

PMMA 기판 위에 형성된 나노미터크기의 회절격자 패턴의 도광판에의 응용해석

정재훈, 김경래, 신원진, 홍진수, 이병욱*, 이태성*, 이종하*, 이근우*, 김창교*
 순천향대학교 물리학과, 전기로봇공학과*

Analysis of PMMA LGP with the shape of nano-patterned stripe

Jae-Hoon Chung, Kyung-Rae Kim, Won-Jin Shin, Chinsoo Hong, Byoung-Wook Lee*, Tae-Sung Lee*
 Jong-Ha Lee*, Keun-Woo Lee*, Chang-Kyo Kim*
 Depart. of Physics, Electronic and Robotics Engineering*, Soonchunhyang University

Abstract - 나노미터 크기의 회절격자 패턴이 형성된 도광판을 설계하기 위한 전산모사를 수행한다. 광원은 LED 4개를 사용하였으며 PMMA 도광판 재질의 파장에 따른 빛의 흡수 현상을 고려하였다. 도광판 위치에 따른 투과광선의 세기 분포, 투과광선의 투과각도 분포 및 편광에 따라 투과광선의 세기가 어떻게 달라지는지 살펴보았다.

1. 서론

과장보다 크기가 작은 구멍을 뚫은 금속판을 통한 전자기파의 급격한 투과율 향상[1]은 20여년 전에 발표된 이후 활발한 연구가 진행되고 있다. 이런 구조체를 광결정(PC; Photonic Crystal)이라 하며 공간에서 굴절률의 변화가 여러 방향으로 빛이 진행하는 원인이다. 이 현상은 보통 광학으로는 설명할 수 없는 현상이다.

이때 금속 이외에 고굴절률을 가진 산화물이 사용되며 회절효율은 떨어지지만 고분자 물질이 사용되기도 한다. 회절격자와 같은 1D PC는 도광판에서 편광필터로 사용하려는 시도가 있어왔다[2,3].

본 논문에서는 점광원이나 선광원에서 복사되는 빛을 나노패턴된 PMMA 플레이트를 통하여 변광원으로 변환시키는 설계를 하기 위한 전산모사에 대하여 다루기로 한다.

2. 본론

2.1. 전산모사

2.1.1 RCWA

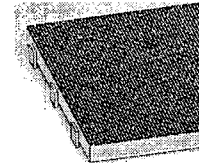
나노패턴 어레이가 형성된 경계면에 입사하는 빛은 나노패턴의 높이에 해당되는 영역, 그 아래의 기판 영역과 공기 매질인 영역의 전자기파 경계조건을 만족하도록 반사와 투과를 한다. 나노패턴의 높이 영역은 위치와 높이에 따라 굴절률이 패턴 물질의 굴절률과 공기로 결정된다. 이같은 굴절률의 공간적 변화를 평면파의 선형결합으로 표현하여 해석하는 방법을 RCWA (Rigorous Coupled-Wave Analysis)라 한다.

RCWA 알고리즘을 채택한 상용 소프트웨어인 GSolver[4]를 사용하여 도광판 해석에 사용하였다. 나노미터 패턴으로 광선이 입사하면 반사하거나 투과하는 광선의 개수는 대략적으로 $\sim 4^n$ 이다. 여기서 n 은 광선이 도광판 윗면에 부딪힌 횟수이다. 이런 특성을 갖는 반사 광선을 모두 추적하려면 시간이 너무 길게 걸린다. 따라서 있을 수 있는 모든 경우의 수를 데이터베이스화하여 읽어들이는 방법이 시간을 절약할 수 있었다. GSolver는 한 개의 광선의 입사조건에 대하여 반사와 투과를 전산모사할 수 있다. 도광판 내에서 다중 반사하는 광선은 윗면에 부딪히는 방향과 세기가 변하므로 Mathematica[5]를 사용하여 해석하였다. GSolver와 Mathematica는 서로 호환기능이 없으므로 데이터베이스를 구축해야 하는 또 다른 이유이다. 보다 시간을 절약할 수 있는 방법은 Mathematica로 RCWA 해석을 할 수 있는 프로그램 코딩이 향후 필요하다.

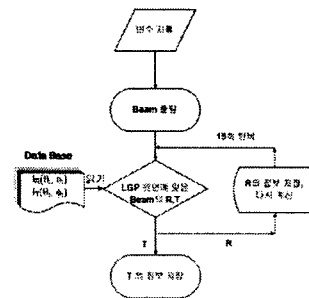
그림2는 GSolver로 구축한 데이터베이스를 Mathematica 코딩으로 도광판을 해석하는 개략도이다.

2.1.2 동심원 도광판

전산모사에서 사용하는 도광판은 두께가 1mm, LED가 놓여있는 측면의 길이는 각기 4cm, 다른 측면의 길이는 3cm이다(그림1 참조). 4개의 LED가 사용되었으며 4개의 LED 어레이는 측면의 중앙에 위치하도록 설치한 구조를 모델로 하였다. LED는 최대 출사방향이 도광판의 측면에 수직을 이루도록 하였다. 도광판 상면에 LED 어레이와 수직방향으로 막대패턴 생성하였다. 하면에 패턴이 형성된 도광판은 상면 패턴과 빛의 출광에는 큰 차이가 없다. 막대패턴의 공간주기는 500nm, 패턴의 높이는 250nm이며 패턴의 filling factor는 50%가 되도록 하였다. 공간주기를 500nm로 놓은 이유는 가시광선의 녹색 파장의 빛이 나노패턴에 입사하는 입사각이 80도 정도일 때 가장 세기가 강한 광선이 투과되는 방향이 수직이 되도록 하기 위해서이다. 도광판의 하면은 반사판을 사용하였다. 도광판 측면은 금속코팅을 한 경우와 코팅하지 않은 상태에서 결과를 구했으며, 도광판을 이루는 물질의 흡수 계수를 파장에 대하여 고려하였다.



〈그림 1〉 나노미터급 어레이 패턴 전산모사 구조도

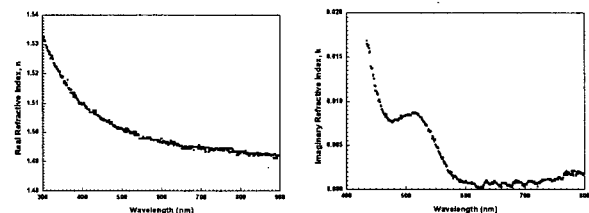


〈그림 2〉 나노미터급 어레이 패턴 전산모사 구조도

2.1.3 전산모사 방법

광선이 상면에 부딪히는 횟수를 15회까지 허용하였다. 여러 가지 경우의 시행착오와 경험으로 15회까지 수행하면 결과에 큰 영향을 미치지 않았다. 밑면에 부딪힌 광선은 반사판에서 반사하여 윗면으로 입사한다. 이때 횟수는 1번 증가한다. LED는 램버선 표면 방출(Lambertian emission) 조건을 만족한다고 놓았으며 이때 방출되는 빛의 세기는 $E_0 \cos \theta$ 로 놓았다. 여기서 E_0 는 중심으로 방출되는 빛의 세기이며, θ 는 중심 방출 방향에서 측정한 방출방향이다. E_0 는 100으로 놓았으며 도광판 속으로 투과한 LED 광선은 각기 400개가 되게 하였다. 광선의 방향은 random number를 생성하여 결정하였으며 그 방향에 따라서 빛의 세기가 자동적으로 결정된다.

R, G, B 파장은 CIE에서 규정한 700nm, 546.1nm, 435.8nm를 사용하였다. 이때 LED에서 방출된 세 색깔의 세기는 같다고 가정하였다. 도광판은 PMMA로 만들어졌다고 했으며 색깔에 따른 물질의 굴절률을 고려하였다 (그림3 참조).



〈그림 3〉 PMMA의 실수굴절률과 허수굴절률

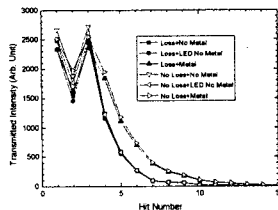
2.2 결과

막대패턴이 형성된 상면에 광선이 부딪힌 횟수에 따라 투과된 광선의 세기를 R에 대하여 얻었다(그림4 참조). 이때 PMMA에 대한 빛의 흡수(Loss, No Loss)와 도광판 측면에 금속코팅의 효과(No Metal, LED No Metal, Metal)를 고려하였으며 3번째 도광판 윗면에 입사하는 빛의 투과율이 상대적으로 크게 나타났다.

표1은 광선이 도광판 윗면에 15회 부딪힐 때 투과되는 빛의 세기를 도광판 측면 상태에 대하여 얻은 결과이다.

도광판 측면에 금속코팅을 하면 도광판 윗면을 통한 빛의 투과가 약 2.1배 향상된다는 사실을 표1로부터 알 수 있다. 또한 TE 편광된 빛이 TM 편광된 빛보다 약 2배 정도 강하게 투과하게 된다.

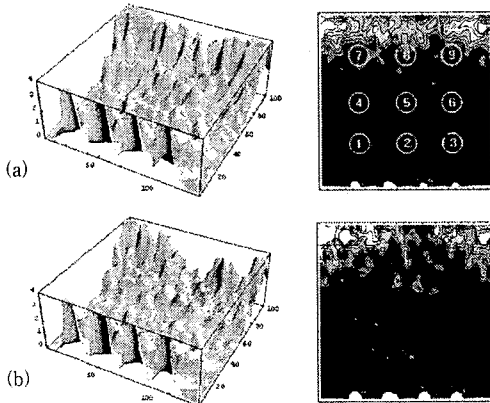
그림5 (a)는 R에 대하여 PMMA에 의한 빛의 흡수를 고려하고, 도광판 측면은 금속이 코팅되어 있지 않은 상태에서 투과된 광선의 분포이다. 이때 도광판은 101×134 픽셀로 나누었다. 그림5 (b)는 측면이 금속 코팅되어 있고, 흡수를 고려하지 않은 결과이다. 투과된 빛이 가장 밝은 부분은 광원인 LED가 놓여 있는 위치이며 15회 광선이 도광판 상면에 부딪힐 때마다 작은 피크로 투과된 빛의 세기가 나타난다. 광원에서 가장 가까운 곳에 위치한 피크는 LED에서 방출된 빛이 도광판 밑면에 반사하여 첫 번째로 도광판 윗면으로 입사할 때 생긴 것이다. G와 B 역시 R과 마찬가지로 투과율 분포는 크게 달라지지 않음을 알 수 있었다.



〈그림 4〉 도광판 윗면에 광선이 부딪힌 회수에 따른 투과된 빛의 세기

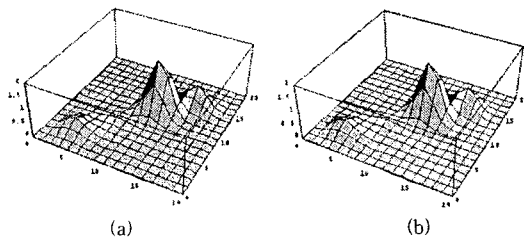
〈표 1〉 편광, 색깔, PMMA 흡수에 따른 투과광선의 상대 세기

색	편광	Loss			No Loss		
		A	B	C	A	B	C
R	TE	5427	5386	8609	5931	5889	9412
	TM	3463	3100	2434	3767	3362	2645
G	TE	1531	1522	1701	3619	3604	3915
	TM	721	647	694	1718	1445	1336
B	TE	876	876	927	3570	3578	3731
	TM	493	490	541	2052	1883	1932
합		12,511	12,021	14,906	20,657	19,761	22,971



〈그림 5〉 R에 대한 도광판 위치에 따른 투과된 빛의 세기 분포

도광판의 위치를 그림5 (a)와 같이 고정시켜 놓고, 투과되는 빛의 세기를 얻을 수 있다. 그림6은 ⑤번 위치에서 B에 대한 투과광선의 방향과 세기를 나타낸 것이다. (a)는 흡수를 고려하고, 도광판 측면은 코팅이 되지 않은 상태이며 (b)는 PMMA의 흡수가 없다고 하고, 도광판 측면은 금속으로 코팅된 것이다. 이 두 경우 차이가 없으므로 이때 투과된 광선은 도광판 측면에서 반사를 하지 않은 광선이거나 임계각 이상의 각도로 측면에 반사하였고 볼 수 있다. 또한 흡수에 의한 영향이 거의 없으므로 LED에서 방출된 빛이 직접 도광판 윗면을 통하여 투과한 것이라 볼 수 있다.



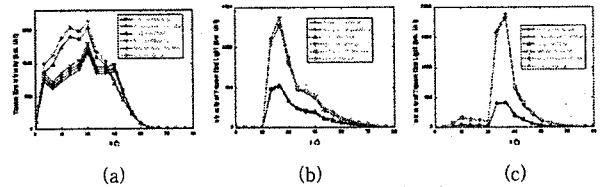
〈그림 6〉 ⑤번 위치에서 B에 투과각도

투과광선의 투과각도는 도광판 윗면을 xy -평면에 있다고 하고 도광판 면에 수직인 좌표를 z 로 놓을 때 z 축으로부터 측정한 각이 θ 이며 x 축으로 측정한 방향각이 ϕ 이다(그림9 참조). 그림7과 그림8은 도광판 전체를 통

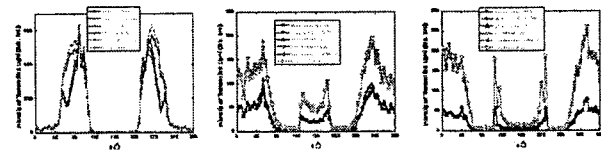
하여 투과되는 광선의 방향을 색깔에 따라 나타낸 것이다. 그림7에서 R, G, B의 θ 투과각은 각기 30°, 25°, 40°이다. 그림8에서 ϕ 투과각은 180°를 기준으로 색깔에 구분없이 거의 대칭을 이루며 R, G, B에 대하여 각기 $\phi=100^\circ, 265^\circ, \phi=60^\circ, 310^\circ, \phi=45^\circ, 330^\circ$ 방향으로 가장 강한 광선이 투과되며 G, B는 이 방향 이외에도 $\phi=150^\circ, 205^\circ, \phi=120^\circ, 235^\circ$ 에서 피크가 나타난다. R은 나노패턴의 공간주기보다 파장이 크기 때문에 이런 피크들이 나타나지 않은 것으로 볼 수 있다. 도광판에서 대부분의 광선이 윗면에 입사할 때 이루는 82° 정도의 입사각에 대하여 일반화된 스넬법칙

$$\begin{cases} n_1 \sin \theta_i \cos \phi_i = n_2 \sin \theta_t \cos \phi_t + \frac{\lambda_0}{\Lambda_x} m_x \\ n_1 \sin \theta_i \sin \phi_i = n_2 \sin \theta_t \sin \phi_t \end{cases} \quad (1)$$

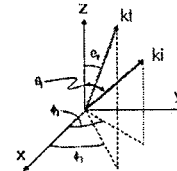
에 $m_x=1$ 을 적용하면 투과되는 광선의 θ 투과각은 G는 수직으로 투과되고 R과 G는 $\pm 20^\circ$ 이내로 G를 중심으로 서로 반대쪽으로 위치하게 된다. 도광판 윗면에서 여러 방향으로 갈라진 반사광선이 도광판 내에서 다중반사하여 도광판 전체적으로 나타나는 효과는 마이크로패턴 도광판과 다르게 40° 이내의 각도에서 강하게 투과된다. 식(1)에서 나노패턴은 x -축 방향과 평행하게 형성되었으며 투과광선은 아래첨자 t , 입사광선은 아래첨자 i 로 나타내었다. λ_0 는 빛의 파장, Λ_x 는 동심원 패턴의 공간주기이다.



〈그림 7〉 색깔에 따른 투과된 광선의 θ 분포



〈그림 8〉 색깔에 따른 투과된 광선의 ϕ 분포



〈그림 9〉 ⑤번 위치에서 B에 투과각도

3. 결 론

나노패턴 회절격자가 형성된 도광판을 설계하기 위한 목적으로 전산모사를 수행하였다. 보통 사용되고 있는 도광판에서 투과광선의 투과방향은 도광판 면 방향으로 75° 정도 기울어진 상태인 나노패턴 회절격자 도광판에서는 최대 투과각도는 40° 정도가 되는 것으로 나타났다.

본문에서 제시한 도광판 구조에서 측면에 금속코팅을 하지 않은 경우에 비하여 금속코팅을 하면 50% 이상 투과광선 양이 증가함을 알 수 있었으며 상대적으로 PMMA의 흡수에 의한 효과는 금속 코팅효과보다 작다는 사실을 알 수 있다. 동일한 세기의 R, G, B를 LED에서 방출하더라도 대략 4:2:1 비율로 투과된다.

위치에 따른 투과광선의 투과각은 일반화된 스넬법칙에 의하여 예측된 결과와 일치함을 알 수 있었다.

그러므로 본 논문에서 수행한 도광판의 전산모사를 최적화된 도광판 제작에 활용할 수 있을 것이다.

[참고 문헌]

- [1] T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi, T. Thio, and P. A. Wolff, "Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays", Nature (London), 391, 667, 1998.
- [2] X. Yang, Y. Yan, G. Jin, "Polarized light-guide plate for liquid crystal display", Opt. Express, 13(21), 8349, 2005.
- [3] Y. Ye, D. Pu, Y. Zhou, and L. Chen, "Diffraction characteristics of a submicrometer grating for a light guide plate" Appl. Opt. 45, 3396, 2007.
- [4] <http://www.gsolver.com> 참조
- [5] <http://www.wolfram.com> 참조