http://dx.doi.org/10.7735/ksmte.2016.25.2.124

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.
ISSN 2283-4846(Online) / ISSN 2233-6036(Print)

백색 LED 보정 공정 적용을 위한 고점도 형광체 미세 정량토출 공정

양봉수[a], 양영진[b], 김형찬[c], 고정범[c], 조경호[b*], 도양회[a]

Fine Dispensing Process of High Viscosity Phosphor for Repairing Application of White LED

Bong Su Yang[a], Young Jin Yang[b], Hyung Chan Kim[c], Jeong Beom Ko[c], Kyung Ho Cho[b*], Yang Hoi Doh[a]

[a] Dept. of Electronic Engineering, Jeju Nat'l University, 102, Jejudaehak-ro, Jeju 63243, Korea
[b] Dept. of Mechatronics Engineering, Jeju Nat'l University, 102, Jejudaehak-ro, Jeju 63243, Korea
[c] Jeju Division, Korea Institute of Industrial Technology, 102, Jejudaehak-ro, Jeju 63243, Korea

ARTICLE INFO

Article history:
Received 28 December 2015
Revised 30 March 2016
Accepted 6 Arpil 2016

Keywords:
High-viscosity phosphor
White LED
Electrohydrodynamics (EHD)
Drop on demand (DOD)

ABSTRACT

Several research works for finding and optimizing the methods of dispensing high viscosity phosphor used in the fabrication of white LED's are currently in progress. High viscosity phosphor dispensing with a high accuracy is crucial because the dispensing rate and uniformity directly affect parameters such as the CIE chromaticity diagram, color temperature and luminous flux of white LED's. This study presents a novel method of dispensing high viscosity phosphor using electrohydrodynamic printing. The dispensing rate was optimized less than 0.01 mg phosphor using experiments and optimizing the process parameters including the standoff distance from the nozzle to the substrate, ink supply pressure, and multi-step pulsed waveform magnitude ratio. The dispensing rate was measured by dispensing 20 dots using drop-on-demand with the optimized parameters, and the experiments were repeated 10 times to maximize the data accuracy. The average dispensing rate that can be reliably used for high viscosity phosphor dispensing was 0.0052 mg.

1. 서 론

최근 화합물 반도체 특성을 이용하여 빛을 방출하는 LED(light emitting diode)를 차세대 광원으로 사용하기 위하여 발광 효율을 높이고, 열 저항을 낮추고, 색의 균일성을 높이는 연구가 진행되고 있다. 백색 LED를 구현하는 방법은 빛의 삼원색인 적색, 녹색, 청색을 내는 3개의 LED를 조합하는 방법, 청색 LED를 광원으로 사용하여 황색 형광체를 여기 시키는 방법과 자외선 발광 LED를 광원으로 이용하여 삼원색 형광체를 여기 시키는 방법으로 크게 3가지로 나누어진다. 백색 LED의 특성 중 색도좌표(CIE), 색온도, 광속 등의 특성은 형광체의 양, 배치 위치 등과 관련성이 높아 형광체 배치공정이 백색 LED 제작공정에서 가장 핵심적인 요소이다. 형광체를 배치하는 가장 일반적인 방법은 정해진 양의 형광체를 실리콘 수지에 분산시킨 형광체 혼합 수지를 정량토출하는 것이다.

특히 형광체를 균일하게 배치되지 않으면 LED 칩으로부터 방출되는 백색 광원의 균일한 색감이 표출되지 않을 뿐만 아니라, 색분

* Corresponding author. Tel.: +82-64-754-3713
Fax: +82-64-752-3174
E-mail address: khcho@jejunu.ac.kr (Kyung Ho Cho).

포의 불균일에 의한 어지럼증을 유발할 수 있어 조명용 광원으로 사용하기 불가능하며, 제품 불량의 가장 큰 원인으로 작용한다[1-4]. 형광체 혼합 수지의 토출 공정에서 사용되는 수지는 LED의 고효율화로 내열성, 황변성이 우수해야 하기 때문에 일반적으로 2000 cp이상의 고점도의 재료를 사용한다. 고점도 수지에 형광체를 혼합 후 반사 홈에 충전하게 되면 토출 위치와 토출량의 정밀도에 따라 LED 칩 패키지 표면형상에 결함이 발생할 수 있다[2]. 특히 형광체의 정량토출이 제대로 이루어지지 않으면 별도의 리페어 공정단계를 필요로 하게 되어 LED 생산비용이 증가하는 문제를 초래한다.

백색 LED 제작 시 현재 산업체에서 요구되는 토출량은 적용 분야에 따라 다양하지만, 일반적으로 1~5 mg 토출하고 0.03 mg 이하의 토출 정밀도를 필요로 한다. 하지만 기존의 형광체 배치공정에서 일반적으로 사용되는 디스펜서를 이용한 공정기술의 경우에는 0.03 mg 이하의 정밀도 구현이 어렵다. 이러한 정밀토출이 가능한 공정기술 개발과 함께 형광체 토출 공정에서 색도좌표 수율과 불량률을 개선할 수 있는 0.01 mg 이하의 미세 토출 기술이 요구되고 있다.

이러한 백색 LED 제작단계에서 형광체를 함유한 수지의 토출 불균일성으로 생기는 문제점을 해결하기 위하여 백색 LED 제조업체에서는 소재, 공정, 장비기술 등에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다. 이중 공압을 이용한 피스톤 펌프 방식은 차압센서 방식의 특성으로 토출량이 증가하는 특성이 수반되고 고점도 형광체 혼합 수지의 토출시간이 증가하여 생산성이 저하되는 한계를 가지고 있다[4]. 이러한 토출 정밀도에 의한 성능저하 문제를 개선하기 위하여 산업 잉크젯 프린팅 기술에 적용하는 피에조 펌프(piezo pump)를 이용하여 형광체 혼합 수지를 미세 토출하는 공정 방안을 개발하였으나 고점도 재료 사용이 어려운 단점이 있으며, 스크류 펌프 디스펜서 방식[3]은 고점도 수지 토출의 장점을 가지고 있으나 스크류와 외벽의 마모로 인한 정밀 정량토출의 어려움을 가지고 있다. 이와 같이 고점도 재료의 정밀 토출 기술을 개발하기 위하여 많은 연구가 진행 중에 있으나, 아직은 산업체에서 요구하는 정밀도가 나오지 못하는 실정이다.

본 연구에서는 고효율 백색 LED 구현을 위한 고점도 형광체 정밀 정량토출을 위하여 전기수력학 프린팅 기술(electrohydrodynamics printing)을 적용하였다. 전기수력학 프린팅 기술은 정전기력을 가해 유체를 기판으로 잡아당기기 때문에 저점도 재료뿐만 아니라 고점도 재료에서도 미세 액적 토출이 가능한 장점을 가지고 있어 피에조 펌프, 스크류 펌프 디스펜서 방식 등이 갖는 고점도 토출의 어려움과 토출 정밀도의 한계를 극복할 수 있다. 고점도 형광체의 정량토출을 구현하기 위해서 전기수력학 프린팅 기술의 DOD (drop-on-demand) 방식을 이용하여 공정실험을 진행하였다. 정량토출 공정 실험은 노즐-기재 사이 간격, 소재 공급압력, 멀티스텝 펄스파형의 전압비율의 공정변수로 설정하여 반복 토출을 하여 토출된 평균직경과 편차를 계산하였다. 공정변수에 따른 실험을 통해 얻어진 최적 공정조건을 적용하여 반복 토출하여 토출량을 측정한 결과 0.01 mg 이하의 미세 정량토출을 구현할 수 있다.

2. 전기수력학 프린팅 공정 기술

2.1 전기수력학 프린팅 공정원리

전기수력학 프린팅 기술을 적용하여 0.01 mg의 미세토출 공정을 구현하기 위해서는 안정적인 토출 공정 구현이 필수적이며, 이를 바탕으로 노즐-접지전극 사이의 거리, 소재 공급유량, 인가접압에 토출되는 액적의 크기 및 질량을 결정할 수 있다.

안정적인 토출 공정 구현을 위하여 전기수력학 프린팅에서는 Fig. 1과 같이 토출 방식에 따라 연속토출(continuous-jet) 방식과 DOD 방식으로 나눌 수 있다. 연속토출 방식은 직류 바이어스 전압에 의해 소재를 연속적으로 토출하는 과정으로 직류 바이어스에 의해 생성된 미세 전극 패턴은 DOD 모드에 비해 균일한 연속 패턴을 형성할 수 있다. DOD 방식은 임의 파형의 주파수와 동일하게 필요 시에만 잉크를 토출 시키는 방식으로 주파수에 따라 토출 빈도를 제어 가능하다. 전기수력학 DOD 방식의 공정단계는 메니스커스 형성단계와 액적 토출단계로 구분된다. 메니스커스 형성 단계는 프린팅 헤드 내부로 공급된 소재가 바이어스 전압에 의하여 노즐에 메니스커스가 형성되는 과정이다. 액적 토출 단계는 노즐에 메니스커스가 형성된 후 고전압 펄스 전압을 인가하여 메니스커스 끝단에서 소재의 미세 액적을 분리시켜 기판 위에 패터닝하는 과정이다[5-8]. DOD 방식을 이용하면 미세 액적의 크기를 제어할 수 있으며 필요시에만 미세 액적을 토출시킬 수 있어 정량

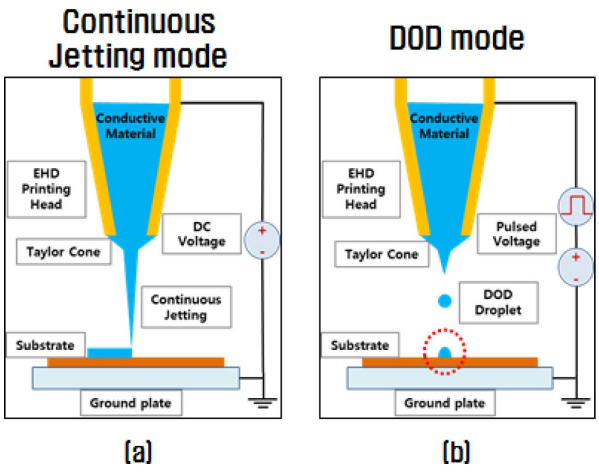

Fig. 1 EHD printing mode by input voltage form (a) continuous jetting mode, (b) DOD mode

토출 공정에 적합하다.

노즐에서 미세 액적을 분리하기 위해서는 노즐 끝에 형성되는 전기장의 세기가 중요하며, 식 (1)은 노즐 끝에 형성되는 전기장의 세기 E_c에 대한 방정식이다.

$$E_c = \left(\frac{2V_c}{r \ln(\frac{4h}{r})} \right) \quad (1)$$

여기서 V_c는 노즐의 인가전압, r은 노즐의 직경, h는 노즐-접지전극 사이의 거리를 나타낸다[9]. 전기장의 세기는 노즐 직경과, 노즐-접지전극 사이의 거리가 일정한 경우, 인가전압에 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

전기수력학 프린팅 공정에서 메니스커스는 토출 에너지인 인가전압과 전압 파형에 의해 변화하고 안정적인 메니스커스를 연속적으로 유지하지 못하면 공정 결과의 균일성이 떨어진다.

안정적인 메니스커스를 유지하며 토출에 필요한 최소 토출 전압 V_{on}는 식 (2)와 같이 유도할 수 있으며 Taylor는 가장 안정적으로 미세 액적을 형성하는 테일러 콘(taylor cone)을 기술하였고, 안정적으로 미세 액적을 형성하는 메니스커스의 반수직 각도(semi-vertical angle) 49.3°를 보고하였다[9,10].

$$V_{on} = \sqrt{\frac{\gamma r cos\theta}{\varepsilon_0}} ln\frac{4h}{r} \quad (2)$$

여기서 γ는 소재의 표면장력, θ는 메니스커스 반수직 각도(semi-vertical angle), ε_0는 소재의 유전율을 나타낸다.

토출 액적의 크기 제어에 대한 실험적 연구결과를 종합하여 수립된 근사해석(scaling law)은 식 (3)과 같다[11].

$$d = 3.78 * 0.6\pi^{-2/3} Q^{1/2} \left(\frac{\rho \epsilon_0}{\gamma K} \right)^{1/6} \quad (3)$$

여기서 d는 액적의 직경, Q는 공급유량, ρ는 유체의 밀도, K는 유체의 전기전도도를 나타낸다. 토출 액적의 직경은 소재 공급유량에 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

전기수력학 프린팅의 공정원리를 바탕으로 토출량을 제어하기 위해서는 노즐-접지전극(또는 기재) 사이 간격, 소재 공급유량, 인가전압 및 토출 에너지가 중요한 공정변수임을 확인하였다. 전기수력학 프린팅 공정에서 노즐-기재 사이 간격에 따라 전기장의 세기와 형상이 바뀐다. 간격이 좁으면 전기장의 세기가 커져 위성드롭이 생기고, 간격이 크면 전기장의 세기가 약해지고 전기장의 형상이 불안정해져서 원하는 위치와 원하는 주기에 토출이 되지 않는다. 소재 공급유량은 토출량에 직접적인 영향을 미치는 인자로 공급유량이 적으면 토출이 안되거나 위성드롭이 생긴다. 공급유량이 많으면 2~3주기 당 1회 토출이 되거나 중복 토출이 되어 토출량이 커지고 편차가 커진다. 인가전압 및 토출 에너지는 안정적인 토출에 영향을 주는 중요한 인자로 토출 에너지가 작으면 2~3주기 당 1회 토출이 되어 토출량이 커지고, 크면 토출량은 일정 수준까지 작아지나 위성드롭이 생겨 편차가 커진다.

노즐-기재 사이 간격거리, 소재 공급 유량, 인가전압 및 토출 에너지와 같은 공정변수 제어를 통해서 토출직경 제어가 가능하고 0.01 mg 이하의 미세 액적 토출이 가능하다.

2.2 안정적인 전기수력학 프린팅 공정 연구

전기수력학 프린팅 공정은 노즐-기재 사이 간격거리, 소재 공급유량, 인가전압 및 토출 에너지 등 다양한 공정변수에 의하여 민감하게 변화한다. 많은 공정변수와 민감도는 안정적이고 연속적인 공정구현에 장애요소로 작용하게 되므로 공정 및 변수에 대한 기준에 대한 연구가 필요하다. 이를 위해서 노즐 끝단에 형성되는 메니스커스 형상 및 각도를 기준으로 공정변수를 설정하는 연구를 진행하였다.

기존 연구결과 금속 노즐 헤드, 펄스파형, OE-6630 기반의 형광체 혼합수지를 사용하여 메니스커스의 반수직 각도 43°~49.8°의 범위에서 토출 직경 편차 20 이하의 안정적인 프린팅 공정결과를 도출하였다[12]. 전기수력학 프린팅 공정에서 안정적인 메니스커스 각도를 유지하면 DOD 공정의 재현성을 향상시킬 수 있어 균일한 액적 토출이 가능하다. 하지만, 0.01 mg 이하의 미세토출을 위해서는 안정적인 메니스커스 각도를 기반으로 소재 공급유량과 토출 에너지 변수를 추가적으로 제어에 대한 공정연구가 필요하다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 전기수력학 프린팅 시스템

고점도 형광체를 0.01 mg 이하의 정량토출을 구현하기 위하여 전기수력학 프린팅의 중요 공정변수인 노즐-기재 사이 간격, 소재 공급유량, 토출 에너지 제어를 정밀하고 안정적으로 제어할 수 있는 시스템을 구성하였다. 노즐-기재 사이 간격 및 토출 위치 제어를 위해 마이크로급 위치 정밀도를 갖는 이송장치가 필요하다.

소재 공급유량은 토출 액적의 크기를 결정하는 주요 변수이며 토출 정밀도를 확보하기 위해서는 nl 이하의 미세한 소재 공급유량 장치가 필요하다. 임의 파형 및 주파수 제어 및 700 V/us 이상의 고속 스위칭이 가능한 고전압 제어장치가 필요하며, 이러한 장치들을 기반으로 전기수력학 프린팅 시스템을 구성하였다.

전기수력학 프린팅 시스템은 전기수력학을 이용하여 다양한 기능성 재료를 전기수력학 기반의 헤드를 통해 기판 위로 패터닝 하

기 위한 주요 공정 시스템으로 Fig. 2와 같이 전기수력학 헤드(EHD head), 고전압 발생장치(high voltage amplifier), 시린지 펌프(syringe pump), 공압 제어기(pneumatic controller), 정밀 이송장치(precision motorized stage), 함수 발생기(function synthesizer) 등으로 구성된다. 미세 액적을 일정하게 토출하기 위해서 이를 제어하는 통합 공정제어 시스템(integrated process control system)을 구성하였고, 공정 모니터링을 위해서 초고속 카메라(high speed camera)와 광원(light source)으로 구성된 측정장비를 사용하였다.

일반적으로 시린지 펌프를 통해 헤드 내부에 소재를 공급하지만, 시린지 펌프만으로는 반복 패터닝 공정상에서 정밀한 소재 공급 제어가 힘들어 노즐 끝 단의 균일한 메니스커스 제어의 한계를 가진다[13]. 본 연구에서는 시린지 펌프를 통해 잉크 챔버에 소재를 공급하고 공압 제어기를 통하여 잉크 챔버 내부의 압력을 일정하게 유지하여 전기수력학 헤드 노즐 끝단의 메니스커스를 보다 정밀하게 제어할 수 있다. 공압 제어기의 압력 범위는 -88 kPa~100 kPa이며, 제어 분해능은 0.1 kPa이 되도록 설계하여 Fig. 3과 같이 제작하였다.

고전압 제어부는 0~10 kV까지 전압을 생성하고 1 kV/us의 고속 스위칭이 가능한 고전압 발생장치, 펄스파의 사용률(duty cycle)과 진폭을 조절하여 출력할 수 있는 함수발생기 그리고 입력전압과 출력전압의 비교 모니터링을 위한 오실로스코프(oscilloscope)로 구성하였다. 이송부는 기판 위에 패턴형성을 위한 정밀도 ±10 μm급 3축 스테이지로 구성하였다. 측정부는 헤드 끝단에서 생성되는 메니스커스 모양을 확인 할 수 있는 고속카메라와 광원으로 구성하였다.

3.2 실험방법

전기수력학 프린팅 적용하여 0.01 mg 이하 미세 토출 구현을 위해서는 인가전압 및 토출 에너지, 토출 주파수, 소재 공급 유량, 노즐-기재 사이 간격 이 주요 제어 변수이며, 안정적인 메니스커스 제어를 위해 고전압 제어부와 공압 제어기를 기반으로 정량토출 공정의 균일도의 제어가 필요하다.

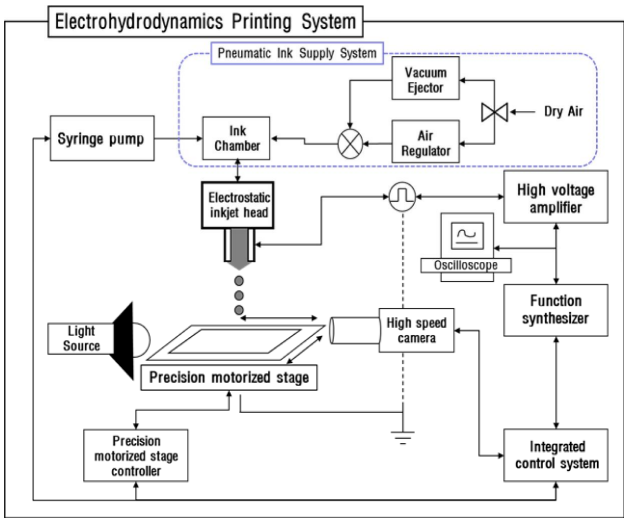

Fig. 2 Structure of electrohydrodynamics printing system

기존의 DOD 공정연구에서 사각파형을 전압 파형으로 사용하지만 바이어스 전압에서 토출전압으로 급격히 변화할 때 파형의 안정성이 떨어지고 급격히 토출될 경우 관성 등 물리적인 원인에 의하여 위성액적이 생기거나 무작위로 토출되어 정밀도를 저하시키는 문제가 발생하기도 한다[14]. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 안정적인 토출 에너지를 유지하는 것이 필요하며, 안정적인 토출 에너지를 유지하기 위해서는 노즐 끝에 형성되는 전기장의 방정식에서와 같이 노즐-기재사이 간격, 인가전압, 펄스 파형의 제어가 요구된다.

본 연구에서는 안정적인 토출 에너지를 유지하기 위해서 안정적인 노즐-기재 사이 간격의 조건을 확보 후 바이어스 전압에서 단계적으로 전압을 증가시키는 멀티스텝 펄스파형을 적용하였다. 멀티스텝 펄스파형은 급격히 증가하는 파형을 없애고 단계적으로 상승하여 파형의 안정성을 확보하여 반복적으로 안정적인 메니스커스를 유지할 수 있는 공정을 구현하였다.

Fig. 4와 같이 멀티스텝 펄스파형은 V1 초기 상승전압, V2 중간

Fig. 3 Developed pneumatic controller

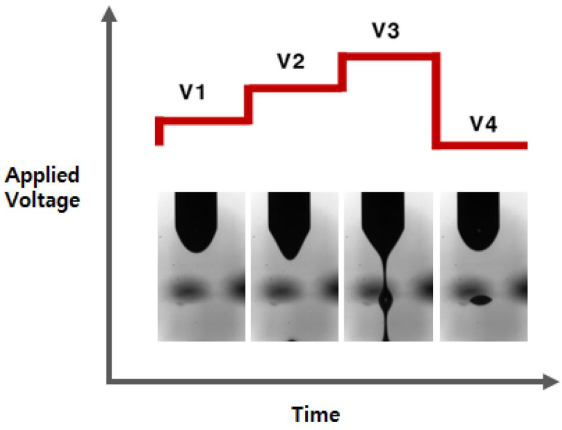

Fig. 4 Multi-step pulsed waveform

전압, V3 토출 전압 그리고 V4 바이어스 전압으로 구성되고 V1, V2, V4는 토출전압 V3을 100%를 기준으로 하여 상대적 비율의 전압이 인가된다.

고점도 형광체의 0.01 mg 이하 미세 토출과 정량토출을 구현하기 위해 멀티스텝 펄스파형의 비율, 소재 공급압력, 노즐-기재 사이 간격 변화에 따른 토출 도트 직경 및 토출 도트 직경 편차를 측정하여 안정적인 토출조건을 도출한다.

고점도 실리콘 수지의 인가전압에 따른 메니스커스를 제어하는 선행연구에서 49.3° 반수직 각도와 근접한 전압조건을 기반으로 하여 인가전압, 파형 주파수를 고정변수 조건으로 하여 실험을 진행하였다.

본 실험은 토출 에너지, 소재공급 압력, 노즐-기재 사이 간격을 주요 공정 변수로 선정하여 실험을 진행하였다. 노즐-기재 사이 간격은 DOD 공정에서 토출 에너지에 영향을 미치는 인자로 안정적인 DOD 공정이 가능한 범위를 선정하는데 목적이 있다. 소재 공급압력은 노즐에 공급되는 소재의 유량을 제어하고 토출 액적의 직경을 제어하는 중요 인자 중 하나이다. 소재공급 압력에 따라 토출되는 액적의 직경을 제어할 수 있고, 반복 토출량의 편차를 줄여 균일한 정량토출의 조건을 확인하고자 하였다. 멀티스텝 펄스파형의 전압 비율은 안정적으로 토출되는 메니스커스 형성/유지와 토출 에너지에 큰 영향을 미쳐 균일한 정량토출 구현의 핵심 공정변수이다. 멀티스텝 펄스파형의 전압 비율 제어를 통해 토출 에너지를 제어하고 최적 공정조건을 기반으로 0.01 mg 이하의 미세 토출량 제어하는데 목적이 있다.

Table 1은 실험에 필요한 공정 변수를 나타내고 있으며 사용한 실리콘은 일반적으로 형광체 수지로 사용되는 다우코닝(Dow Corning)사의 점도가 2,500 cP(A/B 혼합비 4:1)인 OE-6630로 선정하고, 형광체는 Intematix사의 입경 15.5 μm인 EY4453을 선정하였다.

Table 1 Experiment parameters

Parameter	Value
Voltage range	4.5 kV
Frequency	100 Hz
Waveform	Multi step pulsed
Duty ratio	1:1:1:1
Nozzle to substrate distance	Variable
Pneumatic pressure	Variable
Nozzle	ID: 310 μm, OD: 570 μm
Silicon	OE-6630 A/B
Phosphor	EY4453
Substrate	Glass

4. 결과 및 고찰

4.1 노즐-기재 사이 간격에 따른 토출 실험결과

노즐-기재 사이 간격에 따라 전기장의 형상이 바뀌어 토출 안정성에 영향을 미치기 때문에, 노즐-기재 사이 간격에 따른 DOD 토출 실험을 통해 DOD 토출 공정에 적합한 간격조건을 확보하고자 하였다. 노즐-기재 사이 간격에 따른 DOD 토출 실험에서 고정변수를 소재 공급압력 -0.1 kPa, 파형 전압비율 75%/90%/100%/25%로 설정하여 진행하였다. 노즐-기재 사이 간격은 노즐 직경과 유사한 300 μm에서 500 μm까지 50 μm씩 증가시키면서 DOD 토출 공정을 20회 진행하였다.

DOD 토출 실험을 진행하여, 사이 간격 300 μm에서 평균직경 358 μm의 표준편차 31.54, 350 μm에서 평균직경 386 μm의 표준편차 25.52, 400 μm에서 평균직경 377 μm의 표준편차 63.95, 450 μm에서 417 μm의 표준편차 26.07, 500 μm에서 358 μm의 표준편차 27.96의 결과를 얻었다. 사이 간격 300 μm, 350 μm에서는 1회 1도트가 토출되는 DOD 공정이 가능하였지만 400 μm 이상에서는 1회 1도트 토출이 되지 않아 DOD 토출 공정에 적합하지 않았다. 사이 간격 350 μm에서 가장 균일한 토출이 되었음을 확인하였으나, 보다 안정적이며 토출 정밀도를 낮추는 추가 공정실험이 필요하다. 토출 정밀도를 향상시키기 위해서는 토출 액적의 크기에 영향을 미치는 소재 공급유량 제어가 필요하여 소재 공급유량에 대한 공정실험을 진행하였다.

4.2 소재 공급압력에 따른 토출 실험 결과

전기수력학 프린팅 공정의 DOD 토출 공정에서 토출량을 일정하게 유지하기 위해서는 토출 액적의 크기를 일정한 수준으로 제어하는 것이 중요하다. 본 연구에 적용된 전기수력학 프린팅 시스템에서 소재 공급압력은 노즐에 공급되는 소재의 유량을 제어하는 변수이다. 소재-기재 사이 간격에 따른 실험결과에서 토출 정

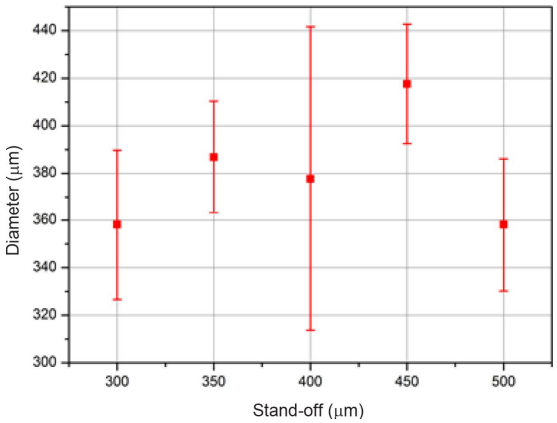

Fig. 5 Droplet diameter according to nozzle-substrate stand-off

밀도를 향상시키기 위해서 소재 공급압력에 따른 DOD 토출실험을 통해 보다 균일한 토출 결과를 확보하고자 하였다. 소재 공급압력에 따른 DOD 토출 실험에서 고정변수를 노즐-기재 사이 간격 350 μm, 파형 전압비율 75%/90%/100%/25%로 설정하여 진행하였다.

소재 공급압력은 -0.30.3 kPa 범위에서 0.1 kPa씩 증가시키면서 DOD 토출 공정을 20회 진행하였다. DOD 토출 실험을 진행하여 소재 공급압력 -0.3 kPa에서는 토출이 되지 않았고, -0.2 kPa에서 평균직경 380 μm의 표준편차 22.89, -0.1 kPa에서 평균직경 389 μm의 표준편차 25.25, 0.0 kPa에서 평균직경 393 μm의 표준편차 48.18, 0.1 kPa에서 평균직경 439 μm의 표준편차 61.34, 0.2 kPa에서 평균직경 606 μm의 표준편차 122.32, 0.3 kPa에서 평균직경 763 μm의 표준편차 29.67의 결과를 얻었다. 소재 공급압력 -0.2~0.0 kPa 사이에서 1회 1도트가 토출되는 DOD 공정이 가능하였지만 그 외의 조건에서는 1회 1도트 토출이 되지 않거나 중력에 의한 드로핑(dropping)이 되어 DOD 토출이 되지 않았다. 소재 공급압력 -0.2 kPa에서 가장 균일한 토출이 가능함을 확인하였으나, 토출 정밀도를 향상시키는 추가 공정 실험이 필요하다. 토출 정밀도를 보다 향상시키기 위해서 노즐의 메니스커스를 안정적인 제어가 요구되며 토출 에너지에 대한 공정실험을 진행하였다.

4.3 멀티스텝 펄스파형의 전압에 따른 토출 실험 결과

전기수력학 프린팅 공정의 DOD 토출 공정에서 인가전압은 토출에 필요한 전기장의 세기에 직접적인 영향을 미치는 인자이다[9]. 동일 인가전압에서 파형의 형태, 비율은 토출 에너지를 변화시켜 DOD 토출 시 메니스커스 형상에 영향을 주어 정량토출 구현의 핵심 공정변수이다. 앞서 진행된 DOD 토출실험에서 확보된 공정조건을 기반으로 멀티스텝 펄스파형의 전압 비율을 제어하여 균일한 토출 직경 및 직경 편차를 갖는 최적 공정조건을 확보하고자 하였다.

멀티스텝 펄스파형의 전압 비율에 따른 DOD 토출 실험에서 고정변수를 노즐-기재 사이 간격 350 μm, 소재 공급압력 -0.2 kPa로 설정하여 진행하였다. 멀티스텝 펄스파형에서 V1, V2, V4의 전압 비율을 5%씩 변화시키면서 DOD 토출 공정을 20회 진행하였다.

우선, 바이어스 전압인 V4의 비율 확인을 위해 파형 비율을 75%/90%/100%/V4로 설정하고 V4 비율을 0~45%까지 변화시키며 실험을 진행하였다.

V4 전압 비율에 대한 DOD 토출 실험결과 15% 미만에서는 토출이 되지 않았고, 15%에서 평균직경 307 μm의 표준편차 29.52, 20%에서 평균직경 320 μm의 표준편차 35.65, 25%에서 평균직경 324 μm의 표준편차 32.17, 30%에서 평균직경 323 μm의 표준편차 25.37, 35%에서 평균직경 291 μm의 표준편차 24.86, 40%에서 평균직경 277 μm의 표준편차 22.69, 45%에서 평균직경 362 μm의 표준편차 137.64의 결과를 얻었다. 45%에서는 1회 1도트 토출이 되지 않고 바이어스 전압만으로도 토출이 되는 경우가 발생하여 편차가 커짐을 확인하였다. 30~40%에서 표준편차 26 이하의 안정적인 토출이 가능하였고 35%에서 표준편차 23 이하의 가장 균일한 토출이 되었음을 확인하였다.

V1의 비율 확인을 위해 파형 비율을 V1/90%/100%/35%로 설정하고 V1 비율을 60~85%까지 변화시키며 실험을 진행하였다. V1 전압 비율에 대한 DOD 토출 실험 결과 60%에서 평균직경 343 μm의 표준편차 29.36, 65%에서 평균직경 328 μm의 표준편차 23.54, 70%에서 평균직경 343 μm의 표준편차 48.55, 75%에서 평균직경 316 μm의 표준편차 26.47, 80%에서 평균직경 324 μm의 표준편차 15.58, 85%에서 평균직경 395 μm의 표준편차 28.39의 결과를 얻었다. 60~65%에서는 1회 1도트 토출이 되지 않았고 75% 이상부터 안정적인 토출이 가능하였고 80%에서 가장 균일한 토출 결과를 확인하였다.

V2의 비율 확인을 위해 파형 비율을 80/V2/100%/35%로 설정

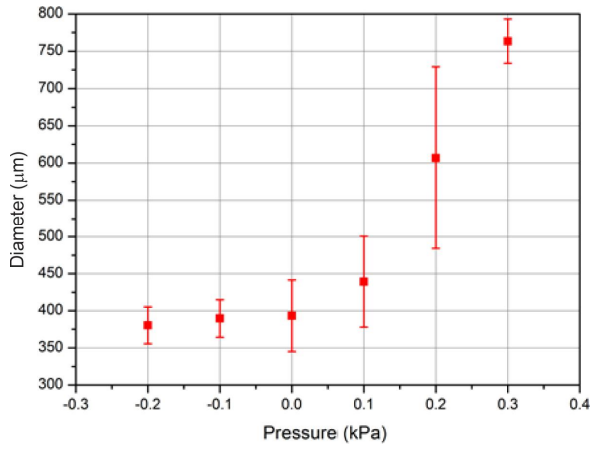

Fig. 6 Droplet diameter according to phosphor supply pressure

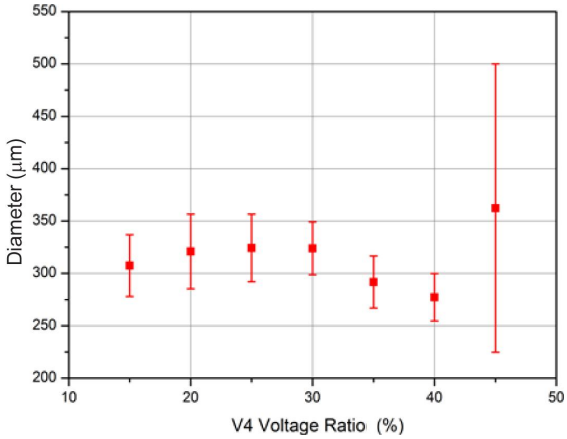

Fig. 7 Droplet diameter according to V4 voltage ratio

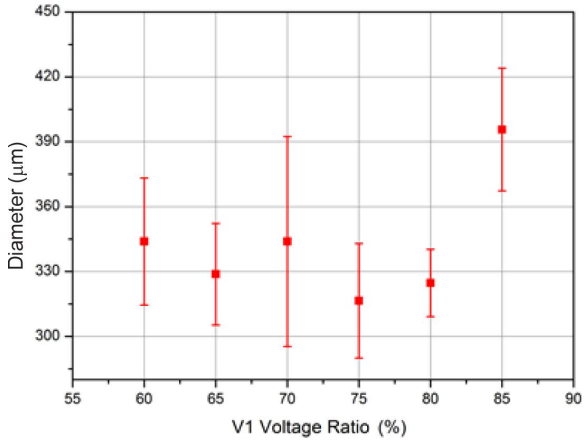

Fig. 8 Droplet diameter according to V1 voltage ratio

하고 V2 비율을 80~95%까지 변화시키며 실험을 진행하였다. V2 전압 비율에 대한 DOD 토출 실험μ결과 80%에서 평균직경 327 μm의 표준편차 18.76, 85%에서 평균직경 322 μm의 표준편차 14.78, 90%에서 평균직경 310 μm의 표준편차 18.20, 95%에서 평균직경 334 μm의 표준편차 21.95의 결과를 얻었다. 모든 비율에서 DOD 토출 공정이 가능하였고 85%에서 15이하의 표준편차를 가지며 균일한 토출이 가능함을 확인하였다.

4.4 멀티스텝 펄스파형의 전압에 따른 토출 실험 결과

고점도 형광체의 0.01 mg 이하 미세 토출과 정량토출을 구현하기 위해 노즐 직경, 인가전압, 파형주파수를 고정변수로 설정하고 노즐-기재 사이 간격, 소재 공급압력, 멀티스텝 펄스파형의 전압비율을 공정변수로 설정하였다. 각 공정변수의 변화에 따른 토출 도트 직경 및 토출 도트 직경 편차를 측정하여 안정적인 토출 조건을 도출하였다. 노즐-기재 사이 간격 350 μm, 소재 공급압력 -0.2 kPa, 멀티스텝 전압비율 80%/85%/100%/35%로 공정조건을 적용하여 토출량 측정 실험을 진행하였다. 샘플기판에 20회씩 DOD 토출을 진행하여 10회 반복 실험하여 전자 정밀저울(Sartorius, 모델: Competence CP225D, 분해능 0.01 mg)을 통해 토출 전 기판의 무게와 토출 후 기판 무게의 차이를 통해 Table 2와 같이 토출량을 확인하였다.

전자저울을 통해 확인한 1드롭의 평균 토출량의 정확도를 확인하기 위하여 샘플 중 무작위로 1개의 드롭을 3차원 형상 측정시스템(Nano system, 모델: WT-250)로 측정한 결과는 Fig. 10과 같다. 3차원 형상에 대한 체적을 계산하여 실리콘 수지의 밀도를 곱해 질량을 확인한 결과 0.0048 mg이었다. 전자저울을 통해 측정한 1드롭의 평균 토출량과 유사한 결과이며 이를 통해 0.01 mg 이하의 미세 정량토출을 구현함을 확인하였다.

Table 2 Result for weight of 1 drop

No.	Substrate weight before DOD (g)	Substrate weight after DOD (g)	Weight of 1 drop (mg)
1	3.20226	3.20236	0.005
2	3.18871	3.18883	0.006
3	3.19234	3.19243	0.0045
4	3.20173	3.20184	0.0055
5	3.19862	3.19872	0.005
6	3.19907	3.19917	0.005
7	3.22341	3.22353	0.006
8	3.18757	3.18768	0.0055
9	3.19683	3.19692	0.0045
10	3.19552	3.19562	0.005
Average		**0.0052 mg**	
Standard deviation		**0.000537**	

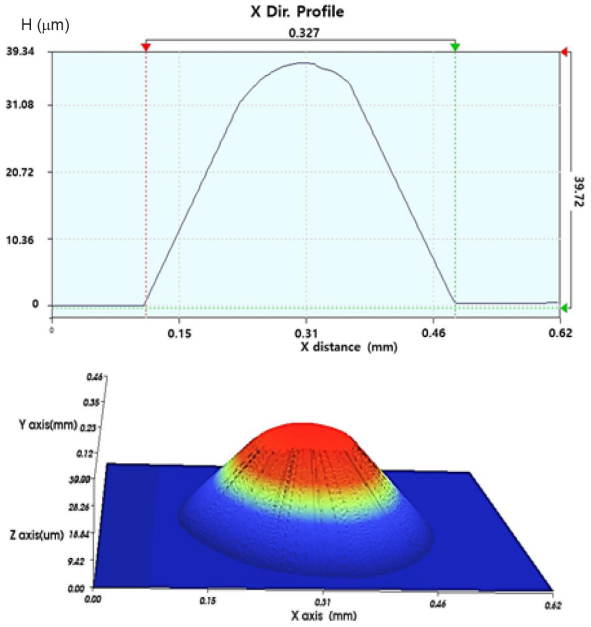

Fig. 9 3D profile of phosphor 1 drop

5. 결 론

본 연구에서는 고점도 형광체의 정량토출을 구현하기 위해 전기수력학 프린팅 기술 및 시스템을 이용하여 0.001 mg 이하의 미세 정량토출을 구현하였다.

고점도 형광체 정량토출 공정을 위해 산업체에서 주로 사용되는 형광체는 EY4453, 실리콘 수지는 OE-6630을 선정하였다. 금속 노즐에서의 안정적인 메니스커스 각도를 유지했던 인가전압 4.5 kV와 파형 주파수 100 Hz를 고정변수로 설정하고 노즐-기재 사이 간격, 소재 공급압력, 멀티스텝 펄스파형의 전압비율을 공정변수로

설정하여 안정적인 토출 조건을 도출하였다. 도출된 최적 공정조건을 적용하여 샘플기판에 20회씩 DOD 토출하고 총 10회를 반복 실험을 통해 토출량을 측정하였다. 측정 결과, 평균 토출량 0.0052 mg의 표준편차 0.000537의 결과를 갖는 균일한 미세 정량토출을 구현할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2015학년도 제주대학교 학술진흥연구비 지원사업에 의하여 연구되었음.

References

[1] Park, S. C., 2012, Luminous Efficiency of Phosphor-converted White Light Emitting Diodes, A Thesis for a Doctorate, Kyungpook National University, Republic of Korea.

[2] Ha, S. J., Kim, J. S., Cho, M. W., Choi, J. M., 2013, Measurement System for Phosphor Dispensing Shape of LED Chip Package Using Machine Vision, J. Korea Academia-industrial Cooperation Soc., 14:5 2113-2120.

[3] Kim, S. H., 2011, Screw Pump for Dispensing LED Phosphor Wear Characteristic, A Thesis for a Master, Inha University, Republic of Korea.

[4] Kang, D. S., 2015, A Study on the CIE Rank Positioning Method for using Electrohydrodynamic Micro-dispensing Mechanism, A Thesis for a Master, Inha University, Republic of Korea.

[5] Jaworek, A., Krupa, A., 1999, Classification of the Modes of EHD Spraying, J. Aerosol Sci., 30:7 873-893.

[6] Kang, D. K., 2011, Experimental Study on Solar Cell Electrode Via Electrohydrodynamic(EHD) Inkjet Printing, A Thesis for a Master, Korea University, Republic of Korea.

[7] Rahman, A., Ali, A., Rahman, K., Kim, H. C., Doh, Y. H., Kim, D. S., Choi, K. H., 1999, Influence of Electrode Position and Electrostatic Forces on the Generation of Meniscus in Dielectric Ink, Japanese journal of applied physics, 49:5 05EC02-(1-8).

[8] Ko, J. B., 2011, Research on Electrostatic Based High Aspect Ration Microelectrode Patterning Process, A Thesis for a Doctorate, Jeju National University, Republic of Korea.

[9] Smith, D. P. H., 1986, The Eelctrohydrodynamic Atomization of Liquids, IEEE Transactions on Industry Applications, IA-22:3 527-535.

[10] Taylor, G., 1964, Disintegration of Water Drops in an Electric Field, Proc. Roy. Soc. A, 280:1382 383-397.

[11] Gana-Calvo, A. M., 1997, Cone-jet Analytical Extension of Taylor's Electrostatic Solution and the Asymptotic Universal Scaling Laws in Electrospraying, Phys. Rev. Lett., 29:2 217-220.

[12] Yang, Y. J., Kim, H. C., Ko, J. B., Yang, B. S., Dang, H. W., Doh, Y. H., Cho, K. H., Choi, K. H., 2014, A Study on High Visocisy Phosphor Dispensing Process for Implementation of High-Efficiency White LED, J. Clean Tech., 20:2 97-102.

[13] Yang, Y. J., Ko, J. B., Dang, H. W. Kim, H. C., Choi, K. H., Cho, K. H., 2012, Development of Pneumatic Ink Supply System for Electrostatic head on Meniscus control, J. KSPE, 29:4 455-460.

[14] Kim, S. W., Yang, Y. J., Kim, H. B., Dang, H. W., Yang, B. S., Choi, K. H., 2015, A Study of High Visocisy Phosphor Dispensing for an Electrostatic Printing Sytem, Trans. Mat. Proc., 24:2 83-88.