

논문 2010-5-34

콤팩트 안테나 테스트 레인지용 파라볼릭 원통형 복반사경 시스템의 근접전계 해석

Near-field Analysis of Dual Parabolic Cylindrical Reflector System for Compact Antenna Test Range

박재현*, 최학근**, 정지훈*

Jae-Hyun Park*, Hak-Keun Choi**, Ji-Hoon Jeong*

요 약 본 논문에서는 CATR(Compact Antenna Test Range)을 위한 반사경 시스템으로 파라볼릭 원통형 복반사경 시스템을 해석하였다. 시험영역의 근접전계는 물리광학법(Physical Optics)을 적용하여 계산하였다. CATR은 균일한 평면파 제공을 위하여 최소한의 진폭과 위상 리플(ripple)을 가져야 하며 교차편파 또한 작아야 한다. 따라서 본 논문에서는 부반사경의 위치와 시험영역의 위치에 따른 근접전계 패턴을 구하여 전계의 리플, 테이퍼와 교차편파를 고찰하였다. 본 논문의 해석결과는 파라볼릭 원통형 복반사경 시스템으로 구성된 CATR 설계에 충분히 이용될 수 있을 것으로 생각된다.

Abstract In this paper, the dual parabolic cylindrical reflector systems are analyzed as the reflector system for the CATR(Compact Antenna Test Range) facility. The near-field at the test zone of the CATR is calculated by using the PO(Physical Optics) approximation. The CATR has to provide an uniform plane wave with the minimum amplitude and phase ripple and the low cross polarization. Therefore, in this paper, the near-field pattern are calculated, and the ripple and taper of the field and the cross polarization are investigated with the position of the subreflector and the test region. It is confirmed that the analysis results can be used for the design of the CATR with the dual parabolic cylindrical reflector.

Key Words : CATR, Parabolic dual cylindrical reflector, Near field

1. 서 론

최근 선진국에서는 인공위성을 통한 신속한 정보 교환 및 무한한 잠재력을 가지고 있는 우주를 선점하기 위해 우주산업에 힘을 쏟고 있다. 위성을 개발함에 있어서 위성 시스템 설계검증은 반드시 필요로 한다. 이러한 시스템 검증 시험시설은 전자기적인 궤도 운용 환경을 모의하기 위하여 양질의 평면파(plane wave)를 제공할 수

있는 시험시설이어야 한다.

시스템 검증 시험시설의 설계 기술은 far-field 조건을 만족하는 평면파를 발생시켜주는 기술이다. far-field 조건을 만족시킬 수 있는 시험시설은 초기에 원거리 환경에서 구축되었으나 안테나의 크기와 거리에 따른 공간감쇠, 환경조건 등으로 인하여 더 이상 정밀한 측정이 어렵게 되었다. 이런 문제를 해결하기 위해 실내에서 far-field 조건을 만족하면서 외부전자기 영향을 받지 않는 시험시설을 CATR(Compact Antenna Test Range)이 개발되었다^{[1][2]}.

CATR을 구성하는 반사경 시스템으로 초기에는 반사

*준회원, 단국대학교 대학원 전자전기공학과

**정회원, 단국대학교 전자공학과

접수일자 2010.9.25 수정일자 2010.10.8

게재확정일자 2010.10.15

경 시스템의 중심에 급전흔이 놓이게 되는 축대칭 파라볼릭 반사경이 주로 사용되었으나, 급전흔의 전파 가림(blockage)을 피하기 위해 오프셋 구조가 이용되었다. 그러나 오프셋 구조는 점원(point source)에 의하여 복사된 구면파가 반사경 표면에 있는 점들에 대하여 경로길이가 다른 공간 감쇠로 인하여 진폭 테이퍼^{[3],[4]}가 생성되고, 오프셋 축으로 교차편파가 생성된다. 그러나 복반사경의 경우 주반사경의 축을 기준으로 부반사경의 축을 기울이도록 설계하면 교차편파를 줄일 수가 있다^{[5],[6]}.

본 논문에서는 CATR을 위한 반사경 시스템으로 2장의 파라볼릭 원통형 반사경을 사용하는 파라볼릭 원통형 복반사경 시스템을 구성하고 근접전계를 해석하여 그 특성을 고찰하고자 한다. 이를 위해 구성된 복반사경 시스템을 PO(Physical Optics)를 적용하여 해석할 수 있도록 하고 부반사경과 급전흔의 위치와 관측점 위치에 따른 근접전계를 계산하여 CATR로서의 성능을 비교 검토한다.

II. 파라볼릭 원통형 복반사경의 구조

그림 1은 CATR을 위한 파라볼릭 원통형 복반사경 시스템이다^{[7]-[9]}. 주반사경과 부반사경은 한쪽 면이 포물면으로 되어 있는 원통형 파라볼릭 반사경으로 급전흔으로부터 오는 구면파를 부반사경에서 반사시켜 주반사경의 초점에서 나오는 원통파(cylindrical wave)처럼 변환시켜 준다. 이 원통파는 주반사경에서 다시 반사되어 평면파로 변환된다.

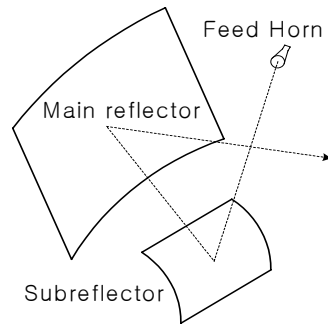
그림 1에서 D_m 은 개구면의 수직길이, h 는 오프셋 높이, F_m 과 F_s 은 각각 주반사경과 부반사경의 초점거리, θ_c 은 최대 빔 각, θ_{cf} 은 급전흔의 경사각, α 는 주반사경의 빔 방향에 대한 부반사경의 기울기를 나타낸다.

주반사경과 부반사경의 포물면 방정식은 각각

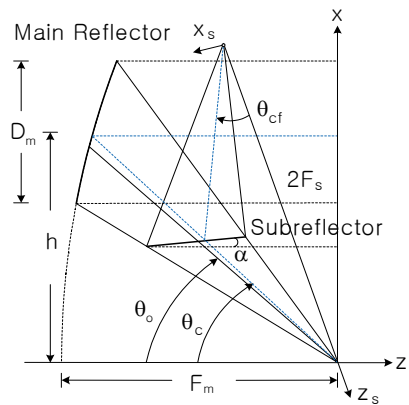
$$x^2 = 4F_m(z - F_m) \quad (1)$$

$$y^2 = 4F_s(\cos\alpha x - \sin\alpha z + F_s) \quad (2)$$

와 같이 나타낼 수 있다.



(a) 복반사경의 구조
(a) Geometry of dual reflector



(b) 복 반사경의 평면도
(b) Projection on symmetric plane of dual reflectors

그림 1. 복반사경의 구조
Fig. 1. Geometry of dual reflector

III. 근접전계 해석

여기서는 파라볼릭 원통형 복반사경에 의한 근접전계를 PO를 이용하여 해석한다.

1. 부반사경의 산란전계

부반사경의 산란전계는 급전흔의 복사전계에 의해 부반사경에 유기된 전류밀도를 경면 상에서 적분함으로써 구해진다. 그림 2는 복반사경 시스템의 부반사경의 좌표계이다. 그림에서 (x_p, y_p, z_p) 는 주반사경으로 향하는 최대빔 축을 z_p 로 하는 좌표계이고, (x_s, y_s, z_s) 와 (x_f, y_f, z_f) 는 각각 부반사경과 급전흔의 좌표계를

나타낸다. r_f 는 급전혼의 중심과 반사경의 한 점 s 와의 거리, θ_f 는 급전 혼의 축 z_f 와 r_f 가 이루는 각, θ_{cf} 는 부반사경 축에 대한 급전 혼의 경사각, θ_t 는 파라볼라 반사경의 회전축과 부반사경의 축이 이루는 각이다. 그림에서 급전 혼의 좌표계 (x_f, y_f, z_f) 와 좌표계 (x_p, y_p, z_p) 와 사이에는 다음의 관계가 있다.

$$\begin{bmatrix} \hat{r}_f \\ \hat{\theta}_f \\ \hat{\phi}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta_f \cos\phi_f & \sin\theta_f \sin\phi_f & \cos\theta_f \\ \cos\theta_f \cos\phi_f & \cos\theta_f \sin\phi_f & -\sin\theta_f \\ -\sin\phi_f & \cos\phi_f & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_{cf} & 0 & -\sin\theta_{cf} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_{cf} & 0 & \cos\theta_{cf} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\cos(\theta_t - \theta_c) & 0 & \sin(\theta_t - \theta_c) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta_t - \theta_c) & 0 & -\cos(\theta_t - \theta_c) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{r}_p \\ \hat{\theta}_p \\ \hat{\phi}_p \end{bmatrix} \quad (3)$$

급전점 O_f 에서 반사경에 입사한 전계에 의한 점 s 에서의 전류밀도는 \mathbf{J}_s 는 물리광학 근사(Physical Optics Approximation)[10]에 의하여

$$\mathbf{J}_s = \frac{2}{\eta} \hat{n}_s \times (\hat{r}_f \times \mathbf{E}_f) \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 η 는 자유공간의 파동임피던스, \mathbf{E}_f 는 급전혼의 전계, \hat{n}_s 는 부반사경에서의 법선 단위벡터 (normal unit vector)

$$\hat{n}_s = \frac{-\frac{\partial z_s}{\partial x_s} \hat{x}_s - \frac{\partial z_s}{\partial y_s} \hat{y}_s + \hat{z}_s}{\sqrt{\left(\frac{\partial z_s}{\partial x_s}\right)^2 + \left(\frac{\partial z_s}{\partial y_s}\right)^2 + 1}} \quad (5)$$

로 주어진다. 식 (5)에 부반사경의 기하학적 구조식

$$z_s = F_s - \frac{y_s^2}{4F_s} \quad (6)$$

을 대입하여 정리하면 법선 단위벡터 \hat{n}_s 는

$$\hat{n}_s = \frac{y_s \hat{y}_s + 2F_s \hat{z}_s}{\sqrt{4F_s^2 + y_s^2}} \quad (7)$$

로서 표현 된다.

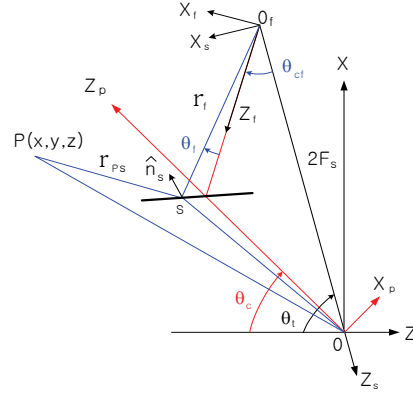


그림 2. 부반사경의 좌표계
Fig. 2. Subreflector coordinates.

부 반사경에 의한 산란전계는 식 (4)에 식 (7)을 대입하여 적분형태로 나타내면

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_p \cdot \hat{\theta}_p \\ \mathbf{E}_p \cdot \hat{\phi}_p \end{bmatrix} = -\frac{j}{\lambda} \int_{-H_s/2}^{H_s/2} \int_{-W_s/2}^{W_s/2} \left(\mathbf{E}_f - \frac{\hat{n}_s \cdot \mathbf{E}_f}{\hat{n}_s \cdot \hat{r}_f} \hat{r}_f \right) \begin{bmatrix} \hat{\theta}_p \\ \hat{\phi}_p \end{bmatrix} \frac{e^{-jk r_{ps}}}{r_{ps}} dx_f dy_f \quad (8)$$

과 같이 주어진다.

여기서, W_s 와 H_s 는 각각 부반사경의 가로와 세로 길이, r_{ps} 는 반사경의 한 점 s 와 관측점 사이의 거리이다.

2. 주반사경의 근접전계

주반사경에 의한 근접전계는 급전혼에 의해 부반사경에 유기되는 전류밀도를 구하고, 이 전류밀도에 의하여 부반사경에서 산란되는 전자계를 구한 다음 이것에 의해 다시 주반사경에 유기되는 전류밀도를 구함으로써 얻어진다. 부반사경에 의한 전계는 식 (8)과 같이 이중적분으로 주어지고 주반사경에 의한 근접전계 또한 이중적분으로 주어진다. 따라서 4중적분이 되어 계산시간이 매우 오래 걸린다. 여기서는 부반사경의 전계를 반사법칙에 의

해 구함으로써 근접전계의 계산시간을 단축한다.

그림 3은 주반사경과 관측점 사이의 좌표계를 나타낸다. 그림 3에서 (x_1, y_1, z_1) 은 개구면의 좌표점이고, (x, y, z) 는 관측점의 좌표계이다.

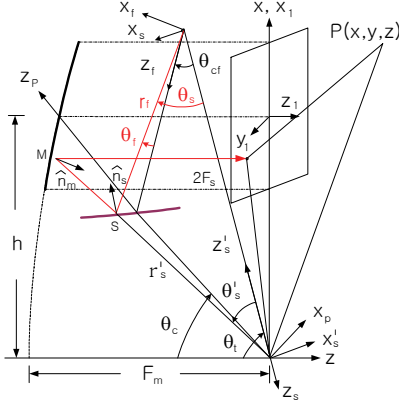


그림 3. 주반사경의 좌표계
Fig 3. Main reflector coordinates.

급전혼의 전계를 E_f 라 할 때 부반사경의 한 점 s에 의한 산란전계는 다음의 반사법칙에 의하여

$$E_p = 2(\hat{n}_s \cdot E_f)\hat{n}_s - E_f \quad (9)$$

로서 표현된다.

여기서 \hat{n}_s 는 부반사경에서의 법선 단위벡터이다.

주반사경 표면에 유기된 전류밀도를 J_m 이라 할 때, 이에 의해 복사되는 근접전계는

$$E(r) = -jw\mu \int_s [J_m G(R) + 1/k^2 \cdot (J_m \cdot \nabla) \nabla G(R)] d\Sigma \quad (10)$$

로서 표현 할 수 있다^[10].

$$G(R) = \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \quad (11)$$

$$(J_m \cdot \nabla) \nabla G(R) = [-k^2(J_m \cdot \hat{R})\hat{R} + \frac{3}{R} (jk + \frac{1}{R})(J_m \cdot \hat{R})\hat{R} - \frac{1}{R}(jk + \frac{1}{R})J_m]G(R) \quad (12)$$

이고, Σ 는 반사경 표면, R 은 주반사경 표면의 한 점과 관측점 사이의 거리이다. 주반사경 표면에 유기되는 전류밀도 J_m 은 물리광학 근사에 의하여

$$J_m = \frac{2}{\eta} \hat{n}_m \times (\hat{r}_p \times E_p) \quad (13)$$

으로 구해진다^[10].

여기서 E_p 는 부반사경에 의한 산란전계이고, \hat{n}_m 은 주반사경의 법선 단위벡터로서

$$\hat{n}_m = -\frac{(x_1 + h)\hat{x}_1 - 2F_m\hat{z}_1}{\sqrt{4F_m^2 + (x_1 + h)^2}} \quad (14)$$

로서 주어진다.

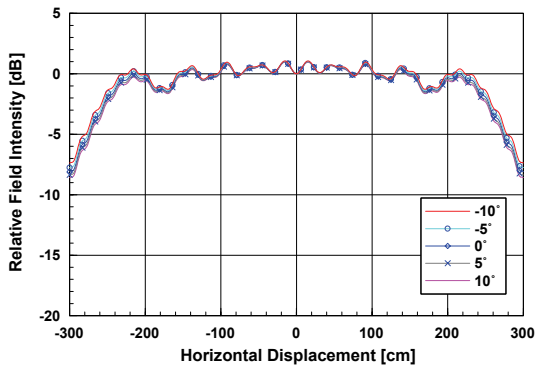
IV. 수치계산 및 검토

여기서는 CATR을 위한 파라볼릭 원통형 복사경 시스템에서 부반사경의 위치의 변화에 따른 근접전계 특성과 관측점 위치에 따른 근접전계 특성을 계산하여 고찰한다.

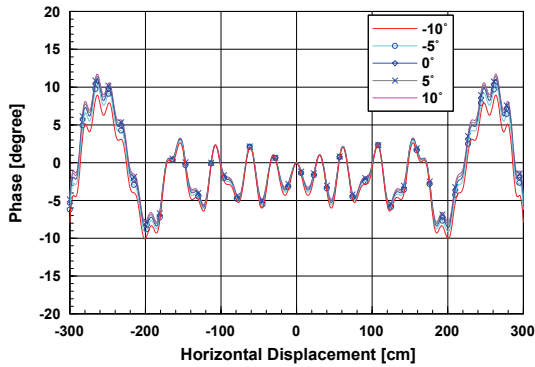
근접전계 특성을 알아보기 위해 개구면의 크기는 680×600 cm이고 주반사경의 오프셋 높이는 2200 cm이며, 주반사경과 부반사경의 초점거리는 각각 1800 cm, 1500 cm로 하였다. 그리고 반사경 시스템의 주파수는 5 GHz 이고, 급전혼은 수직편파로 작동하며, 부 반사경의 테두리에서 2 dB의 ET(Edge Taper)를 갖는 것으로 가정하였다.

1. 복반사경 시스템의 부반사경 위치 변화에 따른 근접 전계

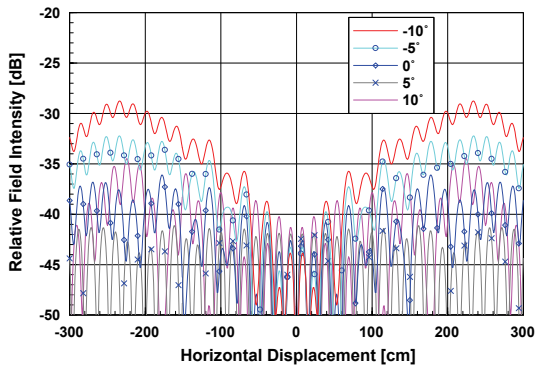
복반사경 시스템에서 각 α 의 변화에 따라 급전혼의 위치, 부반사경의 크기 및 위치 등이 변하게 된다. 여기서는 각 α 를 $-10^\circ \sim 10^\circ$ 사이에서 변화시키면서 근접전계를 계산하여 α 의 변화에 따른 CATR 특성 변화를 고찰한다.



(a) 진폭 패턴
(a) Amplitude patterns



(b) 위상 패턴
(b) Phase patterns



(c) 교차편파 패턴
(c) Cross-pol. patterns

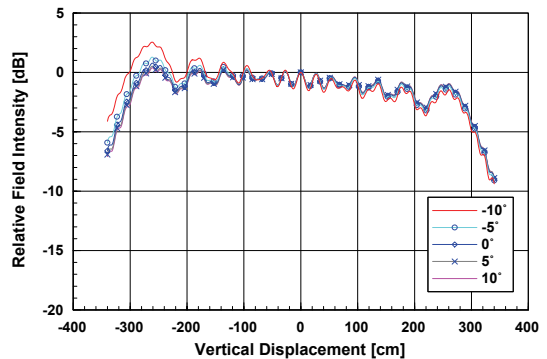
그림 4. 부반사경 위치 변화에 따른 수평 패턴
Fig 4. Horizontal patterns with position variation of the subreflector.

그림 4는 α 변화에 따른 수평 패턴을 나타낸다. 그림 4 (a)의 진폭 테이퍼(리플)은 α 가 -10° 에서 점점 커질수록 중심에서 벗어나면서 진폭테이퍼(리플)이 커지는 것을 볼 수 있다. ± 180 cm구간에서 진폭 테이퍼가 2 dB까지 나타나고 있으나 대부분의 영역에서 진폭 테이퍼(리플)이 1.2 dB(± 1.1 dB)로 나타나고 있다. 그림 4 (b)의 위상 테이퍼(리플)은 ± 200 cm 구간까지 보았을 때 9° ($\pm 6^\circ$)로 거의 동일하게 나타났지만 α 가 10° 에서 작아질수록 중심에서 벗어나면서 조금씩 증가하는 것을 볼 수 있다. 그림 4 (c)의 교차 편파는 α 가 -10° 에서 커질수록 낮게 나타났는데, α 가 $-10^\circ, -5^\circ$ 일 때를 제외하고 -35 dB 이하로 나타났다. 특히, α 가 5° 일 때 -42 dB이하로 가장 좋은 특성을 보여준다.

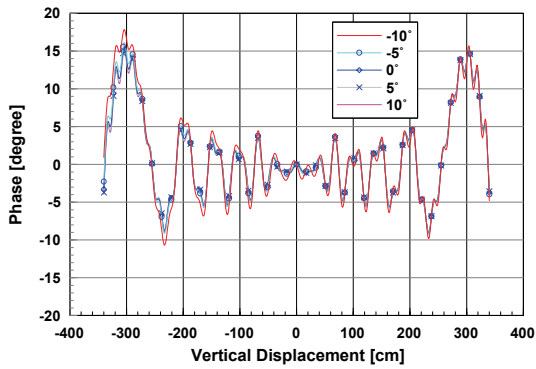
그림 5는 수직 패턴을 나타낸다. 그림 5 (a)의 진폭 테이퍼(리플)은 α 가 -10° 일 때를 제외하고 ± 220 cm 구간에서는 1.8 dB (± 1.6 dB) 로 나타났고 나머지 경우에는 1.2 dB (± 1.0 dB)로 나타났다. 그림 5 (b)의 위상 테이퍼(리플)은 α 가 -10° 일 때 ± 220 cm 구간까지 11° ($\pm 9^\circ$)로 가장 높게 나타났으며 나머지 경우에는 8° ($\pm 6.5^\circ$)로 나타났다.

그림 5 (c)의 교차 편파는 α 가 -10° 에서 점점 커질수록 낮게 낮으며, -10° 와 -5° 를 제외하고는 -35 dB이하로 나타났다.

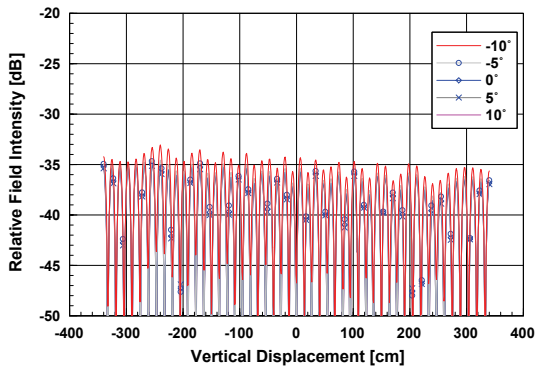
부반사경의 위치 변화에 따른 근접전계를 분석하였을 때 대부분 진폭 패턴과 위상 패턴은 α 에 따라 거의 동일한 특성을 보였으나 교차편파 특성에서는 α 가 5° 일 때 가장 양호한 특성을 보였다.



(a) 진폭 패턴
(a) Amplitude patterns



(b) 위상 패턴
(b) Phase patterns



(c) 교차편파 패턴
(c) Cross-pol. patterns

그림 5. 부반사경 위치 변화에 따른 수직 패턴
Fig 5. Vertical patterns with position variation of the subreflector.

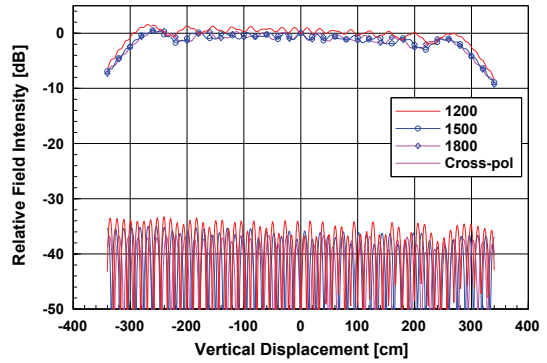
2. 관측점 위치에 따른 근접 전계

관측점 위치에 따른 근접 전계를 알아보기 위해 α 를 5°로 고정시키고 반사경에서 관측점 사이의 거리 z 를 변화시키면서 근접전계를 계산하였다.

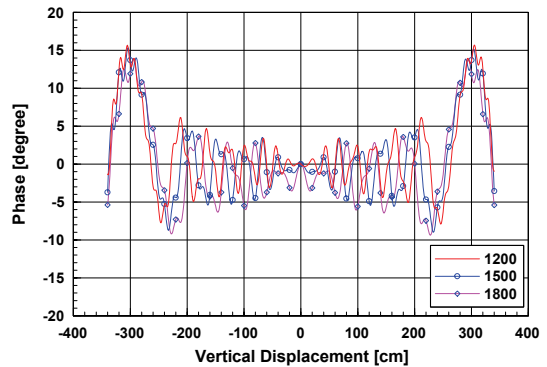
그림 6과 7은 개구면으로부터 관측점 위치에 따른 근접전계 패턴을 보여주고 있다. 개구면으로부터 관측점까지의 거리가 $z = 1200$ cm, 1500 cm, 1800 cm일 때 근접전계의 수직, 수평 패턴을 보여주고 있다.

그림 6에서 $z = 1200$ cm 일 때 진폭 테이퍼가 다른 경우에 비해 1.2 dB로 가장 높게 나타났고 리플은 0.7 dB 정도로 다른 경우와 마찬가지로 비슷하게 나타났다. 교차편파는 $z = 1200$ cm 일 때 -33 dB이하로, 나머지 경우

는 -35 dB이하로 나타났다. 위상 테이퍼(리플)은 ± 220 cm 영역까지 보았을 때, $z = 1800$ cm 일 때 $9^\circ (\pm 6.5^\circ)$ 로 가장 높게 나타났으며 나머지 $z = 1200$ cm일 때 $7^\circ (\pm 6^\circ)$ 로 가장 양호한 특성을 나타냈다.



(a) 진폭 패턴
(a) Amplitude patterns

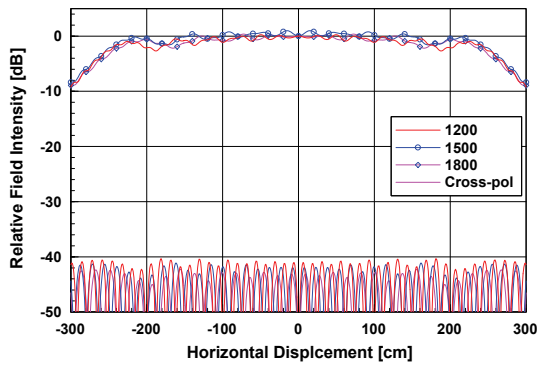


(b) 위상 패턴
(b) Phase patterns

그림 6. 관측점 위치에 따른 수직 패턴
Fig 6. Vertical patterns with distance variation from reflector to test zone.

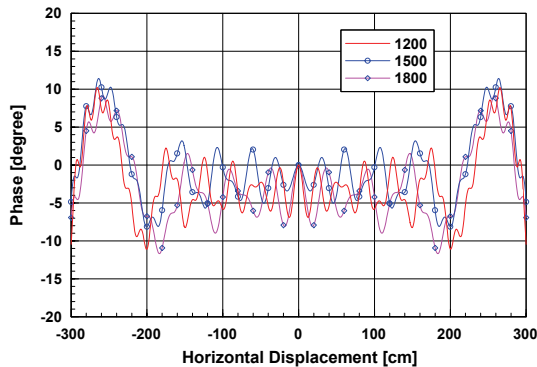
그림 7에서는 $z = 1200$ cm일 때 진폭 테이퍼(리플)이 2.5 dB (± 1.2 dB)로 가장 크게 나타났으며 나머지 경우에는 1.2 dB (± 0.8 dB)로 나타났다. 위상 테이퍼(리플)은 $z = 1800$ cm일 때 $12^\circ (\pm 8^\circ)$ 로 가장 크게 나타났으며 $z = 1500$ cm일 때 $7^\circ (\pm 5^\circ)$ 로 가장 좋은 특성을 나타냈다. 교차편파는 모두 -40 dB이하로 동일한 특성을 보이고 있다.

관측점 위치에 따른 근접 전계에서는 전체적으로 $z = 1500$ cm일 때 가장 양호한 특성을 보여주고 있다.



(a) 진폭 패턴

(a) Amplitude patterns



(b) 위상 패턴

(b) Phase patterns

그림 7. 관측점 위치에 따른 수평 패턴

Fig 7. Horizontal patterns with distance variation from reflector to test zone.

V. 결론

본 논문에서는 CATR을 위한 반사경 시스템으로 파라볼릭 복 반사경 시스템을 구성하여 부반사경 위치와 관측점 위치에 따른 근접 전계를 계산하여 비교하였다. 반사경 시스템의 부반사경 위치 변화에 따른 근접전계를 고찰한 결과 α 가 5° 일 때 수평 패턴에서는 진폭 테이퍼(리플)은 1.2 dB(± 1.1 dB)이고 교차편과는 -42 dB이하로 수직 패턴에서는 1.2 dB (± 1.0 dB)이고 교차편과는 -35dB이하로 가장 좋은 특성을 보였다. 관측점 위치에 따른 근접전계는 관측점 위치가 $z=1500$ cm일 때 비교적 양호한 특성을 갖는 것으로 나타났다.

본 논문의 내용은 CATR을 위한 복반사경 시스템을 설계할 때 요구되는 시험영역의 조건을 만족시키는 최적의 반사경시스템을 설계하는데 이용될 수 있을 것으로 생각된다.

참고 문헌

- [1] L. H. Hemming, *Electromagnetic Anechoic Chambers - A fundamental design and specification guide*, John Wiley & Sons, Inc. 2002.
- [2] W. H. Emerson, "Electromagnetic wave absorbers and anechoic chambers through the years", *IEEE Trans. Antennas and Prop.*, AP-21, No. 4, pp. 484-490, July 1973.
- [3] W. A. Wong, "On the equivalent parabola technique to predict the performance characteristics of a Cassegrain system with an offset feed", *IEEE Trans. Antennas and Prop.*, AP-21, No. 3, pp. 335-339, May 1973.
- [4] W. V. T. Rush, A. Prata, Y. Rahmat-Samii, and R.A. Shore, "Derivation and application of the equivalent paraboloid for classical offset Cassegrain and Gregorian antennas", *IEEE Trans. Antennas and Prop.*, AP-38, pp. 1141-1149, Aug. 1990.
- [5] Y. Mizugutch and M. Akagawa, and H. Yokoi, "Offset dual reflector antenna", in *Dig. IEEE Int. Symp. Antennas Propagat.*, 1976.
- [6] H. Tannaka and M. Mizusawa, "Elimination of cross-polarization in offset dual reflector antennas", *Elec. and Comm. in Japan*, Vol. 58-B, No. 12, pp. 71-78, 1975.
- [7] M. S. A. Sanad and L. Shafai, "Performance and design procedure of dual parabolic cylindrical antennas", *IEEE trans, Antennas propagat.*, Vol. 36, pp. 331-338, March 1988.
- [8] M. S. A. Sanad and L. Shafai, "Dual parabolic cylindrical reflectors employed as a compact range", *IEEE Trans. on Antennas Propagat.*, Vol.

38, No. 6, pp. 814-822, June 1990.

- [9] M. S. A. Sanad and L. Shafai, "Design procedure for a compact range using dual parabolic cylindrical reflectors", Antenna Measurement Techniques Symposium, pp. 137-142, ottawa, Canada, Sept. 1986.
- [10] Y. T. Lo and S. W. Lee, Antenna Handbook, ch. 15, New York, Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1988.

※ 본 연구는 2009학년도 단국대학교 대학연구비 지원으로 연구되었음.

저자 소개

박 재 현(준회원)



- 1997년 : 단국대학교 전자공학과 (공학사)
- 1999년 : 단국대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2009년 : 단국대학교 대학원 전자전기공학과 박사과정

<주관심분야 : 안테나 및 전파전파>

최 학 근(정회원)



- 1979년 : 고려대학교 전자공학과 (공학사)
- 1981년 : 고려대학교 전자공학과 (공학석사)
- 1988년 : 고려대학교 전자공학과 (공학박사)
- 1991년~현재 : 단국대학교 전자공학과

교수

- 2006년~현재 : 단국대학교 공학교육혁신센터장
- 2010년~현재 : 단국대학교 공학대학장
- 1989년~현재 : (주) 하이게인 안테나 기술고문

<주관심분야 : 안테나 및 전파전파, 마이크로파회로>

정 지 훈(준회원)



- 2007년 : 단국대학교 전자공학과 (공학사)
- 2009년 : 단국대학교 대학원 전자전기공학과 (공학석사)

<주관심분야 : 안테나 및 전파전파>