공학석사 학위논문

RF MEMS 스위치를 이용한 재구성 슬롯 안테나의 설계

Design of Reconfigurable Slot Antenna using RF MEMS Switch

지도교수 박 동 국

2004년 2월

한국해양대학교 대학원

전자통신공학과

윤 동 식

< 차 례 >

Abstract

제 1 장 서 론 ····· 1

제 2 장 도금 과 슬롯 안테나 및 스위치 이론 ····· 4

2.1 도금 이론 ····· 4

2.2 슬롯 안테나 이론 ····· 8

2.3 스위치 이론 ····· 11

제 3 장 슬롯 안테나 및 스위치 설계 ····· 16

3.1 슬롯 안테나 설계 ····· 16

3.2 스위치 설계 ····· 17

제 4 장 제조 공정 절차 ····· 25

4.1 마스크 레이아웃 ····· 25

4.2 제조 공정 ····· 27

제 5 장 실험 결과 및 고찰 ····· 31

5.1 도금된 구리 박막의 특성 ····· 31

5.2 안테나 및 스위치 특성 ····· 33

제 6 장 결 론 ····· 40

참고문헌 ····· 41

<표차례>

<표 2-1> 전해 도금의 장점과 단점.....7
<표 2-2> 무전해 도금의 장점과 단점.....7
<표 3-1> 스위치의 크기.....18
<표 3-2> 유한요소해석에 이용된 물성치.....20
<표 3-3> 세 가지 형태 스위치의 on/off 인가전압.....24
<표 5-1> 스위치 동작 상태에 따른 슬롯 안테나 특성.....37

<그림차례>

<그림 2-1> 전해 도금의 기본 메카니즘.....5
<그림 2-2> 슬롯.....8
<그림 2-3> 에어브리지형 MEMS 스위치.....11
<그림 2-4> 켄틸레버형 MEMS 스위치.....12
<그림 2-5> 스위치의 구동 메카니즘.....13
<그림 3-1> 설계된 슬롯 안테나.....16
<그림 3-2> 안테나에 사용된 스위치.....17
<그림 3-3> RF MEMS 스위치의 유한요소 모델 18
<그림 3-4> 동작 상태에서의 RF MEMS 스위치의 스트레스 분포....20
<그림 3-5> 공극의 높이에 따른 스위치의 스트레스 분포.....21
<그림 3-6> 공극에 따른 스위치의 구동전압.....22
<그림 3-7> 인가전압에 따른 스위치 공극 변화.....24
<그림 4-1> 재구성 슬롯 안테나의 마스크 레이아웃.....26
<그림 4-2> 재구성 슬롯 안테나의 제조 공정 순서도.....27
<그림 4-3> 재구성 슬롯 안테나의 공정 순서.....30
<그림 5-1> 도금 시간에 따른 구리 박막의 두께 변화.....31
<그림 5-2> 구리 박막의 SEM 사진.....32
<그림 5-3> 스위치의 광학 사진 33
<그림 5-4> 슬롯 안테나의 반사손실 시뮬레이션결과.....36
<그림 5-5> 슬롯 안테나의 반사손실 측정결과.....39

Abstract

This paper presents reconfigurable slot antenna using a voltage-controlled MEMS switches. The slot antenna operates at its nominal frequency as determinedly the slot length. The tuning of the operating frequency is realized by varying the electrical length of the antenna, which is controlled by MEMS switches, which have different actuation voltages.

Three-pairs of MEMS switches are symmetrically placed in slot. When the MEMS switch is in the ON-state, they essentially behave as equivalent short circuits reducing the length of the slot. On the other hand, when the MEMS switch is in the OFF-state(bias voltage=0V), the length of the slot remains unchanged. As a result, different resonant frequencies are shown at each switch state. The length and the width of the slot are 5.6mm and 200 ㎛, respectively.

Until now, many researchers have reported the development of MEMS switches for operation at RF and microwave frequencies. A actuation voltage of MEMS switches can be determined by switch geometry and air-gap height between a movable plate and a bottom plate. This paper using Cantilever MEMS switch. A width and a thickness of the cantilever are 100 ㎛ and 1㎛, respectively. The length of the cantilever is different at the position of switch 240㎛, 320㎛, 400㎛ in the slot in order to be able to actuate each switch at different DC voltage.

The process used in this work was very simple, reproducible, controllable, and compatible with CMOS fabrication process. The fabricated RF switch showed an applicability other RF systems.

제 1 장 서 론

최근에 가장 큰 관심을 끄는 무선통신 시스템으로는 개인휴대통신을 들 수 있다. 또한 미래의 무선 이동통신 시스템은 다중 전송매체(multi-transmission media), 다중 정보매체(multi-information media), 다중구조의 통신망(multi-dimensional media)등의 복합적인 다양한 세계화 통신 시스템으로 발전할 것으로 보인다.

현재의 무선 이동통신 시스템의 특징은 반도체 기술과 고주파소자 및 회로 기술의 발달로 단말기의 중량과 크기가 크게 줄어들고 있다. 이러한 단말기 시스템의 경량화/소형화에 따라 안테나도 경량화/소형화 되는 추세이며, 또한 다중 매체 서비스화, 다중 통신망화로 인해 안테나도 다기능화 및 지능화 추세이다.

대표적인 안테나로는 1930년대에 집중적으로 연구된 혼 안테나와 도파관 안테나, 1940년대에 개발된 슬롯 안테나, 유전체 안테나, 헬리컬 안테나, 1950년대와 1960년대에 개발된 위상 배열 안테나, 주파수독립안테나(frequency independent antenna)인 스파이얼 안테나와 대주기 안테나, 그리고 1970년대와 1980년대부터 각각 개발 되어온 마이크로스트립 안테나와 집적 (integrated) 안테나 등이 있다. 이외에 수많은 종류의 안테나가 존재하는데 이는 일반적으로 도체 또는 유전체가 특정주파수의 반파장크기일 때 전자기파를 효율적으로 복사를 할 수 있어 어떠한 형태의 도체나 유전체도 안테나로 사용될 수 있기 때문이다.

그러나 안테나의 형태가 결정되면 그에 따라 중심 주파수, 대역폭, 복사패턴등 안테나의 특성이 결정되어 하나의 안테나로 다양한 정보의 송수신이 어렵게 된다.

예를 들면 위성위치확인 시스템(Global Positioning System : GPS)에서

제공하는 정보를 수신하기 위해서는 원편파의 가로형 복사패턴을 가지는 안테나가 필요하지만 지상의 이동통신에서 제공하는 정보의 송수신을 위해서는 선형편파의 전방향성 복사패턴을 가지는 안테나가 필요하다.

따라서 여러 종류의 무선통신시스템에서 제공하는 정보를 송수신 하기 위해서는 여러 개의 안테나가 있어야 하며 이는 많은 안테나 장착 공간을 필요로 하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 하나의 안테나 구조로 여러 종류의 무선 송수신이 가능한 다기능 안테나가 필요하다.

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. (1) 소형화, (2) 설계된 모든 주파수 대역에서 유사한 방사 패턴과 이득, (3) 전자기적 스펙트럼의 효과적인 사용, (4) 동일 장소의 간섭과 전파방해의 역효과를 줄이는데 유용한 주파수 선택성 등 이다 [1]~[4].

RF 초소형 전자기계 시스템(Micro Electro Mechanical System : 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 격리도 특성이 증명되어 왔다 [5]~[9]. 또한, 이들은 뛰어난 선형성과 매우 낮은 신호왜곡을 가지면서 매우 낮은 전력 레벨에서 작동한다. 이러한 특성들은 RF MEMS 스위치를 현재 레이다 및 통신에 응용하는데 있어서 큰 매력을 가지게 한다.

RF MEMS 소자는 빠른 구동과 낮은 전력소모를 가지고 안테나 구조를 재구성 할 수 있게 한다 [10]~[13]. 본 논문에서는 순차적으로 전압 인가된 RF MEMS 스위치를 이용하여 평면 재구성 슬롯 안테나를 설계하였다.

본 안테나는 급전점(Feed point)을 변화시키지 않고, 세 쌍의 RF MEMS 스위치를 구동시켜서 안테나의 슬롯 길이를 조정함으로써 공진 주파수가 동조 된다.

본 논문에서는 앞에서 언급한 바와 같이 MEMS 기술을 이용한 재구성 슬롯 안테나와 이에 사용되는 MEMS 스위치에 대한 설계 및 제작에 중심으로 연구하였다.

먼저 제 2장에서는 MEMS 제조공정에 사용될 도금 이론에 대해 기술하며, 또한 평면형 슬롯 안테나에 대한 설계 방법 및 안테나에 사용될 스위치 설계 및 동작원리에 대한 기술을 하였다.

제 3장에서는 안테나 및 스위치의 특성을 시뮬레이션을 통하여 설계하였으며, 제 4장에서는 설계된 스위치의 마스크 레이아웃의 제작 공정에서 사용되는 방법에 대해서 기술 하였다.

또한 제 5장에서는 본 논문에서 제시한 가변 주파수형 슬롯 안테나에 사용된 구리 도금 박막의 특성과 안테나의 특성을 조사하였다. 그리고 마지막으로 제 6장에서 결론을 기술하였다.

제 2 장 도금 과 슬롯 안테나 및 스위치 이론

2.1 도금이론

수용액을 이용한 도금법에는 크게 전해 도금(electroplating)과 무전해 도금(electrolessplating)으로 분류된다[14].

전해도금은 직류정류기를 사용해서 도금 욕조속의 도금용액의 금속이온을 양극(anode pole)상의 제품상에 석출시키는데, 그 도금속도는 전류밀도에 의해서 결정되며 1~10A/d㎡로 실시되고 있다. 그 때 석출한 금속의 보급은 대극(the other side pole)인 음극이 용해되는 것에 의한 가용성 양극법과 금속염의 보급에 의한 불용성 양극법의 2 종류가 있다.

구리 전해 도금의 경우는 양극이 석출하는 금속과 동일한 것이 사용되는 가용성 양극법으로서 첨가제를 포함하는 황산구리 용액에 기판 음극을 넣고 반대편을 양극으로 전류를 인가하여 흘리면 전해 도금이 시작되어 용액중에서 구리 이온이 발생하여 음극방향으로 끌어 당겨진다. 그리고 시드(seed)층을 기초로 하여 구리가 성장하기 시작한다. 이러한 전해 도금법은 무전해 도금법에 비해 성장속도가 빠를 뿐만 아니라 화학적 반응이 비교적 간단하고 취급이 쉬우며 결정(grain)의 크기가 크고 양호한 막을 얻을 수 있으므로 전기 자계(Electro Migration ; EM)에 대한 내성이 우수하다. 그러나 이 도금법은 반드시 시드층이 필요하다는 단점을 가지고 있다.

다음은 구리 전해 도금시 나타나는 화학 반응식이다. 황산구리 수용액은 다음과 같이 해리되어 2가지의 이온으로 된다.

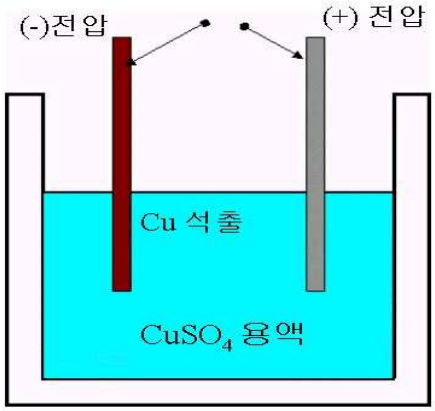
$$CuSO_4 \leftrightarrow Cu^{2+} + SO_4^{2-}$$

그리고 도금중의 양극에서의 반응은 다음과 같이 나타난다.

$$\text{양극 반응} : Cu^{2+} + 2e \rightarrow Cu$$

음극 반응 : $Cu \rightarrow Cu^{2+} + 2e$

황산구리의 농도가 너무 낮으면 음극 효율이 나빠지고 고전류 밀도 부분에 조잡한 도금이 석출된다. 한편 농도가 너무 높으면 용해도에 가까워서 저온에서도 황산구리 결정을 석출하기 쉬워지나 필요이상으로 고농도로 하면 손실이 커지게 된다[15]. <그림 2-1>은 위 반응 과정을 알 수 있는 기본 메카니즘을 나타내었다.



<그림 2-1> 전해 도금의 기본 반응 메카니즘

<Fig. 2-1> Basic reaction mechanism in electroplating

도금 과정에서 발생하는 수소와 산소의 일부는 환원반응에 의해 다시 H_2O로 바뀌게 되고 나머지 일부는 기체 형태로 외부방출을 하게 된다. 그리고 석출되는 금속의 정량적인 관계에 대하여 전극과 전해용액의 계면에서 전하이동반응이 진행할 때 통과하는 전기량은 페르데이가 제시한 법칙이며 그 내용은 다음과 같다[16].

· 전기분해에 의하여 전극상에 석출 또는 용해하는 화학물질의 양은 통과한 전기량(전류×시간)에 비례한다.

· 같은 전기량에 의해 전극상에 석출하는 물질의 양은 각각의 화학 당량에 비례한다.

이 법칙으로부터 일정한 전기량에 의해 전극상에 석출하는 물질의 양은 각각의 물질에 대해 일정함을 알 수 있다. 용액중의 이온이 전하를 가진 원자라 하면 질량은 원자량을 전하수 n으로 나누면 얻어진다. 1g을 석출 또는 용해시키는데 필요한 전기량, 즉 아보가드로 수, 6.023×10^{23}개의 전자를 가진 전기량을 1[F]라 한다. 1[F] = 96485[C] 이다. 또한 1[F] = 1[A · s]이므로 1[F] = 26.8[Ah]에 해당한다.

페르데이의 법칙은 간단히 식 (1)로 표시된다.

$$W = \frac{I \times t \times Eq}{F} \tag{1}$$

여기서 W는 전극상에 석출 또는 용해하는 물질의 질량 [g], I는 전극과 전해액 계면을 통과한 전류의 세기 [A], t는 전류가 흐른 시간 [s], Eq는 석출 또는 용해한 물질의 당량, F는 데르데이 상수이다.

실제로 도금시에는 도금이 될 부분을 정의하기 위해 지지대가 필요하다. 도금과정에서 지지대가 되는 물질은 보통 도금용 감광막이나 금속이 사용된다. 지지대의 역할은 생성되는 도금금속의 모양을 갖추어 주고 도금이 될 곳 이외의 부분을 도금용액으로부터 보호해 준다.

두 번째로의 수용액 도금법은 환원제의 화학반응에 의해 도금용액 속의 금속이온을 금속으로서 석출시키는 방법인 무전해 도금이다. 이 방법에서는 석출 피막속에 금속이외에 환원제의 성분인 인, 붕소가 들어가 전해 도금에 비교하여 석출피막의 순도가 낮다. 무전해 도금은 산성의 도금용액에서 환원 석출하는 것과 알카리성의 도금용액에서 환원 석출하는 것의 2종류가 있다. 산성의 도금용액에서 환원 석출하는 것으로는 니켈을 들 수 있으며, 알카리성의 무전해 도금은 니켈 이외에 코발트, 구

리, 은, 금 등이 실용화 되고 있다.

무전해 도금은 금속이온을 환원제에 의해서 화학 환원하여 금속으로 석출시킨다. 따라서 무전해 도금용액과 균등하게 제품이 접촉하고 있으며 동일한 두께로 하는 것이 가능하며 전해 도금에 비교해서 균일 석출이 양호하다. 다음 <표 2-1>과 <표 2-2>는 전해 도금과 무전해 도금의 특징을 비교하였다.

<표 2-1> 전해 도금의 장점과 단점

<Table 2-1> Advantages and disadvantages of electroplating

장점	단점
· 금속적 감촉이 있다. · 빛을 반사해서 존재를 강조한다. · 두께를 가감할 수 있다. · 내열성이 있다. · 내마모성이 있다. · 내오염성이 있다.	· 색의 종류가 적지 않다. · 크기, 형상에 제한이 있다. · 균일한 두께로 할 수 없다.

<표 2-2> 무전해 도금의 장점과 단점

<Table 2-2> Advantages and disadvantages of electrolessplating

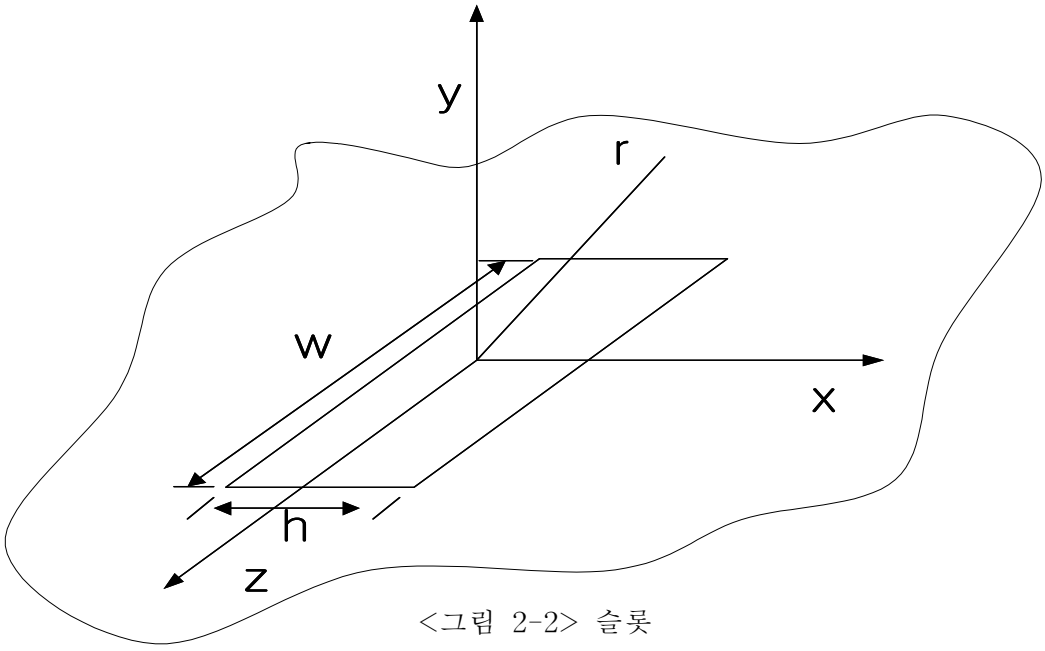
장점	단점
· 금속적 감촉이 있다. · 빛을 반사해서 존재를 강조한다. · 두께를 가감할 수 있다. · 내열성, 내마모성, 내오염성이 있다. · 크기 형상에 제한이 없다. · 균일한 두께로 할 수 있다.	· 색의 종류가 적지 않다. · 도금용액의 온도가 높다. · 가격이 비싸다.

2.2 슬롯 안테나 이론

슬롯에 대한 복사 패턴을 구하기 위해, <그림 2-2>과 같이 도체면에 직사각형의 슬롯을 생각하자, 슬롯의 폭은 h이며, 슬롯의 길이는 w 라 하고, 슬롯 내부의 전계는

$$\overline{E} = E_0 \hat{x} \qquad |x| \ll \frac{h}{2},\ |z| \ll \frac{w}{2} \qquad (2.2.1)$$

으로 가정하자, 전자장 문제에서 많은 경우 경계면의 전자장을 등가 전기면 전류 혹은 등가 자기면 전류로 바꾸어 놓을 수 있다. 여기서도 x-z 평면에서의 전자장을 등가 자기면 전류로 대치하여 y>0인 영역에서의 원거리 전자계를 구하고자 한다.



<그림 2-2> 슬롯

<Fig. 2-2> Slot

즉 식 (2.2.2)을 등가 자기면 전류

$$\overline{M} = 2E_0\hat{z_0} \qquad |x| \le \frac{h}{2},\ |z| \le \frac{w}{2} \tag{2.2.2}$$

$$= 0 \qquad \text{그 외의 영역}$$

으로 대치 할 수 있다[17].

이것에 의한 원거리 영역에서의 전계는

$$E_\phi = -j2V_o w k_0 \frac{e^{-jk_0 r}}{4\pi r} F(\theta,\phi) \tag{2.2.3}$$

$$E_\theta = 0 \tag{2.2.4}$$

$$E_r = 0 \tag{2.2.5}$$

이며,

$$F(\theta,\phi) = \frac{\sin(\frac{k_0 h}{2}\sin\theta\cos\phi)}{\frac{k_0 h}{2}\sin\theta\cos\phi} \frac{\sin(\frac{k_0 w}{2}\cos\theta)}{\frac{k_0 w}{2}\cos\theta}\sin\theta \tag{2.2.6}$$

이다. 여기서 $V_0 = E_0 h$이며, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$을 나타낸다.

식 (2.2.3)에서 $\theta = \frac{\pi}{2}$일 때 즉 E-평면 복사패턴은

$$F(\phi) = \frac{\sin(\frac{k_0 h}{2}\cos\phi)}{\frac{k_0 h}{2}\cos\phi} \tag{2.2.7}$$

의 함수로 표현되며, 이고, $\phi = \frac{\pi}{2}$일때 H-평면 복사패턴은

$$F(\theta) = \frac{\sin(\frac{k_0 w}{2} cos\theta)}{\frac{k_0 w}{2} cos\theta} \sin\theta \tag{2.2.8}$$

의 함수로 표현된다.

따라서 슬롯으로부터 복사되는 전력 P_l 은

$$P_l = \frac{1}{2}\int_s E\phi H_\theta \, ds = \frac{1}{\eta}\int_s |E_\phi|^2 \, ds \tag{2.2.9}$$

$$= \frac{1}{2\eta}\frac{V_o^2}{\pi}\int_0^\pi (\frac{\sin(\frac{k_0 w}{2}\cos\phi)}{\cos\phi})^2 (\sin\phi)^3 \, d\phi \tag{2.2.10}$$

이며, 여기서 $\eta = (\mu/\epsilon_0)^{1/2}$ 이다. 그러므로 슬롯의 복사 콘덕턴스 G_s 는

$$G_s = \frac{2P_l}{V_0^2} = \frac{I}{120\pi^2} = \frac{I}{\pi\eta} \tag{2.2.11}$$

이며,

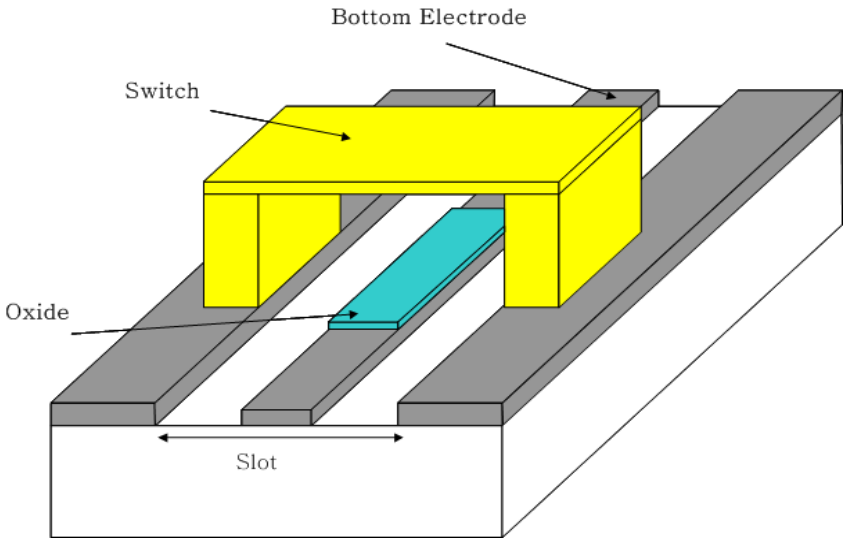
$$I = \int_0^\pi (\frac{\sin(\frac{k_0 w}{2}\cos\phi)}{\cos\phi})^2 (\sin\phi)^3 \, d\phi \tag{2.2.12}$$

이다.

2.3 스위치 이론

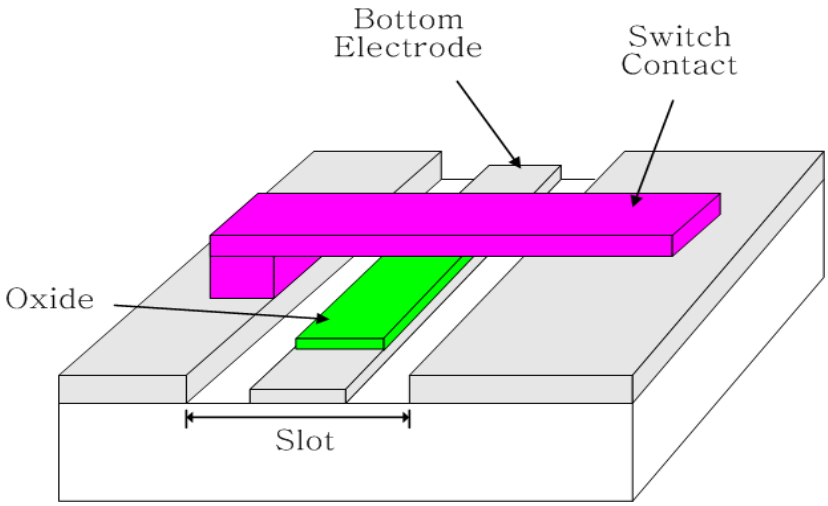
RF MEMS 스위치의 경우 첫 번째 스위치는 양쪽이 고정되어있는 에어브리지형과 한쪽만 고정되어있는 켄틸레버형으로 크게 나누어진다. <그림 2-3> 과 <그림 2-4>는 두 가지 종류의 스위치를 나타내고 있다.

두 종류의 스위치는 모두 산화막(Oxide)를 가지고 있다. 산화막은 스위치에 구동 전압인 DC를 인가하였을 때 양전극과 음전극 사이의 전류 흐름을 막아주는 역할을 한다. 또한 일반적으로 에어브리지형 스위치의 경우 스위치가 동작함으로써 신호의 흐름은 차단하는 회로에 주로 사용되며, 켄틸레버형 스위치의 경우 스위치가 동작함으로써 신호가 흐르게 하는 용도로 많이 사용된다.



<그림 2-3> 에어브리지형 MEMS 스위치

<Fig. 2-3> Air-bridge type MEMS switch



<그림 2-4> 켄틸레버형 MEMS 스위치

<Fig. 2-4> Cantilever type MEMS switch

아래 <그림 2-5> 는 RF MEMS 스위치의 구동 메카니즘을 나타낸 것이다.

상부 전극과 하부전극 사이의 초기 간격을 g_0, 그리고 상부전극이 변형을 일으키고 난 후의 전극간격을 g라고 하면, 상분전극에 균일하게 압력 P가 인가되었을 때 이 전극의 강도상수 (Stiffness constant) k [N/㎥]는

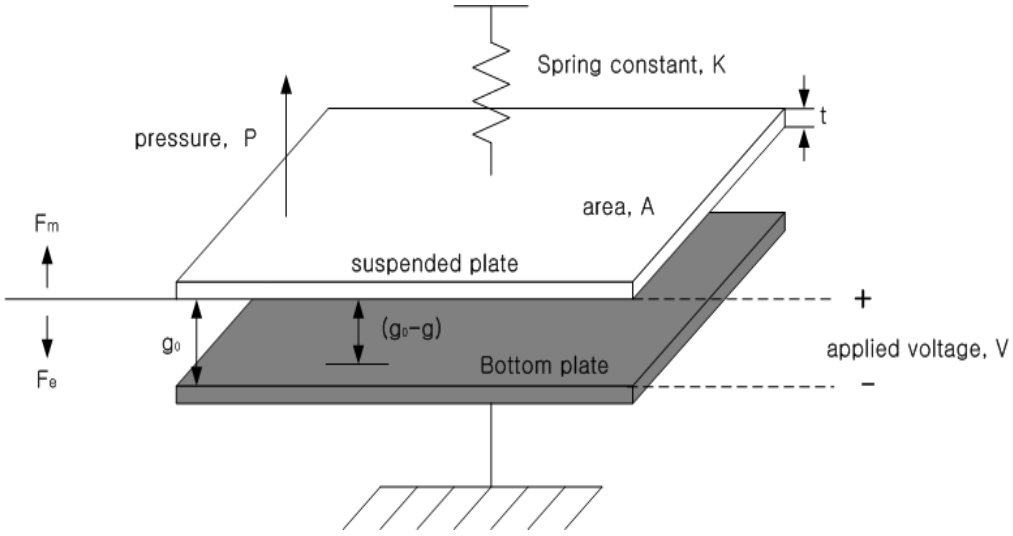
$$k = \frac{P}{(g - g_0)} \tag{2.3.1}$$

으로 표현된다. 이때 상부전극과 하부전극 사이의 전압 V에 의해 상부전극에 인가되는 압력 P는

$$P = \frac{\epsilon V^2}{2g^2} \tag{2.3.2}$$

으로 표현된다. 여기서 ε은 스위치와 하부전극 사이에 존재하는 유전물질의 유전상수이다. 스위치 상에 주어지는 전체 힘 F는

$$F(g) = k(g_0 - g) + P - \frac{\epsilon V^2}{2g^2} \tag{2.3.3}$$



<그림 2-5> 스위치의 구동 메카니즘

<Fig. 2-5> The movement mechanism of switch

으로 표현된다. 전체 힘 $F(g)$는 평형상태에서 0이며, $\partial F/\partial g < 0$ 일 때 안정화된다. 전압이 증가함에 따라 두 평판의 상이의 간격이 줄어들게 된다. 스위치와 하부 전극판 사이에 변화된 임계의 간격 g_c 와 간격이 변화되기 위해 필요로 하는 전압 V_C는 각각

$$gc = \frac{2}{3}(g_0 + \frac{P}{k}) \tag{2.3.4}$$

$$V_c = \sqrt{\frac{8K(g_0 + P/K)^3}{27\epsilon}} = \sqrt{\frac{8K(g_0 - g)^3}{27\epsilon}} \quad (2.3.5)$$

으로 표현된다. 이때 P/K는 상부전극인 평판이 하부전극으로 변화된 거리를 나타낸다. 이에 대한 스프링 상수 K는 다음과 같다

$$K = \frac{wt^3E}{4L^3} \quad (2.3.6)$$

여기서 w는 상부전극의 폭, E는 영 계수, t는 상부전극의 두께, 그리고 L은 상부전극의 길이이다.

기계적인 힘 F_m과 전기적인 힘 F_e의 관계는

$$F_m + F_e = 0 \quad (2.3.7)$$

으로 표현된다. 기계적인 힘 F_m는

$$F_m = F_{bend} + F_{stretch} + F_{damp} + F_{VDW} + F_{contact} \cong F_{bend} \quad (2.3.8)$$

으로 표현되며, 이들 중 계산의 편리성을 위해 구동할 때 가장 중요하게 작용하는 휨 영향만을 고려하고 나머지 현상은 무시하였다. 이때, 각각의 파라미터들은 휨 영향에 따른 힘 F_{bend}, 늘어나는 영향에 따른 힘 $F_{stretch}$, 감폭 영향에 따른 힘 F_{damp}, 반 데르 발스 영향에 따른 힘 F_{VDW}, 그리고 접촉에 따른 힘 $F_{contact}$으로 나타낸다.

위 가정에 따라 휨 영향에 대한 힘 F_m과 정전기적인 힘 F_e만을 고려하면

$$F_m + F_e = 0 \quad (2.3.9)$$

가 되며, 이때 F_m과 F_e는

$$F_m = Kx = K(g_0 - g) = Kd \quad (2.3.10)$$

$$F_e = -\frac{1}{2}\frac{\epsilon A}{d^2}V^2 = -\frac{1}{2}\frac{CV^2}{d} = -\frac{1}{2}\frac{C^2V^2}{\epsilon A} \qquad (2.3.11)$$

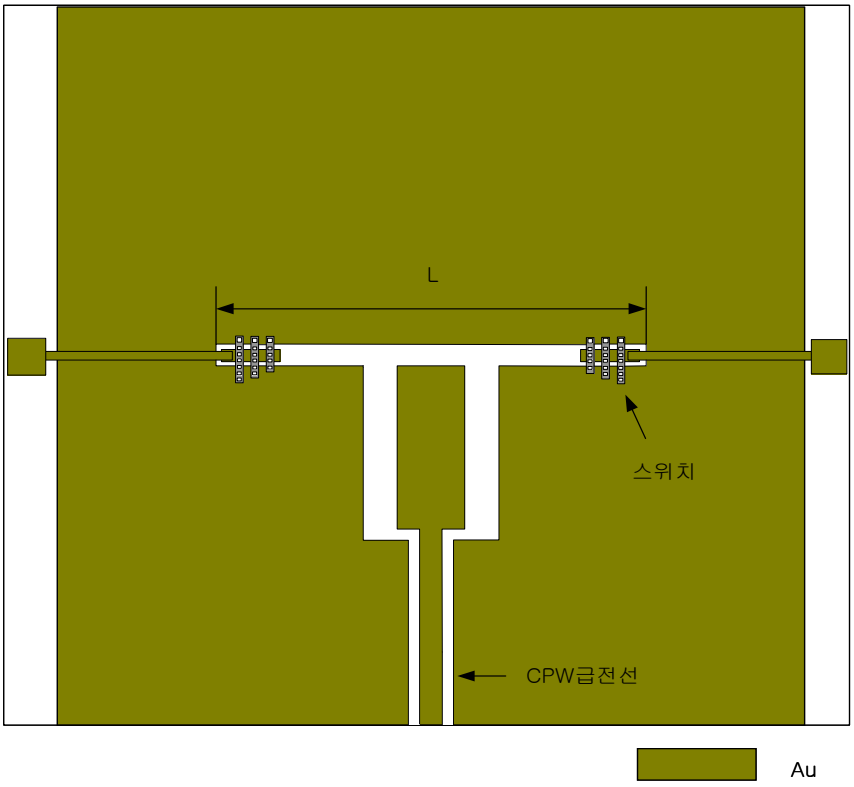
으로 표현된다. 식 (2.3.9)에 식 (2.3.10)과 식 (2.3.11)를 대입하면 인가한 전압 V에 대한 공극의 변위 d의 관계식을 얻을 수 있다.

$$d = \left(\frac{\epsilon A}{2K}V^2\right)^{\frac{1}{3}} \qquad (2.3.12)$$

제 3 장 슬롯 안테나 및 스위치 설계

3.1 슬롯 안테나 설계

안테나 설계를 위한 기판은 $\varepsilon_r = 4$ 이고 기판 두께가 560㎛인 석영 기판을 사용하였다. <그림 3-1>은 설계한 안테나의 모습을 보여준다.



<그림 3-1> 설계된 슬롯 안테나

<Fig. 3-1> Designed slot antenna

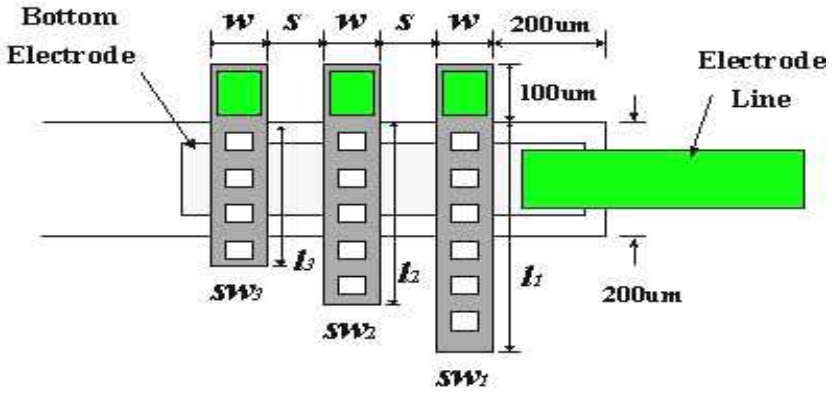
일반 실리콘 기판의 경우 고주파로 올라갈수록 실리콘 자체의 도전성

으로 인하여 손실이 증가하기에 RF 특성이 좋지 않다. 그래서 실리콘 웨이프 위에 두꺼운 산화막을 형성하여 사용하는 경우가 많다. 그러나 이런 두꺼운 산화막을 형성하는 공정은 고온 처리 과정 및 장비의 부재로 인하여 손실이 없는 석영 기판을 사용하여 안테나 및 스위치를 제작을 하였다.

안테나 슬롯의 폭은 200㎛, 길이는 5,600㎛로 하여 설계하였다. 또한 급전방식은 CPW를 급전을 사용하였으며 CPW는 50Ω으로 설계하였다.

3.2 스위치 설계

스위치는 3개의 각기 다른 길이를 가지는 구조로 되어 있다. 스위치가 인가전압을 가했을 때 순차적으로 동작하기위해서 스위치의 전체길이를 400㎛, 320㎛, 240㎛로 하여 설계하였다. <그림 3-2>는 안테나에 사용된 스위치를 나타내며, <표 3-1> 은 설계된 스위치의 크기를 나타낸 것이다.



<그림 3-2> 안테나에 사용된 스위치

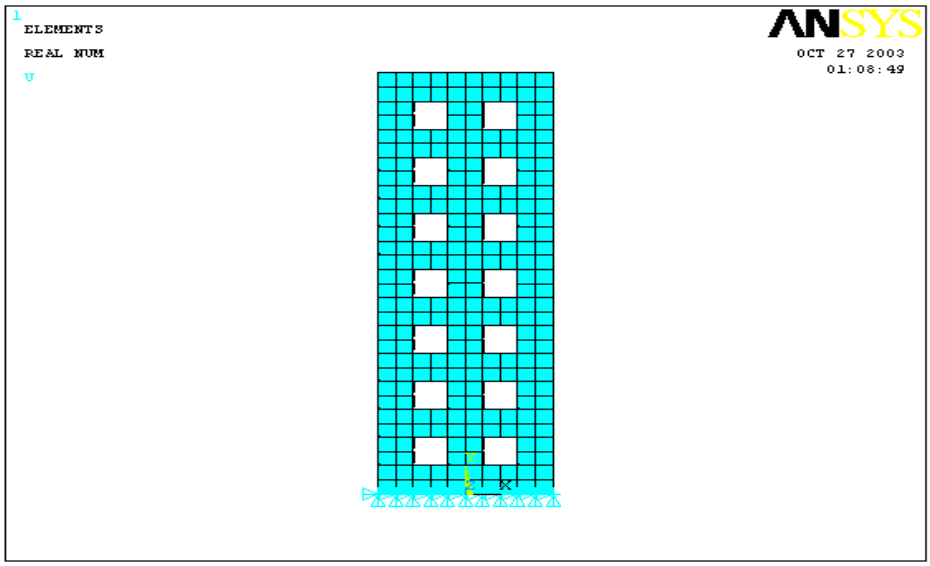
<Fig. 3-2> Switch used in antenna

<표 3-1> 스위치의 크기

<Table 3-1> Dimensions of switch

스위치	l(㎛)	s(㎛)	w(㎛)
SW_1	400	100	100
SW_2	320		
SW_3	240		

본 논문에 사용된 RF MEMS 스위치는 ANSYS 시뮬레이션 툴을 이용하여 기계적 및 전기적 특성을 추출하였다. 스위치의 요소 모양은 8절점 요소(Solid 45)이며, 사각 메쉬를 사용하여 모형화한 것을 <그림 3-3> 에서 보여주고 있다.



<그림 3-3> RF MEMS 스위치의 유한요소 모델

<Fig. 3-3> Finite element model of RF MEMS switch

사각 메쉬는 주로 3차원 입체 구조물에 적용된다. 일반적으로 ANSYS에서 제공하는 메쉬의 경우 삼각 메쉬를 자동적으로 지원하나 2차원 구조나 곡선이 많은 구조에는 해석의 정확도가 있어나 MEMS 구조와 같은 3차원 미세 구조물의 경우 오차 범위가 10%이상의 오차를 보이고있다. 그러므로 기본적인 메쉬가 아닌 8절점 6방형 메쉬인 사각 메쉬를 사용하였다.

스위치의 지지대 부분과의 접촉하는 접점의 모든 방향을 구속하였다. 그리고 전압이 인가될 부분인 스위치의 중안부분을 Trans 126의 솔루션인 emtgen을 사용하여 스위치에 양극을 공극만큼 떨어진 아래쪽에 음극을 인가하여 기계적인 특성 대해서 모델링 하였다.

<표 3-2>는 유한요소 해석에 이용된 MEMS 공정으로 제작될 스위치의 재료인 금(Gold : Au)에 대한 물성치 값이다.

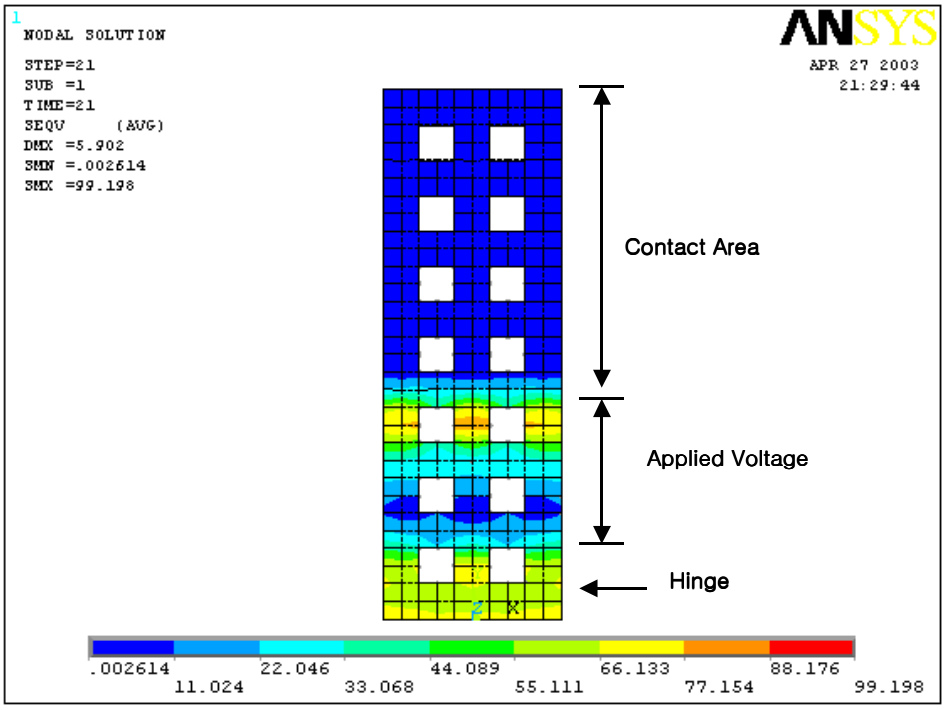
<그림 3-4>은 두께가 1 ㎛이고, 공극 이 6㎛인 캔틸레버 스위치 (SW1)가 동작 상태에서의 스트레스 분포를 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이 스트레스의 분포는 스위치가 접촉되기 시작하는 부분에서 최대의 값을 보이고, 그 다음으로 관절 부분에서 큰 값을 보인다. 그리고 스위치의 접점부와 전압이 인가되는 상극부에서 최소의 값을 나타내고 있다.

<그림 3-5>은 세 가지 스위치의 공극에 대한 스트레스 분포를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 공극의 높이가 클수록 스위치의 최대 스트레스 분포는 증가하는 것을 볼 수 있으며, 스위치의 길이가 작을수록 최대 스트레스가 큰 것을 알 수 있다.

<표 3-2> 유한요소해석에 이용된 물성치

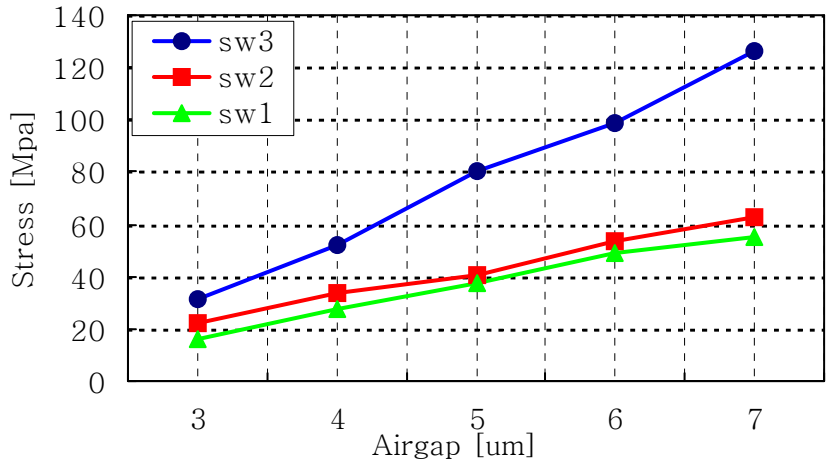
<Table 3-2> Material properties of metal for finite element analyze

스위치 재료		금(Gold : Au)
요소 모양		Solid 45 (Black 8node 45)
물성치	Young' Modulus(GPa)	80×10^{3}
	poisson's Ratio	0.42
	밀도(kg/m^3)	19.32×10^{-15}



<그림 3-4> 동작 상태에서의 RF MEMS 스위치의 스트레스 분포

<Fig. 3-4> Stress distribution of RF MEMS switch of on-state

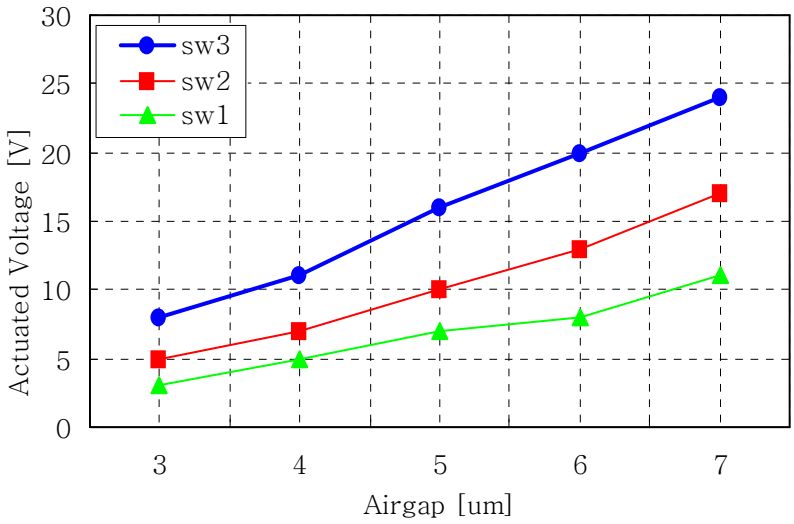


<그림 3-5> 공극의 높이에 따른 스위치의 스트레스 분포

<Fig. 3-5> Stress distribution of switch according to Air-gap height

<그림 3-6>은 두께가 1㎛인 세 가지 종류의 켄틸레버 스위치의 공극에 따른 구동전압을 나타낸 것이다. 길이가 다른 세 가지 스위치의 구동전압이 각각의 공극에 대하여 뚜렷하게 구분되어 나타난 것을 알 수 있다.

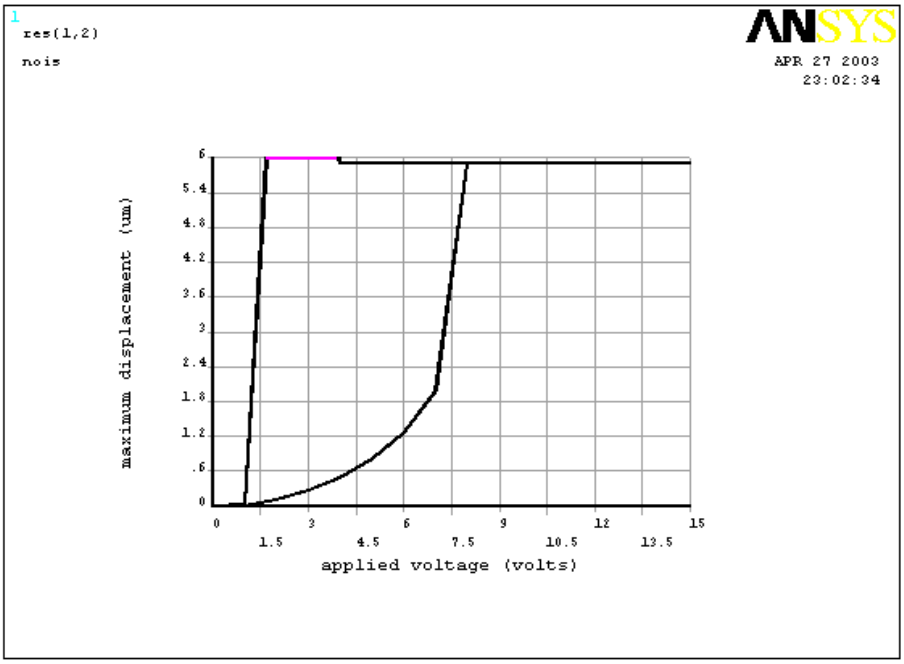
본 설계에서는 MEMS 공정상의 안전성, 즉 스위치 패턴을 형성하고 난 후 희생층인 PR을 제거할 경우 황산과 과산화수소수의 혼합 용액에서의 희생층 제거를 하여야한다. 이때 스위치의 휘어짐 현상이 발생하였다. 이러한 원인은 낮은 공극의 경우 액체의 인력으로 인한 희생층 제거에서 발생한 것으로 분석되며, 따라서 공극의 최소 높이가 4㎛이상이 되어야 액체상에서 희생층 제거시 스위치의 함몰인 휘어짐 현상을 막을 수 있는 것으로 판단된다. 또한 구동전압이 확실하게 구별되도록 하기 위해서 공극 이 6 ㎛인 스위치를 설정하였다.



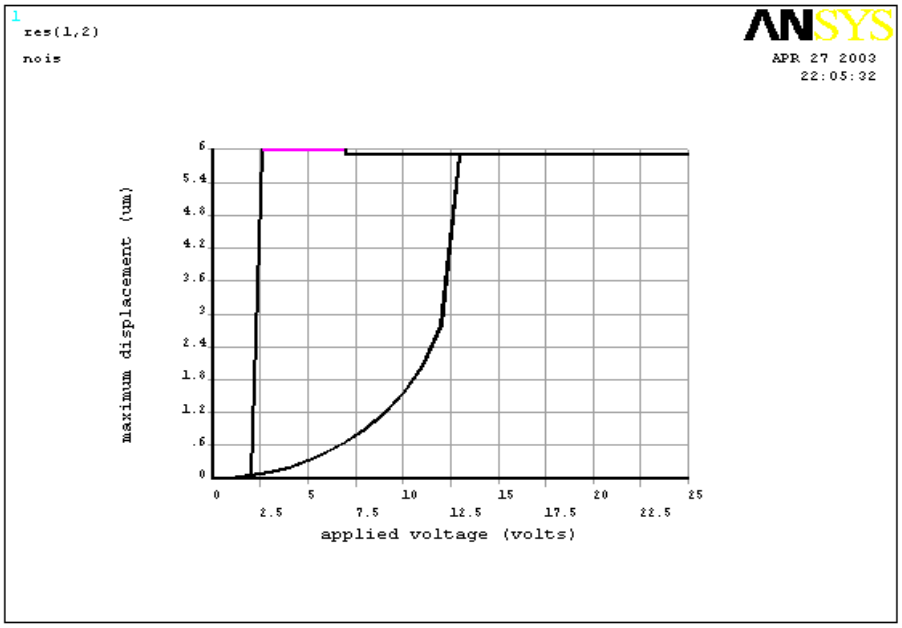
<그림 3-6> 공극에 따른 스위치의 구동전압

<Fig. 3-6> Movement voltage of switch according to Air-gap

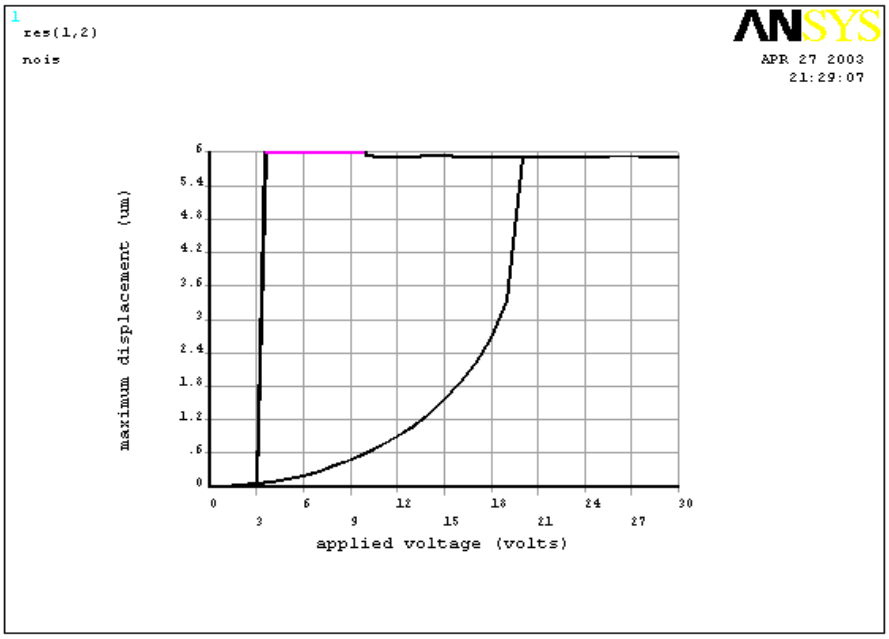
<그림 3-7>는 공극이 6㎛인 세 가지 형태의 스위치가 인가 전압에 따른 스위치의 변위를 나타낸 것이다. <그림 3-7>에서 보는 것과 같이 인가 전압이 서서히 높아짐에 따라 스위치는 조금씩 아래로 내려온다. 점차 인가전압이 증가하다가 어느 일정한 전압에 도달하면 스위치는 급격하게 내려와서 접합부가 on 상태가 되는 것을 알 수 있다. <표 3-3>은 세 가지 형태의 스위치의 on/off 때의 인가전압을 정리한 것이다. 대부분의 스위치는 on/off 사이에 히스테리시스 특성을 나타내고 있다. 길이가 다른 세 가지 스위치의 구동전압이 5V, 7V 간격으로 구본되어 동작됨을 알 수 있다. 이것으로 전압을 순차적으로 인가 함에 따라 세 가지의 스위치는 자신의 구동전압에서 차례로 on 상태로 동작한다는 것을 판단할 수 있다. 그리고 off 상태에서는 전압차가 큰 차이가 없음을 알 수 있다.


1
res(1,2)
nois
ANSYS
APR 27 2003
23:02:34
maximum displacement (um)
6
5.4
4.8
4.2
3.6
3
2.4
1.8
1.2
.6
0
0
1.5
3
4.5
6
7.5
9
10.5
12
13.5
15
applied voltage (volts)

(a) SW1


1
res(1,2)
nois
ANSYS
APR 27 2003
22:05:32
maximum displacement (um)
6
5.4
4.8
4.2
3.6
3
2.4
1.8
1.2
.6
0
0
2.5
5
7.5
10
12.5
15
17.5
20
22.5
25
applied voltage (volts)

(b) SW2



(c) SW3

<그림 3-7> 인가전압에 따른 스위치의 공극 변화

<Fig. 3-7> Air-gap variation of switch according to voltage

<표 3-3> 세 가지 형태 스위치의 on/off 인가전압

<Table 3-3> On/off voltage of three type switch

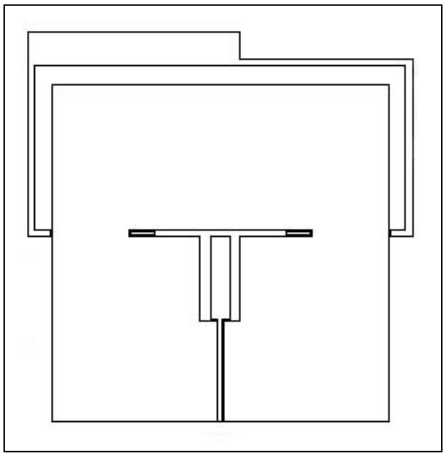
종 류	On-state[V]	Off-state[v]	Hysteresis[V]
SW1	8	1.7	6.3
SW2	13	2.5	10.5
SW3	20	3.5	16.5

제 4 장 제조 공정 절차

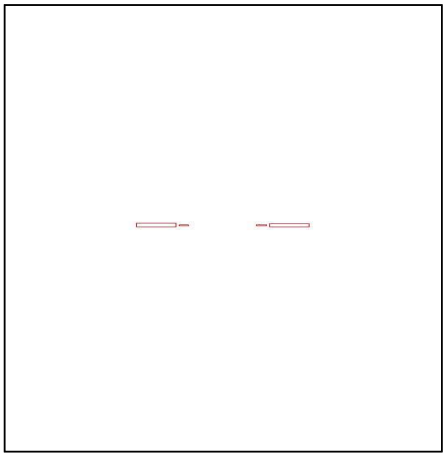
4.1 마스크 레이아웃

<그림 4-1>은 RF MEMS 스위치를 이용한 재구성 슬롯 안테나의 설계를 위한 마스크 레이아웃을 나타낸 것이다. 전체 마스크는 4장으로 구성되어 있다.

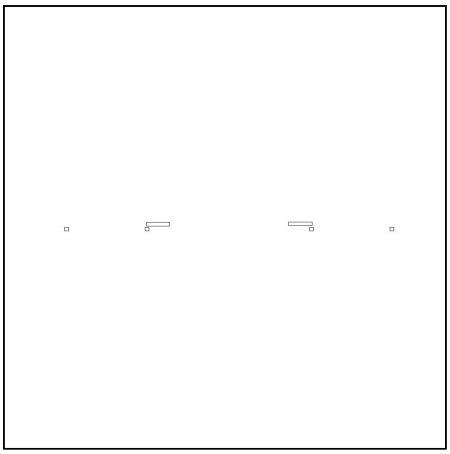
레이아웃의 구성을 살펴보면, 안테나 및 하부전극의 형성과 외부에서 구동전압을 인가하는 기본 금속배선을 <그림4-1> (a)에서 패턴 하였으며, 스위치에 구동 전압을 인가하였을 때 하부전극과 스위치 사이에 구동 전압의 흐름을 막아주는 역할을 하는 절연체로 SiO_2층을 <그림4-1> (b)과 같이 패턴닝 하였으며, 이때 절연층은 하부전극의 크기보다 조금 넓게 설계하였다. 스위치의 공극을 형성하는 전해도금 패턴을 <그림4-1 (c)에서 나타내고 있다. 그리고 스위치 제작을 위한 금(Au) 금속층 패턴 <그림4-1> (d) 나타내고 있다.



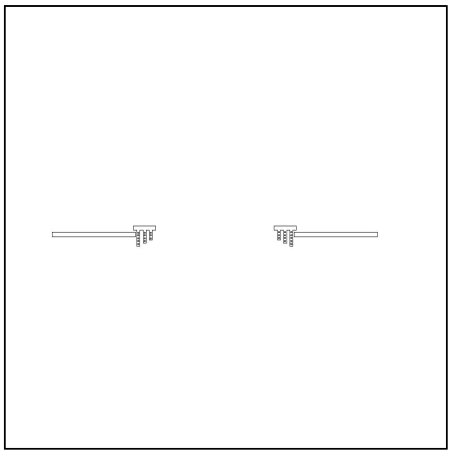
(a) Mask #1



(b) Mask #2



(c) Mask #3



(d) Mask #4

<그림 4-1> 재구성 슬롯 안테나의 마스크 레이아웃

<Fig. 4-1> Mask layout of reconfigurable slot antenna

4.2 제조 공정

<그림 4-2>는 전해도금을 이용한 3차원 재구성 슬롯 안테나 제조를 위한 공정 순서도를 나타내고 있으며 <그림 4-3>는 공정의 소자 단면도를 나타내고 있다.

안테나의 특성 및 급전선으로 사용되는 CPW의 특성을 좋게 하기위해 기판의 손실을 줄이기 위해서 두께가 560㎛인 석영 glass 기판을 사용하였다. 기판을 초기 세척한 후 300Å 두께의 크롬과 2000Å 두께의 금을 in-situ 방식으로 열증착하였다. 리소그래픽법으로 AZ1512 PR을 사용하여 하부전극 및 안테나을 정의한 후 금(Au)을 선택적으로 제거하였고, 하부전극과 스위치의 단락을 막기 위한 절연층인 SiO_2층을 suppter 장비를 이용하여 증착하였다.

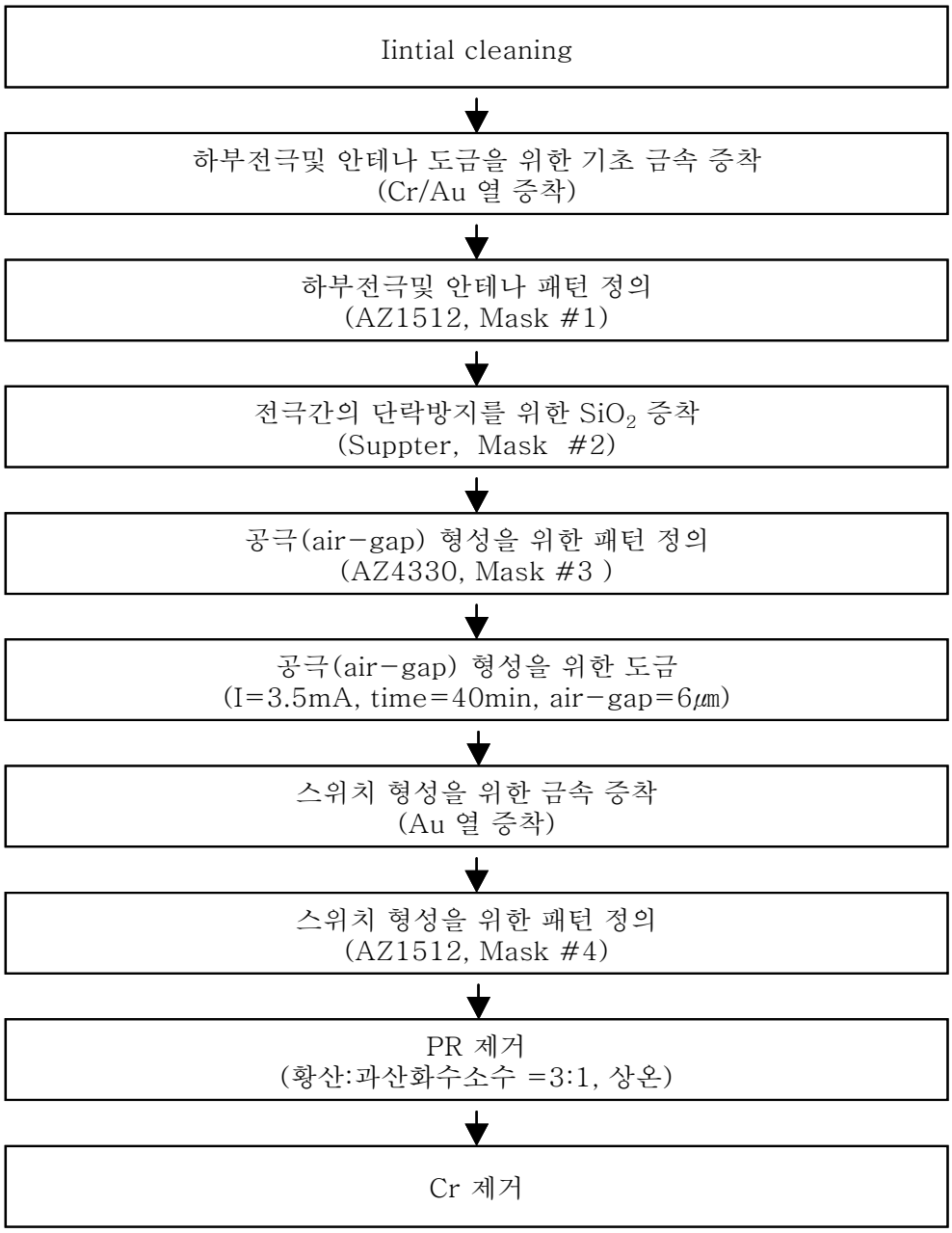
Suppter 장비는 처음 진공도를 1×10^{-5} torr로 하여 SiO_2를 4000Å두께로 하여 증착하였다. 스위치의 공극을 확보하기 위해서 도금용 PR을 사용하여 도금 될 부분을 정의하였다. 구리도금은 황산 구리용액에 도금할 웨이퍼를 넣어 처음 10분은 0.1㎃에서 천천히 3.5㎃까지 올려가면서 도금을 하고 그 이후 30분은 3.5㎃의 전류를 인가하여 전해도금을 행하여 약 6㎛의 공극을 형성 하였다.

그리고 스위치를 형성하기 위해 기초 금속층 금(Au)을 열증착하여 스위치의 금(Au) 박막을 형성하였다. 스위치의 패턴을 형성한 후 하부전극 및 안테나와 같은 방법으로 마스크 4번을 사용하여 선택적으로 금(Au)을 제거하였다.

스위치의 선택적 제거가 끝난 후 스위치를 지탱하고 있는 PR을 제거하기 위하여 아세톤이 아닌 황산과 과산화수소수의 혼합 용액으로 제거하였다. 이것은 PR 스위치 형성을 위해 금(Au)의 열증착 과정에서 PR

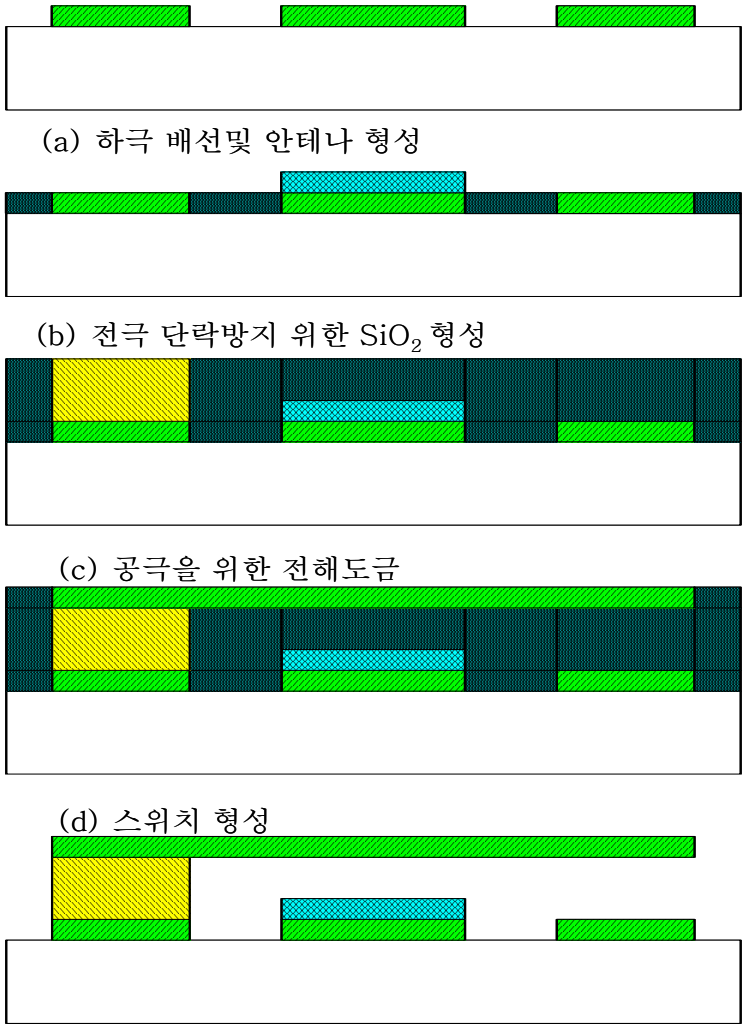
특성의 변화로 인해 상온의 아세톤에서 PR이 찌꺼기를 남기는 것을 보았다 또한 90℃상의 아세톤에서도 같은 현상을 보였다. 또한 이 과정에 상부의 스위치의 기둥 접합 부분에 균열이 일어났으며, 스위치가 PR과 같이 일어나는 형상을 보였다. 그래서 황산과 과산화수소수를 3:1의 비율로 혼용하여 PR의 완전한 제거를 하였다.

마지막으로 도금을 위한 전극으로 사용되었던 크롬의 제거는 기존의 크롬 식각액으로 하였다.



<그림 4-2> 재구성 슬롯 안테나의 제조 공정 순서도

<Fig. 4-2> The fabrication flow chart of reconfigurable slot antenna.



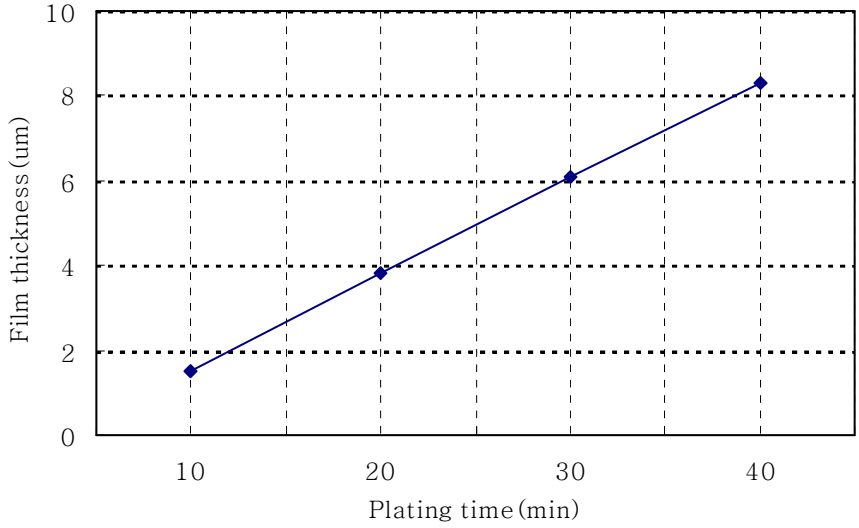
<그림 4-3> 재구성 슬롯 안테나의 공정도

<Fig. 4-3> The fabrication process of reconfigurable slot antenna

제 5 장 결과 및 고찰

5.1 도금된 구리 박막의 특성

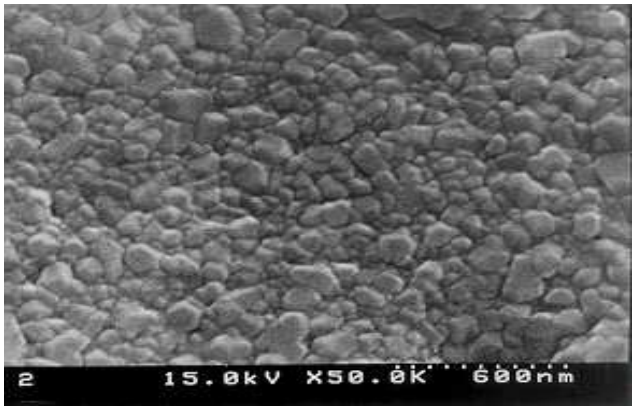
<그림 5-1>는 도금 시간을 10분에서 40분까지 변화 시켜가면서 성장시킨 구리 박막의 두께 변화를 나타낸 것이다. 전류 밀도와 전극간격을 각각 3.5 A/㎠, 2㎝로 전해 도금을 수행하였다. 열 증착 방법으로 성장시킨 2300Å두께의 크롬/금 박막을 기초 도금 배선으로 사용하였고, 이 때 도금 용액의 온도는 25℃를 유지하였다. 성장된 구리 박막의 두께를 측정한 결과 도금 시간이 점차 증가함에 따라 거의 선형적으로 두께가 증가하였다.



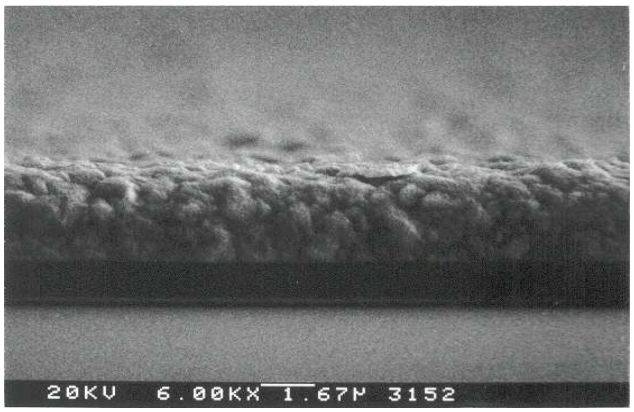
<그림 5-1> 도금 시간에 따른 구리 박막의 두께 변화

<Fig. 5-1> Thickness transition of Cu film according to plating time

구리 박막의 표면 미세 구조의 변화를 보기 위한 전자 주사 현미경 표면 사진을 <그림 4-5>에 나타내었다. 성장된 구리 박막은 매우 균일하고, 치밀한 막이었다.



(a) 구리 박막의 표면 사진



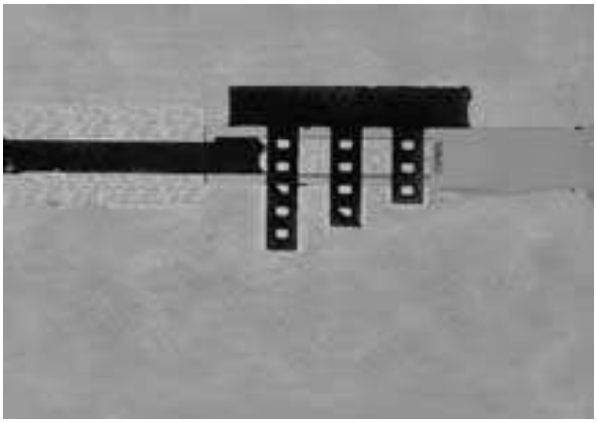
(b) 구리 박막의 단면 사진

<그림 5-2> 구리 박막의 SEM 사진

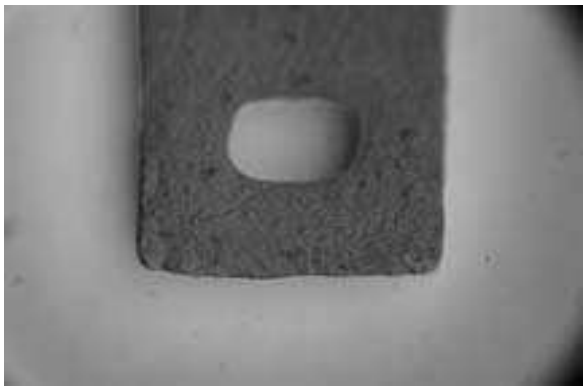
<Fig. 5-2> SEM image of the Cu thin film

5.2 안테나 및 스위치 특성

제작된 안테나는 560㎛의 석영기판위에 크롬/금으로 구성된 2,300Å 도체로 제작되었으며, 스위치와 안테나는 6㎛의 공극을 두었다. 여기서 희생층으로 사용된 PR은 완전히 제거되었으며, 스위치는 완전히 떠 있는 구조를 이루고 있음을 알 수 있다. <그림 5-4>는 안테나에 제작된 스위치를 보여준다.



(a) 스위치 전체 사진



(b) 스위치 확대 사진

<그림 5-3> 스위치의 광학 사진

<Fig. 5-3> Optic image of switch

제작된 안테나의 S 파라미터을 얻기 위해서 HP8510C 네트웍 분석기를 사용하였다. 이때, 측정 주파수 범위는 10㎓ - 20㎓이었다.

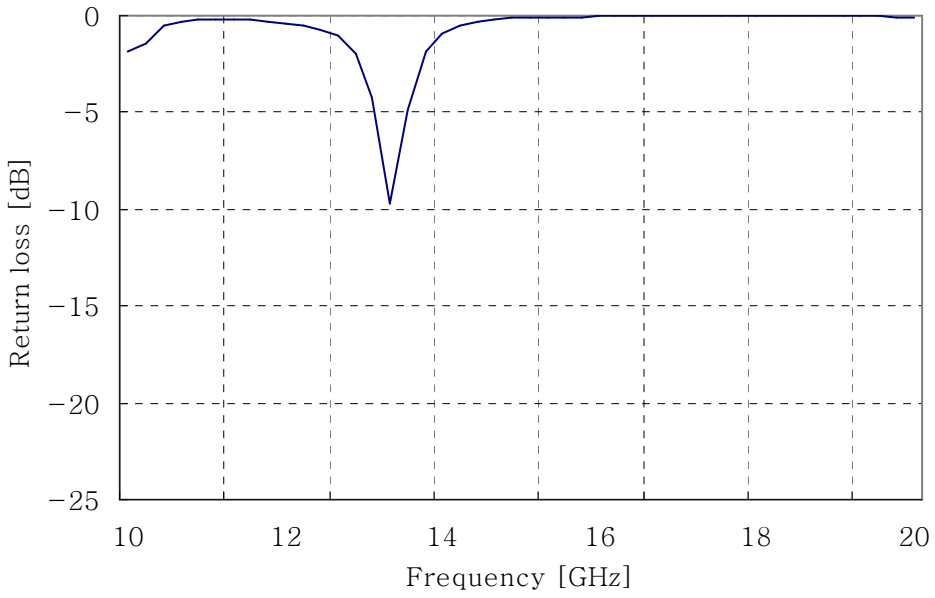
RF MEMS 스위치로 구성된 재구성 슬롯 안테나의 구조는 급전점을 변화시키지 않고, 전기적으로 인가되는 MEMS 스위치에 의해 공진주파수가 변할 수 있는 슬롯 안테나로 설계되었다. 이 슬롯 안테나는 CPW에 의해 급전된다. 안테나 전체의 크기는 10㎜×10㎜이며, 슬롯의 크기는 길이가 500㎛, 폭이 200㎛이다. 그리고 안테나의 급전은 중심 선폭을 160㎛, 접지면과의 간격은 30㎛인 50Ω의 CPW 전송선을 사용하였다. 그리고 안테나와 50Ω CPW 전송선사이에 임피던스 정합을 위해 길이 1/4λ인 임피던스 79Ω의 전송선을 연결하였다.

길이가 다른 세 쌍의 RF MEMS 스위치가 외부에서 인가된 DC 전압에 의해 구동 된다. 인가되는 DC 전압이 낮은 전압에서 순차적으로 증가하면, 스위치 구동전압이 낮은 스위치부터 순차적으로 동작 상태가 된다. 그러므로 슬롯의 길이는 스위치의 동작 상태에 따라 변하게 되어, 슬롯 안테나의 공진 주파수를 변화시킨다.

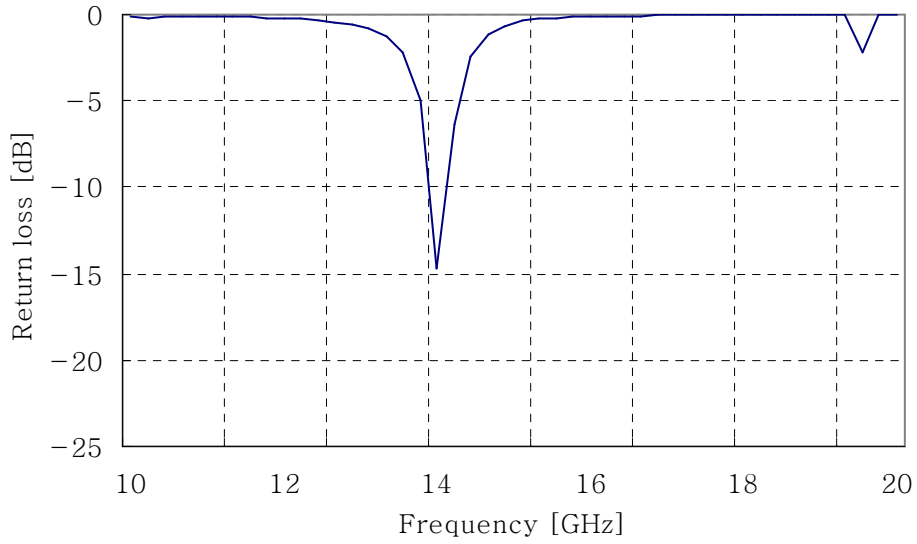
슬롯 안테나의 공진주파수가 전기적으로 구동하는 RF MEMS 스위치에 의하여 동조 되는 것을 <그림 5-4>과 <그림 5-5>에서 보여주고 있다.

세 쌍의 스위치가 순차적으로 인가되는 DC 전압에 의해 차례로 구동함으로써, 안테나의 슬롯의 길이가 점차적으로 짧아진다. 따라서 슬롯 길이에 의해 결정되는 안테나의 공진 주파수가 변하게 된다. 안테나의 반사손실이 대체로 -10 dB 이하로 나타남을 알 수 있다.

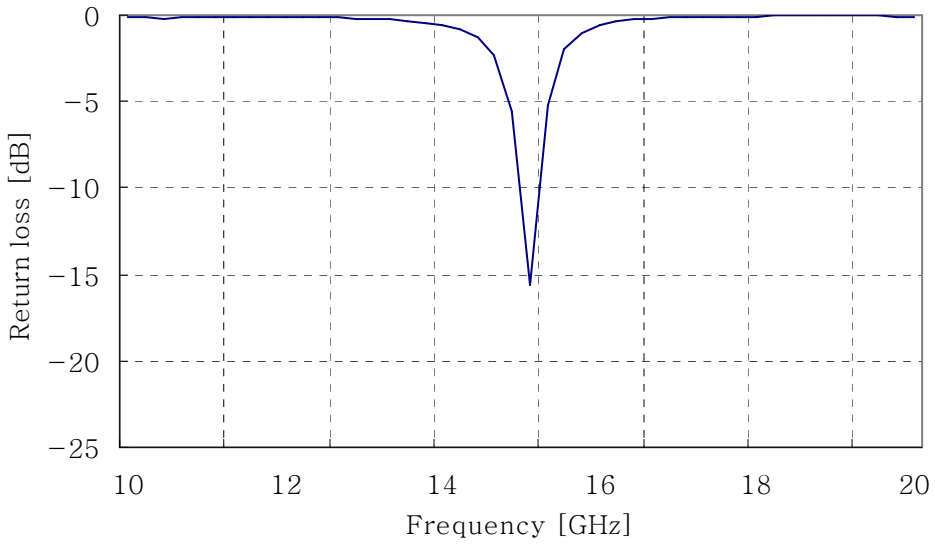
<표 5-1> 는 각 스위치의 on/off 상태에서 슬롯의 길이 변화와 공진주파수를 정리한 것이다. 전기적으로 구동되는 세 쌍의 RF MEMS 스위치를 조정함으로써 안테나의 슬롯 길이를 변화시켜, 안테나의 공진 주파수를 효과적으로 동조 할 수 있음을 알 수 있다.



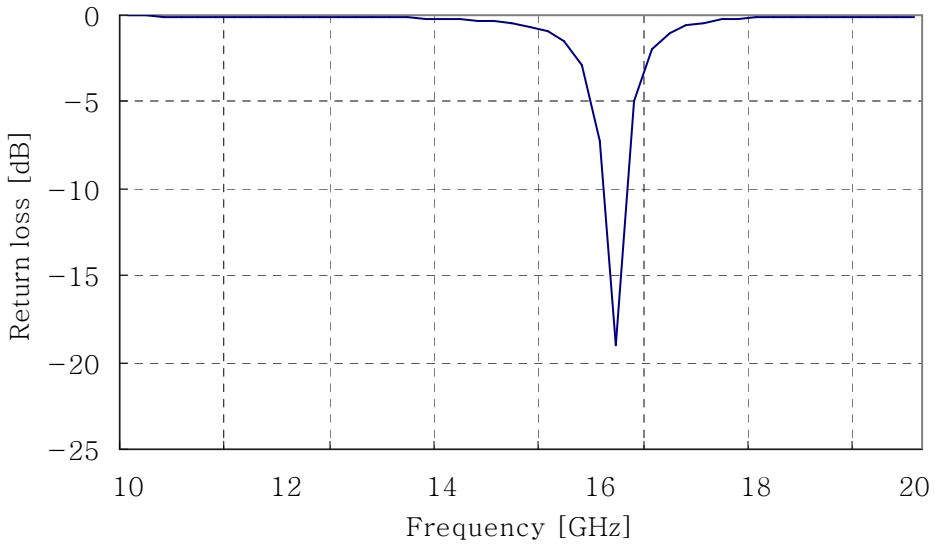
(a) Switch all off



(b) SW1 on



(c) SW1 & SW2 on



(d) Switch all on

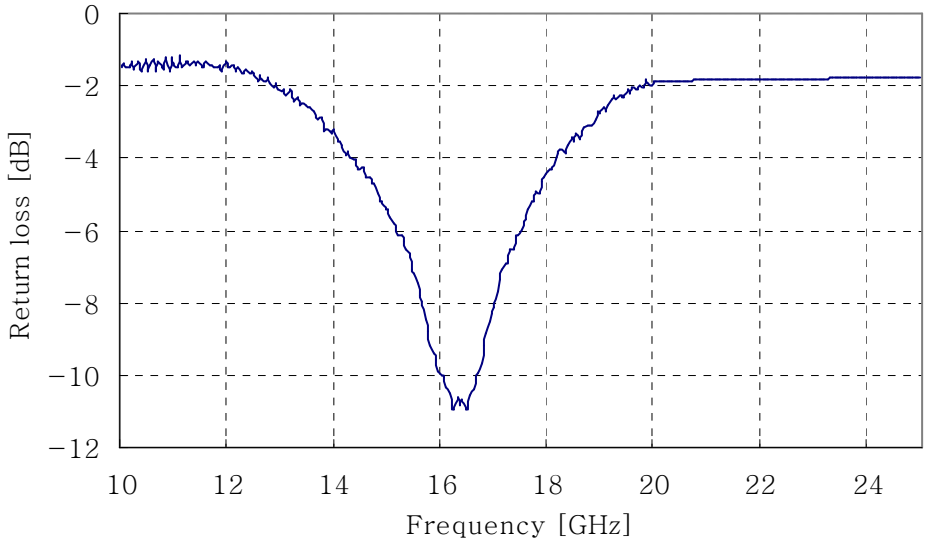
<그림 5-4> 슬롯 안테나의 반사손실 시뮬레이션 결과

<Fig. 5-4> Simulated return loss of slot antenna

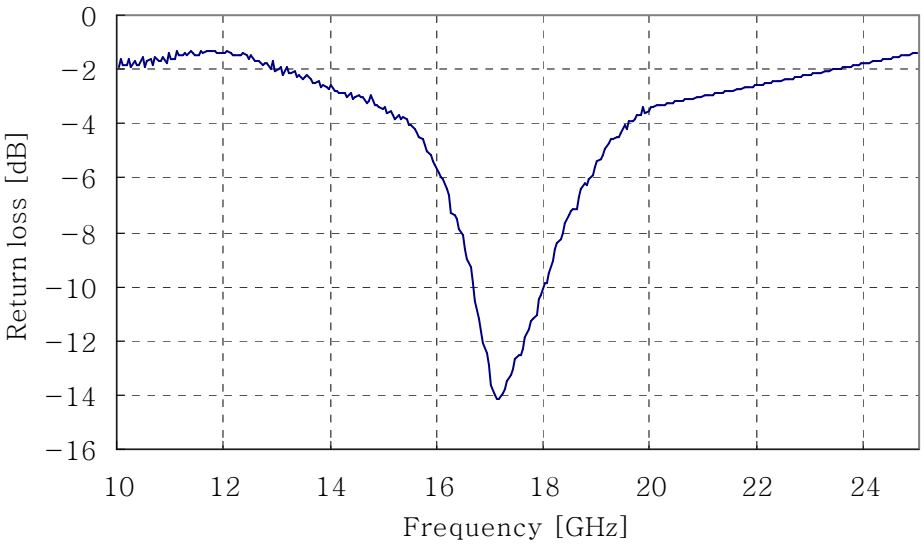
<표 5-1> 스위치의 동작 상태에 따른 슬롯 안테나 특성

<Table 5-1> Slot antenna characteristic to on-state of switch

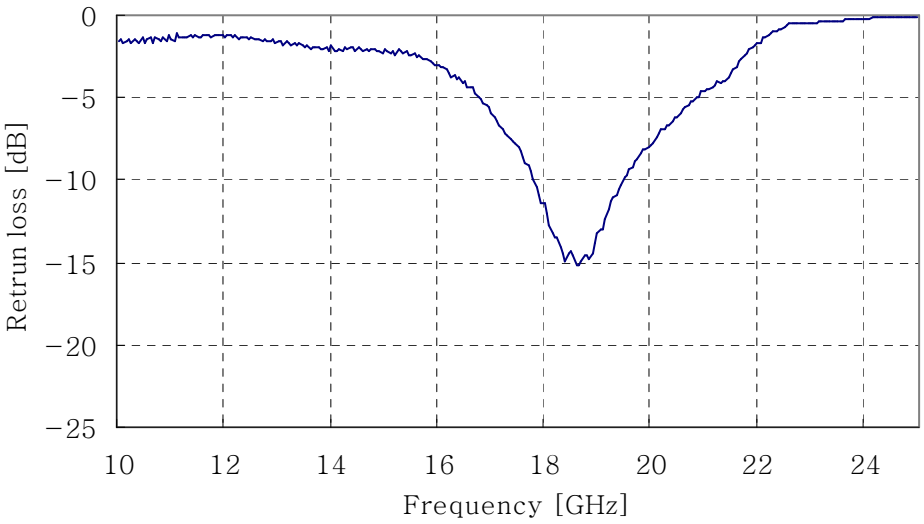
구동전압[V]	0	8	13	20
스위치 상태	all off	SW1	SW1 & SW2 on	all on
슬롯 길이[㎜]	5.0	4.4	4.0	3.6
공진 주파수 [㎓]	13.2	14	15.1	16.3



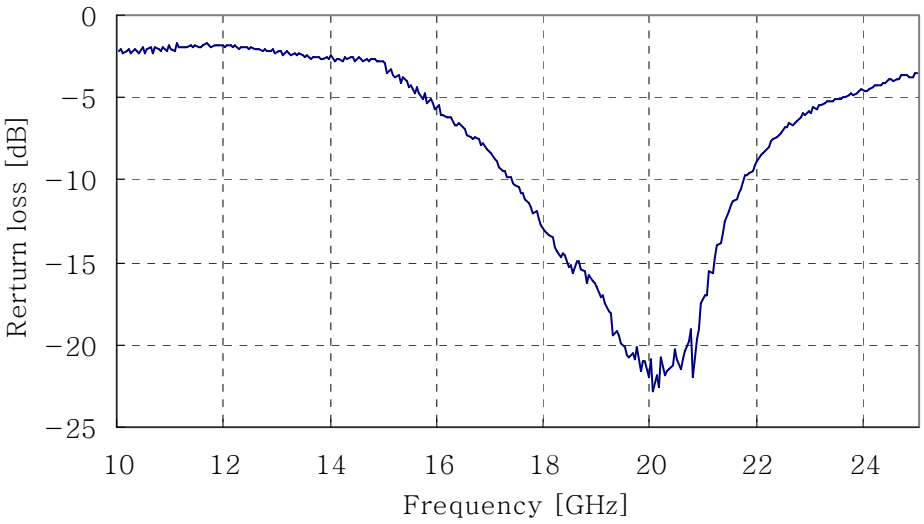
(a) Switch all off



(b) SW1 on



(c) SW1 & SW2 on



(d) Switch all on

<그림 5-5> 슬롯 안테나의 반사손실 측정결과

<Fig. 5-5> Measured return loss of slot antenna

시뮬레이션 결과와 실제측정값과의 주파수가 이동한 것을 볼 수 있다. 이는 제작한 마스크가 오차 범위가 큰 감광(emulsion)마스크를 사용하였으며, 또한 제작과정에 사용된 마스크 정렬기(aligner)의 오차 범위로 인하여 전체적인 스위치의 위치가 변화였으며, 또한 슬롯의 안쪽에 있는 하부 전극판의 크기 및 위치가 당초 설계한 수치와 의 오차로 인한 것으로 보인다. 이런 문제는 더욱 정밀한 마스크와 마스크 정렬시 오차가 작은 장비를 사용함으로 해결 할 수 있을 것이다.

제 6 장 결 론

본 논문에서는 양극 반응을 사용한 도금 기술과 MEMS 기술을 이용하여 평면 재구성 슬롯 안테나를 설계 및 제작하였다. 제작된 안테나는 순차적으로 인가되는 전압에 따라 RF MEMS 스위치가 동작하며, 이때 슬롯의 길이 변화로 안테나의 동작주파수가 변화된다. 설계 및 제작된 안테나 전체 크기는 10㎜× 10㎜이며, 슬롯의 크기는 길이가 5.2㎜, 폭이 200㎛이었다.

스위치 제작에 사용된 기판은 기판 자체의 손실이 적은 석영 기판을 이용하여, 전해 도금을 통한 스위치의 공극을 제작하였다.

스위치의 기계적 및 전기적인 특성을 알아 보기위해서 ANSYS 시뮬레이션 툴을 이용하여 특성을 추출하여 설계 하였다. 슬롯 안테나에 사용된 스위치의 길이는 각각 240㎛, 320㎛, 400㎛ 이며 공극의 높이는 6㎛로 하였다. 시뮬레이션한 MEMS 스위치의 구동전압은 각각 20V, 13V, 8V 이었다. 이렇게 인가된 전압에 의해 스위치가 조정됨으로써 안테나의 슬롯 길이가 변화하여 공진 주파수가 동조 된다. 이때 시뮬레이션의 공진 주파수는 13㎓ - 16.5㎓ 범위에서 네 개의 다른 공진 주파수를 얻을 수 있었고, 측정값의 경우 16㎓ - 20㎓ 범위에서 네 개의 다른 공진 주파수를 얻을 수 있었다. 시뮬레이션 결과와 실제 제작한 안테나와의 공진 주파수가 차이는 것을 알 수 있었다. 이는 제작상 스위치가 위치하는 부분이 실제로 설계한 스위치 위치보다 중앙으로 이동하여 생긴 것으로 보인다. 이는 각 마스크를 정렬시키는 과정에서 장비의 정확도 문제로 인한 오차 때문일 것이다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 더욱 정밀한 마스크를 사용하여야하며, 또한 오차가 낮은 마스크 정렬 장비를 사용함으로써 해결될 것이다.

참고문헌

[1] D. L. Sengupta, "Resonant frequency of a tunable rectangular patch antenna," *Electronics Letters*, vol. 20, pp. 614-615, 1984.

[2] N. Fayyaz, S. Safavi-Naeini, E. Shin, N. Hodjat, "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, 1998.

[3] S. H. Al-Charchafchi, M. Frances, "Electronically tunable microstrip patch antennas," *IEEE Antennas and Propagation Symposium Digest*, vol. 1, pp. 304-307, 1998.

[4] K. A. Jose, V. K. Varadan, V. V. Varadan, "Experimental investigations on electronically tunable microstrip antennas," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 20, pp. 166-169, 1999.

[5] Z. J. Yao, S. Chen, S. Eshelman, D. Denniston, C. Goldsmith, "Micromachined low-loss microwave switches," *IEEE Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 8, no .2, pp. 129-134, June 1999.

[6] J. B. Muldavin, G. M. Rebeiz, "High-isolation CPW MEMS shunt switches: Modeling and Design," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-48, no. 6, pp. 1045-1056, June 2000.

[7] N. S. Barker, G. M. Rebeiz, "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, Nov. 1998.

[8] C. L. Goldsmith, A. Malczewski, Z. J. Yao, C. Shea, J. Ehmke, D. H. Hinzel, "RF MEMS variable capacitors for tunable filters," *Int. J. of RF and Microwave Comp. Aided Eng.*, vol. 9, no. 4, pp.

362-374, July 1999.

[9] K.Peterson, "Micromechanical Memrane Switches on Silicon," *IBM J. Res. Develop.*, vol. 23, pp. 376-385, 1979.

[10] B. A. Cetiner, L. Jofre, C. H. Chang, J. Y. Qian, M. Bachman, G. P. Li, F. De Flaviis, "Integrated MEM antenna system for wireless communications," *IEEE MTT-S Digest*, pp. 1333-1336, 2002.

[11] L. Jofre, B. A. Cetiner, F. De Flaviis, "Miniature multi-element antenna for wireless communications," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 50, no. 5, pp. 658-669, May 2002.

[12] D. Peroulis, K. Sarabandi, L. P. B. Katehi, "A Planar VHF Reconfigurable Slot Antenna," *Proceedings of the IEEE AP-S/URSI International Symposium*, vol. 1, pp. 154-157, May 2001.

[13] B. A. Cetiner, H. P. Chang, J. Y. Qian, M. Bachman, G. P. Li, F. De Flaviis, "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, Jan. 2003.

[13] K.Peterson, "Micromechanical Memrane Switches on Silicon", *IBM J. Res. Develop.*, vol. 23, pp. 376-385, 1979.

[14] J.B. Mohler, *Electroplating and related processes*, New York : Chemical publishing Co. INC., ch. 16, 1969.

[15] M. K. Lee, H. D. Wang and J. J. Wang, "A Cu seed layer for Cu Deposition on silicon", *Elsevier Science, Solid-state*, vo 1. 41, No. 5, pp. 659-702, 1997.

[16] 이성원, *알기쉬운 전기도금*, 세화출판사, 초3, 1991.

[17] 나 정웅, *전자기 이론* , 방한 출판사, pp. 237-254, 1987.

감사의 글

본 논문이 완성되기까지 많은 도움을 주신 박동국 교수님께 감사를 드리며, 심사를 맡아 주신 김기문 교수님, 양규식 교수님께 감사를 드립니다. 그리고 지금 미국에 있는 심준환 교수님께 감사를 드립니다.

또한 어려운 문제가 생겨 힘들어할 때 문제점에 대한 해결책을 제시해 주시든 김연민 박사님께 감사를 드리며, 바쁜 석사 생활에도 제가 찾아가 실험을 부탁할 때 기꺼이 도와주시든 박성근, 권재우, 권경욱, 그 외 경북대 MEMS lab 여러분들에게 감사를 드립니다.

그리고 실험을 도와주신 반도체 물리학과 공정실의 김향, 김경화, 김주영 그 외의 실험실 여러분께 감사를 드립니다.

같은 석사 동기이며, 어려운 일이나 힘든 일이 있을 때 같이 힘들어 해주면 고민을 들어주며 저에게 다시 힘을 준 창규형, 영탁이형, 그리고 인용이, 재교, 진산이, 그 외의 여러분들께 감사를 드립니다.

마지막으로 말없이 힘내라는 누나, 아버지가 못하면 자기가 뒷바라지해 준다는 형, 그리고 도련님 힘내시라고 하시는 형수님 모두 감사드리며, 부족한 막내아들을 여기까지 있게 해 주신 부모님께 이 논문을 받치며, 아버님 어머님 사랑합니다.