

고점도 잉크를 위한 니들 타입 젯 디스펜서의 액적 형성에 관한 해석적 연구

주영철*, 이해민, 권계시
순천향대학교 기계공학과

A Numerical Analysis for Droplet Formation of Needle-Type Jet Dispenser for High Viscosity Ink

Youngcheol Joo*, Hyemin Lee, Kye-Si Kwon
Department of Mechanical Engineering, Soonchunhyang University

요약 잉크젯 기술이 문서의 프린팅뿐만 아니라 산업의 여러 분야에 활용되면서 점도가 높은 잉크를 분사하여야 할 필요성이 많이 늘어나고 있다. 기존 잉크젯 기술로는 고점도 잉크를 분사하기 어려워서 니들 타입 젯 디스펜서 기술이 주목받고 있다. 본 연구는 전산유체해석 기술을 적용하여 니들 타입 디스펜서에서 고점도 잉크가 분사될 때 액적 형성 메커니즘을 설명하였다. 챔버 내에서 니들이 전진하면 니들 앞부분 잉크의 압력이 높아지는데, 초기에는 노즐 내 고점도 잉크의 점성마찰력이 니들 앞부분 잉크의 압력보다 높아서 잉크의 거동이 없다. 니들이 노즐 시트에 충돌하기 직전에 니들 앞의 압력이 급격히 높아지는데, 이때 압력이 노즐 내 잉크의 점성마찰력을 넘어서서 잉크가 토출된다. 액적 토출에 영향을 미치는 중요한 변수인 잉크 초기 충전량, 니들의 전진 속도, 잉크의 점도 변화가 액적 형성에 미치는 영향을 연구하였다. 적절한 형상의 액적을 만들 수 있는 변수의 범위가 무척 좁아서 변수 선정에 주의를 기울여야 한다. 니들 타입 젯 디스펜서에서 액적 토출 해석과 실험 결과를 비교한 결과 전산모사 해석 결과가 실제 현상을 잘 구현함을 확인하였다.

Abstract As inkjet technology is used in various industries, the need for injecting high viscosity ink also increases simultaneously. Since ordinary inkjet technology is not appropriate for use in injecting high viscosity ink, a needle-type jet dispenser is usually developed for this purpose. This study explains the mechanism of inkjet droplet formation in this needle-type jet dispenser numerically. This mechanism uses the fact that as the needle travels in the chamber, the pressure of the ink around the needle tip increases. Subsequently, the ink in the nozzle does not move as the viscous friction force of the ink in the nozzle exceeds the pressure force of the ink around the needle tip. But, when the gap between the needle and the nozzle seat is decreased to about 0.02 mm, the pressure of the ink around the needle tip increases rapidly. This pressure increase overcomes the viscous friction force of the ink in the nozzle. Then the ink is ejected out through the nozzle exit to form the inkjet droplet. Apart from explaining this mechanism, the present work also studies the effects of variables such as initial ink fill, needle speed, and ink viscosity on the inkjet drop formation. The analyzed droplet formation results agree well with the experimentally obtained results.

Keywords : Droplet, High Viscosity, Ink, Needle-type Jet Dispenser, Numerical Analysis

이 논문은 2021학년도 순천향대학교 교수 연구년제에 의하여 연구하였음

*Corresponding Author : Youngcheol Joo(Soonchunhyang Univ.)

email: ychjoo@sch.ac.kr

Received October 14, 2021

Revised November 17, 2021

Accepted February 4, 2022

Published February 28, 2022

1. 서론

미세 액적 분사 기술이 기존의 문서 프린팅뿐만 아니라 반도체 패키징, LED 제조, 태양전지 제조, 의공학 분야 등 산업 전반에 걸쳐 사용되면서 점도가 높은 잉크를 분사하여야 할 필요성이 늘어나고 있다[1-8]. 기존 잉크 젯 기술로는 고점도의 잉크를 분사하기 어려워서 니들 타입 젯 디스펜서의 활용이 활발하게 연구되고 있다[9-17]. 니들 타입 젯 디스펜서는 챔버 내에 있는 니들이 앞으로 움직이면서 챔버 내에 있는 고점도의 잉크를 노즐을 통해 분사하는 방식으로 작동된다. 니들을 들어 올리는 방식은 자기구동 액추에이터나 피에조 액추에이터의 움직임을 레버를 통해 증폭시키거나 공압을 이용하여 니들을 들어 올리는 등 연구마다 차이가 있으나, 니들이 아래로 내려가는 방식은 거의 다 니들 위에 장착된 스프링의 탄성 복원력에 의하여 니들이 내려가는 방식으로 작동하고 있다[9-12,14]. 니들 타입 젯 디스펜서는 챔버 내에서 니들이 직접 왕복운동을 하면서 잉크를 분사하기 때문에 1~5 Pa·s의 고점도 잉크까지 분사가 가능하다는 장점이 있다[11-15].

니들 타입 젯 디스펜서의 개발과 작동에 대한 실험적 연구는 많이 진행되었지만, 액적 형성 메커니즘에 관한 이론적인 연구는 드물다. 초기에는 니들 타입 디스펜서의 각 작동 단계마다 수학적 모델을 만들어 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 액적의 형성을 예측하는 방법을 사용하였다[9-11,16], 최근에는 직접 전산유체해석 프로그램(CFD: Computational Fluid Dynamics)을 이용하여 디스펜서 구동을 해석하여 액적 형성을 예측하는 방법을 사용하고 있다[12,15,17]. 그러나 CFD를 이용한 연구의 대부분은 자신들의 디스펜서 모델에 CFD를 적용하여 어느 변수 범위에서 액적이 생성되고 그 범위 이상에서는 액적이 생성되지 않는지를 파악한 후 간단한 실험으로 확인한 경우가 대부분으로, 디스펜서 내부의 압력이나 유동 등을 파악하여 액적 형성 메커니즘에 관해 밝히려는 연구는 드물다.

본 연구에서는 전산유체해석 프로그램을 이용하여 니들 타입 젯 디스펜서에서 액적이 형성되는 메커니즘에 대해 파악하였고, 중요한 변수인 잉크 초기 충전량과 니들의 전진 속도, 잉크의 점도가 액적 토출에 미치는 영향을 연구하였으며, 이를 실험 결과와 비교하였다.

Nomenclature

P_L Lift pressure for needle

P_S Supply pressure of ink to the chamber
 T_{ON} Valve open time

2. 니들 타입 젯 디스펜서의 구조와 해석 모델

니들 타입 젯 디스펜서의 구조와 작동 원리를 Fig. 1에 나타내었다. 공기압 P_L (lift pressure)이 니들에 작용하면 니들이 스톱퍼(adjustable stopper)까지 올라가면서 니들과 스톱퍼 사이에 있는 스프링을 압축시키고, 니들이 올라가면서 생긴 챔버와 노즐의 빈 공간을 잉크 저장통에서 압력 P_S (supply pressure)로 잉크가 나와서 채운다. 일정 시간 T_{ON} 후에 공기압 P_L 을 끊으면 니들 위에 있는 스프링의 탄성력이 복원되면서 니들을 아래로 밀어내어 니들이 노즐 시트와 충돌하게 된다. 니들이 아래로 내려올 때 챔버 내의 공간은 줄어들게 되고, 챔버와 노즐에 있던 잉크가 노즐 밖으로 토출되어 액적을 형성한다.

액적 형성에 영향을 미치는 변수는 여러 개가 있는데, 그중 하나는 니들이 내려오기 시작하는 시점에 챔버와 노즐 내부를 채우고 있는 잉크의 초기 충전량이다. 니들이 위로 올라갔다가 아래로 내려오기 시작할 때까지의 시간이 T_{ON} 인데, 이 시간의 길이에 따라 잉크의 초기 충전량이 정해진다. 즉 T_{ON} 이 짧으면 니들이 올라가면서 생긴 챔버 내의 빈 공간에 잉크가 충분히 채워지지 않고, T_{ON} 이 너무 길면 잉크가 빈 공간을 채우고도 남아 니들이 내려오기도 전에 노즐 밖으로 흐르게 된다. 잉크 초기 충전량을 직접 조절할 수는 없고, T_{ON} 과 잉크 저장통 압력 P_S 를 조절하는 간접적인 방법으로 액적이 형성될 수 있는 적당한 잉크 초기 충전량을 찾아야 한다.

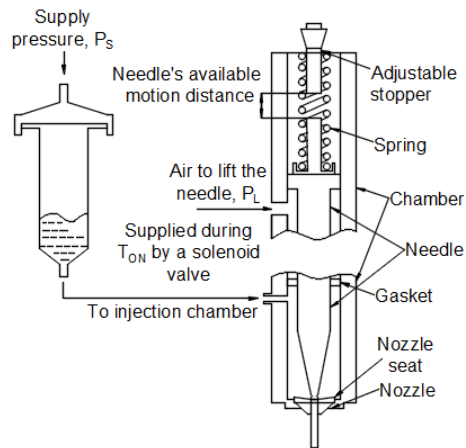


Fig. 1. Basic concept of the needle-type jet dispenser

니들의 전진 속도도 중요한 변수 중 하나인데, 이는 니들이 전진하기 시작해서 노즐 시트에 충돌할 때까지의 거리와 니들 위에 있는 스프링의 탄성계수에 의해 결정된다. 니들의 전진 속도도 직접 측정하기는 어렵고, 니들 이동 거리와 노즐 시트 충돌까지 걸리는 시간을 측정하는 방법으로 간접적으로 산출한다.

본 연구에서는 P_2 이 끊겨서 니들이 아래로 내려오기 시작하는 시점부터 니들이 노즐 시트에 충돌하고 그 후 잉크가 노즐 밖으로 토출되어 액적이 형성되는 과정을 전산유체해석 프로그램인 ANSYS Fluent를 이용하여 모사하였다. Fig. 2는 해석에 사용된 디스펜서 모델이다. 노즐은 안지름 0.1 mm, 길이 5 mm의 굉장히 가늘고 긴 형태이다. 니들은 앞부분이 지름 1.5 mm의 구 모양으로 되어 있는데, 니들이 전진하면 이 구 모양 부분이 노즐 시트의 경사면에 충돌하면서 멈추게 되어 있다. 니들의 잉크 저장통으로부터 챔버에 잉크를 공급하는 잉크 유입 튜브는 지름 2 mm 이고 작동압력 P_3 는 0.015 MPa 이다. 노즐 끝에서 공기중으로 토출되는 잉크 액적의 형성 과정을 관찰하기 위해 노즐 끝에 폭 3 mm, 길이 6 mm의 공기 해석 영역을 설정하였다.

디스펜서의 전체적인 형상이 축대칭 형상이므로 해석은 2차원 축대칭으로 수행하였다. 잉크 유입 튜브가 챔버 벽의 한곳에 부착되어 유입된 잉크에 반지름 방향 유동이 발생하지만, 이는 전체 챔버와 노즐내 유동 해석에 무시할 만하다고 가정하였다. 대신 튜브의 단면적을 계산하여 해석 모델의 입력 튜브 단면적도 이와 동일하게 하였다.

잉크 유동과 공기 영역 내에서 액적의 형성과정은 ANSYS Fluent의 VOF (Volume of Fluid)기능을 이용하였고, 니들의 움직임은 동적격자(dynamic mesh) 기능을 이용하여 해석하였다. 노즐과 공기 영역에는 정확한 유동 해석을 위해 사각형 메쉬를 생성하였고, 챔버 영역에는 니들에 동적격자를 적용하기 위해 삼각형 메쉬를 생성하였다. 해석에 사용한 격자의 크기는 노즐과 공기 영역이 5 μm 이고 챔버 영역이 10 μm 로 총 격자수가 60만개이다. 시간단계(time step)는 1 μs 로 설정하였다. 해석에 사용한 격자보다 격자의 개수를 2배 늘려 해석해도 거의 비슷한 잉크 액적 토출형상 결과가 나왔는데, 두 해석의 잉크 액적 토출 속도는 6% 이내의 상대오차 범위에서 일치하였다.

해석에 사용된 잉크는 글리세린 (Glycerin) 90 wt. %와 물 10 wt. %의 혼합물로, 점도와 표면장력은 각각 0.14 Pa·s와 0.063 N/m 로 측정되었다[6]. 접촉각은

90 로 하였다[18].

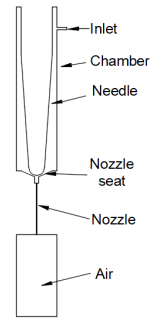


Fig. 2. Schematic diagram of the needle-type jet dispenser

3. 잉크 액적 토출 메커니즘

니들이 아래로 내려가기 시작해서 노즐 시트와 충돌할 때까지의 거리인 이동거리를 0.17 mm로 하고 니들의 속도를 0.2 m/s로 하여 해석하였다. 니들이 아래로 내려오기 시작하는 시점의 초기 잉크 충전량은 잉크가 챔버와 노즐 내부를 다 채웠는데 잉크와 공기의 경계면이 노즐 출구에서 0.1 mm 안쪽인 지점에 형성되었다고 가정하였다. 잉크 입력 튜브의 압력 P_3 는 0.015 MPa이다.

해석을 통하여 Fig. 3과 같이 니들이 전진함에 따라 챔버와 노즐 내의 압력 분포 변화를 구하였다. Fig. 3 (a)는 니들이 전진하기 시작한지 0.4 ms 후의 압력 분포를 보여주는데, 이때 니들과 노즐 시트 사이의 간격은 0.09 mm 이다. 니들이 전진하면서 공간이 줄어들어 잉크의 압력이 상승하는데, 전진에 따른 압력을 직접 받는 니들 맨 앞 부분의 잉크는 압력이 0.085 MPa까지 올라가고 니들 측면의 챔버 부분은 압력 상승이 상대적으로 적다. 노즐이 워낙 가늘고 길며 잉크의 점성이 높아서 노즐내 잉크의 점성마찰력이 니들 앞부분의 압력을 충분히 버틸 수 있으므로 노즐 출구의 공기부에 미치는 압력 변화는 없다. 대신 잉크 유입튜브의 압력은 0.015 MPa이므로 유입튜브에서 잉크가 들어오지 못하고 오히려 유입튜브를 통하여 잉크가 밖으로 빠져나가게 된다. Fig. 3 (b)에 니들 전진후 0.65 ms의 압력 분포를 나타내었는데, 이때 니들과 노즐 시트 사이의 간격은 0.04 mm 이다. 니들 앞부분의 압력은 0.35 MPa까지 올라가는데 니들과 노즐 시트 사이에 0.04 mm의 간격이 있기 때문에 그 사이로 압력이 빠져나가 챔버부의 압력도 같이 상승시킨다.

니들 이동거리와 전진 속도에서 산출하면 니들이 전진하기 시작하지 0.85 ms 후에 노즐시트와 충돌하는 것을 알 수 있는데, Fig. 3 (c)에 니들이 노즐 시트에 충돌하기 직전인 0.84 ms의 압력 분포를 나타냈다. 이때 니들과 노즐 시트 사이의 간격은 0.002 mm 이다. 니들이 전진하면서 공간이 줄어들어 니들 앞부분 잉크의 압력이 상승하는데 니들과 노즐 사이의 간격이 0.002 mm로 거의 막혀 있어서 압력이 챔버 부분으로 빠져나가지 못하고 급격히 상승하게 되어 18 MPa 까지 오른 해석결과를 얻었다. 니들이 전진하기 시작해서 노즐 시트와 충돌할 때까지 이동거리가 총 0.17 mm인데, 초기에는 압력이 미미하게 오르다가 니들과 노즐 시트의 간격이 0.02 mm 인 구간부터 압력이 급격히 상승한 것이다.

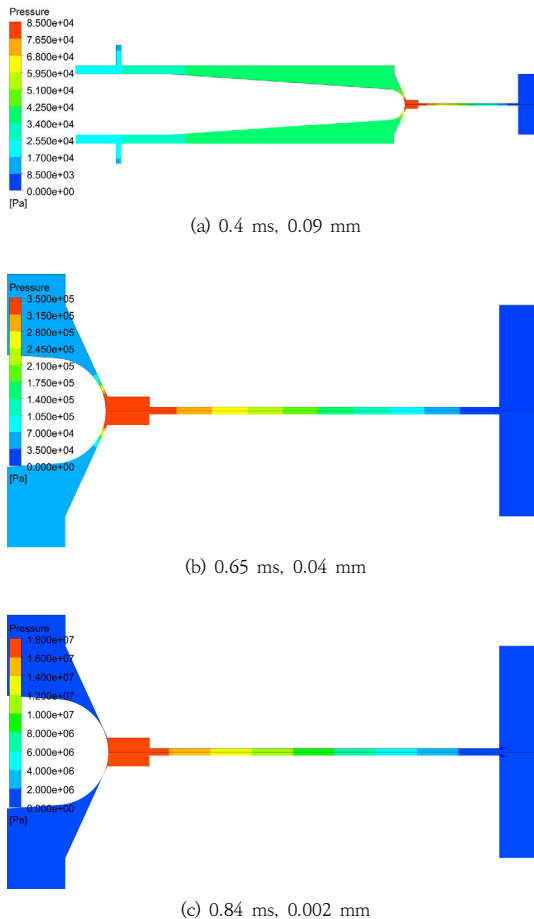


Fig. 3. Pressure distribution in the dispenser according to the time variation (time after needle start to move, gap between needle and nozzle seat)

노즐 내의 잉크는 점성마찰력이 크기 때문에 니들이 전진하여 니들 앞의 압력이 높아져도 움직이지 않고 있다가, 니들이 노즐 시트와 충돌하기 직전에 압력이 급격하게 상승하면서 점성마찰력을 넘어서면 잉크가 전진하기 시작하여 노즐 출구 밖으로 토출된다. 이 현상은 전체 해석영역에서 잉크와 공기가 빠져나가는 체적유량의 변화를 시간에 따라 나타낸 Fig. 4에서 알 수 있다. Fig. 4 (a)는 챔버에 붙어있는 잉크 유입튜브를 통해 드나드는 잉크의 체적유량을 시간에 따라 나타낸 그림이고, Fig. 4 (b)는 노즐 밖의 공기 해석영역의 바깥 경계면을 통하여 드나드는 공기의 체적유량을 시간에 따라 나타낸 그림이다. 잉크나 공기가 해석영역 안으로 들어오면 양의 체적유량을 나타내고, 해석영역 밖으로 유출되면 음의 체적유량을 나타낸다.

니들이 전진하기 시작해서 노즐 시트에 충돌할 때까지 챔버 내의 공간은 니들의 단면적과 니들의 이동속도를 곱한 값인 $1.41 \text{ cm}^3/\text{s}$ 의 체적유량으로 줄어든다. 니들이 전진하기 시작한 0 ~ 0.75 ms 기간에는 잉크가 유입튜브를 통하여 챔버내 공간이 줄어든 것과 같은 체적유량이 빠져나가는 것을 Fig. 4 (a)에서 볼 수 있고, 공기 해석영역의 바깥 경계면을 통하여 나가는 체적유량은 거의 없다는 것을 Fig. 4 (b)에서 볼 수 있다. 이는 앞의 챔버 내 압력분포 그림에서 설명하였듯이 니들 앞 잉크의 압력에 의한 힘이 노즐 내 잉크의 점성마찰력보다 작기 때문에 니들이 전진하면서 줄어든 체적유량이 잉크 유입튜브를 통하여 잉크를 밀어내고 있기 때문이다.

니들 충돌 직전인 0.75 ~ 0.85 ms 에서 잉크 유입튜브를 통해서 빠져나가는 잉크의 체적유량이 약간 줄어드는 것을 Fig. 4 (a)에서 볼 수 있고 공기 해석영역의 바깥 경계면을 통하여 빠져나가는 체적유량이 발생하는 것을 Fig. 4 (b)에서 볼 수 있다. 이는 니들 앞의 압력이 노즐 내 잉크의 점성마찰력보다 커져서 잉크를 천천히 앞으로 밀어내고 있기 때문이다.

Fig. 4 (a)에서 보면 니들 충돌 시점인 0.85 ms에서 잉크 유출량이 급격히 줄어드는데, 이는 니들이 노즐 시트에 충돌하여 더 이상 니들 앞의 높은 압력이 챔버 옆부분에까지 전달되지 않아서 잉크의 유출량이 줄어드는 것을 의미한다. 반면에 이 시점에는 Fig. 4 (b)에서 보는 바와 같이 공기 해석영역의 바깥 경계면 밖으로 빠져나가는 유량이 0이 되는데, 충돌 전후에 액적이 토출된 다음에는 액적이 앞으로 이동할 뿐 더 이상 노즐에서 유출되는 유량은 없기 때문이다.

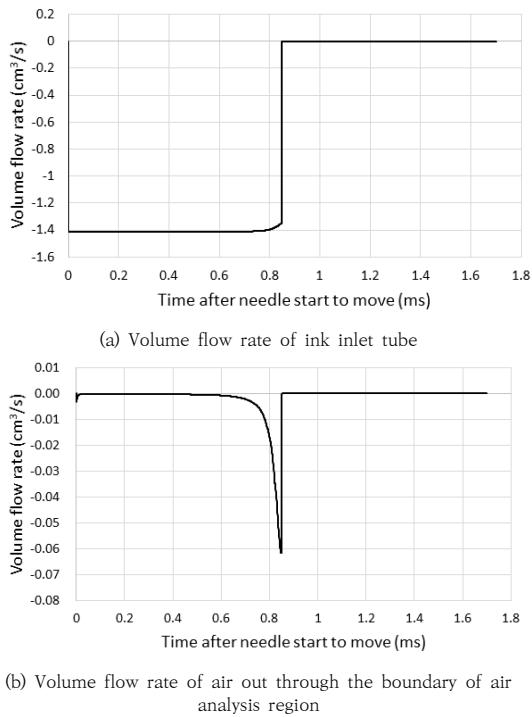


Fig. 4. Variation of volume flow rates according to the time after needle start to move

Fig. 5에 니들이 전진하기 시작한 후 잉크 액적 토출 과정을 시간별로 나타내었다. 초기상태에 노즐 출구의 안쪽으로 0.1 mm 인 지점에 잉크와 공기의 경계면이 형성되어 있는 것이 0 ms 의 그림에 나타나 있다. 0.7 ms 의 그림은 니들 전진 시작부터 약 0.7 ms 까지 노즐내 잉크의 움직임이 거의 없다는 것을 나타낸다. 니들이 노즐 시트와 충돌하기 직전부터 잉크가 노즐 밖으로 토출되기 시작하여 노즐 시트와 충돌하는 시점인 0.85 ms에서는 그림과 같이 잉크가 노즐 출구 밖에 돌출되어 있는 형상을 보여준다. 그 이후에 노즐을 빠져나온 잉크는 1.12 ms 시점의 그림에서 보듯이 꼬리가 있는 액적을 형성한다. 액적이 더 전진하면서 꼬리가 끊어지면 뒷부분은 노즐 출구로 돌아가고 앞부분은 액적에 달라붙어 1.4 ms 시점의 그림에 보이는 구형에 가까운 액적을 형성한다.

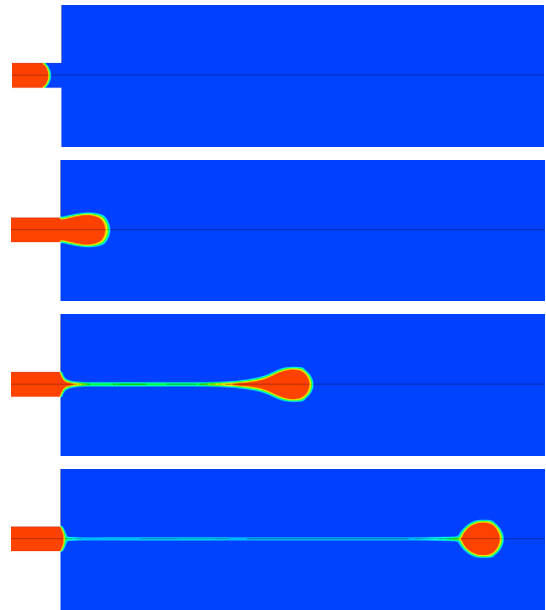


Fig. 5. Typical inkjet droplet formation process (time after needle start to move: 0 ms, 0.7 ms, 0.85 ms, 1.12 ms, 1.4 ms, each)

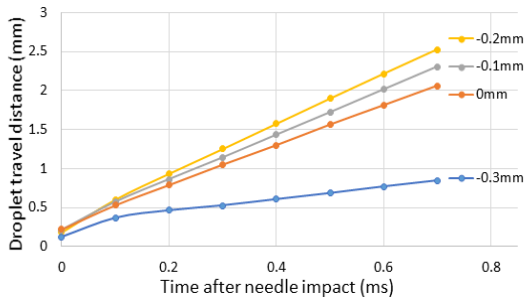
4. 주요 변수가 잉크 액적 토출에 미치는 영향

4.1 잉크 초기 충전량의 영향

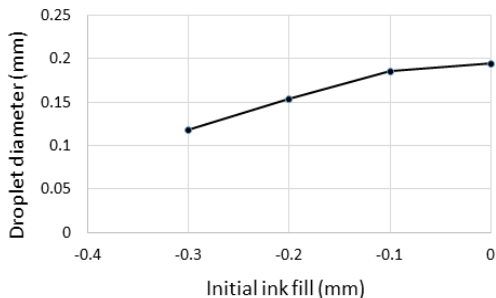
니들이 내려오기 시작하는 시점에 챔버와 노즐 내부를 채우고 있는 잉크의 초기 충전량은 잉크 액적 형성에 직접적인 영향을 미치는 중요한 변수이다. 니들이 스톱퍼에 올라가 있는 시간인 T_{ON} 과 잉크 저장통 압력 P_s 를 조절하는 방법으로 잉크 초기 충전량을 조절한다. 본 연구에서는 잉크의 체적 대신 잉크와 바깥 공기의 경계면 위치로 충전량을 간접적으로 표시하였다. 즉, 잉크가 챔버와 노즐을 모두 채우고 잉크와 바깥 공기의 경계면이 노즐 출구에 형성된 경우를 0 mm로 하였다. 그보다 잉크의 양이 조금 적어서 잉크와 바깥 공기와의 경계면이 노즐 출구에서 0.1 mm 안쪽으로 들어간 지점에서 형성된 경우를 -0.1 mm 로 하였는데, 노즐의 안지름이 0.1 mm이기 때문에 이 경우는 0 mm의 경우보다 잉크 양이 $0.785 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ 적은 경우다. 같은 방법으로 경계면이 -0.2 mm, -0.3 mm, -0.4 mm 에 형성된 경우에 대해 액적 토출을 해석하였다. 니들의 전진 속도는 0.2 m/s이고, 잉크의 점도는 0.14 Pa·s로 동일하다.

Fig. 6 (a)에 니들이 노즐 시트에 충돌한 시점 이후 시간에 따른 노즐 출구로부터 잉크 액적 토출거리를 초기

충진량에 해당하는 값으로 나타내었다. 그래프에서 0 ms는 니들이 노즐 시트에 충돌한 시점을 나타낸다. 잉크 초기 충전량이 0 ~ -0.2 mm 일때 구형에 가까운 깔끔한 액적이 생성되었다. 이 경우 니들이 노즐에 충돌하기 전까지는 노즐내 잉크의 전진이 미미하여 초기 위치에서부터 0.2~0.3 mm 밖에 전진하지 못한다. 그러나 충돌 직후에 노즐 밖으로 잉크가 토출되면 액적이 약 3 m/s의 빠른 속도로 토출된다. Fig. 6 (b)에 토출된 잉크 액적의 지름을 나타내었다. 액적의 형상이 완전한 구형이 아니라 눈물방울 형상이므로 폭 방향의 지름과 길이 방향의 지름을 측정하여 평균값을 액적의 지름으로 하였다. 잉크 초기 충전량이 0 ~ -0.2 mm 일때는 초기 충전량이 적을수록 액적의 크기는 작아지는데, 이는 잉크가 노즐 내 빈 공간을 채우고 남는 부분이 노즐 밖으로 토출되기 때문이다. 니들이 전진하면서 잉크에 전달되는 에너지가 같기 때문에 토출되는 액적의 크기가 적을수록 액적의 토출속도가 빨라지는데, 이는 Fig. 6 (a)에서 잘 나타나 있다.



(a) Ink droplet travel distance according to the time after needle impact



(b) Ink droplet size according to the initial ink fill

Fig. 6. Ink droplet formation with the variation of initial ink fill

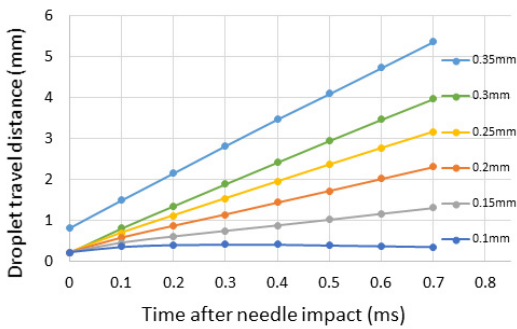
잉크 초기 충전량이 -0.3 mm 일때는 액적의 꼬리가 끊어지지 않아서 액적의 크기도 작고 Fig. 6 (a)에서 보듯이 토출 속도도 느리다. 초기 충전량 -0.4 mm 정도에서는 아예 잉크가 노즐 밖으로 나오지 않는다. 본 해석의 변수 범위에서는 잉크 초기 충전량이 0 ~ -0.2 mm 일때만 적당한 형태의 액적을 얻을 수 있다. 노즐의 길이가 5 mm 인 것을 고려하면 적당한 형태의 잉크 액적을 얻을 수 있는 초기 충전량의 운용 범위가 매우 적은 것을 알 수 있다.

4.2 니들 전진 속도의 영향

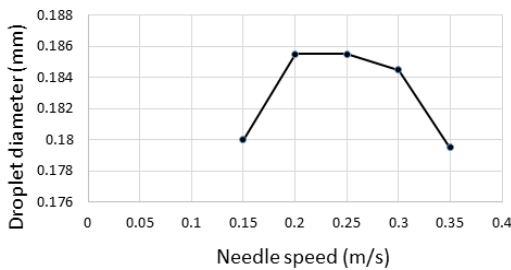
니들이 전진하기 시작하여 노즐 시트에 충돌할 때까지 일정한 속도로 전진한다고 가정하였다. 니들의 전진 속도를 0.1 m/s부터 0.4 m/s까지 변화시키면서 해석을 하였다. 니들이 전진하기 시작하는 시점에서 잉크의 초기 충전량은 잉크와 공기의 경계면이 노즐 출구로부터 0.1 mm 안쪽 지점에 형성된 최적의 충전량의 경우이고, 잉크의 점도는 0.14 Pa·s로 동일하다. Fig. 7 (a)에 니들이 노즐 시트에 충돌한 시점을 기준으로 하여 그 이후에 시간에 따른 잉크 액적이 노즐 출구로부터 토출되어 진행한 거리를 나타내었다. 니들의 전진 속도가 다르면 니들이 전진을 시작할 때부터 노즐 시트에 충돌할 때까지 걸리는 시간이 다르더라도 불구하고 노즐 시트에 충돌한 시점에서 잉크의 토출 거리는 거의 비슷하다. 니들의 속도가 빠를수록 액적 토출 속도가 빨라지는데, 이는 니들의 속도가 빠를수록 큰 운동에너지가 잉크에 전달되었기 때문이다.

Fig. 7 (b)에 액적의 크기를 나타내었는데, 니들의 전진 속도가 0.2 ~ 0.3 m/s인 경우에 토출된 액적의 크기가 크고 거의 구형에 가까운 액적이 발생하였다. 그보다 니들 전진 속도가 느린 0.15 m/s에서는 액적의 머리 크기가 작아졌으며 꼬리도 분리되지 않는다. 0.1 m/s에서는 잉크가 노즐 출구에서 아주 느린 속도로 나오다가 다시 노즐 출구에 남아있는 잉크에 다시 합쳐져 버린다.

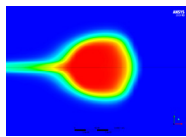
니들 전진 속도가 0.35 m/s 보다 빠른 경우에는 액적이 토출되기는 하지만 속도가 너무 빨라서 공기저항이 커지기 때문에 액적의 형상이 깔끔한 구형에 가까운 형상이 되지 못하고 Fig. 7 (c)에 보이는 앞머리가 평평한 찌그러진 모양의 크기가 작은 액적을 토출하게 된다. 이러한 액적은 실제 산업체에서 사용하기에는 프린팅의 정밀도 면에서 문제가 있기 때문에 피하는 것이 좋다. 따라서 본 해석의 조건에서는 속도 0.2~0.3 m/s의 좁은 속도 영역에서만 깔끔한 형상의 액적을 얻을 수 있다.



(a) Ink droplet travel distance according to the time after needle impact



(b) Ink droplet size according to the needle speed



(c) Ink droplet of needle speed 0.35 m/s at 0.5 ms after needle impact

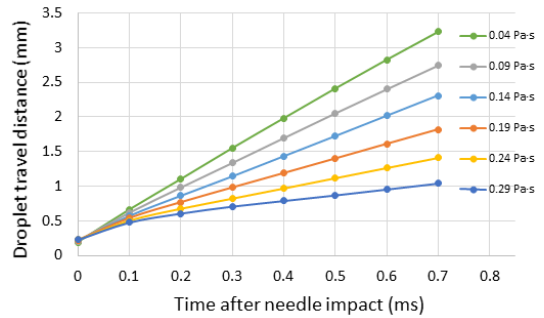
Fig. 7. Ink droplet formation with the variation of needle speed

4.3 잉크 점도에 따른 액적 토출 형상 변화

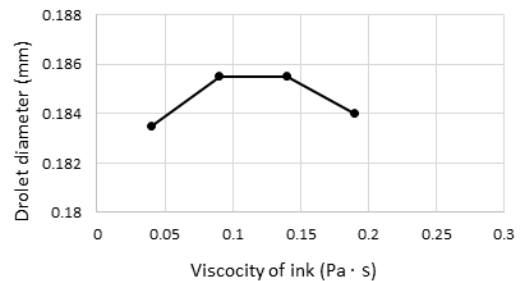
잉크 점도의 효과를 이해하기 위하여 잉크의 점도를 0.04 ~ 0.29 Pa·s까지 변화시키면서 액적 토출 형상을 해석하였다. 니들이 전진하기 시작하는 시점에서 잉크의 초기 충전량은 잉크와 공기의 경계면이 노즐 출구로부터 0.1 mm 안쪽 지점에 형성된 경우이고, 니들의 전진 속도는 0.2 m/s로 동일하다. 니들이 노즐 시트에 충돌한 시점부터 잉크 액적이 노즐 출구로부터 토출된 거리를 나타낸 Fig. 8 (a)를 보면 잉크의 점성이 높을수록 액적의 토출 속도는 느려진다. 이는 점성이 높을수록 노즐 내의 점성마찰력에 의한 손실이 커져서 액적 토출에 쓰여지는 에너지가 줄어들기 때문이다.

Fig. 8 (b)를 보면 0.04 ~ 0.14 Pa·s의 구간에서는 잉크의 점도가 클수록 액적의 크기가 커지는데, 이는 점도가 높을수록 액적의 꼬리가 늦게 끊어지기 때문이다. 잉

크의 점도가 0.19 Pa·s 일때는 액적의 꼬리가 끊어지지 않아서 액적의 크기가 오히려 줄어들며, 그보다 높은 점도에서는 꼬리가 끊기지 않는 현상이 좀 더 심해진다. 니들 타입 젯 디스펜서를 사용하는 이유가 고점도의 잉크를 사용할 때 깔끔한 액적을 얻기 위해서인데, 현재의 운용 변수로는 잉크 점도가 0.14 Pa·s일 때까지 깔끔한 액적을 얻을 수 있고 그보다 점도가 높을 때에는 잉크 초기 충전량과 니들 전진 속도를 변화시키며 적당한 변수값을 찾아야 한다.



(a) Ink droplet travel distance according to the time after needle impact



(b) Ink droplet size according to the ink viscosity

Fig. 8. Ink droplet formation with the variation of ink viscosity

5. 실험 자료와 비교

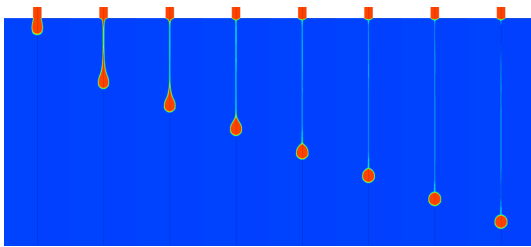
참고문헌에서의 측정결과와 비교하기 위한 자료를 Fig. 9 (a)에 나타내었다[14]. 측정자료에서 첫 사진은 니들이 노즐 시트에 충돌한 시점이고 그 이후는 매 0.1 ms 마다의 액적 형상이다. 이때 니들 이동거리와 니들 전진 속도는 각각 0.17 mm와 0.2 m/s이고, 잉크 입력 튜브의 압력은 0.015 MPa이다. 측정사진에 나타나있는 노즐의 바깥지름은 0.22 mm이다. 같은 입력 변수 조건

에서 해석한 결과를 Fig. 9 (b)에 나타내었는데, 액적 형성과정이 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

4장의 주요 변수가 액적 토출에 미치는 영향에서 보았듯이 구형에 가까운 최적의 액적 상태를 얻을 수 있는 잉크 초기 충전량과 니들 전진 속도, 잉크 점도의 변수 변화 폭이 매우 좁다. 따라서 고점도의 잉크를 토출하여야 하는 어떤 상황에 접했을 때 미리 전산해석을 통하여 적당한 변수를 찾으면 실험을 통하여 적정 변수를 찾아야 하는 시행착오의 수를 크게 줄일 수 있다.



(a) Measured jetting images[14]



(b) Analyzed jetting images

Fig. 9. Comparison of measured and numerically analyzed jetting sequential images

6. 결론

점도가 높은 잉크를 프린팅할 때 사용되는 니들 타입 젯 디스펜서의 액적 토출 형상을 CFD 프로그램인 ANSYS Fluent를 이용하여 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 니들이 전진하면 니들 앞부분의 잉크에 압력이 높은 부분이 생성되는데, 초기에는 그 압력이 노즐 내 잉크의 점성마찰력을 넘지 못하여서 잉크의 이동이 없다. 그러나 니들이 노즐 시트에 거의 근접하게 되면 니들 앞부분의 압력이 급격히 상승하여 노즐내 잉크의 점성마찰력을 이겨내고 잉크가 노즐 밖으로 토출되게 된다.
- (2) 본 해석 조건에서는 잉크 초기 충전량이 0 ~ -0.2 mm, 니들의 전진 속도가 0.2~0.3 m/s, 잉크의

점도가 0.09~0.14 Pa·s 인 변수 범위에서만 액적의 크기가 크고 거의 구형에 가까운 액적이 생성되었다. 그 이외의 범위에서는 크기가 작고 찌그러진 형상의 액적이 생성되거나 꼬리가 끊어지지 않아서 아예 액적이 생성되지 않았다.

- (3) 구형에 가까운 깔끔한 액적을 얻을 수 있는 잉크 초기 충전량과 니들 전진 속도, 잉크 점도의 변수 변화 범위가 매우 좁다. 따라서 고점도의 잉크를 토출하여야 하는 어떤 상황에 접했을 때 미리 전산해석을 통하여 적당한 변수를 찾으면 실험을 통하여 적정 변수를 찾아야 하는 시행착오의 수를 크게 줄일 수 있다.

References

- [1] J. Moon, S. Lee, G. Choi, S. Lee, "Dynamic characteristics of droplet impingement on microscale hole-patterned surfaces with anodization," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 124, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105260>
- [2] J. Moon, M. Cho, S. Lee, "Dynamic contact angle and liquid displacement of a droplet impinging on heated textured surfaces," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 101, pp.128-135, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.10.003>
- [3] J. Moon, C. Choi, J. Allen, S. Lee, "Observation of a mixed regime for an impinging droplet on a sessile droplet," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 127, pp.130-135, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.08.024>
- [4] T. Deng, K. Varanasi, M. Hsu, N. Bhate, C. Keimel, J. Stein, M. Blohm, "Nonwetting of impinging droplets on textured surfaces," *Applied Physics Letter*, Vol. 94, p.133109, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3110054>
- [5] Y. Joo, S. Park, K. Kwon, "Numerical simulation of inkjet drop formation in piezo inkjet head," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 17, No. 7, pp.641-647, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.7.641>
- [6] D. Shin, "Measurement of the intrinsic speed of sound in a hot melt ceramic slurry for 3D rapid prototyping with inkjet technology," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 9, No. 4, pp.892-898, 2008. UCI : G704-001653.2008.9.4.022
- [7] Y. Joo, N. Kim, "A numerical study on the formation of droplet in piezo inkjet head," *Proceedings of the KAIS Spring Conference*, pp.828-831, 2011.
- [8] J. Heo, D. Kim, "Development and performance

evaluation of a liquid particle generator," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 13, No. 9, pp.4334-4340, 2012.

DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.9.4334>

- [9] X. Huang, X. Lin, H. Jin, S. Lin, Z. Bu, G. He, D. Sun, L. Wang, "Effect of enhanced squeezing needle structure on the jetting performance of a piezostack-driven dispenser," *Micromachines*, Vol. 10, No. 12, p. 850, 2019.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/mi10120850>
- [10] C. Zhou, J. Li, J. Duan, G. Deng, "The principle and physical models of novel jetting dispenser with giant magnetostrictive and a magnifier," *Scientific Reports*, Vol. 5, No. 1, 18294, 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/srep18294>
- [11] M. Trimzi, Y. Ham, B. An, Y. Choi, J. Park, S. Yun, "Development of a piezo-driven liquid jet dispenser with hinge-lever amplification mechanism," *Micromachines*, Vol. 11, No. 2, p.117, 2020.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/mi11020117>
- [12] Y. Yang, S. Gu, Q. Lv, J. Liu, Z. Yang, C. Li, H. Tian, "Influence of needle impact velocity on the jetting effect of a piezoelectric needle-collision jetting dispenser," *AIP Advances*, Vol. 9, 045302, 2019.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.5086258>
- [13] K. Kim, Y. lee, H. Chang, R. Lee, H. Wu, "Jetting dispenser height effect on the accuracy of test strip for blood glucose," *Journal of Medical and Biological Engineering*, Vol. 39, pp.109-116, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s40846-018-0380-3>
- [14] T. Phung, K. Kwon, "How to manipulate droplet jetting from needle type jet dispensers," *Scientific Reports*, Vol.9, No.1 19669, Dec. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56198-0>
- [15] S. Lu, G. Cao, H. Zheng, D. Li, M. Shi, J. Qi, "Simulation and experiment on droplet formation and separation for needle-type micro-liquid jetting dispenser," *Micromachines*, Vol. 9, No. 7, p.330, 2018
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/mi9070330>
- [16] X. Shan, Y. Chen, X. Peng, H. Li, "Modeling of laminar fluid flow in jet dispensing process," *15th International Conference on Electronic Packaging Technology*, pp. 276-279, 2014
- [17] S. Lu, X. Chen, H. Zheng, Y. Zhao, Y. Long, "Simulation and experiment on droplet volume for the needle-type piezoelectric jetting dispenser," *Micromachines*, Vol.10, No. 9, 623, 2019
DOI: <https://doi.org/10.3390/mi10090623>
- [18] J. Drelich, J. Wilbur, J. Miller, G. Whitesides, "Contact angle for liquid drops at a model heterogeneous surface consisting of alternating and parallel hydrophobic/hydrophilic strips," *Langmuir*, Vol.12, No.7 pp.1913-1922, 1996.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/la9509763>

주 영 철(Youngcheol Joo)

[정회원]



- 1986년 2월 : KAIST 기계공학과 (공학석사)
- 1993년 5월 : University of California, Los Angeles 기계공학과 (공학박사)
- 1993년 6월 ~ 1995년 9월 : University of California, Los Angeles Postdoctoral Fellow
- 1995년 10월 ~ 1999년 2월 : 삼성자동차 엔진설계실 책임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

기계공학, 열전달, 유체역학, 자동차

이 혜 민(Hyemin Lee)

[준회원]



- 2022년 2월 : 순천향대학교 기계공학과 졸업예정 (공학사)

<관심분야>

열유체, 전산해석, 잉크젯

권 계 시(Kye-Si Kwon)

[정회원]



- 1999년 8월 : KAIST 기계공학과 (공학박사)
- 2012년 1월 ~ 2012년 12월 : Palo Alto Research Center (PARC) 방문 연구원
- 2006년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

잉크젯, 프린팅, 인쇄전자