

폴리머 광스위칭 소자 기술

이 명 현

한국전자통신연구원

머 리 말

광인터넷등을 위한 초고속 대용량의 광통신 시스템의 구축이 현실화되고 있는 상황이다. 이러한 광통신 시스템의 구축을 위해 사용되는 광소자는 1) 기간망 및 지역망용 광전송에 쓰이는 기가비트급 이상 테라비트급 용량의 대용량 시스템 구축에 사용되는 광전송 시스템 소자, 2) 기간망 및 지역망, 가입자간 광선로 분배 노드 및 대용량 광교환기 구축에 사용되는 광회선 분배 및 교환 소자, 3) 광가입자망 구축에 필요한 터미널용 광가입자 소자 등으로 분류할 수 있다. 여기서 광스위치는 광전송로의 도중에 연결되어 경로를 바꾸거나, 통과/차단 등 광 신호를 제어하는 기능을 하는 것으로 광송수신 소자와 더불어 위의 세 소자 분류에서 기본이 되는 광소자이다.

광스위치는 단순히 광신호를 통과/차단할 수 있는 1×1형, 광섬유 선로의 절단등에 대비하여 우회 경로를 만들어 주거나, 단말 장치나 광섬유 케이블의 점검 모니터용으로 사용되며, 대규모 광스위치의 기본이 되는 1×2형, 두 개 광선로간의 신호 교환 기능을 갖는 2×2형, 여러 선로간의 접속 경로를 선택적으로 전환시킬 수 있는 매트릭스형인 M×N형 등이 있다. 특히 광스위치는 공간분할방식의 교환 기능을 갖는 소자로서 뿐만 아니라 ADM(Add/Drop Multiplexer), OXC(Optical Cross Connector) 등에 집적되거나 활용되어 파장분할다중방식(WDM, Wavelength Division Multiplex)의 광전송 시스템 및 광 네트워크 구성을 위한 필수적인 부품으로

활용될 것이다.

광스위치는 제품의 구성 및 작동 원리에 따라 기계식과 비기계식으로 구분할 수 있으며^[1], 대부분의 폴리머 광스위칭 소자는 비기계적인 광도파로형 광소자로 구성되어 있으며, 외부 전기장이나 열에 의해 수반되는 굴절률의 변화에 의해 광 신호의 경로가 바뀌게 된다. 따라서 폴리머 광스위칭 소자는 열광학(TO, Thermo-Optic) 효과를 이용하는 열광학 스위치와 전기광학(EO, Electro-Optic) 효과를 이용하는 전기광학 스위치로 대별할 수 있으며 전자는 주로 WDM 광전송 시스템을 포함한 일반 광통신 시스템에 사용되며, 후자는 초고속 신호처리로 광패킷 교환등의 광통신 시스템에 사용된다.

II. 광스위치용 폴리머

광스위치용 폴리머는 스위칭 기능이 열광학 효과를 이용하느냐, 전기 광학 효과를 이용하느냐에 따라 열광학 폴리머와 전기광학 폴리머로 크게 두 분류로 나눈다. 현재 상용화 및 상용화에 근접하다고 판단되는 폴리머 광소자의 대부분이 수동 및 열광학 광소자이므로 열광학 폴리머에 대해선 자세히 언급하고 전기광학 폴리머에 대해선 간단히 언급하겠다.

1. 열광학 폴리머

현재 상업적으로 사용되고 있는 대부분의 평면 도파로형 열광학 광스위치의 재료로써 유리 광섬

유 재료인 실리카가 사용되고 있다. 광스위치 재료로서 폴리머가 가지는 대표적인 장점은 폴리머의 열광학계수가 $\sim 1 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ 반면에 실리카의 경우 $\sim 1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 정도로 폴리머가 10배 정도 크기 때문에 사용되는 동작 전력의 소모량이 10배 정도 작다^[2]. 그러나 실리카를 이용하여 광도파로를 제작한 경우, 전송 손실 특성이 ~ 0.01 dB/cm로 낮아, 광도파로 소자에 있어서 가장 기본적인 요소를 충족시켜 주고 있다. 그러나 실리카를 이용하여 광도파로를 제작하려면 1000°C 이상의 고온 공정을 거쳐야 하는 등의 공정상의 어려움과 이에따른 잔류 열 응력등의 문제점이 발생하고 있다. 이외는 달리 폴리머 광도파로 소재는 무기재료인 실리카에 비하여 광도파로 소재로 요구되는 여러 가지 특성들, 미세한 굴절률 조절성, 낮은 복굴절률 물질의 합성 가능성도, 다양한 기판에 대한 접착성, 다층 적층성, 치수 안정성 및 유연성, 연결성, 미세 광부품과의 집적화 용이

성, 경제성 등에 있어서 훨씬 많은 장점을 갖고 있다. 초기에 사용된 많은 열광학 폴리머 소재들은 광통신용 폴리머 광소자용으로 개발된 것이 아니라 반도체 소자용 저 유전상수 폴리머 물질로 개발된 것을 응용하여 사용해 왔다. 따라서 광전송 손실과 복굴절성등에서 많은 문제점을 가지고 있었다. 그러나 최근들어 광통신용 열광학 폴리머 광소자에 초점을 맞추어 광전송 손실, 복굴절성, 열안정성을 개선한 물질들이 개발되고 있다. 일반적으로 폴리머 물질은 대부분 C-H, C-O 등의 결합으로 이루어져 있다. 그러나 광통신용 근접 자외선(near Infra Red) 파장 영역에서 C-H 결합의 진동 흡수 때문에 광 흡수 손실이 높다. 최근에 들어서는 이러한 근접 자외선에서 발생하는 C-H 결합의 진동 흡수 손실을, C-F 등의 할로젠 원소로 치환하여 없앤 저손실 선형 광학 폴리머 소재가 속속들이 개발되고 있다^[3]. <표 1>은 현재 전 세계적으로 널리 사용 또

<표 1> 폴리머 소재의 대표적 연구 결과

기 관	재 료	열안정성 (Tg, Td)	복굴절성 ($\Delta n = \Delta n_{TE} - \Delta n_{TM}$)	광 손 실 (dB/cm)
ETRI (ZenPhotonics)	Fluorinated PolyAryleneEthers	Td>500°C	0.003	0.1@1.3 μm 0.2@1.55 μm
NTT	Perfluorinated Polyimides	Tg=308~335°C	0.007-0.008	0.3@1.3 μm 0.6@1.55 μm
	Deuterated Fluoro Acrylate	Tg=114°C	$\sim 10^{-4}$	0.1@1.3 μm 1.35@1.55 μm
	Silicone Resin	Td>400°C	$< 5 \times 10^{-4}$	0.23@1.55 μm
AlliedSignals (Corning, Honeywell)	Acrylate	Td>400°C	0.0002	0.3@1.3 μm 0.5@1.55 μm
	Halogenated Acrylate	Td>400°C	$< 1 \times 10^{-6}$	0.03@1.3 μm 0.07@1.55 μm
Amoco	Polyimide (Ultradel 9000D)	Td>400°C	0.025	0.4@1.3 μm 1.0@1.55 μm
JDS Uniphase (Akzo Novel)	Halogenated (BeamBox)	Tg>150°C	—	0.6@1.55 μm 0.25@1.55 μm
Dow Chem	Perfluorinated cyclobutane	Tg=400°C	0.0008	0.25@1.3 μm 0.25@1.55 μm
DuPont	Acrylate (Polyguide)	Tg>150°C	—	0.2@1.3 μm 0.6@1.55 μm

는 연구되고 있는 저손실 선형 광학 폴리머 소재의 특성을 정리 하여 주고 있다. 이들의 낮은 광도파로 손실, 높은 열광학 효과, 편리한 가공성을 이용하여 광스위치를 포함한 다양한 광소자 연구가 진행되고 있다.

2. 전기광학 폴리머

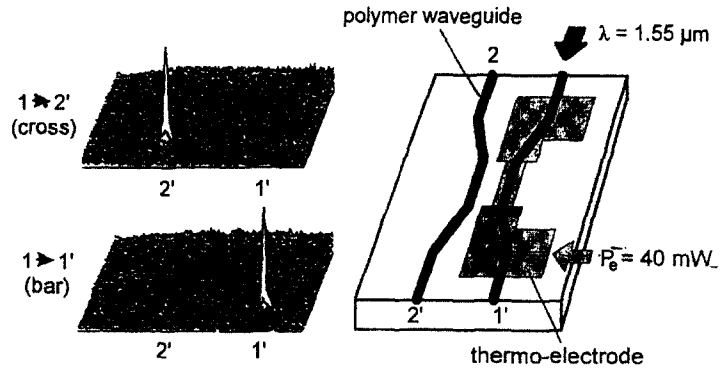
현재 매우 빠른 광스위칭 광소자로서 응용되고 있는 대표적인 전기광학 물질은 LiNbO_3 이다. LiNbO_3 에서 가장 큰 전기광학계수 텐서는 r_{33} 으로써 32 pm/V 정도의 값을 가진다. LiNbO_3 는 40여년간의 성숙된 성장 기술로 현재에는 물질 자체보다 광소자에의 응용과 용도에 따른 LiNbO_3 의 개조등에 많은 연구 노력이 행해지고 있다. 반면에 전기광학 폴리머는 용도에 맞는 다양한 설계와 합성이 가능하고 사용 파장에서 전기광학 특성을 증가시킬 수 있어 향후 연구 발전 전망에 있어서 매우 큰 잠재력과 장점을 가지고 있다. 전기광학 폴리머에서 2차 비선형광학 크로모포(Chromophore)는 벤젠(Benzene)이나 스틸벤(Stilbene)과 같은 π 전자의 공액 물질 양끝에 전자를 주는 그룹(donor)과 전자를 받는 그룹(Acceptor)을 붙인 형태이다. 강한 donor와 acceptor 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 $\pi-\pi^*$ 전이에 의한 최대 흡수 밴드를 장파장(Red Shift)으로 변화 시킴으로써 광통신용 적외선 영역에서의 비선형 광학 특성을 증가 시키고 있다. 최근에는 LiNbO_3 에서 불가능한 100 pm/V 이상의 전기광학계수를 가지는 전기광학 폴리머가 개발되었고, 이를 사용하여 1Vp-p 미만의 구동 전압을 가지는 폴리머 광변조기가 제작 발표¹⁴⁾되었으나 아직 스위칭 소자에는 응용하지 않고 있다. 그러나, IBM, 한국전자통신연구원에서 전기광학 폴리머를 이용하여 초고속 2×2 광스위칭 연구 시제품을 개발하였다.

III. 열광학 폴리머 스위치

열광학 스위치는 온도에 따라 굴절률이 변화하는 열광학 효과를 이용한 소자로서 광도파로의 특정한 부위에 전극을 부착하여 흐르는 전류에 의한 저항열을 조절함으로써 광의 경로를 조절하는 소자이다. 열의 전달 속도가 msec 정도로 매우 느리기 때문에 열광학 스위치는 고속 스위칭 소자로는 부적격 하지만 신호 전달 손실이 매우 낮고 제작공정이 상대적으로 단순해 대규모의 스위치 어레이가 가능하여 WDM 광전송 시스템에서 그 진가를 발휘할 수 있다. 1×2, 2×2 열광학 스위치는 자체적으로 광섬유의 절단 등에 대비하여 우회 경로를 만들어 주는 절체용 등으로 사용되며, 이들 스위치 어레이는 파장 다중/역다중화기 또는 파장 라우터 등과 결합하여 ADM(Add-Drop Multiplexer)이나 OXC(Optical Cross Connector) 등의 구성에 사용되는 초고속 광네트워크 구성을 위해 기본이 되는 소자이다.

1. 열광학 스위치의 작동원리

열광학 스위치는 온도에 따른 광도파로내의 굴절률 변화를 응용한 것으로서 전기광학 소자에서 전압을 가해서 광도파로 내의 코어층 굴절률 변화를 야기 시키는 것과 같이 전극에 전압을 가해서 전류에 의해 발생된 열에 의해 광도파로 내의 코어층의 굴절률 변화를 야기 시켜 놓은 것으로, 여러가지 구조를 가지나 <그림 1>의 구조로 기본적인 작동원리를 설명하였다. <그림 1>의 열전극에 의해 발생하는 열에 의한 코어층의 굴절률이 변화하고, 이에 따라 광도파로 내의 광신호 진행 방향이 바뀌게 되어 스위칭 역할을 하게 되는 것이다. 즉, 입사한 신호는 정상적으로는 광의 방향성 커플링 효과에 의해 1→2'으로 신호가 진행하나 열전극에 의해 1-1'의 광도파로에 열을 제공하면 굴절률이 낮아지고 따라서 전극을 가한 경우 신호는 1→1'으로 진행하게 되는 것이다. 이를 통하여 필요한 정보를 교환해 주는 스위치의 역할을 하게 되는 것이다.

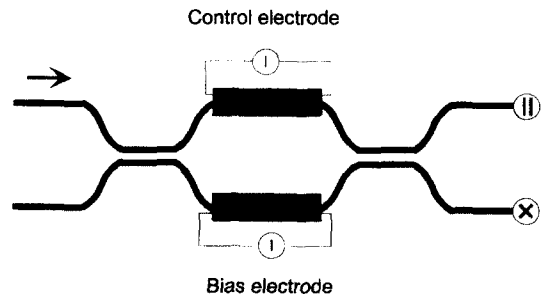


〈그림 1〉 방향성 결합기 형태의 2×2 스위치 모형도

2. 폴리머 열광학 스위치의 구조

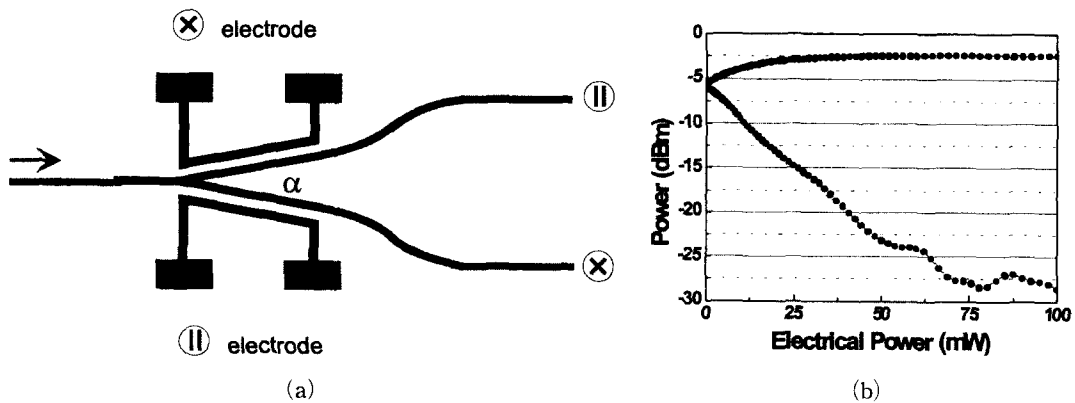
광도파로형 열광학 광스위치의 구조는 〈그림 1〉의 방향성 결합기 형태, 〈그림 2〉에서와 같이 빛의 간섭을 이용한 Mach-Zehnder 간섭계 형태와 〈그림 3〉와 같이 광의 모드진화 (Mode evolution) 특성을 이용한 디지털 광 스위치 (DOS, Digital Optical Switch) 형태가 있다.

일반적으로 간섭계와 결합기 구조는 온도에 민감하며, 누화율이 낮은 단점이 있으나 스위칭 파워가 낮은 장점이 있다. 반면에 디지털 광 스위치는 반응특성이 디지털 형태로서 간섭계나 결합기 형태보다 온도 및 편광특성이 뛰어나다. 디지털 광 스위치는 〈그림 3(a)〉에 나타낸 개략도에서와 같이 분기각이 약 0.1~0.15° 정도로 매우 작은 Y-분기 형태이다. 모드 진화 특성을 이용하기

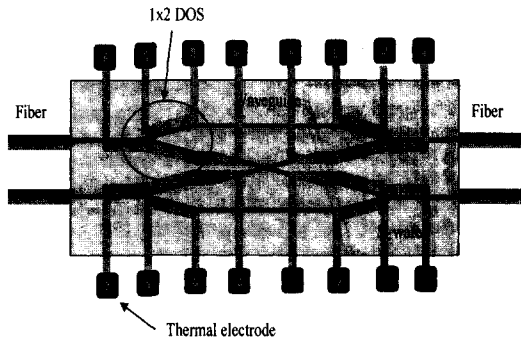


〈그림 2〉 Mach-Zehnder 간섭계 형태의 스위치 모형도

때문에 한쪽 팔의 온도가 증가하여 양팔의 굴절률 차이가 어느 이상이 되면 더 이상 출력 특성의 변화가 없는 〈그림 3(b)〉와 같은 디지털 특성을 나타낸다. 따라서 도파로의 불균열이 존재하여도 편광특성에 무관하게 동작하는 장점이 있



〈그림 3〉 모드진화특성을 이용한 1×2 디지털 광 스위치 개략도(a)와 응답 특성(b)



〈그림 4〉 4개의 1×2형 디지털 광 스위치로 구성된 2×2형 디지털 광 스위치의 기본 구조

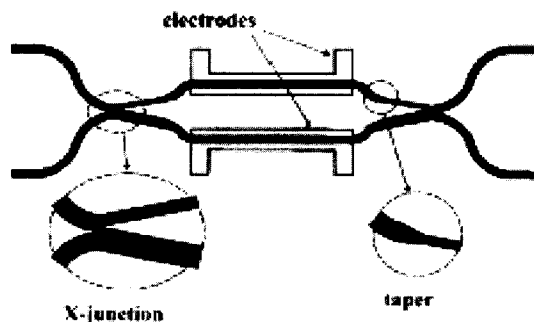
다. 또한 스위칭 누화도 쉽게 -25 dB 이하로 얻을 수 있다. 그러나 간섭계형 스위치와 비교하여 스위칭 전력이 높은 단점이 있다. 이와 같은 이유로 열광학 계수가 상대적으로 낮은 실리카 광도파로 소자에서는 주로 간섭계형 스위치를 제작하며, 열광학 계수가 큰 폴리머 광도파로에서는 디지털 광 스위치 형태의 스위치가 제작된다. 일반적으로 N×N 스위치는 다수의 1×2 디지털 광 스위치의 조합으로 구성된다. 〈그림 4〉는 4개의 1×2형 디지털 광 스위치로 구성된 2×2형 디지털 광 스위치의 기본 구조를 보여 주고 있다. 그리고 가격 경쟁력을 가지기 위한 한 칩에 N개의 2×2형 광 스위치를 배열한 어레이형 구조도 있다.

3. 폴리머 열광학 스위치의 개발현황

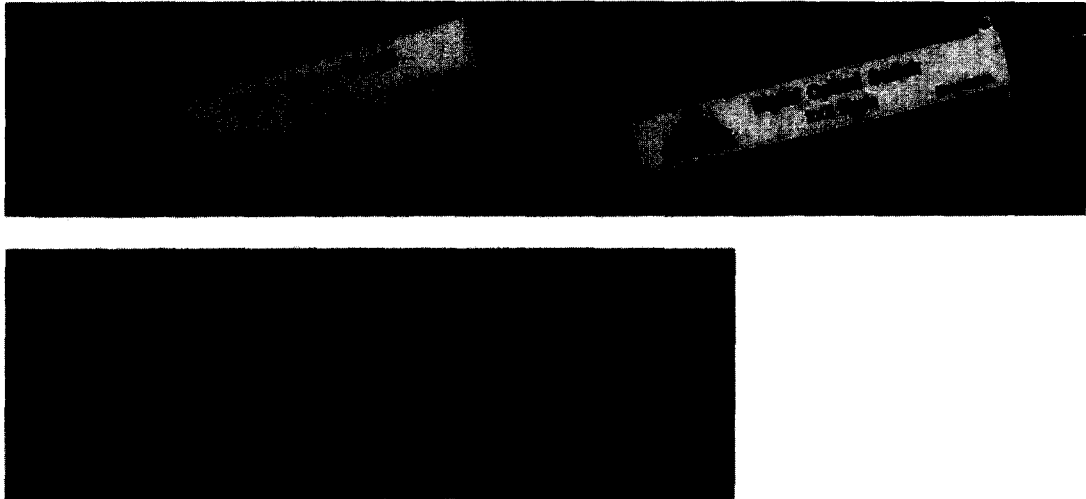
최초로 제안된 열광학 스위치는 1982년 M. Haruna 등에 의해 제작된 실리카(silica)를 이용한 것이며 이후 여러 가지 무기물, 그리고 폴리머 물질들을 이용할 수 있음이 발표되고 있다. 1989년에 이르러서 네덜란드의 Diemeer 등에 의해, 매우 단순한 폴리머 이며 낮은 Tg를 가진 폴리우레탄(polyurethane)과 PMMA를 사용한 열광학 스위칭소자를 He/Ne laser에서 구동 시킴으로서 폴리머에 대한 관심이 높아졌다. 1.3μm의 광원을 사용한 본격적인 광통신용 폴리머계 열광학 스위칭소자는 1993년에, NTT의 Hida 등에 의해 발표된 2×2 스위치 소자로서 이중수소화 또는 이중수소 및 불소가 함께 치환

된 메타아크릴레이트(methacrylate)를 열광학 스위칭소자의 코아(core)물질로 사용한 것이다. 이들 연구팀은 1994년 내열성이 우수한 이중수소화 방향족 실록산(siloxane)을 사용한 광도파로의 제작, PMMA계 폴리머를 사용한 AWG 파장다중역다중소자(Arrayed Waveguide Grating Multi/Demultiplexer)를 발표하는 등 활발한 연구활동을 계속하고 있다.

이들과는 별도로 독일의 Heinrich-Hertz Institut(HHI)의 Strebel 등은 광경화성 폴리머인 BDK/PMMA를 사용한 도파로 제작방법을 사용하여 1 ms의 응답시간과 편광의존도가 0.5 dB보다 작은 우수한 특성의 4×4 열광학 스위칭소자를 제작발표 하였다. 네덜란드 Akzo Nobel 회사에서는 자세한 화학적인 구조가 전혀 밝혀지지 않은 “감광성폴리머”를 사용한 1×2 스위치를 개발하였는데 이 소자의 특성으로서는 3.6 dB의 삽입 손실, 1 ms의 스위칭 시간, 그리고 편광의존성은 거의 없다고 발표하였으며 Beam Box이라는 상품명으로 판매하기에 이르렀다. 1999년 Akzo Nobel은 JDS Uniphase 사에 합병되었으며, E-Tek도 JDS에 합병되므로써, 현재는 캐나다의 JDS Uniphase에서 1×2, 2×2 스위치 및 어레이 소자, 4×4 스위치 등을 시판하고 있다. 미국의 몇 개 업체에서도 폴리머 광소자 상용화를 위한 준비를 하고 있는 것으로 알려져 있다. 우리나라에서도 한국전자통신연구원에서 폴리머 2×2 열광학 디지털 광스위치의 새로운 구조¹⁶⁾를 제안 〈그림 5〉하여 구현 발



〈그림 5〉 ETRI에서 제안 구현한 비대칭 열광학 폴리머 스위치의 구조도



〈그림 6〉 젠포토닉스에서 상용화 중인 1×2, 2×2 열광학 디지털 광스위치와 한국전자통신연구원에서 개발한 4 어레이 2×2 열광학 디지털 광스위치

표하는 등 한국전자통신연구원을 주축으로 꾸준히 연구되어 왔으며 빠른 속도로 발전하여 한국전자통신연구원에서 스핀 오프한 벤처인 젠포토닉스(ZenPhotonics)에 의해 1×2, 2×2 스위치 및 어레이 스위치 소자가 상용화 되고 있다. 〈그림 6〉은 젠포토닉스에서 상용화 중인 1×2, 2×2 열광학 디지털 광스위치와 최근 한국전자통신연구원에서 개발한 4 어레이 2×2 열광학 디지털 광스위치의 사진이다.

IV. 전기광학 폴리머 스위치

열광학 스위치가 온도에 따라 굴절률이 변화하는 열광학 효과를 이용한 반면 전기광학 스위치는 전기장에 따라 굴절률이 변화하는 전기광학 효과를 이용한 소자이다. 이차 비선형 광학 효과의 일종인 전기광학 효과를 이용하기 때문에 매우 빠른(ns 이하의 스위칭 시간) 광스위칭 광소자로써 응용할 수 있다. 이러한 ns 이하의 스위칭 시간을 가지는 광스witch는 초고속으로 신호를 처리하는 광패킷 교환 시스템 등에 매우 중요한 광소자로 인식되고 있다. 그러나 현재 상업적으

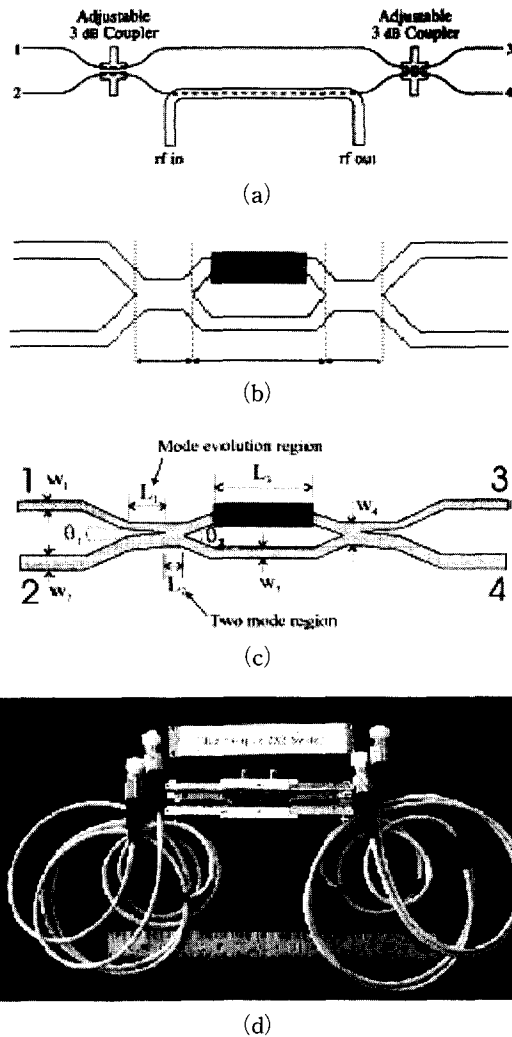
로 이용할 수 있는 대부분의 초고속 광스위치의 경우 LiNbO_3 로 만든 광소자이다. 비록 30 pm/V 정도의 큰 전기광학계수를 가지지만, 매우 비싼 가격과 더 이상 큰 전기광학계수를 가진 결정을 성장시키기가 힘들며, 40여년간의 성숙된 기술로 인해서 1990년대 초부터, 전기광학 폴리머를 이용한 광스위치 제작에서 새로운 대안을 찾고 있다. 앞서서도 언급했듯이 전기광학 폴리머는 용도에 맞는 다양한 설계과 합성이 가능하고 사용 과정에서 전기광학 특성을 증가시킬 수 있어 향후 연구 발전 전망에 있어서 매우 큰 잠재력과 장점을 가지고 있으며 최근 100 pm/V 정도의 큰 전기광학계수를 가지는 폴리머⁴⁾가 개발되었다. 그러나, 지난 10년간 전기광학 폴리머 자체의 연구 개발에 주력했으며, 대부분의 소자 응용도 광변조기에 국한되어 연구하여 왔다. 광스위치의 경우 1995년 IBM에서 Mach-Zehnder 간섭계형 2×2 스위치 연구⁶⁾ 시제품〈그림 7(a)〉을, 1996년과 1997년에 ETRI에서 폴리머 2×2 전기광학 광스위치의 새로운 구조^{7,8)}를 제안 〈그림 7(b,c,d)〉하여 구현 및 연구시제품⁹⁾을 발표하는 등 한국전자통신연구원을 주축으로 꾸준히 연구하여 세계적인 선두 그룹을 형성하고 있다. 그러나 아직 상업화를 위해서는 해결해야

할 많은 문제점을 가지고 있다.

V. 맺음 말

본 고의 폴리머 광스위칭 기술은 광통신용에 국한하여 다루었다. 그러나 광통신용 광스위칭

소자도 공간분할, 파장분할, 시간분할, 자유공간 분할 광스위칭 소자 등으로 크게 나눌 수 있다. 폴리머 광스위칭 기술은 대부분 공간분할 광스위칭 소자에 속하며 많은 광도파로형 광스위칭 소자의 일부분이다. 광도파로형 광스위칭 소자의 일부분으로써 폴리머 광스위칭은 실리카, LiNbO₃ 등으로 만든 광도파로형 광스위칭 뿐만 아니라 OMEMS 스위치 등과도 경쟁적인 관계에 있다. 폴리머가 일부 뛰어난 특성을 보이고 있지만, 많은 단점도 가지고 있어, 이러한 경쟁에서 살아남기 위하여 무엇보다도 매우 우수한 폴리머의 개발이 필수적이다. 열광학 폴리머 광스위칭의 경우, 폴리머가 실리카등의 무기 소재보다 열광학 계수가 10배 정도 크기 때문에 소비 전력이 1/10 정도 작게 사용할 수 있다는 최대의 장점으로 향후 광도파로형 광스위칭중 가장 유망한 스위치로 점차 인식되고 있다. 따라서, 광스위칭 시장의 일부분을 차지할 것으로 예측된다. 그리고 우리나라의 ETRI, 젠포토닉스에서 세계적인 수준의 기술을 가지고 있어 향후 우리나라의 광통신 산업에 크게 영향을 미칠 것으로 판단된다. 또한 전기광학 폴리머 광스위칭의 경우, 아직 기술의 미성장 및 시장의 미형성등으로 비록 주목은 크게 받지 못하지만, ETRI등에서 세계적인 선두 기술을 유지하고 있고, 무기물을 이용한 초고속 광스위칭의 연구 개발이 현재 담보 상태에서 뚜렷한 대안을 찾지 못하고 있는 상황이므로, 이 분야의 연구도 매우 낙관적이다. 따라서, 보다 더 집중적인 연구 및 투자가 있어야 한다고 생각한다.



<그림 7> (a) IBM에서 개발한 Mach-Zehnder 간섭계형 2×2 스위치 구조도, (b), (c) ETRI에서 제안한 폴리머 2×2 전기광학 광스위칭의 구조도 및 (d) 구조도 (b)를 가지고 만든 연구 시제품.

참고 문헌

- [1] 국내광부품의 현황, 광산업정보, 28, 7/8. 2001.
- [2] 한선규, WDM 광통신용 폴리머 광소자 연구 동향, 광학과 기술 16, July 2000.
- [3] 정보통신용 고분자 소재의 개발 동향, 2000 신기술동향조사보고서-광통신용 고분자 소

재, 특허청, 88, 2000.

- [4] Y. Shi et al, Low(Sub-1-Volt) Half-wave Voltage Polymeric Electro-optic Modulators Achieved by Controlling Chromophore Shape, Vol. 288. 118, April. 2000.
- [5] M. C. Oh et al, Asymmetric X-Junction Thermo-optic Switches Based on Fluorinated Polymer Waveguides, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 10, No. 6, 813, June 1998.
- [6] J. I. Thackara, Polymeric electro-optic Mach-Zehnder switches, Appl. Phys. Lett. 67 (26) 3874, December, 1995
- [7] S. G. Han et al, High performance 2×2 polymeric electro-optic switch with modified bifurcation optically active waveguide structure, Electronics Letters, Vol. 32, No. 21, 1994, October 1996
- [8] W. -Y. Hwang et al., Polymeric 2×2 Electrooptic Switch Consisting of Asymmetric Y Junctions and Mach-Zehnder Interferometer, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 9, No. 6, 761, June 1997.
- [9] M. H. Lee et al., Polymeric Electro-optic 2×2 Switch Consisting of Bifurcation Optical Active Waveguides and Mach-Zehnder Interferometer, submitted to the IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2001.

저자 소개



李明鉉

1962년 1월 22일생, 1985년 2월 서울대학교 금속공학과 졸업(학사), 1987년 2월 서울대학교 금속공학과 졸업(석사), 1993년 1월 영국 옥스퍼드 대학교 재료과 졸업(박사), 1988년 4월~1989

년 6월 : 한국과학기술연구원, 연구원, 1993년 3월~현재 : 한국전자통신연구원, 선임연구원, <주관심 분야 : 폴리머 광소자>