

# 적층 세라믹 기판을 이용한 60 GHz WPAN용 2×4 배열 안테나

## Microstrip Patch Array Antenna Using Low Temperature Co-Fired Ceramic Substrates for 60 GHz WPAN Applications

변우진 · 김봉수 · 강민수 · 김광선 · 김종면 · 송명선

Woo-Jin Byun · Bong-Su Kim · Min-Soo Kang · Kwang-Seon Kim · Jong-Myun Kim · Myung-Sun Song

### 요 약

본 논문에서는 상대 유전율이 큰 low temperature co-fired ceramic 기판을 이용한 안테나의 복사 성능을 높이고, 대역폭을 개선하기 위하여 low temperature co-fired ceramic cavity backed 안테나가 제안된다. Low temperature co-fired ceramic cavity는 각 층의 접지면을 다수의 비어로 연결하여 만들어진다. 그리고, cavity의 크기가 안테나의 복사 성능과 대역폭 성능에 미치는 영향을 보여준다. 제안된 2×4 low temperature co-fired ceramic cavity backed 안테나의 크기는 10×20 mm<sup>2</sup>이며, 57~64 GHz 대역에서 이득 11.8~14.1 dBi, 대역폭 13 % (7.9 GHz)을 가진다. 측정 결과는 시뮬레이션 결과와 매우 잘 일치함을 보여준다.

### Abstract

In this paper, a low temperature co-fired ceramic cavity backed antenna in order to improve the performances of radiation and bandwidth for the antenna with high relative dielectric constant is proposed. Low temperature co-fired ceramic cavity consisted of several ground planes with closely spaced metallic vias connected. It is shown that the size of a low temperature co-fired ceramic cavity has the effects on the performances of radiation and bandwidth for the antenna. The proposed 2×4 low temperature co-fired ceramic cavity backed antenna is 10×20 mm<sup>2</sup> in size. Measured results show antenna gain of 11.8~14.1 dBi and bandwidth of 13 % (7.9 GHz) in the 57~64 GHz band.

Key words : Millimeter Wave, 60 GHz WPAN, Low Temperature Co-Fired Ceramic(LTCC), Antenna

### I. 서 론

2003년에 FCC(Federal Communication Committee)가 57~64 GHz 대역을 무선 통신용 비면허 주파수로 할당한 이후, 일본 및 유럽 등의 나라에서도 동일한 목적으로 60 GHz 주파수를 할당하거나 분배를 계획하면서, 밀리미터파 기반 기술과 관련된 연구가 매우 활발히 진행되고 있다<sup>[1]</sup>. 국내의 경우, 2006년에 주어진 기술 규격만 만족하면 응용 분야에 상관

없이 사용할 수 있도록 하기 위하여 “용도 미지정”으로 57~64 GHz 대역을 분배하였다.

특히, WPAN(Wireless Personal Area Networks) 응용의 경우, 10 m 이내의 거리에서 수 Gbps급의 비압축 HD(High-Definition) 영상 전송 기술을 표준화하기 위하여 IEEE 802.15.3c<sup>[2]</sup>, ECMA(European Computer Manufactures Association), WirelessHD 등의 표준화 단체들이 활발히 표준화 작업을 추진하고 있다. 하지만 60 GHz WPAN 응용 서비스가 시장에서 성

「본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT핵심기술개발사업의 일환으로 수행하였음[2008-F-013-01, 스펙트럼공학 및 밀리미터파 전파자원 이용기술 개발].」

한국전자통신연구원 전파기술연구부(Radio Technology Research Department, Electronics and Telecommunications Research Institute)

· 논문 번호 : 20080908-119

· 수정완료일자 : 2008년 11월 6일

공하려면 밀리미터파 송수신기의 크기가 작고, 가격이 낮아야 하며, 적은 전력을 소모하여야 한다. 이와 같은 요구 조건을 달성하기 위하여 실리콘 기반의 능동 소자 기술과 적층 세라믹 기판(LTCC: Low Temperature Co-fired Ceramic) 또는 LCP(Liquid Crystal Polymer) 등을 이용한 안테나와 일체 가능한 패치 기술에 대한 연구가 필수적이며, 관련 연구도 활발히 진행되고 있다.

특히 LTCC는 이미 10 GHz 대역 미만에서 대량 생산 체제가 갖추어져 있고, 밀리미터파 대역에서 유전체 손실 특성이 매우 우수한 기판이 많이 개발되어 있다. 더불어 능동 소자를 실장하기 위하여 기생 인덕턴스와 커패시턴스를 줄일 수 있는 공정과 각 유전체 층을 연결하기 위한 비어 공정 기술의 발전으로 밀리미터파 유전체 도파관과 필터, 송수신 모듈 구성에 LTCC 기술이 많이 적용되었다<sup>[3]~[6]</sup>. 더욱이 송수신 모듈과 안테나의 일체화는 60 GHz WPAN 응용을 위한 송수신기의 소형화에 매우 중요하다. 하지만, LTCC 기판을 이용한 평면형 안테나의 경우 높은 상대 유전율 때문에 안테나의 대역폭이 제한되며 기판의 높이가 높아지면서 surface wave에 의한 영향으로 인하여 안테나의 효율이 떨어지는 문제가 발생한다. 이와 같은 평면형 안테나의 복사 성능을 개선하기 위하여 완전한 금속 cavity를 이용하여 동축선으로 급전된 cavity backed 안테나와 같은 고전적인 방식<sup>[7]</sup>뿐만 아니라, photonic bandgap<sup>[8]</sup>이나 electromagnetic bandgap<sup>[9]</sup>을 이용한 구조가 제안되었다. 또한, 최근에는 60 GHz 대역에서 LTCC 기판의 접지면과 금속띠를 접지 비어로 연결하여 만든 artificial soft surfaces을 이용하여 단일 슬롯 결합 안테나의 이득을 개선시키기 위한 논문이 발표되었다<sup>[10]</sup>. 하지만, 10 dB 임피던스 대역폭이 3.5 GHz로 좁기 때문에 7 GHz 이상의 임피던스 대역폭을 요구하는 60 GHz WPAN 응용에는 적합하지 않다.

본 논문에서는 안테나의 복사 특성을 개선하기 위하여 cavity backed 안테나에 전통적으로 사용되었던 금속 cavity 대신 LTCC cavity를 사용하고, 대역폭 특성을 만족시키기 위하여 적층 패치 안테나를 구성하며, 동축선 급전 대신 신호 비어에 의해 급전되는 2×4 마이크로스트립 패치 배열 안테나의 구조가 제안된다. LTCC cavity는 각 층의 접지면을 밀접하게

위치시킨 다수의 금속 비어로 연결하여 만들어진다. 제안된 안테나는 선형 편파 특성을 가지며 60 GHz 대역에서 13 % (7.9 GHz)의 대역폭과 최대 11.8~14.1 dBi의 이득이 측정되었으며, 60 GHz WPAN 응용에 적합함을 보여준다. 제안된 구조로부터 얻어질 수 있는 부가적인 장점은 급전부가 안테나의 복사면과 반대편에 위치하므로, 송수신 모듈과 안테나 상호간의 신호 결합에 의한 복사 특성 및 송수신기 성능에 영향을 주지 않기 때문에 안테나와 송수신 모듈과의 집적화에 훨씬 더 유리하다는 것이다. 사용된 LTCC 기판은 Ferro A6S이며, 상대 유전율 5.9, 상대 투자율은 1, 60 GHz에서 loss tangent 0.002, 각 층의 기판 두께는 100 um이다. 그리고 사용된 금속 도체는 금과 은이며, 안테나의 복사면은 금( $3 \times 10^7$  S/m)으로 도금되었고, 나머지 비어와 금속면은 은( $4 \times 10^7$  S/m)이다.

제안된 안테나의 설계 순서는 다음과 같다. 첫째, 근사식을 이용하여 패치의 크기에 대한 초기값을 구하고, 둘째, 상용 수치 해석 도구인 CST를 이용하여 급전 위치와 대역폭 규격을 만족시키기 위한 기판의 높이를 결정한 후, 셋째, LTCC cavity의 크기를 결정한다. 그리고, 구해진 단일 LTCC cavity backed 안테나의 설계 파라미터를 이용하여 60 GHz WPAN 규격인 대역폭 7 GHz, 안테나 이득 10 dBi 이상의 성능을 얻기 위한 배열 안테나를 설계한다. 안테나의 이득과 대역폭은 각 단일 안테나와의 간격에 많은 영향을 받기 때문에 상용 툴을 이용하여 최적화하였다.

## II. 단일 LTCC Cavity Backed 안테나 설계

안테나의 대역폭을 넓히고, 이득을 개선하려면 기판의 높이가 높아져야 한다. 하지만, 높이가 증가함에 따라서 surface wave에 의하여 안테나의 효율이 감소하고<sup>[11]</sup>, 복사 특성에 왜곡이 발생한다. 특히 LTCC와 같은 고유전율 기판에 더욱 더 심각한 영향이 발생한다. 따라서 안테나의 대역폭과 이득을 동시에 개선시키기 위한 LTCC cavity backed 안테나의 구조가 그림 1에 제안된다. LTCC cavity는 신호의 누설을 방지하기 위하여 다수의 접지 비어를 접지면에 연결함으로써 마치 완전한 도체 cavity처럼 동작하도록 접지 비어의 간격( $d_1$ )을 최대한 좁게 구성한다<sup>[6]</sup>. 넓은 대역폭을 얻기 위하여 2개의 직사각형 패치

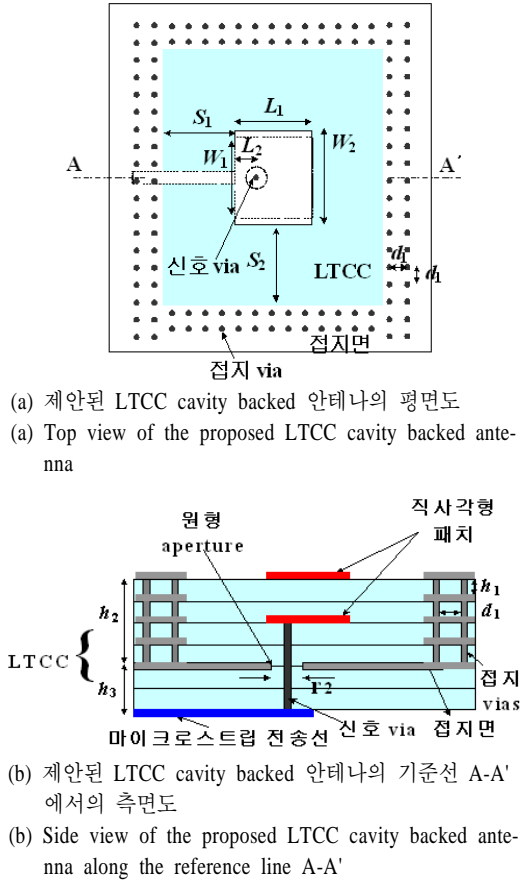


그림 1. 제안된 단일 LTCC cavity backed 안테나의 구조

Fig. 1. Configurations of the proposed LTCC cavity backed antenna.

$(L_1 \times W_1, L_1 \times W_2)$ 가 적층된 구조를 사용하며, 안테나는 패치의 끝에서  $L_2$ 만큼 떨어진 신호 비어(직경 85  $\mu\text{m}$ )에 의해 급전된다. 신호 비어는 접지면에 형성된 직경  $r_2$ 인 원형 aperture를 통과하여 마이크로스트립 전송선으로 연결된다. 2개의 직사각형 패치는 LTCC cavity와 거리  $S_1, S_2$ 만큼 각각 떨어져 있으므로, cavity의 크기는  $(2S_1 + L_1) \times (2S_2 + W_2)$ 가 된다. 각 층의 두께는  $h_1$ 이고, 마이크로스트립 전송선의 특성 임피던스는 50  $\Omega$ 이다.

직사각형 패치의 크기에 대한 초기값은 다음 근사식으로 부터 얻어지고<sup>[12]</sup>, 상용 수치 해석 도구인 CST를 이용하여 최적화한다.

$$L_1 = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta l \quad (1)$$

$$W_2 = \frac{c}{2f_r} \left( \frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-1/2} \quad (2)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} (1 + 12h_2/W)^{-1/2} \quad (3)$$

$$\Delta l = 0.412h_2 \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3)(W/h_2 + 0.264)}{(\epsilon_{eff} - 0.258)(W/h_2 + 0.8)} \quad (4)$$

여기서,  $c$ 는 광속,  $f_r$ 은 동작 주파수,  $\epsilon_r$ 은 LTCC의 상대 유전율,  $\epsilon_{eff}$ 는 유효유전율,  $h_2$ 는 LTCC 기판의 높이를 의미한다.

LTCC cavity의 효과를 분석하기 위하여  $L_1$ 과  $W_1 = W_2$ 에 대한 초기값을 이용하여 LTCC cavity가 있는 경우와 없는 경우에 대한 안테나의 복사 특성을 시뮬레이션 하였다. 여기서 LTCC cavity는 단순히 cavity의 효과를 구분하기 위하여 완전 도체 cavity를 가정하였으며, LTCC 기판의 크기는  $10 \times 10$  mm로 정하였다. 그림 2는 시뮬레이션 파라미터  $h_2 = 4h_1 = 400 \mu\text{m}$ ,  $h_3 = 2h_1 = 200 \mu\text{m}$ ,  $L_1 = 650 \mu\text{m}$ ,  $L_2 = 100 \mu\text{m}$ ,  $W_1 = W_2 = 1 \text{ mm}$ ,  $S_1 = 0.75 \text{ mm}$ ,  $S_2 = 0.675 \text{ mm}$ ,  $r_2 = 400 \mu\text{m}$ 를 이용하여 얻어진 복사 패턴을 보여준다.

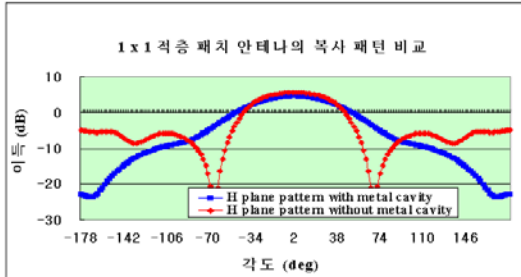
LTCC 안테나의 기판 높이가 400  $\mu\text{m}$ 인 경우 cavity가 없으면 비록 각도 0도에서 빔의 크기가 클지라도 복사 패턴이 매우 왜곡됨을 그림 2로부터 확인할 수 있다. 그리고, cavity를 사용함으로써 복사 패턴의 왜곡이 개선될 수 있음을 또한 확인할 수 있다. 하지만 E-plane 패턴의 모양에 대칭성이 없는 이유는 전송선에 의한 복사가 영향 때문인 것으로 판단된다.

그림 3은 LTCC cavity backed 안테나의 특정 위치에서 정의된 입력 임피던스를 보여준다. 접지면의 원형 aperture에서 바라본 입력 임피던스  $Z_{in}$ 은 안테나의 물리적인 크기와 급전 위치에 의해 결정되는 안테나 자체의 입력 임피던스  $Z_{ant}$ 와 신호 비어의 직경과 높이에 의해 결정되는  $X_L$ 의 합이다<sup>[12]</sup>.  $X_L$ 은 신호 비어의 길이에 비례하고, 폭에 반비례한다.

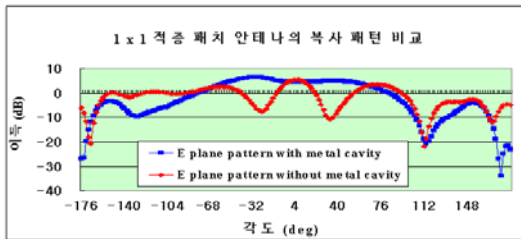
$$Z_{in} = Z_{ant} + X_L \quad (5)$$

그리고,  $Z'_{in}$ 은  $Z_{in}$ 과 원형 aperture가 있는 위치에서 마이크로스트립 전송선으로 연결된 신호 비어와 전송선 길이  $d_2, d_3$ 에 의해 나타나는 리액턴스로 표시되는  $X_B$ 의 합이다.

$$Z'_{in} = Z_{in} + X_B \quad (6)$$



(a) 단일 LTCC 안테나의 H-plane 복사 패턴  
(a) H-plane radiation patterns for LTCC antennas



(b) 단일 LTCC 안테나의 E-plane 복사 패턴  
(b) E-plane radiation patterns for LTCC antennas

그림 2. 60 GHz LTCC cavity backed 안테나와 cavity 가 없는 안테나의 복사 패턴 비교  
Fig. 2. Comparisons of radiation patterns for a 60 GHz LTCC cavity backed antenna and an LTCC antenna without a cavity.

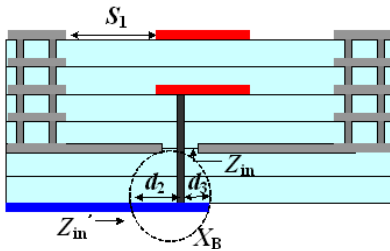


그림 3. LTCC cavity backed 안테나의 입력 임피던스  
Fig. 3. Input impedance of an LTCC cavity backed antenna.

Cavity의 크기를 제외한 안테나 패치의 크기, 기판 높이 및 신호 비어의 급전 위치 등의 파라미터를 그림 2에서 주어진 값으로 결정할 후 LTCC cavity가 안테나의 임피던스 대역폭에 미치는 영향을 분석하기 위하여 그림 3에서 정의된 입력 임피던스  $Z'_{in}$ 을 cavity의 크기를 변화하면서 시뮬레이션 하였다. 그림 4는 cavity의 크기  $S_1, S_2$ 를 변화시키면 얻어진

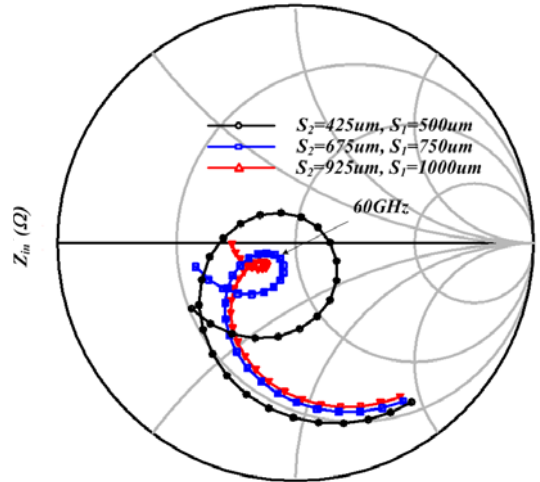


그림 4. LTCC cavity backed 안테나의 LTCC cavity 크기 변화에 대한 입력 임피던스 비교  
Fig. 4. Comparisons of input impedances for an LTCC antenna varying the size of an LTCC cavity.

LTCC cavity backed 안테나의 입력 임피던스를 보여 준다. 공진 주파수는 60 GHz 근처에서 얻어졌으며, cavity의 크기가 증가하면서 임피던스 궤적 루프가 작아짐을 확인할 수 있다. 이로부터 cavity의 크기는 LTCC 기판의 층 수와 더불어서 임피던스 대역폭 규격을 만족시키기 위한 중요한 설계 파라미터라는 것을 알 수 있다. 여기서,  $d_1=300 \text{ um}$ ,  $d_2=425 \text{ um}$ ,  $d_3=150 \text{ um}$ 이다.

### III. 2x4 LTCC Cavity Backed 안테나의 설계 및 측정

단일 LTCC cavity backed 안테나의 설계 파라미터를 이용하여 그림 5에서 보이는 것처럼 2x4 배열 안테나에 적용할 수 있다. 각 단일 안테나와의 간격  $G_1, G_2$ 는  $3 \text{ mm}(=0.6 \lambda_0)$ 이며, 접지 비어의 간격은 안테나 인접의 경우 신호의 누설을 방지하기 위하여  $d_1=300 \text{ um}(=0.15 \lambda_g)$  정도로 좁게 하고, 일반 접지면은 약  $d_1=500 \text{ um}$ 의 간격으로 접지 비어를 연결한다. 그리고, 전체 급전은 마이크로스트립 전송선에서 전력 분배 회로를 통하여 분배되며, 분배된 전력은 신호 비어를 통해서 각 단일 LTCC cavity backed 안테나에 급전되는 구조이다.

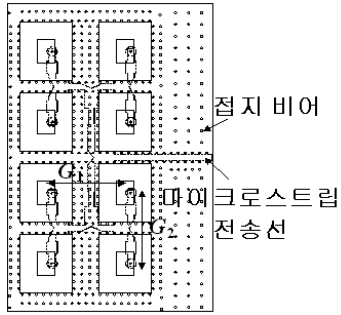


그림 5. 2x4 LTCC cavity backed 배열 안테나의 레이아웃

Fig. 5. Layout for 2x4 LTCC cavity backed array antenna.

표 1. 2x4 배열 안테나 설계 파라미터(단위: mm)

Table 1. Design parameters for 2x4 LTCC array antenna(unit: mm).

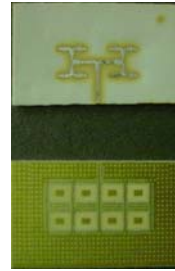
$L_1$	$L_2$	$W_1$	$W_2$	$S_1$	$S_2$	$r_2$
0.65	0.1	1	1	0.75	0.675	0.4
$h_1$	$h_2$	$h_3$	$G_1$	$G_2$	$d_2$	$d_3$
0.1	0.4	0.2	3	3	0.425	0.15

표 1은 2x4 배열 안테나의 이득과 대역폭 특성을 최적화한 후 얻어진 설계 파라미터이다.

그림 6은 2x4 LTCC cavity backed 배열 안테나의 제작 사진이다. 안테나의 급전부와 복사부가 분리된 것을 확인할 수 있으며, 그림 6(b)의 경우 안테나 이득과 복사 패턴을 측정하기 위하여 금속 기구물을 사용한 사진을 보여준다. 금속 기구물에 의한 안테나의 이득과 복사 패턴의 변화는 있지만, 그에 대한 영향이 작도록 금속기구물을 구성하였다.

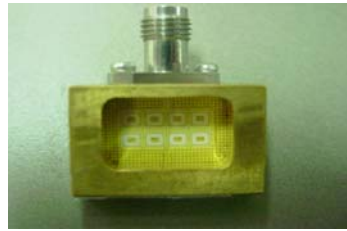
그림 7은 2x4 LTCC cavity backed 배열 안테나의 반사 손실 측정 결과를 시뮬레이션과 비교한 것이다. 측정된 전체 대역폭은 7.9 GHz(13%)이며, 시뮬레이션 대역폭 9.5 GHz에는 미치지 못하지만 매우 비슷한 결과를 보여준다. 측정은 Anritsu 벡터네트워크 해석기(37397C)를 이용하였다.

표 2는 2x4 LTCC cavity backed 배열 안테나의 이득에 대한 측정된 결과를 시뮬레이션과 비교한 것이다. 그림 6에서 보이는 것처럼 안테나의 복사 패턴과 이득을 측정하기 위하여 금속 기구물을 사용하였



(a) 제작된 LTCC 안테나의 급전부와 복사부

(a) Feeder and radiator for the fabricated LTCC antenna



(b) 복사 패턴 측정을 위한 기구물이 있는 안테나

(b) Antenna with a metal block in order to measure the radiation patterns

그림 6. 2x4 LTCC cavity backed 배열 안테나의 제작 사진

Fig. 6. Photograph of the fabricated 2x4 LTCC cavity backed array antenna.

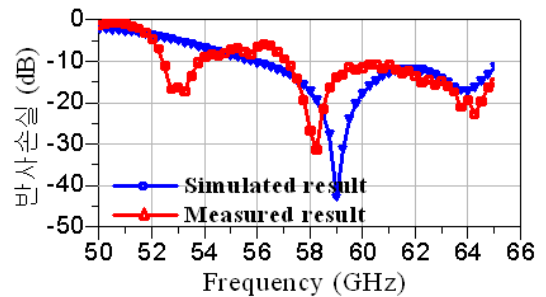


그림 7. 2x4 LTCC cavity backed 배열 안테나의 return loss 측정 및 시뮬레이션 결과 비교

Fig. 7. Comparison of measured and simulated return losses for 2x4 LTCC cavity backed array antenna.

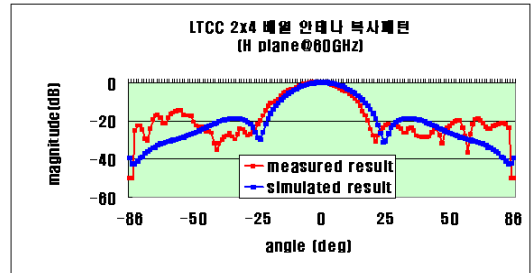
지만, 표 2에 제시된 시뮬레이션 결과 안테나의 이득 차이는 약 0.5 dB 이내이다. 측정된 안테나의 이득은 57~64 GHz 주파수 대역에서 11.8~14.1 dBi이며, 이는 60 GHz WPAN 규격에 충분히 만족함을 알 수 있다. 그리고, LTCC cavity가 없는 경우에 비하여

표 2. 2x4 배열 안테나의 이득 비교(단위: dBi)  
Table 2. Comparison of gains for 2x4 LTCC array antenna(unit: dBi).

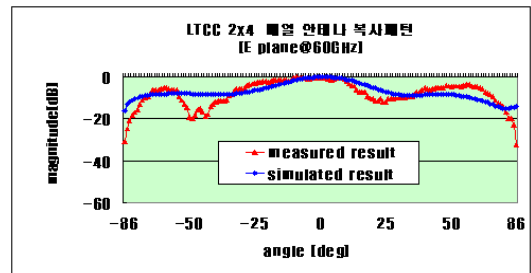
	57 GHz	58 GHz	59 GHz	60 GHz	61 GHz	62 GHz	63 GHz	64 GHz
측정 (기구물)	13.3	14.1	14.1	13.5	13.8	13.5	13.4	11.8
시뮬레이션 (기구물)	13.8	14.3	14.7	14.8	14.1	13.5	13.5	13.2
시뮬레이션	13.9	14.3	14.6	14.7	14.6	14.1	13.4	12.7
시뮬레이션(no cavity)	11.5	10.5	8.4	6.7	6.1	6.6	7.2	7.4

이득 개선 효과가 매우 크다는 것을 확인할 수 있다.

그림 8은 2x4 LTCC cavity backed 배열 안테나의 복사 패턴에 대한 측정된 결과를 시뮬레이션과 비교한 것이다. 복사 패턴 측정은 한국전자통신연구원서 보유하고 있는 18~110 GHz 대역까지 측정 가능한 near field 안테나 측정 시스템을 이용하였다. 안테나 측정 알고리즘은 (주)MTG에서 제공한 것이며, 사용한 프로브는 WR-15 도파관 안테나로써 50~75 GHz 대역에서의 이득 범위는 4.6~6.5 dBi이고, 물리적 길이는 20 cm이다. 이득과 마찬가지로 그림 6에서 보이는 것처럼 안테나의 복사 패턴을 측정하기 위하여 금속 기구물을 사용한 것이며, 시뮬레이션 결과도 기구물을 고려한 것이다. 60 GHz 대역에서 측정된 결과와 시뮬레이션 결과는 주 빔 방향에서 좋은 일치를 보여준다. H plane의 3 dB 빔 폭의 경우 시뮬레이션 결과는 19도, 측정 결과는 17도이며, E plane의 3 dB 빔 폭은 시뮬레이션 결과는 29.5도, 측정 결과는 35도이다. 그리고 가장 큰 side lobe 크기의 경우 H-plane에서의 시뮬레이션과 측정 결과는 각각 -18.7 dB와 -14.7 dB이며, E-plane의 시뮬레이션과 측정 결과는 각각 -7.9 dB와 -3.8 dB이다. E plane 패턴의 경우, -50도에서 시뮬레이션 결과와 측정 결과가 일치하지 않는 현상이 발생하는데, 이는 near field 측정 장비를 사용하면서 V-type connector에 의한 산란으로 인해서 복사 패턴에 왜곡이 발생한 것으로 추정된다.



(a) H-plane 복사 패턴  
(a) H-plane radiation patterns.



(b) E-plane 복사 패턴  
(b) E-plane radiation patterns.

그림 8. 2x4 LTCC cavity backed 배열 안테나의 복사 패턴 측정 및 시뮬레이션 결과 비교  
Fig. 8. Comparisons of measured and simulated radiation patterns for 2x4 LTCC cavity backed array antenna.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 상대 유전율이 큰 LTCC 기판을 이용한 안테나의 복사 성능을 높이고, 대역폭을 개선하기 위하여 전통적으로 사용되었던 금속 cavity backed 안테나를 대체할 수 있는 LTCC cavity backed 안테나가 제안되었다. LTCC cavity는 접지면을 300 um 간격만큼 떨어진 다수의 금속 비어가 연결되어 만들어진다. 그리고, cavity의 크기는 안테나의 복사 성능 개선뿐만 아니라 대역폭 성능에도 매우 많은 영향이 있음을 확인하였다. 제안된 2x4 LTCC cavity backed 안테나의 크기는 10x20 mm<sup>2</sup>, 이득 11.8~14.1 dBi, 대역폭 7.9 GHz로 60 GHz WPAN 응용을 위한 요구 규격을 만족한다. 그리고, 측정 결과와 시뮬레이션 결과는 매우 잘 일치함을 보여준다. 향후 60 GHz WPAN용 송수신 모듈과의 집적화를 통한 소형의 송수신 모듈에 충분히 응용이 가능하다.

참 고 문 헌

- [1] Su Khiong Yong, Chia-Chin Chong, "An overview of multigigabit wireless through millimeterwave technology: Potentials and technical challenges", *EU-RASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, article ID 78907, 2007.
- [2] IEEE Std. P802.15.3c/DF1, "Wireless Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) specifications for high rate Wireless Personal Area Networks(WPANs): Amendment 2: Millimeter-wave based alternative physical layer extension", *IEEE*, 2008.
- [3] F. Xu, K. Wu, "Guided-wave and leakage characteristics of substrate integrated waveguide", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 53, Issue 1, pp. 66-73, Jan. 2005.
- [4] C. H. Lee, A. Sutono, S. Han, K. Lim, S. Pinel, J. Laskar, and E. M. Tentzeris, "A compact LTCC-base Ku-band transmitter module", *IEEE Trans. Adv. Packaging*, vol. 25, no. 3, pp. 374-384, Aug. 2002.
- [5] Y. Lee, W. Chang, and C. Park, "Monolithic LTCC SiP transmitter for 60 GHz wireless communication terminals", in *IEEE MTT-S Microwave Symposium Digest*, Jun. 2005.
- [6] W. Byun, B. -S. Kim, K. -S. Kim, K. -C. Eun, M. -S. Song, R. Kulke, O. Kersten, G. Mollenbeck, and M. Rittweger, "Design of vertical transition for 40 GHz transceiver module using LTCC technology", in *37th Eur. Microw. Conf.*, pp. 1353-1356, Oct. 2007.
- [7] M. A. Gonzalez de Aza, J. Zapata, "Broad-band cavity-backed and capacitively probe-fed microstrip patch arrays", *IEEE Trans. Ant. Prop.*, vol. 48, no. 5, pp. 784-789, May 2000.
- [8] R. Gonzalo, P. de Maagt, and M. Sorolla, "Enhanced patch antenna performance by suppressing surface waves using photonic bandgap substrates", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, no. 11, pp. 2131-2138, Nov. 1999.
- [9] R. Coccioli, F. -R. Yang, K. -P. Ma, and T. Itoh, "Aperture-coupled patch antenna on UC-PBG substrate", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, no. 11, pp. 2123-2130, Nov. 1999.
- [10] J. H. Lee, N. Kidera, S. Pinel, J. Laskar, and M. M. Tentzeris, "60 GHz high-gain aperture-coupled microstrip antennas using soft-surface and stacked cavity on LTCC multilayer technology", *IEEE Antennas and Propagation Society Symposium*, NM, pp. 1621-1624, 2006.
- [11] D. M. Pozar, "Rigorous closed form expressions for the surface wave loss of printed antennas", *Electronic Letters*, vol. 26, no. 13, pp. 954-956, Jun. 1990.
- [12] I. J. Bahl, P. Bhartia, *Microstrip Antenna*, Artech House, 1980.

변 우 진



1992년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)  
 1995년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)  
 2000년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)  
 1999년 11월~2004년 8월: 삼성전

기(주) 책임연구원  
 2004년 9월~현재: 한국전자통신연구원 방송통신융합연구부문 선임연구원  
 [주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 시스템 설계, 밀리미터파 CMOS 및 MMIC 설계, 안테나 설계, 전자파 수치 해석

김 광 선



1998년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)  
 2000년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2000년 4월~현재: 한국전자통신연구원 방송통신융합연구부문 선임연구원

[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 발진기, PLL 설계, 밀리미터파 RF/IF 시스템 분석

김 봉 수



1999년 2월: 충남대학교 정보통신공학과 (공학사)  
 2001년 2월: 충남대학교 정보통신공학과 (공학석사)  
 2000년 12월~현재: 한국전자통신연구원 방송통신융합연구부문 선임연구원

[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 수동회로 해석 및 설계, 밀리미터파 RF/IF 시스템 분석

김 중 면



2004년 2월: 한밭대학교 전자공학과 (공학사)  
 2007년 2월: 충북대학교 정보통신공학과 (공학석사)  
 2001년 2월~현재: 한국전자통신연구원 안테나기술연구팀  
 [주 관심분야] 초고주파 및 안테나

강 민 수



1996년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)  
 1998년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)  
 1998년 2월~2000년 3월: (주)현대 전자 통신사업본부 통신연구소  
 2000년 4월~현재: 한국전자통신연구원 방송통신융합연구부문 선임연구원

[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 회로 설계, 이동통신 시스템

송 명 선



1984년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)  
 1986년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)  
 1986년 2월~현재: 한국전자통신연구원 방송통신융합연구부문 인지 무선연구팀장

[주 관심분야] 초고주파 및 밀리미터파 회로 설계, 응용시스템 개발