

# 바텀애시 골재와 기포를 이용한 경량 콘크리트의 역학적 특성에 대한 재현성 평가

## Evaluation of Reproducibility for Mechanical Properties of Lightweight Concrete using Bottom Ash Aggregates and Foam

지구배<sup>1</sup> · 문주현<sup>2\*</sup> · 양근혁<sup>3</sup>Gu-Bae Ji<sup>1</sup> · Ju-Hyun Mun<sup>2\*</sup> · Keun-Hyeok Yang<sup>3</sup>

(Received May 26, 2019 / Revised August 1, 2019 / Accepted August 1, 2019)

The objective of this study is to examine the reproducibility for compressive strength development and mechanical properties of lightweight concrete made using bottom ash aggregates and foam(LWC-BF). Based on the mix proportions conducted by Ji et al., six identical mixes were prepared with different actual foam volume ratios from 0% to 25% and water-to-binder ratios from 25% to 30%. The presently measured properties, including initial slump, slurry density, compressive strength gains at different ages, splitting tensile strength, and modulus of rupture, were very close to those determined in the previous tests by Ji et al. Thus, the developed LWC-BF has a good potential in obtaining a reproducibility for compressive strength development and mechanical properties even though the troubles of mixing control owing to the addition of preformed foam.

**키워드 :** 경량 콘크리트, 바텀애시 골재, 기포, 역학적 특성, 재현성

**Keywords :** Lightweight concrete, Bottom ash aggregate, Foam, Mechanical properties, Reproducibility

### 1. 서론

최근 신기후 체제 출범에 따라 에너지 소비 절감과 이산화탄소 배출 저감을 위한 국제사회의 요구로 콘크리트산업에서도 화석연료의 사용 저감을 위해 지속적인 노력을 기울이고 있다(Yang and Seo 2013). 또한 사회적·환경적 문제로 인해 천연골재의 수급의 어려움과 골재의 파동으로 인해 산업부산물을 이용한 경량 콘크리트에 대한 관심이 증가하고 있는 실정이다. 이러한 관점에서 고로 슬래그미분말(Ground granulated blast-furnace slag, 이하 GGBS)과 플라이애시(Fly ash, 이하 FA) 및 바텀애시 골재 등의 산업 부산물을 콘크리트의 구성재료로 대체하는 연구가 다양하게 진행되고 있다(Yang et al. 2006; Kurama et al. 2008; Demirbo and Gul 2003).

최근 단열성능 향상을 위해 경량 콘크리트의 열전도율을 개선

하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. Kim et al.(2012)은 경량 골재 콘크리트의 역학적 특성이 보통 콘크리트 보다 낮지만, 밀도 및 열전도율은 각각 20~30% 및 30~37% 낮출 수 있음을 보였다. Yang and Lee(2015)은 밀도가 10% 낮아질 때, 기포 콘크리트의 열전도율이 약 10% 낮음을 보였다. 더불어 콘크리트 뿐만 아니라 산업부산물인 바텀애시 골재와 기포 융합에 대한 연구들이 수행되고 있다(Lee et al. 2019; Jang et al. 2010; Cho 2008).

하지만 이들 산업부산물 및 기포를 이용하여 새롭게 개발되고 있는 경량 콘크리트는 실내실험과 현장실험의 환경차이로 인해 실용화 측면에서 완전한 성능확보에 어려움이 있을 수 있다(Lee 2018). 특히 바텀애시 골재는 함수율이 보통골재 보다 약 4배 정도 높아 배합 시 수분을 흡수하여 콘크리트 내부에 공극을 발생시킬 우려가 있고, 배합수를 저감시켜 유동성 저하 등의 원인이 되고 있다. 또한 기포 콘크리트는 배합시 골재와의 기포의 부딪힘으로

\* Corresponding author E-mail: [mjh@kgu.ac.kr](mailto:mjh@kgu.ac.kr)

<sup>1</sup>경기대학교 건축공학과 일반대학원 박사과정 (Department of Architectural Engineering, Kyonggi University, Kyonggi-do, 16227, Korea)

<sup>2</sup>경기대학교 건축공학과 조교수 (Department of Architectural Engineering, Kyonggi University, Kyonggi-do, 16227, Korea)

<sup>3</sup>경기대학교 건축공학과 교수 (Department of Architectural Engineering, Kyonggi University, Kyonggi-do, 16227, Korea)

인해 기포가 소포되어 기포의 제어가 어려우며, 소포에 의한 체적 감소와 낮은 압축강도 및 건조수축으로 인한 균열발생 등으로 사용성에 한계가 있다. 이와 같이 바텀애시 골재의 재료적 성질과 기포의 혼입율에 의해 콘크리트의 특성이 현저하게 영향을 받는 바텀애시 골재 기반 경량 기포 콘크리트(Lightweight concrete made using bottom ash aggregates and foam, LWC-BF)는 실내 실험과 프리캐스트 공장에서 사용되고 있는 실무재료의 사용에 따른 재현성 평가가 중요하지만, 이에 대한 실험결과 및 기초적 자료에 대한 연구가 부족한 실정이다.

이 연구에서는 기포가 25% 이하로 첨가된 LWC-BF의 역학적 특성에 대한 재현성을 평가하였다. 이를 위해 Ji et al.(2019)의 기존 실험과와 동일한 변수 조건하에서 실험을 수행하였으며, 결과를 비교함으로써 재현성도 확인하였다. 또한 LWC-BF의 역학적 특성들은 ACI 318-14(2014) 및 CEB-FIP(2010) 설계기준과 비교하여 그 안전성도 평가하였다.

## 2. 배합상세 및 실험

### 2.1 사용재료

주요 결합재는 30%의 보통 포틀랜드 시멘트(ordinary portland cement, OPC), 50%의 GGBS 및 20%의 FA로 구성된 시멘트계 재료를 사용하였다. 결합재들의 화학조성비는 Table 1과 같다. 혼

Table 1. Chemical compositions of cementitious materials

Source materials	Chemical composition(%)						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SO <sub>2</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	LOI
OPC	21.7	5.3	62.4	1.7	1.6	3.1	0.8
GGBS	33.5	15.2	43.9	2.5	2.6	0.5	1.7
FA	57.7	21.1	4.3	0.5	1.8	6.4	3.9

※ LOI is Loss on ignition.

Table 2. Mixture proportions

Group	Specimen	W/B(%)	S/a(%)	R <sub>a</sub> (%)	B(kg/m <sup>3</sup> )	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )						
						W	OPC	GGBS	FA	F <sub>BA</sub>	C <sub>BA</sub>	S.P(%)
I	I-0	20	42	0	450	113	135	225	90	436	467	1.7
	I-10			10		101	122	203	81	392	420	0.4
	I-25			25		84	101	169	68	327	350	0.3
II	II-0	30		0		135	135	225	90	421	452	0.7
	II-10			10		122	122	203	81	379	406	0.13
	II-25			25		101	101	169	68	316	339	0.02

※ W/B=water-to-binder ratio, S/a=fine aggregate-to- total aggregate ratio by volume, R<sub>a</sub>=foam volume ratio, B=binder composed of ordinary portland cement(OPC), ground granulated blast-furnace slag(GGBS) and fly ash(FA), F<sub>BA</sub>=bottom ash fine aggregate, C<sub>BA</sub>=bottom ash coarse aggregate, S.P=super-plasticizing agent.

화재인 GGBS와 FA의 SiO<sub>2</sub> 및 CaO의 구성 비율은 각각 33.5% 및 57.7%와 43.9% 및 4.3%이다. 고로슬래그미분말(GGBS)과 FA의 비중은 2.94g/cm<sup>3</sup> 및 2.20g/cm<sup>3</sup>이며, 비표면적은 각각 4,355g/cm<sup>3</sup> 및 4,770g/cm<sup>3</sup>이다. 잔골재와 굵은 골재의 최대치수는 각각 4mm와 13mm인 바텀애시 골재를 사용하였다. 바텀애시 잔골재는 KS F 2527에서 제시하고 있는 표준입도 분포 곡선에 만족하도록 입도를 조정하였다. 바텀애시 잔골재와 굵은 골재의 조립률은 각각 2.74와 6.55이며, 밀도는 1.79g/cm<sup>3</sup>과 1.18g/cm<sup>3</sup>이다. 바텀애시 골재는 표면과 외부가 다공성 구조로 되어 있다. 이로 인해 흡수율은 잔골재와 굵은 골재에서 각각 11.1% 및 15.3%로 보통 골재 보다 약 4배 이상 높았다. 기포제는 소포율이 낮은 동물성 기포제를 사용하였다. 감수제는 현장 조건을 고려하여 가장 일반적으로 사용되는 고체함유 및 밀도가 각각 39.8%와 1.49g/cm<sup>3</sup>인 폴리카르복산계(polycarboxylic acid)를 사용하였다.

### 2.2 실험상세

바텀애시 골재 기반 경량 기포 콘크리트(LWC-BF)의 역학적 특성은 기존 Ji et al.(2019)의 배합조건과 동일한 조건에서 반복 실험하여 재현성을 평가하였다. 재현성 평가 대상 컨트를 실험체의 변수는 Ji et al.(2019)에 의해 수행되었던 배합에서 결정하였다. 이때 단위결합재량 및 물-결합재비(W/B)가 각각 450kg/m<sup>3</sup> 및 25~30%이면서, 기포 혼입율(R<sub>a</sub>)이 0%, 10% 및 25%이었는데, 기포 혼입률은 콘크리트 전체 볼륨 대비 내부의 공극량을 의미한다. 실험체의 배합상세는 Table 2에 나타내었다. 배합은 W/B에 따라 두 그룹으로 구분하였다. 각 그룹의 주요변수는 R<sub>a</sub>이다. 실 기포율(R<sub>a</sub>)은 모든 그룹에서 0%, 10% 및 25%로 변화시켰다. 모든 배합의 잔골재율(s/a)은 42%이다. 실험체명에서 첫 번째 문자는 그룹명이며, 두 번째 숫자는 R<sub>a</sub>를 의미한다. 바텀애시 골재는 배합시 배합수를 흡수하기 때문에 배합전 3일 동안 프리웨팅(Pre-wetting)

진행 후 표면건조상태로 만들어 흡수율의 영향을 최소화하였다. 배합은 바텀에서 골재와 결합재를 투입하여 2분 간 건비빔하였다. 건비빔 후 물을 넣어 습비빔하면서 감수제를 첨가하였다. 이때 재료분리가 발생하지 않는 범위내에서 감수제 첨가량을 조절하여 슬럼프를 측정하였다. 기포는 2.5%의 농도로 물에 희석시킨 기포제를 압축공기로 생성하여 마지막에 혼입하였다.

### 2.3 실험방법

굳지 않은 콘크리트에서는 실 기포율, 굳지 않은 콘크리트의 밀도, 초기 슬럼프 및 침하 깊이를 측정하였다. 굳지 않은 콘크리트의 밀도는 KS F 4039에 따라 1,000mL의 용기를 이용하여 타설 후 2시간 후에 측정하였고, 실 기포율은 Lee et al.(2001)이 이용한 간이 소포법으로 측정하였다. 굳은 콘크리트에서 기건 밀도 및 압축강도는  $\phi 100 \times 200$ mm의 공시체를 이용하였으며, 기건 밀도는 재령 3일, 28일 및 91일에서, 압축강도는 재령 3, 7, 28, 56 및 91일에서 측정하였다. 쪼갬 인장강도는  $\phi 100 \times 200$ mm의 공시체를 이용하여 재령 28일에서 측정하였다. 파괴계수는  $100 \times 100 \times 400$ mm 몰드를 이용하여 재령 28일에서 3등분점 휨 시험을 통해 측정하였다. 콘크리트의 양생온도 20°C와 습도 60% 조건에서 양생하였다.

## 3. 재현성의 평가

### 3.1 실 기포율 및 굳지 않은 콘크리트의 밀도

실 기포율 및 굳지 않은 콘크리트의 밀도를 Table 3에 나타내었다. 실 기포율의 실험결과는 2.0~22.5%였으며, 목표 기포율 대비

실 기포율의 비는 0.73~0.94범위였다. Ji et al.(2019)의 기존 실험 결과의 실 기포율은 2.1~22.5%였으며, 목표 기포율 대비 실 기포율의 비는 0.70~1.00범위였다. 이 범위는 Ji et al.(2019)의 기존 실험결과와 비슷하게 나타났다. 이는 Ji et al.(2019)의 연구와 동일하게 기포 투입 후 혼합 시 바텀에서 골재와 부딪힘으로 인해 소포되는 기포량이 많아 실 기포율의 제어가 어렵기 때문이다(Yang and Lee, 2015). 또한 실험결과 대비 재현성 평가 대상인 이전 실험결과(Ji et al. 2019)의 비는 평균 및 표준편차가 각각 1.02 및 0.09으로 상호 비슷한 수준에 있었다.

굳지 않은 콘크리트의 밀도는 1,320~1,635kg/m<sup>3</sup> 수준에 있었으며,  $R_a$ 가 0%에서 25%로 증가할 때 각 그룹의 실험체에서 평균 18% 감소했으며 그룹 I 과 그룹 II의 실험체에서 비슷한 수준에 있었다. 또한 Ji et al.(2019)의 기존 실험결과는 1,312~1,640kg/m<sup>3</sup> 범위였으며, 실험결과 대비 재현성 평가 대상인 이전 실험결과(Ji et al. 2019) 비의 평균 및 표준편차가 각각 0.99 및 0.10으로 굳지 않은 밀도는 Ji et al.(2019)의 기존 실험결과와 비슷하였다

### 3.2 초기 슬럼프 및 소포 깊이

그룹 I의  $R_a$ 가 0%인 실험체에서는 감수제를 1.7%까지 첨가하여도 슬럼프 값을 측정할 수 없을 정도로 유동성이 낮았다(Fig. 1). 이는  $R_a$ 가 0%이면서 단위결합재량이 450kg/m<sup>3</sup>인 실험체에서 바텀에서 골재의 다공성으로 인해 배합시 시멘트 페이스트가 골재 표면에 흡착되어 슬럼프를 감소시키기 때문이다(Ji et al. 2019). 초기 슬럼프는 50~210mm이었으며, Ji et al.(2019)의 기존 시험결과는 60~200mm로 그룹 I 과 그룹II의  $R_a$ 가 0%인 실험체를 제

Table 3. Test results of fresh concrete

Group	Specimens	$R_a$ (%)	This study				Ji et al.				Comparisons		
			Actual foaming ratio(1)	Initial slump (mm)(2)	Slurry density (kg/m <sup>3</sup> )(3)	Depth of defoaming (mm)	Actual foaming ratio(4)	Initial slump (mm)(5)	Slurry density (kg/m <sup>3</sup> )(6)	Depth of defoaming (mm)	(1) (4)	(2) (5)	(3) (6)
I	I-0	0	2.0	0	1,635	0	2.1	0	1,640	0	0.95	-	1.00
	I-10	10	8.9	210	1,582	0	7.5	200	1,589	0	1.19	1.05	1.00
	I-25	25	18.4	205	1,366	0	17.5	195	1,415	0	1.05	1.05	0.97
II	II-0	0	2.5	50	1,620	0	2.5	60	1,604	3	1.00	0.83	1.01
	II-10	10	9.4	150	1,541	0	10.0	170	1,561	1	0.94	0.88	0.99
	II-25	25	22.5	165	1,320	0	22.5	165	1,312	0	1.00	1.00	1.01
$r_{mea}$											1.02	0.96	0.99
$r_{std}$											0.09	0.10	0.02

※  $r_{mea}$  and  $r_{std}$  are the mean and standard deviation, respectively, of the ratios between the present tests and Ji et al.'s tests.

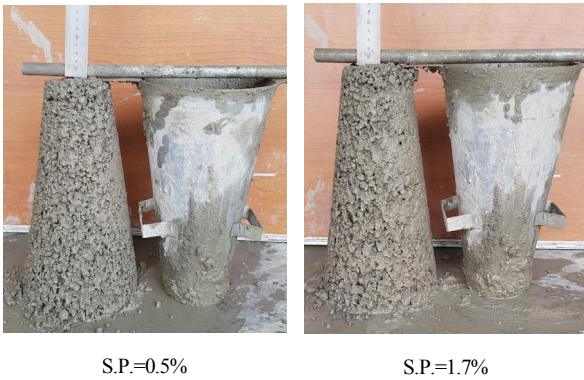


Fig. 1. Typical slump measurements(group I, Specimen I-0)

외하고는 목표 슬럼프인 150mm 이상을 만족하였다(Table 3), 또한 실험결과 대비 재현성 평가 대상인 이전 실험결과(Ji et al. 2019)의 비는 0.83~1.05의 범위에 있었으며, 그 평균 및 표준편차는 각각 0.96 및 0.100이었다. 이와 같이 초기 슬럼프는 Ji et al.(2019)의 기존 실험결과와 비슷하였다.

바탕에서 골재 기반 경량 기포 콘크리트(LWC-BF)의 소포 깊이는  $W/B$ 와  $R_b$ 에 관계없이 침하가 발생하지 않았다. 이는 25% 이내의 기포 혼입이 굳지 않은 콘크리트에 비해 비중이 상대적으로 큰 바탕에서 골재의 침하를 방지 할 수 있음을 의미한다(Ji et al. 2019).

### 3.3 기건 밀도 및 재령 28일 압축강도

바탕에서 골재 기반 경량 기포 콘크리트(LWC-BF)의 재령 별 기건 밀도( $\rho_c$ )는 1,394~1,605kg/m<sup>3</sup> 수준에 있었으며,  $R_b$ 가 0%에서 25%로 증가할 때 각 그룹의 실험체에서 평균 11% 감소하였다. 또한 Ji et al.(2019)의 기존 실험결과는 1,299~1,572kg/m<sup>3</sup> 범위였

으며, 실험결과 대비 재현성 평가 대상인 이전 실험결과(Ji et al. 2019)의 비는 평균 및 표준편차가 재령 3일, 28일 및 91일에서 각각 1.04, 1.05 및 1.05 와 0.03, 0.02 및 0.02로 실험결과는 비슷한 수준이었다(Table 4).

재령 28일 압축강도( $f_{ck}$ )는  $R_b$ 에 현저한 영향을 받았는데, 이는 기존연구의 경향과 유사하였다(Ji et al. 2019; Lee et al. 2019), 실 기포율( $R_b$ )이 0%에서 25%로 증가할 때  $f_{ck}$ 는 그룹 I 과 그룹 II의 실험체에서 각각 평균 55% 및 63%로 감소하였다. 재령 28일 압축강도( $f_{ck}$ )에 대한 실험결과 대비 재현성 평가 대상인 이전 실험결과(Ji et al. 2019)의 비는 평균 및 표준편차가 각각 1.05과 0.02로  $f_{ck}$ 의 변화는 미미하였다. 이처럼 실험결과와  $f_{ck}$ 가 비슷한 수준에 있는 이유는  $R_b$ 에 따른 기건 밀도( $\rho_c$ )가 전반적으로 Ji et al.(2019)의 기존 실험결과와 큰 차이가 없기 때문이다.

### 3.4 압축강도 발현율

Fig. 2에는 LWC-BF의 압축강도 발현율( $f_{c(t)}/f_{ck}$ )에 대한 재현성 평가 실험결과를 나타내었는데, 여기서  $f_{c(t)}$ 는 임의의 재령( $t$ )에서 압축강도를 의미한다. 그룹 II의  $f_{c(t)}/f_{ck}$ 는 재령 3일 및 7일에서 각각 0.20~0.48 및 0.66~0.91이며, 재령 91일에서 1.04~1.06이었다. 또한 Ji et al.(2019)의 기존 실험결과는 재령 3일 및 7일에서 각각 0.16~0.44 및 0.71~0.93이며, 재령 91일에서 1.03~1.06으로  $R_b$ 에 관계없이 초기 재령에서 급격한 발현율을 보였으나, 장기 재령에서는 비교적 완만한 형태를 나타내었다. 이처럼 실험결과 대비 재현성 평가 대상인 이전 실험결과(Ji et al. 2019)의 비는  $R_b$ 가 0% 및 10%인 실험체의 재령 7일의 초기 재령에서 각각 0.95 및 0.98과 재령 91일에서 1.01 및 1.00이었다. 또한  $R_b$ 가 25%인 실험체에서는 재령 7일 및 91일에서 각각 0.93 및 1.01로

Table 4. Summary of test results for 28-day compressive strength and air-dried densities at different ages

Group	Specimens	Measured air-dried density, $\rho_c$ (kg/m <sup>3</sup> )						28-day compressive strength, $f_{ck}$ (MPa)		Comparison				
		This study(1)			Ji et al.(2)			This study(3)	Ji et al.(4)	(1) (2)			(3) (4)	
		3 day	28 day	91 day	3 day	28 day	91 day			3 day	28 day	91 day		
I	I-0	1,588	1,592	1,605	1,572	1,550	1,545	23.8	22.3	1.01	1.03	1.04	1.07	
	I-10	1,551	1,572	1,549	1,481	1,498	1,481	20.3	19.3	1.05	1.05	1.05	1.05	
	I-25	1,427	1,440	1,455	1,400	1,395	1,388	10.9	10.5	1.02	1.03	1.05	1.04	
II	II-0	1,589	1,599	1,591	1,514	1,524	1,537	24.6	23.6	1.05	1.05	1.04	1.04	
	II-10	1,530	1,549	1,548	1,417	1,454	1,449	17.1	15.9	1.08	1.07	1.07	1.08	
	II-25	1,399	1,394	1,417	1,323	1,299	1,308	8.8	8.5	1.06	1.07	1.08	1.04	
$r_{mea}$											1.04	1.05	1.05	1.05
$r_{std}$											0.03	0.02	0.02	0.02

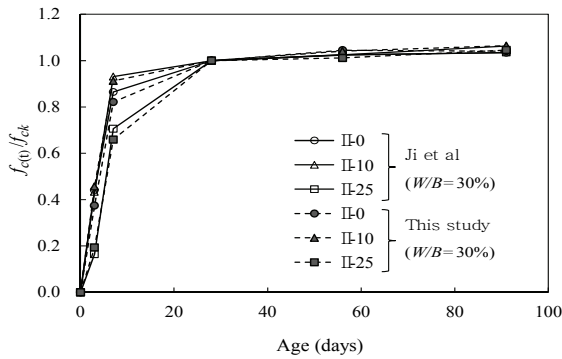


Fig. 2. Typical compressive strength development

$f_{c(t)}/f_{ck}$ 는 상호 비슷한 실험결과를 보였다.

ACI 209R(2008)에서는 재령 28일 압축강도 대비 임의 재령( $t$ )에서의 압축강도 발현률( $f_{c(t)}/f_{ck}$ )을 예측하기 위해서 초기 및 장기 재령에서 다음과 같이 적용하고 있다.

$$\frac{f_{c(t)}}{f_{ck}} = \frac{t}{\alpha + (\beta t)} \quad (1)$$

여기서,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 각각 초기 및 장기재령에 관계되는 압축강도 발현 상수인데, ACI 209R(2008)에서는 OPC를 사용하면서 습윤 양생조건인 콘크리트 실험체에서 각각 4.0과 0.85로 제시하고 있다. 압축강도 발현 상수  $\alpha$ 와  $\beta$ 에 대한 실험결과를 Table 5에 나타내었다. 실험결과 대비 재현성 평가 대상인 이전 실험결과(Ji et al. 2019) 비의 평균 및 표준편차는 각각 1.23 및 0.17와 0.99 및 0.02으로 발현 상수  $\alpha$ 는 실험결과가 재현성평가 대상인 이전 실험결과 보다

Table 5. The constants  $\alpha$  and  $\beta$  determined from each mix for compressive strength development at different ages

Group	Speci-mens	This study		Ji et al.		Comparisons	
		$\alpha(1)$	$\beta(2)$	$\alpha(3)$	$\beta(4)$	$\frac{(1)}{(3)}$	$\frac{(2)}{(4)}$
I	I -0	3.89	0.88	2.89	0.87	1.35	1.01
	I -10	3.67	0.87	2.64	0.86	1.39	1.01
	I -25	4.26	0.85	3.56	0.89	1.20	0.96
II	II -0	3.61	0.88	2.91	0.91	1.24	0.97
	II -10	2.69	0.89	2.92	0.90	0.92	0.99
	II -25	6.47	0.85	5.03	0.85	1.29	1.00
$r_{mea}$		4.10	0.87	3.33	0.88	1.23	0.99
$r_{std}$		1.27	0.02	0.89	0.02	0.17	0.02

$\alpha$  and  $\beta$  are constants to determine the compressive strength gain of concrete at different ages.

높았으나, 발현상수  $\beta$ 는 실험결과와 비교적 잘 일치하였다.

### 3.5 쪼갬 인장강도

재령 28일 압축강도의 제곱근( $\sqrt{f_{ck}}$ )으로 무차원된 쪼갬 인장강도( $f_{sp}/\sqrt{f_{ck}}$ )는 0.29~0.37 범위였으며,  $R_u$ 가 0%에서 25%로 증가할 때 각 그룹의 실험체에서 평균 17% 감소하였다. 실험결과 대비 재현성 평가 대상인 이전 실험결과(Ji et al. 2019) 비는 0.77~1.11 범위였으며, 그 평균 및 표준 편차는 각각 0.94 및 0.16으로 Ji et al.(2019)의 기존 실험결과와 전반적으로 잘 일치하였다. 하지만,  $R_u$ 가 증가함에 따라 실험결과값이 재현성평가 대상인 이전 실험결과 보다 높아지는 경향을 보였다(Table 6).

Table 6. Comparisons of splitting tensile strength and rupture modulus with Ji et al.'s results and code predictions

Group	Specimens	$f_{ck}$ (MPa)	Measured value				Predictions				Comparisons			
			This study(1)		Ji et al.(2)		$\left(\frac{f_{sp}}{\sqrt{f_{ck}}}\right)_{Pre.}$ (3)		$\left(\frac{f_r}{\sqrt{f_{ck}}}\right)_{Pre.}$ (4)		$\frac{(1)}{(2)}$		$\frac{(1)}{(3)}$	
			$\left(\frac{f_{sp}}{\sqrt{f_{ck}}}\right)_{Exp.}$	$\left(\frac{f_r}{\sqrt{f_{ck}}}\right)_{Exp.}$	$\frac{f_{sp}}{\sqrt{f_{ck}}}$	$\frac{f_r}{\sqrt{f_{ck}}}$	CEB-FIP	ACI	$\frac{f_{sp}}{\sqrt{f_{ck}}}$	$\frac{f_r}{\sqrt{f_{ck}}}$	CEB-FIP	ACI		
I	I -0	25.4	0.37	0.62	0.48	0.57	0.43	0.46	0.77	1.09	0.86	1.35		
	I -10	21.3	0.31	0.54	0.31	0.54	0.41	0.46	1.00	1.00	0.76	1.17		
	I -25	14.6	0.29	0.47	0.27	0.51	0.38	0.46	1.07	0.92	0.76	1.02		
II	II -0	24.6	0.34	0.68	0.47	0.65	0.43	0.46	0.72	1.05	0.79	1.48		
	II -10	19.9	0.31	0.57	0.33	0.58	0.40	0.46	0.94	0.98	0.78	1.24		
	II -25	7.4	0.30	0.52	0.27	0.52	0.32	0.46	1.11	0.98	0.94	1.13		
Mean of the ratios between the present tests and Ji et al.'s tests or predictions by code equations									0.94	1.00	0.81	1.23		
Standard deviation of the ratios between the present tests and Ji et al.'s tests or predictions by code equations									0.16	0.06	0.07	0.16		

\*  $f_{ck}$ =28-day compressive strength,  $f_{sp}$ =splitting tensile strength, and  $f_r$ =modulus of rupture.

Table 6에는  $f_{sp}/\sqrt{f_{ck}}$ 의 실험결과와 CEB-FIP(2010)의 예측값과 비교하였다. 이때  $f_{sp}$ 의 예측값은 CEB-FIP(2010)에서 압축강도가 50MPa 이하인 경량 콘크리트에서 규정하고 있는  $0.3(f_{ck})^{2/3}(0.4+0.6\rho_c/\rho_0)$ 을 적용하였다. 실험값( $(f_{sp}/\sqrt{f_{ck}})_{Exp.}$ ) 대비 예측값 비( $(f_{sp}/\sqrt{f_{ck}})_{Pre.}$ )의 평균 및 표준편차는 0.81 및 0.07이었다.

### 3.6 파괴계수

재령 28일 압축강도의 제곱근( $\sqrt{f_{ck}}$ )으로 무차원된 파괴계수 ( $f_r/\sqrt{f_{ck}}$ )는 0.47~0.68 범위이었으며,  $R_a$ 가 0%에서 25%로 증가할 때 각 그룹의 실험체에서 평균 24% 감소하였다. Ji et al.(2019)의 기존 실험결과와  $f_r/\sqrt{f_{ck}}$ 는 0.51~0.65 범위이었다. 이때의 실험결과 대비 재현성 평가 대상인 이전 실험결과(Ji et al. 2019) 비는 평균 및 표준 편차가 1.00 및 0.06으로 재현성 평가 대상 실험결과와 잘 일치하였다. 하지만  $R_a$ 가 증가함에 따라 실험결과값이 재현성평가 대상인 이전 실험결과 보다 낮아지는 경향을 보였다 (Table 6).

Table 6에  $f_r/\sqrt{f_{ck}}$ 의 실험결과를 ACI 318-14(2014)의 예측값과 비교하여 나타냈다. 이때  $f_r$ 의 예측값은 ACI 318-14(2014) 설계기준에서 제시하고 있는  $0.62\lambda_1\sqrt{f_{ck}}$ 를 이용하였는데, 여기서  $\lambda_1$ 은 0.75로 전경량 경량콘크리트의 보정계수이다. 실험값 대비 ACI 318-14(2014) 예측값 비의 평균 및 표준편차는 1.23 및 0.16로 실험값이 ACI 318-14(2014)의 예측값 보다 높았다. 이는 ACI 318-24(2014) 기준은  $f_{ck}$ 와 경량 콘크리트의 보정계수  $\lambda_1$ 의 함수만으로 평가하고 있어  $R_a$ 에 대한 영향을 반영하지 못했기 때문이다.

### 3.7 열전도율

열전도율은 Ji et al.(2019)의 연구에서 수행되지 않은 실험항목이므로 이 절에서는 ACI 122R(2002) 설계기준과의 비교만을 수행하였다. 바텀애시 골재 기반 기포 콘크리트(LWC-BF)의 열전도율은  $R_a$ 에 현저한 영향을 받았다. 모든 그룹의 실험체에서  $R_a$ 가 0%에서 25%로 증가함에 따라 평균 30% 감소하였으며, 이때  $\rho_c$ 는 약 18% 감소하였다(Table 7). 그룹 I 및 II에서 BS-LWFC의 열전도율은  $R_a$ 가 10%와 25%에서 각각 0.42~0.45W/m·K와 0.34~0.37W/m·K의 범위에 있었는데, 이는 기건 밀도가 1,500kg/m<sup>3</sup> 이상인 경량골재 콘크리트의 일반적인 열전도율 0.50W/m·K (Neville 2011) 보다 각각 평균 13% 및 23% 낮은 수치이다.

Table 7. Comparisons of measured thermal conductivity with predictions by ACI 122R

Group	Specimens	$\rho_c$ (kg/m <sup>3</sup> )	Measured value ( $k_c$ ) <sub>Exp.</sub> (W/m·K)	Predictions ( $k_c$ ) <sub>Pre.</sub> (W/m·K)	$\frac{(k_c)_{Exp.}}{(k_c)_{Pre.}}$
			This study(1)	ACI 122R(2)	$\frac{(1)}{(2)}$
I	I-0	1,592	0.50	0.53	0.95
	I-10	1,543	0.45	0.50	0.91
	I-25	1,470	0.37	0.45	0.82
II	II-0	1,594	0.48	0.53	0.91
	II-10	1,528	0.42	0.49	0.86
	II-25	1,315	0.34	0.37	0.91
Mean of the ratios between experiments and predictions					0.89
Standard deviation of the ratios between experiments and predictions					0.05

※  $\rho_c$ =air-dried density and  $k_c$ =thermal conductivity.

일반적으로 경량골재 콘크리트의 열전도율은  $\rho_c$ 에 밀접한 영향을 받는다(Neville 2011). ACI 122R(2002) 설계기준은 열전도율( $k_c$ )에 대한 예측모델을 다음과 같이 제안하였다.

$$k_c = A_1 \text{EXP}[0.00125\rho_c] \quad (2)$$

여기서,  $A_1$ 은 건조상태에 관련된 상수로서 절건 및 기건에서 각각 0.0072 및 0.0865이다. 이 실험결과에서는 절건상태에서 열전도율을 측정하였으므로, 예측모델과 실험결과와의 비교시  $A_1$ 을 0.0072로 적용하였다. Table 7에는 열전도율의 실험값과 ACI 122R(2002)의 예측모델로부터 산정한 예측값을 비교하여 나타냈다. 실험값 대비 예측값의 비( $(k_c)_{Exp.}/(k_c)_{Pre.}$ )는  $R_a$ 가 증가함에 따라 감소하였으며, 그 평균 및 표준편차는 0.89 및 0.05로 ACI 122R(2002)의 예측값은 실험값을 다소 불안전적으로 예측하였다. 이는 열전도율을  $\rho_c$ 의 함수만으로 평가하고 있어 기포 혼입( $R_a$ )에 따른 영향을 고려하지 않았기 때문이다.

## 4. 결론

본 연구에서는 바텀애시 골재와 기포를 25% 이하로 첨가한 경량 콘크리트(LWC-BF)의 역학적 특성에 대한 재현성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 바텀애시골재와 기포를 이용한 콘크리트(LWC-BF)의 재령 28일 압축강도는 재현성 평가 대상인 이전 실험결과와 유사

하였는데, 이들 값들의 상호비교에서 평균과 표준편차는 각각 1.05와 0.02이었다.

2. 바텀애시골재와 기포를 이용한 콘크리트(LWC-BF)의 쪼갬 인장강도 및 파괴계수도 이전 실험결과와 유사하였는데, 이들 값들의 상호비교에서 평균과 표준편차는 쪼갬 인장강도에서 각각 0.96과 0.16이었으며, 파괴계수에서 1.00과 0.06이었다.
3. 바텀애시골재와 기포를 이용한 콘크리트(LWC-BF)의 열전도율은 기포 혼입률이 0%에서 25%로 증가함에 따라 평균 30% 감소하였다.
4. LWC-BF의 쪼갬 인장강도는 CEB-FIP의 설계 값에 비해 낮았으며, 파괴계수는 ACI 318-14의 설계 값에 비해 다소 높았다.
5. 바텀애시골재와 기포를 이용한 콘크리트(LWC-BF)의 압축강도 및 역학적 특성은 기포 혼입에 의한 배합관리가 어려움에도 불구하고 그 재현성이 비교적 우수하였다.

## Conflict of interest

None.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부와 국토교통과학기술진흥원의 국토교통 기술촉진연구사업(19CTAP-C151900-01)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## References

- ACI Committee 318-04. (2014). Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute.
- ACI Committee 209R. (2008). Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures, American Concrete Institute.
- ACI Committee 122R. (2002). Guide to Thermal Properties of Concrete and Masonry Systems, American Concrete Institute.
- CEB-FIP. (2010). CEB-FIP Model Code, Design Code, Comité Euro International Du Béton.
- Cho, M.S. (2008). An Experimental Study on Mechanical Properties of Foamed Concrete using Bottom Ash as Fine Aggregate, Ph.D Thesis, Hanseo University [in Korean].
- Demirbo, R., Gul, R. (2003). The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete, *Cement Concrete Research*, **33(5)**, 723-727.
- Jang, I.G., Woo, Y.J., Lee, H.S., Yoo, J.H., Sim, K.S. (2010). An experimental study on the thermal property and the structural lightweight mortar using micro form agent, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, **26(8)**, 29-36 [in Korean].
- Ji, G.B., Mun, J.H., Yang, K.H. (2019). Evaluation of mechanical properties of lightweight concrete using bottom ash aggregates and foam, *Journal of the Korea Concrete Institute* Accepted [in Korean].
- Kurama, H., Topcu, I.B., Karakurt, C. (2008). Properties of the autoclaved aerated concrete produced from coal bottom ash, *Journal of Materials Processing Technology*, **209(2)**, 767-773.
- Kim, H.K., Jeon, J.H., Lee, H.K. (2012). Workability, and mechanical, acoustic and thermal properties of lightweight aggregate concrete with a high volume of entrained air, *Construction and Building Materials*, **29**, 193-200.
- Lee, K.I., Mun, J.H., Yang, K.H. (2019). A fundamental study to develop low-CO<sub>2</sub> high-insulation lightweight concrete using bottom ash aggregates and air foam, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **31(3)**, Ahead of print [in Korean].
- Lee, K.H. (2018). Reliable Model Proposals for Mechanical Properties and Mixing Proportioning of Lightweight Aggregate Concrete using Expanded Bottom Ash and Dredged Soil Granules, Ph.D Thesis, Kyonggi University [in Korean].
- Lee, D.H., Jun, M.H., Ko, J.S. (2001). Physical properties and quality control of foamed concrete with fly ash for cast-in-site, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **13(1)**, 66-67 [in Korean].
- Neville, A.M. (2011). Properties of Concrete, 5th edition, Wiley&Sons, New York, USA, 376-378.
- Yang, K.H., Oh, S.J., Song, J.G. (2006). Mechanical properties of alkali-activated slag-based concrete using lightweight aggregates, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **20(3)**, 408-412 [in Korean].
- Yang, K.H., Lee, K.H. (2015). Tests on high-performance aerated concrete with a lower density, *Construction and Building Materials*, **74**, 109-117.
- Yang, K.H., Seo, E.A. (2013). Evaluation of shrinkage strain of alkali-activated slag concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **25(6)**, 553-559 [in Korean].

### 바텀애시 골재와 기포를 이용한 경량 콘크리트의 역학적 특성에 대한 재현성 평가

이 연구의 목적은 저량의 기포가 혼입된 바텀애시 골재 기반 경량 콘크리트(Lightweight concrete made using bottom ash aggregates and foam, LWC-BF)의 압축강도 발현 및 역학적 특성에 대한 재현성 평가이다. 이를 위해 Ji et al.에 의해 수행되었던 동일한 배합표를 기준으로 총 6 배합을 수행하였다. 배합에서의 주요변수는 기포 혼입율과 물-결합재 비로서 각각 0~25% 및 25~30%로 변화하였다. 굳지 않은 콘크리트에서 초기 슬럼프, 슬러리 밀도와 굳은 콘크리트에서 재령별 압축강도, 쪼갬인장강도 및 파괴계수는 재현성 평가대상 이전 실험결과와 대체적으로 비슷하였다. 따라서, LWC-BF의 압축강도 및 역학적 특성은 기포 혼입에 의한 배합관리가 어려움에도 불구하고 그 재현성이 비교적 우수하였다.