

# 균일한 삽입손실을 갖는 광대역 빔 조향용 대칭형 초고주파 렌즈

## Symmetric Microwave Lens with Uniform Insertion Loss for Broad-band and Wide Beam Steering Coverage

김 인 선 · 이 광 일\* · 오 승 엽\*

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

### 요 약

본 논문에서는 광대역에서 광각을 조향할 수 있는 대칭형 구조의 선형 위상배열 송신기용 초고주파 렌즈를 설계하였다. 선형 위상 배열 송신기의 정확한 빔 조향 특성을 얻기 위해 렌즈의 균일한 진폭 전달 특성을 얻는데 중점을 두었다. 빔 포트 8개, 배열 포트 8개로 구성된 초고주파렌즈의 입·출력 포트간 삽입손실의 편차는  $\pm 3.1$  dB로써 6 ~ 18 GHz 대역에 대해 매우 균일한 특성을 얻었다. 8개로 선형 배열된 안테나를 이용해 방위 각  $\pm 60^\circ$ 의 조향 특성을 얻을 수 있음을 확인하였으며, 측정된 렌즈 특성과 다중빔 조향 패턴을 제시하였다.

### Abstract

In this paper, a symmetric microwave lens to steer wide angle and to operate at broad band frequency range for a linear phased array transmitter was designed. To get accurate beam steering performance for a linear phased array transmitter, uniform amplitude transmission characteristics of microwave lens was focused. The measured result for the insertion loss deviation between input and output ports of microstrip lens with 8 beam ports and 8 array ports was  $\pm 3.1$  dB over 6 ~ 18 GHz band, which was very uniform characteristics. Using 8 elements linear array antenna, it was confirmed the radiation beam could be steered over  $\pm 60^\circ$  in azimuth. And the measured lens performance data and multi-beam steering pattern were presented.

Key words : microwave lens, phased array transmitter.

### I. 서 론

초고주파 렌즈는 위상 배열 원리를 사용하는 그림 1과 같은 송신기에 많이 사용된다. 이것은 광학용 렌즈의 초점에 평행광선이 동일경로를 거쳐 도달함으로써 광선의 세기가 합성되는 원리를 전자파에 응용한 것이다. 그림 1을 살펴보면 먼저 방사하고자 하는 빔의 방향에 따라 스위치의 포트가 선택

된다. 렌즈의 한 입력 포트에 인가된 신호는 동일한 신호세기로 분할되어 출력되고 각 채널별로 일정한 경로지연을 가지며 각 증폭기를 거쳐 배열안테나에 분산 인가된다.

이것은 임의의 한 렌즈 입력 빔 포트로부터 평행판을 통해 서로 다른 경로 길이를 갖는 각 출력 포트에 전달된 전자파가 선형배열 안테나 상에 등위상면을 형성할 수 있도록 하고, 등위상면에 수직하

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

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

· 논문 번호 : 20011116-164

· 수정완료일자 : 2002년 1월 17일

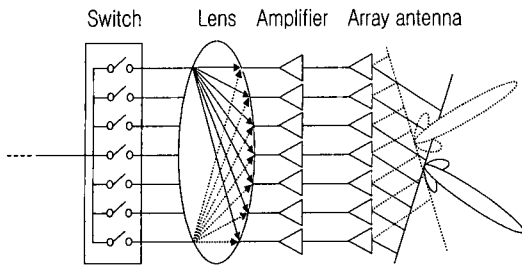


그림 1. 빔 조향 원리  
Fig. 1. Principle of beam steering.

방향으로 전자파가 공간 합성되는 원리<sup>[1]</sup>를 이용한다. 이 때, 렌즈의 입력 포트 수는 방사 빔의 개수를 결정하며, 출력 포트 수는 배열안테나의 소자 수와 동일하다.

평행판 초고주파 렌즈는 로트만(Rotman)에 의해 두께가 얇은 평행판 도파관 구조로 처음 소개되었으며 최근에는 유전율을 갖는 마이크로스트립이나 스트립라인 형태로 소형으로 구현되는 장점을 이용하여 위상배열 시스템을 사용하는 위성통신시스템이나 차량장착용 충돌방지장치, 군사용으로는 광대역의 다중빔 배열송신기에 사용되고 있다<sup>[2]</sup>.

초고주파 렌즈는 몇 개의 입력 포트와 안테나의 배열 개수에 일치하는 출력 포트, 급전 전송선로, 평행판 영역, 빔 전송선로와 평행판 연결 시 불연속의 보상을 위한 테이퍼 선로로 빔 조향 각에 따라 서로 다른 경로 길이를 갖도록 단일 평면 기판에 구현함으로써 구성이 매우 용이하다. 따라서 특히 위성과 항공공용에서와 같이 제한된 공간과 무게에 대한 제한을 극복할 수 있는 소형, 경량의 구조에 적절하다.

본 연구에서는 6~18 GHz 의 광대역에 대해 8 개로 배열된 안테나를 이용하여 방위각  $\pm 60^\circ$ 의 조향 특성을 갖는 위상배열 송신기에 적용하기 위하여, 입력 포트 8개, 출력 포트 8개의 초고주파 렌즈를 설계하였고, 특히 렌즈의 출력 포트에 연결되는 증폭기의 포화구동 범위인  $\pm 3$  dB 이내의 균일한 삽입손실 편차를 갖도록 하는 대칭형 초고주파렌즈를 제안하였다. 그림 1과 같은 위상배열송신기의 경우, 높은 송신출력을 얻으면서 동시에 안테나에 인가되는 전력의 균일성을 위해 전단에 사용되는 진행파관 전력증폭기의 포화출력특성을 사용한다. 또한,

전력증폭기의 포화출력을 얻기 위해 렌즈출력이 광대역주파수에 걸쳐 포트별로 균일한 전달특성을 갖도록 하는 것이 매우 중요하다.

본 논문에서는 초고주파렌즈의 설계를 위해, 첫째 렌즈의 크기 축소를 위해 설계 이전에 특성에 영향을 줄 수 있는 요소의 연구를 통해 적용 가능한 최소 변수를 도출하여 제한된 크기에서 최적의 성능을 제공하는 렌즈가 설계될 수 있도록 하는 과정을 선행하였으며, 둘째 각 출력단의 다수의 능동 증폭기가 균일 포화 구동될 수 있도록 하기 위해 렌즈가 균일한 전달 특성을 갖도록 하였으며, 셋째 원하는 방향으로 정확히 빔을 조향하기 위해 안테나에 입력되는 입력 위상의 오차가 적도록 하는 렌즈 설계를 목표로 하였다.

## II. 대칭 구조 초고주파 렌즈 설계

### 2-1 평행판 영역의 좌표 설정

그림 2는 렌즈의 초기 설계 좌표이다.<sup>[3],[4]</sup> 좌표는  $x-y$  평면에  $(0, 0)$ ,  $(\pm 1, A-C)$ 과  $(0, 2A-C)$ ,  $(\pm 1, A)$ 의 각 세 점의 초점으로 구성된다. 여기서  $A$ 는  $x$  축으로부터 세 초점 중 가장자리 초점까지의 거리를 나타내며,  $C$ 는 그 초점과 렌즈 곡선에 준차하는 대칭 점 간의 거리이다. 급전 곡선(feed curve)은 최종적으로 렌즈의 입력 포트가 위치할 부분이고, 렌즈 곡선(lens curve)은 출력 포트가 위치할 부분이다.

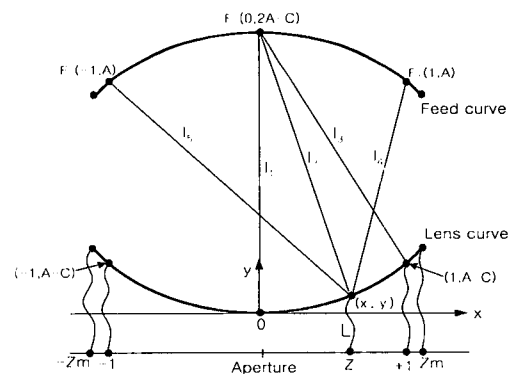


그림 2. 렌즈의 좌표설정  
Fig. 2. Lens coordinates for contour design.

$L$ 은 경로 길이를 고려한 전송선로가 위치할 부분이며 배열 안테나에 해당하는 부분은  $-1 < z < 1$ 에 해당한다. 임의의 급전 곡선 상의 점으로부터 임의의 렌즈 곡선상의 점  $(x_l, y_l)$ 을 경유하여 안테나 개구면까지 거리  $L$ 에 이르는 거리가 전체 경로 길이이다.

세 초점은 각 배열 포트를 경유하여 파면(wave front)까지 정확히 동일한 경로 길이를 갖는 세 점이다. 이 세 점 이외의 경로상의 점은 위상 수차(phase aberration)를 갖는다. 이것은 렌즈의 초점 성능(focusing performance)을 평가하는 중요한 척도로서 원하는 선형 파면으로부터 얼마나 편차를 갖는가를 보여준다. 급전 곡선의 한 점에서 렌즈 곡선의 초점을 지나는 경로 길이와 급전 곡선의 동일한 한 점에서 임의의 렌즈 곡선을 지나는 경로의 차가 원하는 이상적인 파면으로부터 갖는 경로의 편차로부터 구해질 수 있다.

$-1 < z < 1$  범위에서  $A$ 의 값이 커질수록 위상 수차가 작게 형성된다. 즉,  $A$ 의 값이 커질수록 렌즈의 특성은 저 수차 특성을 갖고,  $A$ 의 크기가 작을수록 높은 수차 특성을 갖는다. 그러나 그림 2에서 볼 수 있듯이  $A$ 의 값은 렌즈 크기에 비례하므로  $A$ 가 크면 렌즈의 크기가 커져서 삽입손실이 증가한다. 반면에  $A$ 의 크기가 작으면 삽입손실은 줄어들지만 빔 포트로부터 각 배열 포트로의 경로차가 커져 균일한 전달특성을 얻을 수 없을 뿐 아니라 급전 곡선과 렌즈 곡선의 곡률이 커지므로 내부 간섭이 증가하여 성능의 저하를 가져온다. 그림 2로부터 고려할 또 한가지는  $z_m$ 이다.  $z_m$ 은  $-1 < z < 1$ 의 구간 내에서 최대 위상 수차를 주는  $z$ 값을 의미한다. 실제로 안테나가 배치될 영역으로 사용할 공간을 만약  $-1 < z < 1$ 에서  $-z_m < z < z_m$ 로 확장하여 이용한다면 렌즈 영역을 약간 넓게 사용할 수 있어 동일한 위상 수차 특성을 가지면서 빔 조향 범위를 약간 넓힐 수 있는 장점이 있다. 그러므로 렌즈의 크기와 특성 사이에 적절한 절충으로부터  $A$ 의 값을 결정하고, 그 값으로부터  $z_m$ 을 결정할 수 있다.

그림 2에서 초기 변수  $A$ 와  $C$  둘 중 하나는 독립 파라미터로서 두 변수는 식 (1)과 같은 관계를 갖는다.

$$C = 2 \cot \left\{ 2 \tan^{-1} \left[ 2 \tan \left( \frac{1}{2} \cot^{-1} A \right) \right] \right\} \quad (1)$$

위상 수차의 분석을 통해  $A$ 의 값이 결정되면 안테나가 위치할 공간  $z_m$ 을 변수로 하여 렌즈 곡선  $(x_l, y_l)$ 의 초기 좌표를 식 (2)로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} x_l &= \frac{z_m(\sqrt{4+C^2}-C)[-E+\sqrt{E^2-4D \cdot F}]}{4D} \\ y_l &= -A + \sqrt{\frac{4x_l - z_m^2(\sqrt{4+C^2}-C)^2}{2} - (x_l-1)^2} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $D, E, F$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} D &= 4 - z_m^2(\sqrt{4+C^2}-C)^2 - \frac{4(-2A+C+\sqrt{A^2+1})^2}{(A-C)^2} \\ E &= \frac{(-2A+C+\sqrt{A^2+1})}{(A-C)^2} \left[ 4(-2A+C+\sqrt{A^2+1})^2 \right. \\ &\quad \left. - z_m^2(\sqrt{4+C^2}-C)^2 + \frac{1-(A-C)^2}{4} \right] \\ F &= z_m^2(\sqrt{4+C^2}-C)^2 - 4 - \frac{4}{(A-C)^2} \cdot \\ &\quad \left[ \frac{4(-2A+C+\sqrt{A^2+1})^2 - z_m^2(\sqrt{4+C^2}-C)^2}{8} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1-(A-C)^2}{2} \right]^2 \end{aligned}$$

각 경로차를 고려한 선로의 길이  $L$ 은 식 (3)과 같다.

$$L = 2A - C - \sqrt{x_l^2 + (2A - C - y_l)^2} \quad (3)$$

급전 곡선  $(x_f, y_f)$ 은 구해진 렌즈곡선과 그림 2에 제시한 좌표간의 관계로부터 식 (4)로 구해진다.

$$\begin{aligned} x_f &= x_l \\ y_f &= 2A - C - y_l \end{aligned} \quad (4)$$

구해진 좌표에 실제 구현을 위한 스케일링 요소 (scaling factor) 즉, 안테나 개구폭, 구현하려는 기판의 유전율, 렌즈의 최외각 조향각을 고려함으로써 렌즈의 평행판 영역에 해당되는 최종 좌표를 구할 수 있다.<sup>[4]</sup>

## 2-2 설계 고려 요소

렌즈의 평행판 영역의 좌표가 구해지면 입·출력 포트 구성을 위해 그 구해진 점을 중심으로 적절히 테이퍼 선로를 구성하고 입출력 50Ω 전송선로와 연결하여 렌즈의 형상을 완성한다. 이 과정에서 요구되는 성능을 만족하는 최소의 렌즈 설계를 위해 특

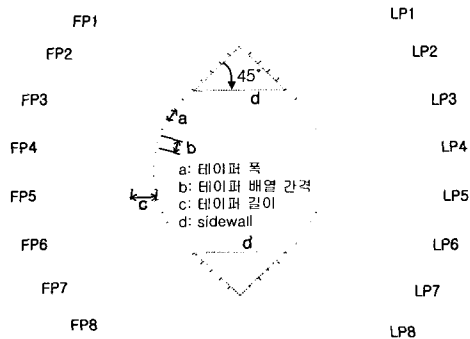


그림 3. 광대역 초고주파 렌즈  
Fig. 3. Broadband microwave lens.

성에 영향을 주는 설계 변수에 대한 연구가 선행되어야 한다. 특성에 영향을 줄 수 있는 요소로는 테이퍼의 폭, 테이퍼의 길이, 최외각 빔 포트(입력 포트)와 최외각 배열 포트(출력 포트) 사이에 불필요하게 생기는 공간 즉, 측면경계(sidewall)의 형상 설정과 처리방법 등이 있다. 그림 3은 렌즈 설계시 고려될 설계 요소를 보여준다. 여기서 FP는 빔 포트, LP는 배열 포트를 의미하며 나머지 포트는 실제 입·출력 포트로서 사용하지 않는 더미(dummy) 포트이다.

### 2-2-1 테이퍼의 배열 간격(그림 3의 b)

빔 포트와 배열 포트의 인접 테이퍼 배열 간격을 동작 주파수에서 반 파장( $0.5\lambda$ ) 이하가 되도록 설정한다. 테이퍼 배열 간격이 반파장 이상일 때 렌즈 진폭 특성에 롤 오프(roll-off)와 위상의 노치(notch) 현상이 발생한다<sup>[5]</sup>. 이것은 테이퍼를 배열된 테이퍼 혼으로 간주할 때 선형 배열 안테나에서 발생할 수 있는 그레이팅 로브(grating lobe)의 영향이다. 그레이팅 로브는 가시영역에서 주 빔과 유사한 크기를 갖는 원치 않는 빔으로서 두 개의 등위 상면을 형성하고 주 빔의 출력을 감소시킨다<sup>[6]</sup>. 이러한 진폭의 노치 현상으로 원하는 렌즈 설계 대역이 제한된다. 이 문제의 극복을 위해 실제 사용하는 포트 사이에 빔 포트로서 사용하지 않는 더미 포트

를 위치시킨다.

본 논문에서는 위상 수차와 주어진 렌즈의 크기를 고려하여  $A=1.95$ 로 설정하였고, 이 경우 테이퍼 폭(그림 3의 a)이  $0.46\lambda$ (18 GHz)이면 테이퍼 간의 배열 간격(그림 3의 b)이 반파장 이상이 되는 경우를 피할 수 있다.

### 2-2-2 테이퍼 길이<sup>[7]</sup>(그림 3의 c)

일반적으로 단일 채널에서 테이퍼 길이가 길수록 정합특성은 좋아지나, 렌즈와 같은 복잡한 형상의 다중 반사에 의한 영향에서도 동일한 결과를 주는 지를 살펴봐야 한다. 길이가 길수록 렌즈의 크기를 확장시키는 결과를 초래하기 때문에 테이퍼 길이에 의한 특성 변화의 고찰을 통해 최적의 성능을 주는 최소의 길이를 찾아서 렌즈의 크기가 커지지 않도록 하여야 한다. 테이퍼에 의한  $S_{11}$  특성은 고대역 주파수에 비해 저대역이 좋지 않으므로 저대역에서의 특성에 초점을 맞추었다. 렌즈 설계 변수에서 모든 조건은 동일하게 하고 테이퍼의 길이를 최소 주파수인 6 GHz를 기준으로  $0.1\lambda \sim 0.5\lambda$ 로 변화하여 렌즈 전체 형상에 대한 시뮬레이션을 수행하여 각 포트에서의 반사 특성( $S_{11}$ )을 분석한 결과,  $0.2\lambda$ 인 경우 7 GHz에서  $S_{11}$ 이  $-6$  dB,  $0.3\lambda$ 에서  $-6.8$  dB,  $0.4\lambda$ 에서  $-6$  dB,  $0.5\lambda$ 에서  $-5.3$  dB로 나타났다.  $0.3\lambda$ 인 경우 전 대역, 특히 저 대역에서도 적은 반사가 발생함을 확인하였으며, 테이퍼 길이가  $0.3\lambda$  이상인 경우 렌즈의 크기가 커짐에 비해 특성이 좋아지지 않으므로 렌즈의 크기를 고려하여 테이퍼의 길이를  $0.3\lambda$ 로 결정하였다.

### 2-2-3 측면경계(sidewall)의 처리<sup>[8]</sup>(그림 3의 d)

렌즈의 형상이 작으면 가장자리 빔 포트와 배열 포트는 직접 인접하지만 진폭 균일 전달 특성을 개선하기 위해 렌즈 형상을 확장하는 경우나, 테이퍼 배열 간격을 맞추기 위한 더미 포트의 배치에 따라 불가피하게 렌즈의 평행판 영역을 확장시켜야 되는 경우가 발생한다. 이 경우 가장자리 빔 포트와 가장자리 배열 포트 사이(FP<sub>1</sub>과 LP<sub>1</sub>, FP<sub>8</sub>과 LP<sub>8</sub> 사이)에 원하지 않는 측면경계가 생긴다. 근본적으로 빔 포

트에 인가된 전력은 가장자리 배열 포트를 넘어서 측면경계 쪽으로도 입사하게 되며 입사각과 같은 반사각으로 반사되어 렌즈의 특성에 영향을 주며 특히 가장자리 포트에 직접적인 영향을 준다. 그러므로 이 영역의 형상을 반사파가 작도록 그림 4에서와 같이 45°가 되도록 설정하고, 설정된 영역에 50 Ω 정합된 부하로 종단된 더미 포트를 두면 반사에 의한 다중산란의 요소 중 단일 반사파는 상당 부분 억제할 수 있다.

본 연구에서는 0.87 cm의 안테나 배열간격을 갖는 8개의 안테나의 선형배열로부터 6~18 GHz 주파수 범위에서 120°(±60°) 범위를 8개의 빔으로 균일 조향할 수 있는 배열 안테나 급전용 초고주파 렌즈의 설계를 목표로 하였다. 설계 이론과 도출된 설계 요소를 적용하여 렌즈 출력 포트간의 전력 전달 편차는 ±3 dB 이내, 렌즈를 경유해 파면(wave front)까지의 위상 편차를 ±40°이내가 되도록 하는 렌즈를 설계하였다. 설계 요소인 렌즈 테이퍼의 배열 간격은 최고 운용 주파수인 18 GHz에서 0.46 λ, 테이퍼 길이는 최저 운용 주파수인 6 GHz에서 0.3 λ, 설계 초기 변수인 A=1.95가 되도록 하였다. 측면 경계는 가장자리 빔 포트(입력 포트)와 가장자리 배열 포트(출력 포트)의 연장선에 45°의 각을 갖도록 형상을 설정하고 전체 20개의 더미 포트 처리하였다.

그림 3의 FP1~FP8은 8개의 빔 포트이고 LP1~LP8은 8개의 배열 포트이다. 실제 포트 사이에 만들어진 14개의 포트는 테이퍼 배열간격을 0.5 λ 이하로 맞추기 위한 더미 포트이다.

### III. 초고주파렌즈의 시뮬레이션 및 측정결과

설계된 결과에 따라 더미 포트 포함 25(입력)×25(출력) 포트를 갖는 형상을 EM 시뮬레이터인 앙상블을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 4에 제작된 렌즈의 형상과 더미 포트에서 산란되는 신호를 흡수하기 위한 흡수체를 나타내었다. 제작된 렌즈는  $\epsilon_r=2.33$ ,  $H=0.7874$  mm,  $t=0.035$  56 mm,  $\tan \delta=0.0012$ 인 RT-Duroid 5870 Rogers사 기판을 사용하였다.

더미 포트는 전송선로 연결 후 50 Ω 종단시키는 것이 바람직 하지만 제한된 크기에서 더미 포트의

커넥터를 장착할 수 있는 충분한 공간을 갖지 못하기 때문에 더미 포트의 종단에서 산란되는 신호를 흡수시켜 반사되는 신호를 최소화시키기 위해 고무(rubber) 형태의 고주파 흡수체인 Cuming사 C-RAM-GDSS-125를 사용하였다. 그림4에서 끝이 뾰족한 마이크로스트립 선로는 더미 포트에 유기된 전자파가 잘 산란되도록 형상화한 것이다. 여기에 사용된 흡수체는 고주파 표면전류 흡수용으로 더미 포트의 종단에서 산란되는 신호를 흡수시킴으로 50 Ω 종단 효과에 근접한 결과를 얻도록 의도하였다.

시뮬레이션시 더미 포트 종단용으로 사용된 흡수체는 고려되지 않았다. 시뮬레이션은 더미 포트를 50 Ω 선로로 하여 수행하였고, 실제 제작시에는 더미 포트 선로 위에 3.18 mm 두께의 흡수체를 장착하였으며, 여기에 사용된 흡수체는 6 GHz에서 11.5 dB, 10 GHz에서 15 dB, 18 GHz에서 20 dB의 특성을 갖는다. 그림 4에서 더미 포트의 길이가 길수록 즉, 흡수체가 전자파를 흡수할 수 있는 더미 포트의 산란표면이 넓을수록 원하는 종단효과에 근접한 결과를 제공하겠지만 기술한 바와 같이 본 제작 렌즈는 제한된 공간으로 제작시 흡수체가 충분한 흡수율을 갖기 위한 더미 포트 길이를 제공하지 못하였기 때문에 원하는 만큼의 50 Ω 종단 효과를 얻을 수 없었던 것으로 생각되며, 시뮬레이션 결과와 실측 결과의 차이는 이와같은 흡수체의 영향으로 판단된다.

제작된 렌즈에서 배열 포트의 가장자리 두 포트는 빔 포트에 유입되는 신호의 유·무를 확인하기 위한 점검용으로 사용하기 위해서 만들어졌다. 제작된 렌즈의 50 Ω 선로의 길이는 30 mm, 더미 선로의 길이는 20 mm가 되도록 하였으며, 렌즈의 가로 최장 길이 대 세로 최장 길이는 13.5×15.5 cm이다.

시험에 사용된 안테나는 배열 안테나의 그레이팅 로브를 배제하기 위한 좁은 배열간격(0.87 cm)으로 인접한 급전부의 커넥터가 같은 축상에 존재하기 어려운 구조이다. 그러므로 사용된 안테나는 좁은 공간을 효율적으로 사용하기 위해 종단부착 동축도파관 어댑터(End-launch coaxial to Waveguide adapter)의 급전부(SMA 커넥터)가 일직선상에 놓이지 않고 인접한 커넥터를 한번은 위로 한번은 아래로 교번하도록 하는 상보급전(cooperated feeder) 구

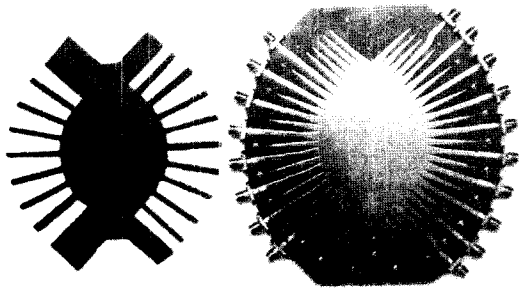


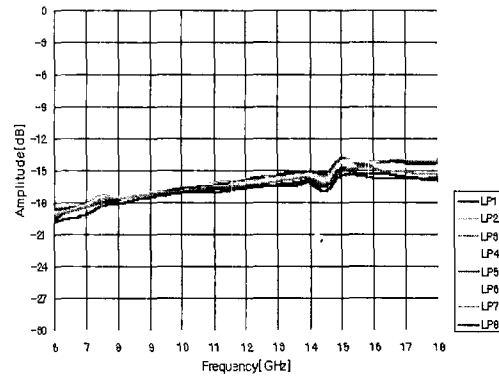
그림 4. 제작된 렌즈와 더미 포트 종단용 흡수체  
Fig. 4. Fabricated array and absorbing material for ends of dummy ports.

조로 설계된 배열 안테나를 사용하였다. 렌즈와 안테나의 연결에는 위상정합된 고주파 케이블을 사용하여 연결하였다.

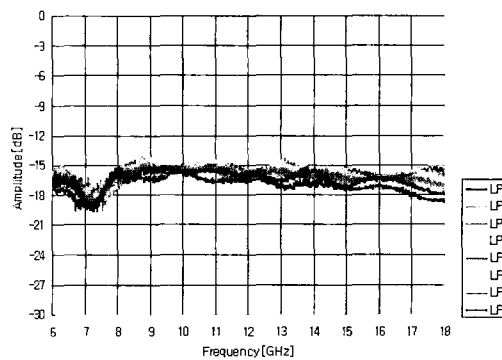
그림 5는 가운데 빔 포트(FP4)로부터 모든 8개 배열 포트로의 삽입손실  $S_{21}$ 을 나타낸다. 가운데 빔 포트는 8개의 빔 포트 중 가장 양호한 특성을 갖는 곳이다. 그림 6은 진폭편차가 가장 저조한 특성을 보여주는 가장자리 포트(FP1)에 급전시의 삽입손실  $S_{21}$ 이다. 시뮬레이션 결과, 각 포트별 주파수에 따른 편차는  $\pm 2.6 \sim \pm 3.0$  dB를 보이고 있으며, 측정결과는  $\pm 2.8 \sim \pm 3.1$  dB로서 매우 양호한 특성을 보이고 있다.

최대 삽입 손실은 가장자리 포트의 경우  $-21.5$  dB, 가운데 포트는  $-19.5$  dB로 측정되었다. 또한, 그 외의 빔 포트인 FP2, FP3, FP5, FP6, FP7, FP8로부터 모든 배열 포트로의 삽입손실을 측정하였으며, 그 결과 주파수 별 각 포트의 진폭 편차는  $\pm 3.1$  dB 이내로 매우 균일한 특성을 보여 주었으며, 설계규격과 매우 유사한 측정결과를 얻었다.

일반적으로 진폭전달 차는 가운데 빔 포트의 경우보다 배열 포트까지의 경로 차가 더욱 두드러지는 가장자리 빔 포트의 경우가 더욱 심화되지만 이미 설계 시 렌즈의 평행판 영역(설계 변수 A)을 충분히 확장시켰으므로 가장자리 빔 포트와 가운데 빔 포트 사이의 출력 편차가 크지 않음을 확인할 수 있다. 그러나, 렌즈 평행판 영역의 확장으로 인해 진폭의 편차는 균일하지만 렌즈 크기가 커짐과 더미 포트의 사용으로 인해 삽입손실이 조금 크게 나타나고 있다.



a) 시뮬레이션



b) 측정결과

그림 5. 빔 포트 F4로부터 배열 포트로의 삽입손실  
Fig. 5. Insertion loss of beam port F4 to all array ports.

렌즈의 위상특성은 임의의  $n$ 번째 빔 포트 급전시 배열 포트까지의 전달위상과 그림 1의 각 안테나로부터 조향 빔에 수직인 등위상면까지의 전파경로  $\phi_n$ 을 더한 배열 포트별 위상을 구하고, 이의 편차를 통해 살펴볼 수 있다. 전파경로  $\phi_n$ 은,

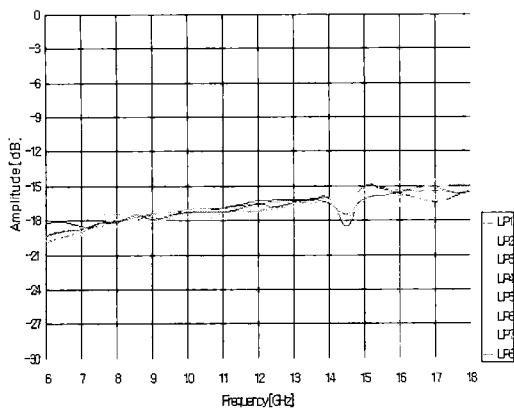
$$\phi_n(\theta) = 2\pi d_l \sin\theta/\lambda \quad (5)$$

이며,  $\theta$ 는 빔 조향각,  $\lambda$ 은 입력신호의 파장,  $d_l$ 은 가운데 배열 포트(LP4)로부터  $l$  번째 배열 포트까지의 거리로서 다음과 같다.

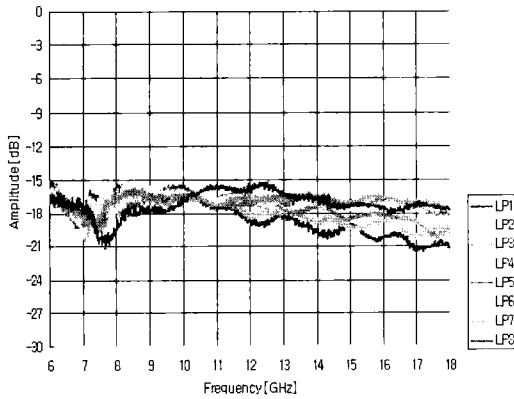
$$d_l = l \cdot d \quad (6)$$

여기서  $d$ 는 배열간격이며, 거리  $d_l$ 은 배열 포트 LP1~LP3에 대하여 양의 값을, LP5~LP8에 대하여

균일한 삽입손실을 갖는 광대역 빔 조향용 대칭형 초고주파 렌즈



a) 시뮬레이션



b) 측정결과

그림 6. 빔 포트 F1로부터 배열 포트로의 삽입손실  
Fig. 6. Insertion loss of beam port F1 to all array ports.

는 음의 값을 갖는다. 그림 7, 그림 8은 각각 가장 자리 포트(FP<sub>1</sub>), 가운데 포트(FP<sub>4</sub>)와 8개의 배열포트(LP<sub>1</sub>~LP<sub>8</sub>) 사이의 측정된 전달 위상에 전파경로  $\phi$ 을 더하여 그린 것이다.

제시한 결과는 네트워크 분석기 HP8510C로 측정된  $S_{21}$ 에 전기적 지연(electrical delay) 기능을 사용하여 도식한 것으로 전기적 지연은 가장자리 포트의 경우 198.29 mm, 가운데 포트의 경우 202.11 mm를 적용하였다. 측정 결과 가장 자리 포트의 경우  $\pm 39.8^\circ$  이내, 가운데 포트의 경우  $\pm 15^\circ$  이내의 위상편차를 나타낸다. 이와 같은 위상편차는 빔 조향을

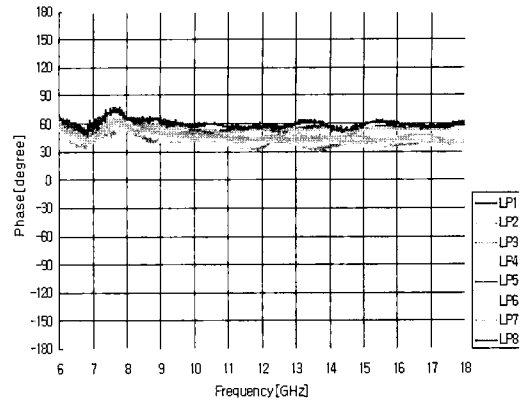


그림 7. 빔 포트 FP4로부터 배열 포트로의 위상차 - 측정

Fig. 7. Phase difference between beam port F4 to array ports-measurement.

얻는데 큰 무리가 없는 좋은 결과이며, 전력 전달 진폭 편차와 위상 편차가 렌즈 설계 목표치에 모두 만족함을 확인할 수 있다.

그림 9~11은 실측된 렌즈의 S-파라미터를 안테나의 진폭과 위상으로 하여 0.87 cm 간격으로 배열된 8개의 혼 안테나의 배열 인자를 고려한 빔조향 패턴의 6 GHz, 12 GHz, 18 GHz에서의 시뮬레이션 결과이다. 그림 9의 경우 최외각 조향빔은 안테나의 능동 단일(active element) 패턴의 영향으로 빔 조향 오차를 주지만, 전 주파수에서 최초 설계 목표인 배

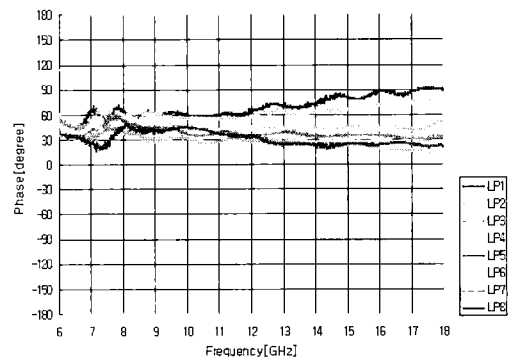


그림 8. 빔 포트 FP8로부터 배열 포트로의 위상차 - 측정

Fig. 8. Phase difference between beam port FP8 to array ports-measurement.

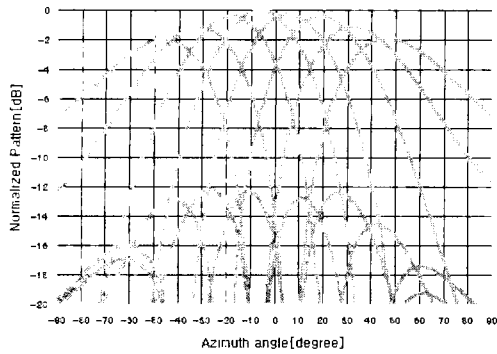


그림 9. 빔 조향 패턴(6 GHz)  
Fig. 9. Array beam steering patterns (6 GHz).

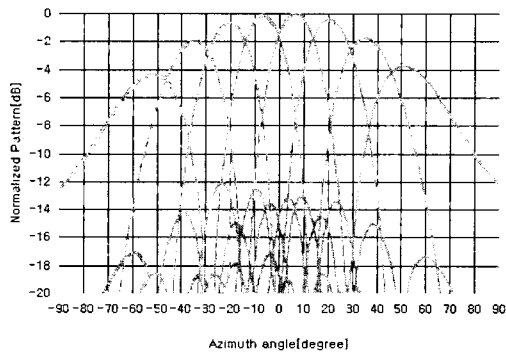


그림 10. 빔 조향 패턴(12 GHz)  
Fig. 10. Array beam steering patterns (12 GHz).

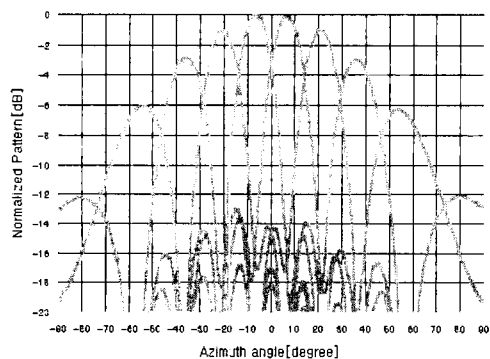


그림 11. 빔 조향 패턴(18 GHz)  
Fig. 11. Array beam steering patterns (18 GHz).

열빔의 반전력 빔폭이  $\pm 60^\circ$  범위를 만족함을 알 수 있다. 그림 10과 그림 11에서 이론적인 조향각  $\pm 6^\circ$ ,  $\pm 19^\circ$ ,  $\pm 34^\circ$ ,  $\pm 52^\circ$ 와 평균  $2^\circ$  이내의 오차로 균일하게 조향된 8개 다중빔을 관찰할 수 있다.

이상에서 살펴 본 렌즈의 각 출력 포트의 진폭 균일 특성과 예측 빔 조향 특성은 그림 1과 같은 위상 배열 송신기의 증폭기가 모두 균일하게 증폭되도록 하여 선형 개구면 안테나에 균일한 전력을 인가할 수 있을 뿐 아니라 원하는 방향으로의 빔 조향이 가능함을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 광대역 주파수 범위에 걸쳐 광범위 각도로 빔을 조향할 수 있는 대칭형 구조의 선형 위상 배열 송신기용 초고주파 렌즈를 설계하였다. 렌즈 특성에 영향을 주는 설계 요소인 테이퍼 폭과 길이, 측면 경계의 처리, 더미 포트의 종단에 대한 개별 연구를 수행하여 주어진 범위 내에서 요구 성능을 만족시키며 렌즈 크기를 축소할 수 있는 설계 변수를 도출하였다. 도출된 변수를 적용해, 0.87 cm의 배열간격을 갖는 8개의 선형 배열 안테나가 6~18 GHz 주파수 범위에서 8개의 빔으로  $\pm 60^\circ$ 의 조향 범위를 균일하게 조향할 수 있는 안테나 급전 소자인 초고주파 렌즈를 설계, 제작하였다. 제작된 렌즈는 포트간의 전력 전달 편차가  $\pm 3.1$  dB 이내이고 렌즈를 경유해 파면(wave front)까지의 위상 편차가  $\pm 39.8^\circ$  이내의 특성을 갖는다.

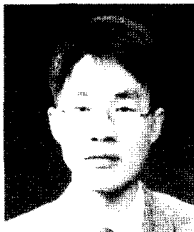
#### 참 고 문 헌

- [1] D. Archer, "Lens-Fed Multiple Beam Arrays", *Microwave Journal*. 18, pp. 37-42, 1975.
- [2] M. S. Smith, "Performance of Ruze and Rotman lenses", *The Radio and Electronic*. vol. 53, no. 9, pp. 329-336, Sep. 1983.
- [3] C. J. Sletton, "Reflector and Lens Antennas - Analysis and Design Using Personal Computers", Artech House, pp. 294-297, 1988.
- [4] J. Paul Shelton, "Focusing Characteristics of symmetrically Configured Bootlace Lenses",



- IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. AP-26, no. 4, July 1978.
- [5] C. J. Sletten, "Reflector and Lens Antennas -Analysis and Design Using Personal Computers", Artech House, pp. 299-303, 1988.
- [6] W. L. Stutzman, "Antenna Theory and Design", John Wiley & Sons, pp. 108-168, 1981.
- [7] R. E. Collin, "The Optimum Tapered Transmission Line Matching Section", *Proc. IRE*. vol. 44, pp. 539-548, Apr. 1956.
- [8] M. S. Smith, "Microstrip port design and sidewall absorption for printed Rotman lenses", *IEE proceedings*, vol. 136, no.1 pp. 53-58, Feb. 1989.

김 인 선



설계

1995년 2월: 순천향대학교 전자공학과 (공학사)  
 1997년 2월: 순천향대학교 전자공학과 (공학석사)  
 1997년 2월 ~ 현재: 국방과학연구소 연구원  
 [주 관심분야] RF 소자 및 안테나

오 승 엽



자공학과 교수

[주 관심분야] 안테나 및 전자파이론

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

이 광 일



자공학과 박사과정

[주 관심분야] RF 소자 및 안테나 설계

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