

엑시머 레이저를 이용한 마이크로 렌즈 가공 모델링 및 시뮬레이션

최경현*, 배창현⁺

(논문접수일 2003. 8. 13, 심사완료일 2003. 10. 1)

Micromachining Modelling and Simulation for Microlens Using Excimer Laser

Kyung-Hyun Choi*, Chang-Hyun Bae⁺

Abstract

This paper addresses the method for figuring out the hole diameter on the mask containing the information about machining depth. With this mask the micro machining is carried out with a simple 2D movement of the mask. Based on the suggested method excimer laser ablation processes are modeled and determination of the optimal laser ablation conditions such as hole diameter, step size, mask movement velocity, etc. is completed. The excimer laser ablation simulation for creating 3D micro lens is carried out by employing determined ablation conditions to prove verification of the method. The results from simulation illustrated the average error of 140nm and the relative error of 2%.

Key Words : Micro Machining(마이크로 가공), MEMS, Excimer Laser(엑시머 레이저)

1. 서론

제품의 소형화는 최근의 모든 기술의 중요한 추세이며, 반도체, 생명공학, 마이크로 전자공학, 전자통신 뿐만 아니라 점점 증가하는 의학 분야에는 매우 다양한 재료에 서브 마이크로 형상을 요구한다⁽¹⁾. 마이크로 형상을 가공하기 위한 기존의 MEMS 기술인 표면 마이크로머시닝(surface micromachining)과 기판 마이크로머시닝(bulk

micromachining)은 실리콘 기반의 2차원 형상 마이크로머시닝 기술로 대량 생산성 및 집적도가 뛰어나며, LIGA 방식은 X선 노광장치를 이용하여 세장비(aspect ratio)가 높은 3차원 마이크로 부품을 제작할 수가 있다. 비전통적인(non-traditional) 3차원 마이크로머시닝의 방법으로 엑시머 레이저를 이용한 재료 가공 및 구조물 제작 등이 활발히 연구되고 있으며, 마이크로머시닝에 핵심기술로 사용되고 있다⁽²⁾. 엑시머(excimer) 레이저를 이용하는 가공은

* 주저자, 제주대학교 기계공학부 (khchoi@cheju.ac.kr)
주소: 690-756 제주도 제주시 제주대학로 66번지

+ 부산대학교 지능기계공학부

금속, 반도체, 폴리머, 유리, 세라믹, 염료, 생체조직, 다이아몬드 등의 거의 대부분의 가공재료에 사용되고 있다. 엑시머 레이저는 Ar, Kr, Xe 등의 희귀가스와 F, Cl과 같은 할로젠족 가스를 혼합하여 방전여기에 의해 발진되는 157-350nm 파장대의 자외선계열 레이저로 가공을 할 때 광 어블레이션(photoablation) 메카니즘 때문에 레이저가 조사되는 폴리머 재료 주위에 열 영향을 최소화할 뿐만 아니라 펄스당 가공 재료의 가공 깊이가 작아서 정확한 가공 깊이를 제어 할 수가 있어 마이크로 초정밀가공을 구현할 수 있는 장점을 가지고 있다. 레이저의 강도와 조사시간 등 엑시머 레이저 가공 조건에 따라 미세한 변형에서 제품 형상의 성형, 절단에 이르기까지 다양한 적용을 할 수 있다⁽³⁾.

엑시머 레이저를 이용한 다양한 마이크로 3차원 가공 형상을 얻기 위하여 레이저 빔이 마스크 이미지 형상을 기반으로 가공 재료 표면에 조사하여 가공하는 마스크 프로젝션(mask projection) 방법이 일반적으로 사용되고 있다. 광학 축소율을 3~10 정도로 하고 마스크의 형상을 가공 재료의 표면에 축소된 이미지로 조절하여 마스크 혹은 가공 재료를 이송하여 마이크로 3차원을 형상을 가공한다⁽⁴⁾. Grower는 엑시머 레이저로 마스크 프로젝션 방법을 이용하여 소형 박막 구조물을 제작하였으며⁽¹⁾, 또한, 태양광 패널, 센서 및 디스플레이 장치에 내재하는 서브미크론 두께를 가지는 무기, 금속 및 유기 박막들의 패턴(pattern)을 형성하였다⁽²⁾. Rumsby는 가공 재료나 혹은 마스크를 이송하여 엑시머 레이저 가공에 의하여 폴리머 MEMS 부품들의 복잡한 3차원 형상을 가공하였다⁽⁵⁾. Masuzawa는 3차원 마이크로 형상을 가공하기 위하여 깊이의 정보가 내재되어 있는 마스크 형상 디자인 방법론을 제안하여 3차원 마이크로 렌즈를 가공하였다⁽⁶⁾. Tönshoff는 엑시머 레이저를 이용해 비금속의 3차원 마이크로 가공에 원하는 형상의 빔 이미지를 재료 가공 중에 연속적으로 변화시킬 수 있는 유연 마스크(flexible mask)의 개념을 도입해 3차원 형상을 가공하는 시스템을 제안하였다⁽⁷⁾.

엑시머 레이저를 이용하여 원하는 3차원 마이크로 형상을 얻기 위해서는 최적의 가공 조건들을 선정하는 것이 중요하다. 기존의 연구에서는 3차원 마이크로 형상을 얻기 위한 최적의 레이저 가공 조건을 실험을 통한 시행착오법(trial and error)으로 결정을 하였다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 Gai는 레이저 가공을 이용한 폴리머 표면의 가공을 시뮬레이션 하기 위한 알고리즘을 개발하였으며⁽⁸⁾, 방세운은 준삼차원 형상의 미소구조물을 가공하는 과정을 예측하기 위한 모델링을 개발하였다⁽⁹⁾. Zhou는 Nd:YAG레이저

의 가공 조건을 결정하기 위해서 one burst 스캐닝 오퍼레이션(scanning operation) 방법론을 제안하였으며, 시뮬레이션과 실험을 통하여 접근법의 유용성 규명을 시도하였다⁽¹⁰⁾. Galantucci는 엑시머 레이저를 이용한 절단에 대하여 3차원 수치 모델을 개발하여 폴리머 재료에 대한 레이저 가공 실험을 수행하였다⁽¹¹⁾. 배창현은 유전자 알고리즘을 이용한 평면 가공을 위한 엑시머 레이저 가공 모델을 개발하였다⁽¹²⁾. 이러한 연구들의 대부분은 3차원 평면 형상에 초점을 두었으며, 마이크로 렌즈와 같은 복잡한 곡면 형상을 가공하기 위해서는 복잡한 마스크 형상과 제어 시스템이 요구되며, 최적의 레이저 가공 조건을 구하기가 어렵다.

본 논문에서는 엑시머 레이저를 이용한 3차원 마이크로 렌즈 가공을 위하여 마스크 형상 디자인을 구현할 때 가공 깊이의 정보가 포함된 마스크 홀(hole)의 직경을 구하는 방법론을 제안하고자한다. 또한, 폴리머 재료를 이용한 마이크로 렌즈를 가공하기 위하여 예비 실험을 통하여 재료의 특성 및 물성치를 파악한 후 제안된 방법론을 기반으로 엑시머 레이저를 이용한 레이저 가공 과정을 모델링하고 실제 레이저 가공에 필요한 변수를 고려한 가공 시뮬레이션을 수행하여 제안된 방법론의 유용성을 검증하고자한다.

2. Hole Area Modulation 방법론

엑시머 레이저 가공에서 가공 표면에 레이저 파워(power) 밀도가 일정할 때 가공 깊이는 레이저 빔에 노출된 시간에 비례한다. 기존의 엑시머 레이저를 이용한 3차원 가공은 깊

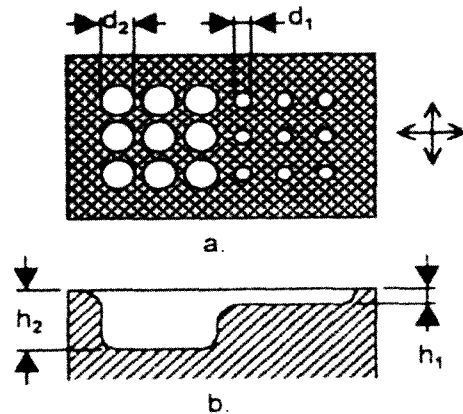


Fig. 1 Ablated surface with mask having different sized holes

이의 정보를 가지고 있지 않은 복잡한 마스크(mask) 형상과 제어를 사용하여 이루어짐으로, 에너지 손실 및 가공시간의 증대를 요구하였다.

만일 동일한 직경을 가진 연속적인 홀들이 2차원 배열로 마스크(mask)에 형성되어 마스크가 배열의 피치(pitch)에 상응하는 면적 내에서 규칙을 가지고 움직인다면, 평탄한 공동(cavity)이 생성될 것이다. 마스크에 있는 홀들의 직경이 2차원 분포를 가진다면, 가공된 공동(machined cavity)에는 깊이를 가진 3차원 공동(cavity)이 생성된다.

위의 개념대로 가공이 된다면, Fig. 1(a)와 같이 마스크 위에 직경이 d_1 과 d_2 인 홀들을 2차원 배열하여 마스크가 일정한 규칙에 의한 이송을 한다면, 가공 표면은 레이저빔에 노출되는 시간의 합이 다르므로, 다른 가공 깊이(h_1, h_2)를 갖는 면이 가공될 것이다. 이처럼 마스크위의 홀 직경의 변화로 가공할 3차원 형상의 깊이 정보를 제어하는 새로운 엑시머 레이저 가공 방법을 Hole Area Modulation(HAM)이라고 한다⁽⁶⁾.

3. HAM기반 레이저 가공 조건

3차원 마이크로 형상을 가공하기 위해서는 3차원 곡면위의 각 지점에서의 정확한 레이저 가공 깊이를 구해야 한다. 이를 위해 마스크의 홀의 직경, 피치의 크기, 스텝 크기, 펄스당 가공 깊이, 이송속도 및 이송 거리가 중요한 HAM 기반 레이저 가공 조건이다.

3.1 마스크 이송에 관련된 변수

마스크를 피치내의 상응하는 면적, 즉 셀 내에서 규칙을 갖는 경로를 설정하여 셀 내에서 마스크 홀에 의한 동일한

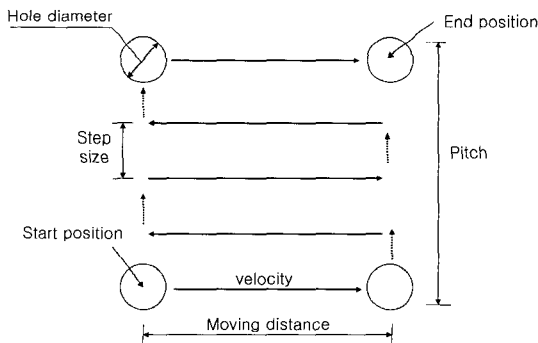


Fig. 2 Path of mask movement

가공 깊이를 갖도록 한다. 다양한 경로들이 고려되어 예비 실험을 통하여 Fig. 2의 경로가 셀 내에서 마스크 홀의 영향이 가공 표면에 균일하게 미치는 것을 알 수가 있었다. 셀의 왼쪽 아래 구석 지점에서 시작하여 셀의 가로축으로 이송 거리만큼 움직이다가 세로축으로 스텝 크기만큼 이동하여 반대방향으로 이송을 계속하게 된다. 이송의 마지막 지점은 셀의 오른쪽 위 구석 지점에서 끝난다. 실선 화살표가 표시된 구간은 레이저가 가공 표면에 조사되는 상태로 이송을 하는 것으로 실제 가공이 일어나는 구간이며, 점선 화살표 구간은 레이저의 빔이 조사되지 않는 상태로 이송하는 구간으로, 실제 가공이 일어나지 않고 단지 다음 위치로 이동을 하는 것을 나타낸다.

마스크 이송에 관련된 변수로는 이송거리(distance of movement), 이송 속도(velocity of movement) 및 스텝 크기(step size)이다. 이송거리는 피치 내의 가공 깊이와는 무관하지만 이웃하는 홀과의 경계치에서 가공 중복에 영향을 주는 변수로서, 이송거리가 크면 클수록 경계치에서의 가공 깊이가 커진다. 이송속도는 레이저 빔의 펄스 반복율과 함께 가공 깊이에 영향을 미친다. 이송 속도가 작을수록 레이저 빔에 의해 노출되는 가공 시간이 길어져서 가공 깊이는 커진다. 스텝 크기(step size)는 피치내의 가공 표면의 거칠기 및 가공 깊이에 영향을 준다. 스텝 크기가 작으면 작을수록 피치 내의 표면 거칠기는 항상 되지만 전체적인 가공 깊이와 가공량은 커지기 때문에 원하는 가공 깊이와의 관계를 고려하여 선정 되어야한다. 피치는 홀과 홀 사이의 거리를 나타내며, 최대 홀 직경보다는 크게 설정이 되어야한다. 피치의 크기도 전체적인 가공 오차에 영향을 주며, 작으면 작을수록 작은 가공 오차가 생긴다.

3.2 엑시머 레이저 펄스당 가공 깊이

펄스당 가공 깊이는 HAM 기반의 엑시머 레이저 마이크로 가공에서 가공 깊이 오차를 결정하는 가장 중요한 요소이다. 펄스당 가공 깊이가 작으면 펄스 반복율을 조절하여 깊이를 정확하게 제어할 수가 있는 장점이 있지만, 가공 시간이나 펄스 수가 많아지는 단점도 있다.

엑시머 레이저의 펄스당 가공 깊이는 가공 재료와 레이저 파워 밀도에 따라 다른 가공 깊이를 가진다. 가공하고자 하는 타원형 마이크로 렌즈를 위해 polyimide 재료를 선정하였다. 이 가공 재료에 대한 펄스당 가공 깊이를 알기 위해 엑시머 레이저 파워 밀도가 $5 J/cm^2$, $10 J/cm^2$, $15 J/cm^2$, $20 J/cm^2$, $25 J/cm^2$, $30 J/cm^2$ 인 경우에 대해 실험을 수행하였다. 광학적 축소율은 마이크로 렌즈를 가공 할 때와

같이 10으로 하였으며, 펄스당 가공 깊이와 광학 렌즈의 초점을 맞추기 위해 사용한 마스크 홀의 직경은 2mm이다.

실험의 결과를 기반으로 레이저 파워 밀도와 펄스당 에칭 깊이의 관계는 Fig. 3과 같다. 펄스당 가공 깊이는 레이저 파워 밀도 증가에 거의 선형적으로 증가함을 알 수가 있다. 마이크로 렌즈 가공을 위하여 엑시머 레이저 파워 밀도를 $2.5 J/cm^2$ 를 사용하였으며, 펄스당 가공 깊이는 $0.1\mu m$ 이기 때문에 가공 깊이의 오차를 적게 할 수가 있다.

4. 마스크 패턴 디자인

엑시머 레이저 가공을 위한 마스크의 형상은 Fig. 4와 같이 직경이 다른 홀들이 행(i)과 열(j)의 2차원 배열로 이루어져 있다. 모든 홀의 간격인 피치는 마스크 전체에서 똑같

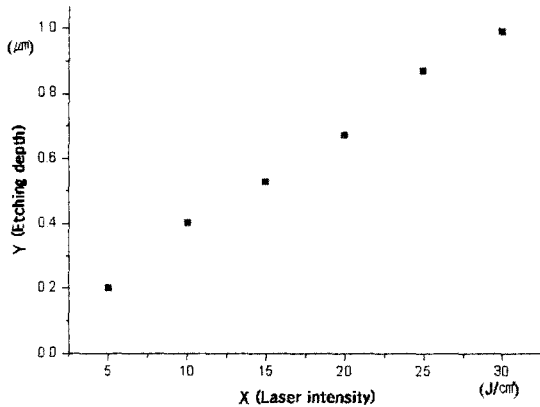


Fig. 3 Etching depth corresponding to laser intensity

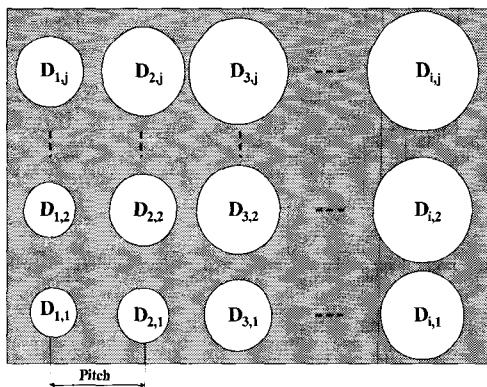


Fig. 4 Hole array on the mask

은 값을 가지고 있다.

HAM의 개념에서 가공할 공동의 가공 깊이(h)는 식 (1)과 같이 상응하는 지점의 마스크 홀의 면적과 비례한다.

$$h \propto \frac{\pi}{4} D^2 \tag{1}$$

마스크 홀의 직경은 가공할 공동의 가공 깊이사이의 비로 결정할 수 있다. 이 방법으로 마스크 홀의 직경들을 결정하면 깊이가 다른 지점 사이의 깊이 차만큼의 비는 가공할 수 있으나 원하는 정확한 가공깊이를 얻을 수는 없으므로, 원하는 절대 깊이는 레이저 에너지 밀도, 조사시간 및 마스크 이송 등 레이저 가공 조건들의 조절로 구할 수 있다. 이러한, 제어 가능한 조건들의 영향을 포함하는 HAM 계수 k 를 도입하여 식 (2)와 같이 어떠한 위치에서의 가공 깊이를 얻기 위한 마스크의 홀 직경을 구할 수 있도록 하였다.

$$h(x, y) = kD(x, y)^2 \tag{2}$$

여기서 $D(x, y)$ 는 좌표(x, y) 지점에서의 가공깊이이고, $h(x, y)$ 는 좌표(x, y) 지점에서의 마이크로렌즈의 깊이이다.

계수 k 는 기준이 되는 지점에서의 가공 깊이와 마스크 홀의 직경으로부터 구할 수가 있다. 본 논문에서는 기준 지점을 최소 가공 깊이를 가지는 지점으로 선정 하였으며, k 는 식 (3)과 같이 마스크의 최소 직경(D_{min})의 홀에 의해 만들어지는 가공 깊이(h_{min})에 의해 결정이 된다.

$$k = \frac{h_{min}}{D_{min}^2} \tag{3}$$

최소 홀 직경에 의한 지점에서의 레이저 가공 깊이는 최소 홀 직경, 펄스 수(f), 펄스당 가공 깊이(e), 스텝 크기(Δs)에 의해 좌우되기 때문에, k 또한 이러한 가공 조건에 의해 결정이 되며, 전체의 가공 재료의 가공량(Removal rate)을 결정하는 계수이다. 마스크의 홀 중에서 최소 직경의 홀 결정은 대단히 중요하다. 최소 홀의 직경이 작으면 작을수록 가공 깊이 h_{min} 가 최소가 되어 가공량이 적어질 뿐만 아니라 요구하는 3차원 형상과의 오차를 줄일 수가 있다. 그러나, 최소 홀의 직경은 홀의 가공하는 기술에 제한을 받으며 마스크 이송 스텝 크기 보다는 커야 한다.

k 를 구하기 위해서는 마스크의 최소 홀 직경에 대하여 주어진 레이저 가공 조건을 가지고 레이저 가공 실험을 통하여 구할 수가 있다. 그러나, 최소 홀 직경이 변화 할 때와

레이저 가공 조건이 변할 때마다 레이저 가공 실험을 해야 하기 때문에 효율적이지 못하다. 식 (4)를 이용하여 주어진 최소 홀 직경 및 레이저 가공 조건에 대해 각 지점 (i, j)의 가공 깊이를 구할 수가 있다. 마스크의 이미지가 1/10 축소율을 가지고 가공 재료 표면에 레이저 빔이 조사되기 때문에, 피치의 크기, 스텝 크기 및 이송 거리도 가공 재질 표면에서는 1/10로 축소된다.

$$h(i, j) = f \times e \times \left(\sum_{m=1}^n \frac{2\sqrt{D_{i,j}^2 - (2m\Delta s)^2}}{V} + \frac{D_{i,j}}{V} \right) \quad (4)$$

여기서, n 은 홀 직경 안에서의 스텝 수이다. 즉, $D/\Delta s$ 이다.

V 는 이송속도이다.

식 (4)를 식 (3)에 대입하면 계수 k 를 식 (5)와 같이 구할 수가 있다.

$$k = \frac{f \times e \times \left(\sum_{m=1}^n \frac{2\sqrt{D_{\min}^2 - (2m\Delta s)^2}}{V} + \frac{D_{\min}}{V} \right)}{D_{\min}^2} \quad (5)$$

식 (5)를 이용하여 최소홀 직경에 대한 다양한 레이저 가공 조건들을 고려하여 구한 계수 k 의 값들이 Table 1에 보여진다. 최소홀의 직경이 $5\mu\text{m}$ 인 경우 마스크의 이동 스텝 크기를 $3\mu\text{m}$, $2\mu\text{m}$, $1\mu\text{m}$ 를 줄일 때 0.0481, 0.08, 0.3333의 k 값을 얻었다. 레이저 가공 깊이는 $0.3\mu\text{m}$, $0.5\mu\text{m}$, $2.1\mu\text{m}$ 를 얻었으며, 최소 홀 직경에 대하여 레이저 가공 깊이가 클수

록 k 의 값이 커진다. 따라서 레이저 가공 조건을 선정 할 때 k 의 값이 작도록 선정을 하면 똑 같은 3차원 마이크로 형상을 가공하면서 레이저 가공에 의한 전체 재료의 제거되는 양은 작아진다.

선정된 k 의 값을 이용하여 마스크의 2차원 배열 (i, j)인 홀들의 직경 선정은 식 (6)으로 구해진다.

여기서, $h(i_c, j_c)$ 은 (i, j) 번째 홀의 중심 지점에 해당하는 레이저 가공 깊이

$$D^2(i, j) = \frac{1}{k} h(i_c, j_c) \quad (6)$$

5. HAM 기반 최적 레이저 가공 조건 선정

마스크의 형상에서 2차원 배열로 된 홀들의 직경이 다르기 때문에 동일한 마스크 이송 경로에 의하여 홀들 사이의 경계에서 이웃하는 홀들에 의하여 레이저 가공이 중복으로 일어난다. 각 피치 내에서는 홀의 직경에 의한 가공 깊이의 오차는 거의 없기 때문에, 홀들 사이의 경계치에서 가공 깊이의 오차를 최소화 하는 목적 함수를 결정하였다.

마스크를 이송할 때 영향을 주는 각 스텝에서 이웃하는 (i, j), ($i+1, j$), ($i, j+1$), ($i+1, j+1$)번째의 네 개의 홀들 사이의 경계치 한 지점에서 레이저 빔의 조사 시간은 식 (7)과 같이 구할 수 있다. 첫 번째 항은 (i, j)번째 홀에 의한 경계치 지점에서의 레이저 빔의 조사 시간을 나타내며, 두 번째 항은 ($i+1, j$)번째 홀에 의한 레이저 빔 영

Table 1 K values corresponding to ablation conditions

e ($\mu\text{m}/\text{pulse}$)	ΔS (μm)	Condition						D_{\min} (μm)	h_{\min}	k
		f (Hz)	L (μm)	P (μm)	V ($\mu\text{m}/\text{sec}$)	Red. Rate				
0.1	3	2	50	50	6	10	5	0.3	0.0481	
0.1	2	2	50	50	4	10	5	0.5	0.08	
0.1	1	2	50	50	2	10	5	2.1	0.3333	
0.1	3	2	50	50	6	10	10	0.8	0.0319	
0.1	2	2	50	50	4	10	10	2.1	0.084	
0.1	1	2	50	50	2	10	10	7.1	0.2857	
0.1	3	2	50	50	6	10	50	21.4	0.0342	
0.1	2	2	50	50	4	10	50	48.9	0.0781	
0.1	1	2	50	50	2	10	50	194	0.3125	

항을 나타낸다. 세 번째와 네 번째 항은 $(i, j+1)$ 번째와 $(i+1, j+1)$ 번째의 홀의 영향을 표시한다.

$$\begin{aligned}
 t_{(i, j)(i+1, j+1)} &= \sum_{m=0}^{n_i} t_{(i, j), m} + \sum_{m=0}^{n_{i+1}} t_{(i, j+1), m} \\
 &+ \sum_{m=0}^{n_{i+1, j}} t_{(i+1, j), m} + \sum_{m=0}^{n_{i+1, j+1}} t_{(i+1, j+1), m} \\
 &= \sum_{m=0}^{n_i} \frac{\sqrt{D_{i, j}^2 - (2m\Delta s)^2}}{2v} + \sum_{m=0}^{n_{i+1}} \frac{\sqrt{D_{i, j+1}^2 - (2m\Delta s)^2}}{2v} \\
 &+ \sum_{m=0}^{n_{i+1, j}} \frac{\sqrt{D_{i+1, j}^2 - (2m\Delta s)^2}}{2v} + \sum_{m=0}^{n_{i+1, j+1}} \frac{\sqrt{D_{i+1, j+1}^2 - (2m\Delta s)^2}}{2v} \quad (7)
 \end{aligned}$$

이 지점에서의 레이저 가공 깊이는 레이저 빔의 조사 시간을 이용하여 식 (8)과 같이 구할 수가 있다.

$$h_{(i, j)(i+1, j+1)} = e \cdot f \cdot t_{(i, j)(i+1, j+1)} \quad (8)$$

목적함수는 마스크 위의 홀들의 경계치에서 실제 레이저 가공 깊이와 구하고자 하는 곡면의 가공 깊이($Dh_{(i, j)(i+1, j+1)}$)의 오차를 전체 가공 표면에서 합을 하여 최소가 되는 식 (9)로 구할 수가 있다.

$$Min \left| \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} (Dh_{(i, j)(i+1, j+1)} - h_{(i, j)(i+1, j+1)}) \right| \quad (9)$$

레이저 가공 변수의 제한 조건은 실제 레이저 시스템의 특성과 마스크 가공 기술 한계를 고려하였다. 피치는 최대 홀 직경보다는 커야하며, 최소 홀의 직경은 가공 기술의 한계를 고려하여 $2\mu\text{m}$ 보다는 커야한다. 또한, 마스크의 이송을 위한 스텝 크기는 마스크의 이송 장치의 최소 이송 거리인 $1\mu\text{m/step}$ 을 고려하였다. 이러한 변수들의 제한 조건들이 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 D_{max} &\leq p \leq 200\mu\text{m} \\
 2\mu\text{m} &\leq D_{min} \leq 20\mu\text{m} \\
 1\mu\text{m} &\leq \Delta s \leq 50\mu\text{m}
 \end{aligned}$$

6. 마이크로 렌즈 레이저 가공 시뮬레이션

마이크로 렌즈 가공 시뮬레이션을 위해 사용된 레이저는 KrF 엑시머 레이저($\lambda=248\text{nm}$)의 특성을 이용하였다. 가공하고자 하는 3차원 형상은 Fig. 5와 같으며, $R_x=70$, $R_y=40$, $R_z=8\text{인}$ Polyimide 재료(두께 $150\mu\text{m}$)의 타원형 마이크로 렌즈이다.

마스크 홀의 최소 직경은 가공 기술 한계를 고려하여 $D_{min}=6\mu\text{m}$ 를 선정하였으며, 최적 레이저 가공 조건을 선정한 결과가 Table 2에 보여진다.

이 들 레이저 가공 조건들로부터 식 (5)를 이용하여 계수 $k=34$ 를 구하였다. 타원형 마이크로 렌즈의 가공 재질 표면에서부터의 가공 깊이는 식 (10)과 같이 구해진다.

$$h(x, y) = Z_0 + R_z \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{x^2}{R_x^2} + \frac{y^2}{R_y^2} \right)} \right) \quad (10)$$

이 식을 마스크 홀들의 직경을 구하기 위해서 식 (6)에 대입하면, 식 (11)을 얻을 수가 있다.

$$D^2(x, y) = \frac{1}{k} \left(Z_0 + R_z \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{x^2}{R_x^2} + \frac{y^2}{R_y^2} \right)} \right) \right) \quad (11)$$

식 (11)을 이용하여 마스크를 디자인 한 결과가 Fig. 6에 보여진다. 전체 마스크의 크기는 $10\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ 이고, 총 100개의 홀로 구성된다. 최소 홀 지름은 $106\mu\text{m}$ 이고, 최대 홀 지름은 $344\mu\text{m}$ 이다. Fig. 7에 최적의 레이저 가공 조건을 사용하여 실험과 동일한 가공 시뮬레이션의 결과로 마이크로

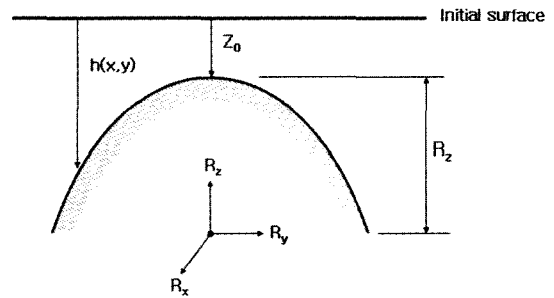


Fig. 5 Elliptical micro lens diagram

Table 2 Optimal laser ablation parameters

Ablation Parameter	Value
Laser intensity (on the workpiece surface)	5 J/cm ²
Optics reduction rate	
Mask movement velocity	15 μm/s
Mask movement	3 μm/step
Frequency	5 Hz
Pitch	40 μm

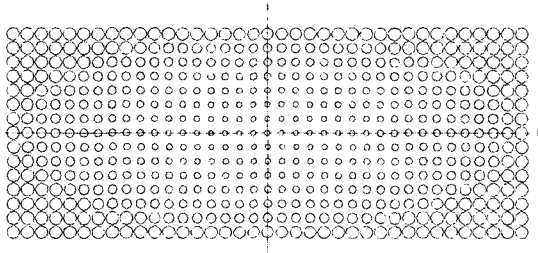


Fig. 6 Designed Mask for ellipsoidal microlens

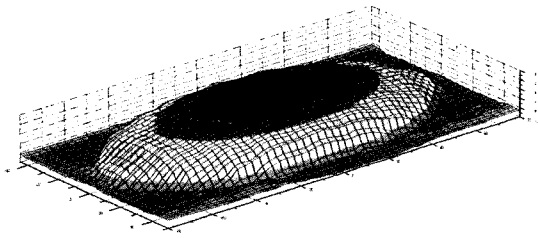


Fig. 7 3D microlens shape machined from simulation

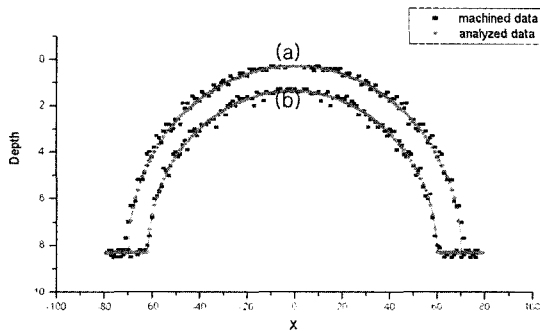


Fig. 8 Comparison micromachined data between desired data ((a) section $y=0$, (b) section $y=20$)

로 렌즈의 형상이 보여진다. 마이크로 렌즈의 실제 요구되는 깊이와 가공 시뮬레이션에서의 가공 깊이의 평균 절대 오차가 140nm를 보였다. 또한, 상대 오차가 2% 이하를 보여주기 때문에 마이크로 가공의 오차 범위인 5% 이하에 속하는 결과를 보여준다.

Fig. 8에는 시뮬레이션 가공과 요구되는 단면의 형상을 비교하였다. Fig. 8(a)는 $y=0$ 에서의 단면을 보여주며, Fig. 8(b)는 $y=20$ 에서의 단면 형상을 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 최소 홀 직경에 의한 가공 깊이가 $0.3\mu\text{m}$ 정도로 전체적인 재료의 제거량이 적음을 알 수가 있다.

7. 결론

본 논문에서는 엑시머 레이저로 3차원 마이크로 형상을 가공하기 위한 새로운 접근법인 Hole Area Modulation (HAM)을 적용하였다. HAM 기반의 엑시머 레이저 마이크로 가공에는 마스크의 홀 직경, 피치, 이송 속도, 이송 스텝, 이송 속도, 펄스 수 등이 가공 깊이에 영향을 준다. 가공 깊이는 마스크의 홀 직경의 면적에 비례하므로, 비례 계수 k 를 도입하였다. k 는 레이저 가공 조건을 선정하여 최소 직경에 대한 가공 깊이를 고려하여 구해진다. 이 값을 통하여 마스크의 2차원 배열의 홀 직경들을 구할 수가 있다. 최적 레이저 가공 조건을 선정하기 위하여 마스크 홀들 사이의 경계에서 가공 깊이 오차의 합을 목적함수로 결정하였다. HAM 기반의 엑시머 레이저 가공 시뮬레이션을 수행하기 위하여 Polyimide(두께 $150\mu\text{m}$) 재료를 사용하였으며, $R_x=70$, $R_y=40$, $R_z=8$ 인 타원형 마이크로 렌즈를 가공 하였다. 시뮬레이션 가공 결과에서 평균 오차는 140nm를 보여 주었으며, 상대 오차도 2%이내의 결과를 얻었다.

향후 연구로 이 시뮬레이션을 통하여 얻은 레이저 가공 조건 및 데이터를 실제 가공에 사용하여 실험을 수행하고 시뮬레이션 결과와 비교하고자 한다.

후기

이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2002-013-E00024).

참고 문헌

- (1) Grower, M. C., 1988, "Industrial applications of pulsed lasers to material microprocessing," *High power Laser ablation*, C.R.Phipps. SPIE, Vol. 3343, pp. 171~182.
- (2) Grower, M. C., 1999, "Eximer Laser micromachining: A 10 year perspective," *Laser applications in microelectronic and optoelectronic manufacturing IV*, SPIE, 3618, pp. 251~256.
- (3) Madou, M. J., 2002, *Fundamentals of microfabrication: The science of miniaturization*, CRC press.
- (4) Meijer, J., Du, K., Gillner, A., Hoffmann, D., Kovalenko, V. S., Masuzawa, T., and Ostendrf, A., 2002, "Laser machining by short and ultrashort

- pulses, state of the art and new opportunities in the age of the photons," *Annals of the CIRP*, Vol. 51, No. 2, pp. 531~549.
- (5) Rumsby, P. T., Harvey, E. C., and Thomas, D. W., 1996, "Laser microprojection for micromechanical device fabrication," *Experimental mechanics: Advances and applications*, SPIE, Vol. 2921, pp. 684~672.
- (6) Masuzawa, T., Miller, J., Bourouina, T., Schoonderbeek, A., and Eindhoven, J., 2002, "Laser beam machining of microlenses by Hole Area Modulation (HAM) method," *Proceedings of the 3th euspen International Conference*, pp. 395~398.
- (7) Tönshoff, H. K., Graumann, C., Rinke, M., Lonergan, P., and Wais, J., 1997, "Improved surface quality of rotation symmetric structures by excimer laser micromachining," *Proceedings of ICALEO'97*, Section A, pp. 114~121.
- (8) Gai, H., and Voth, G.A., 1992, "A computer simulation method for studying the ablation of polymer surface by ultraviolet laser radiation," *Journal of Applied Physics*, Vol. 71, No. 3, pp. 1415~1420.
- (9) Bang, S. Y., Sin, G. S., Yoon, K. G., and Hwang, K. H., 2000, "Three Dimensional Pattern Modelling Using Laser Ablation," *Proceedings of the 2nd Korean MEMS Conference*, pp. 15~23.
- (10) Zhou, X., Imasaki, K., and Furukawa, H., 2001, "Simulation study and experiment on laser-ablation surface cleaning," *Optics & Laser Technology*, Vol. 33, pp. 189~194.
- (11) Galantucci, L.M., 1998, "Excimer laser cutting: experimental characterization and 3D numerical modelling for polyester resins," *Annals of the CIRP*, Vol. 47, No. 1, pp. 141~144.
- (12) Bae, C. H., Choi, K. H., and Lee, S. H., 2002, "Determination of Optimal Excimer Laser Ablation Conditions Using Genetic Algorithm," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 11, No. 6, pp. 17~23.