

## 요 약

본 논문에서는 최근 초소형 기술로 각광받고 있는 MEMS(MicroElectroMechanical System) 기술을 이용한 무선통신 분야의 응용을 제고한다. RF MEMS 기술은 기존의 기술들에 비해 크기나 전력소모, 삽입손실 등에서 우수한 고주파 특성을 갖는 소자나 부품을 만들 수 있으며 특히 휴대용 단말기에 적용 가능한 RF 부품들 즉 저손실 전송선로, 스위치, High Q inductor, 안테나 등의 주요 부품에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다.

렵하고, 더 우수한 성능을 가지게 하려는 목적에 MEMS 기술을 이용한 소자들이 부합되기 때문이다. 무선통신용 RF part는 “One Chip”화를 목표로 많은 학계와 기업체에서 연구와 개발을 진행하고 있으나, inductor 혹은 공진기 부분의 크기 및 공정상의 문제로 인해 어려움을 겪고 있다. 1990년대 중반 이후의 여러 가지 RF MEMS 기술의 도입으로 저손실 전송선로, Micromachined Membrane을 이용한 공진기 및 여파기 그리고 초소형 안테나를 비롯한 많은 RF 응용 소자들이 개발되어 기존의 소자들을 대체하고 있다.

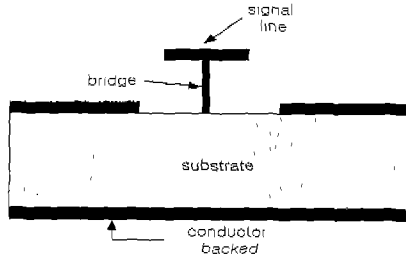
## I. 서 론

MEMS 기술은 1959년에 발표된 Richard. P. Feynman의 연구<sup>[1]</sup>에 그 기원을 두고 있다. 그는 그의 논문에서 물리법칙이 소형화에 있어 문제가 되지 않는다고 했으며, 그의 주장은 1990년대에 들어서 공정기술의 발달로 인해 초소형 소자들의 제작이 가능해짐으로써 증명되고 있다. MEMS 공정은 기존의 실리콘을 이용한 평면 구조의 제작에서 시작하여 LIGA(Roentgen- LithographieGalvanikAbformung) 공정을 포함하는 Bulk Micromachining 방식과 MUMPs(MultiUser MEM Process)로 대표되는 Surface Micromachining으로 크게 구분된다<sup>[2],[3]</sup>. 이러한 MEMS 공정은 최근 들어 급격한 발전을 이루고 있는 Cellular, PCS, IMT-2000 등의 무선 이동통신 분야의 단말기용 RF 분야에 큰 영향을 미치고 있는데, 그 이유는 무선 단말기를 더 가볍고, 더 저

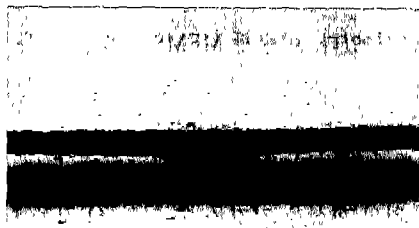
## II. RF MEMS 소자

## 2-1 저손실 전송선로

MEMS 기술을 이용한 첫 번째 RF 응용분야로 저손실 고성능의 전송선로를 들 수 있다. 기존의 마이크로스트립 선로, 슬롯 선로, CPW(CoPlanar Waveguide)등의 전송선로들이 신호선로와 유전체와의 접합에 의한 영향으로 고주파 및 초소형 환경에서 높은 손실을 가지게 되어 회로의 구현 및 성능향상에 제약이 있다는 점에 착안한 MEMS 전송선로 중의 한 예가 유전체의 영향을 줄인 ECPW (Elevated CPW) 선로이다<sup>[4]</sup>. 이 선로는 [그림 1]과 같이 bridge 혹은 supporter를 사용하여 신호 선로를 유전체로부터 격리시킴으로써 선로의 분산특성을 최소화시키는 장점이 있으며 다른 선로와의 결합에 있어서도 같은 Wafer 위에 제작할 수 있다. [그림 2]에 실제



[그림 1] ECPW의 구조

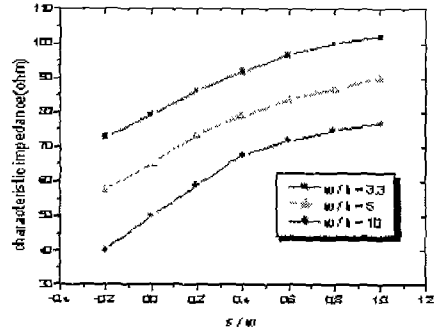


[그림 2] 제작된 ECPW의 SEM 사진<sup>[4]</sup>

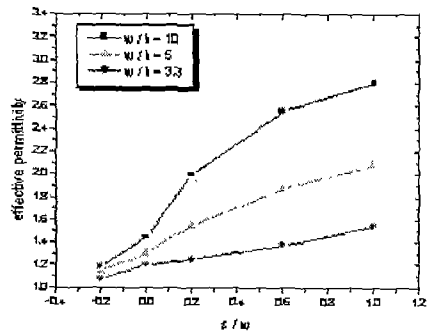
제작된 SEM(Scanning Electron Microscope) 사진을 보여주고 있으며 이 때 특성 임피던스는 신호 선로와 substrate 사이의 높이  $h$ , 신호선폭  $w$ , 신호선로와 접지 사이의 거리  $s$  사이의 비,  $s/w$  와  $w/h$ 의 관계에 의해 구할 수 있다. [그림 3]과 [그림 4]는 각각  $s/w$  와  $w/h$ 에 따른 ECPW 선로의 특성 임피던스와 유효 유전율을 나타내고 있다.

## 2-2 RF MEMS 스위치

기존의 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)에서 RF 스위치는 주로 FET 혹은 PIN 다이오드를 이용한 것이 주로 사용되어져 왔다. 그러나 이런 형태의 스위치들은 높은 삽입손실과 ON-OFF 시의 이격 특성이 좋지 않고, 저항 손실, 전력 소모 특성 등에서 문제를 야기하고 있다. 낮은 주파수 대역에서는 FET 나 PIN 다이오드를 이용한 스위치의 power handling이 크게 문제되지 않으나 주파수가

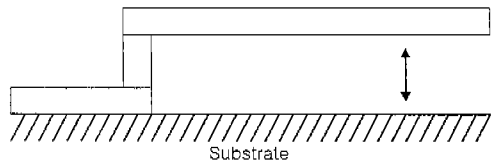


[그림 3] ECPW의 특성임피던스<sup>[4]</sup>

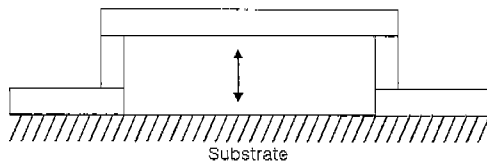


[그림 4] ECPW의 유효 유전율<sup>[4]</sup>

높아질수록 박약한 power handling 문제가 커져 이에 대한 대안을 찾는 것이 요구되어져 왔고, 이에 MEMS 스위치가 제안되었다<sup>[3]</sup>. RF MEMS 스위치는 MEMS 소자 중 기본이 되는 소자로서 낮은 저항 손실과 작은 소모전력, ON-OFF 시의 충분한 이격 특성을 가질 뿐 아니라 집적화에 용이하다는 장점도 가지고 있다. MEMS 스위치는 1970년대 말 membrane을 이용해 처음 제작되었으며 이후 더욱 개발이 진행되어 cantilever 등을 이용한 구조가 제안되었다. RF 분야에서 스위치는 정합회로나, 위상 천이기 등의 응용분야에 주로 사용되며, 스위치는 그 방식에 따라 cantilever beam과 multiple-supported beam으로 나눌 수 있고, 구성 방법에 따라서는

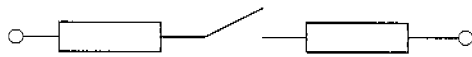


(a) Cantilever beam type

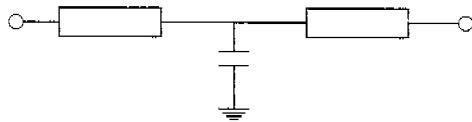


(b) Doubly supported beam type

[그림 5] MEMS 스위치의 종류

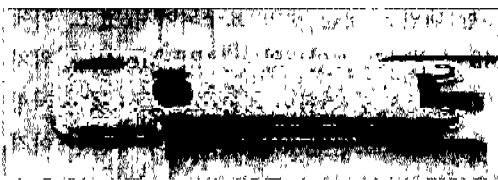


(a) metal contacting



(b) Capacitive coupling

[그림 6] 구성방법에 따른 분류



[그림 7] RF MEMS 스위치 SEM 사진<sup>[21]</sup>

metal contacting 방법과 capacitive coupling 방법으로 나눌 수 있다<sup>[5]~[7]</sup>.

### 2-3 High Q inductors

이동통신용 RF 회로에서 많이 사용되는 inductor

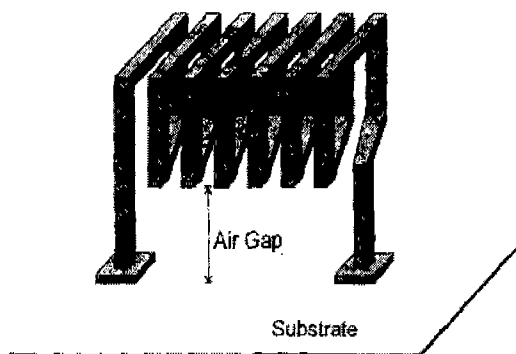
는 주파수가 높아지고 회로의 크기가 작아짐에 따라 평면화되고 소형화되어졌다. 하지만 소자의 물리적 크기가 작아졌음에도 불구하고, 반도체 기판과의 접촉으로 인한 손실로 인해 Q값이 대략 5에서 10 정도에 머물렀다. 이를 극복하기 위해 MEMS를 이용하여 기판과의 접촉을 줄임으로써 전기적 특성을 향상시킬 수 있다. 접촉에 의한 손실을 줄이는 방법은 서론에서 언급한 bulk micromachining 기술과 기판위로 inductor를 들어올리는 surface micromachining 기술이 있다. 이렇게 MEMS 기술을 이용한 inductor의 경우 그 Q 값이 20 이상으로 향상되고 현재 기술로 최고 약 60 정도까지 가능하며, 이에 따라 공진 주파수가 증가하게 되므로 사용 가능한 주파수 대역의 향상을 가져올 수 있다. Q 값을 향상시키는 방법으로 MCM(MultiChip Module)을 사용하여 inductor를 구성하는 금속의 저항을 줄이는 방법 또는 inductor의 eddy current를 없애기 위해 접지면에 pattern을 사용하기도 하였으나 이는 substrate에 patterning을 하는 공정이 필요하므로 비용과 시간면에서 효율적이지는 못하다. 결국 inductor 아래의 substrate을 에칭하고 inductor를 SiO<sub>2</sub>와 같은 절연층에 올리는 suspended inductor가 주목을 받고 있으나 이 방법 또한 구조가 불안정하고 silicon을 에칭하는데 시간이 많이 걸린다는 단점이 제기되어 최근에는 substrate을 그대로 두고 inductor를 짧은 시간에 공정이 가능하고 구조를 안정되게 하는 방법이 연구되고 있다. <표 1>에 기존의 여러 가지 구조에 대한 inductor의 값과 Q 값을 비교하였다.

### 2-4 TFBAR (Thin Film Bulk Acoustic Resonator)

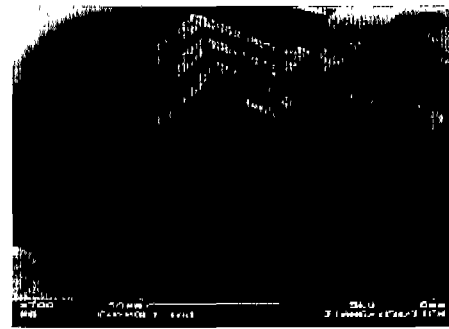
현재 이동 통신용 단말기의 RF 부분에는 여러 종류의 여파기가 사용되고 있다. 이들 여파기의 대부분은 skirt 특성이 우수한 제품들이 사용되고 있으며 그 중 가장 널리 사용되고 있는 것이 DSP (Digital

<표 1> 여러 가지 inductor의 연구결과

Inductor type	Q	Inductance
Spiral inductor on MCM Si substrate <sup>[8]</sup>	Q=30@2GHz	4nH
Spiral inductor with patterned ground shields <sup>[9]</sup>	Q=7.5@2GHz	2nH
Solenoid inductor <sup>[10]</sup>	Q=58@7GHz	2nH
Suspended spiral inductor <sup>[11]</sup>	Q=57@10GHz	1.8nH
Suspended spiral inductor over cavities <sup>[12]</sup>	Q=36@6.6GHz	2.5nH



[그림 8] Suspended Solenoid inductor<sup>[10]</sup>



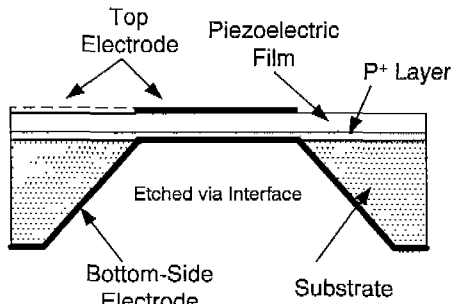
[그림 9] Suspended 사각 나선형 inductor의 SEM 사진<sup>[12]</sup>

Signal Processing) 기술을 이용한 SAW (Surface Acoustic Wave) 여파기 이다. 그러나 SAW 여파기의 경우 반도체 공정을 거쳐 제작되므로 반도체 공정 자체의 기술이 발전하지 않는 한 원하는 성능을 가지는 소형 여파기의 제작은 어려운 실정이다. 이러한 단점을 극복하기 위해 근래에 이르러 초소형 소자의 개발에 적합한 MEMS 기술을 이용한 소자의 개발이 대안으로 제시되고 있다. 그 중에서도 piezoelectric 물질을 이용한 TFBAR (Thin Film Bulk Acoustic Resonator)의 개발이 많이 이루어지고 있으며 앞으로 SAW 여파기를 대체할 것으로 보여진다<sup>[13]-[16]</sup>.

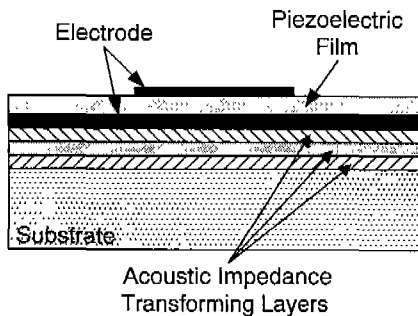
TFBAR는 일반 공진기 이론을 유사하게 적용할 수 있는 구조이며 그런 구조들 중의 하나가 [그림 10](a)에 나타나 있다. 이 공진기는 1.5 GHz에서 7.5 GHz의 대역에서 약 1,000정도의 Q값을 가지고 동

작하나, 공정과 trimming 과정에 문제가 있기 때문에 [그림 10](b)와 같은 solid substrate 위에 만드는 solidly mounted resonator 구조도 고려되고 있다. Piezoelectric 물질로는 주로 AlN 혹은 ZnO 등이 주로 사용되고 있으며 substrate 뒤쪽에 ONO 층을 첨가한다거나 전극의 두께를 조절한다거나하는 등등의 기법을 이용하여 약간의 tuning이 가능하다.

TFBAR는 Butterworth-Van-Dyke (BVD) 등가모델에 의하여 집중소자로 등가화 할 수 있으며 현재는 Van-Dyke 모델에 직렬 저항을 추가한 modified BVD 모델이 주로 사용되고 있다. [그림 11]에 Van-Dyke 등가모델과 모델링된 결과를 보여주고 있다. 이렇게 S 파라미터를 모델링하여 ladder 형태를 가지는 대역통과 여파기를 설계할 수 있다. Ladder 형태의 여파기는 [그림 12]와 같이 직렬성분과 병렬성분이 TFBAR의 직렬공진점과 병렬공진점 만큼의



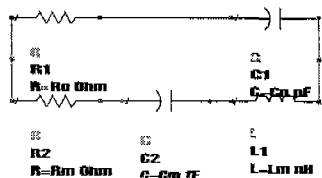
(a) FBAR



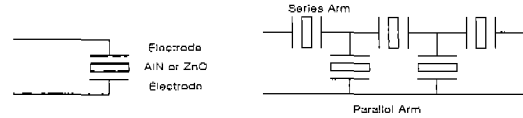
(b) SMR

[그림 10] FBAR의 구조

차이를 가지고 설계되며 서로의 peak 치를 상쇄시켜 대역을 만들 수 있고, 이 여파기의 성능은 기본



(a) Butterworth-Van-Dyke Model



(a) Resonator

(b) Ladder topology

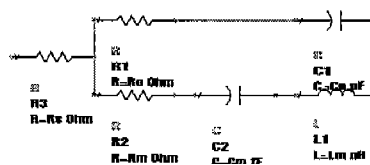
[그림 12] Ladder 구조

형의 TFBAR의 삽입손실, 주파수 등의 성질에 의해 크게 달라질 수 있다.

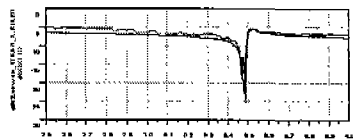
TFBAR의 경우 Piezoelectric 물질 자체에 대한 연구는 물론 여파기의 구조에 대해서도 많은 연구가 진행되고 있으며 최근 Agilent 사에서는 TFBAR를 이용한 듀플렉서를 생산하고 있으나 아직은 그 성능이 안정화되지는 않은 상태이다.

## 2-5 MEMS 초소형 안테나

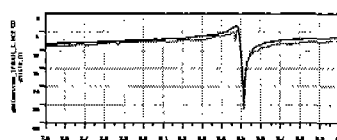
현재 이동 통신용 단말기에 부착된 안테나는 대부분 Whip/Helical 조합형으로 돌출부를 형성하고 있다. 이런 돌출부는 단말기 전체의 부피 증가의 원인이 되며, 미관상 좋지 않고, 파손의 우려가 있다. 이러한 단점을 극복하고자 MEMS 기술을 이용한 초소형 안테나에 대한 연구가 진행 중이며 기존의 평



(b) Modified BVD Model

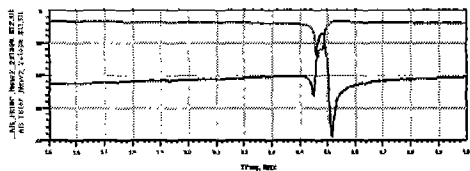


(c) S11

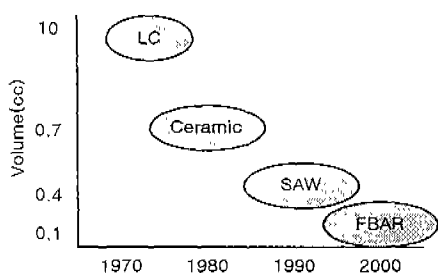


(d) S21

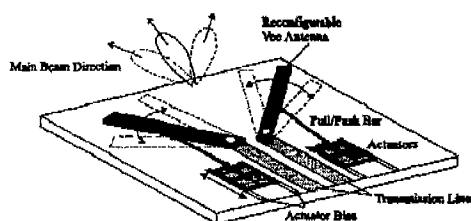
[그림 11] TFBAR 등가회로와 모델링 결과



[그림 13] TFBAR Ladder filter



[그림 14] 용적에 따른 RF 여파기의 발전동향



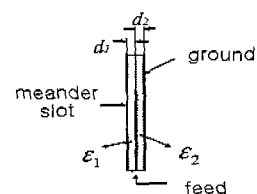
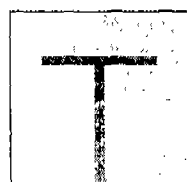
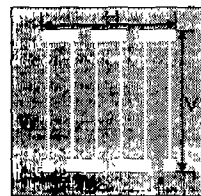
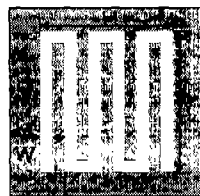
(a) The concept



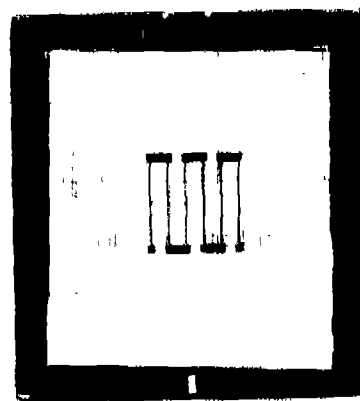
(b) the cross

[그림 15] MEMS Vee 안테나<sup>[17]</sup>

면형 안테나를 MEMS 공정을 통해 제작하려는 노력도 이루어지고 있다. 평면형 안테나의 소형화 방법은 패치의 모양을 적절히 조절하여 전기적 길이를 증가시키거나, 고유전율의 유전체를 사용하는 등의 방법이 있으며 meandered slot 선로를 이용한 소형화 방법도 제시되고 있다. MEMS 안테나로 가장



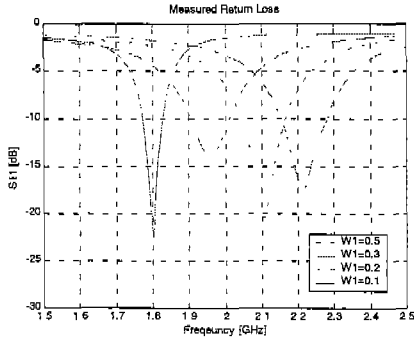
[그림 16] T-shape 구조의 Meandered slot 안테나



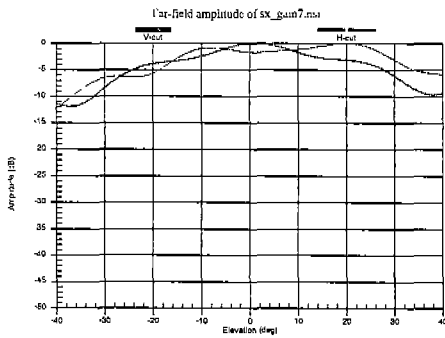
[그림 17] 제작된 안테나의 사진<sup>[20]</sup>

널리 알려져 있는 것이 [그림 15]와 같은 VEE 형태의 안테나인데, 이 안테나는 안테나 빔의 steering과 빔성형을 하나의 시스템 안에서 임의로 조절함으로써 지능형 무기나 자동차, 비행기의 레이더, 무선통신의 스마트 안테나, 원격 sensing과 같은 응용분야에 사용될 수 있고, 이 안테나는 기존의 위상배열 안테나에 비하여 빠른 스캐닝 속도와 고주파에서의 낮은 손실을 가지는 장점을 가지고 있다<sup>[17]</sup>.

Meandered slot을 이용한 안테나의 경우 Feeding 구조에 따라 두 가지의 형태가 있는데 하나는 다중

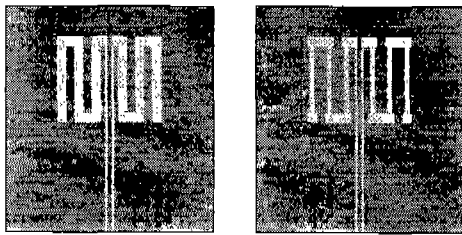


(a) Return loss



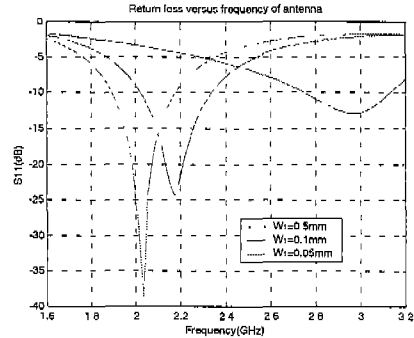
(b) Radiation pattern

[그림 18] T-shape 안테나의 측정결과



[그림 19] CPW 급전구조의 Meandered slot antenna

기판을 사용하여 가운데 기판에 T-shape의 스트립 라인을 사용하는 것이고 다른 한 가지는 conductor backed CPW를 이용한 구조이다. 기존의 meander slot의 경우 slot의 폭을 균일하게 적용하였으나 소형화를 위하여 비균일 slot 폭을 사용하였다<sup>[18]~[20]</sup>.



[그림 20] 안테나의 반사손실

### III. 결 론

본 논문에서는 이동 통신 분야의 최근 RF MEMS의 동향과 연구에 대해 고찰하였다. 고찰된 MEMS 전송선로, 스위치, High Q inductor, TFBAR와 여파기, 초소형 안테나 등은 초소형 단말기의 중요핵심 부품이다. MEMS 전송선로는 기존의 평면형 구조에서 유전체와의 접합으로 생기는 손실을 3차원 구조를 사용함으로써 손실을 줄이고 성능향상을 가지게 하였으며, MEMS 스위치의 경우, 저항 손실을 줄이고 power handling면에서 장점을 가지고 있다. MEMS inductor의 경우는 MEMS 전송선로의 경우와 유사하게 suspended type으로 제작하게 됨으로써 높은 Q 값을 가지게 하고 소형화가 가능하게 되었다. 초소형 공진기로 각광받고 있는 TFBAR는 이를 이용한 여파기 및 듀플렉서 등에 대한 응용에 대한 연구가 진행중이며 그 결과가 좋을 것으로 기대된다. 초소형 안테나의 경우 소형화에는 큰 문제가 없으나 안테나의 성능이 aperture의 면적과 큰 관계가 있는 것을 고려한다면 연구되어야 할 분야가 아직 많이 남아 있는 것으로 보인다. 이외에도 가변 Capacitor 등의 다른 MEMS 응용분야도 있으나 지면상 생략하였다. 기존의 MMIC의 기술을 넘어설 것으로 보이는 MEMS 기술은 그러나 아직은 passive

소자들에 대한 연구가 집중되어 있으며, active 소자들에 대한 연구와 회로적으로도 3차원 구조에 대한 새로운 개념의 도입이 필요할 것으로 보이나 RF 분야의 궁극적 목적인 one chip solution에 가능한 해답을 MEMS 기술이 제공할 것이다.

### 참고문헌

- [1] R. P. Feynman, "There's Plenty of Room at the Bottom", presented at the American Physical Society Meeting in Pasadena, CA, Dec. 26, 1959; reprinted with permission of Van Nostrand Reinhold in *J. Microelectromechanical Systems*, vol. 2, pp. 60-66, 1992.
- [2] J. Bryzek, K. Peterson and W. McCulley, "Micromachines on the March", *IEEE Spectrum*, pp. 20-31, 1994.
- [3] Hector J. De Los Santos, *Introduction to Microelectromechanical (MEM) Microwave System*, Artech House, 1999.
- [4] S. J. Yoon, J. G. Yook, Y. J. Kim, S. G. Lee, O. K. Seo, K. S. Lim and D. S. Kim, "A Novel CPW Structure for High-Speed Interconnects", *IEEE MTT International Symposium*, Jun., 2000.
- [5] S. Duffy, C. Bozler, S. Rabe, J. Knecht, L. Travis, P. Wyatt, C. Keast, and M. Gouker, "MEMS Microswitches for Reconfigurable Microwave Circuitry", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 11, no. 3, Mar., 2001.
- [6] K. E. Peterson, "Micromechanical membrane switches on silicon", *IBM J. Res. Dev.*, vol. 23, pp. 376-385, 1979.
- [7] C. Goldsmith, T.-H. Lin, B. Powers, W.-R. Wu and B. Norvell, "Micromechanical Membrane Switches for Microwave Applications", *Tech. Digest, IEEE MTT Symp.*, pp. 91-94, 1995.
- [8] Larry Zu, etc., "High Q-Factor Inductors Integrated on MCM Si Substrates", *IEEE Trans. on Components, Packaging, and Manufacturing Tech.-Part B.*, vol. 19, no. 3, pp. 635-643, Aug., 1996.
- [9] C. P. Yue and S. S. Wong, "Design strategy of on-chip inductors for highly integrated RF systems", *Design Automation Conference Proceedings. 36th*, pp. 982-987, 1999.
- [10] Y. J. Kim and M. G. Allen, "Surface Micromachined Solenoid Inductors for High Frequency Applications", *IEEE Trans. on Comp. Packag. manufac. tech.-Part C.*, vol. 21, no. 1, pp. 26-33, Jan., 1998.
- [11] J. B. Yoon, C. H. Han, E. S. Yoon and C. K. Kim, "Monolithic high-Q overhang inductors fabricated on silicon and glass substrates", *Electron Device Meeting 1999 IEDM Tech. Digest. International*, 1999.
- [12] H. Jiang, Y. Wang, J. A. Yeh and N. C. Tien, "On-Chip Spiral Inductors Suspended over Deep Copper-Lined Cavities", *IEEE Tran. on MTT*, vol. 48, no. 12, pp. 2415-2423, Dec., 2000.
- [13] R. B. Strokes and J. D. Crawford, "X-band thin film acoustic filters on GaAs", *IEEE Tran. on MTT*, vol. 41, pp. 1075-1080, July, 1993.
- [14] 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, Mar., 1999.
- [15] K. M. Larkin, 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.
- [16] W. W. Lau, Y. Song and E. S. Kim, "Lateral-Field-Excitation Acoustic Resonators For Monolithic Oscillators and Filters", *IEEE International Frequency Control Symposium*, pp. 558-562, 1996.
- [17] J. C. Chiao, Y. Fu, I. M. Chio, M. DeLisio and L. Y. Lin, "MEMS Reconfigurable Vee Antenna", *IEEE MTT-S Digest 1999*, 1999.
- [18] J. M. Kim, J.-G. Yook, W. Y. Song, Y. J. Yoon, J. Y. Park and H. K. Park, "Compact Meander-Type Slot Antennas", *IEEE Antenna Propagation Society International Symposium*, July, 2000.
- [19] J. M. Kim, K. W. Kim, J.-G. Yook and H. K. Park, "Conductor-backed CPW-fed Variable-Width Meander Slot Antenna", *IEEE Microwave and Guided-wave Letters*, 2001.
- [20] J. M. Kim, K. W. Kim, J.-G. Yook and H. K. Park, "Compact stripline-fed meander slot antenna", *IEEE Electronics Letters*, 2001.
- [21] J. Y. Park, J. U. Bu and J. W. Lee, "RF MEMS Devices for Wireless Applications". *Journal of Semiconductor Tech. and Science*. vol. 1, no. 1, pp. 70-83. Mar., 2001.

≡ 필자소개 ≡

김 건 옥

1995년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)

1997년 9월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)

1997년 9월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 박사과정

[주 관심분야] 초고주파회로 해석 및 설계



육 종 관

1987년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)

1989년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)

1998년 12월: University of Michigan 전기전자공학과(공학박사)

1997년 1월~1998년 10월: University of Michigan Research Fellow

1998년 11월~1999년 2월: Qualcomm Inc. Senior Engineer  
1999년 3월~2000년 2월: 광주과학기술원 조교수

2000년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 조교수

[주 관심분야] 마이크로파 구조 해석 및 설계, RF MEMS, 막공진구조

