

# 피에조 잉크젯 헤드의 액적 토출 형상의 전산해석

주영철, 김난숙  
순천향대학교 기계공학과  
e-mail : ychjoo@sch.ac.kr

## A Numerical Study on the Formation of Droplet in Piezo Inkjet Head

Youngcheol Joo, Nansook Kim  
Department of Mechanical Engineering, Soonchunhyang University

### 요 약

본 논문에서는 피에조 잉크젯 헤드의 액적 토출 형상에 대해 전산해석을 통하여 연구하였다. 열유체 해석 전용 프로그램인 FLUENT를 이용하여 에틸렌 글리콜이 잉크젯 헤드의 노즐에서 토출될 때의 형상을 전산모사하였다. 노즐 출구에서 메니스커스 변위의 시간에 따른 변화를 직접 측정하여 노즐 입구의 속도분포를 예측하고 이를 해석의 입력 자료로 사용하였다. 측정치와 해석치를 비교한 결과 전산해석이 측정치의 액적 형성 과정을 잘 모사함을 알 수 있었다.

### 1. 서론

디스플레이 분야의 제조공정중 기존의 포토리소그래피를 기반으로 하는 공정은 공정의 대부분을 높은 청정도를 유지하는 크린룸 내에서 진행하여야 하고 장비투자가 많으며 제조 원가가 높다는 단점이 있다. 이에 반하여 잉크젯 프린팅 기술을 이용하는 방식은 상대적으로 낮은 청정도에서도 진행이 가능하고 공정의 진행 속도가 빠르며 재료 및 공정비용이 저렴하고 환경 친화적인 기술이라는 등 장점이 많아서 연구가 활발히 진행되고 있다. 잉크젯 프린팅 기술은 크게 연속방식 잉크젯 프린팅과 drop-on-demand (DOD) 잉크젯 프린팅의 두 가지 방식으로 나누어지며, DOD 방식은 다시 열 DOD 방식과 피에조 DOD 방식으로 나누어진다. 이중 피에조 DOD 방식은 잉크에 열을 가하지 않고 비교적 높은 점도의 잉크를 사용할 수 있으며 정밀도가 높은 장점이 있어서 디스플레이 공정이나 태양광 전지 제작 공정 등에 적용하려는 노력이 활발히 시도되고 있다[1-3].

이를 위해서는 잉크 방울을 원하는 위치에 정밀하게 토출시킬 필요가 있다. 주액적 이외에 위성 액적이 생성되면 잉크 방울을 제어하는데 많은 어려움이 발생한다. 액적 형성의 불안정은 노즐로부터 액적이 토출될

때 미세한 섭동에 의해 발생된다고 알려져 있다. 이러한 불안정은 주액적이 토출될 때 뒤에 따르는 액적 기둥에서 분리되어 나오는 위성액적을 발생시킨다. 이렇게 발생된 위성 액적은 주변 기류에 쉽게 영향을 받아 원하지 않는 위치에 떨어지게 되어 미세 패턴을 형성하기 어렵게 되고 품질을 떨어뜨리는 결정적인 요인이 된다. 따라서 잉크젯 헤드의 액적 토출 형상에 대한 연구가 필요하다.

Yang 등은 CFD-ACETM 상용해석 코드를 이용하여 작동유체의 물성이 액적 토출에 미치는 영향을 고찰하였다. 물을 비롯한 다양한 작동유체를 이용하여 작동유체의 유체특성이 각각 프린트 헤드에 미치는 영향을 비교하였다[4]. 김성일과 손기현은 미세노즐에서의 액적 형성에 관해 수치해석을 통해 노즐내의 접촉각의 변화에 따른 액적 토출의 특성을 연구하였다[5]. Derby와 Reis는 레이놀즈(Reynolds) 수와 웨버(Weber) 수의 비인 오네소지(Ohnesorge) 수가 1과 13사이의 값을 갖도록 파라핀에 알루미늄을 포함시켜 잉크젯 프린팅을 이용하여 세라믹 제조품을 제작하였다[6]. 하지만 물질을 포함한 파라핀과 순수한 파라핀의 볼륨 크기에 따른 점도의 비의 관계를 보이긴 했지만 점도와 표면장력에 관련한 세밀한 연구는 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 피에조 잉크젯 헤드에서 액적 토출에

대해 좀 더 자세히 이해하기 위해 열유체 전용 해석 프로그램인 FLUENT를 이용하여 토출 형상을 전산해석하였다. 이를 통하여 액적 형성 기구를 좀 더 자세히 이해하고자 한다.

2. 입력자료 측정 및 모델링

피에조 잉크젯 헤드에서 액적 토출 형태의 연구에 사용한 잉크젯 헤드는 그림 1에 나타난 MicroFab Technologies사의 MJ-AT-01-30 피에조 잉크젯 헤드이다. 잉크젯 토출 파형은 그림 2와 같이 정의된 파형을 인가하였고 상승, 하강, 휴지시간은 각각 6μs, 6μs, 20μs씩 주었다. 인가되는 전압을 변화시켜 가며 잉크젯 액적이 토출되기 직전의 메니스커스의 거동, 토출될 때의 액적 형상을 관찰하였다. 작동유체로 에틸렌 글리콜(ethylene glycol)을 사용하였다. 표 1에 작동유체 에틸렌 글리콜의 측정 물성치를 나타내었다.

[표 1] 작동유체의 물성

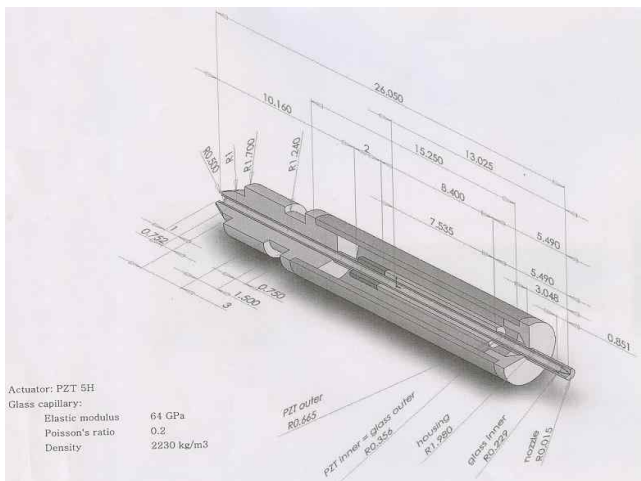
	밀도 kg/m <sup>3</sup>	점도 kg-m/s	표면장력 N/m
Ethylene Glycol	1155	0.0158	0.047

잉크젯을 통해 토출되는 액적의 형태를 파악하기 위해 열유체 전용 해석 프로그램인 FLUENT를 사용하였다. 잉크젯에서 액적이 토출될 때 잉크 방울은 공기 중에 자유표면을 형성한다. 잉크의 물성에 따라 여러 가지 형태의 자유표면을 가진 잉크가 토출되게 되는데 이는 FLUENT의 multigrid method를 이용한 VOF(Volume of Fluid) 모델에 의해 계산된다. 이는 다음과 같은 explicit scheme으로 풀어진다.

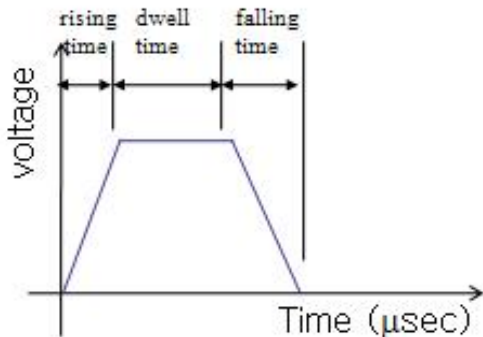
$$\frac{\alpha_q^{n+1} - \alpha_q^n}{\Delta t} V + \Delta(U_f^n \alpha_{qf}^n) = 0 \quad (1)$$

여기서 n+1은 새로운(현재의) time step, n은 이전의 time step, α<sub>q</sub>는 cell내의 qth 유체의 볼륨 조각, α<sub>qf</sub>는 q번째 볼륨 조각의 면의 처음 혹은 두 번째 경사면의 값에 대한 계산법, V는 체적, U<sub>f</sub>는 면을 관통하는 체적유동을 의미한다[8].

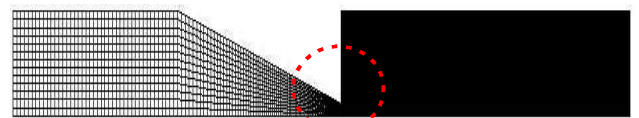
노즐의 모델은 그림 3에 보인바와 같이 헤드의 끝부분을 모델링하였고, 격자형태는 사각으로 격자수는 86250개이다. 노즐부를 기준으로 노즐내의 계산이 많이 필요치 않은 부분은 격자를 크게 하고 노즐부와 계산이 많은 부분은 격자를 조밀하게 생성하였으며 계산성이 좋도록 하기 위해 노즐부 터 출구 쪽 공기부분은 정사각형 격자를 생성하였다.



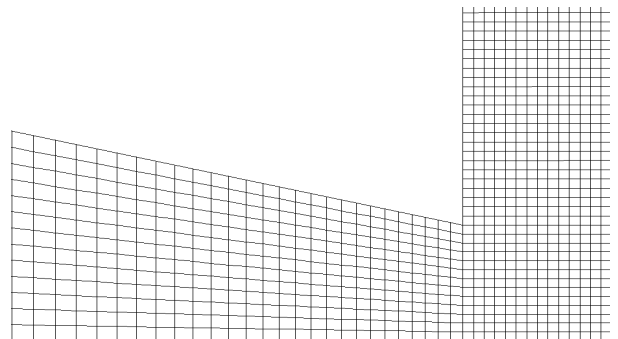
[그림 1] MJ-AT-01-30 피에조 잉크젯 프린트 헤드



[그림 2] 잉크젯 입력 파형 [7]



(a) 노즐의 확대칭 모델링



(b) 노즐 끝 부분의 격자형태

[그림 3] 전산해석 모델링

### 3. 전산해석 결과

잉크젯 헤드에서 액적의 토출 형태를 해석하기 위해서는 잉크젯 노즐 내부 잉크의 유동이나 압력 파형의 시간에 따른 변화를 알아야 한다. 하지만 노즐 내부의 액체 유동이나 압력 변화를 직접 측정하기는 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 잉크젯이 토출되기 시작하는 전압보다 아주 약간 적은 전압을 잉크젯 헤드에 걸어 잉크 메니스커스의 거동을 직접 측정하고 이로부터 잉크젯 헤드 내부의 시간에 따른 속도분포를 유출하였다. 잉크가 토출될 때의 헤드 내부의 속도분포는 토출되기 직전의 속도분포의 진폭을 늘려서 사용하였다.

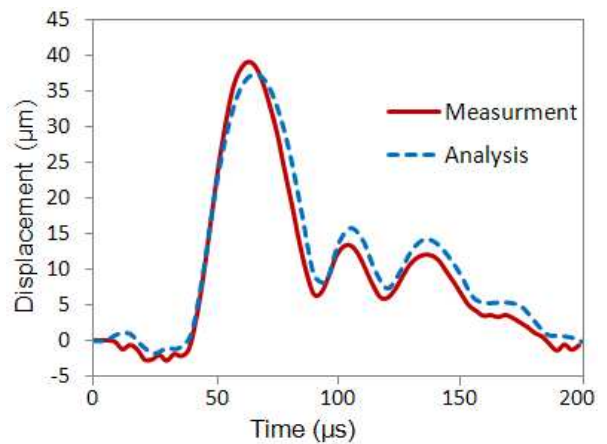
그림 4 (a)에 액적이 토출되는 전압보다 약간 낮은 전압을 가했을 때 메니스커스의 거동을 측정한 결과를 나타내었다. 그림 2와 같은 파형의 전압을 가하면 초기에는 노즐 내부에서 압력파가 생겨 노즐의 헤드와 입구쪽으로 전파되고 반사되어 서로 중첩되지만 약 40 $\mu$ s까지는 헤드의 메니스커스에는 변화가 거의 없다. 그러나 40 $\mu$ s 이후 중첩된 압력파가 헤드에 도착하면서 메니스커스가 헤드에서 나와 약 40 $\mu$ m까지 진출한 후 다시 헤드로 돌아간다. 메니스커스가 한꺼번에 완전히 헤드 내부로 돌아가지는 못하고 노즐 내부의 압력파에 의해 사인파 형태를 나타내며 진폭이 낮아진다. 그림 4(a)의 메니스커스 변위 측정치로부터 그림 4(b)의 속도분포 측정치를 도출하였다.

FLUENT를 이용한 노즐 액적의 토출 해석에는 그림 3 (a)의 왼쪽 노즐 입구부분의 잉크 속도분포가 입력자료로 사용된다. 이 부분의 잉크 속도분포를 직접 측정할 수 없으므로 그림 4 (b)에서 얻은 노즐 출구의 속도분포 측정치에 곡선 일치법을 적용하여 속도 함수를 구하고 연속방정식을 적용하여 입구부분의 속도분포를 가정하는 함수를 얻었다. 노즐 벽면의 마찰에 의한 속도 손실을 보상하기 위한 마찰계수는 시행착오법으로 얻었다. 이 입력자료를 FLUENT에 대입하여 노즐 내부의 유동을 해석한 결과 그림 4 (a)와 (b)의 해석치에서 나타낸 변위와 속도의 분포를 얻었다. 측정치와 비교해 볼 때 FLUENT를 이용하여 해석한 결과가 아주 유사함을 알 수 있다.

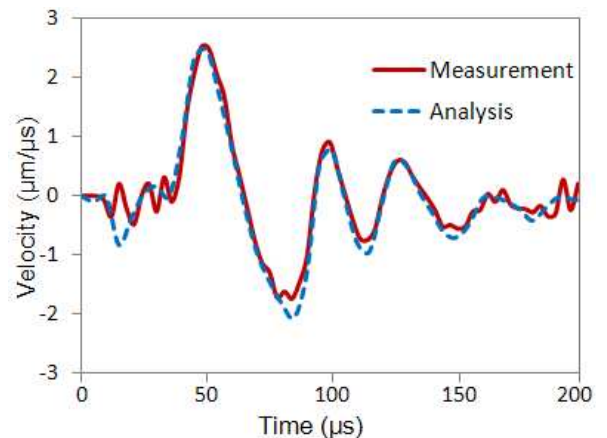
그림 4의 측정과 해석에 사용한 전압을 약간 증가시켜 액적이 토출된 상태의 액적 형상을 측정하고 해석한 결과를 그림 5에 나타내었다. 40 $\mu$ s 이전에는 액적의 형성되지 않아 그림에서 제외시켰다. 50 $\mu$ s에서 액적이 형성되는 것이 보이기 시작하며, 이후 시간이 지날수록 꼬리를 길게 이끈 액적이 토출되는 것을 볼 수 있다.

120 $\mu$ s에 액적의 꼬리가 끊어지고 이후 이 꼬리가 액적의 머리 부분으로 달라붙는데, 그림 5의 경우에는 꼬리의 양이 많아서 머리에 완전히 달라붙지 못하고 일부는 위성액적을 만드는 것을 볼 수 있다. 해석결과와 측정결과와 형상이 거의 일치함을 알 수 있다.

기존의 잉크젯 헤드에서 액적의 토출에 대한 전산해석 연구는 노즐 입구의 압력 파형이나 유속 분포와 같은 해석 입력 자료를 간단한 사인파나 임의의 분포로 가정하여 사용하였다. 이 가정이 정확하지 않으면 전체적인 해석의 신뢰도에 악영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 노즐 출구에서 메니스커스 변위의 시간에 따른 변화를 직접 측정하여 노즐 입구의 속도분포를 예측하고 이를 해석의 입력 자료로 사용하였는데 연구의 차별성이 있다. 측정결과와 해석결과를 비교한 결과 두 결과가 거의 일치함을 알 수 있어 본 연구에서 사용한 방법이 우수함을 알 수 있다.

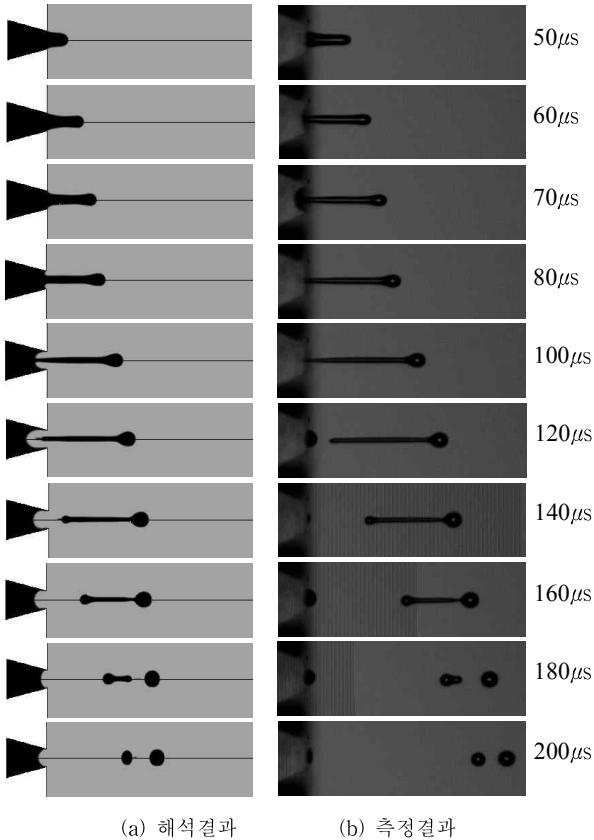


(a) 메니스커스의 시간에 따른 변위 변화



(b) 메니스커스의 시간에 따른 속도 변화

[그림 4] 액적이 토출되는 전압보다 약간 낮은 전압을 걸었을 때 메니스커스의 시간에 따른 변위와 속도



[그림 5] 잉크 액적 토출 형상의 해석결과와 측정결과 비교

#### 4. 결 론

피에조 잉크젯 헤드에서 토출되는 액적의 형성 과정을 측정하고 FLUENT를 이용하여 전산해석을 하였다. 노즐 출구에서 메니스커스 변위의 시간에 따른 변화를 직접 측정하여 노즐 입구의 속도분포를 예측하고 이를 해석의 입력 자료로 사용하였다. 측정치와 해석치를 비교한 결과 전산해석이 측정치의 액적 형성 과정을 잘 묘사함을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

[1] 안동훈, 잉크젯 기술의 디스플레이 응용, 인포메이션 디스플레이, 2003.  
 [2] 김석순, 김동수, 이원희, 신동윤, 김충환, “제조 방식의 대변화에 따른 잉크젯 프린팅 기술”, 한국정밀공학회지, Vol 23, No.8, 2006.  
 [3] 위상권, 오세영, 이정용, 이유섭, 정재우, “A Study on Droplet Formation from Piezo Inkjet Print Head”, 대한기계학회논문집, Vol.30, No.10, pp.1003-1011, 2006.

[4] Yang, A.S, Yang, J.C. and Hong, M.C., “Droplet Ejection Study of a Picojet Printhead,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 16, pp.180-188, 2006.  
 [5] 김성일, 손기현, “Numerical Study on Drop Formation Through a Micro Nozzle,” *대한기계학회논문집*, Vol.29, No.2, pp.205-213, 2005.  
 [6] Derby, B. and Reis, N., “Inkjet Printing of Highly Loaded Particulate Suspensions,” *MRS Bulletin*, November, pp.816-818, 2003.  
 [7] 명재환, 권계시, 임태준, 주영철, 이상욱, “잉크젯 입력 파형에 의한 토출 특성의 실험적 연구”, 한국정밀공학회 2008년도 추계학술대회 논문집, pp.273-274.  
 [8] FLUENT 5 User’s Guide, FLUENT inc, 1998.