

비선형 광학 고분자와 광소자

이 명 현 · 민 유 홍 · 도 정 윤

1. 서 론

20세기가 산업사회라면 21세기는 정보의 시대이다. 산업사회에서는 상품이 가치를 창조했으나 인터넷과 더불어 시작한 21세기는 정보가 가치를 창출하기 시작했다. 정보 상품의 가치가 효과적으로 창출되기 위해서는 산업사회에서 불가피 했던 상품의 운송과 이에 필요한 시간이라는 개념이 없어져야 한다. 그림 1은 정보통신 기술의 발전 추이와 이에 따른 전송 요구량을 보여주고 있다. 과거 음성통신과 일부 데이터 통신에서 필요로 했던 소규모의 전송용량은 화상 통신, 인터넷 폰, 전자신문, 웹 TV 뿐만 아니라 더 나아가 전자 상거래, 가상 현실, 재택 근무, 원격 교육 등이 점차 현실화되면서 폭발적으로 증가하고 있다. 현재 사용되고 있는 유무선 복합기술 등의 정보통신 기술로는 이러한 전송용량의 수요 증가를 따라잡기에 역부족이며, 궁극적으로 초고속 광통신망의 구축만이 이를 해결할 수 있다. 이를 위해 현재 전세계적으로 초고속 정보통신망이 구축되

고, 차세대 무선 통신 기술 및 인터넷 기술 등이 활발히 연구되고 있다.

광통신 연구는 1970년대 초부터 시작되었다. 1980년대 초기에 광통신은 주로 공간분할다중(Space Division Multiplexing, SDM) 방식과 시간분할다중(Time Division Multiplexing, TDM) 방식을 이용하여 광신호의 속도를 증가하기 위한 연구가 진행되었으며, 1990년대 초기에 들어서는 대용 정보의 통신을 위하여 공간분할다중과 시간분할다중



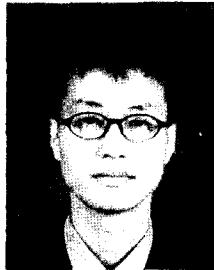
이명현

1981~ 서울대학교 금속공학과 (공학사)
1985~ 서울대학교 금속공학과 (공학석사)
1987~ KIST 재료공학부, 연구원
1989~ Univ. of Oxford 재료과 (공학박사)
1993~ 한국전자통신연구원, 원천기술 연구본부, 선임연구원
현재 연구본부, 선임연구원



민유홍

1987~ KAIST 물리과(이학사)
1991~ KAIST 물리과(이학석사)
1993~ KAIST 물리과(이학박사)
1997~ KAIST 자연과학연구소, 박사후연구원
1998~ 뉴욕주립대, 박사후연구원
1999~ 한국전자통신연구원, 원천기술 연구본부, 선임연구원
현재 연구본부, 선임연구원



도정윤

1987~ 부산대학교 화학과(이학사)
1991~ KAIST 화학과(이학석사)
1993~ KAIST 화학과(이학박사)
1996~ 한화종합화학(연구소), 선임연구원
1999~ 한국전자통신연구원, 원천기술 연구본부, 선임연구원
현재 연구본부, 선임연구원

Nonlinear Optical Polymers and Devices

한국전자통신연구원 원천기술연구본부(Myung-Hyun Lee, Yoo Hong Min, and Jung Yun Do, Telecommunications Basic Research Lab., Electronics and Telecommunications Research Institute, 161 Kajong-Dong, Yusong-Gu, Taejeon 305-350, Korea)

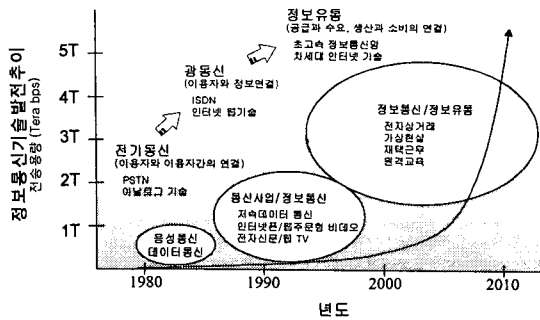


그림 1. 정보 통신 기술의 발전 추이와 이에 따른 전송 요구량.

방식과 더불어, 여러 파장의 광을 동시에 전송할 수 있는 파장분할다중(Wavelength Division Multiplexing, WDM) 방식이 각광을 받으면서 활발한 연구가 진행되고 있다. 1970년에 미국의 Bell연구소, 소련 그리고 일본의 NEC에서 $0.85 \mu\text{m}$ 파장의 광을 연속 발전하는 GaAlAs LD(Laser Diode)가 잇달아 개발되면서, 이 당시 개발된 광섬유의 저손실 구간인 $0.85 \mu\text{m}$ (First Window) 파장 영역에서 광통신 구현을 가능하게 하였다. $0.85 \mu\text{m}$ 파는 현재에도 일부 LAN등 단거리 통신 시스템에 이용되고 있다. 이후 InGaAsP를 이용하여 $1.3, 1.55 \mu\text{m}$ 파를 발전하는 LD가 개발되었고, 광섬유의 저손실 영역도 $1.3 \mu\text{m}$ (Second Window)으로, 그리고 $1.55 \mu\text{m}$ (Third Window)로 변천해 왔다. 특히, $1.55 \mu\text{m}$ 근처의 넓은 저손실 영역과, 이 파장 영역에서 동작하는 광섬유 증폭기(Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA) 및 반도체 광 증폭기(Semiconductor Optical Amplifier, SOA)의 개발은 광의 병렬성을 이용한 파장분할다중 방식을 가능하게 하였다. 동시에 여러 개의 파장을 전송하거나, 병렬로 신호 처리를 함으로써 전송용량을 획기적으로 증가시킬 수 있는 파장분할다중 방식은 현재 광통신 연구의 주류를 이루고 있으며, 이에 따라 WDM용 광소자의 연구도 활발히 진행되고 있다.

WDM 방식에 의해 채널 수를 증가시키고 동시에 초당 수 테라비트급 이상의 광신호처리를 할 수 있는 소자가 개발된다면, 데이터 전송 속도를 현재의 수백만 배 이상 증가시키는 것이 가능하다. 때문에, 차세대에는 초고속 광 신호 처리 소자의 연구 개발도 매우 중요하게 될 것이다. 초고속 정보 통신망의 구축에 있어서, 비선형 광학 고분자를 이용한 초고속 광변조기, 광스위치 등의 광신호처리 소자를 이

용하면 핵심적인 초고속 광 신호 처리를 쉽고 매우 빠르게 구현할 수 있다. 비선형 광학 고분자는 초광대역의 초고속 광신호 처리 소자 구현에 적합한 광학적, 물리적 특성을 가지고 있어 최근 이 분야에 관한 연구가 활기를 띠기 시작했다. 최근 들어 특히 미국USC의 L. Dalton 교수를 중심으로 한 연구진에 의해 2차 비선형 광학 고분자에 있어서 기술적 도약이 이루어짐으로써 비선형광학 고분자의 응용 가능성을 높여주고 있다.¹

지금까지 비선형 광학 고분자 재료 및 소자에 관하여 국내외에 많은 논문과 저서가 출간되었고 고분자 과학과 기술지에도 수 차례에 걸쳐 review되었다.²⁻⁸ 비선형 광학 고분자의 물질과 광소자에 관한 초기 연구와 기본 원리 및 근원 등은 94년,⁵ 96년,^{6,7} 97년⁸ 저술한 특집 review에 이미 서술이 되어 있기 때문에 본 고에서는 앞 고분자 과학과 기술의 특점에서 간과한 부분인 왜 비선형 광학 고분자가 초고속 광신호 처리 소자로서 좋은가? 그리고 비선형 광학 고분자를 이용한 광소자의 상품화에 대한 문제점과 극복 방안 등을 최근 2차 비선형 광학 고분자를 중심으로 한 연구와 이를 이용한 광통신용 초고속 광신호 처리 소자에의 응용에 관하여 소개하고 아울러 이의 전망과 향후 발전 방향등에 대하여 논하고자 한다.

2. 왜 비선형 광학 고분자/광소자인가?

현재 고속 신호처리용 광통신 광소자로서의 재료는 대부분 LiNbO_3 또는 InGaAsP 계통의 무기 결정체이다. 이미 100 GHz급 Ti:LiNbO_3 광변조기와⁹ InGaAsP 계통의 다층양자우물 구조를 이용한 40 GHz급 전계흡수 광변조기의¹⁰ 연구 시제품이 출시되었다. 그러나 이 재료들은 여러 가지 문제점을 가지고 있는데 특히 빛과 밀리미터파(마이크로파) 사이의 위상정합, 즉 속도를 일치시키기 위하여 고도의 전극 기술을 필요로 하고 있다. 그러면 왜 이런 현상이 발생하는 것인가? 그림 2는 결정 무기물과 비정형 고분자의 주파수에 따른 유전상수의 크기 및 변화량을 도시하였다. 대부분의 결정 무기물의 유전상수는 낮은 주파수에서는 격자 진동(포논, Phonon)에 의한 분극과 이온에 의한 분극, 전자에 의한 분극의 영향이 결합되어 나타나며, 광주파수($\sim 10^{14}$ Hz)에서는 전자에 의한 분극이 주요인으로 작용하므로 주파수에 따라 유전상수의 값이 변하게

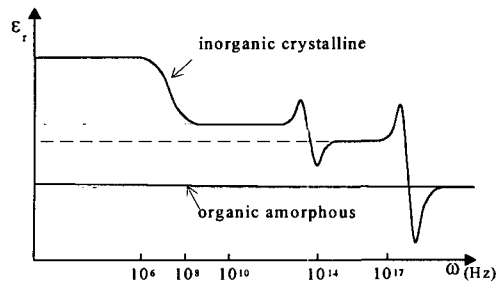


그림 2. 주파수에 따른 유전상수의 크기 및 변화량.

된다. 또한 물질과 주파수에 따라 분극을 결정짓는 주요인이 바뀌기도 한다. 일례로 LiNbO_3 광소자에서는 빛의 속도가 마이크로파의 속도 보다 훨씬 빠르고, 반대로 GaAs계통의 반도체 광소자에서는 마이크로파의 속도가 빛의 속도 보다 빠르다. 이와 같은 이유로 인해 결정 무기물을 이용한 전기광학 소자에서는 빛과 마이크로파간의 속도정합을 이루기 위해 복잡한 전극제작 기술이 필요하며, 넓은 주파수 영역에서 동작 가능한 소자를 만들기가 대단히 어렵다. 실제 시판되는 2.5 GHz와 10 GHz 변조용으로 사용되는 $\text{Ti}:\text{LiNbO}_3$ 광변조기의 경우 전극 구조가 달라 용도에 따라 각각 다르게 사용하여야 한다. 그러나 비정형 고분자의 경우 전자에 의한 분극이 주요인이 되므로 DC에서 광주파수 범위까지 (그림 2) 유전상수의 변화가 거의 없이 일정하고 그 값도 작다. 이러한 특성을 이용하면 초고속 뿐만 아니라 무기물을 이용한 광소자가 구현하기 힘든 광대역 (wide band)의 변조를 가능하게 한다. 동작속도의 가능성 면에서 볼 때 $\text{Ti}:\text{LiNbO}_3$ 광변조기의 전기광학 효과는 격자(또는 이온) 진동에 의해 나타나는 반면, 전기광학 고분자의 경우는 그 동작이 외부 전기장에 대한 π -전자의 반응으로 일어나기 때문에 이론적으로 피코초(pico-second) 이하의 빠르기로 동작하는 것이 가능하다.

현재 광소자로서 응용되고 있는 대표적인 전기광학 물질은 LiNbO_3 이다. 3m(Trigonal)의 점 그룹(Point Group) 대칭성을 가지는 LiNbO_3 에서 가장 큰 전기광학계수 텐서는 r_{33} 로써 32 pm/V 정도의 값을 가진다. LiNbO_3 는 40여년간의 성숙된 성장 기술로 현재에는 물질 자체보다 광소자에의 응용과 용도에 따른 LiNbO_3 의 개조등에 많은 연구 노력이 행해지고 있다. 반면에 비선형 광학 고분자는 용도에 맞는 다양한 설계와 합성이 가능하고 사용 파장에서 비선형광학 특성을 증가시킬 수 있어 향후 연구 발

전 전망에 있어서 매우 큰 잠재력과 장점을 가지고 있다. 2차 비선형 광학 고분자에서 2차 비선형광학 크로모포(Chromophore)는 벤젠(Benzene)이나 스틸벤(Stilbene)과 같은 전자의 공액 물질 양끝에 전자를 주는 그룹(donor)과 전자를 받는 그룹(acceptor)을 붙인 형태이다. 강한 주계와 받게 그룹의 설계나, 이들 사이에 폴리엔 부분(Polyene segments)을 넣어 공액 길이를 증가시키거나, 싸이오펜(Thiophene) 링 등을 첨가시키는 등 다양한 방법으로 비선형 광학 특성을 증가시키고 있다. 또한 π - π^* 전이에 의한 최대 흡수 밴드를 장파장(Red Shift)으로 변화시킴으로써 광통신용 적외선 영역에서의 비선형 광학 특성을 증가시키고 있다. 최근에는 LiNbO_3 에서 불가능한 100 pm/V 이상의 전기광학계수를 가지는 비선형 광학 고분자가 개발되었고, 이를 사용하여 1 Vp-p미만의 구동 전압을 가지는 고분자 광변조기가 제작 발표되었다.¹²⁻¹³

마지막으로 비선형 광학 고분자를 이용한 광소자는 무기물 광소자에 비하여 성능 대비 가격 경쟁력을 가진다. 비선형 광학 고분자에 비해, LiNbO_3 와 반도체등은 성장이 매우 힘들고, 고가의 장비가 필요하며, 물질 자체가 훨씬 고가이다. 아울러, 광소자 제작 공정에서도 비선형 광학 고분자를 이용한 광소자는 대부분의 박막 공정이 스피ن 코팅에 의존하는 등 공정이 간단하며, 낮은 온도에서 이루어지고 있으나, 무기물을 이용한 광소자는 공정이 매우 복잡하며, 높은 온도에서 이루어지고 있다. 또한 실제 제작 단가에 큰 영향을 미치는 광소자의 패키징에 있어서도, 특히 광섬유 부착시 무기물 광소자는 광섬유와 무기물의 큰 굴절률 차이와 광섬유와 광도파로의 단면 크기 차이에 의해 부착이 매우 힘들어 고도의 기술이 필요하며, 주로 레이저 용접(Laser Welding)을 하고 있다. 반면에, 비선형 광학 고분자 광소자는 광섬유와 비선형 광학 고분자간에 굴절률 차이가 거의 없고 광섬유와 광도파로의 단면 크기 차이도 거의 없어 부착이 쉬우며, 에폭시 용접(Epoxy Welding)이 주로 이루어지고 있으며, 대부분 사용되는 에폭시의 굴절률은 광섬유와 비선형 광학 고분자 굴절률 사이에 있어, 접착제 뿐 만 아니라 광주입 효율을 높이는 굴절률 정합액(Index Matching Gel) 역할도 한다. 따라서 상품화할 때, 이러한 패키징 측면에서도 비선형 광학 고분자 광소자는 무기물 광소자에 비하여 월등한 가격 경쟁력을 가진다.

3. 비선형 광학 고분자/광소자의 문제점

앞장에서 비선형 광학 고분자/광소자가 가지는 장점과 잠재력에 관해서 언급했다. 그러나 비선형 광학 고분자를 이용한 광소자가 상용화된 것은 필자가 아는 한 아직까지 없다. 그러나 UCLA의 Fetterman 교수의 창업 벤처인 PWI Inc.(Pacific Wave Industries, Inc.)에서 초고속 광대역 고분자 광변조기의 상업화를 서두르고 있다. 현재 전기 광학 효과를 이용하여 상품화되고 가장 많이 사용되는 것은 LiNbO_3 를 이용한 광소자이다. 그 이유는 무엇보다도 LiNbO_3 를 능가하는 성능과 안정성을 가진 비선형 광학 고분자의 미개발에서 기인된다.

지금까지 사용된 비선형 광학 고분자의 전기 광학 계수는 대부분 $20 \text{ pm/V} (@1.3 \mu\text{m})$ 미만으로 LiNbO_3 의 $32 \text{ pm/V} (@1.3 \mu\text{m})$ 에 미치지 못하였다. 최근 USC의 Dalton 교수 그룹에서 CLD와 GLD라고¹⁴ 명명한 전기 광학 계수를 $90 \text{ pm/V} (@1.06 \mu\text{m})$ 와 $110 \text{ pm/V} (@1.06 \mu\text{m})$ 를 각각 가지는 비선형 광학 크로모포를 개발하였으나, PMMA나 Polycarbonate등을 Host로 하는 Host-Guest 시스템이었다. 안정성을 증가시키기 위해 Polyurethane 등의 체인에 분자결합을 시켰을 때 전기 광학 계수 값이 현저히 줄어드는 약점이 있어 여전히 연구 중이다.

비선형 광학 고분자가 상품화된 광소자에 사용하려면 무엇보다도 열적, 물리적, 화학적으로 안정하여야 하며, 특히 사용 파장에 대하여 광화학적으로 안정하여야 한다. 이와 함께 비선형 광학 고분자를 이용해 제작된 소자의 경우, 가한 전압이나 입사 빔의 세기에 따라 출력 빔의 변조 세기 등이 시간적으로 변하는 소위 DC Drifts 또는 Optical Drifts등도 해결하여야 할 문제이다.¹⁵ DC Drifts는 부분적으로 원인이 규명된 상태이며,¹⁶ 이의 해결을 위해서는 비선형 광학 고분자 뿐만 아니라 클래딩층의 물질에 대한 연구가 병행되어야 한다. 현재 Optical Drifts는 빛과 비선형 광학 고분자간의 주위에 존재하는 화학물질(특히 산소)에 의한 광화학적 반응이 주 원인인 것으로 여겨지고 있으나,¹⁵ 확실한 원인에 대한 규명이 심도있게 진행되고 있으며, 불활성가스 등에 의한 밀봉 패키징으로 해결하려는 노력도 진행되고 있다.

또한 비선형 광학 고분자가 가지고 있는 큰 진행 손실도 개선되어야 한다. 일반적으로 $1.3 \mu\text{m}$ 의 파장에서 Ti가 확산된 LiNbO_3 광도파로에서 진행 손실

은 0.2 dB/cm 인 반면에 비선형 광학 고분자 광도파로에서의 진행 손실은 $\sim 1.0 \text{ dB/cm}$ 정도로 크다. 광섬유나 실리카 광도파로에서의 손실은 $1.4 \mu\text{m}$ 근처의 파장에 있는 O-H 흡수에 의해 일어나는 반면 고분자의 경우는 C-H의 진동 Overtone이 진행손실의 주요 원인이다. 현재 이러한 진동 Overtone에 의한 광흡수 손실을 광통신 파장 영역 밖으로 천이시키기 위하여 수소 대신 중수소나 불소나 염소 등의 할로젠족으로 대체시키는 연구가 활발히 진행 중이다. 현재의 WDM 기반의 광통신 파장은 머리말에 언급했듯이 $1.3 \mu\text{m}$ 에서 $1.55 \mu\text{m}$ 으로 이동하였다. 불행히도 고분자의 경우 $1.3 \mu\text{m}$ 보다 $1.55 \mu\text{m}$ 에서 일반적으로 더 큰 광전송 손실을 가진다. 이것 또한 고분자 재료가 가지는 문제점이다.

현재 가장 실용화에 접근해 있는 초고속 전기 광학 고분자 변조기의 경우, 무엇보다도 전기 광학 계수를 높여 구동 전압을 낮추어야 한다. 40 GHz 급 이상의 광변조기의 구동 전압이 3 Vp-p 이상일 경우 현실적으로 전자 회로 기술에 의한 구동 회로의 제작이 불가능하기 때문이다. 또한 고분자 광변조기에서 구동 전압을 낮추기 위해서는 진행파형 전극 길이를 증가시키거나, 전극 사이의 두께를 감소시키는 방법 등이 있으나, 이러한 경우 광 전송 손실, 금속에 의한 광 손실 등을 유발시키므로 최적 조건을 도출하여야 한다.¹⁷

4. 초기 비선형 광학 고분자/광소자 연구 동향

90년 초부터 97년까지의 초기 비선형 광학 고분자/광소자의 연구는 광이 광을 조절하는 완전 광통신(all-optic)을 위한 2차 및 3차 비선형 광학의 연구 보다 그 전 단계로 전기가 광을 조절하는 전기 광학(EO, Electro-optic)효과에 집중되었다. 초고속 신호 처리용 광소자의 재료로 사용되기 위해 전기 광학 고분자는 3 Vp-p 동작전압을 실현할 수 있는 30 pm/V 이상의 전기 광학 계수, 폴링 및 공정 파장에서의 열처리에 견디기 위한 $250 \text{ }^\circ\text{C}$ 이상의 열분해 온도, 극화(Poling)된 크로모포의 이완 방지와 광소자 제작 공정을 고려한 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 이상과 $250 \text{ }^\circ\text{C}$ 이하의 유리전이온도(T_g), $1.3 \mu\text{m}$ 파장에서 낮은 광 진행 손실 등이 요구되었다. 이러한 비선형 광학 고분자의 자세한 연구에 관해서는 이미 고분자 과학과 기술 제5권 5호와⁵ 제7권 6호에⁶ 잘 소개되어 있

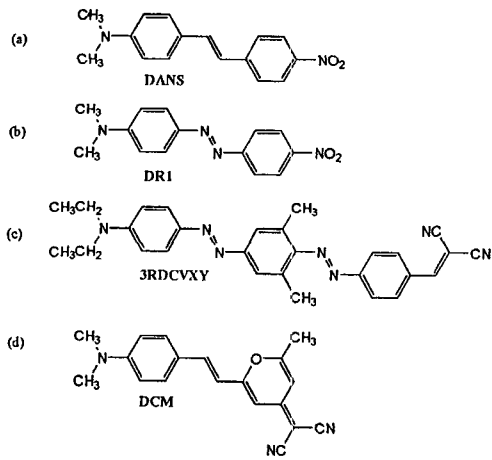


그림 3. 초기 비선형 광학 광소자에 사용된 주요 비선형 광학 크로모포.

어 본 고에서는 생략하고 현재 광소자에 이용되고있는 EO 고분자에 관해 간단히 요약 기술하고자 한다. 초기 비선형 광학 고분자/광소자의 연구에 많이 사용된 대표적인 물질로 Hoechst Celanese사와¹⁸ Akzo Novel¹⁹ 사에서 개발한 PMMA 골격에 DANS(4-dimethylamino-4'-nitrostilbene) 크로모포를 공유 결합시켜 얻은 고분자(그림 3(a))와 IBM과²⁰ NTT에서²¹ 개발한 PMMA 골격에 azo기 계통의 DR1과 3RDCVXY 크로모포를 공유 결합시켜 얻은 고분자(그림 3(b, c))를 들 수 있다. 미국의 Lockheed에서는²² DCM(4-(dicyanomethylene)-2-methyl-6-(p-dimethylaminostyryl)-4H-pyran) 크로모포 Guest에 Polyimide를 Host로 한 고분자 재료를 이용하여 광변조기를 연구 발표했다(그림 3(d)). USC의 L. Dalton과 W. H. Steier 등은 polyurethane 골격에 DR19 크로모포를 공유(가교) 결합한 고분자를 이용하여 110 GHz bandwidth를 가진 광변조기를²³ 발표했다. 그 외 다양한 크로모포를 도입한 고분자 물질이 여러 연구진에 의해 개발되어 광소자로 제작되었지만, 이들 물질은 아직 전기 광학 계수가 낮거나, 크로모포의 함량과 안정성 등의 문제로 실제 상용화에는 접근하지 못하고 있다. 또한 비선형 광학 고분자를 이용한 광소자의 연구에서도 고속 Mach-Zehnder 광변조기,¹⁸⁻²³ 2X2 스위치와^{22,24} 같은 소자와 폴링 등에 의해 나타나는 편광에 의한 굴절률의 차이를 이용한 편광 분리기, 편광 조절기, 편광 선택기 등의 편광소자에²⁵ 국한되어 연구되었다.

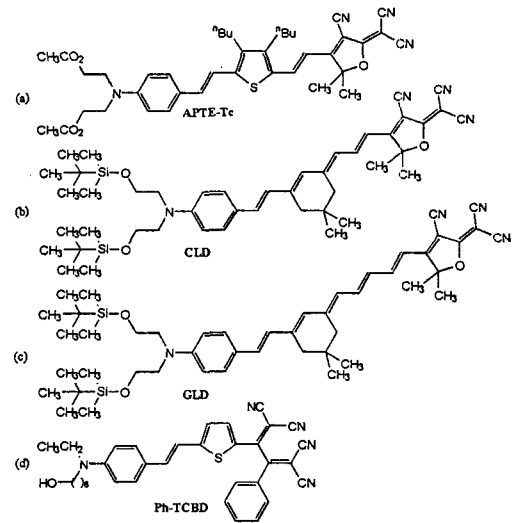


그림 4. 최근 개발된 주요 비선형 광학 크로모포.

5. 최근 비선형 광학 고분자/광소자 연구 동향

최근 2차 비선형 광학 고분자의 연구 개발은 미국의 L. Dalton(USC) 교수 그룹과 Alex K.-Y. Jen (Northeastern University) 교수 그룹에 의해 주도되고 있으며, 참고 문헌 1, 11, 14, 26-29에 잘 나타나 있다. $N(CH_3)_2$ 등의 주계와 double 또는 triple CN계 등의 받계 그룹 사이에 폴리엔 부분(Polyene segments)을 넣어 공액 길이를 증가시키거나, 싸이오펜(Thiophene) 링등을 첨가시키는 등 다양한 방법으로 비선형 광학 특성을 증가시키고 있다.¹¹ 또한 주계 그룹에서 메틸기 대신에 에틸기 및 알킬 실릴 그룹을 도입시켜 용해도를 증가시키고 있다. 분자간의 반응(intermolecular interactions)도 중요한 연구 대상이 되고 있다.^{30,31} 그림 4는 최근 연구 개발된 것이나 개발 중인 2차 비선형 광학 크로모포에 관하여 간략히 나타내었다. 그림 4(a)는 USC의 L. Dalton 교수 그룹에서 개발한 APTF-TC라²⁶ 불리는 크로모포의 분자구조를 보여주고 있다. 이 크로모포는 π -공액 길이를 길게 하고 받계로서 세개의 CN 그룹을 도입하여 전자를 당기는 힘을 강화하였으며 퓨란(furan)링의 도입으로 평면 로킹하는 능력을 가지게 하였다. 또한 싸이오펜 링에 알킬기 체인을 붙여 크로모포-크로모포간의 정전기적 반응(electrostatic interactions)을 방지하였다. APTF-TC의 $\mu\beta_{9,9\mu m}$ 값은 $17,600(10^{-48} \text{ esu})$ 을 가지고 있었다. APTF-TC과 PMMA의 Guest/Host시스템에서

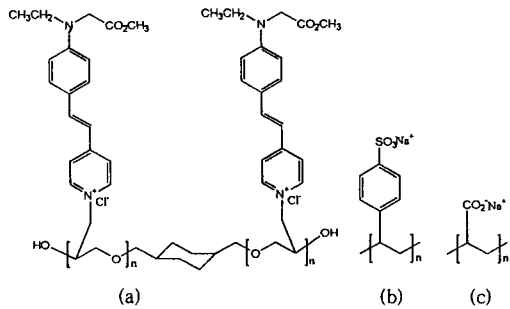


그림 5. APD 박막 제조시 사용되는 비선형 광학 물질인 활성, 수용성 polycation인 SPECH (a), 비활성 수용성 polyanion인 PSS (b)와 PAA (c).

APTF-TC 함유량이 16.6%일 때 전기 광학 계수 r_{33} (56.8 pm/V @1.06 μm)값이 최고값을 나타내었으며 그 이상에서는 크로모포-크로모포간의 정전기적 반응에 의해 r_{33} 값이 감소하였다. 그리고 APTF-TC/PMMA Guest/Host로 광변조기를 제작했을 때, 구동 전압은 1.5~1.8 V_{p-p} 로 이것으로 환산된 r_{33} 값은 ~83 pm/V(@1.3 μm)가 되었다. 그러나 APTF-TC를 폴리우레탄(Polyurethane)에 공유 결합시켜 가교시켜 만든 물질로 광변조기를 제작했을 때, 구동 전압은 10 V_{p-p} 로 풀링 효율에서 많은 문제점을 내포하고 있었다. 최근에 이 그룹에서는 APTF-TC의 π -공액길이를 보다 길게하고 주계에 아세테이트기 대신 알킬실리그룹을 도입하여 용해도를 증가시킨 CLD와 GLD(그림 4(b, c)) 크로모포를 새롭게 합성하였다. CLD과 GLD은 각각 90 pm/V(@1.06 μm)와 110 pm/V(@1.06 μm)의 매우 큰 전기 광학 계수를 보였으며 이들 크로모포를 사용하여 안정하면서 구동전압 1 V_{p-p} 미만을 갖는 초고속 광대역 광변조기의 제작을 서두르고 있다. Northeastern University의 Alex K.-Y. Jen교수 그룹에서는 Ph-TCBD 크로모포(그림 4(d))를 Polyquinoline에^{28,29} 공유결합 시킨 결사슬 비선형 광학 물질을 개발했다. 이 물질의 r_{33} 값은 ~60 pm/V(@1.55 μm)가 나왔으며, 85 $^{\circ}\text{C}$ 에서 1000시간 동안 약 5%의 감소를 보일 정도로 열적으로 안정하였다.

2차 비선형 광학 계수값을 증가시키기 위한 노력의 일환으로 최근 미국에서는 비선형 광학 크로모포를 Alternating Polyelectrolyte Deposition(APD)으로 결사슬형 비선형 크로모포와 Polyanions과 Polycations 용액을 이용해 층층이(layer by layer) 증착시키는 방법도 연구중이다. 그림 5는 미국 Naval Air Warfare Center에서 APD방법으로 연

구중인 SEPCH등을 도시하였으며, 이에 관한 상세한 정보는 참고 문헌 27을 참조하기 바란다.

이러한 비선형 광학 고분자 물질의 연구 개발은 최근 2~3년 동안 활발히 연구 진행되어 좋은 결과를 얻고 있으나, 아직까지 광소자의 연구는 초고속 광대역 광변조기의 연구에 주로 의존하고 있으며, 초기 연구 성과에 비하여 뚜렷한 진전이 없었다.

6. 향후 비선형 광학 고분자/광소자 연구 전망

앞장에서 언급한 것과 같이, 최근에 2차 비선형 광학 고분자의 연구 개발은 한 단계 진전이 있었다. 그리고 2차 비선형 광학 고분자를 이용한 광소자의 응용 연구는 주로 케이블 TV, 외부 변조용 광변조기의 연구가 주를 이루어 왔으며 광스위치, 전기장 센서와 위상 배열 안테나 등의 RF Photonics 응용이 이따금 연구 되어 왔다. 따라서 광소자 또는 광통신 측면에서 필요하거나 예상되는 비선형 광학 고분자의 응용을 제시하고자 한다.

필자가 연구중인 Polyetherimide-DR1 비선형 광학 고분자 시스템에서 얻은 결과에³² 의하면 830 nm의 파장에서의 광 진행 손실이 1300 nm와 1550 nm의 파장에서 보다도 더 낮았다. 830~850 nm 파장대역은 현재 근거리 통신망(LAN)이 구축되어 있는 영역으로서 여기에 사용되는 광소자를 비선형 광학 고분자를 이용하여 제작할 경우 그 시장 가능성이 매우 밝다.

현재 연구가 집중되고 있는 초고속 광대역 광변조기와 광스위치 외에 고속 가변 파장 필터, 고속 파장 변환기 등과 같이 초고속 신호 처리 부분에서 LiNbO₃나 InGaAsP 등의 반도체가 할 수 없는 부분이거나, 성능대비 가격경쟁력을 가지고 이를 대체할 수 있는 부분까지도 응용 범위를 확대해야 할 것이다. 고속 가변 파장 필터³³ 등은 전기 광학 효과, 열 광학 효과, 광 표백 효과, 풀링 등에 의해 굴절을 차가 큰 브래그 그레이팅 제조가^{34,35} 용이한 점 등의 고분자가 갖고 있는 장점들을 최대한으로 이용하는 것이며, 고속 다채널 파장변환기는³⁶ 이차 비선형 광학 효과의 3광혼합(three-wave mixing)을 이용한 소자로서, 실제 응용이 된다면 파라메트릭 광증폭소자와 분산 보상 소자로도 사용이 가능하다.

또한 비선형 광학 고분자의 활용 범위를 광섬유와 결합하여 생각해 볼 때, 광섬유 일부분을 측면 연마

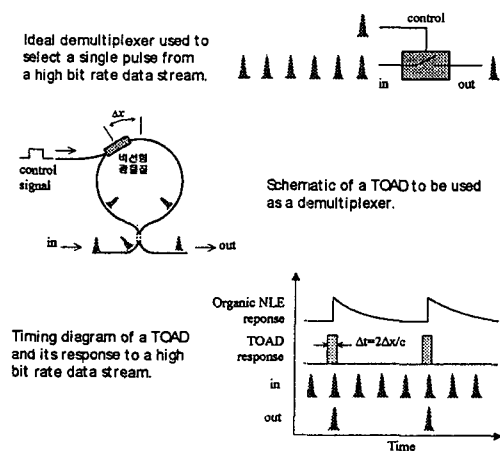


그림 6. 유기 비선형 광학 물질을 이용 일본 RIKEN에서 연구중인 광통신용 TOAD.

하여³⁷ 비선형 광학 고분자를 코팅하거나, 전기 광학 플라스틱 광섬유^{38,39} 등을 제작하여 초고속 파장 선택 필터 등의 초고속 광통신에 여러 기존의 광섬유 소자가 갖지 못하는 특성을 낼 수 있다.

최근 여러 연구 그룹에서 테라Hz 영상 시스템이나, 테라Hz 분광 현미경 등의 용도를 위해 비선형 광학 효과를 이용하여 전기장, 특히 초단 펄스 전기장을 검출하는 연구가 진행 중이다.^{40,41} 비선형 광학 효과의 비공명 반응(non-resonant interaction) 영역에서, 수 fs 정도의 레이저 펄스와 초단 펄스의 전기장이 순간적으로 반응하며 이를 이용하여 초단 펄스 전기장을 광 펄스로 바꿔 검출하게 된다. 현재 이 연구에는 폴링된 LiNbO₃가⁴⁰ 사용되거나 2차 비선형 광학 고분자의⁴¹ 사용이 유망하다.

테라비트 신호 처리 광섬유 시스템의 연구에서 최근 활발히 진행되고 있는 테라Hz 광 비대칭 역다중화기(TOAD; Terahertz optical asymmetric demultiplexer)의 구현에 있어서 지금은 SOA(반도체 광증폭기)의⁴² 비선형 광특성이 이용되고 있다. 그러나 비선형 광학 고분자(2차 및 3차 비선형 광학 특성 둘 다 이용 가능함)를 사용하면 매우 쉽게 구현될 것이다(그림 6).⁴³

이렇듯 비선형 광학 고분자가 다양한 광소자 분야에 응용되고 연구 범위가 확대되어 가면서 비선형 광학 고분자/광소자에 대한 향후 전망을 매우 밝게 하고 있다. 위에서 소개한 것 외에도 다양한 용도의 광소자와 이에 적합한 비선형 광학 고분자의 개발이 계속해서 이루어져 나가야 한다. 특히 필자는 열

광학 고분자와 비선형 광학 고분자 그리고 반도체 소자의 하이브리드형 집적화를 비선형 광학 고분자 연구가 궁극적으로 지향해야 될 목표로 간주하고 있으며 이 목표를 위해 국내 비선형 광학 고분자에 대한 연구 역량이 결집될 필요가 있을 것으로 생각한다.

7. 맺음말

폭발적으로 증가하는 통신 용량에 효과적으로 대처하기 위하여 광통신망의 구축은 필수적이며 이에 따른 광소자의 수요도 기하 급수적으로 증가할 것이다. 현재의 광통신 시스템에서는 채널 수 증가에 의한 WDM방식이 주축을 이루며 발전할 것으로 예측되나 차세대에는 WDM방식과 함께, 광이 갖고 있는 초고속의 특성도 이용할 것이다. 현재 WDM방식에 사용되는 도파로형 광소자는 1xN 광 분리기(1xN Power Splitter), 가변 광 감쇄기(Variable Optical Attenuator), 가변 파장 필터(Tunable Wavelength Filters), 어레이 도파로형 파장 다중/역다중화기(AWG, Arrayed Waveguide Gratings), Add/Drop 다중화기(ADM, Add/Drop Multiplexer)등이다. 그러나 현재 이 모든 제품이 실리콘을 이용하여 제작하여 상품화되고 있으나, 고분자를 이용하면 많은 장점이 있으며, 예로서 최근 우리나라에서 젠 포토닉스(Zen Photonics)가 창업되어 이 분야에 진출한 바 있다. 차후 WDM방식과 함께 광의 초고속성을 이용한 초고속 광신호 처리 소자가 필수적이며 이러한 초고속 신호 처리 소자의 재료로써 현재 LiNbO₃가 주를 이루고 있으나, 다양성과 발전 가능성의 측면에서 비선형 광학 고분자가 충분한 경쟁력을 갖는다. 아울러 비선형 광학 고분자의 장점을 이용한 다양한 초고속 광신호 처리 소자 및 시스템도 함께 개발되어야 한다. 궁극적으로 수동 또는 열광학 고분자와 비선형 광학 고분자등을 이용해 수동 또는 열광학 광소자와 초고속 신호 처리 광소자가 하이브리드형 집적화가 되어야 할 것이다. 그러나 무엇보다도 이러한 광소자의 구현은 적절한 비선형 광학 고분자의 개발 없이는 불가능하므로 다양한 기능을 갖는 비선형 광학 고분자의 개발이 시급하다.

참 고 문 헌

1. B. H. Robinson et al., *Chemical Physics*, **245**, 35 (1999).
2. Ch. Bosshard et al., "Organic Nonlinear Optical Materials", Gordon and Breach Publishers, 1995.
3. D. L. Wise, G. E. Wnek, D. J. Trantolo, T. H. Cooper, and J. D. Gresser(editors), Chapters 12-21 in *Electrical and Optical Polymer Systems* MARCEL DEKKER, Inc., 1998.
4. C. C. Teng, in "Nonlinear Optics of Organic Molecules and Polymers", eds. by H. S. Nalwa and S. Miyata, chap. 7, CRC Press, 1996.
5. J. J. Kim, *Polym. Sci. & Tech.*, **5**, 447 (1994).
6. K. H. Park and N. J. Kim, *Polym. Sci. & Tech.*, **7**(6), 667 (1996).
7. K. S. Lee and K. S. Kim, *Polym. Sci. & Tech.*, **7**(6), 679 (1996).
8. S. G. Han, H. J. Lee, H. C. Oh, and Y. H. Won, *Polym. Sci. & Tech.*, **8**(3), 326 (1997).
9. K. Noguchi et al., *Journal of Lightwave Technology*, **16**, 615 (1998).
10. H. Takeuchi et al., *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **3**, 336 (1997).
11. F. Wang et al., *Chemistry of Materials*, **11**, 2285 (1999).
12. L. Dalton, *Technical Digest*, Sep., 24 (1999).
13. Y. She et al., *Technical Digest*, Sep., 20 (1999).
14. Private Communications with Dr. Cheng Zhang in the University of Southern California.
15. M. H. Lee et al., "Fabrication and Characterization of Electro-optic Polymer Waveguide Modulator for Photonic Applications", in "Electrical and Optical Polymer Systems", eds. by D. L. Wise et al., chapter 17, p. 595, MARCEL DEKKER, Inc., 1998.
16. H. Park et al., *Appl. Phys. Lett.*, **70**(21), 2796 (1997).
17. M. H. Lee et al., *Thin Solid Films*, **303**, 287 (1997).
18. C. C. Teng, *Appl. Phys. Lett.*, **60**(13), 1538 (1992).
19. G. R. Mohlmann, *Synthetic Metals*, **37**, 207 (1990).
20. J. I. Thackara et al., *Appl. Phys. Lett.*, **67**(26), 3874 (1995).
21. Y. Shuto et al., *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **31**(8), 1451 (1995).
22. S. Ermer et al., *Appl. Phys. Lett.*, **61**(19), 2272 (1992).
23. D. Chen et al., *Appl. Phys. Lett.*, **70**(25), 3335 (1997).
24. S. G. Han et al., *Electronics Letters*, **32**(21), 1994 (1995).
25. M. C. Oh et al., *Appl. Phys. Lett.*, **67**(13), 1821 (1995).
26. F. Wang et al., *Polymer Preprints*, **39**(2), 1065 (1998).
27. M. J. Roberts, *Technical Digest*, Sep., 38 (1999).
28. H. Ma et al., *Chem. Mater.*, **11**, 2218 (1999).
29. A. K.-Y. Jen, *Technical Digest*, Sep., 2 (1999).
30. I. Liakatas et al., *Technical Digest*, Sep., 11 (1999).
31. I. Liakatas et al., *Appl. Phys. Lett.*, **76**(11), 1368 (2000).
32. M.-H. Lee et al., *Photonics Conference 99*, Nov. 4-5, p. 335.
33. M.-H. Lee et al., Korea Patent No. 99-52113.
34. M.-H. Lee et al., *Thin Solid Films*, **283**, 247 (1996).
35. M.-H. Lee et al., Korea Patent No. 168882.
36. T. Sugihara et al., *Journal of Lightwave Technology*, **16**, 239 (1998).
37. S. G. Lee et al., *Technical Digest*, Oct., 70 (1997).
38. Y. Koike, *Technical Digest*, Oct., 69 (1997).
39. M. G. Kuzyk et al., *Chemical Physics*, **245**, 327 (1999).
40. Y. J. Rao et al., *Electronics Letters*, **35**(7), 596 (1999).
41. A. Nahata and T. F. Heinz, *Technical Digest*, Sep., 30 (1999).
42. R. J. Manning et al., *J. Opt. Soc. Am. B*, **14**, 3204 (1997).
43. <http://www.riken.go.jp/Yoran/MSE/> 참조.