

바텀애시 골재와 기포를 융합한 경량 콘크리트의 압축 응력-변형률 모델

Stress-Strain Model in Compression for Lightweight Concrete using Bottom Ash Aggregates and Air Foam

이광일¹ · 문주현² · 양근혁^{2*} · 지구배³

Kwang-Il Lee¹ · Ju-Hyun Mun² · Keun-Hyeok Yang^{2*} · Gu-Bae Ji³

(Received July 22, 2019 / Revised August 19, 2019 / Accepted August 19, 2019)

The objective of this study is to propose a reliable stress-strain model in compression for lightweight concrete using bottom ash aggregates and air foam(LWC-BF). The slopes of the ascending and descending branches in the fundamental equation form generalized by Yang et al. were determined from the regression analyses of different data sets(including the modulus of elasticity and strains at the peak stress and 50% peak stress at the post-peak performance) obtained from 9 LWC-BF mixtures. The proposed model exhibits a good agreement with test results, revealing that the initial slope decreases whereas the decreasing rate in the stress at the descending branch increases with the increase in foam content. The mean and standard deviation of the normalized root-square mean errors calculated from the comparisons of experimental and predicted stress-strain curves are 0.19 and 0.08, respectively, for the proposed model, which indicates significant lower values when compared with those(1.23 and 0.47, respectively) calculated using *fib* 2010 model.

키워드 : 응력-변형률 관계, 바텀애시 골재, 기포, 경량 콘크리트

Keywords : Stress-strain relationship, Bottom ash aggregate, Air foam, Lightweight concrete

1. 서론

콘크리트의 응력-변형률 관계는 구조물의 설계와 해석에서 가장 기본적으로 이용되는 재료의 특성이다(Mun et al, 2013). 콘크리트의 응력-변형률의 관계는 사용된 재료들의 강도, 강성 및 밀도에 의한 재료적인 특성 뿐만 아니라 양생조건, 하중재하속도, 재하면의 구속정도 등의 다양한 변수에 의해서 영향을 받는다(Yang et al, 2014). 이에 따라 기존 연구자들은(Sim and Yang 2011; Mun et al, 2013; Lee 2019; Yang et al, 2011) 골재의 강도와 강성이 낮고 단위용적중량이 낮은 경량골재 콘크리트의 특성을 반영하기 위해서 응력-변형률 관계를 압축강도 및 단위용적중량의 함수로 제시하였다. 또한, Yang et al.(2014)은 경량 콘크리트에서 최대응력 이후 최대응력의 50%로 저하되는 변형률을 압축강도 및 단위용적중량의 함수로 일반화하여 최대응력 이후 취성적인

하강 기울기의 특성을 반영하였다. Lee(2013)도 기포 콘크리트에서 낮은 강성을 반영하기 위해서 탄성계수를 압축강도와 단위용적중량의 함수로 일반화하였다. 이와 같이 응력-변형률 관계는 사용되는 콘크리트의 특성을 직접적으로 반영한 구성방정식으로서의 정립이 필수적이다.

한편 단일 콘크리트로 활용되고 있는 저량의 기포가 첨가된 바텀애시 골재 콘크리트는 낮은 강도와 저밀도의 바텀애시 골재의 이용으로 응력-변형률관계에서 최대응력 시점까지는 일반적인 경량골재 콘크리트와 비슷한 특징을 갖는다(Lee 2019). 하지만, 최대응력 이후의 거동은 경량골재 콘크리트보다 취성적이다(Yang et al, 2019). 이는 기포 첨가에 의한 골재량이 감소함에 따라 최대응력 시 골재의 맞물림 효과가 감소하기 때문이다(Lee et al, 2017). 경량골재 콘크리트 보다도 취성적인 거동을 보이는 기포가 첨가된 바텀애시 골재 콘크리트는 기포량에 따라 콘크리트의

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

¹경기대학교 건축공학과 일반대학원 석사과정 (Department of Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon, 16227, Korea)

²경기대학교 건축공학과 교수 (Department of Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon, 16227, Korea)

³경기대학교 건축공학과 일반대학원 박사과정 (Department of Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon, 16227, Korea)

특성이 지배되므로 기포 첨가량에 따른 응력-변형률 모델의 예측이 필요하다. 하지만, 기포가 첨가된 바텀애시 골재 콘크리트에서 응력-변형률 관계에 대한 국내·외 연구는 미미한 수준이며, 특히 이를 이용한 내장재 및 외장재의 구조설계에 유용한 기초자료도 없는 실정이다.

이 연구에서는 바텀애시 골재와 기포를 융합한 경량 콘크리트(bottom ash based lightweight concrete, LWC-BF)의 압축 응력-변형률 관계를 평가하고, 이를 기반으로 기포 콘크리트의 특성을 반영할 수 있는 압축 응력-변형률의 모델을 제시하였다. 이를 위해 단위결합재량(B)과 기포 혼입률(R_b)을 주요변수로 LWC-BF의 9배합을 수행하였다. 콘크리트의 압축 응력-변형률 관계는 Yang et al.(2012)의 기본 방정식을 이용하여 제시하였다. 압축 응력-변형률 관계에서 탄성계수(E_c), 최대응력 시 변형률(ϵ_0) 및 최대응력 이후 최대응력의 50% 시점의 변형률(ϵ_{50})은 실험결과를 기반으로 단순모델로 제시하였다. 제시된 압축 응력-변형률 관계는 *fib* 2010(2010)와 함께 실험결과와 비교하였다.

2. 실험계획 및 측정항목

2.1 사용재료

Table 1에는 시멘트계 재료의 물리적 특성 및 화학적조성비를 나타내었다. 배합에 사용된 보통포틀랜드시멘트(ordinary Portland cement, OPC)의 밀도 및 비표면적은 각각 3.15g/cm^3 및 $3,284\text{cm}^2/\text{g}$ 이다. 그 외 시멘트계 재료인 고로슬래그(ground granulated blast-furnace slag, GGBS) 및 플라이애시(fly ash, FA)의 밀도는 각각 2.94g/cm^3 및 2.20g/cm^3 이고, 비표면적은 $4,355\text{cm}^2/\text{g}$ 및 $4,170\text{cm}^2/\text{g}$ 이다. 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)의 주요 화학적 조성은 CaO 및 SiO_2 로서 각각 전체 화학 조성비의 62.4% 및 21.7% 차지하고 있다. 그 외 시멘트계 재료인 GGBS의 주요 화학 조성비는 43.9%의 CaO와 33.5%의 SiO_2 이며, FA는 57.7%의 SiO_2 와 21.1%의 Al_2O_3 를 차지하고 있다. KS 기준(Korea Standards Association, 2018)에서 제시하고 있는 입도 분포를 만족하기 위해서 바텀애시 잔골재는 2mm 이하 및 2~4mm의 골재를 각각 7:3의 질량 비율로 혼합하였다. 이때의 바텀애시 잔골재 및 굵은 골재의 물리적 특성을 Table 2에 나타내었다. 굵은 골재 및 잔골재의 최대크기는 각각 13 및 4mm이며, 밀도는 각각 1.18 및 1.79g/cm^3 이다. 굵은 골재의 조립률 및 흡수율은 각각 6.55 및 15.3%이다. 잔골재의 조립률 및 흡수율은 2.74 및 11.1%이다. 바텀애시 골재는 일반적으로 $1,000\text{nm}\sim 10\mu\text{m}$ 의 범위를 갖는 공극이

Table 1. Physical properties and chemical composition of cementitious materials

Type	Physical properties		Chemical composition(%)					
	Density (g/cm^3)	Fineness (cm^2/g)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	LOI
OPC	3.15	3,260	21.7	5.3	3.1	62.4	1.6	0.8
GGBS	2.94	4,355	33.5	15.2	0.5	43.9	2.6	3.9
FA	2.20	4,170	57.7	21.1	6.4	4.3	1.8	3.9

OPC=ordinary Portland cement, GGBS=ground granulated blast-furnace slag, FA=fly ash, and LOI=loss on ignition.

Table 2. Physical properties of bottom ash aggregates

Type	Density (g/cm^3)	Fineness modulus	Absorption (%)	Porosity (%)
Fine	1.79	2.74	11.1	33.7
Coarse	1.18	6.55	15.3	46.1

대부분으로서(Lee 2019) 굵은 골재 및 잔골재의 공극률이 각각 46.1% 및 33.7%의 높은 수준에 있었다. 기포제는 밀도 1.06g/cm^3 및 고체 함유량이 35.8%인 암갈색의 동물성을 사용하였다. 감수제는 밀도 1.48g/cm^3 인 폴리카르본산계를 이용하였다.

2.2 실험계획 및 측정방법

Table 3에는 배합상세를 나타내었다. 배합은 B 에 따라 세 개의 그룹으로 구분하였다. 그룹 I, 그룹 II 및 그룹 III에서의 B 는 각각 450kg/m^3 , 500kg/m^3 및 550kg/m^3 이다. 모든 그룹에서 R_b 는 콘크리트의 전체용적 대비 0%, 10% 및 25%로 변화하였고, 물-결합재비(W/B) 및 잔골재율(s/a)은 각각 30% 및 42%로 고정하였다. 시멘트계 재료인 OPC, GGBS 및 FA는 각각 30%, 50% 및 20%로 구성하였다. Table 3에 나타낸 시험체 명에서 첫 번째 문자는 그룹을, 두 번째 숫자는 R_b 을 의미한다. 즉, I-0은 B 가 450kg/m^3 이면서 R_b 가 0%인 배합을 의미한다. 골재는 높은 흡수율에 의한 슬럼프 저하를 방지하기 위해서 3일 동안 프리웨팅 하였으며, 이후 1일간 음지에서 건조하였다. 배합은 바텀애시 골재와 결합재를 투입하여 3분간 충분히 건비빔 한 후 습 비빔을 진행하였다. 이때 배합은 유동성을 확보하기 위해서 고성능 감수제를 투입하였다. 기포는 3%로 희석된 동물성 기포제와 압축공기를 이용하여 제조하였다. 제조된 기포를 배합에 마지막에 투입한 후 2분 이상 혼합하였다.

Table 3. Mixture proportion of concrete specimens

Group	Specimens	W/B (%)	S/a (%)	B (kg/m ³)	R _a (%)	Proportions(%)			S.P (%)		
						OPC	GGBS	FA			
I	I-0	30	42	450	0	30	50	20	0.70		
	I-10				10				0.13		
	I-25				25				0.02		
II	II-0			0	0.03						
	II-10			10	0.03						
	II-25			25	0.03						
III	III-0			550	0				0	0.12	
	III-10								10		0.12
	III-25								25		0.01

W/B=water to binder ratio by weight, S/a=fine aggregate to total aggregates ratio by volume, B=contents of cementitious materials, R_a=foam volume ratio, and S.P=content of superplasticizer relative to B.

콘크리트의 압축 응력-변형을 관계는 KS F 2403(2014)에서 제시하고 있는 ϕ100×200mm의 공시체를 이용하여 측정하였다. 공시체의 가력면은 편심의 영향을 최소화하기 위해서 연마하였다. 가력은 500kN 용량의 만능시험기를 이용하였으며, 0.1mm/min 속도로 변위제어 하였다. 하중 증가에 따른 시험체의 수직변위는 컴퓨터와 전기저항계이자를 이용하여 측정하였다(Yang et al. 2011). 압축 응력-변형을 관계에서 콘크리트의 E_c는 ASTM C 469-14(2014)에서 제시하고 있는 원점과 최대응력의 40%의 점을 연결하는 직선의 기울기로 산정하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 압축 응력-변형을 관계

Fig. 1에는 전형적인 LWC-BF의 압축 응력-변형을 관계를 나타

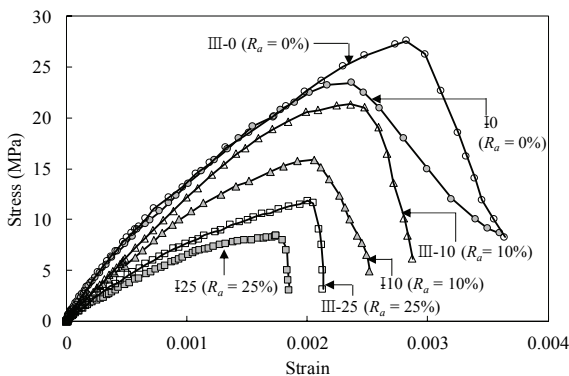


Fig. 1. Typical stress-strain curves

Table 4. Summary of test results

Group	Specimens	w _c (kg/m ³)	f _{ck} (MPa)	E _c (MPa)	ε ₀	ε ₅₀
I	I-0	1,524	23.6	15,116	0.0024	0.0033
	I-10	1,424	15.9	10,336	0.0021	0.0025
	I-25	1,287	8.5	6,068	0.0017	0.0018
II	II-0	1,585	26.7	17,005	0.0025	0.0029
	II-10	1,454	18.0	12,055	0.0023	0.0027
	II-25	1,316	9.4	7,056	0.0019	0.0020
III	III-0	1,621	27.6	17,843	0.0028	0.0034
	III-10	1,549	22.2	14,545	0.0024	0.0028
	III-25	1,345	11.8	7,880	0.0020	0.0021

w_c=density, f_{ck}=compressive strength, E_c=modulus of elasticity, ε₀=strain at maximum stress, and ε₅₀=50% of maximum stress in descending branch

내었다. 압축 응력-변형을 관계에서 초기강성과 ε₀는 R_a가 증가할 수록 감소하였으나, B에 의해 미치는 영향은 미미하였다(Table 4). 최대응력 이후의 기울기도 B보다 R_a에 의해 미치는 영향이 현저하였다. 특히, R_a가 25%로 첨가된 시험체의 최대응력 이후의 응력감소 기울기는 기포가 혼입되지 않은 시험체보다 약 2.43배 높았다. 이는 콘크리트 내부에 기포의 증가가 균열을 저항할 수 있는 골재량을 감소시키고 골재와 페이스트의 계면에서 점착력을 저하시키기 때문이다(Lee 2019).

3.2 탄성계수

LWC-BF의 E_c는 R_a와 f_{ck}에 현저한 영향을 받았다(Table 4). 기포가 혼입되지 않은 시험체의 E_c는 15,116~17,843MPa로서 R_a가 25%인 시험체보다 약 2.39배 높았다. 모든 그룹에서 LWC-BF의 E_c는 f_{ck}가 10% 증가함에 따라 약 9.4% 증가하였다. Fig. 2에는

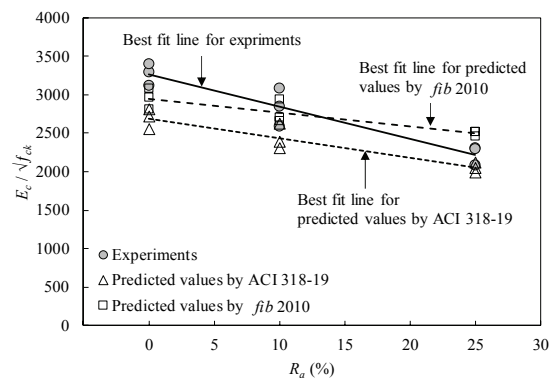


Fig. 2. Comparison of measured and predicted E_c/√f_{ck}

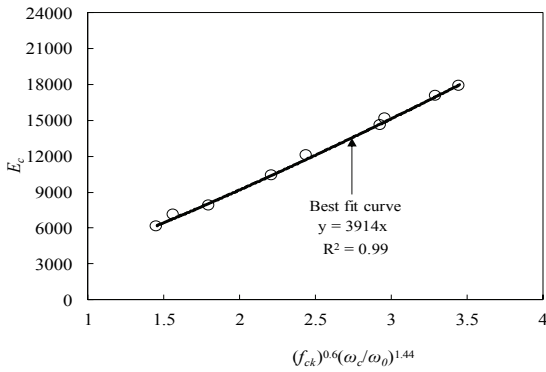


Fig. 3. Regression analysis for E_c

$E_c/\sqrt{f_{ck}}$ 에 대한 LWC-BF의 실험결과와 ACI 318-19(2019) 및 fib 2010(2010)의 예측값을 비교하였다. ACI 318-19(2019)은 LWC-BF의 $E_c/\sqrt{f_{ck}}$ 를 안전측으로 예측하였다. fib 2010(2010)도 대체적으로 실험결과를 안전측으로 예측하였지만, 그 안전측에 정도는 R_a 가 증가함에 따라 감소하였다. 이에 따라 fib 2010(2010)은 R_a 가 25% 이상인 시험체의 $E_c/\sqrt{f_{ck}}$ 를 약 11% 높게 예측하였다. 따라서 E_c 는 R_a 의 증가에 따른 설계기준들의 안전측의 감소에 대한 문제점을 보완하기 위해서 실험결과에 기반한 회귀분석으로부터 다음과 같이 일반화 할 수 있었다(Fig. 3).

$$E_c = 3914 \left[(f_{ck})^{0.6} \left(\frac{w_c}{w_0} \right)^{1.44} \right] \quad (1)$$

여기서, $w_0 (=2,300\text{kg/m}^3)$ 는 콘크리트 단위용적중량의 참고값을 의미한다.

3.3 최대응력 시 변형률

LWC-BF의 ϵ_0 은 R_a 가 증가하거나 B 가 감소할수록 감소하였다(Table 4). 기포가 혼입되지 않은 시험체의 ϵ_0 은 0.0024~0.0028로서 R_a 가 25%인 시험체보다 약 1.38배 높았다. 또한 그룹 I ($B=450\text{kg/m}^3$) 시험체들의 ϵ_0 은 0.0017~0.0024의 범위로서 그룹 III($B=550\text{kg/m}^3$) 보다 약 14% 낮았다. Fig. 4에는 $\epsilon_0/\sqrt{f_{ck}}$ 에 대한 LWC-BF의 실험결과와 fib 2010(2010)의 예측값을 비교하였다. fib 2010(2010)은 R_a 에 관계없이 LWC-BF의 실험결과를 낮게 예측하였다. 기포 혼입률(R_a)이 0% 및 25%인 시험체들의 실험결과에 대한 설계기준의 비는 fib 2010(2010)에서 평균 1.47에 있었다. 예측의 정확도를 개선하기 위해서 실험결과에 기반한 회귀분석으로부터 LWC-BF의 ϵ_0 은 다음과 같이 일반화 할 수 있었다(Fig. 5).

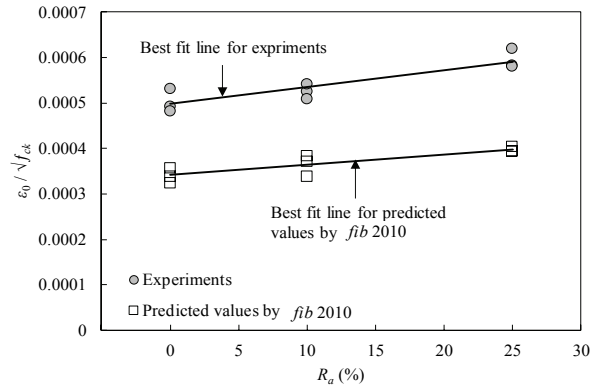


Fig. 4. Comparison of measured and predicted $\epsilon_0/\sqrt{f_{ck}}$

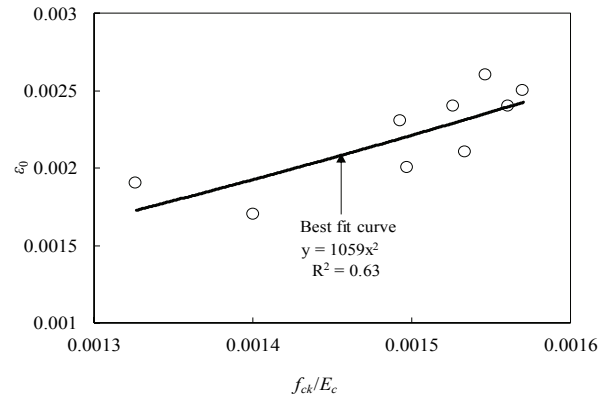


Fig. 5. Regression analysis for ϵ_0

$$\epsilon_0 = 1059 \left(\frac{f_{ck}}{E_c} \right)^2 \quad (2)$$

3.4 최대응력 이후 50%의 하강지점에서의 변형률

압축 응력-변형률 관계에서 최대응력 이후의 거동은 ϵ_{50} 로 평가될 수 있다(Yang et al. 2014; Mun et al. 2013). 따라서 최대응력 이후 하강 기울기는 Yang et al.(2014)에 의해 제시된 원점과 ϵ_{50} 을 잇는 직선의 기울기로 산정하였다. Table 5에 나타난 바와 같이 LWC-BF의 ϵ_{50} 은 R_a 가 증가할수록 감소하였으나, B 에 의해 미치는 영향은 미미하였다. 기포가 혼입되지 않은 시험체의 ϵ_{50} 은 0.0029~0.0034의 범위로서 R_a 가 25%인 시험체보다 약 1.63배 높았다. 반면, B 가 450 kg/m^3 인 그룹 I의 ϵ_{50} 은 0.0018~0.0033의 범위로서 B 가 550 kg/m^3 인 그룹 III와 비슷한 수준에 있었다. 위의 실험결과를 기반으로 LWC-BF의 ϵ_{50} 은 f_{ck} 와 w_c 의 함수로 다음과 같이 일반화 할 수 있었다(Fig. 6).

Table 5. Comparisons of NRMSE calculated from measured and predicted stress-strain curves

Group	Specimens	R_a (%)	f_{ck} (MPa)	Comparisons of measured and predicted NRMSE	
				fib 2010	This study
I	I-0	1,524	23.6	1.09	0.17
	I-10	1,424	15.9	1.11	0.17
	I-25	1,287	8.5	0.86	0.07
II	II-0	1,585	26.7	0.93	0.19
	II-10	1,454	18.0	1.04	0.15
	II-25	1,316	9.4	0.92	0.18
III	III-0	1,621	27.6	2.28	0.29
	III-10	1,549	22.2	1.75	0.33
	III-25	1,345	11.8	1.14	0.18
Total			γ_m	1.23	0.19
			γ_s	0.47	0.08

NRMSE=normalized root mean squares error, and γ_m and γ_s =mean and standard deviation of NRMSE values.

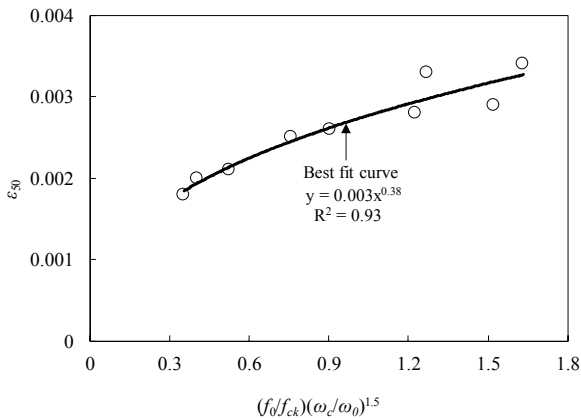


Fig. 6. Regression analysis for ϵ_{50}

$$\epsilon_{50} = 0.003 \left[\left(\frac{f_0}{f_{ck}} \right) \left(\frac{w_c}{w_0} \right)^{1.5} \right]^{0.38} \quad (3)$$

여기서, f_0 (=10MPa)는 콘크리트 압축강도의 참고값을 의미한다.

4. 압축 응력-변형률 모델의 제시

4.1 기본 곡선 방정식

압축 응력-변형률 모델에 대한 기본 방정식은 상승구간과 하강

구간을 모사할 수 있는 다음의 Yang et al.(2012)의 모델을 이용하였다.

$$y = \frac{(\beta_1 + 1)x}{x^{\beta_1 + 1} + \beta_1} \quad (4)$$

여기서, $y(=f_c/f_{ck})$ 는 재령 28일 압축강도로 무치원화된 압축응력을, $x(=\epsilon_c/\epsilon_0)$ 는 최대응력 시 변형률로 무치원된 임의의 변형률 값을, f_c 는 임의의 변형률(ϵ_c)일 때의 압축응력을, β_1 는 상승 및 하강 구간에서의 기울기를 나타내는 계수를 의미한다. Yang et al.(2012)에 의해 제시된 모델은 종 모양의 비선형 포물선으로서 방정식 구성을 위한 E_c , ϵ_0 및 ϵ_{50} 의 정보가 필요하다. 식(4)에서 상승 및 하강구간의 기울기를 나타내는 계수 β_1 는 E_c 와 ϵ_{50} 의 값으로부터 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$0.4(X_a)^{\beta_1 + 1} + (0.4 - X_a)\beta_1 - X_a = 0 \quad (5)$$

$$0.5(X_d)^{\beta_1 + 1} + 0.5(1 - 2X_d)\beta_1 - X_d = 0 \quad (6)$$

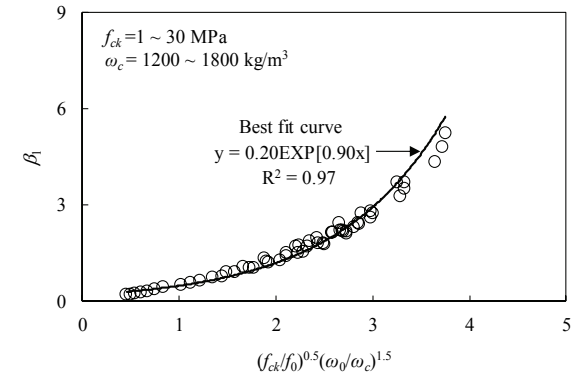
여기서, X_a 와 X_d 는 각각 $0.4f_{ck}/E_c\epsilon_0$ 및 ϵ_{50}/ϵ_0 이다. 식(5)와(6)으로부터 상승 및 하강구간의 β_1 는 E_c , ϵ_0 및 ϵ_{50} 에 의해 결정될 수 있다.

4.2 상승 및 하강구간의 β_1 의 결정

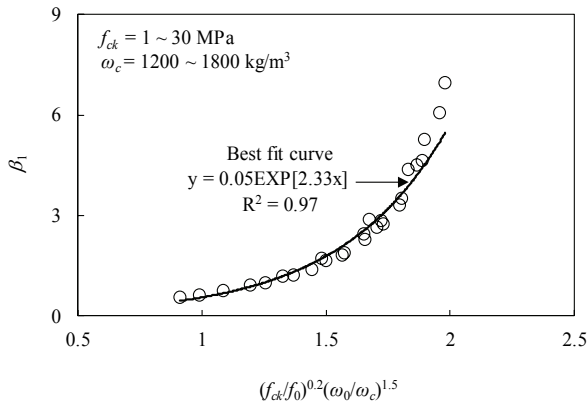
식(5)와 식(6)에서 기울기 계수인 β_1 는 Newton-Raphson의 수치해석기법을 활용하여 산정하였다. E_c , ϵ_0 및 ϵ_{50} 은 실험결과를 기반으로 제시된 식(1)~(3)을 이용하였다. 기울기 계수인 β_1 의 모델링에 사용된 변수는 f_{ck} 와 w_c 로 결정하였으며, 이들의 변수범위를 각각 1~30MPa 및 1,200~1,800kg/m³로 설정하였다. 이들 변수범위에서 산정된 값들을 이용하여 상승 및 하강 구간의 β_1 은 다음과 같이 제시 될 수 있었다(Fig. 7).

$$\beta_1 = 0.20 \text{EXP} \left[0.90 \left(\frac{f_{ck}}{f_0} \right)^{0.5} \left(\frac{w_0}{w_c} \right)^{1.5} \right] \quad \text{for } \epsilon_c \leq \epsilon_0 \quad (7,a)$$

$$\beta_1 = 0.05 \text{EXP} \left[2.33 \left(\frac{f_{ck}}{f_0} \right)^{0.2} \left(\frac{w_0}{w_c} \right)^{1.5} \right] \quad \text{for } \epsilon_c > \epsilon_0 \quad (7,b)$$



(a) Ascending branch



(b) Descending branch

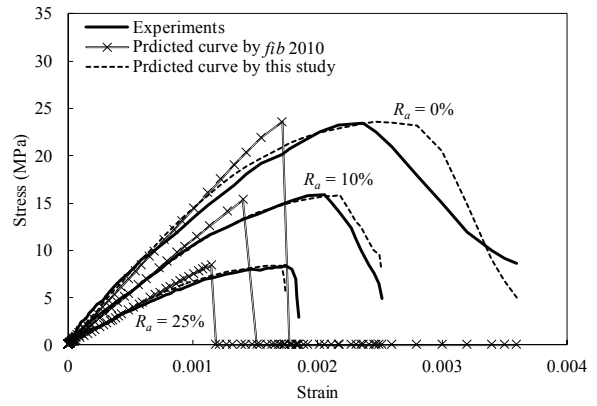
Fig. 7. The value of β_1 obtained from numerical analysis

5. 실험결과와 제안모델의 비교

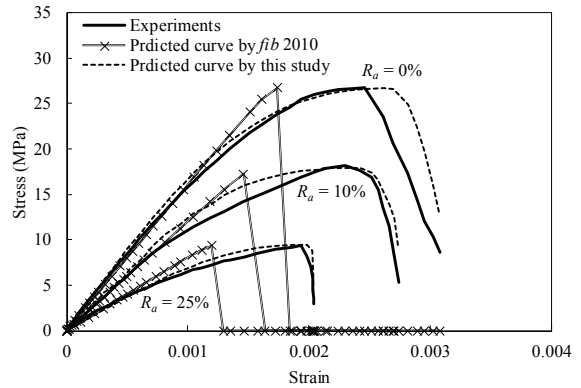
Fig. 8에는 LWC-BF의 압축 응력-변형률 관계에 대한 실험결과와 제시된 모델과 비교하였다. 동일 그림에는 fib 2010(2010)에 의해 예측된 곡선도 나타내었다. 예측값들은 다음의 평균 제곱근 오차(normalized root-mean square error, NRMSE)를 이용하여 실험결과와의 정확성 정도를 평가하였다.

$$NRMSE = \frac{1}{(f_c)_m} \sum \left[\frac{((f_c)_{Exp.} - (f_c)_{Pre.})^2}{n} \right]^{1/2} \quad (8)$$

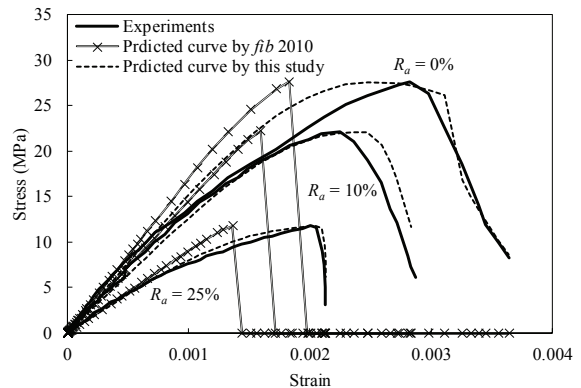
여기서, $(f_c)_m$ 은 측정된 압축응력의 평균값을, $(f_c)_{Exp.}$ 은 실험결과 값, $(f_c)_{Pre.}$ 은 제안모델에 의해 산정된 예측값을, n 은 측정된 데이터 개수를 의미한다. 일반적으로 NRMSE는 그 값이 낮을



(a) Group I ($B=450\text{kg/m}^3$)



(b) Group II ($B=500\text{kg/m}^3$)



(c) Group III ($B=550\text{kg/m}^3$)

Fig. 8. Comparisons of measured and predicted stress-strain curves

수록 예측모델의 정확도가 높음을 의미한다. fib 2010(2010)는 LWC-BF의 압축 응력-변형률관계에서 초기강성을 다소 높게 평가한 반면, 최대응력 이후의 하강 기울기를 낮게 평가하였다. 이에

따라 실험결과와 *fib* 2010(2010)로 예측된 곡선에서 NRMSE의 평균(γ_m) 및 표준편차(γ_s)는 각각 1.23와 0.47이었다(Table 5). *fib* 2010(2010)가 콘크리트 단위용적중량(w_c)의 함수를 포함하고 있음에도 불구하고 실험결과와의 큰 편차의 이유는 기포의 혼입이 경량골재 콘크리트의 역학적 특성을 급격히 저하시키기 때문이다. 반면, 제안모델은 초기강성, 최대응력시 변형률 및 최대응력 이후의 하강 기울기에 대한 실험결과를 비교적 잘 예측하였는데, NRMSE의 평균(γ_m) 및 표준편차(γ_s)가 0.19과 0.08로 *fib* 2010(2010) 보다 현저하게 낮았다.

6. 결론

1. 바텀애시 골재와 기포를 융합한 경량 콘크리트(LWC-BF)의 압축 응력-변형률 관계는 기포의 혼입률(R_b)이 증가함에 따라 초기강성이 감소하며, 특히 최대응력 이후 응력감소 기울기가 급격히 증가하였다.
2. ACI 318-19은 LWC-BF의 탄성계수(E_c)를 낮게 예측한 반면, *fib* 2010은 R_b 가 25% 이상인 시험체들에 대해 약 11% 높게 예측하였다.
3. *fib* 2010(2010)은 LWC-BF의 최대응력시 변형률(ϵ_0)을 R_b 에 관계없이 낮게 평가하였다.
4. *fib* 2010은 LWC-BF의 압축 응력-변형률 관계에서 초기강성과 최대응력 이후의 하강 기울기를 불안전측으로 예측하였는데, 무차원된 평균 제곱근 편차(NRMSE)의 평균(γ_m) 및 표준편차(γ_s)가 1.23와 0.47이었다.
5. 제시된 모델은 R_b 에 관계없이 압축 응력-변형률의 실험결과를 비교적 잘 예측하였는데, 무차원된 평균 제곱근 편차(NRMSE)의 평균(γ_m) 및 표준편차(γ_s)가 0.19과 0.08이었다.

Conflict of interest

None.

감사의 글

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

References

- ACI Committee 318-19. (2019). Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute.
- ASTM C 469. (2010). Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, American Society for Testing and Materials.
- Comit Euro-International du Beton. (2010). *fib* Model Code for Concrete Structures 2010, International Federation for Structural Concrete.
- Korean Standards Association. (2018). Concrete Aggregate[KS F 2527], Korean Standards Association.
- Lee, K.H. (2013). Development of Mixture Proportioning Model for Low-Density High-Strength Foamed Concrete, Master's Thesis, Kyonggi University, Korea [in Korean].
- Lee, K.H. (2019). 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, Korea [in Korean].
- Lee, H.K., Gong, H.M., Beak, S.M., Kim, W.S., Kwak, Y.K. (2013). An experimental study on the size effect of reinforced concrete members with stirrups using recycled coarse aggregates, *Journal of the Korea Society of Waste Management Institute*, **34(2)**, 188-198 [in Korean].
- Lee, K.I. (2019). Compressive Strength and Thermal Conductivity of Lightweight Concrete using Bottom Ash Aggregates and Air Foam, Master's Thesis, Kyonggi University [in Korean].
- Mun, J.H., Mun, J.S., Yang, K.H. (2013). Stress-strain relationship of heavyweight concrete using magnetite aggregate, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, **29(8)**, 85-92 [in Korean].
- Sim, J.I., Yang, K.H. (2011). Mechanical properties of lightweight aggregate concrete according to the substitution rate of natural sand and maximum aggregate size, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **23(5)**, 551-558 [in Korean].
- Yang, K.H., Song, J.K., Lee, K.H. (2011). A stress-strain relationship of alkali-activated slag concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **23(6)**, 765-772 [in Korean].
- Yang, K.H., Mun, J.H., Cho, M.S., Kang, H.K. (2014). Stress-strain model for various unconfined concretes in compression, *ACI Structural Journal*, **111(4)**, 819-826.

바텀애시 골재와 기포를 융합한 경량 콘크리트의 압축 응력-변형률 모델

이 연구의 목적은 바텀애시 골재와 기포를 융합한 경량 콘크리트(bottom ash based lightweight concrete, LWC-BF)의 압축 응력-변형률 모델 제시이다. Yang 등이 제시한 응력-변형률 곡선식에서 LWC-BF 9 배합의 실험으로부터 얻은 탄성계수, 최대응력 시 변형률 그리고 최대응력 이후 최대응력의 50% 응력 시 변형률 값들을 이용하여 상승부와 하강부의 기울기를 결정하였다. 제시된 모델은 기포 혼입율의 증가와 함께 감소되는 초기 강성 및 증가되는 하강부 기울기를 잘 반영하면서 실험결과와 잘 일치하였다. 제시된 모델의 예측값과 실험값의 평균제곱근 오차로부터 결정된 평균값과 표준편차는 각각 0.19 와 0.08로서 각각 1.23과 0.47 값을 보이는 fib 2010 모델에 비해 현저히 낮았다.