

개방형 도파관 배열 안테나의 조향 소자 패턴 및 조향 임피던스에 관한 연구

Scan Element Pattern and Scan Impedance of Open-Ended Waveguide Array Antenna

유제우 · 라동균* · 김동석* · 김찬홍** · 박동철

Je-Woo Yu · Dong-Kyoon Rah* · Dong-Seok Kim* · Chan-Hong Kim** · Dong-Chul Park

요 약

본 논문에서는 직사각형 개방형 도파관들이 삼각 격자 형태로 배열된 구조의 조향 특성을 연구하였다. 무한 배열 해석 이론에서의 도파관 모드와 플로케 모드 함수를 이용하여 도파관 내부와 외부의 전계 성분을 적분방정식으로 유도하고 이를 프로그래밍화하여 조향 소자 패턴과 조향 임피던스를 수치해석하였다. CST사의 MWS (Microwave Studio)와 Ansoft사의 HFSS(High Frequency Structure Simulator)를 이용하여 얻어진 시뮬레이션 결과와 계산된 결과를 비교하였고, 아울러 8×8 부배열을 제작하고 측정하여 시뮬레이션과 계산 결과와 비교함으로써 접근 방법의 타당성을 검증하였다. 제작된 부배열 안테나는 X-대역에 있는 중심주파수의 10.5 % 대역 내에서 E-면(방위각)과 H-면(고각) 조향 범위 ±45°, ±20° 내에서 평탄한 이득을 갖고 또한 -10 dB 이하의 반사 손실을 갖는 것을 확인하였다.

Abstract

In this paper, the scan characteristics of phased array antenna consisted of rectangular open-ended waveguide with a triangular grid are investigated. An infinite array structure is analyzed by numerically solving the integral equation for the electric field over the waveguide aperture using waveguide mode function and Floquet mode function. Next, SEP(Scan Element Pattern) and SI(Scan Impedance) characteristics are simulated by CST's MWS(Microwave Studio) and Ansoft's HFSS(High Frequency Structure Simulator) for the finite and infinite array structures. Also, validity of these approaches is verified by comparing the calculated and simulated results with the measured ones for an 8×8 subarray. Within 10.5 % fractional bandwidth in the X-band, the fabricated subarray showed the flat gain characteristic in the scan range of ±45° in the E-plane(azimuth) and ±20° in the H-plane(elevation), and also showed the return loss characteristic of less than -10 dB.

Key words : Phased Array, Open-Ended Waveguide, Floquet Mode, Scan Element Pattern, Scan Impedance

I. 서 론

위상 배열 안테나는 보통 매우 많은 복사 소자를

가짐으로써 소자간의 상호 결합 현상이 존재하게 되고 이러한 현상은 배열 안테나의 특성에 중대한 영향을 준다. 하지만 현실적으로 모든 소자간의 상호

「본 연구는 한국과학기술원 전파탐지특화연구센터를 통한 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었음.」

충남대학교 전파공학과(Department of Radio Science & Engineering, Chungnam National University)

*MTG(주)(Microwave Technologies Group)

**국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· 논문 번호 : 20060825-099

· 수정완료일자 : 2007년 1월 5일

결합 현상을 계산, 측정하여 예측할 수는 없으며, 따라서 위상 배열 안테나의 복사 패턴은 배열 인자(Array Factor: AF)와 조향 소자 패턴(Scan Element Pattern: SEP)의 곱으로 정의하여 왔다^{[1]-[3]}. 여기서 배열 인자(AF)는 배열의 기하학적인 구조와 개별 안테나 소자를 급전시키는 진폭과 위상에 의해서 결정되는 인자이다. 조향 소자 패턴(SEP)은 상호 결합 현상이 충분히 고려된 배열 속에서 단위 복사 소자가 갖는 패턴을 의미하며, 보통 원래의 단일 복사 소자가 갖는 패턴과는 전혀 다른 특성을 가진다. 한편, 위상 배열 안테나의 특성을 살펴보기 위한 또 하나의 개념으로는 빔 조향에 따라 매우 다양하게 변화하는 입력 임피던스를 의미하는 조향 임피던스(Scan Impedance: SI)가 있다^{[1]-[3]}. 따라서 위상 배열 안테나의 특성은 SEP와 SI를 살펴봄으로써 분석할 수 있다.

X-밴드용 위상 배열 안테나의 기본 복사 소자로는 개방형 도파관이 주로 사용된다. 실제 많은 복사 소자를 갖는 개방형 도파관 배열 안테나는 직사각형 도파관들이 삼각 혹은 사각 격자 형태를 가지고 무한히 배열된 구조라고 가정할 수 있으며, 이러한 무한 배열 구조에 대한 전자기적 해석이 해외 및 국내에서 연구되어져 왔다^{[4]-[7]}.

본 논문에서는 무한 배열 해석 이론을 이해하고 이 이론을 프로그래밍하여 개방형 도파관 배열 안테나의 조향 특성인 SEP 및 SI를 계산하였다. CST사의 MWS와 Ansoft사의 HFSS로 시뮬레이션한 결과와 계산한 결과를 비교하여, 프로그램 결과의 타당성을 검증하였다. 그리고 계산 또는 시뮬레이션한 SEP 및 SI를 토대로 8x8 부배열을 제작하고 측정하였다. 이를 통해 무한 배열 해석 이론을 이용하여 얻어진 SEP, SI에 대한 계산 결과와 상호 결합 현상을 고려한 충분한 배열 개수를 가지는 유한 혹은 무한 배열에서의 SEP, SI 시뮬레이션 결과가 위상 배열 안테나를 설계하는 데 유용하게 이용될 수 있음을 확인하였다.

II. 배열구조의 결정

위상 배열 안테나를 설계함에 있어서 복사 소자의 배열 격자 형태와 간격을 결정하는 것은 기본적인 안테나의 요구 조건인 최대 조향 범위와 매우 밀접한

관계를 갖는다. 평면 배열 구조에는 보통 사각 또는 삼각 격자 형태의 배열 구조가 있으며, 동일한 개구면을 갖는 배열 안테나에서 삼각 격자 형태의 배열 구조가 사각 격자 형태의 배열 구조보다 소자 수를 최대 15 % 정도까지 줄일 수 있다^[2]. 따라서 본 연구에서는, 그림 1과 같이 직사각형 도파관이 삼각 격자 형태의 배열을 갖는 구조에 대해서 고찰하였다.

배열 간격은 요구되는 최대 조향 범위 안쪽으로 그레이팅 로브(grating lobe)가 들어오지 않도록 결정한다. 본 연구에서는 대역폭의 상한 주파수에서 E-면(방위각) 조향 범위는 $\pm 45^\circ$, H-면(고각) 조향 범위는 $\pm 20^\circ$ 로 결정하였다. 먼저, 최대 조향 범위를 고려하여 E-면 배열 간격 dx (그림 1 참조)는 식 (1)에 의해서 결정된다.

$$dx \leq \lambda_h / (1 + \sin \theta_{\max}) \quad (1)$$

여기서 λ_h 는 상한 주파수에서의 파장을 나타낸다. 식 (1)로 부터 E-면 배열 간격을 $0.73 \lambda_h$ 로 결정하였다. 이때의 E-면 조향 범위는 $\pm 63^\circ @ f_1$, $\pm 53^\circ @ f_2$, $\pm 45^\circ @ f_3$ 이고, f_1 , f_2 , f_3 는 각각 하한, 중심, 상한 주파수를 의미한다.

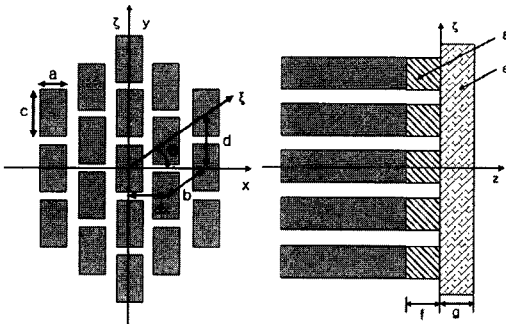
H-면 배열 간격(d)은 그레이팅 로브가 대각선 방향으로 들어오기 때문에 식 (1)에 의해서 결정되지 않고, 그림 2의 그레이팅 로브 다이어그램을 통해서 결정된다^{[1]-[3]}. H-면 조향 범위를 보장하기 위해서 배열 간격 결정에 영향을 주는 WR-90의 너비는 cut-off 특성을 고려하여 최대한 줄였다. 결정된 도파관의 너비는 $0.6 \lambda_h$ 이며, H-면 배열 간격은 $0.73 \lambda_h$ 이 때의 조향 범위는 $\pm 35^\circ @ f_1$, $\pm 29^\circ @ f_2$, $\pm 24^\circ @ f_3$ 이다.

III. 무한 배열 해석 이론

그림 1(a)는 높이 a , 너비 c 인 직사각형 도파관들이 $z=0$ 인 평면에 삼각 격자 형태를 갖고 ξ 방향으로 b , ζ 방향으로 d 의 간격을 가지며, 무한히 배열되어 있는 구조를 나타낸다. 여기서 θ 는 경사각을 의미한다. 그림 1(b)는 각각의 도파관에 비유전율이 ϵ_1 , 깊이가 f 인 유전체 마개가 있고, 배열 안테나의 바깥 전체 부분에 비유전율이 ϵ_2 , 두께가 g 인 유전체 덮개가 있는 구조를 나타낸다. $z < 0$ 인 도파관 내부

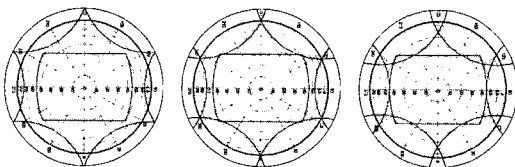
공간의 전개는 식 (2), (3)의 TE 및 TM 모드의 도파관 모드 함수로 전개할 수 있다^[4]. 식 (4)는 식 (2), (3)에 나타난 전파 상수이고, q, r 은 모드 번호를 나타낸다. $z>0$ 인 도파관 외부 공간의 전개는 식 (5), (6)의 TE 및 TM 모드의 플로케 모드 함수로 전개할 수 있다^[4]. 식 (7), (8)은 식 (5), (6)에 나타나는 전파 상수이고, m, n 은 모드 번호를 나타낸다. 도파관 모드 함수와 플로케 모드 함수로 표현된 전개는 $z=0$ 에서 경계 조건을 인가하여 수치 해석이 가능하도록 적분방정식으로 유도할 수 있다^{[4]-[7]}. 그리고 이 수식을 FORTRAN에 비하여 구조가 간단한 MATLAB 프로그램을 작성하여 SEP 및 SI 특성을 계산하였다.

$$\vec{\Phi}_{TEqr} = \frac{\tau}{\sqrt{ac}} \frac{1}{\sqrt{k^2 - \beta_{qr}^2}} \left[\vec{x}_o \frac{r\pi}{c} \cos \frac{q\pi}{a} \left(x + \frac{a}{2}\right) \cdot \sin \frac{r\pi}{c} \left(y + \frac{c}{2}\right) - \vec{y}_o \frac{q\pi}{a} \sin \frac{q\pi}{a} \left(x + \frac{a}{2}\right) \cdot \cos \frac{r\pi}{c} \left(y + \frac{c}{2}\right) \right] \quad (2)$$



(a) 전면 구조 (b) 유전체 마개 및 덮개 구조
(a) Front view (b) A dielectric plug and sheath structure

그림 1. 삼각 격자 형태의 무한 배열 구조
Fig. 1. An infinite array with triangular grid.



(a) 하한 주파수 (b) 중심 주파수 (c) 상한 주파수
(a) f_l (b) f_c (c) f_h

그림 2. 그레이팅 로브 다이어그램
Fig. 2. Grating lobe diagram.

$$\vec{\Phi}_{TMqr} = \frac{\tau}{\sqrt{ac}} \frac{1}{\sqrt{k^2 - \beta_{qr}^2}} \left[\vec{x}_o \frac{q\pi}{a} \cos \frac{q\pi}{a} \left(x + \frac{a}{2}\right) \cdot \sin \frac{r\pi}{c} \left(y + \frac{c}{2}\right) + \vec{y}_o \frac{r\pi}{c} \sin \frac{q\pi}{a} \left(x + \frac{a}{2}\right) \cdot \cos \frac{r\pi}{c} \left(y + \frac{c}{2}\right) \right] \quad (3)$$

$$\beta_{qr} = \begin{cases} \sqrt{k^2 - \left(\frac{q\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{r\pi}{c}\right)^2}, & k^2 - \left(\frac{q\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{r\pi}{c}\right)^2 \geq 0 \\ -j\sqrt{\left(\frac{q\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{r\pi}{c}\right)^2 - k^2}, & k^2 - \left(\frac{q\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{r\pi}{c}\right)^2 < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\vec{\Omega}_{TEmn} = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{bd\cos\Theta}} \frac{k_{\xi m} \vec{x}_o + (k_{\xi m} / \cos\Theta - k_{\xi n} \tan\Theta) \vec{y}_o}{\sqrt{k^2 - \Lambda_{mn}^2}}, & e^{j(k_{\xi m} \xi + k_{\xi n} \zeta)} \\ k_{\xi m} \neq 0 \text{ or } k_{\xi n} \neq 0 \\ \frac{1}{\sqrt{bd\cos\Theta}} \vec{x}_o, & k_{\xi m} = 0 \text{ and } k_{\xi n} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\vec{\Omega}_{TMmn} = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{bd\cos\Theta}} \frac{(k_{\xi m} / \cos\Theta - k_{\xi n} \tan\Theta) \vec{x}_o + k_{\xi n} \vec{y}_o}{\sqrt{k^2 - \Lambda_{mn}^2}}, & e^{j(k_{\xi m} \xi + k_{\xi n} \zeta)} \\ k_{\xi m} \neq 0 \text{ or } k_{\xi n} \neq 0 \\ \frac{1}{\sqrt{bd\cos\Theta}} \vec{y}_o, & k_{\xi m} = 0 \text{ and } k_{\xi n} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\Lambda_{mn} = \begin{cases} \sqrt{k^2 - k_{\xi m}^2 - k_{\xi n}^2}, & k^2 - k_{\xi m}^2 - k_{\xi n}^2 \geq 0 \\ -j\sqrt{k_{\xi m}^2 + k_{\xi n}^2 - k^2}, & k^2 - k_{\xi m}^2 - k_{\xi n}^2 < 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$k_{\xi m} = \frac{2\pi m - \phi_{\xi}}{b}, \quad k_{\xi n} = \frac{2\pi n - \phi_{\xi}}{d} \quad (8)$$

IV. 계산 및 시뮬레이션 결과 검토

앞장의 무한 배열 해석 이론을 통하여 계산한 SEP 및 SI 결과와 CST사의 MWS와 Ansoft사의 HFSS를 이용하여 시뮬레이션한 결과를 비교하였다. 해석 이론과 HFSS는 무한 배열 구조의 계산 및 시뮬레이션에 이용되었고, MWS는 유한 배열 구조의 시뮬레이션에 사용되었다. 유한 배열 구조의 시뮬레이션을

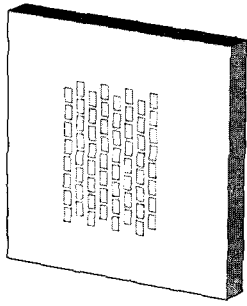


그림 3. SEP 및 SI 시뮬레이션을 위한 8×8 부배열 MWS 모델

Fig. 3. A 8×8 subarray MWS model for SEP and SI simulation.

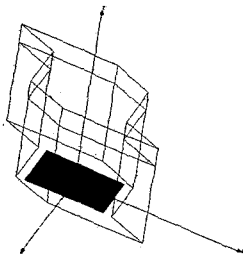
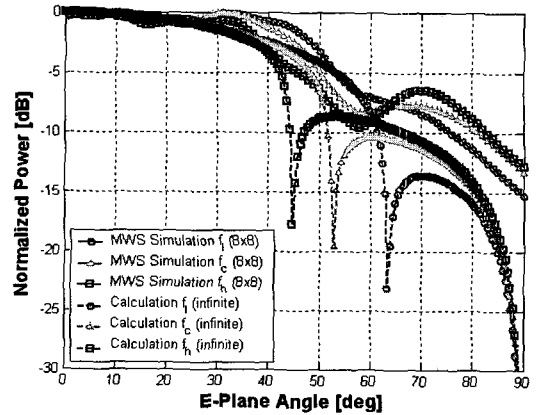


그림 4. SI 시뮬레이션을 위한 무한 배열 HFSS 모델
Fig. 4. An infinite array HFSS model for SI simulation.

위해서 E-면, H-면에서 상호 결합 현상이 충분히 고려된 배열 개수를 결정하고, 그림 3과 같이 8×8 부배열을 선택하여 SEP 및 SI 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 4는 SI 시뮬레이션을 위한 무한 배열 HFSS 모델을 나타낸다.

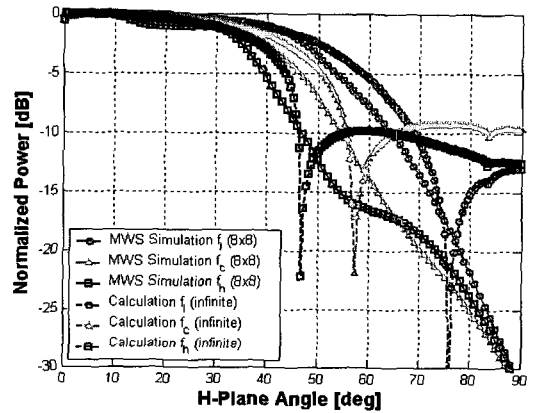
그림 5는 SEP 계산 및 MWS 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 그림 5(a)의 E-면 패턴에서는 조향 범위 $\pm 63^\circ@f_h$, $\pm 53^\circ@f_c$, $\pm 45^\circ@f_h$ 내에서 두 결과의 이득이 최대 1.5 dB의 리플을 가지면서 평탄함을 알 수 있고, 최대 조향 범위 근처에서는 이득이 급격히 작아지는 널(null)이 존재함을 볼 수 있다. 마찬가지로 그림 5(b)의 H-면 패턴에서도 조향 범위 $\pm 35^\circ@f_h$, $\pm 29^\circ@f_c$, $\pm 24^\circ@f_h$ 내에서 두 결과 모두 동일한 리플 내의 평탄한 이득을 가지며 최대조향 범위 밖에서 이득이 급격히 작아지는 널이 존재함을 알 수 있다.

그림 6은 SI 계산 및 HFSS 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 위상 배열 안테나에서 빔 조향을 함에 따라 특정 주파수의 최대 조향 범위 근처에서 반사



(a) E-면

(a) E-plane



(b) H-면

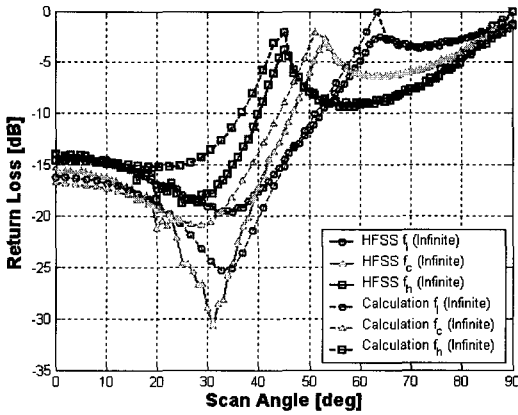
(b) H-plane

그림 5. 계산 및 MWS 시뮬레이션 SEP 결과 비교
Fig. 5. Calculated and MWS-simulated SEP results.

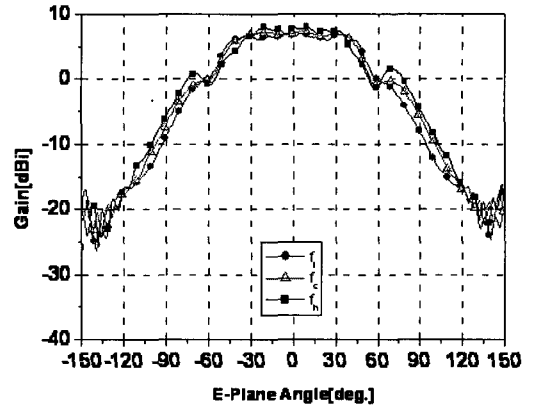
손실이 0 dB에 가까운 현상을 관찰할 수 있다. 그림 6(a)의 E-면 조향의 두 결과가 최대 조향 범위 내에서 -10 dB 이하의 반사 손실을 만족하며, 반사 손실이 가장 큰 각도는 앞의 그림 5(a)에서 SEP의 널이 발생한 각도와 일치한다. 그림 6(b)의 H-면 조향의 경우도 조향 범위가 커짐에 따라 반사 손실이 0 dB 가 되는 각도와 그림 5(b)에서 SEP의 널의 각도와 일치한다.

V. 계산, 시뮬레이션 및 측정 결과

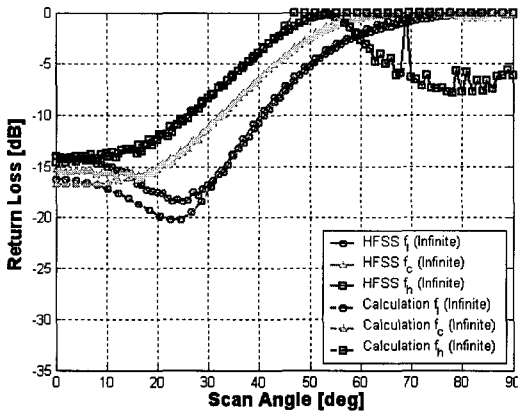
그림 7은 계산 및 시뮬레이션 결과들을 검증하기 위해서 제작된 8×8 부배열 안테나의 SEP 및 SI 측정



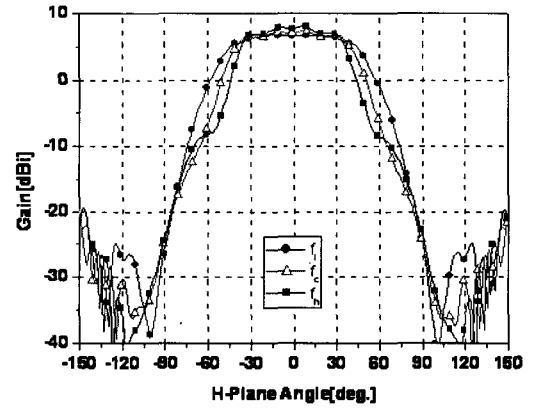
(a) E-면 조향
(a) E-plane scan



(a) E-면
(a) E-plane



(b) H-면 조향
(b) H-plane scan



(b) H-면
(b) H-plane

그림 6. 계산 및 HFSS 시뮬레이션 SI 결과 비교
Fig. 6. Calculated and HFSS-simulated SI results.

그림 8. 시뮬레이션 된 SEP
Fig. 8. Simulated SEP.



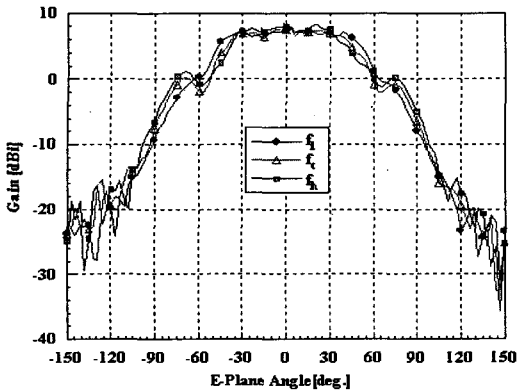
(a) SEP 측정 (a) SEP measurement
(b) SI 측정 (b) SI measurement

그림 7. SEP 및 SI 측정 셋업
Fig. 7. SEP and SI measurement setup.

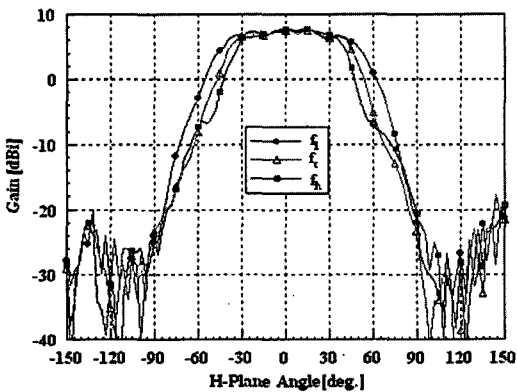
셋업을 보여준다. SEP 특성은 배열의 중심 소자에 도파관 어댑터를 연결하여 급전하고, 나머지 소자는

흡수체로 종단처리한 후에 패턴을 측정하여 얻었다. SI는 배열의 중심 소자에 도파관 어댑터를 연결하여 급전하고, 나머지 모든 소자들에서 각각 출력을 측정하여 얻었다. 이때 입력, 출력 단자를 제외한 나머지 단자들은 흡수체로 종단처리하며, 측정된 상호 결합량은 계산을 통하여 조향 반사 계수로 변환시켰다.

그림 8은 8×8 부배열의 MWS 시뮬레이션 결과를 나타내고 그림 9는 제작된 8×8 부배열 SEP 측정 결과를 보여주고 있다. 전체 대역 내에서 E-면, H-면 각각의 조향 범위인 ±45°, ±20° 내에서 시뮬레이션과 측정 결과의 이득 특성 평탄도가 매우 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.



(a) E-면
(a) E-plane



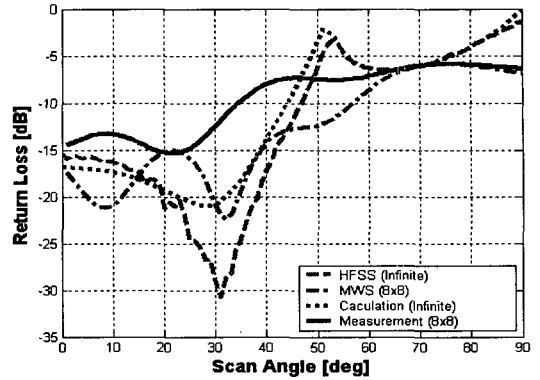
(b) H-면
(b) H-plane

그림 9. 측정된 SEP
Fig. 9. Measured SEP.

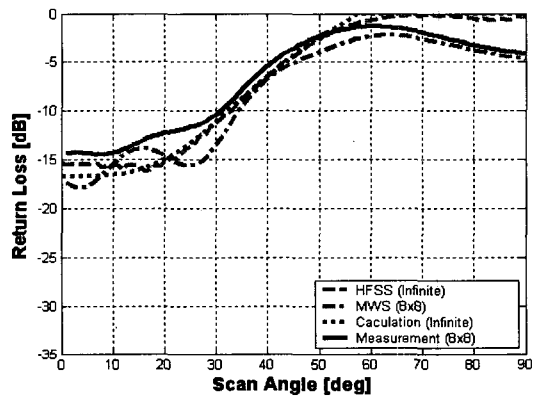
그림 10은 중심 주파수에서 E-면, H-면 조향에 따른 SI 계산, 시뮬레이션 및 측정 결과를 비교한 것이다. H-면에서는 계산, 시뮬레이션 및 측정 결과가 약 3 dB 정도의 오차 내에서 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 반면에, E-면에서는 SI 측정 결과를 보면 계산 및 시뮬레이션 결과에 비해 좁아진 조향 범위(약 ±34°)를 보여주고 있는데, 이는 SI 측정을 위해 특수 제작된 도파관 어댑터의 특성을 향상시키면 개선될 수 있을 것으로 판단된다.

VI. 결 론

본 논문에서는 무한 배열 해석 이론을 이해하고 이 이론을 프로그램화하여 개방형 도파관 배열 안테



(a) 중심 주파수에서의 E-면 조향
(a) E-plane scan at f_c



(b) 중심 주파수에서의 H-면 조향
(b) H-plane scan at f_c

그림 10. 계산, 시뮬레이션 및 측정된 SI 결과 비교
Fig. 10. Comparison of calculated, simulated, and measured SI results.

나의 조향 특성인 SEP 및 SI를 계산하였다. CST사의 MWS와 Ansoft사의 HFSS로 시뮬레이션 한 결과와 계산한 결과를 비교하여, 프로그램 결과의 타당성을 검증하였다. 그리고 계산 또는 시뮬레이션 한 SEP 및 SI를 토대로 8×8 부배열을 제작하고 측정하였다. 제작된 부배열 안테나는 X-대역에 있는 중심주파수의 10.5 % 대역 내에서 E-면(방위각)과 H-면(고각) 조향 범위 ±45°, ±20° 내에서 평탄한 이득을 갖고 또한 -10 dB 이하의 반사 손실을 갖는 것을 확인하였다. 이를 통해 무한 배열의 SEP 및 SI에 대한 이론적 해석이나 상호 결합 현상을 고려한 충분한 배열 개수를 갖는 유한 혹은 무한 배열에서의 SEP, SI 시뮬레이션 결과가 위상 배열 안테나를 설계하는데 유용

하게 이용될 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] R. C. Hansen, *Phased Array Antennas*, John Wiley & Sons, 1998.
- [2] A. K. Bhattacharyya, *Phased Array Antennas*, John Wiley & Sons, 2006.
- [3] 김동석, 김태현, 박동철, 김찬홍, "개방형 도파관 배열안테나의 조향소자 특성", 한국전자과학회 종합학술발표회, 15(1), pp. 347-351, 2005년 11월.
- [4] N. Amitay, V. Galindo, and C. P. Wu, *Theory and Analysis of Phased Array Antennas*, John Wiley &

Sons, 1972.

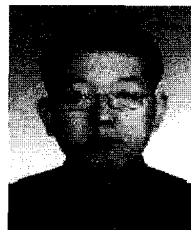
- [5] 하헌태, 김세윤, "위상 배열 안테나의 임피던스 정합에 관한 연구", 대한전자공학회논문지, 29-A(2), pp. 83-91, 1992년 2월.
- [6] 김세윤, 하헌태, "유전체 마개와 덮개가 부착된 구형 도파관의 평면 배열 안테나의 복사패턴 계산", 대한전자공학회논문지, 29-A(9), pp. 728-734, 1992년 9월.
- [7] 하헌태, 김세윤, "경사진 배열구조를 갖는 위상배열 안테나의 복사패턴 계산", 대한전자공학회논문지, 30-A(1), pp. 1-7, 1993년 1월.

유 제 우



2005년 8월: 충남대학교 정보통신공학부 (공학사)
 2005년 9월~현재: 충남대학교 전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 레이더, 위상배열 안테나

김 동 석



1989년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)
 1991년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)
 1991년 2월~1996년 5월: 국방과학연구소 연구원
 1996년 5월~2001년 12월: (주)극동

통신 연구소장

2002년 1월~현재: (주)엠티지 대표이사

[주 관심분야] 안테나, 레이더, 안테나 측정 시스템

라 동 균



1995년 2월: 충남대학교 물리학과 (이학사)
 1997년 2월: 충남대학교 물리학과 (이학석사)
 2005년 9월~현재: (주)엠티지
 [주 관심분야] 안테나, 레이더

김 찬 홍



1991년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 1993년 2월: 포항공대 전자전기공학과 (공학석사)
 1991년 3월~현재: 국방과학연구소 선임연구원
 2005년 3월~현재: 한국과학기술원

박사과정

[주 관심분야] 레이더, 위상배열 안테나, 급전기

박 동 철



1974년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)

1976년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학석사)

1984년 12월: Univ. of California, Santa Barbara (공학박사)

1977년~1978년: Ruhr University, Bochum, Germany 방문교수

1994년~1998년: IEEE MTT Korea Chapter Chairperson

1998년~2001년: IEEE EMC Korea Chapter Chairperson

2000년~2001년: 한국전자과학회 회장

1976년~현재: 충남대학교 전자공학과 교수

2005년 4월~현재: 대덕 Wireless 포럼 회장

[주 관심분야] Microwave and millimeterwave passive components, Antennas, EMI/EMC