



광 응답형 스마트 고분자 소재

유종수 · 이성윤 · 나희영 · 안태정* · 김현경†

조선대학교 응용화학소재공학과, *조선대학교 광기술공학과
접수일(2012년 10월 23일), 수정일(2012년 11월 2일), 게재확정일(2012년 11월 12일)

Photo-responsive Smart Polymer Materials

Jong-Su Yu, Seong-Yun Lee, Hee-Yeong Na, Tae-Jung Ahn*, and Hyun-Kyoung Kim†

Department of Polymer Science and Engineering, Chosun University,

375 Seosuk-Dong, Dong-Gu, Gwangju 501-759 Republic Korea

**Department of Photonic Engineering, Chosun University,*

375 Seosuk-Dong, Dong-Gu, Gwangju 501-759 Republic Korea

(Received October 23, 2012, Revised November 2, 2012, Accepted November 12, 2012)

요약 : 최근 들어 광, 온도, pH, 전기, 자성, 압력 등과 같은 외부 환경의 작은 변화에도 반응하여 모양/부피가 변하거나 기계적, 광학적, 전기적, 화학적 특성 등이 가역적으로 바뀌는 스마트 소재에 대한 관심이 높아지고 있다. 이러한 스마트 소재들 중 광조사에 의해 소재의 다양한 특성을 가역적으로 제어할 수 있는 광응답 스마트 소재가 많은 관심을 받고 있다. 본 논문에서는 광에너지를 받아 기계적 에너지로 바로 전환되어 인공근육, 모터 등과 같은 액츄에이터 기능을 할 수 있는 광구동형 스마트 고분자 소재들에 대해 소개하고자 한다. 특히, 광구동형 스마트 고분자 소재 중에서도 마이크로와 매크로 스케일 변형이 가능한 아조벤젠을 함유한 비결정성 고분자, 액정 고분자, 자기 조립형 초분자에 대한 다양한 연구들에 대해 설명하고자 한다.

ABSTRACT : Control of shape/volume, mechanical, optical, electrical, and chemical switching of materials by external stimuli such as light, temperature, pH, electric field, and pressure has attracted great attention. Among these materials, photo-responsive materials containing photochromic compounds such as azobenzene, spiropyran, and cinnamic acid groups have been the subject of intense interest in recent years. In this review, we describe the recent progress in the area of azobenzene containing polymer materials that can convert light energy into mechanical energy directly. Especially we focus our attention on light-driven actuators such as artificial muscle, motor, and valve. We summarize the photomechanical effects in liquid crystal elastomer, amorphous polymer, monolayer, and supramolecules containing azobenzene, respectively.

Keywords : azobenzene, photo-responsive, photoisomerization, actuator, liquid crystal

I. 서 론

최근 전세계적으로 가장 흔하게 접할 수 있는 단어 중 하나가 “스마트”라 해도 과언이 아닐 것이다. 인간의 편의성 추구에 대한 욕구가 날로 증가함에 따라 각종 전기·전자 기기, 자동차, 디스플레이, 의료 산업 분야에서는 우수한 성능과 기능을 갖는 첨단 기기 및 소재에 대한 필요성이 급격하게 높아지고 있다. 이와 같은 시장의 요구에 따라 소재 분야에서도 스마트 소재에 대한 연구가 최근 주목을 받고 있다. 이는 기존의 재료들이 단지 주어진 환경 변화에 수동적 대응을 한다는 한계를 넘어 스마트 소재는 동·식물처럼 주위 환경변화에 반응 한다는 점에서 급격히 변화되고 있는 산업시장 요구를 만족시킬

수 있을 것으로 기대되고 있다.

스마트 소재란 과거 지능형 소재와 유사한 개념으로 광, 온도, pH, 전기, 자성, 압력 등과 같은 외부 환경의 작은 변화에도 반응하여 모양/부피가 변하거나 기계적, 광학적, 전기적, 화학적 특성 등이 가역적으로 바뀌는 소재를 말한다. 스마트 소재는 3대 소재로 알려진 금속, 세라믹, 고분자 분야에서 고유 응용 영역에 맞게 각각 다양한 연구가 진행 되고 있으며 일부 스마트 소재는 이미 우리 일상생활에 적용되어 사용되고 있다. 현재까지 가장 잘 알려진 대표적인 스마트 소재로는 압력에 의해 전압이 생기는 piezoelectric 소재, 기계적 압력에 의해 자성이 변해 형상이 변화되는 magnetostrictive 소재, 온도나 압력 변화에 의해 기억된 형태로 되돌아 가는 형상기억합금, 전기, 광학, 온도 변화에 따라 컬러가 변화되는 소재 등이 있으며 이들 중에 형상기억합금, 전기적 변형, 압전 소재가 산업분

†Corresponding Author. E-mail: hkkim@chosun.ac.kr

야에서 가장 보편적으로 많이 응용되고 있다.

이러한 다양한 스마트 소재 중에 최근에는 빛의 자극으로 소재의 다양한 특성을 가역적으로 제어하는 광응답 소재가 많은 관심을 받고 있다. 아조벤젠, spiropyran, cinnamic acid 등과 같은 광발색성(photochromic) 분자들이 대표적으로 알려진 광응답 재료들이다. 이와 같은 광발색성 분자들은 특정 파장에 따라 분자의 구조가 바뀌는 광이성화 특성을 갖고 있으며 이로 인해 재료의 물리·화학적 특성이 변화된다.

이와 같은 광응답형 스마트 소재는 인공근육, 나노/마이크로 벨브와 모터 등과 같은 액츄에이터 응용 분야에 적용될 수 있다. 특히, 고분자를 이용한 광응답형 소재는 가공성이 우수하고 가볍고 유연하며 동시에 다양한 형태의 모양을 자유롭게 제조할 수 있다는 큰 장점을 갖고 있어 최근 이에 대한 많은 연구사례들이 발표되고 있다.¹⁻¹⁷

본 논문에서는 광에너지를 받아 기계적 에너지로 전환하여 인공근육과 같은 액츄에이터 기능을 할 수 있는 광구동형 스마트 고분자 소재들에 대해 주로 소개하고자 한다. 특히, 광구동형 스마트 고분자 소재 중에서도 마이크로와 매크로 스케일 변형이 가능한 아조벤젠을 함유한 비결정성 고분자, 액정 고분자, 자기 조립형 초분자들에 대한 다양한 연구들에 대해 설명하고자 한다.

II. 본 론

1. 아조벤젠 (Azobenzene)

아조벤젠은 질소-질소 이중결합에 의해 연결된 두 개의 페닐 고리로 이루어진 대표적인 방향족 아조화합물이다(Figure 1(a)). 일반적으로 아조벤젠의 *trans*-isomer는 자외선 영역(~320 nm)에서 $\pi-\pi^*$ transition에 의한 강한 흡수를 보이고 가시광선(~450 nm) 영역에서 $n-\pi^*$ transition에 의한 약한 흡수를 나타내는 것으로 알려져 있다(Figure 1(b)). 안정한 구조인 *trans*-isomer는 자외선(330~380 nm)를 조사하면 불안정한 구조인 *cis*-isomer로 바뀌고 가시광선(>420 nm)를 조사하면 *cis*-isomer는 *trans*-isomer로 다시 가역반응을 일으키는 광이성화 현상이 일어난다. 이러한 아조벤젠의 광이성화 현상은 구조에서도 큰 변화를 일으켜 분자내 para-carbon 원소 사이의 거리가 *trans*-isomer일 때는 0.90 nm, *cis*-isomer일 때는 0.55 nm로 감소한다. 이와 같은 분자간의 거리 감소와 함께 아조벤젠은 쌍극자 모멘트, 굴절률 및 유전상수 등과 같은 물리·화학적 성질 또한 변하게 된다.

2. 매크로 스케일 변형이 가능한 Azo-LC(Liquid Crystal)고분자

액정 엘라스토머(Liquid crystal elastomer, LCE)는 고분자 네

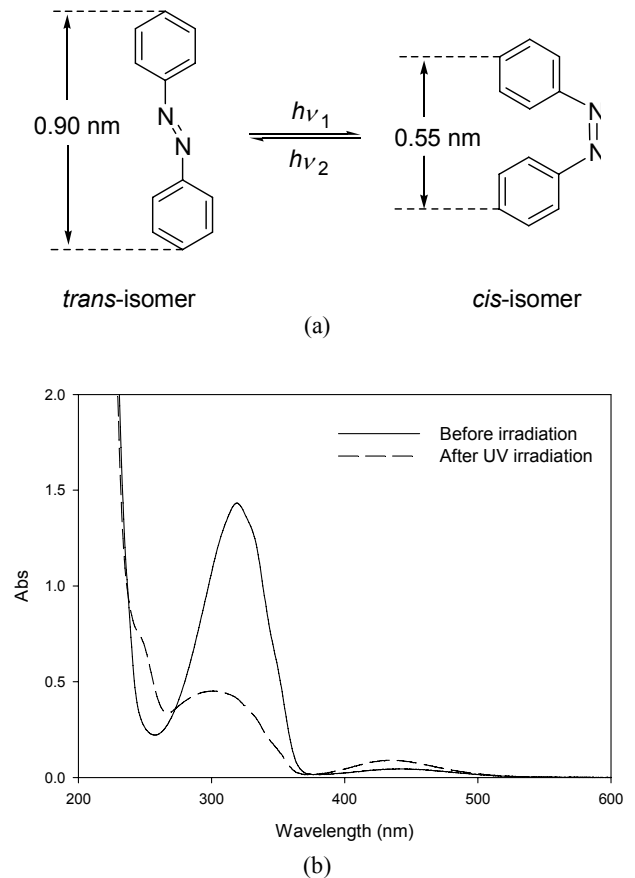


Figure 1. (a) The product structures for photoisomerization reaction of azobenzene ($h\nu_1 = 330\sim 380$ nm; $h\nu_2 = >420$ nm). (b) UV-visible absorption spectra of azobenzene.

트워크의 가역적 성질과 액정의 이방성을 조합한 재료로서 최근 여러 응용 분야에서 주목을 받고 있다. 특히 균일한 배향성을 갖는 LCE는 메소겐(mesogen)의 배향 에너지와 고분자 네트워크의 탄성 결합에 의해 가역적인 형상 변화를 나타내는 특성을 가지고 있어 인공 근육이나 액츄에이터 등에 응용이 제안되고 있다. 현재까지는 온도, 전기장에 의해 재료의 면적 혹은 부피가 변화되는 소재가 인공근육과 액츄에이터 분야에 가장 많이 응용되어 왔으나 최근 들어 광에너지를 기계적 에너지로 바로 변환할 수 있는 광구동형 LCE에 대한 연구가 점점 늘어나고 있는 추세이다.

지금까지 광구동형 액정 LCE에 대해 가장 활발히 연구를 진행하고 있는 팀은 Ikeda연구팀이다. 2003년 advanced materials에 자외선과 가시광선의 조사에 감응하여 bending과 unbending 변형을 일으키는 아조벤젠을 함유한 LCE를 가장 처음 발표한 이래 현재까지 수십 편의 연구결과들을 발표하고 있다(Figure 2).¹⁴⁻¹⁹ Ikeda 연구팀은 아조벤젠을 함유한 LC 단량체를 합성하고 열중합 또는 광중합을 통해 배향성을 갖는 LCE를 제작하였다. 연구 초기에는 광조사에 따른 가역적인 bending/unbending 변형을 위해 유리전이 온도(80 °C) 이상의

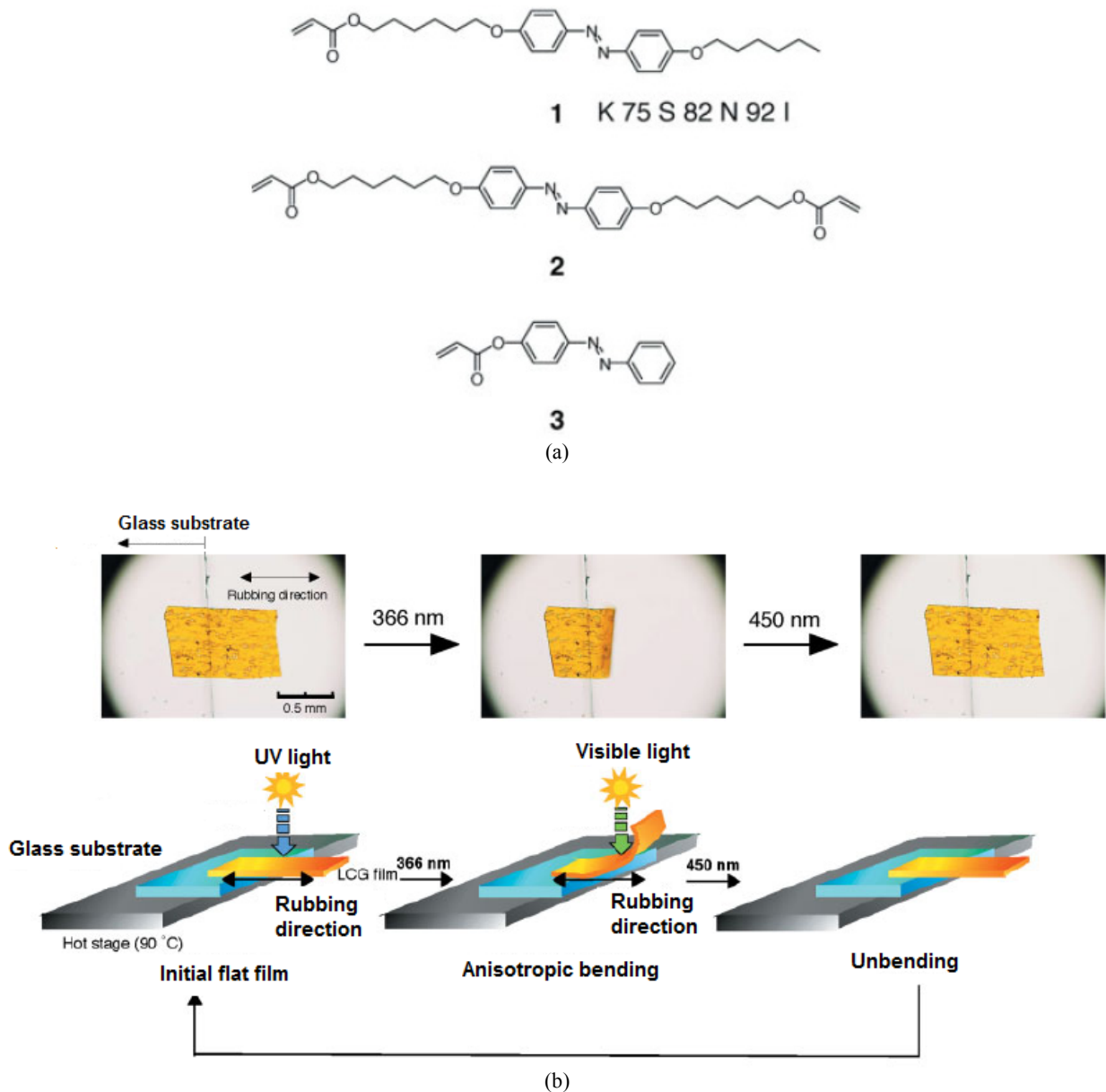


Figure 2. (a) Structures of azobenzene LC monomers. (b) Bending and unbending behavior of the LCN film at 90 °C in air.¹⁴

온도 분위기나 용매에 LCE를 함침 시키는 추가적인 공정이 필요하였으나 현재는 재료에 대한 지속적인 연구를 통해 상온에서도 변형이 가능한 LCE를 제조하였다.¹⁴ 이와 같은 자외선 조사에 따른 bending 현상 원인은 자외선 조사 시 LCE의 표면과 내부에 *cis-isomer*가 불균형적인 분포로 형성되었기 때문으로 해석되었다. 즉 자외선 흡수가 LCE 표면에서 대부분 일어나기 때문에 LCE 표면에는 상대적으로 많은 *cis-isomer*가 형성되고 LCE 내부에는 다량의 *trans-isomer*가 여전히 남아 있기 때문이다. 이와 같은 표면과 내부의 불균형적인 *trans/cis-isomer*의 분포는 결과적으로 광에너지를 기계적 에너지로 바로 변환되는 가역적인 bending/unbending 변형을 유도할 수

있었다. 이 후 Ikeda 연구팀은 지속적인 연구를 통해 등방성 LCE를 제조하고 linear polarizer를 이용하여 광의 조사 방향을 자유롭게 조절하고 광 조사 방향에 따라 bending/unbending 변형이 일어나는 LCE를 개발하여 소개하기도 하였다(Figure 3).¹⁵ 또한 LCE 필름과 polyethylene 필름을 열로 압축시켜 라미네이팅 필름을 제조하고 플라스틱 모터에 라미네이팅 필름을 벨트로 장착한 다음 자외선과 가시광선의 조사에 따라 플라스틱 모터가 회전하는 연구결과를 발표하였다(Figure 4).¹⁸ 또한 동일 라미네이팅 필름을 이용하여 광조사에 의해 자벌레 (Inchworm walk)와 같은 3 차원적인 광구동 운동을 소개하였다(Figure 5).¹⁹

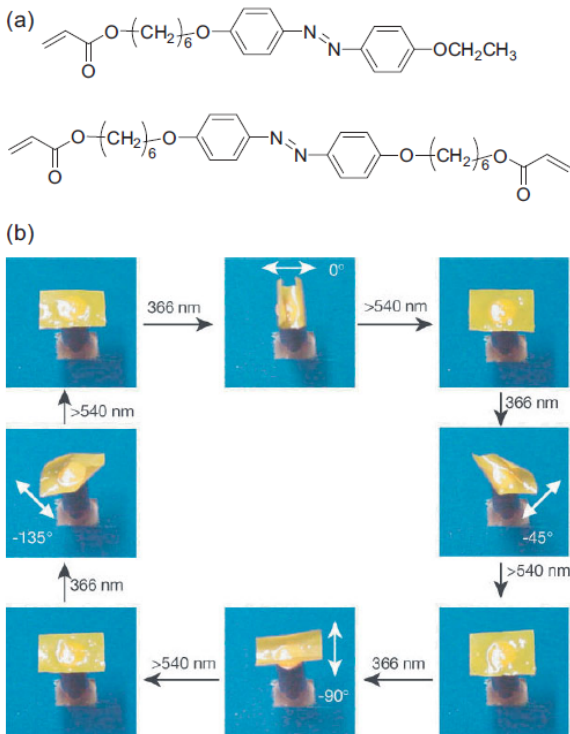
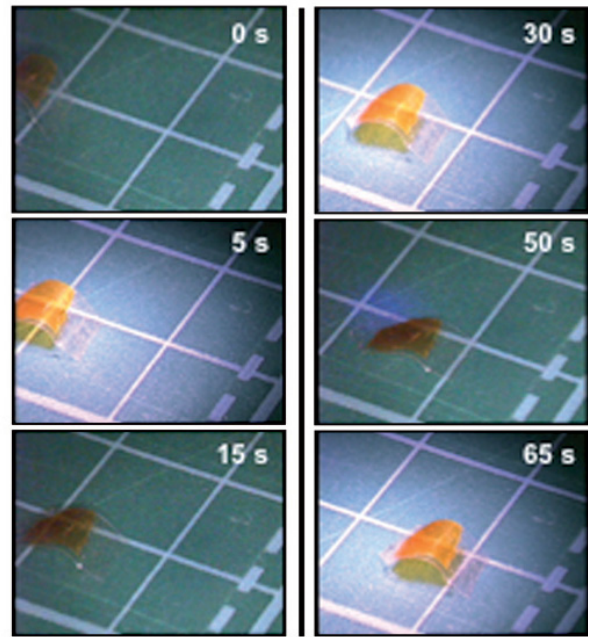


Figure 3. (a) Chemical structures of the LC monomers. (b) Precise control of the bending direction of a film by linearly polarized light.¹⁵



(a)

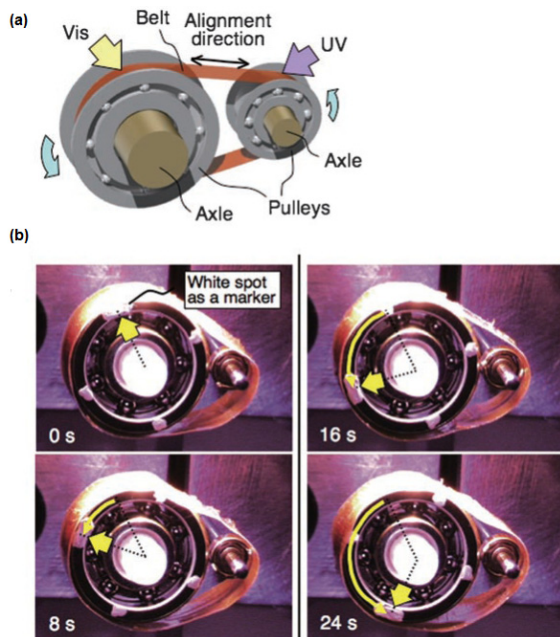
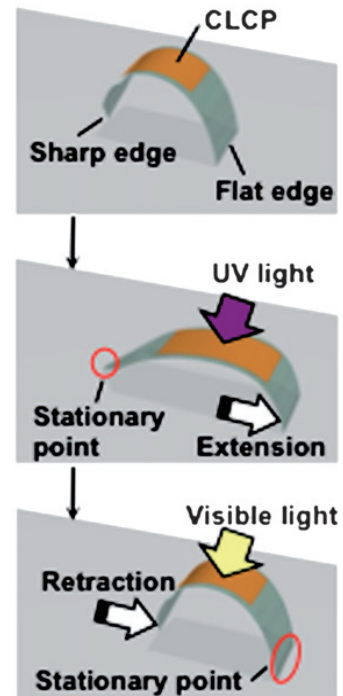


Figure 4. A light-driven plastic motor with the LCE laminated film. (a) Schematic illustration of a light-driven plastic motor system, showing the relationship between light irradiation positions and a rotation direction. (b) Series of photographs showing time profiles of the rotation of the light-driven plastic motor with the LCE laminated film induced by simultaneous irradiation with UV and visible light at room temperature.¹⁸



(b)

Figure 5. (a) Series of photographs showing time profiles of the photoinduced inchworm walk of the CLCP laminated film by alternate irradiation with UV and visible light at room temperature.¹⁹

Bending 형태의 광구동 연구는 Ikeda 연구팀 이외에도 몇몇 그룹들에 의해 발표되었다. 먼저 Broer 연구팀은 경화 밀도가 높고 자외선 조사에 의해 변형 정도가 매우 큰 bending 변형,

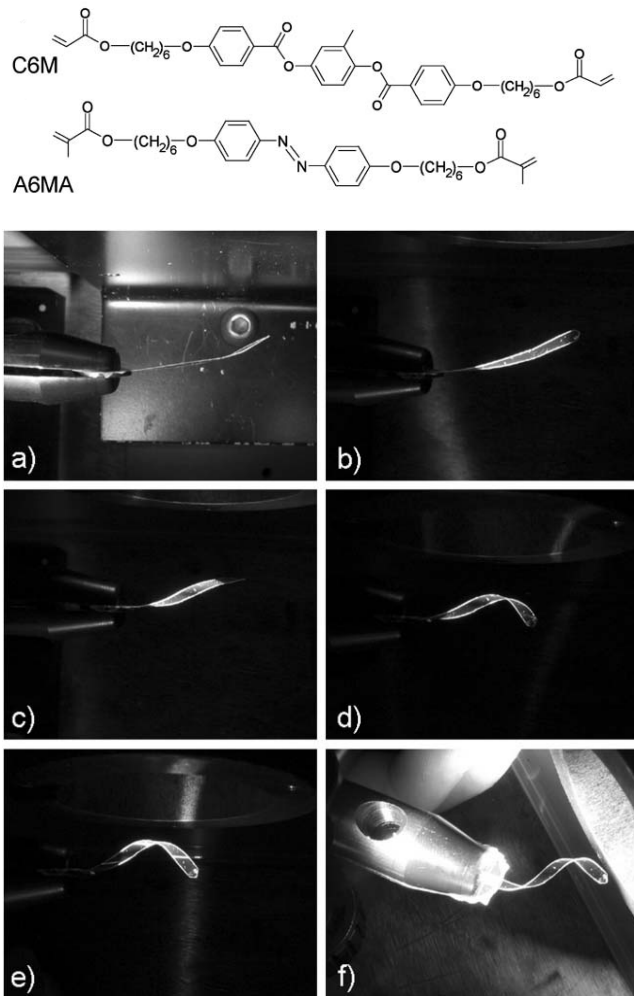


Figure 6. Chemical structures of the LC monomers and UV-induced coiling of a film in the twisted configuration. In panel (a), the sample is pictured before UV irradiation, while in panels (b)-(e) the sample coils under UV intensity of roughly 100 mWcm^{-2} . In the final panel, (f), the film was moved nearer to the UV source in an attempt to show the maximum deformation.²⁰

90° 정도의 트위스트 변형 그리고 coiling 변형이 가능한 LCE를 소개하였다(Figure 6).²⁰ 또한 Palffy-Muhoray 연구팀에 의해 소개된 LCE는 dye 형태의 아조벤젠을 사용하여 LCE를 제조하였다.²¹ 기존 연구들이 bending 변형을 위해 365 nm 근처의 자외선을 사용했다면 이 연구는 514 nm의 가시광선을 사용하여 변형을 유도하였으며 변형의 크기도 약 60° 이상의 큰 bending 결과를 나타냈다(Figure 7).²¹ 가장 최근 발표한 White 연구팀 또한 442 nm의 가시광선 영역의 광조사에 감응하여 bending 변형을 하는 azo-LCE cantilever를 발표하였다(Figure 8).²²

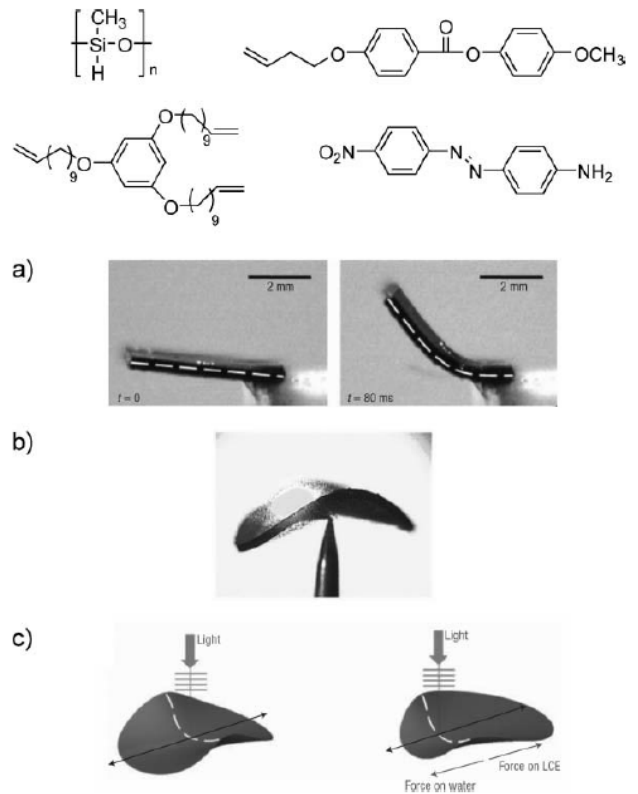


Figure 7. (a) Photo-mechanical response of the 'swimming' CLCP sample. (b) The shape deformation of a CLCP sample upon exposure to 514 nm light. (c) Schematic illustration of the mechanism underlying the locomotion of the dye-doped CLCP sample.²¹

3. 마이크로 스케일 변형이 가능한 아조벤젠을 함유한 비결정성 고분자

고분자는 가공성이 우수하고, 가볍고, 유연하며 동시에 다양한 형태의 모양을 자유롭게 제조할 수 있기 때문에 이미 일상생활과 산업 현장에서 여러 용도로 사용되고 있다. 이러한 고분자의 장점을 이용하여 Merian은 아조벤젠을 함유한 나일론 필라멘트 섬유를 이용하여 자외선에 의해 수축하는 액추에이터 기능을 갖는 광구동형 고분자를 처음 보고하였으나 자외선에 의한 수축율이 약 0.1% 정도로 매우 미비한 변형 정도를 나타냈다.²³

Eisenbach는 아조벤젠 화합물에 의해 가교가 된 poly(ethylene acrylate) network 필름을 일정한 방향으로 연신을 시켜 아조벤젠 화합물이 연신 방향으로 배향되도록 필름을 제조하였다. 배향된 아조벤젠을 함유한 연신 필름은 자외선 조사에 의해 일정한 방향으로 수축 현상을 보이고 가시광선을 조사하면 원상태로 회복하는 팽창현상을 보였다. 이러한 필름 수축 변형은 0.9 nm 분자 길이의 *trans*-isomer 아조벤젠이 자외선 조사에

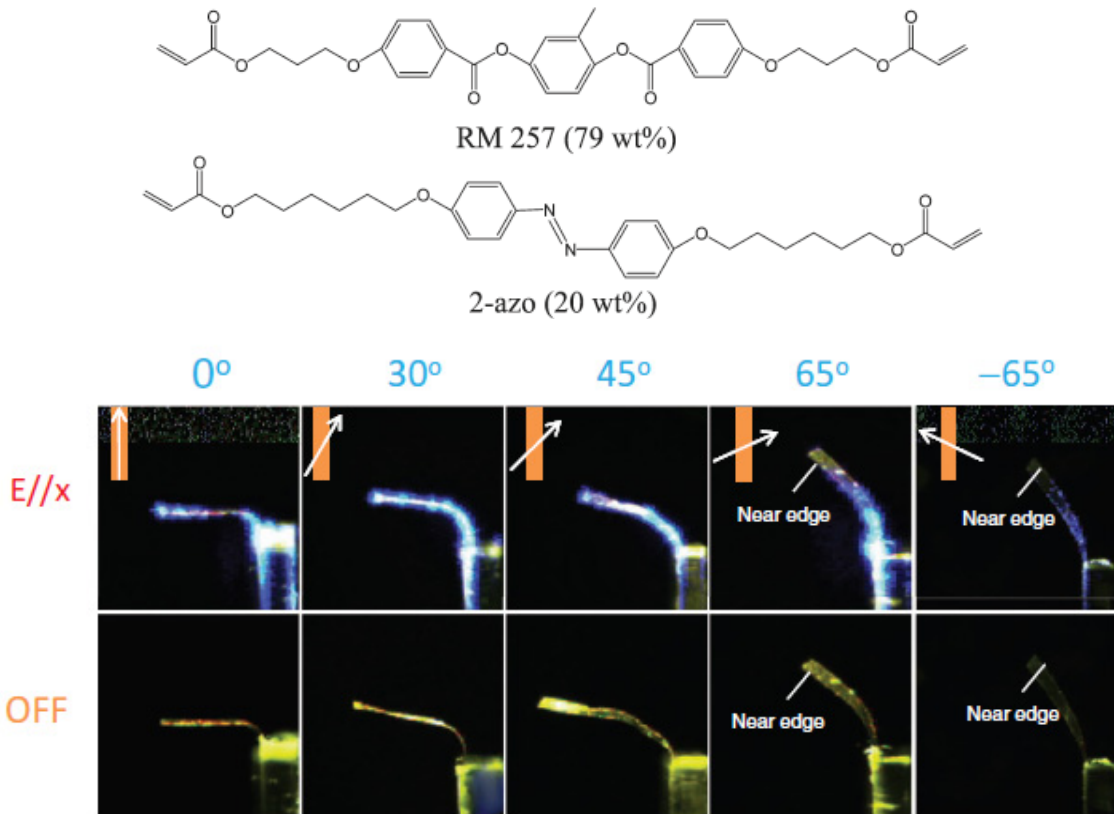


Figure 8. In plane bending and out of plan twisting observed in cantilevers with the nematic director aligned 0°, 30°, 45°, 65°, and -65° to the cantilever long axis (x) when exposed to 200 mWcm⁻² (442 nm) polarized parallel to x.²²

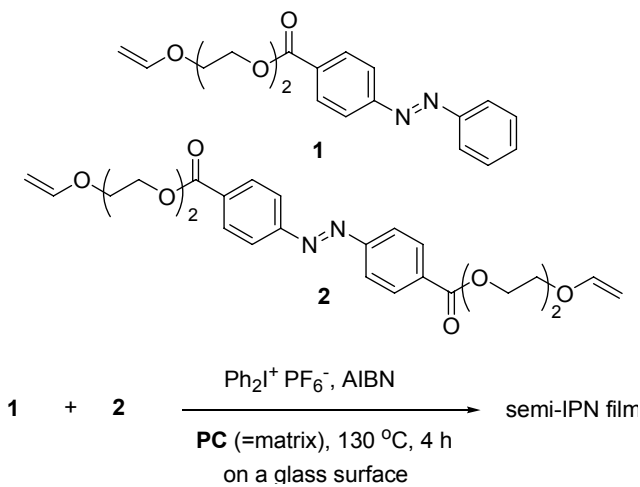


Figure 9. Preparation of semi-IPN film.²⁴

의해 0.55 nm의 *cis*-isomer 아조벤젠으로 이성질체가 변형되고 이로 인해 필름내 한쪽 방향으로 배향된 아조벤젠의 분자 길이가 전체적으로 감소하게 되어 나타난 현상으로 설명되었다.¹

현재까지 광응답형 아조벤젠 화합물은 주로 아크릴레이트

계열의 액정 화합물들에 대한 연구들이 대부분이었다. 그러나 Kim은 양이온 중합이 가능한 아조벤젠을 함유한 다양한 vinyl ether을 합성하여 새로운 광응답형 poly(vinyl ether)를 제조하였다. 또한 아조벤젠의 배향성이 없는 등방성 광응답형 고분자 필름은 아조벤젠을 함유한 비닐이서 단량체와 polycarbonate 또는 polycaprolactone과 같은 선형 고분자와 함께 블렌딩하거나 semi-IPN (Interpenetrating network) 방식을 도입하여 제조하였다(Figure 9).²⁴

이와 같이 제조된 비닐이서 타입의 광응답형 고분자 필름은 아조벤젠의 배향성을 제어하여 물질의 변형을 유도하는 기존 연구들과 달리 광조사 과정에서 달라지는 재료의 elasticity 변화를 통해 필름의 변형을 유도하였다. 또한 광조사에 의한 물질의 가역적 변형을 위해서 자외선과 가시광선을 교대로 조사해야 하는 기존 연구들과 다르게 Kim에 의해 제조된 광응답형 고분자 필름은 광의 온-오프 스위칭 만으로도 필름의 가역적인 strain 변형(광조사-팽창, 광차단-회복)을 확인할 수 있었다. Strain의 변화 정도는 광조사 강도 조절에 따라 약 4~10 μm 정도인 것으로 나타났다. 또한 이러한 strain 변형은 거의 3 초안에 일어나며 변형속도는 약 1.5 μm/sec로 측정되었다(Figure 10).^{24,26}

그러나 이와 같은 가역적인 strain 변형 메커니즘은 이미 잘 알려진 아조벤젠의 *trans-cis* 광이성화 과정에서 발생하는 분자길이 감소에 의한 원인보다는 광조사 과정에서 발생하는 재료의 softening 현상에 의한 필름의 modulus 감소로 해석하였다(Figure 11). 아조벤젠은 광조사 과정에서 동적인 *trans-cis* 광이성화 변형을 일으키고 이러한 동적인 변형 운동은 고분자 필름 내에서 plasticizer 역할을 하게 된다. 이와 같이 광의 유무만으로 가역적인 strain의 변화가 발생되면 가역적인 변위 변화를 유도하기 위해 자외선과 가시광선을 교대로 조사해야 하는 기존의 복잡한 시스템 구성에 비해 아조벤젠 화합물을

응용한 광조사 설계가 훨씬 간편해 질 수 있다.

또한 최근에는 아조벤젠을 함유한 비닐이서 화합물을 아크릴 단량체와 혼합하여 광섬유에 코팅을 한 후 온-오프 광조사에 따라 가역적인 파장 변화와 굴절률 변화를 유도하는 연구를 보고하였다[R]. 전형적인 fiber Bragg grating(FBG)에 아조벤젠 화합물이 코팅된 Azo-FBG는 자외선 조사 하에서 중심 센터 wavelength가 약 0.6 nm 정도 이동하는 결과를 나타냈다. 그러나 파장 이동 정도가 UV 센서로 적용하기에는 아직 부족한 점이 있어 현재 다양한 아조벤젠 함유 재료와 광조사 설계를 통해 광조사에 대한 응답속도와 파장 변위 정도를 향상시

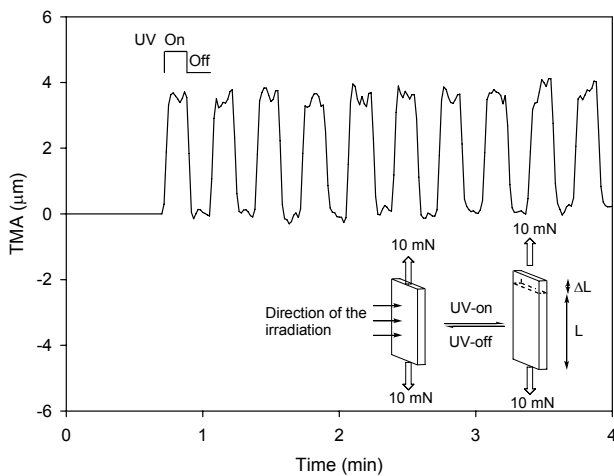


Figure 10. The reversible UV-response of the length of the semi-IPN film at 25 °C.²⁴

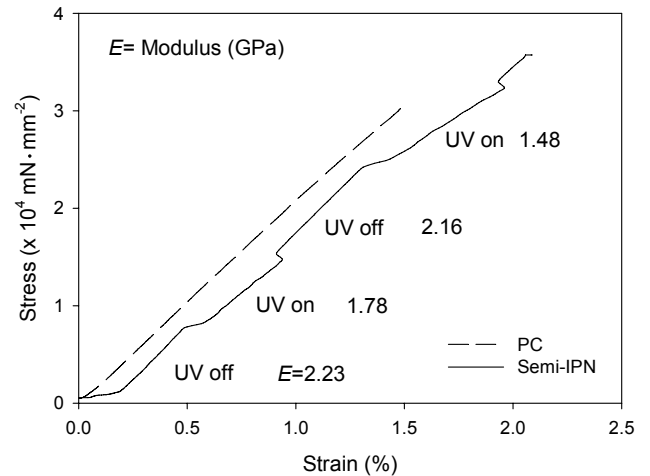


Figure 11. Stress-vs-strain profiles for the semi-IPN and the PC-matrix under switching of UV light.²⁴

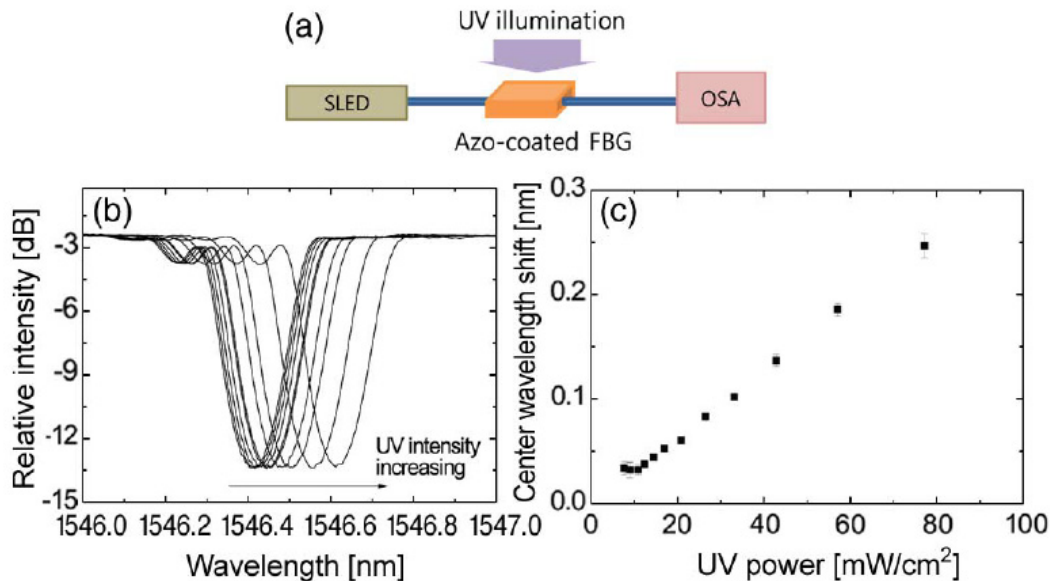


Figure 12. (a) Schematic representation of experimental setup for investigation of optical properties of azo-coated FBG (SLED: superluminescent light emitting diode, OSA: optical spectrum analyzer), (b) optical spectrum responses of az-coated FBG under UV illumination, and (c) center wavelength shift of grating with respect to UV intensity.²⁷

키고자 노력 중에 있다(Figure 12).²⁷

4. 기타 광응답형 고분자

4.1 Monolayer

처음으로 Blair 연구팀은 아조벤젠을 주사슬에 함유한 폴리이미드로 구성된 monolayer를 제조하고 광자극에 따른 기계적 특성 변화에 대한 연구를 소개하였다. 연구결과에 따르면 자외선을 monolayer에 조사하게 되면 공기/물 계면에서의 스트레스가 감소하다가 다시 빛을 차단하고 어두운 곳에 방치하면 monolayer의 스트레스가 다시 상승하는 현상을 보고하였다.²⁸

반면, Seki 연구팀은 주사슬이 아닌 측쇄에 아조벤젠을 함유한 폴리비닐 알코올을 가지고 monolayer를 제작하고 공기/물 계면에서 광자극에 따른 monolayer의 면적 변화를 관찰하였다(Figure 13).²⁹ 자외선을 조사함에 따라 공기/물 계면에서의 monolayer는 약 3배 가까이 팽창을 하고 가시광선을 조사하게 되면 다시 원래 상태로 수축 하는 현상을 보였다. 이러한 선택된 광조사 파장에 따른 monolayer의 면적의 변화는 아조벤젠의 극성 변화에 의한 것으로 설명하였다. 일반적으로 *trans*-isomer에 비해 *cis*-isomer의 쌍극자 모멘트는 높다. 따라서 UV 조사에 의해 *cis*-isomer로 이성화 현상이 일어나면 monolayer의 극성은 높아지게 되고 이로 인해 monolayer는 물에 대한 친화력이 증가되어 면적이 증가된 것으로 해석하였다.

4.2 자기 조립형 초분자 시스템

가장 최근 오사카 대학 하라다 아카라 교수팀은 선택된 파

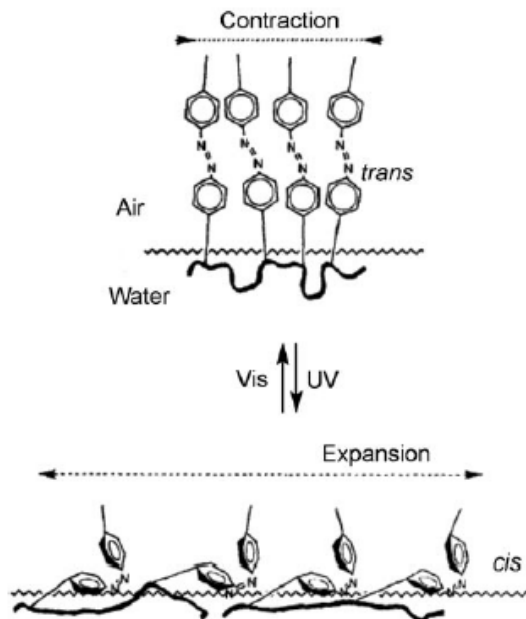


Figure 13. Stress-vs-strain profiles for the semi-IPN and the PC-matrix under switching of UV light.²⁹

장에 의해 접착과 비접착을 제어할 수 있는 아조벤젠을 함유한 자기조립형 초분자를 발표하였다. 이 연구에서는 α -CD 또는 β -CD를 가진 단량체와 아크릴 아미드를 공중합하여 합성한 호스트겔과 아조벤젠을 함유한 모노머와 아크릴 아미드를 공중합시킨 게스트겔을 각각 합성 하였다(Figure 14).³⁰ 호스트겔과 게스트겔은 약간의 진동에도 자기 접착이 발생하며, 접착된 겔에 365 nm의 자외선을 조사하게 되면 순식간에 해리(비접착)되는 결과를 나타냈다. 또한 해리된 겔에 가시광선을 조사하면 다시 접착상태로 되는 가역성을 나타냈다(Figure 15). 이는 선택된 파장 조사에 의해 겔의 접착력을 제어할 수

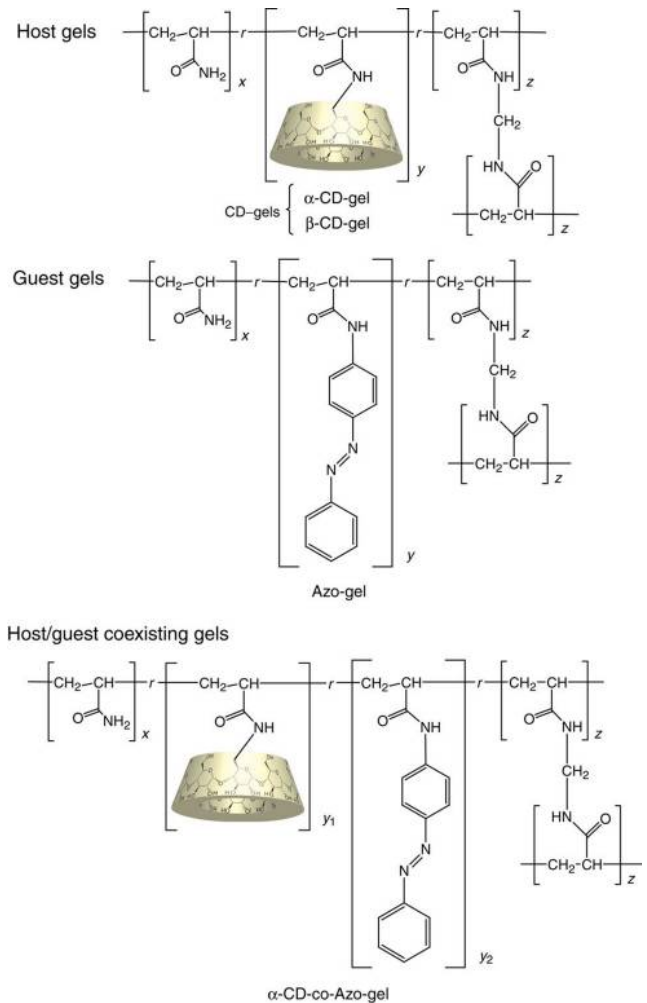


Figure 14. Chemical structures of gels. The figure shows the chemical structures of a host gel (α - and β -CD-gels), a guest gel (Azo-gel), and a host/guest coexisting gel (α -CD-co-Azo-gel). The molar ratios of the acrylamide, the host-modified or the guest-modified acrylamide, and the *N,N'*-methylenebis(acrylamide) are indicated as x , y , and z . Host gels with a mol% $x/y/z$ of 93/5.0/2.0 were used. In this study, guest gels with different Azo group contents (y) were prepared. The character r in the main chain of the polymers indicates that each monomer was copolymerized randomly.³⁰

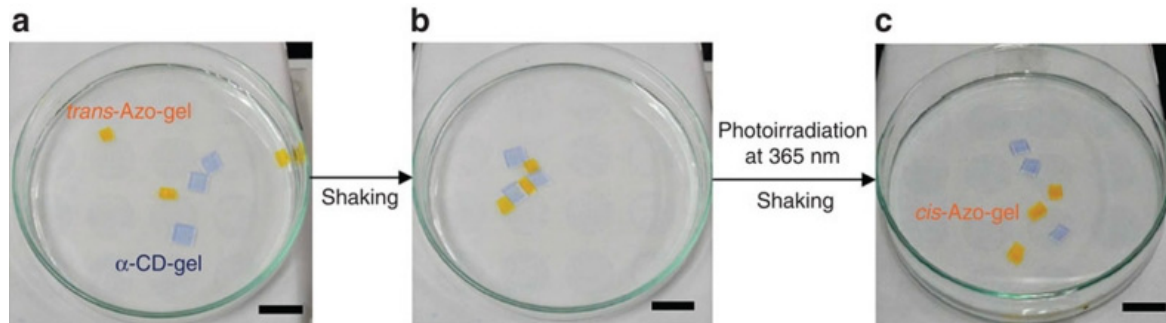


Figure 15. Gel assembly and dissociation. Gel assembly of α -CD gel (blue) with the *trans*-Azo-gel (orange), and gel dissociation with irradiation with ultraviolet light. (a) Addition of water to the gels in a Petri dish. (b) Agitation of the gels for several minutes led to the assembly of an α -CD-gel/Azo-gel. (c) Photoirradiation at 365 nm led to the dissociation of gels.³⁰

있음을 의미하며 이러한 연구결과는 앞으로 물체의 표면에 광응답성 게스트나 해당 호스트를 고정함으로써 다양한 재료를 광자극으로 잘라내거나 연결할 수 있는 가능성을 보여준 흥미로운 연구 결과라 할 수 있다.³⁰

III. 맺 음 말

광에너지는 공간적 제약 없이 원격 제어 (remote control)로 에너지를 전달할 수 있는 이상적인 에너지원이다. 따라서 우리 주변에서 가장 쉽게 얻을 수 있는 광에너지를 바로 기계적 에너지로 변환할 수 있다면 기계적 구동을 위해 추가적으로 필요한 여러 장치나 시스템 구성이 단순해 질 수 있다.

앞서 소개한 많은 연구 결과들을 살펴보면 아조벤젠과 같은 광이성화 물질을 함유한 고분자 소재들은 재료 및 디바이스 설계에 따라 마이크로 스케일부터 매크로 스케일까지 다양한 변형 형태를 나타낼 수 있었다. 이와 같은 변형 형태를 토대로 광응답성 스마트 고분자 소재는 인공근육, 마이크로 모터, 마이크로 밸브 등 다양한 산업 분야에 적용될 가능성이 있다. 그러나 현재까지 소개된 대부분의 논문은 실험실적으로 실현된 기초 연구일 뿐 구체적인 응용 사례가 보고되지는 않았다. 따라서, 광응답형 소재의 약한 기계적 강도, 내구성, 응답속도 등을 지속적으로 개선하고 실제 응용 기술에 필요한 학문적 융합을 접목한다면 신개념의 기능성 스마트 소재를 개발할 수 있을 뿐만 아니라 첨단 산업 분야로의 응용 가능성이 매우 높아질 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 2011년 지역혁신인력양성사업에 의하여 수행 되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. C. D. Eisenbach, "Isomerization of aromatic azo chromophores in poly(ethyl acrylate) networks and photomechanical effect", *Polymer*, **21**, 1175 (1980).
2. L. Matejka, M. Ilavsky, K. Dusek, and O. Wichterle, "Photomechanical effects in crosslinked photochromic polymers", *Polymer*, **22**, 1511 (1981).
3. J. Kupfer, and H. Finkelmann, "Nematic liquid single crystal elastomers", *Makromol Chem Rapid Commun*, **12**, 717 (1991).
4. M. Ishikawa, N. Kitamura, H. Masuhara, and M. Irie, "Size effect on photoinduced volume change of polyacrylamide microgels containing triphenylmethane leuco cyanide", *Makromol Chem Rapid Commun*, **12**, 687 (1991).
5. H. M. Brodowsky, U. C. Boehnke, F. Kremer, E. Gebhard, and R. Zentel, "Mechanical deformation behavior in highly anisotropic elastomers made from ferroelectric liquid crystalline polymers", *Langmuir*, **15**, 274 (1999).
6. H. Finkelmann and E. Nishikawa, "A new opto-mechanical effect in solids", *Phys Rev Lett*, **87**, 015501 (2001).
7. H. Wermter and H. Finkelmann, "Liquid crystalline elastomers as artificial muscles", *e-Polymer*, **013**, 1 (2001).
8. H. Finkelmann, S. T. Kim, A. Muñoz, P. Palffy-Muhoray, and B. Taheri, "Tunable mirrorless lasing on cholesteric liquid crystalline elastomers", *Adv. Mater.*, **13**, 1069 (2001).
9. T. Ikeda, "Photomodulation of liquid crystal orientations for photonic applications", *J. Mater. Chem.*, **13**, 2037 (2003).
10. A. Lendlein, H. Jiang, O. Junger, and R. Langer, "Light-induced shape-memory polymers", *Nature*, **434**, 879 (2005).
11. M. H. Li, P. Keller, B. Li, X. Wang, and M. Brunet, "Light-driven side-on nematic elastomer actuators", *Adv. Mater.*, **15**, 569 (2003).
12. P. Xie and R. Zhang, "Liquid crystal elastomers, networks and gels: advanced smart materials", *J. Mater. Chem.*, **15**, 2529 (2005).

13. O. M. Tanchak and C. J. Barrett, "Light-induced reversible volume changes in thin films of azo polymers: the photo-mechanical effect", *Macromolecules*, **38**, 10566 (2005).
14. T. Ikeda, M. Nakano, Y. Yu, O. Tsutsumi, and A. Kanazawa, "Anisotropic bending and unbending behavior of azobenzene liquid crystalline gels by light exposure", *Adv. Mater.*, **15**, 201 (2003).
15. Y. Yu, M. Nakano, and T. Ikeda, "Directed bending of a polymer film by light", *Nature*, **425**, 145 (2003).
16. Y. Yu, M. Nakano, A. Shishido, T. Shiono, and T. Ikeda, "Effect of cross-linking density on photoinduced bending behavior of oriented liquid-crystalline network films containing azobenzene", *Chem. Mater.*, **16**, 1637 (2004b).
17. Y. Yu, T. Maeda, J. Mamiya, and T. Ikeda, "Photomechanical effects of ferroelectric liquid-crystalline elastomers containing azobenzene chromophores", *Angew Chem Int Ed Engl*, **46**, 881 (2007).
18. M. Yamada, M. Kondo, J. Mamiya, Y. Yu, M. Kinoshita, C. J. Barrett, and T. Ikeda, "Photomobile Polymer Materials: Towards Light-Driven Plastic Motors", *Angew Chem Int Ed Engl*, **47**, 4986 (2008).
19. M. Yamada, M. Kondo, R. Miyasato, Y. Naka, J. Mamiya, M. Kinoshita, A. Shishido, Y. Yu, C. J. Barrett, and T. Ikeda, "Photomobile polymer materials-various three-dimensional movements", *J. Mater. Chem.*, **19**, 60 (2009).
20. K. D. Harris, R. Cuypers, P. Scheibe, C. L. van Oosten, Cees W. M. Bastiaansen, J. Lub, and D. J. Broer, "Large amplitude light-induced motion in high elastic modulus polymer actuators", *J. Mater. Chem.*, **15**, 5043 (2005).
21. M. Camacho-Lopez, H. Finkelmann, P. Palffy-Muhoray, and M. Shelley, "Fast liquid crystal elastomer swims into the dark", *Nat. Mater.*, **3**, 307 (2004).
22. K. M. Lee, H. Koerner, R. A. Vaia, T. J. Bunning, and T. J. White, "Relationship between the photomechanical response and the thermomechanical properties of azobenzene liquid crystalline polymer networks", *Adv. Funct. Mater.*, **21**, 2913 (2011).
23. E. Merian, "Steric factors influencing the dyeing of hydrophobic fibers", *Textiles Res. J.*, **36**, 612 (1966).
24. H. K. Kim, X. S. Wang, Y. Fujita, A. Sudo, H. Nishida, M. Fujii, and T. Endo, "Photomechanical switching behavior of azobenzene-containing semi-interpenetrating network consisting of azobenzene-carrying crosslinked poly(vinyl ether) and polycarbonate", *Makromol Chem Rapid Commun*, **26**, 1032 (2005).
25. H. K. Kim, X. S. Wang, Y. Fujita, A. Sudo, H. Nishida, M. Fujii, and T. Endo, "Reversible photo-mechanical switching behavior of azobenzene-containing semi-interpenetrating network under UV and visible light irradiation", *Makromol Chem Phys*, **206**, 2106 (2005).
26. H. K. Kim, X. S. Wang, Y. Fujita, A. Sudo, H. Nishida, M. Fujii, and T. Endo, "A rapid photomechanical switching polymer blend system composed of azobenzene-carrying poly(vinyl ether) and poly(carbonate)", *Polymer*, **46**, 5879 (2005).
27. H.K. Kim, W. S. Shin, and T. J. Ahn, "UV sensor based on photomechanically functional polymer-coated FBG", *IEEE Photonics Tech. letters*, **22**, 1404 (2010).
28. H.S. Blair and H. I. Pogue, *J. E. Riordan, Polymer*, **21**, 1195 (1980).
29. T. Seki and T. Tamaki, *Chem. Lett.*, 139 (1993).
30. A. Harada, R. Kobayashi, Y. Takashima, A. Hashidzume, and H. Yamaguchi, "self-assembly through molecular recognition", *Nature. Chem.*, **3**, 34 (2011).