

빔 웨이브가이드 안테나의 급전을 위한 원뿔형 컬러게이트 혼의 특성 해석

(An Analysis of the Characteristics of Corrugated Horn for Feeding Beam-waveguide Antenna)

白京勳*, 李相尙*

(Kyung Hoon Baek and Sang Seol Lee)

要 約

C밴드 영역에서 동작하는 위성통신 지구국용 원뿔형 컬러게이트 혼 안테나의 특성을 해석하고 복사 패턴을 측정한다.

혼 어퍼춰에서 평형 하이브리드 모드가 형성되기 위한 컬러게이트의 특성 방정식을 구하고 등가원리에 의하여 얻은 어퍼춰 적분식으로 부터 Fresnel 영역에서의 복사패턴을 계산한다. 주파수 3.85GHz와 6.18GHz에 대한 복사패턴을 계산하고 실험치와 비교하여 타당성을 입증한다.

Abstract

The characteristics of the corrugated conical horn antenna for the satellite communication earth station operating at C band is analyzed and its radiation patterns is measured.

We obtain the characteristic equations of corrugated horn in the condition that the balanced hybrid mode is formed on horn aperture and calculate radiation patterns in the Fresnel region from the aperture integral expressions obtained by the equivalence principle. The radiation patterns which are calculated for the frequency of 3.85GHz and 6.18GHz are well agreed with the measured data.

I. 서 론

혼 안테나는 구조가 간단하고 혼의 길이와 각도에 따라 쉽게 빔 패턴(Beam Pattern)을 변화시킬 수 있는 장점을 갖고 있기 때문에 캐세그레인(Cassegrain) 안테나 혹은 그레고리안(Gregorian) 안테나 등 대형 안테나의 급전용으로 널리 사용되고 있다.

일반적인 혼 안테나는 제작과 설계가 용이한 반면 부엽준위(Side lobe level)가 높고 어퍼춰 효율(Aperture Efficiency)이 낮으며 또한 대역폭이 좁고 수직과 수평 패턴이 비대칭인 단점이 있다. 컬러게이트 혼 안테나는 이러한 단점을 보완하는 안테나로써 특히 회절에 의한 스피로버(Spillover)가 낮을 뿐만 아니라 주편파(Co-Polarized wave) 성분과 교차편파(Cross-Polarized wave) 성분의 비가 크고, 사용 대역폭이 넓기 때문에 2중 편파와 송·수신 기능을 동시에 필요로 하는 위성통신용 안테나의 급전부로 널리 사용되고 있다.

*正會員, 漢陽大學校 電子通信工學科
(Dept. of Telecom. Eng., Hanyang Univ.)
接受日字: 1990年 1月 19日

컬러게이트 혼 안테나는 1960년 초기에 미국과 오스트레일리아에서 전파 천문학 시스템용 안테나의 성능을 개선하기 위하여 최초로 연구되었다.²⁻⁴ Kay는 혼각(Horn semi-flare angle)이 큰 경우에 혼의 복사패턴이 대칭이며 부엽준위가 낮고 옥타브 밴드폭(Octave Bandwidth)특성을 갖는 컬러게이트 혼을 연구 하였고² Minnett와 Rumsey는 원뿔형 컬러게이트 혼 안테나가 포물면(Parabola)안테나의 급전용으로 사용될 수 있음을 보여 주었다.^{3e} 또한 Clarricots와 Saha 등은 혼 내부의 전자계를 하이브리드(Hybrid) 모드로 해석하는 방법을 제시하였다.^{1f}

이 연구에서는 위성통신용 빔 웨이브 가이드(Beam waveguide)안테나의 급전용으로 사용하는 원뿔형 컬러게이트 혼 안테나의 특성을 연구한다. Helmholtz 방정식으로부터 컬러게이트 혼 내부의 모드함수를 구하여 전자계 성분을 유도하고 경계조건을 적용하여 혼 내부의 전파 특성식을 구한다. 또한 혼 어퍼취면에서 평형 하이브리드 모드가 형성되도록 특정방정식을 세우고 등가원리를 적용하여 Fresnel 영역에서의 복사패턴을 구한다. C밴드에서 동작하는 안테나를 제작하고 실험하여 이론적인 특성결과와 비교 검토한다.

II. 혼 내부의 전파 특성

컬러게이트 혼 안테나 내부의 전파특성은 혼각(Horn semi-flare angle)이 클 경우와 작을 경우로 나누어서 해석되고 있다. 혼각이 클 경우는 구좌표의 하이브리드 모드이론이나 모드확장(modal expansion)이론이 적용된다. 그러나 급전용으로 사용하는 혼은 블라킹(Blocking)에 의한 손실을 감소시켜야 하므로 가급적 혼각을 작게하여야 한다. 혼각이 8°이하일 경우, 원뿔형 컬러게이트 혼은 원통(cylindrical) 모드 이론을 이용하여 해석할 수 있다.^{1a}

그림 1은 컬러게이트 원형 도파관의 구조를 나타내는데 이와 같은 구조에서는 $\rho < r_1$ 영역과 $r_1 < \rho < r_0$

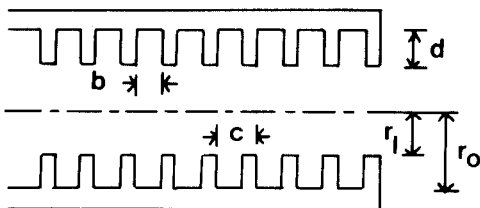


그림 1. 컬러게이트 원형 도파관의 구조
Fig. 1. Structure of corrugated circular waveguide.

영역의 전자계가 다르게 존재하므로 다음과 같은 경계조건을 적용하여 전자계식을 구한다. $\rho < r_1$ 영역의 경우 혼 내부에는 공간조화(space harmonics) 전자계 모드, 즉 하이브리드 모드가 존재하게 되므로 TM모드와 TE모드의 합으로 전자계식을 표현할 수 있다. 그러므로 $\rho < r_1$ 영역에서는 파가 진행하는 방향의 전계 E_z 및 자계 H_z 성분을 모두 갖는 하이브리드 모드가 형성되며 각각의 전자계성분은 다음과 같이 계산된다.^{1f}

$$E_z = a_m J_m(k\rho) e^{jm\phi} \tag{1-a}$$

$$H_z = -a_m j \bar{\Lambda} y_0 J_m(k\rho) e^{jm\phi} \tag{1-b}$$

$$E_\rho = -a_m j \frac{k}{K} \frac{J_m(k\rho)}{k\rho} \left[\bar{\beta} \bar{\Lambda} (k\rho) + m\Lambda \right] e^{jm\phi} \tag{1-c}$$

$$H_\phi = -a_m j \frac{k}{K} y_0 \frac{J_m(k\rho)}{k\rho} \left[\beta \Lambda F_m(k\rho) + m \right] e^{jm\phi} \tag{1-d}$$

$$E_\phi = a_m \frac{k}{K} \frac{J_m(k\rho)}{k\rho} \left[m \bar{\beta} + \bar{\Lambda} F_m(k\rho) \right] e^{jm\phi} \tag{1-e}$$

$$H_\rho = -a_m j \frac{k}{K} y_0 \frac{J_m(k\rho)}{k\rho} \left[m \bar{\beta} \bar{\Lambda} + F_m(k\rho) \right] e^{jm\phi} \tag{1-f}$$

여기서

$$a_m = \frac{k^2}{j\omega\epsilon} e^{-j\beta z}, F_m(k\rho) = K\rho \frac{J_m'(k\rho)}{J_m(k\rho)}, K^2 = k^2 - \beta^2 \tag{2}$$

$$k^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0, k\bar{\beta} = \beta, -jy_0 \bar{\Lambda} = \frac{H_z}{E_z}, y_0 = (\epsilon_0/\mu_0)^{1/2}$$

이며 $J_m'(k\rho)$ 는 m차 1종 Bessel함수의 미분을 나타낸 것이다.

$r_1 < \rho < r_0$ 영역의 경우, $\rho = r_0$ 일때 $E_\phi = 0, E_z = 0$ 의 경계조건이 만족되어야 하며 컬러게이트 혼의 분리간격이 파장에 비해 좁고 폭이 얇을 때는 하이브리드 모드가 아니라 TM모드의 정재파가 슬롯(Slot)내부에 존재하게 된다. 그러므로 $r_1 < \rho < r_0$ 에서 전자계는

$$E_z = \frac{a_m'}{Y_m(kr_0)} [J_m(k\rho) Y_m(kr_0) - Y_m(k\rho) J_m(kr_0)] \tag{3-a}$$

$$H_\phi = -jY_0 \frac{-d'_m}{Y_m(kr_0)} [J_m'(k\rho) Y_m(kr_0) - Y_m'(k\rho) J_m(kr_0)] \tag{3-b}$$

과 같이 계산된다. 여기서 $Y_m(k\rho)$ 및 $Y_m'(k\rho)$ 는 m차 2종 Bessel함수 및 그의 미분형이다.

컬러게이트 원형 도파관의 전파상수는 $\rho < r_1$ 영역에서의 전자계방정식과 $r_1 < \rho < r_0$ 영역에서의 전자계방정식으로 부터 $\rho = r_1$ 점의 어드미턴스 (Admittance)가 서로 정합되는 조건으로 부터 구해진다. 따라서 식(1)과 식(3)으로부터 도파관 전파상수 $\bar{\beta}$ 에 대한 특성방정식을 얻을 수 있다.

$$F_m(X_1) - \frac{(m\bar{\beta})^2}{F_m(X_1)} = \left[\frac{k}{k} \right]^2 S_m(X_1', X_0') \quad (4)$$

$$S_m(X_1', X_0') = X_1' \frac{J_m'(X_1')Y_m(X_0') - Y_m'(X_1')J_m(X_0')}{J_m(X_1')Y_m(X_0') - Y_m(X_1')J_m(X_0')} \quad (5)$$

여기서 $X_1 = Kr_1, X_1' = kr_1, X_0' = kr_0$ 이며, 식(5)는 전파특성을 결정짓는 조건방정식이다. 특히 컬러게이트 간격이 파장에 비해 매우 작으면 간격 사이의 슬롯(Slot)에서는 TM모드만 존재하게 된다. 이 경우 $\rho = r_1$ 에서 $E_\phi = 0$ 의 경계조건이 만족되어야 하므로 식(1)로부터

$$m\bar{\beta} = -\bar{A} F_m(kr_1) \quad (6)$$

의 관계가 유지된다. 식(4)와 식(5)로 부터 $S_m(X_1', X_0') = 0$ 일 때 관내 진행방향의 전계와 자계의 비 $\bar{A} = \mp 1$ 이 된다. $|\bar{A}| = 1$ 이 되는 $S_m(X_1', X_0') = 0$ 조건은 $y_0 |E_z| = |H_z|$ 가 되는 조건으로서 도파관 내에서 평형 하이브리드 모드가 존재하게 된다. $\bar{A} = -1$ 일 때는 EH모드가 형성된다. $S_m(X_1', X_0') = \infty$ 가 되면 식(4)로부터 $F_m(X_1) = \infty$ 로 되고 결국 $k = \infty$ 및 $\beta = j\infty$ 가 되므로써 관내에는 전자파가 존재하지 못하게

된다, 식(4)에서 r_1/r_0 를 변수로 하였을 때 $S_m(X_1', X_0')$ 의 조건을 만족하는 kr_1 값을 계산하면 그림 2와 같다.

그림 2는 기본모드인 $m=1$ 에서 컬러게이트 구조에 따른 전자특성을 나타낸다. 여기서 a는 관내 전파상수가 자유공간에서의 전파상수와 같아지는 조건이며, b는 HE모드, c는 차단 및 d는 EH모드 발생조건을 나타낸 것이다. 그러므로 컬러게이트 원형 도파관에 평형 하이브리드 모드를 형성시키기 위해서는 $S_m = 0$ 되는 조건의 식(5)와 $|\bar{A}| = 1$ 이 되는 조건의 식(6)이 동시에 만족되는 컬러게이트 구조 r_1, r_0 를 선택하여야 한다. 특히 그림 2에서 $S_1 = 0$ 가 만족되는 b의 경우 특정한 r_1/r_0 값을 선택해서 $\bar{A} \neq 1$ 로 되면, 고차의 HE모드가 발생하게 되므로 유의하여야 한다.

III. 복사패턴 계산

빔 웨이브가이드 안테나의 급전으로 사용되는 컬러게이트 혼의 복사전계 계산은 빔 웨이브가이드의 반사판이 혼으로부터 Fresnel 영역에 있기 때문에 Fresnel 영역의 복사전계를 구하여야 한다. 이 논문에서는 Fresnel 영역의 복사전계를 구하기 위하여 Vector Potential에 의한 등가원리를 이용한다. 혼 어퍼취면에서의 전자계식을 등가전류밀도 $\mathbf{J}_s (= \hat{n} \times \mathbf{H}_a)$ 와 등가자류밀도 $\mathbf{M}_s (= \mathbf{E}_a \times \hat{n})$ 로 대치하고, 이 등가전원으로부터 자계 벡터포텐셜 \mathbf{A} 및 전자 벡터포텐셜 \mathbf{F} 를 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{F} \end{bmatrix} = \iint_{sa} \frac{\begin{bmatrix} \mathbf{J}_s \\ \mathbf{M}_s \end{bmatrix} \exp(-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|)}{4\pi|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} ds \quad (7)$$

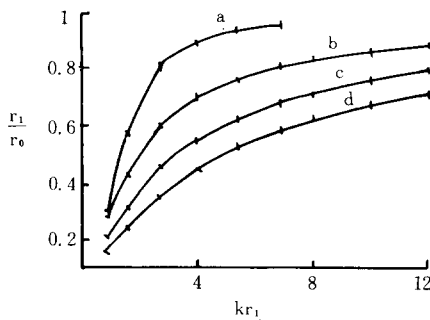
여기서 \hat{n} 은 경계면의 외향 단위법선 벡터이며, \mathbf{r} 은 관찰점 벡터 (field point vector), \mathbf{r}' 은 파원점 벡터 (source point vector)이고 sa 는 혼 어퍼취면이다. 식(7)에서 파원점은 원통좌표 (ρ, ϕ, z) 이고 관찰점은 구좌표 (r, θ, ϕ) 로 표현되며 Fresnel영역으로 근사화한 후 Maxwell 방정식으로 부터 유도되는 복사 전계식⁽⁸⁾

$$\mathbf{E} = -\nabla \times \mathbf{F} + \frac{1}{j\omega\epsilon} \nabla \times \nabla \times \mathbf{A} \quad (8)$$

에 대입하므로써 복사전계를 구한다. 식(8)에 의하여 E_θ, E_ϕ 를 계산하면

$$E_\theta \doteq -\frac{1}{r \sin\theta} \frac{\partial}{\partial \phi} Fr - jkF_\phi - jk\eta A_\theta - \eta \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} Ar \quad (9-a)$$

$$E_\phi \doteq jkF_\theta + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} Fr - jk\eta A_\phi - \eta \frac{1}{r \sin\theta} \frac{\partial}{\partial \phi} Ar \quad (9-b)$$



a: $s_1(x_1, x_0) = -1/2(kr_1)$ c: $s_1(x_1, x_0) = \infty$
 b: $s_1(x_1, x_0) = 0$ d: $s_1(x_1, x_0) = 0$

그림 2. 컬러게이트 도파관의 전파특성 곡선
 Fig. 2. Propagation characteristics curve of corrugated waveguide.

로 된다. 여기서 η 는 자유공간의 고유임피던스이며 혼으로부터 빔 웨이브가이드의 반사판까지의 거리 r 은 수직 좌상이므로 $1/r^3$ 항은 무시하였다.

혼 어퍼취면에서 전계가 x 방향으로 편파되었을 경우 복사전계의 주편파성분인 $E_{\theta-co-pol}$ 과 교차편파 성분인 $E_{\theta-x-pol}$ 은 다음 식으로 부터 구해진다!!

$$E_{\theta-co-pol} = E_{\theta} \cos\phi - E_{\phi} \sin\phi \tag{10-a}$$

$$E_{\theta-x-pol} = E_{\theta} \sin\phi + E_{\phi} \cos\phi \tag{10-b}$$

IV. 계산결과 및 고찰

평형 하이브리드모드를 갖는 컬러게이트 혼 치수를 설계하고 이로부터 복사패턴을 계산하여 설측치와 비교한다. 그림 3은 컬러게이트 혼 안테나의 단면을 나타내며 식(6)에서 $S_m(X_1', X_0') = 0$ 와 $|\bar{A}| = 1$ 이 되도록 하기위하여 그림 3의 혼 치수를 구하면 다음 표 1과 같다.

표 1. 컬러게이트 혼의 치수 데이터

Table 1. Dimension data of corrugated horn.

표시	치 수	표시	치 수
a	41.91	d	2.083
t	0.2848	w	1.22
P	1.423	θ	5.9°
R	407.1		

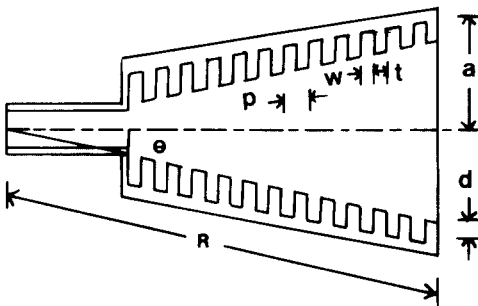


그림 3. 컬러게이트 혼 안테나의 단면
Fig. 3. View of corrugated horn Antenna.

표1의 치수는 식(4)~식(6)에 의해 계산된 결과이다. 혼의 위상중심(Phase Center)으로부터 빔웨이브가이드 반사판까지의 거리는 5.842m이고 반사판의 길이는 2.91m이므로 혼각 $\theta = 5.9^\circ$, 혼의 직경은 0.842m

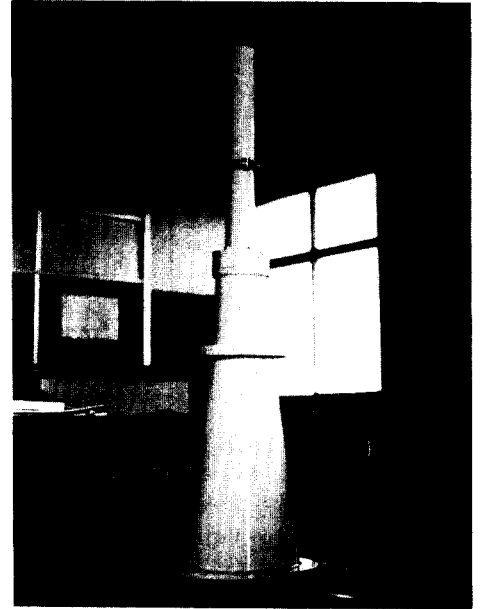


그림 4. 제작된 컬러게이트 혼 안테나의 사진
Fig. 4. Photograph of fabricated corrugated horn antenna.

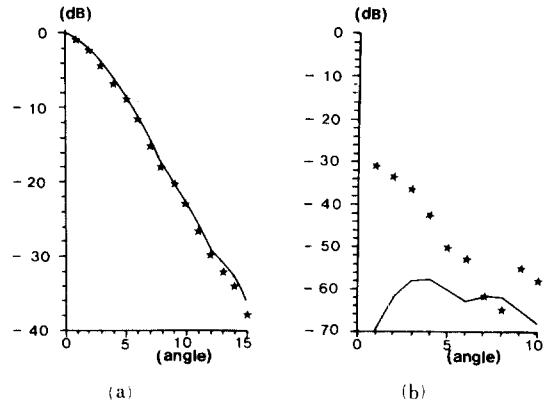


그림 5. 주파수 3.85GHz에서의 복사패턴
(a) 주편파 복사패턴
(b) 교차편파 복사패턴

Fig. 5. Radiation pattern for 3.85GHz.
(a) co-polarized wave pattern.
(b) cross-polarized wave pattern.

로 설계된다. 또한 혼의 목(throat)부근에서 낮은 V. S. W. R를 얻기위하여 슬랄깊이 $d = \lambda/2$, 어퍼취면에서는 $|\bar{A}| = 1$ 인 평형 하이브리드 조건을 얻기위하여 $d = \lambda/4$ 가 되도록 하며, 그 사이의 슬랄깊이는 $\lambda/2 \sim \lambda/4$ 까지 선형적으로 변화시킨다. 그림 4는 이상의

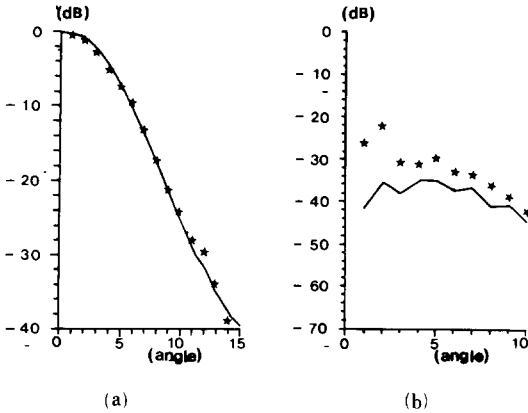


그림 6. 주파수 6.18GHz에서의 복사패턴
 (a) 주편파 복사패턴
 (b) 교차편파 복사패턴
 Fig. 6. Radiation pattern for 6.18GHz.
 (a) co-polarized wave pattern,
 (b) cross-polarized wave pattern.

결과에의해 제작된 컬러게이트 혼 안테나이다. 이때 $Kr_1=2.404$, 전파상수 $\beta=5.73613$, $\bar{\beta}=0.99713$ 및 $\bar{A}=0.9991$ 이 되므로 혼 어퍼춰에서는 거의 완전한 HE_{11} 모드가 발생함을 알 수 있다.

이 연구에서는 최저주파수 3.62GHz에서 동작하는 혼의 치수를 계산하였다. 그 이유는 사용주파수 밴드 중 가장 낮은 주파수에서 컬러게이트의 깊이와 간격을 구하면 높은 주파수에서도 컬러게이트 혼 내부가 용량성으로 되기 때문에 혼 내부에 평형 하이브리드의 전자파를 유지시킬 수 있기 때문이다.

그림 5와 그림 6은 주편파 성분과 교차편파 성분의 복사패턴을 $\phi=45^\circ$ 인 평면상에서 나타낸 그림으로 실선은 본 연구의 계산결과이며 ★표는 실험치를 나타낸다. 이때 반치각(half-power beamwidth)은 주파수 3.85GHz와 6.18GHz일 때 각각 5.0° 및 6.4° 가 됨을 보이며 교차편파성분의 최대치는 각각 -78.4dB 및 -35.9dB 이 됨을 나타내고 있다. 주파수가 높아질수록 반치각이 넓어지고 교차편파성분이 증가한다. 이는 혼 어퍼춰면에서 하이브리드 모드가 평형상태를 약간 벗어나기 때문이다. 주편파 복사패턴의 경우 계산치와 실험치는 잘 일치하나 교차편파의 경우는 다소 오차가 발생하는데 이는 컬러게이트 혼 제작시 발생된 가공오차로 생각된다.

V. 결 론

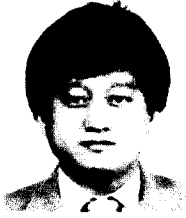
위성통신 지구국용 안테나 시스템의 급전용으로 사용되는 원뿔형 컬러게이트 혼 안테나의 전파특성과 복사패턴을 계산하였다.

어퍼춰 면에서 평형 하이브리드 모드가 형성되는 특정방정식을 유도하고 등가원리를 이용하여 Fresnel 영역에서의 복사패턴식을 구하였다. 결과식을 이용하여 컬러게이트 혼을 제작하고 복사패턴을 측정하여 이론적인 계산결과와 비교하였다. 비교결과 주파수 3.85GHz와 6.42GHz에서 계산된 수직과 수평 반치각은 각각 평균 6.0° 및 5.8° 가 되었고 주편파와 교차편파의 비가 최대 -35.2dB 로써 실측치와 잘 일치함을 확인하였다. 또한 컬러게이트 혼의 전자계가 넓은 주파수 영역에서 완전한 평형 하이브리드 모드가 존재할 수 있는 컬러게이트의 구조에 대하여는 새로운 연구과제로 여겨진다.

參 考 文 獻

- [1] P.J.B. Clarricoats and P.K. Saha, "Propagation and radiation behavior of corrugated feeds," *Proc. Inst. Elec. Eng.*, vol. 118, pp. 1167-1176, Sept., 1971.
- [2] A.F. Kay, "The scalar feed," AFCRL Report Rep 64-347, AD601609, May, 1964.
- [3] V.H. Rumsey, "Horn antenna with uniform power pattern around their axes," *IEEE Trans.*, vol. AP-14, pp. 656-658, Sept., 1966.
- [4] H.C. Minnett and B.M. Thomas, "A method of synthesizing radiation pattern with axial symmetry," *IEEE Trans.*, vol. AP-14, pp. 654-656, Sept., 1966.
- [5] T.S. Chu and W.E. Legg, "Gain of corrugated conical horns," *IEEE Trans.*, vol. AP-30, no. 4, pp. 698-703, July, 1982.
- [6] Graeme L. James, "TE₁₁ to HE₁₁ Mode converters for small angle corrugated horns," *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, vol. AP-30, no. 6, Nov., 1982.
- [7] B.M. Thomas, G.L. James, K.J. Greene, "Design of wide-band corrugated conical horns for cassegrain antenna," *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, vol. AP-34, no. 6, pp. 750-757, June, 1986.
- [8] R.F. Harrington, "Time harmonic electromagnetic fields," *McGraw-hill, Chap.*, 3-5, 1961.

著 者 紹 介



白 京 勳(正會員)

1960年 8月 29日生. 1987年 2月
제주대학교 통신공학과 졸업(공학사). 1989年 2月 한양대학교 대학원 전자통신공학과 졸업(공학석사). 1989年 3月~현재 한양대학교 대학원 전자통신공학과 (박사과정). 1987年 3月~1988年 2月 한양대학교 전자통신공학과 조교. 1989年 12月~현재 제주대학교 통신공학과 조교. 주관심분야는 안테나 공학, 전자장수치해석 및 EMI 등임.

李 相 高 (正會員) 第27卷 第3號 參照

현재 한양대학교 전자통신공학과 교수