

수중 초음파 센서의 고유진동수에 관한 연구

A study on natural frequency of capacitive micromachined ultrasonic immersion transducer

*오승훈¹, #김종민¹

*S. H. Oh¹, #J. M. Kim(0326kjm@cau.ac.kr)¹

¹중앙대학교 기계공학부

Key words : cMUT, Natural frequency, FSI, Circular membrane

1. 서론

최근 전기 에너지를 음향 에너지로 변환하거나 역으로 음향 에너지를 전기 에너지로 감지하는 장치의 개발 및 적용 가능성이 시사되고 있다. 특히, 정전 용량형 초음파 센서는 의료용 영상 장치 및 비파괴 검사 기술과 같은 분야에서 주도적으로 쓰이고 있는 압전 초음파 센서를 대체할 수 있는 차세대 기술로 연구개발이 활발히 진행되고 있다.

정전 용량형 초음파 센서는 표면 마이크로 머시닝(Surface micromachining) 기술을 이용하여 제작되고, 일반적으로, 실리콘 기판과 기판 위에 증착된 멤브레인, 멤브레인 위의 전극으로 구성되며, 실리콘 기판과 멤브레인 사이의 간격에 의해 커패시터(Capacitor) 구조를 갖는다.¹⁾

초음파 센서의 성능에 크게 영향을 미치는 변수로써 초음파 센서의 고유 주파수와 pull-in 전압이 있다. 특히, 고유 주파수는 송신기 또는 수신기로서 작동하는 초음파 센서의 작동 현상을 결정하는 주요 인자로서 초음파 센서의 형상에 의해 지배된다.²⁾

본 연구에서는 유체 내부에서 작동하는 초음파 센서의 원형 멤브레인이 갖는 고유 주파수를 유한요소 해석을 통해 알아보았다.

2. 본론

2.1 이론적 배경

해석에 적용된 지배방정식인 Navier-Stokes 방정식의 수치해법은 방정식의 비선형적 특성과 미지수의 개수로 인해 해결하기 쉽지 않은 영역이다. 특히, 구조 역학에서 사용되는 방정식과 같은, 다른 물리 현상을 나타내는 방정식이 Navier-Stokes

방정식과 결합된다면 수치 해석을 진행하기 위해 필요한 컴퓨터의 자원이 증가하게 된다. 따라서 가정을 통해 방정식을 간략화 시키는 과정이 필요하며, 해석에 필요한 컴퓨터 자원이 컴퓨터의 성능보다 클 경우, 간략화 과정은 필수적이다.

본 연구에서는 유체를 비압축성 유체로 가정하였고, 구조물의 내부 감쇠를 무시하였다. 따라서 지배방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \cdot \bar{\sigma} = \rho_m \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial t^2} \quad (1)$$

$$-\nabla p + \mu \nabla^2 \bar{v} - \bar{v} \nabla \bar{v} = \rho_f \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \bar{v} = 0 \quad (3)$$

여기서 $\bar{\sigma}$, ρ_m , \bar{u} 는 각각 응력 텐서, 멤브레인의 밀도와 변위 벡터를 나타내며, p , μ , \bar{v} , ρ_f 는 각각 압력, 점성, 유체의 속도 벡터, 그리고 유체의 밀도를 나타낸다.

유체-구조 상호작용(Fluid Structure Interaction: FSI) 문제에서 구조물과 유체는 서로 결합되어 있다. 즉, 멤브레인의 진동과 유체의 속도장은 서로 영향을 주고 받는다. 따라서 경계조건으로써 다음을 사용하였다.

$$\bar{v} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \quad (4)$$

$$F_{ext} = F_{drag} \quad (5)$$

여기서 \bar{v} , \bar{u} , F_{ext} , F_{drag} 는 각각 유체의 속도 벡터, 멤브레인의 변위 벡터, 멤브레인에 작용하는 외력 그리고 항력을 나타낸다. 식 (4)는 멤브레인의 표면에서 유체의 속도장이 멤브레인의 속도와 같음을 의미하는 no-slip 조건이며, 식 (5)는

멤브레인의 표면에 항력이 작용하는 것을 나타낸다.

본 연구는 유체 내부에 위치한 멤브레인의 모달 해석이므로 식 (1), (2), (4)의 시간 미분항을 복소 각주파수로 대체하여 사용하였다.

$$\frac{\partial}{\partial t} = j\omega \tag{6}$$

여기서 $\frac{\partial}{\partial t}$ 는 시간 미분항, $j\omega$ 는 복소 각주파수를 나타낸다.

2.2 해석 대상

본 해석에서는 수중 초음파 센서에 일반적으로 적용되는 원형 멤브레인을 대상으로 하였으며, 멤브레인의 재료는 Si_3N_4 이다. 또한, 멤브레인을 포함하는 유체는 물로 설정하였다. 각각의 물성치는 Table 1에 나타내었다.

유한요소 해석에 사용된 원형 멤브레인의 반지름은 $20\ \mu\text{m}$, $30\ \mu\text{m}$, $40\ \mu\text{m}$ 이며, 각각의 반지름을 갖는 원형 멤브레인을 두께가 $1\ \mu\text{m}$, $2\ \mu\text{m}$ 인 경우로 나누어, 총 6가지 경우에 대하여 유한요소 해석을 진행하였다.

2.3 해석 결과

유한요소 해석 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 결과에서 볼 수 있듯이 멤브레인의 반지름이 증가할수록 멤브레인의 고유 주파수는 감소한다. 이는 멤브레인의 반지름이 커질수록 멤브레인에 작용하는 항력이 증가하게 되고 이렇게 증가된 항력이 추가적인 질량으로 작용하게 되어 고유 주파수가 감소하게 되는 요인으로 작용하는 것에 기인한다.³⁾

또한 멤브레인의 두께가 증가하면 멤브레인의 고유 주파수가 증가함을 볼 수 있다. 하지만 멤브레인의 반지름이 증가할수록 두께 변화에 따른 고유 주파수의 차이는 감소하는 경향이 나타난다. 즉, 멤브레인의 두께 증가에 의한 고유 주파수의 증가보다 반지름의 증가에 따른 항력의 증가가 상대적으로 크다고 할 수 있다. 이러한 결과를 통하여, 멤브레인의 반지름이 멤브레인의 두께에 비하여 충분히 크다면 물속에 위치한 멤브레인의 고유 주파수는 두께의 영향을 거의 받지 않을 것이라 판단된다.

Table 1 Properties of materials

Si_3N_4	
Young's modulus [GPa]	169
Poisson's ratio	0.263
Density [kg/m^3]	3270
Water	
Viscosity [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]	1.002×10^{-3}
Density [kg/m^3]	998.2

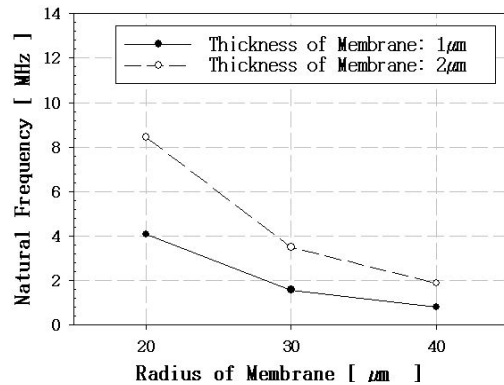


Fig. 1 Natural frequency of circular membrane in water

3. 결론

유한요소 해석을 이용하여 물속에 위치한 원형 멤브레인의 고유 주파수를 알아보았다. 고유 주파수는 멤브레인의 반지름이 증가할수록 감소하고 멤브레인의 두께 증가에 따라 증가하지만, 반지름이 충분히 클 경우 두께의 영향은 무시할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. A. S. Ergun, G. G. Yaralioglu, and T. Khuri-Takub, "Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers: Theory and Technology," *Journal of Aerospace Engineering*, **16:2**, 76-84, 2003.
2. S. A. Anbalagan, G. Uma, and M. Umopathy, "Modeling and simulation of Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer (CMUT)," *Journal of Physics: Conference Series*, **34**, 595-600, 2006.
3. W. Zhang, K. Turner, "Frequency dependent fluid damping of micro/nano flexural resonators: Experiment, model and analysis," *Sensors and Actuators A*, **134**, 594-599, 2007.