



# 차세대 정보통신 산업에 RF MEMS 기술의 응용

■ 박재영 / 엘지전자기술원 소재재료연구소 마이크로시스템그룹

## 서론

현대는 정보전쟁의 시대라고도 할 수 있다. 즉 현대인들은 시간과 공간의 제약 없이 대용량의 정보들을 새롭게, 빨리, 쉽게 주고받기를 원한다. 이러한 시대적 요구에 따라서 정보통신 기술은 급속도로 발전 성장하고 있다. RF (Radio Frequency) MEMS 기술은 바로 이러한 시대적 흐름에 맞추어 차세대 정보통신산업을 이끌 차세대 핵심 전략 기술로 활발히 연구되고 있는 분야이다. RF MEMS 기술은 쉽게 풀이하자면 MEMS 기술을 휴대형 정보기기, 이동 및 무선 통신기기 등에 적용하여 소형화, 저가화, 경량화, 집적화, 그리고 고성능화 시키는 데 필요한 차세대 신기술이다. 또한 이러한 기술들의 장점은 기존의 제품들에 적용되어 소형화, 고성능화, 그리고 저가격화 시키는 것을 뛰어넘어 새로운 정보통신 부품 및 시스템의 창출을 가져오는데 많은 공헌을 할 것으로 예상되며, 본 원고에서는 RF (Radio Frequency) MEMS 기술의 대표적인 적용 및 응용 예를 통하여 이 기술들이 앞으로 이동 및 무선통신 산업에 가져올 파급효과를 살펴보고자 한다.

## RF MEMS 기술의 응용

MEMS (Micro Electro Mechanical System) 기술은 미세한 전기/기계 소자나 시스템을 구현하는 설계

및 제작기술로 micromachining 이라고도 한다. Micromachining은 반도체 기술을 기반으로 20~30년 전에 연구가 시작되었지만 회로제작 및 2차원 구조물 제작에 제한되지 않고 3차원 구조물 까지 구현함으로써 전자 (가전, 디스플레이, 저장, 통신, 자동차등등), 기계, 화학, 생물 등 다양한 분야에 응용되어 기존의 사업을 보다 더 크게 확장하거나 새로운 사업을 창출해내는 핵심요소 기술로 인정 받고 있다. 이러한 MEMS 기술은 최근에 이동 및 무선통신의 핵심 사업분야라 할 수 있는 휴대형 정보단말기(휴대폰, PDA)에 적용되기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 왜냐하면 MEMS 기술은 이동통신 단말기에 사용되는 부품이나 시스템에 적용되게 되면 소형화, 저가화, 경량화, 집적화, 고성능화, 다기능화를 가져올 수 있어서 우리 삶에 커다란 변혁을 초래 할 수 있기 때문이다. 또한 이동 및 무선통신에 사용되고있는 RF transceiver는 RF 수동부품인 필터, 인덕터, 스위치, 커패시터, 공진기, 안테나등과 HBT, FET 등과 같은 능동소자의 조합으로 구성되는데 현재는 앞에서 언급한 수동소자들이 능동소자들과 별도로 제작되고 패키징된 후에 PCB 기판위에 IC 칩들과 assembly 되기 때문에 차세대 무선통신/정보기기들의 소형화,경량화, 다기능화를 가로 막는 가장 큰 장애물로 인식되고 있다.

하지만 RF MEMS 기술을 이용하게 되면 앞에서 언급한 RF 수동 부품들을 제작하는 공정이 능동소자들과



매우 유사하여 한 기판위에 능동소자들과 수동소자들의 집적화 및 소형화가 가능하여 RF 송수신기를 초소형 single chip으로 구현이 가능하다. 그림 1은 RF MEMS 기술이 RF 송수신기에 적용되었을 때의 그 효과를 보여준 것으로 기존의 board level implementation 기술을 이용했을 때와의 차이점을 보여주고 있다. 초소형 single chip transceiver가 구현이 되면 손목시계크기의 휴대형 초소형 정보통신 단말기 구현이 가능하다. 또한 단순히 소형화의 장점뿐만 하나의 송수신기로 여러 가지 방식의 무선통신을 할 수 있어서 미국이나 유럽등 국경에 상관없이 동일한 초소형 이동통신단말기를 사용할 수 있고 또한 하나의 단말기로 여러 주파수 band (cellular, PCS, IMT2000, wireless LAN 등등...)에서 사용이 가능하게 할 수 있다. 또한 고밀도 집적화가 가능하여 화상전송을 포함한 대용량의 정보 전송도 가능하다.

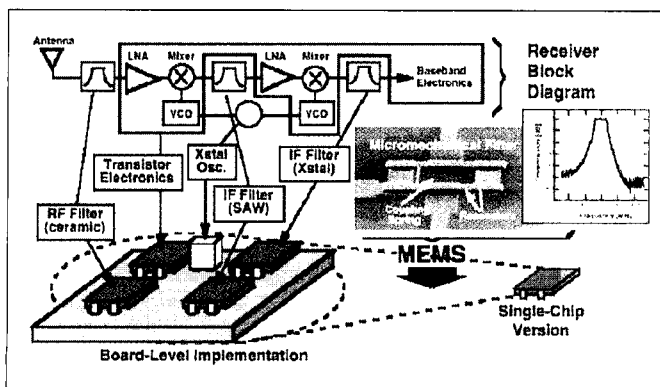
## RF MEMS 스위치

현재 전세계적으로 추진되고 있는 제 3 세대 이동통신인 IMT2000은 기존의 음성, 데이터 통신의 고속화, 고도화뿐만 아니라, 동화상 전송등의 멀티미디어 서비스를 가능하게 하는 획기적인 방식이지만, 표준이 다른 지역간의 roaming 및 기존에 보급된 셀룰러/PCS와의 호환성이 문제가 되고 있다. 따라서 새로이 개발될 IMT2000 단말기는 기존의 셀룰러/PCS를 겸용할 수 있게 하는 multi-mode/multi-band 기능이 기본적인 사

양이 될 것이 거의 확실하다. 또한 10Mbps급 이상의 초고속 대용량 이동통신인 제 4 세대 MB-ISDN도 multi-mode/multi-band 기능을 기본사양으로 해서 표준이 서로 다른 지역에서 문제점 없이 사용될 것이다. Multi-mode/multi-band 기능을 갖는 초소형 제 3, 4세대 이동통신단말기 개발에 꼭 필요한 소자가 RF 스위치다. 하지만 현재 사용되고있는 RF 스위치는 FET 와 Pin diode 스위치와 같은 반도체 스위치로써 높은 삽입손실과 낮은 isolation, 높은 전력소모, 좋지 않는 고주파 특성 등 여러 문제점을 갖고 있다. 따라서 이러한 반도체 스위치의 문제점을 개선한 새로운 스위치가 개발되고 있는데 바로 그것이 RF MEMS 스위치다. 한 예로 반도체 스위치의 소비 전력은 mW로써 이는 반도체 스위치 1개당 MEMS 스위치 1,000개의 소비 전력과 같은 결과로써 통신 시스템의 고집적화에 유리하다. 또한 MEMS 스위치는 기존의 반도체 공정으로 제작한 능동소자와 집적화 및 On-Chip Packaging이 가능하다는 것도 장점이다. 이러한 RF MEMS 스위치는 송신 신호/수신 신호 전환기, 임피던스 정합 회로, reconfigurable 필터 banks, smart antennas, mm-wave 대역의 tuning element 등으로 다양하게 사용될 수 있어서 연구 개발이 폭 넓게 이루어지고 있다.

첫째, 낮은 삽입 손실과 높은 isolation 특성을 갖는 RF MEMS switch를 antenna의 송신 신호/수신 신호 간 절환(diversity) switch 기능으로 사용하는 cellular, PCS, IMT 2000 등이 서로 호환이 가능한 단말기를 개발할 수 있다. 여러 주파수대역에서 사용 가능한 여러 개의 필터들과 co-integration 하여 사용하고자 하는 필터들을 자동으로 선택할 수 있는 filter banks가 구현 가능하다. 또한 단말기의 수신기 잡음지수 효율도 크게 향상시킬 수 있다.

둘째, RF MEMS switch를 이용해서, 고효율/소형/저가격의 multi-mode/multi-band 에 동작하는 초소형 전력 증폭기 모듈을 개발할 수 있다. 기존의 multi-mode/ multi-band 전력 증폭기는 미국 Anadigics 사의 AWT919D 전력 증폭기 모듈의 경우와 같이, 주파수 대역 별로 별도의 전력 증폭기를 구성하고, 사용하고자 하는 주파수 대역의 증폭기만 선택적으로 동작되도록



구성되어 있다. 따라서, 전력 증폭기 모듈이 여러 개의 별도 증폭기 chain으로 구성되어, 전체 모듈 크기가 커질 뿐만 아니라, 가격도 매우 비싸진다. RF MEMS switch를 이용한 전력 증폭기는 단일의 증폭기 chain만을 가지고 있고, 입력과 출력의 임피던스 정합 회로가 mode나 band에 따라 적절한 impedance를 갖도록 되어 있다. 이러한 변환은 임피던스 정합 회로 안에 삽입 손실이 작은 RF MEMS switch를 돕으로써 가능하다. 통상적으로 multi-mode 구현을 위해 FET switch를 사용한 경우에 50%의 효율을 얻을 수 있다면, MEMS switch를 사용하는 경우에는 70%의 효율을 얻을 수 있다. MEMS switch는 전력 소모가 거의 없고, 수십 W의 높은 출력의 신호에 대해서도, 신호 왜곡이 없는 장점도 갖고 있다. 또한, MEMS 스위치를 이용한 전력 증폭기 모듈은 증폭기 chain이 하나로 되어 있어, 가격 및 모듈의 크기 면에서, 다른 제품에 대해 뚜렷한 경쟁 우위를 갖을 수 있다.

셋째, mm-wave 대역의 tuning element로서 tunable MEMS capacitor로 사용가능 하여서 주파수 가변 가능한 tunable filter, mm-wave load-pull(임피던스 합성기)를 개발할 수 있으며, 초소형 tunable phase shifter 나 tunable phased array antenna 같은 제품개발에도 응용 가능하다. 특히 위상배열 안테나는 군용 또는 민간용 레이더, 위성 통신 등에 다양한 목적으로 사용 가능하다.

RF MEMS switch는 cantilever 와 membrane 구조의 스위치들과 rotary 방식의 스위치들이 있으며 이들 대부분이 정전기력을 이용하여 구동되는 원리를 갖는 용량형의 소자들로서 Raytheon System Corporation, Rockwell Science, Michigan 대학, LG 등에서 연구를 주로 수행하고 있으며, DC 전류도 통과할 수 있는 직접 접촉 방식의 정전기력 방식의 저항형의 스위치는

Texas Instruments, SamSung등에서 연구를 수행하고 있다. 그림 2는 저항형 스위치와 용량형 스위치의 구조 및 동작원리에 대하여 설명해 준다. 저항형 스위치는 그림에서와 같이 직접적으로 전극과 전극을 접촉하는 방식이며 용량형 스위치는 구동전압이 인가 되었을 때 (움직이는 상부 전극이 고정된 하부 전극위의 절연체 위로 올라 붙어서 capacitor 가 형성되어 capacitance 가 커짐) 와 인가되지 않았을 때 (움직이는 상부 전극과 고정된 하부 전극 사이에 air gap이 존재하여 capacitance가 아주 작음) 의 impedance on/off ratio에 의하여 스위칭하는 방식이다. 따라서 용량형 스위치의 경우는 bias 전압이 인가되었을때의 impedance가 커야 좋은 isolation 특성을 얻을 수 있다. 따라서 보다 좋은 isolation 특성을 갖는 스위치를 개발하기 위하여 높은 유전율을 갖는 유전체를 절연체로 사용한다든지, 희생층을 제거하고 난후에 절연체의 표면이 손상되지 않도록 하는 다양한 연구가 현재 수행되고 있다.

RF MEMS 용량형 스위치의 impedance off/on ratio는 다음의 공식에 의하여 얻어질 수 있으며, RF MEMS 스위치가 좋은 격리도를 갖기 위해서는 적어도 off/on ratio가 100:1 이상이 되는 것이 바람직하다.

$$\frac{Z_{off}}{Z_{on}} = \frac{C_{on}}{Z_{off}} = \frac{\epsilon_{dielectric} \epsilon_0 h_{air} + h_{dielectric}}{h_{dielectric}} \approx \frac{\epsilon_{dielectric} \epsilon_0 h_{air}}{h_{dielectric}}$$

또한 정전력 구동의 RF MEMS 스위치는 그림 3과 같이 lumped model을 통하여 스위치의 pull down voltage를 수식으로 계산을 할 수 있는데 이 model은 그림 3에서 보여지는 것처럼 고정된 접지전극 위에 ideal한 linear spring을 parallel plate capacitor와 연결 시킴으로써 한쪽의 전극이 인가한 전압 혹은 압력에 의해서 변화하게 되는 model이다. 이 스위치의 model로부터 pressure balance equation을 이용하여 스위치

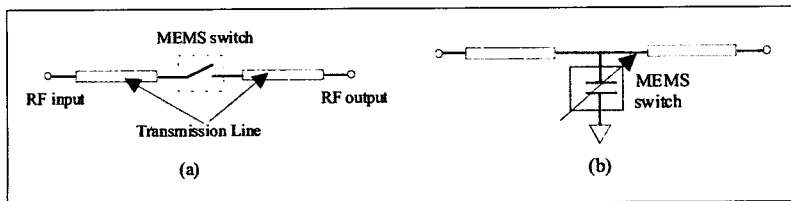


그림 2 RF MEMS 스위치의 개념도

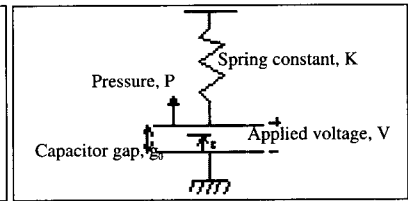


그림 3 RF MEMS 스위치의 lumped model

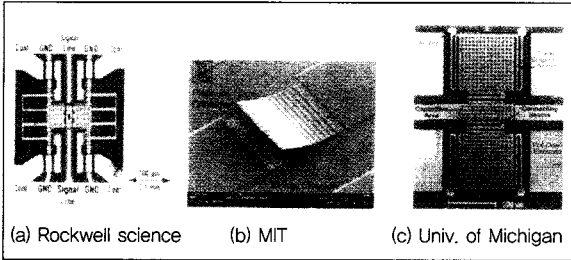


그림 4 RF MEMS 저항형 스위치

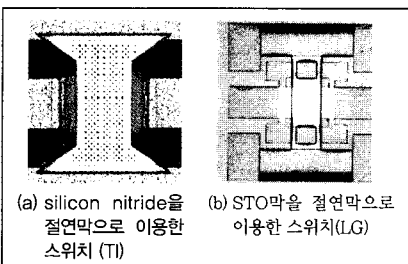


그림 5 RF MEMS 용량형 스위치

의 움직임을 표현할 수 있다.

$$P(g) = k(g_0 - g) - \frac{\epsilon_0 V^2}{2g^2}$$

여기서 P는 스위치의 mechanical body에 걸리는 총 압력이고, g는 하부에 고정된 전극과 움직이는 상부전극과의 간격이고, g<sub>0</sub>는 전압이 스위치에 인가되지 않았을 때의 초기 높이이며, V는 인가된 전압이다. 또한 스위치의 탄성계수는 움직이는 상부전극의 Young's modulus, Poisson ratio, 그리고 residual stress에 의해서 결정된다. 즉 스위치에 전압이 인가 됨에 따라서 움직이는 상부전극이 고정된 하부 전극쪽으로 움직이게 됨에 따라 두 전극들 사이의 격이 줄어들게 되고 움직이는 상부전극에 electrostatic pressure가 증가하게 된다. 위의 수식을 풀게 되면 두 전극들 사이의 간격과 인가한 전압과의 관계를 나타낼 수 있으며, 움직이는 상부전극이 어느 특정한 위치에 이르게 되면 고정된 하부 전극위로 순간 달라붙게 된다. 이 특정 위치는 일반적으로 초기높이의 2/3 지점이다. 즉 앞의 공식에  $g = 2g_0/3$ 를 대입하게 되면 다음과 같은 pull down voltage를 계산하

는 식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$V_p = \sqrt{\frac{8kg_0^3}{27\epsilon_0}}$$

최근에 미국 콜로라도 대학에서는 열전(Electro-Thermal) 구동 방식, LG에서는 압전구동방식을 채택하여 저 전압구동 스위치를 연구개발하고 있다. 그림 4와 5는 제작된 RFMEMS 스위치들의 예이며 구동방식과 응용방향에 따라서 그 구조가 다양하다. 표1에서 본 바와 같이 RFMEMS 스위치들의 성능이 구동전압이 높은 것을 제외하고는 기존의 반도체 스위치들의 성능보다 우수함을 볼 수 있다. 하지만 MEMS 스위치들은 상용화가 되기 위해서는 수백만 번의 작동을 해야 함으로 신뢰성이 가장 중요한 변수이다. 특히 RFMEMS 저항형 스위치의 경우 microwelding에 의하여 용량형 스위치의 경우는 charge에 의하여 발생하는 stiction 문제가 여전히 해결해야 할 문제로 남아 있다.

### RF MEMS 가변 커패시터

RF MEMS 가변 커패시터는 기존의 PN junction의 공핍층을 이용하는 semiconductor varactor에 비하여 tuning range가 넓고, 손실이 적고, 전력소모가 적고, 고주파 특성이 좋기 때문에 널리 연구가 이루어지고 있다. 가변 커패시터를 평가할 때에는 unbiased bias 커패시턴스, tuning ratio, quality factor, self-resonant frequency, 그리고 인가된 RF 신호에 대하여 소자의 선형성과 같은 특성들이 중요한 특성 변수들이다. Unbiased 커패시턴스의 값은 응용분야에 따라서 요구

표1 RFMEMS 스위치들과 반도체 스위치의 성능 비교

변수	GaAs FET	RSC	TI	HRL	Michigan	LG Elite
구동전압 (V)	~ 1	~ 60	~ 50	~ 25	15 ~ 20	5 ~ 10
삽입손실 (dB)	2 at 6 GHz	0.2	0.15 at 10 GHz	0.2	0.6 at 22	~ 0.1
격리도 (dB)	22 at 2 GHz	32 at 10	15 at 10	40 at 12 GHz	20 at 22 GHz	42 dB at 5 GHz
응답속도 (us)	0.01	2 - 5	3.5 - 5.3	20	-	5 - 10
스위칭 원리		Au metal, 저항형	용량형	Au metal, 저항형	용량형	용량형

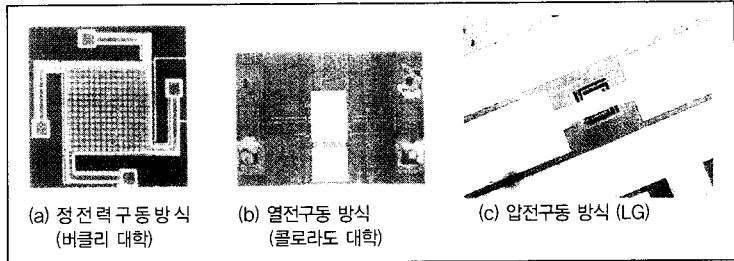


## 기획 시리즈 ④

되는 값들의 차이가 있기는 하지만 일반적으로 0.1pF 에서 수pF값들이 요구되며, tuning ratio의 경우는 대략 100%이상의 값이 요구된다.

RF MEMS 가변 커패시터의 경우 크게 두개의 구조로 나뉘는데, 하나는 두개의 평행판 사이의 gap을 조절하여 커패시턴스를 변화 시키는 구조(그림 6의 (a-c))이며, 다른 하나는 interdigitized comb 구조에서 겹치는 면적을 조절하여 커패시턴스를 변화시키는 구조(그림 6의 (d))이다. 그림 6 (a)는 두개의 평행판 사이에 전압을 인가 하게 되면 정전기력에 의하여 상부 전극이 하부전극을 향하여 움직이게 됨으로써 커패시턴스를 변화 시키는 구조이다. 이 구조는 움직이는 상부전극이 정전기력과 복원력의 균형상태가 유지되는 범위까지는 선형적으로 움직이게 되지만 균형상태가 깨지면 하부전극위로 달라 붙게 된다. 따라서 구동범위는 제한되게 되는데 이는 상부전극과 하부전극 사이에 전압이 인가 되기 전의 air gap의 1/3지점까지이다. 이러한 정전기력으로 구동되는 평행판 구조의 가변 MEMS 커패시터는 이론적으로 50%의 tuning range을 최대로 갖는다. 그림 6 (b)와 (c)는 그림 6(a)의 제한된 선형 구동범위를 극복하기 위한구조로써 움직이는 전극을 각각 열전구동과 압전구동 방식을 이용하였다. 그림 7은 interdigitated comb structure을 갖는 가변 MEMS 커패시터로써 전압을 인가하게 되면 정전기력에 의하여 comb fingers이 평행하게 움직이게 되고 이 때문에

overlapping되는 면이 달라지게 되는 원리를 이용하여 커패시턴스를 변화시키는 구조이다. 이 구조에서는 이론적인 tuning range의 limit은 없으나 구동기의 동작이 comb fingers의

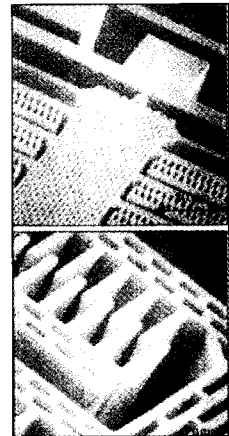


(a) 정전력구동 방식 (버클리 대학)

(b) 열전구동 방식 (콜로라도 대학)

(c) 압전구동 방식 (LG)

길이나 spring의 구조에 의존성이 큰 것이 단점이다. 표2에서 보여지는 것처럼 MEMS 가변 커패시터가 반도체 가변 커패시터 보다 고주파 특성이 월등히 좋음을 볼 수 있다. 하지만 반도체 가변 커패시터 보다 구동전압이 높은 것은 단점이다. 따라서 상용화를 위해서 신뢰성 확보 및 구동전압을 줄이는 연구가 활발히 진행되고 있다.



### Micromachined High Q Inductors and - rmers

인덕터는 RF 통신에 광범위하게 사용되는 소자이지만 반도체 기술로 집적화된 인덕터의 Q값과 인덕턴스

표 2 RFMEMS 가변 커패시터들과 반도체 가변 커패시터와의 성능 비교

Parameters	Solid-state varactors	RSC	U of Colorado	HRL	U of Cal. at Berkeley	LG Electronics
Actuation voltage (V)	~ 4	2 - 14	~ 5	80 - 200	~5.5	~ 6
Min. capacitance (pF)	2 at 4 V	1.8	0.9	0.035	2.11	0.1
Tuning range (%)	335	200	~ 90	185	16	200
Qualit factor	350 at 0.05 GHz	34 at 0.5 GHz	256 at 1 GHz	-	62 at 1 GHz	210 at 1 GHz
Actuation mechanism	Hyper abrupt junction	Electro static	Electro thermal	Sliding motor	Electro static	Electro piezoel.



값이 원하는 specs에 만족되지 못하여 discrete 한 인덕터가 assembly 되어 사용되고있다. 집적화된 인덕터는 높은 Q값과 공진주파수를 갖는 것이 좋다. 이러한 특성을 갖는 인덕터 및 트랜스포머 제작을 위하여 최근에 전기도금을 이용하여 도체선을 두껍게 하고 기판의 손실을 줄이기 위하여 기판위로 소자를 띄우거나 소자가 제작된 부분의 기판을 선택적으로 식각하여 기판 손실의 영향을 줄이는 연구가 많이 이루어지고있다. 또한 인덕터의 conductor lines 사이와 conductor lines 과 core의 사이에서 야기되는 parasitics나 stray 커패시턴스를 줄이기 위하여 core는 air로 하며 conductor lines 사이 또한 air로 하는 연구 또한 이루어지고있다.

인덕터 및 트랜스포머의 구조는 크게 spiral 과 solenoid 구조로 나뉘며 기본적인 디자인 변수는 conductor line의 두께, conductor lines들 사이의 spacing, effective core area, turn number 등이 있다. 고주파대역에서는 conductor line에 skin effect이 있기 때문에 두께를 무한정 높이는 것은 의미가 없으며 대략 skin depth의 2~3배를 하면 바람직하다. 그림 7과 8은 집적화된 3-D MEMS 인덕터를 보여준다. 이들 인덕터들은 3차원구조이며 코어로는 공기 및 절연체를 사용하였는데 그 이유는 자기코어의 경우 도체이기 때문에 고주파에서 손실이 크기 때문이다. 그림 8 (a)는 alumina 라는 절연체를 코어와 구리를 conductor line으로 사용하였으며, (b)는 공기를 core로 사용하였고 구리를 conductor line으로 사용하였다. 그림 9의 (a)는 기판의 손실을 줄이기 위하여 기판을 부분적으로 식각하였고 (b)와 (c)는 posts 나 PDM(plastic deformation magnetic)을 이용하여 소자들을 기판위에 띄움으로 기판으로 오는 손실을 줄였다. 기판위에 polyimide 나 oxidized porous silicon 을 두껍게 입혀서 절연층으로 사용한 후 그 위에 제작된 planar spiral inductor들의 경우 대략 5~15 의 Q 값을 가졌으며,

표3에서와 같이 기판위에 띄우거나 두꺼운 copper conductor line을 이용하여 제작된 MEMS 인덕터들은 대략 20~50 의Q 값을 가졌다. 최근에 유리 기판 위에 제작된 그림 9의 (b) 인덕터경우 지금까지 제작된 MEMS 인덕터들 중에서 140의 Q값으로 가장 높았다.

MEMS 인덕터와 가변 커패시터를 이용하면 현재 송수신기에 사용되고 있는 off chip 형태의 VCO(Voltage Controlled Oscillator)나 LC 가변 필터가 on chip으로 구현 가능하다. 그림 10은 전기도금으로 증착된 두꺼운 구리선을 이용하여 제작된 solenoid type의 트랜스포머들을 보여준다. 이들 집적화된 소자들은 8 GHz 에서 15 GHz 대역에서 사용할 수 있는 소자로서 0.6dB의 삽입손실과 수 GHz의 대역폭을 갖으며 IC 제작공정과 유사하여 고성능을 갖는 집적화된 power amplifier 나 oscillator 등의 제작이 가능하다.

### RF MEMS 필터

RF 송수신기에서 꼭 필요한 수동소자 중 하나는 바로 필터이다. 기존의 discrete 형태의 유전체 필터를 대신할 RF MEMS 필터 연구가 현재 많이 수행되고 있는데 이들 RF MEMS 필터들은 소형화, 집적화가 가능하며 또한 IC 공정과 호환성이 있어서 co-integration이 가능하다는 장점을 갖고 있다. 그림 11은 RF 필터를 구현하기 위하여 현재 많이 연구되고 있는 분야로서 (a)는 기계적인 공진기의 coupling 을

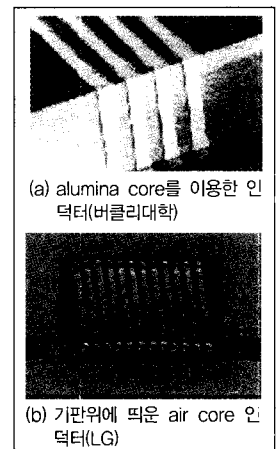
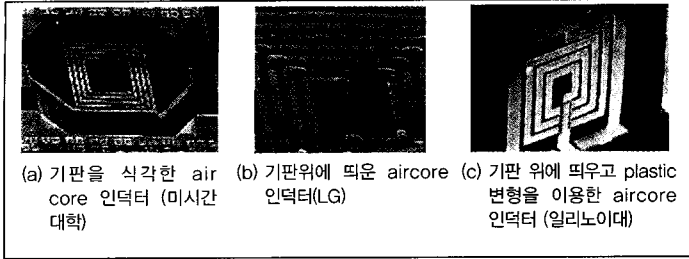
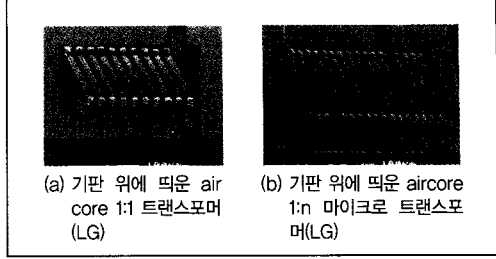


표 3. High Q MEMS 인덕터들의 최근 연구동향

Parameters	버클리대학	조지아공대	KAIST	일리노이대	LG
Inductance	4.6 nH	6 nH	4 nH	3.5 nH	3.5 nH
Quality factor	30	45	47	12	135
Structure	Solenoid type with an alumina core	Suspended solenoid type with an air core	Suspended solenoid type with an air core	Suspended spiral type with an air core and permalloy coils	Suspended spiral type with an air core



(a) 기판을 식각한 air core 인덕터 (미시간 대학) (b) 기판위에 띄운 aircore 인덕터(LG) (c) 기판 위에 띄우고 plastic 변형을 이용한 aircore 인덕터 (일리노이대)



(a) 기판 위에 띄운 air core 1:1 트랜스포머 (LG) (b) 기판 위에 띄운 aircore 1:n 마이크로 트랜스포머(LG)

그림 9 RF MEMS 3-D spiral type 인덕터

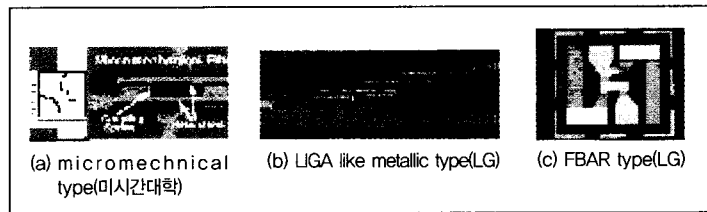
그림 10 RF MEMS 3-D solenoid type 마이크로 트랜스포머

이용하였고, (b)는 전기도금으로 증착된 두꺼운 구리선들의 면으로부터 capacitive coupling 을 이용하였고, 그리고 (c)는 전기적인 신호가 인가가 되면 압전체가 기계적으로 수축과 팽창을 하는 것을 이용한 공진기를 결합하여 구현하였다. 이들 필터 가운데, 그림 11 (c)에서 보여준 FBAR(Film Bulk Acoustic Resonator) 필터는 PCS, IMT2000, 제4세대 통신기기에 적용을 위하여 널리 연구되고 있다. 특히 FBAR 필터는 SAW필터보다 고주파수대역에서 power handling capability가 훨씬 좋다. 왜냐하면 Interdigitated comb structure를 갖는 SAW 필터는 주파수가 증가함에 따라서 comb finger의 metal line의 폭이 좁아지기 때문이다. FBAR 공진기는 기본적으로 상부전극-압전체-하부전극으로 구성되며 크게 membrane형, SMR (solidly mounted resonator)형, 그리고 free standing 형이 있다. Membrane형의 공진기는 얇은 silicon, silicon nitride, silicon oxide, polymer membrane 위에 제작된 공진기를 말하며, SMR형은 여러층의 acoustic 반사층을 기판위에 제작하고 그 위에 제작된 공진기를 말하며, free standing형은 공진기가 공중에 떠 있는 형태이다. FABR 공진기 구현을 위하여 좋은 압전체 재료는 낮은 acoustic loss, 높은 acoustic

coupling coefficient, 높은 acoustic velocity, 낮은 상대 유전율을 갖고 무게가 가벼워야 한다. AlN 과 ZnO 가 현재 널리 사용되고 있는 압전체 들이다. 전극은 압전막이 잘자라야하고, 무게가 가벼워야하고, stress 가 적어야 하며, 전도율이 좋아야 하고, 압전체와 선택적으로 식각할수 있는 재료가 좋다. 표4는 현재 FABR 연구를 수행하고 있는 연구기관의 연구방향을 보여주고 있다.

## 결론

필자는 앞에서 차세대 무선통신 산업을 선도할 핵심 전략기술로 RF MEMS 기술에 관하여 이야기를 나누



(a) micromechanical type(미시간대학) (b) LIGA like metallic type(LG) (c) FBAR type(LG)

그림 11 RF MEMS 3-D spiral type 인덕터

표 4. TFBAR 필터의 최근 연구동향

Parameters	Westing house	Motorola	TFR	Agilent	RSC	LG Electronics
Resonator type	membrane	membrane	SMR	membrane	SMR	membrane
Piezoelectric materials	ZnO	ZnO	AlN	AlN	ZnO	AlN/ZnO
Filter type	Ladder	lattice	ladder	Ladder	ladder	ladder



었다. 이러한 기술들은 앞에서 언급한 바와 같이 무선 및 이동통신 적용되면 우리 삶에 커다란 변혁을 초래할 것이다. 또한 RF MEMS 기술을 이용하여 초소형 single chip transceiver가 구현이 되면 손목시계크기의 휴대형 초소형 정보통신 단말기 구현이 가능하다. 또한 단순히 소형화의 장점뿐만 아니라 초소형 RF MEMS 부품들을 이용하게 되면 하나의 송수신기로 여러 가지 방식의 무선통신을 할 수 있어서 미국이나 유럽 등 국경에 상관없이 동일한 초소형 단말기를 사용할 수 있고 또한 하나의 단말기로 여러 주파수 band (cellular, PCS, IMT2000, wireless LAN 등등...)의 사용이 가능하게 할 수 있다. 또한 고밀도 집적화가 가능하여 화상 전송을 포함한 대용량의 정보 전송도 가능하게 되고, 집에 있는 전자제품 (TV, 라디오, 전자레인지, 에어컨, 냉장고등등)이나 사무실내에 있는 전자제품 들도 외부에서 무선통신을 통해 사용가능하며, 자동차 또한 집적 운전하지 않고 음성이나 단말기의 key pad를 통하여 제어가 가능한 등 차세대 정보화 사회구현에 일조할 것으로 예상된다.

#### [참고문헌]

- [1] Petersen K E, "Micromechanical membrane switches on silicon," IBM J. Res. Dev. 23 376-85, 1979
- [2] Yao J J and Chang M F, "A surface micro-machined miniature switch for telecommunications applications with signal frequencies from DC up to 4 GHz," Tech. Digest, 8th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators pp 384-7, 1995
- [3] Goldsmith C, Randall J, Eshelman S, Lin T-H, Denniston D, Chen S and Norvell B, "Characteristics of micromachined switches at microwave frequencies," Tech. Digest, IEEE Microwave Theory and Techniques Symp. pp 1141, 1996
- [4] Jae Y. Park, Geun H. Kim, Ki W. Cheong, and Jong U. Bu, "Electroplated RF MEMS Capacitive Switches, IEEE 13th International MEMS Conference, Miyajaki, Japan, January, pp. 639-644, 2000
- [5] Young D J and Boser B E, " A micromachined variable capacitor for monolithic low-noise VCOs," Tech. Digest, Solid State Sensor and Actuator Workshop pp 86-9, 1996
- [6] Dec A and Suyama K, " Micromachined varactor with wide tuning range," Electron. Lett. 33 922-4, 1997
- [7] Jae Y. Park, Young J. Yee, Hyo J. Nam, and Jong U. Bu, " Micromachined RF MEMS Tunable Capacitors using Piezoelectric Actuators," Tech. Digest, IEEE Microwave Theory and Techniques Symp. May, 2001
- [8] Harsh K F, Zhang W, Bright V M and Lee Y C, "Flip-chip assembly for Si-based RF MEMS," Proc. IEEE, 12th Ann. Int. Workshop on Micro Electro Mechanical Systems pp 273-278, 1999
- [9] Yao J J, Park S and DeNatale J, " High tuning-ratio MEMS-based tunable capacitors for RF communications applications," Tech. Digest, Solid State Sensor and Actuator Workshop, pp. 124-127, 1998
- [10] Jae Y. Park and Mark G. Allen, "Micro-machined High Q Inductors for High Frequency Applications", Micromachining & Microfabrication '98 Conference, SPIE, vol. 3514, pp. 218-228, Santa Clara, CA 1998
- [11] A. Massarini, M. Kazimierczuk, and G. Grandi, "Lumped parameter models for single- and multiple-layer inductors", 27th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, vol.1, pp.295-301, 1996
- [12] R. B. Strokes and J. D. Crawford, "X-band thin film acoustic filters on GaAs," IEEE Tran. Microwave Theory Tech., vol. 41, pp. 1075 ~ 1080, July 1993
- [13] S. H. Kim, J. S. Lee, H. C. Choi, and Y. H. Lee, "The Fabrication of Thin-Film Bulk Acoustic Wave Resonators Employing a ZnO/Si Composite Diaphragm Structure Using Porous Silicon Layer Etching," IEEE Electron Device Letter, vol. 20, NO. 3, pp. 113 ~ 115, March 1999
- [14] K. M. Lakin, G. R. Kline, and K. T. McCarron, "High Q Microwave Acoustic Resonators and Filters," Proceedings of the 1993 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, vol. 5, pp. 1517 ~ 1520, 1993