

로렌츠 상호작용 원리와 근역장-원역장 변환 공식을 이용한 안테나 근역장 측정 알고리즘 개선

The Enhancement of Antenna Near-Field Measurements Using Near-Field to Far-Field Transform Algorithms Based on the Lorentz Reciprocity Theorem

조용희

목원대학교 정보통신공학부

Yong-Heui Cho(yhcho@mokwon.ac.kr)

요약

안테나 복사 특성을 효과적으로 측정하는 방법 중 하나인 안테나 근역장 측정 알고리즘의 개선을 논한다. 로렌츠 상호작용 원리와 상호작용 표기법을 이용하여 근역장-원역장 변환공식의 핵심인 프로브 교정 알고리즘을 간략히 유도한다. 제안된 일반적인 프로브 교정 방정식과 제작된 시스템을 사각 혼안테나에 대한 평면주사법에 적용하여 근역장 복사 패턴을 얻고 이를 원역장 복사 패턴과 비교하여 복사 특성이 유사한 것을 보인다. 이를 통해 본 논문의 접근법이 매우 간단하면서도 대부분의 안테나 측정에 유용하게 쓰일 수 있는 것을 보인다.

■ 중심어 : | 안테나 | 근역장 | 원역장 | 로렌츠 | 상호작용 원리 | 측정 |

Abstract

The enhancement of antenna near-field measurements is obtained using a general probe compensation equation based on the Lorentz reciprocity theorem and reciprocity notation. The probe compensation is an essential process of the near-field to far-field transformations. Applying the equation proposed in this paper to a planar scanning for a rectangular horn antenna shows that our near-field radiation pattern is similar to that of a far-field and our theory is very simple to use and suitable for most practical applications.

■ keyword : | Antenna | Near-Field | Far-Field | Lorentz | Reciprocity Theorem | Measurement |

1. 서론

안테나 복사 특성을 효과적으로 측정하는 방법에는 원역장 측정 (far-field measurement)과 근역장 측정 (near-field measurement)이 있다[1].

안테나 근역장 측정[2]은 측정시설의 설치비용과 유지

비용을 최소로 하면서도 원역장과 유사한 복사 특성을 얻을 수 있는 방법 중의 하나이다. 일반적으로 원역장 측정시설은 측정 가능한 최대파장(maximum wavelength)의 약 100 여배 크기로 설계하므로 시설의 부피가 매우 크다. 또한, 내부 전자장 흡수체(electromagnetic absorber)를 최상의 조건으로 유지하기 위하여 24시간

항은, 항습 조건을 유지하고 있다. 반면, 근역장 측정시 설은 최대파장의 10 여배 크기로 설계하므로 부피가 작으며 짧은 거리를 측정하므로 흡수체 규격조건이 느슨하다.

근역장-원역장 변환 기법의 역사를 알아보면, 최초로 안테나 근역장-원역장 변환을 사용한 것은 1955년이다 [3][4]. Richmond는 프로브(probe)를 이용하여 전자장의 전력세기를 측정하고 근역장을 DFT(Discrete Fourier Transform)하여 원역장을 얻었다. 참고문헌 [3][4]에 제안된 알고리즘을 개선한 것이 프로브 보정을 이용한 근역장-원역장 알고리즘이다. 현재까지 표준적으로 쓰이는 프로브 교정 방정식(probe compensation equation)은 조지아테크(Georgia Tech.)의 Paris 교수 그룹이 제안하였다[5-7]. Paris 교수 그룹은 로렌츠 상호작용 원리(Lorentz reciprocity theorem)를 AUT(Antenna Under Test)와 프로브에 적용하여 근사화된 프로브 보정 방정식을 얻었다. 하지만 방정식의 유도과정이 매우 복잡하고 방정식의 근사화된 정도 혹은 한계를 알기 어렵다. 현재는 [8]에서 구형주사(spherical scanning)인 경우의 프로브 보정식을 얻기 위하여 MoM(Method of Moments) 기반의 PWS 함수(PieceWise Sinusoidal Function) 계산 알고리즘을 제안하여 원역장을 새롭게 계산했다.

본 논문에서는 로렌츠 상호작용 원리[9]와 본 논문에서 제안하는 새로운 상호작용 표기법을 이용하여 새로운 프로브 보정 방정식을 제안한다. 이 보정 방정식을 평면 주사법(planar scanning)에 적용하면 [6]의 근사적인 보정식을 얻을 수 있다. 새로운 프로브 보정 방정식을 이용하면 프로브 보정의 한계와 근사를 명확히 정의할 수 있다. 제안된 알고리즘을 검증하기 위하여 근역장 측정 시스템을 제안하고 제작한다. 사각 혼안테나(rectangular horn antenna)에 평면주사법과 제안된 근역장-원역장 변환 알고리즘을 적용하여 근역장을 변환한 복사 패턴(radiation pattern)을 얻고 이를 원역장에서 측정된 복사 패턴과 비교한다. 측정결과는 원역장 복사 패턴과 근역장 복사 패턴이 유사한 것을 보여준다. 이를 통해 본 접근법의 명확성과 간결성을 확인한다.

II. 로렌츠 상호작용 원리

로렌츠 상호작용 원리[9]는 서로 다른 두 소스(source)의 전자기장이 갖는 관계를 나타내는 것이다. 즉,

$$\begin{aligned} & \nabla \cdot (\overline{E_a} \times \overline{H_b} - \overline{E_b} \times \overline{H_a}) \\ &= (\overline{E_b} \cdot \overline{J_a} - \overline{H_b} \cdot \overline{M_a}) \\ &- (\overline{E_a} \cdot \overline{J_b} - \overline{H_a} \cdot \overline{M_b}) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 \overline{J} 와 \overline{M} 은 전기전류와 자기전류를 나타내며, a 와 b 는 서로 다른 두개의 소스를 나타낸다.

럼지의 반작용(Runsey's reaction)[10]을 (1)식에 도입하고 본 논문에서 제안하는 상호작용(reciprocity)에 대한 새로운 표기법인 $\langle\langle a, b \rangle\rangle$ 를 도입하여 (1)식을 간략히 하면

$$\langle\langle a, b \rangle\rangle = \langle a, b \rangle - \langle b, a \rangle \quad (2)$$

여기서

$$\langle\langle a, b \rangle\rangle = \oint_S (\overline{E_a} \times \overline{H_b} - \overline{E_b} \times \overline{H_a}) \cdot d\overline{a} \quad (3)$$

$$\langle a, b \rangle = \int_V (\overline{E_b} \cdot \overline{J_a} - \overline{H_b} \cdot \overline{M_a}) dv \quad (4)$$

상호작용 $\langle\langle a, b \rangle\rangle$ 를 이루는 소스 a 와 b 의 대수적 구조(algebraic structure)는 벡터공간(vector space)이다. 소스 a 와 b 는 전자장의 소스인 전기전류와 자기전류이므로 a 와 b 가 이루는 구조가 벡터공간임을 증명할 수 있다. 상호작용 $\langle\langle a, b \rangle\rangle$ 의 특성은 (3)식을 이용하면

$$\begin{aligned} & \langle\langle k_1 a_1 + k_2 a_2, b \rangle\rangle \\ &= k_1 \langle\langle a_1, b \rangle\rangle + k_2 \langle\langle a_2, b \rangle\rangle \end{aligned} \quad (5)$$

$$\langle\langle b, a \rangle\rangle = -\langle\langle a, b \rangle\rangle \quad (6)$$

$$\langle\langle a, a \rangle\rangle = 0 \quad (7)$$

수식 (5)-(7)의 성질은 사교공간(斜交空間, symplectic space)의 중요한 공리이다. 그러므로 상호작용 $\langle\langle a, b \rangle\rangle$ 는 소스 a, b 가 이루는 벡터공간에 사교형태(symplectic form) $\langle\langle \rangle\rangle$ 를 가진 사교공간을 이룬다.

반작용 $\langle a, b \rangle$ 의 특성[10]은

$$\langle k_1 a_1 + k_2 a_2, b \rangle = k_1 \langle a_1, b \rangle + k_2 \langle a_2, b \rangle \quad (8)$$

$$\langle b, a \rangle = \langle a, b \rangle \quad (9)$$

여기서 (9)식은 로렌츠 상호작용 원리가 적용되는 체적 V 가 모든 소스 a, b 를 포함할 때 성립한다. 반작용 $\langle a, b \rangle$ 는 소스 a 와 전자장 b 가 이루는 벡터공간에 내적공간(inner product space)을 이룬다. (4)를 고려하면 자기 자신에 대한 반작용 $\langle a, a \rangle$ 는 소스 a 가 가진 전력(power)을 의미하게 된다. 그래서 $\langle a, a \rangle \neq 0$.

III. 일반적인 프로브 보정 방정식

일반적인 프로브 보정 방정식을 유도하기 위하여 [그림 1]과 같은 임의의 근역장 측정 구조를 생각한다.

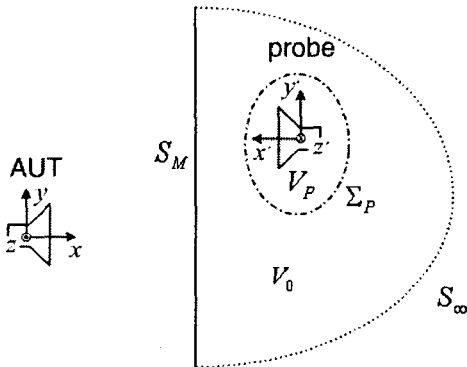


그림 1. 안테나 근역장 측정 모습

[그림 1]에서 AUT(Antenna Under Test)는 측정할 안테나이며 근역장은 프로브(probe)로 측정한다. S_M 은 근역장을 측정하는 열린 표면(open surface)이며, S_∞ 는

로렌츠 상호작용 원리를 적용하기 위한 가상의 무한 표면이다. Σ_P 는 프로브를 감싸는 임의의 닫힌 표면(closed surface)이며 V_P 는 Σ_P 가 만드는 체적이다. $\Sigma = S_M + S_\infty$ 라 정의하고 Σ 가 만드는 체적을 V 라 하면 $V_0 = V - V_P$ 를 만족한다.

프로브 보정을 수행하기 위하여 AUT와 프로브가 만드는 다중반사(multiple reflection)를 무시한다. AUT와 프로브가 만드는 등가 소스(equivalent source)[9][11]를 a 와 p 라 하고, AUT와 프로브에서 반사되는 산란장(scattered field)을 형성하는 등가 소스를 as 와 ps 라 하자. [그림 1]의 구조에 (2)식에 제시된 로렌츠 상호작용 원리를 적용하면

$$\begin{aligned} \langle\langle a + ps, p + as \rangle\rangle_\Sigma &= \langle a + ps, p + as \rangle_V \\ &- \langle p + as, a + ps \rangle_V \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 아래첨자 V 와 Σ 는 상호작용이나 반작용이 정의되는 영역을 나타낸다. (8)식을 (10)식의 우변에 적용하고 체적 V 에 소스 a 와 as 가 존재하지 않는 것 ($\overline{J}_a = \overline{J}_{as} = 0$)을 이용하면

$$\begin{aligned} \langle\langle a + ps, p + as \rangle\rangle_\Sigma &= \langle ps, p + as \rangle_V \\ &- \langle p, a + ps \rangle_V \\ &= \langle\langle ps, p \rangle\rangle_{\Sigma_P} \\ &+ \langle ps, as \rangle_{V_P} - \langle p, a \rangle_{V_P} \end{aligned} \quad (11)$$

(5)식의 배분법칙을 (11)식의 좌변에 적용하고 정리하면

$$\begin{aligned} \langle\langle a, p \rangle\rangle_\Sigma &= \langle ps, p \rangle_{V_P} - \langle p, a \rangle_{V_P} \\ &+ \langle ps, as \rangle_{V_P} - \langle\langle as, ps \rangle\rangle_\Sigma \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 (4)식에 제시된 소스와 전자장 조건을 활용하면 $\langle\langle ps, p \rangle\rangle_\Sigma = \langle\langle a, as \rangle\rangle_\Sigma = 0$, $\langle p, ps \rangle_{V_P} = 0$ 을 증명할 수 있다.

[5][6]에 제시된 프로브 측정 전력 $P_M(\overline{r_0})$ 을 도입하고 S_∞ 에서 전자장의 상호작용은 0인 것을 이용하면 일반적인 프로브 보정 방정식을 얻는다. 즉,

$$\begin{aligned} \langle a, p \rangle_{S_M} &= P_M(\overline{r_0}) \\ + \langle ps, as \rangle_{V_p} - \langle as, ps \rangle_{S_M} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 $P_M(\overline{r_0}) = \langle ps, p \rangle_{V_p} - \langle p, a \rangle_{V_p}$. 프로브 측정 전력 $P_M(\overline{r_0})$ [5,6]은 근역장 측정시 프로브 종단에 유도되는 전력이다. $P_M(\overline{r_0})$ 는 입사 전자파 전력과 비례관계를 이루므로 변위(displacement) $\overline{r_0}$ 지점의 전자파 세기를 비례적으로 측정할 수 있다.

$\langle ps, as \rangle_{V_p} \approx 0$ 이며 $\langle as, ps \rangle_{S_M} \approx 0$ 인 근사를 활용하면

$$\langle a, p \rangle_{S_M} \approx P_M(\overline{r_0}) \quad (14)$$

(14)식의 결과는 [5-7]에 제시된 근사 프로브 보정 방정식과 유사하다. 만약 AUT와 프로브에서 산란되는 전자장을 예측할 수 있으면 (13)식을 사용하여 프로브 보정을 수행하며, 산란장을 알 수 없는 경우에는 (14)식을 사용하여 프로브 보정을 수행한다.

IV. 평면주사 기반 근역장 측정 시스템의 구현

평면주사 기반 근역장 측정 시스템은 제어시스템, 네트워크 분석기, 도파관 프로브(waveguide probe)로 구성된다. 이러한 근역장 측정장비를 제작하기 위해 [그림 2]와 같은 평면주사 혹은 원통주사(circular cylindrical scanning)가 가능한 근역장 안테나 측정장비를 제안한다.

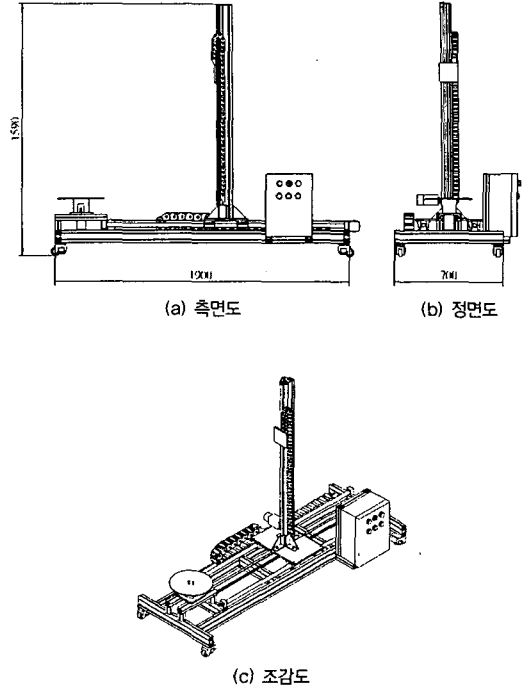
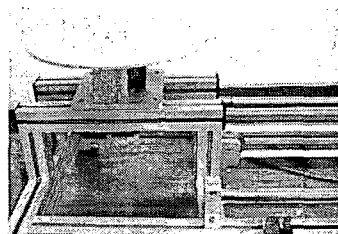
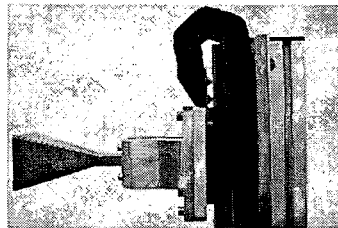


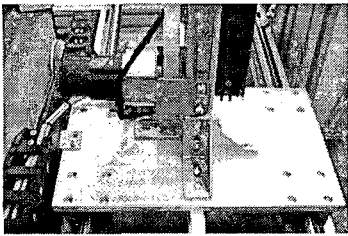
그림 2. 근역장 측정 시스템의 설계도



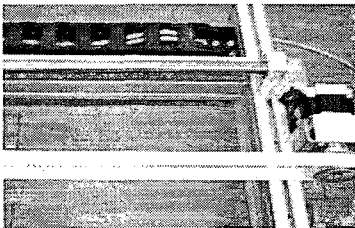
(a) AUT 부분 및 회전운동 제어부



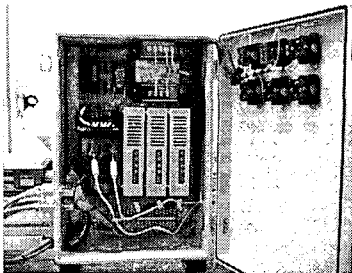
(b) 프로브 부분



(c) 상하운동 제어부



(d) 좌우운동 제어부



(e) 모터 제어부

그림 3. 근역장 측정 시스템의 세부구조

[그림 3]에 소개된 프로브 혹은 AUT가 상하운동과 회전운동을 이용하면 원통주사가 되고 프로브가 상하운동과 좌우운동을 하면 평면주사가 된다.

근역장 측정을 수행할 때 AUT는 [그림 3](a)에 위치하며 프로브는 [그림 3](b)에 설치된다. 프로브는 모터제어를 통해 이동하여 전자파 신호를 감지하는 역할을 한다. OERW(Open Ended Rectangular Waveguide) 프로브를 사용할 수 있지만 본 논문에서는 사각 혼안테나를 사용한다. [그림 3](c)의 스텝핑 모터(steping motor)는 상하운동을 제어한다. 중력의 영향을 감소시키기 위해 상하운동 모터에는 반드시 감속기를 부착하여야 한다. 모터의 제어를 위해 RS-232C 혹은 USB 포트(port)를

이용하는 직렬 통신 프로그램을 작성하였다. [그림 3](a)와 [그림 3](d)에 있는 스텝핑 모터는 회전운동과 좌우운동을 각각 제어한다. [그림 3](e)의 모터 제어부는 모션제어기(motion controller), 모터 드라이버(motor driver), RS-232C 인터페이스(interface)로 구성한다. 모터는 타이밍 벨트와 감속기(gear)를 이용하여 제어한다. 타이밍 벨트의 위치 해상도는 5 mm이지만 30:1 감속기를 사용하므로 위치 해상도는 5/30 mm로 향상된다. 경험적으로 AUT와 프로브의 정렬은 $\lambda/5$ 이하가 되도록 맞춘다. 이 경우 AUT와 프로브의 거리가 3λ 이면 약 3'의 오차가 나게 된다.

V. 근역장 측정 수행

근역장 측정결과를 원역장으로 변환하는 알고리즘은 [그림 4]에 소개되어 있다. [그림 2]의 근역장 측정 시스템을 이용하여 근역장 측정데이터를 얻고 수치효율이 우수한 FFT를 적용하여 파수영역(spectral domain) 원역장을 얻는다. FFT 변환 해상도(resolution)를 증가시키기 위하여 측정영역 이외의 값은 영으로 만든다. 측정영역과 FFT 시행 후의 파수영역은 행렬 인덱스(index)의 시작값이 다르므로 행렬 인덱스가 동일하도록 행렬을 재정렬해야 한다. 좌표변환을 이용하여 파수 k_y, k_z 에 대한 원역장을 θ, ϕ 에 대한 값으로 바꾼다. 근역장 측정에 사용한 프로브 영향을 줄이기 위하여 (14)식에 제시된 프로브 보정 방정식을 이용한다. 마지막으로 프로브 영향이 감소된 원역장 계산결과를 얻는다.

상세히 설명하면 근역장을 측정하기 위하여 [그림 2]와 [그림 3]에 소개된 시스템을 구동하여 결과값을 파일로 만든다. 이 결과값이 (14)식에 있는 $P_M(\overline{r_0})$ 를 구성한다. 초보적인 안테나 공학 이론을 도입하면 근역장과 원역장의 관계[11]는 푸리에 변환(Fourier transform)을 이루므로 정밀한 원역장 계산을 위하여 측정행렬에 영행렬(zero matrix)을 추가한다. 이 과정을 통해 측정값의 해상도(resolution)를 인위적으로 높일 수 있다.

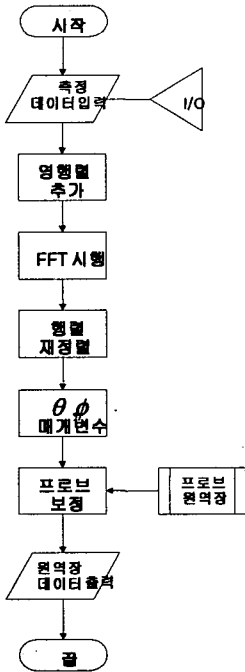


그림 4. 근역장 측정 알고리즘의 흐름도

푸리에 변환을 빠르게 수행하기 위해 $P_M(\overline{r_0})$ 에 대해 FFT(Fast Fourier Transform)를 적용한다. 근사적인 FFT 계산을 위해 택하는 측정위치는 $\overline{r_0} = (x_0, m\Delta y, n\Delta z)$ 이다. 통신이론에서 잘 알려진 표본화 정리(sampling theorem)를 안테나 측정에 적용하면 측정 해상도(measurement resolution)는

$$\Delta y, \Delta z \leq \lambda/2 \quad (15)$$

표본화 정리를 이용하여 원역장에 생기는 파수분포(wavenumber spectrum)를 유도하면

$$k_y = \frac{2m\pi}{M\Delta y}, \quad k_z = \frac{2n\pi}{N\Delta z} \quad (16)$$

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{k_z}{z}\right), \quad \phi = \tan^{-1}\left(\frac{k_y}{k_x}\right) \quad (17)$$

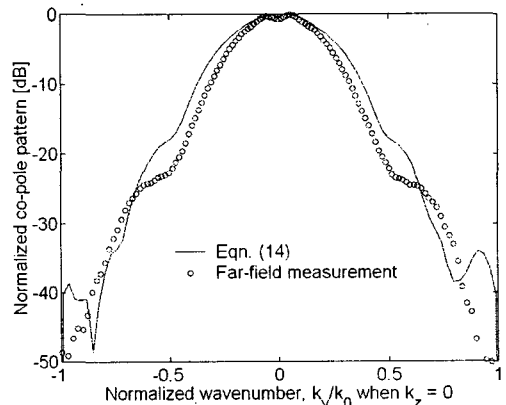
여기서 M 과 N 은 y 축과 z 축의 측정 샘플의 개수

이며 $k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2, \quad k = 2\pi/\lambda.$

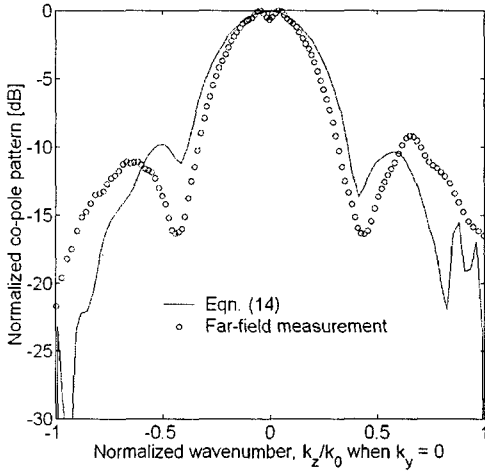
(14)식에서 예측되는 것처럼 $P_M(\overline{r_0})$ 를 변환하여 얻어진 FFT 결과에는 필연적으로 프로브 전자장의 영향이 포함되어 있다. 이것을 없애는 과정이 프로브 보정이다. (14)식에 유도된 근사 프로브 보정식을 이용하면 프로브 보정을 쉽게 행할 수 있다. 다만 프로브 보정을 할 때 프로브의 원역장은 정확히 알아야 한다. OERW(Open Ended Rectangular Waveguide) 프로브인 경우는 [12][13]에 원역장이 근사적으로 표시가 되어 있다. 본 논문에서 사용한 사각 혼안테나 형태의 프로브 원역장은 [14][15]를 이용하면 된다.

본 논문에서 제안된 프로브 보정 방정식의 명확성을 확인하기 위하여 [그림 3]의 측정 시스템과 [그림 4]의 알고리즘을 활용하여 X밴드 표준 혼안테나에 대한 근역장 측정과 근역장-원역장 변환 알고리즘을 적용하였다.

[그림 5]는 정규화된 원역장 파수(normalized far-field wavenumber)가 변하는 경우의 동일 편파(co-polarization) 정규화 복사 패턴(normalized radiation pattern)을 나타낸다. [그림 5]에서 근역장을 변환한 복사 패턴과 원역장에서 측정한 복사 패턴을 비교하면 $k_z = 0$ 인 경우는 두 패턴이 잘 맞으나, $k_y = 0$ 인 경우에는 부엽(side-lobe)에서 잘 맞지 않는 것을 볼 수 있다. 현재 제안된 측정 시스템은 모터 제어가 저가이므로 위치정확도에 다소 문제가 있고, 흡수체가 있으나 측정 시 외벽에 의한 반사가 있어 개선의 여지를 두고 있다.

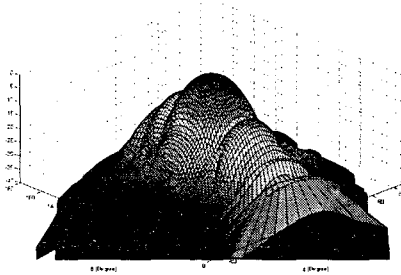


(a) $k_z = 0$ 인 경우 동일 편파 복사 패턴

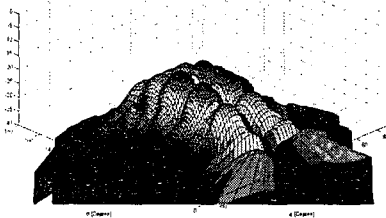


(b) $k_y = 0$ 인 경우 동일 편파 복사 패턴

그림 5. 정규화된 원역장 파수가 변하는 경우의 동일 편파 정규화 복사 패턴
(측정주파수: 19.8 GHz, AUT: X밴드 표준 혼안테나 4.8cm x 3.2cm, AUT-프로브 거리: 10cm)



(a) 3차원 동일 편파 복사 패턴



(b) 3차원 교차 편파 복사 패턴

그림 6. 근역장-원역장 변환을 수행한 θ, ϕ 에 대한 정규화 복사 패턴

[그림 6]은 원역장 파수에 대한 복사 패턴을 (17)식을 이용하여 θ, ϕ 로 변환한 복사 패턴을 나타낸다. 표준 혼안테나의 3차원 복사 패턴과 유사한 것을 알 수 있다.

VI. 결론

안테나 근역장 측정방법을 개선하기 위하여 일반화된 프로브 보정 방정식을 유도하고 저가의 근역장 안테나 측정 시스템을 제안한다. X밴드 표준 혼안테나를 이용하여 근역장 측정 시스템과 변환 알고리즘을 검증한다. 제안된 측정 시스템과 알고리즘은 $k_z = 0$ 위치에서는 원역장 결과와 비슷하나 $k_y = 0$ 위치에서는 원역장 결과와 부엽에서 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 향후에는 $k_y = 0$ 의 부정확성을 개선하기 위하여 모터 제어부와 흡수체 문제를 해결해야 할 것이다.

참고 문헌

- [1] 류홍균, 조용희, "원통주사법을 이용한 안테나 근역장 측정 방법", 한국콘텐츠학회논문지, 제4권, 제2호, pp.28-35, 2004.
- [2] A. D. Yaghjian, "An overview of near-field antenna measurements," IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol.34, No.1, pp.30-45, 1986.
- [3] J. H. Richmond and T. E. Tice, "Probes for microwave near-field measurements," IRE Trans. Microwave Theory Tech., Vol.3, No.3, pp.32-34, 1955.
- [4] J. H. Richmond, "Simplified calculation of antenna patterns with application to radome problems," IRE Trans. Microwave Theory Tech., Vol.3, No.4, pp.9-12, 1955.
- [5] W. M. Leach and D. T. Paris, "Probe-compensated near-field measurements on a cylinder," IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol.21, No.4, pp.435-445, 1973.

[6] D. T. Paris, W. M. Leach Jr., and E. B. Joy, "Basic theory of probe-compensated near-field measurements," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol.26, No.3, pp.373-379, 1978.

[7] E. B. Joy, W. M. Leach, G. P. Rodrigue, and D. T. Paris, "Applications of probe-compensated near-field measurements," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol.26, No.3, pp.379-389, 1978.

[8] J. F. Nye, "A simple method of spherical near-field scanning to measure the far fields of antennas or passive scatterers," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol.51, No.8, pp.2091-2098, 2003.

[9] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, John Wiley & Sons, 1996.

[10] V. H. Rumsey, "Reaction concept in electromagnetic theory," *Phys. Rev.*, Vol.94, No.6, pp.1483-1491, 1954.

[11] W. L. Stutzman and G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, John Wiley & Sons, 1997.

[12] A. D. Yaghjian, *Approximate formulas for the far fields and gain of open-ended rectangular waveguide*, National Bureau of Standards Internal Report, 1983.

[13] A. D. Yaghjian, "Approximate formulas for the far field and gain of open-ended rectangular waveguide," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol.32, No.4, pp.378-384, 1984.

[14] P. Russo, R. Rudduck, and L. Peters, Jr., "A method for computing E-plane patterns of horn antennas," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol.13, No.2, pp.219-224, 1965.

[15] C. Profera, "Complex radiation patterns of dual mode pyramidal horns," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol.25, No.3, pp.436-438, 1977.

저자소개

조용희(Yong-Heui Cho)

정회원



- 1998년 2월 : 경북대학교 전자공학과(공학사)
- 2000년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과(공학석사)
- 2002년 8월 : 한국과학기술원 전자전산학과 전기및전자공학전공(공학박사)

• 2002년 4월~현재 : 한국전자통신연구원
무선방송연구소 위촉·선임·초빙연구원

• 2003년 3월~현재 : 목원대학교 정보통신공학부
조교수

<관심분야> : 안테나, 초고주파, 전자파 산란 및 분산