

전사방식 마이크로광조형의 경화 단면형상 예측

Prediction of Cured Cross-sectional Image in Projection Microstereolithography

김성현¹, 박인백¹, 하영명¹, 이석희^{2,✉}
Sung Hyun Kim¹, In Baek Park¹, Young Myoung Ha¹ and Seok Hee Lee^{2,✉}

1 부산대학교 기계공학부 제어자동화시스템 전공 (Intelligent Control and Automation Division, Pusan National Univ.)

2 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.)

✉ Corresponding author: sehlee@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-2327

Manuscript received: 2009.10.13 / Accepted: 2010.1.30

Projection microstereolithography is a process of fabricating a micro-structure by using dynamic mask such as digital micromirror device(DMD). DMD shapes the beam into cross-sectional image of structure. Photocurable resin is cured by the beam and stacked layer on top of layer. It is difficult to deliver the beam from the DMD to the photocurable resin without any distortions. We assume that the beam exposed to the resin by 1 pixel of DMD has Gaussian distribution, so the shaped beam reflected by the DMD affects its neighboring area. Curing pattern corresponding to a cross-sectional images is predicted by superposition of pixels of Gaussian distribution and it is similar to cured shape.

Key Words: Projection Microstereolithography (전사방식 마이크로광조형), Gaussian Distribution (가우스 분포), Digital Micromirror Device (디지털 미세거울 장치)

1. 서론

얇은 단면을 적층하여 구조물을 만드는 마이크로광조형 기술은 크게 주사방식과 전사방식으로 나눌 수 있다. 주사방식은 레이저처럼 빔의 크기가 일정한 광원을 이용하여 가공물이 만들어져야 할 경로를 생성하여 그 경로를 따라 경화시켜 적층하는 방식이고, 전사방식은 Digital Micromirror Device(DMD)나 Liquid Crystal Display(LCD)와 같은 동적 마스크에 빔을 반사 또는 투영시켜 가공물의 단면 이미지로 패터닝하고 광경화성 수지에 조사하여 한 층을 한 번에 경화하여 적층하는 방식이다.¹ 마이크로광조형은 얇은 단면을 적층하여 구조물을 만들기 때문에 각각의 단면형상이 정확히 만들어져야 온전한 3D 구조물을 제작할 수 있다. 지금까지는 DMD 에 입력된 모델링 단면 이미지에

대한 경화형상단면을 알기 위해 직접 경화 실험을 하거나 실험자의 직감에 의존하였다.

빛의 회절 때문에 수지에 조사되는 패터닝된 빔 이미지는 흐트러짐이 발생한다. 이러한 빛의 복사선속(Radiation flux)의 퍼짐은 Point-Spread Function(PSF)² 로 나타내어진다. 본 논문에서 DMD 에 의해 반사되어 패터닝 된 빔은 여러 광학 기구들을 거쳐 수지 표면에 조사되는 동안 흩어지게 된다. 선속밀도분포(Flux density distribution)은 DMD 를 구성하는 각 미세거울에 의해 반사되어 흩어진 Beam Flux 의 선형 중첩으로 형성된다. 이와 관련하여 Sun, C. 등은 PSF 를 가우스 분포로 근사하여 전사방식 마이크로광조형을 연구하였다.³

본 논문에서는 DMD 의 1 pixel(1 개의 미세거울)에 의해 광경화성 수지 표면에 조사되는 PSF 를 가우스 분포로 가정하고 DMD 각각의 pixel 에

의한 가우스 분포를 선형 중첩하여 얻은 광선속밀도분포와 실제 경화단면의 비교를 통해 DMD 1 pixel PSF 의 가우스 분포를 구한다. 구해진 DMD 1 pixel PSF 의 가우스 분포를 이용하여 DMD 에 입력되는 다양한 단면 이미지에 대해 수치적으로 구현한 광선속밀도분포로 경화단면을 가시화 하여 경화단면을 예측해 본다.

2. 전사방식 마이크로광조형 시스템

2.1 장치 구성

Fig. 1 은 본 논문에서 사용된 전사방식 마이크로광조형 장치⁴ 로써 크게 구동부와 광학부로 나눌 수 있다. 구동부는 X, Y, Z 의 3 축으로 나뉜다. X, Y 축은 100nm 의 분해능을 가지며 150mm 의 이동범위를 갖는다. Z 축은 분해능이 100nm 이고 이동범위는 50mm 이다.

광학부는 UV 램프, DMD, 광케이블, 집속렌즈, 프리즘, 튜브렌즈, 반사경, 대물렌즈로 구성되어 있다. 램프에서 발생된 빛은 내장된 필터를 거쳐 360nm 의 파장만이 선택적으로 사용된다. 집속렌즈(Collimating lens)는 램프에서 나온 빛의 진행방향을 주광선(Principal ray)과 평행하게 해준다. DMD 는 이미지 하나하나의 pixel 에 해당하는 미세거울을 움직여 빛이 원하는 형상단면을 띠도록 반사시킨다. 이 외의 광학장치들은 DMD 에서 나온 빛을 모아 주거나 빔의 경로를 바꾸어주는 등의 역할을 한다.

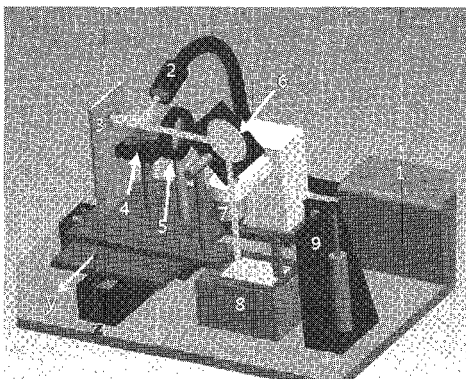


Fig. 1 Projection microstereolithography system used in the research (1. Lamp, 2. Light fiber and Collimating lens, 3. Digital Micromirror Device, 4. Total Internal Reflection prism, 5. Tube lens, 6. UV mirror, 7. Projection lens, 8. Resin vat, 9. Z-stage, light path)

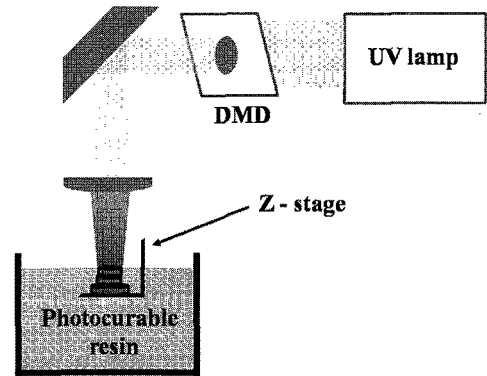


Fig. 2 Principle of projection microstereolithography

2.2 구조물 제작 원리

램프에서 발생된 빛은 광섬유와 집속렌즈를 통과한 다음 DMD 에 이르게 된다. DMD 는 1024*768 개의 미세거울로 이루어져 있다. 하나의 미세거울의 크기는 13.68 μm * 13.68 μm 이다. 컨트롤러에 의해 전해진 구조물의 단면 이미지가 DMD 에 입력되면 그에 해당되는 빛만이 반사된다. DMD 에 의해 반사된 빛은 반사거울을 통해 경로가 바뀌고 대물렌즈를 통해 그 단면적이 더 축소되어 수지에 조사된다. Fig. 2 와 같이 광경화성 수지에 빛이 조사되면 해당 부분은 광경화 반응을 거쳐 고화된 하나의 단층을 만들게 된다. 이후 Z-stage 가 하강하여 수지 표면과 한 층의 두께만큼의 거리를 두게 되면 만들어진 단층 위로 또 다시 동일한 방식으로 하나의 층을 더 쌓는다. 이렇게 층층이 쌓아 올리면 하나의 3D 구조물이 완성된다.

3. 경화실험

경화실험을 통해 pixel 가우스 분포 중첩 이미지의 경계조건이 될 수 있는 임계 경화에너지 그리고 모델링 단면 이미지의 pixel 수와 실제 경화단면의 길이 사이의 비율을 알아낸다.

3.1 가우스 분포

최종적으로 광경화성 수지에 조사되는 광분포는 DMD 에 의해 반사된 빛 다발들의 선형 중첩으로 형성된다.³ xz 평면에 대해 1 pixel 에 의한 빛의 가우스 분포와 각 pixel 의 빔이 중첩된 모습이 Fig. 3 에 나타나 있다.

Fig. 3 에서와 같이 DMD 1 pixel 에 의한 빔의 가우스 분포는 임계 경화에너지 E_c 값을 넘어서지

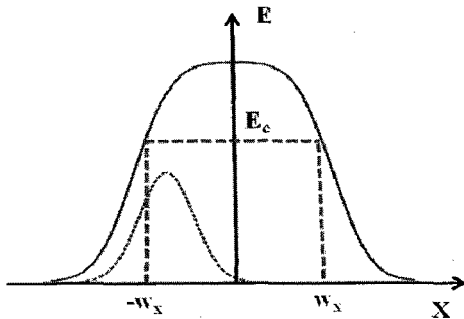


Fig. 3 Schematic of the light distribution at the xz plane (dash line: Gaussian distribution, solid line: Superposition of the Gaussian distribution)³

못하므로 광경화성 수지의 경화가 일어나지 않는다. 이웃한 다수의 pixel 들에 의해 가우스 분포가 중첩되어 임계 경화에너지 값을 넘어서야 그에 따라 광경화성 수지의 경화가 일어나게 된다. 즉 Fig. 3 에서 빛이 중첩된 부분 중 E_c 값을 넘어서는 부분은 -w_x 에서 w_x 에 해당하는 영역이고 이 영역에서만 경화가 일어나게 된다. 수지 표면에 조사되는 광선속밀도분포는 DMD 다수 pixel 들의 가우스 분포의 중첩으로 가정하며 평면 2 차원 가우스 분포를 식으로 나타내면 다음과 같다.⁵

$$G(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{2\sigma^2}\right] \quad (1)$$

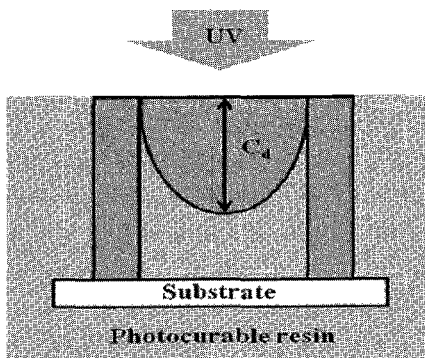


Fig. 4 Schematic of curing depth experiment

3.2 경화깊이 실험

경화두께와 경화폭은 수지를 이루는 모노머 (monomer), 광 개시제(Photoinitiator)의 농도, 광 안

정제의 첨가농도, 빛의 조사시간과 세기 등에 따라 달라진다.⁶ 본 논문에 사용된 광경화성 수지는 1,6 Hexanediol diacrylate(HDDA)에 광 개시제인 2,2-Dimethoxy-2-phenylacetophenone(DMPA)를 2wt%넣고 2 시간 가량 교반기로 저어서 만들었다.

경화실험은 Fig. 4 와 같이 좌우 양 끝에 두 개의 기둥 구조물을 30 μm 적층깊이로 충분한 높이 (약 1 mm)까지 만든 다음 마지막으로 기둥 간격의 폭으로 UV 를 조사하여 경화된 수지의 깊이를 측정한다. 각 조사 에너지당 2 회씩 측정한 UV 조사 에너지에 따른 경화깊이가 Fig. 5 에 나타나 있다.

경화깊이는 식 (2)의 Beer-Lambert 법칙으로 구할 수 있다.¹ 식 (2)에서 C_d는 경화깊이, D_p는 빔의 투과깊이, E_c는 임계 경화에너지, E_{max}는 실제 최대 조사에너지를 나타낸다. 여기서 D_p 와 E_c는 광경화성 수지의 고유 물성이다.

$$C_d = D_p \cdot \ln\left(\frac{E_{max}}{E_c}\right) \quad (2)$$

Fig. 5 와 같이 측정된 값들을 식 (2)에 따라 피팅한 결과, 임계 경화에너지 E_c가 6.5mJ/cm² 이고, 투과깊이 D_p가 712μm 인 것으로 나타났다.

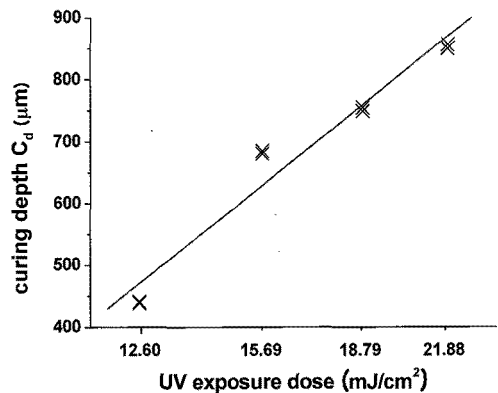


Fig. 5 Curing depth according to UV exposure dose

DMD 의 pixel 거리와 실제 경화물의 거리 사이의 상관관계를 알아내기 위해 Fig. 6 의 (a)와 같은 이미지를 DMD 에 입력한다. 이 이미지는 한 번이 50 pixel 인 크기가 같은 두 개의 정사각형으로 이루어져 있다. 두 정사각형 사이의 거리를 달리 하

였을 때 실제 경화물 사이의 거리를 측정하여 DMD pixel 수와 경화물의 실제 거리 배율을 알 수 있다. 즉 Fig. 6 에서 (a)의 두 정사각형 중심 사이의 거리 L_{DMD} 와 (b)의 DMD의 정사각형 이미지에 의해 경화된 두 원의 중심 사이의 거리 L_{cure} 의 비율을 비교한다.

$$E(x,y) = \sum_{i=-n}^n \sum_{j=-n}^n \left[\frac{E_{DMD}(x+i,y+j)}{2\pi\sigma^2} \cdot \exp\left[\frac{-(i^2+j^2)}{2\sigma^2} \right] \right] \quad (3)$$

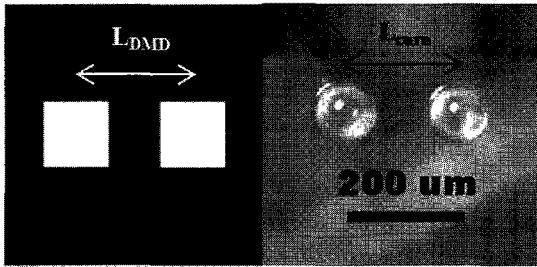


Fig. 6 Bitmap image and cured pattern

Table 1 에서와 같이 실제 경화물의 길이는 DMD 상의 길이의 약 2.18 ($\mu\text{m}/\text{pixel}$)배로 대응됨을 알 수 있다. 다시말해 DMD의 1 pixel에 해당하는 실제 경화물의 길이는 $2.18\mu\text{m}$ 로 근사할 수 있다.

Table 1 Proportion of L_{cure} to L_{DMD}

L_{DMD} (pixel)	L_{cure} (μm)	L_{cure}/L_{DMD} ($\mu\text{m} / \text{pixel}$)
250	553	2.212
190	419	2.205
170	375	2.206
130	285	2.192
110	237	2.155
100	218	2.130

4. 경화단면 형상 예측

4.1 가우스 분포 마스크 생성

DMD의 임의의 한 pixel에 해당하는 부분의 수지 표면의 조사 에너지는 이웃한 pixel들에 의해 중첩되고 그 에너지는 식 (1)을 유도하여 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. E_{DMD} 는 특정 pixel의 좌표 (x, y) 에 대해 i, j 만큼 떨어진 pixel의 미세거울이 on 상태이면 어떤 값을 가지며 off 상태이면 0으로 값을 가지지 않는다.

Fig. 7은 마스크 중앙의 최대값을 1로 고정시

키고 식 (1)의 표준편차 σ 값을 달리했을 때의 마스크 크기를 나타낸다. σ 값이 커질수록 마스크의 크기가 커진다.⁵ 중앙의 마스크 최대값을 1로 고정시킨 이유는 이후 마스크의 중첩시에 σ 에 따른 각 pixel의 변화 추이를 쉽게 살펴보기 위함이다. Fig. 7에서 예로 든 마스크의 크기는 각각 (a)가 19×19 pixel, (b)가 47×47 pixel이다. 식 (3)에서 n 은 특정 pixel에서 이웃한 몇 번째 pixel까지 영향을 주는지를 나타내므로 (a)와 (b) 각각의 n 값은 9와 23이 된다.

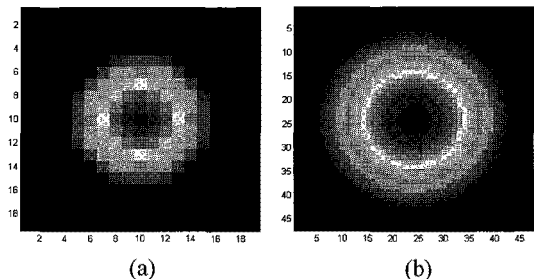


Fig. 7 The same max value 1 at each center (a) $\sigma=3$, mask size= 19×19 pixel (b) $\sigma=10$, mask size= 47×47 pixel

4.2 경화단면 형상 예측

하나의 pixel에 대해 마스크를 통과한 대략적인 가우스 분포가 만들어졌기 때문에 이러한 분포를 이웃한 여러 pixel들에 대해 중첩시켜 얻은 이미지를 실제 경화단면과 비교하여 E_{DMD} 와 σ 의 값을 근사할 수 있다.

크기가 작은 비트맵(bitmap) 이미지가 DMD에 입력될 경우 빔 프로파일러(Profiler)로 직접 에너지 측정이 불가능하기 때문에 Fig. 8과 같이 큰 이미지에 대해 최대 피크 에너지를 조사하였다. 그 값은 $15.7 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 로 나타났으며 한 변이 200 pixel 이상인 정사각형 이미지에 대해서는 거의 동일한 값을 보였다. 최대 피크 에너지와 앞서 구한 임계 경화에너지는 E_{DMD} 와 σ 값이 제대로 근사되었는가에 대한 중요한 근거와 경계조건이 된다.

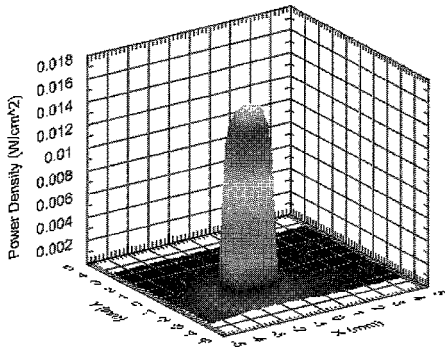


Fig. 8 Beam intensity profile of rectangle bitmap image (800*600 pixel)

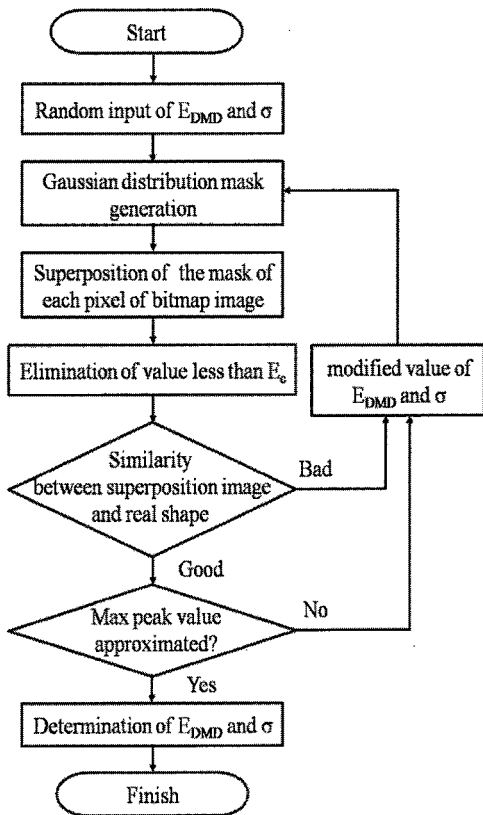


Fig. 9 Approximation process diagram of EDMD and σ

E_{DMD} 와 σ 를 구하는 과정은 Fig. 9 와 같다. 우선 임의의 E_{DMD} 와 σ 값을 주어 2 차원 가우스 분포 마스크를 만든다. 앞서 언급했듯이 마스크의 중첩 추이를 쉽게 가늠하기 위해 마스크의 최대값인 중앙 pixel 값을 1 로 고정하여 σ 를 변화시키며 중첩되어 만들어진 예측 이미지를 실제 경화단면

과 비교한다. 이후 E_{DMD} 값을 보정하여 실제 경화 단면과 비트맵 이미지에 의해 중첩된 마스크의 예측 이미지를 비교한다. 이 단계에서는 주로 L_{DMD} 가 70 pixel 인 Fig. 6 (a)의 비트맵 이미지가 사용되었다. 그 이유는 Fig. 10 의 (a)와 같이 중첩된 영역의 확인이 쉽기 때문이다. 여기서 만들어진 예측 이미지에서 임계 경화에너지 이하의 값을 가지는 영역은 경화가 일어나지 않으므로 모두 0 으로 간주한다. E_{DMD} 와 σ 값의 보정을 반복하여 실제 경화 단면과 유사한 예측 이미지를 획득하고 나서 한번이 200 pixel 인 정사각형 비트맵 이미지를 이용하여 최대 피크 에너지를 비교한다. 실제 경화 단면과 예측 이미지가 유사하지 않거나 최대 피크 에너지가 근사하지 않을 경우 또 다시 E_{DMD} 와 σ 값을 반복 수정하여 근사값을 찾는다.

이렇게 해서 알아낸 근사값은 E_{DMD} 가 약 16, σ 가 약 17 이다. Fig. 10 에 L_{DMD} 가 70 인 비트맵 이미지로 만든 실제 경화단면과 그것을 예측하여 얻은 이미지가 나타나 있다. 마스크의 구성 및 중첩 계산 등의 모든 과정에 MATLAB 이 사용되었다.

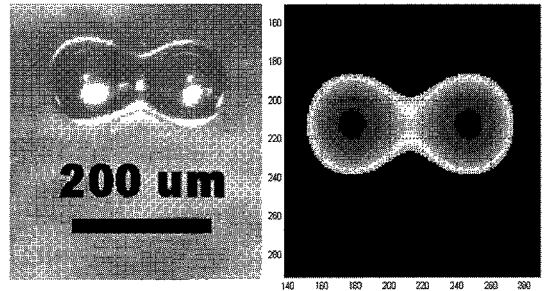


Fig. 10 Pattern cured by bitmap image of Fig. 6 at $L_{DMD}=70$ pixel and prediction image

구해진 E_{DMD} 와 σ 값으로 그려진 가우스 분포 마스크가 Fig. 11 에 나타나 있다. 마스크의 최대값을 1 로 만든 후에 10^{-5} 이하의 값을 가지는 마스크 영역은 모두 제거하였다. 실험에 사용된 마이크로광조형 장치에서 광이 안정적으로 전달되는 DMD 중심부의 800*600 pixel 영역만을 주로 사용한다. 이점을 고려하여 10^{-5} 을 경계 값으로 하여 그 이하의 영역은 제거하였다. 이렇게 획득된 마스크의 크기는 125*125 pixel 이다.

Fig. 12 는 예측된 이미지의 최대 피크 에너지를 보여준다. 실제 최대 피크 에너지인 15.7 mW/cm² 에 근사한 15.96 이라는 값을 나타내고 있다.

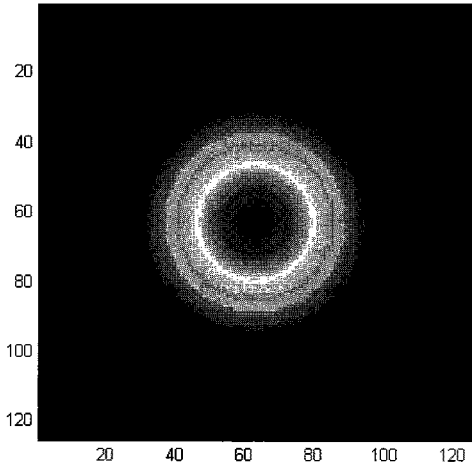


Fig. 11 Approximate Gaussian distribution mask

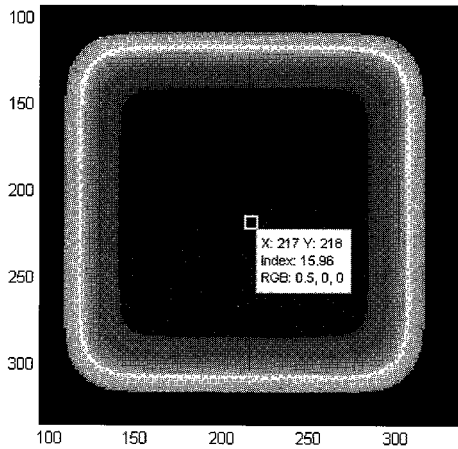
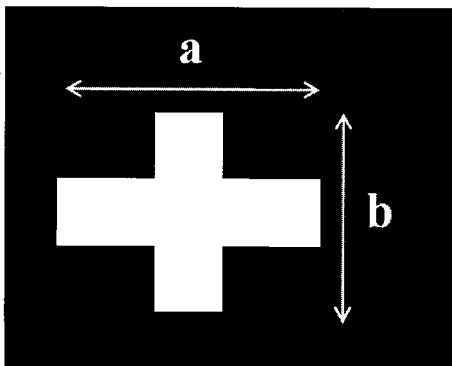
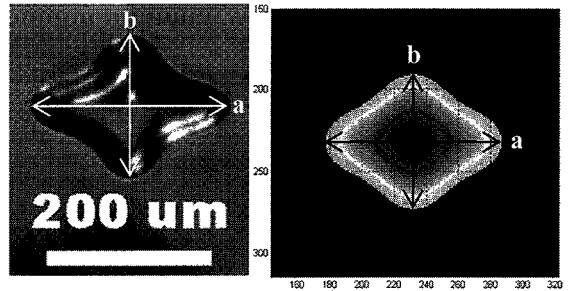


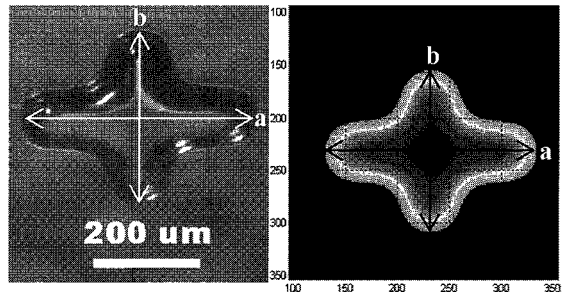
Fig. 12 Peak energy of prediction image generated by square bitmap image (200*200 pixel)



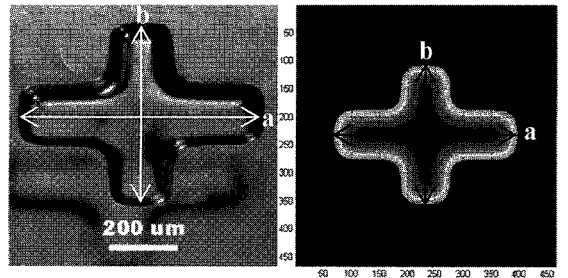
(a) DMD image



(b) CASE I : cured by DMD image at a=120 pixel, b=90 pixel



(c) CASE II : cured by DMD image at a=200 pixel, b=150 pixel



(d) CASE III : cured by DMD image at a=320 pixel, b=240 pixel

Fig. 13 Cross-sectional bitmap image: (a), cured pattern and prediction images: (b), (c), (d)

Fig. 13 은 DMD 에 입력된 십자가 모양의 크기에 따른 경화단면 형상과 그 예측 형상을 보여주고 있다. Fig. 13 (a)의 a, b 에 해당하는 경화단면 형상의 치수와 예측된 이미지의 치수가 Table 2 에 나타나 있다.

Table 2 에서 DMD 이미지에 경화배율만을 고려하여 예측한 값은 실제 경화된 형상에 대해 평균 4.8%의 오차를 보였다. 이에 비해 중첩을 통해 예측한 값은 실제 경화 형상에 대해 평균 1.6%의 오차를 보였다. 특히 제작물의 크기가 비교적 작은

Table 2 Measurement of image of Fig. 13

		DMD image (pixel)	Prediction value by curing magnification (μm)	Cured cross-sectional image (μm)	Prediction image by superposition (μm)
CASE I	a	120	262	241 ± 2	238
	b	90	196	172 ± 6	179
CASE II	a	200	436	443 ± 4	443
	b	150	327	327 ± 7	334
CASE III	a	320	698	719 ± 5	717
	b	240	523	533 ± 9	543

CASE I 에서 경화배율만을 고려하여 예측한 경우 최대 약 14%의 큰 오차를 보이고 있는 반면 중첩하여 예측한 경우 최대 약 4%의 오차를 보여준다. 중첩을 통한 예측 형상 수치 중 a 보다 b 에서의 오차가 더 큰 것은 여러 가지 광학장치들이 이상적인 위치에서 조금 틀어져 있기 때문인 것으로 생각된다.

중첩을 이용하여 경화 단면을 예측하면 과경화나 불경화에 의해 경화물의 모서리가 둥글게 나오는 부분에 대해서도 가시화하여 살펴볼 수 있다.

5. 결론

DMD 의 1 pixel 에 의해 반사되어 광경화성 수지에 조사되는 빛은 가우스 분포를 갖는다는 가정을 하고 각 pixel 의 가우스 분포를 중첩하여 경화 단면을 예측하였다. 몇 가지 단순한 DMD 이미지들에 기초하여 예측에 필요한 가우스 분포 마스크를 생성하였고 다른 여러 이미지에 적용하여 보정을 통해 실제 경화 패턴에 근사한 이미지 예측이 가능함을 보였다. 이전에는 모델링 단면 이미지에 대한 경화단면을 확인하기 위해 직접 경화를 해보거나 제작자의 직감에 의존해 경화형상 단면을 예측하였다. 하지만 본 연구를 통하여 실제 가공을 거치지 않고 경화형상을 가시화하여 확인할 수 있으며 예측된 이미지로 제작 가능한 단면 형상과 그렇지 않은 형상을 가려낼 수 있다. pixel 을 이용한 2D 경화단면을 예측한 본 연구 이후 경화깊이 등을 고려한다면 voxel 개념의 온전한 3D 구조물의 예측도 가능할 것으로 예상된다.

참고문헌

1. Varadan, V. K., Jiang, X. and Varadan, V. V., "Microstereolithography and other fabrication techniques for 3D MEMS," John Wiley & Sons, pp. 8-138, 1996.
2. Hecht, E., "Optics 4th Edition," Addison Wesley Longman, pp. 644-647, 2002.
3. Sun, C., Fang, N., Wu, D. M. and Zhang, X., "Projection micro-stereolithography using digital micro-mirror dynamic mask," Sensors and Actuators A, Vol. 121, No. 1, pp. 113-120, 2005.
4. Park, I. B., Choi, J. W. and Ha, Y. H., "Multiple Fabrications of Sacrificial Layers to Enhance the Dimensional Accuracy of Microstructures in Maskless Projection Microstereolithography," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 10, No. 1, pp. 91-98, 2009.
5. Jung, S. H. and Lee, M. H., "Digital image processing using MATLAB," Hongrung Press, pp. 201-203, 2005.
6. Lee, J. H., Prud'homme, R. K. and Aksay, I. A., "Cure depth in photopolymerization: Experiments and theory," Journal of Material Research, Vol. 16, No. 12, pp. 3536-3544, 2001.