

MEMS 기술에 의한 초소형 마이크로스피커

이승환 교수
(국립 충청대 기계공학과)

1. 서론

21 세기는 Wireless Mobile 시대를 지향하고, 언제 어디서나 사용할 수 있는 제품을 추구함에 따라 모든 전자 소자들이 경박단소화 되고 있다. 생활속에서 경박단소의 시대적인 요구를 직접 체험할 수 있었던 것은 이동통신용 단말기라 할 수 있다. 이동통신 단말기와 관련된 소자 및 제품의 기술은 정보통신 산업의 중심부에 위치하고 있으며, 이는 21세기 대한민국의 효자 상품으로서, 세계 시장을 선도하는 기술로서 자리매김을 하고 있으며, 경박단소화에 따라 MEMS(MicroElectroMechanical Systems) 기술을 이용한 소자의 응용이 시도되고 있다. 따라서 기존 MEMS 기술의 적용 분야가 의료 및 자동차 분야에서 가전 및 통신의 생활 전반에 걸쳐 파급되고 있어 산학연을 중심으로 한 실용적 연구 및 결과의 적용이 무엇보다 중요한 시대에 도래 했다고 해도 과언이 아니다.

본 동향 보고서에서는 이동통신용 부품에서도 사용 가능한 음향소자의 개발 및 적용상황을 살펴보고자 하며, 그 중에서 마이크로스피커의 개발 동향을 중심으로 알아본다. 현재까지 MEMS 기술을 이용한 마이크로스피커는 국내외적으로 세 가지 방향의 연구가 진행되고 있다. 기존 전동형 스피커(Electrodynamic Speaker)를 MEMS 기술을 이용하여 소형화하고자 하는 방향[1]과 Cornell 대학을 중심으로 CMOS 호환의 기술을 이용한 MEMS Speaker[2], 마지막으로 압전 박막을 이용한 마이크로 스피커 개발[3]로 분류할 수 있다. 전동형 MEMS 스피커는 그 구조가 복잡할 뿐만 아니라, 박막 다이어프램상에 고 보자력의 박막 자석을 실현하는데 그 문제점이 있고, CMOS 형 마이크로 스피커의 경우 그 구동전압이 높아(약 100 V) 실용성 면에서 뒤떨어진다는 큰 단점이 있는 반면, 압전형 MEMS 마이크로 스피커는 첫째 구조가 간단할 뿐만 아니라, 구동전압이 낮고, 관련 박막에 대한 그 물성이 비교적 잘 알려져 있는 상황이다. 압전 박막을 이용한 연구 개발 및 제품으로는 압전형 마이크로폰[4], 마이크로스피커 [3,5], Micro-Mixer 혹은 Ejector 및 Agilent社의 Mobile Phone 용

FBAR(Film Bulk Acoustic Resonator)를 들 수 있다. 상기 제시한 압전형 소자는 고품질의 AlN나 ZnO 박막을 이용하고 있으며, 재료물성에 기반한 제품군을 형성하고 있다 해도 과언이 아니다.

따라서 본 동향보고서에서는 주로 압전형 마이크로스피커의 연구 동향을 살펴보고, 현재 상용화되어 있는 용량형 마이크로폰의 구조에 대해서 살펴보기로 한다.

2. 본 론

본 절에서는 M³(MEMS/Microsystems/Micromachine) 제품의 연구개발 및 상용화까지의 연표 및 휴대폰 시장의 규모를 살펴봄으로써 MEMS 기술을

표 1. 국제적 Microsystem의 출하량(단위 : Million US\$).

Applications	2000	2004	CAGR (%)
IT/Peripheral	\$ 8,700M	\$ 13,400M	11.5
Medical/Biomedical	\$ 2,400M	\$ 7,400M	32.5
Industrial/Automation	\$ 1,190M	\$ 1,850M	11.6
Telecommunications	\$ 130M	\$ 3,650M	128.1
Automotive	\$ 1,260M	\$ 2,350M	16.9
Enviromental Monitoring	\$ 520M	\$ 1,750M	35.4
Total	\$ 14,200M	\$ 30,400M	21.0

표 2. MEMS/Microsystem/Micromachine 개발 및 상용화 연표.

Products	Discovery	Product Evolution	Cost Reduction	Full Production
Pressure Sensors	1954-1960	1960-1975	1975-1990	1990
Accelerometers	1974-1985	1985-1990	1990-1998	1998
Gas Sensors	1986-1994	1994-1998	1998-2005	2005
Valves	1980-1988	1988-1996	1996-2002	2002
Nozzles	1972-1984	1984-1990	1990-2002	2002
Photonics	1980-1986	1986-1998	1998-2004	2004
Bio/Medical Sensors	1980-1994	1994-2000	2000-2004	2004
Radio Frequency	1994-1998	1998-2001	2001-2005	2005
Rate Sensors	1982-1990	1990-1996	1996-2002	2002
Micro Relays	1977-1982	1993-1998	1998-2002	2002
Microphones[7]	1992-1996	2001-2003	2004-2005	2005

이용한 소자의 제품에의 응용 가능성을 살펴보고자 한다.

2.1 MEMS 소자의 시장

표1은 Microsystem의 출하량을 응용분야별로 나타낸 것이다[6]. 2000년도까지의 주요 응용 영역별 제품의 출하 상태를 보면 단연 IT와 주변기기 응용을 위한 제품이 시장을 형성하고, 뒤를 이어 의료용 및 자동차용으로 제품이 개발되어 사용되어 왔음을 알 수 있다. 그러나 2004년도 제품 출하의 예측 상황을 살펴보면, 타 제품군에서는 약 10 ~ 30 %의 연평균 성장률을 나타내고 있으나, 통신용 부품은 약 128 %라는 괄목할 만한 성장률을 나타낼 것으로 예상하고 있다. 이러한 예측은 21세기 성장산업으로서 개인 통신용 단말기(휴대폰과 PDA)의 성장과 무관하지 않음을 알 수 있다.

한편 표2는 M³제품의 연구개발 단계에서 상용화까지 소요된 기간을 나타낸 것이다[6]. 일상 생활속에서 널리 사용되고 있는 압력센서의 경우, 1950년대 개발되어 1970년대 중반을 지나면서 경박단소화와 신호처리 계통을 실리콘 반도체 칩에 집적한 후, 약 10여 년간의 단가절감을 통하여 1990년대에는 제품으로서 가격 경쟁력 뿐만 아니라, 제품 경쟁력을 갖는 소자를 양산하고 있음을 볼 수 있다. 그러나 지난 10여 년간 MEMS 기술의 성숙에 힘입어 최근 개발 상용화 과정을 밟고 있는 마이크로폰의 경우, 1990년대 개발되어 2004년경 Motorola와 Nokia제

품에 탑재되어 상용화되어 왔으며, 연구 개발에서 제품 생산의 기간이 단축되어 가고 있음을 확인할 수 있다. 또한 이동통신 단말기에 응용되고 있는 FBAR는 Agilent社에 의하여 개발되어, 2003년경부터 휴대폰에 장착되고 있으며, 국내에서도 이에 대한 연구 개발이 진행되어 제품의 출하를 기다리고 있는 상황이다.

표3은 2005년도 3분기 전 세계적으로 생산된 휴대폰의 판매현황을 나타낸 것이다[8]. 표3은 세계 4대 경쟁사의 제품 판매량만을 나타낸 것으로서, 2004년도 4개 회사에서의 출하량은 대략 4억 4천만대 규모이며, 2005년도 3분기까지의 출하량은 3억9천만대 규모임을 알 수 있으며, 매년 지속적인 성장을 하고 있다. 이러한 성장 가도를 달리고 있는 이동통신 단말기에 새로운 기술에 의한 제품을 탑재시키는 경우, 그 파급효과는 한 기업의 성장 뿐만아니라, 국가적 경쟁력 및 수입대체 효과도 확실하게 담보할 수 있을 것으로 판단한다.

상기 제시한 표를 통하여 유무선 통신 제품, 특히 개인휴대폰에 MEMS 기술에 의한 제품의 응용은 표 1에서 제시한 바와같이 그 성장 속도가 타 제품에 비하여 약 5배가량 되는 이유를 시장 규모를 통하여 확인할 수 있다 하겠다.

2.2 PCS에 적용된 마이크로스피커

현재 개인용 이동통신 단말기는 제1세대 단순통화기능에서 제3세대에서는 MP3 기능, 동영상 촬영을 포함한 인터넷 접속기능을 포함하고 있음에 따라 오디오 및 비디오 기능을 지니고 있으며, 제4세대 DMB(Digital Multimedia Broadcasting)폰에서는 지상파 방송을 수신함에 따라 그 기능 및 역할이 다양화되고 있다. 동영상의 수신을 포함한 고성능 오디오

기능을 확보함과 동시에 초박형 휴대폰을 제작하기 위해서는 각 소자의 소형화가 추진되어야 한다.

그림1은 현재까지 사용된 음향소자 중 마이크로스피커의 휴대폰에의 적용 예를 보여주고 있다. Ericsson 모델에 사용된 초기 제품은 직경이 약 22 mm 두께 4 mm 정도였으며, Samsung의 첫모델은 약 18 mm 직경에 두께 3 mm, 세번째 모델은 직경 14 mm에 두께 약 2 mm 정도의 제품이 사용되고 있다. 그러나 개인용 이동통신 단말기의 슬림화에 따라 현재 사용되고 있는 마이크로스피커와 동일한 성능을 지니면서도 두께는 얇은 새로운 개념의 마이크로스피커의 연구 개발은 꾸준히 요구되고 있는 실정이다. 이러한 시장에서의 요구에 대응하기 위한 하나의 방편으로 MEMS 기술을 이용한 마이크로스피커의 연구가 가속화되어 왔으며, 그 연구 개발 과정 및 구조를 살펴보면 2.3절과 같다.

2.3 MEMS 기술을 이용한 마이크로스피커

본 절에서는 현재까지 연구 개발되고 있는 MEMS 기술을 이용한 마이크로스피커의 동향을 살

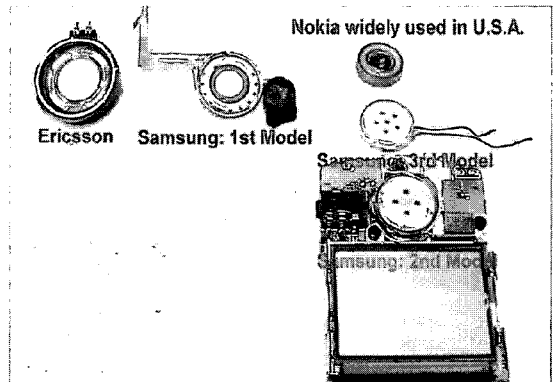


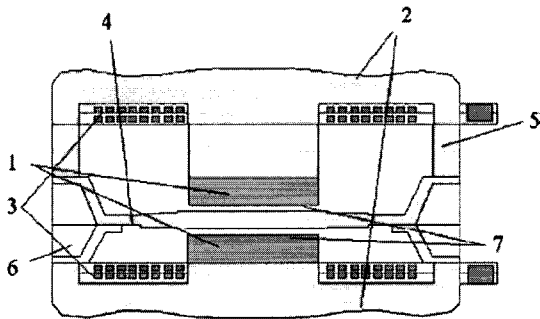
그림 1. PCS에 적용되고 있는 마이크로스피커.

표 3. 2005년도 3분기 글로벌 휴대폰 판매 현황(단위: 만대).

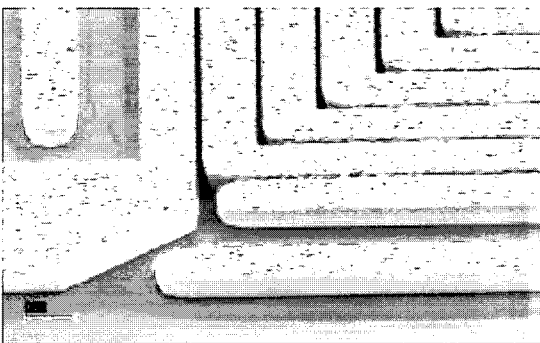
구분	2004년				2005년		
	1분기	2분기	3분기	4분기	1분기	2분기	3분기
노키아	4,470	4,540	5,140	6,610	5,380	6,080	6,660
모토로라	2,530	2,410	2,330	3,180	2,870	3,390	3,870
삼성전자	2,008	2,267	2,269	2,110	2,450	2,440	2,680
LG 전자	875	994	1,180	1,390	1,110	1,209	1,550

해보고자 한다.

그림2는 보청기에의 적용을 위하여 연구 개발된 초소형 스피커를 나타낸다[1]. 그림2(a)는 스피커의 단면 구조를 나타낸 것으로서, 그 구성은 (1)두개의 영구자석, (2)상하부의 연자성 기관, (3)자속발생을 위한 초소형 평판코일, (4)연자성 멤브레인, (5)연자성 간극층, (6)음압 토출구 및 (7)공극으로 이루어져 있다. 소자의 규격은 5 mm x 5 mm x 1.5 mm이며, 영구자석과 초소형 평판코일의 의하여 발생하는 자속의 차에 의하여 발생된 힘이 연자성 멤브레인에 인가되어 음압을 발생시키는 구조로 되어있다. 그림 2(b)는 전기도금에 의해 제작된 초소형 평판 코일의



(a)



(b)

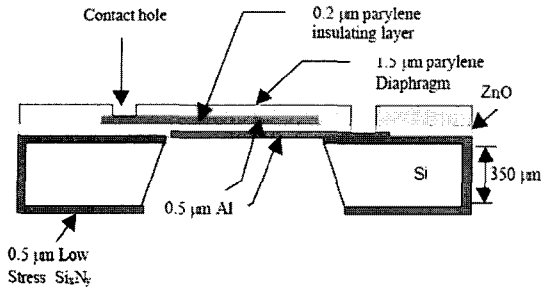
그림 2. 자성체와 코일을 이용한 마이크로스피커: (a)영구자석을 이용한 스피커 단면도, (b)구리 박막을 이용한 자속발생 코일의 SEM 사진.

SEM 사진을 나타낸 것으로, 폭은 31 μm , 두께 20 μm , 코일간 간격은 약 4 μm 로 제작되었으나, 이에 대한 특성 시험 결과는 제시되지 않았다.

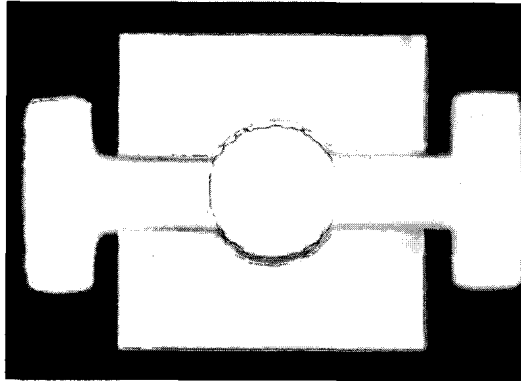
그림3은 음압 발생을 위한 압전 ZnO 박막과 Parylene 다이어프램으로 제작된 마이크로스피커를 나타낸다[3]. 그림3(a)는 제작된 마이크로스피커의 단면도를 나타내고, 그림3(b)는 상부 사진, 그림 3(c)는 실리콘 기관의 하부에서 바라본 마이크로스피커의 사진을 나타낸 것이다. Parylene 다이어프램을 사용한 이유는 첫째 아주 작은 잔류응력을 지니고 있으며(약 20 ~ 40 MPa), 둘째 Parylene은 일종의 폴리머로서 기존 다이어프램 물질로 사용되었던 실리콘 질화막보다도 작은 탄성계수를 지님에 따라 음향소자로 사용 시 큰 감도(마이크로폰으로 사용시)와 휨(Deflection)을 기대할 수 있기 때문이다. Parylene 다이어프램을 사용하여 제작한 마이크로스피커의 출력음압은 구동전압 11 V_{rms} 공진주파수에서 약 600 mPa(스피커로부터 약 2 mm 거리에서)을 나타냄을 보고하였다.

한편 그림4는 동일 저자에 의하여 제작된 또 다른 형태의 마이크로스피커의 단면도(a)와 상부사진(b) 및 실리콘 하부에서 촬영한 사진(c)을 보여주고 있다[4]. 그림4(b)에서 알 수 있듯이 스피커로서 역할을 하는 부분은 총 5개로서 중앙에 1개, 실리콘 기관의 가장자리에 각각 1개의 소자를 포함하고 있으며, 실리콘 기관의 모서리에서 중앙으로 일정한 폭을 갖도록 잔류응력의 실리콘 질화막을 제거하여 각각의 스피커가 Parylene에 의하여 지지되는 구조되는 일종의 외팔보(Cantilever)와 같은 형상을 취하고 있다. 이는 Cantilever 구조를 이용한 음향소자[5]의 잠재적인 단점을 보완하기 위한 구조로 사료된다. 상기 제시한 구조로 제작된 마이크로스피커의 음압수준(Sound Pressure Level)은 인가전압 17.6 V_{rms}에서 약 60 ~ 90 dB를 나타낸다고 보고하였다.

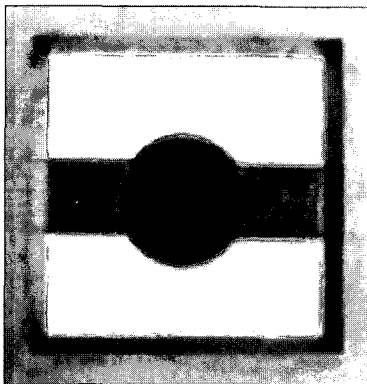
한편 그림5는 압축 응력을 지닌 실리콘 질화막 다이어프램에 압전 ZnO 박막을 증착하여 형성시킨 마이크로스피커를 나타낸 것이다[9]. 그림에서 제시한 바와같이 다이어프램은 5x5 mm²였으며, 원형 전극의 경우, 3 mm의 직경을 지니고 있으며, 십자가 형태의 전극은 약 480 μm 의 길이를 지니고 있다. 기존



(a)

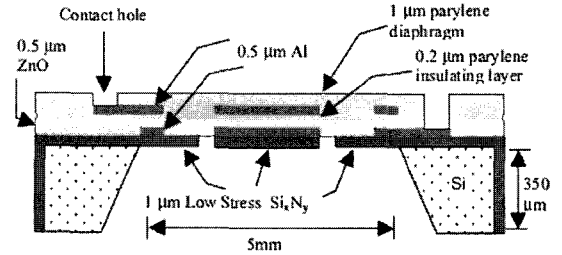


(b)

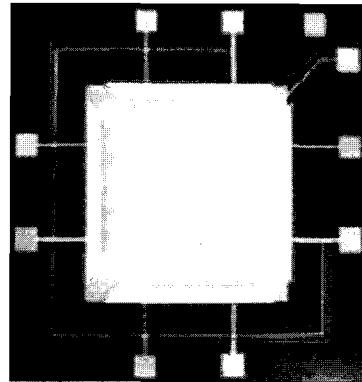


(c)

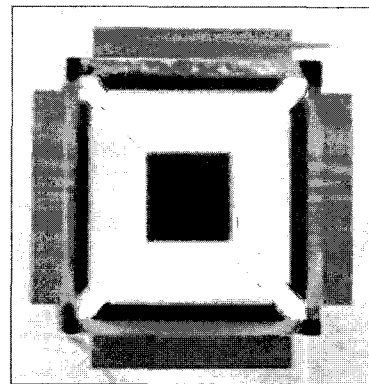
그림 3. ZnO 박막과 Parylene 다이어프램을 이용한 압전형 마이크로스피커.



(a)

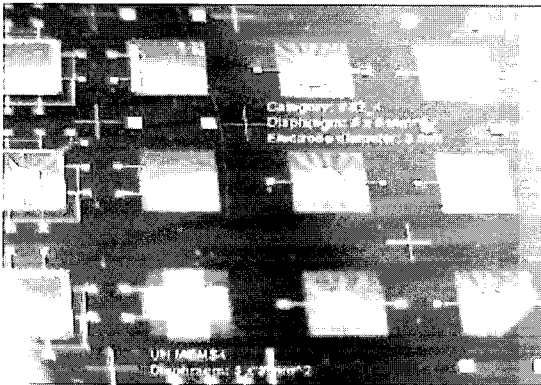


(b)

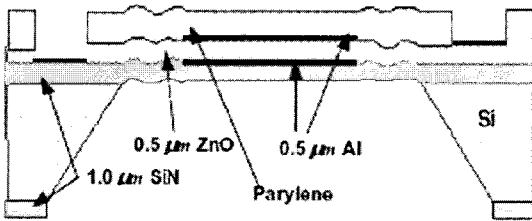


(c)

그림 4. Parylene 다이어프램으로 지지된 Cantilever와 유사한 마이크로스피커.



(a)



(b)

그림 5. Wrinkled 다이어프램에 형성한 압전형 마이크로스피커.

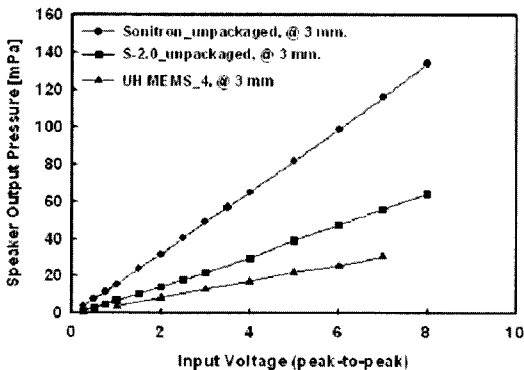


그림 6. 인가전압에 따른 각종 마이크로스피커의 출력 음압.

의 마이크로스피커는 대부분 인장 응력을 지닌 다이어프램을 사용하여 제작하였으나, 본 연구에서는 각 박막의 잔류 응력 측정 및 다층박막의 전체 응력을 고려하여 압전 효과가 발생하는 영역은 인장 응력을 갖게 하고, 압전 효과에 의하여 다이어프램의 변위 (Displacement)가 발생하는 영역은 압축 응력을 갖도록 함으로써 보다 큰 변위 발생을 유발함으로써 큰 음압이 발생되도록 설계한 특징을 지니고 있다 할 수 있다. 그림6은 벌크 압전체를 이용한 스피커 (Sonitron)와 휴대폰에 사용한 마이크로스피커 및 본 연구를 통하여 제작한 MEMS 스피커의 출력 음압 특성을 비교한 것이다. 동일한 인가전압($6 V_{Peak-to-Peak}$)에서 벌크 압전체의 경우 약 100 mPa, 휴대폰에 사용한 마이크로스피커의 경우 약 40 mPa, MEMS 기술에 의하여 제작한 마이크로스피커는 약 26 mPa를 나타내고 있음을 볼 수 있다. 그러나 전술한 두개의 스피커는 MEMS 스피커에 비하여 월등히 큰 다이어프램 면적을 지니고 있었다.

그림7은 저잔류 응력을 지닌 실리콘 질화막을 다이어프램($3 \times 3 \text{ mm}^2$, 두께 $1.5 \mu\text{m}$)으로 사용하고, $0.5 \mu\text{m}$ 압전 ZnO 박막과 $0.4 \mu\text{m}$ 알루미늄 전극을 이용하여 제작한 마이크로스피커를 제시하고 있다[10]. 본 연구를 통하여 제작된 마이크로스피커의 음압수준 (Sound Pressure Level)은 인가전압 $15 V_{P-K}$, 주파수 7.3 kHz에서 약 73 dB SPL을 나타내었음을 보고하고 있으며, 출력 음압은 인가전압 $15 V_{P-K}$ 1차 공진

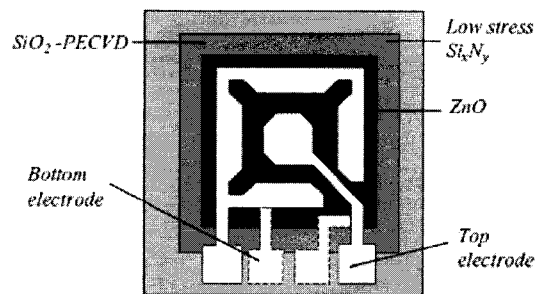


그림 7. 압전형 마이크로스피커.

주파수인 7.3 kHz에서 46.2 mPa를 나타내었음을 보고하고 있다.

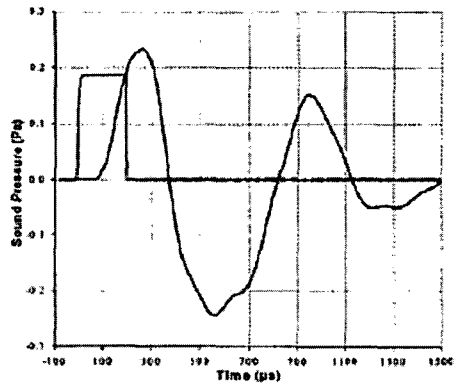
그림8은 CMOS 공정에 의하여 제작된 7 개의 마이크로스피커(1.4 mm x 1.4 mm)가 TO-8 금속 패키지에 부착된 것을 보여주고 있으며[2], 그림9(a)는 200 μ s 동안 90 V의 펄스 전압을 인가 했을때 발생된 음압 특성을 나타낸 것이고, 그림9(b)는 나머지 6개 스피커의 출력 음압 특성 곡선을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 출력 음압은 약 230 mPa의 큰 값을 나타내고 있으나, 기존 스피커의 인가전압에 비해 약 6배에서 수십 배 이상이 요구됨을 알 수 있다.

상기 과정에서 살펴본 바와같이 MEMS 기술을 이용한 마이크로스피커는 세 가지 방향으로 연구가 진행되고 있으며, Hearing Aids 혹은 개인 통신 단말기 등에 사용하기 위해서는 첫째 인가 전압의 저하와 둘째 출력 음압의 향상을 위한 전기-기계적인 연구가 병행, 진행되어야 할 것으로 판단한다. 이러한 향상된 특성을 확보하기 위해서는 마이크로스피커를 구성하고 있는 각종 재료의 물성해석 및 이를 통한 최적 구조의 설계에 대한 심도 있는 연구가 병행되어야 할 것으로 보인다.

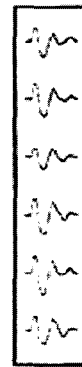
2.4 MEMS 기술을 이용한 마이크로폰

표3에 제시한 바와같이 이동통신용 휴대형 단말기의 수요와 공급은 매년 폭발적인 성장을 하고 있으며, 단일 품목으로서 가장 큰 시장을 형성하고 있는 제품군으로 분류할 수 있을 것이다. 2000년도 초

반에 MEMS 기술에 의한 이동통신용 부품의 산업에의 응용이 다소 회의적이었지만, 2003년경 Agilent社의 FBAR가 휴대폰에 채택 상용화된 이후, 이에 대한 관심이 고조되었으며, 2004년경 Nokia가 당시 상용화 시제품으로 발표된 실리콘 용량형 마이크로폰을 전격적으로 채택하여 많은 이들의 의구심을 불식시켰다. 이에 발맞추어 국내 휴대폰 생산 업체의 경우 2006년 말경에 자사의 제품에 실리콘 용량형 마이크로폰을 채택, 상용화하기 위한 마지막 양산화 작업을 수행하고 있음을 볼 수 있다. 따라서 본 절에서는 현재 상용화되어 우리들 곁에 가까이 와있는 실리콘 용량형 마이크로폰에 대해서 살펴보고자 한다.



(a)



(b)

그림 9.

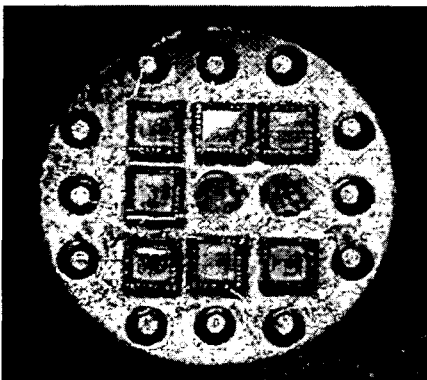
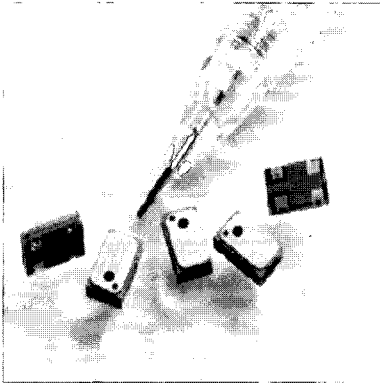
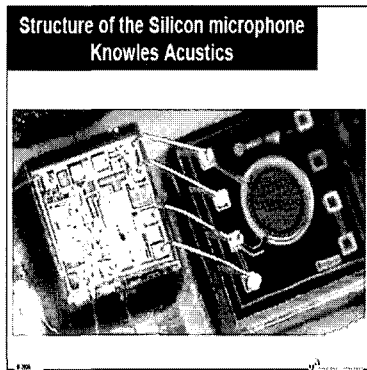


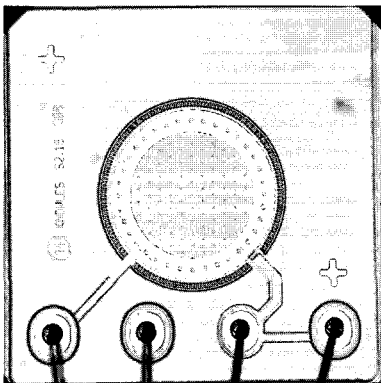
그림 8. CMOS-MEMS Microspeaker.



(a)



(b)



(c)

그림 10. Surface와 Bulk MEMS 기술을 이용하여 제작한 마이크로폰: (a)Sharp Pencil과의 비교 사진, (b)Package 내부 사진(Two-chip), (c)마이크로폰 표면사진.

그림10은 현재 상용화되어, 개인 이동통신 단말기에 부착 사용되고 있는 실리콘 용량형 마이크로폰의 사진을 제시한 것이다. 그림10(a)는 패키지 상태의 마이크로폰의 사진을 나타낸 것으로서 제품의 크기는 약 $3.76 \times 6.15 \text{ mm}^2$ 의 크기를 갖고 있으며, 주파수 1 kHz에서 약 8 mV/Pa 의 감도특성을 갖고 있음을 제시하고 있다. 그림10(b)는 패키지 내부의 사진을 보여 주고 있는 것으로 용량형 마이크로폰은 음압 측정을 위한 센서와 이의 신호 증폭을 위한 IC가 두 개의 칩으로 분리 내장되어 있음을 보여주고 있다. 한편 그림10(c)는 실리콘 용량형 마이크로폰의 근접 촬영 사진이어서 외부에서 인가되는 음압에 따라 미소 변위를 발생하는 다이어프램은 약 $640 \mu\text{m}$ 의 직경을 갖고 있으며, 상부 Backplate에 위치한 전극의 직경은 약 $420 \mu\text{m}$ 로 설계 제작되어 있음을 확인할 수 있었다.

2.5 향후 과제 및 전망

본 동향보고서에서 살펴본 바와같이 MEMS 기술에 의한 제품의 시장 도입은 약 10년에서 15년 정도의 연구개발, 이를 통한 원가 절감 및 신뢰성 평가를 통하여 이루어졌음을 알 수 있다. 국내에서 MEMS 기술의 도입과 연구개발이 1990년대 초반에 시작되었음을 감안할 때, 이제는 국내에서도 현장에 도입될 제품의 출현이 기대되고 있으며, 그의 효시로서 Si Thermopile이 각종 의료기구나 자동차 산업에 적용되고 있음은 MEMS 기술을 연구하는 일원으로서 반가운 일이 아닐 수 없다.

그러나 MEMS 기술이 산업에 적용되기 까지 10여 년 이상의 기간이 소요됨을 감안할 때 다음과 같은 맥락에서 연구 개발이 산/학/연을 중심으로 이루어져야 보다 실효적인 효과를 거둘 수 있을 것으로 기대된다. 첫째 산업계에서의 지속적인 연구 개발에 대한 의지와 실행이 있어야 할 것으로 사료된다. 둘째 학계에서는 보다 장기적인 안목으로 산업계와 교류하여 상품화 연구를 긴밀하게 수행하여 한다고 판단된다. 그러나 상기 두 가지 사항은 정부의 정책과 무관하지 않으므로, 산/학/연 및 정부 부처는 대국적인 측면에서 5년에서 10년 앞을 바라보며 상품화 개발을 실행하여야 할 것으로 판단한다.

상술한 과정을 기조로 산업계의 장기적인 수요를

예측하고, 이를 전략적인 측면에서 지원하며, 학계에서는 제품의 상용화를 위해 최대한의 역량을 발휘한다면 MEMS 기술에 의한 음향 소자의 상품화 뿐만 아니라, 타 제품의 개발 및 상용화가 실현 될 것으로 기대된다.

3. 결론

본 동향 보고서에서는 MEMS 기술을 이용한 음향소자인 마이크로스피커를 중심으로 마이크로폰에 대하여 살펴보았다. 마이크로스피커 관련 세 가지 기술 중 기존의 전동형 구조와 압전형이 CMOS 기술을 이용한 스피커보다 상용화가 용이할 것으로 판단되나, MEMS 기술을 이용한 제품 대동에서 상용화까지가 약 10여년 이상의 연구 개발 및 상용화 연구가 수행되고 있음을 볼 때, 마이크로스피커의 상용화를 위해서는 지속적인 관심과 이에 대한 연구 개발이 끊임없이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

참고 문헌

[1] Jorg Rehder, Pirmin Rombach, and Ole Hansen, "Magnetic Flux Generator for Balanced Membrane Loudspeaker", Sensors and Actuators A 97-98, p. 61, 2002.

[2] B.M. Diamond, John J. Neumann, Jr., and Kaigham J. Gabriel, "Digital Sound Reconstruction Using Array of CMOS-MEMS Microspeakers", Tech. Digest of IEEE 15th International MEMS conference, p. 296, 2002.

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

[4] C.H. Han and EunSok Kim, "Fabrication of Piezoelectric Acoustic Transducers Built on Cantilever-like Diaphragm", Tech. Digest of IEEE 14th International MEMS conference, p. 210, 2001.

[5] S. S. Lee, R. P. Ried and R. M. White, "Piezoelectric cantilever microphone and microspeaker", Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 5, no.4, p.

238, 1996.

[6] Bernard Wybranski, "mstnews: International Newsletter on Microsystems and MEMS", no.5/01, 2001.

[7] David Jordan, "Silicon Microphone Market 2005", Yole Development, 2005.

[8] 전자부품연구원, "휴대폰 시장 통계", 2005.

[9] SeungHwan. Yi and EunSok Kim, "Piezoelectric Microspeaker with Compressive Nitride Diaphragm", Tech. Digest of IEEE 15th International MEMS, p. 260, 2002

[10] S.C. Ko, Y.C. Kim, S.S. Lee, S.H. Choi, and S.R. Kim, "Piezoelectric Membrane Acoustic Devices", Technical Digest of IEEE 15th International MEMS, p. 296, 2002.

저자|약력



성명 : 이승환

◆ 학력

- 1988년 고려대 전기공학과 공학사
- 1990년 고려대 대학원 전기공학 공학석사
- 1998년 고려대 대학원 전기공학 공학박사

◆ 경력

- 1993년 - 1998년 만도기계 중앙연구소 주임연구원
- 1998년 - 2002년 하와이 주립대 전기공학과 방문연구원
- 2002년 - 2004년 GE Sensing Korea, 책임연구원
- 2004년 - 현재 국립충주대 기계공학과 조교수