

잉크젯 입력 파형의 파라미터와 토출 속도의 관계

Relationship between Ink Jetting Speed and Inkjet input Waveform Parameters

권계시^{1,✉}, 명재환¹, 엄태준¹, 주영철¹, 이상욱¹
 Kye-Si Kwon^{1,✉}, Jaehwan Myung¹, Tai Joon Um¹, Youngcheol Joo¹ and Sang-Wook Lee¹

¹ 순천향대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Soonchunhyang Univ.)

✉ Corresponding author: kskwon@sch.ac.kr 041-530-1670

Manuscript received: 2009.2.12 / Revised: 2009.4.12 / Accepted: 2009.6.6

Inkjet printing makes use of ink droplets to form required patterns on a substrate. In order for the inkjet technology to produce reliable patterning tools, the jetting performance needs be controlled precisely. For controlling ink jetting performance, input waveform should be properly designed. In the past, the research was focused on designing dwell time of the input waveform for controlling jetting speed. However, the jetting performance is also closely related to rising and falling time. In this study, the effect of the rising and falling time on droplet speed will be investigated by measuring the droplet speed. In this study, the power OP amp (PA98A) was used in order to drive piezo inkjet head by amplifying the waveform generated from arbitrary function generator. The experimental results show that change of rising and falling time in the waveform not only affect the droplet speed but also optimal dwell time.

Key Words: Piezo Inkjet (피에조 잉크젯), Inkjet Waveform (잉크젯 파형), Ink Jetting Speed (잉크 제팅 속도)

1. 서론

잉크젯 기술이 발전함에 따라서 사무실용 프린터로부터 제조 공정의 도구로서 응용 범위가 점차 넓어지고 있다.^{1,2} 다양한 종류의 잉크가 개발이 되고 있고 이를 안정적으로 토출 시켜야 된다. 이를 위하여 잉크젯에 인가되는 파형(waveform)의 파라미터를 조절하는 방법을 사용한다.³ 한편으로 이러한 토출 현상은 잉크젯 헤드내의 잉크의 음향학적 압력파(pressure wave)의 거동 현상과 관련이 있다고 알려져 있다.⁴ 이러한 압력파는 입력 파형을 조절 함으로서 토출이 용이하게 만들 수 있다.

잉크젯 헤드에 인가되는 입력 전압의 기본 형태는 사다리꼴 형태의 파형이 많이 사용되며 상승 시간(rising time), 하강시간(falling time), 휴지 시간(dwell time) 및 입력 전압의 크기 등의 파라미터를

가지고 있다. 토출 특성을 제어하기 위하여 일반적으로는 상승 및 하강 시간을 고정시키고 휴지 시간을 변화시키면서 토출되는 잉크의 토출 속도를 측정한다. 이 때 토출 속도가 최대가 되게 하는 휴지시간을 찾는 것이 널리 사용되는 파형 설계 방법이다.^{3,4} 기존의 연구에서는 입력 파형의 상승 및 하강 시간은 3~10 μ sec의 범위에서 결정하여 사용하는 것이 추천하였다.⁴ 그러나 상승 및 하강 시간을 어떤 값으로 설정해야 최적인지와 그 효과가 어떻게 최적의 휴지시간에 영향을 미치는지에 대한 연구 논문은 찾기 힘들다. 상승 또는 하강 시간을 지나치게 짧게 하면 헤드를 구동하기 위한 고전압 드라이버의 전류가 상승하여 실제 입력 파형이 왜곡되는 현상이 발생한다. 따라서 최소의 상승 또는 하강시간을 사용하기 보다는 적절한 시간을 사용해야 한다. 한편으로 상승 및 하강 시간

이 길어지면 토출을 위한 압력파가 줄어들게 되어 토출이 어려워진다. 그러므로 상승 또는 하강 시간의 설정 값이 적절한지 또는 상승시간과 하강 시간의 변화가 휴지시간의 최적화 값에 미치는 영향을 체계적으로 평가하는 것이 필요하다.

잉크젯 헤드를 구동하기 위하여 가장 중요한 구성요소 중의 하나는 드라이브 특성이다. 같은 파형을 헤드에 인가하더라도 드라이브 특성에 따라서 잉크 액적의 토출 특성이 다르게 된다. 적절한 드라이브를 선정 또는 제작하기 위해서는 잉크젯 헤드의 정전 용량과 파형의 형태를 고려해야 한다. 본 연구에서는 Apex 사의 PA98A⁵를 사용하였다. 제작된 파형 구동기의 성능을 파악하기 위하여 파형의 상승 하강 시간을 변화하여 실제 헤드에 인가되는 입력 전압의 왜곡의 정도를 관찰하였다. 입력 전압의 왜곡이 생기면 실제 상승 및 하강 시간에 따른 영향을 정확하게 판단하기 어렵기 때문에 왜곡이 적은 범위의 상승/하강 시간에서 실험을 수행하였다. 관심 범위의 상승 및 하강 시간에서 휴지 시간을 변화시켜 토출 속도의 영향을 관찰하였다. 이러한 실험을 통하여 각각의 상승 및 하강 시간에 따른 최적 휴지 시간(optimal dwell time)을 구하고 이를 분석하였다. 이를 통하여 잉크 토출 특성을 제어하기 위한 파형 설계를 토출 현상을 규명하고, 후후의 연구를 위한 참고 데이터를 만드는 것이 본 연구의 목적이 된다.

2. 잉크젯 파형과 토출 현상

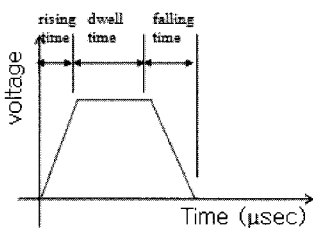


Fig. 1 Typical waveform for piezo inkjet

Fig. 1 과 같이 정의 된 파형을 인가하였을 때 Fig. 2 와 같은 압력파가 헤드 내부에서 진행된다. 파형의 상승 부분은 팽창(expansion)에 관련된 부분으로 두 개의 음의 압력이 반대방향으로 진행된다. 반면에 파형의 하강 부분은 압축(compression)에 관련된 부분으로 양의 압력이 피에조를 중심에서 양쪽으로 진행된다. 이러한 압력파와 파형의 관계를

통하여 최적의 파형을 설계하게 된다. 파형 설계를 위하여 Fig. 2 와 같이 팽창에 의해서 생겼던 두 압력파가 다시 피에조 중심에서 모일 때($T=L/C$) 파형의 하강 부분을 인가하여 양의 압력을 주기 위하여 휴지시간을 결정하는 것이 기존의 파형 설계의 방법이다. 여기서 T, L, C 는 각각 파형의 휴지 시간, 헤드의 튜브(tube) 길이, 잉크의 음속이다.

일반적으로 이러한 입력 파형 설계는 실험을 통하여 수행하게 된다. 이를 위하여 상승 및 하강 시간을 고정하고 휴지 시간을 변경하면서 토출 특성인 속도 측정을 수행한다. 속도가 최대가 되는 휴지 시간을 결정함으로써 최적의 파형을 설계하게 된다.

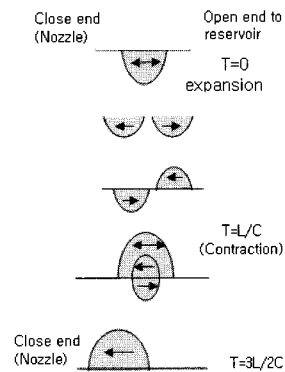


Fig. 2 Pressure wave inside inkjet head.

기존의 연구는 상승 및 하강 시간은 고정하여 실험을 하였고 그 영향을 체계적으로 분석하지 않았다. 또한 상승 또는 하강의 시간 동안에는 압력파가 발생하고 진행하지 않는다고 가정하였다. 그러나 상승 및 하강 시간이 지나치게 짧은 경우에는 고전압 드라이브가 제대로 작동하지 않는 경우가 있기 때문에 적당한 시간의 상승 및 하강 시간의 파형을 이용하게 된다. 따라서 파형의 상승 및 하강 시간 동안에도 압력파가 어느 정도 진행하는지 그 영향을 분석하는 것이 필요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 상승 및 하강 시간을 변경하면서 토출 특성을 측정하고 평가하였다.

3. 잉크 토출 실험

3.1 토출 실험 장치

잉크젯 토출 실험을 위해서는 잉크젯 입력 파형에 따른 잉크의 속도 및 토출 되는 잉크의 크기

를 측정할 수 있어야 한다. 토출 실험을 위하여 사용된 잉크 제팅 장치의 구성은 Fig. 3 과 같다.

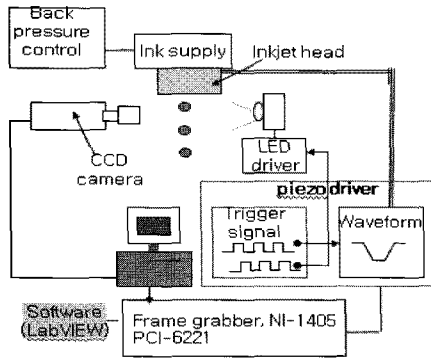


Fig. 3 Schematic of jetting system

Fig. 4 와 같이 LabVIEW 기반의 소프트웨어를 개발하여 Fig. 3 의 모든 구성 요소를 통합하여 자동으로 잉크 방울의 속도 및 체적을 측정할 수 있도록 하였다. 자세한 시스템의 작동에 대한 내용은 참고문헌을 참조할 수 있다.⁶

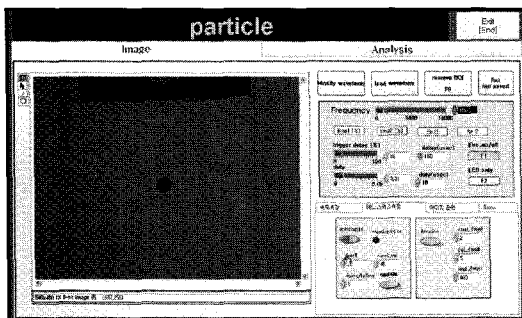


Fig. 4 Developed software for jetting control

3.2 잉크젯 헤드 드라이버 제작

잉크젯을 파형은 수십 volt/μsec 의 슬루 레이트 (slew rate)를 갖는 전압을 잉크젯 헤드를 인가해야 한다. 이 때 가장 중요한 것이 파형을 발생시키기 위한 파형 발생기와 발생된 신호를 증폭하기 위한 드라이버이다. 입력 파형을 발생하기 위하여 임의의 파형 발생기인 Agilent 33120A 를 사용하였다. Agilent 33120A 는 1μsec 에 15 개의 데이터까지 만들 수 있기 때문에 잉크젯 헤드를 드라이브하기 위한 파형을 만들기에 충분하다. 이렇게 생성된 파형은 헤드를 구동하기 위하여 고전압으로 증폭되어야 한다. 잉크젯 헤드를 구동하기 위해서는

높은 슬루 레이트의 증폭기가 필요하다. 또한 상승 또는 하강 시간에는 피에조의 전류가 순간적으로 증가하기 때문에 이를 고려하여 증폭기를 제작 또는 선정해야 한다. 이를 위하여 Fig. 5 와 같이 Power OP amp 인 APEX 사의 PA98A 을 사용하여 임의의 파형 발생기로부터 생성된 파형을 100 배 증폭하였다.

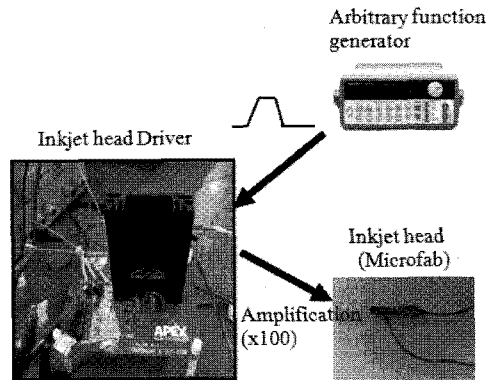
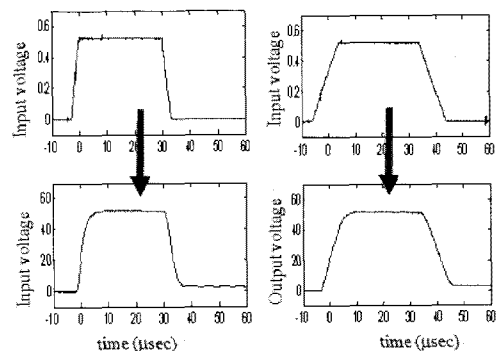


Fig. 5 Inkjet head Driver



(a) 3μsec (rising/falling time) (b) 8μsec (rising/falling time)

Fig. 6 Measured Driving voltage at inkjet head

Fig. 6 은 제작된 드라이버를 사용하여 증폭된 입력 전압 파형을 보여준다. Fig. 6 에서 알 수 있듯이 실제 구동 되는 상승 및 하강의 특성은 드라이버의 특성과 밀접한 관련이 있다. Fig. 6(a)에서는 실제 임의의 파형 발생기로는 3μsec 의 상승 시간을 갖는 파형을 왜곡없이 만들었지만 실제 구동 시 측정을 한 결과를 보면 드라이브의 한계로 파형이 충분히 따라 가지 못하고 있는 것 보여준다. 반면에 Fig. 6(b)의 8μsec 의 상승 및 하강 시간을 갖는 파형은 비교적 양호하게 헤드를 구동함을 보여준다.

다. 입력 파형의 왜곡이 생기면 실험 결과가 파형의 파라미터 변화에 의한 영향과 입력 전압의 왜곡에 의한 영향을 구별하기 어렵다. 따라서 본 연구의 실제 실험에서는 이를 고려하여 상승 및 하강 시간을 8μsec 이상으로 하여 잉크젯 헤드 (Microfab, MJ-AT)를 구동하였다.

3.3 잉크젯 파형과 토출 속도

잉크젯 토출 특성중에서 가장 중요한 것은 잉크의 토출 속도이다. 따라서 토출 속도는 잉크젯을 구동하기 위한 입력 파형의 파라미터를 설계하는데 가장 중요한 측정 요소이다.

본 논문에는 입력 파형의 파라미터를 변화시키면서 이 때 토출되는 잉크의 속도를 측정하여 잉크젯의 토출 특성과 입력 파형의 파라미터 관계를 체계적으로 평가하려고 한다.

토출 실험을 위한 잉크 방울의 주파수는 1kHz로 하고 입력 파형의 전압의 크기는 35volt로 고정하였다. 상승 및 하강 시간을 8μsec 부터 20μsec 까지 2μsec 의 간격으로 증가시켜 잉크 토출 속도를 Fig. 7 과 같이 측정하였다. 이 때 각각의 상승 및 하강 시간에 대해서 휴지 시간을 변화시킨 후 토출 속도를 측정해 보았다. Fig. 7 의 가로축 (x 축)은 각각의 상승/하강시간에서 변화시킨 휴지 시간이고 세로축(y 축)은 이때 측정된 잉크의 토출 속도이다. 이를 통해 관찰하려고 하는 상승 및 하강 시간에 대한 최적의 휴지 시간(optimal dwell time)을 변화를 관찰하는 것이 가능하다. Fig. 7 에서 각각의 상승 및 하강 시간에 대해서 최적의 휴지시간은 속도가 최대가 되는 시점에서 구할 수 있다.

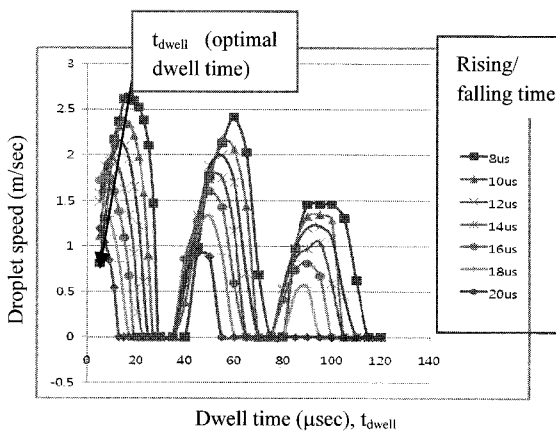


Fig. 7 Dwell time (t_{dwell}) vs droplet speed relationship

Fig. 7 에서 알 수 있듯이 상승/하강 시간이 8μsec 에서 20μsec 로 길어짐에 따라 속도의 최대값이 2.7m/sec 에서 1m/sec 로 감소함을 알 수 있다. 이것은 상승 및 하강 시간이 짧을수록 더 강한 압력파가 생기는 것에 의한 것이다. Fig. 7 의 가로축인 휴지시간의 증가함에 따라서 속도의 피크가 반복적으로 나타나고 이것의 주기는 40μsec 로 상승/하강 시간에 관계없이 모두 동일하였다. 이것은 잉크의 음속에 관련된 특성이므로 상승 시간과 하강시간과 무관하게 동일하였다. 또한 휴지시간에 대한 속도의 피크의 감쇄율 역시 잉크의 고유한 특성인 압력파의 감쇄특성과 관련이 있기 때문에 상승/하강시간에 관계없이 비슷한 특성을 보였다.

파형을 설계할 때 최적의 휴지시간은 잉크의 토출 속도와 휴지시간의 관계에서 첫 번째 피크의 휴지시간으로 정의 된다.⁴ Fig. 7 에서 알 수 있듯이 상승/하강시간에 길어짐에 따라서 최적의 휴지 시간이 짧아짐을 알 수 있다. 이것은 상승 및 하강 시간의 길이가 압력파 생성뿐 만 아니라 압력파의 진행에도 관계가 있기 때문이다. 파형의 상승 및 하강 시간동안 압력파의 진행을 고려하기 위하여 f 라는 factor 를 고려 하면, 실질적으로 압력파가 진행되는 시간에 해당하는 등가 휴지 시간 (equivalent dwell time, t_{eq_dwell})으로 나타낼 수 있다.

$$(t_{rising} + t_{falling}) * f + t_{dwell} = t_{eq_dwell} \quad (1)$$

여기서 t_{eq_dwell} 은 상승(t_{rising}) 및 하강($t_{falling}$) 시간이 아주 작아서 압력파만 발생시키고 압력파의 진행은 휴지 시간에만 진행된다고 가정했을 때의 최적 휴지 시간의 값이다. 실험에서는 파형 왜곡이 있으므로 정확한 값을 구하기는 어려움이 있었지만 실제로 상승/하강 시간을 3μsec 으로 짧게 하여 약 20μsec 의 t_{eq_dwell} 을 얻을 수 있었다. 드라이버의 파형 왜곡 등의 문제로 3μsec 이하의 짧은 시간의 상승/하강시간에서의 결과는 3μsec 와 비슷하였다.

여기서 최적의 t_{eq_dwell} 은 잉크와 헤드의 자체 특성이므로 파형의 파라미터에 대해서 변하지 않는 양이다. 따라서 실제로 파형에 인가하는 최적의 휴지 시간인 t_{dwell} 은 상승 하강 시간 동안에 압력파의 진행 정도에 따라서 바뀌게 된다. 식 (1)에서의 f 는 상승/하강 파형이 인가될 때 압력파가 발생과 동시에 진행되는 데 압력파의 진행 정도를 정량적으로 평가하기 위함이다. f 는 0 에서 1 의 값

을 갖는다. 최근에는 그 영향을 고려하기 시작했고 0.5 라고 가정하여 사용하였다.⁷ 그러나 0.5 인 상수가 아니라 t_{rising} 과 t_{falling} 의 길이에 대해서 이 영향은 바뀌게 된다. 실험으로 t_{rising} 과 t_{falling} 에 대해서 최적의 t_{dwell} 을 구하고 정리하면 Table 1 과 같이 나타낼 수 있다. 이 때 최적의 $t_{\text{eq_dwell}}$ 는 약 20 μsec 라고 하여 상승/시간에 따라서 f 의 양의 변화를 구해보면 0.1~0.4 의 큰 범위로 상승/하강 시간에 비례하여 증가됨을 알 수 있었다.

Table 1 Rising/falling time effects

rising/falling time (μsec)	Measured optimal dwell time t_{dwell} (μsec)	f
8	17	0.19
10	15	0.25
12	13	0.29
14	9	0.39
16	7	0.41
18	5	0.42

4. 결론

잉크젯 파형에서 상승 및 하강 시간의 변화가 토출에 미치는 영향에 대한 실험적 분석을 수행하기 위하여 잉크젯 헤드 드라이브를 파워 OP amp 를 사용하여 제작하였고, 이를 사용하여 파형과 잉크 속도 관계를 구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 상승 및 하강 시간의 증가에 따라서 토출 속도가 감소하였다.

2) 상승 및 하강 시간에 관계없이 휴지시간에 대한 잉크 토출 속도의 관계에서 잉크 토출 속도 파크의 주기 및 감쇄율은 동일하였다.

3) 상승 및 하강 시간에 증가에 따라서 최적의 휴지 시간이 감소하였다. 그 영향은 상승 및 하강 시간이 커짐에 따라서 더 증가하였다. 이는 상승 및 하강 시간이 길어짐에 따라서 입력 파형에서 전압의 상승 및 하강 시에도 압력파의 생성과 더불어 압력파가 진행되는 것을 고려하여 파형을 설계해야 된다는 것을 의미한다.

본 연구에서는 최적의 파형을 위하여 같은 전압에서 토출이 최대가 되게 하는 효율적인 파형을 설계하는 것을 목표로 하였다. 그러나 잉크젯 파

형 설계를 위해서는 토출량, 위성 액적의 발생 여부, 토출의 직진성 등도 고려하여 설계해야 된다. 이것들을 고려한 파형 최적화는 추후의 연구과제로 진행중이다.

후 기

본 연구는 지식경제부 지방기술혁신사업 (RTI04-01-02) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Creagh, L., McDonald, M. and Letendre, W., "Ink Jet Printhead as a precision deposition tool in manufacturing FPDs," SEMICON China, FPD Manufacturing Conference, 2004.
2. Kwon, K. S. and Kim, W., "A waveform design method for high speed inkjet printing based on self-sensing measurement," Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 140, No. 1, pp. 75-83, 2007.
3. Microfab Technologies, Inc., "Drive waveform effects on ink-jet device performance," Microfab Technote No. 99-03, 1999.
4. Bogy, D. B. and Talke, F. E., "Experimental and theoretical study of wave propagation phenomena in drop-on-demand ink jet devices," IBM Journal of Research and Development, Vol. 28, No. 3, pp. 314-321, 1984.
5. Datasheet, "PA98A, high voltage power operational amplifier," <http://www.apexmicrotech.com>, 2009.
6. Kwon, K. S., "Development of a Test stand for measuring ink jetting performance," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 25, No. 8, pp. 45-50, 2008.
7. Kim, M. K., Hwang, J. Y., Lee, S. H., Kang, K. T. and Kang, H. S., "Phase Matching of Pressure Wave in a Drop-On-Demand Inkjet Print Head," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 25, No. 9, pp. 116-125, 2008.