

광굴절 고분자 재료

김 환 규 · 이 지 훈

1. 서 론

우리가 아는 대부분의 중요한 과학적 사실들이 우연한 발견에서 많이 알려졌듯이 광굴절 현상 (photorefractivity, PR)은 약 30년전 Ashkin 등에 의한 우연한 발견에서 비롯되었다.¹ 그 당시 이들은 어떤 강유전체 (ferroelectric) 단결정에 대한 2차 조화파 발생 (secondharmonic generation)과 광변조 (optical modulation) 실험을 하다가 재료에 레이저를 투과시켰을 때 재료의 굴절율이 변하게 되는 사실을 알게 되었다. 물론 그 당시 그들은 단지 그러한 현상을 레이저에 의한 재료의 손상으로 밖에 이해하지 못했었다. 그러다가 1년 후에 Bell 연구소의 Chen에 의해 재료를 적절한 온도까지 가열하거나 또는 균일한 레이저 빔을 다시 조사시킴으로써 재료가 원래 상태로 복원된다는 사실이 밝혀지게 됨으로 지금의 광굴절 현상으로 이해하게 되었다.²

광굴절 (PR) 효과를 개념적으로 살펴보면 PR 재료에 빛을 조사하면 그 내부에 전하 [정공 (hole) 또는 전자 (electron)]의 분리가 일어나게 되고 이러한 전하들이 확산 (diffusion) 내지는 표류 (drift)하게 되는데 (실제 실험에서는 전하의 분리효율을 증대시키기 위해 외부 전장을 인가함으로 표류가 주 전하이동기구임), 이때 전하들이 재료내에 존재하는 트랩채 (보통 구조 결함 혹은 불순물)에 의해 재결합됨으로 인해 내부 전기장이 형성되게 된다. 이러한 현상은 광전도성의 원리와 같다. 이 내부 전기장은 선형 전기광학 효과 (linear electro-optic effect, Pockels effect)를 통해 물질의 굴절을 분포를 공간적으로 변화시킨다. 따라서 이러한 효과를 발현하기 위해서는 물질은 광전도성 (photoconductivity)과 2차 비선형광학 성질 (second-order nonlinearity)을 동시에 가지고 있어야만 가능하다. 그러나 이러한 것들이 필요충

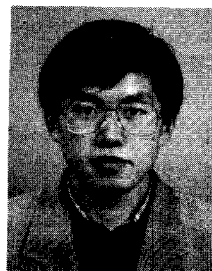
분조건이 아니라는 연구 결과도 최근 보고되었다.³

이러한 PR 효과를 보이는 물질은 광 영상처리, 완전 광통신, 컴퓨터 영상 전송, 광배선, 광스위치, 신경망의 시뮬레이션, optical correlators, optical phase conjugation, 광필터 그리고 영상정보들을 서로 연결할 수 있는 복합형 정보 기억소자 등 실로 그 응용은 방대하다.^{4,5} 특히 PR 재료는 전자 재료와는 달리 정보를 디지털화해



김환규

1976~ 울산대 공업화학과(공학사)
1980 KAIST 화학과(이학석사)
1982 Carnegie Mellon Univ.
1990 고분자화학(이학박사)
1991~ Cornell Univ. 재료공학과
1993 (Postdoc.)
1982~ 한국화학연구소 공업화학연구소
1986 (연구원)
1993~ 한국전자통신연구소 광교환연
1994 구실(선임연구원)
1994~ 한남대학교 고분자학과 조교수
현재



이지훈

1986~ 부산대학교 화학과
1990 (B. S.)
1991~
1993 한국과학기술원 화학과
1993~ (M. S.)
1996 한국과학기술원 화학과
1996~ (Ph. D.)
현재 The University of Michigan
화학과(Post Doc.)

Photorefractive Polymers

한남대학교 고분자학과(Hwan Kyu Kim, Department of Macromolecular Science, Hannam University, Taejon, Korea)
미시간대학 화학과(Ji-Hoon Lee, Department of Chemistry, University of Michigan at Ann Arbor, Michigan, U. S. A.)

야 할 필요 없이 전체 영상을 3차원 홀로그램(hologram three-dimensional diffraction grating)형식으로 저장했다가 즉각적으로 복원할 수 있는 실시간이 공정 가능하므로 정보처리의 고속화 및 고밀도화가 가능하게 된다.

1990년 이전까지는 LiNbO_3 (lithium niobate), BaTiO_3 (barium titanate), LiTaO_3 (lithium tantalate), KNbO_3 (potassium niobate), $\text{K}(\text{NbTa})\text{O}_3$ (potassium niobate tantalate, KTN), $(\text{BaSr})\text{Nb}_2\text{O}_6$ (barium strontium niobate, SBN), GaAs (gallium arsenide), InP (indium phosphite), InGaAs (indium gallium arsenide), $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO), $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ (BGO), $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (BTO) 등의 무기 결정에 대한 PR 효과가 주로 연구되어 왔다.⁶⁻⁸ 그러나, 이러한 무기 결정의 경우 결정 성장의 어려움, 고가, 대량 생산의 어려움, 그리고 실제 소자로의 응용시 그 소자에 적합한 형태로의 제조의 어려움 등 많은 단점을 가지고 있다. 그리하여 무기 결정에 비해 비교적 제조가 용이하고, 비교적 가격이 저렴하여 대량 생산이 가능한 유기물에 대한 관심이 집중되고 있다. 최초의 유기결정은 TCNQ가 도핑된 비선형광학 유기 결정체인 2-(cyclooctylamino)-5-nitropyridine (COANP)이었다.^{9,10} 그러나 결정이 성장하는 동안 dopant들이 결정으로부터 점차적으로 빠져 나오는 문제가 야기되었다.

이에 반하여 유기 고분자 재료는 다양한 종류와 크기를 가진 분자들이 비교적 쉽게 도핑되어질 수 있고, 게다가 응용에 용이한 얇은 박막으로 만들 수 있어 다양한 응용이 가능하다. 특히, 이러한 유기 재료는 큰 비선형 성질과 높은 damage threshold 그리고 낮은 유전상수 등 소자로의 응용에 많은 잇점을 제공할 수 있다. 그러나 여기에도 몇 가지 문제점은 있다. 첫째는 이러한 유기 광굴절 고분자 재료는 반도체와 비교해 볼 때 빛에 응답하는 속도가 다소 느리며, 둘째는 전기광학 효과를 나타내기 위해서는 고분자 재료내의 NLO 색소를 배향시키기 위한 전기장이 필요하게 되는 점이다. 그러나 모든 것을 고려해 볼 때 유기 고분자 재료는 다른 어떤 물질 보다도 상업적 응용으로의 가능성이 높은 재료로 인식되고 있다. 최초의 유기 고분자 재료에 대한 연구는 1991년에 미국의 IBM 연구팀이 정공수송체인 DEH를 비선형 광학 고분자 물질인 BisA-NPDA (모든 화학적 약어는 부록 참조)에 도핑하여 광전도성을 부여함으로 광굴절 효과를 나타내는 고분자 기억소자로의 가능성을 타진한 후에 세계 도처의 많은 연구팀들에 의해 활발한 연구가 진행 중이다.¹¹

본 고에서는 이러한 PR 효과를 증명하기 위한 기본 실험과 이론에 대하여 다룰 것이며 또한 지금까지 개발된 PR 고분자 재료의 종류와 그 물성에 관하여 살펴보고자 한다.

2. 광굴절 효과

앞에서 언급했듯이 PR 효과는 광전도성과 이차 비선형 광학 성질에 의한 복합적인 현상이다. 따라서 재료는 각각의 성질을 나타내기 위해 필요한 구조적인 요소들 즉 내부 전기장 (E_{sc})을 형성시키기 위해 광전하발생체, 전하수송체 또는 매질, 그리고 전하 트랩체들이 필요하게 되고 굴절율의 격자를 형성시키는데 필요한 전기광학 효과를 나타내는 2차 비선형광학 색소들이 필요하다. 대개의 고분자 system 경우에는 전하 트랩체를 따로 주입하지는 않는다. 이러한 기능을 가지는 화합물들은 각기 구조적으로 고분자 주사슬(main chain)에 또는 측사슬(side chain)에 결합되어 있기도 하며 고분자 매질에 분산하여 사용되기도 한다. 물론 여기에는 장단점이 있다. 자세한 것은 PR 재료 부분에서 설명하기로 하겠다.

2.1 광굴절 효과의 기본원리

그림 1은 PR 효과를 잘 설명해주는 그림이다. PR 재료의 법선에 2개의 coherent한 레이저 빔이 서로 교차되게 입사하게 되면 빛의 세기는 정상파(standing wave pattern)를 보이게 되는데, 즉 빛의 간섭현상에 의해 이러한 공간적으로 변조된 세기패턴(spatially modulated intensity pattern)은 빔이 서로 교차되는 영역 전체에 걸쳐 밝고 어두운 면으로 나타나게 되고 그 주기를 Λ_G (spatial wavelength 또는 periodicity)로 표시할 수 있다(식 (1)).

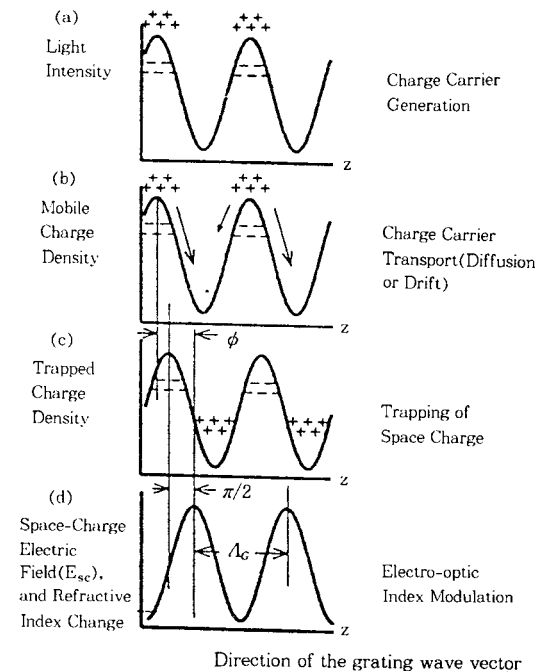


그림 1. Illustration of PR grating formation.

$$\Lambda_G = \frac{\lambda_0}{2n \sin[(\theta_2 - \theta_1)/2]} \quad (1)$$

여기서 n 은 재료의 굴절율, λ_0 는 입사빔의 파장, 그리고 θ_1 와 θ_2 는 각각 PR 재료의 법선에 입사되는 두 빔의 입사각이다. 대개 그 주기의 크기는 $0.3 \sim 20 \mu\text{m}$ 정도이다. 밝고 어두운 면의 법선 방향을 grating wavevector (K_G)의 방향으로 표현하면 그 크기는 $2\pi/\Lambda_G$ 로 표현될 수 있고, 이 K_G 의 방향을 Z축으로 보면 빛의 세기는 sinusoidal 패턴으로 표현된다. 그리고 그 빛의 세기가 최대인 점에서 전하(정공과 전자)가 발생된다. 이렇게 생성된 전하들은 hopping 반응기구를 통해 표류 또는 확산하게 되고 재분배되어, 재료내에 존재하는 트랩 물질들에 의해 재결합(trapping) 되어 내부전기장을 형성시키게 된다(그림 1(c)). 트랩 물질들의 정확한 개념은 대개 재료의 구조적 결함이나 재료내에 포함되어 있는 불순물로 이해되고 있다. 따라서 고분자 재료에서는 근본적으로 존재하게 됨으로 따로 트랩물질들을 주입시킬 필요는 없다. 만약 재료의 굴절율이 전기장에 응답하여 변한다면 그 굴절율의 공간적 변조 패턴(spatial modulation)은 그림 1(d)처럼 나타나게 된다. 따라서 재료의 선형 전기광학 효과를 통해 변조된(modulated) 굴절율의 크기(Δn)는 식 (2)과 같이 내부 전기장(E_{sc})에 상관하게 된다.

$$\Delta n = -(1/2)n^3 r E_{sc} \quad (2)$$

여기서 r 은 재료의 electro-optic (EO) 계수이다. 결국 내부 전기장은 전기광학 효과를 통해서 재료의 굴절율을 변조시키게 되고 굴절율의 변화 패턴이 공간적으로 분포하여 격자를 형성한다. 사인파 빛의 세기 패턴(그림 1(a))과 내부전기장 패턴(그림 1(d))사이의 위상 차는 $\pi/2$ 로 표현되는데 순수한 PR 효과에 의한 것일 때 이것은 $\pi/2$ 에 근접하게 된다. 이러한 현상은 PR 현상만이 가지는 독특한 성질이다.

2.2 광굴절 특성 측정의 기본 실험

재료에 있어서 PR 현상, 즉 빛에 의해 유도된 재료의 굴절율 변화는 다소 복잡하여 다른 현상, 예를 들면 열변색현상, 열굴절현상, 광변색현상, 광이성질화현상, 광표백현상, 전이현상, 3차 비선형 성질 $\chi^{(3)}$ 등과 구별하여 연구되어야 한다. 이러한 현상들은 모두 국부적인 반응기구(local mechanism)로 굴절율의 변화가 수 마이크로미터 내에서 일어난다. 그렇지만 굴절율의 변화가 빛에 의해 발생된 전하들의 움직임에 그 바탕을 둔 PR 현상은 비국부적인 반응기구(nonlocal mechanism)로 위의 국부적인 반응기구와 구별된다. 널리 행해지는 실험으로는 four-wave mixing(FWM) 격자 실험과 두 빔결합

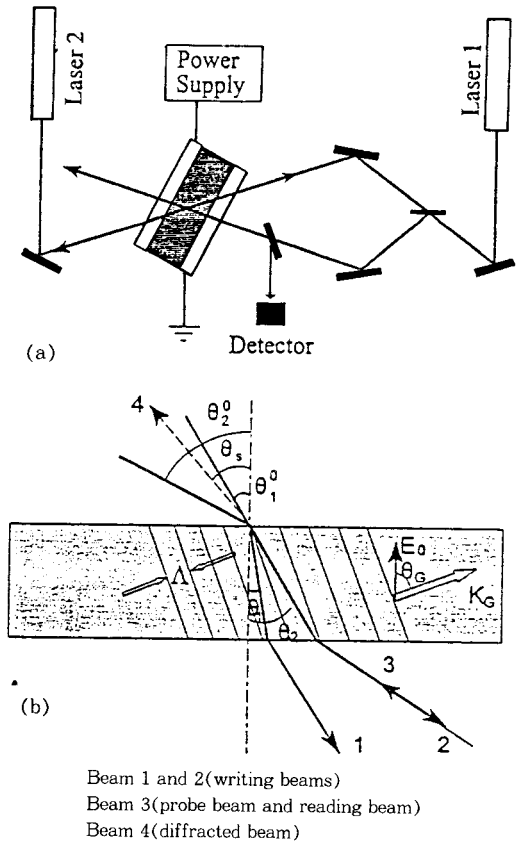


그림 2. (a) Experimental setup and (b) beam geometry for the PR grating experiments.

(two-beam coupling(2BC)) 실험이 있다.

2.2.1 Four-Wave Mixing(FWM) 격자 실험

PR 재료에 기준파형과 입력영상파형인 두 개의 레이저 빔 (beam 1과 2, writing beams)이 교차되게 입사되어 상호 작용하게 되면 굴절율의 격자 패턴(refractive index grating)이 형성된다. 이때 형성된 격자가 기준파형인 세번째 빔 (beam 3, reading beam)을 조사하면, 이 빔의 일부는 형성된 격자에 의해 회절되어 입력 영상 파형인 새로운 빔 (beam 4, signal beam)이 형성되는 것이다. Reading 빔과 새로운 빔의 세기 비를 회절 효율(diffraction efficiency, η)이라고 정의하며, 이는 재료가 입사하는 빛을 홀로그래픽 격자에 의해 얼마나 회절시키는가에 대한 척도로 볼 수 있다(그림 2).

재료내에 형성된 격자가 PR 효과의 근원이라는 증거는 격자 거동실험을 통해 잘 알 수 있다. 그림 3(a)는 낮은 T_g 를 가지고 있는 BisA-NPDA:DEH 고분자 system의 시간에 따른 회절효율의 성장, 감퇴에 대한 그림이다.^{11,12} $E_0 = 11.4 \text{ V}/\mu\text{m}$ 의 외부전장이 인가된 상태에서 writing 빔을 재료에 입사시키면 writing 빔이 차단

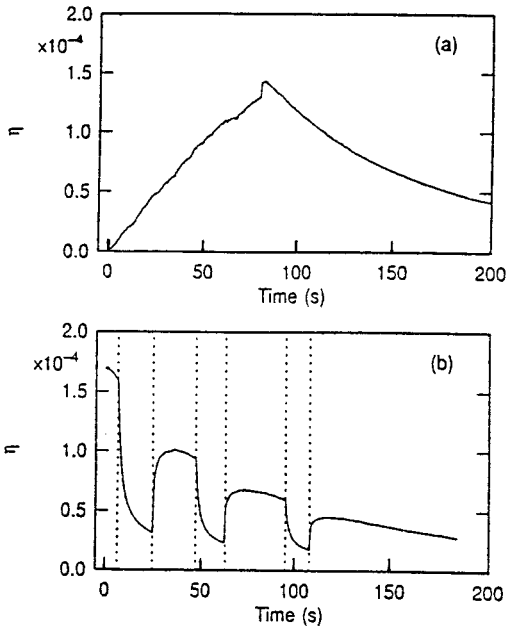


그림 3. Illustration of the grating dynamics in the PR polymer BisA-NPDA : DEH ($\lambda=647$ nm, $E_0=11.4$ V/ μ m).

되기 전까지 회절효율이 점차적으로 증가하다가 writing 빔이 차단되면 reading 빔의 존재 하에 회절효율이 점차적으로 감소함을 알 수 있다. 또한 reading 빔이 존재할 때 회절효율의 전장 의존성을 살펴보면, 그림 3(b)에서 보듯이 $t=6.4$ s에서 재료에 인가된 전기장을 제거하게 되면 ($E_0=0$ V/ μ m) 회절효율이 급격하게 감소하다가 다시 전기장을 인가하게 되면 $t=25$ s에서 회절효율이 다시 증가됨을 알 수 있다. 이 과정은 계속 반복된다. 이러한 현상을 재료내에 배향되어 있는 NLO 색소들이 전기장이 제거됨에 따라 완화 (relaxation)됨으로 이해될 수 있고, 또한 전체적인 peak 세기가 감소되는 이유는 최초로 생성된 E_{sc} 가 암전도성 (dark conductivity)과 reading beam에 의한 광전도성에 의해 점차적으로 감쇄하기 때문이다.

그러나 여기서 중요한 것은 이러한 회절효율의 전기장 의존 성질만으로는 PR 효과를 충분히 입증하지 못 한다는 사실이다. 많은 광화학 반응들도 외부 인가전장에 의해 더 잘 일어날 수 있으며, 전기장에 따른 회절효율의 의존성을 보일 수 있기 때문이다. 그래서 보충 실험으로서 FWM 실험에 편광 빔을 사용하는 편광 비동방성 (polarization anisotropy) 실험이 있다. Writing beam을 모두 s-편광 빔을 사용하여 (또는 그 반대로) 회절효율이 reading beam의 분극율에 얼마나 의존하는가를 관찰하므로 보다 분명한 PR 효과를 증명할 수 있게 된다. 식 (3)과 식 (4)는 s- 또는 p-편광 빔에 따른 회절효율에 관한 식들이다.

$$\eta_s = \sin^2 \left(\frac{\pi n^3 \gamma_{13} E_{sc} d \cos \theta_G}{2 \lambda (\cos \theta_1 \cos_2 \theta)^{1/2}} \right) \quad (3)$$

$$\eta_p = \sin^2 \left(\frac{\pi n^3 \gamma_{eff}^p E_{sc} d \cos 2\theta}{2 \lambda (\cos \theta_1 \cos_2 \theta)^{1/2}} \right) \quad (4)$$

여기서 θ_1 과 θ_2 는 각각 빔 1과 빔 2의 입사각이며 2θ 는 $\theta_1 - \theta_2$, θ_G 는 격자 wavevector (K_G)와 재료의 법선 사이의 각이고, d 는 박막시료의 두께이다. 그리고 전기광학 계수 γ_{eff}^p (p-polarized reading beam 사용시)는 식 (5)로 주어진다.

$$\gamma_{eff}^p = \gamma_{13} [\cos \theta_1 \sin(\theta_G - \theta_2) + \sin \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_G] + \gamma_{33} \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_G \quad (5)$$

이외에도 PR 재료의 특성을 알아보기 위해 행해지는 실험들은 빛에 의해 전하가 생성되는 양자효율, 생성된 전하의 이동도, 재료의 전기광학 계수, 빛의 간섭패턴에 대해 굴절을 격자에 관한 위상차 실험, 또한 격자가 형성되고 지워지는 속도 또 암조건에서 얼마나 빨리 신호가 감쇄하는가 등의 많은 실험들을 통해서 재료의 성능을 보다 잘 이해할 수 있게 된다.

2.2.2 Two-Beam Coupling (2BC) 실험

그림 4(a)는 2BC 실험을 하기 위한 기본적인 측정장치를 보였다. 재료의 굴절율의 변화가 순수하게 PR 효과에 의한 것이라 한다면, 동일한 세기의 두 writing beam (beam 1과 2)이 재료에 입사되어 서로 상호작용한 결과, 생성되어진 굴절을 격자에 의해 재료를 투과한 빔중 하나의 빔의 세기는 증가되고 나머지 한 개의 빔의 세기는 동시에 감소하게 된다. 즉, 광신호의 증폭 현상인 비대칭성 두 빔결합 (asymmetric two-beam coupling) 현상이 관찰된다. 전기장을 끄게 되면 이러한 현상은 일어나지 않는다. 이 비대칭성 두 빔결합 현상은 두 writing beam의 세기가 동시에 감소하거나 증가하는 대칭 손실 또는 대칭 이득 현상과 쉽게 구별되어진다. 이 대칭 손실 또는 이득 현상들은 재료의 광화학반응이나 열적효과와 같은 국부적인 반응기구에 기인하며 위상 차가 없다. 따라서 빔의 세기에 의해 야기된 굴절을 격자에 의한 빔 세기의 변화는 보다 분명하게 PR 효과를 입증할 수 있다.

이 실험을 통해서 한 가지 중요한 파라미터인 두 빔결합 이득계수 (two-beam coupling gain coefficient, Γ) (더 정확하게 말하자면 energy-transfer coefficient)를 알 수 있는데, 그것은 재료가 얼마나 효과적으로 광신호를 증폭시킬 수 있는가 하는 것을 가늠할 수 있는 척도가 된다. 이것은 식 (6)를 통해서 계산될 수 있다.

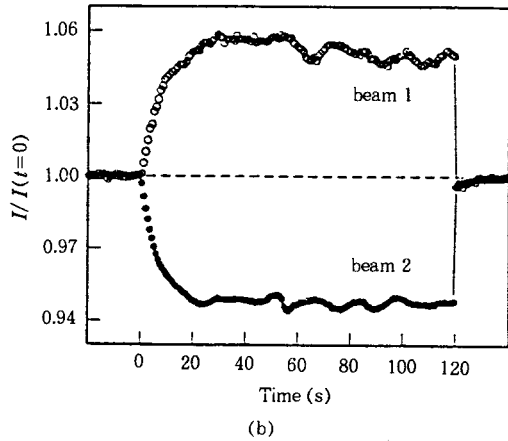
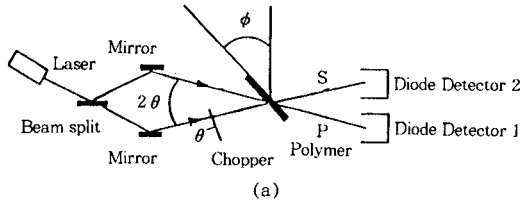


그림 4. (a) Experimental set-up for two-beam coupling, where S and P are signal and pump beams and (b) the asymmetric energy transfer as a proof of the PR origin of the grating [PVK : PDCST : TNF at 753 nm with $E_o=32 \text{ V}/\mu\text{m}$ and $\beta=1$. The intensity of beam 1 is monitored as beam 2 is switched on at $t=0$ and off at $t=120\text{s}$ (open circles) and the intensity of beam 2 is monitored as beam 1 is turned on at $t=0$ and off at $t=120\text{s}$].

$$\Gamma = \frac{1}{L} [\ln(\gamma_0 \beta) - \ln(\beta + 1 - \gamma_0)] \quad (6)$$

여기서 β 는 두 writing beam의 세기 비, $\gamma_0 = I/I_0$ 는 빔 결합 비 (beam coupling ratio) (I : 펌프빔이 존재할 때의 신호빔의 세기, I_0 : 펌프빔이 없을 때 신호빔의 세기), $L (=d \cdot \cos\theta)$ 은 신호빔의 이동거리 (optical path length)이고, d 는 박막시료의 두께, $\theta = \theta_1$ or θ_2 로서 두 writing beam 1, 2의 입사각으로 주어진다. 한편 두 빔 결합 이득계수가 크다고 할지라도 사용되는 레이저빔의 파장에서 재료의 흡광계수 (α)가 상대적으로 크게 되면 실제 총이득 (net gain) 값은 관찰되지 않는다. 따라서 실제응용을 위해서 재료의 총이득 값, 즉 $\Gamma - \alpha \gg 0$ 가 요구되어진다.

그림 4(b)는 PVK/PDCST/TNF 고분자 system ($\alpha = 2.3 \text{ cm}^{-1}$)의 2BC 실험의 한 예를 보여주는 것인데, 빔 1에 대해 $I/I(t=0) = \gamma = 1.06$ 의 포화된 값에 도달하였을 때 두 빔결합 이득계수는 7.8 cm^{-1} 로 측정되었고, 총 이득 > 0 를 관찰할 수 있었다.¹³

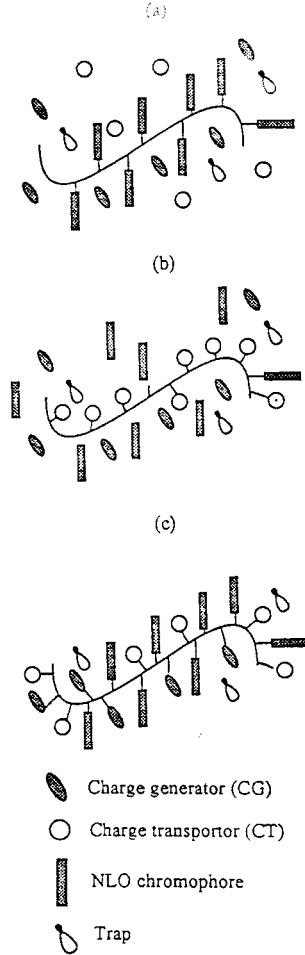


그림 5. Three approaches to creating PR polymeric material.

3. PR 고분자재료

지금까지 많이 연구되어 온 PR 고분자 재료는 크게 세가지 개념으로 분류될 수 있는데, 첫째는 비선형 광학 고분자 재료에 광전도성을 도입하는 것이 있고, 두번째는 그 반대의 경우가 있으며, 세번째는 비선형 광학성과 광전도성을 함께 함유하는 경우 등이다. 따라서 재료의 설계는 세가지 경우가 가능하게 된다 (그림 5). 사실 지금까지 연구되어 온 PR 고분자 재료는 그림 5(a)의 형태와 같이 비선형 광학 고분자 재료에 광전도성을 나타낼 수 있는 전하발생체 (CG)와 전하수송체 (CT)를 도핑한 것 (그림 6과 7)과 그림 5(b)의 형태처럼 광전도성 고분자 재료에 NLO 색소를 도핑한 복합체 형태가 주류를 이루어 왔는데, 이는 기존에 많이 연구되는 system이다. (b)의 경우는 PVK에 각각의 system에 맞는 dopant (charge generator, charge transporter,

NLO 색소)를 도핑하는 비교적 쉬운 제조 방법에 바탕을 두고 있다.¹⁴ **그림 5(c)**는 고분자 재료의 측사슬이나 주사슬에 광전도성을 나타내는 전하발생체(CG)와 전하수송체(CT)의 화합물과 비선형 광학 성질을 나타내는 NLO 색소들을 화학적으로 공유결합시켜 완전 기능화된 system이다. 이 system은 재료 측면에 많은 장점이 있으며 최근에 많은 연구가 진행되고 있다.

각 system의 구체적인 예를 들어보면 (a)의 경우 앞서 말한 IBM 연구팀이 발표한 연구결과중에 대표적인 것으로 *Science*지에 Ducharme 등에 의해 보고된 것들을 들 수 있는데, 사용된 system은 전기광학 고분자재료인 BisA-NAS와 정공수송체인 DEH 29% 무게 함량비로 혼합된 system인데 145 μm 정도의 두꺼운 시료에 높은 전장을 인가함으로써 56 cm⁻¹ 이상의 두 범결합 이득계수를 얻었다. 이 결과는 이전에 보고된 값의 약 100배에 달하는 값이다. 그러나 이러한 값은 시료 자체의 높은 선형 흡광 계수 (α) 값을 능가하지 못하므로 실제적인 응용으로는 사용이 힘들다. 즉 총 이득 < 0 이다.¹⁵ **표 1**은 비선형 광학 고분자 재료에 광전도성을 나타낼 수 있는 전하발생체(CG)와 전하수송체(CT)를 도핑한 system에서 얻어진 결과를 정리하였다.

(b)의 경우에 있어서는 두 가지의 광전도성 고분자 재료 PVK와 polysilanes가 주로 사용되어 왔는데, 보고된 것들의 대부분이 PVK에 근거한 system이다 (**그림 8**).

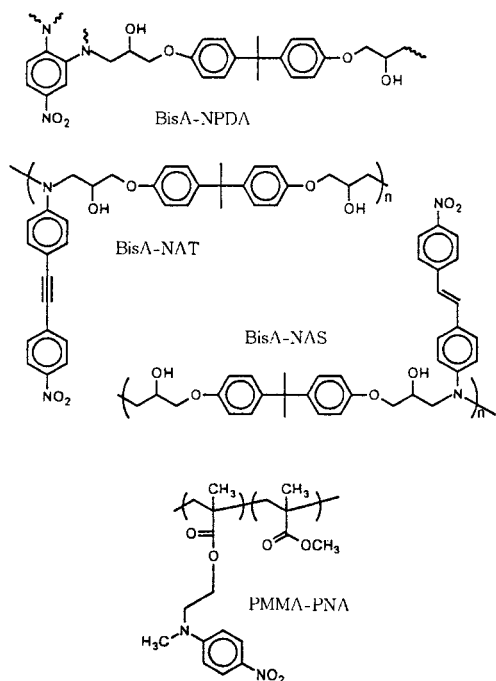


그림 6. Nonlinearoptical polymers which have served as hosts for PR composite materials.

광전도성 고분자재료에 비선형 광학 색소를 도핑한 system에서 얻어진 결과를 **표 2**에 나타내었다. 주된 연구 그룹으로는 SUNY Buffalo의 photonics research laboratory과 Arizona 대학 연구팀으로 볼 수 있는데 전자적 경우 PVK/DEANST (25 wt %) / C₆₀ (0.56 wt %) system에 화학적으로 안정한 가스제인 DBP (20 wt %)를 사용하였는데 이는 고분자 system의 T_g (유리전이 온도)를 상온으로 떨어뜨림으로 system 내의 NLO 색소의 배향을 전기장으로 조절할 수 있어 소위 on-off 교환 개념을 도입하였으며,²⁶ 최근의 연구 결과에서는 NLO 색소인 DEANST를 단지 3.75% 무게 함량비로 도핑한 경우에 40% 이상의 회절 효율과 115 cm⁻¹의 총 2BC 이득 계수 Γ의 값을 얻었다.

한편 Arizona대학 연구팀은 최근 *Nature*지에 PVK/TNF/DMNPAA/ECZ [33 : 1 : 50 : 16 wt %] system을 사용한 광굴절성 실험에서 86%의 회절효율과 200

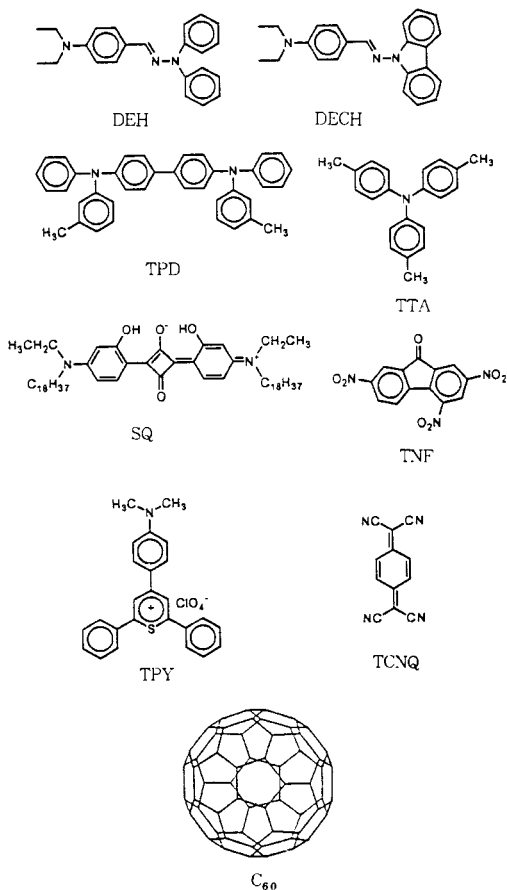


그림 7. Charge-transporting molecules and photocharge generation sensitizers used in PR composite materials (note : TNF is used as a sensitizer in the form of a charge transfer complex with carbazole).

II 1. Optical Properties of Doped Materials Based on NLO Polymer Hosts

NLO-Polymer System	Hole Transporting Agent (CT)	Charge Generation Sensitizer	λ (nm)	α (cm ⁻¹) · Γ (cm ⁻¹)	η (%)	External Field E (V/ μ m)	Ref.	
Bis-NAS	DEH	No	650	>200	56	70	15	
Bis-NAT	DEH	No	650		>0.11	138	16	
Bis-NAT ^a	DEH	No	676	18	1.8	55	17	
PMMA-PNA	DEH	C ₆₀	647	3.4	0.5	5 × 10 ⁻³	11	18
PC-NPP ^b	DEH	SQ/TCNQ	632.8	10	1.1	34.9	19	
PMMA-DTNBI ^c		C ₆₀	676	12	28	56	20	
PENHCOM ^d		C ₆₀	633	25	7	100	21	

^a $\alpha=2.4$ cm⁻¹ and $\Gamma=2.4$ cm⁻¹ at 753 nm.

^b Decomposed polymeric composite system : Polycarbonate (PC) doped with NPP (30 wt%) and DEH (50 wt%) was heated at 250 °C. The decomposition temperature of DEH is 220 °C.

^c PMMA : DTNBI (33 wt%) : C₆₀ (0.2 wt%), 125 μ m thick films, $T_g=45$ °C.

^d C₆₀ (0.2 wt%). The sample was 100 μ m thick.

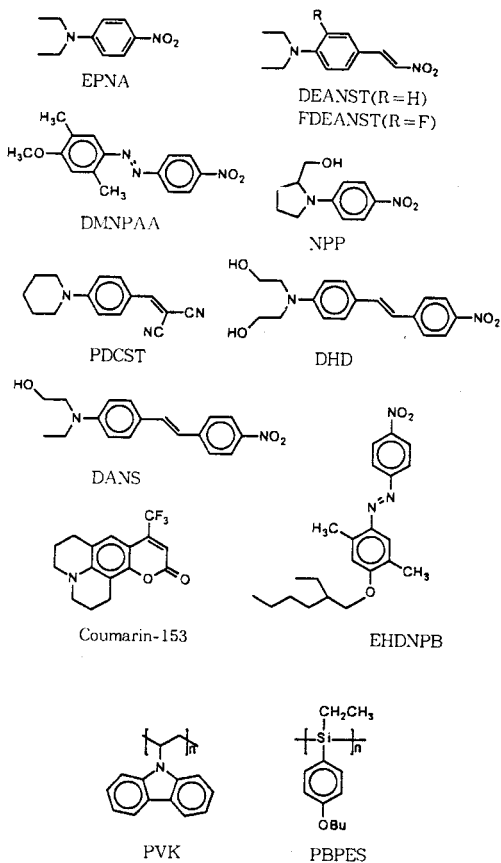


그림 8. Nonlinear optical molecules have been added to charge-transporting polymers and charge-transporting polymers which have served as hosts for PR composite materials.

cm⁻¹ 이상의 총 2BC 이득 계수 Γ 의 값을 발표하여 많은 과학자의 관심이 집중되기도 했다.³⁰ 그러나 여기에서 간과되어선 안될 것은 이러한 높은 수치가 실제적 응용으로 이어진다는 것을 의미하는 것은 아니다. 실제적 응용에는 많은 필요 조건들, 예를 들면 박막의 질, 저장시간

등이 만족되어지지 않으면 안된다. 이러한 복합형 system에서는 NLO 색소와 전하 수송체의 함량이 많아지면 안정성이 떨어지며, 상분리가 일어나는 등의 문제가 발생하는데 이들 문제는 고분자 매질을 사용할 경우 더욱 커진다. 복합형 system의 또 다른 결점은 전기 광학 응답속도 (NLO 색소의 농도에 비해)와 전하 수송속도 (CT의 농도에 의존)의 경쟁 관계에 놓인다는 것이다.

이들 문제를 극복하기 위해 2차 비선형 광학 특성과 전하수송 특성을 동시에 가지는 bi-functional 분자를 도입하여 높은 PR 효과와 빠른 응답 속도를 동시에 얻을 수 있다. Stankus³¹ Zhang 등에³² 의해 이 system에 대한 접근이 이루어졌다(그림 9). C₆₀이 전하발생체로 사용되었고 PMMA ($T_g=105$ °C)와 그 유도체인 PBMA ($T_g=27$ °C)가 고분자 매질로 사용되었다.

그러나 비슷한 구조의 색소를 사용했을 때 PBMA를 바탕으로 한 복합형태가 보다 높은 격자효율을 보였다. 이는 고분자 매질의 T_g 가 낮음으로 해서 색소의 재배향이 용이하기 때문이다. 그림 10에 전기광학 계수 r , 광전도도, 격자효율 η , 총 2BC 이득 계수 Γ 의 색소 농도에 대한 의존성에 대한 연구 결과가 보고되었다.³³

그러나 이러한 복합 형태의 PR 재료의 경우 다소 경제적인 잇점도 있지만 근본적으로 도핑이라는 과정에 의해 dopant들이 고분자 매질에 분산되어 있는, 즉 화학 결합이 아닌 상태이므로 dopant의 고분자 매질로의 용해성에 한계가 있으며 제조 후에도 dopant들이 서서히 고분자 매질에 빠져나와 물성의 내구성이 문제가 된다. 그러므로 모든 기능성 분자들이 고분자 주쇄에 공유 결합한 그림 5(c)와 같은 경우의 PR 재료의 합성이 필요하게 되었는데 아직까지는 합성 자체의 어려움 때문에 극히 극소수의 물질만 보고되어 있는게 현실이다.

Chicago대학의 Yu 등은 poly(phenylene-co-thiophene)계열, poly(phenylenevinylene) (PPV) 계열과 polyimide계열 등의 주사슬에 NLO 색소를 화학적으로 공유결합시키고, 이 주사슬의 공액구조와 포피린들이 나

표 2. Optical Properties of Doped Materials Based on Photoconducting Polymer Hosts

Polymer	Chromophore	Charge Generation Sensitizer	λ (nm)	α (cm ⁻¹)	Γ (cm ⁻¹)	η (%)	External Field E (V/ μ m)	Ref.
PVK	DEANST	TPY	703	14	7	1.1	62.5	22
PVK	EPNA	TNF	633		a	0.2	b	23
PVK	DMNPAA	TNF (ECZ) ^c	674		30	5	40	24
PVK	F-DEANST	TNF	647		11	1.2	40	25
PVK	DEANST	C ₆₀	645		4	2	50	26
PVK	DEANST	C ₆₀ (TCP) ^d	632.8	17	133.6	40	110	27
PVK	BHDNPB	TNF	676	3.5	120	60	~57	28
POMDT ^e		TNF	735	46	24.5			29

^a Net gain = 18 cm⁻¹, PVK:DPNA (39 wt%) : TNF (0.1 wt%), 400 ms response time was measured in this system.

^b The corona field was 10 kV and the sample was 65 μ m thick.

^c PVK : DMNPAA (39.7 wt%) : ECZ (19.8 wt% as plasticizer) : TNF (0.8 wt%).

^d PVK : DEANST (3.75 wt%) : TCP (36 wt% as plasticizer) : C₆₀ (0.22 wt%).

^e POMDT (61 wt%) : DOP (30 wt%) : CNNB-R (7.6 wt%) : TNF (1.4 wt%). The sample was 80 μ m thick.

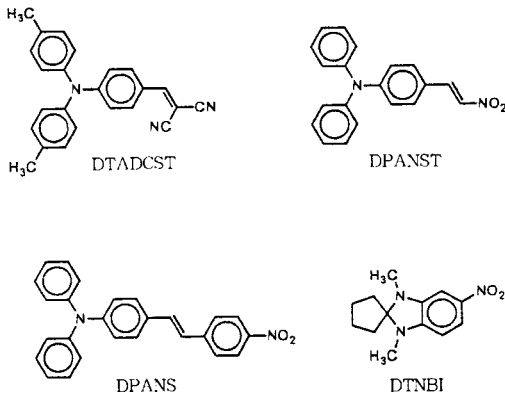
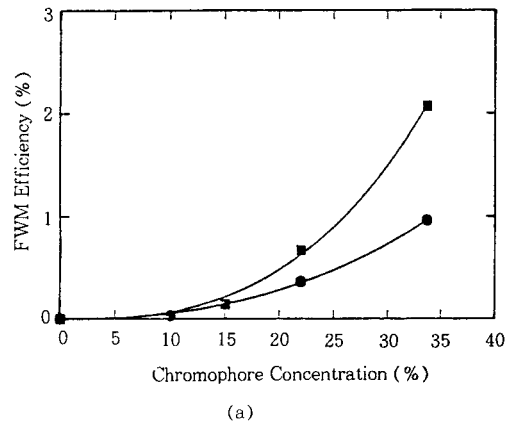


그림 9. Bi-functional chromophores used in PR composite materials.

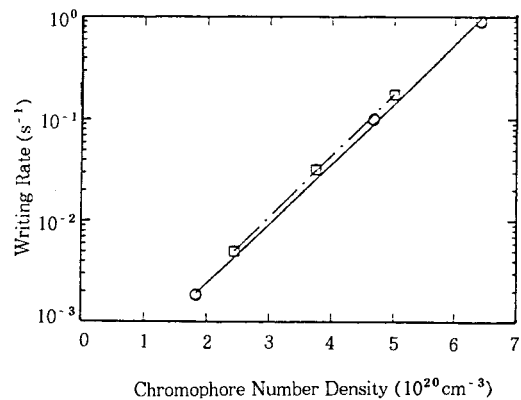
타내는 광전도성 성질을 이용한 완전 기능화된 단일 측사슬 광굴절 고분자를 합성하였다 (그림 11).³⁴

특히 폴리이미드-포피린 system에서 폴리이미드의 높은 T_g 를 이용하여 NLO 색소의 쌍극자 배향을 고정하여 전기 광학효과의 안정성을 높이고, 전하이동 기능이 뛰어난 포피린을 이용하여 총 2BC 이득 계수를 증가시켰다. 합성된 폴리이미드의 흡광계수는 690 nm 파장에서 1260 cm⁻¹이었으며 코로나 극대화한 (poling field, 2 mV/cm) 이후의 1064 nm 파장에서 $d_{33}=110$ pm/V로 높게 나타났으며, 이 전기광학 성질이 열적 시간적으로 안정하였다. 두 빔결합에 의해 측정된 총 2BC 이득 계수, Γ 의 값이 22.2 cm⁻¹의 PR 효과를 나타냈다.

현재 국내에서는 한남대/한국과학기술원 연구팀에서 비교적 합성이 용이하고 또한, 다양한 조성비 (기능성 분자들의)로 합성되어질 수 있는 poly(1,6-heptadiyne) 유도체를 근거한 PR 고분자 재료와³⁵ 폴리이미드계를 바탕으로 한 PR 고분자 재료를 합성하여 광굴절 특성을



(a)



(b)

그림 10. Dependence of the photorefractive properties on the chromophore concentration in composites containing bi-functional chromophores. (a) Concentration dependence of the four-wave mixing (FWM) diffraction efficiency. Solid curves are fits of the data to an expression $\eta \propto N^2$. (b) Concentration dependence of the holographic grating writing rate. Lines are a guide to the eye. Circles : Composites containing DPANST; Squares : Composites containing DPANS.

연구 중에 있다. 특히 poly(1,6-heptadiyne) 유도체를 근거한 PR 고분자 system은 어떠한 전하발생체도 필요하지 않으며 고분자내에서 전하 착제(charge transfer complex)를 형성할 수 있어 다른 system보다 단순하게 할 수 있는 잇점을 갖추고 있다(그림 12). 또한 내구성 이 매우 우수하고, 뛰어난 이차 비선형 광학 특성을 가진

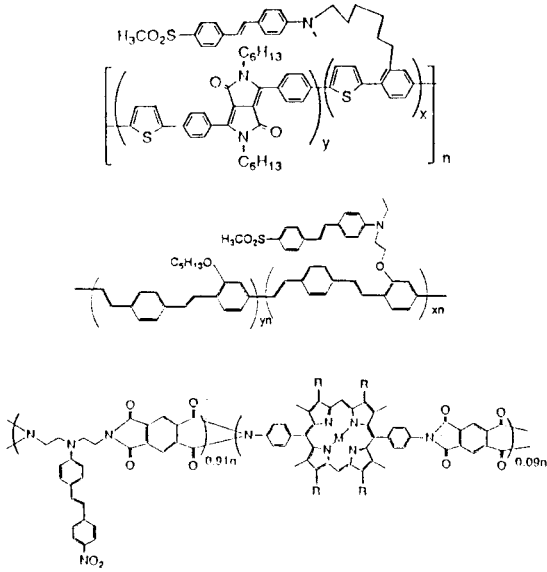
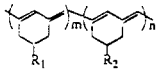
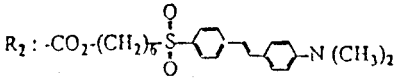


그림 11. Multifunctional and fully functionalized PR polymers.

Structure of Polymer



R₁: -CO₂-(CH₂)₆-Cvz (Cvz: Carbazole)



Schematic Structure of Conjugated Photorefractive Polymer

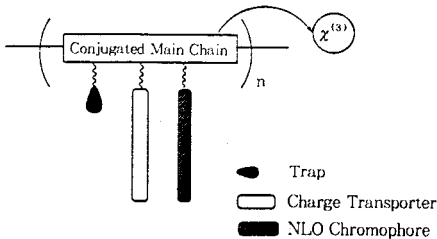


그림 12. Poly(1,6-heptadiyne)-based PR materials.

폴리이미드 유도체들을 바탕으로 한 PR 고분자 재료는 모든 기능성 분자들이 고분자 주쇄에 공유 결합되어 있으며, 또한 다양한 조성비로 합성되어질 수 있는 잇점이 있다.

4. 광굴절 고분자 재료의 최적 에너지 준위¹⁴

PR 효과를 극대화시키기 위해서 PR 물질의 여러 성분들의 흡수특성은 주의깊게 선택해야 한다. 특히 NLO 색소와 전하수송체(charge transporting agent: CTA 또는 CT)는 비선형 광학과 전하이동을 최대화시키기 위해서 높은 농도로 사용하고 있다.

무기 PR 결정에서는 불순물 또는 결함(defect)의 에너지 준위를 조절하여 대부분 밴드갭(band gap)을 작게 하여 장파장에서 광흡수가 일어나게 한다. 유기물의 경우를 설명하기 위해 PR 물질의 여러 성분에 관한 HOMO(highest occupied molecular orbital)와 LUMO(lowest unoccupied molecular orbital)의 에너지 차이의 최적 에너지 준위를 그림 13에 보였다. 대부분의 광전도성 물질 또는 NLO 색소를 함유한 고분자들은 가시영역에서 투명하며 주로 자외선 영역에서 고분자 매질의 HOMO-LUMO 전이가 일어난다. 대부분의 NLO 색소들은 가시영역의 청-녹색 영역에서 강하게 흡수하는데, 이는 NLO 색소의 공액구조의 강한 전하이동 전이에 기인하기 때문이다.

전하발생체(charge generating agent, CGA)는 최소의 밴드갭을 가져서 최대 파장에서 흡수가 일어나야 한다. 이것은 전하발생체를 제외한 다른 모든 성분의 흡수를 최소화하기 위한 파장의 선택이다. 다시말하자면, PR 효과를 극대화하기 위해 전하발생체가 먼저 선택적

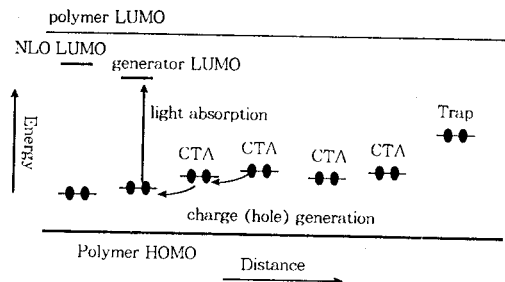
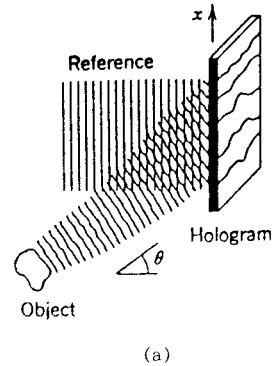


그림 13. Schematic illustration of the location of the relevant energy levels for the various components of a PR polymer in the context of hole generation, transport, and trapping processes. The HOMO-LUMO optical absorption of the host polymer, NLO chromophore, and charge generating agent must be at longer and longer wavelengths, respectively. The charge-transport agent (CTA) is not optically excited, but forms a network for hopping of photogenerated holes to a trapping site.

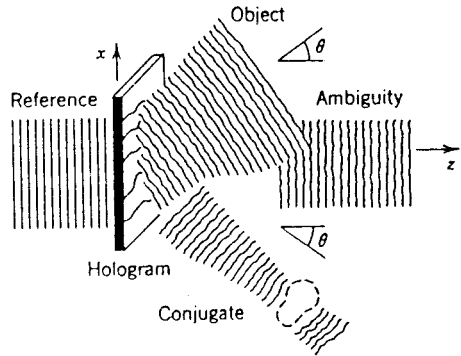
광흡수가 일어나게 해서 전하를 발생시켜야 한다. 다른 요소에 의한 흡수는 바탕 흡수를 증가시키고 PR 효과에는 기여하지 못한다. 이러한 불필요한 광흡수를 제거하여 굴절을 격자의 생성과 2BC 이득 계수 증가를 도모해야 한다. 이러한 이유와 같이 전하수송체의 광흡수는 **그림 13**에 보는 것과 같이 전하발생체보다는 높은 HOMO 에너지준위를 가진다 (LUMO가 보여지지 않았지만). 이러한 이유로 PR 효과를 극대화시키기 위해서 PR 물질의 여러 성분들의 흡수 특성은 주의깊게 선택되어야 하며, **그림 13**에 PR 고분자의 여러 성분이 가지는 HOMO의 최적 에너지 준위를 나타냈다 (정공이 이동전하운반체일 경우).

5. 광굴절 고분자 재료를 이용한 광정보처리 소자

광굴절 효과를 나타내는 물질은 광전도 특성과 전기광학 특성을 함께 갖고 있어 공간적으로 분포된 광패턴을 인식하여 같은 모양의 패턴을 갖는 굴절을 분포 형태로 저장할 수 있는 능력을 갖고 있다. 이러한 과정을 다시 정리해 보면, 광굴절 효과를 나타내는 매질에 빛을 노출시키면 물질내의 불순물 에너지 준위에서 전도대로 여기된 자유공간 전하가 생성되고 이 자유공간 전하들은 이동-확산-표류하여 다른 이온화된 불순물 준위에서 포착되어 재결합(trap)하게 된다. 이때 비균질 분포의 공간 전하가 형성되고, 이 전하 분포는 내부 전기장 패턴을 형성하게 되며, 내부 전기장은 전기광학 효과를 사용하여 물질의 굴절율을 공간적으로 분포하여 변화시킴으로써 광영상 신호의 기록이 가능한 위상 홀로그램(phase volume hologram)을 시킨다. 홀로그래피는 **그림 14**에 보는 바와 같이 두 개의 광파형이, 즉 기준파형과 입력영상 파형, 결합할 때 간섭된 정상파의 패턴이 형성되고, 이것은 다시 굴절을 변화 패턴으로 격자를 형성하여 물질내에 저장된다. 이때 패턴이 저장된 물질에 기준파형을 입사시키면 원래의 입력 영상파형을 재생시킬 수 있다. 위상 홀로그램은 100%에 가까운 높은 회절효율을 얻을 수 있고, 감도가 높아 짧은 시간에 기록이 가능하고, 실시간 공정 처리가 가능하므로 기억소자의 응용이 가능하다. 또한 위상 홀로그램에서는 정확한 Bragg 각에서만 회절되는 빛이 나타남으로 여러 각으로 입사하는 중첩에 의한 지점에 여러 개의 홀로그램을 기록할 수 있다. 이러한 특징으로 병렬처리에 뛰어난 특성을 가지고 있기 때문에 기억소자의 밀도가 매우 큰 잇점이 있어 많은 연구가 이루어지고 있다. 또한 이러한 영상저장 특성을 이용하여 실시간 홀로그램(hologram) 형태의 "two-wave mixing"을 가능하게 한다. Two-wave mixing 방법은 2연산 논리 수행, 광증폭, 광배선 등 여러 방법에 응용될 수



(a)



(b)

그림 14. 홀로그램을 이용한 정보처리. (a) 입력신호(object wave)와 기준신호의 간섭패턴 저장, (b) 입력신호의 재생.

있다.³⁶

6. 맺음말

주요 광굴절 물질로서 지금까지는 무기 재료인 BaTiO₃, Bi₁₂SiO₂₀, LiNbO₃, KNbO₃, GaAs, (Sr, Ba)Nb₂O₆ (SBN) 등이 널리 사용되고 있으나, 무기재료는 결정형태를 갖는 것이 많아 제작상 어려운 점이 있다. 최근들어 이러한 문제를 해결하기 위해 유기 광굴절 고분자 재료를 이용하여 광정보처리 기억소자로서의 응용 가능성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 유기 광굴절 소재가 기억소자로서 부각되는 이유는 유기 화합물 분자의 구조가 단순하고 분자 설계에 의해 얼마든지 변화시킬 수 있고, 고분자 특유의 탁월한 기계적, 열적, 환경적 특성으로 인한 유기물의 뛰어난 가공성으로 박막 필름을 쉽게 얻을 수 있는 장점도 아울러 가지고 있기 때문이다. 지금까지 연구된 유기 광굴절 고분자 재료에 대한 연구는 1991년에 미국의 IBM 연구팀이 처음으로 광굴절 효과를 나타내는 고분자 기억 소자로서의 가능성을 보고한 후에, 비선

형 광학 고분자 매질에 광전도성 특성을 나타내기 위하여 전하발생체, 전하 수송체, 트랩 유기물을 주입시킨 주인-손님계 (composite)와 비선형 광학 유기물과 광전도성 유기물이 spacer를 이용하여 주사슬에 동시에 공유 결합으로 연결된 측사슬 광굴절 고분자 재료 등이 있다. 특히 주인-손님계 고분자의 경우에는 비선형 유기물이나 광전도성 유기물들이 고분자 매질에 대한 용해도가 낮아서 광소자 제작에 이용할 수 없다는 결점이 있다. 이러한 문제점을 해결하고자 비선형 광학 유기물과 광전도성 유기물을 도핑하는 대신에 spacer를 이용하여 주사슬에 동시에 공유 결합으로 연결된 측사슬 광굴절 고분자 재료가 개발되었다. 이 방법에 의하여 비선형 광학 유기물 밀도를 높여 전기 광학 계수를 증가시킬 수 있었고 열적 안정도를 향상시키고 있다. 현재의 추세는 측사슬 광굴절 고분자 재료의 개발에 박차를 가하고 있다. 이와 같이 선진국에서 광굴절 고분자 재료에 대한 연구를 선도하고 있는 실정이다. 국내에서는 광굴절 고분자 재료에 대한 관심은 높지만, 실제로 연구를 하여 연구 결과를 발표하는 대학 및 연구기관은 전무한 실정이다. 현재로 세계 어느 연구팀에서도 광굴절 고분자 재료를 실제적으로 실용화한 경우는 없으나 광굴절 고분자 재료의 개발 성공시에 정보통신 분야에 미치는 영향을 고려해 볼 때 이에 대한 연구 수행이 절실히 요구된다.

참 고 문 헌

1. A. Ashkin, G. D. Boyden, J. M. Dziedzic, R. G. Smith, A. A. Ballman, and J. J. Levenstein, *K. Nassau, Appl. Phys. Lett.*, **9**, 72 (1966).
2. F. S. Chen, *J. Appl. Phys.*, **38**, 3418 (1967).
3. W. K. Chan, L. Yu, *Macromolecules*, **28**, 6410 (1995).
4. P. C. Yeh, *Introduction to Photorefractive Nonlinear Optics*, John Wiley, New York, 1993.
5. P. Gunter, J. P. Huignard, Eds., *Photorefractive Materials and Their Applications I & II*, Springer-Verlag, Berlin, 1988.
6. G. Roosen, J. P. Huignard, M. Crorin-Golomb, Eds., *Photorefractive Materials, Effects and Applications*, *J. Opt. Soc. Am.*, **B7**, 2242 (1990).
7. J. Feinberg, B. Fischer, Eds., *Photorefractive Materials, Effects and Applications*, *J. Opt. Soc. Am.*, **B9**, 1404, 1606 (1992).
8. L. Hesselink, E. Kratzig, K. H. Ringhofer, Eds., *Photorefractive Materials Effects and Applications*, *J. Opt. Soc. Am.*, **B11**, 1648 (1994).
9. K. Sutter, J. Hullinger, P. Gunter, *Solid State Commun.*, **74**, 867 (1990).
10. K. Sutter, P. Gunter, *J. Opt. Soc. Am. B*, **7**, 2274 (1990).
11. S. Ducharme, J. C. Scott, R. J. Twieg, W. E. Moerner, *Phys. Rev. Lett.*, **66**, 1846 (1991).
12. S. Ducharme, J. C. Scott, R. J. Twieg, W. E. Moerner,

Postdeadline Paper, OSA Annual Meeting, Boston, MA, November 5-9, 1990.

13. S. M. Silence, M. C. J. M. Donckers, C. A. Walsh, D. M. Burland, R. J. Twieg, W. E. Moerner, *Applied Optics*, **33**, 2218 (1994).
14. W. E. Moerner, S. M. Silence, *Chem Rev.*, **94**, 127 (1994).
15. M. Liphardt, A. Goonesekera, B. E. Jones, S. Ducharme, J. M. Takacs, L. Zhang, *Science*, **263**, 367 (1994).
16. S. Ducharme, B. Jones, J. M. Takacs, L. Zhang, *Optics Letters*, **18** 152 (1993).
17. S. M. Silence, F. Hache, M. Donckers, C. A. Walsh, D. M. Burland, G. C. Bjorklund, R. J. Twieg, W. E. Moerner, *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, **1852**, 253 (1993).
18. S. M. Silence, C. A. Walsh, J. C. Scott, W. E. Moerner, *Appl. Phys. Lett.*, **61**(25), 2967 (1992).
19. K. Yokoyama, K. Arishima, K. Sukegawa, *Appl. Phys. Lett.*, **65**(2), 132 (1994).
20. S. M. Silence, R. J. Twieg, G. C. Bjorklund, W. E. Moerner, *Phys. Rev. Lett.*, **72**(15), 2047 (1994).
21. C. Zhao, C. K. Park, P. N. Prasad, *Chem. Mater.*, **7**, 1237 (1995).
22. Y. Zhang, C. A. Spencer, S. Ghosal, M. K. Casstevens, R. Burzynski, *J. Appl. Phys.*, **76**(2), 671 (1994).
23. G. G. Malliaras, V. V. Krasnikov, H. J. Bolink, G. Hadziioannou, *Appl. Phys. Lett.*, **65**(3), 262 (1994).
24. B. Kipplen, Sandalphon, N. Peyghambarian, S. R. Lyon, A. B. Padias, H. K. Hall Jr., *Electronic Letters*, **29**, 1873 (1993).
25. M. C. J. M. Donckers, S. M. Silence, C. A. Walsh, F. Hache, D. M. Burland, W. E. Moerner, N. J. Twieg, *Optics Letters*, **18**, 1044 (1993).
26. M. E. Orczyk, J. Zieba, P. N. Prasad, *J. Phys. Chem.*, **98**, 8699 (1994).
27. M. E. Orczyk, B. Swedek, J. Zieba, P. N. Prasad, *J. Appl. Phys.*, **76**(9), 4995 (1994).
28. A. M. Cox, R. D. Blackburn, D. P. West, T. A. King, F. A. Wade, D. A. Leigh, *Appl. Phys. Lett.*, **68**(20), 2801 (1996).
29. L. Li, K. G. Chittibabu, Z. Chen, J. I. Chen, S. Marturunkakul, J. Kumar, S. K. Tripathy, *Optics Commun.*, **125**, 257 (1996).
30. K. Meerholz, B. I. Volodin, Sandalphon, B. Kippelen, N. Peyghambarian, *Nature*, **371**, 497 (1994).
31. J. J. Stankus, S. M. Silence, R. J. Twieg, D. M. Burland, R. D. Miller, J. C. Scott, W. E. Moerner, G. C. Bjorklund, *Proc. SPIE*, **2285**, 204 (1994).
32. Y. Zhang, S. Ghosan, M. K. Casstevens, R. Burzynski, *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 256 (1995).
33. Y. Zhang, S. Ghosan, M. K. Casstevens, R. Burzynski, *J. Appl. Phys.*, in press (1996).
34. L. Yu, W. K. Chan, Z. Peng, A. Gharavi, *Acc. Chem. Res.*, **29** (1996).
35. (a) S. K. Choi, J. H. Lee, H. K. Kim, *Macromol. Symp.*, in press; (b) J. H. Lee, I. K. Moon, H. K. Kim, S. K. Choi, *ACS Polym. Preprints*, **36**(1), in press.
36. K. I. Kitayama and F. Ito, "Optical Signal Processing using Photorefractive Effect", on a Special Issue of Multidimensional Systems and Signal Processing, *An International Journal*, **2** (4), 1991.

Appendix.

BisA-NAS : Poly(4,4'-isopropylidenediphenol-*co*-4-nitro-4-bis(2,3-epoxypropyl)-aminostilbene)
BisA-NAT : Poly(4,4'-isopropylidenediphenol-*co*-4,4'-nitroaminotolane)
BisA-NPDA : Poly(4,4'-isopropylidenediphenol-*co*-4-nitro-1,2-phenylenediamine)
C₆₀ : Buckminsterfullerene
CNNB-R : 3-Cinnamoyloxy-4-[4-(*N,N*-diethylamino)-2-cinnamoyloxy phenylazo]-nitrobenzene
DBP : Dibutylphthalate
DEANST : 4-(*N,N*-Diethylamino)-(*E*)- β -nitrostyrene
DECH : *p*-Diethylaminobenzaldehyde-*N*-carbazolylhydrazone
DEH : *p*-Diethylaminobenzaldehydediphenylhydrazone
DHD : 4-(*N,N*-bis[β -hydroxyethyl]amino)-4'-nitrostilbene
DMNPAA : 2,5-Dimethyl-4-methoxy-4'-nitrostilbene
DOP : Diisooctylphthalate
DPANS : 4-(*N,N*-Diethylamino)-4'-nitrostilbene
DR-1 : 4-(*N*-Ethyl-*N*-hydroxyethylamino)-4'-nitro-1,1'-azobenzene
DTADCST : 4-(*N,N*-Bis-(*p*-tolyl)amino)- β,β -dicyanostyrene
DTNBI : 1,3-Dimethyl-2,2-tetramethylene-5-nitrobenzimidazole
ECZ : 9-Ethylcarbazole
EHDNPB : 1-(2'-Ethylhexyloxy)-2,5'-dimethyl-4-(4"-dinitrophenylazo)benzene
EPNA : *N,N*-Diethylamino-4-nitrobenzene
FDEANST : 3-Fluoro-4-(*N,N*-diethylamino)- β -nitrostyrene
NPP : *N*-(4-Nitrophenyl)-(L)-prolinol
NPDA : 1,2-Diamino-4-nitrobenzene
PBPEs : Poly(*p*-Butoxyphenylethylsilane)
PDCST : 4-Piperidyl-*p*- β,β -dicyanostyrene
PENHCOM : Poly-[4-(*N*-ethyl-*N*-(hydroxyethyl)amino)-4'-nitrostilbenyl methacrylate]-*co*-[*N*-(2-hydroxyethyl)carbazolyl]-*co*-[n-octyl methacrylate])
PMMA : Poly(methylmethacrylate)
PMMA-PNA : Poly{methylmethacrylate-*co*-2-[(*N*-*p*-nitrophenyl-*N*-methyl)]-aminoethylmethacrylate}
PVK : Poly(9-vinylcarbazole)
SQ : Bis[4-(*N*-ethyl-*N*-octadecyl)-amino-2-hydroxyphenyl]cyclobutadienylium-1,3-diolate
TCNQ : 7,7,8,8-Tetracyanoquinodimethane
TCP : Tricresylphosphate
TNF : 2,4,7-Trinitrofluorenone
TPD : *N,N'*-Diphenyl-*N,N'*-bis(3-methylphenyl)-(1,1'-biphenyl)-4,4'-diamine
TPY : 4-(4-Dimethylaminophenyl)-2,6-diphenylthiapyrylium perchlorate
TTA : Tris-*p*-tolylamine