

상보적 분할 링 공진기를 이용한 전기적으로 작은 1/8 모드 기판 집적형 도파관 안테나

Electrically Small Eighth-Mode Substrate-Integrated Waveguide(EMSIW) Antenna Loading Complementary Split Ring Resonator(CSRR)

강 현 성 · Somarith Sam · 임 성 준

Hyunseong Kang · Somarith Sam · Sungjoon Lim

요 약

본 논문은 기판 집적형 도파관(SIW: Substrate Integrated Waveguide)와 상보적 분할링 공진기(CSRR: Complementary Split Ring Resonator)를 기반으로 한 전기적으로 작은 안테나를 제안한다. 안테나의 전기적 크기는 CSRR 과 기존 SIW의 1/8크기인 Eighth-Mode Substrate Integrated Waveguide(EMSIW)를 적용하여 줄일 수 있었다. EMSIW는 기존의 SIW와 비교하였을 때 공진 주파수는 유지하면서 단지 12.5 %의 크기를 차지한다. 또한, EMSIW 안에 CSRR을 회전함으로써 안테나의 방사 특성을 유지하면서 공진 주파수를 바꿀 수 있었다. CSRR을 0°부터 360°까지 회전시켜 공진 주파수를 4.74 GHz에서 5.07 GHz까지 변화를 줄 수 있었다. 단방향성 방사 패턴이 발생하며, 그 최대 이득은 4.5 dBi에서 5.92 dBi로 관측되었다.

Abstract

Based on a substrate integrated waveguide(SIW) and a complementary split ring resonator(CSRR), electrically small antennas are proposed in this paper. Antenna's electrical size is reduced by introducing both CSRR and the eighth-mode substrate integrated waveguide(EMSIW). The EMSIW occupies only 12.5 % of the conventional SIW at the same dominant resonant frequency. In addition, the resonant frequency of the antenna is varied by rotating the CSRR on the EMSIW while keeping the same radiation patterns. The resonant frequency is changed from 4.74 GHz to 5.07 GHz by varying orientation of the CSRR from 0 to 360 degree. Unidirectional radiation patterns are observed and the measured peak gains are from 4.50 to 5.92 dBi.

Key words : Eighth-Mode Substrate Integrated Waveguide(EMSIW), SIW, Complementary Split Ring Resonator (CSRR), Electrically Small Antenna

I. 서 론

급속한 현대 무선통신 시스템의 발전으로 인해 작은 크기와 낮은 가격을 갖는 높은 성능의 안테나

가 주목을 받고 있다. 널리 쓰이는 마이크로스트립 안테나는 평면형 구조와 얇은 두께, 가벼운 무게, 경제적인 가격 등의 장점을 제공한다. 그러나 휴대용 단말기의 소형화와 제한된 공간에 많은 전자부품을

「이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2012R1A1A2040160).」

중앙대학교 전자전기공학부(School of Electrical and Electronics Engineering, Chung-Ang University)

· Manuscript received April 16, 2013 ; Revised July 1, 2013 ; Accepted July 18, 2013. (ID No. 20130416-047)

· Corresponding Author : Sungjoon Lim (e-mail : sungjoon@cau.ac.kr)

내장하기 위해서는 더욱 소형화된 안테나가 요구되고 있다. 이러한 경향으로 인해 소형 안테나는 제한된 크기의 무선 통신 기기에 있어서 꼭 필요한 요소이다. 기존의 안테나 소형화 기술로 기판의 유전율이나 자성 물질을 이용하여 투자율을 증가시키는 방법이 있다. 이로 인해 구조에서의 유효 파장 길이가 줄어들기 때문이다^{[11][12]}. 또한, CRLH(Composite Right-/Left-Handed) 구조가 안테나의 소형화를 구현하기 위해 사용되었다^[3]. 분할 링 공진기와 상보적 분할 링 공진기(CSRR) 또한 전기적으로 작은 안테나를 구현할 수 있게 하였다.

최근에는 부피가 큰 기존의 도파관과 비슷한 성능을 갖고 있는 기판 집적형 도파관(SIW) 기술이 평면형 소형 안테나나 필터 등에 적용된 바가 있다^{[4]-[6]}. 하프 모드 기판 집적형 도파관(HMSIW), 접힌 기판 집적형 도파관(SIFW), 1/4 모드 기판 집적형 도파관(QMSIW)을 사용하여 기존의 SIW와 비슷한 성능을 가지나, 그 크기를 크게 줄일 수 있었다^{[7]-[13]}. 소형화된 높은 효율을 갖는 안테나는 SIW와 CRLH 안테나의 장점을 이용해 설계할 수 있다. 앞서 소형화된 CRLH 기반의 SIW 안테나가 제안되었다^[14]. 이 안테나는 상대적으로 높은 방사 효율과 이득 값을 갖고 있지만, $0.265 \lambda_0 \times 0.318 \lambda_0$ 보다 더 큰 크기를 갖고 있다. 비슷하게, 마이크로스트립 패치 안테나의 42% 정도의 크기를 갖고 있는 CSRR를 적용시킨 SIW 안테나가 제안되었다^[15].

본 논문에서는 1/8 모드 기판 집적형 도파관(EM-SIW) 안테나에 CSRR를 적용하여 훨씬 더 작은 크기의 SIW 안테나를 제안한다. 기존의 SIW와 비교하여 EMSIW은 7/8 정도의 크기가 줄어든 반면에 기본 공진 주파수는 그대로 유지된다. 게다가 EMSIW에 CSRR를 적용했을 경우, 안테나의 공진 주파수는 기존의 EMSIW의 공진보다 더 낮은 주파수에서 공진을 일으키게 된다. 제안된 안테나는 기존의 SIW 안테나에 비해 크기가 크게 줄어들지만, 방사 성능과 효율은 오히려 더 우수한 특성을 보인다.

II. 1/8 모드 기판 집적형 도파관(EMSIW)

기판 집적형 도파관의 폭(W)과 길이(L)가 같을 때, ($W=L=a$) 기본적인 TE₁₁₀ 모드의 전기장과 자기장은

다음과 같이 표현될 수 있다^[16].

$$E_z = E_0 \sin \frac{\pi y}{a} \sin \frac{\pi x}{a} \quad (1)$$

$$H_x = \frac{j\pi E_0}{k\eta a} \cos \frac{\pi y}{a} \sin \frac{\pi x}{a} \quad (2)$$

$$H_y = \frac{-j\beta E_0}{k\eta} \sin \frac{\pi y}{a} \cos \frac{\pi x}{a} \quad (3)$$

$$E_x = E_y = H_z = 0 \quad (4)$$

z 방향의 위상 상수는 β_z 이고, η 는 도파관 내부의 유전 물질의 고유 임피던스일 때, 위상 상수는 다음과 같이 주어진다.

$$\beta_z = \beta_{11} = \sqrt{k^2 - 2(\pi/a)^2} \quad (5)$$

$k = \omega\sqrt{\mu\epsilon}$ 는 파장수를 나타내며, ω 와 ϵ , μ 는 각각 각주파수와 공진기 내부 유전 물질의 유전율과 투자율을 나타낸다. 또한, SIW의 공진 주파수를 결정짓기 위해 다음 수식을 사용하여 설계할 수 있다.

$$f_{mn0} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{W}\right)^2} \quad (6)$$

Fig. 1(a)에서 기존의 기판 집적형 도파관(SIW)의 E-field magnitude 분포를 나타내고 있다. 기본 모드

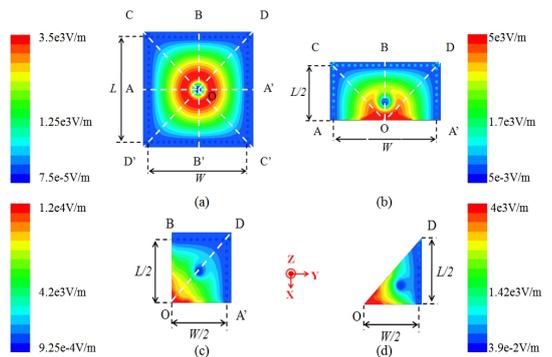


그림 1. 모의실험으로 얻어진 E-field magnitude 분포 (a) SIW, (b) HMSIW, (c) QMSIW, (d) EM-SIW

Fig. 1. Simulated total E-field magnitude distribution (a) SIW, (b) HMSIW, (c) QMSIW, (d) EM-SIW.

에서 SIW의 전기장은 표면과 접지 면에 수직하게 형성되었다. 자기장의 방향은 도파관 표면에 평행하고 옆면의 금속 비아에 수직한 분포를 갖는다. 식 (2)와 (3)에서 자기장으로부터 자계벽(magnetic wall)이 Fig. 1(a)의 A-A', B-B', C-C', D-D'면에서 발생하는 것을 알 수 있다.

SIW가 완전 자계벽인 A-A'면에 따라 잘라졌을 때, Fig. 1(b)에서 보여주듯이 기본 모드 TE₁₁₀의 전기장 분포의 반절을 유지하면서 1/2 기판 집적형 도파관(HMSIW)을 실현할 수 있다^[7]. HMSIW은 기존의 SIW에서 크기를 줄일 수 있어 이를 적용한 소형화 필드나 안테나가 제안되었다^{[8]-[11]}. 비슷하게, HMSIW은 다른 가상의 자계벽인 B-O면을 기준으로 잘라 1/4 기판 집적형 도파관(QMSIW)으로 더욱 소형화시킬 수 있었다.

본 논문에서는 Fig. 1(d)에서 보여주듯이 QMSIW을 O-D면 기준으로 분할하여 EMSIW을 소개한다. 그 구조는 정 이등변 삼각형 모양이고, 두 면은 완전 자계벽, 나머지 한 면은 완전 전계벽으로 이루어져 있다. Fig. 1(a)와 (d)를 비교했을 때 E-field 분포가 거의 변하지 않고 유지되는 모습을 확인할 수 있다. 그러므로 총 크기는 7/8의 감소가 있지만 공진 주파수는 거의 같은 값을 갖게 된다. 또한, Fig. 2에서 보여주듯이 모든 E-field는 접지에서 SIW 구조체로 수직하게, 즉 Z-방향으로 형성되어 있다.

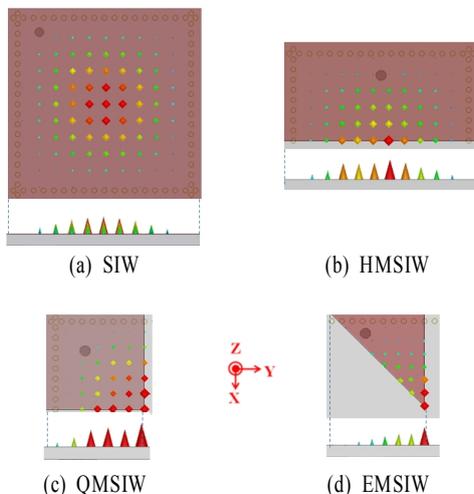
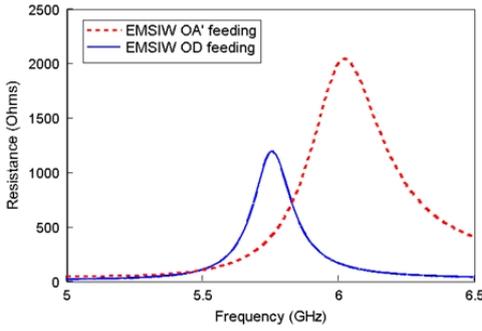


그림 2. 모의실험으로 얻어진 E-field vector 분포
Fig. 2. Simulated total E-field vector distribution.

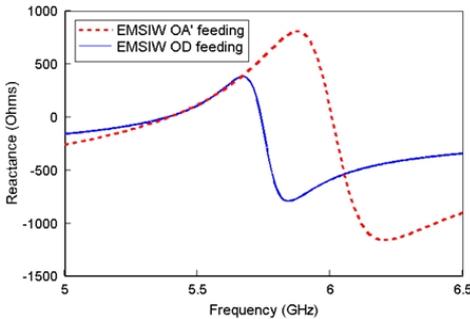
4가지 SIW의 구현을 위해 1.575 mm Rogers RT/Duroid 5880 기판을 사용하였다. EM 시뮬레이션을 위해 2.2의 상대적 유전 상수, 0.0009의 손실 탄젠트 값을 사용하였다. 금속성의 비아는 0.7 mm의 지름을 갖고, 각 비아의 중심에서 중심까지의 거리는 1.4 mm로 디자인하였다. 기존의 24×24 mm² 크기의 정사각형 SIW을 이용하여 HMSIW, QMSIW, EMSIW을 설계하였다. Fig. 1에서는 4가지 모드의 도파관의 E-field 분포를 각각의 공진 주파수에서 도시하였다. SIW, HMSIW, QMSIW, EMSIW은 각각 6.45 GHz, 6.15 GHz, 5.6 GHz, 5.3 GHz에서 공진을 일으킨다. SIW를 이용하여 HMSIW를 설계했을 때 이상적으로 완벽한 자계 면이 형성되지 않기 때문에 프린팅 필드가 생성되어 약간 더 낮은 주파수에서 공진이 일어나게 된다. 또한, QMSIW, EMSIW로 소형화됨에 따라 구조의 면적에 비해 프린팅 필드가 상대적으로 더 커져 주파수가 더욱 낮아지는 특성을 보인다. Fig. 1에서 4개의 SIW 구조는 모두 프로브 급전을 사용하였고, 급전된 부분에서 null 지점이 생긴다.

III. 안테나 설계와 모의실험 결과

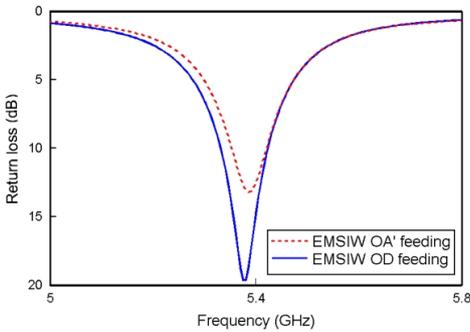
상보적 분할 링 공진기(CSRR)를 적용한 1/8 모드 기판 집적형 도파관(EMSIW)의 작은 크기 때문에 구조 내에 프로브 급전을 이용하여 급전하기에는 공간이 제한적이다. 특히 CSRR의 위치를 조절하여 임피던스 정합도가 달라져 프로브 급전의 자유도가 현저히 떨어지게 되었다. 또한, SIW 구조에 자주 사용되는 인셋 급전 방식은 EMSIW 구조에서 방식을 일으키는 오픈된 면(OA'-평면 또는 OD-평면)의 구조가 변경되어야 하기 때문에 사용이 불가하였다. 반면에 gap coupling을 이용할 경우, EMSIW 구조의 수정 없이 급전을 간단하게 할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 gap coupling으로 50 ohm 임피던스 정합을 시도하였다. EMSIW에는 2면의 오픈된 면(OA'-평면, OD-평면)이 존재하여 이 면을 이용하여 급전을 할 수 있다. OA'-평면을 이용하든 OD-평면을 이용하든 같은 E-field 분포와 같은 공진 주파수를 갖는 것을 확인할 수 있다. 하지만 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 OD-평면 급전이 OA'-평면 급전에 비해 더 낮은 임피던스 값을 갖고 있어 매칭에 더 용이하다고 판단되었다.



(a) 저항
(a) Resistance



(b) 리액턴스
(b) Reactance



(c) 반사 손실 값
(c) Return loss values

그림 3. OD-평면, OA'-평면 급전
Fig. 3. Terms of feeding direction.

그에 따라 더 좋은 반사 손실값을 얻을 수 있었고, 또한 그로 인해 더 넓은 10 dB 대역폭을 만족시킬 수 있었다.

EMSIW의 공진 주파수는 5.38 GHz이며, 구조적 치수는 식 (6)에 의해 이등변삼각형 모양이 된다. CSRR가 적용된 EMSIW 안테나는 EMSIW 공진기의 윗 표면에 한 개의 CSRR을 식각하여 설계되었다. EM-

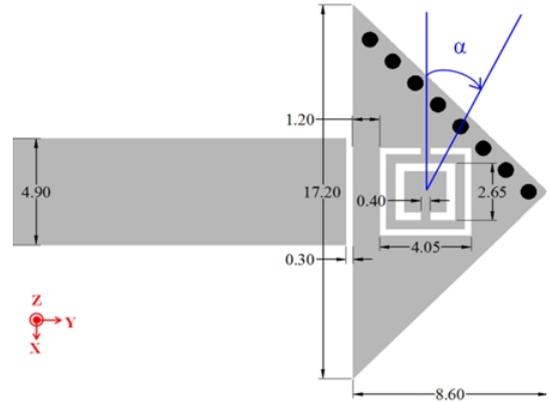


그림 4. 제안된 안테나의 구조와 수치
Fig. 4. Configuration of the proposed antenna with geometrical dimensions.

SIW 공진기 구조 표면에 추가적인 CSRR을 식각하여 구조적 perturbation이 발생하게 된다. 그로 인한 전자기장 분포의 변화로 공진 주파수가 낮아지게 된다^[16]. CSRR이 접지 면에 식각되었을 경우에는 후방 방사가 커지므로, 본 논문에서는 후방 방사를 줄이기 위해 윗 표면에 식각하였다.

Fig. 4에서 안테나의 전체 구조와 치수를 보여주고 있다.

제안된 안테나의 공진 주파수는 CSRR의 크기에 의해서 결정된다. 바깥쪽 링의 크기가 공진 주파수를 낮추는 1차적인 요소이며, 안쪽 링도 2차적인 요소로서 공진 주파수에 영향을 준다. 또한, CSRR의 회전 각도에 따라 공진 주파수가 변화됨을 확인할 수 있다. CSRR의 회전각도는 Fig. 4의 α 로 결정된다. Fig. 5에서 CSRR을 30° 간격으로 0°에서 360°까지 회전시킨 모의실험 반사 손실 결과 값을 보여준다. 동작 주파수는 $\alpha=210^\circ$ 에서 4.72 GHz의 최소 값을 갖고 $\alpha=30^\circ$ 에서 5.09 GHz의 최대값을 갖는다. 모든 회전 각도에서 임피던스는 50 ohm으로 정합되어 있다. 각 회전에 따른 공진 주파수는 표 1에 정리되어 있다. 그림 6은 α 의 변화에 따른 모의실험 방사 패턴(E_θ) 결과를 XZ-, YZ-평면에서 보여주고 있다. 그 결과, α 에 따라 거의 변함이 없는 방사 패턴을 보여주고 있다. $\alpha=30^\circ, 210^\circ, 270^\circ, 300^\circ$ 에 따른 EMSIW의 E-field 분포가 그림 7에 나타나 있다. 그림 7에서와 같이 CSRR의 방향에 따라 CSRR에 커플링 되는 E-field가 변한다는 사실을 확인할 수 있다. CSRR

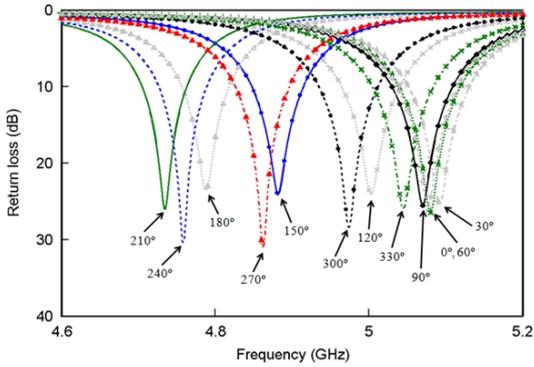


그림 5. 제안된 안테나의 12가지 다른 α 값에 따른 반사 손실의 모의실험 결과
 Fig. 5. Simulated return losses of the proposed antenna with 12 different α value.

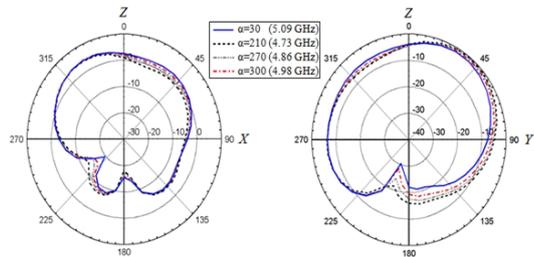


그림 6. α 변화에 따른 모의실험 방사 패턴
 Fig. 6. Simulated radiation pattern with various α value.

에 의해 전기적 길이가 길어질 뿐만 아니라, CSRR의 방향에 따라 전기적 길이가 변하게 되므로 α 에

표 2. CSRR 회전 각도 α 에 따른 4개의 EMSIW 안테나의 성능 요약

Table 2. Performance summary of the EMSIW for four rotation angles of CSRR(α).

		Rotation angle of the CSRR, α			
		30°	210°	270°	300°
Antenna area (λ_0^2)		(0.292×0.146)/2	(0.271×0.135)/2	(0.279×0.139)/2	(0.286×0.143)/2
Simulation	Resonant frequency(GHz)	5.09	4.73	4.86	4.98
	10 dB-BW(%)	1.77	1.30	1.45	1.50
	Peak gain E_θ (dBi)	5.98	5.49	5.79	5.089
	Peak total gain(dBi)	6.15	5.57	5.90	6.05
	Radiation efficiency(%)	90.3	80.85	86	89
Measurement	Resonant frequency(GHz)	5.07	4.74	4.87	4.96
	10 dB-BW(%)	1.55	1.30	1.45	1.51
	Peak gain E_θ (dBi)	5.92	4.50	4.70	5.40
	Peak total gain(dBi)	6.05	4.74	4.87	5.48
	Radiation efficiency(%)	97.86	72.32	77.87	86.93

표 1. α 의 변화에 따른 공진 주파수 변화

Table 1. Simulated resonant frequency variation for different α .

α (°)	Freq.(GHz)	α (°)	Freq.(GHz)	α (°)	Freq.(GHz)
0	5.076	120	5	240	4.757
30	5.091	150	4.881	270	4.861
60	5.08	180	4.787	300	4.973
90	5.070	210	4.733	330	5.045

따라 공진 주파수가 변하게 된다.

IV. 측정 결과

제안된 안테나의 특성을 실험적으로 증명하기 위하여 4개의 안테나($\alpha=30^\circ, 210^\circ, 270^\circ, 300^\circ$)를 제작하였다. Fig. 8은 $\alpha=270^\circ, 300^\circ$ 인 안테나의 제작된 모습이다. 안테나들은 1.575 mm의 Rogers RT/Duroid 5880 기판을 기반으로 제작되었다.

4개의 안테나의 반사 손실 값은 HP 8510C로 측정하였다. Fig. 9에서 측정된 반사 손실 값을 모의실험 값과 비교하여 도시하였고, 두 결과 값이 잘 일치하는 것을 확인하였다. 모든 회전 각도에 따라서 반사 손실 값은 25 dB 이상의 값을 유지하였고, 10-dB 대역폭은 1.3 %보다 크다.

방사 패턴은 α 가 30°, 270°, 300°일 때 XZ-평면과 YZ-평면을 측정하였다. Fig. 10에서 보이듯이 모의

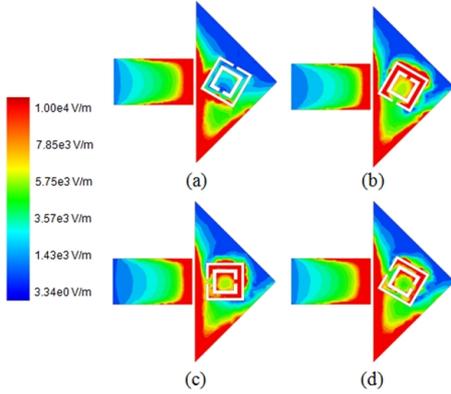


그림 7. 제안된 EMSIW 안테나의 E-field 분포, $\alpha=(a) 30^\circ$, (b) 210° , (c) 270° , (d) 300°
 Fig. 7. Simulated magnitude of E-field distribution of the EMSIW antenna at $\alpha=(a) 30^\circ$, (b) 210° , (c) 270° , (d) 300° .

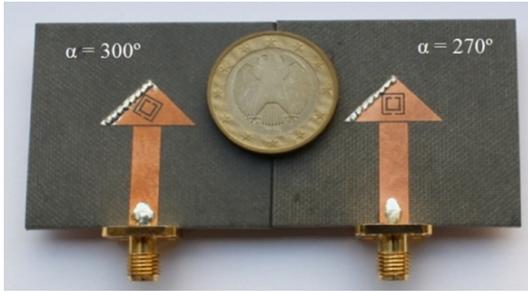


그림 8. 제안된 안테나의 실제 사진 ($\alpha=300^\circ$, $\alpha=270^\circ$)
 Fig. 8. Picture of the fabricated EMSIW antennas with $\alpha=300^\circ$, $\alpha=270^\circ$.

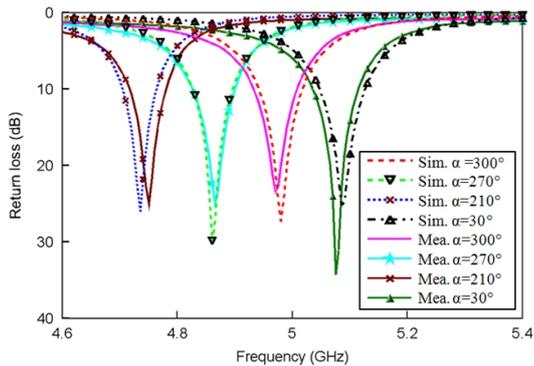


그림 9. 반사 손실의 모의실험 결과와 측정 결과 비교
 Fig. 9. Comparison between the simulated and measured return losses of the proposed antenna.

실험 결과와 측정 결과가 비슷한 것을 알 수 있다. 방사 패턴의 최대 값이 기울어진 각도에 위치하게 된다.

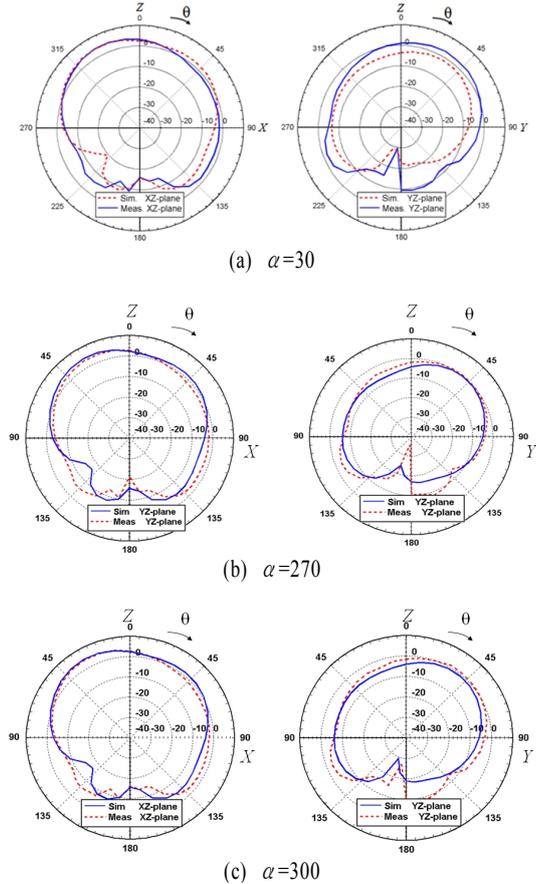


그림 10. 방사 패턴 모의 실험 및 측정 결과
 Fig. 10. Simulated and measured gain patterns.

그 이유는 fringe field로부터 형성된 두 자류(magnetic current)의 vector 방향의 차이와 EMSIW의 비대칭 구조에서 비롯된다. 이처럼 기울어진 각도의 패턴은 2D로 측정했을 때 정확히 찾기 힘들기 때문에 3D 방사 패턴을 무반향실에서 측정하였다. Fig. 11은 $\alpha=30^\circ$ 일 경우 5.07 GHz에서 측정된 3D 방사 패턴을 보여준다. 3D 공간의 모든 부분에서 방사 전력을 측정하여 효율을 구할 수 있었다. α 에 따른 4개의 안테나들에 관해 조사하여 정리한 정보를 Table 2에 나열하였다. 같은 물리적인 길이를 갖고 있지만 공진 주파수가 다르기 때문에 전기적인 크기가 다르다.

Table 3에서는 $\alpha=30^\circ$ 일 경우의 제안된 안테나 성능을 최근 발표된 SIW 안테나들과 비교해 놓았다. 소형화가 됐음에도 불구하고 이득과 효율면에서 더 좋은 성능을 보인다.

표 3. 제안된 안테나와 다른 SIW 안테나들과의 비교
Table 3. Comparison results of proposed antenna and previously reported SIW antennas.

	This work	Ref. ^[14]	Ref. ^[15]	Ref. ^[17]
Frequency (GHz)	5.07	7.75	6.63	3.67
Antenna size (λ_0^2)	(0.292×0.146) /2	0.296× 0.335	0.24× 0.23	0.35× 0.35
Meas. 10 dB-BW(%)	1.55	2.25		0.7
Meas. peak gain(dBi)	5.95	4.31	1.59	4.46
Meas. efficiency(%)	97.86	86.9		

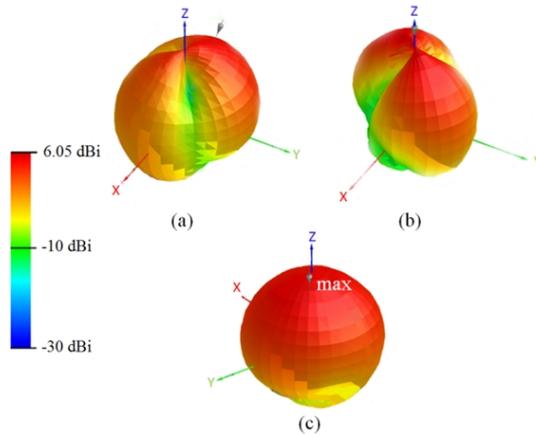


그림 11. 측정된 3-D 방사 패턴 결과($\alpha=30^\circ$). (a) 이득 세타, (b) 이득 파이, (c) 총 이득
Fig. 11. Measured 3-D radiation pattern($\alpha=30^\circ$). (a) gain theta (b) gain phi (c) total gain.

V. 결 론

본 논문에서 CSRR을 적용시킨 소형 EMSIW 안테나를 제안하였다. 제안된 안테나의 공진 주파수는 CSRR의 각도를 회전하여 변화됨을 확인할 수 있었다. 회전 각도에 따라 커플링 에너지가 달라 공진 주파수가 4.74 GHz에서 5.07 GHz까지 변화하였다. 방사 패턴은 거의 동일하게 생성되었고, 4.74 GHz, 5.07 GHz에서 각각 4.5 dBi, 5.9 dBi의 최대 이득을 보인다. 반사 손실과 방사 패턴에 있어서 모의실험 결과와 측정 결과가 잘 일치하였다. 제안된 안테나는 소형화와 높은 방사 성능을 필요로 하는 모바일

무선 통신 기기들에 응용될 수 있다.

References

- [1] P. L. Chi, R. Waterhouse, and T. Itoh, "Antenna miniaturization using slow wave enhancement factor form loaded transmission line models", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 59, no. 1, pp. 48-57, Jan. 2011.
- [2] C. R. Rowell, R. D. Murch, "A capacitively loaded PIFA for compact mobile telephone headsets", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 45, no. 5, pp. 837-842, May 1997.
- [3] K. Takahagi, Y. Otsu, and E. Sano, "2.45 GHz high-gain electrically small antenna with composite right/left-handed ladder structure", *Electronics Letters*, vol. 48, no. 16, pp. 971-972, Aug. 2012.
- [4] D. Deslandes, K. Wu, "Single-substrate integration technique of planar circuits and waveguide filters", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 51, no. 2, pp. 593-596, Feb. 2003.
- [5] F. Xu, K. Wu, "Guided-wave and leakage characteristics of substrate integrated waveguide", *IEEE Microw. Theory Tech.*, vol. 53, no. 1, pp. 66-73, Jan. 2005.
- [6] D. Stephens, P. R. Young, and I. D. Robertson, "W-band substrate integrated waveguide slot antenna", *Electronics Letters*, vol. 41, no. 4, pp. 165-167, Feb. 2005.
- [7] W. Hong, B. Liu, Y. Wang, Q. Lai, H. Tang, X. X. Yin, Y. D. Dong, Y. Zhang, and K. Wu, "Half mode substrate integrated waveguide: a new guided wave structure for microwave and millimeter wave application", *Presented at the Joint 31st Int. Infrared Millimeter Waves Conf. and 14th Int. Terahertz Electron. Conf.*, Shanghai, China, Sep. 2006.
- [8] Y. J. Cheng, W. Hong, and K. Wu, "Millimeter-wave half mode substrate integrated waveguide frequency scanning antenna with quadri-polarization", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 58, no. 6, pp. 1848-1855, Jun. 2010.

- [9] Q. Xin, F. -S. Zhang, B. -H. Sun, Y. -L. Zou, and Q. -Z. Liu, "Yagi-Uda antenna with small size for vehicles", *Electron. Lett.*, 47(7), pp. 428-430, 2011.
- [10] Y. D. Dong, T. Itoh, "Composite right/left-handed substrate integrated waveguide and half mode substrate integrated waveguide leaky-wave structures", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 59, no. 3, pp. 767-775, Mar. 2011.
- [11] B. Liu, W. Hong, Y. Q. Wang, Q. H. Lai, and K. Wu, "Half mode substrate integrated waveguide (HMSIW) 3-dB coupler", *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 17, no. 1, pp. 22-24, Jan. 2007.
- [12] N. Grigoropoulos, B. Sanz-Izquierdo, and P. R. Young, "Substrate integrated folded waveguides (SIFW) and filters", *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 15, no. 12, pp. 829-831, Dec. 2005.
- [13] S. Zhang, T. J. Bian, Y. Zhai, W. Liu, G. Yang, and F. L. Liu, "Quarter substrate integrated waveguide resonator applied to fractal-shaped BPFs", *Microw. Journal Freq. Matters*, May 2012.
- [14] Y. D. Dong, T. Itoh, "Miniaturized substrate integrated waveguide slot antennas based on negative order resonance", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 58, no. 12, pp. 3856-3864, Dec. 2010.
- [15] J. Choi, S. Lim, "Complementary split ring resonator(CSRR)-loaded substrate integrated waveguide (SIW) metamaterial antenna", *IEICE Trans. Commun.*, vol. E95b, no. 1, pp. 304-307, Jan. 2012.
- [16] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 3rd Ed. Hoboken, NJ: Wiley, ch. 6.3 & ch. 6.7, 2005.

강 현 성



2012년 2월: 중앙대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2012년 3월~현재: 중앙대학교 전자전기공학부 석사과정
 [주 관심분야] 소형 안테나, 재구성 안테나

임 성 준



2002년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 2004년 2월: University of California Los Angeles 전기공학과 (공학석사)
 2006년 2월: University of California Los Angeles 전기공학과 (공학박사)

2006년~2007년: University of California, Irvine Post-Doc.
 2007년 3월~현재: 중앙대학교 전자전기공학부 부교수
 [주 관심분야] 마이크로파 회로 및 안테나

Somarith Sam



2010년 2월: Institute of Technology of Cambodia (공학사)
 2013년 3월: 중앙대학교 전자전기공학부 (공학석사)
 2013년 3월~현재: Institute of Technology of Cambodia 전자전기공학과 조교수

[주 관심분야] Metamaterial, RF MEMS, 마이크로파 회로