

A Review on Recent Development and Applications of Dielectric Elastomers

Jin Sung Seo, Dohyeon Kim, Sosan Hwang, and Sang Eun Shim[†]

Department of Chemistry and Chemical Engineering, Inha University, 100 Inha-ro, Michuhol-gu, Incheon 22212, Republic of Korea

(Received March 22, 2021, Revised April 5, 2021, Accepted April 14, 2021)

Abstract: This paper reviews recent developments and applications of dielectric elastomers (DEs) and suggests various techniques to improve DE properties. DEs as smart materials are a variety of electro-active polymers (EAPs) that convert electrical energy into mechanical energy and cause a large deformation when a voltage is applied. The dielectric constant, modulus, and dielectric loss of DEs determine the efficiency of deformation. Among these, the dielectric constant significantly affects their performance. Therefore, various recent approaches to improve the dielectric constant are reviewed, including the enhancement of polarization, introduction of microporous structures in the matrix, and introduction of ferroelectric fillers. Furthermore, the basic principles of DEs are examined, as well as their various applications such as actuators, generators, sensors, and artificial muscles.

Keywords: electro-active polymer, dielectric elastomer, actuator, dielectric constant fillers

Introduction

1990년대 고분자 재료의 개발로 빠른 응답, 큰 변형, 낮은 전력 소모, 가공성 등 다양한 장점을 가진 전기활성고분자(Electro-active polymer, EAP)가 출현하여 전기 변형 현상을 산업에 적용시킬 수 있게 되었다.¹⁻³ 전기활성고분자는 전기 자극에 의해 수축, 팽창, 굽힘 현상을 나타내고, 전기적 에너지를 기계적 에너지로, 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환할 수 있어 액추에이터(actuator)와 제너레이터(generator) 분야에 많이 사용되고 있다. 전기활성고분자는 다른 재료들과 달리 인체의 근육과 유사한 탄성과 강도를 가지고 있어 생체 모방 로봇, 의료용 기기 등 인공근육 분야에서 대표적으로 사용되고 있다.^{4,5} 전기활성고분자의 연구개발로 다양한 유형의 전기활성고분자가 생겨났으며 이는 구동 메커니즘에 따라 이온 확산에 의해 구동되는 이온 전기활성고분자(ionic EAP)와 전자 분극(polarization)에 의한 쿨롱힘(Coulomb force)으로 구동되는 전자성 전기활성고분자(electronic EAP) 두가지로 나뉜다(Figure 1).⁶ 이온 전기활성고분자에는 고분자 겔(polymer gel), 이오노머 금속 복합체(ionomer-metal composite), 전도성 고분자(conductive polymer), 탄소기반 전기활성 물질(electroactive carbon-based material) 등이 있으며 낮은 구동 전압, 유연성, 큰 굽힘 변위와 같은 이점을 가지고 있다. 전자성 전기활성 고분자에는 압전 재료(piezoelectric material), 전

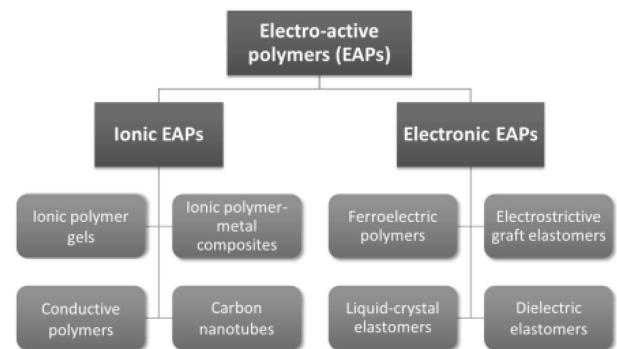


Figure 1. Type of electro-active polymers.⁶

기 변형 재료(electrostrictive material), 강유전성 고분자(ferroelectric polymer), 액정 탄성체(liquid crystal elastomer), 유전 탄성체(dielectric elastomer) 등이 있으며 높은 기계적 에너지, 빠른 응답성의 이점이 있지만 구동 시 높은 인가전압의 단점을 가지고 있다.

Dielectric Elastomers and Dielectric Constant

1. 유전 탄성체

위에서 소개한 전기활성고분자 중 본 논문에서 소개할 재료는 유전 탄성체이다. 유전 탄성체는 다른 재료에 비해 유전율이 높고 유연하며 큰 변형률을 가지고 있다.⁷⁻⁹ 대표적으로

[†]Corresponding author E-mail: seshim@inha.ac.kr

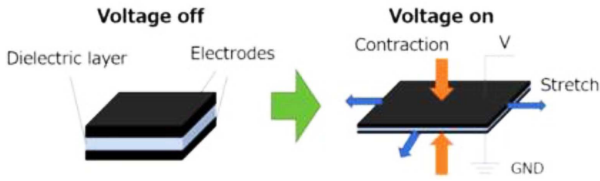


Figure 2. Schematic diagram of the driving principle of a dielectric elastomer actuator (DEA).¹⁰

유전 탄성체 액추에이터(dielectric elastomer actuator, DEA)에 많이 쓰인다. 유전 탄성체 액추에이터의 구동 원리는 두개의 유연한 전극 사이에 유전 탄성체를 샌드위치 구조로 끼워 넣고 전압을 인가하면 맥스웰 응력(maxwell stress)으로 인해 두께방향으로 수축되고 고무의 비 압축성으로 인해 평면 방향으로 팽창한다(Figure 2).¹⁰ 다른 액추에이터와 다르게 유전 탄성체 액추에이터는 가볍고 조용하게 작동하며 에너지 효율적이다. 이러한 장점 때문에 여러 연구 및 산업 분야에서 주목을 받고 있다. 하지만 유전 탄성체 액추에이터의 실제 적용에 가장 큰 걸림돌이 되는 부분은 높은 구동 전압(>10 V/ μm)이다. 높은 구동 전압은 사용자에게도 위험하고 기계에는 치명적인 데미지를 줄 수 있다. 이러한 제한점을 극복하기 위해 구동 전압을 낮추기 위한 연구들이 활발히 진행되고 있다.^{11,12}

2. 유전율

액추에이터 구동 전압과 변형률에 가장 큰 영향을 주는 요인은 유전율(dielectric constant)이다. 유전율은 일반적으로 ϵ_r (때로는 k)으로 표시된다.

$$\epsilon_r(\omega) = \frac{\epsilon(\omega)}{\epsilon_0} \quad (1)$$

여기서 $\epsilon_r(\omega)$ 는 재료의 복합 주파수의 종속 유전율이고 ϵ_0 는 진공 유전율로 8.85×10^{-12} 의 값을 가진다. 유전 탄성체의 커패시턴스는 C 로 표시되며 식은 다음과 같다.

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (2)$$

d 는 전극 사이의 거리를 나타내고 A 는 전극의 겹치는 영역을 나타낸다. 전극의 겹치는 부분과 유전율은 비례하는 반면 전극 사이의 거리와 유전율은 반비례한다.¹³⁻¹⁵ 유전 탄성체의 유전율을 증가시키는 방법에는 대표적으로 세라믹 필러, 고유전율 필러, 메탈 옥사이드, 미세기공구조, 분극 향상 등의 방법이 있다.

Improvement of Dielectric Properties

1. 실리콘(silicone)

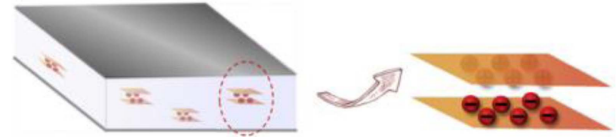


Figure 3. Description of micro-capacitor structure of PDA@SiO₂@GO/PDMS composite.¹⁶

실리콘 고무의 종류 중 하나인 폴리 디메틸 실록산(polydimethylsiloxane, PDMS)은 낮은 모듈러스, 빠른 응답속도, 열안정성, 우수한 생체 적합성 등 많은 장점들로 인해 유전 탄성체 액추에이터 분야에서 가장 많이 사용되는 재료이다. Liu 연구팀은 그래핀 옥사이드(graphene oxide, GO)와 이산화 규소(silicon dioxide, SiO₂), 폴리도파민(polydopamine, PDA)을 이용하여 PDMS의 유전율을 향상시키는 연구를 진행하였다.¹⁶ PDA@SiO₂@GO/PDMS 복합체의 필러 함량이 9%일 때 순수 PDMS 대비 약 4배(10^3 Hz) 상승한 유전율이 측정되었다. Figure 3에 나와있는 PDA@SiO₂@GO/PDMS의 마이크로커패시터 구조로 인해 필러 함량이 증가할수록 전하 저장 용량이 커지고 계면 분극(interfacial polarization)이 많이 발생하게 되어 유전율이 증가하게 된다.

Kofod 연구팀은 영구 쌍극자를 가진 분자를 PDMS에 부착하는 연구를 진행하였다.¹⁷ 이전에 비슷한 방법으로 액정 엘라스토머용 실리콘에 메조겐(mesogen)을 부착하는 방법으로 사용되었지만 유전 탄성체 액추에이터에 특성 향상을 위해 사용되는 것은 처음이다. Figure 4를 보면 가교는 백금 촉매를 통한 하이드로 실릴화로 진행되었다. 이 방법의 장점은 가교 밀도를 조절하여 기계적 특성을 제어할 수 있어 PDMS의 강성과 유전상수를 거의 독립적으로 선택할 수 있다. PDMS의 유전율은 2.5에서 5.9로 약 2배 정도 상승되었다.

Kashani 등은 전기장 조립 시스템(electric field assembly system)을 사용하여 PDMS 매트릭스에서 이산화 티타늄(TiO₂) 입자의 방향을 설정하여 유전특성을 향상시키는 연구를 진행하였다.¹⁸ 입자가 불균일한 전기장에 놓였을 때, 입자의 유도

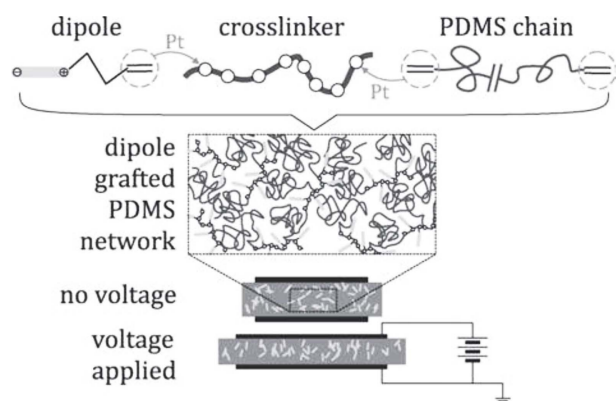


Figure 4. Schematic diagram of functionalization of a dipole in a PDMS chain.¹⁷

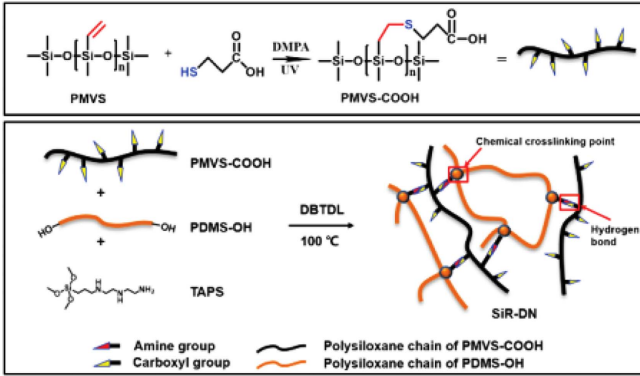


Figure 5. The principle of dual-crosslinking network of PMVS-COOH and PDMS-OH.¹⁹

된 쌍극자에 의해 입자에 방향성이 있는 힘이 가해지는 현상을 유전 영동(dielectrophoretic assembly)이라고 한다. 이 유전 영동 현상으로 인해 입자가 두께 방향으로 배향하게 되면 TiO₂ 입자 사이의 간격이 줄어들어 분극이 강화된다. 같은 양의 필러를 넣었을 때, 방향성을 가진 TiO₂를 넣은 PDMS의 유전율은 일반 TiO₂를 넣은 PDMS의 유전율 보다 약 20% 상승하였다. Tian 등은 PDMS의 이중 가교 네트워크(dual-crosslinking network)을 설계하여 유전특성을 향상시켰다.¹⁹ 먼저 photochemical thiolene click reaction을 이용하여 폴리 메틸 비닐 실록산(PMVS) 분자 사슬에 카르복실기를 도입하여 분자의 극성과 유전상수를 증가시켰다. 그 후 실란을 처리된 PDMS-OH에 아미노기 함유 가교제(amino bearing crosslinking agent)를 사용하여 기능화 된 가교 네트워크 PDMS-NH₂를 형성하였다. 그 후 카르복실기가 도입된 PMVS-COOH와 PDMS-NH₂를 혼합했다. Figure 5을 보면 PMVS-COOH와 PDMS-NH₂ 사이에 수소결합으로 인해 가교 네트워크가 형성됨을 알 수 있다.

PMVS-COOH의 함량이 증가하게 되면 PMVS-COOH 분자가 자유상태에 있고 전기 자극 하에 카르복실기가 회전하게 되어 유전율이 증가하게 된다. 이중 가교 네트워크로 인한 유전 특성은 10³ Hz의 주파수에서 일반 PDMS의 유전율 보다 약 3배정도 향상된 값을 확인하였다. Sarmad 등은 온도별로 열적 환원된 그래핀 옥사이드를 필러로 PDMS에 첨가하여 유전율의 변화를 확인하는 연구를 진행하였다.²⁰ 그래핀 옥사이드의 환원은 각각 150, 200, 300, 그리고 400°C에서 진행되었다. 표면에 산소 함유 작용기가 존재하게 되면 그래핀 옥사이드의 층간 간격이 넓어지게 되는데 환원 온도가 증가하게 되면 산소 함유 작용기가 감소하게 되면서 층간 간격 거리가 감소하게 되고, 환원된 그래핀 옥사이드의 순도가 증가하게 되어 자유 전자, 전기 전도도, 분극이 증가하게 되어 유전특성이 증가하게 된다. 10³ Hz에서 순수한 그래핀 옥사이드를 넣은 PDMS의 유전율은 3.4이고 400°C에서 환원한 그래핀 옥사이드를 첨가한 PDMS의 유전율은 9.6으로 약 3배 증가된 값

Table 1. Dielectric Properties of PDMS by Filler²¹

Base elastomer	Filler	Content	$\epsilon'@10^3$ Hz	$\tan\delta@10^3$ Hz
PDMS	PDA@SiO ₂ @GO	9 vol%	10	0.021
PDMS	Dipole	13 wt%	5.9	0.002
PDMS	TiO ₂ (oriented)	11 vol%	5.5	0.035
PDMS-OH	PMVS-COOH	8 g	10	0.58
PDMS	rGO	0.5 vol%	9.6	0.41
PDMS (porosity 40%)	Ag@SiO ₂	2 wt%	6.9	0.01

을 확인하였다. Liu 연구팀은 은 코팅된 이산화규소 나노입자를 물과 함께 PDMS와 교반 후 물을 증발시켜 미세 기공 구조를 가진 PDMS 매트릭스를 형성하여 미세 기공과 Ag@SiO₂ 나노입자가 유전특성에 미치는 영향을 연구하였다.²¹ 함량에 따라 PDMS 내부의 기공률은 각각 20, 30 그리고 40%이다. 기공률이 증가할수록 기공의 지름은 각각 2.02 μm, 3.10 μm, 3.47 μm으로 점차 증가하게 된다. PDMS 내부에 기공률이 증가하게 되면 모듈러스 값은 감소하게 되고, Ag@SiO₂ 나노입자의 첨가는 유전율을 증가시켜 결과적으로 Electromechanical sensitivity ($\epsilon_r/Y \text{ Mpa}^{-1}$) 값이 증가하게 된다.

2. 니트릴 부타디엔 고무(NBR)

다른 유전체 엘라스토머 재료들보다 상대적으로 높은 유전율을 가지고 있는 니트릴 부타디엔 고무는 높은 분극화, 유연성, 손쉬운 가공 및 저렴한 비용으로 인해 유전 탄성체 액추에이터의 유망한 후보 중 하나이다. Srivastava 등은 그래핀 나노 시트(graphene nanosheet, GNS)와 헥사데실아민(Hexadecylamine, HDA)을 NBR을 카르복실화한 XNBR에 첨가하여 유전특성을 향상시키는 연구를 진행하였다.²² 이러한 GNS의 변형은 직류 전도도를 방지함으로써 유전 손실을 감소시키고 매트릭스와의 상용성을 향상시키고, 마이크로 커패시터 네트워크를 형성할 수 있어 유전율이 증가하게 된다. XNBR은 강한 극성을 가지고 있는 카르복실기와 시아노기의 존재로 GNS-HDA와 강한 접착력을 형성한다. 100 Hz의 주파수에

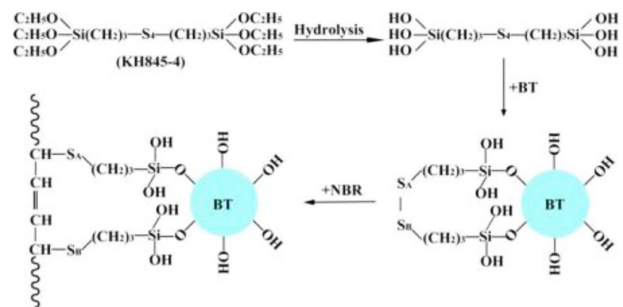


Figure 6. Reaction mechanism between barium titanate (BaTiO₃) and silane coupling agent (KH845-4).²³

Table 2. Dielectric Properties of NBR by Filler

Base Elastomer	Filler	Content	$\epsilon'@10^3\text{Hz}$	$\tan\delta@10^3\text{Hz}$
NBR	GNS	2 phr	127.6	0.4
NBR	ACN@MBT	41 wt%	45	0.05

서 GNS-HDA를 첨가하지 않은 XNBR의 유전율은 8.9이다. 반면에 GNS-HDA를 2phr 첨가했을 때 XNBR의 유전율은 127.6으로 크게 향상되었다. Zhang 등은 NBR의 아크릴로 니트릴(acrylonitrile, ACN)의 함량조절과 실란 커플링 에이전트 (KH845-4)를 반응시킨 바륨티타네이트(Barium titanate, BaTiO₃)를 필러로 사용하는 두가지 방법으로 유전 성능을 향상시켰다.²³ Figure 6을 보면 바륨티타네이트와 실란 커플링 에이전트, NBR의 반응 메커니즘이 표시되어 있다.

ACN의 함량은 각각 20, 26, 35, 그리고 41% 이다. ACN의 함량이 증가하게 되면 분자간의 힘과 분자의 극성이 강해져 유전율이 향상된다. 실란 커플링 에이전트와 바륨티타네이트를 반응시킨 것을 MBT라 부른다. MBT를 포함한 샘플의 유전율은 동일 함량에서 약 2배 높은 유전율이 측정되었다.

3. 폴리 우레탄(PU)

폴리 우레탄 유전체 엘라스토머는 낮은 모듈러스, 우수한 열 안정성, 높은 응답 속도 등으로 유전 탄성체 액추에이터로 활용할 수 있는 다양한 장점들을 가지고 있다. 하지만 낮은 유전율 때문에 많은 제한점을 가지고 있는데 이러한 부분을 개선하기 위해 여러 연구들이 진행되고 있다. Chen 등은 이산화 티타늄 기능화된 그래핀을 필러로 첨가하여 폴리우레탄의 유전성능을 향상시키는 연구를 진행하였다.²⁴ 이산화 티타늄은 뛰어난 안전성과 낮은 독성, 낮은 재료비 등과 같은 많은 장점을 가지고 있고 다중 하이드록실 표면으로 인해 그래핀 나노 시트에 도입하면 그래핀의 친수성을 향상시킬 수 있다. 또한, 반도체층은 내부 전자 및 전하 캐리어의 수송을 제한하여 폴리우레탄의 유전 손실을 줄이고 파괴 강도를 높일 수 있다. 필러의 첨가로 향상된 친수성과 습윤성은 폴리우레탄 매트릭스에서 그래핀의 분산성을 향상시키고 더 많은 마이크로 커패시터를 형성하게 되어 유전율이 증가하게 된다. 순수 폴리우레탄의 유전율은 약 8이다. 반면에 그래핀을 3% 첨가한 폴리우레탄의 유전율은 101.9 이고, 이산화 티타늄 기능화된 그래핀을 첨가한 폴리우레탄의 유전율은 166.4로 상당히 증가한 값을 확인할 수 있다. Tian 등은 산화 그래핀의 부분적 감소와 열가소성 폴리우레탄(thermoplastic polyurethane, TPU)의 수소 결합 파괴를 통해 낮은 전기장에서 작동 변형률을 개선하는 효과적인 방법을 제시하였다.²⁵ 그래핀 옥사이드 나노시트(graphene oxide nanosheet, GONS)의 균일한 분산과

Table 3. Dielectric Properties of PU by Filler

Base Elastomer	Filler	Content	$\epsilon'@10^3\text{Hz}$	$\tan\delta@10^3\text{Hz}$
PU	TiO ₂ @rGO	3 wt%	170	0.03
PU	TRG	2 vol%	1875	0.5

TPU 사이의 강한 상호작용을 위해 용액 블렌딩과 특수 스핀 플래시 건조 기술을 사용하였다. 그 후 180°C의 핫프레스에 1시간을 압착시켜 GONS/TPU 복합체에서 GONS를 부분적으로 감소시켜 열적으로 환원된 산화 그래핀(thermally reduced graphene oxide, TRG)이 되었다. GONS 구조의 부분적인 복원 의해 TRG의 계면 분극이 향상되고 매트릭스 사이의 계면에 축적된 전하 캐리어의 수를 증가시켜 유전율을 증가시킨다. TRG의 산소 작용기는 TPU의 사슬사이의 수소결합을 방해하고 분극 그룹의 이동성을 증가시켜 TPU의 쌍극자 배향 분극을 증가시킨다. 이러한 방법은 낮은 필러 함량으로 높은 유전율 증가를 기대할 수 있는데 2%의 TRG를 첨가한 TPU의 유전율은 약 1875로 순수 TPU의 유전율에 비해 약 230배 상승하였다.

4. 폴리비닐리덴 플루라이드(PVDF)

폴리비닐리덴 플루라이드(polyvinylidene fluoride, PVDF)는 높은 초유전성과, 압전성, 강유전성의 특성으로 상대적으로 높은 유전율로 인해 많은 관심을 받고 있다. 특히 PVDF의 유전율 향상에 대한 연구가 많이 진행되었다. 높은 에너지 밀도 저장과 임베디드 커패시터, 액추에이터 등 다양한 분야에서 잠재력을 가지고 있다. Yang 연구팀은 BaTiO₃ 나노섬유를 PVDF에 필러로 첨가하여 유전율을 향상시키는 연구를 진행하였다.²⁶ 전자 방사(electrospinning)된 BaTiO₃ 나노섬유는 약 800°C에서 페로브스카이트 결정(perovskite crystalline)을 형성하였고, 1H,1H,2H,2H-perfluorooctyltrimethoxysilane을 사용하여 BaTiO₃ 나노섬유의 표면에 짧은 퍼플루오로알킬(perfluoroalkyl) 사슬을 도입하였다. BaTiO₃ 나노섬유의 이러한 섬유질 구조는 PVDF의 유전 손실 및 기계적 특성을 저하시키지 않으면서 유전율을 향상시키는데 효과적이다. BaTiO₃ 나노섬유의 첨가는 PVDF 함량이 감소되고 분자 사슬의 이동을 방해하여 쌍극자 손실이 감소된다. 플루오로실란의 첨가는 BaTiO₃ 나노섬유와 PVDF 매트릭스 사이의 호환성과 계면 상호작용을 향상시켜 복합체의 공간전하 이동 및 축적을 제한시켜 유전율이 향상된다. Bai 연구팀은 탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT)를 SiC 마이크로플레이트를 이용하여 수직으로 정렬시켜 유전율을 향상시키는 연구를 진행하였다.²⁷ 일반 CNT를 폴리머 매트릭스에 첨가하면 항상 곱슬거리기 때문에 병렬 기관 마이크로 커패시터를 형성하는데 제한이 된다. 이러한 이유로 SiC 마이크로 플레이트를 사용하

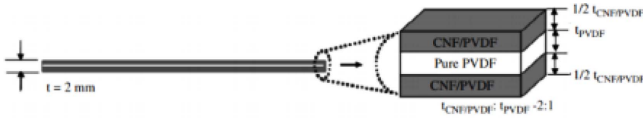


Figure 7. Schematic diagram of CNF/PVDF composite sandwich structure.²⁸

여 CNT를 수직으로 정렬하여 더 많은 마이크로 커패시터를 형성하여 유전율을 증가시켰다. 낮은 퍼콜레이션 문턱값으로 인해 1.47 vol%의 SiC-CNT를 첨가하였을 때 800이상의 유전율을 나타낸다. Zhong 등은 PVDF와 탄소 나노 섬유(carbon nanofiber, CNF)를 다층 구조로 설계함으로써 유전율은 높이고 유전 손실은 줄이는 연구를 진행하였다.²⁸ Figure 7을 보면 일반적인 나노 복합체 구조가 아닌 solution casting과 compression molding을 통한 샌드위치 구조의 CNF/PVDF 복합체를 만들었다. 양쪽의 CNF/PVDF 매트릭스 사이에 순수한 PVDF를 끼워 넣는 구조로 나노 복합체의 전도성 네트워크가 형성되는 것을 막아준다. CNF의 함량은 각각 1, 3, 5, 7, 그리고 15%이다. CNF/PVDF의 유전 특성은 15%의 필러를 첨가했을 때 유전율은 약 71로 순수한 PVDF의 유전율 보다 약 6배 향상된 성능을 보인다. 유전 손실은 필러의 함량이 증가할수록 점점 감소하여 순수한 PVDF보다 더 낮은 유전 손실을 보이는데, 이러한 결과는 지금까지 보고된 적 없는 결과이다. 전도성 네트워크의 형성이 샌드위치 구조에서 순수한 PVDF층을 가로질러 형성될 수 없으므로 누설 전류가 생기지 않아 유전손실이 낮다.

Gupta 연구팀은 TiO₂, BaTiO₃, polydopamine을 이용한 코어 쉘 구조로 PVDF의 유전성능을 향상시키는 연구를 진행하였다.²⁹ 코어 쉘 구조는 TiO₂-BaTiO₃-TiO₂@dopa로 구성 되어있다. 이러한 쉘 구조로 설계된 나노 필러는 폴리머 매트릭스를 둘러싼 인터페이스를 조정하는데 도움이 되고 코어 및 외부, TiO₂의 높은 전기전도도와 BaTiO₃ 쉘의 높은 유전율로 인해 유전특성이 증가하게 된다. 여기서 TiO₂는 커패시터 플레이트의 역할을 하고 BaTiO₃는 유전 매체 역할을 한다. Dopa층은 PVDF 매트릭스에서 나노필러의 균일한 분산을 향상시킨다. Dopa의 NH₂ 그룹과 PVDF의 C-F가 H결합을 형성하여 매트릭스와 필러의 호환성을 향상시키고 계면 분극이 향상되어 유전율이 증가한다.

Table 4. Dielectric Properties of PVDF by Filler

Base elastomer	Filler	Content	$\epsilon'@10^3\text{Hz}$	$\tan\delta@10^3\text{Hz}$
PVDF	BT nanofiber	20 vol%	21	0.06
PVDF	SiC-CNT	1.5 vol%	806	50
PVDF	CNT	15 wt%	71	0.003
PVDF	TiO ₂ @BT@TiO ₂ @dopa	10 vol%	13	0.2

Applications of Dielectric Elastomers

1. 유전 탄성체 액추에이터(DEA)

유전 탄성체의 활용이 가장 활발하게 되고 있는 분야가 바로 액추에이터이다. Table 2를 보면 액추에이터의 성능이 나와있는데 유전 탄성체는 자연의 근육과 가장 유사한 성능을 보여주고 있다.

Koo 연구팀은 튜브 스프링 액추에이터(Tube-Spring Actuator, TSA)라고 하는 인공 근육 유전 탄성체 액추에이터를 제시하였다.³¹ 이 새로운 액추에이터 구조에는 두 개의 종류가 포함되어 있는데 첫번째는 유전 탄성체로 만든 원통형 액추에이터이고 두번째는 튜브 내부에 삽입된 압축 스프링이다. 스프링이 압축된 후 원통형 액추에이터 내부에 삽입된다. 튜브 내부에 있는 압축 스프링은 반경 반향 변형을 구속하면서 축변형을 최대화시킨다. 그 결과 Figure 8과 같이 손가락을 움직일 수 있는 로봇 손에 적용되었다. 이 손은 세 개의 손가락과 가장 긴 링크로 구성되어 있으며 손바닥에는 두 개의 액추에이터가 일렬로 배열되어 있다. 이 디자인은 추가 수단 없이 최대 14%의 변형을 보여주었다.

Pei 등은 압축 스프링 주위에 사전 변형된 유전 탄성체필름을 감아 하중 지지 및 작동, 감지기능을 결합한 다기능 유전 탄성체 롤을 개발하였다.³² 다기능 유전 탄성체 롤은 3M 아크릴 엘라스토머 VHB 4910을 사용하였다. 최대 작동 굽힘 각

Table 5. Comparison of the Properties between Natural Muscles and Artificial Actuators.³⁰

Actuators	Strain	Actuation Pressure	Density	Efficiency	Speed (fast AND slow)
Natural Muscle	●	●	●	●	●
Electromagnetic	●	●	○	●	○
Piezoelectric	○	●	●	●	●
Shape Memory Alloy	●	●	●	○	○
Magnetostrictive	○	●	○	●	○
Electrostatic	●	○	●	●	●
Dielectric Elastomer	●	●	●	●	●

○ = Poor ● = Fair ● = Good

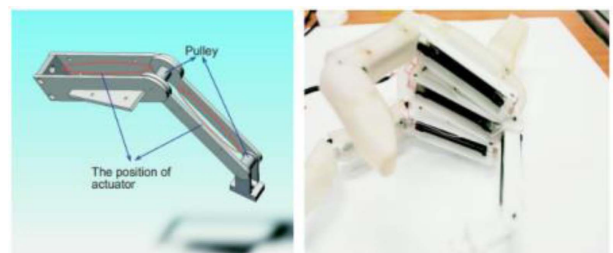


Figure 8. Multi-finger robotic hand with TSA.³¹



Figure 9. MERbot-a six-legged robot with spring rolls.³²

도 90°, 최대 측면 힘 0.7N 및 15N의 최대 축방향 힘을 가진다. 제작이 쉽고 다기능을 가지고 있으며 기계적으로 견고한 다기능 유전 탄성체 롤을 이용하여 6개의 다리를 가진 소형 로봇인 MERbot을 개발하였다(Figure 9).

Shian 등은 유전 탄성체 액추에이터를 활용하여 초점 조절이 가능한 적응형 렌즈를 연구하였다.³³ 유전 탄성체 액추에이터 렌즈는 3M VHB 4905와 VHB 4910을 사용하였다. 렌즈에 전압이 인가되면 전하 사이의 쿨롱 인력이 막에 Maxwell 응력을 생성하여 변형이 발생한다. 이에 따라 액추에이터 막의 장력과 압력이 감소하고 곡률이 변경되어 렌즈의 초점 거리가 변경된다. 이러한 설계는 빠른 응답 시간(< 1초)에서 초점 거리가 100% 이상 변경된다.

2. 유전 탄성체 제너레이터(DEG)

전력 소모가 많은 모바일 전자 장치의 배터리를 보다 편리하게 충전할 수 있고 깨끗하고 재생 가능한 에너지원 개발에 대한 관심이 늘어나면서 유전 탄성체 제너레이터를 활용한 에너지 수확에 관한 연구가 증가하고 있다. 제너레이터는 유전 탄성체에 전압을 인가하였을 때 발생하는 기계적 변형을 전기 에너지로 변환하여 에너지를 수확한다. Kornbluh 등은 일반 신발이나 부츠에 적용 가능한 제너레이터를 개발하였다.³⁴ 발 뒤꿈치의 압박은 착용자에게 신체적 부담이 되지 않기 때

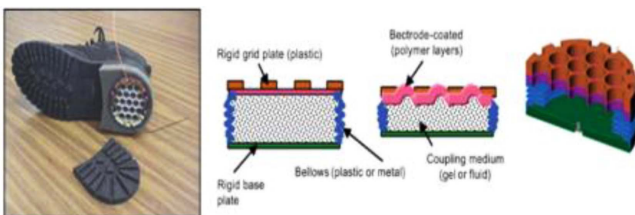


Figure 10. Heel-strike generator based on a dielectric elastomer.³⁴



Figure 11. Dielectric elastomer marine wave generator based on articulated dielectric elastomer roll transducer (top left), connected roll of generator module (bottom left) and sea tests (right).³⁵

문에 선정되었다. 이 장치는 VHB 4910 아크릴 엘라스토머 필름을 20층으로 쌓아 구성되었으며, 걸음당 0.8J 또는 걷는 동안 약 1W의 전기 출력을 생성할 수 있다(Figure 10).

Kornbluh 등은 파도의 에너지를 수확하는 연구를 진행하였다.³⁵ 파도에 의한 부표 운동에 대한 질량의 관성력이 유전 탄성체 롤의 신축과 수축을 일으켰다. 이 제너레이터는 0.1 J/g 이상의 해당 에너지 밀도를 위해 약 220g의 유전 탄성체 엘라스토머 재료를 사용하여 25J 이상의 출력을 생성하였다. 시험에 사용된 에너지 수확은 78% 효율을 보여주었고, 수확된 에너지는 12V로 낮추어 배터리를 충전하는 데 사용되었다(Figure 11).

Conclusions

본 논문에서는 유전 탄성체의 정의 및 지금까지 연구된 자료를 통해 유전 탄성체 엘라스토머의 유전율을 향상시켜 액추에이터의 변형 효율을 향상시키고 제너레이터의 에너지 수확 능력을 극대화시킬 수 있는 방법을 알아보았다. 다양한 엘라스토머 재료들 중 PDMS의 연구가 가장 활발히 진행되었는데 그 이유는 낮은 강성, 유연성, 그리고 인체에 무해하다는 장점으로 인해 유전 탄성체 분야에서 가장 활발하게 연구되어 왔다. 유전 탄성체가 실제 여러 산업에 적용되지 못한 이유는 가장 큰 단점인 높은 구동 전압 때문이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 지금까지 수많은 연구가 진행되었고 현재도 구동 전압을 줄이고 효율을 높이기 위한 연구가 활발히 진행 중이다. 현재 로봇 기술 분야의 연구가 갈수록 더욱 증가하고 우리 생활에 가까워지고 있다. 유전 탄성체 액추에이터의 인공 근육, 생체 모방 기술 분야의 잠재력은 높게 평가되고 있다. 지금까지 한정적인 에너지 자원을 대체하기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있는데, 유전 탄성체 제너레이터를 활용하여 파도, 진동, 압축 등의 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환하여 활용한다면 에너지 자원을 절약할 수 있는 훌륭한 방안이 될 수 있다고 생각한다. 유전 탄성체의 단점을 보완하고 효율을 증가시켜 다양한 분야에서 활용될 수 있도록 국내에서도 많은 연구가 이루어지기를 바란다.

References

1. A. O'Halloran, F. O'Malley, and P. McHugh, "A Review on Dielectric Elastomer Actuators, Technology, Applications, and Challenges", *J. Appl. Phys.*, **104**, 071101 (2008).
2. Y. B. Cohen, K. J. Kim, H. R. Choi, and J. D. W. Madden, "Electroactive Polymer Materials", *Smart. Mater. Struct.*, **16**, (2007).
3. L. Chang, Y. Liu, Q. Yang, L. Yu, J. Liu, Z. Zhu, P. Lu, Y. Wu, and Y. Hu, "Ionic Electroactive Polymers Used in Bionic Robots: A Review", *J. Bionic. Eng.*, **15**, 765 (2018).
4. J. Biggs, K. Danielmeier, J. Hitzbleck, J. Krause, T. Kridl, S. Nowak, E. Orselli, X. Quan, D. Schapeler, W. Sutherland, and J. Wagner, "Electroactive Polymers: Developments of and Perspectives for Dielectric Elastomers", *Angew. Chem. Int. Ed.*, **52**, 9409 (2013).
5. W. Kaal, and S. Herold, "Electroactive Polymer Actuators in Dynamic Applications". *IEEE. ASME. Trans. Mechatron.*, **16**, 24 (2011).
6. L. J. Romasanta, M. A. L. Machado, and R. Verdejo, "Increasing the Performance of Dielectric Elastomer Actuators: A Review from the Materials Perspective", *Prog. Polym. Sci.*, **51**, 188 (2015).
7. Y. Zhao, L. J. Yin, S. L. Zhong, J. W. Zha, and Z. M. Dang, "Review of Dielectric Elastomers for Actuators, Generators and Sensors", *IET. Nanodielectr.*, **3**, 99 (2020).
8. U. Gupta, L. Qin, Y. Wang, H. Godaba, and J. Zhu, "Soft Robots Based on Dielectric Elastomer Actuators: A Review", *Smart. Mater. Struct.*, **28** (2019).
9. F. Carpi, S. Bauer, and D. D. Rossi, "Stretching Dielectric Elastomer Performance", *Science*, **330**, 1759 (2010).
10. H. Shigemune, S. Sugano, J. Nishitani, M. Yamauchi, N. Hosoya, S. Hashimoto, and S. Maeda, "Dielectric Elastomer Actuators with Carbon Nanotube Electrodes Painted with a Soft Brush", *Actuators.*, **51**, 7 (2018).
11. F. Carpi, C. Salaris, and D. D. Rossi, "Folded Dielectric Elastomer Actuators", *Smart. Mater. Struct.*, **16**, S300 (2007).
12. M. W. M. Tan, G. Thangavel, and P. S. Lee, "Enhancing Dynamic Actuation Performance of Dielectric Elastomer Actuators by Tuning Viscoelastic Effects with Polar Crosslinking", *NPG. Asia. Mater.*, **11**, 62 (2019).
13. S. Jiang, L. Jin, H. Hou, and L. Zhang, "Polymer-Based Multifunctional Nanocomposites and Their Applications", pp. 201-243, Higher Education Press, 2019.
14. X. Hao, "A Review on the Dielectric Materials for High Energy-Storage Application", *J. Adv. Dielectr.*, **3**, 1330001 (2013).
15. V. O. Sherman, A. K. Tagantsev, and N. Setter, "Ferroelectric-Dielectric Tunable Composites", *J. Appl. Phys.*, **99**, 074104 (2006).
16. L. Liu, Y. Lei, Z. Zhang, J. Liu, S. Lv, and Z. Guo, "Fabrication of PDA@SiO₂@rGO/PDMS Dielectric Elastomer Composites with good Electromechanical Properties", *React. Funct. Polym.*, **154**, 104656 (2020).
17. B. Kussmaul, S. Risse, G. Kofod, R. Wache, M. Wegener, D. N. McCarthy, H. Kruger, and R. Gerhard, "Enhancement of Dielectric Permittivity and Electromechanical Response in Silicone Elastomers: Molecular Grafting of Organic Dipoles to the Macromolecular Network", *Adv. Funct. Mater.*, **21**, 4589 (2011).
18. M. R. Kashani, S. Javadi, and N. Gharavi, "Dielectric Properties of Silicone Rubber-Titanium Dioxide Composites Prepared by Dielectrophoretic Assembly of Filler Particles", *Smart. Mater. Struct.*, **19**, 035019 (2010).
19. H. Sun, X. Liu, B. Yu, Z. Feng, N. Ning, G. H. Hu, M. Tian, and L. Zhang, "Simultaneously Improved Dielectric and Mechanical Properties of Silicone Elastomer by Designing a Dual Crosslinking Network", *Polym. Chem.*, **10**, 633 (2019).
20. M. P. Sarmad, E. Chehrazi, M. Noroozi, M. Raef, M. R. Kashani, and M. A. H. Baian, "Tuning the Surface Chemistry of Graphene Oxide for Enhanced Dielectric and Actuated Performance of Silicone Rubber Composites", *ACS. Appl. Electron. Mater.*, **1**, 198 (2019).
21. L. Xiong, S. Zheng, Z. Xu, Z. Liu, W. Yang, and M. Yang, "Enhanced Performance of Porous Silicone-Based Dielectric Elastomeric Composites by Low Filler Content of Ag@SiO₂ Core-Shell Nanoparticles", *Nanocomposites*, **5**, 238 (2019).
22. R. Manna and S. K. Srivastava, "Fabrication of Functionalized Graphene Filled Carboxylated Nitrile Rubber Nanocomposites as Flexible Dielectric Materials", *Mater. Chem. Front.*, **1**, 780 (2017).
23. S. Zhu, J. Guo, and J. Zhang, "Enhancement of Mechanical Strength Associated with Interfacial Tension Between Barium Titanate and Acrylonitrile-Butadiene Rubber with Different Acrylonitrile Contents by Surface Modification", *J. Appl. Polym. Sci.*, **135**, 45936 (2018).
24. T. Chen, J. Qiu, K. Zhu, and J. Li, "Electro-Mechanical Performance of Polyurethane Dielectric Elastomer Flexible Micro-Actuator Composite Modified with Titanium Dioxide-Graphene Hybrid Fillers", *Mater. Des.*, **90**, 1069 (2016).
25. S. Liu, M. Tian, B. Yan, L. Zhang, T. Nishi, and N. Ning, "High Performance Dielectric Elastomers by Partially Reduced Graphene Oxide and Disruption of Hydrogen Bonding of Polyurethanes", *Polymer*, **56**, 375 (2015).
26. X. Zhang, Y. Ma, C. Zhao, and W. Yang, "High Dielectric Constant and Low Dielectric Loss Hybrid Nanocomposites Fabricated with Ferroelectric Polymer Matrix and BaTiO₃ Nanofibers Modified with Perfluoroalkylsilane", *Appl. Surf.*

- Sci.*, **305**, 531 (2014).
27. J. K. Yuan, W. L. Li, S. H. Yao, Y. Q. Lin, A. Sylvestre, and J. Bai, "High Dielectric Permittivity and Low Percolation Threshold in Polymer Composites Based on SiC-Carbon Nanotubes Micro/Nano Hybrid", *Appl. Phys. Lett.*, **98**, 032901 (2011).
 28. L. L. Sun, B. Li, Y. Zhao, G. Mitchell, and W. H. Zhong, "Structure-induced high dielectric constant and low loss of CNF/PVDF composites with heterogeneous CNF distribution", *Nanotechnology*, **21**, 305702 (2010).
 29. Prateek, R. Bhunia, S. Siddiqui, A. Grag, and R. K. Gupta, "Significantly Enhanced Energy Density by Tailoring the Interface in Hierarchically Structured TiO₂-BaTiO₃-TiO₂ Nanofillers in PVDF-Based Thin-Film Polymer Nanocomposites", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **11**, 14329 (2019).
 30. R. Pelrine, R. Kornbluh, Q. Pei, S. Stanford, S. Oh, and J. Eckerle, "Dielectric Elastomer Artificial Muscle Actuators: Toward Biomimetic Motion", *Proceedings of SPIE*, **4695**, 126 (2002).
 31. M. Y. Jung, N. H. Chuc, J. W. Kim, I. M. Koo, K. M. Jung, Y. K. Lee, J. D. Nam, H. R. Choi, and J. C. Koo, "Fabrication and Characterization of Linear Motion Dielectric Elastomer Actuators", *Proc. of SPIE*, **6168**, 616824-1 (2006).
 32. Q. Pei, M. Rosenthal, S. Stanford, H. Prahlad, and R. Pelrine, "Multiple-Degrees-of-Freedom Electroelastomer Roll Actuators", *Smart. Mater. Struct.*, **13**, N86 (2004).
 33. S. Shian, R. M. Diebold, and D. R. Clarke, "Tunable Lenses Using Transparent Dielectric Elastomer Actuators", *Opt. Express*, **21**, 8669 (2013).
 34. R. D. Kornbluh, R. Pelrine, H. Prahlad, A. W. Foy, B. Mccoy, S. Kim, J. Eckerle, and T. Low, "Dielectric Elastomers: Stretching the Capabilities of Energy Harvesting", *MRS. Bull.*, **37**, 246 (2012).
 35. R. D. Kornbluh, R. Pelrine, H. Prahlad, A. W. Foy, B. Mccoy, S. Kim, J. Eckerle, and T. Low, "From Boots to Buoys: Promises and Challenges of Dielectric Elastomer Energy Harvesting", *Proc. of SPIE*, **7976**, 67 (2012).