

# 고전력 전송이 가능한 Ka 대역 E-평면 T형 분기 도파관 다이플렉서의 설계 및 구현

## Design and Implementation of the High Power Ka-band Waveguide Diplexer with an E-plane T-junction

윤 소 현 · 엄 만 석 · 염 인 복

So-Hyeun Yun · Man-Seok Uhm · In-Bok Yom

### 요 약

본 논문에서는 E-평면 T형 분기 도파관을 갖는 Ka 대역(20/30 GHz) 다이플렉서의 설계 및 구현에 관해 논하였다. 본 논문의 도파관 다이플렉서는 송신 필터 및 수신 필터를 E-평면 T형 분기 도파관으로 연결하여 E-평면으로 대칭이 되도록 하였다. T형 분기 도파관을 E-평면으로 선택한 이유는 제작시 생기는 절단면을 전류 밀도가 가장 낮은 지역에 두어 PIM(Passive Intermodulation) 레벨을 줄이기 위해서이다. 본 논문의 다이플렉서는 등가 모델을 사용하여 최적 설계를 수행함으로써 해석 시간을 줄이고자 하였다. 또한, 고전력 전송이 가능한 구조로 설계한 후 멀티팩션 해석을 수행하였으며, 해석 결과는 12 dB 마진을 확보하여 ESA/ESTEC 권고 사항을 만족함을 보였다. 제작된 다이플렉서는 전기적 성능 시험 결과를 통해 송수신 대역에서 반사 손실 22 dB 이상, 삽입 손실 0.20 dB 이하, 그리고 -40 dB 이하의 격리도 특성을 가져 요구 사항을 만족함을 보였고, 이로써 설계 결과가 검증되었다.

### Abstract

In this paper, the design and implementation of the Ka-band(20/30 GHz) waveguide diplexer with an E-plane T-junction are described. The waveguide diplexer consists of a transmit filter and a receive filter combined to the antenna port via an E-plane T-junction. The reason why the E-plane T-junction structure was selected is to reduce PIM (Passive Intermodulation) level as the split-plane is located in the low electrical current zone. The optimization was performed using the equivalent circuit so that the computation time might reduce. The structure of the diplexer was designed to handle high power and the multipaction analysis was performed. The multipaction margin was greater than 12 dB and satisfied with ESA/ESTEC recommendation. The manufactured diplexer shows minimum return loss of 22 dB, maximum insertion loss of 0.20 dB and maximum isolation of -40 dB for both transmitted receive bands. Those mean the analysis results of the waveguide diplexer were well agreed with the electrical performance test.

Key words : Polarizer Waveguide Diplexer, E-plane T-junction, PIM, Multipaction

### I. 서 론

하나의 신호를 두 개의 주파수 대역으로 분리 또

는 반대 경로로 신호를 결합하는 기능을 갖는 다이플렉서는 하나의 대형 안테나로 서로 다른 주파수 대역을 동시에 사용할 수 있기 때문에 무게 및 부피

한국전자통신연구원 위성통신 RF기술연구팀(Satellite Communications RF Technology Team, ETRI)

· 논문 번호 : 20050512-056

· 수정완료일자 : 2005년 6월 22일

를 크게 줄일 수 있어 안테나 급전부에 널리 이용되고 있다<sup>[1],[2]</sup>. 안테나 급전부로 사용되기 위해서는 다이플렉서가 송신단과 수신단 사이에 높은 격리도 특성을 가짐으로써, 송신 신호가 수신단으로 흐르는 것을 방지하여야 한다. 만약 고전력 안테나에 사용하고자 한다면 고전력 신호 처리가 가능하고, 삽입 손실이 매우 적어야 하기 때문에 주로 도파관 형태가 이용된다.

다이플렉서는 일반적으로 송신 필터, 수신 필터와 두 필터를 결합시킬 수 있는 분기 도파관으로 구성된다. 분기 도파관은 T 형태이거나 분리기 형태가 사용될 수 있으나 본 논문에서는 T 형태에 대해 논하였다. 기존의 연구 결과는 주로 H-평면 T형 분기 도파관을 사용하여 구현하였다<sup>[3]~[5]</sup>. Conner의 실험<sup>[6]</sup>을 통해 알 수 있듯이 구형 도파관의 기본 모드를 사용하는 경우 넓은 면의 중앙에서 전기 전류가 최소가 되기 때문에 다른 절단면보다 넓은 면 중앙에 대해 절단할 때 성능에 대한 영향을 최소화 시킬 수 있고, 고출력용 부품일 경우 중요한 성능 요소 중 하나인 PIM(Passive Inter-Modulation) 크기를 줄일 수 있다. 따라서 제작 시에는 RF 성능 변화를 감안하여, H-평면 구조보다는 E-평면 구조를 선택하는 것이 바람직하다. 앞서 설명한 이유 때문에 E-평면 구조를 이용한 도파관 다이플렉서가 있긴 하나 T형 분기 형태가 아닌 분리기 형태이다<sup>[7]</sup>. E-평면 T형 분기 도파관을 갖는 다이플렉서의 형상을 그림 1에 나타내었다.

본 논문에서는 Ka 대역(20/30 GHz)에서 최적화된 E-평면 T형 분기 도파관을 갖는 다이플렉서를 설계

하였고, 시험을 통해 설계 결과를 검증하였다. 다이플렉서에서 사용되는 수신 대역 필터는 저 손실 및 온도 변화에 민감하지 않은 유도성 아이리스를 이용한 직접 결합 방식 필터를 선택하였고, 송신 대역 필터는 고차 모드 및 고조파 제거 특성이 우수한 코러 게이트 형태의 저역 통과 필터로 설계하였다. 설계된 E-평면 T형 분기 도파관을 갖는 다이플렉서는 E-평면으로 두 조각 내어 제작하였다. 대부분의 필터 구조에 사용되는 미세 보정 조정 나사를 배제함으로써 제작 과정의 단순화와 내구성을 갖도록 설계, 제작하였고 성능 시험을 통하여 요구 성능이 만족됨을 확인하였다.

## II. 다이플렉서 설계

### 2-1 다이플렉서 구성 및 설계 방법

하나의 대형 위성 탑재용 안테나에 서로 다른 송신 주파수 대역을 동시에 사용하기 위해서는 송신단과 수신단 사이의 높은 격리도가 요구된다. 다이플렉서의 삽입 손실 성능은 통신 시스템 성능 지수인 G/T와 EIRP에 직접적으로 영향을 주기 때문에 삽입 손실을 줄일 수 있는 다이플렉서의 형태 선택이 필요하다. 다이플렉서에 사용되는 송신 필터는 삽입 손실 특성뿐만 아니라 사용되는 고출력 전력에도 견딜 수 있는 필터의 형태가 구현되어야 한다.

표 1에 나타나 있는 요구 성능 규격을 지닌 다이플렉서를 설계하기 위해서 삽입 손실 및 고출력 처리에 용이한 도파관 형태의 송수신 필터 및 접합부를 사용하였다. 두 조각으로 제작되어 결합되는 다이플렉서의 접합부가 전류 밀도가 최소가 되도록 E-평면 T

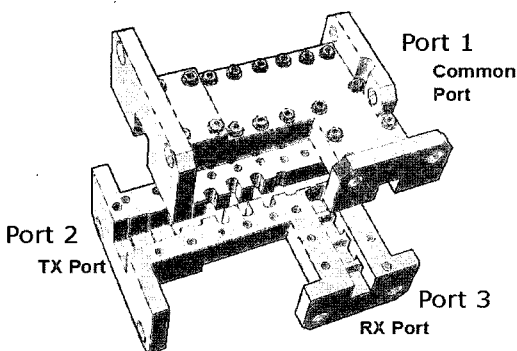


그림 1. 아이리스 편파기, E-평면 T형 분기 도파관 다이플렉서의 형상도

Fig. 1. Waveguide diplexer with an E-plane T-junction.

표 1. Ka 대역 도파관 다이플렉서 성능 규격  
Table 1. Performance specification of Ka band waveguide diplexer.

Parameters	Transmit	Receive
Frequency(GHz)	19.8~20.2	29.6~30.0
Return loss(dB)	> 22	> 22
Insertion loss(dB)	< 0.20	< 0.20
Tx/Rx isolation(dB)	< -40	< -40
Group delay(n <sub>sp-p</sub> )	< 0.2	< 0.2
Multipaction(dB)	> 6	-

형 분기를 사용하였다. 송신 필터는 수신 대역에서 고차 모드 및 고조파 대역이 생기지 않도록 코러게이트 형태의 저역 통과 필터로 설계하였고, 고출력 처리를 위해 최소 도파관 사이의 간격을 적절한 값으로 정하였다. 수신 필터는 대역 내에서 우수한 삽입 손실과 제작이 용이한 형태인 유도성 아이리스를 이용한 직접 결합 공동(cavity) 필터를 사용하였고, 단수를 줄여 삽입 손실을 최소화 하였다.

최적의 성능을 갖는 다이플렉서를 설계하기 위해서는 각 구성품의 적절한 형태 선택과 설계 절차가 요구된다. 높은 주파수에서 사용되는 다이플렉서는 최종적으로 전자계 해석 방법으로 설계가 이루어져야 하나, 시간이 많이 요구되는 단점으로 초기 설계에는 적절한 등가 모델이 사용된 회로 해석 방법이 매우 유용하다. 설계하고자 하는 다이플렉서에 대한 전기적 구성도는 그림 2와 같다. 도파관 T형 분기는 전자계 해석 방법을 사용하여 산란 계수를 직접 구하여 사용하였다. 송신 필터에 사용되는 코러게이트 도파관 스텝 구조에서 각 불연속 스텝은 병렬 캐패시터로, 그리고 도파관 전송 선로 부분은 주파수 산란(dispersion) 현상이 포함된 전송 선로로 모델링이 된다. 수신 필터에 사용되는 유도성 아이리시스 형태 필터는 임피던스 인버터(병렬 인덕터)로, 공진기는 도파관 전송 선로로 각각 모델링된다. 송신 및 수신 동작 주파수를 모두 포함할 수 있도록 도파관 형태는 차단 주파수가 17.3 GHz인 WR-34를 선택하였다.

우선 송신 및 수신 대역용 필터를 요구 성능 규격에 맞게 각각 설계하고, 필터 성능에 영향을 주지 않도록 T형 분기 도파관을 설계한다. 다이플렉서의 초기 설계를 위해 사용되는 회로 해석 툴과 최종 설계

에 사용되는 전자계 기법 해석 툴은 RF 부품 설계에 주로 사용되는 ADS와 HFSS를 사용하였다.

### 2-2 송수신 필터의 초기 설계

다이플렉서에서 필터는 송신 대역용과 수신 대역용으로 이루어져 있다. 고출력 안테나에 사용될 가능성에 대비해서 송신 대역용 필터는 고전력 신호 처리가 가능하도록 도파관 사이의 최소 간격을 2.32 mm로 하였고, 수신 대역에서 고차 모드 및 고조파 대역이 생기지 않도록 코러게이트 형태의 저역 통과 필터로 설계하였다. 코러게이트 저역 통과 필터는 9개의 스텝 분포 소자를 이용하였고, 스텝 소자의 초기 임피던스는 표 2와 같고<sup>[8]</sup> 공진기의 전기적 길이는 45°로 하였다.

다이플렉서 구성도에서 보인 바와 같이 E-평면 스텝 구조는 용량성 소자로 등가화 된다. 병렬 커패시터의 값은 Marcuvitz<sup>[9]</sup>에 의해 구해져 필터 설계에 많이 이용되고 있다. 본 논문에서는 설계를 용이하게 하기 위해서 스텝 구조를 정규화 된 임피던스로 정합된 산란 계수 형태로 식 (1)과 같이 바꾸어 사용하였다. 여기에서  $\alpha$  및  $BY_0$ 는 참고문헌 [9]에 나타나 있다.

$$S_{11} = \frac{\alpha - ja \frac{B}{Y_0} - 1}{\alpha + ja \frac{B}{Y_0} + 1}, \quad S_{22} = \frac{-\alpha - ja \frac{B}{Y_0} + 1}{\alpha + ja \frac{B}{Y_0} + 1}$$

$$S_{12} = S_{21} = \frac{2\sqrt{\alpha}}{\alpha + ja \frac{B}{Y_0} + 1} \quad (1)$$

고차 모드 및 고조파 특성을 고려한 송신 필터와는 달리 수신 필터는 대역 내에서 우수한 삽입 손실과 제작이 용이한 형태를 사용하였다. 또한 30 GHz 대역으로 주파수가 높기 때문에 단수를 줄여 삽입 손실을 최소화 하였다. 수신 필터에 사용된 형상은 유

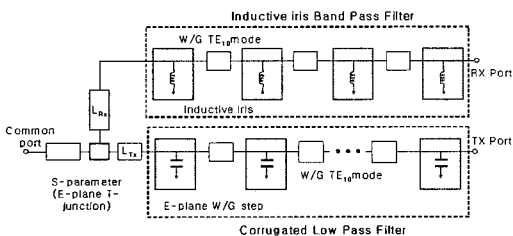


그림 2. E-평면 T형 분기 도파관을 갖는 다이플렉서의 전기적 구성도  
Fig. 2. Configuration of waveguide diplexer with an E-plane T-junction.

표 2. 스텝 구조 저역 통과 필터의 임피던스  
Table 2. Element of the stepped-distributed loss pass prototype(9-steps).

Z <sub>1</sub>	Z <sub>9</sub>	1.213
Z <sub>2</sub>	Z <sub>8</sub>	0.6972
Z <sub>3</sub>	Z <sub>7</sub>	1.790
Z <sub>4</sub>	Z <sub>6</sub>	0.5359
Z <sub>5</sub>		2.011

도성 아이리스를 이용한 직접 결합 공동(cavity) 필터이며 이때 공진기 모드는 TE<sub>101</sub> 모드이다. 또한 필터의 전달함수는 0.05 dB 리플을 갖는 Chebyshev 형태이고, 필터의 단수는 대역 내 손실을 최소화 하고, 송신 대역의 격리도를 만족하도록 3단으로 하였다. 유도성 아이리스는 유도성 소자로 등가화 되며, 앞서 보인 그림 2의 대역 통과 필터(inductive iris band pass filter)로 표기된 부분과 같이 나타낼 수 있다. 이때 리액턴스 값과 아이리스 간격 사이의 관계는 Marcuvitz에 의해 구해진 식<sup>[9]</sup>을 이용하였다.

송수신 필터 설계 시 고려해야 할 사항은 각 대역 내 성능이 만족됨은 물론이고, 상대 대역에서 반사 특성이 일정 값 이하를 유지하여 상대 대역 성능에 영향을 미치지 않도록 해야 한다는 것이다. 이는 T형 분기 도파관에 의해 결정되는데 송신 대역 필터는 수신 대역에서 전반사(이상적인 경우)가 이루어지고 수신 대역에서 반사계수의 위상이 일정하도록 하여야 한다. T형 분기 도파관의 송신단과 수신단의 길이를 통해 위상과 크기를 조절해야 한다. T형 분기 도파관은 도파관 해석의 정확도를 높이기 위해 HFSS 해석 결과를 이용하고 송신 포트의 길이(L<sub>Tx</sub>)와 수신 포트의 길이(L<sub>Rx</sub>)를 조정하면서 전기적인 특성을 관찰하였다.

ADS를 통한 최적화 해석 결과는 그림 3과 같은 특성을 가진다. 반사 손실 특성은 송수신 대역에서 25 dB 이상을 가진다. 점선을 나타낸 격리도 특성은 송신 대역에서는 우수한 성능을 갖지만 수신 대역에서는 약 -30 dB이다. 이는 송신 필터 등가 회로의 각 요소를 HFSS로 해석한 도파관 형태로 하나씩 대체

시키고, 공진기의 위상을 조절함으로써 개선시킬 수 있다. 회로 모델링 소자를 HFSS 결과로 차례로 대신시킨 결과는 3장에서 측정 결과와 비교하여 보여질 것이다. 도파관 형태로 해석한 최종 결과는 등가 회로 모델과 반사 손실 특성은 유사하면서 격리도 특성을 향상시켰다.

### 2-3 고전력 전송 해석

도파관 다이플렉서는 고전력 전송에 많이 사용되므로 이에 대한 해석이 필요하다. 고전력 전송 해석을 위한 파라미터로는 PIM과 멀티팩션이 있다. PIM은 두 개 이상의 주파수가 동시에 동작할 때 수동 소자에서 발생할 수 있는 신호 왜곡이다. 특히 낮은 홀수 차수는 PIM 신호가 수신 주파수 대역에 존재할 경우 큰 문제가 된다. 주파수 f<sub>1</sub>과 f<sub>2</sub>의 두 고전력 신호에 대한 n차 PIM product의 주파수는 다음과 같이 주어진다. 본 논문의 다이플렉서의 경우 PIM 차수는 49차로 매우 높아 낮은 PIM 레벨이 예상된다.

$$f_p = \frac{(n-1)\Delta}{2} + f_2 \quad \text{where } \Delta = f_2 - f_1 \quad (2)$$

PIM을 줄이기 위해 디자인 및 제작 단계에서 주의해야 하는 사항은 다음과 같다.

- 1) 재질과 제작 과정을 세심하게 선택한다.
- 2) 미세 조정 나사를 사용하지 않는다.
- 3) IM이 생길 가능성이 있는 것은 전류 밀도가 최소인 곳에 둔다.
- 4) 접촉면은 최대한 줄이고 만약 접촉면이 존재한다면 그 사이는 충분한 압력으로 밀착되어야 한다.
- 5) 접촉면이 존재하는 곳에는 재질의 불연속을 두지 않는다.
- 6) 접촉면의 평탄도를 엄격하게 관리한다.

고전력 전송 해석의 또 다른 파라미터인 멀티팩션은 고전력의 RF 부품이 진공이나 낮은 압력 조건에 있을 때 발생할 수 있으며 2차 전자 방출에 의해 부품을 파괴시키거나 시스템의 잡음 레벨을 심각하게 증가시켜 성능 저하 또는 완전 손상을 초래할 수도 있다. 멀티팩션은 고주파 에너지에 의해 금속 또는 유전체 표면으로부터 전자의 방출이 지속적으로 증가할 때 일어나는 현상이다. 1934년 미국의 Farn-

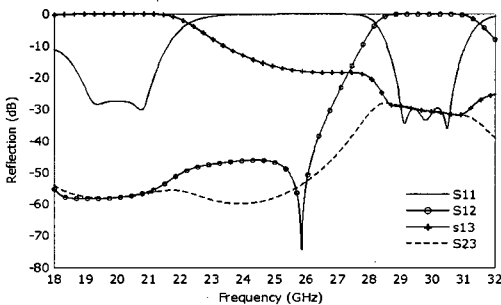


그림 3. 다이플렉서 등가 회로의 전기적 특성  
Fig. 3. Electrical performance of the diplexer's equivalent circuit.

sworth<sup>[10]</sup>에 의해 발견된 멀티팩션은 인가된 고주파 전계에 의해 전자 구름막이 고주파 전계와 동기가 일치되어 왕복운동을 하는 현상을 일컫는다. 멀티팩션이 발생하려면 두 면의 간극이 평균 자유 경로 (mean free path: 표면에서 방출된 전자가 다른 전자 또는 기체 분자와 충돌하기 전까지 이동한 평균 경로 길이)보다 작아야 하므로 실제 구조에서는 좁은 영역에서 발생할 확률이 높다. ESA/ESTEC에서는 이를 지속적으로 연구하여, 시험을 토대로 한 그림 4와 같은 결과를 얻었다<sup>[11]</sup>. 재질에 따른 상이한 그래프를 가지며 본 논문에서는 은 도금 재질에 대한 결과만 수록하였다. 그림 4는 주파수(GHz)와 두 표면 사이 거리(mm)의 곱에 따른 최대 전압을 보여주고 있다. 본 논문에서 구현한 다이플렉서의 최소 거리는 2.32 mm이고, HFSS의 필드 해석을 통해 다이플렉서 최소 거리내의 전압을 확인하였다. 그림 5는 다이플렉서 내부의 필드 값을 보여주는 것으로, 가장 높은 주파수인 20.2 GHz에서 도파관 사이의 거리가 2.32 mm인 곳에서 가장 큰 전계 값을 가짐을

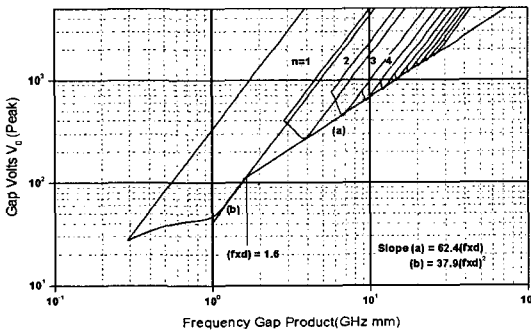


그림 4. 은도금 된 도파관의 susceptibility zone  
Fig. 4. Susceptibility zone for silver plated surface.

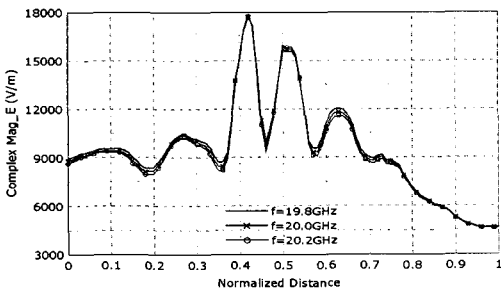


그림 5. 다이플렉서 내부의 복소 전계 크기  
Fig. 5. Magnitude of complex E-field across center line.

표 3. 다이플렉서의 멀티팩션 해석

Table 3. Multipaction analysis of waveguide diplexer.

주파수 (GHz)	임계전압 (V)	Gap전압 (V)	입력전력 (W)	가용전력 (W)	마진 (dB)
19.8	2,866	42.97	264	4,449	12.27
20.0	2,895	42.87		4,560	12.37
20.2	2,924	43.01		4,622	12.43

알 수 있다.

다이플렉서의 최대 입력 전력에 대해 주파수에 따른 멀티팩션 마진을 표 3에 보였다. ESA/ESTEC에서는 현실적으로 시험에 의한 검증이 어려운 멀티팩션에 대해 해석만으로 검증이 가능한 기준을 가지고 있는데, 단일파인 경우는 8 dB 이상, 다중파인 경우는 6 dB 이상이다. 본 논문에서 구현한 다이플렉서의 최소 마진은 표 2에서와 같이 약 12 dB 이상으로 ESA/ESTEC 권고안을 만족한다.

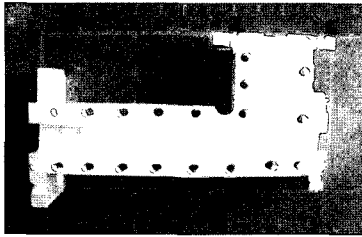
### III. 제작 및 측정 결과

본 논문의 도파관 다이플렉서는 무게를 줄이기 위해서 알루미늄 합금을 사용하였고 두 조각 내어 제작하였다. 접합되는 부분의 불연속에 의한 영향을 최소화 하기 위해서 전류 분포 값이 매우 낮은 부분인 도파관의 넓은 면의 중앙을 절단하는 방법으로 두 조각 내어 제작하였고, 미세 조정 나사가 없는 구조이다. 제작된 도파관 다이플렉서의 절단면을 그림 6(a)에 나타내었고 조립된 상태의 다이플렉서를 그림 6(b)에 보였다. 측정 결과는 해석 결과와 유사하였으며 미세 조정 나사 없이도 성능 규격을 만족하였다. 그 결과를 표 4와 그림 7에 나타내었다.

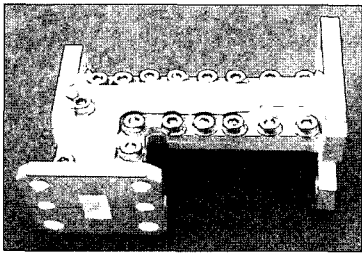
### IV. 결론

본 논문에서는 Ka 대역(20/30 GHz) 도파관 다이플렉서의 설계 및 구현 결과를 보였다. 다이플렉서에서 송수신 포트를 분리 또는 결합하는 분기 도파관은 고출력 처리가 용이하고, 제작시 도파관의 넓은 면으로 두 조각 낼 수 있는 E-평면 T형 분기 도파관을 선택하였다.

도파관 다이플렉서의 해석은 최적화의 계산 시간을 줄이기 위해 선형 회로 설계 툴인 ADS를 사용하



(a) 다이플렉서 제작 절단면  
(a) A half of the diplexer



(b) 조립된 다이플렉서  
(b) Assembled diplexer

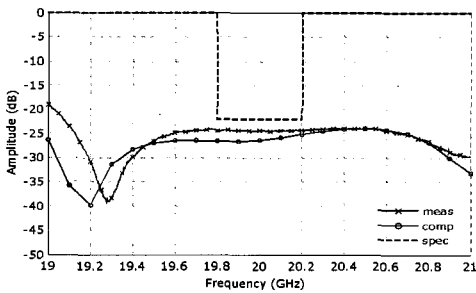
그림 6. 제작된 도파관 다이플렉서  
Fig. 6. Manufactured waveguide diplexer.

표 4. 다이플렉서 측정 결과

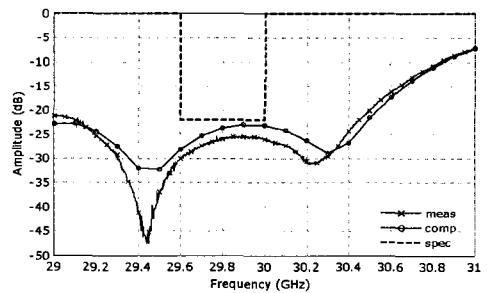
Table 4. Measured results of the diplexer.

Parameters		Required	Measured
Frequency (GHz)	TX	19.8~20.2	19.8~20.2
	RX	29.6~30.0	29.6~30.0
Return loss (dB)	TX	> 22	> 24.43
	RX	> 22	> 25.43
Insertion loss (dB)	TX	< 0.20	< 0.10
	RX	< 0.20	< 0.14
Isolation(dB)	TX	< -40	< -65.47
	RX	< -40	< -51.61
Group delay variation (nPspp)	TX	< 0.2	< 0.08
	RX	< 0.2	< 0.06
Multipaction margin(dB)	TX	> 6	> 12

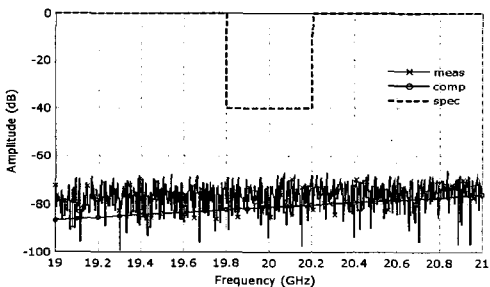
였고, 등가 회로의 각 요소는 정확도를 높이기 위해 HFSS 결과를 활용하였다. 도파관 다이플렉서가 고전력을 전송할 수 있도록 설계 및 제작 시 주의를 기



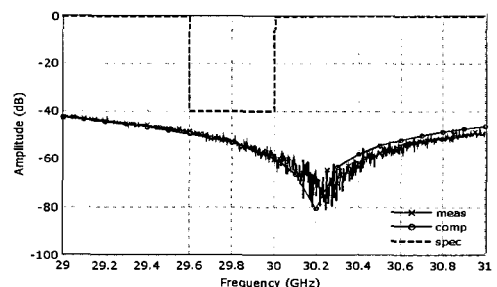
(a) 송신 반사 손실  
(a) Tx return loss



(b) 수신 반사 손실  
(b) Rx return loss



(c) 송신 격리도  
(c) Tx isolation



(d) 수신 격리도  
(d) Rx isolation

그림 7. 다이플렉서 주파수 특성  
Fig. 7. Frequency response of diplexer.

올려야 하며, 특히 멀티팩션은 해석을 통해 고전력 전송 가능성을 가늠할 수 있었다. 본 논문에서 구현된 도파관 다이플렉서는 49차의 높은 PIM 차수를 가지며 12 dB 이상의 멀티팩션 마진을 가져 고전력 전송이 가능함이 확인되었다.

설계된 다이플렉서는 알루미늄으로 제작되었고 내부는 은도금되었다. 제작된 다이플렉서는 미세 조정 나사없이 측정되었고 측정 결과는 해석 결과와 거의 일치하였다. 송신 및 수신 대역에서 22 dB 이상의 반사 손실, 0.20 dB 이하의 삽입 손실 그리고 -40 dB 이하의 격리도를 보여 성능 규격을 모두 만족하였다. 이와 같은 성능 검증을 통해, 본 논문에서 구현된 도파관 다이플렉서는 밀리미터파 대역용뿐 아니라 고전력용 시스템에도 사용될 수 있음이 확인되었다.

### 참 고 문 헌

[1] M. S. Uhm, J. S. Lee, D. K. Baek, B. I. Yom, and S. P. Lee, "Ka band waveguide diplexer using E-plane T-junction with inductive iris", *APMC-2002*, vol. 1, pp. 508-511, 2002.

[2] J. Uher, J. Bornemann, and U. Rosenberg, *Waveguide Components for Antenna Feed System: Theory and CAD*, Artech House Inc., Boston, pp. 200-205, 1993.

[3] J. M. Rebolgar, J. R. Montejo-Garai, "Asymmetric H-plane T-junction for broadband diplexer applications", *IEEE APS*, vol. 4, pp. 2032-2035, 2000.

[4] Y. Rong, H. Yao, K. Zaki, and T. Dolant, "Millimeter wave H-plane diplexer", *IEEE Trans. On Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-47, pp. 2325-2330, Sep. 1999.

[5] K. L. Wu, H. Wang, "A rigorous modal analysis of H-plane waveguide T-junction loaded with a partial-height post for wide-band applications", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. 49, no. 5, pp. 893-901, May 2001.

[6] G. G. Connor, "Elimination of fine tuning in high power, low-PIM diplexers for combined transmit/receive antennas", *Microwave Filters and Multiplexers, IEE Colloquium*, pp. 4/1-4/6, 1990.

[7] J. Esteban, J. Rebolgar, "Design and optimization of a compact Ka-band antenna diplexer", *IEEE AP Symposium*, vol. 1, pp. 148-151, 1995.

[8] R. Levy, "Tables of element values for the distributed low-pass proto-type filter", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. 13, pp. 514-536, Sep. 1965.

[9] N. Marcuvitz, *Waveguide Handbook*, New York Dover Publications, Inc., 1951.

[10] F. T. Farnsworth, "Television by electron image scanning", *J. Faranklin Inst.*, vol. 218, pp. 411-444, 1934.

[11] Space engineering; Multipaction design and test, ESA Publications Division, pp. 19-28, 2003.

### 윤 소 현



2000년: 충북대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2000년~현재: ETRI 위성통신 RF 기술연구팀 연구원  
 [주 관심분야] 위성안테나, 위성용 급전 및 수동소자

### 엄 만 석



1989년: 중앙대학교 전자공학과 (공학석사)  
 1992년~현재: ETRI 위성통신 RF 기술연구팀 선임연구원  
 [주 관심분야] 위성중계기, 위성안테나, RF 부품

염 인 복



1990년: 한양대학교 전자공학과 (공학사)

2004년: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)

1992년 9월~1995년 5월: 무궁화 위성 현장교육 참여 (영국 Matra Marconi사 등)

1990년~현재: ETRI 위성통신 RF기술연구팀장

[주 관심분야] 위성중계기, 위성안테나, 위성중계기 부품