

소형화된 반원형-슬롯 UWB 안테나의 설계

Miniaturized Half-Circular-Slot UWB Antenna Design

장 준 원 · 최 경 · 황 희 용

Joon Won Jang · Kyoung Choi · Hee-Yong Hwang

요 약

본 논문은 원형 슬롯 UWB 안테나를 소형화된 반원모양의 UWB 안테나를 설계하였다. 전자기장 분석을 통해, 기존의 원형 슬롯 UWB 안테나는 슬롯 방사체에서 TE_n 모드에 기초한 일련의 방사 극점(radiation poles)을 가지고 있으며, 완전자계벽의 성질을 갖는 대칭축이 존재한다는 것을 확인하였다. 이를 이용하여 소형화된 반원형 슬롯 UWB 안테나를 설계하고, 광대역 안테나 특성이 유지되는 것을 확인하였다. RF-60A($t=0.64$ mm, $\epsilon_r=6.15$, $\tan \delta=0.0025$)의 기판으로 제작하여 측정된 결과, 기존의 원형 슬롯 UWB 안테나의 이득은 $-2.7 \sim 3.1$ dBi 이고, 소형화된 안테나는 $-2.1 \sim 4.3$ dBi의 이득을 가지며, 두 안테나 모두 비슷한 방사 패턴을 보였다.

Abstract

This paper proposes a miniaturized half-circular-slot UWB antenna. Using an analysis of the field patterns, we show that the original circular-slot UWB antenna operates on a series of multi-pole radiation based on TE_n modes, and a perfect magnetic wall exists along an axis of symmetry on the antenna. Using the perfect magnetic wall we designed and fabricated the miniaturized UWB antenna on RF-60A substrate with $t=0.64$ mm, $\epsilon_r=6.15$ and $\tan \delta=0.0025$, which not only has the half size of the original but also maintains UWB characteristics. The measured gain of the miniaturized antenna is $-2.12 \sim 4.3$ dBi, which is comparable with the gain, $-2.7 \sim 3.1$ dBi, of the original circular-slot UWB antenna. The radiation pattern is also similar to that of the original antenna.

Key words : UWB Antenna, Slot Antenna, Miniaturized Antenna

I. 서 론

최근 다양한 무선 서비스의 상용화에 기인한 주파수 자원의 고갈과 점차 확대되는 통신 서비스의 광대역화에 대한 요구를 충족시키기 위해 최근 UWB 기술에 대해 많은 연구가 이루어지고 있다^[1].

UWB 시스템은 주로 실내를 포함한 근거리용이나, 휴대형으로 많이 상용화 될 것으로 보여 안테나 및 시스템의 소형화에 대한 요구가 크다고 할 수 있다. 그러나 UWB 시스템의 핵심 소자인 UWB 안테나는 주파수 독립적인 특성을 필요로 하기 때문에 소형화에 근본적인 어려움이 존재하고 있으며, 또한

기존에 발표된 안테나의 대부분은 초광대역의 특성에만 초점이 맞추어졌고 소형화에 대한 연구는 이제 막 시작 단계라고 할 수 있다^{[2]-[8]}.

통신 시스템의 다양한 수동 부품들을 소형화하는 방법 중 하나는 완전전계벽(PEC)이나 완전자계벽(PMC)의 특성을 이용하여 소형화시키는 방법인데, 양자 모두 단순히 물리적인 대칭면을 이용하는 것이 아니라, 전자기장적인 대칭면과 그 면의 전자계적인 성질을 규명하여 이용하는 방법이다. 안테나의 소형화에는 다이폴 안테나를 완전전계벽(PEC)의 특성을 이용하여 모노폴 안테나로 만드는데 흔히 적용되고 있으나, 완전자계벽(PMC)의 특성을 이용한 안테나

강원대학교 IT특성화 학부대학(College of Information Technology, Kangwon University)

· 논문 번호 : 20071127-133

· 수정완료일자 : 2008년 2월 21일

의 체계적인 소형화에 대한 연구는 찾아보기 어렵다.

최근 대칭면을 이용한 안테나의 소형화에 대한 연구로서 협대역 안테나의 소형화^[8]와 모노폴 UWB 안테나의 소형화^[9]가 보고되고 있는데, 물리적인 대칭면을 따라 안테나를 절반으로 절단한 경우에 대한 실험적 특성 결과의 발표에 한정되었고, 방사체의 전자기장 분포에 대한 분석이 이루어지지 못하였다. 더욱이 전자, 후자 모두 전자기적인 대칭면의 확인이나 그 대칭면의 전자기적인 특성의 규명이 이루어지지 못하였다.

본 논문에서는 UWB 안테나로 다양한 변형이 발표된 원형(또는 타원형)-슬롯 UWB 안테나를 설계하여 전자기장 패턴 분석을 통한 여러 방사 공진 모드에서의 공통적인 전자기적 대칭면들을 도출하고, 이 결과를 이용하여 소형화된 반원형-슬롯 UWB 안테나를 설계하였다.

II. 본 론

방사체의 전자기장 분포 및 공진 모드 분석을 위해 설계한 원형-슬롯 UWB 안테나는 그림 1과 같이 원형(또는 타원형) 슬롯과 원형 패치의 배치를 비대칭적으로 배치한 형태^{[2]-[6]}로 임피던스 정합(impedance matching)을 위해 여러 임피던스 라인의 다단 스텝(50 Ω, 60 Ω, 70 Ω, 75 Ω)을 사용한 테이퍼형 급전 선로를 새로이 적용하여 보다 광대역의 특성이 나타나도록 프로토타입 안테나를 먼저 설계하였다.

프로토타입 안테나의 주요 설계 변수 값들은 $t = 1.524 \text{ mm}$, $\epsilon_r = 4.4$, 손실 탄젠트(loss tangent) = 0.025의 FR4 기판을 가정하고, 시뮬레이션을 통해 최적화하여 표 1에 나타내었다. 안테나 전체 크기는 가로 60 mm, 세로 65 mm이며, 접지면의 크기는 UWB 대역 내의 공진 주파수보다는 임피던스 실수값에 영향을 주는 점을 고려하여 접지면의 크기를 먼저 고정하고 급전 선로에 테이퍼를 적절히 적용하였다. Rx, Rz 값은 공진 주파수에 관련되고, Rp와 테이퍼형 급전 선로는 안테나의 대역폭과 관련된다. 설계된 프로토타입 안테나의 S_{11} 에 대한 HFSSTM를 이용하여 시뮬레이션된 값과 제작 후 측정된 값은 그림 2에서와 같이 거의 일치하며, 3.6~20 GHz에서 $VSWR < 2.0$ 을 만족한다. 초광대역 또는 주파수 독립적인 안테

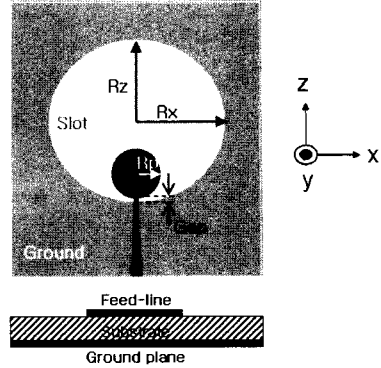


그림 1. 프로토타입 안테나의 구조와 설계 변수
Fig. 1. Geometry and parameters of the prototype antenna.

표 1. 프로토타입 안테나(그림 1)의 설계 변수
Table 1. Design parameters of the prototype antenna.

안테나 파라미터	Rx	Rz	Rp	Gap
값(mm)	19.0	21.0	6.0	1.0

나들은 주기적인 방사 극점 또는 공진 극점들이 흔히 나타나는데, 이들은 안테나 임피던스의 허수부(imaginary)에서 영점 교차점이 주기적으로 나타나는 것^{[9],[10]}으로 알 수 있다.

설계한 프로토타입 안테나의 다중 공진 유도 방식은 슬롯의 크기가 기본 주파수를 유도하는 물리적 길이를 가지고 이후 고조파를 발생시키는 방식으로, 그림 2의 S_{11} 에서 발생하는 주기적인 극점들이나, 그

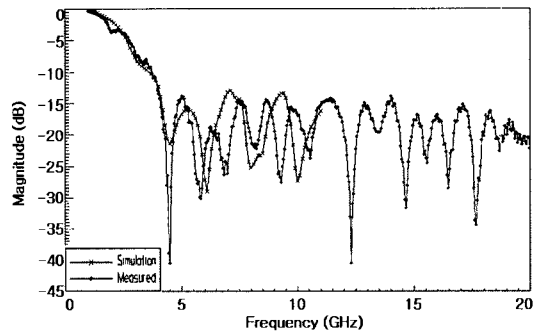


그림 2. 프로토타입 안테나의 S_{11} 값에 대한 EM 시뮬레이션과 측정값 비교
Fig. 2. Comparison of simulated and measured S_{11} for the prototype antenna.

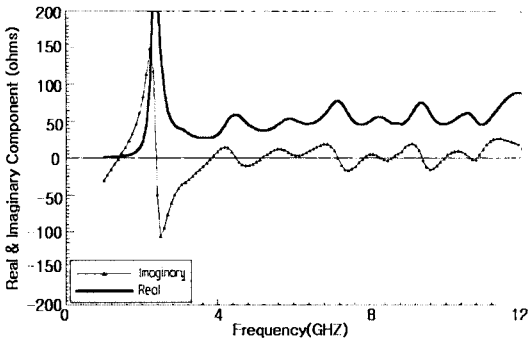


그림 3. 프로토타입 안테나의 임피던스
Fig. 3. Prototype antenna impedance.

그림 3의 안테나 임피던스 허수값의 영점 교차 지점이 주기적으로 나타나는 것으로 주기적인 공진이 나타남을 알 수 있다. 이처럼 공진 주파수가 연속성을 보이며 주기적으로 나타나는 것은 방사성 공진 모드의 연속적인 생성을 말한다. 방사성 공진 모드의 연속적인 생성으로 인하여 안테나 임피던스 실수값이 한 값으로 수렴된다고 생각된다. 그림 3의 안테나 실수값이 광대역에서 근사적인 상수값으로 나타나고 있다.

그림 4는 프로토타입 안테나의 표면 전류 분포를 나타낸 것이다. 안테나에 나타나는 극점의 개수를

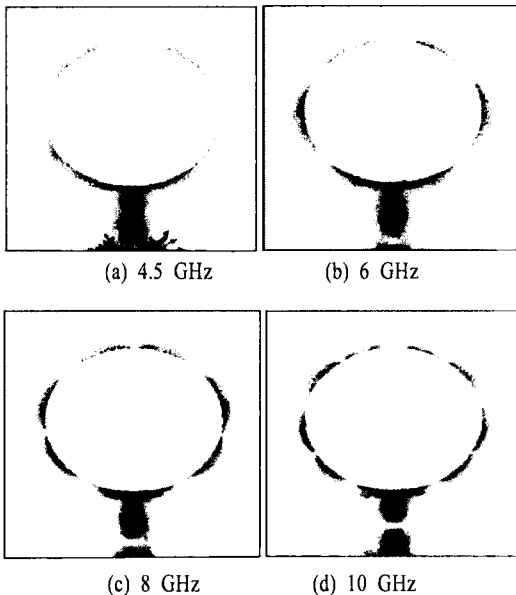


그림 4. 프로토타입 안테나의 표면 전류 분포
Fig. 4. Surface current distribution of the prototype antenna.

이용해 연속적으로 생성되는 공진 모드를 살펴보면, 그림 4의 (a)에서 (d)로 갈수록 극점의 개수가 짝수개의 짝을 이루며, 2개씩 순차적으로 증가하고 있어 차수가 2~5까지의 연속적인 모드 생성을 보여준다. 안테나 주위로 나타난 표면 전류는 위상에 따라 다르게 나타나는 변위 전류로 표면 전류의 분포로 전계(E-field)와 자계(H-field)의 분포도를 알 수 있다.

일반적으로 슬롯과 패치는 쌍대(dual)의 관계를 가지고 있어서 슬롯 안테나의 모드는 같은 구조의 패치 안테나 모드의 쌍대 관계로 생성된다^[11]. 원형의 패치 안테나의 경우, 금속 패치를 방사체로 사용하여 방사하기 때문에 금속의 접선 방향으로 자계가 생성되어 TM 모드로 동작하지만^[12], 이와 쌍대 관계인 슬롯 안테나는 슬롯을 방사체로 사용하여 전계가 슬롯의 접선 방향으로 생성되므로 전체적으로 TE_n 모드로 동작한다. 그러므로, 설계한 UWB 안테나는 UWB 대역에서 TE₂ 모드부터 TE₃, TE₄, TE₅ 모드의 연속적인 모드로 생성된다. 그림 4에서 극점간의 표면 전류가 분포되어 있는 원주상의 길이는 그 주파수의 반파장에 해당되는 길이이므로 각 모드의 공진 주파수는 슬롯의 크기에 의해 결정된다. 이는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다^[13]. 타원형 둘레는 complete elliptic integral of the second kind를 이용하여 구할 수 있다.

$$n\lambda_g = 4a \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta} d\theta \quad (k = \sqrt{a^2 - b^2}/a)$$

$$\cong 2\pi \sqrt{\frac{1}{2}(a^2 + b^2)} \quad (1)$$

여기서, a 와 b 는 타원형의 Rx, Rz 길이이고, n 은 모드의 차수이며 λ_g 는 실효 유전율을 고려한 기판에서의 관내 파장으로서, 그림 4에서 극점이 2개씩 증가하는 주파수 간격을 통해 근사적으로 구할 수 있다. 그리고 $\lambda_g = c/\sqrt{\epsilon_r}$ 을 이용한 근사적인 유효 유전율 계산식과 식 (1)을 이용하여 공진 주파수를 예측할 수 있다.

그림 5는 x-z 평면에서 자계 분포를 나타낸 것으로, y-z 평면상의 자계 분포를 x-z 평면상에서 표현하여 모든 y-z 평면의 자계가 한 평면에 겹쳐서 표현되고 있다. 그림에서 자계의 분포는 y-z 평면에 대해 모두 수직으로 나타나고 있으므로 식 (2)를 만족하

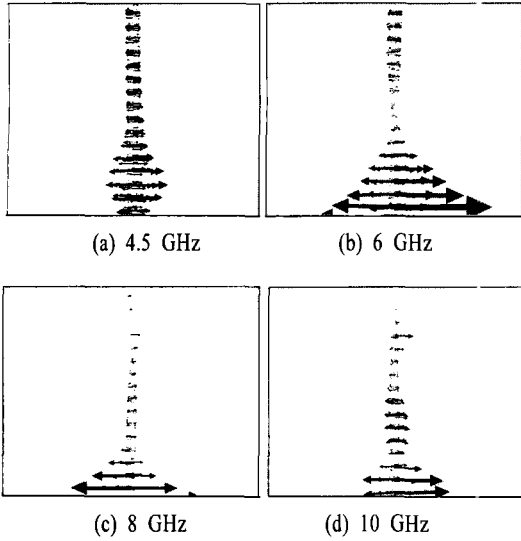


그림 5. 프로토타입 안테나의 x-z 평면에서의 H-field
Fig. 5. H-field on the x-z surface of the prototype antenna.

여 이 면은 완전자계벽이다.

$$\hat{n} \cdot \vec{E} = 0, \hat{n} \times \vec{H} = 0 \quad (2)$$

완전자계벽은 완전전계벽과 쌍대 관계로서 완전 자계벽은 그 면을 개방면으로 대체하면 원 특성이 유지된다^[14].

이제, 이 완전자계벽을 개방면으로 하여 프로토타입 안테나로부터 소형화된, 동일(또는 비슷한) 특성의 UWB 안테나를 설계한다. 분석을 위해 사용했던 FR4 기판의 특성상 고주파에서 높은 손실을 유발하여 손실이 적은 RF-60A 기판($\tan \delta = 0.0025$, $t = 0.64$ mm, $\epsilon_r = 6.15$ @10 GHz)으로 교체하여 프로토타입 안테나를 제작하였다.

제작한 프로토타입 안테나에 완전자계벽을 이용하여 소형화된 반원형-슬롯 UWB 안테나의 전체 구조를 그림 6에 나타내었다. 자계벽을 따라 1/2로 소형화 시키면서 안테나 임피던스에 변화가 나타나게 되고 급전 선로가 개방면에 바로 노출되므로 안테나의 임피던스 실수값이 변화하게 되어, 테이퍼를 적용하여 임피던스 정합을 피하면서 개방면과 직접 맞는 문제점을 해결하기 위해 추가 유전체를 옆에 1 mm 남겨 놓았다. 일반적으로 안테나의 소형화에 따라 임피던스가 줄어들지만^[9], 자계벽을 이용한 본 논문의 소형화의 경우, 임피던스가 상승하는 것으로 나

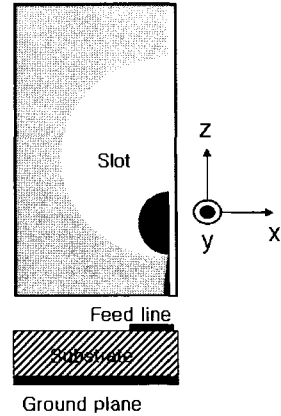


그림 6. RF-60A 기판으로 제작한 반원형-슬롯 UWB 안테나
Fig. 6. Half-circular-slot UWB antenna using RF-60A substrate

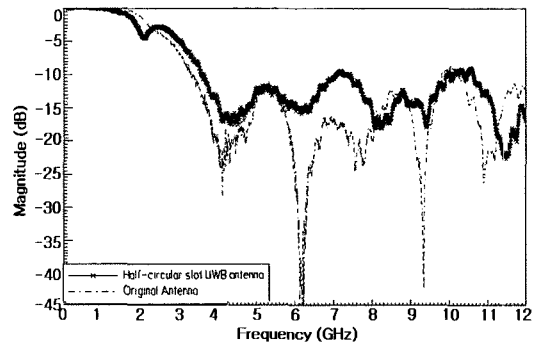


그림 7. RF-60A로 제작된 프로토타입 안테나와 반원형-슬롯 UWB 안테나 S₁₁ 비교값
Fig. 7. Measured S₁₁ of prototype & half-circular-slot UWB antenna using RF-60A substrate.

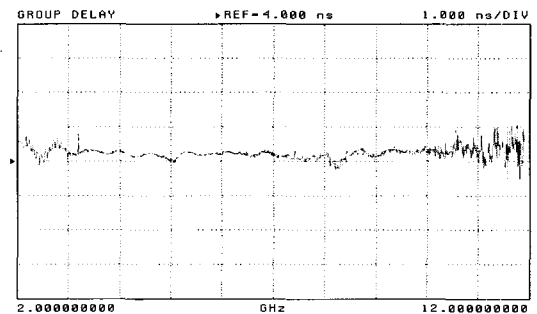


그림 8. RF-60A 기판으로 제작한 반원형-슬롯 UWB 안테나 group delay(1.0 ns/DIV)
Fig. 8. Group delay of half-circular-slot UWB antenna using RF-60A substrate(1.0 ns/DIV).

타났다. 이와 같은 결과는 모노폴 안테나의 경우를 다른 참고문헌 [8]의 그림 1에서 급전 선로의 폭의 변화에서도 확인할 수 있다.

제작한 프로토타입 안테나와 반원형-슬롯 UWB 안테나의 S_{11} 에 대한 측정값은 그림 7에 비교되어 있다. 잘려진 면은 근사적인 개방면으로 작용하여 그림 7의 S_{11} 측정치 비교에서 보는 바와 같이 생성되는 S_{11} 극점의 위치가 기존 프로토타입 안테나와 거의 유사하게 나타났다. 그림 8은 측정된 군지연(Group delay)값을 나타내었다. 원거리장 조건을 만족하는 거리에서 측정되어 기준값이 4 ns이며, 표시 1과 2값이 정의된 UWB 대역 3.2 GHz와 10.6 GHz를 나타낸다. 측정 결과, UWB 전대역에서 1 ns 이내의 변화를 보이며, 근사적으로 일정한 상수값을 나타내고 있다.

안테나의 방사 패턴과 이득은 그림 9에서와 같이 4~9 GHz까지 6개 주파수점들에 대해 x-y 평면상의 그래프로 나타내었고, 기존 프로토타입 안테나와 반원형-슬롯 UWB 안테나의 이득(gain) 최대값은 표 2에 비교해 놓았다. 주파수별로 방사 패턴을 비교해보면 소형화된 안테나(굵은 실선)와 기존의 안테나(점선)가 매우 유사한 방사 패턴을 보이며, 오히려 6 GHz 및 7 GHz 등 몇몇 주파수에서는 기존 안테나보다 더 좋은 방사 패턴을 나타내어 전체 주파수 대역에서 전반적으로 전방향성(Omni-directional)이 향상되었다. 이득의 경우, 프로토타입 안테나는 최대 이득이 -2.7~3.1 dBi 범위 안에 있으며, 반원형-슬롯 UWB 안테나는 -2.12~4.3 dBi으로 유사한 이득값을 보인다. 방사 패턴의 모양과 이득이 몇몇 주파수에서 차이를 보이는 이유는 설계된 안테나상의 다

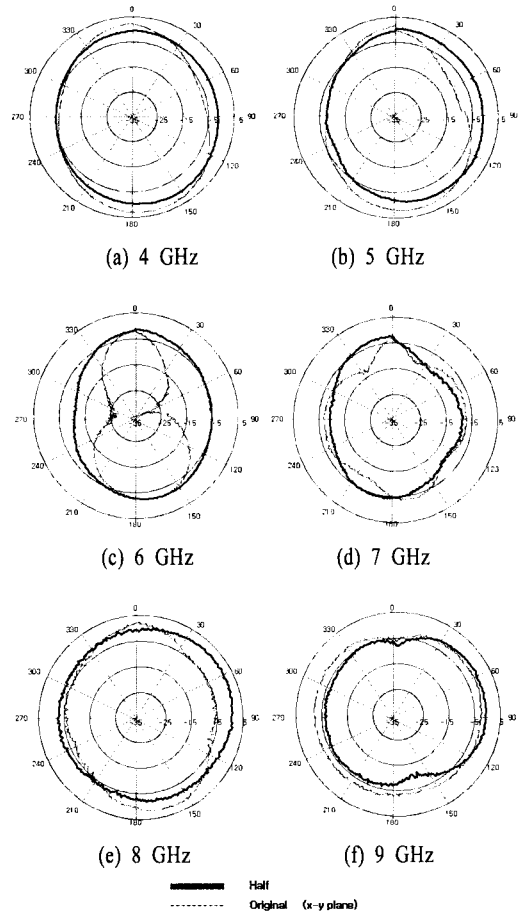


그림 9. 프로토타입 안테나와 반원형-슬롯 UWB 안테나의 측정된 방사 패턴들

Fig. 9. Measured radiation patterns for prototype antenna and half-circular-slot UWB antenna.

수의 극점들이 원형 배열과 반원 배열로 서로 차이가 있으므로 주파수에 따른 공간상의 방사 전력 결합의 차이에 의한 것으로 생각된다.

III. 결 론

본 논문에서는 기존의 원형-슬롯 UWB 안테나인 프로토타입 안테나를 전자기장적인 대칭면과 그 대칭면의 성격을 규명하여 소형화한 반원형-슬롯 UWB 안테나를 설계하였다.

설계한 반원형-슬롯 UWB 안테나의 측정 결과, 3.5~10.2 GHz까지 VSWR<2.0을 만족하고, 최대 이득은 -2.12~4.3 dBi의 범위에 있다. 이는 소형화전 프

표 2. 프로토타입 안테나와 반원형-슬롯 UWB 안테나 이득 측정치 비교

Table 2. Measured gains for prototype antenna and half-circular-slot UWB antenna.

주파수 (GHz) \ 이득(dBi)	4	5	6	7	8	9	10
프로토타입 안테나	3.1	2.2	-1.6	-2.7	-1.5	2.3	1.4
설계한 안테나	0.4	0.4	-1.2	-2.1	0	2	4.3

로토타입 안테나와 유사한 대역폭과 이득값을 갖는 결과이며, 방사 패턴의 경우는 전반적으로 전방향성(omni-directional)이 오히려 향상되었다.

참 고 문 헌

[1] 박길영, 신호섭, 오병철, 김남, "변형된 접지면과 대역저지 특성을 갖는 단일 평면 타원형 UWB 안테나", 한국전자과학회논문지, 16(12), pp. 1194-1205, 2005년 12월.
 [2] 장준원, 황희용, "초광대역 타원형 슬롯 패치 안테나 설계", 한국전자과학회 종합학술대회, 16(1), pp. 607-611, 2006년 11월.
 [3] P. Li, J. Liang, and X. Chen, "CPW-fed printed elliptical slot antenna with fork-like tuning stub", *Microwave Conference 2005 European*, vol. 1, Oct. 2005.
 [4] P. Li, J. Liang, and X. Chen, "Ultra-wideband printed elliptical slot antenna", *Antennas and Propagation Society International Symposium, IEEE*, vol. 3A, pp. 508-511, Jul. 2005.
 [5] J. Liang, L. Guo, C. C. Chiau, X. Chen, and C. G. Parini, "Study of CPW-fed circular disc monopole antenna for ultra wideband applications", *IEE Proc.-Microw. Antennas Propag.*, vol. 152, no. 6, pp. 520-526, 2005.
 [6] Evangelos S. Angelopoulos, Argiris Z. Anastopoulos, Dimitra I. Kaklamani, Antonis A. Alexandridis, Fotis Lazarakis, and Kostas Dangakis, "Circular and elliptical CPW-fed slot and microstrip-fed antennas

for ultrawideband applications", *Antenna and Wireless Propagation Letters*, vol. 5, pp. 294-297, 2006.
 [7] Raul R. Ramirez, Hala Elsadek, Luis Jofre, and Franco De Flaviis, "Reduced size single and dual band linear polarized microstrip antennas for mobile communications", *Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 4, pp. 450-453, 2001.
 [8] M. Sun, Y. P. Zhang, "Miniaturization of planar monopole antennas for ultrawide-band applications", *Small and Smart Antennas Metamaterials and Application*, pp. 197-200, Mar. 2007.
 [9] Warren L. Stutzman, Gray A. Thiele, 안테나 이론과 설계, 교보문고, pp. 216-217, 2003년 3월.
 [10] Ramesh Garg, Prakash Bhartia, Inder bahl, and Apisak Ittipiboon, *Microstrip Antenna Design Handbook*, AH, pp. 358-379, 2001.
 [11] Kai Chang, *Microwave Ring Circuits and Antennas*, Wiley, pp. 252-255, 1996.
 [12] Weng Cho Chew, "A broad-band annular-ring microstrip antenna", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. AP-30, no. 5, pp. 918-922, 1982.
 [13] Murray R. Spiegel, John Liu, *Mathematical Handbook of Formulas and Tables*, McGraw Hill, p. 15.
 [14] David M. Pozar, *Microwave Engineering*, Wiley, p. 14, 2005.

장 준 원



2007년 2월: 강원대학교 전기전자 정보통신공학부 (공학사)
 2007년 3월~현재: 강원대학교 전기전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] RF 소자 및 시스템 설계, 안테나 설계 등

최 경



1981년 2월: 서울대학교 전기공학 과 (공학사)
 1983년 2월: 서울대학교 전기공학 과 (공학석사)
 1988년 2월: 서울대학교 전기공학 과 (공학박사)
 1993년 7월~1994년 7월: Rensselaer Polytechnic Institute 교환교수

1994년 7월~현재: 강원대학교 IT특성화학부대학 전기전자전공 교수
 [주 관심분야] 전자기기 수치해석, Microwave

황 희 용*



1992년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)

1995년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)

2000년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학박사)

2001년 3월~2002년 4월: University of Maryland Research Scholar

2002년 5월~2003년 4월: (주)아모텍 연구소장

2003년 2월~현재: 강원대학교 IT특성화학부대학 전기전자전공 부교수

[주 관심분야] RF, Microwave, Millimeter Wave 분야의 부품 및 시스템

* 책임저자