

액정의 물리 현상과 산업적 응용

이 신 두

1. 서 론

우리는 많은 물질들이 조건이 변함에 따라 한가지 이상의 상태로 존재할 수 있다는 사실을 알고 있다. 그 대표적인 예가 바로 물이며, 0°C 이하에서는 고체, 0°C와 100°C 사이에서는 액체, 그리고 100°C 이상에서는 기체상태이다. 고체, 액체, 기체는 가장 일반적인 상들이라고 어릴 때부터 배웠음에도 불구하고 반드시 그러한 상들만이 자연에 존재하는 것은 아니다. 그 세가지 물질상들은 그 구성단위(원자 혹은 분자)들이 각 상에서 다른 정도의 질서를 갖기 때문에 구별된다. 우리가 소위 말하는 고체결정상은 기본 구성단위가 3차원에서 주기적으로 배열되어 "위치(position)"뿐만 아니라 "방향(orientation)"에 대해서도 장거리 질서(long-range order)를 보유하고 있다. 액체와 기체상태에서는 장거리 질서가 존재하지 않고 고체에 비해 상대적으로 쉽게 변형될 수 있으며 또한 흐를 수 있는 성질을 갖고 있다. 특히 기체는 액체에 비해 그 구성단위의 질량중심이 액체에서 보다 더 임의로 분포되어 평균거리가 멀기 때문에 상호작용이 작아 더욱 쉽게 변형된다.

한편 액정상은 글자 그대로 액체 및 고체결정상의 일부 성질들을 모두 보유하고 있으며, 그 구성단위는 기하학적으로 막대모양이나 원판모양의 비 등방 분자로 되어 있다. 현재 액정은 과학적인 측면에서 신비한 여러가지 형태의 구조적 상전이 현상들(structural phase transition phenomena)을 보일 뿐만 아니라 산업적인 면에서도 현대 정보화 사회를 지탱하는 평판 디스플레이의 응용으로 인해 그 매력은 무한하며 앞으로 어디까지 발전할 것인지 예측하기 어려운 정도로 불가사이하다. 고체와 액체의 이중적인 성질과 전기장이나 표면력과 같은 외부의 힘들에 의해 쉽게 변형되는 성질이 이러한 응용을 가능케 한다. 더 나아가 고분자 액정상태에서 만들어진 케블라(Kevlar)와 같은 초고강도 섬유들(ultra-high strength fibers)는 금속보다도

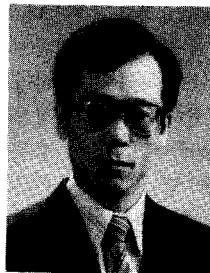
더 질긴 것으로 알려져 있다.

본 글에서는 지난 20여년간 폭발적인 성장을 거듭해 온 액정계가 보이는 물리현상에 대한 연구와 다양한 전기광학 효과들을 소개하고 향후의 연구방향과 응용분야를 언급하고자 한다. 지난 '91년도 노벨 물리학 수상자인 드진(de Gennes)의 이론에서도 알 수 있듯이 액정은 초전도체와의 유사성 뿐만 아니라 다른 물질이 2차원에서 보여 주는 여러가지 현상과도 밀접한 관계를 맺고 있다. 다음 장에서 먼저 액정의 질서도에 따른 상의 분류 및 역사와 최근에 발견된 새로운 상들을 소개하고 주요 전기광학 효과를 이용한 정보 디스플레이와 그외의 다른 산업적 응용을 기술할 것이다. 그 다음 종합적인 고찰과 아울러 향후의 전망을 제시한 후 결론을 맺고자 한다.

2. 액정의 물리 현상

2.1 액정 질서와 상의 분류

액정은 주어진 온도 범위내에서 액체가 지닌 유동성과 결정이 지닌 위치 질서의 일부를 함께 가지고 있는 중간상



이신두
 1976~ 서울대학교 물리학과(B.S.)
 1980
 1980~ 서울대학교 물리학과(M.S.)
 1982
 1982~ Brandeis Univ. (Ph. D)
 1988
 1988~ Bell Communications Research
 1990 (Bellcore) 연구원
 1991~ Optron Systems, Inc 수석연구
 1992 원
 1992~ 서강대학교 물리학과 조교수
 현재

Physical Phenomena in Liquid Crystals and Their Industrial Applications

서강대학교 물리학과(Sin-Doo Lee, Dept. of Physics, Sogang University, C. P. O. Box 1142, Seoul 100-611, Korea)

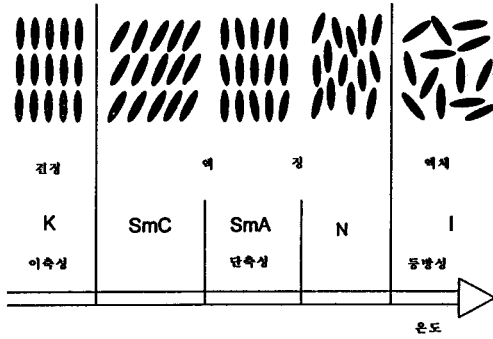


그림 1. 결정, 액정, 액체상태에서의 분자 질서.

(mesophase)라고 할 수 있다. 그 대표적인 액정상들이 그림 1에 나타나 있다. 그림 1에서 알 수 있듯이 액정상에서는 “방향 질서(orientational order)”뿐만 아니라 1차원 혹은 2차원 “위치 질서(positional order)”가 존재한다.¹ 그 중 가장 간단한 구조는 네마틱(nematic) 상이라고 불리우며, 그 구성분자의 축들이 평균적으로 어느 한 방향으로 배열되어 방향 질서만을 갖게 되고 위치 질서는 없는 경우이다. 만약 카이랄(chiral) 분자들로 이루어져 있으면 콜레스테릭(cholesteric) 상이라고 부르며 때로는 카이랄 네마틱 상이라고도 한다. 이러한 네마틱 상의 온도를 낮추게 되면 방향 질서와 더불어 1차원 위치 질서가 존재하는 스멕틱(smectic) 상으로 상전이를 하게 된다. 스멕틱 상 중에서 분자축의 방향과 분자층이 수직인 경우가 스멕틱 A상이며, 더욱 온도를 내리면 대개의 경우 기울어진 스멕틱 A상, 즉 스멕틱 C상으로 변하게 된다. 특히 흥미있는 것은 카이랄 분자들로 구성된 스멕틱 C상(스멕틱 C*상)에서는 거울 대칭이 깨지게 되어 강유전성을 가지게 된다.^{2,3} 그외에 2차원 위치 질서를 가지는 주상(columnar) 액정도 형성될 수가 있으며 2차원 “결합 방향 질서(bond-orientational order)”를 가지는 헥사틱(hexatic) 상도 존재한다.

지금까지는 주로 온도변화에 의해 액정상들이 형성되는 “온도전이형(thermotropic type)”를 논의하였으나, 이러한 유형외에도 다른 물질들을 서로 혼합하게 될 때 액정상을 보이는 “농도전이형(lyotropic type)”이 있다. 이 경우 여전히 온도가 중요한 변수이기는 하지만 구성 성분간의 상대적인 농도가 더욱 중요하다. 예를 들어 비누나 인지질과 같은 양친매성(amphiphilic) 분자들이 물이나 기름에 혼합되어 있는 경우나, 주사슬이나 측사슬형 고분자들이 용매에 녹아 있는 경우 구성분자들의 상대적인 농도를 증가시키면 다양한 액정상을 형성하게 된다.

2.2 액정의 역사

액정의 역사는 새롭고 흥미로운 자연현상을 관찰하던 몇몇의 유럽 과학자들로부터 시작되었다. 그러나 그 사람들은 실험에서 발견한 사실들이 그 당시에는 정확하게 무엇을

의미하는지 깨닫지 못하고 있었으며 종종 액정 발견의 역사적 기술에서 언급되지 않고 있다. 공식적으로 액정이 과학세계에 처음으로 알려진 역사는 1888년 3월 14일에 오스트리아 생물학자인 F. Reinitzer가 독일의 물리학자인 O. Lehmann에게 보낸 편지에서 시작한다.^{4,5} 그 당시 F. Reinitzer의 주된 관심은 식물에서의 콜레스테롤(cholesterol)의 기능에 대한 것이었으며 콜레스테롤 에스테르(ester)를 연구하던 중 이 물질이 두개의 용융점 사이에서 복굴절과 무지개 빛을 보이는 현상을 발견한 후 그 물리학적 원인을 규명하기 위해 O. Lehmann에게 편지를 보내게 되었다. 그러한 성질을 보이는 물질상은 현재 콜레스테릭 상이라고 불리고 있으며, 바로 액정 발견의 효시라고 할 수 있다. 그 이후 액정연구의 절정은 1922년 G. Friedel이 다른 액정상들에 대한 논문을 발표하여 네마틱, 스멕틱, 콜레스테릭 이라는 이름을 사용하여 액정상을 체계적으로 분류하고자 시도하였다.⁵ 이 논문에 분자 질서의 개념을 처음으로 도입하여 스멕틱 액정은 층(layer) 구조를 가지고 있다고 추론하였으며 또한 외부의 전기장이나 자기장에 대해 방향성을 보유했는 것으로 이해하였다.

그 이후 제2차 세계대전 무렵부터 1958년 미국 화학자인 G. Brown이 액정연구에 대한 재조명을 시도할 때까지는 액정에 대한 관심이 줄어들었으나, G. Brown의 연구를 시작으로 다시 세계적으로 활발히 연구가 진행되었다. 특히 1968년 미국 RCA 연구소의 G. H. Heilmeyer 등이 처음으로 액정 디스플레이(liquid crystal display : LCD) 개념을 현실화함으로써 기초적인 과학의 발전과 아울러 새로운 응용 가능성을 제시하게 되어 수 많은 과학자가 액정연구에 참여하게 되었다. 1980년대에는 세계적으로 거의 수 천명에 달했으며 정확하고 자세한 지식의 대부분이 이 시기에 축적되었다 해도 과언이 아니다.

2.3 새로운 상의 발견과 구조적 상전이

위에서 기술한 여러가지 액정상들 사이의 복잡한 구조적 상전이 현상과 더불어 새로운 상들의 존재는 많은 과학자들의 지대한 관심을 끌고 있다⁶. 특히 최근에 발견되어 연구되고 있는 비틀린 스멕틱 A의 결정 경계(twist grain boundary : TGB_A)상⁷은 제2종 초전도체와 아주 유사하며, 준강유전(ferrielectric) 및 반강유전(antiferroelectric) 스멕틱 C*상^{8,9}은 구조적 상전이 측면 뿐만 아니라 응용면에서도 중요할 것으로 예측되고 있다.

2.3.1 비틀린 스멕틱 A결정 경계상

이 새로운 상은 AT & T Bell Laboratories와 Bell Communications Reserch의 액정 연구진이 공동으로 '86년에 처음으로 이러한 상의 존재를 발견하였으나, 정확한 구조를 밝히는 데 많은 어려움이 있어 '89년에 와서야 실험 결과를 발표하였다.^{7,10} 그 이유는 그림 2(a)에서 알 수 있는 것처럼 미시적으로는 스멕틱 층들로 구성되어 있고 거시적으로는 마치 콜레스테릭 상처럼 스멕틱 층들의 기본

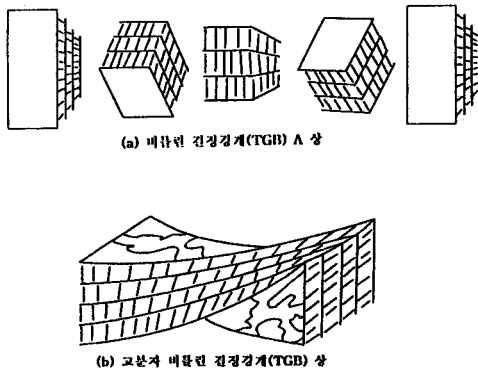


그림 2. 비틀린 결정경계(TGB)상.

블럭들이 비틀려 있기 때문이다. 따라서 X선 실험결과들은 층구조를 가진 것으로 해석되고 가시광선의 영역에서는 콜레스테릭 상처럼 보이게 된다. 이 비틀린 스멕틱 층들의 한 블럭의 길이는 약 250\AA 이며 그 주기는 $0.5\ \mu\text{m}$ 정도이다. 가장 최근에는 스멕틱 C결정 경계(TGB_C)상 또한 보고되었다.¹¹ 이러한 상들의 이론적인 존재 가능성은 실험적인 발견과는 독립적으로 de Gennes의 초전체와 스멕틱 A상의 유사성에 근거한 이론¹²으로부터 Univ. of Pennsylvania 연구진이 거의 같은 시기에 제시되었다.^{13, 14} 이 이론에 따르면 TGB 상들은 분자 카이랄리티(chirality)가 대단히 큰 물질에서만 존재하며 카이랄리티가 상쇄된 라세믹(racemic) 상태에서는 찾아 볼 수가 없다는 것이다. 그러나, 일부 비 카이랄(nonchiral) 물질에서도 유사 TGB 상이 존재할 수가 있다고 보고하였다.¹⁵ 이러한 TGB 상의 대표적인 구조적 특징들 중의 하나는 제2종 초전도체가 보이는 Abrikosov flux 격자 상과 대단히 흡사하며 여러가지 면에서 그 물리적 성질도 많은 공통점을 가질 것으로 예측하고 있다. 그림 2(b)에서 보여 주는 고분자에서의 비틀린 스멕틱 A상은 TGB 상의 경우와 달리 결정 경계가 존재하지 않고 연속적인 변형으로 이루어져 있다. 이러한 많은 액정상들을 체계적으로 연구함으로써 복잡한 물리계가 보이는 많은 새로운 법칙을 유추할 수 있으리라 믿어진다.

2.3.2 준강유전 및 반강유전 스멕틱 C*상

반강유전 스멕틱 C*상의 존재는 Tokyo Institute of Technology의 액정 연구진이 '88년에 발견하였으며,^{8, 9} 처음 보고할 당시에는 기존의 강유전상과는 달리 세계의 안정한 상태(tristable states)를 갖는 스멕틱 C*상의 일종이라고 발표하였다. 그 이후 활발한 연구를 거듭하여 그림 3에서 보이는 것처럼 강유전-준 강유전-반강유전 상으로 전이하는 구조를 제안하였다.⁹ 이것을 시작으로 하여 현재 세계적으로 반강유전 상에 대한 관심이 고조되고 가장 최근에는 이 상을 이용한 LCD의 시제품까지 완성하였다.¹⁶ 또한 주사형 투과 현미경(scanning tunneling microscope)의 도

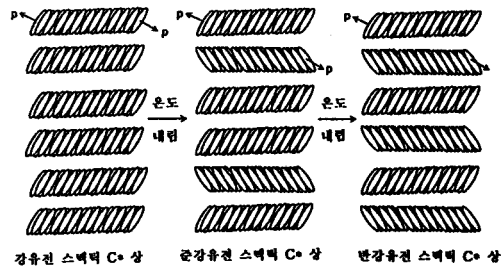


그림 3. 강유전, 준강유전, 반강유전 스멕틱 C*상.

움으로 기판의 계면에 배열된 반강유전 상에서의 액정분자들을 관찰함으로써 그 제안된 구조를 실험적으로 증명하였다.¹⁷ 한편 강유전 상은 여러 중간단계를 거쳐 강유전상과 반강유전상 사이에서 상전이를 하게 된다. 분자분극의 두 방향으로 향하는 스멕틱 층들의 상대적인 비율에 의해 자발분극의 크기가 결정되며 전기장내에서 이들은 전혀 다른 동역학 현상(dynamic phenomena)를 보이게 된다.

이러한 구조를 갖는 분자들의 설계측면에서 보면, 분자 카이랄리티 정도이외에 카이랄 중심의 주변분자들의 상대적인 길이와 기하학적인 구조가 강유전, 준강유전, 반강유전상에서의 구성분자들의 위치 질서에 대단히 큰 영향을 미치는 동시에 이러한 상들의 존재 자체를 결정하는 중요한 변수들 중의 하나이다. 또한 온도에 따른 분자자체의 구조 변화에 의해 상전이 순서가 달라질 것으로 추측할 수 있다. 반강유전 상의 응용면에서는 세계의 안정한 상태를 갖는 것과 전기광학 곡선에서 전기장의 임계값이 아주 명확하게 정의되어 한 상태에서 다른 상태로 전환할 때 응답특성의 균일도와 안정도가 큰 장점이 있다.

3. 액정의 주요 전기광학 효과

이제 상술한 액정상들이 보이는 주요 전기광학 특성을 기술한 후 첨단 정보산업에 이용되고 있는 고화질 평판(flat panel) LCD들 중 가장 간단한 구조의 동작원리를 설명하고자 한다. 액정은 상대적으로 낮은 전압에도 쉽게 반응하는 전기광학적 성질을 갖고 있어 디스플레이를 비롯한 첨단 정보산업 분야에서 무한한 각광을 받고 있다.^{18, 19} 액정의 네마틱 상에서의 대표적인 전기광학 성질은 유전적 비등방성(dielectric anisotropy)에 기인하며¹ 이것은 외부의 전기장과 결합하여 액정분자들의 집합적인 회전을 유도하여 편광자를 통과하는 빛의 세기와 편광성을 변조하게 된다. 이러한 편변조의 크기는 외부의 전기장의 크기의 제곱의 함수이며 또한 그 변조 주파수에도 의존한다. 어느 크기 이상의 주파수 영역에서는 점성에 의해 분자들이 쉽게 회전할 수 없기 때문에 이 경우의 전형적인 응답속도는 수

100 ms이며 이미 잘 알려진 90° 비틀린 네마틱(twist nematic : TN) LCD의 화면속도는 이에 준하여 결정된다. 네마틱 상의 액정분자들과 전기장과의 또 다른 형태의 결합은 전기장의 극성에 따라 분자의 회전방향이 결정되는 변전효과(flexoelectric effect)²⁰이다. 이 효과는 콜레스테릭 상에서도 존재할 수 있으며,²¹ 그 물리화학적 근거는 전기장내에서 액정이 변형될 때 변형의 곡률에 비례하는 유도분극이 생겨나 전기장과 결합하기 때문이다. 이 경우에는 응답속도가 유전효과에서 보다 수백배 이상 빠르다. 따라서 변전효과는 액정이 심하게 변형될 때 현저하게 나타나며 특히 기판표면에 입힌 고분자 박막의 배향력에 큰 영향을 받게 된다.

한편 카이랄 분자들로 구성된 기울어진 카이랄 스멕틱 상, 예를 들어 스멕틱 C*상은 강유전성을 나타내며,^{2,3} 이 상에서는 분자분극에 의한 거시적인 자발분극이 존재하기 때문에 외부의 전기장에 의한 광변조가 가능하며 변전효과와 마찬가지로 전기장의 극성에 의존하고 응답속도는 거의 1 μs에 육박한다. 마지막으로 수직한 카이랄 스멕틱 상, 즉 스멕틱 A상과 같은 경우에는 전기장내에서 분자들이 기울어 지게 되고, 기울어진 각도의 크기에 비례하는 유도분극이 형성되어 전기장과 결합하는 경전효과(electroclinic effect)²²가 존재한다. 이때 분자들의 회전속도는 오히려 강유전 효과에 의한 경우보다 빠르다. 온도의존성을 보면 경전효과가 가장 크고 강유전 효과, 변전효과의 순서이며, 유전효과가 가장 작다. 액정상이 존재하는 온도영역이 넓을수록 그만큼 더 응용의 범위도 넓어 지게 된다. 표 1에서 위에 열거한 주요 전기광학효과들을 서로 비교하여 실제 응용에 필요한 연관된 계수를 구체적으로 나타내었다. 특이할 점은 네마틱 상에서는 분자들이(비등방 유전상수가 양인 경우) 전기장과 평행하게 되도록 회전하지만, 스멕틱 상에서는 강유전이나 경전효과로 인해 분자축들이 전기장에 수직하게 회전한다.

결론적으로 말해 액정의 전기광학 특성들은 크게 나누어 두가지 서로 다른 "대칭성의 깨짐(symmetry-breaking)"의 개념으로 기술할 수 있다. 하나는 내부적으로 액정의 구성분자들 그 자체에 의한 아래-위(up-down) 대칭성의 깨짐이며 다른 하나는 외부의 전기장이나 표면배향력의 비대칭성에 의한 경우이다.²³ 예를 들어 강유전 상은 액정분

자들의 거울대칭(mirror symmetry)이 깨지기 때문에 존재하게 되고, 네마틱 상에서의 전기장의 극성에 의존하는 효과는 심한 변형이나 기판/액정의 경계면에서 비대칭인 배향력에 의해 생겨 난다.

4. 액정 디스플레이의 구동원리

액정의 산업적 응용분야로는 파장 선택 필터(tunable wavelength-selective filters)나 공간 광변조기(spatial light modulators)를 비롯한 광정보 처리용 소자들이 있지만,²⁴ 그 중에서 현재 치열한 국제 경쟁속에 개발되고 있는 평판 LCD를 소개하고 그 구동원리에 대해 기술하고자 한다. LCD는 크게 나누어 두가지, 즉 수동구동(passive addressing) 형과 능동구동(active addressing) 형으로 구분되며 수동형은 액정 박막의 양편에 서로 교차하도록 위치할 수 많은 전극들이 화소를 구성하며 이 전극들에 전압신호를 되풀이하여 공급함으로써 정보를 처리한다. 이러한 수동구동 체계에서는 현재 TN이나 200° 이상의 TN, 소위 Super TN(STN) 구조에서 화소의 수가 640×480 정도이며 크기가 15인치 미만인 LCD가 상용화되어 있다. 수동형이 안고 있는 심각한 문제로는 응답속도에 의한 화면크기의 한계, 각 화소로의 정보전달의 복잡성, 양편에 있는 전극의 정확한 배열의 어려움, 정보용량의 한계 등을 들 수 있다. 이러한 수동형의 문제점들 때문에 현재는 수백만개의 능동형 박막 트랜지스터(thin film transistor : TFT)들을 유리기판 위에 제조하는 기술이 개발되어 국내외의 많은 산업체들이 TFT의 생산성 및 특성의 향상에 박차를 가하고 있다. 이와 병행하여 LCD 제조에 필수적으로 요구되는 배향과 부품 및 소재에 대한 기반기술들을 개발하고 있다. 그러나 능동구동 체계가 안고 있는 가장 큰 문제점은 TFT의 제조공정이 복잡하고 막대한 설비투자가 요구되어 필연적으로 가격이 비싸고, 또한 15인치 크기의 대형 화면용 TFT의 생산은 현재로서는 기술적으로 대단히 어려운 단계이다.

이제 LCD의 구동원리를 설명하기 위해 그림 4에 보여준 가장 간단한 TN 구조를 이용하자. LCD의 구성은 유리기판에 만들어진 구동소자들, 즉 전극들 사이에 액정물질을 두어 화소를 구성하고 외부에 편광자들을 적절한 각도로 위치하게 한다. 그림 4의 TN 구조에서는 두개의 기판들 사이에서 액정분자들이 한 기판에서 다른 기판으로 감에 따라 90°만큼 비틀려 있고 상하의 편광자들이 서로 직교하고 있다. 이때 외부에서 전기장이 인가되면 유전효과에 의해(비등방 유전상수가 양인 경우) 액정분자들이 기판에 수직하게 전기장의 방향으로 배열하게 되어 첫번째 편광자를 통과한 빛의 편광이 액정분자들의 구조에 전혀 영향을 받지 않기 때문에 두번째 편광자에 의해 빛이 차단된다. 만약 전기장이 없는 경우 첫번째 편광자를 통과한

표 1. 액정의 주요효과 및 계수의 비교

효 과	유 전	변 전	강유전	경 전
응답속도	10~100 msec	0.1~1 msec	1~100 msec	0.1~10 msec
분자회전	~E ²	~E	일정각도	~E
변조크기	V-V _c	연 속	V _t 함수	연 속
회전점성	보 통	보 통	꽤 큼	꽤 큼
온도의존성	작 음	보 통	큼	꽤 큼
온도구간	큼	보 통	꽤 큼	작 음

(E=전기장의 세기, V=전압, V_c=임계전압, t=시간)

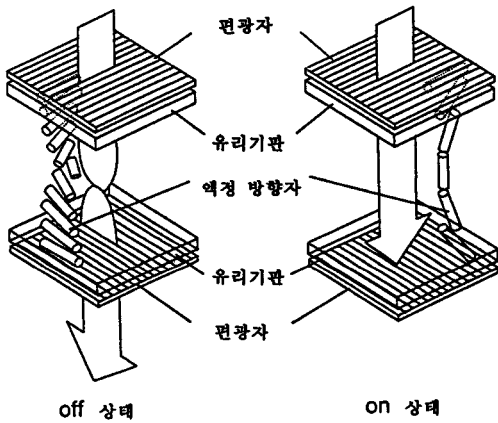


그림 4. 비틀린 네마틱(TN) LCD의 구동원리.

빛의 편광이 비틀린 액정분자들의 구조를 따라 회전하게 되어 두번째 편광자를 통과하게 된다. 다시 말해 인가된 전기장의 크기에 따라 투과되는 빛의 양이 조절되고 각 화소에 원하는 만큼의 빛을 선택적으로 투과시켜 화상을 형성하게 된다. STN의 구동원리도 마찬가지로이나 상하의 편광자들 사이의 각도를 적절히 조절하여야 한다. 이외에 강유전 액정을 이용한 디스플레이나 고분자 속에 액정분자를 분산시킨 고분자 분산형(polymer-dispersed) 디스플레이도 있다. 이들의 기본원리 또한 외부의 전기장을 이용하여 액정분자들의 배열방향을 변화시키고 전기장의 크기에 따라 투과하는 빛의 양을 조절하는 것이다. 이러한 LCD의 성능은 기본적으로 액정물질의 전기광학효과와 TFT 소자나 단순전극들의 구성에 의한 구동방법에 의해 결정될 것이다.

5. 다른 분야에서의 액정 응용

지난 20여년간 농도전이형 액정분야에서 수행되었던 연구는 온도전이형 액정의 경우에 비해 대단히 미미한 실정이다. 농도전이형 액정의 잠재적인 응용에는 크게 네가지 중요한 영역이 있다; 합성세제, 음식 유화제, 원유 추출, 그리고 의학적 응용이다. 세제로서의 응용으로 양친매성 분자들의 혼합물은 가장 오래된 약 3천년의 역사를 가지고 있으나 그 물리화학적 정확한 규명은 최근에 와서야 이루어졌다. 아직도 많은 의문이 풀리지 않은 채 남아 있으며, 예를 들어 왜 어떤 양친매성 물질이 특정온도에서 기름을 물에 용해시키는 데 효과적인지 완전히 이해되지는 않고 있다. 이러한 이해는 뜨거운 물에서 세척하는 효과만큼이나 찬물에서도 효과적인 세제를 개발하는 데 기여할 것이다. 원유추출과 밀접한 연관이 있는 양친매성 물질/물/기름 계가 형성하는 구조에 대한 많은 연구가 수행되었다. 다공성

바위에 저장되어 있는 원유의 상당량(심지어 50% 정도까지)은 유전이 고갈된 후에도 여전히 남아 있다. 만약 이러한 원유가 효과적으로 마이셀(micelle)을 형성하도록 값싼 양친매성 물질/물의 혼합물을 적절히 이용하면 잔류하고 있는 원유를 추가로 추출해 낼 수 있다. 이러한 과정을 통해 잠재적으로 이용이 가능한 원유의 양은 엄청나다.

한편, 음식산업에서는 음식물의 조직, 색깔, 맛 또는 점성을 유지하기 위해 때로는 혼합물을 첨가한다. 유화제는 마요네즈, 샐러드용 드레싱, 크림, 맥주, 치즈나 젤리에 첨가된다. 의학적인 응용에서 보면, 어떤 약은 혈액속에서 잘 용해되지 않아 결과적으로 신체의 필요한 부분으로 운반되지 않는다. 이때 무독성의 적당한 양친매성 물질이 첨가되면 체온에서 쉽게 용해되어 소기의 목적을 달성할 수 있다. 또 다른 가능성으로는 소화기관의 효소에 의해 약이 분해되는 것을 방지하기 위해 양친매성 물질로 만든 캡슐 속에 보호하여 투약하는 것이다.

마지막으로 고분자 액정의 응용은 구성분자들의 액정질서도를 이용하여 초 고강도 섬유를 만들어 내는 것이다. 가장 좋은 예가 케블라인 데 이것은 polyamides 액정상에서 얻어 낸 섬유이다. 액정상에서 압축하게 되면 원래 고분자 용액이 가지고 있던 액정질서도에 더하여 유체의 흐름에 의해 유도된 질서가 존재하게 된다. 이러한 질서가 고체상태에서도 유지되어 탄성이 증가하고 그 결과 고강도를 갖게 된다. 케블라와 같은 고강도의 섬유들은 자동차 타이어, 방탄조끼나 케이블에 이용된다. 이와 병행하여 RNA나 DNA같이 생물학적으로 중요한 거대분자들의 액정질서도가 어떻게 세포의 기능에 영향을 미치는가에 대한 연구는 대단히 중요하다. 따라서 이러한 연구는 향후 중요한 의학적 응용에 새장을 열 것으로 기대된다.

6. 종합적 고찰과 결론

종합적으로 액정분야에서의 기초연구는 주로 그 구성분자간의 미시적인 화학적 상호작용이 어떻게 집합적이고 거시적인 물리현상에 영향을 미치는가에 대한 것이었다. 많은 화학자들이 새로운 액정 화합물을 합성하여 액정상에서 보이는 분자 개개의 화학적 성질을 구체적으로 이해하고자 하였으며, 물리학자들은 응집상태인 액정상에서 발견되는 새로운 물리현상을 규명하고 새로운 물질합성에 대한 과학적인 접근방법을 제시해 주었다. 이러한 학문적 기초 위에서 시계, 계산기, 전화기, 카메라, 사무용 기기, 개인용 컴퓨터, 소형 텔레비전, 자동차 계기판 등에 이용되고 있는 LCD의 개발이 가능하게 되었다. 특히 평판 LCD는 서서히 브라운관을 대체하게 되어 세계시장은 1995년에 약 8조원, 2000년에 약 16조원 정도로 성장할 것으로 예측하고 있다. 현재 국제적으로 지적 소유권에 대한 마찰을 빚고 있는 상

황에서 우리나라에서는 장기적으로 산, 학, 연의 긴밀한 공동연구 개발체제를 정립하여 국제 경쟁력을 강화해 나가야 할 뿐만 아니라 세계시장의 확보에도 주력해야 할 것이다. 특히 액정물질 및 polyimides를 비롯한 배향재료들은 세계적으로 상당히 개발되어 있으나 실제 LCD의 양산에 필요한 고도의 배향기술, 고정밀 TFT 설계 및 제작기술, 고품질의 주변 소재 및 부품의 개발, 새로운 구동방법의 개발 등이 절실히 요청되고 있다.

또 다른 응용으로는 액정 온도계와 온도 감지 필름, 고강도 액정 중합체, 원유추출 및 석유재생 산업에 요구되는 활성제 등을 포함하며, 더 나아가 세포막의 기능에 대한 이해와 질병의 치료를 위한 신의약 개발에도 이바지하고 있다. 액정분야의 미래의 많은 과학자들이 지속적으로 연구를 수행해 감에 따라 축적된 연구결과는 새로운 물리현상의 발견 뿐만 아니라 액정의 산업적 응용에도 공헌하리라 확신한다. 끝으로 본 글이 액정에 관심이 갖고 있는 많은 연구자들에게 조금이라도 도움이 되었으면 한다.

참 고 문 헌

1. P. G. de Gennes and J. Prost, "The Physics of Liquid Crystals", Clarendon, Oxford, 1993.
2. R. B. Meyer, L. Liebert, L. Strzelecki, and P. Keller, *J. Phys. Lett.(Paris)*, **36**, L69 (1975).
3. J. W. Goodby et al., "Ferroelectric Liquid Crystals", Gordon & Breach, Philadelphia, 1991.
4. P. J. Collings, "Liquid Crystals", Princeton University, Princeton, 1990; 이신두 역, "액정 : 자연의 미묘한 제4의 상", 전파과학사, 서울, 1994.
5. S. Kobayashi, Ed., "The 100th Anniversary of Liquid Crystal Research", Gordon & Breach, New York, 1988.
6. P. S. Pershan, "Structure of Liquid Crystal Phases", World Scientific, Singapore, 1988.
7. J. W. Goodby, M. A. Waugh, S. M. Stein, E. Chin, R. Pindak, and J. S. Patel, *Nature*, **337**, 449 (1989).
8. A. D. L. Chandani, Y. Ouchi, H. Takezoe, A. Fukuda, K. Terashima, and A. Kishi, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **28**, L1261 (1989).
9. K. Hiraoka, A. Taguchi, Y. Ouchi, H. Takezoe, and A. Fukuda, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **29**, L103 (1990).
10. G. Srajer, R. Pindak, M. A. Waugh, J. W. Goodby, and J. S. Patel, *Phys. Rev. Lett.*, **64**, 1545 (1990).
11. H. T. Nguyen, A. Bouchta, L. Navailles, P. Barois, N. Isaert, R. J. Twieg, A. Maaroufi, and C. Destrade, *J. Phys. II*, **2**, 1889 (1992).
12. P. G. de Gennes, *Solid State Commun.*, **14**, 997 (1973).
13. S. R. Renn and T. C. Lubensky, *Phys. Rev.*, **A38**, 2132 (1988).
14. S. R. Renn and T. C. Lubensky, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **209**, 349 (1991); S. R. Renn, *Phys. Rev.*, **A45**, 953 (1992).
15. J. S. Patel, *Phys. Rev.*, **E49**, R3594 (1994).
16. Nippondenso Co., Ltd, Showa Shell Sekiyu K. K. (1993).
17. M. Hara, T. Umemoto, H. Takezoe, A. F. Garito, and H. Sasabe, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **30**, L2052 (1991).
18. E. Kaneko, "Liquid Crystal TV Displays", KTK Scientific, Tokyo, 1987.
19. B. Bahadur, "Liquid Crystals : Applications and Uses", Vols. 1, 2, and 3, World Scientific, Singapore, 1990.
20. R. B. Meyer, *Phys. Rev. Lett.*, **22**, 918 (1969).
21. J. S. Patel and R. B. Meyer, *Phys. Rev. Lett.*, **58**, 1538 (1987); J. S. Patel and S.-D. Lee, *J. Appl. Phys.*, **66**, 1879 (1989).
22. S. Garoff and R. B. Meyer, *Phys. Rev. Lett.*, **38**, 848 (1977).
23. S.-D. Lee and J. S. Patel, *Phys. Rev. Lett.*, **65**, 56 (1990).
24. J. S. Patel, M. A. Saifi, D. W. Berreman, C. Lin, N. Andreadakis, and S.-D. Lee, *Appl. Phys. Lett.*, **57**, 1718 (1990); J. S. Patel and S.-D. Lee, *Appl. Phys. Lett.*, **58**, 2491 (1991).