

◆특집◆ NBiT 응용 잉크젯 프린팅 기술

DoD 메탈젯 프린팅 시스템

이택민\*, 강태구\*, 양정순\*, 조정대\*, 김광영\*, 최병오\*, 김동수\*

DoD Metal-Jet Printing 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), Molten Metal (용융 금속)

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.<sup>1,4</sup> 특히, 용융 메탈과 같이 고온, 고점도의 용액을 액적(Droplet)의 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 있다.

이러한 용융 메탈 액적을 토출하는 메탈젯에 관한 기존의 연구로는 연속토출(Continuous Jetting) 방식의 UDM(Uniform Droplet Manufacturing)기술<sup>5</sup> 과 DoD(Drop-on-Demand)기술<sup>6,7</sup> 로 분류 할 수 있다. 연속토출 방식의 UDM 기술은 단위 시간당 액적 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 응용하고 있다.

DoD 방식<sup>1,6,7</sup>의 경우는, 원하는 순간에 원하는

위치에 정확하게 액적을 토출할 수 있는 장점을 가지고 있어 3 차원 형상가공이나 전자회로 구현 등 다양한 형태의 적용이 가능하다.

Fig.1 은 Nagoya Univ.의 K. Yamaguchi 등이 개발한 다이어프램(Diaphragm)의 변형으로 인한 체적변화(Volume Change)기술을 채택한 장비를 나타낸 것이다. 작동방식은 피에조 구동에 의한 다이어프램의 변형이 챔버의 체적에 변화를 야기 시켜 금속재료를 분사하는 방식이다. 사용된 금속은 Bi-Pb-Sn-Cd-In 합금이다. 그러나, 다이어프램방식의 사용으로 인해 가용온도가 55°C 정도로 매우 낮고 사용주파수도 10Hz 정도에 이르며, 액적의 크기도 400um 급의 큰 편에 속한다. KAIST 의 연구<sup>7</sup>는 솔레노이드 액추에이터를 사용하는 형태의 용융 금속 액적 토출 장치를 개발하고 이로부터 금속액적을 토출한 결과에 관한 논문이다(Fig.2). 이 연구에서는, 용기내의 압력제어가 되지 않고, 솔레노이드 구동기를 사용하여 구동 주파수가 매우 느리며, 이로 인해 토출된 액적의 지름이 역시 수백미크론 급으로 크다는 단점이 있다. MicroFab 사의 Solder jet 의 경우<sup>6</sup>는 미세유리관 외벽에 피에조 구동기를 장착하여 고온상태에서 용융 금속 액적을 토출하는 장치이다. 이 장비의 단점은, 온도에 약한 피에조 구동기가 가열로 안에 삽입되어 있으므로, 최고 300°C 까지 작동 가능하다고 하며, 구조적으

\* 한국기계연구원 정보장비연구센터

Tel. (042) 868-7451

E-mail taikmin@kimm.re.kr

로 온도를 더 높이기에는 한계가 있다. Arizona State Univ.의 Tseng 등에 의해 개발된 UDM의 경우, 사용된 금속재료는 Sn-Sb 합금으로써 용융온도는 240°C이다. 노즐은 루비(ruby)로 제작되어 있으며 재료를 토출하기 위하여 피에조 구동기를 사용하고 있다. 토출된 액적 하부에 Deflection Plate가 설치되어 있다. UDM의 경우, 연속토출 방식을 이용한 헤드로서, 구동 주파수는 매우 빠르지만, 방향성을 제어하기가 쉽지 않으므로, 2차원의 패터닝 및 3차원 형상의 적층에는 어려움이 있다. Fig. 3은 MIT의 Prof. Chun 등이 개발한 UDS 장치로서 이 역시 연속토출 방식으로써, 3차원 또는 2차원 조형보다는 구형의 Ball을 만들어 내는 데에 더 적합하다.

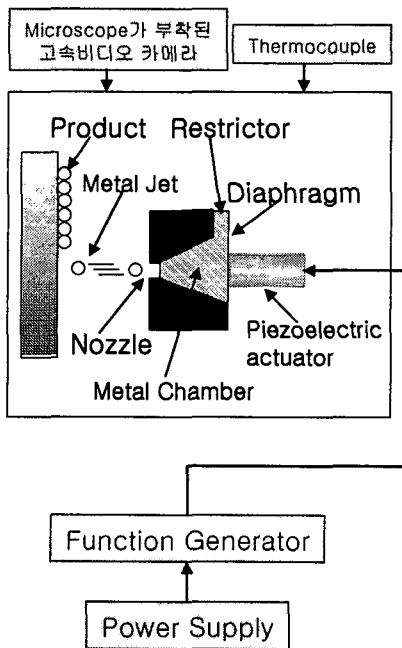


Fig. 1 Metal-jet of Nagoya Univ.

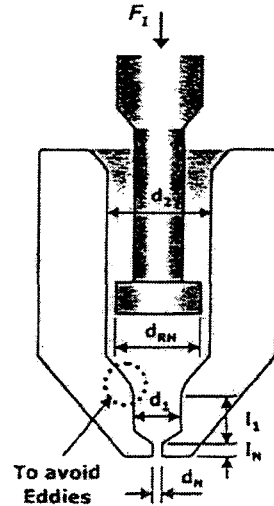


Fig. 2 SIM of KAIST

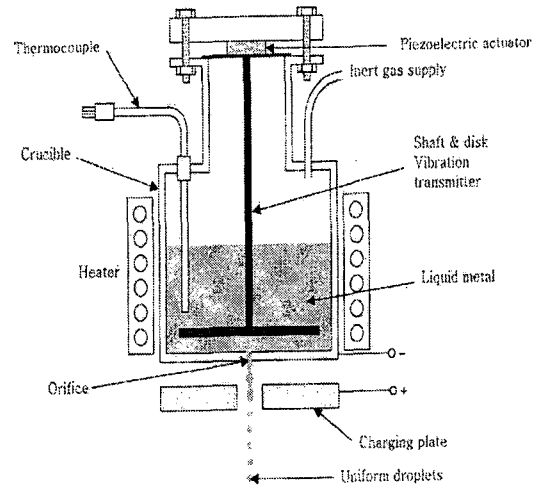


Fig. 3 UDS of MIT

본 논문에서는 한국기계연구원에서 새로이 고안된, 400°C 이상의 고온 상태에서 토출이 가능한 피에조 구동 방식의 DoD 메탈젯 프린팅 시스템을 제안하며, 이의 설계, 제작, 및 성능시험을 수행함으로써, 고온 구동이 가능한 메탈젯 프린팅 시스템의 구현 가능성을 검증하고 이를 이용한 3차원 금속 미세구조물의 제작가능성을 확인하고자 한다.

## 2. 설계 및 제작

### 2.1 메탈젯 프린팅 시스템의 개념설계

Fig.4 는 메탈젯 프린팅 시스템의 개념도이다. Fig.4 에서 알 수 있는 바와 같이, 본 논문에서 제안하는 메탈젯 프린팅 시스템은 압전형 구동기 (piezoelectric actuator)와, 간극 조절이 가능한 노즐 시스템(gap adjustable nozzle system), 압력 조절 장치 (pressure control unit) 및 가열로(furnace)와 단열부 (insulator) 등으로 구성되어 있다. 메탈젯 프린팅 시스템의 작동원리는 용융 메탈이 채워져 있는 챔버 내에서 압전구동기와 기계적으로 체결되어 있는 피스톤헤드 부분이 압전구동기에 인가되는 펄스 신호 입력에 의해 노즐출구(nozzle exit)를 향해 순간적으로 움직이게 되며, 이 때 발생하는 압력과 함께 용융메탈이 노즐출구를 통해 토출되는 것이다.

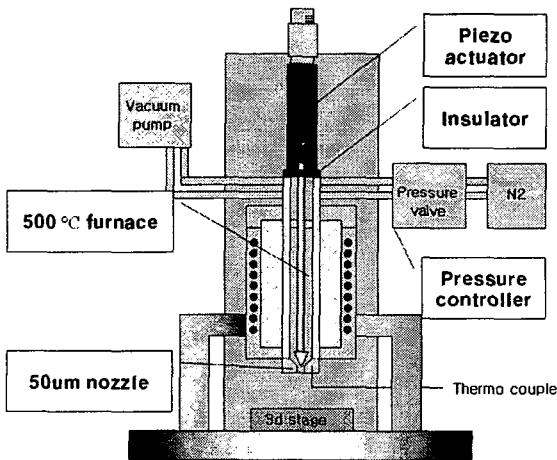


Fig. 4 Conceptual design of the piezoelectric DoD metal-jet system

### 2.2 메탈젯 프린팅 시스템의 설계

본 연구의 개념 설계를 위한 기능적 요구조건 (functional requirements)과 이를 달성하기 위한 설계 인자(design parameters)는 Table 1 과 같다. 먼저 400℃이상의 고열을 사용(FR1)하기 위하여 챔버 주위에 가열로 시스템을 설계(DP1)하였으며, 80µm 이하의 지름을 가지는 액적을 토출(FR2)하기 위하여 노즐크기를 가공 가능한 최소크기(50µm)로 설계 (DP2)하였다. 또한, 수 kHz 의 주파수 구동이 가능

(FR3)하도록 하기 위하여 가열로와 단열이 되어있는 압전구동기를 사용(DP3)하였으며, 균일한 성질 및 크기의 액적을 형성(FR4)하기 위하여 공정 변수를 최대한 유지할 수 있도록 설계/가공(DP4)하였다.

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

Functional Requirements	
FR1	400℃ 이상의 고열 가능
FR2	80µm 이하의 Droplet Diameter
FR3	빠른 주파수 구동
FR4	균일한 성질 및 크기의 Droplet 형성
Design Parameter	
DP1	500℃ 이상 가능한 가열로 시스템 설계
DP2	가공가능한 최소 직경의 노즐 설계
DP3	단열판이 장착된 압전구동기 사용
DP4	공정 변수의 균일성 유지

### 2.3 메탈젯 프린팅 시스템의 제작

Fig.5 는 최종적으로 구현된 메탈젯 시스템이다. 이 시스템은 공급압력 제어, PZT 구동기를 통한 발생 압력과 제어, 정밀 스테이지를 이용한 3 축제어가 가능하다. 각종 페이스트(paste) 뿐 아니라 금속 분말을 용융시켜 토출 할 수 있으며 각종 변수에 대한 정밀 제어를 통하여 최적의 작동환경을 구현할 수 있도록 설계, 제작하였다.

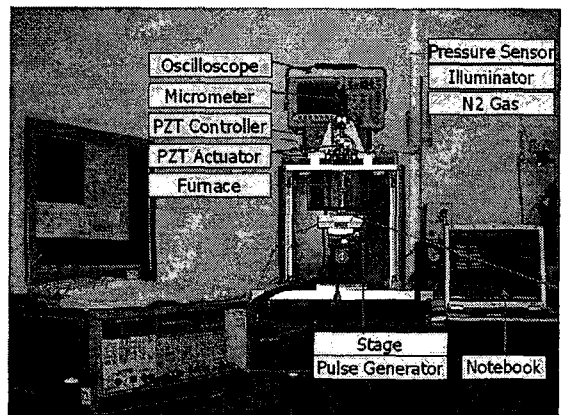


Fig.5 A photograph of the DoD metal-jet printing system

### 3. 메탈젯 프린팅 시스템의 성능 분석

#### 3.1 메탈젯 프린팅 시스템 시험 장치

본 연구의 메탈젯 프린팅 시스템에서는 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 압력제어기와 압력 계측 시스템을 사용하여 챔버 내의 압력을 정밀하게 제어하였다. 메탈 챔버 내의 온도와 노즐 끝단의 온도를 각각 온도 조절기를 사용하여 정밀하게 제어하였으며, 컴퓨터와 D/A 변환 보드(D/A converting board)를 사용하여 입력신호를 생성하였다.



Fig. 6 Measured trajectory of the ejected water droplets from 100µm-diameter nozzle, whose diameter, volume and velocity is 390µm, 30nl and 0.5m/sec, respectively

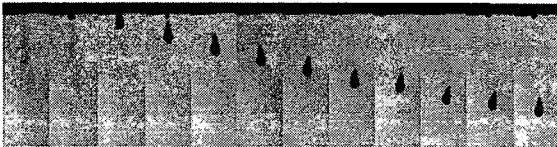


Fig. 7 Measured trajectory of the ejected molten-metal droplets from 200µm-diameter nozzle, whose diameter, volume and velocity is 300µm, 17nl and 0.6m/sec, respectively

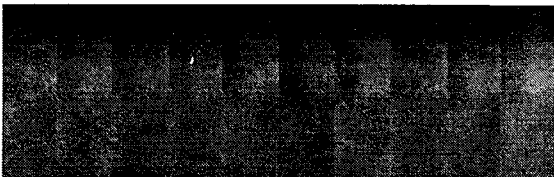


Fig. 8 Measured trajectory of the ejected molten-metal droplets from 50µm-diameter nozzle, whose diameter, volume and velocity is 65µm, 140pl and 4.0m/sec, respectively

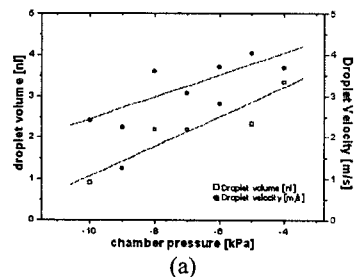
#### 3.2 메탈젯 프린팅 시스템 성능 분석

본 논문에서는 메탈젯 프린팅 시스템의 성능을 분석하기 위하여 각각 다른 점도 및 작동온도를 가지는 물과 용융메탈 두 가지 재료에 관하여 여러가지 실험을 수행하고 그 결과를 비교하였다. Fig. 6, 7 및 8 은 각각 100µm 지름의 cone-type 노즐에서 토출되는 물과 200µm 지름의 cone-type 노즐에서 토출되는 용융메탈 및 50µm 지름의 flat-type 노즐에서 토출되는 용융메탈의 토출궤적을 순간 촬영한 결과를 각각 시간 순으로 나열한 것이다. 이 사진들로부터 토출액적의 지름, 부피 및 토출속도를 각각 측정하였다. 측정된 토출액적의 지름, 부피 및 속도는 Fig. 6 의 경우 각각 390µm, 30nl 및 0.5m/sec 였으며, Fig. 7 의 경우 각각 300µm, 17nl 및 0.6m/sec 로 나타났으며, Fig. 8 의 경우 각각 65µm, 140pl 및 4.0m/sec 로 측정되었다(Table 2).

Table 2 Measured data of ejected droplets

	Diameter (µm)	Volume (nl)	Velocity (m/sec)	Remark
Fig.6	390	30	0.5	water
Fig.7	300	17	0.6	metal
Fig.8	65	140	4.0	metal

또한, 설계변수 및 작동조건이 토출성능에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 챔버내의 압력과 초기 간극 및 작동 주파수의 변화에 따른 토출액적의 부피와 속도변화를 측정하였으며, 이를 Fig.9 에 도시하였다. Fig. 9 에서 알 수 있는 바와 같이, 토출 액적의 부피 및 속도는 챔버내의 압력이 감소할수록, 또 초기 간극이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다. 또한, 작동 주파수의 변화에 따라서는 500Hz 범위 내에서는 크게 영향을 받지 않는 것을 확인하였다.



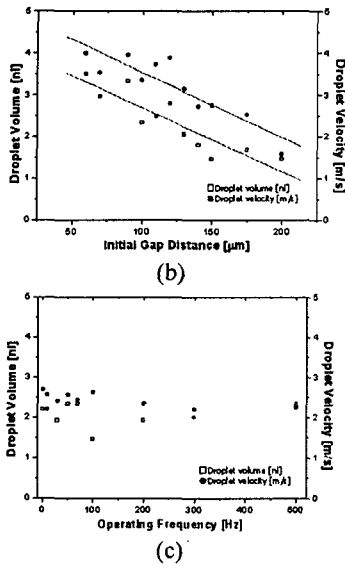


Fig. 9 Experimental Analysis of the effects of the operating parameters on the volume and velocity of the ejected molten-metal droplet: (a) effects of the chamber pressure; (b) effects of the initial gap distance; (c) effects of the operating frequency

본 연구에서는 제작된 메탈젯 프린팅 시스템을 사용하여 3 차원 금속 미세구조물(Fig. 10)을 제작하였다. 먼저 스테이지를 고정된 상태에서 메탈을 토출하여 수직 기둥(Fig.10(a))을 제작하였으며, 스테이지를 천천히 이동시키면서 메탈을 토출하여 기울어진 기둥(Fig.10(b))을 제작하였다. Fig.10(a)는 높이 2,100 $\mu\text{m}$ , 지름 200 $\mu\text{m}$  및 중횡비(aspect ratio) 10.5 인 수직형태의 금속 미세구조물이며, Fig. 10(b)는 높이 1,400 $\mu\text{m}$  에 지름 150 $\mu\text{m}$  를 가지는 65° 기울어진 형태의 금속 미세구조물이다.

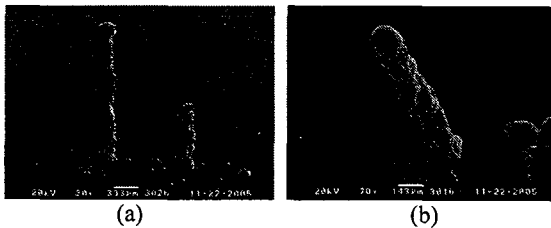


Fig. 10 SEM photographs of the fabricated 3D metal structures using the present DoD metal-jet printing systems: (a) vertical column; (b) 65°-inclined column

#### 4. 결론

본 논문에서는 메탈을 용융하여 젯팅하는 연구에 대한 소개와 이에 대한 성능을 비교하였으며 새로이 고안한 용융메탈 DOD 메탈젯 프린팅 시스템을 소개하였고, 이를 이용하여 제작한 3 차원 구조물을 소개하였다. 기존의 일반적인 잉크젯 프린팅 헤드와는 달리, 메탈젯 프린팅 시스템을 사용하면, 메탈과 같은 고온, 고점도의 용액을 액적의 형태로 토출하여, 반도체 패키징 및 PCB 기판 공정 등에 응용이 가능하며, 기존의 반도체 공정이나 전기도금 등의 공정방법에 비해 공정 원가 및 공정 시간 절감 등의 관점에서 큰 장점이 있을 것이다.

#### 참고문헌

1. Yamaguchi, K., Sakai, K., Yamanaka, T. and Hirayama, T., "Generation of Three-dimensional Micro Structure Using Metal Jet," Precision Engineering, Vol. 24, pp. 2~8, 2000.
2. Wilkes, E. and Basaran, O., "Drop Ejection from an Oscillating Rod," J. of Colloid and interface science, No. 242, pp. 180~201, 2001.
3. Eom, H., Cho, K., Song, I. and Hahn, Y., "Investigation of Process Parameters on Lead-free Solder Balls Fabricated by Droplet-Based Manufacturing Process," J. Kor. Inst. Met.&Mater., Vol. 41, No. 1, pp. 56~63, 2003.
4. Hayes, D., Cox, W. and Grove, M., "Low-Cost Display Assembly and Interconnect Using Ink-Jet Printing Technology," Display Works, 1999.
5. Orme, M., Courter, J., Liu, Q., Huang, C. and Smith, R., "Electrostatic Charging and Deflection of Nonconventional Droplet Streams Formed from Capillary Stream Breakup," Physics of Fluids, Vol.12, No. 9, pp.2224~2235, 2000.
6. Ayers, S., Hayes, D., Boldman, M. and Wallace, D., "Printhead for Liquid Metals and Method of Use," U.S. Patent 5772106, 1998.
7. Sohn, H. and Yang, D., "Drop-on-demand Deposition of Superheated Metal Droplets for Selective Infiltration Manufacturing," Materials Science and Engineering A, Vol.392, pp. 415~421, 2005.