

잔골재를 바이오차로 치환한 콘크리트의 강도와 열적 특성

Strength and Thermal Properties of Concrete for Replacement Fine Aggregate with Biochar

김경철¹ · 임광모^{2*} · 손민수³ · 김영석⁴ · 고경택⁵

Kyoung-Chul Kim¹ · Kwang-Mo Lim^{2*} · Min-Su Son³ · Young-Seok Kim⁴ · Kyung-Taek Koh⁵

(Received November 5, 2023 / Revised November 20, 2023 / Accepted November 21, 2023)

In this study, we aim to develop a carbon-reducing concrete technology by incorporating biochar. Performance evaluation experiments were conducted on concrete mixtures containing biochar with insulating and carbon-capturing properties, which are essential for key infrastructure sectors such as construction and tunnels. Concrete mixtures were designed with different biochar incorporation rates of 0 %, 5 %, 10 %, 15 %, and 20 %, as well as water-to-binder ratios of 0.25, 0.30, 0.35, and 0.40. To assess the physical properties of each mixture, unit weight, total porosity, and permeability were measured, while mechanical properties were determined through the measurement of concrete compressive and flexural strengths. Key factors for enhancing the insulating effect of carbon-reducing concrete containing biochar were identified through regression analysis, indicating a close correlation among biochar incorporation rate, unit weight, concrete strength, and thermal conductivity. It is anticipated that it can be utilized as an insulating material to enhance thermal performance in northern regions with severe winter climates.

키워드 : 바이오차, 단열성능, 친환경 콘크리트, 탄소 저감

Keywords : Biochar, Thermal insulation performance, Eco friendly concrete, Carbon reduction

1. 서론

현재 콘크리트는 다른 재료들에 비해 건설업에서 수요가 가장 높은 재료중 하나이다. 현장에서 쉽게 수급이 가능하며 높은 강도와 가격이 저렴하여 전 세계적으로 많이 사용되고 있다(Mohamad et al, 2021). 시멘트를 생산하는 과정에서 이산화탄소 배출량이 높아 환경에 부정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 시멘트를 대체할 수 있는 재료를 개발하기 위해 다양한 연구가 진행 중이며, 시멘트 수요가 감소할 경우, 생산 중에 배출되는 오염물질 등을 충분히 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다. 친환경 재료를 시멘트 대체 재료로 적용이 가능하고, 경제적인 콘크리트 생산을 위한 연구가 진행되고 있다.

국내에서 현재 연간 200만 톤의 미사용 산림 바이오매스가 존재하고, 폐기물 포함 7,000만 톤의 바이오매스 자원이 발생하여 이를 활용한 처리 기술 개발이 필요하다. 또한 바이오차(biochar)는 건설 분야뿐만 아니라 환경친화적인 특성과 재사용 및 비용의 효율성 등으로 인해 다양한 응용 분야에 사용되고 있다(Yaashikaa et al, 2020). 현재 바이오차는 폐목재 등을 처리하고 변환하는 과정에서 발생하는 이산화탄소를 포집하여 대기 중에 배출되는 탄소의 양을 감소시킬 수 있는 이점을 갖고 있다. 바이오차의 변환 과정에서 저전력 고효율을 내는 친환경 에너지 등을 활용하면 탄소를 처리하고 저장하는 과정에서 소비되는 에너지를 추가로 감소할 수 있다. 이처럼 친환경 재료인 바이오차를 건설

* Corresponding author E-mail: limkm@kict.re.kr

¹한국건설기술연구원 남북한인프라특별위원회 북방인프라특화팀 수석연구원 (Korea Institute of Construction Technology, Kyonggi-do, 10223, Korea)

²한국건설기술연구원 남북한인프라특별위원회 박사후연구원 (Korea Institute of Construction Technology, Kyonggi-do, 10223, Korea)

³한국건설기술연구원 남북한인프라특별위원회 한반도인프라협력팀 수석연구원 (Korea Institute of Construction Technology, Kyonggi-do, 10223, Korea)

⁴한국건설기술연구원 남북한인프라특별위원회 북방인프라특화팀 선임연구원 (Korea Institute of Construction Technology, Kyonggi-do, 10223, Korea)

⁵한국건설기술연구원 남북한인프라특별위원회 위원장 선임연구원 (Korea Institute of Construction Technology, Kyonggi-do, 10223, Korea)

Copyright © 2023 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

분야에 활용하면 탄소중립에 크게 기여할 수 있으며, 매립된 폐기물의 상당 부분을 친환경 건설 재료로 활용할 수 있다.

바이오차를 시멘트 대체 재료로 활용한 연구(Yang and Wang 2021)에서 바이오차 함유량을 2 %와 5 %를 적용하여 바이오차만의 성분을 분석한 결과, 콘크리트 밀도와 탄성계수가 감소하는 것으로 분석되었다. 또한 건설 산업에서 목재 폐기물의 열분해를 통한 바이오 숯의 적용은 건축물과 사회 기반 시설물에서 안정적으로 탄소를 격리할 수 있어 전 세계 탄소 배출량의 상당한 감소로 이어질 수 있다고 분석하였다(Woolf et al. 2010). Khushnood et al.(2016)은 시멘트 대체 재료로 땅콩과 헤이즐넛 껍질에서 추출한 바이오차를 첨가하여 콘크리트의 쏘겜인장강도와 휨강도를 분석한 결과, 바이오차 혼입률이 증가할수록 강도가 증진되는 것으로 분석되었다.

또한 활엽수에서 추출한 바이오 차를 시멘트 중량 대비 5 %로 치환하여 콘크리트의 역학적 특성을 분석하였다. 모르타르 실험을 통해 압축강도가 향상되는데 이는 바이오차의 내부 경화 작용에 기인하는 것으로 분석되었다(Choi et al. 2012). Akhtar and Sarmah(2018a; 2018b)에서는 왕겨를 연소한 숯을 적용하였고, Gupta et al.(2020)에서는 바이오차를 시멘트 중량 대비 0 ~ 2 %를 채움제로 대체하여 역학적 특성을 분석한 결과, 바이오차 콘크리트의 압축강도와 내구성을 향상시키고, 기존 콘크리트에 적용된 실리카퓌의 대체제로 사용이 가능한 것으로 파악되었다. Han and Choi(2023)는 목질계 바이오차를 함유한 시멘트 모르타르의 역학적 특성을 분석하였다. 역학적 성능은 시멘트 질량비 5 %까지 목질계 바이오차로 치환하였고 기존과 유사한 성능을 나타내는 것으로 분석되었다. 다양한 친환경 재료를 활용하여 콘크리트 기술 개발을 통해 시멘트 사용량 감소 및 탄소 저감을 주 목적으로 한다.

따라서 본 연구에서는 비 구조체인 친환경 탄소 저감형 콘크리트를 개발하기 위해 다공성 물질인 바이오차를 사용하였다. 본 연구에서 사용된 바이오차는 강도 증진 목적이 아닌 단열 특성에 초점을 맞췄으며, 기본물성, 역학적 성능 및 단열성능 평가를 통해 결과를 도출하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 사용재료

본 연구에서 사용된 바이오차의 주요 구성 광물의 성분은 C(탄소) 85 %, O(산소) 13 %, Ca(칼슘) 0.6 %, K(칼륨) 0.5 %, Si(규소) 0.2 %, Mg(마그네슘) 0.1 %를 보유하고 있다. 또한 바이오차의 물리적 성질은 5~10 mm 크기의 단일골재, 밀도 0.78 g/cm³, 조립률

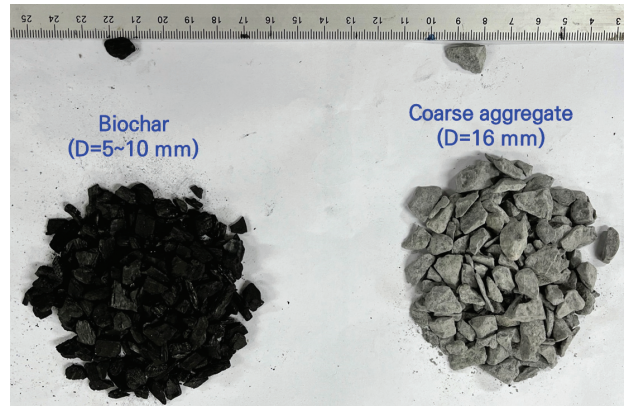


Fig. 1. Comparison of biochar and aggregate

(F,M) 3.09와 흡수율 9.91%를 갖는다(Fig. 1).

구성 바인더는 보통 포틀랜드 시멘트와 굵은 골재(16 mm)를 사용하였다. 바이오차는 밀도가 작고, 물을 흡착시키는 특성을 갖고 있다. 따라서 부피 치환을 하는 경우에는 극소량이 사용됨에 따라 본 배합은 중량비로 치환하였다. 잔골재를 바이오차 혼입량으로 치환하여 다공성 콘크리트로 구성하였다. 골재와 골재 사이의 부착력을 유지하기 위해 배합수의 중량 대비 35 %의 증점제를 사용하였다.

2.2 콘크리트 배합 및 제작

바이오차를 혼입한 콘크리트의 배합조건은 Table 1과 같으며, 전체 배합의 물-바인더(w/b) 비를 0.20, 0.30, 0.35, 0.40으로 구성하였다. Kim et al.(2022)의 연구결과를 바탕으로 작업성이 우수한 0.35를 대표 배합으로 선정하였다. 총 16개의 배합에 바이오차 혼입율을 0, 5, 10, 15 및 20 %를 각각 적용하였다. 시편의 제작방법은 비 구조체에 적용하기 위한 다공성 콘크리트로서, 건식방법으로 시편을 제작하였다. 사전에 준비된 재료를 제조 방법에 따라 각 배합별로 믹싱을 실시하였다. 이후 시편 상면에 가압판을 배치하여 1 MPa의 일정한 압력을 가해 압축 및 부착 등을 고려하여 성형성을 높여 제작하였다. 제작된 시편은 24시간 동안 기건양생을 실시하였고, 거푸집에서 탈형 후 20 ± 5 °C 조건으로 수중양생을 진행하였다.

본 연구에서는 다공성 콘크리트의 성능검증을 위해 기본물성과 역학적 특성 및 열적 특성을 분석하였다. 먼저, 콘크리트의 물리적 특성을 파악하기 위해서 원주형 시편(직경 100 × 높이 200 mm)으로 공극률, 단위중량 및 투수계수를 각 배치별로 측정하였다. 또한 콘크리트의 역학적 성능 평가를 위하여 각 배치별 압축강도와 휨 강도를 측정하였고, 콘크리트의 열적 특성을 파악하기 위하여 열전도율 실험을 수행하였다.

Table 1. Mix proportions

Mixture	W/B	Water (kg)	Cement (kg)	Coarse aggregate (kg)	Biochar		Cohesive agent (kg)	Compaction (MPa)
					Size (mm)	Contents (%)		
Standard	0.35	4.39	12.5	45.8	0~10	0	1.54	1.0
1	0.25		17.5	39.6		5		
2	0.30		14.6	41.9				
3	0.35		12.5	43.5		10		
4	0.40		11.0	44.8				
5	0.25		17.5	37.5		15		
6	0.30		14.6	39.7				
7	0.35		12.5	41.3		20		
8	0.40		11.0	42.4				
9	0.25		17.5	35.4		0		
10	0.30		14.6	37.5				
11	0.35		12.5	39.0		0		
12	0.40		11.0	40.1				
13	0.25		17.5	33.4		0		
14	0.30		14.6	35.3				
15	0.35		12.5	36.7		0		
16	0.40	11.0	37.7					

3. 실험결과 및 분석

3.1 기본물성

종합적인 실험 결과를 기반으로 기준 배합인 W/B 비 0.35를 대표 배합으로 선정하였다. 단열성능은 높지만, 강도가 낮은 W/B 0.40과 바이오차 혼입률 20 %(배합 A), 중간 성능을 갖는 W/B 비 0.30과 바이오차 혼입률 10 %(배합 B), 강도가 높고 단열성능이 낮은 W/B 비 0.25와 바이오차 혼입률 5 %(배합 C)를 대상으로 실험 결과를 비교·분석하였다.

다공성 콘크리트의 총 공극률을 측정하기 위해 원주형 시편을 이용하여 수중 중량(W_1 , g), 기건상태의 시편 중량(W_2 , g)과 시편의 부피(V , cm^3)를 각각 측정하였다. 물의 단위중량(ρ_w , g/cm^3)과 측정된 결과를 식(1)에 각각 대입하여 다공성 콘크리트의 총 공극률을 산정하였다.

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

대표 배합인 W/B 비 0.35 기준 바이오차 혼입률 0, 5, 10, 15 및 20 %에 해당하는 총 공극률은 0.27, 0.37, 0.62, 1.16 및 2.10 %로 측정되었다. 바이오차 혼입률이 증가할수록 총 공극률은 증가하는 경향을 나타내는데 이는 콘크리트 내부 골재 사이의 공극과 외부

공극의 크기가 커져 공극률이 증가하는 것으로 판단된다(Fig. 2).

배합 A, 배합 B 및 배합 C의 총 공극률은 각각 2.87, 0.38 및 0.15 %로서, 감소하는 경향을 나타내었다. W/B 비가 증가할수록 단위 시멘트량 대비 단위 수량이 증가함에 따라 총공극률은 증가하는 것으로 나타났다. 이는 각 배합에서 상대적으로 작은 입자크기(5 ~ 10 mm)인 바이오차가 혼합됨에 따라 압축성형의 방해로 인해 총 공극률이 감소하는 경향을 나타내었다.

또한 다공성 콘크리트의 단위중량 측정을 위해 시편을 측정 2일 전 양생수조에서 꺼내 2일 이상 상온에서 건조 후 기건상태를 유지하였다. 각 배합별 원주형 공시체 시편의 중량과 길이 측정을 통해 식 (2)을 활용하여 산정하였다.

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

여기서, W는 시편의 중량(g), V는 시편의 부피(mm^3), d는 시편의 지름(mm), h는 시편의 높이(mm)이다.

대표 배합인 W/B 비 0.35 기준 바이오차 혼입률 0, 5, 10, 15 및 20 %에 해당하는 단위질량은 2395, 2315, 2206, 2135 및 2045 kg/m^3 의 값을 나타내었다. 이는 경량콘크리트 기준인 2100 kg/m^3 보다 다소 높지만, 바이오차 혼입률이 증가할수록 적용 범위가 만족하는 수준의 값을 나타낸다.

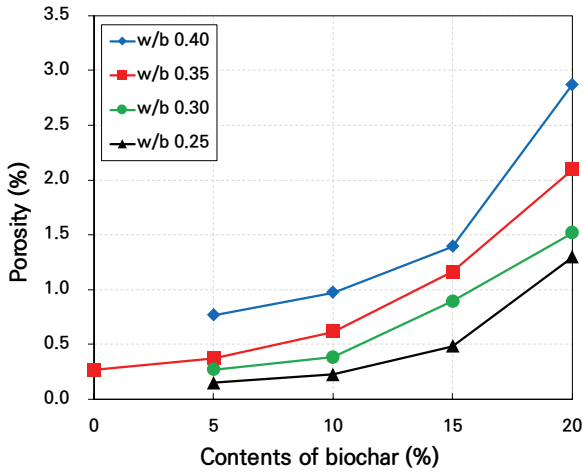


Fig. 2. Porosity



Fig. 4. Test of permeability coefficient

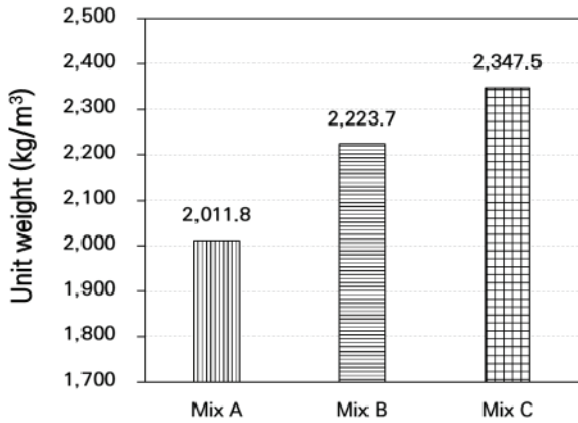


Fig. 3. Classification for unit weight

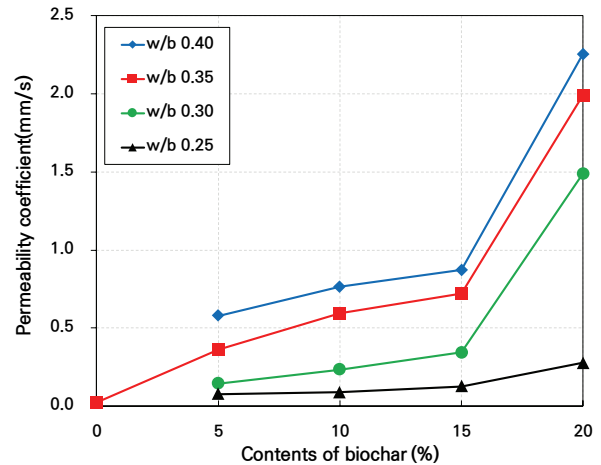


Fig. 5. Permeability coefficient

또한 Fig. 3과 같이 배합 A, 배합 B 및 배합 C의 단위질량은 각각 2012, 2224 및 2348 kg/m³로서, 단위중량이 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 W/B 비가 낮아지고, 압축성형을 통해 콘크리트의 총 공극률이 낮아지면서 단위중량이 증가하는 경향을 나타낸다.

바이오차를 혼입한 다공성 콘크리트의 투수계수 측정을 위하여 월류구와 배수구의 수위차를 150 mm를 두고 투수 원통안에 시편을 설치하였다. 원통 상단으로부터 서서히 물을 채워 배수구와 월류량이 일정하게 되었을 때 실험을 진행하였다(Fig. 4). 투수계수 실험은 0.5분 동안 배수구에서 배출되는 물의 양을 3회 측정하여 식(3)에 대입하여 투수계수를 산정하였다.

$$\text{투수계수} = \frac{L}{h} \times \frac{Q}{A(t_2 - t_1)} \quad (3)$$

여기서, L은 시편의 두께(mm), A는 시편의 단면적(mm²), h는 수위차(mm), t₁은 측정 시작 시간(초), t₂는 측정 종료시간(초), Q는 t₁-t₂에 배수된 수량(mm³)이다.

대표 배합인 W/B 비 0.35 기준 바이오차 혼입률 0, 5, 10, 15 및 20 %에 해당하는 투수계수는 0.02, 0.36, 0.59, 0.72 및 1.99의 값으로 증가하는 경향을 나타낸다(Fig. 5). 이는 바이오차 혼입률이 증가함에 따라 투수계수는 총 공극률과 유사한 경향을 나타내며, 콘크리트 내부 골재 사이의 공극 크기 및 분포에 따라 투수계수에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 배합 A, 배합 B 및 배합 C의 투수계수는 각각 2.25, 0.23 및 0.08로서, 앞서 언급된 물-바인더 비 0.35와 유사한 경향을 나타내었다.

3.2 역학적 성능

바이오차를 혼입한 콘크리트의 역학적 특성을 분석하기 위하여 KS F 2405 콘크리트의 압축강도 시험방법과 KS F 2408 콘크리트의 휨 강도 시험방법에 따라 재령 28일 강도를 측정하였다. 각 배치별 시편 3개의 강도를 측정하였으며, 2,000 kN 용량의 만능형재료시험기(Universal Testing Machine, UTM)를 사용하였다.

대표 배합인 W/B 비 0.35에서 바이오차 혼입률 0, 5, 10, 15 및 20 %에 해당하는 압축강도는 27.89, 20.48, 18.18, 15.29 및 14.55 MPa로 측정되었다(Fig. 6). 이는 바이오차 혼입률이 증가함에 따라 바인더량이 상대적으로 감소하여 골재와 골재 사이의 부착 성능이 감소하여 압축강도가 감소하는 경향을 나타내었다. 배합 A, 배합 B 및 배합 C의 압축강도는 각각 12.73, 21.74 및 28.20 MPa로서, 증가하는 경향을 나타낸다. 이는 콘크리트의 압축강도가 증가할수록 공극률이 감소함에 따라 강도는 전반적으로 높게 나타낸다.

Fig. 7과 같이 W/B 비 0.35에서 바이오차 혼입률 0, 5, 10,

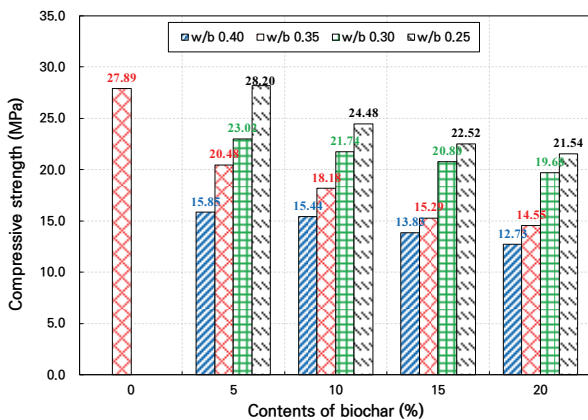


Fig. 6. Compressive strength

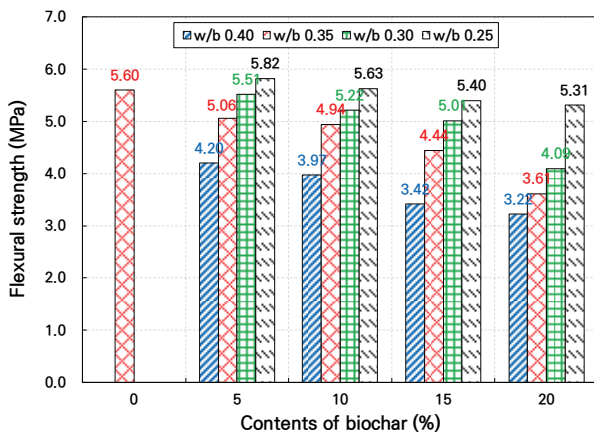


Fig. 7. Flexural strength

15 및 20 %에 해당하는 휨강도는 5.60, 5.06, 4.94, 4.44 및 3.61 MPa로 측정되었다. 일반 콘크리트의 휨강도 실험 파괴 형상과 유사한 파괴 형태를 나타내며, 휨강도 역시 골재와 골재 사이의 부착 성능과 더불어 다량의 공극으로 인해 강도가 감소하는 경향을 나타낸다.

또한 배합 A, 배합 B 및 배합 C의 휨강도는 각각 3.22, 5.22 및 5.82 MPa로서, 휨강도는 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 물-바인더 비가 낮을수록 바인더량이 상대적으로 많아 강도가 증가하는 특성을 나타내며, 반대로 W/B 비가 높은 경우, 바이오차의 다량의 공극과 불완전한 입도 분포로 인해 낮은 강도 특성을 나타낸다.

3.3 열적 특성

바이오차를 혼입한 콘크리트의 열전도율은 TPS(transient plane system)-1500 열전달 측정 장비를 활용하여 실험을 진행하였다. 원주형 시편을 절단시킨 후 상온과 동일한 온도 조건에서 24시간 존치시킨다. 이후 온도가 동일해진 시점에서 시편을 서로 맞닿게 배치하고 시편과 시편 사이에 측정 센서가 맞물리도록 고정하여 열전도율을 측정하였다(Fig. 8).

대표 배합인 W/B 비 0.35에서 바이오차 혼입률 0, 5, 10, 15 및 20 %에 해당하는 열전도율은 2.23, 1.59, 1.50, 1.40 및 1.37 W/mk로 측정되었다. 바이오차 혼입률이 증가할수록 열전도율은 감소하는데 이는 반대로 단열성능이 향상되는 것으로 분석되었다(Fig. 9).

Fig. 10에서 나타낸 것처럼 배합 A, 배합 B 및 배합 C의 열전도율은 각각 1.17, 1.57 및 1.89 W/mk로서, 열전도율은 증가하는데 이는 W/B 비가 낮을수록 골재 사이의 공극은 줄어들고 시멘트 페이스트가 증가함에 따라 열전도율이 증가함에 따라 단열성능은 저하되는 것으로 판단된다.



Fig. 8. Test of thermal conductivity

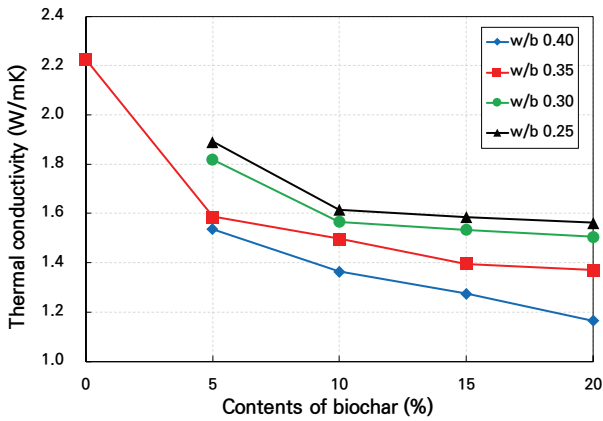


Fig. 9. Thermal conductivity

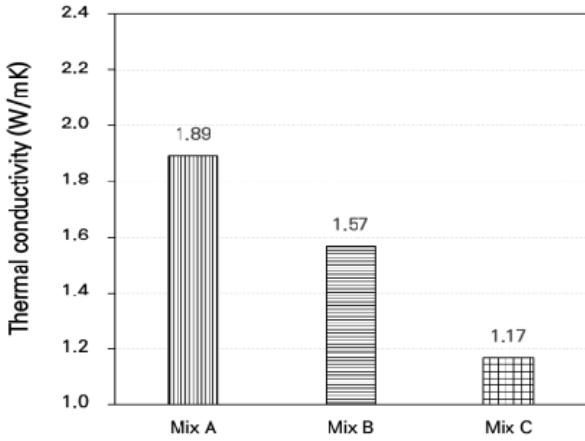


Fig. 10. Classification for thermal conductivity

4. 단열성능과 역학적 특성 분석

4.1 단위중량과 다공성 관계

본 연구에서는 서로 다른 두 실험 결과의 경향을 분석하였다. Fig. 11에서 나타낸 것처럼 대표 배합인 W/B 비 0.35에서 결정계수 (R^2)는 0.86으로서, 단위중량과 다공성은 큰 연관성을 갖는 것으로 판단된다.

또한 앞서 언급된 강도 등급별로 측정된 평균 단위중량은 2012, 2224 및 2348 kg/m^3 로서 증가하는 경향을 나타낸다. 반면에 공극률은 2.87, 0.38 및 0.15 %로서 감소한다.

이는 콘크리트의 단위중량과 총 공극률의 실험 결과에서 총 공극률이 감소할수록 단위중량은 증가하는 경향을 나타낸다. 단위중량이 증가할수록 골재 사이의 공극이 조밀해지며, 이는 콘크리트 시편의 총 공극률에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 강도 등급별

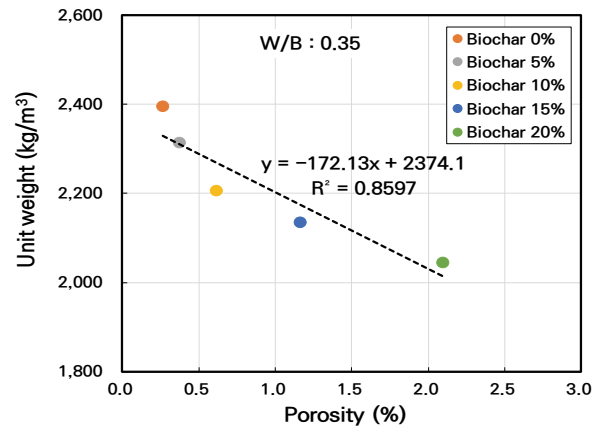


Fig. 11. Relationship of porosity and unit weight according to biochar contents

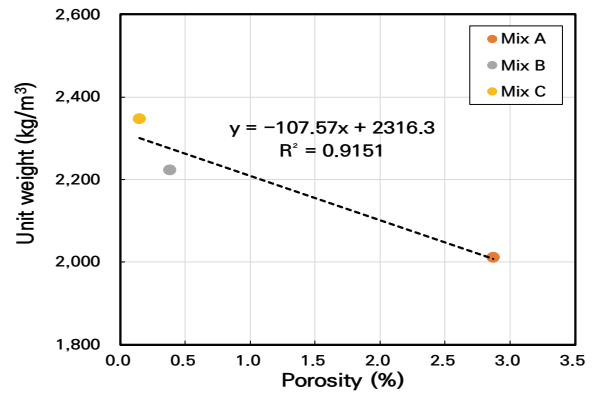


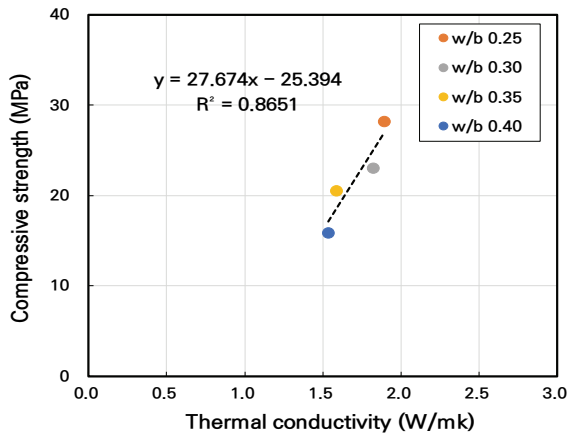
Fig. 12. Relationship of porosity and unit weight according to the classification

결정계수는 0.92로서 단위중량과 총 공극률의 상관관계는 서로 밀접한 영향을 미치는 것으로 판단된다(Fig. 12).

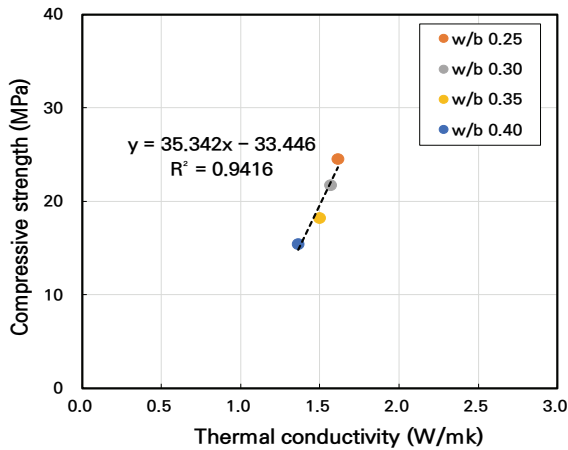
4.2 열전도율과 강도 특성 관계

바이오차 혼입률에 따른 콘크리트의 열전도율과 압축강도의 경향을 분석하였다. Fig. 13과 같이 대표적으로 각 배합별 바이오차 혼입률 5, 10 및 20 %에 해당하는 결정계수는 각각 0.87, 0.94 및 0.90으로 나타났다. 이는 열전도율이 증가할수록 콘크리트의 압축강도 역시 증가하는 경향을 나타내었다. 콘크리트의 압축강도가 증가할수록 공극이 더 치밀해져 열전도율에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

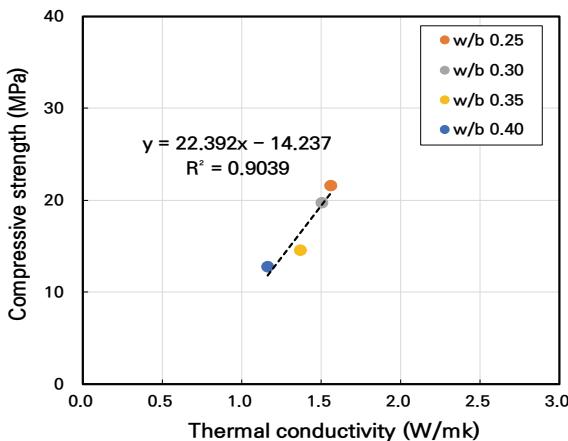
바이오차를 혼입한 다공성 콘크리트의 특성상 열전도율과 콘크리트의 강도는 서로 밀접한 영향을 나타내며, 단열 효과를 높이기 위한 주요 변수임을 나타낸다.



(a) biochar contents 5 %



(b) biochar contents 10 %



(c) biochar contents 20 %

Fig. 13. Relationship of strength and thermal conductivity according to the W/B

5. 결론

본 연구에서는 바이오차를 혼입한 다공성 콘크리트의 기술 개발을 위해 기본물성과 역학적 성능 및 열적 특성 연구를 수행하였으며, 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 각 배합별로 바이오차 혼입률이 증가함에 따라 총 공극률과 투수계수는 증가하는 경향을 나타내며, 내부의 다수 공극에 의해 기인한 것으로 판단된다.
2. 콘크리트의 강도는 W/B 비 0.40, 바이오차 혼입률 20 %에서 가장 낮은 강도 특성을 갖으나, 열전도율은 반대로 낮아 단열 성능이 높게 나타났다. 이는 다공성 콘크리트의 단열 성능을 높이기 위한 주요 변수임을 나타낸다.
3. 실험결과를 바탕으로 상관관계를 도출하기 위해 경향을 분석한 결과, 다공성 콘크리트의 설계 주요 인자로는 콘크리트의 단위중량, 공극률, 투수계수, 강도 및 열전도율인 것으로 분석되었다.
4. 바이오차를 혼입한 다공성 콘크리트의 적용 분야 확대를 위해 인프라별 요구성능 만족할 수 있는 공종별 대상 범위의 도출이 필요할 것으로 판단된다.
5. 단열 효과에 초점을 맞춘 다공성 콘크리트에서 향후 구조 부재에 적용할 수 있도록 작업성 증진과 콘크리트 강도 증진을 위한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영비지원(주요사업)사업으로 수행되었습니다(20230068-001, 남북한 공동번영을 위한 인프라 통합·연계 기반 구축 연구).

References

- Akhtar, A., Sarmah, K. (2018a). Novel biochar-concrete composites : manufacturing, characterization and evaluation of the mechanical properties, Science of The Total Environment, 616-617, 408-416.

- Akhtar, A., Sarmah, K. (2018b). Strength improvement of recycled aggregate concrete through silicon rich char derived from organic waste, *Journal of Cleaner Production*, **196**, 411–423.
- Choi, W.C., Yun, H.D., Lee, J.Y. (2012). Mechanical properties of mortar containing bio-char from pyrolysis, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, **16(3)**, 67–74 [in Korean].
- Choi, W.G., Park, H.R., Suh, S.J. (2004). A fundamental study for the development of building materials using the charcoal, *Journal of the Architectural Institute Korea*, **20(3)**, 185–192. [in Korean].
- Cosentino, I., Restuccia L., Ferro, G.A., Tulliani, J.M. (2019). Type of materials, pyrolysis conditions, carbon content and size dimensions: the parameters that influence the mechanical properties of biochar cement-based composites, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, **103**, 102261.
- Gupta, S., Kua, H.W., Dai Pang, S. (2020). Effect of biochar on mechanical and permeability properties of concrete exposed to elevated temperature, *Construction and Building Materials*, **234**, 117338.
- Han, S., Choi, W. (2023). Evaluation of the mechanical properties of cement mortar containing wood-based bio-char, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **35(3)**, 285–292 [in Korean].
- Kim, K.C., Lim, K.M., Son, M.S., Ryu, G.S., Koh, K.T. (2022). Effect of concrete containing the biochar on properties and thermal insulation performance, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **10(4)**, 428–434 [in Korean].
- Kim, Y.M., Choi, H.Y., Chung, Y.G., Ryu, H.G. (2006). A study on the properties and friendly environment efficiency charcoal concrete bricks, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, **6(1)**, 123–130 [in Korean].
- Khushnood, R.A., Ahmad, S., Restuccia, L., Spoto, C., Jagdale, P., Tuliani, J.M., Giuseppe, A.F. (2016). Carbonized nano/microparticles for enhanced mechanical properties and electromagnetic interference shielding of cementitious materials, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, **10**, 209–213.
- Mohamad, N., Muthusamy, K., Embong, R., Kusbiantoro, A., Hashim, M.H. (2021). Environmental impact of cement production and solutions: a review, *Materials Today: Proceedings*, **48(4)**, 741–746.
- Restuccia, L., Ferro, G.A. (2016). Nonoparticles from food waste: a “green” future for traditional building materials, *Proceedings of the 9th International Conference on Fracture Mechanicals of Concrete and Concrete Structures*, 22–25.
- Restuccia, L., Reggio, A., Ferro, G.A., Kamranird, R. (2017). Fractal analysis of crack paths into innovative carbon-based cementitious composites, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, **90**, 133–141.
- Woolf, D., Amonette, J.E., Street-Perrott, F.A., Lehmann, J., Joseph, S. (2010). Sustainable biochar to mitigate global climate change, *Nature Communications*, **1(1)**, 56.
- Yaashikaa, P.R., Kumar, P.S., Varjani, S., Saravanan, A.A. (2020). Critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy, *Biotechnology Reports*, **28**, e00570.
- Yang, X., Wang, X.Y. (2021). Hydration–strength–durability–workability of biochar–cement binary blends, *Journal of Building Engineering*, **42**, 103064.

잔골재를 바이오차로 치환한 콘크리트의 강도와 열적 특성

본 연구에서는 바이오차를 혼입한 탄소 저감형 콘크리트 기술을 개발하고자 한다. 주요 인프라 분야인 건축과 터널에 단열성과 탄소 포집이 가능한 바이오차를 혼입시킨 콘크리트의 성능 평가 실험을 수행하였다. 콘크리트 배합은 바이오차 혼입률 0, 5, 10, 15 및 20 %와 물-바인더 비율 0.25, 0.30, 0.35 및 0.40으로 선정하여 배합조건을 구성하였다. 각 배합별 물리적 특성을 평가하기 위해 단위중량, 총 공극률 및 투수계수를 측정하였고, 역학적 특성을 파악하기 위해 콘크리트 압축강도, 휨강도를 측정하였다. 바이오차를 혼입한 탄소 저감형 콘크리트의 단열 효과를 향상 시키기 위한 주요 인자는 회귀분석을 통해 바이오차 혼입률, 단위중량, 콘크리트 강도 및 열전도율은 서로 밀접한 상관관계를 갖는 것으로 나타났다. 향후 흑한기후 특성을 갖는 북방지역에 단열성능을 높이기 위한 단열재로 활용될 것으로 판단된다.