

논문 2014-51-10-3

패브리 패롯 공진기형 안테나에서 뮤츄얼 커플링에 의한 스캔특성 분석

(Scan Performance Analysis by Mutual Coupling Effects in Fabry-Perot Cavity Antennas)

김 종 성*

(Jong-Sung Kim[©])

요 약

패브리 패롯형 공진기 안테나의 스캔특성에 대하여 공진기내에 위치하는 4x1 thinned 배열 급전에 대하여 분석하였다. FPC 배열 안테나는 높은 이득과 낮은 부엽 레벨을 갖는다. 그러나 스캔각도는 유사 구조의 패치 배열 안테나보다 약 14-17% 작은 값을 나타낸다. 이는 FPC 구조에서 존재하는 상호 커플링 특성 때문이다. 개방형 배열과는 달리 FPC 배열 구조는 1.0 파장 간격이상의 요소간의 거리에서도 그레이팅 로브가 생성되지 않는 장점을 나타내었다.

Abstract

Scan capabilities of Fabry-Perot cavity (FPC) antennas are investigated for the case of a 4x1 thinned array placed inside the cavity. The FPC array antenna has higher maximum gain and lower sidelobe level (SLL), but the maximum scan angle of the thinned array is 14-17% lower than the patch array alone, due to increased mutual coupling in the FPC structures. However, unlike the bare thinned array, the SLL of FPC array does not suffer from the grating lobe problem even though it has a relative large element spacing of more than 1.0 λ_0 .

Keywords : Directivity, superstrate, sidelobe level suppression, grating lobe, FDTD

I. 서 론

FPC (Fabry Perot Cavity) 안테나는 2개의 평행판, 즉 전반사면의 기능을 하는 접지면(Ground Plane)과 부분적인 반사면 (Partial Reflective Surface: PRS)으로 이루어진다. 여기에서 PRS 면은 방사 어퍼쳐 면의 기능을 한다. 최초의 FPC 안테나는 1956년에 Von

Trentini에 의하여 PRS를 이용하여 도입된 이래^[1], 80-90년대에는 고 유전체와 저 유전체가 1/4 파장의 간격을 두고 주기적으로 배열하여 PRS 면을 구현하는 연구가 많이 이루어졌다^[2-3]. 최근에는 주파수 선택적 표면 (FSS: Frequency Selective Surface) 또는 메타물질 (Meta-Material)을 이용하여 소형 및 저가의 PRS 를 개발하였다^[4]. FPC에서 공진은 접지면과 PRS 사이의 간격이 반파장일때 발생하고, 이때에는 디렉티비티가 급격하게 증가하게 된다. FPC 공진기 구조에 의해 내부에는 정재파(Standing Wave)가 형성되어 안테나의 어퍼쳐 크기를 증대시켜서, 결과적으로 디렉티비티가 증대된다. 디렉티비티의 증대는 누설파(Leaky Wave)의 여기로 표현이 가능하다. 천천히 감쇄하는 누설파가 작

* 정회원, 경성대학교 정보통신공학과
(Department of Information and Communication Engineering, KyungSung University)

※ 이 논문은 2014학년도 경성대학교 학술연구비지원에 의하여 연구되었음.

© Corresponding Author(E-mail: jskim@ks.ac.kr)

접수일자: 2014년05월30일, 수정일자: 2014년08월11일
게재확정: 2014년10월06일

은 값의 전파상수를 가질 때 브로드사이드 방향으로 좁은폭의 빔을 발생시킨다. 그리고 이득의 증대와 대역폭 사이에는 역비례 관계(trade-off)를 갖는다. FPC 구조에서 디렉티비티의 증대는 이득 대역폭을 제한시키므로, 요구되는 대역폭을 유지하면서 디렉티비티의 증대를 얻기 위하여 FPC 내에 thinned 어레이를 도입하는 방법이 제안되었다. Thinned array는 배열 요소간의 간격을 넓으면 안테나의 어퍼처 크기의 증대로 디렉티비티의 증가를 가져온다.

FPC 공진기내에 배열급전을 도입하여 디렉티비티 증대 뿐 만 아니라 이중 편파 및 스캔 기능이 가능하다. 어레이 구조에서 요소간의 거리는 이득의 크기를 결정한다. 즉 요소간의 거리가 클수록 이득이 증가한다. [5]에서는 thinned array에서 요소간의 간격이 1.0 파장이 상에서 상호 커플링이 무시할 수 있을 정도라고 설명하였다. 급전기가 공진기내에서 위치하고, 공진주파수에서 동작하는데도 급전요소간의 간격이 큰 경우에는 이를 정량적으로 분석하는 것이 요구된다.

이 논문에서는 이를 정량적으로 분석하기 위하여 FPC 배열급전형 안테나에서 급전 요소간의 간격과 급전 위상차의 변화에 따른 상호 커플링을 해석한다. 또한 상호 커플링이 배열급전에 의한 스캔 특성에 미치는 영향을 비교 분석한다.

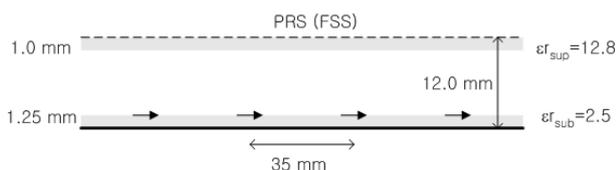


그림 1. 패브리 패롯 공진기내에서 다이폴 어레이
Fig. 1. Dipole Array in the FPC.

II. FPC 안테나의 특성 분석

FPC 구조를 해석하기 전에 이에 대한 이해를 위하여 그림 1의 구조를 이용한다. FPC는 z 방향으로 적층이 되고 x, y 방향으로서는 무한평면이다. PRS는 서셉턴스(Suceptance) 값, 즉, B 로 모델링이 된다.

B 의 값은 PRS 층이 없는 경우에 0이 되고 PRS 층의 반사도가 클수록 그 크기가 증가하여, 안테나의 이득이 증가한다. 그러나 B 를 증가시키는 것은 이득은 증가하지만 대역폭을 줄이는 기능을 갖는다. 3 dB 대역폭

이 증가함에 따라 이득이 감소하는 특성을 [5]의 논문에서 나타내었다. 극단적으로는 $B=0$ 인 경우, 즉 PRS 층이 없는 경우에 FPC 공진이 아니므로 안테나의 이득이 감소하지만, 대역폭은 넓어진다. 동일한 대역폭에서 이득의 증대를 위해서는 그림 1에서와 같이 어레이의 도입이 필요하다.

이러한 구조의 FPC 배열급전 공진기 안테나에서 그림 1의 구조에서 급전 패치간의 간격과 급전 위상의 변화에 따른 안테나의 특성은 참고문헌 [6~7]에 나타내었다. 이의 특성을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 급전요소간의 간격을 증가시키면 디렉티비티가 증가하다가 1.2 파장 간격에서 포화된다. 1 파장이상의 간격에서도 그레이팅 로브가 나타나지 않는다. 이는 개별 FPC 구조가 어퍼처 크기가 증대되어 디렉티비티가 증가하기 때문에 배열요소에 의한 그레이팅 로브가 나타나지 않는다.

둘째, 4×1 배열급전에서 급전 위상차를 선형적으로 변화시켰는데 이에 따른 스캔각도의 변화를 나타내었는데, 급전요소간의 간격이 1.0 파장 이상인 경우에 스캔각도는 개방형 구조에 비해서 $1-2^\circ$ 의 작은 값을 나타내었다.

이 논문에서는 FPC 공진기 구조에서 급전요소간의 상호 커플링을 분석하고 이에 따른 방사특성의 성능을 분석한다. 배열 안테나의 방사패턴은 개별 소자간의 상호 커플링이 무시할 정도로 작은 경우에는 개별 요소의 패턴과 배열 인자의 곱에 의해서 결정된다. 그러나 실제의 배열 안테나에서는 단일 요소간의 상호 커플링이 나타나며 이에 따라서 성능이 저하된다. FPC 구조는 일반적인 개방형 어레이에 비하여 상호 커플링의 증대 효과를 가져온다. 이는 공진기 내에 어레이가 놓이므로 공진기내에 존재하는 정재파에 의하여 상호 커플링의 증대를 가져오기 때문이다.

그림 1의 구조에 대한 상호 커플링을 계산하기 위해서 FDTD를 이용하였으며 해석하였다. 접지면 위에 유전율이 3.2, 두께가 1.25 mm의 서브스트레이트 위에 패치 안테나가 급전기의 기능을 갖는다. 접지면으로부터 12 mm의 높이에 1.0 mm 두께와 12.8의 고 유전율을 갖는 PRS 층이 위치한다. 패치의 크기는 $10.7 \times 4.0 \text{ mm}^2$ 이며 프로우브 급전을 이용하여 급전이 이루어진다.

FDTD 해석에서 여기신호로는 미분형 가우시안 함수

를 시간 스텝은 1.57 ps의 간격으로 인가하여 최대 주파수가 15 GHz 까지 해석하였다. PML 경계조건을 적용하였는데 x, y 축으로는 6 셀, z 축으로는 10 셀의 흡수층을 두었다. 최소 셀의 크기는 x, y 층으로는 1.0 mm, z 축으로는 0.625 mm의 조건으로 비선형 셀분할을 하여 195 x 45 x 35 셀 사이즈로 그림 1의 구조를 해석하였다.

급전 요소간의 간격에 따른 상호 커플링 효과를 비교하였다. 12.0 GHz의 동작주파수에서 FPC 배열에서 요소간의 간격이 0.4에서 2.0 파장의 변화시에 상호 커플링의 계산 결과를 그림 2에 나타내었다. 상호 커플링 레벨이 0.4 파장 간격에서 개방형 어레이가 -18.5 dB 이고, FPC 공진기 구조에서 -11.5 dB 를 나타내었다. PRS 층으로 인한 0.4 파장 간격에서는 약 7.0 dB의 상호 커플링의 증대를 나타내었다. 급전 요소간의 간격이 2.0 파장 간격으로 증가시에는 FPC의 경우가 -19.5 dB, 개방형 배열구조가 약 -39.5 dB의 상호 커플링을 나타내어 약 20 dB의 상호 커플링의 차이를 갖는다. PRS 층의 존재가 모든 거리에 대해서 상호 커플링을 증가시키는데, 특히 급전 요소간의 간격이 클 경우에는 상호 커플링의 레벨은 작지만 FPC와 개방형 구조간의 차이는 크게 나타난다는 것을 알 수 있다.

FPC 구조에서는 안테나의 어퍼처의 크기가 커서 안테나의 디렉티비티를 증대시키는 효과를 나타내는 반면, 어퍼처의 증대 효과에 의해서 이웃하는 요소간의 상호 작용을 증대에 의한 상호 커플링이 증가하는 반작

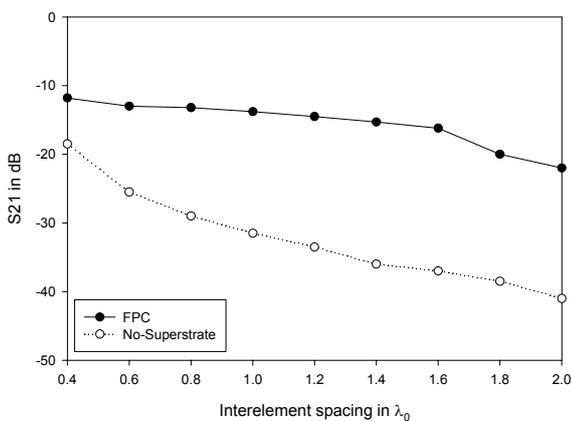


그림 2. 급전요소간의 거리의 변화에 따른 상호 커플링 특성 변화

Fig. 2. Mutual coupling between two patches for the variation of inter-element spacings.

용을 나타낸다.

그림 1의 구조에서 급전요소간의 간격은 1.4 파장으로 고정하고 급전 위상차를 변화시에 표 1은 FPC 배열 안테나의 스캔각도의 계산 결과를 나타내었다. 이때 급전 요소간의 간격은 0.5에서 1.8 파장의 범위이고 위상차는 90° 이다. 위상배열 안테나에서 안테나 요소간의 거리가 d 이고 요소간의 급전 위상차가 β_0 일때 스캔각도 θ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \cos^{-1}\left(\frac{\beta_0 \lambda_0}{2\pi d}\right) \quad (1)$$

그림 3에는 3가지 경우에 대한 스캔각을 급전 요소간의 간격의 변화에 대하여 나타내었다. 표 1에는 3가지 경우에 스캔각에 대한 수치를 나타내었다. 즉, 식 (1)에 의한 스캔각도, 그림 1의 구조에서 PRS 가 없는 개방형 구조(No Superstrate)에서의 스캔각도, 그리고 FPC 공진기에서의 스캔각도를 함께 나타내었다. 식 (1)에 의해서 구한 스캔각도가 FPC에 의한 값과 개방형 구조의 값보다 크다. 이는 식(1)은 안테나 요소간의 상호커플링 효과가 없는 배열요소에 의한 값이기 때문이다. 스캔각도의 감소는 급전 요소간의 간격이 큰 경우가 작은 경우에 비해서 작게 나타난다. 이는 상호 커플링 효과가 요소간의 간격이 작은 경우에 크게 나타나므로 스캔각이 감소되는 정도가 크게 나타나기 때문이다. 0.5 파장 간격에서 약 27%의 스캔각의 감소가 나타나는 반면에 1.0-1.8 파장 간격에 대해서 FPC의 스캔각은 개방형보

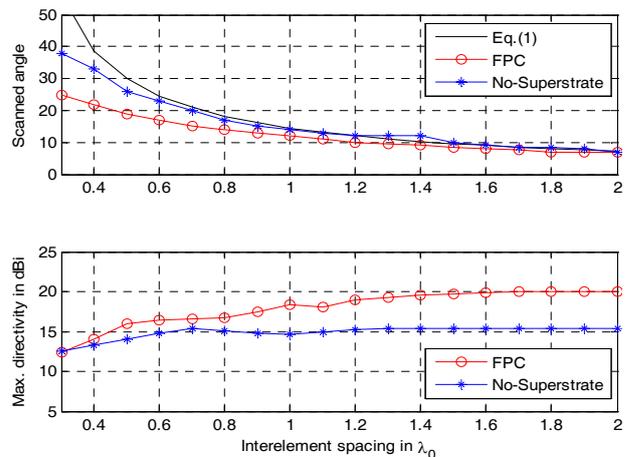


그림 3. 급전요소간의 거리의 변화에 따른 최대 스캔각도 및 디렉티비티 변화

Fig. 3. Maximum scan angles and directivity vs. inter-element spacings.

다 14-17% 작은 값을 갖는다.

0.7 이상의 파장 간격에 대해서 개방형 배열 구조는 상호 커플링에 의한 성능저하가 작아서 스캔각이 식(1)에 의한 값과 동일하다. 그러나 FPC 구조는 2.0 파장 간격에서도 상호 커플링에 의한 성능저하로 스캔각이 식(1) 보다 작은 값을 나타내었다. FPC 구조가 디렉티비티의 증대 효과를 갖는 파장간격인 1.0 파장 이상에서는 약 1-2° 정도의 스캔각의 감소를 나타내었다.

그러나 이는 높은 디렉티비티 특성에 비해서 작은 단점에 해당한다. 특히, thinned 어레이를 이용하여 구현할시에 디렉티비티가 증가하면서 그레이팅 로브를 나타내지 않는 장점에 비추어 스캔각의 작은 감소는 미약한 성능저하에 해당한다.

표 1. 스캔각도의 비교
Table 1. Comparison of scanned angles.

| Dist. (λ_0) | Eq.(1) | No-Super | FPC | Diff. between angles (%) |
|-----------------------|--------|----------|-----|--------------------------|
| 0.5 | 30° | 26° | 19° | 7° (26.9%) |
| 0.7 | 20.9° | 20° | 15° | 5° (25%) |
| 1.0 | 14.5° | 14° | 12° | 2° (14.3%) |
| 1.4 | 10.3° | 10.5° | 9° | 1.5° (14.3%) |
| 1.8 | 8° | 8.5° | 7° | 1.5° (17.6%) |

III. 제작 및 측정결과

그림 4는 마이크로스트립 기판위에 고 유전율을 갖는 슈퍼스트레이트를 반파장의 높이위에 두어 패브리패롯 공진기가 형성된다. 그림 4(a)에는 FPC 공진기 안테나의 전면부와 그림 4(b)에는 마이크로스트립위에 급전기 기능을 하는 패치 구조의 단면부를 나타내었다. 접지면위에 유전율이 2.5, 두께가 1.25 mm 인 유전체가 있고 그 위에 4x1 패치가 공진기내에서 급전기의 기능을 한다. 접지면으로부터 반파장의 높이 위에 위치하는 PRS는 유전율이 12.8 이고 두께가 1.0 mm 인 고 유전체를 이용하여 공진기내에서의 전파를 내부로 전반사시키는 동시에, 일부는 공기중으로 방사하는 기능을 갖는다. 그림 4(a)에는 PRS 가 접지면으로부터 12.0 mm의 높이에 위치하는데, 이 높이는 12.0 GHz의 주파수에서

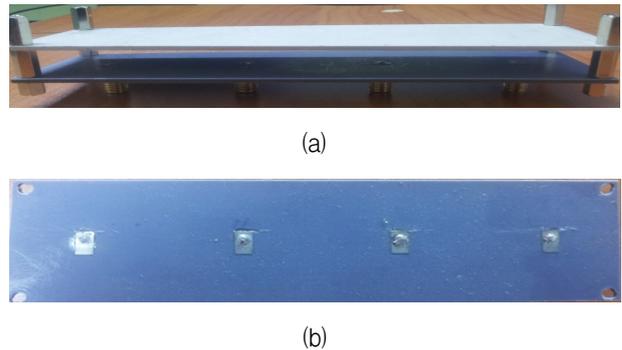


그림 4. 제작한 FPC 안테나 (a) 측면도, (b) 단면도
Fig. 4. The fabricated FPC array antenna with 4x1 array feeds: (a) Front view (b) cross-sectional views

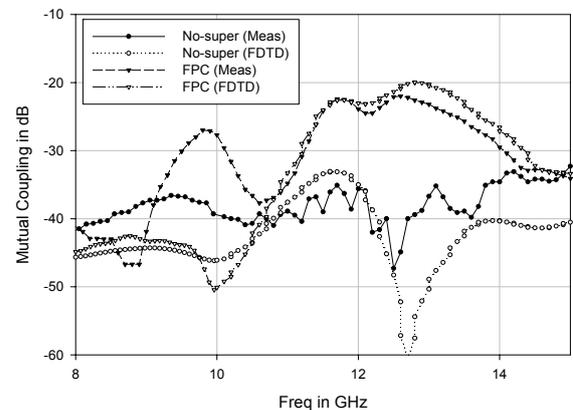


그림 5. FPC 안테나에서 급전 요소간의 상호 커플링
Fig. 5. Mutual coupling between feed elements of the FPC array.

반파장에 해당한다. 그림 4(b)에 나타난 바와 같이 마이크로스트립 패치의 크기는 10.7 x 4.0 mm² 이며 프로우브 급전을 이용하여 급전이 이루어진다. 급전 위치는 임피던스 정합을 위하여 패치의 중심에서 y 축으로 1.8 mm 떨어진 지점이다.

그림 5는 8-15 GHz의 주파수 범위에서 상호 커플링의 측정결과를 계산결과와 함께 나타내었다. 이는 4개의 급전 요소중에서 2개는 50 Ω 으로 정합시키고 나머지 2개의 포트간의 상호 커플링을 구한 것이다. 그림 5의 결과는 포트 1과 포트 2 사이의 측정 결과이고 이때 포트 3, 4는 50 Ω 정합상태이다. S23, S34의 값도 이와 유사한 특성을 나타내었다. 12.0 GHz에서 FPC 배열에서 커플링 레벨이 약 15 dB 정도가 개방형에 비해서 높은 수준을 나타내었다. FPC 배열에서 상호 커플링의 증가는 방사 특성에서 성능저하를 가져온다. 상호 커플

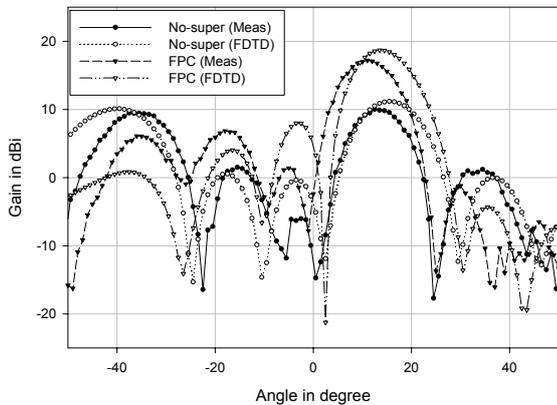


그림 6. 방사패턴 (급전위상=90°)
Fig. 6. Radiation Pattern under the progressive feed phase difference of 90°.

링 레벨은 12 GHz의 주파수에서 개방형 구조는 -40 dB, FPC 구조가 -22 dB 이다. 이는 그림 2의 계산 결과와 약 3 dB 정도의 편차를 가지지만 그 경향은 일치한다.

그림 6은 FPC 구조와 개방형 구조에 대한 H 평면에서의 패턴에 대한 계산 및 측정 결과를 같이 나타낸 것이다. FPC 안테나는 17.5 dBi의 측정 이득을 나타내었는데 이는 개방형의 10.5 dBi에 비해서 7.0 dB의 증대를 나타낸 것이다. 측정 결과와 시뮬레이션 결과는 일치하는 특성을 나타내었으며 또한 FPC 구조에서는 1.4 파장의 급전 간격에서도 그레이팅 로브가 발생하지 않았다. 앞에서 언급한 바와 같이 FPC 배열 안테나에서 높은 상호 커플링은 스캔 각도를 개방형에 비해서 약 1.5° 감소시켰다.

이 논문에서는 다음과 같은 비교 결과를 얻었다. FPC 안테나에서 추가적인 이득을 얻기 위한 배열구조에서 thinned array의 경우에 상호 커플링이 작다. 그러나 스캔 특성에 있어서는 약 14-17 %의 각도 감소효과를 나타내었다.

IV. 결 론

FPC 안테나에서 추가적인 이득을 얻기 위한 배열구조에서 thinned array의 경우에 상호 커플링이 PRS 층이 없는 개방형 배열구조에 비해서 증가한다. FPC 배열급전 안테나는 개방형 배열 구조에 비해서 급전 요소 간의 상호 커플링의 증대에 의한 스캔각의 감소를 나타

내었다. 스캔 특성에 있어서는 약 14-17 %의 각도 감소효과를 나타내었다.

REFERENCES

- [1] G. Von Trentini, "Partially reflecting sheet arrays," *IEEE Trans. Antennas Propagat.* Vol. 4, pp. 666-671, 1956.
- [2] D. R. Jackson and N. G. Alexopoulos, "Gain enhancement methods for printed circuit antennas" *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. 33, N.9, Sept. 1985.
- [3] D. R. Jackson and A. A. Oliner, "A leaky-wave analysis of the high-gain printed antenna configuration," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. 36, July. 1988.
- [4] A. Pirhadi, M. Hakkak, F. Keshmiri, and R. K. Bae, "Design of Compact Dual Band High Directive Electromagnetic Bandgap (EBG) Resonator Antenna Using Artificial Magnetic Conductor," *IEEE Trans. of Antennas and Propagation*, Vol. 55, No. 6, pp. 1682-1690, 2007.
- [5] R. Gardelli, M. Albani, and F. Capolino, "Array thinning by using antennas in a Fabry-Perot cavity for gain enhancement," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, V. 54, N. 7, July 2006.
- [6] Jongsung Kim, Myong-Gyun Kim, and Raj Mittra, "Scan capability of Fabry Perot Cavity(FPC) Antennas with Array Feeds," *IEEE International symposium on Antennas and Propagation and URSL*, pp. 1-2, July, 2012.
- [7] Jongsung Kim, "Phased array antenna using Fabry Perot cavity," *Journal of Institute of Electrical Engineers of Korea*, Vol.49, No.2, pp.50-56, 2012.

— 저 자 소 개 —

김 종 성(정회원)
2012년 2월 대한전자공학회 논문지
TC 편 49권 2월호 참조