

전자기력을 이용한 마이크로 유체구동기의 설계

김동환*(고려대 대학원 기계공학과), 김권희(고려대 기계공학과)

Design of a micro fluid actuator driven by electromagnetic force

D. H. Kim(Mech. Eng. Dept., Korea Univ.), K. H. Kim(Mech. Eng. Dept., Korea Univ.)

ABSTRACT

A micro fluid actuator driven by electromagnetic force at MEMS(Micro Electro Mechanical System) level has been designed. The operation of the actuator was simulated in three steps. First, fluid flow analysis has been performed to determine the actuator load. With the load, dynamic behavior of the actuator structure has been analysed. Finally, fluid-structure interaction analysis has been performed to predict the performance of the actuator. To avoid excessive amount of computation, axisymmetric and plane strain 2-D models were used.

Key Words : 미세기전시스템(micro electro mechanical system, MEMS), 전자기력(electromagnetic force), 마이크로 유체구동기(micro fluid actuator), 유체-고체상호작용(fluid-structure interaction, FSI), 유한요소법(FEM), 유한체적법(FVM)

1. 서론

MEMS (micro electro mechanical system : 미세기전시스템) 공정의 발달로 MEMS 기술에 대해 많은 연구가 활발히 진행 중이다. 특히, 외부의 전기적인 신호나 에너지로 마이크로미터 수준에서 유체를 구동하는 것에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. MEMS 수준에서는 그 크기와 복잡성의 제약 때문에 펌프나 압축기의 기존 구조를 사용하지 못한다. 때문에 고체구조의 열변형, 압전소자의 변형, 열에 의한 액체의 상변화 등을 이용하여 유체를 구동하는 연구가 이루어지고 있다. 이러한 구동방식들은 열에 의한 피로나 변형 등의 문제점을 가지고 있다.

본 연구에서는 전자기력을 이용한 유체 구동기를 제안하고, 해석해 보았다. MEMS 공정의 대부분은 적층 공정이거나 식각공정이다. 3차원의 복잡한 형상의 가공이 어렵기 때문에 구조와 가공 공정이 간단하고 작동 유체의 제약을 덜 받을 수 있는 구조를 제안하였다.

구동기에서의 유체의 거동이 유한요소법(Finite Element Method) 혹은 유한체적법(Finite Volume Method)을 통해 해석 가능한 것은 최근의 연구 사례가 증명하고 있다. 특히 유체-고체 상호작용 (Fluid

Structure Interaction)해석에서 ADINA-FSI를 이용한 연구가 많이 이루어지고 있다[1,2].

구동기에 관한 시뮬레이션은 ADINA-F, ADINA-FSI를 사용하였으며, 크게 축대칭 시뮬레이션 부분과 2차원 유체-고체 상호작용 시뮬레이션 부분으로 나누었다. 축대칭 시뮬레이션은 이동 벽 경계 조건(Moving-wall boundary condition) VOF 모델로 이루어져 있으며, 이를 토대로 유체-고체 상호작용 시뮬레이션을 하였다. 시간적인 효율을 고려하여 유체-고체 상호작용 시뮬레이션에서는 부분적 유체-고체 상호작용 모델을 제안하였다.

VOF 방법(volume of fluid method)은 섞이지 않는 서로 다른 유체에 대한 해석을 하기 위한 표면 추적 방법(surface-capturing method)이다. VOF 방법에서는 하나의 운동량 방정식은 여러 유체에 의해 공유된다. 그리고 각각의 유체는 스칼라 전달 방정식(scalar transport equation)에 의하여 영역으로 전파된다[3]. 1981년 Hirt 와 Nichols가 제안한 이후에 많은 연구가 진행 중이다[4]. 특히 유체 토출에 관한 해석에 대하여 많은 연구가 이루어지고 있다. ADINA VOF 모델에서 표면장력과 벽 접착력(wall adhesion)은 연속체 표면력(continuum surface force) 모델로 시뮬레이션된다. 유체-고체 상호작용 모델은 유체 영역

모델과 고체 영역 모델로 구성되어 있는데, 양쪽 영역에 서로 상호작용이 있을 때, 이를 시뮬레이션하는 것이다.

2. 유체 구동기의 설계

2.1 관련 이론

전기적인 신호를 이용하여 힘을 얻는 방법에는 여러 가지가 있지만, 그 제어가 용의하고, 열을 이용하지 않는 방법 중에는 전자기력이 있다. 자기장을 인가해 주고, 비교적 간단한 회로에 전류를 흘려주는 것으로 힘을 발생시킬 수 있다.

전자기력은 $F_B = B \times iL$ 라는 공식으로 표현된다. 일정한 자기장 B 가 작용하는 공간에 L 의 길이를 가진 도선에 i 의 전류가 흐르게 되면 도선과 자기장의 수직한 방향으로 F_B 의 힘이 발생한다는 이론이다.

MEMS 공정은 공정상 복잡한 형상을 만드는 것이 힘들기 때문에 회로의 간략성이 필요하다. 이러한 이유로 유체를 구동하는 방법으로 전자기력을 제안하였다.

2.2 설계안

이러한 이론을 바탕으로 Fig. 1과 같은 구조를 설계하였다. 구조는 크게 브릿지(bridge), 헤머(hammer), 노즐(nozzle), 뱅크(bank)로 이루어져 있다. 브릿지와 헤머 위에 전기 회로를 구성하여 전류가 구동기의 길이 방향으로 흐르게 하고, 외부에서 전류가 흐르는 방향의 수직방향으로 자기장을 인가해 준다. 이 때 생기는 로렌츠 힘(Lorentz force)으로 헤머와 브릿지 부분을 상승시키고, 브릿지에 탄성에너지가 저장된다. 저장된 탄성에너지는 전류가 끊어짐과 동시에 운동에너지로 전환되게 되고, 헤머가 하

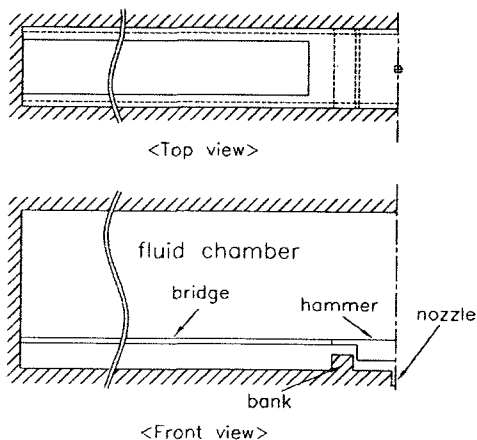


Fig. 1 Schematic of micro fluid actuator

강하게 된다. 헤머가 하강하면서 뱅크로 돌러 싸여 있는 노즐 부위에 압력이 형성된다. 헤머 구조는 노즐 부위에 큰 압력이 형성되어도 후퇴함이 없도록 질량을 크게 설계한다. 브릿지는 가운데가 비어 있는 구조를 채택함으로써 작동 시에 구동 저항을 줄이고, 에너지 낭비를 막는다.

3. 유체구동기의 해석

3.1 해석 알고리즘

본 유체 구동기는 기본적으로 고체로 이루어진 구동기에 전류를 통하여 브릿지 부분에 분포하중을 발생시키고 이것이 유체 부분에 전달되는 형태로 이루어져 있다. 이러한 이유 때문에 반드시 유체-고체 상호작용 해석이 이루어져야 한다. 또한 작동 유체가 공기중으로 토출되는 것으로 가정하였기 때문에 VOF 방법을 이용하여 유체의 표면을 추적하고, 속도 및 압력을 구해야 한다. 이러한 모델을 3차원 모델로 만들어 VOF 방법과, 유체-고체 상호작용 해석을 동시에 한다면 방대한 시간이 소요되며, 높은 사양의 컴퓨터를 요구하게 된다. 이러한 문제점을 해결하여 보다 빠르고 비교적 정확한 해석을 위하여 Fig. 2와 같은 3단계 시뮬레이션 방법을 채택하였다.

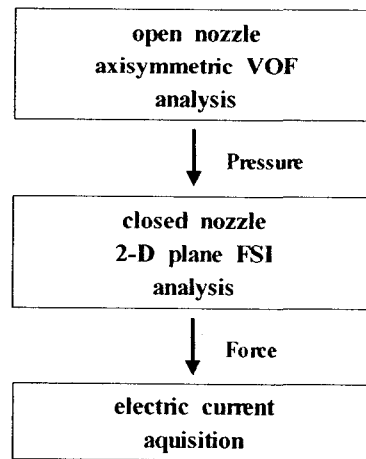


Fig.2 Sequence of 3 step simulation

먼저 축대칭 VOF 모델을 수행하였다. 여기서 목적 속도가 나오는 압력을 구하고, 이 때의 압력을 2차원 부분 유체-고체 상호작용 모델의 목적 압력으로 한다. 유체-고체 상호작용 모델에서 목적압력이 나올 때, 브릿지 부분에 필요한 분포 하중을 통하여 필요한 전류를 구하게 된다.

3.2 물성치 및 목적값

시뮬레이션에 사용된 유체는 물이고, 물성치는

Table 1과 같다. 구조 부분의 물성치는 탄성계수가 190GPa, 프아송비가 0.3, 밀도가 2300kg/m³이다. 구동기의 한 사이클을 100 μ s, 유체가 분출되는 속도는 10 m/s를 목적으로 하였다.

viscosity	20 centipoise
density	1000 kg/m ³
surface tension	0.08 N/m ²
Bulk modulus	2.15 GPa

Table 1 Material property of fluid

3.3 축대칭 VOF 시뮬레이션

축대칭 VOF 시뮬레이션의 목표는 유체의 목적 속도를 얻기 위해 필요한 압력을 해석하는 것이다. 분출 속도가 중요하기 때문에 노즐과 뱅크, 헤머를 축대칭으로 모델링하였다. 2차원 평면 모델에서 노즐을 열고 해석한다면, 노즐의 크기가 과대평가되기 때문이다. 축대칭 해석을 하게 되면 유체 영역에서 헤머 구조와 뱅크 구조에 의해 생기는 압력 변화가 현실적으로 반영될 수 있다.

유체의 기본 물성은 물로 선택하고, 노즐의 바깥 부분은 초기 상태에 공기의 물성치를 주었다. 헤머 부분은 이동벽 경계조건을 이용하여 모델링하였다. 주어진 시간에 헤머 부분이 수직 방향으로 하강하는 변위를 바꾸어 가면서 시뮬레이션하였다. Fig.3 과 같이 유체가 구동기의 밖으로 분사되는 것을 볼 수 있다. 여러 가지 시뮬레이션을 통하여 최적의 값을 찾을 수 있었다. Fig. 3과 같이 처음 0.3 μ s 동안 헤머를 2 μ m 올렸다가 다음 3 μ s 동안 8 μ m 하강시켰을 때 원하는 목적값에 부합하는 속도를 가지게 되었다.

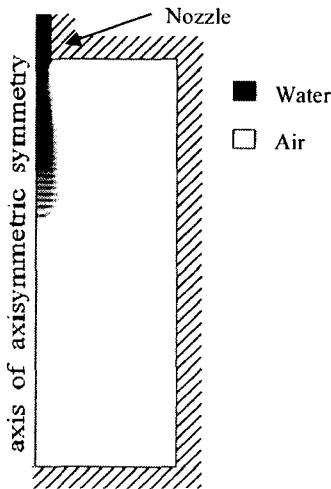


Fig. 3 Shape of fluid ejection at 2.66 μ s

이때 유체의 분출 속도는 약 10m/s 이고, 노즐과 뱅크 사이에 약 35기압이 걸리는 것을 알게 되었다.

처음에 헤머 구조를 살짝 들어 올리는 것으로 유체가 퍼지지 않고 보다 수직으로 분출될 수 있도록 유도 할 수 있다.

3.4 부분적 유체-고체 상호작용 모델의 해석

유체-고체 상호작용 해석의 목표는 VOF 모델에서 나온 압력 값을 토대로 실제로 브릿지 구조에 얼마의 힘이 필요한가를 구하는 것이다. 유체-고체 상호작용 모델은 VOF 모델과는 반대로 분출 속도가 중요한 것은 아니므로 노즐에서의 유체 분출이 없는 것으로 가정하였다. 즉 노즐이 막혀 있는 것으로 가정하였다. 노즐의 면적은 압력이 생성되는 면적에 비하여 크게 작기 때문이다. 2차원 해석으로 노즐의 직경에 맞추어 노즐이 열려 있는 형상으로 모델링하게 되면 노즐의 효과가 과대평가되기 때문이다.

유체 영역은, 미소 압축 가정을 사용하였다. 일반적으로 물은 비압축성으로 구분된다. 그러나 본 시뮬레이션에서는 유체 영역 외부에서 갑작스러운 압력변화가 일어나는 것이므로 압력파의 계산이 불가피하다[3]. 비압축 가정은 이러한 압력파에 대한 변화를 수용하지 못한다. 일반적으로 비압축성으로 구분되어지는 유체라 하더라도 유체-고체 상호작용 해석, 특히 고체 영역에 부하를 가하는 경우에는 미소 압축 가정을 이용한다.

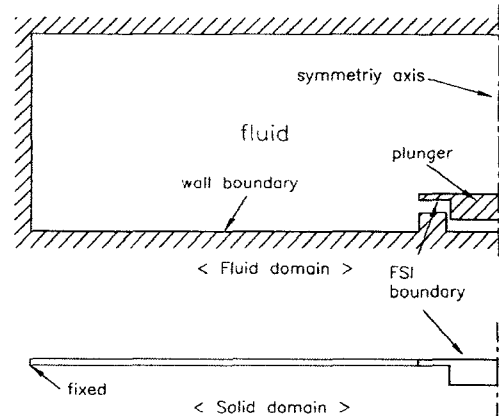


Fig. 4 Local FSI model of micro actuator

Fig. 4와 같이 유체-고체 상호작용 모델에서는 헤머 부분에서만 유체-고체 경계조건을 설정해 주었다. 유체-고체 경계조건은 고체 구조 전체의 경계에 주는 것이 일반적이다. 그러나 본 시뮬레이션에서는 헤머 부분과 헤머 양쪽 일부에만 유체-고체 경계조건을 설정해 주었다. 실제적인 3차원 모델에서는 헤머 양쪽 브릿지 부분은 천공이 되어 있기 때문에, 천

공된 부분에서는 유체 영역에서 구조에 의한 압력 생성이 일어나지 않고, 고체 영역에서 유체 저항으로 인한 손실이 일어나지 않기 때문이다. 부분적 유체-고체 상호작용 모델에서도 유체 영역에서의 운동 조건(kinematic condition)과 고체영역에서의 동적 조건(dynamic condition) 관계가 훼손되지 않기 때문에 해석상의 문제는 없다[5].

이러한 부분적 2차원 유체-고체 상호작용 모델은 구조와 유체의 상호작용을 보다 현실에 가깝게 모델링 할 수 있고, 3차원 유체-고체 상호작용 모델에 비해 절점의 수가 1/100 이하의 수준으로 작아진다. 이것은 바로 해석시간을 줄이는 결과를 낳는다.

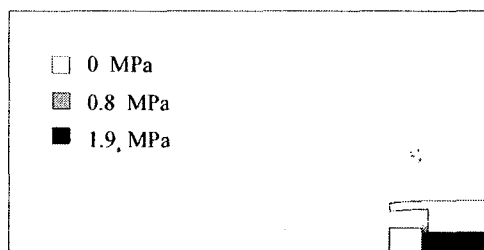


Fig. 5 Pressure analysis with FSI model (solid structure partially hidden)

여러 가지 설계변수를 바꾸어 가면서 유체-고체 상호작용 해석을 한 결과 fig. 5와 같은 최적 결과가 나왔다. 뱅크와 뱅크 사이에 약 20기압이 형성되었고, 이 때 필요한 최대 전류는 약 1A 정도 였다.

앞서 VOF 모델에서 구한 35기압에 미치지지는 못하지만, 최소 전류로 최대의 효율이 이루어지는 모델이다.

4. 결론

MEMS 수준에서 가공이 가능한 유체 구동기를 설계하였다. 유체 구동기는 전자기력에 의해 작동하며, 공정상 간단한 구조로 이루어져 있다. 유체 구동기의 설계를 위하여 ADINA™을 이용하여 해석해 보았다. 방대한 시간을 요구하는 3차원 해석을 대신하여 보다 빠르게 해석할 수 있는 축대칭 VOF 모델 + 2차원 평면 유체-고체 상호작용 모델을 제안하였다. 또한 부분적 유체-고체 상호작용 모델을 제안하였다. 평판에 천공이 있는 모델 등 특별한 경우에 대한 2차원 모델을 제안하여 3차원 해석 시 요구되는 시간적인 문제를 해결하면서도 비교적 정확한 해를 구할 수 있다. 이러한 방법으로 유체 구동기를 해석한 결과 마이크로 유체 구동기의 작동에 필요한 전류를 구하였다.

참고문헌

1. Robert Kroyer, "FSI analysis in supersonic fluid flow", Computers and Structures 81 (2003) 755-764.
2. L. ZHANG "FSI ANALYSIS OF LIQUID-FILLED PIPES", Journal of Sound and Vibration (1999) 224(1). 69-99.
3. "Theory and Modeling Guide Volume III: ADINA-F", Report ARD 04-9, September 2004. ADINA R&D, Inc.
4. Hirt. C. W, and Nichols. B. D, "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free boundaries" J. Comp. Phys, 39, pp.201~225 (1981).
5. Bathe,K.J., Zhang,H., and Zhang,X., "Some advances in the Analysis of fluid flows.", Computers & Structures Vol.64, pp.909-930 1997.