

# 평판형 발룬을 이용한 단일 평형 광대역 주파수 혼합기의 설계 및 제작

## Design and Fabrication of a Wideband Single-Balanced-Mixer using Planar Balun

김성민 · 정재호 · 최현철

Seong-Min Kim · Jae-Ho Jung · Hyun-Chul Choi

### 요 약

본 논문에서는 고주파 계측장비의 RF 수신단에 응용 가능한 광대역 주파수 혼합기를 다이오드를 이용한 단일 평형형으로 설계, 제작하였다. 광대역의 특성을 만족시키기 위하여 등평면 도파관(coplanar waveguide)과 슬롯라인(slotline)의 신호천이를 이용한 평판형의 발룬(balun)을 이용하여 LO신호를 다이오드에 작은 손실을 갖고 인가시켰다. 그리고 LO 신호에 대한 격리도를 향상시키기 위해 RF단과 IF단은 방향성 결합기를 이용하여 구성하였다. 제작된 광대역 주파수 혼합기의 측정결과 9 kHz~2.6 GHz의 광대역 RF신호에 대해 변환손실(conversion loss)이 30.5~31.17 dB의 값으로 그 평탄도가 1 dB 이내로 나타났고, LO 신호에 대해 30 dB 이상의 격리도(isolation)를 나타내었다.

### Abstract

This paper presents a wideband single-balanced mixer using a diode which can be used in RF receiver of microwave measurement systems. For wideband characteristic, local oscillator(LO) signal is provided to diode with low loss using a coplanar waveguide-to-slotline balun. For high isolation characteristic radio frequency (RF) port and intermediate frequency(IF) port are designed using directional coupler. This mixer presents 30.5~31.17 dB conversion loss whose flatness is within 1dB for 9 kHz~2.6 GHz wideband RF signal, and above 30 dB isolation for LO signal.

### I. 서 론

최근 이동통신 기술의 급격한 발전으로 인하여 이동통신용 송·수신 단말기에 대한 급격한 수요 증가가 이루어지고 있다. 이러한 단말기의 수요가 급격히 증가하면서 측정용 고주파 계측장비에 대한 수요도 증가하고 있다. 하지만 국내의 고주파

계측장비의 생산 능력이나 설계 기술력은 상당히 미약한 실정이므로, 생산 능력이나 설계기술력 확보가 시급히 요구되고 있다. 본 논문에서는 고주파 계측장비의 RF 수신단에 사용되는 광대역 주파수 혼합기를 9 kHz~2.6 GHz의 스펙트럼 분석기를 대상으로 설계, 제작하였다. 광대역 특성을 만족시키기 위하여 결합기 구조 대신 등평면 도파관(coplanar

경북대학교 전자·전기공학부(Dept of Electronic and Electrical Eng. Kyungpook National University)

· 논문 번호 : 980916-092

· 수정완료일자 : 1998년 11월 26일

waveguide)과 슬롯라인(slotline)의 신호 천이(tr-ansition)를 통한 평판형 발룬을 이용하여 단일 평형형으로 설계, 제작하였다. 광대역 특성을 가지는 발룬의 설계 시에 다이오드를 DC 파라미터를 이용하여 모델링하고, 모델링한 결과를 통하여 발룬과의 임피던스 정합을 이루도록 하였다. 발룬은 자체의 전달 특성을 측정하여 원하는 주파수 대역에서 최적의 특성을 나타내도록 구현하였다. 국부 발진기 신호에 대한 높은 격리도를 이루어 시스템의 주파수 선택도를 개선시키기 위하여 RF단과 IF단은 방향성 결합기를 이용하여 설계, 제작하였다.

## II. 단일 평형 광대역 주파수 혼합기의 설계

그림 1은 고주파 계측장비의 RF수신단에서 광대역 주파수 혼합기단의 블록도로서 저잡음 광대역 증폭기에서 출력된 9 kHz~2.6 GHz의 광대역 신호를 YIG에서 발생하는 3.4107~6.0107 GHz의 LO 신호와 혼합하여 3.4107 GHz의 단일 중간주파수 신호로 평탄한 변환특성을 가지며 천이해야 하며, 이러한 특성의 광대역 주파수 혼합기를 단일 평형형으로 구성하기 위해서는 광대역의 RF 신호와 LO 신호를 비선형 소자인 다이오드에 평형 모드의 신호로 인가하여야 한다. 이러한 광대역의 특성과 평형모드의 특성을 만족시키기 위하여 LO 단에 발룬(balun)을 사용하였다.

### 2-1 발룬의 설계

주파수 혼합기가 광대역 특성을 나타내고 평형형의 주파수 혼합기 동작을 하기 위해서는 가능한 LO 및 RF의 광대역 신호가 다이오드에 손실이 작고, 일정한 위상차(180°)를 유지시키며 인가되어야만 한다. 따라서 YIG에서 발생된 3.4107~6.0107 GHz에 이르는 LO 신호를 작은 손실을 가지는 평형 모드의 신호로 다이오드에 인가하기 위하여 발룬(balun)을 설계하였다.

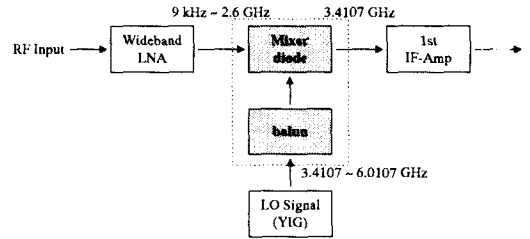


그림 1. RF 수신단의 블록도  
Fig. 1. Block diagram of RF receiver.

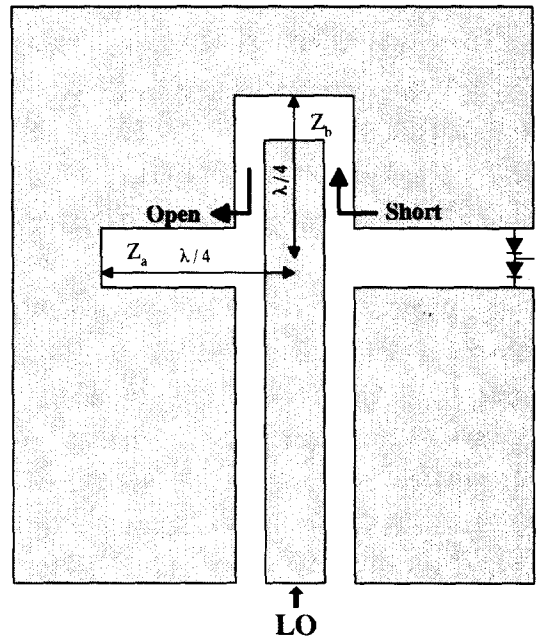


그림 2. 평판형 발룬의 구조  
Fig. 2. The structure of planar balun.

여러 가지 형태의 발룬 중에서 회로의 간결성을 유지하고 평면상에 구현하기 위하여 등평면 도파관과 슬롯라인의 천이를 이용한 평판형 발룬을 사용하였다. 평판형 발룬의 구조는 그림 2에 나타난 것과 같이 하나의 단락스터브와 하나의 개방스터브를 이용하여 광대역의 범위에서 작은 전달 손실을 가지며 불평형 모드의 신호를 평형 모드의 신호로 천이시켜 주는 것이다. 단락스터브의 길이는 설계 중심주파수의  $\lambda/4$ 의 값을 가져 신호천이가

일어나는 중심점에서 등가적으로 개방회로로 동작하도록 하여 등평면 도파관에서 전달된 신호가 접지면으로 손실되는 것을 방지시키는 역할을 한다. 개방스터브의 경우도 단락스터브와 마찬가지로 그 길이를 설계 중심주파수의  $\lambda/4$ 로 설계하여 신호 천이가 일어나는 중심점에서 등가적으로 단락회로로 동작하도록 한다. 개방스터브를 사용하지 않고 물리적으로 단락회로로 구성하는 경우도 있지만 이 경우에는 개방스터브를 사용한 경우에 비해 전달대역폭이 좁아지고 전달대역폭 내에서의 손실량도 커지게 된다. 따라서 본 논문에서는 물리적인 단락회로 대신 개방스터브를 이용한 형태를 이용하여 설계하였다. 이러한 형태의 발룬은 단락스터브의 특성임피던스( $Z_a$ )와 개방스터브의 특성임피던스( $Z_b$ )를 조정하여 전달대역폭과 통과대역에서의 손실을 조절할 수 있다<sup>[1]~[4]</sup>.

평판형 발룬의 설계 주파수는 LO 신호의 중심 주파수인 4.7 GHz로 선정하였다. 각각의 스테브의 길이를 설계 주파수의  $\lambda/4$  길이로 하여 신호가 천이되는 부분의 중심에서 각각의 스테브가 등가적으로 개방, 단락으로 동작하도록 설계한다. 이런 방법으로 설계함으로써 불평형 모드의 신호가 작은 손실을 가지며 평형 모드의 신호로 천이될 수 있도록 설계하였다.

그림 3은 평판형 발룬의 등가회로로서<sup>[5]</sup> 각각의 단락스터브와 개방스터브가 등가회로상의 인덕턴스와 커패시턴스로 나타나며, 각 스테브의 길이는 중심주파수의  $\lambda/4$  이므로 등가회로상의 임피던스 값은 다음과 같이 표현된다.

$$X_C = -jZ_b \cot\left(\frac{\pi}{2} \frac{1}{f_o}\right) \quad (1)$$

$$X_L = jZ_a \tan\left(\frac{\pi}{2} \frac{1}{f_o}\right) \quad (2)$$

그림 2와 같은 구조의 발룬을 주파수 혼합기에 이용할 경우 발룬을 통해 다이오드에 신호를 인가

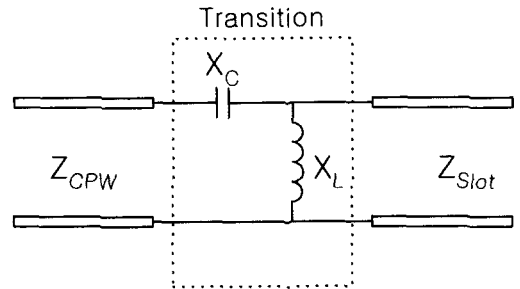


그림 3. 평판형 발룬의 등가회로  
Fig. 3. The equivalent circuit of planar balun.

할 때 발생하는 반사를 줄여 손실을 최소화하기 위해 다이오드의 등가 모델을 추출하여 설계 주파수에서 다이오드의 임피던스와 발룬 출력단의 임피던스를 정합하였다.

### 2-2 LO단 정합을 위한 다이오드 모델링

본 논문에서는 다이오드의 DC 파라미터를 이용하여 다이오드의 선형 등가회로를 추출하여 발룬과의 정합을 이루도록 하였다. 광대역 주파수 혼합기를 평형형으로 설계하기 위해서 사용되는 다이오드는 쌍이 되어야 한다. 이와 같은 조건에 의해 선정된 다이오드는 MA/COM사의 MA4E204M-272이다. 그림 4는 선정된 다이오드의 등가 회로로서  $L_P$ ,  $C_P$ ,  $R_S$ 는 다이오드의 패키지에 의해 발생하는 기생성분이고  $C_D$ 와  $R_D$ 는 다이오드 자체 접합에 의해 발생하는 성분이다.

다이오드의 DC I-V 특성 곡선을 이용하여 DC 파라미터를 추출하여 다이오드의 등가 파라미터를 추출할 수 있다.<sup>[6]</sup> 그림 5는 다이오드의 DC I-V 특성 곡선을 나타낸 것으로써 이 특성 곡선을 이용하여 추출할 수 있는 파라미터는 이상계수( $\eta$ )와 역방향 포화전류( $I_S$ ), 직렬저항( $R_S$ )이다. 그림 5에 나타난 다이오드의 특성 곡선은 동일한 두 개의 다이오드가 직렬로 연결된 형태의 다이오드쌍을 측정된 결과이다. 본 논문에서는 측정 결과를 토대로 단일 다이오드의 파라미터를 추출하여 등

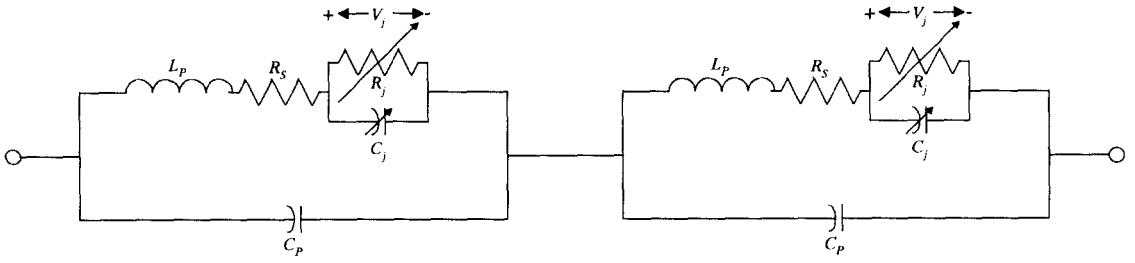


그림 4. 다이오드 MA4E204M-272의 등가회로

Fig. 4. Equivalent circuit of MA4E204M-272.

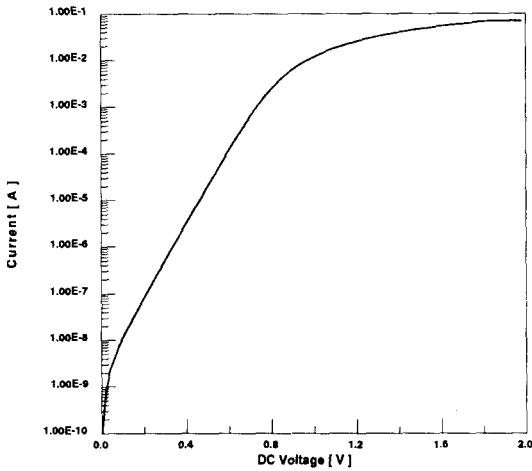


그림 5. 다이오드 MA4E204M-272의 DC I-V 특성곡선  
Fig. 5. DC I-V characteristic curve of MA4E204M-272.

가회로를 구한 후 동일한 다이오드 두 개가 직렬로 연결된 형태의 전체 다이오드 임피던스를 산출하여 이 값에 대해 정합을 이루도록 하였다. 다이오드의 특성 곡선으로부터 추출된 단일 다이오드의 이상계수, 역방향 포화전류, 직렬 저항은 다음과 같다.

$$\eta = 1.038$$

$$I_S = 1.429 \times 10^{-9} \text{ A}$$

$$R_S = 10 \Omega$$

앞에서 추출한 세 가지 파라미터를 이용하여 그

림 4에 나타난 직렬 연결된 두 개의 다이오드 가운데 하나의 다이오드에 대한 입력 임피던스를 구할 수 있다. 이 입력 임피던스를 구하여 동일한 두 개의 다이오드가 직렬로 연결된 전체 다이오드 임피던스를 산출하였다. 정합을 위해 다이오드의 임피던스를 구할 때는 ON 상태에 있을 때와 OFF 상태에 있을 때의 두 가지 상태로 나누어 계산한다. 이는 다이오드가 주파수 혼합기에 이용될 경우 다이오드의 두 상태에 대한 임피던스를 모두 고려해야 하기 때문이다. 다이오드가 ON 상태와 OFF 상태에 따라 접합저항( $R_j$ )과 접합용량( $C_j$ ) 두 가지 파라미터가 변하게 되는데, 이 경우  $R_j$ 와  $C_j$ 는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$R_j = \begin{cases} \frac{0.02548\eta}{I} & : \text{ON 상태} \\ \frac{0.02548\eta}{I_S} & : \text{OFF 상태} \end{cases} \quad (3)$$

$$C_j = \begin{cases} \frac{C_{j0}}{\sqrt{1 - V_n/\phi}} & : \text{ON 상태} \\ \frac{C_{j0}}{\sqrt{1 + V_n/\phi}} & : \text{OFF 상태} \end{cases} \quad (4)$$

위의 두 상태에서 추출된 전체 다이오드 입력 임피던스의 쌍곡선 평균( $Z_m$ )<sup>[7]</sup>은 발륜의 설계 주파수인 4.7 GHz에서  $83.60 - j135.137$ 로 나타났다. 추출된 다이오드의 임피던스와 발륜과의 정합은 발륜 출력단의 슬롯라인 특성임피던스를 통하

여 이루도록 하였는데 이렇게 정합을 이룰 경우에는 실수값으로만 정합이 되기 때문에 다이오드 임피던스의 허수부에 의한 손실은 불가피하게 된다. 따라서 정합시 나타나는 허수부에 의한 손실을 최소화하기 위하여 슬롯라인의 특성임피던스를 조정하여야 한다. 본 논문에서는 슬롯라인의 특성임피던스를 다이오드 임피던스의 크기인  $153 \Omega$ 으로 하여 정합하는 방법을 선택하여 다이오드 임피던스에 의한 LO 신호의 손실량을 최소화하도록 하였다.

### 2-3 RF 및 IF 단을 위한 방향성 결합기의 설계

RF 신호를 인가하고 IF 신호를 검출하는 두 단자는 높은 격리도를 얻어 시스템의 주파수 선택도를 증가시키고 주파수 혼합기를 통과하는 LO 신호의 크기를 최소화 시켜 시스템의 스퓨리어스(spurious) 특성을 향상시키기 위하여 방향성 결합기를 이용하여 구성하였다. 방향성 결합기의 설계 주파수는 IF 주파수인 3.4107 GHz로 설계하였고, LO 신호에 대해 높은 격리도를 얻고 RF신호의 손실을 최소화시키기 위해 결합계수를 22 dB로 설계, 제작하였다<sup>[8],[9]</sup>. 그림 6은 방향성 결합기의 설계도면을 나타내고 있다.

### 2-4. 발룬의 특성 측정

발룬을 광대역 주파수 혼합기에 이용하기 위해 설계된 발룬이 원하는 주파수 대역에서 평탄한 전달 특성을 나타내는지를 판별하기 위하여 치구를 제작하여 발룬만의 전달 특성을 측정하였다. 발룬의 전달 특성은 그림 7과 같이 두 개의 발룬을 직접 연결하여 두 번의 천이를 통해 특성을 시험하는 방식을 이용하여 시험하였다<sup>[2]</sup>. 각 스텝의 특성임피던스는 단락스텝의 경우에는 그 특성임피던스가 커질수록 대역폭이 커지게 된다. 따라서 본 논문에서는 원하는 대역을 만족시키기 위해  $200 \Omega$

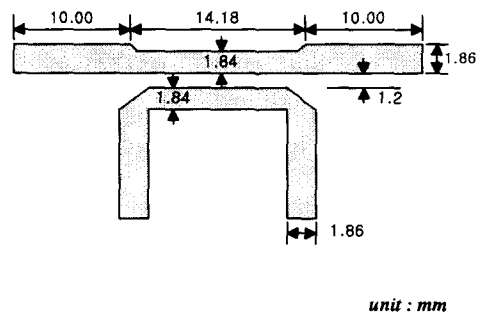


그림 6. 방향성 결합기의 설계도면  
Fig. 6. The layout of directional coupler.

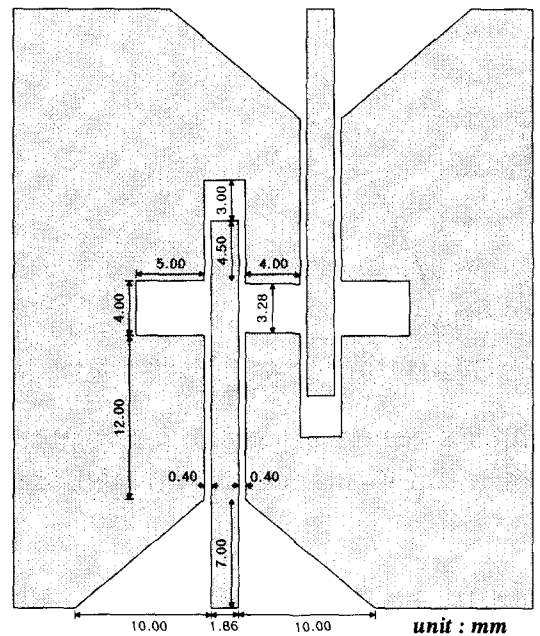


그림 7. 평판형 발룬의 설계도면  
Fig. 7. The layout of planar balun.

으로 설계하였다. 개방스텝의 경우에는 대역에서의 부정합을 최소화하기 위한 값이 식(5)와 같이 주어진다<sup>[2],[5]</sup>. 하지만 본 논문에서는 신호의 크기가 상대적으로 큰 LO 신호를 발룬을 통해 인가하기 때문에 부정합에 의한 손실을 감수하고 공정상의 편의를 위해 등평면 도파관의 특성임피던스와 같은  $70 \Omega$ 으로 설계하였다.

평판형 발룬을 이용한 단일 평형 광대역 주파수 혼합기의 설계 및 제작

$$Z_{b,opt} = \left[ \frac{Z_a \tan^2 \left( \frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_x}{f_o} \right)}{1 + \left( \frac{Z_a}{Z_L} \right)^2 \tan^2 \left( \frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_x}{f_o} \right)} \right] \quad (5)$$

각 스테르브의 길이는 원하는 대역을 만족시키기

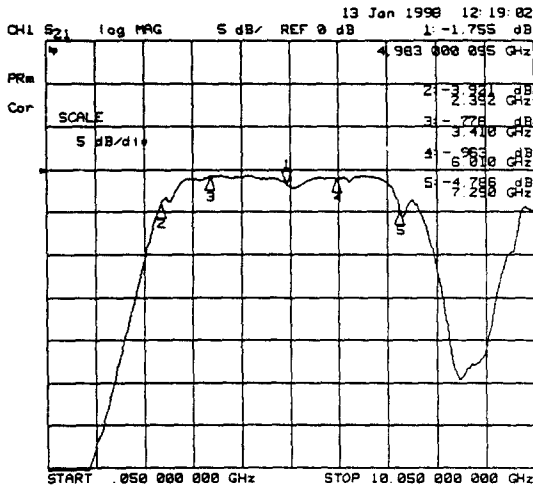


그림 8. 평판형 발룬의 전달 특성

Fig. 8. The transfer characteristic of planar balun.

위해 튜닝을 통하여 각각 5 mm와 4.5 mm로 선택하였다. 이 값들은 원하는 LO 신호의 중심주파수인 4.7 GHz의  $\lambda/4$ 보다 작은 값이다. 이는 각각의 스테르브의 가장자리 효과로 인해 설계치보다 작은 값에서 개방 및 단락회로로 동작하기 때문이다. 그리고 슬롯라인 출력단의 경우는 모델링된 다이오드의 입력 임피던스와의 정합을 위해 153  $\Omega$ 으로 설계, 제작하였다. 실제로 대부분의 고주파 계측 장비 RF 수신단에서는 마이크로스트립라인을 통하여 YIG에서 발생된 LO 신호를 전송시킨다. 따라서 등평면 도파관을 이용한 발룬을 사용하기 위해서는 마이크로스트립라인과 등평면 도파관과의 연결이 필수적이다. 두 전송선의 연결은 그림과 같이 접지면을 테퍼(tapper)의 형태로 구성하여 고차모드의 발생을 억제하고 마이크로스트립라인의 특성 임피던스인 50  $\Omega$ 과 등평면 도파관의 특성임피던스인 70  $\Omega$ 의 연결에 의해 발생하는 임피던스 부정합에 의한 LO 신호의 손실을 최대한 방지하도록 하였다.

그림 8은 발룬의 전달 특성을 나타내고 있다. 주파수 혼합기에 사용될 경우의 원하는 대역인 3.4107

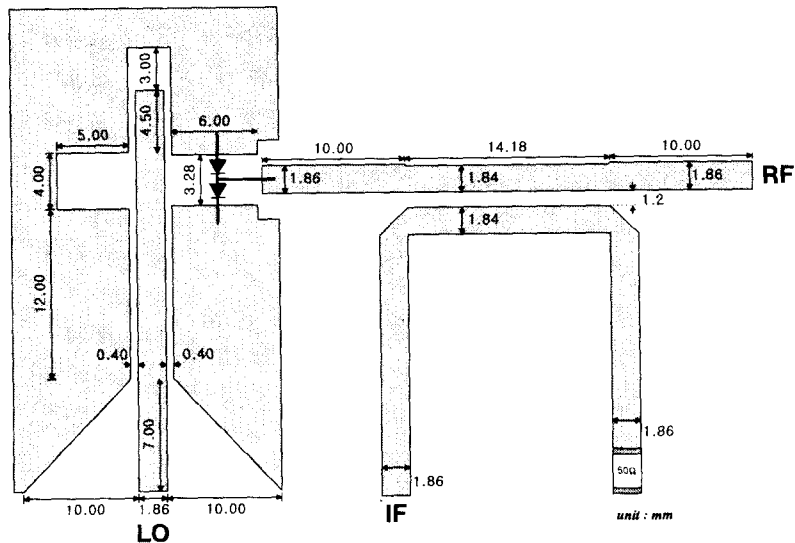


그림 9. 광대역 주파수 혼합기의 설계도면

Fig. 9. The layout of wideband mixer.

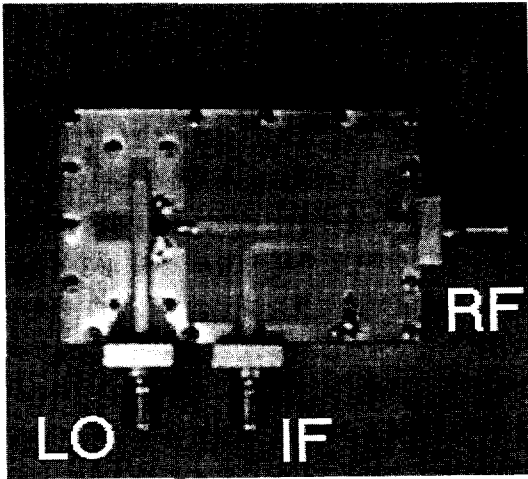


그림 10. 제작된 광대역 주파수 혼합기  
Fig. 10. Photograph of fabricated wideband mixer.

~6.0107 GHz에서는 2 dB 이내의 손실을 가지는 전달 특성을 나타내었고, 통과 대역에서의 평탄도도 1 dB 이내로 나타나 전체의 LO 대역에 대해 작은 손실과 평탄한 특성을 만족시켜 설계된 발룬을 광대역 주파수 혼합기에 적용할 수 있음을 확인하였다.

### III. 광대역 주파수 혼합기의 제작

설계, 제작된 발룬과 방향성 결합기를 이용하여 광대역 주파수 혼합기를 RT/Duroid 3003( $\epsilon_r=3.0$ ) 기판을 이용하여 제작되었다. 그림 9와 그림 10은 각각 설계된 광대역 주파수 혼합기의 치구 도면과 실제 제작된 광대역 주파수 혼합기를 나타내고 있다.

### IV. 광대역 주파수 혼합기의 측정 결과

광대역 주파수 혼합기에 대한 측정은 변환손실과 격리도의 두 가지 항목으로 나누어 행하여졌다. 측정은 LO 신호와 RF 신호의 전력을 각각 9 dBm, -10 dBm으로 입력하여 행하였다. 그리고 측정은

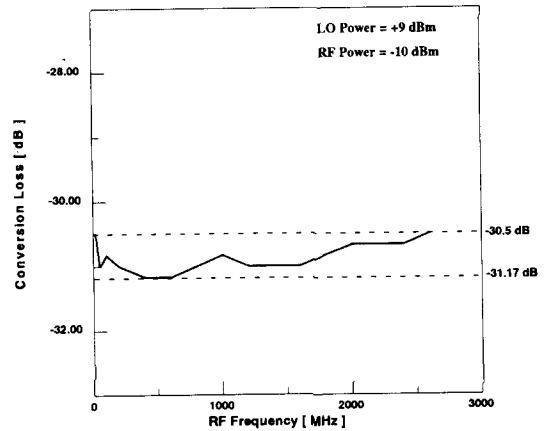


그림 11. 주파수 혼합기의 변환손실 특성  
(RF=-10 dBm, LO=9 dBm)

Fig. 11. Conversion loss of mixer.  
(RF=-10 dBm, LO=9 dBm)

상온인 25°C에서 행하여 졌다. 먼저 주파수 혼합기의 변환손실을 측정하여 그림 11과 같은 RF 주파수에 대한 변환손실 특성을 얻었다. 그림 11에 나타난 변환손실 특성은 원하는 RF 주파수 대역인 9 kHz~2.6 GHz에서 30.5~31.17 dB의 값을 나타내어 그 평탄도가 0.6 dB이내임을 알 수 있었다. 0.6 dB이내의 평탄도를 나타내는 것은 제작된 주파수 혼합기가 광대역 특성을 잘 만족시키고 있음을 나타내고 이 주파수 혼합기를 실제의 시스템에 적용이 가능한 것을 나타내고 있다. 방향성 결합기를 사용하여 출력 전력이 다소 작게 나타나지만 이는 혼합기 뒷단의 IF 증폭기의 이득을 크게 하여 보상할 수 있다.

주파수 혼합기의 격리도에 대한 측정은 신호의 크기가 큰 LO 신호의 격리도에 대해 행하였다. LO 신호의 격리도는 LO/RF 격리도와 LO/IF 격리도의 두 가지로 분류된다. LO 신호에 대한 격리도를 측정한 결과는 그림 12와 같이 RF단에 대해서는 30~39.17 dB로서 30 dB 이상의 격리도를 나타내었고 IF단에 대해서는 33~41.83 dB로서 33 dB 이상의 높은 격리도를 나타내었다. LO 신호에 대

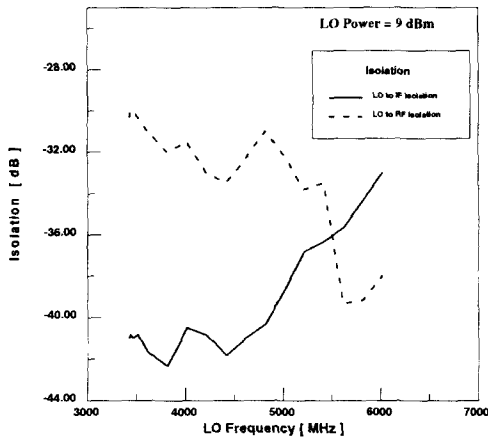


그림 12. LO 신호에 대한 격리도 특성(LO=9 dBm)  
Fig. 12. Isolation for LO signal(LO=9 dBm).

해 이와 같이 높은 격리도를 나타냄으로서 높은 결합계수를 가지는 방향성 결합기를 사용하여 시스템에 적용될 경우 시스템의 주파수 선택도와 스퓨리어스 특성을 개선하려는 설계목적은 만족시켰다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 스펙트럼 분석기와 같은 고주파 계측장비의 RF 수신단에 사용될 수 있는 광대역 주파수 혼합기를 등평면 도파관과 슬롯라인의 신호 천이를 통한 평판형 발륜을 이용하여 설계, 제작하였다. 평판형 발륜을 설계하여 주파수 혼합기에 적용하는 과정에서 설계된 발륜이 주파수 혼합기에 적용이 가능함을 발륜만의 전달 특성을 측정하여 시험하였다. 그 결과 발륜이 전달하여야 하는 LO 신호의 대역인 3.4107~6.0107 GHz에서 손실이 2 dB 이내로 나타나고 평탄도도 1 dB 이내로 나타나 설계된 발륜을 주파수 혼합기에 적용할 수 있음을 알 수 있었다. 설계된 평판형 발륜을 사용하여 광대역의 LO 신호를 작은 손실을 가지는 평형형의 신호로 다이오드에 인가시켜 줌으로써 주파수 혼합기가 광대역의 RF 신호에 대해 동일한

동작을 할 수 있도록 제작하여 주파수 혼합기는 원하는 9 kHz~2.6 GHz의 RF 주파수 대역에서 평탄도가 1 dB 미만이고, 그 값이 30.5~31.17 dB인 변환손실 특성을 나타내었다. 또 LO 신호에 대한 높은 격리도를 나타내도록 하여 시스템에 이용할 때 전체 시스템의 주파수 선택도와 스퓨리어스 특성을 개선하도록 하기 위해 방향성 결합기를 사용하여 RF 및 IF 단을 설계, 제작하여 LO 신호에 대한 격리도는 RF단에 대해 30 dB 이상, IF단에 대해서는 33 dB 이상의 격리도를 나타내었다.

제작된 광대역 주파수 혼합기는 9 KHz~2.6 GHz 대역의 스펙트럼 분석기 RF 수신단의 광대역 주파수 혼합기로 사용이 가능하고 발륜의 구조를 조정함으로써 주파수 대역이 넓어지더라도 이용이 가능하다. 방향성 결합기를 사용하여 검출된 IF신호의 크기가 다소 작은 점이 있으므로 이러한 점을 개선하기 위하여 RF단과 IF단의 구조를 방향성 결합기 대신 마이크로스트립 T-접합을 이용하여 제작할 수 있다. 이런 구조에 대한 주파수 혼합기의 설계를 진행 중에 있다.

#### 참 고 문 헌

- [1] K. C. Gupta, Ramesh Garg, Inder Bahl, Prakash Bhartia, *Microstrip Lines and Slotlines*, Artech House, Inc., Chap. 7, 1996.
- [2] Wes Grammer, K. Sigfrid Yngvesson, "Co-planar Waveguide Transitions to Slotline : Design and Microprobe Characterization", *IEEE Trans, Microwave Theory Tech.*, vol MTT-41, no-9, Sep. 1993.
- [3] Stephen V. Robertson, Linda P. B. Katehi, Gabriel M. Rebeiz, "A Planar Quasi-Optical Mixer Using a Folded-Slot Antenna", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-43, no-4, Apr. 1995.
- [4] E. Vourch, M. Drissi, J. Citerne, V. Fouad



Hanna, "A Full-Wave Analysis of Coplanar waveguide-Slotline Transition", *IEEE MW-SYM Digest*, vol. 2, 1994, pp. 1309~1312

- [5] George Oltman, "The Compensated Balun", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol MTT-14, no-3, Mar. 1966.
- [6] Stephen A. Mass, *Microwave Mixers*, Artech House, Inc., Chap. 2, 1986.

[7] Inder Bahl, *Microwave Solid State Circuit Design*, Wiley-Interscience Publication., Chap. 11.3, 1988.

- [8] David M. Pozar, *Microwave Engineering*, Addison-Wesely, Chap. 8, 1996.
- [9] Brian C. Wadell, *Transmission Line Design Handbook*, Artech House, Inc., Chap 4.5, 1991.

김 성 민



1997년 2월: 경북대학교 전자,전기공학부(공학사)  
 1997년 3월~현재: 경북대학교 대학원 전자공학사 석사과정  
 [주 관심분야] 고주파 회로설계 주파수 혼합기 설계 RF 시스템 설계 등

최 현 철



1982년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학사)  
 1984년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사)  
 1989년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학박사)  
 1989년~1990년: 대현정밀(주) 연구

정 재 호



1994년 2월: 경북대학교 무기재료공학과(공학사)  
 1996년 2월: 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사)  
 1996년 3월~현재: 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정  
 [주 관심분야] 고주파 회로설계 압

소장  
 1990년~1992년: 경북대학교 공과대학 전자공학과 전임강사  
 1992년~1996년: 경북대학교 공과대학 전자공학과 조교수  
 1996년~현재: 경북대학교 전자, 전기공학부 부교수  
 [주 관심분야] 전파전파 및 역산란해석 초고주파 회로 및 시스템 설계 EMI/EMC 등

전체 수치해석 RF 시스템설계 등