

젯팅 디스펜서 변위확대장치의 응답지연 개선 연구

Improvement for Response Delays of Displacement Magnifier in Jetting Dispenser

하명우* · 이광희* · 홍승민** · 이철희†

Myeong-Woo Ha, Kwang-Hee Lee, Seung-Min Hong and Chul-Hee Lee

(Received May 16, 2016 ; Revised July 29, 2016 ; Accepted July 29, 2016)

Key Words : Response Delay(응답지연), Jetting Dispenser(젯팅 디스펜서), Displacement Magnifier(변위확대장치), Displacement Profile(변위프로파일)

ABSTRACT

The objective of this study is to investigate the response delays between piezo-stack actuator and the displacement magnifier of jetting dispenser and to reduce its falling time in terms of displacement optimization. The dispenser is driven by the dual piezo-stack actuators with a hinge lever mechanism to precisely control flow rate of the working fluid (3000 cP). It is commonly found that piezo actuator-driven jetting dispensers involving viscous working fluids have displacement optimization problem for ideal performance. The response delay of the system is caused by the phenomenon that the displacement magnifier cannot exactly follow the motion of the piezo actuators. The response delay may lower the performance of the system due to the inaccurate discharge of working fluid or even damages to the system itself due to inharmonic motion of piezo actuators with lever system. To reduce its response delay, a new displacement profile obtained from displacement optimization is suggested; its performance is tested through finite element analysis; and experiments are carried out to verify the performance of the obtained displacement profile.

1. 서론

최근 반도체, LED, MEMS 패키지, 카메라 모듈 패키지 등의 초소형화, 고집적화 추세에 따라 초정밀 패키지 기술에 대한 요구가 증가하고 있으며, 패키지를 위한 디스펜싱 작업 공정 또한 초정밀 미세 액적 토출이 필요하게 되었다. 이는 근래에 스마트폰과 전자제품의 보급화에 따른 부품의 고기능, 컴팩트화에 대한 영향으로 개발 속도가 가속화하고 있는 추세이다.

스마트폰의 고기능성에 대한 요구는 메모리나 MEMS, FPCB 등의 패키징에서 디스펜서의 정교한 활용이 요구되어진다. 또한 최근 방수폰의 등장으로 인해 방수 및 방진에 대한 최상위 신뢰성의 실링성 확보가 주요 화두가 되고 있으며, 베젤 축소에 따른 tape 접착방법의 한계가 극명하기 때문에 스마트폰의 조립공정 뿐만 아니라 대부분의 전자기기 내부 부품에 대한 방수능력이 요구되어 방수, 방진기능의 부품 실링 또한 향후 지속적인 요구가 있을 것으로 예상된다. 이러한 요구를 충족시키기 위해 디스펜싱

† Corresponding Author; Member, Department of Mechanical Engineering, Inha University
E-mail : chulhee@inha.ac.kr

* Department of Mechanical Engineering, Inha University
** PROTEC. CO. LTD

‡ Recommended by Editor Jae Hung Han

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

작업 공정에서 방수 실링재의 효과적인 도포 능력이 크게 요구되어지고 있다⁽¹⁾.

이 연구에서 고려된 젯팅 디스펜서는 여러 방식의 디스펜서 중 지속적으로 미세정량의 액상을 토출하는 데에 적합한 방식으로 최근 여러 산업 분야에서 사용되고 있다. 그러나 토출 액상의 성질과 점도, 토출량에 따라 그 신뢰성이 낮아진다. 디스펜싱 시스템에서 가장 중요한 요인 중 하나는 반복적으로 미세한 용액을 정확하게 토출할 수 있는 능력인 토출 신뢰성이며 이를 높이기 위해서 여러 연구가 진행되고 있다.

Q. H. Nguyen 등⁽²⁾은 압전작동기와 리니어 펌프를 이용한 젯팅 디스펜서를 제안하였으며 압전작동기에 대한 수학적 모델링과 디스펜서의 정적 해석 및 동적 해석을 통해 그 성능을 평가하였다. Choi 등⁽³⁾은 압전작동기를 사용한 새로운 젯팅 디스펜서를 제안하였으며, Yun 등⁽⁴⁾은 압전작동기를 이용한 젯팅 디스펜서의 고주파수 영역의 토출에 대한 모델링을 수행하였고 이는 변위확대장치를 통하지 않고 직결로 유체를 토출하는 모델로 직접 매개변수 기법을 이용한 유체의 거동을 수학적 모델링을 통해 성능을 평가하였다. Ham 등⁽⁵⁾은 적층형 압전 액추에이터를 이용한 나노리터급 액적 젯팅용 마이크로 디스펜서를 제안하였으며, Sohn 등⁽⁶⁾은 압전 젯팅 디스펜서의 작동 변수에 대한 실험적 분석을 함으로써 토출 신뢰성에 영향을 주는 인자들을 선정하였고 실험계획법을 이용하여 디스펜서의 용액 토출량의 통계적 분석을 통해 최적의 작동 조건을 선정하였다. 또한, Jeon 등⁽⁷⁾은 두 개의 압전작동기를 사용한 새로운 젯팅 디스펜싱 시스템을 설계하고, 유한요소해석과 실험을 통해 실제 제작된 젯팅 디스펜서의 성능을 검증하였다. 이러한 기존의 연구에서는 디스펜서의 설계나 성능평가, 압전작동기의 구동 특성 및 응답 특성 등 디스펜서의 특성을 중점적으로 보았다. 그러나 실제 제작된 젯팅 디스펜서의 작동 조건에서는 압전작동기에서 고속으로 발생하는 변위의 응답속도를 변위확대장치가 따라 오지 못하여 응답 지연 현상이 생기는 문제점이 있다. 응답 지연이 생김으로써 토출 지연 현상 또한 나타나고 있으며 이는 토출 신뢰성에 영향을 주고 있다.

이 연구에서는 압전작동기에서 발생하는 변위의 프로파일이 레버에 미치는 영향과 디스펜서에서 발

생하는 응답 지연 현상을 최소화하기 위해 변위 프로파일에 대한 분석을 진행하였다. 또한, 유한요소 해석을 통해 최적의 변위형태를 제안하였으며 실험을 통해 유한요소 해석으로 도출된 최적의 변위프로파일이 실제로 토출지연을 감소시키는지 비교하였다.

2. 디스펜싱 시스템

이 연구에서 고려한 디스펜싱 시스템은 두 개의 압전작동기가 설치된 젯팅 디스펜서이다. 압전작동기는 캡에 의해 보호된다. 그 하부에는 변위확대장치가 힌지에 의해 고정되고 레버 끝단에는 디스펜싱 시스템의 로드가 장착되며 로드의 하부에 노즐이 위치하게 된다. Fig. 1은 이 연구에서 고려된 젯팅 디스펜서의 개략도이다. 초기의 압전작동기를 이용한 젯팅 디스펜서는 초기 위치의 복원을 위해 변위확대장치 하부에 스프링이 장착되었지만 이 연구에서 고려된 젯팅 디스펜서는 변위확대장치 하부의 복원 스프링 대신 압전작동기 하부 캡에 접시 스프링을 장착하여 초기 위치로 돌아갈 수 있도록 하였다.

압전작동기를 이용한 젯팅 디스펜서의 토출 과정은 다음과 같다. 먼저 압전작동기에서 생성된 변위가 힌지로 고정된 레버형태의 변위확대장치로 전달된다. 그 후, 확대된 변위가 레버를 통해 회전운동으로 바뀌고 디스펜싱 시스템의 로드로 전달되어

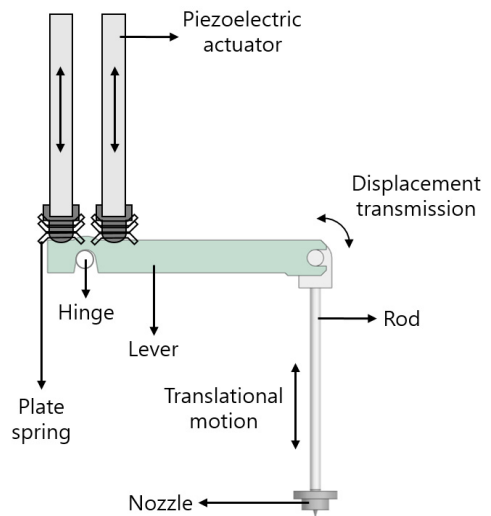


Fig. 1 The schematic of jetting dispenser

다시 병진운동으로 바뀌게 된다. 병진운동을 하게 된 로드는 노즐을 가격하게 되고 충전되어 있던 액상이 노즐을 통해 밖으로 토출되며 이러한 토출 과정이 반복적으로 수행되며 고속의 토출 과정이 이루어진다.

3. 유한요소 해석

이 연구에서 고려된 젯팅 디스펜서에서는 토출과정에서 0.4 ms의 응답 지연 현상을 보인다. 이러한 응답 지연 현상은 압전작동기와 힌지-레버 구조의 변위확대장치 간의 힘의 전달 시 압전작동기의 빠른 응답 속도를 변위확대장치가 받아들이지 못하여 생기는 현상이다. 이 현상이 계속될 경우 토출 지연 현상으로 인해 토출 신뢰도를 떨어뜨리는 결과를 가져오며 지연이 계속될 경우 압전작동기가 파손되는 현상까지 일어났다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 압전작동기에서 발생하는 변위에 대한 변위확대장치의 응답의 지연을 최소화하는 변위 프로파일을 동적 해석을 통하여 찾아내었다.

먼저 젯팅 디스펜서의 변위확대장치를 유한요소 해석하기 위해 3D 모델링을 수립하였고 동역학 상용패키지 프로그램인 DAFUL을 이용하여 변위확대장치의 동역학 해석을 수행하였다. 정확한 해석을 수행하기 위해서는 정밀한 유한요소 모델링이 필수적이므로 해석의 정확도를 높이고 해석에 걸리는 시

간을 줄이기 위해 불필요한 디스펜서 부품들을 제외하였고, 디스펜싱 시스템에서 해석에 필요한 부분만을 최대한 단순화하여 모델링 하였다.

모델링 된 디스펜싱 시스템은 압전작동기, 힌지-레버 구조의 변위확대장치, 로드, 노즐로 구성되어 있다. 모델은 모두 유연체로 가정하였고 해석을 위한 요소는 4면체 요소를 적용하여 생성하였다. 요소의 개수는 122 632개이며 절점의 개수는 29 073개이다. Fig. 2는 유한요소가 적용된 모델을 나타낸다.

구속조건으로는 먼저 압전작동기의 변위를 부가하기 위해 병진조인트를 설정하였고, 변위확대장치의 회전운동은 고정된 힌지에 회전 조인트를 적용 후 RBE2 요소를 이용하여 변위확대장치와 연결하였다. 또한 로드의 병진운동을 적용하기 위해 병진조인트를 설정하였다. Fig. 3은 동역학 해석에 사용된 모델과 그 구속조건이다. 접촉조건으로는 압전작동기 하부 캡과 변위확대장치의 접촉부, 변위확대장치와 로드의 접촉부, 로드와 노즐의 접촉부로 나누어 접촉조건을 부여하였다. 두 개의 압전작동기가 상대적으로 변위를 생성함에 따라 변위확대장치가 작동하고 이로 인해 용액이 토출된다. 이 해석에서 사용된 압전작동기의 변위 프로파일은 Fig. 4와 같다. 유한요소 해석의 결과, 변위확대장치에 생기는 변형은 Fig. 5와 같다. 변위확대장치의 최대 변형 값은 상승 시 0.0354 mm, 하강 시 0.0395 mm로

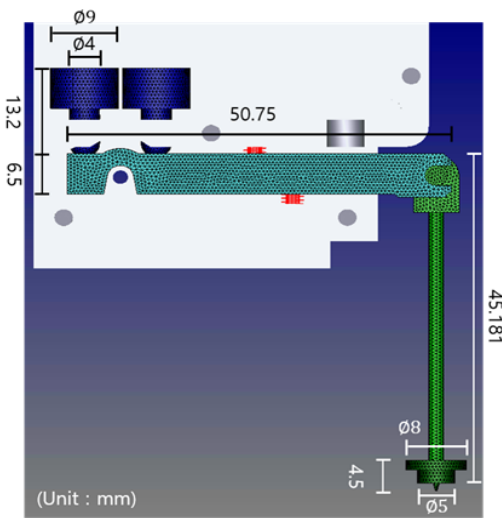


Fig. 2 FE model of jetting dispenser

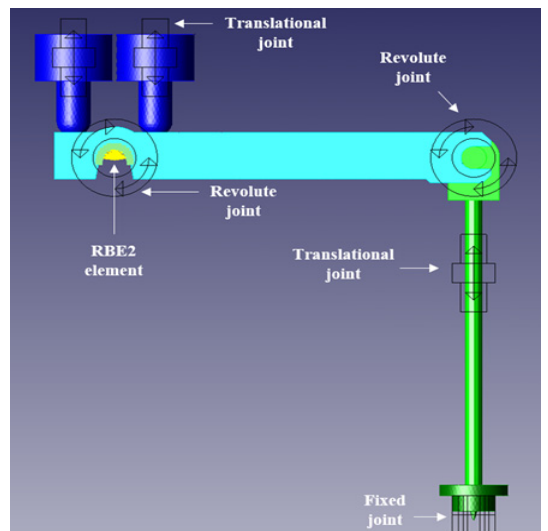


Fig. 3 MBD model of jetting dispenser with constraints in DAFUL

이러한 미소 변형은 토출 신뢰성과 응답 지연에 큰 영향을 미치지 않는다.

이 연구에서는 응답지연현상을 최소화 할 수 있는

새로운 변위 프로파일을 Fig. 6과 같이 제안하였다. 기존의 변위 프로파일을 사용하였을 경우, 상승 시간은 같으나 하강 시간에서 약 0.4 ms의 지연현상이 있었다. 또한 기존의 변위 프로파일은 압전작동기의 변위를 최대치로 사용하기 위한 것으로 두 압전작동기의 변위제어가 동시에 이루어지지 않았기 때문에 지연현상과 압전작동기 파손이 일어난 것이다. 그러므로 이러한 문제점 해결을 위해 새로운 변위 프로파일을 제안하였다. 제안된 프로파일은 두 개의 압전작동기를 손상시키지 않는 범위에서 3 μm씩 상승 및 하강시켜 압전작동기가 최대한 동시에 움직일 수 있도록 구현한 것이다. 제안된 프로파일을 적용하여 해석한 결과, 0.137 ms의 지연을 보여 기존 대비 0.263 ms의 지연현상을 낮추는 결과를 보였다. 여기서 변위 프로파일의 최대 변위 값이 36 μm인 것은 실제 제작된 젯팅 디스펜서에서는 압전작동기의 최대 전압 값인 150 V를 사용하지 않고 130 V를 사용하기 때문에 선형적인 압전작동기의 변위 특성을 고려하여 130 V일 때의 최대 변위인 36 μm를 사용하였다. Fig. 6의 변위 프로파일을 제안하기에 앞서 응답지연은 변위 프로파일의 상단과 하단의 오픈 타임으로 인해 발생하는 것으로 보고 먼저 오픈 타임을 0으로 한 변위 프로파일을 제안하였다. 그러나 오픈 타임이 없는 프로파일로 실험을 실시하였을 때, 액상의 충진이 이루어지지 않아 액상이 토출되지 않는 문제가 있었으며, 변위확대장치의 응답 전에 압전작동기가 다시 변위를 발생시켜 압전작동기에 손상이 가는 문제 또한 발생하였다. 그러므로 오픈 타임을 압전작동기의 최소 제어 단위인 3 μm의 스텝으로

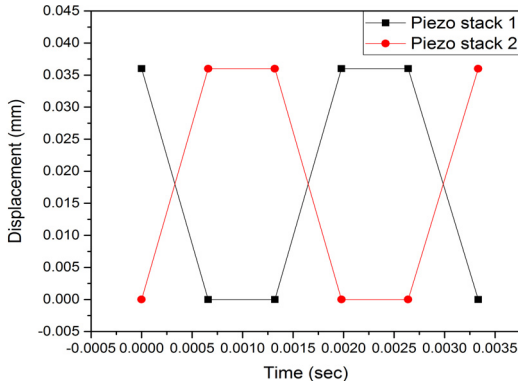


Fig. 4 Original displacement profile of piezo stacks

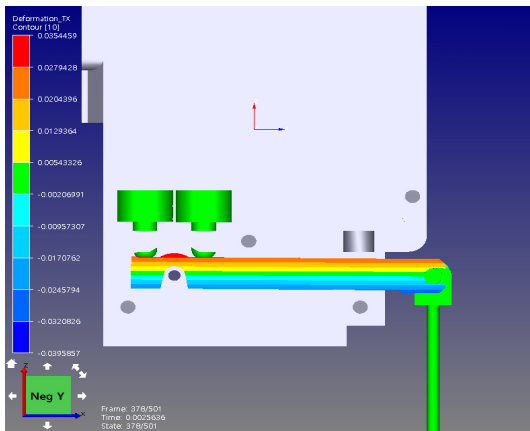


Fig. 5 Deflection results of the lever

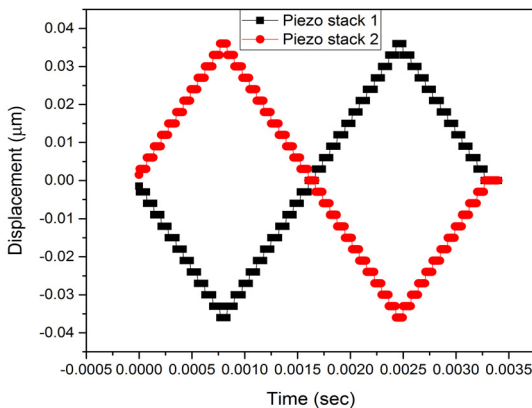


Fig. 6 Modified displacement profile of piezo stacks

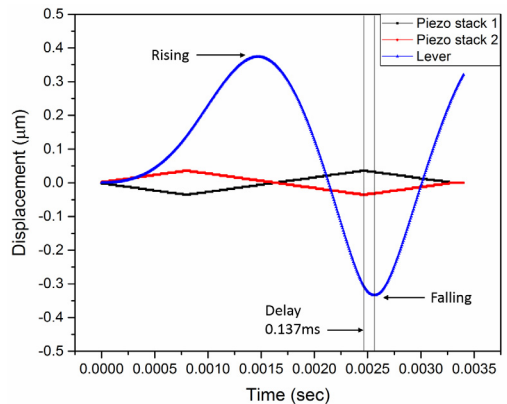


Fig. 7 Result of response delay from MBD analysis

나누어 제어하는 것으로 문제점을 해결하였다. 그에 대한 시뮬레이션 결과 값은 Fig. 7과 같다. 결과 값을 보면 변위의 응답지연이 0.137 ms로 낮아진 것을 확인할 수 있다.

4. 실험 검증

유한요소 해석에서 검증한 변위 프로파일이 실제 제작된 젯팅 디스펜서에도 적용이 가능한지 확인하기 위해 실험을 실시하였다. 실험은 실제 제작된 젯팅 디스펜서(ZEUS-Mini, Protec)를 사용하였으며 오픈 루프 컨트롤러를 통해 변위 프로파일을 입력하여 제어하였다. 실험장비와 측정 장비는 Fig. 8과 같다. 실험 데이터는 젯팅 디스펜서를 구동시킨 후 컨트롤러와 DAQ, 컴퓨터를 TCP/IP로 연결하여 수집하였으며, 모든 신호는 펄스 제어기를 통해 디지털 신호로 바꾸어 10 kHz 주기로 샘플링 하였다. 실험에 사용된 압전작동기의 특성은 Table 1과 같으며 유한요소 해석에서 검증한 변위 프로파일을 컨트롤러에 입력하여 실험을 수행하였다.

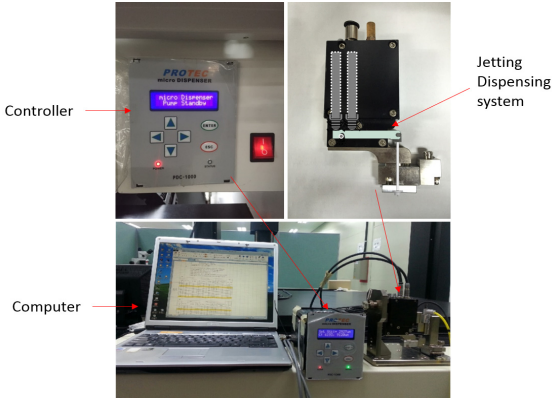


Fig. 8 Test equipment

Table 1 Specification of piezo stack

Piezo stack type	AE0505D44D40DF
Max. displacement [μm]	42@150V
Blocking force [N]	850
Stiffness [$\text{N}/\mu\text{m}$]	20.2
Response frequency [KHz]	34

Fig. 9는 압전작동기가 입력한 변위 프로파일에 의해 변위를 생성한 값을 나타낸다. 두 개의 압전작동기가 3 μm 씩 동시에 변위를 생성하여 상승 및 하강한 것을 알 수 있다. 이는 제안된 변위 프로파일이 컨트롤러를 통해 적절하게 제어되고 있다는 것을 뜻한다. Fig. 10은 기존의 변위 값, 지연시간과 3번의 실험 결과 변위 값, 지연시간을 비교한 것이다. 이 실험은 스트로크의 움직임에 시간에 따라 측정된 것으로 3번의 실험을 실시하였으며, 스트로크의 움직임 편차는 실험 결과 값 평균 +1 % / -1 %의 결과를 보였다. 3번의 실험 결과의 경우 상승 시 2%, 하강 시 2%의 피크를 보였다. 또한 기존의 변위 프로파일로 작동한 결과 값은 약 0.4 ms의 지연 시간을 갖는다. 그러나 유한요소해석으로 얻은 변위 프로파일 값을 적용한 실험의 결과, 약 0.1 ms의 지연 시간을 가지는 결과를 보였다.

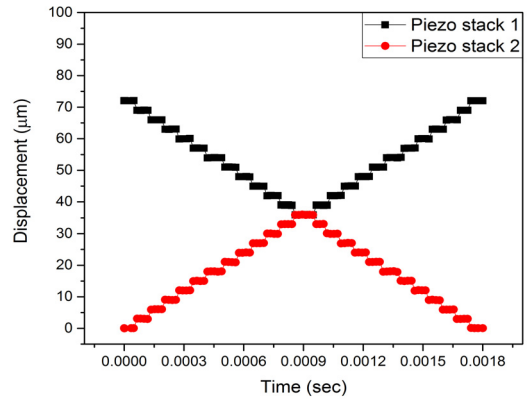


Fig. 9 Generated displacement of piezo stack for the test

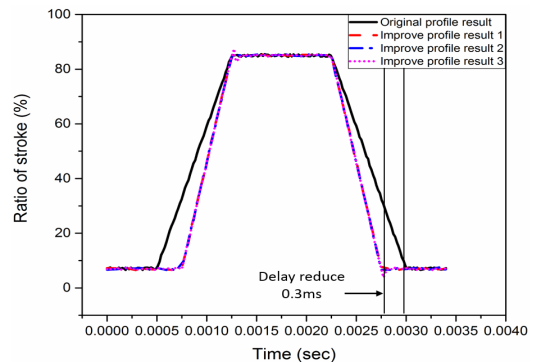


Fig. 10 Comparison of response delay results between original and improved profiles

5. 결 론

이 연구에서는 고속 작동 조건에서의 젯팅 디스펜서 변위확대장치가 압전작동기의 변위로 인해 받게 되는 영향과 응답 지연 현상을 유한요소해석을 통해 고찰하고 실제 실험과 비교하여 검증하였다.

해석 결과를 통해 압전작동기가 변위확대장치에 가하는 변위 프로파일을 바꾸었을 때 기존 문제점인 0.4 ms의 응답지연이 0.137 ms로 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 해석을 통해 얻은 변위 프로파일을 실제 제작된 젯팅 디스펜서에 적용하여 실험한 결과 응답 지연 현상이 약 0.1 ms로 낮아진 결과를 보였다. 이 연구를 통하여 디스펜싱 시스템의 응답 지연 문제를 해결하였고 이를 통해 토출 신뢰도가 낮아지는 것을 예방하고 응답 지연 시간이 줄어든 만큼 용액이 토출되는 시간인 **falling time**을 줄일 수 있어 향후 다양한 점도의 액체를 토출하는데 그 응용범위가 늘어났다고 볼 수 있을 것이다.

후 기

이 연구는 산업통상자원부 우수기술연구센터(ATC) 사업의 연구비지원의 연구결과로 수행되었음(10048876).

References

- (1) Hong, S.-M., 2014, Fabrication and Characteristics of Jetting dispenser with Dual Piezostack Actuators, Inha University, Doctoral Thesis.
- (2) Nguyen, Q. H., Choi, M. K., Yun, B. Y. and Choi, S. B., 2007, Design of a Novel Jetting Dispenser Featuring Piezostack and Linear Pump, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 19, pp. 333~341.
- (3) Choi, M. K., Nguyen, Q. H., Yoon, B. Y. and Choi, S. B., 2006, Design and Control of Jetting

Dispenser Driven by Piezoelectric Actuator, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 11, pp. 1165~1171.

(4) Yun, B. Y., Hung, Q. H., Sohn, J. W. and Choi, S. B., 2008, Performance Characteristics of High Speed Jetting Dispenser Using Piezoactuator, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 4, pp. 432~438.

(5) Ham, Y.-B., Seo, W.-S., Kong, T.-W., Choi, H.-I., Cha, J.-G., Park, J.-H. and Yun, S.-N., 2008, A Micro Dispenser Using Multilayer Piezoelectric Actuator for Nanoliter Droplet Jetting, KSPE 2008 Spring Conference, pp. 639~640.

(6) Sohn, J. W., Hong, S.-M., Kim, G.-W. and Choi, S.-B., 2015, Experimental Analysis of Operating Parameters for Piezoelectric Jetting Dispenser, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 25, No. 10, pp. 687~691.

(7) Jeon, J. C., Hong, S. M., Choi, M. K. and Choi, S. B., 2014, Design and Performance Evaluation of a New Jetting Dispenser System Using Two Piezostack Actuators, Smart Materials and Structures, Vol. 24, No. 1, pp. 015020-1~11.



Chul-Hee Lee received his Ph.D. degree from the Mechanical Engineering Department at the University of Illinois at Urbana-Champaign in 2006. He worked as a research engineer at the Hyundai Motor Company R&D Center from 1996 to 2002. He has worked as a senior engineer at the Caterpillar Inc., USA from 2004 to 2007. He is currently working at the Inha University as an associate professor since Aug. 2007. His research topics include a tribology, finite element analysis and optimization, vehicle dynamics and vibration analysis, smart materials and mechanical control, virtual product development and so on.