

## 엑시머 레이저를 이용한 3차원 마이크로가공

최경현\*(제주대학교 기계공학부), 배창현(부산대학교 지능기계공학과), 이석희(부산대학교 기계공학부), Masuzawa(Tokyo University)

### Three Dimensional Micromachining using Excimer laser

Kyung-Hyun Choi(Cheju National Univ.), Chang-Hyun Bae(Graduate Pusan National Univ.),  
Seok-Hee Lee(Pusan National Univ.)T. Masuzawa(I.I.S., University of Tokyo)

#### ABSTRACT

A new 3D micromachining method, called Hole Area Modulation(HAM), has been introduced and experimentally confirmed its feasibility. In this method, information on the depth of machining is converted to the sizes of small holes in the mask. The machining is carried out with a simple 2D movement of the workpiece. This method can be applied for machining various kinds of microcavities in various materials. In this paper, a mathematical model for excimer laser micromachining based on HAM and also determination of the optimal laser ablation conditions(width, Hole radius, step size, path, etc.) is completed by employing using Genetic Algorithm(GA).

**Key Words** : Excimer laser, Hole Area Modulation(HAM), simulation, Genetic Algorithm(GA)

#### 1. 서론

최근 에너지와 환경에 대한 인식과 정보통신, 전자산업, 생명산업의 발달로 소형화와 미세화의 기술 개발이 요구되고 있다. 이러한 가공기술의 한 방법으로서 엑시머(excimer) 레이저를 이용하는 재료 가공 및 구조물 제작에 대해 활발히 연구되고 있다. 미소 어블레이션 기술에 사용되는 엑시머 레이저는 Ar, Kr, Xe 등의 희귀가스와 F, Cl과 같은 할로젠족 가스를 혼합하여 방전여기에 의해 발진되는 157-350nm 파장대의 자외선계열 레이저로 가공시에 재료에 어떠한 열 손상도 없을 뿐만 아니라 극소형대의 초정밀가공을 구현할 수 있다.

P.E.Dyer는 non-planer한 표면에 엑시머 레이저를 조사하여 가공 결과를 비교하였다.[1] X.Zhou는 Nd:YAG레이저로 ablation을 연구하였다. 최적의 레이저 어블레이션 조건을 결정하기 위해서 one-burst, scanning operation 방법을 시뮬레이션과 실험을 이용하여 비교하였다.[2] N.H.Rizvi는

마스크를 이용한 어블레이션 가공의 여러 잠정과 가공예를 보여주고 있다.[3] C.Paterson은 마스크 투사에 의한 엑시머 레이저 마이크로가공의 수치적 모델을 제시하였다.[4] M.C.Gower는 마이크로 가공을 위해 엑시머 레이저를 사용하는 여러 산업분야의 배경과 시장 중요성을 제시하였다.[5] H.Gai는 레이저 어블레이션을 이용한 폴리머 표면의 가공을 시뮬레이션 하기 위한 컴퓨터 알고리즘을 디자인하였다.[6] 방세윤은 엑시머 레이저로 폴리머 소재를 어블레이션 가공해 준삼차원 형상의 미소구조물을 가공하는 과정을 예측하기 위한 모델링을 수행하였다.[7]

본 논문에서는 엑시머 레이저를 이용한 새로운 3D micromachining 방법인 Hole Area Modulation(HAM)을 제안한다. 그리고 기존에는 원하는 형상을 얻기 위하여 최적의 어블레이션 조건을 trial-error method로 결정을 하였다. 이러한 어려움을 해결하기 위하여 레이저를 이용한 어블레

이선 과정을 모델링하여 GA(유전자 알고리즘)을 이용하여 최적 어블레이션 조건을 선정한다. 이 어블레이션 조건들을 이용하여 결과를 예측할 수 있다.

## 2. Hole Area Modulation(HAM)

### 2.1 HAM의 기본원리

엑사이머 레이저 가공의 원리는 기본적으로 가공물에 레이저빔의 에너지 밀도가 일정하게 조사된다고 할 경우, 가공깊이는 노출시간에 비례하여 증가한다. 만약 일정한 지름을 갖는 홀들이 마스크 위에 일정한 간격으로 2차원적으로 배열이 되고, 그때 이 홀들이 일정한 간격 안에서 어떤 경로를 가지고 이동을 한다면 일정한 깊이를 갖는 구멍을 가공할 수 있을 것이라는 생각에서 출발한다. 결국 기존 가공법과의 다른 점은 마스크의 패턴 디자인으로 가공깊이의 정보를 나타낼 수 있다. 결국 간단한 2차원 제어로 3D가공을 할 수 있다.

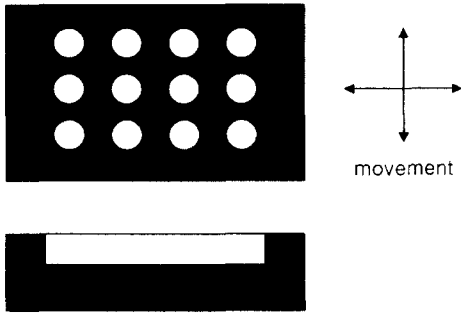


Fig 1. Machining a cavity with a flat bottom

그리고, 위의 개념대로 가공이 된다면, 마스크 위에 지름이 다른 일련의 홀을 배열한다면, 레이저빔에 노출되는 시간의 합이 다르므로, 다른 깊이를 갖는 구멍이 가공될 것이다. 이처럼 홀지름의 변화로 마스크에 가공할 구멍의 깊이 정보를 주는 새로운 엑사이머 레이저 머시닝 방법을 HAM(Hole Area Modulation, 홀지름 조정법)이라고 한다.

### 2.2 Mask Design

HAM에서 사용하는 마스크의 홀 지름은 가공할 공동의 다른 깊이사이의 비로 결정할 수 있다. 이 방법으로 지름을 결정하면 깊이가 다른 지점 사이의 깊이 차만큼의 비는 가공할 수 있으나 원하는 정확한 가공깊이를 얻을 수는 없다. 그래서 원하는 절대 깊이는 가공시간의 조절로 구할 수 있다.

기존에는 아래의 과정을 통해서 메쉬크기와 hole

size 그리고 path를 결정했다.

① Mesh 즉  $W_x$ 를 결정한다. ( $n_x, n_y$ 를 결정함에 따라)

② 정해진 각 cell에서의 가공 깊이 계산 ( $D_{desire}$ )

③ Hole size 계산

㉠ 나누어진 surface의 셀을  $M_w$ 로 한다.

㉡  $M_n = a M_w$  ( $a$ : optical reduction rate)

: surface의 셀을 마스크 scale로 크게한다.

㉢  $R_{max} = \beta M_n$  ( $\beta$ : technical selection coefficient)

$$R = R_{max}(D/D_{max})^{1/2}$$

이렇게 결정된 조건들이 최적의 형상을 가공한다고 할 수는 없다. 그래서 많은 실험으로 조건을 결정한다. 그러나 본 논문에서는 유전자 알고리즘을 이용하여  $W_x, R_{min}, stepsize$ 를 결정한다. 그런 후, 모델링 식을 이용한 프로그램으로 시뮬레이션을 실행하여 원하는 곡면과 가장 흡사한 어블레이션 조건을 결정한다.

## 3. 가공 시뮬레이션을 위한 수학적 모델링

### 3.1 셀(Cell)경계에서 해석

㉠ 경계에 영향을 미치는 step을 결정

$$\left(\frac{W_x}{2} - R_i\right) < m\Delta x$$

$$\therefore m > \frac{\frac{W_x}{2} - R_i}{\Delta x}$$

①

( $W_x$ : 셀의 너비,  $R_i$ :  $i$ 번째 셀의 홀반지름,  $m$ : 영향을 미치는 스텝수(자연수),  $\Delta x$ : 스텝 사이즈)

㉡ 가공길이 결정

$$l_k = 2\sqrt{R^2 - \left(\frac{W_x}{2} - k\Delta x\right)^2}$$

②

㉢ 행의 가공 시간

$$\sum_{k=m}^n t = \frac{l_k}{V}$$

③

$$t_{(i,i+1),j} = \sum_{i=1}^{n+1} \sum_{k=m}^n t_k$$

$$= \sum_{i=1}^{n+1} \sum_{k=m}^n \frac{2\sqrt{R_i^2 - \left(\frac{W_x}{2} - k\Delta x\right)^2}}{V} + \sum_{k=m+1}^n \frac{2\sqrt{R_{i+1}^2 - \left(\frac{W_x}{2} - k\Delta x\right)^2}}{V}$$

④

( $t$ : 시간,  $n$ : step 수,  $l_k$ : 가공되는 길이,  $V$ : 속도)

㉔ 열의 가공 시간

$$t_{i,(j,j+1)} = \sum_{j=1}^{n_x-1} \sum_{k=m}^{n_x} t_k$$

$$= \sum_{j=1}^{n_x-1} \sum_{k=m}^{n_x} \frac{2\sqrt{R_j^2 - \left(\frac{W_y}{2} - k\Delta y\right)^2}}{V} + \sum_{k=m+1}^{n_x} \frac{2\sqrt{R_{j+1}^2 - \left(\frac{W_y}{2} - k\Delta y\right)^2}}{V}$$

㉕ 경계치에서 총 실제 가공시간

$$: t_{real} = \sum_{j=1}^{n_x} t_{(i,i+1),j} + \sum_{i=1}^{n_x} t_{i,(j,j+1)}$$

경계부에 영향을 미치는 스텝수를 계산(식1)하여, 영향을 주는 각 스텝에서 가공깊이(식2)를 구할 수 있다. 식4와 식5을 이용하여, 행과 열의 가공시간을 구할 수 있다. 이 두 값을 더한 값(식6)이 경계치에서 총 가공시간이 된다.

#### 4. 유전자 알고리즘을 이용한 최적 어블레이션 조건 선정

본 논문에서 사용한 유전자 알고리즘은 단순 유전자 알고리즘이다. 이 알고리즘은 비중복 집단과 선택적 엘리트즘을 사용하며 각각의 세대에서 완전히 새로운 개체로 이루어진 집단을 형성한다. 그리고 사용한 선택방법은 룰렛 휠 선택으로 이는 적합도 비례 선택의 일종이다. 이 방법은 적합도의 확률적 분포를 반영하여 새로운 집단을 생성한다. 그리고 시그마 절단 스케일링 연산자를 이용하였고, 2점 교배 연산자와 교환 돌연변이 연산자를 사용하였다. 그리고 모델링식으로부터 총 가공시간을 구할 수 있다. 이 시간을 가공 펄스 반복율과 eche rate에 곱하면 실제 가공깊이(식7)를 구할 수 있다. GA에 필요한 목적함수는 실제 가공깊이 값과 구하고자 하는 곡면의 각 점의 값(식8)을 비교하여 그 오차가 최소가 되는 조건(식9)으로 하였다.

㉖ 총 실제 가공깊이

$$D_{real} = t_{real} \cdot f \cdot e$$

(f: 펄스 반복율, e: 단위 펄스당 어블레이션깊이)

㉗ 총 요구 가공깊이

$$D_{desire} = \sum_{j=1}^{n_x} \sum_{i=1}^{n_y} D_{i,j} + \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_y} D_{i,j}$$

㉘ Q(목적함수) = Min|D<sub>desire</sub> - D<sub>real</sub>|

#### 5. 시뮬레이션 결과 및 결과 고찰

##### 5.1 시뮬레이션에 사용된 조건

시뮬레이션을 위하여 GA로 정하지 않는 기본 조건들은 상용 엑시머 레이저 장비와 같은 조건을 가진다.

##### 5.1.1 기본 조건

레이저는 KrF 타입이고 파장은 248nm이다. 그리고 에너지 밀도는 89mJ이고, 펄스반복율은 100Hz이다. 그리고 minimum stepsize는 1μm이고, 이송속도는 0.1mm/s이다.

##### 5.1.2 GA에 의하여 결정된 조건

GA에 의하여 결정되는 조건은 W<sub>x</sub>, R<sub>min</sub>, stepsize 세 가지이다. W<sub>x</sub> = 50μm, R<sub>min</sub> = 7μm, stepsize는 2μm이다.

##### 5.1.3 path 설명

시뮬레이션에 사용된 path는 두가지이다. 그림 2(a)는 셀의 중간지점에서 시작하여 stepsize만큼씩 증가하면서 테이블을 움직인다. 그림 2(b)는 셀의 왼쪽 구석점에서 시작한다. 그래서 그림처럼 셀의 가로축으로 움직이다가 stepsize만큼 이동하여 가공을 계속하게 된다. 이 path의 특징은 오른쪽 구석점에서 가공이 끝난후 stepsize의 절반만큼 이동 후 다시 처음의 가공을 다시 한다.

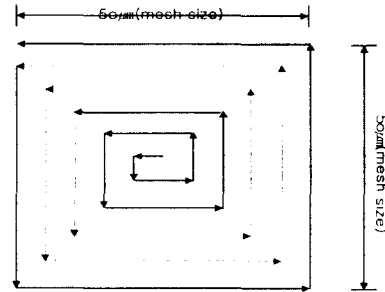


Fig 2(a). Table movement and Mesh size

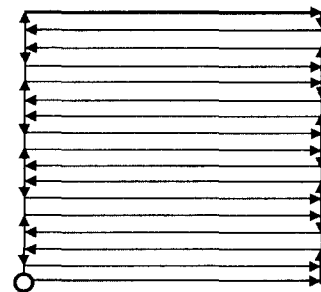


Fig 2(b). Table movement and Mesh size

## 5.2 시뮬레이션 결과

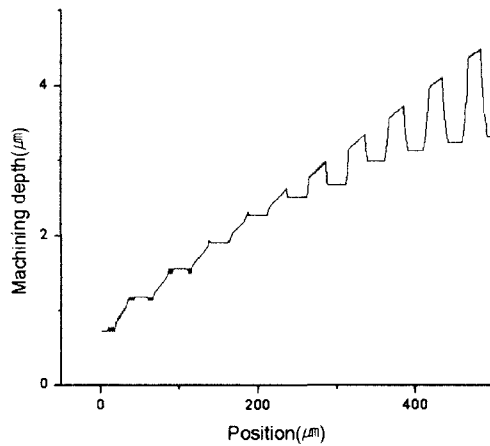


Fig 3. Section curve of the cavity by path(a)

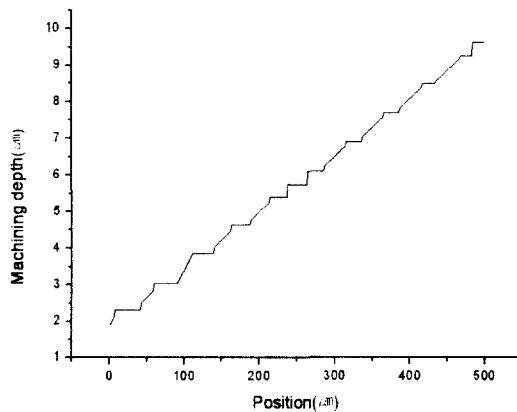


Fig 4. Section curve of the cavity by path(b)

그림 3과 4는 각각 path(a)와 path(b)의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 최대 가공깊이가 10 $\mu\text{m}$ 의 절반정도가 가공된 것을 알 수 있다. 그래서 다시 반복해서 가공을 한 번 더 할려고 했으나, 400 $\mu\text{m}$ 부분으로 갈수록 가공면이 거칠어지는 것을 알 수 있다. 홀의 지름이 커짐으로 해서 이웃 셀에 영향을 주었다고 판단된다. 이런 이유로 반복 가공을 할 수 없었다. 그래서 path(b) 방법을 적용하기로 했다. 그 결과를 그림 4에서 볼 수 있는데, 우선 최대 가공 깊이가 적절히 나왔고, 가공면이 훨씬 좋아진걸 볼 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 엑시머 레이저로 미소구조물을 가공하기 전에 실제 가공에 필요한 어블레이션 조건

및 가공데이터를 얻기 위한 시뮬레이션을 수행할 수 있는 프로그램을 개발하고자 하였다. 가공시 필요한 이송변수를 가정하여 모델링을 하고 원하는 곡면을 얻기 위해 필요한 다른 가공조건, 즉 셀의 크기, 홀의 지름, stepsize를 GA를 이용하여 구하였다. 특히, 테이블의 이송속도는 등속도로 고려하였고, 이송속도와 레이저가 조사되는 이송거리로부터 레이저가 조사되는 시간과 펄스 수를 계산하여 에칭깊이를 계산하였다.

GA에서 구해진 어블레이션 조건들은 시뮬레이션 결과 유효하다고 생각되고, 다양한 어블레이션 조건들의 조합으로 다양한 3차원 형상의 가공이 가능할 것이다. 그리고, 원하는 가공면에 따른 적합한 path의 선정도 중요할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. P.E. Dyer, D.M. Karnakis, P.H.Key, P.Monk., " Excimer laser ablation for micro-machining : geometric effects," Applied surface science 96-98 (1996) 415-419
2. X.Zhou, K.Imasaki, H.Furukawa, " Simulation study and experiment on laser-ablation surface cleaning ", Optics & Laser Technology 33(2001), 189-194.
3. Nadeem H. Rizvi, "Production of novel 3D microstructures using excimer laser mask projection techniques", Part of the Symposium on Design, Test, and Microfabrication of MEMS and MOEMS, SPIE Vol. 3680, March-April 1999.
4. C.Paterson, A.S.Holmes, R.W.Smith, "Excimer laser ablation of Microstructures-A numerical model" Journal of Applied Physics Vol.86 NO11, 1999.
5. Malcolm C Gower, " Excimer laser Micromachining : A 15 year perspective", Part of the SPIE Conference on Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing IV, January 1999 SPIE Vol.3618.
6. Huadong Gai and Gregory A. Voth, " A computer simulation method for studying the ablation of polymer surface by ultraviolet laser radiation", Journal of Applied Physics 71(3), 1415-1420, 1992.
7. 방세운, 신귀성, 윤경구, 황경현, "레이저 어블레이션을 이용한 준삼차원 미소형상 가공 모델링", 2000 Proceedings of the 2nd Korean MEMS