

박사학위논문

이동통신 기지국 RF필터 소형화를  
위한 세라믹 공진기설계에 관한 연구

2018년

한성대학교 일반대학원

스마트융합컨설팅학과

스마트융합제품전공

고 문 봉

박사학위논문  
지도교수 김승천

# 이동통신 기지국 RF필터 소형화를 위한 세라믹 공진기설계에 관한 연구

A Study on the Design of Ceramic Resonator for  
Miniaturization of RF Filter in Mobile  
Communication Base Station

2018년 08월 일

한성대학교 일반대학원

스마트융합건설링학과

스마트융합제품전공

고 문 봉

박사학위논문  
지도교수 김승천

# 이동통신 기지국 RF필터 소형화를 위한 세라믹 공진기설계에 관한 연구

A Study on the Design of Ceramic Resonator for  
Miniaturization of RF Filter in Mobile  
Communication Base Station

위 논문을 공학 박사학위 논문으로 제출함

2018년 08월 일

한성대학교 일반대학원

스마트융합컨설팅학과

스마트융합제품전공

고 문 봉

고문봉의 공학 박사학위 논문을 인준함

2018년 08월 일

심사위원장 \_\_\_\_\_(인)

심 사 위 원 \_\_\_\_\_(인)

# 국 문 초 록

## 이동통신 기지국 RF필터 소형화를 위한 세라믹 공진기 설계에 관한 연구

한 성 대 학 교   일 반 대 학 원  
스 마 트 융 합 컨 설 팅 학 과  
스 마 트 융 합 제 품 전 공  
고                      문                      봉

이동통신의 기술은 음성 위주의 1세대 통신인 AMPS (Advanced Mobile Phone Service)에서부터 4세대 통신 LTE-A (Long Term Evolution -Advanced)의 디지털 멀티미디어 중심의 통신까지 발전하여왔다. 이동통신 기술의 발전은 사용자와 단말기의 증가로 이어졌고, 이는 트래픽의 폭발적 증가로 이어졌다. 시스코의 보고서에 따르면 트래픽은 연평균 22% 이상 증가하는 것으로 보고되고 있다.

차세대 이동통신 기술인 5세대 이동통신에서는 많은 사용자와 높은 트래픽을 처리하기 위하여 기존 4세대보다 수용량 및 속도, 응답속도 등에 훨씬 높은 규격을 만족해야 하는 상황이다. 이에 따라 기지국의 구성형태는 기존의 매크로 기지국 하나로 많은 지역을 수용했던 방식이 아닌 이종네트워크 (HetNet : Heterogeneous Network) 방식의 기지국 구성형태로 변화되어 기지국의 구성에서 중소형 기지국의 필요성이 높아졌다. 중소형 기지국을 사용하게 됨에 따라 기지국 내의 부품도 중소형 기지국에 맞게 개발되어야 한다.

기지국에 사용되는 RF필터의 소형화를 위한 방법은 기존 제품의 구조 형태를 개선하여 제품의 구조 형태를 최적화하는 방법과 제품의 재질을 변경하는 방법 등 여러 요소에 따른 개선 방안이 존재한다. 그러나 그 방법들에 대해서는 한계가 있으며, 구조 형태를 최적화하는 방식에서는 소형화할 수 있는 크기의 한계가 있다. 세라믹을 사용한 소형화 방법은 특성이 기존 금속 캐비티 필터보다 매우 나쁜 특성을 갖는 한계가 있다.

본 연구에서는 이동통신 기지국에서 사용되는 RF(Radio Frequency)필터를 소형화하기 위하여 세라믹을 사용한 공진기를 이용하여 필터를 설계 제작한다. 제작된 필터는 기존 금속 캐비티 필터와 LTCC(Low Temperature Co-fired Ceramic)과 비교를 통하여 그 타당성을 검증하였다.

제작한 필터의 주파수 대역은 800MHz(Cellular) 대역과 2100MHz(WCDMA) 대역에 대해서 설계 진행하였으며, 기존 금속 캐비티 필터와 LTCC 필터와 RF특성 및 물리적 크기를 비교 분석하였다.

본 연구를 통해 제작한 세라믹 기반 캐비티 필터와 기존 금속 캐비티 필터 및 LTCC 필터와 비교한 결과 기존 금속 캐비티 필터 대비 절반 이하로 소형화되었으며, LTCC 필터의 RF특성보다 삽입 손실의 경우 2.4dB, 감쇄 특성 30dB 가량 개선된 것으로 분석되어, 기존 금속 캐비티 필터보다 소형화 되고, LTCC 필터보다 우수한 특성을 갖는 소형화된 RF필터를 제작하여, 제작된 필터는 중소형 기지국에 적용 가능할 것으로 판단된다.

**【주요어】** 캐비티, 세라믹, 공진기, 듀플렉서, 소형화

# 목 차

I. 서 론 .....	1
1.1 연구 배경 .....	1
1.2 연구의 필요성 및 목적 .....	4
II. 이론적 배경 .....	6
2.1 RF필터 .....	6
2.1.1 RF필터란? .....	6
2.1.2 RF필터 설계 및 특성 .....	7
2.1.3 필터 구성에 따른 분류 .....	14
2.1.4 필터 형태에 따른 분류 .....	17
2.2 유전체 공진기 .....	20
2.2.1 유전체 공진기(DR) 필터 .....	20
2.2.2 세라믹 블록 필터 .....	22
2.2.3 스몰 캐비티 필터 .....	24
III. 필터 설계 및 시뮬레이션 .....	27
3.1 세라믹 공진기 .....	27
3.1.1 공진기 소재 선택 .....	27
3.1.2 공진기 도전막 코팅 .....	41
3.2 대역 통과 필터 .....	51
3.2.1 대역 통과 필터 회로 설계 .....	51
3.3 멀티플렉서 .....	63
3.3.1 멀티플렉서 회로 설계 .....	63
IV. 필터 제작 및 측정 .....	94
4.1 세라믹 공진기 .....	94
4.2 대역 통과 필터 .....	94
4.3 멀티플렉서 .....	96

V. 결 론 .....	107
참 고 문 헌 .....	109
ABSTRACT .....	112

## 표 목 차

[표 3-1] 테이프 캐스팅을 위한 분말 조성 .....	28
[표 3-2] 테이프 캐스팅 공정 조건 .....	28
[표 3-3] 소결 및 탈바인딩 공정 조건 .....	29
[표 3-4] 소결 시편별 특성 (분말 3종) .....	30
[표 3-5] 소결 공정 조건 .....	30
[표 3-6] 소결 시편별 특성 (분말 6종) .....	31
[표 3-7] 글래스 프리트 실험 결과 (H-904) .....	34
[표 3-8] 글래스 프리트 실험 결과 (H-905) .....	35
[표 3-9] 소결된 분말의 유전 특성 .....	36
[표 3-10] 소결 온도에 따른 상대밀도 .....	40
[표 3-11] 세라믹 기반 공진기 표면 연마를 위한 사용 소재 .....	43
[표 3-12] 점도 시험 조건 .....	47
[표 3-13] 점도에 따른 코팅 두께 .....	49
[표 3-14] 토출량 조건 .....	50
[표 3-15] 흡입 시간 .....	51
[표 3-16] 800MHz Band Pass Filter Specification .....	52
[표 3-17] 800MHz Band Pass Filter Rx Band Circuit Parameter Value .....	54
[표 3-18] 800MHz Band Pass Filter Tx Band Circuit Parameter Value .....	56
[표 3-19] 800MHz Band Pass Filter Rx Band Circuit Parameter Value (Notch Type) .....	59
[표 3-20] 800MHz Band Pass Filter Tx Band Circuit Parameter Value (Notch Type) .....	61
[표 3-21] 800MHz Duplexer Specification .....	64
[표 3-22] 800MHz Duplexer Circuit Parameter Value .....	66
[표 3-23] 800MHz Duplexer Circuit Parameter Value (Notch Type) .....	70
[표 3-24] 2100MHz Duplexer Specification .....	74
[표 3-25] 2100MHz Band Pass Filter Rx Band Circuit Parameter Value .....	75
[표 3-26] 2100MHz Band Pass Filter Tx Band Circuit Parameter Value .....	78

[附 3-27] 2100MHz Band Pass Filter Rx Band Circuit Parameter Value (Notch Type) .....	81
[附 3-28] 2100MHz Band Pass Filter Tx Band Circuit Parameter Value (Notch Type) .....	84
[附 3-29] 2100MHz Duplexer Circuit Parameter Value .....	87
[附 3-30] 2100MHz Duplexer Circuit Parameter Value (Notch Type) ...	91
[附 4-1] LTCC Duplexer Test Result .....	105
[附 4-2] Metal Cavity Filter Vs. Small Cavity Filter Vs. LTCC Filter ·	106

## 그림 목 차

[그림 2-1] 필터 단일 구조 .....	6
[그림 2-2] 2포트 회로망 .....	8
[그림 2-3] 버터워스 및 체비셰프 필터 .....	14
[그림 2-4] 저역 통과 필터 (LPF : Low Pass Filter) .....	15
[그림 2-5] 고역 통과 필터 (HPF : High Pass Filter) .....	16
[그림 2-6] 대역 통과 필터 (BPF : Band Pass Filter) .....	16
[그림 2-7] 대역 저지 필터 (BS(R)F : Band Stop(Rejection) Filter) .....	17
[그림 2-8] 집중소자 필터 .....	18
[그림 2-9] Transmission Line 필터 .....	18
[그림 2-10] 세라믹 블록 필터 .....	19
[그림 2-11] 금속 캐비티 필터 .....	19
[그림 2-12] 유전체 공진기 필터(Dielectric Resonator Filter) .....	20
[그림 2-13] 유전체 공진기의 전자계 분포 .....	21
[그림 2-14] 유전체 공진기의 결합도 .....	22
[그림 2-15] $\lambda/4$ TEM-mode UIR .....	23
[그림 2-16] 세라믹 블록 필터 .....	24
[그림 2-17] 요철 구조의 공진기 형상 .....	24
[그림 2-18] 스몰 캐비티 필터에서의 공진기 .....	25
[그림 3-1] 정수압프레스 (Warm Isostatic Press) .....	29
[그림 3-2] H-904 .....	32
[그림 3-3] H-905 .....	33
[그림 3-4] CaTiO <sub>3</sub> -CaZrO <sub>3</sub> 합성 분말의 SEM 이미지 .....	38
[그림 3-5] CaTiO <sub>3</sub> -CaZrO <sub>3</sub> 합성 분말의 입자크기 분포 .....	38
[그림 3-6] CaTi <sub>3</sub> -CaZrO <sub>3</sub> 고용체 분말의 열적 특성 .....	39
[그림 3-7] 아르키메스 법 측정 장치 및 측정 .....	40
[그림 3-8] CaTiO <sub>3</sub> -CaZrO <sub>3</sub> 소결 온도별 파단면 사진 .....	41
[그림 3-9] CaTiO <sub>3</sub> -CaZrO <sub>3</sub> 소결 온도별 파단면 고배율 사진 (x4000) .....	41
[그림 3-10] 세라믹 공진기 (코팅 전) .....	44

[그림 3-11]	텀블러 장비 .....	44
[그림 3-12]	공진기 흡입 공정 .....	45
[그림 3-13]	건조 오븐 .....	45
[그림 3-14]	은 페이스트 코팅 (Top/Bottom) .....	46
[그림 3-15]	세라믹 기반 공진기 도전막 코팅면 .....	47
[그림 3-16]	공진기 코팅 영역 .....	48
[그림 3-17]	점도에 따른 코팅 결과 (20kcps) .....	48
[그림 3-18]	점도에 따른 코팅 결과 (10kcps) .....	49
[그림 3-19]	토출량 결과 (불량) .....	50
[그림 3-20]	도전막 코팅 결과 (불량) .....	51
[그림 3-21]	800MHz Band Pass Filter Rx Band Circuit .....	53
[그림 3-22]	800MHz Band Pass Filter Rx Simulation Result .....	55
[그림 3-23]	800MHz Band Pass Filter Tx Band Circuit .....	56
[그림 3-24]	800MHz Band Pass Filter Tx Band Simulation Result .....	57
[그림 3-25]	800MHz Band Pass Filter Rx Circuit (Notch Type) .....	58
[그림 3-26]	800MHz Band Pass Filter Rx Simulation Result (Notch Type) ·	60
[그림 3-27]	800MHz Band Pass Filter Tx Simulation Result (Notch Type) ·	62
[그림 3-28]	800MHz Band Pass Filter .....	63
[그림 3-29]	Duplexer 구성도 .....	64
[그림 3-30]	800MHz Duplexer Circuit .....	65
[그림 3-31]	800MHz Duplexer Rx Band Simulation Result .....	67
[그림 3-32]	800MHz Duplexer Tx Band Simulation Result .....	68
[그림 3-33]	800MHz Duplexer Circuit (Notch Type) .....	69
[그림 3-34]	800MHz Duplexer Rx Band Simulation Result (Notch Type) ·	71
[그림 3-35]	800MHz Duplexer Tx Band Simulation Result (Notch Type) ·	72
[그림 3-36]	800MHz Duplexer Sample .....	73
[그림 3-37]	2100MHz Band Pass Filter Rx Band Circuit .....	74
[그림 3-38]	2100MHz Band Pass Filter Rx Band Simulation Result .....	76
[그림 3-39]	2100MHz Band Pass Filter Tx Band Circuit .....	77

[그림 3-40] 2100MHz Band Pass Filter Tx Band Simulation Result	79
[그림 3-41] 2100MHz Band Pass Filter Rx Band Circuit (Notch Type)	80
[그림 3-42] 2100MHz Band Pass Filter Rx Band Simulation Result	82
[그림 3-43] 2100MHz Band Pass Filter Tx Band Circuit (Notch Type)	83
[그림 3-44] 2100MHz Band Pass Filter Tx Band Simulation Result (Notch Type)	85
[그림 3-45] 2100MHz Duplexer Circuit	86
[그림 3-46] 2100MHz Duplexer Rx Band Simulation Result	88
[그림 3-47] 2100MHz Duplexer Tx Band Simulation Result	89
[그림 3-48] 2100MHz Duplexer Circuit (Notch Type)	90
[그림 3-49] 2100MHz Duplexer Rx Band Simulation Result	92
[그림 3-50] 2100MHz Duplexer Tx Band Simulation Result	93
[그림 4-1] Dielectric Filter Vs. Metal Resonator Vs. Proposed Resonator	94
[그림 4-2] 800MHz Band Pass Filter	95
[그림 4-3] 800MHz Band Pass Filter Rx Band Result	95
[그림 4-4] 800MHz Band Pass Filter Tx Band Result	96
[그림 4-5] 800MHz Duplexer Small Cavity Filter Sample	97
[그림 4-6] 800MHz Duplexer Rx Band Result	97
[그림 4-7] 800MHz Duplexer Tx Band Result	98
[그림 4-8] 2100MHz Duplexer Small Cavity Filter Sample	99
[그림 4-9] 2100MHz Duplexer Rx Band Test Result	99
[그림 4-10] 2100MHz Duplexer Tx Band Test Result	100
[그림 4-11] Metal Cavity Filter (A사)	101
[그림 4-12] Metal Cavity Filter Tx Band Test Result (A사)	101
[그림 4-13] Metal Cavity Filter Rx Band Test Result (A사)	102
[그림 4-14] Metal Cavity Filter (K사)	102
[그림 4-15] Metal Cavity Filter Rx Band Test Result (K사)	103
[그림 4-16] Metal Cavity Filter Tx Band Test Result (K사)	103
[그림 4-17] LTCC Duplexer	104

[그림 4-18] LTCC Duplexer Rx Band Test Result .....	104
[그림 4-19] LTCC Duplexer Tx Band Test Result .....	105

# I. 서론

## 1.1 연구 배경

통신 기술의 발전과 인터넷을 사용하는 기기의 폭발적 증가로 인하여 전 세계 IP 트래픽이 폭증하고 있다. 전화기를 사용하기 위해서 집 또는 공중전화로 찾아가서 줄을 서서 전화하던 시대에서 휴대용 모바일 폰 및 태블릿 등의 이동통신 기기의 등장으로 현재는 이동 중에 통화 및 동영상 시청 등의 다양한 미디어를 활용할 수 있게 되었다.

최근 미국 유나이티드 항공사<sup>1)</sup> 및 국내 아시아나 항공사<sup>2)</sup> 등 여러 항공사에서는 비행 중에도 인터넷 사용이 가능하도록 기내에 와이파이를 제공하여 휴대폰을 사용하여 인터넷을 할 수 있도록 시험 서비스를 제공하기도 하였다.<sup>3)</sup> 이처럼 기술의 발전과 통신기기의 증가는 공간과 장소에 제한되지 않고 가파르게 증가되고 있다.

시스코의 전망 보고서에 따르면 2020년까지 전 세계의 인터넷 사용자 수는 2015년을 기준으로 10억 명 이상이 증가하여 41억 명 정도로 예상하며, 세계 인구의 절반 수준(52%)까지 이를 것이라고 보고 있다. 또한, 트래픽은 연평균 22%씩 성장하여 3배까지 증가할 것으로 예상된다. 인터넷과 연결되는 기기의 수는 2015년 163억 개, 2020년에는 263억 개로 100억 개 이상 증가할 것으로 예상된다.<sup>4)</sup>

이동통신의 기술은 트래픽 증가에 따른 문제해결이라는 시대의 흐름과 기술의 발전으로 지속적으로 발전하고 있는데 세대별 통신 기술을 살펴보면 다음과 같다.

이동통신의 1세대 통신은 셀룰러 아날로그 방식으로 벨 연구소에서 개발된 아날로그 이동전화 시스템 표준인 AMPS(Advanced Mobile Phone

---

1) 유나이티드항공사. <https://www.united.com>

2) 아시아나 항공. <http://flyasiana.com>

3) 류종은(2018). 전자신문 보도자료. <http://www.etnews.com>

4) Cisco Visual Networking Index™ Complete Forecast for 2015 to 2020

System), Ericsson사가 개발한 북유럽 표준의 NMT(Nordic Mobile Telephone)가 있으며 아날로그 음성 통신 위주의 통신이었다. 1세대의 이동 통신은 1983년 서비스가 시작 이후 2008년 2월 18일 미국에서 서비스가 중단되면서 1983년부터 2008년까지 26년간 서비스를 멈추고 종료되었다.<sup>5)</sup>

2세대 이동통신은 GSM과 CDMA 두 가지 표준으로 정해졌다. 두 표준은 각각 3GPP와 3GPP2에서 표준을 정하였으며, 디지털화된 음성 및 단문 메시지 전송 위주의 통신을 서비스하였다. CDMA 방식은 미국의 퀄컴사가 원천 기술을 가지고 있으며, 대한민국에서 2세대 이동통신의 주 표준으로 사용하였다. CDMA 서비스 방식은 동일한 주파수와 동일한 시간상에서 가입자마다 코드를 별도로 할당하여 사용하는 방식이었다. GSM의 경우는 1세대 통신에서 사용되던 TDMA 기반의 통신으로서 유럽을 중심으로 사용된 방식이다. GSM방식의 경우 CDMA방식에 비해서는 보안에 취약하다.<sup>6)</sup>

3세대 이동통신은 GSM/3GPP 계열에서는 UMTS, WCDMA-FDD, WCDMA-TDD, TURA-TDD 등으로 표준을 정하였고, 3Gpp2 계열에서는 CDMA2000, 1xEV-DO 등으로 표준을 정하였다. 3세대 이동통신의 표준은 지역별로 다른 방식을 사용하였는데, WCDMA의 경우 유럽에서 사용되었고, CDMA2000과 EV-DO 방식은 북미에서 사용되었다. 대한민국은 에스케이텔레콤(SKT)과 케이티(KT)의 경우 유심칩(USIM Chip : universal subscriber identity module Chip)을 사용하는 WCDMA 방식으로 서비스를 제공하였고, 엘지유플러스(LGU+)에서는 주파수 문제로 인하여 2.5G라고 불리던 CDMA2000 방식을 사용하였다. 두 방식 모두 디지털 음성에 데이터를 추가하여 고속의 통신을 지원하게 되었다.

3세대에서 4세대로 이동통신 기술이 넘어가는 중간에 중간 단계로 3.5세대라고 불리는 통신 기술이 나타났다. 이러한 표준은 3GPP에서는 GSDPA, HSUPA, HSPA+, LTE 등으로 정하였고, 3GPP2 계열에서는 EV-DO 리비전 A/B/C로 표준을 정하였다. 또한, 두 계열 외에 와이맥스(WiMAX), 와이브로(WiBro) 등의 표준이 추가로 나타났다.

---

5) SmartPC사랑 보도자료. <http://www.ilovepc.co.kr>

6) 김현욱 (2001). "IMT-2000 이동통신 원리". 진한도서.

4세대 가기 전의 표준 경쟁에서 최종적으로 사실상 LTE가 승리함에 따라 4세대 이동통신은 3GPP 계열에서 추진하던 LTE 중심으로 좀 더 확장된 LTE-Advanced를 표준으로 정하였다. 다른 계열인 와이맥스 계열에서 와이브로 에볼루션을 표준으로 추진하였지만, 점유율에서 LTE-Advanced에 비해 미미하였다. 이전 세대의 통신보다 수십 배 이상의 빠른 통신 속도로 다양한 미디어를 서비스할 수 있도록 지원할 수 있도록 개선되어 4세대 이동통신은 정지 중 1Gbps의 전송 속도와 이동 중 100Mbps의 전송 속도를 제공할 수 있다. 4세대부터 IP 지원과 멀티미디어 서비스가 가능한 고속의 통신이 지원됨으로써 음성 전화 통화와 고화질의 방송 시청 및 인터넷 접속을 가능하도록 TPS(Triple Play Service) 서비스가 제공되었다.<sup>7)8)</sup>

5세대 이동통신에서는 현재 4세대 이동통신 규격보다 더 높은 규격을 갖 추기로 하여, 증가하는 트래픽과 사용자를 수용할 수 있도록 계획하고 있다. 5세대의 주요 요구사항은 4세대 이동통신 대비 100배의 용량 증대, 언제, 어디서나 Gbps급의 속도 제공, 이동통신 단말기뿐만 아니라 사물인터넷 시대의 다양한 단말기까지 수용 가능한 수용량 및 초실시간 처리, 가상화 네트워크 인프라, All-IP 진화 및 에너지 절감 등이며, 이러한 요구사항의 성능을 수치화하기 위하여 체감 전송률, 최대전송률, 이동성, 전송지연, 최대연결수, 에너지효율, 주파수 효율, 면적당 용량 8가지 항목으로 정의하였다.<sup>9)</sup>

위와 같은 5세대 이동통신의 계획은 다수의 산업계와 국제기구가 협력하여 정하는 중이다. 5세대 이동통신의 표준화를 이끄는 대표적인 국제기구는 두 곳으로 ITU와 3GPP가 있다. 먼저 ITU에서는 ITU-R에서 IMT-2020으로 5세대 이동통신을 정의하고, 2017년도에 5세대 성능의 요구사항과 평가 기준 및 방법을 마무리하고 2019년 WRC-19에서 5세대 주파수 대역을 할당하여 2020년 10월에 5세대의 규격을 완성할 계획이다.<sup>10)</sup>

3GPP에서는 Release 14에서 5G 규격을 위한 선행 연구를 시작하였고,

7) 임명환. (2008). “손에잡히는 방송통신융합 시사용어”. 한국정보통신기술협회.

8) 정명철. (2009). “3GPP LTE-Advanced 기술표준화 동향”. 한국정보통신기술협회(TTA). IT Standard Weekly.

9) MckKinsey. (2014). "the Internet of Things: Sizing up toe opportunity".

10) WRC-19. (2017). "WRC-19 Agenda and Relevant Resolutions".

Release 15와 Release 16에서 본격적인 5G 규격 작업을 진행한다. Release 15에서는 5G 기본 특성(feature)들을 정의하여 5G Phase 1 규격을, Release 16에서는 추가적인 특성(feature)들을 정의하여 5G Phase 2 규격을, 2020년 3월에 Release 할 계획이다.<sup>11)</sup>

5세대 이동통신의 요구사항을 만족시키기 위한 여러 가지 다양한 방법과 기술 중 하나로 스몰셀(Small Cell) 구성을 통해 네트워크 용량 증대하는 방법이 있다. 이는 기존 매크로(Macro) 기지국을 활용하여 넓은 영역에 대응하는 방식에서 트래픽이 대량으로 발생하는 소규모 핫스팟(hot-spot)이나 빌딩 내에 피코셀(Pico Cell) 또는 펌토셀(Femto Cell)과 같은 소형 기지국을 다수 설치하여 이종 네트워크 (HetNet : Heterogeneous network)<sup>12)</sup> 기반 네트워크 용량을 증대하는 기술이다.

기존 4G에서도 이종 네트워크가 구성되었으나, 초고주파 대역을 활용한 5G에서는 스몰셀 구성을 위한 이종 네트워크가 더 확대될 것으로 예상된다.<sup>13)</sup>

## 1.2 연구의 필요성 및 목적

국제기구의 5세대 규격 제정 준비와 맞추어 이동통신의 환경도 변화됨에 따라, 기지국의 구성의 경우 대형셀인 매크로 기지국 위주로 구성하여 커버리지를 확보하였던 것과 다르게 넓은 커버리지를 갖는 고출력 기지국의 사용은 감소하고 중·소출력의 기지국을 여러 개 구성하여 커버리지 영역을 촘촘히 구축하는 형태인 스몰셀이나 분산 안테나 시스템 (DAS : Distributed Antenna System)<sup>14)</sup> 등의 형태로 변화할 것으로 예상되고 있다. 전 세계적으

---

11) 이해영, 정용준, 김대중, 하리다, 조영익, 김다미. (2017). "3GPP 5G 표준화 현황 및 향후 전망". 한국 통신학회 하계종합학술발표회.

12) 3GPP TR 36.814 V9.0.0. (2010). "Further advancements for E-UTRA physical layer aspects(Release 9).

13) 김향석, 이민호, 송연근. (2014). "스몰셀 시장현황 및 전망". 전자통신동향분석. 29(2).

14) Research and markets. (2014). "Distributed Antenna Systems (DAS): market and Forecast 2014-2019. Mind Commerce Publishing".

로 스몰셀 기지국의 구축은 2012년 75,674개에서 2016년 1,671,185개로 약 200% 증대되고 있다.<sup>15)</sup>

이는 매크로셀로 구축시에 발생하는 장소, 비용, 시간문제에 대한 해법으로 매크로셀과 중·소형 기지국, 스몰셀 기지국을 복합적으로 구성하여 통신 커버리지를 좀 더 촘촘하고 필요한 부분에 집중하기 위한 형태로 기지국의 구성 형태가 변화함을 의미한다.<sup>16)</sup>

스몰셀 및 분산 안테나 시스템 등의 형태로 기지국의 구성이 변화하게 됨으로써 이동통신 기지국의 소형화를 위해서는 기지국 내의 큰 부피를 차지하는 RF필터의 소형화는 반드시 따라갈 수밖에 없는 중요한 요소이다. 기지국 무선통신 시스템에서 신호의 송·출력을 하기 위하여 안테나, 필터, 증폭기, 믹서, 등 다양한 부품이 들어가지만, 이때의 RF필터부는 기지국의 여러 부품 중에서도 큰 영역을 차지하기 때문이다.

RF필터의 크기는 물리적으로 정해진 주파수의 파장에 따라 그 크기가 정해진다. 또한, 주변의 신호간섭의 영향을 줄이기 위한 저지 특성을 제공하기 위하여 제품의 크기가 커지거나 다수의 필터가 사용하게 될 수밖에 없다. 이로 인해서 기지국에 들어가는 RF필터의 구조적 문제에 의해 기지국을 소형화 하는데 RF필터의 소형화는 반드시 이루어져야 할 문제이다.

본 논문에서는 다섯 부분을 기술하며, 제1장에서는 서론, 제2장에서는 이론적 배경, 제3장에서는 필터 설계 및 시뮬레이션, 제4장에서는 필터 제작 및 측정, 제5장에서는 결론으로 구성하였다. 각 장에 대한 구체적인 사항은 다음과 같다.

제1장 서론은 연구의 배경 및 목적과 필요성에 대해 구성 내용을 제시하였다. 제2장 이론적 배경은 기존의 선행 이론 및 연구들을 살펴보고 세라믹을 사용한 공진기를 소개한다. 제3장 필터 설계 및 시뮬레이션에서는 새로운 공진기를 활용한 필터 회로를 설계하고 이에 대한 시뮬레이션 결과에 대해 설명한다. 제4장 필터 제작 및 측정에서는 설계된 필터를 제작하고 이를 측정한다. 제5장 결론에서는 연구결과를 요약하고 향후 연구 방향을 제시한다.

15) 박세환. (2015). “5G 이동통신 시스템의 요구사항 분석”. 정보통신기술진흥센터(IITP).

16) 나지현, 김경숙, 권동승, 정현규. (2015). “LTE 기반 소형셀 기지국 기술동향”. 전자통신동향분석. 30(1).

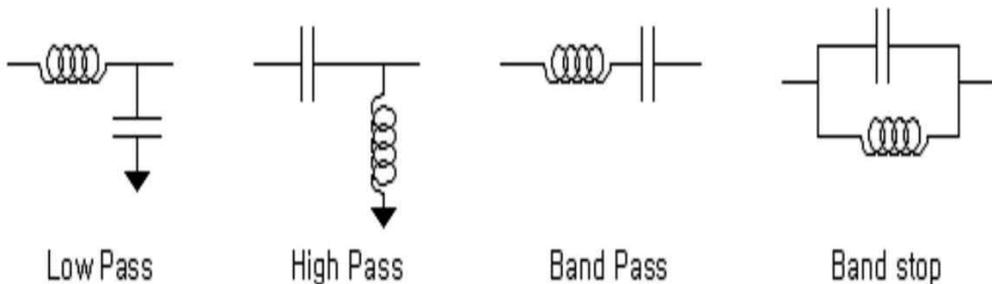
## II. 이론적 배경

### 2.1 RF 필터

#### 2.1.1 RF필터란?

필터는 특정 주파수 대역에 대해서 신호를 통과시키거나 저지하는 특성을 갖도록 설계된 것을 말한다. 이때 어느 대역을 통과 또는 저지시킬 것인가에 따라 필터의 구성이 달라지며, 불리는 이름도 각각 저역 통과 필터(LPF : Low Pass Filter), 고역 통과 필터(HPF : High Pass Filter), 대역 저지 필터(BPF : Band Pass Filter), 대역 저지 필터(BS(R)F : Band Stop(Rejection) Filter)로 구분된다.

위와 같이 특정 주파수 성분을 통과 및 저지하기 위한 회로설계를 구성하기 위해서는 인덕턴스(inductance) 성분인 "L"과 커패시턴스(capacitance) 성분인 "C"의 조합으로 설계된다. L과 C의 조합으로 높은 주파수와 낮은 주파수의 신호를 통과·저지하게 됨으로써 원하는 대역의 신호만을 취하는 필터를 설계할 수 있다. LC 조합으로 네 종류의 단일 구조 필터회로를 설계하면 그림 2-1과 같이 설계할 수 있다.<sup>17)</sup>



[그림 2-1] 필터 단일 구조

17) 윤남일. (2011). “최신 통신이론”. 생능출판사.

## 2.1.2 RF필터 설계 및 특성

RF필터의 구성요소들은 2포트 회로망과 S-산란계수(S-Parameter)를 이용하여 표현이 가능하다. 이러한 회로망으로 표현은 수식적으로 산출 및 계산되어 수식적으로 설계 진행이 가능하도록 되었다. 회로망과 S-산란계수를 통해서 설계 시 디지털 통신과 같이 매우 이상적인 스퀘트 특성을 보여 준다. 그러나 실제 구현할 경우 급격한 신호의 변화는 이루어지지 않고 완만한 신호의 변화를 갖게 된다. 또한 이상적인 필터의 경우 입력된 신호가 그대로 출력되어 손실이 발생하지 않지만 실제 구현 시에는 입력된 전력의 일부가 출력으로 나가지 못하고 일부 소실되는 삽입손실이 발생한다. 그러기 때문에 능동소자를 사용하지 않는 한 반드시 손실이 발생하게 되고, 필터 특성을 확인할 경우 반드시 0dB 이하로 삽입손실 값이 나타나게 된다.

이러한 수식적인 설계 시 이상적 특성에 근사화 시키는 필터 함수로서 버터워스 함수와 체비셰프 함수 등이 있다. 이러한 함수는 수학적 함수로 필터의 차수 및 회로 기본 구성을 설계할 수 있다.<sup>18)</sup>

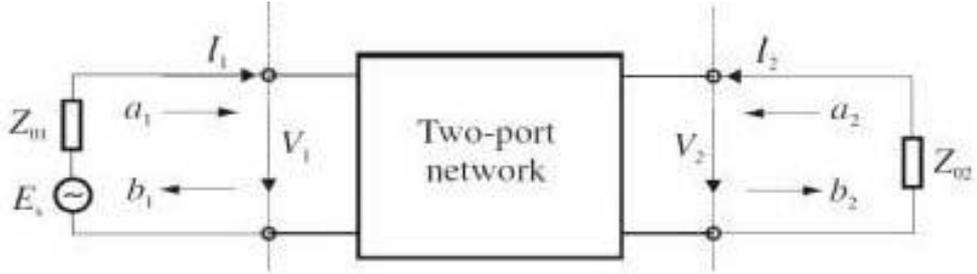
### 2.1.2.1 2포트 회로망

RF필터의 특성을 확인하는 요소들은 그림 2-2와 같이 2포트 회로망으로 표현이 가능하다.<sup>19)</sup>

---

18) David M. (1990). "Microwave Engineering". Wiley.

19) Jiasheng Hong, M. J. Lancaster. (2011). "Microstrip filters for RF/Microwave Applications 2nd Edition". Wiley.



[그림 2-2] 2포트 회로망

각 포트 1과 2에서의 전압과 전류는  $V_1$ ,  $V_2$ 와  $I_1$ ,  $I_2$ 로 나타낼 수 있고, 각 종단의 임피던스는  $Z_{01}$ 와  $Z_{02}$ 이며, 입력 전원은  $E_s$ 이다. 포트 1에서의 정현파  $V_1(t)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$v_1(T) = |V_1| \cos(\omega t + \phi) \quad \text{수식 1}$$

식 (1)은 다음과 같은 페이지 형태로 표현할 수 있다.

$$v_1(T) = |V_1| \cos(\omega t + \phi) = \text{Re}(|V_1| e^{j(\omega t + \phi)}) = \text{Re}(V_1 e^{j\omega t}) \quad \text{수식 2}$$

여기서  $\text{Re}$ 는 실수부이고,  $V_1$ 은 다음과 같다.

$$V_1 = |V_1| e^{j\phi} \quad \text{수식 3}$$

마이크로파 대역 주파수에서는 회로내의 전압, 전류의 측정이 어렵기 때문에 2포트 회로망에서는 입사 전압파  $a_1$ ,  $b_1$ 과 반사 전압파  $a_2$ ,  $b_2$ 를 이용해서 표현할 수 있다. 각 포트에 전압과 전류로부터  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ 는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$V_n = \sqrt{Z_0}(a_n + b_n) \quad n = 1, 2 \quad \text{수식 4}$$

$$I_n = \frac{1}{\sqrt{Z_0}}(a_n - b_n) \quad \text{수식 5}$$

n번째 포트에 전달되는 평균전력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_n = \frac{1}{2} \text{Re} \{ V_n I_n^* \} = \frac{1}{2} (|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad \text{수식 6}$$

여기서  $a_n^2/2$ 와  $b_n^2/2$ 은 각각 n포트에서의 입사전력과 반사 전력이다.<sup>20)</sup>

### 2.1.2.2 S-산란계수(S-Parameter)

산란파라미터는 전자파의 전력 형태에 관한 것이며, 입사 전력파와 반사전력파에 관련되어 회로의 입력과 출력관계를 정의할 수 있다. 그림 2-2를 참고하여 정규화된 입사 전력파를  $a_n$ 이라 하고, 정규화된 반사 전력파를  $b_n$ 으로 정의할 때 각각은 아래 수식과 같다.

$$a_n = \frac{1}{2\sqrt{Z_0}}(V_n + Z_0 I_n) \quad \text{수식 7}$$

$$b_n = \frac{1}{2\sqrt{Z_0}}(V_n - Z_0 I_n) \quad \text{수식 8}$$

첨자 n은 입력과 출력단의 단자 1, 2를 의미한다. 임피던스  $Z_0$ 는 회로의 입력단과 출력단을 연결하는 선로의 특성 임피던스이다. 일반적인 조건에서 입력단에서의 선로임피던스는 출력단에서의 선로임피던스와 다를 수도 있다. 전송선로나 도파관들에서 임피던스 변화를 S-산란계수 표현할 수 있지만, 여기서는 초보적인 단계이므로 간단하게 두 임피던스는 동일하다고 가정한다.

식(7,8)을 바꾸면 식(9,10)과 같이 전압과 전류 표현식을 유도할 수 있다.

20) 송지훈. (2017). “캐비티형 주파수가변 대역통과필터 설계 및 구현”. 군산대학교 석사학위 논문.

$$V_n = \sqrt{Z_0}(a_n + b_n) \quad \text{수식 9}$$

$$I_n = \frac{1}{\sqrt{Z_0}}(a_n - b_n) \quad \text{수식 10}$$

전력에 대한 관계식을 상기하면 식(7,8)의 물리적 의미를 명확하게 알 수 있다.

$$P_n = \frac{1}{2} \text{Re} \{ V_n I_n^* \} = \frac{1}{2} (|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad \text{수식 11}$$

식(9,10)에서 순방향 진행파와 역방향 진행파 성분을 분리하면 다음과 같다.

$$a_n = \frac{V_n^+}{\sqrt{Z_0}} = -\sqrt{Z_0} I_n^+ \quad \text{수식 12}$$

$$b_n = \frac{V_n^-}{\sqrt{Z_0}} = -\sqrt{Z_0} I_n^- \quad \text{수식 13}$$

위 식은 다음의 관계로부터 식(9,10)과 일치함을 알 수 있다.

$$V_n = V_n^+ + V_n^- = Z_0 I_n^+ - Z_0 I_n^- \quad \text{수식 14}$$

그림 2-2에서 나타난 방향 성분에 의하여 S-산란계수를 정의하면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad \text{수식 15}$$

여기에서 S-산란계수의 각 항목은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
S_{11} &= \frac{b_1}{a_1} \Big|_{a_2=0} = \frac{\text{단자1에 반사된 전압}}{\text{단자1에 입사된 전압}} \\
S_{12} &= \frac{b_1}{a_2} \Big|_{a_1=0} = \frac{\text{단자1에 반사된 전압}}{\text{단자2에 입사된 전압}} \\
S_{21} &= \frac{b_2}{a_1} \Big|_{a_2=0} = \frac{\text{단자2에 반사된 전압}}{\text{단자1에 입사된 전압}} \\
S_{22} &= \frac{b_2}{a_2} \Big|_{a_1=0} = \frac{\text{단자2에 반사된 전압}}{\text{단자2에 입사된 전압}}
\end{aligned}$$

수식 16

$a_2=0$ 과  $a_1=0$ 의 조건은 단자 2와 단자 1에서 회로로 되돌아오는 전력파가 없다는 것을 의미함을 알 수 있다. 그러나 이러한 조건은 연결된 전송 선로가 선로의 특성 임피던스에 종단되었을 때 확신할 수 있다.

$S_{11}$ 과  $S_{22}$ 는 각각 입출력 반사계수이고,  $S_{21}$ 은 순방향 전달계수, 그리고  $S_{12}$ 는 역방향 전달계수이다. S-산란계수는 일반적으로 크기와 위상으로 표현하며,  $S_{mn}=|S_{mn}|e^{j\phi_{mn}}$  ( $m, n = 1, 2$ )으로 표현된다. 크기를 dB로 표현하면 다음과 같다.

$$20\log|S_{mn}|dB \quad m, n = 1, 2 \quad \text{수식 17}$$

필터의 특성을 S-산란계수로 표현하면 아래의 식과 같다.

$$\begin{aligned}
L_A &= -20\log|S_{mn}|dB & m, n = 1, 2 \quad (m \neq n) \\
L_R &= -20\log|S_{nn}|dB & m, n = 1, 2
\end{aligned}$$

수식 18

여기서  $L_A$ 는 포트 n과 m사이의 삽입손실이고,  $L_R$ 은 포트 n에서의 반사손실이다.<sup>21)</sup>

S-산란계수는 전력과 매우 밀접하게 관련되어 있으므로 시평균 전력에 관련된 정규화 입력파와 출력파로 표현할 수 있으며 단자 1에서의 평균전력은 다음 식 19와 같다.

21) 송지훈. (2017). “캐비티형 주파수가변 대역통과필터 설계 및 구현”. 군산대학교 석사학위논문.

$$P_1 = \frac{1}{2} \frac{|V_1^+|^2}{Z_0} (1 - |\Gamma_{in}|^2) = \frac{1}{2} \frac{|V_1^+|^2}{Z_0} (1 - |S_{11}|^2) = \quad \text{수식 19}$$

여기에서 입력측의 반사계수는 출력단을 정합시킨 조건 아래  $S_{11}$ 으로 표현된다.

$$\Gamma_{in} = \frac{V_1^-}{V_1^+} = \frac{b_1}{a_1} |_{a_2=0} = S_{11} \quad \text{수식 20}$$

이 식은 단자 1에서 VSWR을  $S_{11}$ 에 의하여 다음과 같이 다시 정의할 수 있다.

$$VSWR = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|} \quad \text{수식 21}$$

식 (16)에 의하여 식 (20)의 입사전력을 인지할 수 있고 그것을  $a_1$ 으로 표현하면,

$$\frac{1}{2} \frac{|V_1^+|^2}{Z_0} = P_{inc} = \frac{|a_1|^2}{2} \quad \text{수식 22}$$

이것이 신호원으로부터 나타나는 최대가용전력(maximum available power)이다. 식 (22)와 식 (20) 및 식 (19)를 이용하여 단자 1에서 총 전력(출력단이 정합된 조건)은 입사전력과 반사전력의 조합으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_1 = P_{inc} + P_{ref} = \frac{1}{2} (|a_1|^2 - |b_1|^2) = \frac{|a_1|^2}{2} (1 - |\Gamma_{in}|^2) \quad \text{수식 23}$$

만약 반사계수 즉  $S_{11}$ 이 영(0)이라 하면, 신호원으로부터 나타나는 모든

가용전력은 회로의 단자 1로 전달된다. 단자 1에 대하여 동일하게 분석하면 다음과 같다.<sup>22)</sup>

$$P_2 = \frac{1}{2}(|a_1|^2 - |b_1|^2) = \frac{|a_1|^2}{2}(1 - |\Gamma_{out}|^2) \quad \text{수식 24}$$

### 2.1.2.3 근사함수

#### 가) 버터워스 함수

버터워스 함수의 경우 통과대역에 대한 특성은 매우 평평한 특성을 가지며, 스킨트 특성은 다소 완만한 형태를 유지한다. 저역통과 영역에서 버터워스 함수의 손실전력은 다음과 같다.

$$P_{LR} = 1 + k^2 \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2N} \quad \text{수식 25}$$

$\omega=0$ 에서  $\omega = \omega_c$ 까지 통과대역이며,  $\omega = \omega_c$ 에서  $1+k^2$ 의 손실전력을 갖고,  $\omega \gg \omega_c$ 일 때, 위 식 (25)와 같은 감쇄특성을 갖는다.

#### 나) 체비셰프 함수

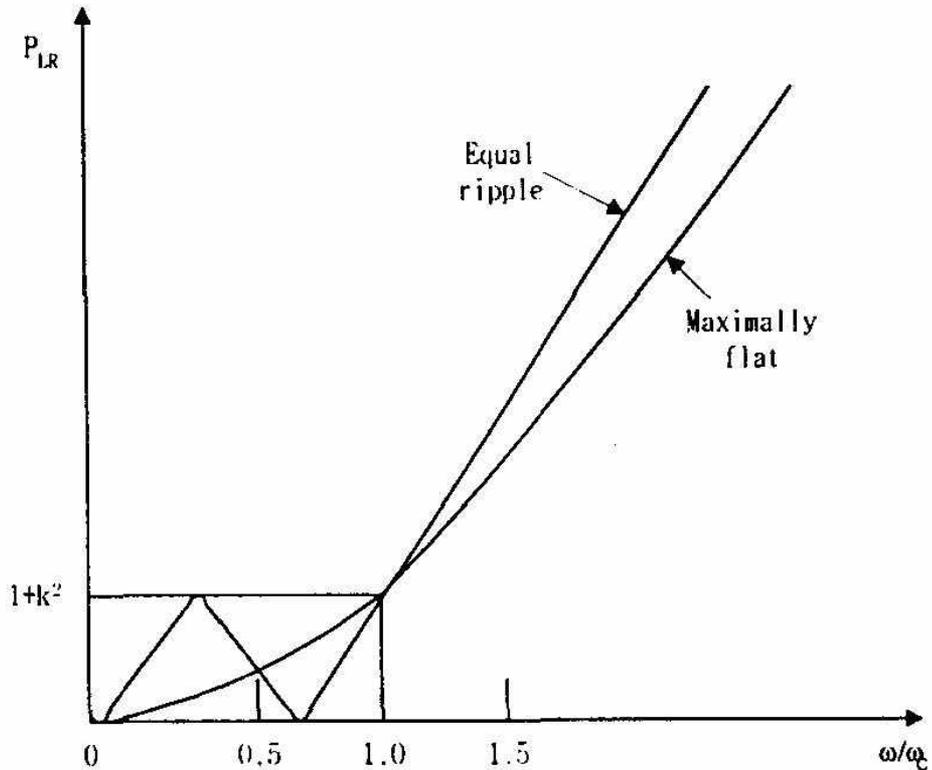
체비셰프 함수의 경우 통과대역에 특성은 리플(Ripple) 성분을 갖고 있어 버터워스 함수와 비교하여 다소 손실이 나쁘나 스킨트 특성이 급격한(shape) 형태를 갖는다. 저역 통과 영역에서 체비셰프 함수의 손실전력은 다음과 같다.

$$P_{LR} = 1 + k^2 T_n^2\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right) \quad \text{수식 26}$$

---

22) 김기래, 윤중환, 이영철. (2010). "RF 회로설계 이론과 응용 제2판". Prentice Hall.

$\omega=0$ 에서  $\omega=\omega_c$ 까지 통과대역이며, 버터워스와는 달리 통과대역에서 리플 특성이 존재한다.  $\omega=\omega_c$ 에서  $1+k^2$ 의 손실전력을 갖고,  $\omega \gg \omega_c$ 일 때, 식 (26)인 값에 근사한 감쇄특성을 갖는다. 그림 2-3에서와 같이 통과대역 특성은 버터워스 형태가 우수하지만, 저지대역에서는 체비셰프 형태가 더욱 좋다.<sup>23)</sup>



[그림 2-3] 버터워스 및 체비셰프 필터

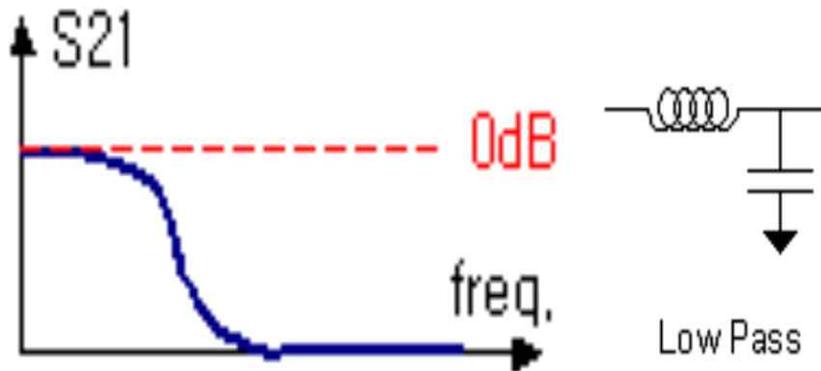
### 2.1.3 필터 구성에 따른 분류

저역 통과 필터는 낮은 주파수를 통과시키고 높은 주파수는 저지(감쇄)시키는 필터이다. 그림 2-4와 같이 특정 임계주파수 이전의 주파수는 통과시켜

23) 김진국. (1998). “진행모드 해석을 이용한 유전체 공진기 대역통과 필터의 설계 및 제작”. 건국대학교 석사학위논문.

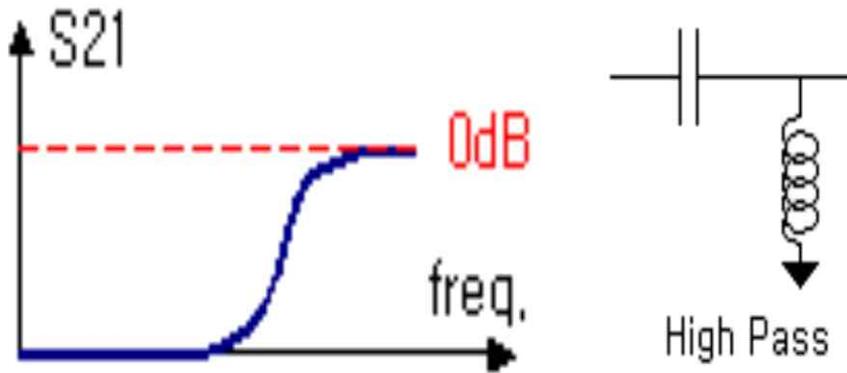
송·수신이 가능하고 임계주파수 이후의 주파수는 저지 또는 감쇄시켜 송수신이 될 수 없도록 한다.

저역 통과 필터의 LC조합 구성은 직렬로 L을 구현하고, 병렬로 C를 구현하여 직렬 방향에서 L(Inductance)을 통하여 높은 주파수는 흐르지 못하게 하고, 낮은 주파수는 통과하도록 한다. 또한, 병렬 C는 높은 주파수는 통과하여 접지(Ground)로 흐르게 하여 신호를 종단(Termination)시키고, 낮은 주파수는 C를 지나치지 못하게 하여 전체적으로 보았을 경우 낮은 주파수는 신호라인을 따라 신호가 전달되고 고주파는 신호라인에서는 저항을 받아 전달되지 않고, 전달된 신호는 접지로 흐르게 하여 낮은 주파수만이 신호가 전달되게 한다.



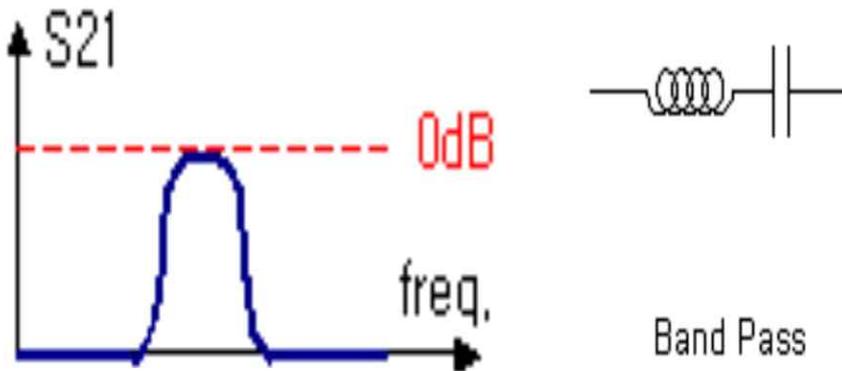
[그림 2-4] 저역 통과 필터 (LPF : Low Pass Filter)

고역 통과 필터의 조합 구성은 저역 통과 필터의 반대 구성으로 직렬로 C를 구현하고, 병렬로 L을 구현하여 낮은 주파수는 직렬의 신호라인을 흐르지 못하게 되고, 높은 주파수는 직렬의 신호라인을 따라 신호가 전달되게 된다. 또한, 낮은 주파수는 병렬 신호라인의 L을 따라 접지로 흐르게 하여 신호를 종단시키고, 높은 주파수는 L을 건너지 못하여 직렬 신호라인으로 신호가 전달되어 최종적으로 높은 주파수만이 신호가 전달되게 된다.



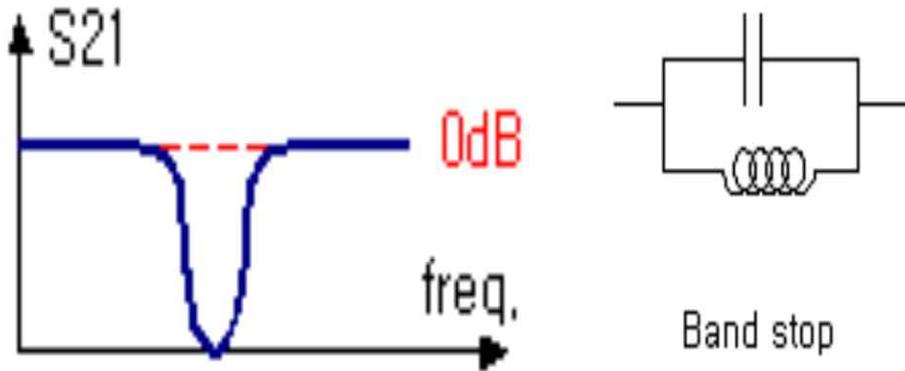
[그림 2-5] 고역 통과 필터 (HPF : High Pass Filter)

대역 통과 필터의 경우 직렬로 L과 C가 구현되어 L과 C의 공진주파수에 의해 해당하는 신호만이 직렬 신호라인을 따라 신호가 전달되어 특정 주파수 대역의 신호만 전달되는 특성을 갖는다.



[그림 2-6] 대역 통과 필터 (BPF : Band Pass Filter)

대역 저지 필터의 경우 대역 통과 필터와 반대의 구성으로 병렬로 L과 C가 구현되어 L과 C의 공진주파수에 의해 해당하는 신호가 병렬 신호라인을 따라 접지로 신호가 전달되어 신호가 Termination 된다. 이에 따라 특정 주파수만이 신호가 저지되는 특성을 보인다.



[그림 2-7] 대역 저지 필터 (BS(R)F : Band Stop(Rejection) Filter)

#### 2.1.4 필터 형태에 따른 분류

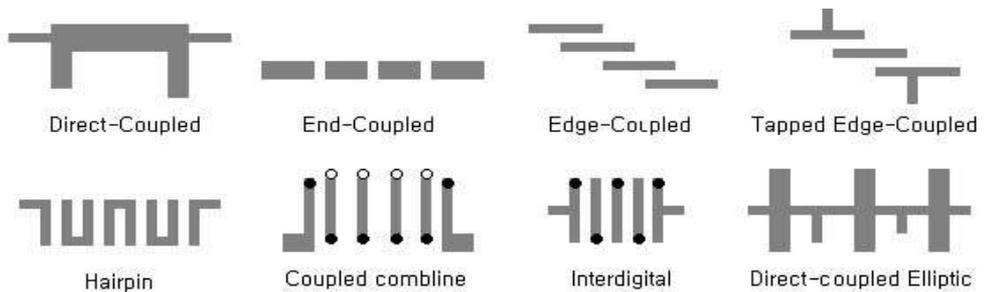
필터는 구성에 따라 저역 통과 필터, 고역 통과 필터, 대역 통과 필터, 대역 저지 필터가 있지만 이러한 필터를 어떠한 형태로 제작하느냐에 따라 그 명칭이 달라진다. L과 C를 칩이나 코일 등의 타입인 집중소자로 구성하여 PCB 등의 기판에 구성하였을 경우 집중소자 필터라고 명명되어진다. 집중소자 필터의 경우 표면실장 형태(SMD Type)의 소자인 경우 3GHz ~ 5GHz 이상의 주파수에서 사용할 경우 각 소자의 사용제한 주파수인 자기공진주파수(SRF : Self Resonance Frequency)에 의해 사용 가능 소자가 제한적인 단점이 있다. 또한, Chip 등으로 구현할 수 있는 값이 한정적이기 때문에 세밀한 값 구현이 어렵다.



[그림 2-8] 집중소자 필터

높은 주파수에서의 필터 설계 시에는 집중소자로 구현하기에는 크기 제한 및 미세조정이 어려운 단점이 있어서 이를 해소하기 위해서 구현하는 필터가 Transmission Line 필터이다. Transmission Line 필터의 경우 선로 간의 커플링 및 공진, 다중 임피던스 연결의 원리를 이용하여 L과 C값을 구현하여 필터를 구성한다.

PCB 패턴상의 선로 폭과 길이, 간격, 선로 간의 마주하는 면적 등에 의해 L값과 C값이 구현되기 때문에 값의 구현을 다양하게 할 수 있다.



[그림 2-9] Transmission Line 필터

세라믹 블록 필터 또는 Dielectric 필터라고 불리는 필터의 경우 파장에 따른 공진을 이용하는 필터이다. 높은 유전율을 갖는 세라믹을 사용하여 신호의 전기적 파장을 줄임으로써 좀 더 소형화된 필터를 구현할 때 사용한다.

단위파장공진기(Comblines)를 이용하는 경우가 많으나 별개의 단위파장공진기를 여러 개 연결하여 사용하는 방식과 유전체 블록으로 구현하는 모노블럭 방식이 있고, 또한 세라믹 내에 다층 패턴을 이용하는 세라믹 칩 필터 등이 있다.



[그림 2-10] 세라믹 블록 필터

도파관(Waveguide) 필터는 공진현상을 직접적으로 이용하는 필터로서, 금속 또는 세라믹 블록 내에 공동(Cavity)을 구현하고, 공동 내의 창 간격 및 공진 봉을 활용하여 주파수 공진을 변화시켜 필터를 구현하는 방식이다.

도파관 필터는 대전력을 사용하는 경우 널리 쓰이며, 그림 2-11과 같이 금속으로 제작된 공진 필터의 경우 kW단위 이상의 전력에서도 사용할 수 있다.



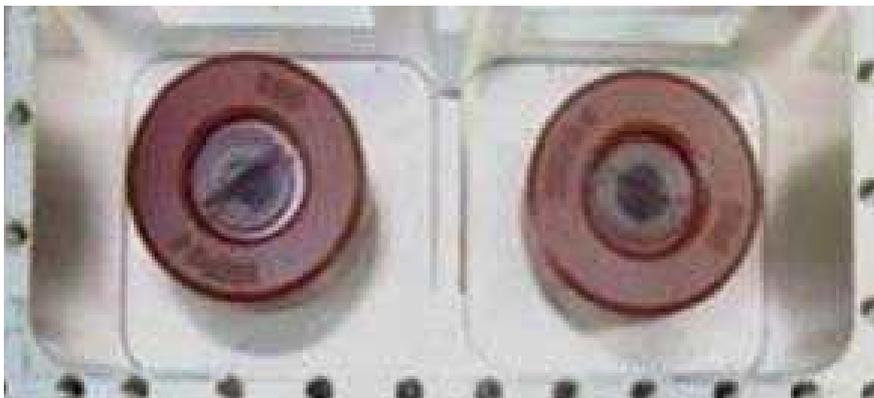
[그림 2-11] 금속 캐비티 필터

## 2.2 유전체 공진기

필터를 설계함에 있어 구조와 형태에 따라 다양한 필터를 제작 할 수 있다. 이중 특성 또는 제품의 크기를 위하여 세라믹을 사용하기도 한다. 세라믹을 사용하는 필터는 세라믹 블록 필터, 유전체 공진기(DR : Dielectric Resonator) 필터, LTCC(Low Temperature Co-fired Ceramic)필터 등이 있다. 이중 세라믹을 사용하여 공진기를 구현한 필터는 세라믹 블록 필터, 유전체 공진기 필터 가 있다. 이러한 세라믹을 사용하여 공진기를 구성한 필터에 대해 구체적으로 살펴본다.

### 2.2.1 유전체 공진기 필터

유전체 공진기 필터(Dielectric Resonator Filter)는 주로 기지국 및 중계기 용으로 많이 사용되며, 금속캐비티 필터와 동일하게 금속을 사용하여 캐비티를 가공한다. 단, 기존 금속공진기를 대신하여 세라믹으로 만든 DR을 공진기로 사용하여 기존보다 좀 더 좋은 삽입손실과 스퀘트 특성을 얻는다. 다만 제작에 있어서 비용이 기존 금속 캐비티 필터에 비해 비싸다는 단점을 갖는다.



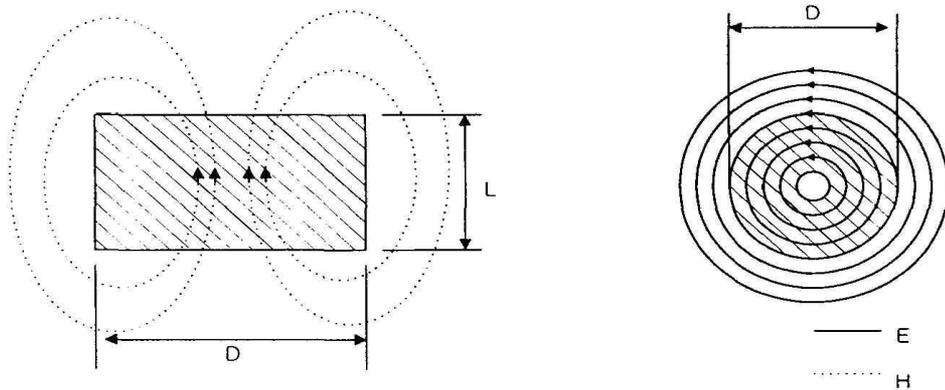
[그림 2-12] 유전체 공진기 필터(Dielectric Resonator Filter)

유전체 공진기는 제작 및 원리는 온도 안정성  $\tau_f$ 가 수 ppm/°C 이내인 고 유전을 세라믹 재료로 만들어진다. 유전체 공진기의 공진은 고유전을 재료와 외부와의 경계에서 발생하는 전자계의 반사로 공진기 일어나게 된다.

유전체 공진기의 기본 공진모드는  $TE_{01\delta}$  모드이며, 높이와 직경의 비가 2.2~3.0일 경우 발생된다.

유전체 공진기는 고유전을 재료로 만들어지고, 전자계를 여기 시킬 경우 대부분의 에너지는 공진기 안에 존재하고, 에너지의 일부는 유전체 외부에 분포하게 된다. 아래 그림 2-13과 같이  $TE_{01\delta}$  모드는 유전체 내부와 외부에 동시에 존재하고, 유전체 공진기 반경과 길이 방향의 자계와 전계 성분으로 나타낼 수 있다.<sup>24)</sup>

유전체 공진기의 전자계 성분은 공진기 외부의 전자계를 소멸모드로 가정하는 기존의 Cohn의 진행파로 가정하는 모델과 자계벽 모델을 사용하여 표현한다.



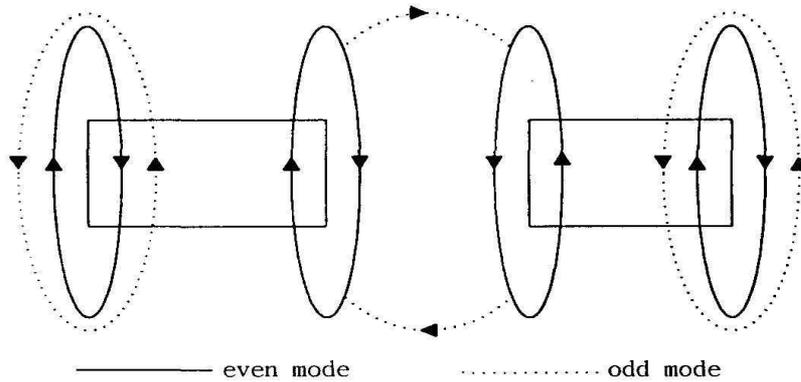
[그림 2-13] 유전체 공진기의 전자계 분포

유전체 공진기를 이용하여 필터를 제작하게 되면 유전체 공진기 간의 필드 분포를 이용하여 유전체 공진기 간의 결합 계수를 계산하여야 하며, 입출력 프로브와 공진기 간의 외부 양호도  $Q_{ex}$ 를 고려하여야 한다.

유전체 공진기의 프로브의 경우 유전체 공진기의 전자계 분포 특성에 의

24) Allan W. Scott. (2005). "Understanding Microwaves". Wiley.

해공진기와 평행하게 구성을 하여 공진기 간의 결합이 이루어 질 수 있도록 하여야한다.<sup>25)</sup>



[그림 2-14] 유전체 공진기의 결합도

### 2.2.2 세라믹 블록 필터

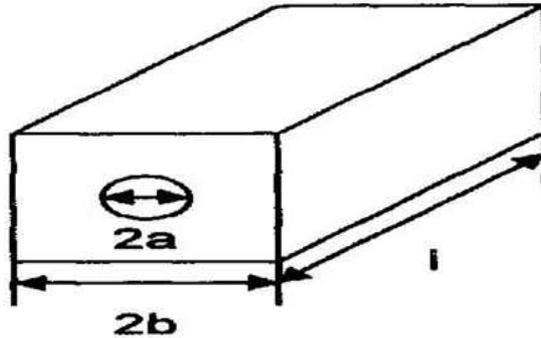
세라믹 블록 필터의 경우 세라믹으로 만든 공진기 블록 전체에 은 등의 도전막을 입히고 신호를 인가하여 블록에 형성된 홀 및 크기 등에 의해 공진기 일어나는 방식이다.

블록을 한 개만 사용하여 사용하거나 다수의 블록을 연결하여 사용하는 경우가 있다. 여러 개를 붙이게 되면 스킵 특성은 좋아지나 상대적으로 삽입손실이 나빠지는 문제가 있다. 세라믹 블록 필터의 경우 FM 방송 등의 낮은 주파수에 많이 사용된다. 제품의 재질과 구조 특성상 삽입 손실이 크고, 격리도가 높이기 어렵기 때문에 기지국 쪽 보다는 전자통신, 전자제어용 회로에 주로 쓰인다.

세라믹 블록 필터공진 원리는 내부가 원형인  $\lambda/4$  TEM Mode UIR(Uniform Impedance Resonator)을 사용한다. 일반적으로 한쪽 끝단이 단락된 공진기는 길이가  $n(\lambda/4)$ ( $n$ 은 홀수)일 경우 LC 병렬회로의 특성을 갖는다.

25) 김진국. (1998). "진행모드 해석을 이용한 유전체 공진기 대역통과 필터의 설계 및 제작". 건국대학교 석사학위논문.

전송 선로로서의 해석시 필요한 요소는 임피던스와 공진기 길이 그리고 유전율, 감쇠 상수이다.



[그림 2-15]  $\lambda/4$  TEM-mode UIR

이때 전송선로의 특성임피던스  $Z_0$ 는,

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \log(1.787 \frac{b}{a}) \quad \text{수식 27}$$

이고, 여기서  $\epsilon_r$ 은 유전율이며,  $a$ 는 공진기의 내부 반지름,  $b$ 는 외부의 반지름이다. 공진기 길이  $l$ 은

$$l = \frac{c}{4f_0 \sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{수식 28}$$

이고, 여기서  $f_0$ 는 공진 주파수이고  $c$ 는 빛의 속도이다. 감쇠 상수  $\alpha$ 는

$$\alpha = \frac{\beta}{2Q_c} \quad \text{수식 29}$$

이고,  $Q_c$ 는 도체 손실에 의한 품질계수이며,  $\beta$ 는 위상정수이다.<sup>26)</sup>

26) 고영준, 김종현. (1998). "PCS 단말기용 유전체 공진기 대역 통과 필터의 설계 및 제작". 신기술연구소논문집. 27.

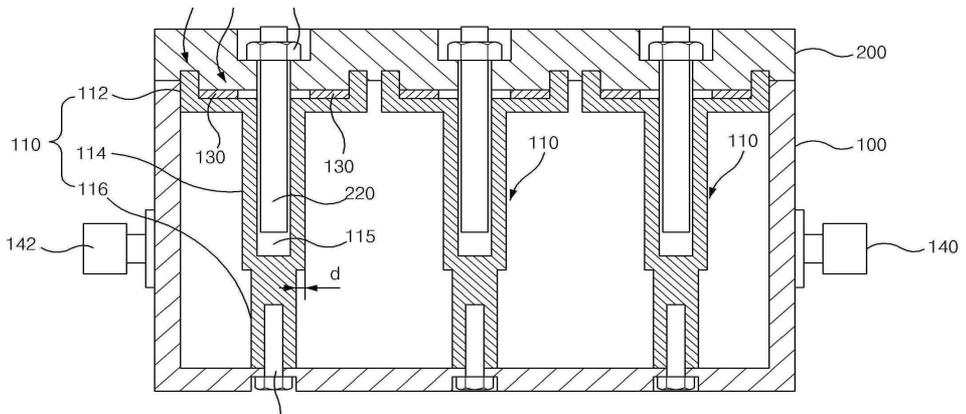


[그림 2-16] 세라믹 블록 필터

### 2.2.3 스몰 캐비티 필터

본 연구에서 제안하는 새로운 형태의 필터 형태로 기존의 금속과 유사한 형태의 특성을 유지하면서 캐비티 필터의 크기를 소형화하기 위한 방법으로 제안되는 필터 구조이다.

금속이 가지는 고유한 물질에서의 길이는 수식적으로 정해져 있어서 그 공진기의 길이를 변화시키기 위해서는 그림 2-17과 같이 공진기의 단을 변경하는 방식(SIR)<sup>27)</sup> 등의 특별한 형상을 하거나 다른 요소를 변화시킬 수 밖에 없다.



[그림 2-17] 요철 구조의 공진기 형상

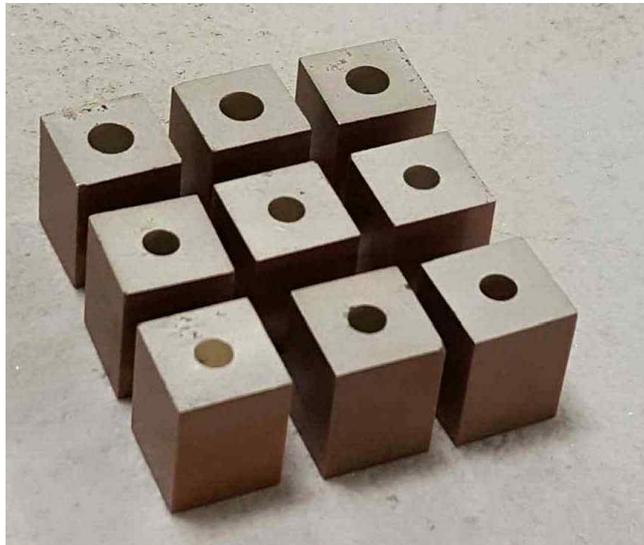
27) 유기한, 배진석, 박상준, 서수덕, 김현수, 김우식. (2000). "Coaxial Air Type Filter에서 UIR과 SIR 특성에 대한 연구". 한국통신학회 학술대회논문집. 210-213.

필터 구조를 특별한 형상으로 변경하는 것은 한계가 있으므로 그 이외의 요소를 변경시키기 위한 방법으로 유전율을 변경하여 그 파장의 길이를 변경하는 방법을 사용하는 것이 스몰 캐비티 필터에서의 공진기이다.

금속 필터의 공진기 형상을 살펴보면 기존 공진기 형상은 바닥에서 올라오는 긴 원통형 또는 가운데가 뚫린 사각기둥 형상이다. 이러한 공진기는 주파수 파장에 의해 그 길이가 정해진다.

$$l = \frac{c}{4f_0 \sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{수식 30}$$

스몰 캐비티 필터에서의 공진기는 기존 금속 유전율보다 높은 유전율을 사용하여 길이를 줄인다. 수식 (30)에 의해 동일한 주파수를 갖는 공진기의 경우 유전율이 증가할 경우 길이의 1/2은 작아지게 된다. 공진기의 길이가 작아지게 되면 필터가 소형화 되는 효과를 얻을 수 있다.



[그림 2-18] 스몰 캐비티 필터에서의 공진기

스몰 캐비티의 필터 형상은 그림 2-18에서 보는 것과 같은 형태로서 세라믹 블록 필터와 유사하게 세라믹을 사용하여 공진기 블록을 형성하되, 공진

기의 홀과 바닥면을 반드시 은 등의 도전막으로 코팅을 하는 것이 차이점이다. 공진기의 홀과 바닥면을 도전막으로 코팅을 함으로써 기존의 공진기와 유사한 형태의 특성이 코팅된 도전막을 통해서 나타나고, 도전막 주위에 유전체가 감싸진 형태가 되어 유전율이 높아진 효과를 얻게 되어 기존 금속 공진기보다 공진기가 소형화 된다.

## Ⅲ. 필터 설계 및 시뮬레이션

### 3.1 세라믹 공진기

#### 3.1.1 공진기 소재 선택

본 논문에서 제안하는 세라믹 기반의 캐비티 필터의 제작을 위해서 세라믹 공진기를 제작하는 방법은 선행연구<sup>28)</sup>에 의하면, 다결정질 세라믹 유전체 부품은 세라믹 분말을 성형한 후, 고온에서 열처리하여 제조한다. 이러한 공정에 영향을 주는 공정 변수를 어떻게 제어하는가에 따라 유전체 부품의 최종 밀도가 결정되고, 이러한 밀도는 유전율뿐만 아니라 손실계수에도 큰 영향을 주기 때문에 공정 변수의 제어가 중요하다.

공정 변수를 제어하기 위하여 고온에서 열처리를 할 때, 글래스 프리트 분말을 첨가하여 소결체의 밀도를 높이는 액상 소결법을 사용하는데, 이러한 액상소결법의 핵심은 글래스 프리트 분말의 조성을 선정하는 것이다.<sup>29)30)</sup>

글래스 프리트를 선정하기 위해서 서로 다른 글래스 프리트 분말 5종을 선택 분석하며 이때 유전체 분말은 잘 알려진 알루미나( $Al_2O_3$ )분말을 사용하여 변수를 단순화하였다.

분말의 테이프 캐스팅을 하기위해 표 3-1의 조성으로 슬러리를 제조하였다. 세라믹 분말을 그린상태에서 붙잡아 주는 역할을 하는 바인더는 Ferro사의 B73225 제품을 사용하였고, 세라믹 분말의 분산제는 BYK-11을 사용하였다. 이들 유기물을 용해시키기 위해 톨루엔과 에탄올을 혼합한 이중용매를 사용하고, 고형분과 바인더의 최종 비율을 1.5로 하였다.

28) Moonbong Ko, Seungcheon Kim. (2018). "A Research on the Sintering and Manufacturing Condition of Small Cavity in Mobile Communication Cavity Filter", JIFS.

29) Taehong Kim, et al. (1999). "Microwave Dielectric Filter Technology Trend", Electronics and Telecommunications trends, ZB.10 No.3.

30) Uiseon Choi et al. (2005). "Structural and Microwave Dielectric Properties of the  $0.9 < \text{gTiO}_3\text{-}0.1\text{SrTiO}_3$  Ceramics with Sintering Temperature", KIEE Journal, 49(5).

[표 3-1] 테이프 캐스팅을 위한 분말 조성

Item		Addition amount (g)	Content relative to powder (%)	Content ratio (%)
Powder	Dielectric +Glass frit	50	-	59.2
Solvent	Toluene	2.43	4.9	2.7
Solvent	EtOH	2.43	4.9	2.7
Binder	Ferro(B73225)	33.92	67.8	40.2
BYK-103	BYK-11	0.25	1.0	0.6
Total		88.97	168.8	100
Powder/Binder		1.5		

그린시트를 제조하기 위해 자동화된 테이프 캐스팅 공정을 이용하고 표 3-2의 공정조건으로 진행하였다.

건조 온도는 그린시트에 균열이 가지 않도록 70°C로 설정하였으며, 그린시트의 두께가 100um가 되도록 댄 높이를 300um로 설정하였다. 또한, 그린시트를 여러 장 쌓아 기판 형태의 최종 반제품을 제조하기 위해 10톤의 압력으로 여러 장의 그린시트를 적층 시키고, 그림 3-19의 정수압 프레스(WIP : Warm isostatic press)를 이용해 70°C의 온도에서 200bar의 정수압을 가해 압착하였다.

[표 3-2] 테이프 캐스팅 공정 조건

항목	조건
댄 높이	300 $\mu$ m
온도	70°C
이동속도	2m/min
장비	압착기
적층 조건	10ton, 5.0sec, 400°C
압착 조건	200bar, 1min, 700°C
절단 크기	33mm * 33mm



[그림 3-1] 정수압프레스 (Warm Isostatic Press)

소결 시편을 제조하기 위해 표 3-3과 같은 탈바인딩 및 소결 공정을 진행하고, 유기물이 충분히 제거되도록 탈바인딩을 300°C, 3시간 유지 시켰으며, 소결 조건은 880°C에서 1시간 유지 시켰다.

[표 3-3] 소결 및 탈바인딩 공정 조건

항목	조건
소결로	박스로
승온 속도	5°C/min
탈 바인딩 온도	300°C/3Hour
소결 온도	880°C/1Hour

소결된 시편에 전극을 도포한 후, LCR 미닛로 유전율 및 Q 값을 측정하여, 표 3-4에 정리하였다. 결과적으로 테이프 캐스팅법으로 제조한 시편은 수축율이 일정하지 않았다. 유전 상수 및 손실계수 값도 산포가 커서 신뢰성이 떨어짐을 볼 수 있다.

[표 3-4] 소결 시편별 특성 (분말 3종)

시편	성형방법	수축률 (%)			소결밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	유전율	Q
		가로	세로	높이			
A제품	Tape casting	9.9	9.5	14.0	2.82	6.7	137
	Tape casting	11.4	10.8	13.2	2.74	7.2	359
B제품	Tape casting	10.9	11.6	17.7	2.93	7.7	325
	Tape casting	10.7	11.1	17.7	2.89	7.6	281
C제품	Tape casting	11.3	11.0	9.2	2.48	6.0	313
	Tape casting	11.0	11.1	9.2	2.50	6.0	193

테이프 캐스팅 공정을 이용해서는 재료 선정을 위한 스크리닝법으로 적합하지 않다고 판단되어, 일반적인 프레스 성형 공정으로 재실험 진행하였다. 이때, 추가적인 글래스 프리트를 조사하여 6종의 분말을 검증하였다.

[표 3-5] 소결 공정 조건

항목	조건
소결로	박스로
승온 속도	5°C/min
소결 온도	880°C/1Hour

소결된 시편의 밀도와 유전율, 손실계수를 측정하여 본 결과, 테이프 캐스팅공법으로 제조한 시편보다 측정 산포가 작아 신뢰성이 높다.

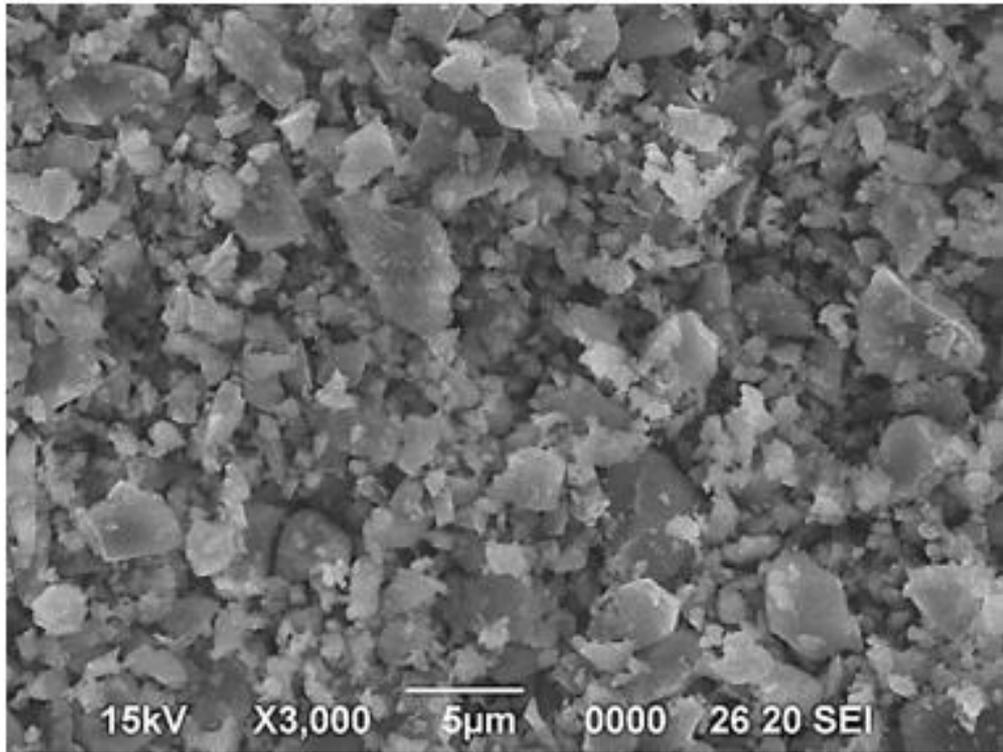
[표 3-6] 소결 시편별 특성 (분말 6종)

시편	성형방법	수축률	(%)	소결밀도	유전율	Q
		직경	높이	(g/cm <sup>3</sup> )		
A제품	Press	14.0	13.9	2.70	7.2	384
B제품	Press	14.8	15.5	2.78	7.7	260
C제품	Press	14.3	14.2	2.40	5.3	216
D제품	Press	14.9	15.3	2.65	6.8	100
	Press	15.0	14.4	2.63	6.8	100
	Press	14.6	15.1	2.65	6.6	104
E제품	Press	17.4	14.0	2.26	5.4	199
	Press	17.7	12.5	2.22	5.3	212
	Press	17.4	14.4	2.25	5.4	179
F제품	Press	10.9	8.1	2.24	5.1	18
	Press	10.9	9.7	2.26	5.2	16
	Press	10.9	6.6	2.18	5.2	21

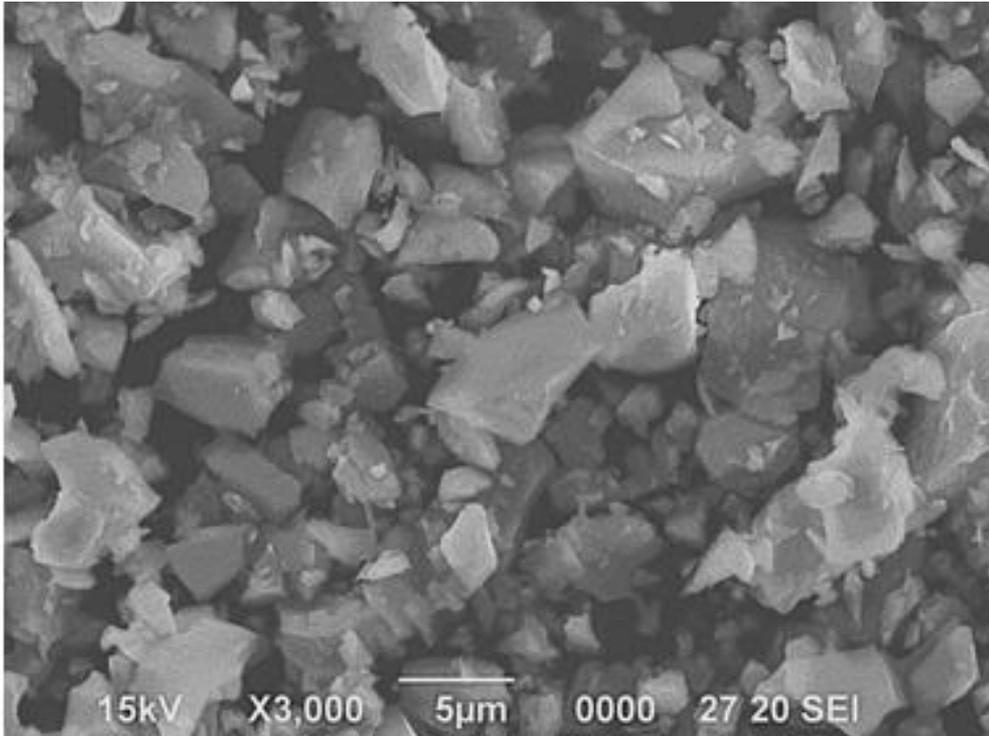
표 3-6의 결과 중 성능이 특별히 우수하다고 판단되는 글래스 프리트는 존재하지 않기 때문에 새로운 조성의 글래스 프리트를 제조하여 8종의 글래스 프리트를 테스트하였다. 이중 성능이 우수할 것으로 예측되는 2 종류의 제품

(H-904, H-905)을 선정하여 유전체를 제조 및 분석을 진행한다. 그림 3-2과 그림 3-3은 두 종류의 Glass의 평균 입경과 분말 이미지를 나타낸다.

H-904의 경우 평균 입경은  $2.54\ \mu\text{m}$ 로 H-905의  $6.16\ \mu\text{m}$ 보다 작았으며, 이는 분말 이미지에서도 확인할 수 있다.



[그림 3-2] H-904 Glass의 평균 입경과 분말 이미지



[그림 3-3] H-905 Glass의 평균 입경과 분말 이미지

두 종류의 글래스 프리트의 소결 특성 및 유전 특성을 검토하기 위해 2인자 3수준의 실험을 진행하였다. 분말의 조성은 알루미나 대비 40%, 50%, 60%의 글래스 프리트를 첨가하여 변화시켰고, 소결온도 또한 840°C, 860°C, 920°C 3가지 온도에서 소결을 진행하였다. 글래스 프리트의 최종 특성 비교는 Q값을 기준으로 판단하였다.

H-904 글래스 프리트를 실험한 결과는 표 3-7과 같다. 조성과 온도에 대한 2인자 3수준으로 실험한 결과이며, 조성비가 6:4이며, 920°C에서 소결한 시편의 Q값은 806으로 가장 높은 결과 값을 보인다.

[표 3-7] 글래스 프리트 실험 결과 (H-904)

조성비(wt)	온도(°C)	차수	수축율 (%)		소결밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	유전율	Q
			직경	높이			
60 : 40	840	1	3.4	23.	2.02	4.0	385
		2	3.6	1.6	2.06	4.0	370
		avg	3.50	12.30	2.04	4.00	377.50
	880	1	8.5	5.5	2.32	4.8	670
		2	8.5	6.1	2.32	5.0	663
		avg	8.50	5.80	2.32	4.90	666.50
	920	1	5.0	2.6	2.17	4.4	877
		2	5.1	2.6	2.18	4.4	735
		avg	5.05	2.60	2.17	4.40	806.00
50 : 50	840	1	6.7	4	2.16	4.4	443
		2	6.7	3	2.17	4.3	423
		avg	6.70	3.50	2.17	4.35	433.00
	880	1	4.7	2.6	2.15	4.2	588
		avg	4.70	2.60	2.15	4.20	588.00
	920	1	10.6	8.9	2.4	5.1	803
		2	10	7.9	2.42	5.2	687
		avg	10.30	8.40	2.41	5.15	745.00
	40 : 60	840	1	9.7	5.7	2.23	4.7
2			9.5	5.7	2.23	4.6	467
avg			9.60	5.70	2.23	4.65	481.00
880		1	12.1	10.7	2.47	5.4	666
		2	12.1	10.7	2.44	5.2	651
		avg	12.10	10.70	2.46	5.30	658.50
920		1	11.7	10.3	2.59	6.1	811
		2	11.4	12.7	25.9	6.0	735
		avg	11.55	11.50	14.25	6.05	773.00

H-905 글래스 프리트에 대해서도 동일하게 2인자 3수준의 실험을 진행하였고 그 결과는 표 3-8과 같다. 이 글래스 프리트도 H-904와 동일하게 조성비를 6:4로 하였고, 920°C에서 소결한 시편이 가장 높은 Q값을 보인다. 이 실험의 결과로 유전체 소결 조제로 적합함을 알 수 있다.

[표 3-8] 글래스 프리트 실험 결과 (H-905)

조성비(wt)	온도(°C)	차수	수축율 (%)		소결밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	유전율	Q
			직경	높이			
60 : 40	840	1	123	11.1	2.78	7.2	332
		2	121	10.6	2.79	7.3	339
		avg	122.00	10.85	2.79	7.25	335.50
	880	1	145	12.9	2.87	7.4	413
		2	145	11.4	2.87	7.2	407
		avg	145.00	12.15	2.87	7.30	410.00
	920	1	133	7.4	2.77	8.0	536
		2	131	7.4	2.64	7.8	532
		avg	132.00	7.40	2.71	7.90	534.00
50 : 50	840	1	14.6	13.1	2.84	7.6	331
		2	14.6	13.1	2.82	7.4	328
		avg	14.60	13.10	2.83	7.50	329.50
	880	1	12.5	12.4	2.83	7.4	428
		2	12.3	12.4	2.86	7.5	421
		avg	12.40	12.40	2.85	7.45	424.50
	920	1	14.8	7	2.64	7.6	475
		2	14.8	9.5	2.8	7.6	487
		avg	14.80	8.25	2.72	7.60	481.00
40 : 60	840	1	16.5	9.1	2.71	7.1	320
		2	16.6	9.6	2.66	7.1	317
		avg	16.55	9.35	2.69	7.10	318.50
	880	1	18.8	6.1	2.62	7.7	320
		2	16.8	4.7	2.6	7.1	317
		avg	17.80	5.40	2.61	7.40	318.50
	920	1	17.9	5.2	2.65	6.9	388
		2	17.7	5.3	2.67	6.9	371
		avg	17.80	5.25	2.66	6.90	379.50

일반적으로 800MHz 대역에서 최상의 성능을 보이는 세라믹 소재의 유율을 약 90에 해당한다고 알려져 있다. 문헌조사 결과 유전율 90에 해당하여 높은 Qxf를 가지는 물질로는 CaTiO<sub>3</sub>-CaZrO<sub>3</sub>의 고용체가 있으며, 이에 연구가 활발하게 되고 있다.

S. Parida은  $\text{CaTiO}_3\text{-CaZrO}_3$ 의 용해도와 마이크로웨이브 유전 특성을 연구하였는데, 이 연구는 페로브스카이트 구조의 Ti 이온 자리를 Zr 이온이 치환하면서 완전 고용체를 형성함을 증명하였다. 특히, 표 3-9과 같은 조성 변화에 따른 소결된 시편의 마이크로웨이브 유전특성을 측정하였다.

표 3-9에서 보면, 유전상수 90인 조성은 x값이 0.5 이하에서 존재한다. 성능수인  $Q \times f$ 와 온도계수인  $\tau f$ 는 조성에 따라 큰 차이가 나지 않는다. 이에 x가 0.5이하인 조성을 가진 분말을 합성하여 분말의 소결 특성을 유전 특성을 측정하여 분석한다.

$\text{CaTiO}_3\text{-CaZrO}_3$  분말의 합성을 위해 탄화칼슘( $\text{CaCO}_3$ , 99.9% Aldrich), 티타니아( $\text{TiO}_2$ , 99.9% Aldrich), 지르코니아( $\text{ZrO}_2$ , 99.9% Tosoh)를 출발 원료로 사용한다.

[표 3-9] 소결된 분말의 유전 특성

Compositions $\text{Ca}(\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{O}_3$	Frequency(f) (GHz)	$\tau f$ ppm/°C	$Q \times f$	$\epsilon_r$
X = 1.0	5.352	-19.98	16543	27
X = 0.9	4.578	81.75	10728	42
X = 0.8	4.352	170.65	3466	28
X = 0.7	3.925	168.00	2917	38
X = 0.6	3.462	460.00	3789	50
X = 0.5	3.143	459.11	4409	59
X = 0.4	2.493	792.07	5408	98
X = 0.3	2.290	588.66	4943	138
X = 0.2	2.140	732.33	5945	141
X = 0.1	2.015	749.08	5013	150
X = 0.0	1.910	843.90	4321	158

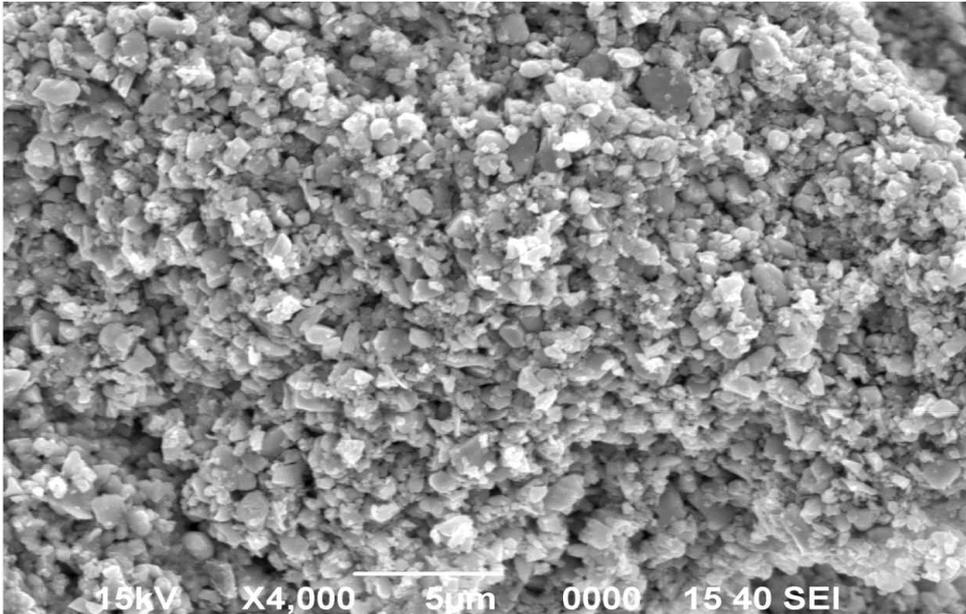
3가지 원료는 전자저울에서 정확히 측량한 후, 습식 볼밀을 진행한다. 습식 볼밀은 지르코니아 볼을 날젠 병에 원료 분말과 함께 넣고, 에탄올을 병의 2/3이 되도록 부은 다음 rpm 100으로 24시간 볼밀을 진행한다. 볼밀 후 슬러리는 바로 120°C로 유지되는 오븐에 넣어 12시간 건조를 시킨 후, 체를 이용하여 조립화를 진행한다.

혼합 분말을 고온에서 상호 확산시켜 단일상을 만들기 위하여 하소 처리를 한다. 하소는 알루미늄나 보트에 건조된 혼합 분말을 채우고, 박스형 전기로에서 1000°C, 10시간 열처리를 진행한다.

하소된 분말은 강하게 응집이 되어있으므로 소결이 가능한 분말 크기로 분쇄하는 것이 필요하다. 이를 위해 마노유발에서 잘게 부수고 플라네타리 밀을 이용해 분쇄를 진행한다. 플라네타리 밀링은 직경 1mm인 지르코니아 볼을 사용하였으며, IPA 용매에 분산제를 0.5wt% 첨가하여 합성 분말의 입자 크기를 감소시킨다.

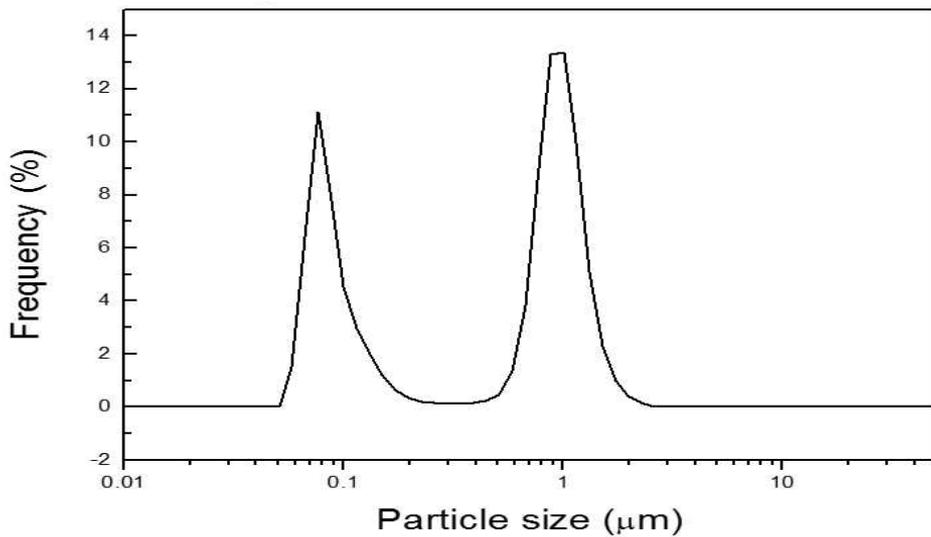
플라네타리 밀링한 슬러리를 비커에 넣고, 마그네틱 스티를 이용하여 200°C의 핫플레이트에서 교반 가열하여 1차 건조시킨다. 이를 트레이에 담아 80°C로 유지된 건조로에서 24시간 건조를 진행한다. 이를 통하여 얻어진 분말은 체가름을 통해 조립화를 시켜 흐름 특성을 좋게 한다.

제조된  $\text{CaTiO}_3\text{-CaZrO}_3$  분말을 주사전자현미경으로 관찰하여 보면 고상 합성에 의해 분말을 제조하였기 때문에, 분말의 모양은 규칙적이지 않으며, 수  $\mu\text{m}$ 의 입자도 간혹 관찰되기 때문에 입도분포는 넓은 것으로 예상된다.



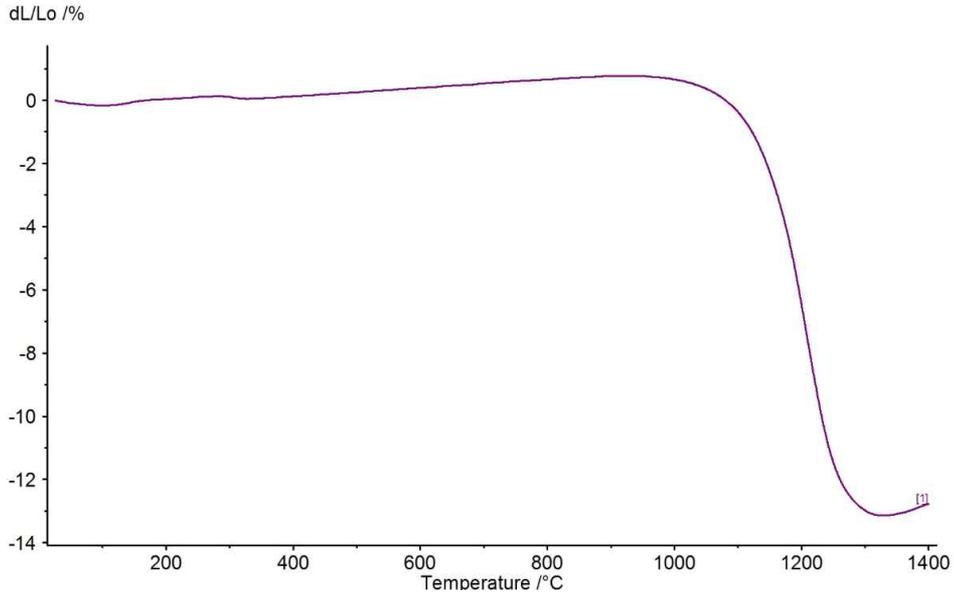
[그림 3-4] CaTiO<sub>3</sub>-CaZrO<sub>3</sub> 합성 분말의 SEM 이미지

입도분석 결과, 평균 입자의 크기인 D50은 0.72 µm이며, 1 µm 정도의 분말과 100nm 정도의 분말이 혼합된 Bimodal 분포를 갖기 때문에 소결 특성이 우수할 것으로 판단된다.



[그림 3-5] CaTiO<sub>3</sub>-CaZrO<sub>3</sub> 합성 분말의 입자크기 분포

제조된  $\text{CaTiO}_3\text{-CaZrO}_3$  분말의 소결 온도를 결정하기 위해서 dilatometer로 수축율을 측정한다.



[그림 3-6]  $\text{CaTiO}_3\text{-CaZrO}_3$  고용체 분말의 열적 특성

$\text{CaTiO}_3\text{-CaZrO}_3$  분말은  $1000^\circ\text{C}$  부근에서 급격하게 소성 수축이 일어남이 관찰된다. 이후  $1340^\circ\text{C}$  부근까지 수축이 일어나다가 더 높은 고온에서는 수축을 멈추고 자연 열팽창에 의해서 시편의 크기가 증가한다. 그림 3-6의 결과에 의해서  $1340^\circ\text{C}$  부근에서 최적의 소성 온도가 존재함을 알 수 있으며, 이를 최적화하기 위해  $1300^\circ\text{C}$ ,  $1340^\circ\text{C}$ ,  $1380^\circ\text{C}$ 에서 합성 분말의 소성을 진행한다.

소결체 밀도 평가는 아르키메데스 법을 이용하여 진행한다. 즉, 그림 3-7과 같이 측정 장치를 설치한 후, 영점을 맞추고 맨 위 접시에서 무게를 측정한다.

건조무게



수중무게



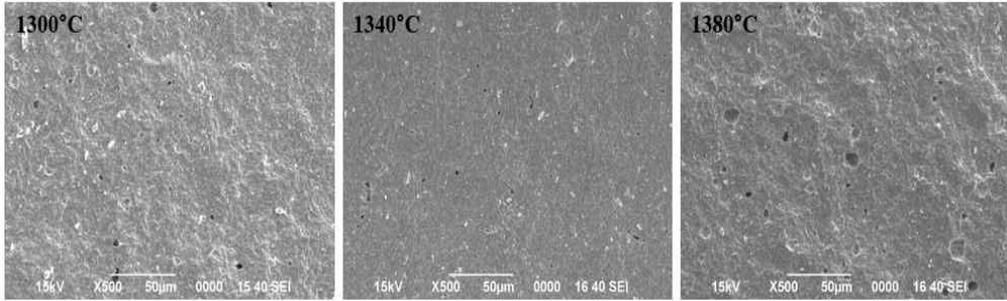
[그림 3-7] 아르키메스 법 측정 장치 및 측정

건조무게 영점을 맞추고 물에 담긴 아래접시에서 무게를 측정하며, 이때 물의 온도는 20℃, 물의 비중은 0.99823, 시편의 개수는 5개로 한다. 소결 온도에 따른 상대 밀도는 표 3-10과 같다

[표 3-10] 소결 온도에 따른 상대밀도

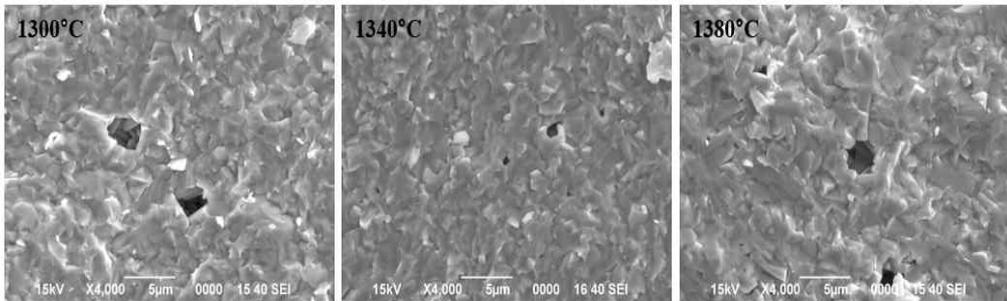
온도	1300℃	1340℃	1380℃
상대밀도	97.9%	99.3%	95.3%

확인할 수 있고, 열분석 결과와 일치한 것을 볼 수 있다. 소성 후 파단면을 관찰함으로써 기공 분포를 정성적으로 파악한다. 파단면 관찰 결과 표 3-10에서의 상대밀도 측정치와 같은 경향을 보인다. 1340℃에서 소결한 시편이 가장 작은 기공 크기를 가지고 있음을 볼 수 있다. 1380℃에서 소결한 시편이 비교적 큰 기공을 가지고 있음을 확인할 수 있다.



[그림 3-8] CaTiO<sub>3</sub>-CaZrO<sub>3</sub> 소결 온도별 파단면 사진

소결된 시편의 파단면에서 미세구조를 확인하기 위해 고배율(X4000) 사진으로 관찰하였다. 되면 1300°C, 1340°C에서는 작고 둥근 모양의 입자가 관찰되는 반면, 1380°C 시편에서는 상대적으로 크며, 침상 모양의 입자들이 관찰되었다. 온도 증가에 의한 밀도 감소는 입자의 이방성 성장에 기인하는 것으로 볼 수 있다.



[그림 3-9] CaTiO<sub>3</sub>-CaZrO<sub>3</sub> 소결 온도별 파단면 고배율 사진 (x4000)

글래스 프리트를 실험한 결과 알루미나 대비 60%의 글래스 프리트를 620°C에서 소결한 시편이 가장 높은 Q값을 보여 기지국 소형화를 위한 세라믹 유전체 공진기(Ceramic dielectric resonator) 제작을 위한 유전체 소결 소재로 적합함을 확인 할 수 있다.

### 3.1.2 공진기 도전막 코팅

세라믹 기반의 필터의 공진기 제작에 있어서 세라믹 공진기를 금속 캐비티 필터의 공진기와 유사한 특성을 내기 위해서는 세라믹 공진기의 관통홀과 상하면에 도전막 코팅이 필요하다. 이에 도전막을 코팅하기 위해서 여러 방법들이 있으며, 선행연구<sup>31)</sup>를 통하여 그 방법과 최적화 값을 확인하였다.

### 3.1.2.1 잉크젯 인쇄법

잉크젯 프린팅법은 프린터 헤드로부터 미세한 잉크 방울을 토출하여 원하는 위치에 패턴을 입히는 공정기술이다. 잉크젯 프린팅 공정은 노즐에서 토출된 미세한 잉크액이 세라믹 표면에 부착되고, 용매가 빠르게 건조되어 고형성분이 고착되는 것에 의해 패턴이 형성된다. 노즐에서 토출된 미세한 잉크액의 크기는 수~수십 pl, 직경은 수 마이크로미터 내외이다. 잉크젯 인쇄법에서는 포토 리소그라피와 같이 현상·에칭 등의 공정이 필요 없으므로 화학적 영향으로 기판이나 재료의 특성이 열화되는 경우가 없고, 비접촉식 인쇄방식이어서 접촉에 의한 디바이스 손상이 없다.

### 3.1.2.2 스크린 인쇄법

스크린 인쇄법은 강한 장력으로 당긴 스크린 위에 잉크 페이스트를 올리고 스퀴지(squeegee, 주걱 모양의 프린팅 도구)를 이용하여 누르면서 이동시켜서 페이스트를 스크린의 메쉬를 통해 세라믹 표면으로 밀어내 전사하는 공정이다. 스크린은 원래 천등으로 이용되었으나 세밀한 패턴링을 위하여 메쉬의 재질이 스테인레스 금속으로 변화하였다. 사용되는 잉크 페이스트는 인쇄에 적당한 점도가 확보 될 수 있도록 금속, 세라믹, 반도체 등의 기본 재료에 수지나 용제 등이 분산된 형태로 사용된다. 인쇄되는 막의 두께는 잉크 페이스트의 점도 및 농도와 스크린 메쉬의 크기 두께, 재질 등에 영향을 받게 된다. 서브마이크론에서는 두께막을 수십 마이크로미터 정도 두께 막을 구현할

31) Moonbong Ko, Seungcheon Kim.. (2017). "A Study on the Resonator Plating Method of Ceramic Resonator Filter". IJCA. 10(10), 229-238.

수 있다.

### 3.1.2.3 그라비아 및 그라비아-오프셋 인쇄법

그라비아 인쇄는 요판 인쇄의 일종으로 원통형 판에 요철을 형성한 부분에 잉크를 묻히고, 볼록한 부분에는 묻은 잉크를 제거한 후, 오목한 부분에 들어간 잉크를 기판에 전사하는 방법이다. 그라비아 오프셋 인쇄법은 그라비아 인쇄법과 오프셋 인쇄법을 결합한 방식으로 LCD 컬러필터 등의 디스플레이 및 전자회로에 응용되고 있는 기술이다. 잉크를 인쇄판에서 고무블랑켓에 전사한 후, 그 블랑켓의 잉크를 다시 기판에 전사하는 방법으로 플렉서블 전자소자의 중용한 제작공정으로 그 가능성이 검토되고 있다.<sup>32)</sup>

### 3.1.2.4 도금 방법(공정)

#### 가. 텀블러(Tumbler)

공진기 도금을 위하여 세라믹 블럭 표면의 이물질 제거를 위한 공정

[표 3-11] 세라믹 기반 공진기 표면 연마를 위한 사용 소재

사용 소재	
사용소재	연마제 , 계면활성제 , 물 , 공진기
조건	
연마제 크기	2φ
속도	200RPM
시간	30min

32) J. Kimura and H. Shibasaki. (1995). "Recent Advances in Clinical Neurophysiology". Proceedings of the 10th International Congress of EMG and Clinical Neurophysiology.



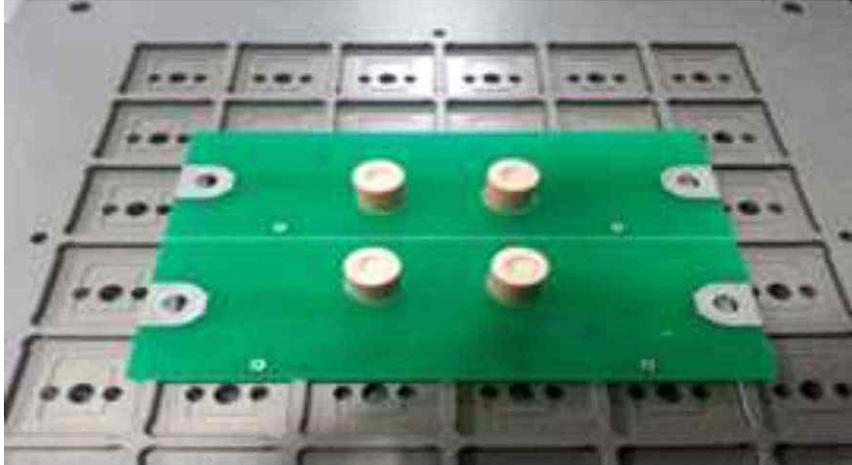
[그림 3-10] 세라믹 공진기 (코팅 전)



[그림 3-11] 텀블러 장비

#### 나. 홀 은(Ag) 코팅

홀 내부에 은 페이스트를 채운 후 흡입하여 공진기의 관통홀 벽면을 코팅



[그림 3-12] 공진기 흡입 공정

#### 다. 건조

건조 오븐을 이용하여 공진기 관통홀 벽면에 묻힌 페이스트를 건조. 100°C/30min 조건으로 건조 진행함.



[그림 3-13] 건조 오븐

#### 라. 인쇄/건조

인쇄면에 은 페이스트를 인쇄한 후 건조 진행(Top/Bottom)



[그림 3-14] 은 페이스트 코팅 (Top/Bottom)

#### 마. 소결

박스로 설비를 사용하여 900°C에서 15분간 소결 진행

#### 3.1.2.5 시편

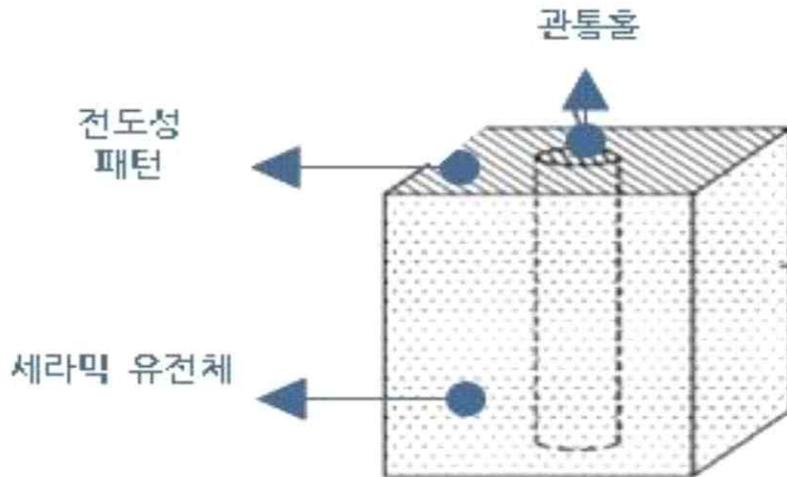
800MHz 유전체 세라믹 공진기의 제조에는 유전율 90의 세라믹 분말을 사용하여 제작하였으며, 제작된 공진기 크기는 14mm이다.

#### 3.1.2.6 측정 방법 및 기준

점도 측정 기준은 Brookfield DV-II, spindle #14/10rpm이며, 토출량 조절 기준은 토출기 토출 시간으로 제어, 흡입 시간 30초 이상 진행하였다. 흡입 시간 조건은 흡입력 250W, 4개 배열 후 동시 작업하였다.

#### 3.1.2.7 공진기 도금 위치

공진기의 측면을 제외한 상단면, 하단면, 관통홀 부위에 전도성 막을 형성한다. 주파수에 따라 설계에 의하여 상단면의 패턴이 변형 되거나 도금 되지 않을 수 있다.



[그림 3-15] 세라믹 기반 공진기 도전막 코팅면

### 3.1.2.8 점도에 따른 코팅 영향

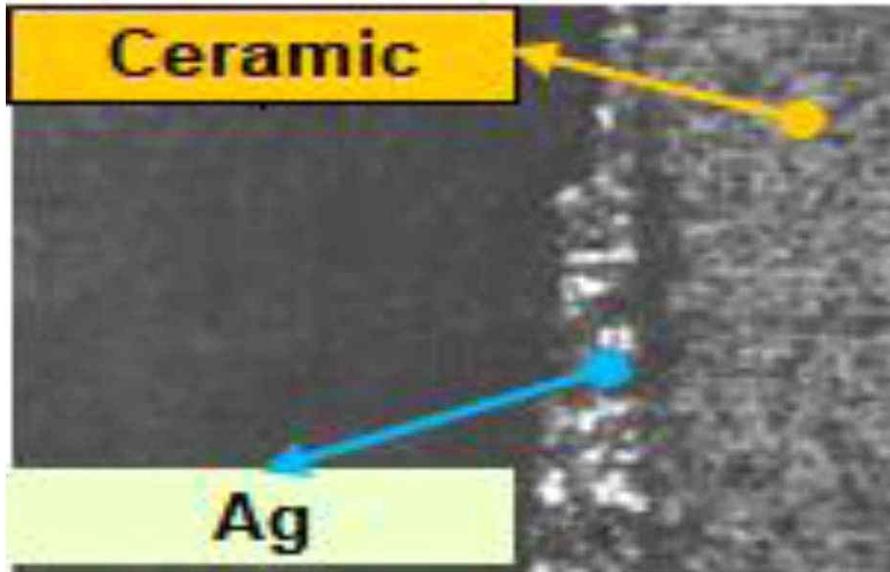
점도에 따른 코팅 두께를 확인하기 위하여 표 3-12과 같이 80kcps ~ 10kcps까지 점도를 변경하여 두께의 변화를 측정하였다. 이때 토출량은 0.3g으로 하고, 흡입 시간은 최소 30s를 진행하였다.

[표 3-12] 점도 시험 조건

점도 (kcps)	토출량 (g)	흡입 시간 (s)
80	0.3	30. min
40	0.3	30. min
20	0.3	30. min
10	0.3	30. min

시험 결과 코팅면은 그림 3-16 ~ 3-18과 같이 이루어 졌으며 각 점도에 따른 코팅 두께는 표 3-13와 같이 나타났다. paste점도에 따른 코팅 두께는 40kcps에서는 코팅 두께가 20  $\mu$ m 수준으로 나타났고, 20kcps에서는 15  $\mu$ m

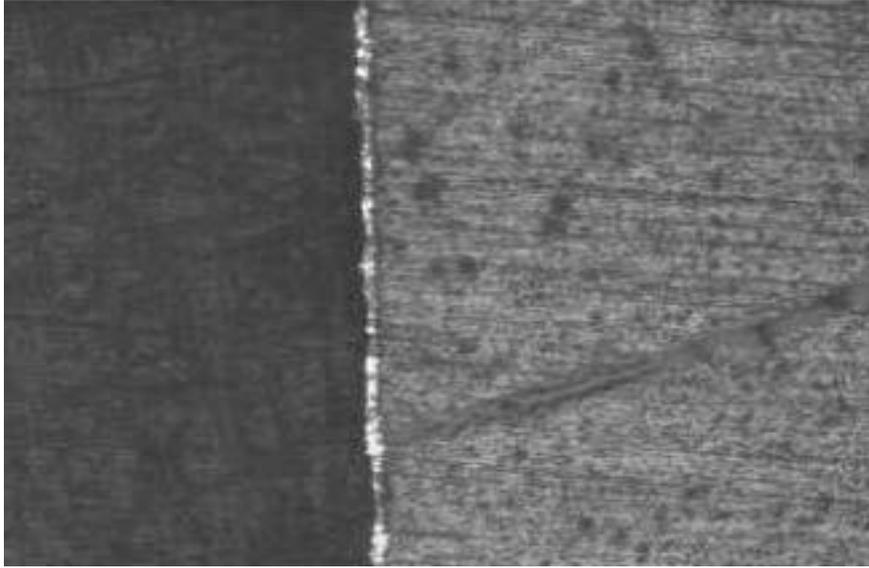
수준으로 나타났다. 10kcps에서는 10  $\mu$ m 수준으로 코팅이 이루어졌다.



[그림 3-16] 공진기 코팅 영역



[그림 3-17] 점도에 따른 코팅 결과 (20kcps)



[그림 3-18] 점도에 따른 코팅 결과 (10kcps)

[표 3-13] 점도에 따른 코팅 두께

점도	40kcps	20kcps	10kcps
Sample	20.0 $\mu$ m	15.0 $\mu$ m	9.0 $\mu$ m
Sample	19.0 $\mu$ m	14.5 $\mu$ m	10.0 $\mu$ m
Sample	18.5 $\mu$ m	13.0 $\mu$ m	11.0 $\mu$ m
Sample	19.5 $\mu$ m	16.5 $\mu$ m	9.0 $\mu$ m
Sample	17.5 $\mu$ m	13.5 $\mu$ m	10.0 $\mu$ m

### 3.1.2.9 점도에 따른 코팅 영향

토출량에 따른 코팅 상태를 확인하기 위하여 표 3-14와 같이 0.1g ~ 0.3g까지 토출량을 변경하여 코팅 상태를 측정하였다. 이때 흡입 시간은 최소 30초를 진행하였다.

[표 3-14] 토출량 조건

항목	1	2	3
토출량(g)	0.1	0.2	0.3
흡입 시간(s)	30	30	30



[그림 3-19] 토출량 결과 (불량)

토출량이 0.1g 이하일 경우 그림 3-19와 같이 미인쇄 되었으나, 토출량이 0.2g 이상일 경우 미인쇄 불량 발생하지 않았다.

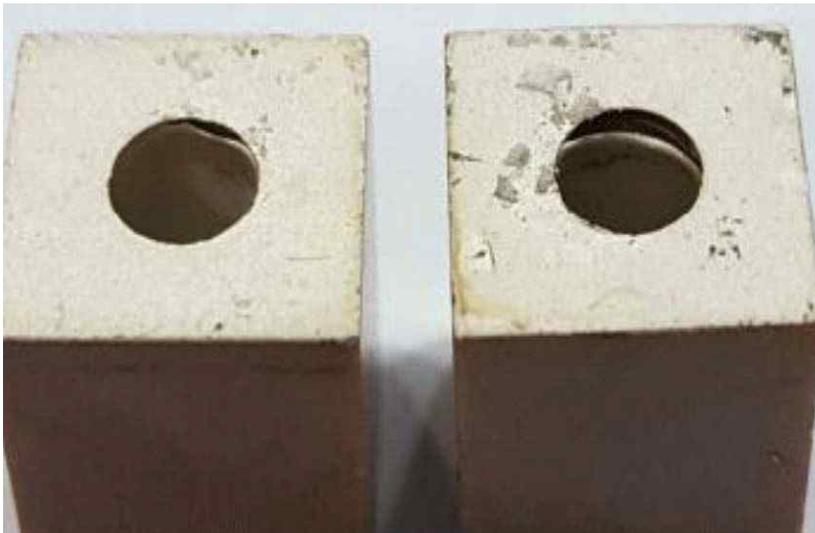
### 3.1.2.10 흡입 시간에 따른 코팅 영향

흡입 시간에 따른 코팅 상태를 확인하기 위하여 표 3-15와 같이 0.5s~20s까지 흡입 시간을 변경하여 코팅 상태를 측정하였다. 이때 토출량은 0.2g, 흡입력은 250W로 진행하였다.

[표 3-15] 흡입 시간

흡입속(W)	토출량 (g)	흡입 시간 (s)
250	0.2	5. min
250	0.2	10. min
250	0.2	20. min

흡입 시간이 5초일 때 그림 3-20과 같이 부분적인 미인쇄 및 페이스트 뭉침이 발생하였다. 흡입 시간이 10초 이상일 때 미인쇄 불량이 발생하지 않았다.



[그림 3-20] 도전막 코팅 결과 (불량)

## 3.2 대역 통과 필터

### 3.2.1 대역 통과 필터 회로 설계

대역 통과 필터를 설계하기 위하여 LC공진 특성을 활용하여 필터를 설계한다. 삽입손실 및 주변대역 감쇄 특성을 고려하여 필터 차수를 결정하게 된다.

다. 특성의 기준은 선행연구<sup>33)</sup>와 표 3-16의 특성을 기준으로 하였으며, 이는 일반적으로 적용되는 소출력 증계기의 필터 규격을 나타낸 것이다.

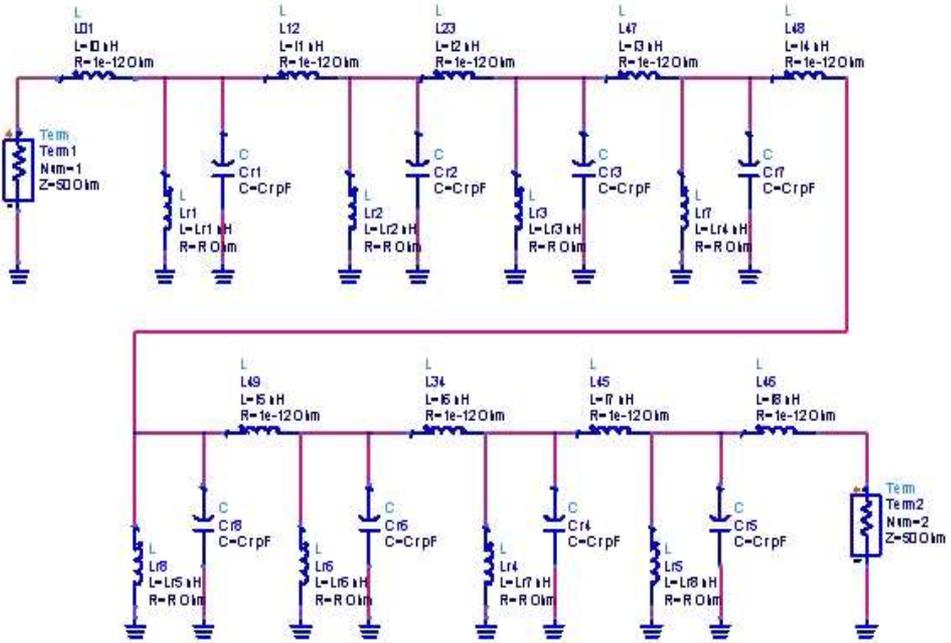
[표 3-16] 800MHz Band Pass Filter Specification

Parameter	Specification	
Frequency Range	Transmit : 869 - 894 MHz	
Insertion Loss	869 - 894 MHz	Max. 3.0dB
Return Loss	869 - 894 MHz	Min. 15dB
Band Isolation	824 - 849 MHz	Min. 80dB
Frequency Range	Receive : 824 - 849 MHz	
Insertion Loss	824 - 849 MHz	Max. 3.0dB
Return Loss	824 - 849 MHz	Min. 15dB
Band Isolation	869 - 894 MHz	Min. 80dB

표 3-16의 800MHz 대역 통과 필터 사양에서 주파수는 Cellular 통신에서 송수신 주파수를 의미한다. 또한, 삽입손실(Insertion Loss)의 경우 입력신호대비 출력신호가 얼마나 정확하게 전달되는지를 의미하는 지수로서 0dB일 경우 입력신호가 출력 신호로 전부 전달됨을 의미한다. 만약 삽입손실이 -3dB일 경우 입력 신호대비 출력 신호는 1/2인 절반만 출력됨을 의미한다. 반사손실(Return Loss)의 경우 입력신호가 반사되는 정도를 나타내는 지수로 그 값이 낮을수록 신호의 전달이 잘 됨을 의미한다. 감쇄특성(Band Isolation)의 경우 주파수간의 간섭에 대한 특성 값으로서 그 값이 낮을수록 서로 간섭이 적어 통신이 원활하게 될 수 있음을 의미한다.

표 3-16와 같이 800MHz Cellular 대역 저지필터의 Tx 대역의 주파수는 869MHz ~ 894MHz이며, Rx 대역의 주파수는 824MHz ~ 849MHz 이다. 각 대역의 삽입손실은 3.0dB이하의 값을 목표로 하며, 대역내 반사손실의 경우 최소 15dB이다. 밴드간의 저지 대역의 감쇄 특성은 80dB이하로 하였다.

33) Moonbong Ko, Sungmin Kim, Heedon Jang, Seungcheon Kim. (2017). "A Study on RF Cavity Filter Miniaturization Ceramic Resonator". JARDCS. 10(1), 208-213.



[그림 3-21] 800MHz Band Pass Filter Rx Band Circuit

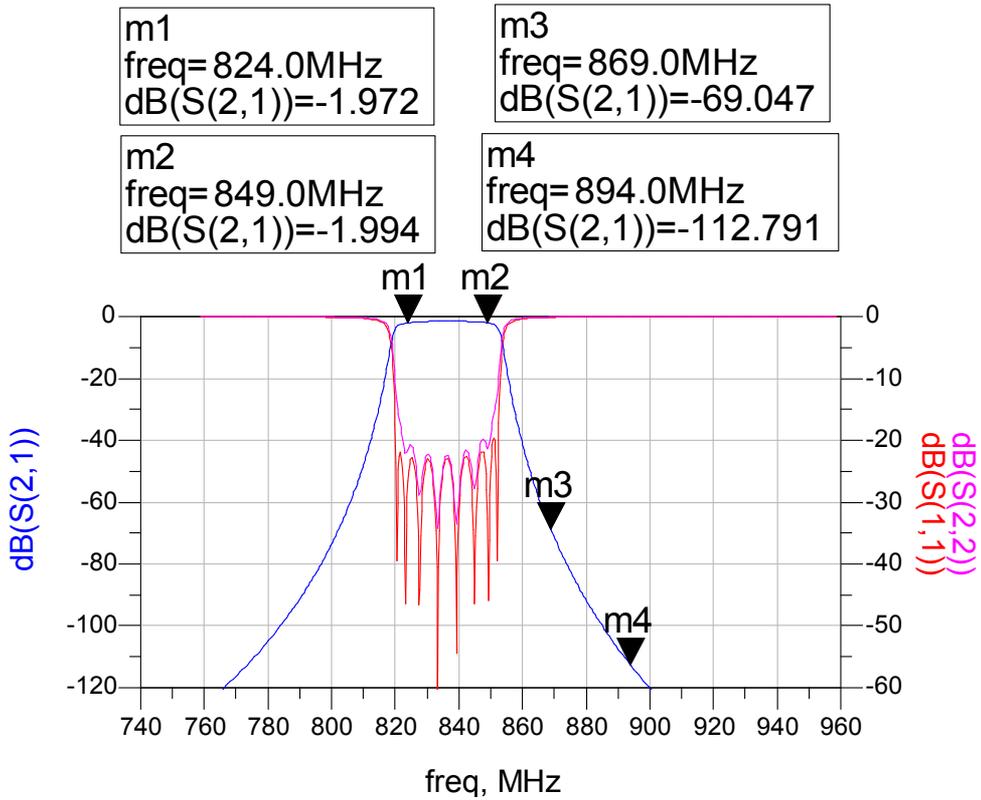
그림 3-21에서 필터의 등가회로 구성을 살펴보면 공진기의 길이 및 폭 등에 의해 공진기의 등가회로는 병렬 구조로서 “L”과 “C”의 구성으로 구현된다. 공진기의 길이는 “L”에 의해 큰 영향을 받게 되고, 공진기의 형상 및 구현방식에 따라 “C”가 영향을 받게 된다. 필터의 시뮬레이션은 “C”의 값을 고정한 후 “L”값의 변화를 가변하여 시뮬레이션을 진행한다. 이는 제품의 길이를 설계시 확정하고, “C”의 값은 필터의 제작 후 튜닝볼트를 삽입하는 등의 후 공정을 통하여 미세 조정을 한다.

800MHz 대역 통과 필터의 설계는 RF 회로설계 전문 툴인 ADS (Advanced Design System) 시뮬레이션 툴을 통하여 설계하였으며, 설계된 필터의 회로도도 그림 3-20과 같으며, 차수는 8차로 구성하였다. 각 파라미터에 대한 회로 값은 표 3-17에 나타내었다.

[표 3-17] 800MHz Band Pass Filter Rx Band Circuit Parameter Value

Item	L_n (nH)	Lr_n (nH)
n = 0	51.457	-
n = 1	360.342	16.4166
n = 2	518.386	12.854
n = 3	563.558	12.6861
n = 4	579.139	12.6627
n = 5	579.345	12.6451
n = 6	553.886	12.6587
n = 7	414.111	12.774
n = 8	57.3212	15.8498

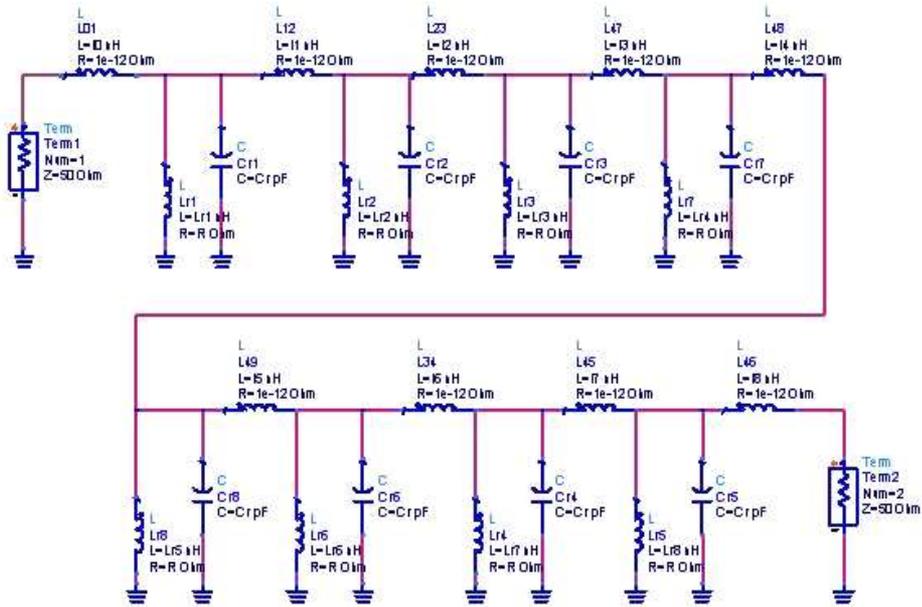
800MHz 대역 저지 필터의 Rx 대역의 각 파라미터는 입출력단의 소자 값의 경우 직렬 인덕턴스 성분의 경우 50 내외의 값을 보이며, 병렬 공진인덕턴스 성분의 경우 16 내외의 값을 갖는다. 입출력단을 제외한 직렬 인덕턴스 성분의 값은 초단과 이어지는 소자의 경우 400 내외의 값을 갖고, 이후 중간 부분에 해당하는 값은 500~600 사이의 값을 갖는다. 병렬 공진 인덕턴스의 성분의 경우 입출력단을 제외하고서는 12내외의 값을 갖는다.



[그림 3-22] 800MHz Band Pass Filter Rx Simulation Result

시뮬레이션 결과 통과 대역인 824MHz ~ 849MHz 대역에서의 손실은 2dB 이하이며, Tx 밴드인 869MHz ~ 894MHz에서의 감쇄 특성은 69dB를 나타내었다. 또한, 대역내 반사손실은 20dB 이하의 값을 갖음을 확인할 수 있다.

그림 3-22은 800MHz에 대한 설계 시뮬레이션 결과로서 각 대역의 반사 손실은 15dB 이하이며, 삽입 손실은 3dB 이하이다



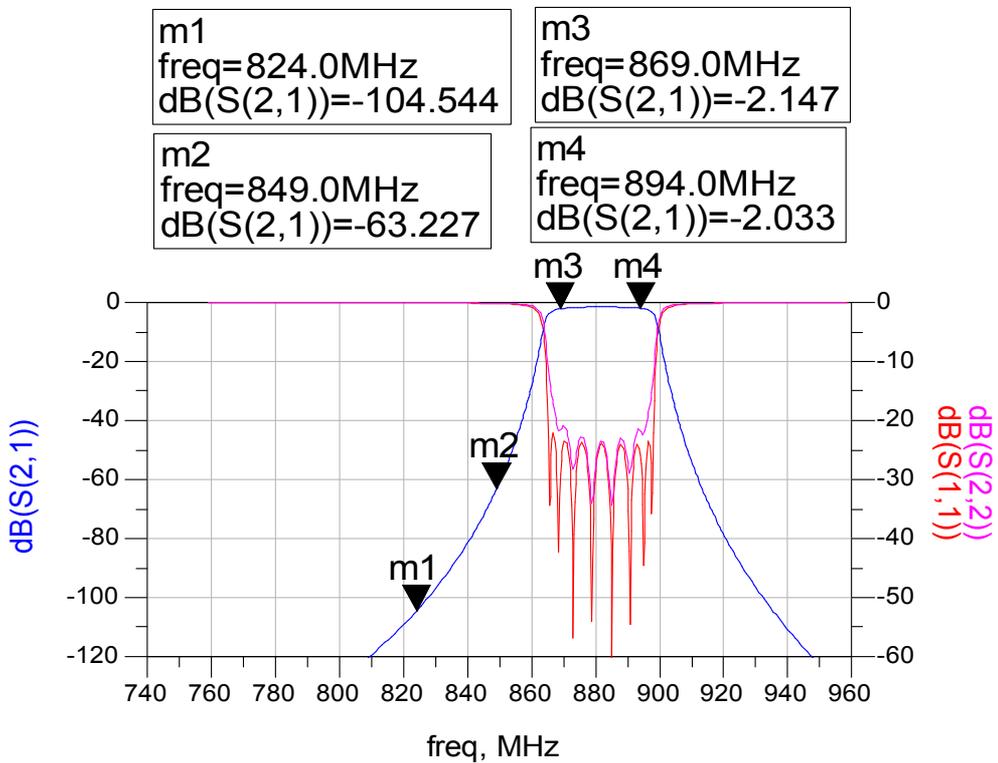
[그림 3-23] 800MHz Band Pass Filter Tx Band Circuit

설계된 800MHz 대역 통과 필터의 Tx 대역의 회로도는 그림 3-22와 같으며, 필터의 차수는 Rx 대역과 동일한 8차로 설계되었다. 각 파라미터에 대한 회로 값은 표 3-18 에 나타내었다.

[표 3-18] 800MHz Band Pass Filter Tx Band Circuit Parameter Value

Item	L_n (nH)	Lr_n (nH)
n = 0	47.1336	-
n = 1	325.798	14.665
n = 2	475.125	11.5541
n = 3	520.9	11.4005
n = 4	536.399	11.3698
n = 5	536.294	11.3624
n = 6	510.81	11.3741
n = 7	377.635	11.4772
n = 8	52.8118	14.1431

800MHz 대역 저지 필터의 Tx 대역의 각 파라미터는 입출력단의 소자 값의 경우 직렬 인덕턴스 성분의 경우 50 내외의 값을 보이며, 병렬 공진 인덕턴스 성분의 경우 14 내외의 값을 갖는다. 입출력단을 제외한 직렬 인덕턴스 성분의 값은 초단과 이어지는 소자의 경우 300 내외의 값을 갖고, 이후 중간 부분에 해당하는 값은 400~500사이의 값을 갖는다. 병렬 공진 인덕턴스의 성분의 경우 입출력단을 제외하고서는 11 내외의 값을 갖는다.

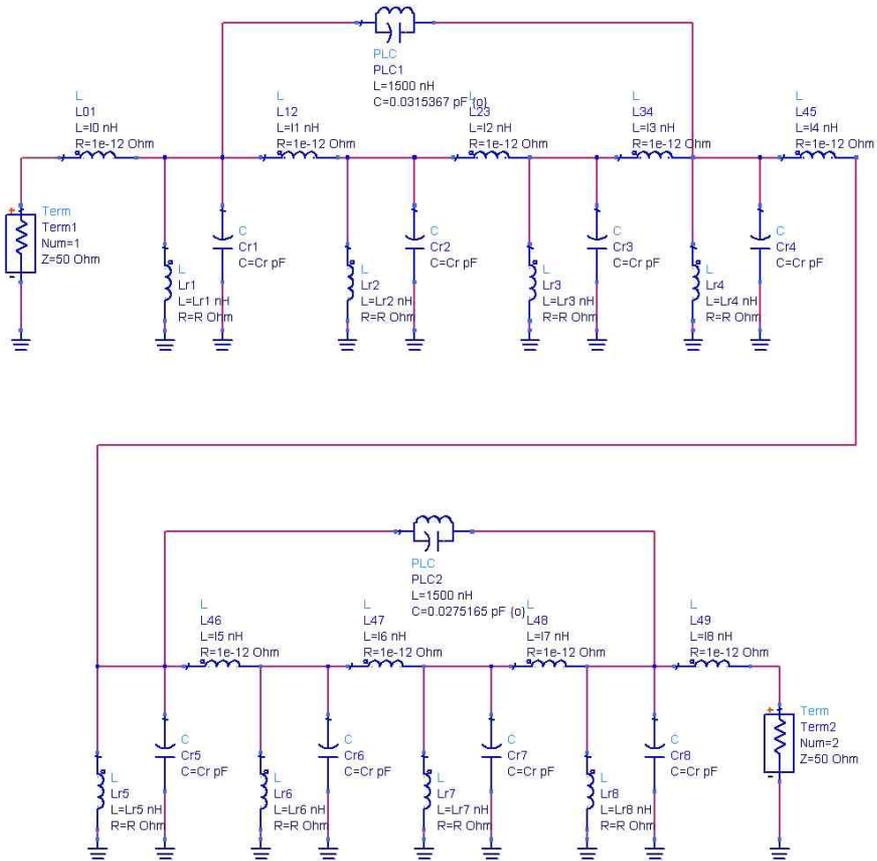


[그림 3-24] 800MHz Band Pass Filter Tx Band Simulation Result

그림 3-24는 800MHz 대역 통과 필터의 Tx 대역에 대한 설계 시뮬레이션 결과로서 결과 통과 대역인 869MHz ~ 894MHz 대역에서의 손실은 2.2dB 이하이며, Rx 밴드인 824MHz ~ 849MHz에서의 감쇄 특성은 63dB를 나타내었다. 또한, 대역내 반사손실은 20dB 이하의 값을 갖음을 확인할

수 있다.

그림 3-25은 800MHz 대역 통과 필터의 감쇄 특성을 개선하기 위하여 노치(Notch) 구조를 적용한 회로이다. 노치 구조는 다수의 공진기를 사용할 때 사용되는 구조로서 그림 3-25에서 첫 번째 공진기와 4번째 공진기 간 신호를 커플링 시켜 통과대역 근처에 감쇄 특성에 영향을 주는 공진을 형성한다.



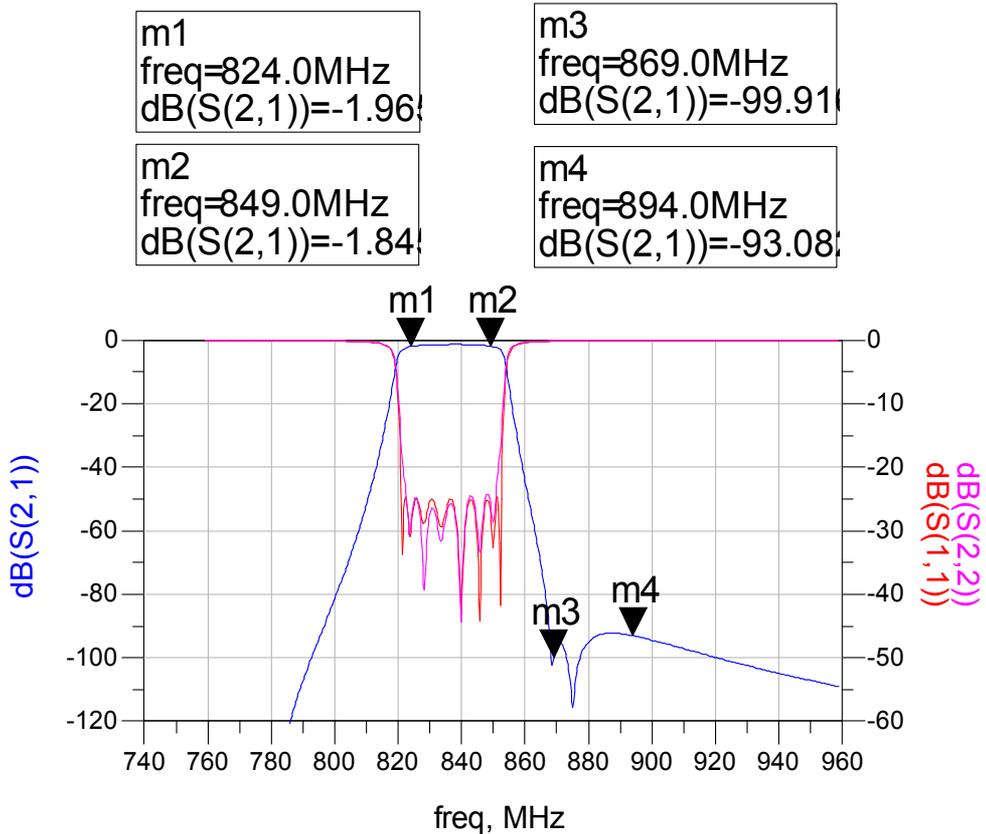
[그림 3-25] 800MHz Band Pass Filter Rx Circuit (Notch Type)

노치 구조가 적용된 800MHz Rx대역 통과 필터의 경우 앞서 설계한 800MHz 대역 통과 필터의 차수와 동일한 차수인 8차로 설계 진행하였으며, 2개의 노치구조를 적용한다.

[표 3-19] 800MHz Band Pass Filter Rx Band Circuit Parameter Value(Notch Type)

Item	L_n (nH)	Lr_n (nH)
n = 0	51.3049	-
n = 1	361.121	16.3261
n = 2	488.078	12.8511
n = 3	575.57	12.6791
n = 4	578.456	12.6023
n = 5	577.604	12.6189
n = 6	515.937	12.6673
n = 7	363.575	12.8344
n = 8	50.2348	16.4987

노치구조가 적용된 800MHz 대역 저지 필터의 Tx 대역의 각 파라미터는 입출력단의 소자 값의 경우 직렬 인덕턴스 성분의 경우 50내외의 값을 보이며, 병렬 공진 인덕턴스 성분의 경우 16 내외의 값을 갖는다. 입출력단을 제외한 직렬 인덕턴스 성분의 값은 초단과 이어지는 소자의 경우 300내외의 값을 갖고, 이후 중간부분에 해당하는 값은 400~500사이의 값을 갖는다. 병렬 공진 인덕턴스의 성분의 경우 입출력단을 제외하고서는 12 내외의 값을 갖는다. 노치 구조의 값은 1500nH 값을 고정으로 적용한다.



[그림 3-26] 800MHz Band Pass Filter Rx Simulation Result (Notch Type)

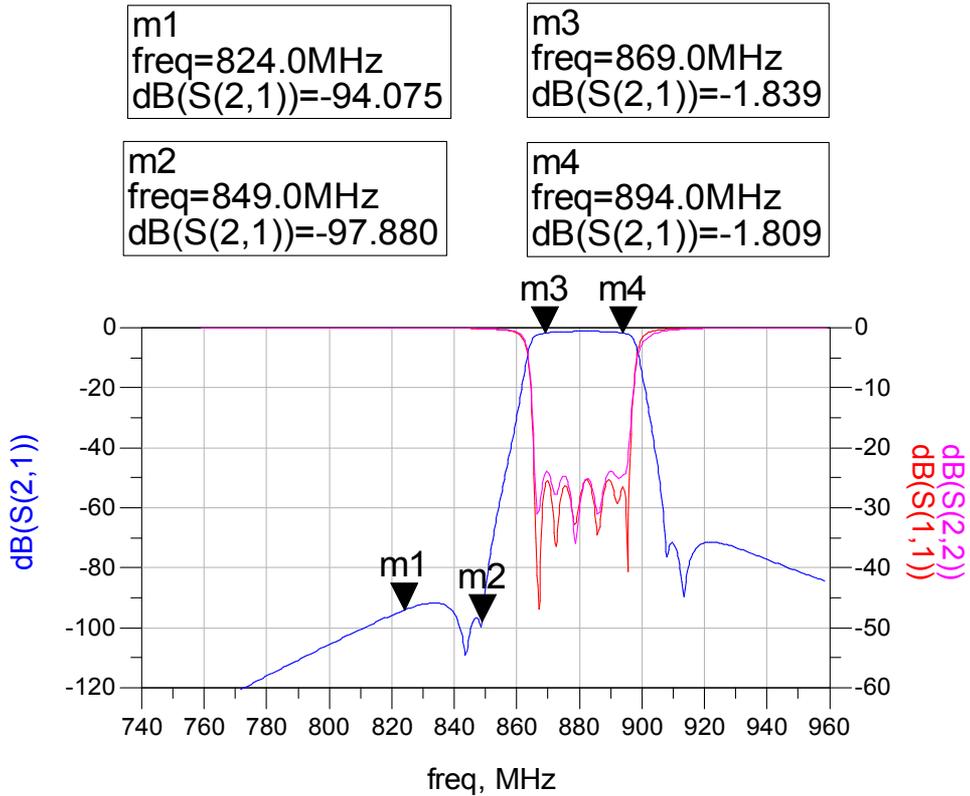
그림 3-26은 노치구조가 적용된 800MHz 대역 통과 필터의 Tx 대역에 대한 설계 시뮬레이션 결과로서 결과 통과 대역인 824MHz ~ 849MHz 대역에서의 손실은 2.0dB 이하이며, Tx 밴드인 869MHz ~ 894MHz에서의 감쇄 특성은 90dB를 나타내었다. 또한, 대역내 반사손실은 20dB 이하의 값을 갖음을 확인할 수 있다.

노치 구조가 적용된 800MHz Tx대역 통과 필터는 앞서 설계한 800MHz 대역 통과 필터의 차수와 동일한 차수인 8차로 설계 진행하였으며, 2개의 노치구조를 적용한다.

[표 3-20] 800MHz Band Pass Filter Tx Band Circuit Parameter Value (Notch Type)

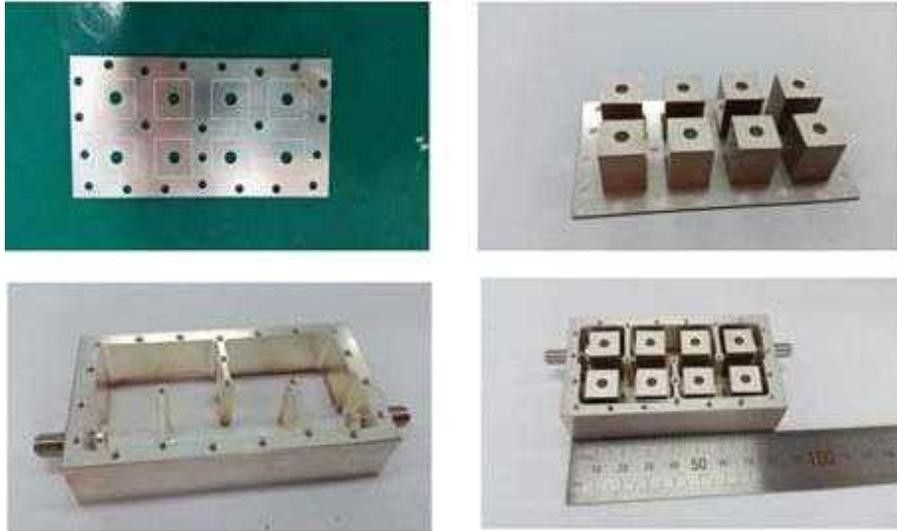
Item	L_n (nH)	Lr_n (nH)
n = 0	46.0253	-
n = 1	331.379	15.7748
n = 2	455.514	12.2396
n = 3	584.96	12.0435
n = 4	575.916	11.9215
n = 5	569.439	11.924
n = 6	432.001	12.0498
n = 7	299.999	12.2218
n = 8	44.3021	15.875

노치 구조가 적용된 800MHz 대역 저지 필터의 Tx 대역의 각 파라미터는 입출력단의 소자값의 경우 직렬 인덕턴스 성분의 경우 40내외의 값을 보이며, 병렬 공진 인덕턴스 성분의 경우 15 내외의 값을 갖는다. 입출력단을 제외한 직렬 인덕턴스 성분의 값은 초단과 이어지는 소자의 경우 300내외의 값을 갖고, 이후 중간부분에 해당하는 값은 300~500사이의 값을 갖는다. 병렬 공진 인덕턴스의 성분의 경우 입출력단을 제외하고서는 12 내외의 값을 갖는다. 노치 구조의 값은 1500nH 값을 고정으로 적용한다.



[그림 3-27] 800MHz Band Pass Filter Tx Simulation Result (Notch Type)

그림 3-27은 노치구조가 적용된 800MHz 대역 통과 필터의 Tx 대역에 대한 설계 시뮬레이션 결과로서 결과 통과 대역인 869MHz ~ 894MHz 대역에서의 손실은 1.9dB 이하이며, Rx 밴드인 824MHz ~ 849MHz에서의 감쇄 특성은 90dB 이하를 나타내었다. 또한, 대역내 반사손실은 20dB 이하의 값을 갖음을 확인할 수 있다.



[그림 3-28] 800MHz Band Pass Filter

800MHz 대역 통과 필터의 Rx 대역과 Tx 대역의 필터는 모두 8차로 구성되어 있으며 그림 3-28과 같이 제작되었다. Rx 대역과 Tx 대역이 같은 차수이고, 두 제품은 동일한 하우징과 공진기를 이용하여 제작하였다.

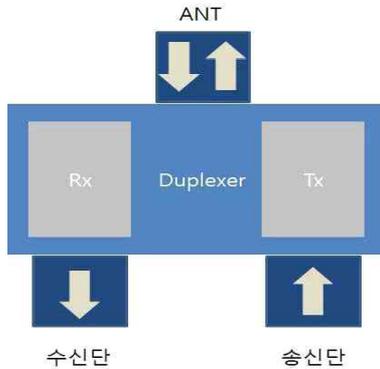
### 3.3 멀티플렉서

#### 3.3.1 멀티플렉서 회로 설계

멀티플렉서를 설계하기 위하여 기존 설계 및 제작하였던 대역 통과 필터를 활용하여 필터를 설계한다. 특성의 기준은 표 3-20의 특성을 기준으로 하였다. 멀티플렉서의 경우 기존 Rx 대역과 Tx 대역 두 대역을 하나의 하우징에 같이 구성하여 제작하게 되며, 입출력 포트의 수는 총 3개로 구성되게 된다. 멀티플렉서의 회로의 기본 구성 및 제품 블록도는 그림 3-29과 같다.

멀티플렉서의 하나인 듀플렉서(Duplexer)는 여러 개의 입력(출력) 신호를 하나의 출력신호(입력신호)에 보내고자 할 때 사용된다. 즉, 동일한 안테나를 이용하여 송신단과 수신단을 사용할 경우 듀플렉서를 사용하게 되며, 간단

히 블록으로 표시하게 되면 그림 3-29과 같다.

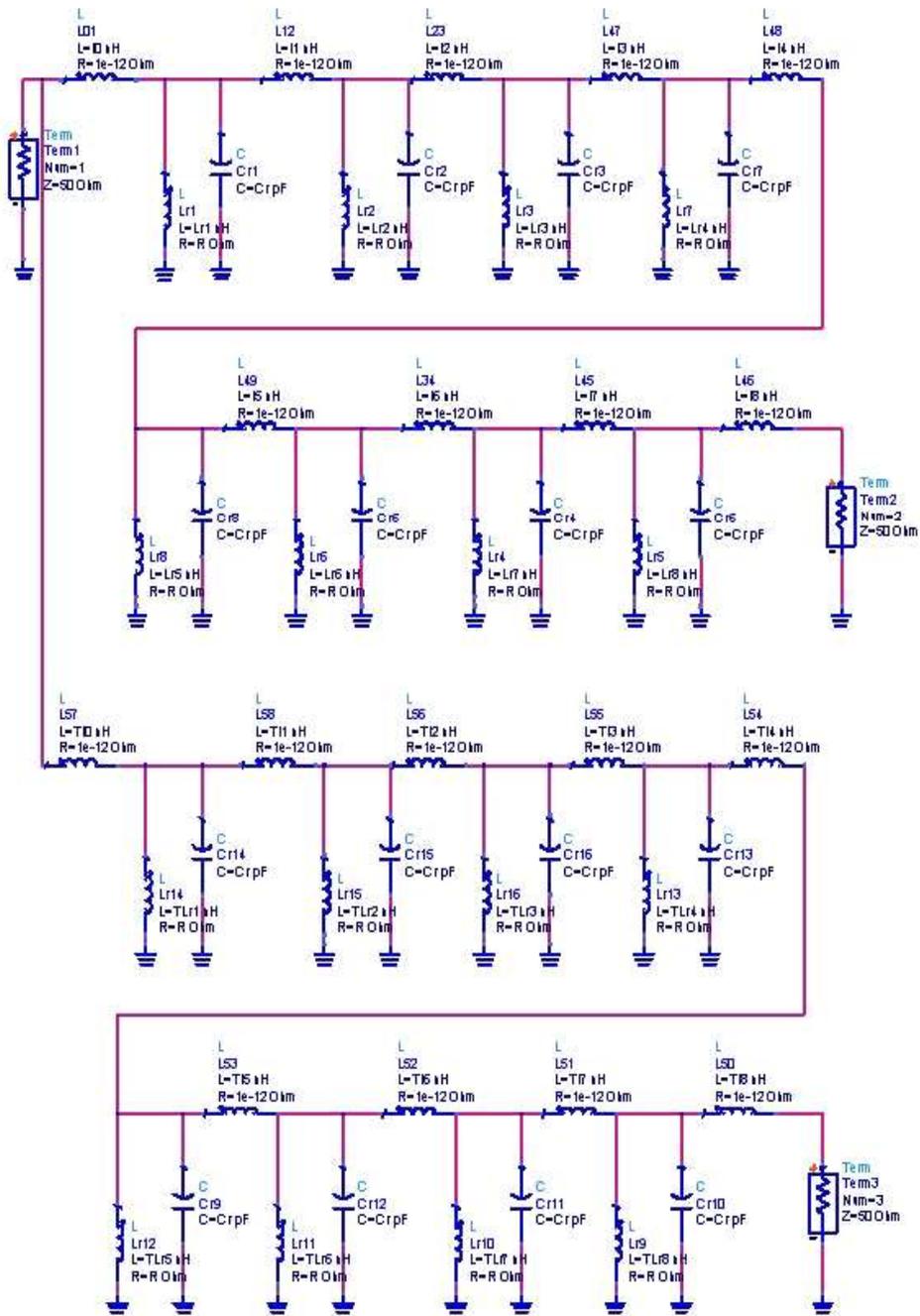


[그림 3-29] Duplexer 구성도

그림 3-29을 보면 송신단(Tx)에서 신호가 입력되면 Tx 대역 필터를 거쳐서 안테나(ANT) 포트에 신호가 전달되고, 안테나에 연결된 안테나를 통하여 신호가 출력된다. 또한, 안테나에서 수신된 신호가 안테나와 연결된 안테나 포트에 신호가 전달되고 이는 다시 Rx 대역 필터를 거쳐서 수신단 포트에 신호가 전달되고 전달된 신호는 기지국 또는 수신단 포트와 연결된 모듈로 신호가 전달되게 된다.

[표 3-21] 800MHz Duplexer Specification

Parameter	Specification	
Frequency Range	Transmit : 869 - 894 MHz	
Insertion Loss	869 - 894 MHz	Max. 3.0dB
Return Loss	869 - 894 MHz	Min. 15dB
Band Isolation	824 - 849 MHz	Min. 80dB
Frequency Range	Receive : 824 - 849 MHz	
Insertion Loss	824 - 849 MHz	Max. 3.0dB
Return Loss	824 - 849 MHz	Min. 15dB
Band Isolation	869 - 894 MHz	Min. 80dB



[그림 3-30] 800MHz Duplexer Circuit

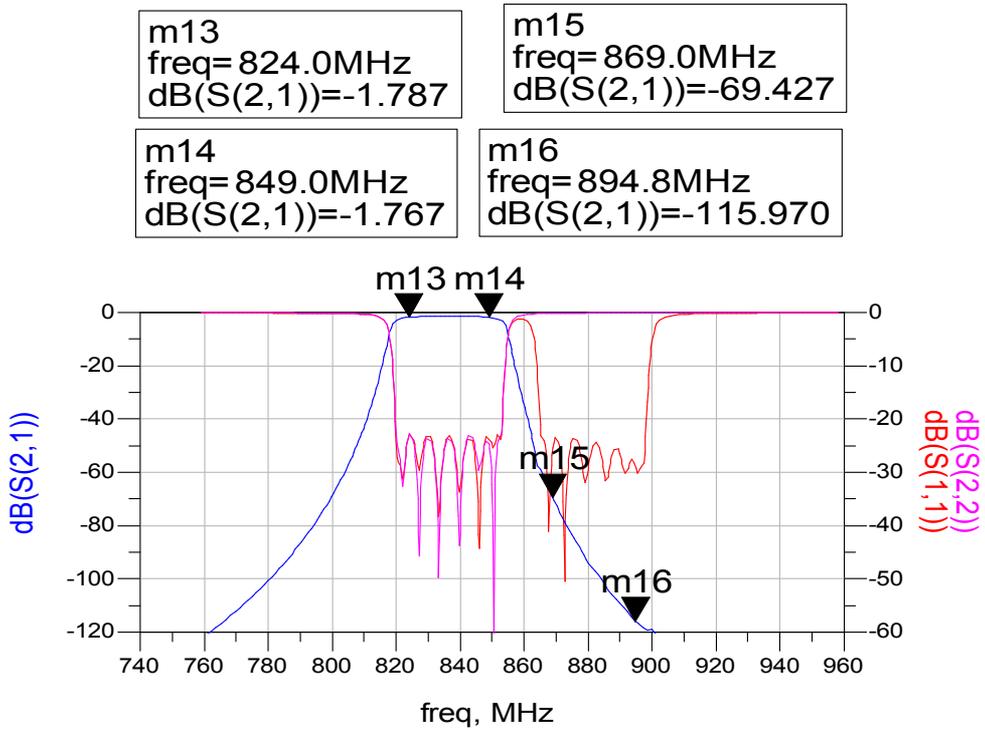
앞서 설계된 800MHz 대역 통과 필터의 Rx 대역과 Tx 대역의 회로를

기본으로 하여 동일한 시뮬레이션 툴인 ADS툴을 사용하여 두 대역을 결합한 듀플렉서를 설계하였다. 두 대역 통과 필터의 결합에 따라 상호간의 결합시 매칭을 위하여 기 설계된 값을 매칭하기 위하여 값을 보정하였다. 보정한 각 파라미터에 대한 회로 값은 표 3-22 에 나타내었다.

[표 3-22] 800MHz Duplexer Circuit Parameter Value

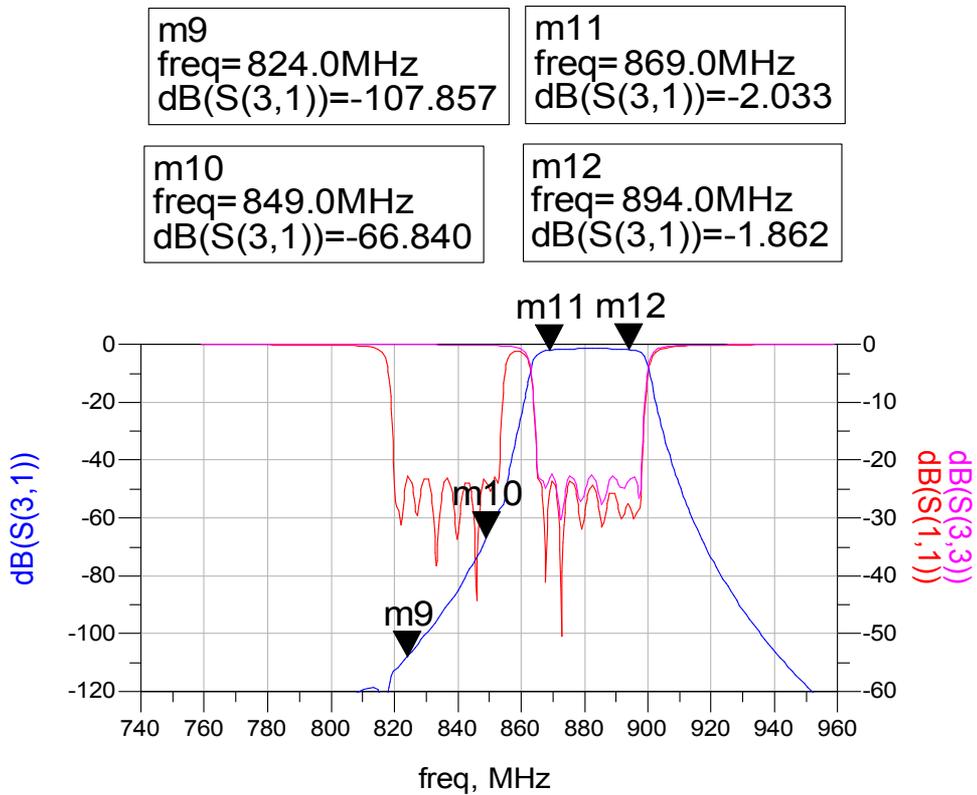
Item	L_n (nH)	Lr_n (nH)	TL_n (nH)	TLr_n (nH)
n = 0	56.9026	-	38.2412	-
n = 1	392.104	16.1608	315.138	15.1776
n = 2	507.832	12.834	462.671	11.5265
n = 3	538.951	12.6991	507.577	11.4033
n = 4	547.873	12.669	520.588	11.3795
n = 5	539.437	12.6754	514.118	11.3812
n = 6	495.937	12.7048	482.9	1.4002
n = 7	345.6	12.8762	350.95	11.5206
n = 8	50.3122	16.5381	51.4196	14.2874

800MHz 듀플렉서의 Rx 대역과 Tx 대역의 각 파라미터는 입출력단의 소자 값의 경우 직렬 인덕턴스 성분의 경우 Rx는 50내외, Tx는 38~52 내외의 값을 보이며, 병렬 공진 인덕턴스 성분의 경우 Rx는 16 내외 Tx는 14~15 내외의 값을 갖는다. 입출력단을 제외한 직렬 인덕턴스 성분의 값은 초단과 이어지는 소자의 경우 Rx와 Tx 모두 300내외의 값을 갖고, 이후 중간부분에 해당하는 값은 Rx와 Tx 모두 400~500사이의 값을 갖는다. 병렬 공진 인덕턴스의 성분의 경우 입출력단을 제외하고서는 Rx는 12내외의 값을 갖고, Tx는 11 내외의 값을 갖는다.



[그림 3-31] 800MHz Duplexer Rx Band Simulation Result

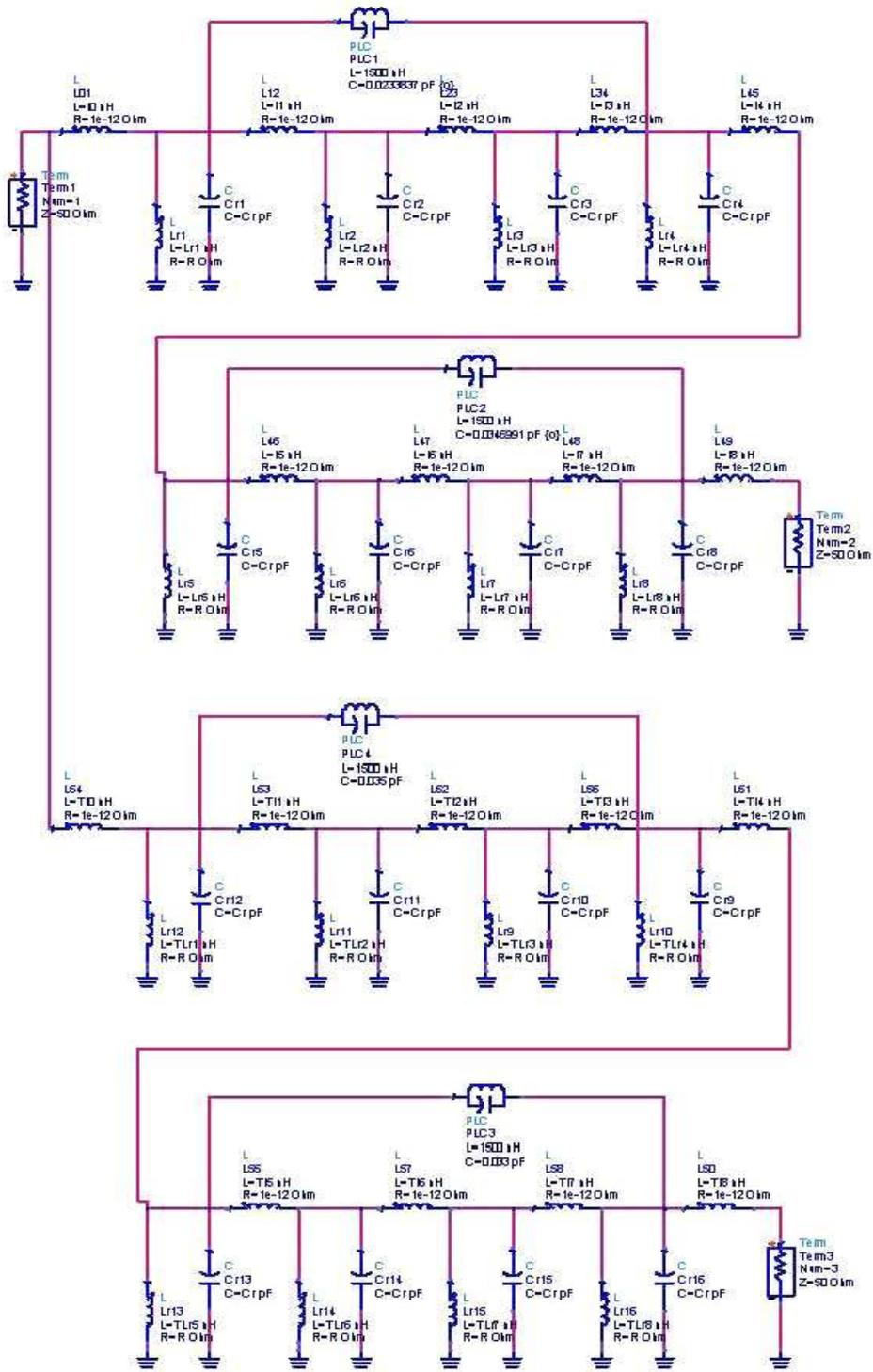
그림 3-31는 800MHz 듀플렉서의 Rx 대역에 대한 설계 시뮬레이션 결과로서 결과 통과 대역인 824MHz ~ 849MHz 대역에서의 손실은 1.7dB 이하이며, Tx 밴드인 869MHz ~ 894MHz에서의 감쇄 특성은 69dB를 나타내었다. 또한, 대역내 반사손실은 20dB 이하의 값을 갖음을 확인할 수 있다.



[그림 3-32] 800MHz Duplexer Tx Band Simulation Result

그림 3-32은 800MHz 대역 통과 필터의 Tx 대역에 대한 설계 시뮬레이션 결과로서 결과 통과 대역인 869MHz ~ 894MHz 대역에서의 손실은 2dB 이하이며, Rx 밴드인 824MHz ~ 849MHz에서의 감쇄 특성은 66dB를 나타내었다. 또한, 대역내 반사손실은 20dB 이하의 값을 갖음을 확인할 수 있다.

800MHz 듀플렉서의 감쇄 특성 개선을 위하여 설계한 듀플렉서에서 Rx 대역과 Tx대역에 각가 2개씩 노치 구조가 적용된 회로를 구성하였다. 노치 구조의 추가로 인하여 추가적인 매칭을 진행하여 파라미터에 대한 보정을 진행하였고, 이에 따른 회로 값은 표 3-23 에 나타내었다.

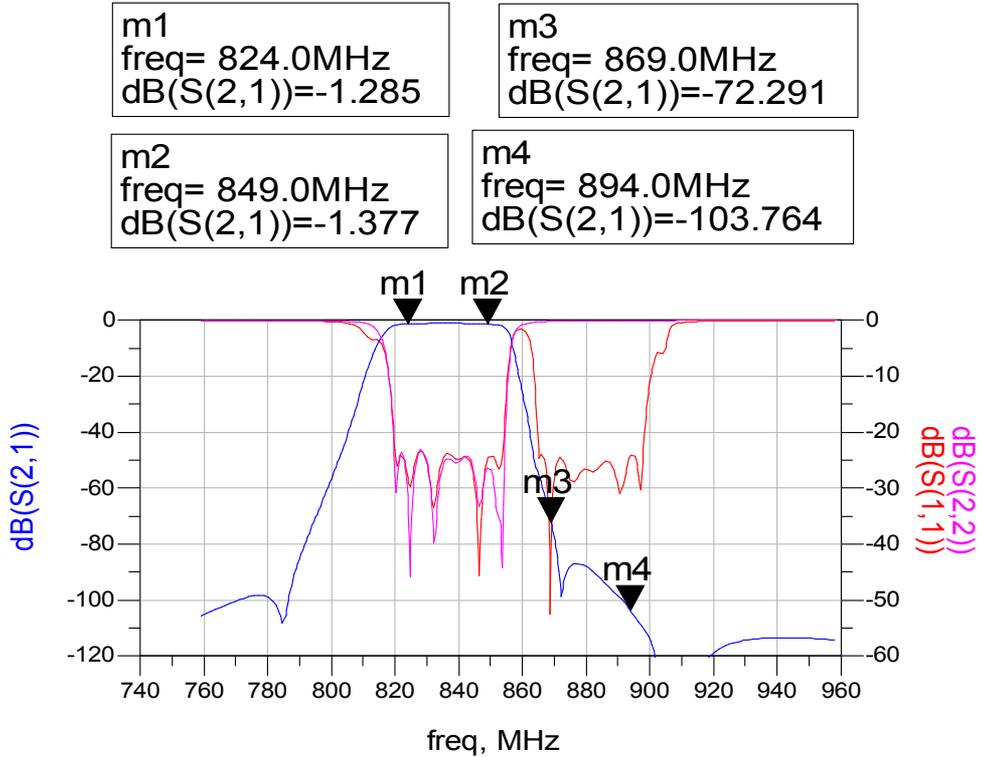


[그림 3-33] 800MHz Duplexer Circuit (Notch Type)

[표 3-23] 800MHz Duplexer Circuit Parameter Value (Notch Type)

Item	L <sub>n</sub> (nH)	L <sub>r_n</sub> (nH)	TL <sub>n</sub> (nH)	T <sub>Lr_n</sub> (nH)
n = 0	50.9026	-	38.2413	-
n = 1	392.104	16.1608	315.138	15.1776
n = 2	507.832	12.834	462.671	11.5265
n = 3	538.951	12.6991	507.577	11.4033
n = 4	547.873	12.669	520.588	11.3795
n = 5	539.437	12.6754	514.118	11.3812
n = 6	495.937	12.7048	482.9	11.4002
n = 7	345.6	12.8762	350.95	11.5206
n = 8	50.3122	16.5381	51.4196	14.2875

노치구조가 적용된 800MHz 듀플렉서의 Rx 대역과 Tx 대역의 각 파라미터는 입출력단의 소자 값의 경우 직렬 인덕턴스 성분의 경우 Rx는 50내외, Tx는 38~52 내외의 값을 보이며, 병렬 공진 인덕턴스 성분의 경우 Rx는 16 내외 Tx는 14~15 내외의 값을 갖는다. 입출력단을 제외한 직렬 인덕턴스 성분의 값은 초단과 이어지는 소자의 경우 Rx와 Tx 모두 300 내외의 값을 갖고, 이후 중간부분에 해당하는 값은 Rx와Tx 모두 400~500 사이의 값을 갖는다. 병렬 공진 인덕턴스의 성분의 경우 입출력단을 제외하고서는 Rx는 12 내외의 값을 갖고, Tx는 11 내외의 값을 갖는다.



[그림 3-34] 800MHz Duplexer Rx Band Simulation Result (Notch Type)

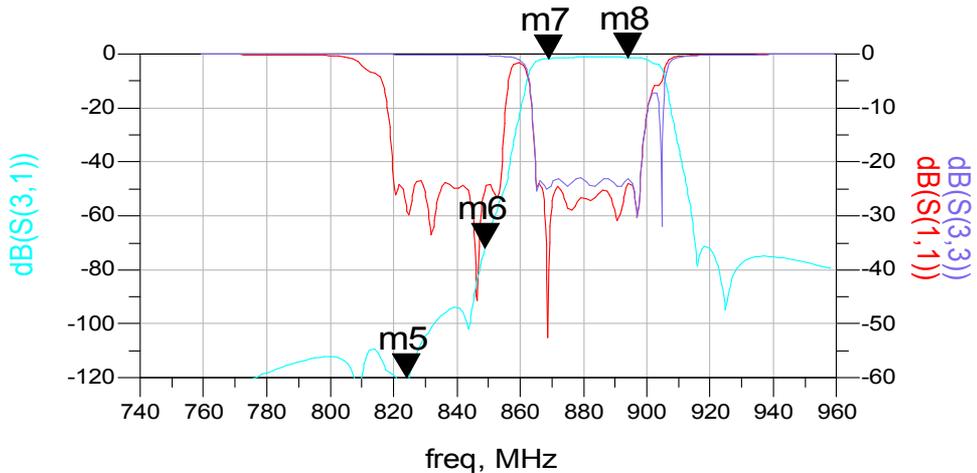
그림 3-34는 800MHz 듀플렉서의 Rx 대역에 대한 설계 시뮬레이션 결과로서 결과 통과 대역인 824MHz ~ 849MHz 대역에서의 손실은 1.4dB 이하이며, Tx 밴드인 869MHz ~ 894MHz에서의 감쇄 특성은 72dB를 나타내었다. 또한, 대역내 반사손실은 20dB 이하의 값을 갖음을 확인할 수 있다.

m5  
freq= 824.0MHz  
dB(S(3,1))=-125.317

m7  
freq= 869.0MHz  
dB(S(3,1))=-1.655

m6  
freq= 849.0MHz  
dB(S(3,1))=-71.819

m8  
freq= 894.0MHz  
dB(S(3,1))=-1.225



[그림 3-35] 800MHz Duplexer Tx Band Simulation Result (Notch Type)

그림 3-35는 800MHz 듀플렉서의 Tx 대역에 대한 설계 시뮬레이션 결과로서 결과 통과 대역인 869MHz ~ 894MHz 대역에서의 손실은 1.6dB 이하이며, Tx 밴드인 824MHz ~ 849MHz에서의 감쇄 특성은 71dB를 나타내었다. 또한, 대역내 반사손실은 20dB 이하의 값을 갖음을 확인할 수 있다.

노치 구조가 적용된 회로도와 시뮬레이션 결과를 바탕으로 하우스징과 공진기 및 공진기의 배치를 진행하여 제작한 샘플은 그림 3-36과 같다.

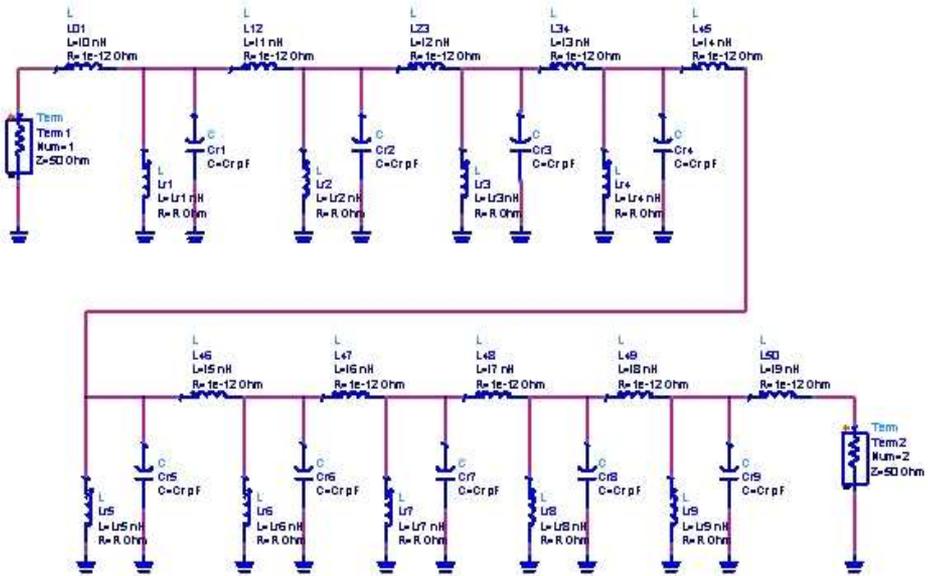


[그림 3-36] 800MHz Duplexer Sample

앞서 설계된 800MHz 대역 통과 필터 설계와 같은 방식으로 시뮬레이션 툴인 ADS를 사용하여 2100MHz 대역의 필터를 설계 진행한다. 2100MHz 대역의 필터는 9차 함수로 설계 진행되며, Rx 대역과 Tx 대역의 회로를 기본으로 하여 두 대역을 결합한 듀플렉서를 설계하였다. 두 듀플렉서의 결합에 따라 상호간의 결합시 매칭을 위하여 싱글밴드 대역 통과 필터의 설계된 값을 매칭하기 위하여 값을 보정하였다. 보정한 각 파라미터에 대한 회로 값은 표 3-25 에 나타내었다.

[표 3-24] 2100MHz Duplexer Specification

Parameter	Specification	
Frequency Range	Transmit : 2110 - 2170 MHz	
Insertion Loss	2110 - 2170 MHz	Max. 3.0dB
Return Loss	2110 - 2170 MHz	Min. 15dB
Band Isolation	1920 - 1980 MHz	Min. 80dB
Frequency Range	Receive : 1920 - 1980 MHz	
Insertion Loss	1920 - 1980 MHz	Max. 3.0dB
Return Loss	1920 - 1980 MHz	Min. 15dB
Band Isolation	2110 - 2170 MHz	Min. 80dB

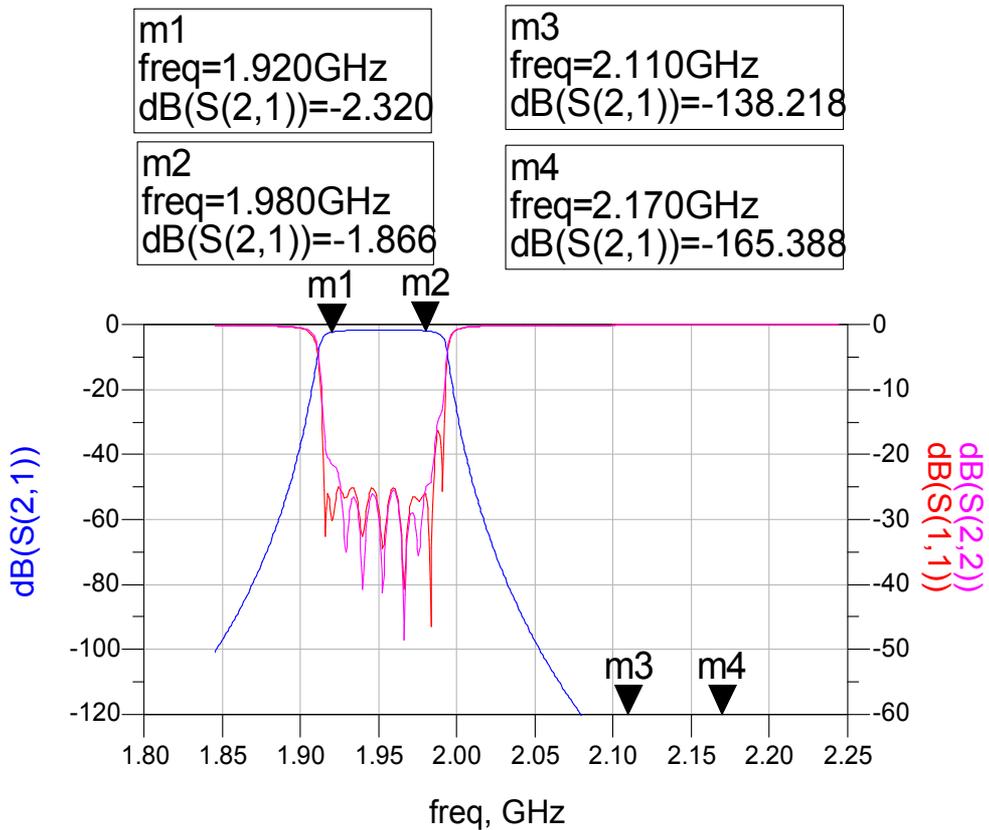


[그림 3-37] 2100MHz Band Pass Filter Rx Band Circuit

[표 3-25] 2100MHz Band Pass Filter Rx Band Circuit Parameter Value

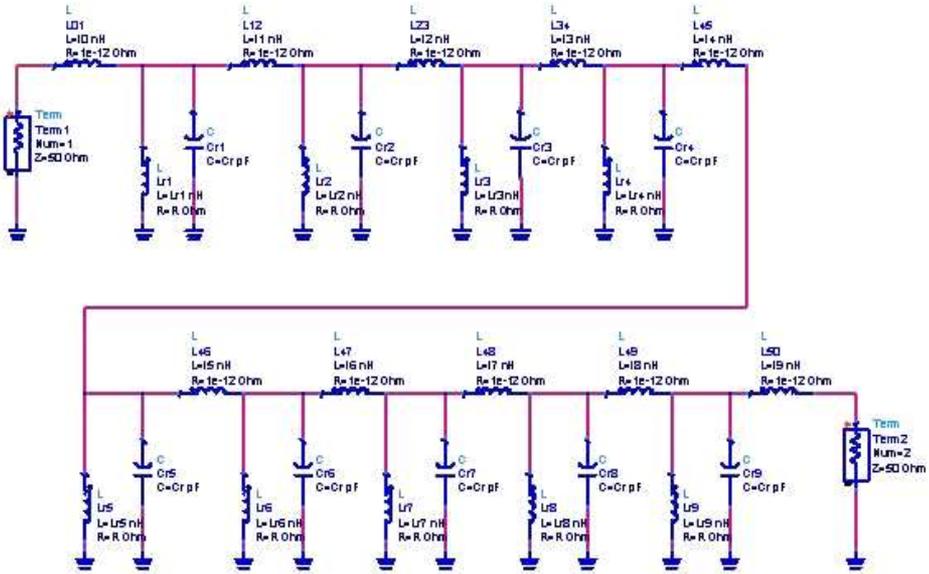
Item	L_n (nH)	Lr_n (nH)
n = 0	21.82	-
n = 1	151.589	7.10973
n = 2	219.524	5.54203
n = 3	239.438	5.43212
n = 4	244.764	5.44599
n = 5	243.572	5.444
n = 6	242.603	5.44574
n = 7	228.066	5.45637
n = 8	153.373	5.53041
n = 9	21.2739	7.15121

2100MHz 대역 저지 필터의 Rx 대역의 각 파라미터는 입출력단의 소자 값의 경우 직렬 인덕턴스 성분의 경우 21 내외의 값을 보이며, 병렬 공진 인덕턴스 성분의 경우 7 내외의 값을 갖는다. 입출력단을 제외한 직렬 인덕턴스 성분의 값은 초단과 이어지는 소자의 경우 150 내외의 값을 갖고, 이후 중간 부분에 해당하는 값은 200 내외의 값을 갖는다. 병렬 공진 인덕턴스의 성분의 경우 입출력단을 제외하고서는 5 내외의 값을 갖는다.



[그림 3-38] 2100MHz Band Pass Filter Rx Band Simulation Result

그림 3-38는 2100MHz 대역 통과 필터의 Rx 대역에 대한 설계 시뮬레이션 결과로서 결과 통과 대역인 1920MHz ~ 1980MHz 대역에서의 손실은 2.3dB 이하이며, Tx 밴드인 2110MHz ~ 2170MHz에서의 감쇄 특성은 120dB 이하를 나타내었다. 또한, 대역내 반사손실은 20dB 이하의 값을 갖음을 확인할 수 있다.



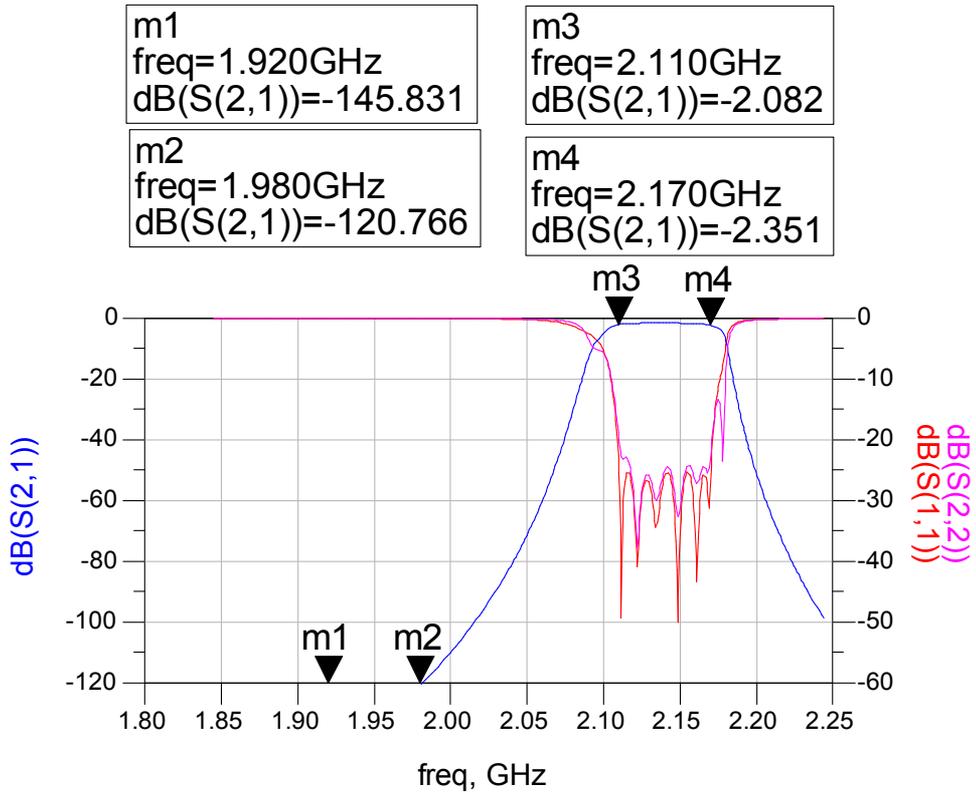
[그림 3-39] 2100MHz Band Pass Filter Tx Band Circuit

설계된 2100MHz 대역 통과 필터의 Tx 대역의 회로도는 그림 3-39과 같으며, 필터의 차수는 Rx 대역과 동일한 9차로 설계되었다. 각 파라미터에 대한 회로 값은 표 3-26에 나타내었다.

[표 3-26] 2100MHz Band Pass Filter Tx Band Circuit Parameter Value

Item	L <sub>n</sub> (nH)	Lr <sub>n</sub> (nH)
n = 0	17.5528	-
n = 1	110.509	6.09944
n = 2	168.819	4.70503
n = 3	207.093	4.58759
n = 4	222.833	4.53456
n = 5	219.306	4.5198
n = 6	198.916	4.53594
n = 7	176.019	4.57574
n = 8	130.084	4.63977
n = 9	19.938	5.78104

2100MHz 대역 저지 필터의 Tx 대역의 각 파라미터는 입출력단의 소자 값의 경우 직렬 인덕턴스 성분의 경우 17~19 내외의 값을 보이며, 병렬 공진 인덕턴스 성분의 경우 6~7 내외의 값을 갖는다. 입출력단을 제외한 직렬 인덕턴스 성분의 값은 초단과 이어지는 소자의 경우 110~130 내외의 값을 갖고, 이후 중간 부분에 해당하는 값은 170~220 내외의 값을 갖는다. 병렬 공진 인덕턴스의 성분의 경우 입출력단을 제외하고서는 4~5 내외의 값을 갖는다.



[그림 3-40] 2100MHz Band Pass Filter Tx Band Simulation Result

그림 3-40는 2100MHz 대역 통과 필터의 Tx 대역에 대한 설계 시뮬레이션 결과로서 결과 통과 대역인 2110MHz ~ 2170MHz 대역에서의 손실은 2.3dB 이하이며, Rx 밴드인 1920MHz ~ 1980MHz에서의 감쇄 특성은 120dB를 나타내었다. 또한, 대역내 반사손실은 20dB 이하의 값을 갖음을 확인할 수 있다.

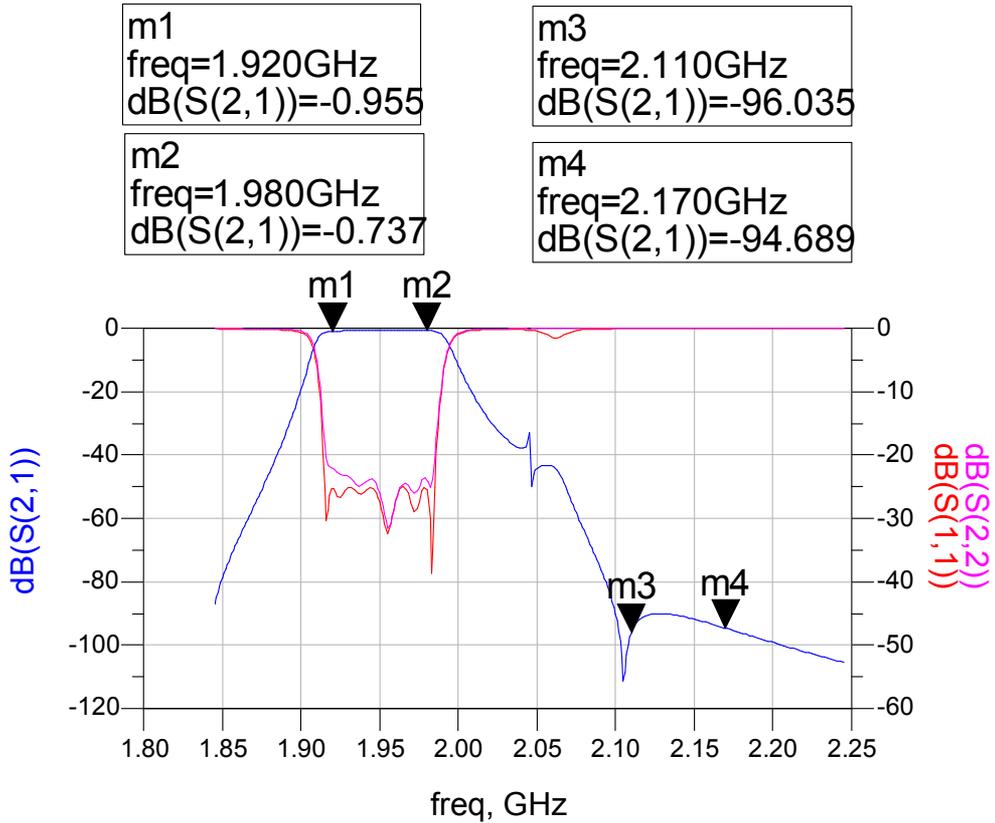


[표 3-27] 2100MHz Band Pass Filter Rx Band Circuit Parameter Value (Notch Type)

Item	L_n (nH)	Lr_n (nH)
n = 0	17.5652	-
n = 1	91.0579	7.7105
n = 2	87.426	5.61413
n = 3	180.373	5.52327
n = 4	223.886	5.44593
n = 5	435.667	5.28713
n = 6	29.8697	6.59947
n = 7	485.541	7.9543
n = 8	168.108	5.33183
n = 9	24.0158	6.89148

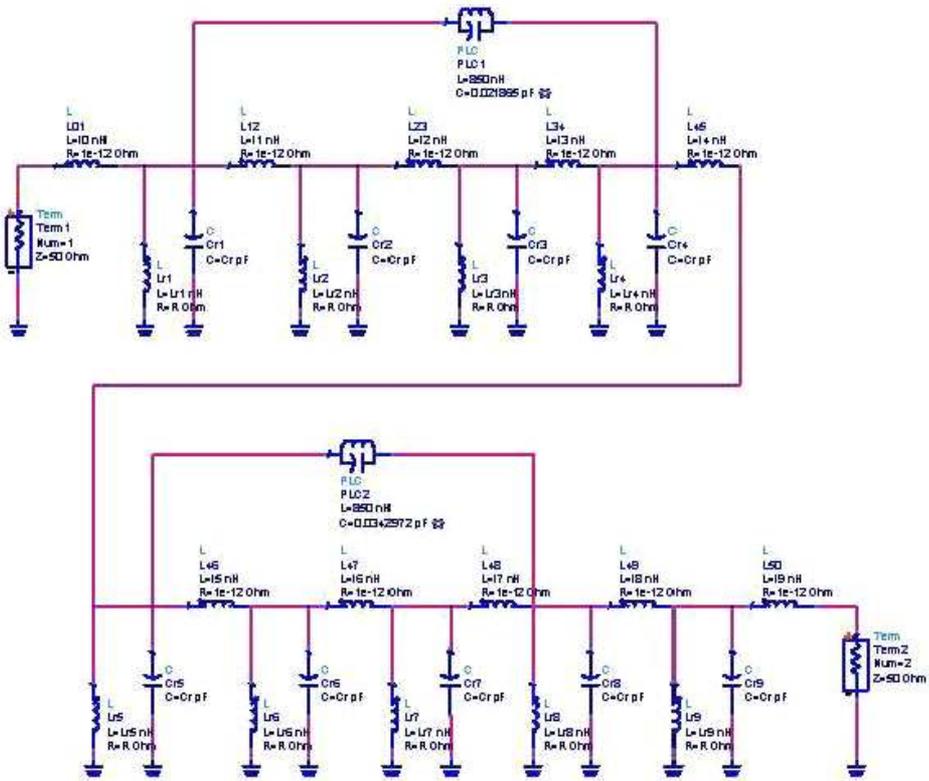
노치 구조가 적용된 2100MHz Rx대역 통과 필터의 경우 앞서 설계한 2100MHz 대역 통과 필터의 차수와 동일한 차수인 9차로 설계 진행하였으며, 2개의 노치 구조를 적용한다.

노치 구조가 적용된 2100MHz 대역 저지 필터의 Rx 대역의 각 파라미터는 입출력단의 소자값의 경우 직렬 인덕턴스 성분의 경우 17~24 내외의 값을 보이며, 병렬 공진 인덕턴스 성분의 경우 6~7 내외의 값을 갖는다. 입출력단을 제외한 직렬 인덕턴스 성분의 값은 초단과 이어지는 소자의 경우 91~168 내외의 값을 갖고, 이후 중간 부분에 해당하는 값은 87~486 값으로 폭 넓은 값을 갖는다. 병렬 공진 인덕턴스의 성분의 경우 입출력단을 제외하고서는 5~7 내외의 값을 갖는다. 노치 구조의 값은 850nH 값을 고정으로 적용한다.



[그림 3-42] 2100MHz Band Pass Filter Rx Band Simulation Result (Notch Type)

그림 3-42는 노치 구조가 적용된 2100MHz 대역 통과 필터의 Rx 대역2에 대한 설계 시뮬레이션 결과로서 결과 통과 대역인 1920MHz ~ 1980MHz 대역에서의 손실은 0.9dB 이하이며, Tx 밴드인 2110MHz ~ 2170MHz에서의 감쇄 특성은 90dB를 나타내었다. 또한, 대역내 반사손실은 20dB 이하의 값을 갖음을 확인할 수 있다.



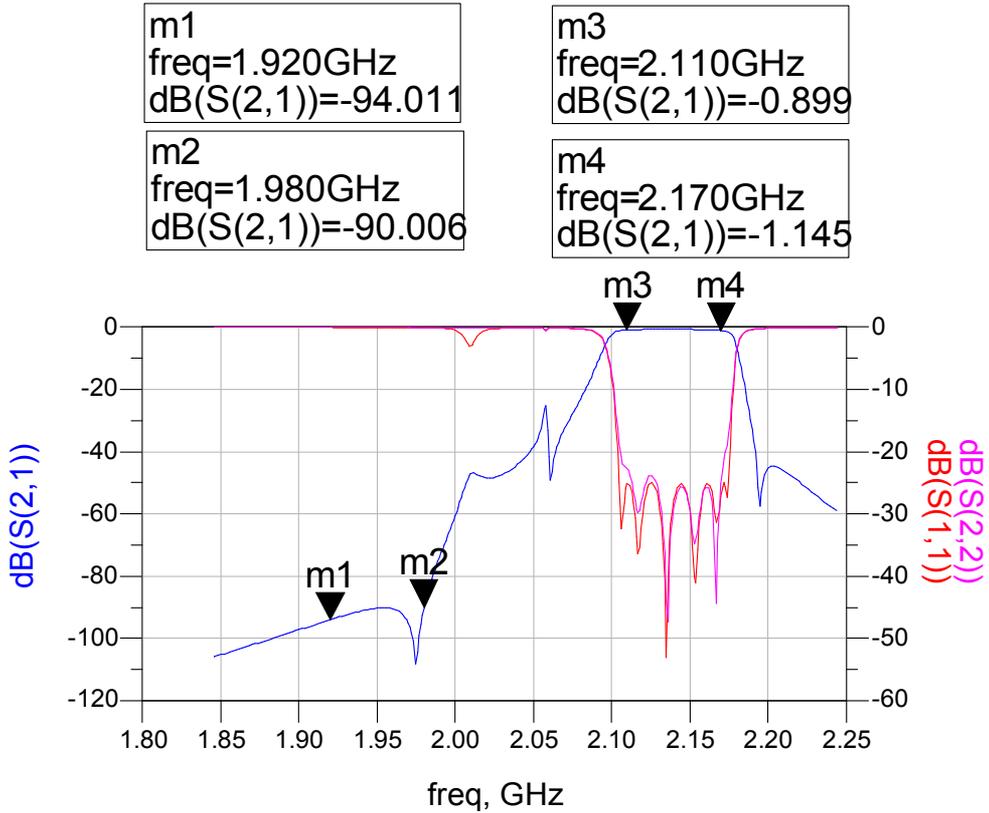
[그림 3-43] 2100MHz Band Pass Filter Tx Band Circuit (Notch Type)

노치 구조가 적용된 2100MHz Tx대역 통과 필터는 앞서 설계한 2100MHz 대역 통과 필터의 차수와 동일한 차수인 9차로 설계 진행하였으며, 2개의 노치 구조를 적용한다.

[표 3-28] 2100MHz Band Pass Filter Tx Band Circuit Parameter Value (Notch Type)

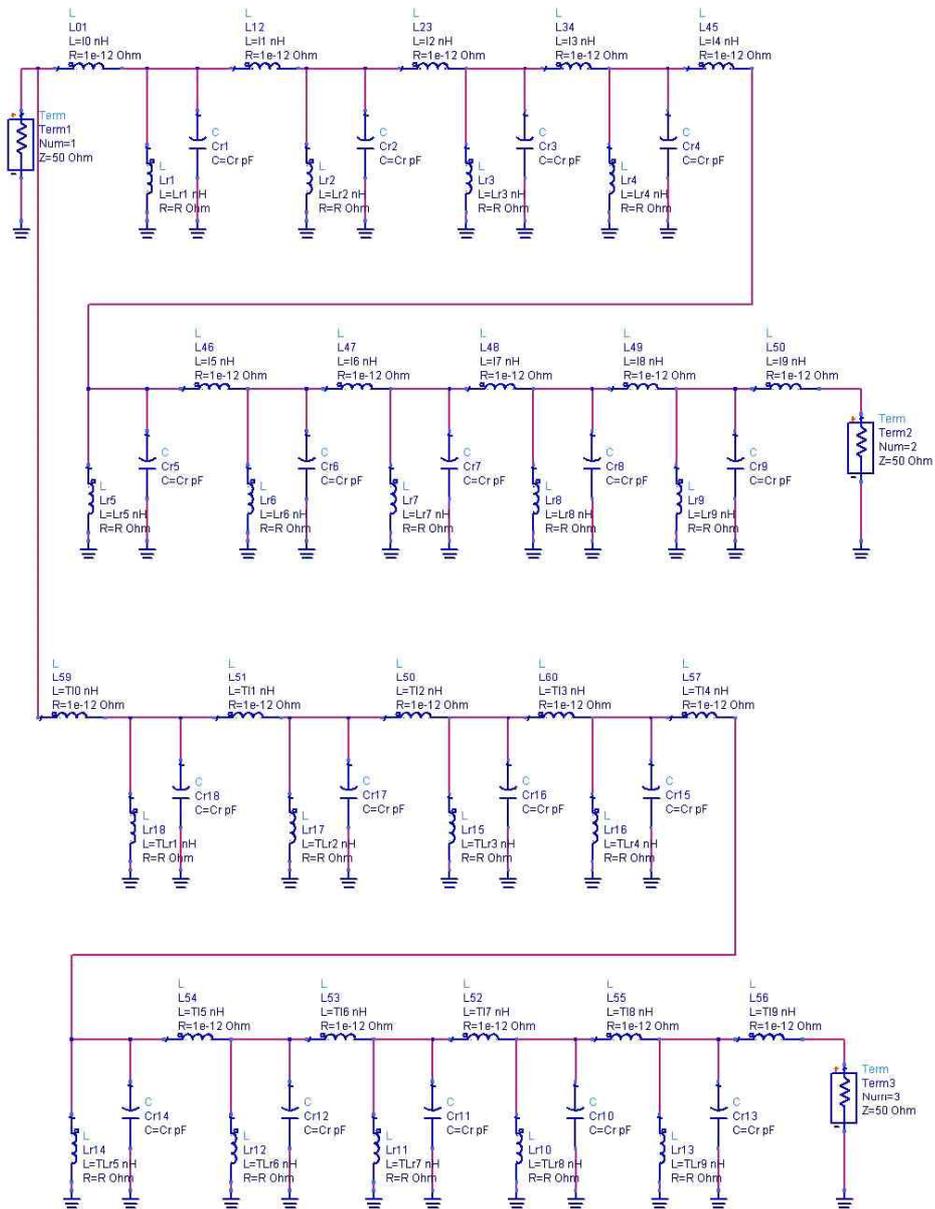
Item	L <sub>n</sub> (nH)	Lr <sub>n</sub> (nH)
n = 0	18.3707	-
n = 1	98.3158	5.94409
n = 2	68.4905	5.17643
n = 3	187.321	4.93441
n = 4	207.813	4.5106
n = 5	385.036	4.40835
n = 6	73.3712	5.12058
n = 7	469.11	9.73389
n = 8	147.901	4.42594
n = 9	20.7674	5.5244

노치 구조가 적용된 2100MHz 대역 저지 필터의 Tx 대역의 각 파라미터는 입출력단의 소자 값의 경우 직렬 인덕턴스 성분의 경우 181~20 내외의 값을 보이며, 병렬 공진 인덕턴스 성분의 경우 5 내외의 값을 갖는다. 입출력단을 제외한 직렬 인덕턴스 성분의 값은 초단과 이어지는 소자의 경우 98~147 내외의 값을 갖고, 이후 중간 부분에 해당하는 값은 68~469 사이의 폭 넓은 값을 갖는다. 병렬 공진 인덕턴스의 성분의 경우 입출력단을 제외하고서는 4~9 내외의 값을 갖는다. 노치 구조의 값은 850nH 값을 고정으로 적용한다.



[그림 3-44] 2100MHz Band Pass Filter Tx Band Simulation Result (Notch Type)

그림 3-44는 노치구조가 적용된 2100MHz 대역 통과 필터의 Tx 대역에 대한 설계 시뮬레이션 결과로서 결과 통과 대역인 2110MHz ~ 2170MHz 대역에서의 손실은 1.2dB 이하이며, Rx 밴드인 1920MHz ~ 1980MHz에서의 감쇄 특성은 90dB 이하를 나타내었다. 또한, 대역내 반사손실은 20dB 이하의 값을 갖음을 확인할 수 있다.



[그림 3-45] 2100MHz Duplexer Circuit

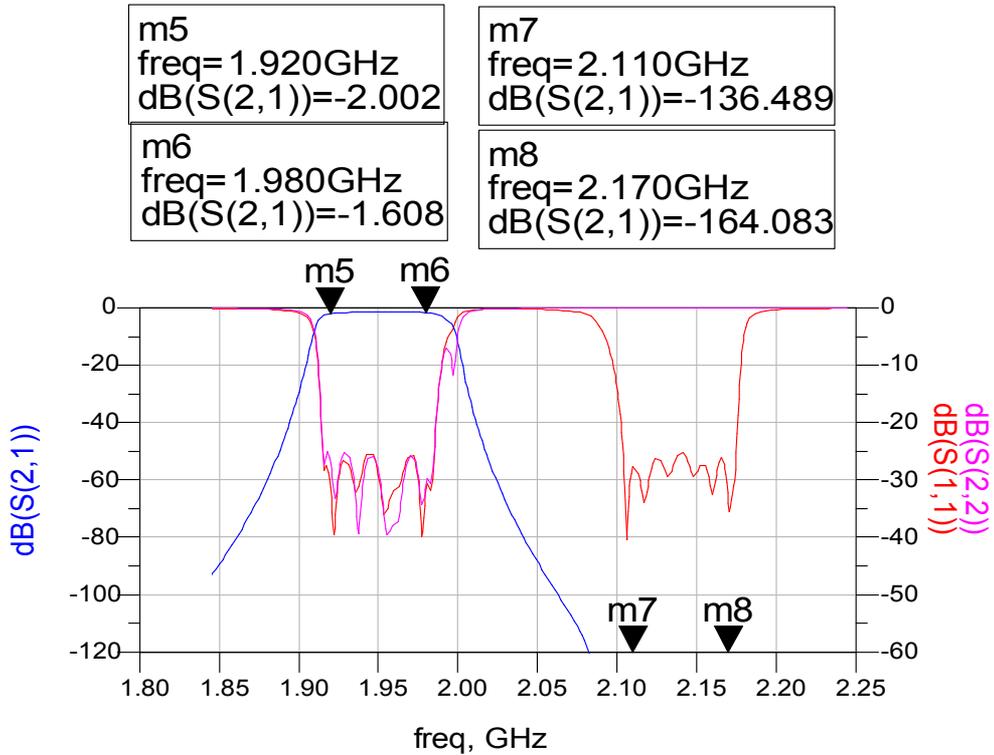
설계된 2100MHz 대역 통과 필터의 Rx 대역과 Tx 대역의 회로를 기본으로 하여 두 대역을 결합한 듀플렉서를 설계하였다. 두 대역 통과 필터의 결합에 따라 상호간의 결합시 매칭을 위하여 설계된 값을 매칭하기 위하여 값

을 보정하였다. 보정한 각 파라미터에 대한 회로값은 표 3-29에 나타내었다.

[표 3-29] 2100MHz Duplexer Circuit Parameter Value

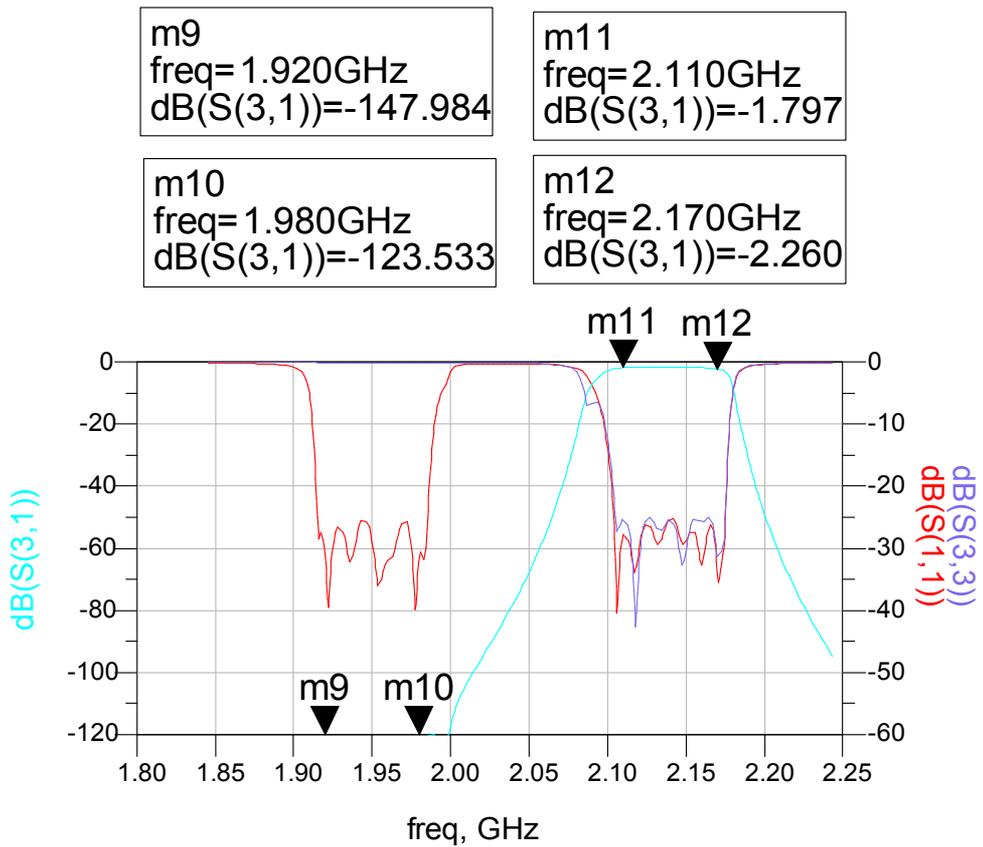
Item	L_n (nH)	Lr_n (nH)	TL_n (nH)	Tlr_n (nH)
n = 0	20.6056	-	14.0371	-
n = 1	138.675	7.41916	108.532	6.3661
n = 2	209.879	5.58202	175.926	4.6656
n = 3	229.945	5.48216	204.598	4.54808
n = 4	229.98	5.46032	207.867	4.55368
n = 5	220.457	5.44935	204.21	4.58032
n = 6	214.75	5.45357	184.334	4.60496
n = 7	201.646	5.46932	171.794	4.65591
n = 8	138.768	56895.5	124.38	5.88263
n = 9	19.9503	7.31993	18.8579	7.66438

2100MHz 듀플렉서의 Rx 대역과 Tx 대역의 각 파라미터는 입출력단의 소자 값의 경우 직렬 인덕턴스 성분의 경우 Rx는 20 내외, Tx는 14~18 내외의 값을 보이며, 병렬 공진 인덕턴스 성분의 경우 Rx는 7 내외 Tx는 6 내외의 값을 갖는다. 입출력단을 제외한 직렬 인덕턴스 성분의 값은 초단과 이어지는 소자의 경우 Rx와 Tx 모두 120~140 내외의 값을 갖고, 이후 중간부분에 해당하는 값은 Rx와 Tx 모두 170~230 사이의 값을 갖는다. 병렬 공진 인덕턴스의 성분의 경우 입출력단을 제외하고서는 Rx는 5 내외의 값을 갖고, Tx는 4 내외의 값을 갖는다.



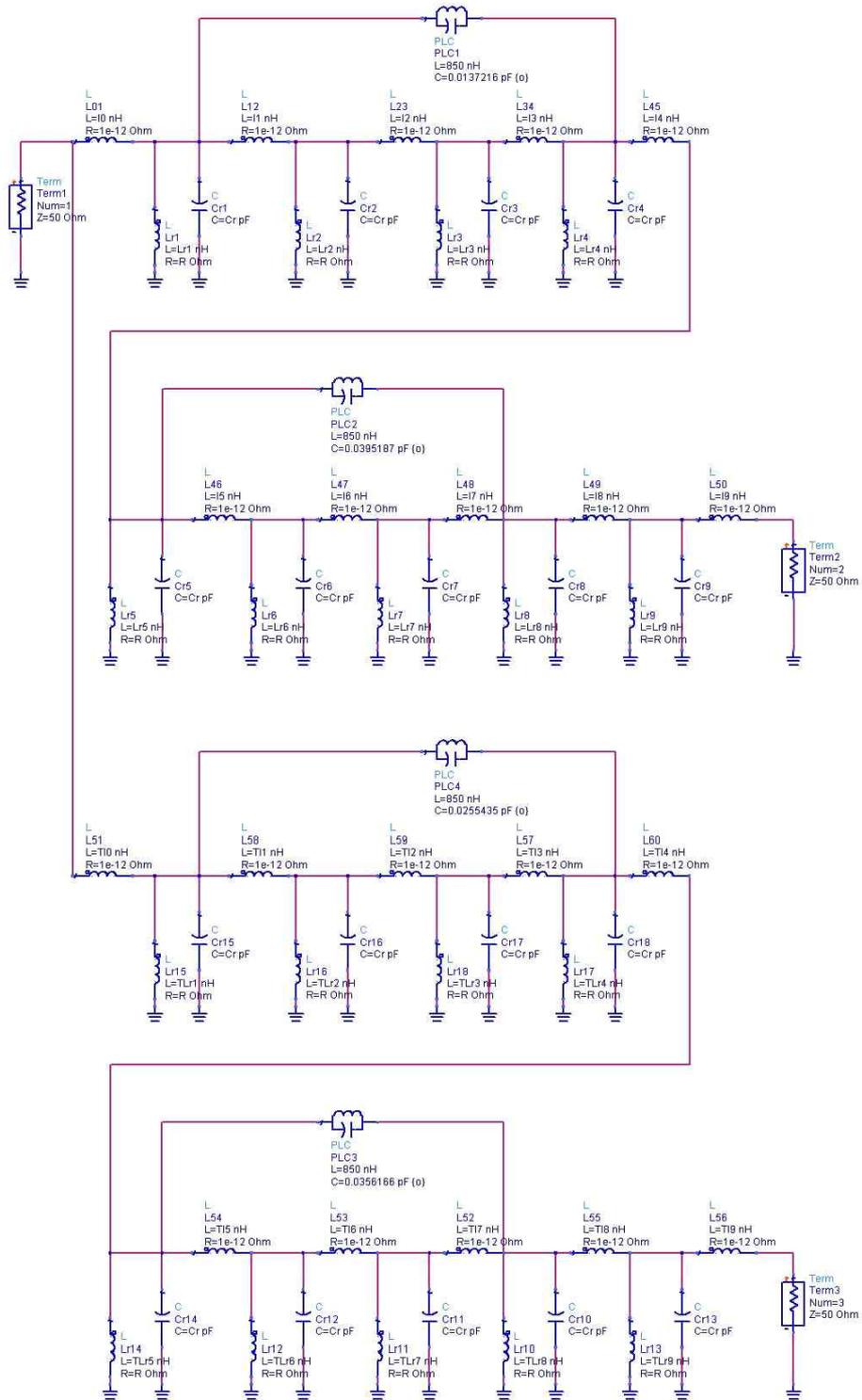
[그림 3-46] 2100MHz Duplexer Rx Band Simulation Result

그림 3-46은 2100MHz 듀플렉서의 Rx 대역에 대한 설계 시뮬레이션 결과로서 결과 통과 대역인 1920MHz ~ 1980MHz 대역에서의 손실은 2.0dB 이하이며, Tx 밴드인 2110MHz ~ 2170MHz에서의 감쇄 특성은 120dB 이하를 나타내었다. 또한, 대역내 반사손실은 20dB 이하의 값을 갖음을 확인할 수 있다.



[그림 3-47] 2100MHz Duplexer Tx Band Simulation Result

그림 3-47은 2100MHz 듀플렉서의 Tx 대역에 대한 설계 시뮬레이션 결과로서 결과 통과 대역인 2110MHz ~ 2170MHz 대역에서의 손실은 2.3dB 이하이며, Rx 밴드인 1920MHz ~ 1980MHz에서의 감쇄 특성은 120dB 이하를 나타내었다. 또한, 대역내 반사손실은 20dB 이하의 값을 갖음을 확인할 수 있다.



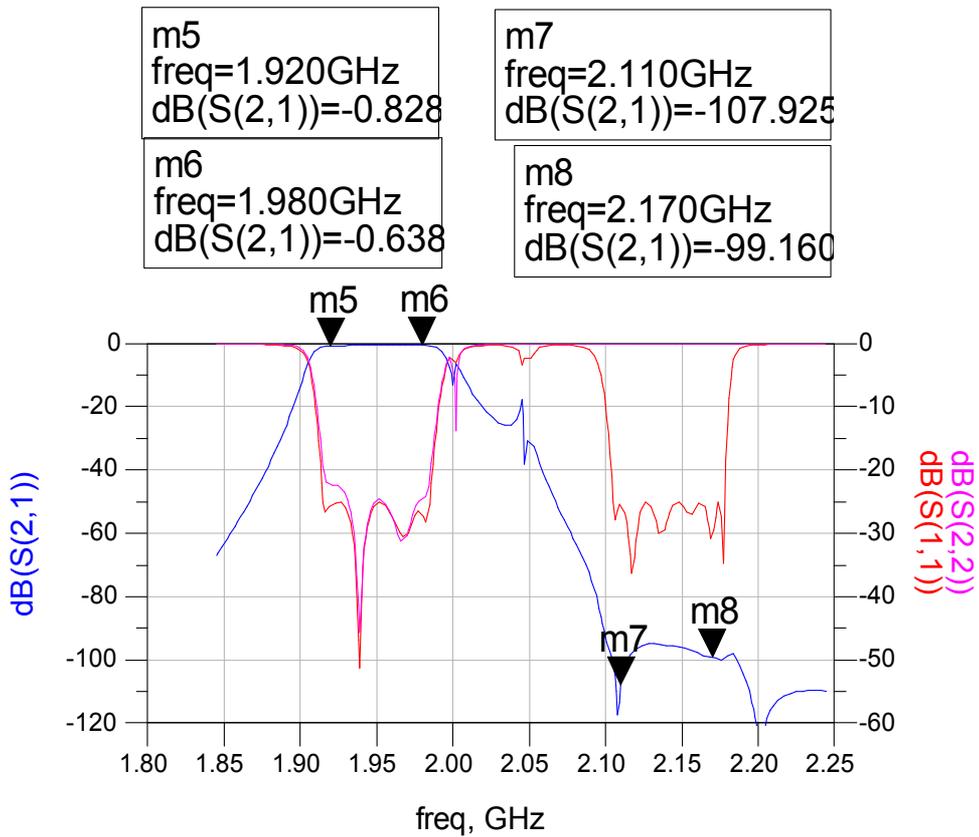
[그림 3-48] 2100MHz Duplexer Circuit (Notch Type)

2100MHz 듀플렉서의 감쇄 특성 개선을 위하여 설계한 듀플렉서에서 Rx 대역과 Tx대역에 각각 2개씩 노치 구조가 적용된 회로를 구성하였다. 노치 구조의 추가로 인하여 추가적인 매칭을 진행하여 파라미터에 대한 보정을 진행하였고, 이에 따른 회로 값은 표 3-30 에 나타내었다.

[표 3-30] 2100MHz Duplexer Circuit Parameter Value (Notch Type)

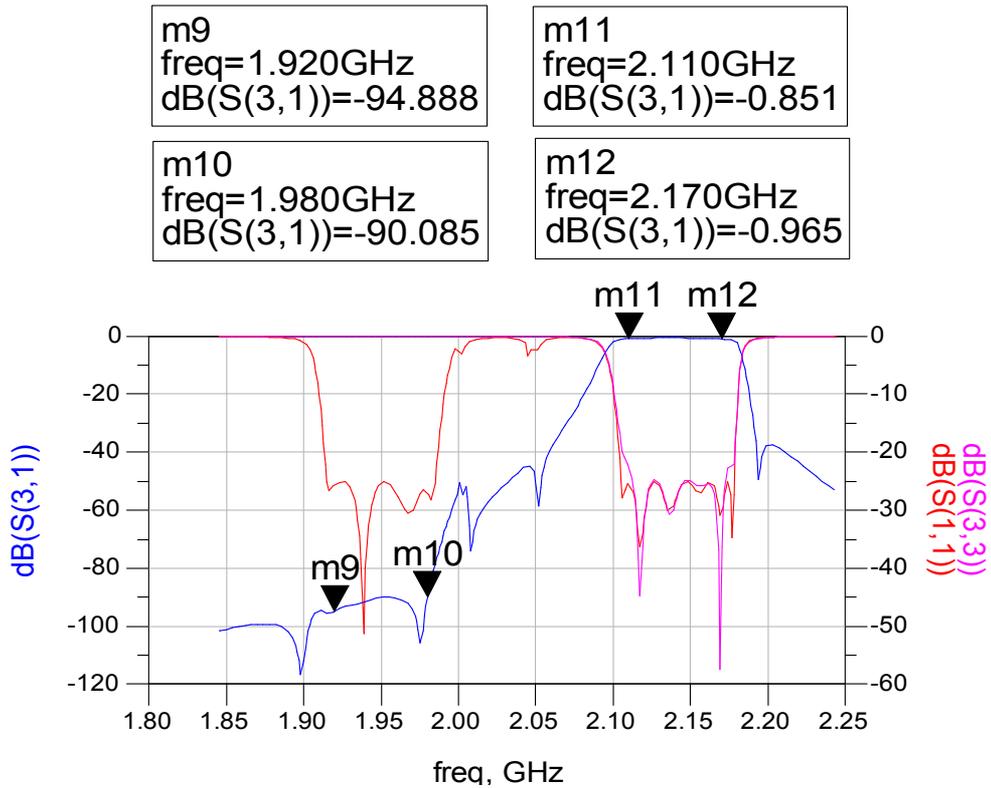
Item	L_n (nH)	Lr_n (nH)	TL_n (nH)	TLr_n (nH)
n = 0	18.9668	-	14.8017	-
n = 1	103.039	7.61591	88.0275	6.22762
n = 2	99.7973	5.65359	65.7435	5.31447
n = 3	141.947	5.49283	206.755	4.87192
n = 4	184.421	5.47106	202.755	4.47876
n = 5	368.442	5.29333	202.46	4.39159
n = 6	29.7974	6.591	418.488	5.56083
n = 7	362.968	8.14147	60.1658	9.32374
n = 8	147.427	5.3585	356.782	4.43903
n = 9	21.2422	7.15682	19.5339	5.75749

노치구조가 적용된 2100MHz 듀플렉서의 Rx 대역과 Tx 대역의 각 파라미터는 입출력단의 소자값의 경우 직렬 인덕턴스 성분의 경우 Rx는 18~21 내외, Tx는 14~19 내외의 값을 보이며, 병렬 공진 인덕턴스 성분의 경우 Rx는 7 내외 Tx는 6 내외의 값을 갖는다. 입출력단을 제외한 직렬 인덕턴스 성분의 값은 초단과 이어지는 소자의 경우 Rx 대역은 100~147 내외의 값을 갖고, Tx 대역은 66~136 내외의 값을 갖는다. 이후 중간 부분에 해당하는 값은 Rx와 Tx 모두 100~400 사이의 폭 넓은 값을 갖는다. 병렬 공진 인덕턴스의 성분의 경우 입출력단을 제외하고서는 Rx는 6 내외의 값을 갖고, Tx는 4 내외의 값을 갖는다.



[그림 3-49] 2100MHz Duplexer Rx Band Simulation Result (Notch Type)

그림 3-49는 2100MHz 듀플렉서의 Rx 대역에 대한 설계 시뮬레이션 결과로서 결과 통과 대역인 1920MHz ~ 1980MHz 대역에서의 손실은 0.9dB 이하이며, Tx 밴드인 2110MHz ~ 2170MHz에서의 감쇄 특성은 95dB 이하를 나타내었다. 또한, 대역내 반사손실은 20dB 이하의 값을 갖음을 확인할 수 있다.



[그림 3-50] 2100MHz Duplexer Tx Band Simulation Result (Notch Type)

그림 3-50은 2100MHz 듀플렉서의 Tx 대역에 대한 설계 시뮬레이션 결과로서 결과 통과 대역인 2110MHz ~ 2170MHz 대역에서의 손실은 1.0dB 이하이며, Rx 밴드인 1920MHz ~ 1980MHz에서의 감쇄 특성은 90dB 이하를 나타내었다. 또한, 대역내 반사손실은 20dB 이하의 값을 갖음을 확인할 수 있다.

## IV. 필터 제작 및 측정

### 4.1 세라믹 공진기

그림 4-1는 800MHz 필터에 사용되는 공진기로서 각각 유전체 필터에 사용되는 DR(Dielectric Resonator), 금속 캐비티 필터에 사용되는 금속 공진기, 세라믹 기반 캐비티 필터에 사용되는 세라믹 기반 공진기이다.

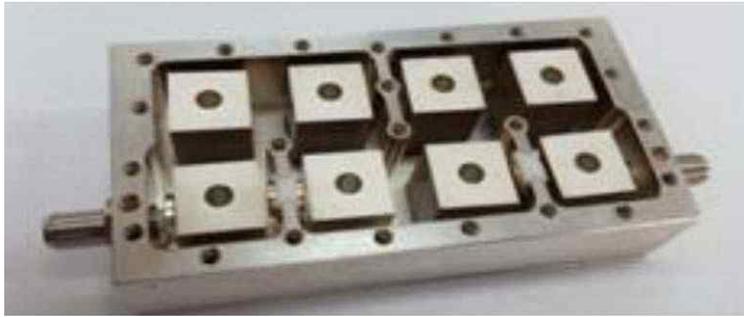
유전체 필터에 사용되는 DR필터의 경우 공진기의 서포트 부분을 제외하고 상단의 도넛형태의 공진기 유전체의 크기는 지름 65mm 높이 20mm의 크기를 갖는다. 금속 공진기의 경우 지름 20mm 높이 25mm를 갖는다. 세라믹 기반 캐비티 필터에 사용되는 세라믹 기반 공진기의 경우 높이 16mm, 가로 세로의 길이는 14mm를 갖는다.



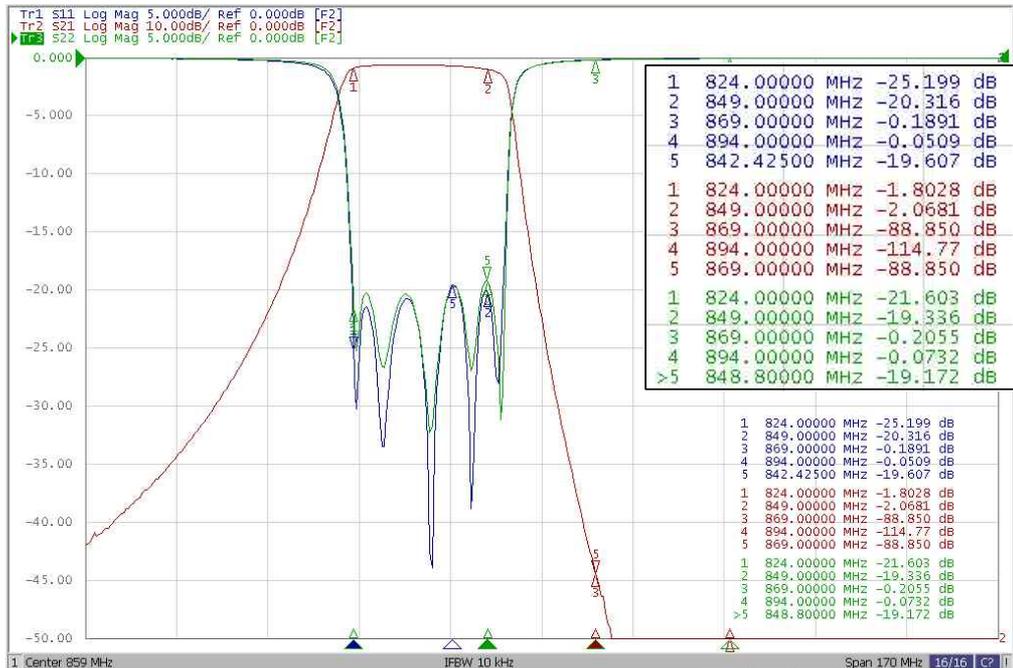
[그림 4-1] Dielectric Filter Vs. Metal Resonator Vs. Proposed Resonator

### 4.2 대역 통과 필터

회로설계 및 시뮬레이션 결과를 기반으로 대역 통과 필터의 제작을 진행하였고, 800MHz 대역의 필터는 Rx 대역과 Tx 대역이 같은 크기의 하우징과 공진기를 사용하였다. 제작된 800MHz 대역 통과 필터의 제품은 그림 4-2과 같으며, Rx 대역과 Tx 대역의 측정값은 그림 4-3, 그림 4-4와 같다.

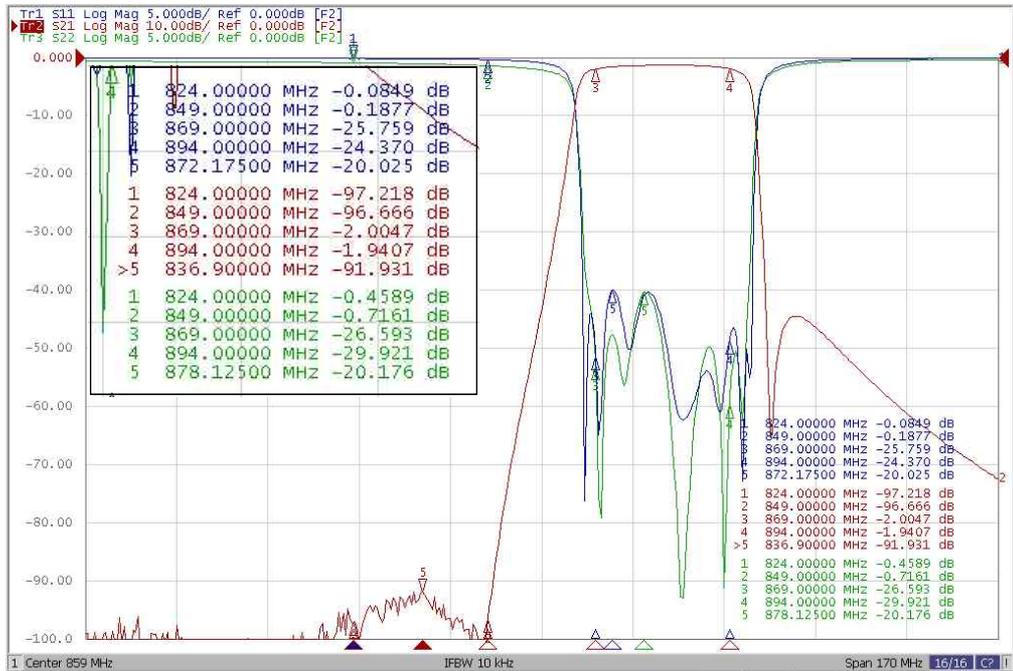


[그림 4-2] 800MHz Band Pass Filter



[그림 4-3] 800MHz Band Pass Filter Rx Band Result

제작된 800MHz 대역 통과 필터 Rx 대역의 제작 특성은 Rx 통과 대역인 824MHz ~ 849MHz에서의 손실 값은 -2.0681dB이며, 대역내 반사 손실은 -19.607dB이다. Tx 통과 대역인 869MHz ~ 894MHz의 감쇄 특성은 -88.850dB 이하의 값을 갖는다.



[그림 4-4] 800MHz Band Pass Filter Tx Band Result

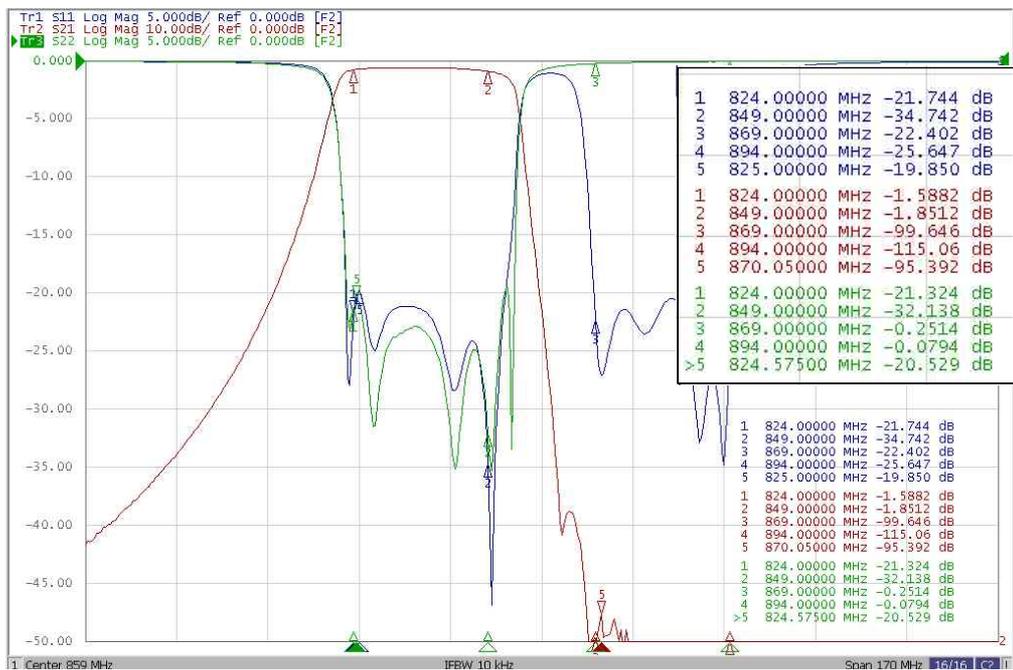
제작된 800MHz 대역 통과 필터 Tx 대역의 제작 특성은 Rx 통과 대역인 869MHz ~ 894MHz에서의 손실 값은 -2.0471dB이며, 대역내 반사 손실은 -20.176dB이다. Tx 통과 대역인 824MHz ~ 849MHz의 감쇄 특성은 -91.931dB 이하의 값을 갖는다.

### 4.3 멀티플렉서

회로 설계 및 시뮬레이션 결과를 기반으로 대역 통과 필터의 제작을 진행하였고, 800MHz 듀플렉서는 노치 구조가 적용된 시뮬레이션 결과를 토대로 제작하였으며, 제작된 제품은 그림 4-5와 같으며, Rx 대역과 Tx 대역의 측정 값은 그림 4-6, 그림 4-7와 같다.

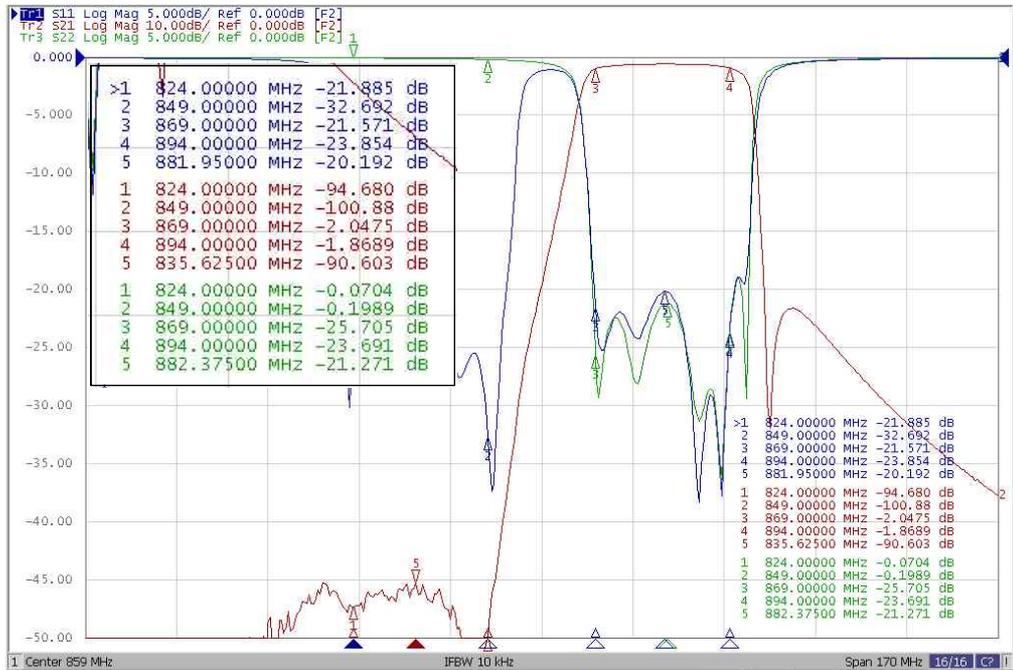


[그림 4-5] 800MHz Duplexer Small Cavity Filter Sample



[그림 4-6] 800MHz Duplexer Rx Band Result

제작된 800MHz 대역 통과 필터 Rx 대역의 제작 특성은 Rx 통과 대역인 824MHz ~ 849MHz에서의 손실 값은 -1.8512dB이며, 대역내 반사 손실은 -20.529dB이다. Tx 통과 대역인 869MHz ~ 894MHz의 감쇄 특성은 -95.392dB 이하의 값을 갖는다.



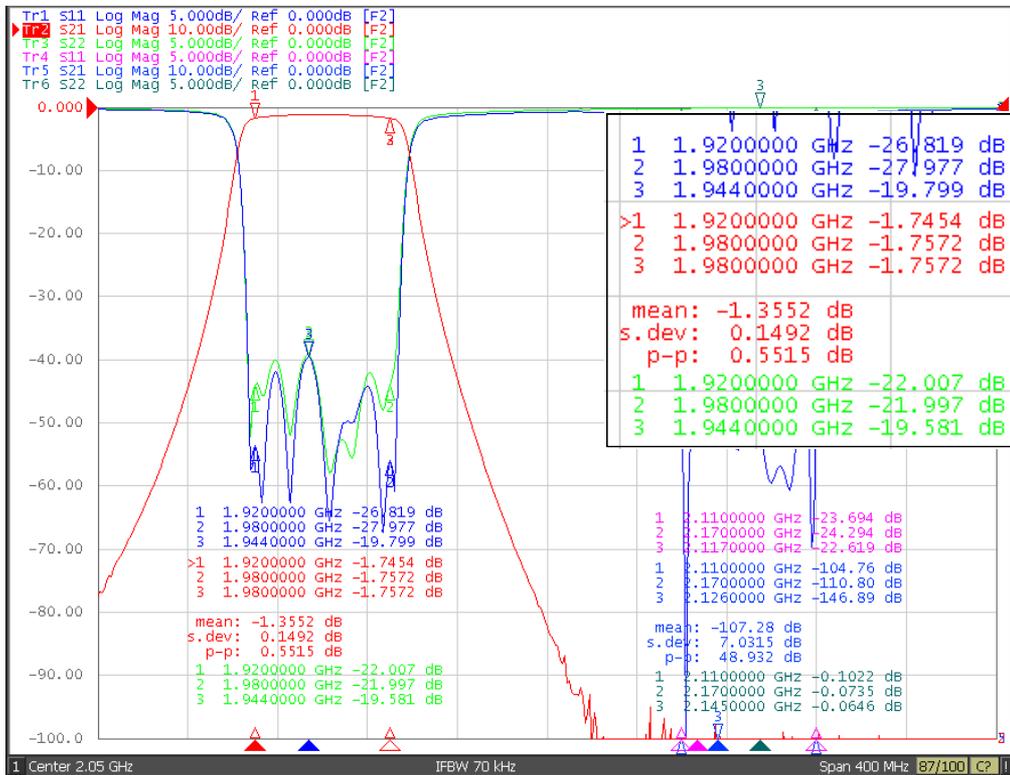
[그림 4-7] 800MHz Duplexer Tx Band Result

제작된 800MHz 대역 통과 필터 Tx 대역의 제작 특성은 Tx 통과 대역인 869MHz ~ 894MHz에서의 손실 값은 -2.0475dB이며, 대역내 반사 손실은 -21.271B이다. Rx 통과 대역인 824MHz ~ 849MHz의 감쇄 특성은 -90.603dB 이하의 값을 갖는다.

회로 설계 및 시뮬레이션 결과를 기반으로 대역 통과 필터의 제작을 진행하였고, 2100MHz 듀플렉서는 노치 구조가 적용된 시뮬레이션 결과를 토대로 제작하였으며, 제작된 제품은 그림 4-8과 같으며, Rx 대역과 Tx 대역의 측정값은 그림 4-9, 그림 4-10와 같다.

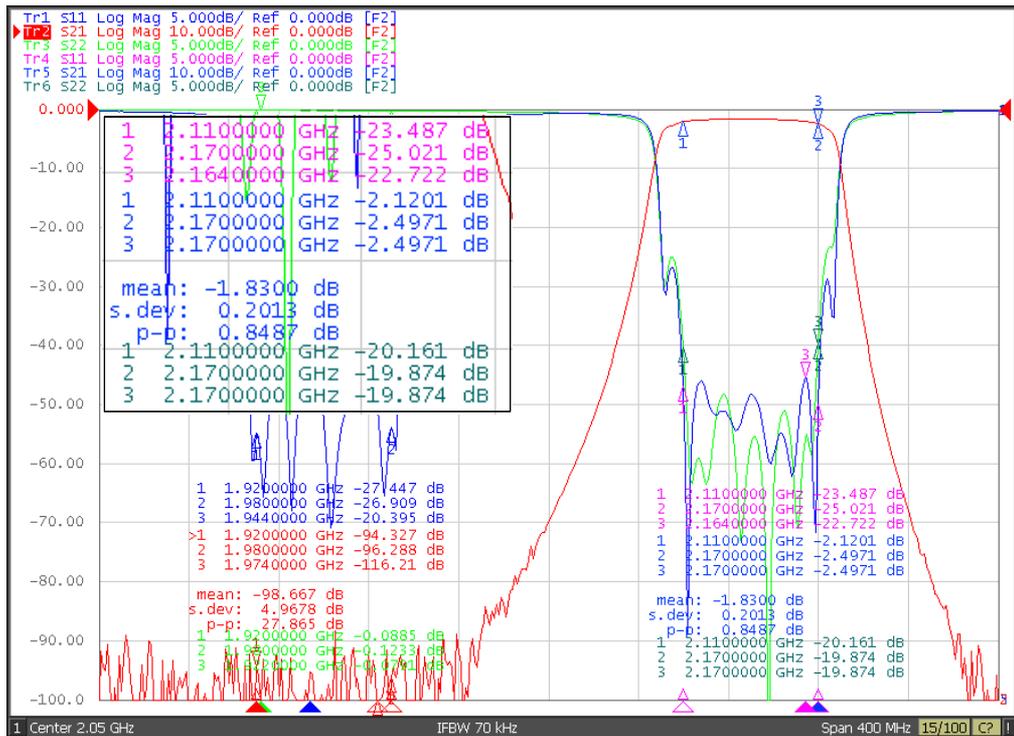


[그림 4-8] 2100MHz Duplexer Small Cavity Filter Sample



[그림 4-9] 2100MHz Duplexer Rx Band Test Result

제작된 2100MHz 대역 통과 필터 Rx 대역의 제작 특성은 Rx 통과 대역인 1920MHz ~ 1980MHz에서의 손실 값은 -1.7572dB이며, 대역내 반사 손실은 -19.581dB이다. Tx 통과 대역인 2110MHz ~ 2170MHz의 감쇄 특성은 -95dB 이하의 값을 갖는다.



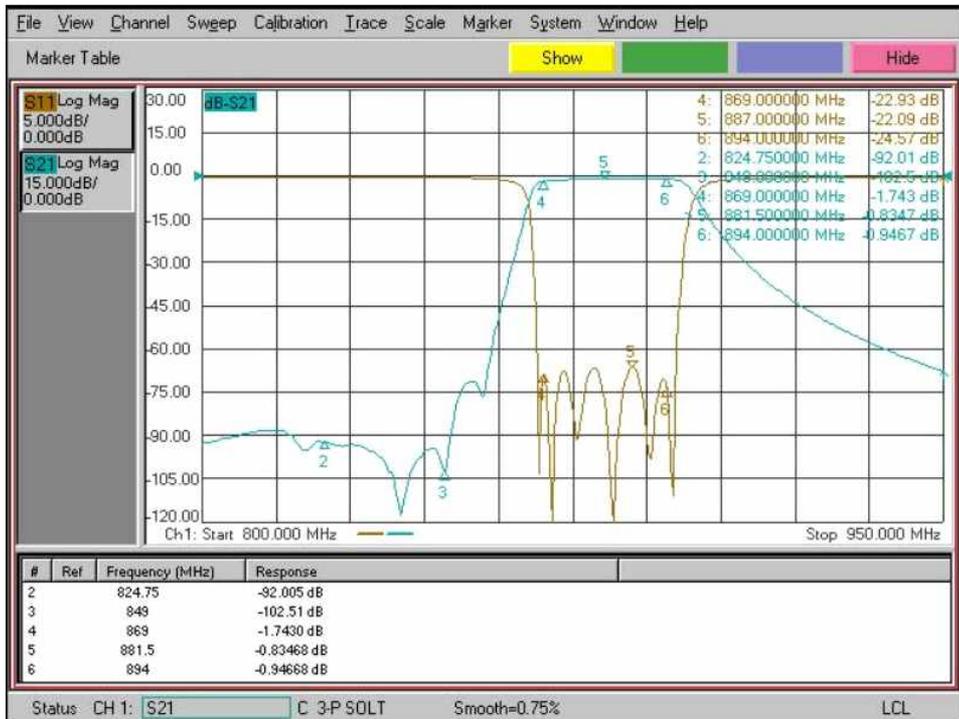
[그림 4-10] 2100MHz Duplexer Tx Band Test Result

제작된 2100MHz 대역 통과 필터 Tx 대역의 제작 특성은 Tx 통과 대역인 2110MHz ~ 2170MHz에서의 손실 값은 -2.4971dB이며, 대역내 반사 손실은 -19.874dB이다. Tx 통과 대역인 1920MHz ~ 1980MHz의 감쇄 특성은 -85dB 이하의 값을 갖는다.

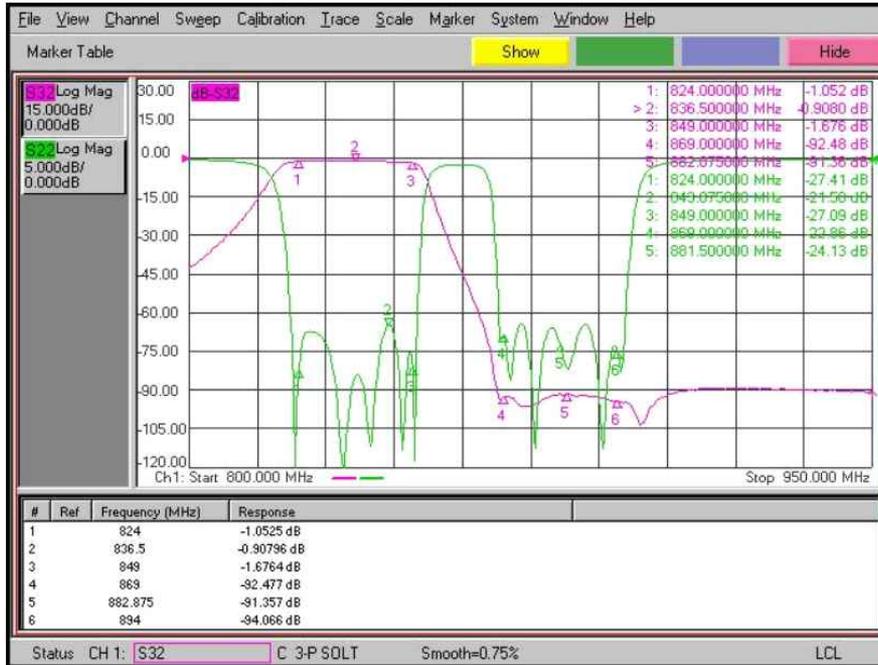
기존 금속 캐비티 필터는 국내 A사와 해외 K사에서 시판 중인 필터를 기준으로 특성을 확인하면 국내 A사의 경우 제품의 크기는 100mm x 65mm x 50mm이고, 제품 특성은 Rx 대역과 Tx 대역 모두 삽입손실 2.5dB이하, 반사 손실 20dB이하, 감쇄특성 90dB이상 이다.



[그림 4-11] Metal Cavity Filter (A사)



[그림 4-12] Metal Cavity Filter Tx Band Test Result (A사)

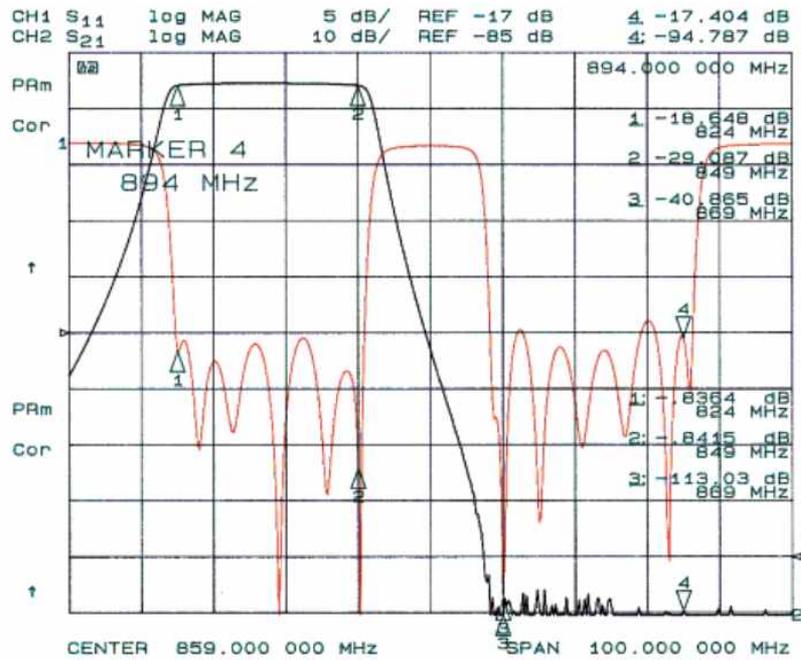


[그림 4-13] Metal Cavity Filter Rx Band Test Result (A사)

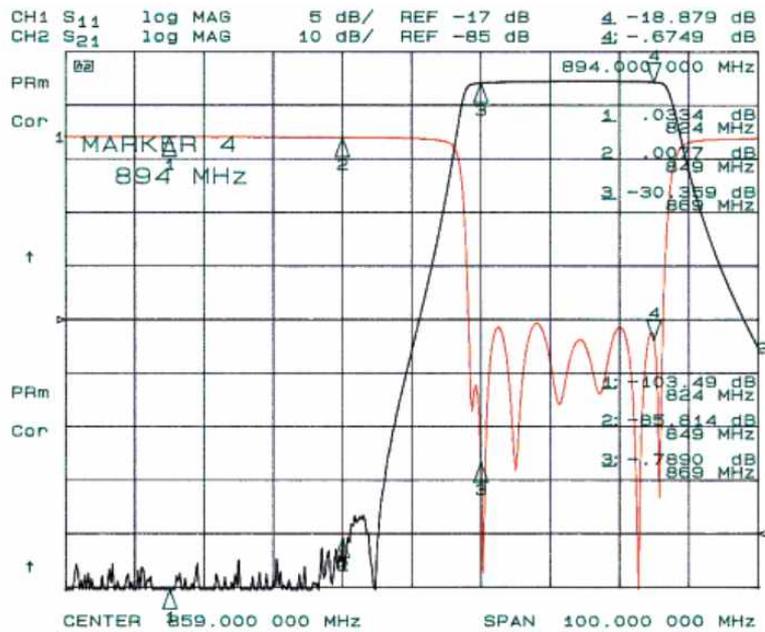
해외 K사의 경우 제품의 크기는 171.5mm x 160.6mm x 70mm이고, 제품 특성은 Rx 대역과 Tx 대역 모두 삽입손실 1.0dB이하, 반사손실 17dB이하, 감쇄특성 85dB이상 이다.



[그림 4-14] Metal Cavity Filter (K사)

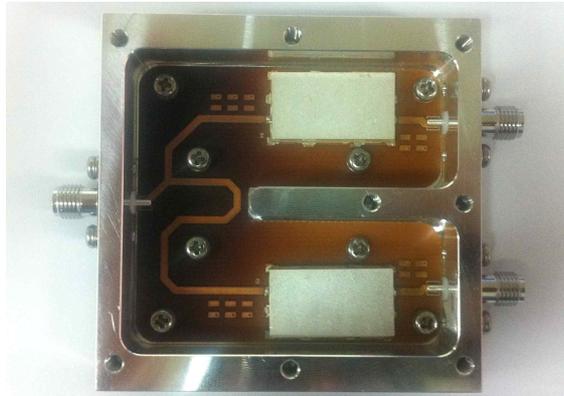


[그림 4-15] Metal Cavity Filter Rx Band Test Result (K사)

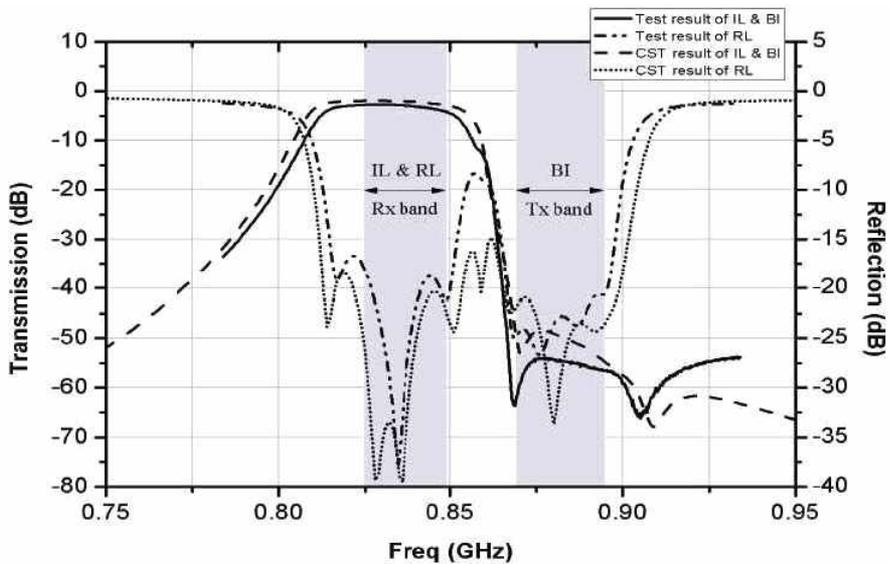


[그림 4-16] Metal Cavity Filter Tx Band Test Result (K사)

기존 선행연구<sup>34)</sup>에 의한 LTCC Duplexer 특성을 확인하면, LTCC 듀플렉서의 제품 크기는 그림 4-17과 같이 제작되어 63mm x 64mm x 13mm이고, 제품의 특성은 그림 4-18와 그림 4-19과 같이 나타났다. 선행연구에서 사용된 시뮬레이션 툴은 CST를 사용하였고, 본 연구에서는 ADS를 사용하였으나, 제품의 측정을 위한 계측기는 동일한 Agilent사의 회로망분석기(Network Analyzer)를 사용하여 제품 간의 측정 오차를 최소화 하였다.

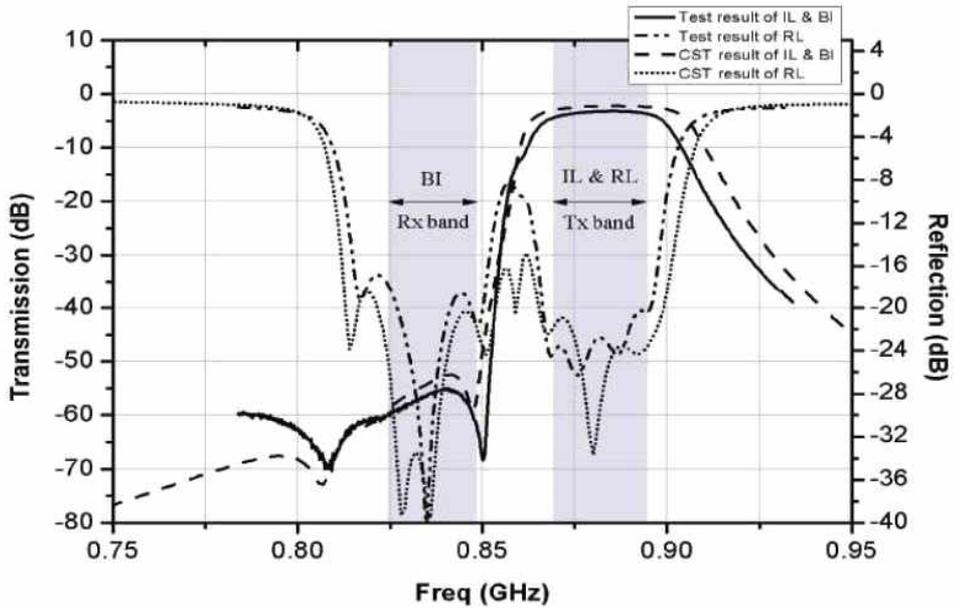


[그림 4-17] LTCC Duplexer



[그림 4-18] LTCC Duplexer Rx Band Test Result

34) 서수덕. (2017). “협대역 LTCC 듀플렉서 기반 이동통신용 쿼드플렉서 구현”. 제주대학교 박사 학위논문.



[그림 4-19] LTCC Duplexer Tx Band Test Result

[표 4-1] LTCC Duplexer Test Result

Item	Unit	Rx		Tx	
		Simulation	Test Result	Simulation	Test Result
Frequency	MHz	824 - 849		869 - 894	
Insertion Loss	dB	2.85	4.22	3.06	4.47
Return Loss	dB	20.35	17	20.97	16.5
Band Isolation	dB	48.53	52	53.45	52.5

LTCC 필터의 경우 특성 Rx와 Tx의 특성을 살펴보면 삽입손실의 경우 각각 4.22dB, 4.47dB로 4dB를 이상의 값을 갖고, 반사손실의 경우 각각 17dB, 16.5dB로서 약 17dB 값을 갖는다. 감쇄특성의 경우 각각 52dB, 52.5dB로 52dB 이상의 값을 갖는 것으로 확인 되었다.

[표 4-2] Metal Cavity Filter Vs. Small Cavity Filter Vs. LTCC Filter

Item	Unit	Metal Cavity Filter		Small Cavity Filter	LTCC Filter
		K사	A사		
Frequency	MHz	Transmit : 869 - 894			
Insertion Loss	dB	1.0	2.5	2.05	4.47
Return Loss	dB	17	20	21.2	16.5
Band Isolation	dB	85	90	90.6	52.5
Frequency	MHz	Receive : 824 - 849			
Insertion Loss	dB	1.0	2.5	1.85	4.22
Return Loss	dB	17	20	20.5	17
Band Isolation	dB	85	90	95.3	52
Size	mm	171.5 x 160.6 x 70	100 x 65 x 50	88 x 82 x 23	63 x 64 x 16

금속 캐비티 필터와 세라믹 기반 캐비티 필터 그리고 LTCC 필터를 비교하여 표 4-32에 정리하였다. 동일한 주파수 대역에서 삽입 손실은 금속 캐비티 필터가 월등히 좋은 특성을 가지고 있으며, LTCC 필터의 경우 4.47dB로 가장 나쁜 특성일 갖는다. 본 연구에서 진행한 세라믹 기반 캐비티 필터의 경우 갖으며 금속 필터와 LTCC 필터의 중간 특성을 갖음을 볼수 있다.

반사손실의 특성은 금속 캐비티 필터와 세라믹 캐비티 필터의 특성을 각각 20dB와 22.455dB로 비슷한 특성을 갖으며 LTCC 필터의 경우 17dB 특성을 가져 두 필터에 비해 특성이 낮음을 볼 수 있다. 통과 대역의 감쇄 특성의 경우 Rx 대역에서는 세라믹 기반 캐비티 필터가 93.411dB로 금속 캐비티 필터 88dB보다 높으나 Tx의 경우는 금속 캐비티 필터의 특성이 세라믹 기반 캐비티 필터의 특성보다 17dB가량 높다. 그러나 LTCC의 경우는 Rx 대역과 Tx 대역 모두에서 금속 캐비티 필터와 세라믹 캐비티 필터에 비해 최소 30dB 이상 특성이 좋지 못한 것을 볼 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 이동통신 기지국의 RF필터를 소형화하는 방법에 관해서 연구하였다. 기존의 RF필터 소형화를 위한 방법으로는 제품의 구조 형상을 변경하는 등의 구조적 변경 방법과 소재의 재질을 변경하여 소형화하는 방법을 사용하였다. 그러나 구조적 변경 방법에는 소형화에 한계가 있었으며, 세라믹을 사용하여 소형화하는 방법에서는 특성에 한계점이 있어 원하는 특성과 소형화 두 가지를 만족하기 어려웠다. 그러나 본 연구에서는 소형화를 진행하면서 특성도 우수한 RF필터를 제작하는 방식에 관해서 연구하였다.

이를 위해 본 연구에서는 세라믹을 사용한 공진기를 제작하고, 이를 통하여 대역 통과 필터 및 듀플렉서를 설계 및 제작하였고, 제품의 특성을 측정하여 분석하였다.

본 연구에서는 필터를 제작하기에 앞서 재질의 변경으로 세라믹을 이용한 공진기를 제작하였다. 공진기의 제작을 위해서 세라믹 공진기의 소성과 분말의 조성비를 연구하여 최적의 비율 및 소성 온도를 확인하여 6:4 비율과 최적은 소성 온도인 1320°C를 확인하였다. 공진기의 금속 캐비티 듀플렉서에 적용되는 공진기와 유사한 특성을 구현하기 위하여 공진기에 은 도전막을 코팅 하였고 이때, 공진기에 코팅을 위한 페이스트의 점도와 흡입시간, 토출량을 조절하여 40kcps이하, 30s 이상, 0.2g이상 의 값을 구하였다.

제작된 세라믹 기반 공진기의 형상은 800MHz 대역에서는 가로 x 세로 x 높이가 각각 14mm, 14mm, 16mm를 갖는 사각 기둥형태로 설계 구현하였고, 2100MHz 대역에서는 원통 형태로서 8pi, 16mm를 갖는 형태로 설계하였다. 공진기의 도금은 바닥 면과 상단과 하단을 잇는 관통홀 및 상단 면에는 도전막을 코팅하였고, 상단면의 은 도전막은 공진기의 길이를 좀 더 최소화하고자 SIR 구조를 구현하기 위하여 은 도전막을 코팅하여 설계하였다.

소형화된 듀플렉서 제작을 위해 설계된 세라믹 기반 공진기를 이용하여 차수가 8인 대역 통과 필터를 설계하였으며 필터의 크기는 88mm x 44mm x 22mm의 크기를 가지며, 삽입 손실은 -2dB, 반사 손실 -19dB, 감쇄 특성

-88dB를 갖는다. 대역 통과 필터는 800MHz Rx 대역인 824~849MHz 제품과 869~894MHz 주파수를 갖는 Tx 대역 제품을 우선 제작하였고, 제작된 제품의 특성을 측정 및 수정 보완하여 800MHz 듀플렉서 및 2100MHz 듀플렉서 설계를 진행하였다.

800MHz 듀플렉서의 제작 결과 제품의 크기는 88mm x 82mm x 23mm의 크기를 가지고, 삽입 손실 -1.9dB, 반사 손실 -22dB, 감쇄 특성 -85dB의 값을 갖는다. 2100MHz 듀플렉서의 제작 결과 제품의 크기는 82mm x 53mm x 22mm의 크기를 가지고, 삽입 손실 -2.8dB, 반사 손실 -21dB, 감쇄 특성 -86dB의 값을 갖는다.

800MHz 듀플렉서의 제작 결과와 기존 800MHz 대역의 금속 캐비티 듀플렉서 및 800MHz 대역의 LTCC 듀플렉서와 비교한 결과, 본 논문에서 제작한 세라믹 기반 공진기 필터의 경우 금속 캐비티 필터보다 제품의 크기는 1/2 이하의 크기로 제작되었으며, LTCC 듀플렉서의 삽입손실보다 2.4dB 가량 좋고, 감쇄 특성 또한 30dB가량 좋은 특성을 확인할 수 있었다.

본 논문에서는 세라믹 기반의 공진기를 설계하였고, 이용하여 필터의 소형화를 연구하였다. 800MHz 대역 및 2100MHz 대역의 필터를 설계 및 제작하여 특성 구현을 진행하였으며, 800MHz 대역의 경우 기존 금속 캐비티 필터와 LTCC 필터와 물리적 특성 및 RF 특성을 비교 분석하였고, 이를 통하여 기존 금속 캐비티 필터 대비 물리적 크기는 1/2 작게 제작되었으며, LTCC 필터의 RF 특성보다 삽입 손실은 2.4dB, 감쇄 특성은 30dB 가량 좋은 특성을 확인하였다. 이러한 세라믹 기반의 공진기 필터 설계 기법을 이용하면 변화하고 있는 기지국 구성에 있어 중소출력 기지국에 적용이 가능한 금속 캐비티 필터보다 소형화되고 LTCC 필터보다 특성이 좋은 필터 설계에 유용하게 이용될 수 있다. 또한, 기존 금속 공진기의 제작시 공진기 체결 등의 여러 작업이 수반 되지만 본 논문에서의 세라믹 기반의 공진기는 공진기를 하우징 또는 기판에 직접 결합함으로써 공진기의 결합 작업량이 단축될 수 있다. 또한, 기존 LTCC 필터의 경우 제품을 제작 후 튜닝이 어렵지만, 논문에서 제안한 세라믹 기반 캐비티 필터의 경우 기존 금속 캐비티 필터와 같은 방식으로 필터를 튜닝 할 수 있어 사용에 제한이 적다.

# 참 고 문 헌

## 1. 국내문헌

- 고영준, 김종현. (1998). “PCS 단말기용 유전체 공진기 대역 통과 필터의 설계 및 제작”. 신기술연구소논문집. 27.
- 김기래, 윤중환, 이영철. (2010). “RF 회로설계 이론과 응용 제2판”. Prentice Hall.
- 김진국. (1998). “진행모드 해석을 이용한 유전체 공진기 대역통과 필터의 설계 및 제작”. 건국대학교 석사학위논문
- 김향석, 이민호, 송연근. (2014). “스몰셀 시장현황 및 전망”. 전자통신동향분석. 29(2).
- 김현욱. (2001). “IMT-2000 이동통신 원리”. 진한도서.
- 나지현, 김경숙, 권동승, 정현규. (2015). “LTE 기반 소형셀 기지국 기술동향”. 전자통신동향분석. 30(1).
- 박세환. (2015). “5G 이동통신 시스템의 요구사항 분석”. 정보통신기술진흥센터(IITP).
- 서수덕. (2017). “협대역 LTCC 듀플렉서 기반 이동통신용 쿼드플렉서 구현”. 제주대학교 박사학위논문
- 송지훈. (2017). “캐비티형 주파수가변 대역통과필터 설계 및 구현”. 군산대학교 석사학위논문.
- 윤남일. (2011). “최신 통신이론”. 생능출판사.
- 유기한, 배진석, 박상준, 서수덕, 김현수, 김우식. (2000). “Coaxial Air Type Filter에서 UIR과 SIR 특성에 대한 연구”. 한국통신학회 학술대회논문집. 210-213.
- 이혜영, 정용준, 김대중, 하리다, 조영익, 김다미. (2017). “3GPP 5G 표준화 현황 및 향후 전망”. 한국 통신학회 하계종합학술발표회.
- 임명환. (2008). “손에잡히는 방송통신융합 시사용어”. 한국정보통신기술협회.
- 정명철. (2009). “3GPP LTE-Advanced 기술표준화 동향”. 한국정보통신기술

협회(TTA). IT Standard Weekly.

류종은(2018). 전자신문 보도자료 <http://www.etnews.com>

유나이티드항공사 <https://www.united.com>

아시아나 항공 <http://flyasiana.com>

SmartPC사랑 보도자료. <http://www.ilovepc.co.kr>

## 2. 국외문헌

- Allan W. Scott. (2005). "Understanding Microwaves". Wiley.
- Cisco Visual Networking Index™ Complete Forecast for 2015 to 2020.
- Divid M. (1990). "Microwave Engineering". Wiley.
- J. Kimura and H. Shibasaki. (1995). "Recent Advances in Clinical Neurophysiology". Proceedings of the 10th International Congress of EMG and Clinical Neurophysiology.
- Jiasheng Hong, M. J. Lancaster. (2011). "Microstrip filters for RF/Microwave Applications 2nd Edition". Wiley.
- MckKinsey. (2014). "the Internet of Things: Sizing up toe opportunity".
- Moonbong Ko, Seungcheon Kim. (2017). "A Study on the Resonator Plating Method of Ceramic Resonator Filter". IJCA. 10(10), 229–238.
- Moonbong Ko, Seungcheon Kim. (2018). "A Research on the Sintering and Manufacturing Condition of Small Cavity in Mobile Communication Cavity Filter", JIFS.
- Moonbong Ko, Sungmin Kim, Heedon Jang, Seungcheon Kim. (2017). "A Study on RF Cavity Filter Miniaturization Ceramic Resonator". JARDCS. 10(1), 208–213.
- Research and markets. (2014). "Distributed Antenna Systems (DAS): market and Forecast 2014–2019. Mind Commerce Publishing"
- Taehong Kim, et al. (1999). "Microwave Dielectric Filter Technology Trend", Electronics and Telecommunications trends, ZB.10 No.3.
- Uiseon Choi et al. (2005). "Structural and Microwave Dielectric Properties of the 0.9 <math>\langle gTiO\_3-0.1SrTiO\_3 </math> Ceramics with Sintering Temperature", KIEE Journal, 49(5).
- WRC-19. (2017). "WRC-19 Agenda and Relevant Resolutions".
- 3GPP TR 36.814 V9.0.0. (2010). "Further advancements for E-UTRA physical layer aspects(Release 9). Filter". IJCA. 10(10), 229–238.

## ABSTRACT

### A Study on the Design of Ceramic Resonator for Miniaturization of RF Filter in Mobile Communication Base Station

Ko, Moon-Bong

Major in Smart Convergence Product

Dept. of Smart Convergence Consulting

The Graduate School

Hansung University

The mobile communication has evolved from the First Generation, Advanced Mobile Phone Service(AMPS), to the Fourth Generation, Long Term Evolution-Advanced(LTE-A), which is the basic technology for multimedia service in mobile environment. Those enhancement of mobile communication technology has led an increase of users and mobile devices, which caused an explosion of data traffic. According to Cisco reports, data traffic has been increasing more than 22 percent in average annually.

The Fifth Generation mobile communication, which is the next generation mobile communication technology, is required to satisfy much higher specifications such as capacity, speed, and shorter response time than the existing fourth generation in order to handle a large number of

users and high data traffic. Accordingly, the configuration of the base station is changed from a conventional macro base station to a configuration of a base station of a heterogeneous network (HetNet) scheme instead of a conventional one. As a result, the necessity of small and medium-sized base stations has increased in the configuration of the base station. As small and medium-sized base stations are used, the parts in the base stations should be developed for small and medium-sized base stations.

Regarding to a method for miniaturization of the RF filter used in the base station, there is an improved method according to various factors such as a method of optimizing the structural form of the product and a method of changing the material of the product by improving the structure of the existing product. However, there is a limit to the methods, and there is a limit to the size that can be miniaturized in the method of optimizing the structural form. The miniaturization method using ceramics has a limitation in that the characteristics are much worse than those of conventional metal cavity filters.

In this study, a filter is designed and fabricated using a ceramic resonator to minimize the size of an RF (Radio Frequency) filter used in a mobile communication base station. The validity of the fabricated filter was verified through experimental comparison with conventional metal cavity filter and LTCC (Low-Temperature Co-fired Ceramic).

The frequency band of the fabricated filter was designed for 800MHz (Cellular) band and 2100MHz (WCDMA) band, and compared with the conventional metal cavity filter and LTCC filter.

The comparison between the proposed ceramic cavity filter of this study and the conventional metal cavity filter and LTCC filter has revealed that the proposed filter has the half size of the conventional metal cavity filter and has the better characteristics than LTCC such as 2.4dB insertion loss

improvement and 30 dB attenuation improvement. The proposed filter with the smaller size than the conventional metal cavity filter and better characteristics than LTCC would be possible to be adopted in the future small and medium sized base stations.

**【Keyword】** Cavity, Ceramic, Resonator, Duplexer, Miniaturization