

工學碩士 學位論文

X-band 用 Zero IF 構造의 抵抗性  
周波數 混合器 設計 및 具現

Design and Implementation of Resistive Mixer of Zero  
IF Structure at X-Band

指導教授      朴東國

2006年 8月

韓國海洋大學校 大學院

電子通信工學科

韓泰京

# 목 차

Abstract

제 1장 서론.....	1
제 2장 주파수 혼합기.....	3
2.1 주파수 혼합기의 원리.....	3
2.2 주파수 혼합 소자.....	5
2.3 주파수 혼합기의 종류.....	10
2.4 저항성 주파수 혼합기.....	12
제 3장 Zero IF 구조의 저항성 주파수 혼합기의 설계.....	15
3.1 저항성 주파수 혼합기의 설계.....	15
3.2 DC 바이어스 및 저역 통과 필터 회로 설계.....	17
3.3 단일 종단의 저항성 주파수 혼합기 설계.....	20
3.4 단일 평형의 저항성 주파수 혼합기 설계.....	21
제 4장 실험 결과 및 고찰.....	27
4.1 주파수 혼합기의 측정 결과.....	27
4.2 실험결과 검토.....	37
제 5장 결론.....	39
참 고 문 헌.....	40

# 그 립 목 차

〈그림 2-1〉 주파수 혼합기의 블록도.....	3
〈그림 2-2〉 상호 변조 곱에 의한 혼합기의 출력 스펙트럼.....	4
〈그림 2-3〉 GaAs MESFET의 물리적 구조에 따른 내부 등가 회로.....	6
〈그림 2-4〉 GaAs MESFET의 저항 영역과 포화 영역의 I-V 특성.....	8
〈그림 2-5〉 GaAs MESFET의 저항 영역 등가회로.....	9
〈그림 2-6〉 주파수 혼합기의 종류.....	11
〈그림 2-7〉 단일 평형 저항성 주파수 혼합기의 구조.....	14
〈그림 3-1〉 DC 바이어스 설계 및 분석 결과.....	18
〈그림 3-2〉 저역 통과 필터 설계 및 분석 결과.....	19
〈그림 3-3〉 단일 종단 저항성 주파수 혼합기 설계 및 제작.....	21
〈그림 3-4〉 동상 및 180° 위상 분배회로 설계 및 분석 결과.....	22
〈그림 3-5〉 단일 평형 저항성 주파수 혼합기의 회로도.....	24
〈그림 3-6〉 단일 평형 저항성 주파수 혼합기의 설계도.....	25
〈그림 3-7〉 단일 평형 저항성 주파수 혼합기의 제작.....	26
〈그림 4-1〉 LO 및 RF 입력정합의 전압 정재파비 및 반사손실.....	27
〈그림 4-2〉 단일 종단 혼합기의 RF 전력에 따른 변환손실.....	29
〈그림 4-3〉 단일 종단 혼합기의 LO 전력에 따른 변환손실.....	30
〈그림 4-4〉 단일 평형 혼합기의 RF 전력에 따른 변환손실.....	32
〈그림 4-5〉 단일 평형 혼합기의 LO 전력에 따른 변환손실.....	33
〈그림 4-6〉 1-dB 압축점(compression point)의 분석 결과.....	34
〈그림 4-7〉 LO:RF 간 격리도에 대한 분석 결과.....	35
〈그림 4-8〉 LO:IF 간 격리도에 대한 분석 결과.....	36
〈그림 4-9〉 RF:IF 간 격리도에 대한 분석 결과.....	36

## 표 목 차

<표 2-1> 내부 등가회로의 소자 명칭.....	7
<표 2-2> 내부 등가회로의 소자 값.....	9
<표 3-1> 저항성 주파수 혼합기의 설계 사양.....	16
<표 4-1> 일반적인 혼합기와 본 논문의 혼합기 비교.....	35
<표 4-2> 단일 종단 과 단일 평형 주파수 혼합기의 비교.....	37
<표 4-3> X-Band의 혼합기와 비교.....	38

# Abstract

A mixer is a key component in the wireless communication systems. In this paper, we design a mixer which is used in a frequency modulated continuous wave(FMCW) radar system. The frequency sweep range of the radar is from 10 GHz to 11 GHz. The transmitted and received signals of the radar are applied to LO and RF ports of the mixer, but the frequency difference between the two signals, which is called beat frequency, is under a few KHz and depending on the distance to target. Thus the isolation between the LO and RF ports is very important factor to design this mixer.

In this paper we propose a single balanced resistive mixer using GaAs MESFET for this application. We first design a single-ended type resistive mixer using a simulation tool, and next design a balanced type to increase the LO-to-RF isolation of the mixer. We fabricated the mixer using GaAs MESFET on substrate of dielectric constant 10 and thickness 0.635 mm. The measured results show that the isolation and conversion loss of the mixer over the frequency band is 20dB and 10.5dB, respectively. The LO input power for operating the proposed mixer is +3dBm, which is lower than a general conventional mixer's LO power. The 1 dB compression point is 6dBm.

# 제 1 장 서 론

근래 모바일 폰 및 ISM 대역 통신, 위성통신, HDTV, DMB, 전락 레이다 등의 분야에서 안테나 및 각종 소자의 소형화에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[1]-[5]. 주파수 혼합기란 이러한 응용 분야의 수신 단에 사용되는 소자로서 높은 주파수의 RF(Radio Frequency) 신호를 전력이 큰 LO(Local Oscillator) 신호와 혼합시켜 증폭, 필터링, 검파 등의 신호처리가 비교적 쉬운 IF(Intermediate frequency) 신호로 바꾸는 역할을 한다.

이러한 주파수 혼합은 일반적으로 비선형 저항 특성을 갖는 다이오드나 FET를 이용해서 구현하는데, 밀리미터파 대역에서는 잡음지수가 낮고 고속 동작 특성이 우수한 쇼트키 장벽 다이오드 및 GaAs MESFET, HEMT 등의 소자가 주로 사용되고 있다[6],[7]. 일반적으로 FET를 이용한 주파수 혼합기는 소자의 비선형성을 이용하는 방법에 따라 핀치-오프(Pinch-off) 영역에서의 전달컨덕턴스의 비선형성을 이용하는 게이트 주파수 혼합기[8], 드레인 전류가 포화되는 지점에서 포화영역과 비포화 영역의 드레인 컨덕턴스의 비선형성과 전달컨덕턴스를 이용하는 드레인 주파수 혼합기[9], 그리고 드레인 컨덕턴스를 이용하는 저항성 주파수 혼합기[10]로 구분될 수 있다.

일반적으로 수신단의 구조에서 주파수 혼합기는 저잡음 증폭기 및 국부발진기와 함께 수신기의 중요한 요소이다. 수신기의 잡음 특성과 수신 가능한 최소 신호 수준이 저잡음 증폭기에 의해서 주로 결정되는 반면에, 고조파 왜곡(IM : Inter-Modulation) 특성은 주로 주파수 혼합기에 의해서 결정된다[11].

본 논문에서는 주파수 혼합기를 낮은 잡음 및 최소 신호 수준, 고조파 왜곡 특성 등을 고려하여 설계 하고자 한다. 이러한 설계 조건을 만족하기 위해서 잡음 특성과 상호변조 왜곡(Intermodulation Distortion : IMD)이 낮은 저항성 혼합기를 사용하였다[12]. 제작된 주파수 혼합기는 마이크로 스트립 선로를 이용하여 설계하였고, 비선형 소자는 GaAs MESFET을 사용하였다. 그리고 LO와 RF의 주파수는 동일하게 입력하여 Zero-IF의 출력을 얻었다. 실험은

저항성 주파수 혼합기의 검증을 위해 단일 종단(Single-ended) 형태를 구현하였고, 다음으로 LO:RF, LO:IF 등의 격리도와 고조파 억제, LO의 AM Noise 제거가 가능한 단일 평형(Single Balanced) 형태의 저항성 주파수 혼합기를 설계 및 제작하였다.

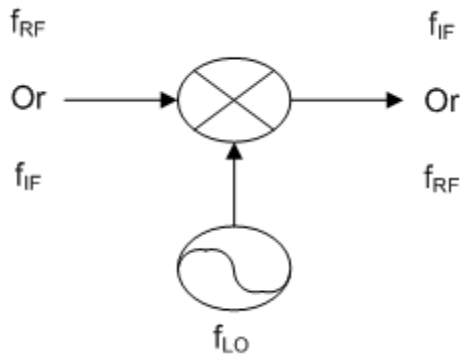
2장에서는 주파수 혼합기의 이론과 종류를 알아본다. 3장에서 Zero IF 구조의 단일 평형 저항성 믹서의 설계 및 제작에 대하여 기술하였다. 4장에서는 실험 결과 및 고찰을 하였다. 5장에서는 결론을 맺었다.

## 제 2 장 주파수 혼합기

본 장에서는 주파수 혼합기의 원리를 알아보고, 주파수 혼합을 위한 비선형 소자인 GaAs MESFET의 등가회로를 살펴본다. 그리고 주파수 혼합기의 종류 및 저항성 혼합기에 대해서 설명하고자 한다.

### 2.1 주파수 혼합기의 원리

주파수 혼합기는 낮은 전력의 신호를 높은 전력의 신호와 비선형 소자를 통하여 혼합함으로써 한 주파수에서 다른 주파수로 천이시키는 회로이다. 혼합기의 기본 블록도는 <그림 2-1>과 같다[13],[14].



<그림 2-1> 주파수 혼합기의 블록도

정현파신호가 선형회로에 인가되면 출력신호는 입력신호와 같은 주파수를 갖는다. 그러나 비선형 회로에 인가되면 입력신호의 기본파와 고조파 성분들이 발생한다. 두 개의 정현신호가 비선형 회로에 인가되면 개개 신호의 기본파와 고조파 성분, 그리고 상호변조 주파수가 발생한다. 비선형 소자에 흐르는 전류는 테일러 급수에 의하여 식 (2.1)과 같이 나타낼 수 있다.



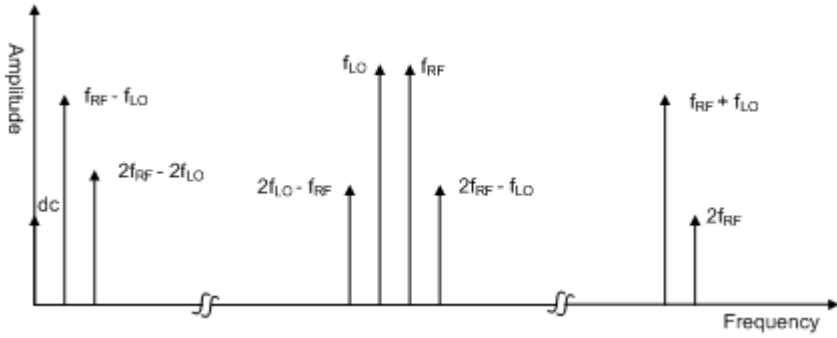
$$i = a_0 + a_1v + a_2v^2 + a_3v^3 + \dots \quad (2.1)$$

여기서 전압( $v$ )을 혼합기에 인가되어 지는 두 신호원으로 보면 식 (2.1)의 전류 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v = v_{RF} \sin w_{RF} t + v_{LO} \sin w_{LO} t \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned}
 i = & a_0 + \frac{a_2}{2} (v_{LO}^2 + v_{RF}^2) && \text{DC 성분} \\
 & + a_1 v_{LO} \cos w_{LO} t && \text{LO 성분} \\
 & + a_1 v_{RF} \cos w_{RF} t && \text{RF 성분} \\
 & + a_2 v_{LO} v_{RF} \cos (w_{RF} - w_{LO}) t && \text{차신호 성분} \\
 & + a_2 v_{LO} v_{RF} \cos (w_{RF} + w_{LO}) t && \text{합신호 성분} \\
 & + \frac{a_2}{2} v_{LO}^2 \cos 2w_{LO} t && \text{LO 2차 고조파 성분} \\
 & + \frac{a_2}{2} v_{RF}^2 \cos 2w_{RF} t && \text{RF 2차 고조파 성분} \\
 & + \dots && \text{기타 고조파 및 IMD 성분들}
 \end{aligned} \quad (2.3)$$

<그림 2-2>와 같이 주파수 혼합기의 출력 성분은 복수의 주파수 성분이 존재하고 있기 때문에 필터를 이용하여 원하는 성분만을 취하여야 한다.



<그림 2-2> 상호 변조 곱에 의한 혼합기의 출력 스펙트럼

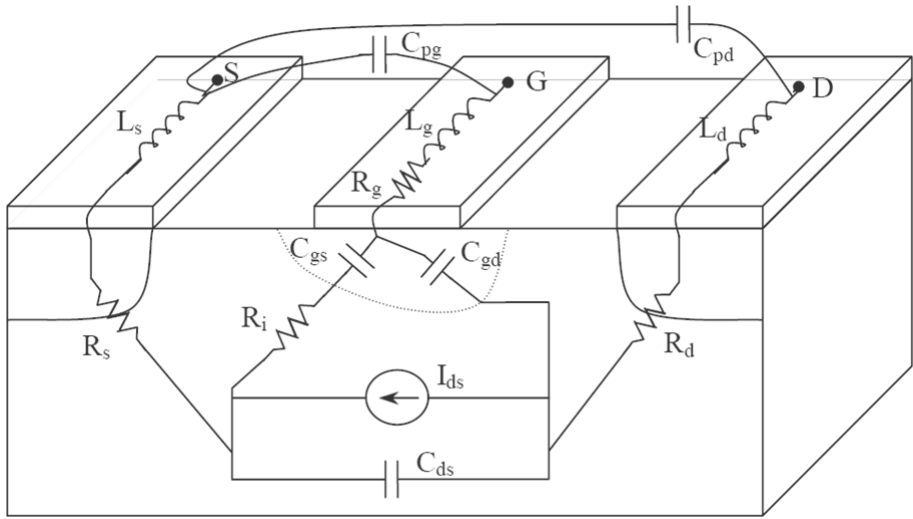
## 2.2 주파수 혼합소자

주파수 혼합은 일반적으로 비선형 저항 특성을 갖는 다이오드나 FET를 이용해서 구현하는데, 밀리미터파 대역에서는 잡음지수가 낮고 고속 동작 특성이 우수한 쇼트키 장벽 다이오드 및 GaAs MESFET, HEMT 등의 소자가 주로 사용되고 있다[15],[16].

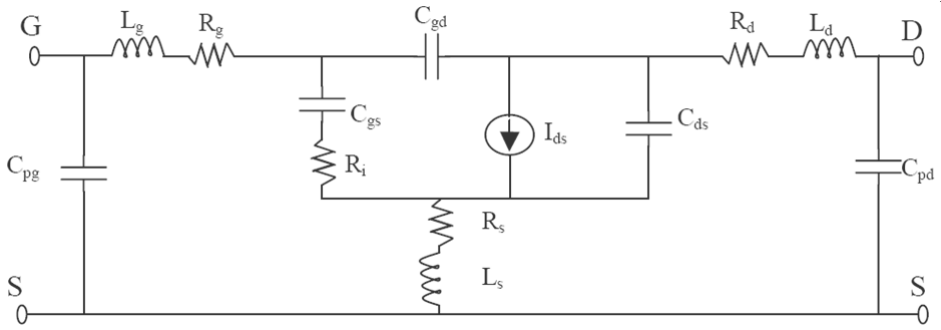
본 논문은 비선형 소자로서 GaAs MESFET을 이용하여 주파수 혼합을 하였다. 먼저 GaAs MESFET에 대한 등가회로를 알아보고, 설계하고자 하는 GaAs MESFET의 저항성 영역에서의 등가회로를 설명한다.

### 2.2.1 GaAs MESFET의 등가 회로

GaAs MESFET 소자는 종래의 BJT나 다른 FET에 비해 수백MHz-40GHz 범위의 혼합기 및 증폭 소자로 널리 이용되고 있다. 아래 <그림 2-3>은 n-채널의 GaAs MESFET에 대한 물리적인 구조에 따른 내부 등가회로를 나타내었다. 이러한 등가회로를 모델링이라고 하는데 물리적인 구조에 따라 정확한 해석은 실제 회로를 구현 시 설계 오차를 줄일 수 있다.



(a) 물리적 구조



(b) 내부 등가회로

<그림 2-3> GaAs MESFET의 비선형 등가회로

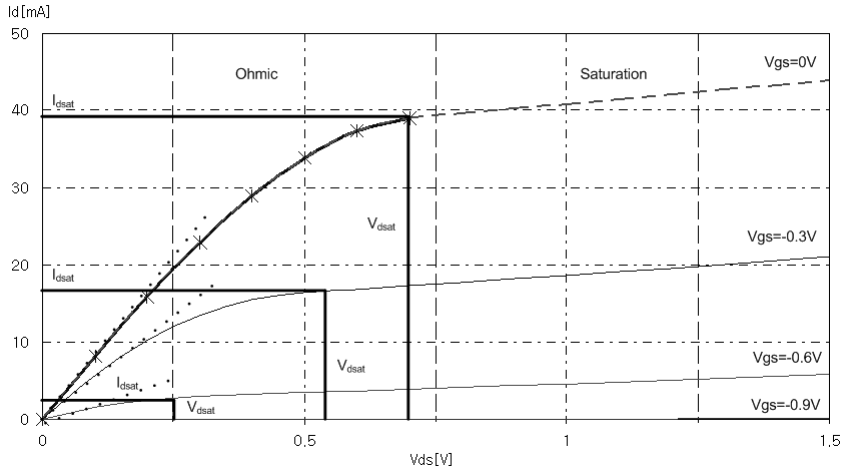
여기서 내부 등가 회로의 각각의 소자의 명칭은 다음 <표 2-1>과 같다.

<표 2-1> 내부 등가회로의 소자 명칭

소자	명칭	소자	명칭
$L_g$	게이트 인덕턴스	$R_d$	드레인 저항
$R_g$	게이트 저항	$L_d$	드레인 인덕턴스
$L_s$	소스 인덕턴스	$I_{ds}$	전압제어 전류
$R_s$	소스 저항	$R_i$	채널 내부 저항
$C_{gs}$	게이트-소스 커패시턴스	$C_{as}$	드레인-소스 커패시턴스
$C_{gd}$	게이트-드레인 커패시턴스	$C_{pg}, C_{pd}$	기생 커패시턴스

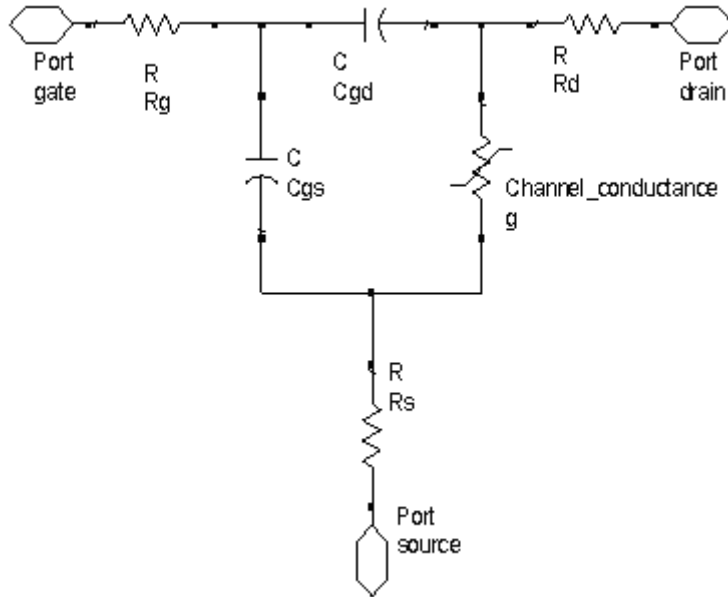
### 2.2.2 저항 영역에서 GaAs MESFET의 등가회로

드레인 전압이 인가되지 않은 GaAs MESFET의 채널 저항은 매우 약한 비선형성을 갖고 있으며, 이 저항은 게이트 전압을 변화시킴으로써 바꿀 수 있다. 일반적으로 FET의 I-V 곡선에서 이 부분을 선형 혹은 전압제어 저항영역이라고 말한다. <그림 2-4>는 게이트 길이가  $0.2\mu\text{m}$ , 게이트 폭이  $160\mu\text{m}$ 인 NE4210S01 GaAs MESFET의 I-V특성을 나타내었다. 게이트 소스 전압이  $-0.9\text{V}\sim 0\text{V}$ 에서 외인성 저항을 포함한 총 채널 저항을 보여주고 있다. 이 저항 영역은 양호한 변환 효율을 가진 MESFET 주파수 혼합기를 실현하는데 적합하다.



<그림 2-4> GaAs MESFET의 저항 영역과 포화 영역의 I-V 특성

<그림 2-4>는 드레인 전압이 인가되지 않은 GaAs MESFET의 등가회로이다. 내부 파라미터의 명칭은 <표 2-1>과 같으며,  $g$ 는 채널 컨덕턴스를 의미한다. 여기서 게이트/채널 커패시턴스는 채널을 따라 분포되고 있는데 간략화를 위해 2개의 집중 커패시턴스, 즉  $C_{gs}$ 와  $C_{gd}$ 로 표현되어 있다. 만일 전압이 FET의 포화 영역으로 인가되면  $C_{gd} \ll C_{gs}$ 이고,  $V_{ds} = 0$ 이라면  $C_{gs}C_{gd}$ 이며 각각은 게이트/채널 커패시턴스의 1/2이 된다. 채널의 컨덕턴스는 게이트 전압  $G(V_g)$ 에 의해 컨덕턴스가 정해진다.



<그림 2-5> GaAs MESFET의 저항 영역 등가회로

그리고 아래 <표 2-2>는 GaAs MESFET의 저항성 영역에서 동작 시 내부 등가 소자의 값을 나타낸다. 아래의 수치는 NEC 사에서 제공되는 데이터를 참고하였다[17].

<표 2-2> 내부 등가회로의 소자 값

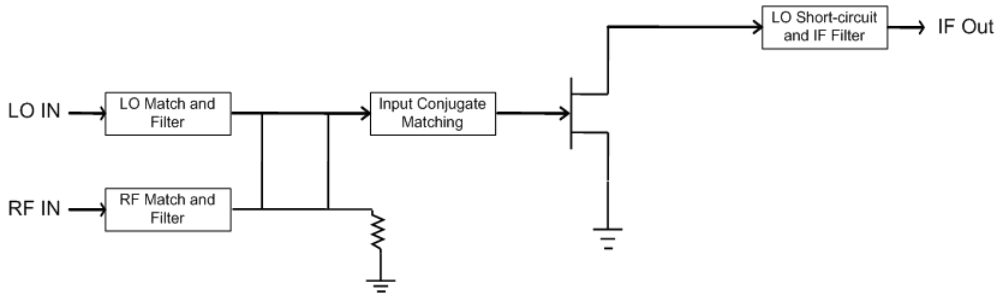
소자	수치	소자	수치
$R_g$	$6\Omega$	$L_d$	$0.68nH$
$L_g$	$0.72nH$	$C_{as}$	$0.035pF$
$R_s$	$0.06\Omega$	$C_{gd}$	$0.001pF$
$L_s$	$0.1nH$	$C_{gs}$	$0.04pF$
$R_d$	$6\Omega$	$g$	$40 \sim 50mS$

## 2.3 주파수 혼합기의 종류

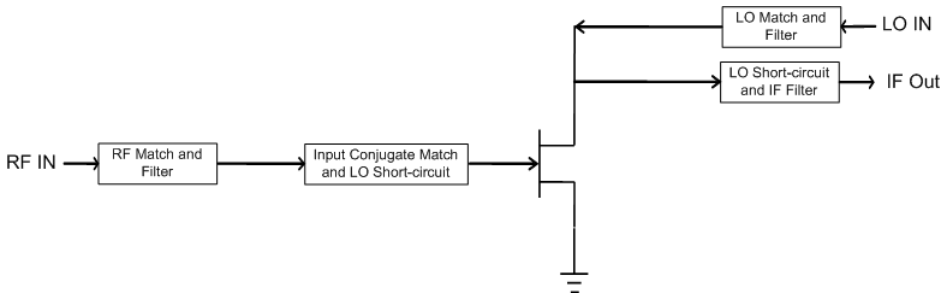
일반적으로 FET를 이용한 주파수 혼합기는 소자의 비선형성을 이용하는 방법에 따라 핀치-오프(Pinch-off) 영역에서의 전달컨덕턴스의 비선형성을 이용하는 게이트 주파수혼합기, 드레인 전류가 포화되는 지점에서 포화영역과 비포화영역의 드레인 컨덕턴스의 비선형성과 전달 컨덕턴스를 이용하는 드레인 주파수 혼합기, 그리고 드레인 컨덕턴스를 이용하는 저항성 주파수 혼합기로 구분될 수 있다[8]-[10].

혼합 형태에서 게이트와 드레인 혼합기는 능동 혼합이 이뤄져서 변환 이득을 갖고, 반면에 저항성 혼합기는 게이트에만 전압이 인가되므로 완전한 능동 혼합은 이루지 못해 변환 손실을 갖는다. 그런데 능동 혼합기는 동적범위가(Dynamic Range) 좁기 때문에 협대역에서 사용이 가능하나, 광대역에서는 특성이 수동 혼합기에 비해 나쁘고, 상호변조도가 좋지 못하다. 그러나 저항성 혼합기는 수동 소자로서 동작하므로, 비교적 혼합기의 다른 형태에 비해 동적범위가 넓어 광대역의 특성을 지닌다. 또한 혼합기 잡음은 내부의 저항성 잡음만 존재 하므로 우수한 잡음 특성(Noise Figure : NF)을 지니고, 매우 낮은 상호 변조왜곡(InterModulation Distortion : IMD) 특성으로 인해 비교적 선형적인 주파수 혼합을 이룬다.

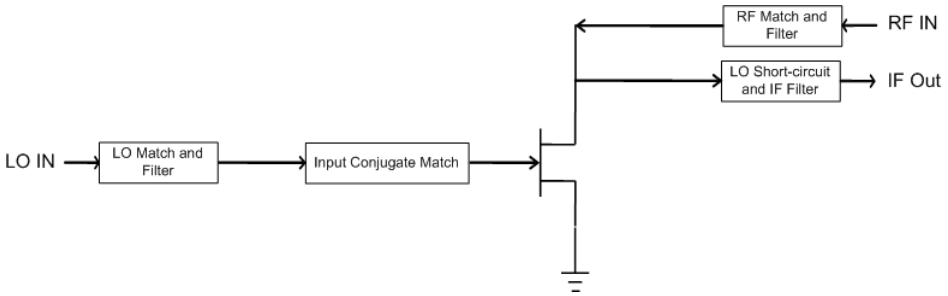
본 논문에서는 10GHz-11GHz의 광대역 주파수를 이용하고, 저잡음 및 낮은 상호변조 특성을 지니는 저항성 혼합기가 적합하다. <그림 2-6>은 주파수 혼합기의 종류이다.



(a) 게이트 혼합기



(b) 드레인 혼합기



(c) 저항성 혼합기

<그림 2-6> 주파수 혼합기의 종류



## 2.4 Zero IF 구조의 저항성 주파수 혼합기

### 2.4.1 단일 종단의 저항성 주파수 혼합기

저항성 혼합기는 일종의 게이트 혼합기로서 비포화 영역에서 시간에 따라 변하는 저항성분을 얻기 위해 FET의 채널저항인 드레인-소스 저항의 비선형성을 이용한다. 이 저항의 매우 약한 비선형성 때문에, 저항성 혼합기는 매우 낮은 상호변조도(Intermodulation)를 가지며 높지 않은 LO 전력 레벨에서 매우 높은 출력 전력을 얻을 수 있다. 저항성 혼합기의 경우에, LO의 주기로 시간에 따라 바뀌는 채널 저항( $R_{ds}$ )이 채널을 ON/OFF 시키는 스위치 역할을 한다고 할 수 있다. 이상적인 스위치라고 가정할 때 상호변조 왜곡 특성이 없으므로 저항성 혼합기가 상대적으로 적은 상호변조 왜곡 특성을 갖는다는 것을 알 수 있다. 또한 저항성 혼합기의 잡음은 채널저항에 의한 열잡음(thermal noise) 즉, 저항성(ohmic) 잡음만이 존재하고 직류 전류에 비례하는 산탄 잡음(shot noise)은 존재하지 않는다. 그러므로 드레인 혼합기나 게이트 혼합기에 비해 우수한 잡음 특성을 갖는다.

MESFET의 채널( $g(V_g)$ )은 낮은 드레인-소스 전압에서 매우 선형적인 저항이다. 이 선형 채널의 저항은 게이트에 LO 신호를 인가함으로써 변화시킬 수 있다. 즉, LO 전압은 게이트 밑의 공핍층의 깊이를 변화시킴으로써 채널 저항을 변화시킨다. 게이트 전압이 FET의 turn-on 전압이하로 떨어질 때의 저항은 실제로 무한대와 같고, 게이트 전압이 게이트의 채널 전도를 유도시키는 값에 도달할 때의 채널 저항은 매우 작다. 보통 수 옴의 값을 가지며, 이러한 저항의 범위는 저항성 혼합기에서 우수한 변환(conversion) 특성을 얻기에 충분하다[10].

<그림2-6> (c)에서와 같이 단일 종단 형태의 저항성 주파수 혼합기를 구현하려면, MESFET은 공통 소스 형태에서 동작된다. 그리고 게이트에 부

(negative)의 전압으로 바이어스 되고, LO 전력이 인가되며, 드레인에는 RF 전력을 인가하고, 저역 통과 여파기를 통해 IF 전력을 추출해 낸다.

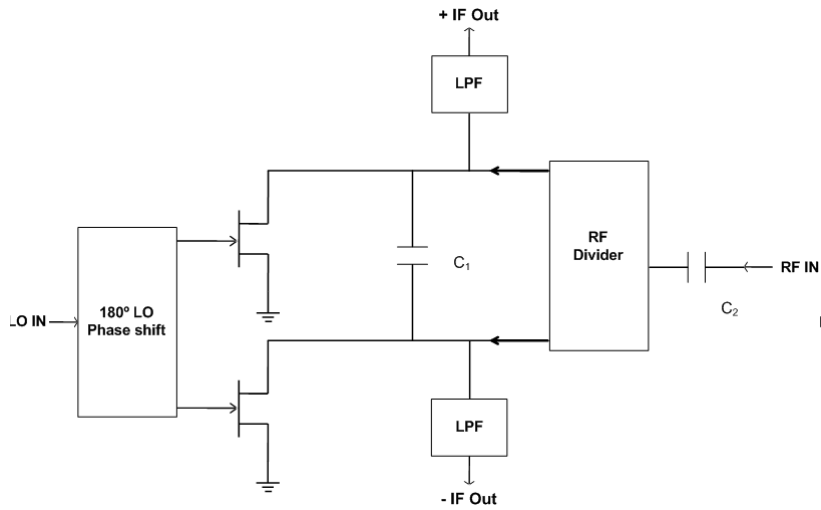
이를 내부 등가회로인 <그림 2-5>에서 보면,  $V_{gs}$ 가  $V_p$ (pinch-off voltage)보다 약간 더 큰 값일 때  $C_{gs}$ 는  $V_{ds}=0$ 인  $C_{gd}$ 와 비슷한 크기의 용량 값을 갖는다.  $V_{ds}=0$ 일 때 상대적으로 큰 값의  $C_{gd}$ 는 RF 전력과 LO 전력을 결합시키나, 상대적으로 LO에 대한 RF의 격리도는 나빠진다. 그래서 단일 소자 혼합기에서는 RF와 LO가 각각의 반대되는 포트에서 단락이 되도록 설계되어야 한다. 만일 RF 전압이 게이트에 전달이 된다면 상호변조가 채널 컨덕턴스  $g(V_g)$ 에서 비선형 때문에 증가한다는 것을 생각할 수 있다. 만일 RF 주파수가 게이트에서 단락된다면 어떤 RF 전압도 게이트에 나타나지 않고 상호변조가 생길 가능성이 없다. 또한 LO 주파수 역시 드레인에서 단락이 되도록 설계가 된다면 LO에 대한 RF의 격리도가 향상된다[11].

## 2.4.2 단일 평형 저항성 주파수 혼합기

RF와 LO가 동일한 주파수의 단일 종단 형태의 저항성 주파수 혼합기는 LO에 대한 RF의 격리도가 좋지 못하다. 그 이유는 일반적인 경우에는 RF와 LO의 주파수가 동일하지 않아 RF에 대역 통과 필터를 사용하여 LO의 주파수와 분리를 해내기 때문이다. 그런데 동일 주파수 형태에서는 실질적으로 필터를 사용하는 것이 의미가 없으므로, 격리도의 개선을 위해 평형 형태를 사용한다[18]-[20].

본 논문에서 구현한 단일 평형 형태의 저항성 주파수 혼합기의 개략도를 <그림 2-6>에 나타내었다. 이는 LO가  $180^\circ$ 의 위상차를 두어서 각각의 비선형 소자에 인가된다. 이때, RF로 넘어가는 LO는 커패시터(C1)에서 상쇄되고, IF 역시 서로 위상이 반대이므로 커패시터(C1)에 의해 상쇄되어 RF에 통과하지 못한다. 또 각각의 비선형 소자에 LO가  $180^\circ$  위상차로 인가되므로 IF 또한

180° 위상차를 두고 나오게 된다. <그림 2-6>은 본 논문에서 구현한 단일 평형 저항성 주파수 혼합기의 개략도이다.



<그림 2-7> 단일 평형 저항성 주파수 혼합기의 구조

# 제 3 장 Zero IF 구조의 단일 평형 저항성 주파수 혼합기의 설계

본 장에서는 먼저 단일 종단 형태로 설계 및 제작하여 저항성 주파수 혼합기에 대한 검증을 하였고, 격리도의 향상을 위해 단일 평형 형태의 혼합기를 설계 및 제작하였다.

## 3.1 저항성 주파수 혼합기의 설계

저항성 주파수 혼합기에 대한 완전한 해석은 비선형 소자에서 보여지는  $LO(w_p)$ 와  $RF(w_p)$ 의 혼합 주파수( $nw_p + mw_s$  :  $n, m$ 은 정수) 성분에 의한 임피던스와 비선형 소자의 모든 파라미터를 알아야 가능하다[21]. 그러나 본 논문에서는 이에 대한 상세한 기술은 하지 않고, 다만  $RF$  회로 시뮬레이션 툴인 ADS를 이용한 설계 절차에 대해서만 기술하고자 한다. 본 연구는 다음의 설계 절차를 이용하여 제작 및 구현을 하였다.

첫째, 시뮬레이션 하기 위해서 GaAs MESFET의 등가회로를 구현 한다. 이를 모델링(modeling)이라 하며, 구현 방법은 물성적인 부분의 내부 소자에 대한 등가 회로를 고려하여 주어진 S-파라미터에서 구할 수 있다[22]-[24]. 일반적으로 널리 알려진 모델링은 Curtice[25], Materka[26], Statz[27] 등으로 지속적인 연구가 진행되고 있다. 그런데 모델링은 그 자체가 연구 논문의 가치가 있으므로, 본 논문에서는 상세히 다루지는 않는다.

둘째, 모델링 된 GaAs MESFET의 I-V 특성 곡선을 알아보기 위해 DC 해석을 한다. 특히 DC의 해석을 통해서 혼합기의 저항성 영역 및 포화 영역을 분석할 수가 있다.

셋째, 모델링 된 GaAs MESFET은  $LO$ 에 대한 대신호 분석(Large Signal S-Parameter : LSSP)을 통해서 게이트의 임피던스를 추출하고, 대신호에 대

한 정합 회로를 구현한다.

넷째, Mass에 따르면 소신호(S-Parameter : SP) 분석을 통해 얻어진 입·출력에 대한 정합 정도는  $2.1dB$  이하의 전압정재파비(Voltage Standing Wave Ratio : VSWR)로 하고 있다[12]. 본 연구에서도 동일한 방법으로 RF와 IF에 대한 입·출력의 임피던스 정합을 이루었다.

다섯째, 개별적으로 설계된 회로들을 조합한 주파수 혼합기는 ADS의 하모닉 발런스(Harmonic Balance : HB)를 이용하여 주파수 혼합에 대한 시뮬레이션을 한다.

본 논문에서 설계하고자 하는 저항성 주파수 혼합기는  $RF$ 와  $LO$  주파수가  $10GHz-11GHz$ 이며,  $LO$  전력은  $+3dBm$ 이다. 설계 및 제작을 위한 혼합기의 설계 사양은 <표 3-1>과 같다.

<표 3-1> 저항성 주파수 혼합기의 설계 사양

항 목	사 양	비 고
GaAs MESFET	NEC4210 S01	NEC 社
Bias	$V_{GG}=-0.7V$ , $V_{DD}=none$	Power Supply
LO Frequency	10.5GHz	LO matching, VSWR = 1.6
RF Frequency	10.5GHz + 1KHz	RF matching, VSWR = 1.4
RF & LO Bandwidth	10GHz - 11GHz	1GHz BW
IF	수십Hz - 수KHz	3차 LPF
기판 유전율	$Er = 10$ , $h = 0.635mm$	Taconic 社

## 3.2 DC 바이어스 및 저역 통과 필터 회로 설계

### 3.2.1 DC 바이어스 회로

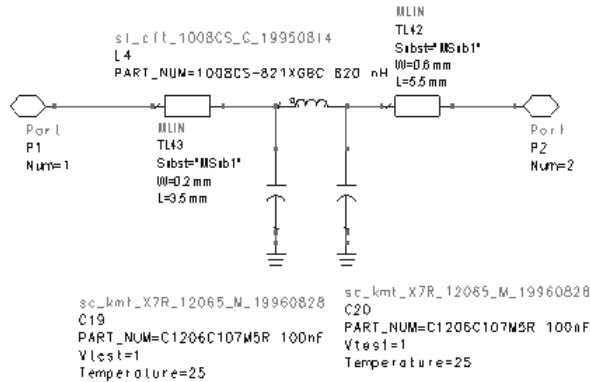
본 논문의 주파수 혼합기에서 바이어스(bias)란 두개의 MESFET이  $LO$  신호에 의해 정류동작을 할 때 발생하는 DC 성분의 전류를 어떤 폐회로 내로 흐르도록 하는 것이다. 그리고 이러한 bias회로는  $LO$  및  $RF$  신호의 유출은 방지하고  $dc$  전류성분만 흐르도록 하는데, 흔히 이것은  $RF$  쇼크(choke)를 통해 이뤄진다.

밀리미터파 대역에서는 이러한  $RF$  쇼크는 마이크로스트립 선로를 이용해 비교적 간단히 구현될 수 있다. 본 연구에서는 이상적인 전송선 개념을 이용하여 개방 스텐브(open stub)의 개방이 되는 지점에서  $1/4$  파장의 길이를 이동하여 단락(short)를, 이 단락에서  $1/4$  파장의 길이 만큼 이동하여 개방을 이루도록 임피던스가 높은 마이크로 스트립 선로에 임피던스가 낮은 개방 스텐브를 달아  $RF$  쇼크를 구현했다. 또한 DC 바이어스가  $RF$  및  $LO$  단으로 누설되는 것을 막기 위해 차단 커패시터(blocking capacitor)를 연결한다. 아래 그림3-1은 이에 대한 설계 및 분석 결과이다.

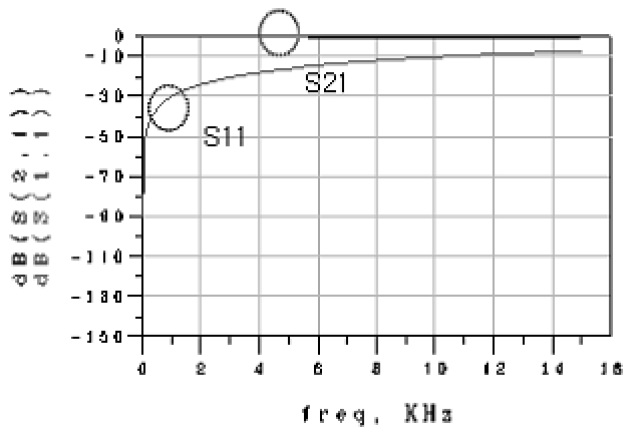


### 3.2.2 저역 통과 필터 회로

본 논문의 주파수 혼합기에서는  $IF$  와  $RF$ ,  $LO$ 의 주파수와의 차가 매우 커서 주파수 차단 특성이 중요하지 않으나, RF 와 LO의 혼합 시 발생하는 dc 성분 및 고조파를 제거하기 위해 3차의 저역 통과 필터(Low Pass Filter : LPF)를 설계하였다. 아래 <그림 3-2>는 차단주파수가  $10\text{KHz}$  인 저역 통과 필터회로의 설계 및 특성에 대한 분석 결과이다.



(a) 저역 통과 필터 회로



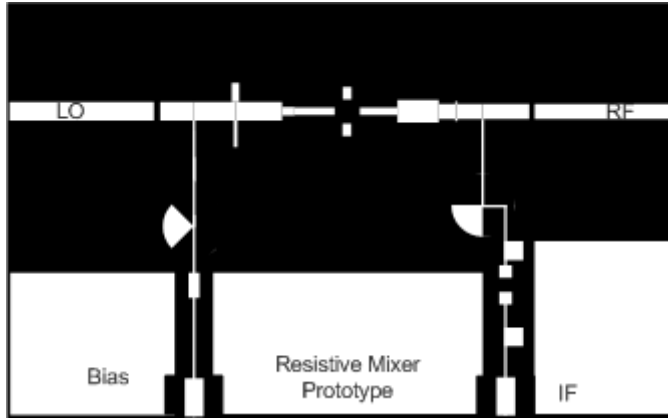
(b) 저역 통과 필터의 특성에 대한 분석 결과  
<그림 3-2> 저역 통과 필터 설계 및 분석 결과



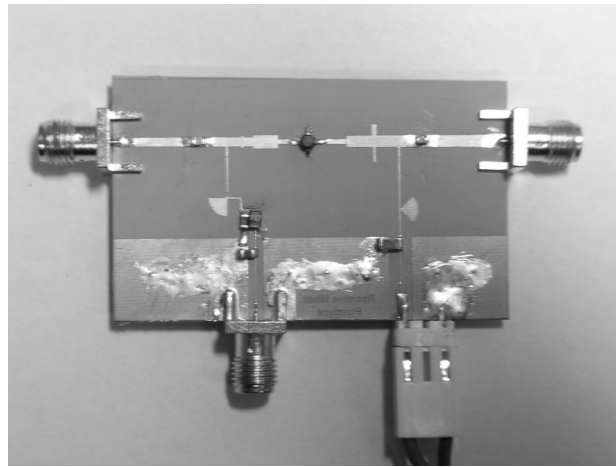
### 3.3 단일 종단의 저항성 주파수 혼합기 설계

본 절에서는 먼저 단일 종단(single-ended) 저항성 주파수 혼합기에 대해서 설계 및 실제 구현된 설계 도면을 제시하였다. 이를 설계하기 위해서는 3.1절의 설계기법에 따라서 대신호 분석(LSSP)을 통한  $LO$ 의 입력 임피던스를 추출하여 정합을 하였고, 소신호 분석(SP)을 통해서  $RF$  및  $IF$ 를 정합하였다. 대신호 분석을 통해 얻어진 게이트 쪽의 임피던스 ( $Z_{LO} = 22.65 - j29.97$ )는 포트 임피던스인  $50\Omega$ 에 정합을 하였다. 그리고  $RF$  입력 임피던스( $Z_{RF} = 26.34 - j11.05$ )는  $50\Omega$  포트 임피던스에 정합을 하였고,  $IF$  출력 임피던스( $Z_{IF} = 15.42 - j5.82$ )는  $75\Omega$ 에 정합을 하였다. 여기서  $IF$ 를  $75\Omega$ 에 정합을 시킨 이유는  $RF$ 에 비해 상대적으로 큰 임피던스를 얻기 위함이다.

<그림 3-3>은 위의 과정을 통해 설계된 단일 종단 저항성 주파수 혼합기의 설계도면 및 제작된 회로이다.



(a) 설계도면



(b) 제작된 회로

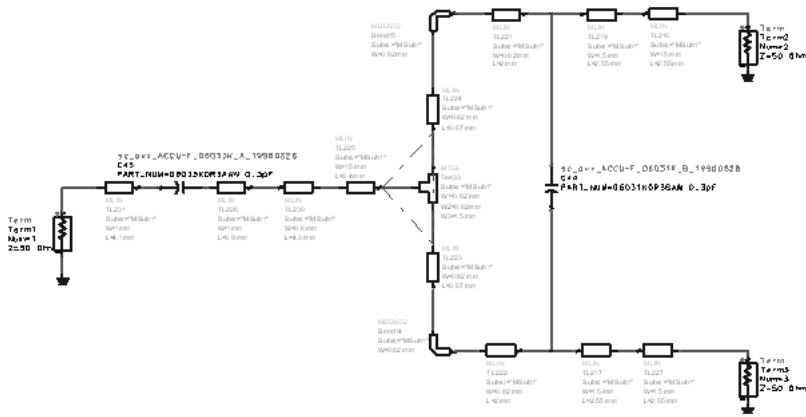
<그림 3-3> 단일 종단 저항성 주파수 혼합기 설계 및 제작

여기서  $LO$ 는 게이트에 인가되고, 드레인에  $RF$  인가 및  $IF$ 추출을 한다. 이때 주파수 혼합과정에서 얻어진  $IF$ 의 신호는 3차 저역통과 필터를 통과한다. 또한  $DC$  바이어스는  $-0.7V$ 를 인가하여 주었다.

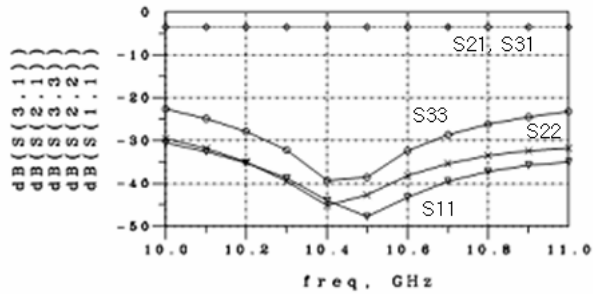
### 3.4 단일 평형의 저항성 주파수 혼합기 설계

<그림 2-7>의 단일 평형 구조를 만들기 위해서 동상 및  $180^\circ$  분배기를 설계

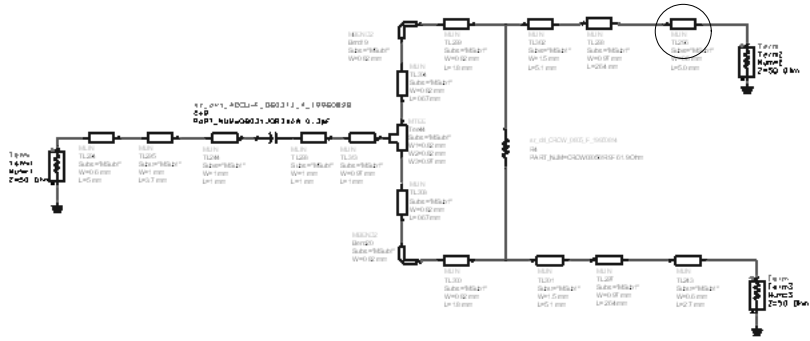
하였다. 먼저 <그림 3-4>의 (a)와 같이 동상분배기는 Wilkinson 3-dB로 분배를 하였고, (c)의 180° 분배기는 한쪽의 출력을  $\lambda/2$ 만큼 더 길게 하여 위상의 편이를 얻었다. 그리고 그림 (b)와 (d)는 모의 실험결과 이다.



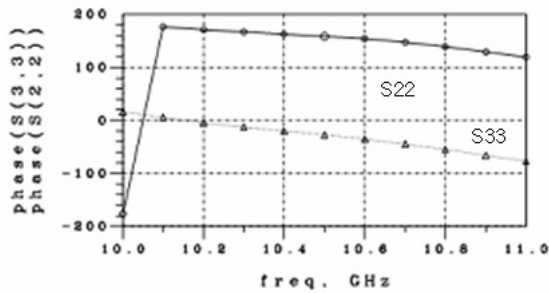
(a) 동상 분배회로



(b) 동상 분배회로 분석 결과



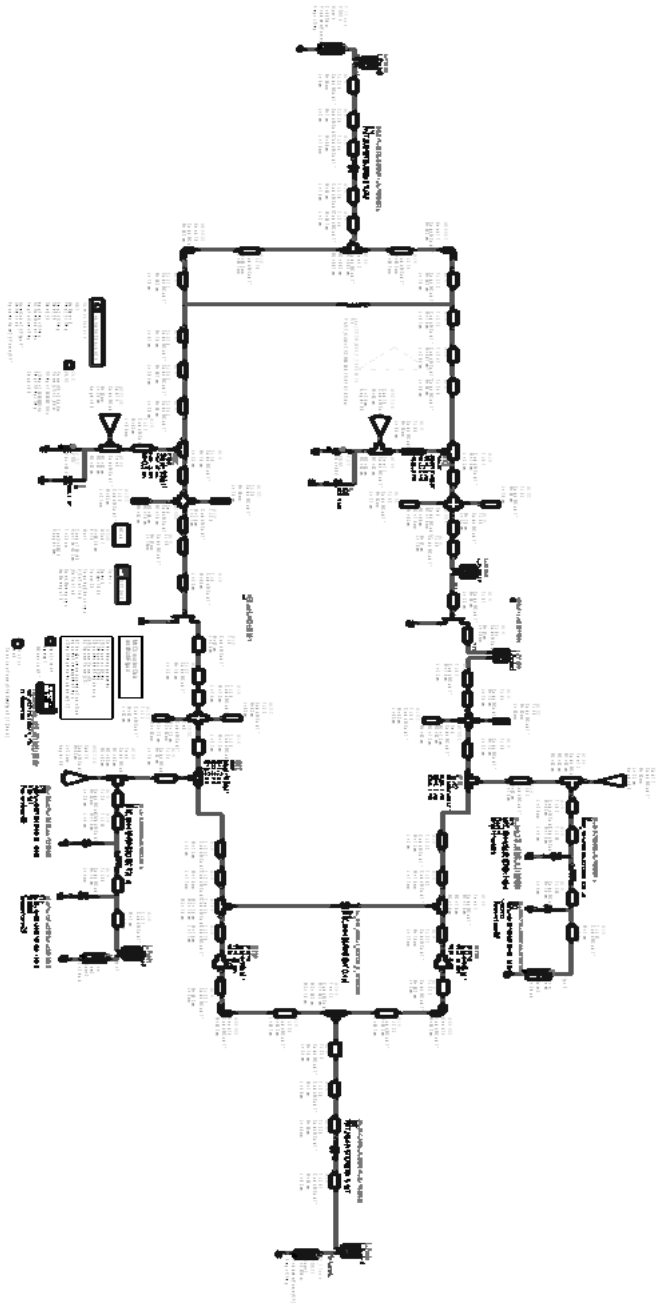
(c) 180° 분배회로



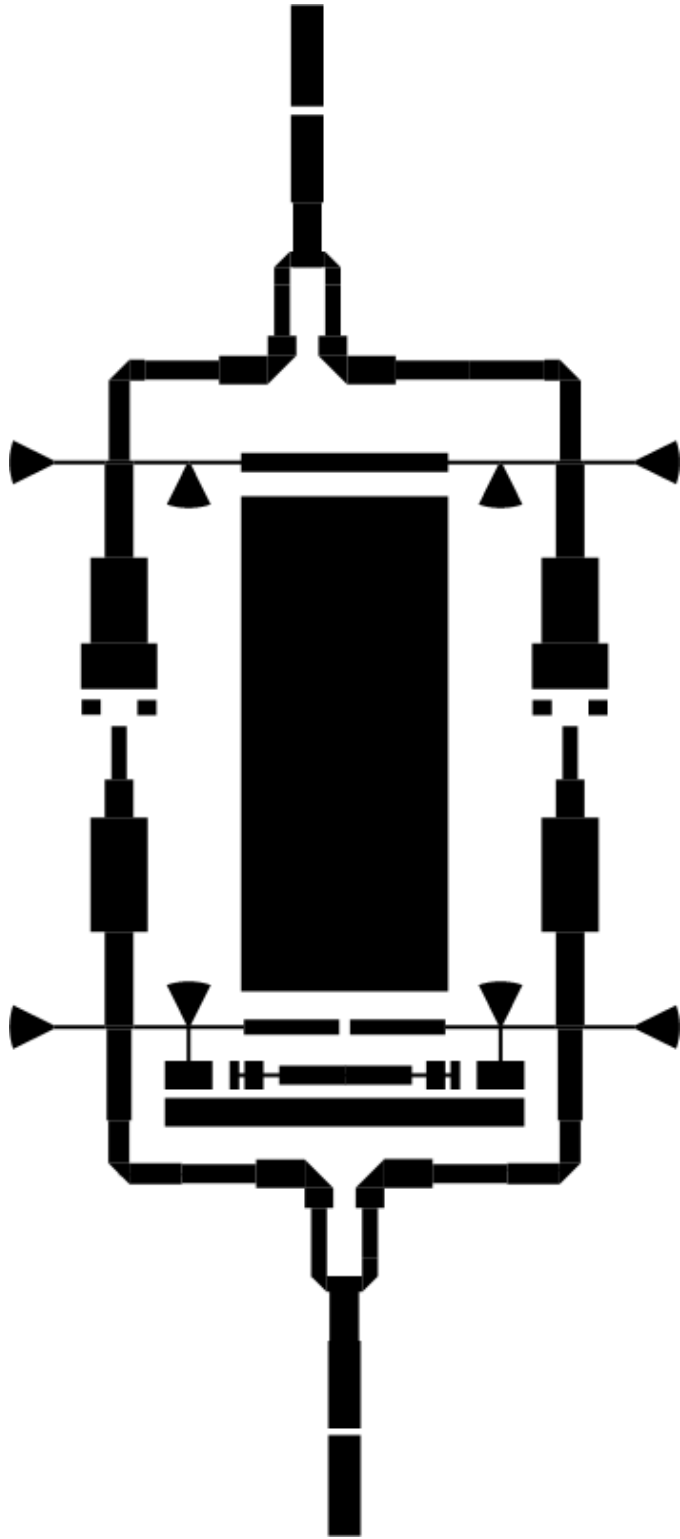
(d) 180° 분배회로 분석 결과

<그림 3-4> 동상 및 180° 위상 분배회로 설계 및 분석 결과

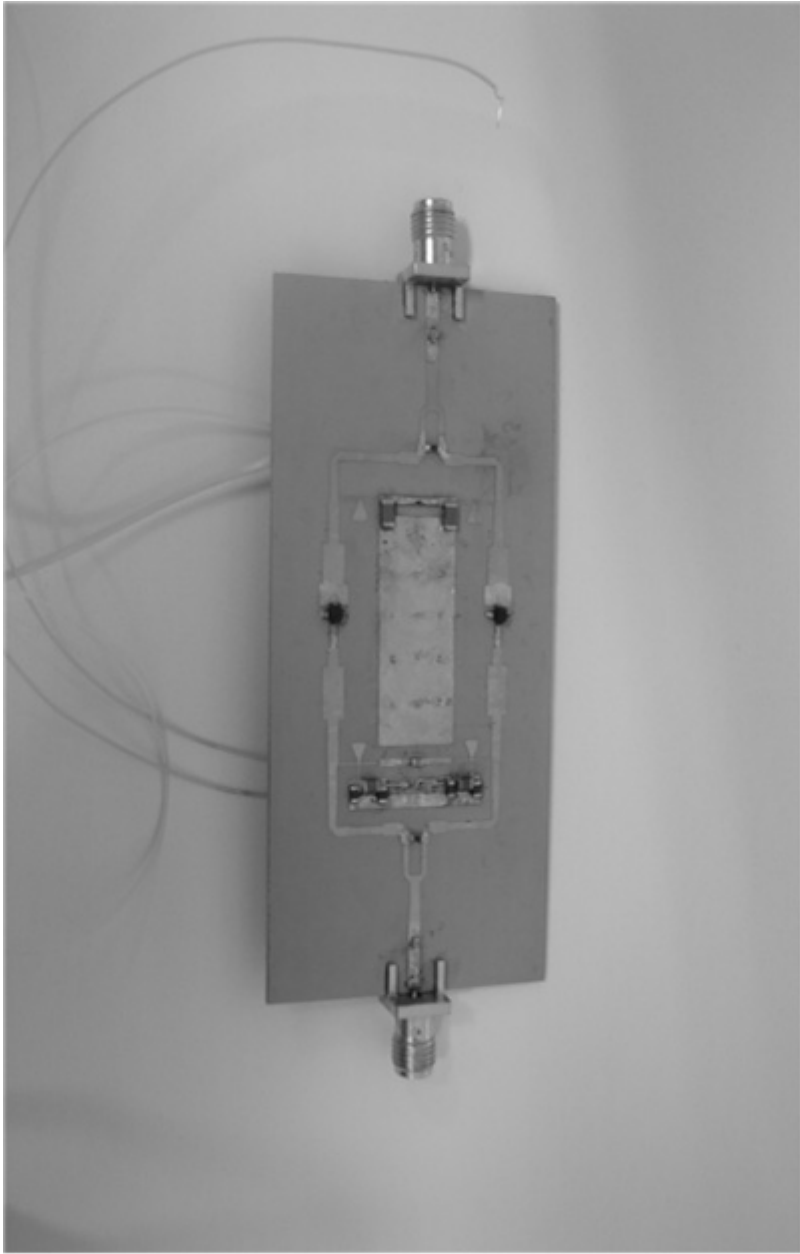
단일 평형의 구조는 먼저 단일 종단 형태의 혼합기를 설계하여 LO에 대해서는 180°의 위상편이를 주어 결합하였고, RF에 대해서는 동상의 결합을 하여 설계하였다. 회로는 다음 <그림 3-5>와 같다. 그리고 설계를 하기 위한 음각 필름은 <그림 3-6>과 같다.



<그림 3-5> 단일 평형 저항성 주파수 혼합기의 회로도



<그림 3-6> 단일 평형 저항성 주과수 혼합기 설계도



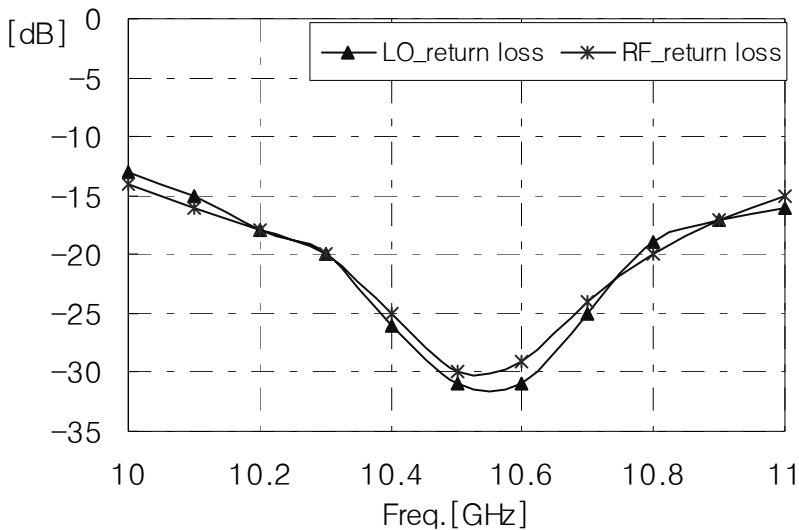
<그림 3-7> 단일 평형 저항성 주파수 혼합기의 제작

## 제 4 장 실험 결과 및 고찰

### 4.1 주파수 혼합기의 측정 결과

#### 4.1.1 반사손실

다음의 <그림 4-1>은 제작된 단일 종단 저항성 주파수 혼합기의  $LO$  및  $RF$ 에 대한 반사손실(return loss) 정도를 알아보았다. 일반적으로 전송선로에서 통과 대역의 반사손실은  $-10dB$  이하의 값이 되어야 한다. 따라서 본 연구에서 설계된 혼합기의 정합정도는 좋은 특성을 보이고 있다.



<그림 4-1>  $LO$  및  $RF$  입력정합의 반사손실

#### 4.1.2 변환손실

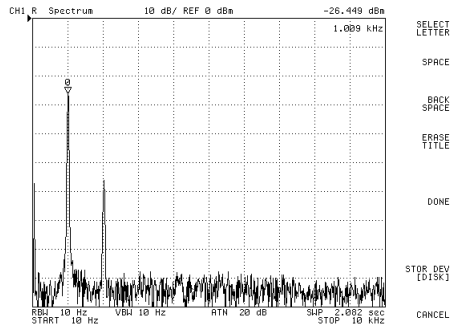
일반적으로 손실을 갖는 주파수 혼합기의 성능지표는 변환 손실(conversion loss) 및 포트 간 분리정도(isolation), 잡음지수(Noise Figure : NF), 입력



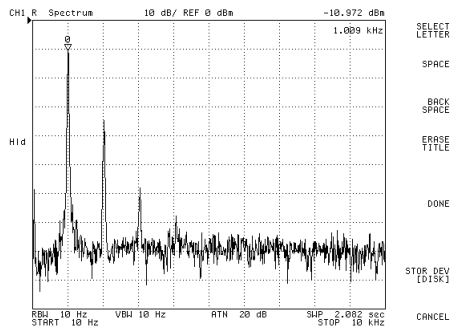
1dB 압축점 등으로 나타낸다. 본 논문에서는 잡음지수를 측정할 장비가 없는 관계로 잡음지수를 제외한 나머지 성능에 대하여 측정을 하였고, 다만 잡음 지수는 시뮬레이션 상태에서의 결과 값만을 언급한다. 먼저 주파수 혼합기의 변환 손실에 대해서 단일 종단(single ended) 형태와 단일 평형(singly balanced) 형태를 알아본다.

### 가. 단일 종단 주파수 혼합기

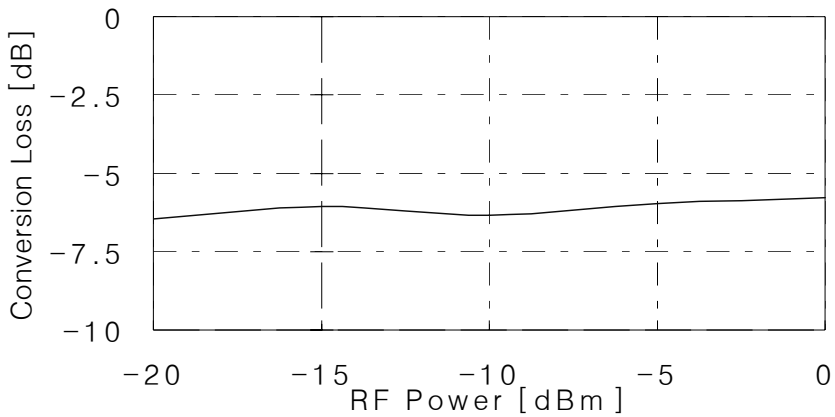
<그림 4-2>는 단일 종단 형태의 변환손실에 대한 측정 결과이다. (a)는 스펙트럼 분석기로 관측한 파형이고, (b)는 RF의 입력 전력을  $-20dBm$ 에서  $0dBm$  까지 변화 시켰을 때 변환 손실로서  $-5.7\sim-6.5dB$ 의 값을 갖는 것을 알 수 있다. 그리고 <그림 4-3>은 LO의 변화에 따른 변환 손실을 나타낸다. (a)는 스펙트럼 분석기로 관측한 파형이고, (b)는 LO의 입력 전력의 변화를  $0dBm$ 에서  $10dBm$ 으로 하였을 때  $-5.3dB\sim-7.7dB$ 의 변환손실을 나타낸 그림이다.



(a) IF 출력 스펙트럼(-20dBm)

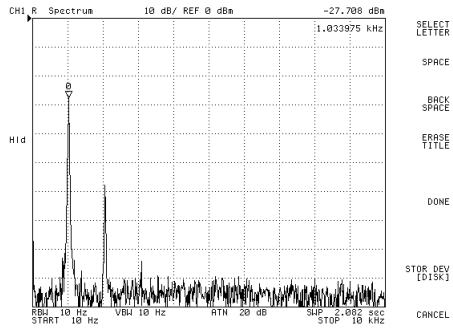


(b) IF 출력 스펙트럼(-5dBm)

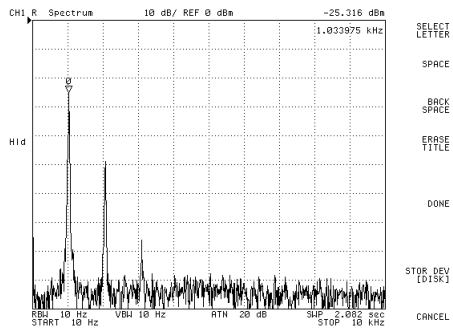


(c) 변환 손실

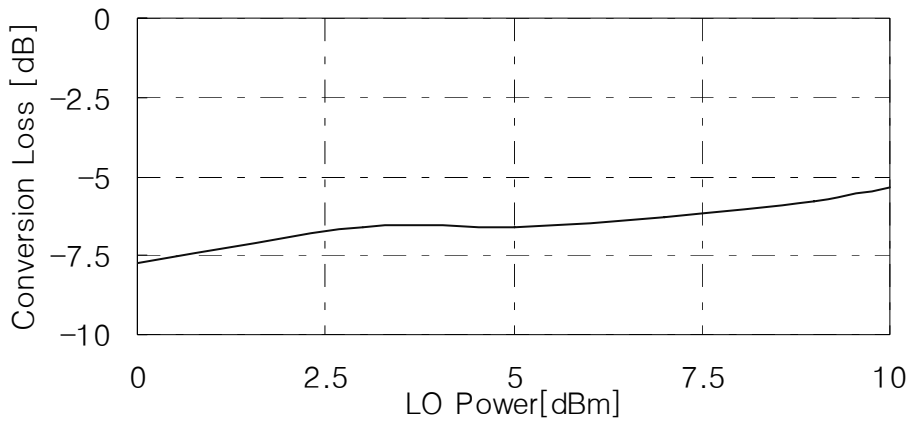
<그림 4-2> 단일 종단 혼합기의 RF 전력에 따른 변환손실



(a) IF 출력 스펙트럼(3dBm)



(b) IF 출력 스펙트럼(10dBm)

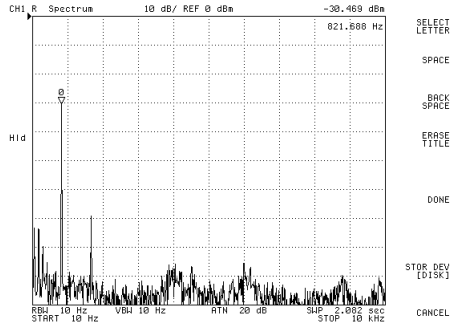


(c) 변환 손실

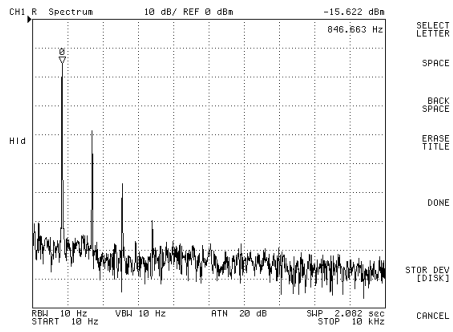
<그림 4-3> 단일 종단 혼합기의 LO 전력 변화에 따른 변환손실

## 나. 단일 평형 주파수 혼합기

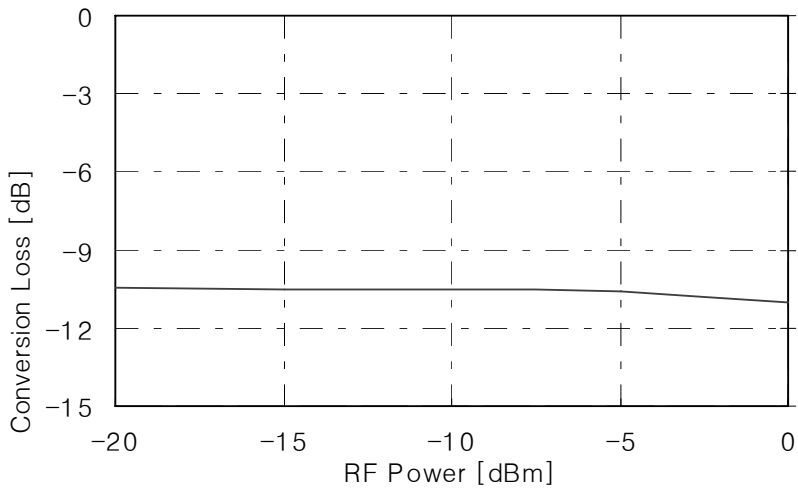
단일 평형 형태의  $RF$  전력의 변화에 따른 변환손실에 대한 측정 결과는 <그림 4-4>에 나타내었다. (a)는 스펙트럼 분석기로 관측한 파형이고, (b)는  $RF$ 의 입력 전력의 변화를  $-20dBm$ 에서  $0dBm$  까지 변화 시켰을 때 변환 손실로서  $-10.5dB$ 의 값을 갖는 것을 알 수 있다. 그리고 <그림 4-5>은  $LO$ 의 변화에 따른 변환 손실을 나타낸다. (a)는 스펙트럼 분석기로 관측한 파형이고, (b)는  $LO$ 의 입력 전력의 변화를  $0dBm$ 에서  $10dBm$ 으로 하였을 때  $10.5dB$ 의 변환손실을 나타낸 그림이다.



(a) IF 출력 스펙트럼(-20dBm)

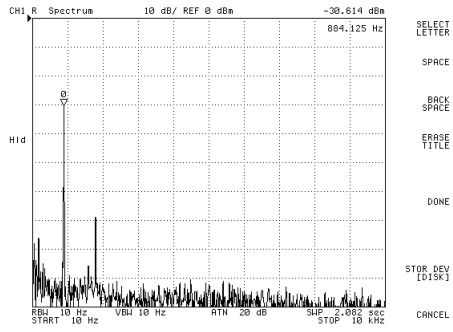


(b) IF 출력 스펙트럼(-5dBm)

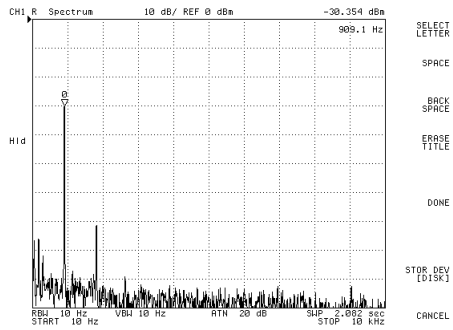


(c) 변환 손실

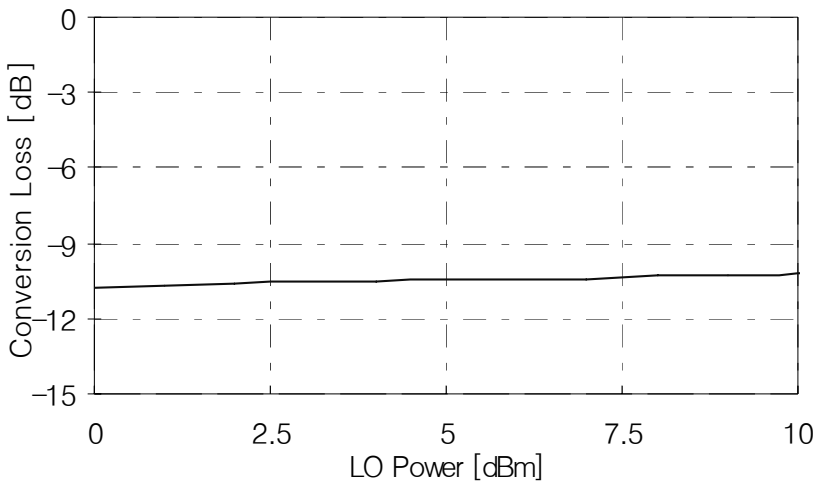
<그림 4-4> 단일 평형 혼합기의 RF 전력에 따른 변환손실



(a) IF 출력 스펙트럼(2dBm)



(b) IF 출력 스펙트럼(8dBm)

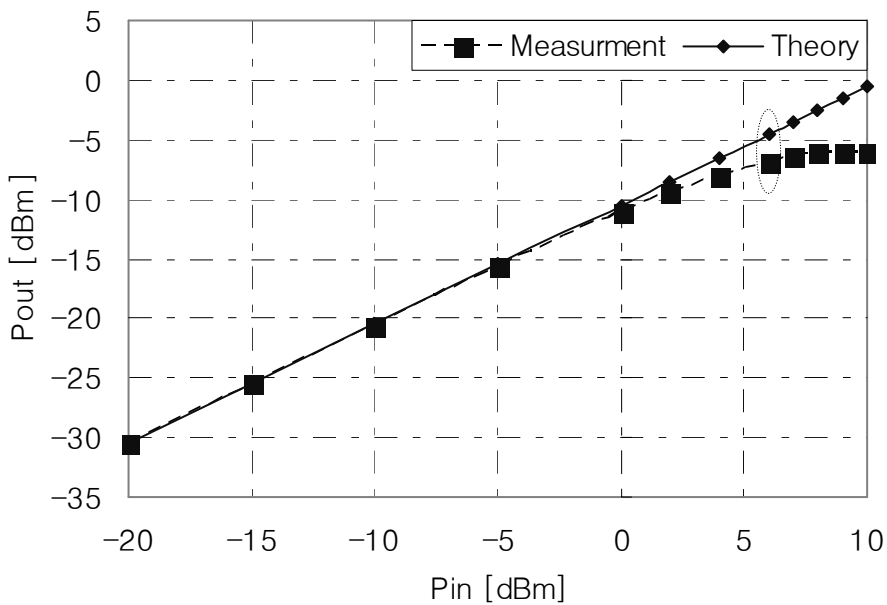


(c) 변환 손실

<그림 4-5> 단일 평형 혼합기의 LO 전력에 따른 변환손실

### 4.1.3 1-dB 압축점

주파수 혼합기에서 1-dB 압축점(Compression Point)은 입력으로 얼마만큼의 입력을 받아들일 수 있는가가 중요하다. 아래 <그림 4-4>는 제작된 주파수 혼합기의 입력 1dB 압축점이다. 본 논문에서 설계 및 구현된 단일 평형 주파수 혼합기의 입력 1-dB 압축점은 6dBm 이다.



<그림 4-7> 1-dB 압축점의 측정 결과

### 4.1.4 포트 간 격리도

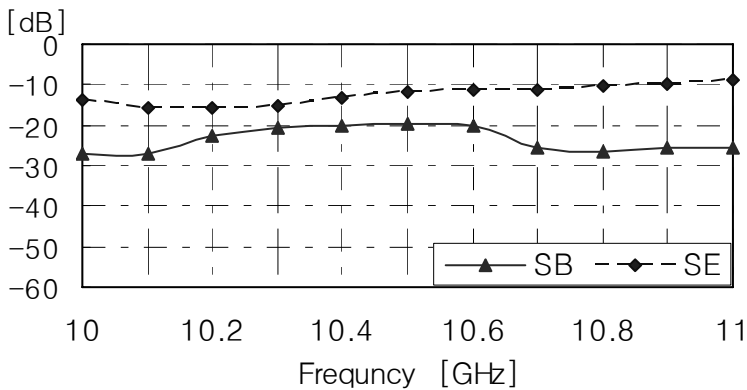
이상적인 주파수 혼합기라면 각각의 포트가 완전히 격리가 이뤄져서 각각의 입력 및 출력에 영향을 미치지 않는다. 그러나 실제로는 각각의 입력 및 출력이 서로 간에 영향을 주게 된다. 이때 각각의 포트간의 분리의 정도를 격리도라 한다. <표4-1>은 설계된 주파수 혼합기와 Hittite 사의 주파수 혼합기에 대

한 격리도를 비교한 것이다.

<표 4-1> 일반적인 주파수 혼합기와 본 논문의 혼합기 비교

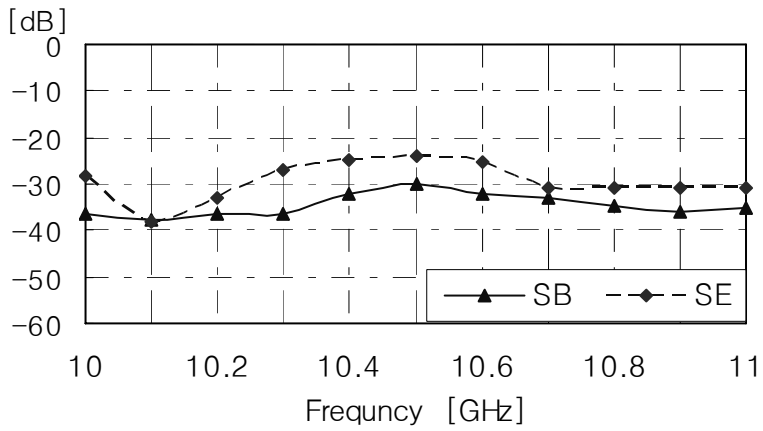
파라미터	Hittite 격리도[28]	본 논문 격리도
$LO: RF[dB]$	-30 ~ -45	-20 ~ -27
$LO: IF[dB]$	-30 ~ -37	-30 ~ -38
$RF: IF[dB]$	-20 ~ -24	-43 ~ -51

다음 <그림 4-8>, <그림 4-9>, <그림 4-10>은 본 논문에서 제작된 주파수 혼합기의 격리도를 나타낸다. 단일 종단 혼합기(SE : Single-Ended)의 각각 포트의 격리도는  $LO: RF=-9dB \sim -14dB$  및  $LO: IF=-24.2dB \sim -38dB$ ,  $RF: IF=-35.8dB \sim -49.9dB$  이다. 그리고 단일 평형 혼합기(SB : Single Balanced)의 각각 포트의 격리도는  $LO: RF=-20dB \sim -27dB$  및  $LO: IF=-30dB \sim -38dB$ ,  $RF: IF=-43dB \sim -51dB$ 의 특성을 나타낸다. 이는 단일 종단 주파수 혼합기 보다 우수한 분리정도를 보여주고 있다.

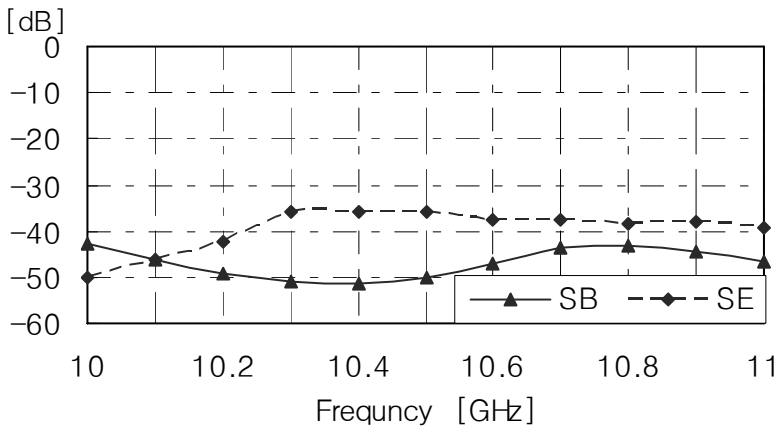


<그림 4-8>  $LO: RF$  격리도에 대한 측정 결과





<그림 4-9> LO:IF 격리도에 대한 측정 결과



<그림 4-10> RF:IF 격리도에 대한 측정 결과

## 4.2 실험 결과 검토

### 4.2.1 단일 종단 과 단일 평형 주파수 혼합기의 성능 비교

본 논문은 Zero IF 구조의 저항성 주파수 혼합기의 성능을 검증하기 위해 먼저 단일 종단 형태를 측정하였고, 다음으로 격리도의 향상을 위해 단일 평형 형태로 설계 및 제작하여 측정하였다. 측정 조건은 주파수 대역 및 입력 전원 (Bias), LO 전력을 동일하게 하여 측정하였다. 다음 <표4-2>는 두 혼합기의 측정된 성능을 비교한 것이다.

<표 4-2> 단일 종단 과 단일 평형 주파수 혼합기의 비교

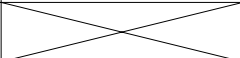
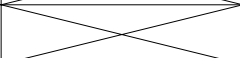
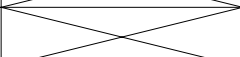
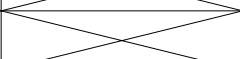
파라미터	단일 종단	단일 평형
사용 대역[GHz]	10 ~ 11	10 ~ 11
변환손실[dB]	-5.7 ~ -6.5	-10.5
LO: RF [dB]	-9 ~ -14	-20 ~ -27
LO: IF [dB]	-24.2 ~ -38	-30 ~ -38
RF: IF [dB]	-35.8 ~ -49.9	-43 ~ -51
입력 LO 전력[dBm]	+3	+3
Bias[V]	$V_{GG}=-0.7, V_{DD}=\text{none}$	

단일 평형 주파수 혼합기의 변환 손실은 단일 종단에 비해 낮지만, 이는 분배기에 의한 것이다. 그런데 LO: RF, LO: IF, LO: RF의 격리도는 11dB~13dB, 5dB, 7.2dB가 개선되었다.

#### 4.2.2 동일 형태의 주파수 혼합기와 성능 비교

본 절에서는 Hittite 사의 주파수 혼합기와 본 논문에서 설계한 단일 평형 저항성 주파수 혼합기에 대한 비교 분석 결과이다. 또한 타 논문에서 제작된 동일한 주파수 밴드를 살펴보았다. 아래 <표4-3>는 비교분석 결과이다.

<표 4-3> X-band의 혼합기와 비교

파라미터	Hittite 사의 혼합기[28]	S. A. Mass의 혼합기[18]	본 논문에서 제작한 혼합기
사용 대역[GHz]	<i>X-Band</i>	10 ~ 11	10 ~ 11
변환손실[dB]	-8 ~ -11	-6.5 ~ -8.5	-10.5
잡음지수[dB]	8 ~ 11		6 ~ 8
<i>LO: RF</i> [dB]	-30 ~ -45		-20 ~ -27
<i>LO: IF</i> [dB]	-30 ~ -37		-30 ~ -38
<i>RF: IF</i> [dB]	-20 ~ -24		-43 ~ -51
입력 <i>LO</i> 전력[dBm]	+13	+15	+3

\*본 논문에서 제작한 혼합기의 잡음지수는 시뮬레이션 결과임.

본 논문에서 설계된 주파수 혼합기의 변환 손실은 Mass의 논문에 비해 낮지만 *LO* 전력의 사용을 고려해 보면 본 연구에서 설계된 혼합기가 낮은 전력이 이용됨을 알 수 있다.

## 제 5 장 결 론

본 논문에서 사용된 주파수 혼합방식은 채널의 낮은 비선형을 이용하는 저항성 주파수 혼합기를 채택하였다. 주파수 혼합기의 설계는 시뮬레이션을 통해 GaAs MESFET에 대한 등가회로를 설계 후,  $LO$ 에 대한 입력 정합 및  $RF$  입력 정합,  $IF$ 에 대한 출력 정합을 하였다. 그리고 구현은 단일 종단 형태를 먼저 제작하였고, 단일 종단 보다 격리특성을 개선하기 위해 단일 평형 형태로 제작 하였다.

본 논문의 단일 종단 저항성 주파수 혼합기 및 단일 평형 저항성 주파수 혼합기의 사용가능한 주파수 대역은  $LO$ 와  $RF$  각각  $10GHz \sim 11GHz$ 이고  $IF$ 는  $100Hz \sim 20KHz$  이며, 이때 변환손실은 단일 종단의 경우  $-5.7dB \sim -6.5dB$  이고, 단일 평형의 경우  $-10.5dB$  이다. 특히 단일 평형의 경우는  $3dB$ 분배기에 의한 손실을 포함한다. 그리고  $LO:RF$  및  $LO:IF$ ,  $RF:IF$ 의 분리 정도는 단일 종단의 경우  $-9dB \sim -14dB$ ,  $-24.2dB \sim -38dB$ ,  $-35.8dB \sim -49.9dB$  이며, 단일 평형의 경우  $-20dB \sim -27dB$ ,  $-30dB \sim -38dB$ ,  $-43dB \sim -51dB$  이다.  $LO:RF$ 의 격리도 만을 비교하면  $-11dB \sim -13dB$ 가 개선 되었다.  $1dB$  압축점은  $+6dBm$  이다. 특히 일반적인 동일 형태의 주파수 혼합기에 비해  $LO$ 의 입력 전력이 낮은  $+3dBm$ 을 인가 하였다.

본 논문에서 설계 및 제작 된 저항성 주파수 혼합기는 낮은  $LO$  전력에서 사용 가능하며, X-band의 마이크로파 통신시스템의 송·수신기 및 FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave) 레이더의 수신부 등에 적용 가능할 것으로 생각된다.

## 참 고 문 헌

- [1] H.-R. Chuang, Sen-You Liu, "A 2.4GHz Transceiver RF Front-end for ISM-Band Digital Wireless Communications", *Applied Microwave & Wireless*, pp. 32-48, June. 1998.
- [2] B. M. Frank, A. P. Freundorfer, and Y. M. M. Antar, "A Novel Common-Gate Mixer for Wireless Applications", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol.50, No. 5, pp. 1433-1435, May. 2002.
- [3] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, 2nd ed., MacGraw-Hill, New York, 1980.
- [4] J. B. Horton and T. H. Oxle, "A Review of the Panel Discussion on Advances in Millimeter-Wave Subsystems", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. MTT-33, pp. 1531-1533, Dec. 1985
- [5] , " ", *Telecommunications Review*, 11 4 , pp. 548-559, 2001.
- [6] P. Bhartia and I. J. Bahl, *Millimeter Wave Engineering and Applications*, John Wiley & Sons, New York, 1984.
- [7] Erik L and Kollberg, *Microwave and Millimeter-wave Mixers*, *IEEE Press*, 1984.
- [8] R. A. Pucel, D. Masse, and R. Bera, "Performance of GaAs MESFET Mixers at X Band", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. MTT-24, pp. 351-360, June 1976.
- [9] G. Bergmann and A. Jacob, "Conversion Gain of a Microwave MESFET Drain Mixers", *Electron Lett.*, Vol. 15, pp. 567-568, Aug. 1979.

- [10] S. A. Mass, "A GaAs MESFET Mixer with Very Low Intermodulation", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. MTT-35, No. 4, April 1987.
- [11] *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol.37, Sep. 1989.
- [12] S. A. Mass, *Microwave Mixers*, 2nd ed., Artech House, Boston-London, 1993.
- [13] S. A. Mass, *Nonlinear Microwave Circuits*, Artech House, Boston-London, 1988.
- [14] K. McClaning and T. Vito, *Radio Receiver Design*, Noble Publishing, Atlanta, 2000.
- [15] D. A. Fleri and L. D. Cohen, "Nonlinear Analysis of the Schottky-Barrier Mixer Diode", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. MTT-21, No.1, Jan. 1973.
- [16] A. Chu and et. al, "Dual Function Mixer Circuit for Millimeter Wave Transceiver Applications", *IEEE MTT-S Inter. Microwave Symposium Digest*, pp. 120-123, 1985.
- [17] <http://www.cel.com>, EXCLUSIVE NORTH AMERICAN AGENT FOR NEC RF, MICROWAVE & OPTOELECTRONIC SEMICONDUCTORS
- [18] S. A. Mass, "A GaAs MESFET Balanced Mixer with Very Low Intermodulation", *IEEE MTT-S Inter. Microwave Symposium Digest*, pp. 895-898, 1987.
- [19] 전영상 외 4 , " " , 1998 추계 마이크로파 및 전파학술대회 논문집, 21 , 2 , pp.27~30 , 한국전자과학회, 1998.

- [20] 박정민 외 3 , " GaAs MESFET 단일 평형 저항성 주파수 혼합기 설계 및 제작", 1998 , 21 , 제2 , pp.59~62 , , 1998.
- [21] D. N. Held and R. Kerr, "Conversion Loss and Noise of Microwave and Millimeter-Wave Mixers: part 1-Theory", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. MTT-26, pp.49-55, Feb. 1978.
- [22] Kennedy, D. P. and R. R. O'Brien, "Computer-Aided Two-Dimensional Analysis of the Junction Field-Effect Transistor", *IBM J. Research and Development*, Vol. 14, pp.95, 1970.
- [23] Shur, M. S., and L. F. Eastman, "I/V Characteristics, Small-Signal Parameters and Switching Times of GaAs FETs", *IEEE Trans. Electron Devices.*, Vol. ED-25, pp.606, 1978.
- [24] Shockley W., "A Unipolar-Field Effect Transistor", *Proc. IRE*, Vol. 40, pp.1365, 1952.
- [25] Curtice, W. R., "A MESFET Model for Use in the Design of GaAs ICs", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. MTT-28, pp.448, 1980.
- [26] Materka, A., and T. Kacprzak, "Computer Calculation of Large-Signal GaAs FET Amplifier Characteristics", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. MTT-33, pp.129, 1985
- [27] Statz, et. al, "GaAs FET Device and Circuit Simulation in SPICE", *IEEE Trans. Electron Devices.*, Vol. ED-34, pp.160, 1987.
- [28] <http://www.hittite.com>, "HMC412MS8G", Hittite Micro-W. Corporation.

## 감사의 글

6 RF | 대한 관심으로 실험실 문을 두드리고 들어가던 때가 생각납니다. 저 자신이 공학도로서 아직은 많이 부족하다고 생각 들지만 이렇게 논문을 마무리하게 되어 감사하게 생각하며, 이제 사회에서 작은 결시에 대한 열매를 맺고자 합니다.

논문을 준비하고 완성되기까지 끊임없는 지도와 관심으로 이끌어 주시고 격려해 주신 박동국 지도교수님께 감사드립니다. 그리고 바쁘신 일정에도 논문 심사를 위해 성심 성의껏 지도해 주신 양규식 교수님, 심준환 교수님께도 감사드립니다.

또한 논문이 마무리되기 까지 도움을 주었던 초고주파 및 안테나 실험실의 용근, , , , , , , 학과 후배인 돈명, , , . 논문이 마무리되기 까지 항상 응원을 해주었던 실험실 동기 현, , 순범 에게도 고마운 마음을 전합니다. 그리고 어려움이 있을 때나 즐거운 일이 있을 때 옆에서 지켜보고 도움을 주셨던 실험실 선배인 성문 선배, , 경대 선배, , . 그리고 실험실 생활 동안 힘들고 지칠 때 항상 께려 해주셨던 광통신 연구실의 정호 선배에게 감사의 마음을 전합니다.

동생의 객지 생활 동안 격려와 도움을 주신 누이들 과 형님, , , , 사랑하는 조카들 에게 깊은 감사의 마음을 전합니다.

끝으로 어려운 가정형편 속에서도 격려와 희망을 주셨던 사랑하는 아버지, 어머니 두분께 저의 작은 결실인 이 논문을 바치며, 이제 사회에서 자신의 자리를 찾아가는 아들이 되겠습니다.