

碩士學位論文

CPW 급전 하이브리드 슬롯 안테나
설계 및 제작



濟州大學校 大學院

通信工學科

高 水 美

2003 年 6 月

CPW 급전 하이브리드 슬롯 안테나 설계 및 제작

指導教授 金 興 洙

高 水 美

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



姜奉秀의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 梁 斗 榮 印

委 員 康 鎭 植 印

委 員 金 興 洙 印

濟州大學校 大學院

2003年 6 月

Design and Fabrication of the Hybrid Slot Antenna Fed by CPW

Soo-Mi Ko

(Supervised by professor Heung-Soo Kim)



A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of
Master of Science

2003. 6.

This thesis has been examined and approved.

Thesis director, Doo-Yeong Yang, Prof. of Telecom. Eng.

(Name and signature)

Date

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATION ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

Abstract	1
I. 서론	2
II. 마이크로스트립 슬롯 안테나	5
1. 마이크로스트립 슬롯 안테나	5
2. 급전방법	8
1) 마이크로스트립 라인 급전	8
2) 동일 평면 도파관(CPW) 급전	9
III. 마이크로스트립 슬롯 안테나 설계	13
1. T-형 마이크로스트립 라인 급전 슬롯 안테나 설계	13
2. CPW 급전 하이브리드 슬롯 안테나 설계	14
1) 유도성 급전 슬롯 안테나	15
2) 용량성 급전 슬롯 안테나	18
3) 하이브리드 슬롯 안테나	22
IV. 제작 및 측정	35
1. 유도성 급전 슬롯 안테나 제작	35
2. 하이브리드 슬롯 안테나	36
V. 결 론	39
참고문헌	40

Abstract

In this thesis, a hybrid slot antenna is designed and fabricated at ISM band of 5.8 GHz. Generally, microstrip antennas have a narrow bandwidth. In order to get the wider bandwidth of a microstrip antenna, the CPW-fed hybrid slot antenna is proposed. The slot antenna is simulated by using Ensemble 6.0. The inductively-fed slot antenna and the capacitively-fed slot antenna are designed on the resonance frequency of 5.8 GHz, respectively. And then these two antennas are combined to be the hybrid slot antenna. Design parameters of the proposed hybrid slot antenna are the width of the slots and the length of the CPW of the capacitively-fed slot. These parameters are adjusted respectively till a good match is obtained over the desired bandwidth. Also, to improve the characteristics and the bandwidth of the proposed hybrid slot, antenna another parameters which are the length of the inductively-fed slot antenna and the width of the center strip in capacitively-fed slot antenna, are changed.

The hybrid slot antenna is fabricated on an FR-4 substrate being the relative permittivity 4.3 and the substrate thickness 1.6mm. The characteristics of fabricated antennas are measured by a vector network analyzer. The measured results of this antenna are compared with its simulated results. The resonant frequency of fabricated hybrid slot antenna is 5.8 GHz, the bandwidth for VSWR ≤ 1.5 is 21 % and the gain is 5 dBi.

I. 서론

최근에는 노트북 컴퓨터, PDA(personal digital assistant)등과 같은 휴대용 단말기의 보급이 확산됨에 따라 이들을 장소에 상관없이 컴퓨터 망에 연결시키는 수단으로 무선 랜이 구축되고 있다. 무선 랜은 무선 채널을 통해 유선 랜의 설치가 어려운 환경까지 랜을 확장시킬 수 있다. 이러한 무선 랜의 장점인 이동성, 휴대성 및 간편성 등으로 인해 무선 랜의 응용분야가 광범위해지고 있다. 아울러 무선 멀티미디어 서비스 요구의 증가와 무선 전송 기술의 발달로 인하여 기존의 1~2 Mbps 전송속도를 갖는 2.4 GHz 대역의 무선 랜의 규격을 6~24 Mbps의 전송속도를 갖는 5 GHz 대역 무선 랜으로 향상시켜 사용할 예정이다.(고영호, 2000) 또한 휴대용 단말기와 액세스 포인트(AP)간 통신을 위한 무선 랜 카드와 더불어 저렴한 비용과 대량생산, 소형 경량화, 그리고 초고주파 집적회로에 함께 구현할 수 있는 안테나 개발이 요구된다. 현재 사용되고 있는 무선 랜 카드용 안테나는 마이크로 스트립 안테나가 주로 사용되고 있다.

마이크로스트립 안테나는 제작이 용이하고 대량 생산이 가능하며, 견고할 뿐만 아니라 가격도 저렴하고 부피가 작고 가볍다는 장점이 있다.(Balanis, 1997) 반면 3~4%의 좁은 대역폭과 방사 효율이 낮다는 단점이 있다. 이러한 마이크로스트립 안테나의 단점인 협대역 특성을 개선하기 위해서 많은 연구가 진행되고 있으며 여러 가지 방법들이 제안되고 있다. 협대역 특성을 개선하기 위한 방법으로는 유전체가 가지고 있는 물리적 성질을 이용하는 방법(Huynh 등 1995), 기생소자를 적층하는 방법(Gupta 등 1985), 기생소자를 패치 주위에 배열하는 방법(Tarhonski 등) 등 다양한 연구 결과들이 보고 되었다. 유전체가 가지고 있는 물리적 성질을 이용하는 방법은 유전체의 유전율이 낮고 두꺼운 기판을 사용하면 대역폭은 향상되지만 표면파와 고차모드의 발생으로 사용이 제한된다. 또한 기생소자를 적층하는 방법은 2개 이상의 패치를 수직으로 적층시킴으로써 이중 공진 효과에 의해 20% 이상의 광대역 특성을 얻을 수 있지만 안테나의 부피가 커지고 제작 면에서

여러 가지 문제를 갖고 있다. 기생소자를 패치의 주위에 배열시키는 방법은 각 소자 간 결합 특성에 의해 비 대역폭이 20%까지 확장되지만 안테나의 크기가 증가한다. 이러한 단점으로 인하여 안테나 구조 자체를 변화시켜 대역폭을 넓히는 방법들이 제안되었다. 이러한 방법 중 하나로써 단일 방사 소자를 사용하여 비교적 넓은 대역 특성을 갖는 마이크로스트립 슬롯 안테나가 연구되고 있다.(박익모 등, 1999) 마이크로스트립 슬롯 안테나는 구조가 간단하며, 패치 안테나에 비하여 대역폭이 넓고 낮은 교차 편파를 갖는다. 마이크로스트립 구형 슬롯 안테나의 경우, 급전 구조의 변형을 통해 넓은 대역에서 임피던스 정합이 이루어지는 안테나의 광대역화 연구가 많이 행해졌다.(장용웅 등, 1998), (장용웅 등, 2000), (장용웅, 2001), (박익모 등, 1999) 그리고 마이크로스트립 원형 링 슬롯 안테나의 경우도 급전 방식을 변형시켜 광대역화 특성을 얻어 단일 모드 뿐 아니라 고차 모드에서도 좋은 정합 특성을 얻었다.(박익모 등, 1999), (서영훈 등, 2000) 최근에는 슬롯 안테나에 동일 평면 도파관(coplanar waveguide : CPW)으로 급전시킨 안테나들이 많이 연구되어지고 있다. CPW는 신호선과 접지 면이 한 면에 있기 때문에 표면에 실장되는 소자들이 전부 한 면에 마운팅 될 수 있고, 공정 시 후면 공정이 필요치 않게 됨에 따라 공정을 단순화 할 수 있다. 또한 신호선과 접지 사이에 필드가 수직으로 형성되므로 마이크로스트립과는 달리 완전한 TEM 모드를 구현할 수 있어서 고주파가 될 수록 마이크로스트립 보다 CPW의 전송 특성이 좋아진다. CPW는 기존 마이크로스트립 선로에 비하여 초고주파 집적회로(MMIC)화가 용이하다.(Bhobe 등 2000), (Gupta 등 1979), (Giauffrent 등 1997), (Garcia 등 1999), (Simons 2001), (Wen 1999)

본 논문에서는 5.8 GHz ISM(industrial, scientific, medical) 대역의 CPW 급전 하이브리드 슬롯 안테나를 설계하고 제작한다. 하이브리드 슬롯 안테나를 설계하기 위해 우선 원하는 중심 주파수에서 공진하도록 유도성 급전 슬롯 안테나와 용량성 급전 슬롯 안테나를 설계한다. 유도성 급전 슬롯 안테나의 슬롯 길이는 한 파장이며, 용량성 급전 슬롯 안테나의 슬롯 길이는 반파장이다. 두 슬롯 안테나는 슬롯 폭을 조절하여 급전 선로와 정합시킨다. 다음으로 두개의 슬롯 안테나를 결합시킨 하이브리드 슬롯 안테나를 제안한다. 제안한 하이브리드 슬롯 안테나를 정합시키기 위하여 시뮬레이션을 통해 여러 파라미터를 변화시키면서 안테나의 특성을 얻

고, 이 특성으로부터 정합에 관련된 주요 파라미터를 결정한다. 또한 대역폭을 향상시키기 위해서 유도성 급전 슬롯과 용량성 급전 슬롯의 길이를 조절하여 최대 대역폭을 갖도록 한다. T형 마이크로스트립 라인 급전 구형 슬롯 안테나를 설계하여 특성을 구하고, 제안한 하이브리드 슬롯 안테나의 특성과 비교, 분석한다. 안테나의 특성을 얻기 위하여 모멘트 법(Method of moments)을 적용한 Ansoft사의 Ensemble 6.0을 이용한다. 마지막으로 유도성 급전 슬롯 안테나 또는 용량성 급전 안테나와 하이브리드 슬롯 안테나를 실제 제작하여 시뮬레이션 툴을 이용하여 해석한 결과와 제작하여 측정된 결과를 비교한다.

본 논문의 구성은 제 II장에서는 구형 마이크로스트립 슬롯 안테나의 기본적인 특성과 슬롯 안테나의 급전 방법에 대하여 기술한다. 또한 마이크로스트립 라인 급전을 변형 시킨 형태의 T-모양의 마이크로스트립 라인 급전방법을 기술한다. 제 III장에서는 T-형 마이크로스트립 라인을 사용한 구형 슬롯 안테나와 CPW로 급전시킨 하이브리드 슬롯 안테나를 설계한다. 또한 전자계 해석 시뮬레이션 툴인 Ensemble 6.0을 이용하여 최적의 크기를 얻는다. 제 IV장에서는 유도성 급전 슬롯 안테나 또는 용량성 급전 슬롯 안테나와 CPW 급전 하이브리드 슬롯 안테나들을 제작 측정하여 비교, 분석한다. 마지막으로 제 V장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 마이크로스트립 슬롯 안테나

1. 마이크로스트립 슬롯 안테나

마이크로스트립 안테나는 1953년 Deschamps에 의해 처음으로 제안되었으며, 1970년대 초반 Howell과 Munson에 의해 발전되어졌고, 이후 많은 연구 활동이 진행되고 있다. 마이크로스트립 안테나의 장점으로는 가격이 저렴하고, 가볍고, 단면적이 작고, 선형이나 평면 배열로 제작하기가 쉬울 뿐만 아니라 초고주파 회로와 집적화 하기가 쉽다. 그러나 마이크로스트립 안테나는 대역폭이 좁다는 문제점이 있다. 이러한 마이크로스트립 안테나의 문제점을 해결하기 위해서 안테나의 구조를 변형시킨 마이크로스트립 슬롯 안테나를 사용하여 보다 넓은 대역폭을 갖게 한다. (박익모 등 1999)

마이크로스트립 급전 슬롯 안테나의 구조는 Fig. 1과 같다. 유전체를 사이에 두고, 한 면에는 마이크로스트립 급전 선로가 놓여 있고, 다른 면에는 접지판에 슬롯을 만든 구조이다. 이 구조에서는 급전선로를 통해 전파되는 에너지가 슬롯에 여기됨으로써 방사가 이루어진다. (Bhal, 1980), (Kahrizi 등 1993), (Yoshimura 1972)

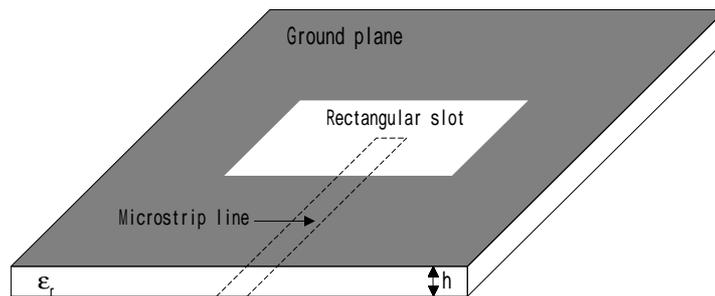


Fig. 1. Geometry of a microstrip rectangular slot antenna

슬롯 안테나는 크게 두 가지 형태로 구분이 되어진다. 하나는 슬롯 폭이 슬롯 길이에 비해서 작은 크기를 갖는 좁은 슬롯과 다른 하나는 슬롯의 폭이 슬롯 길이와 비슷한 크기를 갖는 넓은 슬롯이다.

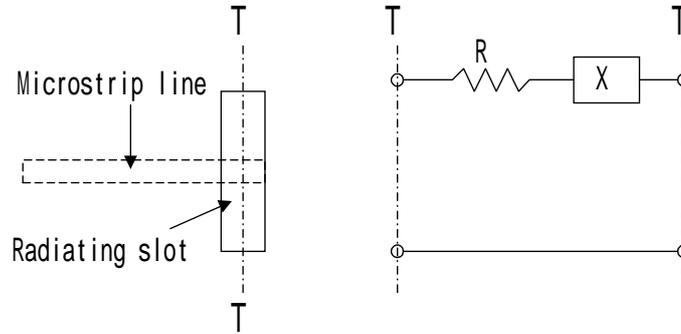


Fig. 2. Equivalent circuit for a narrow-slot antenna.

슬롯 폭이 좁은 슬롯 안테나의 등가 회로를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 입력 임피던스는 방사 저항 R 과 허수 성분 X 가 직렬 연결되어 있다. 방사 슬롯이 설계 주파수에서 공진되었다면, 입력 임피던스의 허수 성분은 '0'이 된다.

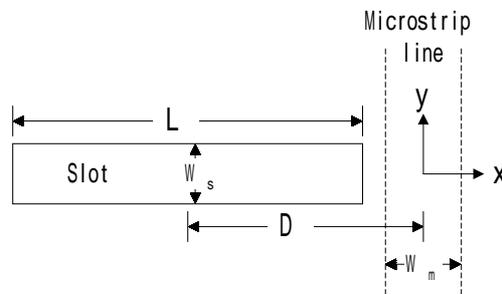


Fig. 3. Parameters of the slot antenna

Fig. 3은 임의의 옵션 위치에서 슬롯에 급전 되었을 때 안테나의 파라미터를 나타내는 것으로써, 슬롯 안테나의 방사 저항 R 은 다음과 같다. (Bahl.등 1980)

$$R = \frac{4.5\pi^2 \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} g(p) \frac{e^{-jpx}}{e^{ph}} dp \cos \frac{\pi}{L} (x+D) dx \right\}^2}{\left(\frac{L}{\lambda_0}\right)^2 \left[1 - 0.374 \left(\frac{L}{\lambda_0}\right)^2 + 0.13 \left(\frac{L}{\lambda_0}\right)^4 \right]} \quad (1)$$

$$g(p) = \frac{\sin(pW_m/2)}{pW_m/2} - \frac{1}{2} \frac{\sin^2(pW_m/4)}{(pW_m/4)^2} \quad (2)$$

여기서 L 은 슬롯의 길이, D 는 슬롯 폭 $W_s \ll \lambda_0$ 인 경우 슬롯의 중심과 폭이 W_m 인 도체 스트립의 중심까지의 거리, p 는 푸리에 변화 변수이다.

슬롯 안테나의 방사 필드는 electric vector potential method를 사용해서 계산할 수 있다. 안테나의 far-field 성분은 다음과 같다.

$$E_\theta = \frac{-jk_0}{4\pi} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \int_{-W_s/2}^{W_s/2} \int_{-L/2}^{L/2} [-M_x \sin\phi + M_y \cos\phi] e^{jk_0(x \sin\theta \cos\phi + y \sin\theta \sin\phi)} dx dy \quad (3)$$

$$E_\phi = \frac{jk_0}{4\pi} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \cos\theta \int_{-W_s/2}^{W_s/2} \int_{-L/2}^{L/2} [M_x \cos\phi + M_y \sin\phi] e^{jk_0(x \sin\theta \cos\phi + y \sin\theta \sin\phi)} dx dy \quad (4)$$

여기서 $\bar{M}(x, y) = M_x \hat{x} + M_y \hat{y}$ 는 표면 자류이고, 전체 $\bar{E}(x, y)$ 의 향으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{M}(x, y) = \bar{E}(x, y) \times \hat{n} = E_y \hat{x} - E_x \hat{y} \quad (5)$$

슬롯 폭이 자유 공간 파장에 비해 매우 작을 경우($W_s \ll \lambda_0$), 1차 근사화에 의해 슬롯에 여기되는 전계는 일정하다고 가정한다. 또한 $E_x = 0$ 이고, $E_y = E_0$ 이면, 식 (3)과 식 (4)는 다음과 같이 정리된다.

$$E_\theta = \frac{jk_0 E_0 L W_s}{4\pi} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \frac{\sin X}{X} \sin\phi \quad (6)$$

$$E_\phi = \frac{jk_0 E_0 L W_s}{4\pi} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \frac{\sin X}{X} \cos\phi \cos\theta \quad (7)$$

여기서 $X = \frac{k_0 L}{2} \sin\theta \cos\phi$ 이다.

E_θ 와 E_ϕ 로부터 얻어지는 E-평면($\phi = \pi/2$)과 H-평면($\phi = 0$)의 방사 패턴은 다음 식을 사용하여 구할 수 있다.

$$R_E(\theta) = E_\theta^2 + E_\phi^2 = \left(\frac{k_0 E_0 L W_s}{4\pi r} \right)^2 \quad (8)$$

$$R_H(\theta) = \frac{k_0 E_0 L W_s}{4\pi r} \frac{\sin\left(\frac{k_0 L}{2} \sin\theta\right)}{\left(\frac{k_0 L}{2} \sin\theta\right)} \cos\theta \quad (9)$$

2. 급전방법

마이크로스트립 슬롯 안테나의 급전에 사용되는 구조는 마이크로스트립 선로 급전과 CPW 급전 방식이 있다.

1) 마이크로스트립 선로 급전

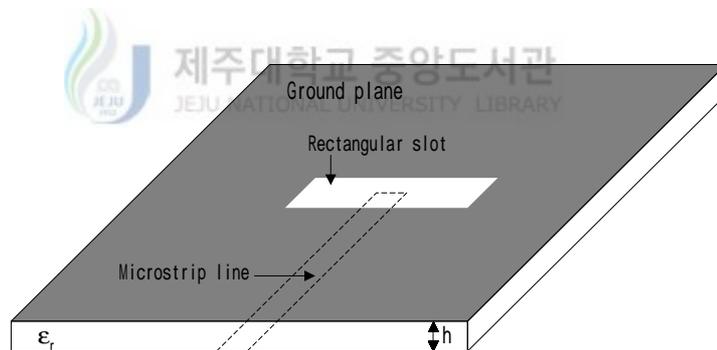


Fig. 4. Microstrip line feed

Fig. 4는 마이크로스트립 급전 선로를 이용하여 슬롯 안테나를 급전시키는 일반적인 방법으로써, 슬롯에 마이크로스트립 선로를 단락시키거나 개방시켜 슬롯을 여기하게 한다. 이때, 마이크로스트립 급전 선로를 슬롯 중심을 가로지르게 하는 방법과 읍셋 시키는 방법이 있다.

슬롯 중심에 급전하는 방법은 슬롯 안테나가 매우 높은 방사저항을 갖기 때문에 정합이 매우 어려워진다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 Yoshimura에 의해서 단락 회로 동조 스테브를 슬롯 중심에서 슬롯의 양 끝단 쪽으로 옮기시키는 방법과 Pozar에 의해서 개방회로 동조 스테브를 슬롯 중심에서 슬롯의 양 끝단 쪽으로 옮기시켜서 급전하는 방법이 제시되었다. 그러나 이러한 마이크로스트립 급전 방법은 비교적 슬롯 폭이 좁은 경우에 한하여 급전점을 슬롯 중심에서 옮기시켜서 정합을 이룰 수 있다. 그러나 슬롯 폭이 커지면 이러한 급전점을 옮기시키는 것으로는 우수한 정합을 이룰 수 없기 때문에 급전단에서 별도의 정합 회로가 필요하다. 또한 많은 연구에도 불구하고 마이크로스트립 슬롯 안테나의 입력 임피던스에 대한 정확한 식은 이론적으로 정립되지 않았다. (장용웅 등, 1998), (박익모 등, 1999), (서영훈 등, 2000)

슬롯 폭이 넓은 경우, 별도의 정합 회로를 사용하는 대신에 마이크로스트립 선로 구조를 변형시킨 T-형 마이크로스트립 선로를 사용한다. T-형 마이크로스트립 선로 급전 슬롯 안테나의 구조는 Fig. 5와 같다. T-형 마이크로스트립 선로 급전 방법은 광대역 특성을 얻을 수 있다. (장용웅 등, 1998), (박익모 등, 1999)

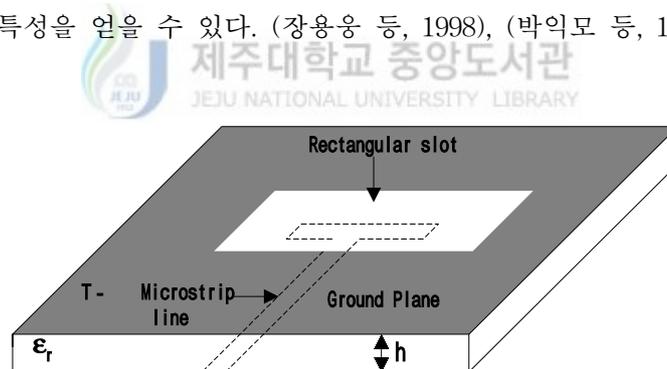


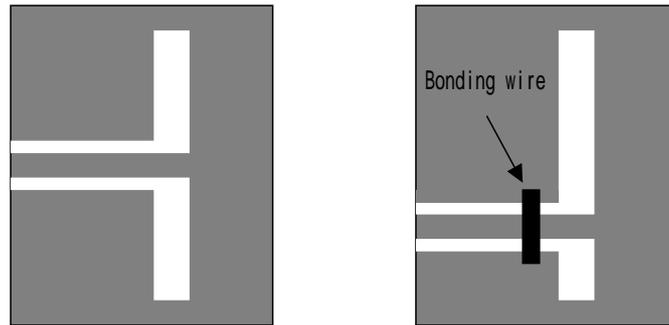
Fig. 5. Geometry of a T-shaped microstrip line

2) 동일 평면 도파관(CPW) 급전

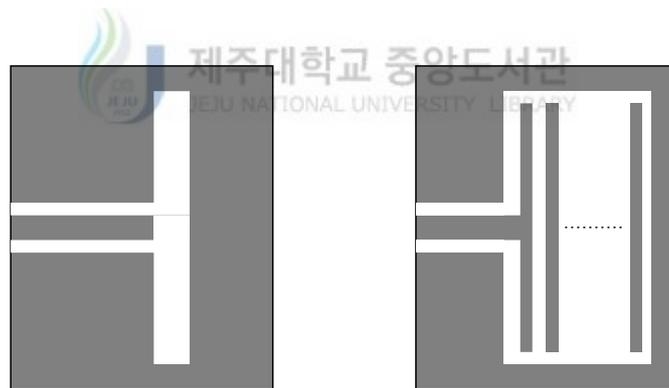
CPW 급전 방법은 특성 임피던스 값을 효율적으로 조절할 수 있을 뿐만 아니라 능동 소자에 집적화 하기가 더 쉽기 때문에 슬롯 안테나는 일반적으로 마이크로스

트립 라인 보다 CPW로 급전한다. (Soliman등, 1999)

CPW 급전 슬롯 안테나의 종류에는 중앙 급전 슬롯 안테나와 한파장 오프셋 급전 슬롯 안테나, 반파장 용량성 급전 슬롯 안테나, 다중 폴디드 슬롯 안테나 등이 있고, 이 안테나들의 구조는 다음과 같다. (Giauffrent, 1997)



(a) One-wavelength center-fed (b) One-wavelength offset-fed



(c) Half-wavelength capacitively-fed (d) Multi-folded

Fig. 6. Existing topologies of CPW-fed slot antennas

CPW 급전 선로의 구조는 Fig. 7과 같이 중앙에 놓인 스트립과 겹에 의해 분리된 두 개의 접지 면으로 구성된 형태이다.

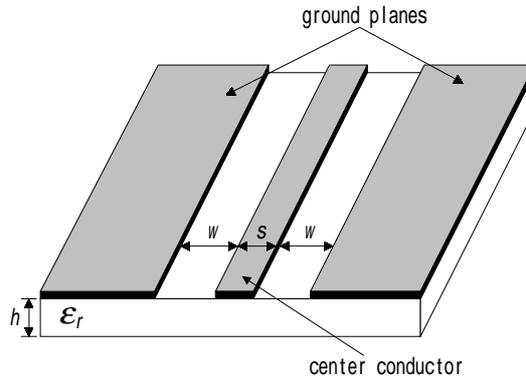


Fig. 7. Geometry of a coplanar waveguide

CPW 급전 선로의 특성 임피던스와 유효 유전율은 중심 스트립과 갭의 폭, 기판의 비유전율과 두께를 이용하여 구한다. CPW의 특성 임피던스는 다음과 같다. (Gupta, 1979)

$$Z_0 = \frac{30\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \frac{K'(k)}{K(k)} \quad (10)$$

$$k = \frac{s}{s + 2w} \quad (10-1)$$

$$K'(k) = K(k') \quad (10-2)$$

$$k' = \sqrt{1 - k^2} \quad (10-3)$$

$$\frac{K(k)}{K'(k)} = \begin{cases} \frac{1}{\pi} \ln 2 \frac{1 + \sqrt{k}}{1 - \sqrt{k}} & \text{for } 0.707 \leq k \leq 1 \\ \frac{\pi}{\ln 2 \frac{1 + \sqrt{k'}}{1 - \sqrt{k'}}} & \text{for } 0 \leq k \leq 0.707 \end{cases} \quad (10-4)$$

이고, s 는 중심 스트립의 폭, w 는 갭의 폭이다. 그리고 유효 유전율은 다음과 같다.

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} \tanh\left\{1.785 \log\left(\frac{h}{w}\right) + 1.75\right\} + \frac{kw}{h} (0.04 - 0.7k + 0.01(1 - 0.1\epsilon_r)(0.25 + k)) \quad (11)$$

여기서 ϵ_r 은 기판의 비유전율, h 는 기판의 두께이다.



Ⅲ. 마이크로스트립 슬롯 안테나 설계

본 논문에서는 T-형 마이크로스트립 라인 급전 슬롯 안테나와, CPW 급전 하이브리드 슬롯 안테나를 설계한다. 기판은 비유전율이 $\epsilon_r = 4.3$ 이고 두께가 $h = 1.6m$ 인 FR-4를 사용하였고, Ansoft사의 Ensemble 6.0을 이용하여 안테나 특성을 시뮬레이션한다.

1. T-형 마이크로스트립 라인 급전 슬롯 안테나 설계

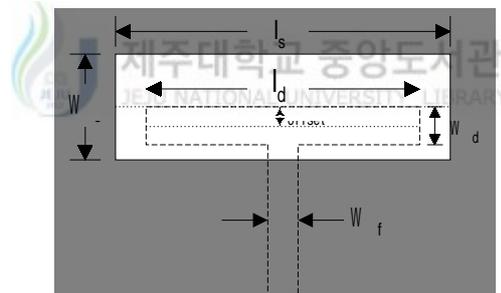


Fig. 8. Parameters of a T-shaped microstrip line

Fig. 8은 T-형 마이크로스트립 라인 급전 슬롯 안테나를 설계하기 위한 안테나의 파라미터를 나타낸 것이다. l_s 와 W_s 는 각각 슬롯의 길이와 폭이며, l_d , W_d 는 각각 T-모양 급전 선로의 길이와 폭이다. W_f 는 급전선의 폭이며, W 는 슬롯의 중심과 T-모양 급전 선로의 중심과의 거리이다.

장용웅, 박익모 등에 의해 연구된 결과를 이용하여 5.8 GHz에서 공진하는 안테나를

설계한다. 이때 안테나의 파라미터는 슬롯의 길이 $l_s = 21mm$, 슬롯 폭 $W_s = 14mm$, T-모양 급전 선로의 길이와 폭은 각각 $l_d = 15.5mm$, $W_d = 4mm$, 읍셋 길이는 $3mm$ 이다.(장용웅 등, 1998), (박익모 등, 1999) 안테나의 반사 손실 특성을 시뮬레이션 한 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

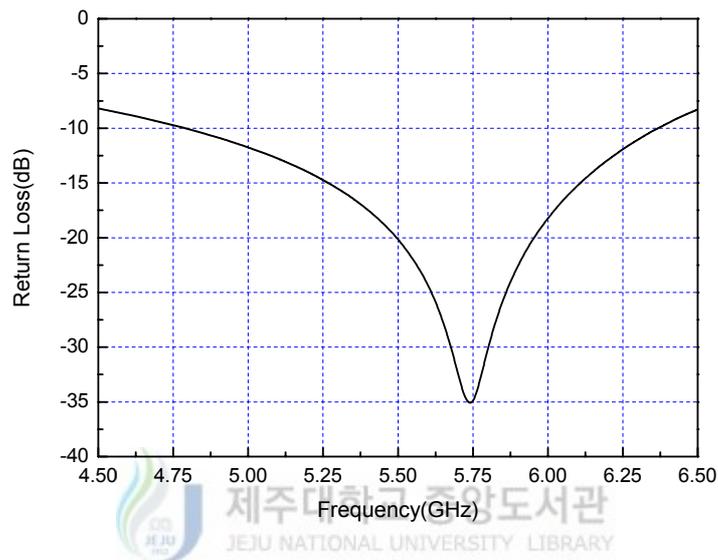


Fig. 9. Return loss of the T-shaped microstrip line-fed slot antenna

안테나는 5.75 GHz에서 공진하며, 반사 손실은 약 -35dB이다. VSWR ≤ 1.5 를 기준으로 하였을 때 5.198~6.15 GHz 주파수 대역에서 동작하며, 약 16%의 비 대역폭을 갖는다. 이득은 전후방 각각 2.3 dBi와 2.1dBi이다.

2. CPW 급전 하이브리드 슬롯 안테나 설계

하이브리드 슬롯 안테나를 설계하기 위해서 한파장 길이를 갖는 유도성 급전 슬

롯 안테나를 설계하고, 이득과 대역폭을 향상시키기 위해서 반파장 길이를 갖는 용량성 급전 슬롯 안테나를 설계하여 유도성 급전 슬롯 안테나의 상단부에 결합시킨다. 하이브리드 슬롯 안테나가 양호한 특성을 갖도록 파라미터를 조절한다.

1) 유도성 급전 슬롯 안테나 설계

Fig. 10은 CPW 급전 슬롯 안테나로써, 유도성 급전 슬롯 안테나이다. 급전 선로가 단락되었을 때, 급전 선로의 길이가 $\lambda_d/4$ 보다 짧을 때를 유도성 급전이라 한다. 여기서 λ_d 는 기판 내 파장이다. 유도성 급전 슬롯 안테나를 원하는 중심 주파수인 5.8 GHz에 맞추어 공진시킨다. 이때 슬롯의 공진 길이 L_s 는 반파장이다. 슬롯 안테나의 임피던스는 슬롯 폭 W_s 에 따라 변화하므로 이것을 변화시켜 CPW와 슬롯을 정합 시킨다. CPW 급전 선로는 식 (10)과 식(11)로부터 50Ω의 파라미터 값을 구한다.

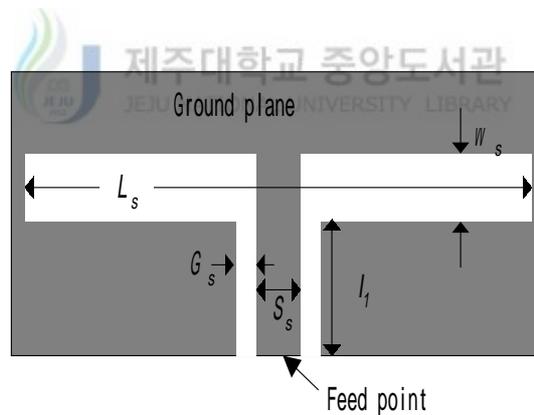
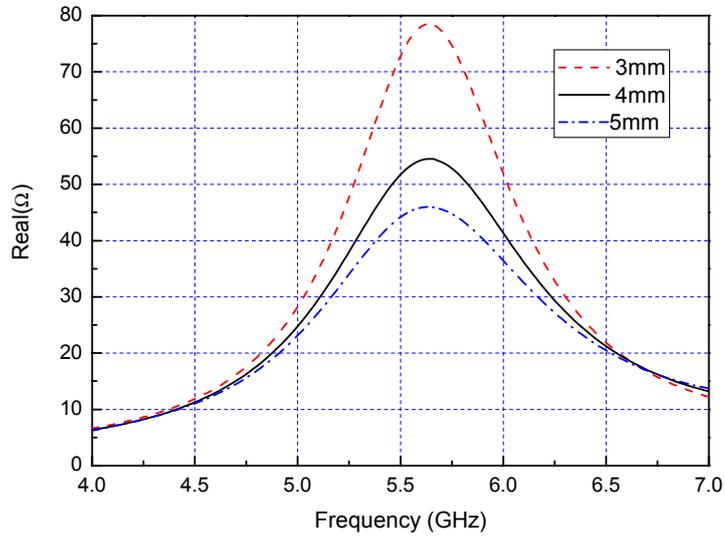
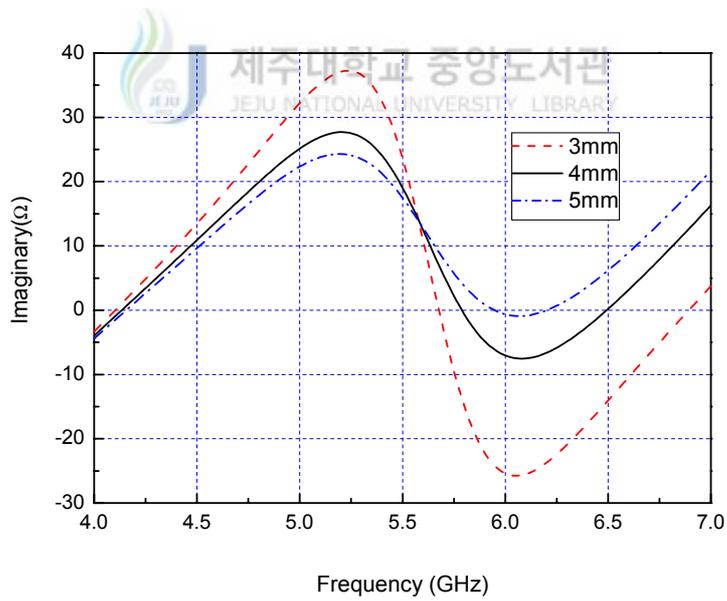


Fig. 10. CPW-fed slot antenna



(a) Real part



(b) Imaginary part

Fig. 11. Impedances of the inductively-fed slot antenna as varying the width

슬롯 폭 W_s 에 따른 안테나의 임피던스 특성을 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11(a)에서 슬롯 폭 W_s 가 커짐에 따라 안테나의 임피던스의 실수 성분 값은 점점 작아지고, 슬롯 폭이 작아짐에 따라 임피던스의 실수 성분 값은 점차 커지는 것을 볼 수 있다. 슬롯 폭 $W_s = 3mm$ 인 경우 안테나의 실수 성분 값을 50Ω 이상의 값을 가지므로 정합이 잘 이루어지지 않게 된다. 또한 슬롯 폭 $W_s = 5mm$ 인 경우에는 임피던스 값이 50Ω 보다 작은 값을 갖게 되는 것을 볼 수 있다. 안테나의 방사 저항은 임피던스의 값에 비례하므로 슬롯 폭 W_s 의 크기가 커짐에 따라 작아지게 된다. Fig. 11(b)에서 슬롯 폭의 크기가 커짐에 따라 안테나의 공진 주파수는 상향 이동하는 것을 볼 수 있다. 시뮬레이션 한 결과, 유도성 급전 슬롯 폭이 $W_s = 4mm$ 인 경우 원하는 중심 주파수에서 가장 좋은 정합 특성을 갖는다.

유도성 급전 슬롯 안테나가 가장 양호한 정합 특성을 가질 때의 파라미터 값은 슬롯의 길이는 $L_s = 33.4mm$ 이고, 슬롯 폭은 $W_s = 4mm$ 인 경우이고, 이 때의 반사 손실 특성과 방사 패턴을 Fig. 12와 Fig. 13에 각각 나타내었다.

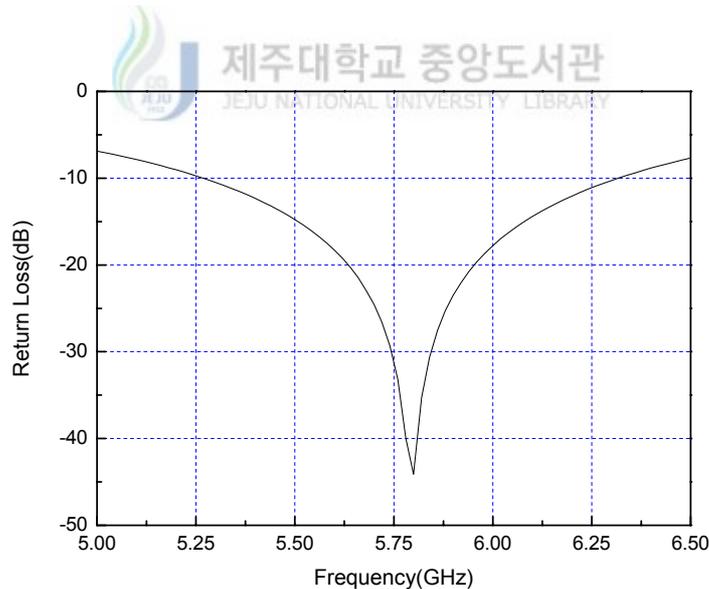


Fig. 12. Return loss of the inductively-fed slot antenna

유도성 급전 슬롯 안테나는 Fig. 12에서와 같이 5.8 GHz에서 -44dB의 반사 손실 값

을 갖는다. 또한 $VSWR \leq 1.5$ 를 기준으로 하였을 때 동작 주파수 대역은 5.471~6.12 GHz이다. 안테나의 비 대역폭은 약 11%이다.

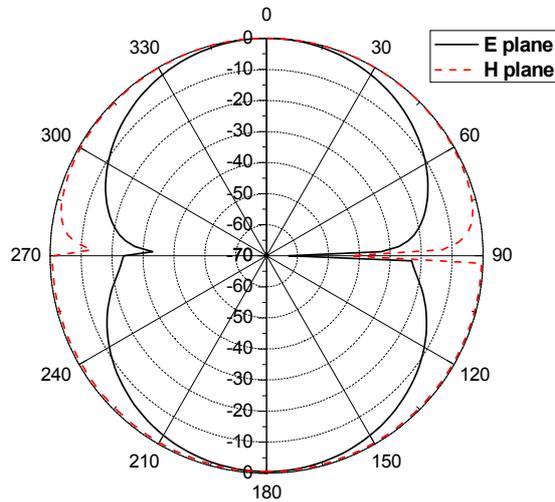


Fig. 13. Radiation patterns of the inductively-fed slot antenna

유도성 급전 슬롯 안테나는 전·후방 방사 패턴을 갖는다. 또한 $\theta = 0^\circ$ 인 경우 최대 복사가 이루어지며, $\theta = 90^\circ$ 일 때, 최소 복사가 이루어지므로 널 값을 갖게 된다. 안테나의 이득은 2.3 dBi이다

2) 용량성 급전 슬롯 안테나 설계

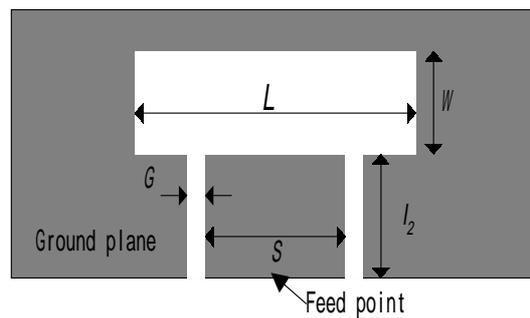


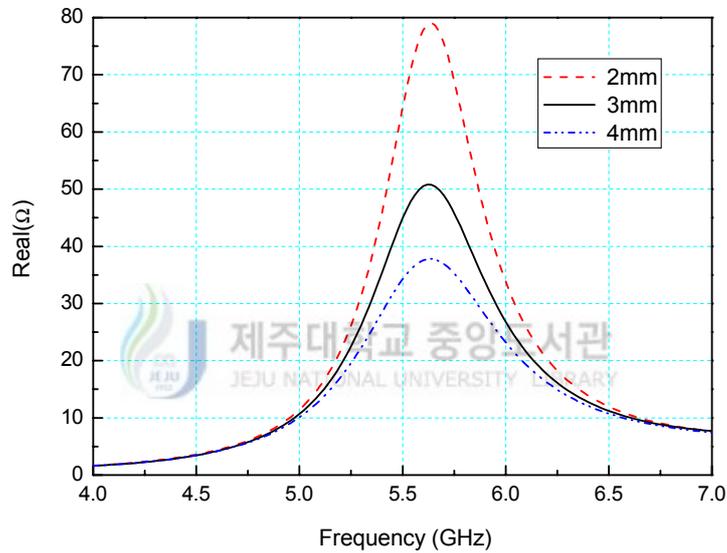
Fig. 14. Capacitively fed slot antenna

Fig. 14는 용량성 급전 슬롯 안테나의 구조이다. 급전 선로가 개방되었을 때, 급

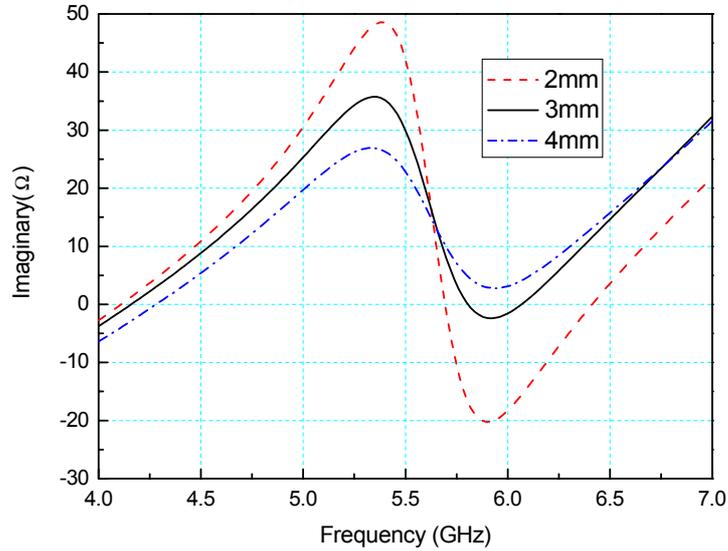
전 선로의 길이가 $\lambda_d/4$ 보다 짧은 경우 용량성 급전이 이루어진다. 용량성 급전 슬롯 안테나의 공진 길이 $L = 0.5\lambda_d$ 이다.

용량성 급전 슬롯 안테나의 CPW 급전 선로의 파라미터는 식 (10)과 식 (11)을 이용하여 50Ω 에 맞는 중심 스트립 폭과 갭의 폭 값을 구한다. 용량성 급전 슬롯 안테나 역시 원하는 중심 주파수인 5.8 GHz 에서 공진하도록 설계한다.

용량성 급전 슬롯 안테나를 정합시키기 위해서 슬롯 폭 W 를 $2 \sim 4\text{ mm}$ 까지 변화시켜 슬롯 폭 변화에 따른 안테나의 임피던스 특성을 Fig. 15에 나타내었다.



(a) Real part



(b) Imaginary part

Fig. 15. Impedance of the capacitively-fed slot antenna as varying the width

Fig. 15 (a)에서 슬롯 폭 W 가 커짐에 따라 안테나의 임피던스의 실수 성분 값은 점점 작아지고, 슬롯 폭이 작아짐에 따라 임피던스의 실수 성분 값은 점차 커지는 것을 볼 수 있다. 슬롯 폭 $W = 2mm$ 인 경우 안테나의 실수 성분 값을 50Ω 이상의 값을 가지므로 정합이 잘 이루어지지 않게 된다. 또한 슬롯 폭 $W = 4mm$ 인 경우에는 임피던스 값이 50Ω 보다 작은 값을 갖게 되는 것을 볼 수 있다. 안테나의 방사 저항은 임피던스의 값에 비례하므로 슬롯 폭 W 의 크기가 커짐에 따라 작아지게 된다. Fig. 15 (b)에서 슬롯 폭의 크기가 커짐에 따라 리액턴스는 점차 유도성 성분이 되는 것을 볼 수 있다. 시뮬레이션 한 결과, 용량성 급전 슬롯 폭이 슬롯 폭 W 가 $2 \sim 3mm$ 인 경우 원하는 주파수 대역에서 리액턴스 값이 '0'에 가까워짐을 볼 수 있다. 따라서 슬롯 폭은 $W = 2 \sim 3mm$ 사이의 값을 선택하여 안테나를 설계한다. 가장 양호한 정합 특성을 갖을 때 슬롯 폭은 $W = 2.7mm$ 이고, 이 때의 용량성 급전 슬롯 안테나의 반사 손실 특성을 Fig. 16에 나타내었다.

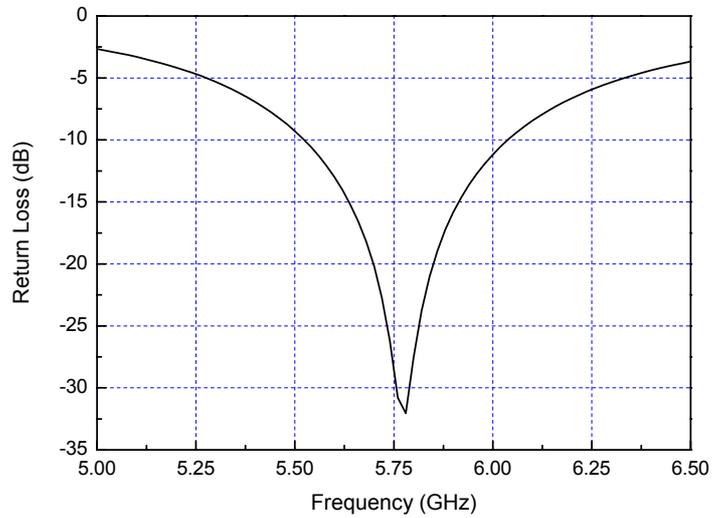


Fig. 16. Return loss of the capacitively-fed slot antenna

용량성 급전 슬롯 안테나는 공진 주파수 5.8 GHz에서 반사 손실은 약 -32 dB이고, 동작 주파수 대역은 $VSWR \leq 1.5$ 를 기준으로 5.688 ~ 6.013 GHz이다. 이때, 비 대역폭은 약 5.5%이다

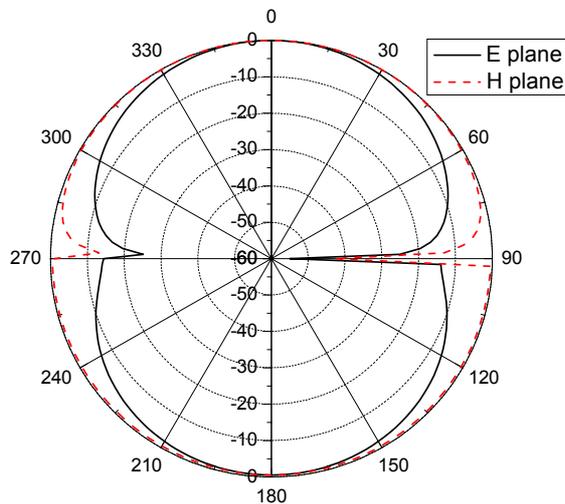


Fig. 17. Radiation patterns of the capacitively-fed slot antenna

Fig. 17은 용량성 급전 슬롯 안테나의 방사 패턴을 나타낸 것이다. 용량성 급전 슬롯 안테나는 전·후방 방사 패턴을 갖는 것을 확인할 수 있고, $\theta = 0^\circ$ 인 경우 최대 복사가 이루어지며, $\theta = 90^\circ$ 일 때, 최소 복사가 이루어져 널 값을 갖게 된다. 용량성 급전 슬롯 안테나의 이득은 약 1.85 dBi이다.

3) 하이브리드(hybrid) 마이크로스트립 슬롯 안테나 설계

유도성 급전 슬롯 안테나의 대역폭과 이득을 향상시키기 위해 앞에서 설계한 유도성 급전 슬롯 안테나의 상단부에 용량성 급전 슬롯 안테나를 결합시킨다. 두 개의 슬롯을 결합시킨 하이브리드 슬롯 안테나의 구조는 Fig. 18과 같다.

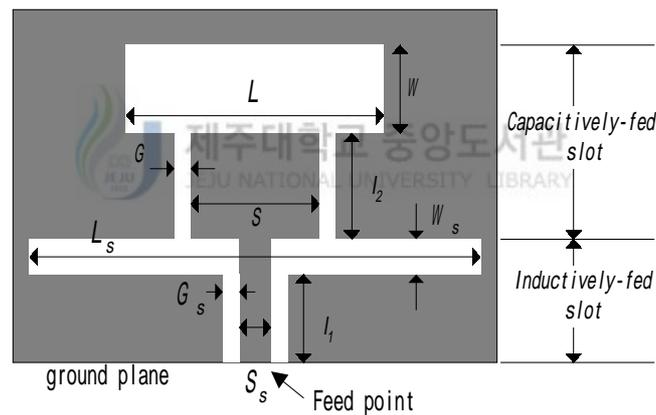


Fig. 18. Geometry of the hybrid slot antenna

하이브리드 슬롯 안테나는 유도성 급전 슬롯 안테나의 용량성 급전 슬롯 안테나 상호간의 커플링에 의해서 안테나의 특성이 변하게 된다. 이 때 하이브리드 슬롯 안테나의 임피던스 특성을 Fig. 19에 나타내었다.

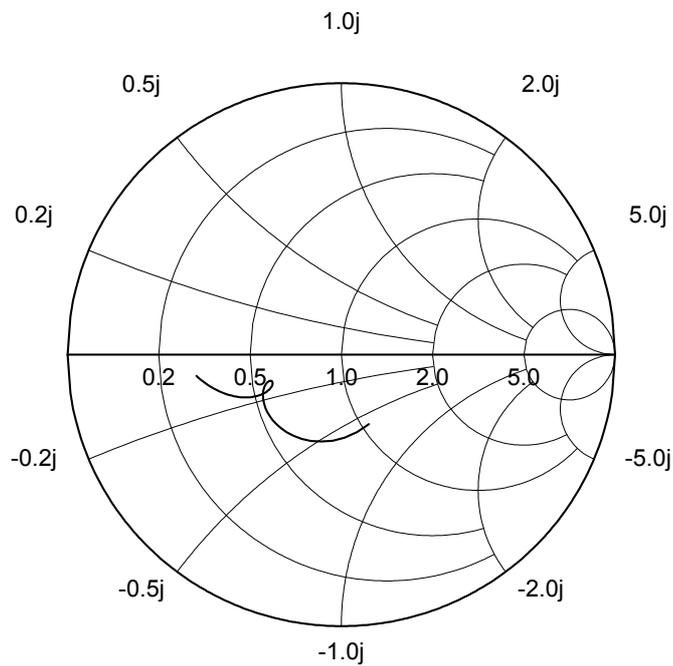


Fig. 19. Impedance locus of the hybrid slot antenna

하이브리드 슬롯 안테나는 임피던스의 실수 성분은 50 Ω보다 작은 값을 가지며, 허수는 용량성 리액턴스 성분을 띄므로 정합이 잘 이루어지지 않는 것을 볼 수 있다. 따라서 안테나 임피던스의 실수 성분을 50 Ω에 맞추고, 용량성 리액턴스 성분을 줄이기 위하여 하이브리드 슬롯 안테나에서 두 개의 슬롯 폭 W_s , W 와 용량성 급전 슬롯 안테나의 급전 선로 길이 l_2 를 조절한다.

우선, 유도성 급전 슬롯 폭 W_s 를 변화시켜 그에 따른 안테나의 임피던스 특성을 분석한다. 슬롯 폭 W_s 의 변화에 따른 안테나의 임피던스 특성을 Fig. 20에 나타내었다.

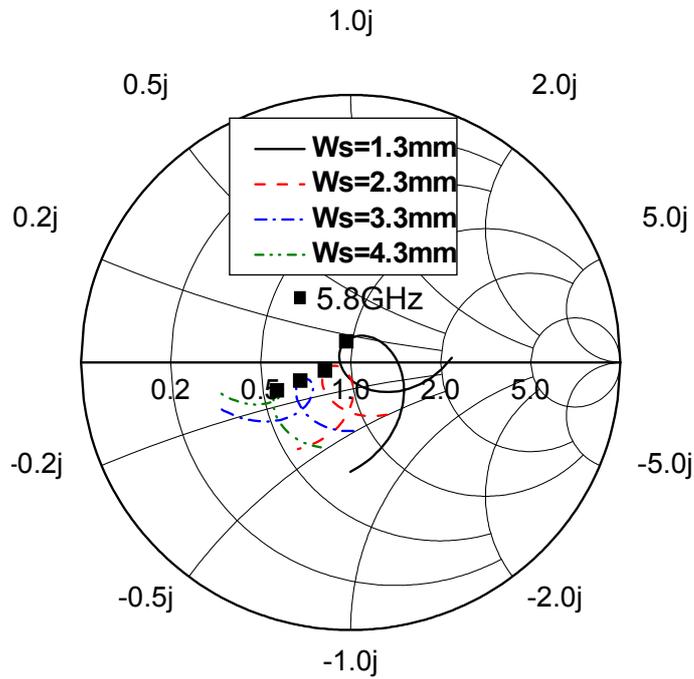


Fig. 20. Impedance locus of the inductively-fed slot antenna as varying the width

유도성 급전 슬롯 폭 W_s 의 크기를 $1.3\text{mm} \sim 4.3\text{mm}$ 까지 변화 시켰다. 유도성 급전 슬롯 폭 $W_s = 1.3\text{mm}$ 인 경우 하이브리드 슬롯 안테나는 원하는 중심 주파수에서 유도성 리액턴스 값을 갖는 것을 볼 수 있다. 또한 $W_s = 4.3\text{mm}$ 인 경우 원하는 중심 주파수에서 임피던스 값은 50Ω 보다 작고, 용량성 성분을 띄는 것을 볼 수 있다. 즉, 슬롯 폭 W_s 의 크기가 작아질수록 임피던스 궤적이 점점 커지면서 반시계 방향으로 회전한다.

다음으로 용량성 급전 슬롯 폭 W 의 변화에 따른 안테나의 임피던스 특성을 살펴보고, 이를 Fig. 21에 나타내었다.

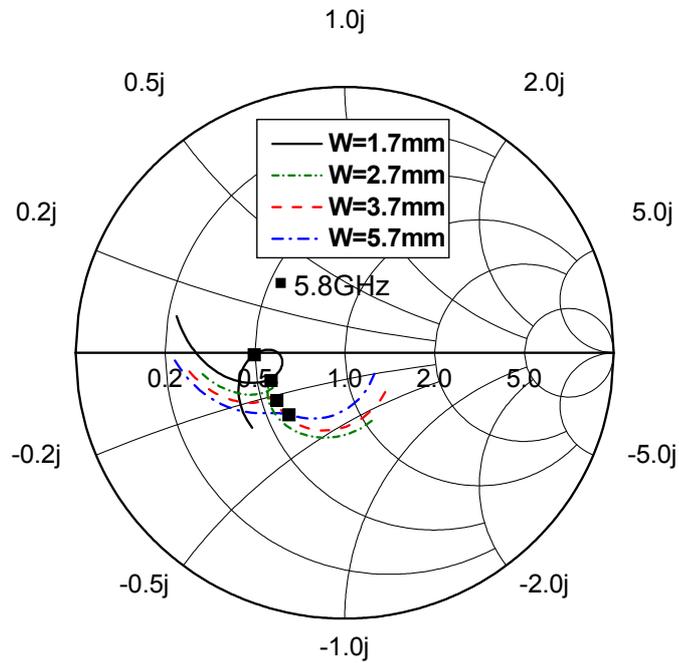


Fig. 21. Impedance locus of the capacitively-fed slot antenna as varying the width

용량성 급전 슬롯 폭 W 를 1.7mm 에서 5.7mm 까지 변화시켰을 때, 하이브리드 슬롯 안테나의 임피던스는 원하는 공진 주파수에서 50Ω 보다 작은 실수 값을 갖고, 용량성 리액턴스 성분을 띄는 것을 볼 수 있다. 용량성 급전 슬롯 폭 W 의 크기가 커질수록 안테나의 임피던스 궤적이 점점 작아지면서 반시계 방향으로 회전하면서 용량성 리액턴스 값이 점점 커지는 것을 볼 수 있다.

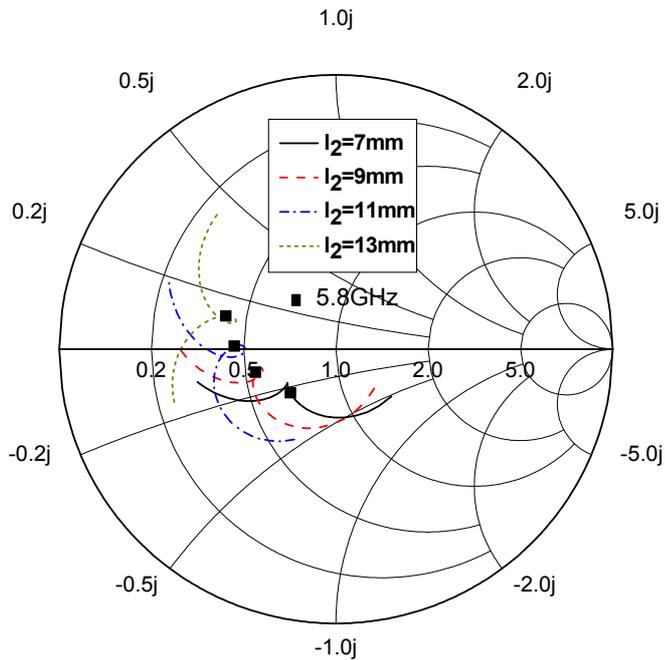


Fig. 22. Impedance locus as varying length of the l_2

Fig. 22는 용량성 급전 CPW 길이 l_2 을 변화시켜 그에 따른 안테나 특성 변화를 나타낸 것이다. l_2 의 길이를 $7mm$ 에서 $13mm$ 까지 변화시켜 보았을 때 l_2 의 길이가 길어질수록 임피던스 궤적이 시계 방향으로 회전하는 것을 볼 수 있다. 즉, l_2 의 길이가 길어질수록 하이브리드 슬롯 안테나의 임피던스의 허수 성분이 유도성 리액턴스 성분을 갖게 된다.

다음으로, S 의 크기 변화에 따른 안테나의 반사 손실 특성을 살펴보았다. 이를 Fig. 23에 나타내었다.

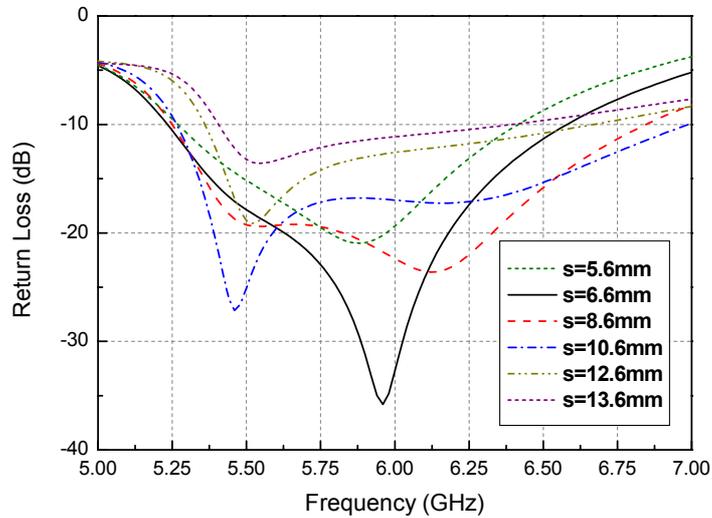


Fig. 23. Return loss as varying width of the S

S 의 크기를 변화시켰을 때 $S = 6.6mm$ 보다 작은 경우 안테나의 반사 손실 특성이 나빠지는 것을 볼 수 있다. 또한 $S = 6.6mm$ 이상인 경우 역시 안테나의 반사 손실 특성이 좋지 않음을 볼 수 있다. 따라서 S 의 크기는 $6.6mm$ 인 경우를 선택한다.

Fig. 20과 21, 22, 23으로부터 $W_s = 1.5mm$, $W = 3.7mm$, $l_2 = 10.5mm$, $S = 6.6mm$ 인 경우를 선택하여 하이브리드 슬롯 안테나를 설계한다. 이때 슬롯의 길이는 $L_s = 33.4mm$, $L = 18mm$ 이다. 위의 설계 파라미터 값들을 이용하여 하이브리드 슬롯 안테나를 설계하였을 때 안테나의 반사손실과 임피던스 특성을 Fig. 24와 Fig. 25에 나타내었다.

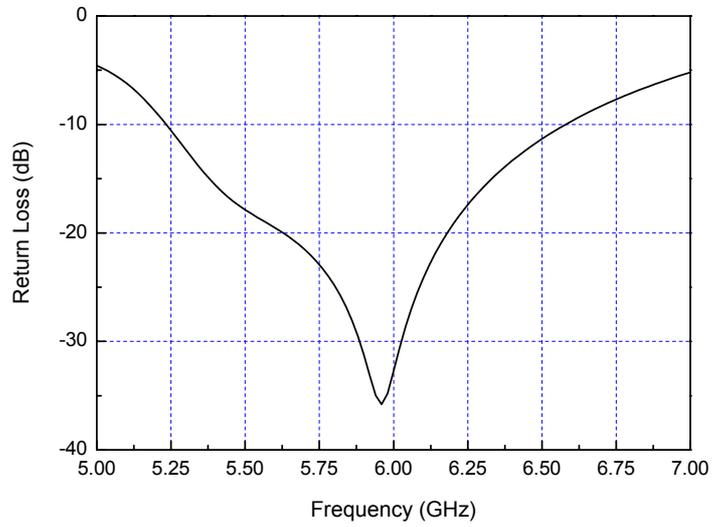


Fig. 24. Return loss of the hybrid slot antenna

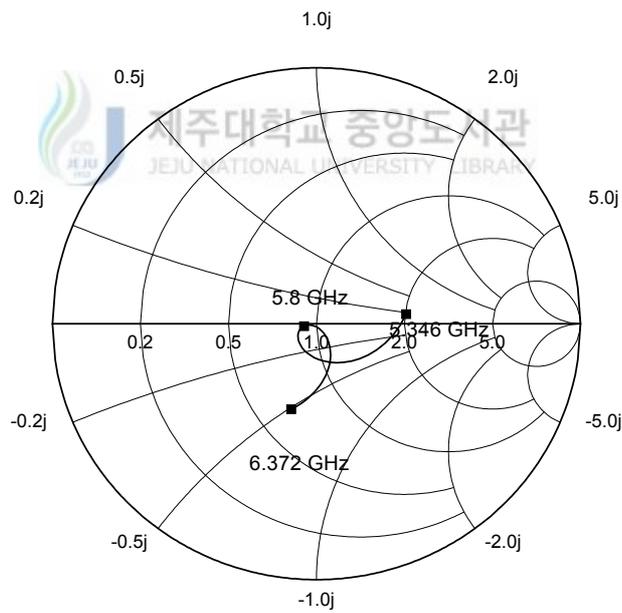


Fig. 25. Impedance locus of the hybrid slot antenna

하이브리드 슬롯 안테나는 중심 주파수가 5.9 GHz이며, 이때 반사 손실은 약 -40dB

이다. $VSWR \leq 1.5$ 를 기준으로 한 안테나의 동작 주파수 대역은 5.346 ~ 6.372 GHz이고, 약 17%의 비 대역폭을 갖는다. 원하는 공진 주파수인 5.8 GHz에서 하이브리드 슬롯 안테나의 임피던스의 실수 값은 약 50Ω이고, 리액턴스 성분은 '0'의 값을 갖는 것을 볼 수 있다.

다음으로 하이브리드 슬롯 안테나의 방사 패턴을 Fig. 26에 나타내었다.

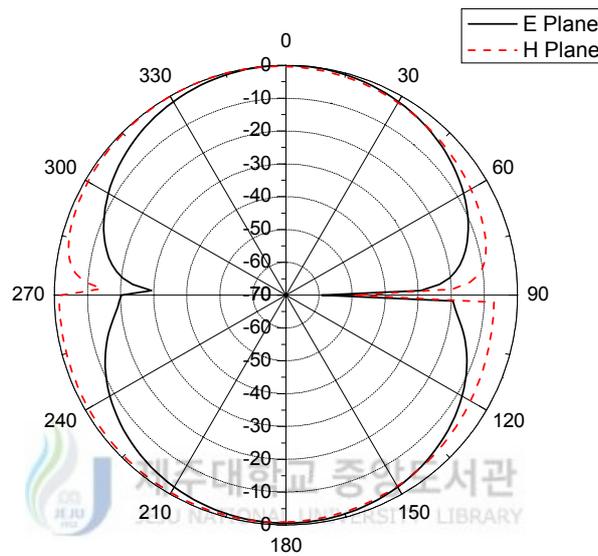


Fig. 26. Radiation pattern of the hybrid slot antenna

하이브리드 슬롯 안테나는 $\theta = 0^\circ$ 에서 가장 많은 방사가 일어나고, $\theta = 90^\circ$ 에서 최소의 방사가 일어나게 된다. 이때, 안테나 이득은 약 3 dBi이다. 두 개의 슬롯 안테나를 결합시켜도 안테나의 방사 패턴에는 큰 영향이 없는 것을 확인할 수 있다. 하이브리드 슬롯 안테나는 유도성 급전 슬롯 안테나의 특성과 비교하였을 때 대역폭 면에서 약 600 MHz, 이득 면에 있어서는 약 0.7dBi정도 높아진 것이다. 그러나 안테나의 세로 길이가 약 2배 정도 증가한 것에 비해 안테나 특성에 큰 영향을 미치지 못했다. 따라서 하이브리드 슬롯 안테나의 대역폭과 이득을 향상시키기 위해서 안테나의 파라미터를 조절하여 더욱 향상된 특성을 갖도록 한다.

유도성 급전 슬롯 안테나와 용량성 급전 슬롯 안테나를 결합시킨 광대역 하이브

리드 슬롯 안테나를 설계하기 위해서 각각의 슬롯 안테나의 공진 주파수를 결정하여야 한다. 두 안테나의 공진 주파수는 반사 손실 -10 dB이하에서의 주파수 대역이 겹쳐지도록 선택한다.

우선 유도성 급전 슬롯 안테나의 공진 길이 $L_s = 33.4\text{mm}$ 로 고정시키고, 용량성 급전 슬롯 안테나의 공진 길이 L 을 유도성 급전 슬롯 안테나의 대역폭 내에서 변화시켜 그에 따른 안테나의 특성 변화를 살펴본다. 슬롯의 길이를 변화시킬 때, 임피던스 특성이 변하기 때문에 슬롯 폭을 조절하여 안테나를 정합 시킨다. 안테나의 반사 손실은 -25 dB보다 작은 값을 갖도록 한다. 용량성 급전 슬롯의 길이 L 의 변화에 따른 안테나의 반사 손실 특성을 Fig. 27에 나타내었다.

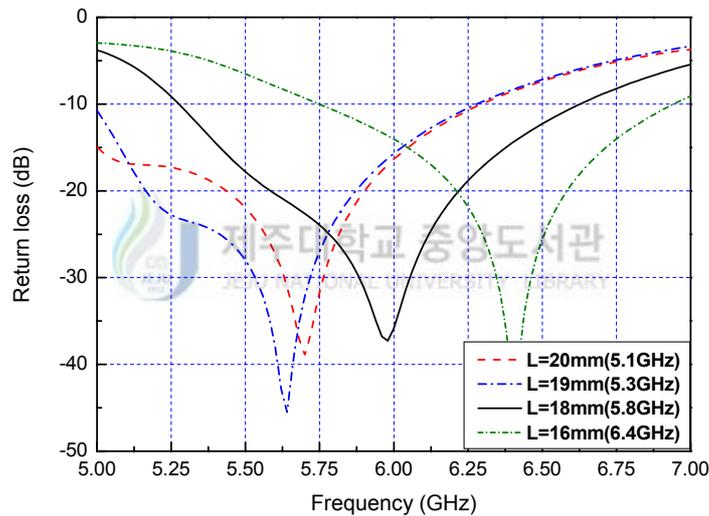


Fig. 27. Return loss as the length of the L

Fig. 27에서 용량성 급전 슬롯 길이 L 이 16mm 인 경우 원하는 주파수 대역보다 더 높은 6.4GHz 에서 안테나가 동작하는 것을 볼 수 있다. 그러나 L 이 19mm 보다 더 긴 경우 안테나의 공진 주파수는 5.6GHz 근처로 큰 변화가 없다. 용량성 급전 슬롯의 공진 길이 L 을 5.8GHz 보다 높은 주파수에서 공진되도록 설계하였을 경우 하이브리드 슬롯 안테나는 원하는 공진 주파수 대역인 5.8GHz 보다 더 높은 주파

수에서 공진하며 5.8 GHz의 무선 LAN 주파수 대역을 수용하지 못한다. L 의 길이 변화에 따라 안테나의 공진 주파수는 변화하지만, 대역폭 면에서는 큰 변화가 없기 때문에 용량성 급전 슬롯의 길이는 $L = 18mm$ 로 선택한다.

다음으로 용량성 급전 슬롯의 길이 $L = 18mm$ 로 고정시킨 후 유도성 급전 슬롯 안테나의 공진 길이 L_s 를 변화시켜 안테나의 대역폭 변화를 분석한다. L_s 의 길이에 따라 안테나의 임피던스 특성이 달라지기 때문에, 하이브리드 슬롯 안테나의 슬롯 폭 W 와 W_s 를 변화시켜 안테나를 정합시킨다. L_s 의 길이에 따른 안테나의 설계 파라미터를 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Parameters as the length of the L_s

Unit : mm	W_s	L	W	S	l_2
$L_s = 30$	3	18	4.5	12.6	12.5
$L_s = 35$	2.5	18	7	12.6	12.5
$L_s = 38$	1.5	18	8	12.6	12.5

Table 1에 정리된 파라미터 값으로 하이브리드 슬롯 안테나를 설계하였을 때 안테나의 VSWR을 Fig. 28에 나타내었다.

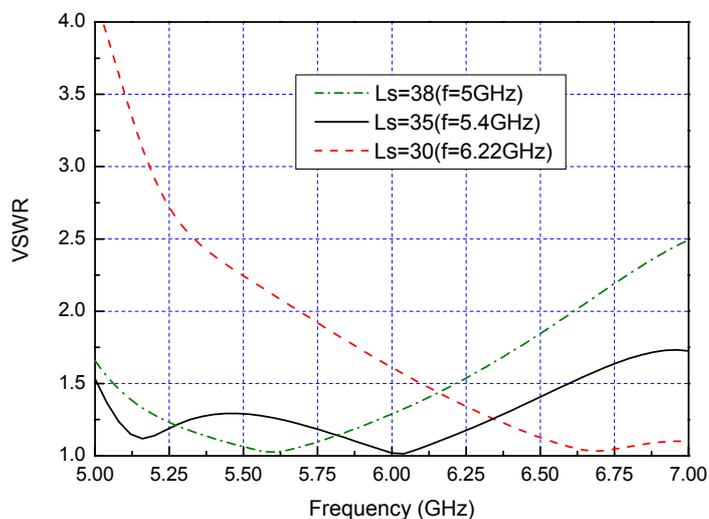


Fig. 28. VSWR as the length of the L_s

Fig. 28에서 유도성 슬롯 안테나의 공진 길이 L_s 가 $30mm$ 인 경우 하이브리드 슬롯 안테나의 동작 주파수 대역이 원하는 대역 보다 더 높은 대역에서 동작하는 것을 볼 수 있다. L_s 의 길이가 $38mm$ 인 경우 원하는 주파수 대역에서 동작하지만 대역폭 면에서 L_s 의 길이가 $35mm$ 인 경우보다 특성이 더 좋지 않을 것을 확인할 수 있다. 따라서 원하는 주파수 대역에서 가장 넓은 대역폭을 갖는 L_s 의 길이가 $35mm$ 인 경우를 선택하여 안테나를 설계한다.

위의 설계 결과들로부터 하이브리드 슬롯 안테나가 더 넓은 대역폭을 갖도록 하기 위해서는 용량성 급전 슬롯의 공진 길이를 $18mm$ 로 고정시키고, 유도성 급전 슬롯의 공진 길이를 원하는 공진 주파수 보다 조금 낮게 조절하여 안테나를 설계해야 한다. 하이브리드 슬롯 안테나의 설계 파라미터를 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Parameters of the antenna

Unit : mm	CPW 폭	스트립 폭	슬롯 길이	슬롯 폭	CPW 길이
유도성 급전 슬롯	0.25	1.26	35	3.5	7
용량성 급전 슬롯	0.5	12.6	18	6	12.5

Table 2의 파라미터 값으로 설계 한 하이브리드 슬롯 안테나의 반사 손실 특성과 T-형 마이크로스트립 라인 급전 슬롯 안테나의 반사 손실 특성을 비교하여 Fig. 29에 나타내었다.

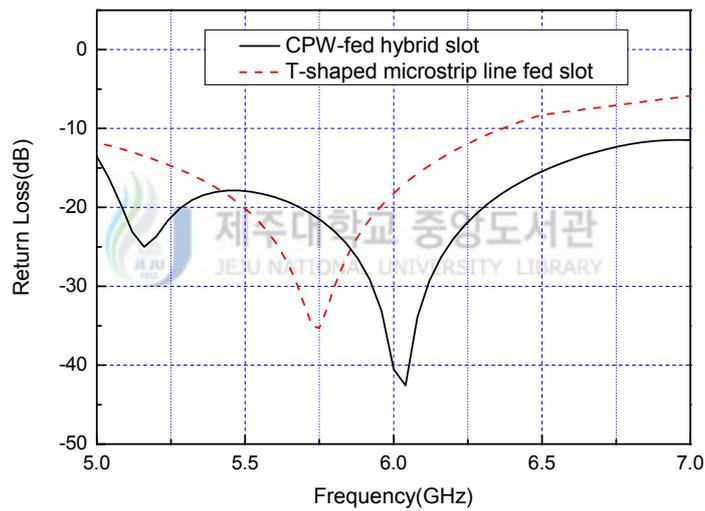


Fig. 29. Return loss of the hybrid slot antenna

하이브리드 슬롯 안테나는 6 GHz 근처에서 공진하며 약 -40dB의 반사 손실을 갖는다. 이때 안테나의 비 대역폭은 27%이며, 이득은 4.6 dBi이다. T-형 마이크로스트립 라인 급전 슬롯 안테나와 비교하였을 때 대역폭에서 약 11%, 이득 면에서 2.3 dBi 향상되었다. 따라서 본 논문에서 제안한 하이브리드 슬롯 안테나가 T-형 마이크로스트립 급전 슬롯 안테나보다 특성이 더욱 우수함을 확인할 수 있다.

위의 과정들로부터 얻어진 하이브리드 슬롯 안테나의 설계 과정을 Fig. 30에 흐름도로 나타내었다.

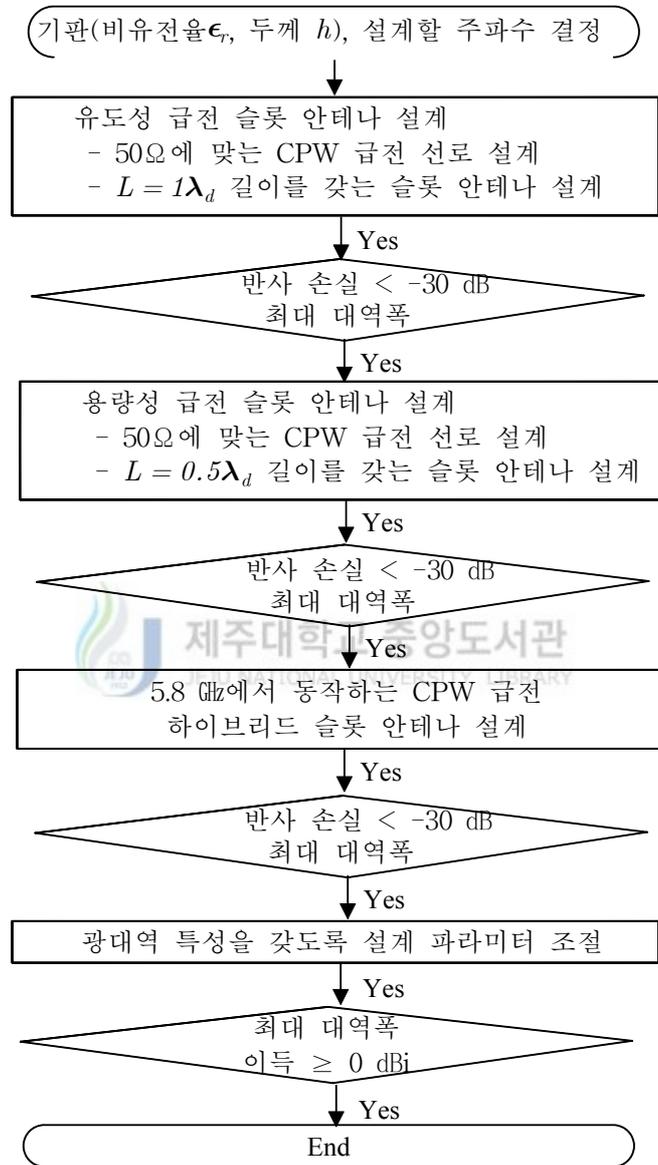


Fig. 30. Flow chart of the design of the hybrid slot antenna

IV. 제작 및 측정

1. 유도성 급전 슬롯 안테나 제작

안테나는 Ensemble 6.0을 사용하여 Layout을 시킨 도면을 CAD 작업을 통해 사용 기판에 맞도록 출력하여, TPR 용액이 묻힌 단면 FR-4 기판 위에 출력한 도면을 놓고 감광기에서 약 80초 간 감광시킨다. 감광한 기판을 TPR 현상액에 넣으면 원하는 안테나 부분만 기판에 남게 된다. 이 과정을 끝마친 기판을 에칭액에 넣어 약 20~30분 정도 부식 시켜 안테나를 제작하게 된다.

유도성 급전 슬롯 안테나를 FR-4 기판을 사용하여 위의 과정을 걸쳐 실제 제작하여 Fig. 30에 나타내었다.



Fig. 30. Fabricated inductively-fed slot antenna

제작된 유도성 급전 슬롯 안테나의 반사 손실 특성을 Anritsu사의 벡터 회로망 분석기 360B를 통해 분석하여 Fig. 31에 시뮬레이션 결과와 함께 비교하여 나타내었다.

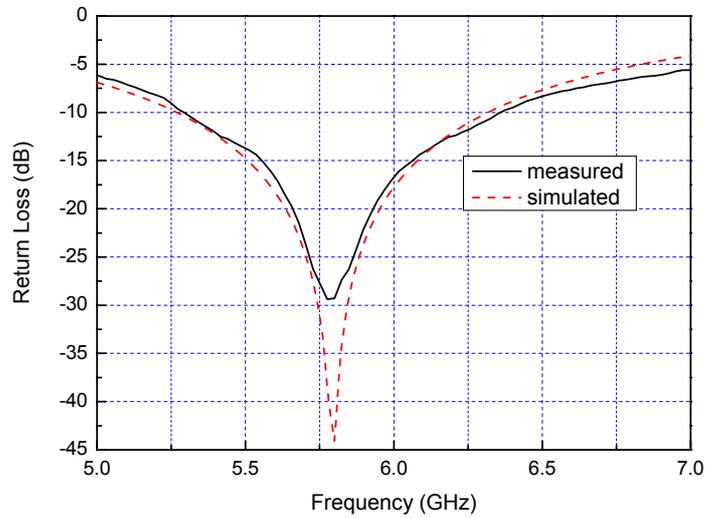


Fig. 31. Return loss of the inductively-fed slot antenna

제작된 유도성 급전 슬롯 안테나의 공진 주파수는 5.78 GHz, 반사손실 -30 dB이며, 5.8 GHz에서 $VSWR \leq 1.5$ 를 기준으로 10%의 대역폭을 갖는다.

2. CPW 급전 하이브리드 슬롯 안테나 제작

하이브리드 슬롯 안테나는 5.8 GHz 대역에서 동작하도록 제작하였고, 제작된 안테나를 Fig. 32에 나타내었다.



Fig. 32. Fabricated hybrid slot antenna

실제 제작한 안테나의 반사 손실 특성과 시뮬레이션 결과를 Fig. 33에 비교하여 나타내었다. 제작한 안테나의 공진 주파수는 5.75 GHz이며, 반사손실은 약 -45 dB이다.

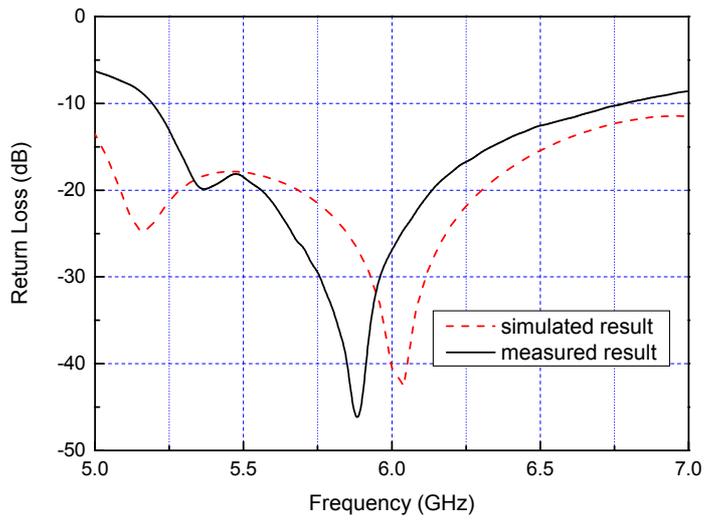


Fig. 33. Return loss of the hybrid antenna

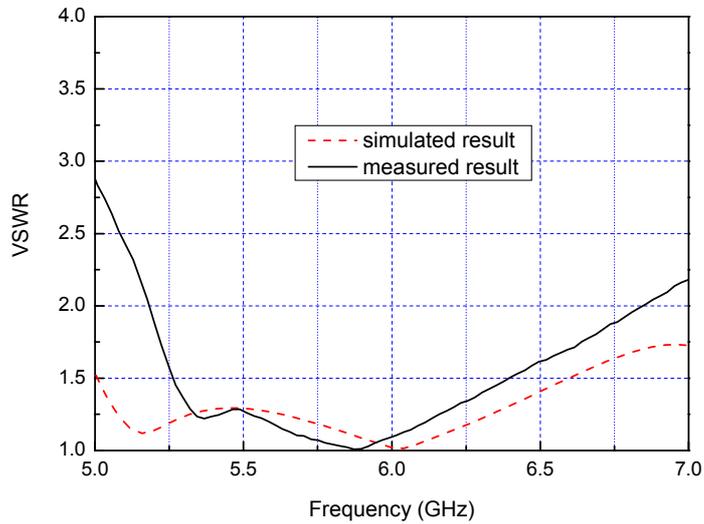


Fig. 34. VSWR of the hybrid antenna

Fig. 34는 제작한 안테나의 VSWR을 시뮬레이션 결과와 함께 나타낸 것이다. 제작한 안테나는 5.8 GHz에서 $VSWR \leq 1.5$ 를 기준으로 21%의 대역폭을 갖는다.

제작한 안테나의 E-면과 H-면 방사 패턴은 Fig. 35에 나타내었다. 제작한 안테나는 접지면이 안테나와 동일 평면에 존재하므로 전·후방으로 원하는 방사 패턴을 갖는 것을 확인할 수 있다. E-면과 H-면의 3-dB 빔 폭은 각각 60°와 44°이다.

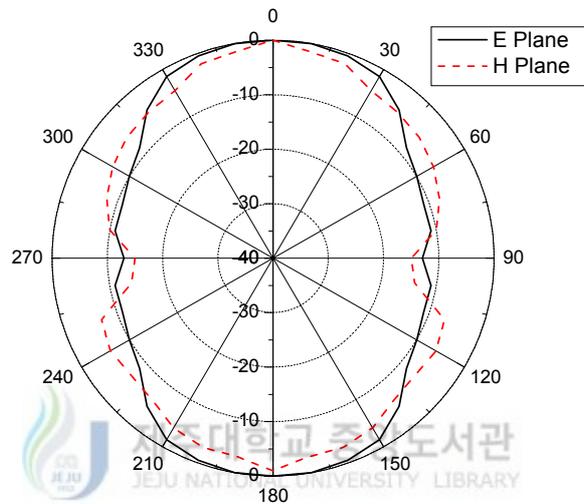


Fig 34. Measured radiation pattern

위의 결과들로부터 하이브리드 슬롯 안테나의 특성과 유도성 급전 슬롯 안테나의 특성 결과를 비교하였을 때, 하이브리드 슬롯 안테나는 유도성 급전 슬롯 안테나보다 대역폭과 이득 특성이 향상되는 것을 확인할 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 5.8 GHz ISM 대역의 용 주파수대역에서 안정적으로 동작하는 CPW 급전 슬롯 안테나를 설계·제작하였다. 우선 유도성 급전 슬롯 안테나와 용량성 급전 슬롯 안테나를 설계하여 안테나의 특성을 분석하였다. 단일 슬롯 안테나인 유도성 급전 슬롯 안테나와 용량성 급전 슬롯 안테나의 이득과 대역폭을 향상시키기 위해서, 유도성 급전 슬롯 안테나의 상단부에 용량성 급전 슬롯 안테나를 결합시켜 하이브리드 슬롯 안테나를 설계하였고, 이를 Ensemble 6.0을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 안테나를 정합시키기 위해서 여러개의 설계 파라미터를 조절하여 CPW 급전 하이브리드 슬롯 안테나를 정합시켰으며, 안테나의 대역폭을 향상시키기 위해서 두개의 슬롯 안테나의 슬롯 길이를 조절하였다.

설계한 안테나는 FR-4 기판을 이용하여 실제 제작하여 유도성 급전 슬롯 안테나일 경우와 하이브리드 슬롯 안테나일 경우를 비교하였다. 제작된 안테나의 특성은 Anritsu사의 벡터 회로망 분석기 360B를 이용하여 측정하였다. 그 결과 유도성 급전 슬롯 안테나의 공진 주파수는 5.78 GHz, 반사손실 -30 dB이며 대역폭은 600 MHz를 얻었고, 약 2.5 dBi의 안테나 이득을 확인하였다. 또한 용량성 급전 슬롯 안테나는 5.8 GHz에서 약 -32 dB의 반사 손실 특성 값을 가졌고, 대역폭은 $VSWR \leq 1.5$ 를 기준으로 325 MHz였다. CPW 급전 하이브리드 슬롯 안테나의 공진 주파수는 5.75 GHz, 반사손실 -30 dB이며 대역폭은 5.25~6.376로 1.126 GHz가 측정되었으며 약 5 dBi의 안테나 이득을 얻었다. 이는 유도성 급전 슬롯 안테나 또는 용량성 급전 슬롯 안테나일 경우보다 하이브리드 슬롯 안테나일 경우 안테나의 특성이 향상됨을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

- Balanis Constantine A., 1997, Antenna theory analysis and design, John Wiley & Sons, pp. 723-784.
- Bhohe, A.U., Holloway, C.L., M.Piket May and R. Halll, 2000, Coplanar waveguide fed wideband slot antenna, Electronics Letters, 3rd, vol. 36, no.16, pp.1340-1342
- Cheng P. Wen, 1969, Coplanar Waveguide : A surface strip transmission line suitable for nonreciprocal gyromagnetic device applications, IEEE Trans. Microwave Theory Tech. vol. 17, pp.1087-1090
- Gupta K. C., 1988, Microstrip antenna design, Artch House, pp. 263-289.
- Huynh T., Lee K. F., 1995, Single-layer single-patch wideband microstrip antenna, Electron. Lett., Vol. 31, pp.1310-1312.
- 장용웅 등, 2000, 십자형 급전선을 갖는 광대역 마이크로스트립 슬롯 안테나의 특성 분석, 대한 전자 공학회 논문지, Vol. 37, no.3, pp.35-42
- 장용웅 등, 1998, T-모양 급전선을 갖는 마이크로스트립 슬롯 안테나의 특성 분석, 한국전자과학회 논문지, Vol. 9, no.5, pp.630-638
- K.C. Gupta, Ramesh Garg, I.J. Bahl, 1979, Microstrip Lines and Slot Lines, Artech House, pp.257-300
- Laurent Giauffrent, Jean Marc Maheurte, and A. Papiernik, 1997, Study of Various Shapes of the coupling slot in CPW-fed Microstrip Antennas, IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 45, pp.642-647
- Masoud Kahrizi etc., Analysis of a wide radiating slot in the ground plane of a microstrip line, 1997, IEEE Trans. MTT., Vol. 41, no.1, pp.29-37
- 박익모, 서영훈, 1999, 광대역 마이크로스트립 슬롯 안테나, 대한 전자 공학회 논문지, Vol. 22, no.1, pp.215-218

- Rainee N. Simons , 2001, Coplanar waveguide Circuits, Components, and Systems, John Wiley & Sons
- 서영훈 등, 2000, 광대역 특성을 갖는 변형된 원형 링 마이크로스트립 슬롯 안테나, 한국 전자파 학회 논문지, Vol. 11, no.5, pp.773-781
- Santiago Sirra-Garcia and Jean Jacques Laurin, 1999, Study of a CPW inductively Coupled Slot Antenna, IEEE Trans. Antennas Propagat., vol.47, pp. 58-64,
- Soliman. E.A., Brebels. S., Delmotte. P.etc., 1999, Bow-tie slot antenna fed by CPW, Electronics Letters, 1st, vol. 35, No. 7, pp. 514-515
- Y. Yoshimura, 1972, A microstrip slot antenna, IEEE Trans. MTT., Vol. 20, no. 11, pp. 760-762.

