《연구논문》 Hankook Kwanghak Hoeji, Volume 13, Number 2, April 2002

그레이스케일 마스크를 이용한 미소렌즈 배열의 제작

성승훈 · 조두진†
아주대학교 물리학과
㉾ 442-749 경기도 수원시 팔달구 원천동 산5번지

(2001년 12월 6일 받음, 2002년 3월 19일 수정본 받음)

홀로그래픽 필름으로 제작된 그레이스케일 마스크를 통하여 두꺼운 포토레지스트를 자외선으로 근접 노광하여 주기 300 μm, 두께 17 μm, 초점거리 2.2 mm인 10×10 미소렌즈 배열을 제작하였다. 그레이스케일 마스크는 컴퓨터로 설계한 미소렌즈 배열을 필름 출력기를 이용하여 고해상도 흑백 필름에 그레이스케일로 기록 및 현상하고 이를 다시 홀로그래픽 필름에 축소복사(6.6배)하여 제작하였다. 본 제작방법은 저렴한 비용으로 100%에 가까운 fill-factor를 얻을 수 있고, 비구면 렌즈를 구현하기가 쉽다는 장점을 가진다.

주제어 : Micro-lens array, Optical fabrication, Grayscale mask, Proximity printing, Optical design.

I. 서 론

미소광학소자는 광정보처리, 광전자공학, 3차원영상 등을 포함하는 매우 광범위한 분야에서 활용되고 있다.[1-4] 미소렌즈는 적용 분야에 따라 그 크기가 수 마이크론에서 수 mm 까지 매우 다양한 크기를 가지므로, 통상적인 연마작업과 같이 어느 정도 크기의 광학소자를 제작하는 방법은 적절하지 않다. 따라서 gradient index 렌즈, photothermal 방법, thermal reflow 방법, 포토레지스트 가공 등을 활용하는데, 이들 방법들은 대부분 반도체 제조공정을 사용한다. 반도체 제조공정은 매우 높은 정밀도를 가진 광학소자들을 제작하는데 유용하지만 여러 단계를 거치므로 제작비용이 높고 크기가 큰 소자를 제작하기 어렵다는 단점이 있다.

Suleski와 O'Shea,[5] O'Shea와 Rockward[6]는 필름 출력기를 이용하여 그레이스케일 마스크를 저렴하게 제작하고 이를 회절광학소자의 제작에 활용하여 좋은 결과를 얻은 바 있다. 일반적인 표면양각 회절광학소자에 있어서 최대 위상변화가 2π 이므로 최대 두께는 파장의 두 배 정도이며, 반도체와 MEMS 분야에서 핵심적인 역할을 하고 있고 인쇄 분야에서 오래 전부터 이용되어 온 포토레지스트가 주로 사용된다. 포토레지스트는 일반적으로 이진 무늬를 기록하는 데 사용되지만, 홀로그래피나 미소광학소자 등의 제작에 있어서는 연속적인 두께 변화를 갖는 아날로그 모드로 많이 이용되고 있다.[1-3]

본 연구에서는 디스플레이 소자, 파면센서 등에 활용될 수 있는 주기 300 μm의 10×10 미소렌즈 배열을 그레이스케일 마스크를 이용하여 두께 20 μm 정도의 두꺼운 포토레지스트에 100%에 가까운 fill-factor로 제작하였다. 그레이스케일 마스크를 제작하기 위하여 컴퓨터로 설계한 미소렌즈 배열을 필름 출력기를 이용하여 고해상도 흑백 필름에 그레이스케일로 기록 및 현상한 1차 마스크를 제작하고, 이를 다시 홀로그래픽 필름에 축소 복사하여 최종적인 2차 마스크를 제작하였다. 제작된 그레이스케일 마스크를 통하여 두꺼운 포토레지스트에 자외선으로 근접 노광한 후에 식각하여 두께 17 μm, 초점거리 2.2 mm인 미소렌즈 배열을 제작하였다. 본 제작방법은 저렴한 비용으로 100%에 가까운 fill-factor를 얻을 수 있고, 비구면 렌즈를 구현하기가 쉽다는 장점을 가진다.

II. 그레이스케일 마스크의 설계

본 연구에서 제작한 10×10 미소렌즈 배열의 각 렌즈는 그림 1에 보인 것과 같이 볼록면-평면으로 구성되며, 초점거리(f)는 곡률반경(R)과 $R=f(n-1)$의 관계를 가진다. 여기서 n은 렌즈의 굴절률로서 포토레지스트의 경우 1.6이다. 렌즈 중심으로부터의 거리 r에 대한 두께 d의 변화는 $d(r)=T-\frac{r^2}{2R}$ 으로 주어지는데, T는 중심에서의 두께이다. 주어진 굴절률 n과 두께 T에 대하여 초점거리 f를 지정하면 거리 r에 따라 요구되는 두께변화 $d(r)$이 주어진다. 그레이스케일 마스크를 통하여 포토레지스트에 이러한 두께변화를 구현하기 위해서는 그

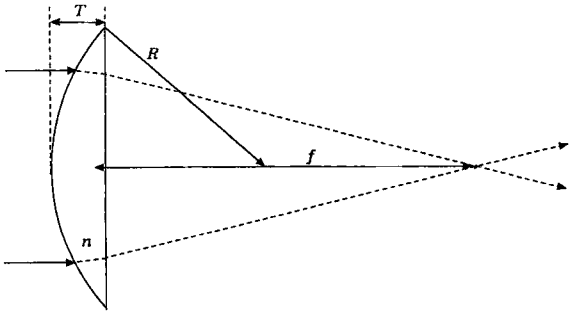

그림 1. 볼록면-평면 렌즈의 단면.

†E-mail: djcho@ajou.ac.kr

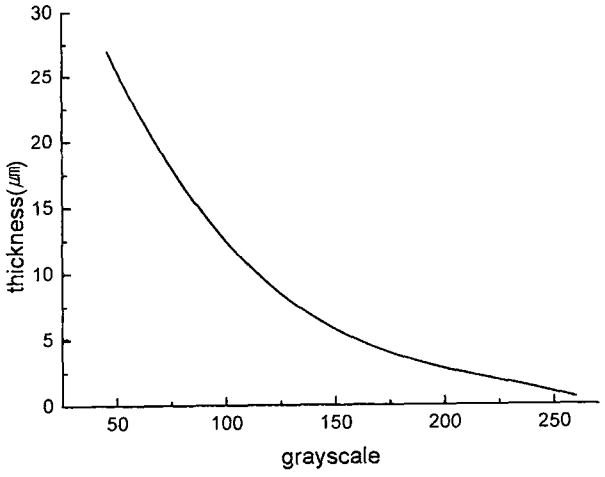

그림 2. 256 그레이스케일에 대한 포토레지스트의 두께변화.

레이스케일 값에 따른 두께변화를 알아야 한다. 그림 2는 1부터 256까지 일정하게 증가하는 그레이스케일을 갖는 16×16 정사각형 배열에 대하여 마스크 제작과정과 포토레지스트 노광 및 처리과정 전체를 통하여 두께변화를 측정한 데이터를 다항식으로 fitting한 것이다. 제작과정 즉, 1차 마스크의 노광 및 현상, 축소복사에 의한 2차 마스크의 제작 그리고 포토레지스트 노광 및 처리에 따라 많은 차이가 나타나지만, 그림 2의 경우 그레이 값 50에서부터 125 부분에서는 비교적 선형적으로 상당한 두께변화를 보이는 반면, 50 이하에서는 거의 노광이 되지 않고 125이상에서는 별로 두께변화를 보이지 않는다. 참고적으로 항온항습기를 이용하여 실험실의 온도 20°C, 습도 42%의 조건하에서 모든 제작과정을 진행하였다.

전체 3×3 mm^2의 크기를 갖는 정사각형에 주기 300 μm, 두께 $T=17$ μm, 초점거리 $f=2.2$ mm인 렌즈를 그림 3(a)와 같이 fill-factor 100%로 배열한 10×10 미소렌즈 배열에 대한 그레이스케일 이미지를 그림 3(b)에 보였다. 여기서 fill-factor는 렌즈배열 전체 면적에 대한 렌즈로 사용되는 부분의 면적 비율로서, 본 연구에서는 렌즈에 기여하지 못하는 면적을 최소화하였다. 그림 3의 이미지는 그림 2에 나타난 다항식을 이용하여 렌즈에 요구되는 두께변화에 대한 그레이 값을 46(가장 어두운 부분)부터 256(가장 밝은 부분)까지 Matlab으로 계산하여 얻은 것으로 필름출력기를 이용하여 고해상도 흑백 필름에 그레이스케일로 기록된다. 위 그레이 값에 대하여 두께를 얻기 위한 전처리 과정은 III절에서 언급하게될 1차 마스크와 2차 마스크를 제작할 때와 동일한 조건으로 제작하였다. 위와 같은 제작과정에서 여러 단계를 거침에 따라 그레이스케일에 따른 포토레지스트의 깊이가 비선형적으로 변화하고 노광이 다소 불균일하므로 정확히 원하는 표면 형태를 얻기 위해서는 시간을 요하는 반복과정이 필요하다. 즉, 포토레지스트의 두께를 고려하여 제작한 것을 측정하여 이를 다시 설계에 반영하므로써 마스크를 최적화하는 설계, 제작 및 측정의 반복과정을 거치면 보다 정밀한 렌즈 배열을 제작할 수 있다.

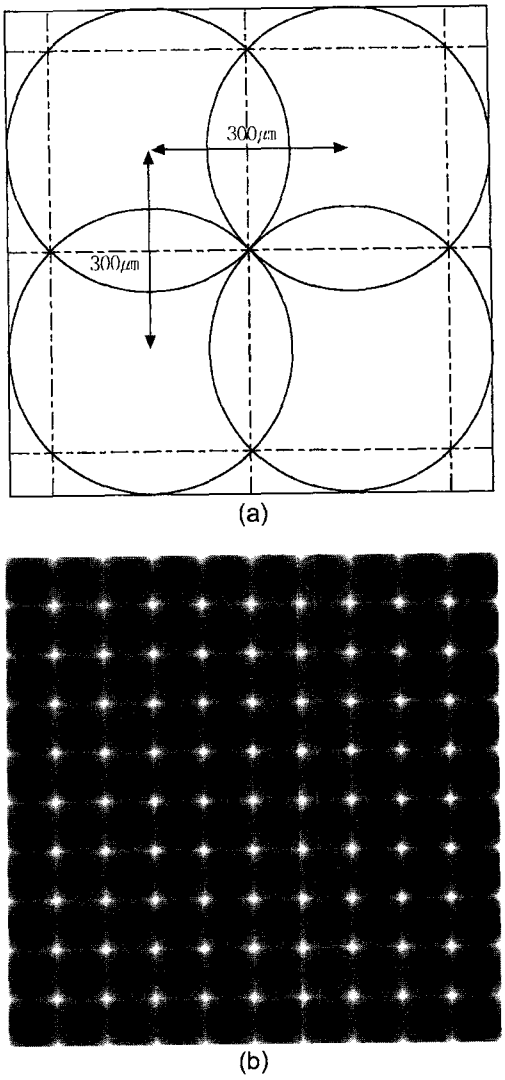

그림 3. 10×10 미소렌즈 배열: (a) 렌즈배열; (b) 그레이스케일 이미지.

III. 그레이스케일 마스크의 제작

그레이스케일 마스크의 제작은 1차 마스크와 이를 축소 복사한 2차 마스크로 이루어진다. 1차 마스크는 II절에서 서술한 대로 컴퓨터로 설계한 그림 3(b)의 미소렌즈 배열 이미지를 상용 필름 출력기(Polaroid HR 6000)를 이용하여 고해상도 흑백 필름(Kodak T-max100)에 그레이스케일로 기록 및 현상한 것이며, 최종 그레이스케일 마스크인 2차 마스크는 1차 마스크를 홀로그래픽 필름에 축소 복사하여 제작한다. 축소복사가 필요한 이유는 필름 출력기의 해상도(4096×2732) 제한과 T-max100의 해상력(5-16 μm) 제한 때문이다. 참고적으로 필름 출력기에 홀로그래픽 필름을 직접 사용하였으나 수 시간에 이르는 노광에도 전혀 감광되지 않았다. 필름 출력기는 필름 규격에 따라 다양한 모듈을 사용하여 큰 크기의 이미지도 출력할 수 있으나, 본 연구에서는 표준 크기 36 mm×24 mm를 사용하였다.

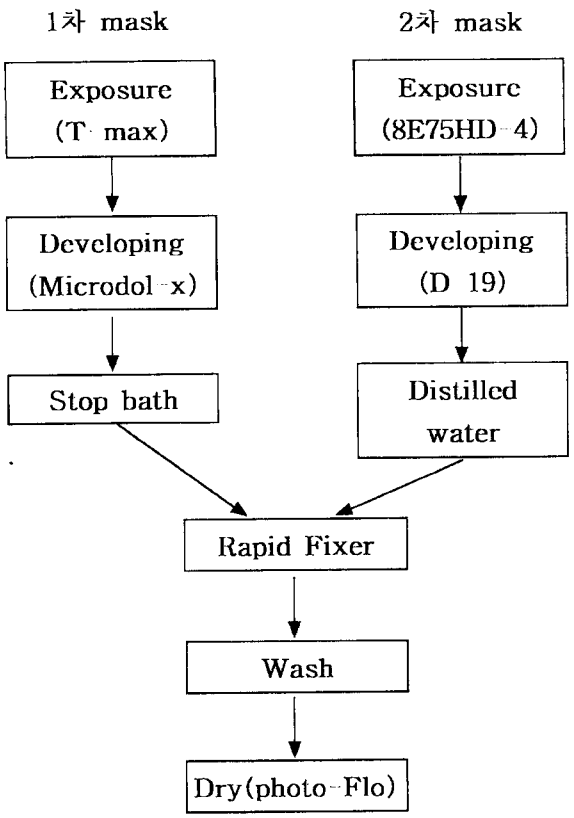

그림 4. 1차 및 2차 그레이스케일 마스크 처리과정.

T-max100과 홀로그래픽 필름의 처리 과정은 그림 4에 보였는데, 보통 사진현상과 같이 현상과 정착 과정을 거쳐 최종적으로 미소렌즈 배열을 위한 그레이스케일 마스크로 제작된다. 현상에는 필름에 적절하게 작용하여 콘트라스트가 강한 Microdol-x를 사용하였는데, 콘트라스트와 입자의 거칠기를 고려하여 13분간 현상하였고, 계속되는 현상을 멈추기 위해 정지액(stop bath)에 1분간 담그고, 현상되지 않은 은염 입자들을 제거하기 위하여 정착액(rapid fixer)에 3분 동안 담근다. 예비 수세(wash)를 30초 동안 하고, 수세를 촉진하기 위하여 수세 촉진제에 3분간 담근 후 흐르는 물에 본 수세를 5분간 하였다. 마지막으로 필름 표면에 있는 물방울을 제거하기 위하여 건조액(희석된 photo-Flo)에 1분간 담근 후 세워서 자연 건조를 하면 1차 마스크가 제작된다.

위와 같이 제작된 1차 마스크는 6.6배로 축소되어 홀로그래픽 필름(grain크기 40 nm인 Agfa 8E75HD-4)에 복사된다. 축소는 일반적인 red filter를 장착한 사진확대기(LPL 7700 Pro)를 거꾸로 사용하여 수행된다. 즉, 인화할 필름을 넣는 위치에 홀로그래픽 필름을 넣고, 인화지를 놓는 위치에 슬라이드를 관찰하는데 이용되는 라이트 박스(형광등 내장)를 놓고 그 위에 1차 마스크를 올려놓는다. 렌즈(Rodagon 1:2.8 $f=50$ mm)의 조리개를 최소(f/16)로 하여 5분간 노광하며, 노광된 홀로그래픽 필름은 D-19 용액으로 2분간 현상한다. 현상된 필름의 콘트라스트는 노광량에 따라 잔류 금속은과 젤라틴의 양에 의해 결정된다. 현상후 정착액에 3분간 정착한 다음, 5분간 수세하고 희석된 photo-Flo에 1분간 담근 후 자연 건조하면 최종적인 그레이스케일 마스크가 제작된다.

IV. 미소렌즈배열 제작 및 결과

제작된 그레이스케일 마스크를 통하여 두꺼운 포토레지스트를 그림 5에 보인 바와 같이 자외선 램프(Osram Ultra-vitalux, $\lambda=365$ nm)로 근접 노광하여 미소렌즈 배열을 제작하였다. 처음에는 접촉 노광을 시도하였으나 필름 grain을 비롯한 noise가 그대로 노광되어 렌즈의 표면이 다소 불규칙하게 제작되었다. 따라서 이미지의 선명도가 다소 감소하더라도 마스크와 포토레지스트 사이에 간격(air gap)을 주어 근접 노광을 하였으며, 간격은 150 μm가 적절한 것으로 나타났다.

짧은 초점거리를 갖는 렌즈를 제작하기 위해서는 두꺼운 포토레지스트 층을 필요로 하므로 Hoechst의 AZ P4903을 스핀코팅으로 두 번 도포하였다. 스핀코팅할 때 적절한 회전수인 3000 rpm에서 30초 동안 한 번 코팅하면 12 μm, 두 번 코팅하면 26 μm의 두께를 얻을 수 있다. 한 변이 300 μm인 정사각형 렌즈의 경우, 본 연구에서 얻은 노광 및 현상 후의 포토레지스트(굴절률 1.6) 두께 17 μm 정도(아래 그림 6참조)로는 초점거리의 최소값이 2.2 mm이다. 초점거리가 더 짧은 두꺼운 렌즈를 얻기 위해서는 코팅할 때 회전수를 낮추거나 코팅 횟수를 늘이는 방법을 사용할 수 있다. 그러나 회전수를 낮추거나 코팅횟수를 증가시킬 경우 표면의 균일도가 저하되는 경향이 있으므로 이를 개선하기 위한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 두께와 균일도를 고려하여 적정한 회전수 3000 rpm과 코팅횟수 2회를 택하였다.

포토레지스트를 코팅한 다음 Hotplate 위에서 95°C로 3분간 softbake 하고, 그림 5와 같이 자외선램프로 그레이스케일 마스크를 통하여 노광한다. 노광 에너지는 5300~6000 mJ/cm^2 이었으며, 현상은 Hoechst사의 AZ 400K(1:4)으로 현상하였다. 현상시간은 약 7분인데, 노광된 부분을 관찰하면서 포토레지스트가 더 이상 현상액에 분해되어 녹아지지 않을 때까지 진행하였다. 현상시간은 실험실의 온도 및 습도에 민감하므로 길게는 1분 정도의 변화가 있었다. 현상이 끝나면 증류수로 간단하게 세척하고 표면에 남아있는 물방울을 제거하기 위해 희석된 photo-Flo에 1분간 담근 다음에 자연 건조하면 최종적인 미소렌즈 배열의 포토레지스트 원판을 얻게된다.

그림 6과 7은 제작된 포토레지스트 미소렌즈 배열의 표면을

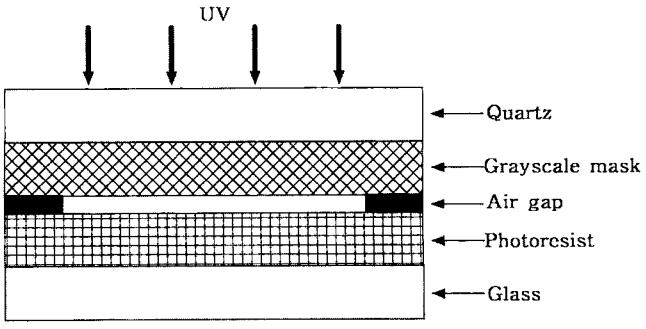

그림 5. 자외선 근접 노광.

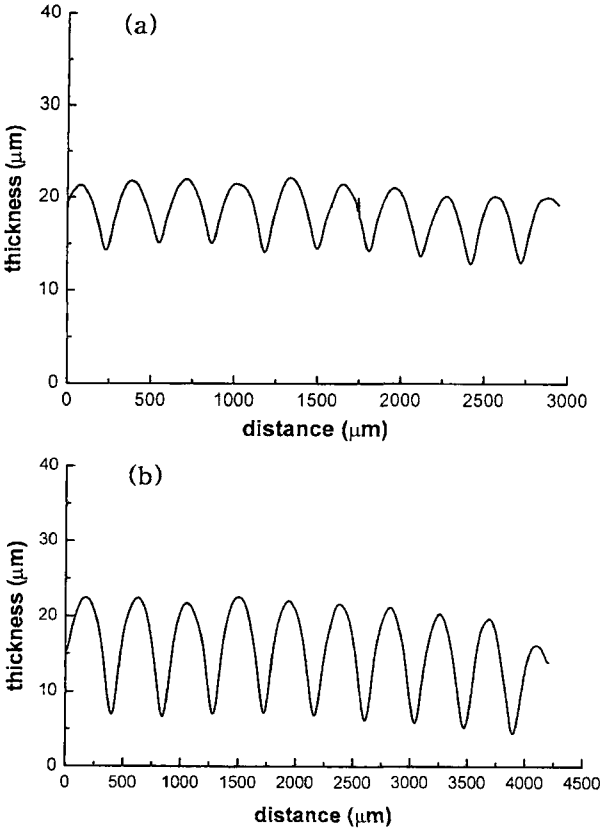

그림 6. α-step으로 측정한 미소렌즈 배열의 표면 형태. (a) 수평 방향, (b) 대각선 방향.

각각 α-step(Tencor P-20)과 3-D 표면 측정기(WYKO NT-2000)로 측정한 것이며, 그림 7은 전체 10×10 미소렌즈 배열 중 3×3 부분만을 나타낸 것이다. 상당히 매끄럽고 구면에 가까

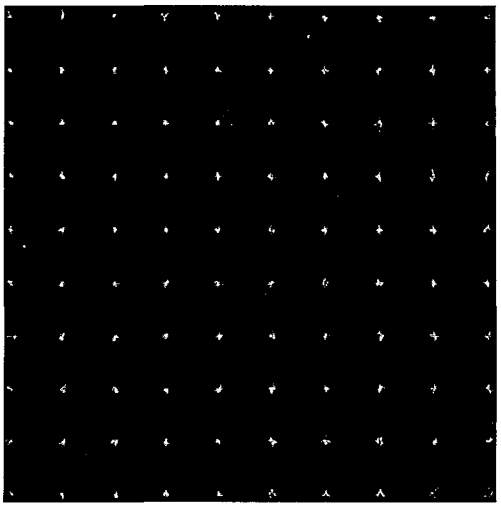

그림 8. 미소렌즈 배열의 확대된 초점들.

운 표면 형태를 보이며 비교적 균일한데, II절에서 언급한 설계, 제작 및 측정의 반복과정을 거치면 더욱 우수한 표면 형태를 얻을 수 있을 것이다. 그림 6(a)는 수평방향(정사각형의 한 변)으로 스캔한 것으로 7 μm 정도의 두께변화를 보이며, 그림 6(b)는 대각선 방향으로 스캔한 것으로 17 μm 정도의 두께변화를 보인다. 즉 본 연구에서 얻은 최대 두께변화는 포토레지스트의 원래 두께 26 μm에 크게 미달하는 17 μm으로 렌즈의 최소 초점거리는 2.2 mm이다. 이는 그림 2의 두께 변화와는 상당한 차이를 보이는 것으로 II절에서 언급한 설계, 제작 및 측정의 반복과정에 대한 필요성을 분명히 보여준다. 특히 그림 2에서 그레이 값 50이하는 현상이 거의 되지 않은 반면, 그림 6에서 볼 수 있는 바와 같이 각 렌즈의 최소 노광부분 즉, 봉우리 부분은 4 μm 정도 깎인 것을 볼 수 있다.

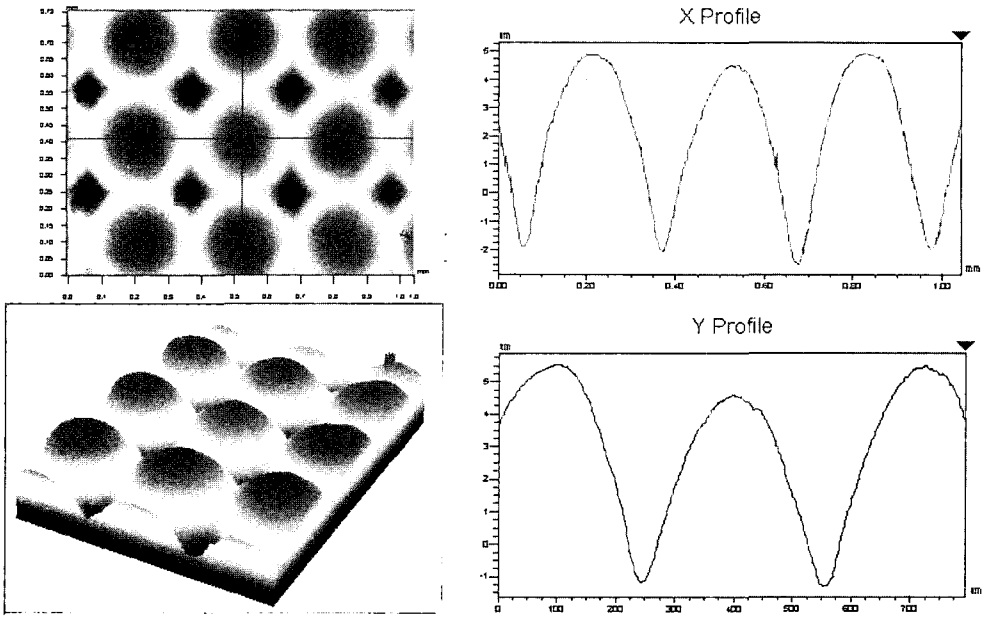

그림 7. 3-D 표면 측정기로 측정한 미소렌즈 배열(3×3부분)의 표면 형태.

또한 최대 노광부분 즉, 각 렌즈의 모서리 부분은 5 μm 정도 남아 있음을 알 수 있다. 그림 6에서 가장자리 2개씩을 제외한 총 16개의 렌즈 단면에 대하여 2차곡선으로 fitting하여 구한 곡률반경은 1.37±0.11 mm로서 설계값 1.32 mm와 일치하지만 비교적 큰 분산을 보인다.

렌즈의 결상능력을 확인하기 위하여 He-Ne 레이저의 평행광을 렌즈에 입사시켜 초점을 사진촬영한 것이 그림 8이다. 이는 2차 마스크를 제작하는데 사용한 확대기 렌즈로 초점면을 약 6배 확대한 것을 T-max100에 직접 노광한 결과이다. 고르지 않은 표면으로 인한 수차의 영향이 분명하지만 상당한 결상능력과 100%에 가까운 fill-factor를 보여 준다.

V. 결 론

본 연구에서는 저렴하게 제작된 그레이스케일 마스크를 이용하여 디스플레이 소자, 파면센서 등에 활용될 수 있는 주기 300 μm의 10×10 미소렌즈 배열을 두꺼운 포토레지스트에 100%에 가까운 fill-factor로 제작하였다. 그레이스케일 마스크는 컴퓨터로 설계한 미소렌즈 배열 이미지를 상용 필름 출력기를 이용하여 고해상도 흑백 필름(Kodak T-max100)에 그레이스케일로 기록 및 현상한 1차 마스크를 다시 홀로그래픽 필름(Agfa 8E75HD-4)에 축소복사하여 제작하였다. 제작된 그레이스케일 마스크를 통하여 두 번 스핀코팅한 두께 26 μm의 두꺼운 포토레지스트를 자외선으로 근접 노광하여 두께 17 μm, 초점거리 2.2 mm인 미소렌즈배열을 제작하였다. 필름 grain 등에 의한 미세한 불균일성의 영향을 완화하기 위하여 coverglass로 마스크와 포토레지스트 사이에 간격을 주어 근접 노광하였는데, 제작된 포토레지스트 미소렌즈 배열의 표면을 α-step과 3-D 표면 측정기로 측정한 결과 상당히 매끄럽고 구면에 가까운 표면 형태를 보이며 비교적 균일한 렌즈배열을 보였다. 또한 He-Ne 레이저의 평행광을 렌즈에 입사시켜 초점을 확대 사진촬영한 결과, 고르지 못한 표면으로 인한 수차의 영향에도 불구하고 상당한 결상능력과 100%에 가까운 fill-factor의 특성을 확인할 수 있었다.

본 제작방법은 저렴한 비용으로 100%에 가까운 fill-factor를 얻을 수 있고, 비구면 렌즈를 구현하기가 쉽다는 장점을 가진다. 또한 포토레지스트의 도포 및 취급 안정화를 통하여 보다 두꺼운, 따라서 짧은 초점거리의 포토레지스트 렌즈 제작과 다양한 비구면 형태의 렌즈도 제작이 가능할 것이다. 우수한 표면 형태를 갖는 보다 정교한 렌즈를 제작하기 위해서는 우선적으로 II절에서 언급한 설계, 제작 및 측정의 반복과정을 거칠 필요가 있다. 또한 근접 노광을 필요케 하는 필름 grain 등의 영향으로 인한 마스크의 미세한 불균일성을 개선하기 위해서는 thermal reflow, 공간여과 및 보다 높은 해상도의 필름을 이용하는 방법 등을 활용할 수 있을 것이다. 그레이스케일 마스크 제작에 있어서 필름 출력기를 이용하는 대신 그레이스케일 이미지를 하프톤 방식으로 레이저 프린터에 출력하는 방법과 공간여과를 병행하는 것도 유력한 방법이다.[6] 제작된 포토레지스트 원판은 일반적인 니켈도금법을 이용하여 니켈원판을 제작하는데 사용하고, 이는 Stamper hot embossing, Roller hot embossing, UV casting/embossing, injection moulding 등과 같은 이미 상용화된 복제 기술을 활용하여 다양한 고분자 물질로 된 미소 렌즈 배열의 대량생산에 활용할 수 있다.[1-3]

감사의 글

본 연구는 아주대학교 96년도 연구용기자재 지원에 의해 수행되었습니다. 그림 7은 삼성종합기술원 디스플레이LAB의 최병소 박사님 팀에서 측정하여 제공한 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] N. F. Borrelli, *Microoptics Technology* (Marcel-Dekker, NY, 1999).

[2] H. P. Herzig, ed., *Micro-optics* (Taylor & Francis, PA, 1997), Chapter 4, 5.

[3] S. Sinzinger and J. Jahns, *Microoptics* (Wiley-VCH, Weinheim, 1999), Chapter 2, 3.

[4] F. Okano, J. Arai, H. Hoshino, and I. Yuyama, "Three-dimensional video system based on integral photography," *Opt. Eng.*, vol. 38, no. 6, pp. 1072-1077, 1999.

[5] T. J. Suleski and D. C. O'Shea, "Gray-scale masks for diffractive-optics fabrication: I. Commercial slide imagers," *Appl. Opt.*, vol. 34, no. 32, pp. 7507-7517, 1995.

[6] D. C. O'Shea and W. S. Rockward, "Gray-scale masks for diffractive-optics fabrication: II. Spatially filtered halftone screens," *Appl. Opt.*, vol. 34, no. 32, pp. 7518-7526, 1995.

Fabrication of micro-lens arrays using a grayscale mask

Seung-hoon Sung and Doo Jin Cho†

Dept. of Physics, Ajou University, Suwon 442-749, KOREA

†E-mail: djcho@ajou.ac.kr

(Received December 6, 2001 ; revised manuscript received March 19 2002)

Some 10×10 micro-lens arrays of a period of 300 μm, a thickness of 17 μm, and a focal length of 2.2 mm are fabricated by exposing a thick layer of photoresist through a grayscale mask via UV proximity printing. The grayscale mask is fabricated in a holographic film by reducing (6.6X) a high-resolution black-and-white film where a grayscale pattern of a micro-lens array designed by a computer has been written using a film recorder. The proposed method has the advantage of a low fabrication cost, a fill-factor of almost 100% and the ease of realizing an aspheric lens.

Classification code : SM.010.