

# 바텀애시 골재를 사용한 다공성 콘크리트의 강도와 컴팩션의 상관관계 연구

## A Study on the Correlation between Strength and Compaction of Porous Concrete Using Bottom Ash Aggregate

양인환<sup>1\*</sup> · 정승태<sup>2</sup> · 박지훈<sup>2</sup>In-Hwan Yang<sup>1\*</sup> · Seung-Tae Jeong<sup>2</sup> · Ji-Hun Park<sup>2</sup>

(Received September 26, 2022 / Revised October 25, 2022 / Accepted November 9, 2022)

In this paper, the effect of compression levels on the strengths of porous concrete using bottom ash aggregates was analyzed. Coal bottom ash (CBA) was used as aggregate in porous concrete in this study. The aggregate size types used in the CBA concrete mixtures were categorized into two different ones. One included only a single aggregate particle size and the other included hybrid aggregate particles mixed at a ratio of 8:2 volume proportion. The water-binder ratio was fixed at 0.30, and the compression levels were applied at 0.5, 1.5, and 3.0 MPa values to fabricate a porous concrete specimen. The total porosity, compressive, splitting tensile, and flexural tensile strengths were tested and analyzed. When the compression level increased, the total porosity decreased, meanwhile the compressive, split tensile, and flexural tensile strengths increased. The total porosity of concrete using hybrid aggregate was lower and the strength was larger than those of concrete using single-type aggregate. Finally, the correlation between the total porosity, compressive, split tensile, and flexural tensile strengths of porous concrete were presented. The total porosity and strength characteristics showed an inversely proportional correlation.

**키워드** : 바텀애시, 다공성 콘크리트, 컴팩션, 총 공극률, 압축강도, 휨인장강도

**Keywords** : Bottom ash, Porous concrete, Compaction, Total void ratio, Compressive strength, Flexural strength

### 1. 서론

국제에너지기구(IEA)의 최근 보고서에 따르면, 2024년 석탄 화력발전소에서의 석탄 수요는 약 2,100만 톤으로 예상된다(Bijawari et al. 2022). 이에 따라 석탄 화력발전소 폐기물과 관련된 처리 문제가 대두되고 있다. 화력발전소 폐기물은 크게 플라이애시(Fly ash), 바텀애시(Coal Bottom ash)로 구분된다. 이 중 약 80 %는 1~100  $\mu\text{m}$  크기의 미분말 형태로 시멘트, 혼화재의 원료로 사용된다(Park et al. 2009; Park and Tia 2004). 플라이애시에 비해 바텀애시는 상대적으로 미연 탄소 함량이 많으며 구조적 특징이 다양하기 때문에 바텀애시의 사용이 제한적이다(Manz 1997). 이에 따라 화력발전소의 주요 폐기물인 바텀애시에 관련한 문제가 대두되고 있다

(Embong et al. 2021; Singh and Bhardwaj 2020).

바텀애시 골재는 내부의 공극을 활용하여 콘크리트의 건조 수축을 감소 할 수 있는 내부 양생용 소재 혹은 단일 성능을 개선할 수 있는 경량골재로 사용이 가능하다(Kim and Lee 2011). 또한, 다공성을 갖는 바텀애시를 활용한 콘크리트는 낮은 열전도도 결과를 도출하기에 유리하다는 평가를 받고 있다(Singh 2018). 하지만, 바텀애시 골재를 콘크리트 골재로 활용할 경우, 유동성, 강도발현, 내구성 저하로 인해 콘크리트 골재 대체재로서 연구가 필요한 실정이다(Yang 2019; Yang et al. 2020).

ACI 522R-10에 따르면 다공성 콘크리트는 시멘트 페이스트와 굵은 골재로 구성되어 있다. 또한, 다공성 특성으로 인해 내부에 상호 연결되어 있는 공극을 통해 물과 공기가 쉽게 통과할 수 있다(Zhong and Wille 2016; Arun and Chekravarty 2022).

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

<sup>1</sup>군산대학교 토목공학과 교수 (Department of Civil Engineering, Kunsan National University, Jeonbuk, 54150, Korea)

<sup>2</sup>군산대학교 토목공학과 박사과정 (Department of Civil Engineering, Kunsan National University, Jeonbuk, 54150, Korea)

다공성 콘크리트의 총 공극률은 일반적으로 15~25 % 사이의 값을 나타낸다(Zhong and Wille 2016; da Costa et al. 2021). 이러한 공극 특성을 통해 다공성 콘크리트는 단열재, 흡음재, 고속도로 방음벽 및 투수재료 등에 주로 이용되고 있다(Park et al. 2009; Arenas et al. 2013; Yang and Park 2020; Yang et al. 2021).

또한, 다공성 콘크리트에 바텀애시 골재를 혼입하면 일반 다공성 콘크리트와 비교하여 유사한 강도 값을 나타냈으며, 합리적인 결과를 나타냈다(Ngohpok et al. 2018; Kuo et al. 2013). 하지만, 다공성 콘크리트 특성상 골재 대비 낮은 시멘트 페이스트량과 바텀애시 내의 공극으로 인해 성형에 어려움이 있다. 이에 다른 연구자들은 진동다짐과 같은 방법을 통하여 다공성 콘크리트의 성형성을 확보하고자 시도하였다. Yang et al.(2022)은 바텀애시 골재를 활용하여 물-바인더 비가 0.30 일 때, 바텀애시 골재 크기와 가압 다짐이 콘크리트의 열전도도에 미치는 영향을 분석하였다. 그러나, 표준 기준에서 제시하는 성형 압력, 시간 및 방법 등의 권장사항이 미흡하기 때문에 가압 다짐, 진동 다짐 등이 다공성 콘크리트의 특성에 미치는 영향에 관한 심도있는 연구가 필요한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 바텀애시 골재를 사용한 다공성 콘크리트의 강도와 컴팩션의 상관관계에 관한 실험 연구를 수행하였다. 또한, 각 강도 특성과 총 공극률 상관관계 분석을 수행하고 기존의 다공성 콘크리트 강도 값과 비교 분석을 진행하였다. 상관관계에서는 각 그래프별 회귀 분석을 통해 각 실험별 연관성을 분석하였다.

## 2. 바텀애시 골재 특성 및 실험계획

### 2.1 바텀애시 골재 특성

본 연구에서는 석탄화력발전소에서 나온 부산물을 5 mm 이하로 가공한 바텀애시 골재를 사용하였다. 이 중 배합설계 및 다공성 콘크리트의 성형성 향상을 위해 1.2 mm 이상의 골재를 사용하였다.

Table 1. Chemical composition of OPC and bottom ash

Component	OPC (%)	Bottom ash (%)
SiO <sub>2</sub>	17.6	55.7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.59	26.2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.43	7.53
CaO	65.0	3.93
Na <sub>2</sub> O	0.19	0.76
MgO	3.53	1.09
K <sub>2</sub> O	1.13	1.17
SO <sub>3</sub>	3.76	0.76

Table 2. Physical properties of coal bottom ash

Aggregate size	SSD density (g/cm <sup>3</sup> )	Oven-dried density (g/cm <sup>3</sup> )	Absorption (%)
2.5~5.0 mm	1.71	1.54	10.7
2.5~5.0 mm (80 %) 1.2~2.5 mm (20 %)	1.73	1.61	7.75
1.2~2.5 mm	1.75	1.65	6.13

Table 1은 본 연구에서 바인더로 사용되는 1종 포틀랜드 시멘트와 골재로 사용되는 바텀애시의 화학적 구성성분을 나타냈다.

Table 2는 바텀애시 경량골재의 크기에 따른 밀도 및 흡수율 실험 결과를 나타냈다. KS F 2504 규정에 따라 바텀애시 골재의 밀도 및 흡수율 실험을 수행하였다. 또한, KS F 2529 규정에 따라 바텀애시 골재를 중량 150 g 표면건조포화상태의 골재로 실험을 수행하였다. 바텀애시 골재의 밀도 및 흡수율 실험은 골재 크기 별 3가지로 분류하여 실험을 수행하였다. 실험 결과는 2.5~5.0 mm 크기의 바텀애시 골재에 1.2~2.5 mm 크기의 바텀애시 골재가 혼입될수록 밀도는 높아지며, 흡수율은 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 바텀애시 골재가 공극이 많은 다공성 재료이므로 밀도가 낮아질수록 다공성의 공극을 통한 흡수율의 증가로 나타나는 것으로 판단된다.

### 2.2 다공성 경량 콘크리트 배합 및 시편제작

Table 3은 바텀애시를 활용한 다공성 콘크리트의 배합표이다. 바텀애시 골재의 크기, 콘크리트의 컴팩션 수준(compaction level)에 따라 재료 특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 표와 같이 6개의 배합설계를 수행하였다.

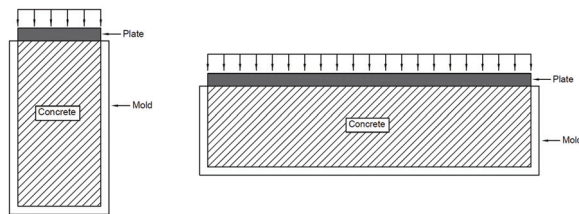
다공성 콘크리트 제조를 위해 서로 다른 두가지 종류의 바텀애시 골재를 사용하였다. 2.5~5.0 mm 크기의 바텀애시 골재를 사용하였으며, 본 논문에서는 단일 골재(Single CBA)로 지칭한다. 또한, 2.5~5.0 mm 크기의 바텀애시 골재 80 %(부피)와 1.2~2.5 mm 크기의 바텀애시 골재 20 %(부피)를 섞은 복합 골재를 사용하였으며, 이 논문에서는 복합골재(Hybrid CBA)로 지칭한다. 물-바인더 비(*w/b*)는 0.30으로 설정하여 골재의 크기, 컴팩션 수준에 따른 재료 특성을 분석하였다. 또한, 콘크리트 시편에 가해지는 컴팩션 수준을 0.5, 1.5 및 3.0 MPa로 설정하여 컴팩션이 다공성 콘크리트의 역학적 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

바인더는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 또한, 물-바인더 비가 낮아 바텀애시 골재사이의 부착력이 감소할 가능성이 있

Table 3. Mixing proportions of porous concrete

Aggregate size mm	W/B	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )				C.A	Unit weight kg/m <sup>3</sup>	Compaction MPa
		Water	OPC	BA				
				1.2~2.5 mm	2.5~5.0 mm			
2.5~5.0 mm (80 %) 1.2~2.5 mm (20 %)	0.30	110.0	366.7	255.0	996.7	38.5	1,766.9	0.5
		110.0	366.7	255.0	996.7	38.5	1,766.9	1.5
		110.0	366.7	255.0	996.7	38.5	1,766.9	3.0
2.5~5.0 mm (100 %)	0.30	110.0	366.7	-	1,245.9	38.5	1,761.1	0.5
		110.0	366.7	-	1,245.9	38.5	1,761.1	1.5
		110.0	366.7	-	1,245.9	38.5	1,761.1	3.0

Note: W: Water; OPC: Ordinary portland cement; BA: bottom ash; C.A.: Cohesive agent



(a) Cylindrical specimen (b) Prismatic specimen

Fig. 1. Schematic compaction process

으므로, 바텀애시 골재 간의 부착력을 확보하기 위해 배합수 중량 대비 35 %의 증점제를 각 배합에 추가하였다.

Fig. 1은 콘크리트를 원주형 몰드와 힘 몰드에 다공성 콘크리트를 타설한 후 컴팩션하는 과정을 나타냈다. 다공성 콘크리트 배합 완료 후, 굳지 않은 콘크리트를 원주형 몰드와 힘 몰드에 타설 및 2층 다짐하여 가압판을 그림과 같이 시편 상면에 배치한다. 이후 유압잭(jack)을 이용하여 가압판에 목표 컴팩션 수준까지 압력을 가하여 콘크리트 시편을 컴팩션하였다.

컴팩션이 완료된 시편은 24시간 이상 기건양생을 수행하였다. 이후 콘크리트 시편을 거꾸집에서 탈형한 후 20 ± 3 °C의 온도의 수조에서 재령 28일까지 수중양생을 실시하였다.

### 2.3 실험 방법

다공성 콘크리트의 총 공극률 실험은 φ100 × 200 mm의 원주형 시편으로 측정하였다. 시편의 수중 중량(W<sub>1</sub>), 기건상태의 시편의 중량(W<sub>2</sub>) 및 시편의 용적(V)을 측정하여 다음 식 (1)을 사용하여 다공성 콘크리트의 총 공극률을 산정하였다.

$$\text{총 공극률}(A) = \left[ 1 - \frac{(W_2 - W_1)}{\rho_w V} \right] \times 100 \quad (1)$$

여기서, A는 총 공극률(%), W<sub>2</sub>는 시편의 기건상태 중량(g), W<sub>1</sub>

는 시편의 수중중량(g), V는 시편의 부피(cm<sup>3</sup>), ρ<sub>w</sub>는 물의 단위중량(g/cm<sup>3</sup>)을 나타냈다.

다공성 콘크리트의 압축강도는 KS F 2405에 따라 원주형 시편에 변위 제어를 통해 하중을 가하여 실험을 진행하였다. 압축강도 실험은 만능시험기(UTM)를 사용하여 하중값(P)을 산출하고, 이를 통해 압축강도(f<sub>c</sub>)를 계산하였다. 압축강도의 모든 시편은 기건 상태로 실험을 진행하였으며, 0.8 mm/min로 UTM 변위제어를 설정하여 정밀한 강도 값을 측정하였다.

KS F 2423에 따라 원주형 시편의 높이 200 mm에 선형 하중을 가해 다공성 콘크리트의 쏘갠장강도를 계산하였다.

실험 진행시, 콘크리트 시편의 접촉면에 편심이 작용하지 않도록 지지대와 평행을 유지하여 실험을 진행하였다. 쏘갠장강도의 모든 시편은 기건 상태로 실험을 진행하였으며, 변위를 0.3 mm/min으로 설정하여 정밀한 강도 값을 측정하였다.

다공성 콘크리트의 힘인장강도는 100 × 100 × 400 mm의 프리즘 시편을 활용하여 4점 하중재하 방식으로 실험을 진행하였다. 힘인장강도 실험은 프리즘 시편 중앙단면을 기준으로 100 mm의 거리 구간에 2개의 가력점을 산정하였다. 이를 만능시험기(UTM)을 이용하여 0.3 mm/min의 변위 제어기법으로 하중을 재하하였다. 이를 통해 측정되는 하중값(P)을 산출하였다.

힘인장강도 실험은 기건 상태 시편으로 진행하였고, 컴팩션 수준에 따라 달라지는 각의 힘 시편의 높이를 측정하여 이를 계산식에 적용하였다.

### 3. 실험 결과 및 분석

#### 3.1 총 공극률

바텀애시 크기, 컴팩션에 따른 다공성 콘크리트의 총 공극률 실험 결과를 Fig. 2에 나타냈다.

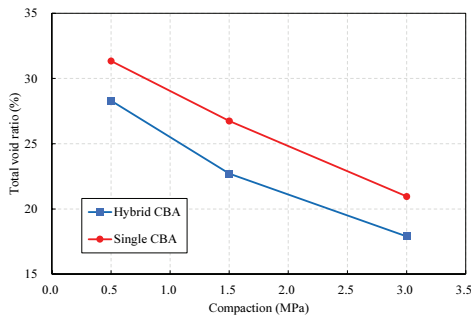


Fig. 2. Total void ratio test result

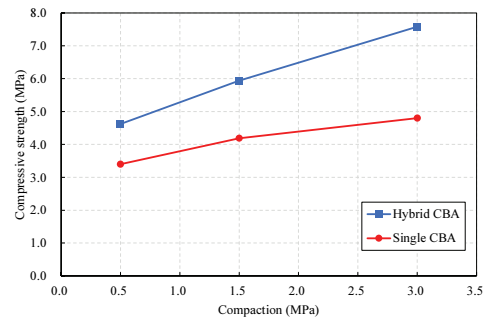


Fig. 3. Compressive strength test result

본 실험에서는 컴팩션 수준이 증가함에 따라 총 공극률은 감소한다. 구체적으로, 바텀애시 골재의 크기가 각각 단일골재와 복합골재일 때, 컴팩션이 0.5 MPa에서 3.0 MPa로 증가함에 따라 시편의 총 공극률은 각각 36 %, 33 % 감소한다. 이는 컴팩션 수준이 높아질수록 다공성 콘크리트는 치밀해지고 이에 따라 내부의 공극이 줄어들어 총 공극률이 감소하기 때문이다.

또한, 복합골재를 사용한 콘크리트보다 단일골재를 사용한 콘크리트의 총 공극률은 더 큰 값을 보인다. 구체적으로, 컴팩션이 0.5, 1.5 및 3.0 MPa일 때, 단일골재를 사용한 콘크리트의 총 공극률은 복합골재를 사용한 콘크리트의 총 공극률보다 각각 약 11 %, 18 % 및 17 % 더 큰 값을 보였다. 이는 복합골재의 1.2~2.5 mm 크기 골재가 2.5~5.0 mm 크기의 골재 사이에 공극을 채워주기 때문이다. 이에 따라 같은 컴팩션 상에서 총 공극률은 복합골재를 사용한 콘크리트가 단일골재를 사용한 콘크리트의 값 보다 더 작은 값을 보이는 것으로 판단된다.

전체 배합의 총 공극률은 약 16~32 % 사이의 값을 나타냈다. 이는 ACI 522R-10에서 제시하는 다공성 콘크리트 총 공극률의 적용 범위인 15~30 % 사이를 대부분 만족한다. 이에 따라 본 연구는 다공성 콘크리트로서 적용 가능하다는 것으로 판단된다.

### 3.2 압축강도

바텀애시 크기, 컴팩션에 따른 다공성 콘크리트의 압축강도 실험 결과를 Fig. 3에 나타냈다.

본 실험은 컴팩션이 증가함에 따라 압축강도는 증가하는 경향을 나타냈다. 구체적으로 바텀애시 골재의 크기가 각각 복합골재, 단일골재 일 때, 컴팩션이 0.5 MPa에서 3.0 MPa로 증가함에 따라 시편의 압축강도는 64 %, 41 % 증가한다. 이는 컴팩션이 증가하면 단위중량이 증가하고 총 공극률은 감소하는 경향이 나타남에 따라 압축강도는 증가하는 것으로 판단된다.



(a) Test setup (b) Failure pattern

Fig. 4. Compressive strength test

또한, 바텀애시 골재의 크기가 단일골재일 때보다 복합골재 일 때, 더 높은 압축강도 값을 나타냈다. 구체적으로, 컴팩션이 0.5 MPa, 1.5 MPa 및 3.0 MPa 일 때, 복합골재를 사용한 콘크리트의 압축강도는 단일골재를 사용한 콘크리트의 압축강도보다 각각 약 36 %, 41 % 및 58 % 더 높은 값을 나타냈다.

압축강도 파괴 형상은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 가시성이 보일 만큼 파괴되지는 않았다. 이는 공극이 없는 일반 콘크리트에 비해 큰 공극과 낮은 강도를 갖는 다공성 콘크리트는 탄성에너지 흡수하기 때문이라 판단된다.

본 실험은 Jang et al.(2015)에서 제시된 바텀애시를 활용한 압축강도 범위인 4.0~6.0 MPa 사이의 값을 만족하는 결과를 나타냈다. 이를 통해 본 연구에서 제작된 다공성 콘크리트는 적용 가능하며 합리적인 값을 나타내는 것으로 판단된다.

### 3.3 쪼갬인장강도

바텀애시 크기, 컴팩션에 따른 다공성 콘크리트의 쪼갬인장강도 실험 결과를 Fig. 5에 나타냈다.

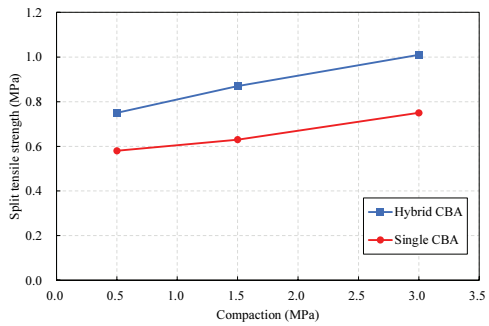


Fig. 5. Split tensile strength test result

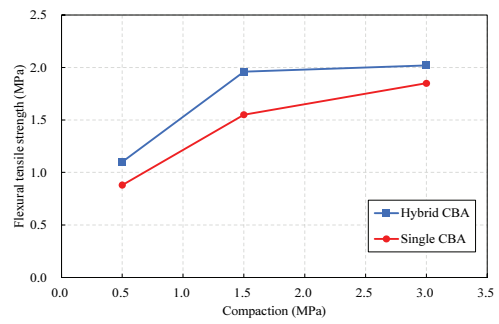


Fig. 7. Flexural tensile strength test result

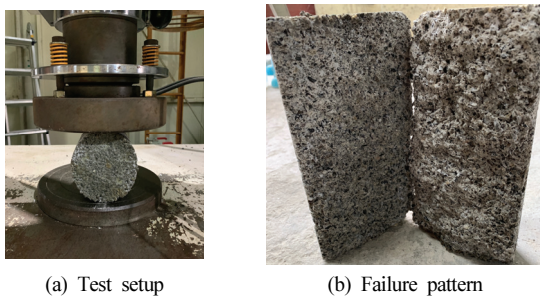


Fig. 6. Split tensile strength test

본 실험은 컴팩션이 증가함에 따라 쪼갠장강도는 증가하는 경향을 나타냈다. 구체적으로 바텀애시 골재의 크기가 각각 복합골재, 단일골재 일 때, 컴팩션이 0.5 MPa에서 3.0 MPa로 증가함에 따라 시편의 쪼갠장강도는 34 %, 29 % 증가한다. 이는 압축강도의 경향과 동일하게 컴팩션이 증가할수록 다공성 재료인 바텀애시 골재의 간격이 조밀해지면서 쪼갠장강도가 증가하는 경향이 나타나는 것으로 판단된다.

또한, 바텀애시 골재의 크기가 단일골재일 때보다 복합골재일 때, 더 높은 쪼갠장강도 값을 나타냈다. 구체적으로, 컴팩션이 0.5 MPa, 1.5 MPa 및 3.0 MPa 일 때, 복합골재를 사용한 콘크리트의 쪼갠장강도는 단일골재를 사용한 콘크리트의 쪼갠장강도보다 각각 약 29 %, 38 % 및 35 % 더 높은 값을 나타냈다.

Fig. 6은 쪼갠장강도 실험 전·후 시편 상태를 나타냈다. 강도 실험 후, 실험 시편은 상부와 하부 하중 재하점을 연결하는 하중재하 평면의 직각 방향으로 쪼갠장파괴가 발생하였다. 이러한 파괴 형상은 콘크리트 내 조밀한 바텀애시 골재 배열 간격이 파괴에너지를 점진적으로 방출시켜 나타나는 형상이라고 판단된다.

### 3.4 휨인장강도

바텀애시 크기, 컴팩션에 따른 다공성 콘크리트의 휨인장강도 실험 결과를 Fig. 7에 나타냈다.

본 실험은 컴팩션이 증가함에 따라 휨인장강도는 증가하는 경향을 나타냈다. 구체적으로 바텀애시 골재의 크기가 각각 복합골재, 단일골재 일 때, 컴팩션이 0.5 MPa에서 3.0 MPa로 증가함에 따라 시편의 휨인장강도는 83 %, 110 % 증가한다. 이는 압축강도와 쪼갠장강도의 경향과 동일하게 컴팩션이 증가할수록 휨인장강도는 증가하는 경향이 나타난다.

또한, 바텀애시 골재의 크기가 단일골재일 때보다 복합골재일 때, 더 높은 휨인장강도 값을 나타냈다. 구체적으로, 컴팩션이 0.5 MPa, 1.5 MPa 및 3.0 MPa 일 때, 복합골재를 사용한 콘크리트의 휨인장강도는 단일골재를 사용한 콘크리트의 휨인장강도보다 각각 약 25 %, 26 % 및 9 % 더 높은 값을 나타냈다.

Fig. 8은 휨인장강도 시편의 파괴형상을 나타냈다. 휨인장강도의 파괴 형상은 일반 콘크리트의 휨인장강도 실험 파괴형상과 비슷한 형상을 나타냈다.

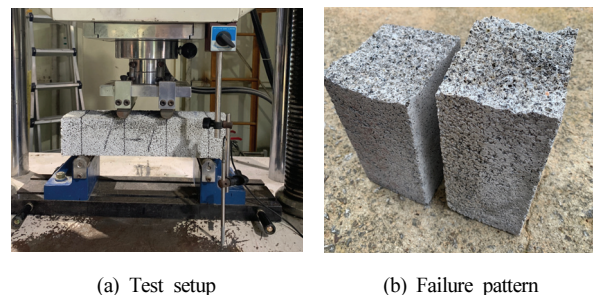


Fig. 8. Flexural tensile strength test

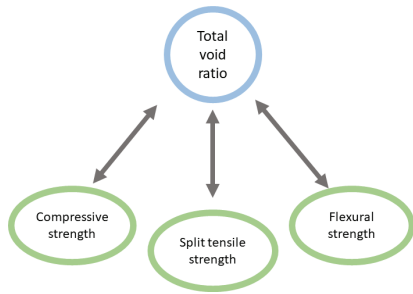


Fig. 9. Relationship between thermal conductivity and unit weight

### 4. 강도 특성과 총 공극률 상관관계 분석

본 연구에서는 Fig. 9에 나타난 바와 같이 다공성 콘크리트의 강도 특성과 총 공극률 시험의 상관관계를 분석하였고, 회귀분석을 수행하였다. 회귀분석을 통한 상관계수( $R^2$ )는 0에서 1사이의 값을 나타내며, 1에 가까울수록 상관관계가 높은 것을 나타내고, 0에 근접할수록 상관관계가 낮은 것을 의미한다.

Fig. 10에 본 연구의 실험결과와 Jang et al.(2015)의 실험결과에 따른 콘크리트 압축강도와 총 공극률의 실험 결과 연관성을 그래프를 통해 나타내었다. 본 실험의 총 공극률은 약 16~32%의 범위에 있고, Jang et al.(2015)의 실험에 의한 총 공극률은 주로 30~40%의 범위에 있다. 압축강도-총 공극률 상관관계는 총 공극률이 증가할수록 압축강도는 감소하는 경향을 나타냈다. 총 공극률이 증가할수록 골재 간 공극은 증가하며 이는 콘크리트 시편의 압축강도 값에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

본 연구와 선행연구의 압축강도-총 공극률 관계의 회귀분석에 따른 상관계수는 0.5966로서, 압축강도-총 공극률 상관관계는 합리적인 값을 나타낸다고 판단된다.

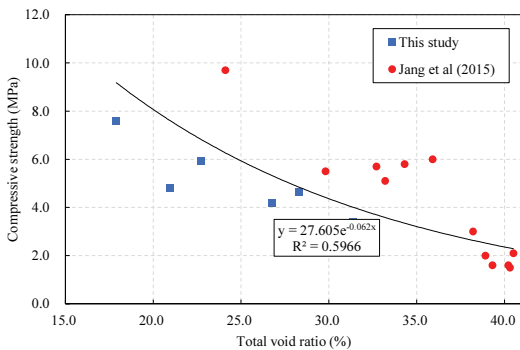


Fig. 10. Relationship between compressive strength and total void ratio

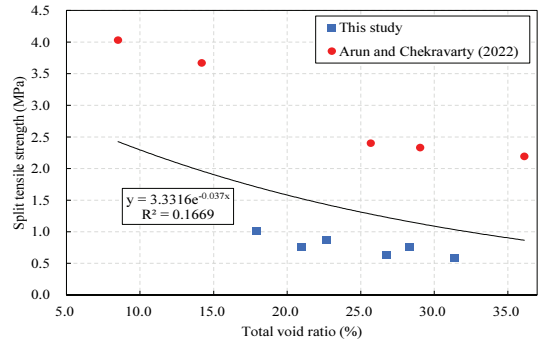


Fig. 11. Relationship between split tensile strength and total void ratio

Fig. 11은 본 연구의 실험결과와 Arun and Chekravarty(2022)의 실험결과에 따른 다공성 콘크리트의 쪼갬인장강도와 총 공극률 상관관계를 나타냈다. 전반적으로 쪼갬인장강도와 총 공극률 상관관계는 총 공극률이 증가할수록 쪼갬인장강도는 감소하는 경향을 보인다. 그림에서 총 공극률이 16~32% 범위에 있을 때, Arun and Chekravarty의 쪼갬인장강도 실험결과는 본 연구의 쪼갬인장강도 실험결과보다 다소 크게 나타나며, 이에 따라 Arun and Chekravarty의 쪼갬인장강도와 본 연구 실험결과는 큰 편차를 나타낸다. 따라서, 회귀분석에 의한 상관계수는 0.1669의 다소 낮은 값을 나타낸다.

Fig. 12은 본 연구의 실험결과와 Rodrigues et al.(2022)의 실험결과에 따른 다공성 콘크리트의 휨인장강도와 총 공극률의 상관관계를 나타낸다. 전반적으로 총 공극률이 증가할수록 휨인장강도는 감소하는 경향을 나타낸다. Rodrigues et al.(2022)의 휨인장강도 실험결과는 본 연구의 휨인장강도 실험결과보다 다소 크게 나타나며, 결과적으로 Rodrigues et al.(2022)의 휨인장강도와 본 실험의 휨인장강도는 큰 편차를 나타낸다. 따라서, 회귀분석에 의한 상관

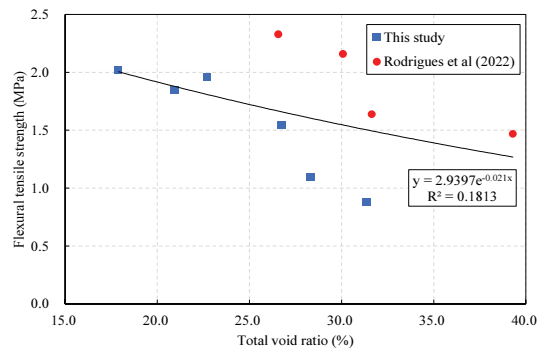


Fig. 12. Relationship between flexural tensile strength and total void ratio

계수는 0.1813의 다소 낮은 값을 나타낸다.

총 공극률과 힘인장강도와의 관계를 나타내는 실험자료가 충분치 않기 때문에 본 연구와 선행 연구 자료의 변동성으로 인해 낮은 상관계수를 나타낸다. 따라서, 추가로 확보되는 측정결과를 활용한 회귀분석을 수행한다면, 더욱 큰 상관계수를 나타낼 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 석탄화력발전소 폐기물을 중 바텀애시를 활용한 다공성 콘크리트의 총 공극률과 강도 특성에 관한 실험 연구를 수행하였으며, 주요 연구결과는 다음과 같다.

1. 컴팩션이 0.5, 1.5 및 3.0 MPa일 때, 단일골재를 사용한 콘크리트의 총 공극률은 복합골재를 사용한 콘크리트의 총 공극률보다 각각 약 11 %, 18 % 및 17 % 더 큰 값을 보였다. 이는 복합골재의 1.2~2.5 mm 크기 골재가 바텀애시 골재 사이에 공극을 채워줌에 따라 더 큰 단위중량을 갖게된다. 이에 따라 총 공극률이 감소하는 것으로 판단된다.
2. 컴팩션이 0.5, 1.5 및 3.0 MPa 일 때, 복합골재를 사용한 콘크리트의 압축강도는 단일골재를 사용한 콘크리트의 압축강도보다 각각 약 36 %, 41 % 및 58 % 더 높은 값을 나타냈다.
3. 컴팩션이 0.5, 1.5 및 3.0 MPa 일 때, 복합골재를 사용한 콘크리트의 쪼갬인장강도는 단일골재를 사용한 콘크리트의 쪼갬인장강도보다 각각 약 29 %, 38 % 및 35 % 더 높은 값을 나타냈다.
4. 컴팩션이 0.5, 1.5 및 3.0 MPa 일 때, 복합골재를 사용한 콘크리트의 힘인장강도는 단일골재를 사용한 콘크리트의 힘인장강도보다 각각 약 25 %, 26 % 및 9 % 더 높은 값을 나타냈다. 이를 통해, 컴팩션 수준이 총 공극률과 강도 실험 결과에 영향을 준다는 것을 판단할 수 있다.
5. 전반적으로 총 공극률이 증가할수록 강도가 감소하는 상관관계를 나타낸다. 총 공극률-압축강도 관계 측정값은 변동성이 작아서 회귀분석에 따른 상관계수는 약 0.60의 값을 나타낸다. 반면에, 총 공극률-쪼갬인장강도 및 총 공극률-힘인장강도 관계에서 측정 결과의 변동성이 증가하여 회귀분석에 따른 상관계수는 낮은 값을 나타낸다.

## Conflicts of Interest

None.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통기술촉진연구사업의 지원을 받아 연구되었습니다(21CTAP-C164197-01).

## References

- Al Bijawi, M.I., Embong, R., Muthusamy, K., Ismail, N., Obianyo, I.I. (2022). Recycled coal bottom ash as sustainable materials for cement replacement in cementitious composites: a review, *Construction and Building Materials*, **338**, 127624.
- Arenas, C., Leiva, C., Vilches, L.F., Cifuentes, H. (2013). Use of co-combustion bottom ash to design an acoustic absorbing material for highway noise barriers, *Waste Management*, **33(11)**, 2316-2321.
- Arun, A., Chekravarty, D. (2022). Strength improvement techniques on pervious concrete, *Materials Today : Proceedings*, **52**, 1979-1985.
- da Costa, F.B.P., Haselbach, L.M., da Silva Filho, L.C.P. (2021). Pervious concrete for desired porosity: Influence of w/c ratio and a rheology-modifying admixture, *Construction and Building Materials*, **268**, 121084.
- Embong, R., Kusbiantoro, A., Muthusamy, K., Ismail, N. (2021). Recycling of coal bottom ash(CBA) as cement and aggregate replacement material: a review, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **682(1)**, 12035.
- Jang, J.G., Ahn, Y.B., Souri, H., Lee, H.K. (2015). A novel eco-friendly porous concrete fabricated with coal ash and geopolymeric binder: heavy metal leaching characteristics and compressive strength, *Construction and Building Materials*, **79**, 173-181.
- Jeong, S.T., Bui, Q.T., Yang, I.H. (2022). A comparative study of the thermal conductivities of CBA porous concretes, *Materials*, **15**, 5204.
- Kim, H.K., Lee, H.K. (2011). Use of power plant bottom ash as fine and coarse aggregates in high-strength concrete, *Construction and Building Materials*, **25(2)**, 1115-1122.
- Kou, S.C., Poon, C.S. (2009). Properties of concrete prepared with

- crushed fine stone, furnace bottom ash and fine recycled aggregate as fine aggregates, *Construction and Building Materials*, **23(8)**, 2877–2886.
- Kuo, W.T., Liu, C.C., Su, D.S. (2013). Use of washed municipal solid waste incinerator bottom ash in concrete, *Cement and Concrete Composites*, **37**, 328–335.
- Manz, O.E. (1997). Worldwide production of coal ash and utilization in concrete and other products, *Fuel(Guildford)*, **76(8)**, 691–696.
- Ngohpok, C., Sata, V., Satiennam, T., Klungboonkrong, P., Chindaprasit, P. (2018). Mechanical properties, thermal conductivity, and sound absorption of pervious concrete containing recycled concrete and bottom ash aggregates, *KSCE Journal of Civil Engineering*, **22(4)**, 1369–1376 [in Korean].
- Park, S.B., Jang, Y.I., Lee, J., Lee, B.J. (2009). An experimental study on the hazard assessment and mechanical properties of porous concrete utilizing coal bottom ash coarse aggregate in Korea, *Journal of Hazardous Materials*, **166(1)**, 348–355.
- Park, S.B., Tia, M. (2004). An experimental study on the water-purification properties of porous concrete, *Cement and Concrete Research*, **34(2)**, 177–184.
- Rodrigues, P.C., de Sales Braga, N.T., Junior, E.S.A., Cordeiro, L.D.N.P., de Melo, G.D.S.V. (2022). Effect of pore characteristics on the sound absorption of pervious concretes, *Case Studies in Construction Materials*, **17**, e01302.
- Singh, M. (2018). 1-coal bottom ash, *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete*, **2018**, 3–50.
- Singh, N., Bhardwaj, A. (2020). Reviewing the role of coal bottom ash as an alternative of cement, *Construction and Building Materials*, **233**, 117276.
- Yang, I.H., Jeong, S.T., Park, J.H. (2022). Effects of the compaction and size of bottom ash aggregate on thermal conductivity of porous concrete, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **10(3)**, 195–203 [in Korean].
- Yang, I.H., Park, J.H. (2020). A study on the thermal properties of high-strength concrete containing CBA fine aggregates, *Materials*, **13**, 1493.
- Yang, I.H., Park, J.H., Jung, H.W. (2020). An experimental study on the thermal conductivity of concrete containing coal bottom ash aggregate, *XV International Conference on Durability of Building Materials and Components(DBMC 2020)*, 1–6.
- Yang, I.H., Park, J.H., Kim, K.C., Yoo, S.W. (2021). A comparative study on the thermal conductivity of concrete with coal bottom ash under different drying conditions, *Advances in Civil Engineering*, **2021**, 1–12.
- 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].
- Zhong, R., Wille, K. (2016). Compression response of normal and high strength pervious concrete, *Construction and Building Materials*, **109**, 177–187.

### 바텀애시 골재를 사용한 다공성 콘크리트의 강도와 컴팩션의 상관관계 연구

본 논문에서는 바텀애시 골재를 사용한 다공성 콘크리트의 강도와 컴팩션의 상관관계를 분석하였다. 본 연구에서는 바텀애시를 두 가지 입도의 골재를 8:2 비율로 섞은 복합골재와 단일 입도만을 갖는 단일골재를 사용하여 각 골재 크기별 특성을 파악 한 후, 콘크리트 골재로 사용하였다. 물-바인더 비는 0.30으로 고정하고, 컴팩션 수준을 0.5, 1.5 및 3.0 MPa 값으로 지정하여 다공성 콘크리트 시편을 제작하였다. 총 공극률, 압축강도, 쪼갬인장강도 및 힘인장강도를 실험을 진행하고 분석을 수행하였다. 컴팩션이 증가할 때 총 공극률은 감소하고, 압축강도, 쪼갬인장강도 및 힘인장강도는 증가하였다. 복합골재를 사용한 콘크리트의 총 공극률은 단일골재를 사용한 콘크리트에 비해 총 공극률은 낮고, 강도는 크게 나타났다. 회귀분석을 통해 다공성 콘크리트의 총 공극률, 압축강도, 쪼갬인장강도 및 힘인장강도 상관관계를 제시하였다. 총 공극률과 강도 특성은 서로 반비례하는 상관관계를 나타냈다.