

# 압전작동기를 이용한 고속 토출 젯팅 디스펜서의 성능 특성

## Performance Characteristics of High Speed Jetting Dispenser Using Piezoactuator

윤보영\* · 구오흥\* · 손정우\* · 최승복†

Bo-Young Yun, Quoc Hung Nguyen, Jung Woo Sohn and Seung-Bok Choi

(2007년 12월 18일 접수 ; 2008년 3월 28일 심사완료)

**Key Words** : Jetting Dispenser(젯팅 디스펜서), Piezoelectric Actuator(압전작동기), Semiconductor Packaging (반도체 패키징), High Speed Jetting(고속 토출)

### 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. 서론

최근 반도체의 칩 사이즈가 소형화됨에 따라 보다 정밀한 공정을 위한 디스펜싱 시스템에 대한 관심이 높아지고 있다. 디스펜싱 시스템은 다양한 소자 제품을 외부환경으로부터 보호하기 위하여 PCB 상의 칩 또는 반도체 소자 제품에 에폭시 레진을 균일하게 정량 도포 접착함으로써 칩 또는 소자의 이탈을 방지하고 제품의 형태를 완성하는 것으로 반도체 제조 공정 및 표면실장기술(surface mount technology: SMT) 작업공정에서 도포 공정 장비의 핵심 기능을 수행한다<sup>(1~3)</sup>. 이러한 디스펜싱 시스템의 가장 핵심은 용액을 정량적으로 토출하는 디스펜

서이다. 디스펜서는 크게 로터-스크류(rotary-screw) 디스펜서, 양변위(positive-displacement) 디스펜서, 젯팅(jetting) 디스펜서의 세 가지로 분류된다. 로터-스크류 디스펜서는 모터로 구동되는 스크류를 이용하여 용액을 토출한다. 스크류의 회전으로 용액을 니들로 보내고, 이때 니들부에서 위로 역방향 압력이 발생하게 되며, 이는 용액의 토출에 영향을 미치게 된다. 양변위 디스펜서는 피스톤의 이동량에 따라 액체의 성질에 관계없이 토출량이 결정되기 때문에 신뢰성이 높다. 그러나 토출량이 작아질수록 액체의 성질과 압축성에 영향을 받아 신뢰성이 낮아진다. 젯팅 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 점

† 교신저자: 정회원, 인하대학교 기계공학부  
E-mail : seungbok@inha.ac.kr  
Tel: (032)860-7319, Fax: (032)868-1716  
\* 인하대학교 대학원 기계공학과

점 더 소형화, 고집적화, 경량화, 박형화로 발전하고 있으며, 이에 따라 초정밀, 초미세 토출이 가능하고 높은 내구성을 갖는 새로운 디스펜서 메커니즘이 요구되고 있다.

Chen과 Adamson등에 의해 유공압과 모터를 이용한 디스펜싱 메커니즘에 관한 연구가 진행되었다<sup>(4,5)</sup>. 그렇지만 이는 유공압과 모터의 응답시간에 따른 문제점으로 고주파수 영역에서의 사용에 제한이 있고, 점차 요구되는 토출량이 작아지는 기술 경향에 적합한 정밀한 양의 유체 토출이 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 고주파수 영역에서의 정밀한 유체의 토출이 힘들다<sup>(6,7)</sup>.

따라서 이 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 구축한다. 그리고 집중 매개변수 기법을 이용하여 빙햄 특성을 갖는 디스펜싱 용액의 거동을 수학적으로 모델링 한 다음 압전구동시스템을 포함한 기계적인 구조의 동적 모델과 결합하여 전체 디스펜싱 시스템의 수학적 인 모델을 도출한다. 유도된 모델을 이용하여 시뮬레이션을 수행하고 압전작동기에 인가되는 다양한 주파수의 입력 전압에 따른 토출 성능을 고찰한다.

## 2. 구성 및 작동 원리

이 연구에서 제안한 젯팅 디스펜서의 구성도를 Fig. 1에 나타내었다. 압전작동기는 고정된 한쪽이 캡과 맞닿아 볼트로 체결되어 있으며 샤프트는 니들과 체결되어 있다. 실질적으로 이 니들이 움직이는 변위에 따라 하우징 내부에 있던 용액이 토출된다. 디스펜싱 용액은 파이프를 통해 하우징으로 공급되며, 하우징의 내부에는 앞서 언급한 니들이 위치하며 하단의 노즐을 통해 용액이 토출된다. 젯팅 디스펜서의 작동원리를 Fig. 2에 나타내었다. 먼저 공압에 의해 용액이 파이프를 통하여 하우징에 유입된다. 이때 압전작동기에 전압을 인가하여 압전작동기

를 팽창시키면 그에 따라 샤프트와 니들이 하강하면서 하우징의 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

제안된 젯팅 디스펜서의 자유물체도를 Fig. 3에 나타내었다. 압전작동기를 포함한 구동부와 디스펜싱 용액으로 나뉜다. 먼저 제안된 시스템에서 압전작동기에서 발생하는 힘  $F_{volt}$ 는 응답시간을 고려하여 다음과 같이 시상수  $\tau$ 를 갖는 1차 동적 모델로 표현할 수 있다.

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

여기서  $V$ 는 압전작동기에 인가되는 전압이다. 이 연구에서 사용한 압전작동기의 물성치는 Table 1에 나타내었다. Fig. 4는 압전작동기에 120 V, 100 Hz의 사인파와 사각파 전압을 인가하였을 때 압전작동기의 변위를 측정된 것이다. 이를 이용하여 압전작동기의 시상수를 구할 수 있다. 그리고 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 구동시스템은 압전작동기, 샤프트, 니들로 구성되어 있으므로 다음 식과 같은 2차의 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.

Table 1 Piezoelectric actuator properties

Parameter	Value	Parameter	Value
Operating voltage	0 ~150 V	Time constant( $\tau$ )	0.5 msec
Coefficient( $\alpha$ )	16.7 N/V	Max. Stroke	50 $\mu$ m
Length	71 mm	Stiffness( $k_p$ )	50 N/ $\mu$ m

여기서 압전작동기는 샤프트와 체결되어 있고 샤프트는 다시 니들과 체결되어 있어 압전작동기, 샤프트

트, 니들의 변위는 같다고 가정할 수 있다. 따라서 식(2)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

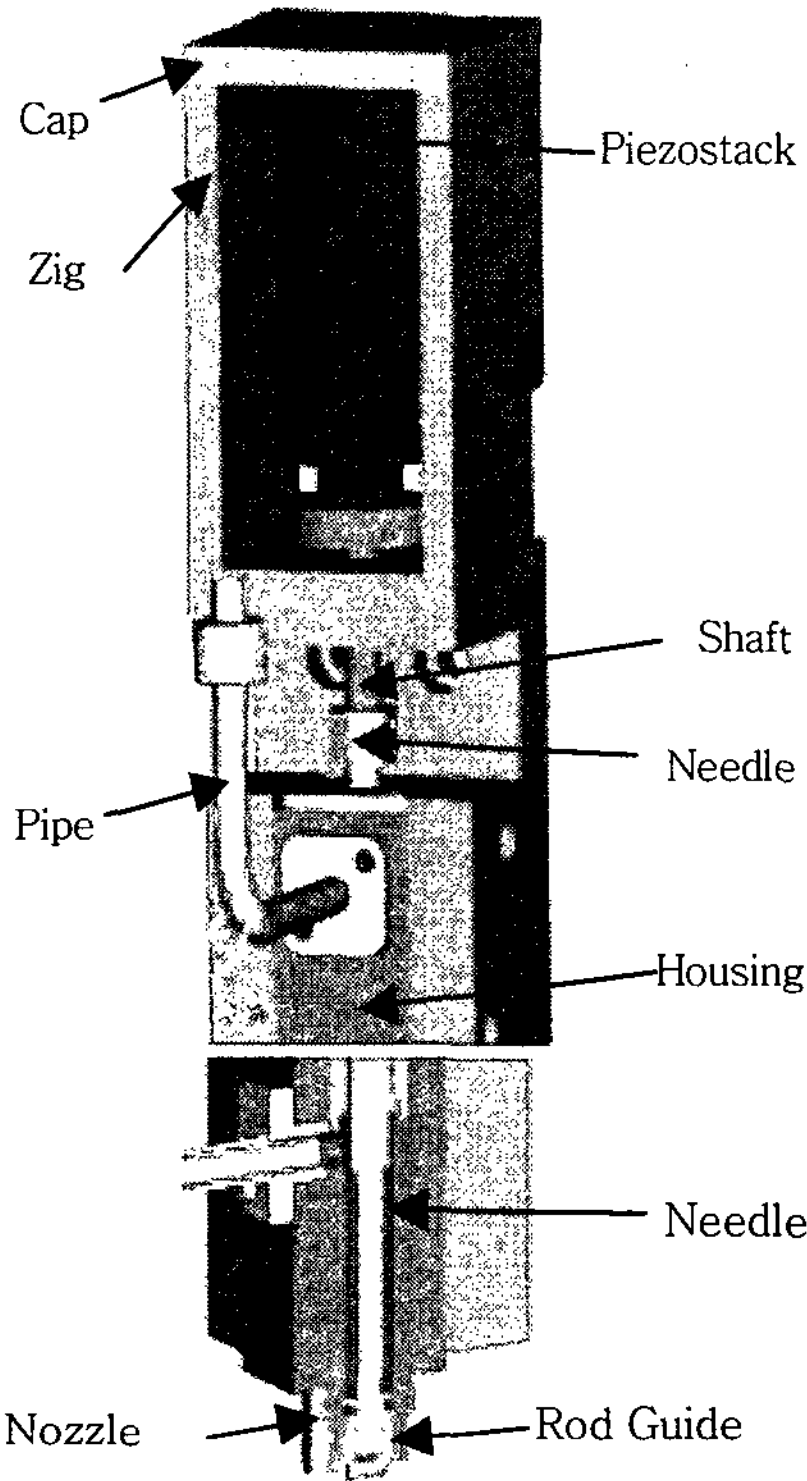


Fig. 1 Configuration of the jetting dispenser

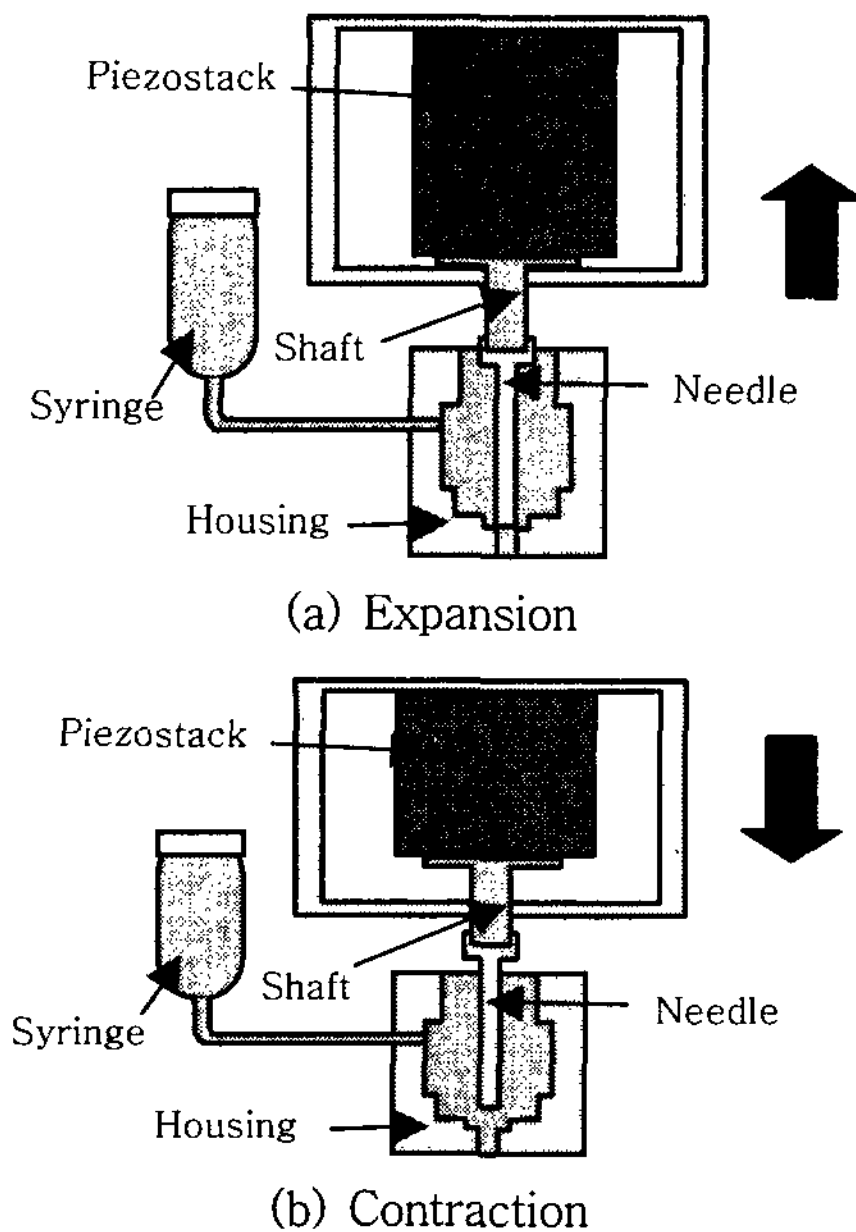


Fig. 2 Operation principle of the jetting dispenser

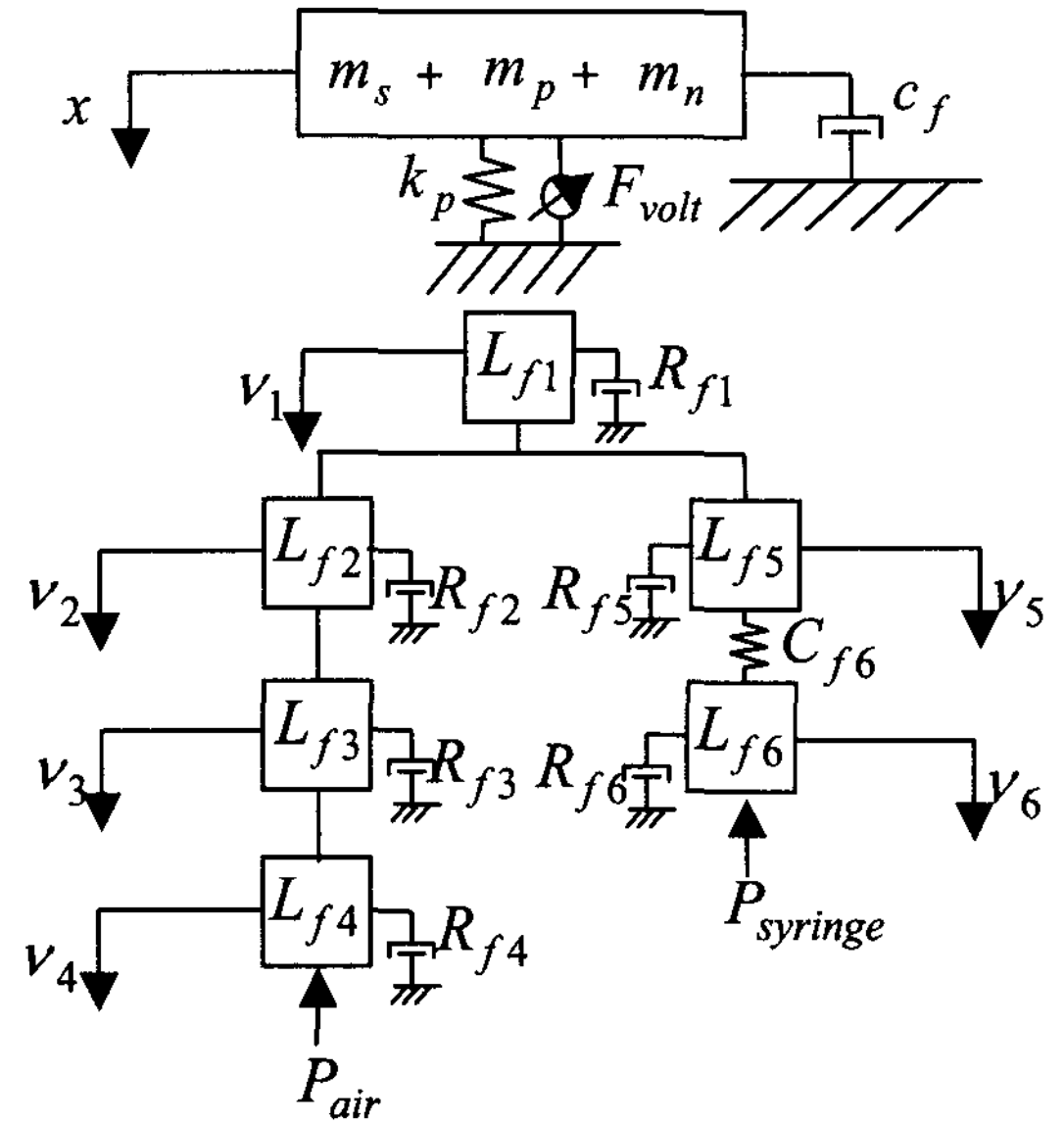
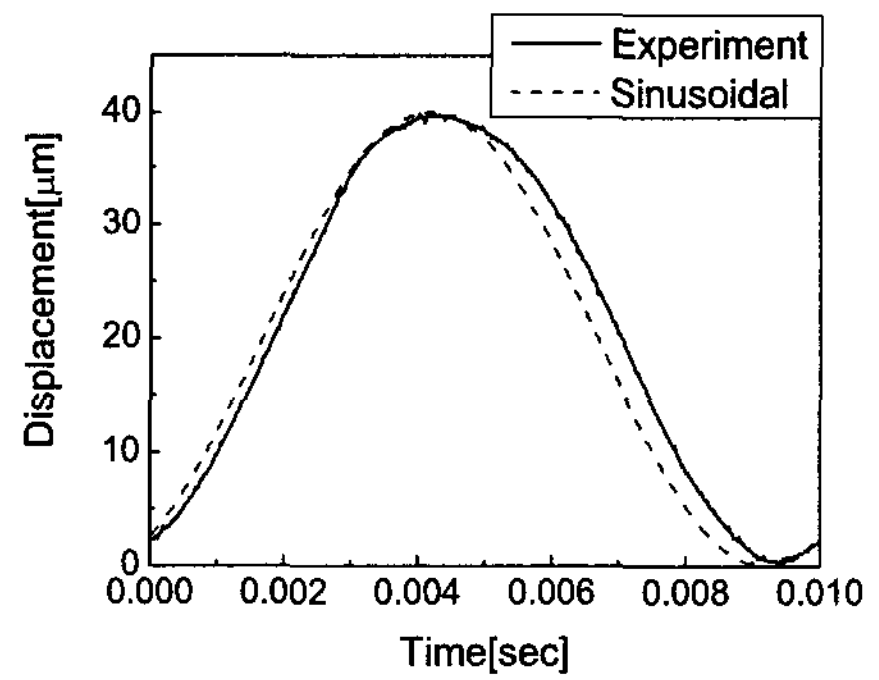
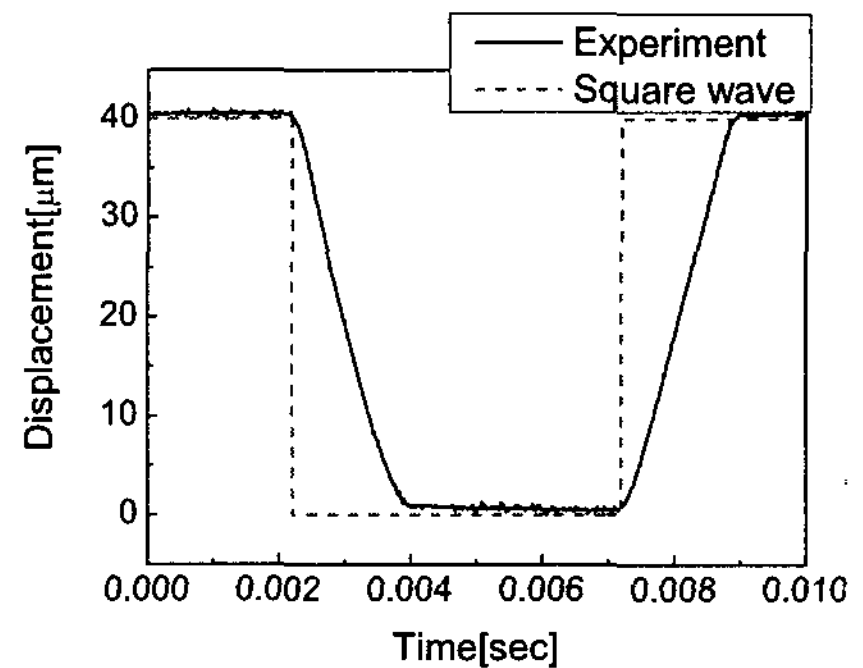


Fig. 3 Free body diagram of the jetting dispense



(a) 120 V-100 Hz sinusoidal excitation



(b) 120 V-100 Hz square excitation

Fig. 4 Displacement of the piezoelectric actuator

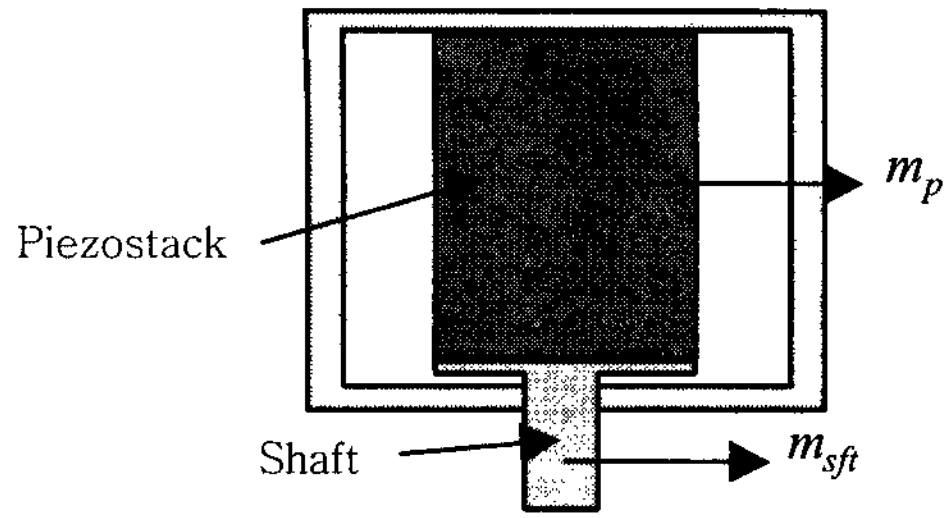


Fig. 5 Actuator part modeling

$$\begin{aligned}
 m\ddot{x} + c_f\dot{x} + k_p x &= F_{volt} \\
 x &= x_s = x_p = x_n \\
 m &= m_s + m_p + m_n
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

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

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

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 용액 집중 질량과 유체저항이다.

이 연구에서는 유체저항을 고려하기 위해 파워 모델을 사용하였다. 이는 디스펜싱 용액이 일반적으로 빙햄(bingham) 특성인 비 뉴토니안 거동을 하기 때문이며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \approx K\dot{\gamma}^n
 \tag{5}$$

여기서  $\tau$ 는 전단력,  $\tau_0$ 는 항복응력,  $\dot{\gamma}$ 은 전단율,  $K$ 는 점성 지수(consistency index),  $n$ 은 유체 거동 지수(fluid behavior index)이다. 만약 항복응력은 작다고 가정하면 유체의 점도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

Table 2 Dispensing liquid properties

Property	Value	Property	Value
Bulk modulus	1.0e9 Pa	Density	1.21 g/cm <sup>3</sup>
Consistency index( $K$ )	$23.59 e^{\frac{92.47}{T}}$	Fluid Behavior index( $n$ )	0.5
Viscosity	40 cP	Design Limit	205°C

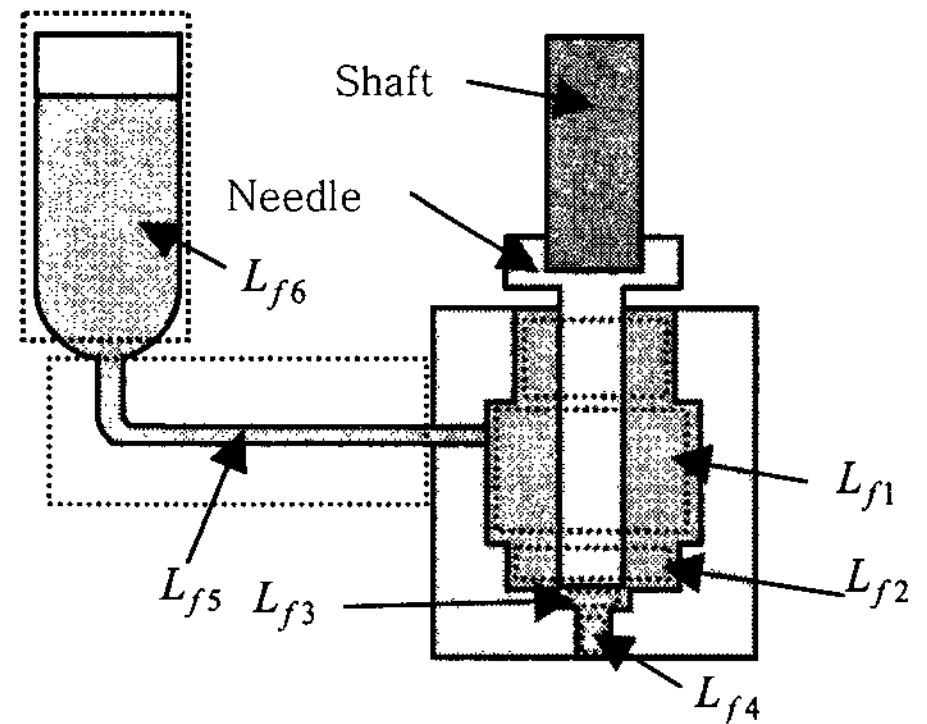


Fig. 6 Dispensing liquid part modeling

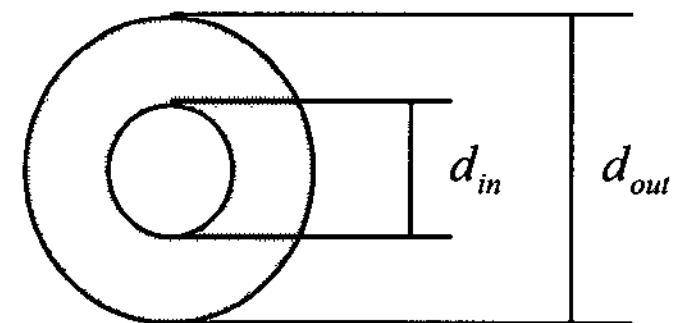


Fig. 7 Annulus shape pip

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

여기서  $v$ ,  $A$ ,  $d$ ,  $l$ 는 유체의 각 구간별 상태(부피), 단면적, 지름, 길이이다. 제안된 시스템에서 이들이 용액을 밀어내는 순간에 유체는 Fig. 7과 같은 환형 형상을 갖게 되며 이때 유체의 저항은 다음과 같다<sup>(6-9)</sup>.

$$\begin{aligned}
 R_{f4} &= \frac{128\mu_4 S_4}{\pi(d_{4out}^2 - d_{4in}^2)(d_{4out} - d_{4in})^2} \\
 S_4 &= \frac{(d_{4out} - d_{4in})^2 (d_{4out}^2 - d_{4in}^2)}{d_{4out}^4 - d_{4in}^4 - (d_{4out}^2 - d_{4in}^2)^2 / \ln(d_{4out} / d_{4in})} \\
 \dot{\gamma} &= \frac{2|\dot{v}|}{A(d_{4out} - d_{4in})}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

여기서  $d_{in}$ 과  $d_{out}$ 은 각각 내경과 외경이다.  
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.

$$\begin{aligned} \bar{M}_f \ddot{\bar{V}}_f + \bar{B}_f \dot{\bar{V}}_f + \bar{K}_f \bar{V}_f &= \bar{F}_f \\ \bar{M}_f &= T_f^T M_f T_f \\ \bar{B}_f &= T_f^T B_f T_f \\ \bar{K}_f &= T_f^T K_f T_f \\ \bar{F}_f &= T_f^T F_f \end{aligned} \quad (10)$$

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 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 수행하였다. 토출 용액으로는 LOCTITE®의 5110™을 고려하였으며, 용액의 물성치는 Table 2에 나타내었다. 시뮬레이션과 동일한 설계 변수를 이용하여 실제 시스템을 제작하였으며, 제작된 디스펜싱 시스템을 Fig. 8에 나타내었다. 제작된 디스펜싱 시스템을 이용하여 Fig. 9와 같이 실험장치를 구현하고 실험을 수행하였다. 시린지 압력이 1bar이고, 0~120 V, 300 Hz의 사각파를 압전작동기에 인가하였을 때 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10(a)는 입력 전압이고, Fig. 10(b)는 니들의 변위이다. 결과에서 보는 바와 같이 유체저항에도 불구하고 매 주기마다 균일한 거동을 보이고 있으며 일정한 양이 토출됨을 알 수 있다. 이 연구에서 제안하는 디스펜서는 별도의 변위확대장치가 없기 때문에 변위는 작지만 힘의 손실 없이 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. 10(c)는 토출되는 유체의 부피이고, Fig. 10(d)는 토출된 유체의 양으로, 각 주기마다 약 0.7 g(0.6 ml)의 유체가 토출됨을 알 수 있다. 100 Hz, 500 Hz, 1000 Hz의 사각파로 구동하였을 때의 니들의 변위와 디스펜싱된 부피를 Fig. 11에서 13에 각각 나타내었다. 시뮬레이션과 실험 결과가 잘 일치하는 것을 확인할 수 있으

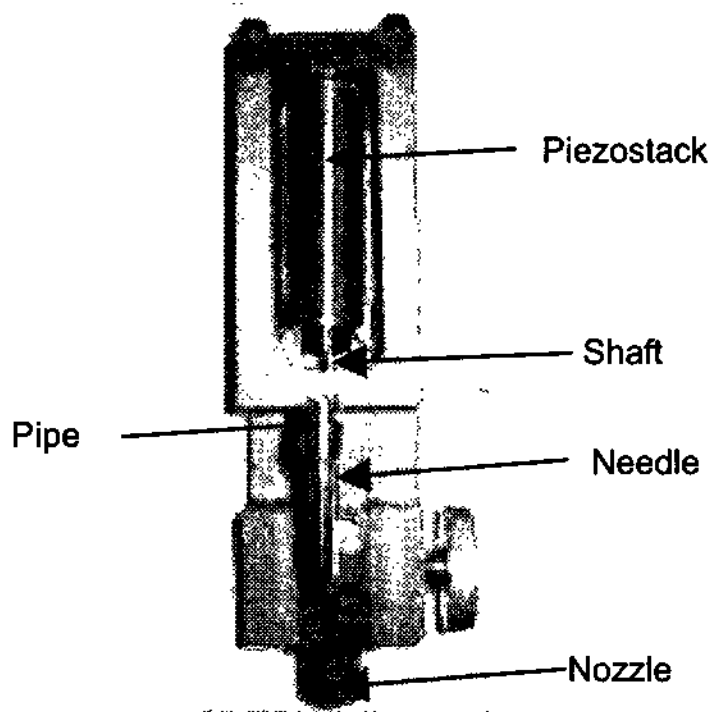


Fig. 8 Manufactured dispensing system

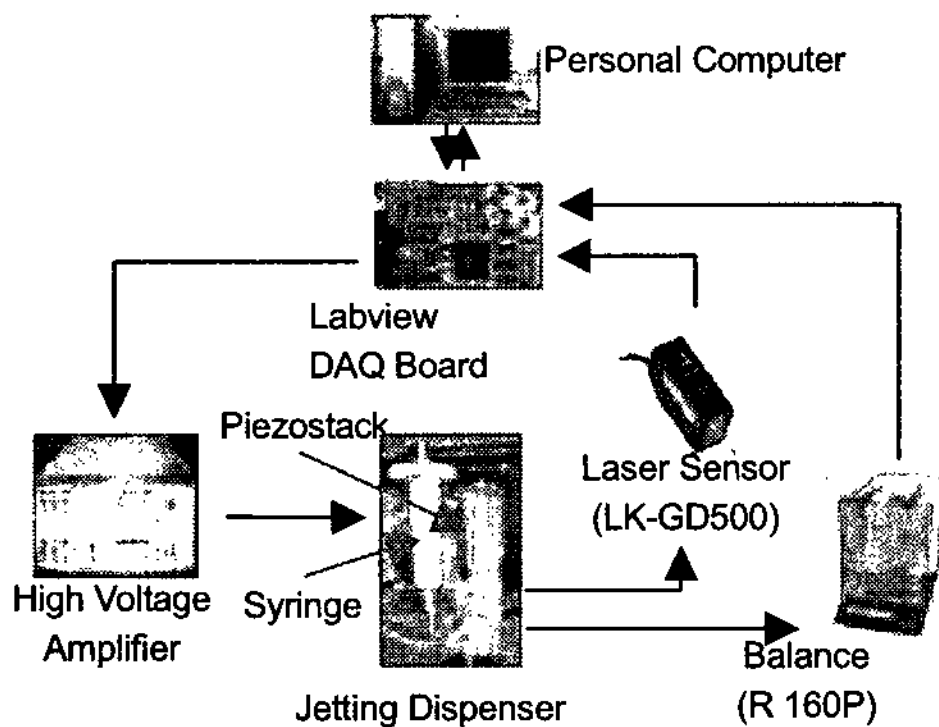
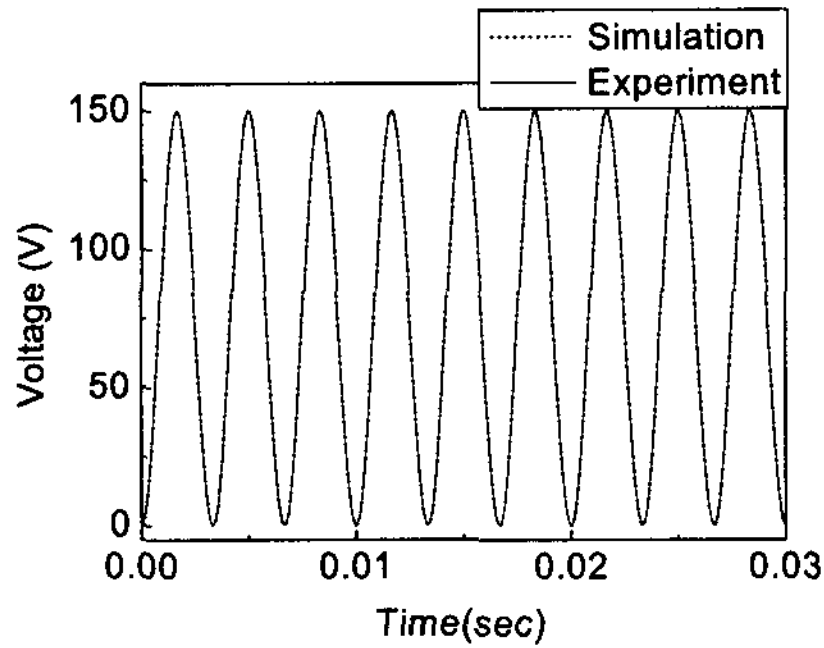


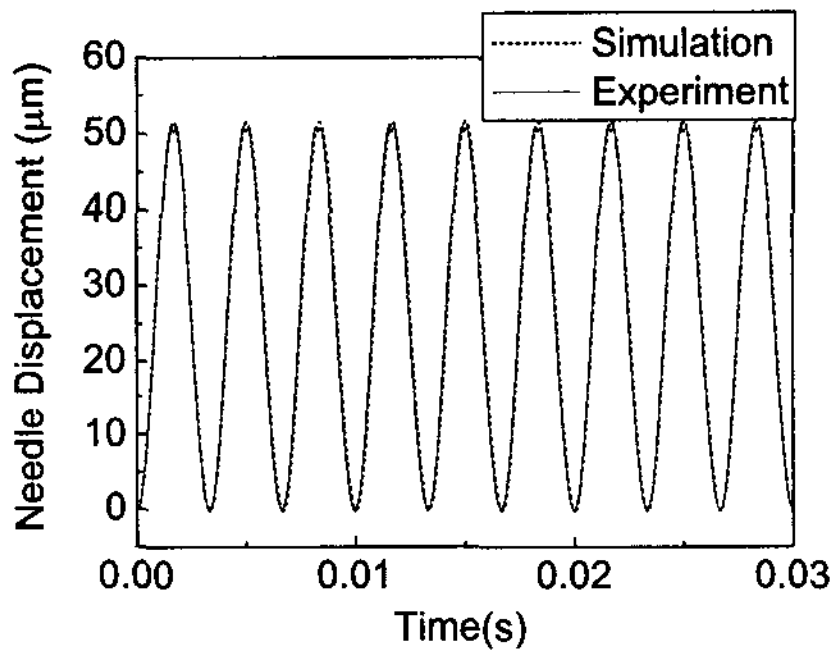
Fig. 9 Experimental setup

며, 토출되는 유체의 정밀성, 토출되는 유량 및 토출 속도의 측면에서 우수한 특성을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 상용 디스펜싱 장치의 작동주파수가

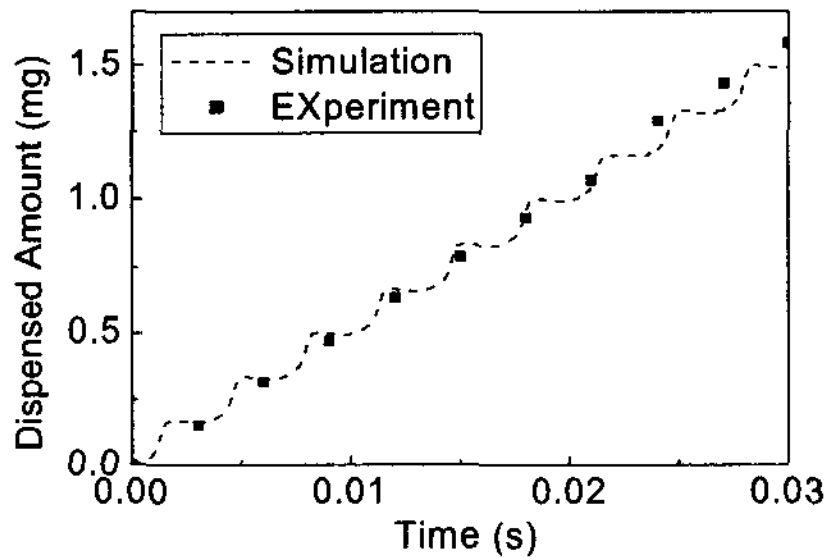
10~50 Hz 정도임을 고려하면 제안된 시스템은 상대적으로 높은 작동주파수에서도 안정적으로 정밀한 토출이 가능함을 알 수 있다.



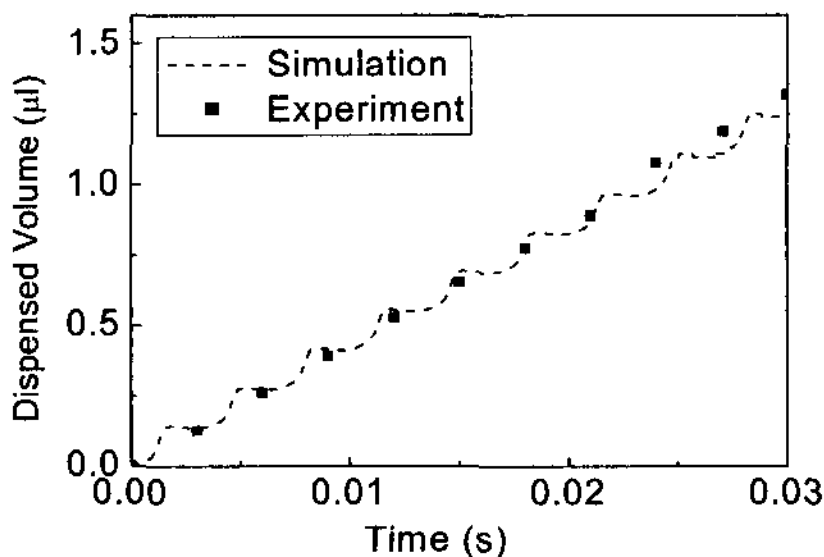
(a) Applied voltage



(b) Needle displacement

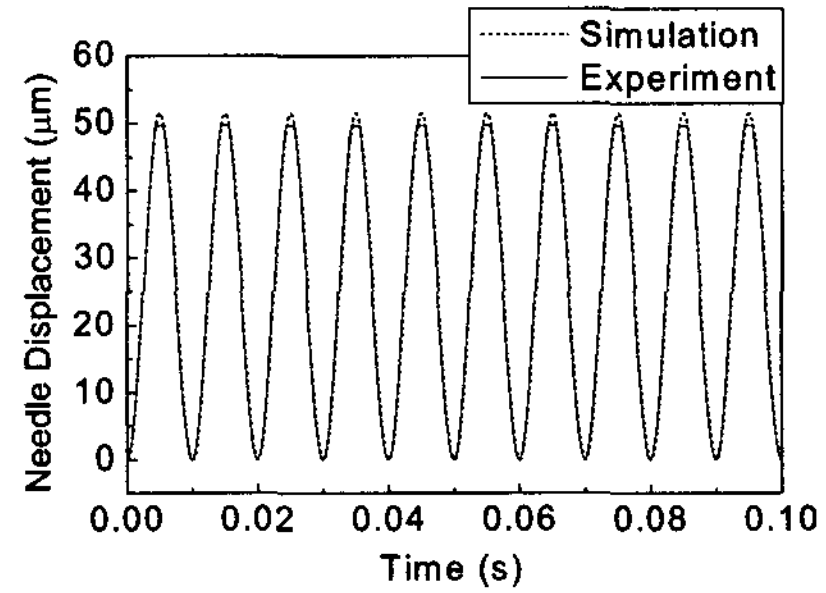


(c) Dispensed amount(mass)

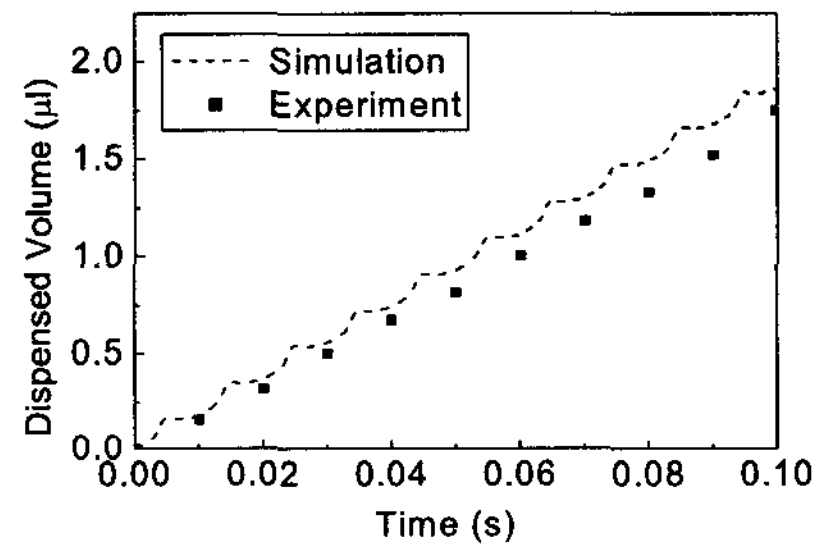


(d) Dispensed volume

Fig. 10 Dispensing results in 300 Hz operation

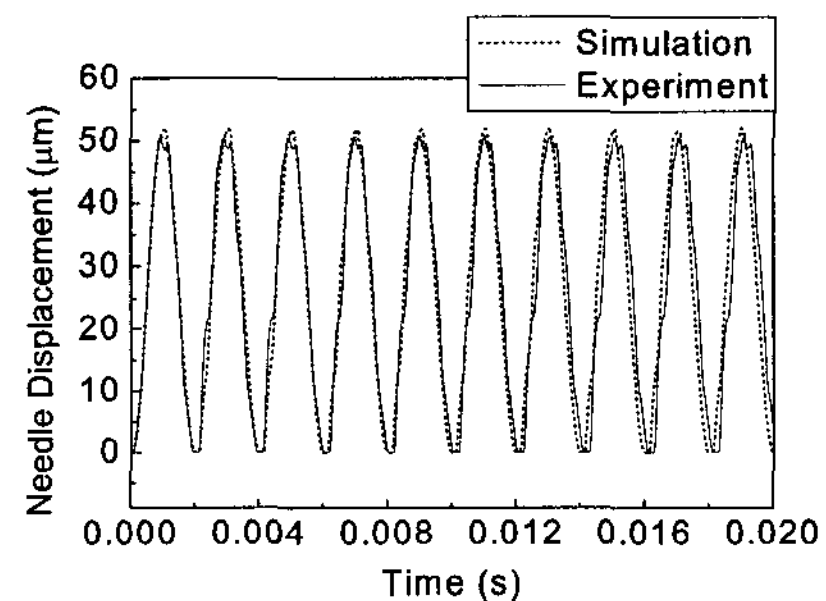


(a) Needle displacement

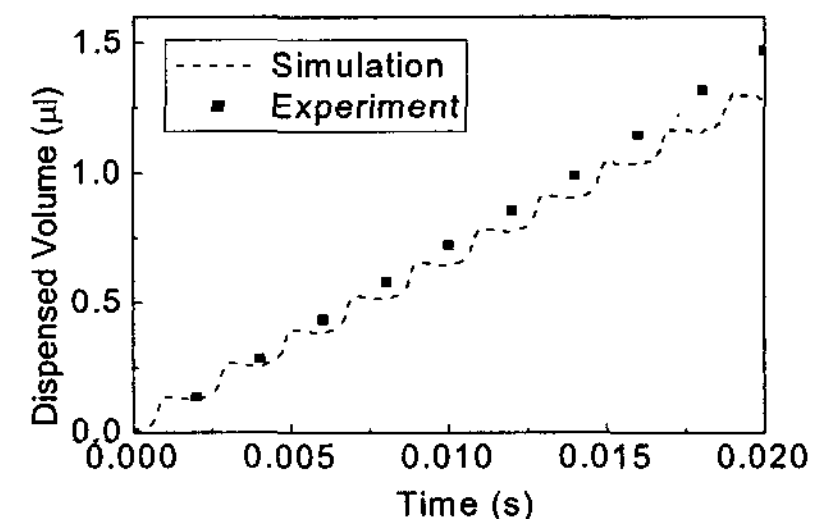


(b) Dispensed volume

Fig. 11 Dispensing results in 100 Hz operation



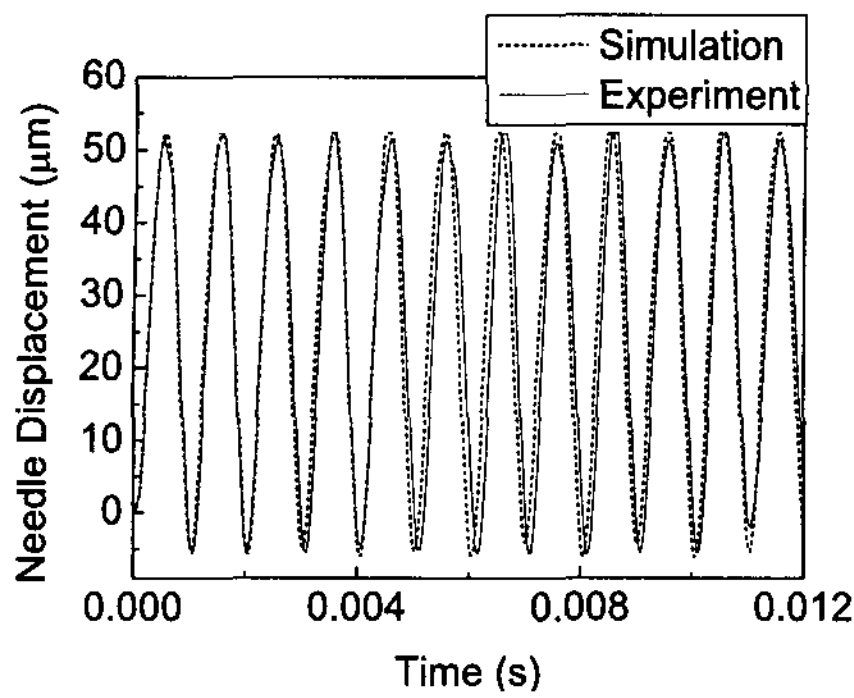
(a) Needle displacement



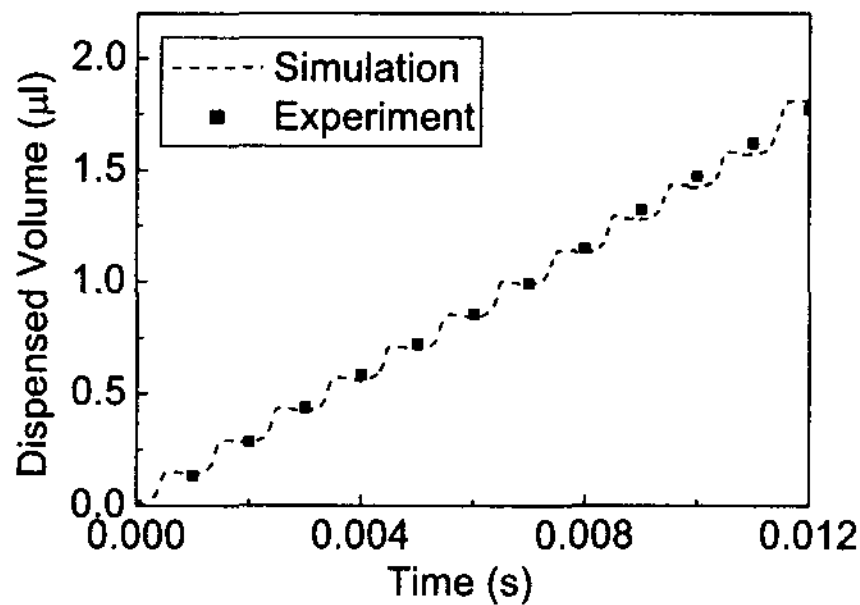
(b) Dispensed volume

Fig. 12 Dispensing results in 500 Hz operation





(a) Needle displacement



(b) Dispensed volume

Fig. 13 Dispensing results in 1000 Hz operation

### 5. 결 론

이 연구에서는 초미세 유량의 정밀 토출을 위해 압전작동기를 이용하여 고주파 구동이 가능한 새로운 젯팅 디스펜서를 제안하였다. 별도의 변위확대장치를 사용하지 않고 압전작동기와 샤프트, 니들을 직결하여 작동기로 사용하였다. 이는 별도의 변위확대 장치를 사용하지 않음으로써 작동력이 줄어드는 것을 방지하여, 점성이 작은 유체의 경우 압전작동기가 움직이는 만큼의 유체가 정밀하게 토출되는 장점을 가지고 있다. 그리고 집중 매개변수 기법을 이용하여 유체의 거동을 수학적으로 모델링 하고 압전 구동부의 모델과 결합해 전체 시스템의 동적 모델을 구축하였다. 시뮬레이션과 실험을 통해 100 Hz에서 1000 Hz까지의 입력 전압에 따른 우수한 디스펜싱 성능을 확인하였다.

### 후 기

이 연구는 한국산업기술재단 최우수실험실지원사

업에 의해 수행 되었으며 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- (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", Surface Mount Technology(SMT), pp. 114~122.
- (3) Wedekin, S., 2001, "Micro Dispensing Comes of Age", Surface Mount Technology(SMT), pp. 62~71.
- (4) Chen, X. B. and Kai, J., 2004, "Modeling of Positive-displacement Fluid Dispensing Processes", IEEE Transaction on Electronics Packaging Manufacturing, Vol. 27, No. 3, pp. 157~163.
- (5) Adamson. S. J., 2004, "Jetting of Underfill and Encapsulants for High-speed Dispensing in Tight Spaces", APEX IPC Printed Circuits Expo Anaheim, CA.
- (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.
- (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.