

총 설

엘라스토머의 새로운 도약

진 광 용 · 나 창 운 · 이 명 훈 · 정 광 운[†]
전북대학교 고분자-나노공학과
(2008년 5월 21일 접수, 2008년 6월 11일 수정 및 채택)

Emerging Technologies of Elastomers

Kwang Yong Jin, Changwoon Nah, Myong-Hoon Lee,
and Kwang-Un Jeong[†]

Department of Polymer-Nano Science & Technology, Chonbuk National University,
664-14, Dukjin-Dong, Dukjin-Gu, Jeonju, 561-756, Korea
(Received May 21, 2008, Revised & Accepted June 11, 2008)

요 약 : 종래의 고무는 대부분 수송 수단인 타이어의 재료로 사용되어 왔으며, 타이어 산업이 곧 고무 산업이라는 인식이 깊다. 본 고에서는 고무를 포함하는 고분자 엘라스토머의 새로운 응용 분야를 조명하고자 한다. 외부의 자극에 반응하는 엘라스토머의 탄성력을 이용하는 액추에이터(actuator), 종이접기의 기술을 이용하여 프로그램된 엘라스토머 이차원 구조를 삼차원으로 변환 시키는 오리가미(origami), 그리고 리소그래피 기술을 이용하여 제조된 엘라스토머 마이크로 렌즈 등의 최신 연구 분야에서의 고분자 엘라스토머의 활용을 알아보하고자 한다.

ABSTRACT : Up to now, most of researches and practical applications of polymeric elastomers have been focused on rubber, a type of elastomeric materials. Therefore, it has been widely accepted that rubber industry is tire industry. In this review, we would like to illuminate new emerging technologies of elastomers. Among many examples, there are actuators which can transform their mechanical shapes with respect to the surrounding environments. Paper folding (so called “origami” in Japanese) technology can be another good example. Utilizing paper folding technology, three-dimensional (3D) architectures containing multi-functions can be constructed from programmed 2D structures. Elastomer microlens can also be fabricated using lithography technologies combined with chemical reactions.

Keywords : elastomer, lithography, actuator, origami, microlens

I. 서 론

엘라스토머는 탄성고무(가황고무)에서부터 열가소성 엘라스토머, 올레핀계 열가소성 엘라스토머, 열가소성 우레탄 등을 포함하는 고분자 탄성 중합체를 총칭하는 용어로서 플라스틱 고분자나 금속 재료 등에 비해 매우 우수한 탄성력을 가지는 물질이다.

엘라스토머의 탄성력을 높이기 위해서는 다음과 같은 세가지 조건을 만족시켜야 한다. 첫째, 엘라스토머를 구성하는 고분자 사슬의 회전운동이 상온에서 자유로워야 한다. 상온보다 유리전이온도(T_g)가 충분히 낮은 상태에서 결정성이 없는 장쇄 분자는 사슬 자체의 회전 운동이나 뒤틀림 운동이 가능하여 외력에 의해 쉽게 늘어나며 무정형의 유연한 성질을 보인다. 하지만 유리전이온도가 높아지면 고분자 사슬은 상온에서 진동운동 만이 가능하다. 둘째, 고분자 사슬간의 인력이 약해야 한다.

[†] 대표저자(e-mail : kujeong@chonbuk.ac.kr)

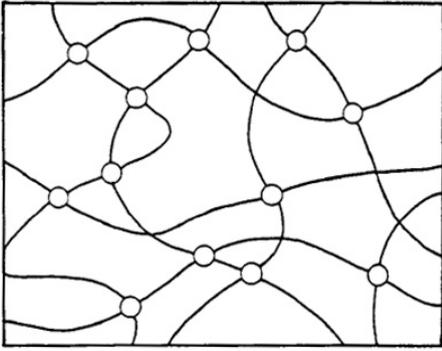


Figure 1. Schematic diagram of the characteristic molecular structure of an elastomer.¹

마지막으로 변형이 일어날 때 장쇄분자 간의 미끌림에 의한 재배열이 일어나지 않도록 화학적 또는 물리적 가교가 있어야 한다. 장쇄분자의 화학 성분 및 분자량, 그리고 가교밀도는 엘라스토머의 탄성, 경도, 강도 등의 물리적 특성을 결정하는 주요 인자이다. 이러한 장쇄분자와 가교점의 역할로 엘라스토머는 외력이 제거되면 원래의 모양과 크기로 돌아가려 하는 탄성력을 보인다 (Figure 1).¹⁴

엘라스토머는 우수한 탄성력 이외에도 가볍고 투명하며 질기고 닳지 않는 우수한 물리적 성질을 가진다. 뿐만 아니라 엘라스토머는 장쇄분자의 구성 성분과 분자량을 조절하여 유연성, 극성, 분자구조의 불규칙성 등을 자유롭게 조절하여 최적의 화학적 특성을 구현 할 수 있다. 또한 온도, 습도, 화학물질, 박테리아 등과 같은 환경적 요인에 안정하다. 예를 들어 실리콘과 같은 엘라스토머는 UV 및 오존에 대한 내성을 가지며 장시간의 고온 노출에도 우수한 열적 안정성을 가진다.^{5,6}

엘라스토머는 19세기 말부터 꾸준한 발전을 이룩하여 현재는 건축, 수송 수단, 신발, 코팅, 섬유, 접착제 및 페인트 등에 없어서는 안 되는 필수 재료이다. 상용되는 대부분의 엘라스토머는 가황 고무로써 타이어의 주 성분이기 때문에 많은 사람들이 타이어 산업이 곧 고무 산업이라는 인식을 가지고 있다. 하지만 엘라스토머가 우수한 탄성력뿐만 아니라 기계적, 화학적, 물리적으로 안정하기 때문에 최근에 액추에이터(actuator), 오리가미(origami),

전기 활성 시스템(electro-active systems), 그리고 생체 기술(bio-technology) 등의 최첨단 연구 분야에서 최적의 소재로 주목 받고 있다. 최근 연구분야에서 엘라스토머 소재의 활용과 새로운 가능성을 알아보고자 한다.

II. 프로그램된 엘라스토머 패턴 구조

엘라스토머 패턴 구조는 다양한 길이 단위에서 이차원 또는 삼차원의 규칙적인 기하학적 구조를 말한다. 이와 같은 엘라스토머 패턴 구조는 집적화 및 소형화가 중요시되는 광전자와 생체 시스템에 널리 사용될 수 있다.⁷

다양한 길이 단위에서 이차원 또는 삼차원의 엘라스토머 패턴 구조를 구현하기 위해서는 리소그래피 기술이 폭넓게 사용되고 있다. 리소그래피는 크게 광-리소그래피(photolithography)와 소프트-리소그래피(soft lithography) 기술로 구별된다.^{7,8} 광-리소그래피 기술은 감광제(photoresist) 위에 포토마스크를 놓고 노광/현상 과정을 거쳐 패턴하는 기술이다. 최근 MIT의 Thomas 연구팀에서는 여러 광원을 동시에 사용하는 광-리소그래피 기술을 이용하여 삼차원의 엘라스토머 패턴 구조를 구현하였다. 특히 엘라스토머인 poly(dimethyl siloxane) (PDMS) 등

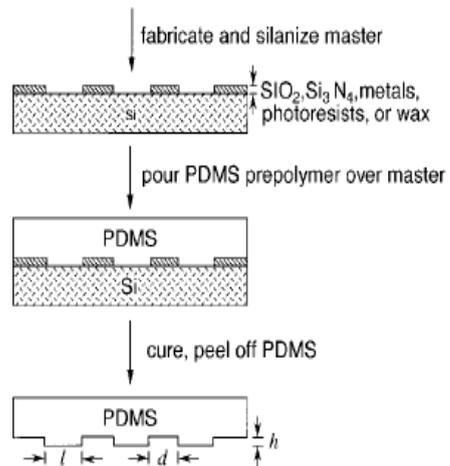


Figure 2. Schematic illustration of the procedure for casting PDMS replicas from a master having relief structures.⁸

의 물질을 사용함으로써 빛 또는 음파를 전반사할 수 있는 삼차원 photonic / phononic crystal의 제조에 성공하였다.⁷

소프트-리소그라피는 스탬프(stamp)나 몰드(mold)를 패턴 구조 제작의 도구로 사용한다 (Figure 2). 이러한 스탬프와 몰드는 주로 엘라스토머 물질로 제작된다. 패턴 구조의 소재로 엘라스토머가 사용되는 주된 이유는 엘라스토머의 우수한 기계적, 화학적, 물리적 특성뿐만 아니라 외부 환경 요소에 대한 영향이 거의 없기 때문이다. 또한 요구되는 조건과 환경에 따라 엘라스토머를 구성하는 화학

성분의 조정이 용이한 장점도 있다. 특히 PDMS 엘라스토머는 표면장력이 매우 낮기 때문에 스탬프와 몰드를 제작하는데 가장 많이 사용되고 있다. 소프트-리소그라피는 밀착 인쇄법을 이용하여 자기-조립 단층막(self-assembled monolayers, SAMs)의 미세패턴을 조립하거나 엠보싱 기술을 사용하여 미세구조를 제조하는 방법이다. microcontact printing, replica molding, microtransfer molding, micromolding in capillaries, solvent-assisted micromolding 등의 기술이 소프트-리소그라피 기술에 포함된다 (Figure 3).⁸

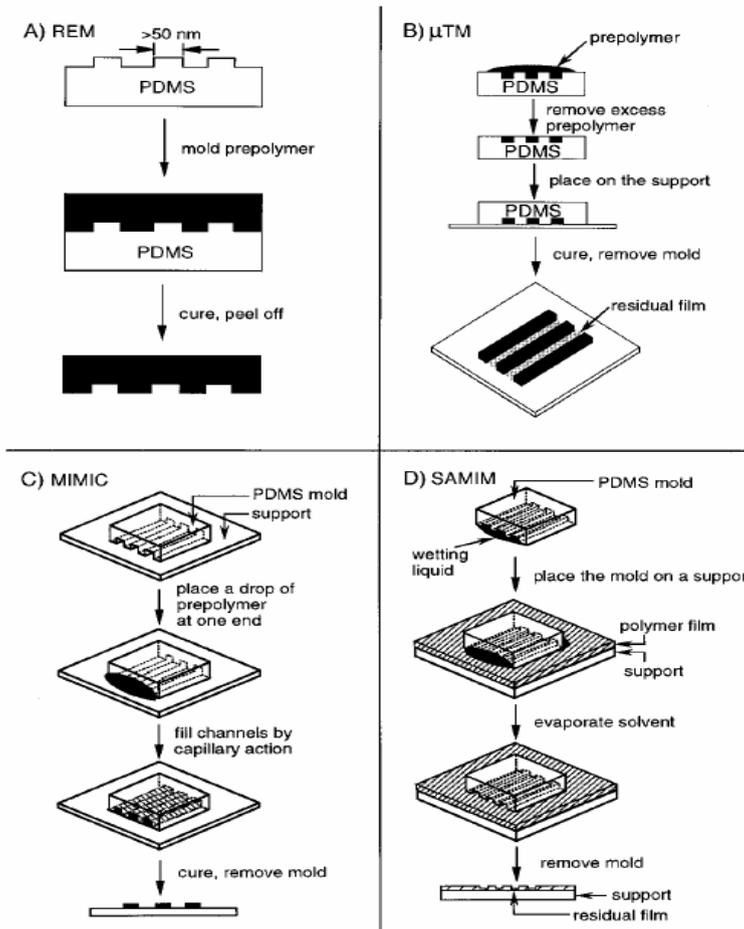


Figure 3. Schematic illustration of procedures for A) replica molding, B) microtransfer molding, C) micromolding in capillaries, and D) solvent-assisted micromolding.⁸

리소그래피 기술에 사용하는 물질로 딱딱한 무기 물질보다 유연한 엘라스토머를 사용함으로써 유연성과 전도성을 동시에 보이는 마이크로 전자 광학 패턴 구조를 구축할 수 있다. 또한 생체 물질로 인체에 무해하고 내후성을 지니는 유연한 엘라스토머를 사용함으로써 생체 적합형 패턴 구조를 구현할 수도 있다.

리소그래피 기술을 이용하여 엘라스토머 패턴 구조를 구현한 대표적인 예로 마이크로 렌즈를 들 수 있다. 이러한 마이크로 렌즈는 수 밀리미터에서 수십 마이크로미터의 다양한 길이 단위에서 제작된다. 마이크로 미터에서 규칙적인 구조를 갖는 곤충의 겹눈이 광합성을 통해 빛을 조절하듯이 마이크로 렌즈도 패턴 구조와 구성 물질에 따라 빛을 자유롭게 조절할 수 있다.⁹

마이크로 렌즈 패턴 구조를 구현하기 위해서는 용융-역류나 잉크젯 인쇄와 같은 surface-tension-driven 기술이 사용되어 왔다. 하지만 최근에 대면적에서 손쉽게 다양한 패턴구조를 구현 할 수 있는 소프트-리소그래피 기술에 관심이 집중되고 있다.^{10,11} 이러한 소프트-리소그래피 기술을 이용하여 마이크로 렌즈를 제조하기 위해서 인체에 무해하고 투명하며 가볍고 부드러운 PDMS 엘라스토머를

가장 많이 사용한다. PDMS 엘라스토머 물질을 사용함으로써 마이크로 렌즈의 미세 구조를 정밀하게 제어 할 수 있을 뿐만 아니라 열적, 화학적, 물리적 안정성을 크게 향상 시킬 수 있다 (Figure 4). 또한 엘라스토머 마이크로 렌즈 패턴 구조를 변화 시킴으로써 굴절률을 변화 시킬 수 있고, 결과적으로 빛을 자유롭게 조절할 수 있다.

다양한 길이 단위에서 이차원 또는 삼차원의 엘라스토머 패턴 구조를 구현함으로써 고집적화 및 다기능화가 요구되는 마이크로 렌즈뿐 아니라 광자, 전기, 자기, 화학 및 생물학적인 분야에서의 응용이 활발히 연구되고 있다.

Ⅲ. 엘라스토머 액추에이터

액추에이터는 입력에너지(빛, 전기, 화학 에너지)를 기계적인 변형 또는 응력으로 변환하는 에너지 변환 장치이다. 입력에너지에 따라 광감응형, 전기감응형, 화학감응형 액추에이터로 구분할 수 있다.^{12,13}

광감응형 액추에이터는 자외선, 가시광선, 적외선에 걸친 넓은 범위의 빛 에너지를 기계적 변형 에너지로 바꿔주는 에너지 변환장치이다. 광감응형 액추에이터의 재료는 빛에 의해 전자를 생성하고 생성된 전자에 의해 기계적인 변위로 변환할 수 있는 간접적인 광전변환 방식과 광화학 반응을 통한 광이성질체화 현상을 이용하여 재료의 형태를 변환하는 직접적인 광전변환 방식으로 나뉘어진다. 또한 광감응형 액추에이터는 빛을 이용하기 때문에 반사나 굴절과 같은 빛의 특성을 이용하게 되면 다양한 색상을 표현하는데 용이하며, 빠른 빛의 속도에 따라 매우 우수한 반응속도를 얻을 수 있고 빛의 파장을 조절함으로써 레이저와 같은 빛을 증폭하는 장치에 응용할 수 있다. 광감응형 액추에이터의 소재는 결정 형태의 기존 무기재료를 사용하는 것보다 고분자 엘라스토머를 사용함으로써 더욱 다양한 종류와 크기를 표현할 수 있으며 얇은 박막으로 제작이 가능하여 광감응형 액추에이터의 응용에 용이하다. 또한 우수한 광전도성 및 광굴절성에 따라 다양한 성질의 빛을 정밀하게 조

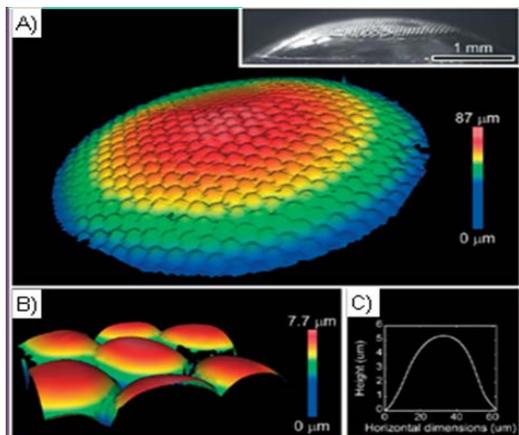


Figure 4. Structure of the microlens. A) optical profile of the microlens structures on a PDMS hemisphere, B) magnified optical profile of microlens surface, and C) surface profile of a single microlens measured using a stylus profiler.¹¹

절함으로써 향후 정보 산업에서 정보처리의 고속화 및 고밀도화 실현을 위한 광감응형 액추에이터의 제작이 가능할 것으로 기대된다.

전기감응형 액추에이터는 전압 인가와 극성 교체에 의한 구조 변화로 발생하는 신축 현상을 응용한 에너지 변환 장치이다. 전기감응형 액추에이터의 재료로는 가볍고 전기적 제어가 가능하며 낮은 소비전력과 높은 수준의 유연성이 요구된다. 또한 마이크로 전기감응형 액추에이터 제작을 위해 마이크로 단위에서의 우수한 가공성이 요구된다. 이뿐만 아니라 전기 에너지의 정밀한 조절을 필요로 하기 때문에 우수한 도전성, 초전도성, 유전성을 지니는 소재가 필요하다. 엘라스토머 소재는 우수한 유연성, 가공성 및 유전성과 전도성을 지니기

때문에 전기감응형 액추에이터로 많이 사용된다.¹⁴

화학감응형 액추에이터는 화학적 변화에 따라 발생하는 에너지 변화를 기계적 변형으로 변환할 수 있는 에너지 변환 장치로써 주로 산화-환원 반응, 팽윤 작용, 이온, pH 등과 같은 화학적 변화에 따라 생성된 에너지 변화를 사용한다. 화학감응형 액추에이터의 재료로 화학적 변화에 민감하게 반응하고 특별한 화학적 변화에 선택적으로 반응할 수 있는 성질이 매우 중요하며 용도에 따라 부가적으로 유연성, 내후성, 내마모성, 압전성 등이 요구된다. 엘라스토머 소재는 온도, 습도, 화학물질 등과 같은 환경적 요인에 안정하므로 다양한 화학적 변화에 대해 선택적인 반응이 가능하기 때문에 우수한 성질의 화학감응형 액추에이터 제작이 가

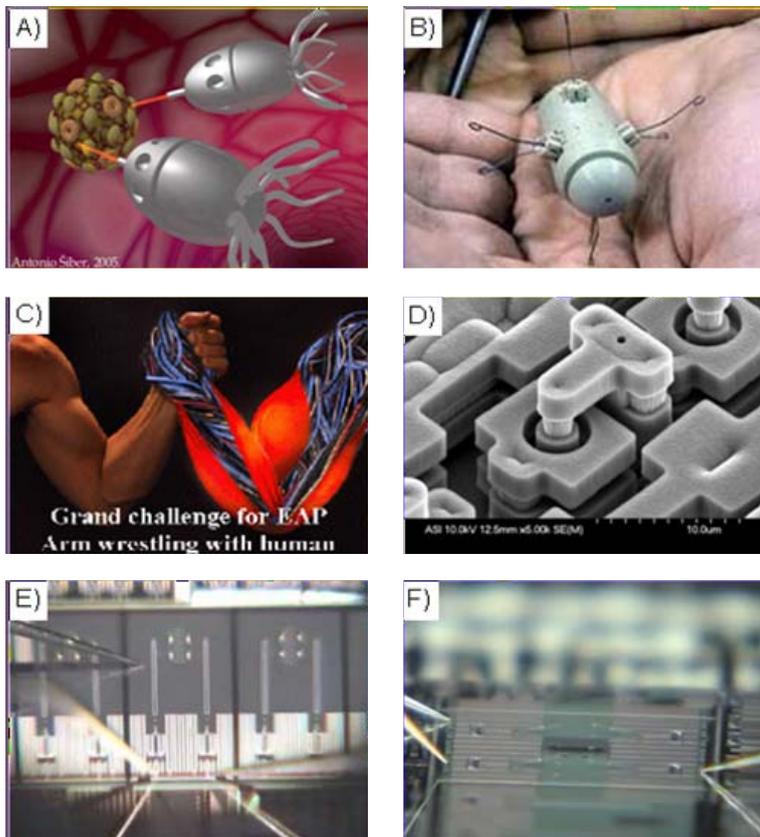


Figure 5. Applications of elastomeric actuators for A) medical applications, B) micro-robotics, C) artificial muscles, D) MEMS, E) tunable laser front, and F) wiggle.¹⁷⁻²⁰

능하다.¹⁵

광감응형, 전기감응형, 화학감응형 액추에이터는 공학뿐만 아니라 생물학 분야에서도 널리 응용되고 있다. 공학분야에서 전기-활성 고분자(electro-active polymers), 마이크로 로봇(micro robot), 압전성 액추에이터(piezoelectric actuators), 그리고 공기압 액추에이터(pneumatic actuators) 등과 같은 장치에 사용되며, 생물학적 분야에서는 인체의 호르몬이나 신체 분비물에 의해 반응하여 기계적 변환을 일으키는 인공 근육, 인공 근육 섬유, 인공 피부, 손가락 구조체, 촉각(haptic), 인간형 로봇 등에 사용되고 있다 (Figure 5).¹⁶

액추에이터 기술은 응용분야에서 고정밀화 및 고밀도화를 위해 외부 변수에 대해 민감하게 반응할 수 있는 특성이 요구될 뿐만 아니라 가볍고 유연하며 콤팩트 구조가 쉬워야 하는 특성이 필요하다. 엘라스토머 소재는 열, 광, 전기, 자기 에너지에 대해 우수한 화학, 물리학적 반응성을 가지기 때문에 외부 변수에 반응하지 않는 물질과 함께 액추에이터 시스템에 사용시 외부 변수와의 반응성 차이에 의한 정밀한 움직임 표현할 수 있다. 또한 탄성력, 경도, 인장강도, 그리고 용융 흐름성 등의 특성이 우수하기 때문에 액추에이터 최적의 소재로 주목 받고 있다.²¹

IV. 엘라스토머 오리가미

오리가미(ori는 접기, kami는 종이를 의미하는 합성어) 기술은 종이를 접어 갖가지 모양을 제작하는 고대 일본의 종이 접기 예술에서 유래했다. 이 기술의 목표는 접착이나 절삭을 사용하지 않고 기하학적으로 주름 패턴을 사용하여 삼차원 구조물을 얻는 것이다 (Figure 6).²²

이러한 종이 접기의 원리를 이용하여 공학자들은 자동차 부품에서부터 우주공학에 이르기까지 다양한 기계 설계에 이용하려고 하고 있다. 미생물학자들은 단백질의 구조가 종이 접기처럼 접혀 있다는 점에 주목하고 있으며 세포막, 곤충의 날개와 같은 자연계의 물질들에서 관찰한 오리가미 기술을 실질적인 공학 및 의학 분야에 응용하기 위해

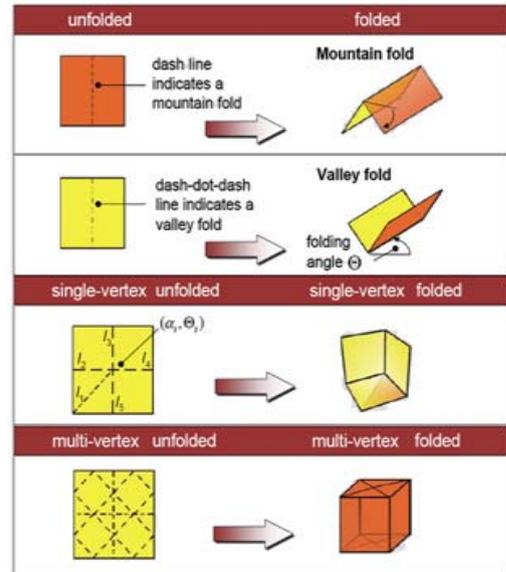


Figure 6. Schematic illustration of origami technology.²²

서 폭넓은 연구와 개발이 진행되고 있다.

오리가미 기술은 종이뿐 아니라 모든 종류의 박막 형태의 물질이 사용 가능한데, 사용하는 재료에 따라 최종 형태를 변형할 수 있는 장점을 가진다. 예를 들어 젖은 종이를 접어서 건조를 시키면 단단하고 견고한 모델이 완성되며, 양면 색종이를 사용하면 색이 변화하는 모델에 효과적으로 사용할 수 있다.²³ 엘라스토머 소재를 사용하게 되면 종이에 비해 보다 우수한 가공성과 외부 자극에 대한 우수한 반응성을 가지기 때문에 보다 정밀한 삼차원 구조의 제작이 가능하다. 또한 완성된 구조에서 다양한 색상을 표현할 수 있으며, 삼차원 구조내의 굴절률의 차이에 따른 광굴절성 삼차원 광학 장비에 사용될 수도 있다.

완성된 삼차원 구조에서 엘라스토머는 본연의 특성을 유지하기 때문에 우수한 탄성 및 기계적, 물리적 특성의 삼차원 오리가미 구조를 얻을 수 있다. 또한 이차원 구조로부터 삼차원 구조로의 변환이 다양하고 쉽게 실현 가능하며 고집적화 및 다기능성의 고차원 패턴 구조제작에 용이하게 쓰일 수 있다. 이와 같이 엘라스토머는 삼차원 구조 제어 및 조립을 위한 오리가미 기술에 가장 적합

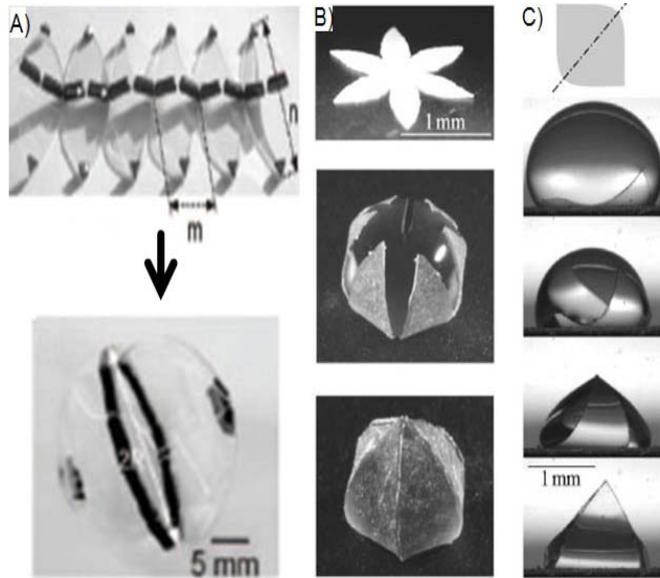


Figure 7. Self assembly system applied origami, A) self assembled sphere via magnet, B) self assembled sphere via droplet, and C) self assembled triangle via droplet.^{24,25}

한 최적의 소재라 할 수 있으며 응용 가능성을 인정받아 꾸준한 연구가 진행되고 있다.

자력 자기-조립 오리가미, 모세관 오리가미, 그리고 주름패턴 자기-조립 오리가미 등은 최근에 꾸준히 연구되고 있는 기술로 액추에이터 변환 시스템과 오리가미 기술을 동시에 활용한 구조 설계 및 제작의 좋은 예이다. 자력 자기-조립 오리가미는 프로그램된 엘라스토머 시트의 내부에 전자석을 이용함으로써 전기를 통해 주면 접기 과정을 거쳐 자발적으로 조립되는 형태이다. 모세관 오리가미는 PDMS 필름에 작은 물방울을 떨어 뜨려 증발과정을 거치면 PDMS 필름의 프로그램된 형태에 따라 물방울을 중심으로 자발적인 조립을 일으킨다. 이는 미세구조에서 탄성 엘라스토머 필름의 친수성과 물의 표면장력을 활용한 방법이다. 주름패턴 자기-조립 오리가미는 인공적으로 미우라-오리(miura-ori) 패턴을 생성하여 하나의 구조에서 접기와 펼치기를 동시에 발생시켜 산이나 계곡과 같은 구조를 기하학적이고 탄성적으로 주기 배열을 시켜 구조의 안정성이나 구조변화에 따른 물리적 특성을 높이는 방법이다. 이러한 종류의 오리가미들은 미

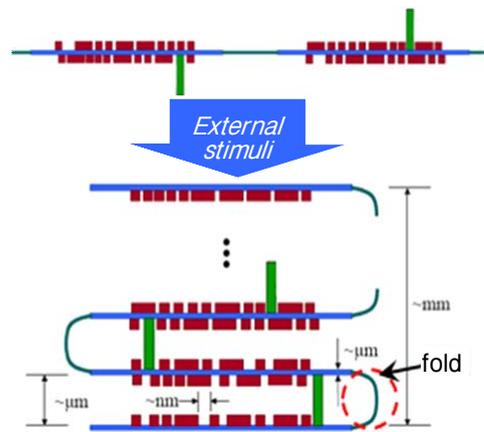


Figure 8. Microfabrication of 2D integrated circuit coupled elastomeric materials.²²

세구조에서의 정밀한 구조 설계를 통해 간단한 이차원 패턴 구조로부터 복잡한 삼차원 기하학적 구조를 조립할 수 있다 (Figure 7).²⁴⁻²⁷

다양한 길이 단위에서 이차원 또는 삼차원의 엘라스토머 패턴 구조를 구현하기 위한 리소그라피 기술, 엘라스토머의 탄성력을 이용해 외부의 자극

에 반응하는 액추에이터 기술, 그리고 종이접기 기술을 이용하여 프로그램된 엘라스토머 이차원 구조를 삼차원으로 변환시키는 오리가미 기술을 함께 사용하게 되면 외부 자극에 따른 에너지 변환 시스템과 고차원 패턴 구조가 동시에 구현되어 고집적화 및 고정밀화가 가능한 복합 디바이스 제작이 가능하리라 생각된다. 그 한 예로 마이크로 전자공학에서는 간단하게 이차원으로 설계된 집적회로의 끝과 끝을 화학적 반응성이 높은 엘라스토머로 접착하여 외부 자극에서 화학반응을 거치면 삼차원 엘라스토머 고집적 회로를 제조할 수 있을 것이다 (Figure 8).²²

V. 결 론

일상의 여러 분야에서 유용하게 쓰이고 있는 엘라스토머 소재는 우수한 기계적, 화학적, 물리적 성질을 보인다. 특히 엘라스토머의 우수한 탄성력 때문에, 기존 응용분야뿐만 아니라 외부자극에 의한 물리적 변형을 일으키는 액추에이터, 간단하게 프로그램된 이차원 패턴 구조를 갖는 엘라스토머 소재를 종이접기 함으로써 복잡한 삼차원 구조를 구현 할 수 있는 오리가미 기술, 그리고 마이크로 단위에서 특정 패턴 구조의 반복을 통해 광학적 효과를 발생시킬 수 있는 마이크로 렌즈와 같은 새로운 응용분야에서 엘라스토머는 최적의 소재로 평가받고 있다. 이제 엘라스토머는 새로운 세계로의 도약을 꿈꾸고 있는 것이다.

감사의 글

본 논문은 학술진흥재단의 신진교수 연구지원 (KRF-2007-331-D00119) 사업에 의해 수행되었으며 부분적으로는 전북대학교 신입교수 지원사업에 의해 지원되었다.

참 고 문 헌

1. M. T. Payne and C. P. Rader, "Elastomer Technology Handbook", ed. by N. P. Cheremisinoff, chap. 14, p.557, CRC Press, Tokyo, 1993.
2. J. E. Mark, B. Erman, and F. R. Eirich, "Science and Technology of Rubber", 2nd Ed., Academic Press, New York, 1994.
3. A. N. Gent and M. Shen, "Science and Technology of Rubber", ed. By F. R. Eirich, Academic Press, New York, 1978.
4. W. P. Mark, N. M. Bikales, C. G. Overberger, G. Menges, and J. I. Kroschwitz, "Encyclopedia of Polymer Science and Engineering", Vol. 5, John Wiley & Sons, Inc, USA, 1985.
5. R. B. Seymour, *Polym. News*, **17**, 176 (1992).
6. V. L. Colvin, "From opals to optics. Colloidal photonic crystals", *MRS Bull.*, **26**, 637 (2001)
7. J.-H. Jang, C. K. Ullal, M. Maldovan, T. Gorishnyy, S. Kooi, C. Y. Koh, and E. L. Thomas, "3D Micro- and Nanostructures via Interference Lithography", *Adv. Funct. Mater.*, **17**, 3027-3041 (2007).
8. Y. Xia and G. M. Whitesides, "Replica molding with a polysiloxane mold provides this patterned microstructure", *Angew. Chem. Int. Ed.*, **37**, 550 (1998).
9. T. Ikeda, J. Mamiya, and Y. Yu, "Photomechanics of Liquid-Crystalline Elastomers and Other Polymers", *Angew. Chem. Int. Ed.*, **46**, 506 (2007).
10. E. P. Chan and A. J. Crosby, "Fabricating Microlens Arrays by Surface Wrinkling", *Adv. Mater.*, **18**, 3238-3242 (2006).
11. R. F. Stevens and N. Davies, "Lens arrays and photography", *The Journal of Photographic Science*, **39**, 199-208 (1991).
12. N. F. Borrelli, "Microoptics technology: fabrication and applications of lens arrays and devices", Marcel Dekker, New York, 1999.
13. K. Uchino, "Electrostrictive actuators: materials and applications", *Am. Ceram. Doc. Bull.*, **65**, 643-652 (1986).
14. T. Huang, H. Xu, K. Jiao, L. Zhu, H. R. Brown, and H. Wang, "A Novel Hydrogel with High Mechanical Strength: A Macromolecular Microsphere Composite Hydrogel", *Adv. Mater.*, **19**, 1622-1626 (2007).
15. J. Guan, H. He, D. J. Hansford, and L. J. Lee, "Self-Folding of Three-Dimensional Hydrogel Mic-

- rostructures”, *J. Phys. Chem. B*, **109**, 23134 (2005).
16. M.-H. Li and P. Keller, “Artificial muscles based on liquid crystal elastomers”, *Phil. Trans. R. Soc. A*, **364**, 2763 (2006).
 17. <http://filologanoga.blogspot.com/2007/01/vizualizacija.html>
 18. http://www.repubblica.it/2004/j/sezioni/scienza_e_tecnologia/robotmedico/robotmedico/robotmedico.html
 19. <http://www.jpl.nasa.gov/news/features-print.cfm?feature=492>
 20. <http://www.memx.com/products.htm>
 21. Y. Yu and T. Ikeda, “Soft Actuators Based on Liquid-Crystalline Elastomers”, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **45**, 5416-5418 (2006).
 22. Tilman Buchner, Dr. Dissertation, *MIT* (2003).
 23. S. Kinoshita, S. Yoshioka, and K. Kawagoe, “Mechanisms of structural colour in the morpho butterfly : cooperation of regularity and irregularity in an iridescent scale”, *Proc. R. Soc. Lond. B*, **269**, 1417-1421 (2002).
 24. M. Boncheva, S. A. Andreev, L. Mahadevan, A. Winkleman, D. R. Reichman, M. G. Prentiss, S. Whitesides, and G. M. Whitesides, “Magnetic self-assembly of three-dimensional surfaces from planar sheets”, *PNAS*, **102**, 3924-2929 (2005).
 25. C. Py, P. Reverdy, L. Doppler, J. Bico, B. Roman, and C. N. Baroud, “Capillary Origami : Spontaneous Wrapping of a Droplet with an Elastic Sheet”, *Physical Review Letters*, **98**, 156103 (2007).
 26. L. Mahadevan and S. Rica, “Self-Organized Origami”, *Science*, **307**, 1740 (2005).
 27. G. T. Pickett, “Self-folding origami membranes”, *EPL*, **78**, 48003 (2007).