

< 논문 >

DoD 메탈젯 시스템의 이론적 해석 및 실험적 분석

이택민[†] · 강태구* · 양정순* · 조정대* · 김광영*** · 최병오** · 김동수*
(2006년 1월 31일 접수, 2006년 11월 24일 심사완료)

Theoretical Analysis and Experimental Characterization of DoD Metal-Jet System

Taik-Min Lee, Tae Goo Kang, Jeong-Soon Yang,
Jeong-Dai Jo, Kwang-Young Kim, Byung-Oh Choi and Dong-Soo Kim

Key Words : Metal-Jet(메탈젯), DoD Injector(DoD 인젝터), Inkjet(잉크젯), Printing(프린팅), Solder-Jet(솔더젯)

Abstract

In this paper, we present a design, analysis, fabrication and performance test of the novel DoD metal-jet system for application to the high-density and high-temperature-melting materials. The theoretical analysis of the metal-jet nozzle system is derived by using electro-mechanical analogy. Based on the theoretical analysis results, we design the metal-jet print head system and fabricate the metal-jet system, which can eject the droplet of lead-free metal solder in high-temperature. In the experimental test, we set up the test apparatus for visualization of the droplet ejection and measure the ejected droplet volume and velocity. As a result, the diameter, volume and the velocity of the ejected droplet are about 65 μm ~ 70 μm , 145pl ~ 180 pl and 4m/s, which shows quite good agreement with the theoretical analysis results of the 75 μm -diameter and 220 pl-volume of droplet. In comparison with the experimental result, the errors of diameter and volume are 7% ~ 13% and 18 ~ 34%, respectively.

1. 서론

최근, 전자 종이와 같은 신개념의 디스플레이 장치 및 RFID 와 같은 일회용 정보 장치 등의 정보장치를 제작함에 있어 프린팅 기법을 도입하려는 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽¹⁻⁴⁾ 이는 프린팅 공정이 기존의 노광기술과 식각기술에 의존하는 반도체 공정에 비해 가격경쟁력이 월등히 우수하기 때문이다. 즉, 반도체 공정의 경우는 높은 정밀도의 장치를 제작할 수 있는 장점이 있으나, 이를 위해 고가의 장비 및 극한의 공정 기술을 필요로 하는 단점을 가지고 있다. 반면, 앞서와 같은

정보장치들을 제작함에 있어서, 전도성, 반전도성 및 부전도성 등의 전기적 성질을 가지는 전자 재료들을 프린팅 기법을 사용하여 기판위에 직접 프린팅하는 공정을 사용하는 경우 반도체 공정과 같은 고정밀도를 가질 수 없는 단점을 가지고 있으나, 기존의 반도체 공정에 비해 제작 시간이 빠르며, 장비의 가격이 저렴하여 그 생산성이 월등한 것으로 평가된다. 특히, 용융 메탈과 같이 고온, 고점도의 용액을 액적의 형태로 토출하여 프린팅하는 메탈젯(metal-jet)방식을 반도체 패키징 및 PCB 기판 공정 등에 응용할 경우 기존의 반도체 공정이나 전기도금 등의 공정방법에 비해 공정 시간 및 공정 원가 절감 등의 관점에서 큰 장점이 있다고 할 것이다.

이러한 용융 메탈 액적을 토출하는 메탈젯에 관한 기존의 연구로는 MIT 의 P. Yim 등⁽⁵⁾과 UC Irvine 의 M. Orme 등⁽⁶⁾이 연구하고 있는 연속 토출(Continuous Jetting)방식의 UDM(Uniform Droplet Manufacturing) 기술과 Nagoya 대학의 K. Yamaguchi

† 책임저자, 회원, 한국기계연구원 정보장비연구센터
E-mail : taikmin@kimm.re.kr
TEL : (042)868-7451 FAX : (042)868-7176

* 한국기계연구원 정보장비연구센터

** 회원, 한국기계연구원 지능형정밀기계연구본부

*** 한국기계연구원 경남기계기술지원단

등⁽¹⁾ 및 MicroFab 사의 Solder Jet⁽⁷⁾과 같은 DoD (Drop-on-Demand)기술로 분류할 수 있다. 이 중 연속도출 방식의 UDM 기술^(5,6)은 단위 시간당 액적(droplet) 생성 속도는 DoD 방식에 비해 월등히 높다(수 kHz~수십 kHz)고 할 수 있으나, 토출되는 액적의 정밀한 위치제어 등에 어려움이 있어, 단순 액적 제작공정에만 제한적으로 응용될 수 있을 것으로 판단된다. 이에 반해 DoD 방식^(1,7,8)의 경우 원하는 순간에 원하는 위치에 정확하게 제어된 액적을 토출할 수 있는 장점을 가지고 있어 3 차원 형상가공이나 전자회로 구현 등 다양한 형태의 적용이 가능하다. 기존의 Nagoya 대학의 연구⁽¹⁾는 작동온도가 55°C 정도로 매우 낮고 아직 그 재현성이 검증되지 않은 단계에 있으며, KAIST의 연구⁽⁸⁾는 용기내의 압력제어가 되지 않고, 솔레노이드 구동기를 사용하여 구동 주파수가 매우 느리며, 이로 인해 토출된 액적의 지름이 수백미크론 급으로 크다는 단점이 있으며, MicroFab 사의 Solder jet 의 경우⁽⁷⁾는 피에조 구동기가 가열로 안에 삽입되어 있는 단점이 있으므로, 최고 300°C 까지 작동 가능하다고 하지만, 무연 솔더 등에 적용하기에는 아직 한계가 있다.

따라서, 본 논문에서는 300°C 이상의 고온 상태에서 분사가 가능한 압전(piezoelectric) 방식의 새로운 DoD 메탈젯 시스템을 설계 및 제작하여 그 성능을 시험하여 고온 구동이 가능한 메탈젯 시스템의 구현 가능성을 검증하고자 한다.

2. 개념설계 및 이론적 해석

2.1 메탈젯 시스템의 공리적 설계

본 연구의 개념 설계를 위한 기능적 요구조건(functional requirements)과 이를 달성하기 위한 설계 인자(design parameters)는 Table 1 과 같다. 각각에 대해 살펴보면, 먼저 500°C 이상의 고열을 사용(FR1)하기 위하여 챔버 주위에 가열로 시스템을 설계(DP1)하였으며, 80 μm 이하의 지름을 가지는 액적을 토출(FR2)하기 위하여 노즐크기를 가공가능한 최소크기(50 μm)로 설계(DP2)하였다. 또한, 수 kHz 의 주파수 구동이 가능(FR3)하도록 하기 위하여 가열로와 단열이 되어있는 PZT 구동기를 사용(DP3)하였으며, 균일한 성질 및 크기의 액적을 형성(FR4)하기 위하여 공정 변수를 최대한 유지할 수 있도록 설계/가공(DP4)하였다.

Fig. 1 은 제안하는 메탈젯 시스템의 개념도이다. 본 시스템은 최상부의 PZT 구동기를 비롯해, 가열로, 노즐 시스템, 정밀스테이지 등으로 구성되어 있다.

Table 1 Functional requirements and design parameters of the metal-jet system

Functional Requirements	
FR1	500°C 이상의 고열 가능
FR2	80 μm 이하의 액적 지름
FR3	수 kHz 주파수 구동
FR4	균일한 성질 및 크기의 액적 형성
Design Parameter	
DP1	챔버 주위에 500°C 이상 가열 가능한 가열로 시스템 설계
DP2	가공가능한 최소 직경의 노즐 설계
DP3	단열판이 장착되어 있는 PZT 구동기 사용
DP4	공정 변수의 균일성 유지

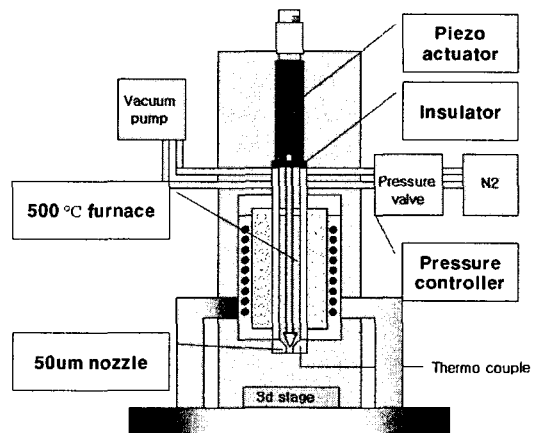


Fig. 1 Conceptual design of the piezoelectric DoD metal-jet system

특히, 메탈 챔버에는 진공 펌프를 장착하여 가열로에 존재하는 산소를 뽑아내고, 절소기체를 삽입하여 용융메탈의 산화를 방지할 수 있도록 구성하였으며, 절소 기체를 압력제어기를 통해서 공급함으로써 전체 시스템 내의 압력을 조절한다. PZT 구동기는 메탈젯의 토출이 DoD 방식으로 이루어지도록 노즐 끝단에 압력파를 형성하며, 정밀 스테이지의 이송을 통해 3 차원 적층이 가능하도록 하였다.

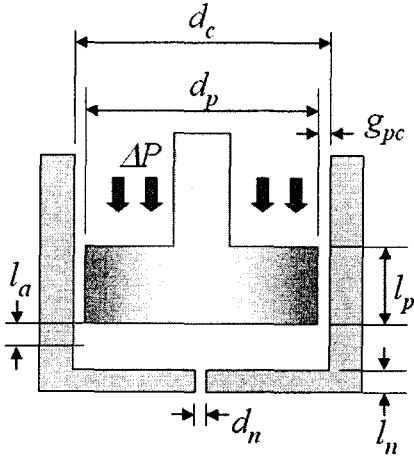


Fig. 2 Physical model of the nozzle part of the metal-jet system

2.2 이론적 해석

Fig. 2 는 메탈젯 시스템 노즐부의 물리적 모델과 설계 변수를 나타낸다. 메탈젯 시스템의 액적 토출의 원리는, 챔버(chamber) 내의 용융메탈에 일정한 압력이 가해지고, 피스톤이 상하구동함에 따라 하단의 노즐을 통해 액적이 토출되는 방식이다. 이러한 메탈젯 시스템의 피스톤헤드(piston head)부분은 전기-기계 유사 (Electro-mechanical Analogy)를 통해 Fig. 3 의 전기회로와 같이 모델링될 수 있다.

유체에 가해지는 정압차이(ΔP)은 전체 유체에 가해지는 전압으로 표현될 수 있으며, 피스톤과 챔버 사이의 간극(g_{pc})은 유체의 흐름을 방해하는 저항(R_{pc})으로 표현될 수 있고, 노즐 또한 유체의 흐름을 방해하는 저항(R_N)으로 표현될 수 있다. 피스톤의 상하구동은 유체를 밀어주었다가 당겼다가 하므로, 교류전류의 발생기로 표현될 수 있으며, 결국 이러한 소자들이 직렬로 연결되어 있는, Fig. 3 과 같이 전기회로로 유사할 수 있다.

먼저, 저항 R_{pc} 와 설계변수와의 관계를 알아보기 위해, 원통형 피스톤과 챔버 사이의 간극(g_{pc})에 비해 피스톤의 직경(d_p)이 훨씬 크다고 가정하고, 층류, 정상류, 비압축성유체라 가정하면, 피스톤과 챔버 사이에 흐르는 단위시간당 유체량(Q_{pc})은⁽⁹⁾

$$Q_{pc} = \int_{\frac{g_{pc}}{2}}^{\frac{g_{pc}}{2}} u \cdot \pi d_c \cdot dy = \frac{\pi d_c g_{pc}^3}{12 \mu l_p} P_{difference} \quad (1)$$

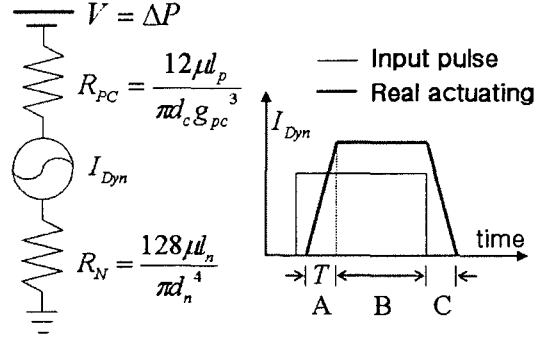


Fig. 3 Electro-mechanical analogy model of the metal jet nozzle system

이며, 여기서 μ 는 유체의 점도이며, $P_{difference}$ 는 피스톤과 챔버의 상하간의 압력차이다.

따라서, 피스톤과 챔버 사이의 유체 저항 R_{pc} 는 식 (2)와 같다.

$$R_{pc} = \frac{12 \mu l_p}{\pi d_c^3 g_{pc}^3} \quad (2)$$

저항 R_N 과 설계변수와의 관계를 알아보기 위해, 노즐에 흐르는 유체를 원통 사이를 흐르는 유체로 가정하고, 층류, 정상류, 비압축성유체라 가정하면, Hagen-Poiseuille Eq.에 의해 노즐에 흐르는 단위시간당 유체량(Q_N)은 식 (3)과 같이 구해지며,⁽¹⁰⁾

$$Q_N = -\frac{\pi d_n^4}{128 \mu l_n} P_{difference} \quad (3)$$

따라서 노즐의 유체 저항은 식 (4)와 같다.

$$R_N = \frac{128 \mu l_n}{\pi d_n^4} \quad (4)$$

본 메탈젯 시스템의 피스톤 구동은 Fig. 3 과 같이 사각파 구동을 사용하였다. 하지만, 사각파 구동을 명령하였어도, 실제 구동은 상승시간(Rise time)이 존재하는 사다리꼴의 구동으로 가정할 수 있다. 또한, 유체가 노즐 밖으로 밀어져 나오는 부분은, 피스톤의 전진 구동이 있는 A 구간에서 이루어지므로, A 구간에서의 유체가 노즐 밖으로 밀어져 나오는 단위시간당 유량(Q)은, 식 (5)와 같이 챔버 내의 압력과 대기압과의 정압차이(ΔP)에 의한 유량(Q_{Stat})과 피스톤 구동에 의한 유량(Q_{Dyn})의 합이다.

$$Q = Q_{Stat} + Q_{Dyn} \quad (5)$$

여기서, 정압차이(ΔP)와 유량(Q_{Stat})의 관계는, Fig. 3 에서와 같이 저항(R_{PC})와 저항(R_N)이 직렬로 연결되어 있는 형식이므로,

$$Q_{Stat} = \frac{1}{R_{PC} + R_N} \Delta P \quad (6)$$

이다. 이 식은 ΔP 가 양의 값과 음의 값 모두의 경우에 적용가능하다. 또한, 피스톤 구동에 의한 유량(Q_{Dyn})을 구하기 위해, 피스톤 전진구동시(A 구간)의 챔버 내의 단위시간당 부피의 변화량(ΔV)을 보면,

$$\Delta V = A_p l_a \frac{1}{T} = \frac{\pi}{4} d_p^2 l_a \frac{1}{T} \quad (7)$$

이며, 여기서 A_p 는 피스톤 바닥의 단면적이고, l_a 는 구동거리이며, T 는 피스톤 전진구동의 상승시간이다.

그런데, ΔV 의 일부는 피스톤과 챔버 사이의 간극으로 빠져나가고, 나머지가 노즐을 통해서 나오게 되므로, 노즐을 통해 나오는 유량 Q_{Dyn} 은 다음의 식 (8)과 같다.

$$Q_{Dyn} = \frac{R_{PC}}{R_{PC} + R_N} \Delta V \quad (8)$$

따라서, 식 (5)에 식 (6)과 식 (8)을 대입하면,

$$Q = \frac{1}{R_{PC} + R_N} \Delta P + \frac{R_{PC}}{R_{PC} + R_N} \Delta V \quad (9)$$

이다. 그런데, 본 메탈젯 노즐 시스템의 경우 저항(R_{PC})에 비해서 저항(R_N)이 100 배 이상 크므로, 식 (9)는 식 (10)과 같이 간략화할 수 있다.

$$Q \cong \frac{1}{R_N} \Delta P + \frac{R_{PC}}{R_N} \Delta V \quad (10)$$

여기서, 피스톤의 전진구동이 이루어지는 A 구간에서의 노즐 밖으로 밀어져 나오는 유체의 부피(V)는 식 (10)을 시간 T 동안 적분한 것이므로,

$$V = \frac{1}{R_N} \Delta P T + \frac{R_{PC}}{R_N} A_p l_a \quad (11)$$

이 된다.

3. 메탈젯 시스템의 제작

3.1 메탈젯 시스템

Fig. 4 는 최종적으로 구현된 메탈젯 시스템이다. 이 시스템은 공압제어, PZT 구동기 제어, 정밀 스테이지 3축 제어가 가능하다. 각종 페이스트 뿐 아니라 금속 분말을 용융시켜 토출할 수 있으며 각종 변수에 대한 정밀 제어를 통하여 최적의 작동환경을 도출 할 수 있도록 설계, 제작되었다. 본 연구의 메탈젯 노즐 시스템의 설계변수는 Table 2 와 같으며, Fig. 5 는 이에 따른 노즐부의 설계와 제작된 형상을 나타낸다.

용융메탈 액적의 토출을 용이하게 하기 위해서는, 다른 일반 잉크젯팅 공정과 마찬가지로, 최소한의 음압으로 용융메탈을 노즐 끝에서 잡아주고, 이를 PZT 구동기로 토출시킨다. 따라서, 메탈젯에서도 최소한의 음압 정도로써 -3.8kPa 을 실험적으로 구하였다. 이때, 저항(R_{PC})와 저항(R_N)의 값을 위해, 사용된 점도는 1000cP 라 가정하여 값을 구하였다.

Table 2 Design parameters and its values

Design parameter	value	Design parameter	value
R_{PC}	3.2 $kg/s \cdot mm^4$	ΔP	-3.8 kPa
R_N	326 $kg/s \cdot mm^4$	T	1 ms
A_p	0.785 mm^3	l_n	50 μm
d_n	50 μm	l_a	30 μm

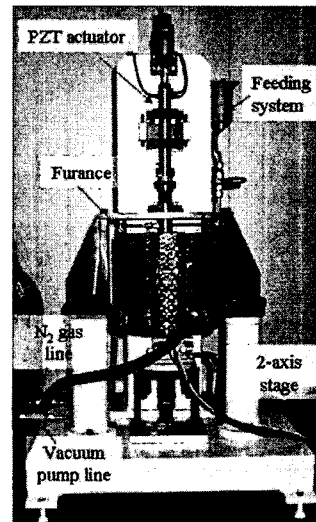
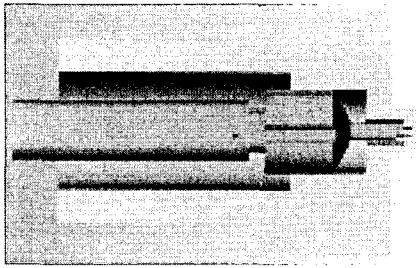
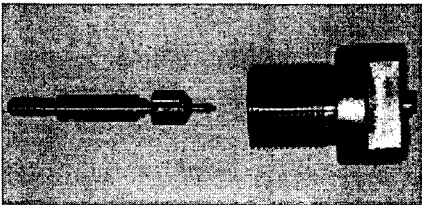


Fig. 4 Manufactured metal-jet system



(a)



(b)

Fig. 5 Design and fabrication of the nozzle part; (a) conceptual view of the nozzle part; (b) photograph of the fabricated piston head and the nozzle part (stainless steel)

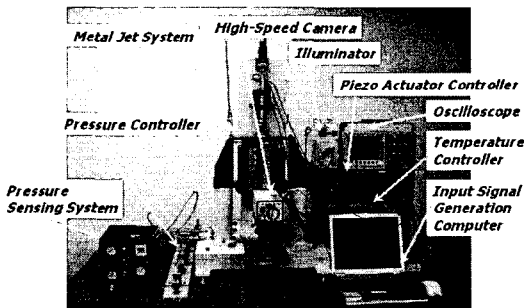


Fig. 6 Experimental apparatus for visualization of the ejected droplets

3.2 메탈젯 시스템 시험 장치

Fig. 6 은 메탈젯 시스템의 시험 장치를 나타낸다. 본 연구에서는 토출되는 액적의 순간적인 형상을 관찰하기 위하여 현미경이 장착된 고속카메라(high-speed camera)와 조명기(illuminator)를 사용하였다. 또한, 미세 양압(positive pressure) 및 음압(negative pressure)의 조절이 동시에 가능한 압력 제어기와 압력 계측 시스템을 사용하여 챔버 내의 압력을 정밀하게 제어하였다. 메탈 챔버 내의 온도와 노즐끝단의 온도를 각각 온도 조절기를 사용하여 정밀하게 제어하였으며, 컴퓨터와 D/A 변환보드(D/A converting board)를 사용하여 입력신호를 생성하였다.

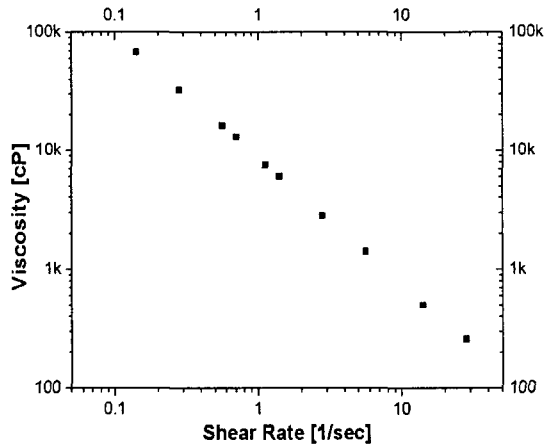


Fig. 7 Measured viscosity of the molten metal at different shear rates

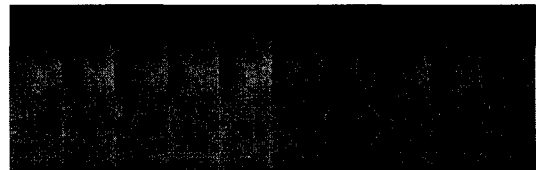


Fig. 8 Trajectory of the 65µm-diameter ejected droplet from the 50µm-diameter nozzle with 3V, 10Hz, 1.0ms pulse width input electrical signal.

4. 메탈젯 액적토출 실험 및 토의

4.1 용융메탈의 물성 분석

본 연구에서 사용된 메탈은 무연솔더중의 하나인 Bi58Sn (Bi58% Sn42%)을 사용하였으며, 용융시의 점도 특성 및 stress-strain 관계를 실험적으로 분석하였다. 분석에 사용된 점도계는 Brookfield사의 모델명 DVII+PRO를 사용하였다. Fig. 7은 변형률(shear rate)에 따른 측정된 점도 특성이며, 그래프에서 알 수 있듯이 용융메탈은 변형율이 커질수록 점도가 작아지는 특성을 나타내었다.

4.2 메탈젯 시스템의 성능 분석 및 토의

Fig. 8은 50 µm 지름을 가지는 노즐이 장착된 메탈젯 시스템으로부터 용융메탈이 토출되는 순간을 Fig. 7의 시험 장치를 이용하여 촬영한 것이다. 각각의 용융메탈 토출사진 사이의 시간 간격은 약 100µs이며 작동 조건은 3Volts, 10Hz, 1.0ms 펄스폭을 가지는 입력 전기신호를 가하여 주었으며, 챔버 압력은 -3.8kPa, 챔버내의 온도는 390°C로 유지하였다. Fig. 8과 같은 액적토출사진들을 분석한 결과, 액적의 속도는 약 4.0 m/s이며, 액적의 지름은 약 65 µm ~ 70 µm

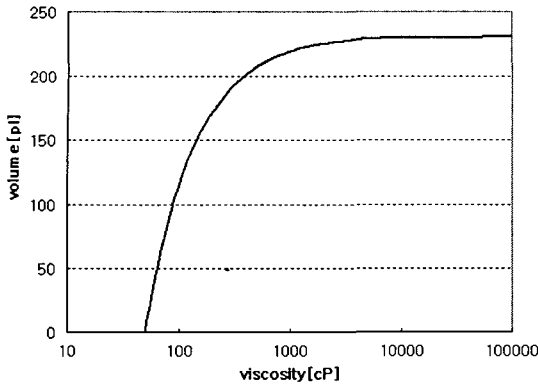


Fig. 9 Calculated droplet volume by Eq.(11) at different viscosities

이었고, 이를 구로 가정한 액적의 부피는 145pl ~ 180pl로 계산된다.

위의 실험결과를 식 (11)의 이론적 해석결과와 비교하여 보면, Table 2의 설계변수 조건에서 이론적 예측치는 약 220pl이며, 이를 지름으로 환산하면, 75 μm 로 계산된다. 즉, 이론적 모델과 실험적 측정치 사이의 오차는 지름의 경우 7% ~ 13%, 부피의 경우 18% ~ 34% 정도라고 할 수 있다. 여기서 오차의 범위가 있는 것은 측정에 의한 오차를 반영한 것이다. 측정의 방법은 CCD와 광원을 뒤에서 비추어 그림자를 통해 액적의 크기를 보고, 이를 획득(capture)한 화면을 통해 재는 방법을 사용하기 때문에 생기는 오차이다.

위에서 발생한 오차의 주된 원인은, 메탈젯팅 과정에서 내부의 점도가 위치마다 시간마다 계속 변하고 있음에도 불구하고, 점도가 변하지 않는 값으로 고정하여 적용한 모델이라는 점이다. 이것은 이 모델이 가지고 있는 한계이지만, 점도의 대표값을 결정하여 이론 수식에 대입하여, 잉크젯의 성능을 예측할 수 있다는 장점이 있다. 그런데, 점도의 대표값 역시 결정하는 것이 쉽지 않다. 잉크의 변형률과 점도를 예측하거나 측정하는 것은 또 하나의 상당히 어려운 연구주제이다. 왜냐하면, 첫째, 피스톤의 구동속도는 주기성을 가지고 시간에 따라 변하므로, 액적하나가 생성되는 과정에서 피스톤의 구동속도가 계속 변하므로, 피스톤 챔버 벽면과 피스톤 사이의 용융메탈 변형률도 계속 변한다. 노즐에서의 변형률의 계산의 경우도 매우 어렵다. 노즐에서 액적이 형성되는 과정은 용융메탈의 변형률은 액적의 내부 위치마다, 노즐에서 얼마큼 떨어진 위치인가 마다 다르고, 시간별로 또한 모두 다르다. 따라서, PZT의 이동속도와 액적의 토출속도로 이를 유추하여 하나의 값으로 대

표하는 것 또한 상당히 어려우며, 이를 측정장치를 통해서 얻는 것도 또하나의 연구주제이며 매우 어려운 일이다.

따라서, 점도의 대표값을 결정하기 보다는 점도의 대표값에 따른 용융메탈 액적의 부피를 식 (11)에 대입하여, Fig. 9와 같이 그래프로 도시하였다. 이 결과, 점도값 1000cP 이하에서는, 점도에 따라서 부피의 변화가 심하지만, 그 이상에서는 액적의 부피가 230pl로 수렴하고 있음을 볼 수 있다. 즉, 본 논문에서 제안하는 메탈젯 시스템에 관한 이론적 모델을 사용하면 점도값을 정확히 알지 못하여도 점도값이 1kcP ~ 100kcP 구간에서 액적의 부피가 5%정도의 차이만을 보이며 수렴하고 있으므로, 식 (11)을 통해 액적의 부피를 일정 범위 안의 값으로 예측하는 것이 가능하다.

5. 결 론

본 논문에서는 고점도 및 고용용점을 가지는 재료를 패터닝하는 데에 적용하기 위한 DoD 메탈젯 시스템의 설계, 해석, 제작 및 성능시험을 수행하였다. 제안한 메탈젯 시스템으로부터 토출되는 액적의 크기를 예측하기 위한 이론적 해석을 수행하였으며, 해석결과를 바탕으로 DoD 방식의 메탈젯 시스템을 설계 및 제작하였다. 또한, 제작된 메탈젯 시스템의 성능을 시험적으로 분석하기 위하여 고속카메라가 장착된 시험장비를 구축하였으며, 이를 통해 50 μm 직경을 가지는 노즐을 장착한 메탈젯 시스템으로부터 약 65 μm ~ 70 μm 의 지름을 가지는 액적을 토출하였다. 촬영된 사진으로부터 측정된 토출액적의 부피와 속도는 145pl ~ 180pl와 약 4.0m/s 이었다. 이를 이론적으로 해석한 결과와 비교하면, 모델에 의한 액적의 부피는 220pl, 지름은 75 μm 로 계산되었으며, 지름의 오차는 7% ~ 13%, 부피의 오차는 18% ~ 34% 정도이다. 이의 주된 원인은, 모델링에서 사용한 점도값이 대표값으로 고정된 값을 사용한다는 점과 액적을 측정하는 기법 상의 오차이다. 이를 줄이는 방법에 대한 후속 연구가 필요하다.

본 연구에서 제시한 노즐 시스템의 이론적 해석 및 설계를 통해 제작된 메탈젯 시스템을 사용하여, 메탈과 같은 고온, 고점도의 용액을 액적의 형태로 토출하여, 반도체 패키징 및 PCB 기판 공정 등에 응용할 경우, 기존의 반도체공정, 전기도금 등의 공정방법에 비해 공정 원가 및 공정 시간 절감 등의 관점에서 큰 장점이 있을 것이며, 3차원 미세구조 형상의 제작 뿐만 아니라, 미래형 저가의 전자소자를 제조하기 위한 새로운 제조공정 장비로의 적용가능성을 가지고 있다고 할 것이다.

참고문헌

- (1) Yamaguchi, K., Sakai, K., Yamanaka, T., and Hirayama, T., 2000, "Generation of Three-dimensional Micro Structure Using Metal Jet," *Precision Engineering*, 24, pp. 2~8.
- (2) Wilkes, E. D., and Basaran, O. A., 2001, "Drop Ejection from an Oscillating Rod," *J. of Colloid and interface science*, No. 242, pp. 180~201.
- (3) Eom, H. C., Cho, K. M., Song, I. H., and Hahn, Y. D., 2003, "Investigation of Preprocess Parameters on Lead-free Solder Balls Fabricated by Droplet-Based Manufacturing Process," *J. Kor. Inst. Met.&Mater.*, Vol. 41, No. 1, pp. 56~63.
- (4) Hayes, D., Cox, W., and Grove, M., 1999, "Low-Cost Display Assembly and Interconnect Using Ink-Jet Printing Technology," *Display Works*.
- (5) Yim, P., Chun, J., Ando, T., and Sikka, V., 1996, "Production and Characterization of Mono-sized Sn-Pb alloy balls," *Int. J. of Powder Metallurgy*, Vol. 32, No. 2, pp. 155~164.
- (6) Orme, M., Courter, J., Liu, Q., Huang, C., and Smith, R., 2000, "Electrostatic Charging and Deflection of Nonconventional Droplet Streams Formed from Capillary Stream Breakup," *Physics of Fluids*, Vol.12, No. 9, pp.2224~2235.
- (7) Ayers, S., Hayes, D, Boldman, M., Wallace, D., 1998, "Printhead for Liquid Metals and Method of Use," U.S. Patent 5772106.
- (8) Sohn, H. and Yang, D., 2005, "Drop-on-demand Deposition of Superheated Metal Droplets for Selective Infiltration Manufacturing," *Materials Science and Engineering A*, 392, pp. 415~421.
- (9) Fox, R. W. and McDonald, A. T., 1985, *Introduction to Fluid Mechanics*, John Wiley & Sons, Inc., pp.339.
- (10) Fox, R. W. and McDonald, A. T., 1985, *Introduction to Fluid Mechanics*, John Wiley & Sons, Inc., pp.347.