

### 1. 머리말

마이크로폰으로 사용할 수 있는 음향 센서에는 많은 종류가 있다. 대표적인 기존 센서 종류로 전자기형(moving-coil electrodynamic microphone), 용량형 (capacitive microphone), 압전형(piezoelectric microphone), 탄소형(carbon microphone) 등을 들 수 있는데, 각 종류에 따라 사용 용도가 다르고, 구현할 수 있는 정밀도에도 차이가 있다. 이 중 공학에서 요구하는 다양한 주파수 대역 및 분해능을 구현할 수 있는 센서로는 주로 용량형과 압전형이 사용되는데, 음장 해석이나 음향 holography, 그리고 정밀 계측 등의 분야에서 지급도 많이 활용되고 있다. 그러나 산업 전반의 기술 수준 발달에 따라 음향센서에 기대되는 성능도 더 높아지고 사양도 까다로워지고 있어, 종래의 마이크로폰과는 차별화된 수 있는 새로운 음향센서의 개발이 요구되고 있다. 이 글에서는 최근에 급격한 발전을 이룬 전자공학 기술과 반도체 공정기술에 의해 구현 가능해진 새로운 형태의 음향센서인 cMUT

\* E-mail : yrvong@knu.ac.kr

(capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer)를 소개하고자 한다.

cMUT란 용량형 음향센서의 일종으로서 그 기본 작동 개념은 이미 오래 전에 알려진 것으로서, 기존 용량형 센서의 그것과 별 차이점이 없다. 그러나 종래의 용량형 센서는 비교적 큰 크기의 단일 소자로 사용되어 왔고, 현재 사용되고 있는 정밀 마이크로폰의 대부분을 차지하는 것이다. 반면에 cMUT는 반도체 공정 기술을 그대로 사용하여 하나의 실리콘 기판위에 수천개 혹은 수만개의 미세 소자를 동시에 설치하여, 이들을 개별 혹은 배열 소자로 작동시킴으로써 종래에는 구현하기 어려웠던 다양한 기능을 용이하게 이룰 수 있다는 특징을 가진다. 반도체 공정 기술을 이용해 실리콘 마이크로폰을 만들 수 있다는 사실 또한 진작에 알려져 있어서, 예전에는 순수 반도체 공정 전문가들에 의해 시도가 되었고 실험적인 연구도 많이 수행된 바 있다. 그러나 음향학적인 깊은 이해 없이 실험적인 시도에 의한 연구에서 더 나아가, 최근에는 cMUT의 근본적인 작동 구조에 대한 연구가 이루어졌고 그에 따라 가정 영역용 마이크로폰을 포함하여, 비파괴 검사용, 수중 음향 계측용,

의료용, 자동화용 등으로 급격히 그 응용 분야가 넓혀지고 있다.

cMUT의 가장 큰 특징은 마이크로 소자로의 구현이 매우 쉽고, 따라서 배열센서로 만들기가 쉽고, 감도가 기존 센서들에 비해 못하지 않고, 특히 작동 주파수 대역이 매우 넓어서 종래에는 주파수 대역별로 별도의 센서를 사용해야 했지만 하나의 cMUT로 거의 DC에서부터 몇 MHz 대역까지의 넓은 주파수 대역을 한꺼번에 측정할 수 있고, 하나의 실리콘 기판 위에 구동/측정 회로를 동시에 설치하여 전체 마이크로폰 장치를 on-chip화 할 수 있다는 장점들을 가진다.<sup>(1)</sup> 이에 관한 연구는 전세계적으로 음향, 초음파 관련 유수의 기관들에서 이루어지고 있다.<sup>(2-13)</sup>

## 2. cMUT의 구조 및 작동 원리

그림 1은 cMUT의 전형적인 구조를 보이고 있다. 실리콘 기판 상에  $\text{Si}_3\text{N}_4$  박막을 증착하고, 박막과 실리콘 기판 사이에 작은 공극을 애칭하여, 전체적으로 커패시터로 작동하는 구조이다. 박막 상부에는 Pt나 Ag, Al 같은 재료로 별도의 전극을 증착시키고, 하부 전극으로는 보통 이온 주입이된 실리콘 기판 하부에 금속 전극을 설치하여 사용한다. 그림 2는 이 개략도 대로 제작된 cMUT의 사진인데, 각 소자의 모양이나 그

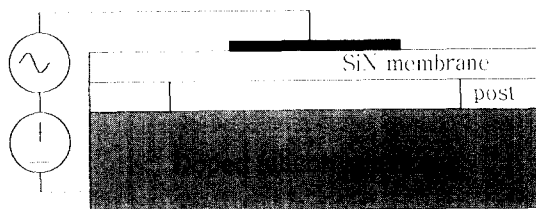


그림 1 cMUT의 개략도

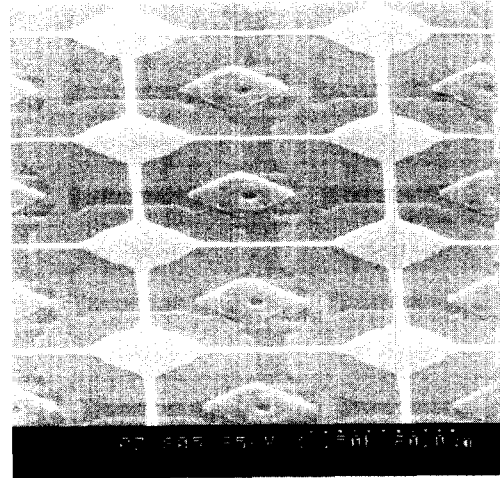


그림 2 제작된 cMUT 배열 센서

배열 상태는 필요에 따라 다양하게 구현할 수 있다. cMUT의 기본 작동 구조식은 식 (1)과 같다.

$$Q = \frac{\epsilon A}{l} V \quad (1)$$

여기서  $Q$ 는 커패시터 내에 축적되는 전하량이고,  $\epsilon$ 는 유전율,  $A$ 는 공극의 횡단면적, 그리고  $l$ 는 공극의 두께이다. 인가되는 전압인  $V$ 는 다시 DC 성분과 AC 성분으로 나누는데, DC 전압은 박막의 초기 변형을 발생시키고, AC 전압은 그 크기에 따라 박막의 추가적인 변형을 야기시켜 전기 신호의 동적 특성에 따라 다양한 음향 송수신자로서의 기능을 수행할 수 있도록 한다. cMUT을 마이크로폰으로 사용할 경우, DC 전압이 가해진 상태에서 외부로부터 인가되는 음압에 의해 박막이 변형되면 그에 따라 커패시터 내에 축적된 전하량  $Q$ 에 변화가 생기고, 이는 전류 혹은 전압 형태로 측정되어 인가된 음압에 거의 선형적인 반응을 나타내게 된다.

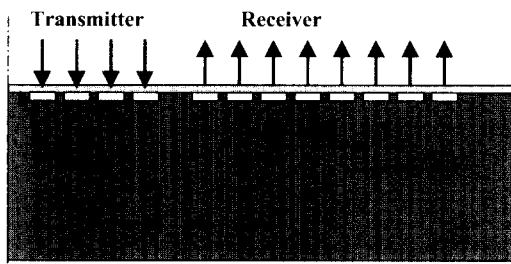


그림 3 cMUT 배열 센서의 구조 및 규격

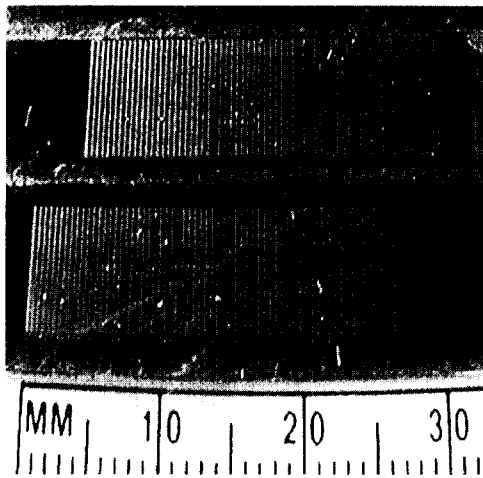


그림 4 선형 cMUT 배열 센서

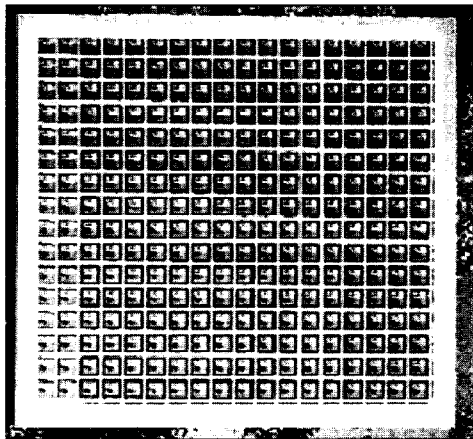


그림 5 2차원 cMUT 배열 센서

이러한 구조의 cMUT는 반도체 공정을 이용하는 만큼 원하는 만큼 얼마든지 작게 만들 수 있는데, 그림 3은 그림 2에 나타난 배열형 cMUT 센서의 규격을 보인다. 또한 반도체 소자의 특성 상 동일 혹은 유사한 구조의 소자를 다량으로 반복 설치하기가 매우 용이한데, 그림 4는 64개의 cMUT 채널을 하나의 배열 센서로 구현한 사진이다. 사진에서 긴 줄로 보이는 각 채널은 다시 그림 1에 보인 개별 소자들을 32개씩 1열로 병렬 연결한 구조를 가진다. 이러한 선형 배열 센서에서 더 나아가 2차원적인 배열 센서로도 쉽게 구현할 수 있는데, 그림 5는 제작된 평면 배열센서의 사진이다. 각종 산업용, 그리고 의료용 정밀 계측이나 음향 holography를 위해서는 많은 수의 음향 센서를 좁은 면적에 설치하고, 각 센서들이 독립적 혹은 병렬 연결되어 사용되어야 하는데, 기존 음향센서들에 비해 cMUT는 그림

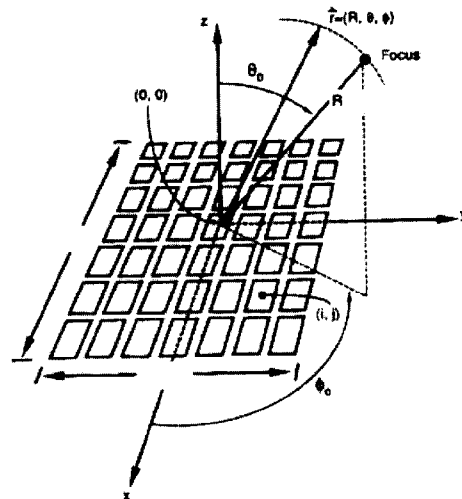


그림 6 2차원 cMUT 배열 센서에 의한 beam steering 및 dynamic focusing

에 나타난 바와 같이 그러한 구조를 매우 쉽게 구현할 수 있다. 즉 다음 절에서도 설명을 하겠지만 cMUT는 개별 소자로서도 기존 센서들에 뒤떨어지지 않는 성능을 나타내지만, 특히 배열 센서로서는 탁월한 기능을 수행할 수 있어서, 그림 6에 나타난 바와 같은 beam steering이나 dynamic focusing을 매우 용이하게 구현할 수 있고, 따라서 3차원 음장해석이나 영상 구현에 가장 적합한 구조를 가진다.

### 3. cMUT의 특성

cMUT의 설계와 해석에는 여타 다른 음향센서에서와 마찬가지로 이론적인 파동 방정식 해석, 등가회로 해석, 그리고 유한 요소법이나 경계 요소법 같은 수치해석법들이 골고루 사용된다. 간단한 구조로 인해 파동 방정식이나 등가회로에 의한 해석 결과와 실험 결과가 비교적 잘 일치하는 편이나, 그림 4와 5에 나타난 배열형 센서의 해석을 위해서는 수치해석적 방법이 자주 이용된다. 그림 7은 cMUT의 전형적인 구동 방식을 도식화한 것이다. 그림에 나타난 구조를 전기-기계 등가회로로 변환하면 그림 8과 같다. 그림에 나타난 간단한 등가회로에 의해 cMUT의 기본적인 성능을 상당 수준 정확히 해석하여 설계에 반영할 수 있는데, 이

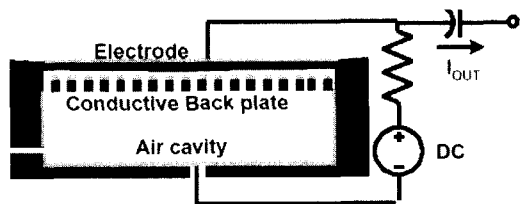
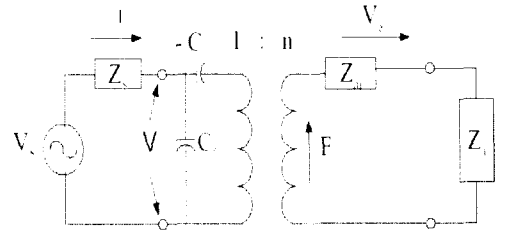


그림 7 cMUT의 작동 원리



$$Z_s = i\omega\rho l \left[ \frac{ak_k(k, J, (k, a)M(k, a)) - i, J(k, a)M(k, a)}{ak_k(k, J, (k, a)M(k, a)) + i, J(k, a)M(k, a)} - 2k_s - k_s' M(k, a)M(k, a) \right]$$

$$k_s = \sqrt{\frac{\sqrt{d^2 + 4\omega^2} - d}{2}}, \quad c = \frac{\omega_s + iV^2}{12(1 - \sigma^2)}$$

$$k_s' = \sqrt{\frac{\sqrt{d^2 + 4\omega^2} + d}{2}}, \quad d = \frac{l}{\rho}$$

$$n = l' \frac{\epsilon_0 \epsilon^2 S}{(\epsilon_0 l_s + \epsilon l_a)^2}$$

그림 8 cMUT의 Mason 등가회로

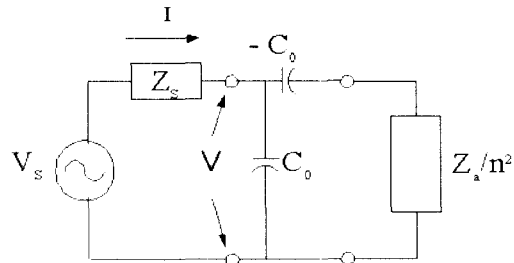


그림 9 cMUT의 단순화된 등가회로

구조를 극단적으로 간단화 하면 그림 9와 같이 된다. 그림 9에서 센서에 인가되는 방사 임피던스인  $Z_a$ 의 정량적인 값은 방사 매질에 따라 다르겠지만, 대부분의 경우 그 값은 저항 성분이 우세한 실수 값으로 주어진다. 따라서 회로 내의 리액턴스 성분은 cMUT에 의한 커패시턴스 밖에 없어서 구조적인 공진 현상은 나타날 수가 없다. 비교를 위하여 현재 고정밀 마이크로폰으로 널리 사용되고 있는 압전형 음향센서의 KLM 등가회로를 보이면 그림 10과 같은데, 여기서 회로 양단에 연결될 방사 임피던스는 저항 성분만 가진다고 하더라도, 전송선로 요소인  $Z_{11}$ ,  $Z_{12}$ 와  $Z_{22}$ 가 리액턴스로 나타나

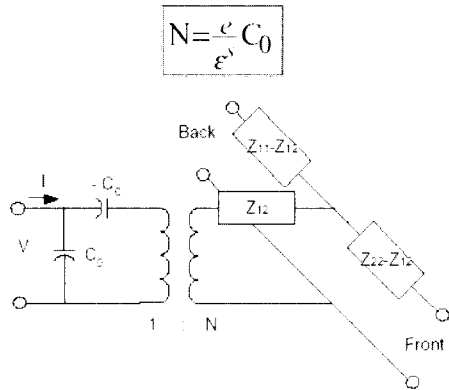


그림 10 압전형 센서의 KLM 등가회로

므로 센서는 필연적으로 구조적인 공진 특성을 보이게 된다. 따라서 압전형 센서는 공진 특성에 따라 특정 주파수에서는 높은 감도를 나타내나, 공진 주파수를 벗어난 대역에서는 감도가 급격히 저하되어 사용이 어렵게 되며, 이러한 특성은 정도의 차이는 있으나 기존 전자기형이나 용량형 센서들에서도 동일하게 나타나는 현상이다. 반면에 cMUT는 특별한 공진 주파수가 없으므로 DC부터 이론적으로는 상한선 없이 모든 주파수 영역에 걸쳐 거의 동일한 감도를 나타낼 수가 있다. 물론 실제 사용 환경에서는 연결되는 전선 등에 의한 기생 리액턴스에 의해 공진 특성을 나타내나 cMUT의 작은 규격에 따른 높은 커패시턴스에 의해 공진점이 보통 수 MHz 대역에서 나타나고, 필요에 따라 얼마든지 높일 수가 있으므로 가청영역 혹은 낮은 초음파 주파수 대역의 마이크로폰으로 사용하기에는 전혀 문제가 되지 않는다. 기존 용량형 마이크로폰들도 기본적으로는 동일한 특성을 나타내어야 하나 큰 규격으로 인해 커패시턴스가 작고, 따라서 기생 리액턴스에 의한 공진 주파수가 매

우 낮게 생성된다는 점에서 cMUT와는 확실히 구분된다.

그림 11은 그림 3에 나타난 규격의 센서를 제작해 실험적으로 측정한 센서 임피던스 스펙트럼인데, 방사 저항이 2.5 MHz 부근에서야 돌출되나 품질계수가 낮고, 그 전후단에서는 매우 평탄한 주파수 특성을 보이므로 앞에서 언급한 광대역 특성을 확인시켜준다. 그림 12는 제작된 센서에 외부로

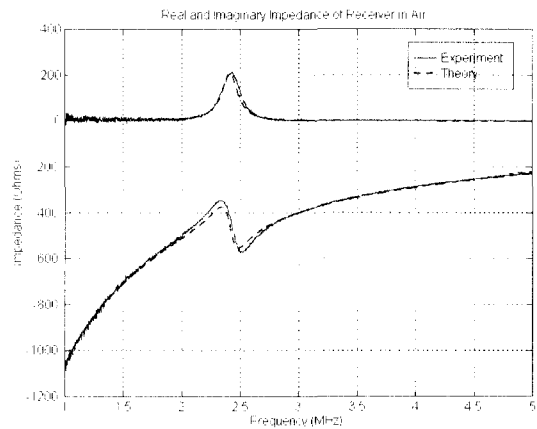


그림 11 cMUT의 임피던스 스펙트럼

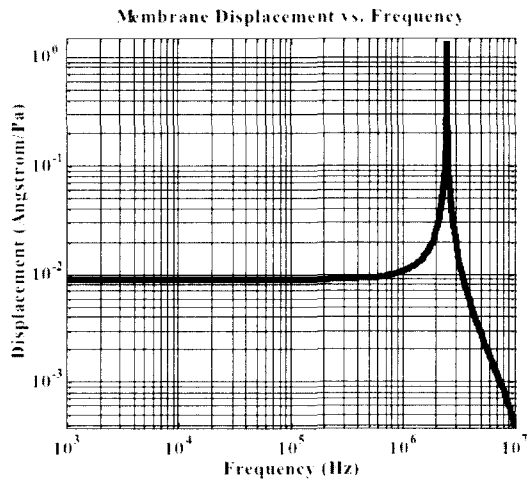


그림 12 cMUT의 감도 스펙트럼

부터 평면 음향파가 입사되었을 때  $\text{Si}_3\text{N}_4$  박막의 변위를 직접 laser interferometer로 측정된 결과인데, 예측한 바와 같이 DC부터 1 MHz 까지 거의 수평선에 가까운 주파수 특성을 보여주고 있다. 고조파 성분 없이 2 MHz 부근에서 나타나는 단일 공진 특성은 측정회로 단에서 적절한 주파수 보상을 한다면 이마저도 충분히 평탄화할 수 있는 것이다. 단, cMUT의 미소한 크기로 인해 외부 음압에 의한  $\text{Si}_3\text{N}_4$  박막의 변위량이 매우 작으므로, 측정시 충분한 신호 안정도와 신호대 잡음비를 얻기 위해서는 입력단의 임피던스가 매우 높은 측정회로를 사용해야 한다는 제한은 따른다. 이상과 같은 cMUT의 특성을 확인하기 위해 위의 cMUT 소자와 역시 공진 주파수가 2.5 MHz로 같은 압전형 음향센서를 동일한 측정 환경에 두고, 외부에서 평면 음향파를 입사하였을 때 각 센서가 보이는 감도를 비교해보면 그림 13과 같이 나타난다. 여기서 cMUT의 감도 특성은 고 임피던스 주파수 보상회로를 부착한 후의 특성이다. 압전형 센서는 공진주파

수 수위에서만 높은 감도를 보이며 고조파 성분의 영향이 심하게 나타나는 반면, cMUT는 측정 주파수대역 전 영역에 걸쳐 심한 기복을 보이지 않는 광대역 특성을 보이고 있다.

#### 4. 맺음말

기존 개별소자형 음향센서와 정밀 소자로서 많이 사용되는 압전형 센서의 단점을 극복할 수 있는 새로운 마이크로폰으로 최근 각광을 받고 있는 cMUT에 대해 간략히 알아보았다. cMUT에 관한 실험적 연구는 이미 오래전부터 시도되었고, 휴대폰용 마이크로폰과 같은 기본적인 용도로는 일부 상용화도 이루어진 바 있다. 그러나 고정밀 음향 해석이나 정밀 계측용으로 cMUT가 채택되기 위해서는 보다 깊이 있는 구조적인 이해와 성능 개선이 이루어질 필요가 있기에, 최근 이에 관한 체계적인 연구가 세계적으로 이루어지고 있다. 향후 더 연구가 이루어질 필요가 있는 부분들로는, 많은 미세소자들을 좁은 면적에 설치하다보면 각 소자들 간의 간섭현상이 심해져서 신호 대 잡음비가 저하되는 현상이 나타나는데 이 간섭현상의 물리적 근원 해석과 그에 따른 저감대책, 실리콘 기판 위에 설치한 세라믹 박막과 전극들의 강인성을 증대시켜서 열악한 사용환경에도 적용할 수 있도록 하는 구조적 개선 및 패키징 방안, 평면 배열 cMUT 센서의 경우 소자가 많게는 수 만개가 좁은 면적에 설치되는데 이들 소자들의 적절한 전기적 결선 방안 등의 개발이 연구과제로 꼽히고 있다. 현재도 cMUT를 계측용, 비파괴 검사용, 의료용, 통신용 등으로 적용하려는 다양

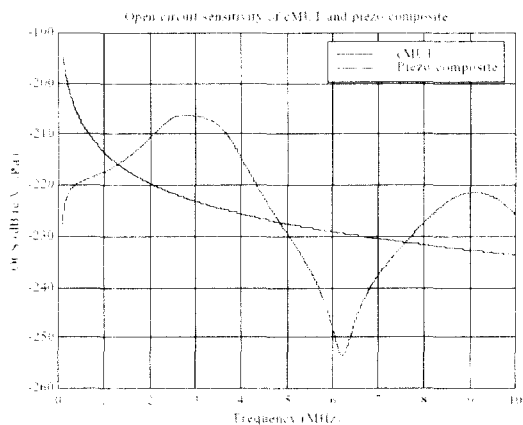


그림 13 cMUT 와 압전형 음향센서의 감도 비교

한 시도가 이루어지고 있지만, 이상의 기술적인 사항들에 대한 연구 결과가 가시화 되면 응용분야가 기하급수적으로 늘어날 것으로 기대된다.

참고문헌

(1) Ladabaum, I., Jin, X. C., Soh, H. T., Atalar, A. 1998, and Khuri-Yakub, B. T. "Surface Micromachined Capacitive Ultrasonic Transducers," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 45, No. 3, p. 678.

(2) Suzuki, K., Higuchi, K. and Tanigawa, H. 1998, "A Silicon Electrostatic Ultrasonic Transducer, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics," and Frequency Control, Vol. 38, No. 6, p. 620.

(3) Haller M. and Khuri Yakub, B. T. 1994, "A Surface Micromachined Electrostatic Ultrasonic Air Transducer," Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium, p. 1241.

(4) Schindel, D. W., Hutchins, D. A., Zoou, L. and Sayer, M. 1995, "The Design and Characterization of Micromachined Air Coupled Capacitance Transducers", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 42, No. 1, p. 42.

(5) Bashford, A. G., Schindel, D. W. and Hutchins, D. A. 1998, "Micromachined Ultrasonic Capacitance Transducers For Immersion Applications, IEEE Transactions on Ultrasonics", Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 45, No. 2, p. 367.

(6) Kelly, S. P., Farlow, R. and Hayward, G. 1996, "Applications of Through-air Ultrasound for Rapid NDE Scanning in the Aerospace

Industry, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control", Vol. 43, No. 4, p. 581.

(7) Kapels, H., Scheiter, T., Hierold, C., Aigner, R. and Binder, J. 1998, "Cavity Pressure Determination and Leakage Testing for Sealed Surface Micromachined Membranes : a Novel On-wafer Test Method", Proceedings of the Eleventh Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, p. 550.

(8) Caronti, A., Caliano, G., Iula, A. and Pappalardo, M. 2000, "Electrical Impedance Mismatch in Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers, IEEE Ultrasonics Symposium.

(9) Larson, J. D. 1981, "Non ideal Radiators in Phased Array Transducers, Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium, p. 673.

(10) Jin, X. C., Degeretekin, F. L., Calmes, S., Zhang, X. J., Ladabaum, I. and Khuri-Yakub, B. T. 1998, "Micromachined Capacitive Transducer Arrays for Medical Ultrasound Imaging, Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium", p. 1877.

(11) Degeretekin, F. L., Atalar, A. and Khuri-Yakub, B. T. 1996, "Single Mode Lamb Wave Excitation in Thin Plates by Hertzian Contacts", Applied Physics Letters, Vol. 69, No. 2, p. 146, Jul. 1996.

(12) Roh, Y. R. and Khuri-Yakub, B. T. "Finite Element Analysis of Underwater Capacitor Micromachined Ultrasonic Transducers, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control (in press).

(13) Roh, Y. R., Lee, S. S. and Khuri-Yakub, B. T. 2001, "Finite Element Analysis of the Cross Talk in Micromachined Ultrasonic Transducers, Ultrasonics International, Delft, the Netherlands.