

미세가공기술의 광학응용

이 은 호*

(*서울대학교 제어계측신기술연구센터)

1. 서 론

이번 글에서는 미세가공기술의 응용 중에서 광학 분야에서의 응용에 대하여 알아보고자 한다. 미세가공기술은 반도체 제작기술과 함께 발전하여 근래에 들어서는 이 기술에 의하여 압력센서, 유량센서, 가속도계 등의 센서들과 기계요소들이 제작되어 사용되고 있다. 미세가공기술을 이용하여 광학요소를 제작할 경우 레이저다이오드와 같은 optoelectronics 요소들과 일체형으로 할 수 있어 크기를 작게 할 수 있음은 물론 생산 비용도 줄일 수 있는 장점을 갖게 된다.

광학분야에서 미세가공기술이 사용되는 분야는 크게 나누어 일반적인 광학요소인 렌즈나 거울 등을 제작하는 분야와, 광통신과 optical computing 에서 사용되는 integrated optics 분야로 나눌 수 있다. 여기에서는 그 중에서 특히 마이크로렌즈에 대하여 알아보기로 하며 종류 및 제작방법에 대해서 서술하고자 한다. 그리고 미세광학요소와 다른 전자, 기계요소들을 결합하여 이용하는 것에 대해서도 간단히 살펴보고자 한다.

2. 마이크로렌즈의 종류 및 가공방법

미세가공기술을 이용하여 제작된 매우 작은 렌즈를 마이크로렌즈라고 부르며 이때 직경이 2mm 이하인 렌즈를 마이크로렌즈라고 한다[1]. 마이크

로렌즈는 렌즈의 광학적 원리에 따라 다음의 두가지로 나눌 수 있다.

- 굴절식 렌즈 (refractive optics)

- 회절식 렌즈 (diffractive optics)

굴절식 렌즈는 흔히 볼 수 있는 렌즈에서와 같이 표면 곡률을 변화시켜 렌즈효과를 얻는 방식과, 렌즈내부에서 굴절율을 곳에 따라 다르게 하여 렌즈효과를 얻는 방식으로 다시 나누어 진다. 후자에 속하는 대표적인 마이크로렌즈에는 GRIN 렌즈 (gradient index lens)가 있다. 회절효과를 이용한 광학요소 (diffractive optical element, DOE)에는 Fresnel lens, Fresnel zone plate, grating 등이 있으며 마이크로렌즈로서 제작될 때에는 주로 Fresnel 렌즈가 이용된다.

일반적으로 일상생활에서 접할 수 있는 렌즈들은 굴절율이 1.4에서 1.6 사이에 있는 유리소재 (glass blank)를 래핑가공 (lapping)하여 제작된다. 이 방식에 의하여 제작된 렌즈들은 대개 구형 표면을 갖게 되고 광학적 성능과 표면경도가 우수하다는 장점들을 가지나 제작에 시간이 많이 요구된다는 결점 역시 갖게 된다. 한편 근래에 많이 사용되는 플라스틱 렌즈의 경우는 거의 모두 주조 방식 (molding)에 의해 제작되어 대량생산에 적합할 뿐만 아니라 광학부 이외에 고정기구부 또는 구조부까지도 일체화시키는 설계가 가능하다[2].

마이크로렌즈는 크기가 작기 때문에 일반 렌즈에서와는 달리 그 제작에 있어 래핑가공 등을 사

용하기 곤란하다. 따라서 마이크로렌즈를 제작할 때에는 이미 반도체 분야에서 발전한 기술인 lithography와 플라스틱 렌즈 제작기술 등을 결합하여 정밀성을 유지하면서 대량생산에도 적합한 방식을 사용한다.

굴절식렌즈의 제작방식은 다음과 같이 나누어진다[1,3,4].

- 일반기계가공
- Ion exchange
- photopolymer
- PROM(photoresist refractive optics by melting)

- Microlithography

회절식 마이크로렌즈의 제작방법은 다음의 4가지로 나눌 수 있다[5].

- Laser direct writing
- Microlithography
- Holographic recording
- laser assisted microfabrication

여기에서 가장 많이 사용되는 방법은 microlithography이며 여기에서 사용되는 mask는 e-beam을 이용하여 제작된다. 이 경우 사용되는 mask의 숫자에 따라 렌즈형상이 결정되며 이 방식에 의하여 제작되는 렌즈를 binary optics라고도 부른다. holographic recording은 diffraction grating 등의 제작에 사용되며 이때 단면은 microlithography때와는 달리 부드러운 형상을 갖는다.

2.1 GRIN(gradient index) 렌즈

GRIN 렌즈의 원리는 그림 1에 나타난 바와 같

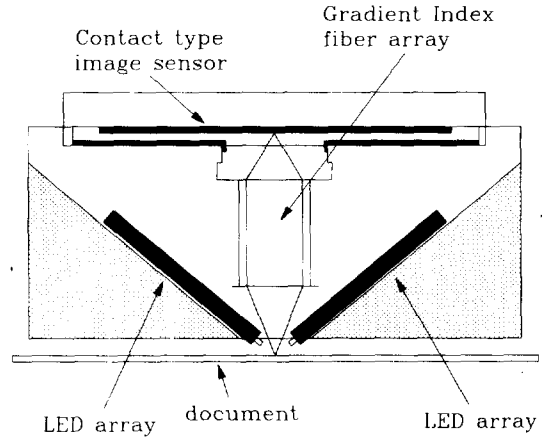


그림 2. 팩시밀리용 센서

다. 원형단면을 갖는 유리기둥에서 표면 쪽의 굴절율과 중심부의 굴절율이 다를 때 유리기둥 속을 통과하는 빛은 굴절하게 되고 특히 표면부분의 굴절율이 중심부에서보다 낮을 경우에는 이 유리기둥은 렌즈의 역할을 할 수 있게 된다[6]. micro GRIN lens에서는 광섬유가 이용되며 Selfoc 이라는 상표명으로 잘 알려져있다.

GRIN 렌즈는 다발형태(array)로 주로 사용되며 내시경과 팩시밀리, LED 프린터 등에서 많이 사용된다. 팩시밀리의 경우는 매우 짧은 초점거리를 이용하여 조명장치와 일체화한 접촉식 문서 판독장치(그림 2)의 제작에 사용되며 LED 프린터의 경우는 레이저다이오드로부터의 빛을 LED와 일체화된 GRIN 렌즈로 집속시키는 목적으로 사용된다. 이외에 사용되는 GRIN 렌즈들의 예를 그림 3에 나타

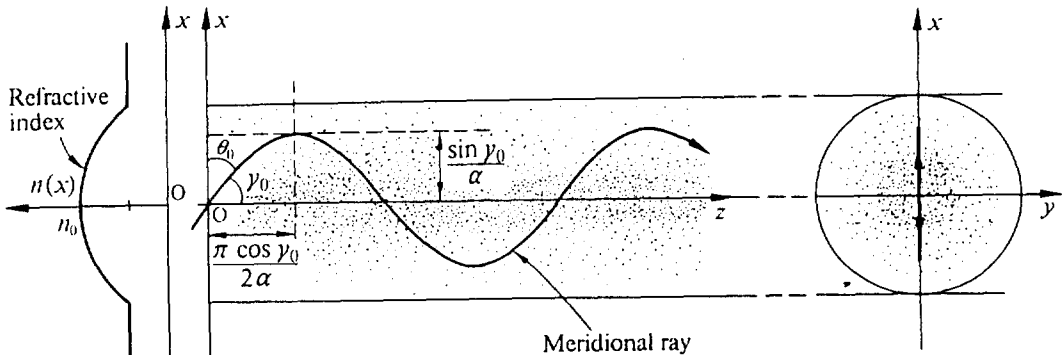
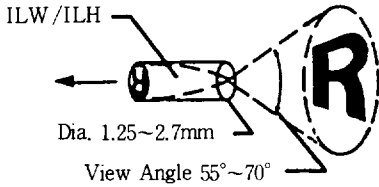


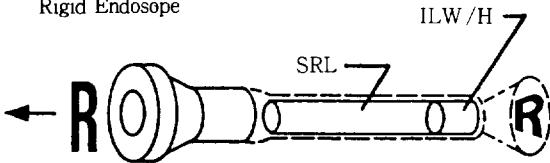
그림 1. GRIN렌즈의 원리

Small Size Objective Lens
High Resolution

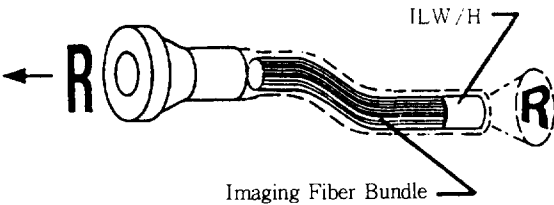


Medical /Industrial Endoscopy

Rigid Endosope



Flexible Fiberscope



1:1 Erect Real Imaging

Simple Compact Optical System

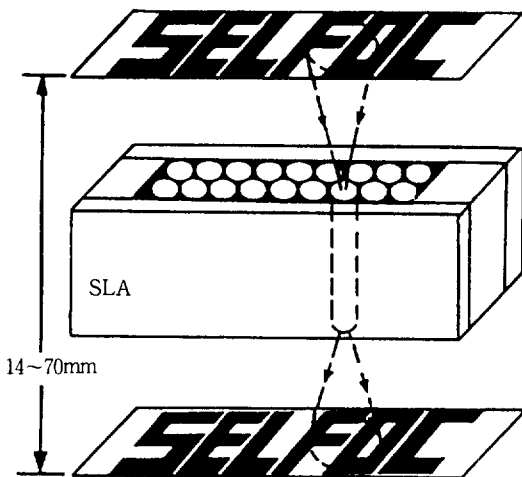


그림 3. GRIN렌즈의 사용 예

내었다.

GRIN 렌즈의 제작은 대개 ion exchange 방법에 의해 제작된다. 이에 따르면 먼저 유리섬유를 KNO₃ 용액에 넣은 후에 이온교환이 일어나면 꺼내어 불화수소용액으로 처리하면 표면부터 굴절율이 변화하게 되고 이 변화율은 유리섬유내부방향으로 부드러운 곡선을 따르게 된다. 이외에 sol-gel process나 CVD(chemical vapor deposition)에 의해서도 GRIN렌즈를 제작할 수 있다. 이렇게 제작된 GRIN렌즈는 다발형태로 많이 사용되며 이것은 여러가닥의 섬유를 묶은 후 절단, 연마과정을 거쳐 제작된다. GRIN 렌즈에서 일반적으로 사용되는 빛의 파장은 510~740nm이며 최소직경은 0.25mm이다[1].

2.2 Micro Lens Array

다수의 마이크로렌즈를 한 묶음으로 하여 제작된 렌즈를 microlens array라 한다. 개별적으로 제작된 렌즈들을 조립하는 것보다 처음부터 lens array로서 제작되며 사용되는 렌즈의 형식에 따라 굴절식과 회절식으로 나눌 수 있다. microlens array의 사용 목적에는 다음과 같은 것들이 있다.

- 센서면에서의 effective fill factor 증대
- adaptive optics 용 wavefront sensor(다수의 sub-image들을 만드는 특성을 활용)

센서면에서 effective fill factor를 높이는 경우는 CCD센서나 TFT LCD등에서 찾아볼 수 있다. 일반적으로 CCD 센서에서는 pixel의 면적이 감지면적보다 넓어서 센서 전면에서 받는 에너지보다 실제로 활용되는 에너지가 더 적다. 이 때 microlens array를 이용하여 pixel에 들어오는 광에너지를 모두 감지면적으로 모을 수 있으면 effective fill factor를 100% 까지 올릴 수 있다[3,7]. 이 경우 센서의 크기를 줄일 수 있으며 이것은 센서가격의 절감, 센서잡음의 감소, 소자내부에서 가용면적 증가 등의 장점을 가져온다. 또한 projection TV에 사용되는 TFT LCD의 경우는 TFT 구조에 가려지지 않은 LCD로만 빛을 보냄으로써 영상의 밝기를 증대시킨다[8]. (그림 4)

Adaptive optics는 지상의 천체망원경으로 별을 관측할 때 발생하는 문제점 중 하나인 대기의 흔들림으로 인한 영상화질의 저하를 능동적으로 보상하

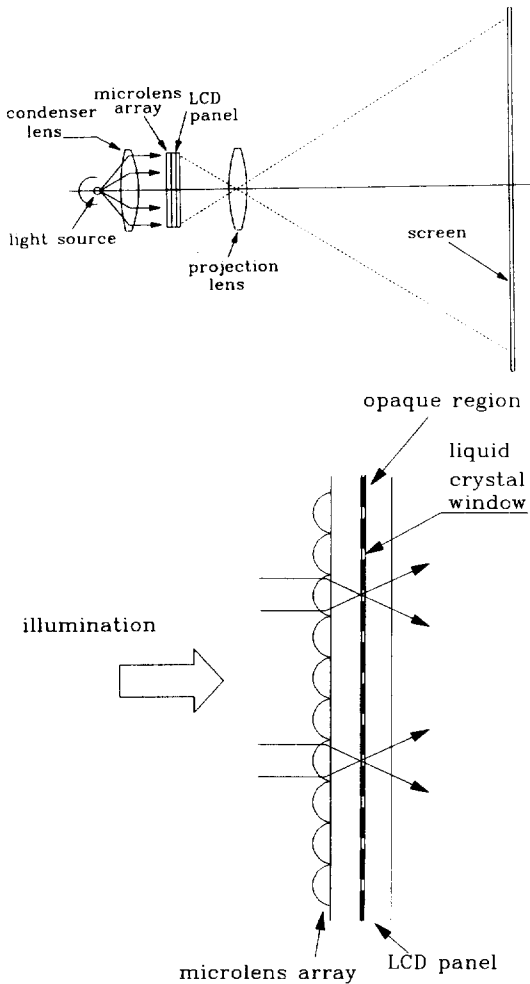


그림 4. Projection TV용 TFT-LCD와 microlens array

려 할 때 사용되는 분야이다[9]. 이 때 대기의 흔들림을 측정하는 wavefront sensor는 reference star의 sub-image들을 이용하며 이것은 microlens array를 이용하여 만들어 진다. Microlens array는 굴절식과 회절식으로 나뉘며 각각의 제작방식은 다음과 같다.

2.2.1 굴절식 마이크로렌즈 array

마이크로렌즈를 제작할 때에는 회절식 렌즈를 제작하는 것이 반도체제작기술을 쉽게 적용할 수 있기 때문에 많이 사용된다. 그러나 회절식렌즈는 그

본질 상 가시광선영역이나 광역 적외선(broadband IR)영역에서 사용되기 어렵다[6,10]. 이 때는 굴절식렌즈를 이용하는 것이 바람직하며 이로부터 마이크로렌즈 array를 제작할 수 있다[3].

굴절식 마이크로렌즈 array는 구면형상렌즈와 GRIN 렌즈로 나누어 진다. 구면렌즈의 경우 구면형상을 가공하는 방법으로는 기계가공, photosensitive polymer, PROM(photoresist refractive optics by melting), microlithography 등이 있다.

기계가공을 이용하는 경우는 microlens array의 mirror image를 갖는 금형을 기계적으로 가공하여 molding 방법으로 microlens array를 제작한다. 금형 제작방법으로는 끝부분의 형상이 구면인 블렌드 밀링커터를 사용하여 금형소재를 절삭가공하는 방법과 같은 크기의 작은 특수강 볼들을 연성소재 위에 펼친 후 압착하여 소성가공하는 방법 등이 있다[1]. 이러한 방법으로 제작된 금형에 많은 경우에 폭시 등의 고분자화합물을 molding하여 렌즈 array를 제작한다. 이 경우 재질로 인한 near UV와 IR영역에서의 낮은 투과율, 낮은 기계적 강도 등의 결점을 보완하기 위하여 유리재질을 사용하는 연구가 추진되고 있으며 sol-gel method는 그 중 한가지 방법이다[1,14].

Photosensitive polymer를 이용하는 방법에서는, 그림 5 에서와 같이 감광판을 렌즈array 형상의

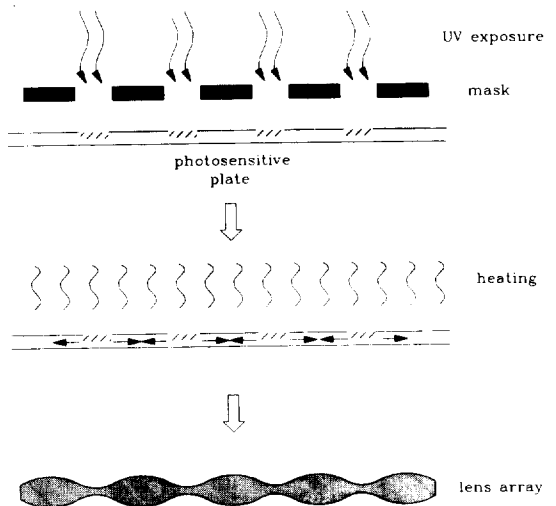


그림 5. Photosensitive polymer를 이용한 microlens array 제작

mask를 통해 자외선에 감광시킨 후 가열할 때 발생하는 감광부분의 팽창으로 렌즈의 구면형상을 얻으며 미국 CORNING 사의 SMILE(spherical micro integrated lens)렌즈가 이 방식에 의해 제작된다[1,4,11].

PROM 방식은 감광방식으로 생성된 원통 형상의 photoresist array를 oven에서 가열하여 녹임으로써 구면렌즈형상을 얻는 방식이다(그림 6 참조) [12,13].

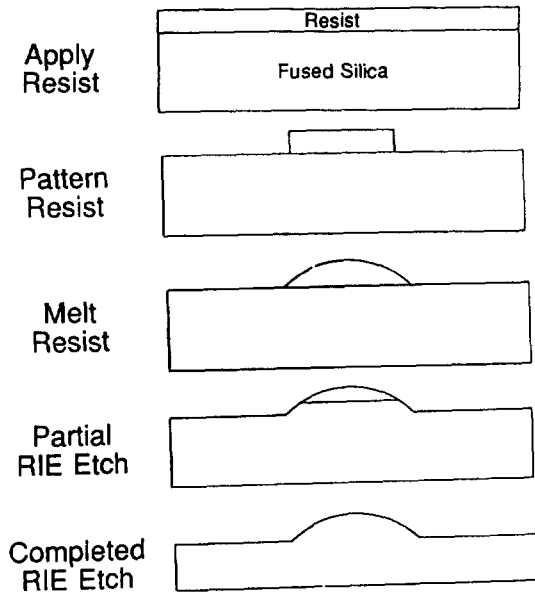


그림 6-1. PROM 방식을 이용한 렌즈제작

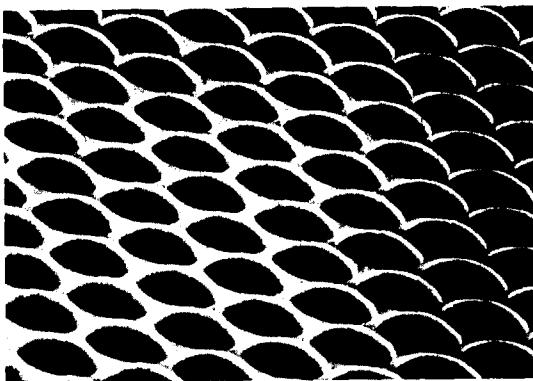


그림 6-2. PROM 방식으로 제작된 Micro Lens Array

2.2.2 회절식 마이크로렌즈 array

회절식 microlens array는 주로 Fresnel lens를 이용하여 제작된다. 따라서 회절식 microlens array의 제작방식은 개개의 micro Fresnel lens를 제작할 때와 동일하다.

Binary optics를 사용하여 Fresnel 렌즈를 제작하는 경우는 사용하는 mask의 수에 따라 만들 수 있는 층수(phase step)가 정해지며 M 회 에칭을 하였을 때 얻을 수 있는 층수는 2M 이다(그림 7 참조). 이때 각각의 phase step의 높이는 $d = \lambda / (2^M(n-1))$ 로 주어지며 여기서는 λ 는 design wavelength, n은 재질의 굴절율이다[3]. 많은 경우 microlithography나 CVD(chemical vapor-deposition)로 master lens array를 제작한 후 이것으로부터 에폭시나 UV-sensitive resin등을 이용하여 microlens array를 molding하는 방법이 사용된다[15, 16, 17]. Microlithography를 사용할 경우 발생할 수 있는 부식깊이 제어의 난점을 해결할 수 있는 방법으로서 thin film deposition이 사용되기도 한다[20].

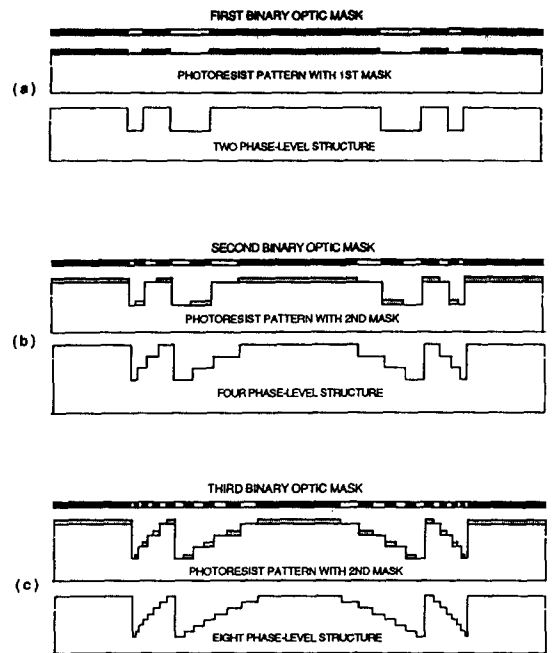
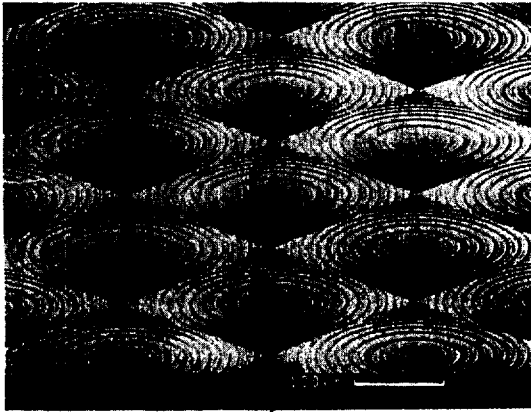
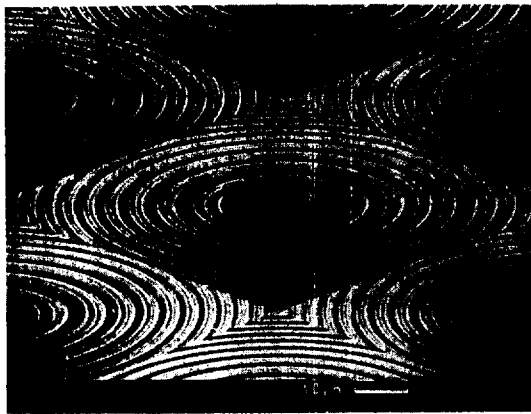


그림 7-1. Binary optics를 사용한 Fresnel Lens 제작



(a)

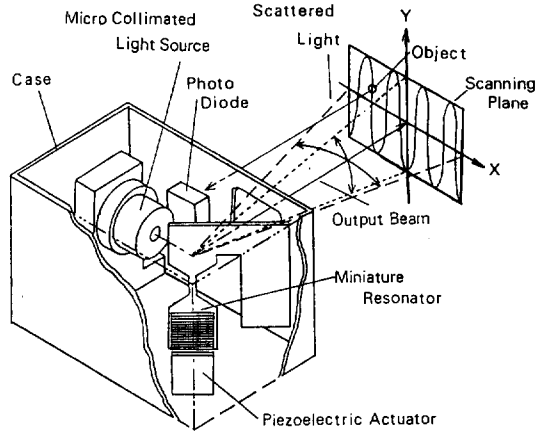


(b)

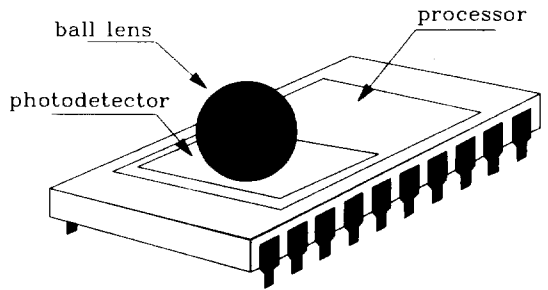
그림 7-2. Binary optics를 사용하여 제작된 Fresnel Lens Array

3. 마이크로렌즈와 기계, 전자분야와의 결합

미세광학기구(micro-optic device)는 optoelectronics, micro-electromechanics등과 결합될 때 그 성능을 발휘할 수 있다. 이러한 장치를 micro photonic device 라고 부를 수 있으며 이것은 optoelectronics, electron-micromechanical, opto-electro-micromechanical 장치들을 모두 포함하는 영역에 속한다[8,18]. 여기에 속하는 것으로서 micro Fresnel lens가 레이저 다이오드에 부착되어 레이저 광을 모으는 데 사용되는 것을 들 수 있으며, 발광체와 수광부를 일체화시킨 근접센서나 변위센서 또한 여기에 속한다. 기계작동부와 결합시킨 것으로는 압전 액츄에이터와 결합된 2차



a) 2D optical sensor



b) integrated machine vision system

그림 8. Micro-photonics

원 스캐너를 들 수 있다.

다른 분야의 응용으로는 머신 비전분야가 있다. 현재의 반도체제작기술을 활용하여 한 개의 소자 위에 렌즈, CCD 센서, 영상처리용 CPU 를 모두 배치하는 것이 가능하며 이 경우 머신비전의 응용 범위를 크게 넓힐 수 있는 가능성을 갖고 있다. 마이크로 볼 렌즈, CMOS 센서와 CPU를 ASIC화하여 이를 지문 감식용 센서로 이용하고 있는 연구 결과가 보고된 바 있다[19].

4. 맺은 말

이상에서 미세광학요소 중 렌즈의 종류와 제작방법, 그리고 사용 용도에 대하여 알아보았다. 미세광학요소에는 광통신이나 optical computing에 사용되는 integrated optics도 포함되나 이 글에서는

다루지 않고, 크게 굴절식과 회절식으로 구분되는 마이크로 렌즈에 대하여만 기술하였다. 액정디스플레이 장치의 보급이 확대되고 CCD 카메라 등이 널리 쓰이게 됨에 따라 더 밝은 화질을 얻으려는 연구와 CCD활용에 대한 연구가 활발하게 진행되고 이에 따라 지금까지 방위 산업이나 천문학 등의 특수용도에서만 사용되던 마이크로렌즈가 일반가전 분야에서 대량으로 사용될 수 있는 가능성이 보이고 있다. 마이크로렌즈의 제작은 일반 반도체제작과는 달리 전자, 물리, 재료, 기계 분야가 모두 결합되어야만 제품을 제작하고 사용할 수 있기 때문에 지금까지와는 다른 접근이 필요하며 공학교육에서의 interdisciplinary 연구 장려, 반도체제작공정의 타분야 활용확대 등이 그 방안이 될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] Carts, Y. A., "Micro-optics has macro potential," *Laser Focus World*, pp. 93-99, June 1991

[2] Optomechanical design, *Plastic optics* ?????

[3] M. Stern, M. Holz, T. Jay, "Fabricating binary optics in infrared and visible materials," *Miniature and Micro-Optics, Proc. of SPIE, Vol. 1751*, pp. 85-95, 1992

[4] N. Phillips, C. Barnett, "Experimental techniques for the evaluation of light-induced microlens formation in photopolymers," *Miniature and Micro-Optics, Proc. of SPIE, Vol. 1751*, pp. 33-46, 1992

[5] P. Langlois, H. Jerominek, H. Leclerc, J. Pan, "Diffractive optical elements fabricated by laser direct writing and other techniques," *Miniature and Micro-Optics, Proc. of SPIE, Vol. 1751*, pp. 2-12, 1992

[6] K. Iizuka, *Engineering Optics, 2nd Ed*, Springer Verlag, 1983 (originally in Japanese)

[7] M. W. Farn, "Microconcentrators for focal plane arrays," *Miniature and Micro-Optics, Proc. of SPIE, Vol. 1751*, pp. 106-117, 1992

[8] K. Nishizawa, M. Oikawa, "Micro-optics research activities in Japan," *Miniature and Micro-Optics, Proc. of SPIE, Vol. 1751*, pp. 54-65, 1992

[9] A. Tebo, "Adaptive Optics : the promise for high-resolution ground-based astronomy," *OE REPORTS, Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, No. 96*, Dec. 1991

[10] E. Hecht, *Optics, 2nd Ed*, Addison Wesley, 1987

[11] L. Glebov, N. Nikonorov, G. Petrovskii, M. Kharchenko, "Formation of optical elements on glasses by ion exchange method and photopolymoinduced crystallization," *Miniature and Micro-Optics, Proc. of SPIE, Vol. 1751*, pp. 169-188, 1992

[12] K. Mersereau, C. Nijander, A. Feldblum, W. Townsend, "Fabrication and measurement of fused silica microlens array," *Miniature and Micro-Optics, Proc. of SPIE, Vol. 1751*, pp. 229-235, 1992

[13] T. Jay, M. Stern, R. Knowlden, "Effect of refractive microlens array fabrication parameters on optical quality," *Miniature and Micro-Optics, Proc. of SPIE, Vol. 1751*, pp. 236-245, 1992

[14] J. Nagues, R. Howell, "Fabrication of pure silica micro-optics by sol-gel processing," *Miniature and Micro-Optics, Proc. of SPIE, Vol. 1751*, pp. 214-224, 1992

[15] H. Hosokawa, T. Yamashita, "ZnS micro-Fresnel lens and its uses," *Applied Optics*, pp. 5106-5110, Dec 1990

[16] H. Ming, Y. Wu, J. Xie, and T. Nakajima, "Fabrication of holographic mic-

- rolenses using a deep UV lithographed zone plate,” Applied Optics, pp. 5111–5114, Dec 1990
- [17] M. Haruna, M. Takahashi, K. Wakabayashi, and H. Nishihara, “Laser beam lithographed micro-Fresnel lenses,” Applied Optics, pp. 5111–5114, Dec 1990
- [18] K. Imanaka, “Micro hybrid integrated devices and components : Micro Photonic Devices,” Miniature and Micro-Optics, Proc. of SPIE, Vol. 1751, pp. 343–353, 1992
- [19] S. Smith, “Performance Breakthrough in Imaging Technology,” Technical Feature, London Press Service, 1991
- [20] M. Motamedi, R. Anderson, R. de la Rosa, L. Hale, W. Gunning, R. Hall, M. Khoshnevisan, “Binary optics thin film microlens array,” Miniature and Micro-Optics, Proc. of SPIE, Vol. 1751, pp. 22–32

이은호(李殷鎬)

1961년 3월 24일생. 1983년 서울대 공대 기계설계학과 졸업. 1985년 동대학원 기계설계학과 졸업(석사).

1991년 Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA Ph.D. in Mechanical Engineering. 1983년 서울대 공대 생산기술연구소 연구조원. 1987~1991년 Material Handling Research Center(MHRC, Georgia Tech) Graduate Researcher for Landmark Tracking System Development. 1991년 서울대 정밀기계설계공동연구소 특별연구원. 현재 서울대 제어계측신기술연구센터 연수연구원.