

물성변화에 따른 압전형 마이크로스피커의 특성

Characteristics of Piezoelectric Microspeakers according to the Material Properties

정경식², 조희찬², 이승환^{1,a}
(Kyong-Shik Jeong², Hee-Chan Cho², and Seung-Hwan Yi^{1,a})

Abstract

This paper reports the characteristics of piezoelectric microspeakers that are audible in open air with high quality piezoelectric AlN thin film according to the materials properties. When we use a tensile-stressed silicon nitride diaphragm as a supporting layer, the Sound Pressure Level (SPL) is relatively small and constant at low frequency region and shows about 70 dB at 10 kHz. However, in case of a compressively stressed composite diaphragm, the SPL of the fabricated microspeakers shows higher output pressure than those of a tensile-stressed diaphragm. It produces more than 66 dB from 100 Hz to 15 kHz and the highest SPL is about 100 dB at 9.3 kHz with 20 V_{peak-to-peak} sinusoidal input biases and at 10 mm distances from the fabricated microspeakers to the reference microphone. From the experimental results, it is superior to have a compressively composite diaphragm in order to produce a high SPL in piezoelectric microspeaker.

Key Words : Piezoelectric microspeaker, Sound pressure level, Composite residual stress, AlN thin film

1. 서론

최근 MEMS (MicroElectroMechanical Systems) 기술을 이용한 음향소자의 연구개발이 가속화되어 마이크로폰의 경우, 실리콘 용량형 (silicon capacitive) 구조가 이동통신 단말기에 적용되고 있으나, MEMS 기술에 의한 마이크로스피커는 아직 연구 단계에 있다. 압전형 MEMS 마이크로스피커는 구조가 간단할 뿐만 아니라[1], 구동전압이 CMOS 기술을 이용한 스피커[2]보다 낮고 (20 V_{peak-to-peak} 이하), 스피커 구동을 위한 압전 박막 (ZnO, PZT, AlN 등)에 대한 물성[3-5]이 비교적 잘 알려져 있어 차세대 박막형 스피커로서의 관심이 증가되고 있다.

MEMS 기술을 이용한 압전 음향소자(piezoelectric acoustic devices)에 대한 연구는 대부분 ZnO 박막을 사용하여 시도되었으나[3], 최근에 PZT를 이용한 연구[4]도 진행되고 있고, AlN 박막을 이용한 FBAR(Film Bulk Acoustic Resonator)가 제일 먼저 상용화되어 이동통신 단말기에 적용됨으로 인해 압전소자를 위한 AlN 박막 물성[5,6]과 이를 MEMS 소자로서의 응용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

따라서 본 논문에서는 고품질의 압전 AlN 박막을 이용한 마이크로스피커를 제작하고, 압전효과를 발생시키는 전극의 구조와 다이어그램의 잔류응력에 따른 압전 마이크로스피커의 음압수준에 미치는 영향을 파악함으로써 그 성능을 향상시킬 수 있는 방법을 모색하고자 하였다.

2. 본론

2.1 압전형 마이크로스피커의 제작

그림 1은 압전형 마이크로스피커의 공정 순서도

1. 충주대학교 기계공학과/친환경에너지 부품소재센터 (충북 충주시 대학로 72 번지)
2. 충주대학교 기계공학과
a. Corresponding Author : isaac_yi@cju.ac.kr
접수일자 : 2008. 4. 7
1차 심사 : 2008. 5. 20
심사완료 : 2008. 5. 24

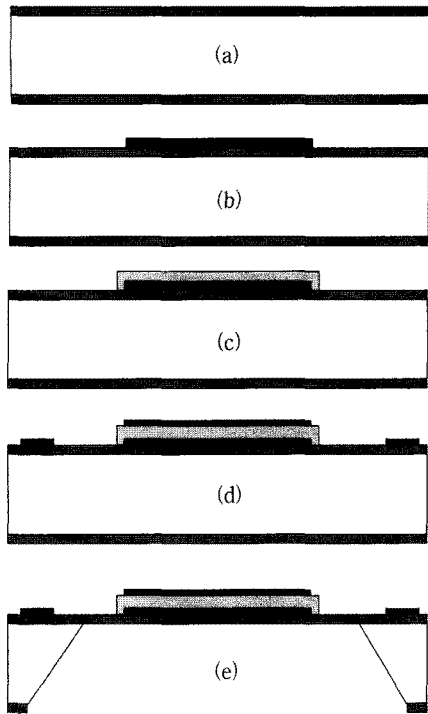


그림 1. 압전형 마이크로스피커의 제작 공정도.
Fig. 1. Fabrication process steps of piezoelectric microspeakers.

를 나타낸 것이다. 양면 연마된 4 인치 (100) 실리콘 웨이퍼의 세척 후, 온도 830 °C, 압력 20 mTorr에서 Si₂H₆과 NH₃를 사용하여 저 응력의 실리콘 질화막 (Low-stressed SiN)을 1 μm 증착하였으며(a), 마이크로스피커의 제작 과정에서 증착되는 각 박막의 잔류응력을 측정하기 위하여 웨이퍼 가장자리에 다이아몬드 연필을 사용하여 변형을 기록하였다.

하부 및 상부의 전극물질로 Mo/Ti를 각각 2000 Å/200 Å 증착 후 첫 번째 마스크를 사용하여 포토레지스트 패터닝을 실시하였으며, RIE (Reactive Ion Etching) 장비를 사용하여 전극부 이외의 Mo/Ti 이중층을 식각 하였다(b). 압전 박막으로 사용하게 된 AlN은 R.F. magnetron sputtering 장비를 사용하여 Ar-N₂ 혼합가스 (가스비=1:4)와 R.F. 전력 70 W, 척 높이 3.1인치에서 AlN를 0.5 μm 증착하였고, 두 번째 마스크를 사용하여 패터닝 후, 하부 전극의 접촉부를 노출시키기 위하여 RIE 장비를 이용하여 AlN 박막을 식각하였다(c). 한편

상부 전극은 하부전극의 형성과 동일한 공정을 수행한 후, 세 번째 마스크를 사용하여 패터닝 및 식각과정을 통하여 상부 전극을 완성하였다. 실리콘 식각 후 형성되는 다이어프램의 기계적 특성을 보완하기 위하여 Parylene 증착 장비를 사용하여 웨이퍼의 전면에 약 1 μm의 Parylene-C를 증착 하였다. Parylene-C의 패터닝을 통한 상부와 하부전극 접촉부를 확보하기 위한 과정으로 Al 박막을 E-Beam Evaporator 장비를 이용하여 1시간 동안 약 2,000 Å 증착한 뒤, 포토레지스트 패터닝 및 Al 습식 식각 과정을 통하여 접촉부 위의 Parylene-C를 노출시킨 다음, 산소 플라즈마내에서 Ashing을 통하여 노출된 Parylene-C를 제거함으로써 전극부를 형성을 완료하였다. 이때 패터링 Ashing을 위해 사용된 Al 박막은 KOH: K₃Fe(CN)₆: H₂O (1 g: 10g: 100 ml) 용액을 이용하여 제거하였다(d). Backside 마스크를 이용한 노광공정을 통하여 웨이퍼 이면의 실리콘 질화막의 패터닝 및 RIE 식각을 통해 실리콘 제거 영역을 확보하였다. 80 °C, 45 wt% KOH 용액 내에서 실리콘을 식각하는 과정에서 웨이퍼 전면을 보호하기 위한 일환으로 포토레지스트의 코팅과 보호막 처리를 통해 웨이퍼를 보호한 다음 실리콘을 식각하고, 최종적으로 웨이퍼의 세척단계를 거침으로써 압전형 마이크로스피커의 제작 공정을 완료하였다(e).

2.2 압전형 마이크로스피커의 음압수준(Sound pressure level) 측정

그림 2는 본 실험에서 사용된 음압측정을 위한 블록다이어그램을 나타낸 것이다. 제시된 바와 같이 주 컴퓨터에 내장된 Lab-view 프로그램에 의하여 NI DAQ Board에서는 사인파의 출력 전압 (1.25 V_{Peak-to-Peak})을 인가 주파수에 따라 출력하고, 출력된 신호는 전력증폭기(Power Amplifier)를 통하여 20 V_{peak-to-peak}로 증폭된 다음, Wafer probe station위에 있는 압전 마이크로스피커에 인가하였다. 이때 인가되는 전압의 피크 치와 주파수는 실시간으로 측정되어 NI DAQ 보드에 귀환시킴으로써 입력전압과 주파수를 확인하였다. 또한 본 연구를 통하여 제작된 압전형 마이크로스피커와 기준 마이크로폰 (B&K Type2669 & 4192L)은 약10 mm 간격을 두고 위치시켰으며, 100 Hz에서 15 kHz까지의 인가 주파수에 따른 음압 변화를 기준 마이크로폰으로 측정하여 컴퓨터에 입력 저장하게 함으로써 측정 완료 후 특성평가 자료로 활용하였다. 본 측정에 사용된 마이크로폰의 감도는 1 V/Pa

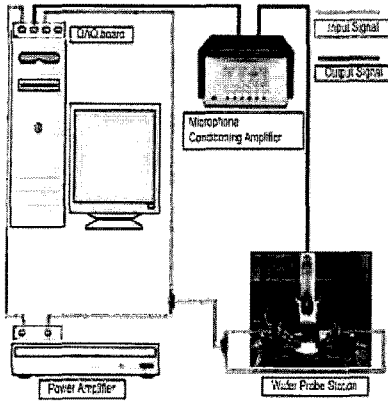


그림 2. 마이크로스피커 측정 시스템의 블록다이어그램.

Fig. 2. Block diagram of microspeaker testing system.

(1 kHz에서 기준음압에 대한 전압특성으로 1 Pa의 음압이 인가되는 경우, 94 dB를 나타냄.)을 갖고 있었으며, 측정 변환된 음압신호는 실효값으로 환산한 다음, 아래의 식 (1)을 이용하여 제작된 압전형 마이크로스피커에서 토출되는 음압을 계산하였다.

$$SPL = 20 \cdot \log \left(\frac{P_{cal}}{P_{ref}} \right) \quad (1)$$

단, P_{cal} : 기준 마이크로폰에서 측정·계산된 마이크로스피커의 음압 [Pa]

P_{ref} : 기준 음압 (2×10^{-5} [Pa])

2.3 증착 박막의 잔류응력 측정

본 연구에서는 마이크로스피커 제작에 사용된 각종 박막의 잔류 응력을 Stoney 방정식[7]으로 알려진 식 (2)에 의하여 측정·계산하였다.

$$\sigma = \frac{E_s \cdot t_s^2}{6(1-\nu_s)t_f} \left\{ \frac{1}{R_s} - \frac{1}{R_f} \right\} \quad (2)$$

$$E_s = 1.301 \times 10^5 (MPa), \nu_s = 0.279$$

단, t_s : 웨이퍼의 두께(μm), t_f : 기판과 증착막 두께(μm)

R_s : 하부 기판의 곡률반경(m), R_f : 박막을 포함한 기판의 곡률반경(m)

E_s : 실리콘의 Young's modulus

압전형 마이크로스피커의 제작에 사용된 각종 박막의 잔류 응력의 측정 결과 (다이어프램의 전체 영역에 균일하게 존재하는 박막들의 잔류응력 측정결과), 본 연구에서 사용된 실리콘 질화막은 LPCVD 장비 내부에서 증착 시 웨이퍼가 놓여진 위치에 따라 차이가 있음이 확인되었으며, 가스가 유입되는 쪽에서는 약 -20 MPa의 잔류응력을 갖고 있었으며, 마지막 웨이퍼가 있는 곳에서는 약 +20 MPa의 잔류응력을 갖고 있는 것으로 측정되었다. 또한 본 연구 과정에서 사용한 압전형 박막인 AIN는 약 -100 MPa, 패럴린(Parylene)은 +20 MPa의 값을 갖고 있음이 측정을 통하여 확인되었다.

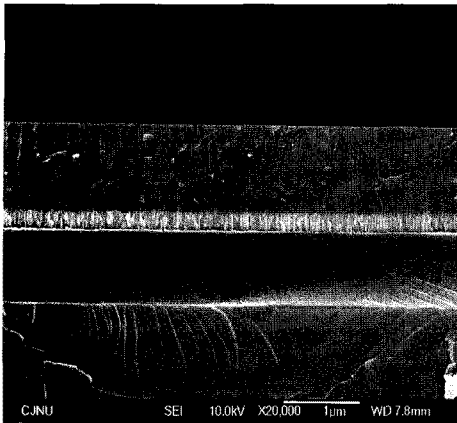
3. 결과 및 고찰

3.1 AIN 박막의 구조적 특성분석

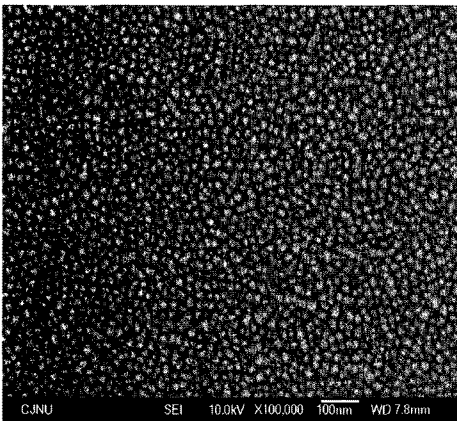
그림 3은 Mo/Ti 전극에 증착된 AIN 박막의 구조적 특성 분석 결과를 나타낸 것이다. 그림 3의 (a)는 Mo/Ti 이중막 위에 증착된 압전 박막의 단면 SEM 사진을 나타낸 것으로, 증착된 AIN 박막은 기판에 수직인 주상 구조 (columnar structure)를 갖고 있음을 볼 수 있다. 그림 3(b)는 표면 SEM 사진을 나타낸 것으로, 결정립의 크기는 직경 약 50 nm이하의 미세구조를 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 그림 3(a)와 (b)에서 볼 수 있듯이 증착된 AIN 박막은 아주 밀도가 높은 상태에 있는 것을 단면과 표면 SEM 사진을 통해 볼 수 있다. 그림 3(c)는 Mo/Ti 이중막 위에 증착된 AIN 박막의 XRD 분석결과를 나타낸 것이다. 증착된 AIN 박막의 2 theta가 약 36도에서 기판에 수직인 AIN(002) 방향[6]을 갖는 박막이 증착되어 있음을 볼 수 있고, 측정된 AIN(002) 방향의 XRD 피크의 강도(intensity)가 큰 것으로 보아 압전 특성이 우수할 것[8]으로 판단된다.

3.2 마이크로스피커 특성 실험결과

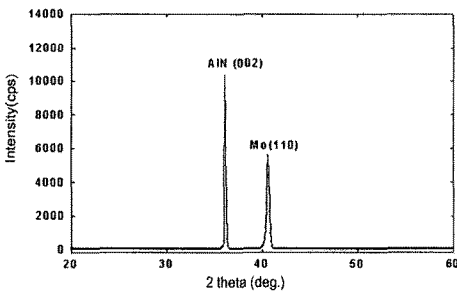
그림 4는 AIN박막으로 제작된 압전형 마이크로스피커를 나타낸 것이다. 그림 4(a)는 4인치 실리콘 웨이퍼에 제작된 마이크로스피커를 나타낸 것으로 본 연구에서는 이들 중 실리콘 웨이퍼의 잔류응력과 전극구조가 갖는 특성을 살펴보기 위하여 일부의 시료에 대해서 그 결과를 제시하고자 한다. 또한 그림 4(b)는 인장응력을 지닌 실리콘 질화막에 제작된 원형전극 구조를 갖는 시료를 나타낸 것이며(시료 #7_B8), 그림 4(c)와 (d)는 실리콘



(a)



(b)



(c)

그림 3. 질화알루미늄 박막의 구조분석: (a) SEM 단면사진, (b) 표면 SEM 사진, (b) XRD 스펙트럼.

Fig. 3. Structural analysis results of AlN film: (a) cross-sectional SEM photo, (b) surface SEM photo, and (c) XRD pattern.

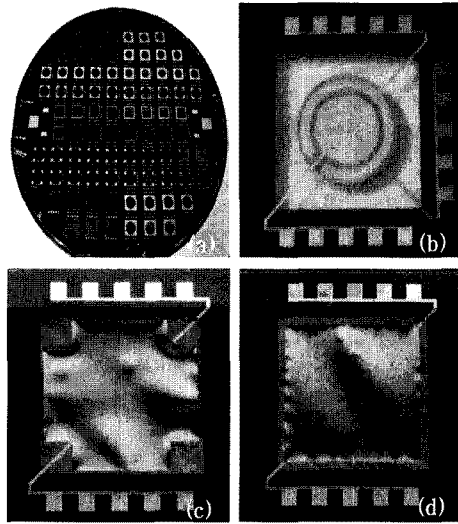


그림 4. AlN박막으로 제작된 압전형 마이크로스피커: (a) 4인치 실리콘 웨이퍼에 제작된 마이크로스피커, (b) 시료 #7_B8, (c) 시료 #12_AIJ, (d) #12_C1.

Fig. 4. Piezoelectric microspeakers fabricated with AlN thin film: (a) microspeakers fabricated onto 4 inches silicon substrate, (b) sample #7_B8, (c) sample #12_AIJ, and (d) sample # 12_C1.

질화막의 잔류응력이 압축성을 갖는 웨이퍼에 제작된 마이크로스피커를 각각 제시한 것이다(그림 4(c) #12_AIJ 와 그림 4(d) #12_C1). 그림 4(c)와 (d)에 제시된 바와 같이 실리콘 질화막의 잔류응력이 압축상태에 있는 경우, 제작된 압전형 마이크로스피커의 능동영역(Mo/Ti 전극들 사이에 압전 AlN 박막이 존재하는 영역)은 주름진(wrinkled) 상태를 나타내고 있음을 알 수 있었다.

그림 5는 정현파 입력 주파수에 따른 제작된 압전형 마이크로스피커의 음압수준(Sound Pressure Level)을 나타낸 것이다. 그림 5(a)에서 보는 것과 같이 압전형 마이크로스피커의 음압수준은 전극의 구조뿐만 아니라 실리콘 질화막의 잔류응력에 따라 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 실리콘 질화막의 잔류응력이 인장응력을 나타낼 때, 음압수준은 인가 주파수 영역(100 Hz ~ 15 kHz)에서 매우 낮게 나타났다. 특히 저주파 (100 Hz에서 1 kHz) 영역에서의 음압수준은 거의 일정한 값을 나타내었으며, 원형 전극구조보다 전극면적이 넓은

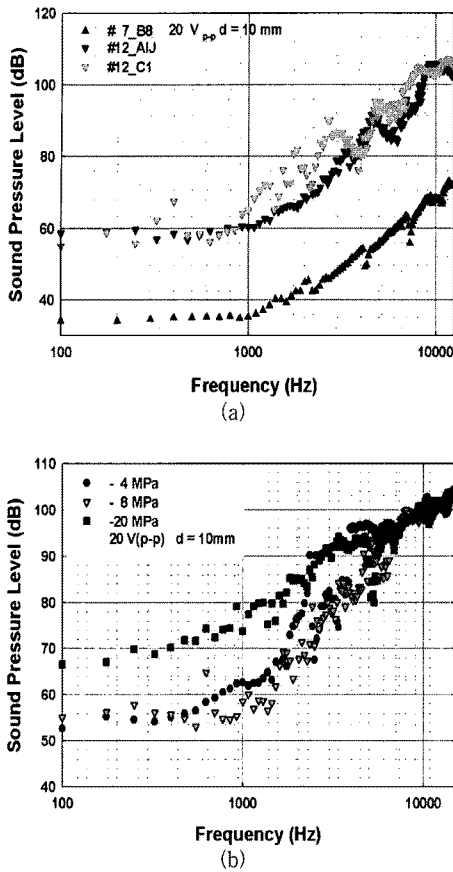


그림 5. 제작된 압전형 마이크로스피커의 주파수 응답특성: (a) 전극구조와 잔류응력 의존성, (b) 정사각형 전극 마이크로스피커의 복합 잔류응력 의존성.

Fig. 5. Frequency response characteristics of fabricated piezoelectric microspeakers: (a) dependence of electrode structures and residual stresses, (b) dependence of composite residual stresses on the microspeaker with square electrode.

십자형 구조가 큰 음압수준을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나 실리콘 질화막의 잔류응력이 압축 응력을 나타낼 때 마이크로스피커의 음압은 전체 적으로 더 높은 출력을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 즉 다이어프램이 압축응력을 지니고 있는 마이크로스피커의 경우(그림 4(d) #12C_1) 인장 응력을 갖는 마이크로스피커와 비교했을 때 약 1.5 배 큰 음압수준을 나타내고 있음이 측정되었다.

따라서 다이어프램의 잔류응력은 높은 음압의 압 전형 마이크로스피커를 제작하기 위해 매우 중요한 요소임을 확인할 수 있다.

한편 그림 5(b)는 각기 다른 잔류응력을 지닌 실리콘 질화막위에 제작된 압전형 마이크로스피커의 음압수준을 나타낸 것이다. 본 연구에서 사용된 복합 다이어프램(실리콘 질화막, AlN 박막, Parylene-C 박막을 구성된 복합박막)의 전체 잔류 응력이 -4 MPa에서 -20 MPa로 변화될 때, 정사 각형 전극구조를 갖는 마이크로스피커의 음압수준 측정결과를 보여주는 것이다. 그림 5(b)를 통해 확 인할 수 있듯이, 복합 다이어프램의 잔류응력이 압 축성으로 그 값이 커질수록 음압수준은 더 증가됨 을 알 수 있다. 복합 다이어프램의 잔류응력이 -20 MPa를 지니고 있는 마이크로스피커의 경우, 입력 전압이 20 V_{peak-to-peak} 일때 음압수준은 100 Hz에서 66 dB, 1 kHz에서 72 dB까지 증가하였으며, 9.3 kHz에서 100 dB 이상 증가함을 볼 수 있었다.

본 실험을 통하여 압전형 마이크로스피커는 초 기 다이어프램의 잔류응력, 압전효과를 발생하는 전극의 구조 및 복합 다이어프램의 잔류응력에 따 라 음압수준에 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 복합 다이어프램의 잔류응력이 인장상태인 경우(다 이어프램이 평평한 양상을 나타내는 그림 4(b)와 같은 구조), 저주파에서의 음압수준은 거의 일정한 상태를 나타내다가 주파수가 증가함에 따라 1 kHz 이상부터 음압수준이 증가하는 것을 나타내었는데, 이는 인가 주파수가 복합 다이어프램의 공진주파 수에 접근하기 때문인 것으로 사료된다. 한편 복합 다이어프램의 잔류응력이 압축성으로 증가함에 따 라 동일 전압에서 발생하는 음압수준이 향상되는 것은 동일한 인가전압에서 복합 다이어프램이 압 축상태로 존재함에 따라, 실리콘 제거 후, 복합 다 이어프램이 주름진 구조(wrinkled structure)를 지 니고, 이에 따라 복합 다이어프램이 인장상태보다 실리콘 기판에 구속되지 않음으로 인해 동일 인가 전압에서 압전현상에 의한 휨(deflection)이 증가하 기 때문이라고 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 전극구조와 다이어프램의 잔류응 력에 따른 압전형 마이크로스피커의 음압수준 측 정을 통하여 각 인자들의 영향을 살펴보았다. 실리 콘 질화막의 다이어프램이 인장응력을 갖는 마이 크로스피커는 저주파 영역에서 음압수준이 낮으며,

1 kHz 이상의 고주파 영역에서 음압수준이 상대적으로 상승하는 특성을 보이고 있음이 확인되었다. 제작된 압전형 마이크로스피커의 음압수준(SPL)은 복합 다이어프램의 잔류응력이 압축성을 나타낼 때 우수한 특성을 나타내고, 또한 전극의 크기가 증가함에 따라 음압수준이 향상되는 특징을 나타내었다. 따라서 압전형 마이크로스피커의 음압수준을 향상시키기 위해서는 복합 다이어프램의 잔류응력을 압축성으로 확보해야 하며, 압전 효과를 나타내는 전극의 구조도 압전효과를 극대화하는 방향으로 설계 제작되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부가 지원하는 충청대학교 지역혁신센터 (Regional Innovation Center)의 지원에 의해서 수행되었습니다. 또한 본 연구수행에 도움을 주신 GE Sensing Korea와 (주) 엠에스솔루션 관계자 여러분께 진심으로 감사를 드립니다.

참고 문헌

[1] S. S. Lee, R. P. Ried, and R. M. White, "Piezoelectric cantilever microphone and microspeaker", *J. MEMS*, Vol. 5, No. 4, p. 238, 1996.

[2] B. M. Diamond, J. J. Neumann Jr., and K. J. Gabriel, "Digital sound reconstruction using array of CMOS-MEMS microspeakers", in

Tech. Digest of IEEE 15th International MEMS conference, p. 296, 2002.

[3] C. H. Han and E. S. Kim, "Parylene-Diaphragm Piezoelectric Acoustic Transducers", in Tech. Digest of IEEE. 13th International MEMS conference, p. 148, 2000.

[4] T.-L. Ren, L.-T. Zhang, L.-T. Liu, and Z.-J. Li, "Design of a new PZT based microphone and microspeaker", *Ferroelectrics*, Vol. 41, p. 101, 2001.

[5] C. H. Chou, Y. C. Lin, J. H. Huang, N. H. Tai, and I. N. Lin, "Growth of high quality AlN thin films on diamond using TiN/Ti buffer layer", *J. Diamond and Related Materials*, Vol. 15, p. 404, 2006.

[6] M. Benetti, D. C. Cannata, F. Di Pietrantonio, E. Verona, A. Generosi, B. Paci, and V. Paci Albertini, "Growth and characterization of piezoelectric AlN thin films for diamond-based surface acoustic wave devices", *Thin Solid Films*, Vol. 497, p. 590, 2005.

[7] A. K. Sinha and T. T. Sheng, "The temperature dependence of stresses in aluminum film on oxidized silicon substrates", *Thin Solid Films*, Vol. 48, p. 118, 1978.

[8] 이승환, 서경원, 유근표, 권순용, "C-축 배양된 ZnO 박막을 이용하여 제작한 압전형 마이크로스피커의 특성평가", *전기전자재료학회논문지*, 19권, 6호, p. 531, 2006.