인공 자기 도체를 이용한 스캔 가능한 패브리 패롯 공진기형 안테나 설계

Design of Scan-Capable Fabry Perot Cavity Antenna Using Artificial Magnetic Conductors

김 명 균 · 김 종 성

Myong-Gyun Kim · Jong-Sung Kim

요 약

이 논문에서는 인공 자기 도체를 이용한 패브리 패롯 공진기형 안테나에서 배열 급전을 이용하여 스캔 기능을 갖는 안테나의 방사 특성을 분석하였다. 제안하는 안테나는 AMC 면의 도입으로 공진 길이가 1/4 파장으로 감소되었고, 배열 급전기의 도입에 의하여 방사되는 빔의 조향각의 제어가 가능하다. 12 GHz의 주파수에서 배열 급전 요소 간의 간격을 1.4 파장으로 하여 어퍼처 크기의 증대에 의하여 약 19 dB의 이득, 14 dB의 SLL 억압 비 그리고 90°의 급전 위상차에서 8°의 스캔 각도를 얻었다.

Abstract

Fabry-Perot cavity(FPC) antennas with artificial magnetic conductor(AMC) surface are designed in order to provide scan capability by 4×1 array feed inside the cavity. The proposed antenna, excited by 4×1 thinned array, not only achieve higher directivities but also improve suppression of sidelobe level(SLL) relative to that of the thin array alone. The FPC antenna with the height of a quarter wavelength generate maximum gain of 19 dB, SLL suppression of 14 dB and maximum scan angle of 8° under the feed phase difference of 90° at the design frequency of 12 GHz.

Key words : Fabry Perot Cavity, Artificial Magnetic Conductor, Frequency Selective Surface

I. 서 론

패브리 패롯 캐비티(Fabry Perot Cavity: FPC)형 안테나는 도체 접지면(PEC: Perfect Electric Conductor)과 부분적인 반사면(Partially Reflective Surface: PRS) 사이에 반파장 길이의 공진기가 형성되는 구조이다. 이 구조는 공진기 내에 급전 안테나에 의하여 필드가 여기되며 특히, 평면형 구조에서는 공진에 의하여 안테나의 어퍼처(aperture) 크기의 증가로 디렉티

비티(directivity)의 증대 효과가 많이 연구되었다^{[1],[2]}.

FPC 형 공진기에서 PEC 면 대신에 PMC(Perfect Magnetic Conductor) 면으로 동작하는 AMC 면의 도입에 의해서 FPC 안테나의 높이가 1/4 파장으로 소형화가 가능하며, 이에 대해서 많은 연구 결과가 발표되었다^{[3]~[5]}.

참고문헌 [3]에서는 패치를 이용한 AMC 면을 설계하였으며, 이를 단일 급전형 안테나를 이용하여 10 dB 이상의 이득의 증대를 얻었다.

「이 연구는 2010학년도 경성대학교 연구년 지원에 의하여 수행되었음.」

경성대학교 정보통신공학과(Department of Information and Communications Engineering, Kyungsung University)

• Manuscript received May 25, 2012 ; Revised August 10, 2012 ; Accepted August 27, 2012. (ID No. 20120525-05S)

• Corresponding Author : Jong-Sung Kim (e-mail : jskim@ks.ac.kr)

참고문헌 [4]에서는 루프 및 이중 루프 구조의 AMC 면을 이용하여 이중 대역에서 동작하는 FPC 안테나를 제작하였다.

참고문헌 [5]에서는 슈퍼스트레이트를 2개의 층을 적용한 FPC 구조로서, 다중 급전을 이용하여 이득의 증대를 얻었다.

참고문헌 [3]과 [4]는 단일 급전에 대한 AMC 면을 적용한 FPC 구조이며, 참고문헌 [5]는 다중 급전이나 AMC가 적용되지 않고 EBG가 적용된 예이며, 배열 급전이지만 스캔 특성에 대한 분석을 하지 않았다.

참고문헌 [6]에서는 FPC 구조에서 슈퍼스트레이트 계층 수에 따른 이득의 증대 및 방사 대역폭의 변화를 분석하였으나, 스캔기능에 대한 결과를 나타내지 않았다. 참고문헌 [7]에서는 PEC에 의한 FPC 공진기를 이용하여 스캔 기능을 구현한 것이다.

이 논문에서는 참고문헌 [4]에서 적용한 사각 링을 이용한 AMC 면을 설계하였다. 이를 12 GHz의 동작주파수에서 FPC 안테나에서 4×1 배열 급전 방식을 이용하여 스캔 기능에 중점을 두고 안테나의 특성을 알아보았다. AMC 표면의 도입으로 소형화가 가능하며, 배열 급전에서 급전기 간의 간격 및 급전 위상의 제어에 의하여 최대 이득, SLL 억압비 및 스캔 각도 등의 다양한 기능에 대한 특성 분석을 하였다. 안테나의 설계를 위해서는 유한요소 시간차분법(FDTD)을 이용하였으며, 이를 측정 결과와 비교하여 이론적인 검증의 하나의 방법으로 활용하였다.

II. 안테나 구조

그림 1의 구조는 12 GHz의 주파수에서 동작하며, AMC 표면을 이용한 FPC 안테나의 수직구조와 AMC 표면의 구조를 나타내었다. FPC의 동작을 위해서는 2개의 반사면이 요구되는 데, 하나는 그림 1에서 나타난 바와 같이 아래쪽에 위치하는 AMC 면이고 다른 하나는 AMC 면으로부터 1/4 파장의 높이에 위치하는 고 유전체 층이다. 기판의 유전율은 2.2이고, 두께가 1.25 mm인 기판 표면에 4×1 마이크로 스트립 패치 안테나가 배열로 형성되어 FPC 안테나의 급전기로서 동작한다.

4개의 패치의 크기는 $7.0 \times 4.0 \text{ mm}^2$ 이며, 패치의 중심으로부터 y 방향으로 1.6 mm의 떨어진 위치에 접

그림 1. AMC를 이용한 FPC형 안테나 구조
Fig. 1. FPC antenna using AMC.

지면을 통과하여 프로브 급전 방식에 의하여 신호가 인가된다.

기판의 표면이 12 GHz에서 AMC 면으로 동작하기 위하여 그림 1(b)에 나타난 바와 같이 도체 사각 링을 주기적으로 배열하여 이 면에서 반사계수의 크기가 1이고, 위상이 0° 가 되도록 하였다.

PRS 면으로 동작하는 고 유전체 층은 $\epsilon_r = 12.8$ 의 높은 유전율을 가지며, 두께가 1.0 mm이고, 패치 안테나로부터 1/4 파장의 높이에 놓인다. 이 PRS 층과 AMC 면 사이에서 FPC가 형성되며, 그 길이는 1/4 파장이 된다.

PRS 층에 의하여 FPC 내부의 필드의 일부는 내부로 반사되고, 나머지는 이를 통과하여 방사되는 전력으로 작용하며, 이때 생성되는 모드가 누설형(leaky) 모드가 된다.

누설형 모드란 전파상수가 복소수이며, 허수부는 공진기 내부에서 전반사되어 정재파에 기여하는 특성을 나타내며, 실수부는 PRS 층에 의하여 공기 중으로 방사되는 전력을 나타낸다^[6].

그림 1의 FPC 구조에서 급전기 간의 간격, 급전기에 인가되는 신호의 위상차에 의하여 방사되는 빔의 스캔 각도를 비롯한 방사 특성의 제어가 이루어진다.

III. AMC 면을 이용한 FPC 공진기 설계

3-1 AMC 구조 설계

그림 2(a)는 그림 1(b)의 4×1 급전 구조에서 단일의

그림 2. AMC 면의 구조

Fig. 2. AMC surface and its unit cell.

AMC 층의 표면만을 나타낸 것이다. 패치를 제외한 공간에 도체의 사각 링을 주기적으로 배열하여 완전 자계 도체면(PMC)으로 동작하는 AMC 면을 구현하였다. 그림 2(b)는 AMC 주기 구조에서 하나의 단위 구조의 형상을 나타내었다.

이 단위 구조의 주기(D)와 사각 링의 크기(a , b)에 의해서 AMC로 동작하는 주파수와 대역폭이 결정된다. 그림 2(a)의 구조 전체를 해석하기 보다 주기적인 구조에서 하나의 사각 링 셀만을 해석하여 반사계수를 계산하는 것이 가능하다. FDTD 해석법에서 주기 구조에 대한 해석 알고리즘을 이용하였다.

12 GHz의 주파수에서 AMC 셀에 수직으로 평면파를 입사시키고 반사되는 필드를 계산하여 반사계수를 구하여 그 결과를 그림 3에 나타내었다. 그림 3(a)에서 AMC 주기 구조의 주기(D)에 따른 반사계수를 구한다. 사각 링의 크기를 $a/b=4.0/2.65$ mm로 고정한 상태에서 주기(D)를 4.6 mm에서 5.4 mm까지 0.2 mm의 간격으로 증가시 반사계수의 위상 변화를 구하였다. 주기가 증가할수록 위상이 0° 가 되는 주파수가 증가하며, 5.0 mm의 주기에서 12 GHz의 AMC 셀로 동작함을 알 수 있다. 이는 낮은 값의 주기에서는 사각 링 간의 간격이 작아서 상호 캐패시턴스가 증가하며, 이는 공진 주파수의 감소를 가져오기 때문이다.

그림 3(b)는 주기(D)가 5.0 mm의 값에서 사각 링 바깥쪽 길이를 $a=4.0$ mm의 값으로 고정한 상태에서 안쪽의 폭에 변화에 대한 반사계수의 위상 변화를 나타낸 것이다.

사각 링의 안쪽 길이가 커서 링의 폭이 작으면 낮은 주파수에서 AMC가 되는 특성을 나타내었다. 이

(a) 주기(D) 변화에 따른 특성($a=4.0$ mm, $b=2.65$ mm)

(a) Reflection phase versus the period(D) of square ring ($a=4.0$ mm, $b=2.65$ mm)

(b) b 변화에 따른 특성($D=5.0$ mm, $a=4.0$ mm)

(b) Reflection phase versus the inner length (b) of square ring ($D=5.0$ mm, $a=4.0$ mm)

(c) 12 GHz 대역에서 동작하는 사각링의 위상 특성

(c) Reflection phase of square ring at 12 GHz

그림 3. AMC 면의 반사계수 위상특성

Fig. 3. Reflection phase of AMC plane.

는 사각 링의 전체적인 경로의 길이를 변화시키는 데 사각 링의 바깥쪽 크기가 고정인 상태에서 사각 링의 두께가 커지면 이는 링의 경로를 감소시켜, 전체

표 1. AMC 링의 대역폭 특성(단위: mm)

Table 1. Bandwidth characteristics of AMC ring(unit: mm).

파라미터 ($D/a/b$)	5/4/2.65	4.5/3.8/1.4	5.5/4/3.85	6/4.5/3
대역폭	37.5 %	37.5 %	33 %	34 %

적으로 공진 주파수의 증가를 가져온다.

그림 3(c)에는 12 GHz의 주파수에서 최적화된 수치의 4가지 조합을 나타내었다. 여기에서 반사계수의 위상의 기울기가 대역폭을 나타내는데, 이의 정확한 수치를 표 1에 나타내었다.

표 1의 4개의 파라미터 중에서 $D=5$ mm, $a=4$ mm, $b=2.65$ mm의 조건에서 37.5 %의 최대 대역폭을 나타내었다. 이때 최대 대역폭의 기준은 반사계수 위상이 $\pm 90^\circ$ 의 조건이다. 따라서 그림 2는 7×7 의 주기 구조이며, 하나의 셀이 5 mm의 정방형이므로 35×35 mm²의 크기를 갖는다. AMC 면의 주기를 증가시키면 FPC 구조에서 안테나의 어퍼쳐 크기가 증가되어 디렉티비티 또한 증가한다. 본 논문에서는 어레이 급전을 이용하므로 하나의 급전 요소 주위의 크기를 그림 2에 나타난 7×7 의 조건 하에서 안테나의 특성을 분석한다.

3-2 AMC를 이용한 FPC 단일 구조 분석

그림 4에는 AMC 반사면을 이용하여 FPC 구조의 안테나를 구현하였을 때의 특성을 분석하기 위하여 단일급전형 2개의 FPC 공진형 안테나를 나타내었다. 그림 4(a)는 슈퍼스트레이트와 PEC가 반사면이 되고, 그 사이의 반파장의 간격일 때 공진기가 형성된다. 공진기의 높이 h 가 12 mm인 것을 제외하고는 그림 1 구조의 모든 파라미터와 동일하다.

그림 4(b)는 그림 2의 사각 링을 주기적으로 배열하여 AMC 면 설계한 경우($D/a/b=5/4/2.65$ mm)이다. 높이는 7 mm이고, 나머지 파라미터는 그림 1과 동일하다.

그림 5는 FDTD 해석에 의하여 그림 4의 2 종류의 FPC 구조에 대하여 11~14 GHz의 주파수 범위에 대해서 디렉티비티의 변화를 나타내었다. 비교를 위해서 그림 4와 동일한 기판 특성을 갖는 마이크로스트

(a) 슈퍼스트레이트/PEC 복합체
(a) Superstrate/PEC composite

(b) 슈퍼스트레이트/AMC 복합체
(b) Superstrate/AMC composite

그림 4. 단일 FPC 구조

Fig. 4. Geometries of FPC antennas.

립 패치 안테나의 디렉티비티도 함께 나타내었다. 그림 5에 나타난 바와 같이 마이크로스트립 안테나가 약 7.0 dBi의 디렉티비티를 나타내지만, 슈퍼스트레이트의 도입에 의한 그림 4의 FPC 안테나는 13.8 dB 및 13.7 dB의 최고 디렉티비티를 나타내었다. 이는 슈퍼스트레이트가 없는 안테나에 비하여 약 6.7 dBi의 증대 효과를 얻었다. 그러나 슈퍼스트레이트/PEC 합성체는 넓은 주파수 대역에서 특성을 유지하는 반면에 슈퍼스트레이트/AMC 구조는 협대역 특성을 나타내었다. 이는 AMC 표면의 주파수 선택적 표면(frequency selective surface)의 효과가 주파수에 관계되는 특성을 갖기 때문이다. 결과적으로 AMC

그림 5. 단일 FPC 구조의 디렉티비티 분석

Fig. 5. Directivity analysis of a single FPC structure.

그림 6. 단일 FPC의 공진 길이 변화에 따른 디렉티비티 변화

Fig. 6. Directivities versus cavity length of FPC including AMC surfaces.

면의 협대역 특성은 공진 길이의 감소에 의한 크기 감소와 타협적인 특성이다.

그림 6은 슈퍼스트레이트/AMC 합성체에서 공진기의 높이를 6 mm에서 9 mm까지 1 mm의 간격으로 최고 디렉티비티를 특성을 나타내었다. AMC 면을 도입한 FPC 구조에의 공진기 길이가 1/4 파장이므로 각각의 길이에 따라서 다른 주파수 특성을 갖는다. 즉, 공진기의 높이가 높으면 낮은 공진 주파수를 나타내지만 높은 경우는 반대이다. 동작 주파수가 12 GHz에서는 약 7 mm가 가장 적합한 치수이다. 그림 6에서 보는 바와 같이 7 mm보다 큰 값에서는 동작 주파수가 감소하고, 반대의 경우는 동작 주파수가 올라간다.

3-3 AMC를 이용한 FPC의 필드 분포 분석

그림 4(b)의 AMC 면을 도입한 FPC 형 안테나는 슈퍼스트레이트와 AMC면 사이에서 공진기가 형성되어 그 사이에 정재파가 형성된다. 이를 관측하기 위하여 2개의 관측면에서 전계를 관측하였는데, 하나는 그림 4(b)의 구조에서 공진기의 중간에 xy 면의 형태로 두었고, 이는 AMC 면과 평행한 평면이다. 다른 하나는 그림 4(b)에서 수직 관측면에서 필드를 관측하였는데, y 방향으로 중간 지점의 zx 평면이 된다.

그림 7(a)는 공진기 내부의 AMC면과 평행한 xy 관측면에서 저장한 전계 E_y 의 크기와 위상을 나타내었다. 공진기 내에서 전계의 크기는 급전기가 위

(a) FPC 내의 수평 관측면에서의 전계(E_y)의 크기(좌)와 위상(우)

(a) Magnitude (left) and phase (right) of electric field(E_y) on the horizontal observation plane inside FPC

(b) FPC 내의 수직 관측면에서의 전계(E_y)의 크기(좌)와 위상(우)

(b) Magnitude (left) and phase (right) of electric field(E_y) on the vertical observation plane inside FPC

그림 7. FPC 내의 전계의 필드 분포

Fig. 7. Distributions of electric fields inside FPC.

치한 중심 부분이 가장 강하고 넓게 전계의 분포되어 안테나 어퍼처 크기가 증대된다. 위상 특성은 xy 관측 평면에서는 동일한 위상을 나타내고 있다.

그림 7(b)는 FPC 구조에서 AMC와 수직하게 관측면을 설정하고, 전계 E_y 의 크기와 위상을 구한 것이다. 수직 관측면의 아래쪽은 공진기 내부이고, 위쪽은 공기층에서의 필드 분포를 나타낸다. 즉, 슈퍼스트레이트가 중간에 위치하고, 아래쪽이 공진기 쪽이고, 위쪽이 공기층 방향이다. 공진기 내에서 전계의 분포에서 AMC 면과 접하는 영역에서 필드의 크기가 가장 크다. 이는 AMC 면이 자체 평면으로 작용하여 전계 성분이 존재하기 때문이다. 그림 7(b)에서 슈퍼스트레이트의 위치를 기준으로 공진기 내에서는 정재파가 형성되고 공기층 영역에서는 필드의 크기가 거리에 따라 감소하고, 위상은 거리에 따라 변화하는 진행파의 특성을 나타내었다. 공진기 내부에서의 위상은 대체로 동일 위상을 나타내지만, 공기층에서는 진행파로 인한 위상의 변화가 발생하게 됨을 나타낸다.

그림 7의 FPC 내부에서의 공진형 필드 분포로 인

하여 안테나 어퍼처 크기가 증대되며, 결과적으로 디렉티비티의 증대를 얻을 수 있다.

IV. 배열 급전을 이용한 FPC 안테나

4-1 AMC를 이용한 FPC 배열 구조의 근접 전계 분석

그림 1의 AMC 표면을 도입한 FPC 안테나에서 4×1 배열 급전에 의한 근접 필드 분포를 알아보았다. 그림 1에서 4개의 급전점 간의 간격을 1.4 파장인 경우에 동위상을 급전시 슈퍼스트레이트로부터 3 mm의 높이에 xy 평면의 관측면을 설정하고 E_y 전계성분을 저장하였다. 동일한 조건에서의 비교를 위해서 2개의 경우를 추가적으로 구하였는데, 하나는 그림 1에서 고 유전층이 없는 일반 마이크로스트립 배열 안테나의 경우에 배열 안테나의 표면으로부터 3 mm 떨어진 위치에서 필드를 관측하였으며, 3 mm 이외의 다른 높이에서도 변화는 있지만 그 특성의 차이는 비슷하였다. 다른 하나는 그림 4(a)와 같은 슈퍼스트레이트/PEC 합성체에 대한 반파장 높이의 FPC 안테나이며, 다른 모든 파라미터는 그림 1과 같다.

그림 8은 3가지의 경우에 대해서 관측면의 중심을 따라서 도미넌트 전계 성분인 E_y 필드의 크기와 위상을 나타내었다. FPC 형 안테나에서는 공진 효과

그림 8. 4×1 배열 급전의 근접 전계 필드 분포의 크기와 위상

Fig. 8. Normalized electric fields on the observation planes, 3.0 mm higher than antenna surfaces.

로 인해 4개의 급전점 근처의 어퍼처 크기가 증가한다. 이로 인한 어퍼처 크기의 증대는 급전점에서 멀어져도 필드의 크기가 완만하게 감소하지만, 일반 4×1 배열 안테나에서는 전계의 크기가 급격히 감소한다. 일반적인 4×1 배열 안테나에서 배열 요소 간의 간격이 1 파장 이상인 경우에는 안테나의 어퍼처 크기가 작아서 필드 분포가 급격할 경우에는 파 필드(far field)의 측면에서 공간적인 알리아싱(aliasing)이 발생하며, 이는 SLL의 증대 및 그레이팅 로브가 발생하게 된다. 위상 특성에 있어서는 일반 배열 안테나에서는 위상이 급전점을 벗어나면 급격하게 변화하지만, FPC 구조의 안테나는 어퍼처 크기의 증대와 공진기 내에서의 정재파 형성의 영향으로 위상의 변화가 전반적으로 완만한 특성을 나타내었다.

근접 전계의 크기 및 위상분포로부터 FPC 구조의 안테나에서 배열 급전시 급전부를 주위로 필드의 변화가 완만하고, 위상 변화가 균일한 특성을 가지므로 급전점 간의 간격이 1.4 파장에서도 그레이팅(grating) 로브가 발생하지 않지만, 일반적인 배열 구조에서는 그레이팅 로브가 발생하게 된다.

4-2 AMC 배열 급전 구조의 방사 특성

배열 급전 요소 간의 간격의 변화에 따른 디렉티비티와 사이드로브 레벨의 변화를 분석하여 그림 9에 나타내었다.

급전점 간의 간격을 0.3 파장에서 2.0 파장까지 변화시 최대 디렉티비티와 SLL 억압비를 나타내었다. 4×1 급전기에서 급전 위상차는 90도의 상태에서 간격 변화에 따른 특성을 분석하였다. FPC 구조에서는 대략 1.2 파장까지는 디렉티비티가 증가하다가 약 20 dBi 정도에서 포화가 된다. 단일 급전형 FPC 안테나가 그림 5에서는 약 13.5 dBi의 디렉티비티인데 비하여 배열 급전에 의하여 약 6.5 dB의 디렉티비티의 증대를 얻었다.

반면에 일반 4×1 배열 안테나는 전반적으로 약 13 dBi를 유지한다. 이는 공진기에 의한 안테나 어퍼처의 증대 효과가 없기 때문이다.

SLL 억압비에 있어서는 4×1 일반 배열 구조에서는 1 파장의 거리 이상에서는 SLL이 증대되어 SLL 억압비가 0에 근접한다. 이는 그레이팅 로브의 발생을 의미한다. 반면에 FPC 구조에서는 급전 요소 간

그림 9. 급전 요소 간의 간격에 따른 특성 분석
Fig. 9. Maximum directivities and SLL suppression versus inter-element spacings.

의 간격이 1 파장 이상의 경우에도 SLL이 증대되지 않고 SLL 억압비는 약 10 dB 정도의 값을 유지한다. 이는 그림 8에서 나타낸 바와 같이 FPC 구조 구조에서는 요소 간의 간격 사이 영역에서 필드의 크기가 완만하며 위상 역시 전반적으로 동일하므로 공간적인 알리아싱 현상이 억제되어 그레이팅 로브가 발생하지 않기 때문이다.

4.3 AMC 배열 구조의 급전위상에 따른 파 필드 특성

그림 10에는 안테나 요소 간의 간격을 1.4 파장으로 고정하고, 급전 위상을 0°에서 180°까지 변화시 최대 디렉티비티와 사이드 SLL 억압비의 특성 분석을 나타내었다.

그림 10. 급전 위상 변화에 따른 특성 분석
Fig. 10. Maximum directivities and SLL suppressions versus feed phase differences.

(a) 급전점 간의 간격에 따른 스캔 각도 해석
(a) Scanned angle vs. inter-element spacing

(b) 급전 위상의 변화에 따른 스캔 각도 해석
(b) Scanned angle vs. feed phase difference

그림 11. 급전 위상 변화에 따른 특성 분석
Fig. 11. Scanned angle vs. inter-element spacing and feed phase difference.

슈퍼스트레이트/AMC 합성체는 급전위상이 약 100° 이상을 주게 되면 디렉티비티가 감소하고 SLL 레벨이 증대함을 알 수 있다. 하지만 슈퍼스트레이트가 없는 것보다는 디렉티비티 증가와 사이드 로브 레벨의 감소의 장점이 그림 10에 나타나 있다. 또한 160° 이상을 제외하고 그레이팅 로브가 발생하지 않음을 확인하였다. 그림 11(a)은 안테나의 급전 요소 간의 거리가 0.3 파장에서 2.0 파장까지 변화시 최대 스캔 각도의 변화를 나타내었다. 4개의 급전 간의 위상차가 90°인 경우의 조건에서 급전 요소 간의 간격에 따른 최대 틸트 각의 변화이다. 최대 스캔 각도는 급전 요소 간의 간격이 커질수록 감소하는 경향을 보인다. FPC형 안테나의 최대 스캔 각도가 마이크로스트립 구조에 비해서 떨어지는데, 이는 안테나의 어퍼처 크기의 증대 때문이다. 슈퍼스트레이트/PEC 복합체에 비해서 슈퍼스트레이트/AMC 복합체가 0.5 파장 이하의 간격에서 스캔 각도가 더 크지만 더 큰 간격에서는 비슷한 특성을 나타내었다.

그림 11(b)에서는 급전간의 간격을 1.4 파장인 상태에서 급전위상차를 0°에서 180°까지 15도 간격으로 변화시킨 경우의 최대 틸트 각의 변화를 나타내었다. FPC형 안테나가 마이크로스트립 안테나보다 전체적으로 틸트 각이 약간 감소하고, 급전 간의 간격이 크거나 위상차를 많이 내면 틸트 각이 감소하

는 특성을 가진다. 또한 최대 스캔각이 약 $1^{\circ}\sim 2^{\circ}$ 정도 낮은 단점이 있다. 하지만 FPC형 안테나는 그레이팅 로브의 억제로 인한 높은 디렉티비티의 특성을 가지는 큰 장점에 비해 작은 단점이다.

V. 안테나 제작 및 측정

그림 12에는 슈퍼스트레이트/AMC 합성체로 FPC의 기능을 갖는 안테나의 제작된 형상을 나타낸 것이다. AMC 표면의 크기는 $140\times 35\text{ mm}^2$ 의 크기를 갖는다. 4×1 배열형 급전을 이용하여 급전 위상차를 제어하여 빔의 조향각도의 제어가 가능하다. AMC면과 고유전 슬랩 사이의 간격이 7 mm이고, 급전 요소 간의 간격은 12 GHz에서 1.4 파장에 해당하는 35 mm로 제작이 되었다. 구체적인 치수는 그림 1과 같다.

그림 13에는 4×1 배열 구조에서 4개의 요소에 동일한 위상으로 동일한 전력을 인가할 경우의 H-평면에서의 방사 패턴을 나타내었다. AMC를 도입한 FPC 구조에서 약 19 dBi의 이득을 나타내는데, 이는 FPC 구조가 약 6.5 dB의 증대 효과를 얻었다. SLL 억압비에서도 FPC 구조는 약 14 dB 정도이며, 그레이팅 로브가 존재하지 않는다는 것이 확인되었다.

그림 14에는 그림 12의 안테나의 4개의 급전점에 90° 의 선형적인 급전 위상차를 줄 경우에 대한 방사 패턴 결과를 나타내었다. FPC 구조에서 약 8° 정도의 스캔 각도를 나타내었다. 일반적인 배열 안테나에서의 9° 에 비하여 약간 감소하였다. 이는 그림 11에서 분석한 특성과 일치한다. 그림 13, 14에서 측정 결과와의 비교를 위해서 FDTD 수치 해석에 의한 계산 결과와 함께 나타내었으며, 비슷한 경향을 나타내었다.

그림 12. AMC 구조를 이용한 FPC 안테나의 제작 구조
Fig. 12. Fabricated FPC antenna including AMC surface.

그림 13. 방사 패턴 계산 및 측정 결과
Fig. 13. Radiation patterns under the condition of in-phase feeds.

그림 14. 방사 패턴 계산 및 측정 결과(위상차= 90°)
Fig. 14. Radiation patterns under the condition of 90° feed phase difference.

그림 15에는 4×1 배열에서 주파수에 따른 최대 이득의 측정 결과를 나타낸 것이다. 그림 6의 단일 구조에 대한 디렉티비티 특성에서 알 수 있듯이 4×1 어레이의 경우에도 최대 이득의 대역폭이 슈퍼스트레이트/PEC 복합체가 12.5 %로 가장 크며, 슈퍼스트레이트/AMC 복합체는 약 4.1 % 정도를 나타내었다. 이는 AMC 표면의 주파수 특성에 기인한 결과이다.

VI. 결 론

인공 자기 도체를 이용한 FPC 형 안테나를 구현

그림 15. 이득 측정 결과
Fig. 15. Measured gain of FPC antennas.

하였다. 일반 FPC형 안테나의 특성을 만족하면서 안테나 높이를 1/2크기로 소형화가 가능하다. 또한 안테나 요소 간의 간격이 한 파장보다 클 경우에도 안테나 어퍼쳐 크기의 증가로 인한 공간적인 알리아싱을 줄여 그레이팅로브를 억제할 수 있다. 이 논문에서는 12 GHz의 주파수에서 7.0 mm의 높이를 갖는 인공 자기 도체를 이용한 공진기형 배열 구조를 구현하였다. 90°의 급전 위상차를 인가시 약 9° 정도의 스캔이 가능한데, 이는 일반적인 패치 안테나보다 1° 정도 낮은데, 이는 약 7 dB의 디렉티비티 증대와 SLL 억압비의 개선에 비해서 작은 단점에 불과하다.

참 고 문 헌

[1] N. G. Alexopoulos, D. R. Jackson, "Fundamental superstrate effects on printed circuit antennas", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 32, no. 8,

pp. 807-816, Aug. 1984.

- [2] D. R. Jackson, N. G. Alexopoulos, "Gain enhancement method for printed circuit antennas", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 33, no. 9, pp. 976-987, Sep. 1985.
- [3] A. P. Feresidis, G. Goussetis, S. Wang, and J. C. Vardaxoglou, "Artificial magnetic conductor surfaces and their application to low profile high-gain planar antennas", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 53, no. 1, pp. 209-215, Jan. 2005.
- [4] Lina Moustafa, Bernard Jecko, "Design of a wide-band highly directive EBG antenna using double-layer frequency selective surfaces and multifeed technique for application in the Ku-band", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 9, pp. 342-346, 2010.
- [5] Abbas Pirhadi, Mohammad Hakkak, Farshad Keshmiri, and Roghieh Karimzadeh Bae, "Design of compact dual band high directive electromagnetic bandgap(EBG) Resonator antenna using artificial magnetic conductor", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 6, pp. 1682-1690, Jun. 2007.
- [6] Renato Gardelli, Matteo Albani, and Filippo Capolino, "Array thinning by using antennas in a Fabry-Perot cavity for gain enhancement", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 54, no. 7, pp. 1979-1990, Jul. 2006.
- [7] 김종성, "패브리 패롯 공진기형 위상배열 안테나 설계", 대한전자공학회논문지, 49 TC(2), pp. 50-55, 2012년 2월.

김 명 균

2011년 2월: 경성대학교 전자정보통신공학부 (공학사)
2011년 3월~현재: 경성대학교 전기전자공학부 석사과정
[주 관심분야] 초고주파공학, 안테나

김 종 성

1988년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1990년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
2001년 8월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
1990년~2002년: KT 연구개발본부

선임연구원

2004년 9월~현재: 경성대학교 정보통신공학과 부교수
[주 관심분야] 초고주파공학, 전자파 수치해석