

## 소형화된 Ka 대역 송수신모듈 설계 및 제작

# Design and Fabrication of a Miniaturized Ka-Band Transceiver Module

김종현\*\*\* · 박천선\* · 김성택\* · 박용배\*\*,\*

Jong-Hyoun Kim\*\*\* · Chun-Seon Park\* · Sung-Taek Kim\* · Yong-Bae Park\*\*,\*

### 요 약

본 논문에서는 대용량의 무선전송장비에 적용할 수 있는 마이크로스트립 대 도파관 전이구조를 갖는 소형화된 Ka 대역 송수신모듈을 제안하였다. 송수신모듈과 모듈이 장착되는 전단부의 소형화를 위해 모듈 상단에 최종단 필터를 장착할 수 있는 기판과 도파관이 수직 구조인 프로브 형태의 전이구조를 적용하였다. 제작된 전이구조 측정결과, 28 GHz ~ 30 GHz 주파수 구간에서 0.67 dB 이하의 삽입손실과 -14.1 dB 이상의 반사손실 특성을 나타내었다. 전이구조를 적용한 송수신모듈 측정결과, 최대 2 W 출력과 35 dB 송신이득, 20 dB 수신 이득을 가지며 -10 dB 이하의 반사손실 성능을 나타내었다.

### Abstract

In this study, we propose a miniaturized Ka-band transceiver module with a microstrip-to-waveguide transition structure that can be applied to high-capacity wireless radio. We apply a probe-shaped transition structure with the vertical structure of a substrate and waveguide that can mount a filter on top of a transceiver module. Measurement results of the fabricated transition structure revealed an insertion loss of 0.67 dB or less and a return loss of -14.1dB or more in the frequency range of 28~30 GHz. Measurement results of the transceiver module when the transition structure was applied revealed a maximum output of 2 W, a transmission gain of 35 dB, a gain of 20 dB, and a return-loss performance of less than -10 dB.

Key words: Ka-Band, Transceiver Module, Microstrip to Waveguide Transition, Front-End

### I. 서 론

밀리미터파(mmWave)에 해당하는 Ka 대역 주파수는 파장 길이가 수 mm인 것이 특징이며, 낮은 주파수 대역보다 데이터 전송량이 많아 빠른 속도를 제공할 수 있다.

또한 초고주파 특성을 활용함으로써 5G의 특징인 초저지연성 실현에도 적합하기 때문에 국내 및 해외 주요 국가에서 Ka 대역을 5G 이동통신 서비스용으로 할당하였다. 밀리미터파를 이용한 송수신 시스템은 마이크로파 대비 소형으로 구현할 수 있어 장비 무게를 경량화 할 수

「이 연구는 (주)휴니드테크놀로지스에서 민군겸용기술개발사업 세부과제인 전장 및 재난지역 UAV 기반 Ka대역 통신중계 및 Hot-Spot 구축을 위한 탑재체 개발(17-CM-MC-01)의 지원을 받아 수행한 연구결과물임.」

\* (주)휴니드테크놀로지스(Huneed Technologies)

\*\* 아주대학교 IT융합대학원(Graduate School of IT Convergence, Ajou University)

\*\*\* 아주대학교 전자공학과(Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University)

· Manuscript received July 11, 2021 ; Revised September 6, 2021 ; Accepted September 15, 2021. (ID No. 20210711-071)

· Corresponding Author: Yong Bae Park (e-mail: yong@ajou.ac.kr)

있고, 넓은 대역폭을 구현할 수 있는 장점이 있기 때문에 대용량의 데이터를 전송하고자 하는 무선전송장비나 무인기를 통한 데이터의 통신 중계 소요가 증가하고 있다. 밀리미터파 대역의 단점인 높은 손실을 고려하여 송수신 모듈은 안테나와 도파관을 통해 연결되고, 송수신모듈은 도파관과 마이크로스트립 간 전이구조가 구현되어야 한다. 또한, 대용량의 데이터를 장거리 전송하기 위하여 고출력증폭기는 높은 출력과 선형성이 요구되며, 전송거리 및 수신감도 증가를 위해 송수신모듈과 안테나 간의 전송 손실을 최소화해야 하며, 장비는 소형화되어야 한다.

기존 Ka 대역 송수신모듈의 연구 내용은 주로 위상 배열 레이더에 적용할 수 있는 송수신 모듈 구조로 송수신 모듈의 출력이 낮고 높은 선형성을 요구하지 않거나 모듈 구조상 배열 안테나에만 적용할 수 있는 한계가 있다 [1],[2].

본 논문에서는 대용량의 무선전송장비에 적용할 수 있는 마이크로스트립 대 도파관 전이구조를 갖는 소형화된 Ka 대역 송수신모듈을 제안하였다. 소형화된 모듈 설계를 위해 다양한 형태의 전이구조 연구사례를 분석하였고, 송수신모듈 상단에 최종단 필터를 장착할 수 있도록 기판과 도파관이 수직 구조인 프로브 형태의 전이구조를 적용하였다. 정확한 설계를 위해 3D 시뮬레이션을 진행하였으며, 제작 및 시험을 통해 성능을 검증하였다.

송수신모듈의 송신부는 최대 2 W 출력과 35 dB 이득을 가지며, 수신부는 20 dB 이득을 갖도록 설계하였다. 입력 커넥터는 K-Type 커넥터를 사용하였으며, 출력 커넥터는 무선전송장비의 최종단 필터와의 전송 손실을 최소화할 수 있도록 도파관 구조를 적용하였다. 최종적으로 제작한 모듈을 WR-28 도파관 어댑터를 사용하여 모듈의 성능을 검증하였다.

## II. 마이크로스트립 대 도파관 전이구조 설계

### 2-1 전이구조

마이크로스트립 대 도파관 전이구조 중 대표적인 구조로는 프로브 구조<sup>[3],[4]</sup>, antipodal finline 구조<sup>[5],[6]</sup>, ridge 구조 등이 있다.

Antipodal finline 구조는 도파관 내부에 비대칭 금속 라

인을 배치하여 두 개의 금속 라인을 통해 도파관의 주 모드인  $TE_{10}$  모드가 마이크로스트립 라인의 Quasi-TEM 모드로 변환하게 된다. 기계의 가공 오차에는 민감하지 않으나, 기판의 전면과 후면에 정교한 패턴 설계가 요구되고, 도파관의 진행 방향으로 모드가 변환되는 구조이므로 송수신 모듈의 크기가 증가될 수 있어 소형화 구조에 적합하지 않다.

ridge 구조는 높은 임피던스를 갖는 도파관과 낮은 임피던스를 갖는 마이크로스트립 라인과 연결하기 위해 ridge 폭은 일정하게 하면서 ridge 간격을 순차적으로 늘림으로써 도파관의 임피던스를 낮추는 구조이다. Ridge 도파관의 전개 분포는 마이크로스트립 라인과 유사하고 광대역의 주파수 응답특성을 갖는 장점이 있으나,  $\lambda/4$  길이의 ridge 도파관을 여러 단으로 직렬로 구성하며, 마이크로스트립 신호 전파방향으로 도파관이 배치되어 소형화 구조에 적합하지 않다.

프로브 구조는 기판에서 도파관으로의 전파방향 반대면을 단락시킨 후 단락된 면으로부터  $\lambda/4$  떨어진 지점에 프로브를 위치시켜 도파관의 주 모드인  $TE_{10}$  모드와 마이크로스트립의 Quasi-TEM 모드의 변환을 이루는 형태이다. 기판과 도파관이 수직인 구조로 소형화 모듈에 적용할 수 있는 적합한 구조이므로 본 논문에서는 프로브 구조를 적용하였다.

### 2-2 전이구조 설계목표

프로브 전이구조는 그림 1과 같이 기판으로부터  $\lambda/4$  지점의 도파관을 기구적으로 단락시킴으로써 도파관의 주 모드인  $TE_{10}$  모드와 마이크로스트립의 Quasi-TEM 모

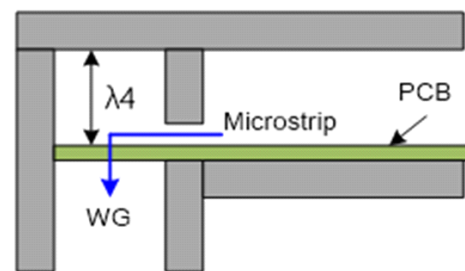


그림 1. 프로브 형태의 전이구조

Fig. 1. Structure of microstrip to waveguide transition.

표 1. 트랜지션 설계목표 및 기판정보

Table 1. Specifications and PCB parameters of the transition.

Specification		PCB parameter	
Freq.	28.0~30.0 GHz	Permittivity	3.38
IL	1.0 dB Max.	Loss tangent	0.002
RL	-10 dB Min.	Dielectric thickness	10 mil

드를 변환하는 구조이다.

트랜지션의 성능은 송수신모듈 목표 성능을 충족할 수 있는 성능으로 설계 목표를 선정하였으며, 표 1에 설계목표 및 기판정보를 나타내었다.

### 2-3 전이구조 최적화 설계

Ka 대역 표준 도파관은 WR-28이며, 도파관 내부 크기는 7.6 mm×3.6 mm이다. TE<sub>10</sub> 모드의 차단주파수는 21.1 GHz이며, 허용되는 주파수 범위는 차단주파수의 약 125%~189%로 26.3~39.8 GHz이다. 트랜지션 기판은 유전율 3.38이고, Loss tangent 0.002이며, 두께가 10 mil인 Rogers RO4003C 기판을 사용하였다. 그림 2는 프로브 형태의 전이구조 시뮬레이션을 위한 형상이다.

트랜지션 기판의 프로브 형상은 부채꼴 모양 등 여러 가지 형상으로 연구되었으나<sup>[8]</sup>, 본 논문에서는 제작이 쉽고, 오차 관리가 용이한 직사각형 형태로 선택하였다. 프로브의 설계 변수는 프로브의 길이와 폭을 주요 변수로 선정하여 최적화 하였다. 표 2는 시뮬레이션을 위한 파라미터이다.

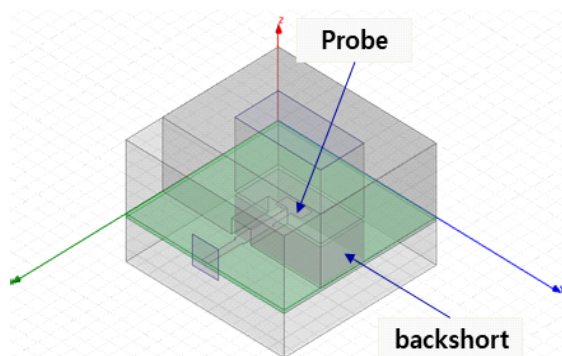


그림 2. 전이구조 3D 시뮬레이션 형상

Fig. 2. 3D structure of the transition.

표 2. 트랜지션 파라미터

Table 2. Parameters of the transition.

Parameter		Value
Waveguide	Longest(a)	7.1 mm
	Shortest(b)	3.6 mm
Probe	Length	0.954 mm
	Width	2.067 mm
Backshort	Length	2.575 mm
50ohm line	Width	0.55 mm
	Dielectric thickness	0.254 mm
	Copper height	0.018 um

그림 3과 표 3은 전이구조의 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 시뮬레이션 결과, 삽입손실은 0.67 dB, 반사손실은 -14.1 dB로 목표 성능을 모두 만족하는 결과를 얻었다.

### 2-4 전이구조 제작오차 시뮬레이션

송수신모듈의 PCB 및 기구 제작 시 발생할 수 있는 가공 오차를 고려하기 위해 프로브의 위치에 따른 성능 변

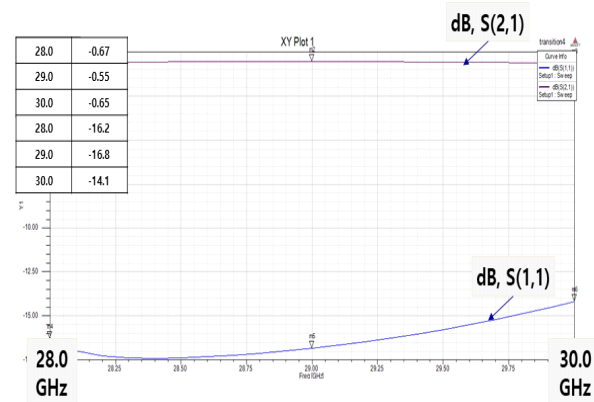


그림 3. 전이구조 시뮬레이션 성능

Fig. 3. Optimized transition performance.

표 3. 전이구조 시뮬레이션 성능

Table 3. Optimized transition performance.

Parameter	Specification	Simulation
Insertion loss	1.0 dB Max.	0.67 dB
Return loss	-10 dB Min.	-14.1 dB

화에 대한 시뮬레이션을 진행하였다. 트랜지션 기관 삽입 시 길이 방향(x방향) 및 폭 방향(y방향) 두 경우에 대하여 위치를 변수로 지정하였다.

시뮬레이션 결과, 길이 방향(x방향)의 경우,  $\pm 0.05$  mm 오차가 발생하였을 경우 삽입손실의 경우 약 0.1 dB 열화되었으며, 반사손실은 큰 변화가 없었다.  $\pm 0.1$  mm의 오차가 발생하였을 경우, 삽입손실 약 0.3 dB가 열화되어 삽입 손실이 1.0 dB를 초과하였으며, 반사손실은 약 2.5 dB 열화되었으나 -10 dB 이하의 성능을 유지하였다. 그림 4와 그림 5는 위치에 따른 시뮬레이션 결과이다.

### Ⅲ. 송수신모듈 설계

#### 3-1 모듈구조 및 설계목표

안테나와 송수신모듈 간 전력 손실을 최소화하기 위해

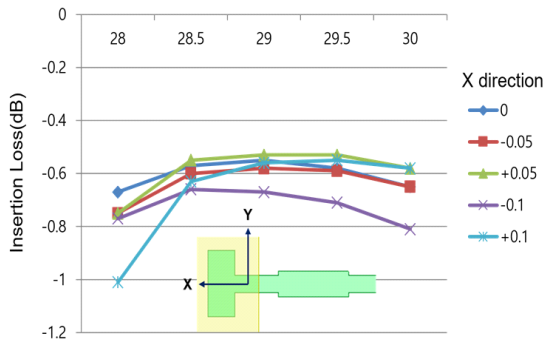


그림 4. 트랜지션 길이방향(X방향) 위치에 따른 성능  
Fig. 4. Performance with probe position in the X direction.

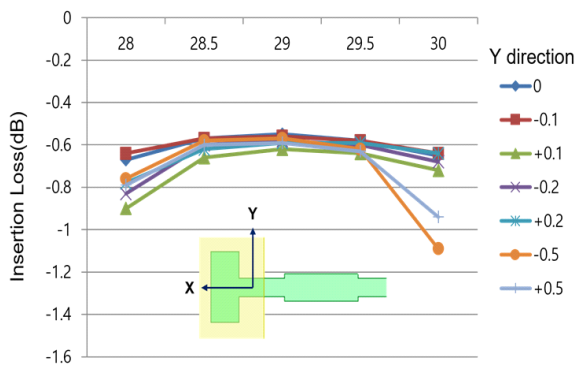


그림 5. 트랜지션 폭방향(Y방향) 위치에 따른 성능  
Fig. 5. Performance with probe position in the Y direction.

송수신모듈과 필터를 도파관을 통해 바로 연결되는 구조를 적용하였다. 송수신모듈의 입력 커넥터는 일반적으로 Ka 대역에서 사용하는 K-Type 커넥터를 적용하였으며, 출력 커넥터는 도파관 구조를 적용하였다.

그림 6은 소형화를 위한 송수신모듈 구조를 비교하였다. 프로브 구조를 적용하였을 경우(a), 도파관을 사용하지 않고 커넥터만 사용하였을 경우(b), 마지막으로 ridge 또는 antipodal 구조를 적용하였을 경우(c)에 대한 각각의 손실 및 크기를 비교 분석하였다.

도파관을 사용하지 않고 K-Type 커넥터를 사용하게 될 경우 최종단 필터와 연결하기 위한 커넥터 및 케이블 손실이 증가하게 되며, 송수신모듈 크기는 감소하나, 필터와 연결하기 위한 구조 관점에서는 크기도 증가된다.

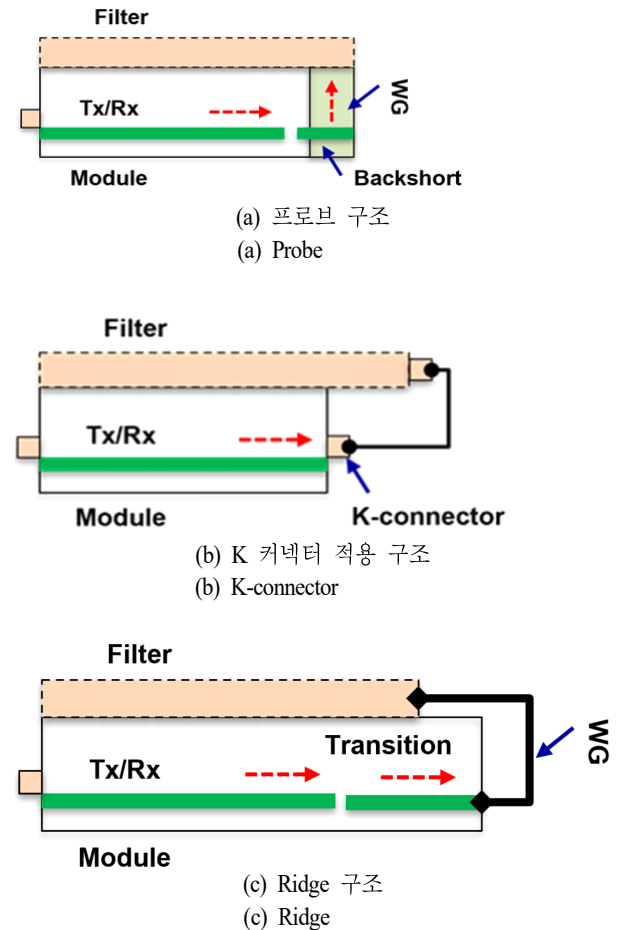


그림 6. 송수신모듈 구조  
Fig. 6. Structure of the transceiver module.

표 4. 송수신모듈 전기적 성능 목표

Table 4. Specifications of transceiver module.

Items	Specifications
Freq. range	28.0~30.0 GHz
Tx output	33 dBm $\pm$ 2 dB
Tx gain	35 dB $\pm$ 2 dB
Rx gain	20 dB $\pm$ 2 dB

Ridge 또는 antipodal 전이구조의 경우, 도파관의 전파 진행방향으로 마이크로스트립이 배치되는 구조로 유사 연구 사례를 보면 전이길이가 약 10 mm로<sup>[9]~[11]</sup> 모듈 크기가 증가하게 되고, 필터와 연결하기 위한 도파관이 추가되어 손실도 증가하게 된다. 따라서 무선전송장비 전단부에 적용할 수 있는 소형화된 송수신모듈 구조는 손실과 크기가 가장 작은 프로브 구조가 적합한 것으로 분석되어 본 논문에서 적용하였다.

본 논문에서 구현할 송수신모듈의 전기적 성능 목표는 표 4와 같으며, 이 규격은 시스템 요구 조건을 만족할 수 있는 규격을 목표로 선정하였다.

### 3-2 기판 및 전송선로 설계

밀리미터파 대역에는 손실을 고려하여 유전율 특성이 우수한 기판을 사용하며, 본 논문에서는 Rogers RO4003C 기판을 사용하였다.

제공된 자료에 의하면 RO4003C 기판은  $\epsilon_r=3.38$  Loss Tangent 0.002의 우수한 특성을 보인다. 또한, RO4003C 기판은 그림 7과 같이 온도변화에 따른 유전상수 변화가

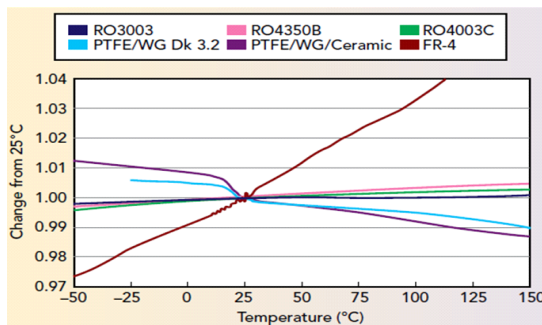


그림 7. PCB 기판의 온도변화에 따른 유전상수 특성<sup>[12]</sup>  
Fig. 7. Normalized dielectric constant vs. temperature<sup>[12]</sup>.

우수한 특성을 보이며<sup>[12]</sup> 이는 온도에 따른 송수신모듈의 특성에 매우 중요한 요소가 된다.

송수신모듈의 전송선로는 GCPW 구조를 적용하였다. GCPW 구조는 CPW 구조와 유사하나 기판을 금속판과 함께 고정하여 EM 커플링 차단이 용이하고, 그라운드 전위가 안정화 되는 장점이 있다. Rogers 사에서 제시한 자료에 의하면 GCPW 구조는 그림 8과 같이 27 GHz~30 GHz 대역에서 마이크로스트립 구조보다 손실 기율기가 보다 안정적인 것으로 알려져 있다<sup>[13]</sup>. 또한, 소형화된 모듈에서 마이크로스트립 구조를 적용하기에는 공간적인 제약으로 인해 적용이 어려움도 고려하였다.

50 ohm 특성 임피던스 라인 설계를 위해 표 5와 같은 기판 정보를 기준으로 시뮬레이션 하여 패턴 폭 0.55 mm로 설계하였다.

## IV. 송수신모듈 제작 및 측정

### 4-1 트랜지션 제작 및 측정

전이구조 시뮬레이션 결과를 토대로 프로브 형태의 트랜지션을 제작 및 측정하였다. 트랜지션 시험은 송수신모듈에 장착되는 동일한 형태의 Test Jig를 별도로 제작하여

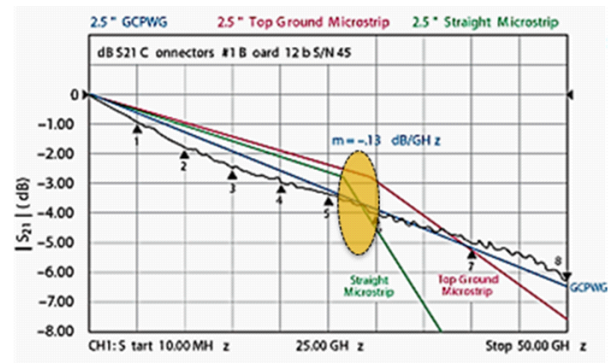


그림 8. 온도변화에 따른 GCPW, 마이크로스트립 비교<sup>[13]</sup>  
Fig. 8. Comparison of test data for GCPW and Microstrip<sup>[13]</sup>.

표 5. 기판 정보

Table 5. Characteristics of substrate.

Permittivity	Loss tangent	PCB height	Copper height
3.38	0.0027	1.2 mm	1/2 oz



성능을 시험하였다. 그림 9와 같이 지그 모듈 내부에 트랜지션을 장착하고, 입력에 K-Type 커넥터, 출력에 WR-28 어댑터를 장착하여 시험을 진행하였다.

표 6은 설계 목표와 시험 결과이다. 트랜지션 시험 결과 삽입손실 0.4 dB, 반사손실 -18 dB의 성능이 확인되어 목표 성능을 만족하였다.

#### 4-2 Carrier PCB 제작 및 측정

PA의 경우 발열이 매우 높고 적절한 방열이 이루어지지 않을 경우, 소자가 파손되거나 특성이 열화되는 문제가 발생할 수 있기 때문에 CPC Carrier에 유테틱 본딩 처리를 하였다. 또한, PA 및 LNA 소자와 PCB간은 와이어 본딩으로 연결하였다. 소자와 PCB간 와이어 본딩을 진행할 경우, 와이어의 길이, 직경, 개수 등에 의해 특성이 많이 좌우된다. 본 연구에서는 제조사로부터 제공된 기술자료와 유사 사례를 토대로 그림 10과 같이 Bonding Diagram을 설계하였다.

표 7은 Bonding Wire 사양을 나타내었다.

그림 11은 제작된 PA 및 LNA Carrier PCB이다.

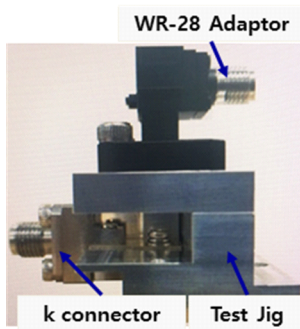


그림 9. 트랜지션 시험 지그 형상

Fig. 9. Test jig for transition.

표 6. 트랜지션 시험 결과

Table 6. Test result of transition.

Items	Specifications	Test result
Freq. range	28.0~30.0 GHz	28.0~30.0 GHz
Insertion loss	1.0 dB Max.	0.4 dB Max.
Return loss	-10 dB Min.	-18 dB Min.

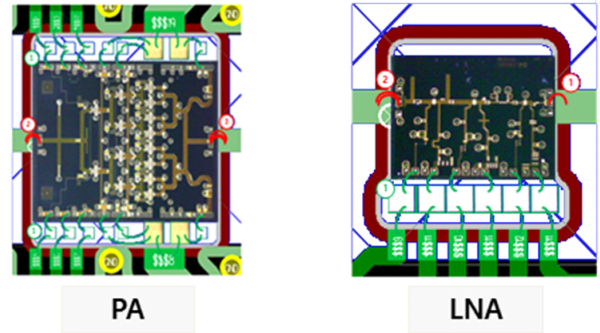


그림 10. PA, LNA 본딩 다이어그램

Fig. 10. Bonding diagram of PA and LNA.

표 7. 본딩 와이어 사양

Table 7. Specifications of bonding wire.

Diameter	Length(RF)	Height(DC)	Height(RF)
25 um	200 um	200 um	100 um

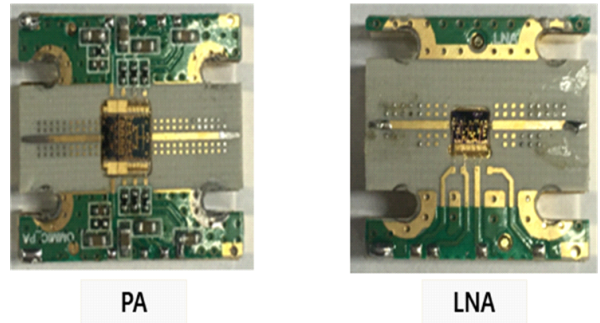


그림 11. 제작된 PA, LNA carrier PCB

Fig. 11. Fabricated carrier PCB.

그림 12와 같이 제작된 Carrier PCB는 엔드런치 커넥터를 사용하여 이득을 측정하였다. 그림 13은 측정된 결과

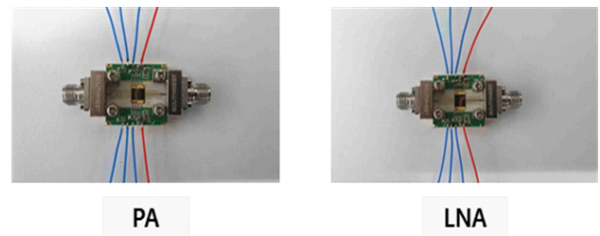
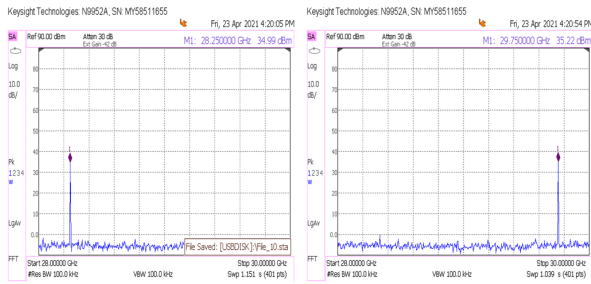
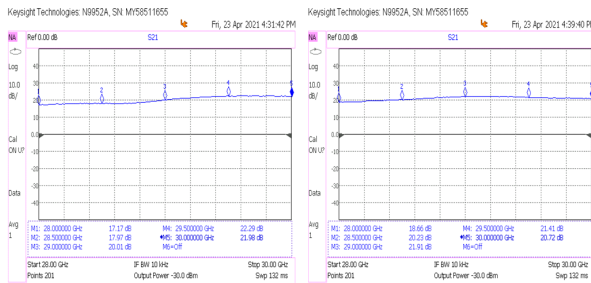


그림 12. 제작된 carrier PCB 시험 형상

Fig. 12. Test picture of carrier PCB.



(a) Carrier PCB 송신 출력  
(a) Tx output power of carrier PCB



(b) Carrier PCB 송신/수신 이득  
(b) Tx and Rx gain of carrier PCB

그림 13. Carrier PCB 측정 데이터  
Fig. 13. Test data of carrier PCB.

표 8. Carrier PCB 시험결과  
Table 8. Test result of carrier PCB.

Items	Test result
PA output power	34.99 dBm
PA gain	18.1 dB Min.
LNA gain	19.6 dB Min.

를 나타내었다.

표 8은 송신출력과 입력 및 출력 단 엔드런치 커넥터 손실 약 1 dB를 보상한 이득 측정결과이다.

#### 4.3 송수신모듈 제작 및 측정

그림 14는 제작된 모듈 형상이다. 송수신모듈의 입력 커넥터는 K-Type 커넥터로 구성되며, 출력 커넥터는 모듈 상단에 위치하며, 도파관(WR-28) 구조로 제작하였다. 송수신모듈 상단에 도파관 형태의 최종단 필터를 장착하여 손실을 최소화하고, 소형화할 수 있어 송수신시스템

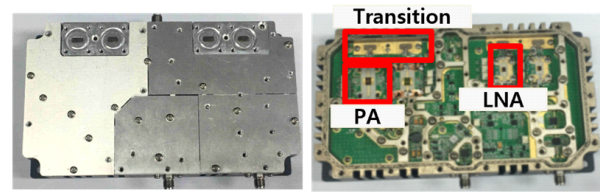


그림 14. 제작된 송수신모듈  
Fig. 14. Fabricated Ka band transceiver module.

전단부 소형화에 매우 효율적인 구조이다. 모듈 내부는 송신 및 수신 경로 신호 증폭, 이득 제어를 위한 송수신부와 PA/LNA Carrier부 그리고 전이부로 구분하여 제작하였다. 제작된 송수신모듈의 크기는 150 mm × 87 mm이며, 프로브 구조 전이길이는 약 4 mm로 ridge 또는 antipodal로 구현했을 경우, 전이길이가 약 10 mm로 예상되므로<sup>[9]~[11]</sup> 전이길이 기준으로 약 60 %, 송수신모듈의 크기를 기준으로는 약 10 % 정도 모듈 크기가 소형화 되었다.

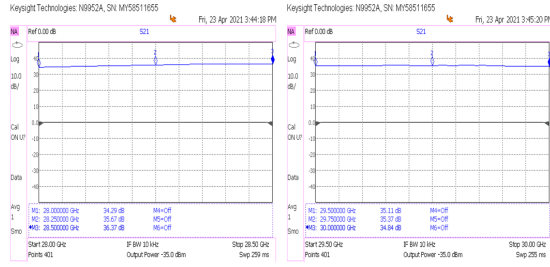
제작된 송수신모듈의 입력단은 K-Type 커넥터이며, 출력단은 WR-28 도파관 구조이므로 모듈 측정은 출력단에 SAGE millimeter사의 WR-28 어댑터를 사용하여 측정하였다. 그림 15는 네트워크분석기와 파형분석기로 모듈을 측정한 결과이며, 측정 결과, 설계 목표성능을 모두 만족함을 확인하였다.

표 9에는 송수신모듈의 설계 목표와 시험 결과를 정리하였으며, 제작된 송수신모듈의 시험 결과 설계 목표를 모두 만족함을 확인하였다.

#### V. 결 론

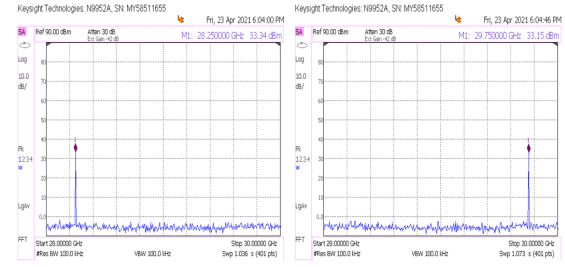
본 논문에서는 대용량의 무선전송장비에 적용할 수 있는 도파관 전이구조를 갖는 소형화된 Ka 대역 송수신모듈을 제안하였다. 송수신모듈의 송신부는 최대 2W 출력과 35 dB 이득을 가지며, 수신부는 20 dB 이득을 갖는다. 제작된 송수신모듈의 측정 결과, 송신 출력 33.1 dBm 이상, 송신 이득 34.2 dB~36.3 dB, 수신 이득 18.2 dB~19.8 dB, 반사손실 -10 dB 이하의 성능을 확인하였다. 제작된 송수신모듈의 크기는 150 mm × 87 mm이며, 프로브 전이 길이는 약 4 mm이다.

제안된 송수신모듈은 모듈의 상단에 직접 출력단 필터를 장착할 수 있도록 도파관과 기관이 수직구조인 프로



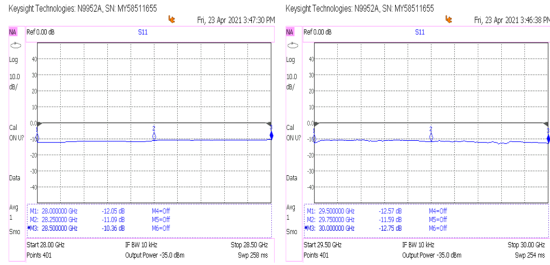
(a) 송수신모듈 송신 이득

(a) Tx gain of transceiver module



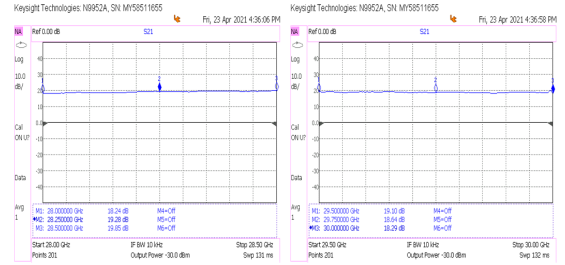
(b) 송수신모듈 송신 출력

(b) Tx output power of transceiver module



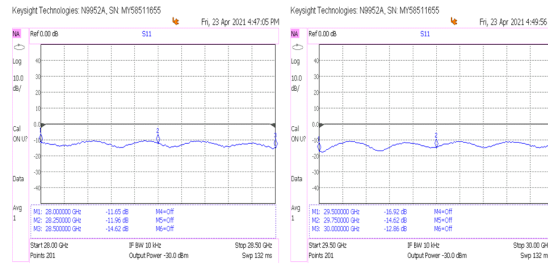
(c) 송수신모듈 송신 반사손실

(c) Tx return loss of transceiver module



(d) 송수신모듈 수신 이득

(d) Rx gain of transceiver module



(e) 송수신모듈 수신 반사손실

(e) Rx return loss of transceiver module.

그림 15. 송수신모듈 측정 데이터

Fig. 15. Test result of Ka band transceiver module.

표 9. 송수신모듈 시험결과

Table 9. Test result of transceiver module.

Items	Specifications	Test result
Freq. range	28.0~30.0 GHz	28.0~30.0 GHz
Tx output	33 dBm $\pm$ 2 dB	33.1~33.3 dBm
Tx gain	35 dB $\pm$ 2 dB	34.2~36.3 dB
Rx gain	20 dB $\pm$ 2 dB	18.2~19.8 dB
Tx RL	-10 dB Min.	-10.36 dB Min.
Rx RL	-10 dB Min.	-11.65 dB Min.

브 구조의 전이구조를 적용하여 ridge 또는 antipodal 전이 구조를 적용했을 경우나 도파관을 사용하지 않고 K-Type 커넥터를 사용했을 경우보다 소형화되었으며, 무선전송 장비의 전단부 소형화에 구조적으로 최적화되었다. 따라서 본 논문에서 제안된 구조를 토대로 Ka 대역의 대용량 무선전송장비의 소형화가 가능하게 될 것으로 기대한다.

## References

[1] J. H. Ha, J. Y. Moon, K. W. Lee, B. C. Nam, and S.



- W. Yun, "A design of X-band tile type active transmit/receive module," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 21, no. 12, pp. 1467-1474, Dec. 2010.
- [2] H. S. Oh, K. W. Yeom, M. K. Chong, H. G. Na, S. J. Lee, and K. W. Lee, et al., "A design and fabrication of a compact Ka band transmit/receive module using a Quad-Pack," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 22, no. 3, pp. 389-398, Mar. 2011.
- [3] H. J. Kwon, S. J. Lee, and H. J. Jang, "Design and fabrication of the Ka-band waveguide to microstrip transition using probe structure," *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 45, no. 7, pp. 67-71, 2008.
- [4] I. H. Shin, C. Y. Kim, S. J. Lee, J. H. Joo, M. H. Lee, and D. W. Kim, "Design and fabrication of Ka-band microstrip to waveguide transitions using E-plane probes," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 23, no. 1, pp. 76-84, Jan. 2012.
- [5] D. W. Kim, S. W. Paek, J. H. Lee, K. I. Jeon, C. R. Lim, and K. W. Chung, et al., "Design and fabrication of 77 GHz HEMT mixer modules using experimentally optimized antipodal finline transition," in *2000 Asia-Pacific Microwave Conference*, Oct. 2000, pp. 189-192.
- [6] S. Jing, L. Fa-guo, H. Li-hua, S. Xiao-ying, and Z. Yan-qiu, "Waveguide-to-microstrip antipodal fin line transition at W Band," in *2013 Third International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control*, Sep. 2013, pp. 510-513.
- [7] H. W. Yao, A. Abdelmonem, J. F. Liang, and K. A. Zaki, "A full wave analysis of microstrip-to-waveguide transition," in *1994 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, May. 1994, pp. 213-216.
- [8] H. Wi, S. S. Yang, "Design and fabrication of low loss millimeter-wave band reduced height waveguide to microstrip transition," *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 56, no. 2, pp. 87-92, 2019.
- [9] M. Simone, A. Fanti, G. Valente, G. Montisci, R. Ghiani, and G. Mazzarella, "A compact in-line waveguide-to-microstrip transition in the Q-band for radio astronomy applications," *Electronics*, vol. 7, no. 2, p. 24, 2018.
- [10] R. Bai, Y. L. Dong, and J. Xu, "Broadband waveguide-to-microstrip antipodal finline transition without additional resonance preventer," in *2007 International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*, Aug. 2007, pp. 385-388.
- [11] J. Li, L. Li, Y. Qiao, J. Chen, and A. Zhang, "Full Ka band waveguide-to-microstrip inline transition design," *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, vol. 39, no. 8, pp. 714-722, 2018.
- [12] A. Aguayo, "Opportunities for high frequency materials in 5G and the IoT," *Microwave Journal*, vol. 60, no. 1, pp. 88-96, 2017.
- [13] J. Coonrod, B. Rautio, "Comparing microstrip and CPW performance," *Microwave Journal*, vol. 55, no. 7, pp. 74-86, Jul. 2012.

김 중 현 [휴니드테크놀로지스/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-7278-7426>



1997년 2월: 한남대학교 정보통신공학과 (공학사)  
2021년 8월: 아주대학교 정보전자전공 (공학석사)  
2012년 6월~현재: (주)휴니드테크놀로지스 수석연구원  
[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파

통신시스템

김 성 택 [휴니드테크놀로지스/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-3725-674X>



1993년 2월: 국민대학교 전자공학과 (공학사)  
2011년 4월~현재: (주)휴니드테크놀로지스 수석연구원  
[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 통신시스템

박 천 선 [휴니드테크놀로지스/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-7407-039X>



2009년 2월: 순천향대학교 전기통신시스템공학과 (공학사)  
2009년 2월: 순천향대학교 전기통신시스템공학과 (공학석사)  
2011년 7월~현재: (주)휴니드테크놀로지스 책임연구원  
[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파

고출력증폭기

박 용 배 [아주대학교 전자공학과/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-7095-4614>



1998년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)  
2000년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)  
2003년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)  
2003년 2월~2006년 8월: KT 인프라연구

소 선임연구원

2006년 9월~현재: 아주대학교 전자공학과 교수

[주 관심분야] 전자장 해석, EMI/EMC