

비축대칭 Glass Array Lens 의 설계 및 개발

Design and Development of Asymmetry Glass Array Lens

✉박순섭¹, 황연¹, 이기용¹, 김건희², 원종호³
✉Soon Sub Park¹, Yeon Hwang¹, Ki Young Lee¹, Geon Hee Kim² and Jong Ho Won³

1 한국생산기술연구원 호남권기술지원본부 (Honam Technology Division, Korea Institute of Industrial Technology)

2 한국기초과학지원연구원 연구장비개발부 (Division of Instrument Development, Korea Basic Science Institute)

3 충남대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University)

✉ Corresponding author: pss4633@kitech.re.kr, Tel: 062-600-6151

Manuscript received: 2008.6.16 / Revised: 2008.9.10 / Accepted: 2008.9.15

Asymmetric glass lens core for portable projection optic system was designed and simulated. And it was machined by newly developed non-rotational ultra precision grinding method. With the designed lens data which optimized for multi-collimation, we generated the WC core surface data. Mold pressing conditions analyzed by FEM. In the machining process, ground profile errors were compensated based on measured data, minimized feed rate and depth of cut. The deviations of machined core profile were acceptable level for glass mold press. Mold pressed glass array lens was coated with SiO₂ and Ta₂O₅ for anti-reflection.

Key Words: Asymmetric Surface (비축대칭곡면), WC Core (초경코어), Ultra-precision Grinding (초정밀 연삭), Micro-array Lens (마이크로 어레이 렌즈), Micro-array Chip (마이크로 어레이 칩), Laser Diode (LD: 레이저 다이오드)

1. 서론

휴대형 차세대 디스플레이 기기의 필요성이 증대되는 상황에서 각국의 치열한 영상시장 경쟁에서 소외되지 않기 위해서는 기술 미성숙 분야인 휴대용 프로젝션 디스플레이 장치에 대한 개발이 시급하다. 여러 가지 후보기술 중 특히 반도체광원(LD/LED 등)을 이용한 프로젝션 시스템은 공간 절약과 색 재현성, 응답속도 면에서 뛰어나 우수한 기술로 인정받고 있다. 기술적으로 반도체광원을 이용한 프로젝션 시스템은 다중 레이저 다이오드 Source Module 은 마이크로 어레이 렌즈(Micro-array lens)와 마이크로 어레이 칩(Micro-array chip)을 고정시킨 후 와이어 본딩을 통해 개별 LD 칩을 동시에 제어할 수 있는 패키지화된 칩 배열 형태가 필요하다.

Fig. 1 과 같이 글라스 재질의 LD 어레이에서 방출되는 레이저 빔을 마이크로 어레이 렌즈에서 시준 및 집광을 하여 콘덴서 렌즈에서 빔을 한 점으로 모아 여기에서 제어된 방향에 의하여 스크린에 이미지를 구현하도록 최적 설계되어야 한다. 이는 앞선 연구에서 개발한 비축대칭 렌즈의 소형화 및 집적화된 어레이의 개념으로 볼 수 있다.

그러나 기술적으로 가공의 면적이 훨씬 넓어지고 반복 형상간의 형상오차에 민감하기 때문에 한 차원 높은 수준의 설계, 가공, 성형 기술이 요구된다. 세부적으로는 설계에 사용된 마이크로 어레이 칩의 파장대역은 640nm 이며, Emitter pitch 는 300 μ m, Number of emitter 는 30EA, Beam divergence 는 Slow 축과 Fast 축이 8 과 40 degree 이다. 적용된 렌즈 구조는 Slow 축과 Fast 축에서 발진되는 타원형의 레이저 빔을 효과적으로 Beam shaping 할 수 있는 비

구면 실린더 렌즈 어레이를 사용하여 모노 그래픽 레이저 광원 프로젝션 디스플레이에 적용되었다.²

2. 광학설계

레이저 다이오드로부터 방사되는 빔의 단면은 Fig. 1 과 같이 발광부의 단면적이 비대칭으로 인하여 빔이 타원형 모양을 하고 있다. 이러한 가시광선대역의 빔을 디스플레이 장치에 응용하기 위해서는 레이저 빔을 레이저 shaping 기능을 수행할 수 있는 광학 부품이 필요하다.^{1,4}

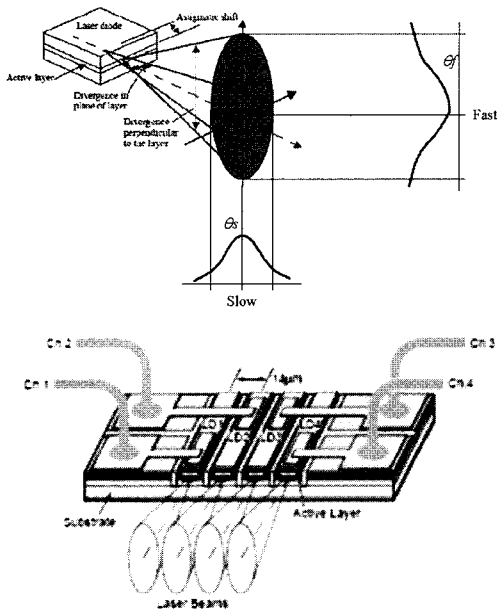


Fig. 1 Property of laser diode beam and arrayed lens package

본 연구에서는 가우시안 빔의 회절현상에 의한 빔 퍼짐을 방지하기 위하여 마이크로 어레이 렌즈에서 콜리메이터 구조를 채용하지 않았으며, SAC 과 FAC 렌즈를 정렬하는 공정을 생략하기 위하여 Slow 축과 Fast 축을 결합시킨 구조의 어레이 렌즈 방식을 고안하여 최적설계에 반영하였다. 광학설계는 CODE-V 의 ‘Ray Tracing, Gaussian Beam Tracing,’ 기능을 이용하여 마이크로 어레이 렌즈, 콘덴서 렌즈의 최적설계를 시행하여 image(screen)에서의 입력 빔 개수에 대한 스폿 사이즈(spot size)를 가우시안 빔 점 퍼짐 함수(Gaussian point spread function)를 이용하여 계산하였다. 광학계의 정렬오

차에 대한 스폿 크기의 변화는 CODE-V 내에서 지원되는 자체 매크로인 Macro-Plus TM 를 수정하여 일괄적으로 계산하였다. 점 퍼짐 함수는 광원을 점 광원이라 보고 이를 바탕으로 하여 광학계의 점 퍼짐 함수를 계산하여 광학계의 분해능을 계산하는 방법이다. 점 퍼짐 함수는 입력 빔의 모드가 렌즈에 의해 결상이 되었을 때, 모드가 변형된 정도라고 볼 수 있으므로, 이를 이용하여 렌즈의 분해능을 계산할 수 있다.

Gaussian Beam Tracing 은 분석할 광학계를 지나는 광선을 근축 근사된 가우시안 빔(paraxial Gaussian beam)이라 가정하여 광학계의 분해능을 계산하며, 사용자에게서 가우시안 빔의 정보를 입력 받게 된다. 이를 기반으로 하여 입력 빔과 스크린상의 가우시안 빔의 형태를 분석하여 분해능을 계산하게 된다.

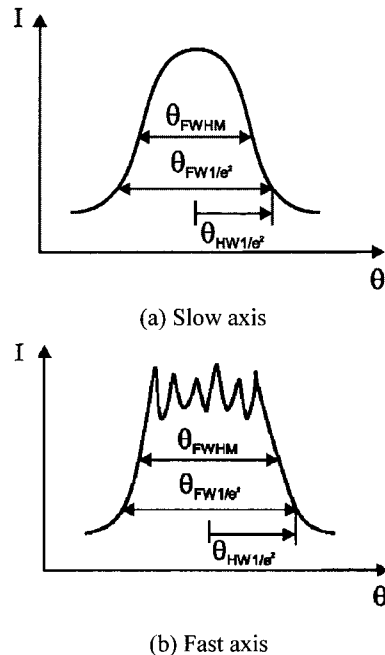


Fig. 2 Pupil intensity of laser beam

또한 사용된 레이저 광은 사용자에게 의해 특별히 지정되므로 ‘Interferogram files’ 기능을 이용하여 사용자가 정의한 광선을 사용하여 광학계의 분해능을 계산하였다. CODE-V 를 이용한 스크린상의 스폿 크기에 의한 분해능의 계산은 광선추적에 기반을 둔 Ray Trace 과 Gaussian Beam Tracing 방법을 병행하여 사용하였다.

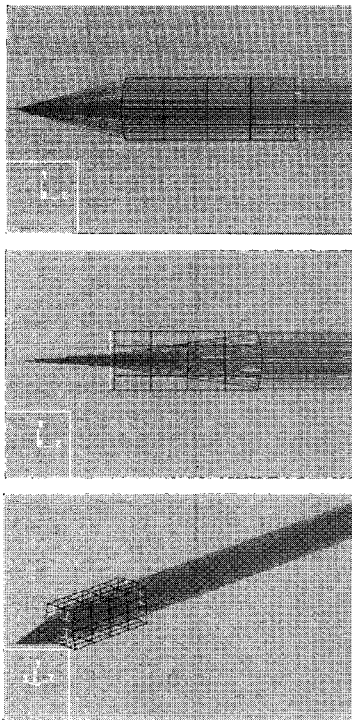


Fig. 3 Condensing of laser beam with cylindrical aspheric lens

점 퍼짐 함수에 영향을 주는 광학계의 요소는 광학계를 구성하는 렌즈의 수차와 동(pupil)의 형태와 빔 진행 거리에 의존한다. 여기에서 다루는 광학계의 동(pupil)의 형태는 모두 레이저 다이오드에서 발산되는 빔이 스크린에 맺힐 때의 형상인 타원과 근사 사각형이며, 점 퍼짐 함수에 의해 결정되는 Strehl 비에 의해 가우시안 빔 스폿 크기가 결정된다. 따라서 가우시안 빔 스폿 크기의 조절은 3 차 수차에 의하여 표현 될 수 있다. 따라서 각 레이저 어레이용 마이크로 렌즈 어레이의 종류별 성능에 대한 특성 판단은 Strehl 비의 계산에 의한 가우시안 빔 스폿 크기로 귀결된다. 레이저 광의 Pupil intensity 는 Fig. 2 와 같이 Relative X Coordinate(Slow 축)와 Relative Y Coordinate(Fast 축)로 구분하며, $1/e^2$ intensity 에서 50%의 Pupil intensity(Gaussian shap mode)인 빔을 'Interferogram files'로 생성하여 성능평가에 활용하였다. 마이크로 렌즈 어레이의 설계는 Fig. 3 과 같이 1 개의 렌즈계로 초기설계 데이터를 만들어서 가우시안 빔 스폿 크기를 목적함수로 하여 최적화 시키면 개략적인 렌즈 형상데이터를 얻을 수 있다. 하지만 이

러한 방법은 최종적인 광학사양(Spot size: <0.6 mm (FWHM), Screen size: 17" @4:3 비율, 스크린의 Resolving power: 640*480@QVGA 등)을 목적함수로 하지 않기 때문에 렌즈의 어레이 배치와 콘덴서 렌즈 배치를 하여야 한다.

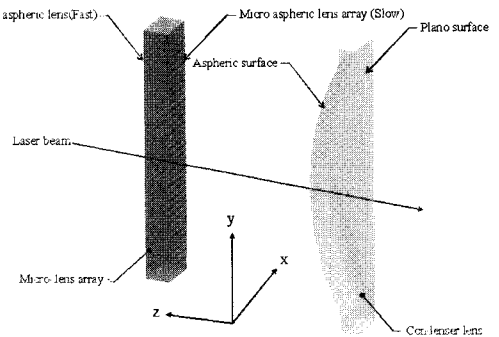
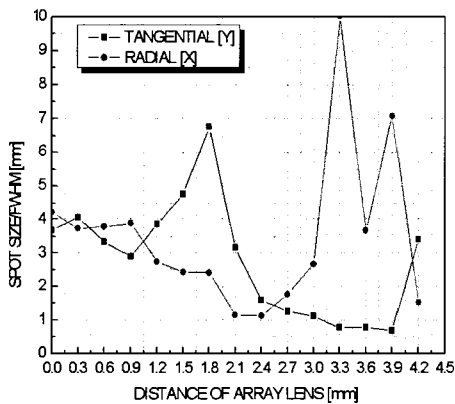


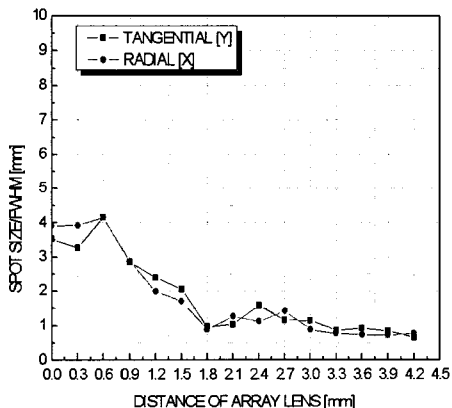
Fig. 4 Micro-lens array and Condenser lens

따라서 본 연구에서는 레이저 다이오드에서 발산되는 빔이 마이크로 렌즈 어레이를 지나면 비점수차를 보정하고, 빔의 경로를 약간 확대시켜 콘덴서 렌즈에서 빔을 집광하는 역할을 하는 구조로 최적설계를 수행하였다. 미세광학 소자의 배열은 Fig. 4 의 레이저 디스플레이 장치의 공간을 최대한 활용하는 구조인 사각기둥형이며, 광 축에 대해 선형 배열을 하고 렌즈 어레이와 콘덴서 렌즈가 배열되고 레이저 집광과 스크린으로 구성되어있다. 또한 레이저 어레이의 모든 빛이 통과하여 결상할 수 있도록 유효경을 0.3m 로 정의하고 렌즈 어레이에 사용된 글라스 재질을 L-LAH81 ($nd=1.806100$, $vd=40.40$)을, 콘덴서 렌즈는 L-BAL42 ($nd=1.583126$, $vd=59.38$)의 광학 글라스를 사용하였다. 스크린에서 가우시안 빔 스폿 크기를 목적함수로 하여 최적화를 시행한 결과 Fig. 5 의 (a)와 같이 레이저 어레이의 중심(0.0)에서 가장자리(4.2)까지의 가우시안 빔 스폿 크기가 균일하지 않은 것을 볼 수가 있다. 다수개의 광원을 사용하는 광학계에서 렌즈 어레이가 동일한 렌즈로 구성되어 배치만 되어있다면, 콘덴서 렌즈를 통하여 광학 수차가 커지고 Strehl 비가 작아져서 가우시안 빔 스폿 크기가 균일하게 분포되지 않는다. 그래서 광학 설계의 최적화는 30 개의 레이저 다이오드에 대한 빔 모델링을 하고 레이저 스캐닝 광학 시스템(laser scanning optical system)의 사양과 같이 렌즈 어레이 및 콘덴서 렌즈, 폴리곤 미러, 스크린을 구성하고,

각각의 부품들의 광학사양(nd, vd, CA, CT, R, k 등)을 정의하였다. 정의된 광학계에 레이저 빔이 발산되어 각각의 광학 부품을 통하여 스크린에 맺히는 가우시안 빔 모드를 분석하였다. 이때 사용된 오차 함수는 선 퍼짐 함수(line spread function), 점 퍼짐 함수(Point spread function)등을 사용하여 렌즈 어레이의 각각의 곡률, 두께를 최적화 수행하였다. 그 결과 마이크로 렌즈의 곡률과 두께를 각각 최적화시키는 방법이 가장 균일한 가우시안 빔 스폿 크기를 얻을 수 있었다. Fig. 5는 렌즈 어레이의 곡률, 두께를 각각 최적화한 렌즈 (Different aspheric array lens) 와 동일한 마이크로 렌즈의 배치로 이루어진 렌즈(Equivalent aspheric array lens)의 가우시안 빔 스폿 크기 균일도를 나타내며, Different aspheric array lens 가 좋은 성능을 나타낸다.

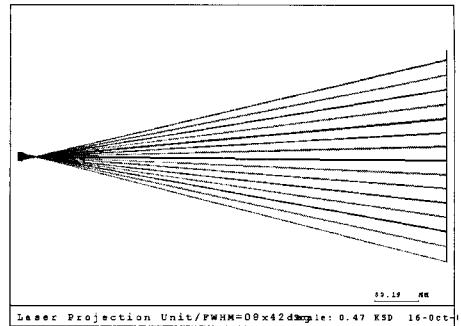


(a)

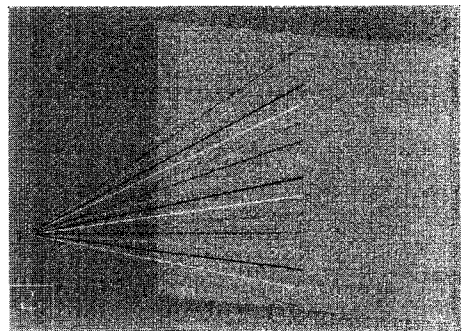


(b)

Fig. 5 Comparison of equivalent aspheric array lens & different aspheric array lens

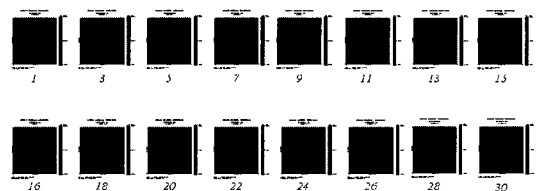


(a)

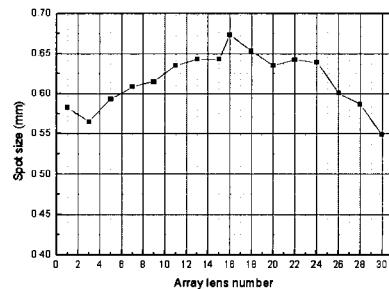


(b)

Fig. 6 Optimization of 635 nm Micro-lens array & Condenser lens



(a) Gaussian beam size analysis by point spread function



(b) Uniformity of beam size

Fig. 7 Gaussian beam size analysis and uniformity

따라서 본 연구에서의 635nm 광 반도체 광원

을 사용하는 마이크 렌즈 어레이 및 실린더 렌즈를 이용한 레이저 빔 스캐닝 광학계의 최적화는 Different aspheric array lens 형상으로 Fig. 6 과 같이 최적 설계되었다. 스크린에 스캐닝 되는 반도체 빔의 형상과 크기를 가우시안 빔 회절을 고려한 분석을 한 결과를 Fig. 7 의 (a)와 같이 Point spread function 에 의한 가우시안 빔 크기로 나타내었고, (b)와 같이 마이크로 렌즈 어레이를 이용한 레이저 beam shaping 으로 총 30 개의 빔이 스크린에서의 각각의 가우시안 빔 크기가 0.68~0.56mm 로 균일한 광학계를 설계하였다.

LD bar 에 렌즈가 정렬되기 위해서는 레이저 다이오드의 광 축과 렌즈의 광 축을 정렬하는 것이 가장 중요하다. Fig. 8 의 TOH(Tolerance of Optical Axis Height)는 렌즈를 마운트에 정렬하기 위한 거리로서, $\pm 5 \mu\text{m}$ 이하의 정렬 오차범위를 가진다. Spot size(0.6mm)에 대해서 유효하지만, 광 축이 스크린에 대해 0.176° 기울어지는 특성이 생기는 특성이 발생한다. 이러한 광 축 정렬을 하기 위해서는 마이크로 렌즈 어레이를 제작할 때 H(전체 높이)에 대한 공차)와 FTT(Flange Thickness Tolerance)는 금형의 정밀도를 고려하여 $\pm 5 \mu\text{m}$ 이내로 규정하였다. 렌즈가 마운트에 정렬될 때 렌즈 밑면과 마운트의 면과의 기울기인 θ 는 $\pm 0.8^\circ$ 이하에서 Spot size 가 유효하지만, 레이저 빔이 스크린에 스캐닝 될 때 광 축이 스크린에 대해 0.12° 기울어지는 특성이 생기는 특성을 가지고 있다. 또한 Slow axis collimation Lens Pitch 는 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 이내로 제작되어야 한다.

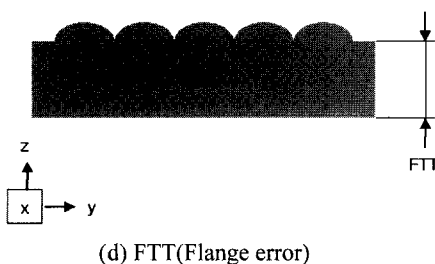
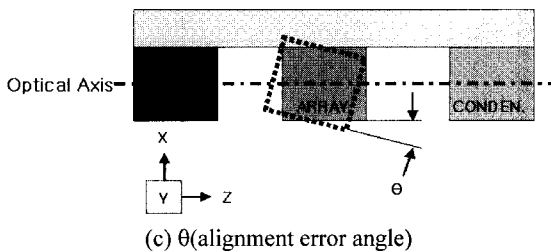
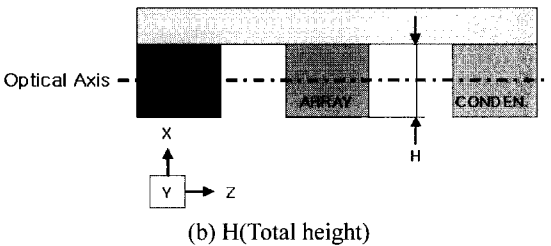
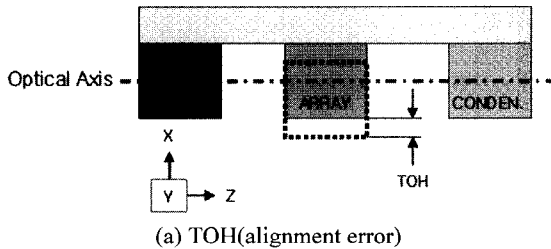


Fig. 8 Error parameters of Micro array lens

3. 렌즈 어레이 금형 설계 및 초정밀 가공

본 연구에 사용되는 어레이를 성형하기 위해서는 기존의 광학 금형 구조를 이용하면 효과적인 렌즈 성형을 할 수가 없다. 따라서 본 연구에서는 WC sleeve 속에 최적화된 연마 글라스 gob(유리소재)를 초정밀 가공된 비축금형 코어 사이에 투입하여 성형하는 구조로 금형 설계를 하였다. 글라스재료의 마이크로 렌즈 어레이 성형 금형은 WC sleeve 와 최적화된 연마 글라스 gob 가 상/하형 금형 사이 동시에 투입되고, 성형 후 취출이 용이하고 사각형의 렌즈 외곽이 완전 성형되어야 하므로, 상하 코어의 정밀도 결정을 할 수 있는 구조를 구비하여야 하며, 정확한 위치결정과 안정적인 체결, 금형 온도의 균일성 확보, 냉각온도의 균일성 확보를 위하여 렌즈성형에 의한 가공 정도 요인을 분석하고 금형 구조, 자중, 위치결정, 금형 코어 변형에 의한 렌즈정밀도 등의 여러 가지 지배인자의 영향을 고려하여 진행하였고, 렌즈성형 시 렌즈를 성형하는 금형 코어의 변형에 대한 FEM(Finite Element Method) 분석을 통하여 금형의 변형 정도를 해석하여 설계에 반영하였다. 성형압력에 따른 렌즈 정밀도는 금형의 코어가 변형에 의해 다시 본 위치로 돌아오려는 물리적 재료특성이 있기 때문에 성형압력에 따른 정밀도와 형상 정도에 미치는 영향은 크다 할 수 있다.

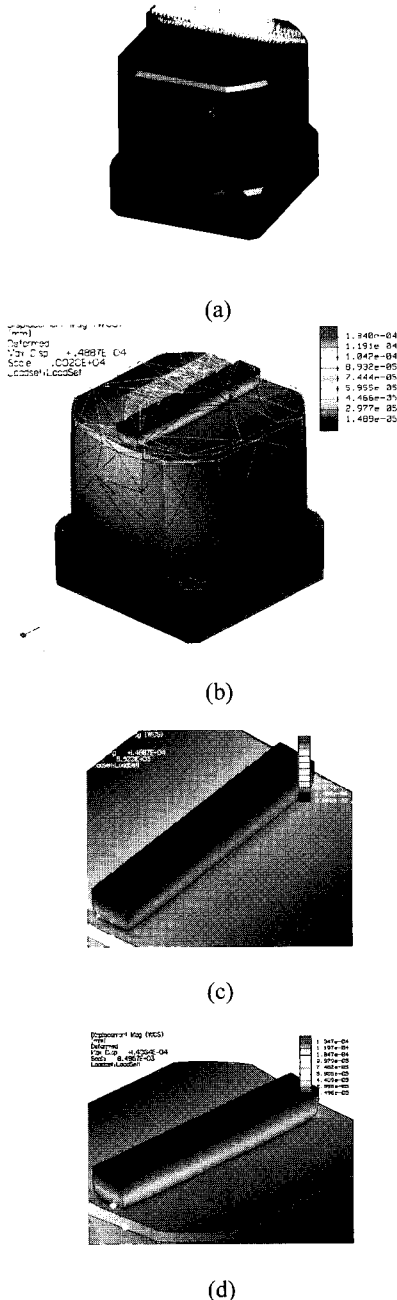


Fig. 9 FEM(Finite Element Method) analysis for GMP(Glass Mold Pressing)

Fig. 9 의 (a) 는 마이크로 렌즈 어레이의 FEM 분석을 하기 위하여 코어 밑단을 물리적으로 고정하고 성형압력 18 kg/f 에 해당하는 압력을 코어의

렌즈 면에 하중을 가하여 변위를 분석하였다. 분석결과 (b)와 같이 어레이 렌즈 면이 가공된 코어 면에서 고정부분을 따라 변형이 감소하는 것을 볼 수가 있다. (c)는 마이크로 렌즈 어레이 금형 코어의 Slow 축에 해당하는 코어의 면을 나타내고, (d)는 Fast 축을 나타낸다.

Slow 축의 최대 응력은 10.4971N/mm² 이며, 성형압력에 따른 금형의 코어의 변형에 가장 많은 변수가 되는 ZZ 방향의 응력은 -11.7590N/mm² 이며, 최대변위는 0.000149mm, ZZ 방향에 해당하는 변위는 -0.000098mm 로 설계되었다. Fast 축의 최대 응력은 3.5789N/mm² 이며, 성형압력에 따른 금형의 코어의 변형에 가장 많은 변수가 되는 ZZ 방향의 응력은 -12.9205N/mm² 이며, 최대 변위는 0.000150 mm, ZZ 방향에 해당하는 변위는 0.000015mm 로 설계되었다. 따라서 Slow 축과 Fast 축의 최대 변위가 각각 -0.000098mm 와 0.000015mm 로 성형하중에 대한 금형의 변형으로 야기될 수 있는 렌즈 정밀도 저하를 방지할 수 있도록 고려하였다.

반복 실험을 통해 습득된 가공의 최적조건은 Table 1 과 같은데 우선 마모량의 최소를 위해 연삭 스톨 지름을 설계곡률에 최대 근접하도록 늘리고, 절입깊이와 이송속도를 줄였다.⁵⁻⁷

Table 1 Grinding condition

Item	Cutting condition
Work piece	Binderless WC
Wheel mesh	#400, #2500
Wheel diameter(mm)	Ø35
Turbine speed(rpm)	35000/38000
Feed rate(mm/min)	0.5, 0.2
Depth of cut(μm)	0.5, 0.2
Vacuum pressure(kpa)	-72.4
Grinding fluid	Water 95%, rust preventive oil 5 %

Fig. 10 은 초정밀 가공된 마이크로 어레이 렌즈 금형 코어의 실제 사진으로 광학 설계된 렌즈 어레이 데이터를 이용하여 성형 간 야기될 수 있는 금형 변형에 의한 렌즈 정밀도를 고려하여 금형 설계를 수행하고 이를 Co 함량이 0.5 %이하인 Binderless WC 재질의 금형 코어에 10 nm 의 분해능을 가지는 초정밀 비구면 가공한 것이다.³

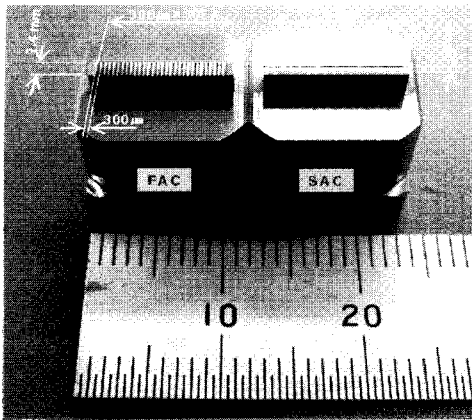


Fig. 10 Machined Micro lens array core

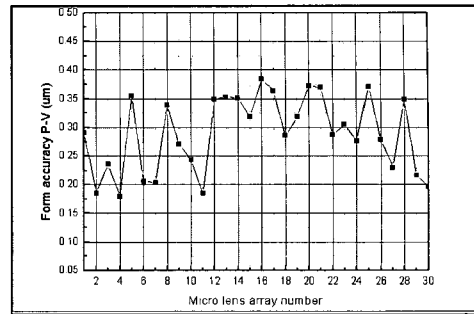
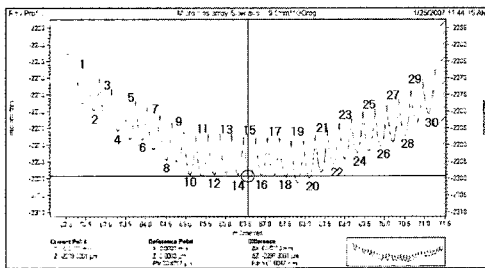


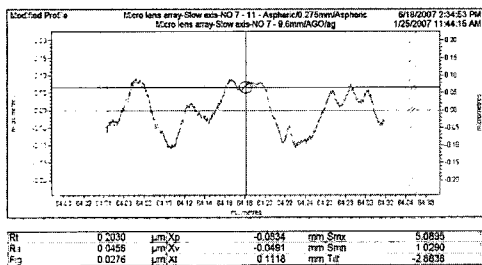
Fig. 12 Deviation of form accuracy

가공된 금형 코어는 접촉식 비구면 측정기인 Form Talysurf PGI +을 이용하여 가공된 마이크로 렌즈 어레이면의 형상정밀도를 측정하였다. 측정 결과는 Fig. 11 과 같으며, (a)는 마이크로 렌즈 어레이 30 개의 Law profile 이고, (b)는 마이크로 렌즈 1 개의 형상정밀도 P-V 0.2030 μm을 나타낸다. Array 피치 정밀도 1.0 μm 이하이고 30 개에 대한 형상정밀도는 Fig. 12 와 같이 P-V 0.18~0.38 μm로 가공허용 오차 범위로 가공되었다.

제작된 마이크로 렌즈 어레이 금형은 저융점 광학글라스와 GMP(Glass Molding Press)를 이용하여 성형되었으며, Essential Macleod software 를 이용한 광학 박막 설계하여 렌즈를 코팅 지그에 장착하여 진공박막 증착기를 이용하여 SiO₂ 의 저 굴절률 물질을 증착하고 고 굴절률 물질인 Ta₂O₅ 를 증착하는 교번으로 2 층의 무 반사 코팅을 수행하였다. 따라서 Fig. 14 와 같은 투과율이 635nm 의 협대역에서 99.7% 이상인 Fig. 13 의 (a)는 글라스 렌즈 어레이의 실물 사진이며, (b)는 광학현미경(×660)을 이용한 300 μm 크기의 마이크로 렌즈의 표면사진이다.

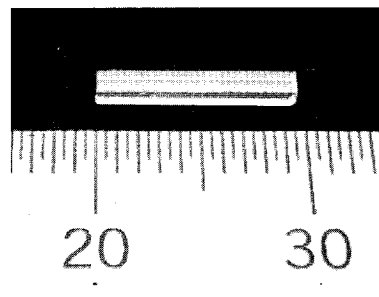


(a)

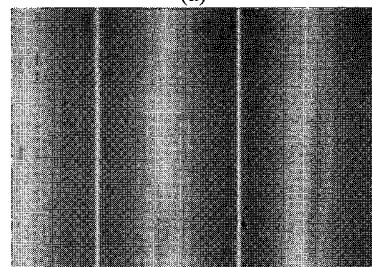


(b)

Fig. 11 Profile data and form error(Form talysurf PGI)



(a)



(b)

Fig. 13 Glass mold pressed micro lens array

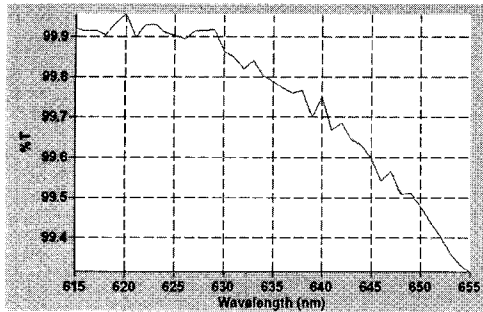


Fig. 14 Anti reflection coating results

4. 결론

1) 이동식 소형 프로젝션 시스템의 광학용 멀티 콜리메이션 렌즈를 설계하여 광학적 성능을 평가하였다.

2) 설계된 멀티 콜리메이션 렌즈의 제작시 발생할 수 있는 오차요인을 분석하고 허용범위내의 제작을 위한 허용오차의 수준을 결정하였다.

3) 30 개의 렌즈 어레이에 대한 형상정밀도가 P-V 0.18~0.38 μm 인 Binderless WC 재질의 금형 코어 제작하였다.

4) 제작된 어레이 렌즈 금형을 이용하여 저용점 광학글라스와 GMP(Glass Molding Press)를 이용하여 글라스 어레이 렌즈를 성형하였고, 진공박막 증착기를 이용하여 투과율이 635nm 의 협대역에서 99.7% 이상인 글라스 어레이 렌즈를 제작하였다.

참고문헌

1. Park, S. S., Lee, K. Y., Hwang, Y. and Kim, H. M., "Research on a micro aspheric glass lens manufacture technology," Proc. of Korean Society for Precision Engineering fall Conference, pp. 393-394, 2006.
2. Suzuki, H., Kodera, S., Maekawa, S., Morita, N., Sakurai, E., Tanaka, K., Takada, H., Kuriyagawa, T. and Syoji, K., "Study on precision grinding of micro aspherical surface," J. of JSPE, Vol. 62, No. 4, pp. 619-623, 1998.
3. Park, S. S. and Lee, H. J., "Research on ultra-precision grinding method," Journal of Korean Society for Precision Engineering, Vol. 23, No. 6, pp. 14-21, 2006.
4. Park, S. S., Lee, K. Y., Kim, H. M. and Won, J. H., "Ultra-precision grinding characteristics in Optical

Glass," Journal of Korean Society for Precision Engineering, Vol. 24, No. 10, pp. 13-18, 2007.

5. Hwang, T. W. and Malkin, S., "Upper bound analysis for specific energy in grinding of ceramics," Wear, Vol. 231, Issue 2, pp. 161-171, 1999.
6. Lee, S. K., Miyamoto, Y., Kuriyagawa, T. and Syoji, K., "Effects of minimizing hydrodynamic pressure in ultra-precision mirror grinding," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 44, Issue 10, pp. 1031-1036, 2004.
7. Malkin, S., "Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives," ELLIS HORWOOD LIMITED, 1989.