

GHz 대역을 위한 1005 RF 칩 인덕터의 최적 구조 설계

*김재욱, **유창근
*호서대학교 전기정보통신공학부, **남서울대학교 전자정보통신공학부
e-mail : jaewook_kim@naver.com

The Optimum Structure Design of 1005 RF Chip Inductors for GHz Band

*Jae-Wook Kim, **Chang-Keun Ryu
*School of Electric, Information & Communication Eng., Hoseo Univ.
**School of Electronic, Information & Communication Eng., Namseoul Univ.

Abstract

In this study, micro-scale, high-performance, solenoid-type RF chip inductors were investigated. The size of the RF chip inductors fabricated in this work was $1.0 \times 0.5 \times 0.5 \text{mm}^3$. The material and shape of the core were 96% Al_2O_3 and I-type. The material and number of turn of coil were copper (Cu) and 6. The diameter ($40 \mu\text{m}$) of coil and length (0.35mm) of solenoid were determined by a Maxwell three-dimensional field simulator to maximize the performance of the inductors. High frequency characteristics of the inductance (L) and quality-factor (Q) of developed inductors were measured using an RF Impedance/Material Analyzer (HP4291B with HP16193A test fixture). The inductors developed have inductances of 10.8nH and quality factors of 25.2 at 250MHz , and show results comparable to those measured for the inductors prepared by CoilCraftTm that is one of the best chip inductor company in the world. The simulated data predicted the high-frequency data of the L and Q of the inductors developed well.

I. 서론

칩 인덕터는 고집적 RF 회로에서 필수적인 수동 소자 중의 하나로써, 커패시터와 결합한 LC 필터, 트랜지스터를 위한 AC 초크, 회로정합과 EMI 필터 등에 적용하여 개인통신서비스, 무선 LAN, 위성통신과 GPS에 등에 사용된다[1-4].

최근 실리콘 공정을 기초로 한 소형 경량의 RF 칩 인덕터의 일반적인 형태는 솔레노이드 형태가 아닌 박막 spiral 형태이지만 반도체 substrate에서의 에너지 손실로 높은 주파수에서 품질계수가 감소(substrate effect)하는 문제점을 갖고 있다[4, 5].

솔레노이드 형태는 substrate로부터 인덕터를 분리하여 전체적인 성능을 향상시킬 수 있다[5, 6]. 또한 접유면적이 작으면서 단순히 권선수를 증가시켜 큰 인덕턴스를 얻을 수 있다.

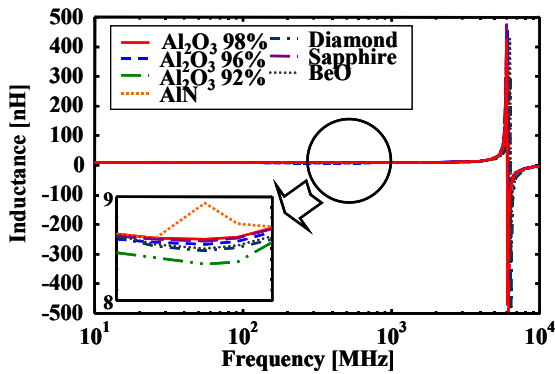
따라서 본 논문에서는 높은 주파수에서 문제점이 대두되고 있는 페라이트 소재의 단점과 박막형태의 substrate effect를 보완할 수 있도록 Al_2O_3 소재를 이용하여 높은 주파수에서 동작할 수 있는 RF 칩 인덕터를 설계·제작하였다. 동일 조건에서 시뮬레이션을 수행하여 높은 인덕턴스, 고품질계수와 높은 자기공진 주파수를 갖는 코어 재질과 모양, 코일 직경과 솔레노이드의 길이를 선정하여 고성능 인덕터의 최적 설계 조건을 도출하였다. 도출된 최적 설계 조건에 따라 극소형 RF 칩 인덕터를 제작하였으며, 그들의 RF 성능을 시뮬레이션 결과와 비교 분석하였다.

II. RF 칩 인덕터의 최적 설계

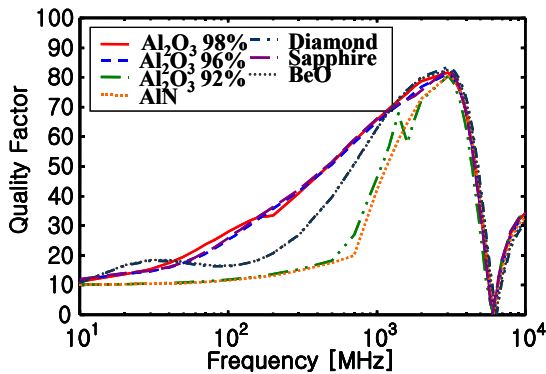
높은 인덕턴스와 고품질계수를 갖는 극소형 RF 칩 인덕터를 선정하기 위하여 Ansoft사의 RF 및 무선 통신용 3차원 구조물 전자계 해석 시뮬레이션 도구인 HFSS (High Frequency Structure Simulator)를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

코아 재질을 선정하기 위해 1.0×0.5×0.5mm³ 크기의 C-type 코아 구조에 40μm 직경의 Cu 코일을 4회 권선한 동일 조건하에 코아의 재질을 98%, 96% 및 92% Al₂O₃, AlN, Diamond, Sapphire, 그리고 BeO로 가변하면서 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 1은 코아 재질에 따른 시뮬레이션 결과를 나타낸다. (a)는 인덕턴스 특성으로서, 제안된 모든 재질들은 거의 비슷한 인덕턴스 값을 가짐을 알 수 있다. (b)는 품질계수 특성으로서, 98% 및 96% Al₂O₃와 Sapphire가 우수한 품질계수 특성을 가짐을 알 수 있다. 인덕턴스, 품질계수 및 SRF (Self-Resonance Frequency ; 자기공진주파수)가 모두 우수한 재질로는 98%와 96%의 Al₂O₃와 Sapphire를 들 수 있으나, 가격 대비 성능면에서 96%의 Al₂O₃가 더 나은 특성을 가지므로 이 재질을 코아 재질로 선정하였다.



(a) 인덕턴스



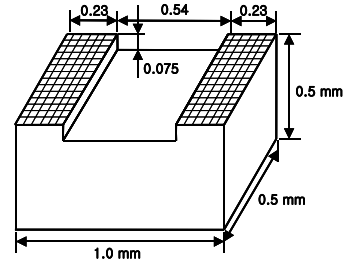
(b) 품질계수

그림 1. 코아 재질에 따른 시뮬레이션 결과

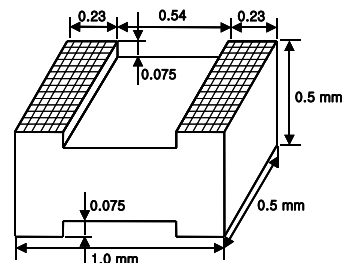
코아의 형상을 선정하기 위하여 다음의 그림 2와 같은 C-Type, H-Type 및 I-Type의 세 가지 구조에 대

하여 시뮬레이션을 수행하였다.

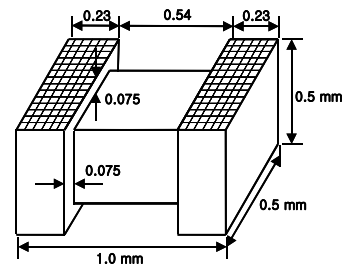
시뮬레이션을 위한 조건으로는 C-Type, H-Type 및 I-Type의 최외각 크기는 1.0×0.5×0.5mm³로 고정하고 Metalization 부분은 W-Ni-Au를 이용하였고 40μm 직경의 Cu 코일을 0.4mm의 슬레노이드 길이에 4회 권선하였다.



(a) C-type



(b) H-Type



(c) I-Type

그림 2. 시뮬레이션을 위한 코아의 다양한 구조

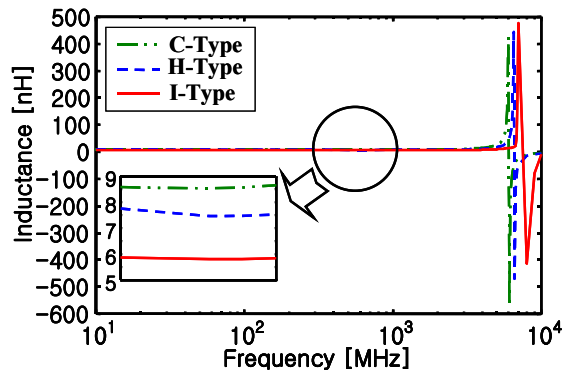


그림 3. 코아 형태에 따른 시뮬레이션 결과

그림 3은 C-Type, H-Type 및 I-Type의 세 가지 형태에 따른 인덕턴스 특성의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 최외각 크기는 세 가지 형태가 모두 동일하나

권선 부분이 C-Type의 단면적이 가장 크고 I-Type이 가장 작으므로 250MHz의 주파수에서 C-Type이 8.57nH의 인덕턴스를 가지며, H-Type의 7.70nH와 I-Type의 5.87nH보다 높은 값을 가짐을 알 수 있다. 하지만 인덕턴스의 반전이 나타나는 SRF는 C-Type이 6.05GHz로 H-Type의 6.55GHz와 I-Type의 7.81GHz보다 상당히 작음을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 품질계수와 SRF의 고주파 성질이 우수한 I-Type을 코아의 형상으로 선정하였다.

코아의 구조 및 재질은 앞의 시뮬레이션 결과를 기반으로 I-형상의 코아 구조에 96% Al₂O₃로 선정하고 코일의 재질은 Cu (Copper)로 6회 권선하여 Air 및 Micro-Strip Line을 고려하여 10MHz~10GHz의 주파수 범위에서 시뮬레이션을 수행하였다.

동일 조건 하에서 솔레노이드의 위치를 좌측, 중앙 및 우측으로 가변하며 시뮬레이션을 수행결과, 중앙에서 11.2nH의 인덕턴스, 29.8의 품질계수, 5.6GHz SRF로 가장 우수하였다.

동일 조건 하에서 솔레노이드의 위치를 중앙에 고정시키고 코일의 직경을 35 μ m, 40 μ m 및 45 μ m으로 각각 가변하며 시뮬레이션을 수행한 결과, 코일의 직경이 40 μ m인 경우가 11.2nH의 인덕턴스, 29.8의 품질계수와 5.6GHz의 SRF를 가지며 모든 면에서 우수하였다.

동일 조건 하에서 솔레노이드의 위치는 중앙, 코일의 직경은 40 μ m으로 고정하여 솔레노이드의 길이를 0.35mm, 0.4mm와 0.45mm로 가변하며 시뮬레이션을 수행하였다. 솔레노이드의 길이가 0.35mm인 경우가 11.2nH의 인덕턴스, 29.8의 품질계수와 5.6GHz의 SRF를 가지며 가장 우수한 주파수 특성을 가짐을 확인하였다.

표 1은 코일의 직경과 솔레노이드의 위치 및 길이 변화에 따른 주파수 특성의 시뮬레이션 결과를 요약하여 나타낸다. 앞서 언급한 바와 같이 최적의 극소형 RF 칩 인덕터를 설계하기 위하여 솔레노이드의 위치는 중앙, 코일의 직경은 40 μ m, 그리고 솔레노이드의 길이는 0.35mm로 최종 확정하였다.

표 1. RF 칩 인덕터의 파라미터 변화에 대한 주파수 특성의 시뮬레이션 결과 요약

구분		L(nH)/250MHz	Q/250MHz	SRF(GHz)
솔레노이드 위치 변화	Left	11.3	29.6	4.85
	Middle	11.2	29.8	5.60
	Right	11.2	29.7	5.12
코일 직경 변화	35 μ m	11.3	29.6	5.51
	40 μ m	11.2	29.8	5.60
	45 μ m	10.9	29.8	5.61
솔레노이드 길이 변화	0.35mm	11.2	29.8	5.60
	0.40mm	10.7	29.7	5.85
	0.45mm	10.4	26.3	5.66

III. 실험

그림 4는 II절의 결과 얻어진 칩 인덕터의 최적 설계에 따라 본 논문에서 제작한 RF 칩 인덕터의 밑면도와 측면도를 나타낸다. 코아의 크기는 1.0mm×0.5mm×0.5mm이고 코아의 재료로는 96% Al₂O₃ alumina를 사

용하였다. 96% Al₂O₃은 8.8의 낮은 유전율 상수와 0.0006의 낮은 loss tangent를 갖는다. 코일은 chip 인덕터의 skin-effect의 원인이 되는 metal loss를 줄이기 위해 전도성이 우수한 약 40 μ m의 직경인 Cu를 사용하였으며, 권선수를 6회로 하였다. 외부전류원은 코일의 양단을 코아 가장자리에 W-paste를 도포하고 Ni과 Au를 도금처리 방식으로 적층하여 Metalizing 한 후 인가하였다. RF 칩 인덕터의 인덕턴스, 품질계수 및 커패시턴스에 대한 주파수 특성은 RF Impedance / Material Analyzer (HP16193A test fixture가 장착된 HP4291B)로 측정하였다.

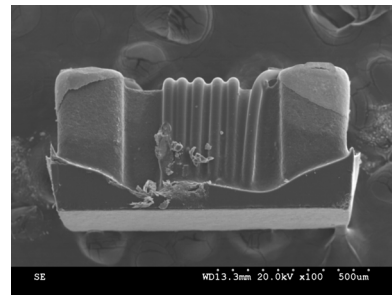


그림 4. 제작된 RF 칩 인덕터 (N=6)

IV. 결과 및 고찰

그림 5~7은 극소형 RF 칩 인덕터에 대한 주파수 특성을 나타내며, Simulation은 Ansoft의 HFSS를 이용하여 시뮬레이션을 한 결과이고, CoilCraft는 미국의 CoilCraft회사의 0402CS11NJBW를 측정된 결과이고, Sample은 본 논문에서 제작한 샘플의 측정 결과이다. 시뮬레이션은 10MHz~10GHz, 측정은 1MHz~1.8GHz의 주파수 범위 내에서 수행되었다.

그림 5에서 250MHz의 주파수에 대하여 Simulation은 L=11.2nH, Coilcraft는 L=10.7nH, Sample은 L=10.8nH의 유사한 결과를 나타내며, Simulation 곡선이 5.6GHz에서 반전되는 것으로 미루어 보아 SRF가 5.6GHz임을 알 수 있다.

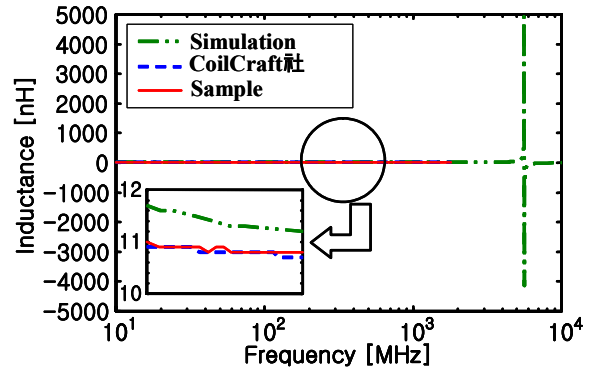


그림 5. 개발된 RF 칩 인덕터의 인덕턴스 특성

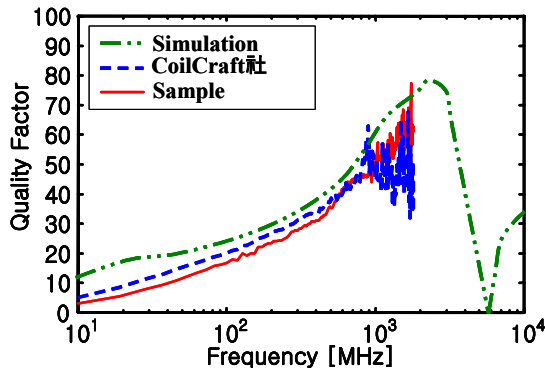


그림 6. 개발된 RF 칩 인덕터의 품질계수 특성

그림 6에서 250MHz의 주파수에 대하여 품질계수 값이 Simulation은 29.8, CoilCraft는 28.8, Sample은 25.2로 유사한 결과를 나타내며, Simulation 곡선이 5.6GHz에서 0의 품질계수 값을 갖는 것으로 미루어 보아 SRF가 역시 5.6GHz임을 추정할 수 있다.

그림 7에서 Simulation 곡선으로부터 커패시턴스가 SRF인 5.6GHz 부근에서 음의 값으로부터 양의 값으로 전위됨을 나타낸다. 이러한 음의 값으로부터 양의 값으로의 전위는 inductive 상태에서 capacitive 상태로 변한다는 것을 나타내며, 전위되는 주파수가 SRF임을 알려준다.

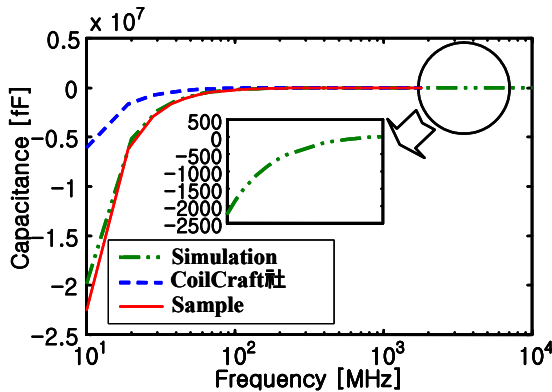


그림 7. 개발된 RF 칩 인덕터의 커패시턴스 특성

표 2. 제작된 RF 칩 인덕터의 측정 결과 요약

구 분	권선수(N)	L(nH) @250MHz	Q @250MHz	SRF (GHz)
Simulation	6	11.2	29.8	5.60
CoilCraft		10.7	28.8	3.60
Sample		10.8	25.2	1.8<

표 2는 제작된 극소형 RF 칩 인덕터의 주파수 특성을 비교한 결과로서, 그림 5~7을 요약하였다. 표의 결과로부터 Simulation은 10MHz~10GHz 범위에서 수행되어 SRF 특성을 알 수 있으나 HP4291B의 주파수 범위는

1MHz~1.8GHz로 SRF 특성을 확인할 수 없으므로 CoilCraft사의 경우는 제품 사양에서 제공하는 3.6GHz를 SRF로 제시하였다[7]. Sample의 경우는 그림 5~7의 주파수 특성 곡선에서 CoilCraft사와 비슷한 형태를 이루는 것으로 미루어 비슷한 SRF 값을 가질 것으로 추정된다.

V. 요약 및 결론

시뮬레이션을 통하여 높은 인덕턴스, 고품질계수와 높은 SRF를 갖는 극소형 RF 칩 인덕터를 설계하기 위하여 코아의 재질과 형태, 코일의 직경과 솔레노이드의 위치 및 길이를 변화시킨 결과, 코아는 Al₂O₃의 I-Type, 코일 직경은 40μm, 솔레노이드의 위치와 길이는 각각 중앙에 0.35mm의 결과를 얻었다. 따라서 1.0×0.5× 0.5mm³ 크기의 솔레노이드형 RF 칩 인덕터를 6회 권선하여 제작하였다.

제작된 인덕터는 250MHz의 주파수에서 10.8nH의 인덕턴스와 25.2의 품질계수를 가지며, 이 결과는 시뮬레이션 결과 및 검증된 CoilCraft사 제품의 측정 결과와 유사하였다.

본 논문에서는 기존의 소형 RF 칩 인덕터의 성능을 유지하면서 소형 경량의 박막 인덕터의 장점도 살릴 수 있는 1005 RF 칩 인덕터가 성공적으로 설계 제작되었고 그 성능도 검증되었다.

참고문헌

- [1] Minda Denesh, John R. Long. Differentially Driven Symmetric Microstrip Inductors. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. vol. 50. no. 1. pp. 332-341. Jan. 2002.
- [2] I. Wolff and H. Kapusta. Modeling of Circular Spiral Inductors for MMICs. IEEE MTT-s Digest. pp. 123-126. 1987.
- [3] R. F. Soohoo. Magnetic Thin Film Inductors for Integrated Circuit Applications. IEEE Trans. on Magnetics. vol. MAG-15. 1803. 1979.
- [4] Myung-Hee Jung, Jae-Wook Kim, Eui-Jung Yun. Development of High- Performance Solenoid-Type RF Chip Inductors. Jpn. J. Appl. Phys. vol. 39 (2000). pp. 4772-4776. Part 1. No. 8. August 2000.
- [5] C. Patrick Yue, S. Simon Wong. On-Chip Spiral Inductors with Patterned Ground Shields for Si-Based RF IC's. IEEE Journal of Solid-State Circuits. vol. 33. no. 5. pp. 743-752. May 1998.
- [6] Jun-Bo Yoon, Chul-Hi Han, Eui-Sik Yoon and Choong-Ki Kim. Monolithic Fabrication of Electroplated Solenoid Inductors Using Three-Dimension Photolithography of a Thick Photoresist. Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 37. pp. 7081-7085. Part1, No. 12B. Dec 1998.
- [7] Coilcraft. Inductors Transformers Filters Catalog. May 2001.