

# Digital Micromirror Device와 Polygon scanner의 Lithography 특성에 따른 산업적 분석

김지훈<sup>1</sup> · 박규백<sup>1</sup> · 박정래<sup>1</sup> · 고강호<sup>1</sup> · 이정우<sup>1</sup> · 임동욱<sup>†</sup>  
인하대학교 기계공학과<sup>1,†</sup>

## Industrial analysis according to lithography characteristics of digital micromirror device and polygon scanner

Ji-Hun Kim<sup>1</sup> · Kyu-Bag Park<sup>1</sup> · Jung-Rae Park · Kang-Ho Ko<sup>1</sup> · Jeong-woo Lee<sup>1</sup> ·  
Dong-Wook Lim<sup>†</sup>

Department of Mechanical Engineering, Inha University<sup>1,†</sup>

(Received December 23, 2021 / Revised December 28, 2021 / Accepted December 31, 2021)

**Abstract:** In the early days of laser invention, it was simply used as a measuring tool, but as lasers became more common, they became an indispensable processing tool in the industry. Short-wavelength lasers are used to make patterns on wafers used in semiconductors depending on the wavelength, such as CO<sub>2</sub> laser, YAG laser, green laser, and UV laser. At first, the hole of the PCB board mainly used for electronic parts was not thin and the hole size was large, so a mechanical drill was used. However, in order to realize product miniaturization and high integration, small hole processing lasers have become essential, and pattern exposure for small hole sizes has become essential. This paper intends to analyze the characteristics through patterns by exposing the PCB substrate through DMD and polygon scanner, which are different optical systems. Since the optical systems are different, the size of the patterns was made the same, and exposure was performed under the optimal conditions for each system. Pattern characteristics were analyzed through a 3D profiler. As a result of the analysis, there was no significant difference in line width between the two systems. However, it was confirmed that dmd had better pattern precision and polygon scanner had better productivity.

**Key Words:** PCB Substrate, DMD, Polygon Scanner, Lithography

### 1. 서론

최근 IT 산업 및 그와 관련된 산업이 급속도로 발전됨에 따라 PCB 산업의 진보 경향이 이전의 rigid PCB에서 flexible PCB로 전환되며 다양한 분야로 확대되어 가는 중이다. PCB에 대한 성능을 높여 소비자의 만족과 업계의 요구 조건을 충족시키기 위해 PCB의 기관의 대폭적인 성능 개선이 이루어져야 하는 상황에 직면한 것은 불가피한 일이다. 모바일 폰의 경우 PCB에서 Substrate Like PCB(SLP)로 변경됨에 따라 더욱 소형화된 기관이 필요해져 회로 선

폭의 고밀도화가 필수적이게 되었다<sup>1,2)</sup>.

PCB 위에 회로 패턴이 매우 미세한 회로 선폭과 고밀도화를 실현해 주기 위한 다양한 방식이 제기되었다. 하지만 기존의 방식으로는 해결할 수가 없어 기존의 기술을 뛰어넘는 새로운 방식의 노광 장비의 필요성이 제기되었다. 기존의 광학모듈의 분해능이 낮은 해상도에서 고집적 및 고미세화를 이루기 위해 높은 분해능의 광학성능을 지니기 위한 기술의 혁신은 물론, 매년 소비자의 욕구를 충족시키기 위해 제품의 다양성 및 소량 및 대량생산 체제에도 적극적으로 대응해야 한다. 따라서 공정의 생산 시간의 단축과 생산성 향상을 이루기 위해 신기술 개발 및 적용의 필연성이 높아지고 있다. 마스크(Mask)를 이용한 노광은 대량 생산에 적합하여 많

1. 인하대학교 기계공학과  
† 교신저자: 인하대학교 기계공학과  
E-mail: 22191319@inha.edu

은 분야에서 사용되고 있으나 마스크 제작을 위한 설비가 필요하며 마스크 제작의 비용이 증가하게 된다. 또한 마스크는 소모품으로 지속적인 세척 및 관리가 필요하며 일정 횟수 이상에는 추가 비용이 발생하게 된다. 이외에도 마스크 공정 추가에 따른 공정 소요 시간이 증가하고 생산성이 감소하는 단점이 있다. 이러한 요구에 부합하는 노광방법들이 새롭게 개발되었는데 바로 Laser Direct Imaging(LDI)를 이용하여 마스크 없이 자재에 직접 패턴을 만드는 노광방법 중의 하나가 Digital Micromirror Device(DMD) 방식과 폴리곤 스캐너 (polygon scanner) 방식이다<sup>3,4)</sup>.

Fig. 1은 DMD의 구조도이다. DMD 방식은  $\mu\text{m}$  단위의 mirror를 사각 형태로 배열해 mirror를 각각 제어함으로써 원하는 패턴을 만들어내는 대면적 노광 방식이다. 폴리곤 스캐너의 경우는 라인 스캔 방식의 노광이 대면적 노광을 빠르게 할 수 없는 단점을 보완하기 위하여 폴리곤 미러를 통한 노광하는 방식으로 라인 스캔 방식의 단점을 보완하였다.

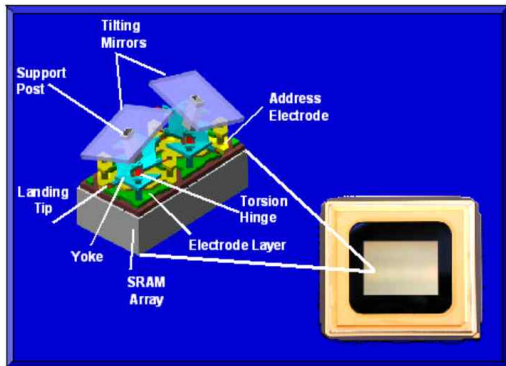


Fig. 1 Schematic of two DMD mirror<sup>5)</sup>

현 실험에서는 DMD에서 구현 가능한 최소 선폭인  $13\mu\text{m}$ 부터 노광 실험을 하였다. DMD 방식에서 사용 중인 플랫폼(flat-top) 모드와 폴리곤 스캐너에서의 가우시안 빔(Gaussian beam) 특성에 따른 비교 테스트를 하였다. 폴리곤 스캐너 사용 시 스캔 속도 및 스캔 거리에 따른 생산성을 고려하여 DMD 방식과 비교하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 노광 방식에 따른 광학계 비교

본 연구에서 사용한 DMD 광학계는 텔레센트릭 광학계를 사용하였다. 텔레센트릭 광학계는 렌즈의 초점 거리를 무한대로 만들어 거리에 따른 상의 크기 변화를 줄이는 역할을 한다. 이러한 텔레센트릭 광학계를 사용하여 스테이지의 높낮이에 따른 상의 크기 변화가 없는 반면 폴리곤 스캐너 방식은 가격적인 문제 및 렌즈 매수를 적게 하기 위한 방법으로 x축 곡률과 y축 곡률이 다른 toroidal F-theta로 설계되어 노광이 진행된다<sup>6)</sup>.

### 2.2. DMD 노광 장치

본 실험에 사용된 DMD는 Texas Instrument사의 XGA(1024\*768) 해상도를 가지고 있다. mirror는 각  $12.68\mu\text{m}$ 의 정사각형이며, mirror간의 거리는  $1\mu\text{m}$ 의 구조를 가지고 있다. 다음 Table 1은 DMD 노광 장치의 시스템 구성에 대한 스펙이다.

Table 1 Specifications of DMD Lithography system

Type	Class
Beam type	Collimated
Peak wavelength	365 [nm]
Beam diameter	9 [mm]
UV irradiation intensity	10,500 [ $\text{mW}/\text{cm}^2$ ]
Power consumption	25 [W]
Position accuracy	$\pm 10$ [ $\mu\text{m}$ ]

DMD노광 장치에 사용되는 광학계는 상 축 및 이미지에 대해 주광선이 광축과 수직인 광학계이다. 노광에 사용한 광원은 365nm UV으로 플랫폼-탑 프로파일을 적용하여 사용하였다. Fig. 2는 실험에서 사용된 DMD 노광 시스템에 대한 사진이다.

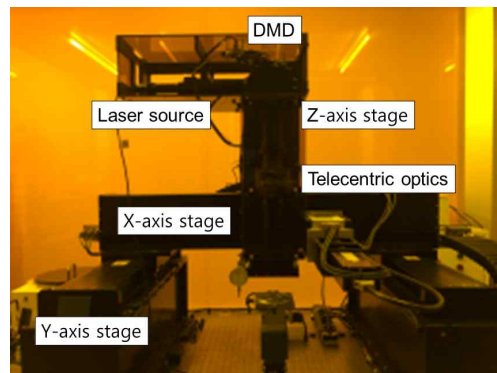


Fig. 2 DMD Lithography system

### 2.3. Polygon scanner 노광 장치

폴리곤 스캐너는 입사되는 광원이 고속으로 회전하는 다각형의 폴리곤 미러에 조사되면서 라인 형태의 패턴이 구현된다. Fig. 3은 폴리곤 스캐너의 개략도를 나타낸다.

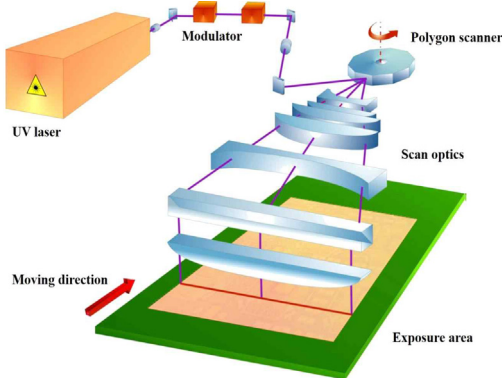


Fig. 3 Schematic diagram polygon scanner<sup>7)</sup>

폴리곤 미러를 사용한 노광에 사용한 광학계는 원하는 선폭을 얻기 위해 toroidal F-theta lens를 사용하여 노광 실험을 하였다. 사용 광원은 가우시안 모드의 레이저 광원을 사용하였으며, 레이저는 Picosecond UV 레이저를 사용하였고, spot의 일정한 간격 조절을 위해 Acousto-Optic deflector(AOD)를 사용하여 spot간의 거리를 일정하게 맞추었다. 6 facet polygon mirror의 시작점, 끝점을 맞추기 위해 facet - laser 동기화 보드를 개발하여 테스트하였다. 600mm 스캔을 위해서는 연구 기간을 고려하여 300mm 스캔 렌즈를 병렬로 2개 사용하여 노광 테스트를 하였다. Fig. 4는 실험에서 사용된 폴리곤 스캐너 노광 시스템에 대한 사진이다. Table 2는 폴리곤 스캐너 노광 시스템에 대한 스펙이다.

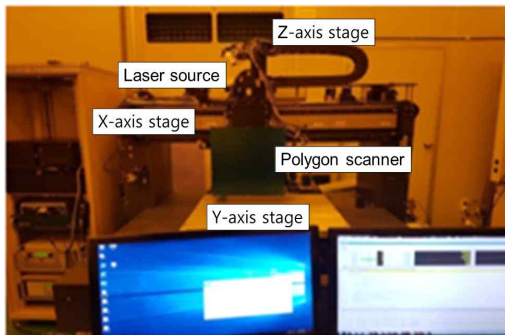


Fig. 4 Polygon scanner system

Table 2 Specifications of polygon scanner system

Type	Class
Optical specification	LSE300 STD
Wavelength	355 [nm]
Input beam diameter	8 [mm]
Scan length	300 [mm]
Position accuracy	± 1 [μm]
Line straightness	2 [μm]

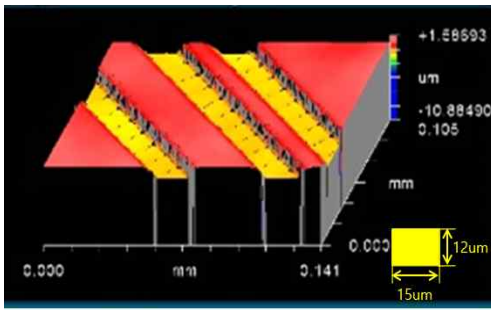
### 2.4. 실험방법

노광 실험을 하기 위해 Photoresist(PR)이 도포된 Flexible Printed Circuit Board(FPCB)를 사용하였다. 노광 시 노광 선폭을 DMD의 mirror 1개 기준인 약 13μm을 기준으로 13μm, 26μm, 54μm로 하고 선폭간 거리를 13μm, 26μm, 54μm로 하여 선폭간 거리에 따른 노광결과를 분석하였다. 폴리곤 스캐너는 스캔 한 번의 라인 폭이 약 10μm 정도로, 원하는 선폭을 만들기 위해서는 라인을 중첩(90% 중첩률)하여 선폭을 맞추는 형식으로 노광을 하였다. 두 시스템의 소스와 파워가 다르므로 각 시스템에서의 최적 노광 조건으로 노광을 진행하였다. 노광 후에는 현상액을 통해 현상하여 그 결과를 zygo사의 NewView 7300 제품인 3D 프로파일러를 통해 노광 결과를 확인하였다.

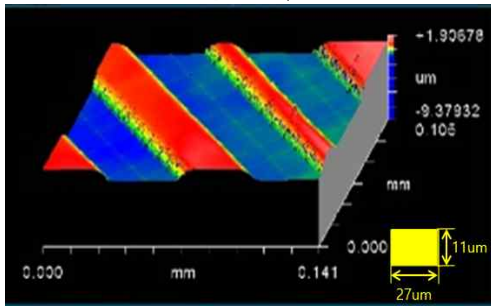
## 3. 노광 실험결과 및 분석

### 3.1. DMD 노광 결과

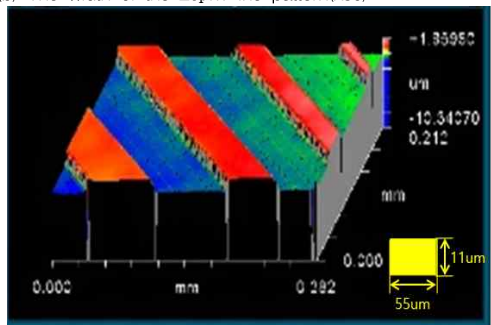
Fig. 5는 DMD 노광 시스템을 통해 얻은 PCB를 zygo를 통해 확인한 결과이다. zygo를 통해 단면을 확인할 수 있는데 DMD에서는 Fig. 5의 우측 하단에 노광된 선폭과 노광된 두께(PR층)를 표현하였다. 선폭 13μm를 타겟으로 한 Fig. 5의 (a)에서는 선폭이 15μm 정도로 설계보다 과하게 노광이 되었으나 (b)와 (c)를 보면 설계한 타겟 값과 유사하게 노광되었음을 알 수 있다. DMD 시스템으로 노광하였을 때, 노광된 곳과 노광되지 않은 곳의 경계면이 잘 구분되어 있고, 플랫-탑 모드를 사용하고 있기에 노광된 바닥면과 측면이 거의 수직으로 구현되었다. 이는 에칭을 진행할 때, 원하는 폭을 얻을 수 있을 것으로 보인다<sup>8)</sup>.



(a) The width of the 13µm line pattern(x50)



(b) The width of the 26µm line pattern(x50)



(c) The width of the 26µm line pattern(x25)

Fig. 5 DMD lithography result using 3D profiler

DMD는 앞서 말했듯이 mirror간의 간격이 1µm을 갖고 배치되어 있는데 이러한 구조적 원인으로 노광 시간이 충분하지 않으면 Fig. 6과 같은 패턴으로 노광이 된다. 이는 Fig. 5에서도 바닥면에 보이는 격자 무늬를 통해 확인할 수 있다. 연속적인 패턴이 필요한 형상 혹은 공정에서는 문제가 될 수 있다. 이를 없애기 위해서는 노광 시간을 조금 더 확보하면 되지만, 이는 패턴 폭을 증가시키며 생산 속도를 감소시킨다.

DMD의 생산성을 확인해보면 본 실험에서는 XGA 해상도로 가로 약 14mm, 세로 10.5mm의 면적을 한번에 노광할 수 있으며, 노광은 30초 진행하였다.

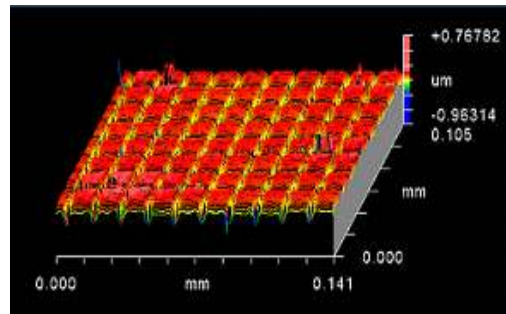
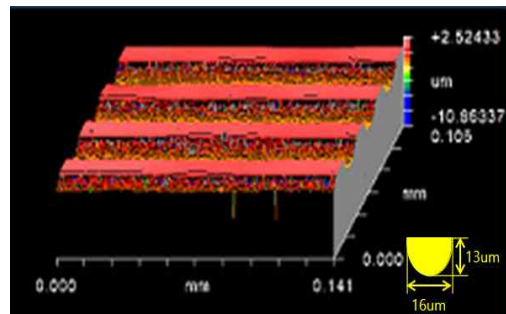
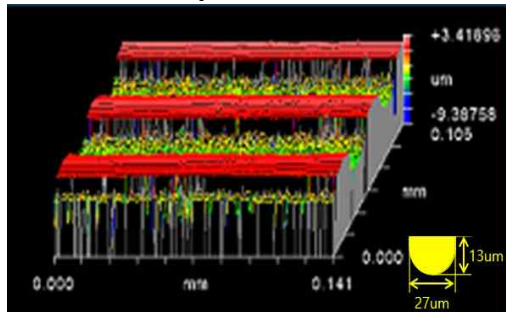


Fig. 6 Structural problem in DMD lithography

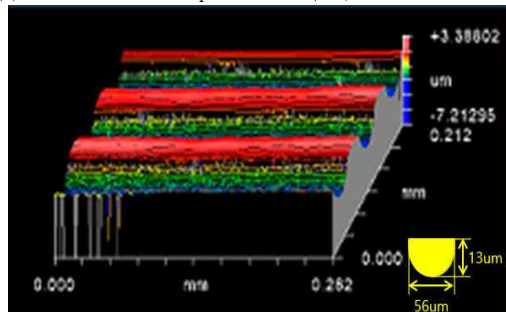
### 3.2. Polygon scanner 노광 결과



(a) The width of the 13µm line scan(x50)



(b) The width of the 26µm line scan(x50)



(c) The width of the 26µm line scan(x25)

Fig. 7 Polygon scanner lithography result using 3D profiler



Fig. 7은 폴리곤 스캐너를 사용하여 노광한 결과이다. 앞선 DMD 노광 결과와 마찬가지로 Fig. 7 우측 하단에 노광된 선폭과 노광된 두께를 표현하였다. 가우시안 빔 모드를 사용하여 노광된 단면이 수직이 아닌 가우시안 형태를 따라가는 둥근 노광 단면을 보인다. 이는 앞선 DMD와 다르게 side wall angle 값이 높아 에칭을 했을 때, 원하는 선폭을 얻기가 쉽지 않을 것으로 보인다.

폴리곤 스캐너를 통해 얻은 값은 스캔 라인 하나를 그렸을 때 16 $\mu$ m 정도로 측정되었다, 13 $\mu$ m 타겟으로 한 것에 비해 라인 선폭이 두껍게 노광되었음을 확인할 수 있었다. Fig. 7 (b)와 (c)를 보면 설계한 선폭과 유사하게 노광되었음을 알 수 있다.

폴리곤 스캐너의 생산성을 확인해보면 본 실험에서의 폴리곤 스캐너 시스템은 한 개의 라인이 최대 300mm를 스캔하는데, 초당 100개의 라인을 스캔하는 스캔 속도와 중첩률 90%로 하였다.

#### 4. 결론 및 토의

본 연구에서는 PR이 코팅된 FPCB동판을 사용하여 DMD 노광시스템과 폴리곤 스캐너 노광시스템의 차이점을 확인하고자 선폭을 동일하게 조건을 맞추고 선폭과 선폭간의 거리를 달리하여 두개의 시스템의 결과를 비교 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 두 개의 광학계 시스템 모두 이미 최적화된 노광 조건이 잡혀있어서 패턴 선폭(폴리곤 스캐너 시스템의 결과 값에서는 Z축 위치마다 선폭이 달라지지만 가장 큰 변곡점 기준으로)에 대한 것이나 선폭간의 간격으로 확인한 위치 정밀도에 대한 값은 특이사항이 없이 거의 동일하게 값이 나왔다.

2) 두 개의 시스템의 생산성을 시간당 면적으로 계산해보는다면(패턴을 고려하지 않고 노광 가능 면적을 전부 노광한다고 가정했을 때), DMD는 14mm \* 10.5mm 면적을 30초에 노광하였기에 4.9mm<sup>2</sup>/sec이다. 폴리곤 스캐너는 라인 폭이 10mm에 중첩률이 90%로 100개 라인 스캔한다면 101mm가 된다. 그러면 노광 면적은 300mm \* 101mm이고 이것이 1초의 일어난므로 시간 당 면적은 30300mm<sup>2</sup>/sec이 된다. 이는 폴리곤 스캐너가 DMD에 비해 약 6000배 정도 높은 수치로 더 빠르게 넓은 영역에 대한 노광을 할 수 있음을 알 수 있었다. 다만 이것은 본 실험에서 사용된 PR와 두 광학 시스템 사이에서만 적용됨을 밝힌다.

3) DMD로 노광한 결과와 폴리곤 스캐너에 의한 노광 결과를 비교 시 폴리곤 스캐너에 사용한 가우시안 빔 모드를 사용한 것에 비해 DMD에서 사용한 플랫폼-답 모드로 노광 하는 것이 PR층 벽과 바닥면과의 각도가 90도에 가까워 FPCB를 에칭 할 때에 원하는 선폭을 균일하게 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

4) 폴리곤 스캐너 광학계 시스템에서는 폴리곤 스캐너 구동을 위해 모터와 체결하게 되는데, 체결 후 모터와 체결된 폴리곤 미러를 스캔하면 모터 jitter에 따라 직선이 아닌 구불구불한 스캔을 하게 되는 이슈가 있었다. 이는 모터를 사용하면 생길 수밖에 없으나  $\mu$ m 단위의 미세한 선폭의 가공 시에는 패턴 정밀도의 문제가 될 수 있음을 알 수 있었다. 5) DMD 광학계 시스템은 step and go 방식으로 폴리곤에서 생기는 jitter 문제나 렌즈 가공 난이도도 toroidal lens 대신 회전 대형형 비구면과 구면으로 이루어져 노광 렌즈 가공도 쉬워진다. 다만 폴리곤 스캐너 스캔에서는 집광도가 좋은 레이저광을 중첩하여 사용하므로 대면적 노광에 효율적이지만 DMD의 경우 대면적의 노광을 위해서는 면적대비 노광 광원의 세기가 커야 한다. 그러기 위해서는 파워가 높은 광원과 그에 따른 광원 설계가 뒤따라야 하므로 시스템 구성이 복잡해지는 차이가 있었다.

6) DMD 광학계 시스템과 폴리곤 스캐너 시스템을 비교하면 DMD는 정밀도를 요구하는 제품 생산에 적합해 보이나 연속적인 패턴이 요구되는 형상에서는 구조적 문제를 가지고 있다. 폴리곤 스캐너는 정밀도는 떨어지지만 다량의 제품 양산 및 연속적인 패턴이 요구되는 형상에 적합해 보인다. 또한 DMD도 다른 광학계에 비해서 대면적 노광을 한다고 하지만, 폴리곤 스캐너가 더욱 큰 면적을 빠른 시간 안에 노광한다고 할 수 있겠다.

#### 참고문헌

- 1) Cho M. W. and Kim D. W., "Maskless lithography technology using DMD for PCB exposure", Journal of the KSME, vol. 50, no. 6, pp. 43-47, 2010
- 2) Rothschild M., et al, "Recent Trend in Optical Lithography", Lincoln Laboratory Journal, vol. 14, no. 2, pp. 221-236, 2003.
- 3) Cho Y. K., "Development of Dual Head Direct Patterning System Based DMD-Galvanoscanner and Research of the Exposure Algorithm to Improve

- Pattern Accuracy”, Ph. D. Thesis, Inha National University, pp. 6-7, 2017.
- 4) De Loor R., Penning, L. and Slagle, R., “Polygon Laser Scanning: A need for speed in laser processing and micromachining”, Laser Technik Journal, vol. 11, no 3, pp. 32-34, 2014.
  - 5) Dudley D., Duncan, W. M. and Slaughter, J., “Emerging digital micromirror device (DMD) applications”, MOEMS display and imaging systems. vol. 4985. International Society for Optics and Photonics, 2003.
  - 6) Watanabe, M. and Nayar, S. K., "Telecentric optics for constant magnification imaging." IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol. 19, pp. 1360-1365, 1995.
  - 7) Blatt P., “Laser Direct Imaging Benefits from Solid State Technology”, Laser Assisted Net Shape Engineering vol. 5, Proceedings of the Lane, pp. 1221-1224, 2007.
  - 8) Kondo, K. and Keisuke F., "Current evolution of electrodeposited copper bumps with photoresist angle.", Journal of The Electrochemical Society, vol. 145 no. 3, pp. 840-844, 1998.

## 저자 소개

### 김 지 훈(Ji-Hun Kim)

[학생회원]



- 2018년 3월~현재: 인하대학교 기계공학과 (통합과정)

< 관심분야 >  
금형 및 성형 해석

### 박 규 백(Kyu-Bag Park)



- 2003. 8월 : 인하대학교 기계공학과(석사)
- 2003년 8월~현재 : 한국기계전기전자시험연구원 책임연구원
- 2019년 3월~현재 : 인하대학교 기계공학과 대학원

< 관심분야 >  
사출성형 및 금형, 측정 및 가공

### 박 정 래(Jung-Rae Park)



- 1995 년 1월 ~2000년 12월: 아남인스트루먼트 대리
- 2000년 1월~2017년 9월 : 이오테크닉스 부장
- 2017년 10월~현재: 애니모션텍 연구소장
- 2019년 3월~현재: 인하대학교 박사과정

< 관심분야 >  
사출성형 및 금형, 유동해석, 레이저 가공

### 고 강 호(Kang-Ho Ko)



- 2009년 2월 : 한국기술교육대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2010년 8월~2013년 2월 : 한미반도체(주) 생산부, 계장
- 2013년 3월~현재: 경기인력개발원 컴퓨터응용설계제작과, 교사

< 관심분야 >  
사출성형 및 금형, 유동해석

**이 정 우(Jung woo Lee)**



- 2020년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2020년 3월~현재: 인하대학교 기계공학과 대학원 박사과정

< 관심분야 >

사출성형 및 금형, 유동해석

**임 등 욱(Dong-Wook Lim)**

[학생회원]



- 2019년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (석사)
- 2019년 3월~현재 : 인하대학교 기계공학과 (박사과정)

< 관심분야 >

금형 및 성형 해석