

조경포장용 콘크리트에서 바이오차의 적용 가능성 검토[†]

- 목질계 바이오차로 시멘트를 일부 대체한 모르타르의 작업성과 역학적 특성을 중심으로 -

Applicability of Biochar in Concrete for Landscape Paving[†]

- Workability and Mechanical Properties of Mortar Partially Replacing Cement with Wood-Based Biochar -

류용욱*, 노희진**, 이기열***

*전남대학교 토목공학과 부교수, **전남대학교 조경학과 석사과정, ***전남대학교 조경학과 부교수

Ryu, Yong-Uk*, Roh, Hee-Jin**, Lee, Gi-Yeol***

*Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Chonnam National University

**Master Candidate, Dept. of Landscape Architecture, Chonnam National University

***Associate Professor, Dept. of Landscape Architecture, Chonnam National University

Received: December 2, 2024

Revised: December 30, 2024

Accepted: December 30, 2024

3인인명 심사필

Corresponding author :

Gi-Yeol Lee

Associate Professor, Dept. of

Landscape Architecture,

Chonnam National University,

Gwangju 61186, Korea

Tel.: +82-62-530-2108

E-mail: gylee@jnu.ac.kr

국문초록

이 논문은 기후변화에 대응하기 위한 탄소중립을 위하여 조경포장에 사용되는 건설재료 중 탄소 배출량이 많은 시멘트를 탄소 함량이 높은 바이오차로 대체하기 위한 기초 연구이다. 포장용 콘크리트를 구성하는 시멘트 모르타르 기준으로 탄소 함량이 높고 다공성 구조를 갖는 목질계 바이오차로 시멘트 사용량의 6%까지 대체하는 배합을 실시하고, 플로우시험을 통한 작업성과 공시체 강도시험을 통한 역학적 특성을 파악하였다. 이와 함께 SEM 이미지 분석을 통하여 목질계 바이오차의 다공성 구조를 확인하였으며, 시멘트 경화체가 바이오차의 다공성 구조 내부에 채워져 있고 외부 표면에 부착되어 있음을 확인하였다. 목질계 바이오차 혼입 시멘트 모르타르의 플로우시험에 따른 작업성은 대체율과 배합 후 시간 경과에 상관없이 보통 모르타르와 차이가 없고, 일부 대체율에서는 작업성이 증가하는 것으로 나타났다. 그리고, 공시체 강도시험을 통한 역학적 특성은 재령에 따라 모든 강도는 증가하였으며, 시멘트 대체율에 따라서 휨강도의 증가율이 가장 크고, 압축강도는 증가율이 상대적으로 낮은 것으로 나타났다. 또한 대체율에 상관없이 국가건설기준 또는 배합설계지침에서 규정하는 설계기준 압축강도와 휨강도를 모두 2배 이상 만족하는 것으로 나타났다. 따라서, 목질계 바이오차로 시멘트를 대체한 모르타르가 작업성과 역학적 특성을 모두 확보하고 있으므로, 조경포장용 콘크리트에 바이오차를 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

주제어: 강도, 국가건설기준, 다공성, 탄소중립, 플로우

ABSTRACT

This paper describes a replacing cement with high carbon content biochar among construction materials used in landscape paving for the purpose of carbon neutral in response to climate change. Based on the cement mortar of paving concrete, a mixture was performed in which up to 6% of the cement usage was replaced with wood-based biochar with high carbon content and porous structure, and the workability through flow tests and the mechanical properties through test specimen strength tests were identified. In addition, the porous structure of wood-based biochar was confirmed through SEM image analysis, and it was confirmed that the cement matrix was filled inside the porous structure of the biochar and attached to the outer surface. The workability of cement mortar mixed with wood-based biochar according to the flow test was no different from that of ordinary mortar regardless of the replacement rate and the time elapsed after mixing, and the workability increased at some replacement rates. The mechanical properties through strength tests showed that all strengths increased with age, and the increase rate of flexural strength was the largest depending on the cement replacement ratio, while the increase rate of compressive strength was relatively low. In particular, regardless of the replacement rate, it was found that the design standard compressive strength and flexural strength specified in the Korea design standard or mixing design guidelines were both more than doubled. Therefore, since the mortar that replaced cement with wood-based biochar has both workability and mechanical properties, there will be no problem in applying biochar to concrete for landscape paving.

Keywords: Strength, Korea Design Standard, Porous, Carbon Neutral, Flow

[†]본 논문은 2024년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신사업의 결과입니다.
(2021RIS-002)

1. 서론

1.1 연구 배경과 목적

바이오차(biochar)는 목재, 식물, 농업부산물 및 동물의 분뇨 등 다양한 유기물 원료로부터 얻어지는 바이오매스(biomass)를 산소가 제한된 환경에서 약 400~700°C 범위의 고온으로 열분해(pyrolysis)하여 만들어진 탄소 함량이 높은 고형물 형태인 숯(charcoal)의 합성이다. 바이오차는 원료인 바이오매스 종류에 따라 목재 부산물 또는 폐기물을 포함하는 목재류를 원료로 하는 목질계 바이오차, 썰겨 등을 원료로 하는 농업부산물계 바이오차, 탈수된 가축의 분뇨를 원료로 하는 축분계 바이오차 및 야채 쓰레기 등 식물성 잔여물을 원료로 하는 식물계 바이오차 등으로 구분된다. 이들 바이오차는 종류에 따라 차이는 있지만 공극이 많은 다공성 구조와 넓은 비표면적, 높은 탄소 함량 및 질소와 미네랄과 같은 특정 영양소의 함량이 많은 특징이 있으며, 이와 같은 특징에 따라 현재는 주로 토양에 유기물과 영양소의 공급, 수분 보유 능력 향상 및 토양의 구조 개선 등의 목적으로 활용되고 있다(Ippolito et al., 2012; Oliveria et al., 2017).

최근 지구온난화 등에 따른 기후변화에 대응하기 위한 친환경 대책으로서 탄소중립에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데, 이들 연구는 대부분 탄소 배출량 저감, 탄소의 포집과 저장을 포함한 흡수 및 탄소 격리로 구분할 수 있다. 특히, 탄소 격리를 중심으로 바이오차의 활용에 대한 연구가 진행되고 있는데, Lehmann et al.(2011)의 연구에 따르면 바이오차를 토양에 매립함으로써 대기중에 있는 이산화탄소의 약 20%를 토양에 반영구적으로 격리가 가능하고, Spokas et al.(2012)는 바이오차의 화학적 안정성에 기반하여 장기간의 탄소격리가 가능함을 밝히는 등 탄소중립 대책으로 바이오차의 활용 가능성이 점차 강조되고 있는 실정이다. 이와 관련하여 조정분야에서도 탄소의 흡수와 격리에 대한 연구가 진행되고 있는데, 조현길 등(2020)은 도시의 공공용지 녹지를 구성하는 식재수목에 의한 탄소의 흡수와 저장량을 계량화하고, 탄소저감 효과를 증진시키기 위한 녹지구조의 개선방안을 제시하였다. 그리고 박병훈과 서자유(2023)는 탄소저감 또는 탄소중립을 위한 자연기반 해법으로서 탄소저감 정원을 제시하고, 이 탄소정원의 조성방법 중의 하나로 수목의 생장에 효과가 있으며 탄소저장 또는 탄소격리가 가능한 바이오차를 부설하여 토양을 개량하는 방안을 제시하였다.

시멘트, 물 및 골재를 주원료로 하여 수화반응과 응결·경화 및 양생과정을 통해 만들어지는 콘크리트는 압축강도가 높은 역학적 특성과 함께 경제성과 시공성 및 내구성이 우수하여 조경을 포함한 건설산업 분야에서 구조물 및 포장에 많이 사용되는 대표적인 건설재료로서, 2022년을 기준으로 전 세계에서 생산된 콘크리트는 약 42억톤의 시멘트를 포함하여 약 400억톤이다. 그런데, 콘크리트의 제성에 중요한 영향을 미치는 시멘트는 제조과정에서 원료인 석회석의 화학적 변환과 소성에 사용되는 화석연료의 연소과정에서 대량의 이산화탄소가 배출되는데, 연간 배출량이 약 28억톤으로서 철강 및 정유산업과 함께 전 세계 이산화탄소 배출량의 상당 부분을 차지하고 있다. 이에 따라 우리나라 등 전세계적으로 시멘트 산업에서 발생하는 탄소의 배출량을 감축하기 위하여 다양한 정책의 도입과 이에 따른 기술개발이 진행되고 있으나, 이 기술들은 대부분 화석연료의 사용량 감소와 순환자원의 재활용 등 시멘트 생산과정에 중점을 두고 있다. 그러나, 적극적인 탄소 중립의 방법이라고 할 수 있는 콘크리트 내 시멘트의 사용량을 줄이기 위한 연구는 부족한 실정으로서, 콘크리트의 성질에 있어서 핵심이라고 할 수 있는 철근 및 골재와의 부착력과 강도가 시멘트 사용량에 영향을 크게 받기 때문이라고 할 수 있다.

바이오차의 원료인 목재는 셀룰로오스와 리그닌으로 구성되어 있으며, 이 성분들은 강도가 높고 접착력이 우수한 역학적 특성에 따라 셀룰로오스를 가는 섬유 형태로 가공하여 콘크리트의 성능 개선을 위한 혼화재료로 활용하고 있다. 탄소 함량이 높고 다공성 구조인 바이오차는 열탄화 제조 특성에 따라 원료의 성분 또한 그대로 유지할 수 있으므로, 목재를 원료로 하는 바이오차는 셀룰로오스 등 주성분을 함께 포함하므로 콘크리트의 혼화재료로 활용 가능성이 높다고 할 수 있다. 이러한 특징에 기반하여 목질계 바이오차를 탄소중립을 위한 시멘트의 대체재 또는 새로운 개념의 콘크리트 혼화재료로 활용하기 위한 기초 연구가 국내외 여러 연구자들(김상우 등, 2024, 최원창 등, 2012; 한상민과 최원창, 2023, Aman et al., 2022; Gupta et al., 2018; Senadheera et al., 2023)에 의해 수행되고 있다. 그런데, 이들 연구는 대부분 바이오차의 적용 가능성, 바이오차 혼입 시멘트의 응결 및 경화 특성, 바이오차의 종류 및 시멘트 대체에 따른 기초 물성과 역학적 특성, 바이오차 혼입에 따른 탄소중립 효과 등을 중심으로 진행되고 있으며, 건설분야에서 콘크리트가 활용되는 구조물 또는 포장 분야에 활용하기 위한 연구는 거의 없는 실정이다.

이에 본 연구에서는 탄소중립을 포함하는 콘크리트의 새로운 혼화재료로서 바이오차를 활용하기 위한 기초 연구의 일환으로 철근 등 보강재와의 부착을 고려할 필요가 없는 포장용 콘크리트의 핵심 재료라고 할 수 있는 시멘트

모르타르를 대상으로 목질계 바이오차의 시멘트 대체율에 따른 작업성과 역학적 특성을 파악하고, 이 결과로부터 바이오차의 적용 가능성을 확인하는 것을 목적으로 한다.

1.2 연구 방법

본 연구의 목적인 목질계 바이오차로 시멘트를 일부 대체한 모르타르의 대표적 기초 물성인 작업성과 강도를 파악하기 위하여 국토해양부에서 지침으로 제시하는 시멘트 콘크리트 포장 배합설계(국토해양부, 2011)에서 굵은골재와 혼화재료를 제외한 단위량으로 모르타르를 배합하여 작업성을 파악하기 위한 플로우시험을 실시하고, 역학적 특성을 파악하기 위한 강도시험용 공시체를 제작하였다. 모르타르 배합 시 바이오차의 대체율은 선행 연구를 참고하여 단위 시멘트량의 0%에서 최대 6%까지 1%씩 대체가 되도록 하였다. 작업성은 바이오차의 다공성 구조와 소수성을 고려하여 모르타르 배합 직후부터 응결이 시작되는 40분까지 10분 간격으로 플로우 값을 측정하였다. 그리고, 역학적 특성은 국가건설기준의 콘크리트 포장 관련 강도 규정인 KDS 24 14 21(국토교통부, 2023)의 휨강도와 KDS 34 60 10(국토교통부, 2016)의 압축강도 및 균열저항성을 포함한 사용성과 내구성에 영향을 주는 조깅인장강도 시험을 실시하였다. 강도시험 시 재형에 따른 역학적 특성의 차이를 확인하기 위하여 초기강도를 추정하는 7일 및 설계기준강도에 해당하는 28일 강도를 각각 측정하였다. 이와 함께 균열 또는 처짐과 같은 사용성 평가에 필요한 휨 또는 인장강도의 크기를 추정하기 위하여 28일 압축강도를 기준으로 휨 및 조깅인장강도와의 비를 산정하고 그 크기를 비교하였다.

2. 시험

2.1 재료

콘크리트를 구성하는 주재료 중 탄소 배출량이 가장 많은 시멘트를 목질계 바이오차로 일부 대체하여 탄소 저감 또는 격리가 가능한 포장용 콘크리트의 개발을 위한 기초 연구의 일환으로 수행한 시멘트 모르타르 기반의 기초 물성 시험에 사용된 재료들의 특성은 다음과 같다.

2.1.1 바이오차

목재 펠릿을 주원료로 하여 제조온도 650~800°C, pH 8~10, 탄화도 70~80%로 국내 K사에 생산하는 목질계 바이오차를 볼밀(ball mill)을 이용하여 그림 1a와 같이 시멘트의 평균 입자크기와 입도를 고려하여 약 10~100 μm 로 분쇄한 분말 형태로 사용하였으며, 바이오차의 대표적 특성인 다공성 구조는 그림 1b에 보인 바와 같이 주사 전자 현미경(Scanning Electron Microscope, SEM) 분석에 의한 이미지를 통하여 확인하였다. 이와 함께, 탄소 함량을 포함한 목질계 바이오차의 유기 원소 구성 비율은 고형연료제품 품질 시험·분석방법(환경부고시 제 2024-174 호)(환경부, 2024)에 따라 원소 분석을 실시하여 표 1에 정리하였다. 분석 결과에 따르면 본 연구에 사용된 목질계 바이오차는 탄소가 약 69%를 차지하여 다른 연구자들이 사용한 바이오차의 탄소 함량과 비슷하거나 상회함을 확인할 수 있다.

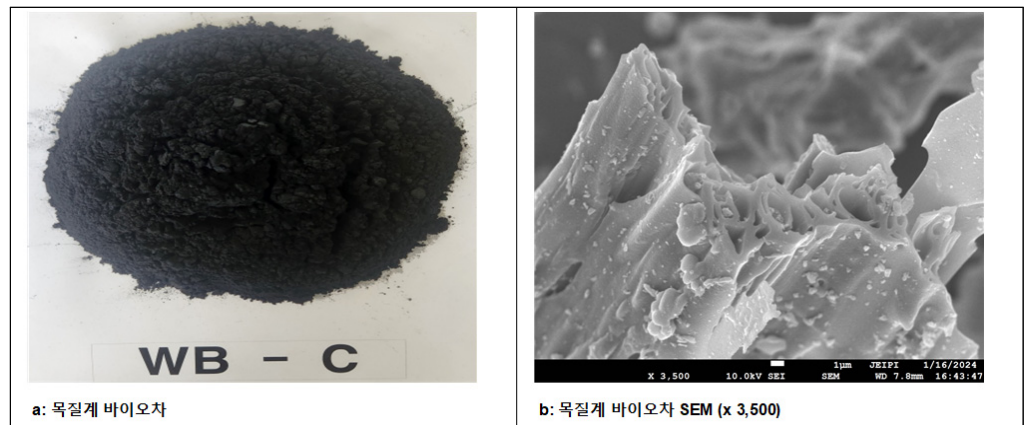


그림 1. 시멘트 대체용 목질계 바이오차

표 1. 목질계 바이오차 원소 구성

원소	탄소 (Carbon)	산소 (Oxygen)	수소 (Hydrogen)	질소 (Nitrogen)	황 (Sulfur)
구성비(%)	68.57	12.05	1.57	3.84	0.28

2.1.2 시멘트

석회석과 점토를 주원료로 하여 국내 S사에서 생산한 비중 3.15의 제1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 제조사에서 제공하는 시멘트의 화학적 조성은 표 2와 같다.

2.1.3 잔골재(표준모래)

잔골재는 바이오차 대체 시멘트 모르타르의 배합 목적에 부합하고 포장용 콘크리트의 제조를 위한 시멘트 모르타르의 품질 변동성을 최소화하기 위하여 KS L ISO679(산업표준심의회, 2022c)에서 규정하는 이산화규소(SiO₂)의 함량이 98% 이상이고 습도는 0.2% 미만을 유지하며, 비중 2.63, 조립율(Finess Modulus, FM) 2.48, 입자의 평균 지름이 0.08~2.0mm이고, 단위중량이 1,600 kg/m³인 프랑스 S사에서 생산하는 ISO 표준모래를 사용하였다.

2.2 배합설계

포장용 콘크리트를 구성하는 시멘트 모르타르의 배합은 시멘트 콘크리트 포장에 대한 최근의 연구성과와 국내 현장의 기술 여건을 고려하여 국토해양부에서 발행한 시멘트 콘크리트 포장 배합설계 지침(국토해양부, 2011)을 준용하였다. 일반적으로 포장에 적용하는 콘크리트는 휨모멘트와 전단력을 주로 저항하는 철근콘크리트 구조와 설계하중이 다른 특성을 고려하여 이 지침에서는 설계기준 압축강도가 아닌 설계기준 휨강도를 설계강도로 규정한다. 이에 따라, 바이오차를 혼입한 포장용 콘크리트의 기초 물성 파악을 목적으로 하는 본 연구에서도 이 지침에서 규정하는 설계기준 휨강도 4.5MPa를 설계(배합)강도로 하여 표 3과 같이 바이오차 대체율에 따른 시멘트 모르타르 배합설계를 실시하고, 플로우시험과 강도시험용 공시체 제작에 필요한 재료의 단위량을 결정하였다. 그리고, 바이오차 대체 시멘트 모르타르의 강도 특성을 다양하게 파악하기 위하여 국가건설기준인 조정설계기준 보도 포장(KDS 34 60 10)(국토교통부, 2016)에서 규정하는 포장용 콘크리트의 압축강도 17.64MPa를 설계(배합)강도로 함께 고려하였다.

2.3 공시체 제작 및 시험 방법

바이오차로 시멘트를 대체한 포장용 콘크리트의 기초 물성 중 시멘트 모르타르의 역학적 특성을 파악하기 위하여 강도별 시험 방법을 규정하고 있는 KS 기준에 따라 압축강도는 50×50×50mm 정사각형 몰드, 쪼갬인장강도는

표 2. 시멘트의 화학적 조성

원소	수산화칼슘 (CaO)	이산화규소 (SiO ₂)	산화알루미늄 (Al ₂ O ₃)	산화철 (Fe ₂ O ₃)	이산화규소 (SO ₃)	산화마그네슘 (MgO)
구성비 (질량 %)	61.42	21.52	5.77	3.25	2.41	3.45

표 3. 배합설계

배합명	설계(배합) 강도 (MPa)	바이오차 대체율 (%)	단위량 (kg/m ³)			
			물	시멘트	잔골재 (표준모래)	목질계 바이오차
WB-C-0	4.5(휨) 17.64(압축)	0	140	311	708	0
WB-C-1		1		307.89		3.11
WB-C-2		2		304.78		6.22
WB-C-3		3		301.67		9.33
WB-C-4		4		298.56		12.44
WB-C-5		5		295.45		15.55
WB-C-6		6		292.34		18.66

Φ50×100mm 원주형 몰드, 휨강도는 40×40×160mm 각주형 몰드를 이용하여 각 배합에 따라 양생기간(7일 및 28일)별로 각 3개씩 총 126개의 공시체를 제작하였다. 강도 시험용 공시체 제작 전에 전용 모르타르 혼합기로 배합된 시멘트 모르타르의 바이오차 대체율에 따른 유동성과 작업성을 파악하기 위하여 그림 2a와 같이 KS L 5111 (산업표준심의회, 2022b)의 규정에 의한 플로우시험을 10분 간격으로 40분 동안 실시하였으며, 이 결과로부터 각 배합의 작업성이 확보되었음을 확인한 후 공시체 제작용 몰드에 시멘트 모르타르를 타설하였다.

타설 후 24시간 동안은 물방울이 떨어지지 않도록 주의하여 몰드 윗부분 표면이 습기에 노출되도록 하였으며, 이후 몰드를 해체하여 시험체를 꺼낸 즉시 양생수조에 담가서 7일 또는 28일간의 수중양생 후 강도시험을 실시하였다. 양생 기간과 바이오차 대체율에 따른 시멘트 모르타르의 역학적 특성을 파악하기 위한 강도시험은 수중양생된 정사각형, 원주형 및 각주형 공시체들을 대상으로 그림 2b와 같이 500kN 용량의 자동압축시험기를 이용하여 KS L 5105(산업표준심의회, 2022a)에 의한 압축강도 시험을 실시하였으며, KS L ISO679(산업표준심의회, 2022c)에 의한 휨강도 시험과 KS F 2423(산업표준심의회, 2023b)에 의한 쪼갬인장강도 시험은 그림 2c 및 2d와 같이 100kN 용량의 만능재료시험기(Universal Testing Machine, UTM)를 이용하였다.

3. 시험결과

3.1 바이오차와 시멘트 경화체의 부착

목질계 바이오차로 시멘트를 대체한 시멘트 모르타르에서 바이오차와 시멘트 수화 생성물인 시멘트 페이스트 또는 모르타르와의 부착 상태를 확인하기 위하여 28일 양생한 시멘트 모르타르 공시체들을 대상으로 강도시험 후 수분이 완전히 제거된 절대건조상태의 시료로 분쇄하여 전자주사현미경(SEM) 분석을 실시하고, 바이오차 대체율에 따른 바이오차와 시멘트 페이스트 또는 모르타르와의 부착 상태를 확인할 수 있는 다양한 해상도의 SEM 이미지를 그림 3에 도해하였다. 시멘트 모르타르의 SEM 이미지에 의하면 그림 1b와 같이 다공성 구조를 갖는 목질계 바이오차의 특징에 따라 바이오차의 공극 내부에 시멘트 경화체(수화 생성물)이 채워져 있음을 확인할 수 있으며, 비표면적이 넓은 바이오차의 표면에도 시멘트 페이스트 또는 모르타르가 부착되어 있는 것을 확인할 수 있다.

이와 같이 SEM 분석을 통하여 바이오차가 무기질 결합제인 시멘트 모르타르와 결합이 양호하므로 새로운 개념



그림 2. 시험전경

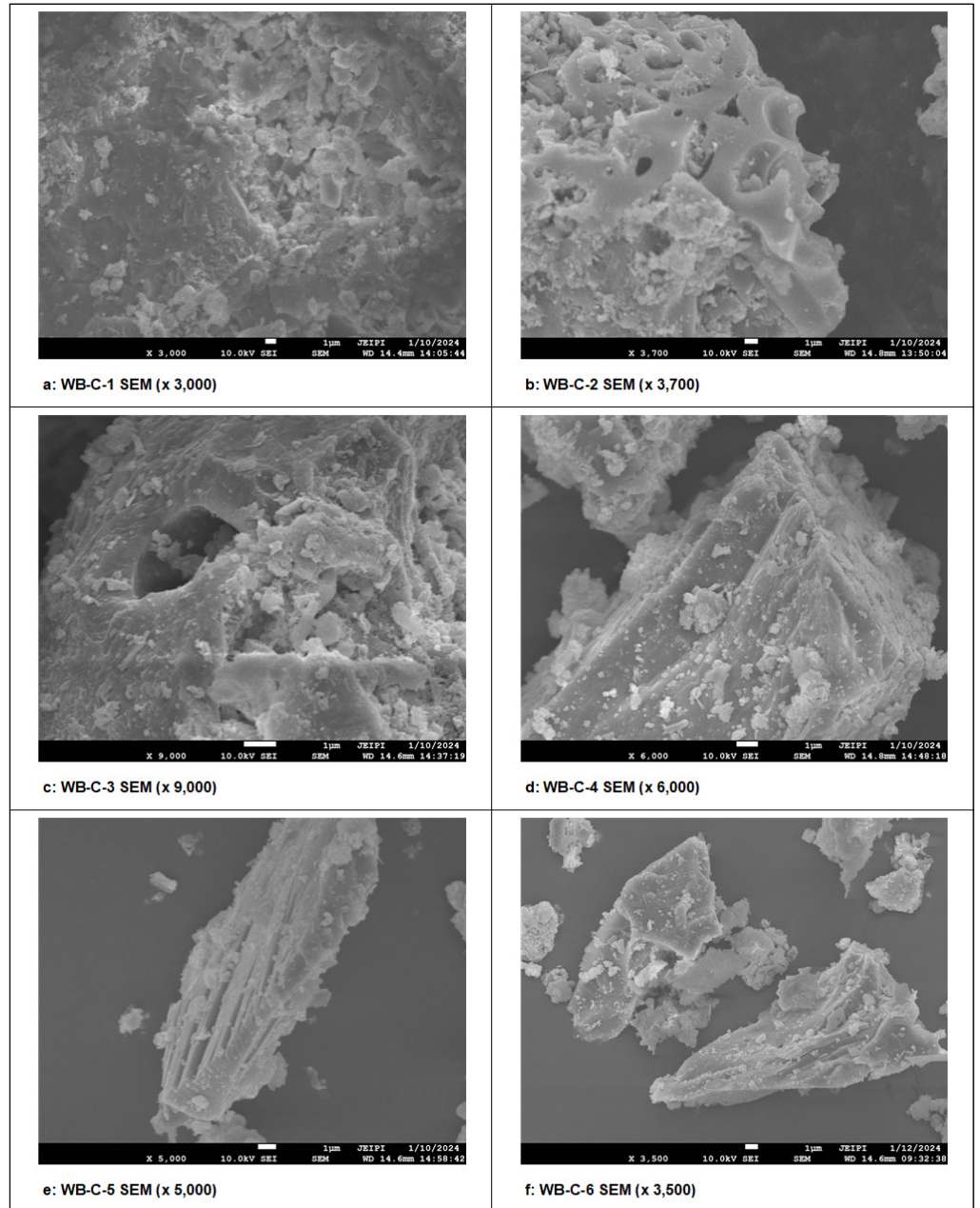


그림 3. 목질계 바이오차 혼합 시멘트 모르타르의 SEM 이미지

의 시멘트 대체재 또는 혼화재료로서 적용이 가능하며, 특히 인장강도와 접착력이 우수한 셀룰로오스 및 리그난을 주성분으로 하는 바이오차의 공극을 포함한 내부 및 외부에 시멘트 모르타르가 부착됨으로써 압축강도와 휨강도와 같은 역학적 특성을 충분히 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 작업성

바이오차를 혼합한 포장용 시멘트 모르타르의 작업성과 유동성은 KS L 5111(산업표준심의회, 2022b)에 의한 플로우시험을 통하여 측정된 플로우 값을 이용하여 종합적으로 확인할 수 있다. 이를 위하여 바이오차 대체율에 따라 시멘트 모르타르의 배합 직후부터 40분 동안 10분 간격으로 그림 2a와 같이 플로우시험을 실시하고, 이들 결과를 그림 4에 정리하였다.

이 그림을 살펴보면, 현행 포장용 콘크리트에 적용되는 시멘트 모르타르와 동일한 조건인 바이오차로 대체하지 않은 WB-C-0 배합의 초기 플로우값은 229mm로 측정되었으며, 유동성이 상실되었다고 간주할 수 있는 배합 후

40분이 경과되었을 때에도 플로우값은 190mm로서 충분한 작업성과 유동성을 확보하고 있는 것으로 나타났다. 그리고, 목질계 바이오차로 시멘트를 대체한 배합의 경우에도 대체율이 1%인 WB-C-1의 플로우값은 초기 241mm, 40분 경과 후 215mm로서 작업성과 유동성이 유지되고 있음을 확인할 수 있으며, 이러한 경향은 목질계 바이오차의 시멘트 대체율이 3%인 WB-C-3 배합까지 유사한 것으로 나타났다. 한편 목질계 바이오차의 시멘트 대체율이 4% 이상으로 증가하는 WB-C-4 배합부터는 대체율과 경과시간에 따라 플로우 값이 감소하여 초기에는 최소 206mm, 40분 경과시에는 최소 185mm로 측정되었다. 그러나, 이들 플로우값을 WB-C-0와 비교하면 배합 직후 감소율은 최대 10%이고, 40분 경과 후에는 감소율이 최대 2.6%로서 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다.

이러한 결과는 목질계 바이오차로 시멘트를 대체한 모르타르의 플로우 값을 기준으로 현행 포장용 콘크리트에 적용되는 보통 시멘트 모르타르와 비교하여 배합 직후 10% 미만, 40분이 경과한 후에는 약 3% 미만으로 감소되거나, 일부 낮은 대체율의 경우에는 플로우가 증가하였으므로, 포장용 콘크리트 타설 시 중요한 작업성과 유동성 측면에서 목질계 바이오차로 시멘트를 대체한 포장용 콘크리트의 적용 가능성을 확인하였다고 할 수 있다.

3.3 역학적 특성

목질계 바이오차로 시멘트를 대체한 모르타르의 양생기간과 대체율에 따른 역학적 특성을 파악하기 위하여 그림 2b에서 2d에 보인 바와 같이 압축, 휨 및 쪼갬인장강도 시험을 각각 실시하였다. 목질계 바이오차 대체율에 따른 배합별로 제작된 정사각형 공시체 3개를 대상으로 그림 2b와 같은 압축시험을 통해 측정된 평균 압축강도와 오차(표준편차)를 7일과 28일 양생으로 구분하여 그림 5에 정리하였다. 이 그림을 살펴보면, 시멘트 대체율에 따른 모르타르의 압축강도는 7일 38.5MPa와 28일 40.9MPa로 측정된 WB-C-0를 기준으로 양생 기간에 상관없이 대체율 1%일때는 강도가 증가하지만, 2% 이상의 모든 대체율에서는 강도가 다소 감소 하는 것으로 나타났다. 또한, 양생 기간에 따라 28일 양생된 기준 압축강도를 7일 강도와 비교하면 대체율이 0%인 보통 모르타르보다 목질계 바이오차로 대체한 경우에 더 크게 증가하였으며, 특히 대체율이 높아질수록 양생 기간에 따라 압축강도가 증가함을 확인할 수 있다. 이와 함께, 시멘트 대체율 6%까지 모든 배합에서 국가건설기준인 KDS 34 60 10(보도 포장)(국토교통부, 2016)에서 규정하고 있는 보도 포장용 콘크리트의 설계기준압축강도인 17.64MPa를 2배 이상 초과하고 있으므로, 기존의 보도 포장용 콘크리트에서 목질계 바이오차로 시멘트의 일부 대체가 가능하다고 할 수 있다.

압축강도 시험과 동일한 배합으로 제작한 각주형 공시체 3개를 대상으로 그림 2c와 같은 휨시험을 통해 측정된 평균 휨강도와 오차(표준편차)를 7일과 28일 양생으로 구분하여 그림 6에 정리하였다. 이 그림을 살펴보면, 바이오차로 대체하지 않은 현행 시멘트 콘크리트 포장 배합설계를 준용하여 제작한 WB-C-0 시험체의 평균 휨강도는 7일 5.4MPa, 28일 8.38MPa로 측정되었으며, 목질계 바이오차 대체율에 따라 7일 양생을 실시한 초기강도는 시멘트 대체율 3%까지 증가하고 4% 이상에서는 휨강도가 감소하는 것으로 나타났다. 그리고, 28일 양생에 따른 기준

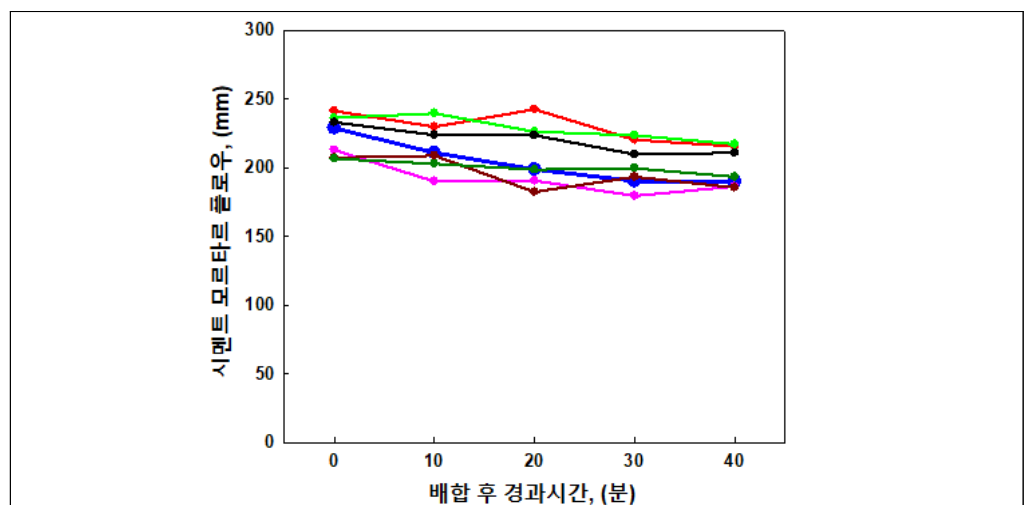


그림 4. 목질계 바이오차 대체율에 따른 플로우

범례: - WB-C-0, - WB-C-1(대체율 1%), - WB-C-2(대체율 2%), - WB-C-3(대체율 3%), - WB-C-4(대체율 4%), - WB-C-5(대체율 5%), - WB-C-6(대체율 6%)

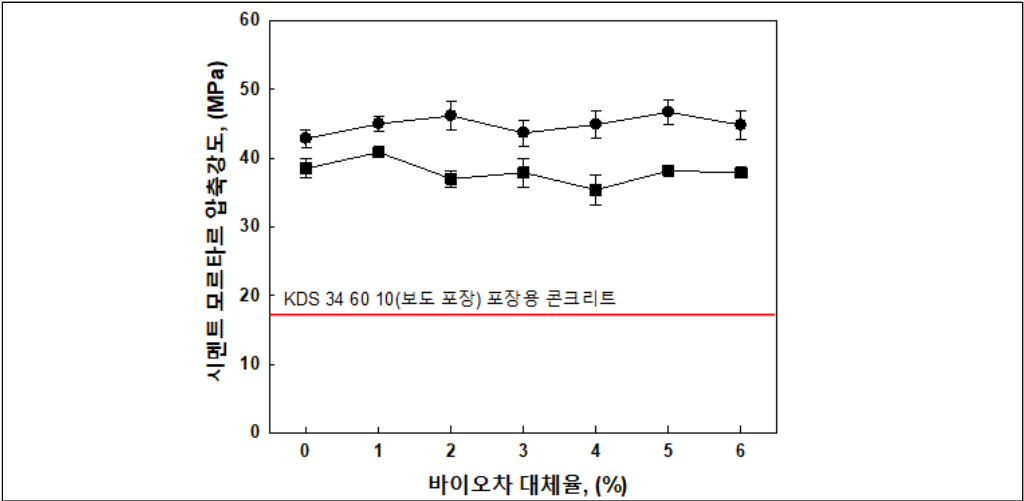


그림 5. 목질계 바이오차 대체율에 따른 압축강도
범례: ■ 7일 양생, ● 28일 양생

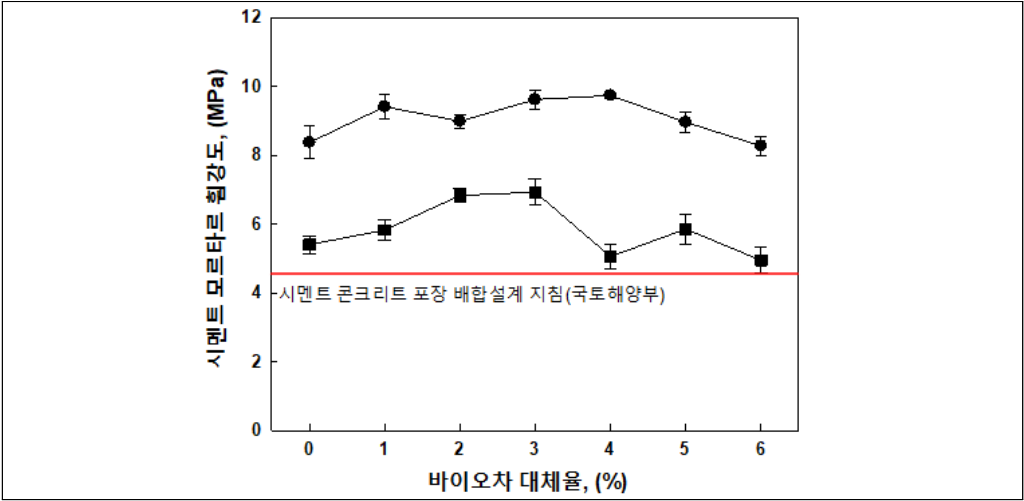


그림 6. 목질계 바이오차 대체율에 따른 휨강도
범례: ■ 7일 양생, ● 28일 양생

휨강도는 시멘트 대체율 4%까지 증가하고 5% 이상에서는 감소하는 것으로 나타났으며, 특히 목질계 바이오차의 대체율이 높아질수록 압축강도와 비교하여 양생 기간에 따른 휨강도의 증가율이 더욱 상향되고 있음을 확인할 수 있다. 이와 함께, 시멘트 대체율 6%까지 모든 배합에서 양생 28일을 기준으로 시멘트 콘크리트 포장 배합설계 지침에서 규정하는 설계 휨강도인 4.5MPa를 만족하고 있으므로 압축강도를 포함하여 기존의 포장용 콘크리트의 주 재료인 시멘트의 일부를 목질계 바이오차로 대체하는데 문제가 없을것으로 판단된다.

포장용 콘크리트의 설계강도와 관련하여 국가건설기준 또는 배합설계 지침에는 규정되어 있지 않지만, 콘크리트 포장의 균열 저항성과 내구성의 확보 여부를 파악하기 위하여 원주형 공시체 3개를 대상으로 그림 2d와 같은 쪼갬 인장(splitting tensile) 시험을 실시하고, 다른 강도와 마찬가지로 측정된 평균 쪼갬인장강도와 오차(표준편차)를 그림 7에 정리하였다. 이 그림에 따르면, 바이오차로 대체하지 않은 보통 시멘트 모르타르의 7일 및 28일 양생 쪼갬인장강도는 각각 2.81MPa과 3.66MPa으로 측정되었으며, 시멘트 대체율 4%를 기준으로 낮은 대체율에서는 강도가 감소하지만 4% 이상에서는 강도가 다시 증가하는 것으로 나타났다. 단, 7일 강도의 경우에는 28일 강도와 다르게 1%와 6%에서 다른 감소와 증가가 반대로 나타났으나, 이는 쪼갬인장 시험 및 파괴하중 측정 과정에서 발생한 오차 때문으로 판단된다. 쪼갬인장강도가 사용성 평가를 위한 중요 변수임에도 불구하고 기준 또는 지침에서는 설계 강도를 별도로 규정하고 있지 않은 관계로 압축강도 또는 휨강도로부터 추정하는 식을 이용하여 간접적으로 목질계 바이오차를 혼입한 시멘트 모르타르의 쪼갬인장강도 확보 여부를 판단할 수 있다.

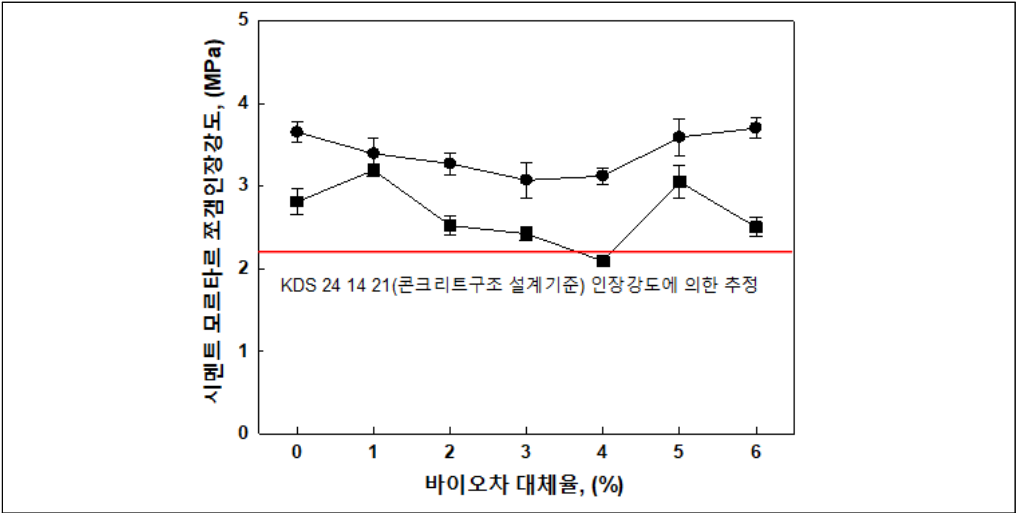


그림 7. 목질계 바이오차 대체율에 따른 쪼갠인장강도
범례: ■ 7일 양생, ● 28일 양생

국가건설기준인 콘크리트구조 설계기준(KDS 24 14 21)(국토교통부, 2023)에서는 인장강도에 대해서 압축강도와 비선형 관계를 고려하여 $0.3(f_{ck})^{2/3}$ 로 규정하고 있으며, 쪼갠인장강도로 고려할 때는 계산된 인장강도의 약 1.1배로 규정한다. 이 규정을 이용하여 쪼갠인장강도를 추정하면 약 2.24 MPa이므로, 본 연구에서는 기준 강도로 이 값을 적용하였다. 목질계 바이오차 대체율에 따른 쪼갠인장강도를 추정된 기준 강도와 비교하면, 양생 7일 강도에서는 일부 대체율에서 기준 강도보다 낮게 측정되었지만, 설계기준강도에 해당하는 양생 28일 강도에서는 최대 대체율인 6%까지 기준 강도를 충분히 확보하고 있으므로 쪼갠인장강도를 이용하여 평가하는 내구성 또는 사용성 측면에서도 포장용 콘크리트에 목질계 바이오차를 대체하는데 문제가 없을것으로 판단된다. 단, 콘크리트의 내구성은 균열뿐만 아니라 동결융해 또는 중성화(탄산화)와 같은 복합적인 요인들을 고려하여야 하므로, 이와 관련한 부분들에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다고 할 수 있다.

3.4 강도 증가율

목질계 바이오차 대체율에 따라 양생 기간에 따른 강도의 증가율을 확인하기 위하여 7일 강도를 기준으로 28일 강도의 증가율을 계산하여 그림 8에 강도별로 비교하였다(표 4 참조). 콘크리트 또는 시멘트 모르타르의 역학적 특성 중 설계기준 또는 지침에서 규정하는 기준 강도인 압축강도와 휨강도를 먼저 살펴보면, 설계 또는 해석의 기준이 되는 압축강도의 경우에는 보통 시멘트 모르타르(WB-C-0)의 증가율이 4%인 반면, 목질계 바이오차 대체율에 따른 28일 강도는 약 10~25%로 모든 대체율에서 압축강도가 증가하는 것으로 나타났다. 그리고, 포장용 콘크리트의 기준 강도인 휨강도의 경우에는 WB-C-0의 증가율이 약 55%이고, 목질계 바이오차로 대체한 경우에는 약 32~93%로서 대체율에 따라 증가 또는 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 균열저항성과 내구성을 평가하는 쪼갠인장강도의 경우에는 WB-C-0의 증가율이 약 30%이고, 목질계 바이오차 대체율에 따라서는 약 11~49%로서 대체율별로 차이가 있으나 증가 또는 감소하는 경향이 휨강도와 비슷하게 혼재되어 있는것으로 나타났다. 이와 같이 재령 28일을 기준으로 바이오차의 대체율에 따른 강도 증가의 차이는 사용 시멘트량, 목질계 바이오차의 주성분인 셀룰로오스 섬유 및 다공성 구조에 따른 영향으로 판단된다. 즉, 압축강도는 시멘트량의 감소와 다공성 구조의 확대, 휨강도와 쪼갠인장강도는 인장강도가 우수한 셀룰로오스 섬유의 증가에 따라 증가율에 차이가 있으며, 본 연구의 시험결과에 따르면 약 4% 대체율을 기준으로 구분된다고 판단된다.

다음으로 목질계 바이오차로 대체한 시멘트 모르타르의 재령 28일 강도의 적용 가능성을 확인하기 위하여 바이오차를 혼입하지 않은 보통 콘크리트 또는 시멘트 모르타르를 대상으로 하는 현행 설계기준 또는 배합설계 지침에서 규정하는 기준 강도로 나눈 증가율을 계산하여 표 4에 정리하였다. 이 결과에 따르면, 보통 포장용 콘크리트의 기준이 되는 압축강도는 대체율에 따라 최소 2.35배에서 최대 2.56배로서 설계기준 강도를 충분히 확보하는 것으로 나타났다. 또한, 차도 포장용 콘크리트의 기준이 되는 휨강도도 압축강도와 유사하게 대체율에 따라 최소 1.84배에서 최대 2.17배로서 기준 강도를 충분히 확보하는 것으로 나타났다. 그러나, 쪼갠인장강도의 경우에는 휨 또는 압

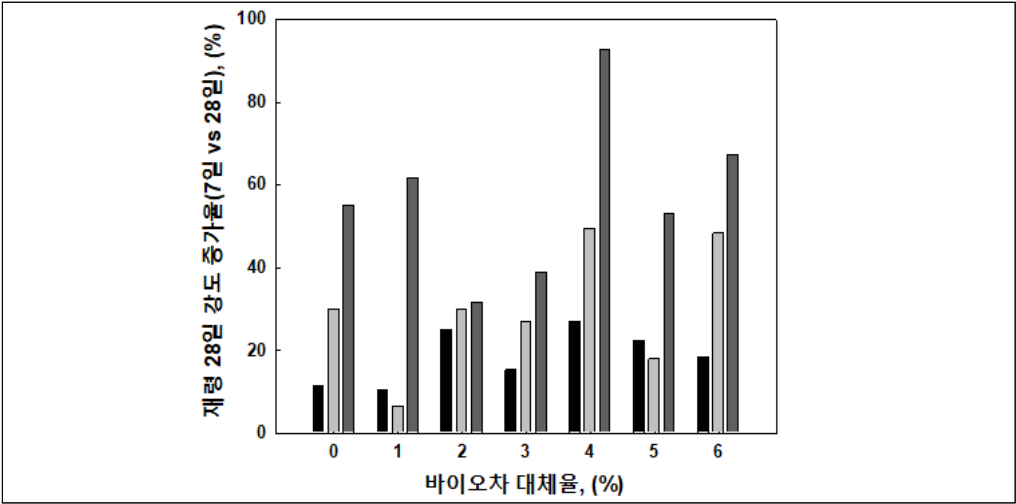


그림 8. 양생 기간에 따른 강도 증가율
범례: ■ 압축강도, ■ 쪼갬인장강도, ■ 휨강도

표 4. 강도 증가율 및 강도비

배합	강도	재령에 따른 강도 증가율 (%) (28일 강도 / 7일 강도)			설계기준(지침)강도 대비 증가율 (28일 강도 / 기준 강도)			강도비 (28일 강도 기준)	
		압축	휨	쪼갬인장	압축	휨	쪼갬인장	휨 / 압축	쪼갬인장 / 압축
WB-C-O		4.4%	54.9%	30.1%	2.23	1.86	1.63	1/4.8	1/11.0
WB-C-1		10.2%	61.7%	10.7%	2.50	2.09	1.51	1/4.8	1/13.3
WB-C-2		15.8%	31.5%	29.8%	2.38	2.00	1.46	1/4.8	1/13.1
WB-C-3		11.7%	38.7%	26.7%	2.35	2.14	1.37	1/4.4	1/13.8
WB-C-4		25.0%	92.6%	49.3%	2.46	2.17	1.40	1/4.5	1/14.2
WB-C-5		20.6%	53.1%	31.6%	2.56	1.99	1.79	1/5.1	1/11.5
WB-C-6		16.5%	67.2%	44.7%	2.46	1.84	1.62	1/5.3	1/12.2

축강도와 다르게 기준 강도와와의 비가 감소하여 대체율에 따라 최소 1.37배에서 최대 1.79배로서, 사용성 및 내구성 확보를 위해 강도의 추가적인 개선이 필요하다고 할 수 있다.

이와 함께 실무에서 휨강도와 쪼갬인장강도의 크기를 산정하는데 활용하는 압축강도와와의 비를 계산하여 표 4에 정리하였다. 바이오차를 혼입하지 않은 보통 콘크리트의 압축강도를 기준으로 하는 휨강도의 비는 일반적으로 1/5~1/8의 범위로 산정하는데, 본 연구에서 수행한 목질계 바이오차로 시멘트를 대체한 모르타르의 휨강도는 대체율에 따라 1/4.4~1/5.3로서 보통 콘크리트의 휨강도 비를 만족하거나 상회함을 알 수 있다. 휨강도와 마찬가지로 압축강도의 1/7~1/15의 범위에서 추정하는 쪼갬인장강도는 목질계 바이오차 대체율에 따라 1/11~1/14.2로서 보통 콘크리트를 기준으로 하는 강도 비의 범위를 충족하고 있음을 알 수 있다. 그러나, 휨강도와 다르게 쪼갬인장강도 비는 상대적으로 낮은 수준으로서 인장강도를 개선하는데 효과적인 혼화재료를 사용할 수 있는 배합설계의 개선 또는 추가적인 섬유 보강재의 사용을 고려할 필요가 있다.

4. 결론

본 연구는 기후변화에 대응하기 위한 핵심적인 대책이라고 할 수 있는 탄소중립을 위하여 조경포장에 사용되는 콘크리트를 구성하는 건설재료 중 탄소 배출량이 가장 많은 재료인 시멘트를 탄소 함량이 높은 목질계 바이오차로 대체 가능성을 확인하기 위한 기초 연구이다. 이를 위하여 시멘트 평균 지름으로 가공한 목질계 바이오차를 단위 시멘트량의 6%까지 대체한 시멘트 모르타르를 배합한 후, 바이오차 혼입 포장용 콘크리트의 기초 물성을 파악하기 위한 시멘트 모르타르의 플로우 및 강도시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 탄소중립을 위한 시멘트 대체재료인 목질계 바이오차의 원소 및 SEM 이미지 분석을 통하여 약 69%의 탄소 함량 및 다공성 구조의 형성을 확인하였으며, 배합된 바이오차 혼입 시멘트 모르타르 경화체에서도 다공성 구조를 유지하면서 목질계 바이오차의 내부와 외부 표면에 시멘트 화합물이 부착되어 있음을 확인하였다.
- 2) 목질계 바이오차로 시멘트를 일부 대체한 모르타르의 플로우시험에 따른 작업성은 보통 모르타르와 플로우값이 비슷하거나 일부 대체율에서는 증가하는 것으로 나타났으며, 배합 후 시간의 경과함에 따른 작업성도 수화작용과 바이오차의 흡수에도 불구하고 보통 모르타르와 유사하게 감소함을 확인하였다.
- 3) 시멘트 대체율에 따른 바이오차 혼입 모르타르의 재령에 따른 역학적 특성은 3가지 강도 모두 재령에 따라 증가하였으며, 28일 강도 증가율은 7일을 기준으로 휨강도 32~93%, 쪼갠인장강도 11~49%, 압축강도 4~25% 순으로 재령에 따라 강도가 증가하였다.
- 4) 목질계 바이오차로 시멘트를 대체한 모르타르의 강도는 대체율에 따라 국가건설기준 및 배합설계지침에서 규정하는 설계기준 압축강도의 2.2~2.6배, 휨강도의 1.8~2.2배를 확보하는 것으로 나타났다.
- 5) 재령 28일 강도를 기준으로 목질계 바이오차의 시멘트 대체율이 휨강도는 4%, 압축강도와 쪼갠인장강도는 5%에서 가장 큰 강도를 발현하였으며, 6%에서도 강도 저하가 발생하지 않고 보통 시멘트 모르타르와 비슷한 강도를 유지하고 있음을 확인하였다.
- 6) 이상과 같이 본 연구에서 수행한 대체율 6%까지의 시험결과를 종합하면, 목질계 바이오차로 시멘트를 대체하는데 따른 모르타르의 작업성과 역학적 특성은 보통 시멘트 모르타르와 비슷한 수준을 유지하며, 포장용 콘크리트 관련 건설기준과 배합설계 지침에서 규정하는 설계기준강도를 만족하고 있으므로 목질계 바이오차를 조경포장용 콘크리트에서 시멘트 대체재로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

그러나, 본 연구에서 평균값으로 제시한 휨, 압축 및 쪼갠인장강도 시험결과는 통계분석에 필요한 적정 데이터(공시체) 수보다 작으므로 강도시험 결과의 신뢰성을 높이는데 한계가 있다. 또한, 조경포장용 콘크리트의 기초물성 파악을 위하여 시멘트 모르타르를 대상으로 시험을 실시하였으므로 목질계 바이오차로 시멘트를 대체하고 굵은골재까지 포함된 조경포장용 콘크리트를 대상으로 작업성과 역학적 특성에 대한 시험과 분석이 필요하며, 향후 바이오차의 최적 대체율과 함께 콘크리트 포장에서 요구되는 동결기 내구성 파악을 위한 동결융해 저항성 등에 대한 연구를 추가적으로 실시할 필요가 있다.

References

1. 국토교통부(2016) 보도포장(KDS 34 60 10:2016). 국가건설기준센터.
2. 국토교통부(2023) 콘크리트구조 설계기준(KDS 24 14 21:2023), 국가건설기준센터.
3. 국토해양부(2011) 시멘트 콘크리트 포장 배합설계 지침.
4. 김상우, 정기훈, 홍예지, 김진섭(2024) 목질계 바이오차 치환율에 따른 콘크리트 및 모르타르의 압축강도 특성, 한국복합신소재구조학회 논문집 15(1): 18-25.
5. 박병훈, 서자유(2023) 탄소저감 현장 실증을 위한 모델정원 설계와 조성. 한국조경학회지 51(6): 75-87.
6. 산업표준심의회(2022a) 수경성 시멘트 모르타르의 압축 강도 시험방법 (KS L 5105), 산업통상자원부 국가기술표준원.
7. 산업표준심의회(2022b) 수경성 시멘트 시험용 플로 테이블 (KS L 5111), 산업통상자원부 국가기술표준원.
8. 산업표준심의회(2022c) 시멘트-시험방법-강도측정 (KS L ISO679), 산업통상자원부 국가기술표준원.
9. 산업표준심의회(2023a) 굳지 않은 수경성 시멘트 페이스트 및 모르타르의 기계적 혼합 방법 (KS L 5109), 산업통상자원부 국가기술표준원.
10. 산업표준심의회(2023b) 콘크리트의 쪼갠 인장 강도 시험방법 (KS F 2423), 산업통상자원부 국가기술표준원.
11. 조현길, 박혜미, 김진영(2020) 공공용지 녹지의 탄소저감과 증진방안. 한국조경학회지 48(4): 1-7.
12. 최원창, 윤현도, 이재연(2012) 바이오숯을 함유한 모르타르의 역학적 특성, 한국구조물진단유지관리공학회 논문집, 16(3): 67-74.
13. 한상민, 최원창(2023) 목질계 바이오차를 함유한 시멘트 모르타르의 역학적 특성 평가. 한국콘크리트학회논문집, 35(3): 285-292.
14. 환경부(2024) 고품질연료제품 품질 시험·분석방법(환경부고시 제2024-174호).
15. Aman, A. M. N., A. Selvarajoo, T. L. Lau and W. H. Chen(2022) Biochar as cement replacement to

- enhance concrete composite properties: A review. *Energies* 15(20): 7662.
16. Gupta, S., H. W. Kua and H. J. Koh(2018) Application of Biochar from Food and Wood Waste as Green Admixture for Cement Mortar. *Science of the Total Environment* 619-620: 419-435.
 17. Ippolito, J. A., D. A. Laird and W. J. Busscher(2012) "Environmental benefits of biochar. *Journal of Environmental Quality* 41(4): 967-972.
 18. Lehmann J., M. C. Rillig, J. Thies, C. A. Masiello, W. C. Hockaday and D. Crowley(2011) Biochar effects on soil biota - A review. *Soil Biology and Biochemistry* 43(9): 1812-1836.
 19. Oliveira, F. R., A. K. Patel, D. P. Jaisi, S. Adhikari, H. Lu and S. K. Khanal(2017) Environmental application of biochar: Current status and perspectives. *Bioresource technology* 246: 110-122.
 20. Senadheera, S. S., S. Gupta, H. W. Kua, D. Hou, S. Kim, D. C. Tsang and Y. S. Ok(2023) Application of Biochar in Concrete - A Review. *Cement and Concrete Composites* 143: 105204.
 21. Spokas, K. A., K. B. Cantrell, J. M. Novak, D. W. Archer, J. A. Ippolito, H. P. Collins and K. A. Nichols(2012) Biochar: a synthesis of its agronomic impact beyond carbon sequestration. *Journal of Environmental Quality* 41(4): 973-989.