

# 나노 광 프로브 어레이 구현을 위한 광학 헤드 유닛 개발

김홍민<sup>1</sup>, 임지석<sup>1</sup>, 김석민<sup>1</sup>, 한정원<sup>1</sup>, 강신일<sup>#</sup>

## Development of Optical Head Unit for Nano Optical Probe Array

H. Kim, J. Lim, S. Kim, J. Han, and S. Kang

### Abstract

A optical head unit for nano optical probe array was developed. The optical probe array is generated by Talbot effect. The shape and thickness of microlens array(MLA) were designed to minimize the spot size at the foci of MLA. To increase the optical efficiency of the system and obtain the large tolerance for fabrication, aperture size was theoretically optimized. Then microlens illuminated aperture array(MLIAA) as an optical head unit was fabricated using a ultra violet(UV) molding process on aluminum aperture array. In this process, Al aperture array was fabricated separately using the photolithography and reactive ion etching(RIE) process. Optical properties of the generated optical probes were measured and compared at Talbot distance from the aperture array having a diameter of  $1\mu\text{m}$  and MLIAA.

**Key Words :** Nano optical probe(나노 광 프로브), Optical head unit(광학 헤드 유닛), Microlens illuminated aperture array(마이크로렌즈 일체형 개구어레이), Talbot effect(탈봇 효과)

### 1. 서론

휴대용 기기에 장착되는 소형 크기의 정보 저장기기의 요구가 증가됨에 따라, 플래쉬 메모리, 마이크로 드라이브, 초소형 광 정보저장기기 등과 같은 다양한 형태의 차세대 휴대형 정보저장시스템이 개발되고 있다. 이러한 다양한 형태의 정보 저장 시스템 중에서 초소형 광 정보저장 기기는 저가의 저장 매체를 제공할 수 있다는 장점 때문에 차세대 정보저장 시스템으로써 주목되고 있다 [1-3]. 초소형 광 정보저장 기기의 성공을 위한 key point 는 소형화 및 고밀도화 뿐만 아니라, 휴대가 가능한 정도의 강건 설계(robust design)에 있다. 최근에 개발된 블루레이 광 저장기기(Blu-ray ODD)의 경우, 면밀도(aerial density)를 높이기 위

해 405nm 의 레이저 다이오드와 개구율(numerical aperture, NA) 0.85 의 대물렌즈(objective lens)를 사용하였다. 그러나, 광 픽업(optical pick-up)의 구동 및 광 디스크(optical disk)의 회전에 의해 발생하는 진동은 시스템의 성능을 저하시키는 원인이 되고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 신개념의 optical ROM 카드 시스템이 제안되었다[4].

Optical ROM 카드 시스템은 광 프로브(optical probe)를 생성하기 위한 광학 헤드 유닛, 위치 제어 스테이지, 사각형 카드 형태의 저장 매체 및 CCD 또는 CMOS 센서 등 네 개의 기본 요소로 구성되어 있으며, 광학 헤드 유닛은 탈봇 효과(Talbot effect)에 의해 2차원 광 프로브를 생성하기 위한 단색 레이저 다이오드와 2차원 개구어레이로 구성되어 있다. 그림 1은 optical ROM 카드 시스템의 기본 구성을 보여주고 있다. 그림 2는 optical ROM 카드 시스템이 매체로부터 정보를 재

1. 연세대학교 기계공학과  
# 연세대학교 기계공학부, E-mail: snlkang@yonsei.ac.kr

생하기위해 채용하고 있는 macro-cell 스캐닝 원리를 보여주고 있다. 탈봇 효과에 의해 생성된 광 프로브 어레이는 데이터 정보가 기록된 매체에 조사된다. 매체에는 투과, 흡수 또는 반사의 bit 패턴이 기록되어 있으며, 매체에서 투과된 빛은 2차원 이미지 센서에서 동시에 페이지(page) 단위로 검출된다. 광 프로브를 수평/수직 방향으로 이동시킴으로써, 서로 다른 데이터 페이지의 정보를 검출할 수 있게 된다. 이때, 각각의 광 프로브가 이동해야할 데이터 영역이 macro-cell 로 정의된다. 따라서 optical ROM 카드 시스템은 광 정보저장기와 같이 복제 가능한 미디어를 사용할 뿐만 아니라, 광 프로브의 요구되는 이동량이 macro-cell 영역으로써 작은 양의 구동만 필요하게 됨으로써 높은 내 충격성을 갖는 장점이 있다. 반면 고밀도의 정보 저장을 위해서는 탈봇 효과에 의해 생성되는 광 프로브의 크기가 작아야 하며, 이를 위해서는 개구의 직경이 작아야 한다. 그러나, 작은 개구는 광학 헤드의 광 효율이 현저히 낮아지게 하는 요인이 되며, 많은 전력 소모로 인해 휴대용 기기에는 채용에 부정적인 요인으로 작용하게 된다. 따라서 성공적인 optical ROM 카드 시스템의 개발을 위해서는 작은 크기의 광 프로브 생성 뿐만 아니라 및 고효율의 광학 헤드 유닛을 구현하는 것이 필수적이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 나노 광 프로브 어레이 구현을 위한 고효율의 광학

헤드 유닛을 개발하였다. 이를 위해 마이크로렌즈 일체형 개구어레이를 제안하고 설계/제작하였다. 또한 마이크로렌즈 일체형 개구어레이를 통해 재생된 광 프로브 어레이를 기존의 개구어레이에 의한 광 프로브 어레이와 비교 평가함으로써 나노 광 프로브 어레이 구현을 위한 광학 헤드 유닛으로서 마이크로렌즈 일체형 개구어레이의 유용성을 평가하였다.

## 2. 광학 헤드 유닛 설계

### 2.1 탈봇 효과

단파장의 빛이 일정한 주기를 갖는 개구어레이를 통과하게 되면, 개구어레이로부터 일정한 거리에서 개구어레이와 같은 주기의 광 프로브가 생성된다. 이러한 현상을 탈봇 효과라고 하고, 개구어레이와 같은 광축상에 처음 광 프로브가 생성되는 위치를 제 1 탈봇 위치, 개구어레이와 제 1 탈봇 위치까지의 거리를 탈봇 거리라고 한다. 이때 탈봇 거리는 식 (1)에 의해 결정되며,  $p$ 는 개구어레이와 광 프로브의 주기,  $\lambda$ 는 조사된 빛의 파장,  $Z_T$ 는 탈봇 거리를 나타낸다[5~8].

$$Z_T = \frac{2p^2}{\lambda} \quad (1)$$

그림 3은 시뮬레이션에 의해 개구의 직경이  $1\mu\text{m}$ , 주기가  $15\mu\text{m}$ 인 개구어레이에  $405\text{nm}$  파장의 레이저를 조사하였을 때 개구어레이를 통과한 빛의 세기 분포를 보여주고 있다. 식 (1)에 의해 탈봇 거리는  $1.1\text{mm}$ 로 결정되며, 그림에서 알 수 있듯이 약  $1.1\text{mm}$  지점에 광 프로브가 생성됨을 알 수 있다. 또한 탈봇 거리를 주기로 제 2 탈봇

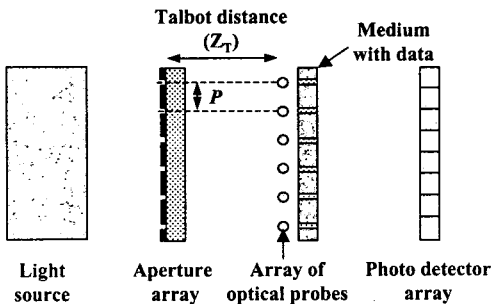


Fig. 1 Concept of optical ROM card system

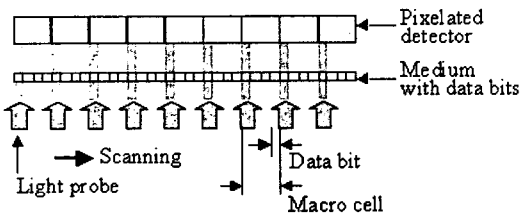


Fig. 2 Principle of macro-cell scanning

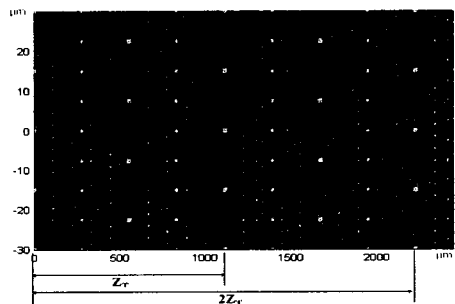


Fig. 3 Simulated optical probes generated by Talbot effect passing through aperture array with a diameter of  $1\mu\text{m}$  and a pitch of  $15\mu\text{m}$

위치( $2Z_r$ ), 제3 탈북 위치( $3Z_r$ ) 등에서 광 프로브가 생성된다. 뿐만 아니라 탈북 거리의 반이 되는 지점( $0.5Z_r$ ,  $1.5Z_r$ ...)에서도 광 프로브가 생성되는데, 이때 생성되는 광 프로브는 개구어레이의 광축과 주기의 반( $0.5p$ )만큼 어긋나 있다.

## 2.2 마이크로렌즈 일체형 개구어레이

일반적으로 탈북 효과에 의해 생성되는 광 프로브의 크기를 작게 하기 위해서는 개구의 직경이 작아야 한다. 작은 크기의 광 프로브는 고밀도의 optical ROM 카드 시스템을 위해 필수적이다. 그러나, 개구어레이를 통과하는 빛의 전체 양은 개구의 면적에 비례하여 증가하게 된다. 따라서 나노 광 프로브 생성을 위한 개구어레이는 그 광효율이 매우 작게 되어, 큰 세기의 광 프로브를 생성시키기 위해서는 큰 세기의 레이저를 사용해야만 한다. 이는 높은 전력소모를 유발시키므로 휴대용 정보저장기기를 위한 광학 헤드로서 단점으로 작용한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 마이크로렌즈 일체형 개구어레이를 그림 4와 같이 제안하였다. 이때 마이크로렌즈는 빛을 개구로 집광시킴으로써 광 효율을 증가시킬 수 있게 된다. 마이크로렌즈 일체형 개구어레이의 초기 설계를 위해 홀 직경을  $1\mu\text{m}$ , 주기가  $15\mu\text{m}$ 인 개구어레이를 사용하였고, 이 개구어레이에 빛을 집광시키기 위한 마이크로렌즈의 형상을 설계하였다. 최적 설계된 마이크로렌즈의 직경은  $14\mu\text{m}$ , 높이가  $2.86\mu\text{m}$ , 곡률 반경이  $10\mu\text{m}$ , 기판의 두께는  $21.32\mu\text{m}$ 이다. 사용된 빛의 파장은  $405\text{nm}$ 이며, 렌즈 재료의 굴절율은  $405\text{nm}$  파장에서 1.53이다. 그림 5는 설계된 마이크로렌즈 일체형 개구어레이의 공차설계 결과로써 설계된 시스템은 렌즈 하부 두께공차  $-6\mu\text{m} \sim 4\mu\text{m}$  내에서 90% 이상의 효율을 갖으며 정렬공차  $\pm 0.3\mu\text{m}$  내에서

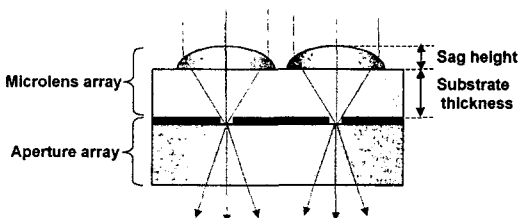


Fig. 4 Schematic of microlens illuminated aperture array

80% 이상의 효율을 갖는다. 그러나 렌즈 일체형 개구어레이의 제작시 마이크로렌즈어레이와 개구어레이를  $0.3\mu\text{m}$  이하의 공차 내에서 정렬하는 것은 거의 불가능한 일이며, 이 문제점을 해결하기 위해 직경이 큰 개구를 대안으로 제시하였다. 그러나 큰 크기의 개구를 사용하였을 경우, 렌즈와 렌즈 사이에 존재하는 빈공간에 의한 노이즈가 발생할 수 있으므로 이에 대한 해석을 수행하였다. 그림 6은 시뮬레이션에 의한 다양한 개구 직경에 대한 탈북 위치에서의 line integrated intensity profile을 보여주고 있다. 개구가 없는 마이크로렌즈어레이(a)의 경우 주변부에서 많은 노이즈가 발생하고 있으며, 그 이외의 경우에는 노이즈가 거의 발생하지 않고 있음을 알 수 있다. 또한, 렌즈들 사이의 빈공간에 의해 발생하는 노이즈를 차단하는데 있어서 개구의 직경이  $10\mu\text{m}$ 면 충분함을 알 수 있다. 이로부터 개구의 직경을  $10\mu\text{m}$ 로 결정하였으며, 최종 마이크로렌즈 일체형 개구어레이의 스펙은 표 1에 정리하였다.

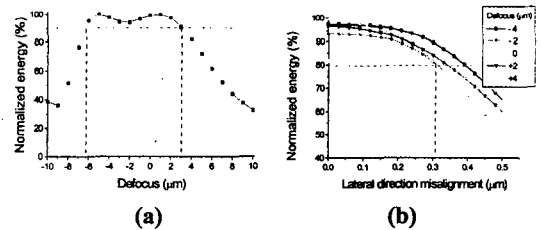


Fig. 5 Normalized energy through aperture hole versus (a) defocus and (b) misalignment

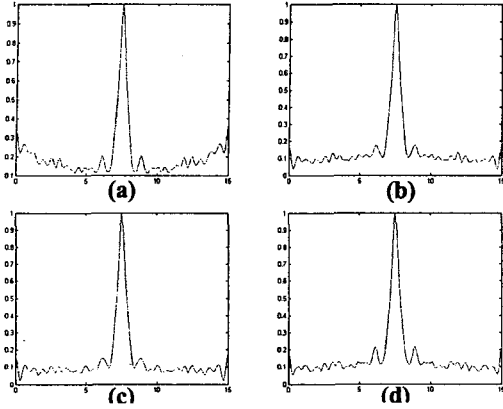
Table 1 Final specification of microlens illuminated aperture array

Size of microlens	$14\mu\text{m}$
Radius of curvature	$10\mu\text{m}$
Sag height	$2.86\mu\text{m}$
Substrate thickness	$21.32\mu\text{m}$
Numerical aperture	0.4
Size of aperture hole	$10\mu\text{m}$
Pitch	$15\mu\text{m}$
Array dimension	$1000 \times 1000$

## 3. 마이크로렌즈 일체형 개구어레이 제작

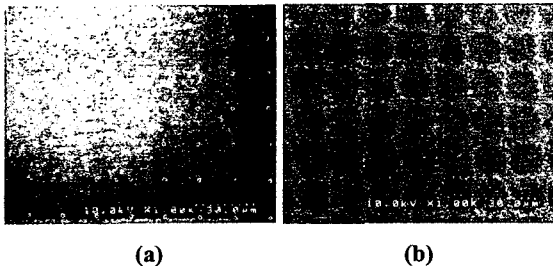
### 3.1 개구어레이 제작

본 연구에서는 마이크로렌즈 일체형 개구어레이



**Fig. 6 Normalized line integrated intensity profile at Talbot position of (a) MLA without aperture array, (b)MLIAA with 5µm aperture, (c)MLIAA with 10µm aperture, and (d)MLA with dark corner**

를 제작하기 위해 먼저 개구어레이를 제작하고 마이크로렌즈를 집적하는 공정을 수행하였다. 또한 직경 1µm의 개구어레이는 마이크로렌즈 일체형 개구어레이의 특성 평가의 비교군으로 사용되었다. 개구어레이의 제작방법으로는 다양한 공정 방법이 있을 수 있으나 본 연구에서는 유리 기판상에 광학적으로 충분히 불투명한 알루미늄 층을 형성하고 이후 알루미늄 박층상에 포토 리소그래피 방식으로 에칭 베리어를 형성한 후 알루미늄 박층을 부분적으로 식각하는 방법을 사용하였다. 본 연구에서는 건식식각 방법인 RIE(reactive ion etching) 공정을 이용하여 etching bias가 존재하지 않는 개구어레이를 제작하였다. 그림 7은 제작된 개구어레이의 SEM 측정 결과이다.

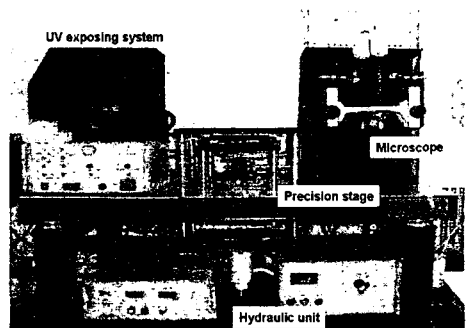


**Fig. 7 SEM images of aluminum aperture hole array with diameters of (a)1µm and (b) 10µm**

### 3.2 Monolithic lithography integration 공정을 이용한 마이크로렌즈 집적

마이크로렌즈 일체형 개구어레이의 제작을 위해 앞서 제작된 개구어레이상에 마이크로렌즈 어레이를 집적하는 공정이 요구된다. 본 연구에서는 monolithic lithography integration 방법을 사용하였다 [9~11]. 이 방법은 개구어레이상에 마이크로렌즈 어레이를 직접 복제하는 공정으로 타 공정에 비해 공정이 단순하여 공정비용이 적고 재현성이 매우 높아 양산공정에 가장 적합한 방법일 뿐만 아니라, 광학적 정렬방법을 수행함으로써 높은 정렬도 구현이 가능하다. 또한 적절한 성형 재료 선택 및 정밀 몰드 제작을 통해 높은 광학성능 및 내구성을 갖는 마이크로렌즈 어레이의 제작이 가능하다. monolithic lithography integration 공정을 이용한 마이크로렌즈 일체형 개구어레이의 제작공정은 기 제작된 개구어레이 상에 자외선에 반응하여 경화하는 포토 폴리머를 도포하고, 투명 몰드와 개구어레이를 정렬하고, 가압공정을 통해 성형시 발생하는 수축을 보정함과 동시에 자외선을 조사하여 폴리머를 경화하는 공정으로 이루어진다. 그림 8은 본 연구의 집적 공정에 사용한 monolithic lithography integration 시스템의 사진이다. 시스템은 콜리메이팅 된 자외선을 조사할 수 있는 광원조사부와 초정밀 정렬을 가능케 하는 현미경 및 스테이지부, 가압을 가능하게 하는 유압 시스템부로 나뉘어 진다.

개구어레이상에 설계된 형상의 마이크로렌즈 어레이를 성형하기 위해 먼저 최종 마이크로렌즈 형상의 음각 형태를 갖는 자외선 투과형 몰드를 제작하였다. 그림 9 (a)는 제작된 자외선 투과형 몰드의 SEM 사진이다. 제작된 자외선 투과형 몰드를 이용하여 개구어레이상에 마이크로렌즈어레이의 정렬 성형 공정을 수행하였다. 사용된 성형 재료는 아크릴레이트 계열의 UV 경화 폴리머로



**Fig. 8 Picture of monolithic lithography integration system**

#### 4. 광 프로브 평가

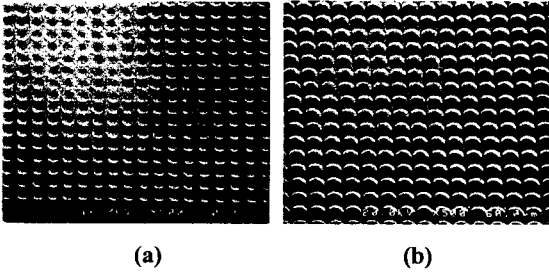


Fig. 9 SEM images of (a) mold and (b) fabricated microlens array

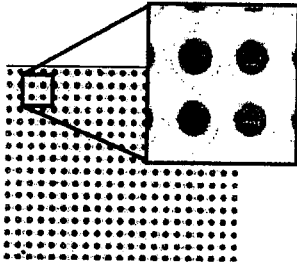


Fig. 10 Microscope image of microlens illuminated aperture array

Table 2 Comparison of geometrical properties between design values and measured values

	Design value	Measured value
Sag height	2.86 $\mu\text{m}$	2.68 $\mu\text{m}$
Radius of curvature	10 $\mu\text{m}$	10.48 $\mu\text{m}$
Substrate thickness	21.32 $\mu\text{m}$	22 $\pm$ 3 $\mu\text{m}$
Surface roughness	$\lambda / 10$ ( $\lambda=405\text{nm}$ )	5.41 nm

재료의 점도는 400cps 이며, 2000mJ의 광량과 90kPa의 가압조건에서 성형공정이 수행되었다.

성형된 마이크로렌즈 어레이의 형상 특성을 평가하기 위하여 광학 현미경, SEM, AFM, 프리즘 커플러 두께 측정기를 이용하여 각각의 항목을 측정 하였다. 그림 9 (b)는 monolithic lithography integration 공정을 통해 제작된 마이크로렌즈 어레이의 SEM 사진을 보여주며, 그림 10는 현미경 사진을 보여주고 있다. 표 2는 각각의 형상 측정 결과를 설계치와 비교한 것이다. 표에서 알 수 있듯이 제작된 렌즈의 직경 및 주기는 설계치와 같이 각각 14 $\mu\text{m}$  과 15 $\mu\text{m}$  이며, 렌즈 높이는 2.68 $\mu\text{m}$ , 렌즈 하부 두께는 22 $\mu\text{m}$  으로 설계공차 이내이며 표면 거칠기는 5.41 $\mu\text{m}$  로 매우 우수함을 알 수 있다.

제작된 마이크로렌즈 일체형 개구어레이의 효율성을 평가하기 위하여 개구어레이에 의해 재생된 광 프로브 어레이와 마이크로렌즈 일체형 개구어레이에 의한 광 프로브 어레이의 광학 특성을 비교 평가하였다. 광 프로브의 형성을 위해 405nm 의 단파장 레이저 소스를 이용한 광원을 마이크로렌즈 일체형 개구어레이와 마이크로렌즈가 형성되지 않은 개구어레이에 조사시켜 각각 Talbot 거리 이후에 재생되는 광 프로브 어레이의 광도 분포를 CCD 카메라를 이용하여 측정하였다. 그림 11은 탈봇 위치에서 측정한 결과를 보여주고 있으며, 마이크로렌즈 일체형 개구어레이를 사용하였을 경우 직경이 1 $\mu\text{m}$ 인 개구어레이와 비교하였을 때 빛의 세기가 약 14배 증가하였다. 또한 탈봇 위치에서 광 프로브의 FWHM(Full Width Half Maximum) 스폿 크기가 0.56 $\mu\text{m}$ 로 측정되었다. 이로써 마이크로렌즈 일체형 개구어레이를 사용함으로써 고효율의 나노 광 프로브 생성을 위한 광학 헤드로 사용할 수 있음을 알 수 있다. 또한 사

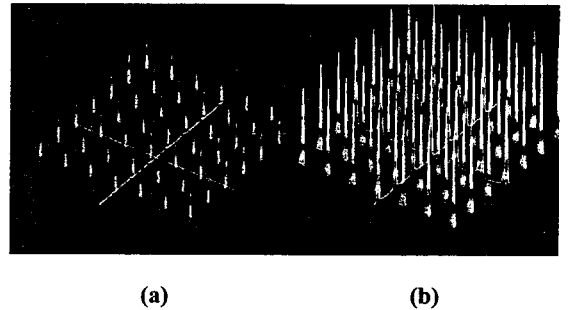


Fig. 11 Intensity profile of optical probes at Talbot position by (a)aperture array without MLA and (b) MLIAA with 10 $\mu\text{m}$  diameter

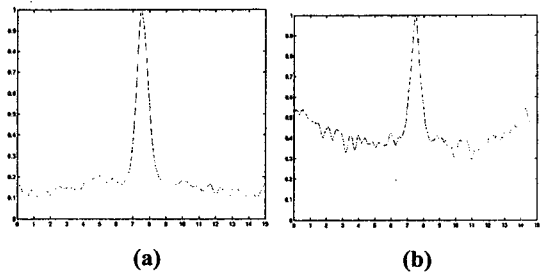


Fig. 12 Line integrated intensity profile of optical probes at Talbot position by (a) MLIAA with 10 $\mu\text{m}$  diameter (b) MLA without aperture array

용된 개구의 직경이 적절함을 평가하기 위해 개구가 존재하지 않는 마이크로렌즈어레이를 이용하여 광 프로브를 측정하였다. 그림 12는 마이크로렌즈 일체형 개구어레이와 개구가 존재하지 않는 마이크로렌즈어레이를 통해 측정된 광 프로브의 line integrated intensity profile을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 마이크로렌즈어레이만 사용하였을 경우 주변에 많은 노이즈를 포함하고 있음을 알 수 있다. 그러나 마이크로렌즈 일체형 개구어레이의 경우 노이즈가 거의 발생하지 않고 있다. 이로써, 직경 10 $\mu$ m의 개구어레이가 적절한 노이즈를 차단시키고 있음을 확인 할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 마이크로렌즈 일체형 개구어레이를 이용하여 나노 광 프로브 구현을 위한 광학 헤드를 개발 하였다. 이를 위해 초점에서 광 스폿의 직경이 최소가 되도록 마이크로렌즈를 설계하였고, 제작을 고려하여 개구의 직경을 설계하였다. 개구어레이는 RIE 공정을 이용하여 제작하였으며, monolithic lithography integration 공정을 이용하여 마이크로렌즈를 개구어레이에 집적함으로써 마이크로렌즈 일체형 개구어레이를 제작하였다. 최종적으로 제작된 마이크로렌즈 일체형 개구어레이에 의해 형성된 광 프로브는 마이크로 렌즈가 없는 개구어레이에 비해 약 14배의 효율 증가를 보였으며, 광 프로브의 FWHM 직경이 0.56 $\mu$ m로 측정되었다. 또한 사용된 개구는 렌즈와 렌즈 사이에 존재하는 빈공간에 의한 노이즈를 적절히 차단하고 있음을 확인하였다. 현재 광 프로브의 직경을 줄이기 위해 고개구율의 마이크로렌즈어레이를 이용한 광학 헤드의 개발에 대한 연구가 진행중에 있다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정 연구실 사업중

“나노 몰드 및 고분자 나노 복제 기술의 나노 광전자소자 응용” 연구과제로서 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. D. H. Cho, S. K. Lee, B. Song, S. K. Kim, S. D. Jung, K. C. Kim, M. A. Chung and W. H. Cho, 2005, Two-dimensional actuators for ultraslim mobile optical disk drive, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 41, pp. 1053~1054.
2. H. F. Shih, C. L. Chang, K. J. Lee and C. S. Chang, 2005, Design of optical head with holographic optical element for small form factor drive systems, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 41, pp. 1058~1060.
3. S. B. Luitjens, M.W. Blum, B. M. De Boer, W. Fontigin, M. A. H. Vander Aa., 2003, Small form factor portable-blue drive: power consumption considerations, *IEEE Trans. Cons. Electr.*, Vol. 49, pp. 637~641.
4. T. Hoog, A. Kastelijin, R. Hendriks, R. Verberne and C. Busch, 2004, Optical ROM card system based on the Talbot effect, *ISOM'04, Fr-L-02*.
5. H. F. Talbot, 1836, *Philos. Mag. J. Sci.*, Vol. 9, pp. 401.
6. L. Rayleigh, 1881, *Philos. Mag.*, Vol. 11, pp. 196.
7. M. Testof, J. Jahns, N. A. Khilo and A. M. Goncharenko, 1996, Talbot effect for oblique angle of light propagation, *Opt. Commun.*, Vol. 129, pp. 167~172.
8. Nicolas Guérineau, Bouchra Harchaoui and Jérôme Primot, 2000, Talbot experiment re-examined: demonstration of an achromatic and continuous self-imaging regime, *Opt. Commun.*, Vol. 180, pp. 199~203.
9. S. Kang, S. Kim, H. Kim and J. Lim, 2005, Fabrication Technology for Photonic Devices-Micro/Nano-Molding, *CPT 2005 (Japan)*, pp. 16~19.
10. S. Kim and S. Kang, 2003, Replication qualities and optical properties of UV-moulded microlens arrays, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol.36, pp. 2451~2456.
11. 김석민, 임지석, 강신일, 전병희, 2004, UV 성형을 통한 마이크로 렌즈 어레이의 제작, *한국소성가공학회지*, 제 13 권, pp 236-241.