

# 슬롯라인-마이크로스트립 변환을 이용한 고효율 V-band 전력 결합 모듈

## High Efficiency V-band Power Combining Modules Using Slotline-to-Microstrip Transition

김 동 기 · 정 진 호\* · 권 영 우

Dong-Ki Kim · Jin-Ho Jeong\* · Young-Woo Kwon

### 요 약

본 연구를 통하여 슬롯라인-마이크로스트립 변환을 이용한 고효율 전력 결합 모듈을 개발하였다. 제작된 전력 결합 모듈은 본 논문에서 제안하는 두 가지 형태의 전력 결합기를 이용하여 슬롯라인 중앙에서 도파관을 통해 입사된 전력을 분배하고 전력 증폭기를 거친 후 다시 전력이 결합되도록 하였다. 제작한 결과 58.5 GHz 와 60 GHz에서 각각 22.96 dBm, 22.81 dBm의 포화 출력 전력과 80 % 이상의(최대 86 %) 고효율 전력 결합도를 얻을 수 있었다. 각각의 전력 결합기를 back-to-back으로 연결하여 손실을 측정할 경우 두 가지 형태 모두 60 GHz 근방에서 1.2 dB 내의 우수한 삽입손실을 보였으며 반사 손실은 15 dB 이상의 특성을 보였다.

### Abstract

Two high-efficiency and high power power-combining modules were developed using slotline-to-microstrip transition at V-band. Power-combining modules incorporating two MMIC power amplifiers demonstrated combining efficiencies higher than 80 %(maximum 86 %) with saturated output power of 22.96 dBm and 22.81 dBm, respectively. The measurement of back-to-back connected combiners demonstrated insertion loss less than 1.2 dB with return loss better than 15 dB around 60 GHz, respectively.

Key words : Power-Combining Module, Slotline-To-Microstrip Transition, High Power-Combining Efficiency

### I. 서 론

밀리미터파 및 마이크로파 대역에서의 전력 결합 기술은 크게 평면(planar) 결합 방법과 공간(spatial) 결합 방법 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 평면 결합 방법으로는 주로 2개의 전력 소자를 결합할 수 있는 2-way 전력 결합기의 형태로 Wilkinson coupler, branch-line coupler, Lange coupler, rat-race coupler 등을 들 수 있다<sup>[1]</sup>. 더 많은 전력 소자를 결합하기 위하여 N-way 형태의 전력 결합기를 제작할 경우 위에 열거한

결합기들은 평면상에서 제작할 수 없기 때문에 주로 corporate 형식의 결합이 이루어지고 있으나 결합하고자 하는 전력 소자의 개수가 늘어날수록 이를 분배 및 결합하기 위한 전송선의 길이가 늘어나 손실 및 복잡도가 증가하고 크기 또한 커져서 밀리미터파 대역 이상의 주파수에서 고출력, 고효율의 전력 증폭 모듈을 제작함에 있어 많은 어려움이 있다<sup>[2]-[4]</sup>.

공간 결합 방식의 전력 결합기는 평면 결합 방식에 비해 결합하는 전력 소자의 개수가 증가하여도 손실이 이에 비례하여 증가하지 않는 장점이 있으며

서울대학교 전기컴퓨터공학부(School of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University)

\*Department of Electrical & Computer Engineering, University of California San Diego

· 논문 번호 : 20050218-019

· 수정완료일자 : 2005년 6월 3일

grid 증폭기와 같이 자유 공간에서 전력을 결합하는 방식과 도파관 내에서 결합하는 두 가지 방식이 제안되어 왔다. 자유 공간 내에서 전력을 결합하는 방식은 spill-over 손실이 존재하고 방열 특성이 좋지 않아 결합 효율이 떨어지는 단점이 있는 반면 도파관 내에서의 전력 결합은 도파관 금속 자체가 좋은 방열판 역할을 할 수 있어 결합 효율이 높다는 장점이 있다. 최근에 도파관 내에서의 전력 결합 방식을 이용한 논문들이 많이 발표되고 있는 이유가 이와 같으며 10 GHz 근방의 X-band, 25 GHz 근방의 Ka-band에서 높은 출력 및 효율을 가지는 결과들이 많이 발표되었다<sup>[5]~[8]</sup>.

본 연구에서는 도파관 내에서 전력 결합이 이루어지는 공간 결합 방식을 사용하여 V-band에서 동작하는 고효율 전력 결합기를 제작하였다<sup>[9],[10]</sup>. 제안된 전력 결합기는 마이크로스트립 라인을 전송선으로 채택한 MMIC 전력 증폭기와 결합시키기 위하여 기존에 잘 알려진 슬롯라인-마이크로스트립 변환 구조를 사용하여 설계되었다. V-band에서 제작된 슬롯라인-마이크로스트립 변환 구조를 이용한 전력 결합기에 대한 결과는 국내외적으로 매우 드물며 Ka-band에서 제작된 전력 결합기의 경우<sup>[7]</sup> 전력 증폭기와 결합시키지 않아 전력 결합 효율은 알 수 없으나 2-way 결합기는 25.7~29.8 GHz에서 삽입 손실 1.0 dB 이하, 반사 손실 15 dB 이상, 4-way 결합기는 26~28.2 GHz에서 삽입 손실 1.0 dB 이하, 반사 손실 15 dB 이상의 특성을 보였다. Ku-band에서 실험한 경우<sup>[11]</sup> 삽입 손실 0.65 dB 이하, 반사 손실 17.5 dB 이상, 전력 결합도 89 %를 보였다. 본 연구에서 제안한 구조들은 Ansoft사의 HFSS를 사용하여 설계되었고 손실이 적은 수정 기판을 사용하여 제작되었으며 60 GHz 근방에서 1.2 dB 이하의 삽입 손실과 15 dB 이상의 반사 손실을 보였다. 전력 결합 효율은 60 GHz에서 최대 86 %의 우수한 특성을 보였으며 전력 결합 모듈은 58.5 GHz와 60 GHz에서 22.96 dBm, 22.81 dBm의 포화출력전력을 나타내었다.

## II. 본 론

### 2-1 제안된 전력 결합기의 구조

본 논문에서 제안하는 전력 결합기는 두 가지 형

태이며 공통적으로 도파관-슬롯라인 변환 구조와 슬롯라인-마이크로스트립 변환 구조를 이용하여 설계된다. 그림 1에 제안된 전력 결합기의 구조를 나타내었다.

첫 번째 제안한 구조는 단자 2와 3에서 동위상 및 등전력 분배 특성을 얻을 것으로 예상하였고, 두 번째 구조로 단자간의 간격 및 전기적 길이를 다르게 하여도 첫 번째 구조와 같은 결과를 얻을 수 있음을

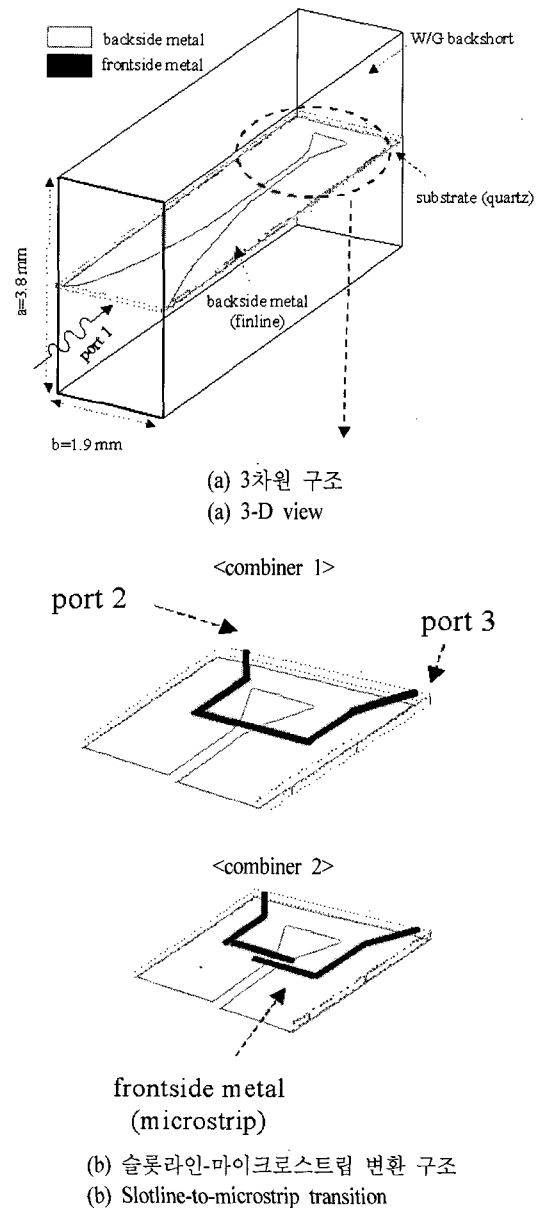


그림 1. 제안된 두 가지 전력 결합기 구조  
Fig. 1. Two proposed power combiners.

검증하였다. 두 번째 구조의 경우, 전기적 길이가 예상과 달라질 경우 동위상, 등전력 분배 특성을 얻을 수 없어 전력 결합 효율이 좋지 않을 수 있으므로 다수의 시뮬레이션을 통하여 검증 후 설계하였다.

그림 1(a)와 같이 도파관의 E-plane 중앙에 수정 기관이 삽입되어 있으며 회색으로 표시된 부분이 도파관-슬롯라인 변환 구조이다. 도파관인 단자 1로 TE<sub>10</sub> 모드의 입사파가 진행하면 기관 아래쪽에 금속 패턴화 된 점점 좁아지는 unilateral finline 형태의 도파관-슬롯라인 변환 구조를 통하여 입사파는 슬롯의 중앙에 집중되게 된다. 이와 동시에 도파관의 높은 임피던스에서 슬롯라인의 낮은 임피던스로의 임피던스 변환이 일어나게 되는데, 임피던스 불연속점에 의한 손실이 생기지 않도록 최대한 부드러운 구조로 설계하는 것이 중요하다. 그러나 임피던스가 너무 천천히 변환되는 구조로 설계할 경우 대신에 금속 패턴에 의한 손실이 발생할 수 있기 때문에 이를 적당히 조절하여야 한다. 설계된 구조는 최대한 광대역 특성을 나타내기 위하여 슬롯라인 끝부분을 radial 스텐드 형태로 설계하였으나 시뮬레이션 결과 역삼각형 형태의 스텐드가 더욱 광대역 특성을 보여 이를 채택하였다. 슬롯라인의 중앙에 집중된 입사파는 그림 1(b)와 같이 magnetic coupling에 의해 다시 슬롯라인-마이크로스트립 변환 구조를 통해 단자 2와 3으로 분배되어 빠져나가게 된다. 이 때 슬롯라인의 임피던스와 마이크로스트립 라인의 임피던스는 같을 필요는 없으며 적절한 임피던스 비를 갖도록 설계하였다. 시뮬레이션 결과를 통하여 슬롯라인의 임피던스를 80 옴 마이크로스트립 라인의 임피던스를 50 옴으로 결정하였고 magnetic 커플링이 충분히 일어나도록 마이크로스트립 라인의 위치를 결정하였다.

결합기 형태 2의 경우(그림 1(b)의 아래쪽) 각 단자의 마이크로스트립 라인이 슬롯라인과 결합되는 위치가 달라서 생기는 위상차가 생기게 되는데 이는 전력 결합 시 전력이 동위상으로 합쳐지지 않게 하여 결합 효율을 저하시키게 되므로 위상차가 나지 않도록 보상을 해주어야 한다. 이를 단자 3의 길이를 단자 2의 길이보다 더 길게 해줌으로써 해결하였다. 시뮬레이션 결과 두 구조가 서로 일치하는 특성을 보이며 동위상 특성을 나타냈으며 그림 2에 단자

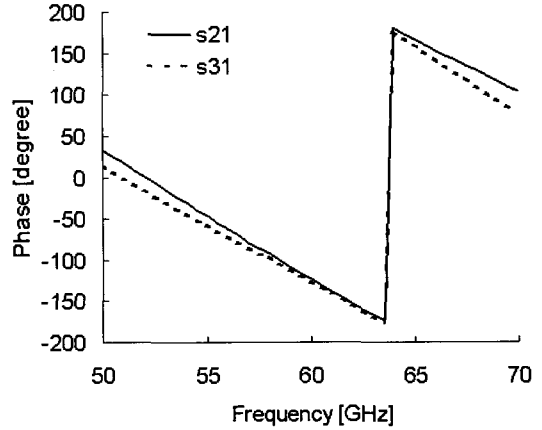


그림 2. 두 번째 형태의 전력 결합기의 각 단자의 위상 특성

Fig. 2. Phase characteristics of the second power combiner.

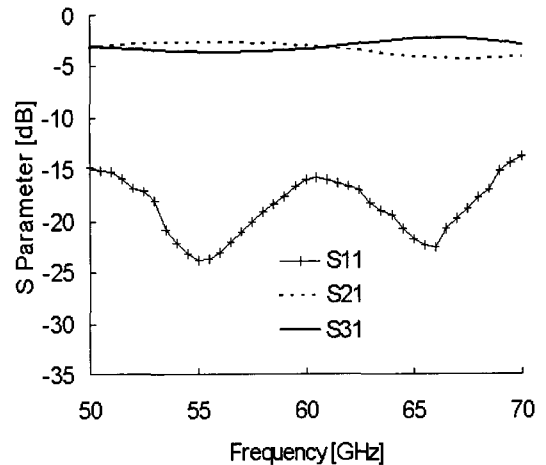


그림 3. 첫 번째 전력 결합기의 시뮬레이션된 S-parameter 특성

Fig. 3. Simulated S-parameter characteristics of the first power combiner.

의 길이가 다른 두 번째 전력 결합기의 단자 2와 3을 통해 빠져나가는 신호의 위상 특성을 보였다.

기술한 대로 설계한 두 가지의 전력 결합기를 Ansoft사의 HFSS를 이용하여 등전력 분배 특성을 시뮬레이션하였다. 두 가지 구조 모두 위상 특성과 마찬가지로 거의 일치하는 결과를 보여 첫 번째 형태의 전력 결합기에 대해 시뮬레이션 한 S-parameter 결과를 그림 3에 나타냈다. 60 GHz의 중심주파수에서 좌우로 각각 10 GHz에 이르는 대역에서 15 dB 이

상의 반사 손실과 각 단자에서 3 dB씩 전력이 분배되는 등전력 분배 특성을 보여주고 있다.

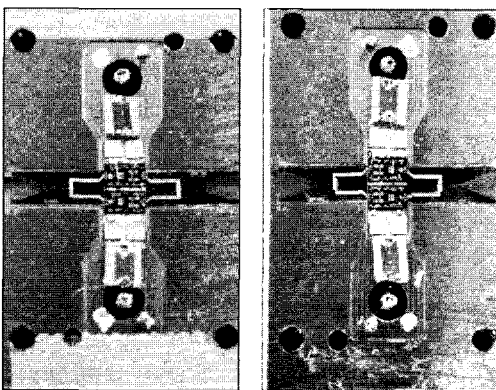
2-2 제작 및 측정 결과

위와 같이 설계된 두 종류의 전력 결합기는 두께 127  $\mu\text{m}$ , 유전율 3.8의 수정기판 위에 제작되었다. 그림 4에 제작된 두 개의 전력 결합기를 이용하여 전력 증폭기를 도파관 내에서 결합한 전력 결합 모듈 1과 2의 사진을 나타내었다.

각 모듈의 입출력 단자는 V-band 표준 도파관 규격인 WR-15와 일치하도록 제작하였다. 전력 증폭기는 60 GHz를 중심 주파수로 하여 GaAs pHEMT 소자를 여러 바이어스에서 S-parameter를 측정하여 소신호 및 대신호 모델을 구축하였고, HP ADS를 이용하여 3단으로 설계하였으며 52~65 GHz에서 18 dB 이상의 소신호 이득을 보였다.

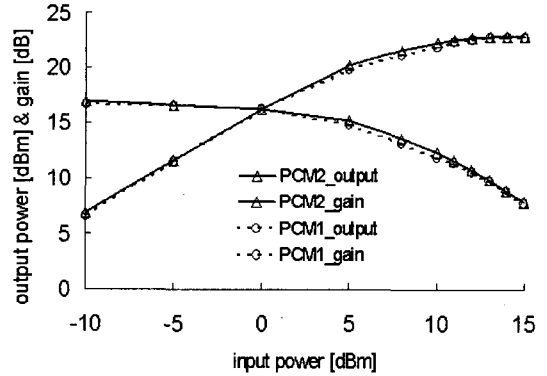
전력 증폭기, 전력 결합기 및 바이어스 라인 등은 와이어 본딩으로 연결하였고, 전력 증폭기 구동을 위한 바이어스는 게이트 -0.3 V, 드레인 4 V이다. 두 모듈의 중심 주파수를 바꾸어가며 출력 전력과 이득을 측정하였고 그림 5에 58.5 GHz와 60 GHz에서 결과를 보였다.

그림 6은 각 전력 결합기의 전력 결합 대역폭에 대한 결과이다. 두 전력 결합기 모두 55.5~61.5 GHz에서 77 % 이상의 전력 결합 효율을 보였다. 그 중

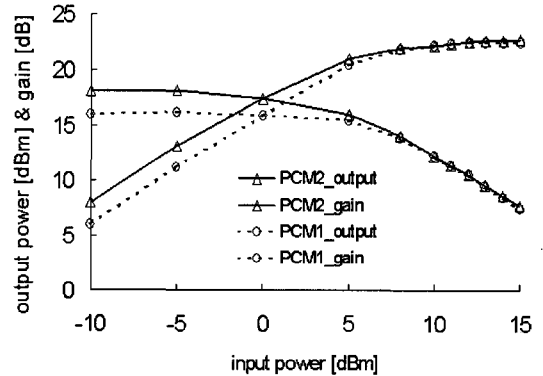


(a) 전력 결합 모듈 1 (a) Power-combining module 1  
(b) 전력 결합 모듈 2 (b) Power-combining module 2

그림 4. 제작된 전력 결합 모듈의 사진  
Fig. 4. The photograph of fabricated power-combining modules.



(a) 구동 주파수: 58.5 GHz  
(a) Operation frequency: 58.5 GHz



(b) 구동 주파수: 60 GHz  
(b) Operation frequency: 60 GHz

그림 5. 측정된 전력 결합기 모듈의 출력 전력과 이득  
Fig. 5. Measured output power and gain of power-combining modules.

에서 우수한 전력 결합 효율을 보였던 58.5와 60 GHz에서 측정 결과 각 모듈의 포화 출력 전력은 58.5 GHz에서 22.96 dBm, 22.75 dBm이며 60 GHz에서는 22.81 dBm, 22.53 dBm이다. 각 주파수에서 측정된 전력 증폭기 한 개의 포화 전력은 각각 20.73 dBm, 20.46 dBm이며 계산 결과 결합 효율은 최대 84 %, 86 %로서 매우 우수한 특성을 나타내었다. 표 1에 이를 정리하였다.

그림 7은 두 전력 결합기를 back-to-back으로 연결하여 측정한 삽입 손실과 반사 손실의 결과이다. 두 결합기 모두 58~60.5 GHz의 주파수에서 1.2 dB 이하의 삽입 손실과 15 dB 이상의 반사 손실을 보였다.

두 번째 결합기의 경우, 63 GHz 근방에서 반사 손실이 크게 나빠지는 경향을 보이는데 이는 마이크로

표 1. 각 주파수에서의 전력 결합 효율 계산 결과  
Table 1. Calculated power-combining efficiencies of each frequencies.

주파수	결합기 1의 출력 전력	결합기 2의 출력 전력	전력 증폭기 1개의 출력 전력	결합 효율 [%] (결합기1/결합기2)
58.5 GHz	22.96 dBm	22.75 dBm	20.73 dBm	84 / 80
60 GHz	22.81 dBm	22.53 dBm	20.46 dBm	86 / 81

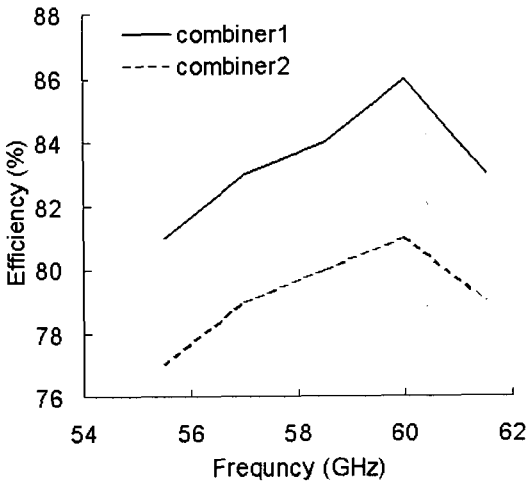


그림 6. 전력 결합도 75 % 이상의 대역폭 측정 결과  
Fig. 6. Measured results of power combining efficiency over 75 %.

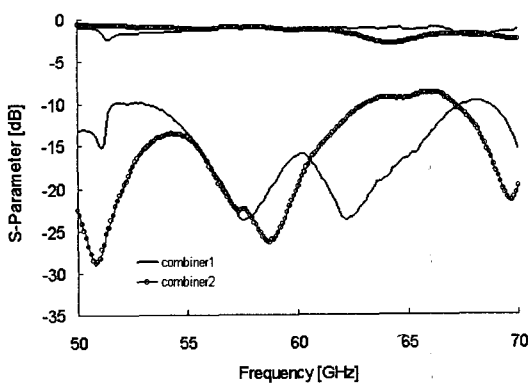


그림 7. Back-to-back으로 연결된 두 전력 결합기의 S-parameter 측정 결과  
Fig. 7. Measured S-parameters of back-to-back connected power combiners.

스트립 라인과 슬롯라인으로 구성되는 원치 않는 공진 회로가 구성되기 때문이라 생각된다. 대역 내 삽

입 손실은 도파관-슬롯라인, 슬롯라인-마이크로스트립 변환에서의 손실과 단자간의 mismatching 그리고 back-to-back 연결을 위한 와이어 본딩에서 그 이유를 찾을 수 있다. 측정은 Agilent사의 네트워크 분석기 8510XF 및 WR-15 도파관 형태의 프루브를 이용하였다.

### III. 결 론

본 논문에서는 60 GHz 근방의 V-band에서 고효율 전력 결합을 위한 두 가지 형태의 전력 결합기를 제안하였다. 슬롯라인-마이크로스트립 변환을 이용한 전력 결합기는 60 GHz에서 최대 86 %의 우수한 전력 결합도를 나타내었고, 전력 결합 모듈은 58.5 GHz, 60 GHz에서 22.96 dBm, 22.81 dBm의 출력 전력을 나타내었다. 본 연구에서는 좋은 방열 특성을 보이는 도파관과 두께 127  $\mu$ m, 유전율 3.8의 수정 기판을 사용한 2-way 전력 결합기를 사용하여 공간 결합 방식의 전력 결합 모듈을 제작하였으며 전력 결합기는 back-to-back으로 연결하여 측정한 결과, 두 가지 형태의 결합기 모두 58~60.5 GHz의 주파수에서 1.2 dB 이하의 삽입 손실과 15 dB 이상의 반사 손실을 보였다. 본 논문에서 제안한 형태의 전력 결합기는 기존에 잘 알려진 슬롯라인-마이크로스트립 변환 구조를 사용하여 설계가 쉬우며 제작 단가가 싸고 금속 가공의 정밀도가 특성을 크게 변화시키지 않아 재현성이 뛰어나다는 장점이 있다.

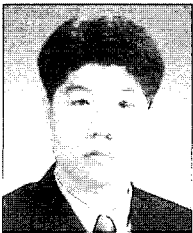
수 watt 급의 고출력 전력 증폭 모듈을 제작할 때에는 특히 많은 열이 발생하여 전력 결합도를 저하시킬 것으로 예상되는 바, 본 연구에서 제안한 형태의 전력 결합기는 차후 N-way 형태의 전력 결합기로의 확장을 위한 중요한 초석이 될 수 있을 것으로 예상된다.

### 참 고 문 헌

[1] John L. B. Walker, *High-Power GaAs FET Amplifiers*, Norwood: Artech House, 1993.  
 [2] R. A. York, Z. B. Popovic, *Active and Quasi-Optical Arrays for Solid-State Power Combining*, New York: Wiley, 1997.  
 [3] Y. Hwang, P. D. Chow, J. Lester, J. Chi, and D.

- Garske, "Fully-matched, high-efficiency Q-band 1 watt MMIC solid state power amplifier", *IEEE Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 167-170, 1996.
- [4] M. K. Siddiqui et al., "A high power and high efficiency monolithic power amplifier for local multipoint distribution service", *IEEE Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 569-572, 1998.
- [5] N. S. Cheng, P. Jia, D. B. Rensch, and R. A. York, "A 120-W X-band spartially combined solid-state amplifier", *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, vol. 47, pp. 2557-2561, 1999.
- [6] S. Ortiz, J. Hubert, L. Mirth, E. Schleich, and A. Mortazawi, "A 25 watt and 50 watt Ka-band quai-optical amplifier", *IEEE Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 797-800, 2000.
- [7] 정진호, 천창울, 권영우 "슬롯라인-마이크로스트립 변환을 이용한 도파관 형태의 ka-band 전력 분배/결합기", *한국통신학회논문지*, 27(5), pp. 506-511, 2002년.
- [8] J. Jeong, Y. Kwon, S. Lee, C. Cheon, and E. A. Sovero, "1.6- and 3.3-W power amplifier modules at 24 GHz using waveguide-based power combining structures", *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, vol. 48, no. 12, pp. 2700-2708, 2000.
- [9] James J. Sowers, et al., "A 36 W, V-band solid source", *IEEE Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 235-238, 1999.
- [10] J. Jeong, D. Kim, S. Kim, and Y. Kwon, "V-band high-efficiency broadband power combiner and power-combining module using double antipodal finline transitions", *IEE Electronic Letters*, vol. 39, no. 4, pp. 378-379, Feb. 2003.
- [11] M. Belaid, K. Wu, "Quasi-optical power amplifier using TEM waveguide concept", *IEEE MTT-S*, pp. 1835-1838, 2001.

김 동 기



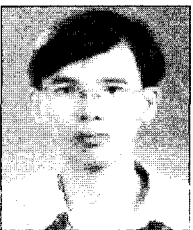
2001년 2월: 성균관대학교 전자공학과 (공학사)  
 2003년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학석사)  
 2003년 3월~현재: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사과정  
 [주 관심분야] RF 수동소자 설계, MMIC 설계, RF MEMS.

권 영 우



1988년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)  
 1990년 2월: 미국 University of Michigan 전기공학과 (공학석사)  
 1994년 2월: 미국 University of Michigan 전기공학과 (공학박사)  
 1994년~1996년: Rockwell International Science Center, MTS  
 1996년~현재: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 부교수  
 1999년~현재: 3차원 밀리미터파 창의 연구단 단장  
 [주 관심분야] MMIC 설계, 밀리미터파 회로 및 시스템, 능동소자 모델링, RF MEMS, Microwave cancer detecting

정 진 호



1997년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공학사)  
 1999년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공학석사)  
 2004년 9월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)  
 2004년 9월~현재: Department of Electrical & Computer Engineering, University of California San Diego, post doctor

[주 관심분야] 능동소자 모델링, 준광학적 전력 결합기, MMIC/OEIC 설계