

일차원과 이차원 Ka-대역 프린티드 다이폴 배열 안테나의 스캔 블라인드니스 분석

Scan Blindness Analysis of 1D and 2D Ka-Band Printed Dipole Array Antenna

구한이 · 송성찬* · 남상욱

Hanni Koo · Sungchan Song* · Sangwook Nam

요약

본 논문에서는 일차원 배열과 이차원 배열일 때 프린티드 다이폴의 스캔 블라인드니스 특성을 분석한다. 먼저 시뮬레이션을 이용하여 일차원과 이차원 배열일 때 프린티드 다이폴안테나의 능동소자패턴을 구한다. 이차원 배열에서는 E-면 방향으로 스캔 블라인드니스가 $\pm 36^\circ$ 부근에서 발생하였으나, 일차원 배열에서는 스캔 블라인드현상이 거의 관측되지 않았다. 이차원 스캔 블라인드니스 원인을 분석하기 위해 먼저 이차원 배열의 단위 셀 분산 특성을 구하고, 주파수에 따른 스캔 블라인드니스와 비교한다. 그리고 일차원 배열과 이차원 배열에서의 단위 셀에서 Q 값을 비교함으로써 일차원과 이차원 배열에서 스캔 블라인드현상 차이를 설명한다. 선형으로 배열된 다이폴 구조에서 두 포트 사이에 아홉 개의 소자가 떨어져 있을 때 E-면 방향으로 전기장의 커플링을 시뮬레이션을 통하여 관측함으로써 이론의 타당성을 보인다. 마지막으로 프린티드 다이폴 배열을 제작하고, 11×1 부배열과 11×3 부배열에 대해 능동소자패턴을 각각 측정하여, 시뮬레이션 결과와 비교함으로써 이론을 검증한다.

Abstract

In this study, an active element pattern (AEP) of a printed dipole was analyzed in 1D and 2D arrays. First, an AEP of the printed dipole was obtained using the simulation in the 2D infinite array. The scan blindness in the 2D array occurred in the E-plane direction at around $\pm 36^\circ$; however, it was barely observed in the 1D array. To analyze the cause of the scan blindness in the 2D array, the dispersion properties of a unit cell was obtained and compared with the scan blindness by frequency change. The difference between the scan blindness of the 1D and 2D arrays was clarified using the comparison of the Q value in the unit cell in the 1D and 2D arrays. Then, the coupling of the electric field in the E-plane direction was observed when nine elements were separated between the two ports in a linearly arranged dipole structure. Finally, the printed dipole array was fabricated, and an AEP was measured for the 11×1 and 11×3 sub arrays. The proposed theory was verified using these observations and by comparison with the simulation results.

Key words: Printed Dipole Array, Active Element Pattern, Scan Blindness, Dispersion Relations

「이 연구는 한화시스템(주)의 지원으로 연구되었음.」

「이 연구는 서울대학교 공학연구원의 지원으로 연구되었음.」

「이 연구는 2018년도 BK 21 Plus 프로젝트 연구비의 지원으로 연구되었음.」

서울대학교 전기정보공학부 뉴미디어통신공동연구소(Department of Electrical and Computer Engineering, INMC, Seoul National University)

*한화시스템(주) 레이더·PGM연구소(Radar·PGM R&D Center, Hanwha Systems Co., Ltd.)

· Manuscript received December 24, 2018 ; Revised January 21, 2019 ; Accepted March 18, 2019. (ID No. 20181224-132)

· Corresponding Author: Sangwook Nam (e-mail: snam@snu.ac.kr)

I. 서론

스캔 블라인드니스는 위상배열안테나에서 매우 중요한 이슈이다. 스캔 블라인드니스가 발생하는 이유는 위상배열안테나에서 특정한 플로케 모드(floquet mode)로 급전이 되었을 때, 안테나 구조가 표면파(surface wave)와 같은 유도된 전파(guided wave)를 지지할 수 있게 되고, 안테나의 입력 임피던스가 무한대로 커지게 되면서 방사를 하지 못하기 때문이다. 이 때 능동소자패턴에서 안테나가 방사되지 못하는 특이점이 발생하게 되는데, 이를 스캔 블라인드니스(scan blindness)라 하고, 스캔 블라인드니스가 발생하는 각도를 블라인드 각도(blind angle)라 한다^[1]. 마이크로스트립 패치 또는 기판에 프린티드된 다이폴에 대한 스캔 블라인드니스 연구는 David Pozar에 의해 다양하게 연구되어 왔다^{[2]~[5]}.

그러나 기판이 수직으로 되어있는 T-형태의 프린티드 다이폴에 대한 스캔 블라인드니스 현상과 원인에 대해 분석된 사례는 없다. T-프린티드 다이폴은 낮은 높이, 경량, 저가 그리고 사이즈의 장점으로 인해 밀리미터 대역의 위상배열안테나 시스템에 주로 사용된다^[6]. 그리고 레이다 시스템뿐만 아니라, 5G 시스템에도 유용하게 사용될 수 있다^[7].

본 논문에서는 Ka 대역 프린티드 다이폴 배열의 일차원 배열과 이차원 배열일 때 능동소자패턴이 차이가 나는 이유에 대해 고찰한다. 분석 방법으로는 먼저 무한 배열 속 능동소자패턴(active element pattern: AEP)을 확인한 뒤, 분산 관계(dispersion relations)와 스캔 블라인드니스와의 관계를 통해 공진 모드의 존재를 확인하고, 선형 배열에서의 전기장이 배열을 따라 상호결합(mutual coupling)이 되는 현상을 고찰한다. IV장에서는 일차원과 이차원 부배열을 제작하고, 각각의 능동소자패턴을 측정하여 스캔 블라인드니스를 검증한다.

II. 단일 소자 설계

가장 기본적인 다이폴 안테나는 $\lambda/4$ 파장을 갖는 동축선 발룬(coaxial balun)으로 구성된 급전부가 포함된 형태이다^[8]. 프린티드 다이폴은 동축선 발룬과 외부 도체를

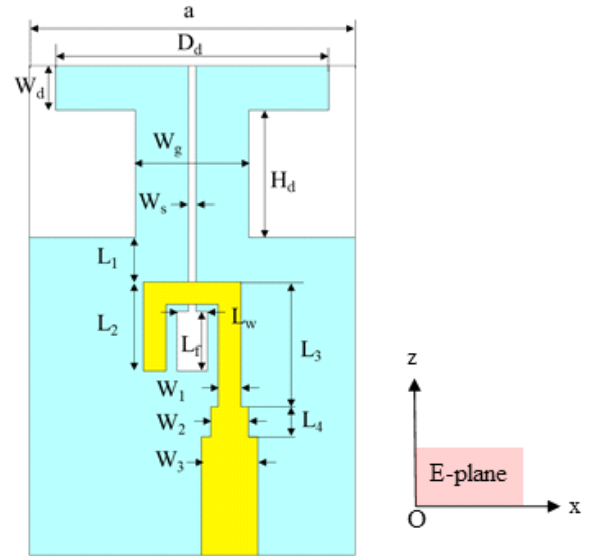


그림 1. 프린티드 다이폴 단일소자
Fig. 1. Printed dipole element.

기판의 마이크로스트립과 스트립 컨덕터로 등가화할 수 있다^[9]. 그림 1은 설계된 프린티드 다이폴 소자를 보여주고 있다. 급전부는 50 옴 마이크로스트립과 슬롯으로 구성되어 있고, 각각 기판의 앞면과 뒷면에 배치되어 있다. 다이폴은 슬롯라인을 통해 급전되고, 발룬은 마이크로스트립과 슬롯의 트랜스포머 역할을 한다. 이 때 폴디드 라인은 Open에서 $\lambda/4$ 떨어진 지점에서 슬롯 라인으로 급전이 된다. 특히 폴디드 라인의 L_2 와 사각형으로 에칭된 슬롯의 길이 L_3 를 파라미터 스터디를 통해 35 GHz에서 안테나 임피던스 매칭이 되는 최적의 값을 얻는다^[7]. 기판은 RT/Duroid Rogers 5880를 사용하고, 이때 기판 유전율은 2.2, loss tangent는 0.009, 유전체 두께는 0.254 mm 그리고 금속두께는 0.017 mm이다. 그림 1에 대한 안테나 파라미터 값은 표 1과 같다. 그림 1에서 보여주는 것처럼 x-축 방향은 프린티드 다이폴의 E-면을, y-축 방향은 H-면을 의미한다.

III. 스캔 블라인드니스 분석

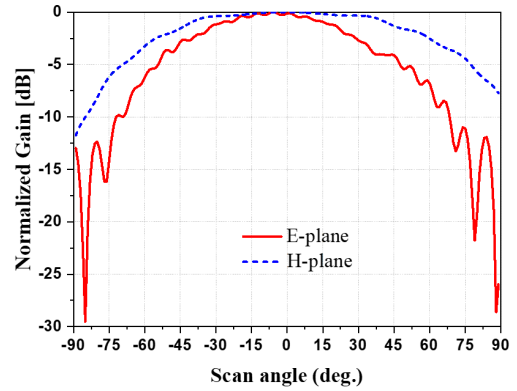
능동소자패턴은 무한 배열 속에서 급전소자 이외의 모든 소자가 매칭으로 중단되었을 때 급전 소자가 갖는 패턴을 의미한다^[1]. 방사 패턴은 CST 시뮬레이션을 이용하

표 1. 안테나 파라미터 값(단위: mm)

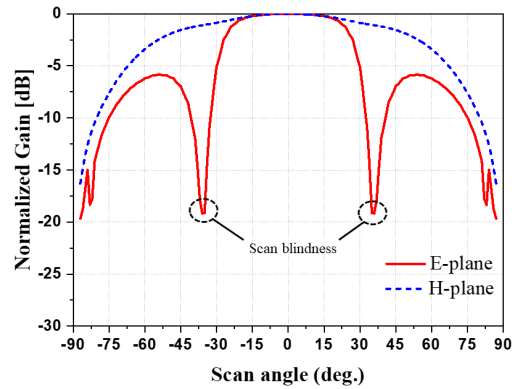
Table 1. Parameter values of the printed dipole antenna (unit: mm)

D_a	W_d	W_g	W_s	W_{h1}	W_{h2}
3.6	0.6	1.5	0.01	1.29	1.6
W_{h3}	W_1	W_2	W_3	L_f	L_w
1.6	0.3	0.5	0.74	0.8	0.4
L_1	L_2	L_3	L_4	a	
0.6	1.2	3.6	3.6	4.285	

여 얻을 수 있다. 이 때 평면 배열 구조는 사각 격자이고, 그레이팅 로브(**grating lobe**)를 피하기 위해 배열 간격을 설계주파수의 반 파장($\lambda_0/2$)으로 정한다. 그림 2(a), 그림 2(b)는 일차원 배열과 이차원 배열에서의 E-면과 H-면에 대한 능동소자패턴을 보여준다. 그림 2(a)의 능동소자패턴은 충분히 많은(21개) 일차원 배열의 중앙에 존재하는 안테나의 복사 패턴을 이용하여 구한 것이다. 그림 2(b)는 무한 배열 속에서 단일소자의 안테나의 복사 패턴을 구한 것이다. 일차원 배열의 경우, E-면과 H-면 방향에서 모두 스캔 블라인드니스가 발생하지 않는다. 반면, 이차원 배열의 경우, E-면 방향 능동소자패턴의 조향 각 $\pm 36^\circ$ 에서 스캔 블라인드니스가 발생한다. 그 원인을 분석하기 위해서는 유도된 전파를 발생시키는 공진 특성을 찾는 것이 중요하다. 공진 특성을 확인하기 위해서 HFSS의 **eigen mode** 시뮬레이션을 사용하여 단일 셀에 대한 분산 관계를 구한다. 일차원 배열에 대해서는 x-축 방향으로 주기 경계조건(**periodic boundary**)을, y-축 방향으로 완전흡수 경계조건(**perfect matched layer: PML**)을 설정한다. 그리고 이차원 배열에 대해서는 x-축과 y-축 방향으로 모두 주기 경계조건(**periodic boundary**)을 설정한다. 이 때 단위 셀의 간격은 $\lambda_0/2$ 이다. 시뮬레이션 결과 일차원 배열에 대한 공진 모드와 이차원 배열에 대한 공진모드는 그림 3에서 서로 일치함을 보여준다. 그리고 **eigen mode**로부터 얻어진 공진 모드와 스캔 블라인드니스와 상관관계를 분석하기 위해 CST 시뮬레이터를 사용하여 주파수 변화에 따른 능동소자패턴의 블라인드 각도 궤적을 구한다. 스캔 블라인드니스와 분산 관계를 서로 비교하기 위해서는 다음 식 (1)과 같이 조향각도를 단일 셀의 위상차로 변환해야



(a) 일차원 배열
(a) 1D array



(b) 이차원 배열
(b) 2D array

그림 2. 능동소자패턴

Fig. 2. Active element pattern.

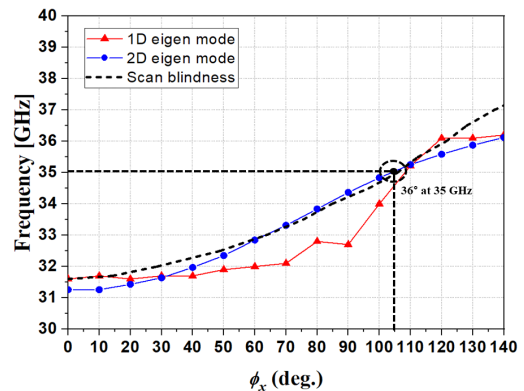


그림 3. Eigen mode와 스캔 블라인드니스 간 분산 곡선 비교
Fig. 3. Dispersion relations comparison between eigen mode simulation and scan blindness.

하고, 둘의 상관관계는 다음과 같다.

$$\phi_x = \beta_{unit} \cdot a = k_0 \cdot \sin \theta_{scan} \quad (1)$$

이때 β_{unit} 는 단위 셀 구조의 전파상수(propagation constant of the unit cell), a 는 단위 셀의 크기, ϕ_x 는 x 방향으로의 단위 셀의 위상차(phase difference of the unit cell to the x-direction) θ_{scan} 는 조향 각(scan angle)을 의미한다. 일차원 및 이차원 배열에 대한 단위 셀의 분산 관계와 스캔 블라인드니스 그래프는 그림 3과 같이 비교하였을 때, 세 그래프가 모두 잘 일치한다. 이는 스캔 블라인드니스가 특정 공진모드의 원인이 될 수 있다는 것을 보여준다.

일차원과 이차원 배열에 대한 두 단위 셀의 손실 정도를 분석하기 위해 그림 4와 같이 단위 셀의 위상차에 대한 Q 값을 구한다. 이때 Q 값은 그림 3에서 구한 분산곡선의 주파수와 위상차에 대응되는 값이다. 일차원 배열에 대한 단위 셀의 Q 값이 1에서 10 사이에서 형성되는 반면에, 이차원 배열에 대해서는 1,000 이상의 값을 보여준다. 특히 설계 주파수에서 스캔 블라인드니스가 발생하는 각도인 36° 를 식 (1)을 이용하여 단위 셀의 위상차를 구하면 약 108° 가 되는데, 이때 일차원 배열에서의 단위 셀의 Q 값은 1.4이고, 이차원 배열에서 단위 셀의 Q 값은 2438이다. 이는 일차원 배열에서 공진 모드의 에너지가 이차원 배열일 때보다 외부 손실이 더 많다는 것을 의미한다.

일차원 배열 과 이차원 배열일 때 프린티드 다이폴의 외부 손실 및 커플링 효과를 고찰하기 위해 그림 5와 같

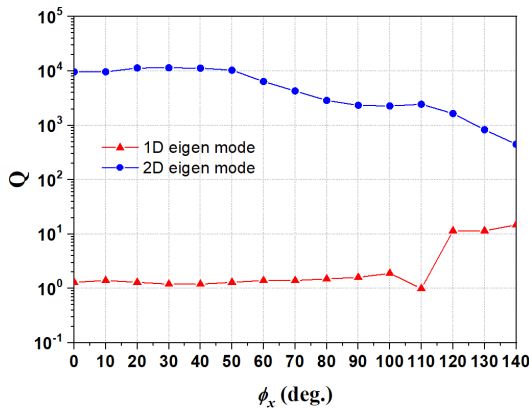


그림 4. 일차원과 이차원 배열 간 Q 값 비교
Fig. 4. Q factor comparison between 1 D and 2 D.

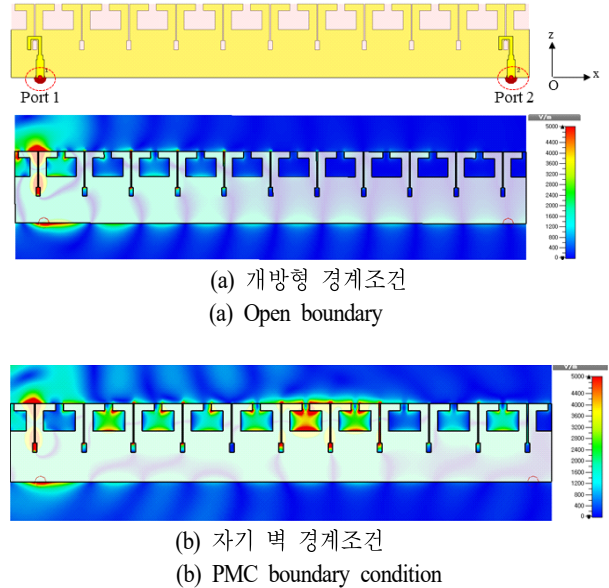


그림 5. 9개의 유닛 셀이 떨어진 선형 다이폴 배열 간 상호 결합 시뮬레이션
Fig. 5. Electric field simulation of coupling between linear dipole arrays placed 9 unit cells apart.

이 두 가지 형태의 시뮬레이션을 진행한다. 그림 5는 11개의 프린티드 다이폴 소자들이 일렬로 배열된 형태를 보여준다. 그리고 소자의 양 끝단에 각각 포트 1과 포트 2를 설정하고, 두 포트 간 진행되는 전파의 크기를 관측할 수 있다. 그림 5(a)에서는 일차원 배열을 증가화하기 위해 H-면 방향으로 간격이 $\lambda_0/2$ 가 되도록 개방형 경계조건을 설정한다. 개방형 경계조건일 경우, 전기장이 잘 유도되지 못하고 감소되는 것을 보여준다. 그림 5(b)에서는 이차원 배열을 구현하기 위해 H-면 방향으로 간격이 $\lambda_0/2$ 가 되도록 자기 벽(perfect magnetic wall)으로 증가화할 수 있다. 포트 1에 급전을 하였을 때 그림 5(a)와 같이 다이폴 열을 따라 유도된 전기장(guided electric field)의 크기를 보여준다. 그림 5의 구조에서 상호결합 크기를 그림 6과 같이 S-파라미터 특성을 통해 확인할 수 있다. 35 GHz에서 개방형 경계조건일 때 S_{21} 값이 -42.4 dB인 반면, PMC 경계조건일 때는 -22 dB로써 상호결합되는 양이 개방형 경계조건보다 약 20 dB가 증가한다. 일차원 배열에서 스캔 블라인드니스가 발생하기 어려운 이유는 이차원 배열과 공진 모드는 유사하지만, E-면 방향으로 유

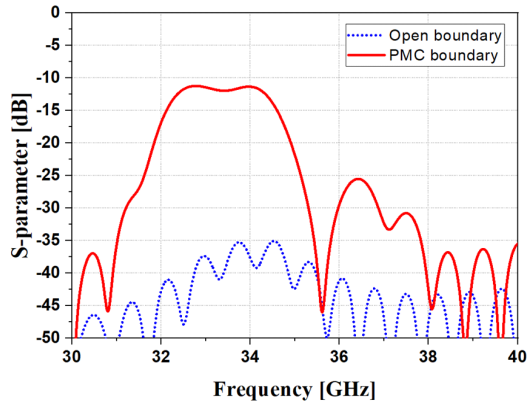


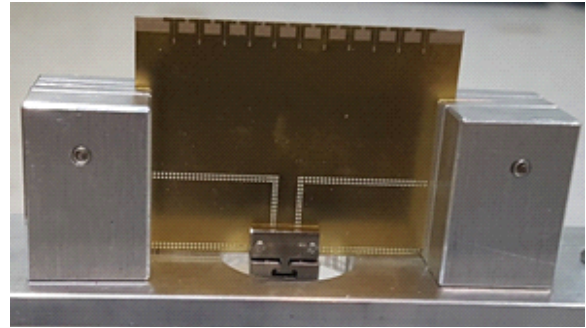
그림 6. 9개의 유닛 셀이 떨어진 두 다이폴 간 S-파라미터 특성

Fig. 6. S-parameter between linear dipole arrays placed 9 unit cells apart.

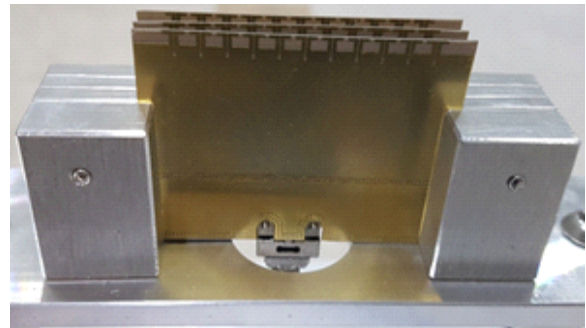
도된 전파가 개방형 경계조건으로 에너지가 빠져나가면서 방사손실이 커지게 되고, Q 값이 증가하게 된다. 동시에 안테나 열을 따라 진행하는 **guided mode**가 감쇠되면서 그림 5에서 보여주는 것처럼 상호결합이 줄어든다. 일반적으로 무한 이차원 배열구조에서 플로케 급전을 하였을 때, **guided mode**를 지지한다면, 상호결합으로 인하여 안테나의 입력 임피던스가 커지게 된다. 이 때 안테나는 방사하지 못하고, **guided mode**로 급전되면서, 스캔 블라인드니스가 발생하게 된다^[1]. 따라서 **guided mode**가 발생하지 못하도록 설계를 한다면 스캔 블라인드니스 문제는 해결이 된다.

IV. 제작 및 측정

앞장에서 무한 배열에서의 능동소자패턴을 살펴보고, 스캔 블라인드니스에 대해 분석을 하였다. 그림 7은 제작된 11×1 부배열과 11×3 부배열을 보여준다. 특히 그림 7(b)에 11×3 부배열은 3개의 기판으로 이루어져 있고, 첫 번째와 세 번째 기판은 자기 벽 역할을 하며, 가운데 소자 이외의 나머지 모든 소자는 칩 저항을 이용하여 50 Ohm으로 종단처리를 하였다. 제작된 기판은 안테나 고정치구에 장착이 되어 안테나는 무반향 챔버(**anechoic chamber**)에서 측정을 하였다. 측정된 능동소자 패턴은 그림 8에 보여주고 있고, 시뮬레이션 결과와 잘 일치한다. 그림 8(a)와 같



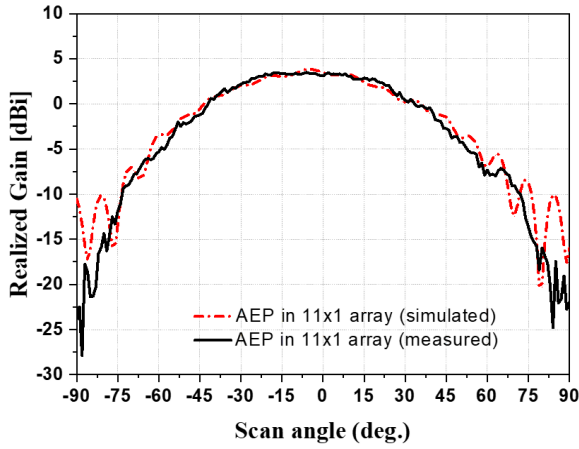
(a) 11×1 부배열
(a) 11×1 sub array



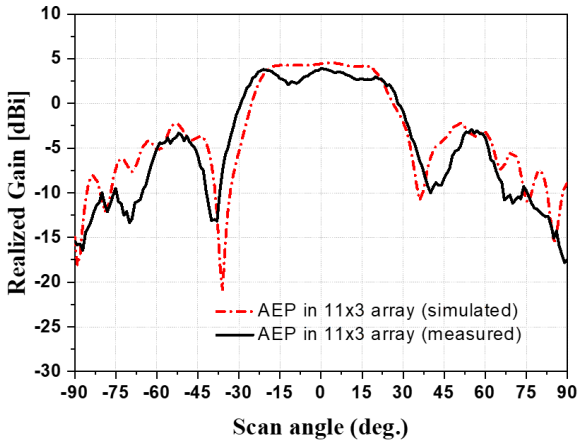
(b) 11×3 부배열
(b) 11×3 sub array

그림 7. 제작된 부배열 안테나
Fig. 7. Fabricated sub array.

이 11×1 안테나는 E-면에서 스캔 블라인드니스가 발생하지 않는다. 반면에, 11×3 부배열은 ±36° 부근에 스캔 블라인드니스가 존재한다는 것을 그림 8(b)에 보여준다. 시뮬레이션과 측정 결과를 토대로 이차원 프린티드 배열안테나에서 스캔 블라인드니스가 발생하는 이유는 프린티드 다이폴 구조와 H-면 방향으로 자기 벽이 존재할 때, 특정한 공진모드가 발생하여 안테나가 방사하지 못하고, 프린티드 다이폴 배열의 E-면 방향으로 전파가 진행되기 때문이다. 반면, 일차원 배열에서는 H-면의 개방형 경계조건을 통해 방사 손실이 발생하면서 스캔 블라인드니스가 발생하지 않는다. 또한 그림 8(b)에서 능동소자패턴이 비대칭인 이유는 프린티드 다이폴의 급전부(**feeding line**)가 비대칭이기 때문이다. 유한 배열구조에서 능동소자패턴은 무한 배열구조에서 능동소자패턴과는 다른 형상을 가진다. 무한 배열구조에서 능동소자패턴은 그림 2(b)에서



(a) 11×1 부배열
(a) 11×1 sub array



(b) 11×3 부배열
(b) 11×3 sub array

그림 8. E-면 방향 능동소자패턴
Fig. 8. 능동소자패턴 in the E-plane.

보여지는 것처럼 항상 대칭을 이루지만, 유한배열구조에서 능동소자패턴은 엣지 효과(edge effect), 안테나 구조의 비대칭, 상호결합 효과(coupling effect)의 변화 등으로 인하여 항상 대칭을 이루지 않는다^{[10],[11]}.

V. 결 론

본 논문에서는 Ka 대역 프린티드 다이폴이 일차원과 이차원으로 배열되어 있을 때, 스캔 블라인드니스를 분석하였다. 먼저 일차원과 이차원 사각배열에서 능동소자패

턴의 E-면 방향으로 스캔 블라인드니스가 발생함을 확인하였다. 그리고 분산 관계와 스캔 블라인드니스와의 관계를 통해 공진 모드의 존재를 확인하였다. 일차원 배열과 이차원 배열일 때 Q 값 및 프린티드 다이폴의 커플링 효과를 고찰하였고, 방사 손실로 인해 일차원 배열에서 상호 결합의 양이 이차원 배열보다 감소함을 확인하였다. 가설의 타당성을 검증하기 위해, 일차원 배열에 대해서 11×1 부배열을 제작하였고, 자기 벽 효과를 주기 위해 이차원 배열에 대해서는 11×3 부배열을 제작하였다. 능동소자패턴 측정결과, 11×3 부배열에 대해서만 ±36°에서 스캔 블라인드니스가 발생함을 검증하였다. 프린티드 다이폴 구조와 자기 벽 효과에 의한 스캔 블라인드니스 원인을 밝힘으로써, 향후 다이폴 배열구조에서 스캔 블라인드니스 문제를 해결하기 위한 방향을 제시할 수 있을 것이다.

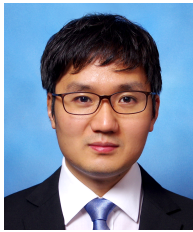
References

- [1] A. Bhattacharyya, *Phased Array Antennas*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2006.
- [2] D. Pozar, M. Schaubert, "Scan blindness in infinite phased arrays of printed dipoles," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 32, no. 6, pp. 602-610, Jun. 1984.
- [3] D. M. Pozar, D. H. Schaubert, "Analysis of an infinite array of rectangular microstrip patches with idealized probe feeds," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 32, no. 10, pp. 1101-1107, Oct. 1984.
- [4] D. M. Pozar, "Analysis of finite phased arrays of printed dipoles," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 33, no. 10, pp. 1045-1053, Oct. 1985.
- [5] D. M. Pozar, "Finite phased arrays of rectangular microstrip patches," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 34, no. 5, pp. 658-665, May 1986.
- [6] C. Sabatier, "T-dipole arrays for mobile applications," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 45, no. 6, pp. 9-26, Dec. 2003.
- [7] S. X. Ta, H. Choo, and I. Park, "Broadband printed-dipole antenna and its arrays for 5G applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 2183-2186, 2017.

[8] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2005.
 [9] R. L. Li, B. Pan, T. Wu, K. Lim, J. Laskar, and M. M. Tentzeris, "Equivalent-circuit analysis and design of a broadband printed dipole with adjusted integrated balun and a printed array for base station applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 7, pp. 2180-2184, Jul. 2009.

[10] S. G. Lee, J. H. Lee, "Calculating array patterns using an active element pattern method with ground edge effects," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 18, no. 3, pp. 175-181, 2018.
 [11] A. K. Bhattacharyya, "An accurate model for finite array patterns based on Floquet modal theory," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 3, pp. 1040-1047, Mar. 2015.

구 한 이 [서울대학교/박사과정]



2006년 2월: 충남대학교 정보통신공학부 (공학사)
 2008년 2월: 충남대학교 전파공학과(공학석사)
 2015년 9월~현재: 서울대학교 전기정보공학부 박사과정
 2008년 1월~2015년 7월: (주) 빅텍 기술연

구소 선임연구원

[주 관심분야] 위상배열안테나, 레이더 등

남 상 욱 [서울대학교/교수]



1981년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1983년 2월: 한국과학기술원 전자공학과 (공학석사)
 1989년: Electrical Engineering at the University of Texas at Austin (공학박사)
 1990년~현재: 서울대학교 전기공학부 교수

[주 관심분야] Antenna and Wave Propagation, EM Field Numerical Analysis, Microwave & Millimeter-Wave Active/Passive Circuit Design 등

송 성 찬 [한화탈레스/수석연구원]



2001년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학사)
 2003년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학석사)
 2002년 11월~2015년 6월: 삼성탈레스(주) 전문연구원
 2015년 7월~2016년 9월: 한화탈레스(주)

전문연구원

2016년 10월~현재: 한화시스템(주) 수석연구원

[주 관심분야] 안테나, 수치해석 등