

압전작동기를 이용한 고주파수 젯팅 디스펜서의 성능 특성

Performance Characteristics of High Frequency Jetting Dispenser Featuring Piezoactuator

윤보영*· 구오흥*· 홍승민*· 손정우*· 최승복†
Bo-Young Yun, Quoc Hung Nguyen, Seung-Min Hong, Jung Woo Sohn
and Seung-Bok Choi

Key Words : Jetting Dispenser(젯팅 디스펜서), Piezoelectric Actuator(압전작동기), Semiconductor Packaging(반도체 패키징), High Frequency Operating(고주파수작동)

ABSTRACT

This paper presents a new jetting dispenser driven by a piezoelectric actuator at high operating frequency to provide very small dispensing dot size of adhesive in modern semiconductor packaging processes. After describing the mechanism and operational principle of the dispenser, a mathematical model of the structured system is derived by considering behavior of each component such as piezostack and dispensing needle. In the fluid modeling, a lumped parameter method is applied to model the adhesive whose rheological property is expressed by Bingham model. The governing equations are then derived by integrating the structural model with the fluid model. Based on the proposed model, dispensing performances such as dispensing amount are investigated with respect to various input trajectories.

1. 서 론

현재 반도체 칩 사이즈의 소형화로 디스펜싱 시스템에 대한 관심이 높아지고 있다. 디스펜싱 시스템은 반도체 제조 공정 및 SMT(surface mount technology) in-line 작업공정에 사용되는 도포 공정 장비의 핵심 기능을 수행한다. 디스펜싱 시스템의 주요한 기능은 다양한 소자 제품을 외부환경으로부터 보호하기 위하여 PCB 상의 칩 또는 반도체 소자 제품에 에폭시 레진을 균일하게 정량 도포 접착함으로써 칩 및 소자의 이탈을 방지하고 외부 환경으로부터의 보호를 목적으로 제품의 형태를 완성하는 것이다⁽¹⁻³⁾. 이러한 디스펜싱 시스템의 가장 핵심은 용액을 정량적으로 토출하는 디스펜서이다. 디스펜서에 관한 연구는 크게 Rotary-screw, Positive-displacement, Jetting 디스펜서에 관한 세 가지로 분류된다. Rotary-screw 디스펜서는 모터로 구동되는 스크류를 이용하여 용액을 토출한다. 이 디스펜서는 스크류의 회전으로 용액을 니들로 보낸다. 이 때 니들부에서 위로 역방향 압력이 발생하게 되고, 이는 용액의 토출에 영향을 미치게 된다. Positive-displacement 디스펜서는 피스톤의 이동량에 따라 액체의 성질에 관계없이 토출량

이 결정되기 때문에 신뢰성이 높다. 그러나 토출량이 작아질수록 액체의 성질과 압축성에 영향을 받아 신뢰성이 낮아진다. Jetting 디스펜서는 플런저를 이용하여 니들 관로의 접착용액의 표면장력을 뚫고 나가 토출되는 것이며 지속적으로 동일한 양을 토출 즉 도팅한다. 이 디스펜서는 도팅이 가능하기 때문에 미세 정량 토출이 가능하여 광범위하게 응용되고 있다. 하지만 반도체 분야에서 현재 칩 패키지 기술은 점점 더 소형화, 고집적화, 경량화, 박형화로 발전하고 있으며, 이에 따라 초정밀, 초미세 토출이 가능하고 높은 내구성을 갖는 새로운 디스펜서 메커니즘이 요구되고 있다.

Chen 과 Adamson 등에 의해 유공압과 모터를 이용한 디스펜싱 메커니즘에 관한 연구가 진행되었다⁽⁴⁻⁵⁾. 그렇지만 이는 유공압과 모터의 응답시간에 따른 문제점으로 고주파수 영역에서의 사용에 문제점과 점차 요구되는 토출양이 작아지는 기술 경향에 적합한 정밀한 양의 유체토출이 힘들다는 단점이 있다. 그리고 최근에는 압전작동기를 적용한 연구가 활발히 진행되고 있으며 Choi 등은 압전작동기의 변위를 확대하여 사용하기 위해 유압식 변위확대장치를 적용하여 연구하였으나 변위확대용 유체의 점성의 영향으로 고주파수영역에서의 정밀한 유체의 토출이 힘들다⁽⁶⁻⁷⁾.

따라서 본 연구에서는 고주파로 구동하는 압전작동기를 이용하여 초미세 정량 토출이 가능한 새로운 젯팅 디스펜서를 제안하고자 한다. 이를 위해 적층형 압전작동기를 도입하고, 레진 용액을 밀어 토출시키는 니들과 연결하여 구동시스템을

† 교신저자; 정회원, 인하대학교 기계공학부

E-mail : seungbok@inha.ac.kr

Tel : (032) 872-7925, Fax : (032) 868-1716

* 인하대학교 대학원 기계공학과

구축한다. 그리고 집중 매개변수 기법을 이용하여 빙햄특성을 갖는 디스펜싱 용액의 거동을 수학적으로 모델링 한 다음 압전구동시스템을 포함한 기계적인 구조의 동적 모델과 결합하여 전체 디스펜싱 시스템의 수학적 모델을 도출한다. 유도된 모델을 이용하여 시뮬레이션을 수행하고 압전작동기에 인가되는 다양한 파형과 크기, 주파수의 입력전압에 따른 토출 성능을 고찰한다.

2. 구성 및 작동 원리

Fig.1 은 본 연구에서 제안한 젯팅 디스펜서의 구성도이다. 압전작동기는 고정된 한쪽이 캡과 맞닿아 볼트로 체결되어 있으며 샤프트는 니들과 체결되어 있다. 실질적으로 이 니들이 움직이는 변위에 따라 하우스 내부에 있던 용액이 토출된다. 디스펜싱 용액은 파이프를 통해 하우스로 공급되며, 하우스의 내부에는 앞서 언급한 니들이 위치하며 하단의 노즐을 통해 용액이 토출된다. 젯팅 디스펜서의 작동원리를 Fig. 2 에 나타내었다. 먼저 공압에 의해 용액이 파이프를 통하여 하우스에 유입된다. 이때 압전작동기에 전압을 인가하여 압전작동기를 팽창시키면 그에 따라 샤프트와 니들이 하강하면서 하우스의 용액을 밀어내며 노즐을 통해 토출시킨다. 다시, 압전작동기에 인가되는 전압을 제거하면 샤프트는 압전작동기가 수축함에 따라 상승하게 되고 이때 관성에 의해 토출되는 용액의 흐름이 끊어지면서 도팅이 된다.

3. 젯팅 디스펜서의 동적 모델링

Fig. 3 은 제안된 젯팅 디스펜서의 자유물체도를 나타낸 것이다. 압전작동기를 포함한 구동부와 디스펜싱 용액으로 나뉜다. 먼저 제안된 시스템은 고주파의 구동주파수를 갖기 때문에 압전작동기에서 발생하는 힘 F_{volt} 는 응답시간을 고려하여 다음과 같이 시상수 τ 를 갖는 1 차 동적 모델로 표현할 수 있다.

$$\tau \frac{d}{dt} F_{volt} + F_{volt} = \alpha V \quad (1)$$

여기서 V 는 압전작동기에 인가되는 전압이다. 본 연구에서 사용한 압전작동기의 물성치는 Table 1 에 나타내었다. Fig. 4 는 압전작동기에 120V, 100Hz 의 사인파와 사각파 전압을 인가하였을 때 압전작동기의 변위를 측정된 것이다. 이를 이용하여 압전작동기의 시상수를 구할 수 있다. 그리고 Fig. 5 에 나타낸 바와 같이 구동시스템은 압전작

Table 1 Piezoelectric actuator properties

Parameter	Value	Parameter	Value
Operating voltage	0 ~ 150 V	Time constant (τ)	0.5 msec
Coefficient (α)	16.7 N/V	Max. stroke	50 μ m
Length	71 mm	Stiffness (k_p)	50 N/ μ m

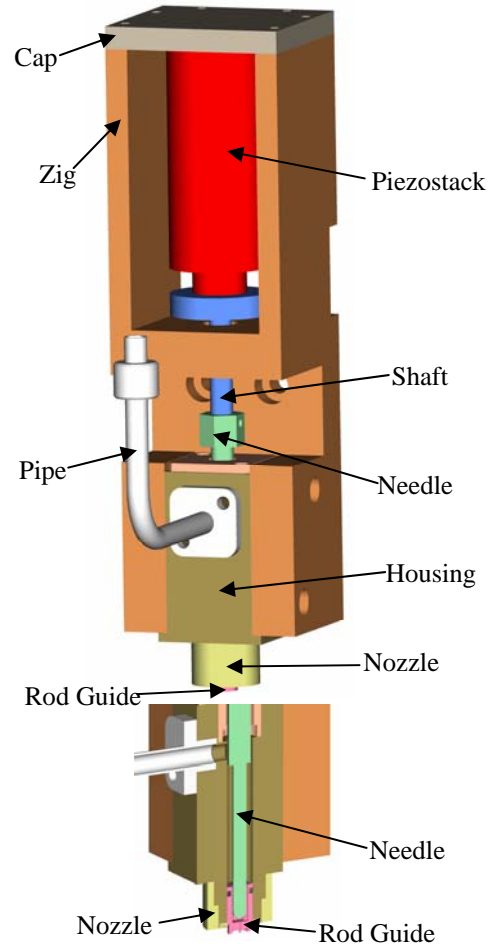


Fig. 1 Configuration of the jetting dispenser

동기, 샤프트, 니들로 구성되어 있으므로 다음과 같은 2 차의 동적 모델로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} m_s \ddot{x}_s &= F_1 \\ m_p \ddot{x}_p + k_p x_p &= F_{volt} - F_1 - F_2 \\ m_n \ddot{x}_n + c_f \dot{x}_n &= F_2 \end{aligned} \quad (2)$$

이때 m_s , m_p , m_n 는 샤프트, 압전작동기, 니들의 질량이고 c_f 는 유체의 저항이다. F_{volt} 는 전압이 가해졌을 시 압전작동기가 내는 힘이고 F_1 과 F_2 는 압전작동기에 의해 샤프트와 니들에 가해지는 힘이다. 여기서 압전작동기는 샤프트와 체결되어 있고 샤프트는 다시 니들과 체결되어 있어 압전작동기, 샤프트, 니들의 변위는 같다고 가정할 수 있다. 따라서 식 (2)는 다음과 같이 간략화할 수

있다.

$$m\ddot{x} + c_f\dot{x} + k_p x = F_{volt} \quad (3)$$

$$x = x_s = x_p = x_n$$

$$m = m_s + m_p + m_n$$

다음으로 Fig. 6 은 구동시스템에 의해 유동이 일어나는 디스펜싱 용액부를 나타내고 있다. 본 연구에서는 이의 모델링을 위해 집중 매개변수 기법을 도입하였다. Fig. 6 에서 보는 바와 같이 전체 디스펜싱 용액을 6 개의 집중 질량 $L_{f1} \sim L_{f6}$ 로 나타내었으며, 집중 매개변수 기법에 의해 용액의 거동을 수학적으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} L_{f1}\ddot{v}_1 + R_{f1}\dot{v}_1 &= 0 \\ L_{f2}\ddot{v}_2 + R_{f2}\dot{v}_2 &= 0 \\ L_{f3}\ddot{v}_3 + R_{f3}\dot{v}_3 &= 0 \\ L_{f4}\ddot{v}_4 + R_{f4}\dot{v}_4 &= P_{air} \\ L_{f5}\ddot{v}_5 + R_{f5}\dot{v}_5 + (v_5 - v_6)/C_{f6} &= 0 \\ L_{f6}\ddot{v}_6 + R_{f6}\dot{v}_6 + (v_6 - v_5)/C_{f6} &= P_{syringe} \end{aligned} \quad (4)$$

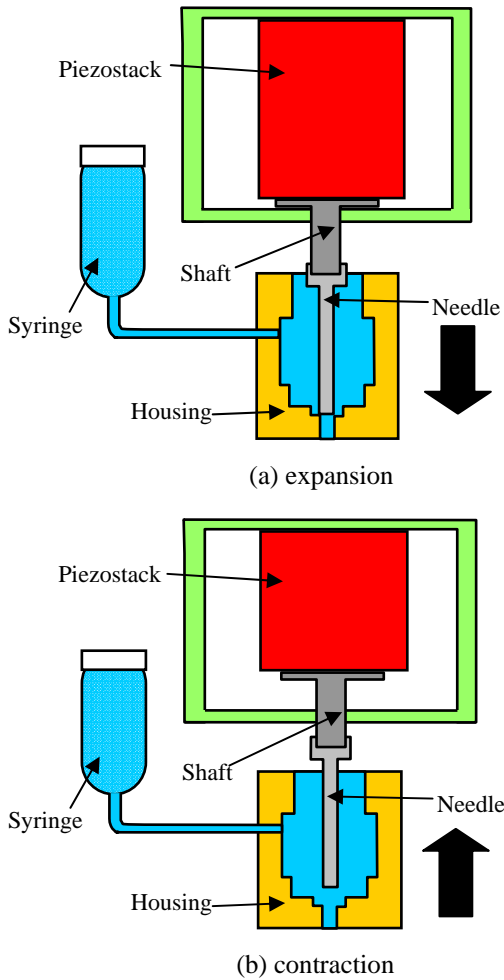


Fig. 2 Operation principle of the jetting dispenser

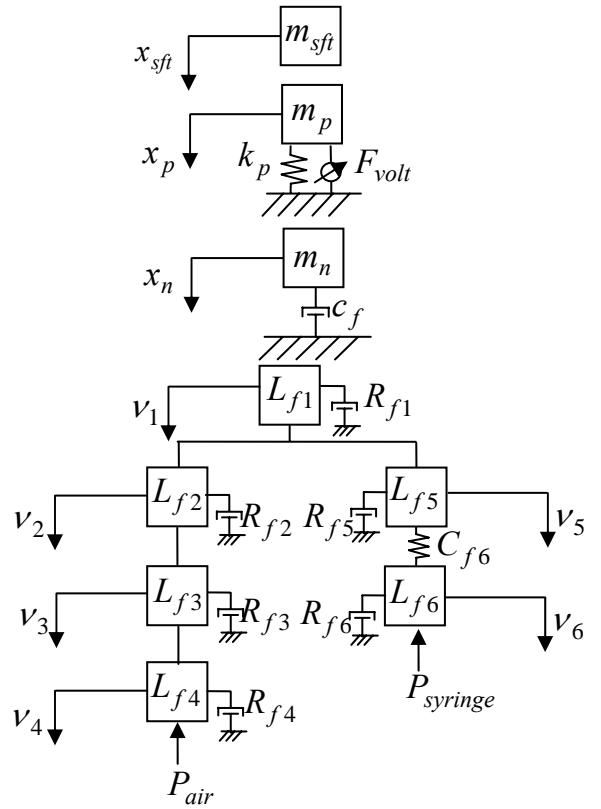
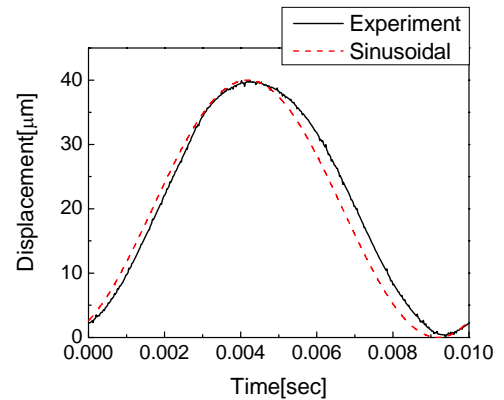
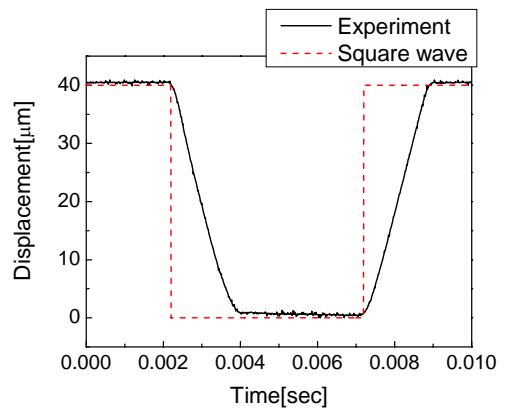


Fig. 3 Free body diagram of the jetting dispenser



(a) 120V-100Hz sinusoidal excitation



(b) 120V-100Hz square excitation

Fig. 4 Displacement of the piezoelectric actuator

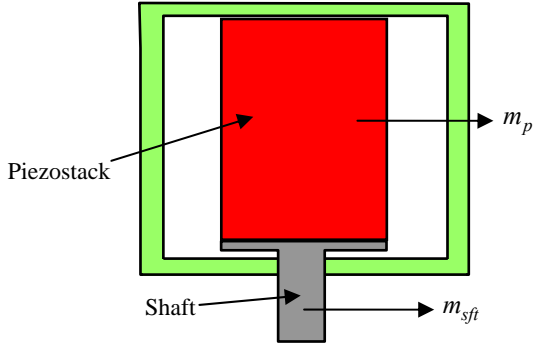


Fig. 5 Actuator part modeling

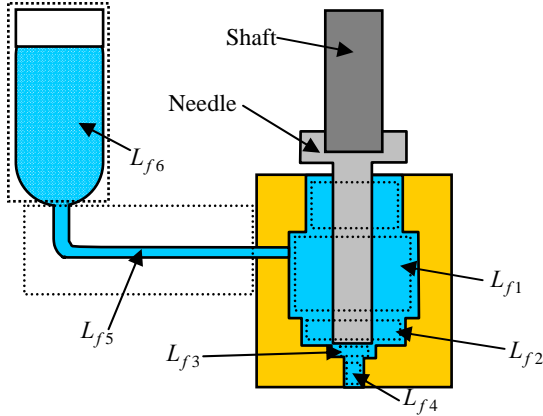


Fig. 6 Dispensing liquid part modeling

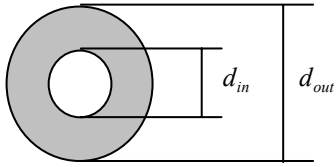


Fig. 7 Annulus shape pipe

여기서 v_i 는 각 용액 집중 질량의 변위, $P_{syringe}$ 는 시린지의 압력, P_{air} 는 대기압이다. 그리고 L_f 와 R_f 는 각 구간별 용 집중 질량과 유체저항을 나타낸다.

본 연구에서는 유체저항을 고려하기 위해 파워 모델을 사용하였다. 이는 디스펜싱 용액이 일반적으로 비뉴턴성인 비 뉴토니안 거동을 하기 때문이며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \approx K\dot{\gamma}^n \quad (5)$$

여기서 τ 는 전단력, τ_0 는 항복응력, $\dot{\gamma}$ 는 전단율, K 는 consistency index, n 은 fluid behavior index이다. 만약 항복응력은 작다고 가정하면 유체의 점도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu = \frac{d\tau}{d\dot{\gamma}} \approx n \frac{K}{\dot{\gamma}^{1-n}}, \quad \dot{\gamma} = \frac{2|\dot{v}|}{Ad} \quad (6)$$

여기서 v , A , d , l 는 유체의 각 구간별 상태(부피), 단면적, 지름, 길이이다. 제안된 시스템에서 니들이 용액을 밀어내는 순간에 유체는 Fig. 7과 같은 환형 형상을 갖게 되며 이때 유체의 저항은 다음과 같다^(6~9).

$$R_{f4} = \frac{128\mu l_4 \zeta_4}{\pi(d_{4out}^2 - d_{4in}^2)(d_{4out} - d_{4in})^2} \quad (7)$$

$$\zeta_4 = \frac{(d_{4out} - d_{4in})^2 (d_{4out}^2 - d_{4in}^2)}{d_{4out}^4 - d_{4in}^4 - (d_{4out}^2 - d_{4in}^2)^2 / \ln(d_{4out}/d_{4in})}$$

$$\dot{\gamma} = \frac{2|\dot{v}|}{A(d_{4out} - d_{4in})}$$

한편, 식 (4)를 행렬로 나타내면 다음과 같다.

$$M_f \ddot{V}_f + B_f \dot{V}_f + K_f V_f = F_f \quad (8)$$

이때, 유체의 컴플라이언스를 고려하지 않으면 각 구간마다 이동하는 부피가 같으므로 다음과 같은 구속조건을 갖게 된다.

$$V_f = T_f \bar{V}_f, \quad \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ v_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_4 \\ v_6 \end{pmatrix} \quad (9)$$

한편 T_f 는 구속행렬, V_f 는 원상태, \bar{V}_f 는 변형된 상태이다. 구속행렬을 사용하면 식(9)를 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$\bar{M}_f \ddot{\bar{V}}_f + \bar{B}_f \dot{\bar{V}}_f + \bar{K}_f \bar{V}_f = \bar{F}_f$$

$$\bar{M}_f = T_f^T M_f T_f$$

(10)

$$\bar{B}_f = T_f^T B_f T_f$$

$$\bar{K}_f = T_f^T K_f T_f$$

$$\bar{F}_f = T_f^T F_f$$

따라서 전체 시스템은 식 (3)과 (10)으로부터 다음과 같이 행렬로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} M \\ \bar{M}_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_f \\ \ddot{\bar{v}}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_f \\ \bar{B}_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\bar{v}}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_p \\ \bar{k}_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \bar{v}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{volt} \\ \bar{F}_f \end{bmatrix} \quad (11)$$

4. 젯팅 디스펜서의 성능평가

제안된 디스펜서의 성능평가를 위해 LOCTITE®의 5110™ 용액을 고려하였으며, 용액의 물성치는 Table 2에 나타내었다. Fig. 8은 압전 작동기에 인가되는 전압이 0~120V, 100Hz의 사각파이고 시린지 압력이 1bar일 때 시뮬레이션 결과이다. 이때, Fig. 8(a)는 입력 전압이며 니들의 변

Table 2 Dispensing liquid properties

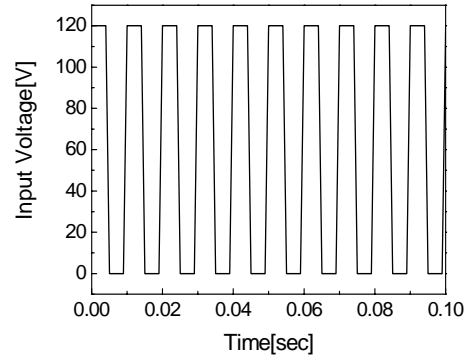
Property	Value	Property	Value
Bulk modulus	1.0E9 Pa	Density	1.21 g/cm ³
Consistency index(<i>K</i>)	23.59 e ^{$\frac{92.47}{T}$}	Fluid behavior index(<i>n</i>)	0.5
Viscosity	40cP	Design limit	205 °C

위는 Fig. 8(b)에 나타내었다. 결과에서 보는 바와 같이 유체저항에도 불구하고 매 주기마다 균일한 거동을 보여주고 있다. 매 주기마다 일정한 양이 토출됨을 알 수 있다. 본 연구에서 제안하는 디스펜서는 별도의 변위확대장치가 없기 때문에 변위는 작지만 힘의 손실없이 작동기와 샤프트, 니들이 동시에 운동을 한다. 따라서 점성이 작은 유체의 경우는 작동기 단독 운동시의 변위와 거의 동일한 변위를 내고 이를 바탕으로 확실한 토출이 이루어진다. Fig. 8(c) 는 토출되는 유체의 부피이며, Fig. 8(d)를 통해 각 주기마다 약 0.7g(0.6ml)의 유체가 토출됨을 알 수 있다. Fig. 9 는 동일한 조건에서 200Hz 와 300Hz 의 사각파 입력에 대한 토출량을 나타낸 것이다. 상용디스펜싱 장치의 작동주파수가 10~50Hz 정도임을 고려하면 상대적으로 높은 작동주파수에서도 정밀한 토출이 가능함을 알 수 있다. 이상의 시뮬레이션에서 사용했던 설계값을 이용하여 디스펜싱 시스템의 설계 변수를 결정하였고 이를 바탕으로 시스템을 제작하였다. Fig. 10 은 제작한 디스펜싱 시스템의 사진이다.

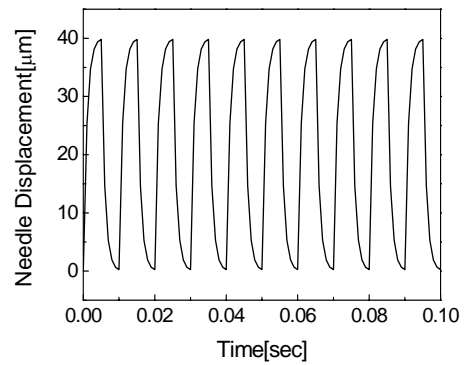
5. 결론

본 연구에서는 초미세 유량의 정밀 토출을 위해 압전작동기를 이용하여 고주파 구동이 가능한 새로운 젯팅 디스펜서를 제안하였다. 이를 위해, 먼저 별도의 변위확대장치를 사용하지 않고 압전작동기와 샤프트, 니들을 직결하여 작동기로 사용하였다. 이는 변위를 확대하지 않음으로 힘이 작아지지 않아 점성이 작은 유체의 경우 압전작동기가 움직이는 만큼 유체가 토출되는 장점을 가지고 있다. 그리고 집중 매개변수 기법을 이용하여 유체의 거동을 수학적으로 모델링 하고 압전 구동부의 모델과 결합해 전체 시스템의 동적 모델을 구축하였다. 시뮬레이션을 통해 다양한 입력 전압에 따른 우수한 디스펜싱 성능을 고찰하였고 이로부터 결정된 설계 파라미터를 이용하여 실제 디스펜싱 시스템을 제작하였다. 제작된 디스펜서를 이용하여 향후 여러 종류의 점성이 다른 용액을 대상

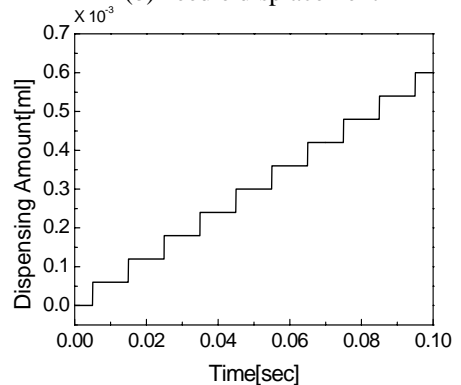
으로 실험을 수행하고 시뮬레이션 결과와 비교하며 적절한 제어 알고리즘을 도입하여 토출되는 유체의 양을 제어할 것이다.



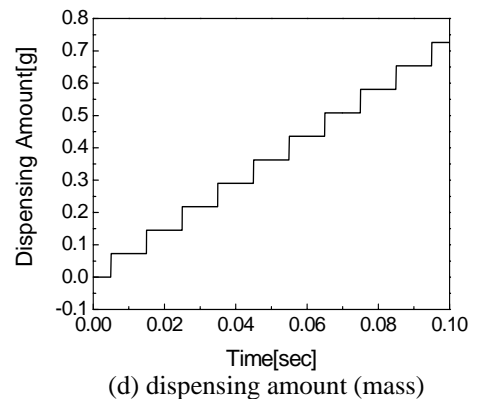
(a) applied voltage



(b) needle displacement

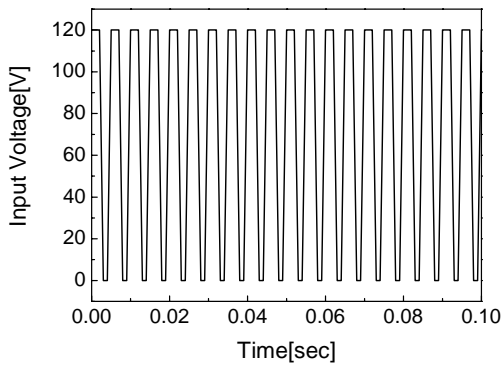


(c) dispensing amount (volume)

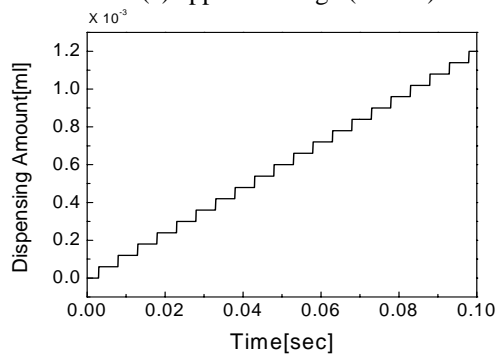


(d) dispensing amount (mass)

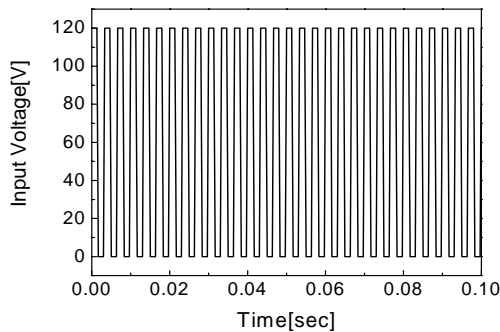
Fig. 8 Simulation results (100Hz)



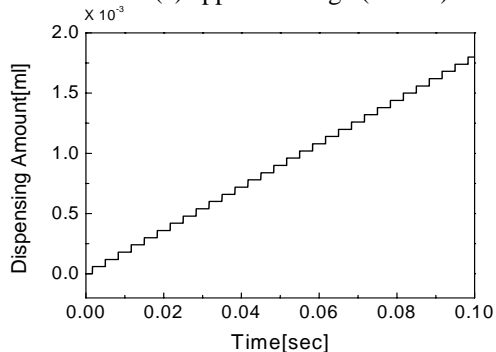
(a) applied voltage (200Hz)



(b) dispensing amount (volume, 200Hz)



(c) applied voltage (300Hz)



(d) dispensing amount (volume, 300Hz)

Fig. 9 Simulation results (200Hz, 300Hz)

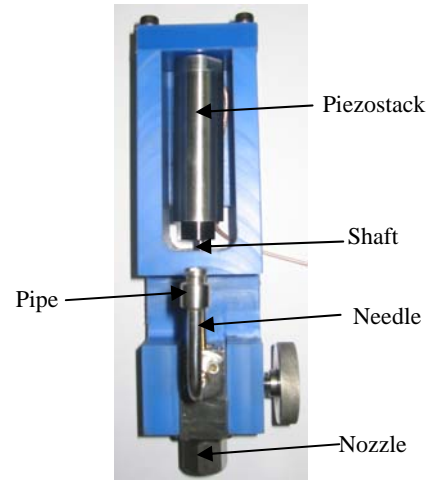


Fig. 10 Manufactured dispensing system

후 기

본 연구는 한국산업기술재단 최우수실험실지원사업에 의해 수행 되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Dixon, D., Kazalski, J., Murch, F. and Marongelli, S., 1997, "Practical Issues Concerning Dispensing Pump Technologies", *Circuits Assembly*, pp. 36~40.
- (2) Ness, C. Q. and Lewis, A. R., 1998, "Adhesives/epoxies & Dispensing", *Surf. Mount Technol.(SMT)*, pp. 114~122.
- (3) Wedekin, S., 2001, "Micro Dispensing Comes of Age", *Surf. Mount Technol.(SMT)*, pp. 62~71.
- (4) Chen, X. B. and Kai, J., 2004, "Modeling of Positive-Displacement Fluid Dispensing Processes", *IEEE Transacion on Electronics Packaging Manufacturing*, Vol. 27, No. 3. pp. 157~163.
- (5) Adamson, S. J., "Jetting of Underfill and Encapsulants for High-Speed Dispensing in Tight Spaces", *APEX IPC Printed Circuits Expo Anaheim, CA, February 24 - 26, 2004*.
- (6) Choi, M. K., Yun, B. Y., Nguyen, Q. H., Choi, S. B. and Hong, S. M., 2007, "Performance Evaluation of a New Type of Jetting Dispenser Using Piezoelectric Actuator", *Proceedings of the SPIE's 14th Annual Symposium on Smart Structures and Materials*, SPIE Vol.6525, pp. 652522-1-652522-9, San Diego, California, U.S.A, March 18-22.
- (7) Choi, M. K., Yun, B. Y., Nguyen, Q. H. and Choi, S. B., 2006, "Design and Control of Jetting Dispenser Driven by Piezoelectric Actuator", *Transactions of the Korea Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol.16, No.11, pp 1165~1171.
- (8) Nasser, K. M., 2000, *Development and Analysis of the Lumped Parameter Model of a PiezoHydraulic Actuator*, Master's thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- (9) White, F. M., 2003, *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill.