

## 콘크리트의 역학적 특성에 대한 바텀애시 골재 양의 영향

# Effect of Bottom Ash Aggregate Contents on Mechanical Properties of Concrete

안태호<sup>1</sup> · 양근혁<sup>2</sup> · 하정수<sup>3\*</sup>

Tae-Ho Ahn<sup>1</sup> · Keun-Hyeok Yang<sup>2</sup> · Jung-Soo Ha<sup>3\*</sup>

(Received September 1, 2020 / Revised December 20, 2020 / Accepted December 21, 2020)

The present study examined the effect of bottom ash aggregate contents on the compressive strength gain and mechanical properties(modulus of elasticity and rupture and splitting tensile strength) of concrete. Main test parameters were water-to-cement ratio and bottom ash aggregate contents for replacement of natural sand. Test results showed that the 28-days compressive strength of concrete and mechanical properties normalized by the compressive strength tended to decrease with the increase in bottom ash fine aggregate content. When compared with *fib* 2010 model equations, bottom ash aggregate concrete exhibited the following performances: lower rates of compressive strength gain at early ages but greater rates at long-term ages; slightly higher measurements for modulus of elasticity and rupture; and lower measurements for splitting tensile strength.

**키워드** : 바텀애시 골재, 역학적 특성, 천연모래, *fib* 2010

**Keywords** : Bottom ash aggregates, Mechanical properties, Natural sand, *fib* 2010

## 1. 서론

산업부산물인 바텀애시는 전체 발생량의 10~15% 정도를 차지하지만 재활용이 어려워 대부분 매립되거나 폐기되고 있다(Lee 2015). 천연골재 대체를 위한 바텀애시의 재활용은 천연골재의 보존과 환경부하 저감 측면에서 효율적인 가치를 기대할 수 있다(Park 2017). 더불어, 바텀애시 골재의 낮은 밀도는 콘크리트의 단위용적중량을 줄이고, 구조단면크기를 감소시켜 건물의 공간 활용도에 장점을 가질 수 있다(Neville 2011). 하지만 바텀애시 골재는 미연탄소가 비교적 다량 포함되어 있으며, 다공성 구조를 갖는다. 이에 따라 골재로서 바텀애시는 흡수율이 높으며, 강성과 강도가 낮은 특성을 갖는다. 이러한 특성들로 콘크리트에서 천연골재를 대체하기 위한 바텀애시의 재활용은 여전히 제한적이다. Yuksel and Genc(2007)은 콘크리트에서 바텀애시의 골재 재활용을 검토

하였다. Singh and Siddique(2013)는 바텀애시 골재의 거친 질감 및 다공성 구조는 콘크리트의 유동성을 급격히 감소시킬 수 있음을 보였다. Ji(2020)은 바텀애시 골재의 치환율이 증가함에 따라 압축강도는 감소하는 경향을 나타내었다. 하지만 Kim(2015)은 천연모래와 유사한 수준의 입도분포를 갖게 파쇄된 바텀애시는 30% 치환에서 천연모래 100%를 사용한 모르타르보다 높은 압축강도 발현이 가능함을 보였다. 그러나 바텀애시 골재를 활용한 콘크리트의 실험 자료는 유동성과 압축강도 발현에 중점을 두고 있어 설계단계에서 요구되는 재료의 역학적 특성 등에 대해서는 여전히 부족한 실정이다.

본 연구의 목적은 바텀애시 골재를 활용한 콘크리트의 압축강도 발현 및 탄성계수, 쪼갬 인장강도 및 파괴계수 등의 역학적 특성을 평가하는 것이다. 콘크리트 배합변수로서 천연모래에 대한 바텀애시 잔골재 치환율과 물-시멘트(Water to cement ratio,  $W/C$ )

\* Corresponding author E-mail: jungsha11@dankook.ac.kr

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

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

<sup>3</sup>단국대학교 건축학부 초빙교수 (Department of Architectural Engineering, Dankook University, Kyonggi-do, 16890, Korea)

Copyright © 2020 by Korean Recycled Construction Resources Institute

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

이다. 측정된 역학적 특성들은 경량골재 콘크리트(Lightweight aggregate concrete, LWAC)의 특성 및 설계기준식(ACI 318-14 2014, fib 2010 2013)들과 비교하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험계획

바텀애시 골재 콘크리트(Bottom ash aggregate concrete, BAAC)의 역학적 특성을 평가하기 위한 배합 실험에서의 주요 변수는  $W/C$ 와 천연모래에 대한 바텀애시 잔골재 치환율( $R_s$ )이다 (Table 1). 본 실험에서는 총 10개의 배합실험을 수행하였으며,  $W/C$  변화에 따라 두 개의 그룹으로 분류하였다. Yang(2019)을 분석한 결과  $W/C$ 가 0.35이하로 감소되면 압축강도 증진 비율이 미비한 수준으로 나타났다. 따라서 그룹 I의 경우는  $W/C$ 를 0.45로 하였으며, 그룹 II의 경우는  $W/C$ 를 0.375로 하였다. 그룹 I, II에서 단위 시멘트 양은 각각  $411\text{kg/m}^3$  및  $467\text{kg/m}^3$ 로 고정하였으며, 각 그룹에서의 천연모래 치환율은 0~100%까지 25%간격으로 변화하였다. 모든 배합에서 전체 골재 용적에 대한 잔골재 용적비 ( $S/a$ )는 0.45로 고정하였으며, 굵은 골재는 바텀애시 굵은 골재를 100% 사용하였다. 목표 공기량은  $5.5 \pm 1.5\%$ , 슬럼프는  $150 \pm 25\text{mm}$ 로 설정하였다.

Table 1. Mixture proportions of the concrete specimens

Group	Specimens	$W/C$	$S/a$	$R_s^{1)}$ (%)	Unit content( $\text{kg/m}^3$ )				
					Water	OPC	$F_s^{2)}$	$F_b^{3)}$	$C_b^{4)}$
I	I - 0	0.45	0.45	100	185	411	0	598	637
	I - 25			75			184	448	637
	I - 50			50			368	299	637
	I - 75			25			552	149	637
	I - 100			0			737	0	637
II	II - 0	0.375	0.45	100	175	467	0	590	629
	II - 25			75			182	443	629
	II - 50			50			364	295	629
	II - 75			25			546	148	629
	II - 100			0			728	0	629

<sup>1)</sup>Natural sand content for replacing bottom ash fine aggregates, <sup>2)</sup> $F_s$  : Natural sand, <sup>3)</sup> $F_b$  : bottom ash fine aggregate, <sup>4)</sup> $C_b$  : bottom ash coarse aggregate

### 2.2 사용재료 및 특성

모든 배합에서 사용된 결합재는 KS L 5201(2016)의 규격을 만족하는 1종 보통포틀랜드 시멘트(Ordinary portland cement,

OPC)이다. 사용된 OPC의 분말도 및 밀도는 각각  $3,360\text{cm}^2/\text{g}$ ,  $3,15\text{g}/\text{cm}^3$ 이다. 바텀애시 골재는 수도권 인근에 위치한 남동발전 영흥발전본부에서 건식처리 방식에 의해 발생된 저회를 파쇄한 것으로서, 잔골재는 2mm 이하, 2~5mm의 재료, 굵은 골재는 5~10mm 및 10~20mm의 크기의 재료를 선별하여 사용 하였다. 바텀 애시 골재의 입형은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 다소 불규칙적으로서 거친 표면과 다수의 내부 공극을 포함하였다. 이에 따라 바텀애시 잔골재와 굵은골재의 흡수율은 각각 4.9%와 8.8%로서 일반적인 잔골재의 흡수율 1~5%, 굵은골재의 흡수율 2.5%보다 높았다 (Lee 2009).

본 연구에서 사용된 바텀애시 골재는 KCS 14 20 20(2018)에서 제시하고 있는 구조용 콘크리트 골재로서 사용에 적합한 표준입도로 혼합하여 사용하였는데, 잔골재의 경우 2mm 이하 및 2~5mm 범위 골재의 혼합질량비 및 조립률은 각각 60:40 및 2.93으로 하였다(Fig. 2(a)). 굵은 골재의 경우에는 5~10mm 및 10~20mm의 재료를 혼합질량비 및 조립률은 각각 20:80 및 6.58로 하였다(Fig. 2(b)). 바텀애시 잔골재와 천연잔골재를 50% 혼합한 경우 조립률은 2.9로 나타났다(Fig. 2(c)). 사용된 골재들의 절건밀도와 단위

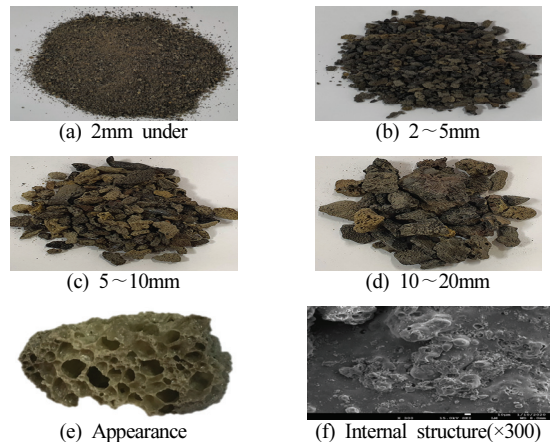
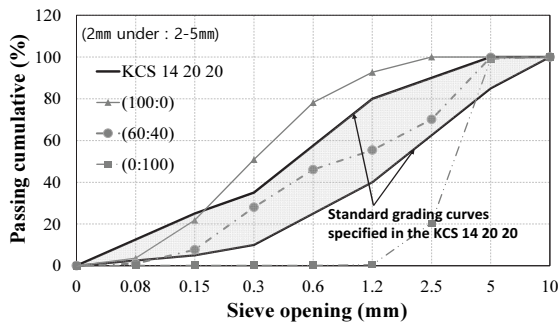


Fig. 1. Production type of bottom ash aggregate

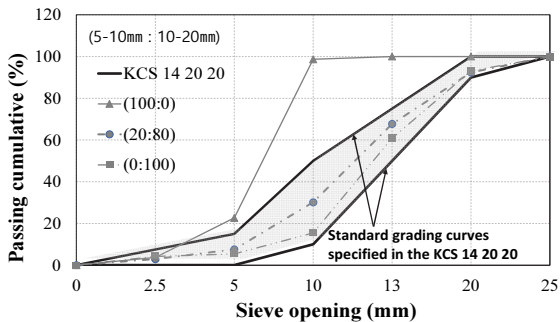
Table 2. Physical properties of aggregates used

Aggregate type	Bulk density ( $\text{kg/m}^3$ )	Oven dry density ( $\text{g/cm}^3$ )	Surface dry density ( $\text{g/cm}^3$ )	Absorption (%)	Fineness modulus	L. O. 1)	
Bottom ash	Fine aggregate	1,190	2.03	2.08	4.9	2.93	0.2
	Coarse aggregate	840	1.73	1.84	8.8	6.58	
Natural sand	1,580	2.55	2.60	2.1	2.87	-	

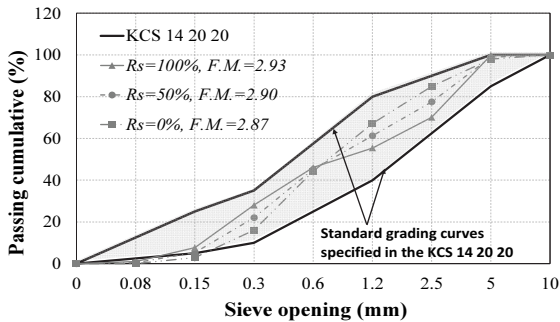
<sup>1)</sup>Loss on ignition



(a) Fine bottom ash granules with different sizes



(b) Coarse bottom ash granules with different sizes



(c) Fine bottom ash granules and natural sand

Fig. 2. Particle distribution curves of bottom ash granules with different sizes

용적질량은 바텀애시 잔골재의 경우 각각 2.03g/cm<sup>3</sup>와 1,190 kg/m<sup>3</sup>이며, 바텀애시 굵은골재의 경우 각각 1.73g/cm<sup>3</sup>와 840 kg/m<sup>3</sup>이며, 천연모래는 각각 2.55g/cm<sup>3</sup>와 1,580kg/m<sup>3</sup>이다(Table 2). 이에 따라 바텀애시 잔골재, 바텀애시 굵은골재 및 천연모래의 실적률은 각각 58.8%, 48.7% 및 61.8%로 평가되었다.

### 2.3 배합 및 실험방법

콘크리트 배합에서 사용된 모든 골재는 표면건조 내부포화 상태의 재료를 사용하였다. 특히 다공성의 바텀애시 골재의 경우 실

험 전 함수조건 제어를 위해 3일 동안 사전침수(Pre-wetting)를 하였으며, 수건으로 남아있는 표면에 물기를 제거하여 표면건조포화상태에 함수량을 측정하였다. 그 함수율을 기준으로 하여, 24시간 건조시 표면건조 함수율과 유사한 수준의 함수율 분포를 보였으므로 이를 통해 단위수량을 보정하였다. 콘크리트의 배합은 0.3m<sup>3</sup> 용량의 강제식 믹서기를 사용하였다.

굳지 않은 콘크리트의 슬럼프와 공기량은 각각 KS F 2402(2017) 및 KS F 2421(2016)에 따라 측정하였다. 굳은 콘크리트의 절건 단위질량은 재령 28일에서 시험체를 100±5℃의 온도에서 질량변화가 없을 때까지 건조시킨 후 질량과 부피 측정을 통해 산정하였다. 콘크리트의 압축강도는 KS F 2405(2017)에 따라 ϕ100×200mm 공시체를 이용하여 재령 3, 7, 28, 56 및 91일에 측정하였다. 콘크리트의 탄성계수( $E_c$ )는 측정된 응력-변형률 곡선에서 원점과 최대 응력의 40%점을 연결하는 할선의 기울기로 산정하였다. 콘크리트의 쪼갬인장강도( $f_{sp}$ ) 및 파괴계수( $f_r$ )는 각각 KS F 2423(2016)과 KS F 2408(2016)에 따라 측정하였다. 위의 역학적 특성 평가를 위한 실험들은 재령 28일에 수행하였다. 굳은 콘크리트의 역학적 특성 평가를 위한 공시체는 항온·항습(20℃, 상대습도 60%)의 환경에서 양생하였으며, 몰드는 재령 1일에서 탈형하였다.

### 3. 실험 결과

각 콘크리트 배합에서 측정된 실험결과는 Table 3에 요약하였다. 일반적으로 콘크리트 탄성계수, 인장강도 및 휨강도와 같은 역학적 특성들은 압축강도의 지수승에 비례한다(Neville 2011). 이를 고려하여 측정된 실험결과들은 재령 28일에서 측정된 압축강도의 루트승으로 무차원하여 분석하였다. 또한 설계기준에서 제시하는 안전성을 평가하기 위해 ACI 318-14(2014) 및 fib 2010(2013)의 설계식들을 LWAC에 준하여 적용하여 실험결과와 비교하였다(Table 4).

#### 3.1 초기 슬럼프

바텀애시 잔골재 콘크리트의 슬럼프 측정결과를 Fig. 3에 나타내었다. 바텀애시 골재는 충분한 프리웨팅을 시켰으며, W/C 비율이 낮고 충분한 점성을 확보하여 재료분리가 일어나지 않았다. 바텀애시 잔골재 치환율 변화에 따른 BAAC의 슬럼프 값은 W/C에 관계없이 바텀애시 잔골재 치환율이 감소할수록 유동성이 개선되는 경향을 나타내었다. 그룹 I의 경우에는 바텀애시 잔골재의 치

Table 3. Summary of test results

Group	Specimens	Slump (mm)	Air content (%)	Oven-dried density (kg/m <sup>3</sup> )	Compressive strength(MPa)					Modulus of elasticity		Splitting tensile strength		Modulus of rupture	
					3 days	7 days	28 days	56 days	91 days	$E_c$ (MPa)	$\frac{E_c}{\sqrt{f_{ck}}}$	$f_{sp}$ (MPa)	$\frac{f_{sp}}{\sqrt{f_{ck}}}$	$f_r$ (MPa)	$\frac{f_r}{\sqrt{f_{ck}}}$
I	I - 100	120	4.2	1,703	15.0	18.3	23.3	25.4	27.9	18,082	3,746	1.95	0.40	3.28	0.68
	I - 75	145	4.4	1,742	16.2	18.6	23.8	25.0	27.8	18,685	3,830	1.97	0.40	3.51	0.72
	I - 50	155	4.2	1,773	17.1	21.0	27.0	29.1	31.1	19,269	3,708	2.04	0.39	4.31	0.83
	I - 25	170	4.8	1,784	15.3	21.2	27.7	31.0	32.0	20,197	3,837	1.84	0.35	4.00	0.76
	I - 0	210	5.1	1,823	18.1	24.5	30.9	33.1	36.3	21,483	3,865	2.52	0.45	4.16	0.75
II	II - 100	130	4.6	1,775	18.9	20.2	27.4	28.3	30.4	20,100	3,840	2.09	0.40	3.91	0.75
	II - 75	165	4.4	1,780	21.3	24.1	28.3	30.9	34.5	20,944	3,937	1.94	0.36	3.90	0.73
	II - 50	160	4.9	1,800	21.3	24.6	28.8	32.7	34.8	21,827	4,067	1.96	0.37	3.82	0.71
	II - 25	180	5.1	1,828	22.6	25.9	30.3	30.9	35.4	21,954	3,988	2.11	0.38	4.07	0.74
	II - 0	220	5.5	1,852	23.7	27.8	32.6	34.5	38.0	22,058	3,863	2.64	0.46	4.44	0.78

Table 4. Comparisons of measured mechanical properties and predictions by code provisions and empirical equations

Group	Specimens	$(E_c)_{Pre.}$ (MPa)			$(f_{sp})_{Pre.}$ (MPa)		$(f_r)_{Pre.}$ (MPa)			$\frac{(E_c)_{Exp.}}{(E_c)_{Pre.}}$			$\frac{(f_{sp})_{Exp.}}{(f_{sp})_{Pre.}}$		$\frac{(f_r)_{Exp.}}{(f_r)_{Pre.}}$		
		ACI 318-14	fib 2010	Lee et al.	fib 2010	Lee et al.	ACI 318-14	fib 2010	Lee et al.	ACI 318-14	fib 2010	Lee et al.	fib 2010	Lee et al.	ACI 318-14	fib 2010	Lee et al.
I	I - 100	14,587	17,079	15,756	2.12	2.67	2.24	3.52	3.97	1.24	1.06	1.15	0.92	0.73	1.46	0.93	0.83
	I - 75	15,252	17,998	16,178	2.17	2.71	2.34	3.61	4.06	1.23	1.04	1.15	0.91	0.73	1.50	0.97	0.86
	I - 50	16,681	19,445	17,061	2.39	2.86	2.58	3.97	4.35	1.16	0.99	1.13	0.86	0.73	1.67	1.09	0.99
	I - 25	17,053	19,855	17,286	2.43	2.90	2.69	4.05	4.41	1.18	1.02	1.17	0.76	0.64	1.49	0.99	0.91
	I - 0	18,605	21,502	18,203	2.65	3.05	2.93	4.41	4.70	1.15	1.00	1.18	0.95	0.83	1.42	0.94	0.89
II	II - 100	16,832	19,584	17,153	2.41	2.88	2.43	4.01	4.38	1.19	1.03	1.17	0.87	0.73	1.75	1.06	0.97
	II - 75	17,179	19,908	17,361	2.47	2.92	2.56	4.10	4.45	1.22	1.05	1.21	0.79	0.66	1.53	0.95	0.88
	II - 50	17,623	20,477	17,626	2.51	2.95	2.66	4.18	4.51	1.24	1.07	1.24	0.78	0.66	1.44	0.91	0.85
	II - 25	18,499	21,480	18,141	2.62	3.02	2.82	4.36	4.66	1.19	1.02	1.21	0.81	0.70	1.45	0.93	0.87
	II - 0	19,568	22,592	18,756	2.77	3.13	3.01	4.61	4.86	1.13	0.98	1.18	0.99	0.84	1.52	1.00	0.91
Mean									1.19	1.02	1.18	0.86	0.72	1.52	0.98	0.90	
Standard deviation									0.04	0.03	0.03	0.08	0.07	0.11	0.06	0.05	

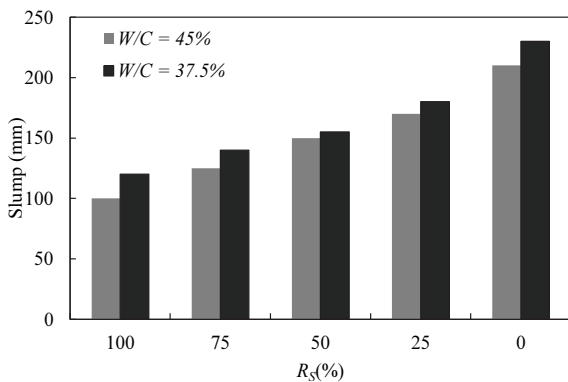


Fig. 3. Initial slump of fresh concrete

환율이 0%인 경우의 슬럼프 값은 210mm로 가장 우수한 유동성을 보였다. 치환율 50% 및 100%인 경우에는 슬럼프가 각각 155mm 및 120mm였으며,  $R_s$ 가 0%인 실험체에 비해 각각 26% 및 43% 낮은 유동성을 보였다. 그룹 II의 경우에도  $R_s$ 가 0%인 경우의 슬럼프가 220mm로 가장 우수한 유동성을 보였다.  $R_s$ 가 50% 및 100%인 경우에는 슬럼프가 각각 160mm 및 130mm였으며, 이들은  $R_s$ 가 0%인 실험체에 비해 각각 27% 및 41% 낮은 유동성을 보였다. 결과적으로 본 실험에서 BAAC는 W/C 변화에 관계없이  $R_s$ 가 높을수록 유동성이 감소됨을 보였는데, 바텀애시 골재의 경우 천연모래에 비해 다공성의 표면을 가짐에 따라 배합수 일부를 흡수한 영향 및 더 거칠고 불규칙적인 입형 그리고 미연탄소분의 증가

로 인해 콘크리트 유동성이 감소된 것으로 판단된다(Park 2017).

### 3.2 압축강도

BAAC의 강도발현은  $R_s$ 가 100%에서 0%로 감소함에 따라 증가하는 결과를 보였다. 일반적으로 바텀애시 골재는 천연 골재에 비해 강도와 강성이 낮다. 이에 따라 바텀애시 골재 콘크리트에서 균열면은 주로 골재를 관통하면서 진전되며, 이는 콘크리트 강도 감소의 주요 원인이 된다(Ji 2019). 재령 28일에서의 강도발현은  $W/C$ 가 0.45인 그룹 I의 경우  $R_s$ 가 100% 시험체가 23.3MPa로 가장 낮았으며,  $R_s$ 가 25%씩 감소함에 따라 각각 2%, 16%, 19% 및 33% 증가하는 결과를 보였다.  $R_s$ 가 0%인 시험체의 재령 28일 압축강도는 30.9MPa로 그룹 I 시험체중 가장 높은 결과를 보였다.  $W/C$ 가 0.375인 그룹 II의 경우  $R_s$ 가 100% 시험체가 27.4MPa로 가장 낮았으며,  $R_s$ 가 25%씩 감소함에 따라 각각 3%, 5%, 11% 및 19% 증가하는 결과를 보였다. 그룹 I의 측정결과와 마찬가지로  $R_s$ 가 0%인 시험체의 재령 28일 압축강도는 32.6MPa로 그룹 II 시험체중 가장 높은 결과를 보였다. 더불어 BAAC의 압축강도 발현은  $W/C$ 가 더 낮은 그룹 II가 그룹 I에 비해 더 낮았는데, 재령이 경과함에 따라 그 발현 수준은 큰 차이를 보이지 않아  $W/C$ 에 대한 영향이 작아지는 것으로 나타났다. 재령에 따라 압축

강도는  $W/C$ 가 0.375일 때  $W/C$ 가 0.45 대비 평균적으로 3일, 7일, 28일, 56일 및 91일에서 각각 1.32배, 1.19배, 1.12배, 1.10배 및 1.12배로 나타났다. 재령변화에 따른 BAAC의 압축강도 발현율은 Fig. 4에 나타내었다. 여기서 그림의 세로축은 각 시험체의 재령별 압축강도( $f'_c(t)$ )를 재령 28일 압축강도( $f_{ck}$ )로 무차원한 값이다. 재령 28일 압축강도에 대한 재령 3일에서의 압축강도 비는 그룹 I 시험체들에서는 0.55~0.68 범위에, 그룹 II에서는 0.69~0.75 범위에 있었다. 재령 28일 압축강도에 대한 재령 91일에서의 압축강도비는 그룹 I에서는 1.15~1.20 범위에, 그룹 II에서는 1.11~1.22 범위에 있었다. 이 값은 Lee et al.(2018)이 제시한 소성바텀애시 및 준설토 기반의 인공경량골재 콘크리트(Lightweight aggregate concrete using expanded bottom ash and dredged soil granules, LWAC-BS)의 재령 3일 및 91일에서의 압축강도 비 값인 0.49~0.83 및 1.14~1.41와 유사한 수준이었다.

KDS 14 20 01(2018) 및 fib 2010(2013)에서는 콘크리트의 재령별 압축강도( $f'_c(t)$ ) 예측을 위한 제안 모델로서 다음 식과 같이 제시하고 있다.

$$f'_c(t) = \beta_{cc}(t) \times f_{ck} \tag{1}$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp\left\{s_1 \left[1 - \left(\frac{28}{t}\right)^{\alpha_1}\right]\right\} \tag{2}$$

여기서,  $\beta_{cc}(t)$ 는 각 재령에서의 압축강도 발현율,  $s_1$ 와  $\alpha_1$ 는 재령별 압축강도의 발현속도에 대한 상수,  $t$ 는 콘크리트의 재령(일)이다. KDS 14 20 01(2018)의 경우 시멘트의 종류 및 양생방법에 따라  $s_1$ 을 0.12~0.40 범위의 값을 제시하고 있으며, 바텀애시 골재 콘크리트에 대한 고려를 하고 있지 않다. fib 2010(2013)에서는 경량골재 콘크리트의 경우 사용되는 경량골재의 강도에 따라  $s_1$ 의 값을 고강도는 0.05, 저강도는 0.25를 적용하도록 제시하고 있으나, 이 또한 바텀애시골재 사용에 대한 고려를 하고 있지 않다. 이 연구에서는 압축강도 발현속도에 대한 상수  $\alpha_1$ 의 값을 0.5를 적용하여 BAAC의 압축강도 발현 예측을 위한  $s_1$ 의 값을 회귀분석한 결과 그 범위는 0.09부터 0.19까지 있었는데, 이 값은  $R_s$ 가 감소할수록 증가하는 경향을 보였다.

### 3.3 탄성계수

바텀애시골재 콘크리트의 재령 28일 압축강도 루트승으로 무차원 시킨 탄성계수와 단위용적질량과의 관계는 Fig. 5와 같다. 비교를 위해 ACI 318-14(2014) 및 fib 2010(2013)의 예측값 및

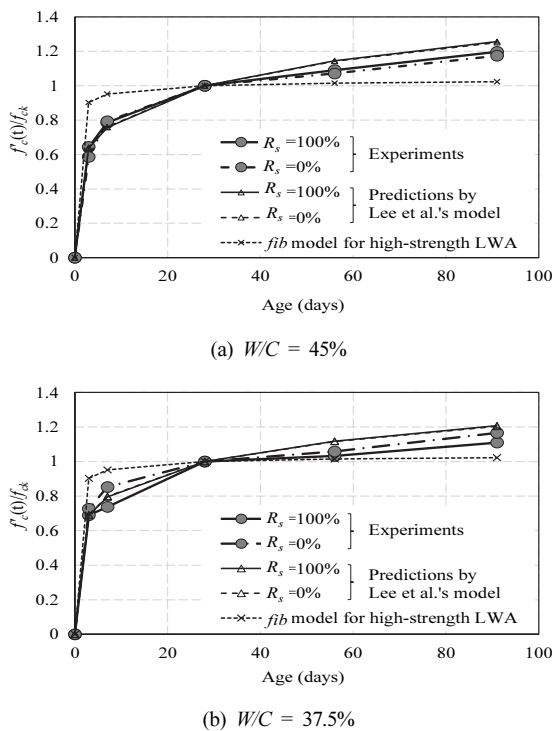


Fig. 4. Compressive strength development against age



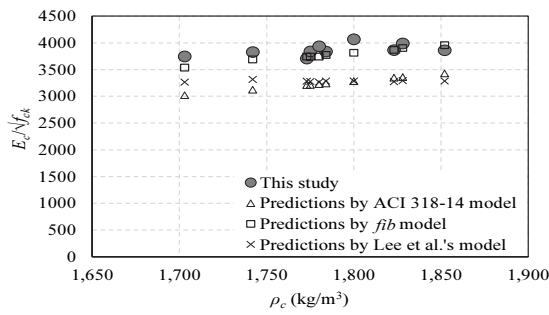


Fig. 5. Effect of  $\rho_c$  on the modulus of elasticity

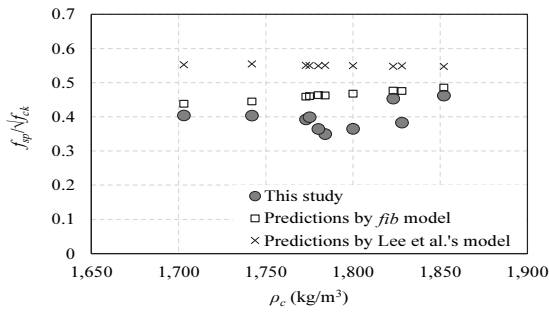


Fig. 6. Effect of  $\rho_c$  on the splitting tensile strength

LWAC의 예측모델(Lee et al. 2018) 값을 함께 나타내었다.  $E_c/\sqrt{f_{ck}}$  값은  $\rho_c$ 의 증가와 함께 증가하는 경향이 나타났으며, *fib* 2010(2013)의 예측값과 유사한 수준으로 나타났다. 경량콘크리트의 탄성계수 예측식 Table 4와 비교한 결과 그룹 I, II의 경우  $R_s$ 가 50% 시험체가 각각 19,269MPa, 21,827MPa로 *fib* model (2013) 예측은 각각 19,445MPa, 20,477MPa로 유사한 수준으로 나타났으며, 무차원 하여 비교한 결과 BAAC의 탄성계수 측정결과와 *fib* 2010(2013) 예측과 유사한 1.02로 가장 낮았다. 반면 ACI 318-14(2014) 및 LWAC의 예측모델의 경우에는 각각 1.19, 1.18로 높게 나타났다.

### 3.4 쏘갠 인장강도

Fig. 6에서는 BAAC의 재령 28일 압축강도 루트승으로 무차원 시킨 쏘갠 인장강도와 콘크리트 단위용적질량과의 관계를 나타내었다. 같은 그림에는 비교를 위해 *fib* 2010(2013)의 예측값 및 LWAC의 예측모델(Lee et al. 2018) 값을 함께 나타내었다. BAAC의  $f_{sp}/\sqrt{f_{ck}}$  값은 동일  $\rho_c$ 에서 *fib* 2010(2013)의 예측값 및 LWAC에 비해 낮게 나타났다. LWAC의 쏘갠 인장강도 예측식 Table 4와 비교한 결과 그룹 I, II의 경우  $R_s$ 가 50% 시험체가 각각 2.04MPa, 1.96MPa로 *fib* 2010(2013) 예측은 각각 2.39MPa,



Fig. 7. Fracture of BAAC particles at the crack planes

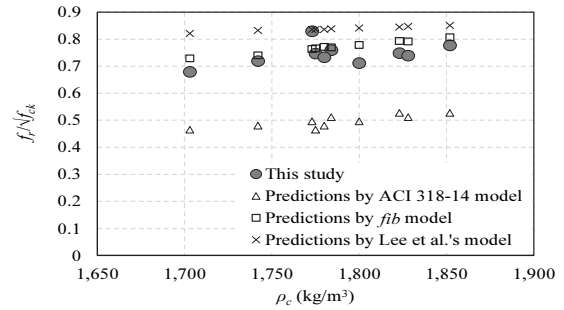


Fig. 8. Effect of  $\rho_c$  on the modulus of fracture

2.51MPa로 유사한 수준으로 나타났으며, 무차원하여 비교한 결과 BAAC의 탄성계수 측정결과와 *fib* 2010(2013) 예측과 유사한 0.86로 가장 낮았다. 반면 LWAC의 예측모델의 경우에는 0.72로 다소 낮게 나타났다. BAAC는 전형적인 쏘갠 인장파괴 양상이 나타났으며, 주요 변수의 영향에 관계없이 파단면이 Fig. 7과 같이 골재를 관통하여 발생하여, 골재에 의한 균열저항 및 맞물림 효과를 기대하기 어려울 것으로 판단된다(Sim 2013).

### 3.5 파괴계수

BAAC의 재령 28일 압축강도 루트승으로 무차원 시킨 파괴계수와 콘크리트 단위용적질량과의 관계는 Fig. 8과 같다. ACI 318-14 및 *fib* 2010(2013)의 예측값 및 LWAC-BS의 예측모델(Lee et al. 2018) 값을 함께 나타내었다. BAAC의  $f_r/\sqrt{f_{ck}}$  값은 그룹 I, II는 각각 0.68~0.75 및 0.75~0.78의 범위에 있었다. BAAC의  $f_r$  범위는 3.28~4.44MPa의 범위에 있었으며,  $R_s$ 의 감소와  $W/C$ 의 감소에 따라 증가하는 경향이 나타났다. BAAC의  $f_r/\sqrt{f_{ck}}$  값은  $\rho_c$ 이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이며, *fib* 2010(2013)의 예측값과 유사한 수준으로 나타났다. 경량콘크리트의 파괴계수 예측식 Table 4와 비교한 결과 그룹 I의 경우  $R_s$ 가 50%인 시험체가 4.31MPa로 LWAC 예측 4.35, 그룹 II의 경우  $R_s$ 가 50% 시험체가 3.82MPa로 *fib* 2010(2013) 예측 4.18로 유사하였다. 경량콘크

리트의 파괴계수 예측식과 BAAC의 실험결과를 무차원하여 비교한 결과 *fib* 2010(2013) 예측과 유사한 0.98로 가장 낮았다. 반면 ACI 318-14(2014) 및 LWAC-BS의 예측모델의 경우에는 각각 1.52, 0.90로 나타났다.

#### 4. 결론

1. 바텀애시 골재 콘크리트의 압축강도 값은 바텀애시 잔골재 치환율이 감소함에 따라 증가하는 결과를 보였으며, 압축강도 발현율은  $W/C$ 가 더 낮은 그룹에서 더 낮았는데, 재령이 경과함에 따라 그 발현 수준은 큰 차이를 보이지 않았다.
2. *fib* 2010의 모델식과 비교하면, 바텀애시 골재 콘크리트의 압축강도에 대한 초기 발현율은 낮은 반면 장기 발현율은 내부양생 효과로 높았다.
3. 바텀애시 골재 콘크리트의 탄성계수와 파괴계수는 ACI 318-14 및 *fib* 2010의 모델식에 비해 안전측에서 평가될 수 있지만, 쪼갬 인장강도는 불안전측이었다.

#### Conflicts of interest

None.

#### 감사의 글

본 연구는 한국남동발전 2019년 현장기술연구개발과제의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

#### References

ACI Committee 318. (2014). Building Code Requirements for Structural Concrete(ACI 318-14) and Commentary, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA.

*fib* 2010. (2013). Model Code for Concrete Structures, Special Activity Group 5, Federation Internationale de Beton, Lausanne, Switzerland.

Ghafoori, N., Bucholc, J. (1997). Properties on high-calcium dry bottom ash for structural concrete, *ACI Materials Journal*, **94(2)**, 90-101.

Ji, G.B. (2020). Evaluation on the Engineering Characteristics and Shrinkage Behavior of Lightweight Concrete using Bottom Ash Aggregates and Predormed Foams, Ph.D Thesis, Kyonggi University [in Korean].

Korea Construction Standards Center. (2018). KDS 41 20 01, KSC 14 20 20, Korean. Goyang-si : Korea Construction Standard Center [in Korean].

Korea Industrial Standards. (2016). KS F 2402, F 2408, F 2421, F 2423. Korea, Eum seong-gun : Korea Agency for Technology and Standards [in Korean].

Kim, H.K. (2015). Properties of normal-strength mortar containing coarsely-crushed bottom ash considering standard particle size distribution of fine aggregate, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **27(5)**, 531-539 [in Korean].

Lee, H.A. (2009). Bond and Flexural Capacity Absorption of Recycled Coarse Aggregate in RC Beams, Master's Thesis, Kongju National University [in Korean].

Lee, J.Y. (2015). A Characteristics of Mortar by using Fine Powder Bottom Ash as a Admixture, Master's Thesis, Daejin University [in Korean].

Lee, K.H., Yang, K.H., Mun, J.H., Kwon, S.J (2018). Mechanical properties of concrete made from different expanded lightweight aggregates, *ACI Materials Journal*, **116(2)**, 9-19.

Neville, A.M. (2011). Properties of Concrete, 5<sup>th</sup> ed, Person Education Limited, UK, Harlow, 846.

Park, S.H. (2017). The Improvement of Bottom Ash Performance for Use as Fine Aggregate and Binder for Concrete, Ph.D Thesis, Daejin University [in Korean].

Singh, M., Siddique, R. (2013). Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on properties of concrete, *Resources, Conservation and Recycling*, **72**, 20-32.

Sim, J.I. (2013). The Influence of Unit Weight of Concrete on Size Effect of Compressive Strength, Direct Tensile Strength and Fracture Energy, Ph.D Thesis, Kyonggi University [in Korean].

Yuksel, I., Genc, A. (2007). Properties of concrete containing nonground ash and slag as fine aggregate, *ACI Materials Journal*, **104(4)**, 397-403.

Yang, K.H. (2019). Evaluation of mechanical properties of lightweight concrete using bottom ash aggregates, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **31(4)**, 331-337 [in Korean].

### 콘크리트의 역학적 특성에 대한 바텀애시 골재 양의 영향

본 연구에서는 바텀애시 골재 양이 콘크리트의 압축강도 발현 및 역학적 특성(탄성계수, 쪼갬 인장강도, 파괴계수)에 미치는 영향을 평가하였다. 실험변수는 천연모래에 대한 바텀애시 잔골재 치환율과 물-시멘트 비이다. 실험결과 바텀애시 골재 콘크리트의 재령 28일 압축강도와 재령 28일 압축강도 루트승으로 무차원한 바텀애시 골재 콘크리트의 역학적 특성들의 값들은 바텀애시 잔골재 양의 증가와 함께 감소하는 경향을 보였다. *fib* 2010의 모델식과 비교하면, 바텀애시 골재 콘크리트의 압축강도에 대한 초기 발현율은 낮은 반면 장기 발현율은 높았으며, 탄성계수와 파괴계수는 안전측에서 평가될 수 있지만, 쪼갬 인장강도는 불안전측이었다.