

EBG 표면 위의 단일 방향 복사 등각 안테나의 성능 해석

윤성현*, 김재관*

Performance Analysis of the Uni-Directional Radiation Equiangular Antenna over EBG Surface

Sung Hyun Yoon*, Jae Kwan Kim*

요 약

본 연구에서는 원형편파를 양방향으로 복사하는 등각 스파이럴 안테나에 EBG(electromagnetic band gap) 반사판을 사용하여 단일 방향으로 복사가 발생하게 하였다. EBG 반사판에서 스파이럴 암 까지의 높이가 가장 낮은 동작 주파수의 0.07 파장 높이로 한 경우, 원형편파의 축비가 손상되는 것이 발생하였다. 본 논문에서는, $+z$ 방향에서의 동일 편파인 우선 원형 편파를 발생시키는 E_θ, E_ϕ 의 크기와 시간 위상차를 해석하여, 전 주파수 영역에서 축비를 개선하는 조건을 제시하였다. 그 결과, 3 ~ 10[dB] 주파수 범위에서 축비는 3[dB] 이하이고, 이득은 자유공간에서의 양방향 복사와 비교해서 약 3[dB] 정도 개선되었고, S_{11} 은 전 주파수 영역에서 -10[dB]이하를 얻었다.

Key Words : EBG reflector, equiangular spiral antenna, circular polarization, Axial ratio, co-polarization, cross-polarization

ABSTRACT

In this study, we used EBG(electromagnetic band gap) reflector to change bi-directional radiation of circular polarization into uni-directional radiation of equiangular spiral antenna. When the height of spiral arm from EBG reflector is 0.07 wavelength of the lowest operating frequency, the axial ratio of the circular polarization was deteriorated. In this paper, we analyzed the magnitude and the time phase difference of E_θ, E_ϕ that generates right hand circle polarization that is co-polarization at $+z$ direction and proposed the improving condition for axial ratio at all related frequency range. As a result, we obtained that the axial ratio was below 3[dB] at range of 3 ~ 10[dB], the gain was improved about 3[dB] with comparison to bi-directional radiation at free space, and S_{11} was below -10[dB] at all related frequency range.

※ 본 논문은 2014년도 특성화전문대학 육성사업으로 지원을 받아 수행된 것임.

•* First and Corresponding Author : Kyungnam College of Information & Technology Subdivision of Communication, yoon1@eagle.kit.ac.kr, 정회원

* 영도산업전자, saracokim@paran.com, 정회원

논문번호: KICS2015-06-180 Received June 10, 2015; Revised August 10, 2015; Accepted August 10, 2015

I. 서 론

임피던스, 복사 패턴 등이 넓은 주파수 대역에서 크게 변하지 않는 주파수 독립 안테나 중의 하나인, 등각 스파이럴 안테나(Equiangular Sp-iral Antenna)는 안테나 면의 수직 방향으로 원형 편파(Circular Polarization)를 대칭적으로 양 방향(bi-directional) 복사하는 패턴을 가진다¹⁾. 그러나 방향 탐지 및 신호 탐지와 같은 많은 응용에서 스파이럴 안테나는 원형 편파를 단일 방향(uni-directional)으로 복사하는 패턴을 요구하므로, 양방향 복사를 단일방향으로 복사하는 변환 장치가 필요하다. 이러한 문제를 해결하기 위한, 캐비티 백 스파이럴(Cavity backed spiral) 방법은 스파이럴 암 뒷면에 사용하는 가장 낮은 주파수의 $\lambda/4$ 파장의 캐비티와 전파 흡수체를 이용하여, 안테나 패턴 앞쪽 방향으로만 복사 되도록 한 것이므로, 복사 전력의 일부가 전파 흡수체에 의해서 약 3[dB]의 전력 손실이 발생하고, 안테나의 소형화에 문제점이 발생한다^{2,3)}. 또 다른 방법은 스파이럴 암 뒷면에 EBG(Electromagnetic Band Gap) 구조물을 반사판으로 사용하는 것이다⁴⁾. EBG는 구조물의 재원에 따라서 어느 특정 주파수 범위에서 표면파(surface wave)에 대하여 고 임피던스 표면(High Impedance Surface)으로 작용하여, 표면파의 전파를 억제하고, EBG 표면에서 반사되는 파는 위상이 $\phi=0$ 도의 위상으로 반사하는 PMC(Perfect Magnetic Conductor)로 작용하는 주파수가 존재하여, 동위상 ($|\phi| \leq 90^\circ$)으로 반사되는 주파수 대역폭이 존재한다⁵⁾. 따라서, EBG를 스파이럴 안테나의 반사판으로 사용하면, 안테나 높이가 낮고(low-profile : $h \ll \lambda/4$), 전력 손실 없이 단일 방향의 복사 특성을 가지는 안테나가 가능하다. 한편, EBG 구조는 금속 패치 사이의 간격에 의한 병렬 공진회로이기 때문에 동위상 ($|\phi| \leq 90^\circ$)의 대역폭이 좁아서 마이크로스트립 패치 안테나와 같이 협대역 안테나에 EBG 접지면을 사용할 경우 안테나의 성능을 향상시키는데 효과적이지만, 스파이럴 안테나와 같이 원형 편파를 발생하는 광대역 안테나에 캐비티 없이 EBG 반사판을 사용하면, 원형 편파의 기준이 되는 축비 (Axial Ratio)의 크기가 3[dB] 보다 작은, 주파수 대역폭이 작아져서 광대역을 사용하기가 어렵다. 특히 낮은 주파수 대역에서 축비가 매우 커져서 원형편파의 특성을 손상시킨다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 문헌 [4]에서는 변형된 EBG 반사판을 사용하여 가장 낮은 해석 주파수인 3[GHz]에서

0.07 λ 파장인 7mm 높이의 low-profile 등각 스파이럴 안테나에서의 축비를 해석하였지만 3[GHz] 근처에서 만족스러운 축비를 얻지 못했다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 문헌 [4]에서 사용한 동일한 안테나 암의 반경을 사용하여 3-10[GHz] 주파수 범위에서 축비를 해석하여 문헌 [4]의 결과와 비교하여 EBG 반사판 위에 $h \ll \lambda/4$ 로 배치한, 단일 방향 등각 스파이럴 안테나의 성능을 해석하고자 한다.

II. 돌기형 EBG 구조 및 반사 위상 특성

돌기형 EBG는 그림 1.과 같이 도체 접지 면을 가지는 유전체 위에 사각형 도체 패치를 에칭한 형태인데, Sievenpiper 구조 혹은 버섯(mushroom) 형태 구조라고 한다⁶⁾. 각 패치는 중심에 via를 사용하여 접지면과 연결하는데, 이것은 병렬 인덕터를 만들기 위한 것이다.

또한 각 패치는 기판의 평면위에 2차원적으로 주기적으로 배열하는데, 직렬 커패시터를 만들기 위하여 유전체 간격을 유지하면서 배열 시킨다. 따라서 이러한 구조물은 그림 2와 같이 LC 병렬 공진회로 나타낼 수 있다.

이러한 모델의 표면 임피던스, 공진 주파수, 인덕턴스, 커패시턴스, 및 대역폭은 식(1)에서 (5)와 같이 표현된다⁷⁾.

$$Z_s = \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 LC} \tag{1}$$

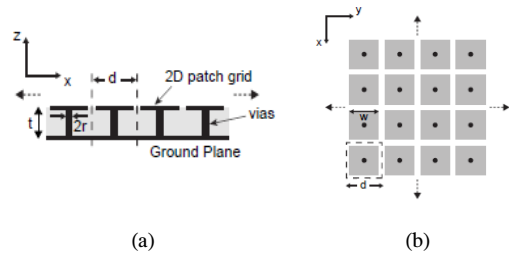


그림 1. EBG 구조의 형태 (a)측면도 (b)상면도
Fig. 1. Geometry of EBG structure. (a) side view (b) top view

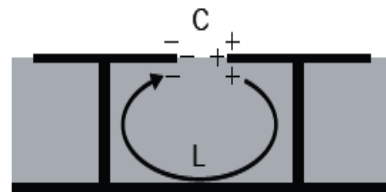


그림 2. EBG 등가 모델
Fig. 2. Equivalent model of EBG.

$$w_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{2}$$

$$L = \mu_0 t \tag{3}$$

$$C = \frac{W\epsilon_0(1+\epsilon_r)}{\pi} \cosh^{-1}\left(\frac{d}{d-W}\right) \tag{4}$$

$$BW = \frac{1}{120\pi} \sqrt{\frac{L}{C}} \tag{5}$$

즉, 저주파에서는 유도성이고, 고주파에서는 용량성이 되고, 공진 주파수에서 고 임피던스가 되어 표면에서 전계의 접선 성분은 유한한 값을 가지지만, 자계의 접선 성분은 0이 되어, 위상이 반전되지 않고 반사 위상이 $\phi = 0^\circ$ 의 위상으로 반사하는 PMC 주파수가 존재하고, 동위상 (in-phase : $|\phi| \leq 90^\circ$)으로 반사되는 특정 주파수 대역폭이 존재한다. 그림 3은 돌기형 EBG의 제원이 $\epsilon_r = 2.2$, via 반경 $r = 0.4mm$ 일 때, $d = 14mm$ 일 때, 패치 폭 W 의 변화에 따른 PMC 주파수 및 동위상 대역폭을 보인 것인데, PMC 주파수는 W 가 클수록 낮아진다는 것을 알 수 있다. 이것은 셀 사이의 간격이 좁아져서 커패시턴스가 커지기 때문에 식(2)에 의한 것이다. 또한, 그림 3에서, PEC 반사판인 경우, 전 주파수 영역에서 반사계수의 위상이 -180° 인 반면에, EBG는 반사계수의 위상이 낮은 주파수에서 180° 로 출발하여 PMC 주파수를 지나, 고주파가 될수록 반사위상이 -180° 로 근접하므로, EBG는 동위상 대역(in-phase : $|\phi| \leq 90^\circ$)을 넘는 고주파에서 부터는 PEC로 작용한다는 것을 알 수 있다.

또한, 그림 4는 $d = 14mm, W = 13.5mm$ 에 유전체 높이 t 에 따른 반사 위상을 보인 것인데, t 가 클수록 PMC 주파수가 낮아진다는 것을 알 수 있다. 이것은 식(3)에 의해서 인덕턴스가 커지고, 식(2)에 의해서 공진 주파수가 작아지기 때문이다.

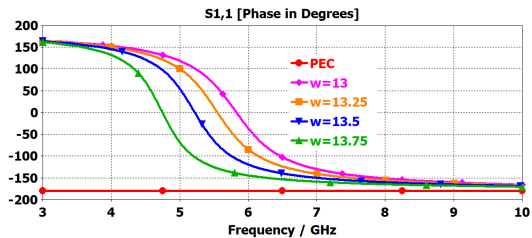


그림 3. $d = 14mm, t = 1.6mm$ 인 경우 W 에 따른 반사 위상
Fig. 3. Reflection phase according to W when $d = 14mm, t = 1.6mm$.

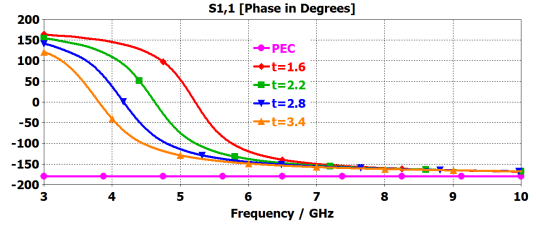


그림 4. $d = 14mm, W = 13.5mm$ 인 경우 t 에 따른 반사 위상
Fig. 4. Reflection phase according to t when $d = 14mm, W = 13.5mm$.

따라서 EBG 반사판을 안테나의 반사판으로 사용하여, 낮은 높이(low-profile)의 안테나를 설계시, EBG의 PMC 주파수를 저주파에서 발생시키고, 동위상 대역폭을 크게하면, EBG 반사판과 스파이럴 안테나 사이의 높이 h 가 고정되어 있으므로, 저주파에서 $h \ll \lambda$ 일지라도, 동위상 반사를 발생시키고, 고주파에서는 EBG가 PEC로 작용하고 높이도 $h \approx \lambda/4$ 에 근접하므로, 전 주파수 영역에서 안테나의 복사 효율 향상 시킬 것이라 사료된다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 단일 방향 복사 등각 스파이럴 안테나를 위하여 EBG 반사판을 사용하는 경우, 원형 편파의 기준이 되는 축비(Axial Ratio)의 대역폭, 이득, S_{11} 및 입력 임피던스의 특성을 개선하는 방법에 대하여 제시하고자 한다.

III. 등각 스파이럴 안테나 해석

하나의 등각 스파이럴 안테나 암은 다음과 같이 두 개의 등각 스파이럴 곡선으로 구성된다.

$$r_1 = r_0 e^{a\theta} \tag{6}$$

$$r_2 = r_0 e^{a(\theta-\delta)} \tag{7}$$

여기서

r_1, r_2 : 스파이럴 곡선의 반지름

r_0 : 스파이럴 곡선 시작점의 반지름

a : 증가율(growth rate)

θ : 원점으로 부터의 주회각도

δ : 곡선 r_1 과 r_2 사이의 주회각도 차

또 다른 암은 첫 번째 암을 180° 회전시켜서 구성한다. 2-암 등각 스파이럴 안테나의 제원은 사용 주파

수 대역과 밀접한 관계를 갖는다. 사용 대역의 가장 높은 주파수는 r_0 와 직접적인 관련이 있는데, 일반적으로 $r_0 \leq \lambda_H/2\pi$ (λ_H 는 가장 높은 주파수의 파장)으로 하고, 가장 낮은 주파수는 외각 반지름 r_1 중 최대 반경 $2\pi r_{\max} \geq \lambda_L$ (가장 낮은 주파수의 파장)에 의해서 결정한다. 그림 5는 2-암 등각 스파이럴 곡선의 제원을, 급전의 구조 및 저주파에서 여유있는 복사 영역을 고려하여, 시작점 반지름 $r_0 = 1.5mm$, $r_{\max} = 56.85mm$ 로 하고, r_1 의 출발 각도 θ 는, -0.25π , r_2 의 출발 각도 θ 는 0.25π 로 하여 $\delta = \pi/2$ 의 주회각도 차를 유지 하고, 증가율 $a = 0.35$, 최종 회전 각도 $\theta = 2.806\pi$ 로 설계한 등각 스파이럴 안테나의 축비 AR 을 보인 것이다⁴¹. 이러한 스파이럴 안테나를 자유공간에서 급전하면 $+z$ 방향으로 우선 원형 편파(Right Hand Circle Polarization) E_R 가 발생하고, $-z$ 방향으로는 좌선 원형 편파(Left Hand Circle Polarization) E_L 가 발생하며, $+z$ 방향으로 원형편파의 축비(Axial Ratio)는 다음과 같이 계산된다⁸.

$$AR = \frac{(|E_R| + |E_L|)}{(|E_R| - |E_L|)} \quad (8)$$

여기서, $E_R = E_\theta - jE_\phi$, $E_L = E_\theta + jE_\phi$

즉, $+z$ 방향($\theta = 0^\circ$)에서 E_θ, E_ϕ 의 크기가 같고, 시간 위상차가 270° 이면, 동일 교차 성분(co-polarization component)인 E_R 만 존재하고, $-z$ 방향($\theta = 180^\circ$)에서는 E_θ, E_ϕ 의 크기는 같고, 시간 위상차는 90° 일 때, 동일 교차 성분인 E_L 만 존재한다. 그러나 대부분인 경우 안테나 자체에서의 반사 및 주변 환경에 의한 반사 때문에 $\pm z$ 방향에서 E_θ, E_ϕ 의 시간 위상차가 $\pi/2$ 의 홀수배를 만족하지 않으므

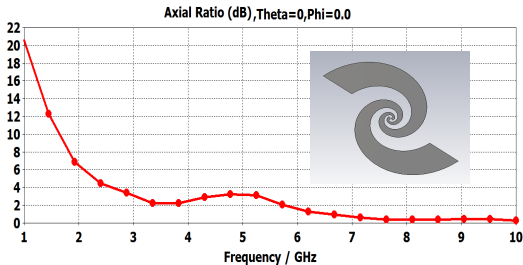


그림 5. 등각 스파이럴 안테나의 축비
Fig. 5. Axial Ratio of equiangular spiral antenna

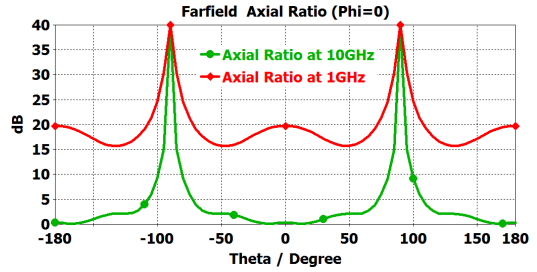


그림 6. 1[GHz]와 10[GHz]에서의 축비
Fig. 6. Axial ratio at 1[GHz] and 10[GHz].

로, 교차 편파 성분(cross-polarization component)이 어느 정도 존재하므로, 식 (8)에 의해서 축비가 타원 편파($1 < AR < \infty$)의 형태로 존재하는데, 일반적으로 $AR \leq 3dB$ 를 원형 편파로 간주한다. 그림 6은 가장 낮은 주파수 1[GHz]와 가장 높은 10[GHz]에서 θ 에 따른 축비를 보인 것인데, $\theta = 0^\circ$ ($+z$ 방향)에서 각각, 1[GHz]에서는 선형편파에 가까운 20[dB], 10[GHz]에서는 원형편파에 가까운 0.3[dB]로 계산되었다. 그림 7은 주파수 10[GHz]인 경우의 E_θ, E_ϕ 성분의 크기와 위상차를 보인 것이다.

그림 7에서 $\theta = 0^\circ$ 위치에서 $E_\theta \approx 2dB$, $E_\phi \approx 1.72dB$, E_θ 위상은 약 26° , E_ϕ 는 296° 로 위상차가 270° 되어서, 그림 8과 같이 동일 편파 성분 E_R 가 약 4.8[dB], 교차 편파 성분 E_L 가 약 -30[dB]로 발생하고, $\theta = 180^\circ$ 위치에서는 E_θ 위상은 약 296° , E_ϕ 는 206° 로 되어 위상차 90° 가 발생하여, $\theta = 0^\circ$ 인 경우와 반대로, 동일 편파인 E_L 와 교차 편파인 E_R 가 발생하여 식(8)에 의해서 $AR=0.3[dB]$ 의 축비가 발생함을 알 수 있다.

또한, 그림 9는 주파수 1[GHz]인 경우의 E_θ, E_ϕ 성분의 크기와 위상차를 보인 것이다. 그림 9에서 $\theta = 0^\circ$ 위치에서 $E_\theta \approx -5.18dB$, $E_\phi \approx 1.37dB$ 의 진폭이 계산되고, E_θ 위상은 약 58.2° , E_ϕ 는 253.6° 로

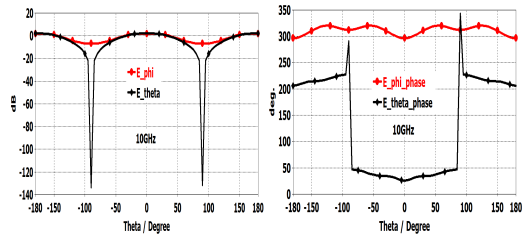


그림 7. 10[GHz]에서 E_θ, E_ϕ 진폭 및 위상
Fig. 7. Amplitude and phase of E_θ, E_ϕ at 10[GHz].

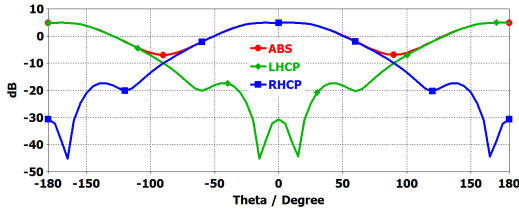


그림 8. 10[GHz]에서의 $|E_R|, |E_L|$
 Fig. 8. $|E_R|, |E_L|$ at 10[GHz].

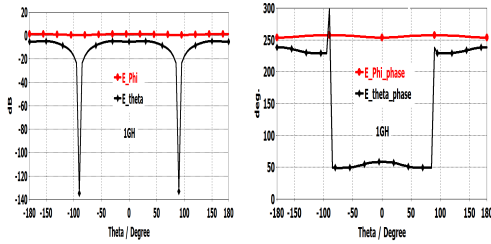


그림 9. 1[GHz]에서 E_θ, E_ϕ 의 진폭 및 위상
 Fig. 9. Amplitude and phase of E_θ, E_ϕ at 1[GHz].

계산되어 위상차가 약 195° 되어서, 직선편파가 되는 180° 보다 약 15° 큰 타원 편파가 되므로, 그림 10과 같이 $\theta = 0^\circ$ 에서 동일 편파인 E_R 의 레벨이 0[dB], 교차편파인 E_L 의 레벨이 -2[dB]인 비슷한 크기를 가지고, $\theta = 180^\circ$ 위치에서 그 반대의 크기를 가지므로 식(8)에 의해서 매우 큰 축비를 가진다. 이렇게 암의 끝부분에 절단면을 가지는 등각 스파이럴 안테나에서 낮은 주파수 일수록 E_θ, E_ϕ 의 레벨 차이가 크고, 위상차도 선형편파를 형성하는 180° 에 근접하여 교차편파가 커지는 이유는, 스파이럴 안테나의 암에 분포된 전류 때문이다. 즉, 그림 11은 1[GHz]와 10[GHz] 주파수 성분의 전류를, 급전하면 원주가 한파장이 되는 능동 영역에서 복사가 일어나는 진행파만 존재하지만, 1[GHz] 주파수 성분의 전류는 복사

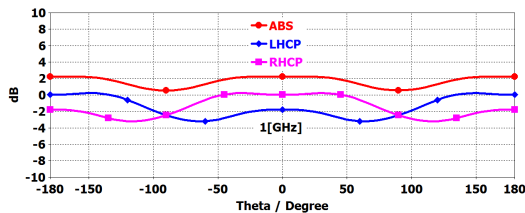


그림 10. 1[GHz]에서의 $|E_R|, |E_L|$
 Fig. 10. $|E_R|, |E_L|$ at 1[GHz].

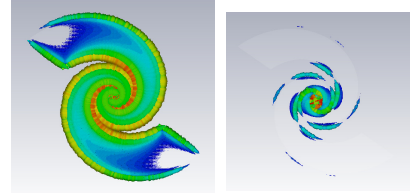


그림 11. 1[GHz]와 10[GHz]의 전류분포 (a) $a = 0.35, \theta = 2.806\pi$, (b) $a = 0.185, \theta = 6\pi$, (c) $a = 0.1129, \theta = 10\pi$
 Fig. 11. Current distribution at 1[GHz] and 10[GHz]. (a) $a = 0.35, \theta = 2.806\pi$, (b) $a = 0.185, \theta = 6\pi$ (c) $a = 0.1129, \theta = 10\pi$

가 발생하는 능동영역 원주에 진행파와 암의 끝부분에서 반사하는 전류 반사파의 합성에 의한 정재파의 존재 때문이다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 스파이럴 암의 끝부분에서 반사 전류를 줄이기 위하여, 암의 끝부분을 원호 처리하여 유효길이를 길게 하였는데, 그림 12는 암의 끝부분에서 원호의 길이를 0.5π 로 하고, 각각의 스파이럴 안테나에서 AR를 관심의 주파수 범위에서 자유공간에서 계산한 것인데, 암의 끝부분에 원호를 사용한 경우가 절단면을 사용한 경우보다 AR이 개선된 것을 알 수 있다. 한편, 본 연구에서는, 가능한 AR값이 관심의 주파수영역에서 제일 작은 경우인, 회전각도 $\theta = 10\pi$ 인 경우를 선택하여 해석하고자 한다.

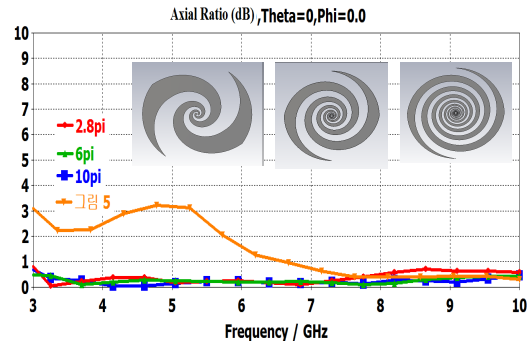


그림 12. (a) $a = 0.35, \theta = 2.806\pi$, (b) $a = 0.185, \theta = 6\pi$, (c) $a = 0.1129, \theta = 10\pi$ 일 때의 AR
 Fig. 12. AR when (a) $a = 0.35, \theta = 2.806\pi$, (b) $a = 0.185, \theta = 6\pi$, (c) $a = 0.1129, \theta = 10\pi$.

IV. PEC 위의 등각 스파이럴 안테나 해석

스파이럴 안테나의 양 방향 복사를 단일 방향 복사 패턴으로 변환하는 간단한 방법은 완전 도체인 PEC(Perfect Electronic Conductor) 위에 안테나를 위치시키는 것이다. 그림 13에서 PEC 반사판은 정사각

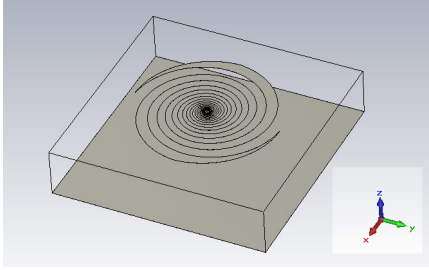


그림 13. 도체 위의 등각 스파이럴 안테나
Fig. 13. Equiangular spiral antenna on the conductor.

형이고 한 변의 길이는 S_{PEC} 이고 안테나는 PEC 반사판 위에 높이 h_{PEC} 에 위치시킨다. 그림 14는 회전 각도 $\theta = 10\pi$ 인 안테나의 높이를 PEC 반사판으로부터 $7mm, 9mm, 11mm$ 로 할 경우 축비를 자유공간인 경우와 비교한 것인데, PEC 반사판에서 안테나의 높이가 높을수록 낮은 주파수 범위에서는 축비가 작고, 낮을수록 축비가 커져서 원형 편파 안테나로 사용할 수가 없다는 것을 알 수 있다. 즉, 낮은 주파수에서 축비가 커지는 이유는 주파수가 낮을수록 $h_{PEC} \ll \lambda/4$ 가 되어 안테나 암의 끝부분에서 급전점으로 들어오는 전류로부터 만들어지는 교차 편파 성분인 $|E_L|$ 이 커지기 때문이고, 이러한 교차 성분이 커지는 이유는 $h_{PEC} = 7mm, 4[GHz]$ 인 경우 그림 15에서 처럼 $\theta = 0^\circ$ 에서 약 $E_\phi = 7.45dB, 214^\circ$ $E_\theta = -6.5dB, 354^\circ$ 가 되어 두 성분의 진폭차이가 크고, 위상차도 140° 로서 90° 보다 크기 때문이다. 그러나 최소의 축비 값을 가지는 $9[GHz]$ 인 경우의 E_θ, E_ϕ 의 크기와 위상은 그림 16에서 처럼 $E_\theta = 5.7dB, 92.5^\circ$ $E_\phi = 5.58dB, 1.7^\circ$ 로서, 두 성분의 크기도 비슷하고, 위상차도 약 90° 이므로, $+z$ 방향에서 동일 원형 편파인 $|E_R|$ 가 발생하고, 충분히 작은 교차편파 $|E_L|$ 이 발생하여 식(8)에 의해서 그림 14

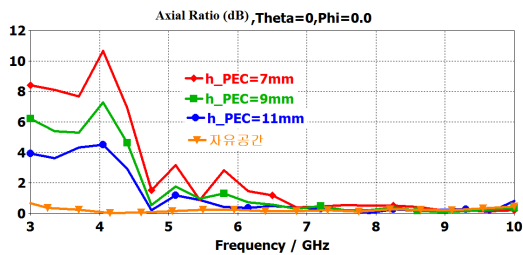


그림 14. 안테나의 높이 h_{PEC} 에 따른 축비
Fig. 14. Axial Ratio according to height of antenna h_{PEC} .

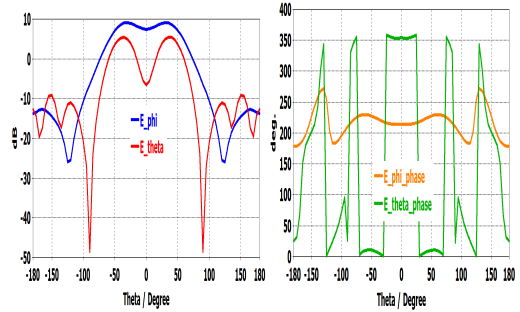


그림 15. $h_{PEC} = 7mm$ 인 경우 $4[GHz]$ 에서 E_θ, E_ϕ 진폭 및 위상
Fig. 15. Amplitude and phase of E_θ, E_ϕ at $4[GHz]$ in case $h_{PEC} = 7mm$.

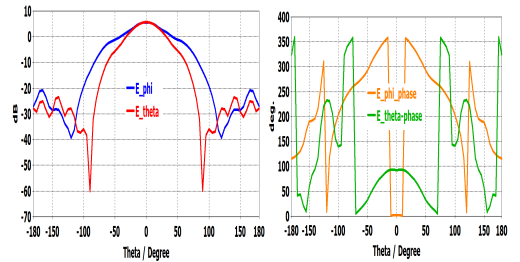


그림 16. $h_{PEC} = 7mm$ 인 경우 $9[GHz]$ 에서 E_θ, E_ϕ 진폭 및 위상
Fig. 16. Amplitude and phase of E_θ, E_ϕ at $9[GHz]$ in case $h_{PEC} = 7mm$.

와 같은 $0dB$ 에 가까운 축비를 발생시킨다.

그림 17은, $9[GHz]$ 와 $4[GHz]$ 에서의 $|E_R|$ 과 $|E_L|$ 성분을 보인 것인데, $\theta = 0^\circ, 9[GHz]$ 에서 약 $8.6[dB], -31[dB]$, $4[GHz]$ 에서 약 $5.5[dB], 3.3[dB]$ 로 계산되었다. 그림 18은 $4[GHz]$ 와 $9[GHz]$ 주파수에서 스파이럴 암에서의 전류 분포를 보인 것인데, $4[GHz]$ 주파수에서 전류 분포는 암의 끝부분에서 급전점으로 진행되는 전류와 급전점에서 암 쪽으로 진행되는 전

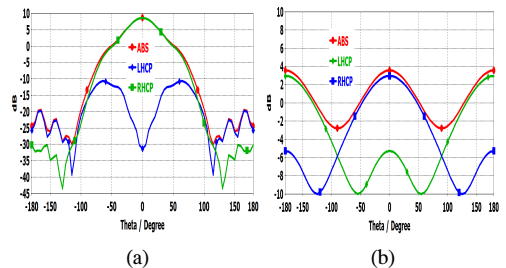


그림 17. (a) $9[GHz]$ 에서 $|E_R|$ 과 $|E_L|$ (b) $4[GHz]$ 에서 $|E_R|$ 과 $|E_L|$
Fig. 17. (a) $|E_R|$ and $|E_L|$ at $9[GHz]$ (b) $|E_R|$ and $|E_L|$ at $4[GHz]$.

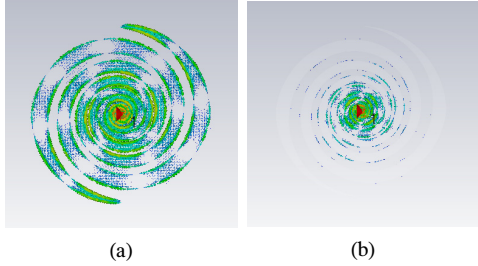


그림 18. PEC 반사판 위 스파이럴 암의 전류 분포 (a) 4[GHz] (b) 9[GHz]
 Fig. 18. Current distribution at the spiral arm on the PEC reflector (a) 4[GHz] (b) 9[GHz] .

류가 보이는데, 이것들에 의해서 정재파가 발생하고, 축비의 손상이 발생한다. 그러나 9[GHz]인 경우 급전점에서 암 쪽으로 진행하는 전류만이 존재하므로 매우 양호한 축비가 발생한다.

즉, 완전 도체인 PEC를 반사판으로 사용하여 높이가 낮은(low-profile) 등각 스파이럴 안테나를 설계할 경우, 높은 주파수일수록 안테나의 높이가 $h \approx \lambda/4$ 에 근접하므로, 축비가 원형편파로 간주할 수 있을 정도로 충분히 작지만, 낮은 주파수에서는 반사판으로부터 안테나의 높이가 $h \ll \lambda/4$ 가 되어 역위상이 되고, 또한 스파이럴 안테나의 복사가 발생하는 능동영역의 반경이 커져서 안테나 암의 종단으로부터 반사되어 급전점으로 되돌아오는 반사파의 양이 많아져서 축비가 커지므로, 원형편파로 사용할 수 있는 유용한 축비 대역폭이 감소한다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 낮은 주파수 영역에서 축비를 개선하여 축비 대역폭을 개선하기 위하여 PEC 대신에 EBG 반사판을 사용하여 유용한 축비 대역폭을 3[GHz]에서 10[GHz]까지 개선하는 방법을 제시하고자 한다.

V. EBG 위의 등각 스파이럴 안테나 해석

원형 편파를 +z 방향으로만 복사하는, 높이가 낮은(low-profile) 안테나의 축비를 개선하기 위하여 PEC 반사판 대신 그림 19와 같이 EBG 반사판 위에 앞에서 사용한 등각 스파이럴 안테나를 위치시키고 축비를 계산하였다. 즉, 안테나의 중심에서 스파이럴 암의 최대 반경은 약 56.85mm , $\epsilon_r = 2.2$, 기판의 높이 $B = 2mm$, $\delta = 0.88mm$, $s = 13.12mm$, $d = 14mm$, $S_{EBG} = 12 \times d$ 로 하였다. 그림 21은 스파이럴 안테나의 높이를 $h_{EBG} = 7mm, 9mm, 11mm$ 로 한 경우의 축비를 계산한 것이다.

그림 20에서 5[GHz]와 7[GHz] 주파수 사이의 축

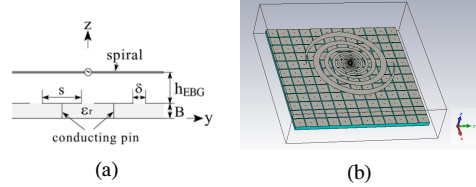


그림 19. EBG 반사판 위의 등각 스파이럴 안테나 (a) 상면도 (b) 측면도
 Fig. 19. Equiangular spiral antenna on the EBG reflector (a)top view (b)side view.

비가 매우 커서 원형편파로 사용할 수 없다는 것을 알 수 있다. 즉, +z 방향에서, 동일 원형편파인 E_R 보다 교차 원형 편파인 E_L 가 매우 작아야만, 축비가 0dB에 접근하는데, 이것은 E_θ 성분과 E_ϕ 성분이 크기가 같고, 위상차가 270도 일 때 발생한다. 그림 21은 $h_{EBG} = 7mm$ 인 경우의 AR 값이 가장 큰 5.8[GHz]에서의 E_θ, E_ϕ 의 크기와 위상을 보인 것인데, $E_\theta \approx E_\phi = -7.7dB$ 로서 거의 같고, 두 성분의 위상차는 약 145° 가 되었다. 즉, 스파이럴 암에서 +z 방향으로 복사되는 우선 원형편파(RHCP) 위상과 EBG 반사판에서 반사되는 우선 원형 편파의 위상이 동위상이 되어야 하고, 스파이럴 암에서 복사되는 좌선 원형 편파(LHCP) 위상과 EBG 반사판에서 반사되는 좌선 원형편파 위상이 역 위상이 되어야 하는데, EBG 반사판은 이러한 조건을 만족시키지 못하여 +z 방향

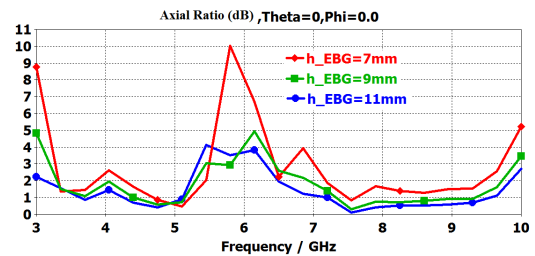


그림 20. 안테나의 높이 h_{EBG} 에 따른 축비
 Fig. 20. Axial ratio according to height h_{EBG} of antenna.

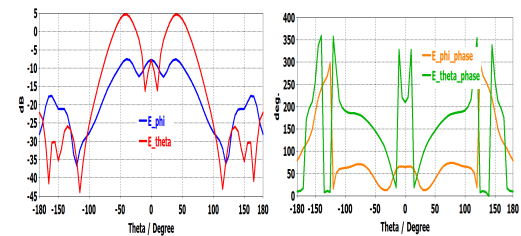


그림 21. 5.8[GHz]에서 E_θ, E_ϕ 진폭 및 위상
 Fig. 21. Amplitude and phase of E_θ, E_ϕ at 5.8[GHz] .

에서 관심의 주파수 대역에서 만족스런 3dB 이하의 축비가 발생하지 않았다.

그림 22는 EBG 반사판에서 5.8[GHz] 주파수의 전류 분포를 보인 것인데, 전류 분포가 EBG 반사판의 중심에서 테두리로 진행되는 진행파와, 중심으로 반사되어 되돌아오는 반사파의 합인 정재파 형태로 존재함을 알 수 있다. EBG 반사판에서의 이러한 전류 정재파에 의해서 축비가 손상된다는 관점에서, 정재파가 많이 존재하는 EBG 반사판의 중심 근처의 셀을 제거하여 5[GHz]와 7[GHz] 주파수 사이의 축비를 개선하고, 스파이럴 암 끝부분 근처에 저항을 삽입하여 낮은 주파수 성분의 반사파를 제거하여 저주파에서의 축비를 개선하고자 하였다.

그림 23은 동일한 스파이럴 안테나 제원에서 사용된 EBG 반사판(12×12) 일부를 제거하지 않은 원형 EBG 경우와, EBG 셀의 중심으로부터 4×4를 제거한 본 연구의 결과인 변형 EBG 경우와 동일한 제원의 EBG 반사판에서 8×8 EBG 셀을 제거한 참고문헌[4]의 결과, 그리고 EBG 반사판을 사용하지 않은 자유공간에서의 등각 스파이럴 안테나의 축비를 보인 것이다.

그림에서, 본 연구의 결과인, 변형 EBG의 경우가 원형편파로 간주 할 수 있는 3[dB]이하의 축비를 관심의 전 주파수 대역에서 얻을 수 있음을 알 수 있다.

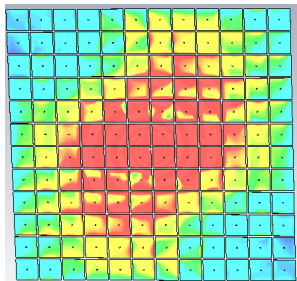


그림 22. EBG 반사판에서 5.8[GHz] 전류분포
Fig. 22. Current distribution of 5.8[GHz] on the EBG reflector.

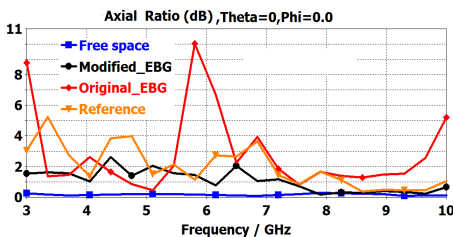


그림 23. 변형된 EBG 반사판을 사용한 스파이럴 안테나의 축비
Fig. 23. Axial ratio of spiral antenna using modified EBG reflector.

또한, 그림 24는 변형된 EBG 반사판을 사용한 경우의 입력 임피던스의 실수부, 허수부, 이득 그리고 S_{11} 를 비교한 것인데, 임피던스인 경우 본 연구의 결과가 관심의 주파수 영역에서 변화의 폭이 작고, 이득인 경우도, 전주파수 영역에서 자유 공간의 경우보다 약 3[dB] 더 크며, 균일 한 것을 알 수 있다. 또한 S_{11} 도 전 주파수 영역에서 -10[dB] 이하가 됨을 알 수 있다.

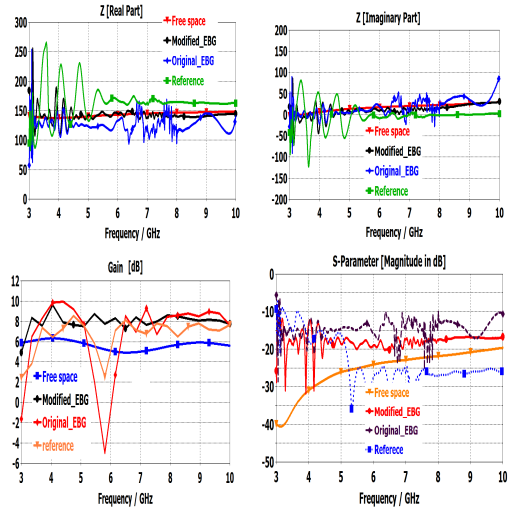


그림 24. 변형된 EBG 반사판을 사용한 스파이럴 안테나의 (a) 입력 임피던스의 실수부 (b) 입력 임피던스의 허수부 (c) 이득 (d) S_{11}

Fig. 24. (a) Real part of input impedance. (b) Imaginary part of input impedance. (c) Gain. (d) S_{11} of spiral antenna using modified EBG reflector.

VI. 결론

안테나에서 EBG 반사판을 이용하는 이유는 금속 반사판을 이용하는 경우에 발생하는 표면파의 생성으로 인한 축엽의 생성과 이득저하 문제를 해결하고, 높이가 낮은(low profile) 안테나 제작을 위한 것이다. 또한, EBG 반사판에서 반사계수 위상이 0°인 PMC 주파수가 존재한다는 것을 이용하여, 양 방향 원형 편파 복사를 단일 방향으로 원형 편파를 복사시키는 안테나를 만들 수 있다. 그러나, EBG의 동위상 주파수 대역폭이 좁은 관계로 광대역 주파수에서 만족스러운 결과를 얻지 못했다. 이것은, EBG 반사판 중심에 정재파 전류가 모이고, 이것이 +z에서 교차 편파를 발생시키고, 축비를 크게 만드는 원인으로 판단하고, 정재파 전류를 제거하기 위하여 EBG 반사판의 중심에

서부터 일부를 제거하여 축비, 입력 임피던스, 이득, S_{11} 를 개선하였다. 즉, 관심의 주파수 대역 3-10[GHz]에서 축비가 3[dB]이하가 되고, 입력 임피던스는 변화의 폭이 작고, 이득은 반사판을 사용하지 않는 자유공간의 경우 보다 약 3[dB] 정도 크고, S_{11} 은 낮은 주파수에서도 -10[dB]이하의 값을 얻어 기존의 문헌^[4]의 연구결과보다 매우 개선된 결과를 얻었다. 향후의 연구 방향은 EBG 반사판 셀에 존재하는 전류 정재파와 금지대역사이의 관계를 해석하여, EBG 반사판을 이용하여 단일 방향 복사 스파이럴 안테나의 최적화 설계를 연구방향으로 하고자 한다.

Reference

[1] J. Dyson, "Equiangular spiral antenna," *IRE Trans. Ant. Propag.*, vol. 7, no. 2, pp. 181-187, Apr. 1959.

[2] J. R. Cho, J. O. Park, B. S. You, U. S. Jeong, W. S. Chung, and D. C. Park, "Design of a 2-18 GHz wideband cavity-backed spiral antenna," *J. KIEES*, vol. 19, no. 10, pp. 1166-1174, Oct. 2008.

[3] N. D. Jeon, D. H. Shin, and D. C. Park, "Design of a 0.5-2 GHz cavity-backed spiral antenna," *J. KIEES*, vol. 21, no. 3, pp. 269-277, Mar. 2010.

[4] H. Nakano, K. Kokkawa, N. Kondo, Y. Iitsuka, and J. Yamauchi, "Low-Profile equiangular spiral antenna backed by an EBG reflector," *IEEE Trans. Ant. Propa.*, vol. AP. 57, no. 5, pp. 1309-1318, May 2009.

[5] S. H. Yoon, "Study on performance enhancement of microstrip antenna using EBG structure," *J. KICS*, vol. 39B, no. 1, pp. 44-52, Jan. 2014.

[6] D. Sievenpiper, "High-impedance electromagnetic surfaces," Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng. Univ. California at Los Angels, CA, 1999. pp. 434-436, Sept. 2004.

[7] D. Sievenpiper, L. Zhang, R. Broas, N. Alexopoulos, and E. Yablonovitch, "High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band," *IEEE Trans. Microw. Theory and Techniques*, vol. 47, no.

11. pp. 2059-2074, Nov. 1999.

[8] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, John Wiley & Sons, pp. 154-168, 1989.

윤 성 현 (Sung Hyun Yoon)



1984년 2월: 동아대학교 전자공학과 졸업 (공학학사)
 1986년 2월: 동아 대학교 전자공학과 졸업(공학석사)
 1991년 2월: 동아대학교 전자공학과 졸업(공학박사)
 1989년 9월~현재: 경남정보대학교 정보통신계열 교수

<관심분야> RF 및 안테나

김 재 관 (Jea Kwan Kim)



영도산업전자 대표
 개발 실적: 디지털선택호출 VHF, Class A형 선박 식별장치 개발 외 다수
 <관심분야> MICRO WAVE StaLO(Stable local Oscillator), X-BAND RADAR