

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2023.23.6.41>
JIIBC 2023-6-7

W밴드 radial 전력 결합기용 TE10-TEM 모드 변환기 설계

Design of TE10 to TEM mode convertor for W-band radial power combiner

김영곤*, 옹명훈**, 류한춘*, 권세훈*, 우선결*

Young-Gon Kim*, Myung-Hun Yong**, Han-Chun Ryu*,
Se-Hoon Kwon*, Seon-Keol Woo*

요약 본 논문에서는 W밴드 radial 전력 결합기용 TE10-TEM 모드 변환기에 대한 설계 방법을 제안하였다. 제안한 구조는 일반적으로 이용 가능한 핀을 이용하여 TEM 모드를 구현하도록 하였으며 2단의 임피던스 변환부 및 back-short 구조를 이용하여 TE10 모드에서 TEM 모드로 자연스럽게 변환되도록 설계 하였다. 제안한 모드 변환기의 핀 구조가 하우징에 접합되어 진동 및 충격의 환경이 성능에 영향 없도록 하였다. 제안한 구조의 back-to-back 특성은 92.5~97.7 GHz 대역에서 삽입손실 1.55 dB 이하 및 10 dB 이상의 반사손실을 가짐을 확인하였다. 제안한 모드 변환기를 이용하여 높은 출력 및 안정적인 환경조건을 요구하는 초소형 레이더 및 다양한 응용 분야에 적용이 가능하리라 판단된다.

Abstract Design of W-band TE10 to TEM mode converter for radial power combiner is proposed in this paper. The proposed structure is used with generally available pin to realize TEM mode and is designed to convert TE10 to TEM mode gradually using 2-step impedance transformer and back short. The pin of proposed mode converter is well bonded to the housing so that environment conditions such as vibration or shock are not affected. The proposed mode converter, in a back-to-back configuration, has less than 1.55 dB insertion loss and more than 10 dB return loss from 92.5 GHz to 97.7 GHz. Proposed converter is expected compact radar and various applications requiring for high power and stable environment conditions.

Key Words : Back-to-back, mode converter, TE10, TEM, radial power combiner, W-band

1. 서 론

마이크로파 및 밀리미터파를 이용한 무선 통신, 레이 다 및 여러 응용 분야에서 높은 출력의 송신 신호에 대한

요구는 끊임없이 이어져 오고 있다. 과거에는 TWTA (Travelling Waveguide Tube Amplifier) 혹은 클라이 스트론(klystron) 등의 진공관 전력증폭기를 이용하여 여러 응용 분야에서 고출력증폭기로 사용해 왔다^[1]. 하지

*정회원, LIG넥스원(주)

**정회원, 유텔(주)

접수일자 2023년 9월 2일, 수정완료 2023년 11월 2일
게재확정일자 2023년 12월 8일

Received: 2 September, 2023 / Revised: 2 November, 2023 /

Accepted: 8 December, 2023

*Corresponding Author: yg_kim@lignex1.com

Dept. of RF Seeker R&D Lab, LIG Nex1 Co., Ltd. Korea

만 진공관 전력증폭기는 긴 예열시간과 수 kV의 고전압 전원공급기를 필요로 하고 낮은 전력결합 효율과 RF 증폭 송신여부에 관계없이 발생하는 높은 대기전력으로 인한 발열을 낮춰주기 위해 추가적인 냉각장치 등이 필요하다^[1]. 최근에는 노후화된 진공관 전력증폭기를 대체하고, 낮은 상시 소모 전력과 낮은 잡음 특성을 갖는 GaN 기반의 화합물 반도체 소자를 이용한 광대역 SSPA (Solid State Power Amplifier)로 대체 개발되고 있는 추세이다.

SSPA의 고출력 신호를 생성하기 위해 단일 MMIC 출력 신호를 올릴 수 있지만 단일 칩이 낼 수 있는 출력에는 한계를 가지고 있다. 이를 극복하기 위해 여러 칩을 묶는 전력 합성 기술에 대한 요구가 많으며 그동안 많은 연구가 이루어져왔다. 전력을 합성하는 방법에는 크게 바이너리로 결합하는 방식과 공간 결합 방식으로 나눌 수 있다^[2]. 바이너리로 결합하는 방식은 결합이 비교적 단순하지만 결합하는 개수가 증가 할수록 효율이 떨어지는 단점이 있다. 이에 비해 공간결합 방식은 결합기 자체의 손실 외에 결합하는 개수에 의한 손실은 미약하여 다수를 결합할 때 효율이 높아지는 장점을 가지고 있다^[2].

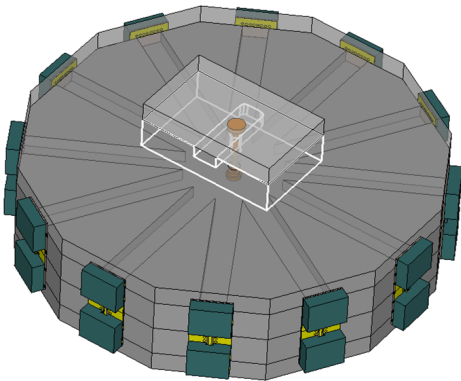


그림 1. 제안한 모드 변환기를 이용한 12-way radial 전력 결합기 구조

Fig. 1. 12-way radial power combiner using proposed mode converter

공간결합 방식을 이용한 전력합성 기술 중 radial 전력결합기는 도파관 구조의 TE₁₀ 모드를 통한 여러 신호를 TEM 신호로 결합한 방식으로 여러 문헌 및 응용분야에서 많이 활용되고 있다^[3-9]. Radial 전력 결합 방식은 모드가 변환되는 구조에 의해 손실이 결정된다. TE₁₀ 모드의 여러 신호를 TEM 모드에서 결합되는 과정에서 E-probe 형태를 많이 사용하고 있다^[3-9]. 이러한 구조는

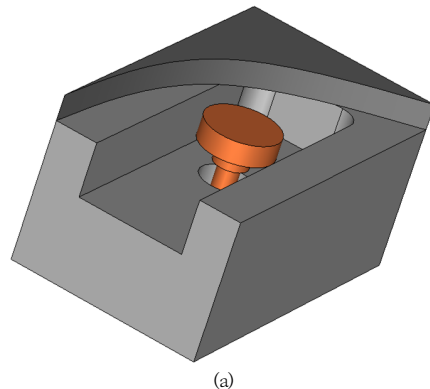
유전체를 이용하여 생기는 손실이 발생 할 수 있다. E-probe의 길이에서 발생할 수 있는 오차로 인해 W밴드와 같이 높은 주파수에서는 적용이 힘들며 진동 및 충격의 환경에서 E-probe의 흔들림이 발생할 수 있다.

그림1은 본 논문에서 제안한 모드 변환기를 이용하여 설계된 12-way radial 전력 결합기를 이용한 SSPA의 형상이다. 이러한 구조의 SSPA의 성능은 결합기의 손실이 출력 전력을 결정하므로 결합기의 손실이 매우 중요하다. 본 논문에서는 W밴드 radial 전력 결합기의 손실을 최소화 할 수 있는 모드 변환기를 제안하였다. 가공의 범용성 및 편의성을 위해 CNC 가공을 이용하였으며 W밴드와 같이 파장이 짧아 오차에 민감한 대역에서도 적용이 가능하도록 구현하였다. 제안한 구조의 특성상 진동 및 충격 조건에서도 큰 영향이 없는 구조로 다양한 무기 체제 등에도 적용이 가능하도록 하였다.

II. W밴드 모드변환기 설계 및 제작

1. 제안한 모드 변환기의 구조 및 전계 분포

W밴드의 TE₁₀ 모드에서 TEM 모드로 변환되는 모드 변환기의 구조를 그림 2와 같이 제안하고 back-to-back 구조로 구현하였다. 그림 2(a)는 제안하는 모드 변환기의 3차원 구조를 나타냈으며 (b)는 내부구조를 보여주고 있다. 본 논문에서는 W밴드 도파관 WR₁₀ 정규 사이즈를 이용하여 설계 및 제작하였으며 TEM 모드의 구조는 제작의 편의성을 위해 제작이 가능하며 쉽게 이용 가능한 지름이 0.51 mm인 핀을 이용하여 설계 및 구현하였다. 도파관 TE₁₀ 모드에서 동축 구조의 TEM 모드로 변환하기 위해 2단 임피던스 변환기와 1/4λ의 back-short 구조를 이용하였다.



(a)

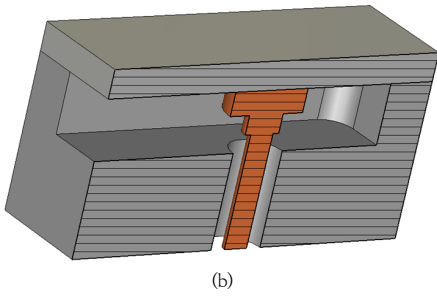


그림 2. 제안한 모드 변환기의 구조 (a) 3차원 구조와 (b) 내부 구조를 나타내는 단면
 Fig. 2. Illustrations of proposed mode converter. (a) 3-D view and (b) side view showing inside structure

그림 3에서는 모드 변환기의 모드가 변화되는 과정에서의 전계 분포를 보여주고 있다. 도파관 TE₁₀ 모드에서 back-short 구조 및 2단 계단 구조를 이용하여 TEM 모드의 전계로 자연스럽게 전이되는 모습을 나타내고 있다.

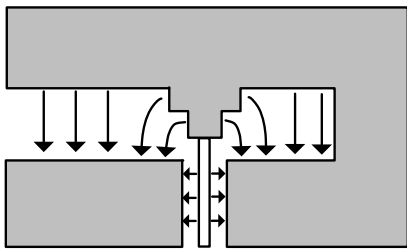


그림 3. 전이구조 각 단계에서의 전계 분포 변화
 Fig. 3. Electric field lines at each cross-section along the transition

2. 모드 변환기의 설계

제안한 W밴드 모드 변환기의 측정을 고려하여 그림 4와 같이 TE₁₀ 모드 - TEM 모드 - TE₁₀ 모드의 back-to-back 구조로 설계 하였다. 그림 4에 각 구조의 역할 및 기능에 대해 나타내었다. 도파관의 TE₁₀ 모드에서 2단의 임피던스 변환부 및 back-short 구조를 이용하여 TEM 모드로 변환하게 되며 TEM 모드 동축부를 통해 신호는 전달된다. 그리고 back-short 구조 및 2단의 임피던스 변환부를 거쳐 도파관의 TE₁₀ 모드로 변화되는 모습을 보여주고 있다.

W밴드의 TE₁₀ 모드를 위한 도파관의 크기는 그림 5와 같이 WR₁₀의 정규 사이즈를 이용하였다. TE₁₀ 모드에서 TEM 모드로 변환하기 위해 2단의 임피던스 변환부는 CNC로 가공이 가능한 범위에서 최적의 크기를 도출하였으며 그 크기는 그림 5와 표 1과 같다. TEM 모드의 50

옴으로 임피던스 정합을 위해 2단의 임피던스 변환 되도록 하였다. W밴드의 파장이 매우 짧아 가공이 가능한 범위에서 임피던스 변환부의 구조를 확정하였다. Back-short 구조를 위해 1/4λ의 길이로 설계하였으며, 밀링 툴의 한계로 인해 back-short의 끝 부분은 지름이 0.5 mm의 라운드가 생기는 것을 고려하였다. TEM 모드의 구현은 0.51 mm 크기의 핀을 이용하였으며, 50옴 정합을 위해 d2의 크기를 가지는 외경으로 설계 하였다. 설계된 모드 변환기를 CST Studio Suite를 이용하여 EM 시뮬레이션을 통해 검증하였으며, 최종 최적화 된 설계 파라미터 값은 표 1과 같다.

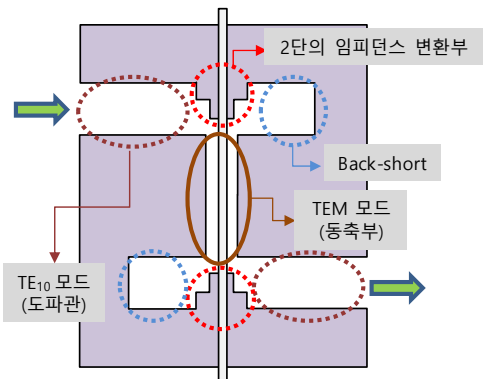


그림 4. 제안하는 모드 변환기의 back-to-back 모습 및 각 구조의 기능 설명
 Fig. 4. Side view of proposed mode converter and structural illustration

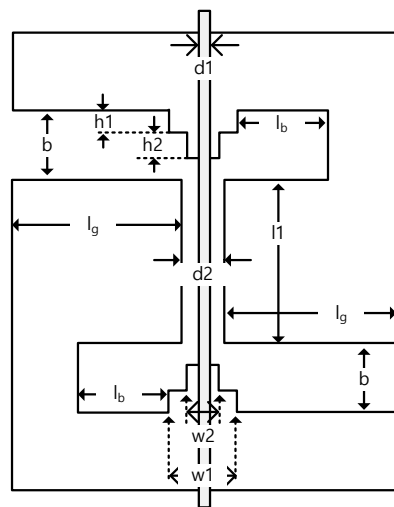


그림 5. 모드 변환기의 설계 변수 값
 Fig. 5. Design Parameter values for mode converter

표 1. 모드 변환기의 크기(단위: mm)

Table 1. Summary of the mode converter dimenstions (unit: mm).

l_g	l_1	l_b	b	h_1	h_2	d_1	d_2	w_1	w_2
5.42	2.26	1.99	1.27	0.50	0.40	0.51	1.17	1.72	0.8

설계된 back-to-back 구조의 모드 변환기의 시뮬레이션 결과는 그림 6과 같다. 10 dB 이상의 반사손실 및 1 dB 이하의 삽입손실의 성능을 80 GHz ~ 110 GHz에서 만족함을 확인 하였고 87 GHz ~ 103 GHz 에서는 15 dB 이상의 반사손실 및 1 dB 이하의 삽입 손실을 가짐을 확인하였다.

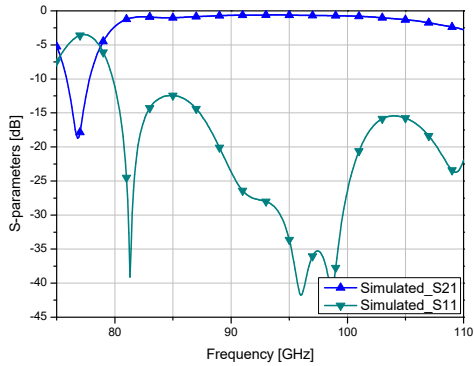


그림 6. 제안하는 모드 변환기의 시뮬레이션 결과

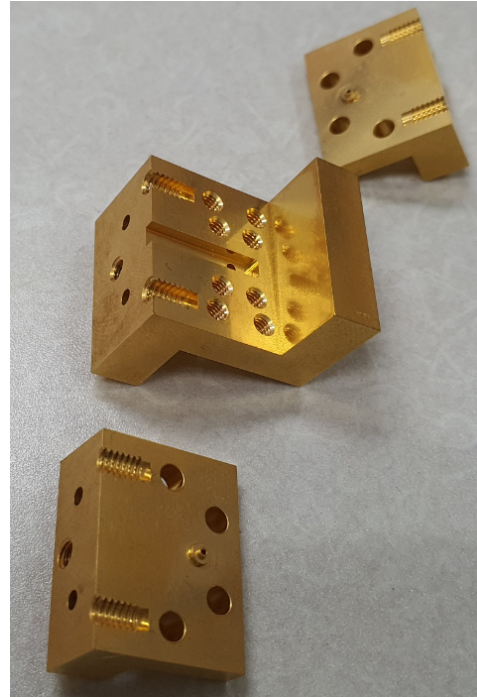
Fig. 6. Simulation result of proposed mode converter

3. 모드 변환기 제작 및 측정

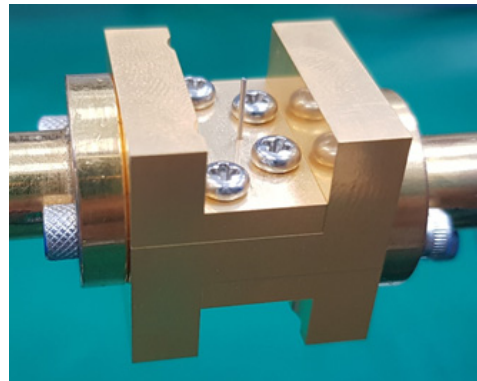
제작된 모드 변환기의 기구물의 형상은 그림 7(a)와 같으며 조립된 형상은 (b)와 같다. 조립의 편이성을 위해 세 블록으로 나누어서 제작하였으며 TEM 모드를 위한 핀 구조는 조립된 이후 삽입하여 에폭시로 양끝을 고정하여 경화하는 방법을 채택하였다.

시뮬레이션 및 측정 결과를 비교하여 그림 8에 나타내었다. Back-to-back 측정 결과, 92.5~97.7 GHz 대역에서 삽입손실 최대 1.55 dB 이하 및 반사손실 10 dB 이상의 우수한 결과를 나타내고 있다. TE₁₀ 모드에서 TEM 모드 단일 변환되는 과정에서의 손실은 최대 0.8 dB 이하의 작은 삽입손실을 가지고 있음을 확인하였다. 시뮬레이션과 측정 결과의 반사손실에서 생기는 오차는 2단 구조의 임피던스 변환부에서 지름 0.51 mm 핀 삽입을 위해 홀을 뚫는 과정에서의 가공 오차와 조립을 위

해 세 부분으로 나누어 가공한 후 조립에 의해 생기는 오차라고 판단된다. 추후에 W밴드 radial 전력결합기를 만드는 과정에서 2단의 임피던스 변환부와 핀의 결합되는 부분에서 생기는 공차를 고려하면 더 나은 삽입손실 및 반사손실을 가지리라 판단된다.



(a)



(b)

그림 7. (a) 제작된 모드변환기의 분해된 모습 및 (b) 측정을 위해 조립된 모습

Fig. 7. (a) Disassemble picture of fabricated mode converter (b) assemble picture of mode converter for measurement

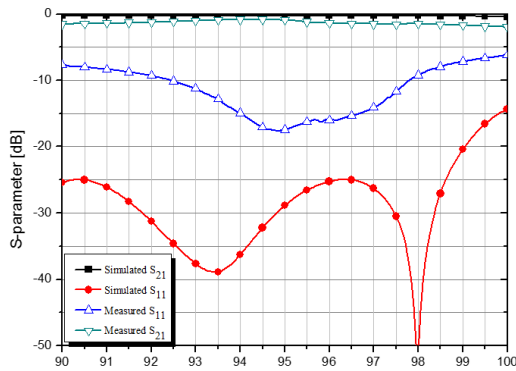


그림 8. W밴드 모드 변환기의 시뮬레이션 및 측정 결과 비교
 Fig. 8. Simulated and measured insertion loss and return loss of W-band mode converter

III. 결 론

W밴드 저손실 특성을 가지는 TE₁₀ 모드에서 TEM 모드로 변환되는 모드 변환기를 제안하였다. 변환 손실은 92.5 ~ 97.7 GHz에서 최대 손실 0.8 dB 이하를 가짐을 확인하였다. 2단의 임피던스 변환부와 TEM 모드의 핀을 이용한 단순한 구조로 저가의 대량 생산에 용이하며 기존의 유전체 및 E-probe를 이용한 구조와는 달리 균수용 무기 체계의 진동 및 충격의 환경적인 조건에서 강건한 구조를 가지고 있다. 본 논문에서 제시한 모드 변환기를 이용한 W밴드 radial 전력 결합기는 저손실 및 고출력을 필요로 하는 초소형 레이더 및 다양한 응용 분야에 활용 되리라 예상된다.

References

- [1] Jaeduk Kim, Sunghun Jung, Seunghak Yoo, Junghyun Jo, Jonghyun Lee, Wangyong Lee, Byungho Moon, "Design and Fabrication of S to C-Band GaN Solid State Power Amplifier for the Electronic Warfare", THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE, Vol. 32, No. 5, pp. 435-445, May 2021.
- [2] Kenneth W. Brown, Darin M. Gritters, and Hooman Kazemi, "W- and G-band solid state power combining", Proc. IEEE Compound Semiconductor Integr. Circuit Symp., pp. 1-4, Oct. 2015.
- [3] Xiao Li, Guanjun Chen, Mingzhou Zhan, and Ruimin Xu, "A new planar compatible power combiner based on radial waveguide," IEEE International Conference on Communication Problem-solving, Beijing, China,

2014, pp. 147-149

- [4] Ting-Ih Hsu and Mario D. Simonutti, "A wideband 60 GHz 16-way power divider/combiner network", IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig., pp. 175-177, 1984.
- [5] J.-P. Fraysse et al., "A 20W Ka-band radial Solid-State Power Amplifier with 20% associated Power-Added Efficiency," European Microwave Conference, Nuremberg, Germany, 2013, pp. 688-691.
- [6] Su Hyun Lee, Dong Heon Lee, Jin Ho Chang, "X-band 1kW SSPA using 20-way Hybrid Radial combiner for accelerator," Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), New Delhi, 2016, pp. 1-4.
- [7] James Schellenberg, Alex Tran, Lani Bui, Andrew Cuevas and Edward Watkins, "37 W 75?100 GHz GaN power amplifier", IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig., pp. 81-84, May 2016.
- [8] Jonggyu Go, Kyungmin Nam, Boki Kim, Kunjun Lee, Jian Park, Sanghoon Kim, Seungsik Yang, "Ka-Band 16-Way Radial Power Combiner Design with Low-Loss and High-Efficiency", THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE, Vol. 33, No. 4, pp. 293-299, April 2022.
- [9] Wan-Sik. Kim, "Development of W-band Transceiver Module using Manufactured MMICA", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 17, No. 2, pp. 223-237, Apr. 2017.
 DOI: <https://doi.org/10.7236/IIBC.2017.17.2.233>

저 자 소 개

김 영 곤(정회원)



- 2006년 2월 : 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 (공학사)
- 2013년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학박사)
- 2013년 2월 ~ 현재 : LIG넥스원(주) 수석연구원
- 주 관심분야 : 초고주파 회로 설계, 마이크로파 송수신기, 마이크로파 탐색기

용 명 훈(정회원)



- 2014년 2월 : 호남대학교 이동통신 공학과 (공학사)
- 2014년 11월 ~ 현재 : 유텔주) 선임 연구원
- 주 관심분야 : 초고주파 회로 설계, RF 송수신기

류 한 춘(정회원)



- 2007년 2월 : 경희대학교 전자공학 (공학사)
- 2007년 2월 ~ 현재 : LIG넥스원(주) 수석연구원
- 주 관심분야 : 마이크로파 탐색기, 마이크로파 송수신기, 디지털 신호처리

권 세 훈(정회원)



- 2012년 2월 : 아주대학교 정보통신컴퓨터공학부 (공학사)
- 2014년 2월 : 아주대학교 컴퓨터공학과 (공학석사)
- 2014년 2월 ~ 현재 : LIG넥스원(주) 선임연구원
- 주 관심분야 : RF, 마이크로파 탐색기, 임베디드, SW 등

우 선 결(정회원)



- 2001년 2월 : 광운대학교 전자공학부 (공학사)
- 2003년 2월 : 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
- 2007년 7월 : 광운대학교 전파공학과 (공학박사)
- 2007년 8월 ~ 현재 : LIG넥스원(주) 수석연구원
- 주 관심분야 : 레이더 신호처리, 마이크로파 탐색기