

# 다물체 동역학 해석을 이용한 커버글라스 Edge 연마용 Abrasive Film Polishing 시스템 개발

하석재<sup>1</sup>, 조용규<sup>1</sup>, 김병찬<sup>1</sup>, 강동성<sup>1</sup>, 조명우<sup>1\*</sup>, 이정우<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>인하대학교 기계공학과, <sup>2</sup>(주)위시스

## Development of Abrasive Film Polishing System for Cover-Glass Edge using Multi-Body Dynamics Analysis

Seok-Jae Ha<sup>1</sup>, Yong-Gyu Cho<sup>1</sup>, Byung-Chan Kim<sup>1</sup>, Dong-Seong Kang<sup>1</sup>,  
Myeong-Woo Cho<sup>1\*</sup>, Woo-Jung Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Inha University  
<sup>2</sup>WISYS

**요약** 최근 스마트폰, 태블릿 PC 및 전자기기 등의 사용이 증가함에 따라 커버글라스의 수요가 증가하고 있는 추세이다. 모바일 기기의 디스플레이가 대형화되면서 접촉이나 낙하 등과 같이 외부에서 힘을 받게 되는 환경에서 높은 강도를 유지하는 것이 요구되고 있다. 커버글라스 제작 공정에서 연마공정은 커버글라스의 표면거칠기 및 충분한 강도를 제공하는 중요한 공정이다. 기존 연삭 스톱에 의한 가공방법은 커버글라스 가공표면에 스크래치, 칩핑, 노칭 및 마이크로 크랙 등의 가공 문제점이 발생한다. 따라서 본 연구에서는 모바일 커버글라스의 연마를 위해 연마필름을 이용한 폴리싱 시스템을 개발하였다. 구조적 안정성을 평가하기 위해 연마 필름 폴리싱 시스템에 대한 유한요소모델을 생성하였고 다물체 동역학 해석을 수행하였다. 연마 필름 폴리싱 시스템에 대한 응력 및 변위 해석을 통해 특성을 분석하였고 레이저 변위 센서를 이용해 제작된 시스템에 대한 변위를 측정하여 구조적 안정성에 대해 확인하였다.

**Abstract** In recently, the demand of cover-glass is increased because smart phone, tablet pc, and electrical device has become widely used. The display of mobile device is enlarged, so it is necessary to have a high strength against the external force such as contact or falling. In fabrication process of cover-glass, a grinding process is very important process to obtain high strength of glass. Conventional grinding process using a grinding wheel is caused such as a scratch, chipping, notch, and micro-crack on a surface. In this paper, polishing system using a abrasive film was developed for a grinding of mobile cover-glass. To evaluate structural stability of the designed system, finite element model of the polishing system is generated, and multi-body dynamic analysis of abrasive film polishing machine is proposed. As a result of the analysis, stress and displacement analysis of abrasive film polishing system are performed, and using laser displacement sensor, structural stability of abrasive film polishing system is confirmed by measuring displacement.

**Keywords** : Abrasive film, Cover-Glass, Multi-Body Dynamics, Oscillation module

---

본 논문은 중소기업청 혁신기업기술개발사업의 일환으로 수행중인 ‘두께 500 $\mu$ m이하 디스플레이용 커버글라스의 Edge chipping 최소화를 위한 Film Type Polishing 시스템 개발(S2166577)’과제 연구비 지원으로 수행되었음.

\*Corresponding Author : Myeong-Woo Cho (Inha University)

Tel: +82-32-860-7306 email: chomwnet@inha.ac.kr

Received August 31, 2015

Revised October 7, 2015

Accepted October 8, 2015

Published October 31, 2015

## 1. 서론

커버글라스는 커버 렌즈의 일종으로 본래 LCD를 보호하는 역할을 수행하지만, 최근 스마트 모바일 및 태블릿 PC의 슬림화, 경량화, 제로 베젤(zero bezel)등 시장의 요구를 해결하기 위해 터치 패널과 더불어 화학강화를 거친 커버글라스 시장이 급성장하고 있다. 또한, 디스플레이 패널의 경박단소화를 위해 글라스 슬리밍(glass slimming)공정 기술이 요구되고 있으며, 글라스 슬리밍은 디스플레이 패널을 케미컬로 양면 식각하여 패널의 두께와 무게를 40% 이상 감소시킬 수 있고, 패널 두께의 감소로 화면 굴절율이 감소되고 투과율이 향상되어 디스플레이 패널의 품질 향상에 크게 기여하고 있다[1]. 일반적인 커버글라스 제조 공정은 절삭, 연마 등과 같은 물리적 가공과 화학 강화, 베젤 인쇄, 그리고 기능성 코팅(functional coating)등 총 4단계로 구분된다[2]. 기존 커버글라스 가공에 적용되고 있는 연삭숫돌에 의한 가공의 문제점은 글라스 가공 중 발생하는 장비의 진동에 의해 절단면에 수직한 방향으로 응력이 발생되어 가공표면에 스크래치(scratch), 칩핑(chipping), 노칭(notch), 크랙(crack)이 발생되며 이로 인한 불량과 글라스의 강도를 저하 시키는 원인이 된다[3]. 따라서 기존 커버글라스 가공 시 연삭숫돌 및 레이저 방식이 아닌 새로운 연마가공법 및 시스템이 필요하다.

본 연구에서는 기존 연삭숫돌이 아닌 폴리싱이 가능한 미립자 연마 필름을 이용한 폴리싱 시스템에 대한 제작 및 평가를 수행하였다. 연마 필름의 형태는 기존에는 시트(sheet) 및 벨트(belt)형태에서 테이프(tape)형상으로 다양화되어 기존 연마 벨트를 이용한 연마 방법의 한계를 극복할 수 있는 기반을 마련하였다[4].

최근 개발되고 있는 연마 필름은 연마 입자를 고분자 수지 접착제와 혼합하여 폴리에스테르, PET 등의 기재 상에 균일하게 도포한 것으로 롤 형태의 연마 필름으로 제조되어, 기존 연삭숫돌에 비해 연삭숫돌의 밸런싱, 드레싱, 트루잉 공정 등이 필요하지 않고 연마 시스템의 운영 및 설치가 비교적 간단하다는 것이 장점으로 부각되면서 다양한 산업 분야에서 초정밀 연마 및 최종 마무리 공정에 적용되고 있다[5].

따라서 본 연구에서는 커버글라스 엣지 가공을 위해 연마필름을 이용한 폴리싱 시스템 설계와 다물체 동역학 해석을 통한 폴리싱 시스템의 구조적 안정성 평가를 수

행하였다.

## 2. Abrasive Film Polishing 시스템 제작

본 연구에서는 기존 벨트 연마 형태와 유사한 메커니즘을 가지고 연마 벨트 대신 롤 형태의 연마 필름을 사용하는 Abrasive film polishing 시스템을 설계 및 제작하였다. Fig. 1은 연마 필름을 이용한 Abrasive film polishing 시스템을 나타내고, 기본 구성은 새로운 연마 필름을 공급하기 위한 공급 롤러(supply roller)와 사용된 연마 필름을 회수하기 위한 연마 필름 회수 롤러(withdrawl roller)로 구성되고, 공작물과 연마필름을 접촉하여 연마하기 위한 접촉 롤러(contact roller)와 접촉 롤러를 전/후진시키고 연마 공정 시 균일한 접촉 압력을 유지하기 위한 에어실린더(air cylinder)로 구성되고, 접촉 롤러에 좌/우 진동을 인가하기 위해 Fig. 2와 같이 모터의 회전운동을 직선운동으로 변환시켜 줄 수 있는 크랭크(crank)와 캠(cam)으로 구성된 오실레이션(oscillation)모듈로 구성되어 있다.

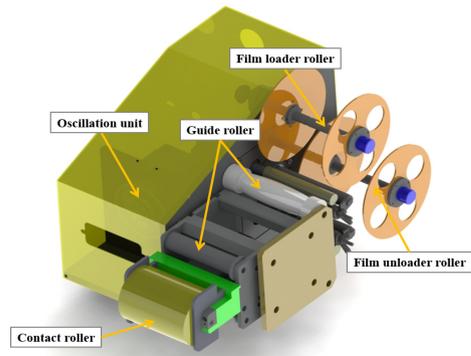


Fig. 1. The structure of abrasive film polishing system

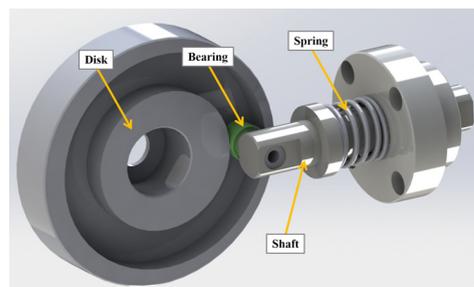


Fig. 2. The structure of the oscillation module

본 연구에서 제작한 Abrasive film polishing 시스템의 구동은 연마 필름이 공급 롤러와 회수 롤러에 의해 연마 필름이 이송되며, 롤러 앞단에 설치되어 있는 장력 조정 장치에 의해 일정한 장력을 유지하며 연마 필름이 이송된다. 또한, 접촉 롤러는 오실레이션 모듈에 의해 연마 공정 시 일정한 주기를 가지고 축 방향으로 가진시켜 연마 공정을 수행한다.

오실레이션 모듈에서 설계 초기의 스프링 직경은 2.5mm을 선정하여 장착하였고, 디스크의 편심 길이는 2.0mm을 사용하였다. 제작한 Abrasive film polishing 시스템의 구동 테스트 결과에서 Fig. 3과 같이 디스크와 캠 샤프트를 연결하는 구동 베어링의 파손을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 디스크와 캠 샤프트를 연결하는 베어링에 대하여 스프링 직경에 따른 응력 분석 및 캠 샤프트의 상대 속도를 다물체 동역학 해석을 이용하여 분석하였다.

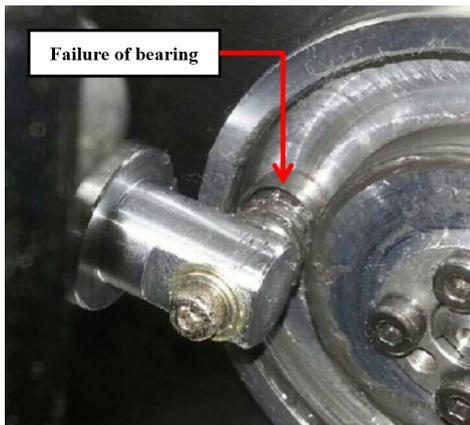


Fig. 3. Failure of bearing in the oscillation module

### 3. 오실레이션 모듈의 동역학 해석

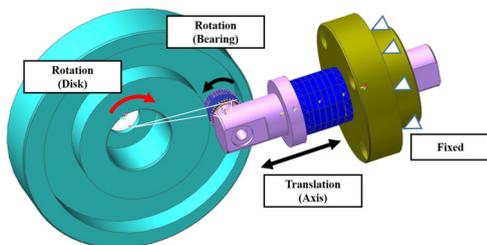


Fig. 4. Dynamic model of the oscillation module

Abrasive film polishing 시스템에서 오실레이션 (oscillation) 모듈에 대하여 동적 하중에 대한 동역학 해석을 수행하였다. 동역학 해석에 사용된 소프트웨어는 Recurdyn V8R2(FunctionBay)을 사용하였다. 동역학 해석을 위해 Fig. 4와 같이 동적 모델을 구성하여 가진 축과 가이드 홀더 사이에 스프링을 장착하였고, 하중이 집중되는 베어링 부품을 유한요소모델로 설정하여 디스크와 스프링 하중에 의해 발생하는 베어링의 응력 분포를 분석하였다. 이때 스프링 권선 직경 변화에 따라 스프링 하중의 크기가 변화하게 되는데 아래와 같은 수식으로 계산하였다.

$$P = K\delta$$

여기에서 P는 스프링에 작용하는 하중, K는 스프링 상수,  $\delta$ 는 스프링의 처짐량을 의미한다. 이 때 스프링 상수는 다음과 같이 표시된다.

$$K = \frac{G \times d^4}{8 \times N_a \times D^3}$$

여기에서 G는 스프링 재료의 전단계수, d는 스프링의 권선 직경,  $N_a$ 는 스프링의 유효권수, D는 스프링의 중심경을 나타낸다.

Table 1. Specification of spring for dynamic analysis

Item	Specification
Shear modulus of material (G)	8,000 GPa
Mean diameter (D)	19.5 mm
Number of active coil ( $N_a$ )	4
Free length of spring	30 mm
Compressed length	18 mm

Table 2. Condition of FEM model for bearing

Item	Specification	
Mesh type	Sweep mesh	
Mesh size	0.2 mm	
Nodes	6,769	
Elements	5,617	
Material Property (Steel)	Young's Modulus	200 GPa
	Density	7.85 kg/m <sup>3</sup>
	Shear Modulus	77.8 GPa

따라서 본 연구에서는 Table 1과 같이 동일한 재질

및 스프링 유효권수, 중심경을 가지는 스프링에 대하여 권선 직경을 2.5mm, 2.0mm, 1.5mm으로 변화시켰을 때 작용하는 동적 하중을 하중조건으로 설정하였다. 앞선 스프링 하중은 수식에 의해 스프링 선경 2.5mm일 때 154.9N, 2.0mm일 때 68.6N, 1.5mm일 때 23.5N이 작용하게 된다. 이러한 스프링 하중조건을 설정하여 베어링에 작용하는 응력을 분석하기 위해 베어링에 대한 유한요소모델을 생성하였고, 해석에 사용한 경계조건은 Table 2에 나타내었다.

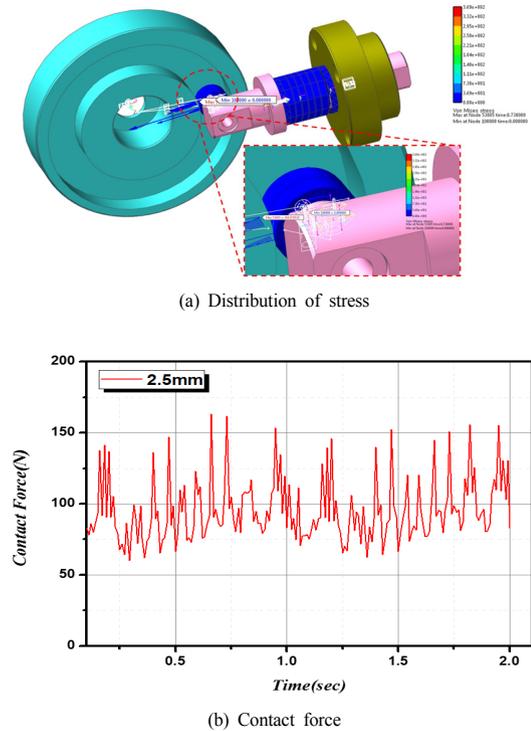


Fig. 5. Result of dynamic analysis case of d=2.5mm

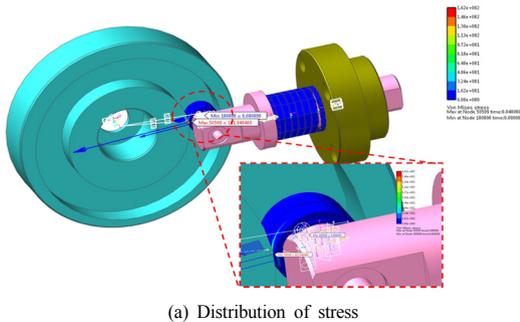


Fig. 6. Result of dynamic analysis case of d=2.0mm

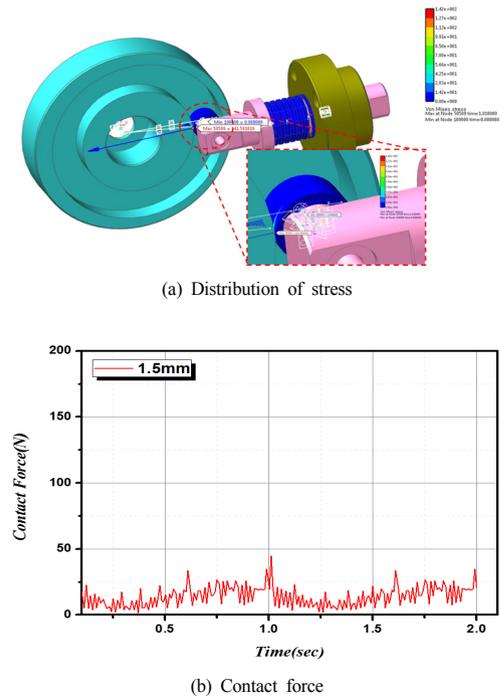


Fig. 7. Result of dynamic analysis case of d=1.5mm

Fig. 5는 스프링 권선 직경이 2.5mm일 때의 해석 결과로 베어링의 이송 방향이 변화하는 순간에 원형 디스크의 모서리 부분에서 약 368MPa로 응력 값이 최대로 나타났으며, 이는 베어링의 항복 강도 317MPa보다 높은 응력이 작용하는 것을 확인하였다. 이때 베어링과 원형 디스크의 접촉반력은 최대 163.2N이 작용하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 4와 Fig. 5는 스프링 권선 직경이 각각 2.0mm, 1.5mm일 때의 해석 결과로 원형 디스크의 두께가 최대인 지점을 지날 때 응력이 최대가 나오는 경

향은 동일하나 작용하는 응력은 스프링 권선 직경 2.0mm일 때 161.9MPa, 1.5mm일 때 141.6MPa로 나타났다, 베어링과 원형 디스크의 접촉 반력은 권선 직경 2.0mm일 때 최대 64.6N, 1.5mm일 때 최대 44.8N이 작용하는 것을 확인할 수 있었다.

따라서 스프링 권선 직경이 감소함에 따라 스프링 상수와 스프링 하중이 감소하여 베어링에 작용하는 응력이 감소하는 것을 확인하였다.

Fig. 6에서 Fig. 8은 스프링 권선 직경의 크기에 따른 가진 축의 상대 속도 변화를 나타낸 것으로 스프링 직경이 감소함에 따라 오실레이션(oscillation)모듈의 상대 속도 변화 폭이 감소함을 알 수 있다. 이는 스프링 권선 직경이 증가할수록 스프링이 복원되는 힘과 복원되는 속도가 증가함에 따른 것으로 판단된다.

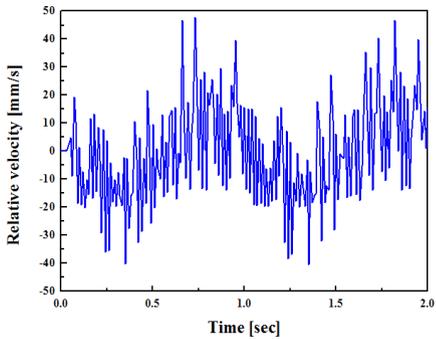


Fig. 8. Result of relative velocity case of d=2.5mm

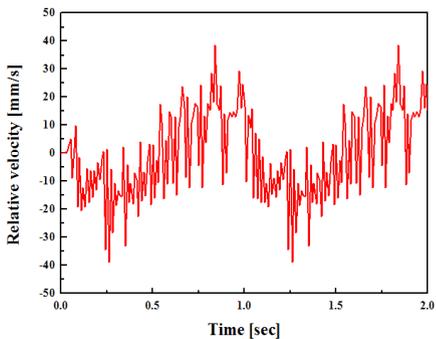


Fig. 9. Result of relative velocity case of d=2.0mm

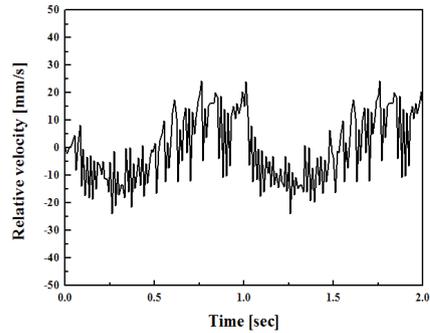


Fig. 10. Result of relative velocity case of d=1.5mm

가진 축의 상대 속도는 연마 시 에어 실린더가 이동되는 속도로 작용하며, 상대 속도가 감소하게 되면 Preston law[6]에 의하여 연마 지점의 선속도가 감소하게 되며, 이는 재료 제거율을 감소시키게 되는 원인으로 작용한다. 따라서 응력 및 상대 속도 분석 결과를 바탕으로 시스템의 안정성과 연마 효율 증대를 고려하여 선경이 2.0mm인 스프링을 진동 모듈에 사용하였다.

#### 4. 시스템 평가

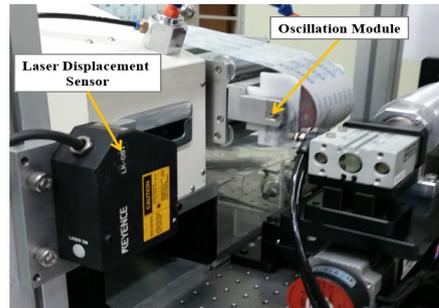


Fig. 11. Photograph of experiment set-up for measurement of displacement

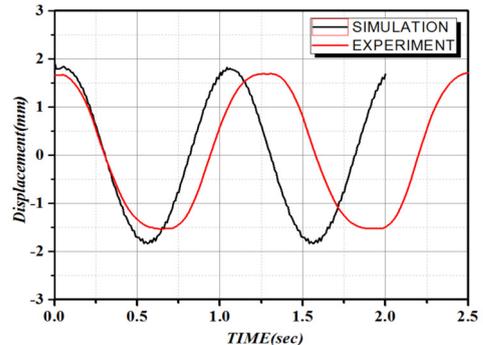


Fig. 12. Displacement of the oscillation module according to time

앞선 다물체 동역학 해석 결과를 바탕으로 Abrasive film polishing 시스템의 오실레이션(oscillation)모듈에 대한 변위 측정을 수행하였다. Fig. 10은 오실레이션(oscillation)모듈의 변위 측정을 위해 레이저 변위 센서를 이용한 측정 시스템을 나타낸다. 오실레이션 모듈의 구동 조건은 다물체 동역학 해석 결과를 기반으로 구동 속도를 1Hz로 설정하여 측정하였다. Fig. 11은 오실레이션(oscillation)모듈에서 디스크의 회전에 따른 가진 축의 위치 변화를 다물체 동역학 해석결과와 레이저 변위 센서를 이용한 결과를 나타낸 것으로 변위 측정 결과 전체적으로 사인(sine)함수 형태로 나타나며, 해석 결과에서는 변위가 4.0mm로 확인되었으며, 실험 결과는 약 3.8mm이며, 오실레이션 모듈의 구동 속도는 0.8Hz로 확인되었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 모바일 커버글라스 Edge 가공을 위한 Abrasive film polishing 시스템을 제작하였으며, 이에 대한 구조적 안정성 평가를 위해 다물체 동역학 해석을 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 제작된 Abrasive film polishing 시스템의 오실레이션 모듈에서 디스크와 캠 샤프트의 동력전달을 위한 베어링이 파손되어, 동적 하중에 의한 구조적 안정성 평가를 위해 스프링 권선 직경 변화에 따른 베어링의 응력 분포를 다물체 동역학 해석을 수행하였다.
- (2) 해석 결과 스프링 직경이 2.5mm에서 응력은 베어링의 항복강도 보다 높은 응력이 작용하는 것을 확인하였으며, 다물체 동역학 해석 결과로 최종 선정된 스프링 권선 직경 2.0mm 이며, 이때 작용하는 응력은 161.9MPa, 접촉 반력은 64.6N로 확인되었다.
- (3) 오실레이션 모듈의 변위를 동적 해석 결과와 레이저 변위 센서를 이용하여 제작된 시스템에 대한 변위를 분석하였으며, 해석 결과 변위는 4.0mm, 레이저 변위 센서 측정 결과는 약 3.8mm로 확인하였으며, 이를 기반으로 모바일 커버글라스 Edge 가공을 위한 Abrasive film polishing 시스템에 대한 구조적 특성을 확인할 수 있었다.

## References

- [1] Yang, S. J., "Jumped into the High-Tech Material Competition", LG Enocnomic Research Institute, 2012
- [2] Displaybank, Korea, "Capacitive Touch Panel Cover Glass Processing Technology", Manufacturing Process, and Market Forecast, 2012.
- [3] Mohajerani, A., Spelt, J. K., "Edge Chipping of Borosilicate Glass by Blunt Indentation", Mechanics of Materials, 42(26), pp.1064-1080, 2010.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechmat.2010.10.002>
- [4] Vereinigte Schmirgel-und Maschine-Fabriken, "VSM High Tech Series", Version 1104/E05-HiTech 01, 2005.
- [5] 3M Korea Co., Ltd, "Superabrasive and Microfinishing System Product Guide", 2005.
- [6] F. W. Preston, "The theory and design of plate glass polishing machines", J. Soc. Glass Tehcnol.,Vol. 11, pp.214-256, 1927.
- [7] FuctionBay Inc., "RecurDyn User Manual", <http://www.functionbay.co.kr>.

### 하 석 재(Seok-Jae Ha)

[정회원]



- 2006년 2월 : 서울산업대학교 금형설계학과 (공학사)
- 2010년 2월 : 인하대학교 기계공학과 대학원 (공학석사)
- 2015년 8월 : 인하대학교 기계공학과 대학원 (공학박사)
- 2015년 9월 ~ 현재 : 인하대학교 기계기술공동연구소 연구원

<관심분야>

마이크로 절삭 모니터링, 마이크로 생산 시스템

### 조 용 규(Yong-Kyu Cho)

[정회원]



- 2010년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학사)
- 2012년 2월 : 인하대학교 기계공학과 대학원 (공학석사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 인하대학교 기계공학과 대학원 박사과정

<관심분야>

Maskless Lithography

김 병 찬(Byung-Chan Kim)

[준회원]



- 2014년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 인하대학교 기계공학과 석사과정

<관심분야>  
초정밀 연마

이 정 우(Jung-Woo Lee)

[정회원]



- 2007년 8월 : 숭실사이버대학교 벤처경영학과 (학사)
- 2004년 7월 ~ 현재 : (주) 위시스 대표이사

<관심분야>  
자동화 생산설비, 머신비전 검사시스템

강 동 성(Dong-Seong Kang)

[정회원]



- 2015년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 인하대학교 기계공학과 대학원 박사과정

<관심분야>  
반도체, LED 정량 토출 시스템, 마이크로 생산 시스템

조 명 우(Myeong-Woo Cho)

[정회원]



- 1983년 2월 : 서울대학교 기계설계과 (공학사)
- 1985년 2월 : 서울대학교 기계설계과 대학원 (공학석사)
- 1985년 ~ 1989년 : 한국생산성본부 자동화 사업부 전문위원
- 1992년 2월 : University of Illinois (공학박사)
- 1993년 1월 ~ 1997년 1월 : 대우전자 시스템 사업부 부장
- 1997년 2월 ~ 현재 : 인하대학교 기계공학과 교수

<관심분야>  
CAD/CAM/CAI, 마이크로 생산 시스템, 머신 비전