

UV 레이저 마이크로머시닝의 가공경로생성에 관한 연구

양성빈*, 신보성, 장원석, 김재구, 김정민, 김효동(한국기계연구원), 전병희(인덕대학)

A study on manufacturing paths generation of UV laser micromachining

S. B. Yang, B. S. Shin, W. S. Chang, J. G. Kim, J. M. Kim, H. D. Kim(KIMM), B. H. Jeon(Induk Institute of Technology)

ABSTRACT

In this paper, laser direct micromachining is developed to fabricate micro patterns using UV laser ($\lambda_3 = 355 \text{ nm}$). Experimentally, laser beam paths mainly influences the surface shape quality. Thus, we proposed laser beam path generator by extracting shape data in a blueprint worked through CAD modeler and using genetic algorithm that considers the characteristics of laser beam. The results show that various shapes of micro patterns could be manufactured using proposed method in this paper.

Key Words : Laser Micromachining (레이저 마이크로머시닝), UV laser (UV 레이저), Beam Manufacturing Path (빔 가공 경로), Genetic Algorithm (유전알고리즘)

1. 서론

레이저 마이크로머시닝(laser micromachining) 공정 기술은 고집속, 고출력, 단펄스의 레이저빔을 이용하여 마이크로(μ)단위의 기계요소 및 정교한 형상의 부품가공을 할 수 있는 기술로서, 절단(cutting), 드릴링(drilling), 밀링(milling)과 기본원리는 유사하지만 단위 및 가공공구가 다르다. 이를 구현하기 위한 연구는 현재 다양한 방면에서 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 355 nm의 UV 파장을 가진 레이저를 이용하여 마스크(mask) 없이 직접적으로(direct) 가공하여 마이크로머시닝 하였다. 이러한 방법은 기존의 마스크를 이용하는 노광공정과는 달리 마스크 없이 빠르게 제작할 수 있기 때문에, 제작 공정을 간략하게 축소할 수 있으며 다양한 패턴을 빠르게 적용시킬 수 있다⁽¹⁾. 그러나 마스크를 사용하지 않고 직접적으로 레이저가 노광되는 부분만을 가공하기 때문에 가공경로(manufacturing path)에 따라서 작업시간의 단축과 재료의 절감 및 제품의 품질에 직접적으로 많은 영향을 준다.

최근 많은 상업용 CAD/CAM 패키지(EdgeCAM, EASY-ROB, ROBCAD etc.)는 가공 경로를 제공하여

절삭공구(machining tool)를 사용하는 대부분의 일반 절삭 가공(machining process)등이 이에 해당하며 시스템 모델링과 시뮬레이션에는 뛰어난 성능을 보이지만, 사용법을 익히기 어렵고 고가인 관계로 보편화 되지 못한 상태이다. 이러한 이유로 레이저 마이크로머시닝 시스템에 직접적으로 도입하기에는 부적합한 점이 많다. 레이저와 같은 집속된 열원을 이용하는 레이저 마이크로머시닝시스템은 과도한 입열 및 입열의 중첩등으로 인하여 예기치 않은 품질의 저하가 발생할 수 있으며, 이러한 이유 때문에 품질을 만족하면서 동시에 가장 짧은 경로를 탐색해야 할 필요성이 있다. 그러나 불행히도 최적화 알고리즘에는 레이저의 열원에 의한 영향을 함께 고려해서 수식화 한다는 것은 매우 어려운 문제이기 때문에 현재까지 이에 관한 연구가 미진한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 UV 레이저를 이용하여 마이크로머시닝 시스템을 구축하였으며, 가공 선폭(line width)은 20 μm 이내를 가지도록 하였다. 또한 가공생성에 관한 기초실험을 위하여 CAD 모델러를 통하여 작업된 도면 데이터를 이용하여 형상 데이터를 추출한 다음 레이저 빔 가공특성을 고려하여 가공경로를 유전자 알고리즘을 통하여 NC 데이터

로 재생성 하였으며, 스테이지 컨트롤러에 이송 명령을 입력하여 제어 하였다. 이러한 방법으로 다양한 모양의 미세패턴과 준 3 차원의 형상을 만들 수 있다.

2. 가공경로생성

2.1 레이저 가공 공정 구조

미세 형상을 마스크 없이 직접 식으로 제작하는 레이저 마이크로머시닝 시스템을 위해 개발된 공정은 Fig. 1의 흐름도와 같은 구조를 가지고 있다. 우선 제작하고자 하는 미세 형상을 CAD 모델러 통하여 제작한 다음 DXF 파일 형태로 저장한다. 여기서 필요한 부분의 도형으로부터 좌표정보를 추출한 다음 레이저 빔 특성을 고려한 가공경로를 설정하여 NC 코드로 재생성 한다. 이러한 작업은 일반적인 절삭 가공과 유사한 방법이다. 그러나 레이저는 절삭 가공과 같이 공구의 진입/후퇴가 없고 이송과정과 패턴 연결 부위 등이 다르다. 즉, 레이저를 이용하여 가공 할 때는 레이저의 on/off 를 자동적으로 작동하게 하여 이러한 부분을 해결하였다.

이렇게 생성된 NC 코드를 이용하여 XYZ-조정밀 스테이지 컨트롤러에 이송 명령을 입력하여 순차적으로 작업을 하게 된다⁽²⁾.

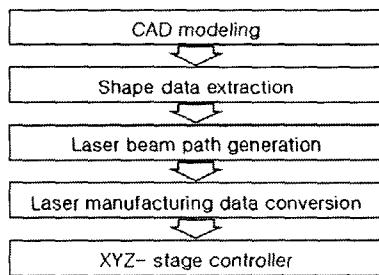


Fig. 1 The system flowchart for laser micromachining system

2.2 경로 생성을 위한 TSP 유전자 알고리즘

경로 생성 문제는 일반적으로 operations research(OR)분야에서 가장 많은 연구가 이루어져 온 조합최적화 문제 중 하나인 순회판매원 문제(traveling salesman problem: TSP)의 특수한 경우로 수식화될 수 있다. 이러한 TSP 문제의 가장 일반적인 n 개의 도시와 도시 사이의 거리가 주어질 때, 모든 도시를 단 한번만 방문하며 최단 길의 여행을 찾는 것으로 도시들의 가능한 방문의 순열(permutation)이 주어질 때 각 도시와 다음 도시와의 유클리드 거리(Euclidean distance)의 합이 최소가 되는 여행을 선택하는 것이다. 따라서 TSP의 탐색 동안 가능한

모든 여행의 집합 $\{T_1, T_2, \dots, T_{n!}\}$ 이 되고 그 크기는 $n!$ 이며 이 중에서 여행거리가 가장 짧은 것이 해가 되는 것으로 정의 자체는 매우 단순하지만 극도로 어려운 전형적인 조합최적화(combinatorial optimization) 문제에 속한다⁽³⁾.

본 연구에서는 가공경로 문제는 TSP 문제와 경로 최소화를 목표로 한다는 점에서는 동일하지만 레이저 마이크로 머시닝에서는 부분 고정 경로(partial fixed path)의 제약 조건(constraint)를 만족하면서 경유해야 한다는 점에서 차이가 있다.

경로 최적화 문제와 관련하여 많은 알고리즘들이 개발되어 왔는데, 현재에 성공적으로 적용되는 있는 것으로는 시뮬레이티 어닐링(simulated annealing), 신경회로망(neural networks), 타부 서치(tabu search), 유전 알고리즘(genetic algorithm) 등을 들 수 있다. 이들은 실행시간이 길고, 항상 유용한 해를 제공한다는 보장은 없으나 확률론적(stochastic)인 방법을 채택하고 있기 때문에 많이 사용되고 있는 실정이다. 이 중에서 전역적인 탐색법으로 국소해(global solution)에 빠지는 오류를 최소화 시키고 있으며, TSP와 같은 복잡한 조합문제에 탁월한 효율을 가지고, 힐 클라임 능력(hill climbing ability)과 백 트래킹 능력(back tracking ability)이 뛰어난 유전 알고리즘을 사용하여 최적의 레이저 빔 가공 경로를 생성하였다⁽⁴⁾. 이때 유전자 알고리즘은 Fig. 2와 같이 일반적인 방법과 마찬가지로 선택, 교배, 돌연변이의 기본적인 유전자 조작을 갖고 있으며 다음과 같다.

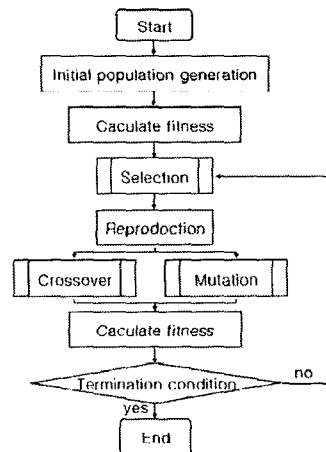


Fig. 2 Flowchart of genetic algorithm for laser micromachining

본 연구를 위해 사용한 유전연산자는 TPS 문제 해결에 사용 가능한 토너먼트선택(tournament selection), 부분 사상 교배(partially mapped crossover:

PMX), 역치(inversion)을 사용되었다. 이와 함께 최적 개체의 생존을 보장해주는 엘리트 전략(elitist strategy)이 사용되었다. 제어 파라미터는 집단 $N = 200$, 교배확률 $P_c = 0.7$, 돌연변이 확률 $P_m = 0.05$ 로 선택하였다.

레이저 가공의 최적경로를 생성하기 위한 적합도 함수(fitness function)는 각 도형의 좌표(x, y)가 주어질 경우에 유클리드 거리의 합으로 최소거리가 되게 하였다.

이때 가공 순서는 각 라인의 고정된 부분을 지나가게 하기 위해서 시작되는 좌표와 종료되는 좌표를 묶는 형태로 이를 경로쌍(path pair)이라고 하며, 시작 좌표와 종료 좌표를 교환 가능한 형태가 되게 하면, 적합도 함수는 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$f = \min \sum l_i$$

여기서, $l_i = \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2}$ (1)

$$x_i, y_i = x_s, y_e \sim x_e, y_s, i = 1, \dots, n$$

s, e 는 시작 좌표와 종료 좌표를 나타내는 것으로 서로 교환은 가능하나 끊어져서는 안 된다.

3. 실험

3.1 실험장치

본 연구에서는 레이저 마이크로 머시닝시스템을 Fig. 3 과 같이 구축하였으며, 355nm 의 UV 파장을 가진 Q-스위칭된 DPSSL(Diode-Pumped Solid-State Laser, Coherent Co.)를 사용하였으며, 주요 사양은 Table 1 과 같다. 레이저 빔은 외부 셔터(external shutter)를 통과하여, 편광기(polarizer), ND(neutral density)필터, 반사경(mirrors)를 거친 뒤 대물렌즈를 거쳐 시편에 조사하게 된다.

Table 1 The specifications of UV laser

Laser source	Nd:YVO ₄
Wavelength	3 rd harmonic ($\lambda_3 = 355$ nm)
Pulse width	40 ns
Average power	0.8 W (at 60 kHz)
Beam diameter	2.4 mm

조정밀 xyz 3 축 스테이지에서 xy 부분은 리니어 모터(liner motor)방식이고, z 축은 스텝모터(step motor)방식으로 정확도(accuracy)는 $\pm 1.0 \mu\text{m}$ 이며, 반복정밀도(repeatability)는 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 를 가진다. 각 스테이지는 unidex 511 컨트롤러를 통하여 제어 되고 컨트롤러는 PC 와 RS232C 통신을 한다.

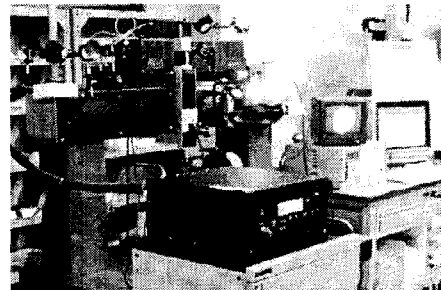


Fig. 3 The system for laser micromachining

3.2 레이저 빔 가공경로 생성 소프트웨어

본 연구를 위해서 레이저 빔 가공경로를 생성하는 소프트웨어를 Fig. 4 와 같이 National Instrument 회사의 LabVIEW 로 구성하였다. 먼저 CAD 파일을 읽어드린 다음 레이저 빔의 가공속도, 초점 거리 등과 유전자 연산자의 변수를 조절한 다음 빔 경로를 생성하고 시뮬레이션을 통하여 가공형상을 미리 예측한 다음 NC 코드로 변환시켜 컨트롤러에 입력하게 하였다.

이러한 과정을 통해서 서로 연결되는 부분은 하나의 선으로 묶어주며, 떨어지는 부분은 레이저 on/off 신호를 넣어 빔을 이송 시키도록 하였다.

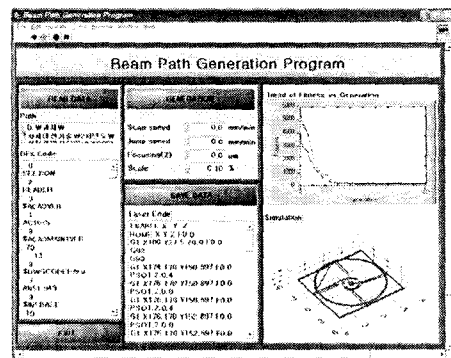


Fig. 4 Software for laser beam path generation

3.3 기초실험

미세 패턴을 위해 먼저 Fig. 5 와 같이 직선과 곡선의 구조를 가진 형상을 도면을 제작 하였다. 이 도면파일을 본 연구를 위해 유전자 알고리즘을 적용 시켜서 개발된 프로그램에 적용시켜보았다.

Fig. 6 은 유전자 알고리즘의 각 세대 별로 적합도의 추이를 나타낸다. 약 150 세대 이후에 수렴을 완료하게 되면, 비교적 빠른 수렴속도를 가지고 있다.

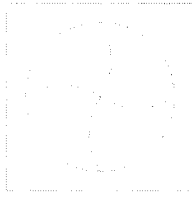


Fig. 5 Simple pattern of line, arc and circle combination

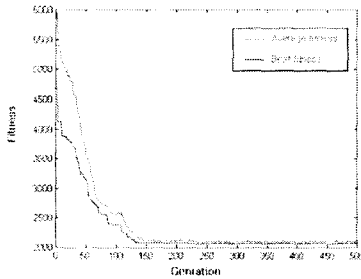
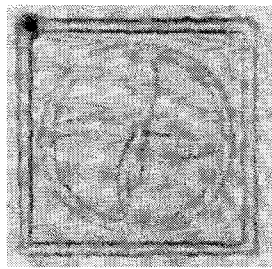
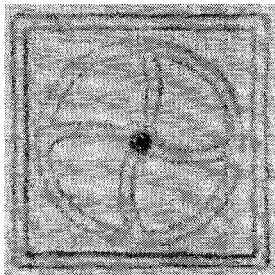


Fig. 6 Trend of fitness vs. generation



(a)



(b)

Fig. 7 Generated micro patterns (a) without genetic algorithm, (b) with genetic algorithm

이렇게 해서 생성된 NC 코드를 가지고 레이저 가공속도 10 mm/min, 레이저 파워 7 mW 의 조건으로 폴리카보네이트(polycarbonate)위에 패턴 형상을 Fig. 7 과 같이 가공하였으며 이때 가공 선폭은 12 μ m이다. 먼저 Fig. 7(a)는 경로를 고려하지 않은 임의의 순서로 생성된 데이터를 가지고 형상을 가공한 것이고, Fig. 7(b)는 유전알고리즘을 이용하여 경

로를 최적화한 후의 데이터를 가지고 가공을 한 형상이다. 두 형상을 비교해 보면 가공경로를 생성한 후의 형상이 더 좋은 것을 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 마스크 없이 직접적으로 가공하는 UV 레이저 마이크로머시닝 시스템을 구축하였으며, 가공 선폭은 20 μ m이내를 가지도록 하였다. 또한, 가공 경로 생성을 위해 CAD 모델의 데이터로부터 형상데이터의 좌표를 추출한 다음 유전알고리즘을 사용하여 레이저 빔 가공특성을 고려한 가공경로를 생성하였다. 이렇게 생성된 가공경로를 이용하여 미세형상을 가공하였다.

이러한 방법은 셔터의 on/off 를 통하여 연결부분과 단락 부분을 구분 짓게 하여, 시작부분과 종결부분의 정밀도가 향상되었으며, 빔 경로가 겹치는 부분도 제거 할 수 있었다. 또한, 작업시간도 30 ~ 60% 감소 하였다. 그리고, 레이저 빔 가공특성의 경험치나 수학적인 수식을 좀 더 첨가시킨다면 더 정밀한 가공형상을 얻을 수 있다.

후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 “차세대 신기술 개발사업” 중 한국기계연구원이 주관하고 있는 “고기능 초미세 광열유체 마이크로 부품 기술 개발 사업”의 세부과제로서 수행 중이며 이에 관계자 여러분 들게 감사의 말씀을 올립니다.

참고문헌

1. S. Dauer, A. Ehlert, S. Buttgenbach, "Rapid prototyping of micromechanical devices using a Q-switched Nd:YAG laser with optional frequency doubling," *Sensor and Actuator*, Vol. 76, 1999. pp. 381-385.
2. Jackson, S.D. and Mittal, R.O., "Automatic Generation of 2-Axis Laser Cutter NC Machine Program and Path Planning from CAD," *Computer in Industry*, Vol. 21, pp.223-231, 1993.
3. Sangit Chatterjee, Cecilia Carrera, Lucy A. Lynch, "Genetic algorithms and traveling salesman problems," *European Journal of Operational Research*, Vol. 93, pp. 490-510, 1996.
4. 한국찬, 나석주, "레이저 절단공정에서 토치경로 생성에 관한 연구," *대한기계학회지*, 제 20 권, 제 6 호, pp. 1827-1835, 1996.