

# 알칼리 활성화 슬래그 콘크리트를 사용한 RC 보의 전단거동 Shear Behavior of RC Beams Using Alkali Activated Slag Concrete

최 성<sup>1\*</sup> · 이광명<sup>1</sup> · 유성원<sup>2</sup>  
Sung Choi<sup>1\*</sup> · Kwang-Myong Lee<sup>1</sup> · Sung-Won Yoo<sup>2</sup>

(Received March 9, 2015 / Revised March 25, 2015 / Accepted March 25, 2015)

Several researches on cement zero concrete using alkali-activators have been conducted to investigate its fundamental material properties such as slump, strength and durability, however, research on the structural behavior of relevant members involving the elastic modulus, stress-strain relationship is essential for the application of this cement zero concrete to structural members. In this paper the shear behavior of reinforced concrete beams using 50 MPa-alkali activated slag concrete was experimentally evaluated. To achieve such a goal, six reinforced concrete beam specimens were fabricated and their shear behaviors were observed. The maximum difference between test results and analysis results in crack shear stress for beam specimens without stirrups is 31%, while that for beam specimens with stirrup is 15%. Furthermore, it is also found that the shear strength of alkali activated slag concrete is by 22~57% greater than the nominal shear strength calculated by design code, implying that shear design equations would provide conservative results on the safety side.

**키워드 :** 무시멘트 콘크리트, 알칼리 활성화제, 고로 슬래그, 전단거동, 공칭전단강도

**Keywords :** Cement zero concrete, Alkali activator, GGBFS, Shear behavior, Nominal shear strength

## 1. 서론

향후 지구 온난화 방지를 위해서는 CO<sub>2</sub> 와 같은 온실가스의 감축이 매우 중요한 문제로 대두될 것이다. 특히 시멘트 제조과정에서 다량으로 발생하는 온실가스의 저감은 시멘트 및 콘크리트 업계의 가장 중요한 현안으로 대두될 것으로 예상된다(Wang et al. 1995).

이러한 CO<sub>2</sub> 발생을 저감하기 위한 대책으로 시멘트를 전혀 사용하지 않는 무시멘트 콘크리트 제조 기술이 주목받고 있으며, 21세기 들어 국내외적으로 슬래그 미분말, 플라이 애쉬 및 알칼리 활성화제를 사용하여 콘크리트를 제조하는 기술이 연구, 개발되고 있는 실정이다(Shi and Day 2001; Shi et al. 2006; Kim et al. 2014). 특히 고로 슬래그를 100% 치환한 알칼리 활성화 슬래그(Alkali Activated Slag, AAS) 콘크리트는 상온에서도 높은 초기 강도와 더불어 50MPa 이상의 고강도 발현이 가능하고, 황산염 등

에 대한 화학 저항성이 높은 것으로 보고된 바 있다(Aydin and Baradan 2014; Oh et al. 2014). 하지만 알칼리 활성화 슬래그 콘크리트를 구조재료로 사용하기 위해서는 강도, 탄성계수, 수축, 내구성 등의 재료 특성뿐만 아니라 응력-변형을 관계 및 힘/전단 구조 부재 거동 등에 대한 연구가 필수적이다(Lee and Seo 2015; Yang 2011).

따라서 본 논문에서는 50MPa 급 프리캐스트 제품용 알칼리 활성화 슬래그 콘크리트를 사용하여 제작한 6개의 철근 콘크리트 보 시험체의 전단거동을 실험적으로 평가하고 분석하여 알칼리 활성화 슬래그 콘크리트의 구조 부재로의 적용성을 검토하였다.

## 2. 실험 연구

### 2.1 사용 재료

본 연구에서는 결합재로 밀도가 2.90g/cm<sup>3</sup>이며, 분말도가

\* Corresponding author E-mail: csomy1113@naver.com

<sup>1</sup>성균관대학교 건설환경시스템공학과 (Dept. of Civil & Environmental System Engineering, Sungkyunkwan Univ., Gyeonggi, 440-746, Korea)

<sup>2</sup>우석대학교 토목환경공학과 (Dept. of Civil & Environmental Engineering, Woosuk Univ., Chungbuk, 365-803, Korea)

4,365cm<sup>2</sup>/g인 KS 기준에 적합한 고로슬래그 미분말을 사용하였다. 잔골재는 밀도가 2.58g/cm<sup>3</sup>인 강사를 사용하였고 굵은 골재는 밀도가 2.62g/cm<sup>3</sup>인 쇄석을 사용하였다.

고로슬래그 미분말의 활성을 위하여, 순도 98%인 수산화나트륨과 SiO<sub>2</sub>가 28.8%, Na<sub>2</sub>O가 9.3%인 공업용 물유리 등 두 종류의 알칼리 활성화제를 사용하여 슬래그 질량대비 Na<sub>2</sub>O는 6%, Ms (SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O)는 1.0의 조건으로 첨가하였다. 또한, AAS 콘크리트의 유동성을 확보하기 위하여 폴리칼본산계 고성능 감수제를 사용하였다.

### 2.2 콘크리트 및 철근 특성

보시험체 제작에 사용한 50MPa급 프리캐스트 제품용 알칼리 활성 슬래그 콘크리트의 배합비는 Table 1과 같다. 알칼리 활성 슬래그 콘크리트의 압축강도 실험 결과를 Table 2에 나타냈으며, 3일 압축강도는 32MPa이고 28일 압축강도와 탄성계수는 각각 55.3MPa과 31.5GPa이었다.

한편 실험에 사용된 인장철근과 전단철근은 SD500과 SD400으로 직접인장시험 결과 평균 항복강도는 각각 499.6MPa과 419.2MPa이었다.

### 2.3 실험계획 및 부재 형상

50MPa 급 프리캐스트 제품용 알칼리 활성 슬래그 콘크리트를 사용한 전단거동 시험용 보시험체의 실험변수로는 인장철근비 3수준(균형철근비의 76, 58, 43%)과 전단철근 간격 2수준(d/2, 무배근)이다. 이러한 실험변수를 가진 6개의 보시험체를 제작하였으며 보시험체의 종류와 실험 변수가 Table 3에 정리되어 있다. 보시험체의 철근 상세 및 제원은 Fig. 1, 2 및 Table 4에 주어져 있으며,

Table 1. AAS Concrete mix proportion

W/B (%)	S/a (%)	Unit Mass (kg/m <sup>3</sup> )						
		W	GGBFS	Fine Agg.	Coarse Agg.	Water glass	NaOH	Super plasticizer
45	50	165	367	855	869	73	19	3.67

Table 2. AAS Concrete properties

Age (days)	Compressive strength (MPa)	Modulus of elasticity (GPa)	Slump (mm)	Air content (%)
1	5.6	31.5	165	3.1
3	32.0			
7	40.6			
28	55.3			

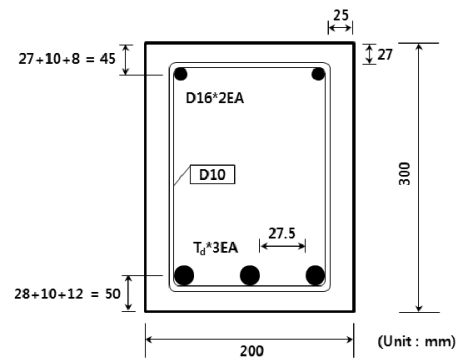


Fig. 1. Reinforcement details

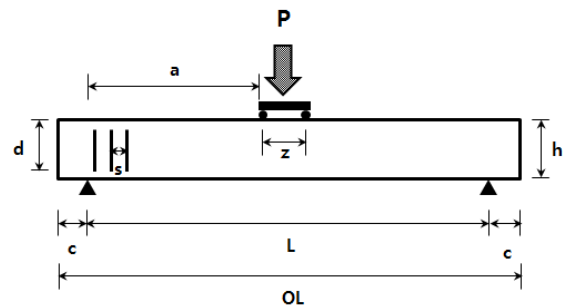


Fig. 2. Dimensions of beam specimen

Table 3. Test variables

ID	Stirrup Space (mm)	f <sub>ck</sub> (MPa)	Tensile Steel
25-1	125	50	D25-3EA
22-1			D22-3EA
19-1			D19-3EA
25-2	-		D25-3EA
22-2			D22-3EA
19-2			D19-3EA

Table 4. Dimension of RC members (unit: mm)

b	h	d	a	L	s	c	z	OL
200	300	250	625	1,600	125 or 0	100	350	1,800

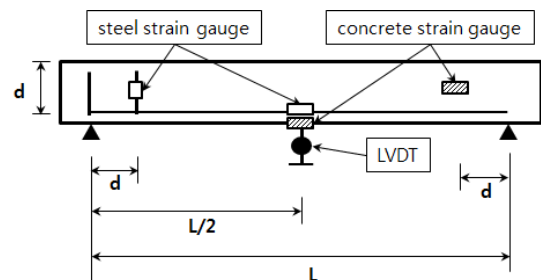


Fig. 3. Gauge locations of beam specimen

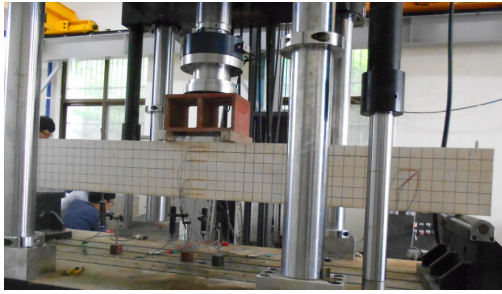


Fig. 4. Test setup

보시험체의 하중 재하시 콘크리트와 철근의 변형률 및 부재의 처짐량을 측정하기 위해 Fig. 3과 같이 게이지를 설치하였다. 제작 완료된 보시험체와 하중 재하장치 형상은 Fig. 4과 같다.

### 3. 실험 결과 및 분석

#### 3.1 균열, 철근 항복 및 극한 하중

제작된 보시험체에 대해 재령 28일에 전단 파괴 실험을 수행한 결과로 부터 휨균열 및 전단균열 하중, 인장철근 및 전단철근의 항복하중 및 극한하중을 구하여 Table 5에 정리하였다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 모든 보시험체에서 전단파괴가 발생했으며, 인장철근 항복하중과 극한하중의 비는 1.06~1.58이고 전단철근 항복하중과 극한하중의 비는 1.15~1.56로 나타났다. 한편 전단파괴와 휨 파괴의 구분은 전단철근의 항복 여부, 콘크리트 힘압축 변형률의

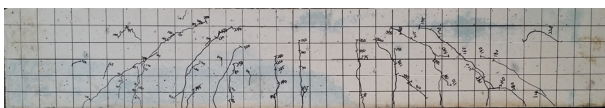


Fig. 5. Crack pattern of beam specimen (D22-1)

Table 5. Results of crack, yield and ultimate load of beams

ID	Crack load (kN)		Tensile steel yield load (kN)	Stirrup yield load (kN)	Ultimate load (kN)	Ultimate /tensile steel yield	Ultimate /stirrup yield
	flexure	shear					
25-1	34.6	163.2	457.0	320.9	499.2	1.09	1.56
22-1	30.9	152.2	289.1	397.2	456.6	1.58	1.15
19-1	25.1	134.0	219.3	264.7	346.8	1.58	1.31
25-2	30.7	125.9	-	-	398.2	-	-
22-2	28.2	118.6	300.0	-	318.0	1.06	-
19-2	32.9	112.9	188.5	-	222.5	1.18	-

극한변형률 도달 여부 및 콘크리트 전단변형률 발생 크기 등을 종합적으로 고려하여 판단하였다.

휨균열이 발생된 하중은 6개 시험체에서 거의 유사하게 나타났으며, 이는 콘크리트 압축강도가 동일하기 때문으로 추정된다. 전단균열 발생 하중의 경우는 전단철근이 있는 경우가 없는 경우에 비하여 약간 크게 나타났으며, 인장 철근비가 클수록 전단 균열 발생 하중이 역시 크게 나타났다. 이는 인장철근의 다우웰 작용으로 인해 나타난 현상으로 판단된다.

인장철근 및 전단철근의 항복하중 역시 다우웰 작용에 의하여 인장 철근비가 클수록 크게 나타났다.

#### 3.2 하중-변위 관계

보시험체의 전단거동 평가 결과, 하중-처짐 관계를 Fig. 6에 나타내었다. 모든 실험 부재의 하중-처짐 곡선은 초기균열 단계까지 선형으로 증가하며, 초기 균열발생 이후 처짐이 비선형으로 증가한 후 극한상태에 도달하였다. 또한 인장철근량(비)이 구조 거동에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이러한 알칼리 활성 슬래그 콘크리트를 사용한 보부재의 전단거동은 일반 콘크리트 부재의 전단 거동과 거의 유사한 것으로 판단된다.

특히 전단철근이 없는 시험체들은 극한하중에 도달한 직후 파괴에 이르는 것으로 나타났으며, 전단철근이 배치되어 있는 시험체일지라도 전단철근이 최소 전단철근량 수준으로 배치된 이유로 전반적으로 연성거동이 거의 없이 취성파괴가 발생한 것으로 나타났다.

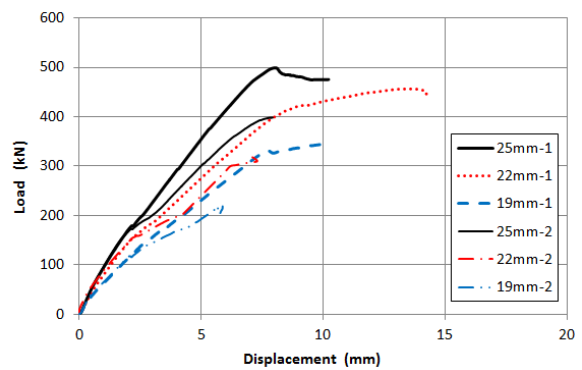


Fig. 6. Load vs. displacement

#### 3.3 하중-인장철근 변형률 관계

하중-철근 변형률 관계를 나타내는 Fig. 7을 보면 휨균열 이전에는 인장철근 변형률이 매우 작았으며, 휨균열 이후에는 선형적

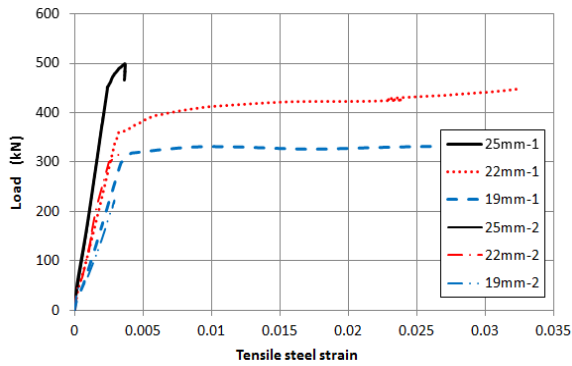


Fig. 7. Load vs. tensile steel strain

으로 증가한 후, 항복 이후에 인장철근 변형률이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

한편 인장 및 전단철근이 가장 많이 배치된 25mm-1 시험체의 경우는 Table 5와 Fig. 7과 같이 전단철근이 인장철근보다 먼저 항복하여 인장철근 항복 직후에 곧바로 극한하중에 도달함으로써 인장철근의 변형률 증가가 작게 나타났으며, 전단철근이 없고 인장철근이 적게 배치된 22mm-2, 19mm-2 시험체들은 전단철근이 없기 때문에 하중이 콘크리트 전단강도를 초과하고 인장철근이 항복한 직후에 곧바로 극한하중에 도달하여 인장철근의 변형률 증가가 작게 나타났다.

### 3.4 하중-콘크리트 휨압축 변형률 관계

하중-콘크리트 변형률 관계를 나타내는 Fig. 8에 의하면 전단 철근이 배치되어 있고 인장철근량이 적정하게 배치된 22mm-1, 19mm-1 시험체들만 콘크리트의 변형률이 0.0032~0.0028로 나타나, 콘크리트가 극한거동을 나타냄을 알 수 있다. 이들을 제외한 나머지 시험체들은 전단 및 인장철근의 항복 후에 급격히 콘크리

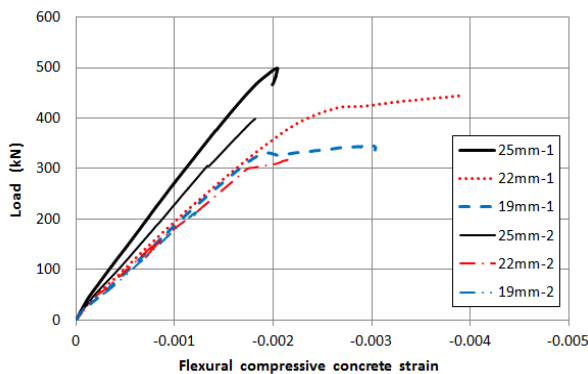


Fig. 8. Load vs. flexural compressive concrete strain

트가 극한상태에 도달하기 전에 파괴되었다.

### 3.5 하중-콘크리트 전단 변형률 관계

하중-콘크리트 전단 변형률 관계를 Fig. 9에 나타내었다. 모든 시험체의 콘크리트 전단 변형률이 0.00014~0.00022의 범위에서 전단 균열이 발생된 것으로 추정되며, 극한 전단 변형률은 0.0006~0.0009로 나타났다. 이때 콘크리트 전단변형률은 Fig. 3의 우측 콘크리트 위험단면에 부착된 로제트 변형률계이지 값을 측정된 후 환산하여 계산하였다.

ACI 318-08 설계기준(ACI Committee 2008)에서 제시하는 콘크리트의 최대전단응력  $v_{cr}$  계산식은 다음과 같다.

$$\text{기본식 } v_{cr} = 0.16 \sqrt{f_{ck}} \tag{1a}$$

$$\text{엄밀식 } v_{cr} = 0.16 \sqrt{f_{ck}} + 17.6 \frac{\rho V d}{M} \leq 0.29 \sqrt{f_{ck}} \tag{1b}$$

콘크리트 압축강도, 철근비, 전단력, 휨모멘트를 식 (1a)에 대입하여 계산하면  $v_{cr}$ 은 1.19MPa이고 식 (1b)에 대입하여 계산하면  $v_{cr}$ 은 1.49(19-2), 1.60(22-2) 및 1.72(25-2)MPa이다.

콘크리트 포와송비  $\nu$ 를 일반적인 값인 0.17로 가정하고, Table 2의 탄성계수 실험값  $E_c = 31.5$  GPa를 전단탄성계수로 치환하여  $G = E_c / 2(1 + \nu) = 13.5$  GPa와 실험에서 구해진 전단 변형률을 곱하여 전단응력을 구하면 1.88~2.96MPa이 얻어진다. 따라서 실험에서 구해진 전단균열응력은 설계식을 사용하여 구한 전단균열 응력보다는 다소 크게 나타났다.

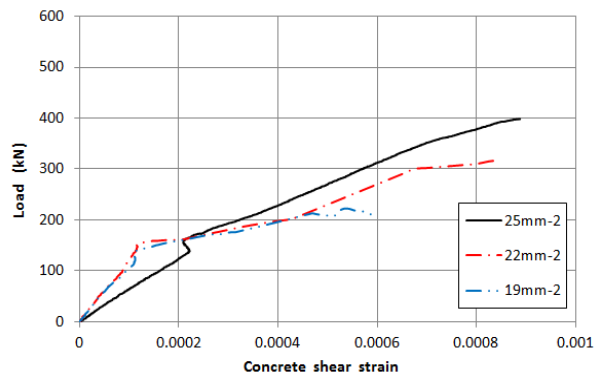


Fig. 9. Load vs. concrete shear strain

### 3.6 하중-전단철근 변형률 관계

하중-전단철근 변형률 관계를 보여주는 Fig. 10에 의하면 25mm-1 시험체의 경우에는 전단철근이 조기에 항복한 후, 인장철근이 항복할 때까지 전단철근의 변형률이 증가하는 현상이 나타났으나, 22mm-1 시험체는 반대로 인장철근이 조기에 항복한 후 전단철근이 항복하는 순서로 파괴가 진행되었다. 한편 인장철근량이 적은 19mm-1 시험체는 인장철근이 항복한 직후 전단철근이 항복하는 형태로 파괴가 진행되어 인장철근량이 전단철근의 거동에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다.

### 3.7 실험값과 설계값의 비교

보시험체의 전단 거동 실험결과를 해석결과와 설계기준식으로 부터 얻은 결과와 비교하여 Table 6에 나타내었다. Table 6에서 실험에 의한 전단력은 실험에서 구해진 전단력과 자중을 더 한 값이며, 해석에서 콘크리트가 부담하는 전단강도  $V_c$ 는 Fig. 7에서의 최대 전단변형률에 전단탄성계수를 곱해서 구해진 값이며, 설계기준에 의한  $V_c$ 는 식 (1b)를 적용한 결과이다. 한편 전단철근이 부담하는 전단강도는  $V_s = A_v f_y d/s$ 를 적용하여 계산하였다.

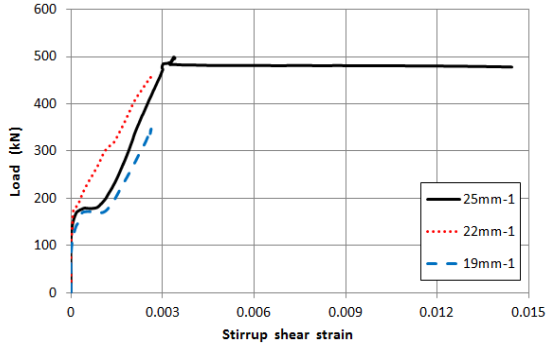


Fig. 10. Load vs. stirrup shear strain

Table 6. Comparison between test, analysis and design code

		25-1	25-2	22-1	22-2	19-1	19-2
Test	Vu	244.0	201.2	230.3	102.2	175.4	113.3
	Vc	154.5	154.5	81.5	81.5	78.0	78.0
Analysis	Vs	114.1	-	114.1	-	114.1	-
	Vc+Vs	268.6	154.5	195.6	81.5	192.1	78.0
	(Vc+Vs)/Vu	1.10	0.77	0.85	0.80	1.10	0.69
Design Code	Vc	86.9	86.9	80.2	80.2	73.7	73.7
	Vs	114.1	-	114.1	-	114.1	-
	(Vc+Vs)/Vu	0.82	0.43	0.84	0.78	1.07	0.65

실험값과 해석값을 비교하면 전단철근이 있는 부재에서는 최대 15% 정도의 오차를 보이나, 전단철근이 없는 부재에서는 최대 31% 정도의 큰 오차를 보였다. 이러한 결과는 전단철근이 없는 부재에서 인장철근의 다우웰 효과가 크게 작용한 것으로 판단된다.

한편 보시험체의 전단강도 실험값과 설계기준식 (1b)에 의해서 계산된 공칭전단강도값의 차이는 해석결과와 실험결과와의 차이와 비교하여 상당히 크게 나타났다. 만일 인장철근비를 고려하지 않은 식 (1a)를 적용하였다면 그 차이가 더 커졌을 것으로 예측된다.

## 4. 결론

50MPa 급 프리캐스트 제품용 알칼리 활성 슬래그 콘크리트를 사용한 RC 보시험체의 전단거동을 실험적으로 평가하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 전단실험 결과, 인장철근 항복하중과 극한하중의 비는 1.06~1.58 정도로 나타났으며 전단철근 항복하중과 극한하중의 비는 1.15~1.56 정도로 나타났다. 이러한 알칼리 활성 슬래그 콘크리트를 사용한 부재의 전단거동은 일반 콘크리트 부재의 전단 거동과 거의 유사한 것으로 판단된다.
2. 전단균열 발생 하중은 전단철근이 배치되어 있는 경우가 배치되어 있지 않은 경우에 비하여 약간 크게 나타났으며, 인장 철근비가 증가할수록 전단균열 발생 하중 역시 약간 크게 나타났다. 이는 인장철근의 다우웰 작용으로 나타난 현상으로 판단된다.
3. 스테리프로 전단보강하지 않은 보 시험체의 경우 설계기준식에 의해서 계산된 전단강도보다 실험값이 22~57% 정도 크게 나타나 상당히 안전축임을 알 수 있다. 향후 보다 정확하게 알칼리 활성 슬래그 콘크리트를 사용한 보부재의 공칭전단강도를 예측하기 위해서는 전단거동에 영향을 미치는 인자들에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

탄소저감형 건설재료 기술개발(과제번호11기술혁신 F04)의 일환으로 국토해양부 건설기술혁신사업의 재정적 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## References

ACI Committee 318 (2008), Building Code Requirements for

- Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 473 pp.
- Aydin, S., Baradan, B. (2014). "Effect of activator type and content on properties of alkali-activated slag mortars," Composites Part B: Engineering, **57**, 166-172.
- Kim, R.H., Kim, G.Y., Kim, J.H., Lee, B.K., Cho, B.S. (2014). "Effect of Types and Replacement Ratio of Alkali Activator on Compressive Strength of Ground Granulated Blast Furnace Slag Mortar," Journal of the Korean Recycled Construction Resource Institute, **2(4)**, 360-366 [in Korean].
- Lee, K.M., Seo, J.I. (2015). "Evaluation of Flexural Behavior of RC Beams Using Alkali Activated Slag Concrete," Journal of the Korean Concrete Institute, forthcoming [in Korean].
- Oh, S.H., Hong, S.H., Lee, K.M. (2014). "Autogenous Shrinkage Properties of High Strength Alkali Activated Slag Mortar," Journal of the Korean Recycled Construction Resource Institute, **2(1)**, 60-65 [in Korean].
- Shi, C., and Day, R. L. (2001). "Comparison of Different Methods for Enhancing Reactivity of Pozzolans," Cement and Concrete Research, **31(5)**, 813-818.
- Shi, C., Krivenko, P.V., Roy, D. (2006). Alkali-activated cement and concrete, Taylor and Francis, 376.
- Wang, S. D., Pu, X. C., Scrivener, K. L., and Pratt, P. L. (1995). "Alkali-Activated Slag Cement and Concrete: A Review of Properties and Problems," Advances in Cement Research, **27**, 93-102.
- Yang, K. H. (2011). Development of a Mix Design and Standards for Eco-Friendly Green Concrete Using Cementless Alkali-Activated Binders, Technical Report, Department of Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon, Kyonggi-do, Korea, 106 pp.

### 알칼리 활성화 슬래그 콘크리트를 사용한 RC 보의 전단거동

현재까지 알칼리 활성화제를 사용한 무시멘트 콘크리트의 연구는 슬럼프, 강도 및 내구성 등 기본적인 재료성질에 대해서 주로 수행되어져 왔다. 그러나 알칼리 활성화제를 사용한 무시멘트 콘크리트의 구조부재에의 적용을 위해서는 탄성계수, 응력-변형률 관계 및 구조 부재 거동 등에 대한 연구가 필수적이다. 본 논문에서는 50MPa급 알칼리 활성화 슬래그 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 보시험체 6개를 제작한 후, 전단실험을 수행하였다. 실험과 해석에 의해 얻은 공칭전단강도는 전단철근이 배치되어 있는 시험체에서는 최대 18% 정도의 차이를 보이나, 전단철근이 없는 시험체에서는 최대 31% 정도의 차이를 보였으며 또한 알칼리 활성화 슬래그 콘크리트의 설계전단강도에 비하여 전단강도 실험값이 22~57% 정도 크게 나타나 전단설계식이 상당히 안전측임을 알 수 있다.