

백색 LED 제조를 위한 정전기력과 보이스코일모터를 이용한 디스펜서 시스템 개발

강동성¹, 김기범¹, 하석재¹, 조명우^{1*}, 이정우²
¹인하대학교 기계공학과, ²(주)위시스

Development of Dispenser System with Electrohydrodynamic and Voice Coil Motor for White Light Emitting Diode

Dong-Seong Kang¹, Ki-Beom Kim¹, Seok-Jae Ha¹,
Myeong-Woo Cho^{1*}, Woo-Jung Lee²

¹Department of Mechanical Engineering, Inha University
²WISYS

요약 LED(Light Emitting Diode)는 저 전력, 긴 수명, 고 휘도, 빠른 응답, 친환경적 특성으로 인해 조명, 디스플레이 등 여러 분야에 사용되고 있다. 백색광 발광다이오드 구현 방식에는 대표적으로 청색 LED 칩과 황색 형광체를 조합하여 백색광을 방출하는 유형이 사용 편리성, 경제성, 효율성 측면에서 LED 백라이트 유닛 및 LED 조명 제조에 가장 적합한 것으로 연구되어 실제 적용되고 있다. 백색광 구현 LED 칩 패키징 공정에서 청색 LED 칩에 황색 형광체에 실리콘을 혼합한 형광봉지재를 토출하는 공정은 중요한 공정이다. 따라서 본 연구에서는 조명용 백색 LED 제조 공정에서 실리콘 봉지재를 토출하기 위하여 정전기력 방식과 보이스코일 모터를 이용하여 EHD 펌프 시스템을 개발하였다. 이를 위하여 인가전압 및 시간에 따른 유체곡면 형상을 확인하기 위하여 기초 토출 실험을 통해 최적의 토출 조건이 결정하였고 또한 검증을 위하여 실험계획법을 사용하였다. 검증된 토출 조건의 균일도를 확인하기 위하여 반복 토출 실험을 수행하였다.

Abstract LED(Light Emitting Diode) is used in various filed like a display because of low power consuming, long life span, high brightness, rapid response time and environmental-friendly characteristic. General fabrication method is combination blue light LED chip with yellow fluorescent substance. Because this way is suitable for industry field in terms of convenience, economic, efficiency. In white light LED packaging process, encapsulation process that is dispensing fluorescent substance with silicon to blue light LED chip is most important. So, in this paper we develop EHD pump system using voice coil motor and electrostatic pump for dispensing fluorescent substance. For these things we conduct basic test about liquid surface profiles by voltage and process time. Through this data we decide optimal process condition and verify the optimal condition using design of experiment method. And to confirm uniformity of the condition, we conduct repeat dispensing test.

Keywords : LED(Light Emitting Diode), Dispensing process, EHD(Electro-hydrodynamics), VCM(Voice Coil Motor), Encapsulation materials

본 논문은 신성장동력장비 경쟁력강화사업의 일환으로 수행중인 ‘백색 LED 구현을 위한 칩/패키지 형광체 Conformal 코팅장비 개발(10043471)’ 과제 연구비 지원으로 수행되었음.

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

Tel: +82-10-3388-7306 email: chomwnet@inha.ac.kr

Received August 20, 2015

Revised October 7, 2015

Accepted October 8, 2015

Published October 31, 2015

1. 서론

LED(Light Emitting Diode)는 저 전력, 긴 수명, 고 휘도, 빠른 응답, 친환경적 특성으로 인해 조명, 디스플레이 등 여러 분야에 사용되고 있는데, 특히 고출력 백색 LED는 최근 각종 조명 등의 응용 시스템에 많이 사용되고 있다[1]. 조명용 백색 LED의 특성 중 수율(Yield)과 가장 관련이 있는 색좌표(Color Coordinates), 색온도

(Color Temperature), 광속(Luminous Flux) 등의 특성은 형광체의 양, 배치 위치 등과 관련성이 높아서 LED제조 공정 중 형광체를 도포하는 봉지공정이 백색 LED 패키지 공정에서 가장 핵심 부분에 해당한다. 일반적인 백색 LED 제작 방식은 LED 패키지 프레임 내부에 형광체를 여기하기 위한 청색광을 방출하는 청색 LED 칩을 다이본딩(Die Bonding), 와이어본딩(Wire Bonding)을 통해 실장한 후, LED 칩 위 혹은 주변에 분말형태의 황색 형광체를 함유한 형광체 슬러리를 토출(Dispensing) 등의 방법으로 배치하고 형광체 슬러리를 열경화하여 백색 LED를 제작한다. 일반적인 백색 LED에 형광체 슬러리를 배치하는 방법은 일정량의 형광체 분말을 투명하고 화학적으로 안정한 실리콘(Silicone) 혹은 에폭시(Epoxy) 수지와 같은 봉지물질(Encapsulant)에 균일하게 분산시킨 분말형태의 형광체 봉지재를 혼합하여 정량토출을 한다[2~4]. 이때 분말인 형광물질이 균일하게 분포되지 않으면 LED 칩으로부터 방출되는 백색 광원이 균일한 색감 표출을 제공하지 못하는 문제가 발생할 수 있다[4]. 일반적으로 조명용 백색 LED 제작 시 생산 수율은 약 10% 이내이며, 생산 수율을 만족하기 위해서는 형광 봉지재의 토출 분해능이 0.01mg이하의 미세 정량 토출 시스템 및 공정기술이 필요하다[5].

따라서 본 연구에서는 형광체 봉지재의 미세 정량 토출을 위해 정전기력(Electro-Hydrodynamic, EHD)원리와 고정밀 제어와 반응속도를 증대시키기 위한 보이스코일 모터(Voice Coil Motor, VCM)를 이용하여 형광체 봉지재의 미세 정량 토출을 위한 정전기력 펌프 시스템의 제작 및 평가를 수행하였다. 정전기력 펌프 시스템의 평가를 위해 토출에 영향을 미치는 중요한 인자인 인가전압, 인가시간 조건에 따른 유체 토출 형상 및 토출량을 분석하였고 도출된 최적 조건에서의 토출량 균일성 실험을 진행하였다.

2. 정전기력 펌프 메커니즘 및 시스템 제작

일반적인 정전기력(Electrohydrodynamics, EHD)의 원리는 유체가 전기적인 힘을 받게 되면 정전 효과에 의해 유체 표면에 전하가 모이고 계속해서 전기적인 힘을 인가하면 유체의 표면은 전하가 포화상태에 이르게 되며 유체의 표면적은 증가되어 유체의 깨짐 현상(break-up)이 발생한다[6]. 이러한 유체의 깨짐 현상은 전압의 크기로 결정된다. Fig. 1은 정전기력의 원리를 나타낸다. 이러한 원리를 이용한 것이 정전기력 잉크젯(Electrohydrodynamics Inkjet)이며, 일반적으로 정전기력 잉크젯 노즐 부분에 고전압을 인가하면 전기장의 힘이 유체의 점성 및 표면장력보다 커지게 되면 타원형 형태(Meniscus)의 끝 부분에서 노즐보다 작은 액적이 토출된다.

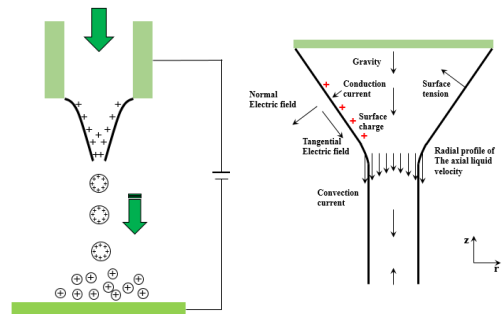


Fig. 1. Schematic of electrohydrodynamic jet

정전기력 잉크젯에서 유체에 작용하는 힘은 중력, 유체 표면장력, 정전기력 총 3가지로 구분할 수 있다. 유체를 대상물 방향으로 이동시키는 힘은 이 3가지 힘의 합력으로 결정된다. 이때 토출된 액적 크기는 노즐 지름의 0.1 ~ 0.5배 수준으로 토출이 가능하다. 일반적인 잉크젯 방식에 비해 상대적으로 큰 지름의 노즐을 사용하여 미세액적 토출 구현 가능하며, 토출된 미세 액적은 직진성이 우수하다[7~9]. 또한 정량 토출을 목적으로 연속적인 유체 공급과 유체 형상 크기를 제어하기 위해 정밀 공압 유닛이 사용되고 있다[9].

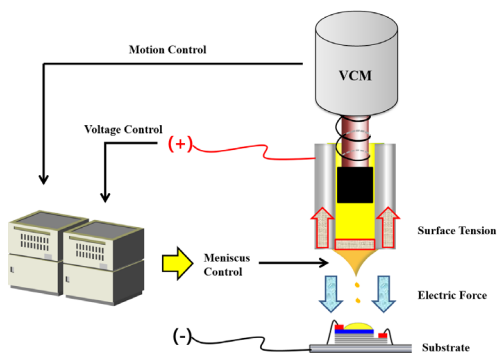


Fig. 2. Schematic of the EHD pump system

하지만 기존 공압을 이용한 토출 시스템은 저점도의 유체만이 사용이 가능하다. LED 패키지 제조 공정에서 사용하는 형광체 봉지재는 대부분이 고점도 유체를 사용하여 기존 공압을 이용한 토출 시스템은 사용이 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 LED 패키지 공정 중 형광체 봉지재 토출을 위해 정전기력 방식과 공압 방식이 아닌 고속 토출 및 고정밀 제어를 위해 보이스코일모터를 장착하여 EHD 펌프 시스템을 제작하였다.

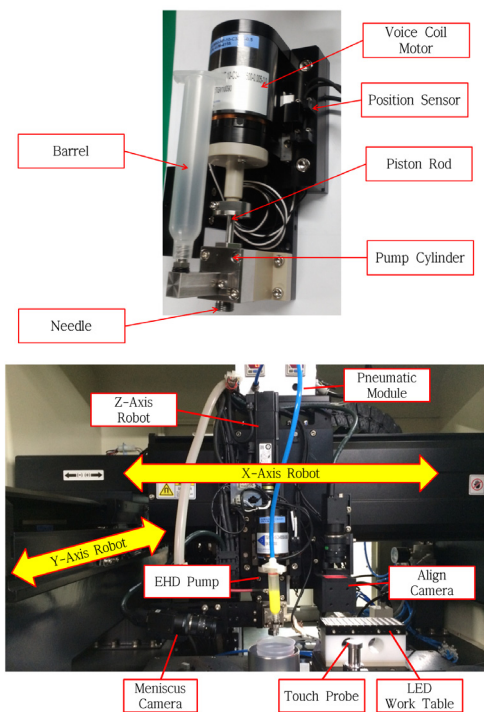


Fig. 3. System of electrohydrodynamic pump

Fig. 2는 EHD 펌프의 토출 시스템의 개념도를 나타낸다. Fig. 3은 본 연구에서 제작한 EHD 펌프 시스템의 구성은 토출 헤드 부(EHD+VCM head), 정밀로봇 이송부(Precision motorized stage), 펌프 위치 감지 센서(Touch Probe), 고전압 증폭기(High Voltage Amplifier)와 신호 제어기(Function synthesizer), 실시간 토출 유무 확인과 자재 위치 감지를 위한 카메라(Machine Vision System)로 구성된다.

3. 유체곡면(Meniscus)형성 구현 실험

정전기력 잉크젯 및 본 연구에서 개발한 EHD 펌프 시스템에서 가장 기초가 되는 공정조건은 인가전압 및 인가 시간에 따른 토출 특성이다. 따라서 본 연구에서는 개발된 EHD 펌프 시스템의 토출 특성을 확인하기 위해 유체곡면(Meniscus) 형상 구현 실험을 수행하였다. 유체곡면 형상 구현의 원리는 유체에 전기를 인가하게 되면 정전 효과에 의해 유체 표면에 전하가 모이고 극성을 띠게 된다. 이에 따라 전기적 인력이 발생하여 유체가 대상물로 이동하게 된다. 이동하는 유체의 크기는 전하의 공급 정도에 따라 달라지기 때문에 인가되는 전압, 시간에 따라 유체 곡면의 형성이 변화 된다[11~12]. 본 연구에서는 펄스 신호 한 번을 인가하여 한 개의 유체 액적이 토출되는 DoD(Drop on Demand)제어 방식을 사용하여 기초 토출 실험을 수행하였다. DoD 방식의 공정단계는 유체곡면(Meniscus) 형성 단계와 미세 액적 토출 단계로 나눌 수 있으며, Fig. 4는 본 논문에서 개발한 EHD 펌프 시스템의 액적 토출 모드를 나타낸다.

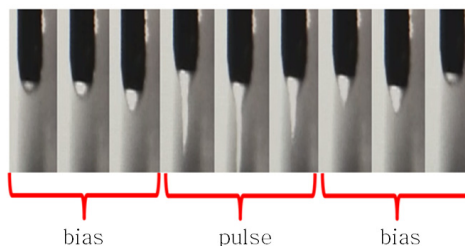


Fig. 4. Cone-jet mode of EHD pump system

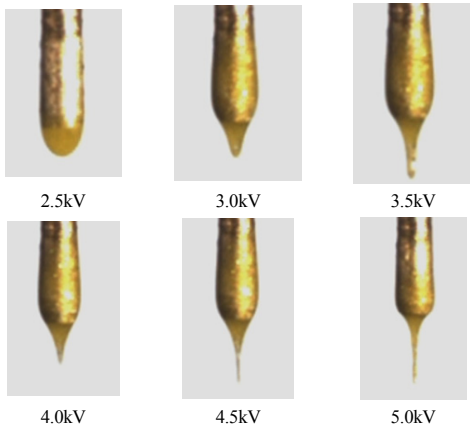


Fig. 5. Result of meniscus shape with a various voltage

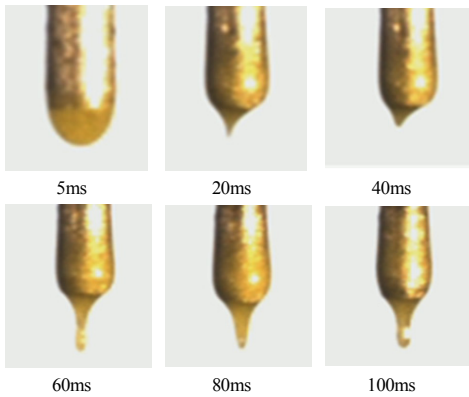


Fig. 6. Result of meniscus shape with a various pulse

EHD 펌프의 인가전압에 따른 유체곡면 형상을 확인하기 위하여 전압 파형은 50ms와 펌프 노즐과 토출 대상물과의 거리는 2.0mm로 고정하고 인가전압 변화에 따른 유체곡면 형상을 확인하였다. 인가전압에 따른 유체곡면 형상에서 사용된 실리콘 봉지재의 점도는 2,500cP인 OE-6630(Dow Corning)을 사용하였다. Fig. 5는 인가전압에 따른 유체곡면 형상을 나타낸다. 형상 측정 결과 인가전압 3.0kV이하에서는 유체곡면 형상은 되었지만 유체 토출이 불안정하였고, 인가전압 5.0kV이상에서는 유체곡면 형상이 불균일하게 토출되고, 실리콘 봉지재가 탄화되는 현상이 확인되었다. 인가전압 3.5kV~4.5kV에서의 낮은 전압에서 노즐 끝단의 액적의 크기가 커서 토출량이 많아지고, 높은 전압에서는 액적크기가 작아져서 토출량이 작아지는 것을 확인하였다. Fig. 6은 인가전압 시간에 따른 유체곡면 형상을 나타낸다. 실

험결과 인가전압 시간 5ms에서는 유체곡면 형상이 나타나지 않았고, 20ms에서는 실리콘 봉지재가 노즐 중앙부분에 형성되지 않고 측면으로 형성이 되는 것을 확인하였다. 인가전압 시간이 40ms~80ms까지 유체곡면의 각도가 커지면서 토출량이 증가되는 것을 확인하였다. 100ms에서는 유체곡면은 형성 되었지만, 노즐 끝단 부분에서 테일(Tail)현상이 발생하였다.

따라서 본 연구에서는 EHD 펌프의 인가전압과 시간에 대한 최적조건을 선정하기 위하여 2인자 5수준 실험계획법을 사용하여 토출 조건을 선정하였다. 실험결과로는 EHD 펌프 노즐 끝단에서의 유체곡면 형상을 정의하여 토출실험에서의 결과로 사용하였다.

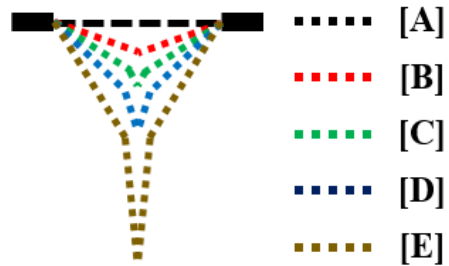


Fig. 7. Criteria of a fluid shape

Fig. 7과 같이 EHD 펌프 노즐 끝단에서의 형상을 5가지로 구분하였다. 노즐 끝단 형상이 A의 경우는 정전기적 인력이 충분하지 않아 유체 곡면이 형성되지 않는 형상이며, B와 C의 경우 유체 곡면은 형성이 되었으나 정전기적 인력에 의하여 유체가 길어지는 현상인 테일(Tail)이 짧아서 유체가 충분히 토출되지 않는 형상을 의미한다. D의 경우 안정적 토출에 적합한 테일을 의미하며 E의 경우 테일이 과도하게 길어져서 중간에 끊기는 현상이 발생하며 토출이 불안정한 형상을 나타낸다. EHD 펌프 최적조건 선정에 관한 실험조건은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Conditions of experiment

| Parameters | Value |
|------------------------|-------------------------|
| Voltage [kV] | 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0 |
| Time [ms] | 20, 40, 60, 80, 100 |
| Nozzle diameter [um] | 292 |
| Distance [mm] | 2 |
| Encapsulation material | OE-6630A/B, 2,500cP |

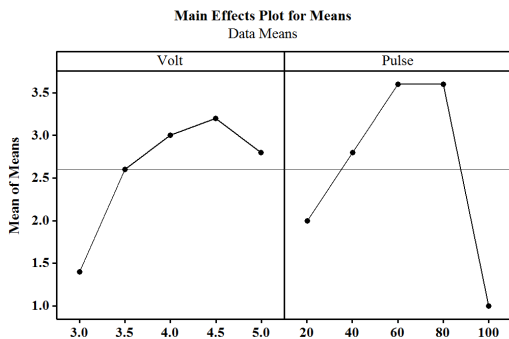


Fig. 8. Main effects plot for means

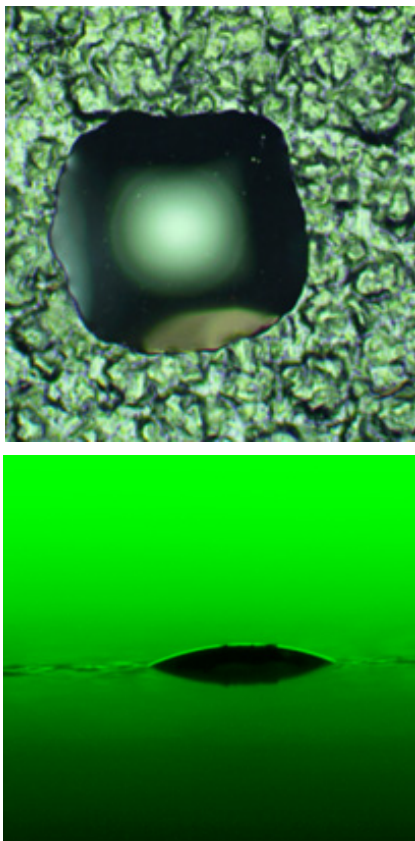


Fig. 9. Fluid shape and dot at 4.5kV, 60msec

실험 결과 인가전압과 인가시간이 증가할수록 EHD 펌프 노즐 끝단 부분에서 토출되는 실리콘 봉지재 테일이 길어지는 것을 확인하였다. Fig. 8은 인가전압과 인가 시간에 따른 주효과 플롯을 나타낸다. 실험결과 EHD 펌프의 최적 토출 조건은 인가전압 4.5kV, 인가전압 시간은 60~80ms로 분석되었다. Fig. 9는 인가전압 4.5kV,

인가전압 시간 60ms일 때 토출된 실리콘 봉지재의 형상을 공구현미경(STM-LM, Olympus, USA)을 이용하여 형상을 나타낸다. 토출된 실리콘 봉지재의 질량은 약 5.2 μg 이고 높이는 18 μm 로 분석되었다.

4. 정전기력 펌프의 균일 토출 실험

앞선 EHD 펌프의 최적 토출 조건을 사용하여 토출 균일도 실험을 수행하였다. 균일도 실험조건은 기초실험에서 사용한 실리콘 봉지재 (OE-6630, Dow Corning, USA)을 사용하였고, 인가전압 4.5kV, 인가전압 시간 60ms로 설정하고, 10 μg 을 목표 질량으로 설정하고 총 100회 반복 토출실험을 수행하였다. Fig. 10은 목표 질량 10 μg 에 대한 EHD 펌프의 토출 편차를 나타낸다. 실험 결과는 토출 질량 평균 9.57 μg 과 편차는 ± 0.4 의 결과를 획득하였다. 향후 EHD 펌프 시스템을 활용하여 형광체를 포함한 실리콘 봉지재의 미세 정량 토출 통해 백색 LED 패키지 공정에서 수율향상이 기대된다.

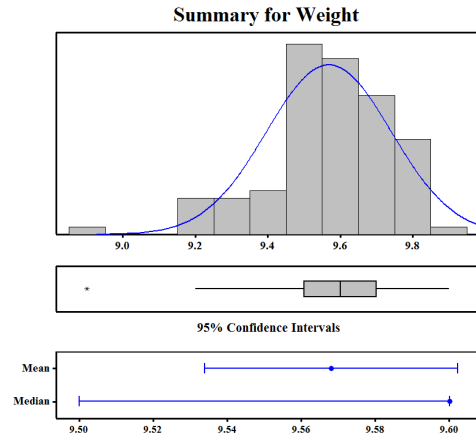


Fig. 10. Standard deviation in dispensing of EHD pump

5. 결론

본 연구에서는 조명용 백색 LED 제조 공정에서 실리콘 봉지재를 토출하기 위하여 정전기력 방식과 보이스코일 모터를 이용하여 EHD 펌프 시스템을 개발하였으며, 이에 대한 성능평가를 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 개발된 토출 시스템을 이용하여 인가전압 및 인가 시간에 따른 기조 토출 실험을 수행하였으며, 실험 결과 인가전압 및 인가시간이 증가함에 따라 실리콘 봉지재의 테일이 길어지는 것을 확인하였다.
- (2) 미세 정량 토출에 대한 최적 조건을 선정하기 위해 2인자 5수준의 실험계획법을 이용하였으며, 그 결과 인가전압 4.5kV, 인가시간 60ms를 도출하였다.
- (2) 최적 토출 조건을 기반으로 100회 반복 토출 실험을 수행하였으며, 실험 결과 실리콘 봉지재의 목표 질량 10 μ g에서 평균 토출 질량 9.57 μ g으로 나타났다으며, 개발된 시스템을 이용하여 백색 LED 제조 공정에서 색좌표 보정에 필요한 형광체 도포 공정에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

References

- [1] J.S. Kim, J. R. Rye, "Process development for reproduction J. L. Bassani, 1977, Yield characterization of metals with transversely isotropic plastic properties, Int. J. Mech. Sci., Vol. 19, pp. 651-656, 2013.
- [2] S. H. Kim, "Screw pump for dispensing LED phosphor wear characteristics", Master of Science, Inha University pp. 6-11. 2011.
- [3] S. J. Ha, J. S. Kim, M. W. Cho, J. M. Choi, "Measurement System for Phosphor Dispensing Shape of LED Chip Package Using Machine Vision", Academia-Industrial cooperation Soc., Vol. 14, No. 5, pp. 2113-2120, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.5.2113>
- [4] D. G. Kim, S.R. Kang, K. C. Lee, "Fabrication of the Emission-Adaptive Phosphor Conformal Coating Layer for White LEDs" The Korean Society For Technology of Plasticity 11th symposium. pp. 80, 2014.
- [5] K. S. Nam, "White LED spectrum measurement & CT.CRI calculation & substitution scheme", Master of Science, Chungnam national university, pp12-52, 2002.
- [6] A. Jaworek and A. Krupa, "Classification of the modes of EHD spraying", Journal of Aerosol Science, Vol. 30, No. 7, pp. 873-893, 1999.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0021-8502\(98\)00787-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0021-8502(98)00787-3)
- [7] J. B. Ko, "Development of Electrostatic Inkjet Head for Printed Electronics," Major of Electronic Engineering, Master of Science, Jeju National University, 2010.
- [8] J. H. Kim, "Electrohydrodynamic drop-on-demand patterning in the pulsed cone-jet mode" KAIST, pp. 12-23, 2008.
- [9] K.S. Kwon, J. H Myong, "Experimental Study on the Relationship between Ink Droplet Volume and Inkjet Waveform", Journal of the Korean society for precision engineering, Vol. 26, No.4, pp. 141-145, 2009.

- [10] J. B. Ko, "Development of Electrostatic Inkjet Head for Printed Electronics, Major of Electronic Engineering", Master of Science, Jeju National University, 2010.
- [11] D. K. Kang, "Experimental Study on Solar Cell Electrode via Electrohydrodynamic (EHD) Inkjet Printing", Master of Science, Korea University, 2012.
- [12] S. W. Kim, Y. J. Yang, H. W. Dang, B. S. Yang, H. B. Kim, K. H. Choi, "A Study of High Viscosity Phosphor Dispensing for an Electrostatic Printing System ", Transactions of Materials Processing, Vol.24, No.2, pp. 83-88, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5228/KSTP.2015.24.2.83>

강 동 성(Dong-Seong Kang)

[정회원]



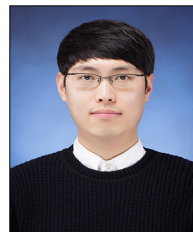
- 2015년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 인하대학교 기계공학과 대학원 박사과정, ㈜ 위시스 연구기획실장

<관심분야>

반도체, LED 정량 토출 시스템, 마이크로 생산 시스템

김 기 범(Ki-Beom Kim)

[정회원]



- 2013년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 인하대학교 기계공학과 대학원 박사과정

<관심분야>

초정밀 연마, 비전 시스템, 마이크로 생산 시스템

하 석 재(Seok-Jae Ha)

[정회원]



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

<관심분야>

마이크로 절삭 모니터링, 마이크로 생산 시스템

조 명 우(Myeong-Woo Cho)

[정회원]



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

<관심분야>

CAD/CAM/CAI, 마이크로 생산 시스템, 머신 비전

이 정 우(Jung-Woo Lee)

[정회원]



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

<관심분야>

자동화 생산설비, 머신비전 검사시스템