

액정표시장치 백라이트용 집광필름의 광학특성 분석을 위한 시뮬레이션 기법 연구

박지희 · 이정호 · 정진하 · 남기봉 · 고재현[†]

한림대학교 전자물리학과
☎ 200-702 강원도 춘천시 한림대학길 39

김중현

삼성전자(주), LCD 총괄
☎ 336-789 충남 아산시 탕정면 명암리 200

(2007년 11월 19일 받음)

LCD 백라이트에 사용되는 집광필름의 광학적 성능을 예측하는 효율적인 방법으로 광선추적기법이 적용된 광학 시뮬레이션이 많이 사용되고 있다. 집광필름의 광특성을 정확히 예측하기 위해서는 시뮬레이션에 영향을 미치는 조건들을 세심하게 설정하여야 한다. 본 연구에서는 가장 대표적인 집광필름인 프리즘필름의 시야각 특성 및 휘도상승률에 중요한 영향을 미치는 시뮬레이션 조건을 분석하기 위해 반사필름, 가상의 평면광원, 프리즘필름으로 구성된 간단한 BLU 모델을 구성한 후 다양한 조건 하에서 체계적인 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 (1) 집광필름의 구조 및 재질 변화에 따른 광학적 성능, 특히 휘도상승률의 상대적 변화는 위에서 기술한 간단한 모델로도 충분히 예측할 수 있음을 확인하였고, (2) 집광필름의 시야각 특성을 정확히 예측하기 위해서는 반사필름의 반사성격 및 집광필름에 입사되는 빛의 분포를 시뮬레이션에 정확히 반영해야만 함을 확인할 수 있었다. 확산판, 확산필름 및 프리즘필름이 적층된 직하형 BLU에서 얻어진 실험결과와 시뮬레이션 결과를 비교 분석한 결과, 상기의 시뮬레이션 모델에 반사필름이 보이는 양방향반사분포함수를 적용하고 확산필름 위의 출광분포를 광원으로 이용할 경우 실험에서 얻어진 프리즘필름 위의 출광분포를 정확히 재현할 수 있음을 확인하였다.

주제어 : Liquid Crystal Display (LCD), Backlight, Collimating Film, Prism Film, Optical Simulation, Reflection Film, Ray Tracing Technique

I 서 론

최근 대형 평판 디스플레이(Flat Panel Display, 이하 FPD) 기술 및 시장은 액정표시장치(Liquid Crystal Display, 이하 LCD)와 플라즈마 디스플레이 패널(Plasma Display Panel, PDP)이 주도하고 있고 그 시장 규모도 지속적으로 확대되고 있다. 전통적인 디스플레이라 할 수 있는 음극선관(Cathode Ray Tube)형 디스플레이와 PDP 등은 화소(pixel) 단위로 가시광선이 자체 발광되는 자발광 디스플레이로 분류할 수 있는데 반해, LCD는 비자발광 디스플레이의 일종으로써 외부에서 독자적으로 만들어진 백색광을 공급받아 화소별로 투과도와 투과 스펙트럼을 조절하여 필요한 영상정보를 구현하는 장치이다. LCD 패널에 밝고 고른 백색광을 공급해 주는 부품이 바로 백라이트 유닛(Backlight Unit, 이하 BLU)으로써, LCD의 화질 특성 중 휘도(luminance), 휘도균일도, 색좌표와 같은 중요 특성들을 결정해 주는 핵심 부품이다. 특히, 대형 LCD로 갈수록 BLU의 원가 비중이 더욱 커지기 때문에 다양한 기술혁신을 통해 BLU의 가격을 낮추고 LCD의 화질을 개선하는 것이 매우 중요한 기술적 과제로 떠오르고 있다.

BLU는 대형 LCD에 사용되는 직하형(direct-lit) BLU와 소형 LCD에 사용되는 엣지형(edge-lit) BLU로 구분할 수 있다. BLU는 매우 다양한 부품들로 구성되는데, 가시광선을 만들어 내는 광원, 반사필름, 확산판 혹은 도광판, 확산 필름, 1장 혹은 2장의 프리즘 필름, 보호필름이나 반사형 편광필름, 이들을 고정시켜 주는 몰드 프레임 등이 대표적인 부품들이라 할 수 있다. 점광원, 선광원, 혹은 면광원의 형태를 가진 광원으로부터 발생하는 가시광선은 BLU 내 다양한 부품들의 광학적 작용을 거쳐서 2차원의 균일화되고 집광된 백색광으로 바뀌어 LCD 패널에 입사된다. 그림 1은 직하형 BLU의 단면을 개략적으로 보여주고 있다. 가장 일반적인 직하형 BLU는 광원으로써 다수 개의 냉음극형광램프(Cold Cathode

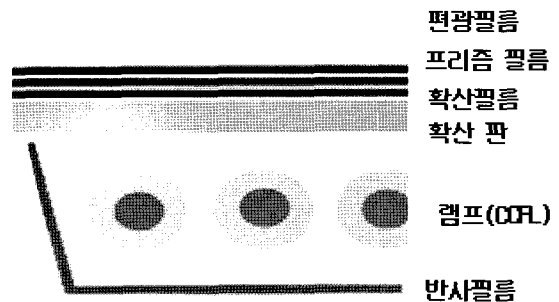


그림 1. 일반적인 직하형 BLU의 단면구조.

[†] E-mail: hwangko@hallym.ac.kr

Fluorescent Lamp, 이하 CCFL)를 나란히 배치하고 그 밑에는 반사 필름(Reflector, reflection film)이, 그 위쪽에는 확산판(diffuser plate)이 광원으로부터 일정한 간격을 두고 올려져 있는 구조를 가진다. CCFL에서 밑으로 내려오는 빛을 반사시켜주는 반사필름은 보통 경면반사(specular reflection)와 확산반사(diffuse reflection)의 성격이 혼재되어 있는 백색 PET(white polyethylene-terephthalate) 재질의 반사필름이 사용된다. 확산판은 특정 위치에 놓여 있는 광원들로부터 올라오는 빛을 임의의 방향으로 확산시켜 휘선의 형성을 방지하는 기능을 가지고 있다. 확산 필름(diffuser sheet)은 확산판을 거친 빛에 대한 추가적인 확산 기능과 더불어 어느 정도의 집광기능을 가지며, 아울러 확산 필름의 위쪽에 놓이는 집광 필름과 확산판의 사이에 위치하여 공기층을 형성하면서 집광필름이 제 기능을 온전히 할 수 있도록 도와줌과 동시에 확산판과 집광필름 사이에 발생할 수 있는 간섭무늬를 제거하는 기능도 담당한다.^[1] 프리즘 필름(prism sheet)으로 대표되는 집광필름은 일차원 프리즘과 같은 마이크로 렌즈 표면 위에서 일어나는 굴절작용을 통해 시야각 특성을 희생하면서 정면의 휘도를 높여주는 역할을 담당한다. 가장 위쪽에 위치한 반사형 편광필름(reflective polarizer)은 LCD의 입사 편광판의 투과축에 수직인 편광 성분의 빛을 반사시켜서 재활용함으로써 LCD의 휘도를 올려주는 휘도향상기능을 가지고 있다. 그림 2는 32인치 직하형 CCFL BLU를 이용하여 각 광학필름 상의 휘도를 시야각에 대해 측정한 결과를 보여준다. 직관형 형광램프인 CCFL은 보통 LCD-TV의 가로 방향

으로 배치되어 있는데, 이 방향에 대해 수직인 방향과 수평인 방향의 시야각 특성이 그림 2의 (a)와 (b)에 각각 보여지고 있다. 확산판 위의 출광분포는 시야각에 무관하게 일정한 휘도를 보이는 람버시안(Lambertian)분포에 가까운데, 이는 입사광을 임의의 방향으로 산란시키는 확산판의 광학적 기능을 고려하면 당연한 결과이다. 확산필름은 확산판 위에 형성된 람버시안의 분포를 변형시켜 BLU의 수직 방향 휘도를 증가시킨다. 이 위에 일차원 마이크로 프리즘 구조를 가지고 있는 프리즘필름을 올려 놓게 되면 일차원 구조에 수직인 방향의 시야각이 협소해지면서 BLU의 정면 방향 휘도가 큰 폭으로 상승한다. 그림 2에는 제시되어 있지 않지만, 프리즘 필름 위에 반사형 편광필름이 올려질 경우에는 BLU의 휘도는 감소하나 LCD 패널을 올려 놓을 경우에는 입사편광판에 수직인 편광성분이 재활용됨으로써 LCD 패널의 휘도가 큰 폭으로 상승하게 된다.

최근에는 기존 광학필름들의 성능 개선과 더불어서 직하형 BLU에 들어가는 각 필름들이 가지는 광학기능들을 통합하여 더 적은 숫자의 광학필름들로 기존의 필름조합과 동일한 기능을 발휘하도록 하기 위한 기술들이 고안되고 제시되고 있다. 몇 가지의 예를 들면 (1) 확산기능과 집광기능의 통합^[2], (2) 투과도가 향상된 일체형 확산필름의 개발^[3], (3) 새로운 구조의 집광필름의 개발^[4], (4) 기존 광학필름의 성능 최적화^[5] 등을 들 수 있다. 이와 같은 기술개발이 노리는 것은 궁극적으로 광학필름의 성능 개선을 통한 필름 숫자의 감소와 이를 통한 BLU 및 LCD의 경쟁력 향상이라고 볼 수 있다. 그렇지만 새로운 광학적 미세 구조를 가지는 광학필름을 실제로 제작하고 그 성능을 평가하고 이를 바탕으로 개발을 완료하는 데에는 많은 시간이 소요된다. 따라서 광선추적기법(ray tracing technique)과 같은 광학 시뮬레이션을 활용하여 필름 개발에 소요되는 시간을 줄이기 위한 노력이 진행되어 왔다.^[6,7] 그렇지만 시뮬레이션을 통해 휘도 향상률이나 시야각 특성과 같은 광학필름의 특성들을 정확히 예측하는 것은 어려운 일이다. 정량적인 예측을 위해서는 각 광학부품들이 가지는 투과, 확산, 반사, 흡수 특성들이 시뮬레이션 조건에 정확히 반영되어야 할 뿐 아니라^[8] 광학필름들 사이, 그리고 광학필름들과 BLU의 다른 부품들 사이의 광학적 상호작용이 정확히 고려되어야 한다.

본 연구에서는 가장 대표적인 집광필름인 프리즘필름을 대상으로 해서 집광필름의 광학특성을 예측하는 시뮬레이션 과정에 영향을 미칠 수 있는 인자들을 체계적으로 분석하고자 하였다. 특히 시뮬레이션 결과에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 두 가지 요인으로써 (1) 광학필름의 밑에 위치해서 빛을 반사시키는 반사필름의 반사 성격에 따른 프리즘필름의 광학특성 변화 및 (2) 집광필름에 입사되는 빛의 입광분포의 변화에 따른 출광분포의 변화를 조사하였다. 본 연구에서 제시하고 있는 각 시뮬레이션 인자들의 변화와 시뮬레이션 결과, 특히 프리즘필름의 시야각 특성 사이의 정량적인 상관성은 향후 BLU용 광학필름의 광학특성을 정확히 예측

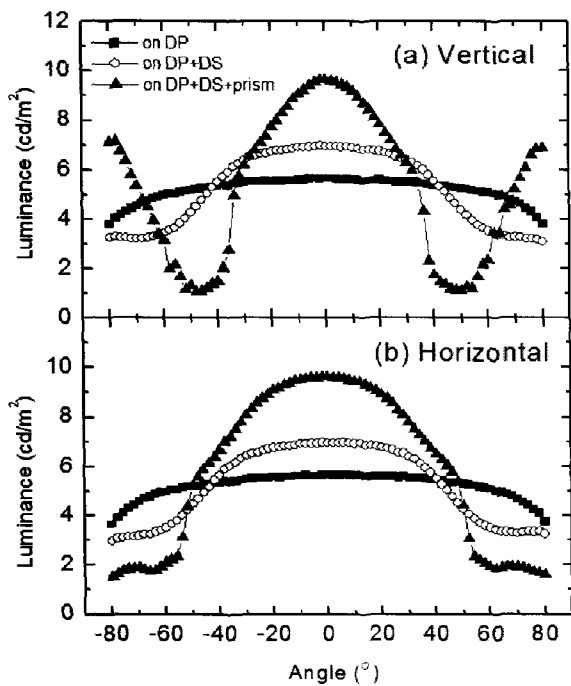


그림 2. CCFL 직하형 BLU를 구성하는 확산판(DP), 확산필름(DS) 및 프리즘필름(prism) 위에서 측정된 시야각별 휘도분포. (a)는 프리즘필름의 일차원 프리즘 구조에 수직인 방향, (b)는 수평인 방향으로의 시야각 특성임.

하기 위한 시뮬레이션 기법의 개선에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

II. 시뮬레이션 조건

시뮬레이션에는 광선추적기법을 사용하는 광학시뮬레이션 소프트웨어인 ASAP (Advanced Systems Analysis Program, Brault Research Org., 2006 V2R1)이 사용되었다. BLU용 집광필름의 광학성능을 효율적으로 평가하기 위해서는 BLU의 핵심적인 요소들이 포함된 단순한 시뮬레이션 모델을 설계하는 것이 필요하다. 본 연구에서 사용된 간이 BLU 구조는 그림 3(a)와 같이 반사판, 가상의 평면 광원, 프리즘필름 순으로 구성되었다. 각 구성 부품 사이의 간격은 10 μm 로 설정하였다. 프리즘필름 위에는 이로부터 출사되는 빛의 각도별 휘도 분포를 확인하기 위한 가상의 검출기가 놓여져 있다. 평면광원에서 방출되는 가시광선의 파장은 555 nm의 단색광으로 설정하였다. 시뮬레이션에 사용된 프리즘필름의 단면구조가 그림 3(b)에 제시되어 있다. 프리즘 필름은 별다른 언급이 없는 경우 12×12 mm^2 의 면적을 가진 평편한 기판 위에 형성된 일차원적 마이크로 프리즘 배열로 구성되어 있고, 기판의 두께는 125 μm , 굴절률은 PET의 굴절률인 1.572로 설정하였다. 프리즘의 피치(pitch)는 60 μm , 높이는 30 μm 로써 프리즘 정각(apex angle)이 직각이 되도록 디자인하였다. 프리즘의 산부분인 일차원 렌즈의 굴절률은 특별한 언급이 없을 경우 1.60으로 설정하였다. 이러한 조건들은 상용화된 프리즘필름이 가지는 구조적, 재료적 특성을 거의 동일하게 반영한 것이다. 단, 프리즘필름을 구성하는 재질들이 가질 수 있는 흡수율이나 필름 표면의 거칠기는 별도로 설정하지 않았다. 실험 결과와의 비교를 위해서 필요한 경우 프리즘산의 굴절률 및 정각, 그리고 기판의 굴절률을 변화시켜가면서 위에 기술한 간이 BLU 모델을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

반사필름의 특성에 따른 광학필름의 특성 변화를 확인하기 위해 반사필름의 반사 성격을 완전 거울반사, 완전 확산반사(혹은 람버시안 확산 반사), 그리고 이 두 가지가 혼재되어 있는 반사 성격 등 세 가지로 설정하였다. 거울반사인 경우 반사필름에 입사되는 광선은 입사각과 반사각이 동일하다는 반사의 법칙을 따라 진행한다. 완전 확산반사인 경우에는 입사광선의 입사각도에 관계없이 반사광이 확률적으로 람버시

안의 분포를 따라 반사되는 성질을 갖는다. 직하형 BLU에 쓰이는 백색 PET형 반사필름은 보통 이 두 가지 반사 성격이 혼재되어 있다. 이를 시뮬레이션에 정확히 반영하기 위해서는 양방향 반사분포함수(bi-directional reflection distribution function, 이하 BRDF)^[9]를 정확히 측정하여 시뮬레이션 코드에 포함시켜야 한다. 본 연구에서는 현재 직하형 BLU에 가장 많이 사용되는 반사 재질 중 하나인 Toray사의 E60L 반사필름에 대한 BRDF의 측정 결과를 거울반사와 확산반사와 구분하여 세 번째 반사성격으로 설정하였다. 반사필름의 반사율은 반사성격에 무관하게 모두 100%로 설정하였다.

집광필름의 광특성을 가장 간단하게 평가하는 방법은 람버시안 분포로 광선을 내보내는 가상의 평면광원을 이용하는 것이다. 이 경우 가상 광원에서 출사되는 광선의 세기 분포는 평면광원에 대한 법선으로부터의 각도를 θ 라고 했을 때 $\cos\theta$ 의 분포를 보이며 출사된다. 그렇지만 실제의 BLU 내에서 집광필름에 입사되는 빛의 분포는 람버시안에서 벗어나는 경우가 많다. 따라서 BLU 내 특정 위치에 놓여 있는 광학필름의 광특성을 평가하기 위해서는 해당 광학필름에 입사되는 빛의 분포를 직접 시뮬레이션 코드에 집어 넣어야 한다. 이러한 과정은 ASAP 내에서 apodization 과정을 통해서 이루어진다. 본 연구에서는 그림 2에 측정치로 제시되어 있는 휘도 분포 중 확산필름 위의 출광분포를 각도별로 수치화한 후에 시뮬레이션 코드에 집어 넣어서 프리즘필름의 광특성을 평가하는데 이용하였다. 이를 통해 일반적으로 사용하는 람버시안 평면광원과 차이점을 해명하고자 하였다. 시뮬레이션에 사용된 광선의 수는 보통 백만 개 이상이었으며 집광필름 위에 놓인 검출기를 이용하여 각도별 광도(luminous intensity)와 이로부터 휘도의 시야각 특성을 구하였다.

III. 결과 및 논의

3.1 굴절률 및 정각이 프리즘필름의 광특성에 미치는 효과

기준에 흔히 사용되던 시뮬레이션 방법을 이용해서 프리즘 필름의 굴절률 변화에 따른 광특성의 변화를 평가하였다. 반사필름의 반사 성격은 거울반사로 설정하였고 광원은 람버시안 분포의 빛을 방출하는 평면광원으로 설정하였다. 기판의 굴절률은 1.5로 고정시킨 상태에서 프리즘산의 굴절률을 1.4에서 1.65까지 변화시키면서 각도에 따른 광도 특성을 평가하였다. 표 1은 각 굴절률 별 시뮬레이션 결과에서 얻어진

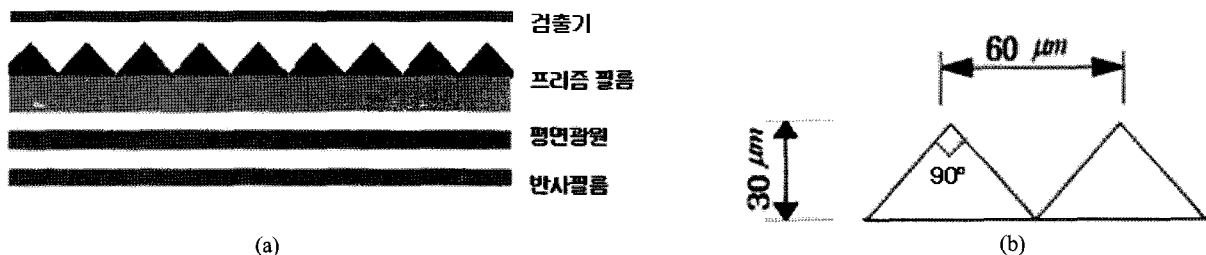


그림 3. (a) 본 연구에 사용된 BLU 모델. (b) 프리즘필름의 단면 구조.

총광속(total flux), 프리즘 필름의 법선 방향의 광도 및 총광속을 고려하여 규격화한(normalize) 법선방향의 광도를 보여 주고 있다. 여기에서 총광속은 검출기에 검출된 광선의 수와 평면광원에서 발생시킨 광선의 수 사이의 비를 %로 변환한 양으로 정의된다. 총광속은 굴절률이 증가함에 따라 감소하는 경향성을 보여주는데, 시뮬레이션 결과 상 검출기에 검출되지 않고 사라지는 광선이 존재하는 이유는 아래에 기술되는 프리즘필름의 광학적 작용을 고려하면 이해될 수 있다.

그림 4(a)는 프리즘 필름에 램버시안 분포를 가진 광선 다발이 입사될 경우 입사광선의 각도 조건에 따라 광선의 경로가 어떻게 달라지는지를 보여주는 그림이다. 램버시안 분포를 가진 광선다발이 프리즘필름의 기판에 입사하게 되면 프레넬(Fresnel) 반사되는 부분을 제외한 나머지 빛들은 공기와 기판의 굴절률 차이에 따른 굴절로 인해 $\pm\theta_{max}$ 이내의 각도로 모이게 된다. 공기의 굴절률을 1, 프리즘필름의 기판의 굴절률을 n_1 이라 하면 스넬의 법칙(Snell's law)에 의해서 θ_{max} 는 $\sin^{-1}(1/n_1)$ 로 결정된다. 굴절률 n_1 이 커질수록 광선들은 기판 내에서 더 좁은 원추형 각도 영역 내로 국한될 것이다. 예를 들어 그림 4(a)의 광선 '가'의 경우에는 두 번의 굴절을 거치면서 정면 방향의 휘도 상승에 기여하는 광선을 표현한 것이고, 프리즘필름의 입장에서는 가장 바람직한 각도 영역 내로 들어오는 광선이라 할 수 있다. 광선 '나'의 경우는 프리즘 산의 한 쪽 면에서 전반사(total internal reflection)를 한 후에 다른 프리즘산으로 재입사하여 후면으로 내려가거나 고시야각 영역으로 빠져서 소위 'side lobe'를 형성한다. 광선 '다'의 경우는 프리즘필름에 거의 수직 방향으로 입사하여 두 번의 전반사를 거치면서 후면으로 되돌아오는 광선으로써, 프리즘필름에 입사되는 광선의 절반 정도는 광선 '다'와 같은 경로를 거치게 된다. 후면으로 되돌아온 광선들은 후면에 위치한 반사필름이나 기타 다른 부재들에 부딪혀서 방향이 바뀌면서 광선 '가'와 같이 정면 휘도의 상승에 기여하는 광선들로 변환될 수 있다. 이처럼 후면으로 되돌아온 광선들을 바람직한 각도 영역으로 입사될 수 있는 유용한 광선으로 바꾸는 재생(recycling) 기능이야말로 프리즘필름이 BLU의 고휘도화에 기여할 수 있는 주요 원인이다. 따라서 프리즘필름의 후면에 배치된 BLU 부재들, 특히 반사필름의 반사

특성 및 반사율에 따라 프리즘필름의 집광 성능 및 시야각 특성이 변할 것이라고 예상할 수 있다.

표 1의 시뮬레이션 결과는 거울반사의 성격을 가진 반사필름을 이용하였다. 이 경우 그림 4(a)의 '다'와 같은 광선은 프리즘산에서 발생하는 두 번의 전반사와 반사필름 위에서 정면반사를 경험하면서 무한 루프(loop)를 형성하게 되고 따라서 시뮬레이션 시간 내에 검출기에 검출될 수가 없게 된다. 그림 4(b)는 거울반사형 반사필름 위에 구축된 프리즘필름에 다수 개의 광선을 아래로부터 입사시켰을 경우 나타나는 광선 경로를 시뮬레이션 상에서 추적해 본 결과이다. 거울반사의 특성 상 프리즘산의 경사진 계면과 반사필름 사이에 갇혀서 무한 루프를 그리는 광선의 개수가 상당히 많음을 알 수 있고 일부의 광선들은 정면 방향으로, 극히 일부는 고시야각 방향으로 빠져나감을 볼 수가 있다. 프리즘산의 굴절률이 커지게 되면 기판과 프리즘산 사이의 계면에서 발생하는 굴절각이 커지면서 법선 방향을 향하는 광선의 밀도가 늘어나서 그림 4(a)의 '다'의 경로를 밟는 광선의 비중이 커질 것이므로 검출기에 검출되는 총광속은 줄어들게 된다. 그렇지만 이러한 결과는 거울반사라는 이상적인 반사특성을 가정하여 발생한 것이고 실제 BLU내에서 발생하는 손실은 주로 집광필름의 계면에서 발생하는 산란이나 매질의 흡수에 의한 것이므로 굴절률의 차이에 따라 가시광의 손실률이 달

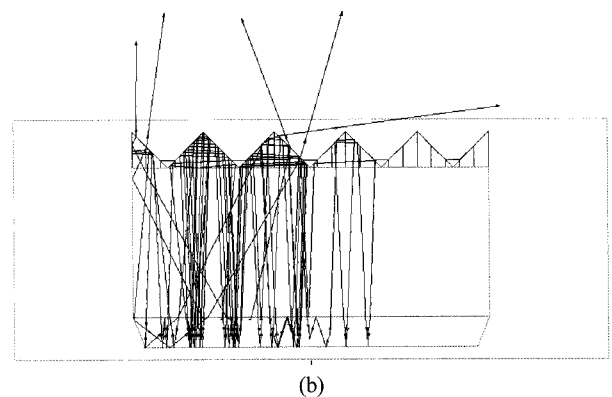
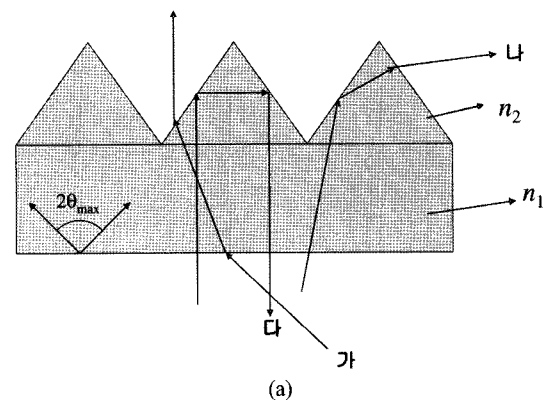


그림 4. (a) 프리즘 필름에 입사되는 광선의 각도에 따라 출광되는 방향이 바뀌어 보여주는 개략도. (b) 프리즘필름 구조에 입사.

표 1. 프리즘산 부위의 굴절률 변화에 따른 시뮬레이션 결과. 각 굴절률별 총광속, 정면광도 및 규격화된 정면광도를 보여 주고 있음.

굴절률	총광속(%)	정면광도	규격화된 광도
1.40	86.5	47.3	54.7
1.45	81.0	46.4	57.3
1.48	78.0	46.4	59.6
1.50	75.5	45.8	60.6
1.55	70.3	44.8	63.8
1.60	65.2	44.2	67.7
1.65	60.4	43.5	72.0

라질 것으로 예상할 수는 없다. 이런 측면에서 상기 시물레이션 결과를 정당하게 평가하기 위해서는 검출기에서 검출된 총광속의 수치로 광도 분포를 나누어 준 ‘규격화된 광도 분포’를 고려하여야 한다. 표 1의 마지막 열은 검출기에서 검출된 법선방향의 광도를 총광속으로 나누어 준 ‘규격화된 광도’이다. 이를 검토해 보면 굴절률이 높아질수록 프리즘 필름의 정면(법선 방향) 휘도상승률이 향상될 것으로 예상된다.

이러한 추론이 타당한지 검증하기 위해 동일한 형상에 프리즘산의 굴절률만을 변화시킨 프리즘 필름들을 제작하여 직하형 BLU에 넣은 다음 휘도의 상대적인 변화량을 평가한 후 시물레이션 결과와 비교하였다. 그림 5는 제작된 프리즘 필름의 SEM(Scanning Electron Microscopy) 사진이다. 프리즘산의 피치는 60 μm , 프리즘 정각은 직각으로 설정하였고 이러한 디자인이 실물에 잘 반영되어 있음을 알 수 있다. 기판은 125 μm 의 두께에 굴절률은 1.5를 가지도록 제작되었으며, 프리즘산의 굴절률은 1.47에서 1.56까지 변화되었다. 그림 6은 표 1의 시물레이션 결과 및 상기의 실험 결과를 요약한 것으로서 굴절률의 변화에 따라 정면 휘도가 어떻게 바뀌는지를 상대적으로 표현한 것이다. 정량적인 비교를 위한 기준으로써 시물레이션은 굴절률 1.55와 이 조건에서 얻어진 정면 광도를 100%로 설정하였고 실험 결과에서는 굴절률 1.56 및 이 조건에서 측정된 정면 휘도를 100%로 놓았다. 이 기준값과 비교된 다른 굴절률에서의 실험 혹은 시물레이션 결과들의 정면 휘도 변화량을 %로 변환하여 그림 6의 세로축에 표현하였다. 그림 6의 가로축에 표현된 Δn 은 각 시물레이션이나 실험에 이용된 프리즘산의 굴절률에서 기준굴절률(실험은 1.56, 시물레이션은 1.55)을 뺀 수치이다. 실험 결과를 보게 되면 굴절률 1.56에 비해 1.47의 굴절률을 가진 프리즘 필름의 정면 휘도는 약 9% 정도 떨어짐을 알 수 있다. 실험에서 변화시킨 굴절률 영역 내에서 시물레이션 결과와 실험 결과를 비교해 보면 약간 차이가 보이지만 전체적으로

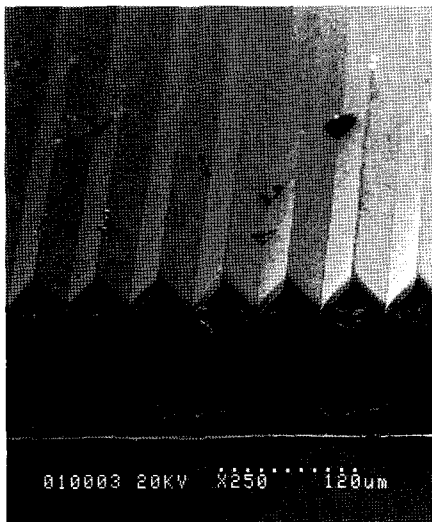


그림 5. 시물레이션 결과와 비교하기 위해 시험적으로 제작된 프리즘 필름의 SEM 사진.

양쪽 결과에서 굴절률의 감소에 따라 정면 휘도가 감소하는 비율이 정량적으로 매우 비슷함을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 거울반사와 랩버시안 평면광원을 이용한 단순한 시물레이션 방법을 이용하는 경우에도 집광 필름이 나타내는 광특성의 상대적인 변화, 특히 정면 휘도 상승률의 변화를 정량적으로 예측하는 것이 가능하다는 것을 보여준다. 그림 6을 보게 되면 프리즘산의 굴절률을 1.55에서 1.65로 올리게 될 경우 정면 휘도가 약 13% 정도 올라갈 것으로 예상할 수 있다.

그림 7은 프리즘산의 정각을 70도에서 110도로 변화시켰을 경우 상기와 동일한 방법으로 시물레이션을 수행한 결과이다. 정각 90도에서 가장 높은 정면 휘도를 보이고 이 보다 각도가 커지거나 줄어들게 되면 휘도가 감소할 것으로 예상된다. 90도보다 작은 정각을 가지는 프리즘 필름은 수직 방향 혹은 이에 근접한 방향으로 올라가는 광선들의 상당 부분을 고시야각 쪽으로 손실시키게 되고 정각이 90도보다 큰 경우에는 수직 부근의 광선들을 굴절을 통해 더 퍼뜨려 넓은 시

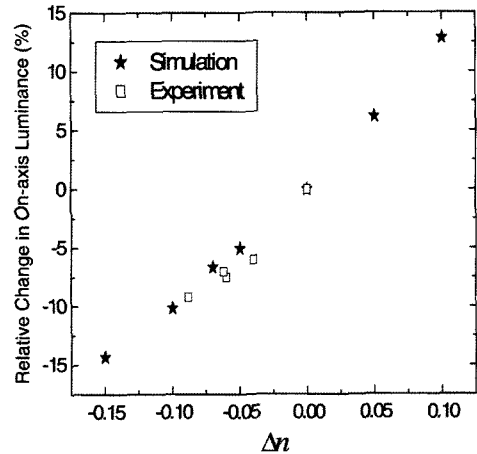


그림 6. 프리즘산 부위 굴절률의 변화에 따른 정면 휘도의 상대적 변화율. 시물레이션 결과와 실험결과를 비교하였음.

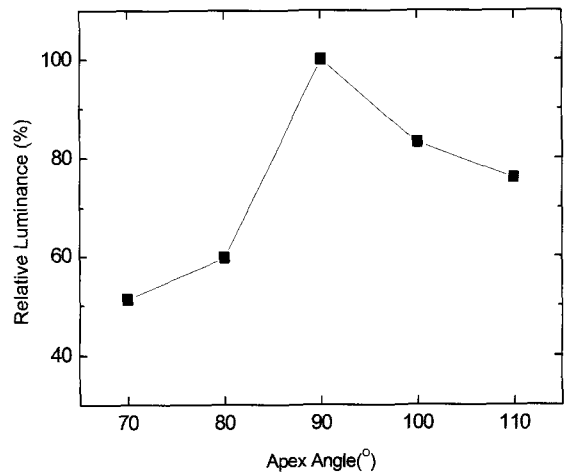


그림 7. 시물레이션을 통해 얻은 프리즘산 정각의 각도 변화에 따른 정면 휘도 상승률의 변화.

야각특성을 부여하기 때문에 양자 모두 정면 휘도는 감소하게 된다. 이러한 예측은 기존에 보고된 실험 결과와 잘 일치한다.^[10] 본 논문에서는 그 결과를 구체적으로 서술하지 않겠지만 프리즘산의 형태를 정삼각형에서 포물선이나 타원과 같은 다양한 마이크로 렌즈 형상으로 변형시킬 경우에는 90도의 정각을 가진 프리즘필름에 비해 정면휘도상승률이 감소함을 확인하였다. 즉 정각 90도의 조건에서 두 번의 전반사를 통해 발생하는 빛의 재생 기능이 깨지게 되면 정면휘도의 측면에서는 불리한 결과가 도출되는 것이다. 이에 대한 상세한 결과는 이후 다른 기회에 보고할 예정이다. 이상의 결과들에 근거해 볼 때 거울반사 성격을 가진 반사필름, 램버시안 분포의 평면광원만으로 구성된 간단한 BLU모형을 이용해서도 BLU용 광학필름의 광특성을 평가하는 것이 가능함을 알 수 있다. 물론 이러한 간단한 모형을 이용할 경우 해당 광학필름의 정면휘도상승률과 시야각특성을 정량적으로 예측하는 것은 매우 어렵지만 상기의 시뮬레이션 결과는 이런 모델들을 이용할 경우에도 적어도 굴절률이나 프리즘 정각과 같은 광학필름의 디자인 인자들의 변화에 따른 광특성의 상대적인 변화를 예측하는 것은 충분히 가능하다는 것을 보여준다.

3.2 반사필름의 반사성격이 프리즘필름의 광특성에 미치는 영향

실제 BLU에 사용되는 반사필름의 표면은 일정한 거칠기를 가지고 있고 반사와 투과 이외에 산란특성을 함께 나타낸다. 시뮬레이션으로부터 좀 더 정확한 결과를 얻기 위해서는 반사필름이 보이는 산란 특성을 정확히 이해하고 이를 시뮬레이션 코드에 반영할 필요가 있다. 반사필름의 반사 성격에 따라 광특성, 특히 정면휘도 및 시야각특성이 어떻게 바뀌는지를 확인하기 위해 2장에서 서술한 세 가지 반사성격의 반사필름을 준비하여 시뮬레이션을 수행하였다. 표 2에 5×5 mm²의 면적을 가진 프리즘필름에 대해 세 가지 성격의 반사필름을 적용한 시뮬레이션 결과를 요약하였다. 기판의 굴절률은 1.55이고 프리즘산의 굴절률은 1.56으로 설정하였다. 사용된 광원은 램버시안 분포의 평면광원이었다. 거울반사를 이용한 시뮬레이션 결과에서 얻은 총광속에 비해 확산반사의 성격이 포함된 E60L 재질의 반사필름이나 완전확산반사형 반사필름의 총광속이 훨씬 높음을 알 수 있다. 확산반사의 성격이 포함되어 있는 경우 프리즘산에서 두 번의 전반사를 거쳐 내려온 광선(그림 4(a)의 ‘다’와 같은 경우)이라 하더라도 반사필름에서 확산반사를 거치면서 광선의 방향이 달라질 수 있기 때문에 무한 루프에 갇히는 광선의 비중이 현저히 줄어들게 된다. 총광속의 차이로 인해 법선방향의 정면 광도는 확산반사필름 쪽이 높지만 검출기에 검출된 총광속을 고려하여 정면광도를 규격화하게 되면 거울반사형 반사필름을 사용할 경우의 정면광도가 가장 높고 시야각 특성은 가장 좁게 됨을 알 수 있다. 이러한 경향성은 두 장의 프리즘필름을 교차하여 놓은 경우에 대한 시뮬레이션 결과로부터도 동일

표 2. 반사필름의 반사성격 및 프리즘필름의 개수에 따른 시뮬레이션 결과. 각 조건별 총광속, 정면광도 및 규격화된 정면광도를 보여주고 있음.

반사필름의 반사성격		완전 거울반사	백색PET (E60L)	완전 확산반사
단일 프리즘 필름	총광속(%)	61.2	83.6	85.2
	정면광도	41.7	51.5	51.7
	규격화된 광도	68.1	61.6	60.6
교차 프리즘필름 (2장)	총광속(%)	33.2	51.9	53.5
	정면광도	47.9	65.8	67.6
	규격화된 광도	144.2	126.8	126.5

하게 확인할 수 있었다.

이상의 결과에 근거해서 그림 2에 나와 있는 프리즘필름 위의 출광분포를 만들어 낼 수 있는 시뮬레이션 모델을 정립하기 위하여 다음과 같은 조건 하에서 시뮬레이션을 수행하였다. 면적이 12×2 mm²이고 굴절률이 1.575인 기판 위에 굴절률 1.60, 정각이 90도인 프리즘산을 형성하여 프리즘필름을 디자인하였다. 광원으로는 램버시안 분포를 가진 평면광원을 적용하였다. 이러한 조건들은 면적을 제외하면 그림 2의 실험 결과를 얻기 위해 사용된 프리즘필름의 조건과 거의 동일한 것이다. 반사필름의 반사성격은 3.1절에서와 마찬가지로 세 가지로 설정하였다. 이 세가지 조건에 따라 프리즘필름 위의 출광분포가 어떻게 바뀌는지를 분석하였고 실험 결과의 출광분포와 가장 근사한 결과를 만들어 낼 수 있는 BLU모형을 찾고자 하였다. 그림 8은 프리즘필름의 일차원 렌즈에 수평인 방향과 수직인 방향에 대한 시야각 특성을 보여준다. 그림 8에 제시된 그래프들의 가로축은 프리즘필름의 법선 방향을 기준으로 측정된 각도를 의미하고 세로축은 상대휘도이다. 상대휘도는 0도에서의 휘도를 100으로 놓고 규격화하였다. 그 이유는, 두 번째 시뮬레이션에서는 프리즘필름의 정면휘도상승률 보다는 시야각 특성에 집중해서 분석을 하고자 하였기 때문이다. 그림 8(a)는 프리즘필름의 산과 나란한 방향에 대한 시야각 분포를 보여주는데, 세 가지 반사필름 모두 비슷한 시야각 특성을 나타내었다. 즉, ±40도 이내에서는 거의 동일한 휘도를 보여주다가 이를 벗어나게 되면 상대휘도가 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 실제 BLU의 프리즘 필름 위에서 측정된 출광분포와는 매우 다른 분포이다. 실험 결과는 0도를 중심으로 해서 완만한 봉우리 형상을 보여주고 있지만 세 가지 종류의 반사필름이 적용된 시뮬레이션 결과들 중 어느 것도 실험에서 측정된 출광분포를 구현할 수가 없었다. 그림 8(b)에 보이는 수직방향의 분포를 보게 되면, 실험 결과는 0도 부근에서 매우 날카로운 피크를 형성하는데 반해 확산반사의 성격이 포함된 반사필름의 경우에는 이 보다 훨씬 넓은 시야각 특성을 보여준다. 거울반사의 경우 0도 부근, 즉 법선 부근의 출광분포는 확산반사의 분포에 비해 더 좁은 시야각 분포를 나타내고 있고 실험값과 비슷한 형태를 보인다. 이는 거울반사형

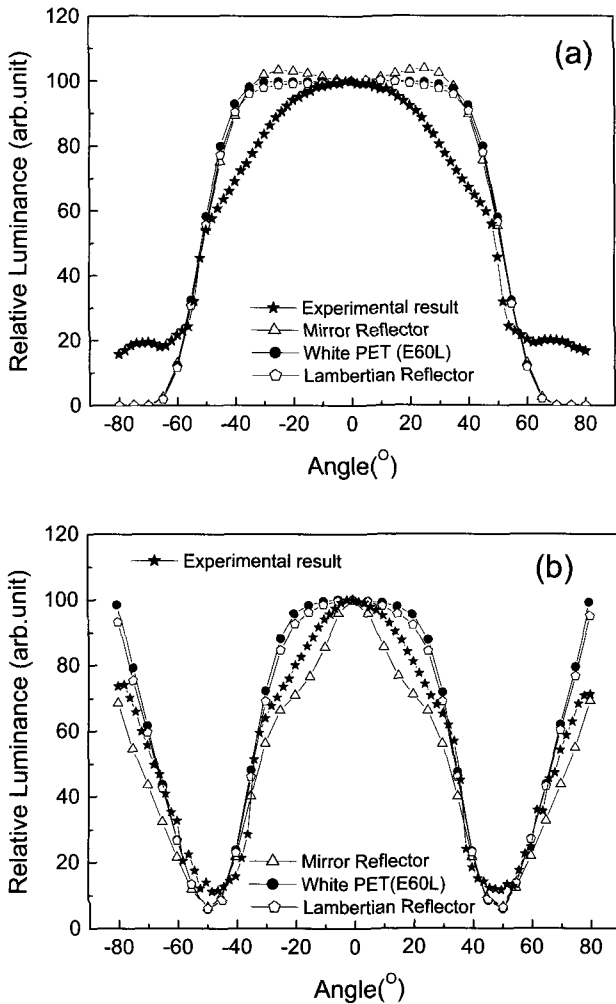


그림 8. 세 가지 반사필름과 람버시안 분포의 광원이 적용된 BLU모델로부터 얻어진 프리즘필름 위의 출광분포. (a)는 프리즘필름의 일차원 프리즘 구조에 수평인 방향, (b)는 수직인 방향으로의 시야각 특성임.

반사필름이 법선 방향에 근사적으로 나란하게 입사되는 광선들의 각도 조건을 깨뜨리지 않고 0도 부근의 휘도에 기여하도록 만들기 때문이다. 이러한 경향성은 거울반사가 사용된 마이크로 피라미드형 집광필름에서도 확인된 바가 있다.^[6] 그렇지만 거울반사필름이 포함된 시뮬레이션 결과에서 얻은 출광분포도 실제 직하형 BLU에 대한 측정으로부터 얻은, ±40도 부근에서 휘도가 급격히 감소하는 형태를 정확히 재현할 수는 없었다. 결국 그림 3에 제시되고 있는 간단한 모델 내에서는 반사필름의 반사성격을 변화시켜도 실제 직하형 BLU에 포함된 프리즘필름 위의 출광분포를 재현할 수는 없었다.

이러한 불일치는 직하형 BLU의 구조를 생각하면 충분히 예견되는 결과이다. 왜냐하면 직하형 BLU 내에서 프리즘필름에 입사되는 빛의 분포는 시뮬레이션에서 이용된 람버시안 광원이 아니기 때문이다. 그림 2에 제시된 프리즘필름 위의 출광분포를 만들어내는 입사광의 분포는 확산필름을 통과한 후 형성된, 다소 정면으로 집광된 출광분포이다. 따라

서 다음 단계로는 프리즘필름에 입사되는 빛의 분포가 바뀌에 따라 프리즘필름의 시야각특성이 어떻게 바뀌는지를 조사하였다.

3.3 광원의 출광분포가 프리즘필름의 광특성에 미치는 영향

본 시뮬레이션 모델에서 사용된 가상의 평면광원의 출광분포로서 그림 2의 확산필름 위에서 측정된 휘도분포를 이용하였다. apodization을 통해서 수치화된 휘도분포는 시뮬레이션 과정 중 적당한 통계적인 과정을 거쳐서 가상의 평면광원의 출광분포로 변환되었고 이를 이용한 시뮬레이션 결과가 그림 9에 제시되어 있다. 그림 9(a) 및 (b)는 각각 프리즘산의 수평방향 및 수직방향에 대한 상대휘도의 시야각 분포를 나타낸다. 확산필름 위의 출광분포를 프리즘필름에 대한 입사광에 적용시킬 경우 거울반사필름이 적용된 시뮬레이션 결과는 수직방향으로 매우 좁고 뾰족한 시야각 특성을 보여 주는데 반해 완전확산반사필름과 백색 PET의 일종인 E60L의 경우에는 상대적으로 더 넓은 시야각특성을 보여주고 있고 직하형 BLU에서 측정된 출광분포와 매우 근접해 있음을 알 수 있다. 수평방향의 결과 역시 확산반사의 성격이 포함된 모델들이 실험적으로 측정된 출광분포에 더 근접해 있음을 보여준다. 본 논문에서는 구체적으로 보고하지 않겠지만, 확산판 위에 직접 프리즘필름을 올려놓고 시야각 특성을 측정하게 되면 그림 8에서 보이는 출광분포 중 백색 PET 혹은 완전확산반사 성격의 반사필름이 적용된 시뮬레이션 결과와 매우 비슷한 분포가 얻어짐이 확인되었다. 이상의 결과는 광학 시뮬레이션을 이용해 집광필름의 광학적 성능, 특히 시야각 특성을 정확히 예측하기 위해서는 집광필름이 BLU내에 놓이는 위치에서 따라 겪게 되는 입사광의 분포를 정확히 반영하는 것과 더불어 반사필름의 산란 특성이 정확히 반영된 반사분포함수를 적용하는 것이 매우 중요하다는 것을 의미한다. 향후에는 집광필름의 시야각특성 뿐 아니라 정면휘도 상승률까지 정량적으로 예측할 수 있는 시뮬레이션 기법에 대한 연구가 이루어져야 한다. 이를 위해서는 BLU를 구성하는 각 광학부품들이 가지는 반사율, 흡수율, 투과율 및 양방향산란분포함수에 대한 정확한 측정이 요구되고 이를 시뮬레이션 과정에 반영하여야 한다.

이제 프리즘필름에 입사되는 빛의 분포에 따라 프리즘필름의 정면휘도상승률이 어떻게 영향을 받는지를 검토해 보자. 현재 프리즘필름이 포함된 직하형 BLU의 경우 “확산판+확산필름+프리즘필름”이란 기본적인 필름 조합 위에 추가적으로 확산필름이나 반사형 편광필름이 올라가게 된다. 이러한 조합과 “확산판+프리즘필름” 조합의 광특성을 비교할 경우 휘도상승률은 전자가 더 우수하지만 프리즘필름 자체가 만들어내는 휘도상승률은 후자가 더 클 것으로 예상된다. 왜냐하면 “확산판+확산필름+프리즘필름”의 구성에서는 확산필름이 부분적으로 휘도향상의 역할을 나누어 수행하기 때문에 프리즘필름의 휘도상승률이 상대적으로 떨어질 수밖에 없기

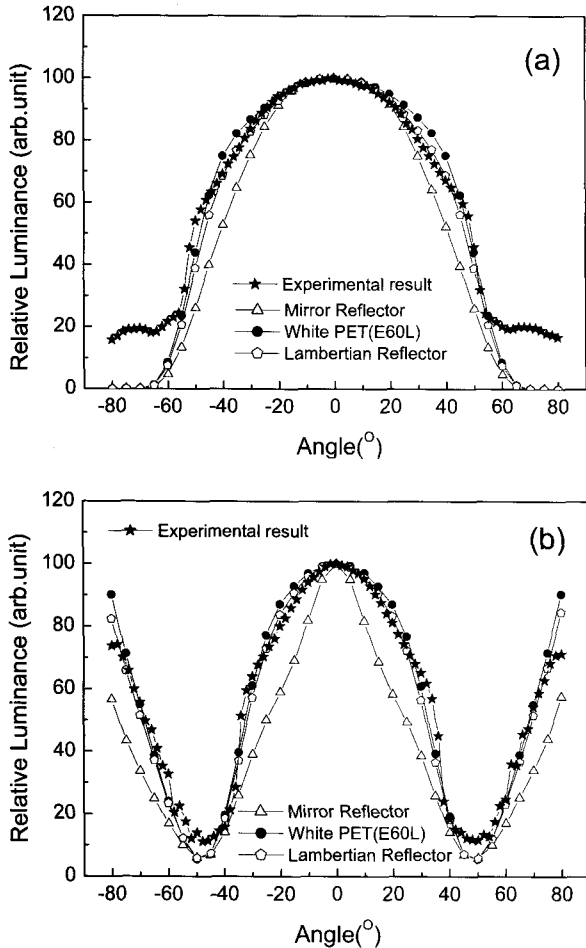


그림 9. 세가지 반사필름과 확산필름위의 출광분포를 가상의 평면광원에 적용한 BLU모델로부터 얻어진 프리즘필름 위의 출광분포. (a)는 프리즘필름의 일차원 프리즘 구조에 수평인 방향, (b)는 수직인 방향으로의 시야각 특성임.

때문이다. 실제로 본 연구에서 사용된 32인치 CCFL BLU를 이용하여 “확산판+확산필름+프리즘필름” 조합 및 “확산판+프리즘필름” 조합의 정면 휘도를 비교한 결과가 표 3에 제시되어 있다. 본 결과는 CCFL BLU를 1시간 동안 켜서 에이징을 시켜 놓은 상태에서 BLU 내부 및 주위의 온도 변화가 거의 없는 상태에서 휘도계(Minolta, CA100A)로 측정된 결과이다. 실험 결과로부터 프리즘필름의 휘도상승률을 조건에 따라 비교해 보면, 확산판 위에 프리즘만을 올려놓게 되면 정면휘도가 1.6배 상승하지만 확산판+확산필름 위에 프리즘필름을 올려 놓게 될 경우에는 확산필름 위의 정면 휘도에 비해 약 1.39배 정도만 상승한다는 것을 확인할 수 있다. 이 실험 결과는 집광필름에 입사되는 빛의 분포가 집광필름의 휘도상승률에 직접적인 영향을 미친다는 것을 의미한다. 따라서 “확산판+확산필름+프리즘필름”로 대표되는 일반적인 필름조합에서 확산기능과 집광기능을 통합하여 필름의 숫자를 줄이기 위해서는 필름 수 감소에 따라 예상되는 휘도 감소분을 어떤 광학적인 아이디어로 보완할 것인가 하는 것이 매우 중요한 기술적 이슈가 될 것이다.

표 3. 32인치 CCFL BLU 내 각 광학필름 위에서의 중앙 휘도 비교값.

광학필름 조합	정면 휘도 (cd/m ²)	휘도비율
확산판	5658	1.00
확산판 + 확산필름	6951	1.23
확산판 + 프리즘 필름	9052	1.60
확산판 + 확산필름 + 프리즘 필름	9663	1.71

IV. 결론 및 요약

광학 시뮬레이션은 BLU용 집광필름의 개발에 있어서 개발 기간을 단축시킬 수 있는 매우 효과적인 방법이다. 그렇지만 특정한 미세광학구조를 가지는 집광필름의 광학적 특성을 정확히 예측하기 위해서는 시뮬레이션 조건에 대한 세심한 설정이 필요하다. 본 연구에서는 반사필름, 가상의 평면광원, 집광필름으로 구성된 간단한 BLU 모델을 구성한 후에 광선추적기법을 이용하는 광학 시뮬레이션이 집광필름의 광특성을 예측하는데 어떤 기여를 할 수 있는지를 분석하였다. 세 가지 종류의 반사재질로 구성된 반사필름과 두 가지 종류의 출광분포를 가지는 광원을 적용하여 시뮬레이션을 수행한 결과 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

첫째, 반사필름, 가상의 평면광원, 집광필름으로 구성된 간단한 BLU 모델은 집광필름의 광학적 성질을 변화시킴에 따라 변하는 집광 성능의 상대적인 변화를 예측하는데 유용하게 사용될 수 있다. 가장 대표적인 집광필름인 프리즘필름의 굴절률 및 정각의 변화에 따른 정면휘도 상승률의 변화를 시뮬레이션으로 예측한 결과 직하형 BLU에서 얻어진 측정결과를 잘 설명할 수 있었다. 단, 상기 방법을 적용하는데 있어서 집광필름 위에 설정된 검출기에서 검출된 총광속을 이용해서 정면광도를 규격화해야만 의미 있는 결과를 얻을 수 있음이 확인되었다. 왜냐하면 프리즘필름과 같이 정각이 90도인 광학구조를 가지고 있는 경우에는 전반사와 경면반사를 반복하면서 무한 루프에 갇히는 광선들이 발생하고 이 부분들을 시뮬레이션 결과에 정확히 반영해야 하기 때문이다.

둘째, 반사필름의 반사성격 및 평면광원의 출광분포를 정확히 설정해야만 프리즘필름의 시야각 특성을 정확히 구현할 수 있다. 반사필름의 성격을 완전확산반사, 완전거울반사, 그리고 두 가지 성격이 혼재되어 있는 백색 PET의 양방향반사분포함수를 적용한 결과 완전확산반사 → 백색 PET의 반사 → 완전거울반사의 순으로 시야각이 줄어들게 됨을 확인하였다. 아울러, 일반적으로 많이 사용되는 램버시안 분포의 광원을 적용할 경우 직하형 BLU내에서 확산필름 위에 올려진 프리즘필름의 광학적 특성을 정확히 재현할 수 없음을 확인하였다. 이상 결과는 BLU 내의 특정 위치에 놓여 있는 집광필름의 성능을 정확히 구현하기 위해서는 해당 필름에 입사되는 빛의 분포를 시뮬레이션 코드에 정확히 반영할 필요가 있음을 의미한다. 프리즘필름의 밑에 위치한 확산필름 위

에서 측정된 휘도의 시야각 분포를 시뮬레이션 내 가상 광원의 출광분포로 설정한 결과 직하형 BLU에서 측정된 실험 결과를 훌륭히 설명할 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서는 가장 대표적인 집광필름인 프리즘필름을 대상으로 해서 집광필름의 광특성을 예측하는 시뮬레이션 과정에 영향을 미칠 수 있는 인자들을 체계적으로 분석하였다. 본 연구를 통해서 얻어진 프리즘필름의 광학적 특성과 각 인자들 사이의 정량적인 상관성은 향후 BLU용 광학필름의 광학특성을 정확히 예측하기 위한 시뮬레이션 기법의 개발 및 개선에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

프리즘필름의 굴절률 변화와 관련된 실험을 도와 주신 (주) 상보의 김광원 연구소장님과 관련 연구원들께 감사의 인사를 포함합니다.

참고문헌

[1] M. Schiavoni, G. Counil, P. Gayout, and J.-L. Allano, "Novel glass diffuser plate for large LCD-TV," *SID '07 Digest*, pp. 50-53, 2007.
 [2] J. Ha, J. Paek, T. Jang, and J. Choi, "A new cost-effective optical plate for high performance LCD-TVs," *SID '07 Digest*, pp. 46-49, 2007.

[3] M. Tjahjadi, G. Hay, D. J. Coyle, and E. G. Olczak, "Advances in LCD backlight film and plate technology," *Information Display*, Vol. 10, No. 6, pp. 22-27, 2006.
 [4] M. H. Lee, W. T. Moon, M. J. Kim, S. K. Lee, J. S. Yoon, Y. H. Jung, B. K. Jung, H. S. Soh, and B. C. Ahn, "New light collimation film (LCF) for direct-lit BLU system," *SID '06 Digest*, pp. 503-506, 2006.
 [5] 박경주, 엄태성, 이동현, 권진혁, 이만환, 정병관, 소희섭, "프리즘 시트의 구조와 반사 편광 필름의 확산도 최적화에 의한 휘도와 시야각 향상", *한국광학회 2007 동계학술대회 논문집*, pp. 249-250, 2007.
 [6] J.-Y. Lee, K.-B. Nahm, J.-H. Ko, and J. H. Kim, "Effects of Reshaping Micro-pyramids and Prisms on the Optical Performances of Light Collimating Films in the Field of LCD Backlight," *IDW '06 Digest*, pp. 941-944, 2006.
 [7] J.-H. Park, J.-Y. Lee, and J.-H. Ko, "Enhancement of on-axis luminance of flat fluorescent lamps (FFLs) by using micro-lens arrays," *IMID2007 Digest*, pp. 965-968, 2007.
 [8] 권진혁, "LCD Backlight의 최적화 기술과 계측방법", *한국광학회 2007 동계학술대회 논문집*, pp. 249-250, 2007.
 [9] J. C. Stover, *Optical Scattering, Measurement and Analysis* (McGraw-Hill, New York, 1990), pp. 1-21.
 [10] M. E. Gardiner, M. B. O'Neill, and D. L. Wortman, "Luminance control film," U. S. Patent 6091547, 2000.

Optical Simulation Study on the Performances of Collimating Films for LCD Backlight Applications

Ji-Hee Park, Jung Ho Lee, Jin Ha Jeong, Kie-Bong Nahm, and Jae-Hyeon Ko[†]

Dept. of Physics, Hallym University, Chuncheon, Gangwondo 200-702, Korea

[†]*E-mail: hwangko@hallym.ac.kr*

Joong Hyun Kim

AMLCD Division, Samsung Electronics Co. Ltd., Asan, Chungnam 336-789, Korea

(Received November 19, 2007)

Optical simulation methods such as a ray tracing technique have been widely used to predict the optical performances of collimating films for LCD backlight applications. It is necessary to optimize simulation conditions which have substantial effect on the simulation result in order to predict accurate performances of collimating films. We have set up a very simple backlight model consisting of a reflection film, a virtual flat light-source, and a prism film, which is a representative collimating film for backlight, in order to analyze the simulation conditions which are strongly correlated with the on-axis luminance gain and the viewing-angle characteristics of prism films. It was found that the dependence of the relative change in the on-axis luminance on the structure and material properties of collimating films can be derived from the above-mentioned simple BLU model and from simulation using it. However, the exact reflection property of the reflection film and the distribution of the incident light onto the optical film were found to be very important for revealing exact viewing-angle characteristics of collimating films.