

기술 특 집

액정을 이용한 광소자의 개발 동향

김재훈 (한림대학교 물리학과 액정 연구실)

본 특집에서는 최근에 활발한 연구가 진행되고 있는 액정을 이용한 광소자의 개발동향을 학계에 보고된 내용을 중심으로 살펴보고자 한다.

I. 서 론

현재 우리는 정보화 시대에 살고 있다. 이러한 정보화 시대를 선도해 나가는 것이 바로 액정 디스플레이와 같이 이동성이 가능한 정보 디스플레이와 광통신(optical communication)이다. 특히, 미래에는 모든 정보들이 광으로 전달, 저장될 것으로 예측되기 때문에 광 병렬처리, 광 접속 또는 중계, 그리고 광컴퓨터 등에 이용되는 광소자의 중요성이 날로 커지고 있다. 특히 인터넷 사용의 폭발적 증가로 인해 급증하고 있는 통신용량을 적절하게 수용하기 위해 파장다중분할(wavelength division multi-plexing; WDM) 방식의 광통신에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^[1]. 현재까지 WDM 광통신은 수동형 파장분할 광소자를 이용한 정적 WDM 기술이 주를 이루어 오고 있다. 하지만, 차세대 정보통신 시대에는 고화질 영상 정보의 교류와 더불어 가상현실을 포함하는 실감형 정보 서비스가 이루어 질 뿐만 아니라 향후 10년동안 통신 트래픽은 매년 거의 2배 이상 지속적으로 증가할 것으로 예상된다. 이와 같은 첨단 서비스를 제공하는 시대에 요구되는 정보의 양은 테라급 이상으로, 대용량 트래픽 예상량과 가변량에 대처하기 위해서는 전송 자원의

공유를 최적화하여야 하며 이를 위한 해결책은 능동형 광소자를 이용한 동적 WDM 방식이 필수이다.

그러나, 현재까지 개발된 대부분의 광소자들은 광개폐(optical switching) 기능이 없는 수동소자로 동적 WDM을 구현하기 위한 파장제어 광소자, 광스위치의 개발이 필요하다. 이외에도 전기광학적으로 접속가능한 기억매체, 초점거리 변환 렌즈, 그리고 3차원 입체 디스플레이 등과 같은 소자를 개발하기 위해서는 능동소자의 개발은 필요불가결한 요소이다.

이러한 능동소자들은 광기계, MEMS, 광도파, 열광학, 음향광학, 자기광학, bubble, holography, nano technology, 그리고 액정 등을 이용한 방법으로 제작되었다. [표 1]에 각 기술 및 물질에 따른 응용범위를 요약해 보았다. 이 중에서도 액정은 응답속도 문제 때문에 주로 적은 포트수의 응용에 적합하지만 전기장 또는 자기장에 의해 디지털 (on/off) 또는 아날로그 모드로 작동하는 액정의 광학 특성에 광 개폐, 광세기 감쇠, 그리고 파장선택과 같은 분야에 응용할 수 있다^[2]. 특히 지난 30년간 액정 디스플레이의 상업화를 위한 연구를 통해 확립된 장시간사용에 대한 신뢰성 및 안정성, 넓은 온도 범위, 상용성의 확보 등은 다른 기술 또는 물질을 이용한 광소자에서는 찾아보기 힘든 장점으로 이를 이용한 광소자가 차츰 상용화 되어가고 있다. 그 중에서도 가장 많은 연구가 이루어졌던 광 개폐 소자를 중심으로 가변형 광필터와 광개폐가 가능한 microlens나 grating 과 같은 단일 소자의 개발에 대한 연구 동향을 살펴보기로 한다.

[표 1]

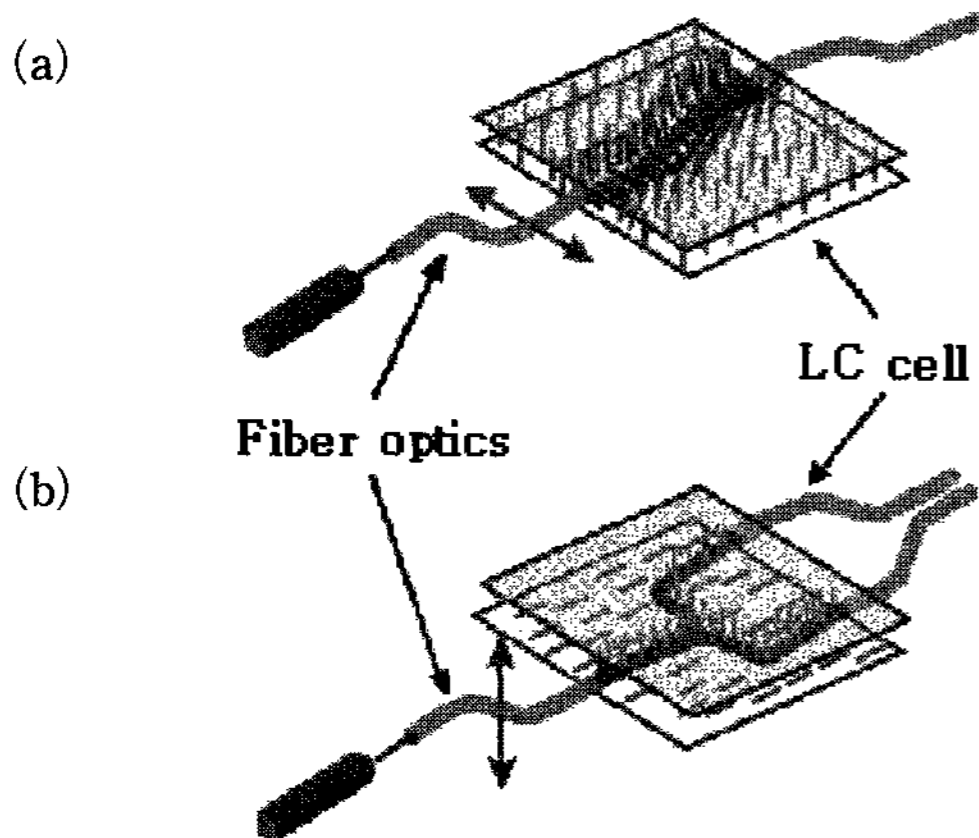
응용범위	GaAs	InP	Si	PLC	LiNbO ₃	LC	MEMS	Holography	Nano
Selection	○	○	○	○		○		○	○
Compensation			○		○	○			
Switches	○	○		○	○	○	○		○

II. 본 론

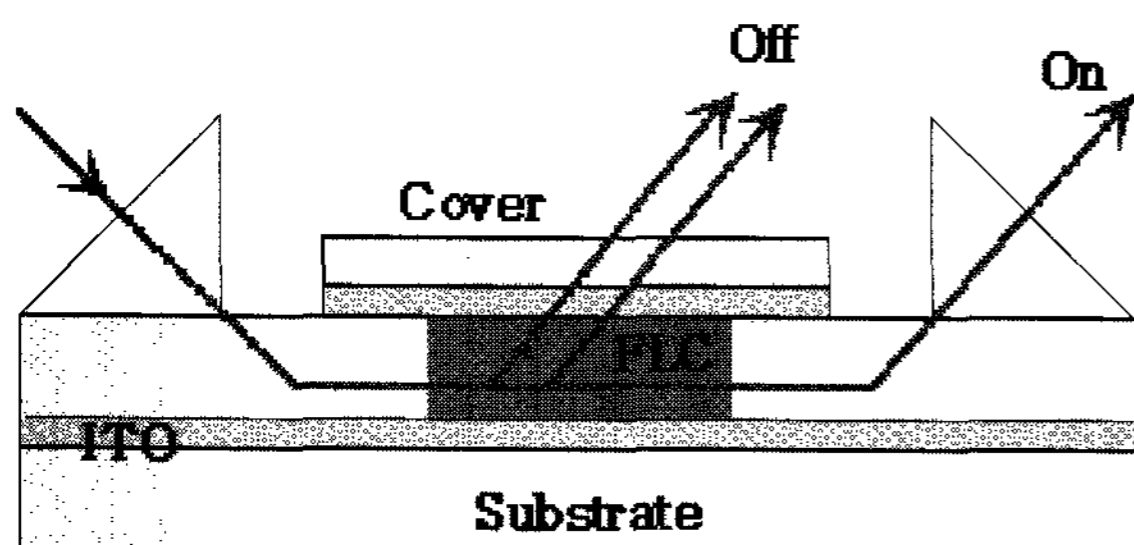
1. 액정을 이용한 광분배 소자

액정을 이용한 광분배 소자로는 크게 광도파로를 이용하는 방법과 편광을 조절하는 방법을 들 수 있다. 이러한 소자는 그 동안 미국과 유럽을 중심으로 많은 연구가 이루어져 일부 제품의 경우에는 상용화까지 되고 있다. 특히 유럽의 8 개국이 연합해서 형성한 LC Photonet은 11개의 교육기관과 8개의 사업체가 참여하고 있는 가장 큰 연구 네트워크의 하나로 물질개발에서 새로운 개념의 액정을 이용한 광소자 개발에 이르기까지 광범위한 연구를 수행하고 있다. 그 연구의 일부를 소개하면 다음과 같다^[3].

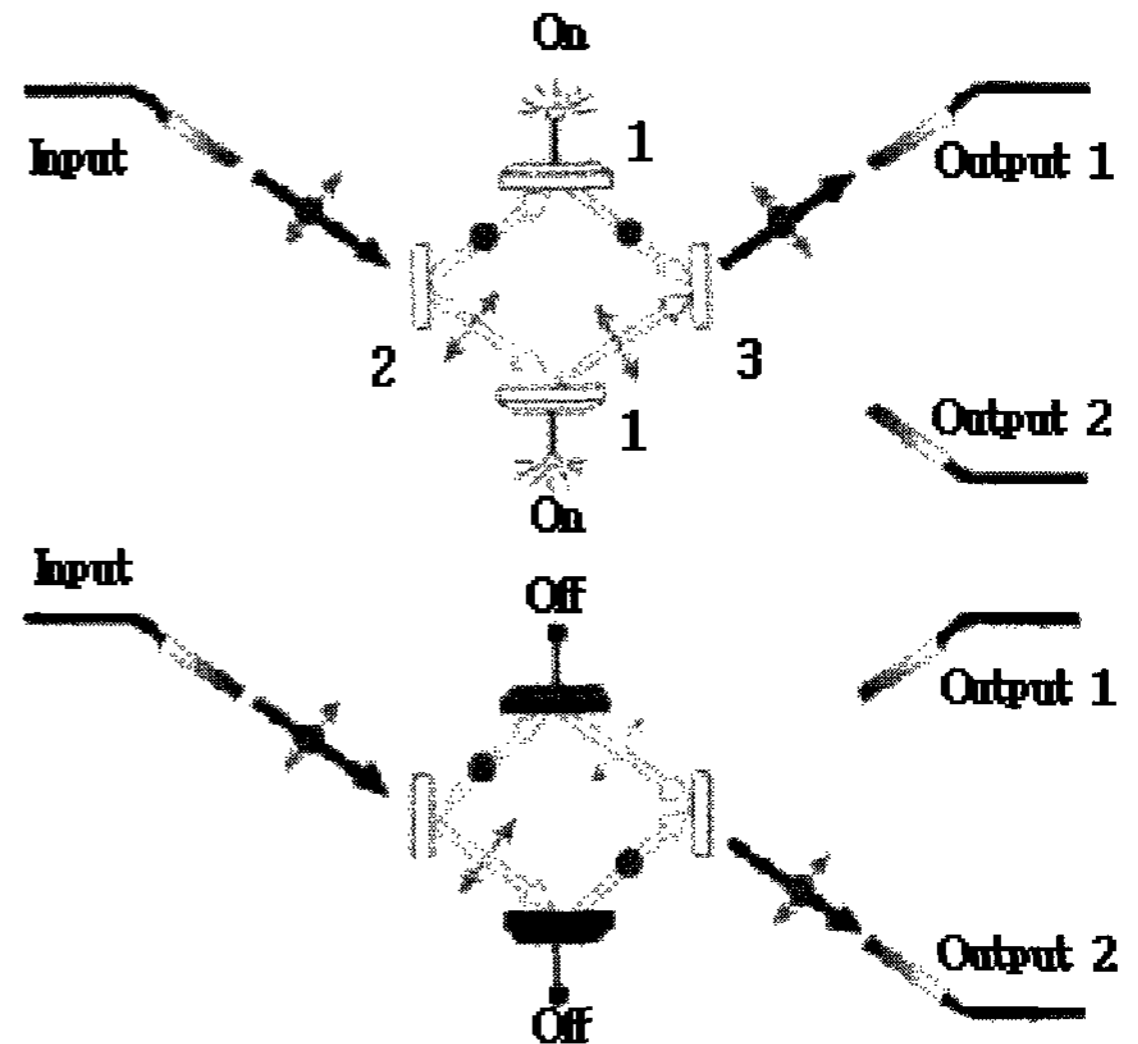
스페인의 마드리드 그룹에서는 [그림 1]과 같은 구조를 갖는 광도파 소자를 제안하였다^[3]. 이때 특정영역만 선택적으로 전압을 인가하여 액정의 유효 굴절률을 조정함으로써 선택된 영역에서만 전반사 조건을 만족시켜 광도파 경로를 제공한다. 이러한 소자는 선택적 광개폐나 광경로 변경 소자로 이용될 수 있다. 최근에는 이러한 개념을 바탕으로 [그림 2]와 같이 강유전성 액정을 광도파로로 이용한 광 switching 소자도 발표되었다^[4]. 강유전성 액정을 이용해 빠른 on/off switching time($\sim 120 \mu s$)을 갖는다는 장점이 있으나 액정과 경계면의 큰 굴절률차에 의한 빛 손실이 커서 On 과 Off state간의 대비비가 약 5:1 정도 밖에 되지 않으며, 입사광이 편광되어 있어야 한다는 단점이 있다.



[그림 1] 액정의 광도파를 이용한 (a) 선택적 광개폐 및 (b) 광경로 변경 소자



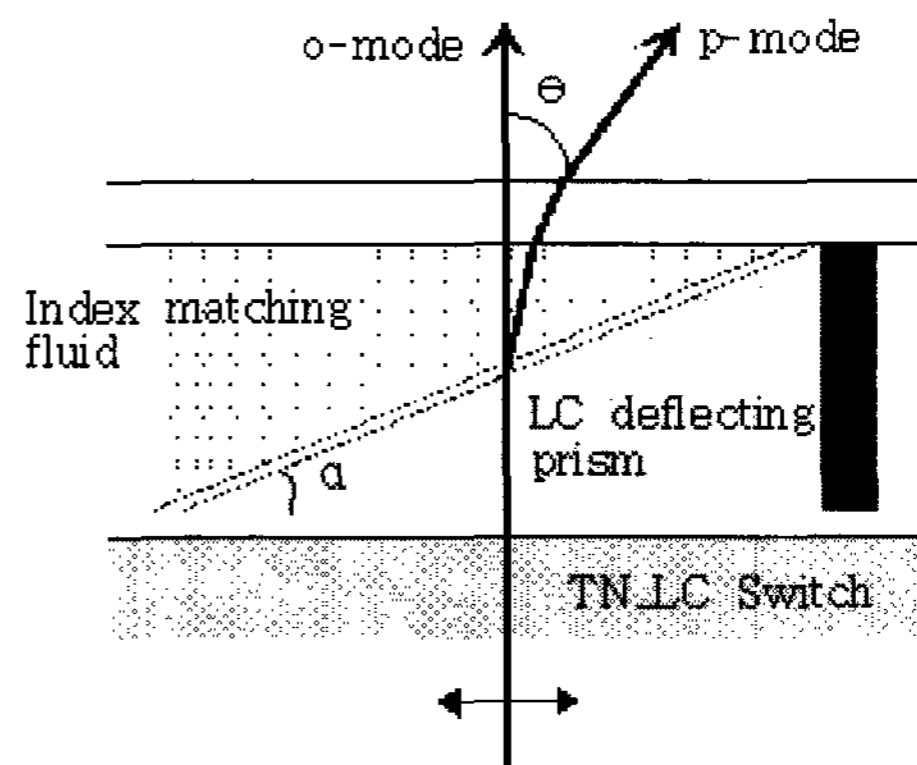
[그림 2] FLC-광도파로를 이용한 광개폐 시스템



[그림 3] 액정을 이용한 광개폐 소자
1: LC cell 2: Polarizing beam splitter
3: Polarizing beam combiner

이 밖에도 액정을 이용해 빛의 편광을 조절함으로써 1×2 및 2×2 광연결을 구현하여 광통신 복구회로로 사용되는 상용제품이 미국의 Spectraswitch 및 Chorum Technology 사에 의해 개발되었다^[5]. [그림 3]은 Spectra switch사의 1×2 광연결 시스템의 구성도로, 동일한 기능을 하는 기존의 시스템이 역학적인 방법(Mirror를 역학적으로 광경로 상에 위치시켜 광경로를 바꾸는 시스템)을 이용하는데 반해 비역학적이고 경로제어 시간 또한 역학적인 시스템에 비해 빠를 뿐만 아니라 동작의 안정성에 있어서도 탁월하기 때문에 광통신 선로상의 문제점이 발견되었을 때 다른 경로로 신호를 연결시키는 복구 시스템에 널리 이용될 것으로 기대된다. 그러나 온도에 따른 액정 시편의 굴절률 특성 변화 및 액정 분자의 열적요동에 따른 빛 손실을 최소화해야 하는 문제는 여전히 상존하고 있다.

이 밖에도 광분배 소자의 하나로 Beam steering 소자가 있다. 이는 레이저 빛을 정확한 위치로 보내는데 필요한 장치로 현재는 MEMS 기술을 이용해 소형거울을 제작해 이를 전기적으로 조절하여 구현하고 있다. 최근 미국 Kent대의 액정연구소에서는 [그림 4]와 같이 비틀린 네마틱 액정



[그림 4] 액정 편향 프리즘을 이용한 beam steering device

(twisted nematic LC ; TN_LC) 시편과 액정 프리즘을 이용한 beam steering 소자에 대한 연구결과를 발표하였다^[6]. TN_LC 시편에 입사한 빛은 시편에 인가한 전압에 따라 편광이 유지되거나 90도 만큼 회전하여 썩기 모양의 액정 편향 프리즘에 입사하게 된다. 이때 액정 프리즘의 광축과 TN 시편을 통과한 빛의 편광과의 각도에 따라 편향정도가 결정된다. 이러한 구조를 N개 만큼 연결하면 빛을 2^N 개 만큼의 각도로 편향시킬 수 있다.

2. 다중파장 분할에 관한 연구

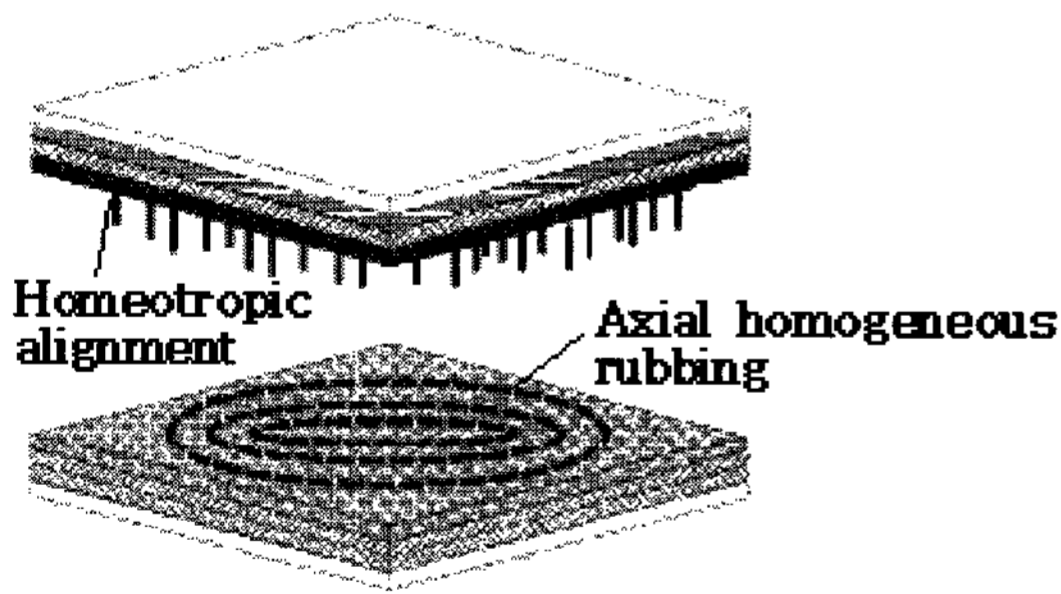
동적 WDM 광통신에서 주요부품 중 하나인 가변형 광필터로 이용되는 액정 Fabry-Perot 가변파장 광필터(liquid crystal Fabry-Perot optical tunable filter ; LCFP-OTF)는 기존의 PZT 타입 또는 광기계 타입의 가변파장 광필터와는 달리 moving part가 없으므로 소자의 신뢰성이 매우 뛰어나며, 액정의 물질 특성상 PZT 타입에 비하여 열적 안정성이 높고 매우 낮은 에너지 소모로도 구동이 가능한 장점을 지닌다. 지금까지 LCFP-OTF의 개발은 액정 디스플레이에서 확립된 기술을 바탕으로 주로 TN_LC 구조를 이용하였거나 응답속도를 향상시키기 위해 강유전성 액정을 이용하였다^[7,8]. 그러나 LCFP-OTF의 파장 가변 원리가 전기장 인가에 의한 액정 배향상태의 변화에 기인하기 때문에, 광투과 특성이 입사빛의 편광 상태에 매우 크게 영향을 받는다는 문제점이 존재한다. 현재 광통신에 사용되는 single

mode fiber에서는 최종 출력단의 편광 방향을 예측할 수 없기 때문에 대다수의 광소자들은 편광의존성이 최소가 되도록 개발되고 있다. 따라서 액정 파장가변 필터를 상용화하기 위해서는 편광의존성을 제거하는 원천 기술의 개발이 필수적이다.

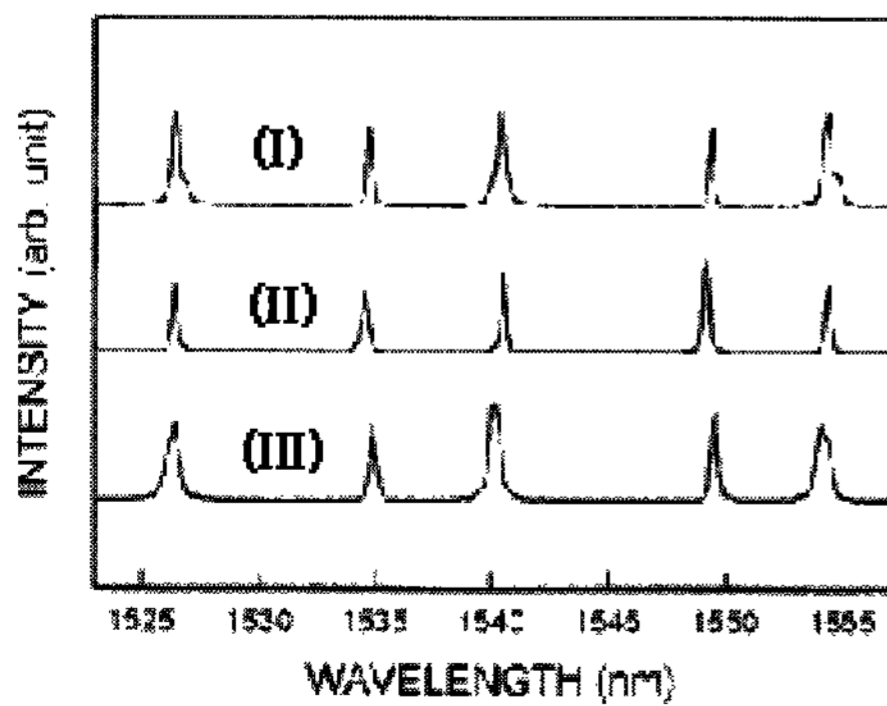
최근 서울대의 연구그룹에서는 [그림 5]와 같이 원형러빙과 수직배향을 결합하여 편광의존성을 제거한 새로운 LCFP-OTF를 개발하였다^[9]. 원형러빙에 의해 축상에서 대칭적으로 배열된 액정분자들에 의해 입사한 빛은 편광상태에 관계없이 동일한 위상차를 느끼게 되고, 인가한 전압에 의해 유효 굴절률 값을 바꿔 줌으로써 파장의 정밀한 조율이 가능하게 된다. [그림 5(b)]는 입사한 빛의 편광에 따른 액정 Fabry-Perot 광필터를 통과한 빛의 세기를 파장에 따라 측정한 결과로 예측한 바와 같이 편광 의존성이 제거되었음을 알 수 있다.

3. 광개폐 기능이 있는 광소자의 개발

기존의 microlens array 및 grating과 같은 광소자는 주로 고분자나 고체물질을 이용해 표면양각(surface relief) 또는 굴절률을 점진적으로 변화시킴 (gradient refractive index : GRIN)으로써 제작된다^[10,11]. 그러나 이러한 소자들은 광개폐 기능이 없기 때문에 고집적의 광 상호연결, 광 steering, 또는 광변조가 필요한 기술에는 이용을 할 수가 없다. 현재까지는 이러한 특성을 얻기 위해 광개폐가 불가능한 표면양각을 이용한 microlens array와 광개폐가 가능한

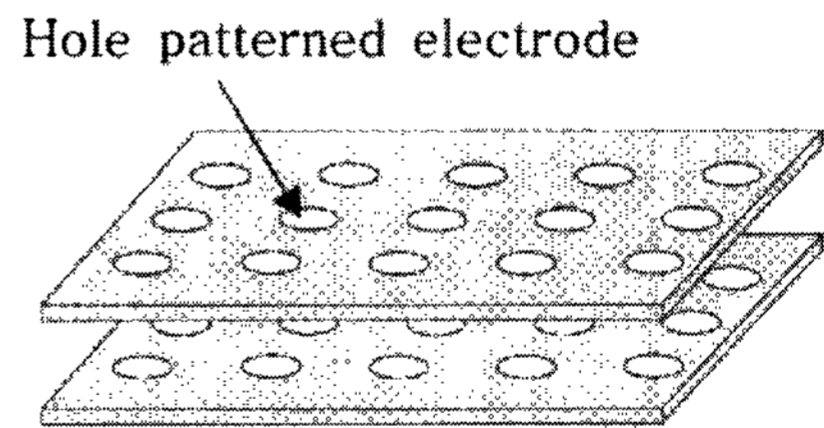


(a)

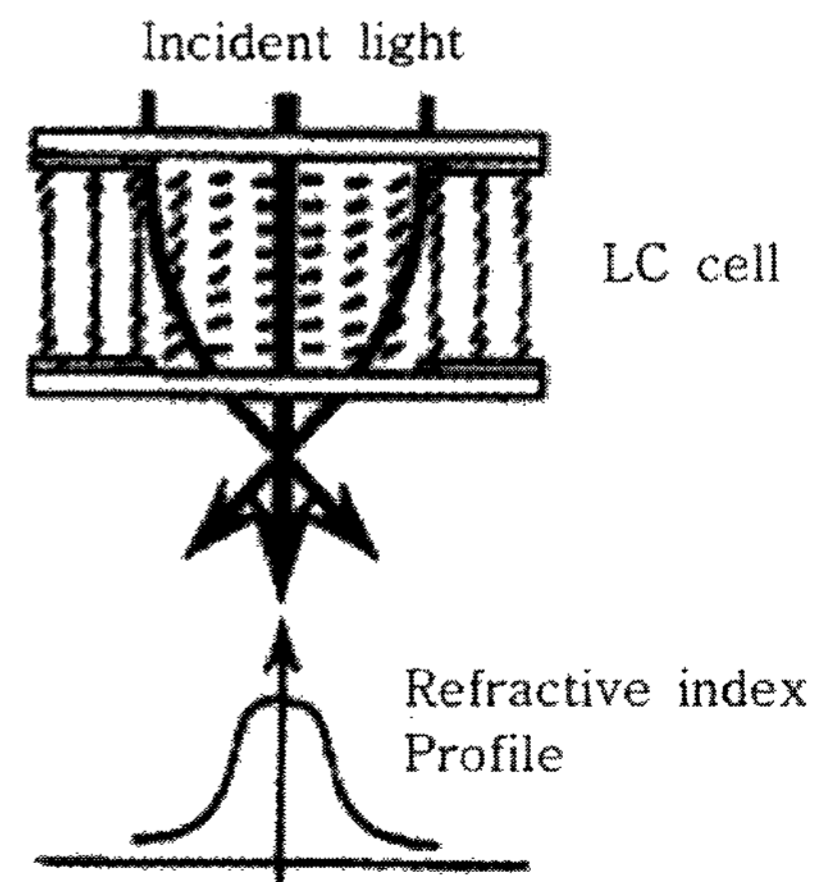


(b)

[그림 5] 혼합배향을 이용한 액정 Fabry-Perot 소자
(a) 시편구조 (b) 편광에 따른 투과 특성 : 편광 (I) 0도, (II) 45도, (III) 90도



(a)



(b)

[그림 6] Hole patterned 전극구조를 이용한 액정 microlens
(a) 전극구조 (b) 렌즈동작 특성

액정 modulator를 결합하여 광개폐 기능을 부여하였다^[12] 그러나, 일본의 Sato교수 그룹은 [그림 6]과 같이 전극을 원형으로 patterning함으로써 비등방적인 전기장을 유도하여 액정의 분자배열을 변형함으로써 GRIN lens를 구현하였다^[13]. 그러나 이러한 방법은 위아래의 patterning된 hole부분을 정확하게 일치시켜야 할 뿐만 아니라 GRIN 특성을 최대화하기 위해 시편의 두께를 100 μm 이상으로 해야 하기 때문에 광개폐를 위해서는 고전압을 인가해야 하며 개폐 속도가 늦다는 단점이 있다.

최근에는 국내 연구진이 액정과 고분자 혼합물의 비등방상분리를 이용함으로써 네마틱 액정 뿐만 아니라 강유전성 액정을 이용한 광개폐 및 초점거리의 변화가 가능한 microlens array 및 광개폐 기능을 갖는 일, 이차원 grating을 개발하였다^[14]. 특히 강유전성 액정을 이용한 microlens 및 이차원 grating의 제작은 최초로 시도된 것으로 응답속도가 기존의 네마틱 액정을 이용한 소자에 비해 1000배 정도 빠르기 때문에 향후 많은 응용분야가 있을 것으로 기대되고 있다. [그림 7]은 강유전 및 네마틱성 액정을 이용한 microlens array의 편광현미경 하에서의 사진과 강유전성 액정 microlens array의 동작특성을 보여준다.

4. 제어가 가능한 광자밴드갭 소자의 개발

이 밖에도 최근에는 액정을 이용하여 제어가 가능한 광자밴드갭 소자도 개발되고 있다.

3차원 주기성을 가진 유전물질로 이루어진 광자결정(photonic crystal)에서의 광자밴드갭(photonic band gap) 구조는 반도체에서의 전자밴드갭(electronic band gap)과 유사한 개념으로, microlaser, 필터, 고효율 LED, 광개폐, 저손실 광도파 등 다양한 광소자로의 응용가능성이 매우 높아 전 세계적으로 많은 학자들이 연구에 몰두하고 있다. 지금까지는 제어 가능한 광자결정의 구조체는 cm나 mm 파장영

역의 경우, 전기적인 스위치나 압전소자를 유전체 내에 두거나, 적외선 laser를 외부에서 조사하는 등의 방법을 이용하여 실현하였지만^[15], 가시광이나 광통신에 이용되는 파장 영역에서는 위의 소자들을 유전물질 내에 넣기 힘들므로, 액정처럼 전기장이나 자기장에 의해 유효 유전률이 변화하는 재료를 이용하여 광밴드갭을 제어하고자 하는 연구가 국내외에서 수행되고 있으나, 아직까지는 기초연구 수준으로 실용화를 위해서는 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 예상된다^[16].

지금까지 살펴본 소자들은 액정의 선형광학 특성을 이용한 것으로 액정의 비선형광학 특성을 이용한 빛으로 빛을 조절하는 광전소자(photonic device)를 개발하려는 연구도 꾸준히 진행되고 있다.

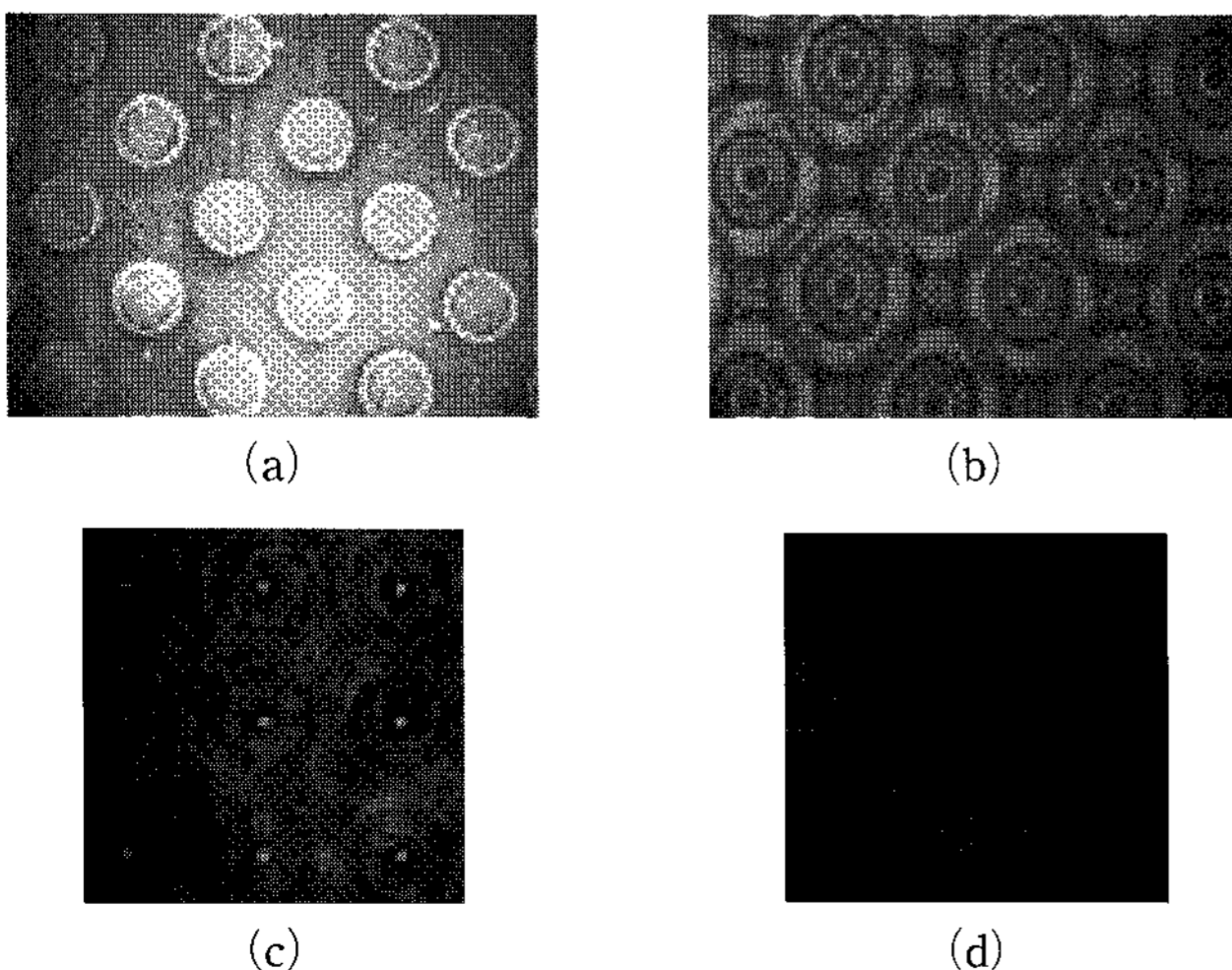
III. 결 론

현재까지 액정을 이용한 광소자의 개발에는 기존의 액정 디스플레이 개발에서 축적된 기술이 큰 도움이 되어왔음을 부인할 수 없다. 그러나 디스플레이 기술에서 요구되는 사양과 광소자에서 요구되는 사양이 다르기 때문에 다음의 세 가지 측면에 대한 연구가 선행되어야만 한다. 첫 번째로 가시광 영역에서의 액정특성을 자외선 영역까지 확장시켜야만 한다. 두 번째로 디스플레이에서 요구되는 약 200 : 1 정도의 대비비는 광 개폐용 소자에는 부족하며 약 40,000 : 1 정도가 되게 획기적으로 개선해야만 한다. 마지막으로 빠른 응답속도(<1ms)를 구현해야만 한다. 이러한 연구를 통해 개발된 액정 광소자는 현재 광→전기→광의 연결상태를 갖는 통신 네트워크를 광→광의 연결상태를 갖는 진정한 광네트워크이 되는데 크게 이바지 할 것으로 기대된다.

마지막으로 국내 액정 디스플레이 산업이 전 세계에서 차지하고 있는 비중을 생각해 볼 때 액정을 이용한 광소자의 개발에 있어서도 미국이나 유럽 등에 비해 상대적으로 유리한 고지를 선점하고 있음에도 불구하고 아직까지 국내에서 광소자에 대한 연구활동은 미미한 실정으로 이에 대한 학계 및 산업계의 분발이 요구되는 시점이다.

참 고 문 헌

- [1] E. Suhir, *Microelectronics Journal*, 31, 839 (2000).
- [2] H. Kostal, *Special report on Lightwave v19* (2001).
- [3] G. Abbate and J. Oton, *Adv. Mater.* 12, 459 (2000).
- [4] G. Scalia *et. al.*, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 320, 321 (1998).
- [5] A. Leuzinger, *Special report on Integrated Communication Design, v2* (2000).
- [6] See <http://www.lci.kent.edu/boslab/pubs/index.html>



[그림 7] 액정을 이용한 microlens array
 (a) 강유전성 액정 microlens array(FMA)
 (b) 네마틱 액정 microlens array
 (c), (d) FMA의 렌즈 특성

-
- [7] J. Patel *et. al.*, Appl. Phys. Lett. 57, 1718 (1990).
[8] J. Patel, Opt. Lett. 17, 456 (1992).
[9] J.-H. Lee, H.-R. Kim, and S.-D. Lee, Appl. Phys. Lett. 75, 859 (1999).
[10] M. Fritze, M. Stern, and P. Wyatt, Opt. Lett. 23, 141 (1998).
[11] S. Ohmi *et. al.*, Opt. Lett. 27, 496 (1998).
[12] K. Rastani, C. Lin, and J. Patel, Appl. Opt. 31, 3046 (1992).
[13] T. Nose and S. Sato, Liq. Cryst. 5, 1425 (1989).
[14] J.-H. Kim and S. Kumar, to be published.
[15] J.-M Lourtioz *et al*, IEEE J. Lightwave Tech. 17, 2025 (1999).
[16] D. Kang *et. al.*, Phys. Rev. Lett. 86, 4052 (2001).