

유전판 로트맨 렌즈

A Dielectric Slab Rotman Lens

김 재 흥 · 조 춘 식*

Jaeheung Kim · Choon-Sik Cho*

요 약

본 논문에서는 밀리미터파 대역의 응용에 적용될 수 있는 새로운 형태의 로트맨 렌즈를 제시하였다. 본 논문에서 새로이 제시하는 유전판 로트맨 렌즈는 도체손실과 포트간 상호간섭(mutual coupling)을 감소시킬 수 있는 특성을 지니고 있으며 밀리미터 대역에서 구현이 보다 용이한 구조이다. 기존의 렌즈가 도체 평판 구조인데 반해 제안된 렌즈는 유전판과 슬롯으로 구성되어 있으며 TE₀ 모드로 구동한다. 중심주파수 15 GHz에서 9개의 빔 포트와 9개의 배열포트로 구성된 렌즈를 9개의 TSA(Tapered Slot Antenna) 배열과 더불어 설계 및 제작하였다. 측정결과에 따르면 빔폭은 13 GHz에서 약 15°이며 효율은 약 34 %를 나타냈으며 포트간 상호간섭은 주파수가 상승함에 따라 점진적으로 감소함을 관찰할 수 있었다. 밀리미터파 대역에서 제작 및 측정장비의 부족으로 인해 설계주파수를 15 GHz로 크게 낮추었음에도 불구하고 효율은 평행 도체판 구조의 렌즈와 대등한 값을 얻었다. 향후 밀리미터파 대역에서 고유전율 막(high dielectric thin film) 형태로 제작된다면 도체 손실과 상호간섭을 크게 감소시킬 것이 기대된다.

Abstract

A new type of a Rotman lens is presented in this paper for millimeter-wave applications, such as collision avoidance radar. A dielectric slab Rotman lens is proposed to reduce the conductor loss and to create an appropriate form for favorable implementation at millimeter-wave frequency. The proposed lens consists of a dielectric slab and slot lines whereas the conventional lenses are constructed with parallel conducting plates. The dielectric slab Rotman lens excited in TE₀ mode shows a high degree of confinement for the fields, low dispersion, and has an appropriate feed structure. A prototype lens has been designed and fabricated with 9 beam ports and 9 array ports together with 9 tapered slot antennas. This lens has been tested in the range from 10 GHz to 15 GHz and the measured beam widths are about 15° at 13 GHz. The measurements also show low mutual coupling between beam ports and an efficiency of about 34.6 %. The overall performance is comparable to that of conventional Rotman lenses even though the prototype was tested at lower than desired frequencies in the microwave frequency range due to our limited resources for fabrications and measurements. It is expected that at millimeter-wave frequency the dielectric slab Rotman lens will have lower conductor loss and lower mutual coupling than conventional Rotman lenses.

Key words : Rotman Lens, Dielectric Slab Waveguide

I. 서 론

전자기파 기술은 10 GHz보다 높은 대역의 응용으로 빠르게 확산되고 있다. 이는 보다 넓은 대역의 정

「이 연구는 IC Design Education Center(IDECE) 지원으로 연구되었음.」

강원대학교 전기전자정보공학부(School of Electrical, Electronic, and Information Engineering, Kangwon National University)

*한국항공대학교 정보통신공학과(Dept. of Information and Telecommunication Engineering, Hankuk Aviation University)

· 논문 번호 : 20041001-128

· 수정완료일자 : 2004년 11월 11일

보통신 서비스의 요구에 부응하기 위함이기도 하기에 과거 군사용으로 독점되던 기술이 민간 상업용으로 사용되거나 개발 중에 있다. 예로서 과거 레이더 기술에 사용하던 빔형성(*beamforming*) 안테나의 경우 차량용 충돌방지 레이더나 지하매설 금속 탐지기 등에서 유용하게 사용될 수 있는 기술이다. 군사용과는 달리 상업용으로 상용화하기 위해서는 제작비용은 매우 중요한 요소인데 여러 빔형성 기술 중에 특히 로트맨 렌즈는 매우 간단한 구조에 따른 제작비용이 저렴하므로 비용측면에서 매우 유리하다. 이 렌즈는 초점 곡선(*focal arc*)에 전원(*source*)이나 검출기(*detector*)를 연결하여 동시에 다중빔을 생성시키거나 다중 타겟으로부터 반사되어 오는 전파를 동시에 탐지 가능한 렌즈이다.

현재까지 두 가지 형태의 로트맨 렌즈가 발표되었는데 하나는 렌즈의 발명자인 Rotman과 Turner가 구현한 형태로 평행도체판에 동축(*coaxial fed parallel conductor wave guide*)으로 입전한 형태^[1]이며 다른 하나는 Archer가 구현한 형태로 도체판 사이에 공기가 아닌 고체형태의 유전물질로 채워진 일반적으로 *microwave substrate*라고 불리는 형태로서 마이크로스트립 선로로 입전된다^[2]. 소개된 두 가지 형태의 렌즈는 밀리미터 대역(30 GHz~300 GHz)보다는 낮은 마이크로파 대역(300 MHz~30 GHz)에서 주로 구현되었기에 도체손실과 상호간섭의 영향이 상대적으로 심각하지 않거나 적절히 억제되어 왔다. 그러나 밀리미터파 대역에서는 손실이 증가하여 무시할 수 없는 수준에 도달할 수 있으며 상호간섭의 영향의 감소 및 제작의 난이도 등에 있어서 어려움이 있다. 밀리미터파 대역에서의 손실 중 도체 손실의 비중이 더욱 커지며 이는 표면저항의 증가에 기인하며 표면저항은 도전율과 표면침투깊이(*skin depth*)에 반비례하는데 즉, $R_s = 1/(\sigma \delta) = (\pi f \mu / \sigma)^{1/2}$ (σ : 도전율, δ : *skin depth*, f : 주파수, μ : 자화율)에 반비례한다. 본 논문에서 새로운 구조의 로트맨 렌즈를 제안하는 바 이는 도체판 대신 유전판을 사용하므로 도체손실을 감소시킬 수 있으며 입전구조가 *Tapered slot* 구조이므로 상호간섭 또한 감소시킬 수 있는 구조를 갖고 있으며 형태측면에서 새로운 렌즈는 기존의 렌즈 중 서브스트레이트 형태와 상보형태를 갖는다. 일반적으로 유전판 도파관은 마이크로파 대역에

서는 방사손실(*radiation loss* 또는 *spillover loss*)이 심각하여 사용하지 않으며 주로 밀리미터파 대역에서 사용하는데 이 대역에서는 금속 도파관보다 낮은 손실로 전자기파의 전력을 전달 및 한정할 수 있다^{[3],[4]}. 그러나 유전판은 TEM 모드를 지원할 수 없기에 TE 또는 TM 모드로 렌즈를 구동(*excitation*)시켜야 한다. TEM 모드와는 달리 TE 또는 TM 모드의 장의 분포(*field distribution*)는 공간뿐만 아니라 주파수에도 따라 변화하기에 non-TEM 모드로 구동되는 렌즈의 대역폭은 TEM 모드로 구동되는 렌즈에 비해 제한적일 수 있다. 이러한 non-TEM 로트맨 렌즈는 Peterson과 Rausch에 의해 평행 도체판에 사각형 도파관으로 TE 모드로 입전하는 형태로 구현된 바 있다^[5]. 동작주파수가 중심주파수에서 멀어질수록 빔각도가 편향되지만 낮은 순차(*low order*)의 TE 또는 TM 모드의 경우 장의 종성분(*longitudinal component of field*)이 크지 않기에 상대적으로 심각하지 않다.

II. 유전판 로트맨 렌즈 시스템의 설계

2-1 유전판 로트맨 렌즈의 모드

유전판 로트맨 렌즈를 여기시키기 위한 적절한 모드를 찾기 위해 각 모드의 장 분포(*field distribution*)를 살펴볼 필요가 있다. 이는 가능한 입전구조 및 실효유전율(*effective dielectric constant*)을 얻는 과정이기도 하다. 그림 1에 유전판을 나타내며 모드의 장 성분(*field component*)을 살펴보면 다음과 같다.

TE modes: E_y, H_x, H_z

TM modes: E_x, E_z, H_y

효과적 구동을 위해서는 유전판의 모드와 입전구조간의 편극(*polarization*)이 맞아야 하는데 TE 모드의 전기장은 수평성분(E_y)만 존재하므로 슬롯구조로

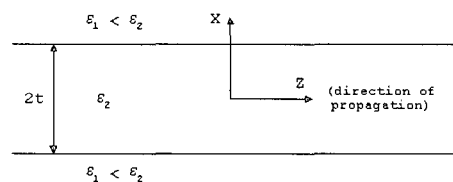


그림 1. 유전판의 구조

Fig. 1. Geometry of a dielectric slab.

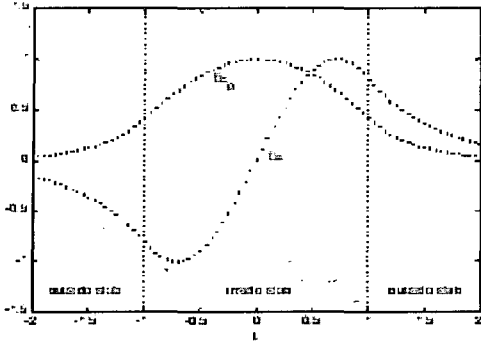


그림 2. 15 GHz에서 사용할 유전판($\epsilon_r=10.2$, $2t=5.715$ mm)의 전기장분포

Fig. 2. Normalized electric field distributions(E_y) of the lowest two TE modes, TE_0 and TE_1 , across the dielectric slab with $\epsilon_r=10.2$ and $2t=5.715$ mm at 15 GHz.

입전할 경우 전기장은 유전판과 쉽게 정렬될 수 있다. TE 모드 중에 가장 낮은 모드인 TE_0 와 TE_1 모드가 고려되었으며 유전판 내부 또는 경계면에서 전파되는 전력은 주파수와 유전판의 두께에 따라 달라지는데 그림 2에서와 같이 TE_0 모드의 전기장은 유전판 내부 중심부에 집중되어 있으며 TE_1 모드의 전기장은 유전판과 공기(또는 진공)간의 경계면에 집중되어 있음을 볼 수 있다. 유전판 바로 바깥 부근의 전력은 방사(radiation)될 경향이 높으므로 방사손실이 상대적으로 클 것이다. 이는 단일모드 광파이버가 다중모드 광파이버보다 손실이 적은 이유와 근본적으로 같다⁶⁾. 또한 낮은 순차 모드일수록 디스퍼션(dispersion)의 경향이 낮은 장점도 있다. 이와 같은 논의로부터 유전판 중심부에 슬롯구조를 설치할 경우 유전판은 TE_0 모드로 효과적으로 구동이 가능함을 인지할 수 있다.

사용할 유전판을 기준하여 즉, $\epsilon_r=10.2$, 두께 = 5.715 mm인 유전판에 대해 15 GHz에서 TE_0 모드의 전파상수(propagation constant, β)는 다음의 식으로부터 계산하여 얻을 수 있다⁷⁾.

$$\tan(ht) = \frac{2hp}{h^2 - p^2}$$

for even modes: $pt = ht \tan(ht)$
 for odd modes: $pt = -ht \cot(ht)$

$$h^2 + \beta^2 = (\epsilon_1 \mu_0) k_0^2 \quad (2)$$

$$-p^2 + \beta^2 = (\epsilon_2 \mu_0) k_0^2 \quad (3)$$

$$(pt)^2 + (ht)^2 = (\epsilon_1 \mu_0 - \epsilon_2 \mu_0)(k_0 t)^2 = V^2 \quad (4)$$

$$\beta^2 = \frac{1}{2} \{ (\epsilon_1 \mu_0 + \epsilon_2 \mu_0) k_0^2 + p^2 - h^2 \} \quad (5)$$

계산 결과로 TE_0 모드의 전파상수는 $\beta = 920.734$ (rad/m), 유효 유전율은 $\sqrt{\epsilon_{eff}} = \beta / \beta_0 = 2.931 = n_{eff}$ ($\mu_r = 1$)를 구하였다. 동일한 방법으로 TE_1 모드에 대해서도 $\beta = 831.703$ (rad/m)와 $\sqrt{\epsilon_{eff}} = n_{eff} = 2.647$ 을 구하였다. TE_0 와 TE_1 모드에 대한 전기장(E_y) 분포는 위의 계산 결과로서 그림 2에 도시되어 있다.

2-2 유전판 로트맨 렌즈의 설계

유전판 로트맨 렌즈는 렌즈, TSA(Tapered Slot Antenna) 배열, 슬롯라인, 그리고 SMA 커넥터를 연결키 위해 마이크로스트립 선로간의 천이(transition)로 구성되어 있다. 연구 초기에는 BST(BiSrTi) 등의 매우 높은 유전율을 갖는 물질로 77 GHz에서 구현하려 했으나 제작 및 측정 장비의 부족으로 현실적인 어려움에 봉착하여 주파수를 낮추고 유전체를 사용가능한 것 중에 높은 것을 사용하였다. 렌즈의 설계 방정식은 본 렌즈에 적절히 적용될 수 있도록 수정하였으며 초점각(focal angle), 유전판의 실효 유전율(ϵ_{eff}), 그리고 지연선의 실효 유전율(ϵ_{line}) 등의 설계요소를 고려하여 방정식 (6), (7), (8)로부터 지연선(delay line; w) 길이, 배열곡선(array curve; x, y)의 좌표를 계산할 수 있다.

$$y = \frac{b_1}{b_0} n \left(\frac{1}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} - \frac{\sqrt{\epsilon_{line}}}{\epsilon_{eff}} w \right) \quad (6)$$

$$x^2 + y^2 + 2gx = \frac{\epsilon_{line}}{\epsilon_{eff}} w^2 - 2 \frac{\sqrt{\epsilon_{line}}}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} gw \quad (7)$$

$$aw^2 + bw + c = 0 \quad (8)$$

여기서,

$$a = \frac{\epsilon_{line}}{\epsilon_{eff}} - n^2 \left(\frac{b_1}{b_0} \right)^2 \frac{\epsilon_{line}}{\epsilon_{eff}^2} - \frac{\epsilon_{line}}{\epsilon_{eff}} \frac{(g-a_0)^2}{(g-a_0)^2}$$

$$b = 2 \frac{\sqrt{\epsilon_{line}}}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \frac{g(g-1)}{(g-a_0)} - \frac{\sqrt{\epsilon_{line}}}{\epsilon_{eff} \sqrt{\epsilon_{eff}}} \frac{(g-1)b_1^2 n^2}{(g-a_0)^2}$$

$$+ 2 \frac{\sqrt{\epsilon_{line}}}{\epsilon_{eff} \sqrt{\epsilon_{eff}}} \left(\frac{b_1}{b_0} \right)^2 - 2 \frac{\sqrt{\epsilon_{line}}}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} g$$

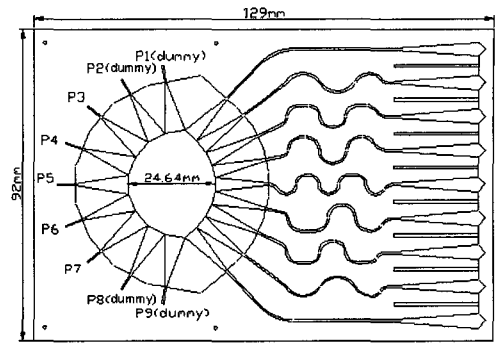
$$c = \frac{(b_1 n)^2 g}{\epsilon_{eff} (g - a_0)} - \frac{(b_1 n)^4}{4\epsilon_{eff}^2 (g - a_0)^2} - \frac{(b_1)^2 n^2}{b_0 \epsilon_{eff}}$$

로트맨 렌즈 시스템의 부수적인 부분인 TSA 배열과 천이구조는 기본적으로 널리 사용되는 기법을 적용 설계하였다^{[9],[10]}. 초점거리(focal length)는 렌즈의 크기를 결정하는 요소로서 경로오차(path length error)와 배열크기로부터 [11]에서 제시된 방법으로 결정하였다. 경로오차는 주로 초점오차(focusing error 또는 aberration)를 발생시키며 결과적으로 빔폭의 증가를 초래한다. 따라서 적절한 초점거리는 주어진 배열의 양끝에서 발생할 수 있는 심각한 경로오차를 피할 수 있도록 정하였다. 지연선은 앞서 계산된 결과로부터 구불구불한 곡선의 형태로 제작하였으며 임피던스는 120 Ω으로 하였다. 이는 TSA의 입력 임피던스가 주파수에 따라 80 Ω에서 180Ω 사이에서 변화하므로^[12] 반사계수를 1/5 이하로 유지될 수 있도록 120 Ω으로 선정하였기 때문이다. 그 외 설계의 요소들은 설계의 절충방안^[13]을 고려하여 모든 설계 요소를 표 1에 정리하였다.

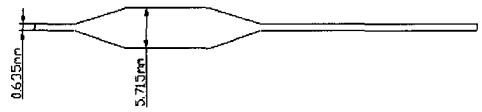
그림 3에서 보듯이 렌즈시스템은 9개의 빔포트(포트 1, 2, 8, 9는 dummy 포트로 항상 50 Ω으로 결선되어 있다.)와 9개의 TSA와 연결될 9개의 배열포트로 구성되어 있다. 전체적인 크기는 13 cm × 9 cm 정도이며 만약 77 GHz에서 구현하였다면 크기는 대

표 1. 유전판 로트맨 렌즈 설계요소
Table 1. Design parameters for dielectric slab Rotman lens.

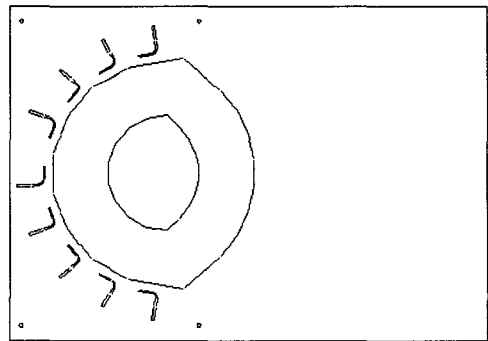
Design parameters	Values
Design frequency	15 GHz
Focal angle	30°
Scanning angle	35°
Ratio of focal lengths	1.078
Antenna array	9 TSAs(spacing of 0.5 λ)
Length of array	80 mm(4 λ)
Polarization of array	Horizontally on H-plane
Substrate RO3010	ε _r =10.2, t=0.635 mm
Lens medium (Dielectric slab)	ε _{eff} =8.59 for TE ₀ , t=5.715 mm
Off-axis focal length	22.857 mm



(a) 전면
(a) Front



(b) 측면
(b) Side

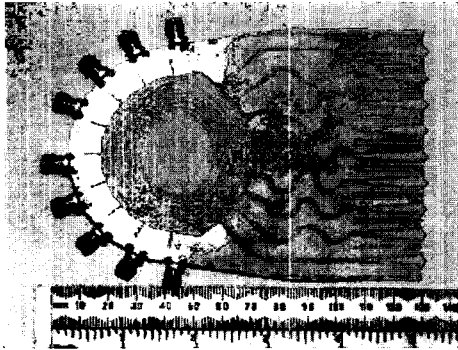


(c) 후면
(c) Back

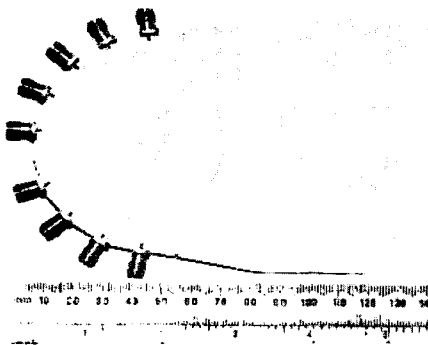
그림 3. 유전판 로트맨 렌즈의 구조
Fig. 3. Geometry of the dielectric slab Rotman lens with tapered slot antenna array.

략 1/5로 감소된 크기로 제작 가능할 것이며 이는 대략 2.5 cm × 1.75 cm 정도가 될 것이다. 계산으로부터 얻은 렌즈구조의 값으로부터 필름마스크를 제작하기 위해 그림 3과 같이 도면을 작도하였다.

Rogers사의 RO3010을 포토에칭하였으며 TSA가 렌즈와 동일 평면상에 슬롯구조로 구성할 수 있으므로 둘간의 천이(transition)없는 구조로 동시에 에칭작업을 통해 제작이 가능하다. 이는 본 렌즈가 TSA와 결합될 경우 부수적으로 얻을 수 있는 장점으로 제작과정의 간략화를 이룰 수 있으며 결과적으로 비용



(a) 전면
(a) Front



(b) 후면
(b) Back

그림 4. RO3010기판($\epsilon_r = 10.2$, $t = 0.635$ mm)과 추가적인 유전판으로 렌즈매체($t = 5.715$ mm)로 접착시켜 제작된 렌즈

Fig. 4. Fabricated lens on RO3010($\epsilon_r = 10.2$, $t = 0.635$ mm) with additional layers of the lens medium ($t = 5.715$ mm).

의 절감을 꾀할 수 있을 것이다. 상대적으로 주파수가 낮기에 렌즈의 매체의 두께를 되도록 두껍게 하기 위해 그림 4에서 보듯이 두께 2.54 mm의 유전판을 깔고 다듬어서 에칭된 서브스트레이트의 양면에 접착하였다.

만약 설계주파수를 밀리미터파 대역으로 충분히 높일 경우에 이 과정은 매우 높은 유전율을 갖는 BST(BaSrTi)와 같은 물질을 코팅함으로써 이루어질 수 있을 것으로 예상된다.

III. 측 정

3-1 빔 패턴

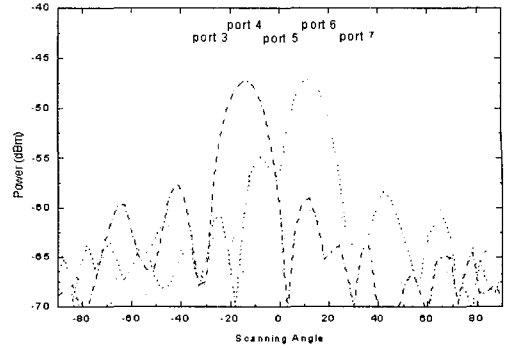
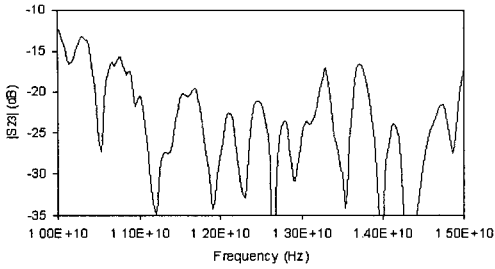


그림 5. 13 GHz에서 측정된 빔 패턴(전력: 7.62 dBm)
Fig. 5. Beam patterns measured at 13 GHz at which the sweeper power was 7.62 dBm.

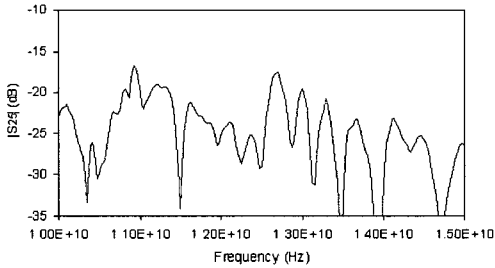
빔 패턴은 각 빔 포트에 대해 -90° 에서 90° 까지 3° 간격으로 측정이 이루어졌으며 출력 혼 안테나와 측정 렌즈 시스템간의 거리는 약 3 m이었다. 측정시 부딪힌 문제점은 출력혼 안테나의 출력전력이 주파수가 상승함에 따라 급격히 감소하였는데 이는 전력 스위퍼 HP83620A의 출력전력이 10 GHz 이상의 대역에서 급격히 감소되었기 때문이었다. 따라서 중심 주파수보다 약간 낮은 13 GHz에서 빔패턴의 측정을 실행하였다. 측정결과로서 그림 5에서 보는 바와 같이 빔 폭(*beam width*)은 빔 포트 3에서 7까지 차례로 15° , 16° , 15° , 15° , 16° 측정되었으며 빔이 지향하는 각도(*beam direction angle*)는 차례로 33° , -12° , 0° , 12° , 33° 를 나타냈다. 외곽의 포트 즉, 3번과 7번 빔 포트에서 관측될 수 있는 빔 각도의 편향은 경로오차와 설계주파수로부터 2 GHz 낮게 측정하므로써 발생할 수 있는(회파와 종파성분의 크기가 주파수에 따라 변하는) non-TEM 전파편향이 요인이 될 수 있다. 본렌즈의 유효한 스캐닝각도는 대략 -30° 에서 30° 정도로 관측되었다.

3-2 포트간 상호간섭(Mutual Coupling)

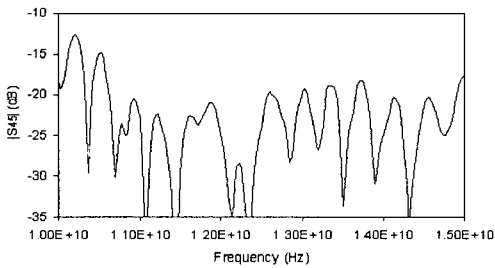
포트간 상호간섭의 주요한 영향은 각 포트의 임피던스가 일정하지 않고 인접포트의 상황에 따라 변화한다는 것이다. 우선 각 포트의 상호간섭을 관측하기 위해 10 GHz에서 15 GHz까지 S-parameter를 측정하였다. 모든 가능한 조합에 대해 측정이 이루어져야 하나 포트수가 많고 렌즈의 대칭성을 고려하여 대표적인 결과를 그림 6에 도시하였다. 첫 번째 측



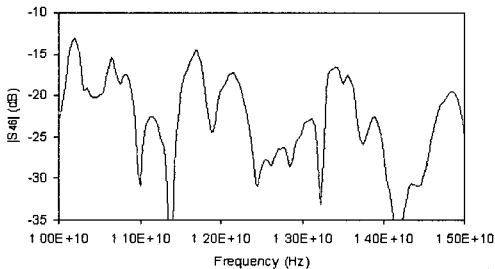
(a) 포트 2와 3
(a) Between port 2 and port 3



(b) 포트 2와 5
(b) Between port 2 and port 5



(c) 포트 4와 5
(c) Between port 4 and port 5



(d) 포트 4와 6
(d) Between port 4 and port 6

그림 6. 포트간 상호간섭
Fig. 6. Variations of measured coupling as a function of frequency.

정은 off-axis 부근에서 인접된 포트간의 간섭의 결과

로서 빔포트 2와 3간의 $|S_{23}|$ 를 나타냈으며 두 번째로 빔포트 2와 중앙빔포트인 포트 5와의 $|S_{25}|$ 를 나타냈다. 세 번째로 on-axis 부근에서의 상호간섭을 살펴 보기 위해 포트 4와 포트 5간의 $|S_{45}|$ 를 측정하였고 마지막으로 포트 4와 포트 6간의 $|S_{46}|$ 를 측정하였다. TSA 간의 상호간섭이 주파수가 상승함에 따라 점진적으로 감소하기^[14]에 tapered slot 구조를 갖고 있는 렌즈의 입전포트에서도 동일한 효과를 관측할 수 있었다. 전체적으로 10 GHz에서 -15 dB에서 15 GHz에서 -20 dB로 감소함을 관측할 수 있었다. 이는 유전판 렌즈가 높은 주파수 대역에서 상호간섭 측면에서 유리한 구조임을 보여준 결과이다.

3.3 유전판 로트맨 렌즈의 효율

렌즈의 효율은 성능을 판별하는 하나의 척도로서 중요한 요소이다. 렌즈의 효율은 도체 손실과 유전체 손실은 물론 수반되는 모든 손실을 포함한다. 본 논문에서 제작한 렌즈시스템은 TSA와 슬롯선로를 통해 직접 연결되어 있어 렌즈자체만의 효율을 산출하기 어렵기에 간접적인 방법을 모색하였다. 이는 다소나마 근사적인 방법으로서 측정된 빔폭과 그 외의 측정결과로부터 안테나를 포함한 렌즈시스템의 효율을 산출할 수 있다. 송-수신 안테나간의 편극(polarization)이 완전히 정렬되었다는 가정 하에 Friss 방정식을 수정하여 효율에 관한 식을 도출할 수 있었다. 부엽(side lobe)을 동반한 선형 배열 안테나의 빔폭과 지향도(Directivity)에 관한 근사식^[15]은 다음과 같이 주어진다.

$$D_0 \cong \frac{101}{\Theta - 0.0027\Theta^2} \quad (\Theta \text{ in degrees}) \quad (9)$$

이 근사식은 지향도가 높을 경우 정확도가 높다. 이 근사식을 Friss 방정식에 포함된 지향도에 치환하여 효율에 관한 식으로 정리를 하여 다음과 같은 식을 얻었다.

$$e_r = \frac{P_r}{P_t} \frac{1}{G_r(1-|\Gamma_r|^2)(1-|\Gamma_t|^2)} \frac{\Theta - 0.0027\Theta^2}{101} \left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right)^2 \quad (10)$$

여기서 첨자 t 는 transmitting을 r 은 receiving을 의미
 e_r = efficiency(with respect to conductor and dielectric loss)

P_t, P_r = transmitting and receiving powers
 G_t, G_r = gains of antenna($G_t = e_t D_t, G_r = e_r D_r$)
 Γ_t, Γ_r = reflection coefficients
 R = distance between transmitting and receiving antennas
 θ = half power beamwidth(in degrees)

측정세팅 및 측정결과로부터 즉, 송신과 수신 안테나간의 거리는 3 m이며 송신 혼 안테나의 특성은 2 GHz에서 18 GHz 대역에서 최대이득은 11. dBi과 최대 VSWR은 3:1이며 13 GHz에서 전력 스위퍼의 출력은 7.26 dBm이며 중앙빔포트(포트 5)에서 반사계수는 0.36으로부터 식 (10)을 이용 13 GHz에서 효율 34.6 %를 산출하였다.

IV. 결 론

본 논문에서 새로운 형태의 로트맨 렌즈가 제안되었고 또한 10 GHz 이상의 대역에서 구현하였다. 이 렌즈의 가능한 특성을 검증하기 위해 TSA 배열과 함께 설계 및 제작하였다. TSA의 경우 대역폭이 넓기에 렌즈안테나의 특성인 광대역특성을 유지할 수 있다. 그리고 기존의 렌즈와는 달리 천이(transition)없이 직접 슬롯선로를 통해 유전판 렌즈와 결합하여 제작 가능하였으며 또한 동일면에 제작이 가능하기에 제작 절차가 간소화 될 수 있으며 이는 상용 시스템에서 중요한 비용 절감 효과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

포트간 상호간섭은 예상대로 주파수가 상승함에 따라 감소하는 특성을 관측할 수 있었다. 이는 밀리미터파 대역에서는 더욱 감소할 것으로 예상되며 따라서 보다 안정적인 입력 임피던스를 유지할 수 있을 것이다. 그 외의 여러 항목을 비교하여 표 2에 정리하였다.

로트맨 렌즈마다 각각의 설계요소들이 상이하기에 본 논문에서 구현한 유전판 렌즈를 기존에 발표된 도체판 렌즈와 직접적으로 비교하기는 어렵지만 효율측면에서 비교할 수 있었다. 비교대상은 서브스트레이트 형태로 5.8 GHz에서 구현된 렌즈로서 안테나 배열을 포함한 렌즈 시스템의 효율은 40 %이다^[6]. 한편 유전판 렌즈 시스템이 장비부족으로 인해 상대적으로 낮은 주파수에서 구현되었기에 동반

표 2. 유전판 렌즈와 도체판 렌즈와 비교

Table 2. Comparison between dielectric slab Rotman lens and conducting plate Rotman lens.

	Conduct. plate	Dielect. slab
Conductor loss	Relatively high	Relatively low
Mutual coupling		$\propto 1/f$
Transition between a lens and TSA	Necessary	Not necessary
Fabrication	TSA and the lens on the opposite plane	TSA and the lens on the same plane

되는 방사손실(radiation loss 또는 spillover loss)에도 불구하고 얻은 효율 34.6 %는 서브스트레이트 형태의 40 %와 대등한 것이다.

결론적으로 제안된 렌즈는 밀리미터 대역보다 낮은 대역에서 구현되었음에도 불구하고 효율측면에서 필적할 만한 성능을 보였으며 밀리미터파 대역에서 구현된다면 MMIC 기술을 기반으로 실리콘($\epsilon_r = 12$)에 BST 필름코팅과 레이저 에블레이션 기술을 활용 소형 정밀 제작이 가능할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] D. H. Arther, "Lens-fed multiple beam arrays", *Microwave Journal*, pp. 171-195, Sep. 1984.
- [3] J. Weinzierl, et al., "Dielectric waveguides at submillimeter wavelengths", *IEEE Proceedings of Sixth International Conference on Terahertz Electronics*, pp. 166-169, 1998.
- [4] C. Yeh, et al., "Communication at millimeter-submillimetre wavelengths using a ceramic ribbon", *Nature*, vol. 404, pp. 584-588, Apr. 2000.
- [5] A. F. Peterson, E. O. Rausch, "Scattering matrix integral equation analysis of the design of a waveguide Rotman lens", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 47, no. 5, pp. 870-878, May 1999.
- [6] B. E. A. Saleh, M. C. Teich, *Fundamentals of*

- Photonics*, Chap. 8, John Wiley & Sons, 1991.
- [7] J. F. Lotspeich, "Explicit general eigenvalue solutions for dielectric slab waveguides", *Applied Optics*, vol. 14, no. 2, pp. 327-335, Feb. 1975.
- [8] J. Kim, "Developments of Rotman lenses at micro/millimeter-wave frequencies", *Ph. D. dissertation, Dept. Elect. Eng.*, Univ. of Colorado, Boulder, CO, 2002.
- [9] R. Janaswamy, D. H. Schaubert, "Characteristic impedance of a wide slotline on low-permittivity substrate", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-34, no. 8, pp. 900-902, Aug. 1986.
- [10] Y. H. Choung, W. C. Wong, "Microwave and millimeter-wave slotline transition design", *Micro-wave Journal*, pp. 77-89, Mar. 1994.
- [11] J. Kim, F. S. Barnes, "Scaling and focusing of the Rotman lens", *IEEE AP-S International Symposium Digest*, pp. 773-776, 2001.
- [12] R. N. Simons, R. Q. Lee, "Linearly tapered slot antenna impedance characteristics", *IEEE AP-S International Symposium Digest*, pp. 170-173, 1995.
- [13] R. C. Hansen, "Design trades for Rotman lens", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 39, no. 4, pp. 464-472, Apr. 1991.
- [14] R. Q. Lee, R. N. Simons, "Measured mutual coupling between linearly tapered slot antennas", *IEEE Trans. on Ant and Prop.*, vol. 45, no. 8, pp. 1320-1322, 1997.
- [15] N. A. McDonald, "Approximate relationship between directivity and beamwidth for broadside collinear arrays", *IEEE Trans. on Antennas Propagat.*, vol. AP-26, no. 2, pp. 340-341, Mar. 1978.
- [16] S. F. Peik, J. Heinstadt, "Multiple beam microstrip array fed by Rotman lens", *IEE Ninth International Conference on Antennas and Propagation*, pp. 348-351, 1995.

김 재 흥



1989년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1998년 12월: University of Colorado at Boulder Electrical Eng. (공학석사)
 2002년 5월: University of Colorado at Boulder Electrical Eng. (공학박사)

2002년 8월~현재: 강원대학교 전기전자정보공학부 BK21 사업단 교수

[주 관심분야] Lens Antennas, Power Amplifiers, Scattering Problems 등

조 춘 식



1987년 2월: 서울대학교 제어계측공학과 (공학사)
 1995년 12월: University of South Carolina, Electrical Eng. (공학석사)
 1998년 12월: University of Colorado at Boulder, Electrical Eng. (공학박사)

2004년 3월~현재: 한국항공대학교 정보통신공학과 전임 강사

[주 관심분야] MMIC, LNA, Oscillator, Antenna, Computational Electromagnetics 등