

## 기판접합기술을 이용한 두꺼운 백플레이트와 수직음향구멍을 갖는 정전용량형 마이크로폰의 설계와 제작

권휴상<sup>†</sup> · 이광철\*

### Design and fabrication of condenser microphone with rigid backplate and vertical acoustic holes using DRIE and wafer bonding technology

Hyu-sang Kwon<sup>†</sup> and Kwang-Cheol Lee\*

#### 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.

**Key Words :** Au/Sn eutectic bonding, Si deep reactive ion etching, MEMS condenser microphone, microphone packaging, rigid backplate, two-chip technology, wafer bonding

## 1. 서 론

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 일렉트릭 마이크로폰에 비하여 높은 온도에서 조립 및 동작이 가능하므로 기존에 사용하고 있는 표면실장 장비 및 기술을 이용하여 MEMS 마이크로폰을 조립할 수 있는 장점을 가지고 있다.

마이크로폰은 개발 역사가 오래된 만큼 그 종류도 매우 다양하지만 그 중에서 정전용량형이 가장 특성이 우수하다고 알려져 있다. 정전용량형 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 있으나 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 일렉트릭(electret) 마이크로폰이 개발되었다. 일렉트릭 마이크로폰은 제작이 간단하여 대량생산이 가능하고 가격이 저렴하며 소형화하기 좋으면서 성능이 비교적 우수하기 때문에 오늘날 휴대폰을 비롯하여 대부분의 일반 기기에서 널리 사용되고 있다.

한국표준과학연구원 기반표준부 역학그룹 (KRISS Division of Physical Metrology, Mechanical Metrology Group)

\*한국표준과학연구원 전략기술연구부 미래신수요특정그룹 (KRISS Division of Advanced Technology, Leading-Edge Technology Group)

<sup>†</sup>Corresponding author: hyusang@kriiss.re.kr

(Received : October 12, 2006, Accepted : December 11, 2006)

하지만 이러한 일렉트릿 마이크로폰은 기본적으로 진동막의 품질을 균일하게 제작하기 힘들기 때문에 진동 특성이 계층용 마이크로폰에 비하여 떨어지며 이 때문에 계층용으로 제작되는 분극전압형 마이크로폰과 일 반용 일렉트릿 마이크로폰 사이에서 품질이 우수하며 산업용으로 사용이 가능한 중저가 고성능 제품이 절실히 요구되어 왔다.

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>15-17</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>19-21</sup>. 이를 해결하기 위하여 단일기판을 이용한 마이크로폰의 경우 SOI 기판을 이용하거나 에피택시(epitaxy) 방법으로 백플레이트를 만들으로써 백플레이트의 강성을 높이는 방법이 보고되고 있다. 하지만 백플레이트 두께가 증가함에 따라 단일기판을 이용하여 제조할 경우 음향 구멍 식각 및 재 평탄화 공정 등 공정의 복잡성이 증가하는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 마이크로폰 음향 성능을 개선시키기 위하여 두꺼운 백플레이트 및 수직 음향구멍을 가지는 정전용량형 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 공융점 접합기술(Au/Sn eutectic bonding)을 이용하여 저응력 실리콘 질화막 진동막 및 두꺼운 단결정 실리콘 백플레이트를 가지는 MEMS 정전용량형

마이크로폰을 제작하였고 제작된 마이크로폰의 음향특성을 평가하였다.

## 2. 정전용량형 마이크로폰 설계 및 제작

정전용량형 마이크로폰은 음압에 의하여 거동하는 진동막의 면적 변위에 비례하여 전압 신호가 발생하므로 일차적으로 선형적이면서도 큰 변위를 가지는 진동막의 설계가 필요하다. 감도를 높게 하기 위해서는 동일한 음압에 대하여 진동막의 유효 면적변위가 커야 하기 때문에 원형이 가장 효율적인 형상 구조임을 알 수 있다. 그런데 MEMS 공정을 이용해서는 공정의 복잡성과 공정의 일반성 등의 문제로 인하여 실제로 얇은 원형 판 구조물을 만들기가 용이하지 않기 때문에 본 연구에서는 가장 일반적인 정사각형 판 구조물을 사용하였다.

본 연구에서는 계층용 마이크로폰 중에서 사용 요구가 많으면서 직경이 작아서 기존의 정밀가공으로는 제작에 어려움이 많은 1/4 인치 마이크로폰을 목표로 하였는데, 1/4 인치 외경으로부터 패키징을 고려하여 칩의 크기를 3.8 mm×3.8 mm로 하였으며 진동막의 크기는 2.5 mm×2.5 mm로 정하였다.

정사각형 진동막의 거동에 대한 엄밀해는 정확하게 주어지지 않으며 근사적으로 고유 진동수와 변위를 구할 수 있다. 본 연구에서는 이와 같은 근사해를 이용하여 1 자유계 등가 질량과 등가 compliance를 구할 수 있었으며 이로부터 다음과 같은 고유 진동수를 얻을 수 있었다<sup>11</sup>.

$$f_0 = \frac{2\sqrt{C_1}}{\pi^2 a} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} \quad (1)$$

또한 진동막의 면적 변위로부터 계산한 등가 변위를 이용하여 다음과 같이 감도를 산출하였다.

$$M_{sens} = V_{bias} \cdot \frac{4}{\pi^2 d} \cdot \frac{a^2}{h\sigma C_1} \quad (2)$$

여기서  $2a$ 는 한 번의 길이를,  $\sigma$ 는 진동막의 인장응력을,  $\rho$ 는 진동막 재료의 밀도를 각각 나타낸다. 또한  $C_1$ 은 근사해의 계수로 3.45으로 주어진다.  $V_{bias}$ 는 분극전압을,  $d$ 는 진동막과 백플레이트 사이의 거리를, 그리고  $h$ 는 진동막의 두께를 의미한다. 본 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 95.2 kHz로 계산되어졌으며 감도는 28 V 분극전압에 9  $\mu\text{m}$ 의 진동막 간극인 경우에

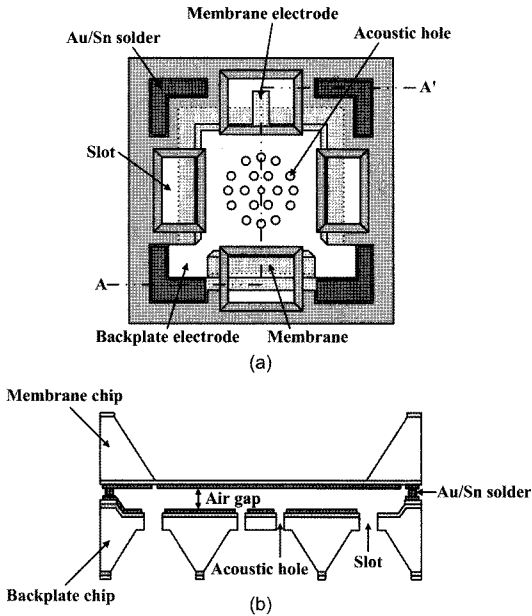


그림 1. 제안된 정전용량형 마이크로폰의 (a) 평면도와 (b) A-A' 선에서의 단면도  
 Fig. 1. (a) Top view and (b) cross-sectional view along the line A-A' of the proposed condenser microphone.

3.8 mV/Pa로 계산 되어졌다.

이와 같이 계산된 마이크로폰 설계값은 다른 여러 요인들 즉, 프리앰프의 입력용량과 마이크로폰의 기생 용량을 무시하였으며 선형 근사화로 가정하였기 때문에 실제 감도값과는 차이를 가진다는 사실을 알 수 있다.[12,14].

그림 1의 단면도 및 평면도에서는 본 연구에서 제안한 정전용량형 MEMS 컨덴서 마이크로폰의 구조와 형태가 잘 나타나 있다. 앞서 설명한 바와 같이 본 연구에서는 진동막 칩과 백플레이트 칩을 각각 다른 두 개의 기판으로 제작하였으며 이를 결합하여 정전용량형 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 있

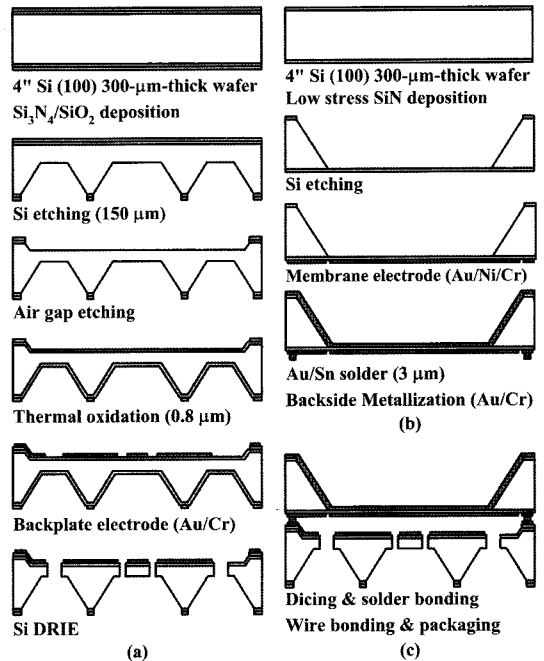


그림 2. 정전용량형 마이크로폰의 제조공정: (a) 백플레이트 기판, (b) 진동막 기판, (c) 결합 및 패키징  
 Fig. 2. Fabrication processes of the condenser microphone: (a) backplate wafer, (b) membrane wafer, and (c) bonding and packaging processes.

다. 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.

그림 2에 본 연구에서 제안한 정전용량형 MEMS 마이크로폰의 제조 공정도를 나타내었다. 4인치 (100) 두께 300 μm 실리콘 웨이퍼를 사용하여 진동막 기판과 백플레이트 기판을 제조하였다.

백플레이트 기판 제조 공정은 다음과 같다. 먼저 전기적 절연을 위하여 웨이퍼에 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>를 증착한다. 그리고 뒷면 실리콘을 KOH 수용액을 이용하여 약 150 μm 정도 식각함으로써 백플레이트 두께를 조절한다. 그리고 기판의 앞면을 KOH 수용액으로 약 6 μm 정도 식각하여 공기층을 형성한다. 그 위에 열산화막을 0.8 μm 두께로 성장시킨 후 Au/Cr 백플레이트 전극을 형성하였다. 두께 20 μm 양성 감광막을 실리콘 건식식각 식각 마스크로 이용해서 두께 150 μm, 반지름 50-60 μm의 수직 음향구멍을 형성하였다.

진동막 기판을 제조하는 공정은 다음과 같다. 먼저 웨이퍼에 두께 0.5 μm의 저응력 실리콘 질화막을 성장

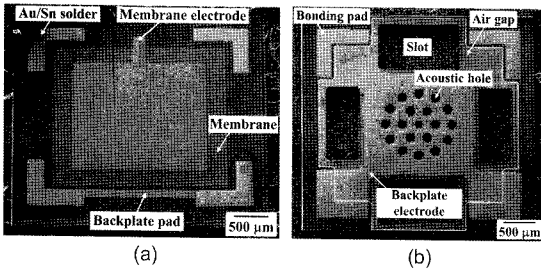


그림 3. 제조된 (a) 진동막 칩과 (b) 백플레이트 칩의 SEM 사진

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

시킨 후 KOH 수용액을 이용하여 2.5 mm×2.5 mm 넓이의 진동막을 제조한다. 그리고 이 위에 2 mm×2 mm Au/Ni/Cr 진동막 전극을 형성한다. 진동막 전극의 Ni 층은 금 주석 공융점 접합시 젖음층으로 사용되며 부서지기 쉬운 Cr-Au 합금층이 형성되지 않도록 하는 역할을 한다. 진동막 전극을 형성한 후에 전자선 증착(E-beam evaporation) 방법을 이용하여 3 μm 두께의 금/주석 층을 형성하였다. 그리고 마이크로폰의 전기적 잡음을 감소시키기 위하여 진동막 기판의 뒷면에 Au/Cr을 증착하였다.

그림 3에서 이와 같은 방법으로 각각 완성된 진동막 칩과 백플레이트 칩을 잘 보여주고 있다. 진동막 칩과 백플레이트 칩의 전체 크기는 3.8 mm×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 °C로 5분간 가열하여 결합하였다. 그림 4는 이와 같은 방법으로 결합하여 완성된 마이크로폰 칩을 보여 주고 있다.

### 3. 음향 특성실험과 결과고찰

제작된 마이크로폰 칩은 B&K사의 1/2인치 프리앰프를 사용할 수 있도록 금속 패키지를 이용하여 조립하였다. 슬롯을 통하여 노출된 백플레이트 전극패드에 25.4 μm 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. 그림 5는 마이크로폰을 패키지는 방법에 대하여 잘 나타내고 있으며 그림 6에서는

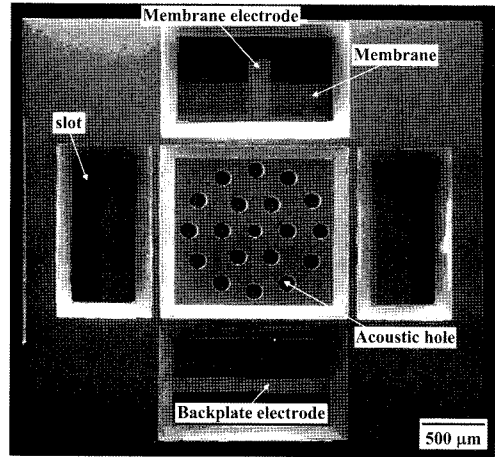


그림 4. 금/주석 공융점 접합 후 제조된 정전용량형 마이크로폰의 SEM 사진

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

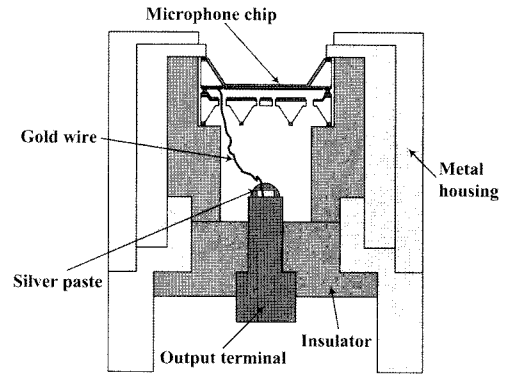


그림 5. 1/2인치 Brüel & Kjær (B&K) 전치 증폭기에 사용 가능하게 제작된 마이크로폰 패키지의 개략도

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

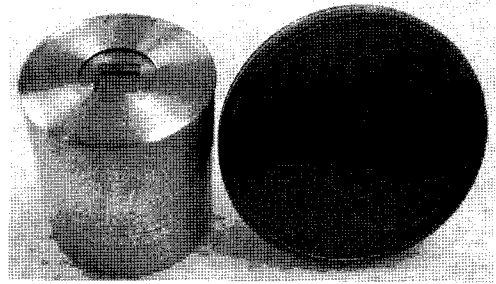


그림 6. 동전과 비교한 제조된 마이크로폰의 사진

Fig. 6. A packaged condenser microphone chip with a coin.

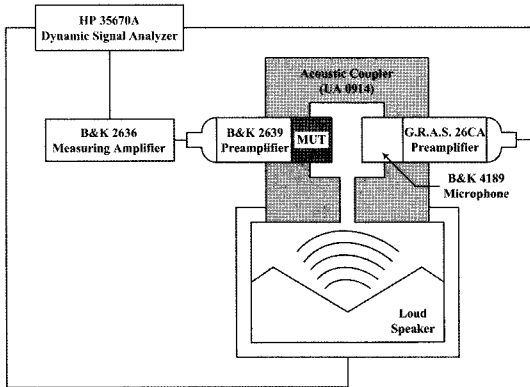


그림 7. 제작된 마이크로폰의 음향특성 측정을 위한 실험 장치 개략도

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

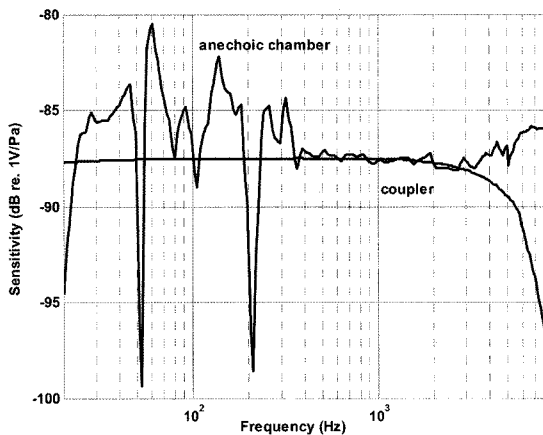


그림 8. 제작된 마이크로폰의 주파수 응답 측정결과  
Fig. 8. Measured frequency response of the fabricated microphone.

패키지가 완료된 후 제작된 마이크로폰의 사진을 보여 주고 있다.

B&K사의 음향 결합기(UA 0914)를 사용하여 제작한 마이크로폰의 음향 특성을 측정하였다. 그림 7과 같이 음향 결합기 양단에 제작한 마이크로폰과 기준 마이크로폰(B&K 4189)을 장치하고 주파수 분석기(HP35670A)를 이용하여 주파수 응답 특성을 측정하였다. 이때 제작한 마이크로폰의 공기층 간격은 약 9  $\mu\text{m}$  이었으며 진동막과 백플레이트 사이에 DC 28 V의 분극전압을 가하였다.

제작된 마이크로폰은 1 kHz에서 39.8  $\mu\text{V}/\text{Pa}$  (-88 dB re. 1 V/Pa)의 감도를 보였으며 20 Hz에서 5 kHz 사이

의 주파수 영역에서 1 dB 미만의 평탄한 주파수 특성을 보였다. 5 kHz 이상에서 감도 저하는 실험에 사용된 음향 결합기의 한계로 인한 것이며 높은 주파수 영역에서 사용 가능한 음향 결합기 및 무향 챔버를 이용해서 측정할 경우 10 kHz 이상에서 평탄한 주파수 특성을 보임을 확인하였다.

## 4. 결 론

음향성능을 향상시키기 위하여 두꺼운 백플레이트와 수직음향구멍을 가지는 MEMS 컨덴서 마이크로폰을 제작하였다. 진동막 기관과 백플레이트 기관을 각각 따로 제작한 후 이를 집합함으로써 단일기관을 이용한 마이크로폰에 비하여 단순화된 공정을 이용하여 두꺼운 백플레이트를 가지는 컨덴서 마이크로폰을 제작할 수 있었다.

제작한 마이크로폰의 감도는 28 VDC 전압을 인가하였을 때 1 kHz에서 39.8  $\mu\text{V}/\text{Pa}$  (-88 dB re. 1 V/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.

## 참고 문헌

- [1] N. Ono, T. Arita, Y. Senjo, and S. Ando, "Directivity steering principle for biomimicry silicon microphone", *Transducers'05*, pp. 792-795, 2005.
- [2] J. J. Neumann Jr. and K. J. Gabriel, "A fully-integrated CMOS-MEMS audio microphone", *Transducers'03*, pp. 230-233, 2005.
- [3] D. Schafer, S. Shoaf, and P. Loepfert, "Micromachined condenser microphone for hearing aid use", *Solid-State Sensor and Actuator Workshop (Hilton Head'98)*, pp. 27-30, 1998.
- [4] See, for example, <http://www.knowledacoustics.com/> or <http://www.sonion.com/>
- [5] W. H. Hsieh, T.-J. Yao, and Y.-C. Tai, "A high performance MEMS thin-film teflon electret microphone", *Transducers'99*, pp. 1064-1067, 1999.
- [6] D. T. Martin, K. Kadirvel, J. Liu, R. M. Fox, M. Sheplak, and T. Nishida, "Surface and bulk micromachined dual back-plate condenser microphone", *MEMS'05*, pp. 319-322, 2005.
- [7] J. W. Weigold, T. J. Brosnihan, J. Bergeron, and X. Zhang, "A MEMS condenser microphone for consumer applications", *MEMS'06*, pp. 86-89, 2006.

- [8] 고상춘, 전치훈, 장원익, 문석환, 황건, 최창익, “콘덴서형 MEMS 음향센서의 제작 및 음향특성”, 제7회 한국 MEMS 학술대회 논문집, pp. 81-84, 2005.
- [9] 이경일, 조진우, 이대성, 황학인, 김진우, 이석순, “도금 진동판을 이용한 초소형 정전용량형 음향센서”, 제7회 한국 MEMS 학술대회 논문집, pp. 93-96, 2005.
- [10] P. R. Scheeper, B. Nordstrand, J. O. Gulløv, B. Liu, T. Clausen, L. Midjord, and T. Storgaard-Larsen, “A new measurement microphone based on MEMS technology”, *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 12, no. 6, pp. 880-891, 2003.
- [11] Y. Iguchi, T. Tajima, M. Goto, M. Iwaki, A. Ando, K. Tanioka, F. Takeshi, S. Matsunaga, and Y. Yasuno, “New fabrication process for high-performance silicon condenser microphone with monocrystalline silicon diaphragm and backplate”, *MEMS'04*, pp. 601-604, 2004.
- [12] G. S. K. Wong and T. F. W. Embleton *Handbook of Condenser Microphones*, AIP Press, New York, Chap. 3, pp. 37-69, 1995.
- [13] D. Maier-Schneider, J. Maibach, and E. Obermeier, “A new analytical solution for the load-deflection of square membranes”, *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 4, no. 4, pp. 238-241, 1995.
- [14] *Microphone Handbook*, Brüel & Kjær A/S, Nærum, Denmark, 1996.



**권 휴 상**

- 1990년 한국과학기술원 기계공학과 졸업
- 1992년 동 대학원 석사
- 1997년 동 대학 박사
- 1998년~현재 한국표준과학연구원 선임연구원
- 주관심분야 : 소음 및 진동, 신호처리 응용, 센서

**이 광 철**

- 1990년 한국과학기술원 물리학과 학사
- 1992년 포항공과대학교 물리학과 석사
- 2003년 포항공과대학교 기계공학과 박사
- 1992년~1999년 포항산업과학연구원 선임연구원
- 1998년~현재 한국표준과학연구원 책임연구원