《연구논문》 Hankook Kwanghak Hoeji, Volume 16, Number 6, December 2005

가변 속도 이동식 마스크를 이용한 렌즈 곡면 형성

이준섭 · 박우제 · 송석호† · 오차환 · 김필수

한양대학교 물리학과 마이크로광학 연구실

㉮ 133-790 서울특별시 성동구 행당동 17번지

(2005년 10월 20일 받음, 2005년 11월 29일 수정본 받음)

MEMS 공정을 이용한 굴절렌즈 제작을 위하여, 슬릿 패턴을 갖는 마스크를 이동시키며 노광을 하는 가변 속도 이동식 마스크에 의한 노광 방법을 제안하였다. 감광제 면이 굴절렌즈의 곡면을 이루려면 감광제의 위치에 따른 노광 에너지의 분포를 조절해야 한다. 마스크의 패턴 형태와 이동 속도, 방향에 따라 감광제의 위치에 따른 노광 에너지의 분포를 이론적으로 분석하였으며, 감광제 박막에 임의의 곡면을 갖는 굴절렌즈 형상을 형성할 수 있음을 실험적으로 확인하였다. 100 μm 이상의 후막 감광제를 이용하거나, 혹은 곡면 형상을 갖는 얇은 감광제 형상을 마스크로 하여 이온식각을 수행하여 수백 μm 정도의 최대높이를 갖는 렌즈 곡면형상을 제작할 수 있었다.

주제어 : Lens fabrication, moving mask lithograghy, Lens array, toric lens, f-θ lens.

I. 서 론

렌즈는 광학에서 가장 오래된 관심 분야의 하나이며, 가장 널리 사용되는 광학 부품이다. 근래에는 조명 기구와 휴대용 디지털 기기의 보급 확대에 의하여 렌즈의 수요가 증대되고 있는데, 이러한 렌즈의 제작은 정밀 기계가공에 의하여 이루어지고 있다.[1] 기계 가공에 의해 고 정밀도의 렌즈 형성이 가능하지만, 렌즈의 금형제작에 일반적으로 사용되는 다이아몬드 터닝 머신으로는 비회전 대칭인 토릭 렌즈면의 형성에 어려움이 있고, 금형의 제작 단가가 비싸며, 고밀도의 렌즈 어레이 제작이 매우 어렵다. 따라서, 기존의 금형기술은 높은 수율과 양산을 목적으로 최근에 개발되고 있는 웨이퍼-규모 패키징(wafer-scale packaging)[2] 기술, 즉, 대 면적의 웨이퍼 상에 고밀도 렌즈어레이를 형성하고 웨이퍼-웨이퍼 접착에 의해 렌즈 군을 패키징하는 기술에는 적합하지 못하게 되어, 새로운 렌즈 어레이 제작용 마스터 형성기술을 필요로 하고 있다.

본 연구와 관련된 이동식 마스크 노광 기술은 MEMS 분야에서 X선을 광원으로 하여 처음 시도되었다.[3] 일반적인 노광은 마스크가 고정된 상태에서 이루어지는데,[4] 마스크를 고정시키고 노광을 수행하면 기판의 위치별로 다른 노광량을 줄 수가 없다. 그러므로 한 번의 사진식각 공정이 끝난 후에 잔류되는 감광제는 그림 1(a)에서 보이는 바와 같이 2차원적으로 동일한 높이를 갖게 된다. 한 번의 노출과정을 거쳐 2차원적으로 다양한 높이를 갖는 구조를 만들기 위한 방법으로서, 그레이 마스크(grey mask) 노광[5] 기술이 있다. 일반적으로 사용되는 마스크는 광 투과의 차폐 여부만이 결정되는데, 그레이 마스크는 마스크의 위치별로 투과되는 광량을 조절하도록 설계된 마스크이므로 사진식각이 끝난 후에 잔류되는 감광제 높이차를 그림 1(b)와 같이 3차원적으로 조절할 수 있다. 그러나, 3차원적으로 형성되는 구조의 해상도를 수 μm 이하로 조절하기가 어렵다는 단점을 가지고 있다. 3차원 감광제 곡면구조를 형성하기 위한 또 다른 방법은 그림 1(c)에 보이는 이동식 마스크에 의한 노광[6]이다. 이는 특정 패턴을 가지고 있는 마스크를 속도의 변화 없이 일정하게 이동시키면서 노광을 수행하는 방법으로, 마스크 패턴에 따라 다양한 모양의 3차원 구조를 형성할 수 있는 기술이다. 즉, 마스크가 좌에서 우로 이동을 한다면 마스크에서 광이 투과되는 패턴부의 좌-우 방향 폭을 위치별로 다르게 해서

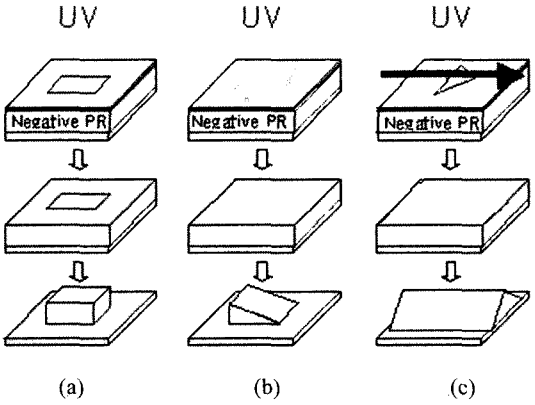

그림 1. 노광에 따른 잔류감광제의 형상.
(a) 일반적인 노광 과정.
(b) 그레이 마스크를 이용한 노광 과정.
(c) 이동식 마스크를 이용한 노광 과정.

†E-mail: shsong@hanyang.ac.kr

감광제의 위치별로 노광이 되는 광량이 달라지도록 하여, 사진 식각 공정이 끝난 후에 잔류되는 감광제의 두께가 위치별로 다르게 되도록 하는 방법이다. 그러나, 마스크를 일정한 속도로 이동시키는 이러한 방법은 이동방향으로만 동일한 3차원 형태가 형성되고, 보다 다양한 3차원 곡면 모양을 대면적에 형성하기에는 한계를 가지고 있다.

본 논문에서는, 마스크 패턴은 가급적 단순한 모양과 일정한 형태를 유지한 상태에서, 마스크의 이동속도와 이동방향을 위치에 따라 다양하게 변화시키는 방법을 제안하고자 한다. 한 예로서, 마스크 패턴으로는 폭이 20㎛에서 200㎛이고, 길이가 2 mm에서 3 mm 정도인 단순한 슬릿 모양을 이용하는 경우에 대해 이론적인 분석과 실험을 수행하였다. 제안된 방법은 마스크의 이동 속도를 조절하여 마스크의 진행 방향에 따라 노광 시간을 조절할 수 있으며, 두 개의 슬릿을 수직으로 배치하고 마스크를 슬릿 방향에 따라 두 번 노광을 수행하면 임의의 3차원적인 구조를 형성할 수 있음을 이론적으로 분석하였으며, 실험을 통하여 구현 가능성을 검증하였다.

II. 본 론

1. 가변 속도 이동식 마스크에 의한 노광

그림 2(b)와 같이 마스크의 패턴이 일정한 폭을 갖는 슬릿 형태이고 왼쪽에서 오른쪽으로 움직이는 경우, 이동 속도를 그림 2(a)에서와 같이 처음에는 빠르고 점차 느려지다가 다시 빠르게 움직인다고 하자. 이동하는 마스크의 슬릿 폭은 일정하기 때문에 이동 속도가 빠른 부분에서는 감광제가 빛에 노출되는 시간이 짧아지고, 속도가 느린 부분에서는 빛에 노출되는 시간이 길어지므로, 마스크의 이동 속도를 조절하는 것에 의하여 각 위치에서의 감광제의 노광 에너지를 임의로 조절할 수 있게 된다. 그림 2(c)에서 보면, 중심부분으로 다가갈수록 이동속도가 느려지므로 노출량이 많아지는 것이 음영의 짙어짐으로 표현되어 있다. 따라서, 감광제를 현상한 후에 보면, 그림 2(d)와 같이 평면상에 위치에 따라 다른 식각 깊이를 갖는 3차원 형상을 얻을 수 있게 된다.

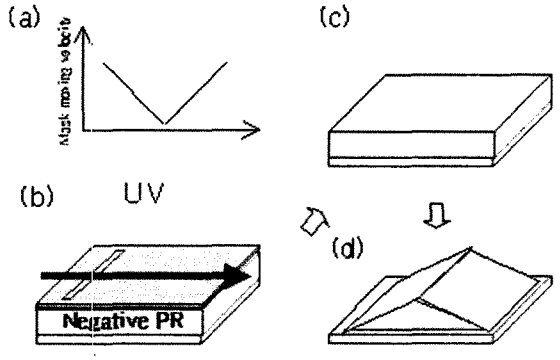

그림 1. 가변 속도 이동식 마스크에 의한 노광.
(a)마스크의 이동속도 변화.
(b)노광시의 마스크 이동도.
(c)음영으로 표시된 감광제 면의 노광 에너지 분포.
(d)현상후의 잔류 감광제의 구조.

본 논문에서는 특히, 수직으로 배치된 한 쌍의 슬릿 형태를 갖는 마스크 패턴을 이용하는 경우에 대해서 보다 구체적으로 분석하였다. 슬릿의 모양은 제작하고자 하는 구조에 따라 다른 임의의 모양을 사용해도 가능할 것이다. 그러나, 설계 및 분석을 보다 용이하고 직관적으로 하기 위해 서로 수직인 슬릿을 이용하는 경우에 대해 한정하여 보고하고자 한다. 그리고 마스크의 이동속도 변화는, xy 이동장치(motorized stage)에 의해 마스크가 단위 길이만큼 연속적으로 이동할 때, 이동하면서 각 위치에서 정지하고 있는 시간의 변화로도 표현이 가능하므로 본 논문에서는 이동 속도를 각 위치에서 정지하는 시간 변화로 대치하여 분석하였다. 마스크의 이동 방향 및 범위를 확대하고, 후막 감광제를 사용하거나, 후속으로 이온식각(deep reactive ion etching)을 수행하면[7] 3차원 구조의 높이를 더욱 확장할 수 있을 것이다.

사진식각 공정에서 노광 에너지는 사용되는 광원의 세기와 노광 시간의 곱으로 표현된다. 가변 속도 이동식 마스크를 이용한 노광에서도 마스크의 이동 속도가 느린 부분에서는 노광 에너지가 높아지는 것은 상대적으로 노광되는 시간이 길어지기 때문이다. 그러므로 광원의 세기가 일정하게 유지되면 노광 시간을 조절하는 것에 의하여 노광 에너지를 결정하게 된다. 음성 감광제(negative photoresist)를 사용하는 경우에는 노광 에너지가 높을수록, 즉, 노광 시간이 길수록 현상 후에 잔류되는 감광제가 많게 되고, 노광 시간이 짧을수록 감광제의 두께가 얇아진다. 양성 감광제(positive photoresist)는 이와 반대인 양상을 보인다.

노광 에너지를 수식적으로 표현하면 다음과 같다.

$$E(x,y) = I(x,y)\,T(x,y) = I_0[\,T(x,y)] \tag{1}$$

감광제 평면인(x, y)면에서, 위치에 따른 조도를 $I(x, y) = I_0$로 일정하게 유지하면, 노광 시간 $T(x, y)$의 조절에 의하여 위치에 따라 다양한 노광 에너지 분포를 형성할 수 있음을 나타낸다.

감광제가 음성인 경우에는 잔류 감광제의 두께가 노광 시간에 대응되므로, (x, y) 위치에서의 잔류 감광제의 두께가 (x, y)에서의 노광 시간 $T(x, y)$에 대응하게 된다. 음성 감광제에서는 노광 시간이 길어질수록 현상이 끝난 후의 잔류 감광제의 두께가 두꺼워지기 때문이다. 형성하고자 하는 곡면을 $Z(x, y)$라 할 때,

$$T(x,y) = aZ(x,y) = a[\,z(x) + z(y) + z(x,y)] \tag{2}$$

와 같이 (x), (y), (x, y)항들로 분리하여 표현하기로 하자. 회전대칭이 성립되는 일반적인 곡면의 경우에는 $r^2 = (x^2 + y^2)$인 반경 r의 함수 꼴을 갖는데, 3차까지를 고려했을 때 $Z(x, y)$는 다음과 같다.

$$
\begin{aligned}
Z(x,y) &= a(x^2+y^2)+b(x^2+y^2)^2+c(x^2+y^2)^3 \\
&= z(x)+z(y)+z(x,y) \\
&= [ax^2+bx^4+cx^6] \\
&+ [ay^2+by^4+cy^6] \\
&+ [2by^2+3cy^4]x^2 \\
&+ [3cx^4]y^2
\end{aligned} \tag{3}
$$

위 식은 a, b, c 세 개의 미지수로 표현되는 회전대칭인 면을 표현하는 식으로 a, b, c 세 개의 미지수는 렌즈 설계 시에 최적화를 통해 얻어지는 상수에 해당된다. 수식 (3)의 마지막 우변에서 첫 항은 $z(x)$에 해당되고, 두 번째 항은 $z(y)$에, 세 번째와 네 번째 항은 $z(x, y)$에 해당한다.

이를 가변 속도 이동식 마스크에 의한 노광에 적용하면, 수식 (3)의 각 항은 한 번의 가변 속도 변화에 의한 노광에 해당한다. 우선 첫 항 $z(x)$에 대한 노광과정을 보자. x축에 수직하고 폭이 일정하게 열려 있는 슬릿이 x축 방향으로 단위 길이만큼 이동하면서 각 위치에서 $[ax^2+bx^4+cx^6]$만큼의 시간 동안 정지하고 다음으로 이동하며 노광을 수행하면, 각 위치에서 필요한 노광 에너지인 $I_0\alpha[z(x)]$만큼의 에너지가 누적된 상태가 된다. 마찬가지로 y축에 수직하고 폭이 일정하게 열려 있는 슬릿이 y축 방향으로 단위 길이만큼 이동하면서 각 위치에서 $[ay^2+by^4+cy^6]$만큼의 시간 동안 정지하고 다음으로 이동하며 노광을 수행하면, 각 위치에서 필요한 전체 노광 에너지의 일부인 $I_0\alpha[z(y)]$만큼의 에너지가 추가로 누적된 상태가 된다. 이 단계가 마무리 되면 감광제의 각각의 위치에서는 x, y의 곱으로 이루어지는 항으로 결정되는, 즉 $I_0\alpha[z(x,y)]$ 만큼의 에너지를 제외한, 노광 에너지가 누적된 상태로 된다.

x, y의 곱으로 이루어지는 $z(x, y)$에 해당하는 에너지인 $I_0\alpha[z(x,y)]$를 이동식 마스크에 의한 노광으로 누적시키기 위해서는, 마스크 슬릿의 폭이 위치에 따라 다르게 형성되어 있어야 한다. x나 y만으로 이루어지는 경우에는 변수가 하나이기 때문에, 각기 다른 변수에 대해서는 위치에 따른 변화가 무시되므로 폭이 일정해야하지만, x와 y의 곱으로 표현된 항은 두 변수 중 하나는 마스크의 이동속도, 즉 단위 길이 이동에서의 정지 시간 조절로 변화를 조절할 수 있으나, 나머지 변수는 슬릿의 폭으로 조절해야 한다. 그러므로 수식 (3)의 세 번째 항에 해당하는 노광에너지를 누적시키기 위해서는 x축에 대해 x^2으로 폭이 다르게 설계된 슬릿을 y축에 대하여 단위 길이만큼 이동하면서 각 위치에서 $[2by^2+3cy^4]$만큼의 시간동안 정지하고 다음으로 이동하도록 수행하고, 네 번째 항에 해당하는 노광에너지를 누적시키기 위해서는 y축에 대해 y^2으로 폭이 다르게 설계된 슬릿을 x축에 대하여 단위 길이만큼 이동하면서 각 위치에서 $[3cx^4]$만큼의 시간 동안 정지하고 다음으로 이동하도록 수행하면 된다. 세 번째와 네 번째 항에 해당하는 에너지의 누적을 위한 노광은 슬릿의 폭을 일정 비율로 줄이고 시간을 그 비율만큼 길게 하는 방법으로 수행하면 폭이 좁은 슬릿을 이용해서 수행할 수 있다.

이상의 4회에 걸친 이동식 마스크에 의한 노광을 수행하면 a, b, c 세 개의 미지수로 표현되는 회전대칭인 면을 형성할 수 있다. 마스크에는 x축 방향과 y축 방향으로 1개씩의 슬릿을 배치할 수 있으므로, 마스크의 이동이 두 축에 대하여 가능한 경우에는 2개의 마스크를 정렬하여 노광을 수행하면 네 번의 노광을 통해 각각의 항에 해당하는 노광에너지를 줄 수 있으므로, 원하는 곡면을 형성할 수 있다.

그림 3은 수식 (3)에서 계수 a, b, c가 각각 0.00326, 0.0208, 0.00511 인 경우, 슬릿 이동시 누적 노광 에너지를 계산한 결과이다. 1단계에서는 단위 1의 폭을 갖는 슬릿을 각 단위 위치에서 $[ay^2+by^4+cy^6]$ 시간만큼 정지하면서 y축 방향으로 y축 좌표 -20에서 20까지 이동시키면서 노광하는 과정과 누적 노광 에너지의 분포를 나타낸다. x축에 대해서는 동일한 노광 에너지가 누적됨을 알 수 있다. 2단계에서는 단위 1의 폭을 갖는 슬릿을 각 단위 위치에서 $[ax^2+bx^4+cx^6]$의 시간만큼 정지하면서 x축 방향으로 x축 좌표 -20에서 20까지 이동시키면서 노광하는 과정과 누적 노광 에너지의 분포를 나타낸다. 2단계가 끝나면 x축 방향과 y축 방향에 대하여 각기 다른 누적 노광 에너지의 분포를 갖지만, 등위상면은 원이 아니다. 3단계에서는 x^2으로 폭이 다르게 설계된 슬릿을 각 단위 위치에서 $[2by^2+3cy^4]$의 시간만큼 정지하면서 y축 방향으로 y축 좌표 -20에서 20까지 이동시키면서 노광하는

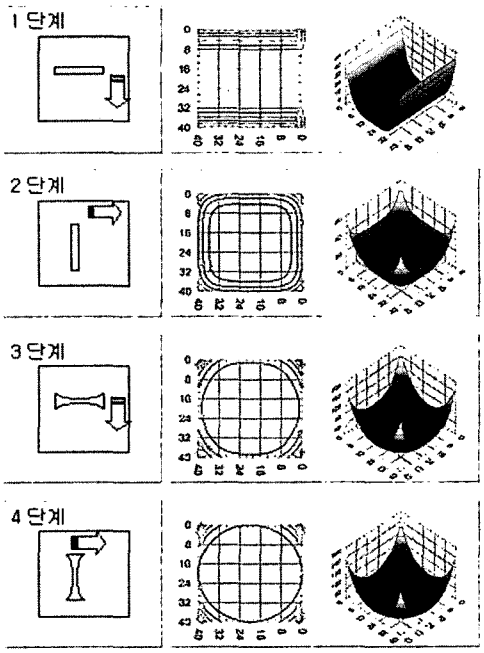

그림 3. 단계별 마스크의 형태 및 이동방향과 등고선과 3차원 그래프로 표시된 감광제에 누적되는 노광에너지의 분포를 나타내는 시뮬레이션 결과.

과정과 누적 노광 에너지의 분포를 나타낸다. 4단계는 y^2으로 폭이 다르게 설계된 슬릿을 각 단위 위치에서 $[3cx^4]$의 시간만큼 정지하면서 x축 방향으로 x축 좌표 -20에서 20까지 이동시키면서 노광하는 과정과 누적 노광 에너지의 분포를 나타낸다. 각 1단계에서 4단계 까지는 수식 (3)의 마지막 우변의 네 개 항에 해당하는 노광에너지가 더해지는 과정이다. 4단계까지 노광이 이루어지면 누적 노광 에너지의 분포는 원형의 등위상면을 갖는데, 이는 누적 노광 에너지가 회전 대칭으로 분포됨을 나타낸다. 이와 같은 노광 에너지 분포가 형성되면 현상 후에 양성감광제 경우에는 볼록한 면이, 음성 감광제 경우에는 오목한 면이 형성된다.

수식 (3)에서 각각의 $z(x)$, $z(y)$, $z(x, y)$항들이 양수가 아닌 음수인 경우에는 노광 에너지 축적과정에 의해서 직접적으로 양수와 음수를 동시에 표현할 수 없다. 이미 노출된 노광 에너지를 감소시킬 수 없기 때문이다. 이러한 문제는 다음과 같이 일정한 값을 더하여 모든 항을 양수로 만듦으로써 해결할 수 있는데, 실제 적용과정에서는 슬릿이 각각의 위치에서 정지하게 되는 시간을 일률적으로 증가시키는 것이다. 즉, 슬릿이 수식적으로 -3초간 정지해야 하는 위치에서는 4초가 증가된 1초간 정지하고, 2초간 정지해야 하는 위치에서도 4초가 증가된 6초간 정지하도록 한다. 이는 수식적으로는 z축에 대하여 +4초만큼 평행 이동한 것에 해당한다.

(x, y)축 방향으로 비대칭인 토릭 면(toric surface profile)의 경우는 다음과 같다.

$$Z(x, y) = ax^2 + by^2,\ a \neq b \tag{4}$$

폭이 일정하고 x축 방향과 y축 방향으로 1개씩 배치된 슬릿을 이용하여 ax^2, by^2에 해당하는 시간만큼 기다리고 다음 단위 길이만큼 이동하는 방법에 의하여 노광을 2회 수행하는 것으로 형성할 수 있고, 좀 더 복잡하게 표현되는 면도 슬릿의 이동 속도를 조절하는 것에 의하여 형성이 가능하다. 그림 4는 계수 a, b가 각각 3, 1인 토릭 면에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다. 일정한 폭을 갖는 슬릿을 x축 방향으로 각각의 단위 위치에서 ax^2만큼의 시간동안 정지하면서 이동시키고, 이어서 y축 방향으로 각각의 단위 위치에서 by^2만큼의 시간동안 정지하면서 이동시키며 노광을 하였을 때의 누적 노광 에너지의 분포이다. 임의의 단위로 표시된 등위상면과 노광 에너지의 누적 분포를 보면 토릭 면이 형성됨을 알 수 있다. 노광 에너지의 분포는 그림 3에서와 같이 가장자리가 높은데, 양성 감광제를 이와 같은 분포로 노광하면 현상 후에 토릭 형태로 볼록한 면이 형성될 것임을 예상할 수 있다.

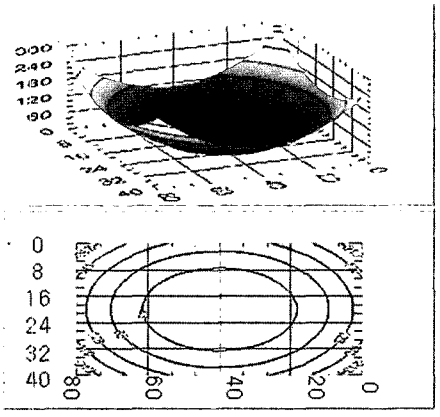

그림 4. 3차원 그래프와 등고선으로 표시된 토릭면에 대한 노광 에너지 분포의 시뮬레이션 결과.

렌즈의 면의 수식은 x와 y를 변수로 하여 구성된다. 이를 이동식 마스크에 의한 노광에 적용하면, 이동 속도의 변화로 변수를 조절할 수 있고, 슬릿 폭의 변화로도 변수를 조절 할 수 있음을 나타낸다. 그러므로 x나 y 중 하나의 변수만 있는 수식의 항은 이동 속도의 변화만으로 표현이 가능하고, x와 y를 모두 변수로 하는 수식의 항도 이동 속도와 슬릿 폭의 변화를 이용하면 표현이 가능하다.

3. 가변 속도 이동식 마스크를 이용한 렌즈의 제작

앞서 고찰한 내용을 바탕으로 하여 렌즈면의 높이 차이가 100 ㎛ 정도인 렌즈 어레이를 제작하였다. 제작은 다음과 같이 두 가지 방법으로 수행되었다. 첫 번째 방법은 감광제로 clariant사의 양성감광제인 AZ9260을 사용하여 실리콘 기판 위에 렌즈 면을 형성한 후, 이어서 Deep-RIE (reactive ion etching) 공정을 수행하여 렌즈면의 두께 차이가 150 ㎛ 정도인 원판(master)을 제작하였다. 그리고, 제작된 원판을 사용하여 PDMS 재질을 이용한 복제 렌즈를 제작하였다. 두 번째 방법은 감광제로 microchem사의 음성후막감광제인 SU-8을 이용하여 사진 식각만으로 렌즈면의 두께 차이가 100 ㎛ 정도인 렌즈를 형성하였다. 두 가지 방법으로 제작된 렌즈들은 가로, 세로가 각각 2 mm인 정사각형 형태의 단면을 갖는 3×3 어레이로 제작되었으며, 렌즈의 실제 두께 차이는 각각 300 ㎛와 200 ㎛ 정도이지만, 이는 렌즈 단면의 대각선 방향에 대한 것이며, 렌즈 직경이 2 mm의 원형인 경우로 제한하면 159.3 ㎛ 와 95.3 ㎛의 두께 차이를 갖도록 하여 개구수가 상용 핸드폰 카메라의 렌즈 범위에 근접하도록 하였다.

그림 5는 가변 속도 이동식 마스크에 의한 노광을 위한 장치의 구성도이다. 중심 파장이 365 mm이고 조도가 1.3 mW인 UV 광원과, 빛 차단기(shutter), 이동식 마스크를 움직여 주는 정밀 스테이지(PI사, motorized linear stage M-505.4D, Travel range : 100 mm, Resolution : 0.25 ㎛), 그리고 이를 조절하기 위한 컴퓨터로 구성된다. 그림 6은 실제 구성된 실험 장치의 사진이다. 기판은 상하로 수직 이동이 가능하도록 구성된 고정대에 부착되도록 하고, 마스크의 이동과 정지로 이루어지는 전체 노광의 시작과 종료는 빛 차단기로 조절하였다. 이동식 마스크는 x, y축으로 이동이 가능하도록 십자 형태로 결합된 2개의 선형 이동 스테이지에 결합되어 컴퓨터로 동작이 제어되도록 하였다.

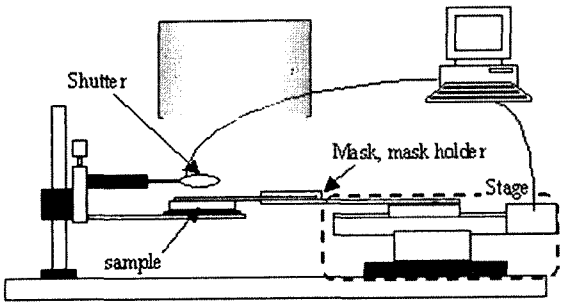

그림 5. 실험 장치의 구성도.

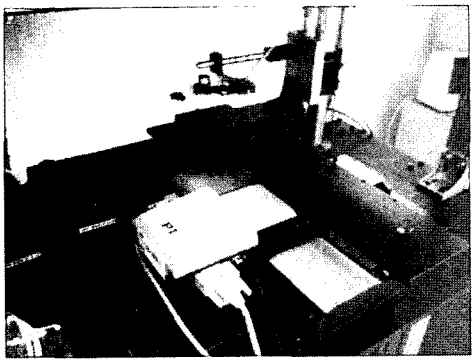

그림 6. 실험 장치의 사진.

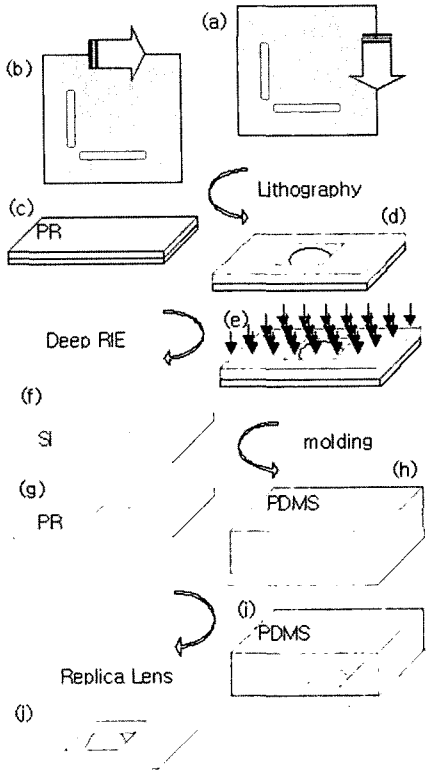

그림 7. AZ 9260을 감광제로 하고 이동식 마스크 노광에 의한 사진 식각 공정과 Deep RIE, molding, 복제 공정을 이용한 렌즈의 제작 공정도.

감광제의 잔류 두께를 노광 시간으로 조절하기 위해서는 사용되는 감광제가 초기에 두껍게 도포되는 것이 좋고, 노광에 사용되는 광원의 세기가 약할수록 정밀조정 측면에서 유리하다. 첫 번째 실험인 AZ9260 감광제와 Deep-RIE 과정을 이용하여 제작하는 과정은 그림 7과 같다. AZ9260을 14㎛의 두께로 도포한 1 mm 두께의 실리콘 기판을 사용한다. 감광제가 도포된 기판은 마스크를 y축 방향과 x축 방향으로 각각 속도를 바꾸며 노광을 실시한다(a), (b). 그러면 감광제는 수식 (3)에서 정의된 노광량에 따라 감광된다(c). 다음으로 AZ 400K developer로 현상을 실시하여 잔류 감광제의 두께 차이가 12 ㎛가 되도록 감광제로 이루어진 곡면을 형성한다(d). (a)에서 (d)까지의 과정은 렌즈 제작의 과정에서 사진 식각 공정(lithography)에 해당한다. 사진 식각이 끝나면 Deep-RIE를 수행한다(e). 이 과정을 통해 두께 차이가 증가되는데 감광제가 완전히 제거되도록 이온식각을 수행하면 렌즈 표면 형상을 갖는 실리콘 면이 만들어진다(f). 이온식각을 수행하면 식각된 실리콘의 표면에 감광제를 도포하고 열처리(reflow)를 한다(g). 그 위에 PDMS를 붓고(h) 굳힌 다음, PDMS를 분리하면 복제용 틀(stamper)이 만들어진다(i). 이를 이용하여 복제 렌즈(replica Lens)를 만든다(j).

감광제로 형성된 곡면의 두께 차이를 증가시키기 위하여 이온식각을 수행하였는데, 식각에 사용되는 가스의 종류와 비율을 조절하는 것에 의하여 감광제와 실리콘의 식각 비율을 조절할 수 있다. 본 실험에서 사용된 식각장치는 최대 80배 정도의 식각율 차이를 형성할 수 있으므로,[8] 실리콘 기판 위에 12 ㎛의 두께로 형성된 감광제가 있다면, 실리콘에는 840 ㎛의 두께 차이를 갖는 곡면의 형성이 가능하다. 실험에서는 30배 정도의 식각율 차이가 나도록 식각조건을 선정하여 원하는 곡면을 제작할 수 있도록 하였다. 다음 과정에서는 최종적으로 곡면이 형성된 실리콘에 1 ㎛ 이하의 감광제층을 도포하고 열처리를 하였는데, 이는 이온식각에 의하여 손상된 표면을 매끄러워지도록 하기 위해서 이다. 이렇게 형성된 틀을 이용하여 복제 렌즈를 만들었는데, 감광성 에폭시 재질을 이용하여 자외선 복제(UV embossing)로 렌즈 어레이를 형성하였다.

두 번째 실험 재질인 SU-8 음성 감광제는 수 백 ㎛ 두께로도 도포가 가능하므로, 이온식각 과정을 거치지 않고도 개구수가 높은 렌즈를 형성할 수 있다. 즉, SU-8을 감광제로 이용한 렌즈의 형성 과정은 그림 7에 설명된 과정 중, (a)단계에서 (d)단계까지인 사진 식각 공정만으로 제작이 가능하다. SU-8은 광 투과율이 높으므로 후속의 자외선 복제 과정이 없이 바로 렌즈로도 사용이 가능하므로,[9] 본 실험에서는 1 mm 두께의 실리카 기판을 사용하여 렌즈를 제작하였다. 노광단계에서는 실리카 기판의 감광제가 도포되지 않은 쪽에서 UV광을 입사시키는 후면 노광[10]을 실시하였는데, 이는 음성 감광제인 SU-8 물질이 기판에 부착된 부분부터 감광되면서 렌즈면을 형성하도록 하여, 상대적으로 약하게 노광되는 반대면 감광제 부분이 현상과정에서 잘 제거되도록 하기 위함이다.

하기 위함이다.

4. 측정 결과

그림 8은 그림 7의 과정을 통하여 얻어진 AZ 9260을 감광제로 이용한 사진식각과 Deep-RIE, 복제 공정에 의하여 제작된 렌즈의 이론적인 단면 형상과 측정된 단면 형상이다. 측정은 KLA Tencor사의 P-10 Surface profiler를 이용하였으며, 측정된 단면은 렌즈의 중심이 지나도록 하였다. 측정 범위는 2 mm이다. 렌즈 두께의 차이는 최대 159.3 ㎛이고, 곡률반경은 3.22 mm이다. 측정 결과는 이론값과 근사적이지만, 횡 방향으로 측정 위치가 900 ㎛를 넘어서면 전반적으로 측정값이 이론값에 비하여 작은 것을 볼 수 있다. 측정 위치가 900 ㎛에서 1350 ㎛의 범위에서는 측정값과 이론값의 차이가 점점 커지다가 1350 ㎛의 범위를 넘으면 그 차이가 대략 10 ㎛ 정도로 고정이 되는데, 이는 자외선 복제과정에서 사용된 에폭시 재질의 수축(shrinkage) 현상에 의한 것이다.[11] 즉, 에폭시 재질이 경화되는 과정에서 중심 부분에서의 부피감소가 주변 보다 많이 일어나서 생긴 것으로, 측정 위치가 1350 ㎛의 범위를 넘어선 범위에서는 측정값을 40 ㎛정도 오른쪽으로 평행이동하면 이론값과 유사한 값을 보인다. 따라서, 에폭시 재질의 부피에 따른 수축 정도를 결정하고 이를 실제 렌즈설계 과정에 반영하는 노력이 필요하다.

그림 9는 SU-8을 감광제로 이용한 사진식각에 의하여 제작된 렌즈의 이론적인 단면 형상과 측정된 단면 형상이다. 측정은 KLA Tencor사의 P-10 Surface profiler를 이용하였으며, 측정된 단면은 렌즈의 중심이 지나도록 하였다. 측정 범위는 2 mm이다. 렌즈 두께의 차이는 최대 95.3 ㎛이고, 곡률반경은 5.29 mm이다. 측정 결과는 이론값과 근사적이지만, 측정 위치가 1250 ㎛인 위치에서 측정값이 이론값에 비하여 5 ㎛ 정도가 작아지면서 부분적으로 골을 이루는 것을 볼 수 있다. 골은 70 ㎛의 폭으로 나타나는데, 이러한 현상은 마스크의 이동시에 부분적으로 계산된 것과는 다른 속도로 이동하였기 때문으로 추정된다. 이 영역을 제외하고는 전반적으로 이론에 가까운 측정값을 보인다.

형성된 렌즈면은 정밀 기계 가공으로 가공된 면에 비하여 거칠다. 이는 후속의 감광제도포와 열처리에 의하여 식각면이 매끄러워지기는 하였으나, Deep RIE 공정을 통해 두께의 단차가 증가되면서, 사진식각이 마무리되었을 때의 거친 정도도 마찬가지로 증가되기 때문이다. SU-8을 감광제로 하여 사진 식각만으로 렌즈면을 형성하는 경우에는 감광제의 특성에 위한 것으로 추정된다. 사진 식각 과정이 마무리 된 상태에서, SU-8은 AZ9260에 비하여 도포 두께는 두꺼우나 형성된 면이 거친 것을 확인할 수 있었다. 형성된 면이 거친 다른 이유로는, 마스크의 이동 방식에 의한 것으로 추정된다. 실험 과정에서 마스크는 가변 속도로 이동하지 않고 단위 거리만큼의 이동과 계산된 시간만큼의 정지를 반복하며 가변 속도의 효과를 유발 시켰는데, 이러한 정지와 이동의 반복에 의하여 현상 후에 렌즈면은 곡면이 아닌 미세한 두께 차이를 갖는 계단과 같은 면으로 이루어지게 되고, 이러한 두께 차이가 전체적인 렌즈면에 대해서는 거칠기로 작용하였을 것으로 판단된다.

제작된 렌즈는 그림 10에 보여지는 것과 같이 3x3의 어레이로 구성된다. 어레이의 구성은 마스크의 설계와 균일한 조도를 갖는 노광영역의 면역에 따라 증가가 가능하다. 그림 10의 렌즈 어레이는 AZ9260을 이용한 사진식각과 Deep RIE 공정을 통하여 제작된 복제렌즈이고, 촬영이 용이하도록 금이 도금된 것이다.

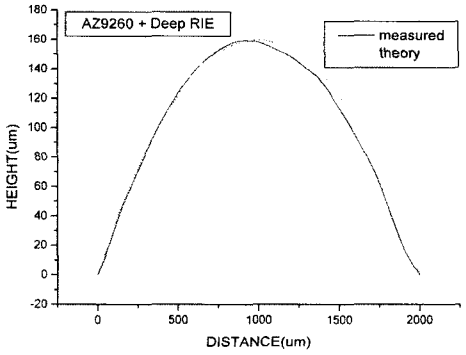

그림 8. AZ 9260을 감광제로 이용한 사진식각과 Deep-RIE, 복제 공정에 의하여 제작된 렌즈의 이론적인 단면 형상과 측정된 단면 형상.

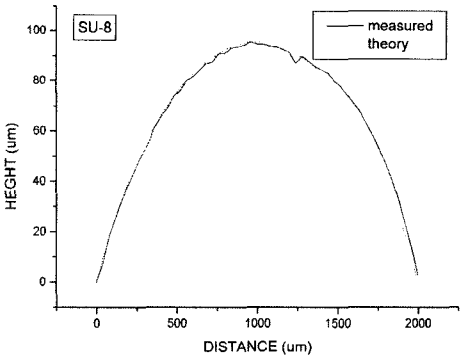

그림 9. SU-8을 감광제로 이용한 사진식각에 의하여 제작된 렌즈의 이론적인 단면 형상과 측정된 단면 형상.

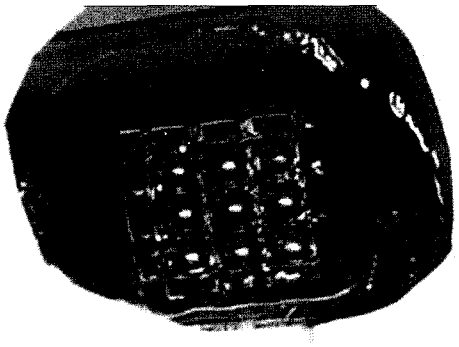

그림 10. AZ 9260을 감광제로 이용한 사진식각과 Deep-RIE, 복제 공정에 의하여 제작된 렌즈 어레이에 Au를 증착한 것의 사진.

III. 결 론

본 논문에서는 가변 속도 이동식 마스크를 이용하여 렌즈를 제작할 수 있음을 이론적으로 분석하고 실험을 통하여 확인하였다. 렌즈면의 형성을 위하여 기존의 이동식 마스크에 의한 방법과는 다른 이동 방식을 도입하였고, 형성되는 렌즈면의 규모는 기존의 마이크로렌즈의 범위를 벗어나는 소형 렌즈의 제작도 가능함을 확인하였다.

마스크의 슬릿의 형태를 바꾸면서 중복하여 노광을 실시하면 수학적으로 기술되는 곡면에 부합되는 노광 에너지의 분포를 기판면에 형성 할 수 있음을 알 수 있었다. 이는 수학적으로 기술이 가능한 곡면은 형성이 가능함을 의미한다. 이동 속도를 변화시키면 동일한 마스크를 이용하여 각기 다른 곡면을 갖는 렌즈의 형성도 가능하다. 실험에서는 가변 속도 이동식 마스크 방법을 이용하여, AZ9260을 사용한 사진식각과 Deep RIE를 함께 이용하여 두께 차이가 159.3 ㎛이고 직경이 2 mm인 렌즈와 SU-8을 사용한 사진 식각을 통하여 두께 차이가 95.3 ㎛이고 직경이 2 mm인 렌즈를 제작 하였다.

슬릿을 어레이로 배치하는 것에 의해 렌즈를 어레이로 제작할 수 있음을 확인하였는데, 어레이로 배치되는 슬릿의 폭을 조절하면 동일 기판에 각기 다른 곡면을 갖는 렌즈 어레이의 제작도 가능할 것으로 예상된다. 측정 결과를 보면 전반적인 형태가 이론값과 유사함을 알 수 있다. 제작된 렌즈의 표면은 정밀 기계가공에 의하여 가공된 면에 비하여 거친 것을 확인하였는데, 렌즈면의 형성을 위한 마스크의 이동 방식을 실제 가변 속도 방식으로 바꾸면, 단위 거리만큼의 이동과 계산된 시간만큼의 정지를 반복함으로써 발생되는 계단과 같은 면이 곡면으로 바뀌어 좀 더 매끄러운 면이 형성될 것으로 예상된다.

형성된 렌즈는 고해상도의 영상재현에는 적합하지 못할 것으로 판단되지만, 어레이 형성이 가능하고, 조명 광학계에는 적용하기에 적합할 것으로 예상되며, 토릭 렌즈나 f-θ 렌즈와 같이 회전 대칭이 아닌 곡면이나, 마스크 이동용 스테이지의 구동범위를 넘지 않는 범위에서는, 한 방향으로 폭이 긴 곡면의 형성에도 적합할 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구에는 한양대학교의 과학기술(1)장학금(제2004-HG0244호)이 지급되었으며, 지원에 감사 드립니다.

본 연구에는 한국과학재단의 특정기초연구지원사업(과제번호 : R01-2005-000-10276-0)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

[1] 김상석, 김정호, "초정밀 가공기술을 이용한 광응용부품 개발", *광학과 기술 8권 2호*, pp. 5-13, Apr. 2004.

[2] A. Polyakov, S. Sinaga, P. M. Mendes, M. Bartek, J. H. Correia and J.N. Burghartz "High-resistivity polycrystalline silicon as RF substrate in wafer-level packaging", *ELECTRONICS LETTERS* 41(2), pp. 100-101, Jan. 2005.

[3] N. Matsuzuka, et. Al., "Algorithm for Analyzing Optimal Mask Movement Pattern in Moving Mask Deep X-ray lithography", *2002 international symposium on micromechatronics and human science*, pp. 159-164, 2002.

[4] Marc J. Madou, *Fundamentals of Microfabrication* (CRC *press*, New York Washington, D.C. USA, 2002), pp. 2-6.

[5] Donald C. O' Shea et al., "Diffractive Optics design, fabricaton, and test. *Tutorial Texts in Optical Engineering*" Vol TT62. *SPIE press*, pp. 149-154.

[6] Chunlei Du et al., "Profile control technology for high-performance microlens array" *Opt. Eng.* 43(11), pp. 2595-2602, Nov. 2004.

[7] Marc J. Madou, *Fundamentals of Microfabrication* (CRC press, New York Washington, D.C. USA, 2002), pp. 104-106.

[8] Brian Morgan, Christopher M. Waits, "Development of a Deep Silicon Phase Fresnel Lens Using Gray-Scale Lithography and Deep Reactive Ion Etching". *JMEMS* 13(1), pp. 113-120, Feb. 2004.

[9] Ren Yang, Wanjun Wang, Steven A. Soper, "Out-of-plane microlens array fabricated using ultraviolet lithography" APL Appl. *Phys. Lett.* 86, 161110, 2005.

[10] 이준섭, 신현준, 송석호, "선택적 경사 노광과 후면 노광에 의한 3차원 구조물의 제작" *전기학회논문지 53권 1호*, pp. 47-52 Jan. 2004.

[11] Chr. Gimkiewicz et al., "Wafer-scale replication of optical components on VCSEL wafers" *OFC 2004 (1)*, pp. 23-27, Feb. 2004.

Generation of Lens surface by moving mask lithography

Joon-Sub Lee, Woo-Jae Park, Seok-Ho Song†, Cha-Hwan Oh and Pill-Soo Kim

Micro Optics Laboratory, Department of Physics, Hanyang University, Seoul 133-791, KOREA

†*E-mail: shsong@hanyang.ac.kr*

(Received October 20, 2005, Revised manuscript November 29, 2005)

We propose a fabrication method for refractive lens by variable velocity moving mask lithography and slit pattern. Distribution of exposure dose should be controlled for the curved photoresist surface that works as a refractive surface. We analyze theoretically the distribution of exposure dose by change of moving velocity, moving direction of mask and the shape of mask pattern , and confirm for the curved surface experimentally. The lens could have sag height of a few of hundreds ㎛, by using thick photoresist or Deep RIE process.

OCIS Codes : 120.4610, 220.1250, 220.3630, 220.3740, 230.4000.