

# 기판 두께와 천공의 위치 및 크기가 근접 결합 급전을 이용한 천공된 마이크로스트립 패치 안테나의 대역폭과 방사특성에 미치는 영향

이 규 훈\*, 광 은 혁\*, 김 부 균<sup>o</sup>

## Effect of Substrate Thickness, Perforation Position and Size on the Bandwidth and Radiation Characteristics of a Proximity Coupled Perforated Microstrip Patch Antenna

Kyu-Hoon Lee\*, Eun-Hyuk Kwak\*, Boo-Gyoun Kim<sup>o</sup>

### 요 약

정사각형 천공이 2×2 배열된 정사각형 패치 안테나에 근접 결합 급전을 이용하여 기판 두께와 천공의 위치 및 크기가 안테나의 대역폭과 방사특성에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 안테나 기판과 급전 기판의 두께가 두꺼워질수록 방사특성의 저하 없이 대역폭이 증가 되었다. 천공 중심의 위치를 패치 길이 방향 가장자리로 이동시키는 경우 방사특성의 큰 저하 없이 대역폭을 증가시킬 수 있었다. 천공 중심의 위치를 패치 폭 방향으로 이동시키는 경우 중심 위치가 대역폭과 방사특성에 미치는 영향이 매우 작았다. 천공의 크기가 작아질수록 대역폭은 증가 되고 방사특성은 향상되었다.

**Key Words** : perforated antenna, proximity coupled, bandwidth, shared aperture, SAR

### ABSTRACT

Effect of substrate thickness, perforation position and size on the bandwidth and radiation characteristics of a proximity coupled perforated microstrip patch antenna (PCPPA) with 2×2 square perforations inside a patch is investigated. As the thicknesses of antenna substrate and feed substrate increase, the bandwidth of a PCPPA increases without the degradation of radiation characteristics. As the position of a perforation moves toward the edge of a patch along the length direction, the bandwidth of a PCPPA increases without the degradation of radiation characteristics, while the effect of changing the position of a perforation along the width direction on the bandwidth and radiation characteristics of a PCPPA is negligible. As the perforation size is decreased, the bandwidth of a PCPPA is increased and the radiation characteristics of a PCPPA are enhanced.

\* 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술연구진흥센터의 정보통신·방송 연구개발사업의 일환으로 수행하였음. [12-911-01-102, 재구성이 가능한 초소형 다중대역 전파영상 시스템]

♦ First Author : Soongsil University Department of Electronic Engineering, mans7@naver.com, 학생회원

o Corresponding Author : Soongsil University Department of Electronic Engineering, bgkim@e.ssu.ac.kr, 종신회원

\* Soongsil University Department of Electronic Engineering, ehkwak@ssu.ac.kr, 학생회원

논문번호 : KICS2014-04-111, Received April 4, 2014; Revised June 7, 2014; Accepted June 10, 2014

## I. 서 론

이중대역 합성 개구 레이더 (synthetic aperture antenna, SAR)는 파장이 다른 두 개의 주파수 대역을 사용함으로써 단일대역 안테나에 비해 목표물로부터 더 많은 정보를 얻을 수 있다는 장점을 가진다<sup>[1]</sup>. 이중대역 안테나 구현 시 개구면을 공유하는 구조 (shared aperture structure)를 이용하면 안테나의 크기를 줄이고 무게를 감소시킬 수 있다. 개구면 공유 구조의 경우 고주파수 대역에서 동작하는 패치 안테나의 방사 소자 사이에 저주파수 대역에서 동작하는 dipole/slot 안테나를 배열하는 interlaced 안테나 구조가 있으며<sup>[2]</sup>, 저주파수 대역에서 동작하는 천공(perforated)된 패치 안테나의 내부와 외부에 고주파수 대역에서 동작하는 패치 안테나 배열을 집적하는 구조가 있다<sup>[3]</sup>.

이중대역 안테나를 구현하기 위해 패치 안테나를 개구면을 공유하는 구조에 이용하는 경우 천공된 패치 안테나는 일반적인 패치 안테나를 이용한 경우에 비해 서로 다른 대역에서 동작하는 안테나 소자간의 상호결합을 감소시킬 수 있으며 전기적으로 소형으로 동작한다는 장점이 있다. 따라서 패치 안테나를 이용한 이중대역 안테나 구현 시 개구면 공유 구조를 사용하는 경우 천공된 패치 안테나의 사용은 불가피하다고 생각된다.

그러나 천공된 패치 안테나는 일반적인 패치 안테나에 비하여 반사손실 대역폭이 좁기 때문에 대역폭을 확장하기 위한 여러 가지 방법이 연구되었다. 대표적인 방법으로 안테나 패치의 상단에 기생 패치를 적층하는 방법이 있다<sup>[4]</sup>. 이 경우 2×2 배열로 천공된 패치에 2×2 배열로 천공된 기생 패치를 적층하는 방법을 사용하였으며 중심 주파수가 1.275 GHz 이고 7.8%의 넓은 대역폭을 가졌다. 그러나 기생 패치를 사용하여 적층하는 경우 설계가 어려워지고 비용이 증가한다는 단점이 있다.

대역폭 확장을 위한 다른 방법으로 급전 선로에 튜닝 스테르브를 삽입하는 방법이 있다<sup>[5]</sup>. 이 경우 개구면 공유 구조를 가지는 이중대역 안테나에서, 4×4 배열로 천공된 패치가 저주파수 대역인 L-대역을 담당하며 급전 선로에 튜닝 스테르브를 삽입함으로써 6.4%의 넓은 대역폭 특성을 가졌다<sup>[5]</sup>. 그러나 급전선로에 스테르브를 삽입하는 경우 배열 안테나의 급전 선로 설계시 어려움이 발생하며 교차편파가 증가하는 문제가 발생하게 된다<sup>[6]</sup>.

동축 프로브 급전방식이나 패치의 가장자리에 마이크로스트립 선로를 이용하여 급전하는 다이렉트 급전

방식은 좁은 반사손실 대역폭 특성을 가지며 급전부와 패치 사이에서 전류의 불연속으로 인해 발생하는 원하지 않는 방사로 인한 안테나의 성능 저하가 발생한다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 근접 결합 급전 방식이 사용되었다<sup>[7]</sup>. 근접 결합 급전 방식을 사용한 적층된 마이크로스트립 패치 안테나에서 기판의 유전상수와 두께가 안테나의 반사손실 대역폭 및 방사특성에 미치는 영향에 대한 연구 결과가 발표되었다<sup>[7-8]</sup>.

천공된 패치 안테나의 대역폭을 확장하기 위하여 기생 패치를 사용하거나 튜닝 스테르브를 사용한 안테나에 대하여 연구가 이루어진 반면 천공된 패치 안테나 자체의 구조 파라미터가 안테나의 대역폭과 방사특성에 미치는 연구는 아직까지 학술지에 발표되지 않은 것으로 보인다. 본 논문에서는 기생 패치와 튜닝 스테르브를 사용하지 않은 근접 결합 급전을 이용한 천공된 패치 안테나 (proximity coupled perforated patch antenna; PCPPA)의 기판 두께와 천공의 위치 및 크기가 PCPPA의 반사손실 대역폭과 방사특성에 미치는 영향에 대하여 Ansys 사의 HFSS 를 이용하여 전산모의한 연구 결과를 보고한다.

본 논문의 구조는 다음과 같다. 제2장에서는 PCPPA의 안테나 기판 두께와 급전 기판 두께가 안테나의 반사손실 대역폭과 방사특성에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 또한 PCPPA를 제작하여 측정된 안테나 특성을 전산모의 결과와 비교한 결과를 제시한다. 제3장에서는 PCPPA의 천공의 크기와 위치가 안테나의 반사손실 대역폭과 방사특성에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 마지막으로 제 4장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. 안테나 기판의 두께와 급전 기판의 두께가 안테나의 대역폭 및 방사특성에 미치는 영향

본 논문에서 연구한 PCPPA의 구조도를 그림 1에 보인다. PCPPA는 급전선로를 기준으로 상판은 안테나의 방사패치와 안테나 기판으로 이루어져 있고 하판은 급전 기판과 접지면으로 구성된다. 방사 패치의 길이와 폭을 각각  $L_p$  와  $W_p$  로 나타냈다. 방사 패치는 내부에 한 번의 길이가  $d$  인 정사각형 형태의 천공이 2×2 배열된 구조를 가진다. 천공의 중심 간의 거리를 길이 방향으로  $d_L$  로 폭 방향으로  $d_W$  로 나타내었다. 급전 선로는 방사 패치의 한쪽 종단으로부터 급전 선로가 개방된 오픈 스테르브까지의 길이를  $\Delta L$  로 나타내었으며 급전 선로의 폭  $w_f$  는 기판의 두께

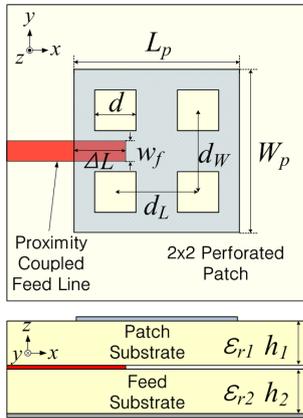


그림 1. 일반적인 PCPPA의 구조도  
Fig. 1. Geometry of a PCPPA.

에 따라 전송선로의 특성 임피던스가 50 Ω이 되도록 설계하였다. 안테나 기판의 두께와 유전상수를 각각  $h_1$  과  $\epsilon_{r1}$ , 급전 기판의 두께와 유전상수를 각각  $h_2$  와  $\epsilon_{r2}$  로 나타내었다. 본 논문에서 연구한 모든 안테나의 패치는  $L_p$  와  $W_p$  가 모두 30 mm 인 정사각형 구조를 가진다. 안테나 기판과 급전 기판의 크기는 한 변의 길이가 각각 100 mm 와 112 mm 인 정사각형 기판이고 Taconic 사의 TLY-6 ( $\epsilon_r=2.2, \tan\delta=0.0009$ ) 을 사용하였다.

그림 1의 구조를 가지는 PCPPA를 이용하여 S대역에서 동작하는 안테나를 설계하였다. 표 1은 기본 모드로 동작하도록 설계한 일반적인 패치 안테나와 PCPPA의 구조 파라미터를 보이며 그림 2는 설계한 일반적인 패치 안테나와 PCPPA의 반사손실 스펙트럼과 공진 주파수에서의 방사패턴을 보인다.

그림 2 (a) 는 표 1과 같은 설계 파라미터를 가지는 일반적인 패치 안테나와 PCPPA의 반사손실 스펙트럼을 보인다. 일반적인 패치 안테나와 PCPPA의 동작 주파수는 각각 3.00 GHz 와 2.80 GHz 임을 볼 수 있다. PCPPA의 경우 천공으로 인하여 안테나 패치의

표 1. 그림 1과 같은 PCPPA와 일반적인 패치 안테나의 설계 파라미터  
Table 1. Design parameters of a conventional patch antenna and a PCPPA shown in fig. 1.

안테나 종류	$h_1$ [mm]	$h_2$ [mm]	$L_p$ [mm]	$W_p$ [mm]	$\Delta L$ [mm]	$d_L, d_W$ [mm]	$d$ [mm]	$w_f$ [mm]
일반적인 패치	1.6	1.6	30	30	11	-	-	3.5
천공된 패치	1.6	1.6	30	30	3.6	12.7	8.0	3.5

가장자리를 따라 흐르는 전류로 인해 전류가 흐르는 경로의 길이가 증가하여 일반적인 패치 안테나에 비하여 전기적으로 소형으로 동작한다. 일반적인 패치 안테나와 PCPPA의 10 dB 반사손실 대역폭은 각각 3.8 % 와 2.4 %로서 PCPPA의 대역폭이 작음을 볼 수 있다.

그림 2 (b) 와 (c)는 각각 일반적인 패치 안테나와 PCPPA의 동작 주파수에서의 방사패턴을 보인다. 일반적인 패치 안테나와 PCPPA의 전방 이득은 각각 7.9 dBi 와 8.0 dBi 로 비슷하였다. 최대 교차편파의 크기는 전방 이득의 -3 dB 빔 폭 내에서 교차편파의 최대값으로 정의하였으며 일반적인 패치 안테나의 경우 E-평면과 H-평면에서 각각 -32.6 dBi 와 -14.8 dBi 를 가지며 PCPPA의 경우 E-평면과 H-평면에서 각각 -31.7 dBi 와 -11.9 dBi 를 가진다. H-평면의 경우 접지면의 가장자리로부터 안테나의 가장자리로 전계 벡터가 형성되고 급전 선로에서 spurious 방사가 발생하여 E-평면에 비해 교차 편파가 큰 값을 가지는 것으로 생각된다. PCPPA의 경우 안테나 패치의 천공으로 인해 안테나의 폭 방향으로 흐르는 전류의 성분이 증가하여 H-평면의 교차 편파의 크기가 일반적인 패치 안테나보다 약 3 dB 큰 값을 가진다고 생각된다.

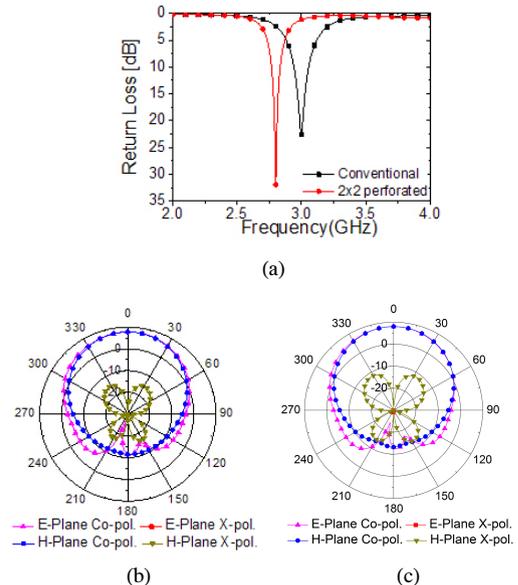


그림 2. 표 1과 같은 설계 파라미터를 가지는 일반적인 패치 안테나와 PCPPA의 방사특성. (a) 반사손실 스펙트럼, (b) 일반적인 패치 안테나의 방사패턴, (c) PCPPA의 방사패턴  
Fig. 2. Radiation characteristics of the conventional patch antenna and PCPPA with the design parameters shown in table 1. (a) return loss spectrum, (b) radiation patterns of the conventional patch antenna, (c) radiation patterns of the PCPPA.

표 2에 표 1과 같은 설계 파라미터를 가지는 일반적인 패치 안테나와 PCPPA의 10 dB 반사손실 대역폭과 방사특성을 정리하였다.

표 1의 구조 파라미터를 가지는 PCPPA의 급전 기판 두께를 각각 0.8 mm, 1.6 mm, 3.2 mm 로 변화시키며 안테나의 입력 임피던스 특성과 방사특성을 살펴보았다. 그림 3은 여러 가지 급전 기판 두께에서 PCPPA의 반사손실 스펙트럼과 스미스 도표에 도시한 입력 임피던스 특성을 보이며 표 3에 공진주파수와 대역폭 특성을 정리하였다.

그림 3 (a)에서 급전 기판이 두꺼워짐에 따라 안테나의 프린징 필드가 증가하여 공진 주파수가 감소하여 급전 기판의 두께가 0.8 mm 에서 3.2 mm 로 두꺼워지는 경우 안테나의 공진 주파수는 약 6 % 감소하였다. 또한 급전 기판이 두꺼워짐에 따라 10 dB 반사손실 대역폭이 증가하여 급전 기판의 두께가 0.8 mm 에서 3.2 mm 로 두꺼워지는 경우 대역폭은 1.8 % 에서 3.8 % 로 2배 이상 증가하였다. 이 현상은 기판의 두께가 증가함에 따라 방사 손실에 대한 Q-factor 가

표 2. 표 1과 같은 설계파라미터를 가지는 일반적인 패치 안테나와 PCPPA의 반사손실 대역폭과 방사특성  
Table 2. Return loss bandwidth and radiation characteristics of the conventional patch antenna and PCPPA with the design parameters shown in table 1.

안테나 종류	$h_1, h_2$ [mm]	$\Delta L$ [mm]	공진 주파수 [GHz]	대역폭 [%]	E-평면 이득[dBi]		H-평면 이득[dBi]	
					Co-pol.	X-pol.	Co-pol.	X-pol.
일반적인 패치	1.6	11	3.00	3.8	7.9	-32.6	7.9	-14.8
천공된 패치	1.6	3.6	2.80	2.4	8.0	-31.7	8.0	-11.9

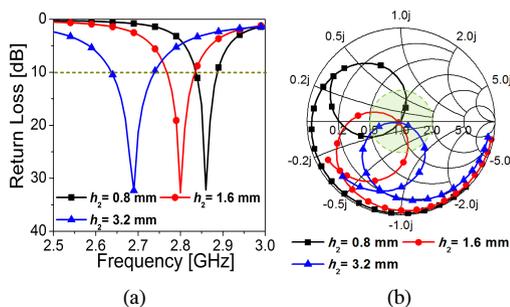


그림 3. 여러 가지 급전 기판 두께에서 PCPPA의 (a) 반사손실 스펙트럼과 (b) 스미스 도표에 도시한 임피던스 특성  
Fig. 3. (a) Return loss spectrum and (b) impedance characteristics plotted in a Smith chart of PCPPAs with various feed substrate thicknesses.

표 3. 여러 가지 급전 기판 두께를 가지는 PCPPA의 공진 주파수와 반사손실 대역폭  
Table 3. Return loss bandwidth and resonant frequency of PCPPAs with various feed substrate thicknesses.

$h_2$ [mm]	$\Delta L$ [mm]	공진 주파수 [GHz]	대역폭 [%]
0.8	9.6	2.86	1.8
1.6	3.6	2.80	2.4
3.2	1.0	2.69	3.8

감소하였기 때문으로 보인다<sup>9)</sup>.

그림 3 (b)에서 급전 기판이 두꺼워질수록 전송 선로와 안테나의 커플링이 증가하여 임피던스 정합을 위한 오픈 스텐브의 길이가 감소하였다. 따라서 입력 임피던스의 인덕턴스 성분이 감소하여 임피던스의 원형 궤적이 커패시티브 영역으로 이동하였다.

그림 4는 표 1의 구조 파라미터를 가지는 PCPPA의 여러 가지 급전 기판 두께에서 PCPPA의 E-평면과 H-평면 방사패턴을 보이며 방사특성을 표 4에 정리하였다. 급전 기판이 두꺼워짐에 따라 방사효율은 거의 변화가 없었으나 이득이 다소 감소하여 급전 기판의 두께가 3.2 mm 인 경우 0.8 mm 인 경우에 비해 0.4 dB 작은 이득 특성을 가졌다. 이 현상은 급전 기판의 두께가 증가할수록 안테나의 공진 주파수가 감소함에 따라 방사 패치의 전기적인 면적이 감소하여 전방이득이 작아지기 때문으로 생각된다. 교차편파의 경우 E-평면에서 기판의 두께에 관계없이 -25 dBi 이하의 매우 작은 값을 가졌다. H-평면의 경우 기판이 두꺼워짐에 따라 교차편파의 크기가 증가하여 기판의 두께가 3.2 mm 인 경우 0.8 mm 인 경우에 비해 최대 교차편파의 크기가 4.5 dB 큰 값을 가졌다.

그림 5 (a)는 표 3의 여러 가지 급전 기판 두께 중

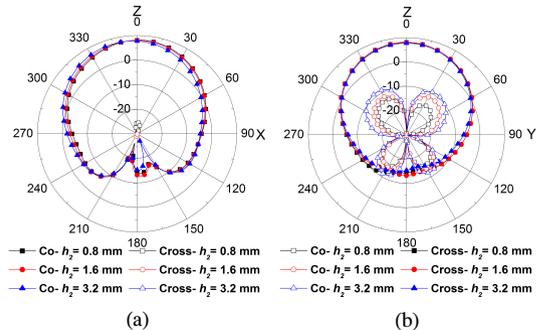


그림 4. 여러 가지 급전 기판 두께를 가지는 PCPPA의 (a) E-평면 방사패턴, (b) H-평면 방사패턴  
Fig. 4. (a) E-plane radiation pattern and (b) H-plane radiation pattern of PCPPAs with various feed substrate thicknesses.

표 4. 여러 가지 급전 기판 두께를 가지는 PCPPA의 방사특성  
Table 4. Radiation characteristics of PCPPAs with various feed substrate thicknesses.

$h_2$ [mm]	방사 효율 [%]	E-평면[dBi]		H-평면[dBi]	
		Co -pol.	X-pol.	Co -pol.	X-pol.
0.8	97	8.1	-25.5	8.1	-13.4
1.6	99	8.0	-31.7	8.0	-11.9
3.2	99	7.7	-31.1	7.7	-8.9

가장 넓은 대역폭을 가지는 급전 기판 두께가 3.2 mm 인 경우의 설계 파라미터를 가지는 제작된 PCPPA의 사진을 보인다. 그림 5 (b), (c), (d)는 각각 PCPPA의 전산모의 및 측정된 반사손실 스펙트럼, E-평면 방사 패턴, H-평면 방사패턴을 보인다. 그림 5 (b)에서 보면 측정된 공진 주파수는 2.67 GHz로 전산모의 결과 2.69 GHz와 비슷한 값을 가졌고, 측정된 대역폭은 4.7 %로 전산모의 결과 3.8 %보다 다소 넓은 대역폭 특성을 가졌다. 그림 5 (c)와 (d)에서 보면 측정된 동일 편파 전방 이득은 6.5 dBi로 전산모의 결과보다

표 5. 급전 기판의 두께가 3.2 mm인 PCPPA의 전산모의 및 측정된 대역폭 및 방사특성  
Table 5. Simulated and measured return loss bandwidth and radiation characteristics of a PCPPA with feed substrate thickness of 3.2 mm.

해석 방법	$h_2$ [mm]	$\Delta L$ [mm]	공진 주파수 [GHz]	대역폭 [%]	E-평면 이득[dBi]		H-평면 이득[dBi]	
					Co -pol.	X -pol.	Co -pol.	X -pol.
전산 모의	3.2	1.0	2.69	3.8	7.7	-31.1	7.7	-8.9
측정			2.67	4.7	6.5	-9.6	6.5	-11.8

약 1.2 dB 낮은 특성을 가졌다. 이는 전산모의에서는 고려되지 않은 천공 면과 천공 주위의 거칠기에 의해 발생되었다고 생각된다. 측정된 E-평면과 H-평면의 방사패턴은 전산모의 결과와 비슷한 패턴을 보인다. 교차 편파의 경우 E-평면에서 -9.6 dBi로 전산모의 결과보다 약 20 dB 큰 값을 가졌다. 이것은 측정 시 오차로 보이며 특히 교차 편파 측정 시 동일 편파 성분이 더해졌기 때문으로 생각된다. 표 5는 공진주파수, 대역폭, 방사특성에 대한 PCPPA의 전산모의 결과와 측정 결과를 정리한 표이다.

표 1의 구조 파라미터를 가지는 PCPPA의 안테나 기판 두께를 0.8 mm, 1.6 mm, 3.2 mm로 변화시키며 안테나의 입력 임피던스 특성과 방사특성을 분석하였다. 그림 6은 여러 가지 안테나 기판 두께에서 PCPPA의 반사손실 스펙트럼과 스미스 도표에 도시한 입력 임피던스 특성을 보이며 표 6에 공진 주파수와 대역폭 특성을 정리하였다.

그림 6 (a)에서 안테나 기판이 두꺼워짐에 따라 공진 주파수가 다소 감소하였다. 급전 기판의 두께가 0.8 mm에서 3.2 mm로 두꺼워지는 경우 안테나의 공진 주파수는 약 1.4 % 감소하였다. 따라서 안테나 기판의 두께 변화가 안테나의 공진 주파수 변화에 미치는 영향은 급전 기판의 두께 변화에 비해 작음을 볼 수 있다. 또한 안테나 기판 두께가 0.8 mm에서 3.2 mm로 두꺼워지는 경우 대역폭은 1.8 %에서 3.7 %로 2배 이상 증가하였다. 따라서 안테나 기판의 두께 변화에 따른 안테나의 대역폭 특성은 급전 기판의 두께 변화와 비슷한 특성을 보인다.

그림 6 (b)에서 안테나 기판이 두꺼워질수록 전송 선로와 안테나의 커플링이 감소하여 임피던스 정합을 위한 오픈 스텐터의 길이가 증가하였다. 따라서 입력 임피던스의 인덕티브 성분이 증가하여 임피던스의 원형 궤적이 인덕티브 영역으로 이동하였다.

그림 7은 표 1의 구조 파라미터를 가지는 PCPPA

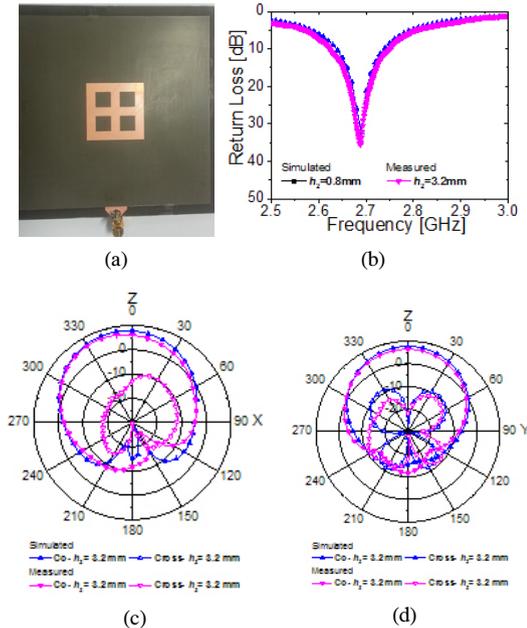


그림 5. (a) 급전 기판 두께가 3.2 mm인 제작된 PCPPA의 사진 (b) 전산모의 및 측정된 반사손실 스펙트럼, (c) 전산모의 및 측정된 E-평면 방사패턴, (d) 전산모의 및 측정된 H-평면 방사패턴

Fig. 5. (a) Photograph of the fabricated PCPPA with feed substrate thickness of 3.2 mm, (b) Return loss spectrum with measurement and simulated results, (c) E-plane radiation pattern with measurement and simulated results, and (d) H-plane radiation pattern with measurement and simulated results.

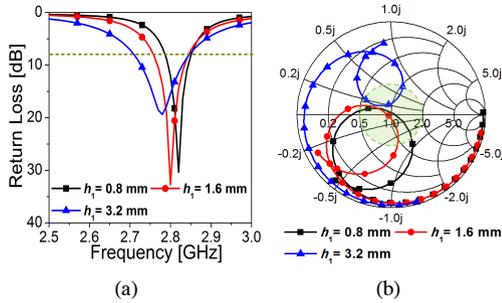


그림 6. 여러 가지 안테나 기판 두께를 가지는 PCPPA의 (a) 반사손실 스펙트럼과 (b) 스미스 도표에 도시한 임피던스 특성  
Fig. 6. (a) Return loss spectrum and (b) impedance characteristics plotted in a Smith chart of PCPPAs with various antenna substrate thicknesses.

표 6. 여러 가지 안테나 기판 두께를 가지는 PCPPA의 공진 주파수와 반사손실 대역폭  
Table 6. Resonant frequency and bandwidth of PCPPAs with various antenna substrate thicknesses.

$h_1$ [mm]	$\Delta L$ [mm]	공진 주파수 [GHz]	대역폭 [%]
0.8	1.6	2.82	1.8
1.6	3.6	2.80	2.4
3.2	13.4	2.78	3.7

의 여러 가지 안테나 기판 두께에서 PCPPA의 E-평면과 H-평면 방사패턴을 보이며 방사특성을 표 7에 정리하였다. 안테나 기판이 두꺼워질수록 방사효율이 다소 증가하였으나 안테나 기판의 두께와 관계없이 비슷한 방사특성을 가졌다. 전방 이득의 경우 안테나 기판의 두께에 관계없이 약 8.0 dBi로 비슷한 크기를 가졌다. 최대 교차편파의 경우 E-평면에서 기판의 두께에 관계없이 -29 dBi 이하의 작은 값을 가지며 H-평면의 경우 -10 dBi 이하의 크기를 가졌다. 따라서 안테나 기판의 두께 변화가 방사특성에 미치는 영향은 급전 기판의 두께 변화에 비해 작음을 볼 수 있다.

급전 기판 두께와 안테나 기판 두께가 모두 3.2 mm인 경우 대역폭은 5.5%로 매우 큰 값을 가졌다. E-평면과 H-평면에서의 전방이득은 7.6 dBi로 2장에서 분석한 기판의 두께에 따른 전방이득과 비슷한 크기를 가졌다. 최대 교차편파의 경우 E-평면에서 -36.4 dBi로 매우 좋은 특성을 보이며, H-평면에서는 -9.7 dBi로 다소 증가하였다. 표 8에 안테나 기판과 급전 기판 두께가 모두 3.2 mm인 경우의 대역폭과 방사특성을 정리하였다.

천공된 패치 안테나를 개구면 공유 구조에 사용하는 경우 S대역에서 동작하는 안테나의 급전선로는 다

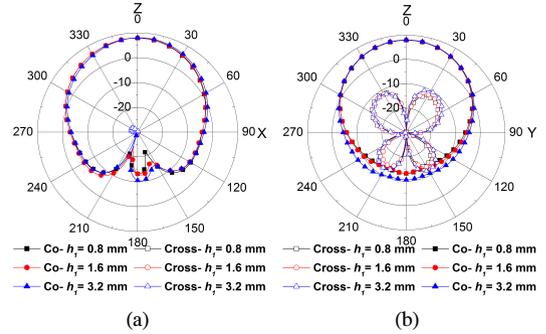


그림 7. 여러 가지 안테나 기판 두께에서 PCPPA의 (a) E-평면 방사패턴과 (b) H-평면 방사패턴  
Fig. 7. (a) E-plane radiation pattern and (b) H-plane radiation pattern of PCPPAs with various antenna substrate thicknesses.

표 7. 여러 가지 안테나 기판 두께에서 PCPPA의 방사특성  
Table 7. Radiation characteristics of PCPPAs with various antenna substrate thicknesses.

$h_1$ [mm]	방사 효율 [%]	E-평면 이득 [dBi]		H-평면 이득 [dBi]	
		Co-pol.	X-pol.	Co-pol.	X-pol.
0.8	97	7.9	-31.7	7.9	-11.4
1.6	99	8.0	-31.7	8.0	-11.9
3.2	99	8.0	-29.5	8.0	-10.4

른 주파수 대역을 구성하는 배열안테나 소자와 동일한 평면에 놓이게 된다. 근접 결합 급전 방법을 이용할 경우 S대역 안테나의 급전선로가 배열안테나 소자 사이로 삽입되어야 한다. 급전 기판의 두께를 증가시켜 대역폭을 확장시키는 경우 50 Ω 전송선로를 구성하기 위한 근접 급전 선로의 도체 폭이 증가하여 배열 안테나 소자 사이의 간격보다 넓어질 수 있기 때문에 급전 기판 두께를 증가시키는데 제한이 발생할 수 있다. 따라서 기판 두께를 조절하여 대역폭을 확장시키는 경우 급전선로 폭의 변화가 거의 없는 안테나 기판을 두껍게 하여 대역폭을 확장하는 방법이 우선시 되어야 한다고 생각된다.

표 8. 안테나 기판과 급전 기판 두께가 모두 3.2 mm인 경우 PCPPA의 반사손실 대역폭 및 방사특성  
Table 8. Return loss bandwidth and radiation characteristics of the PCPPA with  $h_1 = h_2 = 3.2$  mm.

$h_1, h_2$ [mm]	$\Delta L$ [mm]	공진 주파수 [GHz]	대역폭 [%]	E-평면 이득 [dBi]		H-평면 이득 [dBi]	
				Co-pol.	X-pol.	Co-pol.	X-pol.
3.2	3.8	2.63	5.5	7.6	-36.4	7.6	-9.7

### III. 패치 내 천공의 위치와 크기가 안테나의 대역폭 및 방사특성에 미치는 영향

본 장에서는 그림 1의 구조와 표 1의 구조 파라미터를 가지는 PCPPA를 설계하고 천공의 위치와 크기를 변화시키며 안테나의 입력 임피던스 특성과 방사 특성을 분석하였다. 그림 8은 천공의 위치가 패치의 폭 방향으로 이동하여 여러 가지  $d_W$ 를 가지는 패치의 형태를 보인다.

그림 9는 표 1의 구조 파라미터를 가지는 PCPPA에서 여러 가지  $d_W$ 에 따른 반사손실 스펙트럼과 스미스 도표에 도시한 임피던스 특성을 보이며 표 9에 공진주파수와 반사손실 대역폭 특성을 정리하였다. 그림 9 (a)에서  $d_W$ 의 변화가 안테나의 공진 주파수와 대역폭에 거의 영향을 미치지 않으며 그림 9 (b)에서  $d_W$ 의 값에 관계없이 스미스 도표에 도시한 임피던스 궤적의 크기와 위치가 거의 동일하였다. 이 경우 여러 가지  $d_W$ 에 따른  $\Delta L$ 도 비슷한 길이를 가지며 따라서 천공의 폭 방향 이동이 입력 임피던스의 변화에 거

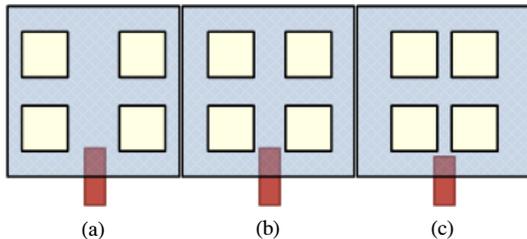


그림 8. 여러 가지  $d_W$ 를 가지는 천공된 패치의 형태 (a)  $d_W = 17.3$  mm, (b)  $d_W = 12.7$  mm, (c)  $d_W = 10.3$  mm  
Fig. 8. Geometry of perforated patches with various values of  $d_W$ . (a)  $d_W = 17.3$  mm, (b)  $d_W = 12.7$  mm, and (c)  $d_W = 10.3$  mm.

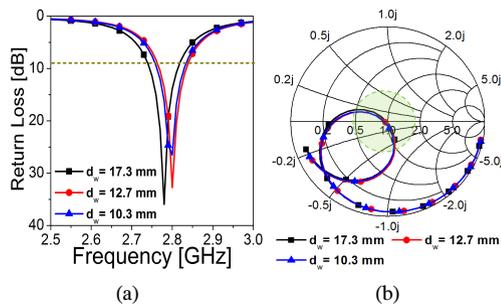


그림 9. 여러 가지  $d_W$ 를 가지는 PCPPA의 (a) 반사손실 스펙트럼, (b) 스미스 도표에 도시한 임피던스 특성  
Fig. 9. (a) Return loss spectrum and (b) impedance characteristics plotted in a Smith chart of PCPPAs with various values of  $d_W$ .

표 9. 여러 가지  $d_W$ 를 가지는 PCPPA의 공진주파수와 대역폭  
Table 9. Resonant frequency and bandwidth of PCPPAs with various values of  $d_W$ .

$d_W$ [mm]	$\Delta L$ [mm]	공진주파수 [GHz]	대역폭 [%]
17.3	3.8	2.78	2.5
12.7	3.6	2.80	2.4
10.3	3.4	2.80	2.4

의 영향을 미치지 않음을 볼 수 있었다.

그림 10은 표 1의 구조 파라미터를 가지는 PCPPA에서 여러 가지  $d_W$ 에 따른 방사패턴을 보이며 방사 특성을 표 10에 정리하였다. 이 경우  $d_W$ 의 변화가 안테나의 방사효율에 거의 영향을 미치지 않았으며 전방 이득은  $d_W$ 의 값에 관계없이 8.0 dBi를 가졌다. 고차편파 크기는  $d_W = 12.7$  mm인 경우 E-평면과 H-평면에서 각각 -31.7 dBi와 -11.9 dBi로 가장 좋은 특성을 보인다. 천공 위치의 폭 방향으로의 변화는 반사손실 대역폭과 방사특성에 거의 영향을 미치지 않는 것을 볼 수 있다.

그림 11은 천공의 위치가 패치의 길이 방향으로 이

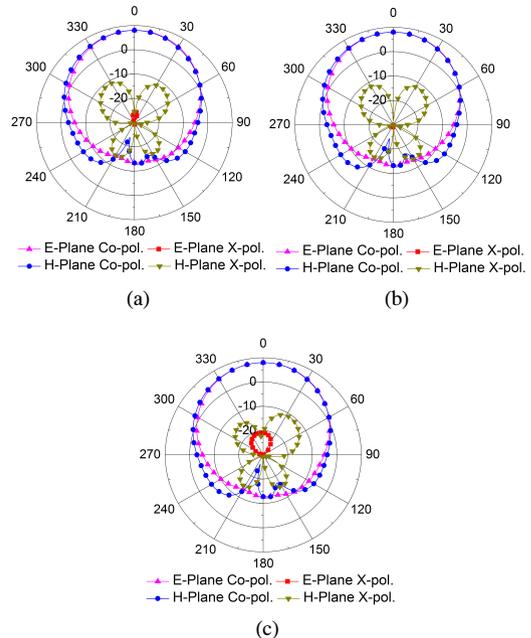


그림 10. 여러 가지  $d_W$ 를 가지는 PCPPA의 방사패턴 (a)  $d_W = 17.3$  mm, (b)  $d_W = 12.7$  mm, (c)  $d_W = 10.3$  mm  
Fig. 10. Radiation patterns of PCPPAs with various values of  $d_W$ . (a)  $d_W = 17.3$  mm, (b)  $d_W = 12.7$  mm, and (c)  $d_W = 10.3$  mm.

표 10. 여러 가지  $d_W$  를 가지는 PCPPA의 방사특성  
Table 10. Radiation characteristics of PCPPAs with various values of  $d_W$ .

$d_W$ [mm]	방사효율 [%]	E-평면 이득 [dBi]		H-평면 이득 [dBi]	
		Co-pol.	X-pol.	Co-pol.	X-pol.
17.3	99	8.0	-25.6	8.0	-11.1
12.7	99	8.0	-31.7	8.0	-11.9
10.3	98	8.0	-20.9	8.0	-11.1

동하여 여러 가지  $d_L$  을 가지는 패치의 형태를 보인다.

그림 12는 표 11의 구조 파라미터를 가지는 PCPPA에서 여러 가지  $d_L$  에 따른 반사손실 스펙트럼과 스미스 도표에 도시한 임피던스 특성을 보이며 표 11에 공진주파수와 반사손실 대역폭 특성을 정리하였다. 그림 11 (a)에서  $d_L$  이 감소할수록 안테나의 공진 주파수가 감소하였다.  $d_L$  이 17.3 mm 에서 10.3 mm 로 감소하는 경우 안테나의 공진 주파수는 약 5.5 % 감소하였다. 그 이유는  $d_L$  이 감소할수록 마이크로스트립 패치안테나의 폭 방향 가장자리로 흐르는 전류의 크기가 증가하여, 전류 경로의 유효 길이가 증가하여 공

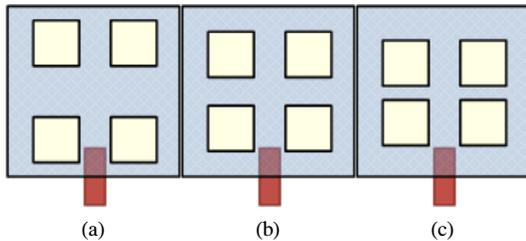


그림 11. 여러 가지  $d_L$  을 가지는 천공된 패치의 형태 (a)  $d_L = 17.3$  mm, (b)  $d_L = 12.7$  mm, (c)  $d_L = 10.3$  mm  
Fig. 11. Geometry of perforated patches with various values of  $d_L$ . (a)  $d_L = 17.3$  mm, (b)  $d_L = 12.7$  mm, and (c)  $d_L = 10.3$  mm.

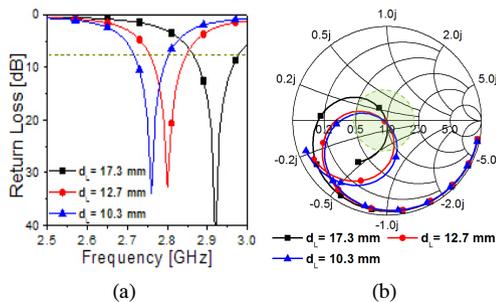


그림 12. 여러 가지  $d_L$  을 가지는 PCPPA의 (a) 반사손실 스펙트럼, (b) 스미스 도표에 도시한 임피던스 특성  
Fig. 12. (a) Return loss spectrum and (b) impedance characteristics plotted in a Smith chart of PCPPAs with various values of  $d_L$ .

표 11. 여러 가지  $d_L$  을 가지는 PCPPA의 공진주파수와 반사손실 대역폭  
Table 11. Resonant frequency and bandwidth of PCPPAs with various values of  $d_L$ .

$d_L$ [mm]	$\Delta L$ [mm]	공진주파수 [GHz]	대역폭 [%]
17.3	3.4	2.92	2.9
12.7	3.6	2.80	2.4
10.3	3.7	2.76	2.3

진 주파수가 감소한 것으로 생각된다. 10 dB 반사손실 대역폭은  $d_L = 17.3$  mm 인 경우 2.9 % 로 대역폭이 가장 작은  $d_L = 10.3$  mm 인 경우 2.3 % 에 비하여 126 % 증가한 특성을 보였다. 이러한 특성은  $d_L$  이 증가할수록 안테나의 공진 주파수가 증가함에 따라 패치의 전기적 면적이 증가하여 단위 시간 당 안테나에서 소모되는 에너지가 증가하고 이로 인해 Q-factor가 감소하였기 때문으로 생각된다. 그림 12 (b)에서  $d_L$  이 감소할수록 스미스 도표에 도시한 임피던스 궤적의 위치가 커패시티브 영역으로 이동하였다. 이 현

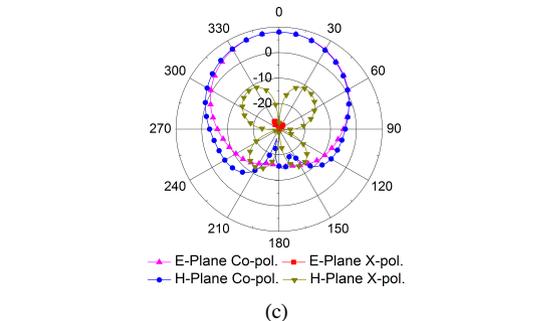
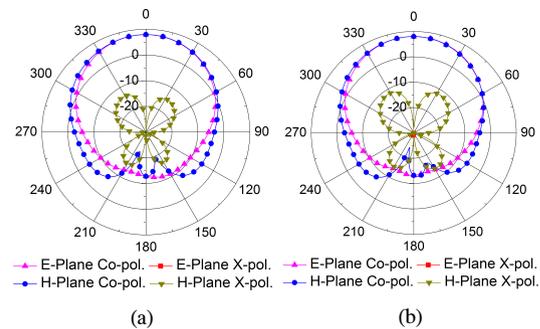


그림 13. 여러 가지  $d_L$  을 가지는 PCPPA의 방사패턴. (a)  $d_L = 17.3$  mm, (b)  $d_L = 12.7$  mm, (c)  $d_L = 10.3$  mm  
Fig. 13. Radiation patterns of PCPPAs with various values of  $d_L$ . (a)  $d_L = 17.3$  mm, (b)  $d_L = 12.7$  mm, and (c)  $d_L = 10.3$  mm.

표 12. 여러 가지  $d_L$  을 가지는 PCPPA의 방사특성  
 Table 12. Radiation characteristics of PCPPAs with various values of  $d_L$ .

$d_L$ [mm]	방사효율 [%]	E-평면 이득 [dBi]		H-평면 이득 [dBi]	
		Co-pol.	X-pol.	Co-pol.	X-pol.
17.3	99	7.9	-30.5	7.9	-13.8
12.7	99	8.0	-31.7	8.0	-11.9
10.3	99	8.0	-26.4	8.0	-11.1

상은  $d_L$  이 감소함에 따라 급전 선로 상단에 위치한 도체의 면적이 증가하여 방사 패치의 커패시턴스 성분이 증가하였기 때문으로 보인다.

그림 13은 여러 가지  $d_L$  을 가지는 PCPPA의 방사 패턴을 보이며 방사특성을 표 12에 정리하였다. 이 경우  $d_L$  의 변화에 따른 안테나의 방사효율이 동일하여 전방 이득은  $d_L$  값에 관계없이 약 8.0 dBi 로 비슷한 크기를 가졌다. 교차편파의 경우  $d_L$  이 감소할수록 크기가 증가하였다. E-평면의 경우  $d_L$  에 관계없이 -26 dBi 이하로 작은 크기를 가졌으며 H-평면의 경우  $d_L = 17.3$  mm 일 때 -13.8 dBi 로 가장 작은 크기를 가졌다.

그림 14는 천공의 위치가 대각선을 따라 이동하여 여러 가지  $d_L = d_W$  를 가지는 PCPPA의 패치 형태를 보인다.

그림 15는 표 1의 구조 파라미터를 가지는 PCPPA에서 여러 가지  $d_L = d_W$  를 가지는 PCPPA의 방사손실 스펙트럼과 스미스 도표에 도시한 임피던스 특성을 보이며 표 13에 대역폭과 방사특성을 정리하였다. 이 경우 여러 가지  $d_L$  을 가지는 PCPPA의 특성과 매우 유사한 결과를 보인다. 그림 15에서  $d_L$  과  $d_W$  가 동일하게 감소함에 따라 안테나의 공진 주파수가 감소함을 볼 수 있으며 표 13에서  $d_L = d_W$  의 변화가

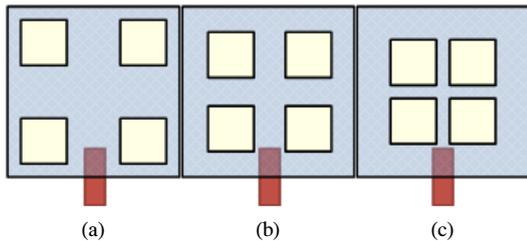


그림 14. 여러 가지  $d_L = d_W$  를 가지는 천공된 패치의 형태 (a)  $d_L = d_W = 17.3$  mm, (b)  $d_L = d_W = 12.7$  mm, (c)  $d_L = d_W = 10.3$  mm

Fig. 14. Geometry of perforated patches with various values of  $d_L = d_W$ . (a)  $d_L = d_W = 17.3$  mm, (b)  $d_L = d_W = 12.7$  mm, and (c)  $d_L = d_W = 10.3$  mm.

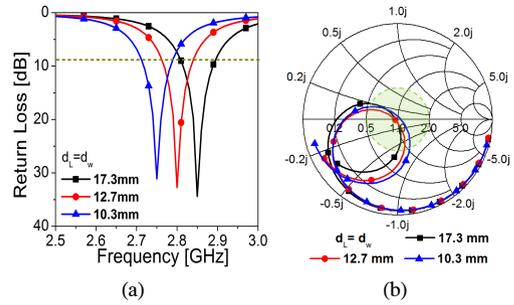


그림 15. 여러 가지  $d_L = d_W$  를 가지는 PCPPA의 (a) 방사손실 스펙트럼과 (b) 스미스 도표에 도시한 임피던스 특성  
 Fig. 15. (a) Return loss spectrum and (b) impedance characteristics plotted in a Smith chart of PCPPAs with various values of  $d_L = d_W$ .

표 13. 여러 가지  $d_L = d_W$  를 가지는 PCPPA의 방사손실 대역폭 및 방사특성  
 Table 13. Return loss bandwidth and radiation characteristics of PCPPAs with various values of  $d_L = d_W$ .

$d_L, d_W$ [mm]	$\Delta L$ [mm]	공진 주파수 [GHz]	대역폭 [%]	방사 효율 [%]	E-평면 이득 [dBi]		H-평면 이득 [dBi]	
					Co-pol.	X-pol.	Co-pol.	X-pol.
17.3	3.5	2.85	2.6	99	7.9	-40.4	7.9	-13.5
12.7	3.6	2.80	2.4	99	8.0	-31.7	8.0	-11.9
10.3	3.9	2.75	2.3	99	8.0	-29.8	8.0	-11.1

안테나의 방사특성에 거의 영향을 미치지 않음을 볼 수 있다.

표 1의 구조 파라미터를 가지는 PCPPA에서 급전 기관과 안테나 기관의 두께가 모두 3.2 mm 인 경우 여러 가지  $d_L = d_W$  에 따른 안테나의 대역폭 및 방사 특성을 분석하고 표 14에 그 결과를 정리하였다.  $d_L = d_W = 17.3$  mm 인 경우 대역폭은 6.0 % 로 가장 넓은 특성을 가졌다. 방사효율은 99 % 로 천공이 길이방향으로 이동한 경우와 동일한 값을 가진다. 전방 이득의 경우 여러 가지  $d_L = d_W$  에 관계없이 약 7.5 dBi 로 비슷한 크기를 가졌다. 교차편파의 경우  $d_L = d_W = 17.3$  mm 일 때 가장 작은 특성을 가졌다. 이 경우 E-평면에서 -43.4 dBi 로 매우 작았고 H-평면에서 -9.5 dBi 로 가장 작은 특성을 가졌다. 급전 기관과 안테나 기관 두께가 모두 3.2 mm 인 경우  $d_L = d_W$  의 변화에 따른 대역폭과 방사특성의 변화는 표 11과 표 12에 보인 특성의 변화와 비슷한 경향을 가진다.

표 1의 구조 파라미터를 가지는 PCPPA를 설계하고 여러 가지 천공의 크기에 따른 대역폭 및 방사특성을 분석하였다. 그림 16은 여러 가지 천공 크기를 가

표 14. 기판 두께가 모두 3.2 mm이고 여러 가지  $d_L = d_W$  를 가지는 PCPPA의 반사손실 대역폭과 방사특성 Table 14. Return loss bandwidth and radiation characteristics of the PCPPAs with  $h_1 = h_2 = 3.2$  mm and various values of  $d_L = d_W$ .

$h_1, h_2$ [mm]	$d_L, d_W$ [mm]	$\Delta L$ [mm]	$d$ [mm]	공진 주파수 [GHz]	대역폭 [%]	
3.2	17.3	3.5	8	2.69	6.0	
	12.7	3.8	8	2.63	5.5	
	10.3	3.9	8	2.61	5.4	
	$d_L, d_W$ [mm]	E-평면 이득 [dBi]	H-평면 이득 [dBi]			
			Co-pol.	X-pol.	Co-pol.	X-pol.
	17.3	7.5	-43.4	7.5	-9.5	
	12.7	7.6	-36.4	7.6	-9.0	
10.3	7.5	-25.4	7.5	-7.4		

지는 PCPPA의 반사손실 스펙트럼과 스미스 도표를 보이며 표 15에 공진주파수와 대역폭을 정리하였다. 그림 16 (a) 에서 천공의 크기가 증가할수록 공진 주파수가 감소하였다. 이 현상은 패치의 가장자리로 흐르는 전류의 성분이 증가하여 전류가 흐르는 경로의 길이가 증가하였기 때문으로 보인다. 대역폭의 경우 천공의 크기가 증가할수록 방사 패치의 면적이 감소하여 반사손실 대역폭이 감소하였다. 천공의 크기가 13.0 mm 인 경우 대역폭은 1.3 % 로 가장 작고 천공의 크기가 5.5 mm 인 경우 대역폭은 3.0 % 로 가장 넓은 특성을 가졌다. 그림 16 (b) 에서 천공의 크기가 감소할수록 임피던스 정합을 위한 급전선로의 오픈 스텐터브의 길이가 다소 증가하여 인덕턴스 성분이 커지기 때문에 임피던스의 원형 궤적이 인덕티브 영역으로 이동하였다.

그림 17은 여러 가지 천공 크기를 가지는 PCPPA의 방사패턴을 보이며 방사특성을 표 16에 정리하였다. 천공의 크기가 감소할수록 방사 패치의 면적이 증가하여 방사효율이 증가하고 동일 편파 이득이 다소 증가하였다. 천공의 크기가 증가함에 따라 안테나의 폭 방향으로의 전류 성분이 증가하여 교차편파의 크기가 증가하였다. 천공의 크기가 5.5 mm 인 경우 E-평면의 교차 편파 크기는 -29.4 dBi 로 매우 작고 H-평면의 교차 편파 크기는 -13.5 dBi 로 가장 작은 특성을 가졌다.

표 1의 구조 파라미터를 가지는 PCPPA에서 급전 기판의 두께와 안테나 기판의 두께가 모두 3.2 mm 이고 천공의 크기가 5.5 mm 인 경우에 대하여 분석하고 전산모의 결과를 표 17에 정리하였다. 이 경우 대역폭

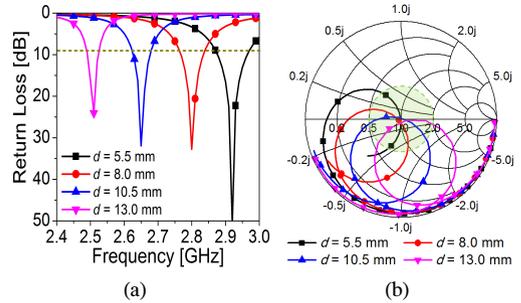


그림 16. 여러 가지 천공 크기를 가지는 PCPPA의 (a) 반사손실 스펙트럼과 (b) 스미스 도표에 도시한 임피던스 특성 Fig. 16. (a) Return loss spectrum and (b) impedance characteristics plotted in a Smith chart of PCPPAs with various perforation sizes.

표 15. 여러 가지 천공의 크기를 가지는 PCPPA의 공진주파수와 대역폭 Table 15. Resonant frequency and bandwidth of PCPPAs with various perforation sizes.

$d$ [mm]	$\Delta L$ [mm]	공진주파수 [GHz]	대역폭 [%]
5.5	3.9	2.92	3.0
8.0	3.6	2.80	2.4
10.5	3.3	2.65	1.9
13.0	2.5	2.51	1.3

은 6.3 % 로 넓은 특성을 가졌다. 전방 이득은 7.5 dBi 로 기판의 두께와 천공의 위치 및 크기의 변화에 따른 이득에 비해 다소 감소하였다. 교차편파의 경우 E-평면에서 -36.3 dBi 로 매우 작고 H-평면에서 -8.5 dBi 로 동일한 천공의 크기를 가지는 얇은 기판의 안테나에 비해 다소 큰 값을 가졌다.

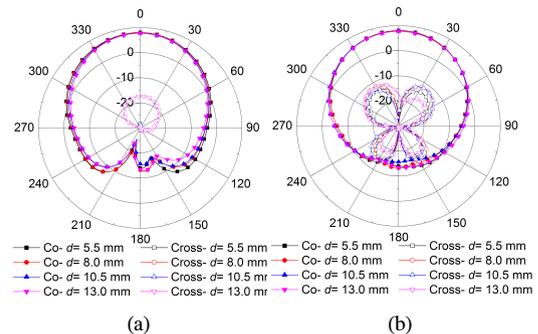


그림 17. 여러 가지 천공의 크기를 가지는 PCPPA의 (a) E-평면 방사패턴, (b) H-평면 방사패턴 Fig. 17. (a) E-plane radiation pattern and (b) H-plane radiation pattern of PCPPAs with various perforation sizes.

표 16. 여러 가지 천공 크기를 가지는 PCPPA의 방사특성  
Table 16. Radiation characteristics of PCPPAs with various perforation sizes.

d [mm]	방사 효율 [%]	E-평면 이득 [dBi]		H-평면 이득 [dBi]	
		Co-pol.	X-pol.	Co-pol.	X-pol.
5.5	99	8.0	-28.4	8.0	-13.5
8.0	99	8.0	-31.7	8.0	-11.9
10.5	97	7.8	-28.7	7.8	-11.9
13.0	93	7.7	-17.3	7.7	-11.8

표 16. 여러 가지 천공 크기를 가지는 PCPPA의 방사특성  
Table 16. Radiation characteristics of PCPPAs with various perforation sizes.

d [mm]	방사 효율 [%]	E-평면 이득 [dBi]		H-평면 이득 [dBi]	
		Co-pol.	X-pol.	Co-pol.	X-pol.
5.5	99	8.0	-28.4	8.0	-13.5
8.0	99	8.0	-31.7	8.0	-11.9
10.5	97	7.8	-28.7	7.8	-11.9
13.0	93	7.7	-17.3	7.7	-11.8

#### IV. 결 론

본 논문에서는 전산모의를 통하여 근접 결합 급전을 이용한 천공된 마이크로스트립 패치 안테나(PCPPA)의 기관 두께와 천공의 위치 및 크기가 대역폭과 방사특성에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

급전 기관 두께를 증가시키면 방사특성의 큰 저하 없이 대역폭을 증가시킬 수 있었다. 그러나 이 경우 급전 기관 두께가 증가하면 급전선로의 폭이 증가하여 PCPPA를 개구면 공유 구조 이중 대역 안테나의 단위 안테나로 사용할 경우 급전 기관 두께 증가에 제한이 가해진다. 안테나 기관 두께를 증가시켜도 방사특성의 큰 저하 없이 대역폭을 증가시킬 수 있었다. 안테나 기관 두께의 변화는 급전선로의 폭에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

천공 중심의 위치를 길이 방향으로 이동시키는 경우 중심의 위치가 패치 가장자리 방향으로 이동할수록 방사특성의 큰 저하 없이 대역폭을 증가시킬 수 있었다. 천공 중심의 위치를 폭 방향으로 이동시키는 경우 중심의 위치가 대역폭과 방사특성에 미치는 영향이 매우 작음을 볼 수 있었다. 천공 중심의 위치를 대각선 방향으로 이동시키는 경우 중심의 위치에 따른 대역폭과 방사특성은 천공 중심의 위치를 길이 방향으로 이동시키는 경우와 거의 비슷하였다.

천공의 크기가 커질수록 안테나는 전기적으로 소형

으로 동작하였으나 대역폭이 감소하였고 동일 편파의 전방 이득이 감소하고 교차 편파의 크기가 증가하여 방사특성이 저하됨을 볼 수 있었다.

#### References

- [1] L. L. Shafai, W. A. Chamma, M. Barakat, P. C. Strickland, and G. Séguin, "Dual-band dual-polarized perforated microstrip antennas for SAR applications," *IEEE Trans. Antennas Propaga.*, vol. 48, no. 1, pp. 58-66, Jan. 2000.
- [2] R. Pokuls, J. Uher, and D. M. Pozar, "Dual-frequency and dual-polarization microstrip antennas for SAR applications," *IEEE Trans. Antennas Propaga.*, vol. 46, no. 9, pp. 1289-1296, Sept. 1998.
- [3] S. D. Targonski and D. M. Pozar, "Dual-band dual-polarized antenna element," *Electron. Lett.*, vol. 34, no. 23 pp. 2193 -2194, Nov. 1998.
- [4] L. L. Shafai, W. A. Chamma, G. Séguin, and N. Sultan, "Dual-band dual-polarized microstrip antennas for SAR applications," in *IEEE Antennas and Propaga. Symp.*, pp. 1866-1869, Montreal, Quebec, Canada, Jul. 1997.
- [5] D. M. Pozar and S. D. Targonski, "A shared-aperture dual-band dual-polarized microstrip array," *IEEE Trans. Antennas Propaga.*, vol. 49, no. 2, pp. 150-157, Feb. 2001.
- [6] D. M. Pozar and B. Kaufman, "Increasing the bandwidth of a microstrip antenna by proximity coupling," *Electron. Lett.*, vol. 23, no. 8, pp. 368-369, Apr. 1987.
- [7] W. S. T. Rowe and R. B. Waterhouse, "Investigation into the performance of proximity coupled stacked patches," *IEEE Trans. Antennas and Propaga.*, vol. 54, no. 6, pp. 1693-1698, Jun. 2006.
- [8] K.-H. Lee, E.-H. Kwak, and B.-G. Kim, "Characteristics of proximity coupled microstrip patch antenna for various thicknesses of antenna substrate," *2013 IEK Conf.*, p. 85, Seoul, Korea, May 2013.
- [9] C. A. Balanis, *Antenna Theory*, 3<sup>rd</sup> ed., NY: John Wiley & Sons, 2005.

이 규 훈 (Kyu-Hoon Lee)



2012년 2월 : 송실대학교 정보  
통신전자공학부 학사  
2014년 2월 : 송실대학교 전자  
공학과 석사  
<관심분야> 마이크로스트립 안  
테나

김 부 균 (Boo-Gyoun Kim)



1979년 : 서울대학교 전자공학  
과 학사  
1981년 : KAIST 전기 및 전자  
공학과 석사  
1989년 : University of Southern  
California, 전자공학과 박사  
2011년~2013년 : 중앙전파관리  
소 전파관리위원회 자문위원  
2011년~2014년 : 산업기술연구회 이사  
2008년~2010년 : 송실대학교 IT대학 학장  
1981년~현재 : 송실대학교 정보통신전자공학부 교수  
<관심분야> 위상 배열 안테나, 마이크로스트립 안  
테나, EMC

곽 은 혁 (Eun-Hyuk Kwak)



2009년 2월 : 송실대학교 정보  
통신전자공학부 학사  
2011년 2월 : 송실대학교 전자  
공학과 석사  
2011년~현재 : 송실대학교 전자  
공학과 박사과정  
<관심분야> 마이크로스트립 안

테나, Metamaterial>