

개방형 도파관 배열안테나의 조향소자 특성

° 김 동 석, 김 태 현*, 박 동 철*, 김 찬 홍**

MTG, *충남대학교, **국방과학연구소

전화 : (042) 621-9590 / 팩스 : (042) 621-9591

Scan Element Characteristics of Open-Ended Waveguide Array Antenna

° Dong-Seok Kim, Tae-Hyun Kim*, Dong-Chul Park*, and Chan-Hong Kim**

MTG Co. Ltd.

*Chungnam National University

**Agency for Defence Development

E-mail : dkim@mtginc.co.kr

Abstract

Scan Element Pattern(SEP) and Scan Impedance(SI) concepts are used to analyze the characteristics of open-ended waveguide array, which is the representative phased array antenna element in C-band and X-band. Transmit SEP's are calculated for 15×15 subarray and SI's are obtained by applying periodic boundary conditions for a unit cell of the given array condition. CST's MWS and Ansoft's HFSS are utilized for each analysis. Some relations are reviewed between the two results, which are based on mutual coupling effects. For validation purpose, an 8×8 subarray is constructed and tested. Transmit SEP measured in MTG's far-field range shows good agreement with the calculated transmit SEP.

Key words : Scan Element Pattern(SEP), Scan Impedance(SI), phased array, mutual coupling.

I. 서 론

상호결합 현상은 위상배열 안테나의 고유한 특성들을 결정하는 요소로서 이를 이해하고 적절한 방법으로 이용하는 것이 필요하다[1]. 실질적 적용 대상인 위상배열 안테나들은 매우 많은 수의 소자수를 가지는 경우이므로 상호결합량을 계산하여 안테나의 특성을 예측하기는 불가능한 일이다. 따라서 등방성 소자(isotropic element)의 기하학적 배열 구조에 의해서 결정되는 배열인자(array factor)와 무한배열(infinite array) 속에서 하나의 복사소자가 가지는 소자패턴(element pattern)의 곱으로 안테나의 특성을 이해하는 방법론이 사용되어 왔으며 이때 개개의 소자가 배열 속에서 상호결합의 영향으로 나타내는 특성을 능동소자패턴(AEP : Active Element Pattern)이라는 개념으로 이해하여 왔다 [2-6].

1990년대 후반에 상호결합 현상과 빔 조향에 따라 매우 다양하게 변화하는 임피던스 특성을 체계

적으로 정리한 조향소자패턴(SEP : Scan Element Pattern) 및 조향임피던스(SI : Scan Impedance) 개념을 도입하여 위상배열 안테나 특성분석에 이용하고 있다[1,7].

본 논문에서는 CST 사의 MWS(Microwave Studio) 및 Ansoft 사의 HFSS(High Frequency Structure Simulator)를 Transmit SEP 및 SI의 해석에 사용하는 방안을 제시하고 C-대역 및 X-대역에서 대표적인 위상배열 안테나 소자로 인식되어지는 개방형 도파관(open-ended waveguide) 배열 안테나의 특성분석에 적용하였다. 또한 8×8 부배열을 제작하여 Transmit SEP를 측정하고 결과를 상호 비교함으로써 타당성을 검증하였다.

II. 위상배열 안테나의 소자특성 분석

일반적으로 위상배열 안테나 복사패턴은 아래 식으로 표현된다.

$$E(\theta, \phi) = AF(\theta, \phi) \cdot EP(\theta, \phi) \quad (2-1)$$

여기서 $AF(\theta, \phi)$ 는 배열인자로서 배열의 기하학적 구조와 배열간격 및 각 소자에 여기되는 진폭과 위상의 함수에 의해 고유하게 결정된다. 또한 $EP(\theta, \phi)$ 는 소자패턴을 의미하며 배열을 구성하는 단위 셀(unit cell)로서 가지는 평균적인 복사특성을 나타낸다.

배열구조는 배열의 단위격자 구조가 사각형 형태인 사각형 배열(rectangular array)과 삼각형 구조의 격자구조를 가지는 삼각형 배열(triangular array)이 널리 사용되는데 주축방향으로 동일한 빔 조향범위를 제공하는데 있어 삼각형 배열구조인 경우가 상대적으로 소자수가 적게 필요하여 대형 위상배열 안테나 등에서는 매우 유리한 조건으로 작용한다 [7]. 본 연구에서는 아래 그림 2-1과 같이 수직으로 배열된 삼각형 배열구조를 고려한다.

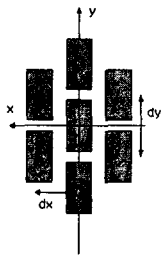


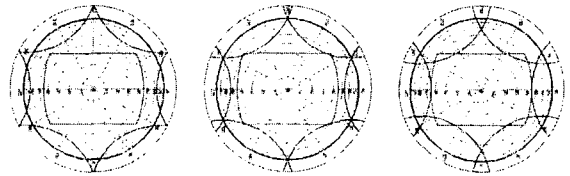
그림 2-1. 개방형 도파관의 삼각형 배열구조

배열간격은 위상배열 안테나가 정해진 범위(θ_{max})에서 빔을 조향할 때 가시 공간(visual space)인 전면 반공간(front hemi-sphere)으로 하나의 주 빔 외에 또 다른 주 빔 즉, 그레이팅 로브(grating lobe)가 들어오지 않도록 결정한다. E-면인 수평방향 조향범위는 직접적으로 dx와 (2-2)식으로 결정된다.

$$d \leq \frac{\lambda}{1 + \sin \theta_{max}} \quad (2-2)$$

본 연구에서는 상한 주파수에서 조향범위가 대략 $\pm 45^\circ$ 가 되도록 dx를 $0.557\lambda_c$ 로 결정하였으며 이때 조향범위는 $\pm 63^\circ @ f_l$, $\pm 53^\circ @ f_c$, $\pm 45^\circ @ f_h$ 이다. 여기서 λ_c 는 중심 주파수에 대한 파장을, f_l , f_c , 그리고 f_h 는 각각 하한, 중심, 상한 주파수를 의미한다. H-면인 수직방향으로는 빔 조향범위가 직접적으로 dy와 식(2-2)에 의해 결정되지는 않는데 그 이유는 배열구조상 그레이팅 로브가 대각방향으로 접근하기 때문에 이 식에 의해 결정되는 범위보다는 좀 더 바깥에서 발생한다. X-대역의 표준

WR-90 도파관을 기준으로 도파관의 너비는 $0.57\lambda_c$, 간격은 $0.675\lambda_c$ 로 정하여 기구적 구현이 가능한 범위의 칩수를 선택하여 빔 조향범위는 대략 $\pm 31^\circ @ f_l$, $\pm 26^\circ @ f_c$, $\pm 21^\circ @ f_h$ 이다(그림 2-2 참조).



(a) 하한주파수 (b) 중심주파수 (c) 상한주파수
그림 2-2. 빔 조향범위($\pm 45^\circ \times \pm 30^\circ$ 를 기준으로 표현함) 및 그레이팅 로브 위치

배열구조 안의 복사소자는 그 특성(VSWR 및 복사패턴)이 고립된 소자와는 달리 인접 소자와의 상호결합에 의해 매우 다양하게 변한다. 즉, 특정 복사소자의 종류(dipole, waveguide 등)에 따라 고유하게 결정되는 요소보다는 배열의 기하학적 구조 및 간격에 의해 결정되는 요소가 매우 특징적이다. 특히, 위상배열 안테나에서는 빔 조향각에 따라 복사소자의 임피던스가 매우 다양하게 변화하므로 이러한 특성을 지칭하여 능동소자패턴 또는 능동 VSWR(active VSWR)이라 칭하였다. 그러나 근래에는 능동이라는 용어가 다른 분야의 개념과 혼동되는 점이 있고 위상배열 안테나의 특성변화는 빔 조향에 따른 특성변화로 대표되므로 능동이라는 개념 대신 조향이라는 개념을 사용하여 조향소자패턴, 조향 임피던스, 조향 VSWR(scan VSWR) 등을 사용한다 [1,7]. 따라서 식(2-1)은 식(2-3)으로 표현된다.

$$E(\theta, \phi) = AF(\theta, \phi) \cdot SEP(\theta, \phi) \quad (2-3)$$

SEP는 두 가지 개념의 정의가 있다. 첫째는 하나의 복사소자가 배열 속에서 단순히 받는 상호결합에 의한 영향만을 고려한 것으로 상호결합 현상이 충분히 고려될 정도의 배열개수를 가지는 부배열에서 중심소자를 여기하고 나머지 소자들은 종단처리(termination)하여 구해진 소자 특성으로 이를 송신 SEP라 하는데 실제 위상배열 안테나에서 소자 각각의 반사계수가 상호결합하여 나타내는 능동임피던스 특성이 반영되지 않으므로 적용의 한계가 있지만 주파수 대역이 상대적으로 좁고 소자 각각이 잘 정합되어 있는 경우 비교적 제한된 조향범위에서 적용 가능하다. 이 개념의 SEP는 계산이 가능하고 측정도 비교적 용이하게 이루어질 수 있어 종래

에 대부분 이 개념의 SEP를 AEP라는 개념으로 널리 사용하여 왔다.

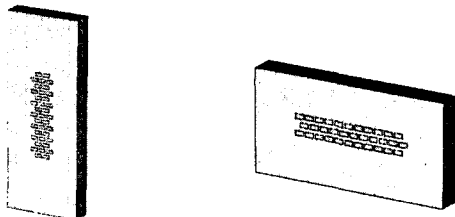
그러나 광대역 위상배열 안테나에서는 소자 개개의 VSWR 특성이 비교적 큰 값을 가지므로 안테나의 임피던스가 빔조향에 따라 매우 크게 변화하게 된다. 따라서 빔조향에 따른 배열 속에서의 소자패턴도 매우 다른 특성을 나타낸다. 이러한 상황의 소자 특성은 송신모드에서는 관찰할 수 없고 수신모드에서 특정 소자 하나의 특성을 관찰할 수 있다. 이러한 이유로 이 경우의 SEP를 Receive SEP라 부르는데 실제로는 충분히 큰 부배열에서 모든 소자를 균일한 진폭과 적절한 위상 조건으로 수신하도록 하여 얻어지는 소자특성으로 식 (2-4)와 같은 평균적인 값을 가진다.

$$Receive\ SEP(\theta, \phi) = \frac{4\pi A(1 - |\Gamma(\theta, \phi)|^2)}{N\lambda^2} \quad (2-4)$$

이 개념의 SEP는 안테나 전체의 특성이 SEP×N(소자수)로 간단히 표현된다는 장점이 있고 빔조향에 따른 반사계수가 패턴 속에 내재되어 있다는 점이 특징이다. 여기서 $\Gamma(\theta, \phi)$ 는 빔 조향에 따른 반사계수로서 조향반사계수(scan reflection coefficient)이고 이는 안테나의 조향 임피던스와 관계되며 이들은 주기적 무한배열 구조에 대한 Floquet Unit Cell 기법을 이용하여 해석한다.

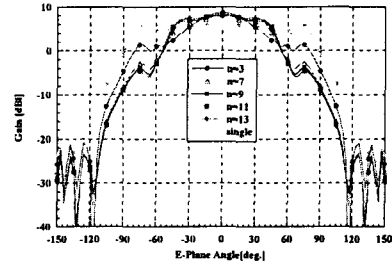
III. 상용해석 S/W를 이용한 송신 SEP 및 SI 해석

본 연구에서는 그림 2-1의 구조를 이용하여 개방형 도파관 배열의 송신 SEP 및 SI를 분석한다. 송신 SEP 분석을 위해 적절한 소자수의 부배열을 이용하게 되며 배열소자의 개수를 늘려가면서 특성변화를 관찰함으로써 상호결합이 충분히 고려되는 정도의 적절한 부배열의 크기를 결정할 수 있다.

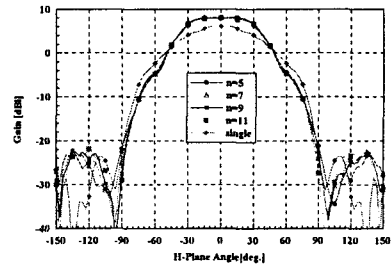


(a) E-면 특성해석 구조 (b) H-면 특성해석 구조
그림 3-1. 배열크기에 따른 특성변화 해석구조

상호결합의 정도는 복사소자의 종류 및 기하학적 배치에 따라 다르며 E-면과 H-면에 따라서도 다르다. 그림 3-1과 같이 E-면과 H-면으로 소자개수를 늘려가며 특성변화를 관찰함으로써 적절한 배열의 크기를 정할 수 있다.



(a) E-면



(b) H-면

그림 3-2. 배열크기에 따른 송신 SEP 변화

그림 3-2는 중심주파수에서의 소자수를 늘려가며 계산한 송신 SEP를 보여준다. 이 해석에는 CST사의 MWS가 사용되었다. 이와 같은 상호결합 분석 결과로 판단하면 정해진 배열구조(삼각 배열구조)와 배열간격에서 E-면 방향으로로는 대략 9~11개 이상의 배열이 필요하고 H-면 방향으로로는 7~9개 이상의 배열이 필요함을 알 수 있다. 그림 3-3은 해석에 사용된 15×15 부배열의 MWS 모델이며 그림 3-4는 이 해석의 결과로 얻어진 송신 SEP를 나타낸다.

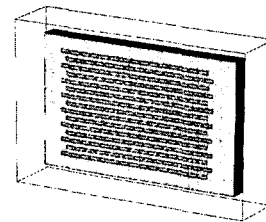
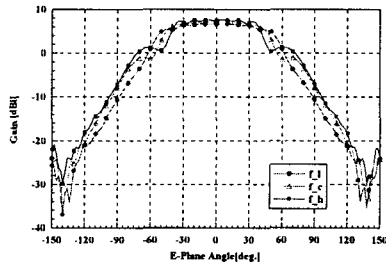


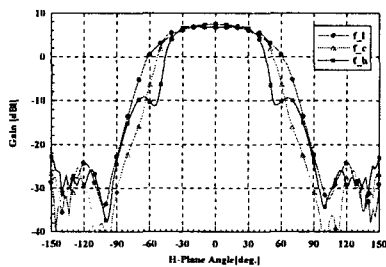
그림 3-3. 15×15 부배열 해석구조

계산된 송신 SEP 특성을 살펴보면 고립된 단일소

자의 패턴과는 매우 다르며 특정범위 내에서 매우 균일한 패턴을 보여주고 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 특성은 실제 위상배열 안테나에서 요구되어지는 특성으로 flat-top pattern이라 부르는데 배열 속에서 복사소자의 종류와는 비교적 무관하게 소자간의 상호결합 현상에 의해 특징적으로 나타나는 현상이다. 실제로는 가능한 한 넓은 범위에서(적어도 조향범위에서) 이러한 특성을 가지는 복사소자가 요구된다. E-면 패턴에서는 각 주파수별로 최대조향범위 근처에서 약간의 널이 발생하며 H-면 패턴에서는 최대 조향범위 밖에서 깊은 널이 발생한다.



(a) E-면



(b) H-면

그림 3-4. 15×15 부배열을 이용한 송신 SEP 해석결과

실제로 빔조향이 이루어지는 상황에서의 수신 SEP는 SI 분석을 통해 간접적으로 예측할 수 있다. 그림 3-5는 SI 분석을 위해 주기적 경계조건을 적용한 HFSS 해석 모델이다.

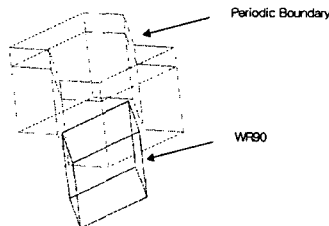
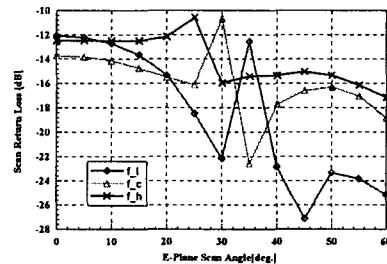
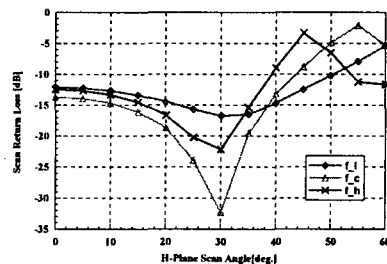


그림 3-5. 주기적 경계조건을 적용한 HFSS 해석 모델

이 해석에서는 주기적 경계조건하에서 특정한 방향으로의 빔조향 조건을 입력변수로 설정하여 해석 가능하며 그 결과는 조향반사계수이다. 그림 3-6은 E-면과 H-면에 대해 최대 60°까지 빔조향을 했을 때 반사손실의 변화를 나타낸 것이다. 두 방향 모두 최대 조향각(그레이팅 로브가 발생하기 시작하는 조향각) 부분에서 반사계수가 커지는 것을 볼 수 있다. 이러한 반사계수의 증가는 안테나의 부정합 손실($1 - |\Gamma|^2$)을 증가시켜 안테나가 이 방향으로 빔 조향을 하였을 때 이득이 급격히 감소하고 반사가 심하게 일어난다. 이러한 현상을 blindness라 한다. 계산 결과를 송신 SEP와 비교하면 유사한 현상을 볼 수 있다. 즉 반사계수가 커지는 조향각에서 송신 SEP 패턴 상 이득이 감소하는 현상과 일치한다. 이 점은 수신 SEP 상에서 관찰하면 더욱 현저하게 나타날 것으로 예상된다. 전반적으로는 H-면 방향이 E-면에 비해 이러한 현상이 훨씬 두드러지며 이러한 현상은 일반적으로 타 결과들과도 일치한다 [5].



(a) E-면 조향



(b) H-면 조향

그림 3-6. 빔조향에 따른 반사계수

IV. 제작 및 측정

해석결과의 검증을 위해 송신 SEP를 측정하기 위한 부배열이 제작되었다. 부배열의 크기는 8×8이며 모듈화 된 도파관 구조를 정밀 기계 가공하여 조립

하는 형태로 제작되었다. 배열의 중심소자에는 급전을 위한 도파관 어댑터가 연결되고 나머지 소자들은 전파 흡수체를 이용하여 종단처리 되었다. 그림 4-1은 조립된 부배열의 송신 SEP 측정을 위해 포지셔너(positioner)에 장착된 사진이다.

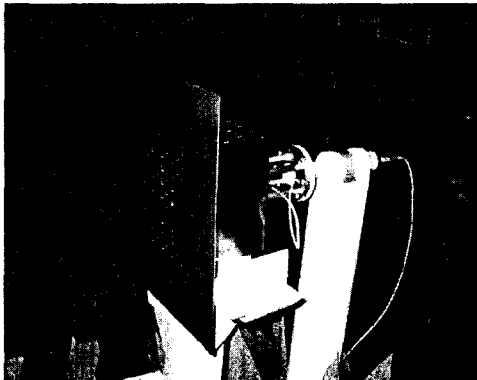
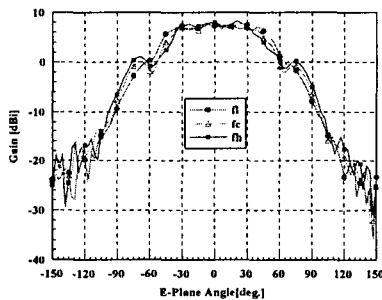
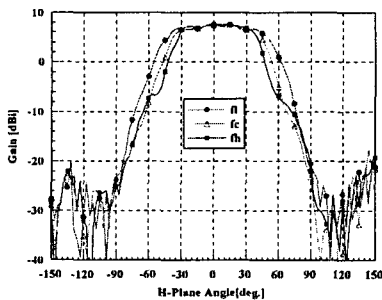


그림 4-1. 8×8 부배열의 송신 SEP 측정 (Far-Field Range-MTG)



(a) E-면



(b) H-면

그림 4-2. 측정된 송신 SEP

제작된 부배열의 크기가 계산된 부배열의 크기와 달라 약간의 차이는 있지만 두 결과는 매우 잘 일치하고 있으며 특히 배열 속에서 상호결합에 의해 특징적으로 나타나는 현상들을 매우 잘 보여주고

있다.

V. 결 론

본 논문에서는 위상배열 안테나 해석방법으로서 상호결합 현상과 빔 조향에 따라 변화하는 특성을 표현하는 조향 소자패턴과 조향임피던스를 상용 S/W를 이용하여 해석하는 방안을 제시하였다. 이 방법을 이용하여 C/X-대역의 대표적 위상배열 안테나 소자인 개방형 도파관 안테나의 삼각형 배열구조에 적용하여 X-대역에서 송신 SEP와 SI를 구하여 상호 비교/분석하였다. 아울러 8×8 부배열을 제작하고 송신 SEP를 측정하여 계산결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

Acknowledgement

본 연구는 한국과학기술원 전파탐지특화연구센터를 통한 국방과학연구소(ADD)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] R. C. Hansen, "Measurement of Wideband Arrays," *24th Proceedings of Antenna Measurement Association (AMTA-2002)*, Cleveland Ohio, pp. 242-246, 2002.
- [2] D. M. Pozar, "The Active Element Pattern," *IEEE Trans. on Antennas and Propag.* vol. 42 no. 8, August 1994.
- [3] R. C. Hansen, *Microwave Scanning Antennas Volume II*, Academic Press, 1964.
- [4] N. Amitay, V. Galindo, and C. P. Wu, *Theory and Analysis of Phased Array Antennas*, Wiley-Interscience, 1972.
- [5] A. A. Oliner and G. H. Knittel, *Phased Array Antennas*, Artech House, 1972.
- [6] R. J. Mailloux, *Phased Array Antenna Handbook*, Artech House, 1994.
- [7] R. C. Hansen, *Phased Array Antennas*, John Wiley & Sons, 1998.

M E M O