creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사 학위논문

스프링 구조가 포함된 진동막을 이용한 실리콘 나노와이어 기반 MEMS 마이크로폰의 공정과 특성 분석

Fabrication and Characterization of Silicon Nanowire-based MEMS Microphones with Spring Supported Membrane

2020 년 2 월

서울대학교 대학원

전기 · 정보공학부

이 승 현

스프링 구조가 포함된 진동막을 이용한 실리콘 나노와이어 기반 MEMS 마이크로폰의 공정과 특성 분석

지도 교수 조 동 일

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함
2020 년 2 월

서울대학교 대학원
전기 · 정보공학부
이 승 현

이승현의 공학석사 학위논문을 인준함
2020 년 2 월

위 원 장 _____ 전 국 진 _____ (인)

부위원장 _____ 조 동 일 _____ (인)

위 원 _____ 서 종 모 _____ (인)

초 록

사물인터넷(internet of things; IoT)의 영향으로 고품질, 고성능의 센서에 대한 수요량이 크게 증가하면서 미세전자기계시스템(microelectromechanical systems; MEMS) 센서가 큰 관심을 받고 있다. MEMS 마이크로폰의 경우 정전용량형(capacitive type) 마이크로폰이 가장 많이 이용되고 있으며, 정전용량형 마이크로폰의 성능을 개선하기 위해 많은 연구가 수행되고 있다. 정전용량형 마이크로폰은 소자의 소형화와 민감도가 trade-off 관계로, 소자의 크기를 소형화 하는데 제한적이다. 또한, 진동막(membrane)과 후기판(backplate) 사이의 공기층(airgap)에서 물, 기계적 충격, 음향과부하 등에 의해 진동막이 후기판에 붙는 문제가 발생한다. 본 논문에서는 이를 해결하기 위한 방안으로 실리콘 나노와이어(silicon nanowire; SiNW)를 적용한 MEMS 마이크로폰을 제안하고자 한다. 본 논문에서 제안하는 마이크로폰은 실리콘 나노와이어의 우수한 압저항(piezoresistive; PZR) 효과를 이용하여 소자 소형화에 유리하며, 후기판이 불필요하여 진동막과 후기판 사이의 공기층으로부터 발생하는 문제점들을 해결할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한, 감도를 높이기 위해 스프링 구조를 활용하였으며 실리콘 나노와이어를 스프링 안에 삽입하여 스프링에 변위가 발생하면 실리콘 나노와이어도 변위가 발생해 소리를 감지할 수 있도록 설계하였다. 실리콘 나노와이어 공정 기술을 응용하여 마이크로폰 공법을 개발하였으며, 이를 활용하여 마이크로폰을 제작하였다. 나아가, 제작한 마이크로폰의 성능 평가를 바탕으로 본 논문에서 제안하는 마이크로폰의 특성을 분석하였다.

주요어 : 실리콘 나노와이어, MEMS 공정, 압저항 효과, 마이크로폰
학 번 : 2018-28016

목 차

제 1 장 서 론 1
제 1 절 연구의 배경 1
제 2 절 연구의 내용 4

제 2 장 본 론 6
제 1 절 실리콘 나노와이어 6
제 1 항 실리콘 나노와이어의 압저항 효과 6
제 2 항 실리콘 나노와이어의 공정 기술 7
제 2 절 마이크로폰 설계 12
제 1 항 실리콘 나노와이어 12
제 2 항 진동막 및 스프링 15
제 3 절 마이크로폰 공법 17
제 1 항 마이크로폰 공법 개발 17
제 2 항 마이크로폰 제작 결과 22
제 4 절 마이크로폰 특성 평가 방법 37
제 1 항 음압의 세기에 따른 마이크로폰 특성 평가 38
제 2 항 주파수에 따른 마이크로폰 특성 평가 40
제 5 절 마이크로폰 특성 평가 결과 및 분석 42
제 1 항 음압 세기에 따른 마이크로폰 특성 평가 42
제 2 항 주파수에 따른 마이크로폰 특성 평가 50

제 3 장 결 론 57
제 1 절 결론 57
제 2 절 향후 계획 58

참고문헌 59

Abstract 64

표 목차

[표 2-1] 스피커 볼륨 크기에 따른 음압의 세기.....40
[표 2-2] 스피커 볼륨의 크기에 따른 출력전압 비교 (0.5 kHz 음압 인가).....43
[표 2-3] 스피커 볼륨의 크기에 따른 출력전압 비교 (1 kHz 음압 인가).....45
[표 2-4] 스피커 볼륨의 크기에 따른 출력전압 비교 (1.5 kHz 음압 인가).....47
[표 2-5] 주파수 스위프하여 음압 인가 시 타입 2 마이크로폰 소자의 출력전압 결과 및 주파수 별 민감도.....51
[표 2-6] 기준 마이크폰으로 측정한 주파수에 따른 음압의 세기 (dBSPL).....52
[표 2-7] 음압 인가하지 않은 상태에서 타입 2 마이크로폰 소자의 출력전압 결과 및 주파수 별 SNR.....53
[표 2-8] 기준 마이크폰으로 측정한 노이즈.....54

그림 목차

[그림 1-1] 세계 MEMS 마이크로폰 수익.....1
[그림 1-2] MEMS 마이크로폰 시장 전망 2
[그림 1-3] 정전용량 MEMS 마이크로폰 구조.....2
[그림 2-1] 실리콘 나노와이어.....7
[그림 2-2] 바텀-업 방식으로 성장시킨 실리콘 나노와이어.....8
[그림 2-3] 탑-다운 방식으로 형성한 실리콘 나노와이어 9
[그림 2-4] SBM 공정법의 공정도.....11
[그림 2-5] 스프링 내 실리콘 나노와이어 구성.....13
[그림 2-6] 전기적 연결에 따른 2 가지 디자인.....13
[그림 2-7] 설계한 3 가지 타입의 마이크로폰.....15
[그림 2-8] 스프링 디자인.....16
[그림 2-9] 모드 분석 시뮬레이션 결과.....17
[그림 2-10] 실리콘 나노와이어 기반 마이크로폰 공정도.....18
[그림 2-11] 마이크로폰 공정도 중 실리콘 나노와이어 형성 부분.....19
[그림 2-12] 마이크로폰 공정도 중 진동막 부분 21
[그림 2-13] 습식산화 공정 테스트 결과 (산화막 제거 후 촬영) 24
[그림 2-14] 타입 1 습식산화 공정 결과 (산화막 제거 후 촬영) 25
[그림 2-15] 타입 2 습식산화 공정 결과 (산화막 제거 후 촬영) 25
[그림 2-16] 타입 3 습식산화 공정 결과 (산화막 제거 후 촬영) 26
[그림 2-17] 습식산화 공정 결과 (산화막 제거 후 촬영).....26
[그림 2-18] 습식식각 공정 결과.....27
[그림 2-19] 습식식각 공정 결과.....28
[그림 2-20] 실리콘 산화막 증착 공정 결과.....29
[그림 2-21] 실리콘 질화막 증착 공정 결과.....29
[그림 2-22] 실리콘 식각 공정 결과.....31
[그림 2-23] 실리콘 식각 공정 결과.....32
[그림 2-24] 마이크로폰 공정 결과 (side view) 34
[그림 2-25] 마이크로폰 공정 결과 (side view) 34
[그림 2-26] 마이크로폰 공정 결과 (진동막) 35
[그림 2-27] 타입 1 마이크로폰 공정 결과 (top view).....35
[그림 2-28] 타입 2 마이크로폰 공정 결과 (top view).....36
[그림 2-29] 타입 3 마이크로폰 공정 결과 (top view).....36

[그림 2-30] 제작한 마이크로폰 소자와 상용센서 배치 37
[그림 2-31] 신호처리 회로.....38
[그림 2-32] 마이크로폰 측정 환경.....39
[그림 2-33] 마이크로폰 측정 환경.....41
[그림 2-34] 스피커 볼륨의 크기에 따른 출력전압 비교 (0.5 kHz 음압 인가, 상용센서 포함).....43
[그림 2-35] 스피커 볼륨의 크기에 따른 출력전압 비교 (0.5 kHz 음압 인가, 상용센서 제외).....44
[그림 2-36] 스피커 볼륨의 크기에 따른 출력전압 비교 (1 kHz 음압 인가, 상용센서 포함).....45
[그림 2-37] 스피커 볼륨의 크기에 따른 출력전압 비교 (1 kHz 음압 인가, 상용센서 제외).....46
[그림 2-38] 스피커 볼륨의 크기에 따른 출력전압 비교 (1.5 kHz 음압 인가, 상용센서 포함).....47
[그림 2-39] 스피커 볼륨의 크기에 따른 출력전압 비교 (1.5 kHz 음압 인가, 상용센서 제외).....48
[그림 2-40] 스프링 내의 위치에 따른 변위의 기울기 변화...49
[그림 2-41] 스프링 내의 위치.....49
[그림 2-42] 진동막 중심에 압력을 인가 시 스프링에 나타나는 응력 분포 시뮬레이션 결과.....50
[그림 2-43] 주파수에 따른 타입 2 마이크로폰의 출력전압 결과 55
[그림 2-44] 기준 마이크로폰으로 측정한 주파수 별 음압의 세기.....55

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 배경

최근 사물인터넷(internet of things; IoT)의 영향으로 고품질, 고성능의 IoT 센서에 대한 수요량이 크게 증가함에 따라 미세전자기계시스템(microelectromechanical systems; MEMS) 분야가 크게 성장하고 있다. 그 중에서 스마트폰, AI 스피커 등의 음성인식 비서 서비스 적용으로 정확한 음성 인식을 돕는 필수 반도체인 MEMS 마이크로폰이 크게 주목을 받고 있다. 2017년 MEMS 마이크로폰은 10억 달러 이상 시장을 기록하였으며, 2017년부터 2022년까지 연평균 11.3 % 성장할 것으로 전망되고 있다 [1-3]. MEMS 마이크로폰은 정전용량형(capacitive type)과 압전형(piezoelectric type) 방식 등이 주로 이용되고 있으며, 그 중에서도 정전용량형 방식이 가장 일반적이다 [1].

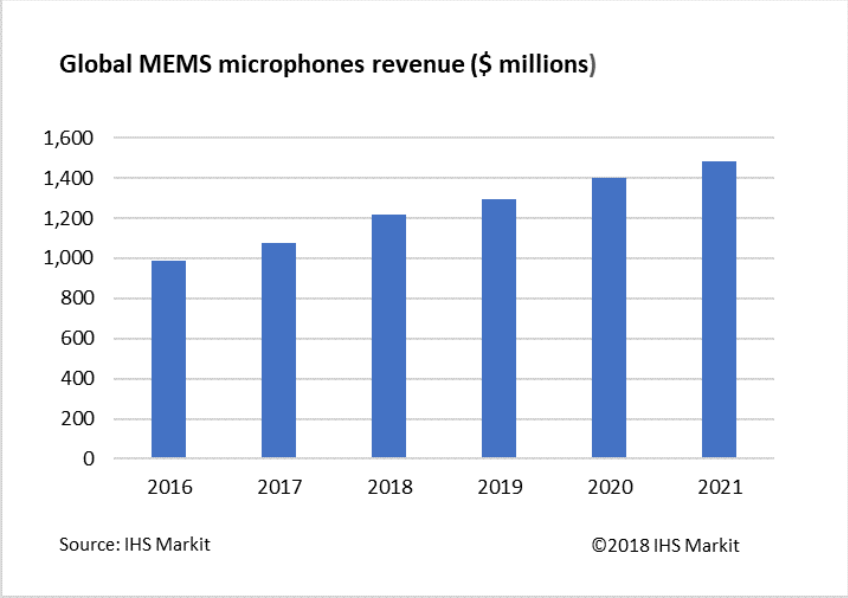

그림 1-1 세계 MEMS 마이크로폰 수익 [2]

그림 1-2 MEMS 마이크로폰 시장 전망 [3]

정전용량형 MEMS 마이크로폰은 아래 그림 1-3과 같이 진동막(membrane)과 후기판(backplate)으로 구성되며 진동막과 후기판 사이에 공기층(airgap)이 존재한다 [4]. 정전용량형 MEMS 마이크로폰은 음압에 따른 진동막의 변위를 진동막의 전극과 고정판의 전극 간의 정전용량의 변화를 통해 감지하여 소리를 측정한다.

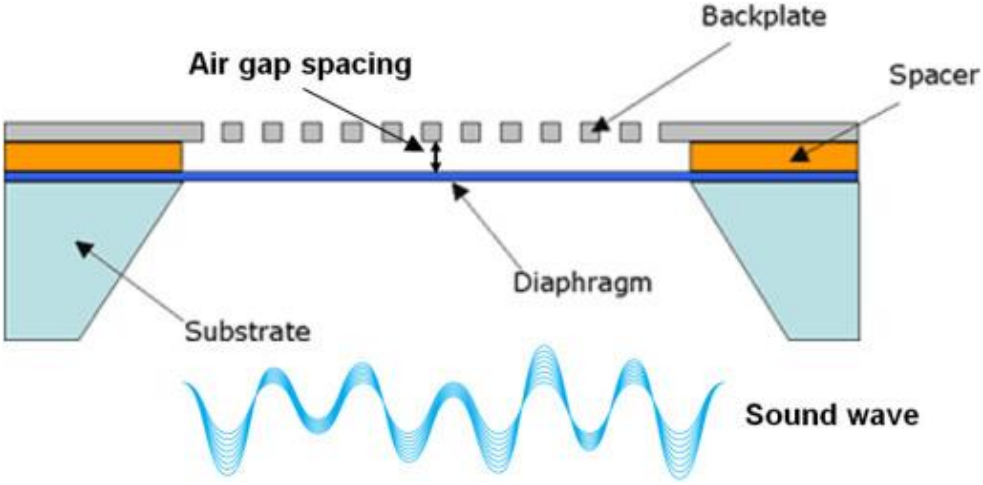

그림 1-3 정전용량 MEMS 마이크로폰 구조 [4]

가장 일반적으로 사용되는 상용 MEMS 마이크로폰은 정전용량형으로 정전용량형 마이크로폰 성능을 개선하기 위해 많은 연구가 이루어지고 있다 [5-10]. 정전용량형 마이크로폰의 단점 중 하나는 마이크로폰 소자의 크기를 소형화 하는데 제한적이라는 점이다 [11, 12]. 커패시턴스 (capacitance) 는 평판의 면적에 비례하고 두 평판 사이의 거리에 반비례하여 마이크로폰 소자의 소형화와 민감도는 trade-off 관계이다. 따라서 정전용량형 MEMS 마이크로폰은 소자의 크기를 감소시킬 경우 커패시턴스가 감소하여 민감도는 낮아지게 된다.

또한, 정전용량형 MEMS 마이크로폰의 구조상 필수적인 진동막과 후기판 사이의 공기층에서 여러 문제들이 발생한다 [13, 14]. 미세 먼지가 진동막과 후기판 사이의 공기층에 들어가게 되면 진동막의 움직임에 방해가 되어 센서 작동에 문제가 발생할 수 있다. 또한, 물이 진동막과 후기판 사이의 공기층에 들어가면 진동막을 후기판 쪽으로 당기는 인력을 가진 필름이 형성된다. 물이 증발하면서 진동막을 후기판 쪽으로 당기는 인력이 강해져 진동막과 후기판이 접촉하게 되면 진동막과 후기판이 영구적으로 붙을 가능성이 크다. 마지막으로 가속, 기계적 충격, 음향과부하 등에 의해 진동막이 후기판 쪽으로 변위가 발생하여 접촉하게 되면 진동막과 후기판이 정전기적으로 붙은 상태로 고정되어 마이크로폰이 작동하지 못하게 된다.

앞의 내용을 요약하면 현재 가장 일반적으로 사용되는 MEMS 마이크로폰은 대부분 정전용량형이며, 정전용량형 MEMS 마이크로폰은 소형화에 제한적이고 진동막과 고정판 사이의 공기층으로부터 여러 문제들이 발생한다. 이러한 문제점들에 대한 대안으로 실리콘 나노와이어(silicon nanowire; SiNW)의 압저항 효과를 이용한 마이크로폰을 제시하고자 한다.

제 2 절 연구의 내용

본 논문에서는 실리콘 나노와이어의 우수한 압저항 효과를 이용한 MEMS 마이크로폰을 제안한다. 제안한 실리콘 나노와이어 기반 MEMS 마이크로폰은 후기판 없이 스프링과 결합된 진동막, 앵커(anchor), 캐비티(cavity)로 구성하였으며 실리콘 나노와이어를 스프링 안에 삽입한 형태이다. 마이크로폰에 음압이 인가되면 음압에 따른 진동막의 변위가 스프링의 변위를 발생시키고, 이에 따라 실리콘 나노와이어의 저항 변화를 통해 소리를 감지하는 원리를 이용하였다.

본 논문에서 제시하는 실리콘 나노와이어 기반 MEMS 마이크로폰은 압저항형 방식을 이용하여 후기판이 필요없어 정전용량 마이크로폰의 소형화 제한 문제를 해결할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 진동막과 후기판 사이의 공기층으로부터 발생하는 문제점들을 해결할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 본 논문에서 제시하는 마이크로폰 공법의 경우, 노광 공정 횟수가 4회로 상용 센서 대비 상당히 간단한 공정이며 thin silicon-on-insulator (SOI) 웨이퍼나 전자빔 노광(electron beam lithography) 공정과 같은 고가의 공정이 필요하지 않다는 점에서 큰 장점을 가지고 있다.

마지막으로 본 논문에서 제안하는 실리콘 나노와이어 기반 MEMS 마이크로폰 성능을 평가하기 위해 실리콘 나노와이어 공정 기술을 활용한 마이크로폰 공법을 통해 마이크로폰 소자를 제작하여 측정을 진행하였다.

본 논문의 제 1장 서론에 이어서, 제 2장 이하의 본문 구성은 다음과 같다. 제 2장 1절에서는 제안한 마이크로폰에 이용한 실리콘 나노와이어에 대해 설명한다. 제 2장 2절에서는 제안하는 실리콘 나노와이어 기반 MEMS 마이크로폰의 설계에 대해 설명한다. 제 2장

3절에서는 개발한 실리콘 나노와이어 기반 MEMS 마이크로폰의 공정 기술과 개발한 실리콘 나노와이어 기반 MEMS 마이크로폰 공정 기술을 이용하여 제작한 마이크로폰의 결과를 공정 별로 설명한다. 제 2장 4절에서는 제작한 실리콘 나노와이어 기반 MEMS 마이크로폰의 특성 평가 방법을 설정한다. 제 2장 5절에서는 제작한 마이크로폰 측정 결과에 대해 설명한다. 제 3장은 결론으로 본 논문의 내용을 정리하고 향후 계획에 대하여 기술한다.

제 2 장 본 론

제 1 절 실리콘 나노와이어

커패시턴스의 변화를 감지하는 방식 이용한 MEMS 센서 연구가 많이 수행되고 있지만, 정전용량형 센서의 경우 커패시턴스가 평판의 면적에 비례하고 두 평판 사이의 거리에 반비례하여 소자 소형화에 제한적이다. 이를 해결하기 위한 방안으로 실리콘 나노와이어의 압저항 특성을 이용한 MEMS 센서 연구가 수행되고 있다 [15]. 실리콘 나노와이어의 압저항 특성은 벌크 실리콘과 비교하면 압저항 특성이 수십 배 크기 때문에 센서에 적용하기에 큰 이점을 가지고 있다 [16].

나노와이어는 수십~수백 nm 단면적 크기를 가지는 1차원 나노 구조이다. 나노와이어는 큰 표면적 대 부피비를 가지고, 고종비를 가진 구조로 표면전하효과(surface charge effect)증가와 양자구속효과(quantum confinement effect), 자기 조립 특성(self-assembly), 응력 완화 특성(stress relaxation) 등 기존의 벌크 소재에서 발견할 수 없는 다양한 특성들이 나타난다.

제 1항 실리콘 나노와이어의 압저항 효과

실리콘, 금, 백금, 구리 등을 다양한 물질을 이용한 나노와이어가 연구되고 있다 [17, 18]. 그 중 실리콘 나노와이어의 경우 2000년대에 실리콘 나노와이어의 벌크 실리콘 대비 우수한 압저항 효과가 발견이 되면서 큰 관심을 받고 있다 [19]. 실리콘 나노와이어는 압저항 효과에 대한 이론적인 원리와 공정 기술에 대해 주로 연구가 수행되고 있다.

실리콘 나노와이어의 압저항 효과는 압력에 따른 비저항 변화로

나타나게 된다. 실리콘 나노와이어의 우수한 압저항 효과에 대한 이론적인 원리 및 모델은 아직 명확하게 설명되지 못하고 있다[20]. 실리콘 나노와이어의 압저항 효과를 양자구속효과로 설명하는 모델 [21-23]과 표면전하 효과로 설명하는 모델 [24-26]이 제시되었다. 양자구속효과를 이용한 모델의 기본 원리는 응력에 의해 에너지 밴드가 민감하게 변하고 유효 질량이 변하여 압저항 효과가 나타나게 된다는 것이다. 표면전하 효과로 설명하는 모델의 기본 원리는 응력에 의해 표면전하가 변하고 나노와이어의 전하 분포가 변하여 압저항 효과가 나타나게 된다는 것이다. 하지만 아직 정립된 실리콘 나노와이어의 압저항 효과 이론적 모델은 없다 [20].

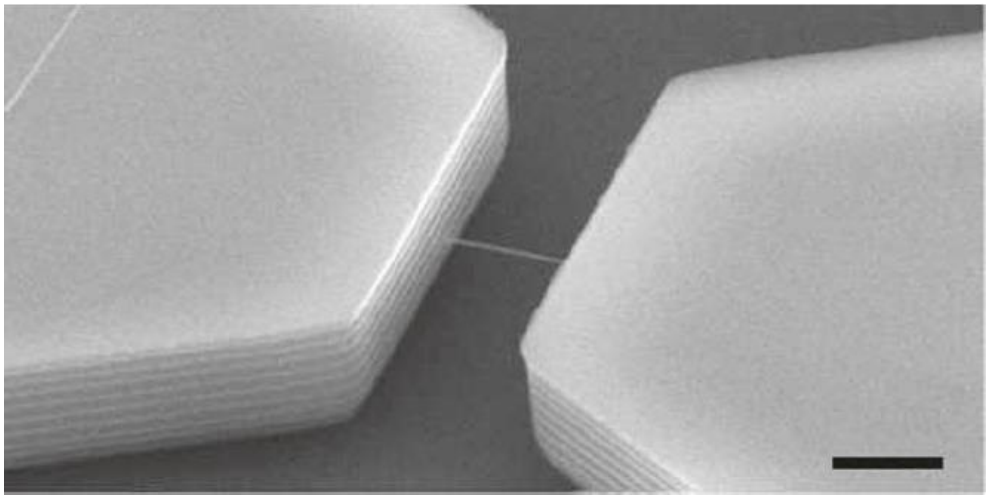

그림 2-1 실리콘 나노와이어 [19]

제 2항 실리콘 나노와이어의 공정 기술

실리콘 나노와이어 공정 기술에 대한 연구는 바텀-업(bottom-up)방식과 탑-다운(top-down)방식으로 나눌 수 있다[27]. 바텀-업 방식은 주로 vapor-liquid-solid(VLS) 기법을 활용한 방식으로 금속 촉매제를 이용하여 실리콘 나노와이어를 성장시킨다 [28]. 바텀-업

방식은 실리콘 나노와이어를 수 nm 수준으로 형성할 수 있으나 실리콘 나노와이어의 단면적 크기를 조절하기 어렵고 센서 구조체와의 통합이 어렵다는 단점을 가지고 있다. 탑-다운 방식은 Thin SOI 웨이퍼를 사용하여 전자빔 노광공정을 통해 실리콘 나노와이어를 형성하는 방식이다 [29]. 탑-다운 방식은 바텀-업 방식에 비해 실리콘 나노와이어의 정렬이 쉽다는 장점이 있지만 공정 상에서 실리콘 나노와이어의 두께 조절이 불가능하고 공정이 고가인 동시에 느리다는 단점을 가지고 있다. 또한, 탑-다운 방식의 경우 센서 구조체와 통합하기 위해서는 별도의 공정이 요구된다.

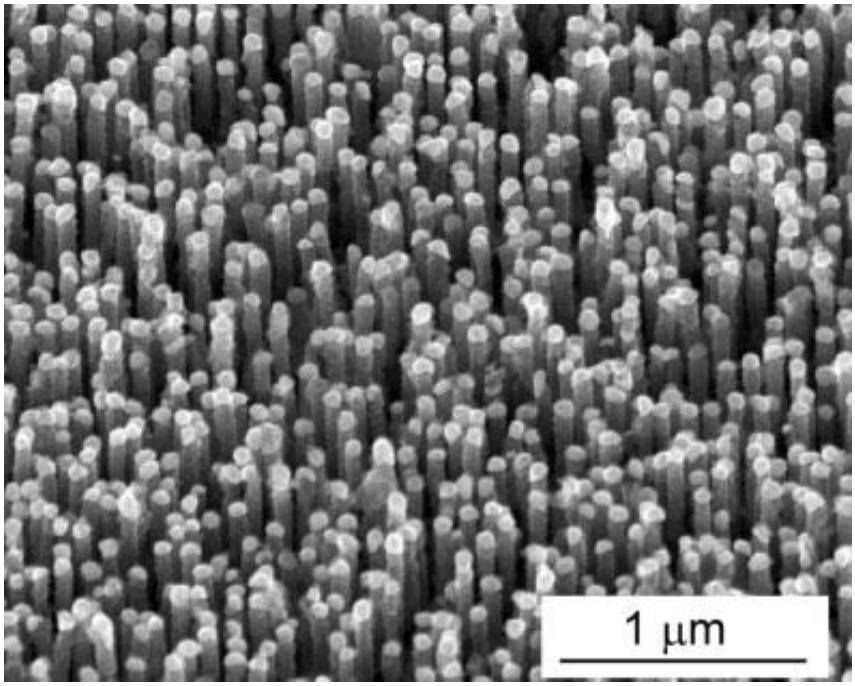

그림 2-2 바텀-업 방식으로 성장시킨 실리콘 나노와이어 [28]

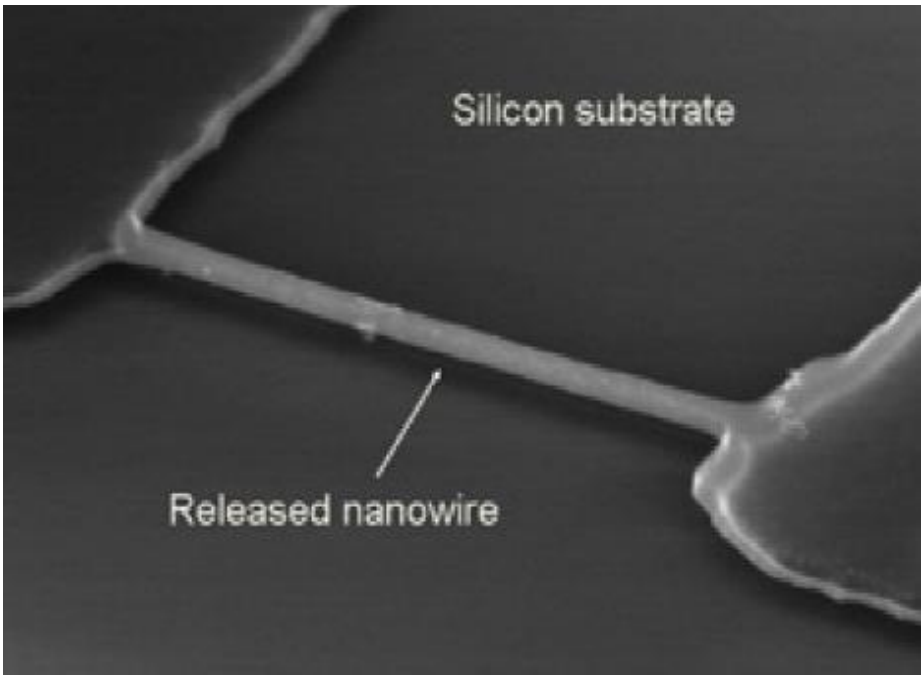

그림 2-3 탑-다운 방식으로 형성한 실리콘 나노와이어 [29]

본 논문에서 제시하는 실리콘 기반 마이크로폰은 본 연구진이 보유하고 있는 sacrificial bulk micromaching (SBM) 공정법을 활용하여 실리콘 나노와이어를 형성하였다 [30, 31]. SBM 공정법은 실리콘 나노와이어의 너비와 두께를 별도로 조절이 가능하며 실리콘 나노와이어와 센서 구조체를 동시에 형성할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

그림 2-4는 SBM 공정법의 공정도이다. 먼저 p 타입, (111) SOI 웨이퍼를 준비한다. 웨이퍼 클리닝을 진행하고 플라즈마 화학증착 공정을 이용하여 실리콘 산화막(silicon oxide)을 증착한다. 그 후 실리콘 나노와이어 패턴을 형성할 마스크를 이용하여 포토 공정을 진행한 후, 실리콘 산화막을 ICP 건식식각(dry etch) 방식을 통해 실리콘 산화막을 식각한다. 이때 감광제 (photoresist) 패터닝은 실리콘 나노와이어 부분을 패터닝하는 것으로 실리콘 나노와이어의 길이와

두께에 영향을 미친다. 이후, 실리콘을 반응성 이온 식각 (reactive ion etch) 방식을 통해 식각 공정을 진행한 후 감광제를 제거한다. 다음으로 습식산화 (wet oxidation) 공정을 수행한다. 습식산화 공정으로 실리콘 나노와이어 양 측면 실리콘이 산화되어 형성된 실리콘 산화막은 이후 습식식각 (wet etch) 공정에서 실리콘 나노와이어를 보호하는 역할을 한다. 실리콘 산화막을 형성한 후, 트랜치 바닥 부분의 실리콘 산화막을 제거하기 위해 ICP 건식식각 공정을 진행한다. 그리고 2차 DRIE 공정을 통해 실리콘을 식각한다. 그 후 potassium hydroxide (KOH) (45wt%, 85℃)와 같은 알칼라인 식각 용액을 이용하여 습식식각 공정을 한다. 실리콘 결정 방향에 따라 실리콘 식각 속도가 다른 특성을 통해 습식산화 공정으로 형성된 실리콘 산화막으로 보호되지 않는 실리콘은 습식식각되어 실리콘 나노와이어는 부유된다. 이때, SBM 공정은 습식산화 공정 시간에 따라 실리콘 나노와이어의 너비를 결정할 수 있으며, 습식식각 공정 시간에 따라 실리콘 나노와이어의 두께를 조절할 수 있다.

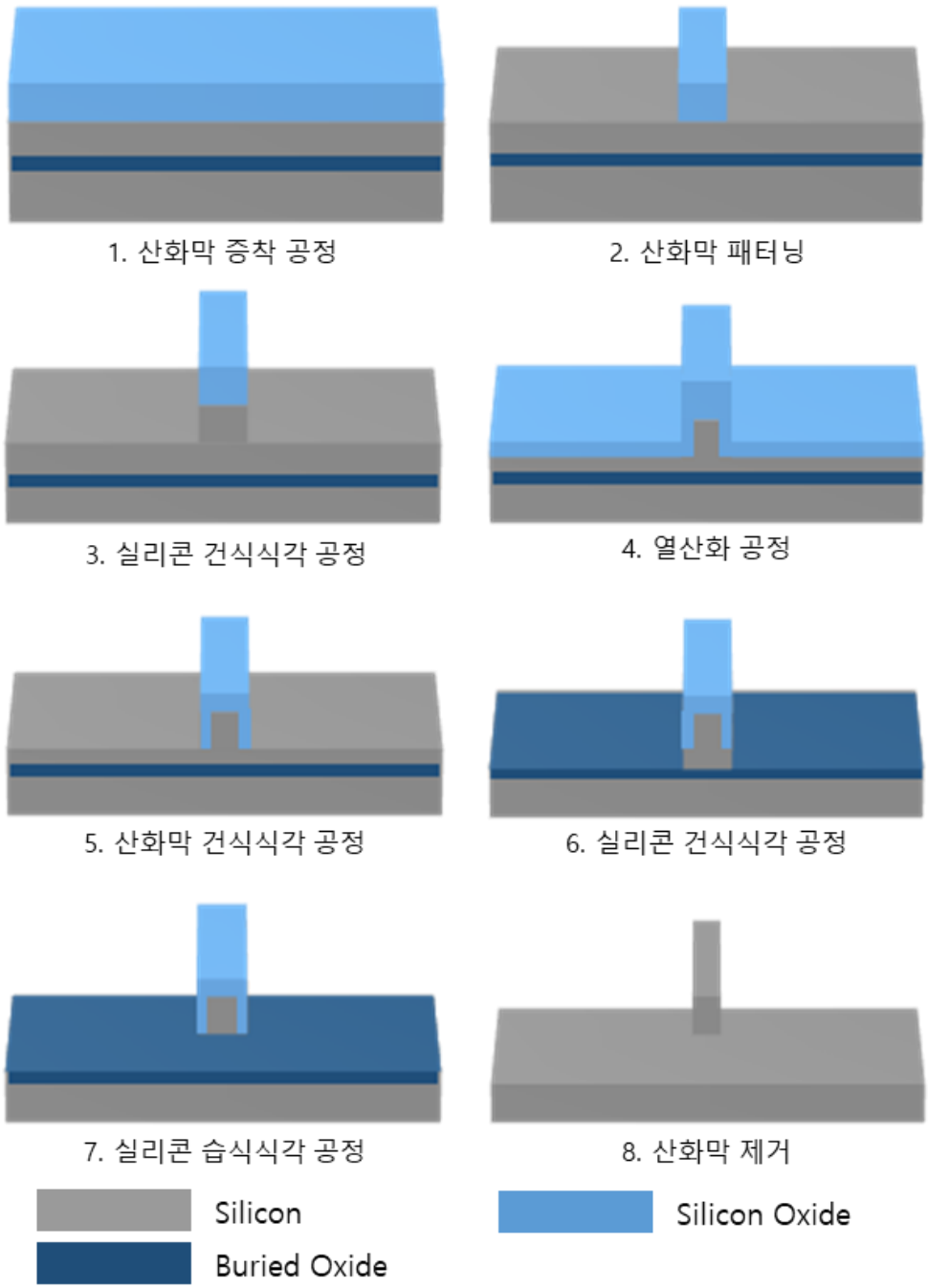

그림 2-4 SBM 공정법의 공정도

제 2 절 마이크로폰 설계

본 논문에서 제안하는 실리콘 나노와이어 기반 MEMS 마이크로폰은 후기판 없이 스프링과 결합된 진동막, 앵커 (anchor), 캐비티 (cavity)로 구성하였다.

마이크로폰 소자의 크기는 전극을 포함하여 약 1.2 mm × 1.2 mm × 360 μm 수준으로 설계하였다. 진동막의 직경은 스프링을 제외하고 300 μm이며, 두께는 약 2 μm이다. 전극 패드의 크기는 400 μm × 400 μm이며, 캐비티는 직경 400 μm, 높이 360 μm이다.

제 1항 실리콘 나노와이어

스프링 내에 실리콘 나노와이어를 삽입한 형태로 구성하여 마이크로폰에 음압이 인가되면 음압에 따른 진동막의 변위가 스프링의 변위를 발생시키고, 동시에 실리콘 나노와이어도 함께 변위가 발생하도록 설계하였다. 스프링 내에 실리콘 나노와이어는 그림 2-5와 같이 실리콘 질화막(silicon nitride)으로 구성된 스프링 내에 실리콘 산화막으로 측면과 윗면이 덮인 형태로 구성되어 있다. 실리콘 나노와이어의 크기는 300 nm × 300 nm× 15 μm로 설계하였다.

실리콘 나노와이어는 스프링 안에 배치하고 전기적 연결을 위해서 실리콘 구조물을 통해 앵커까지 연결하는 형태로 설계하였다. 앵커는 총 5 영역으로 나누어 절연을 통하여 분리하고 각 영역에 전극 패드를 배치하였다. 절연을 통해 분리된 두 영역의 앵커를 실리콘 나노와이어와 실리콘 구조물을 통해 연결한 형태로 그림 2-6과 같이 2 가지 디자인을 설계하였다. 디자인 1은 하나의 스프링에 한 영역의 앵커만 연결하고, 진동막 중심에서 실리콘 구조물을 방사형으로 구성하여 모든 실리콘 나노와이어가 연결되도록 하였다. 따라서 임의의 두 전극을 선택

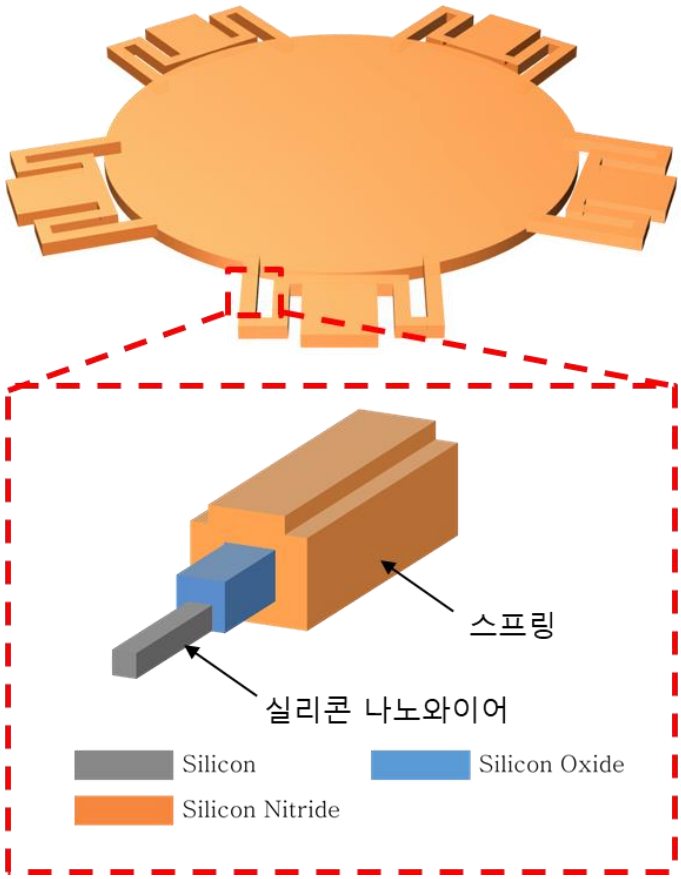

그림 2-5 스프링 내 실리콘 나노와이어 구성

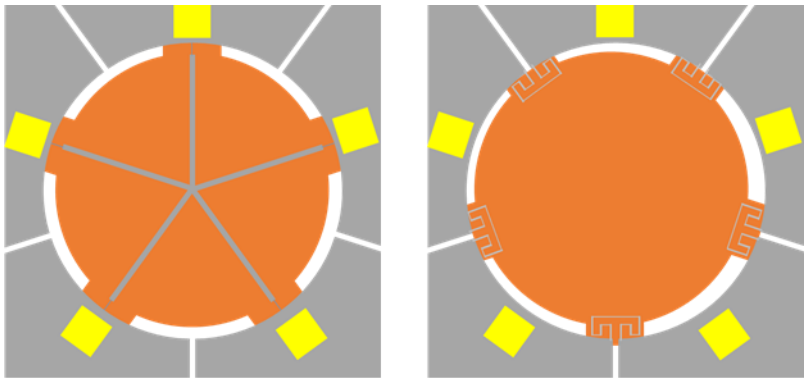

그림 2-6 전기적 연결에 따른 2 가지 디자인

하면 측정이 가능하도록 설계하였다. 디자인 2는 하나의 스프링에 두 영역의 앵커가 연결되도록 하고, 스프링 내에만 실리콘 나노와이어와 실리콘 구조물을 구성하여 두 영역의 앵커를 연결해주었다. 따라서 이웃한 두 전극을 선택하면 측정이 가능하도록 설계하였다. 이때, 디자인 2는 스프링 내 실리콘 나노와이어 위치를 두 가지로 설정하여 총 3 가지 타입의 마이크로폰을 설계하였다.

그림 2-7은 3 가지 타입의 마이크로폰을 보여준다. 타입 1의 경우 임의의 두 전극을 선택하면 측정이 가능하여 작동하는 소자 확보하기에 더 유리하다는 장점을 가지고 있다. 타입 2의 경우 민감도는 떨어지지만, 다른 타입들과 비교하면 마스크 정렬이 간단하고 공정상 이슈 발생 가능성이 작다는 장점을 가지고 있다. 타입 3의 경우, 실리콘 나노와이어가 스프링 내에서 음압 인가 시 변위가 큰 부분에 위치해 있어 다른 타입들에 비해 민감도가 크다는 특징을 가지고 있다.

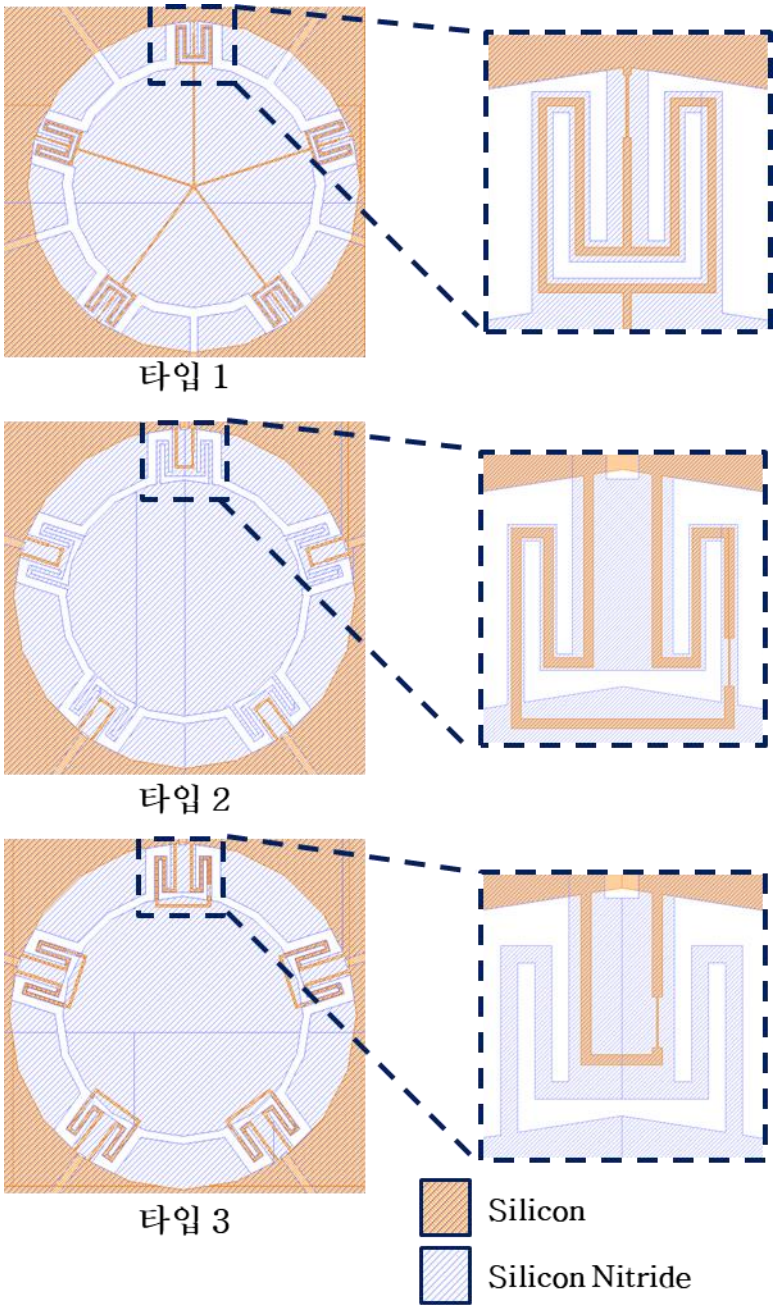

그림 2-7 설계한 3 가지 타입의 마이크로폰

제 2항 진동막 및 스프링

진동막의 경우 스프링이 없이 fully clamped edges 구조로 구성할 경우 진동막의 변위가 제한적이므로, 스프링을 결합한 형태로

설계하였다. 이를 통해 감도를 높일 수 있는 효과를 얻을 수 있다. 그림 2-8은 설계한 마이크로폰의 스프링 디자인을 보여준다. 스프링은 folded 스프링을 활용하여 설계하였다. 경첩처럼 동작하여 음압 인가 시 진동막의 가장자리 부분에 변위가 크게 발생하는 구조이다 [32].

본 연구진이 수행했던 실리콘 나노와이어의 압저항 효과 실험 결과 [33]를 바탕으로 길이 15 μm, 단면적 300 nm × 300 nm를 갖는 실리콘 나노와이어가 음압 감지를 위해 필요한 변위 범위를 계산하였다. 130 dB이하의 가청 음압 범위의 음압을 마이크로폰에 인가하였을 때, 실리콘 나노와이어에 수십 nm 이상의 충분한 변위가 발생하여 음압을 감지할 수 있도록 스프링 및 진동막을 설계하고, 유한요소법 기반 시뮬레이션을 수행하여 이를 확인하였다. 또한, 유한요소법 기반 시뮬레이션을 통해 모드 및 공진주파수 분석을 진행하였다. 그림 2-9는 시뮬레이션을 통해 모드 분석을 진행한 결과이며, 1차 모드의 공진 주파수가 약 12 kHz에서 발생한 결과를 보여준다.

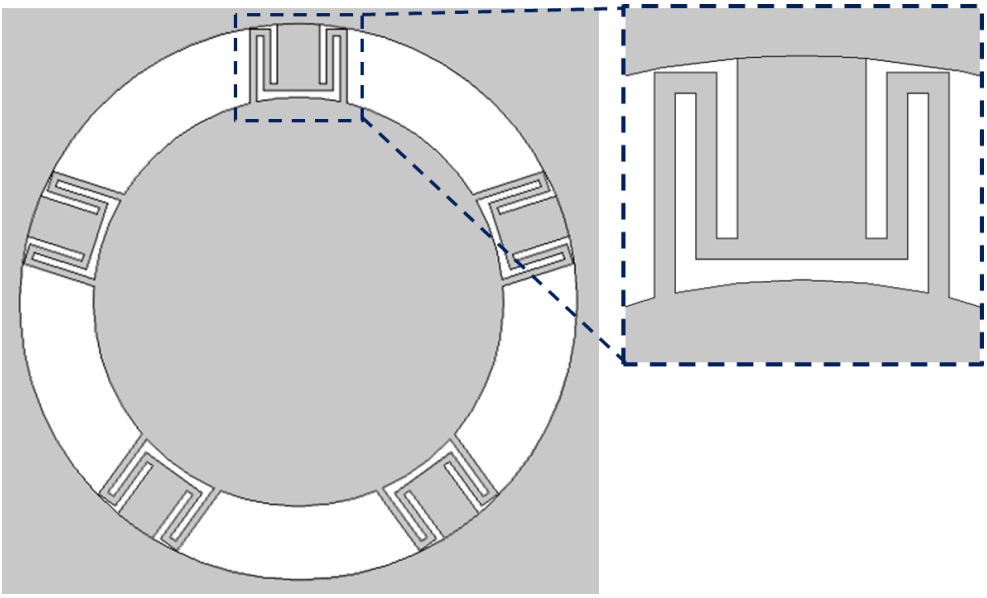

그림 2-8 스프링 디자인

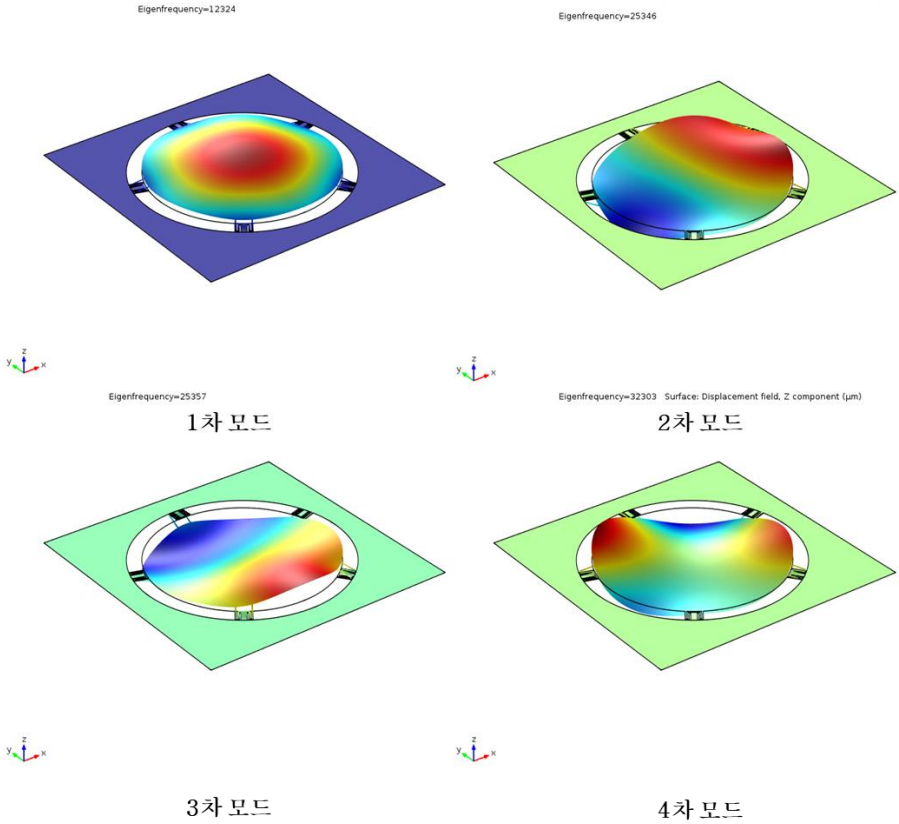

그림 2-9 모드 분석 시뮬레이션 결과

제 3 절 마이크로폰 공법

제 1항 마이크로폰 공법 개발

본 연구진이 보유하고 있는 sacrificial bulk micromaching (SBM) 공정법 [31, 32]을 응용하여 실리콘 나노와이어 기반 마이크로폰 공정 기술을 개발하였다. 개발한 공법은 노광 공정 횟수가 4회로 Knowles 社의 경우 12회, Infineon 社 10회인 것에 비하면 상당히 간단한 공정인 것을 알 수 있다 [34]. 또한, Thin SOI 웨이퍼나 전자빔 노광 공정과 같은 고가의 공정이 필요하지 않다는 점에서 상당한 이점을 가지고 있다 [35].

그림 2-10은 개발한 실리콘 나노와이어 기반 마이크로폰 공법의

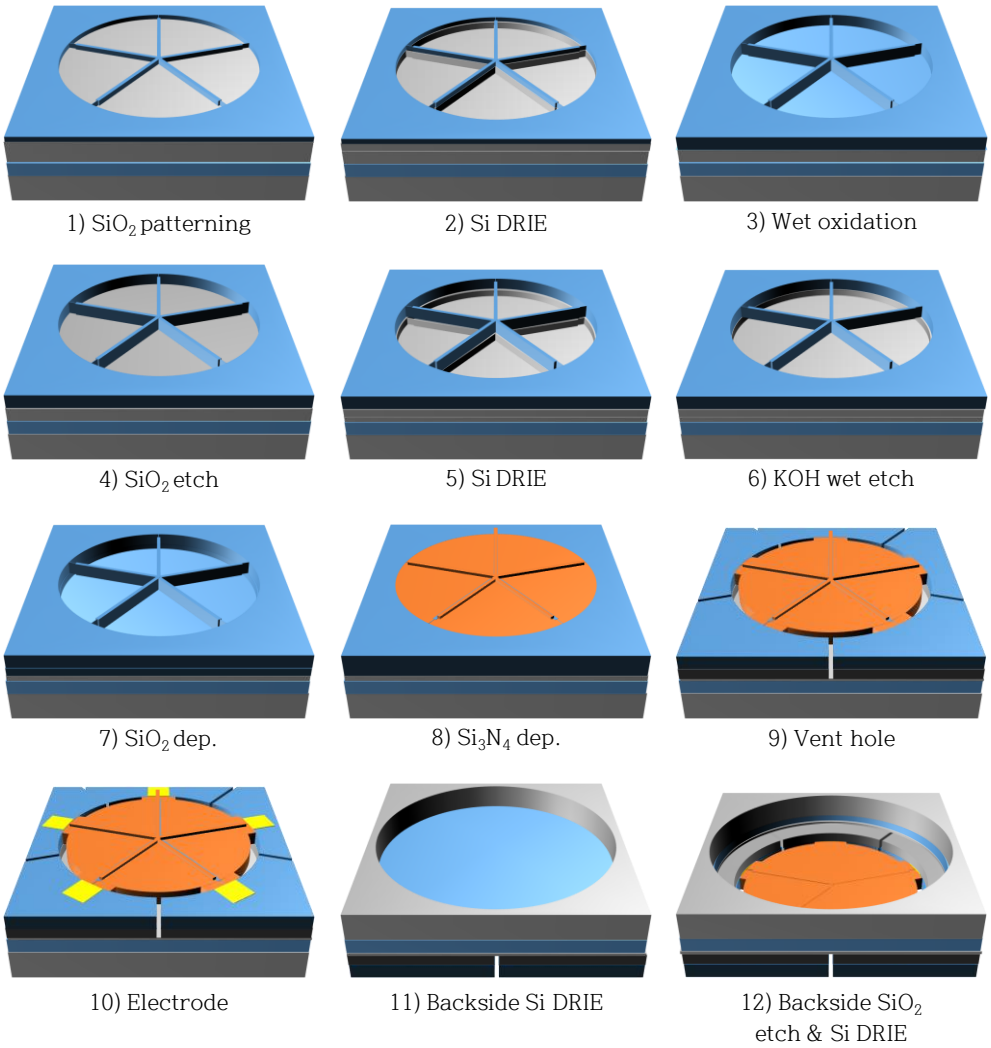

그림 2-10 실리콘 나노와이어 기반 마이크로폰 공정도

공정도를 보여준다. 공정에는 6 inch 크기에 65 μm 두께의 디바이스층, 2 μm 두께의 BOX (buried oxide) 층, 400 μm 두께의 주실리콘기판 (handle) 층을 가진 p 타입, (111) SOI 웨이퍼 (Siltron 社)가 사용된다. 마스크는 총 4장이 첫 번째 마스크는 나노와이어와 진동막의 크기를 정의하는 역할을 한다. 두 번째 마스크는 스프링과 절연선을 정의하는 역할을 하며, 세 번째 마스크는 전극 패턴을 정의하는 역할을 한다. 마지막 마스크는 웨이퍼의 후면(backside)에 캐비티의 패턴을

정의하는 역할을 한다. 개발한 실리콘 나노와이어 기반 마이크로폰 공법은 사용되는 마스크에 따라 4단계로 나눌 수 있다. 1단계는 나노와이어 형성, 2단계는 스프링 및 절연이 필요한 부분 형성, 3단계는 전극 형성, 4단계는 캐비티 형성으로 나눌 수 있다.

그림 2-11은 마이크로폰 공정도 중 첫 번째 단계인 실리콘 나노와이어 형성 부분을 나타낸 것이다. 먼저 CMP (chemical-mechanical planarization) 공정을 통해 SOI 웨이퍼의 디바이스 층의

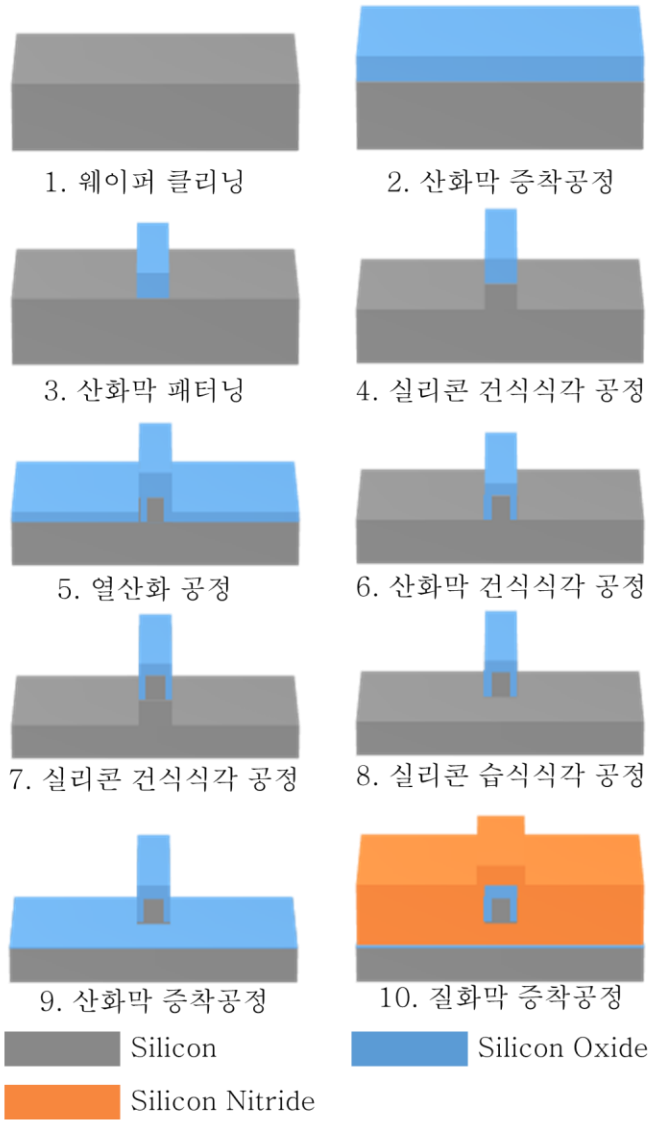

그림 2-11 마이크로폰 공정도 중 실리콘 나노와이어 형성 부분

두께를 10 μm 이내로 만들어준다. 그 후 웨이퍼 클리닝을 진행하고 플라즈마 화학증착 공정을 이용하여 실리콘 산화막을 증착한다. 첫 번째 마스크를 이용하여 포토 공정을 진행한 후, 실리콘 산화막을 ICP 건식식각 방식을 통해 실리콘 산화막을 식각한다. 이때 감광제 패터닝은 실리콘 나노와이어 부분을 패터닝하는 것으로 실리콘 나노와이어의 길이와 두께에 영향을 미친다. 이후, 실리콘을 반응성 이온 식각 방식을 통해 식각 공정을 진행한 후 감광제를 제거한다. 다음으로 습식산화 공정을 수행하는데 습식산화 공정 시간에 따라 실리콘 나노와이어의 너비를 결정할 수 있다. 또한, 습식산화 공정으로 실리콘 나노와이어 양 측면 실리콘이 산화되어 형성된 실리콘 산화막은 이후 습식식각 공정에서 실리콘 나노와이어를 보호하는 역할을 하게 된다. 실리콘 산화막을 형성한 후, 진동막 부분의 실리콘 산화막을 제거하기 위해 ICP 건식식각 공정을 진행한다. 그리고 2차 DRIE 공정을 통해 실리콘을 식각한다. 그 후 KOH (45wt%, 85℃)와 같은 알칼라인 식각 용액을 이용하여 습식식각 공정을 할 때, 실리콘 결정 방향에 따라 실리콘 식각 속도가 다른 특성을 활용하여 실리콘 습식식각 공정을 수행한다. 이 과정을 통해 실리콘 나노와이어는 부유되며, 습식식각 공정 시간에 따라 실리콘 나노와이어의 두께를 조절할 수 있다.

그림 2-12는 마이크로폰 공정도 중 진동막 부분을 나타낸 것이다. 이어서 실리콘 산화막을 증착하는 공정을 통하여 진동막 부분에 얇은 실리콘 산화막을 증착한다. 이는 이후 마지막 공정인 웨이퍼 후면 실리콘 식각 공정으로 진동막 밑부분에 존재하는 실리콘을 식각할 때, 진동막의 실리콘 질화막을 보호하기 위한 보호막 역할을 한다. 그 후 전면에 실리콘 질화막을 증착한다. 두 번째 마스크를 이용하여 포토 공

그림 2-12 마이크로폰 공정도 중 진동막 부분

정을 진행한 후, 실리콘 질화막과 실리콘 산화막을 순서대로 ICP 건식식각 방식을 통해 식각한다. 이때 감광제 패터닝은 스프링과 전기적 절연이 필요한 부분을 패터닝하는 것이다. 그 후 DRIE 공정을 통해 SOI 웨이퍼의 BOX 층 실리콘 산화막이 드러날 때까지 실리콘을 식각한

후 감광제를 제거한다. 이를 통해 전기적으로 절연이 되어야하는 부분들이 절연된다.

그 후, 세 번째 마스크를 이용하여 포토 공정을 진행한 후, 실리콘 질화막과 실리콘 산화막을 순서대로 ICP 건식식각 방식을 통해 식각한다. 이때 감광제 패터닝은 전극 패드 부분을 패터닝하는 것이다. 실리콘 산화막 건식식각할 때 충분히 식각을 하여 실리콘도 식각이 되도록 진행한다. 그 후 전자빔증발법 (e-beam evaporation) 을 이용하여 Cr을 300 Å (adhesion 용) 증착하고, Au를 3000 Å 증착한다. 다음으로 애싱 (ashing) 공정을 통해 감광제를 제거하여 전극 부분에만 Cr과 Au과 남아있도록 한다.

그런 후, 웨이퍼 후면에 CMP 공정을 진행하여 웨이퍼의 주실리콘기판 층의 두께를 350 μm 가 되도록 만들어 준다. 그 후에 웨이퍼 클리닝을 진행하고 웨이퍼 후면에 네 번째 마스크를 이용하여 포토 공정을 진행한다. 이때 감광제 패터닝은 마이크로폰 캐비티 부분을 패터닝하는 것으로 마이크로폰 캐비티의 단면의 면적이 결정된다. 그 후 DRIE 공정을 통해 SOI 웨이퍼의 BOX 층 실리콘 산화막이 드러날 때까지 실리콘을 식각한다. 다음으로 SOI 웨이퍼의 BOX 층 실리콘 산화막을 ICP 건식식각 방식을 통해 식각한다. 이 과정에서 웨이퍼는 관통이 되기 때문에 더미 substrate 웨이퍼를 SOI 웨이퍼에 붙여서 진행한다. 마지막으로 DRIE 공정을 통해 스프링과 진동막 밑부분에 존재하는 실리콘을 식각하여 제거한다.

제 2항 마이크로폰 제작 결과

먼저 SOI 웨이퍼의 디바이스 층의 두께를 10 μm 이내로 만들기 위해 CMP 공정을 진행하였다. 공정 결과 SOI 웨이퍼의 디바이스 층의

두께가 약 7 μm 인 것으로 측정되었다.

웨이퍼 클리닝을 진행하고 한국나노기술원의 LPCVD 장비(제조사: CENTROTHERM 社, 모델명: E1550)를 이용하여 실리콘 산화막 500 nm를 증착하였다. 공정 결과 약 520 nm 두께의 실리콘 산화막이 증착된 것으로 측정되었다.

다음으로 서울대학교 반도체공동연구소 Maskless Pattern System 장비(제조사: HP/NanoSystemSolutions 社, 모델명: DL-1000)를 이용하여 포토 공정을 진행하였다. Maskless Pattern System 장비의 경우 마스크를 따로 제작할 필요없이 gds파일 만으로 패턴을 구현할 수 있어 마스크 제작없이 진행하였다. 또한, 웨이퍼에 500 nm의 미세 선폭 구현이 가능하여 실리콘 나노와이어 패턴의 너비를 500 nm로 설정하고 노광 공정을 진행하였다. 감광제는 약 850 nm의 두께를 갖는 감광제를 사용하였다.

실리콘 산화막 패터닝을 위해 서울대학교 반도체공동연구소 Dielectric ICP Etcher 장비(제조사: 기가레인 社, 모델명: NeoS-MAXIS 200L)를 이용하여 실리콘 산화막 520 nm ICP 건식식각 공정을 수행하였다. 10 % 추가 식각 (over etch) 을 진행하여 공정 결과, 실리콘 산화막이 모두 식각됨을 확인하였다.

다음으로 한국나노기술원 ICP etcher IV 장비(제조사: STS 社, 모델명: Multiplex ICP)를 이용하여 반응성 이온 방식을 통해 450 nm 실리콘 식각 공정을 진행하였다. 측정 결과, 실리콘이 약 470 nm 식각된 것을 확인하였다.

그 후, 나노종합기술원 LPCVD 장비(제조사: CENTROTHERM 社, 모델명: E1550)를 이용하여 실리콘 나노와이어의 너비를 결정하는 습식산화 공정을 수행하였다. 실리콘 (111) 방향 기준으로 200 nm의 실리콘 산화막이 형성하는 것을 목표로 진행하였으나 측정 결과, 그림

2-13과 같이 실리콘 나노와이어 너비가 약 600 nm로 두껍게 형성이 되어 실리콘 (111) 방향 기준으로 250 nm의 실리콘 산화막이 형성하는 것을 목표로 수정하여 공정을 수행하였다. 습식산화 공정 후, 불산 용액을 활용하여 산화막을 제거하여 실리콘 나노와이어 너비를 측정하였다. 실리콘 나노와이어의 너비를 측정한 결과, 그림 2-17과 같이 실리콘 나노와이어 너비가 약 500 nm로 형성되었음을 확인하였다.

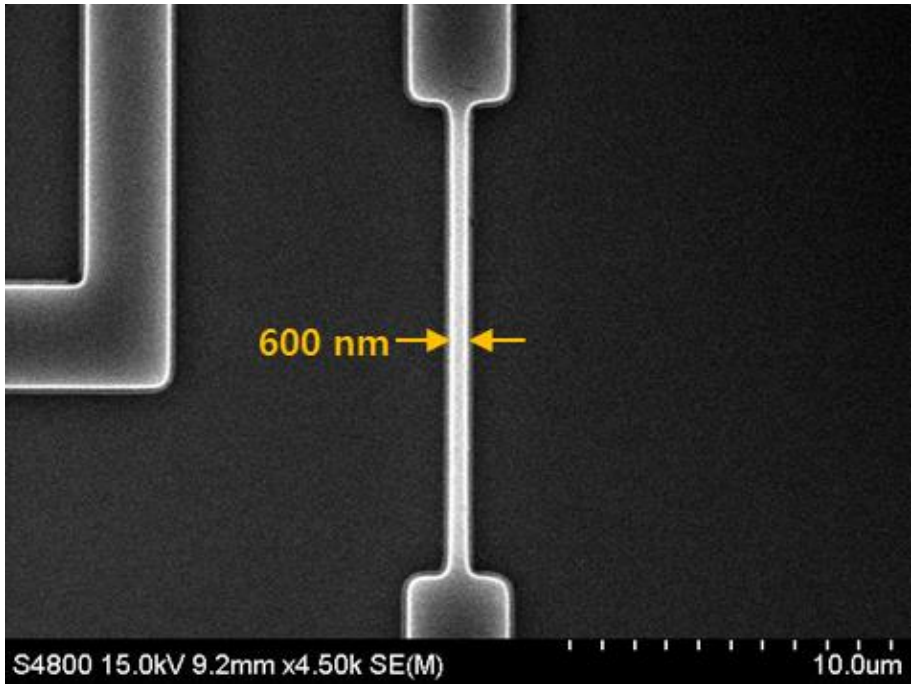

그림 2-13 습식산화 공정 테스트 결과 (산화막 제거 후 촬영)

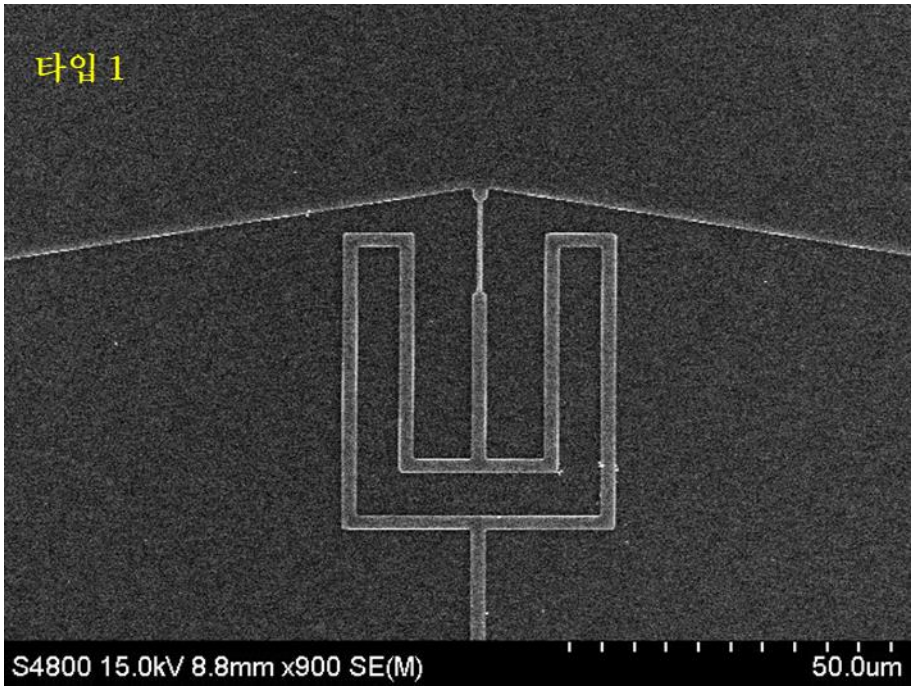

그림 2-14 타입 1 습식산화 공정 결과 (산화막 제거 후 촬영)

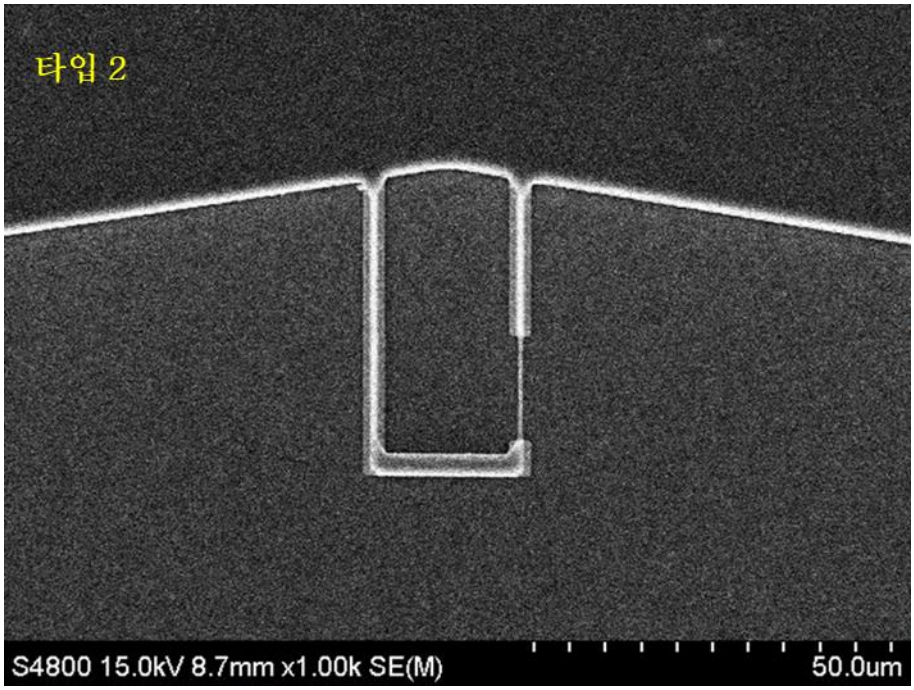

그림 2-15 타입 2 습식산화 공정 결과 (산화막 제거 후 촬영)

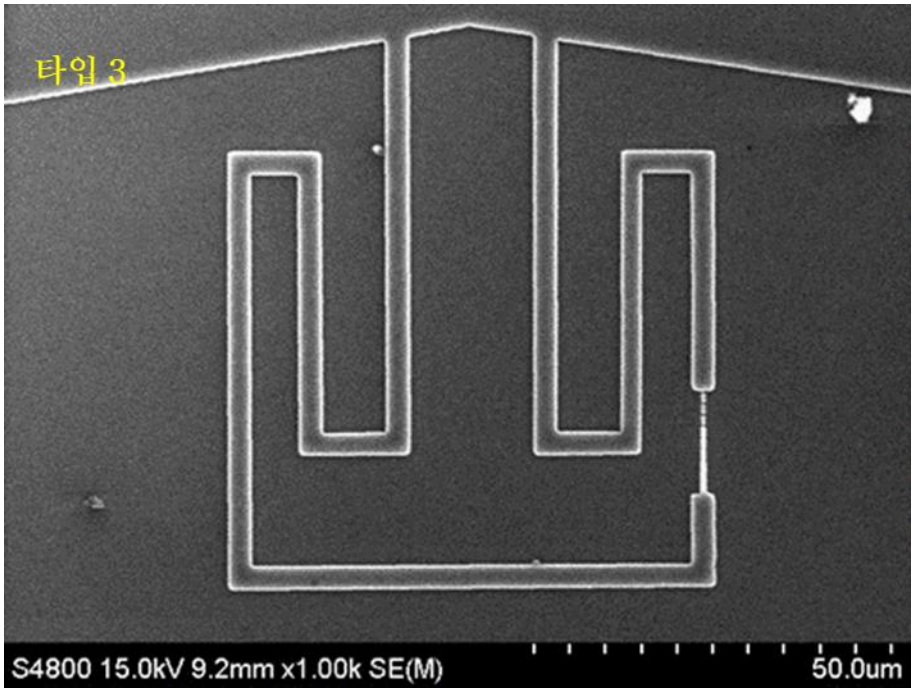

그림 2-16 타입 3 습식산화 공정 결과 (산화막 제거 후 촬영)

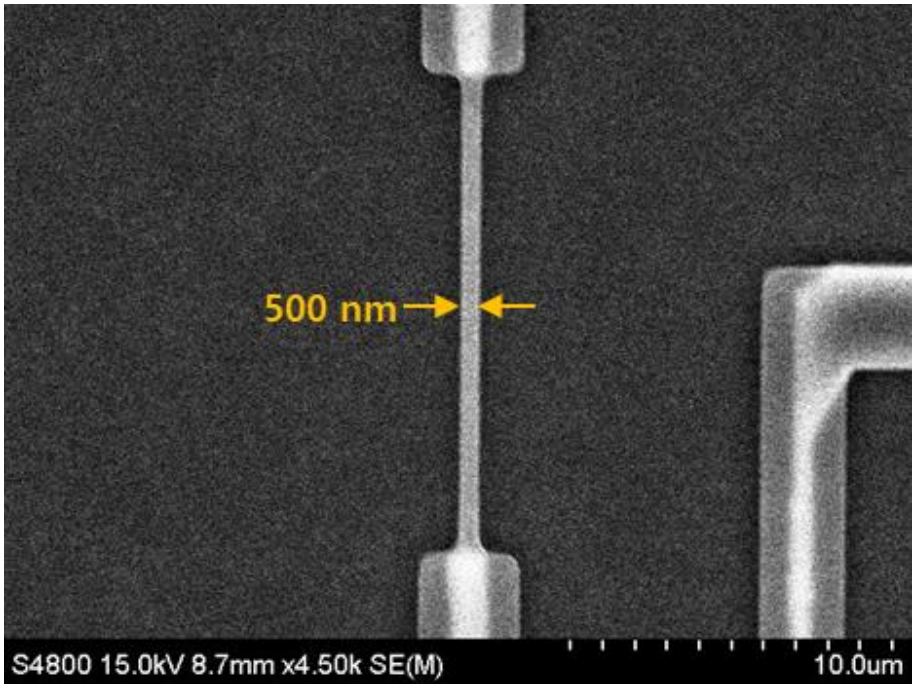

그림 2-17 습식산화 공정 결과 (산화막 제거 후 촬영)

실리콘 산화막 형성 후, 진동막 부분의 실리콘 산화막을 제거하기 위해 한국나노기술원 ICP Etcher III 장비(제조사: Oxford Instruments 社, 모델명: ICP 380)를 활용하여 ICP 건식식각 공정을 진행하였다. 습식산화 공정을 통해 형성된 250 nm의 실리콘 산화막을 모두 제거하기 위해 10 % 추가 식각을 진행하였다. 공정 결과, 실리콘 산화막이 모두 식각됨을 확인하였다.

이후 한국나노기술원 ICP etcher IV 장비(모델명/제작회사: Multiplex ICP / STS 社)를 이용하여 700 nm의 실리콘을 식각하였다. 공정 결과, 약 730 nm 두께의 실리콘이 식각되었음을 확인하였다.

그 후 중탕기를 이용하여 KOH (45%, 85℃) 용액을 85℃까지 가열한 후 1분간 습식식각 공정을 수행하였다. 공정 결과, 그림 2-18과 그림 2-19와 같이 실리콘 나노와이어 두께가 약 165 nm로 형성된 것을 확인하였으며 실리콘 나노와이어가 부유되었음을 확인하였다.

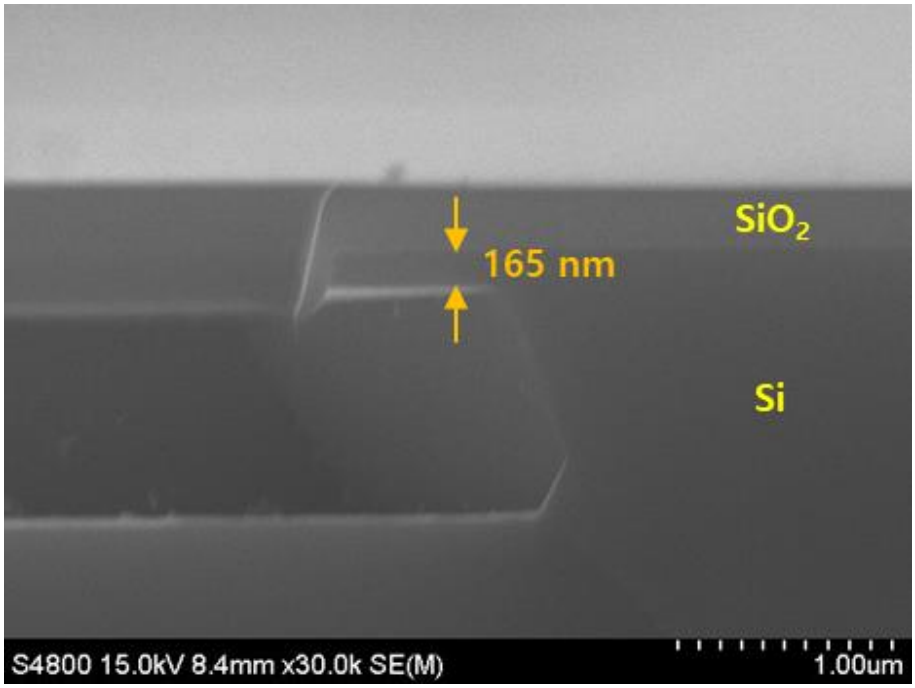

그림 2-18 습식식각 공정 결과

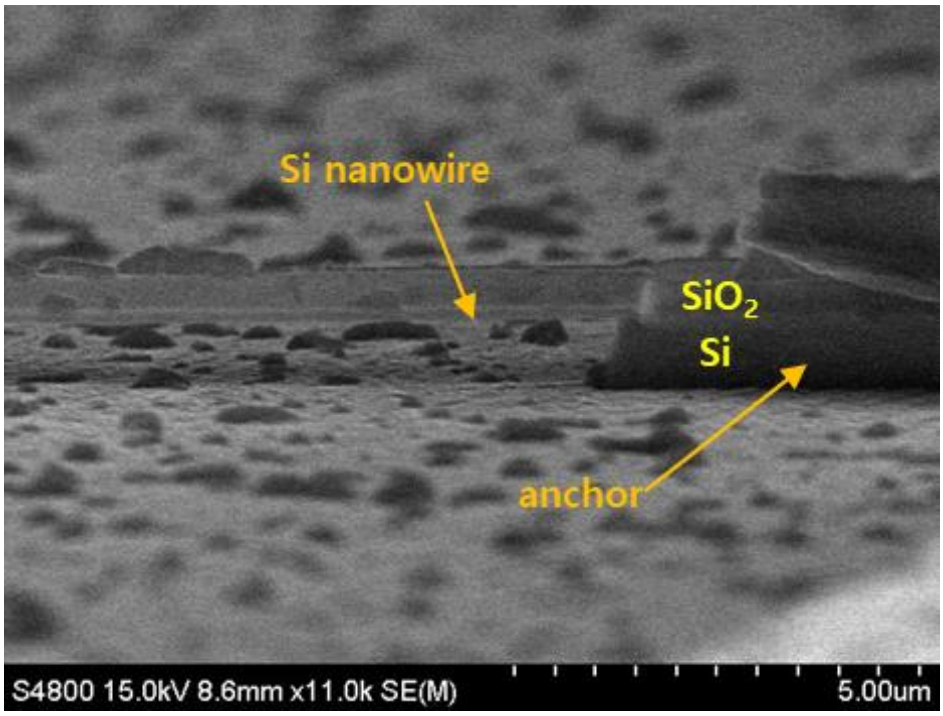

그림 2-19 습식식각 공정 결과

실리콘 나노와이어를 부유시킨 후, 실리콘 산화막을 증착하는 공정을 통하여 진동막 부분에 얇은 실리콘 산화막을 증착하였다. 한국나노기술원 HDPCVD 장비(제조사: BMR 社, 모델명: High-DEP)를 이용하여 100 nm 실리콘 산화막을 증착하였다. 공정 결과, 그림 2-20과 같이 진동막 부분에는 약 80 nm의 실리콘 산화막이 증착되었으며 실리콘 나노와이어 밑부분에는 약 50 nm의 실리콘 산화막이 증착되었음을 확인하였다.

그 후 전면에 한국나노기술원 HDPCVD 장비(제조사: BMR 社, 모델명: High-DEP)를 이용하여 1.7 μm 두께의 실리콘 질화막을 증착하였다. 공정 결과, 약 1.6 μm 두께의 실리콘 질화막이 증착되었으며 앵커 부분이 진동막 부분보다 약 20 nm 정도 낮게 증착이 되었다. 또한, 실리콘 나노와이어 밑과 앵커와 진동막 경계의 단

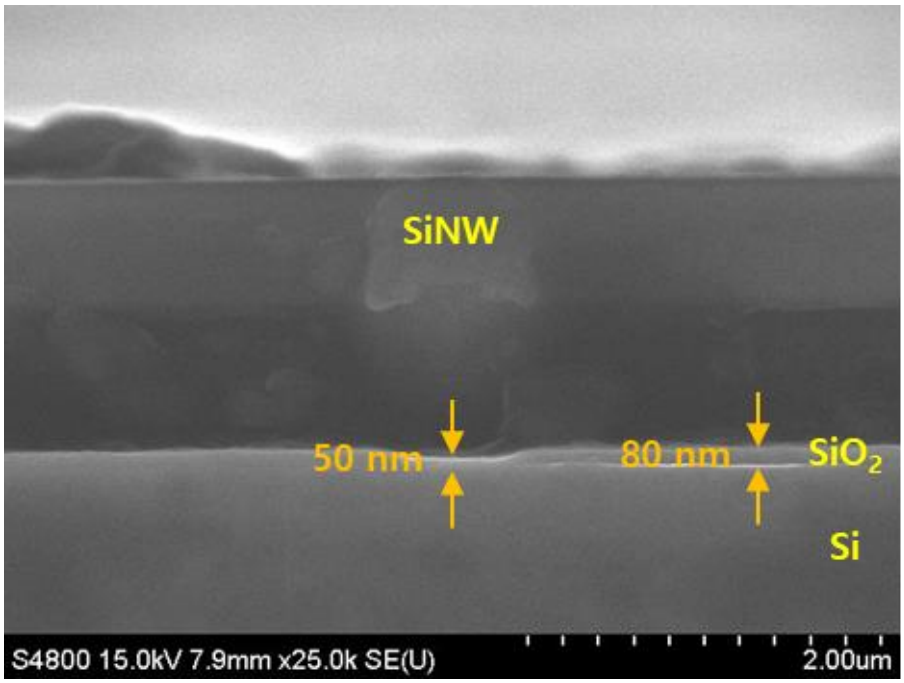

그림 2-20 실리콘 산화막 증착 공정 결과

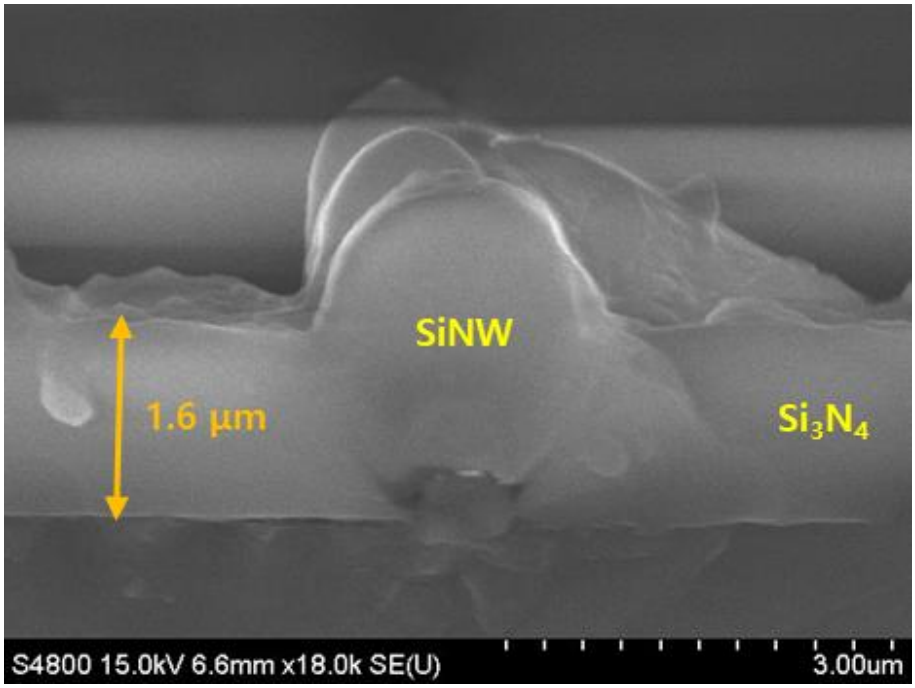

그림 2-21 실리콘 질화막 증착 공정 결과

차가 있는 부분에서 약 800 nm의 높이를 가지는 보이드 (void)가 형성되었다.

이후 두 번째 마스크를 이용하여 포토 공정을 진행하였다. AZ 4620 감광제(positive)를 이용하여 감광제가 7 μm 두께로 형성이 될 수 있도록 스핀코팅하여 도포하였다. 서울대학교 반도체공동연구소 Aligner 장비(제조사: Karl suss 社, 모델명: MA-6 III)를 이용하여 노광공정을 진행하였다. 그 후 AZ 300 MIF 현상액(developer)를 이용하여 감광제를 현상하였다.

먼저 실리콘 질화막을 식각하기 위해 한국나노기술원 ICP Etcher III 장비(제조사: Oxford Instruments 社, 모델명: ICP 380)를 활용하여 ICP 건식식각 공정을 진행하였다. 1.6 μm 두께의 실리콘 질화막을 10 % 추가 식각하여 실리콘 질화막을 모두 식각하였다.

이어서 실리콘 산화막을 식각하기 위해 한국나노기술원 ICP Etcher III 장비(제조사: Oxford Instruments 社, 모델명: ICP 380)를 활용하여 ICP 건식식각 공정을 진행하였다. 약 300 nm 두께의 실리콘 산화막을 10 % 추가 식각하여 실리콘 산화막을 모두 식각하였다. 공정 결과, 실리콘 질화막과 실리콘 산화막이 모두 제거되어 실리콘이 드러남을 확인하였다.

그 후 한국나노기술원 ICP etcher IV 장비(모델명/제작회사: Multiplex ICP / STS 社)를 이용하여 7 μm의 실리콘을 10 % 추가 식각하였다. 공정 결과, 그림 2-22와 같이 전기적 절연이 필요한 부분의 실리콘을 모두 식각하여 SOI 웨이퍼의 BOX 층 실리콘 산화막이 드러남을 확인하였다.

감광제를 제거한 후, 세 번째 마스크를 이용하여 포토 공정을 진행하였다. 그 후, 실리콘 질화막과 실리콘 산화막을 순서대로 ICP 건식식각(dry etch) 방식을 통해 식각한다. 이때 감광제 패터닝은 전극

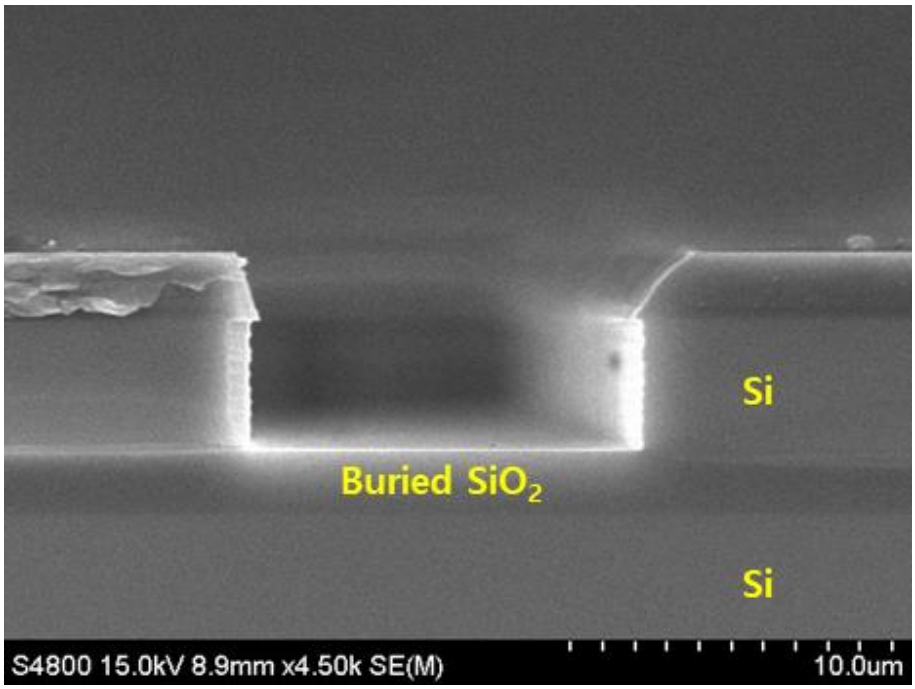

그림 2-22 실리콘 식각 공정 결과

패드 부분을 패터닝하는 것이다. 실리콘 산화막 건식식각할 때 충분히 식각을 하여 실리콘도 식각이 되도록 진행한다. 그 후 전자빔증발법을 이용하여 Cr을 300 Å (adhesion 용) 증착하고, Au를 3000 Å 증착한다. 다음으로 애싱 공정을 통해 감광제를 제거하여 전극 부분에만 Cr과 Au과 남아있도록 한다.

그런 후, 주실리콘기판 층의 두께를 350 μm 가 되도록 웨이퍼 후면에 CMP 공정을 진행하였다.

그 후에 웨이퍼 클리닝을 진행하고 웨이퍼 후면에 네 번째 마스크를 이용하여 포토 공정을 진행하였다. AZ 4620 감광제(positive)를 이용하여 감광제가 10 μm 두께로 형성이 될 수 있도록 2500 rpm으로 스핀코팅하여 도포하였다. 서울대학교 반도체공동연구소 Aligner 장비(제조사: Karl suss 社, 모델명: MA-6 III)를 이용하여 노광공정을 진행하였다. 그 후 AZ 300 MIF 현상액을 이용하여 감광제를

현상하였다.

그 후 웨이퍼의 주실리콘기판 층 실리콘을 식각하기 위하여 성균관대학교 정보통신용 신 기능성 소재 및 공정 연구센터 Si Deep etcher (제조사: SPP 社, 모델명: MUC-21)를 이용하여 실리콘 식각 공정을 진행하였다. 웨이퍼의 총 두께가 약 360 μm로 웨이퍼가 실리콘 식각 공정 중 헬륨 쿨링 (He cooling)에 의해 깨질 가능성이 크기 때문에 웨이퍼 전면에 보호필름을 부착한 후 실리콘 식각 공정을 진행하였다. SOI 웨이퍼의 BOX 층 실리콘 산화막이 드러나야 하므로 SOI 웨이퍼의 주실리콘판 층 350 μm 두께의 실리콘을 10 % 추가 식각하였다. 공정 결과, 그림 2-23과 같이 전기적 절연이 필요한 부분의 실리콘을 모두 식각하여 SOI 웨이퍼의 BOX 층 실리콘 산화막이 드러남을 확인하였다.

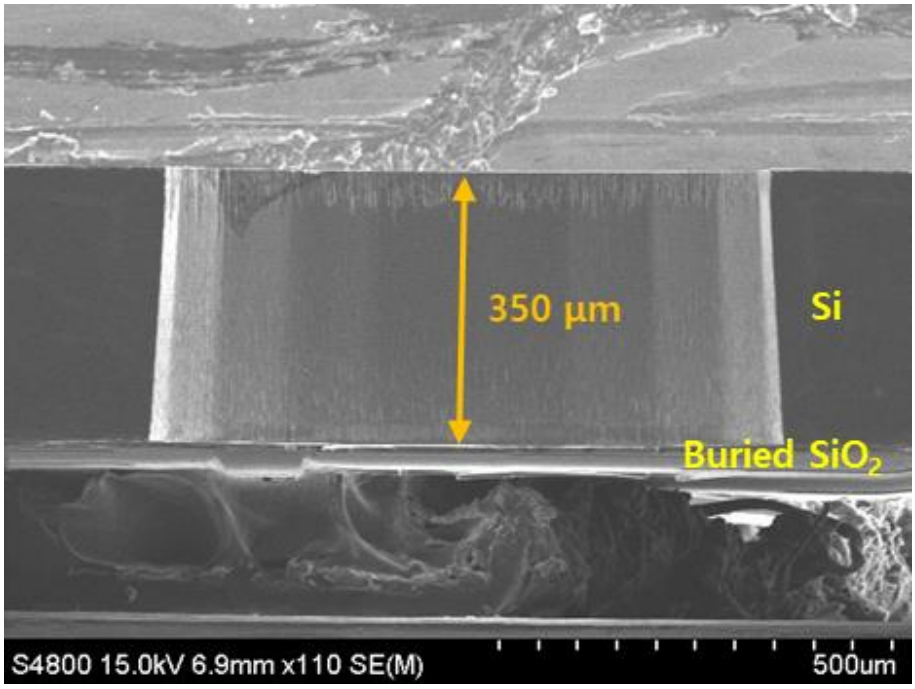

그림 2-23 실리콘 식각 공정 결과

웨이퍼 전면에 부착한 보호필름을 아세톤에 담가 보호필름을 분리하고, SOI 웨이퍼 BOX 층의 실리콘 산화막을 식각하였다. 실리콘 산화막 식각 공정 중에 웨이퍼가 얇아 깨질 가능성이 크고, SOI 웨이퍼 BOX 층의 실리콘 산화막을 식각하면 스프링 부분에서 관통이 발생하기 때문에 더미 웨이퍼(dummy wafer)를 감광제를 이용하여 웨이퍼 전면에 붙인 후에 실리콘 산화막 식각 공정을 수행하였다. 한국나노기술원 ICP Etcher III 장비(제조사: Oxford Instruments 社, 모델명: ICP 380)를 활용하여 ICP 건식식각 공정을 진행하였다. SOI 웨이퍼 BOX 층의 2 μm 두께를 가진 실리콘 산화막을 10 % 추가 식각하여 실리콘 산화막이 모두 식각되도록 하였다. 공정 결과, 실리콘 산화막이 모두 제거되었으며 스프링 부분에서 관통이 된 것을 확인하였다.

마지막으로 한국나노기술원 ICP etcher IV 장비(모델명/제작회사: Multiplex ICP / STS 社)를 이용하여 4 μm의 실리콘을 식각하였다. 스프링과 진동막 밑부분에 해당하는 실리콘을 식각하였다. 공정 결과, 그림 2-26과 같이 진동막의 두께가 2 μm로 형성된 것을 확인할 수 있었다.

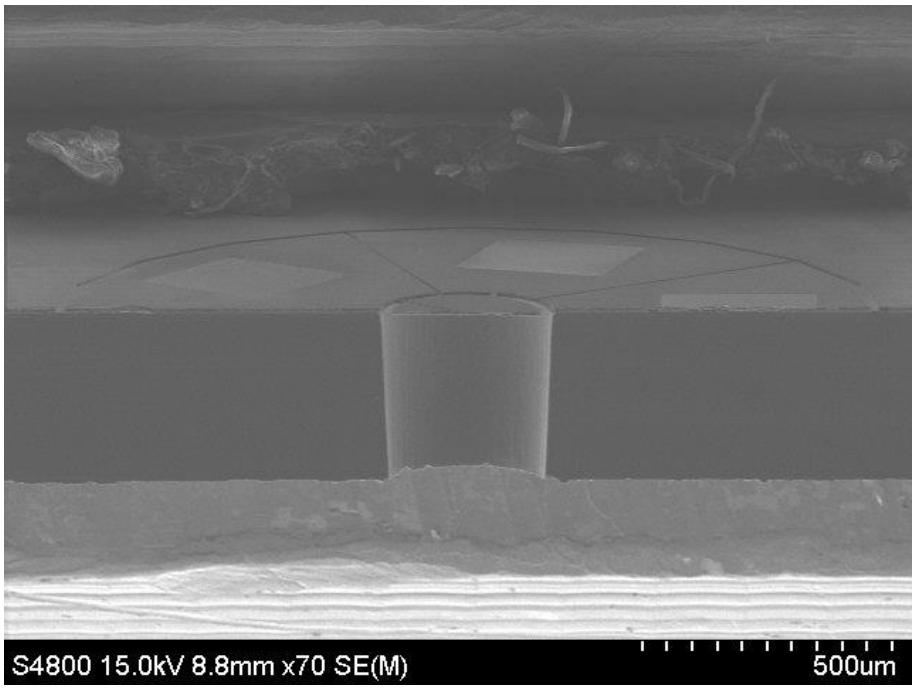

그림 2-24 마이크로폰 공정 결과 (side view)

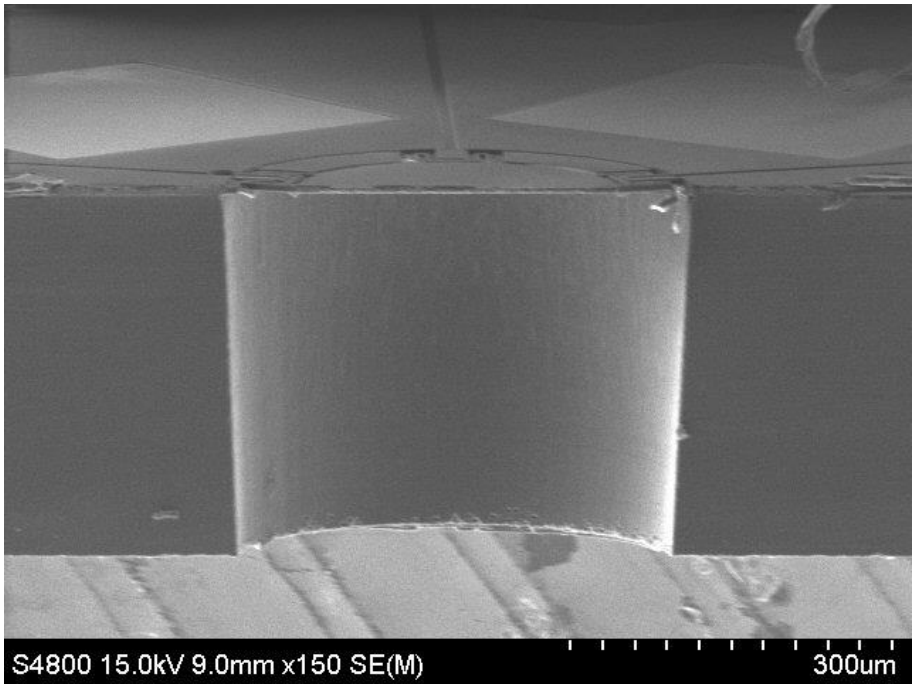

그림 2-25 마이크로폰 공정 결과 (side view)

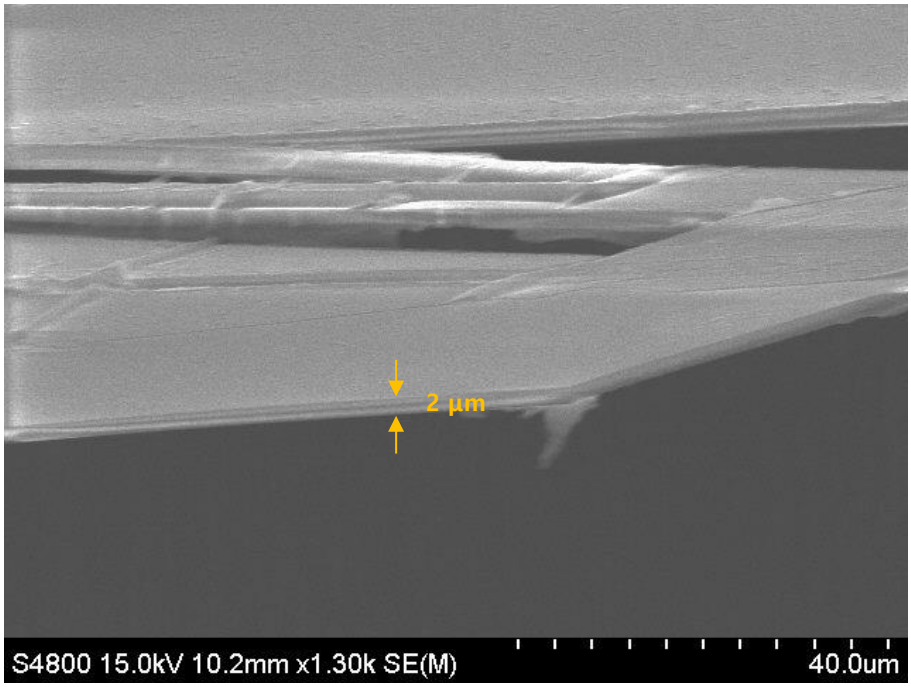

그림 2-26 마이크로폰 공정 결과 (진동막)

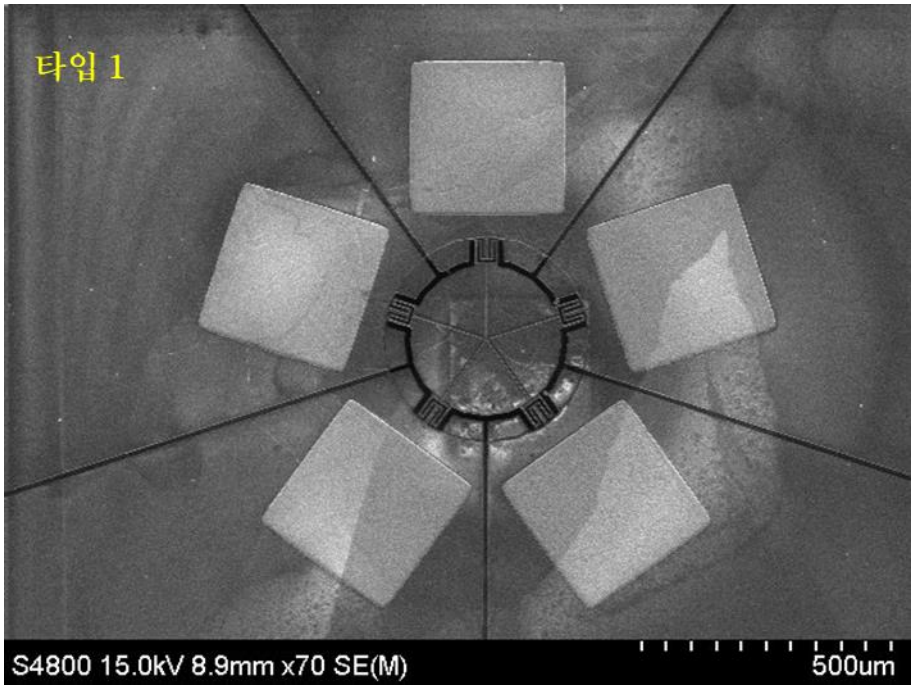

그림 2-27 타입 1 마이크로폰 공정 결과 (top view)

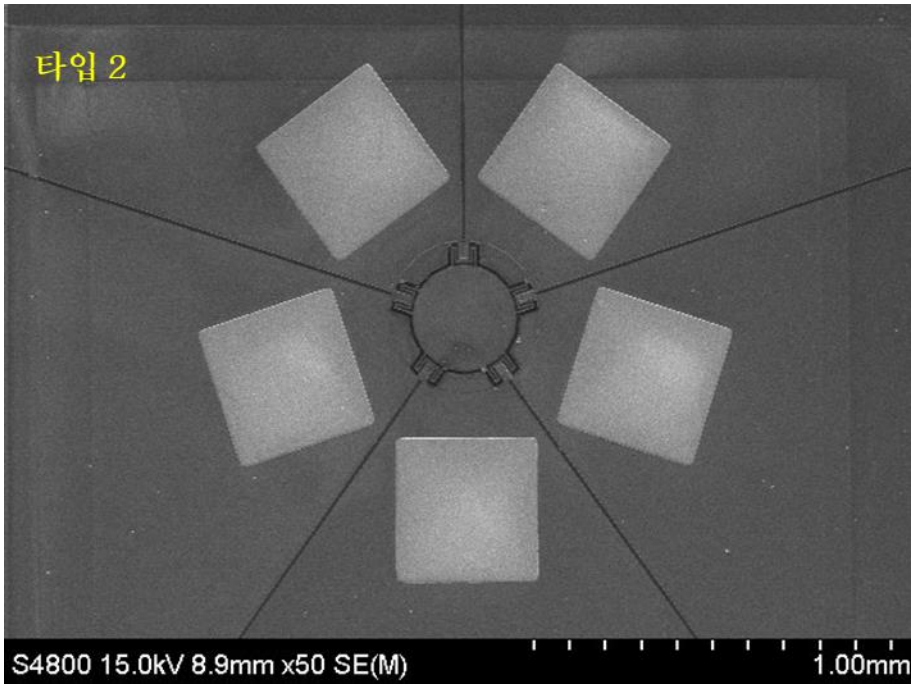

그림 2-28 타입 2 마이크로폰 공정 결과 (top view)

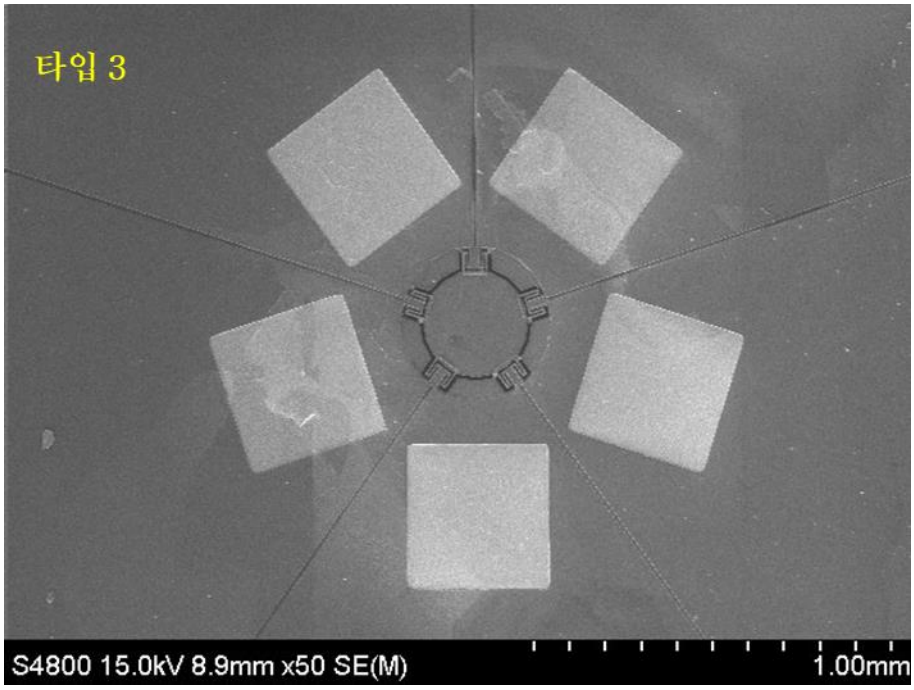

그림 2-29 타입 3 마이크로폰 공정 결과 (top view)

제 4 절 마이크로폰 특성 평가 방법

제작한 마이크로폰 소자를 측정하기 위해 거상인 社의 F251 변환기판을 준비하였다. 변환기판의 중심에 소리 유입 통로를 위한 구멍을 뚫은 후 제작한 실리콘 나노와이어 기반 마이크로폰 소자를 부착하였다. 그 후, 와이어 본딩(wire bonding)을 통해 제작한 마이크로폰 소자와 변환기판 간의 전기적 연결을 해주었다. 상용센서(Knowles 社, SPW 2430)와 성능을 비교하기 위하여 와이어 본딩한 마이크로폰 소자와 상용센서를 동일한 PCB 판에 부착하였다. 그림 2-30은 제작한 마이크로폰 소자 5개와 상용센서를 PCB 판에 부착한 결과이다.

마이크로폰 소자의 신호 처리를 위해 상용 opamp(uA741CP)를 이용하여 회로를 구성하였다. 그림 2-31은 구성한 신호처리 회로를 보여준다. R_i는 제작한 마이크로폰 소자의 저항에 해당하고, R_f는 1 MΩ의 저항을 이용하여 구성하였다. 측정에 활용된 마이크로폰 소자는

그림 2-30 제작한 마이크로폰 소자와 상용센서 배치

약 150 kΩ 수준으로 구성한 회로를 통하여 약 7배의 증폭을 얻을 수 있었다. +입력단자와 -입력단자에 각각 2 V, 2.064 V의 전압을 인가하고, 정측 전원단자와 부측 전원단자에 각각 +15 V, -15 V의 전압을 인가하였다. 상용센서의 경우 신호처리 회로가 포함이 되어있는 제품으로 추가로 회로를 구성하지 않았다. 입력전압 3.3 V를 인가하고, spectrum analyzer 장비를 이용하여 출력전압을 확인하였다.

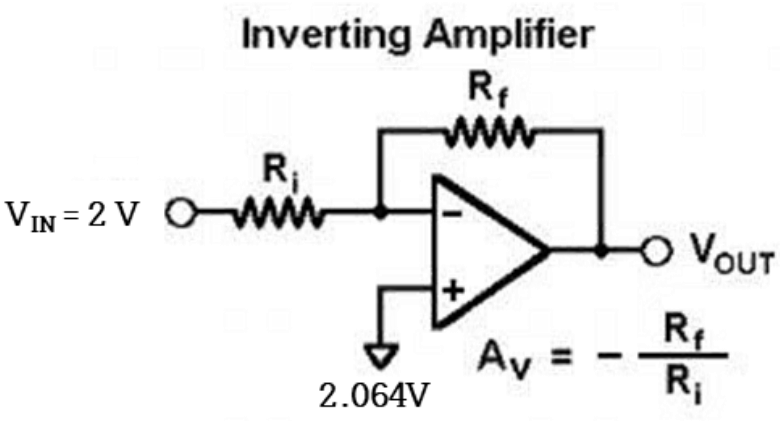

그림 2-31 신호처리 회로

제 1항 음압의 세기에 따른 마이크로폰 특성 평가

그림 2-32과 같이 마이크로폰 측정 실험 환경을 구축하였다. 외부의 소음을 최대한 차단한 공간에서 스피커를 준비하고 제작한 마이크로폰 소자 5개와 상용 센서를 부착한 PCB 판을 스피커로부터 5 cm 거리에 배치하였다. 전원공급기를 이용하여 신호처리 회로에 입력 전압을 인가하고, 제작한 마이크로폰 소자는 신호처리 회로를 통해 spectrum analyzer 장비와 연결하였다. 따라서 제작한 마이크로폰의 출력 전압은 opamp를 활용한 신호처리 회로를 통해 증폭되고, 증폭된

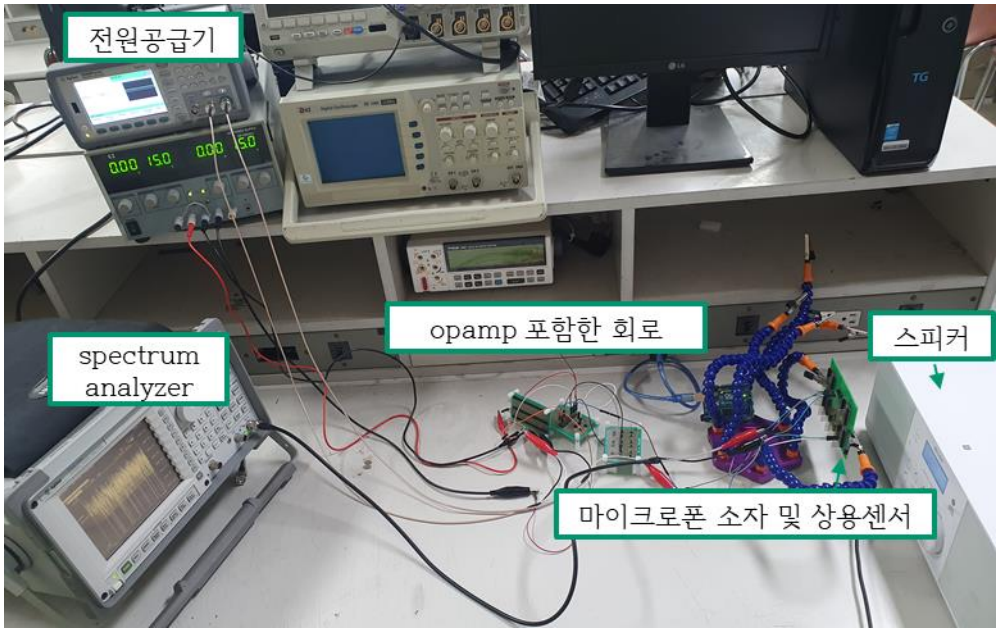

그림 2-32 마이크로폰 측정 환경

출력 전압은 spectrum analyzer 장비를 이용하여 측정할 수 있도록 구성하였다.

스피커 볼륨 크기는 0부터 30까지 설정이 가능하여 실험에서는 스피커 볼륨 크기를 5 단위로 인가하여 측정하였다. 표 2-1은 스피커 볼륨 크기를 0부터 30까지 5 단위로 인가하였을 때, 음압의 세기를 측정한 결과이다. 주파수는 0.5 kHz, 1 kHz, 1.5 kHz에 대하여 측정을 진행하였으며, spectrum analyzer 장비에서 증폭된 출력전압의 해당 주파수 성분을 확인하였다.

표 2-1 스피커 볼륨 크기에 따른 음압의 세기

스피커 볼륨 크기	음압의 세기 (dB)
0	40
5	50
10	65
15	75
20	80
25	85
30	87

제 2항 주파수에 따른 마이크로폰 특성 평가

그림 2-33과 같이 마이크로폰 측정 실험 환경을 구축하였다. 무향실에서 스피커(Brüel & Kjær 社, Type 4295)와 증폭기(Brüel & Kjær 社, Type 2734)를 준비하고 제작한 마이크로폰 소자를 스피커로부터 5 cm 거리에 배치하였다. 전원공급기를 이용하여 신호처리 회로에 입력 전압을 인가하고, 제작한 마이크로폰 소자는 신호처리 회로를 통해 데이터 수집 하드웨어(Brüel & Kjær 社, Type 3160)와 연결하였다. 이때, PULSE Labshop 소프트웨어를 이용하여 측정값을 확인하였다. 기준 마이크로폰(reference microphone, Brüel & Kjær 社, Type 4192)을 측정할 경우에는 제작한 마이크로폰을 제거하고 기준 마이크로폰을 동일한 위치에 배치하였다. 그런 후, 프리앰프(Brüel & Kjær 社, Type 2673)와 신호 처리기(Brüel & Kjær 社, NEXUS)를 통해 데이터 수집 하드웨어(Brüel & Kjær 社, Type 3160)와 연결하였다. 제작한 마이크로폰 측정 시와 동일하게 PULSE Labshop 소프트웨어를 이용하여 측정값을 확인하였다.

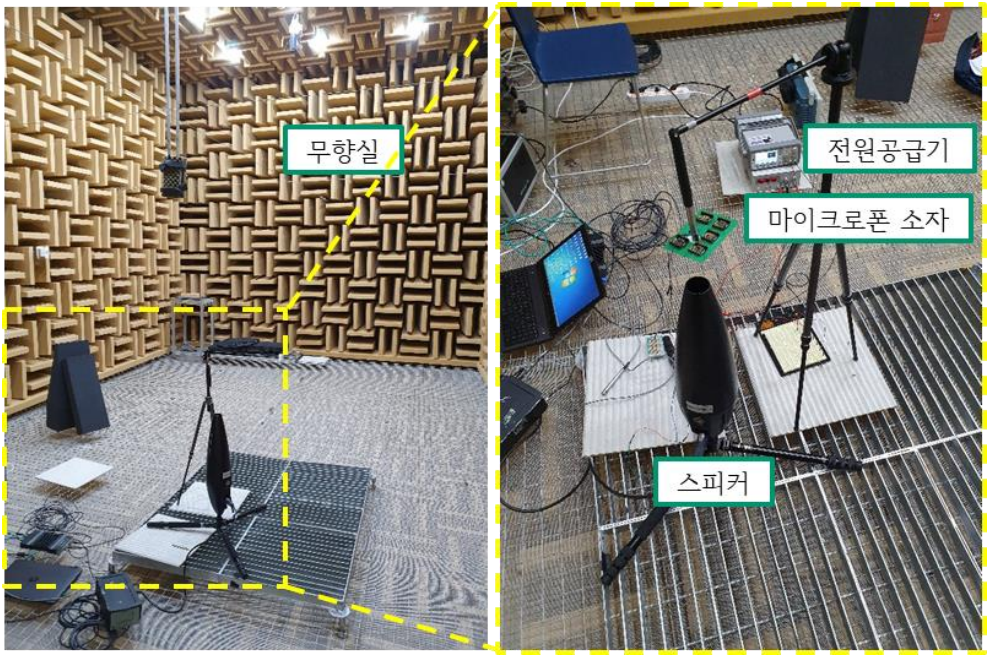

그림 2-33 마이크로폰 측정 환경

실험은 먼저 일정한 음압의 세기에서 20 Hz에서 20 kHz까지 1/3 옥타브(One-third octave)로 주파수 스위프(frequency sweep)하여 마이크로폰 소자의 증폭된 출력 전압값을 확인하였다. 이때, 주파수에 따라 완벽히 일정한 음압을 인가하는 것이 불가능하여 스피커에 인가되는 전압을 일정하게 하고, 기준 마이크로폰으로 각 주파수에서의 음압의 세기를 측정하였다.

그런 후, equivalent input noise (EIN)를 측정하기 위해 측정하기 위해 음압을 인가하지 않은 상태에서 마이크로폰의 출력 노이즈를 측정하였다. 이때 노이즈는 마이크로폰 소자와 연결된 회로에서 발생하는 것으로 마이크로폰 소자에서 발생하는 노이즈의 경우 주로 공기 분자의 브라운 운동(brownian motion)에 의한 것이다. 연결된 회로에서 발생하는 노이즈는 주로 증폭기에 의해 발생하는 것이다.

측정 결과를 이용하여 각 주파수에서 해당하는 민감도(sensitivity)는 아래 식(2.5.3)을 통해 계산하였다.

$$sensitivity_{dBV} = 20 \times \log_{10}\left(\frac{sensitivity_{mV/Pa}}{Output_{REF}}\right) \qquad (2.4.1)$$

보통 mV/Pa 단위로 계산하고 dB로 변환하는 것이 일반적이다.

마이크로폰 출력에서 신호와 잔류 잡음의 비율을 나타내는 signal-to noise ratio(SNR)은 아래 식(2.5.4)를 통해 계산하였다.

$$SNR = sensitivity - EIN \qquad (2.4.2)$$

제 5 절 마이크로폰 특성 평가 결과 및 분석

제 1항 음압의 세기에 따른 마이크로폰 특성 평가

상용센서(Knowles 社, SPW 2430)와 함께 타입 2와 타입 3 디자인의 소자를 이용하여 측정하였다. 민감도가 가장 클 것으로 예측되는 타입 3와 가장 작을 것으로 예측되는 타입 2만 측정을 진행하고, 타입 1은 진행하지 않았다.

표 2-2는 0.5 kHz의 음압 인가 시 스피커 볼륨의 크기에 따른 타입 2, 타입 3, 상용센서의 출력전압 변화를 나타낸 것이다. 그림 2-34는 0.5 kHz의 음압 인가 시 스피커 볼륨의 크기에 따른 출력전압 변화를 상용센서를 포함하여 그래프로 나타낸 것이다. 그림 2-35는 상용센서를 제외하고 나타낸 그래프이다. 제작한 마이크로폰 소자의 경우 타입 2, 3 모두 상용센서에 비해 민감도가 상당히 작은 것으로 확인이 되었으며, 타입 3가 타입 2보다 민감도가 약 3.0 배 큰 것으로 확인되었다.

표 2-2 스피커 볼륨의 크기에 따른 출력전압 비교

(0.5 kHz 음압 인가)

	타입 2	타입 3	상용센서
스피커 볼륨 크기	출력 전압 (mV)	출력 전압 (mV)	출력 전압 (mV)
0	0.1977	0.2325	0.002714
5	0.2334	0.2877	0.9731
10	0.2505	0.4816	6.481
15	0.3213	0.7303	26.57
20	0.421	1.081	53.32
25	0.5559	1.412	101.3
30	0.7262	1.674	132.6

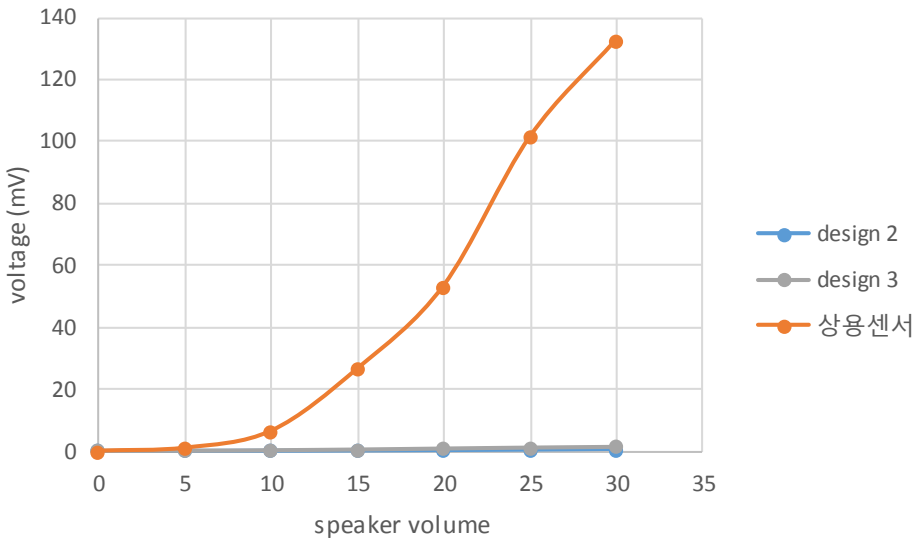

그림2-34 스피커 볼륨의 크기에 따른 출력전압 비교

(0.5 kHz 음압 인가, 상용센서 포함)

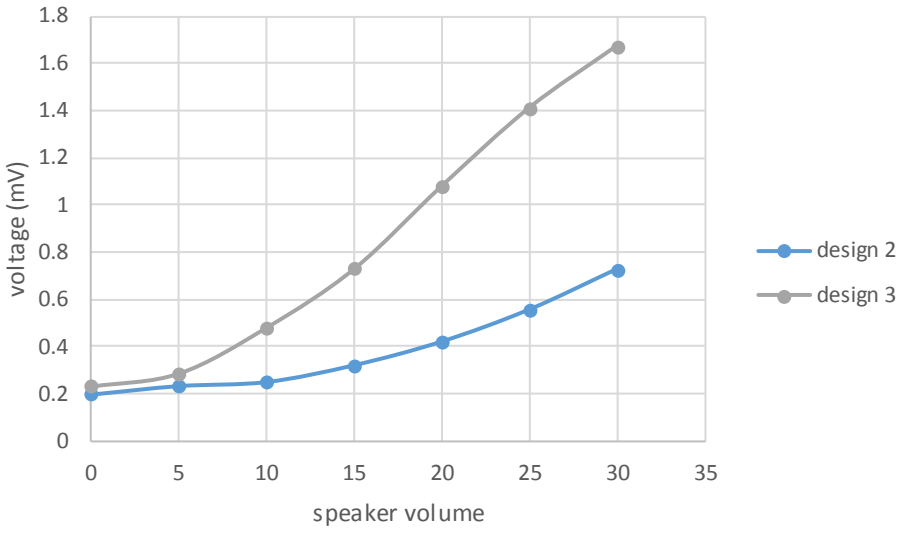

그림2-35 스피커 볼륨의 크기에 따른 출력전압 비교

(0.5 kHz 음압 인가, 상용센서 제외)

표 2-3은 1 kHz의 음압 인가 시 스피커 볼륨의 크기에 따른 타입 2, 타입 3, 상용센서의 출력전압 변화를 나타낸 것이다. 그림 2-36은 1 kHz의 음압 인가 시 스피커 볼륨의 크기에 따른 출력전압 변화를 상용센서를 포함하여 그래프로 나타낸 것이다. 그림 2-37은 상용센서를 제외하고 나타낸 그래프이다. 제작한 마이크로폰 소자의 경우 타입 2, 3 모두 상용센서에 비해 민감도가 상당히 작은 것으로 확인이 되었으며, 타입 3가 타입 2보다 민감도가 약 6.6 배 큰 것으로 확인되었다.

표 2-3 스피커 볼륨의 크기에 따른 출력전압 비교

(1 kHz 음압 인가)

	타입 2	타입 3	상용센서
스피커 볼륨 크기	출력 전압 (mV)	출력 전압 (mV)	출력 전압 (mV)
0	0.182	0.21	0.00355
5	0.2085	0.2647	0.7359
10	0.2271	0.3262	4.91
15	0.2461	0.66	19.17
20	0.3116	1.116	41.38
25	0.4332	1.973	66.64
30	0.6277	2.943	98.86

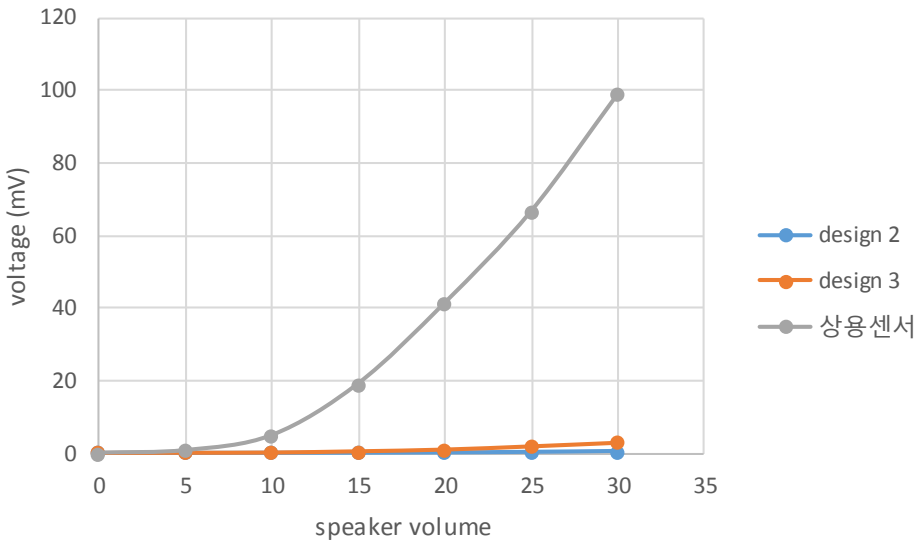

그림2-36 스피커 볼륨의 크기에 따른 출력전압 비교

(1 kHz 음압 인가, 상용센서 포함)

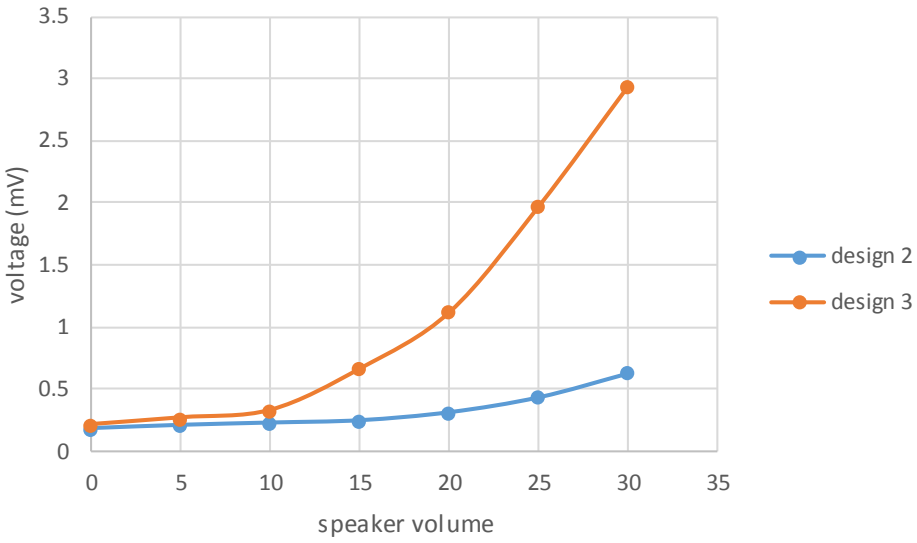

그림2-37 스피커 볼륨의 크기에 따른 출력전압 비교

(1 kHz 음압 인가, 상용센서 제외)

표 2-4는 1.5 kHz의 음압 인가 시 스피커 볼륨의 크기에 따른 출력전압 변화를 나타낸 것이다. 그림 2-38은 1.5 kHz의 음압 인가 시 스피커 볼륨의 크기에 따른 출력전압 변화를 상용센서를 포함하여 그래프로 나타낸 것이다. 그림 2-39는 상용센서를 제외하고 나타낸 그래프이다. 제작한 마이크로폰 소자의 경우 타입 2, 3 모두 상용센서에 비해 민감도가 상당히 작은 것으로 확인이 되었으며, 타입 3가 타입 2보다 민감도가 약 3.2 배 큰 것으로 확인되었다.

표 2-4 스피커 볼륨의 크기에 따른 출력전압 비교

(1.5 kHz 음압 인가)

	타입 2	타입 3	상용센서
스피커 볼륨 크기	출력 전압 (mV)	출력 전압 (mV)	출력 전압 (mV)
0	0.2087	0.2219	0.007217
5	0.2532	0.3796	1.166
10	0.3413	0.6902	7.976
15	0.412	0.9538	31.9
20	0.539	2.075	60.41
25	1.054	3.122	133.7
30	1.496	4.009	160

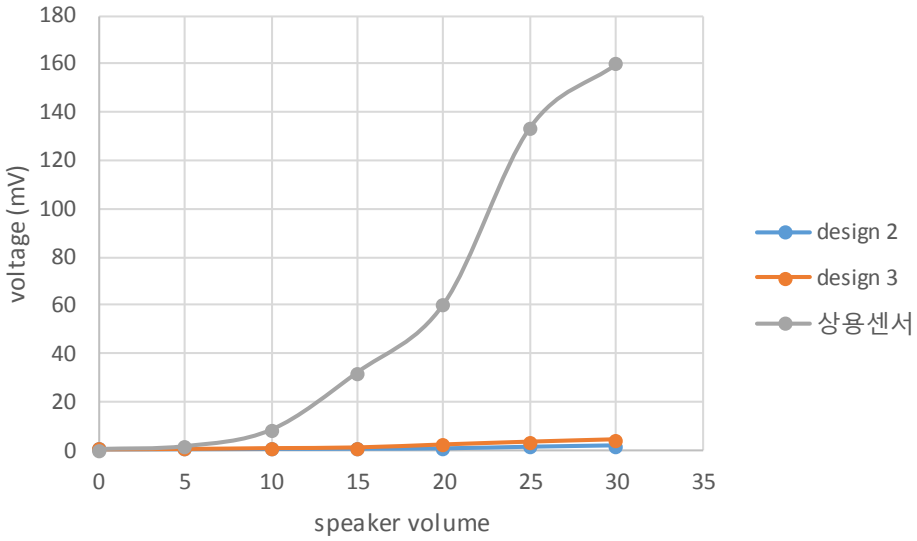

그림2-38 스피커 볼륨의 크기에 따른 출력전압 비교

(1.5 kHz 음압 인가, 상용센서 포함)

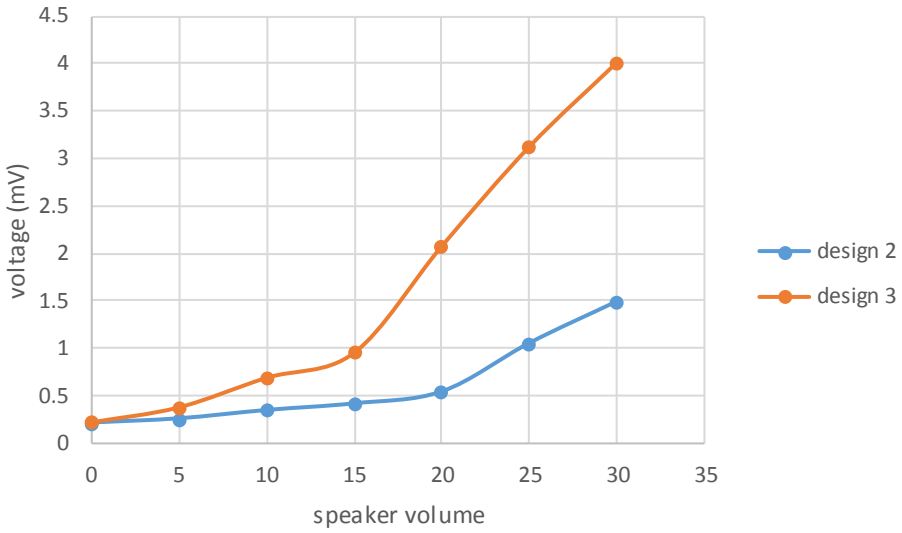

그림2-39 스피커 볼륨의 크기에 따른 출력전압 비교

(1.5 kHz 음압 인가, 상용센서 제외)

이에 대하여 유한요소법 기반 시뮬레이션을 수행하여 진동막 중심에 압력이 인가될 경우, 스프링의 위치에 따라 발생하는 변위를 확인하고, 변위의 기울기 변화를 그림 2-40과 같이 그래프로 나타내었다. 그래프의 X축은 스프링 내의 위치로 그림 2-41에서 A에서 화살표 방향으로 A′ 까지의 거리를 나타낸다. Y축은 해당 지점에서 변위의 기울기 변화를 나타낸다. 타입 2와 타입 3의 실리콘 나노와이어 위치에 해당하는 부분을 그래프에 표시하였다. 이를 통해 변위의 기울기 변화량은 타입 3가 타입 2보다 약 2.7 배 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 측정한 타입 2와 타입 3의 민감도 차이와 비슷한 수준인 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 민감도를 높이기 위해서 그래프에서 스프링 변위의 기울기 변화량이 9000을 넘는 지점에 해당하는 부분에 실리콘 나노와이어를 배치한다면 민감도를 타입 3보다 10배 이상 크게 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 그림 2-42는 유한요소법 기반

시뮬레이션을 수행하여 진동막 중심에 압력을 인가하였을 때, 스프링에 나타나는 응력 분포를 확인한 결과이다. 그림 2-42에서 B에 해당하는 부분이 스프링 변위의 기울기 변화량이 가장 크게 나타나는 부분으로 진동막 중심에 압력을 인가하였을 때, 응력이 크게 나타나는 부분과 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

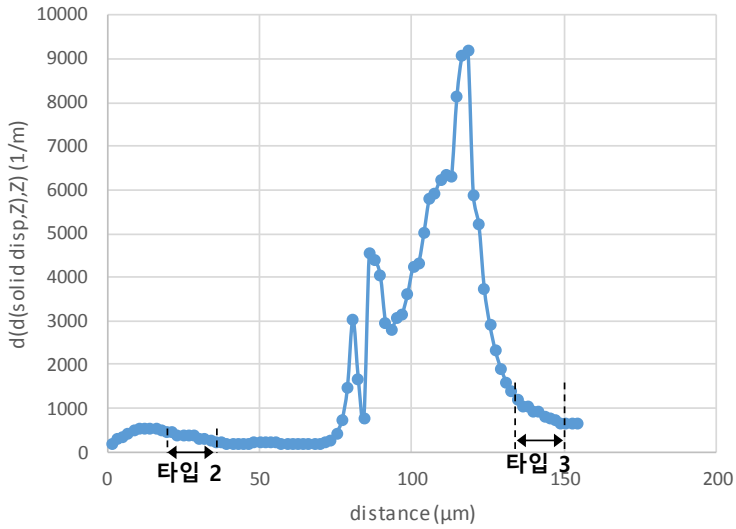

그림2-40 스프링 내의 위치에 따른 변위의 기울기 변화

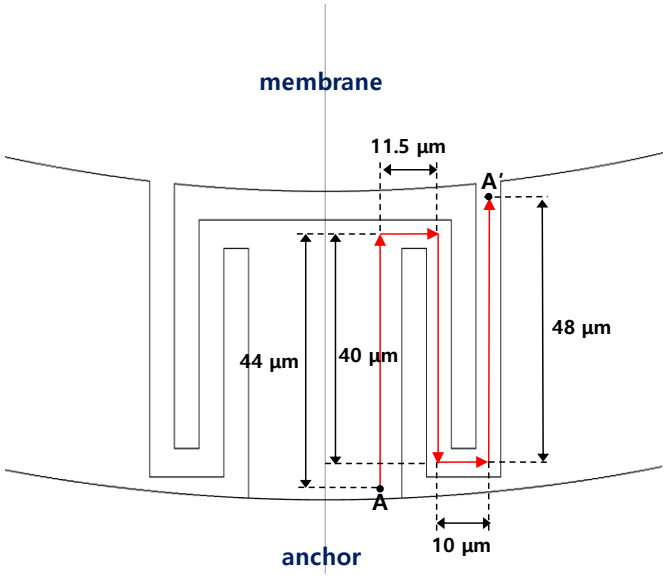

그림2-41 스프링 내의 위치

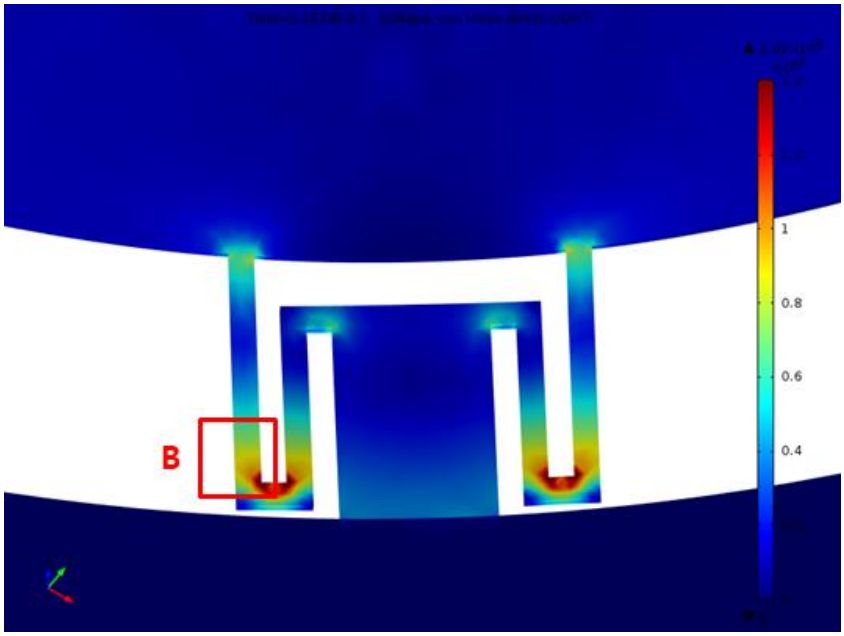

그림2-42 진동막 중심에 압력을 인가 시
스프링에 나타나는 응력 분포 시뮬레이션 결과

제 2항 주파수에 따른 마이크로폰 특성 평가

주파수에 따른 마이크로폰 특성은 타입 2 마이크로폰 소자를 활용하여 진행하였다. 먼저 일정한 음압의 세기에서 20 Hz에서 20 kHz까지 1/3 옥타브로 주파수 스위프하여 마이크로폰 소자의 증폭된 출력 전압값을 확인하였다. 측정은 3번 반복하였으며 민감도 및 SNR 계산에는 평균값을 이용하였다. 표 2-5는 타입 2 마이크로폰 소자의 측정 결과이다. 그 후, 기준 마이크로폰으로 주파수 스위프하였을 때 각 주파수에 해당하는 음압의 세기를 측정하였다. 타입 2 마이크로폰 소자 측정과 마찬가지로 3번 반복하여 측정하였으며 민감도 계산에는 평균값을 이용하였다. 표 2-6은 기준 마이크로폰을 이용하여 주파수에 따른 음압의 세기를 측정한 결과이다.

equivalent input noise (EIN)를 측정하기 위해 음압을 인가하지

표 2-5 주파수 스위프하여 음압 인가 시

타입 2 마이크로폰 소자의 출력전압 결과 및 주파수 별 민감도

Frequency	1st	2nd	3rd	Averaged output	Sensitivity	Sensitivity	output
Hz	V	V	V	V	mV/Pa	dB	dBV
20	0.00114	0.00059	0.00006	0.00060	4.61	-46.7	-124.489
25	0.00074	0.00051	0.00057	0.00061	2.60	-51.7	-124.347
31.5	0.00054	0.00024	0.00022	0.00033	0.81	-61.8	-129.62
40	0.00453	0.00479	0.00461	0.00465	6.41	-43.9	-106.657
50	0.00798	0.00747	0.00716	0.00754	6.00	-44.4	-102.458
63	0.01644	0.01212	0.01510	0.01455	6.20	-44.2	-96.7407
80	0.00529	0.00507	0.00568	0.00534	1.09	-59.3	-105.442
100	0.00115	0.00130	0.00129	0.00125	0.11	-79.6	-118.07
125	0.00058	0.00150	0.00024	0.00077	0.04	-88.1	-122.247
160	0.00030	0.00013	0.00043	0.00029	0.02	-95.4	-130.804
200	0.00144	0.00142	0.00109	0.00132	0.09	-81.2	-117.612
250	0.00247	0.00200	0.00256	0.00234	0.21	-73.5	-112.609
315	0.00264	0.00248	0.00245	0.00252	0.36	-68.8	-111.963
400	0.00253	0.00328	0.00293	0.00291	0.62	-64.2	-110.709
500	0.00344	0.00325	0.00303	0.00324	0.74	-62.7	-109.793
630	0.00396	0.00437	0.00427	0.00420	0.56	-65.0	-107.538
800	0.00584	0.00602	0.00577	0.00588	0.78	-62.2	-104.619
1000	0.00954	0.00927	0.00950	0.00944	1.03	-59.8	-100.504
1250	0.01193	0.01202	0.01195	0.01197	0.79	-62.0	-98.4408
1600	0.01694	0.01691	0.01687	0.01691	2.55	-51.9	-95.4386
2000	0.02563	0.02585	0.02577	0.02575	5.90	-44.6	-91.7836
2500	0.03908	0.03922	0.03898	0.03909	8.66	-41.3	-88.1584
3150	0.06742	0.06747	0.06708	0.06732	13.98	-37.1	-83.4368
4000	0.13463	0.13556	0.13514	0.13511	35.80	-28.9	-77.3862
5000	0.30583	0.30729	0.31026	0.30779	55.94	-25.0	-70.2348
6300	0.52129	0.52631	0.52857	0.52539	68.36	-23.3	-65.5904
8000	0.39329	0.38840	0.39361	0.39177	210.13	-13.6	-68.1394
10000	0.31437	0.31750	0.31741	0.31643	400.96	-7.9	-69.9946
12500	0.27542	0.28115	0.27933	0.27863	2313.38	7.3	-71.0993
16000	0.25258	0.25236	0.25808	0.25434	2413.06	7.7	-71.8916
20000	0.24325	0.24284	0.24350	0.24319	7900.89	18.0	-72.281

표 2-6 기준 마이크폰으로 측정한 주파수에 따른 음압의 세기(dBSPL)

1st	2nd	3rd	Averaged Pressure	Averaged SPL
Pa	Pa	Pa	Pa	dB SPL
0.130	0.129	0.129	0.129	76.2
0.234	0.233	0.233	0.233	81.3
0.407	0.407	0.407	0.407	86.2
0.727	0.725	0.724	0.725	91.2
1.257	1.256	1.253	1.256	96.0
2.352	2.346	2.343	2.347	101.4
4.941	4.897	4.935	4.924	107.8
11.829	11.861	11.901	11.864	115.5
19.931	19.359	19.729	19.673	119.9
16.947	16.923	16.896	16.922	118.5
15.121	15.114	15.101	15.112	117.6
11.125	11.138	11.132	11.131	114.9
6.987	6.973	6.981	6.980	110.9
4.719	4.723	4.711	4.717	107.5
4.388	4.408	4.420	4.405	106.9
7.433	7.502	7.473	7.469	111.4
7.529	7.550	7.556	7.545	111.5
9.209	9.217	9.123	9.183	113.2
15.219	15.163	15.028	15.137	117.6
6.692	6.570	6.626	6.629	110.4
4.386	4.352	4.348	4.362	106.8
4.495	4.531	4.523	4.516	107.1
4.845	4.827	4.778	4.817	107.6
3.787	3.765	3.769	3.774	105.5
5.494	5.489	5.523	5.502	108.8
7.718	7.687	7.653	7.686	111.7
1.869	1.865	1.859	1.864	99.4
0.794	0.791	0.782	0.789	91.9
0.121	0.120	0.120	0.120	75.6
0.106	0.106	0.105	0.105	74.4
0.031	0.031	0.031	0.031	63.7

않은 상태에서 주파수에 따른 출력전압을 측정하였다. 2번 측정을 진행하였으며 SNR 계산에는 평균값을 이용하였다. 표 2-7은 타입 2 마이크로폰 소자의 측정 결과이다. 그 후, 기준 마이크로폰으로 음압을

표 2-7 음압 인가하지 않은 상태에서

타입 2 마이크로폰 소자의 출력전압 결과 및 주파수 별 SNR

Frequency	1st	2nd	Averaged output	Signal to Noise ratio
Hz	V	V	V	dB
20	0.00052	0.00077	0.00064	-0.7
25	0.00046	0.00018	0.00032	5.6
31.5	0.00033	0.00011	0.00022	3.5
40	0.00456	0.00485	0.00471	-0.1
50	0.00624	0.00730	0.00677	0.9
63	0.00908	0.01344	0.01126	2.2
80	0.00443	0.00495	0.00469	1.1
100	0.00033	0.00061	0.00047	8.4
125	0.00043	0.00015	0.00029	8.5
160	0.00036	0.00041	0.00039	-2.6
200	0.00025	0.00019	0.00022	15.6
250	0.00018	0.00028	0.00023	20.1
315	0.00008	0.00022	0.00015	24.3
400	0.00014	0.00043	0.00029	20.1
500	0.00022	0.00031	0.00026	21.8
630	0.00028	0.00014	0.00021	26.0
800	0.00014	0.00005	0.00010	35.7
1000	0.00006	0.00027	0.00016	35.2
1250	0.00010	0.00029	0.00020	35.7
1600	0.00028	0.00015	0.00021	38.0
2000	0.00003	0.00008	0.00006	53.1
2500	0.00021	0.00011	0.00016	47.9
3150	0.00006	0.00004	0.00005	62.5
4000	0.00022	0.00013	0.00017	57.9
5000	0.00001	0.00002	0.00002	85.8
6300	0.00011	0.00007	0.00009	75.7
8000	0.00133	0.00131	0.00132	49.5
10000	0.00012	0.00008	0.00010	69.9
12500	0.00006	0.00004	0.00005	74.6
16000	0.00004	0.00009	0.00006	71.9
20000	0.00005	0.00005	0.00005	74.4

인가하지 않은 상태에서 주파수 별 음압의 세기를 측정하였다. 타입 2 마이크로폰 소자 측정과 마찬가지로 2번 측정하였으며 그래프에는 평균값을 이용하였다. 표 2-8은 기준 마이크로폰을 이용하여 인가하지 않은 상태에서 주파수에 따른 음압의 세기를 측정한 결과이다.

표 2-8 기준 마이크폰으로 측정한 노이즈

Frequency	1st	2nd	Averaged Pressure	Averaged SPL
Hz	Pa	Pa	Pa	dB
20	0.00024	0.00012	0.00018	19.2
25	0.00007	0.00025	0.00016	18.0
31.5	0.00029	0.00031	0.00030	23.5
40	0.00022	0.00007	0.00015	17.3
50	0.00012	0.00009	0.00010	14.3
63	0.00005	0.00003	0.00004	6.1
80	0.00003	0.00003	0.00003	3.2
100	0.00004	0.00005	0.00004	7.0
125	0.00002	0.00003	0.00002	1.2
160	0.00004	0.00002	0.00003	2.9
200	0.00003	0.00001	0.00002	0.7
250	0.00027	0.00026	0.00027	22.5
315	0.00005	0.00004	0.00004	7.0
400	0.00001	0.00004	0.00003	2.5
500	0.00002	0.00002	0.00002	-0.9
630	0.00001	0.00002	0.00002	-1.0
800	0.00003	0.00003	0.00003	3.1
1000	0.00001	0.00000	0.00001	-11.1
1250	0.00002	0.00001	0.00001	-3.2
1600	0.00001	0.00003	0.00002	-1.6
2000	0.00001	0.00001	0.00001	-8.6
2500	0.00001	0.00001	0.00001	-6.1
3150	0.00001	0.00001	0.00001	-7.9
4000	0.00000	0.00000	0.00000	-12.7
5000	0.00001	0.00000	0.00001	-11.4
6300	0.00002	0.00001	0.00002	-2.0
8000	0.00000	0.00002	0.00001	-4.8
10000	0.00000	0.00000	0.00000	-16.4
12500	0.00000	0.00001	0.00001	-10.9
16000	0.00000	0.00001	0.00001	-10.9
20000	0.00000	0.00001	0.00001	-11.7

그림 2-43은 주파수에 따른 타입 2 마이크로폰 소자의 출력전압값을 dBV 단위로 나타낸 그래프이며, 그림 2-44는 주파수에 따른 기준 마이크로폰 소자로 측정한 음압의 세기를 dB SPL 단위로 나타낸 그래프이다. 타입 2의 그래프를 보면 160 Hz 이하에서는 음압을 인가하였을 때와 인가하지 않았을 때의 출력전압 그래프가 일치하는 것으로 나타났다. 이는 타입 2의 마이크로폰 소자가 160 Hz 이하의

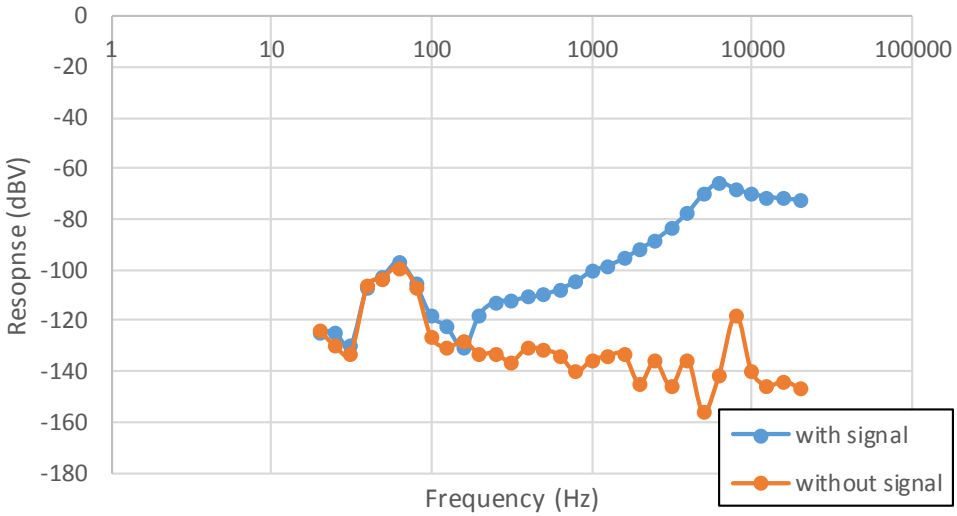

그림 2-43 주파수에 따른 타입 2 마이크로폰의 출력전압 결과

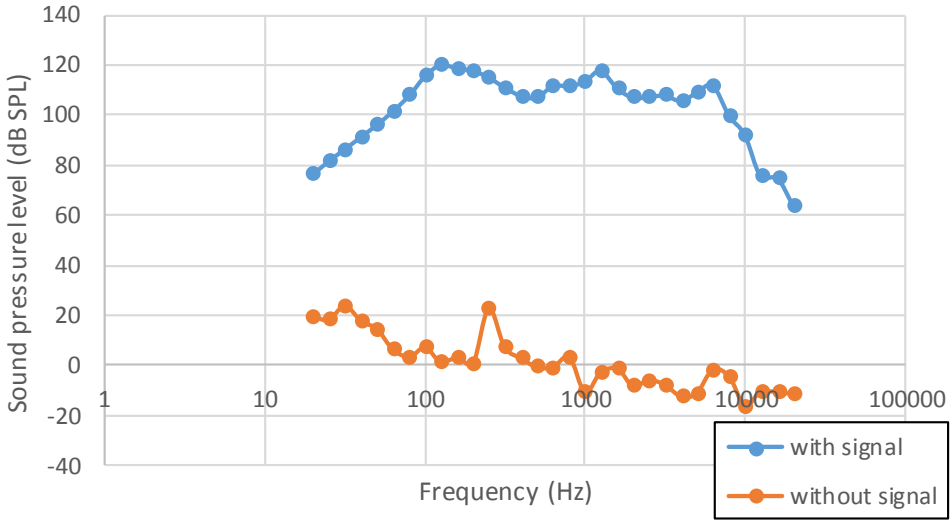

그림 2-44 기준 마이크로폰으로 측정한 주파수 별 음압의 세기

주파수 대역에서 민감도가 작고, 60 Hz의 파워 노이즈가 상당히 크게 발생하여 노이즈가 음압에 의한 출력전압보다 크게 작용한 것으로 판단된다. 또한, 타입 2 마이크로폰 소자의 민감도 및 SNR 계산값을

확인해보면 3 kHz 이상에서부터 상용센서 수준의 민감도와 SNR을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

제 3 장 결 론

제 1 절 결론

본 연구는 실리콘 나노와이어를 이용한 압저항 방식의 MEMS 마이크로폰을 제시하였다. 제시한 마이크로폰은 압저항 방식으로 후기판이 필요없어 스프링과 결합된 진동막, 앵커, 캐비티로 구성하였다. 실리콘 나노와이어는 스프링 안에 삽입하여 스프링에 변위가 발생하면 실리콘 나노와이어도 변위가 발생하도록 설계하였다. 따라서 마이크로폰에 음압이 인가되면 음압에 따른 진동막의 변위가 스프링의 변위를 발생시키고, 이에 따라 실리콘 나노와이어도 변위가 발생해 음압을 감지한다.

또한, 연구진이 보유하고 있는 실리콘 나노와이어 공법을 활용하여 마이크로폰 공법을 개발하였다. 개발한 공법은 노광 공정 횟수가 4회 상용센서에 비해 상당히 간단하며 Thin SOI 웨이퍼나 전자빔 노광 공정과 같은 고가의 공정이 필요하지 않다는 점에서 상당한 이점을 가지고 있다.

개발한 마이크로폰 공법을 통해 마이크로폰을 제작하고, 제작한 마이크로폰 소자를 이용하여 제안한 마이크로폰의 특성 평가를 진행하였다. 마이크로폰 특성 평가는 2 가지로 음압의 세기에 따른 마이크로폰 특성과 주파수에 따른 마이크로폰 특성을 분석하였다. 분석 결과, 민감도는 상당히 작게 나타났으나 스프링 내에 실리콘 나노와이어 위치를 수정하면 민감도를 10배 이상 향상시킬 수 있을 것으로 판단되었다. 또한, 160 Hz 이하의 주파수 대역에서는 민감도가 작고, 60 Hz의 파워 노이즈가 상당히 크게 발생하여 음압을 인가하였을 때와

인가하지 않았을 때의 출력전압 차이가 나타나지 않았으나. 3 kHz 이상에서는 상용센서 수준의 민감도와 SNR을 나타내는 것을 확인되었다. 60 Hz의 파워 노이즈에 대한 해결방안과 주파수 응답 특성에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

차후에 추가적인 연구를 통해 문제점을 보완한다면 정전용량형 MEMS 마이크로폰의 단점을 해결할 수 있는 고성능 MEMS 마이크로폰이 될 것이라고 생각한다.

제 2 절 향후 계획

실리콘 나노와이어 기반 MEMS 마이크로폰 제작 및 특성 분석을 통해 실리콘 나노와이어를 마이크로폰에 적용하는데 있어 가능성을 확인하였다. 하지만 상용 MEMS 마이크로폰의 성능을 갖기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다. 우선 주파수 응답의 경우 패키지가 가장 큰 요인으로 이를 고려하여 설계할 필요가 있다 [36]. 저주파수 응답은 주로 vent hole과 진동막을 덮는 패키지 부피에 의해 결정이 되며, 고주파수 응답은 주로 패키지를 통한 소리 유입통로의 헬름홀프 공명에 의해 결정이 된다. 따라서 이를 고려하여 패키지를 포함하여 설계할 필요가 있다.

또한, 마이크로폰 설계 최적화 연구가 필요하다, 스프링과 실리콘 나노와이어의 통합 구조에 대한 설계를 최적화한다면 마이크로폰 성능을 향상시키고 실리콘 나노와이어의 압저항 효과가 가지고 있는 응력과 단면적 크기에 따른 비선형성을 개선할 수 있을 것이다.

참고문헌 (References)

[1] 인공지능 음성 스피커 성장의 핵심 기술 'MEMS 마이크로폰', HelloT, 2018. 5. 2.

[2] IHS Markit, "MEMS Microphones Report - 2017," 2017.

[3] Yole Developement, "Acoustic MEMS and Audio Solutions 2017," 2017.

[4] K. Nandakumar, J. L. Funk, "Understanding the Timing of Economic Feasibility: the Case of Input Interfaces for Human-computer Interaction," *Technology in Society,* vol. 43, pp. 33-49, 2015.

[5] C. H. Je, J. W. Lee, W. S. Yang, J. D. Kim and Y. H. Cho, "A surface-micromachined capacitive microphone with improved sensitivity," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 23, no. 5, Apr. 2013.

[6] T. Tajima, T. Nishiguchi, S. Chiba, A. Morita, M. Abe, K. Tanioka, N. Saito, and M. Esashi, "High-performance ultra-small single crystalline silicon microphone of an integrated structure," *Microelectronic Engineering*, vol. 67-68, pp. 508-519, 2013.

[7] J. Jantawong, N. Atthi, C. Leepattarapongpan, A. Srisuwan, W. Jeamsaksiri, K. Sooriakumar, A. Austin, and S. Niemcharoen, "Fabrication of MEMS-based capacitive silicon microphone structure with staircase contour cavity using multi-film thickness mask," *Microelectronic Engineering*, vol. 206, pp. 17-24, 2019.

[8] Y. Du, M. Kuntzman, and Y. Chen, "A revisit to the lumped element model of capacitive MEMS microphones," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 143, no.3, 2018.

[9] J. Manz, G. Bosetti, A. Dehé, and G. Schrag, "A novel silicon "star-comb" microphone concept for enhanced signal-to-noise-ratio: Modeling, design and first prototype," *Transducers*, Kaohsiung, Taiwan, Jun. 18-22, pp. 67-70, 2017.

[10] Néstor N. Peña-García, Luz A. Aguilera-Cortés, Max A. González-Palacios, Jean-Pierre Raskin, and Agustín L. Herrera-May, "Design and modeling of a MEMS dual-backplate capacitive microphone with spring-supported diaphragm for mobile device applications," *Sensors*, vol. 18, no. 10, 2018.

[11] W. J. Mao, C. L. Cheng, S. C. Lo, Y. S. Chen, and W. Fang, "Design and Implementation of a CMOS-MEMS Microphone without the Back-Plate," *Transducers*, Kaohsiung, Taiwan, Jun. 18-22, pp. 1037-1040, 2017.

[12] Jaroslaw Czarny, Emmanuel Redon, Thierry Verdot, Kerem Ege, Jean-Louis Guyader, "Novel architecture of MEMS microphone that employs deflecting micro beams and piezoresistive nano gauges," *12ème Congrès Français d'Acoustique (CFA 2014)*, pp. 189-195, Poitiers, France, Apr. 22-25, 2014.

[13] Avoiding Epic Fails in MEMS Microphones," Vesper Technologies, USA, 2017.

[14] C. H. Huang, C. H. Lee, T. M. Hsieh, L. C. Tsao, S. Wu, J. C. Liou, M. Y. Wang, L. C. Chen, M. C. Yip and W. Fang, "Implementation of the CMOS MEMS condenser microphone with corrugated metal diaphragm and silicon back-plate," *Sensors J.*, vol. 11, pp. 6257-6269, 2011.

[15] A. Shakarami, A. Afifi, A Mir, "Analysis and simulation of Piezoresistivity effect in Silicon nanowires for using in MEMS pressure Sensors," *Majlesi journal of Mechatronics systems*, vol. 3, no. 3, 2014.

[16] R. He, et al., "Giant piezoresistance effect in silicon nanowires," Nature nanotechnology, vol. 1, no. 1, pp. 42-46, 2006. J. Park et al., "Coulomb blockade and the Kondo effect in single-atom transistors," *Nature*, vol. 417, pp. 722-725, 2002.

[17] D. Letian, Q. Yang, Y. Yu, Z. Niu, Y. Sun, H. Liu, A. Dehestani, K. Schierle-Arndt, and P. Yang, "Benzoin Radicals as Reducing Agent for Synthesizing Ultrathin Copper

Nanowires," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 139, no. 8, pp. 3027-3032, 2017.

[18] S. Kodambaka, J. Tersoff, M. C. Reuter, and F. M. Ross, "Germanium nanowire growth below the eutectic temperature," *Science*, vol. 316, Issue 5825, pp. 729-732, 2007.

[19] R. He, P. Yang, "Giant piezoresistance effect in silicon nanowires," *Nature Nanotechnoloy*, vol. 1, pp. 42-46, 2006.

[20] M. Mcclarty, N. Jegenyes, M. Gaudet, C. Toccafondi, R. Ossikovski, F. Vaurette, S. Arscott, and A. Rowe, "Geometric and surface chemical origin of the piezoresistance in silicon nanowires," *Applied physics letters*, 2016.

[21] J. X. Cao, X. G. Gong, and R. Q. Wu, "Giant piezoresistance and its origin in Si (111) nanowires: First-principles calculations," *Physics Review B*, vol. 75, 233302, 2007.

[22] D. Shiri, Y. Kong, A. Buin, and M. P. Anantram, "Strain induced change of bandgap and effective mass in silicon nanowires," *Applied Physics Letters*, vol. 93, 073114, 2008.

[23] Y. Niquet, C. Delerue, and C. Krzeminski, "Effects of strain on the carrier mobility in silicon nanowires," *Nano Letters*, vol. 12, pp. 3545-3550, 2012.

[24] A. C. H Rowe, "Silicon nanowires feel the pinch," *Nature Nanotechnology*, vol. 3, no. 6, pp.311-312, 2008.

[25] J. S. Milne, A. C. H. Rowe, S. Aroscott, and C. Renner, "Giant piezoresistance effects in silicon nanowires and microwires," *Physics Review Letters*, vol. 105, 226802, 2010.

[26] A. C. H Rowe, "Piezoresistance in silicon and its nanostructures," *Journal of Materials Research*, vol. 29, pp. 731-744, 2014.

[27] R. G. Hobbs, N. Petkov, and J. D. Holmes, "Semiconductor Nanowire Fabrication by Bottom-Up and Top-Down Paradigms, Chemistry of Materials," *Chemistry of Materials*, vol. 24, pp. 1975-1991, 2012.

[28] T. Shimizu, T. Xie, J. Nishikawa, S. Shingubara, S. Senz, and U. Gösele, "Synthesis of Vertical High-Density Epitaxial Si (100) Nanowire Arrays on a Si(100) Substrate Using an Anodic Aluminum Oxide Template," *Advanced Materials*, vol. 19, no. 7, pp. 917-920, 2007.

[29] A. Koumela, D. Mercier, C. Dupré, G. Jourdan, C. Marcoux, E. Ollier, S. T. Purcell, and L. Duraffourg, "Piezoresistance of top-down suspended Si nanowires," *Nanotechnology*, vol. 22, 395701, 2011.

[30] S. Lee, S. Park, and D. I. Cho, "Surface/bulk micromachining (SBM) process: A new method for fabricating released MEMS in single crystal silicon," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 8, pp. 409-416, 1999.

[31] S. Lee, S. Park, J. Kim, S, Lee, and D. I. Cho, "Surface/bulk micromachined single crystalline silicon micro gyrocscope," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 9, pp. 557-567, 2000.

[32] B. H. Kim, and H. S. Lee, "Acoustic-Thermal Noise in a Capacitive MEMS Microphone" *Sensors J.*, vol. 15, pp. 6853-6860, 2015.

[33] S. H. Jang, J. W. Sung, B. B. R. Chang, T. Y. Kim, H. H. Ko, K. I. Koo, and D. I. Cho, "Characterization of the Piezoresistive Effects of Silicon Nanowires," *Sensors*, vol. 18, no. 10, pp. 1-9, 2018.

[34] “환경 및 사용자 적응형 MEMS 마이크로폰 솔루션 개발,” ETRI, 대전, 한국, 2017.

[35] K. N. Lee, S. W. Jung, K. S. Shin, W. H. Kim, M. H. Lee, and W. K. Seong, “Fabrication of suspended silicon nanowire array”, *Small*, vol. 4, no. 5, pp. 642−648, 2008.

[36] S. A. Jawed, D. Cattin, N. Massari, M. Gottardi, A. Baschirotto, "A 1.8 V 828 lW 80 dB digital MEMS microphone", *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, vol. 67, no.3, 2011.

Abstract

Design and Fabrication of Silicon Nanowire-based MEMS Microphones with Spring Supported Membrane

SeungHyun Lee
Electrical and Computer Engineering
The Graduate School
Seoul National University

Micro-electro-mechanical system (MEMS) sensors are receiving great attention since the demand for high-quality and high-performance sensors has greatly increased due to the influence of the Internet of things (IoT). The capacitive MEMS microphone, which is one of the most common type, has been studied by many researchers to improve the performance of capacitive microphones. the capacitive MEMS microphone has limitations in miniaturization due to trade-off between device miniaturization and sensor sensitivity. In addition, the capacitive MEMS microphones are suffered from the stiction issues between membrane and backplate by water, mechanical shock, or acoustic overload. This paper presents a new architecture of MEMS microphone using silicon nanowires (SiNWs) alternative to overcome these issues. The microphone presented in this paper is advantageous for miniaturization of the device by using the giant piezoresistive (GPZR) effects of SiNWs. Also, it is possible to

prevent the issues arising from the airgap between membrane and backplate, since the backplate is unnecessary for the SiNW-based MEMS microphones. In addition, the spring structure is used to increase the sensitivity. SiNWs are inserted into the springs so that when the springs are displaced, the SiNWs are displaced to detect sound pressure. The microphone fabrication method was developed by applying the SiNW fabrication process. Furthermore, the characteristics of the microphone presented in this paper were analyzed based on the performance evaluation of the fabricated microphone using the developed microphone fabrication method.

Keywords : silicon nanowire, MEMS fabrication, piezoresistive effect, microphone
Student Number : 2018-28016