

최소 위상 오차를 갖는 곡선 배열안테나용 Rotman 렌즈의 설계

Design of Rotman Lens for Curved Array Antenna with Minimal Phase Error

박 주 래 · 박 동 철*

Joo-Rae Park · Dong-Chul Park*

요 약

컨포멀 배열에 적용할 수 있는 곡선 배열안테나용 Rotman 렌즈의 설계 방법을 제안한다. 본 논문에서는 곡선 배열 안테나와 연동하여 Rotman 렌즈의 평행판 영역에 존재하는 배열 포트의 위치와, 배열 포트와 배열안테나 소자를 연결하는 전송선의 길이를 구하는 설계식을 유도하고, 이 설계식을 바탕으로 빔 곡선 최적화 절차와 재초점 절차를 통하여 위상 오차를 최소화하고 있다. 제안된 설계식과 설계 절차에 의해 설계된 Rotman 렌즈는 정확히 3초점을 보유한 채 직선 배열안테나뿐만 아니라, 원곡선, 포물선, V자형 곡선 등의 오목하거나 볼록한 배열안테나를 급전할 수 있으며, 최소의 위상 오차를 나타내고 있다.

Abstract

We propose a design method of a Rotman lens for curved array antenna applicable to conformal array. In this paper, design equations are derived to obtain an array curve, transmission line lengths of a Rotman lens in conjunction with a curved array antenna, and the phase error of a Rotman lens based on these design equations is minimized through the beam curve optimization procedure and the refocusing procedure. Rotman lenses designed by the proposed design equations and design procedures still maintain 3 focal points, can feed a convex or concave array antenna with circular curve, parabolic curve, V-shaped curve, etc as well as a straight line array antenna, and have minimal phase error.

Key words: Beam Curve Optimization, Curved Array Antenna, Phase Error, Refocusing, Rotman Lens

I. 서 론

항공기, 차량 또는 함정의 비평면 부위의 표면을 따라 적용시킨 컨포멀 배열안테나는 기존의 평면 배열안테나 및 반사형 안테나에 비하여 공기 역학 특성을 개선시키고, 레이더 단면적을 감소시킬 수 있다는 장점으로 인하여 매력적인 기술로 떠오르고 있다^{[1],[2]}. Rotman 렌즈는

Rotman과 Turner에 의해 설계식이 제시된 이래^[3], 광각 스캔이 가능하고, 주파수에 무관하게 빔을 조향할 수 있고, 몇 개의 렌즈가 적층되면 이차원 빔을 생성할 수 있으며, 저비용 및 소형으로 제작할 수 있어 배열안테나를 급전하는 빔 형성 회로망(*beam forming network*)으로 널리 활용되고 있다^{[4],[5]}. 따라서 Rotman 렌즈 급전 컨포멀 배열 안테나는 성장·발전 가능성이 높은 기술이다.

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

*충남대학교 전파공학과(Department of Radio Science & Engineering, Chungnam National University)

· Manuscript received July 25 2014 ; Revised September 30, 2014 ; Accepted October 6, 2014. (ID 20140725-055)

· Corresponding Author: Dong-Chul Park (e-mail: dcpark@cnu.ac.kr)

Rotman 렌즈는 3초점을 갖는 이차원 평행판 렌즈이다. 렌즈의 평행판 영역(parallel plate region)은 배열 곡선(array curve)과 빔 곡선(beam curve)으로 구성되며, 배열 곡선 상에 위치하는 배열 포트들은 배열안테나(array antenna)에 있는 안테나 소자들과 TEM 모드 전송선(transmission line)에 의해 연결된다.

3초점을 포함하는 빔 곡선 상에 위치하는 빔 포트들은 각각의 빔이 급전되는 위치이다. 초점에 위치하는 빔 포트는 위상 오차가 0인 위상면을 형성시키지만, 초점 사이 또는 초점을 지나 외각에 위치하는 빔 포트는 위상 오차를 갖게 된다. 이 위상 오차와 빔 곡선과 배열 곡선 상의 포트들 간의 상호 결합 영향은 Rotman 렌즈의 성능을 결정하는 인자들이다⁶⁾. 위상 오차는 스캔 각도가 넓거나, 급전하는 배열안테나의 길이가 길수록 증가하고, 위상 오차가 커지면 빔 조향 오차, 부엽 레벨, 빔 폭이 증가된다. 상호 결합 영향은 주로 빔 곡선과 배열 곡선의 형상에 종속되며, 제어하기가 어려운 특성을 가지고 있으며, 포트들 간의 상호 결합 영향을 줄일 수 있는 평행판 영역의 형상은 배열 곡선과 빔 곡선이 거의 대칭인 구조라고 알려져 있다^{6),17)}.

최적의 진폭 및 위상 성능을 갖는 Rotman 렌즈를 설계하기 위해서는 우선적으로 상호 결합 영향이 최소화되는 형상을 구하고, 이 형상에 영향을 주지 않은 채 위상 오차를 최소화하는 방법이 필요하다. 왜냐하면 위상 오차만이 최소화되는 형상을 구하더라도 상호 결합 영향이 크면 무의미하기 때문이다.

Rotman 렌즈의 3초점 원리는 배열안테나의 형상에 관계없이 적용이 가능한 것으로 알려져 있지만^{11),14)}, 지금까지 많은 연구자들에 의해 발표된 설계식은 직선 배열안테나와 연동되어 있으며, 광각 스캔 각도^{8),9)}, 빔 곡선^{6),9),10),11)}, 전송선 길이¹²⁾에 대한 유의미한 개선이 진행되어 왔다.

본 논문에서는 기하 광학(Geometrical Optics) 방법으로 위상 오차가 최소화된 곡선 배열안테나용 Rotman 렌즈를 설계하는 방법을 제안하고 있다. 직선 배열안테나는 물론 곡선 배열안테나와 연동하여 Rotman 렌즈의 배열 포트의 위치와, 배열 포트와 배열안테나 소자를 연결하는 전송선의 길이를 구하는 설계식을 유도하고, 이 설계식을 바탕

으로 빔 포트의 위치를 구하고 있다. 빔 포트의 위치는 빔 포트로부터 대응되는 동위상면까지 곡선 배열안테나 상의 중심점과 중심점으로부터 대칭 또는 비대칭인 두 개의 점을 통과하는 경로들은 동위상이라는 조건을 이용하며, 이 조건을 유지하면서 최대 위상 오차가 가장 작은 빔 포트의 위치를 결정하는 빔 곡선 최적화 절차를 통해 구한다. 또한, 구해진 빔 곡선을 따라 초점을 재설정함으로써 초점 사이에 위치하는 빔 포트의 최대 위상 오차와 초점을 지나 외각에 위치하는 빔 포트의 최대 위상 오차를 균등화하여 Rotman 렌즈의 최대 위상 오차를 추가적으로 감소시키는 재초점 절차¹²⁾를 사용한다.

제안된 설계 방법에 따라 설계된 Rotman 렌즈는 정확히 3초점을 보유한 채 직선 배열안테나뿐만 아니라, 원곡선, 포물선, V자형 곡선 등의 오목 및 볼록 곡선 배열안테나를 급전할 수 있고, 현저하게 개선된 위상 성능을 나타내고 있다. 또한, 이러한 절차들을 적용하기 전에 비하여 Rotman 렌즈의 빔 곡선과 배열 곡선의 형상은 거의 변화시키지 않고 위상 오차를 감소시킨다. 즉, Rotman 렌즈의 진폭 성능은 변화시키지 않으며 위상 성능을 개선시킨다.

II. 곡선 배열안테나용 Rotman 렌즈의 설계식

Rotman 렌즈는 광학렌즈의 원리를 초고주파 대역에서 구현한 초고주파 렌즈 안테나의 일종이다. 그림 1과 같이 주로 직선 배열안테나와 연동하여 Rotman 렌즈의 어느

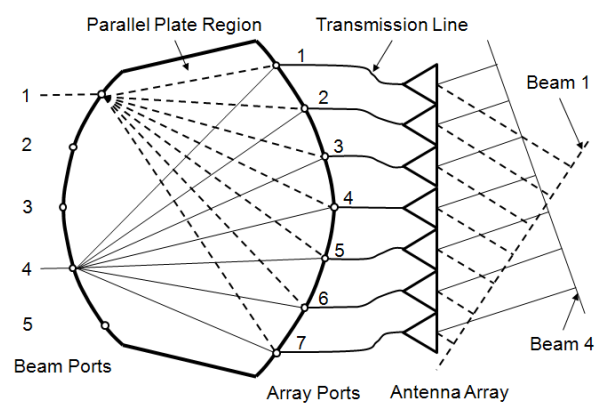


그림 1. Rotman 렌즈의 원리
Fig. 1. Principle of Rotman lens.

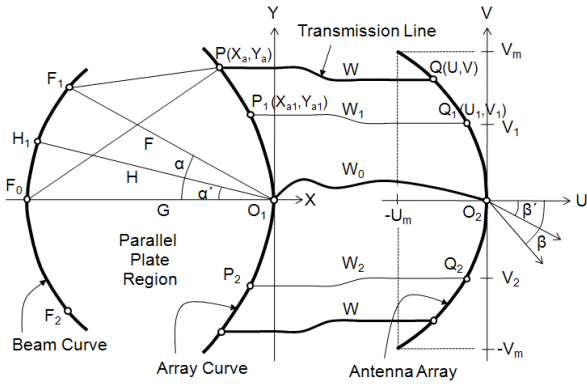


그림 2. Rotman 렌즈의 좌표
Fig. 2. Coordinates of Rotman lens.

한 빔 포트로부터 평행판 영역을 통해 분산되는 각각의 전파경로는 배열안테나 상에 동위상면을 형성하고, 동위상면에 수직한 방향으로 전자파가 공간 합성되는 원리를 이용한다. 본 논문에서는 기하 광학적으로 위상 오차가 최소화된 곡선 배열안테나용 Rotman 렌즈의 설계식을 제안하고자 한다.

그림 2는 제안된 곡선 배열안테나용 Rotman 렌즈의 설계 좌표이다. 빔 곡선은 3개의 초점을 포함하며, 각 초점의 위치는 \$F_1(-F\cos\alpha, F\sin\alpha)\$, \$F_2(-F\cos\alpha, -F\sin\alpha)\$, \$F_0(-G, 0)\$이다. 여기서 \$G\$는 정축 초점거리(on-axis focal length)이고, \$F\$는 비축 초점거리(off-axis focal length)이며, \$\alpha\$는 비축 초점 \$F_1\$과 \$F_2\$를 마주 보는 초점 각도(focal angle)이다. 두 좌표는 분리되거나 회전될 수 있다. 빔 곡선과 배열 곡선의 파라미터는 \$O_1\$을 원점으로 하는 좌표를 사용하며, 배열안테나의 파라미터는 \$O_2\$를 원점으로 하는 좌표를 사용한다. 여기서 배열안테나는 직선 배열안테나가 아니고, 곡선 배열안테나임에 유의한다.

2.1 배열 포트의 위치와 전송선의 길이

3개의 초점으로부터 대응되는 동위상면까지 모든 전자파는 지나온 경로에 무관하게 전체의 위상 변화가 동일하여야 한다. 그림 1을 참조하여 이러한 개념을 사용하면 다음과 같은 수식을 얻을 수 있다.

$$\overline{F_1P} + W + V\sin\beta - U\cos\beta = F + W_0 \quad (1)$$

$$\overline{F_2P} + W - V\sin\beta - U\cos\beta = F + W_0 \quad (2)$$

$$\overline{F_0P} + W - U = G + W_0 \quad (3)$$

식 (1)~(3)에서 \$P\$는 배열 곡선 상의 한 점으로 좌표는 \$(X_a, Y_a)\$이다. \$Q\$는 곡선 배열안테나 상의 한 점으로 좌표는 \$(U, V)\$이다. \$W\$는 \$P\$와 곡선 배열안테나 상의 한 점 \$Q\$를 연결하는 전송선의 길이이고, \$W_0\$는 배열 곡선 상의 중심점 \$O_1\$과 곡선 배열안테나 상의 중심점 \$O_2\$를 연결하는 전송선의 길이이다. \$\beta\$는 \$\alpha\$에 의해 지정된 초점 \$F_1\$에 대응하는 빔의 각도이다.

설계 파라미터 \$F, G, W, W_0, U, V, X_a, Y_a\$를 곡선 배열안테나의 현의 길이의 반인 \$V_m\$으로 정규화시키고, \$f, g, w, u, v, x_a, y_a\$로 표현한다. 정규화된 식 (1)~(3)을 이용하여 대수학적 처리방법을 통하면 식 (4)~(6)과 같이 정리된다.

$$x_a = a + bw \quad (4)$$

$$y_a = \frac{v}{f} \gamma (f - w + u \cos \beta) \quad (5)$$

$$Aw^2 + Bw + C = 0 \quad (6)$$

여기서

$$\gamma = \frac{\sin \beta}{\sin \alpha}$$

$$a = \frac{(v \sin \beta)^2 + 2fu \cos \beta + (u \cos \beta)^2 - 2gu - u^2}{2(f \cos \alpha - g)}$$

$$b = -\frac{f - g + u \cos \beta - u}{f \cos \alpha - g}$$

$$A = b^2 + \left(\frac{v}{f} \gamma\right)^2 - 1$$

$$B = 2ab - 2\left(\frac{v}{f} \gamma\right)^2 (f + u \cos \beta) + 2gb + 2g + 2u$$

$$C = a^2 + \left(\frac{v}{f} \gamma\right)^2 (f + u \cos \beta)^2 + 2ga - 2gu - u^2$$

설계 파라미터 \$g, f, \alpha, \gamma\$의 값이 주어지면 배열안테나 소자의 좌표 \$(u, v)\$와 대응하는 배열 포트의 좌표 \$(x_a, y_a)\$와 전송선의 길이 차이 \$w\$를 위의 수식들을 이용하여 구할 수 있다.

2-2 빔 포트의 위치

배열 포트의 위치와 전송선의 길이를 구한 후에, 빔 포트의 위치는 다음과 같은 방법으로 구한다. 빔 포트로부터 대응되는 동위상면까지 곡선 배열안테나의 중심점과 중심점으로부터 비대칭인 양쪽 끝에 가까운 점을 통과하는 경로들 간의 위상 변위가 동일하다는 조건을 사용하면 식 (7), (8)을 구할 수 있다. 이 수식은 Uyguroglu의 경로길이 수식^[10]에서 직선 배열안테나의 중심점으로부터 비대칭인 양쪽 끝에 가까운 점들을 통과하는 경로 대신에 비대칭인 양쪽 끝에 가까운 점들을 통과하는 경로로 대체한 참고문헌 [11]의 수식을 곡선 배열안테나로 연동 범위를 확장한 수식이다.

$$\overline{H_1 P_1} + W_1 + V_1 \sin \beta' - U_1 \cos \beta' = H + W_0 \quad (7)$$

$$\overline{H_1 P_2} + W_2 + V_2 \sin \beta' - U_2 \cos \beta' = H + W_0 \quad (8)$$

식 (7), (8)에서 H_1 은 빔 곡선 상의 한 점으로 좌표는 (X_b, Y_b) 이며, 원점 O_1 로부터 거리는 H 이다. 렌즈의 상단에 위치하는 P_1 은 배열 곡선 상의 한 점으로 곡선 배열안테나 상의 한 점 Q_1 과 전송선으로 연결되고, 전송선의 길이는 W_1 이다. 렌즈의 하단에 위치하는 P_2 는 배열 곡선 상의 한 점으로 곡선 배열안테나 상의 한 점 Q_2 와 전송선으로 연결되고, 전송선의 길이는 W_2 이다. β' 는 α' 에 의해 지정된 빔 포트 H_1 에 대응하는 빔의 각도이다. Q_1 의 좌표는 (U_1, V_1) 이며, Q_2 의 좌표는 (U_2, V_2) 이다. 따라서 곡선 배열안테나 상에 존재하는 동위상점 집합은 $((U_1, V_1), (0, 0), (U_2, V_2))$ 이다.

설계 파라미터 $H, X_b, Y_b, X_{a1}, Y_{a1}, X_{a2}, Y_{a2}, U_1, V_1, U_2, V_2$ 을 V_m 으로 정규화시키고, $h, x_b, y_b, x_{a1}, y_{a1}, x_{a2}, y_{a2}, u_1, v_1, u_2, v_2$ 로 표현한다. 정규화된 식 (7), (8)을 이용하여 대수학적 처리방법을 거치면 식 (9), (10)과 같이 정리된다.

$$x_b = -h \cos \alpha' \quad (9)$$

$$y_b = h \sin \alpha' \quad (10)$$

이때 식 (9), (10)과 연계된 관련 식들은 다음과 같다.

$$A' \sin^2 \alpha' + B' \sin \alpha' + C' = 0$$

$$h = \frac{c'}{2(x_{a1} + x_{a2})\cos\alpha' - 2(y_{a1} + y_{a2})\sin\alpha' + 2b'}$$

$$a_1' = w_1 - u_1 \cos \beta'$$

$$a_2' = w_2 - u_2 \cos \beta'$$

$$a' = -(x_{a1}^2 - x_{a2}^2) - (y_{a1}^2 - y_{a2}^2) + a_1'^2 - a_2'^2 + 2(a_1' v_1 - a_2' v_2) \sin \beta' + (v_1^2 - v_2^2) \sin^2 \beta'$$

$$b' = a_1' + a_2' + (v_1 + v_2) \sin \beta'$$

$$c' = -(x_{a1}^2 + x_{a2}^2) - (y_{a1}^2 + y_{a2}^2) + a_1'^2 + a_2'^2 + 2(a_1' v_1 + a_2' v_2) \sin \beta' + (v_1^2 + v_2^2) \sin^2 \beta'$$

$$d' = a_1' - a_2' + (v_1 - v_2) \sin \beta'$$

$$A' = -(a'(x_{a1} + x_{a2}) - c'(x_{a1} - x_{a2}))^2 - (a'(y_{a1} + y_{a2}) - c'(y_{a1} - y_{a2}))^2$$

$$B' = -2(c'd' - a'b')(a'(y_{a1} + y_{a2}) - c'(y_{a1} - y_{a2}))$$

$$C' = -(c'd' - a'b')^2 + (a'(x_{a1} + x_{a2}) - c'(x_{a1} - x_{a2}))^2$$

빔 방향 β' 에 대하여 위상 오차를 최소화하는 동위상점 집합 $((u_1, v_1), (0, 0), (u_2, v_2))$ 을 찾으면, 위의 수식들을 이용하여 최소의 위상 오차를 갖는 빔 포트의 좌표 (x_b, y_b) 를 구할 수 있다.

2-3 배열안테나의 좌표

최초에는 Rotman 렌즈의 경로길이 수식은 초점거리 F 로 정규화되어 있다^[3]. 그러나 이 방법은 경로길이 수식의 해가 단순한 형태로 표현되는 장점은 있으나, 초점거리가 변경되면 배열안테나의 길이가 변경되므로 본 논문의 빔 곡선 최적화 방법을 적용하거나, 렌즈의 위상 오차를 직접적으로 비교하기가 어려운 단점이 있다. 본 논문에서는 렌즈의 경로길이 수식을 곡선 배열안테나의 현의 길이의 반인 V_m 을 기준으로 정규화하였다.

그림 3은 배열안테나의 곡선 형상에 따른 좌표를 나타낸 것이다. 그림 3 (b)에서 R 은 원곡선 배열안테나의 반지름이며, θ 는 중심각의 반이다. 그림 3 (c)에서 F_L 은 포물선의 초점거리이다. 그림 3(d)에서 ϕ 는 V자형 곡선의 사이각의 반이다.

곡선 배열안테나의 현의 길이의 반과 그림 3에 제시된 배열안테나의 곡선 형상 파라미터와의 관계식은 각각 다음과 같다.

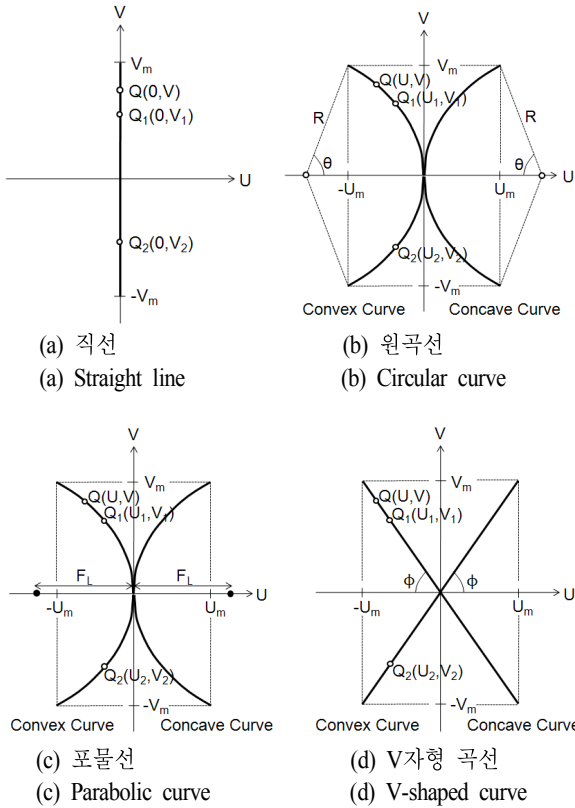


그림 3. 배열안테나의 좌표
Fig. 3. Coordinates of array antenna.

$$V_m = S_m/2 \quad (11)$$

$$V_m = \frac{S_m \sin\theta}{2} = R \sin\theta \quad (12)$$

$$V_m = \frac{S_m}{2} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{V_m}{4F_L}\right)^2 + \frac{1}{4}} + \frac{4F_L}{V_m} \ln\left(\frac{V_m}{2F_L} + \sqrt{\left(\frac{V_m}{2F_L}\right)^2 + 1}\right)} \quad (13)$$

$$V_m = \frac{S_m}{2} \sin\phi \quad (14)$$

식 (11)~(14)에서 S_m 은 배열안테나의 길이이다.

Ⅲ. 빔 곡선 최적화 및 재초점 절차

동위상면에 대한 경로길이 차이는 Rotman 렌즈 급전 배열안테나의 위상 오차를 결정한다. 배열안테나 소자의

위치 $Q(U, V)$ 에 대하여 비초점 빔 위치 H_1 의 경로길이 오차는 점 P 와 점 Q 를 경유하는 H_1 로부터 동위상면까지 경로길이와 점 O_1 과 점 O_2 를 경유하는 H_1 로부터 동위상면까지 경로길이 간의 차이에 의해 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta L = \overline{H_1P} + W + V \sin\beta' - U \cos\beta' - H - W_0 \quad (15)$$

위상 오차를 그래프로 표현하는 방법으로는 두 가지가 있다. 하나는 1개의 빔에 대하여 각각의 배열안테나의 소자를 경유하는 경로들 간의 위상 오차를 표현하는 방법이고, 다른 하나는 스캔 각도에 따라 최대 위상 오차를 표현하는 방법이다. 전자는 1개의 빔에 대한 상세한 위상 오차를 나타낼 수 있는 장점이 있으며, 후자는 모든 빔에 대한 위상 오차를 나타낼 수 있는 장점이 있다. 본 논문에서는 후자를 사용하고 있다.

3-1 빔 곡선 최적화 절차

식 (15)의 경로길이 오차 식과 식 (9), (10)의 수식들을 이용하면, 빔 방향 β' 에 대하여 위상 오차를 최소화하는 $Q_1(u_1, v_1)$ 과 $Q_2(u_2, v_2)$ 를 찾을 수 있다.

빔 방향 β' 에 대하여 Q_1 의 세로 좌표 값인 v_1 을 1에서부터 0까지, Q_2 의 세로 좌표 값인 v_2 를 -1에서부터 0까지 가변시키며, 각각의 동위상점에 대한 최대 경로길이 오차들을 구한다. 이때 Q_1 의 가로 좌표 값인 u_1 과 Q_2 의 가로 좌표 값인 u_2 는 배열안테나의 곡선을 따라 함께 이동시킨다. 이 최대 경로길이 오차들 중에서 가장 작은 최대 경로길이 오차를 주는 동위상점 집합 (Q_1, O_2, Q_2)과 빔 포트의 위치를 선택한다. 이러한 절차로 요구되는 모든 빔 방향들에 대응하는 동위상점 집합들과 빔 포트의 위치들을 구한다.

이 빔 곡선 최적화 절차는 배열안테나 상의 중심점과 중심점을 기준으로 비대칭인 경우를 포함하여 양쪽에 최소한 한 개 이상의 동위상점을 형성하는 위상 오차 곡선을 제공하며, 이런 위상 오차 곡선들 중에서 가장 작은 최대 위상 오차를 갖는 빔 포트를 결정하므로 지금까지 알려진 방법들^{[3],[6],[9],[10]} 중에서 최소의 위상 오차를 갖게 된다.

3-2 재초점 절차

본 저자들은 빔 곡선 및 배열 곡선의 형상에 거의 변화를 주지 않고 추가적으로 위상 오차를 감소시킬 수 있는 재초점 방법을 제안한 바 있다^[12]. 본 논문에서는 빔 곡선 최적화 절차에 따라 구해진 빔 곡선을 갖는 곡선 배열안테나용 Rotman 렌즈에 대하여 재초점 방법을 적용하는 절차를 제시하고 있다.

재초점 방법은 빔 곡선을 따라 초점을 재설정함으로써 초점 사이에 위치하는 빔 포트의 최대 위상 오차와 초점을 지나 외각에 위치하는 빔 포트의 최대 위상 오차를 균등화하여 Rotman 렌즈의 최대 위상 오차를 추가적으로 개선시키는 방법으로 빔 곡선의 위상 오차가 작으면 작을수록 재초점을 적용하기 전후 간의 빔 곡선과 배열 곡선의 변동이 더욱더 감소하게 되는 장점이 있다.

3-1 절의 빔 곡선 최적화 절차에 따라 빔 곡선이 구해지고 나면, 구해진 빔 곡선을 따라 비축 초점(off-axis focal points)을 이동시키면서, 최대 위상 오차를 비교하여, 최대 위상 오차가 가장 낮은 최적의 초점 각도 α 를 결정한다. 이 초점 각도 α 를 이용하여 빔 곡선 상에서 초점거리 F 와 γ 를 직접 구할 수 있다. 이러한 재초점 절차를 따르면 고정된 파라미터인 g 를 포함하여 모든 설계 파라미터들이 구해진다. 이 설계 파라미터들을 적용하고 빔 곡선 최적화 절차를 재 수행하여 모든 빔 포트들의 위상 오차를 최소화한다.

재초점 절차에 따라 구해진 설계 파라미터들을 적용하여 설계된 Rotman 렌즈와 재초점 전의 Rotman 렌즈를 비교하면 빔 곡선과 배열 곡선의 형상은 거의 변동되지 않으면서도 위상 오차는 현저하게 감소하게 되며, 주로 전송선의 길이가 조정된다.

본 논문의 빔 곡선 최적화 절차와 재초점 절차를 적용하면, 3초점을 보유한 채 빔 곡선과 배열 곡선의 형상을 거의 변경시키지 않으면서 최적의 위상 성능을 구현할 수 있다.

IV. 시뮬레이션 결과

제안된 식과 절차에 따라 설계된 Rotman 렌즈의 직선 배열안테나뿐만 아니라, 원곡선, 포물선, V자형 곡선 등의 오목 및 볼록 곡선 배열안테나에 대한 급전 성능을 입

증하기 위하여 시뮬레이션 결과를 제시하고자 한다.

4-1 직선 배열안테나

Rotman 렌즈 급전 직선 배열안테나의 설계 파라미터는 $g=1.6, f=1.44, \gamma=1.1, \alpha=40^\circ, \beta_m=50^\circ$ 이다. 이 설계 파라미터는 참고문헌 [6]과 동일하며, 렌즈의 설계 파라미터가 F 대신에 V_m 에 의해 정규화되어 있는 차이만 존재한다. 제안된 Rotman 렌즈의 설계 방법은 직선 배열안테나를 급전하는 데에도 직접 적용할 수 있으며, 유도된 수식에서 배열안테나의 세로축 값을 0으로 놓으면 직선 배열안테나에 대한 수식으로 전개할 수 있다. 이 렌즈에 대하여 재초점 절차를 거치면 $f=1.4502, \gamma=1.0992, \alpha=38.52^\circ$ 로 설계 파라미터가 변경된다.

그림 4는 Rotman 렌즈 급전 직선 배열안테나의 형상으로 원형 빔 곡선을 갖는 경우와, 빔 곡선 최적화와 재초점 절차를 적용한 경우에 대하여 각각 빔 곡선과 배열 곡선을 겹쳐 그린 것이다. 빔 곡선과 배열 곡선의 뚜렷한 변화는 없으며, 비축 초점(off-axis focal points)의 위치가 변경된 것을 알 수 있다.

그림 5는 Rotman 렌즈 급전 직선 배열안테나가 원형 빔 곡선을 갖는 경우와 빔 곡선 최적화 및 재초점 절차를 적용한 경우에 대하여 스캔 각도, β 에 따른 정규화된 최대 경로길이 오차를 나타낸 것이다. 제안된 방법은 위상

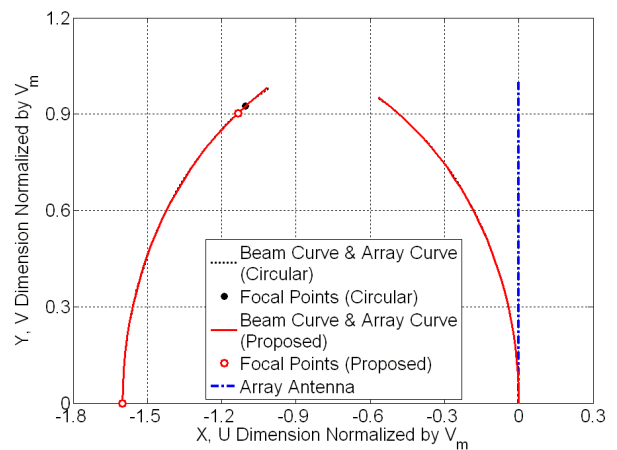


그림 4. 렌즈 급전 직선 배열안테나의 형상
Fig. 4. Shapes of lens-fed straight line array antenna.

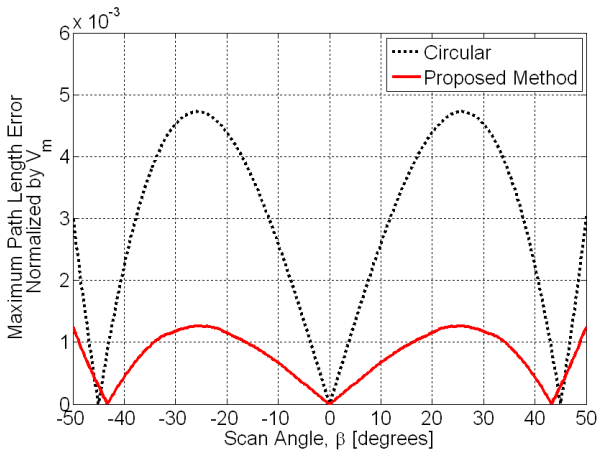


그림 5. 렌즈 급전 직선 배열안테나의 위상 오차
Fig. 5. Phase error of lens-fed straight line array antenna.

성능을 크게 개선시켰고, 배열안테나를 정확히 3초점을 보유한 채 급전할 수 있고, 재초점을 통하여 초점 사이에 위치하는 빔 포트의 최대 위상 오차와 초점을 지나 외각에 위치하는 빔 포트의 최대 위상 오차가 균등화되었음을 알 수 있다. 그림에서와 같이 스캔 범위 내에서 위상 오차가 0인 점이 3개가 존재한다는 것은 제안된 설계 방법이 Rotman 렌즈의 3초점 원리에 따라 정확히 설계되었음을 입증하는 것이다. 제안된 방법의 정규화된 최대 경로길이 오차는 원형 빔 곡선 대비하여 73.4 %의 감소율을 나타내고 있다.

4.2 원곡선 배열안테나

제안된 Rotman 렌즈의 설계 방법은 원곡선 배열안테나의 형상이 블록하거나 오목한 경우에 대하여 모두 적용될 수 있으며, 본 논문에 제시된 Rotman 렌즈 급전 블록 원곡선 배열안테나의 설계 파라미터는 $g=1.6, f=1.27, \gamma=1.1, \alpha=40^\circ, \beta_m=50^\circ, \theta=30^\circ$ 이다. 이 렌즈에 대하여 재초점 절차를 거치면 $f=1.3207, \gamma=1.0999, \alpha=36.79^\circ$ 로 변경된다.

그림 6은 Rotman 렌즈 급전 블록 원곡선 배열안테나의 형상으로 원형 빔 곡선을 갖는 경우와, 빔 곡선 최적화와 재초점 절차를 적용한 경우에 대하여 각각 빔 곡선과 배열 곡선을 겹쳐 그린 것이다. 직선 배열안테나의 경우와 마찬가지로 빔 곡선과 배열 곡선의 뚜렷한 변화는 없으

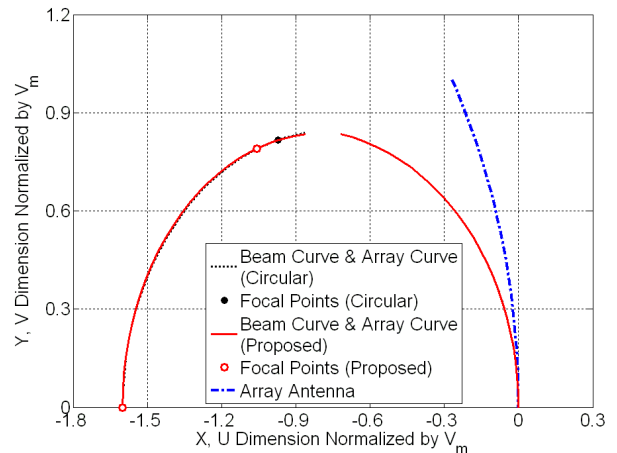


그림 6. 렌즈 급전 블록 원곡선 배열안테나의 형상
Fig. 6. Shapes of lens-fed convex circular curve array antenna.

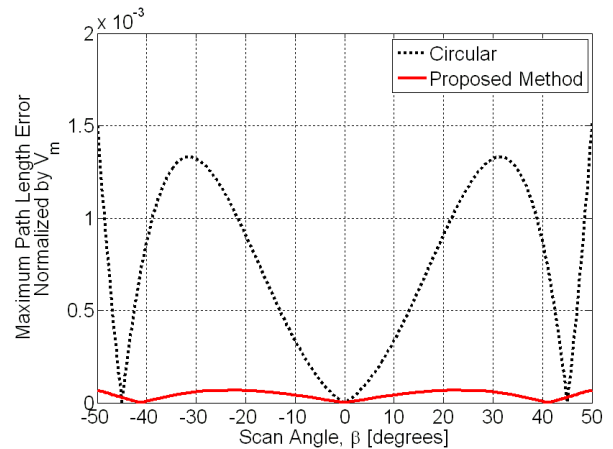


그림 7. 렌즈 급전 블록 원곡선 배열안테나의 위상 오차
Fig. 7. Phase error of lens-fed convex circular curve array antenna.

며 비축 초점의 위치가 변경된 것을 알 수 있다.

그림 7은 Rotman 렌즈 급전 블록 원곡선 배열안테나가 원형 빔 곡선을 갖는 경우와 빔 곡선 최적화 및 재초점 절차를 적용한 경우에 대하여 스캔 각도, β 에 따른 정규화된 최대 경로길이 오차를 나타낸 것이다. 제안된 방법은 3초점을 보유한 채로 위상 성능을 크게 개선시킬 수 있다. 제안된 방법의 정규화된 최대 경로길이 오차는 원형 빔 곡선 대비하여 95.5 %의 감소율을 나타내고 있다.

4-3 포물선 배열안테나

제안된 Rotman 렌즈의 설계 방법은 포물선 배열안테나의 형상이 형상이 불록하거나 오목한 경우에 대하여 모두 적용될 수 있으며, 본 논문에 제시된 Rotman 렌즈 급전 오목 포물선 배열안테나의 설계 파라미터는 $g=1.6$, $f=1.66$, $\gamma=1.1$, $\alpha=40^\circ$, $\beta_m=50^\circ$, $f_L=0.9930$ 이다. 여기서 f_L 은 배열안테나의 초점거리 F_L 을 V_m 으로 정규화한 것이다. 이 렌즈에 대하여 재초점 절차를 거치면 $f=1.6472$, $\gamma=1.0973$, $\alpha=38.43^\circ$ 로 변경된다.

그림 8은 Rotman 렌즈 급전 오목 포물선 배열안테나의 형상으로 원형 빔 곡선을 갖는 경우와, 빔 곡선 최적화와 재초점 절차를 적용한 경우에 대하여 각각 빔 곡선과 배열 곡선을 겹쳐 그린 것이다. 배열 곡선의 변화는 거의 없으며, 빔 곡선과 비축 초점의 위치가 변경된 것을 알 수 있다. 여기에서 빔 곡선의 변화는 원형 빔 곡선 방법과 제안된 방법에서 사용한 빔 곡선 최적화 방법의 차이에 의해서 발생된 것이다. 위상 오차가 작은 빔 곡선 방법을 사용할수록 이 차이는 감소한다.

그림 9는 Rotman 렌즈 급전 오목 포물선 배열안테나가 원형 빔 곡선을 갖는 경우와 빔 곡선 최적화 및 재초점 절차를 적용한 경우에 대하여 스캔 각도, β 에 따른 정규화된 최대 경로길이 오차를 나타낸 것이다. 제안된 방법은 3초점을 보유한 채로 위상 성능을 크게 개선시킴을 알

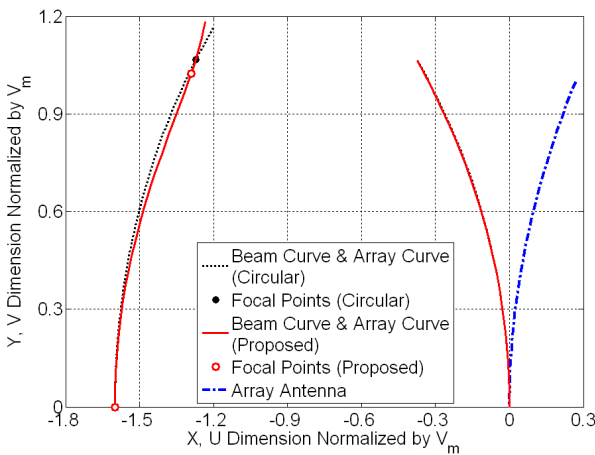


그림 8. 렌즈 급전 오목 포물선 배열안테나의 형상
Fig. 8. Shapes of lens-fed concave parabolic curve array antenna.

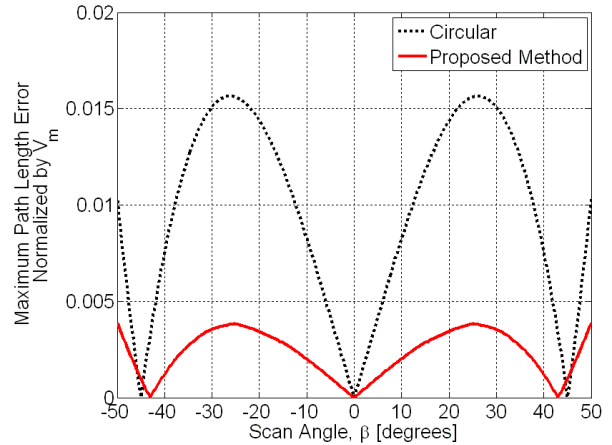


그림 9. 렌즈 급전 오목 포물선 배열안테나의 위상 오차
Fig. 9. Phase error of lens-fed concave parabolic curve array antenna.

수 있다. 제안된 방법의 정규화된 최대 경로길이 오차는 원형 빔 곡선에 대비하여 75.2%의 감소율을 나타내고 있다.

4-4 V자형 곡선 배열안테나

제안된 Rotman 렌즈의 설계 방법은 V자형 곡선 배열안테나의 형상이 불록하거나 오목한 경우에 대하여 모두 적용될 수 있으며, 본 논문에 제시된 Rotman 렌즈 급전 V자형 곡선 배열안테나의 설계 파라미터는 $g=1.6$, $f=1.66$, $\gamma=1.1$, $\alpha=40^\circ$, $\beta_m=50^\circ$, $\phi=75^\circ$ 이다. 이 렌즈에 대하여 재초점 절차를 거치면 $f=1.6458$, $\gamma=1.0965$, $\alpha=38.29^\circ$ 로 변경된다.

그림 10은 Rotman 렌즈 급전 오목 V자형 곡선 배열안테나의 형상으로 원형 빔 곡선을 갖는 경우와, 빔 곡선 최적화와 재초점 절차를 적용한 경우에 대하여 각각 빔 곡선과 배열 곡선을 겹쳐 그린 것이다. 오목한 포물선 배열안테나와 마찬가지로 배열 곡선의 변화는 거의 없으며, 빔 곡선과 비축 초점의 위치가 변경된 것을 알 수 있다. V자형 곡선 배열안테나는 중심점에서 변곡점을 가지므로 렌즈의 배열 곡선도 변곡점을 가짐을 알 수 있다. 이러한 변곡점은 전송선의 길이에도 나타나는 현상이다.

그림 11은 Rotman 렌즈 급전 오목 V자형 곡선 배열안테나가 원형 빔 곡선을 갖는 경우와 빔 곡선 최적화 및 재초점 절차를 적용한 경우에 대하여 스캔 각도, β 에 따

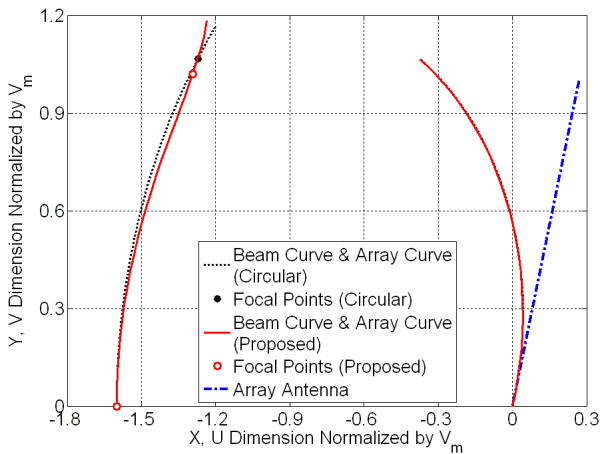


그림 10. 렌즈 급전 오목 V자형 곡선 배열안테나의 형상
Fig. 10. Shapes of lens-fed concave V-shaped curve array antenna.

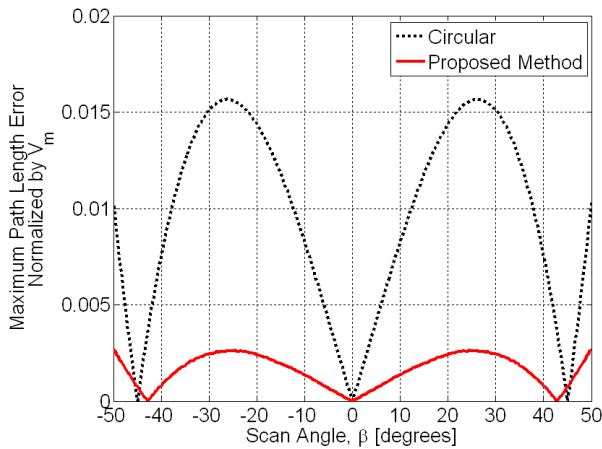


그림 11. 렌즈 급전 오목 V자형 곡선 배열안테나의 위상 오차
Fig. 11. Phase error of Rotman lens-fed concave V-shaped curve array antenna.

른 정규화된 최대 경로길이 오차를 나타낸 것이다. 제안된 방법은 3초점을 보유한 채로 위상 성능을 크게 개선시킬 수 있다. 제안된 방법의 정규화된 최대 경로길이 오차는 원형 빔 곡선 대비하여 82.9%의 감소율을 나타내고 있다.

그림 4와 그림 6에서는 렌즈의 형상 변화를 육안으로 구분하기 어려운 데 비하여 그림 8과 그림 10에서는 뚜렷하게 구분된다. 이 이유는 그림 5와 그림 7에 나타낸 원형

빔 곡선에 의한 경로길이 오차와 제안된 방법에 의한 경로길이 오차 간의 차는 작은 반면에 그림 9와 그림 11에 나타낸 경로길이 오차 간의 차는 상대적으로 훨씬 크기 때문이다.

시뮬레이션 결과를 통하여 제안된 방법에 의해 설계된 Rotman 렌즈는 직선 배열안테나뿐만 아니라, 원곡선, 포물선, V자형 곡선 등의 곡선 배열안테나를 정확히 3초점을 보유한 채 급전할 수 있음을 확인할 수 있다. 또한, 빔 곡선 최적화와 재초점 절차는 빔 곡선과 배열 곡선의 형상을 변경시키지 않은 채 렌즈의 위상 성능을 현저하게 개선할 수 있는 탁월한 방법임을 알 수 있다. 실제로 이 방법에 의한 결과는 빔 곡선 및 배열 곡선의 형상 변화를 최소화하며, 렌즈의 3초점을 보유하는 조건에서 구현할 수 있는 최적의 위상 성능이다.

따라서, Rotman 렌즈의 진폭 성능을 최적화하는 빔 곡선과 배열 곡선의 형상을 구하면, 이 형상을 변경시키지 않으며, 즉 진폭 성능을 변화시키지 않으며, 최적의 위상 성능을 구현할 수 있다.

V. 결 론

컨포멀 배열에 적용할 수 있는 곡선 배열안테나용 Rotman 렌즈의 설계 방법을 제안하였다. 이 설계 방법은 직선 배열안테나는 물론 곡선 배열안테나와 연동하여 Rotman 렌즈의 평행판 영역에 존재하는 배열 포트의 위치와, 배열 포트와 배열안테나 소자를 연결하는 전송선의 길이를 구하는 설계식을 유도하고, 이 유도된 설계식을 바탕으로 빔 곡선 최적화 절차와 재초점 절차를 통하여 위상 오차를 최소화하는 것을 특징으로 한다.

시뮬레이션 결과를 통하여 제안된 방법에 의해 설계된 Rotman 렌즈는 직선 배열안테나뿐만 아니라, 원곡선, 포물선, V자형 곡선 등의 배열안테나를 정확히 3초점을 보유한 채 급전할 수 있으며, 빔 곡선과 배열 곡선의 형상을 거의 변경시키지 않으면서 최적의 위상 성능을 구현할 수 있음을 보였다.

향후 포트들 간의 상호 결합 영향을 감소시킬 수 있는 빔 곡선과 배열 곡선의 형상을 제공하는 설계 파라미터들에 관한 연구가 이루어진다면 최적의 진폭 성능과 위

상 성능을 갖는 Rotman 렌즈의 기하 구조를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Lars Josefsson, Patrik Persson, *Conformal Array Antenna Theory and Design*, John Wiley & Sons, 2006.
- [2] R. C. Hansen, *Phased Array Antennas*, John Wiley & Sons, 2009.
- [3] W. Rotman, R. F. Turner, "Wide angle microwave lens for line source applications", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-11, pp. 623-632, Nov. 1963.
- [4] D. H. Archer, "Lens-fed multiple beam arrays", *Microwave J.*, vol. 27, pp. 171-195, Sep. 1984.
- [5] A. F. Peterson, E. O. Rausch, "Scattering matrix integral equation analysis for the design of a waveguide Rotman lens", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 47, pp. 870-878, May 1999.
- [6] R. C. Hansen, "Design trades for Rotman lenses", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 39, pp. 464-472, Apr. 1991.
- [7] J. P. Shelton, "Focusing characteristics of symmetrically configured bootlace lenses", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-26, pp. 513-518, Jul. 1978.
- [8] D. Archer, R. J. Prickett, and C. P. Hartwig, "Multi-beam array antenna", U. S. Patent 3,761,936, Sep. 1973.
- [9] T. Katagi, S. Mano, and Shin-Ichi Sato, "An improved design method of Rotman lens antennas", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-32, pp. 524-527, May 1984.
- [10] R. Uyguroglu, A. Y. Oztoprak, and C. Ergun, "Improved phase performance for Rotman lens", *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 23, pp. 634-638, Nov. 2013.
- [11] 박주래, 박동철, "Rotman 렌즈의 위상 오차 최소화를 위한 빔 곡선 최적화", *한국전자과학회논문지*, 25(8), pp. 864-871, 2014년 8월.
- [12] Joo-Rae Park, Dong-Chul Park, "Phase error minimization by refocusing Rotman lens", *2013 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings*, pp. 1097-1099, Nov. 2013.

박 주 래



1991년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)
 1993년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)
 1993년 3월~현재: 국방과학연구소 책임연구원
 2004년 3월~현재: 충남대학교 전자공학과 박사과정

[주 관심분야] 다기능 RF 시스템, 배열 안테나

박 동 철



1974년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1976년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학석사)
 1984년 12월: University of California, Santa Barbara (공학박사)
 1977년~1978년: Ruhr University, Bochum, Germany 방문교수

1994년~1998년: IEEE MTT Korea Chapter Chairman
 1998년~2001년: IEEE EMC Korea Chapter Chairman
 2000년~2001년: 한국전자과학회 회장
 2005년~2007년: 대덕 Wireless 포럼 회장
 1976년~현재: 충남대학교 전자공학과 교수
 [주 관심분야] Microwave and Millimeterwave Passive Components, Antennas, EMI/EMC