

저손실 고효율 Ka-대역 16-Way 방사형 도파관 결합기 설계

Ka-Band 16-Way Radial Power Combiner Design with Low-Loss and High-Efficiency

고종규 · 남경민 · 김보기 · 이건준 · 박지안* · 김상훈* · 양승식*

Jonggyu Go · Kyungmin Nam · Boki Kim · Kunjun Lee · Jian Park* · Sanghoon Kim* · Seungsik Yang*

요 약

본 논문에서는 Ka-대역에서 동작하는 저손실 고효율의 16개 경로를 갖는 방사형 도파관 전력 결합기를 설계 및 제작하였다. 제안된 공간 전력 결합기는 높은 출력전력을 결합할 때 발생할 수 있는 절연파괴를 피하기 위하여 금속으로 제작된 단락 핀 도파관-도파관 전이구조(waveguide-to-waveguide transition)를 이용해 설계하였다. 제안된 방사형 도파관 전력 결합기는 전계특성과 절연특성을 분석하기 위해 3D-EM 시뮬레이션을 이용해 최적화 설계되었으며, 제작된 방사형 도파관 전력 결합기의 성능을 네트워크분석기를 이용해 검증하였다. 제안된 공간 전력 결합기는 사용 주파수 대역에서 각 포트 간 $2.1^{\circ} \sim 3^{\circ}$ 이하의 낮은 위상차를 보였고, -13 dB의 낮은 반사손실, $-0.12 \sim -0.16$ dB의 삽입손실과 96 % 이상의 높은 결합효율을 보였다.

Abstract

In this study, a 16-way radial power combiner with low loss and high efficiency operating in the Ka-band is designed and fabricated. The proposed combiner is designed using a short-pinned waveguide-to-microstrip transition structure to avoid dielectric breakdown that may occur when combining high powers. It was designed and optimized using a 3D electromagnetic simulation, and verified using a network analyzer. The proposed radial power combiner showed a low phase difference of 2.1° to 3° or less between ports, low return loss of -13 dB, insertion loss of -0.12 dB to -0.16 dB, and high combining efficiency of 96 % in the requisite frequency band.

Key words: Spatial Power Combiner, Radial Power Combiner, Waveguide-to-Waveguide Transition

I. 서 론

Ka-대역과 같은 밀리미터파 대역의 MMIC(monolithic microwave integrated circuit)는 L~S 대역과 같은 낮은 주파수 대역에 비하여, 상대적으로 출력전력이 낮고 증폭기

의 효율 또한 낮아 고출력 SSPA(solid state power amplifier) 개발의 어려움이 있다^[1]. 통상적으로, 높은 고출력의 SSPA는 마이크로스트립 전송선로로 구성된 윌킨슨 전력 결합기(Wilkinson power combiner)를 이용하여 출력전력을 결합하도록 구성한다. 이 방법은 설계가 간편하고

(주)알에프피티(RFPT)

*한화시스템(Hanwha Systems)

· Manuscript received March 2, 2022 ; Revised March 14, 2022 ; Accepted April 1, 2022. (ID No. 20220302-021)

· Corresponding Author: Jonggyu Go (e-mail: jggo@rfpowertech.co.kr)

제작비용이 저렴하다는 장점으로 널리 이용되고 있다^{[2],[3]}. 그러나, Ka-대역과 같은 밀리미터파 대역은 기판의 유전손실로 인한 신호 손실이 크고, 커넥터의 낮은 유전파괴 특성 때문에 높은 전력을 효과적으로 결합하기가 매우 어렵다^[4]. 밀리미터파와 같은 초고주파 대역에서 높은 전력을 결합을 위해, 낮은 유전체 손실과 높은 결합효율을 가지며 절연파괴 현상을 피할 수 있는 도파관을 이용한 공간 결합기에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다^{[5],[6]}.

본 논문에서는 Ka-대역에서 동작하고, 16개의 포트구성된 저손실, 고효율 성능을 갖는 방사형 도파관 전력 결합기(radial power combiner)를 설계 및 제작하였다. 전이구조의 단순화와 동시에 200 W 이상의 전력을 절연파괴 없이 결합하기 위해, 도파관-도파관 전이구조를 갖도록 설계하였다. 제작된 도파관 전력 결합기는 네트워크분석기를 이용하여 각 포트별 특성을 측정하였으며, 측정결과를 분석하여 설계결과를 검증하였다.

II. 방사형 도파관 전력 결합기 설계

방사형 도파관 전력 결합기는 여러 개의 포트에 인가된 전력이 하나의 포트에 결합되어 출력되도록 설계한다. 제안하는 방사형 도파관 전력 결합기는 WR28 규격의 16개 도파관이 하나의 포트에 결합할 수 있도록 설계하였다. 그림 1은 제안된 방사형 도파관 전력 결합기의 구조를 나타내고 있으며, 설계 치수는 표 1에 기재하였다. 그림 1의 a_1 과 b_1 은 Ka-대역의 도파관 표준 규격인 WR28 규격으로 크기로 설계하였으며, 그림 1의 w_3 는 FB320 규격의 4-hole flange 도파관 어댑터가 16개의 포트에 연결될 수 있도록 그 폭과 높이를 정하였다.

$$Z_0 = \frac{138 \times \log_{10} \left(\frac{r_2}{r_1} \right)}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Z_0 : Characteristic Impedance

r_2 : Outside Diameter

r_1 : $\neq r$ Diameter

(1)

도파관-도파관 전이구조는 전통적으로 동축 커넥터의 내심 핀을 개방시키는 방법과 단락 핀을 사용하는 방법

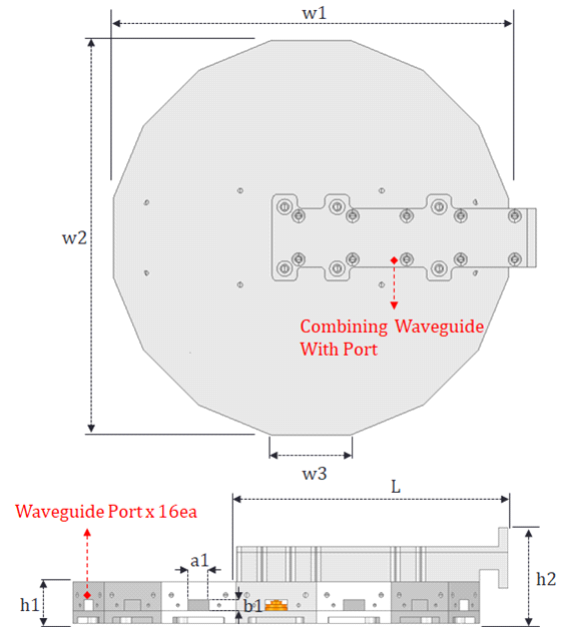


그림 1. 제안하는 방사형 도파관 전력 결합기 구조

Fig. 1. Proposed radial power combiner structure.

표 1. 제안하는 공간 전력 결합기의 치수

Table 1. Dimensions of proposed spatial power combiner.

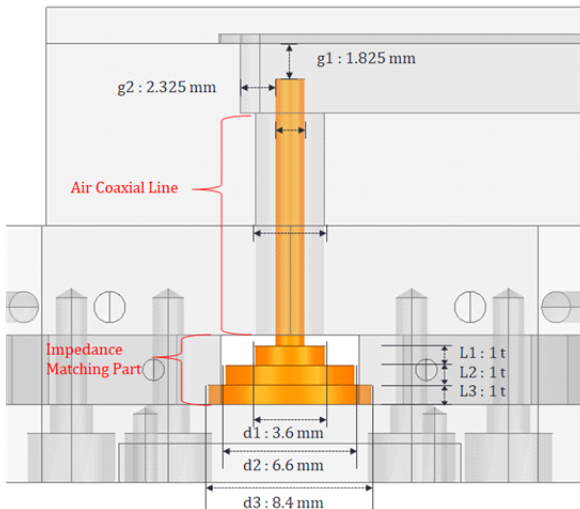
Parameter	Value [mm]	Description
a_1	7.112	WR28 width "a"
b_1	3.556	WR28 width "b"
L	85.5	Output waveguide length
h_1	13.2	Hight of radial waveguide power combiner
h_2	30.3	Hight of radial waveguide power combiner with output waveguide
w_1	128	Radial waveguide power combiner width 1
w_2	128	Radial waveguide power combiner width 2
w_3	24.46	WR28 adapter connection part size

이 있다^[7]. 특히, 개방 핀을 이용한 전이구조에 비하여, 단락 핀 구조를 이용한 전이구조는 커넥터의 유전체파괴를 피할 수 있기 때문에, 펄스 모드의 전력 결합뿐만 아니라, CW 모드의 전력결합에 있어서도 개방 핀 구조보다 상대적으로 매우 높은 전력을 결합할 수 있는 장점이 있다.

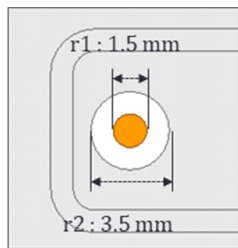
본 논문에서 제안하는 방사형 도파관 전력 결합기는

단락 핀을 이용한 도파관 전이구조로 설계되었으며, 도파관 전이구조는 자유공간 동축 선로와 임피던스 정합부로 구성된다. 설계된 결합기의 전체적인 전이구조를 그림 2(a)에 나타내었으며, 설계에 이용된 치수를 그림에 함께 표기하였다. 특히, 손실 없이 도파관 전이가 잘 일어날 수 있도록 사용하고자 하는 주파수 대역의 4분의 1파장을 고려하여, 그림 2의 g_1 과 g_2 의 값을 결정하였으며, 최적화하여 설계에 반영했다.

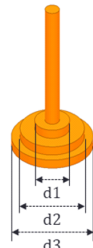
그림 2(b)에서는 자유공간 동축 선로의 구조를 보인다. 자유공간 동축 선로는 자유공간의 유전율과 식 (1)을 이용해 내심과 외심의 직경 r_1 및 r_2 를 결정하였다^[8]. 그림



(a) 도파관 변이구조
(a) Waveguide transition



(b) 자유공간 동축 선로
(b) Air coaxial line



(c) 단락 핀
(c) Shorting pin

그림 2. 제안된 도파관 트랜지션 구조

Fig. 2. The waveguide transition structure of proposed spatial power combiner.

2(c)에서는 임피던스 정합부를 나타내고 있다. 임피던스 정합부는 세 개의 서로 다른 크기의 원판으로 구성되며, 사용 주파수 대역에서 최소 반사손실을 갖도록 최적화하였다.

그림 3에서는 반사손실 성능 최적화를 위하여 도파관-도파관 전이구조의 임피던스 정합부를 구성하는 세 개의 원판의 크기별 임피던스 정합 시뮬레이션 결과를 스미스 차트로 나타내었다. 원판 직경 d_1 과 d_2 를 각각 3.6 mm과 6.6 mm로 고정하고, d_3 를 1 mm 크기로 늘리며 임피던스의 변화를 분석하였다. 스미스차트에서 볼 수 있듯이, d_3 가 작을수록 대역폭은 줄어들지만, 관심 주파수 대역에서의 정합이 용이함을 알 수 있다. 시뮬레이션을 통하여 최적화된 값으로서 d_3 를 8.4 mm로 결정하였다.

제안하는 방사형 도파관 전력 결합기의 전력결합손실과 전력성능을 분석하기 위해 3D-EM 시뮬레이션을 이용한 전계 시뮬레이션을 수행했다. 그림 4는 제안하는 방사형 도파관 전력 결합기의 전계 분포 시뮬레이션 결과를 보인다. 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이, 16개의 포트에 각각 입력된 TE₁₀ 모드의 신호가 중앙에 위치한 도파관 전이구조로 모여 하나의 결합 포트에 전력이 결합되어 출력됨을 알 수 있다. 방사형 도파관 전력 결합기의 최대 전력성능은 자유공간의 절연파괴 전압과 전력 결합기의 전계의 크기로 계산이 가능하고, 식 (2)로 표현할 수 있다^[9]. 이때 *Break*, *Max*는 각각 절연파괴 전압과 최대전

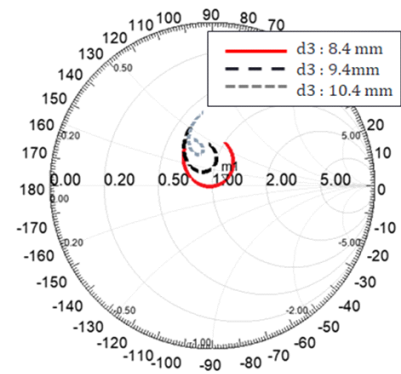


그림 3. 임피던스 정합부 직경의 변화에 따른 시뮬레이션 결과

Fig. 3. Simulation results of impedance matching circuits according to diameter variations of d_3 .

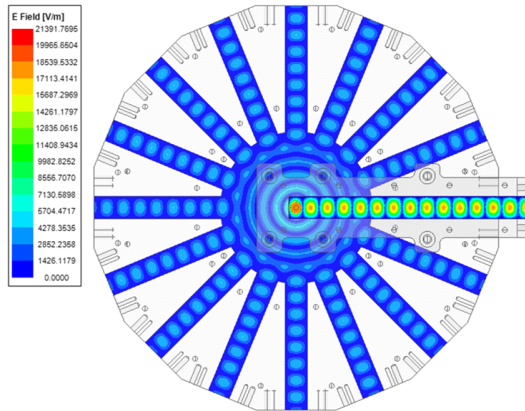


그림 4. 제안하는 방사형 도파관 전력 결합기의 3D-EM 시뮬레이션 결과

Fig. 4. 3D-EM simulation results of proposed radial power combiner.

기장 세기를 나타낸다. 제안하는 방사형 도파관 전력 결합기의 절연파괴 취약점은 16개의 전력이 하나로 결합되는 단락 핀 도파관 전이구조로 예상되고, 취약점의 전계 시뮬레이션 결과는 21,391 V/m로 나타났다. 자유공간의 절연파괴 전압은 3×10^6 V/m와 시뮬레이션 결과를 식 (2)로 계산한 결과 제안하는 방사형 전력 결합기의 최대 전력성능은 19.6 kW로, 초기 설계 목표치인 200 W의 이상의 성능을 만족하는 결과를 보였다.

$$P_{\max} = \left(\frac{E_{\text{Break}}}{E_{\text{Max}}} \right)^2$$

E_{Break} : Breakdown voltage

E_{Max} : Maximum E-field

(2)

III. 제작 및 측정결과

그림 5에서는 제작한 방사형 도파관 전력 결합기의 사진을 나타내었다. 제안하는 방사형 도파관 전력 결합기는 제작 가공의 용이성을 위해 몸체, 임피던스 정합부 및 출력 결합부의 세 부분으로 구성하였다. 제작한 방사형 도파관 전력 결합기의 몸체 및 출력 결합포트는 전도성을 고려해 알루미늄 표면에 은도금 처리를 하였고, 전이구조의 임피던스 정합부는 구리에 표면의 산화방지 및 전도성을 유지하기 위해 금도금 처리하였다. 또한, 출력 결합

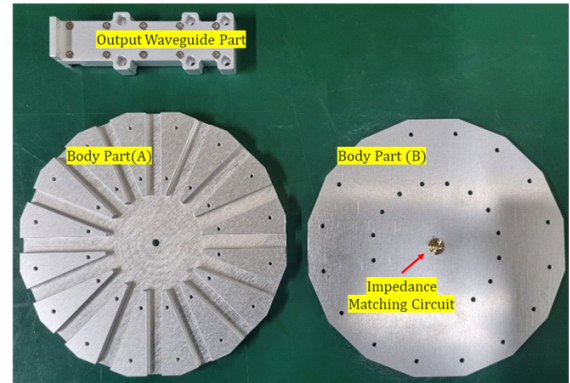


그림 5. 제작된 공간 전력 결합기

Fig. 5. Fabricated radial combiner.

부는 도파관의 표준 사이즈인 WR28 표준으로 제작했다. 공간결합기는 각 구성부의 전기적 접합이 매우 중요하다. 각 구성부가 서로 밀착하여 결합될 수 있도록 나사를 이용하여 조립했으며, 밀착 결합이 되지 않을 경우에 발생할 수 있는 신호 손실을 최소화하기 위하여 높은 전도성을 갖는 LOCTITE사의 에폭시(ABP 8068TA)를 사용하여 접합했다.

그림 6에서는 제작된 공간 전력 결합기의 반사손실과 삽입손실 측정을 위한 측정 환경을 보이고 있다. 공간 전력 결합기는 측정을 위해 10 MHz~43.5 GHz의 측정 주파수대역의 KEYSIGHT사 네트워크분석기(network analyzer) N5234A 모델에 동축 케이블을 연결하여 측정하였다. 하

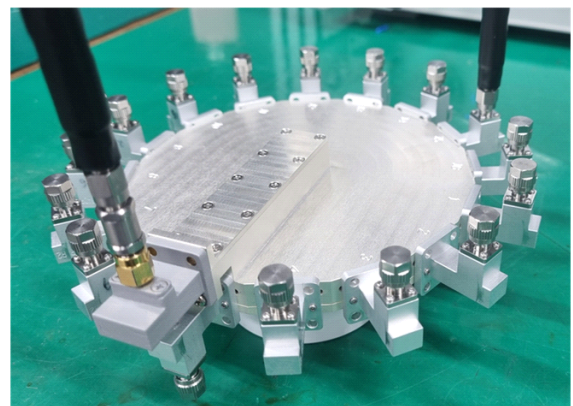


그림 6. 제작된 공간 전력 결합기의 측정환경

Fig. 6. Measurement environment of manufactured radial power combiner.

나의 포트를 측정할 때, 측정하지 않은 나머지 15개의 포트는 50 Ohm으로 종단(termination)하여 측정 포트의 특성에 영향이 없도록 하였다. 방사형 도파관 전력 결합기의 삽입손실은 설계 시 설정한 포트 개수에 의해 결정되고 이론적 계산이 가능하다. 16개 포트를 갖는 공간 전력 결합기의 이론적 삽입손실은 -12 dB이고, 계산값에서 측정된 삽입손실을 제외한 값이 단일 경로의 삽입손실이 된다.

그림 7에서는 제작된 방사형 도파관 전력 결합기의 반사손실과 삽입손실의 시뮬레이션 결과와 측정결과를 비교해 S-파라미터로 나타내었다. 반사손실은 관심 주파수 대역 f_0 를 중심으로 $f_0 \pm 0.5$ GHz의 대역에서 -13 dB 이하의 성능을 만족했으나, 측정 결과와 시뮬레이션 결과 사이에 8 dB 이상의 큰 차이를 보였다. 이 결과는 앞서 설명하였듯이, 방사형 도파관 전력 결합기의 조립과정에서 발생한 불안정한 전기적 접합에서 발생하는 부정합으로 예상된다. 측정된 삽입손실 성능은 $0.12 \sim 0.16$ dB를 나타내었으며, 시뮬레이션 결과와 큰 차이를 보이지 않았고, 96%~97%의 우수한 전력결합 효율을 나타내었다.

공간 전력 결합기는 캐비티(cavity) 형태의 3D 구조물 내부에 전계가 전파되어 전력이 결합하는 구조이므로, 각 포트에서 하나의 결합포트로 전력이 결합될 때, 각 포트

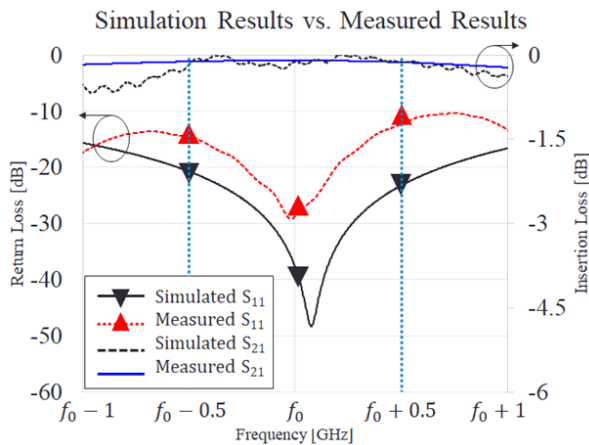


그림 7. 방사형 도파관 전력결합기의 반사손실과 삽입손실 측정결과

Fig. 7. Measurement result of return loss & insertion loss of radial power combiner.

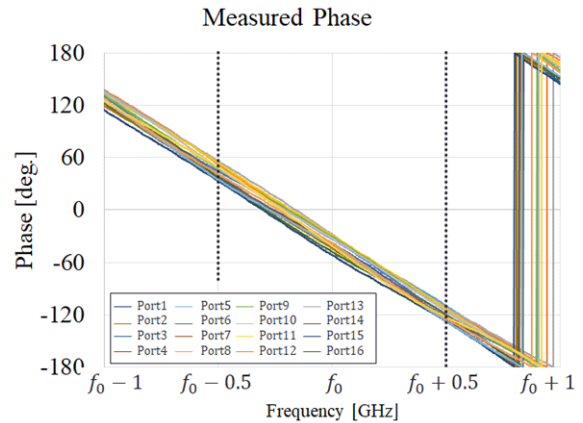


그림 8. 공간 전력 결합기 포트 위상차 측정결과

Fig. 8. Phase measurement results of radial power combiner.

의 위상이 서로 동일하지 않으면 결합손실이 발생하게 된다. 따라서 포트 간 위상차가 작을수록 효율적인 결합이 가능하기 때문에 방사형 도파관 전력 결합기의 매우 중요한 성능 지표가 된다. 그림 8은 제작된 결합기의 관심 주파수의 중심 주파수 f_0 를 중심으로 $f_0 \pm 0.5$ GHz의 대역에서 포트 간 위상차 측정결과를 나타내었으며, 측정된 전 대역에서 $2.1^\circ \sim 3^\circ$ 의 우수한 성능을 보였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 Ka-대역에서 16개의 경로를 갖는 방사형 도파관 전력 결합기를 제안하였다. 제안하는 결합기는 Ka-대역에서 이용되는 커넥터의 절연과파를 피하기 위하여 단락 핀 구조를 갖는 도파관 전이구조를 이용하여 설계하였다. 설계한 방사형 도파관 전력 결합기는 3D-EM 시뮬레이션을 이용하여 그 특성을 예측하였으며, 제작한 공간 전력 결합기의 특성은 설계결과와 잘 부합함을 확인하였다. 제작된 공간 전력 결합기는 목표 주파수 대역에서 $-0.12 \sim -0.16$ dB의 삽입손실 성능을 보였으며, 96% 이상의 전력결합 효율을 나타내었다. 또한, 제작하는 공간 전력 결합기의 포트 간 위상차는 $2.1^\circ \sim 3^\circ$ 를 보였다. 제안된 결합기는 고효율 증폭기 소자가 낼 수 있는 최대의 출력 전력을 최소한의 손실로 결합할 수 있으므로, 정합이 상대적으로 어려운 Ka-대역과 같은 밀리미터파 대역에서 전력결합 소자로서의 활용이 기대된다.

References

- [1] N. Estella, E. Camargo, J. Schellenberg, and L. Bui, "High-efficiency, Ka-band GaN power amplifier," in *2019 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, Boston, MA, Jun. 2019, pp. 1423-1472.
- [2] S. Skakata, Y. Komatsuzaki, and S. Shinjo, "Adaptive input-power distribution in Doherty power amplifier using modified Wilkinson power divider," in *2020 IEEE Topical Conference on RF/Microwave Power Amplifiers for Radio and Wireless Applications(PAWR)*, San Antonio, TX, Jan. 2020, pp. 34-37.
- [3] P. Hantula, R. Tongta, "Design of two L-band RF amplifiers combination using Wilkinson power dividers," *International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications*, vol. 9, no. 1, pp. 38-42, Jan. 2020.
- [4] Southwest Microwave, "The BEST performance microwave connectors," *Southwest Microwave*, Tempe, AZ, pp. 113-117, 2002.
- [5] X. Li, G. Chen, M. Zhan, and R. Xu, "A new planar compatible power combiner based on radial waveguide," in *2014 IEEE International Conference on Communication Problem-Solving*, Beijing, Dec. 2014, pp. 147-149.
- [6] G. Zhai, B. Shi, "Compact low loss millimeter wave 8-way radial waveguide power combiner," in *TENCON 2017: 2017 IEEE Region 10 Conference*, Penang, Nov. 2017, pp. 1598-1601.
- [7] P. Wade, "Rectangular waveguide to coax transition design," *QEX*, no. 239, pp. 10-17, Nov./Dec. 2006.
- [8] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, Hoboken, NJ, John Wiley & Son, 2017.
- [9] J. L. Cano, F. D. Paolo, A. Mediavilla, and P. Colantonio, "Full-band oversized turnstile-based waveguide four-way power divider/combiner for high-power application," *Electronics*, vol. 8, no. 2, p. 193, Feb. 2019.

고 종 규 [(주)알에프피티/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-0965-4778>



2016년 2월: 서울과학기술대학교 전기정보공학과 (공학석사)
 2016년 2월~2018년 1월: (주)WiSOL 사원
 2021년 4월~현재: (주)알에프피티 선임연구원
 [주 관심분야] 안테나, 레이더 시스템, RF 측정기법

김 보 기 [(주)알에프피티/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-0648-4846>



2010년 8월: 백석대학교 정보통신공학과 (공학사)
 2018년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학박사)
 2022년 2월~현재: (주)알에프피티 책임연구원
 [주 관심분야] 공간결합기, SSPA, IMFET

남 경 민 [(주)알에프피티/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-9474-1015>



2005년 2월: 중앙대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2008년 2월: 중앙대학교 전자전기공학부 (공학석사)
 2020년 4월~현재: (주)알에프피티 수석연구원
 [주 관심분야] 초고주파회로, 레이더 시스템, 안테나

템, 안테나

이 건 준 [(주)알에프피티/상무이사]

<https://orcid.org/0000-0003-1828-6265>



1997년 2월: 원광대학교 반도체학과 (이학사)
 1999년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
 2012년 2월: 고려대학교 전파공학과 (공학박사)
 2018년 2월~현재: (주)알에프피티 상무이사
 [주 관심분야] 초고주파회로, 전력 증폭기, 안테나

박 지 안 [한화시스템/전문연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-8458-508X>



2014년 2월: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 (공학사)

2016년 2월: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 (공학석사)

2015년 12월~현재: 한화시스템 전문연구원

[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 능동회로, RF 송수신기, 레이더 시스템 등

양 승 식 [한화시스템/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-3308-256X>



2003년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)

2005년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)

2009년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학박사)

2009년 8월~현재: 한화시스템 수석연구원
[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 능동회로, RF 송수신기, 레이더 시스템 등

김 상 훈 [한화시스템/전문연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-6866-5998>



2009년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학사)

2016년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학박사)

2016년 1월~2017년 3월: LG전자

2017년 3월~현재 : 한화시스템 전문연구원

[주 관심분야] 고출력 증폭기, RF 송수신기, 전력 결합기, 레이더 시스템 등