

Ka-Band용 Half-Height Waveguide 전력 합성기 설계

Design of a Ka-Band Half-Height Waveguide Power Combiner

박필준 · 최재훈

Pil-Jun Park · Jae-Hoon Choi

요 약

본 논문에서는 half-height W/G(Waveguide)를 이용하여 Ka-band 대역의 위성통신용 전력합성기를 설계하였다. 낮은 삽입 손실과 포트간 아이솔레이션 특성이 좋은 방향성 결합기를 위성 통신용 전력합성기로서 채택하였다. half-height W/G를 이용하여 설계된 전력합성기는 full-height W/G를 사용하여 설계된 전력합성기에 비하여 작은 부피와 무게를 가지기 때문에 크기와 무게면에서 많은 이점을 얻을 수 있다. 본 논문에서는 FDTD(Finite-Difference Time-Domain)를 이용하여 half-height W/G 전력 합성기를 분석하고 설계 하였으며 full-height W/G로 구성된 전력 증폭기와 성능을 비교하였다. 또한 최적의 차수로 설계된 half-height 전력합성기를 제작하여 측정하였다. 설계된 half-height 전력합성기는 Ka-band 위성 통신용 대역(20.255~21.255 GHz)에서 삽입손실 0.3 dB 이하, 반사손실 20 dB 이상, 포트간 분리도 20 dB 이상, 출력 포트간 위상차가 5° 이내의 특성을 만족하도록 설계되었다.

Abstract

A half-height waveguide power combiner is designed and analyzed for Ka-band satellite application. The branch line directional coupler is utilized as a power combiner to achieve high port-to-port isolation and low insertion loss. The half height waveguide is adopted to reduce the volume and mass of a power combiner. In this paper a half height waveguide power combiner is designed and analyzed by FDTD and its performance is compared with that of a full-height waveguide power combiner. The designed half-height combiner having optimum order is manufactured and tested. The measurement shows that the designed half-height power combiner satisfies all the performance requirements (insertion loss less than 0.3 dB, reflection loss more than 20dB, port to port isolation more than 20 dB, and port to port phase difference within 5°) in the satellite communication frequency band of 20.255 GHz to 21.255 GHz.

I. 서 론

합성기는 채널 합성기와 전력합성기로 구분될 수 있다. T-junction과 Y-junction 형태의 전력합성기는 각각의 입력단에 채널 필터를 부착함으로써 간단하게 채널 합성기로 사용될 수 있지만 이러한 T-junction과 Y-junction 형태의 합성기들은 낮은 포트간

아이솔레이션 특성을 갖기 때문에 동일 주파수의 전력합성기로는 적합하지 않다. 또한 동축케이블 형태의 전력합성기가 응용될 수 있지만 이러한 동축케이블 형태의 전력합성기는 비교적 큰 삽입손실을 갖기 때문에 위성 통신에서 요구되는 성능을 만족시킬 수 없다^{[1],[2]}. 따라서 일반적으로 balanced-amplifier 시스템에서 사용되는 도파관 형태의 방향

한양대학교 전파공학과(Department of Radio Science and Engineering, Hanyang University)

· 논문 번호 : 20000605-066

· 수정완료일자 : 2000년 7월 6일

성 결합기는 높은 포트간 아이솔레이션 및 매우 작은 삽입 손실을 갖기 때문에 위성통신에서 요구하는 고성능 전력합성기로서 적합하다. 또한 높은 전력에 견디고 전송 손실을 줄이기 위하여 도파관 형태의 전력합성기가 적합하다. 이러한 도파관 형태의 전력 합성기는 Ka 대역의 시험 위성에 장착된 두 개의 고 전력 증폭기들의 출력을 합해 주도록 설계되었다. 위성 통신용 주파수 대역인 20.255~21.255 GHz 대역에서 실제 사용 가능한 전력합성기는 20 dB 이상의 반사손실, 20 dB 이상의 포트간 아이솔레이션, 0.3 dB 이하의 삽입 손실을 갖도록 요구된다. 또한 위성 탑재용이라는 특수한 제약속에서 전력합성기의 부피 및 무게는 매우 중요한 요인으로 작용된다. 본 논문에서는 도파관 형태의 전력합성기가 갖는 비교적 큰 부피와 무게를 개선하기 위하여 half-height W/G를 사용하여 이러한 문제를 극복하고자 하였다. 또한 위성통신용으로서 사용 가능한 성능을 만족하면서 최대한 부피와 무게를 줄이기 위하여 높은 차수의 방향성 결합기로부터 낮은 차수의 방향성 결합기로 점차적으로 차수를 줄여 설계를 진행하였다. half-height W/G로 설계된 전력합성기는 위성 통신에 필요한 성능을 만족하고 있으며 기존의 full-Hight W/G로 설계된 전력합성기보다 부피와 무게면에서 개선을 가져왔다. 전력합성기의 설계 및 해석에는 FDTD(Finite-Difference Time-Domain)가 사용되었으며 시제품 제작을 통해 측정치와 이론치를 비교 분석하였다.

II. Branch Line 방향성 결합기 설계 및 해석 이론

2-1 Branch Line 방향성 결합기 설계

Branch Line 방향성 결합기는 입력이 인가되면 두 개의 출력단과 한 개의 분리된 포트(isolation port)를 갖는 4단자 마이크로파 소자이다. 두 개의 출력은 서로 위상차가 90°를 나타내며 출력의 크기는 설계된 커플링 정도에 좌우된다.

Branch Line 방향성 결합기는 다음과 같은 절차에 의해 설계된다^[3].

- i) 설계 중심 주파수와 대역폭을 결정
- ii) Branch Line 방향성 결합기의 출력 오차 결정
- iii) 결합기의 성능을 좌우하는 차수 결정
- iv) Prototype Parameter 계산 [K_i, H_i]
- v) Prototype을 설계 주파수에 맞게 변환

도파관 형태의 방향성 결합기는 그림 1에 그림으로 표시된 바와 같이 많은 T-junction으로 구성되어 있으며 각각의 T-junction은 중심주파수에 대하여 임피던스 정합을 이루고 있다. 설계하고자 하는 중심 주파수는 20.755 GHz이며 대역폭은 1 GHz (20.255~21.255 GHz)이다. 방향성 결합기의 출력 오차는 0.2dB이며 방향성 결합기의 차수는 4(5 Branches)로 선택하였다. 또한 방향성 결합기의 차수는 시스템의 규격을 만족하는 성능을 나타내기 위한 최소 차수로 하기 위해 점차적으로 낮추어 설계 및 해석하였다.

T-junction의 위치 및 크기 형태는 K_{i-1}, K_i, H_i 등으로 표현되는 ϕ' 와 ϕ'' 로 결정되며 ϕ', ϕ'' 는 각각 수식 1과 같이 표현된다^[4].

$$\phi' = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2H_i K_{i-1}}{H_i^2 + K_i^2 - K_{i-1}^2} \right) \quad (1.a)$$

$$\phi'' = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2H_i K_i}{H_i^2 + K_{i-1}^2 - K_i^2} \right) \quad (1.b)$$

식 (1.a) 와 (1.b)에서 K_i 는 수직 방향의 갭 크기를 나타내며 H_i 는 수평 방향의 갭 크기를 나타낸다. 그림 1에서 포트 1과 포트2의 위상은 90° 차이가 나며 동일한 크기를 갖는 신호가 입사되면 포트 3에는 출력이 나타나지 않게 되며 포트 4에서는 두 개의 입력이 더해져 출력되게 된다. 즉 포트 1에 1$\angle 0^\circ$의 입력이 여기되고 포트 2에 1$\angle 90^\circ$의 입

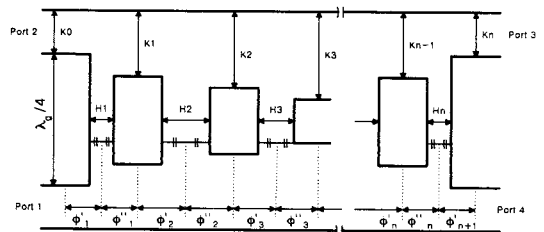


그림 1. Branch Line 방향성 결합기 구조
Fig. 1. Branch Line Directional Coupler.

력이 여기되면 출력포트 3에서는 출력이 나타나지 않으며 포트 4에서는 $\sqrt{2}$ 의 크기를 갖는 전압 출력이 나타나게 된다.

2-2 T-junction의 FDTD 모델링

본 논문에서는 전력합성기의 설계와 해석에 FDTD를 사용하였다. 방향성 결합기는 많은 T-junction으로 구성되어 있어 정확한 성능 분석을 위해서는 T-junction을 매우 정확하게 모델링해야 한다. 그러나 T-junction의 수직 방향 갭의 크기가 매우 작기 때문에 정확히 해석되기가 어렵다. 따라서 균일한 셀 크기를 갖는 미분형의 FDTD 모델링으로는 정확한 해를 구하기가 어렵다^[5]. 또한 다중 셀크기를 갖는 FDTD 모델링 또한 3차원 인터플레이션 오차가 생기기 때문에 정확한 해를 구하기가 어렵다^[6]. 이러한 문제를 해결하기 위해 많은 연구가 진행되었으며^{[6],[7],[8]} 본 논문에서는 적분형 Maxwell 방정식을 이용한 FDTD 해석법을 사용하였다^[9]. Maxwell 적분 방정식은 식 (2)와 (3)처럼 나타난다.

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int \int_s \left(\epsilon \frac{d\vec{E}}{dt} + \sigma \vec{E} \right) \cdot d\vec{S} \quad (2)$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \int \int_s \mu \frac{d\vec{H}}{dt} \cdot d\vec{S} \quad (3)$$

그림 2의 case 1의 경우는 FDTD 셀의 한면이 offset1 만큼 도체로 되어 있는 경우에 속하며 이런 경우의 적분형 FDTD의 수식은 식 (2)의 이산화를 통해 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \overline{H}_x^{n+1}{}_{i,j,k} &= \overline{H}_x^n{}_{i,j,k} + \frac{\Delta t}{\epsilon_0(\Delta y - \text{offset1})} * \\ &\Delta z * (\overline{E}_z^{n+1/2}{}_{i,j-1/2,k} - \overline{E}_z^{n+1/2}{}_{i,j+1/2,k}) * (\Delta y - \text{offset1}) \\ &+ \frac{\Delta t}{\epsilon_0(\Delta y - \text{offset1}) * \Delta z} * (\overline{E}_y^{n+1/2}{}_{i,j,k-1/2} \\ &- \overline{E}_y^{n+1/2}{}_{i,j,k+1/2}) * \Delta z \end{aligned} \quad (4)$$

또한 그림 2의 case 2의 경우는 FDTD 셀의 두 면의 일부가 offset2와 offset3 만큼 도체로 되어 있는 경우에 속한다. case 2의 경우 또한 식 (2)의 이산화를 통해 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\overline{H}_x^{n+1}{}_{i,j,k} = \overline{H}_x^n{}_{i,j,k} + \frac{\Delta t}{\epsilon_0(\Delta y - \text{offset2}) * \Delta z}$$

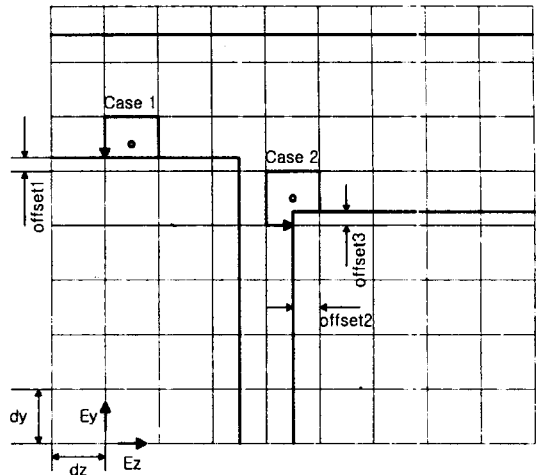


그림 2. T-junction에서의 FDTD 셀 구조
Fig. 2. FDTD Cell Grid for T-junction.

$$\begin{aligned} &* (\overline{E}_z^{n+1/2}{}_{i,j-1/2,k} - \overline{E}_z^{n+1/2}{}_{i,j+1/2,k}) * (\Delta y - \text{offset2}) \\ &+ \frac{\Delta t}{\epsilon_0(\Delta y - \text{offset3}) * \Delta z} * (\overline{E}_y^{n+1/2}{}_{i,j,k-1/2} \\ &- \overline{E}_y^{n+1/2}{}_{i,j,k+1/2}) * (\Delta z - \text{offset3}) \end{aligned} \quad (5)$$

E_z 에 대한 이산화된 수식도 H_x 의 경우와 유사하게 유도할 수 있다.

III. 전력합성기의 설계 및 성능 분석

방향성 결합기의 차수가 4인 full-height W/G 전력합성기와 half-height W/G 전력합성기를 FDTD를 이용하여 설계하고 해석하였으며 두 개의 방향성 결합기의 특성을 비교 검토하였다. 또한 시스템에서 요구되는 성능을 만족하는 최소 차수가 2인 half-height W/G 전력합성기를 설계하고 해석하여 측정치와 비교하였다. 표 1, 2, 3은 설계된 전력합성기의 설계 차수를 나타내고 있다.

방향성 결합기의 차수가 4인 경우 전력합성기의 형태가 그림 3에 그림으로 표시되어 있다. 5개의 수직 갭을 가지며 입력 포트-1, 입력포트-2에는 크기가 같고 위상이 90° 차이나는 입력이 인가되며 출력 포트-1과 출력 포트-2중 하나의 출력단에만 출력이 나타나게 된다. 그림 3의 K_i 와 H_i 의 수치는 표 1, 2, 3에 나타나 있으며 방향성 결합기의 차수가 4

표 1 설계 주파수 대역으로 변환된 K 값 [단위 : mm]

Table 1. K-values to be transformed at the design frequency [unit : mm].

Waveguide Type	Order	K_1	K_0	K_2	K_3	K_4	K_5
Full-Height W/G	4	4.3	4.64	5.77	5.77	4.64	4.3
Half-Height W/G	4	2.15	2.32	2.885	2.885	2.32	2.15
Half-Height W/G	2	2.15	2.9	2.9	2.15		

표 2 설계 주파수 대역으로 변환된 H 값 [단위 : mm]

Table 2. H-Values to be transformed at the design frequency [unit : mm].

Waveguide Type	Order	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5
Full-Height W/G	4	0.37	2.0	3.855	2.0	0.37
Half-Height W/G	4	0.185	1.0	1.92	1.0	0.185
Half-Height W/G	2	1.0	2.5	1.0		

표 3. 설계 주파수 대역으로 변환된 ϕ 값

Table 3. ϕ -Values to be transformed at the design frequency [unit : mm].

Waveguide Type	Order	ϕ_1	ϕ_1''	ϕ_2	ϕ_2''	ϕ_3	ϕ_3''	ϕ_4	ϕ_4''	ϕ_5	ϕ_5''
Full-Height W/G	4	1.46	1.61	1.61	2.32	2.32	2.32	2.32	1.61	1.61	1.46
Half-Height W/G	4	1.46	1.61	1.61	2.32	2.32	2.32	2.32	1.61	1.61	1.46
Half-Height W/G	2	1.46	2.12	2.12	2.12	2.12	1.46				

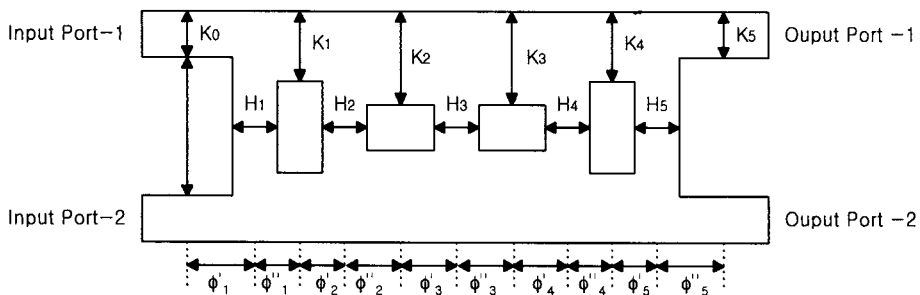


그림 3. 차수가 4인 방향성 결합기의 구성도

Fig. 3. Directional Coupler of order 4.

인 fullheight W/G로 구성된 전력합성기의 성능은 그림 4에 나타나 있다. 설계 대역폭인 20.255~21.255 GHz에서 반사손실은 25 dB 이상을 나타내고 있으며 입력 포트간 아이솔레이션은 25 dB 이상의 값을 나타내고 있다. 방향성 결합기의 출력포트간

위상차는 그림 5에 그림으로 표시되어 있으며 매우 넓은 대역에 걸쳐 거의 출력 위상의 차이가 없는 것을 알 수 있다. 따라서 방향성 결합기의 위상 특성이 매우 좋기 때문에 설계시 출력간의 위상 차이보다는 출력의 크기에 비중을 두고 설계해야 된다.

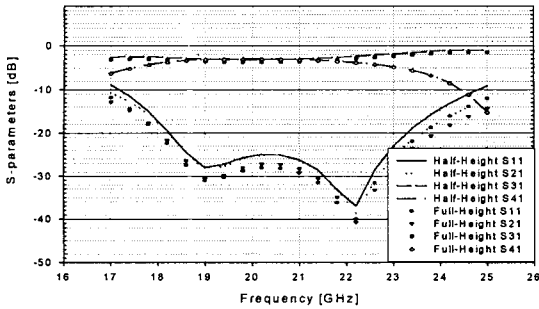


그림 4. FDTD 수치 해석에 의한 차수가 4인 half-height W/G 전력합성기와 full-height W/G 전력합성기의 산란계수 특성

Fig. 4. S-parameter characteristics of full-height waveguide power combiner of order 4 and half-height waveguide power combiner of order 4 by FDTD.

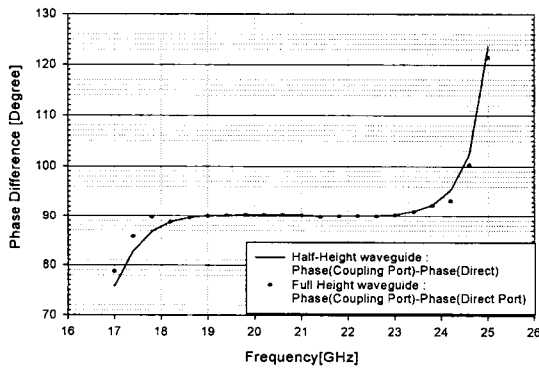


그림 5. FDTD 수치 해석에 의한 full-height W/G 전력합성기와 half-height W/G 전력합성기의 출력포트간의 위상차

Fig. 5. Phase difference of the two output ports of directional couplers with full-height waveguide and half-height waveguide by FDTD.

Half-height W/G로 구성된 전력합성기의 설계 수치는 표 1, 2, 3에 나타나 있으며 전체적인 크기가 약 30% 가량 줄어든 것을 알 수 있다. 또한 half-height W/G 전력합성기의 산란계수 특성은 그림 4에 그림으로 표시되어 있다. 그림 4에서 나타난 것과 같이 half-height W/G 전력합성기의 성능은 full-height W/G 전력합성기의 특성에 비교하여도 거의 성능의 차이가 없다. 또한 출력 포트의 위상차는 그림

5에 그림으로 표시되어 있으며 설계 대역폭내에서 90°를 만족하는걸 알 수 있다. 그림 6은 두 개의 입력단에 위상차가 90°인 입력이 인가되었을 때 전력합성기로의 출력이 3 dB가 나타나고 있음으로 표시하고 있다.

설계 요구 성능을 만족하는 최소 부피를 갖는 전력합성기를 설계하기 위해 차수가 2인 half-height W/G 전력합성기를 설계하였으며 설계 치수는 표 1, 2, 3에 나타난 바와 같다. 그림 7은 차수가 2인 방향성 결합기의 구조를 나타내고 있으며 그림 8은 제작된 합성기 사진을 나타내고 있다. 입력 포트 1과 2에 크기가 같고 위상이 90° 차이가 나는 입력이 인가되면 출력 포트 1과 2중 한 출력 포트에서만 출력이 나타나게 된다.

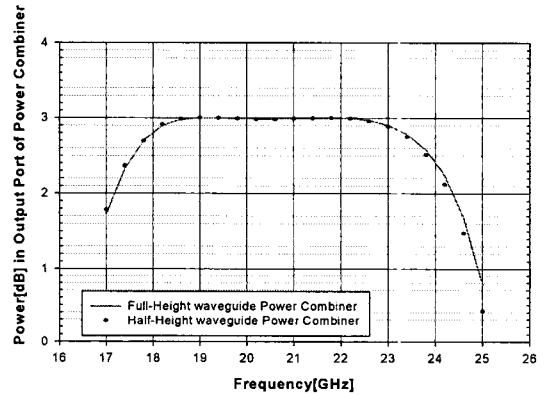


그림 6. FDTD 시뮬레이션에 의한 차수가 4인 full-height W/G 전력합성기와 half-height W/G 전력합성기의 출력 전력

Fig. 6. Output powers of 4 full-height and half-height waveguide power combiners by FDTD.

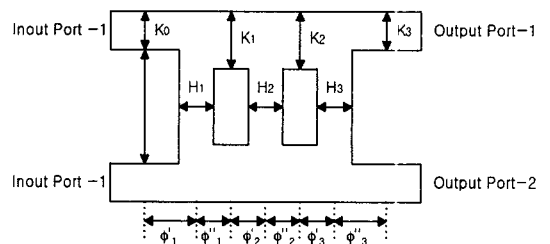


그림 7. 차수가 2인 방향성 결합기 구조

Fig. 7. Ka-Band Directional Coupler of order 2.

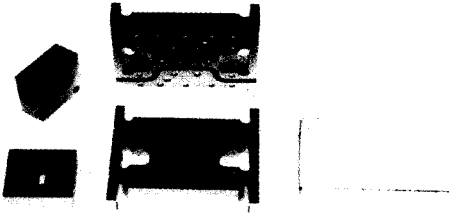


그림 8. 제작된 방향성 결합기 사진
Fig. 8. A Ka-band Directional Coupler.

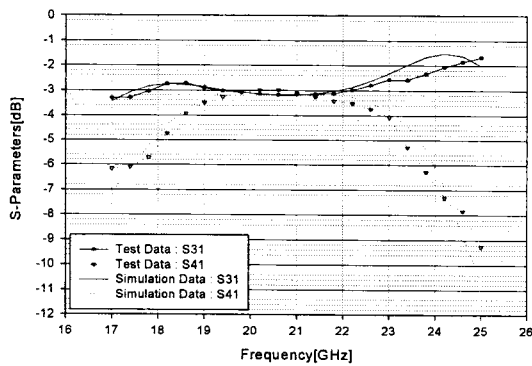


그림 9. Half-height W/G 전력 합성기의 S_{31} 과 S_{41} 의 해석치와 측정치 비교
Fig. 9. The measured and simulated S_{31} and S_{41} values of half-height waveguide power combiner of order 2.

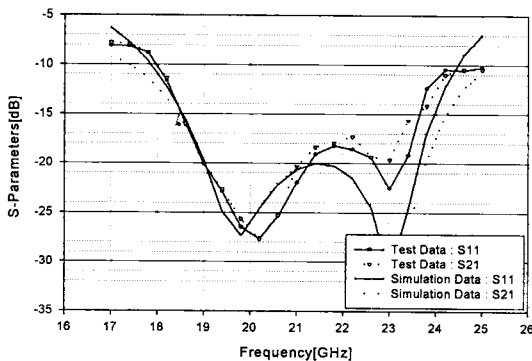


그림 10. 차수가 2인 half-height W/G 전력합성기의 S_{11} 과 S_{21} 의 해석치과 측정값 비교
Fig. 10. The measured and simulated S_{11} and S_{21} values of half-height waveguide power combiner of order 2.

차수가 낮아졌기 때문에 차수가 4인 전력합성기에 비해 전체적으로 성능이 저하되었지만 설계 대역폭에서 설계 요구 성능을 만족하고 있다. 그림 9와 10은 설계된 전력 합성기의 성능을 나타내고 있다. 방향성 결합기의 반사 손실은 20 dB 이상을 만족하고 있으며 포트간 아이솔레이션 또한 20 dB 이상을 나타내고 있다. 또한 출력 포트간 커플링 오차는 약 0.2 dB 이하를 만족하고 있다. 설계된 전력합성기의 FDTD를 이용한 시뮬레이션 결과와 측정치가 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 Ka-대역 위성 통신용 half-height W/G 전력합성기를 설계하고 제작하였다. 최소의 부피와 무게를 갖으면서 시스템에서 요구되는 성능을 만족시키는 전력증폭기의 설계를 위해 차수가 4에서부터 점차적으로 작은 차수를 갖도록 차수가 2인 방향성 결합기를 설계하고 해석하였다. half-height W/G를 사용하여 설계되고 해석된 전력합성기는 full-height W/G 전력합성기에 비해 약 57% 가량 부피가 줄어 들었다. 또한 측정결과는 설계된 전력합성기는 Ka-Band 위성용으로 적합하였으며 삽입손실 0.1 dB 이하를 만족하며 반사 손실은 20 dB 이상을 만족하였다. 포트간 아이솔레이션은 20 dB 이상을 나타내고 있으며 출력 오차는 약 0.2 dB를 만족하였다. 본 논문에서 연구된 half-height W/G 구조체는 도파관 형태의 필터와 같은 마이크로파 소자들의 부피 및 무게를 줄이는데 사용할 수 있을 것이다.

참고 문헌

- [1] David M. Pozar, *Microwave engineering*, Addison-Wesley, New York, 1993.
- [2] Peter A. Rizzi, *Microwave engineering passive circuits*, Prentice-Hall, London, 1988.
- [3] George L. Matthaei, Leo Young, E. M. T. Jones, *Microwave filters, impedance-matching, networks, and coupling structures*, Artech House, Washington, 1980.

- [4] LEO Young, "Synchronous branch guide directional couplers for low and high power applications," *IRE Transaction on Microwave Theory and Thechiques*, PGMTT-10, pp. 459-475, November, 1962.
- [5] A. Taflove and M. E. Brodwin, "Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time-dependent Maxwell's equations," *IEEE Trans. Microwave Theory Thech.*, vol. MTT-23, pp. 623-630, August, 1975.
- [6] I. S. Kim and W. J. R. Hoefer, "A local mesh refinement algorithm for the time-domain finite-difference method using Maxwell's curl equations," *IEEE Trans. Microwave Theory Thech.*, vol. 38, pp. 812-815, June, 1990.
- [7] S. S. Zivanovic, K. S. Yee, and K. K. Mei, "A subgridding method for the time-domain finite-difference method to solve Maxwell's equations," *IEEE Trans Microwave Theory Thech.*, vol. 39, pp. 471-479, Mar., 1991.
- [8] K. S. Kunz and L. Simpson, "A technique for increasing the resolution of finite-difference solutions to the Maxwell equation." *IEEE Trans. Elecromagn. Compat.*, vol. EMC-23, pp. 419-422, Nov., 1981.
- [9] Paolo Mezzanotte, Luca Roselli, and Roberto Sorrentino, "A simple way to model curved metal boundaries in FDTD algorithm avoiding staircase approximation," *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 5, no. 8, pp. 267-269 August, 1995.

박 필 준



1997년: 한양대학교 전파공학과(공학사)
 1999년: 한양대학교 전파공학과(공학석사)
 1999년~현재: 한양대학교 전자통신전파공학과(박사과정)
 [주 관심분야] 마이크로파 능·수

동 소자 설계 및 수치해석

최 재 훈



1980년: 한양대학교 전자공학과(공학사)
 1986년: 미국 Ohio State University 전기공학과(공학석사)
 1989년: 미국 Ohio State University 전기공학과(공학박사)
 1989년~1991년: 미국 Arizona State

University 연구교수

1991년~1995년: 한국통신 위성사업본부 연구팀장
 1995년~현재: 한양대학교 전자전기공학부 부교수
 [주 관심분야] 안테나 설계 및 분석, 마이크로파 능·수동 소자 설계, 전자파전파 모델링