

PVA/CNC/BaSO₄ 조직 재생용 지지체의 기계적 물성과 방사선 불투과성 연구

서영호 · 조선미* · 한성수* · 오태환*[†]

영남대학교 대학원 유기신소재공학과, *영남대학교 화학공학부
(2024년 1월 3일 접수, 2024년 2월 14일 수정, 2024년 3월 21일 채택)

Study of Mechanical Properties and Radiopacity of PVA/CNC/BaSO₄ Scaffold for Tissue Regeneration

Young-Ho Seo, Sun-Mi Zo*, Sung-Soo Han*, and Tae-Hwan Oh*[†]

Department of Advanced Organic Materials Engineering, Graduate School, Yeungnam University, Gyeongsan 38541, Korea

*School of Chemical Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan 38541, Korea

(Received January 3, 2024; Revised February 14, 2024; Accepted March 21, 2024)

초록: PVA/CNC/BaSO₄ 조직 재생용 지지체를 동결건조법을 통해 제조하였으며, CNC 첨가로 인한 강도 향상 연구 및 BaSO₄ 첨가로 인한 방사선불투과성을 가져 조직 내 이식시 재료의 식별성 향상 연구를 진행한 결과, CNC 첨가로 인한 지지체의 강도는 약 20% 가량 높아졌으며, X-ray 촬영을 통해 BaSO₄ 5 wt% 첨가시 방사선불투과성을 가져 지지체의 뚜렷한 식별이 가능하였다. 또한, MTT 측정 결과, 실험기간동안 지지체의 세포 독성은 없는 것을 통해 생체적합성을 가지는 것을 확인하였다.

Abstract: PVA/CNC/BaSO₄ scaffolds for tissue regeneration were manufactured via a freeze-drying method. The BaSO₄ was mixed to make radiopaque scaffolds. The effect of BaSO₄ on the compressive strength and radiopacity was investigated. The CNC was added to increase a compressive stress of the scaffolds. The presence of BaSO₄ in PVA/CNC/BaSO₄ scaffold was revealed by a wide angle X-ray scattering and SEM-EDX. Compressive strength of the scaffold increased by approximately 20% with the help of CNC and little change with respect to BaSO₄ content was observed. Radiopacity was achieved by adding BaSO₄ of 5 wt%, revealed by X-ray imaging. MTT assay test confirmed the biocompatibility of PVA/CNC/BaSO₄ scaffolds.

Keywords: polyvinyl alcohol, cellulose-nanocrystal, barium sulfate, scaffold, compressive strength, radiopacity.

서 론

조직 공학에서 조직 재생은 생체 조직의 대용품을 만들어 이식함으로써 생체 조직을 직접 이식하기보다는 손상된 조직의 개선 및 회복에 그 목적이 있다.

생체 기능을 대체할 수 있는 조직을 재생시키기 위해 지지체(scaffold)는 생체조직공학에서 매우 중요한 역할을 하고 있다. 이러한 지지체의 특성으로는 생체적합성, 생체 내 흡수성, 적절한 물리적 성질이 있다. 또한, 큰 표면적의 부피와 다공성을 가져야 하며, 생체 내 분해성과 세포의 영양분과 산소 공급을 위한 혈액공급이 원활하여야 하며, 선택적으로는 방사선불투과성을 고려해야 한다.¹

생분해성 고분자는 분해환경 혹은 용도에 따라서 크게 두

종류로 분류가 가능하다. 먼저, 토양이나 자연환경하에서 분해되는 생분해성 플라스틱과 의료용을 목적으로 생체 내에서 분해되는 생분해성 고분자(생체 내 분해흡수성 고분자)로 분류된다.

Polyvinyl alcohol(PVA)는 다량의 물을 흡수하면 살아있는 조직처럼 행동하며 물리적, 화학적 교차결합을 통해 3차원 지지체를 형성하기 때문에 생체적합성이 높은 생체내 분해성 고분자로 약물전달시스템, 조직재생 및 조직 공학 용도로 많이 사용되어지고 있다. 다만, PVA 하이드로젤의 기계적 물성은 구조적 지지력을 요구하는 부품에서의 적용을 제한하고 조기 용융 과정을 통해 목표 지점에서 빠르게 분해되는 단점이 있다.^{2,3}

이런 단점을 보완하기 위해 최근에는 약물 전달, 조직 공학 및 생물 의학 응용 분야에 적용하기 위해 cellulose-nanocrystal (CNC)를 활용하여 기계적 강도를 강화하는 연구가 진행되고 있다. CNC는 산 가수분해 방법에 의해서 제조할 수 있는데,

[†]To whom correspondence should be addressed.
taehwanoh@ynu.ac.kr, ORCID[®] 0000-0003-4922-5000
©2024 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

비결정영역은 글루코오스로 가수분해되고 결정영역은 각각 분리되어 작은 크기의 막대 모양 나노 셀룰로오스를 형성하게 된다. CNC의 직경은 약 2-20 nm, 길이는 50-500 nm의 범위로 존재하며, 결정화도(crystallinity)가 높기 때문에 침상구조를 나타내며, 바이오메디컬 분야의 뼈와 치아의 대체 의공학용 복합소재, 복합재료, 복합필름, 제약 및 약물전달제, 음식과 화장품 첨가제 등으로 활용되고 있다.⁴⁸ 특히, 조직 공학 및 생물 의학 응용 분야에서 하이드로젤 제조시 CNC를 복합하여 기계적 물성 강화에 초점을 맞춘 연구가 진행되고 있다.

다만, 이러한 고분자 소재로 제조된 지지체의 경우 생체 내 이식시 지지체의 위치 및 상태를 시각적으로 확인하기가 어려워 방사선 불투과성 물질을 함유하여 엑스선 및 CT 촬영을 통한 영상화로 지지체를 모니터링 할 수 있어야 한다. 방사선 불투과성 물질로 황산 바륨(barium sulfate, BaSO₄)은 자연계에 널리 분포하는 물질이며 무색, 무미, 무취로 공기 중에서도 안정하며 녹는 점이 1600 °C인 안정적인 물질로서 병원에서 조영제, 즉 차폐체로 사용되는 내복제로 활용되고 있다. 이러한 황산 바륨은 우수한 가공성과 경제성을 지니며 친환경 물질이며 차폐 물질로 활용되고 있다. 현재 임상에서 사용되는 황산 바륨은 분말 형태로, 황산 바륨이 단일 차폐체로 사용될 때 형태학적인 제한점이 발생하여 고분자 재료와 혼합하여 제한점을 극복할 수 있다.⁹⁻¹⁴

조직 재생용 지지체를 제조하기 위해서는 여러 가지 방법 중 동결-건조(freeze-drying)법을 활용할 수 있다.¹⁵ 동결-건조는 건조하고자 하는 재료를 동결시킨 다음 높은 진공장치 내에서 액체 상태를 거치지 않고 기체 상태의 증기로 승화시켜 건조하는 방법으로, 일반적인 건조 방법보다 훨씬 고품질의 제품을 얻을 수 있다. 동결된 상태에서 승화에 의해 수분이 제거되기 때문에 건조된 제품은 가벼운 형태의 다공성 구조를 가지며, 원래 상태를 유지하고 있어 물을 가하면 급속히 복원될 뿐 아니라 비교적 낮은 온도에서 건조가 일어나므로 열적 변성이 적고, 성분의 손실이 적은 이점이 있다.^{16,17}

본 연구에 앞서 PVA/CNC 하이드로젤의 CNC 첨가로 인한 강도향상 연구를 진행하여 CNC의 1 wt% 이하의 낮은 함량비로도 지지체의 강도를 향상시킬 수 있음을 확인하였다.¹⁸ PVA에 CNC를 0.25, 0.5, 0.75 wt% 첨가하여 하이드로젤 지지체를 제조하였고, 젤 강도 측정 결과, 0.25 wt% 첨가시 6%, 0.5 wt% 첨가시 17%, 0.75 wt% 첨가시 95% 가량의 젤 강도 향상을 확인하였다. 따라서, 본 연구에서는 기계적 물성 향상을 위해 CNC가 함유된 PVA/CNC 혼합 수용액을 제조하고 BaSO₄를 첨가하여 방사선 불투과성을 확보하고 동결건조법을 통해 무독성, 향상된 기계적 특성 및 방사선 불투과성을 가지는 조직 재생용 지지체를 제조하고자 하였으며, 동결 건조법으로 제조된 PVA/CNC/BaSO₄(PCB) 지지체의 기계적 성질과 방사선 불투과성 등을 살펴보았다.

실 험

재료 및 시약. 본 실험을 위해 사용된 PVA는 오씨아이(OCI Co., Korea)사의 F-17 등급으로 중합도(degree of polymerization, DP) 1700, 감화도 98-99.5%, 분자량 74800 g/mol인 것을 사용하였다. CNC는 에이앤폴리(Anpoly, Korea)의 spray dry로 건조된 powder 상의 CNC로 직경 2.3-4.5 nm, 길이 44-108 nm의 크기를 사용하였다. PVA는 정제 과정없이 사용되었고 물은 deionized(DI) water를 사용하였다. BaSO₄는 시그마-알드리치(Sigma-aldrich, USA)사로부터 구입하여 사용하였다.

PVA/CNC/BaSO₄ 지지체 제조. DI water에 CNC 0.5 wt%와 BaSO₄를 각각 1, 3, 5 wt% 분산시킨 다음 초음파 분쇄기를 활용해 상온에서 5분간 CNC와 BaSO₄ 입자를 분쇄하였다. CNC는 DI water에 잘 분산되었으며, BaSO₄ 입자의 첨가로 인한 CNC의 분산에 미치는 영향은 크지 않았고, 분산 후의 모습을 Figure 1에 나타내었다. PVA 11 wt%를 넣고 100 °C에서 3시간 동안 용해하여 혼합 수용액을 제조하였다. 혼합 수용액은 80 °C에서 기포가 없어질 때까지 같은 온도를 유지하였다. 제조된 PVA/CNC/BaSO₄ 용액을 페트리 접시(50 mm × 15 mm)에 부어 모양을 만들었다. 접시에 부은 용액을 상온에서 3시간 방치한 후 -58 °C 저온 냉동고에 넣어 48시간 냉동시킨 다음 -53 °C에서 48시간 동결 건조하여 지지체를 제조하였으며, 제조과정은 Figure 2에 나타내었다.

지지체의 물성평가. Fourier transform infrared(FTIR): 제조된 지지체의 구조 변화를 측정하기 위해 FTIR(Spectrum 100, Perkin-Elmer, USA)을 사용하였으며, 4 cm⁻¹ 해상도로 4회 scan하여 4000-600 cm⁻¹ 파장 범위에서 분석하였다.

Wide Angle X-ray Diffraction(WAXD): 결정성 분석을 위해 X선 회절 분석기 XPERT PRO(Malvern Panalytical, Netherlands)를 이용하여 40 kV, 30 mA의 조건에서 2θ = 5-40°의 범위를 1°/min의 속도로 측정하였다.

Differential Scanning Calorimetry(DSC): 지지체의 열적 거동 분석을 위해 시차 주사 열량계 DSC Q200(TA Instruments,

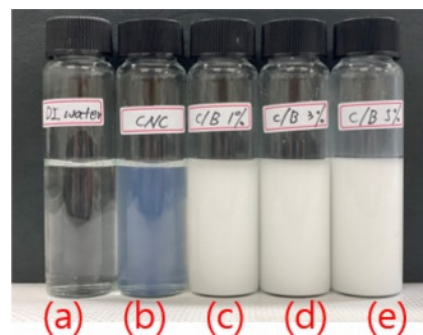


Figure 1. Image of the CNC/BaSO₄ mixed solution after dispersion: (a) DI water; (b) CNC 0.5%; (c) CNC/BaSO₄ 1%; (d) CNC/BaSO₄ 3%; (e) CNC/BaSO₄ 5%.

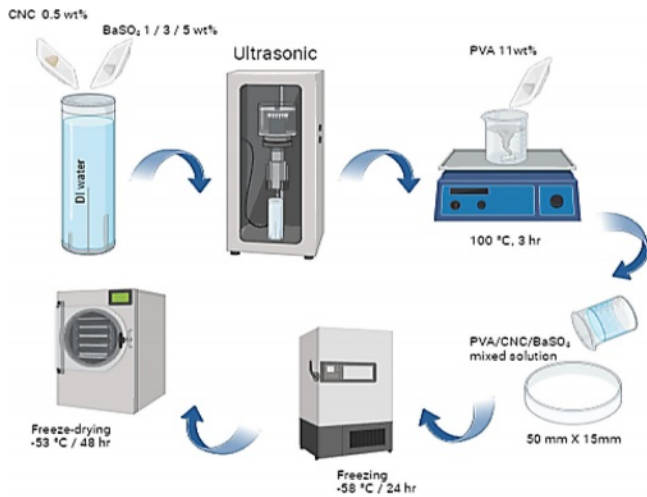


Figure 2. Image of the manufacturing process of the PVA/CNC/BaSO₄ scaffold.

USA)를 사용하여 측정하였다. 측정 조건은 질소 가스 분위기에서 온도 범위 40-260 °C, 승온 속도 10 °C/min로 측정하였다.

Thermogravimetric analysis(TGA): 지지체의 열 중량 분석을 위해 TGA550(TA Instrument, USA)를 사용하여 질소기류하에서 10 °C/min의 승온속도로 온도범위 30-1000 °C로 측정하였다.

Compressive strength: 압축강도를 측정하기 위해 AGS-X(Shimadzu Co., Japan)를 사용하여 상온에서 압축 강도를 측정하였다. 압축 강도 측정을 위한 하이드로젤 시편의 두께는 0.5 cm이었고, 지름은 4 cm였다. 압축 강도 측정 시 크로스 헤드(cross head) 속도는 10 mm/min이었으며, 시편이 70% 변형될 때의 값을 10회 측정하여 평균하였다.

Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive Spectrometer(SEM-EDS): 지지체의 표면관찰을 위해 전자주사현미경 EM-30N(COEXEM, KOREA)을 사용하여 측정하였고, EDS QUANTAX Compact(Bruker, USA)를 통해 지지체의 성분을 정량분석하였다.

지지체의 방사선불투과성 및 생체적합성 평가. Radiopacity: 방사선불투과성 측정을 위해 경북 경산시에 소재한 모 병원의 X선 촬영장치인 DHF-155HII(Hitachi, Japan)를 사용하여 전압 41 kV, 전류 100 mA, 노출시간 2초로 촬영하였으며, 측정장비에 연결된 모니터를 통해 영상화된 사진을 취득하였다. 촬영방법은 Figure 3에 나타내었다.

3-[4,5-dimethylthiazol-2-yl]-2,5 diphenyl tetrazolium bromide(MTT) assay: PVA/CNC/BaSO₄ 지지체의 세포 생존능(cell viability)을 확인하기 위해, 1.5 cm 정사각형 모양으로 자른 후, 에틸알콜(ethyl alcohol)을 20, 40, 60, 80, 100% 농도로 1시간 간격으로 소독한 후, 70% 에틸알콜에서 24시간

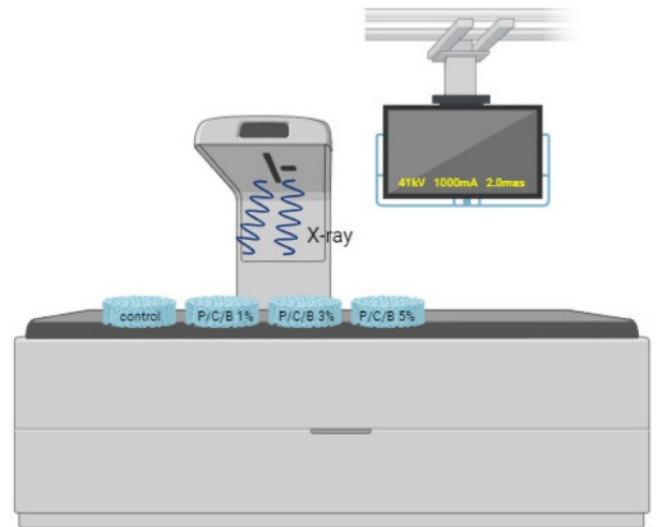


Figure 3. Image of radiopacity verification process.

멸균 처리하였다. 세포 배양 배지는 DMEM(Dulbecco's Modified Eagle Medium, Gibco BRL., USA)에 우태아혈청(Fetal Bovine Serum, Gibco BRL., USA) 10%와 항생제(Penicillin-streptomycin, Gibco BRL., USA) 1%가 함유된 배양액을 만든 후, 세포배양 플라스크에 분주하여 37 °C, 5% CO₂ 환경에서 배양하고 배양액은 하루에 한 번씩 교체하였다. 배양기에서 형성된 단층 세포를 0.05% trypsin-EDTA(Gibco BRL., USA)로 분리한 후, 4 °C에서 1000 rpm으로 5분 동안 원심 분리한 후 배양액으로 희석하였다. 아세포를 배양액에서 24시간 배양(1 × 10⁵/well)한 후 용출액을 처리하였다. 24시간 후 배양액을 버리고 10 μL의 cell viability reagent(PrestoBlue™, Thermo Fisher Scientific Inc., USA) 용액을 첨가하고 2시간 동안 배양한 후 Microplate reader(Epoch™, BioTek® Instruments, USA)로 570 nm 파장에서 흡광도를 측정하고 일정기간(1, 3, 5일) 간격으로 대조군과 비교 조사하였다.

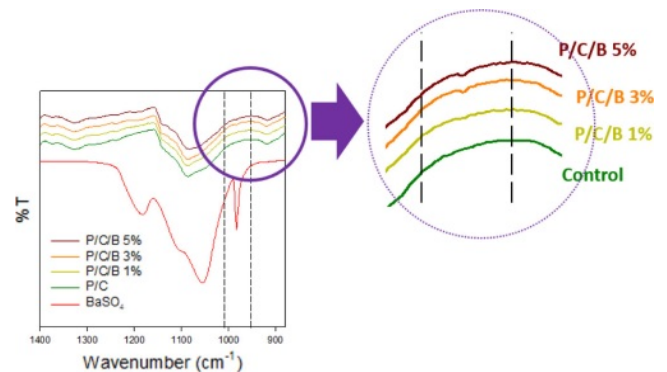


Figure 4. FTIR spectra profiles of PVA/CNC/BaSO₄ scaffolds with different BaSO₄ content.

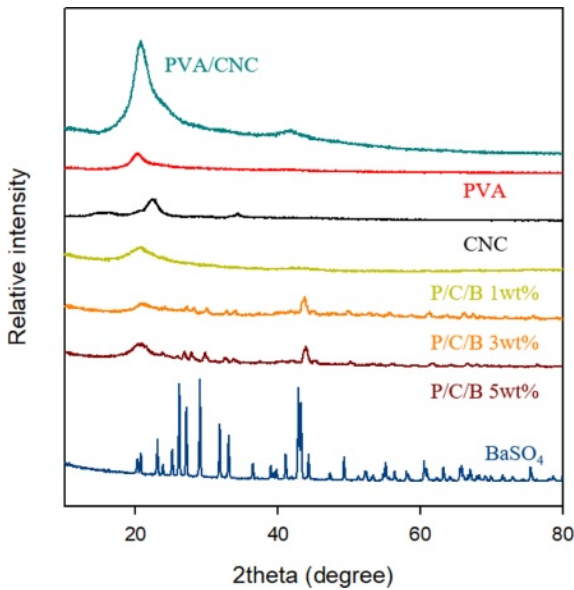


Figure 5. X-ray diffraction patterns of the BaSO₄ and PVA/CNC/BaSO₄ scaffolds with different BaSO₄ content.

결과 및 토론

지지체의 물성평가. FTIR: PVA/CNC/BaSO₄ 지지체의 구조변화를 확인하기 위해 FTIR을 이용하여 분석하였다. Figure 4의 그래프상에서 982 cm⁻¹ 영역의 SO₄²⁻ 굽힘진동 피크가 control 시료에서는 관찰되지 않았으나, BaSO₄가 3, 5 wt% 첨가된 시료에서는 피크가 다소 약하게 관찰되었다. 다만, BaSO₄

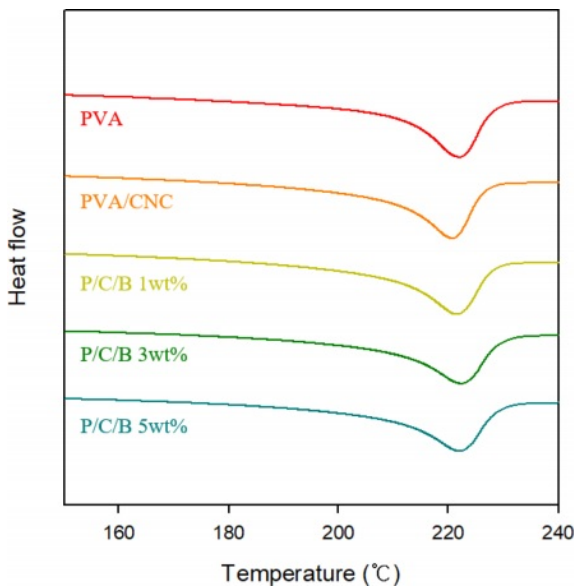


Figure 6. DSC curves of the PVA/CNC/BaSO₄ scaffolds with different BaSO₄ content.

Table 1. Thermal Data for the PVA/CNC/BaSO₄ Scaffolds by DSC

Sample	T _m (°C)	ΔH (J/g)
PVA	222.01	53.68
PVA/CNC	220.63	54.41
PVA/CNC/BaSO ₄ 1%	221.51	53.19
PVA/CNC/BaSO ₄ 3%	222.37	55.98
PVA/CNC/BaSO ₄ 5%	223.08	55.63

1 wt% 첨가시에는 소량 첨가로 인해 피크 확인이 어려운 것을 확인하였다.

WAXD: Figure 5는 PVA/CNC/BaSO₄ 지지체의 결정화도를 나타낸다. 2θ=19.5°에서 PVA의 특징적인 피크인 부분적으로 가수분해된 PVA 반결정질 영역(110) 평면을 확인할 수 있었으며, CNC의 경우, 2θ=23°에서 특성 결정 곡선이 나타나며, PVA 단독 시료에는 나타나지 않았고, CNC가 첨가된 시료에서는 관찰할 수 있었다. 또한, BaSO₄의 경우, 2θ=23.99°, 25.50°, 26°, 27.05°, 28.95°, 31.7°, 32.92° 및 42.75°에서 피크가 관찰되었으며, 다만, 1 wt% 소량 첨가시에는 관찰되지 않았다.

DSC: Figure 6은 PVA/CNC/BaSO₄ 지지체의 DSC 측정결과이다. 측정에 따른 용융열(ΔH)과 용융온도(T_m)를 Table 1에 나열하였다. PVA 단독시료 대비 CNC와 BaSO₄ 첨가에 따른 융점 변화와 열용량의 변화는 크지 않은 경향을 나타내었다.

TGA: Figure 7은 PVA/CNC/BaSO₄ 지지체의 TGA 측정결과이다. 측정에 따른 최종 중량 감소율과 잔존율을 Table 2에 나열하였다. BaSO₄ 분해온도의 경우 약 1600 °C 부근으로 알려져 있다. 따라서 PVA/CNC/BaSO₄ 지지체의 BaSO₄ 첨가량의

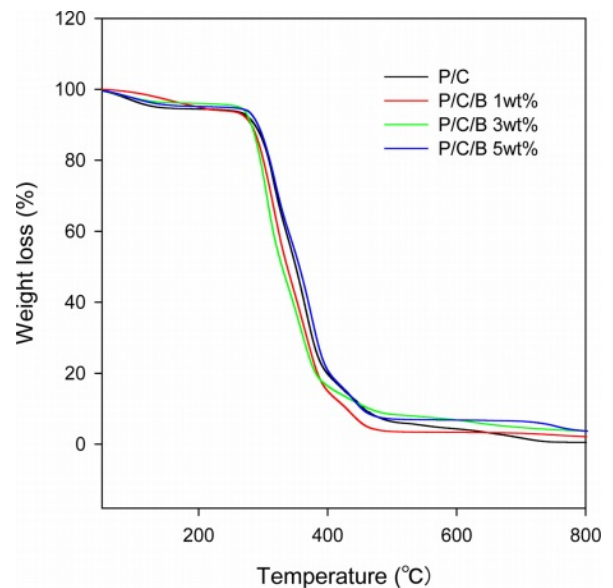


Figure 7. TGA curves of the PVA/CNC/BaSO₄ scaffolds with different BaSO₄ content.

Table 2. TGA Data for the PVA/CNC/BaSO₄ Scaffolds

Sample	Weight loss (%)	Residue (%)
PVA/CNC	100	0
PVA/CNC/BaSO ₄ 1 wt%	99.784	0.261
PVA/CNC/BaSO ₄ 3 wt%	97.461	2.539
PVA/CNC/BaSO ₄ 5 wt%	96.336	3.664

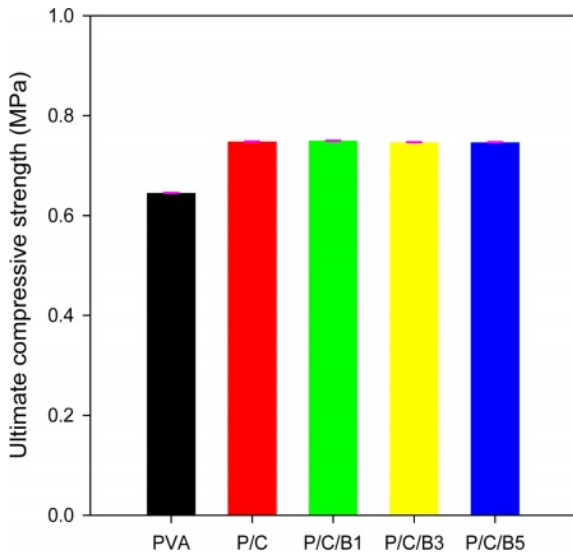


Figure 8. Ultimate compressive strength of PVA/CNC/BaSO₄ scaffolds with different BaSO₄ content.

증가에 따라 중량 감소율은 낮아지는 것을 확인하였으며, 이를 통해 잔존 중량에 따른 BaSO₄ 첨가를 확인할 수 있었다.

Compressive Strength: Figure 8에 PVA/CNC/BaSO₄ 지지체의 BaSO₄ 함량에 따른 압축 강도를 나타내었다. 각 시료별 10회 측정하여 평균값을 사용하였으며, 그래프는 시료가 70%의 변형을 겪을 때까지의 응력을 나타낸다. CNC 첨가로 인한 강도 향상을 확인하기 위해 PVA 단독 시료를 동일한 제조방법으로 제조하여 CNC 첨가에 따른 강도 변화를 관찰하였다. 측정결과, PVA 단독 시료 대비 CNC가 첨가된 시료의 경우 약 20% 가량의 강도 향상이 확인되었다. 이는 혼합된 CNC가 PVA의 젤 형성은 방해하지 않으면서 PVA의 수소결합을 형성해 CNC 자체의 고강도 및 고강성 특성이 지지체의 압축강도 향상에 기여한 것으로 판단되며, BaSO₄ 첨가에 따른 강도 변화는 관찰되지 않았다. 따라서, CNC 첨가로 인해 지지체의 강도는 향상되며, BaSO₄ 첨가로 인한 지지체의 기계적 물성에 미치는 영향은 크지 않음을 확인하였다.

SEM-EDS: Figure 9는 PVA/CNC/BaSO₄ 지지체의 SEM 측정결과이다. 외관상 변화는 크지않고 BaSO₄ 함유량이 증가할수록 BaSO₄ 입자가 많이 관찰되었다. 또한, EDS 측정을

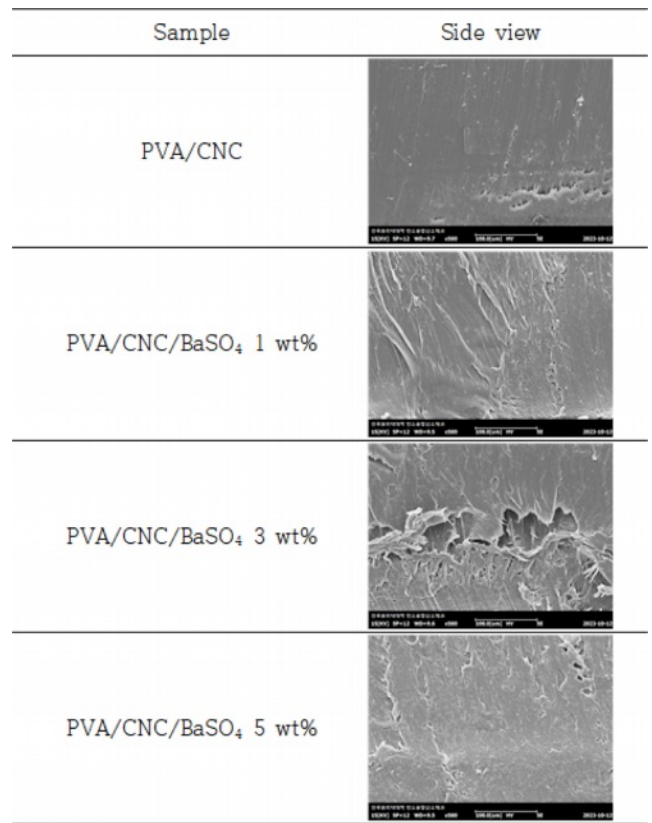


Figure 9. SEM images of the PVA/CNC/BaSO₄ scaffolds with different BaSO₄ content.

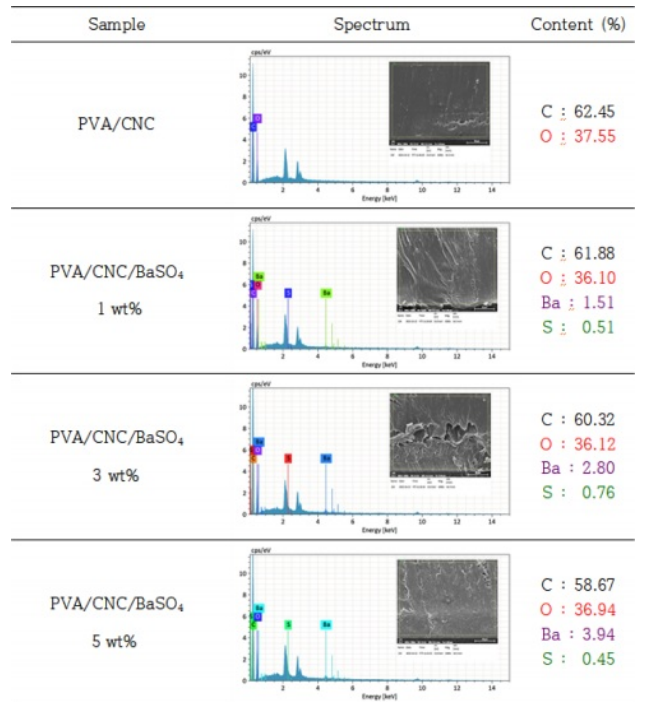


Figure 10. SEM-EDS spectrum of the PVA/CNC/BaSO₄ scaffolds with different BaSO₄ content.

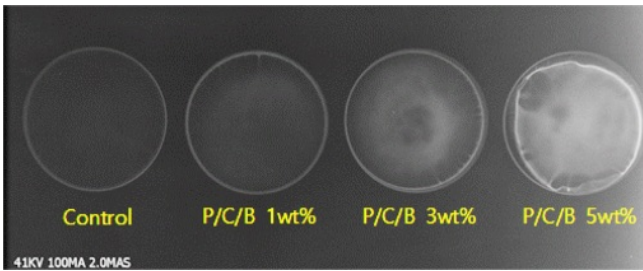


Figure 11. X-ray image of the PVA/CNC/BaSO₄ scaffolds.

통해 성분분석을 진행하였으며, BaSO₄ 첨가량이 높아질수록 해당성분 검출량이 높아지는 것을 확인하였고, 지지체의 부분별 무작위 측정시 유사한 성분값이 검출됨에 따라 적절한 분산성을 가지는 것으로 판단하였으며, 측정 결과를 Figure 10에 나타내었다.

지지체의 방사선불투과성 및 생체적합성 평가. Radiopacity: PVA/CNC/BaSO₄ 지지체의 X-선 촬영 결과를 Figure 11에 나타내었다. PVC/CNC(control) 시료와 PVA/CNC/BaSO₄ 시료를 비교하였다. BaSO₄의 함량 증가로 인해 생체 내에서 지지체의 추적이 용이해지며, 그 함량이 높을수록 방사선 불투과성이 높아져 지지체 식별이 향상되는 것을 관찰하였으며, 5 wt% 함량 첨가시 뚜렷한 관찰이 가능함을 확인하였다.

MTT assay: PVA/CNC/BaSO₄ 지지체의 생체적합 특성 및 세포 부착 특성 확인 결과를 Figure 12에 나타내었다. 세포가 배양된 대조군(control)과 PVA/CNC(P/C) 및 PVA/CNC/BaSO₄ (P/C/B)의 황산바륨 1, 3, 5 wt% 첨가 함량별 지지체의 초기 세포 포화 밀도는 모두 동일하였으며, P/C/B 지지체가 대조군에 비해 1, 3, 5일차의 짧은 실험 기간에서 유의미한 변화는 관찰되지 않고, P/C 시료 대비 황산바륨이 첨가된 P/C/B 지지체의 세포 증식이 높은 경향을 나타내었다. 이는 입자 크기가 작은 황산바륨의 첨가로 표면적이 증가하게 되어 더 많은

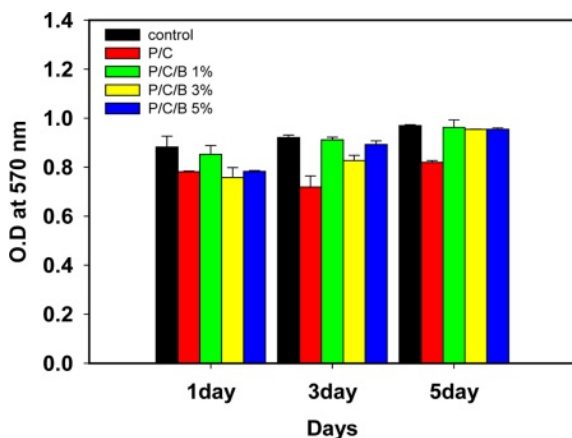


Figure 12. MTT assay test results of PVA/CNC/BaSO₄ scaffolds in NIH/3T3 cells.

세포가 부착하고 증식할 수 있는 환경이 제공되어 세포와 지지체가 물리적으로 상호 작용할 가능성이 높아진 결과로 판단된다. 또한, P/C/B 지지체의 세포 증식이 원활히 나타남에 따라 세포 독성은 없고, 5일차의 황산바륨 함량별 세포 증식 결과는 1, 3, 5 wt% 모두 유사한 세포 증식 결과를 나타냄에 따라 방사선 불투과성에 따른 식별도가 높은 황산바륨 3, 5 wt% 첨가된 지지체가 본 연구 방향성에 있어 가장 적합한 지지체라고 판단하였다.

따라서, PVA/CNC/BaSO₄ 지지체는 CNC 첨가로 압축강도는 향상되며, BaSO₄ 첨가로 방사선 불투과성을 확보하고 세포 성장에 있어서는 PVA/CNC 지지체에 비해 황산바륨이 첨가된 PVA/CNC/BaSO₄ 지지체가 세포 성장에 유리한 영향을 줄 수 있음을 확인하여 지지체의 생체적합성을 확인하였다.

결론

본 연구에서는 생체적합성을 가지는 PVA/CNC/BaSO₄ 혼합 수용액으로 기계적 물성과 방사선 불투과성이 확보된 조직 재생용 지지체를 동결건조를 통해 제조하였으며, BaSO₄ 함량에 따른 방사선 불투과성 및 생체적합특성에 관한 연구를 수행한 결과, FTIR 분석을 통해 BaSO₄ 첨가에 따른 982 cm⁻¹ 영역의 SO₄²⁻ 굽힘진동 피크를 관찰하였고, XRD를 통해 BaSO₄ 특정 피크가 제조된 지지체에서 관찰됨을 확인하였다. 또한, BaSO₄ 첨가에 따른 용점 변화는 관찰되지 않고, 열 중량 분석으로 중량 감소율이 감소하는 것을 통해 BaSO₄ 분산 여부를 확인할 수 있었다. 더불어, SEM에서 BaSO₄ 첨가량이 높아짐에 따라 BaSO₄ 표면에 입자가 많아지는 것을 확인하였으며, EDS 성분 분석을 통해 BaSO₄ 첨가 함량에 따라 해당 성분의 수치가 증가하는 것을 관찰하였다. 지지체 강도의 경우, CNC 첨가로 인해 PVA 단독시료 대비 압축강도가 약 20% 가량 증가하였고, BaSO₄ 첨가로 인한 강도변화는 관찰되지 않았다. 방사선불투과성 확인을 위한 지지체의 X-선 촬영결과, BaSO₄ 첨가 함량이 높을수록 방사선불투과성이 높아져 지지체의 시각적으로 위치 및 상태 확인이 용이해지며, BaSO₄ 5 wt% 이상 첨가시 식별성이 뚜렷하게 관찰된다고 판단하였다. 또한, MTT 분석을 통해 실험 기간동안 세포 증식이 원활하게 나타남에 따라 독성은 없고, P/C 지지체 대비 입자 크기가 작은 황산바륨의 첨가로 인해 표면적이 높아져 P/C/B 지지체가 상대적으로 세포 증식율이 더 높아지는 경향을 관찰하였다.

이와 같은 결과를 고려할 때, PVA/CNC/BaSO₄ 지지체는 CNC 첨가로 인해 지지체의 강도는 증가되고 BaSO₄ 첨가로 인해 방사선 불투과성과 세포 증식율이 향상되는 것을 확인함에 따라 재료의 생체 내 삽입시 지지체의 위치확인 및 생체 적합성을 가져 생체 내 삽입 가능 의료용 재료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글: 본 연구는 첨단바이오신소재기술개발사업(과제 번호 20008490)의 지원을 받아 수행된 과제로 이에 감사드립니다.

이해상충: 저자(들)는 이해상충이 없음을 선언합니다.

참 고 문 헌

- Kim, S. M.; Kim, K. M.; Lee, K. S.; You, C. K.; Lee, Y. K. Enhanced Strength of the Tissue Engineering Scaffold. *Korean J. Dent. Mater.* **2011**, 38, 321-326.
- Amanda, J. R. W.; Hilldore, J.; Lan, S. K.; Park, C. J.; Morgan, A. W.; Eurell, J. A. C.; Clark, S. G.; Wheeler, M. B.; Jamison, R. D.; Johnson, A. J. W. The Mechanical Properties and Osteoconductivity of Hydroxyapatite Bone Scaffolds with Multi-scale Porosity. *Biomaterials*, **2007**, 28, 45-54.
- Harley, B. A.; Leung, J. H.; Silva, ECCM.; Gibson, L. J. Mechanical Characterization of Collagen-glycosami-noglycan Scaffolds. *Acta Biomaterialia*, **2007**, 463-474.
- Jo, S. Y.; Lim, Y. M.; Youn, M. H.; Gwon, H. J.; Park, J. S.; Nho, Y. C.; Shin, H. S. Fabrication and Characterization of PVA/CMC Hydrogels by Freezing-Thawing Technique and Gamma-Ray Irradiation. *Polym. Korea* **2009**, 33, 551-554.
- Shin, J. S.; Yoon, H. J. Present and Future of Nanocellulose. *News & Information For Chem. Eng.* **2016**, 34, 500-512.
- Vanderfleet, O. M.; Cranston, E. D. Production Routes to Tailor the Performance of Cellulose Nanocrystals. *Nature Rev. Mater.* **2021**, 6, 124-144.
- Xu, S.; Girouard, N.; Schueneman, G.; Shofner, M. L.; Meredith, J. C. Mechanical and Thermal Properties of Waterborne Epoxy Composites Containing Cellulose Nanocrystals. *Polymers* **2013**, 54, 6589-6598.
- Yang, J.; Zhang, X.-M.; Xu, F. Design of Cellulose Nanocrystals Template-assisted Composite Hydrogels Insights from Static to Dynamic Alignment. *Macromolecules*, **2015**, 48, 1231-1239.
- Kim, S. C.; Dong, K. R.; Chung, W. K. Performance Evaluation of a Medical Radiation Shielding Sheet with Barium as An Environment-friendly Material. *Korean Phys. Soc.* **2012**, 60, 165-170.
- Kim, S. C.; Kim, K. T.; Park, J. K. Barium Compounds through Monte Carlo Simulations Compare the Performance of Medical Radiation Shielding Analysis. *Korean Soc. Radiol.* **2013**, 70, 403-408.
- Kim, H. J. Analysis of CT Image Quality Change according to Clinical Application Shielding Materials. *Korean Soc. Radiol.* **2023**, 17, 215-221.
- Gang, H. H.; Kim, D. H. A Study on Barium Mixed Radiation Shield using 3D Printer. *Korean Soc. Radiol.* **2020**, 14, 627-634.
- Kim, S. C.; Park, M. H. Development of Radiation Shielding Sheet with Environmentally-Friendly Materials; II: Evaluation of Barum, Tourmaline, Silicon Polymers in the Radiation Shielding Sheet. *Radiol. Technol.* **2011**, 34, 141-147.
- Jo, H. W.; Oh, T. H.; Cha, J. W.; Han, S. S.; Lee, J. S. Preparation of Syndiotactic Poly(vinyl alcohol) Microfibrils with Radiopaque Inorganic Particles. *Polym. Korea* **2013**, 37, 563-570.
- Mellor, J. D. *Fundamentals of Freeze Drying*; Academic Press: London, 1978.
- King, C. J. *Freeze Drying of Food*; CRC Press: Cleveland, 1971.
- Ooi, S. Y.; Ahmad, I.; Amin, M. C. I. M. Cellulose Nanocrystals Extracted from Rice Husks as a Reinforcing Material in Gelatin Hydrogels for Use in Controlled Drug Delivery Systems. *Ind. Crop. Prod.* **2016**, 93, 227-234.
- Seo, Y. H.; Zo, S. M.; Han, S. S.; Oh, T. H. Study on Mechanical Properties and Biocompatibility of PVA/CNC Biomaterial Hydrogel. *Text. Sci. Eng.* **2023**, 60, 353-360.

출판자 공지사항: 한국고분자화학회는 게재된 논문 및 기관 소속의 관할권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.