

論文

무밸브 마이크로 펌프의 성능평가를 위한 3차원 전기-유체-구조 상호작용 해석

팜마이*, 판반푸억*, 한철희**, 구남서***

Three Dimensional Electro-Fluid-Structural Interaction Simulation for Pumping Performance Evaluation of a Valveless Micropump

My Pham*, Van Phuoc Phan*, Cheol Heui Han** and Nam Seo Goo***

ABSTRACT

In this study, the pumping performance of a piezoelectric valveless micropump is simulated. The micropump, which was developed in the previous work, is composed of a four-layer lightweight piezocomposite actuator, a polydimethylsiloxane (PDMS) pump chamber, and two diffusers. The piezoelectric domain, the fluid domain and the structural domain are coupled in the three-dimensional simulation. We used ANSYS for the piezoelectric and structural domains and ANSYS CFX for the fluid domain. The effects of driven frequency on the flow rate have been investigated by simulating the flow characteristics for 10 Hz and 40 Hz driven frequencies. The flow rates with respect to driven frequencies up to 300 Hz have been calculated.

초 록

본 논문에서는 압전 작동기로 구동되는 무밸브 마이크로 펌프의 펌프 성능을 계산하였다. 선행연구에서 개발된 마이크로 펌프는 4층의 경량 압전 복합재료 작동기, PDMS로 된 챔버와 2개의 디퓨저로 이루어져 있다. 유한요소 해석은 압전 영역, 구조 영역 및 유체 영역을 완전 연성하여 수행되었다. 구조 및 압전 영역의 해석은 ANSYS를 사용하였으며, 유체영역의 해석은 ANSYS CFX를 사용하여 수행하였다. 작동 주파수가 10 Hz와 40 Hz인 경우에 대한 해석을 수행하여 작동 주파수가 유동 특성에 미치는 영향을 고찰하였다. 또한 300 Hz까지의 유동 해석을 통하여 작동 주파수에 따른 유량을 계산하였다.

Key Words : Micropump(마이크로 펌프), Piezo-composite actuator(압전 복합재료 작동기), Micro-electo-mechanical system(MEMS), Electro-fluid-structural interaction(전기-유체-구조 상호작용)

1. 서 론

최근 의공학 및 공학 분야에서 필요로 하는 소형화된 통합 화학 분석 시스템(micro-total analysis system, μ -TAS)을 개발하기 위해서는 먼저 소량의 유체를 정확한 양으로 처리할 수 있으며, 반응조건의 제어가 용이하고, 소량의 동력만을 필요로 하고, 전기장, 열, 초음파 등의 비전통적인 방법에 의하여 유체를 다룰 수 있는 기술

† 2009년 4월 6일 접수 ~ 2009년 7월 14일 심사완료

* 정희원, 건국대학교 신기술융합학과 대학원

** 정희원, 충주대학교 항공·기계설계학과

*** 정희원, 건국대학교 신기술융합학과

교신저자, E-mail : nsgoo@konkuk.ac.kr

서울시 광진구 화양동 1번지

의 개발이 필요하다[1]. 마이크로 펌프는 마이크로 밸브 등과 함께 소형화된 μ -TAS에 이용되는 핵심 요소 중 하나이다.

마이크로 펌프의 작동 원리로는 전기장 또는 자기장으로 다이어프램을 구동시켜 유체를 이동시키는 능동적 방법과 삼투압이나 모세관 현상을 이용하는 수동적 방법을 사용되고 있으며 그 중에서 가장 널리 사용된 것은 압전 작동기를 사용하는 능동적 방법이다[2,3].

압전 작동기는 재료의 압전 현상을 이용하는 것으로 유니모프, 바이모프 및 적층 형태로 사용되는데 마이크로 펌프에 응용되는 것은 유니모프 형태가 주를 이루고 있다. 유니모프 작동기 중에서 NASA에서 개발한 THUNDER와 비교하였을 때 무게는 가벼우면서도 큰 작동 변위를 가지는 LIPCA (lightweight piezo-composite actuator) 작동기가 개발되었다 [4,5]. 구남서 등은 압전 세라믹 층을 사용하였을 때 작은 작동변위와 쉽게 파손되는 등의 결점들을 극복하기 위하여 LIPCA를 이용한 무밸브 마이크로 펌프를 개발하였다[6].

무밸브 마이크로 펌프는 디퓨저/노즐을 사용하는 펌프로 밸브가 필요 없으며 기하학적 구조를 이용하여 유체가 흐르는 방향을 설계한 펌프이다. 체크밸브와 같은 복잡한 구조물이 필요 없기 때문에 펌핑의 신뢰도가 높다는 장점을 가진다[1]. 그러나 무밸브 마이크로 펌프는 역류현상을 완전하게 제거하기가 어려우며 이 때문에 무밸브 마이크로 펌프를 개발하기 위해서는 펌프의 성능예측 및 설계를 위한 수치해석 연구가 필요하다.

Nabity는 준 1차원 모델을 이용하여 전기적 작동 다이어프램(diaphragm) 펌프를 설계하고 해석하였다[7]. Athavale 등은 마이크로 펌프의 유체유동 해석에서 CFD(computational fluid dynamics)와 구조해석을 연계하여 수행하였다 [8]. 전기-유체-구조 상호 연계해석을 수행할 수 있는 상용 소프트웨어 패키지로는 CoventorWare™, FLUENT™, CFD-ACE+, ANSYS™, 및 COMSOL Multiphysics™ 등이 있다.

현재까지의 무밸브 마이크로 펌프의 성능평가에 관한 연구는 주로 2차원 연구에 국한되어 있으며, 완전한 전기-유체-구조 상호 연계 해석을 수행한 연구를 찾기 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 이전의 연구에서 개발된 무밸브 마이크로 펌프 [6]를 3차원으로 모델링한 후 전기-구조부분은 ANSYS를, 유체부분은 ANSYS CFX를 연계하여 사용하여 마이크로 펌프의 작동성능을 해석하

였다. 성능해석 결과는 실험결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

II. 전기-유체-구조- 상호작용을 고려한 3차원 해석

2.1 LIPCA 무밸브 마이크로 펌프

본 연구에서 해석 대상으로 고려한 무밸브 마이크로 펌프는 이전 연구 [6]에서 개발한 것이다. 단일 PZT의 작동 성능을 향상시킨 압전-복합재료 작동기 LIPCA를 다이어프램으로 사용하였으며, 사진전사법과 PDMS 몰딩법으로 제작하였다. Fig. 1에 최종 제작된 마이크로 펌프를 나타내었다. 크기는 22 mm × 12 mm × 2 mm이고, 공진주파수는 약 200 Hz이고 400 Vp-p (Voltage peak to peak)의 인가전압과 200Hz의 진동수에서 유량은 최대값인 1.3 ml/min에 도달하였다. 보다 자세한 내용은 참고문헌 [6]을 참고하기 바란다.

2.2 전기-구조 연성 모델

압전 작동기인 LIPCA 다이어프램의 전기-구조 연성해석을 위하여 다이어프램을 Fig. 2와 같이

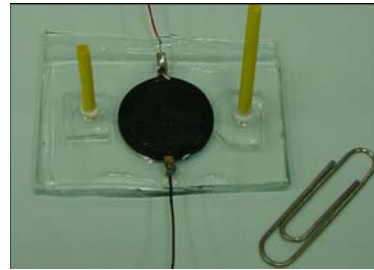


Fig. 1. The fabricated micropump of the LIPCA actuating micropump

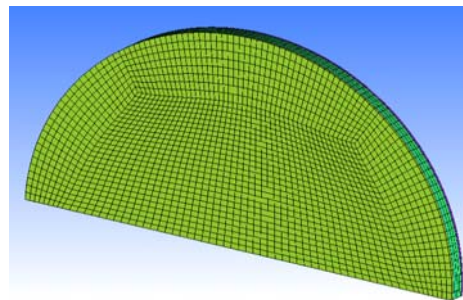


Fig. 2. The finite element mesh of structural part

모델링하였다. 대칭성을 고려하여 다이어그램의 반만을 모델링 하였으며, 총 15,656 개의 육면체 요소로 사용하였다. 일반적으로 동적 문제에서 비대칭 모드의 변형이 발생하면 대칭 모델을 사용할 수 없으나 전모델의 시험 해석과 실험 결과 대칭 모드의 변형이 나타나므로 대칭 모델의 사용이 가능하다.

본 연구에서 마이크로 펌프의 작동기로 사용되는 압전 복합재료 작동기 LIPCA는 역방향 압전효과를 이용하여 기계적 변형을 획득한다. 역방향 압전효과란 세라믹 결정에 전위를 가하면 기계적인 변형이 발생하는 것을 말한다. 재료의 역방향 압전 현상은 두 가지 방법으로 해석할 수 있는데 하나는 열적상사(thermal analogy)를 이용하는 방법이고 다른 하나는 완전연성해석(fully coupled analysis)방법이다. 열적 상사법을 사용하면 전기장의 분포가 특이한 경우를 제외하면 역방향 압전 효과를 해석할 수 있으나, 본 연구에서는 전기, 구조 뿐 아니라 유체가 연성된 문제를 해석하여야 하기 때문에 완전 연성법을 사용하였다. 본 연구에서는 전기-구조 연성 해석이 가능한 ANSYS를 이용하여 재료의 압전현상을 완전연성해석 방법으로 해석할 수 있다.

LIPCA에 전압을 걸어주면, 다이어그램이 LIPCA의 변형에 따라 움직이면서 챔버의 용량을 변화시켜 물을 챔버로 끌어들이고 내보내는 펌프 작용을 일으키게 된다. LIPCA에 가해지는 전압은 아래의 정현파 형태의 방정식으로 표현할 수 있다.

$$V = V_0 \sin(\omega t) \quad (1)$$

여기에서 V_0 는 최대전압이고 ω 는 작동주파수이다. LIPCA가 유연한 PDMS에 부착이 되어 있으므로, 원형의 LIPCA경계는 단순지지 되어 있다고 가정하였다.

2.3 유체 모델

3차원 유체모델은 비압축성 나비어-스톡스 방정식을 사용하여 계산하였다.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \nabla \cdot \eta [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \nabla p = 0 \quad (3)$$

여기에서 ρ 는 물의 밀도, \mathbf{u} 는 속도벡터, η 는 동점도, p 는 압력을 나타낸다.

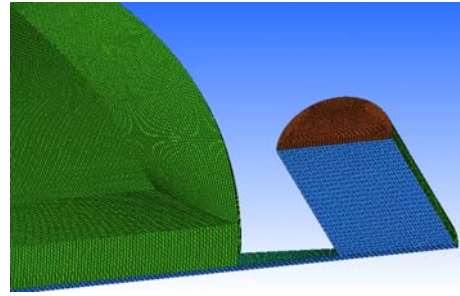


Fig. 3. Finite element mesh of fluid model near inlet

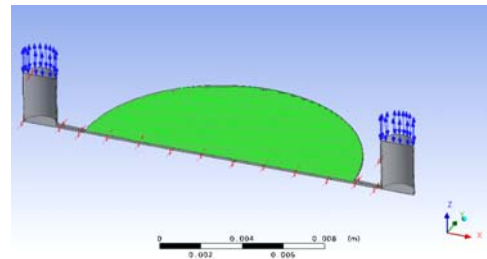


Fig. 4. Fluid model of the valveless micropump

Fig. 3에 나타난 바와 같이 ANSYS ICEM CFD를 사용하여 육면체 요소를 가지도록 격자를 구성하였으며, 사용된 격자의 수는 635,627 개이다. 유한 요소 모델의 질(quality)을 확인하여 충분한 갯수의 격자를 사용하였다.

유동은 3차원 층류 유동이며, 온도에 따라 유체의 물성치가 변하지 않는다고 가정하였다. Fig. 4은 무밸브 마이크로 펌프의 유체모델을 나타낸다. 입구와 출구 모두 높이는 3mm이고 챔버의 지름은 14mm이며 깊이는 120 μm 이다. 디퓨저의 목 지름은 120 μm 길이는 1.5mm이며 확대각은 8° 이다. 기하학적 대칭성으로 인하여 유체모델은 전체 모델의 반만을 모델링 하였으며, 벽에는 no-slip 경계조건을 부가하였다.

구조-유체 연성 문제의 해결을 위하여 고체의 대변형 문제에 주로 사용되는 라그랑지안(Lagrangian) 방법과 유체 문제의 해석에 주로 사용되는 오일러리안 (Eulerian)방법의 장점을 결합한 ALE(arbitrary Lagrangian-Eulerian) 방법을 사용하였다.

2.4 ANSYS 및 ANSYS CFX 연계해석절차

Fig. 5에 ANSYS와 ANSYS CFX를 연계하여 해석하는 절차를 나타내었다 [9]. 먼저, ANSYS에서 구성한 구조 요소와 CFX에서 만든 유체 격자가 서로 일치하지 않는 경우, 둘 사이의 변수

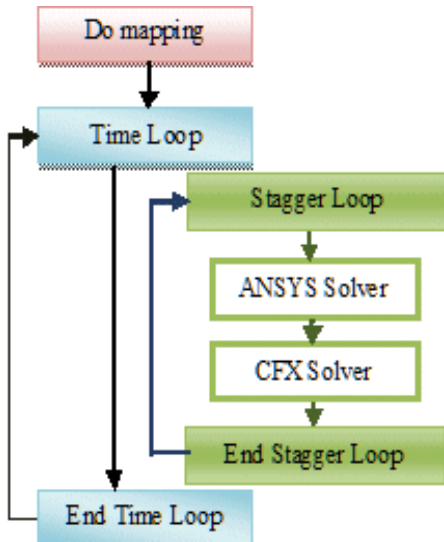


Fig. 5. ANSYS multi-field solver process

전달을 위하여 매핑을 수행한다. 이러한 매핑을 통하여 유체와 구조 격자 간의 경계면(interface)에서 양쪽 면에 작용하는 하중을 내삽하여 전달하게 된다. 매 시간 간격마다 스테거(stagger) 루프가 있어서 해가 수렴될 때 까지 이 스테거 루프 동안 반복계산이 이루어진다. 각각의 스테거 반복 계산 동안 구조 및 유체 솔버는 물리적 해를 구하여 다른 솔버의 계산에 필요한 변수 값을 저장하며, 매핑을 통하여 전달한다. 이때 ANSYS는 ANSYS CFX에 변위값을 전달하며, ANSYS CFX는 하중 값을 ANSYS에 전달한다.

ANSYS CFX를 이용한 유체-구조 연성 해석에서는 유체와 구조 사이의 경계에서 no-slip 조건이 부가되며, 하중과 변위값이 서로 전달되며 속도는 전달되지 않는다. 속도가 전달되기 위해서는 유체-구조-동역학적 연성이 필요하나, 이것이 구현된 상용 프로그램은 아직 발표되지 않고 있다.

III. 결과 및 토론

3.1 LIPCA 작동변위

무벨브 마이크로 펌프의 전기-유체-구조 상호 작용 현상을 해석하기 이전에, LIPCA 다이어프램의 작동변위를 실험결과 [6]와 비교하였다.

Fig. 6에 전압 +200V에 대한 LIPCA 다이어프램의 변형 형상을 나타내었다. 원형 평판의 전형적인 1차 모드로 변형됨을 확인할 수 있다. Fig.

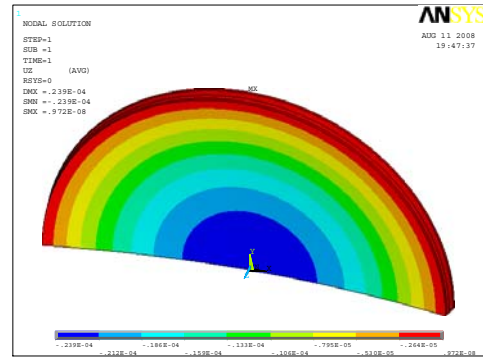


Fig. 6. Deformation shape of the LIPCA diaphragm at 200 Vp-p

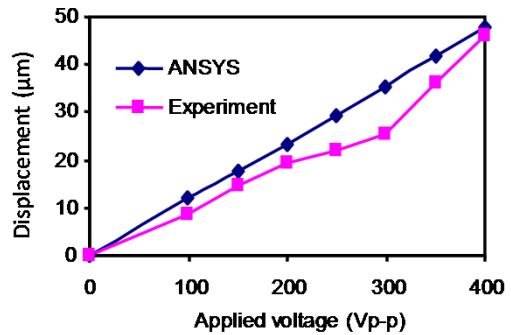


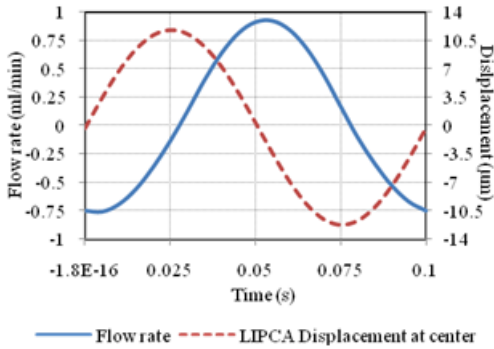
Fig. 7. Center displacement of the LIPCA versus applied voltages (f=1Hz)

7에 실험 및 계산 결과를 비교하여 나타내었다. 실험에서 구한 변위 값은 인가전압이 200Vp-p 이내에서는 선형성을 보이다 200 Vp-p에서 400 Vp-p 사이에는 약간의 비선형성을 보이고 있다. 반면에 ANSYS 계산으로 얻은 변위 값은 전 구간에서 선형적인 값을 나타내고 있다. 그러나 대체적으로 인가한 전압에 대하여 실험으로 얻은 변위 값과 계산한 값이 일치함을 볼 수 있다.

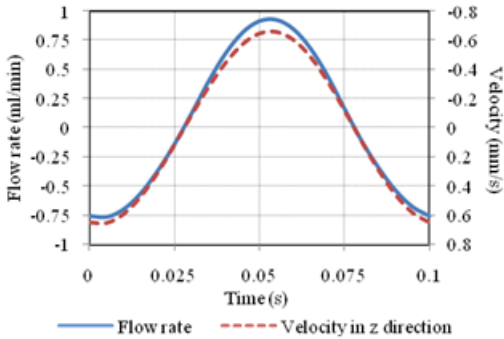
주파수가 1 Hz이고 인가전압이 400 Vp-p (±200 V)일 때, 계산된 다이어프램의 최대 변위는 다이어프램의 중앙에서 47.8 μm이었으며 실험결과에서는 47 μm이었다. 따라서, 실험에서 구한 변위값과 계산값이 잘 일치하므로 전기-구조 연성해석이 원활하게 수행됨을 확인하였다.

3.2 유량 특성 분석

마이크로 펌프의 유량 특성을 고찰하기 위하여 작동 주파수가 10 Hz와 40 Hz 일 때, 유체와 고체의 경계면에서의 최대 중심 변위와 속도를



(a) Flow rate at the outlet and the LIPCA displacement at the center



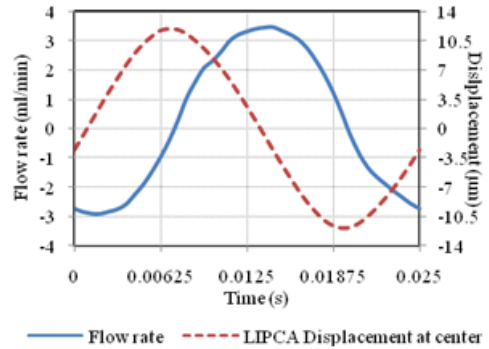
(b) Velocity of structure–fluid interface at the center at 10 Hz

Fig. 8. Flow characteristics at 10 Hz

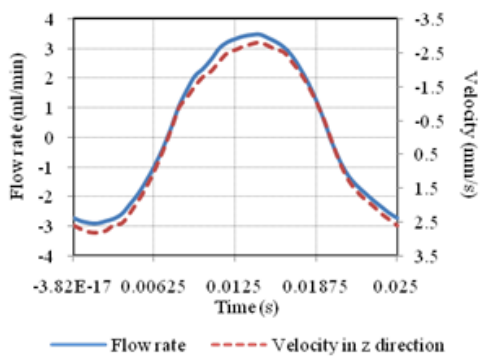
계산하여 Fig. 8 및 9에 나타내었다. 정상 상태에 도달하였을 때의 중심 변위를 나타낸 Fig. 8(a)와 9(a)를 비교해 보면, 초기에 음의 유량을 가지는데, 이는 출구에서 유체가 유입됨을 의미한다. 또한, 중심 변위가 최대가 되었을 때, 유량은 거의 0이 된다. 중심 변위가 0이 되는 반주기 시간에서 유량은 최대가 된다. 따라서 유량의 변화는 중심 변위에 대하여 4분의 1 주기 래그(lag)가 발생함을 확인할 수 있다.

Fig. 8(b)와 9(b)에 나타낸 유체-구조 경계면에서의 전달 속도를 보면, 유량이 전달 속도와 더 관련이 깊음을 확인할 수 있다. 즉, 유량과 경계면에서의 속도는 시간에 대하여 비례 관계를 가져 속도가 커지면, 이에 비례하여 유량도 커진다. 따라서, 다이어프램의 작동 변위가 0이 되는 시점에서, 전달 속도가 최대가 되기 때문에 유량이 최대가 된다. 또한 다이어프램의 변위가 최대가 될 때, 속도가 0이기 때문에 유량도 0이 된다.

그림 8(b)와 9(b)를 최대 유량 발생 시점에 대



(a) Flow rate at the outlet and the LIPCA displacement at the center



(b) Velocity of structure–fluid interface at the center at 40 Hz

Fig. 9. Flow characteristics at 40 Hz

하여 비교해 보면, 40 Hz일 때 피크점이 오른쪽으로 이동하였음을 알 수 있는데, 이는 유체-구조 연성 효과에 기인한 것으로 사료된다. 무벨브 마이크로 펌프는 LIPCA 다이어프램의 상하 운동에 따라 유체를 이동 시키는데, 유체의 운동에는 유체 질량에 따른 시간 지연이 발생한다.

Fig. 10 및 11은 각각 작동주파수가 40 Hz이고 시간(t)가 0.014375 s 일 때 계산한 입구 및 출구 부분에서의 유동장을 보여준다. 이때 시간 0.014375 s는 출구에서 최대 유량이 발생하는 시간을 나타낸다. Fig. 11에서 디퓨저의 출구 부분에서 얻은 최대속도는 5.278 m/s이었다. LIPCA는 아래로 이동하는 중이며, 물은 출구를 통해 밖으로 나가는 중이나 입구에서도 역류가 발생하고 있다. 해석결과 평균유량은 10 Hz에서 0.052 ml/min, 40 Hz에서 0.2283 ml/min이었다. 기존 실험결과는 10 Hz에서 0.075 ml/min, 40Hz에서 0.3 ml/min이었다[6]. 따라서 10Hz에서 31%, 40Hz에서 23.9%의 오차가 발생했다. 오차가 발

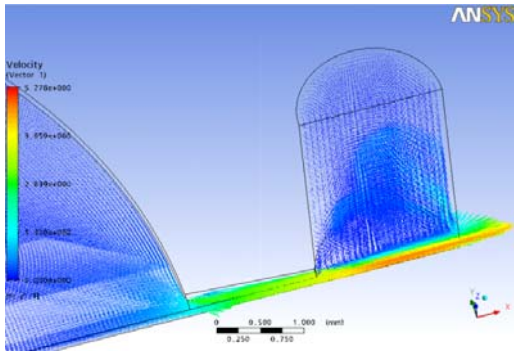


Fig. 10. Fluid velocity distribution at inlet

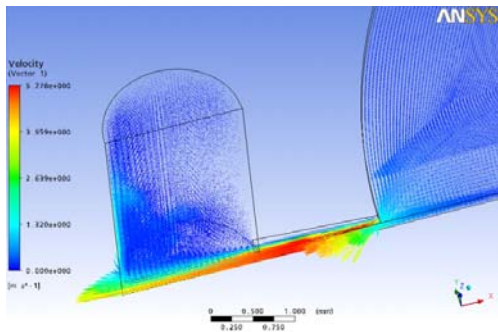


Fig. 11. Fluid velocity distribution at outlet

생한 이유는 해석 시 부가한 경계조건과 실험에서의 경계조건 (예를 들면 벽과 디퓨저의 표면조도나 중력의 영향 등)사이의 차이점에 기인하며, 향후 이러한 부분을 고려하여 오차를 줄이는 연구를 수행하고자 한다.

3.3 작동 주파수의 영향

마이크로 펌프에서 가장 중요한 특성 중 하나는 유량과 작동주파수 사이의 관계이다. 본 연구에서는 일정한 전압 하에서 주파수의 변화에 따른 유량의 변화를 계산하였다. 이때 인가된 전압은 200 Vp-p이다. Fig. 12에 주파수의 변화에 따른 출구에서의 유량의 변화를 주기에 대하여 정규화한 시간에 대하여 나타내었다. 정규화한 시간은 가진 주파수가 유량의 시간적 변화에 미치는 영향을 고려하기 위하여 도입하였다. 그림에서 알 수 있듯이 주파수가 커짐에 따라 출구에서의 유량이 커지고 유체와 구조의 연성으로 말미암아 최대 유량이 발생하는 위치(피크의 위치)가 오른쪽으로 이동함을 확인할 수 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 ANSYS와 ANSYS CFX를 사용하여 전기-유체-구조를 연계한 무밸브 마이크로 펌프의 해석을 통하여 여러 가지 조건 하에서 마이크로 펌프의 성능에 대한 연구를 수행하였다. 시뮬레이션 결과 평균유동이 경계면에서의 속도와 작동주파수에 의존함을 알 수 있었다. 해석결과와 실험결과사이에 약간의 차이가 발생하고 있으나 본 연구결과는 최적의 작동주파수를 파악하는데 활용가능하다. 향후 확대각 및 디퓨저 길이 변화에 따른 마이크로 펌프 성능의 변화를 파악하여 최적의 기하학적 형상을 얻는 연구를 수행할 예정이다.

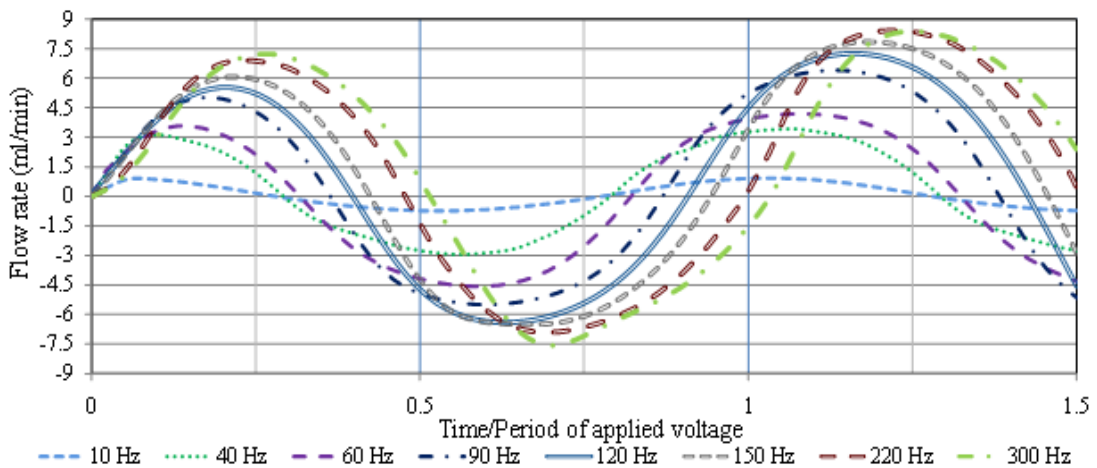


Fig. 12. Flow rate versus time graph at the outlet of the micropump for various driven frequencies

후 기

본 연구는 2006년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었으며(과제번호: KRF-2006-331-D00085), 또한 중점연구소 지원사업 (과제번호: KRF-2006-005-J03302)의 일환으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 김도현, "마이크로플루이딕 시스템 현황", 화학공학, 제 42권 제 4호, pp. 375-386, 2004.8
- 2) P. Woias, "Micropumps-past, progress and future prospects", *Sensors and Actuators B*, 105, pp. 28-38, 2005.
- 3) N.T. Nguyen, Xiaoyang Huang, Toh Kok Chuan, "MEMS-Micropumps: A Review", *ASME*, Vol. 124, 2002.6.
- 4) K. J. Yoon, S. S. Shin, H. C. Park and N. S. Goo, "Design and Manufacturing of Lightweight

Piezo-composite Curved Actuator", *Smart Materials and Structures*, Vol. 11, pp. 163-168, 2002.

5) K. Mossi, Z. Ounaies, R. Smith and B. Ball, "Pre-stressed Curved Actuators: Characterization and Modeling of their Piezoelectric Behavior", *Proceeding of SPIE's 10th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, San Diego, 2003.

6) 구엔탄팅, 구남서, "원형 경량 압전 복합재료 작동기를 이용한 마이크로 펌프의 개발", 한국항공우주학회지, 제 34권 6호, pp. 35-41, 2006. 6.

7) James Nabity, "Modeling an Electrostatically Actuated MEMS Diaphragm Pump", *ASEN 5519 Fluid-Structures Interactions*, 2004.4

8) M.M. Athavale, H.Q. Yang, and A.J. Przekwas, "Coupled Fluid-Thermo-Structures Simulation Methodology for MEMS Applications", CFD Research Corporation, 1997.

9) Documentation for ANSYS: Coupled Field Analysis Guide.