

바이오차를 혼입한 콘크리트의 건조수축 평가

김남현¹, 강승범², 김선희³, 최원창^{4*}

Drying Shrinkage Evaluation of Biochar-Incorporated Concrete

Nam-Hyun Kim¹, Seung-Beom Kang², Sun-Hee Kim³, Wonchang Choi^{4*}

Abstract: This study analyzes the drying shrinkage characteristics of concrete incorporating biochar as an alternative supplementary cementitious material. To evaluate drying shrinkage performance, free shrinkage tests were conducted for up to 90 days under controlled temperature and relative humidity conditions. The progression and final shrinkage values were analyzed, alongside the properties of fresh concrete and the mechanical properties of hardened concrete, to examine the comprehensive effects of biochar incorporation. The test results demonstrate that biochar-incorporated concrete exhibits reduced shrinkage compared to plain concrete. This reduction is primarily attributed to the internal curing effect of biochar; its porous structure absorbs and stores free water and gradually releases it during hydration and drying, thereby mitigating internal moisture loss within the concrete matrix. Furthermore, microstructural observations reveal that the interfacial transition zone in biochar-incorporated concrete undergoes densification. This densification promotes pore refinement and restricts moisture evaporation pathways, thereby enhancing resistance to shrinkage. Overall, these findings suggest that biochar can be utilized as a sustainable alternative supplementary cementitious material to improve the dimensional stability and durability of concrete.

Keywords: Biochar, Drying shrinkage, Alternative supplementary cementitious material, Interfacial transition zone

1. 서 론

2050 탄소 중립 선언과 기후변화 대응을 위한 국제적 요구가 확대됨에 따라 온실가스 감축은 전 세계적인 핵심 과제로 부상하였다. 특히 시멘트 산업은 전 세계 온실가스 배출량의 약 7~8%를 차지하는 대표적인 고탄소 산업으로, 시멘트 사용량 저감 또는 대체재 적용을 통한 탄소배출 저감 방안의 필요성이 제기되고 있다(Chaudhury et al., 2023; Volaity et al., 2025).

이러한 배경에서 바이오차(Biochar)를 시멘트 대체재로 활용하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 바이오차는 산소가 제한된 환경에서 바이오매스를 열분해하여 생성되는 고탄소 물질로, 콘크리트에 혼입할 경우 시멘트 사용량 저감과 동시에 구조물 내 탄소를 장기간 고정 및 저장하는 탄소 격리 수단으로 활용될 수 있다(Spokas et al., 2010; Zhou et al., 2025). 이에

따라 바이오차를 시멘트 대체재로 활용하기 위한 역학적 및 내구성 특성에 관한 연구가 다수 보고되고 있으며, 적정 혼입량에서 역학적 성능 향상이 보고되고 있다(Ling et al., 2023; Patel et al., 2025).

특히, 다양한 내구성 지표 중 건조수축은 콘크리트 구조물의 균열 발생과 직접적으로 연관되는 주요 특성으로, 초기 재령에서 수분 손실로 인해 발생한 수축 변형이 내부 구조에 의해 제한될 경우 내부 인장 응력이 유발되어 건조수축균열이 발생할 수 있다. 이러한 균열은 수밀성 및 내구성 저하로 이어질 수 있으므로, 건조수축 평가는 콘크리트 구조물의 균열 제어 및 장기 성능 확보를 위해 중요한 항목으로 간주된다(Park et al., 2011; Kwon & Kim, 2016; Jeon et al., 2024). 이에 따라 건조수축은 시멘트계 대체 혼화재료 (Alternative Supplementary Cementitious Materials, ASCM)의 적용성을 검토하는데 있어 중요한 평가 항목이며, KS L 5122에서도 그 필요성을 명시하고 있다.

기존 연구에서는 바이오차를 시멘트계 재료에 혼입할 경우 건조수축이 감소하는 경향이 보고되어 왔다. Lin et al. (2023)은 바이오차 혼입 시 수축 저감 효과에 주목한 연구들이 다수 수행되었음을 보고하였으며, Gupta et al. (2020)은 실리카 폼 사용으로 인해 크게 증가하는 건조수축을 바이오차 혼입을 통해 저감하고자 하였다. Wu et al. (2025)와 Lin et al.

¹정회원, 가천대학교 건축공학과 석사과정

²정회원, 가천대학교 건축공학과 박사과정

³정회원, 가천대학교 건축공학과 부교수

⁴정회원, 가천대학교 건축공학과 교수, 교신저자

*Corresponding author: wchoi@gachon.ac.kr

Department of Architectural Engineering, Gachon University, 1342, Seongnam-daero, Sujeong-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2026년 5월 31일까지 학회로 보내주시면 2026년 6월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

(2026) 또한 UHPC 및 고로슬래그에 바이오차를 혼입하여 건조수축 감소 효과를 적용하고자 하였다. 다만, 이러한 연구들은 주로 모르타르 또는 특수 시멘트계 재료를 대상으로 수행되었으며, 콘크리트 수준에서 바이오차 혼입에 따른 건조수축 특성을 평가한 연구는 제한적인 실정이다. 이에 본 연구에서는 바이오차를 혼입한 콘크리트를 대상으로 건조수축 시험을 수행하여, 바이오차의 ASCM 적용 가능성을 검토하고자 한다.

2. 실험

2.1 바이오차

바이오차는 왕겨, 목재, 가축 분뇨 등 다양한 바이오매스를 원료로 하여 제조될 수 있으며, 원료의 종류 및 제조조건에 따라 물리·화학적 특성이 상이하다. 본 연구에서는 Kang et al. (2025a)를 참고하여 높은 탄소 함유량을 가지는 목질계 바이오차를 사용하였다.

해당 바이오차는 국내 K사에서 생산된 목재 펠릿 기반 제품으로, 650~850°C 범위에서 열분해된 것이다. 바이오차는 높은 흡수성을 고려하여 100±5°C 조건에서 24시간 동안 충분히 건조하였으며, 이후 시멘트 매트릭스 내의 filler effect를 기대하여 Roll mill을 이용해 250 rpm 조건에서 30분 이상 분쇄하였다. 분쇄된 바이오차의 입도 분포는 PSA (Particle Size Analysis)를 통해 정량적으로 평가하였으며, 미세구조 및 화학적 조성을 분석하기 위해 SEM (Scanning Electron Microscope), SEM-EDX (Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-ray Spectrometer) 및 XRF (X-ray Fluorescence) 분석을 수행하였다.

2.2 배합 및 시편 제작

본 연구에서 제작한 콘크리트의 배합비는 Table 1에 제시하였다. 콘크리트의 목표 설계기준강도는 24 MPa로 설정하였으며, 주요 변수는 시멘트 중량 대비 바이오차 (Biochar, BC)의 치환율 (3%, 5%, 7%)이다. 바이오차의 혼입률은 선행 연구를 참고하여 혼입률 별 차이를 비교하기 위해 3~7% 범

Table 2 Number of specimens prepared for each test

Test type		Age (days)	Number of specimens
Compressive strength	Air curing	28	3
	Water curing		3
Flexural strength			3
Drying shrinkage		~90	3

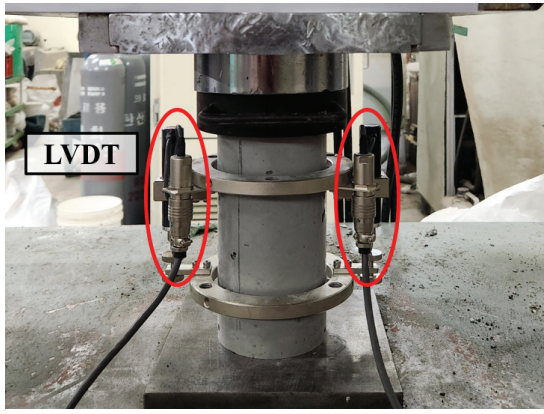
위로 설정하였다. 바이오차의 높은 수분 흡수율은 작업성을 저하시키는 것으로 보고되고 있으며(Choi et al., 2012; Gupta and Kua, 2018), 이를 고려하여 바이오차를 혼입한 배합에는 결합재 중량 대비 0.2%의 고성능 감수제 (Super Plasticizer, SP)를 혼입하였다.

콘크리트 타설 직후 굳지 않은 콘크리트의 특성을 평가하기 위해 슬럼프 시험과 공기량 시험을 각각 KS F 2402, KS F 2421에 따라 수행하였다. 압축강도, 휨강도 및 건조수축 시험을 위한 공시체는 각 시험 당 Table 2에 제시한 수량의 공시체를 제작하였다. 압축강도 시험용 공시체는 KS F 2403에 따라 $\varnothing 100\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 의 원주형으로, 휨강도 시험용 공시체는 $100 \times 100 \times 400\text{ mm}$ 각주형으로 제작하였다. 압축강도 시험은 수중양생 및 기건양생 조건으로 구분하여 재령 28일에 수행하였으며, 휨 강도 시험은 수중양생 조건에서 재령 28일에 실시하였다. 압축강도시험 시 공시체 양측에 LVDT (Linear Variable Differential Transformer)를 설치하여 축방향 변형을 계측하고 이를 바탕으로 정적 탄성계수를 산정하였다. 휨강도 시험은 4점 재하 방식으로 수행하였으며, 압축강도, 휨강도 및 건조수축 시험 전경은 Fig. 1에 제시하였다.

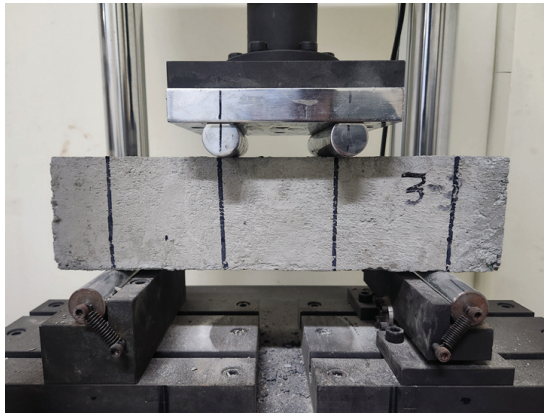
건조수축 시험용 공시체는 KS F 2424를 참고하여 $100 \times 100 \times 400\text{ mm}$ 각주형 공시체로 제작하였으며, 자유 건조수축 조건에서 길이 변화를 측정하였다. 건조수축 측정 시 Park et al. (2011)의 연구를 참고하여 측정 편차가 큰 다이얼 게이지 대신 매립형 게이지를 사용하였다. 매립형 게이지는 표점거리 60 mm의 센서를 사용하여 각주형 공시체의 중앙부에 매립하였으며, 이에 대한 개략적인 배치는 Fig. 2에 모식도로 나타

Table 1 Mix proportion of concrete

Elemental Composition	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)					
			W	C	S	G	BC	SP
Plain	50	40	165	330.0	712	1069	-	-
BC_3%				320.1			9.9	
BC_5%				313.5			16.5	0.66
BC_7%				306.9			23.1	



(a) Compressive strength test



(b) Flexural strength test



(c) Drying Shrinkage test

Fig. 1 Test setup

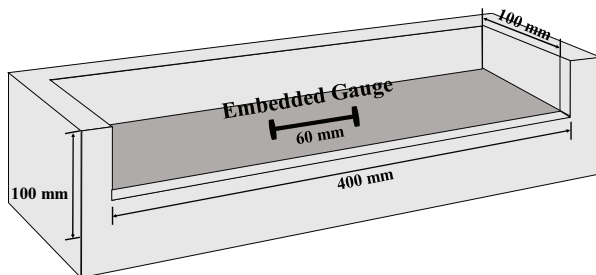


Fig. 2 Schematic of embedded gauge setup

내었다. 건조수축 시험은 온도 $20 \pm 3^\circ\text{C}$, 상대습도 $60 \pm 5\%$ 조건에서 90일간 수행하였다.

3. 결 과

3.1 바이오차의 재료적 특성

Fig. 3은 분쇄된 바이오차의 PSA 측정 결과를 나타낸 것이다. D_{10} , D_{50} 및 D_{90} 은 각각 $3.486 \mu\text{m}$, $20.552 \mu\text{m}$, 및 $91.697 \mu\text{m}$ 로 나타났으며, 평균 입경은 $32.92 \mu\text{m}$ 이다. Gupta et al. (2018a)은 바이오차의 입경이 $20 \mu\text{m}$ 이하일 경우 시멘트 매트릭스 내에서 미세 충전재로 작용할 수 있다고 보고하였다. 본 연구에서는 D_{50} 이 약 $20 \mu\text{m}$ 수준으로 나타났다는 점을 고려하면, 일정 수준의 Filler effect를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 4는 분쇄된 바이오차를 각각 $\times 20\text{k}$ 와 $\times 10\text{k}$ 배율로 관찰한 SEM을 나타낸 것이다. Fig. 4(a)에서는 바이오차의 다공성 미세구조가 관찰되었으며, Fig. 4(b)에서는 Gupta et al. (2020)의 보고와 유사하게 분쇄 과정에서 일부 거대 기공 구조가 파괴된 형상이 확인되었다.

Table 3는 바이오차의 XRF 분석 결과이다. 분석 결과 MgO, SiO_2 , CaO 등이 나타났으며, 목질계 바이오차를 활용한 기존

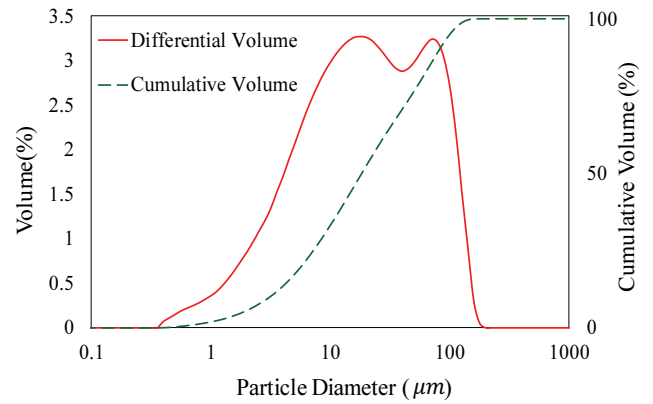
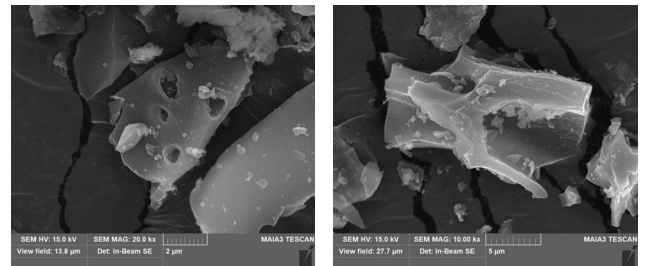


Fig. 3 PSA of Biochar



(a) $\times 20\text{k}$

(b) $\times 10\text{k}$

Fig. 4 SEM of biochar

Table 3 XRF Chemical Composition of Biochar (wt%)

Chemical Composition	wt%
MgO	11.04
Al ₂ O ₃	3.37
SiO ₂	13.52
P ₂ O ₅	3.40
SO ₃	2.33
Cl	6.54
K ₂ O	5.44
CaO	37.92
TiO ₂	1.01
Cr ₂ O ₃	0.42
MnO	0.51
Fe ₂ O ₃	4.54
NiO	0.03
ZnO	9.89
SrO	0.03
Total	100.00

연구와 유사한 결과를 확인하였다(Hamidi et al., 2025).

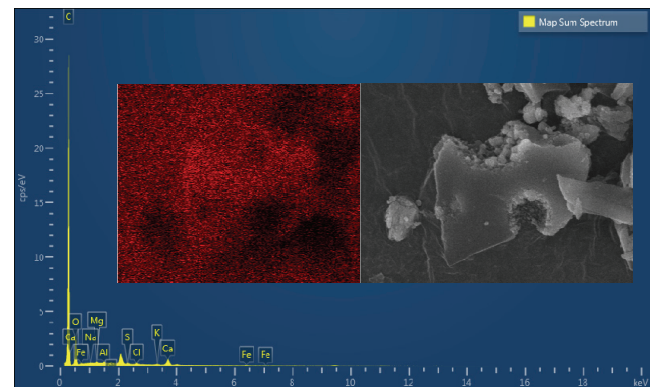
Table 4 및 Fig. 5는 바이오차의 SEM-EDX 분석 결과를 나타낸 것이다. EDX 스펙트럼에서 탄소에 해당하는 피크가 우세하게 관찰되었으며, 탄소 원소 맵핑 결과 시료 전반에 걸쳐 탄소가 균일하게 분포하는 것을 확인하였다. 원소 조성은 탄소 함량이 85.35 wt%로 가장 높게 나타났으며, 산소는 12.78 wt%로 확인되었다. 본 연구에서는 EDX로 측정된 wt% 값을 각 원소의 원자량을 고려하여 몰수로 환산한 후 O/C (Oxygen to Carbon) 비율을 계산하였으며, 그 결과 O/C 비율은 0.11로 산정되었다. 이는 목질계 바이오차를 사용한 선행 연구와 유사한 결과를 나타내었다(Gupta and Kua., 2018; Kang et al., 2025b). 일반적으로 O/C 비율이 0.2 미만인 바이오차는, 최소 1000년 이상의 반감기를 갖는 것으로 보고된다(Spokas et al., 2010). 이러한 결과로부터, 본 연구에서 사용한 목질계 바이오차는 ASCM 적용 시 장기간에 걸쳐 탄소를 안정적으로 격리할 수 있는 잠재력을 지닌 것으로 볼 수 있다.

3.2 굳지 않은 콘크리트의 특성

Fig. 6은 바이오차의 혼입률에 따른 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프 및 공기량 변화를 나타낸 것이다. 바이오차 혼입률이 증가함에 따라 슬럼프와 공기량은 모두 감소하는 경향을 보였다. 공기량은 혼입률 증가에 따라 감소하였으며, 이는 미세 입자의 혼입으로 인해 입자 간 공극이 감소한 데 따른 결과로 예상된다(Han and Choi, 2023). 슬럼프는 바이오차 혼입률 증

Table 4 SEM-EDS Elemental Composition of Biochar (wt%)

Elemental Composition	wt%
Carbon	85.35
Oxygen	12.78
Sodium	0.08
Magnesium	0.11
Aluminum	0.11
Silicon	0.10
Sulfur	0.07
Chlorine	0.11
Potassium	0.11
Calcium	1.02
Iron	0.16
Total	100.00

**Fig. 5** SEM-EDX Spectrum

가에 따라 현저히 감소하였으며, BC_7% 배합에서는 Plain 대비 약 50% 감소하였다. 이는 바이오차의 높은 흡수성에 인해 유효 수분량이 감소한 것에 기인한 것으로, 선행 연구 결과와 일치한다(Abbas et al., 2025).

3.3 콘크리트의 역학적 특성

압축강도 시험 및 정탄성계수 측정은 KS F 2405 및 KS F 2438을 참고하여 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 전반적으로 바이오차를 혼입한 배합은 기건양생 대비 수중양생 조건에서 더 높은 압축강도를 나타냈다. 이는 바이오차의 높은 흡수성으로 인해 수화에 필요한 유효 수분량이 감소하지만(Suarez-Riera et al., 2023), 수중양생 시에는 외부로부터의 지속적인 수분 공급으로 인해 수화 반응이 보다 원활하게 진행되었기 때문이다(Chen et al., 2023). 이러한 경향은 Gupta and Kua (2018)가 보고한 사전 침지된 바이오차를 혼입 시 압축강도가 증가한다는 결과와 유사하다. 바이오차 혼입 시 압축강도는 내부양생 효과로 3~5%의 적정 혼입률 범위에

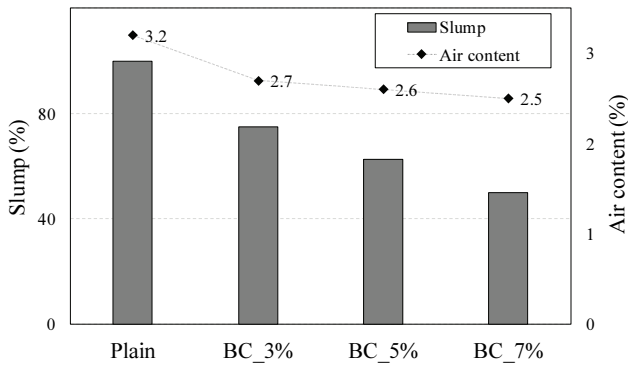


Fig. 6 Fresh concrete properties

서 증가하는 경향을 보였으나, BC_7% 배합에서는 강도하락이 관찰되었다. 이는 시멘트량 감소로 인한 것으로 판단된다.

정탄성계수 시험 결과, 바이오차 혼입률 증가에 따른 일정한 변화 양상은 나타나지 않았다. 이는 바이오차 혼입이 시멘트 기반 재료의 정적 탄성계수에 유의미한 영향을 미치지 않는다는 기존 연구 결과와 일치한다(Gupta et al., 2018b; Han and Choi, 2023). Fig. 7에서 나타난 바와 같이 BC_3% 배합에서는 탄성계수가 소폭 증가하였으며, 이는 바이오차의 수분 흡수 특성에 따른 내부 함수율 증가와 관련된 것으로 판단된다. 이러한 경향은 콘크리트의 내부 함수율 증가에 따라 탄성계수가 증가함을 보고한 Liu et al. (2014)의 결과와 유사하다. 반면, BC_5 및 BC_7%에서 관찰된 탄성계수의 감소는 내부 함수율이 증가함에도, 시멘트 치환율 상승에 따라 시멘트 성분의 비율이 감소한 데 따른 결과로 판단된다(Gupta et al., 2018b).

기건양생 조건에서 혼입률 간 탄성계수 차이는 BC_3%와 BC_7% 배합 사이에서 가장 크게 나타났으며, 약 2.7 GPa로 수중양생 조건(4.1 GPa)에 비해 약 34% 작았다. 이는 수중양생 조건에서 상대적으로 높은 함수율로 인해 수분 조건의 영향이 더 크게 작용한 결과로 해석된다. 종합하면, 본 연구 범위에서 관찰된 탄성계수의 변화는 양생 조건 및 배합 구성 변화에 따른 부수적 영향으로 판단되며, 바이오차 혼입이 정적 탄성계수에 미치는 직접적인 영향은 제한적인 것으로 볼 수 있다.

휨강도 시험은 KS F 2408을 참고하여 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 8에 나타내었다. 바이오차를 혼입한 배합에서 휨강도가 향상되는 경향이 관찰되었다. 이는 바이오차가 콘크리트 내부 기공을 충전하여 공극 구조를 조밀하게 형성하기 때문으로 보고되고 있다(Patel et al., 2025). 또한 Sirico et al. (2022)는 바이오차 첨가 시 균열 후 거동이 개선되고 연성이 증가함을 보고하였으며, 이러한 특성이 휨 하중 조건에서의 강도 발현에 기여하는 것으로 판단된다.

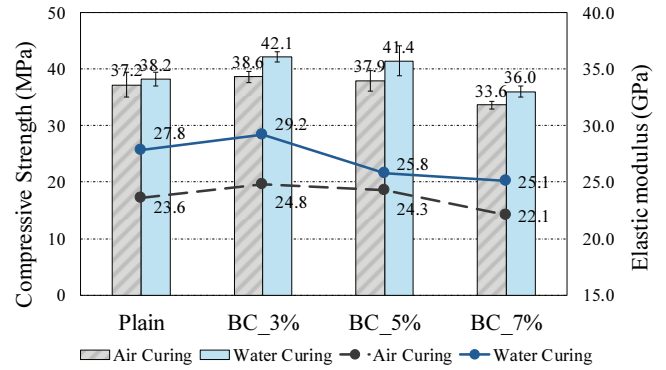


Fig. 7 Compressive strength and elastic modulus of concrete

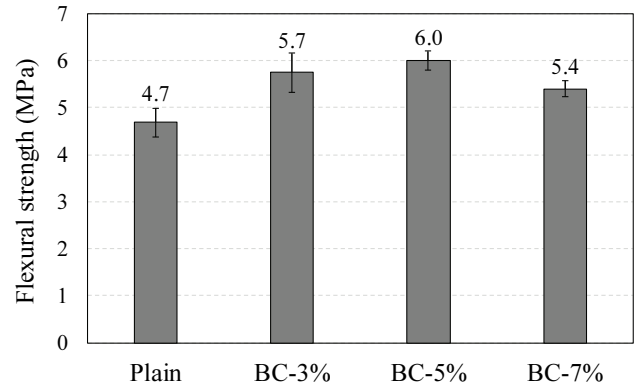


Fig. 8 Flexural strength of concrete

3.4 콘크리트의 건조수축 특성

콘크리트의 건조수축은 단위수량의 영향을 크게 받으며, 단위수량이 증가할수록 건조수축이 증가하는 것으로 알려져 있다(Jeon et al., 2024). 본 연구 배합은 W/B 0.50에 해당하므로 비교적 단위수량이 큰 조건에 해당한다. 또한, 기존 연구에서도 W/B가 비교적 높은 조건에서는 자기수축의 영향이 제한적인 것으로 보고되었으며(Rasoolinejad et al., 2019; Tang et al., 2021), 바이오차 혼입 시 자기수축이 감소하는 경향 또한 제시된 바 있다(Gupta et al., 2020; Lin et al., 2026). 이를 종합하면, 본 연구에서 측정된 수축 거동은 총수축에 해당하나, 자기수축의 기여는 제한적일 것으로 판단된다.

Fig. 9는 각 배합의 90일간의 콘크리트 수축 결과를 나타낸 것이다. 본 연구 결과, 바이오차를 혼입한 모든 배합에서 Plain 대비 최대 약 15.9%의 수축 저감이 확인되었다. 이는 바이오차의 다공성 구조가 혼합 및 수화 초기 단계에서 자유수의 일부를 흡수하여 수분 증발에 따른 수축을 완화한 데 기인한 것으로 해석된다. 아울러 바이오차에 저장된 수분이 수화 과정에서 점진적으로 방출되면서 내부 양생 효과를 발현한다. 특히, 바이오차의 다공성 구조는 수분을 방출한 후에도 수축이 거의 발생하지 않아, 건조수축 저감에 기여하는 것으로 보고되

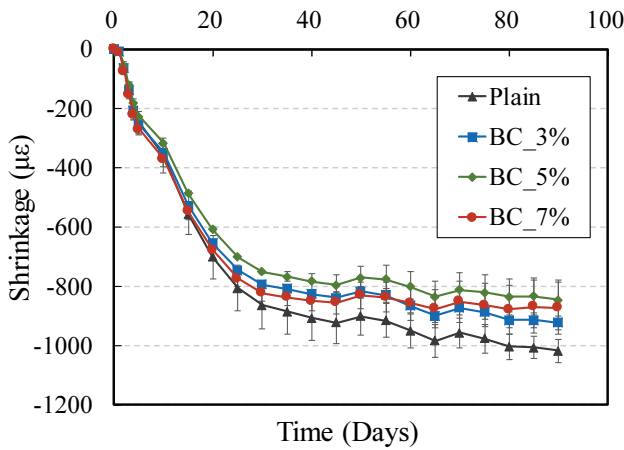
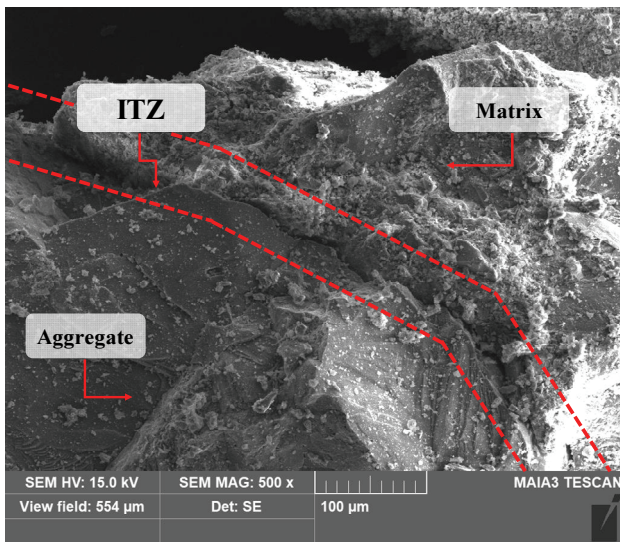
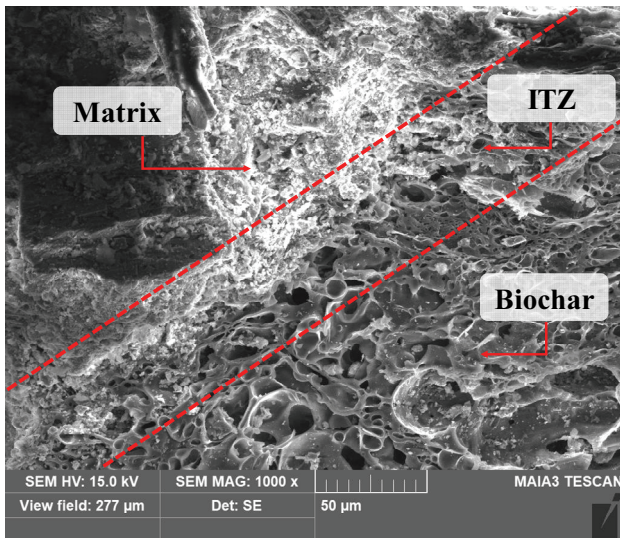


Fig. 9 Shrinkage of concrete under drying condition



(a) Plain specimen after drying shrinkage



(b) BC 5% specimen after drying shrinkage

Fig. 10 Comparison of ITZ microstructures

고 있다(Muthukrishnan et al., 2019; Gupta et al., 2020).

또한, 바이오차의 거친 표면은 시멘트 매트릭스와의 기계적 맞물림을 형성하며, 바이오차 기공 표면에서 서서히 공급되는 수분은 계면전이영역(Interfacial Transition Zone, ITZ) 내 수화 생성물의 발달을 촉진한다. 이에 따라 ITZ는 보다 치밀한 미세 구조를 형성하는 것으로 보고되고 있다(Chen et al., 2023; Wang et al., 2025). 이러한 ITZ의 치밀화는 계면 부근의 모세관 공극률을 감소시켜 수분 증발을 억제하고, 건조수축 저감에 기여하는 것으로 보고되고 있다(Chen et al., 2023; Lin et al., 2023).

Fig. 10은 건조수축이 완료된 후 시편 일부를 SEM으로 촬영한 결과이다. Fig. 10(a)에서는 골재와 시멘트 페이스트의 경계를 따라 ITZ에 미세 균열이 형성되어 있으며, 균열을 기준으로 골재와 시멘트 페이스트가 명확히 분리되는 양상이 나타난다. 이는 건조 과정에서 해당 계면이 수분 이동 및 응력 집중에 취약한 구간으로 작용했을 가능성을 보여준다. 반면, Fig. 10(b)에서는 바이오차와 시멘트 페이스트 간의 ITZ에서 Fig. 10(a)와 같은 미세 균열이나 이격이 관찰되지 않았으며, 바이오차와 시멘트 페이스트가 비교적 밀착된 상태를 유지하고 있다.

수축량은 Plain, BC_3%, BC_7%, BC_5% 순으로 나타났다. 이는 혼입을 증가에 따라 바이오차가 저장하는 수분량이 증가하면서 내부양생 효과가 강화되어 전반적인 수축 저감 효과가 발현된 결과로 판단된다. BC_3% 배합에서는 Plain 대비 약 95.28 μm 의 수축 감소가 나타났다. 다만, 치환율이 상대적으로 낮아 BC_5% 대비 수축 저감 폭은 크지 않은 것으로 해석된다. BC_5% 배합에서는 내부양생 효과의 발현과 ITZ의 치밀화가 복합적으로 작용하여 가장 큰 수축 저감을 나타내며, Plain 대비 약 171.38 μm 감소하였다.

특히 BC_7% 배합에서는 초기 재령에서 다른 바이오차 혼입 배합에 비해 수축량이 상대적으로 가파르게 증가하는 경향을 보였다. 이는 Fig. 6에서 나타난 것 처럼 내부 유효 수분량이 일시적으로 감소하여 초기 시멘트 매트릭스의 형성이 다소 저해되었으며(Barbhuiya et al., 2024), 이와 함께 시멘트 대체율 증가에 따른 매트릭스 치밀성 저하 및 공극률 증가가 복합적으로 작용하였기 때문으로 해석된다(Kim et al., 2022). 이후 저장된 수분이 점진적으로 방출되면서 수축이 완화되었고, 최종 재령에서 Plain 대비 약 149.09 μm 감소하였다. 이러한 이유로 BC_5% 대비 BC_7%에서 수축 저감 효과가 감소한 것으로 해석된다.

4. 결 론

본 연구에서는 바이오차를 ASCM으로 적용한 콘크리트를

대상으로 건조수축 특성 평가를 중심으로 굳지 않은 콘크리트 특성, 역학적 특성을 평가하였다. 본 연구를 통해 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 건조수축 시험 결과, 바이오차를 혼입한 모든 배합에서 Plain 배합 대비 수축 저감 효과를 확인하였다. 이는 바이오차의 다공성 구조가 수분을 저장한 후 건조 과정에서 서서히 방출하는 내부 양생 효과로 인해 시멘트 매트릭스 내부 수분 손실이 완화된 결과로 판단된다.
- 2) 미세구조 관찰 결과, 바이오차를 혼입한 콘크리트에서는 계면전이영역(ITZ)이 Plain 대비 상대적으로 치밀하게 형성된 것이 확인되었다. 이러한 ITZ의 치밀화는 ITZ 부근의 모세관 공극률을 감소시켜 수분 증발 경로를 억제하고, 그 결과 건조수축이 저감된 것으로 해석된다.
- 3) BC_7% 조건에서는 초기 재령에서 수축이 상대적으로 크게 나타났으나, 일정 재령 이후에 건조수축이 감소하는 경향을 보였다. 이는 혼입률 증가에 따라 수화 초기 시멘트 매트릭스 형성이 저해되어 건조수축이 증가할 수 있으나, 이후 바이오차의 내부 양생 효과에 의해 수분이 지속적으로 공급되면서 건조수축이 완화된 결과로 판단된다.
- 4) 굳지 않은 콘크리트 시험 결과, 바이오차 혼입률 증가에 따라 슬럼프가 감소하였으며, 이는 바이오차의 높은 수분 흡수 특성으로 인해 배합 내 유효 자유수량이 감소한 데 따른 결과로 해석된다. 특히 바이오차 혼입률이 높은 배합에서의 슬럼프 감소에 대한 보완이 필요하다.
- 5) 역학적 특성 결과, 바이오차를 3~5% 범위로 혼입한 경우 압축강도가 향상되었으며, 휨강도 또한 전반적으로 향상되었다. 이러한 결과는 바이오차 혼입이 filler effect를 수행하여 공극 구조를 치밀화하고 바이오차의 내부 양생효과를 통해 수화 반응의 지속으로 강도 향상에 기여한 것으로 판단된다.

종합적으로, 본 연구 결과는 바이오차가 콘크리트의 건조수축 저감에 효과적인 ASCM으로 활용될 가능성을 보여주며, 특히 내부양생 효과와 ITZ 치밀화가 주요 기여 요인으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2024년도 정부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다. (No. RS-2024-00408370)

References

1. Abbas, A. A., and Thapa, S. J. (2025), Experimental Investigation of Low-Carbon Concrete Using Biochar as Partial Cement Replacement, *Sustainability*, 17(23), 10744.
2. Barbhuiya, S., Das, B. B., and Kanavaris, F. (2024), Biochar-concrete: A comprehensive review of properties, production and sustainability, *Case Studies in Construction Materials*, 20, e02859.
3. Chaudhury, R., Sharma, U., Thapliyal, P. C., and Singh, L. P. (2023), Low-CO2 emission strategies to achieve net zero target in cement sector, *Journal of Cleaner Production*, 417, 137466.
4. Chen, L., Zhou, T., Yang, J., Qi, J., Zhang, L., Liu, T., ... and Li, B. (2023), A review on the roles of biochar incorporated into cementitious materials: Mechanisms, application and perspectives, *Construction and Building Materials*, 409, 134204.
5. Choi, W., Yun, H.D., and 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.
6. Gupta, S., Krishnan, P., Kashani, A., and Kua, H. W. (2020), Application of biochar from coconut and wood waste to reduce shrinkage and improve physical properties of silica fume-cement mortar, *Construction and Building Materials*, 262, 120688.
7. Gupta, S., Kua, H. W., and Low, C. Y. (2018a), Use of biochar as carbon sequestering additive in cement mortar, *Cement and concrete composites*, 87, 110-129.
8. Gupta, S., Kua, H. W., and Dai Pang, S. (2018b), Biochar-mortar composite: Manufacturing, evaluation of physical properties and economic viability, *Construction and Building Materials*, 167, 874-889.
9. Gupta, S., and Kua, H. W. (2018), Effect of water entrainment by pre-soaked biochar particles on strength and permeability of cement mortar, *Construction and Building Materials*, 159, 107-125.
10. Hamidi, F., and Tunstall, L. E. (2025). Insights into the influence of biochar powder on the fresh state properties and strength development of concrete, *Construction and Building Materials*, 498, 144006.
11. Han, S., and 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).
12. Jeon, D., Oh, H. S., Kwon, S., Kim, D. J., Pyo, S., and Yoon, S. (2024), A Comprehensive Review of Inherent Cracking Mechanisms in Concrete Structures: A State-of-the-Art Study, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 36(3), 255-266 (in Korean).
13. Kang, S. B., Yun, H. D., and Choi, W. (2025a), Feasibility on diverse biochars as supplementary cementitious materials, *Scientific Reports*, 15(1), 40732.
14. Kang, S.B., Kim, N.H., Kim, S.H., and Choi, W. (2025b), Evaluation of the Material Properties of Cementitious Mixtures Containing Biochar, *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, 16(4), 1-7 (in Korean).
15. Kim, K., Lim, G., Son, M., Ryu, G., Koh, K., and Kang, J. (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.
16. KS F 2402 (2022), Standard Test Method for Concrete Slump. Korea Standards Association, Seoul, South Korea (in Korean).
 17. KS F 2403 (2019), Standard Test Method for Making Concrete Specimens. Korea Standards Association, Seoul, South Korea (in Korean).
 18. KS F 2421 (2016), Standard Test Method for Air Content of Fresh Concrete by The Pressure Method(Air Receiver Method). Korea Standards Association, Seoul, South Korea (in Korean).
 19. KS F 2424 (2025), Standard Test Method for Length Change of Mortar and Concrete. Korea Standards Association, Seoul, South Korea (in Korean).
 20. KS L 5122 (2024), Standard Guide for Evaluation of Alternative Supplementary Cementitious Materials (ASCM) for Use in Cement and Concret. Korea Standards Association, Seoul, South Korea (in Korean).
 21. Kwon, S.H., and Kim, J.K. (2016), Understanding of Drying Shrinkage and Autogeneous Shrinkage in Concrete, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, 28(6), 22-26 (in Korean).
 22. Lin, X., Li, W., Guo, Y., Dong, W., Castel, A., and Wang, K. (2023). Biochar-cement concrete toward decarbonisation and sustainability for construction: characteristic, performance and perspective, *Journal of Cleaner Production*, 419, 138219.
 23. Lin, X., Nguyen, Q. D., Castel, A., and Tam, V. W. (2026), Effect of biochar on the shrinkage deformation of ground granulated blast-furnace slag-cement mortars, *Construction and Building Materials*, 506, 144734.
 24. Ling, Y., Wu, X., Tan, K., and Zou, Z. (2023), Effect of biochar dosage and fineness on the mechanical properties and durability of concrete, *Materials*, 16(7), 2809.
 25. Liu, B. D., Lv, W. J., Li, L., and Li, P. F. (2014), Effect of moisture content on static compressive elasticity modulus of concrete, *Construction and Building Materials*, 69, 133-142.
 26. Muthukrishnan, S., Gupta, S., and Kua, H. W. (2019), Application of rice husk biochar and thermally treated low silica rice husk ash to improve physical properties of cement mortar, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 104, 102376.
 27. Park, S. S., Kwon, S. J., and Song, H. W. (2011), Analysis technique for restrained shrinkage of concrete containing chlorides, *Materials and Structures*, 44(2), 475-486.
 28. Patel, R., Stobbs, J., and Acharya, B. (2025), Study of biochar in cementitious materials for developing green concrete composites, *Scientific Reports*, 15(1), 22192.
 29. Rasoolinejad, M., Rahimi-Aghdam, S., and Bazant, Z. P. (2019), Prediction of autogenous shrinkage in concrete from material composition or strength calibrated by a large database, as update to model B4, *Materials and Structures*, 52(2), 33.
 30. Sirico, A., Belletti, B., Bernardi, P., Malcevski, A., Pagliari, F., Fornoni, P., and Moretti, E. (2022), Effects of biochar addition on long-term behavior of concrete, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 122, 103626.
 31. Spokas, K. A. (2010), Review of the stability of biochar in soils: predictability of O: C molar ratios, *Carbon Management*, 1(2), 289-303.
 32. Suarez-Riera, D., Falliano, D., Carvajal, J. F., Celi, A. C. B., Ferro, G. A., Tulliani, J. M., ... and Restuccia, L. (2023), The effect of different biochar on the mechanical properties of cement-pastes and mortars, *Buildings*, 13(12), 2900.
 33. Tang, S., Huang, D., and He, Z. (2021), A review of autogenous shrinkage models of concrete, *Journal of Building Engineering*, 44, 103412.
 34. Volaity, S. S., Aylas-Paredes, B. K., Han, T., Huang, J., Sridhar, S., Sant, G., ... and Neithalath, N. (2025), Towards decarbonization of cement industry: a critical review of electrification technologies for sustainable cement production, *npj Materials Sustainability*, 3(1), 23.
 35. Wang, D., Jantwal, A., Kaynak, E., Sas, G., and Das, O. (2025), Promoting internal curing in concrete by replacing sand with sustainable biochar, *Case Studies in Construction Materials*, 22, e04542.
 36. Wu, F., Zhang, Q., Dong, S., Cai, Y., Yang, S., Xu, F., ... and Jiang, J. (2025), Biochar modification enhances mechanical and durability properties of cement-based materials, *Scientific Reports*, 15(1), 22174.
 37. Zhou, Q., Wu, D., Ye, C., Du, J., Qiu, L., Jin, M., and Wu, W. (2025), Carbon Sequestration Potential of Biochar-Modified Building Materials: A Critical Review, *Journal of Building Engineering*, 114687.

Received : 02/05/2026

Revised : 03/06/2026

Accepted : 03/09/2026

요 지 : 본 연구는 바이오차를 시멘트계 대체 혼화재료로 적용한 콘크리트의 건조수축 특성을 분석하였다. 건조수축 성능을 평가하기 위해 일정한 온·습도가 유지되는 제어된 환경 조건에서 최대 90일까지 자유 건조수축 시험을 수행하였으며, 해당 시험을 통해 건조수축의 진행 양상과 최종 수축량을 비교·분석하였다. 또한, 굳지 않은 콘크리트의 특성과 경화 콘크리트의 역학적 특성도 함께 평가하여, 바이오차 혼입이 콘크리트의 전반적인 재료 특성에 미치는 영향을 검토하였다. 시험 결과, 바이오차를 혼입한 콘크리트는 일반 콘크리트 대비 수축 저감 효과를 보였다. 이러한 수축 저감은 바이오차의 다공성 구조가 자유수를 흡수·저장한 후, 수화 및 건조 과정에서 내부 수분을 지속적으로 공급함으로써 콘크리트 내부의 수분 손실을 완화하는 내부 양생 효과에 기인한 것으로 판단된다. 또한, 미세구조 관찰 결과, 바이오차 혼입시 계면전이영역이 일반 콘크리트에 비해 보다 치밀하게 형성된 것이 확인되었다. 이러한 계면전이영역의 치밀화는 모세관 공극률을 감소시키고 수분 증발 경로를 억제하는 데 기여하였으며, 결과적으로 콘크리트의 수축 저항성을 향상시키는 데 중요한 역할을 하는 것으로 해석된다. 종합적으로, 본 연구 결과는 바이오차가 콘크리트의 건조수축 저감을 위한 시멘트계 대체 혼화재료로서 유효하게 활용될 수 있음을 보여준다.

핵심용어 : 바이오차, 건조수축, 시멘트계 대체 혼화재료, 계면전이영역