

인공 자기 도체를 이용한 기지국 안테나의 방사 특성 개선 및 두께 감소

The Radiation Characteristics Improvement and Thickness Reduction of Base Station Antenna with Artificial Magnetic Conductor

손철홍 · 안지환 · 장기훈 · 윤지환 · 윤영중

Cheolhong Son · Jihwan Ahn · Kihun Chang · Ji Hwan Yoon · Young Joong Yoon

요 약

본 논문에서는 도체 판 대신 인공 자기 도체를 반사판으로 이용하여 방사 특성이 개선되고 두께를 줄인 PCS 용 기지국 안테나 구조를 제안하였다. 반사판으로 도체 판을 사용하는 기존 기지국 안테나의 경우, 도체 판 끝부분에서 기생 방사가 발생하고 이는 안테나의 후방사를 증가시켜 기지국 안테나의 방사 특성을 악화시킨다. 하지만 인공 자기 도체를 사용하면 표면에서의 높은 임피던스에 의해 표면파가 억압되어 후방사를 크게 줄일 수 있다. 그리고 부엽 특성도 개선되어 서비스 지역이 겹치는 문제를 막을 수 있다. 뿐만 아니라, 인공 자기 도체 표면에서의 0° 반사 위상에 의해 기지국 안테나의 두께를 또한 줄일 수 있다.

Abstract

In this paper, a Base Station Antenna(BSA) utilizing Artificial Magnetic Conductor(AMC) as reflector instead of common conductive plate to improve radiation characteristics and achieve low-profile is proposed. In the case of the conventional BSA on conductive surface which acts as a reflector, a secondary radiation is caused at the corner of the conductive surface, and it increases the back-lobe of the antenna, resulting in deteriorating the radiation characteristic of the conventional BSA. However, using the AMC, the back-lobe of the BSA can be largely reduced by the surface wave suppression. And the Side-Lobe Level(SLL) is also improved, resulting in preventing the service area overlapped. Furthermore, due to the 0° reflection phase on AMC, the profile of the BSA can be also reduced.

Key words : Base Station Antenna, Conductive Surface, Artificial Magnetic Conductor, Front-Back Ratio, Low-Profile

I. 서 론

이동 통신 시스템이 지속적으로 발전함에 따라 안테나의 성능을 향상시키기 위한 많은 연구들이 이루어지고 있다. 단말기의 소형화 및 다기능화에 대한 요구를 만족시키기 위해 인테나 및 다중 대역 안테나가 이미 개발되었고, 이러한 연구는 최근 기지

국 안테나에서 활발히 진행되고 있다^[1]. 초기에는 편파 및 공간 다양성에 관한 기지국 안테나가 미국, 일본에서 제안되었다^[2]. 최근에는 스마트 안테나를 기지국 안테나에 적용하여 주파수 대역 및 방사 패턴을 조절하는 연구가 진행되고 있다^{[3]~[5]}.

기지국 안테나는 일반적으로 부채꼴 형태로 분할된 3개의 무선 영역에 다이폴 배열로 이루어진 3개

「본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT원천기술개발사업의 일환으로 수행하였음[2007-F-041-03, 지능형 안테나 기술 개발.]

연세대학교 전기전자공학과(Department of Electrical & Electronic Engineering, Yonsei University)

· 논문 번호 : 20090130-015

· 수정완료일자 : 2009년 11월 17일

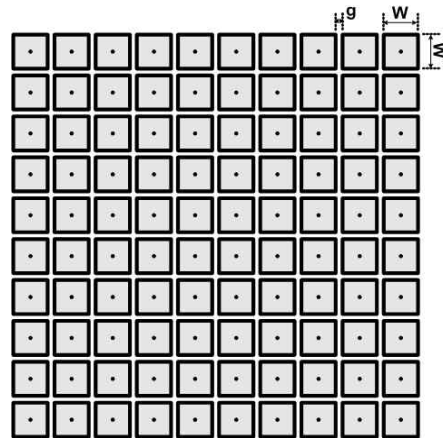
의 안테나가 각각 위치한 형태로 이루어져 있다^[6]. 이러한 경우, 넓은 수평 빔 폭에 의해 기지국 내에 중첩되는 서비스 지역이 증가하게 된다^[7]. 수평 빔 폭을 줄이기 위해 반사판이 사용되고 있으며, 일반적으로 기존 기지국 안테나에서는 반사판으로써 도체 판을 사용한다^[8]. 하지만 도체 판을 사용함으로써 몇 가지 문제점이 발생한다. 우선, 도체 판 표면에서 반사 위상이 180°이므로 안테나에서 나가는 직접파와 도체 판에 부딪쳐 돌아오는 반사파 사이에 상쇄 간섭이 발생하고, 이를 해결하기 위해 안테나와 반사판 사이에 $\lambda/4$ 의 공간이 요구된다. 게다가 도체 판에 흐르는 표면파에 의해 도체 판 끝부분에서 기생 방사가 발생하고, 기생 방사는 안테나의 후방사를 증가시킨다. 이 때, 후방사는 3개 무선 영역에 위치한 기지국 안테나 사이의 간섭을 유발시키고 간섭은 기지국 안테나의 전기적 성능을 악화시킨다^[9]. 그러므로 도체 판의 한계를 극복할 수 있는 대안이 필요하다.

인공 자기 도체는 다이폴의 반사판으로써 다이폴의 방사 패턴 개선 및 얇은 두께 구현에 초점을 맞추어서 연구되어 왔다^{[10][11]}. 우선, 인공 자기 도체의 높은 표면 임피던스에 의해 기지국 안테나의 전후 방사비가 개선될 수 있다. 뿐만 아니라, 인공 자기 도체의 0° 반사 위상에 의해 기지국 안테나의 두께를 줄일 수 있다. 따라서 본 논문에서는, PCS 대역에서 인공 자기 도체를 이용한 기지국 안테나의 성능 개선에 대한 방법을 다루고 있다. 본 논문에서 제시된 모든 시뮬레이션 결과는 CST社의 Microwave Studio V2008을 이용하여 얻은 결과이다.

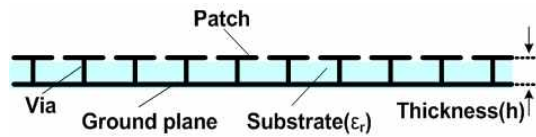
II. 인공 자기 도체의 기본 원리

그림 1은 인공 자기 도체의 구조를 보여주고 있다. 그림에서 보는 것과 같이 인공 자기 도체는 금속 패치, 접지면, 유전체, 비아로 이루어져 있다. 모든 패치는 동일한 크기를 가지며 유전체와 결합한 주기적인 격자 구조를 갖는다. 이러한 구조는 인공 자기 도체의 고유한 특성을 나타낼 수 있게 한다^[12].

인공 자기 도체의 주기적인 격자 구조가 전자기파의 영향을 받음에 따라 패치면 상단에서 전류가 유도되고 인접한 패치면 끝단에서는 전압이 형성되면서 전기 용량 성분이 발생하게 된다. 뿐만 아니라,



(a) 정면
(a) Front view



(b) 측면
(b) Side view

그림 1. 인공 자기 도체의 구조
Fig. 1. Configuration of the AMC.

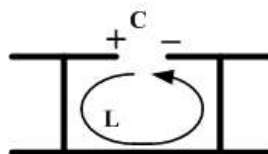


그림 2. 전기 용량과 인덕턴스의 발생
Fig. 2. Origin of capacitance and inductance.

이러한 과정에서 형성된 전하가 인접한 패치 사이에서 여기됨에 따라 전하들은 비아와 접지면을 따라 큰 루프를 형성하며 흐르게 되고 이에 의해 인덕턴스 성분이 발생하게 된다. 그림 2는 전기 용량과 인덕턴스의 발생을 나타내었다. 이러한 인공 자기 도체의 전자기적 특성은 병렬 LC 공진 회로로 등가화할 수 있으며, 등가 회로는 그림 3에서 확인할 수 있다.

또한, LC 공진 회로를 인공 자기 도체에 적용함으로써 인공 자기 도체의 표면 임피던스를 계산할 수 있다. 그리고 LC 공진 지점에서 인공 자기 도체의 표면 임피던스가 매우 크게 나타난다^[13].

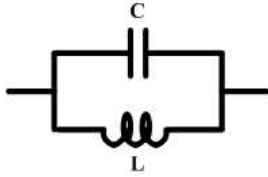


그림 3. 인공 자기 도체의 등가 회로
Fig. 3. An equivalent circuit of the AMC.

$$Z_s = \frac{1}{\frac{1}{j\omega L} + j\omega C} = \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 LC} \quad (1)$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2)$$

여기서 Z_s 는 인공 자기 도체의 표면 임피던스이고, 인공 자기 도체의 반사 계수와 반사 위상은 각각 식 (3), (4)로 표현된다.

$$\Gamma = \frac{Z_s - \eta}{Z_s + \eta} = |\Gamma|e^{j\phi} \quad (3)$$

$$\phi = \text{Im} \left\{ \ln \left(\frac{Z_s - \eta}{Z_s + \eta} \right) \right\} \quad (4)$$

이 때, 식 (2)에서 주어진 공진 조건을 식 (4)에 적용하면 인공 자기 도체의 반사 위상은 0° 에 가까워진다. 그러므로 인공 자기 도체는 높은 표면 임피던스와 0° 반사 위상 특성이 있음을 알 수 있다.

III. 기존 기지국 안테나

3-1 기존 기지국 안테나의 규격

우선, A 사의 기지국 안테나를 모델로 선정하였고, 설계 조건은 표 1에 나타내었다^[14].

표 1. 기존 기지국 안테나 규격
Table 1. Specification of conventional BSA.

변 수	수 치
크기 (폭×높이×두께)	150×600×70 mm ³
동작 주파수 범위	1,750~1,870 MHz
이득	> 13.0 dBi
-3 dB 수평 빔 폭	65°±5°
-3 dB 수직 빔 폭	18°±3°
부엽	< -13 dB
전후 방사비	> 25 dB

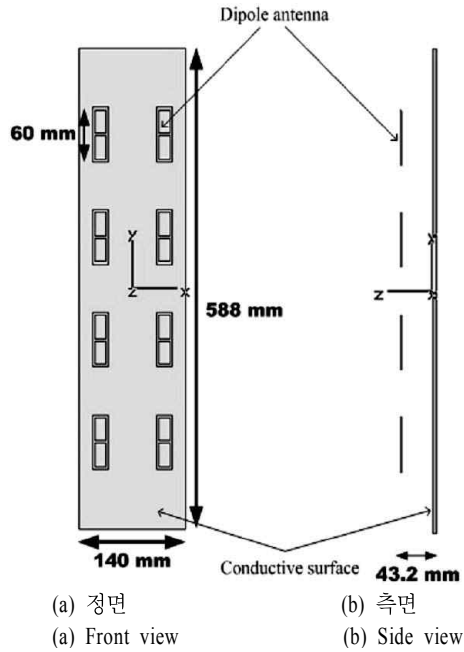


그림 4. 기존 기지국 안테나의 구조
Fig. 4. Configuration of conventional BSA.

3-2 기존 기지국 안테나의 시뮬레이션 결과

그림 4는 기존 기지국 안테나의 구조를 보여주고 있다. 먼저, 중심주파수는 1.81 GHz이고, 도체 판의 크기는 140×588×43.2 mm³이다. 13 dB 이상의 이득을 얻기 위해 2×4 배열을 사용하였고, 수평 및 수직 편파를 없애기 위해 다이폴은 x축으로 $\lambda/2$, y축으로 $3\lambda/4$ 의 간격으로 배열하였다. 그림 5에서 방사 패턴을 살펴보면 최대 이득이 15.3 dB의 지향성 패턴인데, 안테나 특성 분석을 용이하게 하기 위해 최대 이득을 0 dB로 맞추었음을 알 수 있다. 그리고 -3 dB 수평 및 수직 빔 폭이 각각 60.9°, 15.5°이고, 부엽은 -13.5 dB이다. 전후 방사비는 23.2 dB임을 알 수 있다. 그러므로 설계된 기존 기지국 안테나는 표 1에서 제시된 규격을 잘 만족한다.

IV. 제안된 기지국 안테나

기존 기지국 안테나와 비교했을 때 제안된 기지국 안테나의 정량적 목표는 두 가지로 결정된다. 첫째, 안테나와 반사판 사이의 거리를 $\lambda/4$ 에서 0.02 λ 로 줄이는 것이고, 둘째, 후방사에 의한 기지국 안테나 사이의 간섭을 막기 위해 30 dB 이상의 전후 방

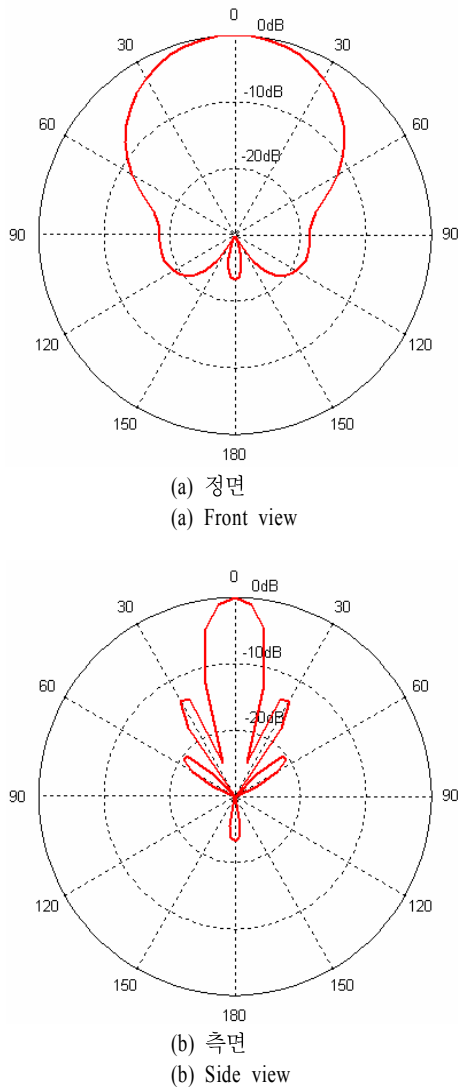


그림 5. 기존 기지국 안테나의 방사 패턴
Fig. 5. Radiation pattern of conventional BSA.

사비를 목표로 한다. 하지만, 기지국 안테나를 설계하기 전에 인공 자기 도체의 크기를 결정해야 한다.

4-1 인공 자기 도체의 단위 격자 결정

인공 자기 도체의 반사 위상은 주파수에 따라 변하고 주파수는 인공 자기 도체를 구성하는 변수들(패치 폭, 패치 간격, 유전율, 유전체 두께)에 의해 영향을 받는다. 예를 들어, 패치 폭이 증가하면 인접한 패치 사이의 전기 용량이 증가하고 그 결과, 주파수가 감소하고 그에 따라 반사 위상이 달라진다. 그리

표 2. 인공 자기 도체의 단위 격자 크기
Table 2. Dimension of AMC unit cell.

변 수	크 기
패치 폭(W)	$0.152 \lambda_{1.81} \text{ GHz}$
패치 간격(g)	$0.018 \lambda_{1.81} \text{ GHz}$
유전율(ϵ_r)	4.5
유전체 두께(h)	$0.039 \lambda_{1.81} \text{ GHz}$
비아 홀 반지름(r)	$0.001 \lambda_{1.81} \text{ GHz}$

고 유전체 두께가 감소하면 인덕턴스가 감소하여 주파수가 증가하고 반사 위상은 또다시 변하게 된다. 그러므로 인공 자기 도체의 단위 격자 크기는 이러한 변수들을 조절함으로써 결정된다^[15]. 이를 바탕으로 Fullwave 시뮬레이션을 통하여 1.81 GHz에서 인공 자기 도체의 특성을 가지는 단위 격자를 설계하였으며^[16], 표 2에 최종적으로 결정된 인공 자기 도체의 단위 격자 크기를 기록하였다.

또한 위 데이터로부터 인공 자기 도체의 전기 용량과 인덕턴스를 계산할 수 있으며, 이를 식 (1)과 (4)에 적용하여 인공 자기 도체의 반사 계수 위상을 계산할 수 있다^[12].

$$C = \frac{W\epsilon_0(1+\epsilon_r)}{\pi} \text{Cosh}^{-1}\left(\frac{W}{g}\right) \tag{5}$$

$$L = \mu_0 h \tag{6}$$

Fullwave 시뮬레이션을 통해 얻은 결과와 통해 얻은 반사 위상과 식 (5), (6)을 통해 얻은 결과를 그림 6에 나타낸다. Fullwave 시뮬레이션의 경우, 1.81 GHz,

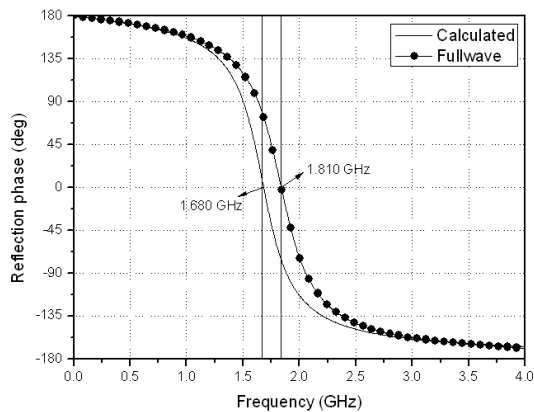


그림 6. 인공 자기 도체의 반사 위상
Fig. 6. Reflection phase of the AMC.

식을 통해 얻은 결과의 경우 1.68 GHz에서 반사 위상이 0°이 됨을 볼 수 있으며, 두 결과가 비교적 일치함을 확인할 수 있다.

그리고 인공 자기 도체의 표면 임피던스를 이용하여 인공 자기 도체에서의 표면파를 계산할 수 있다. 인공 자기 도체는 공진 주파수 근처에서 표면파를 억제하는 특성을 보이며, 공진 주파수보다 낮은 주파수 영역에서는 TM 모드의 표면파가, 공진 주파수보다 높은 주파수 영역에서는 TE 모드의 표면파가 진행하게 된다. 각 모드에 대하여 표면파의 감쇄 상수를 α , 자유공간의 임피던스를 n_0 라 할 때, 식 (1)은 표면파의 모드에 따라 다음과 같이 표현할 수 있다^[12].

$$Z_{s, TM} = \frac{j\alpha}{\omega\epsilon_0} \tag{7}$$

$$Z_{s, TE} = \frac{-j\omega\mu_0}{\alpha} \tag{8}$$

$Z_{s, TM}$ 과 $Z_{s, TE}$ 는 각각 TM 모드와 TE 모드 표면파에 대한 표면 임피던스이다. 식 (7)과 (8)로부터 각 모드에 대한 전파 상수, k_{TM} 과 k_{TE} 를 다음과 같이 구할 수 있으며, 이로부터 그림 7과 같은 분포도를 얻을 수 있다.

$$k_{TM} = \frac{\omega}{c} \sqrt{1 - \frac{Z_{s, TM}^2}{n_0^2}} \tag{9}$$

$$k_{TE} = \frac{\omega}{c} \sqrt{1 - \frac{n_0^2}{Z_{s, TE}^2}} \tag{10}$$

그림 7을 살펴보면 우선, 공진 주파수 이하에서는 TM 파가 존재하다가 공진 주파수 근처에서 억제되고 공진 주파수에서는 어떤 파도 존재하지 않음을 알 수 있다. 그리고 공진 주파수를 넘어섬에 따라 TE 파는 존재하는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 인공 자기 도체는 공진 주파수에서의 높은 표면 임피던스에 의해 표면파 억압 특성이 있음이 입증된다.

4-2 제안된 기지국 안테나의 시뮬레이션 결과

먼저, 제안된 기지국 안테나의 구조는 그림 8에 나타나 있다. 기존 기지국 안테나와 마찬가지로 동

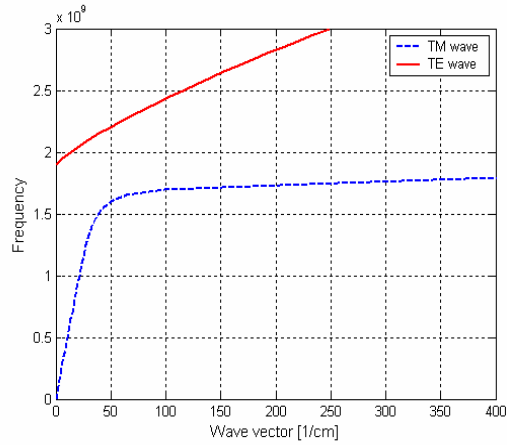


그림 7. 표면파에 대한 분포도
Fig. 7. Dispersion diagram for surface waves.

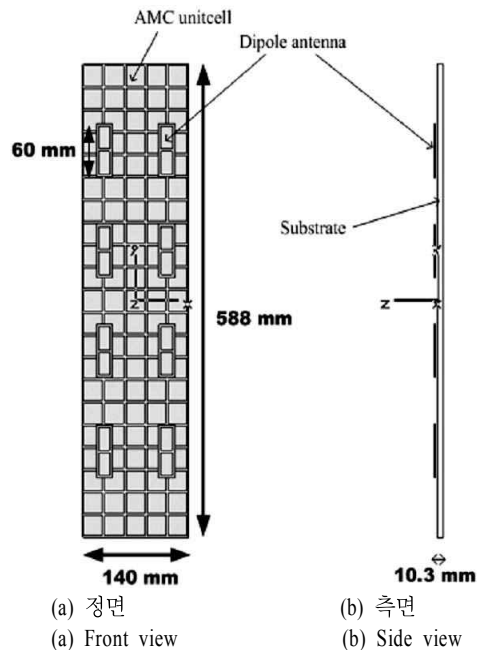
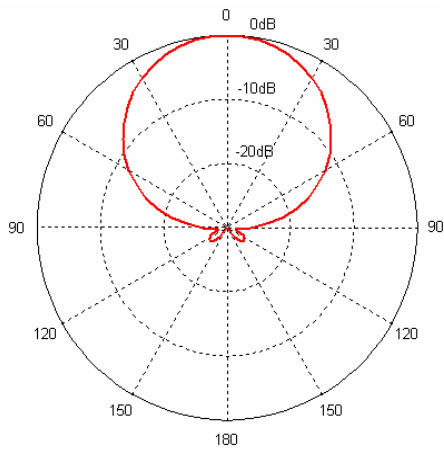


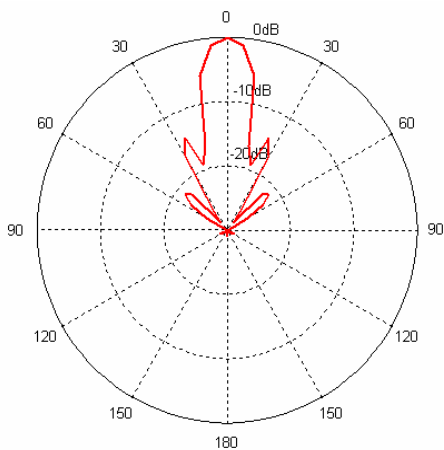
그림 8. 제안된 기지국 안테나의 구조
Fig. 8. Configuration of proposed BSA.

일한 간격의 2×4 다이폴 배열이 사용되었으며, 크기는 140×588×10.3 mm³로 앞선 경우와 비교해 보았을 때 두께가 32.9 mm가 줄어들었다.

그림 9은 제안된 기지국 안테나의 방사 패턴 결과를 보여준다. 최대 이득은 15.8 dB로 기존 기지국 안테나의 최대 이득과 비교했을 때 0.5 dB 향상되었고, -3 dB 수평 및 수직 빔 폭은 각각 58.8°, 14.0°이다.



(a) 정면
(a) Front view



(b) 측면
(b) Side view

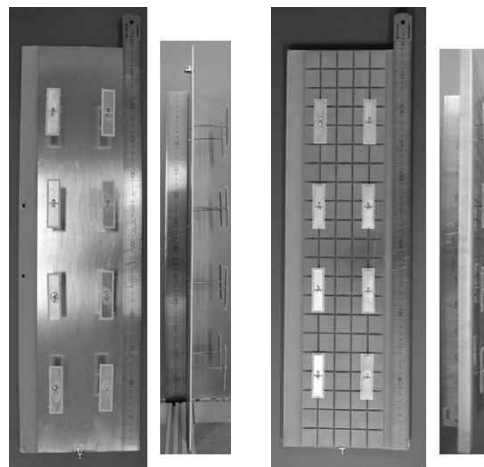
그림 9. 제안된 기지국 안테나의 방사 패턴
Fig. 9. Radiation pattern of proposed BSA.

부엽은 -15.4 dB로 기존 기지국 안테나의 부엽에 비해 1.9 dB 개선되었다. 전후 방사비는 31.1 dB로 기존 기지국 안테나에 비해 7.9 dB 향상되었으며, 후방사가 크게 줄어들음을 알 수 있다.

V. 제작 및 측정 결과

5-1 설계된 기지국 안테나 제작

그림 10에는 제작된 기지국 안테나의 모습을 보여주고 있으며, 유전율이 4.5 인 $1.6, 3.2$ mm의 FR4 기판을 사용하였다. 8개 다이폴에 동일한 전력을 공급



(a) 기존 기지국 안테나 (b) 제안된 기지국 안테나
(a) Conventional BSA (b) Proposed BSA

그림 10. 제작된 기지국 안테나 사진
Fig. 10. Pictures of fabricated BSAs.

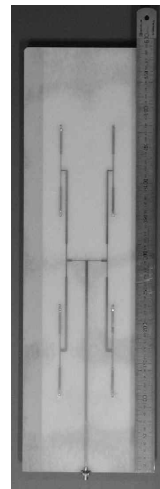


그림 11. 제작된 급전 구조 사진
Fig. 11. Picture of fabricated feeding structure.

하기 위해 50 Ω 매칭된 급전 구조를 설계하였으며, 제작된 급전 구조는 그림 11에 나타내었다.

5-2 측정 장비 설정

그림 12는 방사 패턴 측정을 위한 무손실 챔버 안에서의 장비 설정을 나타낸 것이다. $0.5 \sim 3$ GHz에서 동작하는 Double-Ridged Horn 안테나를 수신 안테나로 하였으며, 기지국 안테나의 이득을 정확히 측정하기 위해 송수신 안테나의 편파를 동일하게 맞추었다.

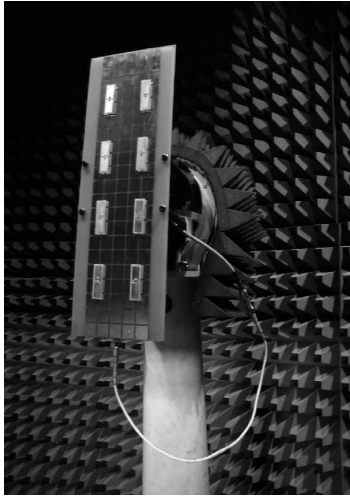


그림 12. 방사 패턴 측정 설정
Fig. 12. Radiation pattern measurement setup.

5-3 기지국 안테나의 측정 결과

그림 13에는 기존 기지국 안테나와 제안된 기지국 안테나의 VSWR을 나타내었다. 그림 14에 있는 측정된 기존 기지국 안테나의 방사 패턴을 살펴보면 부분적으로 패턴이 지글지글한 것을 볼 수 있는데, 이는 측정 시 케이블 선의 간섭에 의한 것이다. 최대 이득은 13.2 dB이고 시뮬레이션 결과와 비교해 보았을 때 2.1 dB의 이득 감소가 발생하였다. 이는 제작 공정 시 발생한 다이폴과 급전 구조의 불완전한 연결에 의한 전력 손실에 따른 것으로 분석된다. -3 dB 수평 및 수직 빔 폭은 각각 58.5°, 18.4°이고, 부엽

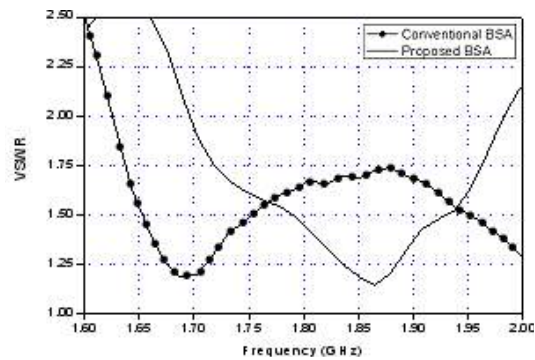
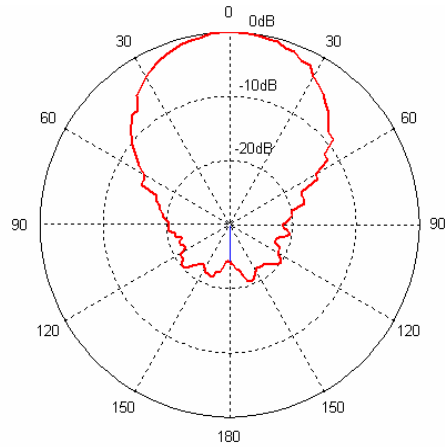
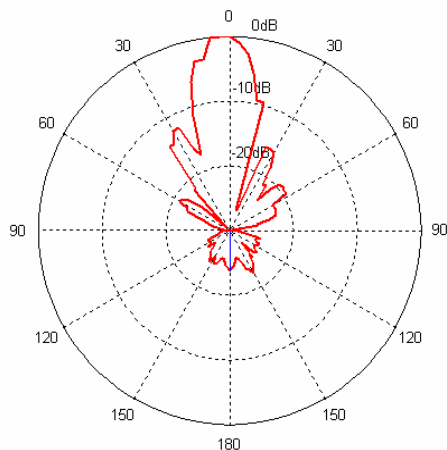


그림 13. 기존 기지국 안테나와 제안된 기지국 안테나의 측정된 VSWR
Fig. 13. Measured VSWR of conventional BSA and proposed BSA.



(a) 정면
(a) Front view



(b) 측면
(b) Side view

그림 14. 기존 기지국 안테나의 측정된 방사 패턴
Fig. 14. Measured radiation pattern of conventional BSA.

과 전후 방사비는 -13.1 dB, 24.0 dB이다.

제안된 기지국 안테나의 측정된 방사 패턴은 그림 15에 나타내었다. 최대 이득은 13.6 dB로 앞에서와 동일한 이유로 2.2 dB의 이득 감소가 발생하였다. -3 dB 수평 및 수직 빔 폭은 각각 55.9°, 15.5°이고 부엽은 -14.5 dB로 기존 기지국 안테나의 부엽에 비해 1.4 dB 개선되었다. 전후 방사비는 29.8 dB로 기존 기지국 안테나와 비교했을 때 5.8 dB가 향상되는 결과를 얻었고, 앞서 제시한 기지국 안테나의 정량적 목표를 만족한다. 끝으로 측정 결과를 손쉽게

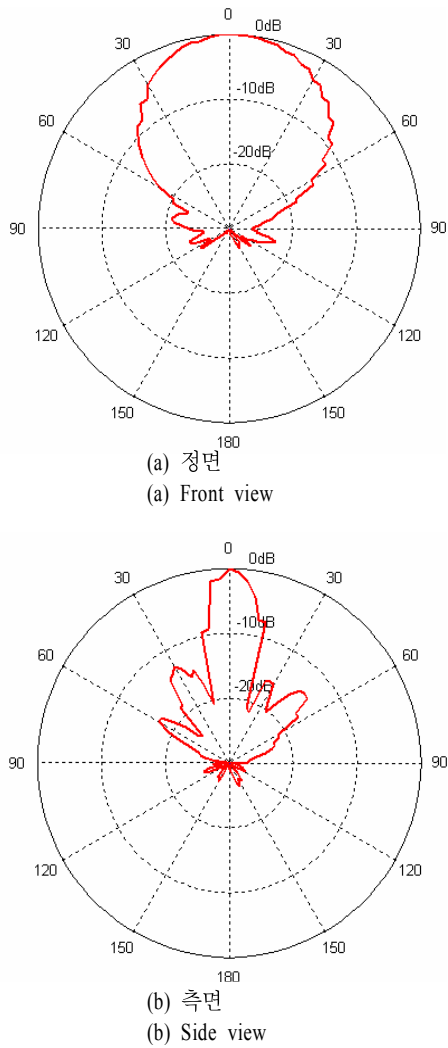


그림 15. 제안된 기지국 안테나의 측정된 방사 패턴
Fig. 15. Measured radiation pattern of proposed BSA.

표 3. 측정된 두 기지국 안테나의 성능 비교
Table 3. Comparison with the performance of two BSAs.

변 수	기존 기지국 안테나	제안된 기지국 안테나
크기 (폭×높이×두께)	140×588×43.2 mm ³	140×588×10.3 mm ³
동작 주파수 범위	1,750~1,870 MHz	1,750~1,870 MHz
이득	13.2 dBi	13.6 dBi
-3 dB 수평 빔 폭	58.5°	55.9°
-3 dB 수직 빔 폭	18.4°	15.5°
부엽	-13.1 dB	-14.5 dB
전후 방사비	24.0 dB	29.8 dB

비교하기 위해 데이터를 간략히 정리하여 표 3에 나타내었다.

VI. 결 론

본 논문에서는 PCS 대역에서 인공 자기 도체를 이용하여 기지국 안테나의 성능을 개선하는 방법에 대해 제안하였다. 먼저, 인공 자기 도체의 높은 표면 임피던스에 의해 전후 방사비는 24.0 dB에서 29.8 dB로 개선할 수 있었으며, 부엽 또한 -13.1 dB에서 -14.5 dB로 감소시킬 수 있었다. 뿐만 아니라 제작된 기존 및 제안된 기지국 안테나의 크기는 각각 140×588×43.2 mm³와 140×588×10.3 mm³로 인공 자기 도체를 적용함으로써 32.9 mm만큼 두께를 줄일 수 있었다. 그러므로 인공 자기 도체를 적용함으로써 기지국 안테나의 전기적 성능을 개선할 수 있을 뿐만 아니라 두께 또한 줄일 수 있음이 입증되었다.

참 고 문 헌

- [1] K. J. Oh, B. J. Kim, and J. H. Choi, "The design and implementation of a multi-band planar antenna for cellular/PCS/IMT-2000 base station", *Journal of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 15, no. 8, pp. 781-787, Aug. 2004.
- [2] Y. Yamada, K. Kagoshima, and K. Tsunekawa, "Diversity antennas for base and mobile stations in land mobile communication systems", *IEICE Trans.*, vol. E74, no. 10, pp. 3202-3209, 1991.
- [3] S. H. Lee, J. N. Lee, D. S. Lee, J. K. Park, and H. S. Kim, "Design of the pattern adjustable base station antenna for WCDMA applications", *Journal of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 8, no. 2, pp. 64-69, Jun. 2008.
- [4] T. Ohgane, "Spectral efficiency improvement by base station antenna pattern control for land mobile cellular systems", *Global Telecommunications Conference*, pp. 913-917, 1993.
- [5] The Korean Institute of Electromagnetic Engineering & Science, *Antenna Technology Workshop 2008*.

- [6] Y. Ebine, "Design of base station antennas for next generation cellular mobile radio(IMT-2000)", *Tech. Rep. IEICE(2000)*, AP2000-4.
- [7] Y. Kimura, Y. Ebine, "Control of horizontal radiation pattern of base station antenna for cellular mobile communications by performing approach arrangement of slender metal conductors", *Electronics and Communications in Japan*, Part 1, vol. 88, pp. 20-31, 2005.
- [8] D. R. Lee, J. D. Park, J. I. Choi, and N. Kim, "Analysis of near field for base station panel antenna(4×2 dipole array)", *Journal of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 15, no. 5, pp. 473-479, May 2004.
- [9] K. Fujimoto, *Mobile Antenna Systems Handbook*, 3rd Edition, Artech House, Section 4.4.3, pp. 195-203, London, 2008.
- [10] A. F. Feresidis, G. Goussetis, S. Wang, and J. Y. C. Vardaxoglou, "Artificial magnetic conductor surfaces and their application to low-profile high-gain planar antennas", *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, vol. 53, pp. 209-215, Jan. 2005.
- [11] A. Erentok, P. L. Luljak, and R. W. Ziolkowski, "Characterization of a volumetric metamateria realization of an artificial magnetic conductor for antenna applications", *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, vol. 53, pp. 160-172, Jan. 2005.
- [12] D. Sivenpiper, "High-impedance electromagnetic surfaces", Ph. D. dissertation, Department of Electrical Engineering, Univ. California, Los Angeles, CA, Chapter 1, 1999.
- [13] D. Sivenpiper, L. Zhang, R. F. J. Broas, and N. G. Alexopolous, "High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 47, pp. 2059-2074, Aug. 1999.
- [14] <http://www.aceantenna.co.kr/>
- [15] F. Yang, Y. Rahmat-Samii, "Reflection phase characterizations of the EBG ground plane for low profile wire antenna application", *IEEE Trans. Antenna Propagation*, vol. 51, no. 10, pp. 2691-2703, Oct. 2003.
- [16] H. Mosallaei, Y. Rahmat-Samii, "Broadband characterization of complex periodic EBG structures: An FDTD/prony technique based on the split-field approach", *Electromagn.*, vol. 23, no. 2, pp. 135-151, Feb. 2003.

손 철 홍



2007년 2월: 연세대학교 전기전자공학부 (공학사)
 2009년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
 2009년 3월~현재: 삼성전자 연구원
 [주 관심분야] 인공 자기 도체, 안테나

안 지 환



2005년 8월: 연세대학교 기계전자공학부 (공학사)
 2008년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
 2008년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
 [주 관심분야] 초고출력 안테나 시스템, 반사판 안테나, 메타메터리얼

장 기 훈



2002년 8월: 연세대학교 기계전자공학부 (공학사)
2004년 8월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
2009년 8월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)
2009년 8월~2009년 12월: 연세대학교 전기전자공학과 Post Doc.

2009년 12월~현재: Research Associate in the University of Arizona

[주 관심분야] 인공 자기 도체, 주파수 선택 표면, 안테나

윤 영 중



1981년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1986년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
1991년 2월: Georgia Institute of Technology (공학박사)
1992년~1993년: 한국전자통신연구원 위성통신기술연구단

1993년~현재: 연세대학교 전기전자공학과 교수
[주 관심분야] 마이크로파 소자, 안테나, 전파전파, EMI/EMC

윤 지 환



2008년 8월: 연세대학교 전기전자공학부 (공학사)
2004년 8월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
2008년 9월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 석사과정
[주 관심분야] 메타메터리얼, 인공 자기 도체, 영차공진 안테나