

# 광각 빔조향 특성을 갖는 소형 로트만 렌즈

## A Compact Rotman Lens with Wide Angle Steering Characteristics

이 광 일\* · 김 인 선\* · 오 승 엽

Kwang-Il Lee\* · In-Seon Kim\* · Seung-Hyeub Oh

### 요 약

본 논문에서는 광대역 주파수 범위에서 동작하며 광각 빔 조향이 가능하고 반복 제작이 용이한 간단한 구조의 전자전장비용 소형 마이크로스트립 로트만 렌즈를 제안하였다. 렌즈를 2차원의 평행판 회로로 모델링한 후 둘레 전체에 대해 경계적분을 수행하고 8개의 빔포트와 8개의 배열포트 간 전달계수를 구하였으며, 제작된 렌즈의 회로망 측정결과와 잘 일치하는 결과를 얻었다. 선형배열안테나로 급전된 다중빔 패턴을 예측하여 제작렌즈가 3:1의 주파수 대역에 걸쳐  $\pm 65^\circ$  이상의 광각 빔 스캔과  $\pm 5$  dB 이하의 삽입손실 편차를 가짐을 확인하였다.

### Abstract

This paper presents a design of wide angle steering microstrip Rotman lens operating over broadband frequency range for Electronic Warfare equipments. It has a compact and simple structure which it is easy to manufacture repetitively. The lens is modelled as a 2-dimension planar circuit, the contour integral method is performed over entire lens contour and the transmission coefficients from 8 beam ports to 8 array ports are found. The measured results are well agreed with those of analysis. Prediction of the multibeam array pattern fed by linear array antenna shows  $\pm 65^\circ$  of beam steering and  $\pm 5$  dB insertion loss deviation over 3:1 frequency range.

Key words : Rotman lens, wide angle

### I. 서 론

전기적으로 안테나 빔의 방향을 제어하는 초고주파 대역 또는 밀리미터파 대역의 위상배열 송신기는 많은 응용분야를 갖고 있다. 레이더, 전자전장비 등의 무기체계를 비롯하여 민수용으로는 자동차 충돌방지장치, 자동착륙장치, 통신 중계기 등에 많이 적용되고 있는 추세이다. 일반적인 위상배열 송신기는 위상제어를 위해 위상 천이기를 사용하므로 고가의 시스템 구축비용이 들고 구조가 복잡한 단점이 있다. 이에 반해 로트만 렌즈와 같은 초고주파렌즈를 이용한 송신기는 저가이며, 구조가 간단하고,

신뢰성이 높으며, 소형으로 제작이 가능하다는 장점을 갖고 있다<sup>[1]</sup>. 로트만 렌즈는 시간지연 빔포머로서 다중빔 발생이 가능하고 위상과 진폭오차가 적으며, 광대역 주파수 범위에서 동작이 가능하다<sup>[2],[3]</sup>.

항공기에서와 같이 제한된 공간에 장착되어야 하는 위상배열송신기는 크기에 많은 제약이 따른다. 특히 위상배열송신기는 여러 채널로 구성된 송신기 구성품들로 인해 크기를 많이 차지하게 된다. 초고주파렌즈는 배열안테나의 크기 및 증폭기들의 장착 공간에도 영향을 주는 구성품이므로 소형 설계가 필수적이다.

3:1의 광대역 주파수 범위에서  $\pm 65^\circ$ 의 넓은 지향

충남대학교 전자공학과(Department of Electronics, Chungnam National University)

\*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· 논문 번호 : 20020225-025

· 수정완료일자 : 2002년 4월 18일

범위를 갖는 렌즈를 균일한 진폭전달특성을 갖도록 하면서 소형으로 설계하기란 매우 어렵다. 본 논문에서는 로트만 렌즈와 전송선, 고풍력 증폭기 및 선형배열 안테나로 구성된 광대역 위상배열송신기를 위해 16 dB 이하의 적은 삽입손실을 갖는 소형 로트만 렌즈를 8×8 입출력 대칭구조로 설계 제안하고 경계적분법으로 렌즈의 특성을 해석하여 최소의 크기로 최적화시켰다. 또한, 선형배열 혼 안테나의 특성을 활용하여 광역의 지향 각도에 대해 빔 지향 특성을 분석하였다.

## II. 광각 로트만 렌즈의 설계

로트만 렌즈는 그림 1에서 표시한 바와 같이 급전곡선과 렌즈곡선으로 형성되는 평행판 영역과 전송선으로 구성된다. 급전곡선을 따라서 빔포트들이 배치되며, 렌즈곡선을 따라서 배열포트들이 배치된다. 배열포트는 전송선을 통해 배열안테나에 접속된다.

배열안테나는  $-1 < n < 1$  에 대응되는 위치에 배열된다. 대칭형 로트만렌즈의 설계는 안테나 배열간격, 배열개수, 조향범위 등을 아는 변수로 하여  $F_1, F_2, F_0$ 의 3개의 초점으로부터 등위상 파면까지의 전달경로가 동일하다는 조건과 A의 초기값으로부터 렌즈곡선상의 배열포트의 좌표점과 전송선의 길이를 구할 수 있다<sup>[4]</sup>.

$$l_1 - l_2 = L \quad (1)$$

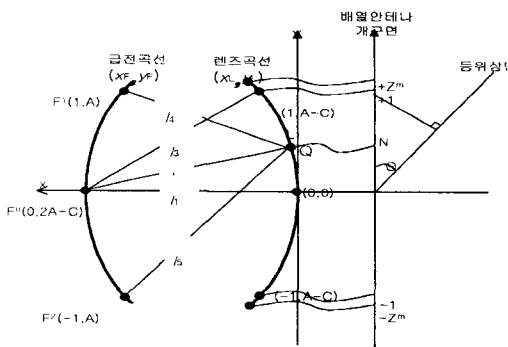


그림 1. 대칭형 로트만렌즈의 구조  
Fig. 1. Structure of symmetric Rotman lens.

$$l_4 + L = l_3 - kz/2 \quad (2)$$

$$l_5 + L = l_3 + kz/2 \quad (3)$$

여기서  $L$ 은 렌즈곡선 상의 Q점에서 X축까지의 경로이다. A는 중앙초점으로부터 양 초점까지의 수직길이, C는 마주보는 빔포트와 렌즈포트의 초점간 길이를 나타낸다.

식 (1), (2), (3)은 각각 초점  $F_0, F_1, F_2$ 에서 렌즈곡선상의 모든 경로에 대해 등위상면을 나타내고 있다.  $k$ 는  $F_1, F_2$ 에 대해 안테나 개구면의  $z = \pm 1$ 까지의 경로 차이를 나타낸다.  $z = \pm 1$ 까지의 범위에서 최대위상수차를 구하여 동일한 위상수차를 나타내는 최대  $z$  값 즉  $\pm z_m$ 까지를 안테나 개구면으로 하고 이를(배열개수-1) 개수만큼 균등하게 나눈 후, 이에 대응하는 x축의 좌표를 구하면 배열포트의 좌표를 구할 수 있고, 빔포트 좌표점은 렌즈가 좌우 대칭이라는 조건에 따라 그림 1로부터 구한다.

본 논문에서는 Shelton이 제시한 이론에 근거하여 대칭구조에 대해 위상수차를 고려한 렌즈의 좌표를 설정하였다<sup>[5]</sup>. 광대역 주파수범위에서 광역의 스캔 각도로 조향이 가능하면서 소형의 크기를 갖는 전자전용 대칭형 로트만렌즈의 설계요구사항은 다음과 같다.

- 주파수 범위 : 6~18 GHz
- 조향범위 :  $\pm 65^\circ$
- 배열안테나 간격 : 8.7 mm
- 배열안테나 개수 : 8개
- 조향범 개수 : 8개
- 저수차 및 균일진폭특성:  $\pm 5$  dB

초기값 A로부터 구한 빔포트의 좌표점  $(x_F, y_F)$ 와 배열포트의 좌표점  $(x_L, y_L)$ 이 구해지면 이를 빔포트의 가장자리에서 급전시 최대조향각  $\theta_m$ 을 얻을 수 있도록 스케일링 계수를 구한다. 그림 2에서 가장자리 빔포트에서 배열포트의 초점을 거쳐 안테나 개구면의 등위상면까지의 관계는 다음식과 같다.

$$L_1 + L_C + \sin \theta_m = L_{-1} + L_C - \sin \theta_m \quad (4)$$

배열안테나의 전체간격 AS, 마이크로스트립 기판의 유전율  $\epsilon_r$ 을 고려하여 스케일링 계수 sf를 적

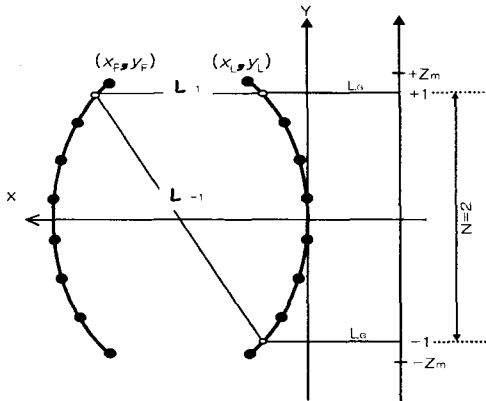


그림 2. 렌즈 좌표의 설계  
Fig. 2. Design of lens coordinates.

용한 빔포트와 배열포트의 설계좌표  $(x_F, y_F), (x_L, y_L)$ 는 다음과 같다.

$$x_F = x_i \times sf, y_F = y_j \times sf, \quad (5)$$

$$x_L = x_i \times sf, y_L = y_j \times sf, \quad (6)$$

여기서 ;  $sf = \frac{2 \sin \theta_m \cdot AS}{(L_{-1} - L_1) \cdot 2z_m \cdot \sqrt{\epsilon_r}}$

### III. 경계적분법에 의한 렌즈 해석

저수차 및 광각을 갖는 로트만 렌즈의 설계를 위해 광학 경로추적 방식으로 요구된 설계 사양을 만족하기 위한 렌즈의 입출력 좌표를 설정하였다. 그러나, 실제로 마이크로스트립 선로를 이용하여 제작하였을 때 나타나는 포트간의 상호결합특성, 입출력 포트와 평행판 렌즈와의 결합선로에서의 임피던스 특성 등을 예측하기 어렵다<sup>[6]</sup>. 따라서, 본 논문에서는 이러한 특성들의 해석을 위해 경계적분법을 이용하여 2차원 평행판 다중 포트 모델을 만들고, 렌즈의 각 포트들에 대한 산란행렬을 구하였다.

마이크로스트립 선로를 이용한 렌즈의 경우, 마이크로스트립의 두께가 동작주파수에서의 파장에 비해 매우 작기 때문에 두께 방향으로 전계의 변화가 없다고 가정할 수 있다. 그러므로 렌즈를 2차원 구조의 다중포트를 갖는 평행판으로 보고 경계적분법을 적용할 수 있다<sup>[7],[8]</sup>.

그림 3의 마이크로스트립 평행판 회로의 가장자

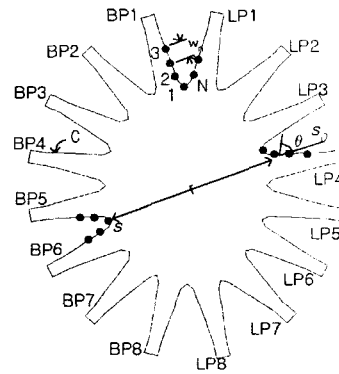


그림 3. 설계된 렌즈의 형상  
Fig. 3. Contour of designed lens.

리에서의 산란된 전자계를 고려하여 경계 C의 안쪽에 있는 한 점 s에서의 전압은 Kirchhoff의 적분식에 의해 다음과 나타낼 수 있다.

$$v(s) = \frac{1}{4j} \int_C [H_0^{(2)}(kr) \frac{\partial v(s_0)}{\partial n} - v(s_0) \frac{\partial H_0^{(2)}(kr)}{\partial n}] ds_0 \quad (7)$$

경계 C 상의 한 점 s에서의 전압은 경계 C 상의 전압과 전류밀도의 향으로 다음 식과 같이 표현할 수 있다. 마이크로스트립 선로의 경우는 다시 다음과 같이 표현된다.

$$v(s) = \frac{1}{2j} \int_C [k \cos \theta H_1^{(2)}(kr) v(s_0) + jw \mu H_n(s_0) H_0^{(2)}(kr)] ds_0 \quad (8)$$

여기서,  $k = w \sqrt{\mu \epsilon_0 \epsilon_{eff}}$ , r는 s와 s<sub>0</sub>를 잇는 직선거리이며, θ는 이 직선과 s<sub>0</sub>에서 들레 경계의 바깥쪽으로 수직인 선에 의해 만들어진 각이다. H<sub>1</sub><sup>(2)</sup>는 제2종 1차 Hankel 함수이고, H<sub>0</sub><sup>(2)</sup>는 제2종 0차 Hankel 함수이다. J<sub>n</sub>은 s<sub>0</sub>에서 평행판 쪽으로 흐르는 전류밀도이다. 식 (9)에 따라 계산을 위해 그림 3에 그려진 평행판의 경계를 N개의 분할 구간으로 나눈다. 이 때, 각 구간들의 폭 W<sub>m</sub>(m=1, 2, ..., N)은 파장에 비해 상당히 작아야 한다. 여기서는 0.1 λ<sub>d</sub> (λ<sub>d</sub>는 유전체에서의 실효파장)으로 하였다. 경계면에서의 전압은 다음과 같다.

$$\sum_{m=1}^N a_{lm} v_m = \sum_{m=1}^N b_{lm} I_m, \quad l=1, 2, \dots, N \quad (9)$$

$$a_{lm} = \delta_{lm} - \frac{k}{2j} \int_{w_m} \cos \theta H_0^{(2)}(kr) ds_0 \quad (10)$$

$$b_{lm} = \frac{w\mu h}{2} \begin{cases} \frac{1}{W_m} \int_{w_m} H_0^{(2)}(kr) ds_0, & l \neq m \\ 1 - \frac{2j}{\pi} (\ln \frac{kW_l}{4} - 1 + \gamma), & l = m \end{cases} \quad (11)$$

여기서,  $\delta_{lm}$ 은 Kronecker delta 이고,  $\gamma(=0.5772)$ 는 Euler 상수이다. 전압 [V] 는 [Z]행렬과 전류[I]행렬로 나타낼 수 있다.

$$[V] = [B][I] \quad (12)$$

$$[Z] = [A]^{-1}[B] \quad (13)$$

한 개의 포트를 여러개의 서브포트로 나누었으므로 각 포트별로 서브포트를 한 개의 포트로 결합해야 하며, 서브포트들의 전압이 같다고 할 수 있으므로 병렬로 접속된 것으로 간주할 수 있다.

$$Y_{ij} = \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m Y_{kl} \quad (14)$$

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

$$[S] = [Y_0]^{-1/2} \{ [Y_0] - [Y] \} \{ [Y_0] + [Y] \}^{-1} [Y_0]^{1/2} \quad (15)$$

$[Y_0]$ 는 대각행렬로  $1/Z_{01}, 1/Z_{02}, \dots, 1/Z_{0m}$ 의 원소들을 갖는 각 포트에서의 어드미턴스이다.

#### IV. 광각 로트만렌즈의 해석결과 및 실험

소형 렌즈의 설계를 위해  $A=1.05$ 로 하였으며, 테이퍼 폭은 18 GHz에서  $0.6 \lambda_d$  ( $\lambda_d$ 는 마이크로스트립 선로에서의 실효파장), 테이퍼의 길이는 6 GHz에서  $0.3 \lambda_d$ , 안테나 배열간격은 8.7 mm, 최외각 조향빔은 배열안테나의 빔폭을 고려하여  $\pm 55^\circ$ 로 하였다. 설계 결과에 따라 해석을 수행하였으며, 제작할 렌즈를 고려하여  $\epsilon_r=2.33$ ,  $H=0.7874$  mm,  $t=0.03556$  mm,  $\tan \delta=0.0012$ 인 RT-Duroid 5870 Rogers사 기판의 특성 값을 사용하였고, 마이크로스트립 선로에서의 프링징 필드(Fringing field)를 고려하여 실효선로폭을 적용하였다. 테이퍼의 동축콘넥터와 연결되는 50 ohm 선로 부분을 제외하고는 모두 자체적으로 처리하였다. 렌즈곡면의 전압분포 계산을 위한 분할 간격은 최대주파수 18 GHz를 기준하여  $0.1 \lambda_d$

로 하였다. 해석결과를 설계 목표에 근접시키기 위해 그림 3의 빔포트 BP1, 2와 BP7, 8, 배열포트 LP1, 2과 LP7, 8에 대해 포트의 폭에 수직인 선을 축으로 경사각도, 테이퍼 경계간의 간격 등을 조정하여 최적의 값으로 렌즈의 형상을 확정하였다.

안테나 배열간격은 그레이팅 로브를 피하면서 SMA 커넥터의 크기를 고려하여  $0.522 \lambda_d$ 로 하였다. 테이퍼의 폭은 소형의 렌즈 크기를 유지하면서 최외각 조향빔을 얻기 위해  $0.6 \lambda_d$ 로 하였으나, 튜닝 과정에서 가장자리 포트의 경우  $0.55 \lambda_d$ 로 조정하였다.

A 값은 클수록 렌즈의 곡률이 완만하여 빔포트간의 결합량이 감소하고 배열포트로의 전달이 균일하게 이루어진다. 그러나 A 값이 크면 C 값도 커지고 렌즈의 크기가 증가하고 삽입손실도 함께 증가한다. 또한 렌즈의 빔 포트와 배열포트 사이의 측면벽이 증가하여 다중 반사의 요인으로 작용한다. A의 값은 0.9~3.0의 범위에서 선택하였으며, 안테나간의 배열간격을 8.7 mm로 하여 렌즈포트와 빔포트의 좌표를 선정하고, 빔포트와 렌즈포트의 수에 따라 테이퍼의 폭을 결정한 후 이에 따라 경계적분에 의한 해석을 수행하였을 때, 실제 테이퍼의 배치가 가능하고, 측면벽을 형성하지 않으며 설계목표를 만족하는 가장 작은 A의 값으로  $A=1.05$ 를 선정하고 설계하였다.

이에 따른 진폭 균일성이 설계목표인  $\pm 5$  dB 내로 계산되었으며, 테이퍼의 폭은  $0.6 \lambda_d$ 로 설정하였다. 테이퍼의 폭이  $0.5 \lambda_d$  보다 클 경우 그레이팅 로브를 야기할 수 있으며, 측정결과 16.5 GHz에서 진폭균일특성이 약간 나빠지는 것으로 나타났으나, 최종적인 방사빔의 조향특성이 설계목표치에 매우 근접하였음을 확인하였다.

각 렌즈포트의 테이퍼와 연결된 전송선로의 길이는 그림 2에서 나타낸 바와 같이 식 (4)를 이용하여 구할 수 있으며, 제작된 8입력과 8출력을 갖는 소형 로트만 렌즈의 형상은 그림 4와 같다. 제작된 렌즈의 8개의 출력단은 최소한의 전송선로를 적용함으로써 선형이 아닌 원형의 형태를 가지며, 그림 1에서 나타낸 것처럼 등위상의 배열안테나 개구면 축이 된다. 각각의 렌즈출력은 동일한 길이 동일한 위상지연을 갖는 동축케이블을 사용하여 선형 배열된

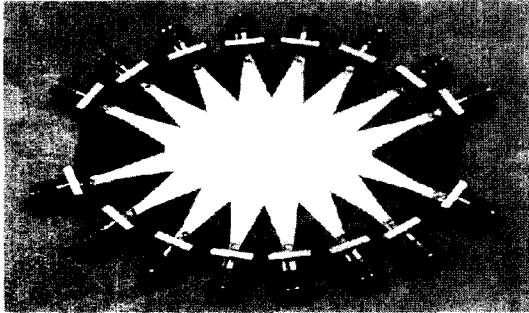


그림 4. 제작된 렌즈의 형상  
Fig. 4. Photograph of fabricated lens.

각각의 안테나까지 연결된다.

기관과 커넥터 고정을 위한 케이스로서는 알루미늄을 사용하였고, SMA 커넥터를 사용하였다. 제작된 렌즈의 크기는 9.5 cm×7.5 cm이다. 그림 5~7에 제작된 렌즈에 대해 빔포트 BP4에 급전하였을 때 배열포트에서 측정된 진폭전달특성을 해석결과와 비교하여 도시하였다. 측정은 HP8510C 네트워크분석기를 사용하였고, 급전포트를 제외한 나머지 포트는 50 ohm 종단기(50 Ohm Termination)를 연결하여 측정하였다.

8개의 빔포트 중 가운데 포트인 BP4에 급전시 배열포트에서의 진폭전달특성 즉, 삽입손실은 주파수에 따라 11 dB에서 17 dB의 분포를 보이고 있으며, 삽입손실의 편차는 최저주파수인 6 GHz와 최고주파수인 18 GHz에서 각각 ±1 dB와 ±2.7 dB의 매우 균일한 특성을 나타내었다. 6 GHz와 12 GHz의 경우는 해석결과와도 잘 일치하는 경향을 보이고 있다. 18 GHz의 경우 배열포트 중 외각인 LP2와 LP7에서 해석결과와 5 dB까지 차이가 나타나고 있다. 경계적분에 의한 특성 해석은 프린징 필드의 영향을 적용하여 포트의 폭 및 렌즈의 곡면을 확장함에 따라 포트간의 간격과 폭이 변화된다. 제작시 파장이 짧은 고대역 주파수에서 나타나는 그레이팅 로브가 주파수편이 되면서 이로 인해 삽입손실의 편차가 크게 나타나는 현상으로 판단된다. 위상의 해석결과와 측정결과와는 6 GHz, 12 GHz, 18 GHz에서 각각 최대 15도, 30도, 50도의 차이를 보이는 데, 이것은 경계적분 해석시 고려하지 못한 SMA 콘넥터에서의 위상지연으로 판단된다.

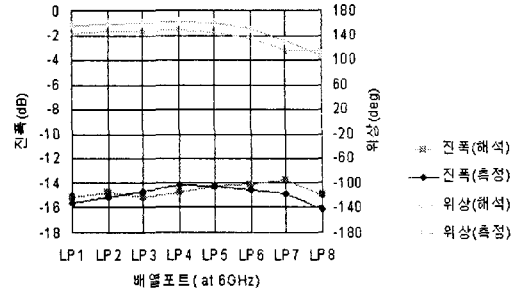


그림 5. 가운데 빔포트에서 배열포트로의 삽입손실 및 위상(6 GHz)

Fig. 5. Insertion loss and phase of beam port BP4 to all array ports(6 GHz).

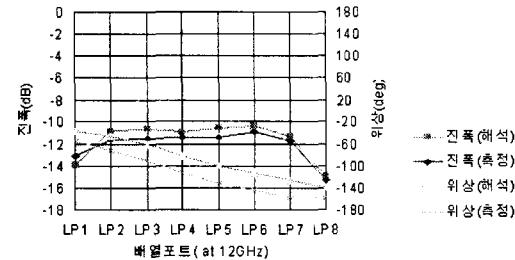


그림 6. 가운데 빔포트에서 배열포트로의 삽입손실 및 위상(12 GHz)

Fig. 6. Insertion loss and phase of beam port BP4 to all array ports(12 GHz).

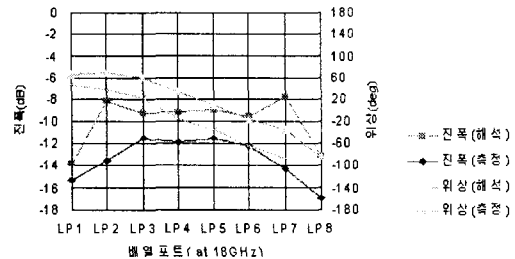


그림 7. 가운데 빔포트에서 배열포트로의 삽입손실 및 위상(18 GHz)

Fig. 7. Insertion loss and phase of beam port BP4 to all array ports(18 GHz).

입력포트인 8개의 빔포트에서의 입력반사계수를 측정한 결과 광대역의 주파수범위에서 사용할 수 있는 좋은 결과를 얻었다. 6 GHz에서 -7.4 dB ~ -10.4 dB, 18 GHz에서 -14 dB ~ -40 dB의 측정값

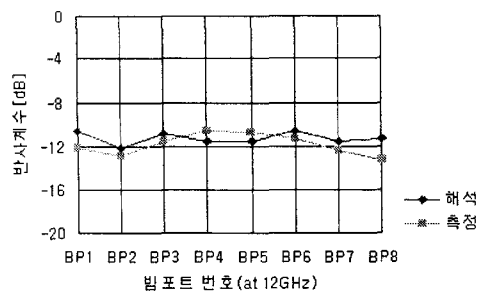


그림 8. 각 빔포트에서의 반사계수(12 GHz)  
Fig. 8. Return loss of each beam port(12 GHz).

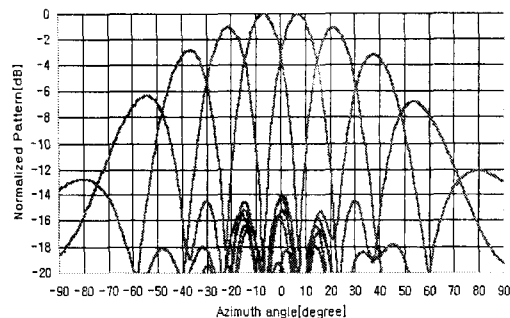


그림 11. 빔조향 패턴(18 GHz)  
Fig. 11. Array beam steering patterns(18 GHz).

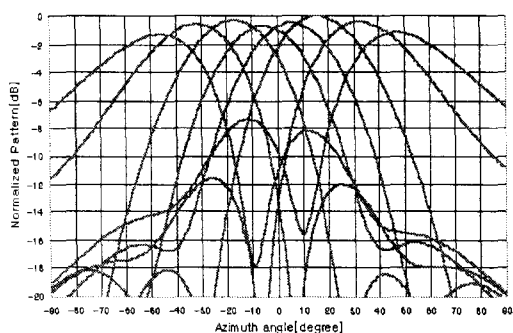


그림 9. 빔조향 패턴(6 GHz)  
Fig. 9. Array beam steering patterns(6 GHz).

배열된 8개 혼 안테나의 배열인자를 고려한 빔조향 패턴을 계산을 통해 예측하였다. 그림 9~11은 각각 6, 12, 18 GHz에서의 빔조향 패턴이다. 6 GHz의 경우 최외각 조향빔은 안테나 패턴의 영향으로 빔조향 오차를 주지만, 18 GHz의 경우  $\pm 54^\circ$ 로써 설계치의  $1^\circ$  이내의 오차로서 좋은 결과를 주고 있다. 반전력 빔폭을 기준으로 한 빔조향 범위는 설계목표인  $\pm 65^\circ$ 를 만족하고 있음을 알 수 있다.

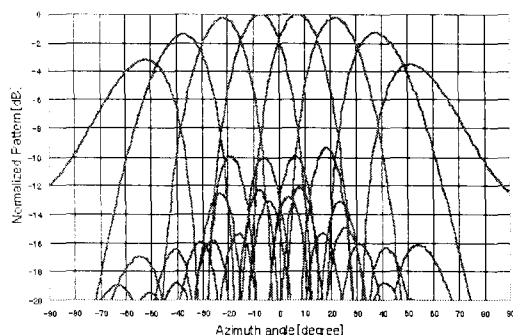


그림 10. 빔조향 패턴(12 GHz)  
Fig. 10. Array beam steering patterns(12 GHz).

을 얻었고, 12 GHz에서 입력 빔포트 별로 측정된 결과를 그림 8에 나타내었다.

설계 제작된 초고주파렌즈가 위상배열송신기에서 빔포트의 스위칭에 따라 빔지향 특성이 어떠한지를 확인하기 위해 측정된 렌즈의 S-파라미터를 안테나의 진폭과 위상으로 하여 0.87 cm 간격으로

## V. 결 론

본 논문에서는 3:1의 광대역 주파수대역에서 동작하며, 0.87 cm의 배열간격을 갖는 8개의 선형배열 안테나로  $\pm 65^\circ$ 의 초광각 범위까지 빔의 조향이 가능한 대칭형 로트만 렌즈를 광학 추적방식으로 설계하고 이를 2차원 평행판 모델링과 경계적분을 통해 해석하고 최적화하였다. 또한, 렌즈의 측면벽 등에 반사 최소화를 위한 부가적인 더미포트가 없는 간단한 구조의 소형 렌즈를 제작하였고, 소형의 크기에서 전대역에 걸쳐 16 dB 이하의 삽입손실과  $\pm 5$  dB 이내의 편차를 가지며, 입력반사계수는 최저주파수에서  $-7.4$  dB 이하, 최고주파수에서  $-15$  dB 이하의 값을 갖는 좋은 특성을 얻었다. 경계적분에 의한 해석결과 일부 고주파 대역을 제외한 전대역에서 측정결과와 일치하는 좋은 결과를 얻었다. 추후 고주파 대역에서 프린징필드에 따른 자계벽 효과를 최소화하는 작업이 이루어진다면 소형 로트만 렌즈의 설계 및 해석에 유용하게 적용될 수 있을 것으로 보인다.

참 고 문 헌

- [1] A. F. Peterson and 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] P. Phu, R. Dahlstrom, B. Scheiner, E. Adler and J. Lilly, "A wide-Bandwidth Electronic Scanning Antenna for Multimode RF Sensing", *IEEE Radar Conference*, pp. 177-180, 1999.
- [3] W. Rotman and R. F. Turner, "Wide-angle Microwave Lens for Line Source Application", *IEEE Trans. Antennas Propagation*, vol. AP-11, pp. 623-632, Nov. 1963.
- [4] C. J. Sletton, "Reflector and Lens Antennas - Analysis and Design Using Personal Computers". Artech House, pp. 294-297, 1988.
- [5] J. Paul Shelton, "Focusing Characteristics of symmetrically Configured Bootlace Lenses", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. AP-26, no. 4, July 1978.
- [6] 박주래, 소준호, 이철수, 김상기, "광대역 능동 위상배열 송신기용 마이크로스트립 로트만 렌즈", *전자공학회 논문지*, pp. 1766-1772, Sep. 1996.
- [7] 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.
- [8] T. Okoshi, T. Miyoshi, "The Planar Circuit - An Approach to Microwave Integrated Circuitry", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-20, no. 4, April 1972.

이 광 일



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

[주 관심분야] 안테나 및 전자파이론

김 인 선



1995년 2월: 순천향대학교 전자공학과 (공학사)  
 1997년 2월: 순천향대학교 전자공학과 (공학석사)  
 1997년 2월~현재: 국방과학연구소 연구원

[주 관심분야] RF 소자 및 안테나 설계