

◆특집◆ 나노/마이크로 하이브리드 패턴 가공 및 응용기술

광학 마이크로 피라미드 패턴의 제조 및 광특성 해석

이재령^{*,**}, 전은채^{**}, 제태진^{**}, 우상원^{**}, 최두선^{**}, 유영은^{**}, 김휘^{*,#}

(#,* 고려대학교 전자및정보통신공학과, ** 한국기계연구원 나노공정연구실)

Fabrication and analysis of optical micro-pyramid array-patterns

Je-Ryung Lee^{*,**}, Eun-chae Jeon^{**}, Tae-Jin Je^{**}, SangWon Woo^{**}, Do-Sun Choi^{**},
Yeong-Eun Yoo^{**}, Hwi Kim^{*,#}

(Received 1 August 2014; accepted 1 September 2014)

ABSTRACT

A transparent poly methyl methacrylate (PMMA) optical micro-pyramid array-pattern is designed and fabricated using an injection molding technique. The device's optical characteristics are tested and analyzed theoretically. In the optical pattern generated using the fabricated PMMA pattern, the components, due to not only refraction but also diffraction, are observed simultaneously. Wave optic modeling and analysis reveals that the energy ratio between the diffraction and refraction in the optical pattern are dependent on the critical dimension of the optical pattern such that the refraction and diffraction tend to be directly and inversely proportional to the pattern dimension, respectively.

Key Words : Diffraction(회절), Refraction(굴절), Planing(평삭), Injection molding(사출)

1. 서 론

최근 디스플레이 업계에서는 광효율을 높이고 제품에 쓰이는 광원의 수를 줄이는 광학 필름과 광학 플레이트 구조에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 재귀반사 패턴이나 광학 피라미드 패턴

이 대표적인 예이다.^[1,2] 광학 패턴에 대한 연구를 진행함에 있어서, 광선 추적 모델링 방식, 즉 기하광학 해석을 일반적으로 많이 사용하고 있는데, 기하광학만으로는 일정 크기 이하의 광학 패턴에서 일어나는 회절 광학 효과를 해석할 수 없다.

특히 마이크로 광학 패턴의 경우, 회절광학 효과가 기하광학효과보다 더 압도적으로 나타날 수도 있는데, 고품질의 마이크로 광학 소자를 만들기 위해서는 파동 광학을 기반으로 한 굴절 및 회절을 모두 고려한 설계/해석/평가 방법의 정립이 필요하다. 본 논문에서는 기존 연구^[3,4]를 통해 고안된 사각 피라미드 형태의 광학 플레이트를 제조하고, 이의 광학적 특성으로 실험적으로 관찰하였다. 기하광학 및 파동광학을 기반으로 실험결과를 비교 분석하였다. 또한 광학 패턴의 크기에 따른

* School of Electronics and Information Engineering, Korea UNIV.

** Dept. of Nano Manufacturing Technology, Korea Institute of Machinery and Materials

Corresponding Author :

School of Electronics and Information Engineering, Korea UNIV.

E-mail : hwikim@korea.ac.kr

회절과 굴절 효과의 연관성을 고찰하였다.

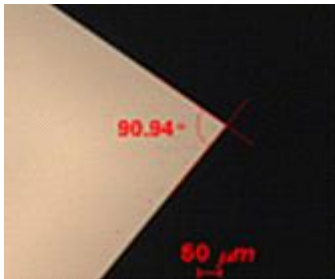
2. 광학 피라미드 패턴 제작

2.1 금형 가공

본 연구에서 회절특성 평가를 진행한 마이크로 피라미드 패턴은 초정밀 플레인너를 사용하여 제작하였다. 가로/세로 50 μ m, 높이 25 μ m, 꼭지각 90도를 목표로 하여, 90mm×60mm크기의 니켈 소재로 패턴을 가공하였다. 가공에 사용된 장비는 그림1의 도시바(Toshiba) UVM-450C이고, 가공속도

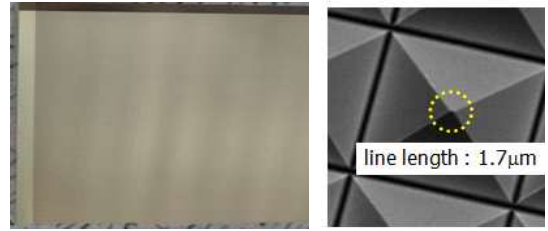


(a)



(b)

Fig. 1 (a) Ultra-fine planer machining system (Toshiba), (b) A diamond tool



(a)

(b)

Fig. 2 Machined square pyramid patterns on Ni mold

는 200mm/s로 하였다.

가공 시에는 90도 다이아몬드 공구를 사용하였고, 가공 표면을 좋게 하기 위해 중첩가공 방법^[5]을 사용하였고, 10+7+5+3+2+1 μ m로 절삭 깊이를 나누어 주었다. 그림2에서 보는 바와 같이, 가공된 양각의 사각피라미드 패턴을 SEM을 통해 관찰한 결과, 표면 상태가 매우 깨끗하게 가공됨을 확인하였다. 단, 피라미드 맨 윗부분의 꼭지점이 완벽한 점 형상으로 나타나지 않았음을 확인하였다. 피라미드의 꼭지점은 그림 2(b)와 같이 약 1.7 μ m 길이의 선으로 형성되었다. 가공이 덜 된 부분을 높이로 환산하기 위해 1.7 μ m의 밑변을 갖는 이등변 삼각형의 높이를 계산해 주었다. 계산한 결과 약 0.85 μ m로 확인되었고, 니켈에 가공된 양각의 사각 피라미드 패턴은 높이 약 24.1 μ m로 확인하였다.

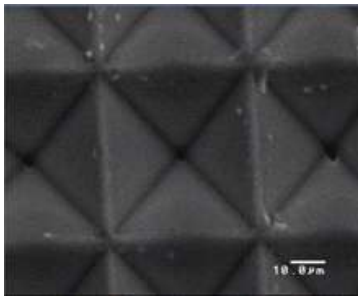
2.2 사출 성형

패턴이 가공된 금형과 사출성형 시 많이 사용되는 투명 PMMA(Poly methyl methacrylate)를 이용하여 마이크로패턴을 갖는 사출성형 플레이트를 제작하였다. 패턴이 성형되는 광학 플레이트의 크기는 가로 40mm, 세로 70mm, 높이 2mm이다. 실험에는 스미토모(Sumitomo)사의 SE-50D 사출성형기를 사용하였다.

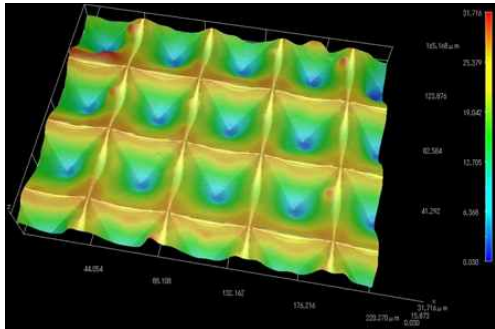
사각피라미드의 꼭지점 부분의 사출 성형이 어렵기 때문에 기존 연구^[6]를 통해 사출방향, 사출속도, 금형 온도를 최적화하였다. 사출방향과 수평방



Fig. 3 Injection molding system(Sumitomo)



(a)



(b)

Fig. 4 (a) 2D image of the pyramid pattern measured by SEM, (b) 3D profile of the pyramid pattern measured by a 3D optical microscope

향으로 형성되는 피라미드 사이의 경계는 낮은 온도에서도 선 형상으로 날카롭게 성형이 되었지만, 수평방향의 경계는 선 형상이 아닌 불룩한 모양으로 성형되었다. 이는 미세 패턴 성형 시 수지가 금형에 충전 되는 동안 표면에서부터 고화가 빠르게 진행되면서 유동성이 급격하게 저하되는

현상이 발생하여 패턴과 패턴 경계 부분이 웰드라인이 형성되어 미성형이 발생된 것으로 판단할 수 있다^[7]. 따라서 금형 온도를 80도로, 사출속도를 150mm/s로 성형 조건을 최적화하였다. 최적화 된 후 사출성형 된 플레이트는 사출방향과 수직, 수평을 이루는 두 방향의 경계가 모두 선 형상으로 사출됨을 확인하였다. 제작된 음각의 사각피라미드의 크기를 측정해 본 결과 가로는 50 μ m로 가공된 금형과 같은 크기로 측정되었으나 높이는 22 μ m로 금형에 비해 낮은 높이로 측정되었다.

3. 광학 패턴 관측 및 해석

3.1 광학 실험

그림 5에서 나타낸바와 같이 사출된 플레이트에 레이저빔을 수직 입사시켜 리어 스크린으로 관찰하는 방식의 광학 실험을 통해 스크린에 맺히는 이미지를 관찰하였다. 실험과 같은 조건으로 시뮬레이션을 수행할 수 있도록 레이저, 플레이트, 스크린 간의 간격을 지정한 후 광학 실험을 진행하였다.

633nm He-Ne 레이저를 플레이트에 통과시켰고 리어 스크린에 맺히는 이미지를 관찰하였다. 이때 그림6과 같이 두 개의 직선이 수직/수평 방향으로 나타났고 이 직선들 사이를 이어주는 4개의 곡선이 관찰되었다.

직선이 아닌 곡선이 나타나는 현상은 피라미드의 모서리부분이 수평면에 있지 않고 공간적으로 기울어져 있기 때문에 나타나는 현상이다. 광학

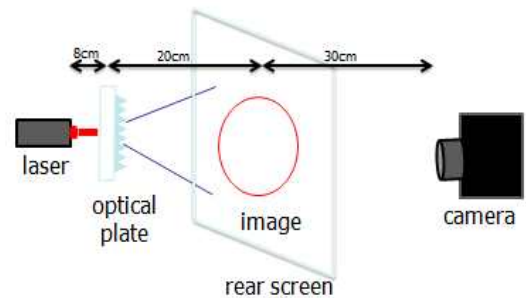


Fig. 5 Experimental setup for optical pattern generation

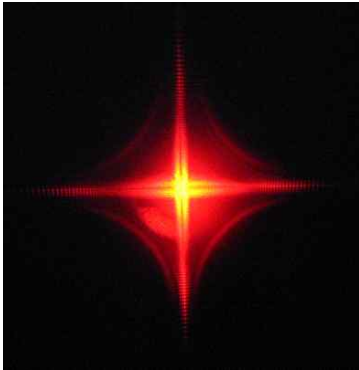


Fig. 6 Optical pattern generated by the micra-pyramid patterns under the normal incident illumination of a 633nm HeNe laser

실험에서 레이저 빔은 사각 피라미드의 4개의 면과 모서리 부분에 입사하게 되는데, 면에 입사하는 빛은 굴절을 겪게 되고, 모서리와 꼭지점 부근을 지나게 되는 빛은 회절을 하게 된다. 피라미드 네면에 의해 굴절된 레이저빔의 네개의 방향이 다른빔으로 갈라지게 된다. 한편, 모서리가 공간적으로 입사면에 평행하지 않기 때문에, 곡선형태의 회절패턴을 만들어내게 되는데 이를 conical diffraction이라 부른다^[8,9]. 수직/수평 방향으로 나타난 두 개의 직선 역시 바둑판 형태로 배열되어 있는 사각 피라미드의 밀변에 의해 생기는 회절현상이다.

본 연구에서는 그림6을 실험 현상을 설명함과 동시에 피라미드 구조의 스케일에 따라 광학패턴에서 굴절광과 회절광의 기여하는 정도가 어떠한 비율로 바뀌는지, 즉 구조 스케일에 따른 굴절과 회절 효과의 상대적인 발생 비율을 다음 장에서 분석하였다.

3.2 기하광학 시뮬레이션 해석

3.1의 광학 실험에서 나타난 결과가 회절에 의한 결과임을 확인하기 위해 광학 시뮬레이션을 실시하였다. 우선 굴절이 아닌 회절에 의해 곡선이 나타나는 것임을 확인하기 위해 굴절효과는 관

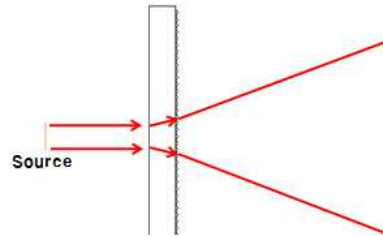


Fig. 7 Schematic diagram of optical simulation (ZEMAX)

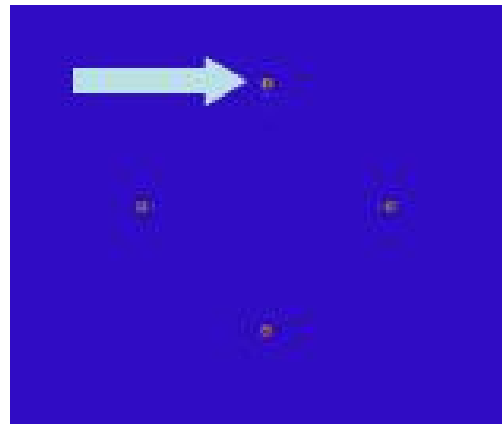


Fig. 8 Optical analysis results of Zemax

찰이 가능하지만 회절효과는 관찰할 수 없는 기하광학 해석 상용소프트웨어 ZEMAX를 사용하여 광학해석을 수행하였다.

시뮬레이션을 진행하기 위해 CATIA를 이용하여 사출된 플레이트의 모델링하였다. 모델링된 플레이트를 상용소프트웨어로 읽어 들여 광특성 해석을 진행하였다. ZEMAX는 광학 시스템으로부터 관찰자가 지정해준 거리에서의 빛의 경로와 그 위치에서 맺히는 상을 관찰할 수 있는 기하광학 해석 시뮬레이터(ray tracing 툴)로서, 그림 5의 광학 실험 셋업을 동일하게 모델링하여 광 패턴을 해석하였다. 굴절효과만 관찰이 가능한 기하광학해석의 시뮬레이션의 결과는 사각 피라미드의 네 면에서 나온 4개의 밝은 빛만 관찰되었다.

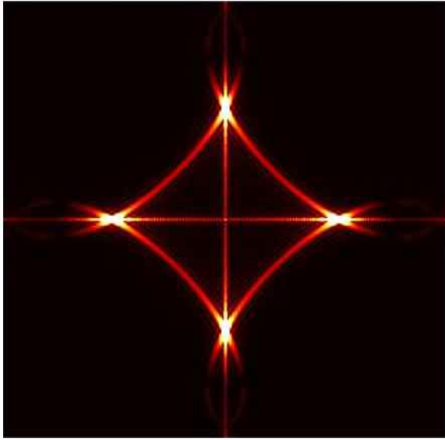


Fig. 9 Optical analysis results of wave optic modeling

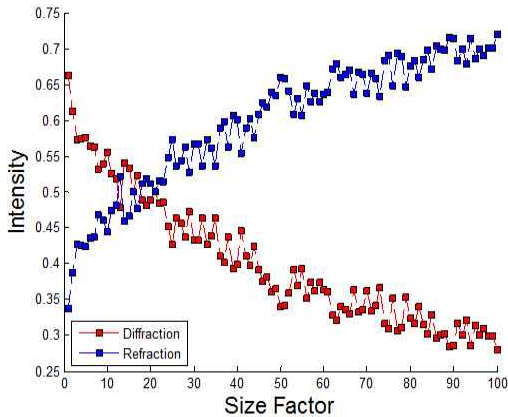


Fig. 10 Relationship of pyramid structure scale and the relative ratio of diffraction and refraction effects

3.3 파동광학 시뮬레이션 해석

회절효과와 굴절효과, 패턴의 크기에 관계를 알아보기 위해 파동광학 기반 광특성 해석을 수행하였다. 이를 위해 회절광파의 Angular spectrum 표현공식을 이용^[10,11]하고, 사각피라미드의 높이, 가로/세로를 지정할 수 있도록 하는 파동광학 시뮬레이터를 구현하였다. 제작된 마이크로 패턴과 같이 가로/세로 50 μm , 높이 22 μm 로 디자인을 해 주었을 때 그림 9와 같은 시뮬레이션 결과를 얻을

수 있었다. 그림 6의 실험결과와 흡사한 수직, 수평방향의 두 직선과 마름모꼴의 네 곡선을 같은 결과를 보여준다.

마지막으로 사각 피라미드 패턴의 크기의 변화에 따른 굴절, 회절 효과를 해석하였다. 피라미드의 비율은 일정하게 유지하되 크기를 100배까지 (가로/세로 50000 μm , 높이 22000 μm) 키워 회절효과와 굴절효과를 관찰하였다. 이 결과 그림10과 같이 약 20배 즉, 가로/세로 1000 μm , 높이 4000 μm 에서부터 굴절이 회절보다 더 높이 나타남을 확인하였다. 따라서 사각피라미드 패턴의 크기가 mm의 단위를 가지기 시작하면서 굴절의 효과가 더 상승됨을 알 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 고안된 사각 피라미드 형태의 광학 플레이트를 제조하고, 이의 광학적 특성으로 실험적으로 관찰하였다. 기하광학 및 파동광학을 기반으로 실험결과를 비교 분석하였다. 또한 광학 패턴의 크기에 따른 회절과 굴절 효과의 연관성을 고찰하였다.

1. 마이크로 피라미드 패턴의 금형을 가공하고 사출 성형으로 광학 플레이트를 제작하였다.
2. 사출된 마이크로 피라미드 플레이트의 광특성을 평가하였고 십자가 모양의 패턴과 마름모꼴 모양의 곡선 패턴이 나타남을 확인하였다.
3. 기하광학 해석툴 ZEMAX를 이용해 굴절효과만 고려한 결과 선 형상이 없이 피라미드 네 면에서 굴절되어 나간 네 개의 점만 확인되었다.
4. Angular spectrum 모델링을 이용해 굴절효과와 회절효과를 고려해 시뮬레이션을 한 결과 광학 실험 시 나타난 결과에 부합하는 광학 패턴을 확인하였다.
5. 피라미드의 크기를 증가시키며 굴절과 회절의 효과를 확인 한 결과 피라미드의 크기가 1mm가 넘어가게 되면 굴절효과가 회절효과보다 높아짐을 확인하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부 산업융합원천기술개발 사업 “100nm~100 μ m 나노복합구조물응용제품 생산을 위한 금형가공 및 에너지 10% 절감 성형시스템 개발”과 산업기술연구회 한국기계연구원 기관고유사업 “그린에너지 기기 양산화 기술지원센터 구축사업”의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- (1) Saghai H.R , “A study in optical properties of AlGaIn/GaN pyramid and prism-shape quantum dots,” *Physica E*, Vol. 41 Issue 2, pp. 245-253, 2008.
- (2) Karl M., “Reversed pyramids as novel optical micro-cavities,” *Superlattices and Microstructures*, Vol. 47 Issue 1, pp. 83-86, 2010.
- (3) Jeon E.-c., “Optimization of Hybrid LED Package System for Energy Saving Based on Micro Machining Technology and Taguchi Method,” *Inter. J. of Prec. Eng. and Manufacturing*, submitted.
- (4) Jeon E.-c., “Development of hybrid LED package system having micro optical pattern based on micro machining technology and Taguchi method”, *MNE*, 37th, pp.475, 2011.
- (5) Je T.-J., “Improvement of machining quality of copper-plated roll mold by controlling temperature variation,” *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol. 21 No. 4, pp. 37-41, 2011.
- (6) Woo S.-W., “Study on injection molding of micro pattern diffusion plate for LED lighting”, *KSPE*, Vol. 10, pp. 271-272, 2012.
- (7) Jeon E.-c., “ Manufacturing of micro-pyramid patterns and verification of their optical effects”, *ICOMM*, No. 014, pp. 467-472, 2013.
- (8) Kim H., in preparation for submitting to an academic journal.
- (9) Kim H., “Mathematical modeling of the triangle-mesh-modeled three-dimensional surface objects for digital holography,” *Applied Optics*, Vol. 47 No. 19, pp. 117-127, 2008.
- (10) Kim H., “Geometrical analysis of optical transmission characteristics of prism sheet layers,” *Optical Engineering*, Vol. 44 No. 12, pp. 128001-1 - 128001-11, 2005.
- (11) Kim H., “Geometric optics analysis on light transmission and reflection characteristics of metallic prism sheets,” *Optical Engineering*, Vol. 25 No. 8, pp 084004 2006.