

# 기판접합기술을 이용한 MEMS 컨덴서 마이크로폰의 설계와 제작

## Design and Fabrication of MEMS Condenser Microphone Using Wafer Bonding Technology

권 휴 상† · 이 광 철\*

Hyu-sang Kwon and Kwang-Cheol Lee

(2006년 10월 2일 접수 ; 2006년 11월 13일 심사완료)

**Key Words :** Au/Sn Eutectic Bonding(금/주석 공융점 접합), Si Deep Reactive Ion Etching(실리콘 고종형비 건식식각), MEMS Condenser Microphone(MEMS 용량형 마이크로폰), Microphone Packaging(마이크로폰 패키징), Rigid Backplate(강인 고정판), Double-chip Technology(double-chip 기술), Wafer Bonding(기판접합)

### ABSTRACT

This paper presents a novel MEMS condenser microphone with rigid backplate to enhance acoustic characteristics. The MEMS condenser microphone consists of membrane and backplate chips which are bonded together by gold-tin (Au/Sn) eutectic solder bonding. The membrane chip has 2.5 mm × 2.5 mm, 0.5 μm thick low stress silicon nitride membrane, 2 mm × 2 mm Au/Ni/Cr membrane electrode, and 3 μm thick Au/Sn layer. The backplate chip has 2 mm × 2 mm, 150 μm thick single crystal silicon rigid backplate, 1.8 mm × 1.8 mm backplate electrode, and air gap, which is fabricated by bulk micromachining and silicon deep reactive ion etching. Slots and 50~60 μm radius circular acoustic holes to reduce air damping are also formed in the backplate chip. The fabricated microphone sensitivity is 39.8 μV/Pa (-88 dB re. 1 V/Pa) at 1 kHz and 28 V polarization voltage. The microphone shows flat frequency response within 1 dB between 20 Hz and 5 kHz.

### 1. 서 론

소리를 측정하는 가장 기본적이며 필수적인 변환 센서로써 마이크로폰은 우리의 삶 주변에서 다양하게 사용되고 있다. 더욱이 IT 기술의 발전과 더불어 인터페이스와 통신을 위하여 경제적이면서 고성능화, 소형화된 마이크로폰의 중요성은 날로 커지고 있다.

마이크로폰에 관한 연구와 개발은 오랫동안 계속 되어 왔으며 그 종류는 이루 헤아리기 어려울 정도

로 많지만 대표적으로 다이내믹(dynamic)형 마이크로폰과 컨덴서(condenser)형 마이크로폰을 들 수 있다. 다이내믹형 마이크로폰은 기계적인 진동을 전자기적 변환에 의하여 전기 신호로 변환하는 변환기로써 그 역사가 오래되었으며 구조적으로 튼튼하고 외부의 충격 등에 강한 특성을 가지고 있다. 하지만 주변 전자기파로부터 큰 영향을 받으며 소형화하기 어렵다는 문제를 가지고 있다.

현재까지 개발된 마이크로폰 중에서 성능이 가장 우수하다고 알려진 컨덴서 마이크로폰은 근접한 두 대전판 사이에 분극전압을 가하고 음압에 의하여 진동하는 대전판의 거리 변화에 따른 전하의 발생으로 전압 신호를 발생시킨다. 이 마이크로폰은 주파수 특성이 우수하고 신호 대 잡음비가 좋은 특성을 가지고 있어서 계측용 마이크로폰으로 널리 사용된다.

† 책임저자; 정회원, 한국표준과학연구원 기판표준부 역학그룹  
E-mail : hyusang@kriss.re.kr

Tel : (042)868-5057, Fax : (042)868-5643

\* 한국표준과학연구원 전략기술연구부 미래신수요측정클립

그러나 감도를 좋게 하기 위해서는 진동하는 대전판을 넓게 만들고 그 사이의 거리를 작게 하여야 하며 분극전압을 크게 해야 한다. 이 때문에 습기 등 외부환경의 변화에 취약하며 취급에 어려움이 있다는 단점과 함께 제작도 쉽지 않다. 그러므로 이를 보완하여 일반 기기용 제품으로 사용할 수 있도록 분극전압 대신에 이미 대전되어 있는 폴리머 필름을 사용하여 전하를 발생시키는 일렉트릿(electret) 마이크로폰이 개발되었다. 일렉트릿 마이크로폰은 제작이 간단하여 대량생산이 가능하고 가격이 저렴하며 소형화하기 좋으면서 성능이 비교적 우수하기 때문에 오늘날 휴대폰을 비롯하여 대부분의 일반 기기에서 널리 사용되고 있다. 하지만 이러한 일렉트릿 마이크로폰은 기본적으로 진동막의 품질을 균일하게 제작하기 힘들기 때문에 진동 특성이 계측용 마이크로폰에 비하여 떨어지며 이 때문에 계측용으로 제작되는 분극전압형 마이크로폰과 일반용 일렉트릿 마이크로폰 사이에서 품질이 우수하며 산업용으로 사용이 가능한 증거가 고성능 제품이 절실히 요구되어 왔다.

1980년대 들어 R. Hijab 등에 의해 MEMS 마이크로폰에 대한 연구가 보고된 이후 지난 20여 년간 MEMS 공정기술을 이용한 다양한 종류의 마이크로폰 구조 및 제조 기술에 대한 연구가 이루어져 왔다<sup>(1-4)</sup>. MEMS 공정은 반도체 공정 기술을 바탕으로 안정적이며 조절 가능한 물성을 가지는 박막을 제조할 수 있으며 일괄 공정이 가능하므로 소형화, 저가, 고감도 등 고성능 마이크로폰을 구현할 수 있는 많은 장점을 가지고 있다. 또한 기존 일렉트릿 마이크로폰에 비하여 높은 온도에서 조립 및 동작이 가능하므로 기존에 사용하고 있는 표면실장 장비 및 기술을 이용하여 MEMS 마이크로폰을 조립할 수 있는 장점을 가지고 있다.

MEMS 마이크로폰이 가지고 있는 저가, 소형화, 고성능과 같은 장점 및 향후 응용 가능성으로 인하여 현재 보청기 및 휴대폰 응용을 목표로 한 초소형 및 고감도 MEMS 마이크로폰이 출시되고 있으며 그 이외에 방향성 마이크로폰 등 마이크로폰 성능 개선을 위한 다양한 연구들이 보고되고 있다. 하지만 아직까지는 저가이며 비교적 음향 성능이 우수한 기존 일렉트릿 마이크로폰과의 경쟁에서 많은 어려움을 겪고 있다. 그러므로 일렉트릿 마이크로폰에 비하여

가격 및 음향 성능이 보다 우수한 마이크로폰이 요구되고 있으며 이를 극복하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있다.

현재까지 대부분의 MEMS 마이크로폰은 단일기판을 이용하여 백플레이트(backplate) 및 진동막 구조를 적층하는 방법으로 만든다<sup>(5-9)</sup>. 이와 같이 단일기판을 이용하여 만들어지는 마이크로폰은 반도체 일괄 공정을 이용하여 저가 구현 및 CMOS회로를 집적화할 수 있는 장점을 가지고 있으나 박막을 적층하여 제조하므로 백플레이트 두께가 1~10  $\mu\text{m}$ 로 제한되는 단점을 가지고 있다. 얇은 백플레이트는 백플레이트 자체의 낮은 공진 주파수 등의 문제점으로 인하여 마이크로폰 음향 성능을 저하시키는 중요한 요인 중의 하나이다<sup>(10-13)</sup>. 이를 해결하기 위하여 단일기판을 이용한 마이크로폰의 경우 SOI 기판을 이용하거나 에피탁시(epitaxy) 방법으로 백플레이트를 만듦으로써 백플레이트의 강성을 높이는 방법이 보고되고 있다. 하지만 백플레이트 두께가 증가함에 따라 단일기판을 이용하여 제조할 경우 음향구멍 식각 및 재 평탄화 공정 등 공정의 복잡성이 증가하는 단점을 가지고 있다.

이 연구에서는 마이크로폰 음향 성능을 개선시키기 위하여 두꺼운 백플레이트 및 수직 음향구멍을 가지는 컨덴서형 마이크로폰을 제안하였다. 백플레이트와 진동막을 각각 다른 기판에서 제작한 후 이를 접합하여 마이크로폰을 완성함으로써 단일기판을 이용한 마이크로폰에 비하여 공정의 단순화, 공정 유연도 증가 및 수율을 증가하도록 하였다. 기판 미세가공기술 및 금/주석 공용점 접합기술(Au/Sn eutectic bonding)을 이용하여 저응력 실리콘 질화막 진동막 및 두꺼운 단결정 실리콘 백플레이트를 가지는 MEMS 컨덴서 마이크로폰을 제작하였고 제작된 마이크로폰의 음향특성을 평가하였다.

## 2. 컨덴서 마이크로폰 설계 및 제작

컨덴서 마이크로폰은 음압에 의하여 거동하는 진동막의 면적 변위에 비례하여 전압 신호가 발생한다. 그러므로 일차적으로 선형적이면서도 큰 변위를 가지는 진동막의 설계가 필요하다. 감도를 높게 하기 위해서는 동일한 음압에 대하여 진동막의 유효 면적변위가 커야 하고 또한 전체적인 판의 크기를

고려할 때 원형이 가장 효율적인 형상 구조임을 알 수 있다. 그런데 MEMS 공정을 이용해서는 직각 공정의 제한 때문에 얇은 원형 판 구조물을 만들기 어렵지 않다. 이러한 제작의 제한 때문에 되도록 원형에 가깝게 정팔각형으로 진동막을 구현하여 소개한 연구결과가 있다<sup>(10)</sup>. 그러나 실제로 이러한 다각형 가공은 공정의 복잡성과 공정의 일반성 등의 문제로 인하여 실제적인 적용에 어려움이 많기 때문에 이 연구에서는 가장 일반적인 정사각형 판 구조물을 사용하였다.

마이크로폰은 그 종류나 사용하는 방법 등에 따라 다양한 크기를 가지고 있다. 그러나 일반적으로 산업용 마이크로폰의 경우에는 직경이 6 mm 혹은 9 mm 등이 널리 사용되고 있으며 계측용 마이크로폰으로는 직경이 1 인치, 1/2 인치, 1/4 인치, 1/8 인치, 1/16 인치 등으로 나뉘어져 있다. 이 연구에서는 계측용 마이크로폰 중에서 사용 요구가 많으면서 직경이 작아서 기존의 정밀가공으로는 제작에 어려움이 많은 1/4 인치 마이크로폰을 목표로 하였다. 그러므로 1/4 인치 외경으로부터 나사산과 보호캡 등 패키징을 고려하고 나서 가능한 한 진동막의 크기를 최대로 설계하였다. 그 결과 칩의 크기를 3.8 mm × 3.8 mm로 하였으며 진동막의 크기는 2.5 mm × 2.5 mm로 정하였다.

사각 판 구조물의 공진 주파수 등의 진동 특성에 관한 연구는 최근까지도 많이 진행되고 있다. 그러나 이와 같은 판 구조물의 동적 거동에 대한 엄밀해는 정확하게 주어지지 않으며 다양한 해석방법과 근사해가 소개되고 있다. MEMS 진동막의 해석으로 잘 알려진 최근의 연구에 의하여 제안하는 진동막의 고유 진동수와 변위를 다음과 같이 구할 수 있었다.

잘 알려진 막(membrane) 모델을 이용하여 한 변의 길이가 2a인 정사각형 얇은 막의 고유 진동수는 다음과 같이 계산된다<sup>(14)</sup>.

$$f_0 = \frac{1}{2\sqrt{2}a} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} \quad (1)$$

여기서  $\sigma$ 는 진동막의 인장응력을,  $\rho$ 는 진동막 재료의 밀도를 각각 나타낸다. 이와 같은 일반적인 선형막 이론과 달리 최근 소개된 정사각형 막의 해석에 따라 작용하는 압력  $p$ 와 중심( $x=y=0$ )에서의 최대 변위  $w_0$ 의 관계는 다음과 같이 주어진다<sup>(15)</sup>.

$$p(w_0) = C_1 \frac{\sigma h}{a^2} w_0 + C_2 \frac{Eh}{a^4} w_0^3 \quad (2)$$

여기에서  $E$ 는 Young's modulus이고  $h$ 는 진동막의 두께를 나타낸다.  $C_1$ 과  $C_2$ 는 계수로써 Poisson's ratio  $\nu$ 에 따라 결정되어 지는데, 최근 연구결과에 의하면 다음과 같은 식으로 제안되었다.

$$C_1 = 3.45, \quad C_2 = \frac{1.994(1-0.271\nu)}{(1-\nu)} \quad (3)$$

이 식에서 첫 번째 항은 진동막의 인장응력, 즉 인장력에 관련된 항으로 기존의 막 가정에 의한 선형 항이다. 그런데 두 번째 항은 Young's modulus에 관련되는 비선형 항이고 이로 인한 해석결과의 차이가 나타난다. 진동막의 변위가 작을 경우에는 비선형 항을 무시할 수 있으며 선형항으로 단순화하여 계산할 수 있다.

또한 임의의 위치에서의 진동 변위에 대한 이론적인 해석도 많이 진행되었는데 선형항만으로 간략하게 정리하면 Timoshenko에 의하여 처음 제안되었던 다음과 같은 식이 된다.

$$w(x, y) = w_0 \cdot \cos \frac{\pi x}{2a} \cdot \cos \frac{\pi y}{2a} \quad (4)$$

그러므로 식 (2)와 식 (4)를 이용하여 1자유계 등가 질량과 등가 compliance를 구할 수 있으며<sup>(12,13)</sup> 이로부터 다음과 같은 고유 진동수를 얻을 수 있다.

$$f_0 = \frac{2\sqrt{C_1}}{\pi^2 a} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} \quad (5)$$

또한 진동막의 면적 변위로부터 계산한 등가 변위를 이용하여 다음과 같이 감도를 산출하였다<sup>(12,13)</sup>.

$$M_{sens} = V_{bias} \cdot \frac{4}{\pi^2 d} \cdot \frac{a^2}{hcC_1} \quad (6)$$

여기서  $V_{bias}$ 는 분극전압을 의미하고  $d$ 는 진동막과 백플레이트 사이의 거리를 나타낸다. 이때 마이크로폰에 연결된 프리앰프의 입력용량과 마이크로폰의 기생용량을 무시하고 식을 정리하였다<sup>(12)</sup>. 게다가 앞서 설명한 바와 같이 비선형 항들을 무시하고 식을 정리하였기 때문에 실제 감도값은 계산값보다 작아진다는 사실을 유추할 수 있다.

이 연구에서 사용한 저응력 실리콘 질화막(SiN)의

인장응력은 300 MPa이며 이 재료의 밀도는 약 3000 kg/m<sup>3</sup>이므로 이로부터 계산된 고유 진동수는 89.4 kHz 혹은 95.2 kHz로 계산되어졌으며 감도는 28 V 분극전압에 10 μm의 진동막 간극인 경우에 3.4 mV/Pa로 계산되어졌다.

이와 같은 방법으로 설계된 마이크로폰에 있어서 고유 진동수는 사용범위에 비해 너무 높고 감도가 작다는 사실을 알 수 있지만 외경의 크기가 정해져 있으며 실리콘 질화막을 사용하는 이 연구에서는 성능개선에 어려움이 많으며 향후 이를 개선하기 위한 구조설계 연구가 필요하다.

Fig. 1의 단면도 및 평면도에서는 이 연구에서 제안한 MEMS 컨덴서 마이크로폰의 구조와 형태가 잘 나타나 있다. 앞서 설명한 바와 같이 이 연구에서는 진동막 칩과 백플레이트 칩을 각각 다른 두 개의 기관으로 제작하였으며 이를 결합하여 컨덴서 마이크로폰으로 완성하였다. 이 두 개의 칩은 공기층을 사이에 두고 금/주석 합금층을 이용하여 결합되어 있다.

진동막 칩은 외부에서 인가되는 음압에 의하여 변형을 일으키는 얇은 진동막과 그 위에 형성되어 있는 진동막 전극으로 되어 있으며 또한 백플레이트 칩과의 접합 및 전극 연결을 위한 금/주석 결합층이 형성되어 있다.

백플레이트 칩은 수직 음향구멍이 배치되어 있는 두꺼운 백플레이트와 그 위에 형성되어 있는 백플레이트 전극, 그리고 공기층 감쇠 조절 및 진동막 면적 대비 백플레이트 면적 최적화를 위한 슬롯으로 구성되어 있다. 백플레이트 전극은 금/주석 결합층을 통하여 진동막 칩에 형성된 전극패드에 연결되어 있으며 슬롯을 통하여 와이어 본딩(wire bonding)을 함으로서 전기적으로 연결을 할 수 있도록 하였다.

Fig. 2에 이 연구에서 제안한 MEMS 컨덴서 마이크로폰의 제조 공정도를 나타내었다. 4인치 (100) 두께 300 μm 실리콘 웨이퍼를 사용하여 진동막 기관과 백플레이트 기관을 제조하였다.

백플레이트 기관 제조 공정은 다음과 같다. 먼저 전기적 절연을 위하여 웨이퍼에 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>를

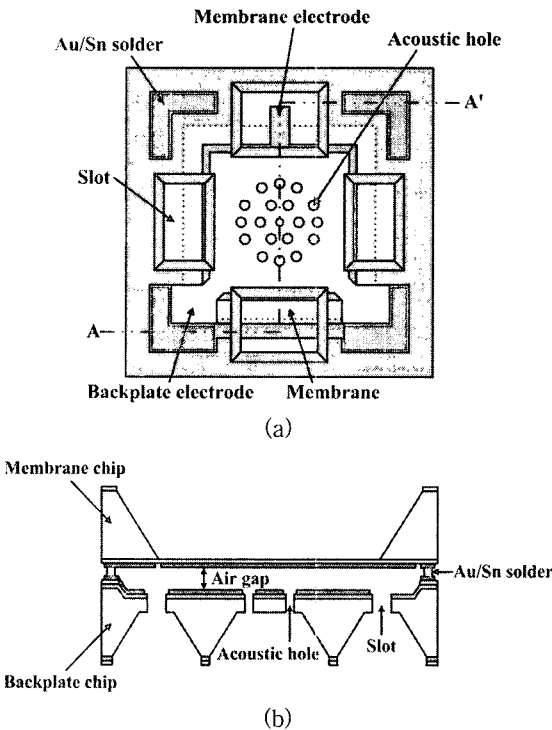


Fig. 1 (a) Top view and (b) cross-sectional view along the line A-A' of the proposed condenser microphone

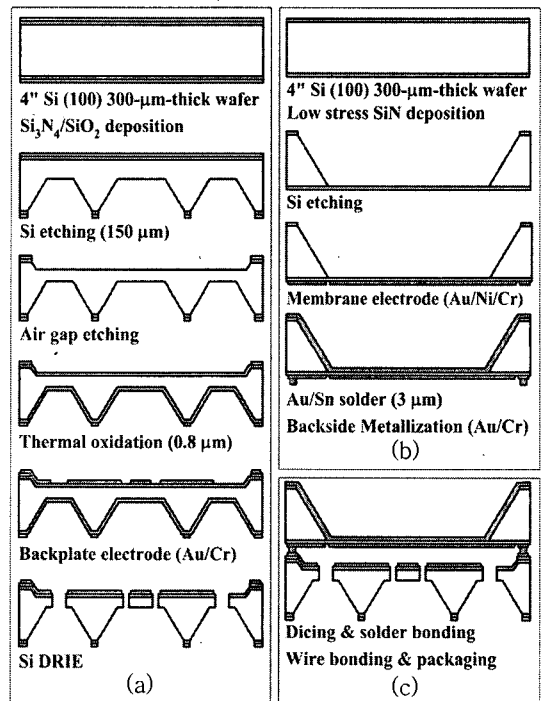


Fig. 2 Fabrication processes of the condenser microphone: (a) backplate wafer, (b) membrane wafer, and (c) bonding and packaging processes

증착한다. 그리고 뒷면 실리콘을 KOH수용액을 이용하여 약 150  $\mu\text{m}$  정도 식각함으로써 백플레이트 두께를 조절한다. 그리고 기관의 앞면을 KOH수용액으로 약 6  $\mu\text{m}$  정도 식각하여 공기층을 형성한다. 그 위에 열산화막을 0.8  $\mu\text{m}$  두께로 성장시킨 후 Au/Cr 백플레이트 전극을 형성하였다. 두께 20  $\mu\text{m}$  양성 감광막을 실리콘 건식식각 식각 마스크로 이용해서 두께 150  $\mu\text{m}$ , 반지름 50~60  $\mu\text{m}$ 의 수직 음향구멍을 형성하였다.

진동막 기관을 제조하는 공정은 다음과 같다. 먼저 웨이퍼에 두께 0.5  $\mu\text{m}$ 의 저응력 실리콘 질화막을 성장시킨 후 KOH 수용액을 이용하여 2.5 mm  $\times$  2.5 mm 넓이의 진동막을 제조한다. 그리고 이 위에 2 mm  $\times$  2 mm Au/Ni/Cr 진동막 전극을 형성한다. 진동막 전극의 Ni층은 금 주석 공용점 접합시 젖음층으로 사용되며 부서지기 쉬운 Cr-Au 합금층이 형성

되지 않도록 하는 역할을 한다. 진동막 전극을 형성한 후에 전자선 증착 (E-beam evaporation) 방법을 이용하여 3  $\mu\text{m}$  두께의 금/주석 층을 형성하였다. 그리고 마이크로폰의 전기적 잡음을 감소시키기 위하여 진동막 기관의 뒷면에 Au/Cr을 증착하였다.

Fig. 3에서 이와 같은 방법으로 각각 완성된 진동막 칩과 백플레이트 칩을 잘 보여주고 있다. 진동막 칩과 백플레이트 칩의 전체 크기는 3.8 mm  $\times$  3.8 mm이며 접합을 위한 금/주석 층의 면적은 약 0.3 mm<sup>2</sup>이다. 그리고 이 진동막 칩과 백플레이트 칩을 정렬하여 맞춰 놓은 후 핫 플레이트 (hot plate) 위에서 370  $^{\circ}\text{C}$ 로 5분간 가열하여 결합하였다. Fig. 4는 이와 같은 방법으로 결합하여 완성된 마이크로폰 칩을 보여 주고 있다.

### 3. 음향 특성실험과 결과고찰

제작된 마이크로폰 칩은 B&K사의 1/2인치 프리 앰프를 사용할 수 있도록 금속 패키지를 이용하여 조립하였다. 슬롯을 통하여 노출된 백플레이트 전극 패드에 25.4  $\mu\text{m}$  지름의 Au선으로 와이어 본딩 함으로써 전선을 연결하였다. Au선의 다른 쪽 끝은 금속 패키지에 만들어 놓은 신호선 연결 단자에 실버 페이스트 (silver paste)를 이용하여 접착하였다. 진동막 칩의 뒷면에 증착되어 연결되어 있는 Au/Cr층은 금속 패키지 외면의 접지에 접촉되어 전기적으로 연결함으로써 잡음을 최소화하도록 하였다. Fig. 5와 6에 패키지 완료된 마이크로폰을 나타내었다.

B&K사의 음향 결합기(UA 0914)를 사용하여 제작한 마이크로폰의 음향 특성을 측정하였다. Fig. 7과 같이 음향 결합기 양 단에 제작한 마이크로폰과 기준 마이크로폰(B&K 4189)을 장치하고 주파수 분석기(HP35670A)를 이용하여 주파수 응답 특성을 측정하였다. 이때 제작한 마이크로폰의 공기층 간격은 약 10  $\mu\text{m}$ 이었으며 진동막과 백플레이트 사이에 DC 28 V의 분극전압을 가하였다.

기준 마이크로폰인 B&K 4189은 250 Hz에서 50 mV/Pa (-26 dB re. 1 V/Pa)의 감도를 보였고 제작된 마이크로폰은 1 kHz에서 39.8  $\mu\text{V}$ /Pa (-88 dB re. 1 V/Pa)의 감도를 보였으며 20 Hz에서 5 kHz 사이의 주파수 영역에서 1 dB 미만의 평탄한 주파수 특성을 보였다. 5 kHz 이상에서 감도 저하는 실험에

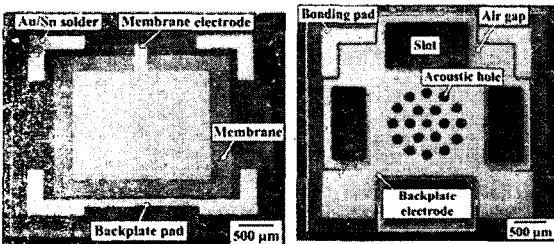


Fig. 3 SEM photomicrographs of the fabricated (a) membrane and (b) backplate chips

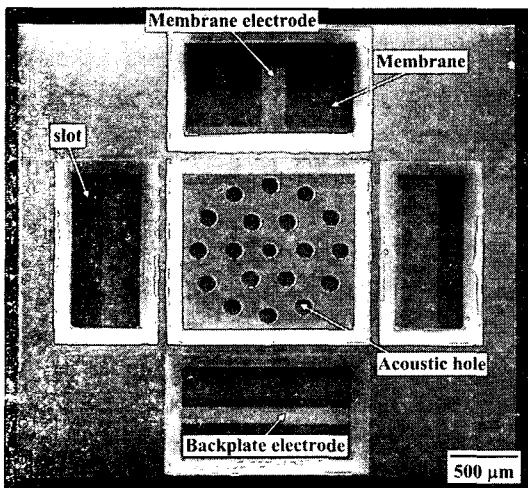


Fig. 4 SEM photomicrograph of the fabricated condenser microphone chip after Au/Sn eutectic bonding

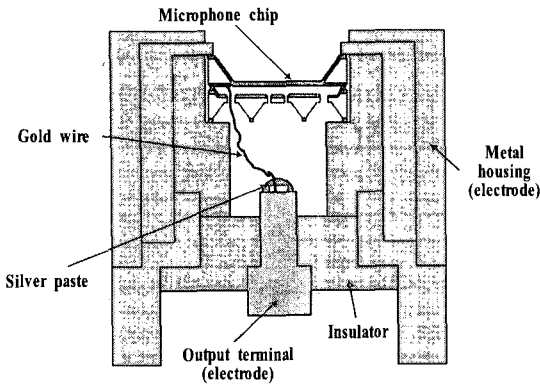


Fig. 5 A schematic diagram of the fabricated microphone package. The microphone package is compatible with 1/2 Brüel & Kjær (B&K) preamplifier

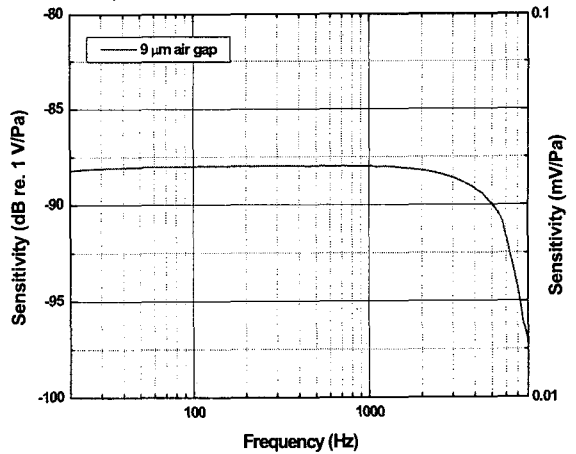


Fig. 8 Measured frequency response of the fabricated microphone

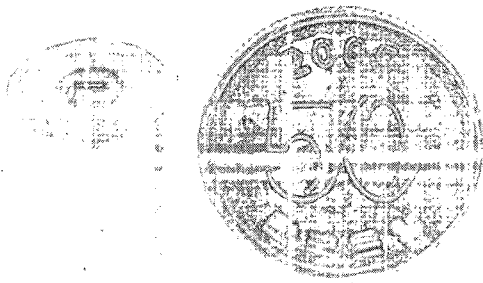


Fig. 6 A packaged condenser microphone chip with a coin

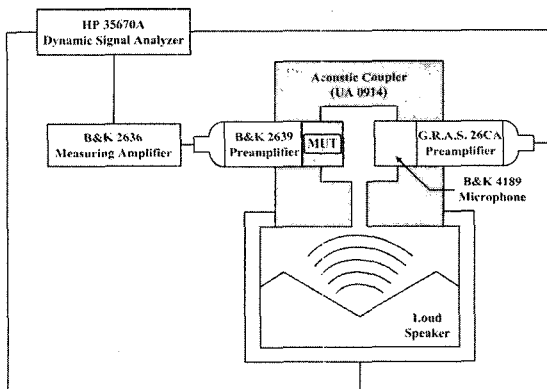


Fig. 7 Schematic of the experimental set-up for acoustic response measurements of the fabricated microphone

사용된 음향 결합기의 내부현상과 면적에 따라 특정 주파수에서 공진이 발생하여 사용주파수 상한이 존

재하여 나타나는 현상으로 인한 것이며 높은 주파수 영역에서 사용 가능한 음향 결합기 및 무향 챔버를 이용해서 측정할 경우 10 kHz 이상에서 평탄한 주파수 특성을 보임을 확인하였다.

마이크로폰의 감도는 설계값에 비하여 아주 작게 나타남을 확인할 수 있는데 이는 감도계산에서 무시한 비선형 항들과 함께 마이크로폰의 기생용량, 그리고 공기층 및 구조물의 감쇠 영향 등 많은 요인에 의한 것이라 판단되며 이에 대한 보다 엄밀한 해석이 수행되어야 한다.

#### 4. 결론

음향성능을 향상시키기 위하여 두꺼운 백플레이트와 수직음향구멍을 가지는 MEMS 컨덴서 마이크로폰을 제작하였다. 진동막 기판과 백플레이트 기판을 각각 따로 제작한 후 이를 접합함으로써 단일기판을 이용한 마이크로폰에 비하여 단순화된 공정을 이용하여 두꺼운 백플레이트를 가지는 컨덴서 마이크로폰을 제작할 수 있었다.

제작한 마이크로폰의 감도는 28 V DC 전압을 인가하였을 때 1 kHz에서  $39.8 \mu\text{V}/\text{Pa}$  ( $-88 \text{ dB re. } 1 \text{ V}/\text{Pa}$ )이었으며 20 Hz에서 5 kHz의 주파수 영역에서 약 1 dB 미만의 평탄한 주파수 응답 특성을 보였다.

이와 같이 개선된 성능의 마이크로폰을 제작할 수 있는 MEMS 공정의 설계와 제작에 대한 기술을 확립하였다.

## 참 고 문 헌

- (1) Ono, N., Arita, T., Senjo, Y. and Ando, S., 2005, "Directivity Steering Principle for Biomimicry Silicon Microphone", *Transducers' 05*, pp. 792~795.
- (2) Neumann Jr. J. J. and Gabriel, K. J., 2003, "A Fully-integrated CMOS-MEMS Audio Microphone", *Transducers' 03*, pp. 230~233.
- (3) Schafer, D., Shoaf, S. and Loeppert, P., 1998, "Micromachined Condenser Microphone for Hearing Aid Use", *Solid-state Sensor and Actuator Workshop (Hilton Head' 98)*, pp. 27~30.
- (4) See, for example, <http://www.knowledgistics.com/> or <http://www.sonion.com/>
- (5) Hsieh, W. H., Yao, T.-J. and Tai, Y.-C. 1999, "A High Performance MEMS Thin-film Teflon Electret Microphone", *Transducers' 99*, pp. 1064~1067.
- (6) Martin, D. T., Kadirvel, K., Liu, J., Fox, R. M., Sheplak, M. and Nishida, T., 2005, "Surface and Bulk Micromachined Dual Back-plate Condenser Microphone", *MEMS' 05*, pp. 319~322.
- (7) Weigold, J. W., Brosnihan, T. J., Bergeron, J. and Zhang, X., 2006, "A MEMS Condenser Microphone for Consumer Applications", *MEMS' 06*, pp. 86~89.
- (8) Ko, S. C., Jun, C.-H., Jang, W. I., Moon, S.-H., Hwang, G. and Choi, C. A., 2005, "Fabrication and Acoustic Characteristics of Capacitive-MEMS Acoustic Sensor", *The 7th Korean MEMS Conference*, pp. 81~84.
- (9) Lee, K. I., Cho, J. W., Lee, D. S., Hwang, H.-I., Kim, J. W. and Lee, S. S., 2005, "A Capacitive Type Miniature Acoustic Transducer with a Diaphragm by Electroplating", *The 7th Korean MEMS Conference*, pp. 93~96.
- (10) Scheeper, P. R., Nordstrand, B., Gulløv, J. O., Liu, B., Clausen, T., Midjord, L. and Storgaard-Larsen, T., 2003, "A New Measurement Microphone Based on MEMS Technology", *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 12, No. 6, pp. 880~891.
- (11) Iguchi, Y., Tajima, T., Goto, M., Iwaki, M., Ando, A., Tanioka, K., Takeshi, F., Matsunaga, S. and Yasuno, Y., 2004, "New Fabrication Process for High-performance Silicon Condenser Microphone with Monocrystalline Silicon Diaphragm and Backplate", *MEMS' 04*, pp. 601~604.
- (12) Wong, G. S. K. and Embleton, T. F. W., 1995, *Handbook of Condenser Microphones*, AIP Press, New York, Chap.3, pp. 37~69.
- (13) *Microphone Handbook*, 1996, Brüel & Kjær A/S, Nærum, Denmark.
- (14) Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., and Sanders, J. V., 2000, "Fundamentals of Acoustics", John Wiley & Sons, Inc., Chap.4, pp. 91~109.
- (15) Maier-Schneider, D., Maibach, J. and Obermeier, E., 1995, "A New Analytical Solution for the Load-deflection of Square Membranes", *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 4, No. 4, pp. 238~241.