

◆ 특집 ◆ 3 차원 임의형상제작 기술 및 응용

UV-DMD 기반의 전사방식 미세광조형에서 미세 구조물의 정밀도 개선을 위한 Dithering Process 개발

Development of Dithering Process for Accuracy of Microstructure by Projection Microstereolithography based on UV-DMD

박인백¹, 하영명¹, 김민섭¹, 이석희^{2,✉}
In Baek Park¹, Young Myung Ha¹, Min Sub Kim¹ and Seok Hee Lee^{2,✉}

¹ 부산대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Pusan Univ.)

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

✉ Corresponding author: sehlee@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-1476

Key Words: Projection Microstereolithography (전사방식 미세광조형), Dithering Process (디더링 처리기법)

1. 서론

Microstereolithography(μ SL)는 microstructure 의 제작을 위해 기존 Stereolithography(SL) 기술을 응용한 것이다.¹ μ SL 은 수지 표면에 집광된 빔을 주사 경로에 따라 이송하여 구조물을 제작하는 이 기법을 Scanning-method 이라 부른다. scanning μ SL(S μ SL)과 단면 형상으로 패터닝된 빔을 수지 표면에 전사하여 제작하는 이 기법을 Projection method 라 부른다. projection μ SL(P μ SL)로 나뉘진다.^{2,3} S μ SL 은 가공에 사용되는 빔 스팟 크기가 미세하여 비교적 정밀도가 높다. 반면에 P μ SL 은 한 층당 하나의 패터닝된 빔을 조사하여 가공하므로 비교적 가공속도가 빠르다.³ 이러한 두 기법은 광조사로 광경화 레진을 경화한 후 적층시켜 3 차원 미세구조물을 제작하는 원리는 동일하나, 조사되는 광 강도 분포가 미세구조물의 정밀도에 미치는 영향은 서로 다르다. 광을 단면이미지로 패터닝하여 구조물을 제작하는 P μ SL 의 경우 수지 표면에 조사되는 광 강도 분포가 미세 구조물의 정밀도에 큰 영향을 끼친다. 이러한 이유는 광의 패터닝에 사용되는 Digital Micromirror Device(DMD),⁴ Liquid

Crystal Display(LCD)⁵ 와 같은 동적 패턴 생성기(Dynamic pattern generator)에서 단면을 구성하는 각 픽셀이 수지표면으로 광을 전달하기 때문이다. 일반적인 P μ SL 에서 패터닝된 광의 크기를 축소하기 위한 대안렌즈(Objective lens)는 각 마이크로 미러에 의해 전달된 광 강도의 차이를 더욱 크게 한다. 이러한 패터닝된 광의 광 분포를 조절하기 위해 단면이미지에 그레이스케일(Grayscale)을 사용한 연구가 진행되었다.⁶ LCD 에 그레이스케일을 적용해 해당이미지마다 액정의 크리스탈 배열의 조절로 광 투과율을 줄였고, 상업용 Digital light processing(DLP)의 DMD 를 사용한 경우 해당 픽셀의 미세 거울을 주기적으로 기울여 광 조사시간의 차를 부여하였다. 그러나 상업용 DLP 의 DMD 는 짧은 파장과 높은 조사에너지를 가진 UV Beam 에 최적화되어 있지 않아 긴 수명과 높은 반사율이 보장되지 않는다. 반면에 본 연구에서는 사용되는 UV-DMD 는 UV 에 적합하지만 0 과 1 의 단색 비트맵 이미지(Bitmap Image)를 입력 받는 제약을 받는다. 이러한 문제로 그레이스케일의 구현을 위해 선 부가장치를 장착하거나 복잡한 과정을 거쳐야 하는 단점을 가진다. 하지만 그레이스케일이 적용

된 단면이미지로 패턴된 광의 광 분포의 조절이 가능한 큰 장점을 지니므로 대안이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 UV-DMD 에 부가장치를 장착하지 않고 8Bit 의 그레이스케일을 적용시키기 위해 Computer Graphic(C.G)나 인쇄기법에 사용되는 Dither method 를 사용한다. Dither method 는 1bit 의 그레이스케일로 8bit 의 그레이스케일 효과를 가질 수 있다. 이러한 Dither method 로 미세구조물의 정밀도를 높이기 위해 단면이미지에 1bit 의 그레이스케일을 적용했다. 이 과정과 제작공정을 Dithering process 라 명하고, 기존의 공정과의 미세 구조물의 정밀도를 비교한다.

2. 전사방식의 마이크로 광조형

2.1 패턴 생성기의 구동

본 연구에서는 High-resolution 의 PμSL apparatus 구현을 위해 1024*768pixel 의 UV 용 DMD™ (Discovery 1100, Texas Instrument)를 패턴 생성기 (Pattern generator)로 사용했다.⁷ 이러한 이유는 UV-DMD 는 LCD 보다 작은 pixel size 와 pixel 간의 간격으로 해상도와 반사율이 높고, Filling ratio, Switching speed 등이 우수하기 때문이다.⁸ 또한 상업용 DLP 에서 사용되는 DMD 에 비해 350-400μm 이하에 반사율이 높고 높은 광 에너지에서도 긴 수명을 가지도록 제작되어 400μm 이하의 UV 를 광원으로 사용하는 광 조형 기술에 적합하다.^{9,10} UV-DMD 의 각 미세 거울은 13.68μm*13.68 μm 로 흑백 이미지를 입력 받아 이미지의 각 픽셀 값에 따라 각각 구동된다. 즉, 0 일 때는 off로 -12°, 1 일 때 on 으로 12° 로 기울어진다. 입사된 광은 Fig. 1 과 같이 +12° (1 의 값을 가진 픽셀)로 기울어지는 미세거울들에 의해 Ning(Patterning)되어 반사된다. 패턴된 광은 대안렌즈에서 축소되어 광경화성 수지 표면에서 결상되어 수지를 경화시킨다.²

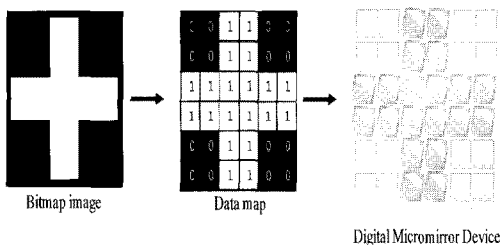


Fig. 1 Schematic of DMD operation according to bitmap image

2.2 UV-DMD 기반의 마이크로 광조형

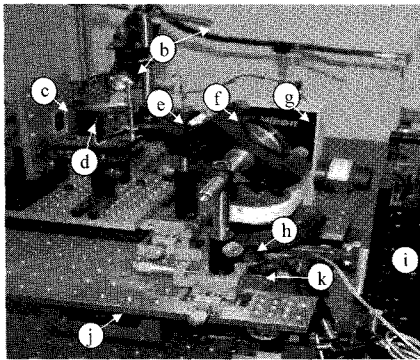
본 연구에서 사용된 UV-DMD 기반의 PμSL 는 Fig. 2 와 같이 200W 급의 UV-Lamp(EXPO Co., Canada)와 각종 optics, 적층을 위한 100nm 급의 Z 축 정밀스테이지 등으로 구성되었다. UV-Lamp 에서 방출된 365nm 의 UV-light 는 UV-DMD 에 의해 패턴닝 되고 반사되어 대안렌즈를 통해 광 경화 레진의 표면까지 도달된다. 본 장치에는 특수프리즘(LightGate™, Unaxis, USA)으로 광 패스(Light path) 를 줄이고, 패턴 되어진 광의 형상왜곡의 최소화 하기 위해 Tube lens(MellesGriot Co., USA)와 정밀조절이 가능한 UV 용 반사거울을 장착했다.^{7,11} 대안 렌즈(CFI Plan Flour 10x, Nikon, Japan)를 통과한 패턴된 광이 광 경화 레진의 표면에서 정확히 결상되기 위해 렌즈 포커싱 장치(IM-4, Nikon, Japan)을 사용하여 포커스 거리를 맞추었다. Fig. 2 의 (a)는 PμSL 의 실제 사진이며, (b)는 광 경로와 장치 제어의 흐름을 표시하였다. UV-lamp 의 에너지 및 조사시간의 제어, DMD 에 1bit 의 비트맵 이미지인 단면이미지 입력의 제어, 대면적 가공을 위한 X,Y-Stage 의 미세 구동과 3D 미세구조물의 제작을 위한 Z축의 스테이지 (ALS130-050, Aero-tech, USA)의 제어는 중앙 제어기에서 제어된다.

3. 패턴 광의 광 강도 분포

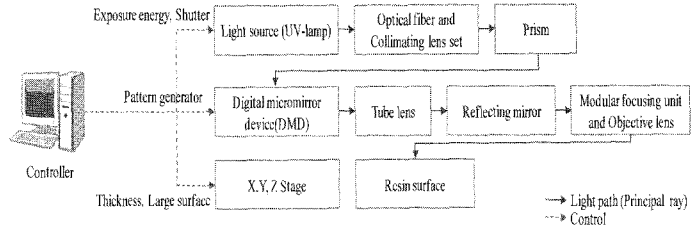
3.1 패턴 광

Pμsl 의 가공정밀도는 패턴 생성기의 해상도, 광학기기의 셋업, 광 경화 레진의 경화특성 등과 같이 여러 요인들에 영향을 받는다. 이 중 DMD 의 높은 해상도에도 불구하고 대안렌즈를 통과한 패턴된 광 내의 광 강도는 가공 정밀도에 큰 영향을 끼친다. 이를 확인하기 위해 800*600pixel 의 비트맵 이미지를 DMD 에 입력하고, 반사되어진 패턴된 광의 강도 분포(P_{DMD})와 P_{DMD} 이 대안렌즈를 통과한 후 레진 표면에서 결상된 광의 강도 분포 (P_{OBJ})를 측정해 Fig. 3 에 제시했다. 결과로 P_{DMD} 은 광 강도가 비교적 고른 반면에 P_{OBJ} 은 집광되는 과정에서 강도 차이가 커짐을 알 수 있다.

레진 표면에 일정 시간 동안 패턴된 광을 조사할 때, 단면 내 임의 위치에서의 에너지가 레진의 경화를 위한 임계에너지 보다 낮은 경우는 불경화, 높은 경우 과경화되어 미세구조물의 정밀도를 저하시킨다. 그러므로 패턴 광의 광 강도 분포를 최대한 균일하게 조사되어야 한다. 이를 위해 특수



(a)



(b)

Fig. 2 Pμsl used in the research (a) Photograph of the developed Pμsl system a. UV lamp, b. Optical fiber and Collimating lens set, c. Digital Micromirror Device, d. Prism, e. Tube lens, f. Reflecting mirror, g. Modular focusing unit, h. Objective lens i. Z-axis Stage, j. X,Y-axis Stage, k. Resin Vat), (b) Block diagram for light path in the system

한 광학기기를 사용하거나 레진의 임계 에너지를 조절할 수 있는 광 억제제를 사용할 수 있다. 첫째, 특수한 광학기기를 사용하는 경우에 대안렌즈 이후 Diffuser lens 나 Homogenize lens 등을 사용해 광 강도 차이를 줄일 수 있다. 하지만, 패턴 광의 형상왜곡이 발생시키거나 낮은 출력을 가진 광원을 사용하는 경우엔 적용하기 힘들다. 두번째로 레진에 광 억제제를 일정량 혼합하여 임계에너지를 낮추는 경우는 레진을 구성하는 성분들의 함유량에 따라 경화특성이 변한다. 그러므로 적합한 함유량을 찾기 위해 많은 실험을 거쳐야 한다. 또한 광 억제재로 인하여 미세구조물의 전체 크기가 감소되므로 단면 형상의 크기 조절과 가공 조건이

바뀌어야 하는 제약을 가지게 된다. 이러한 이유로 패턴 광의 변형 없이 광 강도 분포를 특정 목적에 따라 조절할 수 있는 방안이 필요하다.

4. 그레이스케일(Grayscale)

4.1.1 비트의 그레이스케일 구현

최근에 상업용 DMD, LCD 와 같은 패턴 생성기를 사용한 Pμsl 에서 그레이스케일로 광 강도를 조절해 미세구조물을 제작하는 기법들이 연구되었다. 하지만 그레이스케일을 이용한 미세구조물의 제작은 단순한 형상에 한정되어 있고 복잡한 형상과 응용은 아직 미비하다. 그레이스케일은 백(white)과 흑(black)사이의 회색 영역을 표시하기 위해 백색과 흑색의 비율을 변화시킨 색조로 사진 또는 영상 처리기법에서 grayscale 또는 grayscale digital image 라 표현하며, 그 역할은 흑색의 적은 강도를 백색으로 변화해 회색으로 표현되게 한다.¹² 이러한 그레이스케일을 Pμsl 에 패턴 생성기에 적용하면 특정목적에 위한 광 강도 분포의 조절이 가능하다. 하지만 1bit 의 비트맵 이미지의 입력만이 가능한 UV-DMD 에 적용할 수 없다. 이를 위해 그래픽 기법 중 컴퓨터 그래픽 또는 인쇄장치에서 해상도를 초과하는 색의 표현을 주변의 픽셀 또는 도트의 색으로 근접하게 생성하기 시키기 위해 사용되는 dither method 를 이용했다. 이를 사용해 그레이 효과를 확인하기 위해 경화 실험을 실시했다. 부가적으로 패턴 광의 강도 분포를 조절이 가능하

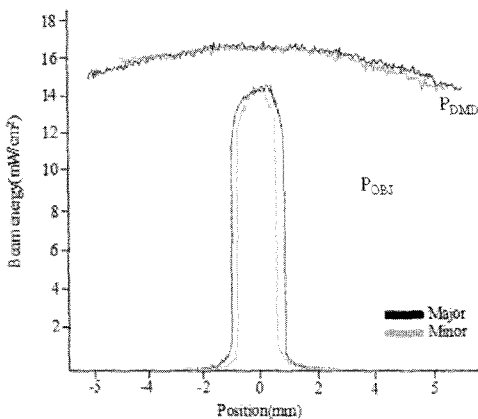


Fig. 3 Beam Intensity profiles of a patterned beam after DMD(P_{DMD}), and Objective lens(P_{OBI})

도록 그레이 수준(graylevel)을 조절할 수 있도록 하였다.

4.2 Dither 기법

UV-DMD 에 8bit 의 그레이 이미지를 사용할 수 없으나 흑과 백의 1bit 로써 그레이와 유사한 효과를 낼 수 있는 Dither method 를 적용하였다. 예를 들어 흑백을 가지는 1bit 의 디스플레이 장치에서 임의의 면적의 흑색 도트와 백색 도트의 비율을 조합해 하프톤 화상(halftone image)과 비슷하게 생성시켜 특정한 회색으로 보이게 하는 것이다.

Dither 기법의 효과를 확인하기 위해 우선 fig. 4 의 (a)와 같은 단면 이미지를 제작했다. 대안렌즈를 통과한 패턴 광이 광 경화 레진의 표면에서 이루는 광 강도를 빔 프로파일러를 사용해 측정했다. 이러한 광 강도의 분포 값을 광 강도에 따라서 0~255 의 8bit 그레이스케일로 나눠 가장 높은 광 강도의 값을 G_{max} , 낮은 값을 G_{min} 으로 두었다. 이러한 G_{max} 와 G_{min} 은 dithering 시 그레이 수준(Gray-level)으로 사용된다. Fig. 4 의 (b)는 그 예로서 G_{max} 와 G_{min} 의 그레이 수준을 150 으로 dithering 시킨 패턴 광을 측정할 것이다. 이러한 dithering 을 거친 단면 이미지의 광 강도 분포는 기존의 광 강도 분포를 변경시킬 수 있으나, 광 강도를 줄이게 되므로 레진의 임계에너지에 맞게 조절해야 한다.

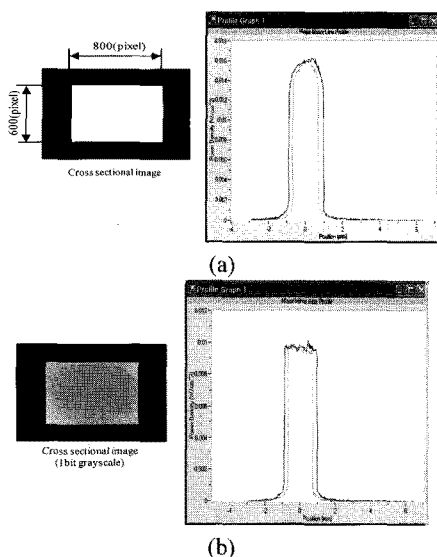


Fig. 4 Measurement of beam intensity according to cross-sectional image (a) Beam intensity of original cross-sectional image and (b) grayscale image

Fig. 5 는 그레이 수준차에 따른 광 강도를 알아보기 위해 0 부터 255 까지의 단면 이미지들을 dithering 시켜 측정한 결과이다.

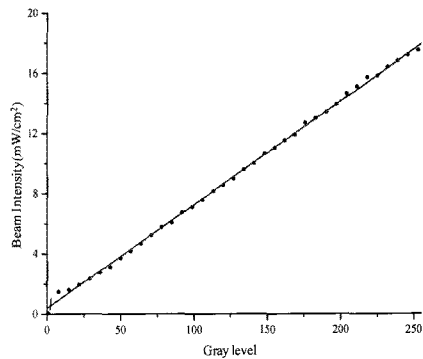


Fig. 5 Beam intensity according to gray level of a cross-sectional image

그 결과 그레이 수준이 증가함에 따라 광 강도가 선형적으로 높아짐을 알 수 있었다. 이것은 레진의 임계에너지를 고려해 dithering 시 8bit 의 그레이 수준을 설정해야 함을 내포한다.

5. 경화 실험

5.1 광 경화 레진의 경화 특성

본 연구에서 사용된 광 경화 레진은 1 관능 모노머(monomer)로 경화속도와 투명성이 높은 1, 6 Hexanediol Diacrylate(HDDA, Miwon Chem Tech Co., S. Korea)에 365~380nm 의 광 대역의 광 개시제인 2,2-Dimethoxy-2-phenylacetophenone(DMPA, Fisher Scientific Co., USA)을 5wt.% 첨가했다. 혼합방법은 암실에서 3 시간 동안 마그네틱 스트러를 사용해 실시하였다. 제작되어진 레진의 경화 특성은 실험과 수식을 통해 임계에너지(E_c)는 3.784 mJ/cm^2 , 광 투과 깊이(D_p)는 $440.728\mu\text{m}$ 로 산출되었다.¹ 적층 시스템에서 미세구조물의 가공 정도에 중요한 점성은 약 7.5 cps 이하로 측정되었고 광 투과율은 약 $500\mu\text{m}$ 의 두께에서 90%이상 투과됨을 보였다.

5.2.1 비트 그레이스케일의 경화 실험

Dither method 를 통한 1 비트 그레이스케일의 경화실험을 위해 $1024*768\text{pixel}$ 의 이미지에 8 비트 그레이를 부여했다. 이미지의 우측에서 좌측면을 기준으로 그레이 수준 차를 임의의 값으로

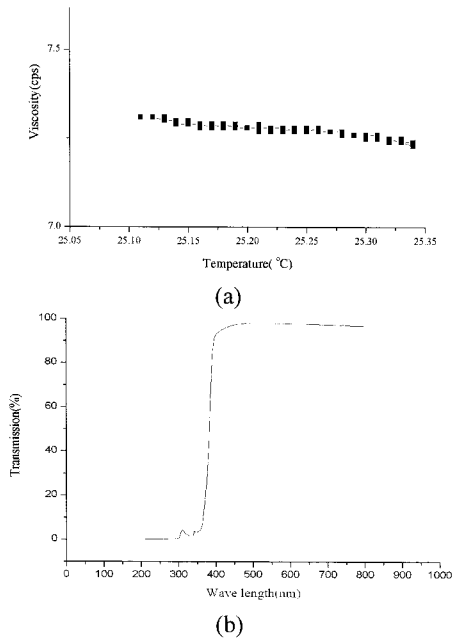


Fig. 6 Material properties of photo-curable resin (a) viscosity (b) Light transmission

dithering 시켰다. 가공조건은 희생층을 제작 후 레진 표면과 플랫폼을 50um 만큼 하강시킨 뒤, 16.4 mJ/cm²의 동일한 조사에너지로 경화시켰다.

Fig. 7의 (a), (b), (c)는 50, 150, 20의 그레이 수준 차로 dithering 후 경화한 것이다. 실험 결과는 그레이 수준 차로 인한 패턴 광의 강도 제어 및 dither method로 인해 경화형상이 달라짐이 보였다.

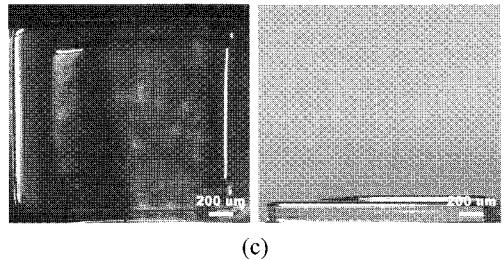
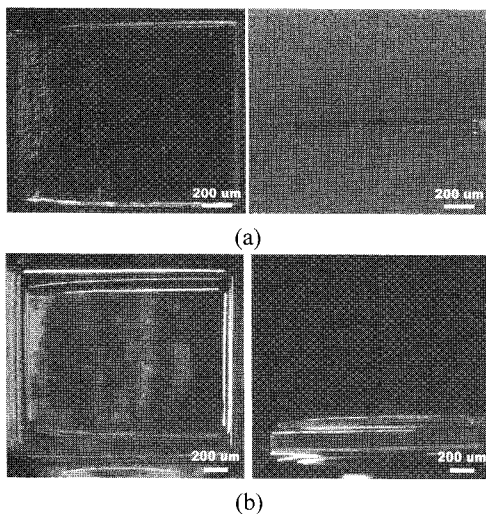


Fig. 7 Measurement of fabricated microstructure by dithered cross-sectional images with different gray level (a) 255 to 200 gray level (c) 255 to 100 gray level (d) 200 to 180 gray level

6. 결과 및 미세 구조물 제작

본 연구에서 검증되어진 Dither method로 미세 구조물의 정밀도를 높이기 위해 다음과 같이 적용했다.

PμSL의 미세구조물제작은 단면이미지들의 적층으로 완성된다. 단면이미지는 3D 모델링을 주어진 적층두께로 슬라이싱 되어 생성된다. 이때 3D 모델의 형상 일부가 적층두께로 인해 단면이미지가 올바르게 생성되지 못하는 경우가 발생된다. 이를 해결하기 위해선 미세한 적층 두께로 단면 이미지를 생성시켜야 하지만, 레진의 표면장력에 인

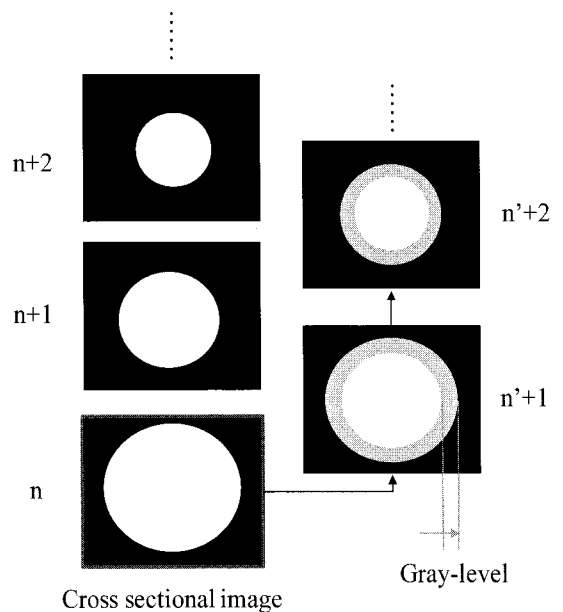


Fig. 8 Regeneration of cross sectional image by dithering process

한 문제로 무작정 줄일 수 없다. 이러한 문제로 미세구조물에 표면 거칠기가 낮아지거나 모델링한 형상과 달라지는 경우가 발생된다. 이를 해결하기 위하여 Fig. 8 과 같이 단면이미지들 간의 차를 생성시킨다. 생성된 이미지 면적에 그레이 수준 차를 두어 8bit 의 그레이스케일을 만든다. 그레이 수준 차는 실험을 통해 결정되어진다.

이후 dithering method 를 통해 1bit grayscale 로

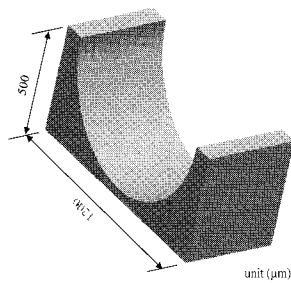
재 생성시켜 기존의 단면이미지들과 겹친다. 이러한 과정을 dithering process 라 명했다.

Fig. 9(a)의 3D 모델에 Dithering process 를 적용하여 table 1 의 가공조건을 사용해 제작하였다.

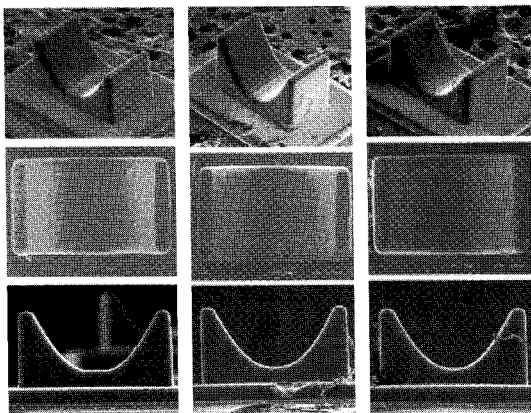
측정결과로 일반적인 단면이미지로 제작한 미세 구조물보다 높은 표면 정도를 보여준다. 또한 (b)의 원호 형상이 dithering process 로 인해 (c), (d) 와 같이 보정됨을 볼 수 있다.

Table 1 Fabrication condition for Fig. 9(a)

Conditions	
Exposure energy	16.4 mJ/cm ² Cross
Cross section image	50 ea
Layer thickness	10 μm
Dwell time	30 sec
Sacrificial layer	7 layer
Total Process time	2.5 hr
Gray-level($G_{min}=0$)	180, 220(G_{max})



(a)



(b)

(c)

(d)

Fig. 9 SEM image of fabricated microstructure with dithering process (a)3D Model (b) General process (c) 180 gray-level (d) 220 gray-level

7. 결론

본 연구는 UV-DMD 의 단면이미지로 인한 광 강도를 조절하기 위하여 8bit 의 그레이스케일을 1bit 의 그레이스케일로 변화시키기 위해 Dithering method 을 적용했다. 8bit 의 그레이스케일의 그레이 수준 차로 광 강도의 조절이 가능함을 검증하였고, 이를 이용해 미세 구조물의 표면 거칠기와 정밀도를 높이기 위한 Dithering process 를 개발했다. 그 결과 Pμs 에서의 일반적인 가공방법에 비해 매끄러운 표면을 지닐 수 있었으며, 높은 정밀도로 제작됨을 알 수 있었다. 이후 연구는 미세 구조물의 가공시간을 줄이기 위해 적층 두께를 높힐 경우 발생하는 형상오차나 표면거칠기 등에 Dithering process 를 적용해 정밀도를 높이고자 한다.

참고문헌

1. Varadan, V., Jiang X. and Varadan, V. V., "Microstereo-lithography and other fabrication techniques for 3D MEMS," John Wiley & Sons, pp. 103-138, 2001.
2. Jacobs, P. F., "Rapid Prototyping and manufacturing: Fundamentals of Stereolithography," Society of Manufacturing Engineers, pp. 81-92, 1992.
3. Nakamoto, T., Yamaguchi, K. and Abraha A. P., "Consideration on the producing of high aspect ratio micro parts using uv sensitive photopolymer," Proceeding of 7th International Symposium on Micro Machine and Human Science, pp. 53-58, 1996.
4. Bertsh, A., Zissi, S., Jézéquel, J. Y., Corbel, S. and André, J. C., "Microstereolithography using a liquid crystal display as dynamic mask generator," Microsystem Technologies, Vol. 3, No. 2, pp. 42-47, 1997.
5. Beluze, L., Bertsch, A. and Renaud. P.,

- “Microstereolithography: a new process to build complex 3D objects,” Proc. SPIE, Vol. 3680, No.2, pp. 808-817, 1999.
6. Hayashi, T., Shibata, T., Kawashima, T., Makino, E., Mineta, T. and Masuzawa, T., “Photolithography system with liquid crystal display as active gray-tone mask for 3D structuring of photoresist,” Sensors and actuators A: Physical, Vol. 144, No. 2, pp. 381-388, 2008.
 7. Park, I. B., Choi, J. W., Ha, Y. M. and Lee, S. 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.
 8. Sun, C., Fang, N., Wu, D. M. and Zhang, X., “Projection micro-stereolithography using digital micro-mirror dynamic mask,” Journal of Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 121, No. 1, pp. 113-120, 2005.
 9. Douglass, M. R., “Lifetime Estimates and Unique Failure Mechanism of the Digital Micromirror Device,” IEEE International Proc. of Reliability Physics Symposium, pp. 9-16, 1998.
 10. Dudley, D., Duncan, W. and Slaughter, J., “Emerging Digital Micromirror Device(DMD) Applications,” Proc. SPIE, Vol. 4985, pp. 14-25, 2003.
 11. Ha, Y. M., Choi, J. W. and Lee, S. H., “Mass production of 3-d microstructures using projection microstereolithography,” Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 22, No. 3, pp. 514-521, 2008.
 12. Johnson, S., “Stephen Johnson on Digital Photography,” O'REILLY, pp. 17-19, 2006.