

웨어러블 디바이스를 위한 신축성 하이드로 젤 소재

박지현, 하태성
(주식회사 제브)

1. 서론

웨어러블 의료기기는 인구노령화와 생활습관병 확산에 따라 장소와 시간에 구애 받지 않고 특정 생체신호를 측정하여 건강상태를 확인 용도로 사용되고 있으며, fitness tracker, smart watch 등 착용자의 심장박동, 걸음 수 등을 측정하는 장치에서 심전도(ECG), 주변 소음 등의 센싱 영역의 확대로 의료서비스와의 통합, 연계가 진행되고 있다. 이를 통해 사용자의 감정, 스트레스 정도를 측정하여 신체, 정신 등의 복합 웰빙 서비스를 제공하고 노령화 시대의 건강관리서비스 및 고위험 질환자의 질병 사전 감지 등 다양한 관리 기능을 수행하는 방향으로 발전하고 있는 추세이다.

특히, 웨어러블 기기의 초소형, 초경량화로 인해 사용자는 보다 오랜 시간 일상 생활속에서 장시간 착용하게 되고, 등산, 샤워, 운동과 같은 다양한 활동 범주 안에서 기기의 착용에 제약을 받지 않아야 한다. 또한 극한 환경에서도 우수한 밀착력과 신호감지 효과 유지하고, 기기의 마모나 파손에 견딜 수 있는 패치형태의 중요성이 부각되고 있다. 패치형태의 경우, 장시간 착용해야 하는 생체신호 모니터링 기기는 피부 자극 및 감염 없이 오랜 시간 편안하게 착용할 수 있는 편의성을 제공하는 것도 매우 중요하다고 할 수 있다. 이러한 요구조건을 만족하기 위한 해결책을 의료용 접·접착제에서 찾고 있으며 특히, 신축성이 뛰어나 피부 굴곡에 따른 착용감이 좋으며 다양한 기능성을 부여할 수 있는 하이드로 젤 소재가 부각되고 있다.

기대수명의 연장에 따른 환자의 삶의 질 향상을 위

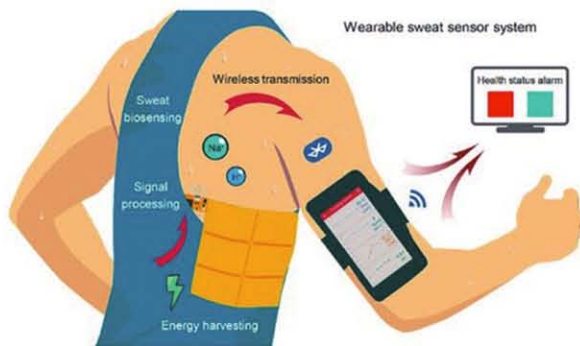


그림 1. 모바일기반 웨어러블 센서 (Caltech, 2020)

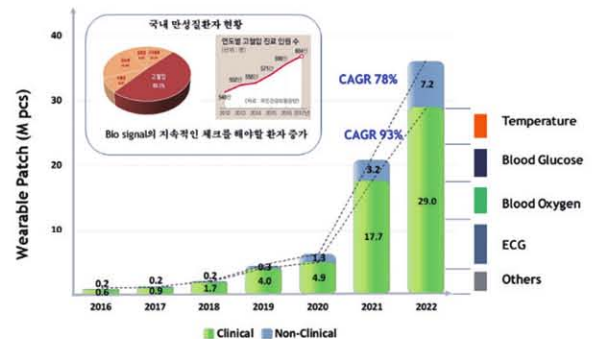


그림 2. 웨어러블 패치 성장률 및 국내 만성질환자 성장 추이

한 수술 전후 케어 기술에 대한 관심 증가로 의료용 접착소재에 대한 관심이 크게 증가하고 있다. 의료용 접착소재의 전세계 시장은 2016년 8조원 이상의 규모이며, 연평균 10% 이상의 지속적인 성장이 예측되는 미래선도산업이 될 것으로 평가된다. 의료용 접착제는 메디컬 디바이스의 조립에서부터 수술용 봉합사, 창상피복제로 대표되는 내부/외부 조직 고정 및 치유 용도까지 다양하게 사용되고 있음. 최근에는 웨어러블 스마트 의료기기에 대한 시장 수요 확대로 웨어러블 기기의 고정용 소재로 시장이 확대되고 있다.

웨어러블 시스템 등에서 요구하는 차세대 하이드로 겔 소재는 구성하는 물질의 종류가 다양해지고 있으며 형태가 복합적으로 변화함에 따라 소재를 제조하기 위한 새로운 제조 공정의 필요성이 부각되고 있다. 다양한 제조 방법에서도 전자빔 (electron beam) 기반 제조 공정은 복합공정을 동시에 진행할 수 있으며 의료용 소재를 핸들링하기에 매우 적합한 공정으로 그 가능성이 크게 평가받고 있다. 본고에서는 하이드로 겔 소재의 활용과 전자빔 공정기술을 이해하고자 하며, 이를 통해 차세대 하이드로 겔 소재를 개발하기 위한 방향성을 검토해보고자 한다.

2. 하이드로 겔의 정의와 활용

2.1. 하이드로 겔의 정의와 분류

하이드로 겔 (hydrogel)은 친수성 고분자가 수소 결합, 이온결합 등의 물리적인 결합 또는 화학적인 공유결합을 통하여 3차원적으로 가교 (Cross-linking)된 구조를 지님으로써 많은 수분을 함유할 수 있는 물질을 뜻한다. 일반적으로 대부분의 단백질 약물들은 체내에 주입되었을 때, 혈액에 존재하는 단백질 분해 효소에 의하여 분해되거나 변성됨으로써 그 치료 효과를 빠르게 잃어버리게 된다. 이에 따라 원하는 치료 효과를 얻기 위하여 단백질 약물들을 과량으로 투여하거나 자주 주사를 놓아야 하기 때문에 이로 인한 부작용과 환자들의 불편이 큰 문제로 대두되고 있다. 주입형 하이드로 겔은 원하는 체내 부위에 복잡한 수술 과정 없이 간단히 이식될 수 있고, 내부에 봉입된 단백질 약물을 천천히 오랜 시간 동안 질병 부위로 전달함

으로써 치료 효과를 극대화할 수 있는 잠재력을 지니고 있어 많은 관심을 받고 있다.

하이드로 겔은 다양한 분류방법을 가지고 있다. 이러한 하이드로 겔의 분류는 그 활용분야와 준비 과정에 따라 중요하게 나누어진다.

- 고분자 조성에 따른 분류
- 구성에 따른 분류
- 가교 유형에 따른 분류
- 형태에 따른 분류
- 구조내 전하에 따른 분류

보다 자세한 분류는 그림 3에 표시하였으며, 최근에는 그 사용형태와 적용 특성에 따른 구분기준도 늘어나는 상황이다.

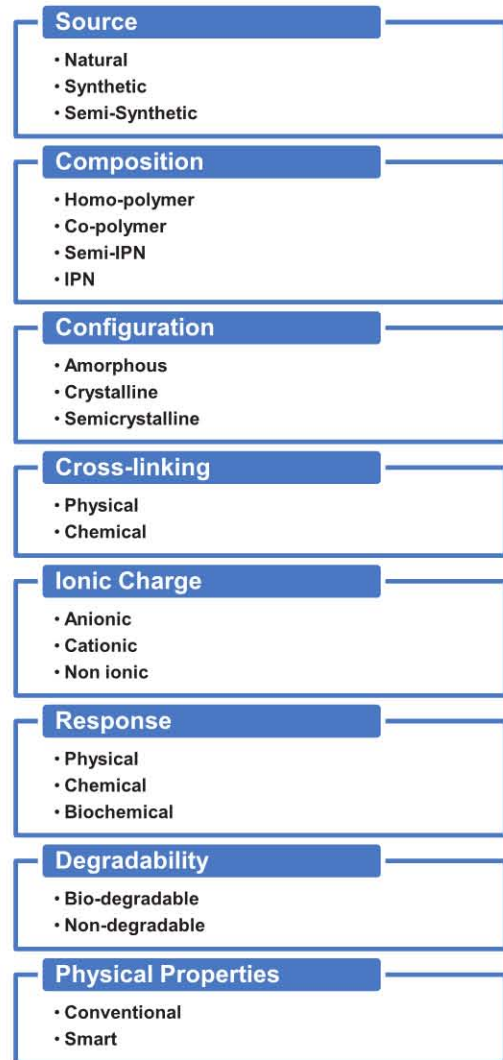


그림 3. 하이드로겔의 분류

2.2. 하이드로 겔의 상업적 활용

하이드로 겔은 3차원 가교된 초고분자 형태를 가지면서 내부에 자유이동이 가능한 수분을 포함하고 있는 소재이기때문에 그 활용도가 높다고 할 수 있다. 3차원 가교 구조는 엔트로피 스프링 역할을 하여 높은 탄성과 신축성을 나타내고 내부에 존재하는 수분과 다양한 기능성 물질을 주입하여 의료용이나 전기전자 용도로 사용할 수 있다. 기존의 하이드로 겔은 상처부위의 분비물을 흡수하거나 일반적인 약물을 방출하는 용도, 생체조직용 접착제 형태 등으로 의료분야에 주로 사용되고 있으나, 최근 전기전자산업과의 융합과정에서 웨어러블 디바이스의 부착과 센서 헤드로서 활용성 더욱 부각되고 있는 상황이다.

하이드로 겔은 주로 무해한 성분으로 합성될 수 있고, 신체 거부반응이 거의 없으며, 체내에서 스스로 생분해가 가능하다는 점에서 의료용으로 활발히 활용되고 있다. 하이드로 겔에 약물을 주입하는 DDS (Drug Delivery System) 시스템이나 상처를 치료하기 위한 드레싱목적으로 주로 사용되고 있다. 하이드로 겔은 얇고 둥근 막 형태로 제조하여 콘택트렌즈로도 이용된다. 또한 하이드로 겔은 scaffold는 단백질 전달 장치로도 활용이 가능하다. 하이드로 겔은 세포에 대한 부착력이 우수하기 때문에 이러한 활용도도 매우 높다고 할 수 있다.

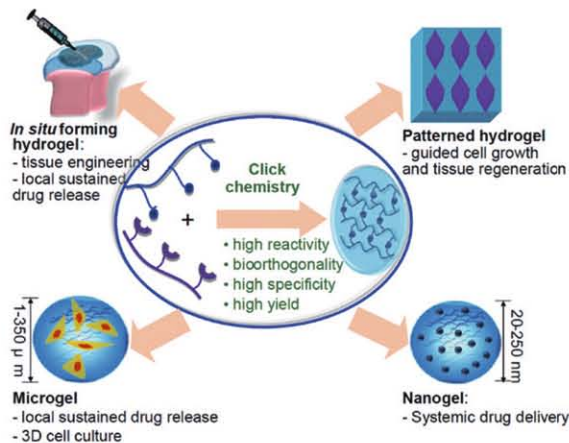


그림 4. 하이드로겔소재의 의료분야 활용

하이드로 겔을 의료적으로 사용하기 위해서는 점착/접착소재가 부가적으로 활용되어야 하는데, 이는 1) 약물 전달이나 흡수과정에서 점착소재가 차단막 역할을 하

여 성능 발현의 장애요인이 되거나, 2) 센서로 활용되는 과정에서 신호 수신에 잡음이 생기거나, 3) 자극적인 접착소재의 활용과정에서 피부 손상이 야기되거나, 4) 별도의 접착소재 활용에 따른 작업의 번거로움과 외관적인 불편함을 발생시킬 수 있다. 이러한 다양한 문제점으로 인해 의료시장에서는 지속적으로 자가점착력을 갖는 하이드로 겔 개발의 필요성을 요구하고 있으나, 하이드로 겔 표면에 점착소재를 코팅한 형태의 기술접근이 주로 이루어지고 있어 의료용 웨어러블 디바이스 시장에는 근접하지 못하고 있는 상황이다.

피부 미용에서 가장 중요한 부분 중 하나는 피부의 탄력 및 보습력 제공이다. 따라서 하이드로 겔의 높은 함수율 및 보습력은 피부미용에서 아주 중요한 부분으로 작용한다. 하이드로 겔은 90 % 이상이 물로 이루어져 있기 때문에 뛰어난 함수율과 보습력을 가질 수 있을 뿐만 아니라, 시원한 착용감으로 인해 마스크팩 시트소재로서 많은 관심을 받고 있다.

하이드로 겔의 특성은 산업체에서 이용되기 상당히 용이하다. 하이드로 겔 고분자중 SAP (Super Absorber Polymer)는 물 흡수성이 매우 뛰어나기 때문에 기저귀와 같이 빠른 수분 흡수를 필요로 하는 산업에 이용되고 있다. 뿐만 아니라 흡착성 하이드로 겔을 이용하여 산업 폐수를 정화하는데 쓰기도 한다. 최근에는 생물공정분야에서 단백질을 합성하는데 사용되기도 한다.

3. 전자 빔 공정의 이해와 활용

3.1. 전자 빔의 개념과 적용

전자 빔이란 운동에너지와 방향이 균일한 전자의

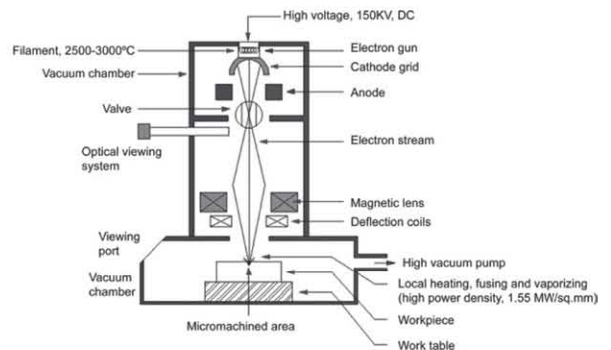


그림 5. 전자빔 조사 장치 모식도

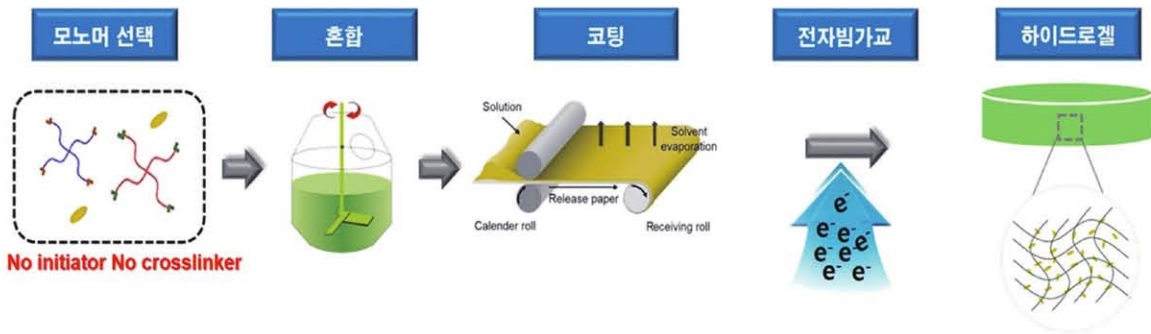


그림 6. 전자빔공정을 활용한 하이드로 겔 제조 공정

연속적인 흐름으로, 전자총 음극을 고온으로 가열해서 발생한 전자를 고주파 가속관에서 빛의 속도에 가깝게 가속하는 전자가속기에 의해 발생된다. 전자는 전압에 의해 형성된 전기장을 통과할 때 가속되며 전압에 의해 선형적인 가속구조를 가지게 된다. 이렇게 가속된 에너지를 활용하는 것이 전자 빔이라 할 수 있다. 전자 빔 에너지를 이용하면 물질의 구조를 바꾸고 유해한 미생물을 사멸 시키거나 원하는 화학 반응을 선택적으로 일어나게 할 수 있다. 방사선 기술의 일부인 전자 빔 기술은 사용상의 위험성에도 불구하고 다양한 장점을 가지고 있어 의료, 환경, 고분자 및 섬유 분야 등에 적극적으로 활용되고 있다.

이온화 조사에 대한 첫 번째 실험은 1895년에 수행되었고 1921년에 특허를 받았지만 기술 제한으로 인해 이 방법이 수십 년 동안 널리 사용되지 않았다. 1970년대와 1980년대에 걸쳐 기술의 변화로 전자 빔 내의 에너지 준위를 더 잘 제어할 수 있게 되었고, 이를 통해 더 많은 의료기기에 이 기술을 적용할 수 있게 되었다. 이러한 발전은 전자 빔이 감마선이나 산화에틸렌과 비교할 때 많은 재료가 손상을 덜 일으킨다는 다양한 연구 결과와 함께 이 기술의 관심을 키우게 되었다.

3.2. 전자빔 기반 고분자 가공 기술

전자 빔 기반 고분자 가공기술은 전자 빔에 의한 순

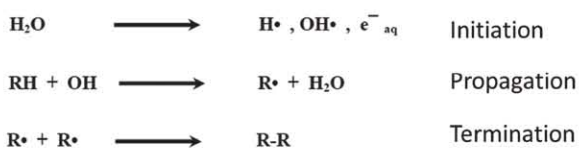


그림 7. 전자빔기반 고분자 가교 메커니즘

간적인 라디칼 생성과 이를 활용한 중합/가교/절단 반응에 기인한다. 일반적인 자유 라디칼 시스템의 고분자 중합 시스템과 거의 유사한 메커니즘을 가지지만 별도의 개시제가 필요없이 액티베이션 될 수 있기 때문에 일반적인 라디칼 고분자 중합 방식과는 차이점을 가진다.

고체 기판에 증착된 얇은 코팅층의 전자 빔 경화 기술이 전자 빔 기반의 고분자 가공기술의 시작이라 할 수 있다. 최근에는 다양한 응용 분야를 위해 특별히 설계된 수많은 단량체 및 “반응성” 예비 중합체에 대한 활발한 연구가 다양한 기업에서 진행되고 있으며, 이를 통해 원하는 거의 모든 특성을 나타내도록 코팅을 맞춤형으로 컨트롤 할 수 있다. 안료 및 자성 분말은 전자 빔의 투과력의 한계까지 제형에 포함될 수 있으며, 이는 박막의 경우 큰 문제를 일으키지 않는다. 대부분의 제형은 동시에 경화 및 가교 결합되어 내마모성이 우수한 경질 코팅막을 구성하게 된다. 또한, 고분자 매트릭스의 가교 구조에 의해 고분자 벌크구조 내에서 입자의 이동이 크게 감소한다. 따라서 우수한 분산성을 유지한 채로 코팅을 진행할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

전체 경화에 필요한 전자 빔 노출용량은 사용된 구성에 따라 크게 달라진다. 경화과정에 따라 차이는 있지만 대부분의 반응이 연쇄 반응을 포함하기 때문에 이 용량은 대부분의 경우 작다. 따라서 경화 시간은 매우 짧게 결정되고, 때로는 몇 초 단위로 감소하여 생산 속도를 크게 높일 수 있다. 전자 빔 공정은 불활성 분위기(질소 또는 연소된 가스)에 대한 저항이 크지 않기 때문에 UV 시스템 등에 추가되는 환경제어 장치의 필요성이 크지 않다.

최근에는 시스템 구축에 대한 비용이 작게 발생하는 UV 경화시스템과 직접적인 경쟁을 진행하고 있다. UV 경화는 종종 수율을 향상시키기 위해 감광제의 사용을 필요로 한다. 대규모 생산의 경우 UV시스템이 요구하는 에너지 소모량은 매우 큰 편이다. 또한, 제형에 안료 또는 자성 입자가 많이 포함되어 있는 경우 UV 광선의 침투가 매우 낮아 적용에 한계가 있다.

전자 빔 기반 경화 시스템의 또다른 주요 응용 분야는 복합 재료에 관한 것이다. 항공우주 분야용 대형 탄소 섬유 강화 건축 요소는 상온에서 전자 빔으로 경화된다. 이 기술을 통해 열 경화 샘플에서 관찰되는 변형을 피할 수 있다. 이러한 복합 구조체에 적용하기 위해서는 10 MeV에서 20 MeV 범위의 에너지로 작동하는 대형 전자 가속기가 필요하다.

3.3. 전자 빔을 활용한 기능성 하이드로 겔의 제조

현재까지 알려진 하이드로 겔 제조 방법은 경화성 관능기를 갖는 수용성 단량체 또는 수용성 고분자를 물에 분산시킨 다음 광 또는 열 개시제를 이용하여 3차원 가교 구조를 형성시키는 것이다. 이 경우 하이드로 겔 내에 개시제, 개시제 부산물이 잔존하게 되며, 이러한 물질들은 표면으로 용출 (migration)되어 피부 자극과 트러블을 야기하게 된다는 단점이 존재한다.

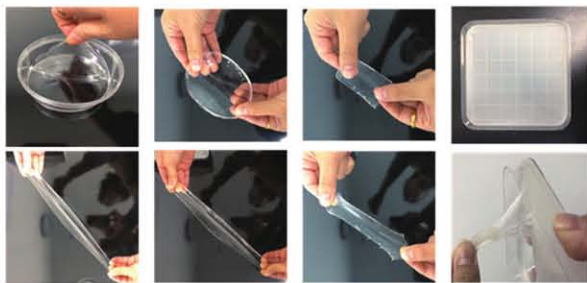


그림 8. 전자빔을 활용해 제조한 하이드로 겔 (주식회사 제브, 2021)

이러한 문제점을 해결하기 위해 최근에 전자 빔을 이용한 하이드로 겔 제조가 시도되고 있다. 전자 빔 조사 기법은 선진국에서 활발하게 연구가 진행되고 있는 분야로 별도의 개시제 없이도 3차원 가교 구조 유도가 가능하고 다양한 수용성 고분자에 적용이 용이하며, 의료용 소재에서 반드시 거쳐야 하는 살균 공정을 따로 거치지 않는다는 장점이 있다.

국내 전자 빔을 이용한 하이드로 겔 제조는 초기 단계로 미용 및 시술용 패치 제조에 적용되고 있으나, 바이오/메디컬 시장에서 급속하게 성장하는 의료용 웨어러블 디바이스인 스마트 패치 분야를 중심으로 자가점착력을 가지며 전기전도성이나 약물전달 기능을 갖는 신규 하이드로 겔 소재 개발에 대한 요청이 증가되고 있는 실정이다.

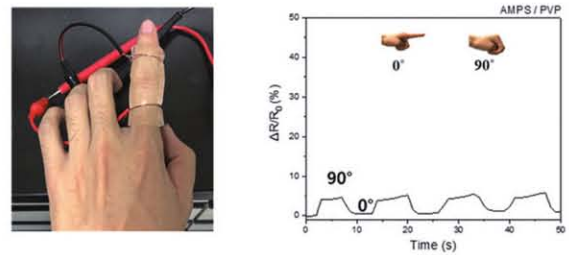


그림 9. 전자빔 기반 하이드로 겔을 활용한 센서 적용평가 (주식회사 제브, 2022)

전자 빔 조사 시 물을 용매로 한 미디엄에서는 다양한 화학종이 발생하게 된다. 그중 발생하는 ·OH 라디칼을 이용하여 이온성 모노머를 가교하여 하이드로 겔을 제조하는 방식이 최근 주요 공정기술로 평가되고 있다.

하이드로 겔 소재는 대부분 물분자로 구성되어 있다. 그에 따라 이론적으로 낮은 접착력과 기계적 강도를 지니게 된다. 현재까지 알려진 접착력 향상 방법은 main polymer가 가교점을 가지면서, 피부표면과 화학결합을 유도하는 것이다. 그리고 하이드로 겔의 Cohesion 향상과 함께 secondary crosslinking site를 도입하는 것이 필요하다.

또한, 친수성 고분자로 이루어지며 다량의 수분을 함유하고 있는 하이드로 겔은 물에 쉽게 용해되어 분해되는 수분해성을 가지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 일반적으로 하이드로 겔 고분자 사슬간 가교 정도를 높여, 내수분해성을 용이하게 높일 수 있다. 하지만, 하이드로 겔 내부 가교도가 과도하게 높아질 경우, 피부 접착력이 취약해질 수 있으며, 높은 반복 내구성을 요구하는 웨어러블 시스템의 기본적인 물성은 충족시키기에 어려움이 존재하게 된다. 따라서, 우수한 내수분해성과 접착력을 구현할 수 있는 최적의 하이드로 겔 가교시스템을 확보하는 것이 중요하다.

4. 결론

웨어러블 디바이스의 활용은 지속적으로 증가하고 있으며, 기술의 융합을 통해 그 사용범위가 지속적으로 확장되어가고 있다. 이러한 기술의 확장과정에서 새로운 소재의 필요성, 특히 생체적합성을 가지는 접착 소재의 중요성이 더욱 부각되고 있다. 하이드로 겔은 이러한 기술의 변화와 융합에 가장 적합한 소재로 평가된다. 기존에 하이드로 겔을 제조하는 방식은 소재의 적용과 재료의 복합화에 한계가 있으며, 이러한 한계를 극복하기 위해 전자 빔 공정을 적용한 새로운 개념의 하이드로 겔 소재가 최근 큰 관심을 받고 있다. 전자 빔 공정은 기존의 UV 공정시스템의 단점을 극복할 수 있는 좋은 대안으로 평가되지만 상업적으로 활용되기 위해서는 다양한 기반 기술연구가 필요하다. 향후 전자 빔 공정에 적용가능한 다양한 하이드로 겔 소재 기반 연구와 타기술과의 융합연구를 통해 보다 효과적인 웨어러블 시스템용 하이드로 겔 소재의 개발이 가능할 것으로 기대한다.

참고문헌

- [1] Aswathy, S. H., U. Narendrakumar, and I. Manjubala. *Heliyon* **6(4)**, e03719 (2020).
- [1] Green, Rylie A., et al. *Science and Technology of Advanced Materials* **11(1)**, 014107 (2010).
- [1] Ahmed, Enas M. *Journal of advanced research* **6(2)**, 105-121 (2015).
- [1] Akhtar, Muhammad Faheem, Muhammad Hanif, and Nazar Muhammad Ranjha. *Saudi Pharmaceutical Journal* **24(5)**, 554-559 (2016).
- [1] Kwon Sun-Beom, Lee Hyang-Yeol. *J. Biotechnol Bioind.* **7**, 12-16 (2019).
- [1] 강인규, 이진호, 박기동, 김수현, 나재운, 한동근, & 노인섭. *고분자 과학과 기술*, **27(5)**, 544-558 (2016).
- [1] Hwang, I., Kim, H. N., Seong, M., Lee, S. H., Kang, M., Yi, H., ... & Jeong, H. E. *Advanced healthcare materials*, 1800275 (2018).
- [1] Rose, D. P., Ratterman, M. E., Griffin, D. K., Hou, L., Kelley-Loughnane, N., Naik, R. R., ... & Heikenfeld, J. C.. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, **62(6)**, 1457-1465 (2015).
- [1] Jiang, Y., Chen, J., Deng, C., Suuronen, E. J., & Zhong, Z. *Biomaterials*, **35(18)**, 4969-4985 (2014).

저자약력

박지현



- 2003년 : 부경대학교 화학공학과 학사
- 2005년 : 부경대학교 화학과 석사
- 2014년 : 과학기술연합대학원대학교 레이저플라즈마응용공학 박사
- 2014년 ~ 2017년 : 한국원자력 연구원 박사후 연구원
- 2017년 ~ 현재 : (주) 제브 기술연구소 책임 연구원

• 관심분야 : 방사선을 이용한 고분자, 나노 이용 기술

하태성



- 1992년 : 한양대학교 기계공학 학사
- 1994년 : 한양대학교 기계공학 석사
- 2004년 : 조지아공과대학 항공공학 박사 수료
- 2005년 : 한양대학교 대학원 원자력공학 석사
- 2022년 : 한국교통대학교 고분자공학 박사

• 관심분야 : 전자빔을 이용한 에너지 소재 설계 및 합성