

액정 엘라스토머 기반 유연 전자소자

Flexible Electronics Enabled by Liquid Crystal Elastomers

김 현 | Hyun Kim

Advanced Materials Division, Korea Research Institute of Chemical Technology,
141 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34114, Korea
E-mail: hyunkim@kRICT.re.kr

1. 서론

액정 엘라스토머는, 저밀도로 가교된 액정 고분자의 일종으로, 외부 자극에 의해 큰 스트레인의 가역적인 액추에이션이 가능할 뿐 아니라, 분자 배향의 자유로운 설계가 가능하다는 독보적인 특성에 기반하여, 차세대 소프트 로봇에 활용될 수 있는 프로그램 가능한 유연 액추에이터 소재로써 큰 주목을 받고 있다. 따라서, 액정 엘라스토머를 열, 빛, 전기, 용매 등과 같은 다양한 자극원을 이용해 설계된 형태로 구동을 제어하는 지능형 유연 액추에이터로써의 연구가 해당 소재의 가장 대표적인 분야라고 할 수 있다.^{1,2} 나아가, 액정 특유의 분자 배향 및 물리적 이방성 설계를 기반으로, 최근에는 액추에이터 분야 이외에도 다양한 폼팩터를 지니는 유연 전자소자 및 의공학 소자 등으로 그 응용 영역이 활발하게 확대되고 있다. 이에 본 기고에서는 액정 엘라스토머 기반의 유연 전자소자 응용 사례를 크게 세가지 범주, 1) 전기 자극 기반 액추에이터, 2) 미세 전자소자, 및 3) 의공학 전자소자, 로 소개하고자 한다.

2. 본론

2.1 액정 고분자, 네트워크, 및 엘라스토머

액정 고분자는 간단히 말해 액정성을 지니는 고분자들의 통칭이며, 고분자 구조, 가교 형태, 물리적 및 열역학적 특성에 따라 크게 세가지 종류로 구분될 수 있다(그림 1a).³ 첫번째는 liquid crystal main-chain polymers (LCPs) 이며, 일반적으로 mesogen 그룹을 메인 체인으로 지니며 가교되지 않은 선형 고분자 체인들이 액정 상으로 결합되어 있는 형태를 지닌다. 이러한 LCPs는 높은 분자 배향성에 기반하여, 유리화 전이 온도(T_g)는 보통 200 °C 이상을 나타내고, 2 GPa 이상 modulus의 고강도 기계적 성질, 고내열성, 고차단성 등의 뛰어난 물리적 특성에 기반하여 Kevlar나 Vectran과 같은 고성능 엔지니어링 소재로써 활용되어 왔다. 두번째는 liquid crystal polymer networks(LCNs) 이며, 중~고밀도로 가교된 네트워크를 지니 상온 이상의 T_g (40~100 °C)와, modulus 0.8 ~ 2 GPa 범위의 유리질 물리적 성질을 지닌다. LCPs가 외부 자극에 의해 변하지 않는 고정형성, 즉, 0%에 가까운 변형률을 지닌다면, LCNs의 경우에는 약 5% 정도의 변형률을 보이며, 이는 그림 1a에서 order parameter, S 로 표현되고 있다.

세번째는 액정 엘라스토머, liquid crystal elastomers(LCEs), 로써 상온 이하의 T_g (20 °C 이하)와 저밀도 가교 특성에 기반하여 기계적으로 modulus 0.1 MPa 이하의 고탄성 및 고유연성의 물리적 성질을 지니며, 외부

Author



김 현

2010 인하대학교 생명화학공학과(학사)
2010-2013 SK 케미칼 QA팀 대리
2015 인하대학교 화학공학과 (석사)
2019 University of Texas at Dallas, Department of Bioengineering (박사)
2019-2021 US Army Research Laboratory, Sensors and Electron Devices Directorate (Post-Doc.)
2021-현재 한국화학연구원 고기능고분자연구센터 선임연구원

자극을 주었을 때 분자 수준의 액정상이 쉽게 변할 수 있어, 90% 이상(수축 길이 기준 최대 400%)의 가역적 변형률을 나타낸다는 점이 LCPs나 LCNs와는 다른 중요한 특징이라 할 수 있다(그림 1b).⁴ 이때, 가장 대표적인 외부 자극은 열이라고 할 수 있으며, 단방향으로 배향된 액정 엘라스토머는 이러한 외부 자극에 의해 부피가 거의 일정하게 보존되는 비등방적 액추에이션(분자 정렬 방향으로의 수축 및 정렬 수직 방향으로의 팽창)을 나타내게 된다(그림 1c).² 이러한 액추에이션 거동은 액정의 nematic-to-isotropic, 즉, 질서-무질서 상전이에 기반 하며, 기본적으로는 상전이 온도(T_m) 이상으로의 가열을 통해 액추에이션을 유도할 수 있으며, 직접적인 가열 이외에도 빛, 전기를 통한 광열, 전열 효과를 이용하거나, 전기장, 자기장, 화학적 용매 등, 상전이를 유도하는 다양한 외부 자극의 활용이 가능하다. 이렇듯, 액정 엘라스토머는 다양한 자극원을 활용 하여 가역적이고 큰 변형률의 액추에이션이 가능하다는 점에서, 인공 근육 혹은 소프트 로봇에 적용 가능한 유연 액추에이터 로써 유망한 특성을 지닌다.

2.2 액정 엘라스토머의 분자 배향 설계

이러한 비등방적 액추에이션 거동은 분자 배향에 기반하고 있으므로, 어떻게 분자 배향을 설계할 것인지가 액정 엘라

스토머를 액추에이터로써 활용할 때 우선적으로 고려해야할 요소라고 할 수 있으며, 분자 배향의 프로그램에는 크게 세가지 방법이 이용되고 있다.

첫번째는, 가장 대표적인 방법인 기계적인 인장에 의한 단방향 배향이다. 그림 2a²에서 볼 수 있듯이, 1990년대 Finkelmann 연구팀에서 기계적 인장을 기반으로 단방향으로 정렬된 polysiloxane 기반의 액정 엘라스토머를 선형 액추에이터로써 활용한 사례가 보고되었으며,⁵ 이후 해당 분야로의 응용이 시작되었다고 할 수 있다. 보통 기계적 정렬은 2 단계로 이루어지는데, 1 단계에서는 부분적으로 가교가 이루어지며, 2 단계에서 기계적으로 변형 혹은 외부 응력 하에서 완전한 가교를 이루어, 인장으로 인해 정렬된 상태의 분자 배향을 고정시키게 된다. 이러한 기계적 인장은 가장 쉽고 간단하게 가능하며 선형적인 일을 수행하는데 있어 가장 적합하지만, 한편으로는 국부적인 복잡한 액정성의 분자 배향과 이에 따른 복잡한 구동이 가능한 액추에이터로의 제작은 어렵다는 한계가 있다.

두번째는, 2015년 Ware 및 White 연구팀에 의해 보고된, 광패터닝으로 대표되는 표면 배향이다(그림 2b).⁶ 해당 연구에서는, azobenzene 기반의 dye가 코팅된 액정 배향 cell을 제작하고, 이어 편광된 빛을 국부적으로 노출시키는 pixel-

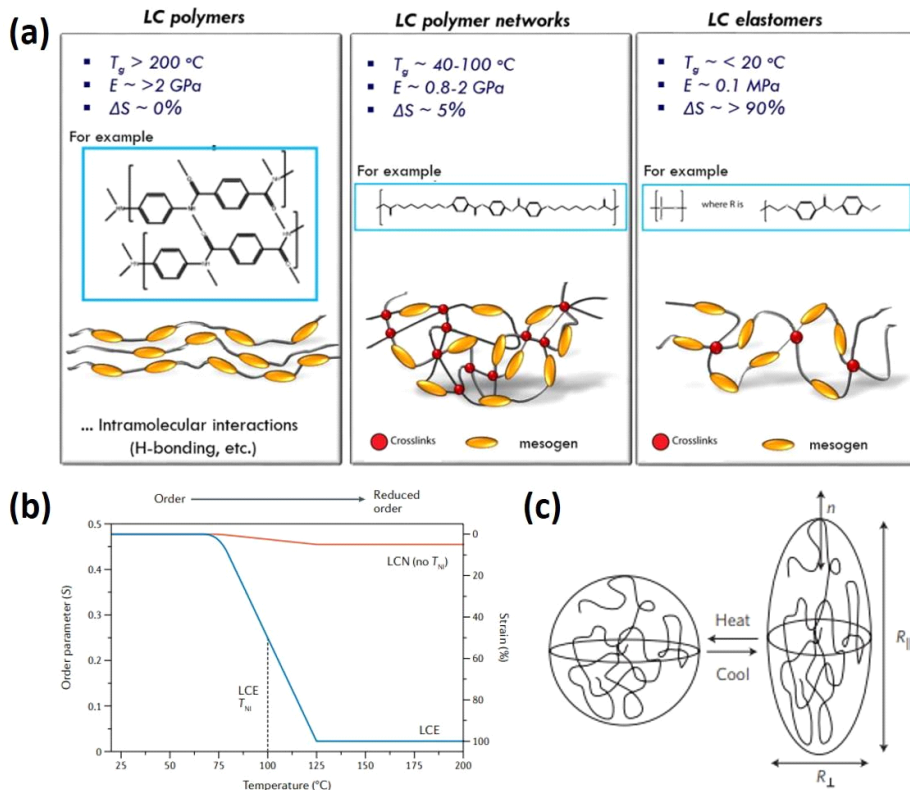


그림 1. 액정 고분자의 종류 및 열기계적 특성. (a) 액정 고분자, 액정 네트워크, 액정 엘라스토머의 구조 및 특성.³ (b) 액정 네트워크 및 액정 엘라스토머의 온도에 따른 order parameter 및 strain 변화.⁴ (c) 액정 엘라스토머에서 정렬된 nematic (우) 및 isotropic (좌) 상전이에 따른 비등방적 형태 변화 모식도.²

by-pixel 방식으로 배향 cell을 패터닝한다. 그림에서 보이는 패터닝은 +1 defect을 지나는 9개의 azimuthal 도메인을 나타낸다. 이후에 diacrylate 그룹을 지나는 액정 모노머와 chain extender 로써 amine을 약 1.1:1의 mol 비율로 준비하고, 1.5 wt% photoinitiator를 섞은 mixture를 배향 cell에 주입하여, aza-Michael addition 반응을 통해 약 15시간에 걸쳐 느린 속도로 step-growth oligomerization을 진행한다. 이후, 마지막으로 ultra violet(UV) 노출을 통해 radical polymerization을 하게 되면 최종적으로 voxel(pixel의 3차원 개념) 단위로 분자 배향이 설계된 액정 엘라스토머를 합성할 수 있다. 해당 방법은 one-pot에서 two-step의 간단한 방법을 통해 프로그램된 액정 엘라스토머를 제조할 수 있는 강력한 기술로써, 이후 현재까지 많은 후속연구에 응용되고 있다. 한편으로는 분자 배향의 설계가, 패터닝된 표면과 액정 분자간의 상호작용 및 anchoring energy에 기반하므로, 약 100 μm 이상의 두께를 지니는 필름에는 적용이 어렵다는 한계 또한 지니고 있다.

마지막으로는, 최근 많은 주목을 받고 있는 direct ink writing 방식의 3D 프린팅을 통한 3차원 구조체의 배향이며, 2017년에 Ware 연구팀에서 최초로 보고된 바 있다(그림 2c).⁷ 액정 엘라스토머의 경우, 특히 3D 프린팅과 매우 좋은 시너지 효과를 보여준다고 할 수 있는데, oligomerization 된 액정 mixture를 노즐에서 분사할 시, 기계적 shear stress에 의해 프린팅 방향으로 분자 배향이 된 수백 μm 정도의 두께를 지니는 fiber가 나오게 되고, 동시에 UV 광가교를 통해 3D 구조체로의 적층이 가능하기 때문이다. 각각의 fiber가 지니는 비등방적 액추에이션에 의해, 적층된 3D 구조체는 설계된 복잡한 거동을 할 수 있게된다. 이러한 액정 엘라스토머의 3D 프린팅된 구조체는 시간에 따라 모양을 바꾸게 되므로, 4D 프린팅을 실현하는 핵심 소재 및 기술로써 특히 많은 주목을 받고 있다. 특히 해당 기술은 액정 엘라스토머의 실용적인 스케일업을 가능하게

하여 향후 더욱 많은 확대가 예상된다.

지금까지 논의된 바와 같이, 액정 엘라스토머는 하이드로젤이나 형상 기억 고분자 등의 다른 지능형 소재와 구별되는 2가지 주요한 고유 특성, 1) 가역적인 큰 변형률의 비등방적 액추에이션, 2) 국부적인 분자 배향의 설계 가능성, 에 기반하여 차세대 스마트 고분자로써 많은 연구가 진행되고 있다. 최근에는 액추에이터 활용 이외에도 다른 응용기술로 확대되는 과정에 있으며, 그 중 주요한 응용기술 중 하나는, 유연 전자소자로의 활용이라고 할 수 있다. 이후 챕터에서는 액정 엘라스토머 기반의 유연 전자소자를 크게 세가지 분야로, 1) 전기 자극 기반의 유연 액추에이터, 2) 미세 전자소자, 3) 의공학 소자로 활용하는 연구들에 대해 소개하고자 한다.

2.3 액정 엘라스토머의 전기 자극 기반 유연 액추에이터 응용

액정 엘라스토머는 기본적으로 전기 전도성이 없는 고분자이나, 전도성 소재와의 복합소재화 또는 전열용 wire와 결합하는 방식을 통해 전열 반응을 이용하여 전기 자극 기반의 유연 액추에이터 소자로써 이용할 수 있다. 예를 들면, 액정 엘라스토머와 탄소나노튜브(carbon nanotubes, CNTs)의 복합 소재를 들 수 있다(그림 3a).⁸ 해당 연구에서는, chemical vapor deposition을 통해 제작된 CNT forest에서 물리적인 drawing 프로세스를 통해 얻어진, 연속적으로 정렬된 CNT 시트를 액정 배향 가이드 레이어로써 활용하였다. 액정 엘라스토머의 분자 배향은 CNT 시트가 지니는 나노 스케일의 그루브 표면에 의해 패터닝될 수 있었으며, 이에 따라 국부적으로 분자 배향의 설계가 가능한 LCE/CNT 복합소재 필름을 제작할 수 있었다. 해당 복합소재는 구조적으로 CNT 시트가 필름의 양측 표면에 매우 가깝게 위치하고, 사이에서 액정 엘라스토머가 배향된, 샌드위치 구조라 할 수 있으며, 표면의 CNT 시트로 인해 전기적 전도성을

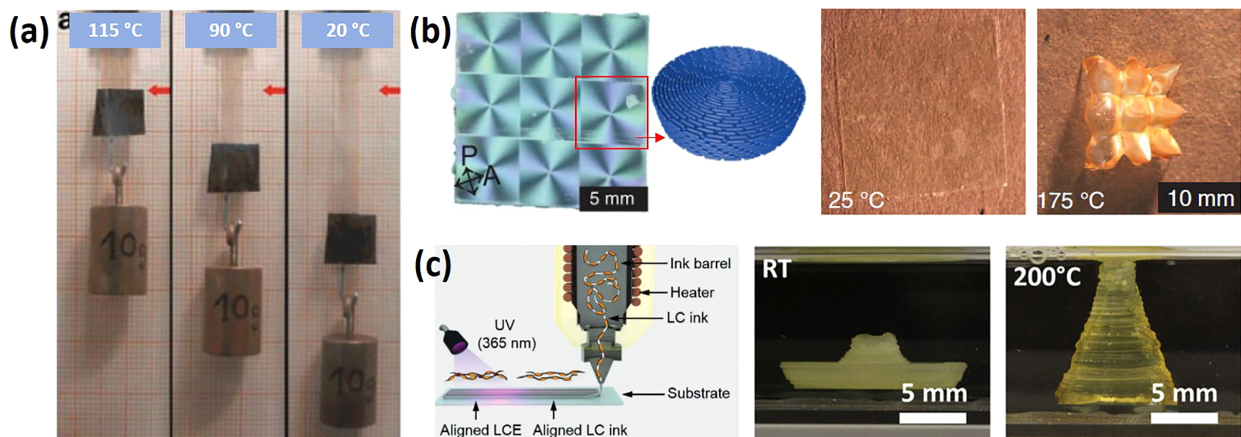


그림 2. 액정 엘라스토머의 분자 배향 프로그램을 위한 대표적인 공정기법 및 액추에이션. (a) 기계적 연신에 의한 단방향 분자 배향 및 액추에이션.² (b) 광패터닝에 의해 복잡하게 설계된 9 도메인의 +1 azimuthal defect 분자 배향 및 액추에이션.⁶ (c) 3D 프린팅에 의한 3D 구조체의 액추에이션.⁷

나타낸다. 따라서 약 15 V 정도의 원만한 전기 자극을 이용하여 전열 효과를 유도할 수 있고, 이를 선형 액추에이터 소자로 활용할 수 있었다. 나아가, 필름을 꼬는 twist insertion 공정을 통해, 선형 액추에이션의 변형률과 작업 성능의 개선 또한 가능하였다.

다른 복합소재의 예는, 그림 3b에서 볼 수 있는 액정 엘라스토머와 액체 금속의 복합소재이다.⁹ 해당 연구에서는, eutectic Gallium-Indium (EGaIn)을 액정 엘라스토머에 분산하여 복합소재를 제조하였다. 해당 복합소재는 전열 효과에 의한 선형 및 굽힘 액추에이션이 가능한 소프트 로봇의 액추에이터로써 활용 가능할 뿐 아니라, 특히 액체 금속의 전도성 경로 자가조립에 의해 데미지 저항 기능성을 가진다. 아울러 외부 데미지를 감지하고, 이어서 액추에이션을 구동하는 형태의 스마트 유연 전자소자로써도 활용될 수 있었다.

이와 같은 전열 효과 기반의 액추에이터와는 다른 메커니즘으로써, 액정 엘라스토머가 지니는 이방적인 유전 특성을 이용할 경우, 전기장을 자극원으로 활용하여 빠른 속도의 액추에이션이 구현될 수 있음이 최근 보고된 바 있다(그림 3c).¹⁰ 해당 연구에서는, 광패터닝으로 가교된 액정 엘라스토머의 양 표면을 유연 전도성 전극으로 코팅하고, 이후 양 전극에

전위차를 주어 Maxwell stress를 유도해 10 Hz의 빠른 속도로 구동이 가능한 유연 액추에이터 소자로 보고하였다.

지금까지 거론된 액정 엘라스토머는, 분자 배향의 설계와 가교 이후에는 재가공 및 재활용이 불가능하다는 한계가 있다고 할 수 있다. 최근의 연구에서는 thiourea 기반의 동적 공유결합 가교제를 이용하여 이러한 한계를 극복하고 재가공 및 재활용이 가능한 새로운 액정 엘라스토머를 개발하여, 이를 전열 자극 기반의 액추에이터로 응용한 바 있다. 해당 연구에서는, diacrylate 기반의 액정 모노머와 dithiol 기반의 chain extender를 활용하여, thiol-acrylate Michael addition 반응으로 고분자 체인을 형성하고, triethylene glycol spacer 를 포함하는 poly(ether-thiourea)를 이용하여 aza-Michael addition 반응으로 가교하였다. 그림 3d에서 볼 수 있듯이, 해당 액정 엘라스토머는 동적 공유결합을 가능하게 하여 열 및 용매를 통해 재가공이 가능하므로, 전열용 wire와 결합된 선형 액추에이터를 재가공하여 다른 형태의 벤딩 액추에이터 소자로 재활용할 수 있었다.¹¹

이렇듯, 액정 엘라스토머의 전자소자 활용에 있어 가장 대표적인 분야는 전기 자극을 활용하는 유연 액추에이터 및 소프트 로봇으로의 응용이라고 할 수 있다. 액정 엘라스토머 소재가 지니는 고유의 특성에 기반하여 향후 해당 분야로의

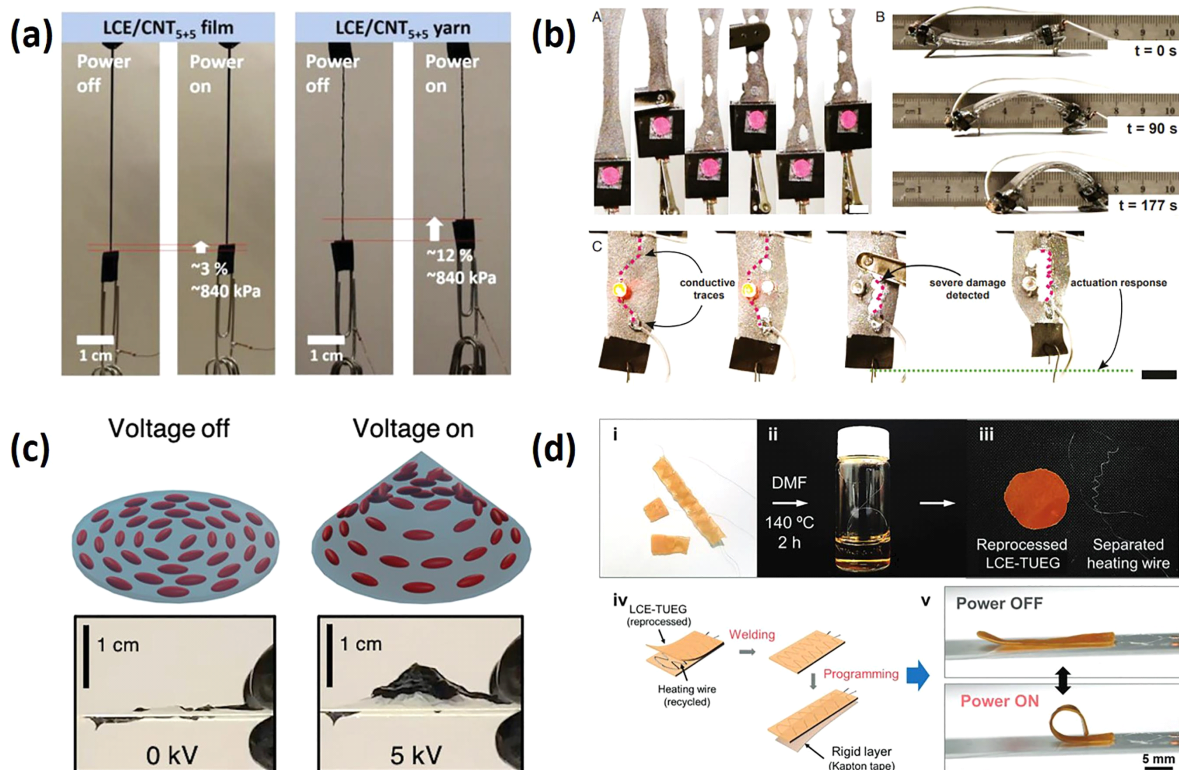


그림 3. 액정 엘라스토머의 전기 자극 기반 유연 액추에이터 응용 사례. (a) 액정 엘라스토머/탄소나노튜브 복합소재 간의 전열 자극에 의한 단방향 액추에이션.⁸ (b) 액정 엘라스토머/액체금속 복합소재 필름의 (b-A) 전열 자극에 의한 단방향 액추에이션 및 데미지 저항 기능성, (b-B) 벤딩 액추에이션을 활용한 소프트 로봇 응용, (b-C) 데미지 감지 및 감응에 의한 전열 자극 액추에이션.⁹ (c) +1 azimuthal defect으로 패턴된 액정 엘라스토머의 전기장에 의한 액추에이션.¹⁰ (d) Thiourea 기반의 동적 가교 액정 엘라스토머의 재가공 및 전열 자극 벤딩 액추에이터로 재가공 사례.¹¹

더욱 많은 연구가 예상된다.

2.4 액정 엘라스토머의 미세 전자소자 응용

논의되었던 액추에이터 이외에도, 최근 액정 엘라스토머를 이용하여 다양한 형태의 미세 전자소자에 활용하는 연구들이 보고되고 있다. 특히, 광패터닝을 통해 국부적으로 패터닝된 액정 엘라스토머 기판을 설계하고 상온보다 높은 온도에서 가교를 할 경우, 가교 온도가 기판의 flat한 구조를 지정하므로, 추후 상온에서 액정 엘라스토머 기판을 분리할 시, 설계된 3차원 구조로 pop-up될 수 있음이 보고된 바 있다(그림 4a).¹² 이러한 개념에 착안하여, 2차원의 평평한 표면을 요구하는 포토리소그래피 공정을 통해 미세 전자소자를 제작하고, 추후 3차원의 나선, 웨이브, 혹은 좌선성 및 우선성을 동시에 지니는 등의 원하는 구조의 3차원 미세 전자소자를 제작할 수 있다. 이러한 3차원 미세 전자소자는 구조적으로 변형 저항성을 지니므로, 늘리거나 비틀는 등의 외부 변형 하에서 기존의 성능을 유지할 수 있다. 그림 4b에서는, 패터닝된 액정 엘라스토머를 기판으로, 다층 박막구조를 지니는 metal-insulator-metal(MIM) capacitor를 제작할 경우, 약 100%의 변형에도 박막 기반의 미세 전자소자가 원래의 성능을 유지할 수 있음을 보여준다.¹² 이외에도, 액정 엘라스토머 위에 전도성을 지니는

금 박막을 증착할 경우, 낮은 온도로의 환경 변화를 감지하는 골드체인 모니터링 센서용 안테나로도 활용할 수 있다(그림 4c,d).¹²

이외에도, 액정 네트워크 고분자를 기판으로, 다양한 구조의 전극 혹은 전자소자로 활용될 수 있음이 최근의 연구들로 보고되고 있다. 예를 들면 광화학적 활성을 지니는 azobenzene으로 기능화된 액정 네트워크 고분자를 키리가미(kirigami) 구조화하여 기판으로써 활용하고, reduced graphene oxide(rGO)로 전도성을 패터닝할 경우, 인장 및 구조변경이 가능한 스마트 전극 소자로 활용할 수 있음이 보고되었다(그림 4e).¹³

또다른 최근 사례에서는, 광패터닝을 통해 국부적으로 분자 배향이 프로그램된 액정 네트워크 고분자에 크로뮴(Cr) 박막을 두껍게 증착할 경우, 기판의 분자배향을 따라 미세 균열의 패터닝이 가능함이 보고된 바 있다. 일반적인 경우, 균열은 공정의 실패를 의미하여 기피해야 할 현상으로 여겨지나, 해당 연구에서는 균열의 제어를 통해 마이크로/나노 스케일의 패터닝이 간단한 1 스텝 공정으로 가능하여, 시간, 노력, 비용이 많이 드는 전통적인 리소그래피 공정의 대안으로 활용될 수 있음을 제시하였다. 나아가 패터닝된 균열을 이용하여 다른 기능성 소재를 패터닝할 수 있음을 제시하였고, 해당 사례에서는 전도성 은나노입자를 균열에

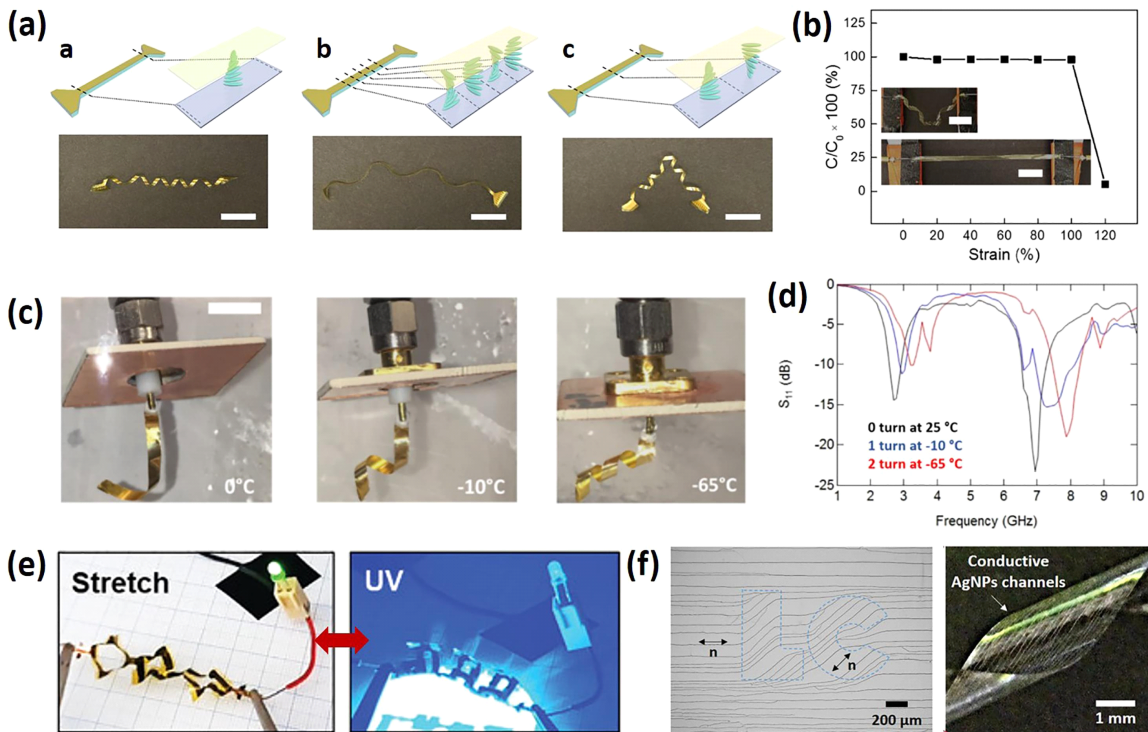


그림 4. 액정 엘라스토머 및 액정 네트워크 기반의 다양한 미세 전자소자 응용 사례. (a) 분자 배향의 설계에 따른 미세 전자소자의 다양한 3차원 구조 설계 사례. (b) 좌선성 및 우선성을 국부적으로 지니는 3차원 나선 구조 액정 엘라스토머 기판에 제작된 MIM capacitor의 인장 저항성. 트위스트 배향된 액정 엘라스토머 기반 안테나의 저온 감지에 따른 (c) 모양 변화 및 (d) 그에 따른 반사 계수 측정 결과.¹² (e) 인장 및 재구조화가 가능한 키리가미 구조화된 azo-LCN/rGO 기반의 유연 전자소자.¹³ (f) 액정 네트워크를 활용한 미세 균열 패터닝 및 전도성 채널 형성에 따른 유연 전극 소자.¹⁴

패터닝함으로써, 형상 변형이 가능한 투명 전극을 제작할 수 있다(그림 4f).¹⁴

이처럼, 액정 고분자의 자유로운 분자 배향 설계를 통해, 다양한 박막 기반의 미세 전자소자를 제조하면, 인장 및 변형 저항성을 지니는 미세 소자로 활용하거나, 외부 환경을 감지하는 지능형 소자로 응용 또한 가능하므로, 향후 다양한 후속 연구가 기대된다.

2.5 액정 엘라스토머의 의공학 전자소자 응용

앞선 챕터에서 논의되었던 액정 엘라스토머 기반의 다양한 미세 전자소자는, 더 나아가 의공학 전자소자으로도 활용될 수 있다. 의공학적 전자소자로 응용하기 위해서는 추가적인 다양한 기능성이 요구되는데, 예를 들면, 1) 생체 내에서 분해되지 않고 안정적으로 기능을 수행해야하고, 2) 인체에 무해한 생체적합성 또한 지녀야한다. 액정 엘라스토머는 특유의 분자 배향 이방성에 기반하여, 가혹한 생체 내의 생화학적 환경, 즉, 온도, 이온, 생체 분자 등의 환경에서 분해되거나 박리되지 않는 우수한 차단성(barrier properties)을 지니며 최근의 연구들을 통해 입증되고 있다. 따라서, 설계된 액정 엘라스토머는, 생체 내 삽입 후에 모양, 구조, 혹은 위치를 변경하는 지능형 기능성을 제공할 수 있을 뿐 아니라, 봉지

소재(encapsulation materials)로써도 활용될 수 있다.¹⁵

최근의 연구에서는, 분자 배향된 액정 엘라스토머 기관 위에, 포토리소그래피 공정으로 다채널 전극배열(multi-electrode arrays, MEAs)을 지니는 신경전극 소자(neural electrodes)를 제작하고, 생체 내 이식후에 원하는 위치로 전극을 배치할 수 있음을 보고하였다. 특히, 이러한 전극 재배치를 통해, 이식 시 발생한 상처부위를 회피하여, 원하는 위치로 전극을 이동시킴으로써 더 깨끗한 신경신호를 녹화할 수 있었다. 해당 신경전극 소자는 이식 이후 8주차까지 안정적으로 신경신호를 녹화하는 본래의 기능을 수행할 수 있음이 보고되었다(그림 5a-c).¹⁵

또한 생체 이식용 의공학 전자소자들은, 위에서 언급된 가혹한 생화학적 환경 외에도, 생체의 움직임에 따른 지속적인 기계적 변형 스트레스에 노출되게 된다. 따라서, 변형 저항성을 지니는 3차원 나선 구조의 액정 엘라스토머를 기관 및 봉지 소재로 활용하여, 반복적인 기계적 변형 하에서도 본래의 기능을 유지할 수 있음이 보고된 바 있다(그림 5d).¹⁶

이처럼, 프로그램 가능한 액정 엘라스토머는, 다양한 형태 및 기능을 지니는 지능형 의공학 전자소자으로도 활용될 수 있으며, 현재로써는 해당 분야로의 응용이 초기 단계라고 할 수 있으나, 향후 더욱 확대가 가능할 것으로 전망한다.

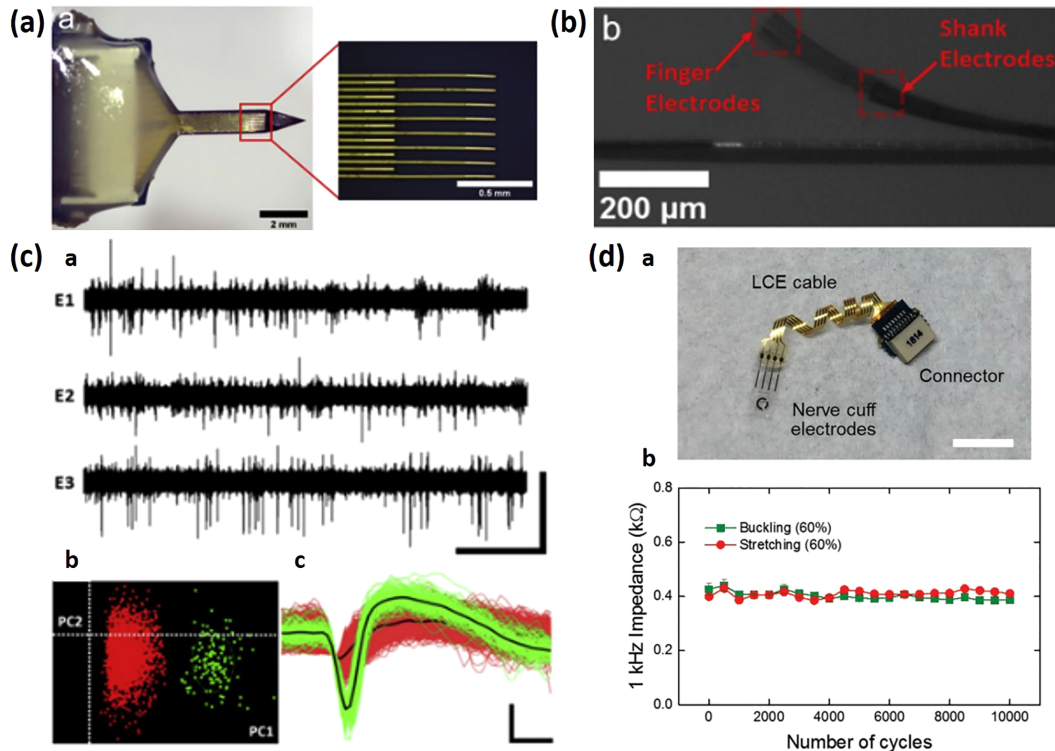


그림 5. 액정 엘라스토머 기반의 다양한 의공학 전자소자 응용 사례. 액정 엘라스토머 기판에 제작된 생체내 배치 가능한 다채널 신경전극 (a) 현미경 이미지, (b) 뇌와 유사한 0.2% agarose 환경에서의 전극 배치 기능성, (c) 이식 8주차에서의 신경 신호 녹화 (스케일바 가로 및 세로, 각각 5 s 및 90 μ V (c-a), 225 ms 및 25 μ V (c-c)).¹⁵ (d) 액정 엘라스토머를 기관 및 봉지소재로 활용하는 인장 가능한 3차원 나선 구조의 신경 전극 이미지 및 인장 저항성 실험 결과.¹⁶

3. 결론

본 기고에서는, 액정 엘라스토머 기반의 다양한 폼팩터를 지니는 유연 전자소자 연구에 대해 소개하였다. 액정 엘라스토머와 유연 전자소자의 결합은 상당히 유망한 전망을 제시하는데, 이는 분자 배향의 자유로운 설계가 가능하다는 특유의 강점을 기반으로, 다양한 공정을 통해 전자소자의 구조를 1차원, 2차원 및 3차원으로 폭 넓게 설계할 수 있기 때문이며, 더 나아가서는 외부 환경에 따라 구조를 변경하는 4차원 유연 전자소자으로도 활용할 수 있기 때문이다. 따라서, 액정 엘라스토머는, 향후 해당 소재의 전통적인 응용 영역인 유연 액추에이터 뿐 아니라, 미세 전자소자, 의공학 전자소자 등 다양한 응용 분야에 걸쳐, 설계 가능한 폼팩터를 제공하는 스마트 소재로써 활발한 확대가 가능할 것으로 전망한다.

참고문헌

1. R. S. Kularatne, H. Kim, J. M. Boothby, and T. H. Ware, *J. Polym. Sci. B Polym. Phys.*, **55**, 395 (2017).
2. T. J. White and D. J. Broer, *Nat. Mater.*, **14**, 1087 (2015).
3. T. J. White, *J. Polym. Sci. B Polym. Phys.*, **56**, 695 (2018).
4. K. M. Herbert, H. E. Fowler, J. M. McCracken, K. R. Schlafmann, J. A. Koch, and T. J. White, *Nat. Rev. Mater.*, **7**, 23 (2022).
5. J. K  pfer, and H. Finkelmann, *Macromol. Rapid Commun.*, **12**, 717 (1991).
6. T. H. Ware, M. E. McConney, J. J. Wie, V. P. Tondiglia, and T. J. White, *Science*, **347**, 982 (2015).
7. C. P. Ambulo, J. J. Burroughs, J. M. Boothby, H. Kim, M. R. Shankar, and T. H. Ware, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **9**, 37332 (2017).
8. H. Kim, J. A. Lee, C. P. Ambulo, H. B. Lee, S. H. Kim, V. V. Naik, C. S. Haines, A. E. Aliev, R. Ovalle-robles, R. H. Baughman, and T. H. Ware, *Adv. Funct. Mater.*, **29**, 1905063 (2019).
9. M. J. Ford, C. P. Ambulo, T. A. Kent, E. J. Markvicka, C. Pan, J. Malen, T. H. Ware, and C. Majidi, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **116**, 21438 (2019).
10. H. E. Fowler, P. Rothmund, C. Keplinger, and T. J. White, *Adv. Mater.*, **33**, 2103806 (2021).
11. J. Lee, J. Bae, J. H. Hwang, M. Choi, Y. S. Kim, S. Park, J. Na, D. Kim, and S. Ahn, *Adv. Funct. Mater.*, **32**, 2110360 (2022).
12. H. Kim, J. Gibson, J. Maeng, M. O. Saed, K. Pimentel, and R. T. Rihani, J. J. Pancrazio, S. v Georgakopoulos, T. H. Ware, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **11**, 19506 (2019).
13. W. Cho, J. Jeon, W. Eom, J. G. Lee, D. G. Kim, Y. S. Kim, T. H. Han, and J. J. Wie, *Adv. Funct. Mater.*, **21**, 2102106 (2021).
14. H. Kim, M. K. Abdelrahman, J. Choi, H. Kim, J. Maeng, S. Wang, M. Javed, L. K. Rivera-Tarazona, H. Lee, S. H. Ko, and T. H. Ware, *Adv. Mater.*, **33**, 2008434 (2021).
15. R. Rihani, N. Tasnim, M. Javed, J. O. Usoro, T. M. D' Souza, T. H. Ware, and J. J. Pancrazio, *Neuromodulation* (2022).
16. J. Maeng, R. T. Rihani, M. Javed, J. S. Rajput, H. Kim, I. G. Bouton, T. A. Criss, J. J. Pancrazio, B. J. Black, and T. H. Ware, *J. Mater. Chem. B*, **8**, 6286 (2020).