

AI 기반 웨어러블 스마트 의류를 위한 고신축 다색 전계발광 사운드 디스플레이 개발

오승주*, 배진우*

*한국기술교육대학교 에너지신소재화학공학과
e-mail:jwbae@koreatech.ac.kr

Development of a Highly Stretchable Multicolor Electroluminescent Sound Display for AI-Driven Wearable Smart Textiles

Seung-Ju Oh*, Jin Woo Bae*

*Dept. of Energy, Materials and Chemical Engineering, Korea University of Technology and Education

요약

본 연구에서는 기존 전계발광 디스플레이가 가진 낮은 신축성과 낮은 휘도 문제를 극복하기 위해, 새로운 형태의 신축성 전계발광 사운드 디스플레이를 개발하였다. 투명한 이온겔 전극과 Ecoflex, Triton X, 무기 형광체로 구성된 고유전율 발광층을 도입하여, 청각 정보를 광학 신호로 변환할 수 있는 혁신적인 디스플레이를 구현하였다. 개발된 소자는 다양한 기계적 변형(신장, 굽힘, 비틀림)에도 불구하고 우수한 휘도, 신축성, 음향 출력을 동시에 달성하였다. 또한, 다색 픽셀화를 구현한 신축성 직물형 사운드 디스플레이를 개발하여, 신장 조건에서도 안정적인 발광과 명확한 음향 출력을 유지하였다. 해당 디스플레이는 문자 등 시각적 정보를 나타낼 뿐만 아니라 다양한 색상의 발광, 소리 출력을 동시에 구현할 수 있다. 이러한 시스템은 AI 기술과 연계하여 사용자의 동작이나 음성 입력에 실시간으로 반응하는 직관적인 인간-기계 인터페이스 시스템으로 확장될 수 있다. 이러한 접근은 차세대 웨어러블 디스플레이와 스마트 의류 분야에서 고도화된 AI기반 인터랙티브 플랫폼 구축을 가능하게 할 것으로 기대된다.

1. 서론

최근 AI 기술과 결합된 차세대 인간-기계 인터페이스(Human-Machine Interface, HMI) 시스템이 주목받고 있다. 특히, 신축성 디스플레이는 복잡한 감각 정보를 실시간으로 수집, 분석하고 직관적으로 피드백할 수 있어 스마트 의류, 소프트 로봇, 헬스케어 등 다양한 분야에서 활용 가능성이 높다. 또한, 다양한 사용자 데이터를 기반으로 적응형 피드백을 제공할 수 있는 AI 기반 인터페이스가 주목받고 있으며, 이와 결합된 신축성 디스플레이는 향후 차세대 웨어러블 전자소자의 핵심이 될 것으로 기대된다.

전계발광(Alternating Current Electroluminescence, ACEL) 소자는 간단한 구조, 낮은 소비 전력, 긴 수명, 우수한 변형 내성을 바탕으로 차세대 신축성 디스플레이 후보로 각광 받고 있다[1]. 그러나 기존 전계발광 소자는 고휘도 구현을 위해 높은 유전율이 요구되지만, 고유전성 발광층은 일반적으로 낮은 신축성을 가지며, 동시에 전극은 높은 전도성과 기계적 복원력을 모

두 충족시키기 어렵다는 기술적 한계가 존재하였다[2]. 이에 따라 고유전율을 유지하면서도 신축성이 우수한 발광층 소재와, 높은 전기적 안정성과 기계적 유연성을 갖춘 전극 개발이 필수적이다. 본 연구에서는 이러한 문제를 극복하고자 Ecoflex-Triton X 복합체 기반 발광층과 PU/EMIMTFSI 기반 이온겔 전극을 도입하여, AI 기반 인터랙티브 디바이스에 적합한 고성능 신축성 전계발광 사운드 디스플레이를 개발하였다.

2. 실험방법

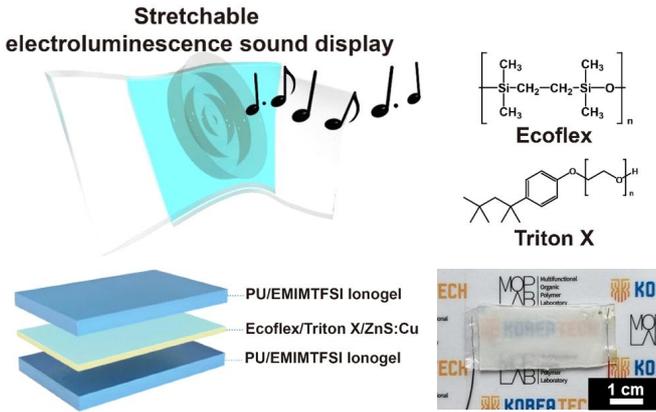
2.1 재료

Ecoflex 00-30 (Smooth-On), Triton X-100 (Sigma-Aldrich), ZnS:Cu, ZnS:Mn 형광체 (Shanghai KPT Co.)를 사용하였다. Polyurethane(PU) (KA-480, Kolon Industries, Inc.)와 1-ethyl-3-methylimidazolium bis(trifluoromethylsulfonyl)imide(EMIMTFSI)(Iolitec)는 PU/EMIMTFSI 이온겔(Ionogel) 전극 제작에 사용되었다.

2.2 전계발광 사운드 디스플레이 제작

발광층을 제조하기 위해 먼저 Ecoflex와 Triton X를 혼합한

후 ZnS:Cu 형광체를 Thinky mixer를 사용하여 2000 rpm으로 15분 동안 분산시킨 용액을 제조하였다. Triton X의 함량은 0 wt%, 1 wt%, 2 wt%로 조절하여 다양한 조성의 발광층을 제작하였다. Doctor blade 코팅법을 통해 제작된 용액을 이온노즐 전극위에 100 μm 로 코팅하여 80 $^{\circ}\text{C}$ 에서 5분 동안 경화하여 발광층을 제조하였다. 마지막으로 맨 위에 이온노즐 전극으로 덮어 전계발광 사운드 디스플레이를 제작하였다. (그림 1) PU/EMIMTFSI 이온겔 전극은 폴리우레탄과 EMIMTFSI를 1:4 중량비로 혼합하여 테트라하이드로푸란(Tetrahydrofuran, THF)에 용해시킨 후, 용액을 캐스팅하고 자연 건조하여 제작하였다.



[그림 1] 신축성 전계발광 사운드 디스플레이의 개략도 및 발광층 구동에 사용된 Ecoflex와 Triton X의 화학 구조식.

2.3 직물형 전계발광 사운드 디스플레이 제작

먼저 PU/EMIMTFSI 이온겔 전극 위에 EcoTX1 발광층을 100 μm 두께로 코팅한 후, 이를 섬유 형태로 꼬아 직조하여 5×4 배열의 다중 픽셀 구조를 구성하여 직물형 전계발광 사운드 디스플레이를 제작하였다. 제작된 각 픽셀은 독립적으로 전기적 구동이 가능하도록 설계되었다.

2.4 전계발광 디스플레이 특성 평가

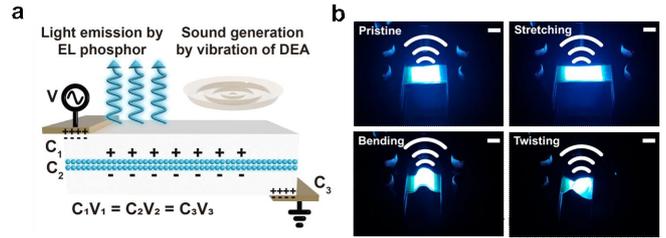
유전 특성은 임피던스 분석기(Solartron 1260/1296)로 측정하였다. 발광 특성은 분광방사계(PR-655, Photo Research)로, 음향 특성은 마이크로폰(40PH, GRAS)과 스펙트럼 분석기(SpectraPLUS-SC)로 평가하였다. 기계적 특성은 인장시험기(Tinius Olsen H5KT)를 사용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 고성능 신축성 전계발광 사운드 디스플레이 구현

본 소자는 AC 전압 인가 시 발광층 내 전계발광 형광체가 여기되어 빛을 방출하고, 동시에 이온겔 전극과 발광층 간 발생하는 정전기력(electrostatic force)에 의해 진동이 유도되어 소리가 생성되는 원리로 구동된다(그림 2a)[3]. 이때, 인가된 전압은 계면 간 전위차를 유발하여 전계발광과 진동을 동시에 발생시킨다.

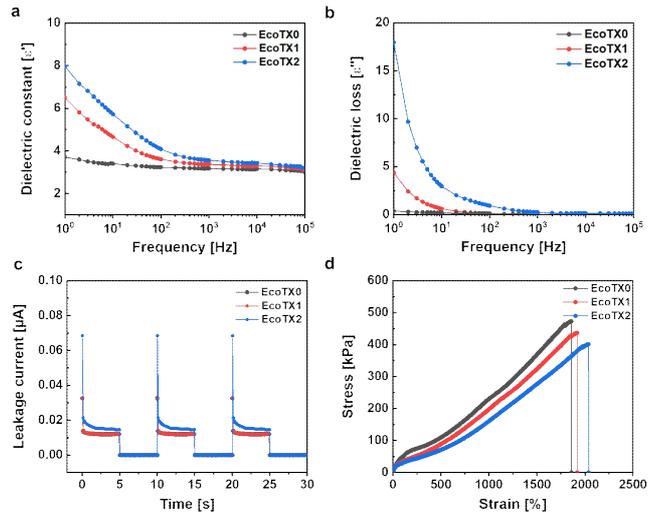
EcoTX1 기반 소자는 400 V, 15 kHz 구동 조건에서 319 cd/m^2 의 휘도와 500 V 구동 시 73.7 dB의 음향 출력을 기록하였다. 특히 신축, 굽힘, 비틀림 등 다양한 변형 상태에서도 안정적인 발광과 음향 출력을 동시에 유지하였다. (그림 2b)



[그림 2] a. 신축성 전계발광 사운드 디스플레이의 구동 원리 모식도. b. 다양한 변형 상태(신장, 굽힘, 비틀림)에서도 발광 및 음향이 동시에 출력되는 신축성 전계발광 사운드 디스플레이의 동작 모습.

3.2 발광층의 전기적 및 기계적 최적화

Triton X의 함량 증가에 따라 유전율이 3.75에서 4.36으로 증가하였으며, 인장 변형률은 1758%까지 증가하였다. (그림 3) Triton X는 고분자 매트릭스 내부에서 연성을 증가시키고, 형광체 입자 간 계면 결합을 향상시켜 광학적 균일성과 기계적 복원력을 동시에 향상시켰다[4]. 반면, 과도한 Triton X 도입(EcoTX2)은 누설 전류 증가 및 기계적 특성 저하를 초래하였다. EcoTX1 조성은 유전 손실과 누설 전류가 소폭 증가했지만, 전기적 안정성과 기계적 유연성의 균형을 가장 잘 나타냈다.

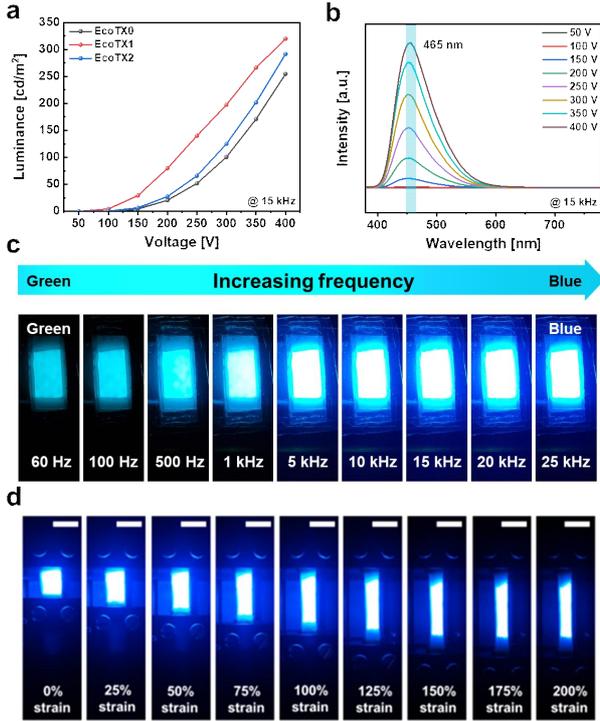


[그림 3] Triton X 함량 변화에 따른 a. 발광층의 유전상수, b. 유전손실, c. 누설 전류, d. 인장 특성.

3.3 신축성 전계발광 사운드 디스플레이의 광출력 특성

전압과 주파수에 따른 발광 세기 변화를 분석한 결과, 전압 증가(200 V \rightarrow 500 V) 및 주파수 증가(5 kHz \rightarrow 25 kHz)에 따라 발광 휘도가 선형적으로 향상되었다. 특히, 최적 조성인 EcoTX1은 최적 구동 조건(400 V, 15 kHz)에서 320 cd/m^2 이상의 높은 발광 강도를 유지하였다(그림 4a, 4b). 또한, 주파수 증가에 따라 발광 색은 녹색(499 nm)에서 청색(465 nm)으로 이동한 것을 확

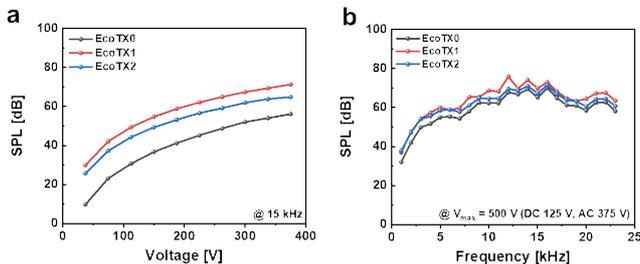
인하였는데, 이는 ZnS:Cu 형광체 내 얇은 트랩과 깊은 트랩의 활성화에 따른 발광 과정 이동으로 해석된다(그림 4c)[5]. 이는 다양한 주파수 변조를 통한 발광 색을 동적으로 조절할 수 있는 가능성을 보여준다. 더 나아가 신축성 평가 결과, 소자를 최대 200%까지 인장시켰을 때에도 발광 휘도의 변화가 거의 없었음을 확인하였다(그림 4d).



[그림 4] a. 전압에 따른 신축성 전계발광 사운드 디스플레이의 발광 강도, b. 전압에 따른 발광 스펙트럼 변화, c. 주파수 변화에 따른 발광 색 변화, d. 신율 변화에 따른 발광 특성.

3.4 신축성 전계발광 사운드 디스플레이의 음향 출력 특성

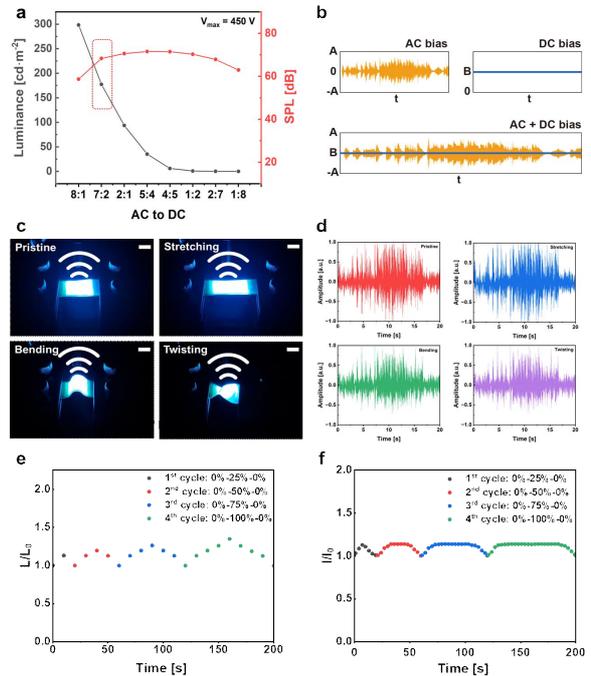
음향 출력 특성 평가 결과, 구동 전압 및 주파수 증가에 따라 음압 레벨이 증가하였다(그림 5). 500 V, 15 kHz 조건에서 73.7 dB의 높은 음향 출력이 측정되었으며, 특히 고주파 영역에서 발광과 음향 출력이 동시에 증가하는 특성이 관찰되었다. 이는 신축성 사운드 디스플레이가 복합 정보 출력(빛 + 소리)에 최적화되어 있음을 보여준다.



[그림 5] a. 전압에 따른 신축성 전계발광 사운드 디스플레이의 음압 특성, b. 주파수에 따른 음압 특성.

3.5 신축성 전계발광 사운드 디스플레이 구현

AC 및 DC 바이어스 조합을 달리하여 구동한 결과, A C:DC 비율이 최적화된 조건(7:2, $V_{max} = 450$ V)에서는 높은 휘도와 안정적인 음향 출력을 동시에 달성할 수 있었다(그림 5a). 최적화된 조건으로 클래식 음원을 변환하여 소자를 작동시켰다(그림 5b). 소자를 작동시켰을 때, 다양한 기계적 변형 조건(신장, 굽힘, 비틀림)에서도 발광 및 음향 특성이 안정적으로 유지되는 것으로 나타났다. 특히, 반복적인 인장-이완 사이클에서도 성능 저하 없이 안정적인 동작 특성을 보였다(그림 5e, 5f). 이는 EcoTX 1 발광층과 PU/EMIMTFSI 이온겔 전극의 우수한 기계적 특성 덕분에 해석된다.

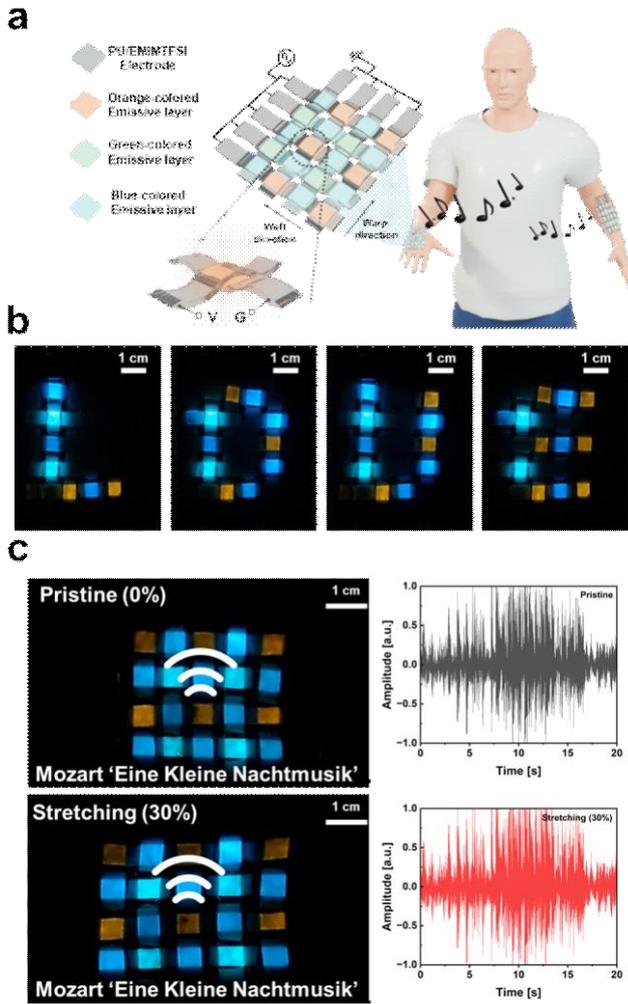


[그림 6] a. AC:DC 전압 비율 변화에 따른 발광 성능 및 음향 특성, b. 신축성 전계발광 사운드 디스플레이 구현을 위한 입력 파형 비교, c. 다양한 변형 상태에서의 신축성 전계발광 사운드 디스플레이의 발광 및 음향 출력, d. 변형 조건에 따른 음향 출력 파형, e. 다양한 신율 및 반복 인장에 따른 발광 강도 변화, f. 다양한 신율 및 반복 인장에 따른 음압 변화

3.6 신축성 다색 직물형 사운드 디스플레이 구현

PU/EMIMTFSI 이온겔 전극과 EcoTX1 발광층을 기반으로 제작된 직물형 사운드 디스플레이는, 다색 발광층(주황색, 녹색, 파란색)을 교차 배열하여 5×4 다중 픽셀 구조를 구현하였다(그림 6a). 다색 픽셀 배열을 통해 다양한 문자 및 패턴(예: L-O-V-E) 표현이 가능하였다. 또한, 디스플레이를 통해 음원을 구동하여, 정적 상태(0%)와 신장 상태(30%) 모두에서 안정적인 사운드 출력과 픽셀 발광을 동시에 구현할 수 있음을 입증하였다(그림 6c). 이러한 결과는 본 직물형 사운드 디스플레이를 활용하여 AI기반 웨어러블 헬스케어 모니터링, 스마트 의류, 소프트 로봇 스킨 등 차세대 인터랙티브 플랫폼으로의 응용 가능성을 뒷받

침한다.



[그림 7] a. 직물형 신축성 전계발광 사운드 디스플레이의 구조 모식도, b. 'LOVE' 문자를 표현하는 픽셀화된 직물형 신축성 전계발광 사운드 디스플레이의 발광 모습, c. 신축 전후에서의 직물형 신축성 전계발광 사운드 디스플레이의 발광 및 음향 출력 파형.

4. 결론

본 연구에서는 고유전율과 신축성을 동시에 갖춘 발광층 및 전기적 안정성과 기계적 유연성을 갖춘 전극을 기반으로, 신축성 전계발광 사운드 디스플레이를 성공적으로 개발하였다. 다양한 변형 상태에서도 광학 및 음향 출력을 안정적으로 유지할 수 있었다. 또한, 주파수 변조에 따른 발광 색 변화와 음향 출력 조절이 가능함을 보여 향후 AI 기반 인터랙티브 웨어러블 시스템, 웨어러블, 스마트 의류, 소프트 로봇 스킨 등 차세대 응용 분야에 폭 넓게 적용될 수 있는 가능성을 제시하였다.

참고문헌

[1] Chun, F., Zhang, B., Gao, Y., Wei, X., Zhang, Q., Zheng, W., ... & Wang, F. "Multicolour stretchable perovskite electroluminescent devices for

user-interactive displays", *Nature Photonics*, 18, 8, 856-863, 2024

[2] Lee, H., Kang, D. H., Cho, S., Kim, Y. R., Lee, Y., Na, S., ... & Ko, H., "Low-voltage stretchable electroluminescent loudspeakers with synchronous sound and light generation", *ACS Applied Materials & Interfaces*, 15, 12, 16299-16307, 2023

[3] Oh, S. J., Choi, S. E., Woo, I., Yoon, J. U., Bae, J., & Bae, J. W., "Stretchable Multicolored Electroluminescent Sound Display for Wearable and Interactive Textiles", *Advanced Functional Materials*, 2420432, 2025

[4] H. Park, S. J. Oh, D. Kim, M. Kim, C. Lee, H. Joo, I. Woo, J. W. Bae, J. H. Lee, "Plasticized PVC-gel single layer-based stretchable triboelectric nanogenerator for harvesting mechanical energy and tactile sensing", *Adv. Sci.*, 9,22, 2201070, 2022

[5] Wang, L., Xiao, L., Gu, H., & Sun, H., "Advances in alternating current electroluminescent devices", *Advanced Optical Materials*, 7, 7, 1801154, 2019