

유전자 알고리즘을 이용한 엑시머 레이저가공의 최적조건 선정

배창현*, 최경현⁺, 이석희⁺⁺

(논문접수일 2002. 4. 1, 심사완료일 2002. 10. 16)

Determination of Optimal Excimer Laser Ablation Conditions Using Genetic Algorithm

Chang-Hyun Bae*, Kyung-Hyun Choi⁺, Seok-Hee Lee⁺⁺

Abstract

A new 3D micromachining method, called Hole Area Modulation(HAM), has been introduced to enhance the current micromachining technology. 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 optimal laser ablation conditions(width, hole radius, step size, path, etc.) is performed by Genetic Algorithm(GA).

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

1. 서론

MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)는 대량생산을 통한 저가의 고성능, 초소형, 초경량 등 반도체 집적회로의 장점을 지닌 센서 및 응용시스템이다. 이 분야의 기본 단위는 마이크로미터이며, 실제 MEMS 기술로 만들어진 부품 또는 완전한 시스템은 수 밀리미터, 센티미터이며

그 자체로 완전한 시스템이다. MEMS의 주 응용분야는 자동차, 디스플레이를 포함한 가전제품 등의 기간산업과 앞으로 다가올 항공, 우주, 전자, 기계, 의료, 생물, 제약 산업까지 매우 다양하다.

미국, 일본, 유럽을 비롯한 기술 선진국가에서 1987년부터 기초 및 응용연구를 수행하고 있으며, 미국에서는 1992년부터 인프라 구축 사업을 시작하였다. 미국은 주로 마이

* 주저자, 부산대학교 지능기계공학과 생산자동화실험실(paechang@hyowon.pusan.ac.kr)

주소: 609-735 부산시 금정구 장전2동

+ 제주대학교 기계공학부

++ 부산대학교 기계공학부

크로 머신 즉, 센서나 액츄에이터의 응용에 많은 연구를 진행중이며, 일본 및 유럽은 마이크로 머시닝 분야에 연구를 수행하고 있다. 마이크로 머시닝이란 MEMS를 위한 제조 기술을 의미하며, MEMS에서 요구되는 부품의 정밀도는 서브미크론 뿐만 아니라 나노미터(Nanometer)이하를 요구하고 있으므로, 기존의 머신공정(밀링, 드릴링, 슬라이싱, 커팅 등)으로는 MEMS의 구현이 불가능하며, 고도의 초정밀, 초미세 복합가공기술의 개발이 필요하다.

MEMS 구현을 위한 비전통적인 마이크로머시닝 기술들이 개발되어 실용화 단계에 있다. 반도체 공정을 응용한 기술인 표면 마이크로머시닝, 기관 마이크로머시닝 등은 실리콘 기판의 2차원 형상으로 전체 및 일부를 상대로 한 마이크로머시닝 기술로 대량 생산성 및 집적도가 뛰어나며, 국내에서도 높은 수준의 기술력을 확보하고 있다. LIGA 방식은 X선 노광장치를 이용하여 1mm 정도의 높이로 폭이 2~3 μ m 기둥이나 벽을 만드는 마이크로머시닝법인데, 500이 넘는 높은 형상비(폭과 높이의 비)의 구조를 만드는 공정도 개발되어 있다.

비전통적인(Non-Traditional) 3차원 마이크로 머시닝의 방법으로 방전가공 기술이 일본과 국내에서 개발되어 실용화 단계에 이르고 있다. 또한, 유럽에서는 3차원 마이크로 머시닝 기술의 한 방법으로 엑시머 레이저를 이용한 재료 가공 및 구조물 제작에의 응용은 현재 활발히 연구되고 있으며, 마이크로머시닝에 핵심기술로 사용되고 있으며 그 활용 폭은 초소형 정밀기기를 개발하는데 유리한 장점을 갖고 있어 점차 넓어지고 있다. 엑시머 레이저는 MEMS 부품의 가공시 유용한 도구로 사용가능하며 특히 실리콘 표면의 도핑, 에칭, 증착, 마이크로 패터닝 등에 활용 가능하다. 엑시머 레이저는 Ar, Kr, Xe 등의 희귀가스와 F, Cl과 같은 할로젠족 가스를 혼합하여 방전여기에 의해 발전되는 157-350nm 파장대의 자외선계열 레이저로 가공시에 재료에 어떠한 열 손상도 없을 뿐만 아니라 극소형대의 초정밀가공을 구현할 수 있는 장점을 가지고 있다. 레이저의 강도와 조사 시간 등 레이저 어블레이션 조건에 따라 미세한 변형에서부터 제품 형상의 성형, 절단에 이르기까지 다양한 적용이 가능하다⁽¹⁾.

그러나 지금까지는 원하는 형상을 얻기 위하여 최적의 레이저 어블레이션 조건을 시행오차법으로 결정하였다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 Gai⁽²⁾는 레이저 어블레이션을 이용한 폴리머 표면의 가공을 시뮬레이션 하기 위한 컴퓨터 알고리즘을 개발하였으며, 방⁽³⁾은 준삼차원 형상의 미소구조물을 가공하는 과정을 예측하기 위한 모델링 연구를 수행

하였다. Zhou⁽⁴⁾는 Nd:YAG 레이저로 어블레이션 조건을 결정하기 위해서 원벌스트 스캐닝 오퍼레이션(one-burst scanning operation) 방법을 도입하였으며, 시뮬레이션과 실험을 통하여 접근법의 유용성 규명을 시도하였다. 다양한 3차원 가공 형상을 얻기 위해서는 마스크의 사용이 필수적이다. Rizvi⁽⁵⁾는 마스크를 이용한 어블레이션 가공의 여러 장점과 가공예를 보여주었으며, Paterson⁽⁶⁾은 마스크 투사에 의한 엑시머 레이저 마이크로가공의 수치적 모델을 제시하였다. 이러한 연구들의 대부분은 3차원 평면 형상에 초점을 두었으며, 마이크로 렌즈와 같은 복잡한 곡면 형상을 얻기 위해서는 복잡한 마스크 패턴과 제어 시스템이 요구되며, 최적의 레이저 어블레이션 조건을 구하기가 어렵다.

본 연구에서는 엑시머 레이저를 이용한 새로운 3차원 마이크로머시닝 방법으로 Hole Area Modulation(HAM)을 기반으로 레이저 어블레이션 과정을 모델링하여 유전자 알고리즘을 이용함으로써 최적 어블레이션 조건을 선정하고자 한다. 선정된 어블레이션 조건을 이용하여 가공단면과 표면을 시뮬레이션 할 수 있는 시스템으로 개발하였다.

2. Hole Area Modulation(HAM)

엑시머 레이저 가공에서 가공물의 표면에 일정한 에너지 밀도로 가공할 때, 가공 깊이는 레이저 빔에 노출된 시간에 비례한다. 기존의 엑시머 레이저를 이용한 3차원 가공은 깊이 정보를 가지고 있지 않은 마스크(mask)를 사용하여 공동을 가공하므로, 에너지 손실 및 가공시간의 증대를 요구하였다.

그러나, 만일 동일한 직경을 가진 연속적인 구멍들이 2차원 배열의 마스크(mask)에 형성되어지거나, 또한 마스크가 배열의 피치에 상응하는 면적 내에서 규칙을 가지고 움직인다면, 평탄한 공동(cavity)이 생성될 것이다. 마스크안에 있는 구멍들의 직경이 2차원 분포를 가진다면, 가공된 공동(machined cavity)에는 깊이를 가진 2차원 분포로 변환이 될 것임으로, 3차원 공동(cavity)이 생성된다.

위의 개념대로 가공이 된다면, 그림 1(a)와 같이 마스크 위에 지름의 크기가 d_1 과 d_2 인 구멍들을 2차원적으로 배열한다면, 레이저빔에 노출되는 시간의 합이 다르므로, 다른 가공 깊이(h_1 , h_2)를 갖는 면이 가공될 것이다. 이처럼 마스크 구멍 지름의 변화로 가공할 구멍의 깊이 정보를 주는 새로운 엑시머 레이저 가공 방법을 Hole Area Modulation(HAM) 이라고 한다⁽⁷⁾.

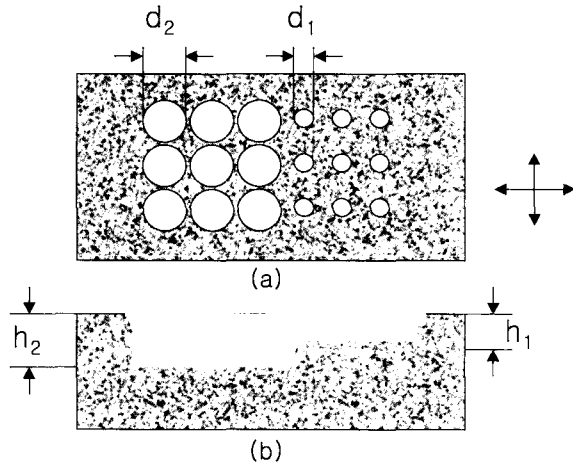


Fig. 1 Ablated surface with mask having different sized holes

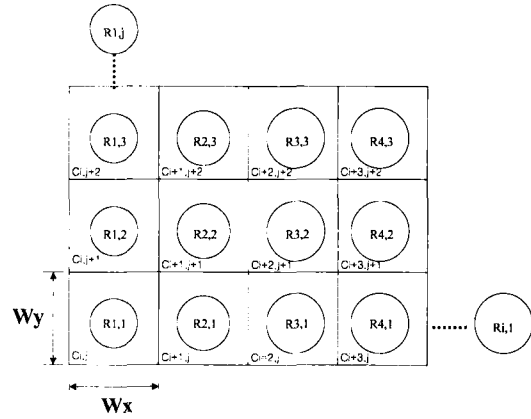


Fig. 2 HAM ablation parameters

3. 레이저 어블레이션 모델링

HAM에서 사용하는 마스크의 구멍 지름은 가공할 공동의 다른 깊이 사이의 비로 결정할 수 있다. 이 방법으로 지름을 결정하면 깊이가 다른 지점 사이의 깊이 차만큼의 비는 가공할 수 있으나 원하는 정확한 가공깊이를 얻을 수는 없으므로, 원하는 절대 깊이는 레이저 에너지 밀도 및 조사 시간의 조절로 구할 수 있다.

따라서, 그림 2에서 보는바와 같이 HAM 기반의 레이저 어블레이션 조건은 셀 크기 $W_x \times W_y$, 마스크 홀 반지름

$R_{i,j}$ ($i=1,2,\dots,n$ $j=1,2,\dots,m$), 레이저 경로 등으로 결정하였다. 각 셀의 어블레이션 깊이는 그 셀에 속하는 홀의 넓이에 의해서 결정이 된다. 그러나, 홀의 지름의 크기가 다르기 때문에 동일한 경로 때문에 셀의 경계에서 이웃들의 셀에 속하는 홀에 의하여 어블레이션이 중복으로 일어난다. 따라서, 셀의 경계치에서 어블레이션 깊이를 고려하는 것이 타당하다고 여겨진다.

레이저 경로 설정으로 본 연구에서는 두 가지의 경로를 고려하였다. 그림 3(a)는 셀의 중간지점에서 시작하여 스텝 사이즈만큼씩 증가하면서 레이저가 진행된다. 그림 3(b)는

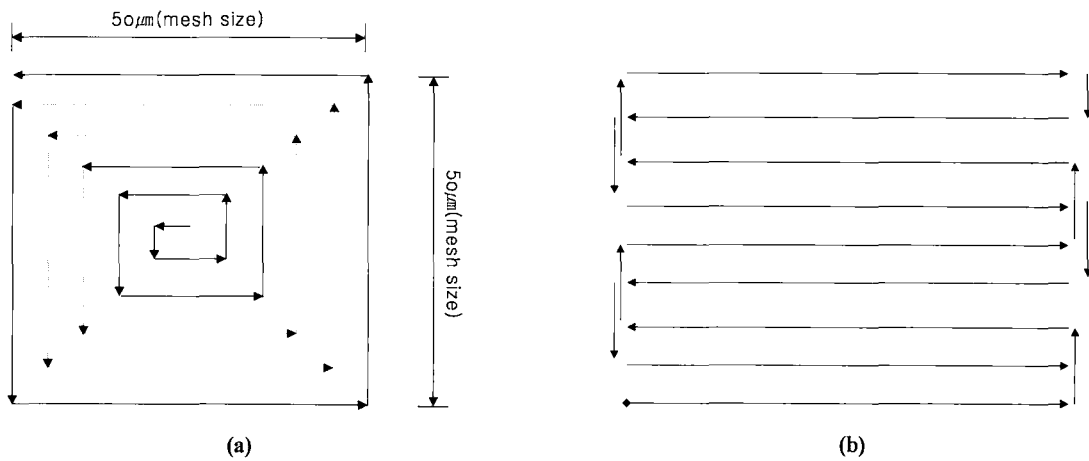


Fig. 3 Laser paths

셀의 왼쪽 구석점에서 시작하여 그림처럼 셀의 가로축으로 움직이다가 스텝 사이즈만큼 이동하여 가공을 계속하게 된다. 이 경로의 특징은 오른쪽 구석점에서 가공이 끝난 후 스텝 사이즈의 절반만큼 이동 후 다시 처음의 위치 쪽으로 가공을 다시 한다.

1) 가공경로 I

셀의 경계에 영향을 미치는 스텝 수 m 을 다음 식에서 얻을 수 있다.

$$\left(\frac{W_x}{2} - R_{i,j}\right) < m \cdot s \leq m \cdot \frac{\frac{W_x}{2} - R_{i,j}}{s} \quad (1)$$

여기서, W_x : 셀의 너비,
 $R_{i,j}$: i 번째 행과 j 번째 열에 해당하는 셀의 홀 반지름,
 s : 스텝 사이즈

영향을 주는 각 스텝에서 행 방향(i 배열)의 경계치에서 어블레이션 시간은 식 (2)와 같이 구할 수 있다. 한 지점(i 배열)에서의 가공에 영향으로 미치는 홀은 $i, i+1$ 두 셀의 홀이 영향을 미치게 된다.

$$\begin{aligned} \therefore t_{(i,i+1),j} &= \sum_{k=m_i}^{n_i} t_k + \sum_{k=m_{i+1}}^{n_i} t_{k+1} \\ &= \sum_{k=m_i}^{n_i} \frac{2\sqrt{R_i^2 - \left(\frac{W_x}{2} - k \cdot s\right)^2}}{V} + \sum_{k=m_{i+1}}^{n_i} \frac{2\sqrt{R_{i+1}^2 - \left(\frac{W_x}{2} - k \cdot s\right)^2}}{V} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, t : 가공시간, n, m : 스텝 수, V : 레이저 스캐닝 속도
 $t_{(i,i+1),j}$: i 번째의 셀과 $i+1$ 번째 셀의 경계치에서의 어블레이션 시간

또한, 열 방향(j 배열)의 경계치에서 어블레이션 시간도 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \therefore t_{(i,j,j+1)} &= \sum_{k=m_j}^{n_j} \frac{2\sqrt{R_j^2 - \left(\frac{W_y}{2} - k \Delta y\right)^2}}{V} + \\ &\quad \sum_{k=m_{j+1}}^{n_j} \frac{2\sqrt{R_{j+1}^2 - \left(\frac{W_y}{2} - k \Delta y\right)^2}}{V} \end{aligned} \quad (3)$$

가공깊이는 가공시간을 이용하여 구할 수 있다.

$$\therefore Dr_i = t_i \cdot f \cdot e \quad (4)$$

여기서, f : 조사시의 빔의 펄스 반복률,
 e : 펄스 당 에칭깊이(μm)

2) 가공경로 II

가공경로 II에 대한 해석의 순서는 경로 I 과 비슷하다. 그러나, 해석방법은 달라지는데 한 지점에서의 가공깊이는 올라갈 때 가공깊이와 내려올 때 가공깊이의 합으로 구해진다. 그리고, 각 셀에서 이웃홀의 영향으로 각 지점의 가공시간이 다르게 된다.

각 셀의 각 지점의 가공시간을 구하기 위해서는 셀을 세 부분으로 나누어서 각 구간에서의 가공식을 이용하여 구할 수 있다.

$$t_{i-1} = \frac{LRH_{up} + LRI_{up} + LRH_{down} + LRI_{down}}{V} \quad (5)$$

$$t_{i-2} = \frac{2(LRI_{up} + LRI_{down})}{V} \quad (6)$$

$$t_{i-3} = \frac{LRI_{up} + LRK_{up} + LRI_{down} + LRK_{down}}{V} \quad (7)$$

여기서,

$$LRH_{up} = \sum_{k=m_1}^{n_1} \sqrt{R_h^2 - \left(\frac{W}{2} - k \cdot s\right)^2},$$

$$LRI_{up} = \sum_{k=m_1}^{n_1} \sqrt{R_i^2 - \left(\frac{W}{2} - k \cdot s\right)^2}$$

$$LRK_{up} = \sum_{k=m_1}^{n_1} \sqrt{R_k^2 - \left(\frac{W}{2} - k \cdot s\right)^2},$$

$$LRH_{down} = \sum_{k=m_2}^{n_2} \sqrt{R_h^2 - \left(\frac{W-s}{2} - k \cdot s\right)^2}$$

$$LRI_{down} = \sum_{k=m_2}^{n_2} \sqrt{R_i^2 - \left(\frac{W-s}{2} - k \cdot s\right)^2},$$

$$LRK_{down} = \sum_{k=m_2}^{n_2} \sqrt{R_k^2 - \left(\frac{W-s}{2} - k \cdot s\right)^2}$$

경로 II의 가공깊이도 식 (4)를 이용해서 구할 수 있다.

4. 유전자 알고리즘을 이용한 최적 어블레이션 조건 생성

유전자 알고리즘은 생물집단이 자연선택과 유전자 교환

을 통해 번식하는 과정을 수학적 방법으로 모델링한 알고리즘이다⁽⁸⁾. 이 알고리즘은 비중복 집단과 선택적 엘리티즘을 사용하며 각각의 세대에서 완전히 새로운 개체로 이루어진 집단을 형성한다. 유전자 알고리즘을 적용하기 위한 개체 집단은 최소 홀 반지름, 셀의 크기 그리고 스텝 사이즈의 순서로 정의된다. 본 유전자 알고리즘에 사용된 선택전략은 룰렛 휠 선택으로 이는 집단내 다른 개체들의 적합도에 대한 특정 개체의 상대적인 적합도 크기를 이용하여 개체를 선택한다. 적합도가 클수록 선택될 확률도 높아지는 방법이다. 적합도가 결정되었다고 하여 그 값을 그대로 선택시의 확률에 반영시킬 필요는 없으며 적당한 함수를 도입하여 적용도의 차이를 확대 또는 축소시킬 수 있다. 이러한 함수를 스케일링이라고 한다. 본 연구에서는 시그마 절단 스케일링 연산자를 이용하였고, 2점 교배 연산자와 교환 돌연변이 연산자를 사용하였다. 이용된 GA 매개변수는 Table 1과 같이 설정하였다.

Table 1 GA parameters

GA parameter	Value
Population size	50
Generation size	1000
Probability of crossover	0.6
Probability of Mutation	0.01
Ratio of Convergence	0.99
Ratio of Swap	0.1

유전자 알고리즘의 목적함수는 실제 어블레이션 깊이 값(식 4)과 구하고자 하는 곡면의 각 점의 값(Dd_{ij})의 오차를 전 구간에서 합을 하여 최소가 되는 식 (8)로 구할 수가 있다.

$$F_{obj} = \text{Min} \left| \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^W (Dd_{ij} - Dr_{ij}) \right| \quad (8)$$

적합도 함수로 정의되는 F_{Fit} 값이 항상 양의 큰 값을 갖도록 임의의 큰 상수(N)과 F_{obj} 의 차를 이용하여 실제 어블레이션 깊이와 계산된 깊이와의 차이가 최소가 될 때 적합도 함수는 최대가 되도록 식 (9)로 설계하였다.

$$F_{Fit} = N - F_{obj} \quad (9)$$

식 (10)은 설계변수의 제한 조건이다. 설계변수의 제한조건은 실제 레이저기계특성과 마스크 가공특성을 고려하였다. 설계변수는 셀사이즈(W_x), 최소 반지름(R_{min}), 스텝사이즈(s)이다.

$$\begin{aligned} \text{Subject to } 24\mu\text{m} &\leq W_x \leq 100\mu\text{m} \\ 1\mu\text{m} &\leq R_{min} \leq 10\mu\text{m} \\ 0.1\mu\text{m} &\leq s \leq 5\mu\text{m} \end{aligned} \quad (10)$$

5. 적용 예

시뮬레이션을 위해 사용된 레이저의 기계적 특성은 KrF 엑사이머 레이저(Lumonics PM 800)의 특성을 이용하였다.

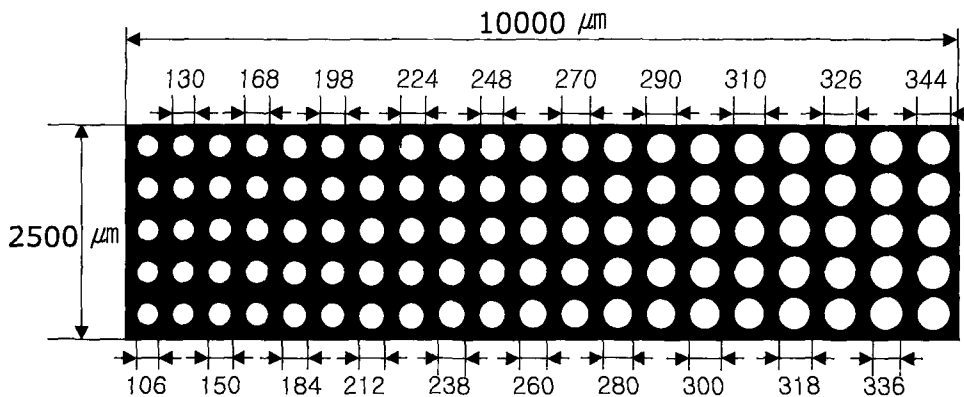


Fig. 4 Mask Design

Table 2 Parameters for simulation

Equipment & Materia	Value
Laser Source	KrF laser
Wavelength	248nm
Maximum pulse energy	800mJ
Maximum pulse frequency	100Hz
X-Y table movement	1 μ m
Square section beam	10mm \times 20mm
Reduction factor	\pm 10.
Material	125 μ m thick polyimide

Table 2는 기계적 특성과 시뮬레이션에 필요한 매개변수들이다. 가공하고자 하는 마이크로 형상은 길이가 1000 μ m이고 최대깊이가 10 μ m인 경사면이다. 이 형상을 가공하기 위해서 GA에 의하여 결정된 조건은 셀 사이즈 $W_x (= W_y)$ 는 50 μ m, 최소 반지름 R은 5.3 μ m, 스텝 사이즈는 2 μ m이다. 그림 4에서는 GA로 결정된 parameter를 이용하여 디자인한 마스크를 보이고 있다. 전체 마스크의 크기는 10mm \times 2.5mm이고, 총 100개의 홀로 구성된다. 최소 홀 지름은 106 μ m이고, 최대 홀 지름은 344 μ m이다. 실제 마스크를 가공할 경우에 홀의 원형도가 완벽하지는 않을 것이나, 실험을 수행하는 데는 영향이 적을 것으로 가정한다. 본 연구의 알고리즘을 적용하여 개발한 GUI가 그림 5, 6에서 보여지고 있다. 그림 5에서 보여주는 것과 같이 개발한 GUI는 총 5개의 모

듈 즉, 입력 모듈, 계산 모듈, 마스크 디자인 모듈, 경로 생성 모듈 그리고 시각화 모듈로 구성된다. 그림 5와 6은 두 가지 경로에 따른 가공면의 시뮬레이션 결과를 보이고 있다. 그림 5의 오른쪽 상단 부분의 그래프는 가공면 중 X 방향의 단면을 보여준다. 그래프상의 직선으로 나와 있는 부분은 원하는 가공 단면을 보여준다. 그래서 시뮬레이션된 결과와 비교하여 그 오차를 직관적으로 알 수 있다. 그림 5의 오른쪽 아랫부분은 가공면의 전체 모습이다. 그림 5에서 알 수 있듯이 경로 I에 의해 가공된 면은 원하는 가공면보다 가공거칠기가 상당히 크다. 이것은 그림 3에서 나타나듯이 마스크 홀 지름이 클수록 셀간의 겹침이 심해져서 가공면이 거칠어졌다는 것을 알 수 있다. 경로 I의 또 다른 특징은 경로대로 한번의 가공을 했을 때 가공깊이가 원하는 것보다 작은 것을 알 수 있었다. 그래서 경로 I의 경우 가공의 반복수(repetition)의 결정이 중요하다.

동일한 가공 조건으로 시뮬레이션을 했지만, 경로 II에 의한 가공 면은 그림 6에서 보듯이 최대 가공 깊이가 적절하고, 가공면의 표면조도가 우수하였다. 그러므로, 동일한 레이저 어블레이션 조건에서도 가공 경로의 적절한 선정이 요구됨을 알 수가 있다.

6. 결론

본 연구에서는 엑시머 레이저로 미소구조물을 가공하기 위한 새로운 접근법인 Hole Area Modulation(HAM)을 소개하고, 실제 가공에 필요한 어블레이션 조건 및 가공데이

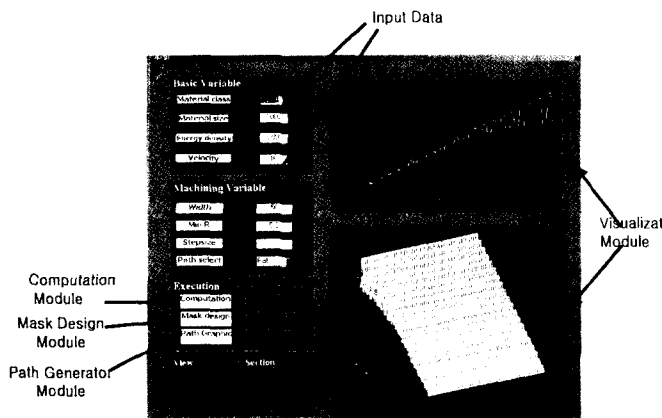


Fig. 5 Section curve & Surface by path I

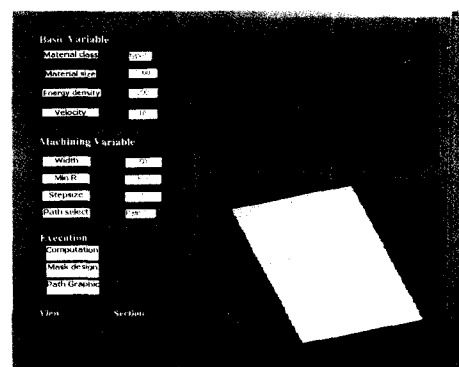


Fig. 6 Section curve & Surface by path II

터를 얻기 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 가공시 필요한 이송변수를 가정하여 모델링을 하고 원하는 곡면을 얻기 위해 필요한 다른 가공조건, 즉 셀의 크기, 구멍의 지름, 스텝 사이즈를 GA를 이용하여 구하였다. 여기서 테이블의 이송 속도는 등속도로 고려하였고, 이송속도와 레이저가 조사되는 이송거리로부터 레이저가 조사되는 시간과 펄스 수를 계산하여 어블레이션 깊이를 계산하였다.

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

참 고 문 헌

- (1) M.C. Gower, "Excimer laser Micromachining : A 15 year perspective", Part of the SPIE Conference on Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing IV, Vol. 3618, pp. 251 ~ 261, 1999.
- (2) H. Gai and G.A. Voth, "A computer simulation method for studying the ablation of polymer surface by ultraviolet laser radiation", Journal of Applied Physics, Vol. 71, pp. 1415 ~ 1420, 1992.
- (3) 방세운, 신귀성, 윤경구, 황경현, "레이저 어블레이션을 이용한 준삼차원 미소형상 가공 모델링", Proceedings of the 2nd Korean MEMS Conference pp. 15 ~ 23, 2000.
- (4) X. Zhou, K. Imasaki, H. Furukawa, "Simulation study and experiment on laser-ablation surface cleaning", Optics & Laser Technology, Vol. 33, pp. 189 ~ 194, 2001.
- (5) N.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, pp. 546 ~ 552, 1999.
- (6) C. Paterson, A.S. Holmes, R.W. Smith, "Eximer laser ablation of Microstructures-A numerical model", Journal of Applied Physics, Vol. 86, pp. 6538 ~ 6546, 1999.
- (7) 최경현, 배창현, 이석희, Masuzawa., "엑시머 레이저를 이용한 3차원 마이크로가공", 2001년 추계정밀학회 논문집, pp. 1076 ~ 1079, 2001.
- (8) 김민석, 정성중, "반경오차 보정을 위한 최적파라미터 튜닝", 2000년 춘계한국공작기계학회 논문집, pp. 629 ~ 634, 2000.