

경계적분법과 세그멘테이션 기법에 의한 광대역 마이크로스트립 로트만 렌즈의 해석 및 설계

An Analysis and Design of Wideband Microstrip Rotman Lens by Contour Integral and Segmentation Method

이 광 일 · 오 승 열*

Kwang-Il Lee · Seung-Hyeub Oh*

요 약

본 논문은 경계적분법과 세그멘테이션 기법을 이용하여 광대역 주파수 및 광 조향각 범위에서 빔조향이 가능한 마이크로스트립 로트만 렌즈의 해석 및 설계를 제안하고 있다. 렌즈 각 포트간의 모든 상호결합과 다중반사 및 선로간 불연속 특성이 해석에 포함되었다. 등간격 포트 설계를 통해 광조향각 범위에서 배열포트의 출력 리플을 억제하는 구조를 구현하였다. 12 입력 12 출력의 각 포트에 지수함수 테이퍼를 적용하여 임피던스 정합 및 포트간 상호결합을 해석하고 최적화하였다. 제작된 렌즈는 측정결과 6~18 GHz의 광대역 주파수 범위와 $\pm 53^\circ$ 의 조향각 범위에 대해 ± 1.8 dB 이하의 삽입손실 편차와 1° 이하의 조향 정확도를 가지며, 해석결과와도 잘 일치함을 확인하였다.

Abstract

This paper presents analysis and design of microstrip Rotman lens operating over wide band and wide steering angle by the contour integral method along with the segmentation method. All mutual coupling, internal reflections between ports and the discontinuity at every junction are taken into account. Equally spaced ports are designed and realized, which make suppress output ripple through the array ports. Impedance matching and mutual coupling between ports are analyzed and optimized using 12 input and 12 output exponential tapers. The measured results of fabricated lens show ± 1.8 dB insertion loss deviation over 6~18 GHz wide frequency range and beam steering accuracy less than 1° over $\pm 53^\circ$ angle and agrees well with the analysis results.

Key words : Microstrip Rotman Lens, Wide Angle, Exponential Taper

I. 서 론

송신 빔의 제어를 위해 초고주파 로트만 렌즈를 사용하는 다중빔 배열 송신기는 고가의 위상변이기를 사용하여 송신기 복사 빔의 방향을 제어하는 일반적인 위상배열 송신기에 비해 적은 비용으로 제작이 가능하며, 광대역 주파수 범위에서 사용할 수

있고 구조가 간단한 장점을 가지고 있어서 군사용 전자전장비를 비롯하여 레이더 및 민수용으로는 자동차 충돌방지장치와 통신 중계기 등에도 이용 범위가 확대되고 있다^[1].

로트만 렌즈는 Rotman과 Turner에 의해 도파관 혼 안테나와 평행판을 이용하여 처음 제안된 이후 도파관을 이용한 렌즈뿐만 아니라 마이크로스트립

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

*충남대학교 전자공학과(Department of Electronics, Chungnam National University)

· 논문 번호 : 20030428-069

· 수정완료일자 : 2003년 6월 1일

선로를 이용한 렌즈의 설계 및 해석이 이루어져 왔다^[2]. 도파관 형태의 렌즈에 대해서는 선형배열 안테나의 복사 이론을 이용하여 렌즈에 대한 진폭 전달 특성 및 위상 특성에 대한 해석이 가능하다^[3]. 그러나 도파관 구조의 로트만 렌즈는 광대역 주파수 범위에서 동작하도록 하기에는 제작이 어려우며, 구조 또한 복잡하다. 마이크로스트립 렌즈는 제작이 용이하고, 광대역의 주파수 범위에서 운용할 수 있도록 설계 및 제작이 가능하므로 많은 장점이 있다^{[4],[5]}.

마이크로스트립 로트만 렌즈는 많은 입출력 포트를 가지고 있는 다중포트 회로망으로서 상용으로 판매되고 있는 모멘트 기법과 FEM 기법을 이용한 해석 소프트웨어를 이용하여 산란계수 해석이 가능하나, 많은 시간이 소요되는 단점이 있어서 다중포트 로트만 렌즈의 해석을 위해서는 보다 효율적인 해석 방법이 요구된다고 할 수 있다.

본 논문에서는 경계적분법과 세그멘테이션 기법을 이용하여 마이크로스트립 렌즈를 2차원의 평행판 다중포트 회로망으로 모델링하고 해석을 위한 영역을 평행판 영역인 렌즈 캐비티 영역과 테이퍼 영역으로 분할하여 경계적분을 수행하였다^{[6]~[9]}. 얻어진 2개 영역의 임피던스 행렬은 세그멘테이션 기법에 의해 합성된 후 렌즈 전체에 대한 산란행렬로 변환하고 빔포트의 반사계수, 포트간 결합계수, 모든 배열포트로 전달되는 진폭 분포 특성과 위상 특성을 분석한다. 이 결과는 렌즈 내부 포트간 상호결합 현상과 다중 반사 현상을 포함한 특성을 포함하고 있으며, 실험결과와도 잘 일치함을 확인하였다.

실험을 위해 등간격의 포트 배치를 갖는 12 빔포트 12 배열포트의 마이크로스트립 렌즈를 제안하고 설계하였으며, 이를 통해 배열포트에서의 출력리플을 억제하였다.

II. 경계적분법과 세그멘테이션 기법에 의한 렌즈 해석

그림 1에 제시한 것과 같은 마이크로스트립 선로를 이용한 렌즈의 경우, 마이크로스트립의 두께가 동작주파수에서의 파장에 비해 매우 작기 때문에 두께 방향으로 전계의 변화가 없다고 가정할 수 있

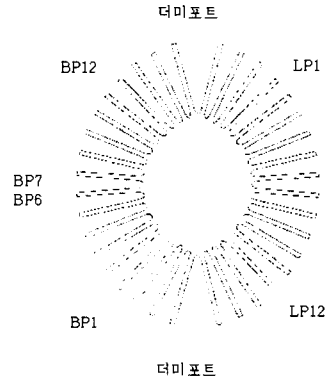


그림 1. 12-입력 12-출력 지수함수 테이퍼 포트와 3-더미포트를 갖는 로트만 렌즈의 형상

Fig. 1. Rotman lens configuration with 12-input, 12-output exponentially tapered ports and 3 dummy ports.

다. 그러므로 렌즈를 2차원 구조의 다중포트를 갖는 평행판으로 보고 경계적분법을 적용할 수 있다^[8].

마이크로스트립 평행판 회로의 가장자리에서의 산란된 전자계를 고려하여 경계 C 의 안쪽에 있는 한 점 S 에서의 전압은 Kirchhoff의 적분식에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v(s) = \frac{1}{4j} \int_C [H_0^{(2)}(kr) \frac{\partial v(s_0)}{\partial n} - v(s_0) \frac{\partial H_0^{(2)}(kr)}{\partial n}] ds_0 \quad (1)$$

경계 C 상의 한 점 S 에서의 전압은 경계 C 상의 전압과 전류밀도의 향으로 나타낼 수 있으며 마이크로스트립 선로의 경우는 다음 식 (2)와 같이 표현된다.

$$v(s) = \frac{1}{2j} \int_C [k \cos \theta H_1^{(2)}(kr) v(s_0) + jw \mu h J_n(s_0) H_0^{(2)}(kr)] ds_0 \quad (2)$$

그림 2에 평행판 회로망의 경계적분 형상을 나타내었다. 여기서, $k = w\sqrt{\mu\epsilon_0\epsilon_{eff}}$, γ 는 관찰점 S 와 급전점 S_0 를 잇는 직선거리이며, θ 는 이 직선과 S_0 에서 둘레 경계의 바깥쪽으로 수직인 선에 의해 만들어진 각이다. $H_1^{(2)}$ 는 제 2종 1차 Hankel 함수이고, $H_0^{(2)}$ 는 제 2종 0차 Hankel 함수이다. J_n 은 S_0 에서 평행판 쪽으로 흐르는 전류밀도이다. 식 (2)에 따른 계산을 위해 평행판의 경계를 N 개의 분할 구간으로 나눈다. 이 때, 각 구간들의 폭 $W_m(m=1, 2, \dots, N)$ 은

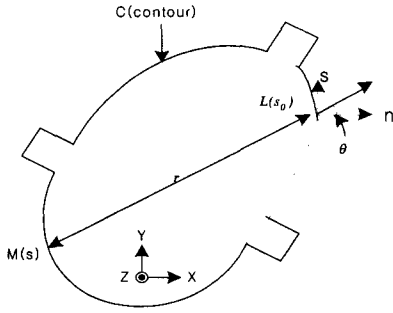


그림 2. 평행판 회로망의 경계적분 해석 형상
Fig. 2. Configuration of planar component to be analyzed by the contour integral method.

파장에 비해 상당히 작아야 한다. 여기서는 $0.02 \lambda_{dh}$ (λ_{dh} 는 유전체에서의 실효파장)으로 하였다. 경계면에서의 전압은 다음과 같다.

$$2jv_l = \sum_{m=1}^N \left\{ kv_m G_{lm} + \frac{j\omega\mu d}{p} i_m F_{lm} \right\} \quad (3)$$

여기서, v_l 은 l 번째 구간상에서의 전압이고, i_m ($=J_n W_m$)은 m 번째 구간으로 흐르는 전체의 전류이다. 행렬 원소 G_{lm} 과 F_{lm} 은 다음과 같다.

$$G_{lm} = \begin{cases} \int_{W_m} \cos \theta H_1^{(2)}(kr) ds_0 & , l \neq m \\ 0 & , l = m \end{cases} \quad (4)$$

$$F_{lm} = \begin{cases} \frac{1}{W_m} \int_{W_m} H_0^{(2)}(kr) ds_0 & , l \neq m \\ 1 - \frac{2i}{\pi} \left(\ln \frac{kW_l}{4} - 1 + \gamma \right) & , l = m \end{cases} \quad (5)$$

식 (5)에서 $\gamma(=0.5772)$ 는 Euler 상수이다. 위에서 가정한 것과 같이, N 구간들 중 어느 곳으로도 급전할 수 있고, i_m 은 m 번째 구간으로 급전된 전류를 나타낸다. 전압 $[V]$ 는 $[Z]$ 행렬과 전류 $[I]$ 행렬로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} [V] &= [A]^{-1} [B] [I] \\ [Z] &= [A]^{-1} [B] \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $[V]$ 와 $[I]$ 는 각 구간에서의 전압과 전류로 구성되는 열벡터이다. $[A]$ 와 $[B]$ 는 회로의 형상에 의해 정해지는 $N \times N$ 행렬이다. 식 (6)으로부터 구한 이 행렬들의 원소들은 다음과 같다.

$$\begin{cases} a_{lm} = -kG_{lm} & , l \neq m \\ a_{lm} = 2j & , l = m \end{cases} \quad (7)$$

$$b_{lm} = \frac{j\omega\mu d}{p} F_{lm} \quad (8)$$

마이크로스트립 렌즈가 입력포트인 빔포트와 출력포트인 배열포트를 합쳐서 N 개의 포트를 갖고 있고 각 포트가 N_i 개의 서브포트로 나뉘어진다면 렌즈 캐비티의 임피던스 행렬 Z_l 은 $N \cdot N_i \times N \cdot N_i$ 행과 열을 갖는 행렬이 된다.

마찬가지로, 테이퍼 영역에 대한 경계적분은 다중 회로망으로 다룰 수 있으며, 각 테이퍼의 임피던스 Z_l 은 따로 계산한다. 테이퍼의 측면 벽을 따라서는 결합포트가 없으며, 해당 구간의 전압 V 는 경계조건 $\frac{\partial V}{\partial n} = 0$ 을 만족한다. 따라서 계산된 각 i 번째 테이퍼의 임피던스 Z_l^i 에서 해당되는 열과 행을 제거할 수 있다.

세그멘테이션 기법을 로트만 렌즈에 적용하면 경계적분을 렌즈의 전 둘레 구간에 대해 수행할 때에 비해 상당히 시간을 줄일 수 있으며, 이로 인해 성능 최적화를 위한 반복 해석작업이 용이하다. 로트만 렌즈의 경우, 포트의 개구면 만으로 구성된 N 포트의 렌즈 캐비티 영역 r 과 테이퍼와 전송선로로 구성된 N 개의 테이퍼 영역인 두 개의 세그먼트로 나누었다. 테이퍼 영역 중 전송선로가 커넥터와 연결되는 부분은 p 영역, 렌즈 캐비티의 개구면과 만나는 영역은 q 영역으로 명명하였다. 따라서, 그림 2와 같이 q_1 은 r_1 과 q_2 는 r_2 와 q_N 은 r_N 과 서로 결합한다. 그림 3에서 빔포트와 배열 포트의 테이퍼는 오른쪽 그림과 같이 포트의 개구면과 커넥터 부분을 동일하게 N_i 개로 분할한다. 또한, 테이퍼의 측면과 전송선로의 측면 부분도 $0.02 \lambda_{dh}$ 이하의 간격으로 분할하여 경계적분시 각 구간에서는 동일한 전압을 갖는다고 가정한다. 테이퍼의 개구면은 렌즈 세그먼트와 테이퍼 세그먼트가 만나는 부분으로서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{q_n} &= V_{r_n} \text{ and } i_{q_n} = -i_{r_n} \\ ; n &= 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (9)$$

렌즈 세그먼트 l 과 테이퍼 세그먼트 t 에 대해 임피던스 행렬은 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_l = \begin{bmatrix} Z_{lp} & Z_{lpr} \\ Z_{lrp} & Z_{lr} \end{bmatrix} \quad Z_t = \begin{bmatrix} Z_{tp} & Z_{tpq} \\ Z_{tpq} & Z_{tq} \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서 p_a 는 테이퍼의 50Ω 전송선로의 포트이고, p_b 는 렌즈 캐비티의 결합포트를 가리키나, 렌즈 캐비티의 경우 개구면의 포트 q 를 제외하고는 없으므로 $p_b=0$ 이 될 것이다. $Z_{p_a}, Z_{p_a,q}, Z_{q,p_a}, Z_{q,q}, Z_{p_b}, Z_{p_b,q}, Z_{q,p_b}, Z_{q,q}$ 은 각각의 서브 행렬이다.

세그먼트 l 과 i 의 Z -행렬은 그림 3과 그림 4와 같이 분할하여 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_p \\ V_q \\ V_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{pp} & Z_{pq} & Z_{pr} \\ Z_{qp} & Z_{qq} & 0 \\ Z_{rp} & 0 & Z_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서 행렬요소로서 0은 null 행렬을 가리킨다. 식 (9)를 식 (11)에 대입하여 V_r, V_q, i_q, i_r 을 제거하면

$$V_p = [Z] i_p \quad (12)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서, $Z_{pr} = [Z_{rp}]' = [0]$, Z 는 렌즈의 전체 행렬이며, 다음 식 (13)과 같이 정리 될 수 있다.

$$Z = [Z_{p_a}] + [Z_{p_a,q}][Z_{q,q}Z_i]^{-1}[-Z_{q,p_a}] \quad (13)$$

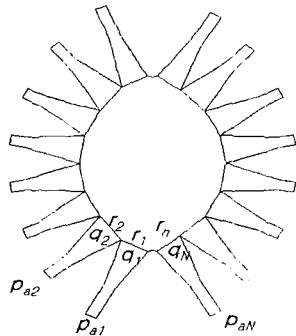


그림 3. 로트만 렌즈 경계의 세그멘테이션
Fig. 3. Segmentation of Rotman lens contour.

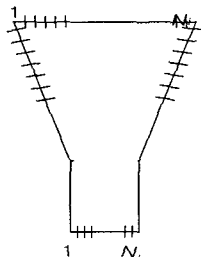


그림 4. 짧은 선으로 나누어진 테이퍼 부분
Fig. 4. Taper section divided by short lines.

여기서,

$$Z_i = [Z_{rr}], Z_{pp} = [Z_{p_a}] = \begin{bmatrix} Z_{p_{a1}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Z_{p_{a2}} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & Z_{p_{aN}} \end{bmatrix}$$

로서 대각행렬이 된다. $Z_{p_{a_n}}$ 은 n 번째 테이퍼의 입력 임피던스이다. $Z_{p_{a_i}}, Z_{q,q}, Z_{q,p_a}$ 는 모두 $Z_{p_{a_n}}$ 와 같은 구조의 $N \times N$ 대각 행렬이다. 행렬 Z_i 도 $N \times N$ 행렬이다. 결국, 경계적분법으로 렌즈 캐비티와 테이퍼를 각각 계산한 후, 이를 세그멘테이션으로 결합할 경우, 테이퍼의 측면은 경계조건에 의해 해당 행과 열이 제거되므로, 테이퍼의 커넥터 부분과 포트 개구면의 분할을 N_i 로 동일하게 나누면, 임피던스 행렬의 크기는 $(N \times N_i) \times (N \times N_i)$ 가 된다.

다음으로 렌즈의 전체 산란 계수를 구하기 위해 인접 서브포트들 간에 전압이 서로 같다는 가정에 근거를 두고 서브포트들의 결합은 어드미턴스들의 합으로 나타낼 수 있으므로 이를 구하기 위해 다음과 같이 $[Z]$ 행렬의 역 행렬을 계산한다.

$$[Y] = [Z]^{-1} \quad (14)$$

일반적으로 포트 i 와 j 가 각각 n 과 m 개의 서브포트들로 나누어져서, $i = \{i_1, i_2, \dots, i_n\}$ 이고, $j = \{j_1, j_2, \dots, j_m\}$ 이라면, 그 때, 전체의 어드미턴스의 Y_{ij} 항은 다음과 같다.

$$Y_{ij} = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^m Y_{kl} \quad (15)$$

여기서 Y_{kl} 는 다수의 서브포트들을 갖는 어드미턴스 행렬의 원소들이다. 렌즈 전체의 산란행렬은 다음의 관계식을 사용하여 어드미턴스 행렬로부터 직접 구할 수 있다

$$[S] = [Y_0]^{-1/2}([Y_0] - [Y])([Y_0] + [Y])^{-1}[Y_0]^{1/2} \quad (16)$$

여기서 $[Y_0]$ 는 대각행렬로 대각원소들은 각 포트에서의 어드미턴스로서 $1/Z_{01}, 1/Z_{02}, \dots, 1/Z_{0N}$ 이다.

Ⅲ. 등간격 지수함수 테이퍼 렌즈의 설계 및 해석

제시된 해석 방법을 이용하여 로트만 렌즈 구조에서 흔히 나타날 수 있는 그레이팅 로브를 억제한

마이크로스트립 렌즈를 설계 및 해석하였다. 로트만 렌즈는 빔포트와 배열포트들이 배열 구조를 가지고 있으며, 선형 배열 안테나에서와 같이 $0.6 \lambda_{eff}$ (λ_{eff} 는 유전체에서 최고 동작주파수 파장) 이상으로 포트간의 간격이 형성되면 로트만 렌즈를 배열 안테나와 연결할 때 그레이팅 로브를 발생시키게 된다^[10].

그러나, 지금까지 로트만 렌즈의 설계는 위상 전달 특성의 해석에 치중해 온 것이 사실이다. 또한, 3:1 이상의 광대역 주파수 범위에서의 특성 해석은 안테나의 복사특성을 이용하여 해석함에 따라 제한적인 해석이 수행되었다. 따라서 광대역 및 광각 렌즈의 내부 불연속 구조에 따른 다중 반사와 포트 간 상호 간섭의 영향을 고려한 렌즈 설계는 별로 이루어지지 않았다고 할 수 있다. 그리고, 대칭형 구조의 로트만 렌즈의 설계시 배열 안테나 개구면 선상에서 균일 간격으로 나누어 이를 스케일링 계수로 하여 렌즈의 포트 좌표를 결정하였기 때문에 광 조향각으로 설계를 할 때에는 가장자리 포트와 인접포트의 간격은 가운데 포트와 인접 포트의 간격보다 많이 벌어지게 된다^[11]. 이 때문에 포트 간격을 설정할 때 최고 주파수에서 $0.5 \lambda_{eff}$ 보다 적은 값으로 설정하였고 이로 인해 저주파수 대역에서는 반사계수가 커지며, 전달특성이 나빠지는 결과를 초래하였다.

본 논문에서는 12 빔포트, 12 배열 포트 렌즈의 설계를 위해 포트 중심간의 간격을 $0.52 \lambda_{eff}$ 로 균일하게 하면서, 최대 조향각이 $\pm 53^\circ$ 가 되도록 하였으며, 주파수는 5 GHz에서 18 GHz까지 동작하도록 지수함수 테이퍼를 사용하여 포트 간의 상호결합을 최적화하였다. 렌즈의 구조는 대칭형 구조를 택하였

으며, 테이퍼의 길이는 6 GHz에서 $0.08 \lambda_{eff}$ 로 하였다. 제작할 렌즈를 고려하여 $\epsilon_r=2.33$, $H=0.7874$ mm, $t=0.03556$ mm, $\tan\delta=0.0012$ 인 RT-Duroid 5870 Rogers사 기판을 사용하였고, 마이크로스트립 선로에서의 프링징 필드(Fringing field)를 고려하여 실효 선로폭을 적용하였다. 테이퍼의 동축콘넥터와 연결되는 50 ohm 선로 부분을 제외하고는 모두 자체벽으로 처리하였다. 렌즈곡면의 전압분포 계산을 위한 분할 간격은 최대주파수 18 GHz를 기준하여 $0.02 \lambda_{eff}$ 로 하였다. 가장자리 빔 포트에 신호를 급전할 때는 다른 포트들의 경우에 비해 가장자리 빔포트와 배열포트의 경계면인 측면 벽에서의 반사가 크고, 배열포트까지의 경로차가 크기 때문에 진폭 전달특성이 나빠진다. 이를 보완하기 위해 측면 벽에 그림 1과 같이 더미포트를 설계, 배치하였다. 이렇게 하면 배열 포트간의 경로길이 비율이 줄어들어 고른 특성을 얻는 데 유리하다.

그림 5에 경계적분과 세그멘테이션 해석에 적용된 설계 렌즈의 프링징 필드를 고려한 경계적분 둘레와 형상을 도시하였다. 실선 부분이 실제 마이크로스트립 패턴이고, 점선 부분이 경계적분 둘레이다. 점선 둘레는 주파수에 따라서 달라지며, 저주파수에서는 실효 폭이 더 커지며, 고주파수 대역에서는 작아진다. 그림 6에 제작된 12 빔포트, 12 배열 포트 마이크로스트립 렌즈의 형상을 도시하였다.

그림 6의 아래쪽이 빔포트들이고, 위쪽이 배열포트들이다. 지수함수 테이퍼와 연결되는 50 Ω 전송선로의 길이는 SMA 동축 커넥터를 배치할 수 있도록 30 mm로 하였다. 각각의 배열 포트 출력은 동일

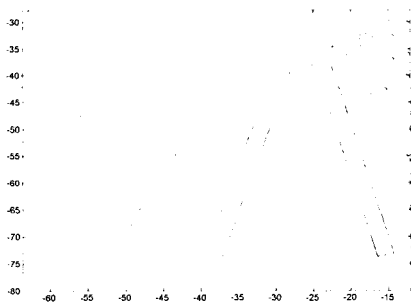


그림 5. 경계적분을 위한 렌즈 경계(점선)
Fig. 5. The contour of lens for contour integral analysis(dotted line).

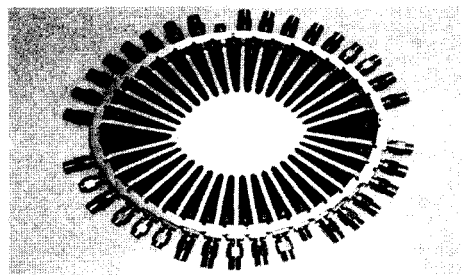


그림 6. 제작된 등간격 12×12 포트 마이크로스트립 렌즈
Fig. 6. Fabricated 12×12 port lens with equally spaced ports.

한 길이 동일한 위상지연을 갖는 동축케이블을 사용하여 선형 배열된 각각의 안테나까지 연결된다. 기관과 커넥터 고정을 위한 케이스로서는 알루미늄을 사용하였고, 제작된 렌즈의 크기는 17.7 cm × 14.6 cm이다.

그림 7~그림 9에 설계된 등간격 지수함수 테이퍼 렌즈의 해석결과와 실험결과를 비교 도시하였다. 그림 7은 6 GHz에서 가장자리 빔포트로 부터 배열포트로의 삽입손실 및 위상을 도시하였다. 그림 8은 12 GHz, 그림 8은 18 GHz에서의 결과를 나타내고 있다. 가장자리 빔포트는 가장 큰 53°의 조향각을 이루는 포트로서 배열포트로 분포되는 진폭의 리플이 가장 큰 곳이다. 그러나, 그림에 나타난 것처럼 6 GHz에서는 ±0.9 dB, 12 GHz에서는 ±1.35 dB, 최고 주파수인 18 GHz에서는 ±1.8 dB의 적은 리플을 보이고 있으며 해석결과와 잘 일치하고 있다. 가장자리 빔포트에서 배열포트로 전달되는 위상도

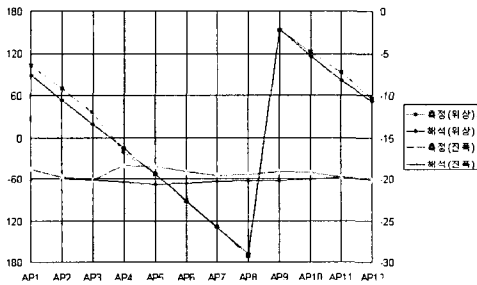


그림 7. 가장자리 포트에서 배열포트로의 삽입손실 및 위상(6 GHz)
Fig. 7. Insertion loss and phase of outermost beam port to all array ports(6 GHz).

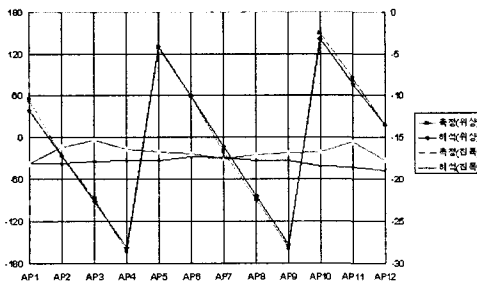


그림 8. 가장자리 포트에서 배열포트로의 삽입손실 및 위상(12 GHz)
Fig. 8. Insertion loss and phase of outermost beam port to all array ports(12 GHz).

매우 선형적인 변화를 보이고 있으며, 해석결과와도 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

설계 제작된 초고주파렌즈가 위상배열송신기에서 빔포트의 스위칭에 따라 빔지향 특성이 어떠한지를 확인하기 위해 해석 및 측정된 렌즈의 S-파라미터를 안테나의 진폭과 위상으로 하여 0.6 cm 간격으로 배열된 8개 혼 안테나의 배열인자를 고려한 빔조향 패턴을 계산을 통해 예측하였다. 그림 10~그림 12에 6 GHz, 12 GHz, 18 GHz에서 가장자리 빔포트와 가운데 빔포트로 급전될 때 빔조향 패턴을 해석결과를 측정결과와 함께 도시하여 비교하였다.

가장자리 빔포트인 BP#1에서의 최대 조향각의 설계치는 53° 이나, 6 GHz의 경우 최외각 조향빔은 안테나 패턴의 영향으로 빔조향 오차를 주지만, 18 GHz의 경우 53.9°로써 설계치의 1° 이내의 오차로서 좋은 결과를 주고 있다. 또한, 등간격 포트 설계로 인해 18 GHz에서 나타날 수 있는 그레이팅 로브가 가시영역 내에서 보이지 않고 있는 좋은 결과를

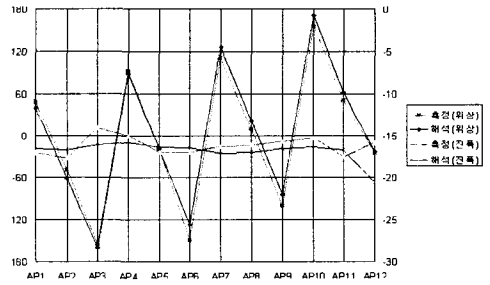


그림 9. 가장자리 포트에서 배열포트로의 삽입손실 및 위상(18 GHz)
Fig. 9. Insertion loss and phase of outermost beam port to all array ports(18 GHz).

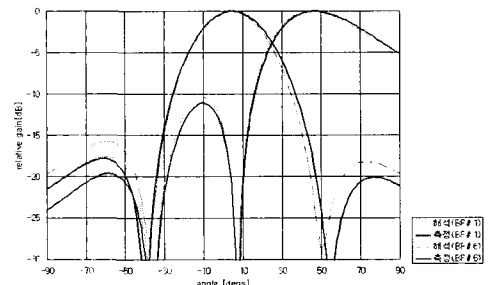


그림 10. 6 GHz에서의 빔조향 패턴(BP#1, BP#6)
Fig. 10. Beam steering pattern at 6 GHz(BP#1, BP#6)

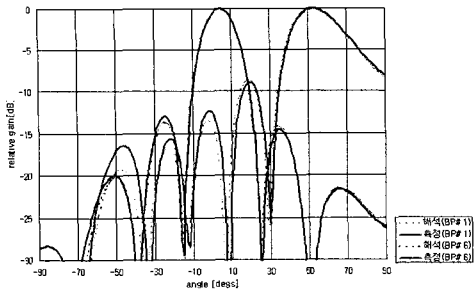


그림 11. 12 GHz에서의 빔조향 패턴(BP#1, BP#6)
Fig. 11. Beam steering pattern at 12 GHz(BP#1, BP#6).

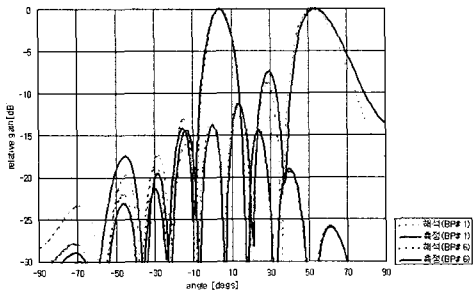


그림 12. 18 GHz에서의 빔조향 패턴(BP#1, BP#6)
Fig. 12. Beam steering pattern at 18 GHz(BP#1, BP#6).

나타내고 있다. 최외각 조향빔은 해석결과와 1.5°의 조향오차를 보이고 있으나, 가운데 포트의 경우 조향빔은 해석결과와 0.2° 이내의 조향오차를 보이며, 잘 일치하는 결과를 보이고 있다. 주엽 대 축명의 이득 차이가 해석치보다 측정치가 크게 나타나는 것은 경계적분 해석시 고려하지 못한 커넥터의 손실과 불연속 선로에서의 복사 손실로 인해 나타나는 현상으로 판단된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 경계적분법과 세그멘테이션 기법을 적용하여 광대역 마이크로스트립 로트만 렌즈를 해석하였다. 제시된 해석방법을 적용하여 3:1의 광대역 주파수와 ±53°의 광 조향각 범위에서 동작하는 마이크로스트립 렌즈를 설계하고 배열포트로 전달되는 삽입손실의 리플과 위상오차를 최적화하였다. 측정결과 전 대역에 걸쳐 가장자리 포트에서 ±

1.8 dB 이내의 리플특성을 얻었으며, 18 GHz에서의 빔조향 오차는 0.9°로서 좋은 결과를 얻었다. 등간격 포트 설정과 지수함수 테이퍼를 사용하여 배열포트의 출력리플을 억제하였으며, 빔포트와 배열포트의 경계면에 더미포트를 사용하여 내부 반사를 흡수하고 배열포트에의 리플을 최소화 할 수 있었다. 해석결과와 측정결과와의 비교를 통해 제시된 해석방법이 신뢰성있게 마이크로스트립 렌즈의 성능을 예측할 수 있음을 알 수 있었다. 추후 포트와 포트 사이의 프린징 필드 교차영역에 대해 고차모드의 해석과 복사손실 등을 고려한 정확한 모델링이 이루어진다면 마이크로스트립 렌즈의 설계 및 해석이 더욱 정확해지고 유용한 해석결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] A. F. Peterson, E. O. Rausch, "Scattering Matrix Integral Equation Analysis for the Design of a Waveguide Rotman Lens", *IEEE Trans. Antennas Propagation*, pp. 870-878, May 1999.
- [2] W. Rotman, R. F Turner, "Wide-angle Microwave Lens for Line Source Application", *IEEE Trans. Antennas Propagation*, vol. AP-11, pp. 623-632, Nov. 1963.
- [3] M. S. Smith, A. K. S. Fong, "Amplitude performance of Ruze and Rotman lenses", *Radio Electron. Eng.*, vol. 53, no. 9, pp. 329-336, Sep. 1983.
- [4] M. J. Maybell, "Ray structure method for coupling coefficient analysis of the two dimensional Rotman lens", *Proc. IEEE AP-S Conference*, pp. 144-147, 1981.
- [5] P. C. Scharma, K. C. Gupta, C. M. Tsai, J. D. Bruce and R. Presnell, "Two-dimensional field analysis for CAD of Rotman-type beam-forming lenses", *Int. Jour. of MIMICAE*, vol. 2. no. 2, pp. 90-97, 1992.
- [6] T. Okoshi, T. Miyoshi, "The planar circuit-an approach to microwave integrated circuitry", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-20, no. 4, Apr. 1972.

- [7] K. K. Chan, W. Tam, "Field Analysis of planar Bootlace Lens Feeds", *International Conference on Radar, Paris*, vol. 1, pp. 273-278. April 1989.
- [8] K. K. Chan, "Planar waveguide model of Rotman lens", *IEEE AP-S Symp. Dig.*, pp. 651-654, 1989.
- [9] T. Okoshi, Y. Uehara, T. Takeuchi, "The segmentation method-An approach to the analysis of microwave planar circuits", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 23, no. 10, pp. 662-669, 1976.
- [10] C. J. Sletton, "Reflector and Lens Antennas -Analysis and Design Using Personal Computers", Artech House, pp. 294-297, 1988.
- [11] J. P. Shelton, "Focussing characteristics of symmetrically configured bootlace lenses", *Radio & Electron. Eng., IEEE Trans.*, AP-26, (4), pp. 513-518, 1978.

이 광 일



1980년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
 1990년 8월: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)
 1979년 12월~현재: 국방과학연구소 책임연구원
 1995년 3월~현재: 충남대학교 전

자공학과 박사과정

[주 관심분야] RF 소자 및 안테나 설계

오 승 엽



1971년 2월: 연세대학교 전기공학과 (공학사)
 1973년 2월: 연세대학교 전기공학과 (공학석사)
 1982년 8월: 연세대학교 전기공학과 (공학박사)
 1977년 7월~현재: 충남대학교 전

자공학과 교수

[주 관심분야] 안테나 및 전자파이론