



## 경량골재를 사용한 알칼리 활성화 슬래그 콘크리트의 역학적 특성

양근혁<sup>1)\*</sup> · 오승진<sup>1)</sup> · 송진규<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>목포대학교 건축공학전공 <sup>2)</sup>전남대학교 건축학부

## Mechanical Properties of Alkali-Activated Slag-Based Concrete Using Lightweight Aggregates

Keun-Hyeok Yang,<sup>1)\*</sup> Seung-Jin Oh,<sup>1)</sup> and Jin-Gyu Song<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Architectural Engineering, Mokpo University, Mokpo 534-729, Korea

<sup>2)</sup>Dept. of Architecture, Chonnam University, Gwangju 500-757, Korea

**ABSTRACT** Six alkali-activated (AA) concrete mixes were tested to explore the significance and limitations of developing an environmental friendly concrete. Ground granulated blast-furnace slag and powder typed sodium silicate were selected as source material and an alkaline activator, respectively. The main parameter investigated was the replacement level of lightweight fine aggregate to the natural sand. Workability and mechanical properties of lightweight AA concrete were measured: the variation of slump with time, the rate of compressive strength development, the splitting tensile strength, the moduli of rupture and elasticity, the stress-strain relationship, the bond resistance and shrinkage strain. Test results showed that the compressive strength of lightweight AA concrete sharply decreased when the replacement level of lightweight fine aggregate exceeded 30%. In particular, the increase in the discontinuous grading of lightweight aggregate resulted in the deterioration of the mechanical properties of concrete tested. The measured properties of lightweight AA concrete were also compared, wherever possible, with the results obtained from the design equations specified in ACI 318-05 or EC 2, depending on the relevance, and the results predicted from the empirical equations proposed by Slate et al. for lightweight ordinary Portland cement concrete. The stress-strain curves of different concrete were compared with predictions obtained from the mathematical model proposed by Tasnimi. The measured mechanical properties of lightweight AA concrete generally showed little agreement with the predictions obtained from these equations.

**Keywords :** alkali-activated concrete, lightweight aggregate, slag, mechanical properties

### 1. 서 론

보통포틀랜드시멘트 (ordinary portland cement, OPC)의 생산 및 수화 과정에서 방출되는 이산화탄소 양을 줄이기 위하여 콘크리트 산업에서는 플라이애쉬나 고로슬래그와 같은 포졸란계 재료들을 치환한 콘크리트의 적용이 증가하고 있다. 1960년대부터는 시멘트 대체를 위한 더 적극적인 노력으로서 알칼리 활성화된 (alkali-activated, AA) 고로슬래그 또는 플라이애쉬에 기반한 시멘트가 첨가되지 않은 콘크리트에 대한 연구들이 활발히 진행되고 있다.<sup>1-5)</sup> 알칼리 활성화 콘크리트에 대한 기존 연구들의 분석으로부터 Pacheco-Torgal 등<sup>1)</sup>과 Wang 등<sup>3,4)</sup>은 알칼리 활성화 콘크리트는 보통포틀랜드시멘트 (OPC) 콘크리트에 비해 초기 및 장기강도 발전, 내 화학성, 내 중성화 및 동결융해 저항성 등이 우수함을 보였다. 특히 Yang 등<sup>5)</sup>

은 분말형의 활성화제는 액상형에 비해 알칼리 활성화 모르타르의 경화를 지연시키고 취급상 용이하여 알칼리 활성화 모르타르 및 콘크리트의 현장 적용성을 높일 수 있음을 보였다.

친환경 콘크리트 생산을 위한 또 다른 효율적인 방안으로서 인공 경량골재의 사용을 들 수 있다. 점토 또는 플라이애쉬로부터 생산되는 인공 경량골재는 일반적으로 콘크리트의 비중을 감소시키고 단열 및 방음 성능을 높이기 위해 사용된다.<sup>6)</sup> 따라서 인공 경량골재의 사용은 산업부산물의 재활용, 콘크리트에서 천연골재 사용의 절감 및 구조물에서 소비되는 에너지의 절감을 통해 환경보존에 기여할 수 있다. 굵은골재로서 최대 직경 13 mm 이하의 경량골재를 치환한 OPC 콘크리트에 대한 연구<sup>7-12)</sup>는 다수 진행되었다. 하지만 경량콘크리트의 유동성과 압축강도 발전은 경량 굵은골재보다는 경량 잔골재에 의해 더 큰 영향을 받을 수 있음에도 불구하고<sup>6)</sup> 최대 직경 5 mm 이하의 경량 잔골재 치환수준에 따른 콘크리트 성능 변화에 대한 연구는 매우 미비하다. 게다가 이산화탄소 방

\*Corresponding author E-mail: yangkh@mokpo.ac.kr

\*Received February 4, 2008, Revised March 11, 2008, Accepted March 11, 2008

©2008 by Korea Concrete Institute

출이 저감된 친환경 콘크리트에 대한 관심이 급속하게 증가함에도 불구하고 경량골재를 이용한 알칼리 활성화 콘크리트에 대한 연구는 거의 없다. 인공 경량골재는 흡수율이 매우 높기 때문에 천연골재보다 결합재 종류, 물-결합재비, 단위수량 및 잔골재율과 같은 배합조건에 의해 더 큰 영향을 받는다. 따라서 알칼리 활성화 경량콘크리트의 소요강도에 대한 배합설계 및 현장적용 확대를 위해서는 이에 대한 충분한 실험 데이터들을 축적할 필요가 있다.

본 연구에서는 친환경 콘크리트의 개발에 대한 특성 및 한계를 파악하기 위하여 인공 경량골재를 사용한 고로슬래그 기반 알칼리 활성화 콘크리트 6배합을 실험하였다. 굵은골재로서 최대직경 13 mm인 인공 경량골재를 사용하였고, 잔골재로서 최대직경 5 mm인 천연모래 및 인공경량골재를 혼용하였다. 배합된 콘크리트들의 경과 시간에 따른 슬럼프 변화, 압축강도 발현, 할렬인장강도, 파괴계수, 탄성계수, 응력-변형률관계, 부착강도 및 건조수축 등이 측정되었다. 이들 측정된 역학적 특성들은 경량 OPC 콘크리트를 위해 제시된 ACI 318-05<sup>13)</sup> 및 EC 2<sup>14)</sup> 설계기준, 또는 Slate 등<sup>11)</sup>의 제안 모델들과 비교되었다. 또한 측정된 응력-변형률 관계는 경량 OPC 콘크리트의 실험 결과에 근거하여 제시된 Tasnimi<sup>12)</sup>의 모델과 비교되었다.

## 2. 실험

### 2.1 사용 재료

무시멘트 결합재 생산을 위해 모재와 알칼리 활성화제로서 각각 고로슬래그와 분말형의 규산나트륨을 이용하였다. X선 회절분석에 의해 측정된 이들 재료들의 화학적 조성을 Table 1에 나타내었다. 사용된 고로슬래그의 주요 성분은 칼슘산, 실리콘산 및 알루미늄산으로서 실리콘산과 알루미늄산의 질량비는 2.29이다. 규산나트륨은 50.2%의 나트륨산과 45%의 실리콘 산으로서 몰비는 약 0.9이다. 고로슬래그의 비중과 비표면적은 각각 2.2와 4200 cm<sup>2</sup>/g이다. 규산나트륨의 비중은 1.2이며 최대 입경

**Table 1** Chemical composition of the selected source materials and alkali activator (% by mass)

Materials	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	LOI*
GGBS	31.5	13.8	0.53	44.4	5.2	0.18	1.0	2.8	0.59
Sodium silicate	45	-	-	-	-	50.2	-	-	4.8

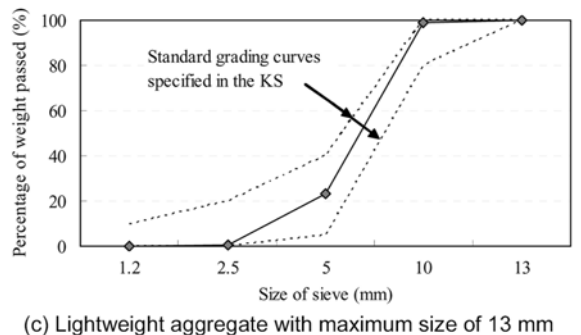
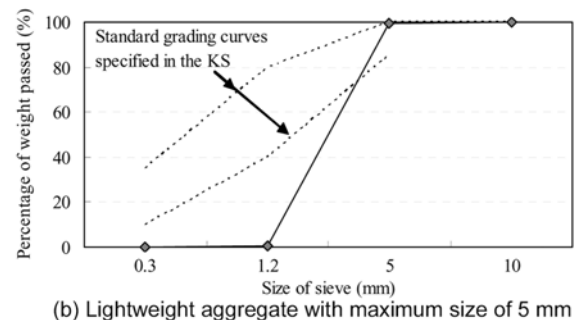
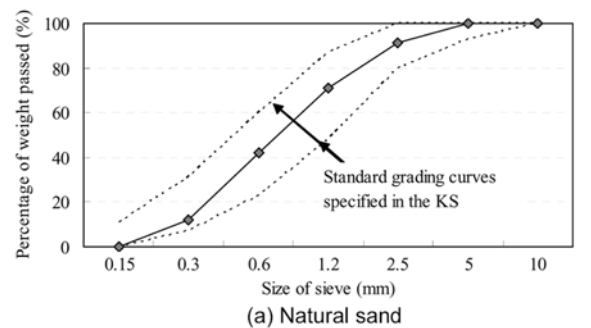
\*Loss on ignition

**Table 2** Properties of aggregates used

Type		Maximum size (mm)	Specific gravity	Water absorption (%)	Fineness modulus
Coarse aggregate	Expanded clay granule	13	1.04	31.79	5.77
	Sand	5	2.5	2.74	2.96

은 425 μm이다.

팽창점도를 이용하여 독일의 Liapor에서 생산된 작은 환약형상의 알맹이들이 인공 경량골재로 이용되었다. 인공경량골재의 내부는 공극구조이며 표면은 매끄럽다. 굵은골재로서 최대 직경 13 mm의 인공 경량골재가, 그리고 잔골재로서 최대직경 5 mm인 인공 경량골재와 천연모래가 이용되었다. Table 2와 Fig. 1에는 사용된 골재들의 각각 물리적 성능과 입도분포를 나타내었다. KS 기준<sup>15)</sup>에서 제시하는 골재의 표준 입도분포곡선이 또한 Fig. 1에 주어졌다. 사용된 경량골재의 비중은 천연모래에 비해 약 2.5배 낮았지만 흡수율은 매우 높았다. 게다가 최대 직경 5 mm인 경량골재의 입도분포는 매우 불연속으로서 KS 기준에서 제시하는 표준 입도에 비해 매우 높은 조립률을 보였다. 사용된 경량골재에서 2.5 mm 이하의 입도는 거의 보이지 않았다.



**Fig. 1** Particle distribution curves of aggregates

## 2.2 배합설계

경량 잔골재 치환율을 주요 변수로 알칼리 활성 고로 슬래그 기반 콘크리트 6배합이 Table 3에 나타난 바와 같이 준비되었다. 경량 잔골재의 치환은 용적비로 산정하였다. Yang 등<sup>5)</sup>은 알칼리 활성 모르타르의 초기 유동성과 압축강도는 원재료의 화학적 조성 및 활성화제의 농도를 조합하는 알칼리 품질 계수에 비례함을 보였다. 또한 물-결합재비가 0.5일 때 알칼리 품질계수가 0.0274이면 28일 강도가 50 MPa 이상의 고강도 모르타르를 얻을 수 있음을 보였다. 이에 따라 본 콘크리트 배합에서는 알칼리 품질계수가 0.0278로 있을 수 있도록 규산나트륨 첨가량을 조절하였다. 모든 배합에서 단위수량은 170 kg/m<sup>3</sup>, 물-결합재비는 0.5이며 잔골재율은 45%이다.

일반적으로 경량골재는 사전에 충분히 수분을 함유한 상태에서 배합에 이용되지만 본 연구에서 이용된 경량골재는 사전에 수분을 함유시킬 경우 재료분리가 심하게 발생하였다. 이를 고려하여 경량골재는 절건 상태에서, 그리고 천연모래는 표면 건조 내부 포화상태에서 별도로 저장되었다가 배합에 이용되었다. 또한 모든 콘크리트 배합에서 폴리카르보산계 고성능 감수제가 결합재 대비 0.65% 첨가되었다. 콘크리트 압축강도 향상을 위해 AE제는 첨가하지 않았다.

Table 3에 나타난 시험체 명에서 첫 번째 문자 A와 두 번째 수는 각각 알칼리 활성 콘크리트와 경량 잔골재 치환율을 의미한다.

## 2.3 측정

배합된 콘크리트의 슬럼프는 배합 직후, 30분, 60분 및 90분에서 측정되었다. 슬럼프 측정 후 각 콘크리트는 계획된 역학적 특성 평가를 위한 강제 몰드에 타설되었다. 타설 후 각 몰드는 양생온도 21 ± 2°C, 상대습도 75 ± 5%의 양생실에서 계획된 실험일까지 양생되었으며, 모든 강제 몰드들을 재령 1일에서 제거하였다.

콘크리트의 압축강도는 재령 1, 3, 7, 28, 56 및 91일에서  $\phi 100 \times 200$  mm 실린더를 이용하여 측정되었으며,

할렬인장강도, 탄성계수, 파괴계수 및 부착성능은 재령 28일에서만 측정되었다. 콘크리트의 탄성계수와 응력-변형률 관계를 측정하기 위하여 Fig. 2 (a)에 나타난 바와 같이 컴프레서미터 및 전기저항 게이지가  $\phi 100 \times 200$  mm 실린더에 설치되었다. 파괴계수는 150 × 150 × 450 mm 크기의 직육면체 시험체의 상부 2점 대칭가력을 통해 측

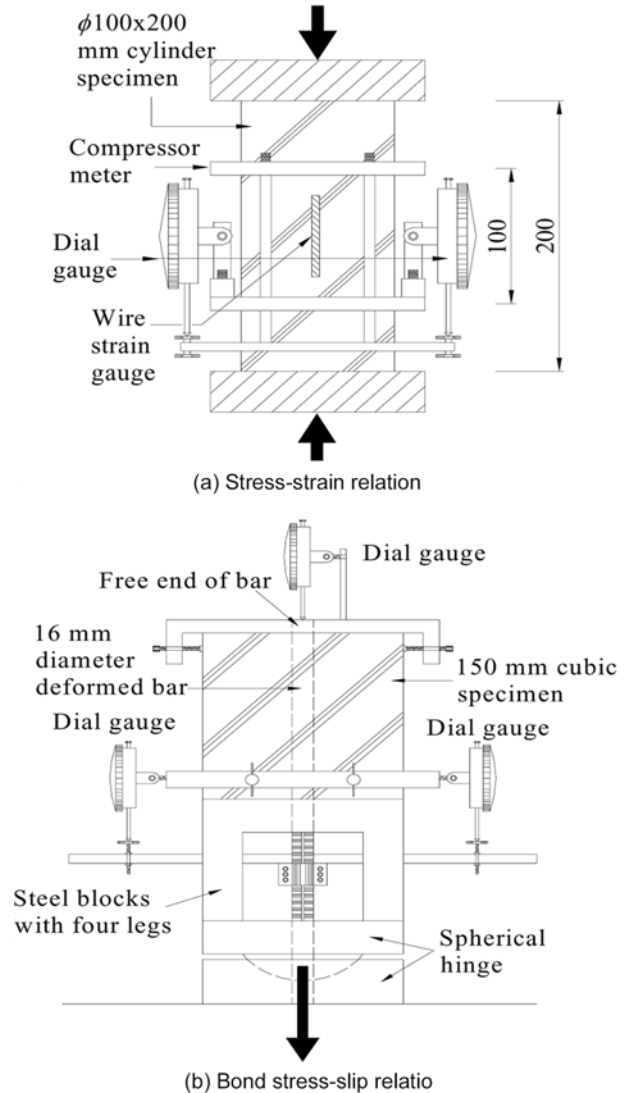


Fig. 2 Testing procedures for different properties of concrete

Table 3 Details of concrete mixes tested

Specimen	W/B	$R_{LF}$ (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )						$R_{sp}$ (%)
			B		W	$S_N$	$S_{LW}$	$G_{LW}$	
			GGBS	Sodium silicate					
A0	0.5	0	280	60	170	773	0	389	0.65
A15		15				657	49		
A30		30				541	98		
A50		50				386	163		
A75		75				193	244		
A100		100				0	325		

Note) B, W,  $S_N$ ,  $S_{LW}$  and  $G_{LW}$  refer to binder organized by GGBS and sodium silicate, water, natural sand, lightweight fine aggregate and lightweight coarse aggregate, respectively.  $R_{sp}$  is water reducing admixture-to-binder ratio by weight and  $R_{LF}$  indicates the replacement level of lightweight fine aggregate to natural sand by volume.

정되었다. 배합된 콘크리트들의 부착성능을 파악하기 위하여 항복강도 820 MPa의 16 mm 이형철근이 150 × 150 × 150 mm 몰드에 매립되었으며, Fig. 2 (b)에 나타낸 매립된 철근의 직접인발시험<sup>16)</sup>으로부터 부착응력-미끄러짐이 측정되었다. 모든 시험의 가력은 자동제어가 가능한 500 kN 용량의 UTM을 이용하였으며, 실험상세는 보통포틀랜드 시멘트 콘크리트를 위해 KS 기준에서 제시된 상세들을 따랐다. 건조수축 변형률은 100 × 75 × 420 mm의 몰드 중앙에 매립된 전기저항 게이지 (WFLM 60-11)로부터 측정되었다. 재령 1일부터 측정된 건조수축 변형률은 데이터로거에 자동 저장되었다.

### 3. 실험 결과 및 분석

#### 3.1 초기 슬럼프 및 슬럼프 손실

알칼리 활성 경량콘크리트의 초기 슬럼프는 Table 4에 나타낸 바와 같이 경량잔골재 치환율 ( $R_{LF}$ )의 증가와 함께 약간 증가하였다. 하지만 측정된 콘크리트의 슬럼프는 시간 경과와 함께 급격히 감소하였는데, 이 슬럼프 손실속도는  $R_{LF}$ 가 증가할수록 급격하였다. 특히  $R_{LF}$ 가 50% 이상일 때에는 슬럼프 측정이 불가능하였다. 경량골재의 매끄러운 표면질감은 콘크리트의 초기 유동성에 유리하지만 높은 흡수율은 알칼리 활성화제의 빠른 수화반응속도와 함께 콘크리트의 급격한 슬럼프 손실의 원인이 되었다.

#### 3.2 28일 압축강도 및 압축강도 발현

알칼리 활성 경량콘크리트의 28일 압축강도는 Table 4에 나타낸 바와 같이  $R_{LF}$ 가 30%를 넘어서면 급격히 감소하였다. Fig. 3에는 콘크리트의 압축파괴 후 파괴면의 확대사진을 나타내었다. 사용된 경량골재의 입도분포가 불연속이기 때문에 경량골재 입자들 사이의 공극크기 및 경량골재와 페이스트 경계면의 미세균열의 수는  $R_{LF}$ 의 증가와 함께 증가하였다. 특히  $R_{LF}$ 가 100%인 콘크리트에서는 재료분리로 인해 경량골재 입자들 사이의 공극이 매우 현저하였다. 한편, 시험된 콘크리트들의 파괴면은 골재를 관통하였다. 이는 경량골재의 강도가 페이스트 강도에 비해 낮기 때문이다. 이와 같이  $R_{LF}$ 의 증가와 함께

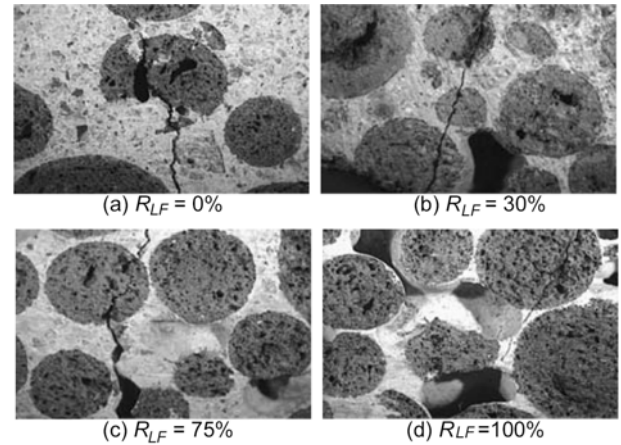


Fig. 3 Microstructural surface of lightweight AA concrete

증가하는 경량골재 입자들 사이의 공극크기 및 경량골재와 페이스트 경계면에서의 미세균열 수와 경량골재의 낮은 강도가 콘크리트 압축강도 저하의 주요 원인이라 판단된다.

Fig. 4에는 알칼리 활성 경량콘크리트의 재령에 따른 압축강도 발현율을 나타내었다. 콘크리트의 압축강도 발현율을 평가하기 위해 각 재령에서의 압축강도 ( $f_{ck}(t)$ )를 재령 28일 강도 ( $f_{ck}$ )로 무차원하였다. Yang 등<sup>5)</sup>은 고로슬래그 기반 알칼리 활성 모르타르의 초기강도 발현율은 OPC 모르타르에 비해 현저히 높으며 장기강도 발현율은 OPC 모르타르와 비슷한 수준에 있음을 보였다. 알칼리 활성 경량콘크리트의 강도발현율은  $R_{LF}$ 에 의해서도 중요한 영향을 받았다. 경량 잔골재 치환율의 증가에 따른 강

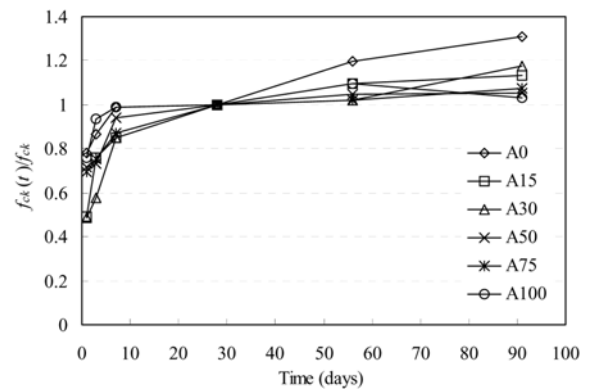


Fig. 4 Compressive strength development of test specimens

Table 4 Summary of slump and compressive strength of lightweight AA concrete tested

Specimen	Slump (mm)				Compressive strength (MPa)						
	Initial	30 mins	60 mins	90 mins	1 day	3 days	7 days	28 days	56 days	91 days	
A0	169	135	110	79	14.9	16.6	18.8	19.1	22.9	25.0	
A15	179	129	95	60	7.2	11.0	12.4	14.6	15.9	16.5	
A30	183	115	51	-	6.5	7.7	11.4	13.4	13.7	15.8	
A50	186	95	-	-	4.0	4.1	5.3	5.6	5.9	5.9	
A75	196	75	-	-	3.8	4.2	4.8	5.5	5.6	5.9	
A100	227	52	-	-	2.5	3.1	3.3	3.3	3.7	3.4	

도발현율은 초기재령에서는 증가하였지만 장기재령에서는 약간 감소하였다. Neville<sup>9)</sup>이 지적한바와 같이 콘크리트 배합에 사용된 절건 상태의 경량골재는 20% 이상의 배합수를 흡수할 수 있다. 따라서 경량골재의 높은 흡수력은 초기재령에서 수화반응에 필요한 자유수를 감소시켜 결과적으로 높은 강도발현을 유도하였다.

### 3.3 활렬인장강도

실험 결과들의 회귀분석에 근거하여 Slate 등<sup>11)</sup>은 대기 양생된 경량 OPC 콘크리트의 활렬인장강도 ( $f_{sp}$ )를  $0.41\sqrt{f_{ck}}$ 로 제시하였다. ACI 318-05는 경량 OPC 콘크리트의  $f_{sp}$ 에 대한 상세를 제시하지 않고 있지만 EC 2는 압축강도 50 MPa 이상인 경량 OPC 콘크리트의  $f_{sp}$ 를 다음과 같이 제시하고 있다.

$$f_{sp} = 0.33(f_{ck})^{2/3}(0.4 + 0.6\rho/2200) \quad (1)$$

여기서  $\rho$ 는 경화 콘크리트의 밀도 ( $\text{kg/m}^3$ )이다. Table 5에는 알칼리 활성 경량콘크리트의  $f_{sp}$ 에 대한 실험 결과와 해석값의 비교를 나타내었다. 알칼리 활성 경량콘크리트의  $f_{sp}$ 는  $R_{LF}$ 의 증가와 함께 감소하였다. 하지만 압축강도의 제곱근으로 무차원된 활렬 인장강도 ( $f_{sp}/\sqrt{f_{ck}}$ )는  $R_{LF}$ 에 거의 영향을 받지 않았으며 평균 0.39였다. 이 값은 Slate 등의 제시한 값과 비슷한 수준이다. 한편 EC 2는  $R_{LF}$ 가 30% 이상일 때 알칼리 활성 경량콘크리트의  $f_{sp}$ 를 과대평가 하였다.

### 3.4 파괴계수

Slate 등은 경량 OPC 콘크리트의 파괴계수 ( $f_r$ )를  $0.35\sqrt{f_{ck}}$ 로 나타낼 수 있음을 보였다. EC 2에서는 경량 OPC 콘크리트의  $f_r$ 에 대한 상세를 제시하지 않지만, ACI 318-05에서는 경량 잔골재와 조골재를 사용한 콘크리트에서는  $0.465\sqrt{f_{ck}}$ , 경량 잔골재만을 사용한 콘크리트에서는  $0.527\sqrt{f_{ck}}$ 로, 경량 잔골재가 치환되었을 때에는 두 값의 선형 보간법에 의해  $f_r$ 을 산정할 수 있음을 제시하고 있다. Table 6에는 알칼리 활성 경량콘크리트의  $f_r$ 에 대한 실험 결과와 예측값의 비교를 나타내었다. 압축강도의 제곱근으로 무차원된 알칼리 활성 경량콘크리트의 파괴계

Table 5 Splitting tensile strength

Specimen	$f_{ck}$ (MPa)	$\frac{f_{sp}}{\sqrt{f_{ck}}}$	$f_{sp}$ (MPa)			$(f_{sp})_{Exp.} / (f_{sp})_{Pre.}$	
			Exp.	EC 2	Slate et al.	EC 2	Slate et al.
A0	19.1	0.40	1.76	2.05	1.79	0.857	0.982
A15	14.6	0.39	1.49	1.68	1.56	0.886	0.953
A30	13.4	0.39	1.44	1.56	1.50	0.923	0.959
A50	5.6	0.38	0.91	0.85	0.97	1.069	0.936
A75	5.5	0.40	0.93	0.81	0.96	1.144	0.965
A100	3.3	0.41	0.74	0.56	0.75	1.322	0.989

Table 6 Modulus of rupture

Specimen	$\frac{f_r}{\sqrt{f_{ck}}}$	$f_r$ (MPa)			$(f_r)_{Exp.} / (f_r)_{pre.}$	
		Exp.	ACI 318-05	Slate et al.	ACI 318-05	Slate et al.
A0	0.44	1.94	2.30	1.57	0.84	1.23
A15	0.43	1.64	1.98	1.37	0.83	1.19
A30	0.44	1.61	1.86	1.32	0.87	1.22
A50	0.39	0.93	1.18	0.85	0.79	1.09
A75	0.38	0.89	1.13	0.85	0.79	1.05
A100	0.42	0.77	0.85	0.66	0.91	1.17

수 ( $f_r/\sqrt{f_{ck}}$ )는  $R_{LF}$ 가 75%까지는  $R_{LF}$ 의 증가와 함께 감소하였으며, 이때의 평균값은 0.42로서 Slate 등의 제안 값에 비해 20% 높았다. 반면 측정된 알칼리 활성 경량 콘크리트의  $f_r$ 은  $R_{LF}$ 에 관계없이 ACI 318-05에 의한 값보다 낮았다.

### 3.5 탄성계수

일반적으로 콘크리트의 탄성계수는 콘크리트 압축강도와 밀도의 함수로 나타낸다. 밀도가  $1,440 \text{ kg/m}^3$  이상인 콘크리트의 탄성계수 ( $E_c$ )에 대해 ACI 318-05는  $0.043\sqrt{f_{ck}}(\rho)^{1.5}$ 로 제시하고 있는 반면 Slate 등은 다음 식으로 제안하고 있다.

$$E_c = (3320\sqrt{f_{ck}} + 6859)(\rho/2320)^{1.5} \quad (2)$$

EC 2는 밀도가  $800 \text{ kg/m}^3$  이상인 콘크리트의 탄성계수를 다음과 같이 제시하고 있다.

$$E_c = 22000(f_{ck}/10)^{0.3}(\rho/2200)^2 \quad (3)$$

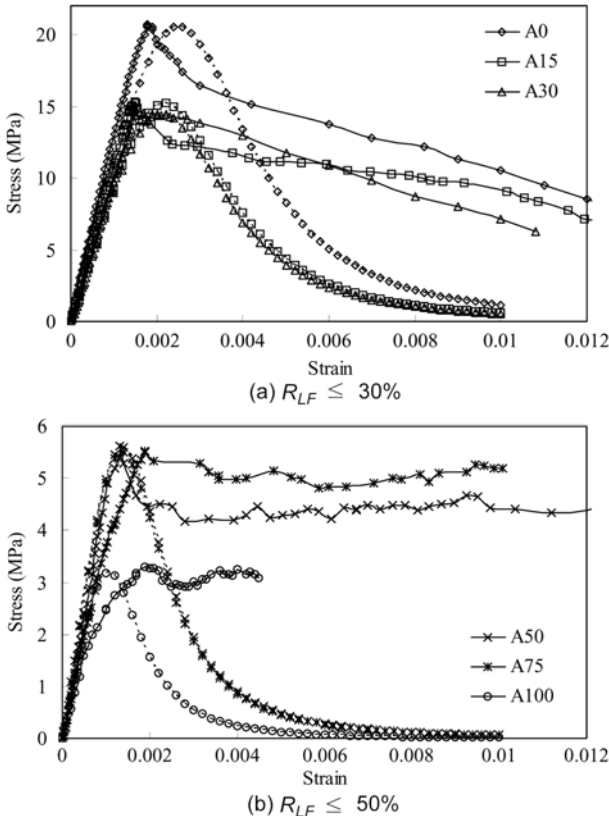
Table 7에는 알칼리 활성 경량콘크리트의 탄성계수에 대한 실험 결과와 각 제안 모델들의 예측값을 나타내었다. 알칼리 활성 경량콘크리트의  $E_c$  및 무차원화된  $E_c/\sqrt{f_{ck}}$ 는  $R_{LF}$ 의 증가와 함께 감소하였다. 이들 감소는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 경량골재 입자들 사이의 공극이  $R_{LF}$ 의 증가와 함께 증가하였기 때문이다. EC 2에 의해 얻은  $E_c$ 는 실험 결과 및 다른 예측값들에 비해 현저히 높았다. 반면 ACI 318-05 및 Slate 등의 제안 모델에 의한 예측값들은  $R_{LF}$ 가 15% 이하일 때 실험값과 비슷하였지만  $R_{LF}$ 의 증가와 함께 실험값을 과대평가하였다. ACI 318-05 및 Slate 등의 제안 모델은 밀도가  $1,440 \text{ kg/m}^3$  이상인 경량 OPC 콘크리트의 실험 결과에 근거하였기 때문에 이보다 낮은 밀도를 갖는 경량콘크리트의 탄성계수에 대해서는 그 정확도가 낮아졌다.

### 3.6 응력-변형률 관계

Fig. 5에는 측정된 알칼리 활성 경량콘크리트의 응력-변형률 관계를 나타내었다. 동일 그림에 경량 굵은골재

**Table 7** Modulus of elasticity

Specimen	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\frac{E_c}{\sqrt{f_{ck}}}$	$E_c$ (MPa)			$(E_c)_{Exp.} / (E_c)_{Pre.}$			
			Exp.	ACI 318-05	EC 2	Slate et al.	ACI 318-05	EC 2	Slate et al.
A0	1615	3073	13428	13508	16499	13770	0.994	0.814	0.975
A15	1454	3031	11563	11175	14153	11924	1.035	0.817	0.970
A30	1319	2607	9545	10139	12813	10979	0.941	0.745	0.869
A50	1153	1902	4510	6072	8895	7871	0.743	0.507	0.573
A75	1043	1678	3944	5426	7706	7062	0.727	0.512	0.558
A100	775	1630	2975	3770	5707	5569	0.789	0.521	0.534



**Fig. 5** Stress-strain curves of lightweight AA concrete (solid and dotted lines with symbols indicate test results and predictions obtained from Tasnimi's equations, respectively)

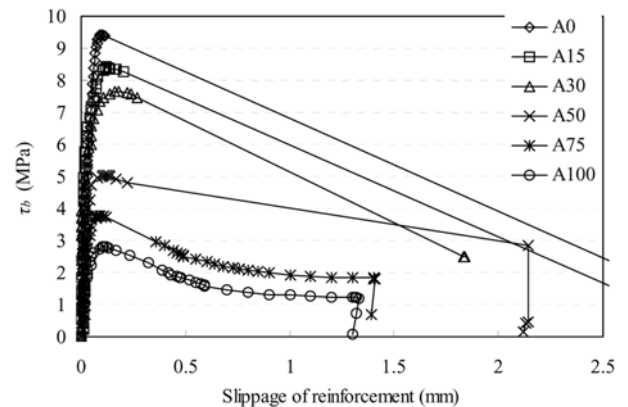
와 천연모래를 사용한 OPC 콘크리트의 실험 결과에 기반하여 제안된 Tasnimi<sup>12)</sup>의 모델이 함께 주어졌다. 알칼리 활성화 경량콘크리트의 응력-변형률 곡선의 형상은  $R_{LF}$ 에 의해 영향을 받았다. 알칼리 활성화 경량콘크리트의 최대응력 시 변형률 ( $\epsilon_0$ )은  $R_{LF}$ 가 30% 이하일 때에는 압축강도의 증가와 함께 증가하였지만  $R_{LF}$ 가 50% 이상에서는 압축강도의 감소에도 불구하고 증가하였다. 또한  $R_{LF}$ 가 50% 이상인 알칼리 활성화 콘크리트들에서 최대응력 이후의 하강 기울기는 완만한 연성과 거동을 보였다.

측정된 알칼리 활성화 경량콘크리트의 응력-변형률 관계는 Tasnimi의 제안 모델과 큰 차이를 보였다. 경량 잔골재 치환율이 30% 이하인 알칼리 활성화 콘크리트의  $\epsilon_0$ 은 Tasnimi의 모델에 비해 작았지만,  $R_{LF}$ 가 50% 이상에서는 측정된  $\epsilon_0$ 이 제안 모델보다 컸다. 게다가 Tasnimi의 모델

에서 최대 응력 이후의 기울기는 실험 결과에 비해 매우 취성 특성을 보였다. 경량골재의 불연속 입도분포로 인한 골재입자들 사이의 내부공극은 하중 증가에 따른 황변형률을 급격히 증가시키고, 골재와 페이스트 사이의 부착균열들을 연결하는 연속균열들의 수를 증가시킨다.<sup>6)</sup> 따라서 경량골재의 불연속 입도분포는 보다 낮은 압축강도와 함께 보다 증가된  $\epsilon_0$  및 최대응력 이후 완만한 하강기울기에 대한 주요 원인이 되었다고 판단된다.

### 3.7 부착응력-미끄러짐 관계

Fig. 6에는 알칼리 활성화 경량콘크리트에 매립된 철근의 부착응력-미끄러짐 관계를, Table 8에는 압축강도의 제곱근으로 무차원화된 부착강도 ( $\tau_b / \sqrt{f_{ck}}$ )를 각각 나타내었다. 알칼리 활성화 경량콘크리트의 부착강도 ( $\tau_b$ )는  $R_{LF}$ 의 증가와 함께 감소하였다. 알칼리 활성화 경량콘크리트의 무차원화된  $\tau_b / \sqrt{f_{ck}}$ 는  $R_{LF}$ 가 50% 이하일 때 평균 2.1이지만  $R_{LF}$ 가 75% 이상에서는 1.5로 급격히 감소하였다. 한편 알칼리 활성화 콘크리트의 최대 부착응력 시 철



**Fig. 6** Bond stress-slip curves of lightweight AA concrete

**Table 8** Bond strength of reinforcement installed in concrete

Specimen	A0	A15	A30	A50	A75	A100
$\tau_b$	9.44	8.41	8.02	5.01	3.79	2.80
$\frac{\tau_b}{\sqrt{f_{ck}}}$	2.16	2.20	2.19	2.11	1.61	1.54

근의 미끄러짐 양은  $R_{LF}$ 가 30% 이하일 때  $R_{LF}$ 의 증가와 함께 약간 증가하였다. 부착응력-미끄러짐 관계에서 초기 기울기 및 최대부착응력 이후 하강 기울기는  $R_{LF}$ 에 거의 영향을 받지 않았다.

### 3.8 건조수축 변형률

Fig. 7에는 재령에 따른 알칼리 활성화 경량콘크리트의 건조수축 변형률을 나타내었다. 일반적으로 천연골재를 사용한 알칼리 활성화 콘크리트의 건조수축 변형률은 초기 14일 이내에 대부분 발생하며 그 이후 건조수축 변형률 증가 기울기는 매우 완만하다.<sup>5)</sup> 하지만 알칼리 활성화 경량콘크리트의 건조수축 변형률은 재령 30일까지 약 100  $\mu\text{m}$  수준에서 거의 변화가 없으며, 그 이후 재령의 증가와 함께 급격히 증가하였다. 장기재령에서 알칼리 활성화 경량콘크리트의 건조수축 변형률은  $R_{LF}$ 의 증가와 함께 증가하였다. 경량골재 자체의 높은 흡수력으로 인해 콘크리트의 초기 건조수축 변형률을 매우 낮았다. 반면 Neville이<sup>6)</sup> 지적한 바와 같이 경량골재의 낮은 강성 및 콘크리트 내부에서 경량골재 사이의 공극은 페이스트의 구속력을 약화시키기 때문에 장기재령에서 건조수축 변형률이 현저히 증가된다고 판단된다.

## 4. 결 론

친환경 콘크리트 개발을 위한 중요성과 한계를 파악하기 위해 경량골재를 사용한 알칼리 활성화 콘크리트의 역학적 성질이 실험되었고 보통포틀랜드시멘트 경량콘크리트에 대한 기준 및 제안 모델들과 비교되었다. 이들 실험과 비교 평가로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 알칼리 활성화 경량콘크리트의 초기 슬럼프는 경량 잔골재 치환율의 증가와 함께 약간 증가하였지만 시간경과에 따른 슬럼프 손실은 경량 잔골재 치환율의 증가와 함께 급격하였다.
- 2) 알칼리 활성화 경량콘크리트의 28일 압축강도는 경량 잔골재 치환율이 30%를 넘을 때 급격히 감소하였

다. 반면 경량 잔골재 치환율 증가에 따른 강도발현율은 초기재령에서는 증가하였지만 장기재령에서는 약간 감소하였다.

- 3) 알칼리 활성화 경량콘크리트의 활렬인장강도, 탄성계수 및 파괴계수는 보통포틀랜드시멘트 경량콘크리트에 대한 ACI 318-05 및 EC 2 기준 식 그리고 Slate 등의 제안 모델들과 다소 차이를 보였다.
- 4) 알칼리 활성화 경량콘크리트의 최대응력 시 변형률은 경량 잔골재 치환율이 30% 이하일 때에는 압축강도의 증가와 함께 증가하였지만 경량 잔골재 치환율이 50% 이상에서는 압축강도의 감소에도 불구하고 증가하였다. 측정된 응력-변형률 곡선은 보통포틀랜드시멘트 경량콘크리트를 위해 제시된 Tasnimi의 모델과 큰 차이를 보였다.
- 5) 경량 잔골재 치환율 증가에 따라 알칼리 활성화 경량콘크리트의 부착강도는 감소하였지만, 최대 부착응력 이후 부착강도 하강기울기는 경량 잔골재 치환율의 영향을 거의 받지 않았다.
- 6) 알칼리 활성화 경량콘크리트의 건조수축 변형률은 재령 30일까지 거의 변화가 없었지만 그 이후 재령의 증가와 함께 급격히 증가하였다. 장기재령에서 알칼리 활성화 콘크리트의 건조수축 변형률은 경량 잔골재 치환율의 증가와 함께 증가하였다.

본 연구에서 실험된 알칼리 활성화 경량콘크리트는 비교적 낮은 압축강도를 나타내었다. 이의 한 원인으로서는 사용된 경량골재가 비교적 강도가 낮고 입도분포가 불연속이기 때문이다. 게다가 측정된 알칼리 활성화 경량콘크리트의 역학적 특성들은 보통포틀랜드시멘트 경량콘크리트를 위한 기준 및 제안 모델과 차이를 보였다. 비록 알칼리 활성화 경량콘크리트의 압축강도 발현과 역학적 특성은 결합재의 특성과 함께 경량골재의 물리적 특성, 입도분포 및 치환율 등에 의해 중요한 영향을 받지만, 이에 대한 연구는 매우 부족하다. 따라서 알칼리 활성화 경량콘크리트의 다양한 배합조건에 따른 역학적 특성들의 평가에 대해 지속적으로 연구할 필요가 있다.

## 감사의 글

이 논문은 교육인적자원부 지방연구중심대학육성사업(바이오하우징연구사업단) 및 국립문화재연구소 전통건축기술개발연구사업의 지원에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

1. Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., and Jalali, S., "Alkali-Activated Binders: A Review. Part 2. About Materials and Binder Manufacture," *Construction and Building Materials*, March 2007, Vol. 22, No. 7, 2008, pp. 1305~1314.
2. Palomo, A., Grutzeck, M. W., and Blanco, M. T., "Alkali-Activated Fly Ashes: A Cement for the Future," *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, 1999, pp. 1323~1329.

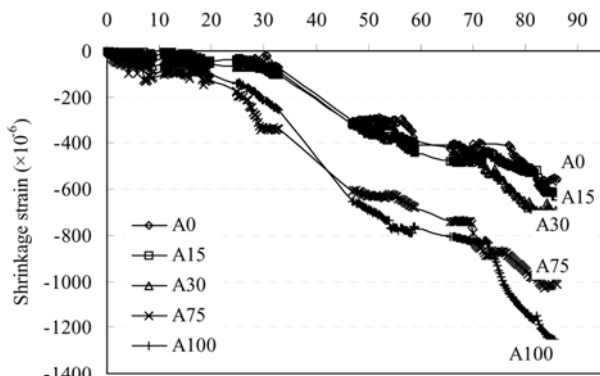


Fig. 7 Shrinkage strain of lightweight AA concrete against age

3. Wang, S. D., Pu, X. C., Scrivener, K. L., and Pratt, P. L., "Alkali-Activated Slag Cement and Concrete: A Review of Properties and Problems," *Advanced Cement Research*, Vol. 27, 1995, pp. 93~102.
4. Wang, S. D., Scrivener, K. L., and Pratt, P. L., "Factors Affecting the Strength of Alkali-Activated Slag," *Cement and Concrete Research*, Vol. 24, 1994, pp. 1033~1043.
5. Yang, K. H., Song, J. K., Ashour, A. F., and Lee, E. T., "Properties of Cementless Mortar Activated by Sodium Silicate," *Construction and Building Materials*, July 2007, Vol. 22, No. 8, 2008, pp. 1981~1989.
6. Neville, A. M., *Properties of Concrete*, Longman, 1995.
7. Zhang, M. H. and Gjorv, O. E., "Characteristics of Lightweight Aggregates for High-Strength Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 88, 1991, pp. 150~158.
8. Almusallam, T. H., and Alsayed, S. H., "Stress-Strain Relationship of Normal, High-Strength and Lightweight Concrete," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 47, 1995, pp. 39~44.
9. Kim, Y. J., and Harmon, T. G., "Analytical Model for Confined Lightweight Aggregate Concrete," *ACI Structural Journal*, Vol. 103, 2006, pp. 263~270.
10. Mitchell, D. W. and Marzouk, H., "Bond Characteristics of High-Strength Lightweight Concrete," *ACI Structural Journal*, Vol. 104, 2007, pp. 22~29.
11. Slate, F. O., Nilson, A. H., and Martinez, S., "Mechanical Properties of High-Strength Lightweight Concrete," *ACI Journal*, Vol. 83, 1986, pp. 606~613.
12. Tasnimi, A. A., "Mathematical Model for Complete Stress-Strain Curve Prediction of Normal, Light-weight and High-Strength Concrete," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 56, 2004, pp. 23~34.
13. ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI 318R-05)*, American Concrete Institute, 2005.
14. The European Standard EN 1992-1-1:2004, *Eurocode 2: Design of Concrete Structures*, British Standards Institution, 2004.
15. 한국공업표준협회, KS 규준안, 한국공업표준협회, 2006.
16. 정헌수, 양근혁, 김현호, "순환골재 품질과 치환율이 콘크리트 역학적 특성에 미치는 영향," *대한건축학회논문집*, 22권, 6호, 2006, pp. 71~78.

**요 약** 친환경 콘크리트 개발의 의미와 한계를 파악하기 위해 알칼리 활성 경량콘크리트 6배합이 실험되었다. 무시멘트 친환경 결합재를 생산하기 위해 고로슬래그와 분말형 규산나트륨이 각각 모재와 활성화제로 이용되었다. 최대직경 13 mm의 경량골재가 굵은골재로 이용되었으며, 최대직경 5 mm의 경량골재가 천연모래의 용적비로 0, 15, 30, 50, 75 및 100% 치환되었다. 굳지 않은 콘크리트에서는 시간경과에 따른 슬럼프 변화가 측정되었으며, 굳은 콘크리트에서는 재령에 따른 압축강도 발현속도, 활렬인장강도, 파괴계수, 탄성계수, 응력-변형률 관계, 부착강도 및 건조수축 변형률이 측정되었다. 실험된 알칼리 활성 경량콘크리트의 압축강도는 경량 잔골재 치환율이 30% 이상일 때 급격히 감소하였다. 특히 사용된 경량골재의 불연속 입도분포는 콘크리트의 역학적 특성들을 나쁘게 만들었다. 알칼리 활성 경량콘크리트의 역학적 특성들은 보통포틀랜드시멘트 경량콘크리트를 위해 제시된 ACI 318-05 및 EC 2 설계기준 또는 Slate 등의 제안 모델들과 비교되었다. 또한 측정된 응력-변형률 관계는 보통포틀랜드시멘트 경량콘크리트의 실험 결과에 근거하여 제시된 Tasnimi의 모델과 비교되었다. 실험 결과와 각 제안 모델들과의 비교는 잘 일치하지 않았다.

**핵심용어** : 알칼리 활성 콘크리트, 경량골재, 슬래그, 역학적 특성