

엑시머 레이저를 이용한 3차원 마이크로 가공

최 경 현*

Three Dimensional Micromachining using Excimer laser

Kyung-Hyun Choi*

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, the mathematical model for excimer laser micromachining based on HAM and the determination of the optimal laser ablation conditions(width, hole radius, step size, path, etc.) is suggested completed by employing using Genetic Algorithm(GA).

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

1. 서 론

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, 산업, 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 마이크로 머신 즉, 센서나 액추에이터의 응용에 많은 연구를 진행중이며, 일본 및 유럽은 마이크로 머시닝 분야에 연구를 수행하고 있는 편이다. 마이크로 머시닝이란 MEMS를 위한 제조 기술을 의미하며, MEMS에서 요구되는 부품의 정밀도는 서브미크론 뿐만 아니라 Nanometer이하를 요구하고 있음으로, 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, 기판 마이크

* 제주대학교 기계에너지생산공학부, 산업기술연구소
Faculty of Mechanical Energy Production Eng., Res. Insti. Ind. Tech., Cheju Nat'l Univ.

로머시닝 등은 실리콘 기판의 2차원 형상으로 전체 및 일부를 상대로 한 마이크로머시닝 기술로 대량 생산성 및 집적도가 뛰어나며, 국내에서도 높은 수준의 기술력을 확보하고 있다. LIGA방식은 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 개발이 되어있다.

비전통적인(Non-Traditional) 3차원 마이크로 머시닝의 방법으로 방전가공 기술이 일본과 국내에서 개발되어 실용화 단계에 이르고 있다. 또한, 유럽에서는 3차원 마이크로머시닝 기술의 한 방법으로 엑시머 레이저를 이용한 재료 가공 및 구조물 제작에의 응용은 현재 활발히 연구되고 있으며, 마이크로머시닝에 핵심기술로 사용되고 있으며 그 활용 폭은 초소형 정밀 기기를 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 발진되는 157~350nm 파장대의 자외선계열 레이저로 가공시에 재료에 어떠한 열 손상도 없을 뿐만 아니라 극소형대의 초정밀가공을 구현할 수 있는 장점을 가지고 있다. 레이저의 강도와 조사시간 등 레이저 어블레이션 조건에 따라 미세한 변형에서부터 제품 형상의 성형, 절단에 이르기까지 다양한 적용을 할 수 있다.¹⁾

그러나 지금까지는 원하는 형상을 얻기 위하여 최적의 레이저 어블레이션 조건을 trial-error 방법으로 결정을 하였다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 Gai²⁾는 레이저 어블레이션을 이용한 폴리머 표면의 가공을 시뮬레이션 하기 위한 컴퓨터 알고리즘을 개발하였으며, 방세운³⁾은 준삼차원 형상의 미소구조물을 가공하는 과정을 예측하기 위한 모델링 연구를 수행하였다. Zhou⁴⁾는 Nd:YAG레이저로 어블레이션 조건을 결정하기 위해서 one-burst 스캐닝 오퍼레이션(scanning operation) 방법을 도입하였으며, 시뮬레이션과 실험을 통하여 접근법의 유용성 규명을 시도하였다. 다양한 3차원 가공 형상을 얻기 위하여 마스크의 사용이 필수적이

다. Rizvi⁵⁾는 마스크를 이용한 어블레이션 가공의 여러 장점과 가공예를 보여주었으며, Paterson⁶⁾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 블레이션 과정을 모델링하여 유전자 알고리즘을 이용하여 최적 어블레이션 조건을 선정하고자 한다.

II. Hole Area Modulation(HAM)

엑시머 레이저 가공에서 가공 표면에 파워(power) 밀도가 일정할 때 가공 깊이는 레이저 빔에 노출된 시간에 비례한다. 기존의 엑시머 레이저를 이용한 3차원 가공은 깊이의 정보를 가지고 있지 않은 마스크(mask)를 사용하여 동공을 가공함으로써, 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 2차

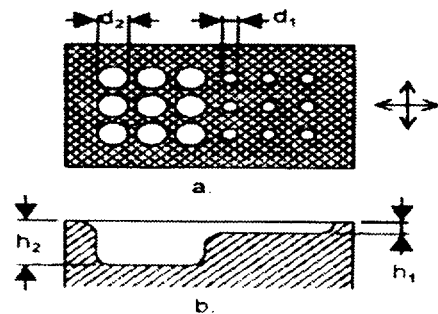


Fig. 1. Ablated surface with mask having different sized holes

원 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 2차원 배열한다면, 레이저빔에 노출되는 시간의 합이 다르므로, 다른 깊이(h_1, h_2)를 갖는 면이 가공될 것이다. 이처럼 구멍 지름의 변화로 마스크에 가공할 구멍의 깊이 정보를 주는 새로운 엑시머 레이저 가공 방법을 Hole Area Modulation(HAM) 이라고 한다.⁷⁾

III. 레이저 어블레이션 모델링

HAM에서 사용하는 마스크의 구멍 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 없으므로, 원하는 절대 깊이는 레이저 에너지 밀도 및 조사시간의 조절로 구할 수 있다.

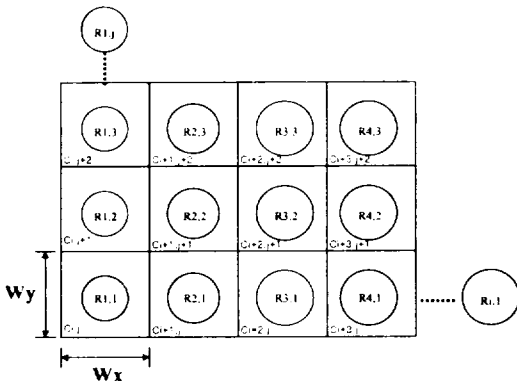


Fig. 2. HAM ablation parameters.

따라서, 그림 2에서 보는 바와 같이 HAM 기반의 레이저 어블레이션 조건은 셀 크기 $W_x \times W_y$, 구멍 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. 그

러나, 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.

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

$$m > \frac{\frac{W_x}{2} - R_{i,j}}{\Delta x} \left(\frac{W_x}{2} - R_{i,j} \right) < m \Delta x \quad (1)$$

여기서, W_x 는 셀의 너비, $R_{i,j}$ 는 i 번째 행과 j 번째 열에 해당하는 셀의 홀 반지름, Δx 는 스텝 사이즈이다.

영향을 주는 각 스텝에서 행 방향(i 배열)의 경계치에서 어블레이션 시간은 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

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

여기서 t 는 시간, n 은 스텝 수이다. 그리고 $t_{(i,i+1),j}$ 는 i 번째의 셀과 $i+1$ 번째 셀의 경계에서의 어블레이션 시간을 의미한다.

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

$$t_{i,(j,j+1)} = \sum_{j=1}^m \sum_{k=m}^m t_k = \sum_{j=1}^m \sum_{k=m}^m \frac{2\sqrt{R_j^2 - \left(\frac{W_y}{2} - k\Delta y\right)^2}}{V} + \sum_{k=m+1}^m \frac{2\sqrt{R_{j+1}^2 - \left(\frac{W_y}{2} - k\Delta y\right)^2}}{V} \quad (3)$$

따라서, 셀 경계치에서 총 실제 가공시간은 식 (4)와 같다.

$$t_{real} = \sum_{j=1}^n t_{(i,i+1),j} + \sum_{j=1}^n t_{i,(j,j+1)} \quad (4)$$

IV. 유전자 알고리즘을 이용한 최적 어블레이션 조건 생성

본 논문에서 사용한 최적화의 기법은 유전자 알고리즘이다. 이 알고리즘은 비중복 집단과 선택적 엘리티즘을 사용하며 각각의 세대에서 완전히 새로운 개체로 이루어진 집단을 형성한다. 선택방법은 룰렛 휠 선택으로 이는 적합도 비례 선택의 일종으로, 적합도의 확률적 분포를 반영하여 새로운 집단을 생성한다. 시그마 절단 스케일링 연산자를 이용하였고, 2점 교배 연산자와 교환 돌연변이 연산자를 사용하였다. 어블레이션 모델링으로부터 총 가공시간을 구할 수 있다(식 (4)). 이 시간을 가공 펄스 반복율 f 와 단위 펄스당 어블레이션깊이 e 를 곱하면 실제 가공깊이를 식 (5)과 같이 구할 수 있다.

$$D_{real} = t_{real} \cdot f \cdot e \quad (5)$$

요구되는 어블레이션 깊이는 식 (6)으로 구할 수가 있다.

$$D_{desire} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n D_{i,j} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n D_{i,j} \quad (6)$$

GA에 필요한 목적함수는 실제 어블레이션 깊이 값 (식 (5))과 구하고자 하는 곡면의 각 점의 값(식 (6))을 비교하여 그 오차가 최소가 되는 식(7)으로 구할 수가 있다.

$$Q(\text{Objective function}) = \text{Min} |D_{desire} - D_{real}| \quad (7)$$

V. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션에서 사용된 레이저는 KrF 타입, 파장은 248 nm, 에너지 밀도는 89 mJ, 펄스반복율은 100Hz이다. 최소 레이저 이송 스텝 사이즈는 1 μ m이고, 이송속도는 0.1 mm/s로 선정하였다. 가공하고자

하는 마이크로 형상은 길이가 500 μ m이고 깊이가 8 μ m인 직선 단면이다. GA에 의하여 결정된 조건은 셀 사이즈 $W_x(=W_y)$ 는 50 μ m, 최소 반지름 R은 7 μ m, 스텝 사이즈는 2 μ m이다.

레이저 경로 설정으로 본 연구에서 두 가지의 경로를 고려하였다. 그림 3(a)은 셀의 중간지점에서 시작하여 스텝 사이즈만큼씩 증가하면서 레이저가 진행한다. 그림 3(b)는 셀의 왼쪽 구석 점에서 시작하여 그림처럼 셀의 가로축으로 움직이다가 스텝 사이즈만큼 이동하여 가공을 계속하게 된다. 이 경로의 특징은 오른쪽 구석 점에서 가공이 끝난 후 스텝 사이즈의 절반만큼 이동 후 다시 처음의 위치 쪽으로 가공을 다시 한다.

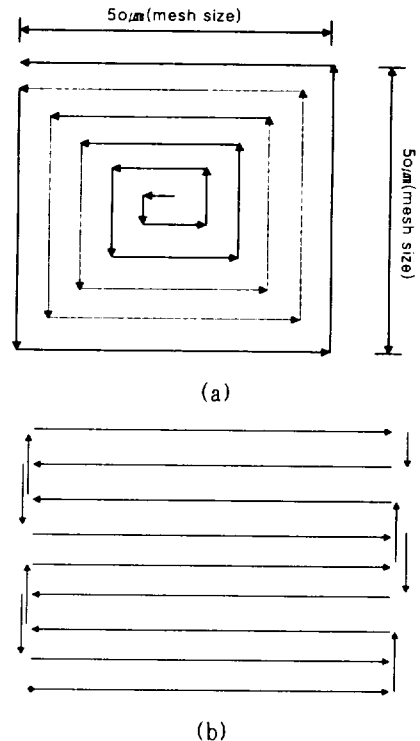


Fig. 3. Laser paths.

Fig. 4와 5는 두 가지 경로에 따른 가공 단면의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 경로(a)에 의해 가공된 가공 깊이는 10 μ m의 절반정도가 가공 된 것을 알 수 있다. 목표 깊이에 이르기 위

해 다시 반복해서 가공을 했으나, 400 μm 부분으로 갈수록 가공면이 거칠어지는 것을 알 수 있다.

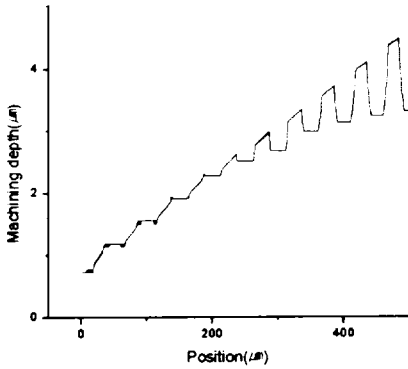


Fig. 4. Section curve of the cavity by path(a).

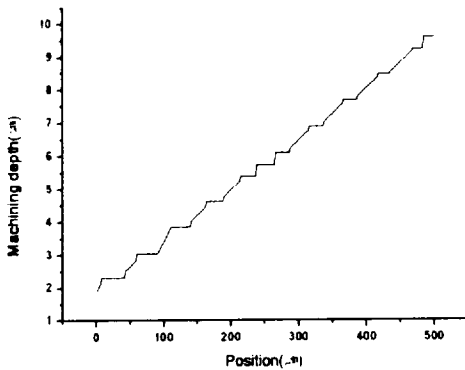


Fig. 5. Section curve of the cavity by path(b).

구멍의 지름이 커짐으로 해서 이웃 셀에 영향을 주었다고 판단된다. 경로(b)에 의한 가공 면은 Fig. 5에서 나타나듯이 최대 가공 깊이가 적절하고, 가공면의 표면조도가 우수하였다. 그러므로, 동일한 레이저 어블레이션 조건에서도 가공 경로의 적절한 선정이 요구됨을 알 수가 있다.

VI. 결론

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

조건 및 가공데이터를 얻기 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 가공시 필요한 이송변수를 가정하여 모델링을 하고 원하는 곡면을 얻기 위해 필요한 다른 가공 조건, 즉 셀의 크기, 구멍의 지름, 스텝 사이즈를 GA를 이용하여 구하였다. 여기서 테이블의 이송속도는 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.

참고문헌

1. M.C. Gower, 1999. 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.
2. H. Gai and G.A. Voth, 1992. A computer simulation method for studying the ablation of polymer surface by ultraviolet laser radiation. *Journal of Applied Physics* 71(3), 1415-1420, 1992.
3. 방세윤, 신귀성, 윤경구, 황경현, 2000. 레이저 어블레이션을 이용한 준삼차원 미소형상 가공 모델링, 2000 Proceedings of the 2nd Korean MEMS Conference pp.15-23.
4. X. Zhou, K. Imasaki, H. Furukawa, 2001. Simulation study and experiment on laser-ablation surface cleaning. *Optics & Laser Technology*, vol.33, pp.189-194.
5. N.H. Rizvi, 1999. 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.
6. C. Paterson, A.S. Holmes, R.W. Smith, 1999.

Eximer laser ablation of Microstructures-A numerical model. *Journal of Applied Physics*, Vol.86 No.11.

7. 최경현, 배창현, 이석희, Masuzawa.. 2001. 엑시머 레이저를 이용한 3차원 마이크로가공. 2001년 추계정밀학회 논문집, pp.1076-107