

순차적으로 전압 인가된 RF MEMS 스위치를 이용한 재구성 슬롯 안테나의 설계

심준환* · 윤동식* · 박동국* · 강인호* · Jung-Chih Chiao**

*한국해양대학교 전파정보통신공학부, **University of Texas at Arlington(UTA) 전기공학과

Design of a Reconfigurable Slot Antenna using Sequentially Voltage-Applied RF MEMS Switches

Joon-Hwan Shim* · Dong-Sik Yoon* · Dong-Kook Park* · In-Ho Kang* and Jung-Chih Chiao**

*Div. of Radio and Information Communication Engineering, National Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea

**Electrical Engineering Department, University of Texas at Arlington(UTA), Texas 76010, USA

요약 : 본 논문은 순차적으로 전압 인가된 RF MEMS 스위치를 이용하여 재구성 슬롯 안테나를 설계하였다. MEMS 스위치의 구동전압과 최대 스트레스를 구하기 위하여, 에어갭 높이에 따른 스위치의 특성을 ANSYS 시뮬레이션으로 분석하였다. MEMS 스위치의 구동전압은 하부 전극과 상부 스위치 사이의 에어갭 높이와 스위치 형상에 의해 결정된다. 설계된 MEMS 스위치의 길이는 각각 240 μm , 320 μm , 400 μm 이고, 에어갭은 6 μm 이었다. 설계된 슬롯 안테나는 전체크기가 10 mm x 10 mm이며, 슬롯의 크기는 길이가 500 μm , 폭이 200 μm 이었다. 그리고 CPW 급전선은 전체의 길이는 5 mm이며, 입구에서의 CPW는 30-80-30 μm 이고, 슬롯에서의 CPW는 150-300-150 μm 이다. 제안된 소자의 공진주파수의 튜닝은 RF MEMS 스위치에 DC 바이어스를 인가함으로써 안테나의 전기적인 길이를 변화시켜 이루어진다. 설계된 슬롯 안테나를 시뮬레이션, 제조 및 측정을 하였다.

핵심용어 : MEMS, RF-MEMS 스위치, 슬롯 안테나, 재구성 안테나

Abstract : In this paper, we designed a reconfigurable slot antenna using sequentially voltage-applied RF MEMS switches. In order to obtain pull-in voltage and maximum stress of the MEMS switches, the switch structures in accordance with airgap height was analyzed by ANSYS simulation. A actuation voltage of MEMS switches can be determined by switch geometry and airgap height between a movable plate and a bottom plate. The designed lengths of MEMS switches were 240 μm , 320 μm , 400 μm , respectively and the airgap was 6 μm . The total size of the designed slot antenna was 10 mm x 10 mm and the slot length and width were 500 μm and 200 μm , respectively. The length and size of the CPW feedline were 5 mm and 30-80-30 μm , respectively, and then the size of the CPW in the slot was 150-300-150 μm . The tuning of the resonant frequency of the proposed device is realized by varying the electrical length of the antenna, which is controlled by applying the DC bias voltages to the RF MEMS switches. The designed slot antenna has been simulated, fabricated and measured.

Key words : MEMS, RF MEMS switch, Slot antenna, Reconfigurable antenna

1. 서 론

안테나 개발에 있어서 보다 더 높은 주파수, 높은 전력, 평면 재구성한 구조를 가능하게 하는 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)의 개발은 마이크로웨이브 소자의 집적화와 저가격의 무선 네트워크 구성을 위해서 필수적이다. 재구성 안테나는 주파수, 대역폭, 편파, 이득에서의 선택성을 가지도록 그 특성을 적용함으로써 통신, 전자 감시 및 대응 분야의 응용에서 큰 주목을 받고 있다. 광대역 안테나와 비교하여 재구성 안테나는 다음과 같은 장점을 가지고 있다. 그것들은 (1) 소형, (2) 설계된 모든 주파수 대역에서 유사한 방

사 패턴과 이득, (3) 전자기적 스펙트럼의 효과적인 사용, (4) 동일 장소의 간섭과 전파방해의 역효과를 줄이는데 유용한 주파수 선택성 등 이다(Sengupta, 1984; Fayyaz, et al., 1998; Al-Charchafchi and Frances, 1998; Jose, et al., 1999).

RF MEMS 소자는 RF와 마이크로웨이브 응용을 위한 MEMS 기술에서 나왔으며, 그 중에서 RF MEMS 스위치는 다양하고 새로운 RF MEMS 회로를 위한 기본 블록이다. 이러한 스위치들은 뛰어난 RF 성능, 매우 낮은 삽입 손실, 그리고, 높은 격리 특성이 증명되어 왔다(Yao et al., 1999; Muldavin and Rebeiz, 2000; Barker and Rebeiz, 1998; Goldsmith et al., 1999). 또한, 이들은 뛰어난 선형성과 매우

* 대표저자 : 심준환(정회원), jhsim@hhu.ac.kr, 051)410-4811

** dkpark@mail.hhu.ac.kr, 051)410-4311

ihkang@mail.hhu.ac.kr, 051)410-4422

낮은 신호왜곡을 가지면서 매우 낮은 전력 레벨에서 작동한다. 이러한 특성들은 RF MEMS 스위치를 현대 레이더 및 통신에 응용하는데 있어서 큰 매력을 가지게 한다.

RF MEMS 소자는 빠른 구동과 낮은 전력소모를 가지고 안테나 구조를 재구성 할 수 있게 한다(Cetiner et al., 2002; Jofre et al., 2002; Peroulis et al., 2001; Cetiner et al., 2003). 본 논문에서는 순차적으로 전압 인가된 RF MEMS 스위치를 이용하여 평면 재구성 슬롯 안테나를 설계하였다. 먼저 RF MEMS 스위치와 안테나의 특성을 ANSYS 시뮬레이션(ANSYS Vser's Guide)을 통하여 그 특성을 조사하였으며, 이를 통하여 설계된 MEMS 공정을 통하여 제작된 안테나의 특성을 측정하였다. 본 안테나는 급전점을 변화시키지 않고, 세 쌍의 RF MEMS 스위치를 구동시켜서 안테나의 슬롯 길이를 조정함으로써 공진주파수가 튜닝 된다.

2. MEMS-based 안테나 설계

2.1 슬롯 안테나 구조

Fig. 1은 세 쌍의 RF MEMS 스위치로 구성된 재구성 슬롯 안테나 구조이다. 이 구조는 Feed point를 변화시키지 않고, 전기적으로 인가되는 MEMS 스위치에 의해 공진주파수가 변할 수 있는 정방향 슬롯 안테나로 설계되었다. 이 슬롯 안테나는 CPW에 의해 급전된다. 안테나 전체의 크기는 10 mm x 10 mm이며, 슬롯의 크기는 길이가 500 μm , 폭이 200 μm 이다. 그리고 CPW 급전선은 전체의 길이가 5 mm이며, 입구에서의 CPW는 30-80-30 μm 이고, 슬롯에서의 CPW는 150-300-150 μm 이다.

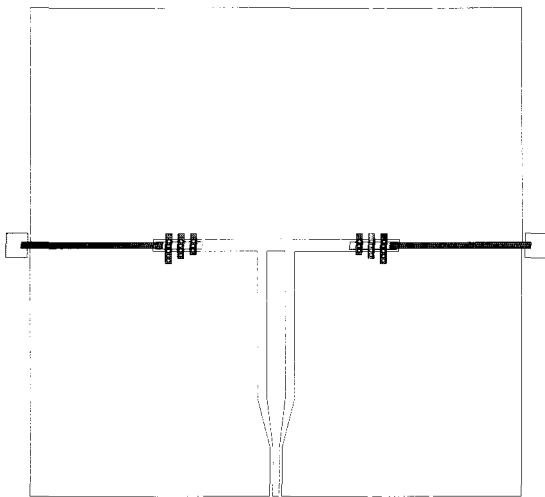


Fig. 1 Schematic of the proposed reconfigurable slot antenna.

길이가 다른 세 쌍의 RF MEMS 스위치가 외부에서 인가된 DC 전압에 의해구동 되면, 각 스위치의 구동전압에서 낮은 전압에서 순차적으로 온 상태(on-state)가 되면, 슬롯의 길이가 스위치의 온 상태(on-state)에 따라 변하게 된다. 결국, 슬롯 길이의 변화는 슬롯안테나의 공진주파수를 변화시켜 안테

나 튜닝이 가능하게 된다.

2.2 RF MEMS 스위치 구조

Fig. 2는 서로 다른 길이를 가진 세 개의 캔틸레버(cantilever) MEMS 스위치를 나타낸 것이다. 각각의 길이는 구동되는 전압의 크기를 서로 다르게 하기 위하여 설계되었다. Table 1은 각 스위치의 크기를 나타낸 것이다. 각 스위치의 간격은 100 μm 로 떨어져 있고, 캔틸레버의 지지부는 100 μm x 100 μm 로 되어 있다.

Fig. 3은 캔틸레버 MEMS 스위치의 상세한 모양을 나타낸 것이다. 캔틸레버 스위치는 세 부분으로 나눌 수 있다. 스위치는 먼저 스위치를 지지하는 포스트(post)부, DC 구동전압을 인가하는 전극부, 슬롯의 길이를 변화시키는 접촉부로 구성된다. DC 전압은 Fig. 2에 나타난 것처럼 외부에서 전극라인을 통하여 인가되며, 스위치의 상부 전극과 하부 전극의 전기적 단락을 막기 위하여 하부 전극위에 산화막이 올라가 있다.

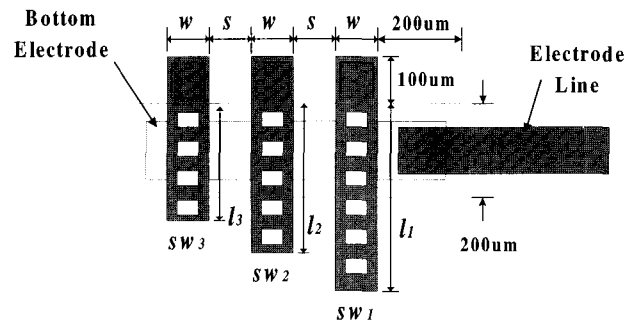


Fig. 2 Schematic of the RF MEMS switches with different length.

Table 1 Details of the RF MEMS switches.

Switch	l (μm)	s (μm)	w (μm)
sw ₁	400	100	100
sw ₂	320		
sw ₃	240		

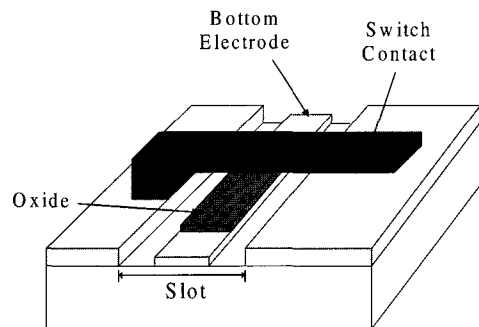


Fig. 3 Schematic of the cantilever MEMS switch.

3. MEMS 스위치 및 안테나의 시뮬레이션 특성

3.1 MEMS 스위치 시뮬레이션 특성

RF MEMS스위치를 ANSYS 시뮬레이션 툴을 이용하여 기하학적 및 전기적 특성을 추출하였다. Fig. 4는 두께가 $1\ \mu\text{m}$ 이고, 에어갭이 $5\ \mu\text{m}$ 인 캔틸레버 스위치(sw_2)가 온 상태(on-state)

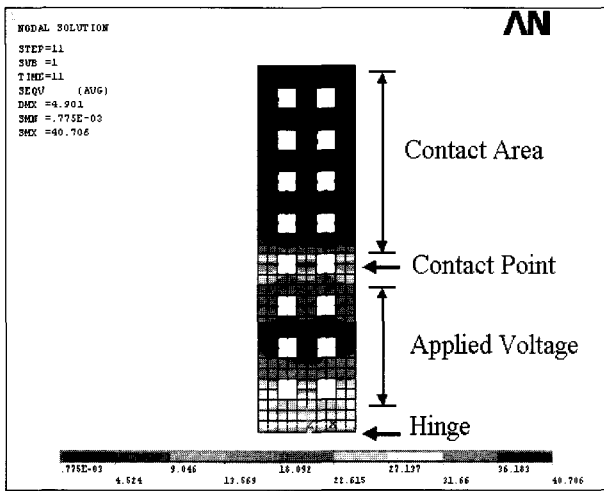


Fig. 4 Stress distribution of the cantilever MEMS switch with airgap of $5\ \mu\text{m}$ (sw_2).

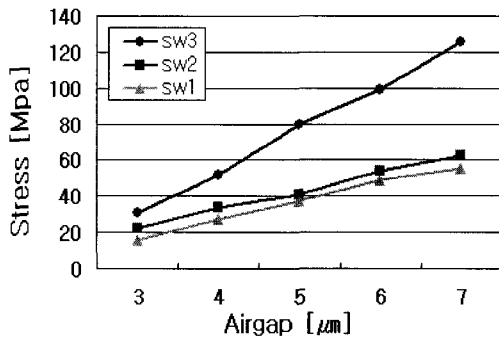


Fig. 5 Stress distribution of the cantilever MEMS switch according to airgap.

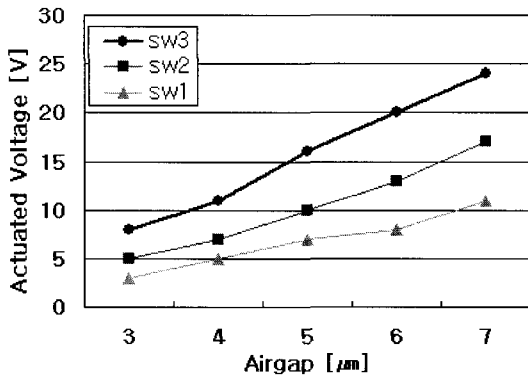
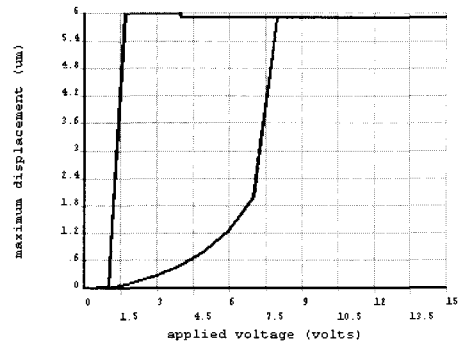


Fig. 6 Actuated voltage of the cantilever MEMS switch according to airgap.

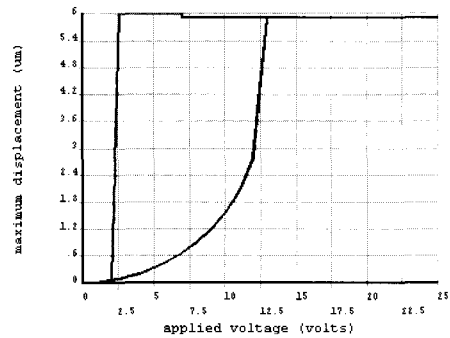
에서의 스트레스 분포를 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이 스트레스의 분포는 스위치가 접촉되기 시작하는 부분에서 최대 값인 $40\ \text{MPa}$ 을 보이고, 그 다음으로 힌지(hinge)부분에서 큰 값을 보인다. 그리고 접촉부와 전압이 인가되는 전극부에서 최소 값을 나타내고 있다.

Fig. 5는 두께가 $1\ \mu\text{m}$ 인 세 가지 종류의 RF MEMS 스위치의 에어갭에 따른 스트레스 분포를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 에어갭의 높이가 클수록 최대 스트레스는 증가하며, 스위치의 길이가 작을수록 최대 스트레스가 큰 것을 알 수 있다.

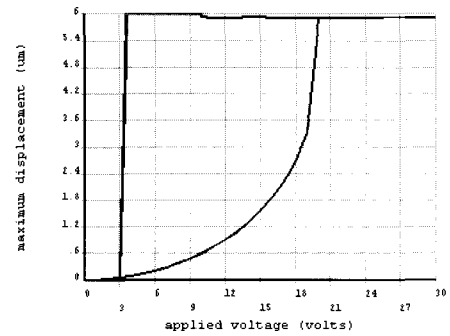
Fig. 6은 두께가 $1\ \mu\text{m}$ 인 세 가지 종류의 캔틸레버 스위치의 에어갭에 따른 구동전압을 나타낸 것이다. 길이가 다른 세 가지의 스위치의 구동전압이 각각의 에어갭에 대하여 뚜렷하게 구분되어 나타난 것을 알 수 있다. 본 설계에서는 MEMS공정상의 안정성, 즉 스위치의 stiction현상이 발생하지 않고, 구동전압이 확실하게 구별되는 에어갭이 $6\ \mu\text{m}$ 인 스위치를 설정하였다.



(a) sw_1



(b) sw_2



(c) sw_3

Fig. 7 On-off state of the cantilever MEMS switch according to applied voltage.

Fig. 7은 두께가 1 μm 이고, 에어갭의 높이가 6 μm 인 세 가지 종류의 캔틸레버 스위치의 인가전압에 따른 스위치의 온-오프 상태(on-off state)를 나타낸 것이다. 그림과 같이 인가전압이 서서히 높아짐에 따라 스위치는 조금씩 아래로 내려온다. 점차 인가전압이 증가하다가 어느 일정한 값 이상이 되면 스위치는 급격하게 떨어져서 접촉부가 온 상태(on-state)가 되는 것을 알 수 있다. 또한, 오프 상태(off-state)가 되는 전압도 어느 일정한 값 이하에서 스위치가 급격하게 오프(off) 되는 것을 알 수 있다.

Table 2는 세 가지 스위치의 온-오프 상태(on-off state)때의 인가전압을 정리한 것이다. 대부분의 스위치는 온-오프 상태(on-off state) 사이에 히스테리시스 특성을 나타내고 있다. 길이가 다른 세 개의 스위치의 구동전압이 5 V, 7 V 간격으로 구분되어 동작됨을 알 수 있다. 이것으로 전압을 순차적으로 인가함에 따라 세 개의 스위치는 자신의 구동전압에서 차례로 온 상태(on-state)로 동작한다는 것을 판단할 수 있다. 그리고 오프 상태(off-state)에서는 전압차가 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

Table 2 The actuated voltages of the cantilever switches at on-off state.

Switch	On-state [V]	Off-state [V]	Hysteresis [V]
sw ₁	8	1.7	6.3
sw ₂	13	2.5	10.5
sw ₃	20	3.5	16.5

3.2 슬롯 안테나의 시뮬레이션 특성

슬롯안테나의 공진주파수가 전기적으로 구동하는 RF MEMS 스위치에 의하여 튜닝(tuning)되는 것을 Fig. 8에 보여주고 있다. 세 쌍의 스위치가 순차적으로 인가되는 DC 전압에 의해 차례로 온 상태(on-state)로 구동함으로써, 안테나

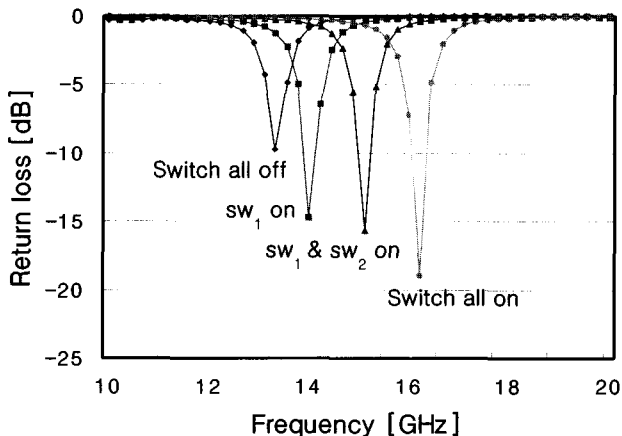


Fig. 8 Simulated return loss for the four resonant frequencies of the slot antenna.

의 슬롯의 길이가 점차적으로 짧아진다. 따라서 슬롯길이에 의해 결정되는 안테나의 공진주파수가 변하게 된다. 안테나의 반사손실이 대체로 10 dB이하로 나타남을 알 수 있다. Table 3은 각 스위치의 온-오프 상태(on-off state)에 의해 나타나는 슬롯 길이 변화와 공진주파수를 정리한 것이다. 이상의 결과로부터, 전기적으로 구동되는 세 쌍의 RF MEMS 스위치를 조정함으로써 안테나의 슬롯 길이를 변화시켜, 안테나의 공진주파수를 효과적으로 튜닝 할 수 있음을 알 수 있다.

Table 3 Characteristic of the slot antenna by on-off state of each switch.

Control voltage [V]	0	8	13	20
Switch state	all off	sw ₁ on	sw ₁ & sw ₂ on	all on
Slot length [mm]	5.0	4.4	4.0	3.6
Resonance frequency [GHz]	13.2	14	15.1	16.3

4. 슬롯 안테나의 제조공정 및 측정 결과

4.1 안테나의 제조공정

Fig. 9는 가변 슬롯 안테나 제조를 위한 공정 단면도를 나타낸 것이다. 먼저 안테나의 특성 및 급전선으로 사용되는 CPW의 특성을 좋게 하고, 기판의 손실을 줄이기 위해서 두께가 560 μm 인 석영 유리(glass) 기판을 사용하였다. 기판을 초기 세척한 후 300 Å 두께의 크롬과 2000 Å 두께의 금을 in-situ 방식으로 열증착 하였다. 다음으로 마스크 #1로 AZ1512 PR을 사용하여 하부전극 및 안테나를 정의한 후, Au를 선택적으로 제거하였다. 그리고 하부전극의 특성향상을 위하여 마스크 #2로 도금영역을 정의하였다. 1 μm 두께의 구리 도금을 위하여 황산 구리용액에 3.5 mA 전류를 인가하여 5분 동안 도금하였다.

하부 전극과 스위치의 DC 단락을 막기 위한 절연층인 산화막을 스퍼터 장비를 이용하여 4000 Å을 증착한 후, 마스크 #3을 사용하여 산화막 영역을 정의하고, HF 용액에서 식각하였다. 다음으로 스위치의 희생층을 형성하기 위하여 AZ4330 도금용 PR을 스펀코팅한 후, 마스크 #4를 사용하여 스위치 포스트 부분을 정의하였다. 포스트 도금은 황산 구리용액에 도금할 웨이퍼를 넣어 처음 10분은 0.1 mA에서 천천히 3.5 mA까지 올려가면서 도금을 하고, 그 이후 30분은 3.5 mA의 전류를 인가하여 전해도금을 행하여 약 6 μm 의 두께를 형성하였다.

스위치를 형성하기 위해 상부금속을 Au를 열증착하여 3000 Å 두께의 스위치 Au 박막을 형성하였다. 마스크 #5를 사용하여 스위치의 패턴을 형성한 후, Au 전용 식각용액에서 2분간 식각하였다. 스위치를 분리하기 위하여 희생층 PR을 황산과 과산화수소수(3:1) 혼합 용액에서 제거하였다. 마지막으로 도금을 위한 전극으로 사용되었던 크롬을 CR-7용액에서 식각하였다.

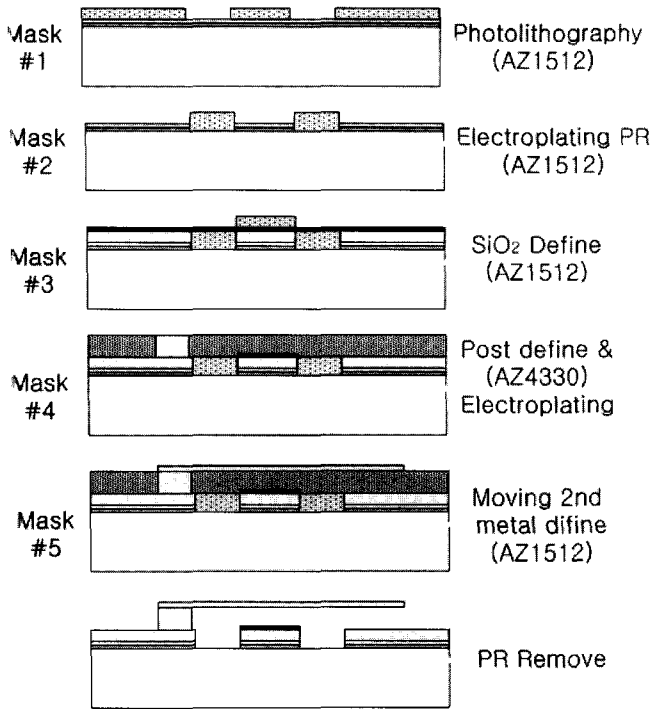


Fig. 9 The fabrication process of reconfigurable slot antenna

4.2 제조 및 측정 결과

Fig. 10은 제작된 안테나의 스위치 부분을 확대한 현미경 사진이다. 여기서 희생층으로 사용된 PR은 완전히 제거되었으며, MEMS 스위치를 기계적으로 충격을 가하여 스위치가 완전히 켜 있음을 확인하였다.

제작된 안테나의 S 파라미터를 얻기 위해서 HP8510C 네트워크 분석기를 사용하였다, 이때, 측정에 사용된 주파수 범위는 10~24 GHz이었다. Fig. 11은 안테나의 측정된 결과이다. 세 개의 MEMS 스위치가 순차적으로 인가되는 DC 전압에 의해 차례로 구동함으로써, 안테나의 슬롯의 길이가 점차적으로 짧아진다. 따라서 슬롯 길이에 의해 결정되는 안테나의 공진 주파수가 변하게 된다. 그림에서와 같이 안테나의 반사손실이 대체로 10 dB 이하로 나타남을 알 수 있다. Table 4에 각 스위치의 온-오프 상태(on-off state)에 따른 측정된 공진주파수를 정리하였다.



Fig. 10 The optical images of the fabricated antenna and RF MEMS switches.

시뮬레이션 결과와 실제 측정값을 비교해 보면, 공진 주파수가 3 GHz 정도의 차이를 볼 수 있다. 이는 제작한 마스크를

Emulsion 마스크를 사용함에 따른 오차와 제작과정에 사용된 마스크 정렬기(Aligner)의 오차로 인하여 전체적인 스위치의 위치가 크기가 변화하였으며, 또한 슬롯의 안쪽에 있는 하부 전극의 크기 및 위치가 당초 설계한 수치와의 오차로 인한 것으로 보인다. 이런 문제는 더욱 정밀한 Cr 마스크와 마스크 정렬시 오차가 작은 장비를 사용함으로써 해결 할 수 있을 것으로 판단된다.

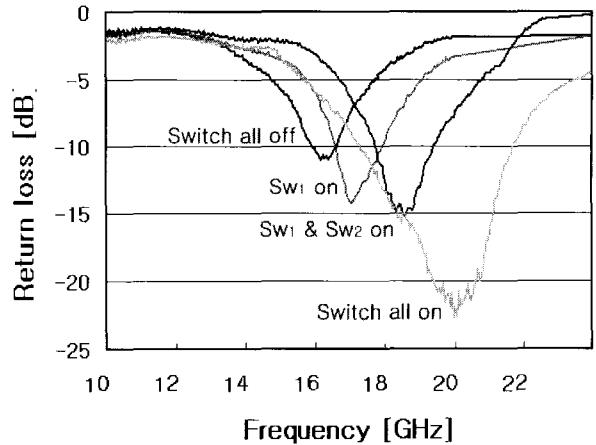


Fig. 11 Measured return loss of the slot antenna.

Table 4 The measured resonant frequency of the fabricated slot antenna.

Switch state	all off	sw1 on	sw1 & sw2 on	all on
Slot length [mm]	5.0	4.4	4.0	3.6
Resonance frequency [GHz]	16.2	17.1	18.6	20

5. 결론

순차적으로 전압 인가된 RF MEMS 스위치를 이용하여 평면 재구성 슬롯 안테나를 설계하였다. 설계된 안테나 전체의 크기는 10 mmx 10 mm이며, 슬롯의 크기는 길이가 500 μm, 폭이 200 μm이었다. RF MEMS 스위치를 ANSYS 시뮬레이션 툴을 이용하여 기계적 및 전기적 특성을 평가하였다. 세 가지 MEMS 스위치의 길이는 각각 240 μm, 320 μm, 400 μm 이며, 에어갭의 높이는 6 μm이었다. 설계된 안테나를 시뮬레이션 하였으며, MEMS 공정을 통하여 제작하여 그 특성을 조사 하였다. 시뮬레이션 및 측정결과에서 반사손실은 대체로 10 dB 이하로 나타남을 알 수 있었다. 그러나, 시뮬레이션 결과와 실제 측정값을 비교했을 때, 제작된 소자의 공진 주파수가 시뮬레이션 결과보다 3 GHz 정도 더 높게 나타났다. 향후, 마스크 제작에서 정밀한 Cr 마스크를 이용하고, 제작과정에서의 오차를 줄여서 해결할 수 있을 것으로 판단된다. 제안된 슬롯 안테나는 인가된 전압에 의해 스위치가 조정됨으로써 안테나의 슬롯 길이가 변화하여 공진주파수가 튜닝 되었다. 따라서 제안된

재구성 슬롯 안테나는 무선통신 소자에 효과적으로 응용될 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 한국과학재단의 해외 Post-doc. 연수지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] ANSYS Inc., 2000, ANSYS User's Guide ver. 5.6
- [2] Al-Charchafchi, S. H. Frances, M.(1998), "Electronically tunable microstrip patch antennas," *IEEE Antennas and Propagation Symposium Digest*, vol.1, pp.304-307.
- [3] Barker, N. S. Rebeiz, G. M.(1998), "Distributed MEMS true-time delay phase shifters and wide-band switches," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol.MTT-46, no.11, pp.1881-1890.
- [4] Cetiner, B. A. Chang, H. P. Qian, J. Y. Bachman, M. Li, G. P. De Flaviis, F.(2003), "Monolithic Integration of RF MEMS Switches With A Diversity Antenna on PCB Substrate," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol.51, no.1, pp.332-335.
- [5] Cetiner, B. A. Jofre, L. Chang, C. H. Qian, J. Y. Bachman, M. Li, G. P. De Flaviis, F.(2002), "Integrated MEM antenna system for wireless communications," *IEEE MTT-S Digest*, pp.1333-1336.
- [6] Fayyaz, N. Safavi-Naeini, S. Shin, E. Hodjat, N.(1998) "A novel electronically tunable rectangular patch antenna with one octave bandwidth," *Proceedings of IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, vol.1, pp.25-28.
- [7] Goldsmith, C. L. Malczewski, A. Yao, Z. J. Shea, C. Ehmke, J. Hinzl, D. H.(1999), "RF MEMS variable capacitors for tunable filters," *Int. J. of RF and Microwave Comp. Aided Eng.*, vol.9, no.4, pp.362-374.
- [8] Jofre, L. Cetiner, B. A. De Flaviis, F.(2002), "Miniature multi-element antenna for wireless communications," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol.50, no.5, pp.658-669.
- [9] Jose, K. A. Varadan, V. K. Varadan, V. V.(1999), "Experimental investigations on electronically tunable microstrip antennas," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol.20, pp.166-169.
- [10] Muldavin, J. B. Rebeiz, G. M.(2000), "High-isolation CPW MEMS shunt switches: Modeling and Design," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol.MTT-48, no.6, pp.1045-1056.
- [11] Peroulis, D. Sarabandi, K. Katehi, L. P. B.(2001), "A Planar VHF Reconfigurable Slot Antenna," *Proceedings of the IEEE AP-S/URSI International Symposium*, vol.1, pp.154-157.
- [12] Sengupta, D. L.(1984), "Resonant frequency of a tunable rectangular patch antenna," *Electronics Letters*, vol.20, pp.614-615.
- [13] Yao, Z. J. Chen, S. Eshelman, S. Denniston, D. Goldsmith, C.(1999), "Micromachined low-loss microwave switches," *IEEE Journal of Microelectromechanical Systems*, vol.8, no.2, pp.129-134.

원고접수일 : 2004년 4월 1일

원고채택일 : 2004년 6월 1일