

Dumbbell 패치를 이용한 밀리미터파 대역 슬롯 도파관 안테나

Slotted Waveguide Array Antenna using Dumbbell Patch for Millimeter-Wave

이 정 수 · 성 영 제* · 김 영 식*

Jung-Su Lee · Young-Je Sung* · Young-Sik Kim*

요 약

본 논문에서는 슬롯 판과 도파관의 두 파트로 구성되어 있는 단층 구조의 슬롯 도파관 배열 안테나를 설계하였다. 슬롯 판과 도파관 사이의 전기적인 접촉을 구현하는 것이 대량 생산에 있어 가장 어려운 점이며 이를 위하여 Dumbbell 패치와 초크를 가지는 슬롯 도파관 배열 안테나를 제안하였다. 초크는 슬롯 판과 도파관 사이의 겹에 의해 발생하는 누설 전류를 막아 주지만 도파관 사이에 공간상의 손실이 발생하게 된다. 본 논문에서는 Dumbbell 패치를 사용하여 공간상의 손실을 줄일 수 있었고, 16×16 배열 안테나를 제작한 결과 27.2 dB의 이득과 45 %의 효율을 얻었다.

Abstract

In this paper, the single-layer slotted waveguide array antenna is designed, which consists of two parts; the slot plate and the structure of waveguide. The key difficulty in mass production is the realization of perfect electrical contact between the two parts. Therefore the single-layer slotted waveguide array antenna is presented with a dumbbell patch and a choke. The choke can prevent from the leakage between the slot plate and waveguide, while the choke in the adjacent waveguide incurs space dissipation. To reduce the spacing of antennas about a dumbbell patch is utilized. The 16×16 array antenna gain of 27.2 dB with 45 % aperture efficiency is obtained.

Key words : Dumbbell Patch, Antenna, Slot, Millimeter-Wave

I. 서 론

최근 휴대전화나 자동차, 선박, 항공기 무선 등 이동통신의 급격한 증가에 따라 현재 국내외적으로 정보의 광대역화 및 초고속화에 대한 요구가 폭발적으로 증가하고 있으며 이러한 요구에 적합한 무선 멀티미디어 시스템에 대한 연구 및 개발이 국내외적으로 활발히 진행되고 있다.

그리하여 과거에는 주로 군사용이나 천문/기상관측용으로 개발되어 왔던 밀리미터파 대역의 시스템이 최근 들어 상업용 통신 및 센서 시스템으로 응용

되고 있다. 특히 민간부문에서의 밀리미터파 시스템은 광대역 LMDS(local multi point distribution system), B-WLL(broadband wireless local loop), MBS(multi media broad band service) 등에 이용될 수 있으며, 양방향의 점대점(point-to-point) 또는 점대다점(point-to-multipoint) 통신에 높은 지향성과 대역폭을 바탕으로 응용할 수 있다.

밀리미터파 대역에서 배열 안테나의 특성은 급전 구조에 의해 크게 좌우된다. 기존에 평판 안테나로 가장 선호되던 마이크로스트립 라인을 이용한 급전 구조는 밀리미터파 대역에서 도체에 의한 높은 손실

한국과학기술원 인공위성연구센터(Satellite Technology Research Center, KAIST)

*고려대학교 정보통신대학 전파공학과(Dept. of Radio Sciences and Eng., Korea University)

· 논문 번호 : 20031118-161

· 수정완료일자 : 2004년 3월 22일

이 발생하는 단점을 가지게 되어 높은 이득을 만족시키기 어려운 것이 입증되었다^{[1],[2]}.

도파관을 이용한 급전 구조는 마이크로스트립 라인에 비해 손실이 매우 적어 밀리미터파 대역의 급전 구조로 적절하다. 하지만 도파관을 이용한 구조의 경우 제작이 매우 어려워지는 문제점이 있다. 따라서 본 논문은 급전 구조는 도파관을 이용하되 제작하기 어려운 슬롯 부분을 인쇄 기술(printed technology)을 이용하여 설계하였다. 하지만 인쇄 기술을 이용하여 안테나를 제작할 경우 도파관과 슬롯 판의 전기적인 접촉이 불완전하게 되어 안테나 이득이 감소하게 된다^[3]. 이러한 문제를 개선하기 위해 다양한 연구가 있어 왔으며^[3], 본 논문에서도 이러한 문제를 해결하고 작은 크기에 높은 이득을 가지는 도파관 배열 안테나를 제작하기 위하여 Dumbbell 패치와 초크를 이용한 도파관 안테나를 제안한다.

II. Dumbbell 패치 설계

그림 1은 Dumbbell 패치의 기본 구조이다. 슬롯 위에 일정한 유전체 층을 가지고 그 위에 Dumbbell 패치가 존재하는 구조이다. 즉 슬롯에서 커플링을 통하여 Dumbbell 패치로 급전이 되므로 슬롯 하나를 이용하여 두 개의 패치로 방사되는 구조이며 작은 공간으로 높은 이득을 가질 수 있게 한다. 슬롯과 패치의 크기는 $W_1 = 3.6 \text{ mm}$, $W_2 = 2.2 \text{ mm}$, $L_1 = 2.4 \text{ mm}$, $S_1 = 0.4 \text{ mm}$ 이다^{[4],[5]}. 패치의 크기는 일반적으로 사용되는 반파장의 크기로 설계하였으며 슬롯의 두께를 적절히 조절하여 도파관에서 패치로 전달되는 전력량을 조절하였다. 슬롯의 두께가 커질수록 전달되는 전력량은 커지나 반사손실이 나빠지는 결

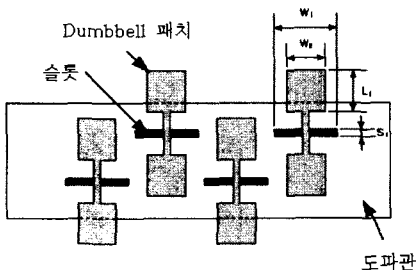


그림 1. Dumbbell 패치의 기본 구조
Fig. 1. Configuration of Dumbbell patch.

과를 보였다. 기판의 두께는 0.508 mm이며 유전율은 2.2이다.

본 논문에서는 적절한 반사손실을 가지면서 도파관 내부에서 고차모드가 발생하지 않는 $6.7 \times 2.8 \text{ mm}^2$ 의 크기를 가지는 도파관을 이용하여 설계하였으며 가로축상의 Dumbbell 패치의 간격을 중심 주파수의 반파장인 4.35 mm를 약간 벌어난 4.0 mm로 설계하여 반사손실을 줄이는 방법을 사용하였다. 따라서 단일 소자의 특성보다는 소자를 일정한 수로 배열하여 설계하는 방법을 택하였다.

그림 2와 3은 그림 1의 구조로 소자를 일정한 간격인 4 mm로 10개를 배열하여 HFSS로 모의 실험한^[6] 결과이며 39 GHz에서부터 43 GHz까지 모두 -10 dB 이하의 S_{11} 값을 가지며 약 20 dB의 안테나 이득을 보였다.

III. 급전 구조 설계

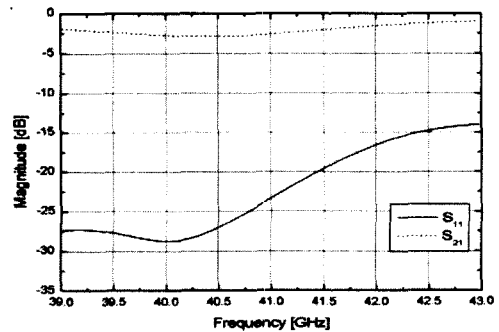


그림 2. 10×2 배열 안테나의 반사손실
Fig. 2. Return loss at 10×2 array antenna.

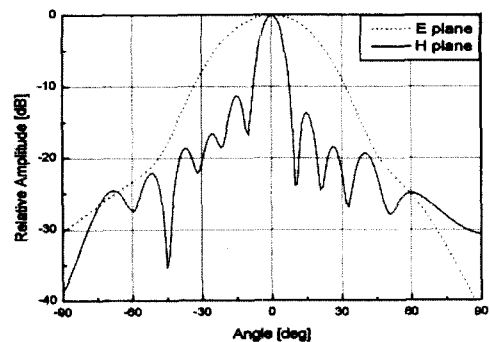


그림 3. 10×2 배열 안테나의 방사 패턴
Fig. 3. Radiation pattern at 10×2 array antenna.

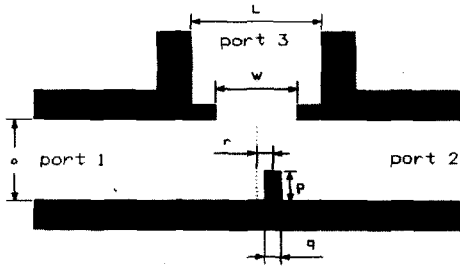


그림 4. T-junction 전력 분배기의 단면도
Fig. 4. Top view of T-junction power divider.

3-1 T-junction 전력 분배기의 구조 및 설계

그림 4는 도파관으로의 급전을 위해 사용한 T-junction 전력 분배기의 형태를 단면도로 나타낸 것이다. 유도성 벽을 사용하여 신호를 각 포트에 분배하는 구조이며 포트 1과 포트 2의 도파관의 크기는 $5.5 \times 2.8 \text{ mm}^2$ 이며 포트 3의 도파관의 크기는 Dumbbell 구조를 설계하면서 결정한 도파관의 크기인 $6.7 \times 2.8 \text{ mm}^2$ 이다. T-junction 전력 분배기의 설계과정은 포트 3으로의 전달되는 도파관 창의 폭 W 와 유도성 벽의 길이 p 의 크기를 조절하여 포트 1에서 포트 3으로 분배되는 전력량이 결정하고, 포트 3 도파관의 중간위치와 유도성 벽과의 거리인 r 과 유도성 벽의 두께인 q 를 조절하여 W 와 p 에 의하여 결정한 포트 3으로의 전력량을 미세하게 조절하고 최적의 포트 1에서의 반사손실 값을 결정하게 된다.

그림 5는 도파관 창의 폭인 W 의 변화에 따른 S_{11} 과 S_{31} 를 모의 실험하여 구한 결과이다. $P=1.8 \text{ mm}$, $r=0.4 \text{ mm}$, $q=1 \text{ mm}$ 일 때 도파관 창의 폭을 3.0 mm 에서 4.0 mm 까지 0.2 mm 씩 증가시켜 모의 실험하였으며, W 가 증가할수록 S_{31} 은 -9.1 dB 에서부터 -3.7 dB 까지 차례로 증가하였고 W 가 3.4 mm 일 때 S_{11} 은 최적의 값을 가진다. 그림 6은 유도성 벽의 길이 p 의 변화에 따른 S_{11} 과 S_{31} 을 모의 실험한 결과이다. 앞에서와 마찬가지로 $W=3.4 \text{ mm}$, $r=0.4 \text{ mm}$, $q=1 \text{ mm}$ 일 때 유도성 벽의 길이를 1.2 mm 에서 2.2 mm 까지 0.2 mm 씩 증가시켜 모의 실험하였으며, p 가 증가할수록 S_{31} 은 -8 dB 에서부터 -4.3 dB 까지 차례로 증가하였고 p 가 1.8 mm 일 때 S_{11} 은 최적의 값을 가진다.

일반적으로 W 와 p 만으로도 포트 3으로의 원하는

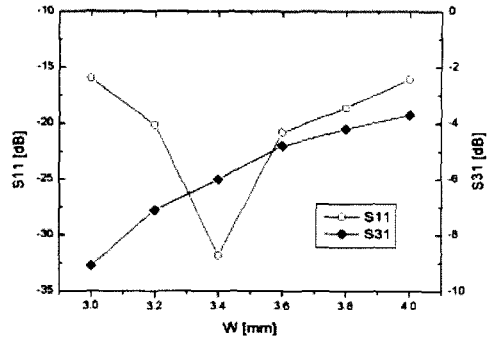


그림 5. W 의 변화에 따른 S_{11} & S_{31}
Fig. 5. The variation of S_{11} & S_{31} with respect to W .

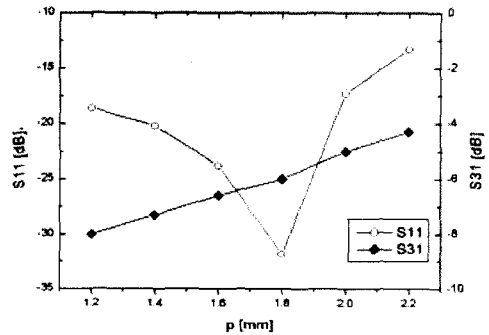


그림 6. p 의 변화에 따른 S_{11} & S_{31}
Fig. 6. The variation of S_{11} & S_{31} with respect to p .

전력분배가 가능하다. 하지만 보다 정밀한 전력분배를 위하여 r 과 q 를 조절하여 W 와 p 로 결정한 포트 3으로의 전력분배를 미세하게 조절하고 최적의 포트 1의 반사손실 값을 결정하게 된다. 본 논문에서는 T-junction 전력 분배기를 총 8개를 연결하여 급전 구조를 설계하였으며 각각의 포트는 동일한 전력량과 위상을 가지도록 설계하였다. 8개의 포트에 동일한 전력을 분배하기 위해서는 각각의 T형 분배기의 전력 분배량이 달라야 한다. 이 이유는 전 단계에서 이미 분배되고 남은 전력으로 계속하여 동일한 전력을 분배하여야 하기 때문이다. 8개의 포트에 분배하기 위해서는 각각의 T형 분배기의 전력 분배량이 첫 번째 단은 12.5%, 두 번째 단은 14.3%, 세 번째 단은 16.7%, 네 번째 단은 20%, 다섯 번째 단은 25%, 여섯 번째 단은 33.3%, 일곱 번째 단은 50%, 마지막 단은 100%의 분배량을 가질 때 각각의 포트에 동일한 전력량이 들어가게 된다. 따라서 이에 맞는 적절한 W 와 p 값을 그림 5, 6을 바탕으로 하여 결정

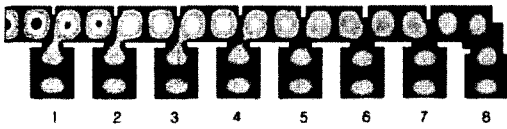


그림 7. 급전 구조에서 E-field 크기 분포
Fig. 7. E-field scalar distribution of feed structure.

표 1. 급전 구조의 설계 변수와 전기적인 특성
Table 1. Design specification and electrical characteristic of feed structure.

도파관 번호	도파관 창의 폭 W [mm]	유도성 벽의 길이 p [mm]	크기 [dB]	위상 [deg]
1	3.2	1.5	-8.65	57.37
2	3.2	1.6	-8.77	55.87
3	3.2	1.7	-9.1	65.03
4	3.4	1.6	-8.88	64.54
5	3.4	1.8	-9.16	52.73
6	3.5	2	-9.14	72.15
7	3.8	2.2	-9.1	73.86
8			-9.54	70.52

한 다음 모의 실험을 통한 튜닝으로 최적의 급전 구조를 설계하였다.

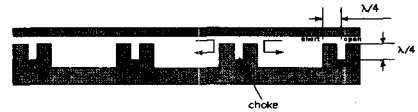
표 1은 동일한 전력량과 위상차를 가지는 급전 구조의 설계하기 위하여 도파관 창의 폭과 유도성 벽의 길이를 적절히 조절하여 모의 실험하여 설계된 급전구조의 전기적인 특성을 나타내었으며 분배되는 전력의 크기는 각 도파관에서 -9 dB 정도의 값을 가지고 위상 차는 $\pm 10^\circ$ 이내의 오차를 가진다. 그림 7은 표 1에서 설계한 급전 구조를 모의 실험을 이용하여 E-field의 크기 분포를 나타내었다. 모의 실험 결과 설계된 급전 구조는 39 GHz부터 43 GHz까지 모두 -10 dB 이하의 S_{11} 값을 가진다.

3-2 초크를 이용한 안테나 설계

밀리미터파 대역에서는 슬롯의 크기가 작아지게 되어 기계적인 가공의 어려움으로 방사되는 슬롯 판을 주로 인쇄 기술을 이용하여 제작하게 된다. 이러한 경우 급전되는 도파관과 방사되는 슬롯 판 사이에 갭이 발생하게 되어 전기적인 접촉이 불완전하게 되고 안테나의 이득이 줄어드는 단점이 발생하게 된다. 이러한 이유로 각각의 급전되는 도파관 사이에



(a) 초크가 없을 때
(a) without choke



(b) 초크가 있을 때
(b) with choke

그림 8. 초크를 이용한 구조
Fig. 8. Structure using choke.

초크를 넣어 급전되는 도파관과 방사되는 슬롯 판 사이의 전기적인 접촉을 개선시켜 인접하는 도파관 사이의 영향과 손실을 줄일 수 있게 되어 안테나의 이득을 높이는 설계를 하였다^[7].

그림 8의 (a)는 급전되는 도파관을 자른 단면도이며 도파관과 슬롯 판 사이에 갭이 발생하여 인접하는 도파관 사이에 누설 전류가 흐르게 되고 안테나 외부로도 누설전류가 흘러 안테나의 이득이 감소하게 된다. (b)는 인접하는 도파관 사이에 초크를 넣어 갭에서 발생하는 누설전류를 막아주는 역할을 한다. 동작원리는 초크와 도파관 사이의 거리와 초크의 깊이를 각각 $\lambda/4$ 로 하여 갭을 도파관으로부터 단락회로(short circuit)로 보이게 한다.

본 논문에서는 도파관과 초크 사이의 거리를 1.6 mm, 초크의 깊이를 1.5 mm로 설계하였다. 이는 약 $\lambda/4$ 정도의 거리이며 모의 실험을 통하여 본 논문의 안테나 구조에 적합하게 설계한 수치이다. 방사되는 도파관과 슬롯 판 사이의 갭을 0.1 mm로 두고 도파관의 길이를 100 mm로 하여 모의 실험을 해 본 결과 초크가 없을 때는 약 20 %의 전력이 갭을 통하여 인접하는 도파관으로 흘러갔으며 초크를 포함하였을 때는 약 4 %만의 누설 전류가 발생하였다.

하지만 이것은 슬롯과 Dumbbell 패치 없이 도파관만으로 모의 실험을 한 결과이므로 초크를 넣었을 때 배열 안테나 전체의 결과를 예측하기 위하여 안테나 전체구조를 모의 실험을 해 본 결과 구한 안테나 이득을 표 2에 나타내었다. 중심주파수인 41 GHz에서 16×16 배열 구조로 소자간의 간격을 그림 9의

표 2. 모의 실험한 안테나 이득
Table 2. Simulation result of antenna gain.

	도파관과 슬롯판 사이에 갭이 없는 이상적인 경우 [dB]	갭이 있지만 초크를 포함하였을 때 [dB]	도파관과 슬롯판 사이에 갭이 있을 때 [dB]
16×16 배열 안테나	30.3	29.2	28

기준으로 가로 9.845 mm, 세로 4 mm의 일정한 간격으로 배열하여 전체를 모의 실험을 결과이며 도파관과 슬롯 판 사이에 갭이 존재하지 않을 경우 이득이 각각 30.3 dB과 29.1 dB로써 65×80 mm²의 유효 개구면을 가지는 안테나의 이론적인 이득치인 30.8 dB과 거의 유사한 결과를 가진다. 하지만 도파관과 슬롯 판 사이에 갭을 0.1 mm 정도 줄 경우 안테나의 이득

이 도파관과 슬롯 판 사이에 갭이 없는 이상적인 경우에 비하여 약 2.5 dB 정도 감소하게 되는 결과가 나타났다. 초크를 넣어 모의 실험을 한 결과 도파관과 슬롯 판 사이에 갭이 없는 이상적인 경우에 비하여 약 1 dB 정도의 손실을 보여 인접하는 도파관 사이의 누설 전류를 막아 이득의 손실을 줄여주는 역할을 하는 것을 볼 수 있다.

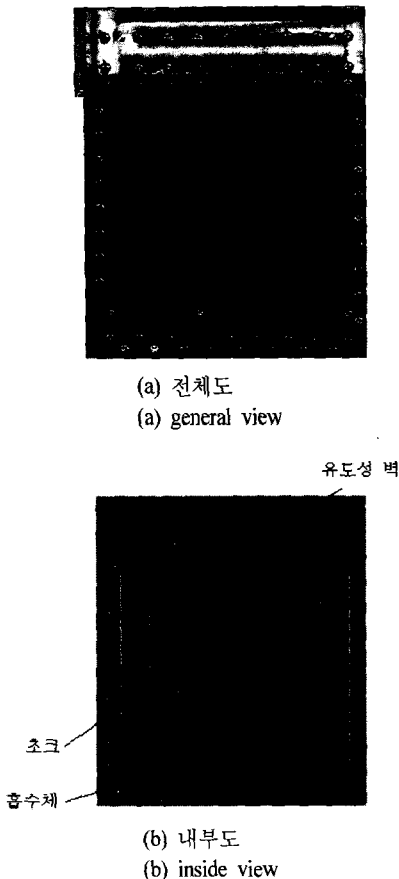
IV. 측정 결과

그림 9는 제작된 안테나의 전체 구조와 도파관 내부 구조를 나타낸 그림이다. 배열의 끝에 입력단을 달아 급전하는 방법인 종단 급전 방법을 이용하였으며 16×16 배열 구조로 제작하였다. 유효 개구면의 크기는 65×80 mm²이며 방사되는 도파관의 끝을 모의 실험 과정에서는 포트로 설정하였지만 실제 제작에서는 흡수체를 넣어 제작하였다.

그림 10은 제작한 안테나의 반사손실을 나타낸다. 39 GHz에서부터 43 GHz까지 모두 -10 dB 이하의 반사손실을 가진다. 하지만 중심 주파수인 41 GHz 근처에서 슬롯에서의 반사파가 중첩되어 반사손실이 커짐을 알 수 있다.

그림 11은 중심주파수인 41 GHz에서 모의 실험한 결과와 측정 결과의 방사 패턴을 비교한 그래프이다. 모의 실험과 측정 결과가 잘 일치하였고 약 -10 dB 이하의 부엽 레벨을 가진다. 하지만 E-면 방사 패턴의 약 ± 50° 부근에서 그레이팅 로브가 나타났으며 이는 Dumbbell 패치가 서로 엇갈리게 분포되어 있어 발생하는 문제점으로 보인다.

측정 결과 안테나 이득은 중심주파수인 41 GHz에



(a) 전체도
(a) general view

(b) 내부도
(b) inside view

그림 9. 제작한 슬롯 도파관 안테나
Fig. 9. Fabricated slotted waveguide antenna.

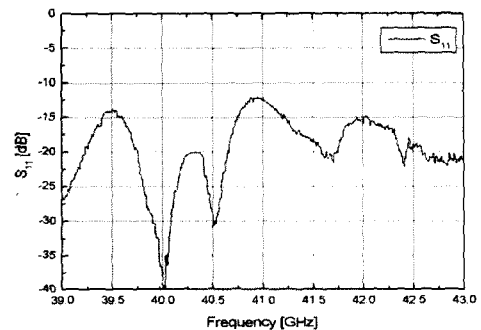


그림 10. 안테나의 반사손실
Fig. 10. Measured results of return loss.

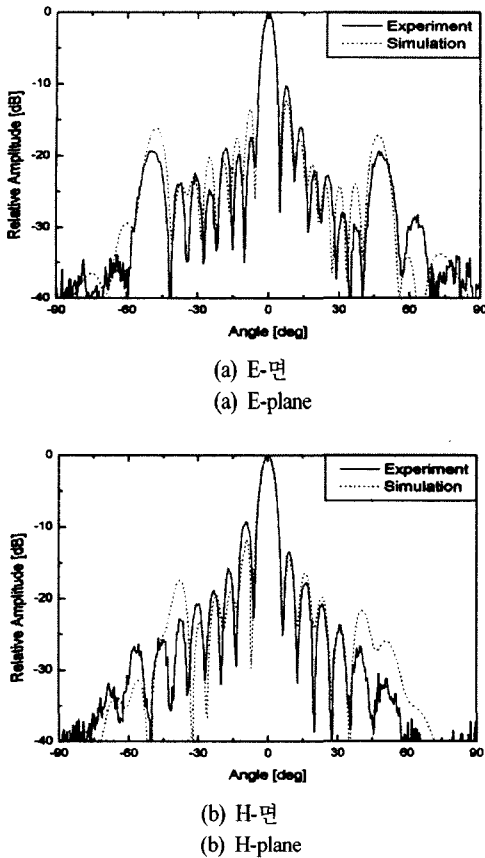


그림 11. 41 GHz에서의 방사 패턴
Fig. 11. Radiation patterns at 41 GHz.

서 27.2 dB였고 39 GHz부터 43 GHz의 대역에서 약 26~27 dB의 이득을 가졌다. 이는 모의 실험을 통하여 구한 이득인 29 dB보다 약 2 dB 적은 값이며 45%의 효율을 가진다. 안테나의 3 dB 빔폭은 E-면에서 약 4.5~5.0°이며 H-면에서는 약 5.5~6.0°의 측정 결과를 가진다.

V. 결 론

밀리미터파 대역 배열 안테나는 작은 공간에 보다 높은 이득과 효율을 가지며 낮은 부엽 레벨을 가져야 한다. 이를 위하여 본 논문은 슬롯 도파관 배열 안테나를 설계하였으며 Dumbbell 패치를 이용하여 작은 공간에 높은 이득을 가질 수 있게 하였으며 초크를 이용하여 도파관과 슬롯 판 사이의 전기적인

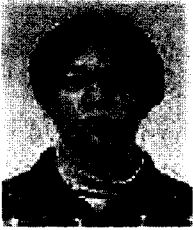
접촉을 만들어 안테나의 손실을 줄일 수 있도록 하였다. 인접하는 도파관 사이에 초크를 넣는 방법은 공간상의 비효율을 발생시키지만 Dumbbell 패치를 이용하여 이 문제를 해결할 수 있었다. 제작 결과 16 × 16 배열 안테나의 경우 27.2 dB의 이득과 45%의 효율을 보였다. 모의 실험 결과보다 약 2 dB 정도 낮은 값이며 이는 기판에서의 도체와 유전체에 의한 손실로 파악된다.

본 논문의 구조는 급전 구조가 단층으로 비교적 간단하고 슬롯 판을 인쇄 기술을 이용하여 제작하므로 대량 생산이 용이하다는 장점을 가지므로 BMWS, B-WLL 등의 상업용 통신 시스템에서의 가입자용 안테나로 이용할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] J. Huang, "A Ka-band circularly polarized high-gain microstrip array antenna", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 43, pp. 113-116, Jan. 1995.
- [2] M. Weiss, "Microstrip antennas for millimeter waves", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 29, pp. 171-174, Jan. 1981.
- [3] K. Sakakibara, Y. Kimura, A. Akiyama, J. Hirokawa, M. Ando and N. Goto, "Alternating phase-fed waveguide slot arrays with a single-layer multiple-way power divider", *IEE Proc.-Microw. Antennas and Propagation*, vol. 144, pp. 425-430, Dec. 1997.
- [4] Constantine A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, Wiley, 1997.
- [5] W. L. Stutzman, G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, Wiley, 1981.
- [6] HFSS, *Release 7*, Ansoft Corp., PA, USA, 1999.
- [7] Y. Kimura, T. Hirano, J. Hirokawa and M. Ando, "Alternating-phase fed single-layer slotted waveguide arrays with chokes dispensing with narrow wall contacts", *IEE Proc.-Microw. Antennas and Propagation*, vol. 148, pp. 295-301, Oct. 2001.

이 정 수



2001년 8월: 고려대학교 전기전자
전파공학부 (공학사)
2001년 9월~2003년 8월: 고려대학
교 전파공학과 (공학석사)
2003년 8월~현재: 한국과학기술원
인공위성연구센터 연구원
[주 관심분야] 안테나 및 수동소자

설계 및 해석

김 영 식



1978년 3월~1982년 1월: 홍익공업
대학 전자과 조교수
1988년 5월: University of Massach-
ssetts at Amherst (공학박사)
1988년 5월~1989년 2월: University
of Massachsrtts at Amherst Post
Doc.

1989년 3월~1993년 2월: ETRI 이동통신연구단 무선기술
연구실 실장

1993년 3월~현재: 고려대학교 전파통신공학과 교수
[주 관심분야] RF front-end system

성 영 제



2000년 2월: 고려대학교 전기전자
전파공학부 (공학사)
2000년 3월~2002년 2월: 고려대학
교 전파공학과 (공학석사)
2002년 3월~현재: 고려대학교 박
사과정

[주 관심분야] 넓은 저지대역을 갖
는 DGS 구조, DGS 구조를 이용한 RF소자의 성능 개
선, Reconfigurable patch antenna, 밀리미터파 대역 배열
안테나