

기술 특 집

나노 임프린트 공정 기술의 디스플레이 응용 연구 현황 및 전망

이희철 (한국산업기술대학교 신소재공학과)

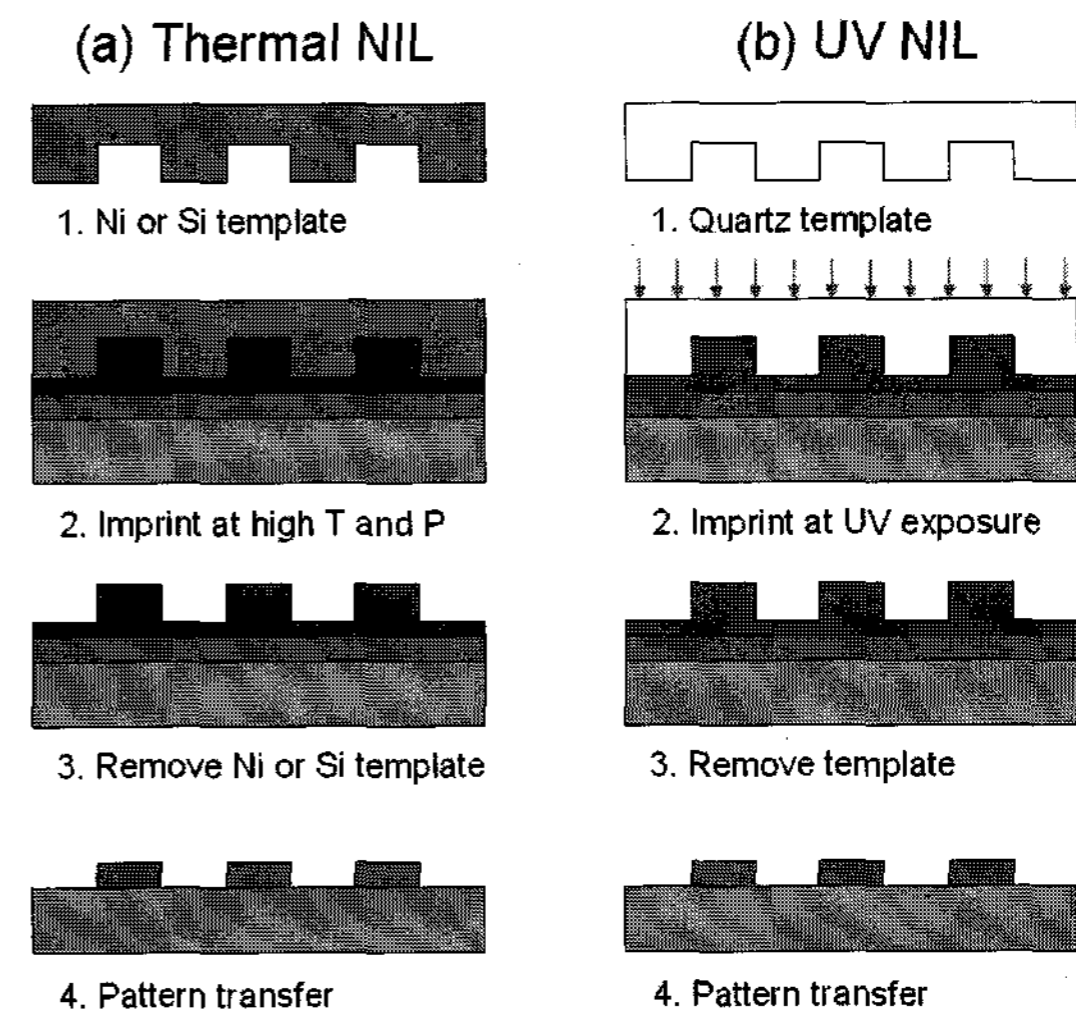
I. 개요 및 서론

21세기 연구 개발 분야를 주도하고 있는 정보 통신 기술, 나노 기술, 및 바이오 기술은 나노 사이즈에서 마이크로 사이즈의 넓은 범위의 패턴들을 손쉽게 값싸게 제작할 수 있는 공정을 필요로 하고 있다. 따라서 기존의 포토 리소그래피(photo lithography) 패턴 공정이 갖는 낮은 생산성(through-put), 비싼 장비 및 높은 제조 단가의 문제점을 해결할 대체 비광학 나노 패터닝 공정에 대한 요구가 높아지고 있다. 이러한 요구에 부응하기 위하여 나노 임프린트(nano imprint), 마이크로 접촉 프린팅(micro contact printing), AFM 리소그래피(atomic force microscopy lithography), 및 딥펜 리소그래피(dip-pen lithography) 등과 같은 여러 가지 대안 패터닝 기술에 대한 아이디어가 제시되었고 이와 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다.

이중 나노 임프린트 공정기술은 1995년 Princeton 대학의 Stephen Chou 교수에 의해 처음 제안된 기술로서 10 nm 이하 크기의 미세 나노 패턴에서 수 mm 사이즈의 대면적 패턴까지 손쉽게 복제할 수 있는 패터닝 기술로 여러 분야에서 상용화 기술로서의 응용을 위하여 주목을 받으며 폭 넓게 연구되고 있다.

초기의 기술은 [그림 1](a)과 같은 열경화 방식으로 기판 위에 열소성 변형 고분자 레지스터 박막을 입히고 그 위에 나노 구조물이 각인된 경질의 금형을 이용하여 레지스터 표면을 일정 압력을 가하면서 눌러 나노 구조물의 패턴을 복제하는 방식이다. 이 기술은 주로 전자빔 리소그래피(e-beam lithography)로 제작된 금형을 사용하며 가열 가압에 의해 패턴을 형성 하고 레지스터를 경화시키는데, 최근에 10nm 이하의 배열을 패턴 제작하는데 성공함으로써 나노 기술의 실질적인 실용화 기술 측면에서 큰 주목을 받고 있다.

Texas Austin 대학의 Wilson 교수 연구진은 1999년에 [그림 1](b)와 같은 자외선 경화 방식의 나노 임프린트 기술을 제안하였는데 이 기술은 점성이 낮은 상태의 레지스터를 기판 위에 일정량 투여한 후 자외선이 투과할 수 있는 석영과 같은 금형을 기판과 일정한 간격 유지하여 저점도의



[그림 1] 나노 임프린트 리소그래피 공정 수순도
(a) 열경화 방식 (b) 자외선 경화 방식

레지스터들이 표면 장력에 의해 안으로 충전되도록 한다. 충전이 어느 정도 완료된 시점에서 금형을 기판에 완전히 접촉시키고 자외선을 조사하여 레지스터를 경화시킨 후 금형을 분리하면 금형에 새겨진 나노 구조물의 패턴들이 기판 위에 복제된다. 이 방법의 장점은 레지스터의 충전을 잘 조절하면 잔류 레지스터 층이 적게 남아 산소 플라즈마 식각에 의해 이를 제거하는 공정 시간이 짧아 전사 패턴의 왜곡이 적다는 것이다.

현재 나노 임프린트 공정을 주목하고 있는 여러 산업 분야 중 사업 규모 면에서 큰 분야는 집적 회로 반도체와 디스플레이이다. 반도체 분야에서 나노 임프린트 공정을 주목하는 이유는 현재 반도체 회로의 집적화에 따라 리소그래피 기술의 단가가 전체 칩 제작비용의 상당량을 차지하고 있기 때문이다. 반도체 집적 회로의 게이트 길이는 2010년에 20 nm 이하로 낮아질 것으로 예상되고 있고 여러 국가에서 막대한 연구비를 투자하여 극자외선 빔, 이온 빔, X-선 빔 등의 차세대 리소그래피 기술을 개발하고 있지만 향후 몇 년 후에는 리소그래피 장비의 가격이 수천만 불을 넘어 설 것

이라는 예상도 있다. 나노 임프린트 기술은 높은 스탬프 제조 단가를 제외한다면 낮은 장비 가격 및 빠른 생산성을 가지므로 차세대 리소그래피 공정으로 큰 장점을 가지고 있으며 2003년 ITRS(International Technology Road-map for Semiconductor)에 포함되어 차세대 리소그래피 기술 후보군 하나로서 자리 매김 하였다. 하지만, 나노 임프린트 기술이 반도체 집적 회로에 적용되기까지는 복잡한 패턴 형상을 갖는 스탬프의 제작 기술 확보, 마스크 패턴 사이의 정렬 문제 해결 그리고 레지스터의 잔류층의 효율적인 제거 기술 확보 등 우선적으로 해결되어야 할 기술적 장벽이 높은 것이 현실이다.

디스플레이 산업에서도 비광학 방식의 나노 및 마이크로 사이즈 패턴링 기술 확보에 대한 필요가 크게 대두되고 있다. 우선적으로 편광판, 저반사 필름, 나노 렌즈 어레이, 나노 프리즘 어레이, 광분산 층과 같은 다양한 광 기능성 필름에 적용이 고려되고 있다. 또한, 최근 디스플레이 단가의 하락에 의한 공정 원가의 절감을 위해 PDP 및 LCD 등 대형 평판 디스플레이 공정에서 기존의 포토 리소그래피 방법을 나노 임프린트 공정 또는 인쇄 프린팅 공정 등의 직접 프린팅 공정 기술로 대체하고자 하는 연구가 활발히 진행 중이다. 이러한 연구가 실질적으로 상용화될 시에는 그 기술적, 경제적인 파급 효과는 막대할 것으로 예상된다.

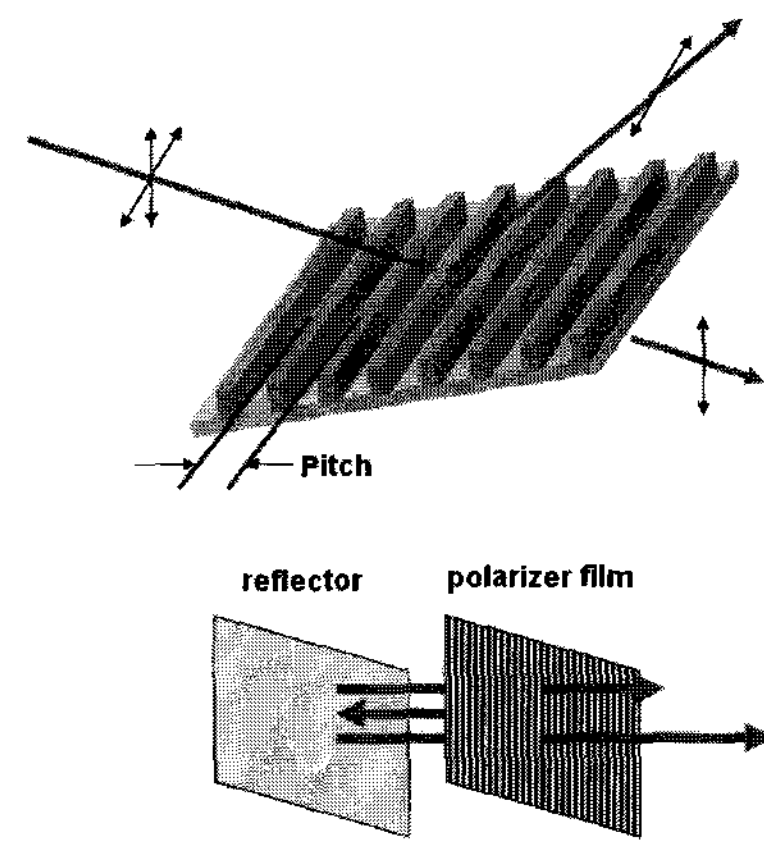
따라서 본 기고에서는 현재까지 개발되어 온 나노 임프린트 기술의 디스플레이 분야 적용 연구 현황에 대하여 정리해 보고 앞으로의 기술 방향 및 향후 전망에 대해 논하고자 한다.

II. 디스플레이 응용 연구 현황

1. 기능성 필름

앞서 서론에서 언급한 다양한 디스플레이용 기능성 필름은 반복적인 주기적 패턴을 가지므로 스탬프 제작이 상대적으로 용이하며 한 개의 마스크로 제조 공정이 이루어진 경우가 많아 마스크간의 정렬 문제가 없어 나노 임프린트 공정을 적용하기에 적합한 응용 분야로 사료되고 있다. 또한, 낮은 제조 단가를 갖는 장비로 빠른 속도로 패턴을 구현할 수 있어 경제적으로도 장점을 갖는다.

현재 LCD 액정부에 부착된 편광판에 의해 감소하는 휘도를 보상해 주기 위해 사용되는 DBEF(Dual Brightness Enhancement Film) 시트는 미국의 3M사가 세계적으로 90% 이상을 독점하고 있으며 단일 부품인데도 불구하고 그 시장이 2007년 추정치로 7억2700만 불에 달한다. 따라서 이를 대체하기 위한 국내외 기업들의 노력이 진행되어 왔는데 [그림 3]의 WGP(wire grid polarizer) 시트는 반사판과 함께 사용될 경우 기존의 DBEF 시트를 대체하여 LCD 디스플레이의 휘도 개선 용도로 사용될 수 있는 후보로 연구되고 있다. 휘도 강화 원리는 WGP 시트를 반사판과 함께 사용하여 일차적으로 편광 현상에 의해서 통과하지 않는 빛의 위상을 변화시켜 통과가 가능하게 하여 LCD 모듈 쪽으



[그림 2] WGP(wire grid polarizer)의 작동 원리 및 휘도 강화 효과 개념도

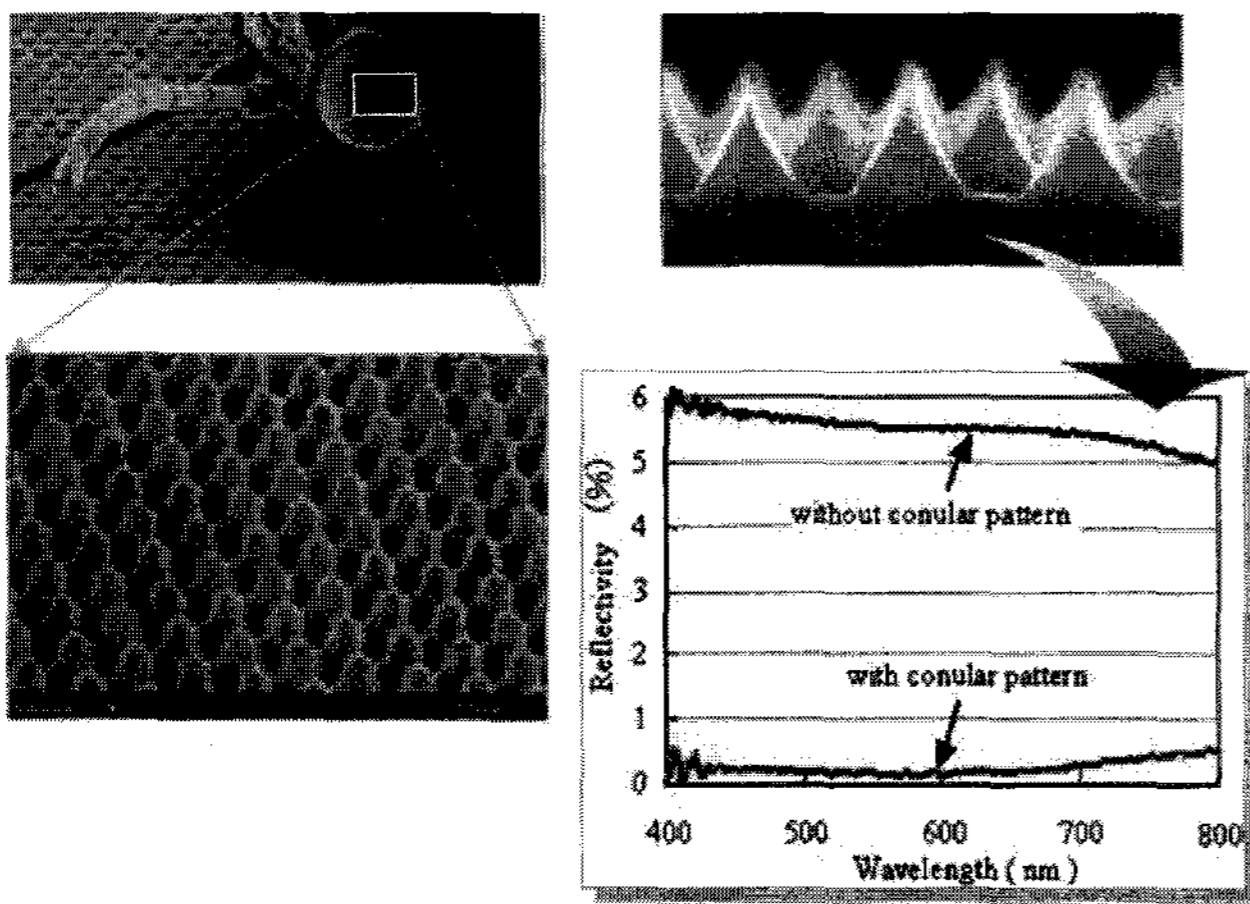
로 향하는 빛의 광효율을 증가시키는 방식이다. 이렇게 WGP 시트가 가격 경쟁력을 가지면서 LCD 디스플레이에 적용 DBEF 시트를 대체하려면 대면적의 높은 생산성을 갖는 나노 임프린트 기술이 필요하다고 사료되고 있다. 2006년 LG전자는 Tokyo에서 열린 NanoTech 전시회에서 나노 임프린트 기술을 이용한 WGP 시트를 발표하였으며 향후 대형 디스플레이에 적용하기 위한 연구 계획을 갖고 있다고 밝혔다.

[그림 2] 현재 LCD 디스플레이의 BLU(Back Light Unit)에 효율적인 발광 특성을 사용되는 기능성 필름은 DBEF 시트 이외에 확산 필름, 반사 필름, 프리즘 시트 등이 있는데 기존 LCD의 경박화 및 채산성 향상을 위해서는 이러한 광학 필름 및 판형의 부품들을 줄일 필요가 있다. 현재 나노 임프린트 공정 기술을 이용하여 양면 패턴(double-side pattern) 및 마이크로-나노 동시 패턴(nano-in-micro pattern)을 구현하여 광학 필름의 숫자를 줄이는 연구가 여러 업체에서 활발히 진행되고 있다.

평판 디스플레이에서 반사 방지 필름은 태양광 또는 조명 광의 평판 디스플레이 패널 표면에서의 반사를 방지하여 이미지를 선명하게 하는 효과를 가질 수 있다. 현재 사용되는 반사 방지 필름은 굴절률 차이가 나는 막을 표면에 입혀 빛의 간섭 현상을 통해 반사를 방지하고 있다.

[그림 3]의 나방눈 모사 패턴(moth-eye pattern)은 자연계에 존재하는 나노 패턴으로 매우 우수한 저반사 특성을 보여주는데 일본의 Omron사는 그림에서 보는 바와 같이 나노 임프린트공정을 이용하여 이 자연계의 현상을 모방한 나노 패턴을 구현하여 아주 우수한 반사 방지막 특성을 얻었다. 나노 임프린트 기술에서는 이와 같은 3차원적 구조의 패턴을 구현하고자 할 때 스탬프만 이와 같은 모양으로 제작한다면 가능하다. 따라서 대면적에서 높은 생산성을 갖는 나노 임프린트 기술의 확보를 통해서 나방눈 모사 패턴을 갖는 고기능성 저반사 필름을 PDP 및 LCD 대형 디스플레이에 적용하는 것이 가능하리라 판단된다.

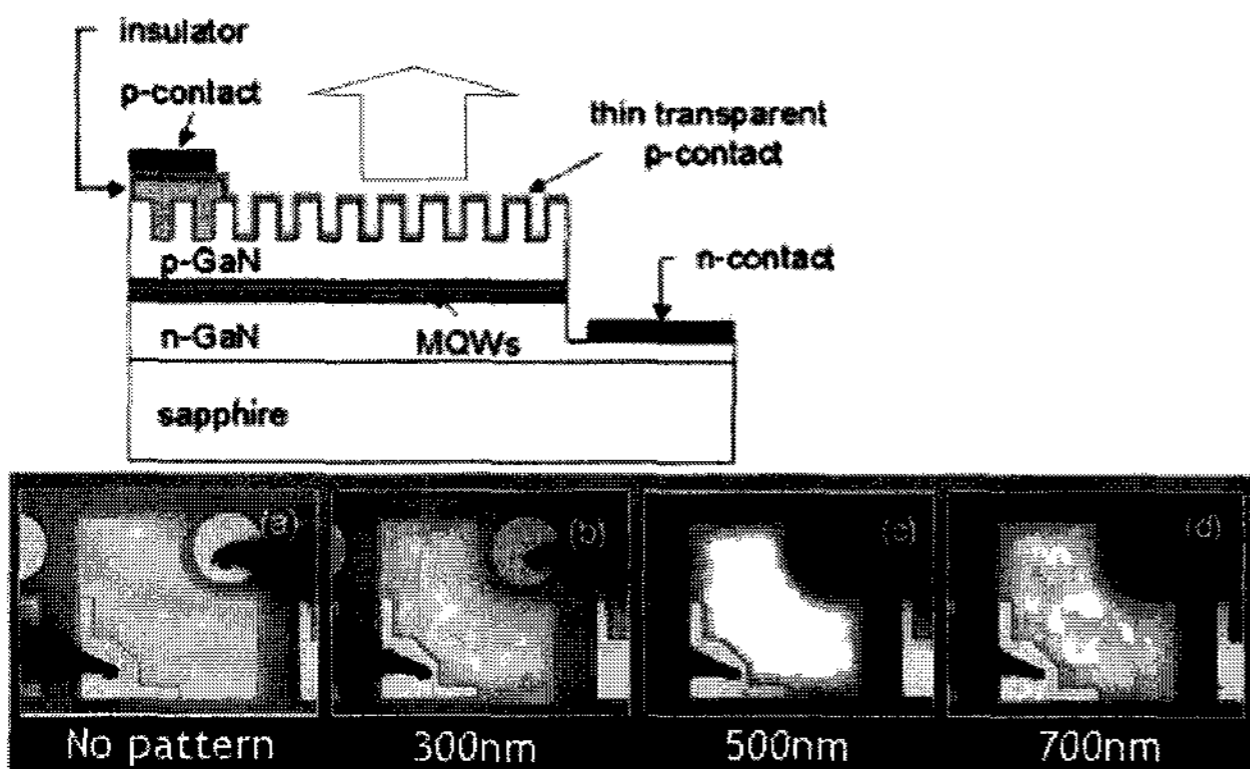
LED(Light Emitting Diode)에 의해서 발생하는 빛은 색재현성이 매우 우수하여 LCD 디스플레이의 BLU 램프로



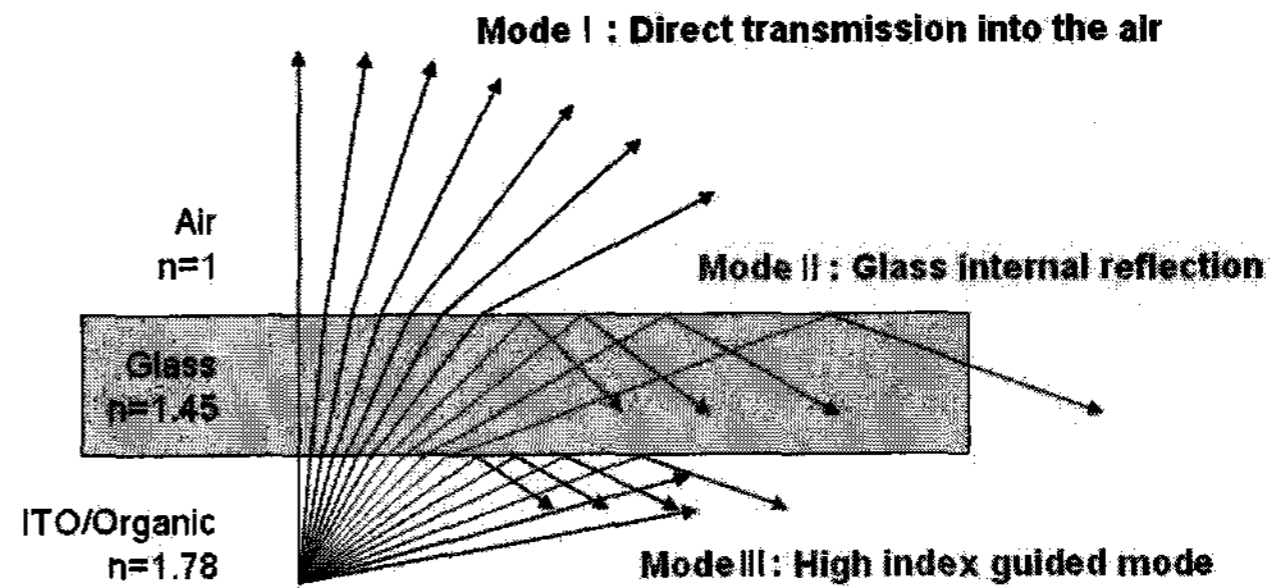
[그림 3] 나방눈 모사 패턴 및 이를 이용한 반사 방지 특성 향상 효과 데이터

현재 사용되고 있는 CCFL(Cold Cathode Fluorescent Lamp)을 LED로 대체하려는 노력이 여러 업체를 통해서 이루어지고 있다. 또한 LED는 자연 빛에 가까운 색 형성이 가능하여 차세대 조명용으로도 주목을 받고 있다. 하지만, LED가 갖는 높은 제조 단가 및 낮은 효율은 상용화에 걸림돌이 되고 있다. 현재 가시광선영역에서의 발광 효율의 극대화를 위하여 [그림 4]와 같이 200~300nm의 패턴을 500~700nm의 주기로 LED 내부 표면에 삽입하여 광자 방출 효율을 향상시키고자 하는 연구가 여러 그룹에서 진행되고 있다. [그림 4]에서 보면 패턴 삽입에 의한 발광효율개선 효과는 500nm 주기의 패턴에서 가장 효과적인 것을 볼 수 있다. 포토 리소그래피에 의한 패턴 형성에 비하여 나노 임프린트 기술에 의한 패턴링은 공정이 단순 용이하고 저가이며 친환경적이며 특히 200~300nm 크기의 패턴 형성에 매우 효과적일 것으로 인식되고 있다.

OLED 디스플레이는 유기 재료에 전계를 가하여 전기 에너지를 빛으로 바꾸어 주는 자체 발광형 소자이므로 BLU가 필요 없기 때문에 경량 및 박형으로 제작이 가능하다. 또한 OLED 디스플레이는 빠른 응답 및 넓은 광시야각 등이 상적인 디스플레이 특성을 보유하기 때문에 차세대 휴대 정



[그림 4] 나노 패턴을 이용한 LED 개략도 및 나노 패턴 주기에 따른 발광 특성



[그림 5] OLED 디스플레이 유기 발광층에서 발생한 빛의 경로 모드

보 통신 기기 및 디지털 정보 가전의 핵심 표시 장치 중 하나로 인식되고 있다. 내부의 유기 발광층에서 발생한 빛은 여러 가지 모드를 가지고 외부로 나오는데 이때 전반사 조건이 만족하게 되면 [그림 5]와 같이 ITO 전극과 유리 기판 계면 또는 유리 기판과 공기 계면에서 외부로 나오지 못하고 갇히게 된다. 계산식에 의하면 두 계면 모두 편평할 경우 ITO 전극과 유리 기판 계면에서 전반사 되는 빛은 총량의 46.9%, 유리 기판과 공기 계면에서 전반사 되는 빛의 총량의 34.2%에 달해 밖으로 나오는 빛은 전체량의 겨우 18.9%에 해당한다. 여기에서 내부의 유기 발광층에서 발생한 빛을 외부로 이끌어 내는 것을 out-coupling이라고 부른다. OLED 디스플레이에서 out-coupling을 향상시키기 위한 방법으로는 계면에서의 굴절률을 조절하여 전반사를 막는 방법과 계면에 나노 패턴을 삽입하는 방법 등이 있다. 나노 패턴을 삽입하는 경우 나노 임프린트 공정에 의해서 이를 형성하는 기술이 적극 검토되고 있다. 실제로 나노 임프린트 공정에 의한 나노 패턴 계면에 의해서 휘도가 향상되었다는 연구 결과들이 발표되었다.

2. 플렉시블 디스플레이

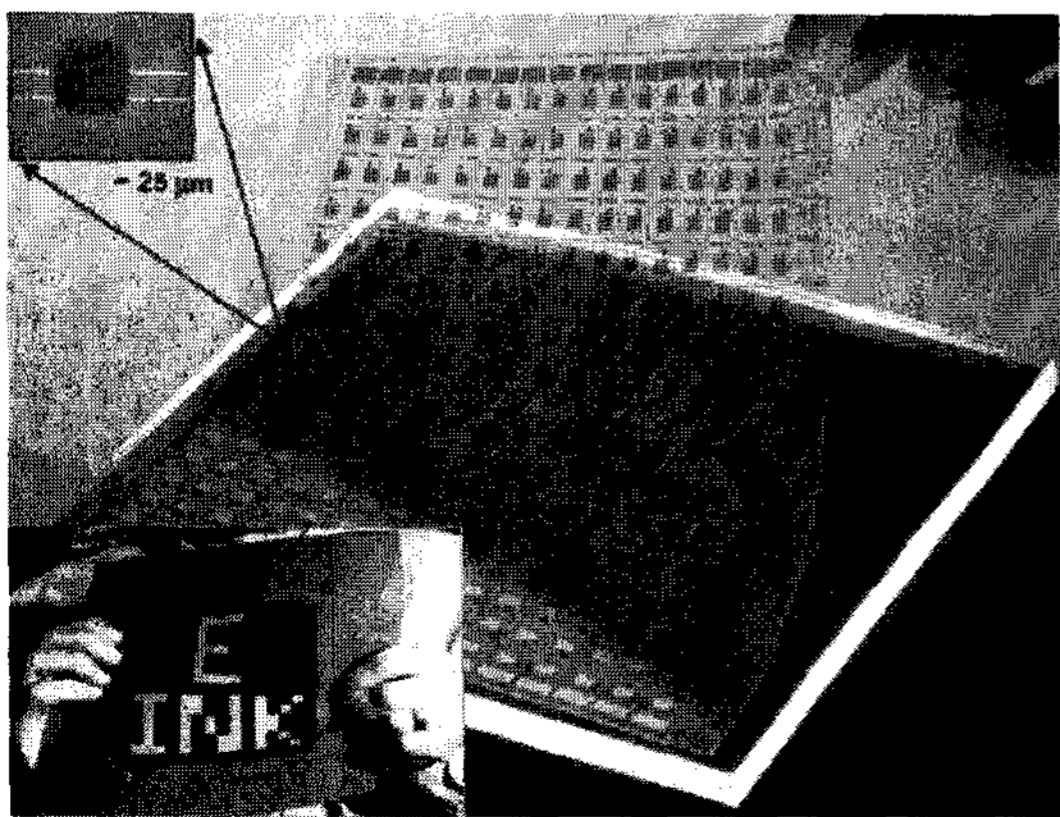
LCD 기술의 발전 및 업체들 간의 경쟁으로 인한 기판의 거듭된 대형화는 청정 제조 시설의 건설 투자비용 및 유지비용 증가, 기판의 핸들링 문제 및 공정 난이도 문제 등을 발생시키고 있다. 특히 포토 리소그래피 공정에서는 패턴링 장비를 위한 과도한 작업 공간의 확보, 장비 단가의 천문학적 증가 및 포토 마스크 제조비용의 증가 및 공정 핸들링 문제로 인하여 개선의 필요성이 절실히 대두되고 있다. 현재 LCD 업체에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 잉크젯 기술 또는 롤 프린팅(roll printing) 방식의 나노 임프린트 기술 등의 직접 인쇄형 방식의 리소그래피 공정을 도입하여 기존의 포토 리소그래피 공정을 대체하고자 하는 연구를 적극적으로 진행하고 있다. 우선적으로 잉크젯 기술을 이용한 컬러 필터 공정의 경우 상용화를 앞두고 있다. 하지만, 롤 프린팅 방식의 나노 임프린트 기술의 상용화를 위해서는 롤 형태의 스탬프 제작의 어려움, 스탬프에서 경직된 유리 기판으로의 패턴 전사 불량 및 마스크간의 정렬 문제 등 몇 가지 선결 과제가 남아 있어서 이런 부분에 대한 연구 개발이 집중될 필요가 있다.

경직된 유리 기판을 사용하는 LCD 디스플레이보다 플라스틱 또는 얇은 금속 박판 등의 유연한 기판을 사용하는 플렉시블 디스플레이는 스탬프로부터의 패턴 전사가 용이하여 나노 임프린트 기술을 이용한 리소그래피 공정을 적용하는데 더 적합하다. 또한, 나노 임프린트 리소그래피 공정에서는 포토 리소그래피 공정에서 사용되는 현상액과 같은 화학 물질을 사용하지 않고 자외선 경화 방식을 채택할 경우 높은 열을 가하지 않는다. 따라서 열 및 화학 물질에 약한 플라스틱 기판을 사용하는 플렉시블 디스플레이를 제작하는데 나노 임프린트 기술을 활용하고자 하는 연구가 최근에 많이 진행되고 있다.

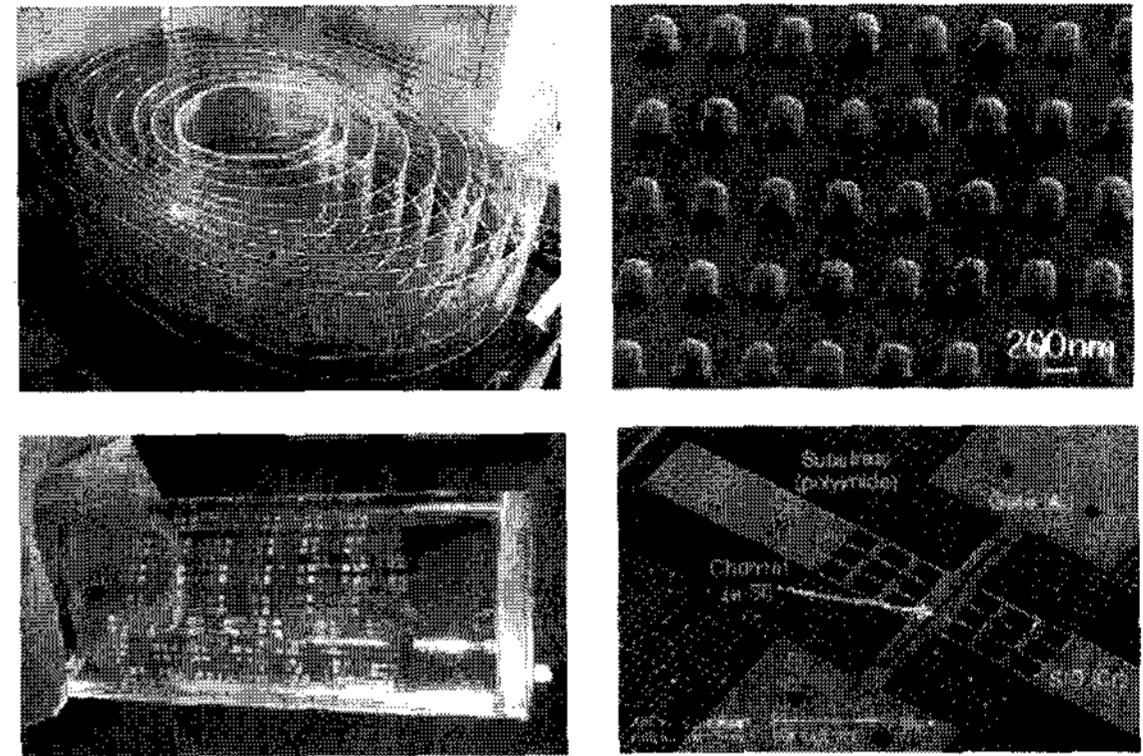
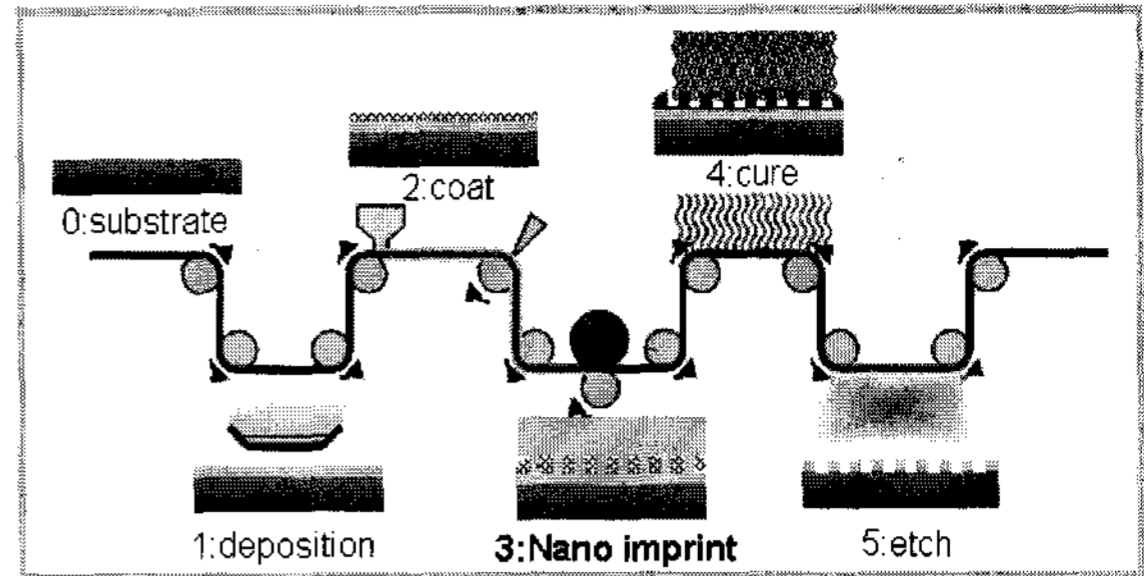
플렉시블 디스플레이는 얇고 가벼워 휴대성이 높으며 저전력을 소모하므로 친환경적이며 용어 그대로 유연한 성질을 가져 다양한 형태로 제작이 가능하여 지금까지의 디스플레이가 적용되지 않은 분야를 개척하면서 새로운 문화와 고부가가치를 창출할 수 있을 것으로 기대되어 여러 선진국에서 연구 개발에 노력을 아끼지 않는 분야중의 하나이다.

[그림 6]은 미국의 e-ink사의 전자 잉크 마이크로캡슐을 이용한 플렉시블 디스플레이의 사진이다. 작은 그림의 디스플레이를 구동하기 위해서 큰 그림의 플라스틱 위에 형성된 능동 후면 회로가 사용되어진다. 이 후면 구동 회로는 평면 스탬프를 이용한 나노 임프린트 기술로 개발되었으며 후면 회로의 신호에 따라 마이크로캡슐이 회전하면서 각 픽셀의 흑과 백이 결정된다.

나노 임프린트 기술이 플렉시블 디스플레이에 적용되기 위해서는 생산성을 확보해야 하는데 이를 위하여 유연한 기판 위에 연속적으로 패터닝 공정이 수행되는 롤투롤(roll-to-roll) 방식이 큰 관심을 받고 있다. 이러한 롤투롤을 이용한 공정이 상용화된다면 저가로 다양한 소자 및 모듈의 대량 생산이 구현될 수 있을 것으로 예상된다. [그림 7]의 상단 그림은 나노 임프린트 기술 및 롤투롤 방식을 이용한 패터닝 공정의 개략도를 나타내는 그림으로써 롤 형태의 벨트 위로 기판이 이동하며 기판 위 박막의 증착, 마스크 재료 코팅, 임프린트 공정 및 가열, 식각 공정 등이 연속적으로 일어남을 알 수 있다. [그림 7]의 중간 그림은 일본의 Hitachi 제작소가 개발한 롤투롤 방식의 나노 임프린트 기



[그림 6] e-ink사의 플렉시블 디스플레이(작은 그림) 및 후면 구동 회로(큰 그림)



[그림 7] 롤투롤 방식의 나노 임프린트 연속 패터닝 기술의 개략도(상단) Hitachi 제작소의 임프린트 샘플(중간) HP사의 스탬프 및 플라스틱 기판 위에 제작된 TFT 후면 구동 회로(하단)

술 활용 연구 결과물인데 이 기술은 피전사체가 되는 플라스틱 필름을 상하의 벨트 상태로 늘어놓은 나노 금형 사이에 끼워 반송하는 것으로서 필름의 가열, 패턴 전사시의 가압, 필름과 나노 금형의 박리 등 프린트 공정의 연속 처리를 가능하게 한 것이다. 개발된 기술의 특징은 박판 스테인리스 스틸 벨트의 표면에 직경 200nm을 가진 니켈 도금으로 형성한 나노 금형과 필름을 동기 반송하여 가열, 가압, 박리의 각 공정을 연속화하는 기술을 개발하였다. [그림 7]의 하단 그림은 미국의 HP사에 의해서 개발된 연구 결과물에 대한 그림으로서 플렉시블 디스플레이 구동을 위한 비정질 실리콘 TFT 소자에 롤투롤 방식의 나노 임프린트 기술을 적용한 것이다. 그림에서 보여진 롤투롤 임프린트 스탬프를 이용하여 높은 생산성을 가질 수 있었으며 자기 정렬 방식을 이용한 마스크간의 어레이 기술을 확보하여 신뢰성 높은 능동 후면 TFT 회로를 polyimide 플라스틱 기판 위에 제작할 수 있었다.

III. 국내의 현황 및 향후 전망

현재 나노 임프린트 기술의 원천 기술은 대부분 미국이 보유하고 있으며 장비 기술은 유럽을 중심으로 발달하여 있다. 미국, 유럽, 및 일본 등의 나노 기술 선진국 들은 이러한 기반 기술 확보를 넘어서 나노 임프린트 기술에 의한 나노 패턴을 디스플레이 등의 실제 전자 소자에 적용하려는 산학 연합의 연구 network을 오래전부터 갖추어서 연구를 진행

해 오고 있다. 우리나라도 최근 임프린트 기술에 의한 나노 패턴 기술이 소개되면서 저변이 확대되고 공정 기술의 개발이 진행되고 있으며 정부 주도의 사업단이 발족되어 공정 기술 및 기계 장비에 대한 개발이 집중적으로 진행되고 있다. 따라서 조만간 나노 임프린트 기술이 디스플레이 등과 같은 최첨단 신공정에 적용되어 국가 및 기업의 기술적 경제적 부가가치를 높일 수 있으리라 기대된다.

감사의 글

나노 임프린트 기술의 디스플레이 응용을 위하여 함께 공부하고 고민하였던 고려대학교 이현 교수님, LG화학 김상호 박사님, 전자부품연구원 최주환 박사님, (주)이엔쓰리 박훈 이사님 등 비광학 나노 패터닝 연구회 회원님들께 감사드립니다.

참고 문헌

[1] S. Y. Chou et al., Appl. Phys. Lett., Vol. 67, p. 3114,

2005.

[2] C. G. Wilson et al., J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 18, p. 3572, 2000.

[3] H. J. Kim et al., IMID '06 Digest technical papers, pp. 1539, 2006.

저자 소개



이희철

1995 KAIST 전자재료공학과(공학사), 1997 KAIST 재료공학과(공학석사), 2002 KAIST 재료공학과(공학박사), 2002~2005: LG전자기술원 소자재료연구소 선임연구원, 2006~2007: LG전자기술원 LG-KAIST나노센터 책임연구원, 2007~현재: 한국산업기술대학교 신소재공학과 전임강사