

## 미세가공 정전용량형 초음파 탐촉자 개발(I) - 진동 막 거동 분석

### Development of Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer (I) - Analysis of the Membrane Behavior

김기복\*<sup>†</sup>, 안봉영\*, 박해원\*, 김영주\*, 이승석\*

Ki-Bok Kim\*<sup>†</sup>, Bongyoung Ahn\*, Hae-Won Park\*, Young-Joo Kim\* and Seung-Seok Lee\*

**초 록** 본 연구는 고효율 비접촉 초음파 송수신이 가능한 미세가공 정전용량형 초음파 탐촉자(cMUT)를 개발하기 위한 기초연구로 수행되었다. cMUT의 주요 구성요소인 미세 진동 막의 거동-공진 주파수, 막 변위, 막 붕괴 변위, 막 붕괴전압-을 이론적인 해석과 유한요소해석을 이용하여 분석하였다. 진동 막의 두께와 크기, 희생층 두께, 전극의 두께와 크기 등과 같은 cMUT의 설계인자를 검토하였다. 분석결과 진동 막의 공진주파수는 진동 막의 두께가 증가함에 따라 증가하였으며 직경에 따라서는 감소하였다. 직류 바이어스 전압이 증가함에 따라 진동 막의 변위는 증가하였으며 진동 막의 붕괴전압을 분석하였다.

**주요용어:** 미세가공, 비접촉, 공기결합, 미세가공 정전용량형 초음파 탐촉자

**Abstract** This study was conducted to develop a capacitive micromachined ultrasonic transducer (cMUT) which enable to high efficient non-contact transmit and receive the ultrasonic wave in air. Theoretical analysis and finite element analysis of the behavior of membrane (such as resonance frequency, membrane deflection, collapse deflection and collapse voltage) of the cMUT were performed. The design parameters of the cMUT such as the dimension and thickness of membrane, thickness of sacrificial layer, thickness and size of electrode were estimated. The resonance frequency of the membrane increased as the thickness of the membrane increased but decreased as the diameter of the membrane increased. The deflection of the membrane increased as d-c bias voltage increased. The collapse voltage of the membrane was analyzed.

**Keywords:** MEMS, Non-contact, Air-coupled, cMUT

#### 1. 서 론

최근 들어 미국의 Stanford 대학을 중심으로 cMUT(capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer)라 불리는 초소형의 정전용량형 센서가

개발되어 고 효율의 초음파 송수신이 가능하게 되었다[1-6]. cMUT는 실리콘 웨이퍼 위에 미세 가공된 수백 또는 수천 개로 이루어진 박막의 진동을 이용하여 초음파를 송수신하는 새로운 개념의 초음파 탐촉자이다. 이 센서는 1990년대 후반에 몇몇

연구자에 의해 시작되었지만 MEMS 기술의 발전과 함께 불과 몇 년 사이에 상당한 기술적인 발전이 이루어지고 있다[7,8].

cMUT는 일반 반도체 공정에 이용되는 실리콘 웨이퍼 위에 두께 수천 Å의 얇은 막을 역시 수천 Å의 공기 층위에 제작하면 웨이퍼와 얇은 막은 공기 층을 사이에 두고 capacitor를 형성한다. 이렇게 제작된 capacitor에 교류 전류를 흘리면 얇은 막이 진동하여 초음파가 발생하게 되며, 이 경우 센서의 얇은 막에 의해 물이나 오일 등의 접촉매질 없이도 초음파의 송수신이 가능하다.

최근에 초음파 센서, 특히 의료용 접촉식 초음파 센서는 수백 개의 초음파 센서를 배열한 후 전기적 신호를 조절하여 초음파의 방향과 에너지를 조절하거나 초음파를 한 곳으로 집중시키는 기술이 적용되고 있는데, 사용되는 센서가 압전 소자이므로 아무리 작게 가공한다고 하여도 전체적으로 수 mm의 크기로 밖에 가공할 수 없다. 그러나 cMUT의 경우에는 하나의 센서가 직경이 약 수십  $\mu\text{m}$ 에 불과하기 때문에 수 만개의 센서를 배열한다고 하더라도 수 mm에 불과하며, 한번의 제작 공정으로 수만 개의 센서를 동시에 정확하게 원하는 위치에 배열할 수 있기 때문에 압전형 센서를 이용하는 배열형 센서에 비하여 정확성이 비교가 안 될 만큼 뛰어나다.

cMUT 개발 결과가 발표됨에 따라 기존의 접촉식 초음파 센서가 차지하고 있던 응용 분야 중 많은 부분이 cMUT로 대체될 것으로 생각된다. 의료용으로 사용될 경우 초음파 검사 시 탐촉자와 신체 사이에서 경우에 따라 불편감을 느끼는 액체를 바르지 않고도, 즉, 탐촉자와의 접촉 없이 검사가 가능하다거나, 항공기 날개나 포신 등의 결합 검사 시에도 전체를 물 속에 담그거나 불기동을 만드는 대신 센서의 자동 스캔만으로 건전성을 평가할 수 있기 때문에, 비접촉식 센서로서의 우월성은 월등할 것이다.

현재 cMUT는 아직도 발전 단계에 있는 신기술이고 그 적용 분야도 매우 넓은 것으로 인식되고 있기 때문에 국내에서도 비파괴 및 초음파 관련 분야에 cMUT 연구가 시급히 이루어져야 할 것으로 판단되며 본 연구진에서는 cMUT의 세계적인 연구 개발 동향을 파악하기 위한 문헌연구를 수행한 바가 있다[9].

본 연구에서는 cMUT 개발을 위한 기초연구로서 1차적으로 초음파 발생요소가 되는 개별 미소 진동

막의 설계 및 작동조건에 따른 운동 특성을 분석하고자 하였다.

## 2. cMUT 설계

이상적인 초음파 센서는 대역폭이 무한대로 넓어야 하며 삽입손실이 거의 없어야 한다. 현실적으로 이러한 조건을 만족시키는 센서를 제작한다는 것은 불가능할 뿐만 아니라 무수히 많은 설계 변수 값들을 바꾸어 가면서 센서를 제작하여 일일이 최적 설계 조건을 찾는다는 것은 거의 불가능하다. 따라서, 센서 설계 단계에서 센서가 갖추어야 할 요구조건들을 최대한 만족할 수 있도록 여러 가지 모델링 기법과 시뮬레이션 방법이 이용되고 있다[3-5,10,11].

cMUT의 경우 개별 미소 진동 막의 크기와 두께를 정밀하게 조절할 경우 센서의 감도와 dynamic range를 향상시킬 수 있는 것으로 보고되고 있다[3,4]. 따라서 cMUT 설계 시 고려해야 할 인자들을 고찰한 후 현재 본 연구진이 운용 가능한 각종 반도체 공정장비의 특성을 감안하여 다음과 같은 cMUT 설계 사양을 결정하였다.

Table 1 Design parameters and specifications of the cMUT

Design parameter	Specification
active area	$10 \times 10 \text{ mm}^2$
membrane diameter	20, 50, 100 $\mu\text{m}$
membrane thickness	2000~8000 Å, 1000 step
air gap	5000, 10000 Å
insulation layer thickness	2000, 4000 Å
electrode area	50, 75, 100%
electrode thickness	500 Å

Table 1의 설계 조건을 고려하여 active area의 면적이  $10 \times 10 \text{ mm}^2$ 인 array를 구성한 다음 진동 막의 직경을 100  $\mu\text{m}$ 로 할 경우 포함되는 설계된 센서의 면적에서 차지하는 진동 막의 개수는 약 9400개이며 전체 면적에서 차지하는 면적 비는 0.69로 계산되었다. 설계 사양에 따른 cMUT 진동 막 배열의 개략도는 Fig. 1에서 보는바와 같으며 진동 막 중앙의 hole은 희생층 식각을 위한 것으로서 제작 공정에 따라 그 크기가 달라지게 된다. 한편, 개별 진동막을 Fig. 2에 나타내었다.

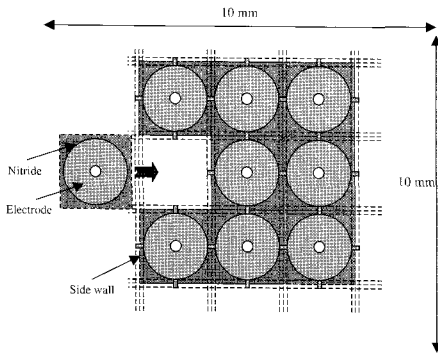


Fig. 1 Design concept of the cMUT array

3. 설계 조건에 따른 진동막의 모델링

3.1. 진동막의 이론적인 공진주파수

초음파를 발생시키기 위한 진동 막으로서는 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>가 많이 이용되고 있다. 필요한 주파수의 초음파를 발생시키기 위해서는 진동 막의 기계적 특성(잔류응력, 탄성계수, 직경, 두께 등)을 조절하거나 인가되는 교류전압의 주파수를 조정해야 한다. 진동 막의 물성 값들은 cMUT 제작 공정에 따라 그 값들이 조금씩 달라지게 된다. 예를 들어 SiO<sub>2</sub>의 경우, 비유전율이 thermal process로 제작 될 경우 3.9정도이고 PECVD로 제작 될 경우 약 4.2정도이다. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>는 일반적으로 LPCVD 공정으로 제작되는 경우가 많은데 공정변수를 조절할 경우 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>의 잔류응력을 조절할 수 있다. 대체적으로 cMUT의 경우 두께가 그 지름에 비해 매우 작기 때문에 두께 방향의 응력은 크게 고려되지 않는다[1]. 진동 막의 진동을 이용하여 초음파를 발생시키고 수신할 경우 송수신 효율은 막의 공진 주파수에 큰 영향을 받게 되므로 진동 막의 공진 주파수를 반드시 분석해야 한다.

Fig. 2에서 보는 바와 같은 진동 막을 고려할 경우 제 1 공진 주파수는 다음과 같이 표시된다[12].

$$f_c = \frac{(2.4)^2}{2\pi} \sqrt{\frac{Y_0}{12\rho(1-\delta^2)}} \frac{t_n}{a^2} \quad (1)$$

- 여기서,  $f_c$  = 미소 진동 막의 공진 주파수
- $Y_0$  = 미소 진동 막의 탄성계수
- $\rho$  = 미소 진동 막의 밀도
- $\delta$  = 미소 진동 막의 Possion 비
- $t_n$  = 미소 진동 막의 두께
- $a$  = 미소 진동 막의 반경

상기 식을 이용하여 실제 제작되는 cMUT의 공진 주파수를 이론적으로 구할 수 있다. 식 (1)에서 알 수 있듯이 진동 막의 공진 주파수는 cMUT의 dimension과 기계적 특성 값의 함수이다. 따라서, 진동 막의 탄성계수, 밀도, 포와송 비와 같은 기계적 특성 값들은 cMUT의 제작 공정에서 결정되어 거의 일정한 값을 가지므로 진동 막의 공진 주파수를 조정하기 위해서는 두께와 반경을 변화시키면 된다.

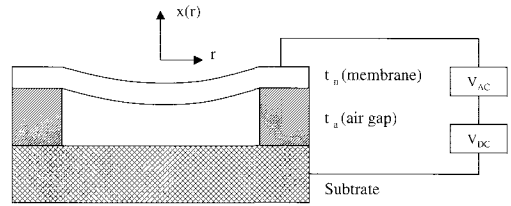


Fig. 2 Schematic of free membrane suspended above a silicon substrate

3.2. 유한요소법을 이용한 공진주파수 해석

본 연구에서 설계한 cMUT는 진동 막의 중앙부분에 희생층을 식각하기 위한 hole을 가지게 된다. 따라서 진동 막 중앙의 hole의 크기가 진동 막의 고유 진동수(공진 주파수)에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 유한요소해석을 실시하였다. Hole의 크기는 0에서 3  $\mu$ m로 그 직경을 변화시켜 가면서 해석을 수행하였다. 유한요소해석 도구인 ANSYS를 이용하여 진동 막의 진동 모드 해석을 수행하였으며 필요한 물성 값들은 관련 문헌과 반도체 공정 자료에서 참조하였다[3,13-15].

모드 해석으로부터 진동 막의 진동 특성을 알 수 있으며 고유 진동수, 모드 형상 등을 알 수 있다. 따라서 이러한 모드 해석으로부터 진동 막의 공진 주파수를 피하거나 아니면 특정 주파수에서 진동하도록 cMUT를 설계할 수 있게 된다. Table 2에 본 연구에서 설계된 cMUT 구성재료에 대한 물성 값들을 나타내었다.

Table 2 Mechanical properties of main components in the cMUT

Item	Si	SiO <sub>2</sub>	Air	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Au
Young's modulus (GPa)	130.9	75	-	320	80.6
Residual stress (MPa)	-	225	-	280	-
Density (kg/m <sup>3</sup> )	2329	22000	-	3270	19700
Poisson's ratio	0.28	0.17	-	0.263	0.421
Permittivity	13	4.2	1	7.9	-

Fig. 3은 미소 진동 막의 진동 특성을 분석하기 위한 유한요소 해석의 결과로서 미소 진동 막의 반경  $50\mu\text{m}$ , 두께  $0.8\mu\text{m}$ , hole의 반경  $1.5\mu\text{m}$  일 때 미소 진동 막의 제 1 진동 모드 형상을 나타낸다.

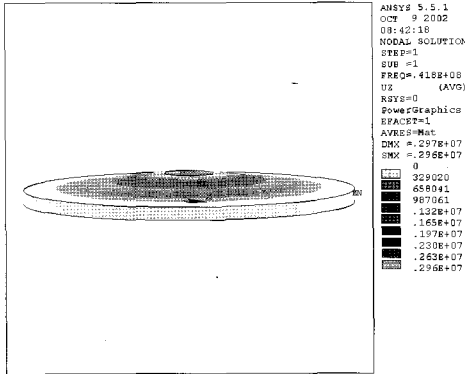


Fig. 3 First vibration mode shape for single circular silicon nitride membrane (dia.= $50\mu\text{m}$ , thickness = $0.8\mu\text{m}$ , dia. of hole= $1.5\mu\text{m}$ )

진동 막의 중심 hole의 반경을 증가시키면서 모드해석을 수행하여 제 1 공진 주파수 변화를 각각 분석한 결과 Fig. 4에서 보는바와 같이 hole의 반경이 증가하더라도 진동 막의 공진 주파수는 크게 변하지 않는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 본 연구에서 설계된 cMUT의 진동 막 직경에 비하여 hole의 크기가 차지하는 비율은 상대적으로 매우 작기 때문에 진동 막의 공진 주파수에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

Fig. 5는 본 연구에서의 설계된 cMUT의 설계 사양에서 진동 막의 반경을 각각 10, 25,  $50\mu\text{m}$ 로 증가시키면서 두께를  $0.2\mu\text{m}$ 에서  $0.1\mu\text{m}$  간격으로  $0.8\mu\text{m}$ 까지 증가시켰을 때 공진 주파수 변화를 나타내는 것으로 진동 막의 반경과 두께가 증가함에 따라 공진 주파수는 선형적으로 증가함을 보이고 있다.

3.3. DC 바이어스 전압에 따른 진동막의 변위 해석

커패시터를 형성하는 진동 막과 하부 전극사이에서 진동 막의 초기 변위를 얻기 위하여 직류 바이어스 전압을 인가하면 진동 막은 쿨롱 힘에 의해 아래쪽으로 끌리게 된다. 이 상태에서 일정한 진폭을 갖는 교류를 인가하면 진동 막이 상하로 진동하여 진동 막 바깥쪽의 매질에 막 진동에 의한 주기적인 압력을 가하게 된다. 따라서 주기적인 압력을

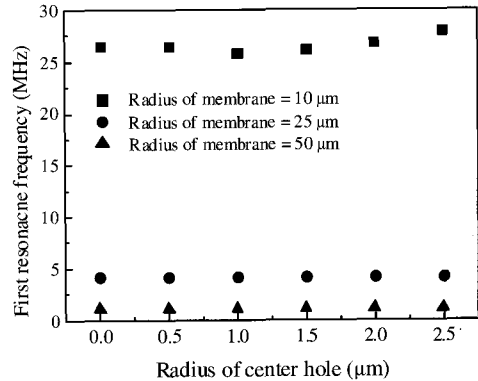


Fig. 4 Plot of first resonance frequency vs. radius of center hole

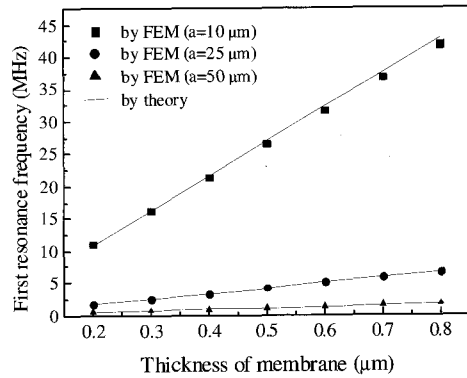


Fig. 5 Plot of first resonance frequency vs. thickness of single circular membrane

받는 매질 내에서 탄성파가 발생하여 매질 바깥쪽으로 계속 전파하게 된다. 이때 가해지는 압력은 초기에 인가되는 바이어스 전압의 크기에 좌우되며 막의 진동주파수는 인가되는 교류전압의 주파수를 이용하여 조절할 수 있다.

초기 인가되는 바이어스 전압을 크게 할 수록 발생하는 음압의 세기가 증가하게 되지만 쿨롱 힘이 증가하게 되면 막의 변위도 증가하게 되므로 초기에 설정된 커패시터 간격 이내로 막의 변위를 제한해야 한다. 만약 막의 변위가 커패시터 간격보다 커지게 되면 전기적인 short가 발생하게 된다. 또한 진동 막의 변위는 막의 잔류응력이나 탄성한도 내에서 유발되어야 하므로 진동 막의 기계적 특성을 고려하여 바이어스 전압을 적당하게 인가하여야 한다. 직류 바이어스 전압과 교류전압이 인가될 때 진동막에 작용하는 전체 힘( $F_{total}$ )은 바이어스 전압에 의한 쿨롱 힘( $F_{DC}$ )과 교류전압에 의한 쿨롱

힘( $F_{AC}$ )의 합력으로 다음과 같다.

$$F_{total} = F_{DC} + F_{AC} \quad (2)$$

바이어스 전압이 임의의 한계 이상으로 작용할 때 진동 막이 붕괴하게 되는데 이 때의 붕괴변위 ( $x_{collapse}$ )는 인가전압과 변위사이의 운동방정식으로부터 다음과 같이 표현 될 수 있다[4,10].

$$x_{collapse} = \frac{1}{3} (t_a + (\epsilon_a / \epsilon_n) t_n) \quad (3)$$

이때 막의 붕괴전압은 다음과 같이 근사화된다[4].

$$V_{collapse} = \sqrt{\frac{128 Y_0 t_n^3 (t_n + (\epsilon_n / \epsilon_a) t_a)^3}{27 \epsilon_a (1 - \sigma^2) a^4}} \quad (4)$$

- 여기서,  $\sigma$  = 진동 막의 포와송 비
- $\epsilon_n$  = 진동 막의 유전율
- $\epsilon_a$  = 공기의 유전율

본 연구에서 설정된 cMUT 설계 및 제작 조건에서 진동 막의 붕괴전압 및 진동 막의 거동 특성을 해석하기 위하여 유한요소해석을 실시하였다. 희생 층 식각을 위한 중심부의 hole을 고려하더라도 진동 막의 형상은 원형이기 때문에 대칭 조건을 이용하여 1/4 모델을 적용하였다. 이렇게 함으로써, solid 모델링 시 요소 및 절점의 수를 크게 줄일 수 있기 때문에 해석시간을 단축시킬 수 있으며 electrostatic force에 의한 static 해석을 수행하였다. 인가되는 직류 바이어스 전압을 40 V에서 500 V까지 변화시키면서 발생하는 진동 막의 변위를 시뮬레이션 하였다. 이때 본 연구의 유한요소해석 모델에서 전압 변화에 따른 진동 막의 변위를 바로 계산하기 힘들기 때문에 전압 변화를 쿨롱 힘으로 환산하여 이러한 쿨롱 힘이 진동 막의 전체 면적에 균일하게 작용하는 모델을 가정하여 진동 막의 변위를 시뮬레이션 하였다.

본 연구의 설계조건에서 진동 막의 반경을  $50 \mu\text{m}$ , 중심 hole의 반경을  $1.5 \mu\text{m}$ , 진동 막과 하부전극 사이의 간격을  $1 \mu\text{m}$ 로 설정한 다음 진동 막의 직경을 각각 0.2, 0.5,  $0.8 \mu\text{m}$ 의 3 수준으로 변화시켜 가면서 유한요소해석을 수행한 결과를 Fig. 6에 정리하였다.

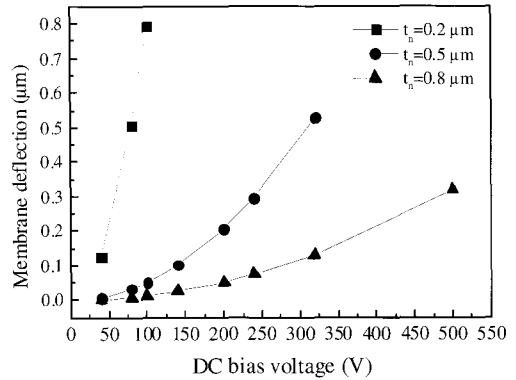


Fig. 6 Plot of membrane deflection vs. DC bias voltage at indicated thickness of membrane

분석 결과 직류 바이어스 전압이 증가함에 따라 진동 막의 변위는 증가하는 것으로 나타났으며 동일한 직류 바이어스 조건에서는 진동 막의 두께가 증가함에 따라 진동 막의 변위는 감소하는 것으로 분석되었다. 진동 막의 두께가  $0.2 \mu\text{m}$ 인 경우 식 (3)에 의해 막의 붕괴변위는  $0.348 \mu\text{m}$ , 진동 막의 두께가  $0.5 \mu\text{m}$ 인 경우 막의 붕괴변위는  $0.37 \mu\text{m}$ , 진동 막의 두께가  $0.8 \mu\text{m}$ 인 경우 막 붕괴변위는  $0.40 \mu\text{m}$ 로 각각 계산되었다.

따라서 이들 값들을 고려하여 본 연구에서의 cMUT 설계 조건에서의 진동 막 붕괴전압을 분석한 결과 Table 3에서 보는 바와 같으며 추후 개발 될 cMUT 설계조건에서 직류 바이어스 전압의 크기를 결정하는데 고려되어야 할 값들이다.

그러나 cMUT를 구동하기 위해서는 직류바이어스 전압과 더불어 교류전압이 추가로 인가되므로 식 (2)의 진동 막에 작용하는 전체 쿨롱 힘이 증가되므로 본 연구의 cMUT 설계 사양에 필요한 직류 바이어스 전압은 Table 3에서 제시된 붕괴전압 보다 작은 값이 되어야 할 것으로 판단된다.

Table 3 Collapse deflection and collapse voltage of the selected specifications of the cMUT

Air gap	Membrane		$x_{collapse}$ ( $\mu\text{m}$ )	$V_{collapse}$ (V)
	radius	thickness		
1.0 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$	0.2 $\mu\text{m}$	0.35	70
		0.5 $\mu\text{m}$	0.37	260
		0.8 $\mu\text{m}$	0.40	550

3.4. 교류전압에 따른 진동막의 진동특성

상기 Table 3의 분석 결과를 토대로 하여 진동막의 두께  $0.8 \mu\text{m}$ 의 설계조건에서, 100 V의 직류 바이어스( $V_{DC}$ )를 인가한 다음 교류 인가전압( $V_{AC}$ )의 피크 값을 5, 10, 15 volt의 3 수준으로 바꾸어 가면서 교류전압을 인가하면서 진동 막의 진동 변위를 분석하였다. 직류전압과 교류전압을 함께 인가하는 이유는 인가하는 교류전압의 주파수와 동일한 주파수의 진동을 얻기 위한 것이다. 즉, 진동 막에 인가하는 전압에 의해서 진동 막이 받는 힘은 전압의 제곱에 비례하게 되므로 진동 막이 받게 되는 힘과 전압과의 관계는 다음과 같이 표시된다.

$$F_{total} \propto V_{DC}^2 + V_{AC}^2 + 2V_{DC}V_{AC} \quad (5)$$

즉, 적당한 전기적인 필터를 선택하여 상기 식의 첫째 항과 두 번째 항을 제거하면 마지막 항에 비례하는 진동 막의 운동을 발생시킬 수 있다. cMUT의 미소 진동 막에 가해지는 교류 전압의 주파수는 1 MHz로 하였으며 이때 교류전압은 3주기의 시간 동안 인가하였다. 따라서 직류 바이어스 인가전압과 교류인가 전압이 더해져서 진동 막에 가해지게 되므로 교류에 의한 쿠울롱 힘이 시간에 따른 변화값으로 진동 막에 인가되게 된다. 진동 막이 원형이므로 1/4 대칭 모델을 적용하여 transient 해석을 수행하였으며 그 결과는 Fig. 7에서 보는 바와 같다. 직류전압에 따른 진동 막의 거동 시뮬레이션과 마찬가지로 인가되는 교류전압에 따른 쿠울롱 힘의 변화를 압력조건으로 바꾸어 유한요소해석을 수행하였다. 교류인가 전압( $V_{AC}$ )에 의한 진동 막의 초기 변위를 0으로 기준을 설정한 다음 교류전압의 크기 변화에 따른 진동 막의 진동방향이 위 쪽일 때를 +, 아래쪽일 때를 -로 하여 나타내었다.

Table 4는 Fig. 7의 결과를 요약한 것으로서 100V의 직류 바이어스 인가상태에서 교류전압의 피크 값을 변화시켰을 때 나타나는 진동 막의 중심부에서의 위 방향의 최대 변위와 아래 방향의 최대 변위를 각각 정리하여 나타낸 결과이다. 진동 막과 하부전극 사이의 간격(공기 층의 두께)이  $1.0 \mu\text{m}$ 이므로 5V의 교류 피크 전압일 때 진동 막의 변위는  $(1.0-0.0259) \mu\text{m} \sim (1.0+0.0259) \mu\text{m}$ 의 범위에서 진동하게 되며  $1.0 \mu\text{m}$  간격에 대하여 약  $\pm 2.6 \%$ 의 변위를 나타내었다.

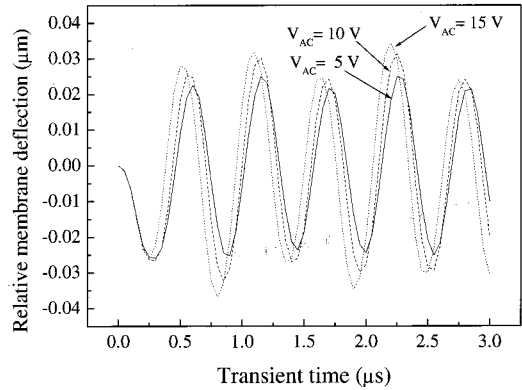


Fig. 7 Transient analysis result of single membrane with  $a = 50 \mu\text{m}$  and  $t_n = 0.8$ ,  $V = 100 \text{ V}$

Table 4 Maximum values of upper and lower deflection of membrane at several ac voltages

$V_{DC}$	Membrane deflection	$V_{AC-peak}$		
		5 V	10 V	15 V
100 V	upper	$0.0250 \mu\text{m}$	$0.0313 \mu\text{m}$	$0.0343 \mu\text{m}$
	lower	$0.0259 \mu\text{m}$	$0.0323 \mu\text{m}$	$0.0367 \mu\text{m}$

마찬가지로 10V의 교류 피크 전압에서는  $(1.0-0.0323) \mu\text{m} \sim (1.0+0.0313) \mu\text{m}$ 의 범위에서 진동막의 변위가 발생하며  $\pm 3.2\%$ 의 변위를 나타내었으며 15V의 교류 피크 전압에서는  $(1.0-0.0367) \mu\text{m} \sim (1.0+0.0343) \mu\text{m}$ 의 범위에서 진동 막의 변위가 발생하며  $\pm 3.6\%$  정도 변위가 발생하는 것으로 나타났다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 cMUT 개발을 위한 기초연구로서 초음파 발생요소가 되는 개별 미소 진동 막의 운동 특성을 해석하고 분석하여 cMUT의 설계 및 작동 조건을 분석하였다. 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

가. 진동 막의 공진 주파수를 분석하기 위하여 이론적인 해석과 유한요소해석을 수행한 결과 진동 막의 두께가 증가할수록 공진 주파수는 증가하였으며 직경이 증가할수록 공진 주파수는 감소하였다.

나. 직류 바이어스 전압에 따른 진동 막의 변위를

유한요소해석으로 분석한 결과 직류 바이어스 전압이 증가할수록 진동 막의 변위는 증가하였으며 동일한 직류 바이어스 조건에서는 진동 막의 두께가 증가함에 따라 변위는 감소하였다. 따라서 이러한 해석을 통하여 진동 막의 막 붕괴전압의 예측이 가능하였다.

다. 직류 바이어스와 교류 전압이 인가된 진동 막의 유한요소해석 결과 진동 막의 변위 거동이 교류 전압의 진폭변화에 따라 진동하는 것으로 나타나 cMUT의 초음파 발생 메커니즘을 잘 구명할 수 있는 것으로 분석되었다.

추후 cMUT의 초음파 변환효율을 분석할 수 있는 등가회로모델에 대한 연구와 진동 막의 상부 전극의 크기에 따른 진동 막의 붕괴전압 및 진동 특성 등을 해석하기 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다. 아울러 본 연구에서 분석된 진동 막의 거동특성을 실제 제작된 cMUT를 이용하여 검증하기 위한 연구도 필요할 것으로 판단된다.

**참고문헌**

[1] M. I. Haller and B. T. Khuri-Yakub, "A surface micromachined electrostatic ultrasonic air transducer," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, Vol. 43, No. 1, pp. 1-6, (1996)

[2] X. Jin, O. Oralkan, F. L. Degertekin and B. T. Khuri-Yakub, "Characterization of one-dimensional capacitive micromachined ultrasonic immersion transducer arrays," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, Vol. 48, No. 3, pp. 750-760, (2001)

[3] I. Ladabaum, X. Jin, H. T. Soh, A. Atalar, and B. T. Khuri-Yakub, "Surface micromachined capacitive ultrasonic transducers," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, Vol. 45, No. 3, pp. 678-690, (1998)

[4] A. Bozkurt, I. Ladabaum, A. Atalar, and B. T. Khuri-Yakub, "Theory and analysis of electrode size optimization for capacitive microfabricated ultrasonic transducers," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, Vol. 46, No. 6, pp. 1364-1374, (1999)

[5] O. Oralkan, X. Jin, F. L. Degertekin and B. T. Khuri-Yakub, "Simulation and experimental

characterization of a 2-D capacitive micro-machined ultrasonic transducer array element," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.* Vol. 46, No. 6, pp. 1337-1340, (1999)

[6] J. Johnson, O. Oralkan, U. Demirci, S. Ergun, M. Karaman, and P. Khuri-Yakub, "Medical imaging using capacitive micromachined ultrasonic transducer array," *Ultrasonics*, Vol. 40, pp. 471-476, (2002)

[7] G. Percin, L. Levin, and B. T. Khuri-Yakub, "Controlled ink-jet printing and deposition of organic polymers and solid-particles," *Applied Physics Letters*, Vol. 73, No. 16, pp. 2375-2377, (1998)

[8] G. Percin, L. Levin, and B. T. Khuri-Yakub, "Piezoelectrically actuated droplet ejector," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 68, No. 12, pp. 4561-4563, (1997)

[9] 김기복, 안봉영, 김국진, 김영주, 박해원, 이승석, 박세일, "미세 가공된 정전용량형 초음파 센서(cMUT) 연구동향", *한국비파괴검사학회 · 대한기계학회 2002년도 초음파분과 학술대회 논문집*, pp. 267-274 (2002)

[10] G. Caliano, A. Caronti, M. Baruzzi, A. Rubini, A. Iula, R. Carotenuto, and M. Pappalardo, "PSpice modeling of capacitive microfabricated ultrasonic transducers," *Ultrasonics*, Vol. 40, pp. 449-455, (2002)

[11] A. Caronti, A. Iula, G. Caliano, M. Pappalardo, "An accurate model for capacitive micromachined ultrasonic transducers," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.* Vol. 49, No. 2, pp. 159-168, (2002)

[12] W. P. Mason, "Electromechanical Transducers and Wave Filters", NewYork : D. Van Nostrand, (1942)

[13] G. T. A. Kovacs, "Micromachined transducers sourcebook," McGraw-Hill, USA, (1998)

[14] M. Elwenspoek, and H. V. Jansen, "Silicon micromachining," Cambridge Press, UK, (1998)

[15] 이종덕, "실리콘 집적회로 공정기술," 대영사, (2000)