

2.45GHz 대역 LTCC Balun-BPF의 설계

A Design of LTCC Balun-BPF for 2.45GHz Band

정 을 영* 최 경** 황 희 용***
Jung, Eul-Young Choi, Kyoung Hwang, Hee-Yong

Abstract

This paper presents a LTCC Balun-BPF, which is a BPF(band pass filter) with a Balun in a single LTCC chip for the direct interface with a MMIC chip having balanced inputs. The physical dimension of the designed Balun-BPF is $2.4 \times 2.0 \times 0.88$ mm and the used dielectric constant ϵ_r is 36. A Balun of three-lines structure with striplines and a BPF of comb-line structure was combined into the Balun-BPF. The simulated result shows 4.8dB of insertion loss, 178~179 degree of the phase imbalance, 14dB of the return.

키워드 : 발룬, 대역통과필터, 저온동시소성세라믹 공법

Keywords : *balun, BPF(band pass filter), LTCC(low temperature co-fired ceramic)*

1. 서론

최근 Wireless, Bluetooth 등의 무선 통신이 발달하면서 무선 통신 제품들의 성능 발달 수준에 비례하여 소형화와 경량화가 신속히 진행되고 있다. 이에 발맞춰 무선 통신 제품들의 주요 근간을 이루는 RF부품들의 소형화에 대한 연구도 활발히 진행되어 가고 있고, 또한 소형화만이 아니라 여러 부품들을 하나로 집적화 시키는 것에 대한 연구 및 기술도 진척이 되어가고 있다. 현재 이러한 연구에는 Antenna와 Balun의 합성, Filter와 Mixer의 조합 등 여러 가지 조합과 합성에 대한 연구가 진

행 중이며, 집적·소형화를 위해서 사용되는 기술들도 LTCC나 MMIC 등의 여러 가지 공법들이 많이 도입·발달되어가고 있다.

이중에서도 Balun은 현재 연구가 활발히 진행되어가고 있는 분야이다. Balun은 1944년 Marchand에 의해서 제안된 이후 다양한 구조로 제시되어왔다. Balun은 초고주파 소자에서 중요한 위치를 차지하는 소자로서 불평형 신호를 평형 신호로 변환해주는 회로·구조물을 통칭한다. 또는 그 반대의 변환기능을 할 때도 똑같이 Balun이라고 부른다. 초고주파 회로 상의 Balun의 기능은 Mixer나 증폭기의 평형 신호를 사용하는 부품과 불평형 신호를 입출력으로 하는 부품들의 상호연결이며, 이러한 Balun의 출력특성은 하나의 불평형 입력과 두개의 평형 출력을 가지며 특정 주파수영역에서 두 출력단이 같은 크기의 출력과 180° 위상차를 만족시키는 것이 Balun의 기본 조건이다. 이러한 Balun에 대한 연구는 최초의 Marchand가 제시한

* 강원대학교 대학원 전기공학과 석사과정
** 강원대학교 전기공학과 교수, 공학박사
*** 강원대학교 전기공학과 조교수, 공학박사

Marchand형 Balun에서 시작하여 소형화를 위한 Microstrip형 Balun, Stripline형 Balun, Lumped형 Balun 또는 Lange coupler를 이용한 것과 Transformer를 이용한 것 등 소형화와 안정된 동작을 위한 여러 가지연구가 현재 진행 중에 있다.[1][2]. 또한 이 Balun과 대부분의 무선통신시스템에 연속적인 Chip으로 기판에 부착되어 사용중인 BPF를 한 Chip에 집적하는 연구도 활발히 진행 중이다. 이러한 집적화는 전체 모듈의 면적과 시스템의 경량화면에서 상당한 이점을 준다. 현재 Balun과 BPF, 이 두 소자의 집적에 대한 연구는 LTCC 공정 뿐 아니라 집적소자를 이용한 방법, MMIC 공정을 이용한 방법 등 여러 가지 연구가 활발히 진행 중이며 시중에 출시된 제품도 있다. 그 크기도 $2 \times 2.5\text{mm}^2$ 에서 $5 \times 10\text{mm}^2$ 까지 여러 가지 크기가 연구·사용되고 있다.

본 논문에서는 이 중에서 저온에서 세라믹과 금속의 동시 소성 방법을 이용하여 기판을 형성, 여러 가지 부품들을 기판에 임베디드함으로써 고집적화, 경박단소화, 고신뢰성을 이룰 수 있는 기술인 LTCC 공법을 활용한 Balun과 BPF의 집적화에 대해 연구하였다.

두 소자의 집적화를 위해 본 논문에서는 널리 응용되며 집적회로에도 적합한 Microstrip Three-line Balun[4]에서 변형된 2-line Coupler Balun을 응용하여 집적에 용이한 다층구조를 갖는 Balun 모형을 설계하였고[1]~[3], BPF 역시 집적에 용이한 Combline형 BPF를 응용하여 다층구조를 갖는 BPF를 설계하였다[5][6]. 최종적으로 Balun-BPF의 설계는 이렇게 각각 설계된 Balun과 BPF를 그림 1에서 보는 바와 같이 하나의 유전체 Chip에 같이 구현함으로써 완성을 하였다. 이렇게 설계된 Balun-BPF는 LTCC 공법을 이용하여 유전율 36, 2024사이즈의 One single dielectric body에 Balun과 BPF를 집적 할 수 있으므로 소형화와 경량화된 부품을 필요로 하는 Bluetooth module, Wireless LAN, 무선통신 시스템 등과 같은 다양한 분야의 모듈에 적용될 수 있다.

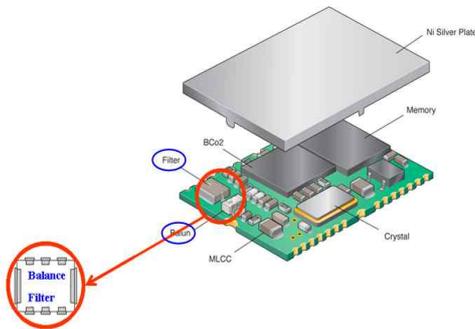


그림 1 Bluetooth Module에서의 Balun과 BPF의 집적화

2. BPF, Balun 설계 및 시뮬레이션

2.1 BPF 설계

(1) BPF 등가회로 및 시뮬레이션

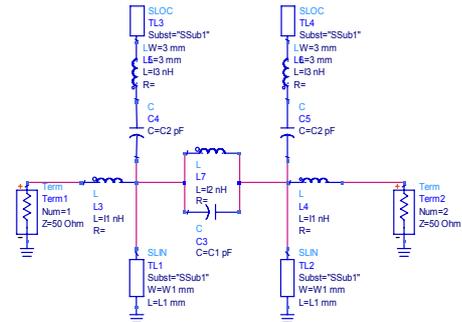


그림 2 설계된 BPF의 등가회로

본 논문에서 제안된 BPF는 comb-line Filter를 응용한 BPF로서 기본적인 회로는 그림 2에 보는 바와 같이 구성되었다[5][6]. 2개의 공진기로 구성된 기본적인 comb-line Filter 구조에 중심주파수 대역을 중심으로 앞과 뒤의 스킵트 특성을 향상시키기 위하여 공진기 사이와 각 공진기의 윗부분에 LC 공진부를 삽입하여 Notch를 구성하도록 하였다.

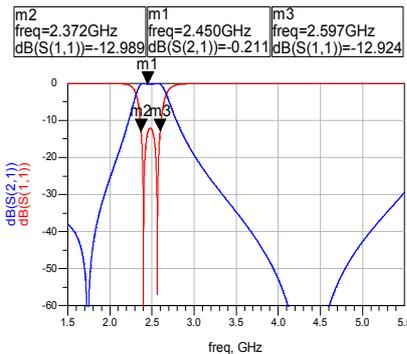
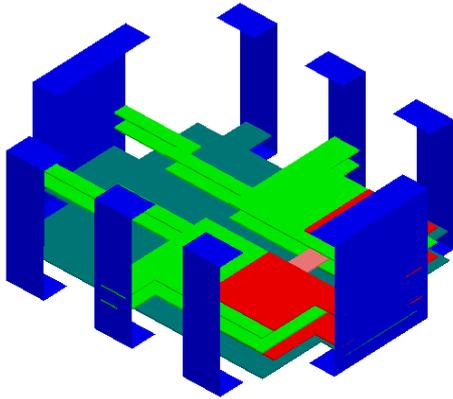


그림 3 설계된 BPF의 시뮬레이션 결과

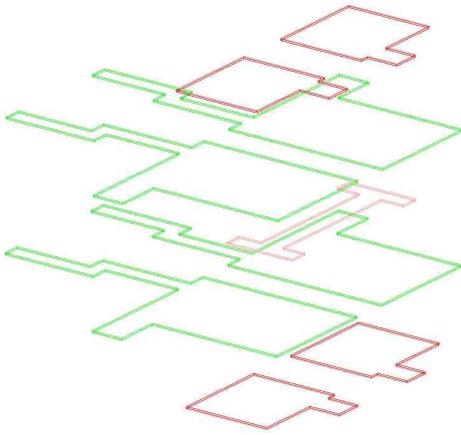
그림 3는 위에서 제안된 BPF 회로를 Agilent사의 ADS로 시뮬레이션한 S parameter 결과이다. 중심주파수 2.45GHz를 중심으로 대역폭은 200MHz정도 나왔고, 삽입손실은 1.3dB, 반사손실은 12.9dB이고, 회로에서 의도했듯이 삽입된 Notch로 인해 중심대역 각각 앞과 뒤에 공진점을 추가시켜서 전체적으

로 스킨트 특성이 개선되는 것을 알 수 있다.

(2) BPF 입체구조 및 시뮬레이션



(a) BPF의 전체적인 구조



(b) BPF 층 구조
그림 4 BPF의 3D 구조

BPF 등가회로를 구조화한 LTCC 모형을 그림 4에 나타내었다. 이 모형의 전체적인 구성을 보면, 우선 입력은 탭입력을 사용하였으며, 그 탭입력에 이어지는 기본적인 comb-line을 등가화한 공진부인 2개의 층구조가 있다. 그리고 그 공진층의 위·아래에 앞서 등가회로상에서 Notch를 형성시키기 위해 삽입하였던 공진부와 같은 패턴층이 각각 삽입되어 있으며, 마찬가지로 공진기 사이의 Notch 역시 공진층 사이에 I자 모양의 패턴을 삽입하여 구성시켰다.

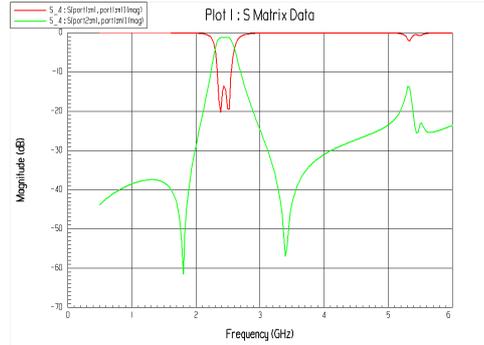
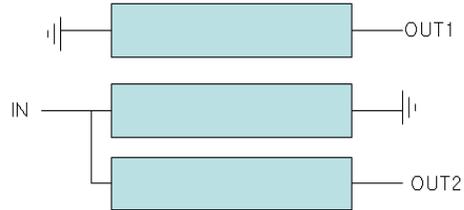


그림 5 BPF 구조체의 시뮬레이션 결과

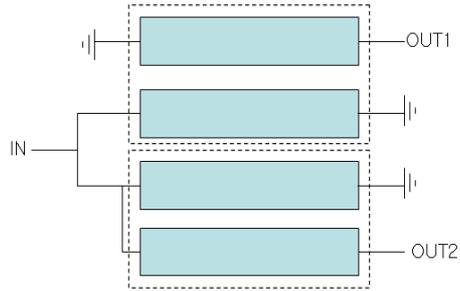
다음으로 그림 5는 위의 구조체를 Ansoft사의 HFSS를 이용하여 시뮬레이션한 S parameter 결과이다. 중심주파수 2.45GHz를 중심으로 대역폭은 100MHz이고, 삽입손실은 1.6dB, 반사손실은 15dB, 그리고 중심대역 앞·뒤에 회로에서 의도한 것과 같은 Notch에 의한 공진점도 생기는 것을 볼 수 있다.

2.2 Balun 설계

(1) Balun 등가회로 및 시뮬레이션



(a) Three-line Balun 등가회로



(b) 2-line couplers Balun
그림 6 Balun의 기본적인 등가회로

본 논문에서 응용한 Balun은 Three-line에서 변형된 2-line couplers Balun이다[1][2]. 이 Balun들에 대한 기본적인 등가회로를 그림 6에 나타내었다. 2-line couplers Balun은 Three-line Balun을 기본으로 하여 그것으로부터 중앙의 선로가 2개로 분리되어 전부 4개의 선로로 구성된 Balun이다. Three-line의 단점은 3개의 선로가 서로 Coupled line으로 구성이 되기 때문에 3개가 같이 종속적으로 연결이 되어야만 한다. 그러나 2-line couplers balun은 이러한 Three-line에서 중앙의 접지된 선로를 2개의 선로로 분리하면서 Balun을 전체적으로 2개의 부분으로 구성할 수 있도록 분리를 했다. 2개의 부분으로 나누어짐으로 인해 좀 더 쉽게 Balun을 유진체에 쉽게 구조적으로 설계할 수 있다. 이에 대한 등가회로는 그림 7에서 보는 바와 같이 구성이 된다.

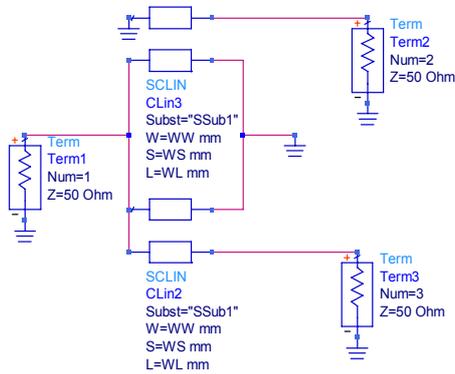
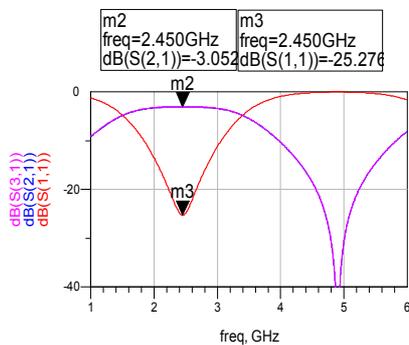
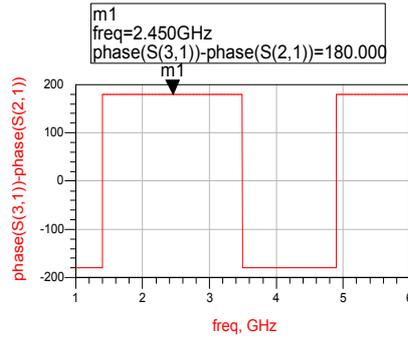


그림 7 2-line couplers Balun 시뮬레이션 회로

그림 7에서 보는 바와 같이 coupled line을 위아래로 각각 구성을 하여 각각의 중앙의 선로들을 통해서 입력이 들어가고 바깥쪽 coupled line을 통하여 각각 출력이 나가게 된다.



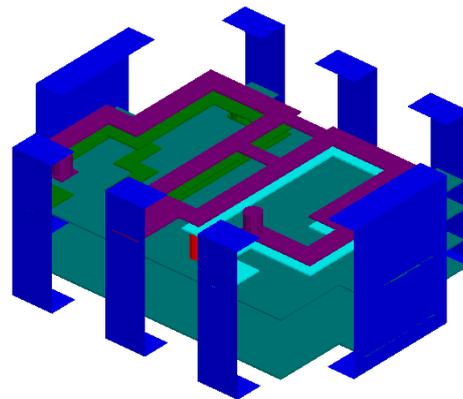
(a) S parameters



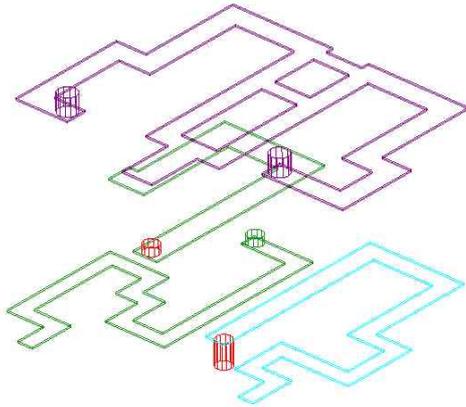
(b) Balanced 위상특성
그림 8 Balun 회로 시뮬레이션 결과

위의 그림 8은 그림 7의 등가회로에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 위의 결과에서 보듯이 설계한 Balun이 일반적인 Balun의 주요한 특성인 중에 하나인 Amplitude balance는 0.001dB로 출력간의 차이가 거의 없이 3.01dB씩 이상적으로 나뉘어져 각각의 출력 포트에 출력이 되고, 다른 특성인 위상특성을 살펴보면 출력 포트의 위상이 한쪽에서는 90도가 다른 한쪽에서는 -90도가 출력이 되어 전체적으로는 출력들 간의 위상차이가 180도가 된다. 따라서 출력 신호가 본 연구에서 원하는 이상적인 평형특성을 가진 신호가 됨을 알 수 있다.

(2) Balun 입체구조 및 시뮬레이션

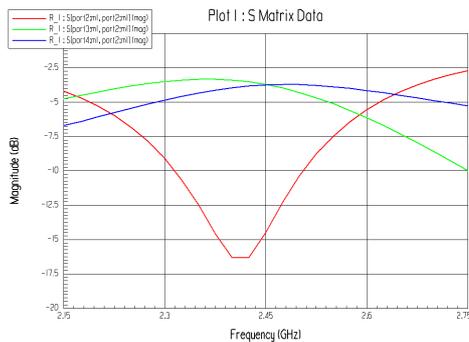


(a) Balun의 전체적인 구조

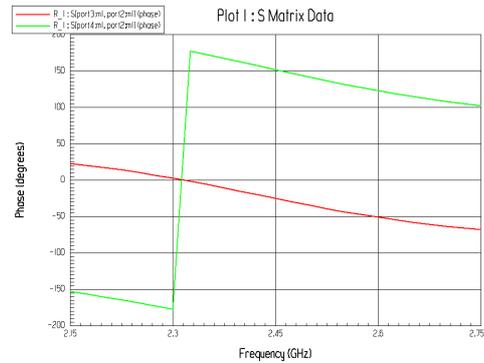


(b) Balun 층 구조
그림 9 Balun 3D 구조

위에서 설계한 Balun 등가회로를 토대로 구조화한 LTCC 3D 모형을 그림 9에 나타내었다. 맨 윗층의 선로는 등가회로 상에서 중앙의 접지에 연결된 2개의 선로를 등가적으로 구현한 것으로서 입력은 BPF의 출력과 같은 포트상의 via를 통해 연결시켜 BPF의 출력을 입력으로 받도록 하였고, 각각의 선로를 끝에 via를 통해서 바로 위층과 아래층의 접지와 연결시켜 회로상의 접지된 부분을 처리하였다. 그리고 등가회로 상에서 위의 접지에 한쪽 끝이 연결된 Coupled line은 위의 구조상에서는 오른쪽과 같은 형태로 마찬가지로 한쪽 끝을 via로 연결하여 접지시키고 나머지 끝은 하나의 출력 포트와 연결을 시켰다. 등가회로의 나머지 아래쪽 Coupled line도 같은 방식으로 한쪽은 다른 하나의 출력 포트와 연결하였고 입력은 coupled line을 구현하기 위하여 via로 입력부분을 연결하였다.



(a) S-Parameters



(b) Phase

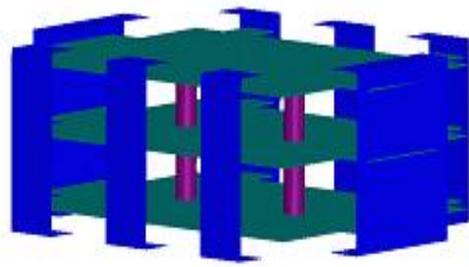
그림 10 Balun-BPF 시뮬레이션 결과

이렇게 구조화한 Balun을 HFSS를 이용하여 시뮬레이션한 결과를 그림 10에 나타내었다. 2.45GHz를 중심으로 100MHz 대역폭 내에서 삽입손실은 0.74 dB이고, 평형 출력간의 위상차는 177°~178°가 나왔다.

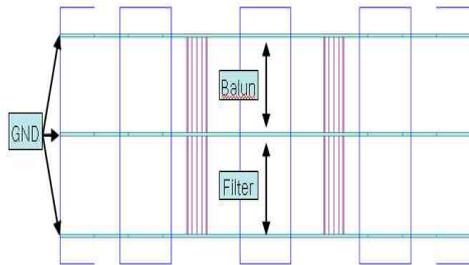
3. Balun-BPF 설계 및 시뮬레이션

3.1 유전체 Chip의 구조와 RWG Mode의 제거

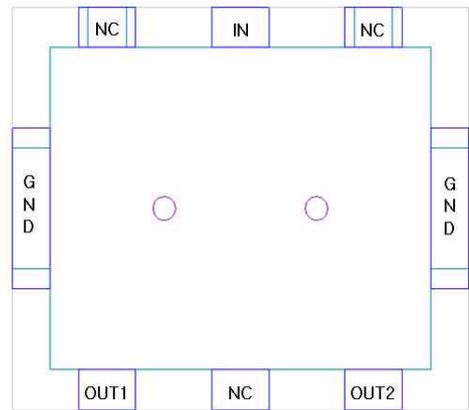
Filter와 Balun을 합쳐 Balun-BPF를 설계하기에 앞서 그 전에 유전체 구조에 대한 영향을 살펴볼 필요가 있다. 설계한 BPF와 Balun을 이용하여 Balun-BPF를 설계 시 회로와는 다르게 구조체 안에서는 BPF와 Balun이 서로 간섭을 일으켜 각각의 기능에 대해 방해받거나 성능이 안 좋아질 수가 있다. 그리고 또한 유전체 Chip의 모양이 직사각형 형태이므로 유전체가 Rectangular Waveguide처럼 동작을 하게 되어 뜻하지 않은 Rectangular Waveguide Mode가 발생을 하게 되어 Balun-BPF의 주파수 특성에 좋지 않은 영향을 끼칠 수 있다. 이러한 점들을 없애기 위하여 본 논문에서는 BPF와 Balun 사이에 접지된 층을 삽입을 하여 BPF와 Balun에서 나오는 갖가지 요소들을 접지층에서 흡수를 할 수 있게 하여 각각의 기능에 영향을 받지 않도록 하였다. 또한 Rectangular Waveguide Mode의 발생의 문제도 Waveguide Mode를 없애는 가장 기본적인 방법 중에 하나인 Rectangular Waveguide의 중심에 via를 삽입함으로 인해 해결 하였다[7]. 이러한 것들을 그림 11에 나타내었다.



(a) 전체적인 구조

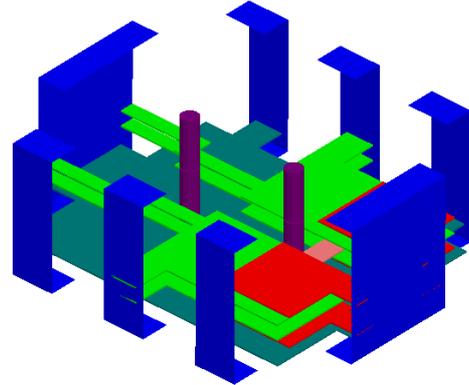


(b) 측면도

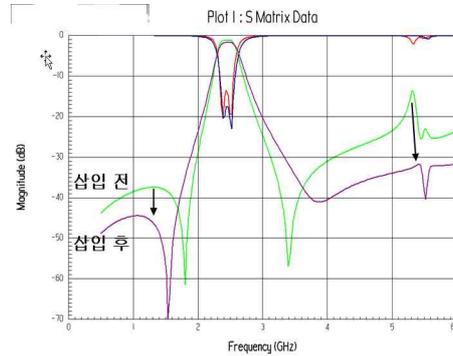


(c) 평면도 및 포트 구조
그림 11 유전체 Chip의 구조

그림 11의 (b)에서 보듯이 앞서 Balun과 BPF를 분리시키는 유전체의 중간에 있는 Ground 층만이 아니라 위·아래에도 접지층을 두어 나중에 Chip이 부착될 기판이나 기타 다른 것들로 인한 영향을 덜 받도록 고려를 해주었다. 그리고 그림에서 보이는 2개의 원형기둥은 앞서서 말한 Rectangular Waveguide Mode를 없애주는 역할을 하는 via이다. 이렇게 Balun-BPF의 성능을 향상시키는 접지층과 via를 삽입시킨 후 BPF 상에서의 효과를 시뮬레이션한 결과를 그림 12에 나타내었다.



(a) via를 삽입한 BPF 구조

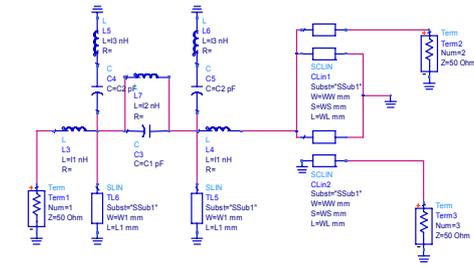


(b) via 삽입 전 · 후 BPF 시뮬레이션 결과 비교
그림 12 via 삽입 전 · 후 BPF 구조 및 시뮬레이션 결과 비교

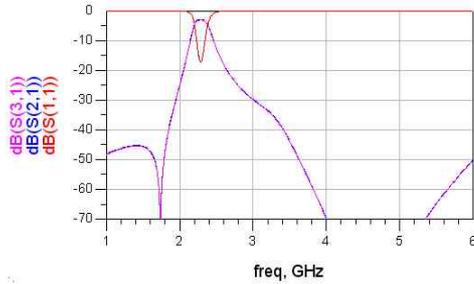
위의 그림에서 화살표의 이동에서 보듯이 시뮬레이션 결과 전체적으로 삽입손실과 통과 특성이 삽입 전인 그림 5의 필터의 특성보다 3~5dB정도 향상 되었다. 특히 Notch에 의해 공진이 형성되는 지점 앞·뒤 차단 주파수 영역에서 Rectangular Waveguide Mode에 의해 저지가 안 되고 Spurious 현상이 일어나던 대역을 저지해주고 있다.

3.2 Balun-BPF 시뮬레이션

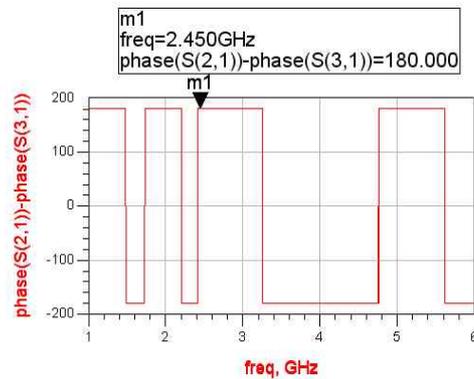
전체적인 Balun-BPF의 설계는 앞서 각각 설계되었던 Balun과 BPF를 같이 연결하여서 구현을 하였다. Balun과 BPF를 연결하여 설계한 Balun-BPF 회로도를 그림 13 (a)에 나타내었다. Balun-BPF의 회로는 단순히 Balun 회로상의 입력 포트와 BPF 회로상의 출력 포트를 연결함으로써 쉽게 구성을 하여 전체적으로는 BPF의 입력이 Balun-BPF의 입력이 되고 Balun의 각각의 출력이 Balun-BPF의 평형 출력이 된다.



(a) Balun-BPF 회로



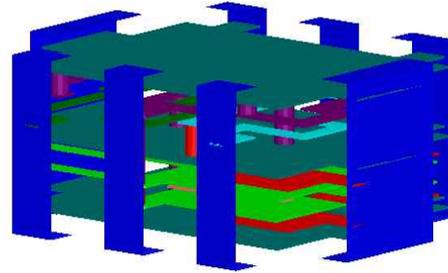
(b) S parameters



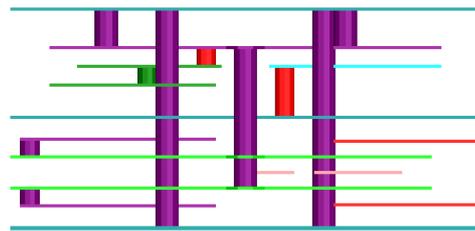
(c) Phase

그림 13 Balun-BPF 회로 및 시뮬레이션

회로 시뮬레이션 결과에서 보듯이 전반적으로 Filter의 특성들을 만족하는 것을 볼 수 있다. 중심 주파수 2.45GHz를 중심으로 대역폭 100MHz 내에서 반사손실은 14dB정도 나왔으며, 삽입손실은 3.05dB로 나왔다. 삽입손실이 3dB이상으로 이처럼 크게 나온 것은 Balun-BPF가 출력 포트를 2개 가지는 Coupler와 같은 입·출력 구조이므로 가장 이상적인 출력이라도 3dB로 절반씩 나누어져 출력이 되기 때문이다. 다음으로 Balun-BPF의 Balun의 특성을 살펴보면 Amplitude balance는 0.0001dB이하로 거의 0에 가깝게 나왔고, 평형 출력간의 위상 차이는 전 대역에서 180도나 -180도로 이상적으로 나옴을 확인하였다.



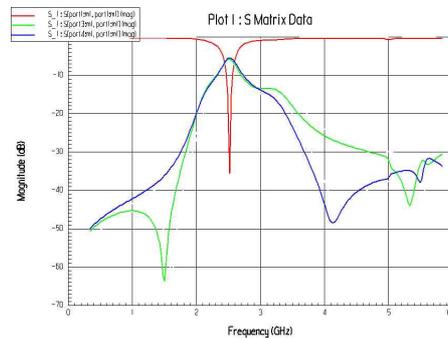
(a) 전체 구조



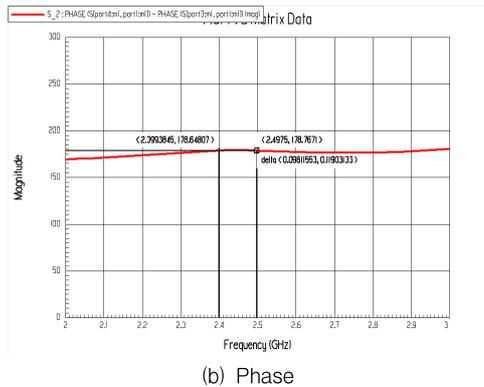
(b) 내부 측면도

그림 14 Balun-BPF 구조

Balun-BPF의 구조 역시 각각 Balun의 구조를 위층에 BPF의 구조를 아래층으로 하여 유전체 Chip 안 각각의 층에 구현을 함으로써 설계하였다. 그 전체적인 구조의 모양은 그림 14에서 보는 것과 같다. 앞서서 제안한 것과 같이 Balun과 BPF는 접지층으로 분리되어 각각의 기능이 작동하도록 하였으며 Balun의 입력 포트와 BPF의 출력 포트를 Chip 내에서 하나의 via로 같이 연결이 된다. 그러므로 인해 BPF의 출력이 Balun의 입력으로 인가되어 전체적으로 하나의 Balun-BPF처럼 동작이 되도록 설계·구현을 하였다.



(a) S parameters



(b) Phase
그림 15 Balun-BPF 시뮬레이션

그림 15는 구조체를 HFSS를 이용하여 시뮬레이션한 결과를 나타낸 것이다. 그림 15 (a)를 보면 중심주파수 2.45GHz를 중심으로 대역폭 100MHz 내에서 반사손실은 14dB정도 나왔으며, 삽입손실은 4.8 dB로 나왔고, Amplitude balance는 0.4dB로 두 출력 포트간의 출력차가 조금 있었다. 그리고 다음으로 위상특성은 그림 15 (b)를 보듯이 대역폭 내에서 178°~179°로 원하는 Balun의 위상특성을 충분히 만족을 하였다.

4. 결론

본 논문에서는 지금까지 각각의 부분으로 구성이 되어있던 Balun과 BPF를 One single dielectric body에 집적시켰다. 이를 위해 각각 Balun은 2-line Couplers Balun을 BPF는 comb-line Filter를 채택하였고 이를 응용하여 Balun-BPF를 설계하였다. 이렇게 설계된 Balun-BPF의 시뮬레이션 결과는 2.45GHz를 중심으로 전체 대역폭 100MHz 내에서 반사손실 14dB, 삽입손실 4.8dB, 출력 포트간의 Amplitude balance는 0.4dB나왔으며, 위상차는 대역 내에 전체적으로 178°~178°로 180°에 근접하는 수치들이 나왔다. 이상으로 설계된 Balun-BPF는 따로 구성이 되어왔던 Balun과 BPF를 하나의 Chip으로 만들므로 인해 소형, 경량화를 요구하는 무선 통신 기기나 시스템에 유용하게 적용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Choonsik Cho, "A New Design Procedure for Single-Layer and Two-Layer Three-Line Baluns", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 46, No. 12, 1998.
- [2] 이병화, 박동석, 박상수, "새로운 3-라인 발룬

설계", *한국전자과학회논문지* 제 14권 제 7호, pp750-754, 2003.

- [3] Samir F. Mahmoud, Philip Pieters and Eric Beyne, "Analysis and Design of Two Types of Microwave Baluns", *The 12th International Conference on Microelectronics*, 2000.
- [4] C. M. Tsai and K.C. Gupta, "CAD procedures for planar re-entrant type couplers and three-line baluns.", in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. dig.*, pp. 1013-1016, 1993.
- [5] 김준연, 손미현, 이성수, 김용준, "다층 인쇄 회로기판에 집적된 Compline 구조의 2.4GHz 대역통과필터", *대한 전기학회 추계학술대회* pp35-37, 2001.
- [6] Dal Ahn, J. S. Lim, I. S. Kim, Y. K. Shin, K. Y. Kwang, "Design of 2-pole Band Pass Filtler Using Closed Loop Resonator and Coupled Lines", *IEEE MTT-S, vol.3*, pp 1643~1646, June 1996.
- [7] David M. Pozar, "Microwave Engineering, second edition", *john wiley & sons, INC.*, pp313-317, 1998.