

## 마이크로 광 조형기술에서 수지경화현상을 고려한 레이저 주사경로 생성

조윤형\*(포항공대 대학원 기계공학과), 조동우(포항공대 기계공학과)

### Generation of Laser Scan Path Considering Resin Solidification Phenomenon in Micro-stereolithography Technology

Y. H. Cho\*, D. W. Cho (Mechanical Eng. Dept., POSTECH)

#### ABSTRACT

In micro-stereolithography technology, fabrication conditions that include laser power, laser scan speed, laser scan pitch, and material property of photopolymer such as penetration depth and critical exposure are considered as major process variables. But the existing scan path generation methods based only on CAD model have not taken them into account, which has resulted in cross-section dimension of low accuracy. Thus, to enhance cross-section dimensional accuracy, the physical resin solidification phenomena should be reflected in laser scan path generation and stage operating code. In this paper, multi-line experiments based on single line solidification model are performed. And the method for improving cross-section dimensional accuracy is presented, which is to apply the database based on experimental results to laser scan path generation.

**Key Words** : Scan Path Generation (주사경로생성), Resin Solidification Phenomenon (수지경화현상), Micro-Stereolithography (마이크로 광 조형기술)

#### 1. 서론

마이크로 광 조형기술은 일본의 K. Ikuta<sup>(1)</sup>에 의해 최초로 제안한 기술로써, 산업분야에서 상용화된 *stereolithography* 기술을 바탕으로 이를 마이크로 구조물 제작에 응용한 기술이다. 수  $\mu\text{m}$  직경의 초점된 레이저 빛을 광 경화성수지표면 위에 주사하여 하나의 단면층을 성형하고 이를 연속적으로 적층 성형함으로써, 최종적으로 3 차원 마이크로 구조물을 만들게 된다. 이러한 마이크로 광 조형기술에서 중요한 공정변수로는 레이저 파워, 주사속도, 광 경화성수지의 팽창 등을 들 수 있다.

마이크로 광 조형기술에 대한 연구에 있어서는 K. Ikuta, A. Bertsch<sup>(2)</sup> 등이 다수의 연구결과를 발표하였다. K. Ikuta 는 Super IH 공정을 제안하여 이를 이용한 3 차원 형태의 마이크로 구조물을 제작하였으며, A. Bertsch 는 액정을 사용한 패턴발생기를 이용하여 제작시간을 단축시키는 방안을 제시하였다. 그러나 마이크로 광 조형기술에서 형상 정밀도 향상을 위한 주사경로 생성이나 단면 슬라이싱에 관

련된 연구내용은 아직 미진한 상태이다. 반면에 일반적인 패속조형기술에 있어서의 형상 정밀도 향상을 위한 연구들은 계속되어 왔다. 이와 관련된 대부분의 연구들은 대상 구조물의 CAD 정보를 기반으로 하는 주사경로 생성에 초점을 맞추고 있다. 매크로 크기의 구조물을 조형하는 패속조형기술에 있어서는 이러한 방식의 주사경로 생성이 형상정밀도를 향상시킬 수 있는 방법이 될 수 있다. 그러나, 마이크로 구조물을 제작하는 마이크로 광 조형기술에 있어서는 CAD 정보 기반의 주사경로 생성만으로는 원하는 형상정밀도를 구현할 수 없다. 마이크로 광 조형시스템에 있어 이것이 가능하기 위해서는 광경화 반응모델이 주사경로 생성시 반영되어야만 한다.

따라서, 본 연구에서는 단일선 주사에 대한 광경화모델을 기반으로, 다중선 주사에 의한 경화실험을 수행함으로써, 다중선 주사 성형시 성형조건이 형상정밀도에 미치는 영향을 실험적으로 파악하였다. 또한 실험 결과를 데이터베이스화하고, 주사경로생성 프로그램에 반영함으로써 단면 헤칭시 마

이크로 구조물의 단면 형상정밀도를 향상시킬 수 있는 방법을 개발하였다.

## 2. 수지경화 모델

### 2.1 단일선 주사 경화모델

마이크로 광 조형기술은 초점된 자외선 빛을 수지표면에 주사하여 단일층을 경화시켜 이를 적층하는 방식으로 구조물을 성형하게 된다. 초점된 레이저 빛이 수지표면에 단일선을 그리면서 광경화성 수지를 경화시켜가는데 이 때 경화현상에 영향을 주는 인자로는 레이저의 파워  $P$  및 파장  $\lambda$ , 빔의 반경  $R$  및 인텐시티  $I_q$ , 렌즈의 초점거리  $f$  가 주요인자이다. 단일선 주사에 대한 경화관계식은 Jacobs<sup>(3)</sup>에 의해 제시되었으며[Fig. 1] 식(1)과 같이 나타난다.

$$I_q(x, y, z) = \frac{2P}{\pi r_o^2} \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{r_o^2}\right] \quad (1)$$

여기서  $r_o$  는 레이저 빔의 가우시안 반경을 나타낸다. 수지의 깊이방향에 따라 빔의 반경이 변화하게 되며, 빔의 초점반경  $r_{o\min}$  및 광경화성 수지의 임계노출  $E_c$  및 투과깊이  $D_p$ , 레이저 주사속도  $v$  를 고려하면 식(2) 와 식(3)이 만들어지게 된다.

$$r_o(z) = r_{o\min} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi r_{o\min}^2}\right)^2} \quad (2)$$

$$y = \frac{r_o}{\sqrt{2}} \sqrt{\log_e\left(\frac{2P}{\pi E_c r_o v}\right) - \frac{z}{D_p}} \quad (3)$$

따라서, 식(2), 식(3)식에 의하여 광경화성 수지 위에 초점된 빔을 단일선으로 주사하였을 경우 수지의 경화폭 및 경화깊이를 계산할 수 있게 된다.

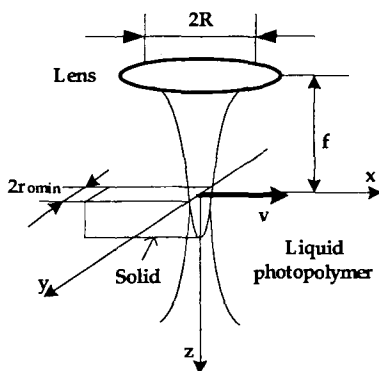


Fig. 1 Single line model

### 2.2 다중선 주사 경화실험

단일선 주사 경화모델을 사용하면 단일선 주사에 대한 수지의 경화폭 및 경화깊이를 계산할 수 있다. 그러나, 실제 마이크로 구조물의 성형시에는 단일층을 성형하기 위해 단일선이 중첩된 형태인 다중선으로 주사가 이루어지게 된다. 이 경우 단일선 경화모델에 의해 계산된 조형물의 치수와 실성형된 조형물의 치수와는 상당한 차이가 발생하게 된다. 이에 영향을 주는 요소로는 단일선들 간의 중첩된 정도와 그 밖의 외적인 성형조건 즉, 레이저 파워 및 주사속도, 주사폭등이 이에 영향을 미친다. 따라서 마이크로 광 조형기술에서의 주사경로생성시 이 같은 현상을 고려하여야 원하는 형상을 갖는 구조물을 조형할 수 있게 된다.

### 2.3 실험 방법 및 성형조건

다중선 주사시 실제 수지가 경화되는 현상을 파악하기 위해 Fig. 2 와 같은 실험을 수행하였다.

#### 2.3.1 실험방법

레이저는 파장 351.1 nm인 CW Ar<sup>+</sup> 레이저를 사용하였으며, 광경화성 수지로는 3D system 사의 SL5410 을 사용하였다. 먼저 단일층을 성형하기 위하여 단일선 경화모델을 통하여 성형조건에 대한 층 두께를 계산한 후 수지표면으로부터 스테이지를 z 축 방향으로 계산된 깊이만큼 내렸다. 고정판은 난반사가 적고, 성형물이 잘 붙어있을 수 있도록 실리콘 웨이퍼를 사용하였다. 다중선 성형시 G-코드에 의한 이상적인 모델과의 성형결과 비교를 용이하기 하기 위해서 시편은 직사각형 형태로 성형하였으며 주사방식은 지그재그 주사방식을 택하였다. 성형 후 메탄올을 사용한 세척 과정을 수행하고 광학현미경을 사용하여 직사각형 모양의 시편의 x 축과 y 축 방향의 길이를 측정하였다.

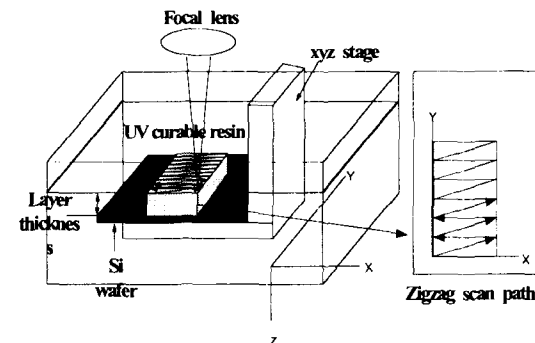


Fig. 2 Experiment setup

### 2.3.2 성형조건

지그재그 주사방식의 특성상 x 축과 y 축에 대한 경화현상이 다르게 나타나게 된다. 여기서는 Fig. 2 에서 보이는 y 축 방향을 세로축 방향으로 정의하였고, x 축 방향을 가로축 방향으로 정의하였다.

세로축 방향의 경화현상을 살펴보기 위해 시편의 가로축 방향의 길이는 400  $\mu\text{m}$ 로 고정시킨 채 Table 1 과 같은 성형조건으로 실험을 수행하였으며, 가로축 방향에 대해서는 세로축 방향의 길이를 400  $\mu\text{m}$ 로 고정시킨 후 Table 2 와 같은 성형조건으로 실험을 수행하였다.

Table 1 longitudinal direction multi-line experiments

Laser Power ( $\mu\text{W}$ )	Scan Speed (mm/min)	Scan Pitch ( $\mu\text{m}$ )	Command ( $\mu\text{m}$ )
2	100	1	100 ~ 500
		2	200~1000
2	120	1	100 ~ 500
		2	200~1000
2	140	1	100 ~ 500
		2	200~1000
2	160	1	100 ~ 500
		2	200~1000
2	180	1	100 ~ 500
		2	200~1000
2	200	1	100 ~ 500
		2	200~1000

Table 2 Transverse direction multi-line experiments

Laser Power ( $\mu\text{W}$ )	Scan Speed (mm/min)	Scan Pitch ( $\mu\text{m}$ )	Command ( $\mu\text{m}$ )
2	100 ~	1	100 ~ 1000
	200	2	200 ~ 1000

### 2.3.3 실험결과

다중선 주사 성형결과 전체적으로 주사속도가 증가함에 따라 세로축 방향과 가로축 방향 모두 이상적으로 성형된 길이가 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 주사속도가 증가함에 따라 노출된 에너지가 작아진 것에 기인한 것이다.

실험에서 보여지듯 동일한 주사 폭을 갖는 코딩이라도 레이저 파워 및 주사속도와 같은 성형조건에 따라 실성형에서는 스테이지 구동 명령과 많은 치수 차이가 생김을 확인할 수 있었다. 따라서 이러한 차이가 실제 주사경로 생성시 형상정밀도를 위해 반드시 고려되어야 함을 알 수 있다. 그래프에서 보여지듯이 다중선 주사 성형 경향에서 이러

한 차이는 성형조건에 따라 또한 방향에 따라 다르게 나타나지만 공통적으로 선형성을 띠고 있음을 확인할 수 있었다.

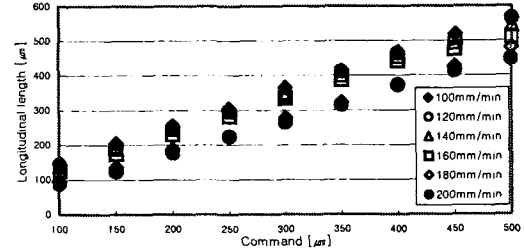


Fig. 3 Longitudinal direction experiments results [ scan pitch: 1  $\mu\text{m}$  ]

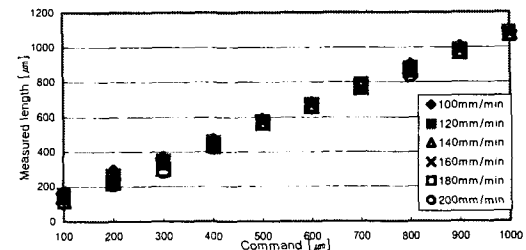


Fig. 4 Transverse direction experiments results [ scan pitch: 1  $\mu\text{m}$  ]

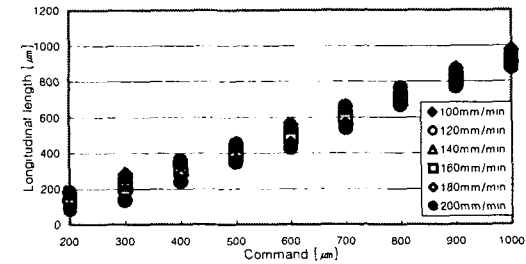


Fig. 5 Longitudinal direction experiments results [ scan pitch: 2  $\mu\text{m}$  ]

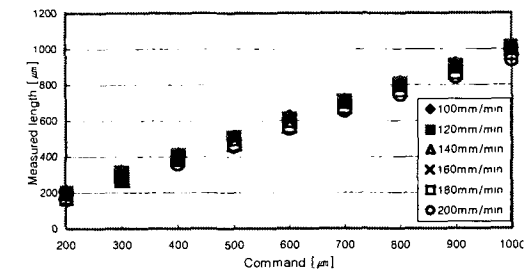


Fig. 6 Transverse direction experiments results [ scan pitch: 2  $\mu\text{m}$  ]

### 3. 다중선 경화현상을 고려한 주사경로생성

#### 3.1 단면 정보 생성 및 해칭 프로그램

지그재그 주사방식의 단면 해칭 프로그램에 대한 기본 흐름도는 Fig 7에 나타내었다. stl 파일의 구조화를 통해 얻어진 단면정보를 바탕으로 z 축 슬라이싱 작업 및 다중 루프 생성 작업을 수행한다. 이를 사용자 정의의 주사간격으로 y 축 단면 슬라이싱을 하여 최종적으로 한 층의 단면을 성형할 수 있는 지그재그 주사경로를 생성하였다.

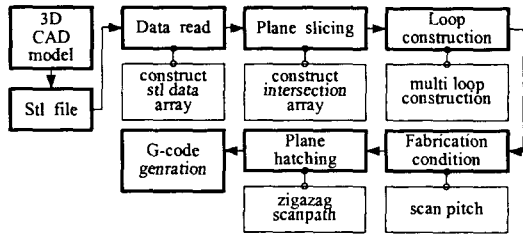


Fig. 7 Flow chart of zigzag hatching program

#### 3.2 다중선 성형 실험결과에의 데이터 베이스화

마이크로 광 조형기술에서 정확한 단면형상을 성형하기 위해서는 앞서 수행한 실험과 같이 성형 조건에 따른 실제 경화현상이 프로그램 내에 반영되어야 한다. 이를 위해서 2.3.2 절에서 보여준 다중선 성형 결과에 대한 데이터 베이스화를 통해 주사경로 생성시 고려할 수 있도록 하였다.

2.3.2 절에서의 실험결과에서 보여지듯 지그재그 주사방식의 다중선 성형에서는 세로축 방향과 가로축 방향 모두 선형성을 보이고 있다. 따라서 단일 성형조건에 대한 실험결과와는 간단한 일차식으로 나타내게 된다.

$$Y_{longi} = \alpha y_{cmd} + \beta \quad (4)$$

$$X_{trans} = \gamma x_{cmd} + \delta \quad (5)$$

여기서,  $x_{cmd}$ ,  $y_{cmd}$  는 G-코드상의 명령값을 의미하며  $X_{trans}$ ,  $Y_{longi}$  는 각각 가로축 방향과 세로축 방향에 대한 실제 성형 길이를 나타낸다.

따라서, 다중선 성형결과로부터 각각의 성형조건에 대한 세로축, 가로축 방향의  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  이 4개의 변수를 데이터베이스화하였다. 이로부터, 성형조건 선택 시 Fig.7 에서 보여진 알고리즘으로 만들어진 G-코드상의  $X$ ,  $Y$  값들을 식(4), (5)의 관계로부터 다시 변환시켜 주는 과정을 수행하게 함으로써, 최종적으로 다중선 경화현상을 고려한 G-코드를 생성하게 하였다.

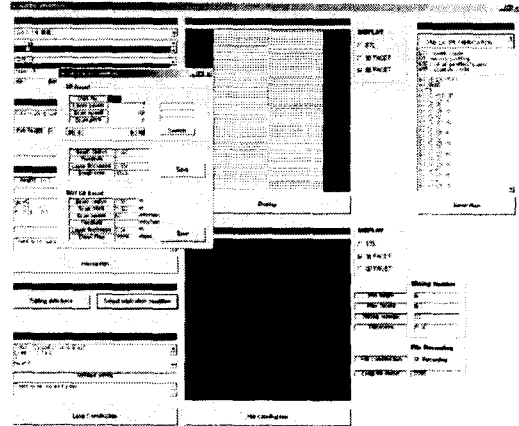


Fig. 8 Program execution result

### 4. 결론

마이크로 광 조형기술에서 레이저 단면 주사경로 생성시 다중선 경화현상을 실험을 통해 데이터 베이스화하고 이를 단면 주사경로 생성에 반영해줌으로써, 새로운 방식의 형상 정밀도 향상을 위한 방법을 제시하였다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부 21 세기 프론티어 연구개발사업인 지능형마이크로 시스템개발사업 (MS-02-321-01)의 연구비 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. K. Ikuta, K. Hirowatari, "Real three dimensional micro fabrication using stereo lithography and metal molding", Proc. of IEEE international Workshop on Micro Electro Mechanical system(MEMS '93), pp. 42-47,1993.
2. A. Bertsch, J. Y. Jezequel and J. C. Andre, "Study of the spatial resolution of a new 3D micro fabrication process : the microstereolithography using a dynamic mask-generator technique", J. of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 107, pp. 275-282, 1997.
3. Paul F. Jacobs, "Rapid Prototyping & Manufacturing : Fundamentals of Stereolithography (Society of Manufacturing engineers in cooperation with the Computer and Automated Systems Association of SME), 1996.