. 주요변수는 W/B, 알칼리 활성화제의 혼입비율, 혼화제의 종류 및 혼입유무로서 총 8개의 실험체를 제작하였으며, 재료 및 구조성능 평가를 위한 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 친환경 무기결합재 콘크리트는 초기 경화속도가 빠르며, 고강도 콘크리트의 가능성을 보였다. 또한, 이를 활용한 철근콘크리트 보는 기존 시멘트를 사용한 철근콘크리트 보와 유사한 거동과 파괴양상을 보였다. 친환경 무기결합재 콘크리트가 시멘트 콘크리트를 대체할 수 있는 기초연구로서 향후 건설소재 및 재료분야에 활용할 수 있을 것으로 사료되며, 이러한 특성을 바탕으로 콘크리트 2차 제품 생산과 구조부재를 PC화하여 활용할 경우 생산성 향상, 공기단축 등 효율이 상승될 것으로 보인다.

**핵심용어** : 나트륨계 알칼리 활성화제, 무기결합재, 휨성능, 철근콘크리트 보