

# 유한요소해석을 이용한 초음파 센서의 진동모드와 응력 해석 Oscillational Mode and Stress Analysis of Ultrasonic Transducer by Using Finite Element Method

\*오승훈<sup>1</sup>, 정현석<sup>1</sup>, #김종민<sup>1</sup>  
\*S. H. Oh<sup>1</sup>, H. S. Chung<sup>1</sup>, #J. M. Kim(0326kjm@cau.ac.kr)<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>중앙대학교 기계공학부

Key words : COMSOL, MEMS, Natural frequency, Ultrasonic transducer

## 1. 서론

MEMS(Micro Electro Mechanical System)란 반도체 미세공정을 적용해서 1  $\mu\text{m}$ 에서 1 mm의 크기로 제작된 전자전기 시스템을 뜻한다. MEMS 기술은 기계 및 전자 부품의 소형화는 물론 대량생산을 통한 저가격화, 집적화, 소비 전력의 감소 등과 같은 목표를 만족시킬 수 있다. 또한, MEMS 기술은 가속도 센서, 잉크젯 프린터의 헤드 등에서 벗어나 액추에이터, 마이크로 로봇, 광부품 등을 포함하는 광범위한 분야로 확산, 응용되고 있다. 최근 국내외적으로 각광을 받고 있는 나노 기술과 MEMS와의 접목을 통하여 MEMS 기술의 확대 이용이 가시화되고 있다. 이러한 MEMS 기술과 나노 기술을 접목시킨 ultrasonic transducer는 그것의 형상이 갖는 고유 진동수 대역에서 구동함으로써, 정확한 신호 감지 능력 그리고 내구성 향상을 도모할 수 있어 그 기대가 높다. 하지만 음파는 공기 중에서의 심한 감쇠로 인해 최초 신호 발원지로부터 전파되어 갈 수 있는 거리가 한정되어 있고 음파간섭에 의한 신호왜곡이 발생할 수 있다. 그리고 그 신호의 감도 또한 매우 약하여 ultrasonic transducer가 신호를 감지해내지 못하거나 매우 늦은 응답속도를 나타낼 수 있다는 단점이 있다. 따라서 음파에 대한 감지감도를 높이기 위한 방법으로 ultrasonic transducer를 구성하는 박막의 형상을 가공하여 고유진동수의 조절을 통해 광 대역의 주파수를 감지할 수 있는 ultrasonic transducer의 개발이 진행되고 있다.<sup>1)</sup>

이에 따라 본 연구에서는 이러한 ultrasonic transducer의 감도향상을 위한 선행연구로써 유한요소해석을 이용하여 박막에 가공되는 마이크로 홀의 면적에 따른 고유진동수의 변화를 살펴보고 ultrasonic transducer의 응력분포를 확인하였다.

## 2. 유한요소해석

본 연구에서는 유한요소 프로그램인 COMSOL을 이용하여 ultrasonic transducer의 모델링 및 진동해석, 그리고 응력(Von mises stress) 해석을 수행하였다. 분석된 ultrasonic transducer는 silicon 기판, diaphragm으로써 기능하는  $\text{Si}_3\text{N}_4$  박막 그리고 하부 silicon 기판과  $\text{Si}_3\text{N}_4$  박막에 증착된 Pt 전극으로 구성된다.  $\text{Si}_3\text{N}_4$  박막은 ultrasonic transducer의 신호 감지능력 향상을 위해 마이크로 홀이 형성되어있다. 실제 MEMS 공정을 통해 제작된 ultrasonic transducer의 형상을 Fig. 1에 나타내었고, 해석을 위해 사용된 물성을 Table. 1에 나타내었다.

Ultrasonic transducer의 고유진동수(Natural frequency)와 각각의 고유진동수에서의 진동모드 형상, 그리고 응력분포를 조사하기 위해 natural frequency analysis를 수행하였다. Natural frequency analysis를 통하여 1차에서 3차까지의 고유진동수와 각각의 고유진동수에 대응하는 진동모드의 형상을 찾아낸다.

Ultrasonic transducer의 모델링은 모델의 형상이 갖는 대칭적 특징을 고려하여 Fig. 2에 나타난 바와 같이 전체 모델의 1/4만을 모델링 하여 해석에 적용하였고 1/4의

경계가 되는 부분은 symmetry 조건으로 구속하였다. 이러한 대칭조건을 이용한 모델링을 통하여 전체 해석에 소요되는 시간을 줄일 수 있다.<sup>2)</sup>

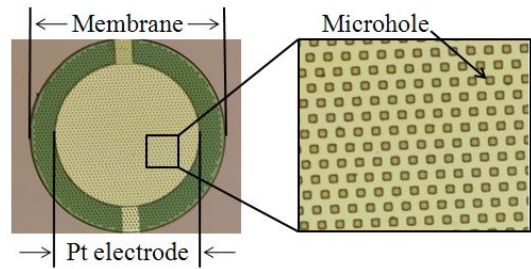


Fig. 1 Component of ultrasonic transducer

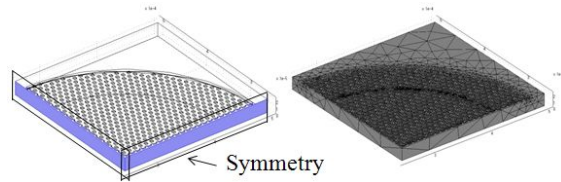


Fig. 2 1/4 Model of ultrasonic transducer

해석은 silicon 기판과  $\text{Si}_3\text{N}_4$  박막 사이의 간격 차이인 air gap을 1.5  $\mu\text{m}$ 으로 동일하게 유지한 상태에서 AR(Area Ratio)을 0%, 20%, 40%, 60%로 변화시켜 각각의 AR에 따른 고유진동수의 변화를 관찰하였다. AR은  $\text{Si}_3\text{N}_4$  박막 넓이에 대한  $\text{Si}_3\text{N}_4$  박막 위에 가공된 마이크로 홀의 넓이 비이다. Ultrasonic transducer의 모델 형상을 Fig. 3에 나타내었다.

또한 동일한 60%의 AR 조건에서 air gap에 대한 변화를 주었을 때에 ultrasonic transducer에 작용하는 최대 응력의 변화를 관찰하였다. Air gap의 변화는 1.5  $\mu\text{m}$ , 2.0  $\mu\text{m}$ , 3.0  $\mu\text{m}$ 으로 설정하여 적용하였다.

해석에 적용된 경계조건(Boundary Condition)은 silicon 기판에 대한 하부 구속만이 적용되었다. 이 상태는 ultrasonic transducer가 실험대 위에 움직이지 않게 붙여진 상태로 진행되는 실험과 흡사하다.

모델의 air gap에 의한 damping 효과는 고려하지 않았다.

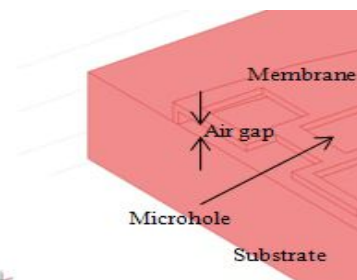


Fig. 3 Part view of ultrasonic transducer

Table. 1 Properties of material

Material	Young's Modulus [GPa]	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Poisson's Ratio
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	169	3270	0.263
Pt	147	21500	0.39
Silicon	131	2330	0.27

3. 결과

Natural frequency analysis 를 통해서 ultrasonic transducer 의 1 차에서 3 차까지의 고유진동수와 그에 따른 진동모드를 확인하였다. 1 차 진동모드는 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 박막의 중심을 기준으로 박막이 상하로 진동하는 center vertical mode 의 형태를 나타내었다. 2 차 진동모드는 박막의 중심축을 중심으로 상하 진동하는 axial vertical mode 의 형태가 나타났으며 3 차 진동모드는 박막의 중심으로부터 물결이 치는 형태인 center wave mode 가 나타났다. 각각의 고유진동수에 따른 진동모드형상을 Fig. 4 에 나타내었다.

Silicon 기판과 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 박막 사이의 간격 차이인 air gap 을 1.5 μm으로 일정하게 유지한 상태에서 AR 이 0%일 때의 1 차에서 3 차까지의 각각의 고유진동수는 108.172kHz, 374.052kHz 그리고 428.952kHz 로 나타났다. 그리고, AR 이 20%인 경우에 대한 고유진동수는 각각의 진동모드에 대해 101.497kHz, 348.955kHz, 401.314kHz 로 나타났으며, AR 이 40%일 때의 고유진동수는 각 진동모드에 대해 91.804kHz, 314.899kHz 그리고 363.354kHz 로 나타났다. 마지막으로 AR 을 60%로 모델링 한 경우에는 각 진동모드에 대해 81.123kHz, 278.357kHz 그리고 321.384kHz 로 관측되었다. 해석을 통해 얻어진 각각의 AR 에 대한 고유진동수를 Fig. 5 에 나타내었다. 고유진동수의 변화에서 보여지듯 동일한 air gap 을 갖는 모델의 경우 AR 의 값이 증가할수록 고유진동수는 감소하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 각각의 AR 에서 나타난 모드형상은 모두 동일하였다.

각 진동모드에서 걸리는 최대 응력은 AR 이 60%로 일정한 조건 하에서, air gap 이 1.5 μm일 때 1 차에서 3 차까지의 진동모드에서 각각 48.445GPa, 134.392GPa, 135.593GPa 이 나타났고, air gap 이 2.0 μm인 조건에서는 1 차에서 3 차까지의 진동모드에서 각각 47.183GPa, 99.156GPa, 99.506GPa 이 나타났다. 마지막으로 air gap 이 3.0 μm일 때에는 1 차에서 3 차까지의 진동모드에서 각각 50.440GPa, 88.791GPa, 95.905GPa 의 최대응력이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

Air gap 에 따라 ultrasonic transducer 에 작용하는 최대응력을 Fig. 6 에 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯 최대응력은 일정한 값의 AR 에 대해 air gap 이 작아질수록 커지는 경향을 갖는다. 최대 응력은 각 진동모드에서 박막이 가장 많이 변형되는 부분에서 발생한다. 그 외의 최대 응력에 가까운 값을 갖는 응력들은 변형이 일어나는 부분의 주변, 마이크로 홀의 모서리부분 등에 분포한다. 따라서 마이크로 홀의 형상 등을 변형하여 응력의 분포를 개선할 수 있다.

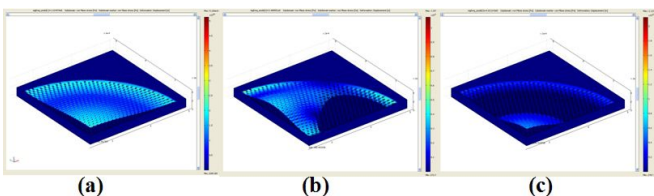


Fig. 4 Oscillation mode of Air gap 1.5 μm, AR 20% (a) Center vertical (b) Axial vertical (c) Center wave

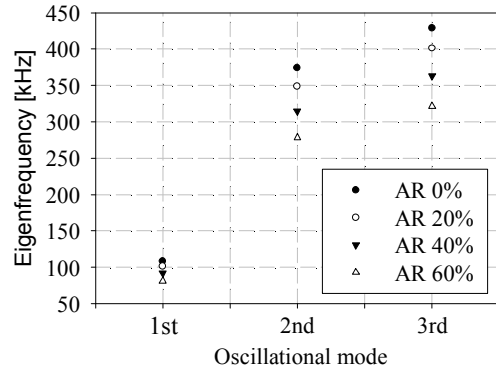


Fig. 5 Natural frequency at air gap 1.5 μm

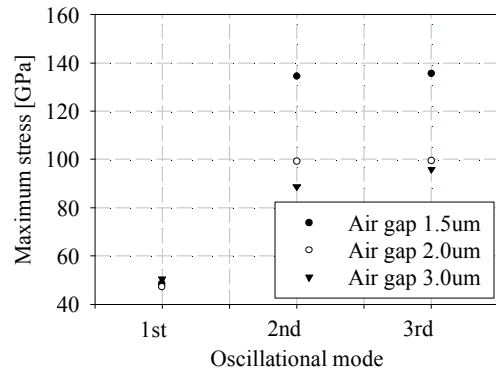


Fig. 6 Maximum stress at AR 60%

4. 결론

본 연구에서는 유한요소해석 기법을 이용하여 ultrasonic transducer 의 Natural frequency analysis 를 수행하였다.

해석을 통하여 모델의 고유진동수와 그에 따른 진동모드를 살펴보고, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 박막상의 마이크로 홀의 AR 및 박막과 기판 사이의 차이인 air gap 의 변화에 따른 ultrasonic transducer 의 고유진동수와 최대응력의 변화를 알아보았다. 이와 같은 결과들을 종합하여 ultrasonic transducer 의 고유진동수는 동일한 air gap 조건상에서 AR 이 증가할수록 작은 값을 나타낸다는 사실을 확인할 수 있었다. 또한 동일한 AR 조건상에서 air gap 을 변화시켰을 때에는 air gap 이 감소할수록 더 큰 응력이 발생한다는 것을 확인하였다. 이 자료는 앞으로 ultrasonic transducer 에 관한 연구를 진행함에 있어 거동특성에 관한 유용한 정보 자료로 사용될 수 있을 것이다.

후기

참고문헌

1. A. Fleischman, R. Modi, A. Nair, J. Talman, G. Lockwood, S. Roy, "Miniature high frequency focused ultrasonic transducers for minimally invasive imaging procedures", Sensors and Actuators A, 103, 76-82, 2003
2. A. Abdullah, A. Pak, "Correct Prediction of the Vibration Behavior of a High Power Ultrasonic Transducer by FEM Simulation", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 39, 21-28, 2008