

초정밀 기계가공 기반의 스캐닝용 마이크로 하이브리드 렌즈의 설계 Design of Ultraprecision machining based micro-hybrid lens for scanning

*유동윤¹, #이선규¹, 이차범²

*D.Y. Yoo¹, #S.K.Lee (skye@gist.ac.kr), C.B.Lee²

¹광주과학기술원 기전공학부, ²LG디스플레이 광기술사업부

Key words : hybrid lens, refractive-diffractive, micro lens, ultra precision machining

1. 서론

최근 스마트폰, 넷북 등의 휴대용 스마트 기기의 발전과 휴대기기의 소형화로 IC칩과 같은 전자기기의 소형화뿐만 아니라 기기의 모든 구성요소의 소형화를 요구하고 있다. 휴대폰 카메라, 스캐닝 장치 등에 사용되는 광학 소자도 초소형화되고 있다. 특히 초소형 스캐닝 장치의 개발에 있어서 수백 마이크론의 직경과 초점을 갖는 초소형 마이크로 레벨의 렌즈는 필수적이다.

스캐닝을 위한 렌즈는, 결상렌즈로서 얇고 가볍고 비싸지 않은 장점이 있는 회절 렌즈를 많이 사용한다.[1] 또한 초소형 시스템에 적용하기 위해서 짧은 초점거리에 넓은 결상면을 가져야 한다. 그러므로 초소형 스캐닝용 렌즈는 높은 NA(Numerical Aperture)와 높은 결상 효율을 요구한다. 하지만 높은 NA와 결상 효율을 갖는 마이크로 렌즈는 큰 색수차와 작은 회절 효율의 단점이 있는 단일 회절 렌즈만으로는 만들기 어렵다.[1] 이런 단점의 보완에 MOD (Multi-Order Diffractive) 렌즈, 이중 렌즈(Doublet), 혹은 하이브리드(Hybrid refractive-diffractive) 렌즈를 사용한다. 그 중에서 굴절면과 회절면의 특성을 혼합한 하이브리드 렌즈는 큰 색수차를 줄일 수 있고, 회절 한계까지 효율을 올릴 수 있다.[1-2] 초소형 렌즈의 가공은 MEMS가공, 레이저가공, 초정밀기계가공을 사용한다. 연속적인 곡면 가공은 광학 효율을 떨어뜨리지 않는 면에서 높은 효율의 렌즈를 제작하려면 초정밀 기계가공이 필요하다.

본 연구에서는 초정밀 기계가공을 기반으로 높은 NA와 회절 효율을 갖는 마이크로 렌즈를 제작하기 위해서 굴절과 회절 특성을 고려하였고 소형화를 위해 구면 위에 비구면 프레넬 렌즈를 혼합하여 하이브리드 설계를 적용하였다. 렌즈의 굴절면 특성은 Code V로 최적화하였고, 회절면 특성은

RCWA 방식을 사용하여 회절면의 깊이와 프레넬 렌즈 엣지의 주기와 회절효율의 관계에 대하여 최고 효율을 갖는 깊이와 패턴의 최소폭을 구하여 설계에 적용하였다. 또한 렌즈의 최대 직경은 가공시 사용되는 공구의 각도 한계에 맞춰 설계하였다. 이와 같은 방법으로 초정밀 기계가공 기반의 높은 NA와 효율을 갖는 하이브리드 렌즈를 설계하였다.

2. 하이브리드 렌즈 설계

하이브리드 렌즈는 굴절면과 회절면의 이중 렌즈 형태의 렌즈로 구성된다. 렌즈를 얇게 제작하기 위해 그림1과 같이 구면(비구면)과 프레넬 면을 혼합하였다.

먼저 렌즈의 굴절특성의 설계는 광학 설계 툴 Code V로 하였다. 굴절특성은 식(1)의 비구면식에 의해 결정된다.

$$Z(r) = \frac{cr^2}{(1 + \sqrt{1 - (1+k)cr^2})} + Ar^4 + Br^6 + Cr^8 + Dr^{10} + \dots \quad (1)$$

렌즈의 광원은 468 nm 청색 광원으로 설정하고, 렌즈 초점거리 300 μm , 직경 500 μm , 물질은 PMMA(index=1.4985)를 기준으로 이중 렌즈의 곡률(c)과 비구면 계수(A, B, C, D)를 Transverse Ray Aberration Error Function을 사용하여 렌즈면 형수차가 최소화되도록 최적화하여 구하였다.

또한 단일 렌즈와 이중 렌즈의 특성을 비교하기 위해 렌즈 초점거리 300 μm 와 직경 500 μm 로 동일하게 렌즈를 설계하여 결상 렌즈 평가 척도인 MTF(Modulation Transfer Function)와 Spot Diagram을 비교하였다.

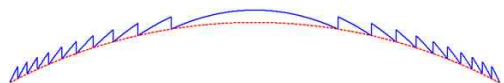


Fig. 1 Hybrid Refractive-Diffractive Fresnel Lens

Table 1. Comparison of Lens Optimization Result

	Singlet	Doublet	
		비구면/구면	비구면/비구면
MTF	70% (20 l/mm)	Diffraction limit	Diffraction limit
Spot Size	250 μm^2	36.3 μm^2	9.1 μm^2

이중 렌즈는 구면과 비구면, 비구면과 비구면을 결합한 경우를 각각 비교하였다. 표1의 결과에서 볼 수 있듯이 라인의 분해능인 MTF면에서 단일 렌즈는 20 line/mm를 70%이고 이중 렌즈는 회절 한계의 MTF를 보여서 결상에 이중렌즈가 유리하다. 또한 빛이 모이는 정도인 Spot size로 보면 비구면/구면 혹은 비구면/비구면 조합의 이중렌즈가 결상렌즈로써 이상적이다.

하이브리드 렌즈는 단일 렌즈가 가지는 큰 색수차의 분산 특성을 다음 식(2)와 같은 렌즈 두께를 적용하여 줄어든다.[1]

$$t = \frac{m\lambda}{n-1} \quad (2)$$

(n은 굴절률, λ 는 파장, m은 차수)

또한 프레넬 면은 modulus function(MOD)으로 구면(비구면)을 평면 프레넬 면으로 변환이 가능하다.[3] 그러므로 프레넬 렌즈의 두께를 (2)에 따라 결정하여 분산이 적게 일어나도록 설계할 수 있다. 이 때, 프레넬 엣지의 크기가 회절효율에 큰 영향을 미친다. 이러한 점을 분석하기 위하여 벡터 방식의 Grating 해석 방법인 RCWA방식을 사용하여 렌즈의 두께와 프레넬 엣지의 주기에 따른 회절효율을 구하였다.

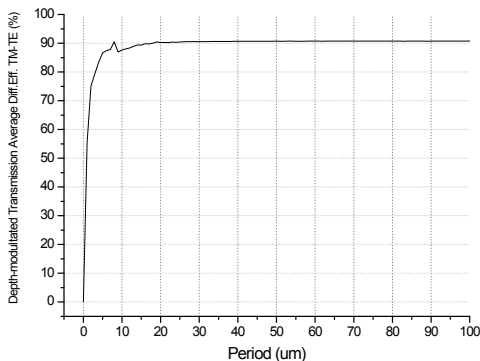


Fig. 2 Depth-modulated Transmission TE-TM wave Average Diffraction Efficiency with period of Fresnel edge

기준된 파장과 굴절률 토대로 m에 따라 렌즈의 두께를 변화시키며 회절 효율을 관찰하였다. 가장 높은 회절효율은 m=1인 깊이 0.94 μm 이었다. 그림2 처럼 주기가 길 때 회절효율이 90.7%의 높은 효율과 주기가 5 μm 이하일 때 회절효율이 급속히 낮아져 1 μm 에서 55.3%이었다. 그러므로 렌즈 전영역에서 55%이상의 회절 효율을 유지하려면 프레넬 엣지 최소주기가 1 μm 이상으로 설계해야한다.

위의 설계를 통해서 얇은 초점의 높은 회절효율 렌즈의 설계가 가능했다. 마이크로 렌즈 설계에서 광학 설계뿐만 아니라 초정밀 기계가공의 한계를 고려해야한다. 프레넬 엣지의 주기에 따라 가공 한계가 달라지는데, 위의 광학 설계를 토대로 최소 공구 여유각을 선삭 공구 최소 window각 30도를 기준으로 하여 가공 가능한 최대 직경은 비구면/구면 조합은 423.4 μm , 비구면/비구면 조합은 487.4 μm 으로 구하였다. 또한 두 가지 설계에서 변경된 직경에 따라 각각 0.65, 0.73의 높은 NA로 계산되었다.

3. 결론

스캐닝에 요구되는 결상 렌즈의 높은 분해능과 회절효율을 위해 굴절-회절의 하이브리드 설계를 하였고, 초정밀 기계가공의 가공한계를 적용하여 0.65, 0.73의 높은 NA의 마이크로 하이브리드 렌즈를 설계할 수 있었다.

후기

본 연구는 GIST 솔라에너지연구소 차세대 태양 전지 기술 개발 및 연구기반 구축사업의 지원과 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 20110018621).

참고문헌

1. D.W. Sweeney, G.E. Sommargren, "Harmonic Diffractive Lenses", Appl. Opt. Vol. 34, No.14, 2469-2475.
2. T.Stone, N.George, "Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats", Appl.Opt. Vol.27, No.14, 2960-2971.
3. J.Yan, K.Maekawa, J.Tamaki, T.Kuriyagawa, "Micro grooving on single-crystal germanium for infrared Fresnel lenses", J.Micromech.Microeng. 15(2005) 1925-1931.