

위성탑재용 안테나 설계기술에 관한 연구

(A Study on a Design Technique of Satellite Payroad Antennas)

이영훈*·박한규*·김은수**/*연세대학교, **광운대학교

□ 차 례 □

I. 서론
II. 이론

III. 결론

I. 서론

1965년 4월 세계 최초의 상업 위성인 INTELSAT 1호(일명 Early Bird)가 발사된 이후 통신 위성은 초기에는 대부분 국제간의 전화, 데이터 통신 및 TV 배분 등에 활용되었으나, 위성 및 통신 기술의 발전으로 인한 위성 수명의 증대, 통신 회선당 가격의 저하와 위성 통신이 지나는 광역성, 동보성 등으로 인하여 인접 지역 국가간(regional) 혹은 자국내(domestic) 통신용으로 위성의 수요가 급격히 증가하고 있다.[1][2]

이처럼 각국에서 경쟁적으로 통신 위성을 보유하게 됨에 따라 인접 지역간의 전파 간섭으로 인한 영향을 최소화하기 위하여 위성 안테나의 방사 패턴(radiation pattern)은 물론 빔의 방향(beam pointing)을 엄격하게 규제하고 있다. 이에 따라 선택된 지역(coverage region)내에 빔의 방사 전력을 최대화시키고, 인접 지역에 미치는 전력을 최소화시키는 형상 빔(shaped beam)의 설계가 필요하게 되었다.[3]

빔을 형상화하는 방법으로 반사판 변형법(shaped reflector) 및 피드 배열법(feed arrays)이 주로 사용되고 있다.[4] 반사판 변형법[5]은 반사판 측면(profile)의 변이로 인한 위상 분포를 변형하여 빔을 형상화시키는 방법이며, 피드 배열법은 개별의 피드에 의하여 형성되는 작은 폭의 빔을 합성(superposition)하여 빔의 등고(contour)를 얻는 방법으로서, 선택된 지역에 최대의 방사 전력을 얻을 수 있으며 인접 지역에서는 방사 전력이 급격히 떨어지게 되는 장점이 있다. 또한 코히어런트(coherent)하게 여겨진 신호를 빔 형상 회로를 통하여 진폭과 위상을 조정함으로써 빔 형성에 유동성을 갖게 되어 주로 이 방식이 사용되고 있다.[6]

본 논문에서는 반사판의 방사 적분이 수행되기 전단계인 반사판 표면에서의 전류 분포 계산 단계에서 좌표 변환을 이용하여 개별 피드에 의한 1차적인 전자계 패턴을 합성하므로써 방사 적분을 한번만 수행하는 1차 전자계 합성 이론을 제안하였으며, 또한 이론의 전개를 위한 반사판 안

테나 해석은 피드 배열의 경우처럼 반사판 표면의 넓은 전류 분포 및 넓은 관측각에 대하여 쉽게 수렴되고 정확도가 높은 자코비 베셀 급수 전개(Jacobi Bessel series expansion)를 이용한 해석법을 사용하였다. 또한 본 논문에서 제안한 방법의 유용성을 입증하기 위하여 피라미드 혼(pyramidal horn)을 피드로 사용하여 수치 해석하였으며 이를 실험치와 비교, 분석하고자 한다.

II. 이 론

1. 물리광학 법칙을 이용한 반사판 안테나

해석

반사판에 의하여 산란되는 벡터 방사 전자계를 예측하는 방법으로 회절 기하학 이론(geometrical theory of diffraction), 개구면 전자계법(aperture field method) 및 물리 광학적 유도 전류법(physical optics induced method) 등이 사용된다. 본 논문에서 사용한 물리 광학적 유도 전류법은 반사판 표면에 유도되는 등가 전류에 대하여 개구면 이론을 적용하여 예측하는 방법으로써, 이들 방법은 주로브 및 주로브 근처의 4~5개의 부로브에서는 정확하게 예측할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 반사판 전면 방향의 주로브 및 넓은 부로브대하여 해석이 정확한 물리 광학적 유도 전류법을 사용하여 해석하기로 한다.

피드에 의하여 반사판 표면에 유도된 전류는 물리 광학적 근사 이론에 의하여 아래 식으로 나타난다.

$$\vec{J}(r') = 2\hat{n} \times \vec{H}_s(r') \quad (1)$$

식 (1)에서 $\vec{H}_s(r')$ 는 피드에 의하여 반사판 표면에 형성된 자계이다. 원거리에서 전계 및 자계는

$$\vec{E} = -jk\eta \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} (T_\theta \hat{\theta} + T_\phi \hat{\phi}) + O(r^{-2}) \quad (2)$$

$$\vec{H} = -jk \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} (T_\theta \hat{\theta} - T_\phi \hat{\phi}) + O(r^{-2}) \quad (3)$$

가 된다. 여기서,

$$\vec{T}(\theta, \phi) = \int_{\Sigma} \vec{J}(r') e^{jkr' \cdot \hat{r}} ds' \quad (4)$$

으로 물리 광학적 방사 적분식(physical optics radiation integral)을 구성할 수 있다.

2. 피드 배열 반사판 안테나 해석

피드가 배열되어 있을 경우 좌표 변환하여 반사판 표면에서의 자계를 구할 수 있다. 즉, 개별 피드 좌표계를 공통의 중심 좌표계로 변환하며, 이 좌표계에서 개별 피드에 의한 전자계를 합성할 경우 전체 배열의 근거리 혹은 원거리 영역 등 어디서든지 전체 전자계의 계산이 가능해지며, 이렇게 구한 전체 자계로 물리 광학적 근사 이론에 의하여 반사판 표면에서의 전류를 구할 수 있다.

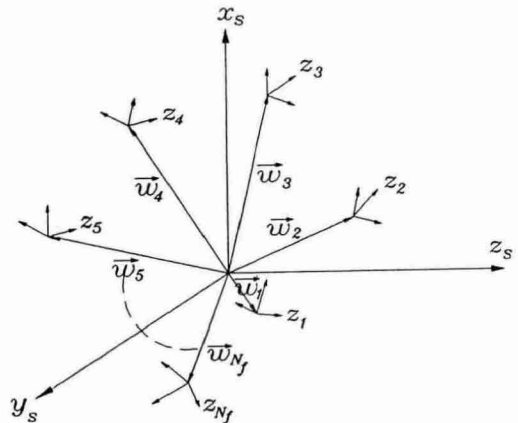


그림 1. 개별 좌표계와 원 좌표계

Fig 1. Feed element coordination system and source coordination system

반사판의 좌표계는 공통의 신호원 피드 좌표계(이후 원 좌표계라 칭하며, 첨자 s로 표시한다.)

및 반사판 좌표계(primed), 관측 좌표계(unprimed)로 구분된다. 그림 1과 같이 피드 배열 시스템이 총 N_f 개의 피드로 구성되어 있고 개별 패턴의 크기가 같다고 가정한 후, 개별 피드 좌표계(이후 개별 좌표계로 칭하며, 첨자 i 는 i 번째 피드를 나타낸다.)를 원 좌표계로 변환한다.

우선 개별 피드에 의한 전자계의 원 좌표계에서의 합성에 대하여 고찰하여 보자. 개별 피드의 좌표계가 각각의 피드의 위상 중심점이 좌표계의 원점에 있는 좌표계를 가지고 있으며, 개별 좌표계의 원점이 반사판 좌표계에서 직각 좌표계로 \vec{w}_i 에 있다고 가정한다. 또한 개별 좌표계와 원 좌표계과의 오일러 각을 $(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$ 라고 가정하면 다음 식과 같이 변환된다.[7]

$$\vec{r}_i = [{}^iA](\vec{r}_s - \vec{w}_i) \quad (5)$$

여기서 $[{}^iA]$ 는 (α, β, γ) 를 $(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$ 로 바꾼 오일러 회전 행렬이다. 개별 피드에 의한 반사판 표면에서의 자계는 아래식으로 나타난다.

$$\vec{H}_i(\vec{r}_i) = \frac{1}{\eta} [-V_i(\theta_i, \phi_i) \vec{\theta}_i + U_i(\theta_i, \phi_i) \vec{\phi}_i] \frac{e^{-jk r_i}}{4\pi r_i} \quad (6)$$

여기서 U_i, V_i 는 i 번째 피드의 E_θ, E_ϕ 패턴 함수이다.

따라서, 개별 피드에 의한 자계도 합성되기 전에 아래와 같이 원 좌표계로 변환되어야 한다.

$$\vec{H}_s(\vec{r}_i) = [{}^iA]^t [{}^iT] \vec{H}_i(\vec{r}_i) \quad (7)$$

여기서 $[{}^iT]$ 는 (θ, ϕ) 를 (θ_i, ϕ_i) 로 바꾼 구 좌표계-직각 좌표계 변환 행렬이다. 이제 공통의 원 좌표계로 변환된 개별 피드에 의한 자계를 합성하기로 한다. 원 좌표계의 점 \vec{r}_s 에서의 전체 자계는 아래와 같이 N_f 개의 개별 피드의 원 좌표계로 변환된 자계를 합성하면 된다.

$$\vec{H}_s(\vec{r}_i) = [{}^iA]^t [{}^iT] \vec{H}_i(\vec{r}_i) \quad (7)$$

여기서 $[{}^iT]$ 는 (θ, ϕ) 를 (θ_i, ϕ_i) 로 바꾼 구 좌표계-직각 좌표계 변환 행렬이다. 이제 공통의 원 좌표계로 변환된 개별 피드에 의한 자계를 합성하기로 한다. 원 좌표계의 점 \vec{r}_s 에서의 전체 자계는 아래와 같이 N_f 개의 개별 피드의 원 좌표계로 변환된 자계를 합성하면 된다.

$$\vec{H}_s(\vec{r}_s) = \sum_{i=1}^{N_f} \vec{H}_s(\vec{r}_i) \quad (8)$$

위 식에서 여기서의 가중치(Weighting) 계수 I_i 를 포함시키면, 식(44)는 아래와 같이 변환된다.

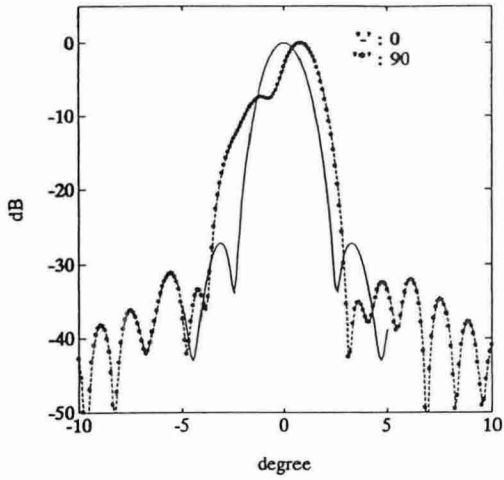
$$\vec{H}_s(\vec{r}_s) = \sum_{i=1}^{N_f} I_i \vec{H}_s(\vec{r}_i) \quad (9)$$

따라서 원 좌표계로 표시된 반사판 표면에서의 합성된 자계는 식(3)에 대입하여 반사판 좌표계로 나타내며, 식(1)에 의하여 등가 유도 전류로 변환한 후 방사 적분식에 대입하면 피드 배열에 의한 방사 패턴을 구할 수 있게 된다.

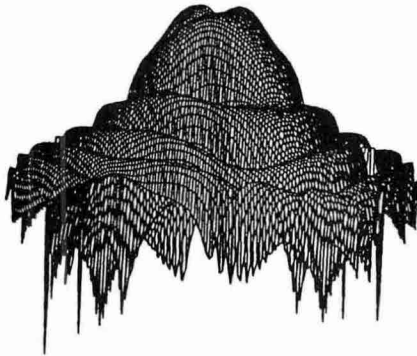
3. 피드 배열 반사판 안테나의 수치적 결과

1차 전자계 합성이론을 근거로 수치적으로 해석하였다. 표1과 같이 피드를 배열하여 이를 각각 수치적으로 해석하였으며, 각각의 피드 배열에 대한 결과치는 표 2과 같다. 따라서, 안테나의 방사 패턴은 배열된 피드의 위치와 크기에 따라서 방사패턴의 특성이 변화됨을 알 수 있다.

또한, 표 1에서의 각각의 피드 배열에 대한 방사 패턴 및 3차원 방사 패턴은 그림 2과 같다.



(a) 방사 패턴



(b) 3차원 방사 패턴

그림 2. (e)형의 방사패턴 및 3차원 패턴

Fig 3. Radition pattern and three dimensional pattern of type(e)

표 1. 피더 배열의 좌표

Table 1. Coordinates of feed array

피더 형태	①	①	②	③	①'	②'
a축	x축	0λ	-	-	-	-
	y축	0λ	-	-	-	-
b형	x축	0λ	0λ	-	-	-
	y축	-0.9λ	0.46λ	-	-	-

c형	x축	0λ	0λ	0λ	0.96λ	-
	y축	-1.2λ	0λ	0.96λ	-	-
d형	x축	0.46λ	-0.5λ	1.0λ	0.58λ	-
	y축	-0.36λ	0.9λ	0λ	-	-
e형	x축	-0.5λ	-0.46λ	-	1.0λ	0.36λ
	y축	-0.9λ	0.36λ	-	0λ	-0.96λ
f형	x축	-0.5λ	-0.46λ	0λ	0.9λ	-
	y축	-0.9λ	0.36λ	0.96λ	1.2λ	-

표 2. 피드 배열에 의한 방사 패턴의 변화

Table 2. Radition pattern variation of feed array

구분 형태	각도(ϕ)	3dB 빔폭	1차 부로브	2차 부로브	3차 부로브
a형	0°	2.3°	27 dB	33 dB	45 dB
	90°	2.3°	27 dB	33 dB	45 dB
b형	0°	2.5°	30 dB	28 dB	33 dB
	90°	2.0°	27 dB	33 dB	37 dB
c형	0°	0.7°	3 dB	13 dB	30 dB
	90°	1.1°	5 dB	19 dB	32 dB
d형	0°	1.2°	13 dB	23 dB	27 dB
	90°	2.5°	22 dB	32 dB	37 dB
e형	0°	0.6°	2 dB	20 dB	33 dB
	99°	1.2°	6 dB	15 dB	35 dB
f형	0°	0.6°	4 dB	20 dB	38 dB
	90°	2.5°	10 dB	37 dB	45 dB

4. 실험 및 결과 고찰

본 논문에서는 피드 배열 구조에 의한 안테나 방사 패턴의 특성이 변하는 점을 이용하여 빔 형상에 관하여 연구하였다. 따라서 이러한 구조를 갖는 안테나를 구성하기 위해서 피드로 사용되는 피라미드 혼 안테나와 반사판 안테나를 설계하여야 한다.

혼 안테나는 반사판 안테나에 인가되는 피드의 여기 크기, 위상에 의해서 반사판 안테나의 방사 패턴이 변하므로 위상의 보정을 위하여 혼 안테나는 도파관과 개구면의 총 길이를 동일하게 설

계하여 제작하였으며 설계치는 표 3과 같다.

반사판 안테나는 $F=27.1 \lambda$, $D=45 \lambda$, $h=27.1 \lambda$ 의 크기를 갖는 안테나를 선택하였다.

표 3. 혼 안테나 설계치

Table 3. Design values of horn antennas (단위 mm)

구 분	a_1	b_1	ρ_1	ρ_2	총 길이
1형	25	43	65	65	220
2형	23	18	100	100	220
3형	34	50	120	100	220

표 4는 표 3의 혼 안테나에 대한 반사 손실과 위상 특성을 측정된 결과로서, 상기 측정치로부터 위상 차이가 약 $\pm 5^\circ$ 이내에 있음을 알 수 있고, 반사 손실은 20 dB 이하로 잘 매칭됨을 보여

주고 있다. 따라서 이들을 피드 배열을 다중 피드로 사용하였을 경우 동일한 위상으로 여기될 수 있음을 보여주고 있다.

표 4. 혼 안테나의 측정 결과(12 GHz)

Table 4. Measurement results of horn antennas (12 GHz)

구 분	1형	2형	3형
반사 손실	20 dB	21 dB	24 dB
위 상	45°	50°	52°

표 5는 표 1과 같이 피드가 배열된 경우에서 안테나 패턴의 변화에 대한 측정치로서, 이를 3dB 점은 거의 같으며, 부엽에서 약간의 차이가 발생하였다. 표3에서 알 수 있듯이 피드배열에 대한

표 5. 실험치와 이론치의 비교

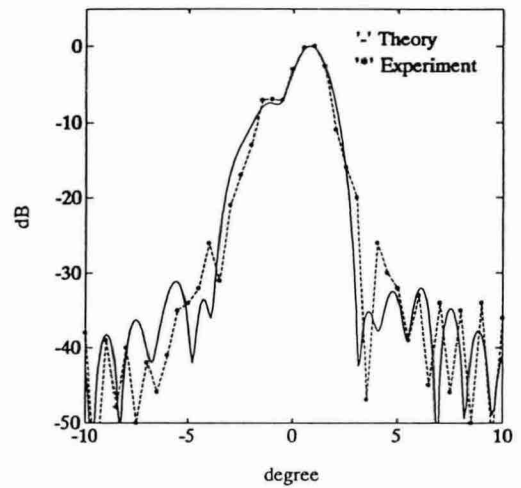
Table 5. Comprision of theoretical and measured values

구분 형태	각도 (φ)	이론치	3dB 빔폭	1차 부로브	2차 부로브	3차 부로브
		실험치				
a형	0°	이론치	2.4°	20 dB	36 dB	45 dB
		실험치	2.3°	26 dB	37 dB	41 dB
	90°	이론치	2.3°	20 dB	28 dB	45 dB
		실험치	2.1°	20 dB	23 dB	28 dB
b형	0°	이론치	2.3°	25 dB	23 dB	33 dB
		실험치	2.0°	23 dB	28 dB	31 dB
	90°	이론치	2.5°	25 dB	32 dB	48 dB
		실험치	2.4°	25 dB	38 dB	34 dB
c형	0°	이론치	2.6°	18 dB	35 dB	28 dB
		실험치	2.8°	26 dB	35 dB	37 dB
	90°	이론치	2.0°	8 dB	33 dB	29 dB
		실험치	2.2°	9 dB	32 dB	37 dB
d형	0°	이론치	1.2°	13 dB	28 dB	37 dB
		실험치	1.3°	17 dB	28 dB	37 dB
	90°	이론치	2.3°	22 dB	31 dB	37 dB
		실험치	2.3°	24 dB	28 dB	30 dB

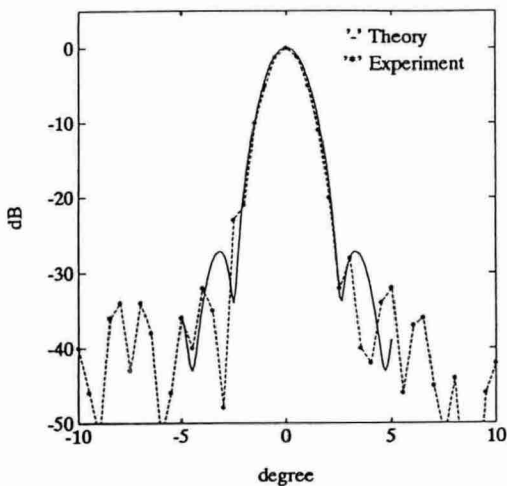
e형	0°	이론치	3.2°	25 dB	28 dB	33 dB
		실험치	3.2°	30 dB	26 dB	37 dB
	90°	이론치	2.0°	25 dB	33 dB	30 dB
		실험치	2.8°	25 dB	32 dB	30 dB
f형	0°	이론치	1.1°	6 dB	20 dB	28 dB
		실험치	1.0°	5 dB	38 dB	36 dB
	90°	이론치	2.4°	18 dB	25 dB	38 dB
		실험치	2.2°	16 dB	23 dB	40 dB

3dB빔폭의 변화를 확인할 수 있었으며, 본 논문에서 제안한 1차계 전자계 합성이론에 대한 타당성을 입증하였다.

그림 3은 그림 2에 나타낸 (e)의 피드배열인 경우에 대한 측정치를 나타낸 것이다. 1차 전자계 합성 이론에 의한 수치 해석 결과와 유사하게 측정되어, 제안된 이론의 유효성을 잘 입증하고 있다. 단 일부 오차는 대기 혹은 지면 등 반사판 외부로 부터의 복사 전자파 및 비정렬(misalignment) 등 측정 오차에 기인한 것으로 추산된다.



(b) $\phi = 90^\circ$ 에서의 방사 패턴 측정치



(a) $\phi = 0^\circ$ 에서의 방사 패턴 측정치

그림 3. 방사패턴 측정치(e형)

Fig 3. Measured data of Radiation pattern with type(e)

III. 결 론

본 논문에서는 피드 배열 반사판 안테나의 방사 패턴을 계산함에 있어 개별 피드로 부터 반사판에 반사된 전자계를 원거리 영역에서 합성하는 종래의 해석 방법과 달리, 물리 광학적 방사 적분 수행의 이전 단계인 반사판 표면에서 전자계를 합성하는 1차 전자계 합성 이론에 대하여 연구하였다. 개별 피드에 대한 방사 적분을 반복 수행하게 되는 종래의 방법과 비교하여, 1차 전자계 합

성 이론은 단 한번의 방사 적분을 수행하게 되어 계산이 용이하게 되었다.

혼의 중심 주파수는 12 GHz 대역으로써 측정 결과 10~15 GHz 사이에서 반사 손실은 대체적으로 20 dB 이하로 나타났다. 또한, 혼 안테나에 대한 위상 오차를 줄이기 위하여 혼 안테나의 길이를 모두 동일 길이로 설계 제작하였으나 측정 결과 이들은 약 $\pm 5^\circ$ 이내의 위상 오차를 갖는 것으로 확인하였다.

반사판 안테나는 단일 피드의 경우 부로브가 최소화 되도록 설계하였으며, 3종류의 피드를 총 6개의 형태로 조합하여 수치적으로 분석하고 실험하였다. 실험 결과 1차 전자계 합성 이론을 적용하여 수치적으로 계산한 방사 패턴이 실제 측정된 패턴과 근사됨을 확인하였다. 피드의 배열로 인하여 안테나의 빔 패턴의 영향을 받는 것이 확인 되었으며 특히, 피드간의 간격이 넓을수록 부로브가 커지는 현상을 확인할 수 있었다. 또한 반사판 안테나의 촛점 거리가 짧을수록 비대칭형의 패턴을 갖는 것으로 실험 결과 판명되었다. 따라서, 수치적 계산 및 실험 결과로부터 얻어진 반사판 안테나의 특성을 이용하면 단일 피드로 구성된 반사판 안테나의 특성을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

본 논문에서 제안한 1차 전자계 합성법은 방사 적분의 계산의 용이성으로 인하여 임의의 피드의 위치, 방향 등 임의의 배열과 진폭과 위상 등 여기 상태의 조정을 통한 빔의 임의의 형상 해석에 적용이 가능하며, 레이더 등을 위한 부채형 빔등의 특수한 빔 형상의 설계에 응용되리라 예상된다. 아울러 빔 형상 회로를 통하여 유동적인 여기 상태의 변경을 이용한 빔 스캔 분야 등에 대한 연구도 필요하다 하겠다.

참 고 문 헌

1. W. L. Morgan and G. D. Gordon, *Communications Satellite Handbook*, John Wiley & Sons, 1989
2. H. Hwangbo, "The Korea Domestic Communications and Broadcasting Satellite System," 14th AIAA International Communication Satellite Systems Conference & Exhibit, Mar. 1992
3. CCIR Report 676-1, "Shaped Beam Antennas," ITU, 1990
4. T. Kitsuregawa, *Advanced Technology in Satellite Communication Antennas Electrical & Mechanical Design*, Artech House, 1990
5. G. Maral and M. Bousquet, *Satellite Communications Systems; Systems, Techniques and Technology*, John Wiley & Sons, 1993
6. Y. R. Samii, "Modern synthesis and analysis techniques for microwave reflector antennas," AEU, vol. 46, no. 5, pp. 343-354, May 1992
7. W. A. Imbriale, P. G. Ingerson and W. C. Wong, "Large lateral feed displacements in a parabolic reflector," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-22, no. 6, pp. 742-745, Nov. 1974

筆者紹介

▲김 은 수

- 1974년 3월 ~ 1978년 2월 : 연세대학교 공과대학 전자공학과 공학사
- 1978년 3월 ~ 1980년 2월 : 연세대학교 대학원 전자공학과 공학석사
- 1980년 3월 ~ 1982년 2월 : 연세대학교 대학원 전자공학과 공학박사
- 1987년 2월 ~ 1988년 8월 : 미국 Caltech 전자공학과 객원교수
- 1989년 3월 ~ 1992년 1월 : 대한전자공학회 편집위원
- 1990년 5월 ~ 현재 : 체신부 통신 기술 발전 위원회 간사
- 1990년 7월 ~ 현재 : 국방과학연구소 전문위원
- 1990년 9월 ~ 현재 : 한국통신학회 편집위원 및 분과위원장
- 1992년 4월 ~ 현재 : 광운대학교 전자공학과 교수
- 1992년 1월 ~ 현재 : 대한전자공학회 전문위원