

자기변형잉크젯헤드에서 토출된 액적의 정적 착지정확도 모델링 및 실험적 검증

Modeling and Experimental Verification on Static Landing Accuracy of Droplets from Magnetostrictive Inkjet Head

유은주¹, 박영우^{2,✉}
Eun Ju Yoo¹ and Young Woo Park^{2,✉}

¹ 충남대학교 대학원 기계설계·메카트로닉스공학과 (Department of Mechanical Design & Mechatronics Engineering, Graduate School, Chungnam National Univ.)

² 충남대학교 메카트로닉스공학과 (Department of Mechatronics Engineering, Chungnam National Univ.)

✉ Corresponding author: ywpark@cnu.ac.kr, Tel: +82-42-821-6874

Manuscript received: 2012.7.13 / Revised: 2012.10.29 / Accepted: 2012.10.30

Most research on the inkjet printing technology has focused on the development of inkjet head itself, and of process, not on the landing accuracy of the droplets to a target. Thus, this paper presents the modeling and experimental verification on the static landing accuracy and precision of the droplets from the magnetostrictive inkjet head. A simple model based on the angle deviation of a nozzle tip and on a distance to a substrate is considered, assuming that there is no ambient effect. The angle deviation of the nozzle tip is determined by using its digital image with the aid of a pixel calculation program, and the distance to the substrate is set to 1 mm. Three experiments have planned and preformed. The first experiment is to collect the initial data for the landing distribution of the droplets. The second experiment is to collect the repeatability data of the stage used. Then, these data are used to rederive the equation for the final landing position of the droplet. The final experiment is to verify the equation and to show the calibration results. The respective landing accuracy of the droplet after calibration on the x-axis and on y axis has improved from 338.51 μm and -133.63 μm to 7.06 μm and 13.11 μm . The respective percent improvement on the x-axis and on y axis reaches about 98 and about 90. The respective landing precision of the droplet after calibration on the x-axis and on y axis has improved from $\pm 182.6 \mu\text{m}$ and $\pm 182.88 \mu\text{m}$ to $\pm 24.64 \mu\text{m}$ and $\pm 42.76 \mu\text{m}$. The respective percent improvement on the x-axis and on y axis reaches about 87 and about 77.

Key Words: Magnetostrictive Inkjet (자기변형 잉크젯), Static Modeling (정적 모델링), Landing Accuracy (착지 정확도), Landing Position (착지 위치), Droplet (액적)

1. 서론

잉크젯 프린팅 기술은 수십에서 수백 마이크로미터의 직경을 갖는 액적을 특정 위치에 형성시키는 기술로써 기계, 전자, 유체의 복잡한 메커니즘

을 통해 마이크로미터 단위의 액적을 다루기 때문에 구현이 어렵다.¹ 이러한 잉크젯 프린팅 기술은 사무용에서부터 전자 재료의 토출 등 그 응용범위가 점점 넓어지고 있다.² 하지만 잉크젯 프린팅 기술은 주로 잉크젯 헤드의 설계와 이를 검증하기

위한 액적 형성 과정 연구에 치중되어 있어 액적 형성 이후의 과정에 대한 연구는 토출 액적의 분자 모델링을 통한 미세 접근 방법과 실험을 통한 액적의 토출 위치에 관한 경향을 파악하는 정도로 미비한 실정이다.³ 따라서 잉크젯 헤드에서 토출되는 액적의 정적 모델링을 통해 액적과 기관 사이의 관계를 이론적, 현상적으로 규명하고, 이를 바탕으로 잉크젯 헤드의 성능을 정량화 할 필요가 있다. 또한 이러한 연구를 통해 유체의 특정위치 토출이 가능해짐으로써 고정도의 유체 토출을 실현 할 수 있기 때문에 궁극적으로는 패터닝 기술이나 자동화 기술과 같은 보다 발전된 연구의 초석을 다질 수 있다. 본 논문에서는 선행 연구에서 수행한 자기변형 잉크젯 헤드의 액적 형성 연구를 바탕으로 액적 형성 이후의 과정을 모델링하고 액적과 기관 사이의 관계 규명하여 토출된 액적의 착지 위치를 예측하고 기관의 위치보정을 통한 착지 정확도 향상에 관한 연구를 수행하고자 한다.⁴ 따라서 토출된 액적의 착지 위치에 직접적인 영향을 주는 노즐과 스테이지에 초점을 맞추어 토출된 액적의 착지 위치를 예측하고, 경향을 파악하여 최종적으로 액적이 떨어지는 기관의 위치보정을 통한 특정 위치 토출의 가능성을 검증한다.

2. 자기변형 잉크젯 시스템의 구성

자기변형 잉크젯 헤드에서 토출된 액적의 착지 정확도에 관한 연구를 수행하기 위한 실험장치는 Fig. 1 과 같으며 자기변형 잉크젯 헤드와 xy 및 z 축

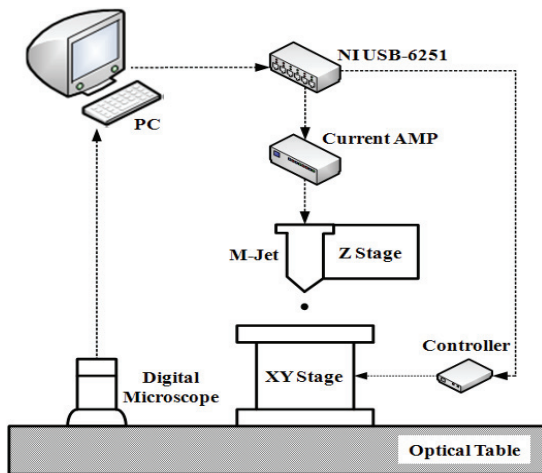


Fig. 1 Schematic diagram for experimental setup

스테이지를 중심으로 이를 제어하기 위한 컴퓨터 기반 제어 시스템, 토출된 액적의 착지 위치 결과를 측정하기 위한 측정 시스템 등으로 구성된다.

2.1 제어 시스템

제어 시스템은 랩뷰(LabVIEW) 기반의 유저 인터페이스(User Interface, UI), 데이터 수집기(DAQ, NI USB-625), 전류 앰프, xy 스테이지 제어기 등으로 구성된다. 유저 인터페이스는 자기변형 잉크젯 헤드에서 액적을 토출 하기 위한 구동파형 제어 부분과 액적이 떨어지는 기관의 위치를 결정하는 xy 축 스테이지 제어부분으로 나눌 수 있다. 이때, z 축 스테이지는 노즐과 기관 사이의 높이를 조절하는 부분으로 갭 게이지(Gap Gauge)를 통한 수동 조작이기 때문에 별도의 제어 시스템을 구현하지 않는다. 구동파형 제어부는 Fig. 2 와 같이 구성되며 기존에 저장된 구동파형을 불러오거나 새로 편집하여 원하는 구동파형을 설계 할 수 있

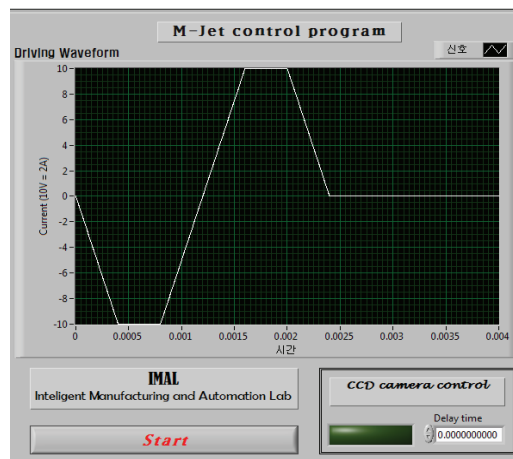


Fig. 2 Driving waveform UI for M-Jet

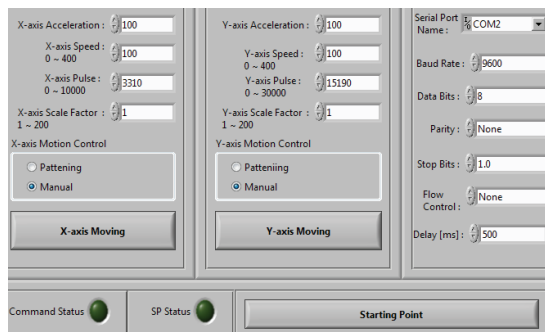


Fig. 3 Stage control UI

다. xy 스테이지의 제어부는 Fig. 3 과 같이 구성되고 시리얼 통신을 통해 원하는 위치로의 위치 이송이 가능하다. 기본적으로 각 축에 대한 이송속도와 위치를 설정 할 수 있으며 배율(scale factor)을 통해 분해능(resolution)을 설정한다. 또한 각 축을 나누어 제어 가능하기 때문에 각 축의 개별 이송과 패턴링을 위한 복합적인 이송이 모두 가능하다.

2.2 측정 시스템

측정 시스템은 자기변형 잉크젯 헤드에서 토출된 액적을 분석하기 위한 것으로 영상을 찍는 디지털 현미경과 픽셀(Pixel)계산 프로그램으로 이루어진다. 이 때, 고려해야 할 것은 객관적인 기준이다. 디지털 현미경으로 촬영한 영상만을 이용하여 분석할 경우, 배율이나 초점거리에 따라 영상을 이루는 픽셀의 실제 길이가 달라지기 때문에 노즐의 형상이나 액적의 착지 위치를 분석하기 위한 영상의 픽셀 길이에 대한 기준이 필요한 것이다. 따라서 대물 마이크로미터(Objective Micrometer)의 1 픽셀을 기준으로 화면의 각 픽셀 당 실제 길이를 계산하여 이를 적용한다.

디지털 현미경은 내부의 렌즈와 측정하고자 하는 시료 사이의 거리에 따라 촬영 영상의 1 픽셀에 대한 실제 길이가 달라지기 때문에 픽셀 계산시 다양한 시료에 대한 명확한 기준 값이 존재해야만 한다. 따라서 동일한 배율과 초점을 갖는 조건에서 대물 마이크로미터를 이용한 픽셀 비례식을 식(1)과 같이 세울 수 있다. 이 때, d_1 는 대물 마이크로미터와 렌즈 사이의 거리, d_2 는 측정하고자 하는 시료와 렌즈 사이의 거리이고 a 는 대물 마이크로미터의 촬영 영상 1 픽셀의 실제 길이 이므로 이를 통해 시료 촬영 영상의 1 픽셀 실제 길이 b 를 구할 수 있다.

$$d_1 : a = d_2 : b \quad (1)$$

3. 자기변형 잉크젯 시스템의 모델링

본 논문에서는 노즐에서의 액적형성 이후의 과정에 관한 토출 액적의 정적 모델링을 통해 착지 정확도를 향상시키는 것이므로 자기변형 잉크젯 시스템의 모델링은 시스템 전체를 대상으로 하는 것이 아니라 실제 액적이 토출되는 노즐과 액적이 떨어지는 기관까지를 범위로 하여 진행된다.

3.1 가정사항

자기변형 잉크젯 시스템의 모델링을 하기 위해서는 몇 가지의 유체역학적 기본 가정들을 통해 토출 액적의 어느 부분까지를 고려할 것인지 결정해야만 한다.

먼저 유체는 압축성과 점성계수의 변동, 점성의 유무에 따라 세분화된다. 본 논문에서 사용한 유체는 수성잉크로 물과 비슷한 물성치를 갖고 시각적인 효과가 있다. 물은 비압축성 유체로 유체의 유동 중에 밀도의 변화가 없는 유동이다. 또한 점성유체로써 점성에 의한 전단응력을 고려해서 해석해야 하는 점성유동이다. 점성유동은 레이놀즈 수(Reynolds number)에 의해 층류와 난류로 나뉘는데 본 시스템은 유속이 느리므로 난류보다는 층류에 더 가깝다고 볼 수 있다. 따라서 토출 유체는 비압축성 뉴턴 유체로 점성 층류 유동을 갖는다고 가정한다.

자기변형 잉크젯 헤드에서 액적이 토출되는 노즐의 끝단과 기관 사이의 거리는 1 mm 로 고정하였고 노즐에서 토출된 액적의 속도는 약 5 m/s 로 기관에 떨어지는 시간은 약 0.2 ms 이다. 이처럼 액적이 떨어지는 구간과 시간이 짧기 때문에 액적이 토출되어 기관에 도달하기까지의 유체 증발량을 미소하다고 보고, 액적의 토출 시 유체의 증발을 무시한다는 가정을 한다.

노즐과 기관 사이의 공간은 실제로 유동이 있는 공기가 존재하며 이 유동은 토출된 액적의 착지 위치에 영향을 미칠 수 있는 요인 중 하나이다. 하지만 외부의 바람이나 외력이 가해지지 않는 상태이기 때문에 토출되는 액적의 토출 궤적에 영향을 줄 만큼의 유동이 없다고 보고 노즐과 기관 사이의 공간은 유동이 없는 공기로 채워져 있다고 가정한다.

쿨롱 힘(Coulomb force)은 2 개의 전하가 서로 밀어내고 끌어당기는 힘을 의미하며 이 힘은 약 10^{-16} m 의 거리에 있는 전하들까지 작용한다. 하지만 본 논문의 자기변형 잉크젯 헤드에서 토출되는 액적의 분사방식은 액적 하나하나를 개별적으로 토출하는 요구적하(Drop on Demand) 방식으로 자기변형재료가 유체를 밀어주는 힘이 쿨롱 힘보다 크고 노즐 끝단에서 액적이 토출되는 순간이 미소하므로 이 때의 쿨롱 힘은 무시한다고 가정한다.

마지막으로 유체 속을 움직이는 구체의 크기가 미소한 경우 구체가 받는 저항은 중력과 반대되는 방향으로 형성되는 항력(drag force)과 동일해

진다. 본 논문에서 토출되는 액적은 구체에 가해지는 항력보다 큰 힘으로 자기변형재료가 유체에 힘을 가하고 시스템의 모델링 시 액적의 토출 속도보다는 노즐의 형상에 초점을 맞추므로 토출되는 액적에 가해지는 항력은 스토크스의 법칙(Stokes' law)을 따를 때 항력은 무시할 정도로 작다고 가정한다.

3.2 오차

오차는 시스템의 정·동적 오차와 구성 시스템 사이의 오차로 나눌 수 있다.⁵ 먼저 시스템의 정적 오차의 경우, 시스템 구성 장치의 편평도와 직진성에 관한 부분으로써 시스템 전체의 편평도와 스테이지의 직진성을 기계적인 구조로 보장해야 하며 이를 위해 전체 시스템을 방진테이블 위에 설치한다. 구조의 동적 오차는 시스템의 동적 모델링에서 주로 고려해야 할 부분으로 본 논문에서는 스테이지의 이송 시에 발생하는 위치오차만을 실험적으로 고려한다.

각 구성 시스템 사이의 오차는 각 구성 요소들 간의 영향에 따른 것으로 각 구성 요소들의 상호연관성을 파악하여 요소들 간의 간섭을 최소화해야 한다. 특히 액적이 토출되는 노즐의 끝단과 액적이 떨어지는 기관의 원하는 토출 위치가 일직선으로 배치되어야 하는 초기 상태에서 둘 사이가 일직선으로 배치가 되지 않으면 액적의 착지 위치에 큰 영향을 미치게 되고 만약 이 오차가 일관적이지 않다면 이를 보정할 수 있는 방법이 없기 때문에 본 논문에서는 기관 고정판을 제작하여 스테이지에 부착하고, z 축을 통해 일직선 배치를 할 수 있도록 한다.

본 논문에서는 위 세 가지의 오차에 노즐 형상 오차를 추가하였다. 노즐 형상의 경우, 토출된 액적의 토출 각도에 큰 영향을 주는 요소로 액적의 착지 위치에 직접적인 영향을 주기 때문이다. 자기변형 잉크젯 헤드에 사용하는 노즐은 높은 화학적 저항성과 낮은 마찰력의 장점을 가지는 붕규산염 재질의 유리 노즐로 가공 특성상 균일한 크기나 내부의 형상을 얻기 어렵고 끝단의 표면이 불균일하다. 따라서 본 시스템에서 사용한 노즐의 내부형상 분석을 통한 토출 각도의 오차를 고려하여 그에 따른 착지 위치의 오차를 보정한다.

3.3 시스템의 정적 모델링

정적 모델링은 자기변형 잉크젯 헤드의 성능 정량화 및 향상을 위한 필수 과정으로 액적 형성

이후에 토출된 액적이 기관으로 떨어지는 일련의 과정을 통해 액적과 기관 사이의 관계를 표현할 수 있다. 본 논문에서는 스테이지가 고정된 상태의 정적 상태를 모델링하고 액적의 착지 위치가 가장 큰 영향을 주는 노즐 형상만을 분석하여 모델링 한다. Fig. 4는 자기변형 잉크젯 헤드에서 액적이 형성된 이후에 해당되는 노즐과 토출 액적, 기관의 부분을 단순화한 모습이다. 노즐에서 토출된 액적의 착지 위치에 영향을 미치는 토출각도(θ)는 액적이 노즐에서 떨어질 때의 각도로 액적이 기관에 떨어지는 위치(P_d)는 식(2)와 같이 표현된다. 이 때, l 은 노즐 끝단과 기관 사이의 거리를 의미한다.

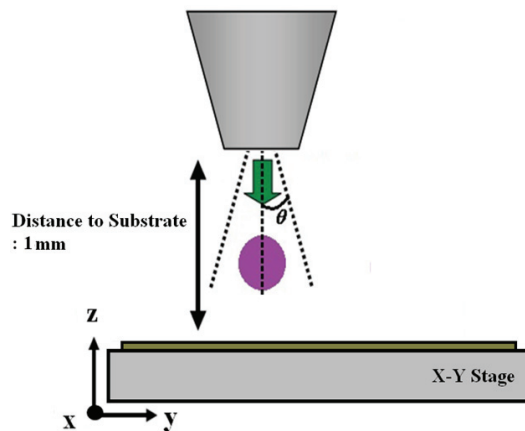


Fig. 4 Schematic diagram for static modeling

$$P_{d(x,y)} = l \tan \theta_{(x,y)} \tag{2}$$

3.4 액적의 착지 위치 예측과 보정

토출된 액적의 착지 정확도에 관한 연구는 가공 기계의 원점을 보정하는 것과 동일한 측면에서 이루어진다. 일반적으로 토출을 하고자 하는 특정 위치가 있을 때, 토출 위치는 액적이 토출되는 노즐의 끝단과 일직선으로 위치되며 이를 초기상태라 한다. 본 논문에서의 토출 위치는 수식 토출 및 기준 설정과 결과 분석의 단순화를 위해 대물 마이크로미터의 원점인 (0,0)으로 설정하고 이를 토출 원점이라 한다. 이 때, 노즐의 끝단과 토출 원점이 일직선 상태가 되는 초기상태의 스테이지 상대좌표는 (3310, 15190)이다. 하지만 이 초기상태는 액적의 토출이 이상적으로 이루어질 때만 가능한 것으로 노즐의 형상에 의해 일정 토출 각도를 갖고

이에 따른 액적의 착지 위치가 달라지게 된다. 따라서 본 논문에서는 시스템의 초기상태에서 액적이 노즐의 형상에 의해 갖는 액적의 착지 위치 예측 식을 도출하고, 실제로 스테이지를 고정된 초기상태의 액적 반복 토출 실험을 통한 착지 위치 결과를 분석한다. 또한 초기상태의 스테이지 위치 반복 실험을 통해 동일 좌표로의 스테이지 이송 시 노즐의 끝단과 일직선이 되는 위치로부터 토출 위치가 벗어나는 정도를 분석한다. 이 두 실험 결과는 최종 액적의 착지 위치의 예측식에 적용하여 초기상태를 보정한다. 이 때 액적에 대한 착지 정확도와 정밀도의 측면에서 분석하고, 보정하여 토출된 액적의 착지 정확도를 향상한다.

3.4.1 노즐의 형상 분석

시스템의 정적 모델링을 바탕으로 하여 첫 번째 액적의 착지 위치 예측을 위한 수식 도출을 위해서는 노즐의 형상을 분석해야 한다. Fig. 5 와 같이 노즐은 실제 실험에서 위치될 기관의 x 축과 y 축을 노즐의 단면 기준 축으로 하여 분석한다. 본 논문에 사용된 노즐의 직경은 앞서 언급한 식(1)을 통해 구할 수 있고, 119.14 μm 이다. 이 노즐의 직경과 1 픽셀 값을 이용하여 각 축의 단면에 대한 내부 형상을 분석 할 수 있고 각 축의 단면에 대한 내부 형상은 Fig. 6 과 같다.

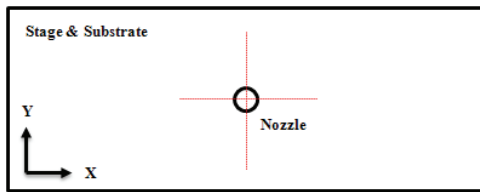
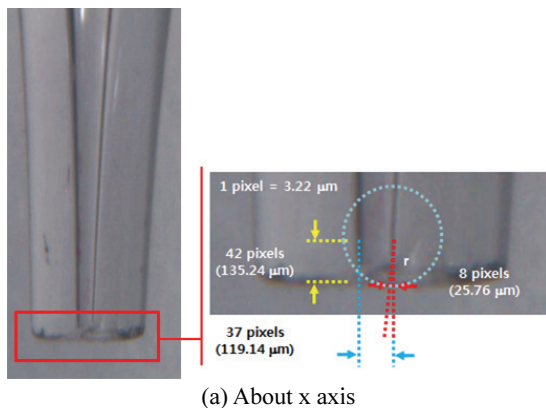
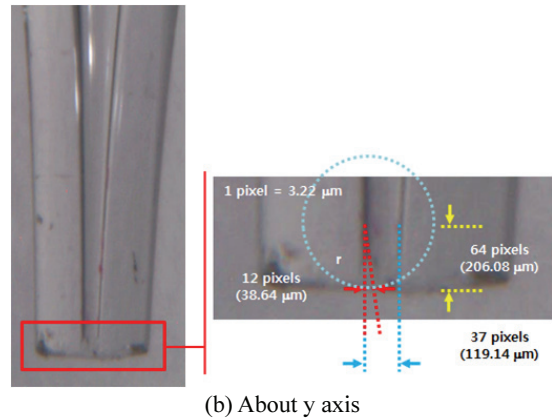


Fig. 5 The relationship between nozzle section and stage



(a) About x axis



(b) About y axis

Fig. 6 Cross-sectional analysis of nozzle about axes

Fig. 6(a)를 통해 x 축 단면 내부 형상에서 직선형상인 좌측에 비해 우측은 약간 틀어진 형상임을 확인 할 수 있다. 이 때 틀어진 정도는 8 픽셀로 약 25.76 μm 이다. 이 틀어짐이 액적의 토출 각도에 미치는 영향을 알아보기 위해 틀어짐 높이를 반지름으로 한 원을 그려 원주를 통한 틀어짐 각을 구할 수 있다. 원주는 $2\pi r$ 이므로 노즐 x 축 단면 형상의 틀어짐 원주는 849.31 μm 이다. 이 원주를 통해 구한 x 축 틀어짐 각(θ_x)은 10.75° 이다. 이와 동일한 방법으로 Fig. 6(b)의 y 축 단면 내부 형상에 대한 틀어짐 각(θ_y)은 10.92° 이다.

노즐 끝단과 기관 사이의 거리(l)는 1 mm 이므로 앞서 언급한 식(2)에 노즐의 각 축에 대한 분석을 통해 얻은 액적의 토출 각도를 적용하여 첫 번째 액적의 착지 위치 예측 수식을 도출하면 P_d 는 (190, 193) μm 이다. 이 때, 토출 원점을 기준으로 각 축에 대한 노즐 단면의 좌측과 우측 비틀림을 감안하면 토출 액적의 방향성을 결정할 수 있다. 노즐의 x 축에 대한 단면은 우측 비틀림이 존재함으로 실제 토출 액적의 x 축은 원점을 기준으로 (+)방향에 치중되고, 노즐의 y 축에 대한 단면은 좌측 비틀림이 존재함으로 실제 토출 액적의 y 축은 원점을 기준으로 (-)방향에 치중된다.

3.4.2 액적의 정적 착지 정확도 실험

액적의 정적 착지 정확도 실험은 총 세 가지로 이루어진다. 가장 먼저 이루어지는 액적의 반복 토출 실험은 시스템의 초기상태에서 이루어지며 노즐의 형상에 의해 토출된 액적이 토출 원점으로부터 벗어나는 정도를 분석한다. 그 다음은 정적 오차에 해당하는 부분으로써 스테이지의 이송 시

에 발생하는 위치오차를 고려하기 위한 스테이지 반복 이송 실험이다. 즉, 고정판을 이용하여 기관을 시스템 초기상태의 위치에 고정한다 하더라도 스테이지가 동일한 좌표로 이송할 때 이 지점에 정확히 위치하지 않기 때문에 실험을 통한 스테이지의 이송 위치를 고려해 주어야 한다. 마지막으로 이 두 실험 결과를 분석하여 보상하고 이를 검증하는 것이 마지막 착지 위치 예측을 통한 보정 실험이다.

위에서 언급한 세 가지의 실험결과는 정도의 측면에서 분석한다. 정도란 정확도(accuracy)와 정밀도(precision)를 합한 개념으로써 실험의 샘플이 모집단이 아니기 때문에 확률의 개념이 도입된 평균치를 중심으로 한 정규분포에 가까운 t 분포를 이용한다. 실험 횟수는 정규 분포에 근사해질 수 있는 최소 측정 수인 30 회로 설정한다.

t 분포를 이용한 액적의 착지 정확도는 식(3)과 같이 구할 수 있다. 토출된 액적의 착지 정확도는 평균 정확도(δ_m)와 평균치를 중심으로 한 정확도(δ_{av})의 합으로 δ_{av} 는 (+), (-)값을 모두 갖기 때문에 노즐의 방향성을 고려하여 구한다. 이 때 x 축은 (+) 방향, y 축은 (-)방향을 갖는다. 또한 착지 정밀도(ϵ)는 식(4)와 같다. 이 때 $t(\Phi, \alpha/2)$ 는 자유도($\Phi = n-1$)로 확률 (1- α) 일 때의 t 분포값이다. n 은 실험 횟수이고, α 는 일반적으로 95%의 확률로 하여 0.05 로 정의한다. 불편분산(v)는 수식(5)를 통해 구할 수 있다.

$$\delta_{av} = t(\Phi, \frac{\alpha}{2}) \times \sqrt{\frac{v}{n}} \tag{3}$$

$$\epsilon = t(\Phi, \frac{\alpha}{2}) \times \sqrt{v} \tag{4}$$

$$v = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{av})^2 \tag{5}$$

3.4.3 실험결과 및 분석

먼저 시스템의 초기상태에서 이루어진 액적의 반복 토출 실험 결과는 Table 1 에 나와있다. 실험 결과 x 축에 대한 $\delta_{m_droplet}$ 은 190.45 μm , $\delta_{av_droplet}$ 는 9.41 μm 이므로 토출된 액적의 x 축 정확도 $\delta_{droplet}$ 은 199.86 μm 이다. 또한 정밀도 $\epsilon_{droplet}$ 은 51.52 μm 이므로 토출된 액적의 x 축에 대한 착지 위치는 토출원

점으로부터 199.86 μm 떨어진 곳에 $\pm 51.52 \mu\text{m}$ 의 범위를 갖는다. 이와 동일한 방법으로 y 축의 $\delta_{m_droplet}$ 은 -85.21 μm , $\delta_{av_droplet}$ 은 17.61 μm 이므로 $\delta_{droplet}$ 은 -102.82 μm 이다. 이 때 $\epsilon_{droplet}$ 은 96.39 μm 이므로 y 축에 대한 착지 위치는 토출원점으로부터 -102.82 μm 떨어진 곳에 $\pm 96.39 \mu\text{m}$ 의 범위를 갖는다.

Table 1 Experimental result for ejected droplets

No.	x axis	y axis	No.	x axis	y axis
1	161.70	-100.10	16	192.50	-26.95
2	219.45	-3.85	17	177.10	-19.25
3	150.15	-88.55	18	242.55	-77.00
4	173.25	-103.95	19	154.00	7.70
5	161.70	-127.05	20	207.90	-23.10
6	180.95	-73.15	21	180.95	-146.30
7	192.50	-130.90	22	211.75	-84.70
8	180.95	-80.85	23	211.75	-123.20
9	188.65	-111.65	24	231.00	-127.05
10	215.60	-46.20	25	227.15	-100.10
11	150.15	-127.05	26	184.80	-100.10
12	161.70	-100.10	27	204.05	-111.65
13	161.70	-69.30	28	192.50	-173.25
14	204.05	-7.70	29	219.45	-134.75
15	188.65	-30.80	30	184.80	-115.50

Table 2 Experimental results for repeated transfer of stage

No.	x axis	y axis	No.	x axis	y axis
1	130.90	-50.05	16	107.80	-3.85
2	157.85	-23.10	17	111.65	-65.45
3	180.95	11.55	18	42.35	127.05
4	103.95	-77.00	19	11.55	-3.85
5	180.95	-15.40	20	142.45	-34.65
6	161.70	-7.70	21	180.95	-23.10
7	184.80	-30.80	22	154.00	-15.40
8	169.40	19.25	23	161.70	11.55
9	157.85	-69.30	24	19.25	-7.70
10	161.70	-57.75	25	11.55	-11.55
11	0.00	-19.25	26	123.20	11.55
12	0.00	-34.65	27	134.75	7.70
13	-23.10	19.25	28	107.80	11.55
14	142.45	-30.80	29	146.30	30.80
15	134.75	-7.70	30	142.45	-111.65

정적오차를 고려하기 위한 스테이지의 반복이 속 실험 결과는 Table 2 에 나와있다. 실험결과 x 축에 대한 δ_{m_stage} 는 114.73 μm , δ_{av_stage} 는 23.92 μm 이므로 스테이지의 x 축 정확도 δ_{stage} 는 138.65 μm 이다. 또한 정밀도 ϵ_{stage} 는 131.08 μm 이므로 스테이지의 x 축에 대한 착지 위치는 토출원점으로부터 138.65 μm 떨어진 곳에 $\pm 131.08 \mu\text{m}$ 의 범위를 갖는다. 동일한 방법으로 y 축의 δ_{m_stage} 는 -15.02 μm , δ_{av_stage} 는 15.79 μm 이므로 δ_{stage} 는 -30.81 μm 이다. 이 때 ϵ_{stage} 는 86.41 μm 이므로 y 축에 대한 착지 위치는 토출원점으로부터 -30.81 μm 떨어진 곳에 $\pm 86.41 \mu\text{m}$ 의 범위를 갖는다.

시스템의 정적 모델링을 통해 얻은 식(2)의 P_d 에 앞의 두 실험 결과를 반영하여 최종 액적이 기관에 떨어지는 액적의 착지 위치(P_{d_final})를 식(6)과 같이 도출 할 수 있다.

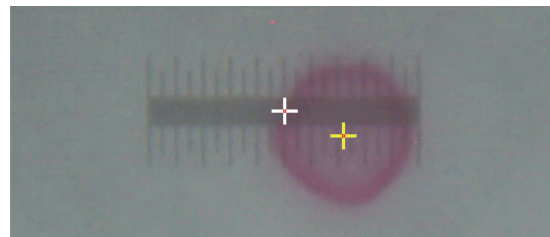
$$P_{d_final(x,y)} = (\delta_{(x,y)} + \epsilon_{(x,y)})_{droplet} + (\delta_{(x,y)} + \epsilon_{(x,y)})_{stage} \quad (6)$$

액적 토출 실험을 통해 얻은 $\delta_{droplet}$ 은 (199.86, -102.82) μm , $\epsilon_{droplet}$ 은 (± 51.52 , ± 96.39) μm 이다. 스테이지의 반복 실험을 통해 얻은 위치오차에 의한 δ_{stage} 는 (138.65, -30.81) μm , ϵ_{stage} 는 (± 131.08 , ± 86.41) μm 이다. 이 두 실험 결과에 의한 정확도와 정밀도는 일정한 비율로 발생하는 것이 아니기 때문에 두 값의 합을 통한 최대 값을 고려해야만 한다. 따라서 초기상태에서의 토출된 액적 위치는 토출원점으로부터 (338.51, -133.63) μm 떨어진 곳에 위치하고 (± 182.6 , ± 182.8) μm 의 토출 범위를 갖는다. 스테이지의 분해능은 4 μm 이므로 시스템의 초기상태에서 액적의 착지 위치를 보정하여 토출원점에 액적이 떨어질 수 있도록 한다. 따라서 스테이지의 x 축의 좌표를 -130 point 이송하여 액적의 x 축에 대한 토출 위치를 -520 μm 로 보정하고 스테이지의 y 축 좌표를 +79 point 이송하여 액적의 y 축에 대한 원점 위치를 +316 μm 로 보상한다. 즉 노즐 끝단과 일직선이 되는 기관의 토출 원점은 초기상태 (0,0)으로부터 (-520, 316) μm 떨어진 곳이 위치한다. 이상적인 경우 이러한 보상을 통해 액적이 떨어지는 위치는 (0,0)이 된다. 보정 실험 결과는 Table 3 에 나와있다. 실험결과 x 축에 대한 $\delta_{m_calibration}$ 은 2.57 μm , $\delta_{av_calibration}$ 은 4.49 μm 이므로 스테이지의 x 축 정확도는 7.06 μm 이다. 또한 정

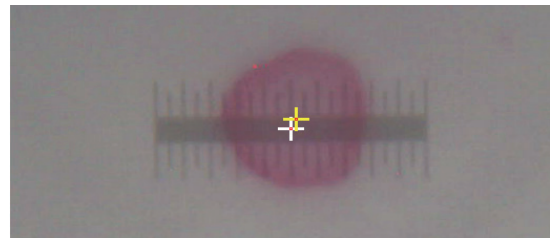
밀도 $\epsilon_{calibration}$ 은 24.64 μm 이므로 스테이지의 x 축에 대한 착지 위치는 토출원점으로부터 1.92 μm 떨어진 곳에 $\pm 24.64 \mu\text{m}$ 의 범위를 갖는다. y 축의 $\delta_{m_calibration}$ 은 20.92 μm , $\delta_{av_calibration}$ 은 7.81 μm 이므로 $\delta_{calibration}$ 은 -13.11 μm 이다. 이 때 $\epsilon_{calibration}$ 은 42.76 μm 이므로 y 축에 대한 착지 위치는 토출원점으로부터 13.11 μm 떨어진 곳에 $\pm 42.76 \mu\text{m}$ 의 범위를 갖는다.

Table 3 Experimental results after stage calibration

No.	x axis	y axis	No.	x axis	y axis
1	11.55	3.85	16	-11.55	15.40
2	-19.25	11.55	17	-7.70	11.55
3	-7.70	-3.85	18	3.85	26.95
4	7.70	7.70	19	-23.10	30.80
5	23.10	46.20	20	-11.55	-7.70
6	-15.40	73.15	21	3.85	11.55
7	7.70	50.05	22	11.55	34.65
8	3.85	11.55	23	11.55	26.95
9	0.00	-3.85	24	19.25	42.35
10	3.85	69.30	25	3.85	11.55
11	15.40	42.35	26	3.85	11.55
12	7.70	19.25	27	19.25	15.40
13	3.85	11.55	28	15.40	3.85
14	15.40	11.55	29	-11.55	11.55
15	0.00	38.50	30	-7.70	-7.70



(a) Before calibration



(b) After calibration

Fig. 7 Droplet positions before and after calibration

시스템의 초기상태 보정 결과, 시스템의 초기 상태에서 토출된 액적은 Fig. 7(a)같이 토출원점 (0,0)으로부터 (338.51, -133.63) μm 떨어진 곳에 위치하고, ($\pm 182.6, \pm 182.8$) μm 의 토출 범위를 가질 때, 토출원점은 (0,0)이 아닌 (-520, 316) μm 로 보정 상태에서의 토출된 액적은 Fig. 7(b) 같이 토출원점 (0,0)으로부터 (1.92, 13.11) μm 떨어진 곳에 위치하고, ($\pm 24.64, \pm 50.57$) μm 의 범위를 갖는 것을 알 수 있다.

본 논문에서는 자기변형 잉크젯 헤드에서 토출된 액적의 착지 위치를 예측하여 이를 보정하여 토출 액적의 착지 정확도를 향상하는 연구를 수행하였다. 보정 결과 x 축에 대한 액적의 착지 정확도는 338.51 μm 에서 7.06 μm 로 약 98%, y 축의 착지 정확도는 -133.63 μm 에서 13.11 μm 로 약 90% 향상되었다. 또한 x 축에 대한 액적의 착지 정밀도는 $\pm 182.6 \mu\text{m}$ 에서 $\pm 24.64 \mu\text{m}$ 로 약 87%, y 축의 착지 정밀도는 $\pm 182.8 \mu\text{m}$ 에서 $\pm 42.76 \mu\text{m}$ 로 77% 향상되었다.

4. 결론

본 논문에서는 자기변형 잉크젯 헤드의 액적 형성과정 이후에 관한 토출 액적의 착지 위치를 예측하고, 이 예측을 통해 액적의 특정 위치 토출에 대한 착지 정확도를 향상시키는 내용을 다루었다. 토출된 액적의 착지 위치 예측을 위한 가장 기본 단계는 자기변형 잉크젯 헤드 시스템을 단순화하여 노즐과 기관 사이의 정적 모델링을 하는 것으로 이 단계에서 어떠한 가정을 세우고, 어떠한 요인을 고려하여 어떻게 접근을 하느냐에 따라 결과가 달라 질 수 있다.

따라서 본 시스템의 정적 모델링 시, 고려해야 할 여러 요인 중 액적의 착지 위치에 가장 영향을 주는 요인인 노즐의 내부 형상과 스테이지만을 고려한 기본 모델링을 통해 보상을 수행하였고 그 결과 결과 x 축에 대한 액적의 착지 정확도는 약 98%, y 축의 착지 정확도는 약 90% 향상시켰다. 본 논문에서 고려하지 않은 액적의 토출 속도나 기관에 따른 액적의 퍼짐 정도와 같은 액적 자체의 정보를 기본 모델링에 추가한다면 실제 시스템과 근사한 모델링이 가능하고, 실험 샘플 역시 더 많은 수를 확보하여 모집단을 얻을 수 있다면 이론적으로 부족한 부분도 충분히 보정 가능 할 것이다.

참고문헌

1. Yoo, J. H. and Park, Y. W., "Experimental investigation of magnetostrictive DoD inkjet head for droplet formation," *Current Applied Physics*, Vol. 11, No. 1, pp. 353-359, 2011.
2. Kwon, K. S., "Development of a Test Stand for Measuring Ink Jetting Performance," *J. of the KSPE*, Vol. 25, No. 8, pp. 45-50, 2008.
3. Sedighi, N., Murad, S., and Aggarwal, S. K., "Molecular Dynamics Simulations of Nanodroplet Spreading on Solid Surfaces, Effect of Droplet Size," *Fluid Dynamics Research*, Vol. 42, No. 3, Paper No. 035501, 2010.
4. Yoo, J. H. and Park, Y. W., "Development of Magnetostrictive Inkjet Head for Liquid Droplet Formation," *Journal of Applied Physics*, Vol. 111, No. 7, Paper No. 07A936, 2012.
5. Feng, J. Q., "A General Fluid Dynamic Analysis of Drop Ejection in Drop-on-Demand Ink Jet Devices," *J. Imaging Science and Technology*, Vol. 46, No. 5, pp. 398-408, 2002.