

# 가압다짐과 바텀애시 골재 크기 특성이 다공성 콘크리트의 열전도도에 미치는 영향

## Effects of the Compaction and Size of Bottom Ash Aggregate on Thermal Conductivity of Porous Concrete

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 July 25, 2022 / Revised August 5, 2022 / Accepted August 9, 2022)

In this paper, the effects of the bottom ash aggregate sizes and compaction levels on the thermal conductivity of porous concrete were investigated. In this experimental study, bottom ash was used as aggregates after identifying the aggregate characteristics. SA mixtures included hybrid aggregates, and DA contained only one particle size. The water-binder ratio was fixed at 0.30, and the compaction levels were applied to the concrete specimens at 0.5, 1.5, and 3.0 MPa. Unit weight, total void ratio, and thermal conductivity were measured and analyzed. As the compaction level increased, the unit weight and thermal conductivity increased in the SA mixtures, but the total void ratio decreased. In addition, the thermal conductivity of the specimens under oven-dried condition were lower than that of the specimens under air-dried condition. The correlation between the unit weight, total porosity, and thermal conductivity of porous concrete was analyzed. The thermal conductivity-unit weight correlation was proportional, while the thermal conductivity-total void ratio correlation was inversely proportional.

**키워드** : 바텀애시, 다공성 콘크리트, 가압다짐, 총 공극률, 열전도도

**Keywords** : Bottom ash, Porous concrete, Compaction, Total void ratio, Thermal conductivity

### 1. 서론

석탄화력발전소에서 발생하는 산업 폐기물은 인체와 환경에 유해한 중금속을 함유하고 있다(Kim et al. 2014). 연못이나 지하에 매설된 부산물은 함유하고 있는 유해 인자로 인해 지하수와 인접 토양을 오염시켜 석탄을 주로 사용하는 국가에서는 매우 심각한 문제가 나타날 수 있다(Siddique 2010).

이에 따라 석탄화력발전소 건설 시 가장 문제가 되는 플라이애시, 바텀애시, 석탄연소부산물 등 이와 관련된 후처리 문제가 대두되고 있다.

석탄화력발전소 전체 발생량의 약 80 %를 차지하는 플라이애시는 1~100  $\mu\text{m}$  크기의 미분말 형태로 생산되며 대부분은 시멘트나 시멘트 혼화재의 원료로 재활용된다(Park et al. 2009; Park and Tia 2004). 하지만, 바텀애시의 경우 다른 부산물에 비해 중금

속 함량이 많아 매립지로 보내는 것은 지하수의 오염, 사회적 문제를 초래할 수 있다(Jang et al. 2015). Singh(2018)에 따르면, 바텀애시는 골재 내부의 다공성 구조로 인해 열전도율이 낮은 콘크리트의 제조에 유리하다는 평가를 받고 있다. 하지만, 상대적으로 바텀애시는 유동성, 강도발현, 내구성 평가에 관한 연구는 부족한 실정이다(Yang 2019; Yang et al. 2020a).

일반적으로 다공성 콘크리트는 굵은 골재와 시멘트 페이스트로 이루어진 콘크리트로서 내부 공극은 서로 상호 연결되어 있다(Chandrupa and Biligiri 2016). 시멘트 페이스트와 굵은 골재로 제조된 다공성 콘크리트는 단열재, 흡음재 및 투수재료 등에 이용되고 있다(Park et al. 2009). 특히, 다공성 콘크리트는 높은 공극률로 인해 열전도도가 낮기 때문에 단열재료로서의 활용성이 주목받고 있다.

\* 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 특성을 갖고 있는 바텀애시를 콘크리트에 혼입하면 골재의 내부 공극으로 인해 단열 성능을 개선할 수 있다(Kim and Lee 2011; Singh and Bhardwaj 2020; Singh et al. 2019). 또한, 바텀애시의 기공과 우수한 열적 특성을 이용하여 고속도로 방음벽 및 단열재로 사용된다(Arenas et al. 2013; Yang and Park 2020b; Yang et al. 2021).

기존의 이론에 따르면(Ngohpok et al. 2018), 다공성 콘크리트에 굵은 골재 대비 바텀애시의 혼입률이 높아질수록 열전도율은 낮아지는 경향을 나타냈다. 이를 통해 바텀애시의 공극이 열전도율을 낮추는 데에 영향을 미치는 것을 확인하였다.

바텀애시는 알칼리와 금속알루미늄으로 구성되어 있으며, 이러한 성분으로 인해 부피 팽창을 유발하지 않는다(Shen et al. 2021). 이를 기반으로 바텀애시를 이용해 제작된 다공성 콘크리트는 다량의 연속 공극률로 인해 밀도 및 열전도도가 낮아 단열 분야에 적용할 수 있는 가능성을 보여주었다. Kuo et al.(2013)의 연구결과에 따르면 바텀애시를 활용하여 제작한 다공성 콘크리트는 일반적인 다공성 콘크리트와 비교하여 합리적인 결과를 나타냈다. 또한, 다공성 콘크리트는 친환경 도로포장재 용도로서 중요한 역할을 한다(Zhang et al. 2021).

한편, Jeong et al.(2021)은 바텀애시 골재를 사용하여 물-바인더 비가 0.25 및 0.35 일 때, 물-바인더 비가 바텀애시를 활용한 콘크리트의 열적 특성 실험결과를 분석하였으나, 바텀애시 골재 구성 및 이에 따른 가압다짐(compaction)이 콘크리트의 열전도도에 미치는 영향에 대한 분석은 수행되지 않았다.

하지만 기존의 선행연구는 골재의 입도 구성을 고려하지 않고 다공성 콘크리트의 강도와 투수 특성 분석 연구에 다수를 차지한다. 따라서, 골재의 입도 크기에 따른 다공성 콘크리트의 재료 특성에 관한 연구가 필요한 실정이다. 또한, 다공성 콘크리트의 성형성을 확보하기 위해서는 가압다짐이 필요하기도 하나, 가압다짐이 다공성 콘크리트의 공극 및 열전도도에 미치는 영향에 관한 연구는 미비한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 가압다짐에 따라 바텀애시를 사용한 다공성 콘크리트의 열전도도의 특성에 관한 실험 및 연구를 수행하였다. 다공성 골재로서 바텀애시를 크기에 따라 두 가지로 분류하여 골재로 사용하였다. 바텀애시를 사용한 물-바인더 비가 0.30인 다공성 콘크리트를 제작하여 단위중량, 총 공극률 및 열적 특성을 분석하였다. 또한, 회귀분석을 통해 열전도도-단위중량, 열전도도-총 공극률 상관관계를 분석하였다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 사용재료 특성

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 화력발전소에서 나온 폐기물을 건식공정을 거쳐 5 mm 이하로 가공된 바텀애시 골재를 사용하였다. 이 중 배합 설계 및 다공성 콘크리트의 작업성 향상을 위해 1.2 mm 이상의 골재를 사용하였다. 또한, 바텀애시 골재를 1.2~2.5 mm 와 2.5~5.0 mm로 나누어 두 가지 크기를 2:8 비율로 합한 SA와 2.5~5.0 mm 크기만을 갖고 있는 DA로 구분하였다. 이를 통해, 각 골재 종류에 따른 골재의 물성 실험을 진행하였다.

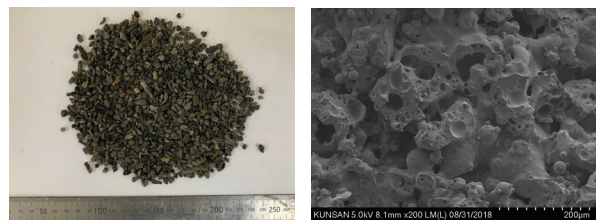


Fig. 1. Bottom ash aggregate image

Table 1은 바텀애시 골재의 크기별 물리적 성질을 나타냈다. KS F 2529 규정에 따라 경량 잔골재의 중량 150 g의 표면건조 포화상태의 바텀애시 골재를 사용하여 KS F 2504 규정에 따라 밀도 및 흡수율 실험을 진행하였다. 바텀애시 골재 크기별 표건 밀도는 1.71~1.73 g/cm<sup>3</sup> 사이의 값을 나타냈으며, 이는 표준 바텀애시 밀도인 1.0~2.0 g/cm<sup>3</sup> 범위 안에 만족하는 결과이다. 흡수율은 7~10 % 사이의 값을 나타내고 있다. 이는 Kim et al.(2021)의 콘크리트 제작에 사용된 바텀애시의 밀도, 흡수율과 비슷한 값을 보이며, 본 연구에서 활용된 바텀애시가 콘크리트 골재로서 활용 가능한 것으로 판단된다. 또한, DA가 SA 보다 더 높은 밀도를 갖고 있으며, 흡수율은 반대로 더 낮은 값을 나타냈다. 공극이 많은 바텀애시 골재의 특성으로 인해 밀도가 낮을수록, 공극을 통한 흡수율이 증가하는 것으로 판단된다.

Table 2는 배합설계에 사용되는 재료별 특성을 나타냈다. 바인더는 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 배합 시 낮은 단위 수량으로 인한 골재 사이의 접착성이 감소할 가능성이 있기 때문에 증점제를 사용하였다.

Table 1. Physical properties of materials used

Materials	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Absorption (%)
Water	1.00	-
Cement	3.14	-
Bottom ash	2.5~5.0 mm	1.71
	1.2~2.5 mm	1.75
Cohesive agent	0.97	-

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> )	Apparent-density (g/cm <sup>3</sup> )	Absorption (%)
SA	1.73	1.61	1.84	7.75
DA	1.71	1.54	1.85	10.7

## 2.2 다공성 콘크리트 배합 및 시편 제작

Table 3은 바텀애시를 사용한 다공성 콘크리트의 배합표를 나타냈다. 동일한 물-바인더 비에서 골재의 크기, 가압다짐을 실험 변수로 하여 6종류의 배합 설계를 수행하였으며, 이에 따른 콘크리트 물성 영향을 파악하고자 하였다.

바텀애시 골재 크기는 1.2~2.5 mm 20%와 2.5~5.0 mm 80%를 부피비로 치환한 SA와 2.5~5.0 mm로만 이루어진 DA를 사용하였다. 또한, 모든 배합은 물-바인더 비는 0.30로 고정하고 가압다짐은 0.5, 1.5 및 3.0 MPa로 설정하여 이에 따른 물리적 특성과 열전도도를 분석하였다.

외적 요인이 콘크리트의 양생에 미치는 영향을 배제하기 위해 28일 동안 수중양생을 실시하였다. 잔골재로 모래를 사용하지 않고, 바텀애시 골재만을 사용하였으며, 골재 간의 접착성을 확보하기 위해 배합수 중량 대비 35%의 증점제를 추가로 사용하였다.

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
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

Fig. 2는 원주형 시편과 프리즘 시편의 가압다짐 과정을 나타내었다. 콘크리트 배합 완료 후, 굳지 않은 콘크리트를 원주형 몰드와 프리즘 몰드에 타설한 후 다짐하였다. 이후, 콘크리트 시편 상면에 가압판(Steel plate)을 배치하여 유압 프레스 장비를 이용한 유압 제어를 통해 목표 가압다짐 수준까지 시편을 가압다짐하였다.

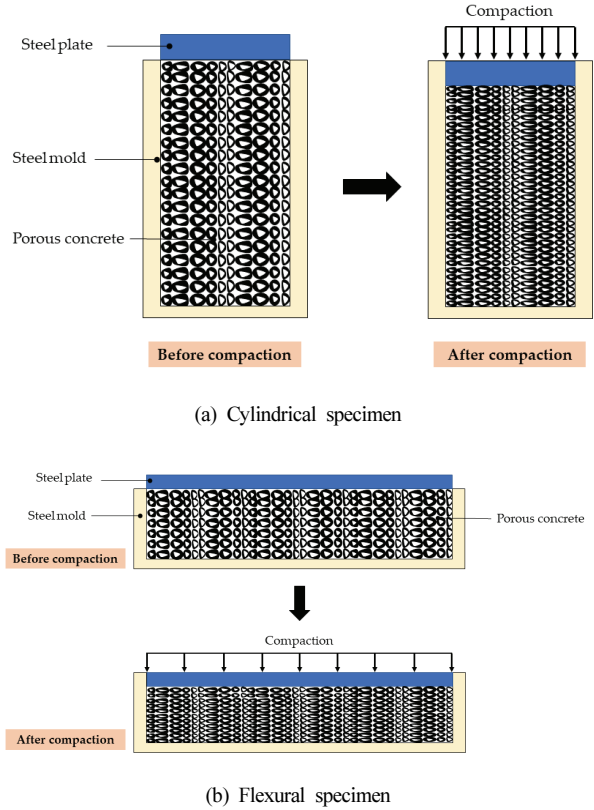


Fig. 2. Compaction process

### 2.3 실험방법

가압다짐을 활용한 다공성 콘크리트의 모든 실험은 한 배합당 3개 이상의 시편으로 실험을 진행하였으며, 평균값을 계산하여 실험결과를 도출하였다.

다공성 콘크리트의 단위중량은 원주형 공시체(직경 100×높이 200 mm)으로 실험을 진행하였으며, 실험 시편은 모두 기건상태에서 실험을 진행하였다. 시편의 기건 중량( $W$ ), 부피( $V$ )를 측정하여 식 (1)을 통해 단위중량을 계산하였다.

$$\text{단위중량}(\gamma) = \frac{W}{V} = \frac{W}{\left(\frac{\pi \times d^2}{4}\right) \times h} \quad (1)$$

다공성 콘크리트의 총공극률은 ASTM C1754(2016)에 따라 원주형 공시체(직경 100× 높이 200 mm)를 사용하여 실험을 진행하였다. Fig. 3에 나타낸 바와 같이 시편의 수중중량( $W_2$ ), 기건중량( $W_1$ ) 물의 단위중량( $\rho_w$ ), 및 부피( $V$ )를 측정하여 식 (2)를 통해 총공극률을 계산하였다.

$$\text{총 공극률}(A) = \left[1 - \frac{(W_2 - W_1)}{\rho_w V}\right] \times 100 \quad (2)$$

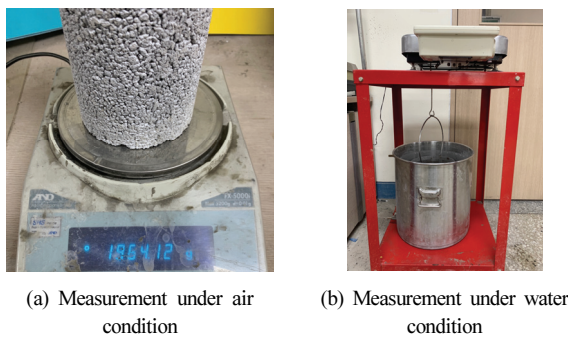


Fig. 3. Total void ratio test

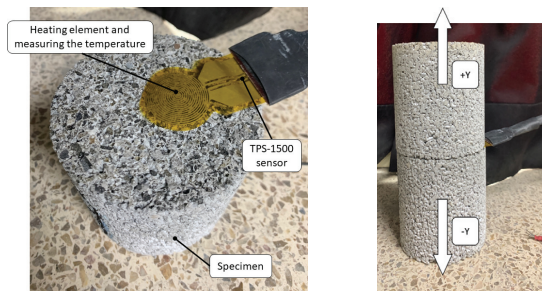


Fig. 4. Thermal conductivity test

다공성 콘크리트의 열전도도는 ASTM D7984-16에 따라 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 TPS 방법을 적용하였다. 이 방법의 경우, 평단성을 확보한 곳에 두 개 시편을 위아래로 위치시키고 두 시편 사이에 온도 센서를 삽입하여 열전도도를 측정한다.

열전도도 실험은 시편 하나당 3번 이상 반복 측정하였으며, 한 배합당 3개의 시편을 사용하여 결과값을 도출하였다.

기건 상태의 원주형 공시체 높이를 반으로 잘라  $\varnothing 100 \times 100$  시편 2개 사이에 열전달 센서를 넣어 계산하였다. 또한, 오븐 건조 상태의 열전도도는  $105 \pm 5$  °C 오븐기에서 24시간 이상 건조시킨 후 측정하였다.

실험 진행 시, 시편의 절삭 단면과 측정 센서의 높이를 유지하고, 열전달 센서에 맞닿는 콘크리트 절단면을 깨끗이 닦아 열전도도 실험에 영향을 미치지 않게 하였다. 또한, 열전달 센서와 절단면이 잘 맞물리도록 확인한 후에 실험을 진행하였다.

TPS-1500 열전달 측정 장비는 주변의 온도와 습도가 실험 결과에 영향을 미치기 때문에, 콘크리트 시편과 주변의 온도가 거의 동일하게 유지되는 열적 평형 조건에서 열전도도를 측정하였다.

열전도도 측정은 식 (3)을 통해 계산하였다.

$$\text{열 전도도} k = -q_y \frac{H}{T_1 - T_2} \quad (3)$$

여기서,  $k$ : 열전도도,  $q_y$ : y방향 열 유속 ( $W/m^2$ ),  $T_1 - T_2$ : 시편의 온도 변화,  $H$ : 시편의 높이를 의미한다.

### 3. 실험 결과 및 분석

Table 4 에 콘크리트 시편의 단위중량, 총공극률 및 열전도도 측정 결과를 나타내었다.

Table 4. Porous concrete test results

Aggregate size	W/B	Compaction (MPa)	Unit weight ( $kg/m^3$ )	Total void ratio (%)	Thermal conductivity [Air] (W/mK)	Thermal conductivity [Oven] (W/mK)
DA	0.30	0.5	1,202	31.3	0.58	0.34
		1.5	1,264	26.8	0.59	0.37
		3.0	1,372	20.9	0.60	0.39
SA		0.5	1,257	28.3	0.60	0.42
		1.5	1,359	22.7	0.63	0.43
		3.0	1,474	17.9	0.67	0.46

### 3.1 단위중량

Fig. 5는 가압다짐에 따른 다공성 콘크리트의 골재의 종류, 가압다짐의 크기에 따른 단위중량 결과를 그래프로 나타내었다. DA와 SA를 사용한 다공성 콘크리트 시편의 단위중량은 가압다짐 수준이 0.5 MPa 일 때, 각각 1,202 kg/m<sup>3</sup>, 1,257 kg/m<sup>3</sup>이며, 1.5 MPa 일 때, 1,264 kg/m<sup>3</sup>, 1,359 kg/m<sup>3</sup> 이고, 3.0 MPa 일 때, 1,372 kg/m<sup>3</sup>, 1,474 kg/m<sup>3</sup>로 가압다짐이 높아질수록 단위중량은 증가하는 경향을 나타냈다. 이러한 실험 결과는 가압다짐 수준이 증가함에 따라 콘크리트 내 공극이 줄어들면서 단위 중량이 증가하기 때문으로 판단된다. 바텀애시를 활용한 다공성 콘크리트의 단위중량은 전체적으로 1,200~1,480 kg/m<sup>3</sup> 범위의 값을 나타낸다. 이는 Zaetang et al.(2013)에서 제시한 다공성 콘크리트의 단위중량 값과 유사한 값을 나타냈다.

0.5, 1.5 및 3.0 MPa 가압다짐에서 SA를 사용한 콘크리트가 DA를 사용한 콘크리트보다 각각 약 5 %, 7 % 및 7 % 더 높은 결과를 나타냈다. 이는, 가압다짐을 통해 압축된 다공성 콘크리트는 SA를 사용한 콘크리트가 DA를 사용한 콘크리트보다 단위부피당 골재 사이의 거리가 더 치밀한 구조를 갖게 되는 것을 의미한다. 이를 통해 가압다짐 수준이 높을수록, 골재가 SA일수록 단위중량은 증가하는 경향을 확인할 수 있다.

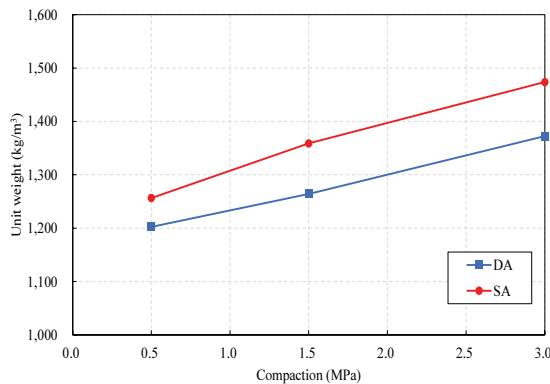


Fig. 5. Unit weight test results

### 3.2 총 공극률

Fig. 6은 가압다짐에 따른 다공성 콘크리트의 총 공극률 실험결과를 그래프로 나타내었다. DA와 SA를 사용한 다공성 콘크리트의 총 공극률은 각각 가압다짐이 0.5 MPa 일 때, 31.34 %, 28.33 % 이고, 1.5 MPa 일 때, 26.75 %, 22.66 % 이며, 3.0 MPa 일 때,

20.96 %, 17.89 %로 가압다짐이 증가할수록 총 공극률은 감소한다. 또한, 가압다짐이 0.5, 1.5 및 3.0 MPa 일 때, SA를 사용한 콘크리트의 총공극률이 DA를 사용한 콘크리트의 총공극률보다 약 10 %, 15 %, 15 % 더 낮은 결과를 나타냈다. 이러한 실험결과는 가압다짐이 증가할수록 콘크리트 내 골재 간의 거리는 좁아지고, 공극은 줄어들어 총 공극률은 감소하기 때문으로 판단된다.

따라서, 가압다짐이 증가할수록, SA를 사용하는 콘크리트가 DA를 사용하는 콘크리트에 비해 총공극률이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 이는, 단위중량과는 상반된 결과로서, 단위중량이 증가함에 따라 총 공극률은 감소하는 결과를 도출할 수 있다. 가압다짐과 골재의 종류에 영향을 받는 단위중량과 총 공극률 실험은 서로 상관관계를 보이는 것으로 판단된다.

전체배합의 총 공극률은 약 17~32 % 사이의 값을 나타냈다. 이는 가압다짐이 0.5 MPa 일 경우를 제외한 나머지 배합이 ACI 522R-10에서 제시하는 다공성 콘크리트의 총 공극률 범위인 15~25 %에 만족하는 결과를 나타냈다. 또한, Park et al.(2009)에서 바텀애시를 사용한 다공성 콘크리트의 총 공극률 범위는 약 19~22 % 사이의 값을 나타냈다. 이를 통해, 본 연구의 총 공극률 실험 결과는 다공성 콘크리트로서 적용 가능하다는 것으로 판단된다.

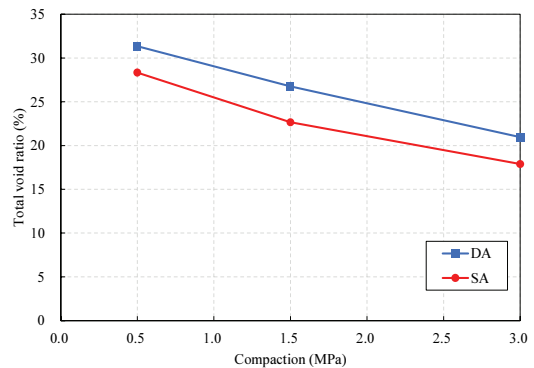


Fig. 6. Total void ratio test results

### 3.3 열전도도

Fig. 7은 가압다짐에 따른 다공성 콘크리트의 기건 상태 열전도도와 오븐건조 상태 열전도도 결과를 그래프로 나타내었다.

기건 상태일 때의 DA와 SA를 사용하는 콘크리트 시편의 열전도도는 각각 가압다짐이 0.5 MPa 일 때 0.58, 0.60 이며, 1.5 MPa 일 때 0.59, 0.63 이고, 3.0 MPa 일 때 0.60, 0.67 이다.

오븐건조 상태의 DA와 SA를 사용하는 콘크리트 시편의 열전도도는 각각 가압다짐이 0.5 MPa 일 때 0.34, 0.37 이며, 1.5 MPa



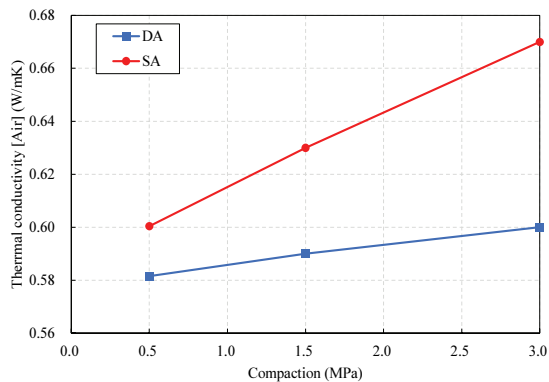
일 때 0.37, 0.43 이고, 3.0 MPa 일 때, 0.39, 0.46 이다.

또한, 가압다짐이 0.5, 1.5 및 3.0 MPa 일 때, 기건 상태에서 SA를 사용하는 콘크리트의 열전도도가 DA를 사용하는 콘크리트의 열전도도보다 약 3 %, 7 %, 12 % 더 높고, 오븐건조 상태에서 각각 약 21 %, 17 %, 18 % 더 높은 결과를 나타낸다.

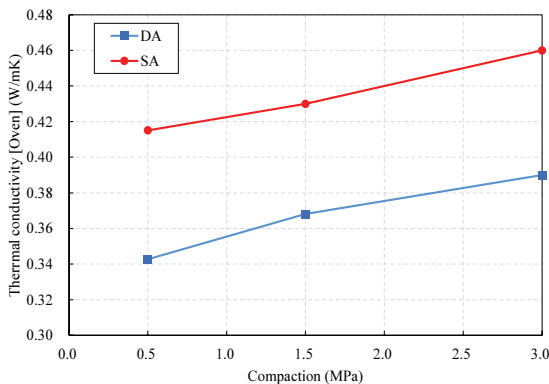
가압다짐이 높을수록, 골재의 종류가 SA일수록 열전도도는 높아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 단위중량 결과와 비례하는 결과로 상관관계는 서로 비례하는 결과를 추론할 수 있다.

다공성 콘크리트의 열전도도는 동일한 골재 종류와 가압다짐 일 때, 오븐 건조 상태보다 기건 상태일 때 더 높은 값을 나타내었다. 구체적으로, DA골재를 사용하고 가압다짐 수준이 각각 0.5, 1.5 및 3.0 MPa일 때, 기건 상태 시편의 콘크리트 열전도도가 오븐 건조 상태 콘크리트 시편의 열전도도에 비해 각각 약 70 %, 60 % 및 54 % 더 크게 나타났다.

또한, SA를 사용하는 콘크리트 시편의 가압다짐 수준이 각각



(a) Thermal conductivity [air] results



(b) Thermal conductivity [oven] results

Fig. 7. Total void ratio test results Thermal conductivity test results

0.5, 1.5 및 3.0 MPa일 때, 기건 상태 시편의 열전도도가 오븐 건조 상태 시편의 열전도도에 비해 각각 약 45 %, 47 % 및 46 % 더 크게 나타났다.

이는 다공성 콘크리트 안에 있는 수분의 차이로 인한 결과로, 오븐 건조 상태에서는 공극 안에 존재하던 자유수의 증발로 인해 콘크리트 내부 및 골재 사이의 공극이 증가하면서 기건 상태 일 때보다 더 낮은 열전도도가 측정되었다고 판단된다.

#### 4. 열전도도와 물리적 특성 상관관계 분석

선행연구(Jeong et al. 2021)에 따르면, 열전도도-단위중량 상관관계는 동일한 가압다짐 값에서 W/B 증가에 따라 단위중량 증가 대비 열전도도가 큰 폭으로 증가하여 낮은 상관관계를 보였다. 또한, 열전도도-총공극률 상관관계는 동일한 가압다짐 값에서 W/B 증가에 따라 총공극률 증가 대비 열전도도가 큰 폭으로 증가하여 낮은 상관관계를 나타냈다.

상관관계 그래프에서 관계식을 통해 서로 다른 두 실험 간 회귀 분석을 진행하여 연관성을 분석하였다. 회귀분석을 통한 상관계수 ( $R^2$ )는 0에서 1사이의 값을 나타내며, 1에 가까울수록 상관관계가 높은 것을 나타내고, 0에 근접할수록 상관관계가 낮은 것을 나타냈다.

본 연구에서는 선행연구를 기반으로 실험을 진행함으로써 실험 결과를 더욱 확보하여 명료한 상관관계를 획득하였다.

가압다짐 증가에 따라 열전도도-단위중량, 열전도도-총공극률 상관관계는 선행 연구의 동일한 상관관계 그래프에서의 상관계수  $R^2$ 보다 더 큰 값을 나타냈다. 이러한 값은 동일한 가압다짐에서 단위중량, 총 공극률 및 열전도도 실험 모두 DA를 사용한 콘크리트에서 SA를 사용한 콘크리트로 일정한 감소량으로 인해 더 높은 상관계수가 나타난 것이라 판단된다.

##### 4.1 열전도도와 단위중량 상관관계

Fig. 8은 다공성 콘크리트의 열전도도와 단위중량 상관관계 그래프를 나타냈다. 열전도도-단위중량 상관관계는 선행연구(Jeong et al. 2021)와 동일하게 단위중량이 증가함에 따라 열전도도 결과도 증가하여 서로 비례하는 경향을 나타냈다. 또한, 선행연구와 본 연구 결과를 종합한 상관관계  $R^2$ 값은 0.5096으로 열전도도와 단위중량 상관관계는 선행연구( $R^2=0.4555$ ) 보다 더 높은 상관계수 값을 보였다.

이는 선행연구 결과에 단위중량 증가 대비 열전도도가 일정한

폭으로 증가하는 일정한 경향을 가진 본 연구의 결과가 추가됨으로써 더 높은 상관계수 값을 나타냈다고 판단된다.

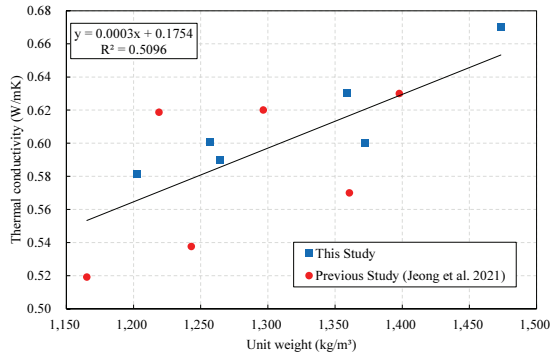


Fig. 8. Relationship between thermal conductivity and unit weight

#### 4.2 열전도도와 총 공극률 상관관계

Fig. 9는 열전도도와 총공극률 상관관계 그래프를 나타냈다. 열전도도-총공극률 상관관계는 선행연구와 동일하게 총공극률이 증가함에 따라 열전도도 결과는 감소하는 서로 반비례하는 경향을 나타냈다. 또한, 선행연구와 본 연구 결과를 종합한 상관관계  $R^2$  값은 0.4667으로 열전도도와 총공극률 상관관계는 선행연구 ( $R^2=0.3991$ ) 보다 더 높은 상관계수 값을 보였다.

이는 선행연구를 기반으로 실험을 진행함으로써 실험결과를 더욱 확보하여 명료한 상관관계를 획득하여 더 높은 상관계수를 나타냈다고 판단된다.

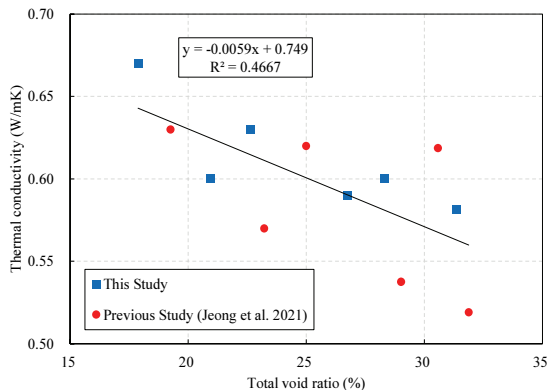


Fig. 9. Relationship between thermal conductivity and total void ratio

### 5. 결론

본 연구에서는 석탄화력발전소 부산물인 바텀애시를 활용한 다공성 콘크리트의 특성과 열전도도에 관한 실험 연구를 수행하였으며, 주요 연구결과는 다음과 같다.

1. 가압다짐이 0.5, 1.5 및 3.0 MPa일 때, SA 사용 다공성 콘크리트의 단위중량은 DA 사용 콘크리트의 단위중량에 비해 약 5%, 7% 및 7% 더 높은 결과를 나타냈다. 반면에, 총 공극률은 약 10%, 15%, 15% 더 낮은 결과를 나타낸다. 따라서, 사용 바텀애시 골재의 입도 구성은 단위중량과 총공극률에 영향을 준다.
2. 가압다짐이 0.5 MPa, 1.5 MPa 및 3.0 MPa일 때, 열전도도 결과는 SA를 사용한 콘크리트가 DA를 사용한 콘크리트보다 기건 상태의 경우 약 3%, 7%, 12% 높았으며, 오븐 건조 상태의 경우 21%, 17%, 18% 더 높은 결과를 보였다. 따라서, 사용 바텀애시 골재의 입도 구성과 가압다짐 수준은 열전도도 결과에 영향을 준다.
3. 동일한 골재의 입도 구성, 물-바인더 비 및 가압다짐에서 기건 상태 시편의 열전도도가 오븐 건조 상태 시편의 열전도도보다 큰 값을 나타냈다. 이는 다공성 콘크리트 공극을 채우는 자유수의 차이가 열전도도의 결과에 영향을 준다는 것을 의미한다.
4. 단위중량이 증가할수록 열전도도는 증가하는 경향을 나타낸다. 열전도도-단위중량 관계의 회귀분석에 따른 상관계수는 0.5096으로 선행연구( $R^2=0.4555$ )와 비교하여 더 높은 값을 나타냈다.
5. 열전도도-총 공극률 상관관계는 서로 반비례하는 경향을 나타냈다. 두 변수 간의 상관계수는 0.4667로 선행 연구의 상관계수 0.3991과 비교해 더 높은 값을 나타냈다.

#### Conflicts of interest

None.

#### 감사의 글

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

## References

- American Concrete Institute (2010). Report on Pervious Concrete, ACI committee 522, Farmington, Hills., MI, Michigan, U.S.A., 1–42.
- 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.
- Chandrappa, A.K., Biligiri, K.P. (2016). Pervious concrete as a sustainable pavement material—research findings and future prospects: a state-of-the-art review, *Construction and Building Materials*, **111**, 262–274.
- 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., Kim, B.S., Park, J.H., Yang, I.H. (2021). An experimental study on thermal property of porous concrete containing bottom ash, *Korean Recycled Construction Resources Institute*, **9(4)**, 625–632 [in Korean].
- Kim, H.K., Jang, J.G., Choi, Y.C., Lee, H.K. (2014). Improved chloride resistance of high-strength concrete amended with coal bottom ash for internal curing, *Construction and Building Materials*, **71**, 334–343.
- 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.
- Kim, Y. H., Kim, H.Y., Yang, K.H., Ha, J.S. (2021). Effect of concrete unit weight on the mechanical properties of bottom ash aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, **273**, 121998.
- 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.
- Ngohpok, C., Sata, V., Satiennam, T., Klungboonkrong, P., Chindaprasirt, P. (2018). Mechanical properties, thermal conductivity, and sound absorption of pervious concrete containing recycled concrete and bottom ash aggregates, *KSCCE Journal of Civil Engineering*, **22(4)**, 1369–1376.
- 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.
- Shen, P., Zheng, H., Lu, J., Poon, C.S. (2021). Utilization of municipal solid waste incineration bottom ash (IBA) aggregates in high-strength concrete, *Resources, Conservation and Recycling*, **174**, 105736.
- Siddique, R. (2010). Use of municipal solid waste ash in concrete, *Resources, Conservation and Recycling*, **55(2)**, 83–91.
- Singh, M. (2018). 1-coal bottom ash, *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete*, **2018**, 3–50.
- Singh, N., Mithulraj, M., Arya, S. (2019). Utilization of coal bottom ash in recycled concrete aggregates based self-compacting concrete blended with metakaolin, *Resources, Conservation and Recycle*, **144**, 240–251.
- Singh, N., Bhardwaj, A. (2020). Reviewing the role of coal bottom ash as an alternative of cement, *Construction and Building Materials*, **233**, 117267.
- Yang, I.H., Park, J.H., Jung, H.W. (2020a). 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. (2020b). A study on the thermal properties of high-strength concrete containing CBA fine aggregates, *Materials*, **13(7)**, 1493.
- 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].
- Zaetang, Y., Wongsat, A., Sata, V., Chindaprasirt, P. (2013). Use of lightweight aggregates in pervious concrete, *Construction and Building Materials*, **48**, 585–591.
- Zhang, Y., Li, H., Abdelhady, A., Yang, J., Wang, H. (2021). Effects of specimen shape and size on the permeability and mechanical properties of porous concrete, *Construction and Building Materials*, **266**, 121074.



### 가압다짐과 바텀애시 골재 크기 특성이 다공성 콘크리트의 열전도도에 미치는 영향

본 논문에서는 바텀애시 골재의 크기 구성과 가압다짐이 다공성 콘크리트의 열전도도에 미치는 영향을 분석하였다. 본 실험 연구에서는 바텀애시를 두 가지 입도의 골재를 섞은 SA와 한 가지 입도만을 갖는 DA를 사용하여 골재 특성을 파악한 후, 다공성 콘크리트 골재로 활용하였다. 물-바인더 비는 0.30으로 고정하고, 가압다짐을 0.5, 1.5 및 3.0 MPa를 콘크리트 시편에 적용하였다. 단위중량, 총 공극률 및 열전도도를 측정하고 분석을 수행하였다. 가압다짐이 증가할 때 단위중량과 열전도도는 증가하고 총공극률은 감소하였다. DA 사용 콘크리트에 비해 SA 사용 콘크리트의 단위중량과 열전도도는 크고 총공극률은 작게 나타난다. 또한, 오븐건조상태 시편의 열전도도가 기건상태 시편의 열전도도보다 낮은 결과를 나타냈다. 회귀분석을 통해 다공성 콘크리트의 단위중량, 총 공극률 및 열전도도와의 상관관계를 제시하였다. 열전도도와 단위중량은 서로 비례하는 상관관계를 나타내며, 열전도도와 총공극률은 서로 반비례하는 상관관계를 나타냈다.