

제 4 장 액정 마이크로/나노구조를 이용한 광전자소자 응용

김윤호

지난 호에서는 액정의 결함구조를 제어함으로써 자기조립시스템에 적용 가능한 연구내용에 대해 서술하였다. 특히, 액정물질만이 가지는 빠른 반응속도와 쉬운 액정분자배향처리 방법 등의 장점은 액정결함구조가 자기조립 빌딩블록으로써 충분히 경쟁력을 가지고 있다는 것을 보여주고 있으며, 간단하고 비용대비 효율이 높은 방법으로 초미세 패턴의 대량생산에 적합하다는 것을 보여주었다. 본 원고에서는 대량생산이 가능한 액정 결함구조의 패턴을 이용하여 수행할 수 있는 광전자 소자의 응용 가능성에 대해서 설명하고자 한다. 특히, 대면적으로 패턴화가 가능한 스메틱 액정의 결함구조인 TFCD (toric focal conic domain)와 콜레스테릭 액정의 ULH (uniform lying helix) 구조를 이용한 연구결과들에 대해 서술하고자 한다.

1. 스메틱 액정구조의 응용연구

스메틱 액정결함구조 (Toric Focal Conic Domain, TFCD) 는 지난 호에 언급한 것처럼 딥플 형태의 구조뿐만 아니라 결함구조 내부의 독특한 액정분자의 배향 덕분에 특이한 광학적 효과를 가진다. 액정결함구조 내부에서는, 복굴절 특성을 보이는 액정 분자들이 결함구조의 중심으로부터 정확하게 방사형으로 배향되어 있다. 또한 중심부로 갈수록 높아지는 굴절률 분포를 가지기 때문에, 렌즈와 같은 광학적 응용에 용이하다. 이번 절에서는 TFCD 에서 나타나는 광학적 효과를 바탕으로 TFCD 의 규칙적인 배열을 어떤 응용분야로 활용할 수 있는지를 서술하고자 한다.

1.1 마이크로렌즈 어레이 (MLA)

렌즈는 빛을 모아주는 역할을 하는 장치로 현미경, 망원경, 안경 등 다양한 여러 형태로 사용이 된다. 마이크로렌즈 어레이는 말 그대로 이러한 빛을 모을 수 있는 렌즈 구조체를 수~수백 μm 크기로 만들고 이를 2 차원적으로 배열해 놓은 것을 의미한다. 소형소자의 개발은 마이크로렌즈 어레이의 필요성을 크게 만들었으며, 2 차원적으로 잘 배열된 마이크로렌즈 어레이는 광디퓨저(light diffuser), 전자디스플레이, 광학센서 등 다양한 분야에 응용되고 있다. 마이크로렌즈 어레이의 제작방법은 포토리소그래피(photolithography), 홀로그래픽 리소그래피(holographic lithography), 광열(photothermal) 패터닝, 잉크젯 프린팅 등 다양한 방법이 사용되었다. 위의 방법들은 각각의 방법에 따라 장점이 있지만, 패턴 전처리, 값비싼 장비, 복잡한 공정 과정 등의 단점을 가지고 있다. 그래서 자기조립물질을 이용한 마이크로 렌즈의 제작은 쉽고 싼 가격에 대면적으로 형성할 수 있다는 점에서 상당히 매력적이라 할 수 있다. 실제로 투명한 콜로이드 입자와 하이드로젤(hydrogel) 등을 이용하여, 직접 렌즈를 형성하거나 주형에서 떼어내는 몰딩방법(molding)으로 마이크로렌즈 어레이를 제작하는 방법들이 보고되었다.

액정결함구조인 TFCD 는 움푹 파인 딴플 구조와 액정분자의 방사형 배향에 의해 TFCD 의 중앙으로 빛을 집중시켜 마이크로 렌즈로써 좋은 광학적 특성을 보여준다. TFCD 정렬구조가 만들어진 스멕틱 액정 필름의 두께 조절을 통해, TFCD 의 크기와 TFCD 를 지난 빛의 초점거리를 조절할 수 있었다. 그리고 여기서 사용한 불소기 함유 스멕틱 액정은 TFCD 정렬 구조를 소프트 크리스탈 형태로 안정적으로 유지시켜, 두 차례의 몰딩을 통해 원뿔형태와 딴플형태의 두 가지 고분자 마이크로렌즈 어레이를 만들 수 있었다. 스멕틱 액정으로 만들어진 TFCD 마이크로렌즈 어레이(MLA-1)와 자외선 경화 고분자(NOA63)로 TFCD 의 역상을 떠서 원뿔형태의 고분자 마이크로 렌즈 어레이(MLA-2)를 만들었다. 그 다음, MLA-2 를 또 다른 고분자인 PDMS(polydimethylsiloxane)로 한번 더 역상을 떠서 딴플형태의 고분자 마이크로 렌즈 어레이 (MLA-3)를 만들어 총 3 가지 형태의 마이크로 렌즈 어레이를 만들 수 있었다, 그림 1.

빛의 투영실험은 광학현미경을 이용하였고, 마이크로 렌즈 어레이를 현미경의 샘플 스테이지 위에 올리고 백색광을 샘플 스테이지 아래서 위로 투과시켜 줌으로써 실험을 진행하였다. 투영판으로는 "F"자만 투명하게 프린트된 필름을 사용하였고, 현미경의 z 축의 방향으로 초점을 바꿔가며 마이크로 렌즈 어레이의 초점 거리를 관찰하였다. 빛이 TFCD 로 만들어진 MLA-1 을 지나면 대물렌즈아래서 "F" 이미지가 TFCD 의 중앙부분에서 깨끗하게 관찰되는 것을 볼 수 있다. 기존의 마이크로렌즈 어레이가 반구형태로 만들어져 빛을 집중시키는데 반해, TFCD 는 움푹파인 딴플구조와 TFCD 의 중앙에서 방사형으로 배향된 액정분자들이 TFCD 의 중앙으로 빛을 집중시키기 때문에 포커싱메커니즘이 매우 다르다고 말할 수 있다.

TFCD 에서 NOA63 고분자로 역상으로 떼어낸 MLA-2 는 TFCD 와는 다르게 내부가 같은 굴절률($n=1.52$)로 되어 있으며 원뿔형태로 솟아있는 구조를 보여준다. "F" 철자를 이용한 투영실험에서 원뿔형태 구조 중앙에 깔끔하게 "F"가 육각형 배열로 정렬된 것을 볼 수 있었다. MLA-2 에서 PDMS($n=1.43$)으로 역상으로 떼어낸 딴플형태의 MLA-3 의 경우, MLA-1 과 MLA-2 와는 다른 렌즈효과를 보여주었다. MLA-1 과 MLA-2 는 모두 마이크로 렌즈를 지나 앞쪽에 초점이 맺힌 반면, MLA-3 는 딴플 구조로 인해 초점거리가 마이크로 렌즈 뒤쪽으로 맺혀 "F"자가 뒤집어진 것을 관찰하였다. 이는 복굴절 성질을 가지는 액정분자로 이루어진 MLA-1 과 굴절률의 차이가 없는 MLA-3 가 다른 결과를 보인다는 것을 보여주었고, TFCD 의 MLA-1 은 기존의 딴플형태의 구조가 보여주는 광학적 효과와는 완전히 다르다는 것을 입증할 수 있었다. 이 연구를 통해 TFCD 를 이용하여 새로운 마이크로렌즈 어레이를 만들 수 있고, 특이한 구조의 고분자 마이크로 렌즈 어레이까지 만들 수 있음을 보여주었다.

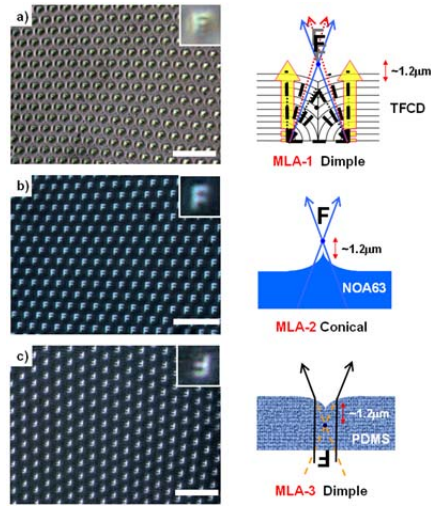


그림 1. TFCD 기반 마이크로 렌즈 어레이 투영실험. a)TFCD 마이크로렌즈 (MLA-1) b)자외선경화폴리머(NOA63)으로 몰딩하여 얻은 원뿔모양 렌즈 (MLA-2) c) PDMS 로 몰딩을 통한 딩플모양 렌즈 (MLA-3)

또한 액정은 온도에 따라 상이 달라지는 것을 이용하여 온도 감응형 마이크로 렌즈가 되는 것을 보여줄 수 있었다. 여기서 사용된 액정은 상용화된 액정인 8CB 이다. 이 물질은 상온에서 TFCD 를 잘 유지하는 물질로 사다리꼴 채널에서 TFCD 가 잘 배열되었으며, 스멕틱 A-네마틱 상전이 온도에서의 투영실험을 통해 스멕틱 A 상에서 마이크로 렌즈 어레이가 잘 만들어지고 온도를 더 높여 네마틱상으로 가게 되면 렌즈가 사라지는 것을 관찰하였다. 온도에 따라서 빠르게 렌즈의 생성여부를 제어할 수 있으며, 이를 통해 온도 감응형 마이크로렌즈 어레이로써 활용이 가능하다는 것을 보여주었다, 그림 2.

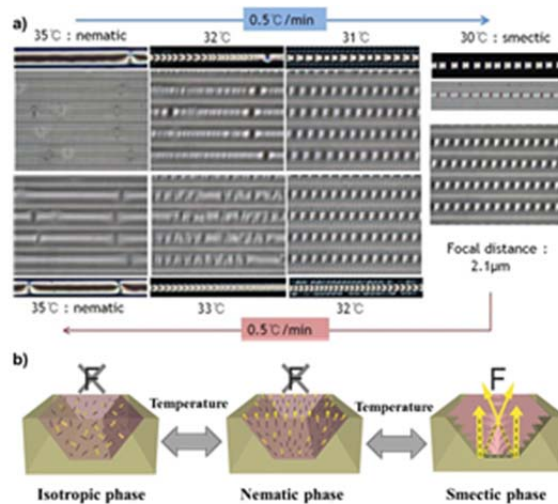


그림 2. 온도감응형 마이크로 렌즈 어레이. a)온도변화에 따른 마이크로렌즈 어레이 생성과 사라짐 b)온도에 따라 발현되는 서로 다른 액정상의 (Iso.-N-Sm) 분자 배향에 따른 마이크로렌즈 효과 개념도

1.2 포토마스크

빛을 집중시키는 마이크로렌즈의 특성은 포토마스크로써의 활용을 가능하게 한다. 포토마스크는 포토리소그래피(photolithography) 공정에서 필수적인 장비로, 빛의 차폐역할을 담당하는 장치이다. 마이크로렌즈를 이용한 포토마스크는 기판에 도포되어 있는 포토레지스트(photoresist)에 렌즈를 지난 빛의 도즈(dose) 차이를 주어 패턴을 형성하게 된다. 기존의 액정기반 마이크로렌즈는 원형의 홀 패턴에 전기장으로 액정을 배향시켜 홀 중앙에서 바깥쪽으로 갈수록 굴절률이 달라지는 것을 이용하였다. 하지만 기존의 방법은 패턴된 전극과 전기장, 복잡하고 두꺼운 액정 셀(cell) 형태로 만들어야 한다는 단점을 가지고 있었다.

액정결함구조인 TFCD 는 그림 3b 처럼 구조 내부의 액정분자의 방사형 배향이 빛을 집중시키는데 유리하다. 앞서 설명한 TFCD 마이크로렌즈 어레이를 포토마스크로 활용하는 것은 기존의 제작 방법에 비해 외부장의 이용 없이 쉽고 빠르게 제작이 가능하다는 장점이 있다. 각 TFCD 중심에서 방사형으로 액정이 배향되어 있으며 움푹파인 구조가 만들어내는 스멕틱 층의 곡률과 경사는 효과적인 굴절률 차이를 만들어 낸다. 그래서 빛이 TFCD 정렬구조에 입사되면 TFCD 의 중앙으로 빛이 집중되어 렌즈효과를 보인다. TFCD 구조 바깥부분의 평평한 지역은 스멕틱 층이 기판에 평행하게 만들어져 액정분자가 기판에 수직하게 배향되어 있고, 그 결과 빛이 굴절되지 않고 그대로 지나가게 되는 윈도우(window)로써의 역할을 한다. 이런 TFCD 의 렌즈특성을 이용한 포토마스크는 노출되는 자외선의 양과 포토레지스트의 종류에 따라 다양한 포토레지스트 패턴들이 만들어질 수 있다.

그림 3d 는 TFCD 포토마스크를 이용해 자외선(365nm)을 입사시키고 실리콘 기판에 스피코팅된 포토레지스트를 식각하여 리소그래픽 패턴이 생성되는 것을 보여준다. 빛을 받은 부분이 식각되어 나가는 positive 포토레지스트를 사용했을 때는 튀어나온 링 형태가 관찰되었고, 반대로 빛을 받은 부분이 식각되지 않고 남아있는 negative 포토레지스트를 사용했을 때는 들어간 링 형태가 관찰되었다. 그리고 TFCD 의 크기를 조절하여 초점거리를 변화시키면 다양한 모양의 포토레지스트 패턴이 형성될 수 있다는 것을 볼 수 있었다. 또한 그림 3e 처럼 편광된 자외선을 TFCD 포토마스크에 입사시키면, 액정분자의 방사형 배향방향에 따라 빛을 차단시키는 부분과 통과시키는 부분이 생기면서 편광된 빛의 방향에서 대칭을 이루는 형태의 포토레지스트 패턴이 나타났다. 이는 TFCD 의 구조가 포토마스크로 사용되었을 때 광학적으로 선택성이 있다는 것을 보여준다. 이로써 TFCD 의 크기, 포토레지스트의 종류, 빛의 선택적 차폐에 의해 하나의 포토마스크로 여러 포토레지스트 패턴을 형성할 수 있음을 보여 주었다.

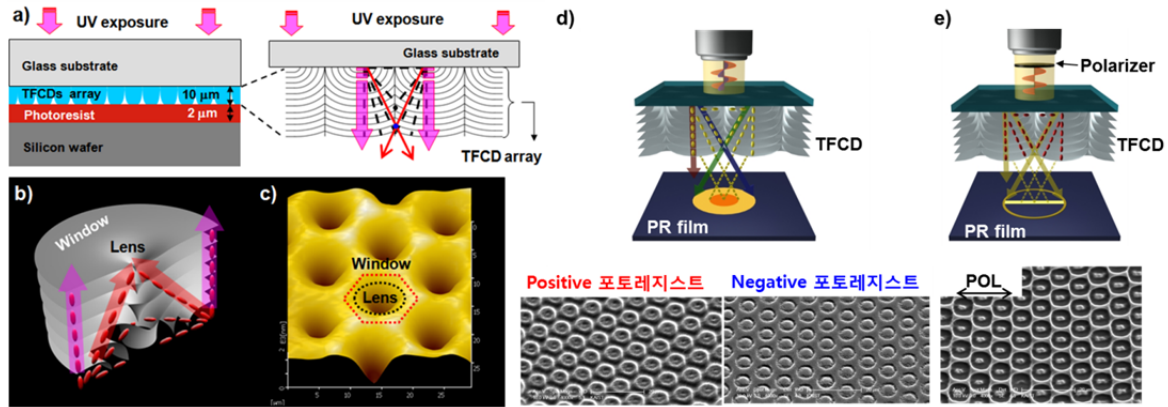


그림 3. TFCD 기반 마이크로렌즈 어레이의 포토마스크 실험. a)TFCD 포토마스크의 모식도 b)TFCD 마이크로렌즈 하나의 포커싱 메커니즘과 c) 원자력간현미경(Atomic force microscopy, AFM)으로 본 TFCD 구조의 윈도우와 렌즈 영역. d) 포토레지스트의 종류에 따른 감광된 패턴의 차이. e) 편광판 삽입시 빛의 선택적 차폐에 의해 감광된 패턴의 모양.

2. 콜레스테릭 구조제어와 광학적 응용연구

이전 호에서 설명한 콜레스테릭 구조는 (uniform lying helix, ULH) 액정분자들의 꼬여있는 나선축이 기판에 수평하게 향할 때 나타나는 구조이다. 또한 나선축이 한 방향으로만 배향하도록 제어해야만 규칙적인 라인형태의 ULH 구조가 만들어 진다. ULH 라인구조를 만드는 방법은 다음과 같다. 우선 두 개의 ITO (indium tin oxide) 기판에 폴리이미드(polyimide) 배향막을 도포하고 액정을 한 방향으로 배향시켜주는 러빙(rubbing)방법으로 각 기판을 처리한다. 그 다음 약간의 간격을 두고 위아래 기판의 러빙방향이 180 도 차이가 나도록 antiparallel 하게 셀을 조립을 한다. 이렇게 만들어진 셀 안에 키랄네마틱 액정을 집어넣으면 액정분자들이 아래서부터 수평 배향되기 때문에 나선축이 기판에 수직인 방향을 향하고 있는 Grandjean 구조가 형성된다.(그림 10a) 여기에 전기장을 인가해주면 액정분자의 배향이 기판에 수직인 방향으로 서러고 하고, 나선축이 기판에 수평하게 누워 안정하고 규칙적인 ULH 라인구조가 나타나게 된다.(그림 10b) 셀의 두께(d)와 셀 안으로 들어갈 키랄네마틱액정의 나선 피치(p)의 비율이 1:1 이 될 때는 안정적인 ULH 구조가 나온다. 만약에 두께가 피치에 비해 두 배이상 크다면, 전기장을 인가할 때 셀 내부에서 키랄 액정의 나선 피치에 굴곡(undulation)이 일어나 2 차원의 격자구조가 만들어지는 등 다른 액정결함구조가 만들어 질 수 있다.

ULH 라인구조는 TFCD 에서 사용한 것처럼 라인형태의 포토마스크로써 활용이 가능하다. 키랄 도펀트(CB15)를 2wt% 첨가해준 네마틱 액정(5CB, 4'-pentyl-4-cyanobiphenyl)을 만들어놓은 셀에 넣어 전기장을 인가해주면 그림 4e 와 같이 약 13 μm 의 피치를 가지게 되는 ULH 라인구조가 나타나게 된다. ULH 구조는 그림 4b 와 같이 누워있는 축을 따라 액정방향이 꼬여있는 구조가

되고, 막대기모양의 액정분자 자체가 장축방향과 단축방향에 따라 굴절률의 차이를 가지기 때문에 액정방향이 기판에 수직인 부분과 수평인 부분 그리고 그 외 중간 부분들이 모두 다른 굴절률을 가진다. 광학적으로 본다면 라인을 따라서 그림 4c 처럼 마치 실린더 형태의 렌즈를 형성하기 때문에, 포토레지스트에 조사되는 빛의 양 (dose)을 조절할 수 있다. 즉, ULH 구조를 포토마스크로 사용하여 자외선을 감광시켜주면, ULH 구조의 방향을 따라서 포토레지스트에 라인구조가 형성된다.(그림 4f)또한 포토레지스트 라인구조는 ULH 구조에서의 다양한 굴절률 분포에 의해 도달하는 빛의 양이 차이가 나기 때문에 그림 4f 의 내부사진처럼 굴곡진 구조를 가진다는 것을 원자력간현미경으로 관찰할 수 있었다. 그리고 라인의 거리가 피치의 반에 해당한다는 사실을 통해 액정의 배향에 따른 굴절률 차이에 의해 빛의 조사량에 차이가 있었음을 알 수 있었다. 만약 키랄 도펀트의 양을 조절하여 피치를 조절하게 되면, 라인의 크기가 달라져 더 작거나 큰 라인 패턴을 만들 수 있다. 또한 전기장의 인가에 따라 키랄 액정을 이용한 포토마스크를 충분히 조절할 수 있다. 이 연구를 통해 액정결함구조 중 하나인 ULH 라인구조의 렌즈효과에 의해 라인형태의 포토마스크로 활용할 수 있음을 보여주었다.

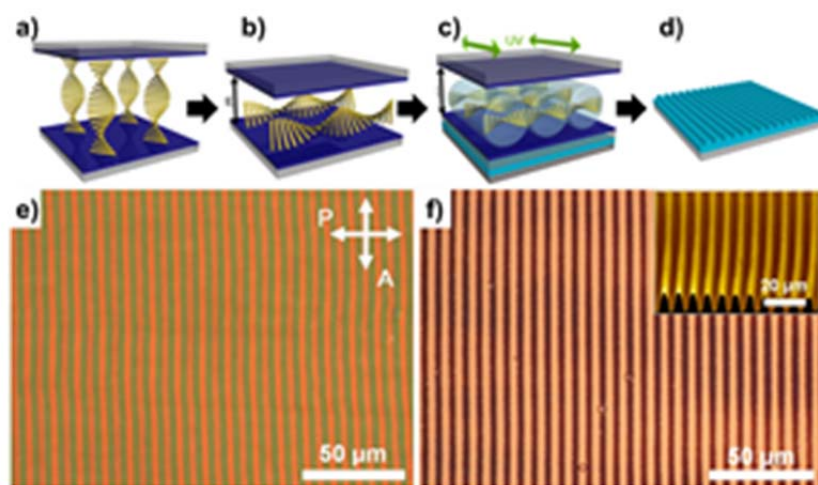


그림 4. 콜레스테릭 액정구조 기반 ULH 구조의 포토마스크 실험. a)-d)ULH 구조 형성과 자외선감광실험을 통한 포토레지스트 라인패턴의 형성 모식도. e)ULH 구조의 편광현미경사진과 f)식각 후 포토레지스트의 라인 패턴의 광학현미경사진과 원자력간현미경사진.

지금까지 액정결함구조인 TFCD 와 ULH 의 배열을 제어하는 방법과 대면적으로 잘 정렬된 액정 결함구조의 제어를 통해 광전자소자 응용분야인 마이크로렌즈 어레이와 포토마스크 등으로 활용될 수 있음을 보여주었다. 액정결함구조의 장점은 액정의 유동성과 외부장에 쉽게 반응하는 특성 때문에 빠르고 간단하게 규칙적인 배열을 만들 수 있어 비용대비 효율이 높고 대면적

패턴형성에 적합하다는 것이다. 그 중에서도 스멕틱 A 액정의 결함구조인 TFCD 는 그 구조와 구조내부 액정분자배향의 특이성에 의해 다양한 응용분야를 보여줌에 따라, 육각형 배열형태에 국한된 TFCD 를 다른 형태로 배열시키는 연구들이 진행되었다. 예를 들면, 다른 제한 구조인 원기둥 사각 배열 안에서 TFCD 의 배열을 조절하는 방법이나 네마틱액정상에서 분자의 배향을 조절시켜 그 다음 상인 스멕틱 A 상에서 TFCD 의 배열을 조절시키는 다중방향 러빙방법 등은 TFCD 를 사각형이나 평행사변형 형태의 정렬구조로 만드는 방법으로, 이는 TFCD 의 응용에 있어 그 스펙트럼을 넓히려는데 목적이 있다.

3. 마무리

이 글에서는 두 가지의 액정결함구조에 대해 설명하였지만 액정 폴리머, bent-core 액정, 강유전성 액정, 블루페이즈 액정 등 무궁무진한 액정물질들과 새로운 액정상들이 존재하고 있으며, 이러한 물질들 또한 특정 광학특성이나 물리적 특성을 가지는 액정결함구조를 형성할 수 있다. 특이한 광학적 효과를 가지는 다양한 액정결함구조를 산업이나 연구에 활용할 수 있도록 제한조건이나 대면적으로 제어하여 규칙적인 정렬구조로 형성시키면, 좋은 광학적 효과의 장점을 극대화시킬 것으로 기대된다. 이는 현재 디스플레이에 국한된 소자 응용분야에서 벗어나 액정결함구조를 이용한 새로운 광전자 소자 응용분야를 찾는 데 근간이 되어 줄 것이라 생각한다.