

낮은 정재파비와 삽입손실을 갖는 밀리미터파(Ka 밴드) 복합모드 탐색기용 2-축 도파관 로터리 조인트 설계 및 제작

Design and Fabrication of a 2-Axis Waveguide Rotary Joint for a Millimeter-wave (Ka-Band) Multi-Mode Seeker with Low VSWR and Insertion Loss

송성찬¹ · 유성룡^{*2} · 임주현³ · 정용인³

Sung-Chan Song¹ · Sung-Ryong Yoo^{*2} · Ju-Hyun Lim³ · Yong-In Jung³

요 약

본 논문에서는 밀리미터파 탐색기에 적용 가능한 Ka-대역 도파관 로터리조인트를 설계 및 제작하였다. 제안된 로터리 조인트는 낮은 정재파 비와 저손실 특성을 유지하며, 방위각과 고각 회전이 가능하도록 하는 두 개의 회전축으로 설계되어 있다. 또한 구형 도파관과 원형 도파관 사이에 전파 모드를 정합하기 위한 리지 도파관 형태의 모드 변환기와 $\lambda/4$ 길이의 초크 구조로 로터리 조인트를 설계하였다. 제작된 로터리 조인트의 성능은 회로망 분석기와 고출력 송신기를 이용하여 확인하였으며, 진동/충격 시험을 통해 신뢰성 검사를 수행하였다. 그 결과, 중심 주파수(F_c) \pm 500 MHz의 대역에서 최대 정재파비 1.19 : 1 이하, 삽입손실 0.80 dB 이하의 우수한 특성을 갖는 것을 확인하였다.

Abstract

In this study, a Ka-band waveguide rotary joint that can be applied to a millimeter-wave seeker is designed and fabricated. The proposed rotary joint maintains a low standing-wave ratio and low-loss characteristics, and has two rotary axes designed to enable azimuth and elevation rotation. The rotary joint is designed as a ridge-waveguide-type mode converter and a $\lambda/4$ choke structure to match the electromagnetic wave propagation mode between the spherical and circular waveguides. A performance test using a network analyzer and a high-power transmitter to assess vibration and shock were conducted. Results showed that the rotary joint had a very low standing-wave ratio of less than the maximum of 1.19:1 and an insertion loss of less than 0.80 dB at $F_c \pm 500$ MHz.

Key words: Millimeter Wave Seeker, Ka-Band, Rotary Joint, Chock, Mode Transformer.

I. 서 론

Ka-대역에서 동작되는 소형 레이더 시스템인 밀리미터 파 탐색기는 각도 및 거리방향으로 고해상도 신호획득이

한화시스템(Hanwha Systems)

*(주)엘트로닉스(ELTRONIX)

1: 수석연구원, 2: 책임연구원, 3: 전문연구원

· Manuscript received December 20, 2018 ; Revised January 7, 2019 ; Accepted February 19, 2019. (ID No. 20181220-129)

· Corresponding Author: Sung-Chan Song (e-mail: sungchan.song@hanwha.com)

가능하여 고정밀 유도무기체계가 적용된다^[1]. 하지만 마이크로파 대비 밀리미터파 대역에서 송신출력을 높이는 데 하드웨어 한계가 있고, 상대적으로 높은 대기 감쇄율을 갖는 주파수 특성으로 인해 레이다 탐색기 최대탐지거리 성능이 제한된다. 이를 만회하기 위해 회전하는 안테나에 고풍력 송신신호를 전달하는 로터리조인트는 송신기 및 안테나와의 임피던스 정합을 위해 낮은 정재파비(voltage standing wave ratio: VSWR)와 삽입손실(insertion loss)이 요구된다.

도파관 로터리 조인트는 크게 고정(body)부, 회전(rotating)부 및 입력/출력 도파관으로 구성되며, 보통 두 개의 구형 도파관 사이에 원형 도파관을 이용하여 구현한다. 구형 도파관과 원형 도파관의 연결부에 회전체를 설계하여 물리적으로 접촉이 없이 회전이 가능토록 하고, 전기적으로는 연결이 되어있도록 하는 초크 구조를 설계한다^[2]. 초크 구조는 절단면에서 무한 임피던스를 갖도록 하여 전자기파가 누설되지 않고 잘 전달되도록 하는 역할을 한다. 또, 구형 도파관의 기본 모드인 TE₁₀ 모드를 원형 도파관에서 발생하는 모드인 TE₀₁, TM₀₁ 또는 TE₁₁ 모드와 동축선에서 발생하는 모드인 TEM 모드와 정합을 시키기 위해 모드 변환기를 설계한다^{[3],[4]}.

본 논문에서는 밀리미터파 탐색기에 적용 가능한 2개의 축, 방위각, 고각이 포함된 Ka-대역 도파관 로터리 조인트의 설계에 중점을 두었으며, 시스템에서 요구하는 낮은 정재파비와 삽입 손실을 갖도록 설계하였다.

II. 본 론

2-1 2축 로터리 조인트 설계

설계된 Ka-대역 밀리미터파 2축 도파관 로터리 조인트의 형상은 그림 1과 같으며, 각 축이 독립적으로 회전할 수 있도록 하는 회전 조립체(rotation assembly)를 포함하고 있다. 입력 단(Port 1)에서 입력되는 신호는 출력 단(Port 2)으로 출력이 되는데, WR-28 표준도파관 7.11 mm (가로)×3.56 mm(세로)의 크기로 설계하였으며, 상호간의 전달 특성을 확보하기 위해 Port 1과 Port 2의 정합이 필요하다. 이러한 정합은 모드 정합과 임피던스 정합 두 가지로 구분하며, 모드 정합을 위한 모드 변환기와 임피던스

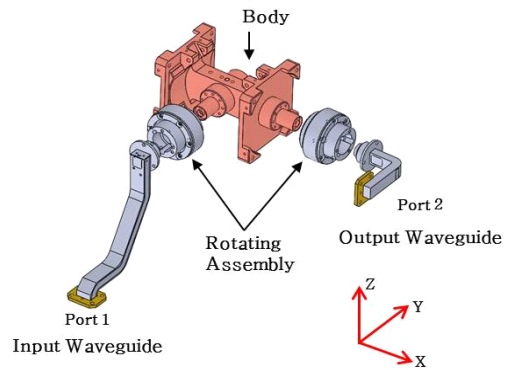


그림 1. 도파관 로터리 조인트 설계 형상
Fig. 1. Design drawing of the waveguide rotary joint.

정합을 위한 임피던스 조절부가 필요하다.

임피던스 정합을 위해 몸체 내부에 동축선과 유사 구조로 설계하여 50Ω의 임피던스를 갖도록 설계하고, 도파관에서 190~750Ω 사이로 발생하는 임피던스를 낮추기 위해 리지 도파관을 설계하였다.

도파관의 기본 모드에서 발생하는 임피던스는 식 (1)을 이용하여 구할 수 있으며^[5], 이 식은 리지 도파관의 기본 모드 임피던스를 구하는데 사용될 수 있다.

$$Z_0 = \frac{Z_{0\infty}}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} \quad (1)$$

다층의 리지 도파관을 설계하여 다단으로 임피던스를 조정하여 정합이 용이하도록 설계하였다.

모드 변환기는 리지 도파관의 특성을 이용하여 도파관 내부 구조의 변형과 몸체 내부 구조와 연결부 등의 조정을 통해 관내 파장(λ_g)을 기준보다 길게 하여 기본 모드의 차단 주파수를 낮춰 대역폭을 증가시키도록 하고, 구형 도파관의 전파모드인 TE₀₁ 모드를 원형 도파관의 전파모드인 TM₀₁ 모드로 변환하는 구조와 달리^[6] 도파관의 TE₀₁ 모드와 동축선의 TEM 모드를 정합하도록 설계하였다.

회전 운동을 위하여 분리된 회전 조립체 부분은 전자파의 누설과 반사파의 간섭이 없도록 초크 구조를 설계하였으며, 조립 및 가공 공차에 따라 발생하는 영향이 없도록 횡방향 초크 구조를 설계하였다. 최종 설계는 고주파 전자장 해석도구인 Ansoft社 HFSS를 이용하였고, 로

터리 조인트 재질(알루미늄, 은도금)의 도전을 특성을 반영하여 구조 최적화 설계를 통해 정재파 비와 삽입손실 목표 성능을 달성할 수 있는 최대 ± 0.02 mm 이하의 기계 가공 공차 목표를 도출하였다.

2-2 도파관 로터리 조인트 제작 및 시험

그림 2는 제작된 도파관 로터리 조인트와 Agilent 社의 N5230C의 회로망 분석기, 전력계, 고전력 더미 로드, 시험치구, 도파관 방향성결합기, 고출력 송신기를 이용하여 저 전력(0.1 mW, CW)과 고 전력(500 W, Peak)을 시험하는 구성이다. 제작된 로터리 조인트의 사이즈는 128 mm (가로)×125 mm(세로)이다.

그림 3과 같이 제작된 로터리 조인트의 저 전력 측정 결과는 시뮬레이션 결과와 유사한 특성을 갖는 것을 확인할 수 있으며, 시뮬레이션과 측정 결과의 차이는 조립 공차 등에서 발생하는 손실에 기인한 결과로 판단한다. 특히 기존 제작된 로터리조인트^[6]보다 우수한 성능을 갖는 것을 표 1의 성능 비교를 통해 확인하였다.

2-3 진동/충격 환경시험

제작된 로터리 조인트 구조가 유도탄 탐색기 운용환경에 적합한지를 확인하기 위해 진동과 충격에 대한 환경시험을 진행하였다. 환경시험은 진동/충격 각 축별로 시험 전·후 회로망 분석기를 통해 삽입손실과 정재파 비를 확인하는 것으로 진행하였으며, 진동/충격 환경시험에 대

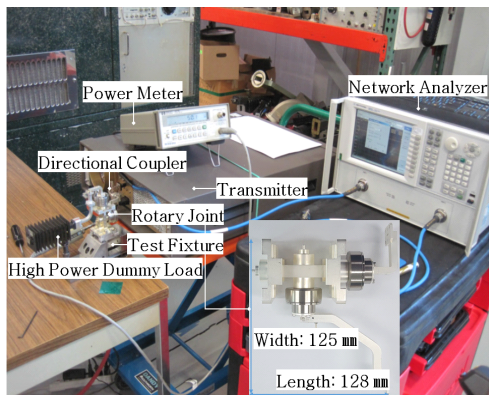


그림 2. 저 전력 및 고 전력 시험 구성
Fig. 2. Test configuration of low and high power.

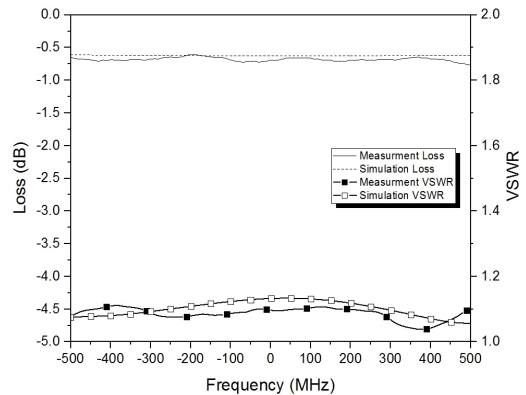


그림 3. 시뮬레이션 및 측정 결과
Fig. 3. Simulated and measured results.

표 1. 제안된 로터리 조인트 측정 결과 비교

Table 1. Comparison of proposed rotary joint with reference paper.

Div.	Low power test		High power test
	VSWR	Insertion loss	Insertion loss
Ref. [6] rotary joint	1.4 : 1	1.84 dB	1.70 dB
Proposed rotary joint	1.15 : 1	0.8 dB	0.78 dB

한 조건은 표 2와 같다.

제작된 로터리 조인트는 밀리미터파 탐색기 회전축과 동일한 구조를 갖는 시험치구에 조립되어 진동/충격 시험기 위에 장착된다. 그림 4는 실제 진동/충격 시험 구성을 보여준다. 각 축당 진동/충격 인가 후 측정된 결과는 그림 5에 나타냈으며, 상세 측정 결과는 표 3에 정리하였다. 진동/충격 시험 결과, 모두 최대 1.19 : 1 이하의 정재파 비와 0.80 dB 이하의 삽입 손실을 유지하였고, 환경시험 중

표 2. 진동 및 충격 시험 조건

Table 2. Test conditions for vibration and shock.

Test item	Test condition
Vibration	0.1 g ² /Hz @20~2,000 Hz, each axis 120 sec
Shock I	40 G, 11 ms, Sawtooth, each axis 3 times
Shock II	120 G, 1~3ms, Sawtooth, each axis 5 times

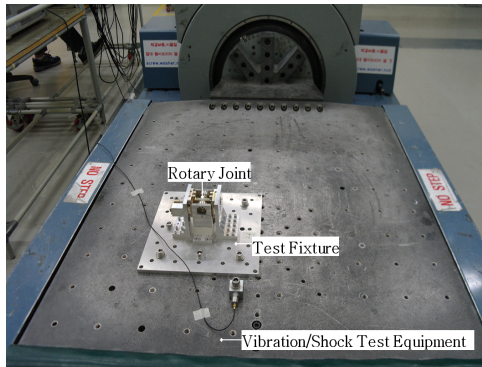


그림 4. 진동 및 충격 시험 구성
Fig. 4. Test configuration of vibration and shock.

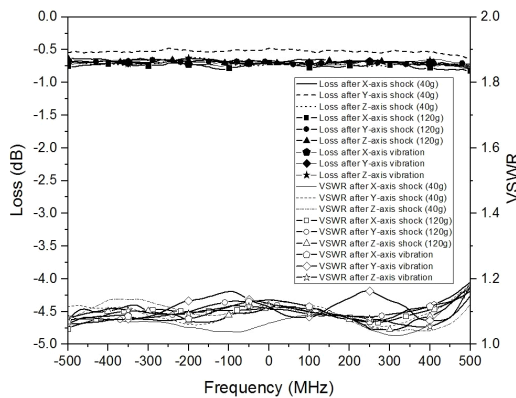


그림 5. 진동 및 충격 시험 측정 결과
Fig. 5. Measured results for vibration and shock test.

표 3. 진동 및 충격 시험 측정 결과 요약
Table 3. Summary of measured results.

Div.		X axis	Y axis	Z axis
Insertion loss	Vibration	-0.79 dB	0.78 dB	-0.75 dB
	Shock I	-0.76 dB	-0.62 dB	-0.79 dB
	Shock II	-0.80 dB	-0.76 dB	-0.77 dB
VSWR	Vibration	1.17 : 1	1.18 : 1	1.15 : 1
	Shock I	1.18 : 1	1.18 : 1	1.14 : 1
	Shock II	1.17 : 1	1.19 : 1	1.17 : 1

료 후 측정 결과는 환경시험 전 또는 성능시험 결과와 비슷하여, 저 손실 Ka-대역 고전력 전송선로 인터페이스의 신뢰성을 입증하였다.

III. 결 론

본 논문에서는 방위각과 고각 회전이 가능토록 2 축 Ka-대역 로터리 조인트를 설계하여 제작 및 측정하였다. 측정결과는 $F_{c \pm 500}$ MHz 범위에서 최대 1.19 : 1 이하의 정재파비와 0.80 dB 이하의 삽입손실을 나타냈고, 고 전력 시험과 유도탄 탐색기 운용환경 하에서 진동과 충격 시험을 수행하여 로터리 조인트 신뢰성을 입증하였다. 본 논문에서 확보된 우수한 정재파 비 성능과 삽입손실은 로터리 조인트 입력 단과 송신기 출력 단 임피던스 부 정합에 의한 송신기 보호용 아이솔레이터를 필요 없게 만들어 추가 송신 선로손실을 배제하고, 송신기의 고출력 신호를 회전하는 안테나에 저 손실로 전송 가능하게 하여 밀리미터파 탐색기 최대 탐지거리 성능 향상에 기여한다.

References

- [1] MBDA-systems, *Comparison B1 BINT Infographics*. Available: <https://www.mbda-systems.com/wp-content/uploads/2017/01/2017-01-Comparison-B1-BINT-Infographics.pdf>.
- [2] H. E. King, "Broad-band coaxial choke coupling design," *IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 8, no. 2, pp. 132-135, Mar. 1960.
- [3] A. Morini, "Design of a dual-band rotary joint operating in X- and Ka-bands," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 59, no. 6, pp. 1461-1467, Jun. 2011.
- [4] D. G. de Mesquita, A. G. Bailey, "A symmetrically excited microwave rotary joint," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 18, no. 9, pp. 654-656, Sep. 1970.
- [5] P. B. Mital, "Broadband waveguide feed for parabolic reflectors," *Active and Passive Electronic Components*, vol. 17, no. 1, pp. 9-19, Jan. 1994.
- [6] 정채현, 성종현, 백종균, 이국주, 박창현, 권준범, "밀리미터파대역(Ka-대역) 소형 레이더용 고 전력 저 손실 2축 도파관 로터리 조인트 연구," 한국인터넷방송통신학회논문지, 18(1), pp. 91-96, 2018년 2월.