

원통형 포스트를 갖는 정사각 도파관-동축 커넥터 변환부 설계

박영규*, 민재용**

Design of a Square Waveguide-to-Coaxial Connector Transition with a Cylindrical Post

Young-Kyu Park*, Jae-Yong Min**

요약

본 논문에서는 정사각 형태의 도파관을 출력 포트에 갖는 안테나, 직교모드변환기, 편파기 등의 성능을 측정하기 위한 정사각 도파관-동축 커넥터 변환부를 제안하였다. 제안된 도파관 변환부는 자기장 방향으로 동일한 폭을 갖고 전기장 방향으로는 계단형 구조를 갖는다. 도파관 변환부는 정사각 도파관, 도파관 연결부 및 도파관-동축 커넥터 변환부로 구성된다. 도파관-동축 커넥터 변환부의 길이와 높이는 저반사 특성과 고차모드 억압 상태를 얻을 수 있도록 결정되었다. 도파관 연결부의 높이와 길이는 반사와 고차 모드 전파를 충분히 줄일 수 있도록 결정되었다. 동축 커넥터의 내심 종단에 원통형 포스트를 삽입하여 광대역 특성을 얻었다. 최적 설계된 도파관 변환부는 밀링 가공으로 제작하였고 back-to-back 방법으로 측정하였다. 제작된 안테나는 주파수 $0.773f_0 - 1.215f_0$ 범위에서 -20 dB 이하의 반사계수와 $0.796f_0 - 1.298f_0$ 에서 -0.3 dB 이상의 투과 계수를 갖는다.

Abstract

This paper presents a square waveguide to coaxial connector transition for measuring the antennas, orthogonal mode transducers, and waveguide polarizers having square waveguide ports. It has the same widths in the H -plane and the step structures in the E -plane. The waveguide transition consists of a square waveguide, a waveguide junction and a waveguide-to-coaxial connector. The lengths and heights of the waveguide-to-coaxial connector are determined to acquire the low-reflection and sufficient suppressions of the higher modes performances. Each waveguide junction has a length and a height for sufficiently reducing reflections and higher mode propagations. The broadband performances of the transition are acquired by employing a cylindrical post on the center conductor of the coaxial connector. The optimally designed transition is fabricated with the milling processes and is measured by employing the back-to-back method. It has a reflection coefficients of less than -20 dB over $0.773f_0 - 1.215f_0$ and a transmission coefficient of greater than -0.3 dB over $0.796f_0 - 1.298f_0$.

Keywords

waveguide transition, coaxial connector, cylindrical post, low reflection, higher mode suppression

* 한화시스템 선임연구원
 - ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0410-191X>
 ** KIPCO우주항공 수석연구원(교신저자)
 - ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8711-8110>

• Received: Nov. 21, 2024, Revised: Jan. 17, 2025, Accepted: Jan. 20, 2025
 • Corresponding Author: Jae-Yong Min
 Dept. of KIPCO 145, Gasan digital 1-ro, Geumcheon-gu, Seoul, Republic of Korea
 Tel.: +82-70-5038-3953, Email: jymin@kipcokorea.com

1. 서 론

직교모드변환기, 도파관 편파기, 다이플렉서 등의 부품은 원형 혹은 사각 형태의 도파관 포트 구성된다[1]-[3]. 최종 포트가 임의의 도파관으로 중단되는 경우 별도의 도파관-동축커넥터 변환부가 요구된다[4][5].

대표적인 도파관-동축커넥터 변환부의 예가 정규 도파관 어댑터이다[6]. 흔히 도파관 내부에 모노폴 형태의 동축 커넥터가 연결되며 광대역 특성을 위하여 인쇄형 다이폴 구조, 계단형 변환 구조 등이 적용된다[7][8]. 이와 같은 도파관 변환부는 도파관 형태에 따라 원형 도파관-동축 커넥터 변환부[9], 릿지 도파관-동축 커넥터 변환부[10] 등이 있다. 도파관 변환부의 설계에서는 저반사/저손실 특성이 요구될 뿐만 아니라 동작 주파수 범위 내에서 고차 모드가 충분히 억압되어야 한다[11][12].

본 논문에서는 정사각 도파관-동축 커넥터 변환부를 설계하였다. 제안된 도파관 변환부는 사각 도파관의 광벽 길이가 3단 계단을 통해 줄어들면서 동축 커넥터로 연결되는 구조이다. 제안된 도파관 변환부의 설계에는 변수 조절법을 이용하였다. 최종 도파관 변환부는 2개를 제작하여 back-to-back 방식으로 측정하였다. 이와 같은 과정을 통하여 제안된 구조의 성능을 확인하였다.

II. 도파관 변환부 설계

2.1 도파관 변환부 구조

그림 1은 본 논문에서 제안한 정사각 도파관-동축 커넥터 변환부의 모습이다. 전체 구조는 3개의 영역으로 나누어진다. 영역 1은 사각 도파관에서 동축 커넥터로 변환되는 부분이고 마지막 영역 3은 직선형 정사각 도파관만 존재한다. 영역 2는 도파관 연결부로 전체 구조의 광대역화 및 영역 1과 영역 3 사이의 임피던스 정합 역할을 한다. 영역 1에 있는 동축 커넥터의 내심 중단에는 원통 포스트를 연결하여 제안된 정사각 도파관-동축 커넥터 변환부를 광대역화 하였다.

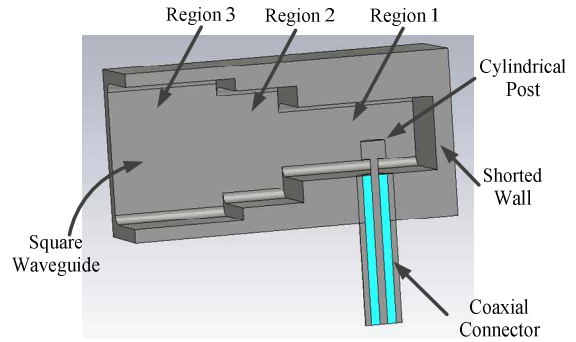


그림 1. 정사각 도파관-동축 커넥터 구조
Fig. 1. Structure of a square waveguide-to-coaxial connector

그림 2는 제안된 도파관 변환부의 설계 변수이다. 도파관이 시작되는 영역 3은 광벽 길이가 a 인 정사각 구조를 갖고 동축선 변환부와 연결된다. 각 영역의 모서리에는 기계 밀링 가공을 고려하여 반경 R_c 를 반영하였다. 제안된 구조는 상용 소프트웨어인 CST사의 MicrowaveStudio™을 이용하여 최적 설계하였다. 본 논문에서는 주요 설계 치수에 대한 변수 조절법을 제시하고 각각의 역할을 설명하였다. 본 논문의 데이터는 도파관 변환부의 동작 범위 내 중심 주파수 f_0 로 정규화하여 제시한다.

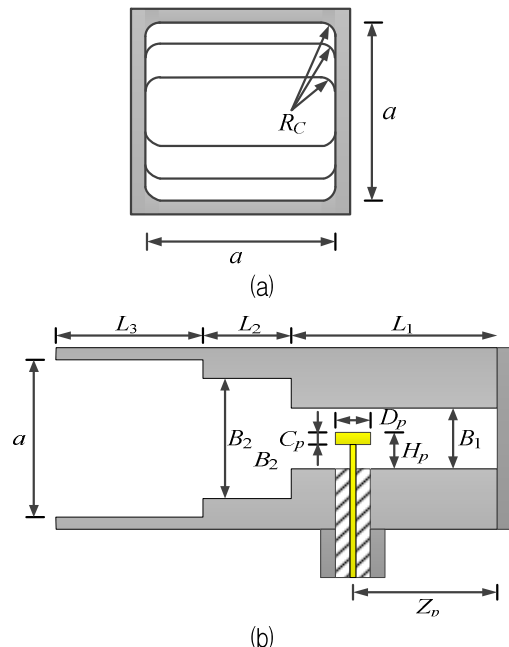


그림 2. 정사각 도파관-동축 커넥터 설계 변수
(a) 정면 모습 (b) 측면 모습

Fig. 2. Design parameters of the square waveguide-to-coaxial connector (a) Front View (b) Side view

그림 3은 동축 커넥터가 연결된 영역 1의 길이 L_1 의 변화에 따른 반사계수와 TM_{11} 모드의 억압 특성이다. 길이 L_1 이 증가함에 따라 도파관 변환부의 동작 주파수가 낮아짐을 알 수 있다. 또한 길이 L_1 이 $0.93a$ 이하인 경우 이중 공진 효과에 의해 -20dB 반사계수 대역폭이 줄어들음을 확인하였다. 영역 1의 길이 L_1 이 $0.974a$ 인 경우 -20dB 이하의 반사계수 대역폭은 40% 이상이고 주파수 $1.2f_0$ 보다 낮은 주파수 범위에서 고차모드 TM_{11} 가 20dB 이상 억압되는 것을 확인하였다. 고차모드 TE_{11} 모드는 주파수 $1.328f_0$ 이하에서 -20 dB 이하로 억압된다.

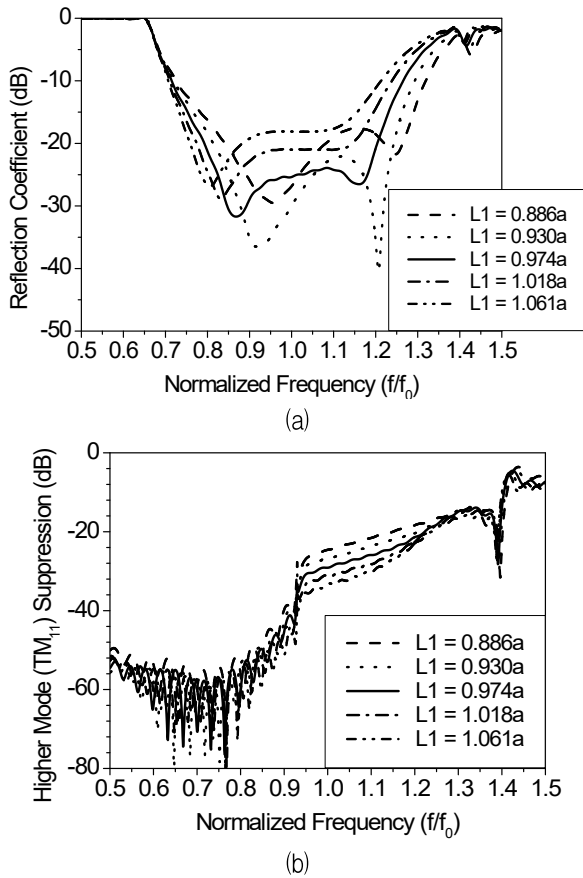


그림 3. 길이 L_1 변화에 따른 도파관 변환부 성능
(a) 반사계수, (b) TM_{11} 모드 억압 특성
Fig. 3. Performances of the waveguide transition versus a length L_1
(a) Reflection coefficient, (b) Suppression of the TM_{11} mode

그림 4는 높이 B_1 의 변화에 따른 도파관 변환부의 성능이다. 영역 1의 높이 B_1 이 증가함에 따라 높은 주파수 대역에서 임피던스 정합 특성이 개선되면서 반사계수 대역폭이 증가된다. 반면에 고차모드

성분은 높이 B_1 이 증가할수록 증가한다. 주파수 $1.2f_0$ 이하의 동작 대역에서 고차모드를 -20 dB 이하로 억압시키기 위해서는 높이 B_1 은 $0.535a$ 이하의 값을 가져야 한다. 영역 1의 높이(B_1)가 $0.518a$ 인 경우 반사계수 대역폭이 가장 넓고 TM_{11} 및 TE_{11} 모드가 모두 -20 dB 이하를 갖는다.

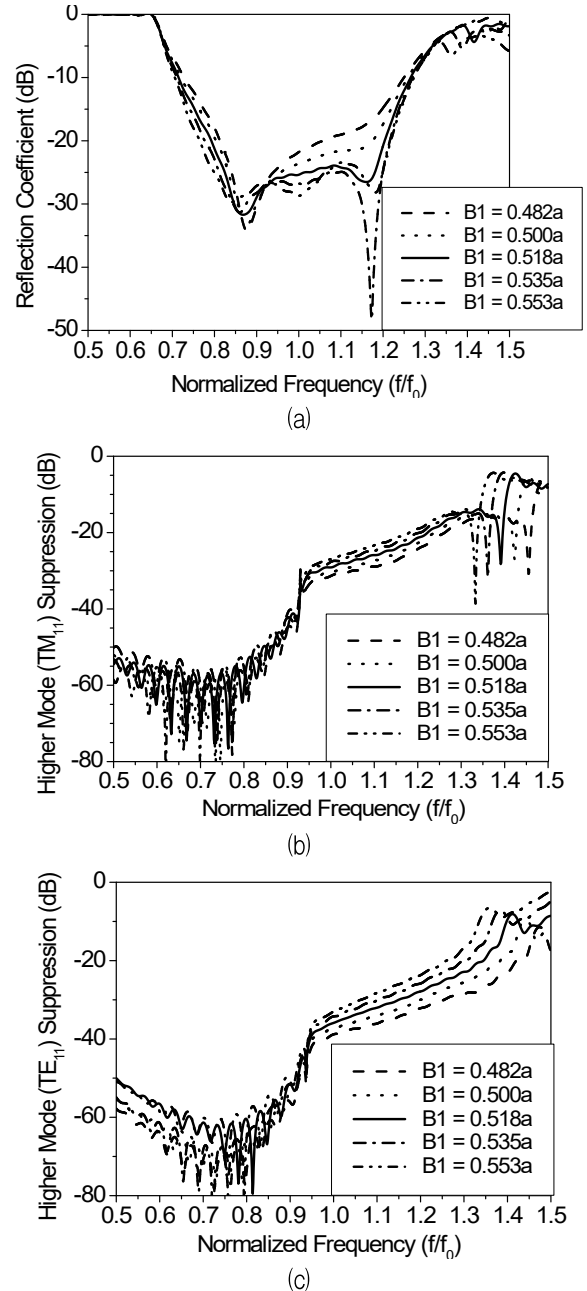
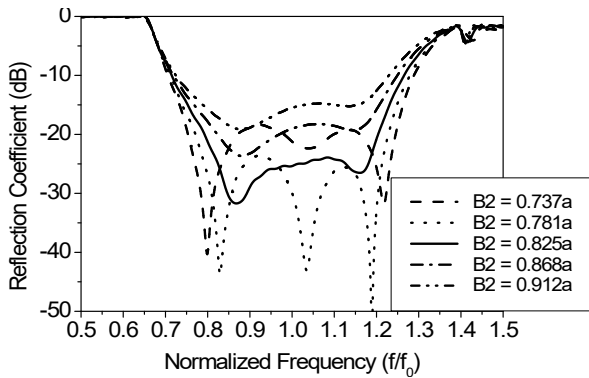
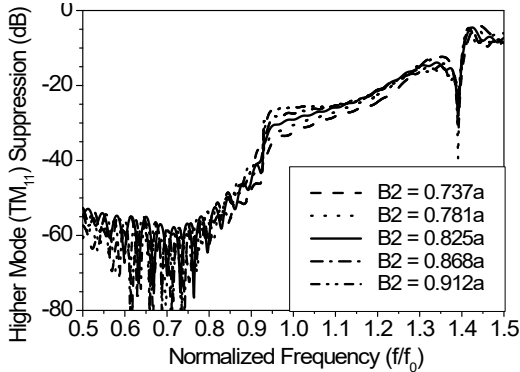


그림 4. 높이 B_1 변화에 따른 도파관 변환부 성능
(a) 반사계수, (b) TM_{11} 모드 억압, (c) TE_{11} 모드 억압
Fig. 4. Performances of the waveguide transition versus a height B_1 (a) Reflection coefficient, (b) Suppression of the TM_{11} mode, (c) Suppression of the TE_{11} mode

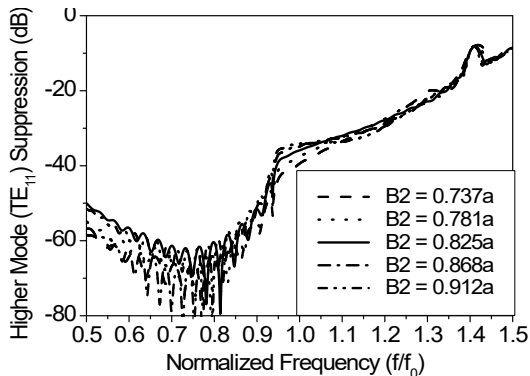
그림 5는 영역 2의 높이 B_2 의 변화에 따른 영향을 분석한 결과이다. 영역 2는 도파관 변환부의 설계에서 임피던스 정합 효과와 동작 대역을 결정짓는다. 높이 B_2 가 변할 경우 임피던스 정합 특성에 많은 영향을 미친다. 높이 B_2 가 증가함에 따라 고차 모드가 많이 발생됨을 알 수 있다. 고차 모드 TM_{11} 은 주파수 $1.212f_0$ 이하에서 -20 dB 이하의 억압 특성을 보이고 TE_{11} 모드는 $1.344f_0$ 이하에서 -20 dB 이하의 억압 특성을 갖는다.



(a)



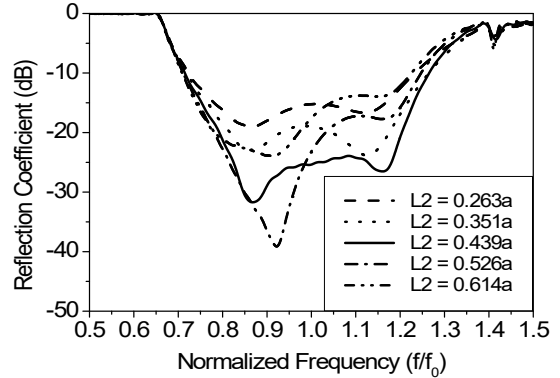
(b)



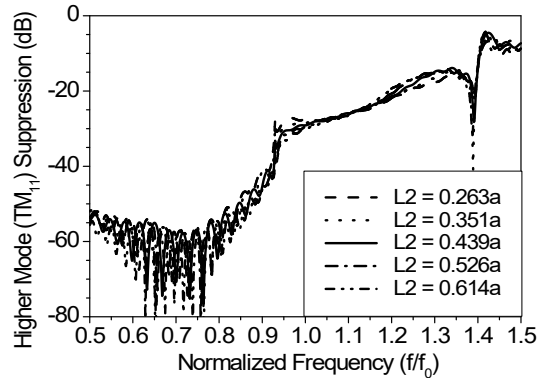
(c)

그림 5. 높이 B_2 변화에 따른 도파관 변환부 성능
(a) 반사계수, (b) TM_{11} 모드 억압, (c) TE_{11} 모드 억압
Fig. 5. Performances of the waveguide transition versus a height B_2 (a) Reflection coefficient, (b) Suppression of the TM_{11} mode, (c) Suppression of the TE_{11} mode

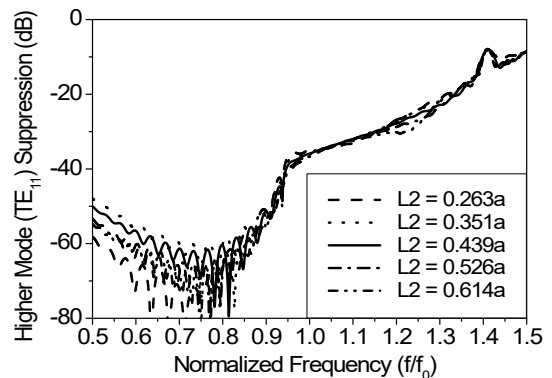
그림 6은 길이 L_2 변화에 따른 반사계수 및 고차 모드 억압 특성이다. 길이 L_2 가 길어질 경우 높은 주파수 영역에서 임피던스 정합이 불량해지면서 동작 대역폭이 줄어들음을 알 수 있다. 또한 최적 길이가 아닌 경우 완벽한 임피던스 정합이 이루어지지 않는다. 길이 L_2 가 증가할 경우 고차 모드 TM_{11} 은 증가되어 -20 dB 보다 높아진다. 고차 모드 TM_{11} 을 충분히 억압하기 위해서는 길이 L_2 는 $0.526a$ 이어야 한다.



(a)



(b)



(c)

그림 6. 길이 L_2 변화에 따른 도파관 변환부 성능
(a) 반사계수, (b) TM_{11} 모드 억압, (c) TE_{11} 모드 억압
Fig. 6. Performances of the waveguide transition versus a length L_2 (a) Reflection coefficient, (b) Suppression of the TM_{11} mode, (c) Suppression of the TE_{11} mode

이 경우 고차모드 TE_{11} 은 주파수 $1.333f_0$ 이하에서 -20 dB 이하의 역압 특성을 갖는다.

다음으로 도파관 변환부의 가공성을 고려하여 각 모서리에 반영된 모서리 반경 R_c 의 영향을 분석하였다. 변환부의 모서리 반경의 효과는 그림 7과 반경 R_c 가 반영된 정사각 도파관 앞에 동일한 크기를 갖고 직각 모서리로 구성된 더미 도파관을 연결한 후 반사계수를 계산하여 확인하였다. 그림 8은 내부 모서리의 반경 R_c 에 따른 반사계수 계산 결과이다. 가공 반경이 $0.5 \sim 2.0$ mm 범위에서 변화하여도 반사계수의 변화는 크게 영향 없음을 알 수 있다. 본 논문에서는 가공성을 고려하여 모서리 반경을 1.5 mm로 하였다.

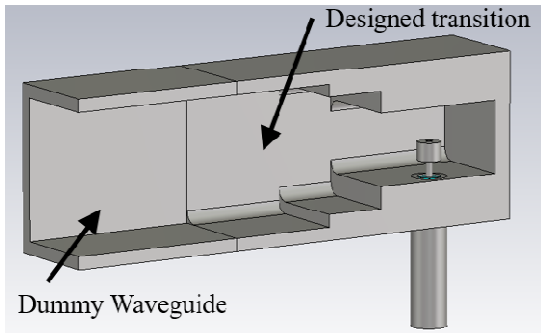


그림 7. 도파관 변환부 내 모서리 반경 모델링 모습
Fig. 7. Modelling view of the corner radius of the designed waveguide transition

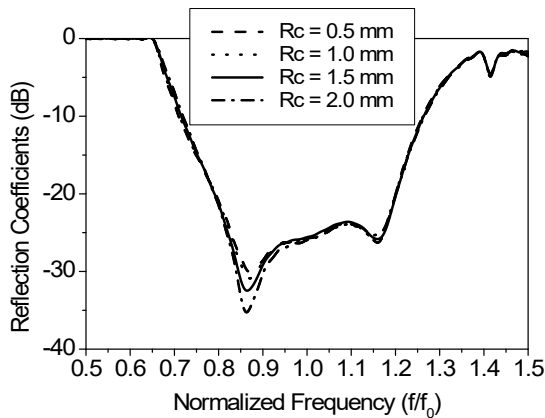


그림 8. 모서리 반경 R_c 에 따른 반사계수
Fig. 8. Reflection coefficients with the variations of the corner radius R_c

마지막으로 동축 커넥터의 내부 도체 종단에 설치된 원통형 포스트 유무에 따른 영향을 계산하였

다. 그림 9는 원형 포스트의 유무에 따른 입력단 임피던스 계산 결과이다. 동축 커넥터의 내부 도체 종단에 원형 포스트를 설치함으로써 저항과 인덕티브 성분이 동시에 증가하여 넓은 범위에서 임피던스 정합을 이루게 된다. 따라서 설계된 도파관 변환부의 동작 대역폭은 원형 포스트의 직경 및 길이를 조정하여 얻을 수 있다.

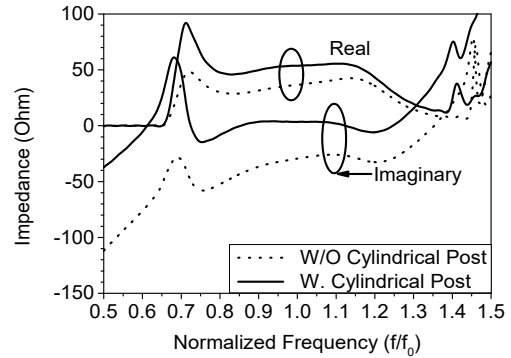


그림 9. 동축 커넥터의 원형 포스트 유무에 따른 입력 임피던스

Fig. 9. Input impedance with and without a cylindrical post of the coaxial connector

이상의 과정을 통해 최종 설계된 정사각 도파관-동축 커넥터의 최종 설계 치수는 표 1과 같다. 도파관 내부의 치수는 도파관 광벽 길이(a)에 대하여 제시하였고 동축 커넥터 치수는 mm 단위로 제시한다. 동축 커넥터의 내심 직경은 1.25 mm이고 유전체 직경은 4.10 mm 이다.

표 1. 설계된 도파관 변환부의 치수

Table 1. Dimensions of the designed waveguide transition

Item	Dimension	Item	Dimension
B_1	$0.518a$	C_p	2.9mm
B_2	$0.825a$	D_p	4.0mm
L_1	$0.974a$	H_p	5.5mm
L_2	$0.439a$	Z_p	$0.474a$
L_3	$0.781a$		

그림 10은 최종 설계된 정사각 도파관 변환부의 고차 모드 역압 특성을 보이고 있다. 고차 모드 TM_{11} 모드 및 TE_{11} 모드는 각각 $1.211f_0$ 와 $1.377f_0$ 이하에서 -20 dB 이하의 역압 특성을 보인다. 이 보다 높은 고차모드 TM_{21} 및 TE_{21} 모드에서는 주파수 $1.5f_0$ 이하에서 -24.2 dB 이하의 역압 특성을 갖는다.

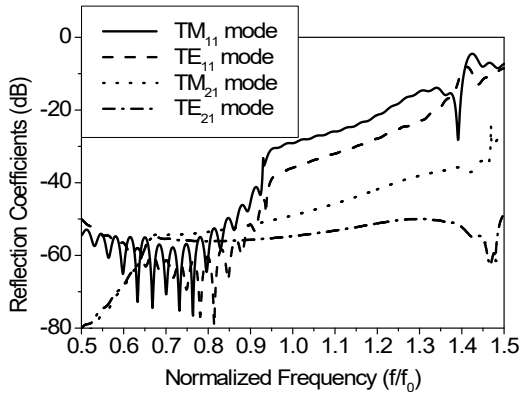


그림 10. 최종 설계된 도파관 변환부의 고차모드 특성
Fig. 10. Performances on the higher modes of the finally designed waveguide transition

이와 같이 광대역에서 고차 모드가 -20 dB 이하의 특성을 갖는 것은 도파관-동축 커넥터 변환 구조가 있는 영역 1을 제외하고 모두 전기장 방향으로 대칭적인 구조를 갖기 때문이다.

III. 도파관 변환부 제작 및 측정

이상과 같이 설계된 도파관 변환부는 정밀 밀링 가공 방식을 이용하여 제작하였다. 그림 11은 제작된 도파관 변환부의 모습이다. 전체 영역 1 ~ 3으로 구성된 도파관 부분을 가공하고 단락 벽을 별도 가공한 후 볼트로 조립하였다. 동축 커넥터는 종단에 원형 포스트를 갖는 프로브를 별도 제작하여 부착하였다.



그림 11. 제작된 정사각 도파관-동축 커넥터 변환부
Fig. 11. Fabricated square waveguide-to-coaxial transition

도파관 변환부의 전기적 성능은 2개의 변환부를 제작하여 back-to-back 방식으로 측정하였다. 그림 12은 도파관 변환부의 전기적 성능 측정 모습이다. 제작된 도파관 변환부의 전기적 성능은 back-to-back의 전송선 등가 회로로부터 역 계산하여 얻었다.



그림 12. 제작된 도파관 변환부의 성능 측정
Fig. 12. Performance measurements of the fabricated waveguide transition.

그림 13는 제작된 변환부의 반사계수 및 투과 계수 측정 결과이다. 제작된 도파관 변환부는 $0.773f_0$ - $1.215f_0$ 범위에서 -20 dB 이하의 반사계수 특성을 가지며 측정 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

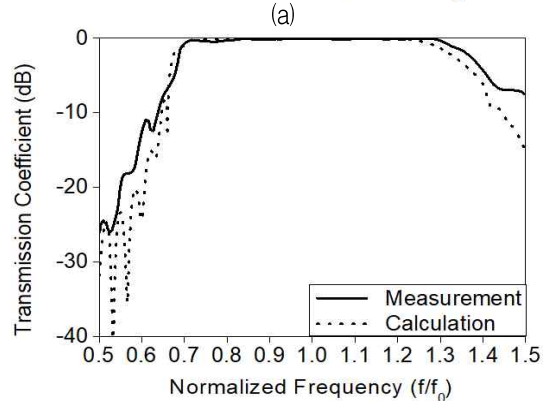
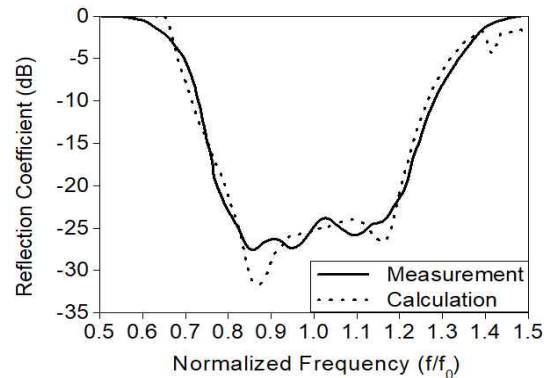


그림 13. 도파관 변환부 측정 결과
(a) 반사계수 (b) 투과계수

Fig. 13. Measurement results of the waveguide transition
(a) Reflection coefficient (b) Transmission coefficient

도파관 변환부는 주파수 0.796% - 1.298%에서 -0.3 dB 이상의 투과 계수를 갖고 이론적인 계산 결과와 잘 일치한다.

IV. 결 론

본 논문에서는 정사각 도파관에서 동축 커넥터로 변환되는 도파관 변환부를 설계, 제작하였다. 제안된 도파관 변환부는 3개의 영역(정사각 도파관, 도파관 연결부 및 동축 커넥터 변환부)으로 구성되며 동축 커넥터 내심의 종단에 원통형 포스트를 연결하여 임피던스 정합 효과를 확인하였다. 도파관 변환부의 각 영역별 길이와 높이의 설계 방법은 변수 조절법을 이용하여 설명하였다. 또한 동축 커넥터 내심의 종단에 인덕티브 성분을 갖는 원통형 포스트를 삽입하여 광대역화 하였다.

최적 설계된 도파관 변환부는 기계 밀링 가공으로 제작하였다. 제작된 도파관 변환부는 back-to-back 방식으로 측정하였다. 본 논문에서 제작된 도파관 변환부는 주파수 0.773% - 1.215% 범위에서 -20 dB 이하의 반사계수와 주파수 0.796% - 1.298%에서 -0.3 dB 이상의 투과 계수를 갖는다. 따라서 제안된 도파관 변환부는 40% 이상의 대역폭이 요구되는 직교모드 변환기, 편파기, 급전피드 측정에 효과적으로 적용될 수 있다.

References

[1] J. Uher, J. Bornemann, and U. Rosenberg, "Waveguide Components for Antenna Feed Systems: theory and CAD", Artech House, Jun. 1999.

[2] L. Shu, J.-W. Noh, B. Enkhbayar, J.-H. Bang, and B. C. Ahn, "Design of an E-band Boifot Ortho-mode transducer", Journal of KIIT, Vol. 14, No. 3, pp. 1-9, Aug. 2016. <https://doi.org/10.14801/jkiit.2016.14.8.1>.

[3] G. Virone, R. Tascone, O. A. Peverini, and R. Orta, "Optimum-iris-set concept for waveguide polarizers", IEEE Microwave and Wireless Components Letters,

Vol. 17, No. 3, pp. 202-204, Mar. 2007. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2006.890474>.

[4] N. Jargalsaikhan, J.-H. Bang, S.-G. Choi, B.-C. Ahn, and A. Gorshkov, "A new high-permeance monopulse feed with a simple comparator network", International Journal of Antennas and Propagations, Vol. 2019, pp. 1-7, Jun. 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/8230641>

[5] A. J. Ruiz-Cruz, R. Montejo-Garai, J. M. Rebollar, and J. M. Montero, "C-band orthmode transducer for compact and broadband antenna feeders", Electronics Letters, Vol. 45, No. 16, pp. 813-814, Jul. 2009. <https://doi.org/10.1049/el.2009.1034>.

[6] P. Wade, "Rectangular waveguide to coax transition design", QEX 8, pp. 10-17, Nov.-Dec. 2006.

[7] J.-Y. Yun, J. Nho, C.-H. Lee, Y.-G. Park, and B.C. Ahn, "Design of a circular waveguide to coaxial cable transition employing a printed dipole", Journal of KIIT, Vol. 15, No. 7, pp. 65-71, Jul. 2017. <https://doi.org/10.14801/jkiit.2017.15.7.65>.

[8] B. Mohamadzade, A. Dunning, D. Hayman, and K. Smart, "Broadband coaxial-to-rectangular waveguide transition", International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), Venice, Italy, Oct. 2023. <https://doi.org/10.1109/ICEAA57318.2023.10297906>.

[9] Q. C. Zhu, A .G. Williamson, and M. J. Neve, "Design of coaxial line-to-circular waveguide transitions", 2009 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Boston, MA, USA, pp. 1-4, Jun. 2009. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2009.5165684>.

[10] M. A. Nasr and A. A. Kishk, "Vertical coaxial-to-ridge waveguide transitions for ridge and ridge gap waveguides with 4:1 bandwidth", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 67, No. 1, pp. 86-93, Jan. 2019. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2018.2873312>.

- [11] E. Altanzaya, J. Heo, S. Xu, C.-S. Lee, B.-C. Ahn, S.-S. Kim, and S.-G. Choi, "Computational design of an in-line coaxial-to-circular waveguide adapter with more than an octave bandwidth", *Symmetry*, Vol. 16, No. 3, pp. 1-12, Mar. 2024. <https://doi.org/10.3390/sym16030304>
- [12] J.-H. Bang and B.-C. Ahn, "Coaxial-to-circular waveguide transition with broadband mode-free operation", *Electronic Letters*, Vol. 50, No. 20, pp. 1453-1454, Sep. 2014. <https://doi.org/10.1049/el.2014.2667>.

저자소개

박 영 규 (Young-Kyu Park)



2016년 2월 : 충북대학교
정보통신공학과(공학사)
2018년 2월 : 충북대학교
전파통신공학과(공학석사)
2018년 3월 ~ 2022년 5월 :
두타기술 주임연구원
2022년 6월 ~ 현재 : 한화시스템

선임연구원

관심분야 : 위성 배열 안테나, 레이더 시스템

민 재 용 (Jae-Yong Min)



2002년 8월 : 한국교통대학교
전자통신공학과(공학사)
2005년 2월 : 충북대학교
전파공학(공학석사)
2016년 8월 : 충북대학교
전파공학(공학박사 수료)
2006년 2월 ~ 2022년 6월 :

(주)한화/방산 종합연구소 선임연구원

2024년 6월 ~ 현재 : KIPCO우주항공 서울종합연구소
수석연구원

관심분야 : RF/RADAR Array System, RFSoc