

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2021.21.5.19>

JIIBC 2021-5-3

Ka 대역 고출력 고효율 도파관 공간 결합기 설계 및 제작

Design and fabrication of Ka-band high power and high efficiency waveguide spatial combiner

김효철*, 조흥래*, 이주흔*, 이덕재*, 안세환**, 이만희**, 주지한**, 김홍락**

Hyo-Chul Kim*, Heung-Rae Cho*, Ju-Heun Lee*, Deok-Jae Lee*,
Se-Hwan An**, Man-Hee Lee**, Ji-Han Joo**, Hong-Rak Kim**

요약 본 논문에서는 고출력 저손실의 도파관 공간결합 구조를 제안하였다. 제안하는 공간결합구조는 각 포트의 중심에서 원형 도파관을 통해 결합하는 방식으로 구현 하였다. 특히 도파관의 모드 중 전송 선로 손실이 가장 적은 TE01모드를 이용하여 저 손실을 구현하고, 새로운 모드 변환 방식을 적용하여 소형화를 이루었다. 또한 전계 분석을 통해 새로운 모드 변환 구조의 절연 파괴 전압을 계산하여 고출력에 적합함을 확인하였다. 최종 8-way 도파관 공간 결합기를 설계, 제작하여 삽입 손실은 0.4dB 이하 결합효율 97% 이상의 결과를 얻어 평면 결합 방식 대비 전기적 성능이 매우 우수함을 확인하였다.

Abstract This report proposes a waveguide spatial combiner with high power low loss. The proposed spatial combiner implements high power by combining from the center of each port through a waveguide. In particular, we implement low loss using TE01 mode, which has the lowest transmission track loss among modes of circular waveguide, and miniaturization is achieved by applying a new mode conversion method. In addition, it was confirmed that it was suitable for high output by calculating the insulation breakdown voltage of the new mode conversion structure through E-field analysis. The final 8-way waveguide spatial combiner was designed and manufactured, and the insertion loss was less than 0.4dB and the combining efficiency was 97% or more, confirming that the electrical performance was very good compared to the planar combining method.

Key Words : Ka band, Spatial combiner, Radial Combiner, Mode transition

1. 서 론

초고주파 대역에서 개별의 MMIC는 충분한 전력을 생성할 수 없다. 그래서 여러 디바이스를 결합하여 요구 출력을 충족하기 위한 전력 결합 기술은 매우 중요하다.

결합기는 PCB 형태의 Hybrid 커플러, Wilkinson 전력 합성기와 고출력에 유리한 도파관 결합기에 이르기까지 많은 설계 기법이 존재하여왔다. 하지만 이러한 평면결합방식은 비교적 구조가 간단하여 설계 및 제작이 용이 하지만 결합수가 많아질수록 손실이 증가하고 결합

*정회원, 피플웍스(주)

**정회원, LIG 넥스원(주)

접수일자 2021년 7월 30일, 수정완료 2021년 9월 3일

게재확정일자 2021년 10월 8일

Received: 30 July, 2021 / Revised: 3 September, 2021 /

Accepted: 8 October, 2021

Corresponding Author: hrcho@peopleworks.co.kr

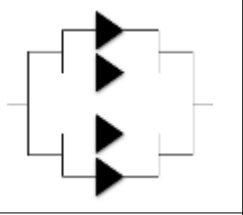
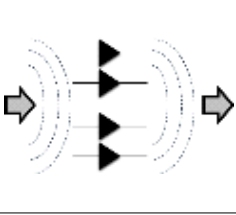
Dept. of Military R&D Team, peopleworks Co., Ltd. Korea

효율이 떨어지는 단점이 있다. 최근에는 이러한 단점의 대안으로 공간결합방식에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

공간결합 방식은 N개의 입력 신호가 단일 결합이 이루어 지면서 손실을 줄이고 결합 효율을 높일 수 있는 반면 상대적인 구조가 복잡하다는 단점이 있다.^[1]

평면결합 방식과 공간결합 방식의 비교는 표 1에 나타내었다.

표 1. 평면결합방식과 공간결합방식의 비교[1]
Table 1. Comparison of the planar combining technique and spatial combining technique

	
평면결합 방식	공간결합 방식
Wilkinson combiner	Radial combiner
구조가 간단	상대적인 구조의 복잡
설계 및 제작이 용이	설계 및 제작 어려움
결합 수에 따른 효율 감소	높은 결합효율 및 결합 수에 따른 효율 감소 없음
낮은 power rating	높은 power rating
결합 수가 적을 때 유리	결합 수가 많을 때 유리

공간 결합 방식은 결합수에 상관없이 일정한 결합효율을 갖는다. 이는 결합수가 많아질수록 공간결합방식이 유리하지만, 적을수록 평면결합 방식이 유리할 수 있다. 두 결합 방식의 효율이 동일할 때의 결합 소자의 수를 임계 상수라 하며 식(1)에 의해 계산할 수 있다.^[2]

$$N_c = 2^{So[dB]/a[dB]} \quad (1)$$

Binary의 각 단의 손실을 0.2dB, 공간결합 구조의 손실이 0.5dB로 가정한다면, 임계 상수는 6이 된다. 이는 6개 미만은 평면결합방식, 6 초과는 공간결합방식이 결합 효율 측면에서 유리하다는 것을 알 수 있다.^[2]

그림 1.은 삽입 손실과 소자의 개수에 따른 효율 특성 비교를 나타내었다.

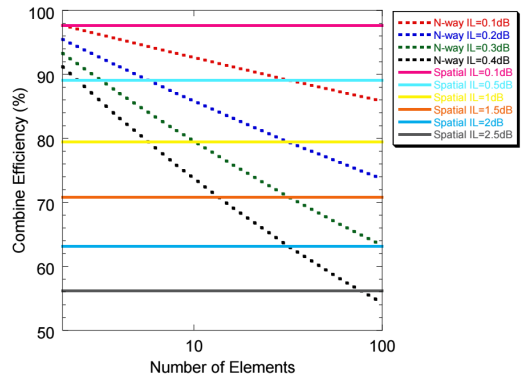


그림 1. 삽입 손실과 소자의 개수에 따른 효율 특성 비교^[2]
Fig. 1. Combining efficiency versus insertion loss with number of amplifier

Ka 대역용 고출력 SSPA를 구현하기 위해 결합 효율 만큼 중요한 항목은 내전력이다. 다수의 증폭기를 결합하여 높은 전력을 얻는 결합기에서 최종 출력을 견딜 수 없다면 SSPA에 심각한 결합을 초래할 수 있기 때문이다. 특히 방산 및 위성 통신용 레이더 시스템에서는 Duty 30 ~ 40%의 출력을 요구하기 때문에 매우 중요하다. [1], [2]에서 제안한 공간 결합방식은 최종 출력이 동축라인으로 구현을 하기 때문에 회로의 특성상 고출력에 적합하지 않다. 순수 도파관 구조의 공간결합기가 필요한 이유이다.

본 논문의 목표는 Ka 대역의 매우 높은 내전력을 만족하는 저손실 고효율의 소형화 도파관 공간 결합기를 구현하는 것으로, H-plane으로 방사된 신호를 중심에서 원형 도파관으로 결합을 하여 이후에 구형 도파관의 기본모드로 변환하는 모드 변환기를 적용하여 설계를 하였다.

II. 본 론

1. 원형 도파관 TE01 mode 8-way 공간 결합기

Ka 대역의 구형 도파관의 규격을 WR22(EIA 규격)로 선정하고 시뮬레이션을 진행하였다. 도파관 모드 중 손실이 가장 적은 전송 모드는 TE01 모드^[3] 입력 도파관을 H-plane으로 위치 하여 원형 도파관에 TE01모드가 형성되도록 하였다.

원형 도파관의 전송 모드 및 결합기 구조는 그림 2에 나타내었다.

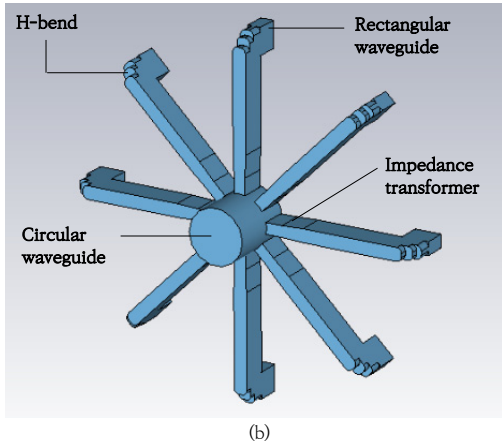
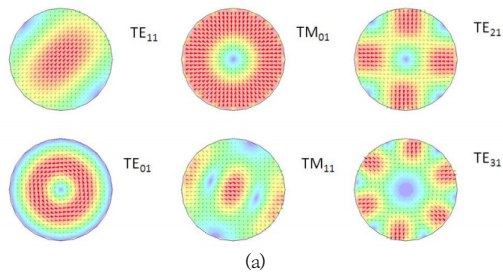


그림 2. (a) 원형도파관 전송 모드. (b) 3D 모델링
 Fig. 2. (a) Circular waveguide Transmission mode. (b) 3D modeling

원형 도파관의 각 모드에서 전송 손실은 그림 3에 표시 하였으며 분배 손실 9dB를 포함한 정상적인 손실이 발생하는 모드는 TE₀₁ 임을 확인하였다.

각 모드별 삽입손실은 그림 3에 나타내었다.

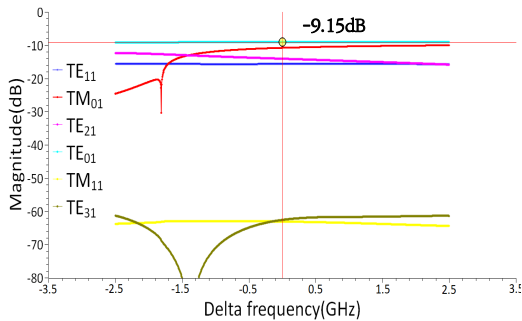


그림 3. 도파관 모드별 삽입손실
 Fig. 3. Insertion loss by waveguide mode

그림 4는 원형도파관 TE₀₁ 모드에서의 시뮬레이션 결과이다.

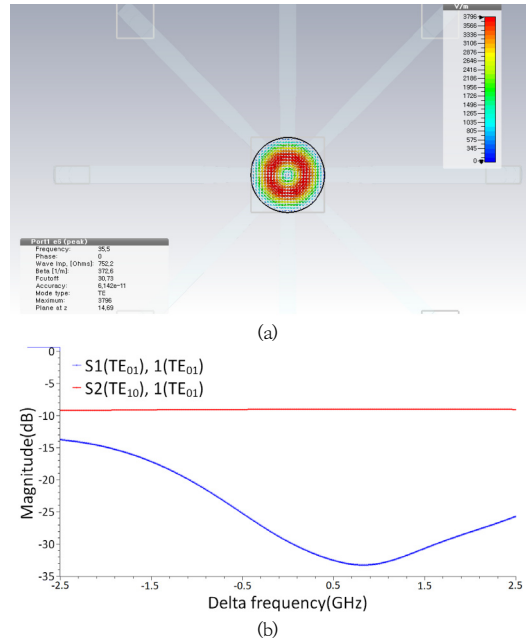


그림 4. (a) TE₀₁ 모드. (b) TE₀₁ 모드 시뮬레이션 결과
 Fig. 4. (a) TE₀₁ mode. (b) Simulation result of TE₀₁ mode

2. TE₁₀ - TE₀₁ 모드 변환기

TE₁₀-TE₀₁ 모드 변환의 대표적인 방법은 Flower-Petal 변환기와 Marie 변환기이다. 광대역 구현이 가능하다는 장점이 있지만 구조가 복잡하고, 20cm 이상의 매우 긴 길이가 필요하다.^{[4]-[5]} 제품의 소형화를 위해 Yu의 모드 변환 방식을 적용하여 구현하였다.^[6]

그림 5는 TE₀₁ 모드 변환기의 3D 모델링을 나타내며 포트 1에 입력된 구형도파관 기본모드(TE₁₀)는 분배기 영역에서 특수한 방향의 동일한 진폭 4개의 신호로 분할되어 90도 등각으로 원형 도파관에 입력이 되고 TE₀₁ 모드로 변환하게 된다.

3. 전력결합기 전계 분석

결합기의 출력 포트에 CW(Continuous Wave)신호를 인가하여 대역 내 Low frequency(f_L), Center Frequency(f_C), High Frequency(f_H)에 대해 전계를 분석하였다.

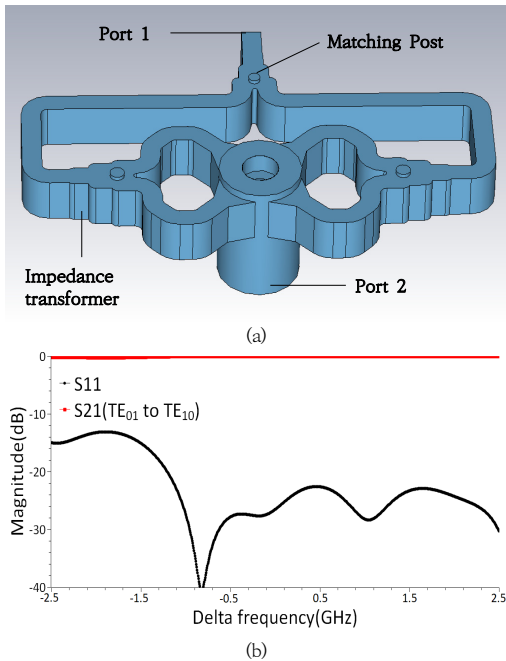


그림 5. (a) 모드변환기 3D 모델링. (b) TE01 모드 시뮬레이션 결과
 Fig. 5. (a) 3D modeling of the TE01 mode transition. (b) Simulation result of the TE01 mode

전계 분석은 이상적 환경에서 각 구조물에 발생한 전계를 통해 방전 임계 전력을 계산하기 위해 필요하다. 각 주파수별 전계 값은 표 2에 나타내었다.

표 2. 전력결합기 전계 분석

Table 2. E-field analysis of power combiner

주파수(GHz)	전 계
fL	24,280 V/m
fC	23,870 V/m
fH	24,830 V/m

전계 분석을 통하여 반사 손실이 낮을수록 강한 전계가 형성됨을 확인하였다. EM-시뮬레이터를 통한 전계 분석 결과는 그림 6에 나타내었다.

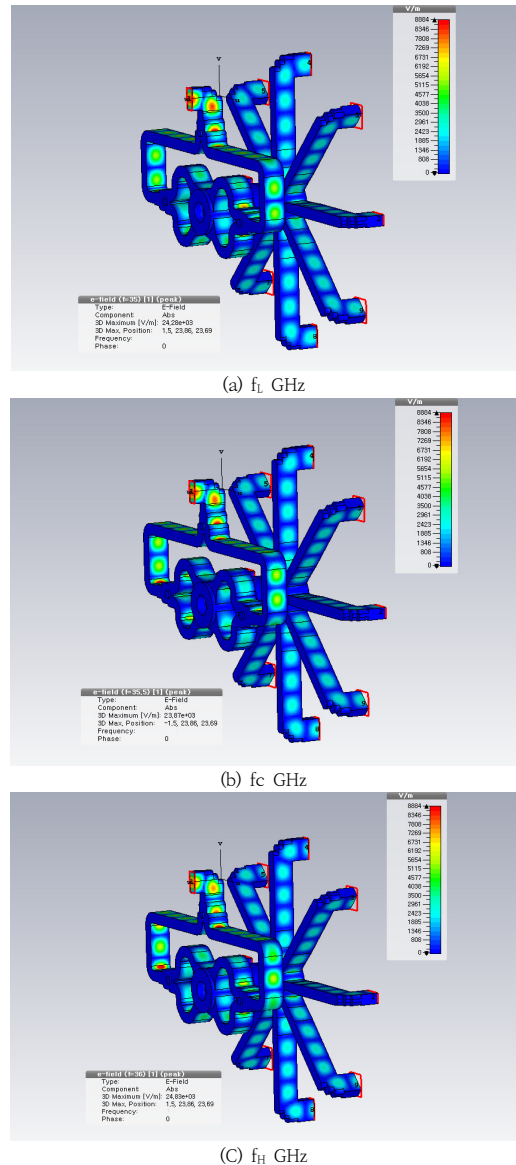


그림 6. 전력 결합기 전계 분포

Fig. 6. E-field distribution in the power combiner

4. 결합기의 방전 임계 전력 산출

지상 고도 상온에서 도파관 내부에서 발생할 수 있는 절연파괴 전압은 3×10^6 V/m로 이론적으로 시뮬레이션 전계값이 작을수록 높은 방전 임계전력을 확보할 수 있다.

방전 임계 전력 수식은 다음과 같다.

$$P_{\max} = (E_{\text{brk}} / E_{\text{max}})^2 \quad (2)$$

식 (2)을 통해 계산된 방전 임계전력은 다음과 같다.

표 2. 결합기의 방전 임계전력 산출

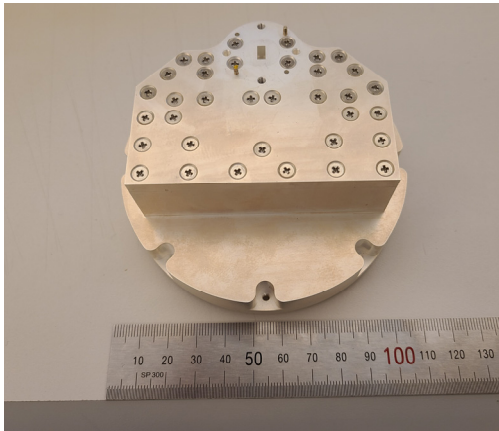
Table 2. Power rating of power combiner

주파수 (GHz)	전 계	방전 임계전력
f_L	24.280 V/m	15.267W
f_C	23.870 V/m	15.796W
f_H	24.830 V/m	14.598W

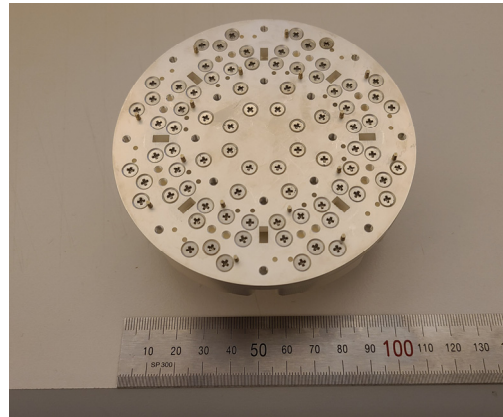
상기 분석을 통해 사용 전력 대비 충분한 마진을 확보하였다. 시뮬레이션 결과를 토대로 전계가 높은 부위에 불연속면을 최소화 하기 위해 가장자리에(edge)에 라운드 처리를 하여 시제를 제작하였다.

5. 전력결합기 제작 및 측정

기구 가공을 통해 회로를 구현하는 도파관에 경우 가공 방식, 오차 및 조립 구조에 따라 많은 성능 변화가 발생한다. 설계 단계에서 기구적인 요인을 면밀히 적용하여 최적화를 진행하고, 도면화 하여 제작을 하였다. 기구는 크게 4-파트로 분리하여 회로를 구현하고, 조립 공차를 최소화하기 위해 각 기구물에 가이드 핀을 적용하였다. 결합기의 제작 사진은 그림 7.과 같다.



(a) Top 면



(b) Bottom 면

그림 7. 8-way 도파관 공간 결합기

Fig. 7. 8-way waveguide spatial combiner

도파관 플랜지(Flange)는 국제 표준 규격인 UG-383/U를 선택하여 적용하였다. N5224A 회로망 분석기 및 N4693-60002 E-Cal kit을 통해 교정(Calibration)을 하고 도파관 어댑터를 연결하여 시험을 하였다. 측정하지 않는 포트는 종단을 하였다. 측정 사진은 그림 8에 나타내었다.

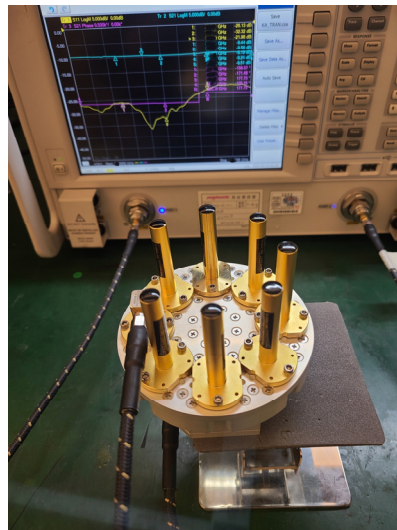


그림 8. 8-way 도파관 결합기 측정 사진

Fig. 8. The waveguide combiner measurement photo

시험 결과는 매우 우수하여 반사 손실은 사용 주파수 대역에서 23dB 이상, 삽입손실은 8-way의 분배 손실 9dB를 제외하고 0.4dB 이하의 성능을 확인하였다.

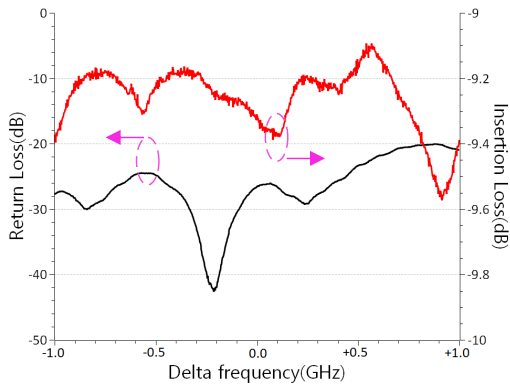


그림 9. 공간 결합기 반사손실, 삽입손실 측정 결과
Fig. 9. The spatial combiner IL, RL measurement results

격리도는 각 포트의 중심에서 결합이 되는 공간 결합기의 구조상 비슷한 위치에서의 격리 특성은 유사하여 본 논문에서는 4개의 격리 특성을 비교하였다. 회로망 분석기를 통한 격리도 측정 연결도는 그림 10에 나타내었다.

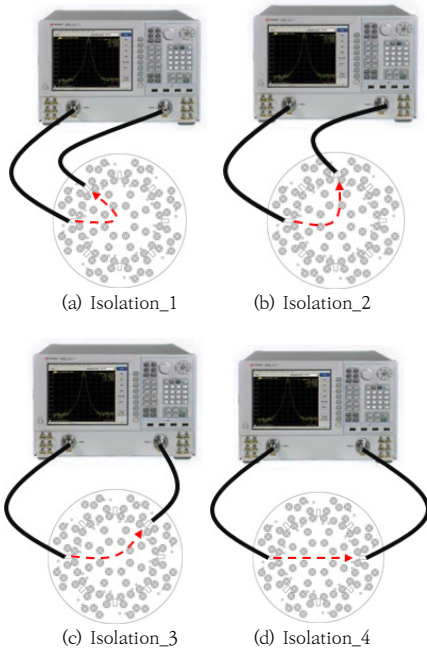


그림 10. 회로망 분석기 격리도 측정 연결도
Fig. 10. Isolation measurement setup of network analyzer

격리도 특성에서 주목할 만한 점은 인접 포트 들은 8 ~ 9dB의 양호한 성능을 보인 반면, 마주 보고 있는 포트 들은 4 ~ 5dB로 상대적으로 낮은 성능을 보였다. 이는 진행되는 파와 일직선 상에 존재하여 신호를 감쇄할 수 있는 저항 성분이 존재하지 않아 발생한 것으로 추정된다.

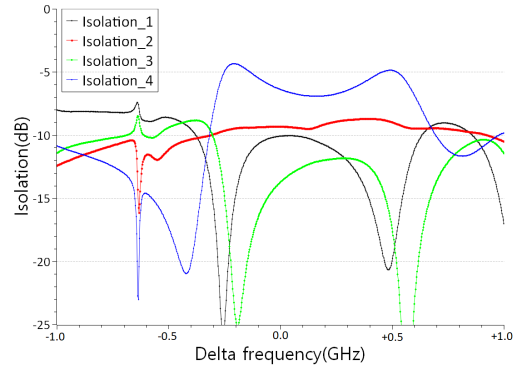


그림 11. 공간 결합기 격리도 측정 결과
Fig. 11. The spatial combiner isolation measurement results

결합기의 결합 효율은 고출력 고효율의 시스템을 구현 하기 위해 매우 중요한 파라미터이다.

실제 결합 효율을 계산하기 위해서는 분배기와 결합기의 손실을 고려해야 하나, 단위 전력 증폭기의 이득이 충분히 크다면, 분배기의 손실은 무시되며 결합기의 손실에 의해 결합 효율이 결정된다.

$$\eta_c \approx \sqrt{\frac{|S_{21}|^2}{1 - |S_{11}|^2}} \quad (3)$$

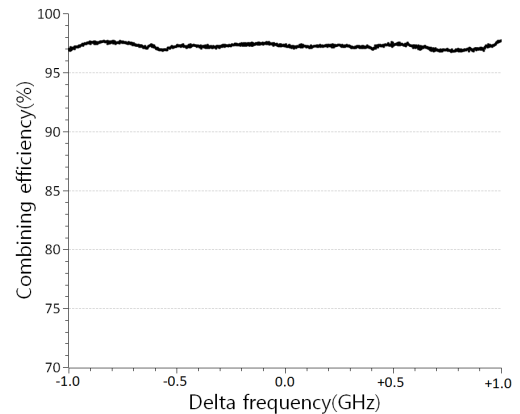


그림 12. 출력 결합 효율
Fig. 12. Output combining efficiency

결합효율을 구하기 위해 각 포트의 평균 손실을 구한 후 식 (3)을 통해 계산을 하고 그림 12에 그 결과를 나타 내었다.

8-way 도파관 공간결합기의 결합효율은 사용 대역에서 97% 이상의 매우 우수한 결합 효율을 확인하였다.

III. 결 론

본 논문에서는 밀리미터파(Ka 대역) 시스템에 적용 가능한 8-way 도파관 공간 결합기에 대해 연구를 하였다.

구형 도파관으로 입사된 신호를 중심에서 원형 도파관으로 결합을 하여 고출력을 구현하고, 바뀐 모드를 분배기 영역에서 특수한 방향의 동일한 진폭 4개의 신호로 분할하여 원형도파관에 연결하는 구조를 적용하여 소형화를 이루었다.

전기적 성능은 삽입손실 0.4dB 이하 반사손실 23dB 이상의 매우 우수한 특성을 보였다. 비록 바이너리 결합기 대비 낮은 격리도 특성을 보였으나 바이너리 결합기 대비 15 ~ 17% 이상의 높은 결합 효율을 보여 고출력 고효율 시스템에 적합함을 확인하였다.

본 연구를 통해 확보한 결과를 통해 초고주파, 고출력 고효율 SSPA에 다방면으로 적용이 가능할 것으로 기대 된다.

References

- [1] Song-Hyun Yun, Si-Ok Kim, Su Hyun Lee, Byeong-Ok Lim, Bok-Hyung Lee, Yong-Kyu Jeon, Hyun-Kyu Kim, Young-Geun Yoo, "A Study on a Ku-Band High Power and High Efficiency Radial Combiner", The JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. Vol. 28, No. 5, pp 400-409, May 2017.
DOI : <https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2017.28.5.400>
- [2] Bo-Ki Kim, "A Study on Ku-band Broadband Spatial Power Combiner Using Coaxial Waveguide"(Ph.D Dissertation, Kwangwoon University, 119p, Feb 2018.
- [3] S.E. Miller, A.C. Beck, "Low-Loss Waveguide Transmission", IEEE, Vol. 41, Issue 3, 348~358p, March 1953.
DOI : 110.1109/JRPROC.1953.274381
- [4] S.S. Saad, J.B. Davies, O.J. Davies, "Analysis and design of a circular TE₀₁ mode transducer", IEE Journal On Microwaves, Optics and Acoustics Vol. 1,

Issue 2, pp. 58~62, Jan 1977
DOI : 10.1049/ij-moa.1977.0003

- [5] H.A. Hoag, S.G. Tantawi, R. Callin, H. Deruyter, Z.D. Farkas, K. Ko, N. Kroll, T.L Lavine, A.Menegat, A.E. Vlieks, "Flower-petal mode converter for NLC", IEEE 06, Print ISBN 0-7803-1203-1, August 2002.
DOI : 10.1109/PAC.1993.308664
- [6] C.F. Yu, T.H. Chang, "High Performance Circular TE₀₁ Mode Converter", IEEE International Conference on plasma Science, Print ISBN : 0-7803-9300-7, June 2005.
DOI : 10.1109/PLASMA.2005.359406
- [7] M.H. Chen, "A 19-Way Isolated Power Divider Via the TE₀₁ Circular Waveguide Mode Transition", IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Print ISSN : 0149-645X, June 1986
DOI : 10.1109/MWSYM.1986.1132234
- [8] Hyo-Chul Kim, Heung-Rae Cho, Ju-Heun Lee, Deok-Jae Lee, Se-Hwan An, Man-Hee Lee, Ji-Han Joo, Jun-Beom Kwon, Hae-Chang Jeong, So-Su Kim, "Design and Fabrication of Ka-band High Power and Low Loss Waveguide Combiner" The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(IIBC) Vol. 21, no. 3, pp.35-42, Jun. 30, 2021. pISSN 2289-0238, eISSN 2289-0246
DOI : <https://doi.org/10.7236/JIIBC.2021.21.3.35>
- [9] Dong-Hak Lee, Doo-Yeong Yang, "Analysis and Design of a Wide Corrugated Conical Horn Antenna Based on Mode Matching Converter", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society. Vol. 17, No. 7, pp 1-7, Jul 2016
DOI : <https://doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.7.1>

저 자 소 개

김 효 철(정회원)



- 2007년 2월 : 제주대학교 통신공학과 (공학사)
- 2007년 1월 ~ 2008년 3월 : ㈜액티패스 연구원
- 2008년 3월 ~ 2017년 4월 : ㈜이너트론
- 2017년 4월 ~ 2020년 8월 : ㈜성산전 자동차 선임연구원
- 2020년 8월 ~ 현재 : ㈜피플릭스 수석연구원
- 주 관심분야 : 공간결합기, 도파관결합기, 모드변환기 등

조 흥 래(정회원)



- 2003년 2월 : 위덕대학교 정보통신(공학사)
- 2002년 11월 ~ 2004년 4월 : ㈜알트론 연구원
- 2005년 3월 ~ 현재 : ㈜피플웍스 수석 연구원
- 주 관심분야 : 레이더시스템, 마이크로파 송수신기 등

이 만 희(정회원)



- 2007년 2월 : 충남대학교 전기정보통신공학부 (공학사)
- 2009년 2월 : 충남대학교 전파공학과 (공학석사)
- 2009년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원(주) 선임연구원
- 주 관심분야 : 마이크로웨이브 탐색기, 초고주파 회로 및 시스템

이 주 흔(정회원)



- 2017년 2월 : 호서대 전자공학과(공학사)
- 2019년 2월 : 호서대 전자디스플레이공학부(공학석사)
- 2019년 2월 ~ 현재 : ㈜피플웍스
- 주 관심분야 : 초고주파 능동/수동회로, 재구성 안테나 시스템, 초고주파 센서 네트워크 시스템 등

주 지 한(정회원)



- 2002년 8월 : 충북대학교 전파공학과 (공학사)
- 2004년 8월 : 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
- 2008년 8월 : 광운대학교 전파공학과 (공학박사)
- 2008년 7월 ~ 현재 : LIG넥스원(주) 수석 연구원

- 주 관심분야 : 마이크로웨이브 탐색기, 초고주파 회로 및 시스템

이 덕 재(정회원)



- 1998년 2월 : 충남대학교 전자공학과 (공학사)
- 2000년 2월 : 충남대학교 초고주파공학(공학석사)
- 2000년 2월 ~ 2001년 11월 : ㈜래트론 연구원
- 2001년 12월 ~ 현재 : ㈜피플웍스 이사

- 주 관심분야 : 레이더시스템, 마이크로파 송수신기 등

김 흥 락(정회원)



- 1995년 2월 : 대구대학교 전자전기컴퓨터학부 (공학사)
- 1997년 8월 : 대구대학교 전자공학과 (공학석사)
- 1997년 7월 ~ 현재 : LIG넥스원(주) 수석연구원
- 주 관심분야 : 초고주파 회로 설계, 마이크로파 신호처리기, 마이크로파 송수신기, 마이크로파 탐색기

안 세 환(정회원)



- 2004년 2월 : 송실대학교 정보통신공학과 (공학사)
- 2006년 2월 : 송실대학교 정보통신공과 (공학석사)
- 2007년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원(주) 수석연구원

- 주 관심분야 : 초고주파 회로 설계, 마이크로파 송수신기, 마이크로파 탐색기

※ 본 연구는 2020년도 LIG넥스원의 지원을 받아 수행된 연구결과임. (계약번호 LIGNEX1-2021-0326(00), 소형 고풍력 반도체 송신기)