韓國電磁波學會論文誌 第 13 卷 第 9 號 2002年 10月 論文 2002-13-9-03

Rotman 렌즈를 이용한 BMWS용 빔 제어 안테나

Beam Steering Antenna using Rotman Lens for BMWS Application

오순수 · 성영제 · 이정수 · 이종문* · 표철식* · 김응배* · 김영식

Soon-Soo Oh · Young-Je Sung · Jung-Su Lee · Chong-Moon Lee* · Cheol-Sig Pyo* · Eung-Bae Kim* · Young-Sik Kim

요 약

도파관 렌즈를 이용한 기존의 Rotman 렌즈 안테나는 렌즈 내부면에서 안테나 소자까지 구부러진 도파로를 가지고 있다. 그러나 본 논문에서는 직선 도파로를 갖는 개선된 Rotman 렌즈 안테나를 제안하였으며 이를 적용하여 3개의 입력 단자와 6개의 개방된 도파관을 안테나 소자로 가지는 BMWS용 빔 제어 안테나를 설계 및 제작하였다. 측정 결과 빔 제어 안테나는 15.4～17.2 dB의 이득과 0°, +14°～+16°, −15°～−16°의 지향각 그리고 약 −10～−20 dB의 부엽레벨을 가진다.

Abstract

The conventional Rotman lens antenna using a waveguide lens has the bended waveguide from the inner lens contour to the antenna element. However in this paper the improved Rotman lens antenna having a straight waveguide is proposed. By applying this technique, the beam steering antenna for BMWS application which has 3 input ports and 6 antenna elements consisted of open-ended waveguide has been designed and fabricated. From the measurement, the gain of the beam steering antenna is 15.4～17.2 dB. The direction angle is 0°, +14°～+16°, −15°～−16° and the side lobe level is −10～−20 dB.

Key words : Rotman Lens, Antenna, Beam Steering, BMWS

Ⅰ. 서 론

국내외적으로 정보 제공 서비스의 광대역화 및 초고속화에 대한 요구가 증가하고 있으며 이에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 국내에서는 24.24～26.7 GHz 대역의 B-WLL(Broadband Wireless Local Loop)이 현재 상용화되어 서비스를 시행하고 있다. 아울러 40.5～43.5 GHz 대역의 BMWS(Broad Multimedia Wireless Service) 또한 서비스 규격 등 제반 사항을 준비 중이다. BMWS는 고정형 및 이동형 무신랜 서비스 등을 지원하기 위해 근거리 이동성을 요구하고 있다. 따라서 가입자 장치가 이동하더라도 안테나의 좁은 빔을 기지국을 향하여 조정할 수 있는 빔 제어 안테나가 필요하다.

일반적으로 빔 제어 안테나는 안테나 소자마다 한 개의 위상천이기와 한 개의 감쇠기를 갖고 있다[1]. 위상천이기를 이용하여 안테나 소자로 공급되는 신호에 위상 차이를 만듦으로써 원하는 방향으로 빔을 제어할 수 있다. 그리고 감쇠기의 감쇠 정도를 달리하여 낮은 부엽 레벨을 만들 수 있다. 일반적인 빔 제어 안테나는 안테나 소자마다 위상천이기를 갖춰야 하므로 제작 단가가 높다는 단점을 가지고

「본 연구는 한국전자통신연구원(ETRI)의 지원을 받아 수행되었음.」
고려대학교 전파통신공학과(Department of Communication Science and Engineering, Korea University)
*한국전자통신연구원 무선방송연구소(Radio & Broadcasting Research Laboratory, ETRI)
· 논 문 번 호 : 20020511-059
· 수정완료일자 : 2002년 7월 29일

있으며 이는 BMWS 상용화에 큰 장애물로 작용할 수 있다.

본 논문에서는 Rotman 렌즈[2]를 사용하여 위상천이기의 필요성을 제거하였다. 또한 도파관을 사용하여 손실을 최소화하였으며, 렌즈와 안테나 간의 경로를 직선으로 만드는 방법을 제안함으로써 제작 단가와 공정 시간을 줄였다. 설계한 안테나는 Ansoft 사의 FEM 시뮬레이터인 HFSS[3]를 사용하여 모의실험을 한 후 제작 및 측정을 통해 결과를 비교 분석하였다.

Ⅱ. 렌즈 및 안테나 소자 설계

2-1 이론적 배경

그림 1은 Rotman Lens의 구성도로서 1963년 Rotman에 의해 제안되어 위상 천이기가 필요하지 않은 빔 제어용 안테나에 활용되고 있다[2].

스위치가 빔의 입력 경로 (A, B, C) 중 하나를 선택하면 선택된 입력경로를 통과한 파는 Circular focal arc의 F점을 통해 입사한다. 렌즈를 통과하여 Inner lens contour에 존재하는 P(X,Y)에 도달한 파는 전기적인 길이 W의 케이블이나 도파관을 통해 Outer lens contour의 Q(N)에 위치한 안테나 소자를 통해 방사한다. B를 통해 입사한 파는 파면이 x축과 수직인 면을 이루어 방사하지만, A를 통해 입사한 파는 경로 차이에 의하여 파면이 그림 1과 같이 Wavefront A면에서 형성이 되어 AA 방향으로 진행한다. 동일한 원리에 의해 C를 통해 입사한 파는 파면이 그림 1의 Wavefront C면에서 형성이 되어 빔이 CC 방향으로 진행한다. 따라서 빔 단자 중 하나를 선택함으로써 원하는 방향으로 빔을 방사시킬 수 있다.

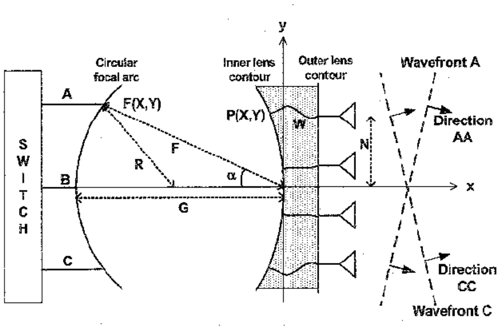


그림 1. Rotman 렌즈 구성도

Fig. 1. Configuration of Rotman lens.

그림 1에서 F점부터 파면까지의 전기적 거리가 동일하다는 조건으로부터 유도한 식[1]을 바탕으로 다음의 순서에 의해 Rotman 렌즈 안테나를 설계한다.

① x축 외(off-axis)의 촛점 길이 F, x축 위(on-axis)의 촛점 길이 G, x축으로부터 안테나 소자까지의 거리 N을 결정한다. 최적의 G는 다음 식 (1)에 의해 구할 수 있다.

$$\frac{G}{F} = 1 + \frac{\alpha}{2} \tag{1}$$

② 각 파라메타를 정규화시킨다.

$$\eta = N/F,\ x = X/F,\ y = Y/F,\ g = G/F,$$
$$w = \frac{W - W_0}{F}, \tag{2}$$
$$a_0 = \cos\alpha,\ b_0 = \sin\alpha.$$

③ 다음 식 (3)로 부터 η 에 따른 w를 구한다.

$$aw^2 + bw + c = 0 \tag{3}$$

여기서 a, b, c는 다음과 같다.

$$a = \left[1 - \eta^2 - \left(\frac{g-1}{g-a_0}\right)^2\right],$$
$$b = \left[2g\left(\frac{g-a}{g-a_0}\right) - \frac{(g-1)}{(g-a_0)^2} b_0^2\eta^2 + 2\eta^2\right] - 2g,$$
$$c = \left[\frac{gb_0^2\eta^2}{g-a_0} - \frac{b_0^4\eta^4}{4(g-a_0)^2} - \eta^2\right].$$

④ 다음 이원이차방정식을 풀어 x, y를 구한다.

$$x^2 + y^2 + 2gx = w^2 - 2gw,$$
$$y = \eta(1 - w). \tag{4}$$

⑤ 각 파라메터에 F를 곱하여 실제 수치를 구한다.

2-2 도파관 렌즈 및 안테나 소자 설계

렌즈을 구현하기 위하여 TEM파를 만드는 평행판 전송선로[2]나 준 TEM파의 마이크로 스트립 선

로[4]를 사용할 수 있다. BMWS의 운용 주파수 대역은 40.5~43.5 GHz이므로 위 전송선로를 사용할 경우 많은 손실을 가져올 수 있다. 따라서 도파관을 사용하여 렌즈를 구현함으로써 손실을 최소화 할 수 있다[5],[6]. 빔이 입사하는 입력단의 도파관의 규격은 WR-28인 7.10 mm×3.55 mm, 안테나로 연결되는 출력단의 도파관의 규격은 7.10 mm×2.85 mm로 정하였다. 출력단의 도파관의 규격은 안테나 소자간의 간격을 반 파장에 가깝게 만들기 위하여 도파관의 좁은 벽의 길이를 감소시켰다. 그리고 안테나 소자간의 간격이 한 파장을 넘지 않기 위하여 도파관 넓은 벽 즉 7.10 mm를 렌즈의 높이로 정하였다. 본 논문에서는 3개의 입력단과 6개의 안테나 소자를 갖는 선형 배열 안테나를 설계하였다. 빔의 방향은 0° 와 +18°, −18°로 설정하였으며 이에 따른 렌즈 파라메터는 표 1과 같다.

밀리미터파 대역의 안테나 소자 중 혼 안테나는 개방된 형태의 도파관보다 이득은 크지만[1] 제작이 어려우며, LTSA(Linear Tapered Slot Antenna)는 천이구조가 추가적으로 필요하며 손실이 많다는 단점을 갖고 있다. 따라서 본 논문에서는 도파관 렌즈와 연계하여 제작이 용이하며 손실이 적은 개방 종단된 도파관을 안테나 소자로 사용하였다.

표 1의 렌즈 파라메터에 따라 기존의 방식으로 설계한 Rotman렌즈 안테나의 도면은 그림 2와 같다.

표 1. 설계한 렌즈 파라메터
Table 1. Designed lens parameter.

파라메터	단위	값
F	mm	21.41(3.0 λ)
G	mm	22.47
g	−	1.05
R	mm	11.45
α	degree	18.00
N	mm	−12.13, −7.28, −2.43, 2.43, 7.28, 12.13
P(X,Y)	mm	(−3.00, −12.51), (−1.19, −7.18), (−0.14, −2.42), (−0.14, 2.42), (−1.19, 7.18), (−3.00, 12.51)
F(X,Y)	mm	(−20.37, −6.62), (−22.47, 0.00), (−20.37, 6.62)
W		0.91λ, 1.00 λ, 1.00 λ, 1.00 λ, 1.00 λ, 0.91 λ

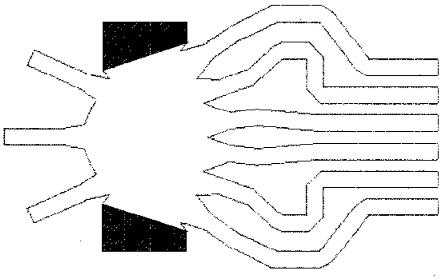


그림 2. 기존 방식으로 설계한 Rotman 렌즈 안테나
Fig. 2. Rotman lens antenna using the conventional design method.

그림 2에서 렌즈로부터 안테나 소자까지의 구부러진 도파관 경로가 존재하는 이유는 그림 1의 P 점부터 안테나 소자까지의 전기적 길이 W를 제한된 물리적 영역 안에서 구현하였기 때문이다. 즉, 입력단의 중앙으로 파가 입사한 경우 각 안테나 소자에서 동일한 위상을 갖기 위해서 전기적 길이 W에 한 파장이나 두 파장을 추가하였다.

Ⅲ. 개선된 Rotman 렌즈 안테나

그림 2와 같이 렌즈로부터 안테나 소자까지의 복잡한 경로를 설계하기 위해서는 설계 시간이 추가로 필요하다. 더구나 기울어진 면이 많은 도파관은 제작 시간과 단가를 증가시킨다. 또한 긴 도파관은 분산 현상을 증가시켜 각 안테나 소자 간 위상차이가 주파수에 따라 변화하는 문제를 더욱 증대시키는 문제점을 가지고 있다.

따라서 본 논문에서는 동일한 전기적 길이를 유지하면서 구부러진 도파관 경로를 직선 경로로 바꾸는 방법을 제안한다. 식 (5)[7]에서 도파관의 넓은 벽의 길이 a가 감소하면 관내파장 λ_g이 증가하므로 도파관의 물리적 길이가 동일하더라도 더 큰 전기적 길이를 구할 수 있다. 이렇게 넓은 벽의 길이를 적절하게 결정함으로써 구부러진 도파관 경로를 이용하여 구현하던 전기적 길이를 직선 도파관으로 구현할 수 있다.

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1-\left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} \tag{5}$$

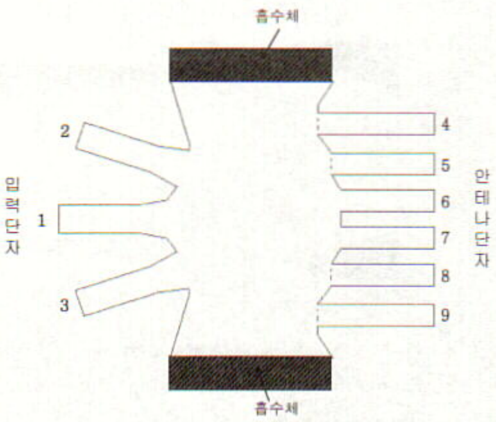


그림 3. 개선된 Rotman 렌즈 안테나
Fig. 3. Improved Rotman lens antenna.

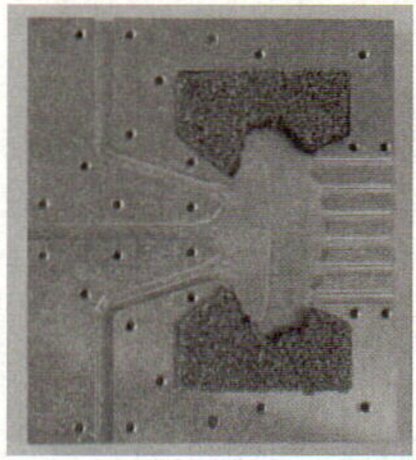
여기서 λ_g는 도파관 내의 파장, λ는 자유공간에서 파장, a는 도파관의 넓은 벽의 길이를 의미한다.

표 1의 설계 파라메터를 제안한 방법에 의해 다시 설계한 개선된 형태의 Rotman 렌즈 안테나는 그림 3과 같다.

여기서 1, 2, 3은 파가 입사하는 단자이며 4, 5, 6은 안테나 단자를 가리킨다. 안테나 단자는 개방 종단된 도파관으로 구성되어 동시에 방사소자의 역할을 수행한다. 식 (5)에 의해 단자 4와 9 그리고 5와 8의 도파관 넓은 면의 길이 a를 감소시켜 관내파장을 증가시킬 수 있다. 따라서 단자 4와 9의 도파관의 높이는 5.87 mm, 단자 5와 8의 도파관 높이는 4.73 mm이며 단자 6과 7은 도파관 렌즈의 높이와 동일하게 7.10 mm로 설계하였다. 그림 3의 렌즈의 옆면은 흡수체를 이용하여 안테나 소자로 반사되는 파를 제거하는데 반사파는 빔 단자로부터 안테나 단자 사이의 직선 경로상의 파에 영향을 주어 원하는 방향으로 빔을 제어하는 것을 방해한다.

Ⅳ. 모의실험 및 측정 결과

그림 3의 개선된 Rotman 렌즈 안테나의 반사손실과 투과 계수의 크기와 위상, 방사패턴 등을 모의실험하고 최적화 하였다. 선반 공정으로 제작한 Rotman 렌즈 안테나의 내부를 그림 4에 나타내었다. 안테나 재질로서 가볍고 단가가 낮은 알루미늄을 사용하였다.



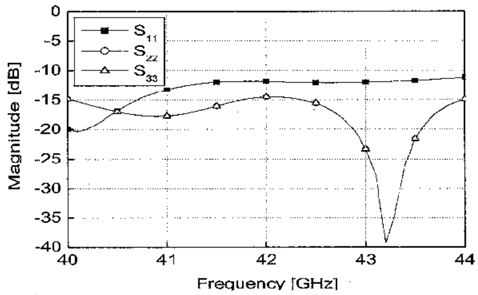
(a)

(b)

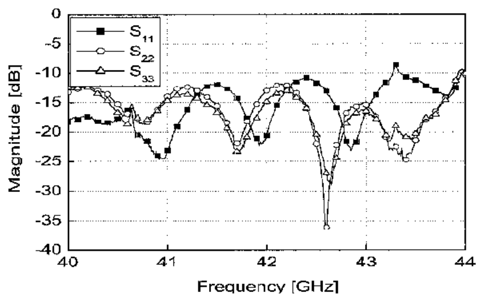
그림 4. 제작한 Rotman 렌즈 안테나
(a) 내부도, (b) 정면도
Fig. 4. Fabricated Rotman lens antenna.
(a) inside view, (b) front view

모의실험과 측정에 의한 입력단의 반사손실은 그림 5에, 입력단 사이의 상호 결합은 그림 6에 나타내었다. 측정에 의한 반사손실이 모의실험과 다른 이유는 모의실험에서 흡수체가 모든 반사파를 제거하여 반사손실이 없다고 가정하였으나 실제의 흡수체는 −10∼−15 dB의 반사손실이 존재하기 때문이다. 그림 5의 반사손실은 운용 주파수 범위 내에서 −10∼−20 dB 이하의 값을 가지며 상호 결합량은 −10∼−15 dB 이하의 값을 나타낸다.

제작한 안테나 소자의 간격은 4.86 mm로서 어댑터를 연결할 수 없다. 따라서 입력단에서 각 안테나 소자까지의 투과 계수는 측정이 불가능하여 모의실험 결과만 그림 7과 그림 8에 도시하였다. 그림 7은 빔 단자 1을 통해 파가 입사하는 경우로써 대칭성으로 인하여 S_{41}과 S_{91}, S_{51}과 S_{81}, S_{61}과 S_{71}은 동일한 크기와 위상을 가진다. 또한 빔 단자 2나 빔 단자 3의 위치는 단자 1을 기준으로 수평 대칭이므로 투과계수는 서로 대칭적이므로 단자 2로 입사하는 경우만 그림 8에 도시하였다. 설계한 안테나가 낮은 부엽



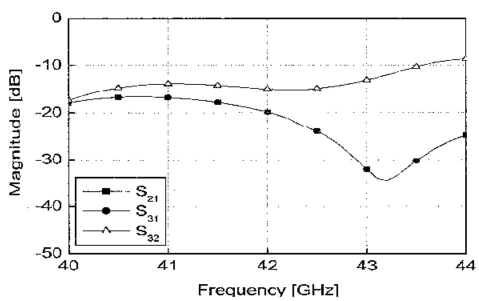
(a)



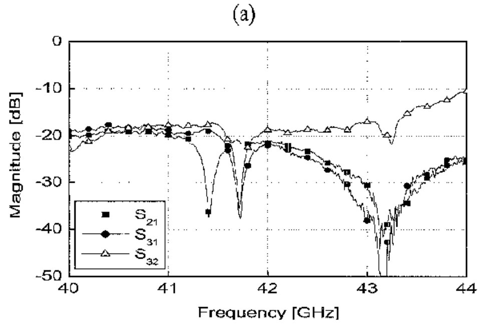
(b)

그림 5. 입력단의 반사손실 (a) 모의실험, (b) 측정

Fig. 5. Return loss at input ports.
(a) simulation, (b) measurement



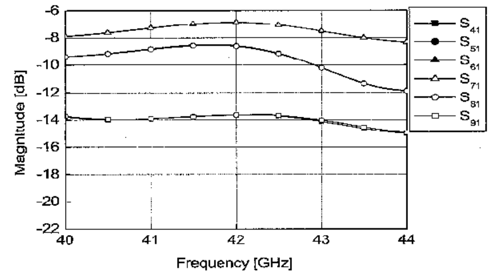
(a)



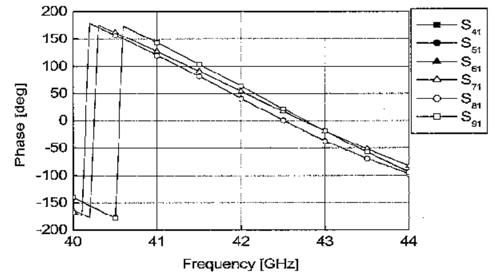
(b)

그림 6. 입력단 사이의 상호 결합 (a) 모의실험, (b) 측정

Fig. 6. Mutual coupling between input ports.
(a) simulation, (b) measurement



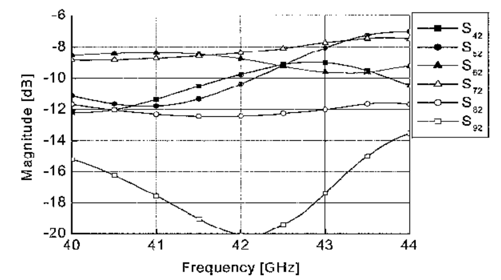
(a)



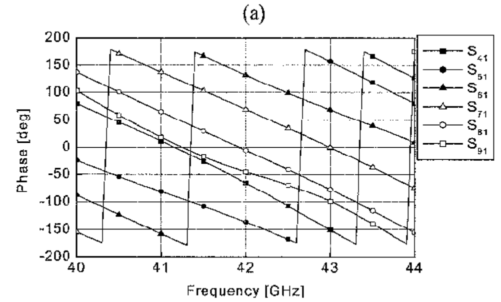
(b)

그림 7. 단자 1을 통해 파가 입사한 경우의 투과 계수 (a) 크기, (b) 위상

Fig. 7. The transmission coefficient through port 1.
(a) magnitude, (b) phase



(a)



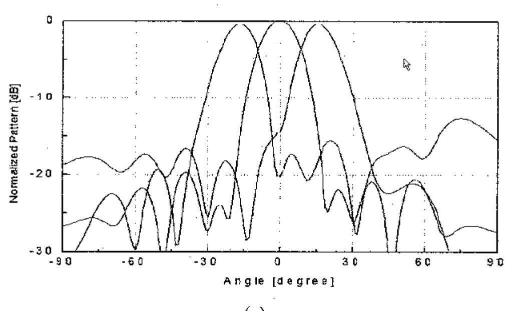
(b)

그림 8. 단자 2를 통해 파가 입사한 경우의 투과 계수 (a) 크기, (b) 위상

Fig. 8. The transmission coefficient through port 2.
(a) magnitude, (b) phase

레벨을 얻기 위하여 그림 3과 같이 렌즈 내부면을 수정함으로써 그림 7(a)와 그림 8(a)와 같이 안테나 소자 배열의 중심에 많은 파가 전달되고 가장자리에 가장 적은 파가 전달되도록 하였다. 그림 7(b)는 전달 계수의 위상으로서 거의 동위상임을 알 수 있다. 그러나 그림 8(b)에서 안테나 단자 사이의 위상 차이에는 오차가 존재하는데 그 이유는 BMWS 운용 주파수가 밀리미터파 대역이므로 렌즈의 내부 벽의 굴곡에 민감한 점과 분산에 의한 영향으로 사료된다.

40.5와 42.0, 43.5 GHz에서 모의실험과 측정에 의한 E면 방사패턴을 그림 9, 10, 11에 각각 도시하였으며 이득과 지향각, 3 dB E면 빔 폭, 부엽레벨을 표 2에 정리하였다. 이 결과로부터 입력단자 1로 빔이 입사할 때는 약 16.9 dB의 이득을 가지는 반면 입력단자 2, 3으로 입사할 때는 이득이 0.2∼1.7 dB 정도 줄어듦을 알 수 있다. 그리고 빔이 단자 2나 3으로 입사할 경우 빔 방향이 바뀌는 것을 볼 수 있다. 그러나 모의실험과 측정치의 지향각이 설계 각



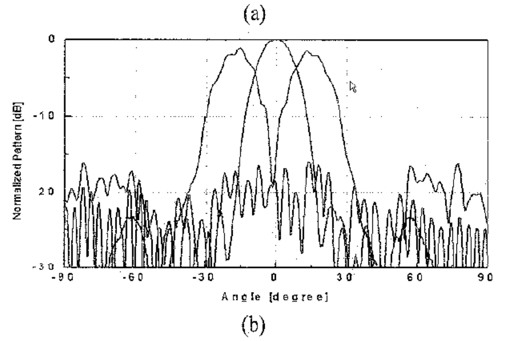


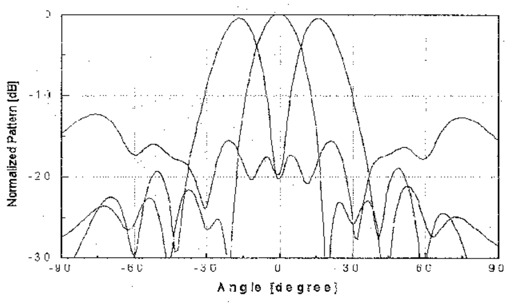
그림 9. 40.5 GHz에서 E면 방사패턴
(a) 모의실험, (b) 측정

Fig. 9. E-plane radiation patterns at 40.5 GHz.
(a) simulation, (b) measurement

표 2. 이득, 지향각, 3 dB E면 빔폭, 부엽레벨의 측정 결과

Table 2. The measured result of gain, direction angle, 3 dB E-plane beamwidth and side lobe level.

주파수 [GHz]	입력 단자	이득 [dB]	지향각 [degree]	3 dB E면 빔폭 [degree]	부엽레벨 [dB]
40.5	1	16.9	0	14.3	−21.8
	2	15.4	+14	14.5	−15.0
	3	15.7	−15	14.0	−14.8
42.0	1	17.2	0	14.5	−19.5
	2	15.5	+14	13.5	−10.3
	3	15.7	−16	13.8	−10.3
43.5	1	16.5	0	15.0	−20.3
	2	16.3	+16	13.8	−10.8
	3	16.8	−18	14.0	−10.8



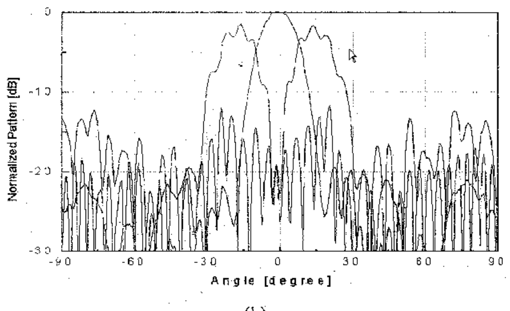


그림 10. 42.0 GHz에서 E면 방사패턴
(a) 모의실험, (b) 측정

Fig. 10. E-plane radiation patterns at 42.0 GHz.
(a) simulation, (b) measurement

도인 18°에 2°∼4° 정도 모자라는 이유는 TE_{10} 모드의 도파관을 통과하면서 생긴 분산과 제작 및 실험 오차로 사료된다. 그리고 입력단자 1로 빔이 입사할

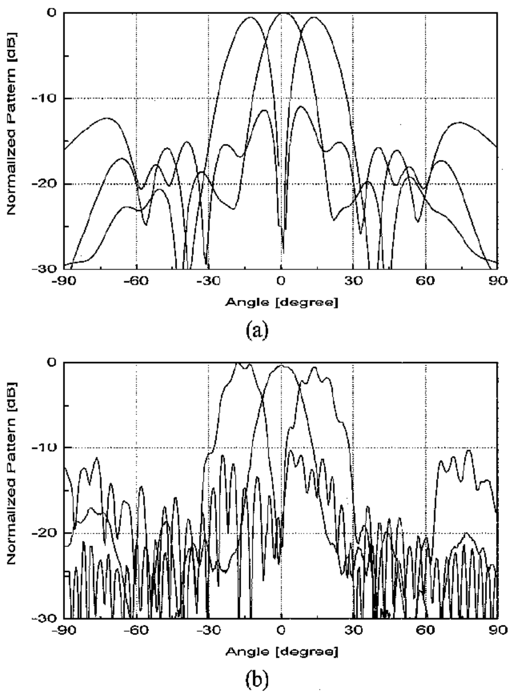


그림 11. 43.5 GHz에서 E면 방사패턴
(a) 모의실험, (b) 측정

Fig. 11. E-plane radiation patterns at 43.5 GHz.
(a) simulation, (b) measurement

때는 약 −20 dB, 단자 2나 단자 3으로 빔이 입사할 때는 약 −10∼−15 dB의 부엽레벨을 갖는다.

V. 결 론

위상천이기가 필요하지 않은 빔 제어 안테나로써 3개 방향으로 빔을 제어하고 6개의 개방된 도파관을 안테나 소자로 갖는 BMWS용 Rotman 렌즈 안테나를 설계 및 제작하였다. 기존의 Rotman 렌즈 안테나는 도파관 렌즈 내부면에서 안테나 소자까지 구부러진 경로의 도파로를 가지는데, 이러한 복잡한 도파로는 분산과 설계 및 제작 시간 증가 그리고 가격 상승을 야기한다. 따라서 본 논문에서는 도파관의 넓은 벽의 길이와 관내 파장 사이의 관계를 이용하여 직선 경로의 도파로를 만들 수 있는 방법을 제안하여 개선된 Rotman 렌즈 안테나를 설계하였다. 제작한 안테나는 빔 단자 1로 빔이 입사할 때는 16.5∼17.2 dB, 빔 단자 2, 3으로 입사할 때는 15.4∼16.8 dB의 이득을 가진다. 그리고 지향각은 빔 단자 1의 경우 0°, 빔 단자 2의 경우 +14°∼+16°, 빔 단자 3의 경우 −15°∼−16° 이고, 부엽레벨은 입력단자 1로 빔이 입사할 때는 약 −20 dB, 단자 2로 빔이 입사할 때는 약 −10∼−15 dB이다. 따라서 본 논문에서 제시한 개선된 Rotman 렌즈 안테나의 빔 단자와 안테나 소자수를 증가시킴으로써 BMWS 시스템의 빔 제어용 안테나로 적용될 수 있음을 알 수 있다.

감사의 글

본 논문의 안테나 제작을 위해 도와주신 (주) 텔웨이브의 문종용 과장님과 서준석 책임 연구원님께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

[1] W. L. Stutzman, G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, Wiley, 1981.

[2] W. Rotman, R. F. Turner, "Wide-Angle Microwave Lens for Line Source Applications", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 11, pp. 623-632, Nov. 1963.

[3] HFSS, *Release 8*, Ansoft, corp., PA, USA, 1999.

[4] J. Kim, F. Barnes, "Scaling and Focusing of the Rotman Lens", *2001 IEEE Int. Symp. Antennas and Propagation*, pp. 773-776, July 2001.

[5] E. O. Rausch, A. F. Peterson and W. Wiebach, "A Low Cost, High Performance, Electronically Scanned MMW Antenna", *Microwave J.*, vol. 40, pp. 20-32, Jan. 1997.

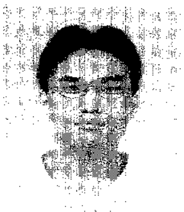
[6] H. H. Fuchs, D. Nüβler, "Design of Rotman Lens for Beamsteering of 94 GHz antenna array", *Electron. Lett.*, vol. 35, pp. 854-855, May 1999.

[7] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 449, 1998.

오 순 수

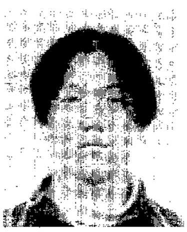
1998년 2월: 인하대학교 전자공학과 (공학사)
2000년 2월: 인하대학교 전자공학과 (공학석사)
2000년 3월~현재: 고려대학교 전파공학과 박사과정
[주 관심분야] 안테나, 전자파 수치해석, 초고주파 소자 설계

성 영 제



2000년 2월: 고려대학교 전기전자전파공학부 (공학사)
2000년 3월~2002년 2월: 고려대학교 전파공학과 (공학석사)
2002년 3월~현재: 고려대학교 박사과정
[주 관심분야] 안테나 급전을 위한 도파관 구조 및 밀리미터파 대역 배열 안테나

이 정 수



2001년 2월: 고려대학교 전기전자전파공학과 (공학사)
2001년 3월~현재: 고려대학교 전파공학과 석사과정
[주 관심분야] 안테나 설계

이 종 문

1996년 2월: 충북대학교 컴퓨터공학과 (공학사)
1996년 1월~1998년 2월: 새한텔레콤 기술연구소 연구원
1999년 8월: 충북대학교 전파공학과 (공학석사)
2000년 4월~현재: 한국전자통신연구원 안테나기반연구팀 연구원
[주 관심분야] 위성통신, 능동소자, 마이크로스트립안테나

표 철 식

1963년 4월 24일생
1991년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1999년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
1991년 1월~현재: 한국전자통신연구원 무선방송연구소 전파기반연구부 안테나기반연구팀, 선임연구원
[주 관심분야] RF 집적형 안테나, 능동위상배열 안테나 및 밀리미터파 안테나

김 응 배

1981년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공학사)
1983년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공학석사)
1999년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공학박사)
1983년 1월~1988년 3월 : 금성전기/금성반도체 연구소 연구원
1988년 3월~1988년 11월: 한국통신진흥(주) 과장
1989년 11월~현재: 한국전자통신연구원 무선방송기술연구소 광대역무선멀티미디어 팀장
[주 관심분야] B-WLL, BMWS, TDMA 시스템, CDMA 시스템, 밀리미터파 RF기술

김 영 식

1978년 3월~1982년 1월: 홍익공업대학 전자과 조교수
1998년 5월: University of Massachusetts at Amherst (공학박사)
1988년 5월~1989년 2월: University of Massachusetts at Amherst (Post Doc.)
1989년 3월~1993년 2월: ETRI 이동통신연구단 무선기술연구실 실장
1993년 3월~현재: 고려대학교 전파통신공학과 교수
[주 관심분야] RF front-end system