

공리적 설계를 이용한 마이크로 광 조형 장치의 설계

이승재*, 이인환**, 조동우#

Design for Micro-stereolithography using Axiomatic Approach

Seung-Jae Lee*, In Hwan Lee** and Dong-Woo Cho#

ABSTRACT

Micro-stereolithography technology has made it possible to fabricate any form of three-dimensional microstructures. It makes a 3D structure by dividing the shape into many slices of relevant thickness along horizontal surface, hardening each layer of slice with a laser, and stacking them up to a desired shape. Until now, however, the micro-stereolithography device was not designed systematically because the key factors governing the device were not considered. In this paper, we designed micro-stereolithography device using axiomatic approach. This paper contains an overview and an analysis of a new proposed system for development of micro-stereolithography device, and detailed descriptions of the activities in this system. The newly designed system offers reduced machine size by minimizing of optical components and decoupled design matrix.

Key Words : Micro-stereolithography technology (마이크로 광 조형 기술), Axiomatic approach (공리적 접근)

1. 서론

마이크로 광 조형 기술(micro-stereolithography technology)^{1, 2}은 현재 산업 분야에서 널리 쓰이고 있는 광 조형(stereolithography) 기술을 응용하여 마이크로 크기의 제품을 제작하는 기술이다. 즉, Fig. 1 과 같이 수 μm 직경의 초점 된 레이저 빛을 광 경화성 수지 표면 위에 주사하여 단면 형상을 성형하고, 이를 층층이 쌓아 올려 원하는 3 차원 형상을 얻어내는 것이다. 현재까지 마이크로 크기의 형상을 제작하는 기술의 대부분은 반도체 공정을 이용하고 있다.

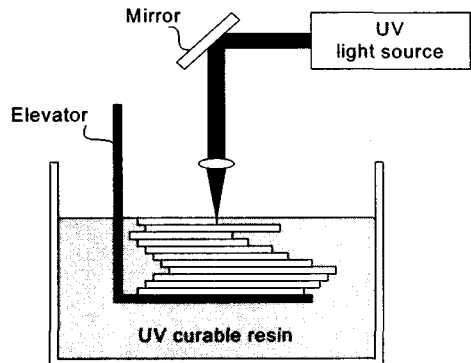


Fig. 1 The principle of micro-stereolithography

... 접수일: 2004 년 3 월 5 일; 게재승인일: 2004 년 5 월 7 일

* 포항공과대학교 기계공학과 대학원

** 영남대학교 기계공학부

교신저자: 포항공과대학교 기계공학과

E-mail: dwcho@postech.ac.kr Tel. (054) 279-2171

이러한 공정은 대량생산에 유리하며 전자 회로를 일체화 할 수 있다는 큰 장점을 가지고 있으나, 3 차원 형상이나 높은 세장비를 가진 제품을 제작하기에는 한계가 있다는 단점을 가지고 있다. 이에 반해 마이크로 광 조형 기술은 마이크로 크기의 3 차원 형상을 용이하게 제작 할 수 있으며, 높은 세장비를 가진 제품을 제작할 수 있다는 점에서 큰 장점을 가지고 있다. 한편 이러한 마이크로 광 조형 기술은 정밀한 제어 시스템과 광학 시스템으로 구성되어 있다. 따라서 보다 정밀하고 미세한 구조물을 제작하기 위해서는 이들 시스템의 구성 및 공정에 영향을 주는 인자를 고려하여 마이크로 광 조형 장치를 설계하여야 한다.

본 연구에서는 마이크로 광 조형 장치를 개발함에 있어 시스템 구성과 미세 구조물 성형에 영향을 주는 주된 인자들간의 관계를 공리적 접근 방법을 통하여 분석하여 기존의 장치를 개선하여 최적화된 마이크로 광 조형 장치를 설계하였다.

2. 마이크로 광 조형 기술

2.1 마이크로 광 조형 장치의 특징

마이크로 광 조형 기술(micro-stereolithography technology)은 기본 원리가 기존의 광 조형 기술과 유사하다. 즉, CAD 로 만들어진 제품의 형상 데이터를 일정한 층 두께를 가진 단면으로 나누고, 레이저 빛의 경로를 제어하여 단면 층들을 성형시킨다. 이를 계속 적층하여 3 차원 형상의 제품을 제작하는 방식이다(Fig. 2).

하지만 마이크로 단위의 제품에는 “scale effect”가 존재하며, 이는 매크로 크기의 제품을 제작하는 기존의 광 조형 기술과 비교하여 수지 점성에 의한 영향이 더욱 중요시되며, x-y-z 스테이지(stage)의 정밀도에 의해서도 영향을 받는다. 따라서 마이크로 광 조형 장치의 설계를 위해서는 자외선 빛에 의한 광 경화성 수지의 반응 현상, 정밀한 x-y-z 스테이지의 제어 그리고 수 μm 의 크기를 갖는 자외선 빛의 초점 제어 등에 대한 연구 및 기술 개발이 필요하다.

2.2 광학 시스템 및 제어 시스템

Fig. 3 은 기존의 마이크로 광 조형 장치의 개략도이다. 광원으로는 CW(continuous wave) Ar ion

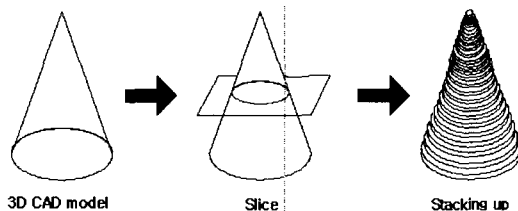


Fig. 2 Fabrication process of stereolithography by stacking up the sliced cross-sections

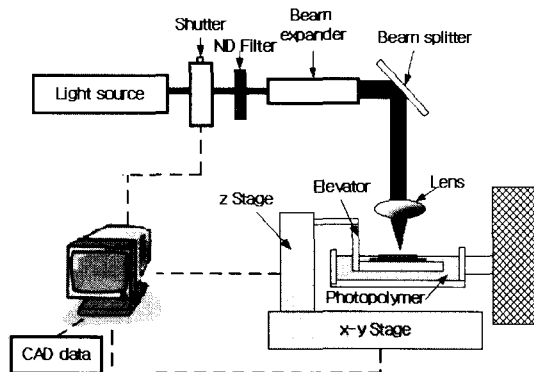


Fig. 3 Schematic drawing of the previous micro-stereolithography apparatus

레이저를 이용하였다. 이 레이저는 파장 351.1 nm 에서 약 460 mW의 최대 출력을 갖는다.

레이저에서 나온 자외선 빛은 렌즈로 입사되어 광 경화성 수지(photopolymer) 위에 초점이 맺히게 된다. 이때 원하는 작은 초점반경을 갖는 동시에 상대적으로 긴 초점거리를 갖는 대물렌즈(objective lens)를 이용하기 위하여 빔 익스펜더(beam expander)를 이용하여 빛의 지름을 확대하였다. 상대적으로 큰 출력인 레이저 파워를 적절히 조절하기 위하여 ND 필터(neutral density)를 사용하였다. 그리고 레이저 빛의 방향을 원하는 방향으로 조정하기 위하여 빔 스피리터(beam splitter)를 이용하였다. 이러한 빔 스피리터 또한 레이저 빛의 에너지를 일정한 비율로 투과/반사 시키기 때문에 레이저 빛의 출력을 줄이는 역할도 하고 있다.

자외선 레이저 빛을 광 경화성 수지에 주사하여 원하는 형상을 성형하기 위해서는 단면 형상의 성형을 위한 x-y-z 스테이지와 엘리베이터(elevator)가 필요하다. 한 층의 성형은 x-y 스테이지의 구동으로 이루어지며 다음 층의 성형을 위해서 z 축 스테이지를 구동하여 일정한 층 두께를 가진 폴리머

층을 만들어주게 된다. 이때 서터의 ON/OFF 제어를 통하여 레이저 빔을 차단시킨다. 이는 한 층 성형 후 다른 층으로 이동할 경우와 성형을 하지 않고 경로를 변경할 경우에 사용된다.

3. 공리적 설계의 적용

3.1 공리적 설계

마이크로 광 조형 장치의 최적화된 설계를 위하여 공리적 접근 방법³을 이용하였다. 기능적 요구(functional requirement) 사항은 아래와 같다.

FR₁: 레이저 빔 경로(beam path)가 제어되어야 한다.

FR₂: 광 경화성 수지 층이 적층되어야 한다.

FR₁은 마이크로 크기의 구조물을 제작할 때 레이저 빔이 조사되는 경로에 따라 광 경화성 수지가 경화되기 때문에 선정되었다. FR₂는 3차원 형상의 마이크로 구조물을 성형하기 위해서는 레이저에 의해 경화되는 광 경화성 수지의 층들이 여러 층으로 적층되어야 하기 때문에 선정되었다.

이러한 기능적 요구를 만족하는 설계 요소(design parameter)는 다음과 같다.

DP₁: 광학 시스템을 사용한다.

DP₂: 스테이지 시스템을 사용한다.

위의 기능적 요구 사항들과 설계 요소들 간의 관계를 설계 행렬(design matrix)을 이용하여 나타낼 수 있다. 이러한 설계 행렬을 이용하게 되면 각 단계들 간의 관계를 정량적으로 나타낼 수 있기 때문에 최적의 설계를 쉽게 도출해 낼 수 있게 된다. 다음은 FR's 와 DP's 간의 설계 행렬이다.

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 \\ 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \end{Bmatrix}$$

첫 번째 단계에서의 설계 행렬은 uncoupled design 임을 나타낸다. 즉, 공리 1인 독립의 공리를 만족하기 때문에 최적의 설계를 얻을 수 있는 것을 나타낸다.

앞서 언급한 기능적 요구를 세분화하여 하위 개념으로 계층 구조를 나눌 수 있다. 이러한 계층 구조는 설계를 좀 더 용이하게 하고 최적의 설계를 도출하게 하는 공리적 접근 방법의 특징이다. 다음은 위의 기능적 요구에 대한 하위개념의 기능적

요구 사항이다.

FR₁₁: 레이저 주사 경로(scan path)를 제어해야 한다.

FR₁₂: 레이저 빔을 반사시켜야 한다.

FR₁₃: 레이저 빔을 초점 시켜야 한다.

FR₁₁은 레이저 빔의 경로를 제어하게 될 때 하나의 단면 층 성형을 위한 주사 경로의 제어가 필요하기 때문에 선정되었고, FR₁₂는 엘리베이터 위해서 성형이 되기 위해서는 레이저 빔을 반사시켜 원하는 지점으로 빔 경로를 위치시켜야 하기 때문에 선정되었다. 마지막으로 FR₁₃은 경화되는 수지의 면적이 작을수록 미세한 구조물을 제작할 수 있으므로 레이저 빔의 작은 초점 반경이 요구되므로 선정되었다.

위의 기능적 요구 사항을 만족하는 설계 요소는 다음과 같다.

DP₁₁: x-y 스테이지를 사용한다.

DP₁₂: 광학 미러(mirror)를 사용한다.

DP₁₃: 광학 렌즈를 사용한다.

레이저 빔 경로 제어라는 기능적 요구 사항의 하위 개념들과 가장 관계가 깊은 DP₁₁은 사용자가 원하는 경로로 레이저 빔을 이동시키기 위해서는 광학 부품들이 부착된 x-y 스테이지가 필요하기 때문에 설계 요소로 선택하였다. DP₁₂는 레이저에서 나온 빛이 x-y 스테이지 위에 부착되어 있는 광학 부품에 도달해야 하므로 선정되었으며, DP₁₃은 엘리베이터 위에 성형하고자 하는 위치에 레이저 빔이 초점되도록 하기 위해 선정되었다. 두 번째 단계에서의 설계 행렬은 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} FR_{11} \\ FR_{12} \\ FR_{13} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{11} \\ DP_{12} \\ DP_{13} \end{Bmatrix}$$

FR₂에 대한 하위의 기능적 요구는 다음과 같다.

FR₂₁: 광 경화성 수지의 표면이 평탄하여야 한다.

FR₂₂: 한 층의 층 두께를 조절해야 한다.

광 경화성 수지 층이 적층되어야 한다는 기능적 요구를 만족시키기 위하여 각 층의 수지 표면은 평탄화가 이루어진 후에 적층이 되어야 하며, 또한 적층하고자 할 때의 층 두께가 조절될 수 있

어야 한다.

이러한 광 경화성 수지의 적층에 대한 설계 요소는 다음과 같다.

DP₂₁: 광 경화성 수지의 점성이 낮아야 한다.

DP₂₂: z 축 스테이지를 사용하여 엘리베이터의 높이를 조절하여야 한다.

DP₂₁ 은 한 층을 성형하고 다음 층을 성형할 때 수지의 표면이 평탄하여야 적층하였을 때 오차를 줄일 수 있다는 것이고, DP₂₂ 는 이러한 각각의 층들이 사용자가 원하는 값으로 일정한 층 두께를 갖도록 한다는 것이다. 그러나 DP₂₁ 의 수지 점성은 층 두께를 만드는데 영향을 준다. 즉, 점성이 높을수록 얇은 층을 만들기 어렵기 때문이다. 따라서 FR₂ 와 DP₂ 의 관계를 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} FR_{21} \\ FR_{22} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 \\ x & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{21} \\ DP_{22} \end{Bmatrix}$$

위의 관계에 의하면 FR₂ 와 DP₂ 의 설계 행렬은 decoupled design 이다. 이것은 uncoupled design 처럼 가장 이상적인 경우는 아니지만 독립의 공리를 만족하기 때문에 최적의 설계를 얻을 수 있게 되는 관계이다.

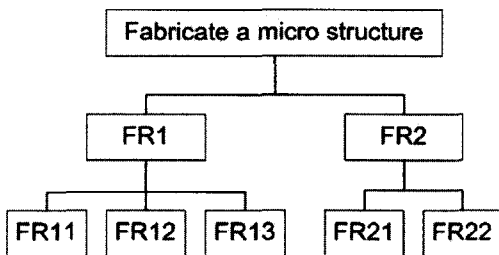


Fig. 4 Tree diagram representing the functional requirements (FRs)

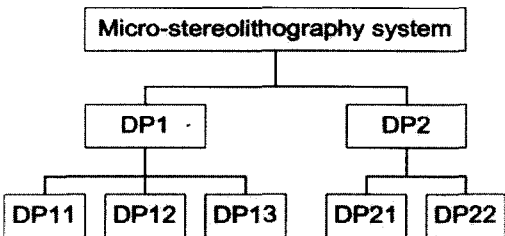


Fig. 5 Tree diagram representing the design parameters (DPs)

Fig.4 와 Fig. 5 는 위에서 언급한 기능적 요구와 설계 요소를 단계적으로 분해한 계층도를 나타낸다. 또한 공리적 설계 기법을 적용하여 단계별 기능적 요구와 설계 요소간의 관계를 나타낸 시스템의 전체 설계 행렬은 Table 1 과 같다.

Table 1 The design matrix for newly designed system

		DP ₁			DP ₂	
		DP ₁₁	DP ₁₂	DP ₁₃	DP ₂₁	DP ₂₂
FR ₁	FR ₁₁	X	0	0	0	0
	FR ₁₂	0	X	0	0	0
	FR ₁₃	0	0	X	0	0
FR ₂	FR ₂₁	0	0	0	X	0
	FR ₂₂	0	0	0	x	X

3.2 공리적 설계를 적용한 시스템의 구성

공리적 설계 기법을 적용하여 실제로 시스템을 구성하여 보았다. Fig. 6 은 공리적 설계 기법을 적용하여 새롭게 설계된 마이크로 광 조형 장치의 개략도이다. Fig. 7 은 실제 제작된 마이크로 광 조형 장치의 사진이다.

본 연구팀에서 제작한 이전의 마이크로 광 조형 장치와의 가장 큰 차이점은 x-y-z 스테이지를 x-y 스테이지와 z 스테이지로 각각 분리하여 시스템의 설계 행렬을 coupled design 에서 decoupled design 으로 변화시켰다는 것이다. 즉, 이전의 시스템에서는 일체화된 x-y-z 스테이지에 부착된 엘리베이터를 수지 안에서 구동하여 성형을 하는 방식이었다.

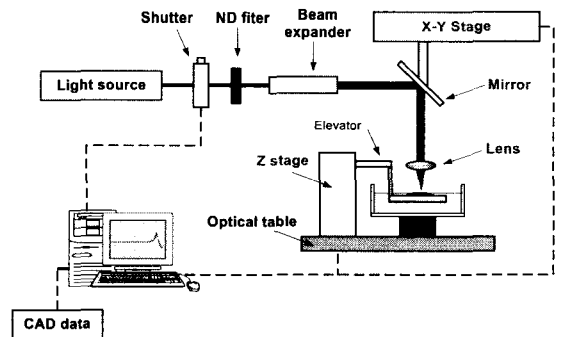


Fig. 6 Schematic diagram of the designed micro-stereolithography apparatus

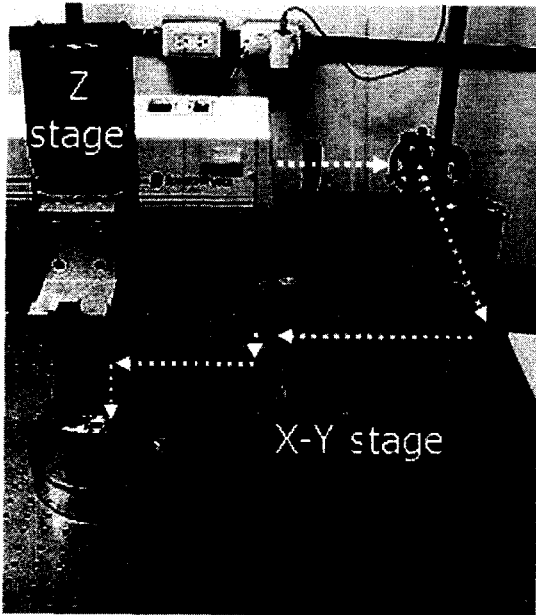


Fig. 7 Photograph of newly developed micro-stereolithography using axiomatic approach

이러한 방식에서는 수지 내부에 위치한 엘리베이터의 이동 속도에 의하여 수지의 층 두께가 변하게 되는 단점이 있다. 하지만 공리적 설계 기법을 적용한 새로운 시스템에서는 광학 부품들이 부착된 x-y 스테이지를 독립적으로 구동시켜 레이저 빛의 경로가 수지 밖에서 제어되도록 하였다. 또한 경화되는 각각의 층 두께는 별도로 분리된 z 스테이지에 의하여 제어된다. 따라서 이전 시스템에서 발생한 스테이지 구동에 따른 수지 점성에 대한 영향을 제거시켰다. Fig. 8 은 이전에 개발된 마이크로 광 조형 장치의 사진이며, 이를 공리적 설계 기법으로 분석한 설계 행렬은 Table 2 에 나타나 있다. 즉, 이전의 시스템은 coupled design 임을 알 수 있었다.

한편 새로운 시스템에서는 x-y 스테이지 위에 광학 미러 대신 2 개의 직각 프리즘을 사용하였고 렌즈와 프리즘을 하나의 단일 부품으로 집적화하였다. 이는 설치되는 광학 부품들의 부피 및 무게를 감소시키므로 x-y 스테이지가 구동될 때 진동에 의하여 발생하는 오차 및 관성력을 줄일 수 있다. 또한 정밀 가공한 부품으로 렌즈 및 프리즘을 고정시키므로 레이저 빛을 정확히 직각으로 반사시킬 수 있으며, 이는 광축 정렬을 보다 쉽고 정확하게 할 수 있도록 하여 광학 오차를 줄일 수 있다.

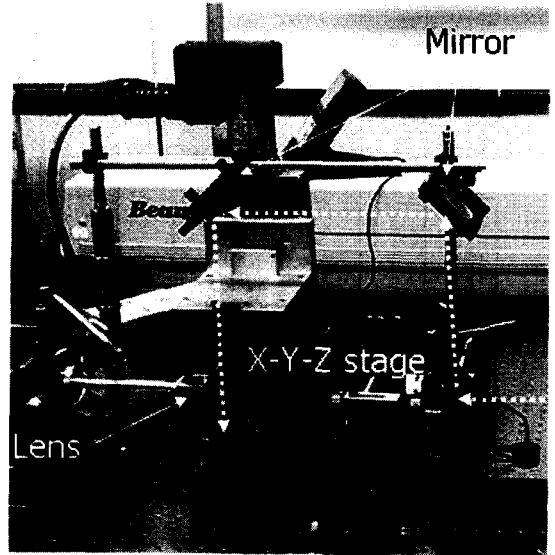


Fig. 8 Photograph of previous micro-stereolithography

Table 2 The design matrix for previous system

		DP ₁			DP ₂	
		DP ₁₁	DP ₁₂	DP ₁₃	DP ₂₁	DP ₂₂
FR ₁	FR ₁₁	X	0	0	X	0
	FR ₁₂	0	X	0	0	0
	FR ₁₃	0	0	X	0	0
FR ₂	FR ₂₁	x	0	0	X	0
	FR ₂₂	0	0	0	x	X

4. 결론

본 논문에서는 공리적 설계 기법을 적용하여 기존의 마이크로 광 조형 장치를 분석하고 재설계하였다. 공리적 접근을 사용하여 기존의 시스템을 분석한 결과 coupled design 임을 설계 행렬을 통해 알 수 있었고 새롭게 재설계된 시스템의 설계 행렬은 decoupled design 임을 알 수 있었다.

또한 마이크로 광 조형 장치의 중요 인자들을 고려하여 설계함으로써 기존의 시스템에서 발생하였던 수지 점성에 의한 영향을 제거하였다. 마지막으로 광학 부품들의 소형화 및 집적화를 통하여 시스템의 정밀도 향상 및 성형성 개선 방안을 제시할 수 있게 되었다.

후 기

본 연구는 나노 핵심 기반기술 개발 사업의 일환인 나노 생체물질의 초미세력 감지 기술 개발 과제(M1-0214-00-0116)의 연구비 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Lee, In Hwan, Cho, Dong-Woo, "Fabrication of 3D structures using micro-stereolithography technology," Proceeding of the KSPE Autumn Annual Meeting, pp. 1080-1083, 2001.
2. Kang, Hyun-Wook, Lee, In Hwan, Cho, Dong-Woo, "Development of Virtual Assembly Process for the Fabrication of Micro-fluidic System Using Micro-stereolithography Technology," Proceeding of the KSPE Autumn Annual Meeting, pp. 23-26, 2003.
3. Suh, N. P., "Axiomatic Design: Advances and Applications," Oxford University Press, pp.10-31, 109 - 117, 2001.