THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2012 Aug.; 23(8), 958～966.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2012.23.8.958
ISSN 1226-3133 (Print)

LTCC 기술을 이용한 Bluetooth/WiFi 이중 모드 무선 전단부 모듈 구현

A Bluetooth/WiFi Dual-Mode RF Front-End Module Using LTCC Technology

함범철 · 유종인* · 김준철* · 김동수* · 박영철

Beomcheol Ham · Jong In Ryu* · Jun Chul Kim* · Dongsu Kim* · Youngcheol Park

요 약

본 논문에서는 저온 동시 소성 세라믹(Low Temperature Co-fired Ceramic: LTCC) 기술을 사용하여 블루투스와 WiFi에서 동작하는 무선 전단부 모듈(RF Front-end Module)을 설계, 구현하였다. 무선 전단부 모듈은 2.4/5 GHz 대역 다이플렉서와 2 GHz 대역 발룬, 5 GHz 대역 발룬, 그리고 송·수신용 SPDT 스위치와 SP3T 스위치로 구성되어 있다. LTCC의 설계에 있어, 적층 구조의 특성으로 인해 발생되는 예상 기생 성분은 시뮬레이션을 활용하여 설계하였다. 제작한 무선 전단부 모듈은 내부 접지(inner ground) 3개 층을 포함하여 총 13개 패턴으로 구성되었으며, 무선 전단부 모듈의 크기는 3.0 mm×3.7 mm×0.66 mm이다.

Abstract

This paper presents a compact bluetooth/WiFi dual-mode dual-band RF front-end module(FEM) is realized by low temperature co-fired ceramic(LTCC) technology. The proposed RF front-end module consists of a diplexer, baluns in the LTCC substrate, and an SPDT switch, an SP3T switch on the LTCC substrate. In order to reduce the module size and increase integration level, the proposed diplexer and balun are designed using LC lumped elements. The parasitic elements caused by coupling effect between metal pattern layers and ground plane layer are considered during the design. The fabricated dual-mode RF front-end module has 13 pattern layers including three inner ground layers and it occupies less than 3.0 mm×3.7 mm×0.66 mm.

Key words : LTCC, Diplexer, Balun, Front-end Module

Ⅰ. 서 론

최근 들어 무선 통신 시스템 기술은 매우 빠르게 발전되어 왔다. 특히, GPS, 블루투스, WiFi 등을 수용하기 위해서 다중 밴드, 다중 모드에서의 동작이 요구되어지고 있으며, 이를 위해서 무선 통신 시스템의 소형화와 고집적화, 모듈화는 상당히 중요하다.

무선 전단부 모듈의 소형화와 고집적화를 위한 기술 중에서도 LTCC 기술을 사용하여 무선 전단부 모듈을 구현한 사례가 많이 보고되었으며, LTCC 기술은 적층 구조의 설계와 SiP(System in Package) 구조에 적합하여, 이 기술을 이용한 무선 전단부 모듈

한국외국어대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Hankook University of Foreign Studies)
*전자부품연구원 시스템패키징센터(Packaging Research Center, Korea Electronics Technology Institute)
· Manuscript received April 18, 2012 ; Revised June 26, 2012 ; Accepted July 20, 2012. (ID No. 20120418-046)
· Corresponding Author : Youngcheol Park (e-mail : ycpark@hufs.ac.kr)

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. All Rights Reserved.

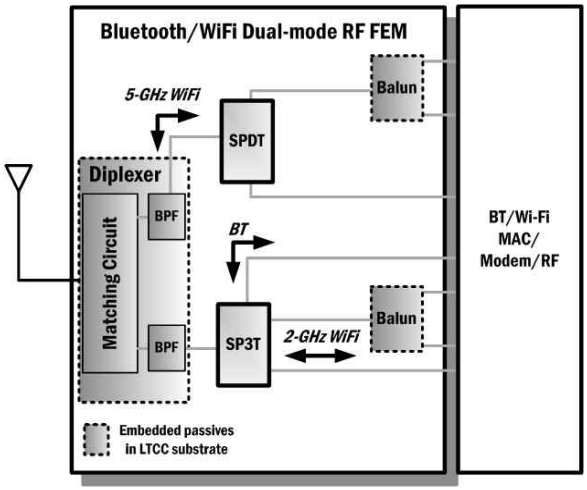


그림 1. 제안된 이중 모드 무선 전단부 모듈 구조
Fig. 1. Block diagram of the proposed dual-mode RF FEM.

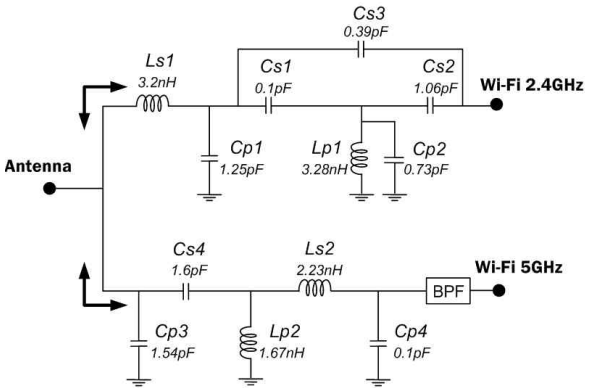
연구가 활발히 이루어지고 있다[1],[2].

본 논문에서는 LTCC 기술을 이용하여 블루투스와 Wi-Fi에서 동작하는 이중 모드 무선 전단부 모듈을 구현하였다. LTCC 기술은 적층 구조로서 커패시터와 인덕터를 내부에 구현할 수 있는 매우 좋은 기술이라는 장점이 있지만, 적층 구조로 인한 특성으로 내부 접지 층과 신호 선로 간의 커플링으로 인한 기생 성분이 필연적으로 발생하게 되는 단점이 있으므로, 2.4/5 GHz 대역 다이플렉서와 2.4/5 GHz 대역 발룬을 설계할 때, 이러한 기생 성분까지 고려하여 설계하였고, 구현한 무선 전단부 모듈을 그림 1에 나타내었다.

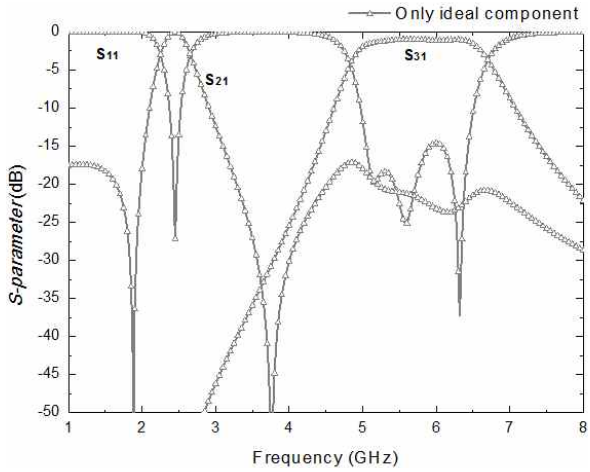
구현한 무선 전단부 모듈은 2.4/5 GHz 다이플렉서와 2.4/5 GHz 발룬, 그리고 송·수신용 SPDT 스위치와 SP3T 스위치로 구성된다. 제작된 무선 전단부 모듈은 3개의 내부 접지 패턴을 포함하여 총 13개 패턴으로 구성된다.

Ⅱ. 기생 성분을 이용한 수동 소자 설계 및 최적화

다이플렉서[3]와 발룬 등 수동 소자들을 소형화하여 제작하기 위해서는 전송 선로를 이용하여 설계하기 보다는 주로 인덕터와 커패시터 소자만을 사용하여 설계한다. 그리고 적층 구조로 제작하는 과정에서 접지와 소자들 사이의 기생 성분이 필연적으로



(a) 회로도
(a) Schematic



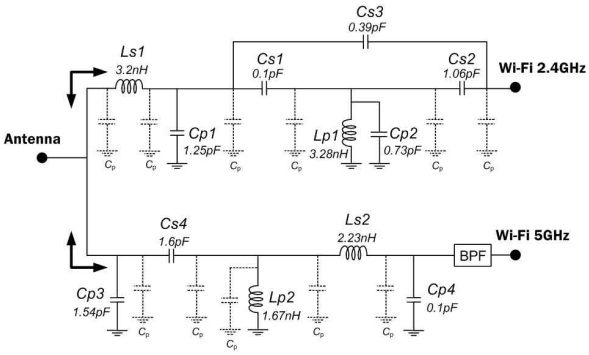
(b) 시뮬레이션 결과
(b) Simulation result

그림 2. 기생 성분을 고려하지 않은 2.4/5 GHz 밴드 다이플렉서
Fig. 2. 2.4/5 GHz band diplexer without parasitic components.

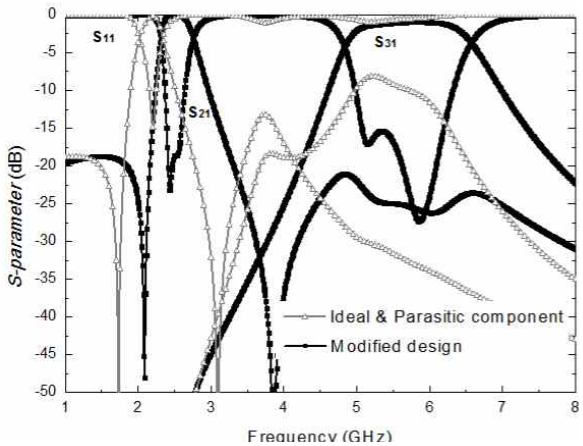
발생한다. 일반적으로 기생 성분은 수동 소자의 특성을 열화를 일으키지만, 기생 성분의 영향이 무조건적으로 특성을 열화시키는 것은 아니다. 기생 성분을 고려하여 설계함으로써 최적화시킬 수도 있다.

그 예로 그림 2에 기생 성분을 고려하지 않고 이상적인 소자만을 이용한 다이플렉서의 회로도를 나타내었다. 여기서, 5 GHz 경로의 BPF는 기 설계된 filter의 *S*-parameter 값을 활용하였다.

그러나 위 그림의 회로 시뮬레이션 결과와 layout을 감안한 회로의 결과는 다소 간의 차이가 난다. 이는 적층 구조로 인해 소자들 간의 거리, 접지와 소자들 사이의 커플링, 레이어 층간의 커패시터 등 기생 성분들이 특성에 영향을 주기 때문이다. 이의 비교



(a) 회로도
(a) Schematic



(b) 시뮬레이션 결과
(b) Simulation result

그림 3. 기생 성분을 추가한 2.4/5 GHz band 다이플렉서
Fig. 3. 2.4/5 GHz band diplexer with parasitic components.

를 위하여 그림 3에는 이상적인 소자 만을 사용한 다이플렉서에 기생 성분을 추가한 시뮬레이션 결과와 기생 성분을 고려하여 재설계 후 시뮬레이션 수행 결과를 비교하여 나타내었다.

기생 성분을 고려하지 않고 설계한 다이플렉서의 회로에 기생 성분을 추가하게 되면 그림 3에서 보는 것처럼 2.4 GHz 대역은 대역이 이동이 되며, 5 GHz 대역의 특성은 완전히 틀어지게 된다. 적층 구조로 제작하면서 Shunt 커패시터 성분이 기생 성분으로 존재하게 되고, 그것으로 인하여 소자들의 용량 값도 변화하게 된다. 기생 성분을 고려하여 최종적으로 설계된 다이플렉서 회로도를 그림 4에 나타내었고, 그 결과를 그림 3에서 굵은 실선으로 나타내었다. 기생 성분을 고려하지 않고 설계한 다이플렉서와 용량 값을 비교하였다. 기생 성분을 포함하여 설계를 함으로써, 기생 성분의 영향으로 WiFi 2.4 GHz 대역의 경우, L_{s1}의 용량 값이 3.2 nH에서 2.76 nH로 줄어들었으며, C_{s1}과 C_{s3}의 용량 값도 기생 성분을 포함함으로써 용량 값을 대폭 줄일 수 있었다. WiFi 5 GHz 대역의 경우, C_{s4}의 용량 값은 1.6 pF에서 1.7 pF, L_{p2}의 용량 값은 1.67 nH에서 0.86 nH, L_{s2}의 용량 값은 2.23 nH에서 1.87 nH로 변화한 것을 볼 수 있다. 기생 성분을 고려함으로써 소자의 용량 값을 줄여 구현을 할 수 있었고, C_{p2}와 C_{p3}, C_{p4}의 경우는 기생 성분을 이용하여 통합함으로써 제거할 수 있었다. 기생 성분을 고려하여 설계함으로써, 소자들의 용량 값을 줄이거나, 제외함으로써 소형화하여 구현하는 것에 효과적으로 작용한다는 것을 예상할 수 있다. 이러한 내용을 바탕으로 본 논문에서 사용되는 수동 소자들을 구현하였다.

Ⅲ. 다이플렉서 설계 및 구현

2.4/5 GHz 대역 다이플렉서를 설계, 제작하였으며, 2.4 GHz은 삽입 손실을 최소화하기 위해서 BPF를 사용하지 않고, 인덕터와 커패시터 소자 만을 사용하여 구현하였으며, 그림 4에 나타내었다. 다이플렉서의 최적화를 위한 정합 방법에는 개방 정합(open matching)과 공액 정합(conjugate matching)이 있다. 개방 정합은 LTCC의 적층 구조로 인해 발생하는 기생 성분으로 인해 상대 대역의 임피던스가 개방 위치에 위치하는 것이 어렵다.

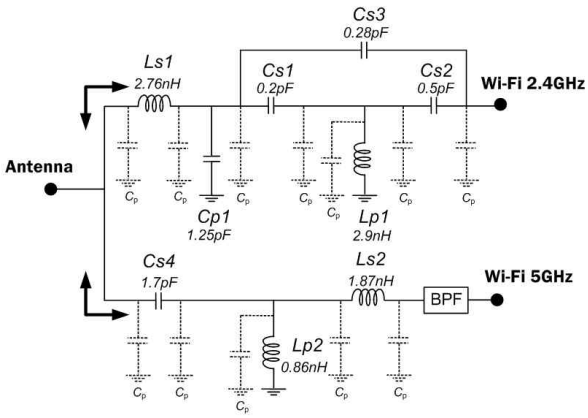


그림 4. 2.4/5 GHz band 다이플렉서 회로도
Fig. 4. Schematic of 2.4/5 GHz band diplexer.

공액 정합은 상대 대역의 특성 임피던스를 50 Ω에 최대한 가깝게 하면서 각 대역에서의 허수 값은 서로 상쇄가 되도록 하는 정합으로 개방 정합에 대비하여 구현하기가 수월하고, 회로의 작은 손실과 상대 대역에서의 감쇄 특성을 좋게 하는 장점이 있다.

이러한 이유로 공액 정합을 적용하여 2.4/5 GHz 대역 다이플렉서를 구현하였다. 공액 정합을 위해서 2.4/5 GHz 대역의 어드미턴스를 식 (1)에 나타내었다.

$$\begin{aligned} Y_{2G\,band} &= G_{2G\,band} + jB_{2G\,band} \\ Y_{5G\,band} &= G_{5G\,band} + jB_{5G\,band} \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)에서 G는 컨덕턴스, B는 서셉턴스이다. 공액 정합을 위해서는 2.4/5 GHz 대역의 서셉턴스 값이 서로 상쇄되어 두 값의 합이 0이 되는 것이 가장 이상적이다. 이를 식 (2)에 나타내었다.

$$B_{2G\,band} + B_{5G\,band} \approx 0 \quad (2)$$

식 (1), (2)를 통하여 공액 정합을 사용하여 설계한 다이플렉서의 3D 구조를 그림 5에 나타내었다.

다이플렉서는 총 7개의 패턴으로 구현하였으며, 구현한 다이플렉서의 2.4/5 GHz 대역의 삽입 손실은 각각 최대 2.27 dB, 1.73 dB 이하, 반사 손실은 최대 12.7 dB, 14.15 dB 이하의 특성을 가지며, 그림 6에 시뮬레이션 결과와 비교하여 나타냈다.

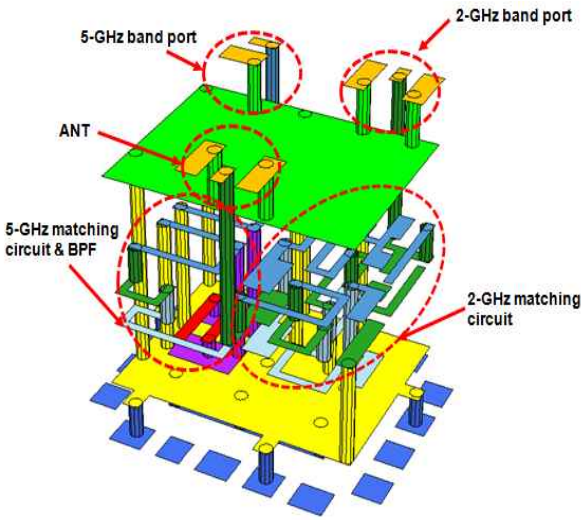


그림 5. 다이플렉서의 3D 구조
Fig. 5. Three-dimensional view of the diplexer.

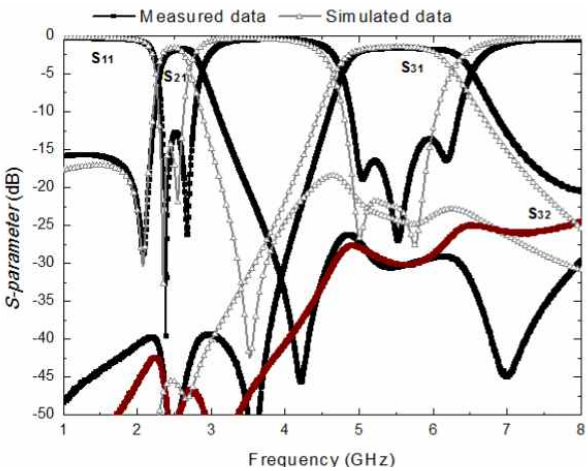
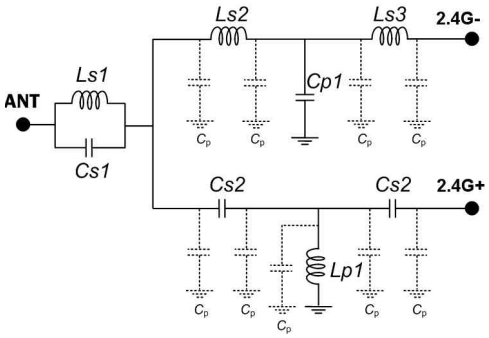


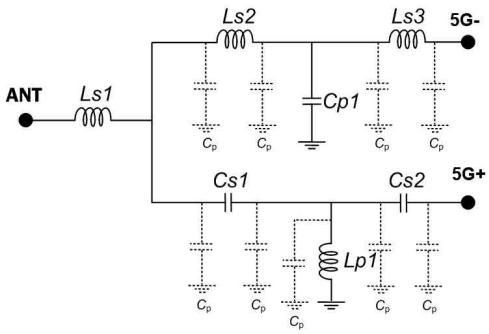
그림 6. 다이플렉서의 시뮬레이션 특성과 측정된 특성 비교
Fig. 6. Simulated and measured performance of diplexer.

Ⅳ. 발룬 설계 및 구현

일반적으로 고주파 대역에서의 발룬은 분포 소자, 혹은 집중 소자를 사용하여 구현되고, 특성의 안정



(a) 2.4 GHz 발룬
(a) 2.4 GHz balun



(b) 5 GHz 발룬
(b) 5 GHz balun

그림 7. 회로도
Fig. 7. Schematic.

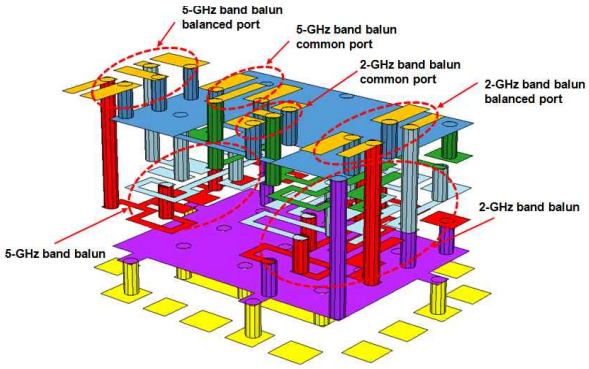
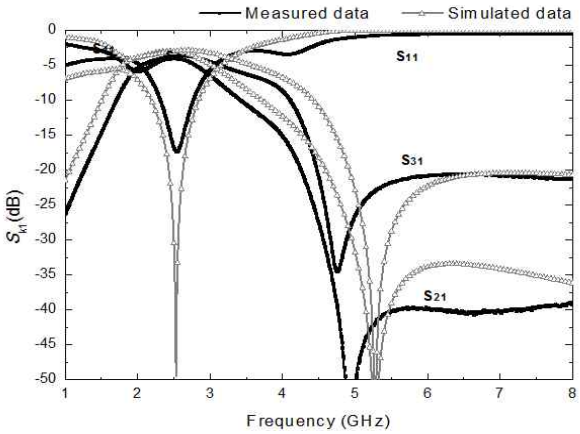
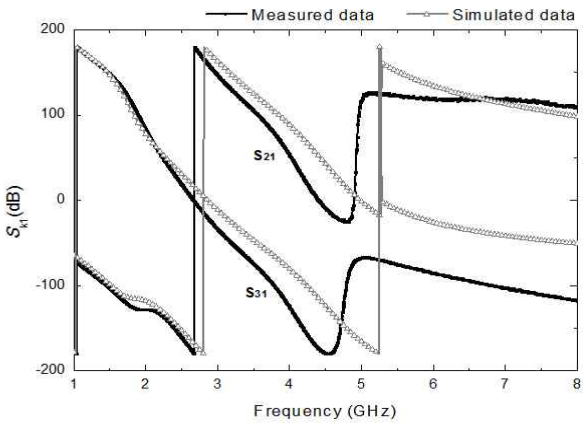


그림 8. 2.4/5 GHz 발룬의 3D 구조
Fig. 8. Three-dimensional view of the 2.4/5 GHz balun.



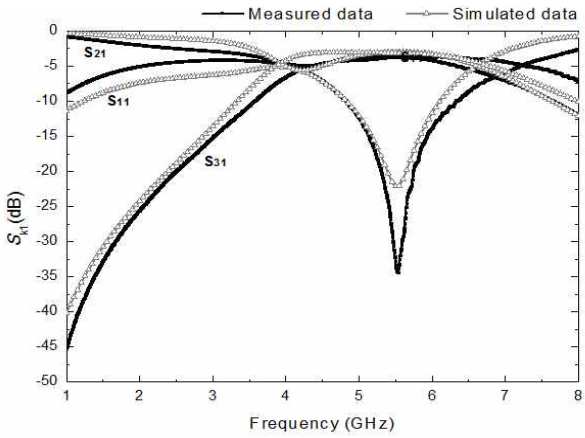
(a) 발란스 특성
(a) Amplitude imbalance characteristic



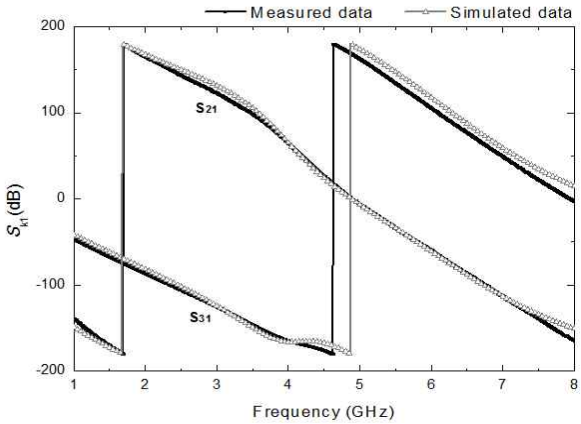
(b) 위상 특성
(b) Phase difference characteristic

그림 9. 2.4 GHz 발룬
Fig. 9. 2.4 GHz balun.

화를 위해서 전송 선로로 설계되어진다[4]. 이와 같이 전송 선로로 구현한 소자들은 주파수에 따른 영향을 최소화 하여 안정성이 뛰어나다는 장점이 있지만,



(a) 발란스 특성
(a) Amplitude imbalance characteristic



(b) 위상 특성
(b) Phase difference characteristic

그림 10. 5 GHz 발룬
Fig. 10. 5 GHz balun.

인덕터와 커패시터 소자를 사용하여 구현하는 것보다 상대적으로 많은 공간을 필요로 하는 단점이 있다. 본 논문에서는 무선 전단부 모듈의 소형화를 위해 2.4 GHz 대역 발룬과 5 GHz 대역 발룬을 모두 인덕터와 커패시터 소자를 사용하여 설계하였다[2]. 설계한 2.4/5 GHz 대역 발룬의 회로도를 그림 7에 나타내었다.

2.4 GHz 대역 발룬은 매칭 회로 앞단에 인덕터와 커패시터 공진기를 사용하여 5 GHz 대역의 발룬과의 상대 대역 감쇄 특성을 향상시켰으며, 2.4/5 GHz 대역의 발룬은 총 5개 패턴을 사용하였고, 설계한 두 발룬의 3D 구조를 그림 8에 나타내었다.

구현한 2.4/5 GHz 대역 발룬의 측정 결과, 삽입 손실은 각각 최대 4.06 dB, 4.0 dB 이하, 반사 손실은

각각 최대 13.0 dB, 15.4 dB 이하의 특성을 가진다. 또한, imbalance 특성은 2.4/5 GHz 대역에서 각각 최대 0.32 dB, 0.45 dB이며, 위상 특성은 각각 약 180.2 ~179.2°, 170~182°의 특성을 가진다. 구현한 발룬의 측정 결과를 시뮬레이션 결과와 비교하여 그림 9와 그림 10에 나타내었다.

V. 무선 전단부 모듈의 설계 및 구현

본 논문에서 제안한 무선 전단부 모듈은 크기의 최소화를 위해서 2.4/5 GHz 대역 다이플렉서와 2.4/5 GHz 대역 발룬을 집중 소자를 사용하여 설계하였다. 주파수 스위칭을 위하여 해당 대역에서 삽입 손실 0.55 dB를 가지는 상용 SPDT, SP3T 스위치(NJG-16 시리즈)를 사용하였다. 각 스위치에 사용되는 DC Blocking 커패시터의 경우 모두 LTCC 기판에 실장하였다. 다이플렉서는 두 번째와 세 번째 내부 접지 사이에 위치하며, 2.4/5 GHz 대역 발룬은 첫 번째와 두 번째 내부 접지 사이에 위치시켰다. 제작된 무선 전단부 모듈과 3D 구조를 그림 11에 나타내었고, 그림 12에 제작된 무선 전단부 모듈을 나타내었다.

모듈을 구성하는 수동 소자들을 개별적으로 설계, 제작하여 특성을 확인하는 검증절차를 거친 후 모듈에 내장시킨다. 다이플렉서와 발룬을 제작하여 특성을 측정한 결과, 우수한 특성을 가지는 것을 확인하였고 모듈화 하였다. 모듈을 측정한 결과, 5 GHz 대역 발룬 특성이 틀어지는 현상이 발생하였다. 원인 분석 결과, 모듈을 구성하기 위해 추가되는 패드들, 수동 소자 간의 연결, via 연결 등이 전기적 특성에 영향을 미치는 것을 실험적으로 확인하였고, 집중 소자 만을 사용하여 구현하였기 때문에, 주파수가 올라가면서 민감도가 올라가는 것도 영향을 미치는 것이라 판단하였고, 문제점을 보완하기 위해 주변 소자들끼리의 커플링 및 기생 성분의 분석을 통해 모듈에 최적화 성능에 부합하도록 재설계하였다.

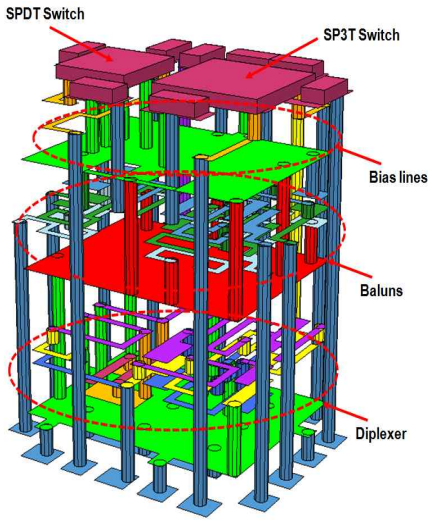
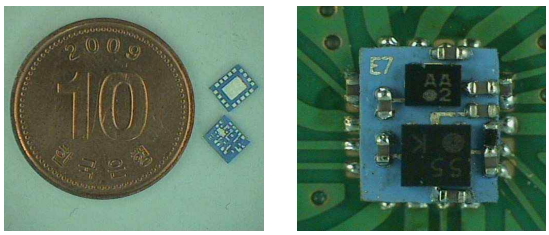


그림 11. 제안된 무선 전단부 모듈의 3D 구조
Fig. 11. Three-dimensional view of the proposed RF FEM.



(a) LTCC 기판 (a LTCC substrate)
(b) 모듈의 전면 (b) Top view

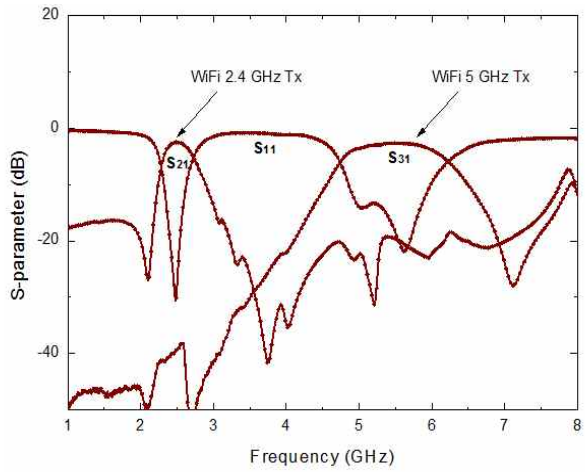
그림 12. 제작된 무선 전단부 모듈
Fig. 12. Fabricated RF FEM.

표 1에는 무선 전단부 모듈의 측정 결과를 정리하여 나타냈다. 또한 2.4 GHz WiFi 대역 수신 단 발란스 특성의 경우 2.4/5 GHz WiFi 대역에서 각각 1.3 dB, 0.5 dB 이하, 위상 특성은 각각 약 171.9~172.2°, 181.3~195.8°를 나타냈다. 더불어, 두 개의 무선 전단부 모듈을 제작하여 특성 변화 정도를 확인한 결과, 최대 약 0.2 dB의 오차 범위를 가짐으로써 어느 정도 안정적인 설계가 이루어졌음을 확인할 수 있었다.

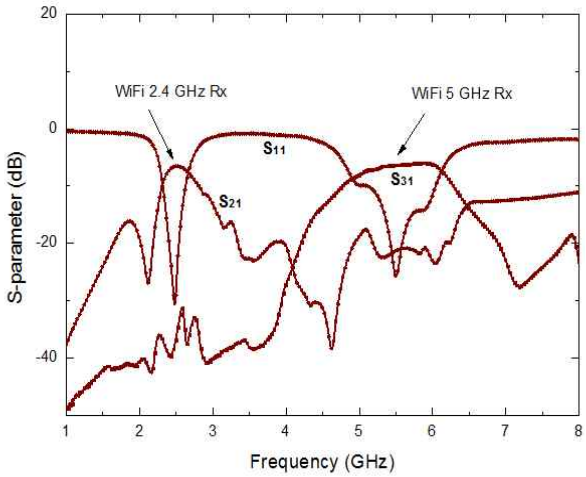
표 2에 이중 모드 무선 전단부의 크기를 비교하여 나타내었다. 표에서 나타나는 바와 같이 본 논문에

표 1. 이중 모드 무선 전단부 모듈의 성능
Table 1. Performance of the dual-mode RF front-end module.

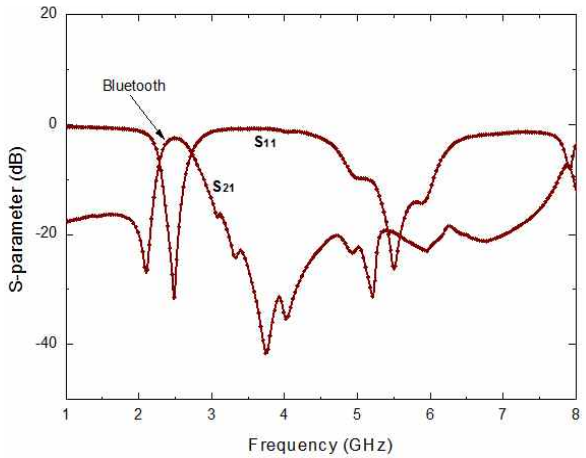
측정 경로		최대 반사 손실(dB)		최대 삽입 손실(dB)		비고
		2.4 GHz	5 GHz	2.4 GHz	5 GHz	
2.4 GHz/ 5 GHz	송신	19.6	13.3	3.24	3.16	그림 13 (1)
	수신	19.1	10.3	7.32	7.17	그림 13 (2)
2.4 GHz	BT	19.3	-	3.1	-	그림 13 (3)



(a) 2.4/5 GHz 대역 송신단
(a) Insertion and return losses of 2.4/5 GHz band Tx path



(b) 2.4/5 GHz 대역 수신단
(b) Insertion and return losses of 2.4/5 GHz band Rx path



(c) 블루투스 대역
(c) Bluetooth path

그림 13. 무선 전단부 모듈의 측정 결과
Fig. 13. Measured result of RF FEM.

표 2. 2G/5G 대역 이중 모드 무선전단부 모듈의 비교
Table 2. Comparison of dual-mode RF front-end module.

	크기(mm)	Max. I.L @ 2.4 GHz (dB)	비고
상용 FEM[5]	4×4×0.45	1.8	SW+AMP +Balun
상용 FEM[6]	5×5×0.9	-	Diplexer+SW +AMP
상용 FEM[7]	4×4×0.55	4.5[1]	SW+AMP
본 논문	3×3.7×0.66	4.32[2]	Diplexer+SW +Balun

[1]: Rx bypass mode 기준
[2]: 발룬 변환 효과 보상 후 결과

서 제안된 구조의 모듈은 상용 모듈 대비 대등한 수준의 크기를 가짐을 알 수 있다. 또한, 모듈의 삽입 손실의 경우 전단부에서의 발룬 변환 손실 3 dB를 감안하면 4.32 dB로서, 발룬이나 다이플렉서가 제외된 상용 품과 비교하여도 대등한 성능을 나타낸다고 할 수 있다.

Ⅵ. 결 론

본 논문에서는 블루투스와 WiFi에서 동작하는 이중 모드 무선 전단부 모듈을 설계하였고, LTCC 기술을 사용하여 기생 성분까지 고려하여 설계, 제작하였다. 무선 전단부 모듈을 구성하는 2.4/5 GHz 대역 다이플렉서와 2.4/5 GHz 발룬은 낮은 삽입 손실과 반사 손실을 가졌으며, 완성된 무선 전단부 모듈의 측정 결과, 각 대역에서의 삽입 손실과 반사 손실, 그리고 상대 대역에서의 감쇄 특성 모두 우수한 특성을 나타내었다. 구현한 무선 전단부 모듈의 크기는 3.0 mm×3.7 mm×0.66 mm으로 발룬이나 다이플렉서가 내장되지 않은 상용 무선 전단부와 크기를 비교하여도 매우 우수한 수준이다. 따라서, 본 연구는 무선 전단부 모듈의 소형화 및 LTCC기판을 활용 한 집적화 기술수준 향상에 기여할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] D. H. Kim, D. Kim, J. C. Kim, J. C. Park, and C.

D. Park, "A novel integrated dual-mode RF front-end module for Wi-Fi and bluetooth applications", *2011 EEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 1-4, Jun. 2011.

[2] D. Kim, D. H. Kim, J. I. Ryu, C. D. Park, C. S. Kim, I. S. Song, and J. C. Kim, "A compact WiMAX diplexer module with LTCC and FBAR technologies", *Proc. 39th Eur. Microw. Conf.*, vol. 1, pp. 567-570, Sep. 2009.

[3] Andriy Yatsenko, Denys Orlenko, Sergiy Sakhnenko, Georgiy Sevskiy, and Patric Heide, "A small-size high-rejection LTCC diplexer for WLAN applications based on a new dual-band bandpass filter", *IEEE/MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 2113-2116, Jun. 2007.

[4] D. Staiculescu, N. Bushyager, A. Obatoyinbo, L. J. Martin, and M. M. Tentzeris, "Design and optimization of 3-D compact stripline and microstrip bluetooth/WLAN balun architectures using the design of experiments technique", *IEEE Trans.*, vol. 53, pp. 1805-1812, May 2005.

[5] http://www.rfmd.com/CS/Documents/RF3688DS.pdf

[6] http://www.rfmd.com/CS/Documents/RF5288DS.pdf

[7] http://www.anadigics.com/products/view/awl9966

함 범 철

2010년 2월: 한국외국어대학교 전자공학과 (공학사)
2010년 3월~현재: 한국외국어대학교 전자정보공학과 석사과정
2011년 5월~현재: 전자부품연구원 위촉연구원
[주 관심분야] RF 수동 소자, System on Package, LTCC, RF FEM, RF Power Amplifier 등

김 준 철

1991년: 서강대학교 물리학과 (이학학사)
1993년: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)
1998년: 서강대학교 전자공학과 (공학박사)
1997년~2009년: 전자부품연구원 시스템패키징연구센터 수석연구원
2010년~현재: 전자부품연구원 패키징연구센터 센터장
[주 관심분야] RF 수동 소자, 필터, System on Package 등

유 종 인

1988년: 한양대학교 전파공학과 (공학사)
2000년: 한양대학교 전파공학과 (공학석사)
2000년~2001년: 에이스테크놀로지 연구원
2002년~2005년: 삼성전자 선임연구원
2006년~현재: 전자부품연구원 시스템패키징연구센터 선임연구원
[주 관심분야] RF 능/수동 소자, RF system, System on Package, Embedded Components 등

김 동 수

1997년: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1999년: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
2001년: 미국 Georgia Institute of Tech. ECE (공학석사)
2004년: 미국 Georgia Institute of Tech. ECE (공학박사)
2004년~2011년: 전자부품연구원 시스템패키징연구센터 선임연구원
2011년~현재: 전자부품연구원 패키징연구센터 책임연구원
[주 관심분야] RF 수동 소자/모듈, Ferroelectric Tunable Device, 전력 증폭기 등

박 영 철

1992년 2월: 연세대학교 전기공학과 (공학사)
1994년 2월: 연세대학교 전기공학과 (공학석사)
2004년 2월: 미국 Georgia Institute of Tech. ECE (공학박사)
1994년~2007년: 삼성전자 정보통신총괄
2007년~현재: 한국외국어대학교 전자공학과 교수
[주 관심분야] RF 전력증폭기 및 주파수 체배기 설계 및 모델링, 디지털 전치왜곡 시스템, 차세대 무선 단말 시스템 등