

고성능의 초소형 RF 칩 인덕터 개발

Development of High-Performance Ultra-small Size RF Chip Inductors

윤의중^{1,a}, 천채일²

(Eui-Jung Yun^{1,a} and Chae Il Cheon²)

Abstract

Ultra-small size, high-performance, solenoid-type RF chip inductors utilizing low-loss Al_2O_3 core materials were investigated. The dimensions of the RF chip inductors fabricated were $1.0mm \times 0.5mm \times 0.5mm$ and copper coils were used. The materials (96% Al_2O_3) and shape (I-type) of the core, the diameters ($40\mu m$) and position (middle) of the coil, and the lengths (0.35mm) of solenoid were determined by a high-frequency structure simulator (HFSS) to maximize the performance of the inductors. The high-frequency characteristics of the inductance (L) and quality-factor (Q) of the developed inductors were measured using a RF impedance/material analyzer (E4991A with E16197A test fixture). The developed inductors exhibit an inductance of 11 to 11.3nH and a quality factor of 22.3 to 65.7 over the frequency ranges of 250 MHz to 1.7 GHz, and show results comparable to those measured for the inductors prepared by CoilcraftTM. The simulated data described the high-frequency data of the L and Q of the fabricated inductors well.

Key Words : RF chip inductor, Solenoid inductor, Ultra-small size, Al_2O_3 core

1. 서론

칩 인덕터는 무선 LAN (local area network), 위성통신과 GPS (global positioning system) 등의 고집적 RF (radio frequency) 회로에서 필수적인 수동 소자이며 커패시터와 결합한 LC 필터, AC (alternating current) 초크, EMI (electromagnetic interference) 필터와 회로정합 등의 응용분야에 사용된다. 최근 고성능의 소형 무선통신제품 및 첨단 전자 제품에는 GHz 대역에서 동작하는 소형 RF 칩 인덕터의 필요성이 증가하고 있다[1-3].

전자기파 흡수체, 변환기, 또는 인덕터와 같은

고주파 전자기 소자에 대해 코어 물질의 초기 투자율은 RF 영역에서 중요한 요소이다. 기존에 많이 사용되어진 자성 페라이트 코어 재료는 낮은 주파수 영역에서 큰 투자율을 갖는다[4,5]. 그러나 300 MHz 이상의 주파수영역에서 자화율이 급속히 감소하는 문제점을 지니고 있다[6]. 또한, 기존의 칩 인덕터들은 성능 면에서는 우수하나 크기와 무개면에서 문제점을 가지고 있다.

최근 실리콘 공정을 기초로 한 소형 경량의 RF 칩 인덕터의 일반적인 형태는 솔레노이드 형태가 아닌 박막 또는 적층 형태이다. 그러나 이와 같은 박막 나선형 인덕터는 반도체 기판에서의 에너지 손실로 높은 주파수에서 품질계수(quality-factor: Q)가 감소하는 기판 효과의 문제점을 갖는다. 그러므로 반도체 기판으로부터 인덕터를 분리해낸 솔레노이드 형태를 적용함으로써 기판 효과를 제거할 수 있고 전체적인 성능을 향상시킬 수 있다 [7-9]. 또한 점유 면적을 적게 하면서 단순히 권선수를 증가시켜 큰 인덕턴스를 얻을 수 있을 뿐만

1. 호서대학교 정보제어공학과
(충남 아산시 배방면 세출리 산29-1)
2. 호서대학교 신소재공학과
a. Corresponding Author : ejyun@office.hoseo.ac.kr
접수일자 : 2003. 9. 25
1차 심사 : 2003. 10. 27
2차 심사 : 2003. 11. 18
심사완료 : 2003. 11. 25

아니라 일반적으로 잘 알려진 식을 사용하여 쉽게 인덕턴스를 계산하거나 설계할 수 있다[8-10].

따라서 이 연구에서는 기존의 소형 RF 칩 인덕터의 성능을 유지하면서 소형 경량의 박막 인덕터의 장점도 살릴 수 있는 초소형의 솔레노이드 RF 칩 인덕터를 최적 설계하고 제작하였다. Ansoft의 HFSS (high frequency structure simulator)를 이용하여 동일조건에서 시뮬레이션을 수행하여 높은 인덕턴스, 고품질계수와 높은 자기공진주파수를 갖는 코아의 재질과 모양, 코일의 위치 및 직경, 솔레노이드의 길이 등을 선정하여 고성능 인덕터의 최적 설계 조건을 도출하였다. 도출된 최적 설계 조건에 따라 극소형 RF 칩 인덕터를 제작하였으며, 그들의 측정된 RF 특성을 시뮬레이션 특성 및 전세계적으로 가장 앞서가는 미국의 CoilCraft의 제품의 특성과 비교 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 초소형 RF 칩 인덕터 최적구조 설계

높은 인덕턴스와 고품질계수를 갖는 극소형 RF 칩 인덕터의 최적구조를 설계하기 위하여 Ansoft사의 RF 및 무선 통신용 3차원 구조물 전자계 해석 시뮬레이션 도구인 HFSS를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였고 극소형 RF 칩 인덕터의 최적 구조를 도출하였다.

코아 재료를 결정하기 위해 1.0×0.5×0.5mm 크기의 C-형태 코아 구조에 전극 부분을 W-Ni-Au로 하고 40 μ m 직경의 Cu 코일을 4회 권선한 동일 조건에서 코아의 재료를 98%, 96% 및 92% 순도의 Al₂O₃, Diamond, Sapphire, 그리고 BeO로 변화시켜 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 1은 코아 재료에 따른 인덕턴스(L)-주파수(f) 특성의 시뮬레이션 결과이다. 그림 1에서 보듯이 사용된 모든 재료들은 거의 비슷한 L 값을 가지나, 그 중 92% Al₂O₃가 가장 낮은 L 값을 가진다.

그림 2는 코아 재료에 따른 품질계수(Q)-주파수(f) 특성의 시뮬레이션 결과이다. 98% 및 96% Al₂O₃와 Sapphire가 250MHz 주파수에서 약 40 정도의 우수한 Q 특성을 가짐을 알 수 있다.

또한 그림 1에서는 L값의 전이가 발생하는 주파수 이고 그림 2에서는 Q값이 0이 되는 주파수로 정의 되는 SRF(self-resonance frequency; 자기공진주파수)는 사용된 모든 코아 재료들에 대하여 거의 비슷한 SRF 값을 가짐을 알 수 있다.

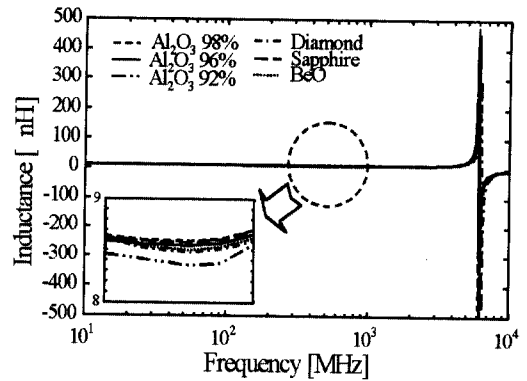


그림 1. 코아 재료에 따른 L-f 특성의 시뮬레이션 결과.

Fig. 1. Simulation results of the L-f characteristic with various core materials.

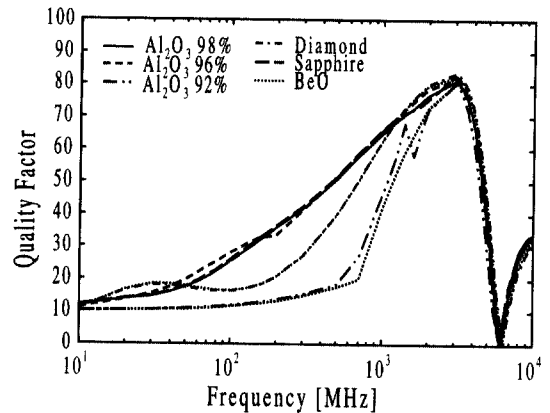


그림 2. 코아 재료에 따른 Q-f 특성의 시뮬레이션 결과.

Fig. 2. Simulation results of the Q-f characteristic with various core materials.

따라서, 그림 1과 2로부터 인덕턴스, 품질계수 및 SRF가 모두 우수한 재료로는 98%와 96%의 Al₂O₃와 Sapphire를 들 수 있으나, 가격이 가장 저렴한 96%의 Al₂O₃를 코아 재료로 선정하였다.

코아의 형태를 결정하기 위하여 그림 3과 같은 C, H 및 I형의 세 가지 구조에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 위에서 코아 재료로 선정된 96% Al₂O₃를 사용하였으며, 전극 부분을 W-Ni-Au로 하고 40 μ m 직경의 Cu 코일을 0.4mm의 솔레노이드 길이로 4회 권선한 동일 조건에서 시뮬레이션을 수행하였다.

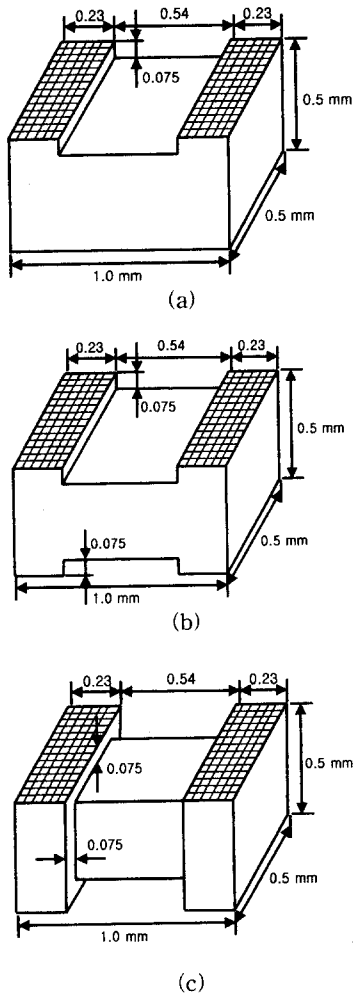


그림 3. 시뮬레이션을 위한 코어의 다양한 구조 ; (a) C형, (b) H형, (c) I형.
 Fig. 3. Various structures of the core for simulation ; (a) C-type, (b) H-type, and (c) I-type.

그림 4는 C, H 및 I형에 따른 L-f 특성의 시뮬레이션 결과이다. 너비는 세 가지 형태가 모두 동일하나 코일이 감기는 부분의 경우 C형의 단면적이 가장 크고 I형이 가장 작다. 따라서 250MHz의 주파수에서 8.57nH의 L값을 갖는 C형이 7.7nH의 H형, 5.87nH의 I형과 비교하여 높은 L값을 가진다. 그러나 L의 반전이 나타나는 SRF는 I형이 7.81GHz로 H형의 6.55GHz와 C형의 6.11GHz보다 큼을 알 수 있다.

그림 5는 C, H 및 I형의 세 가지 코어 형태에 따른 Q-f 특성의 시뮬레이션 결과이다. 그림에서 Q값은 250MHz에서 H형이 22.1로 가장 작고, I형의 31.7은 C형의 38.9보다 약간 작음을 알 수 있다. 이는 Q값을 결정하는 인덕턴스-저항비(L/R)가 H형의 경우 가장 작고, C형의 경우가 가장 크기 때문으로 생각된다. 그러나 Q값이 0이 되는 SRF는 그림 4에서 얻은 결과와 같이 I형이 7.81GHz로 가장 크고 C형이 6.11GHz로 가장 작은 값을 가진다. 그 이유는 SRF가 \sqrt{L} 에 반비례하므로 L값이 가장 작은 I형의 SRF가 최대가 되고 L값이 가장 큰 C형의 SRF가 최소가 된다고 할 수 있다.

표 1에서는 코어 형태에 따른 주파수 특성을 서로 비교하기 위한 시뮬레이션 결과를 요약하였다. 여기서 코어의 형태 및 언급된 시뮬레이션 조건을 제외하고는 다른 모든 시뮬레이션 조건은 동일하였다. 표 1에서 I형의 N=5, l=0.4mm인 경우가 L, Q, SRF의 모든 면에서 우수한 주파수특성을 나타내고 있다. 또한 코어에 코일을 권선한 후 코일을 고정시키고 외부의 영향으로부터 인덕터를 보호하기 위하여 인덕터의 윗면과 측면에 절연체 보호막을 입히게 되는데, 이러한 경우 C형은 보호막에 의하여 전체적인 크기가 증가하는 반면에 I형은 크기가 변하지 않는 구조적인 측면에서 장점을 가진다. 따라서 본 논문에서는 코어의 형태를 I형으로 결정하였다.

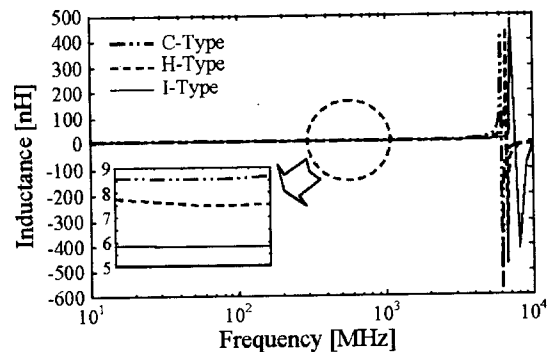


그림 4. 코어 형태에 따른 L-f 특성의 시뮬레이션 결과.
 Fig. 4. Simulation results of the L-f characteristic with various core structures.

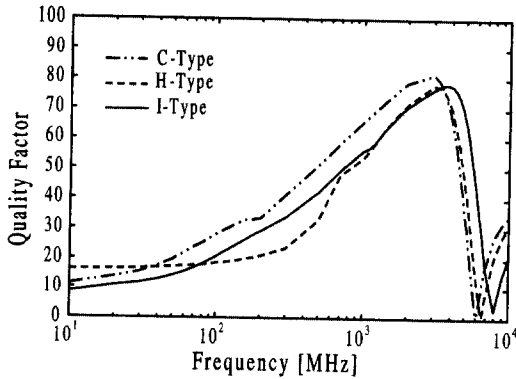


그림 5. 코아 형태에 따른 Q-f 특성의 시뮬레이션 결과.

Fig. 5. Simulation results of the Q-f characteristic with various core structures.

표 1. 코아 형태에 따른 주파수 특성비교를 위한 시뮬레이션 결과 요약; N=권선수, l=솔레노이드길이.

Table 1. Summary of simulation results for comparing the frequency characteristic with various core structures; N=No. of turns, l=solenoid length.

| Core Type | Important simulation conditions used | L [nH] at 250MHz | Q at 250MHz | SRF [GHz] |
|-----------|--------------------------------------|------------------|-------------|-----------|
| C | N=4 l=0.4mm | 8.62 | 38.9 | 6.11 |
| H | N=4 l=0.4mm | 7.70 | 22.1 | 6.55 |
| | N=4 l=0.3mm | 8.12 | 24.0 | 6.08 |
| I | N=4 l=0.4mm | 5.87 | 31.7 | 7.81 |
| | N=5 l=0.4mm | 8.54 | 36.8 | 6.52 |

이상의 시뮬레이션 결과로 결정된 96% Al₂O₃의 코아 재료와 I형의 코아 형태를 이용하고 코일이 코아에 감기는 위치를 좌측, 중앙 및 우측으로 변화시켜 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과, 코일의 위치가 중앙인 경우에 대하여 품질계수와 SRF가 가장 우수한 특성을 가지므로 코일의 위치는 중앙으로 선택하였다.

앞에서 결정된 코아 재료, 코아 형태, 코일의 위치를 사용하고 코일의 직경을 35 μ m, 40 μ m 및 45 μ m

으로 각각 변화시켜 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과로부터 코일의 직경이 40 μ m인 경우가 인덕턴스, 품질계수, SRF 등 모든 면에서 우수하여 코일의 직경을 40 μ m으로 선택하였다.

지금까지 결정된 코아 재료, 코아 형태, 코일 위치 및 코일 직경을 사용하고 솔레노이드의 길이를 0.35mm, 0.4mm와 0.45mm로 변화시켜 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 6은 솔레노이드의 길이 변화에 따른 L-f 특성의 시뮬레이션 결과이다. 여기서 솔레노이드의 길이는 코일이 코아에 감기기 시작하는 점에서 끝나는 점 사이의 길이를 의미하며 코일의 직경이 일정할 때 코일 사이의 간격이 변하면 솔레노이드의 길이가 변한다고 할 수 있다. 그림에서 보듯이 솔레노이드의 길이가 0.35mm인 경우 250MHz의 주파수에서 11.2nH로 가장 높은 인덕턴스 값을 가진다. 그러나 SRF는 솔레노이드의 길이가 0.35mm인 경우의 SRF(5.6 GHz)보다 솔레노이드의 길이가 0.4mm인 경우의 SRF (5.85 GHz)가 약간 더 우수한 값을 가짐을 알 수 있다.

그림 7은 솔레노이드의 길이 변화에 따른 Q-f 특성의 시뮬레이션 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 솔레노이드의 길이가 0.35mm와 0.4mm인 경우의 Q-f 특성이 유사하였고 0.45mm인 경우의 Q-f 특성보다 약간 더 우수하였다.

그림 6과 7의 결과로부터 솔레노이드의 길이가 0.35mm인 경우가 11.2nH의 인덕턴스, 29.8의 품질계수와 5.6GHz의 SRF를 가져 전반적으로 가장 우수한 주파수 특성을 가짐을 확인할 수 있다.

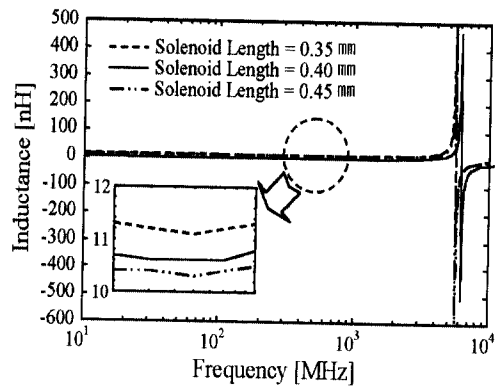


그림 6. 솔레노이드 길이 변화에 따른 L-f 특성의 시뮬레이션 결과.

Fig. 6. Simulation results of the L-f characteristic with various solenoid lengths.

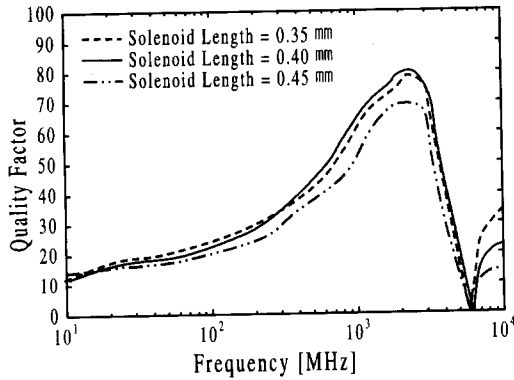


그림 7. 솔레노이드 길이 변화에 따른 Q-f 특성의 시뮬레이션 결과.

Fig. 7. Simulation results of the Q-f characteristic with various solenoid lengths.

2.2 RF 칩 인덕터 제작 및 측정 방법



(a)



(b)

그림 8. 제작된 RF 칩 인덕터 (N=6) : (a)측면도, (b) 밑면도.

Fig. 8. The Fabricated RF Chip Inductors (N=6): (a) Side View and (b) Bottom View.

그림 8은 이 논문의 연구결과 얻어진 칩 인덕터의 최적 구조를 이용하여 본 논문에서 제작한 대표적인 RF 칩 인덕터의 밑면도와 측면도를 나타내는 SEM 사진이다. 코아의 크기는 $1.0\text{mm} \times 0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ 이고 코아의 재료로는 96% Al_2O_3 (alumina)를 사용하였다. Alumina 코아는 후막이나 적층형이 아닌 압축성형에 의한 일반적인 세라믹 제조공정에 의해 제조되었다. 96% Al_2O_3 은 8.8의 낮은 유전율 상수와 0.0006의 낮은 loss tangent를 갖는다.

코일은 칩 인덕터의 skin-effect의 원인이 되는 metal loss를 줄이기 위해 전도성이 우수한 약 40 μm 의 직경인 Cu를 사용하였으며, 권선수를 6-12회로 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 1MHz~3GHz의 주파수 측정범위를 가지는 RF Impedance/Material Analyzer (E16197A test fixture가 장착된 E4991A)로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 9는 N=6으로 제작된 초소형 RF 칩 인덕터의 대표적인 L-f 특성 결과이다. 그림에서 "Simulation"은 Ansoft의 HFSS를 사용하여 10MHz~10GHz의 주파수 범위에서 시뮬레이션 한 결과이다. 또한 "CoilCraft"는 미국의 CoilCraft회사의 sample을, "Measurement"는 이 연구에서 제작한 sample을 각각 E4991A RF Impedance/Material Analyzer를 사용하여 1MHz~3GHz의 주파수 범위에서 측정한 결과이다. 그림에서 보듯이 250MHz 주파수에서 "Measurement"는 10.99nH의 인덕턴스로 11.20nH의 "Simulation", 10.98nH의 "Coilcraft"와 비교하여 유사한 결과를 가진다. 또한, 900MHz와 1.7GHz의 주파수에서 "Measurement"는 각각 10.78nH와 11.29nH의 인덕턴스를 가지며 "Coilcraft"의 10.8nH와 11.48nH의 인덕턴스와 비교하여 유사한 결과를 가진다. "Simulation" 곡선이 7.9GHz에서 반전되는 것으로 미루어 보아 SRF가 7.9GHz 정도임을 예측할 수 있다.

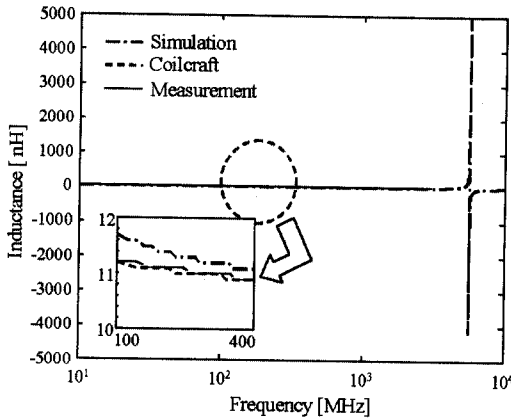


그림 9. 개발된 RF 칩 인덕터의 L-f 특성(N=6).
 Fig. 9. The L-f characteristics of RF chip inductors developed(N=6).

그림 10은 N=6으로 제작된 초소형 RF 칩 인덕터의 대표적인 Q-f 특성 결과이다. 그림에서 보듯이 250MHz 주파수에서 품질계수 값이 "Measurement"는 22.3, "Simulation"은 29.8, "Coilcraft"는 23.2로 유사한 값을 가진다. 또한, 900MHz와 1.7GHz의 주파수에서 "Measurement"는 각각 49.12와 65.68의 품질계수를 가지며 "Coilcraft"의 51.31과 67.42의 품질계수와 비교하여 유사한 결과를 나타내며, "Simulation" 곡선이 7.9GHz에서 0의 품질계수 값을 가지므로 SRF가 역시 7.9GHz임을 추정할 수 있다.

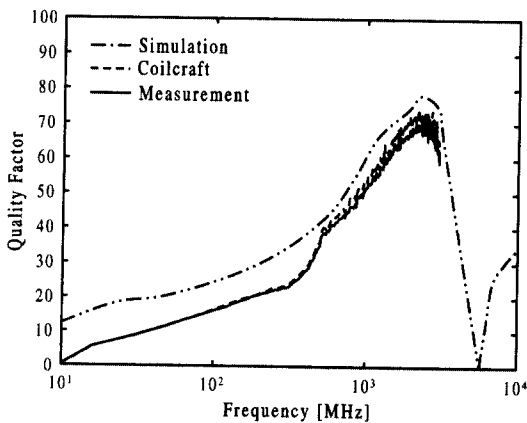


그림 10. 개발된 RF 칩 인덕터의 Q-f 특성(N=6).
 Fig. 10. The Q-f characteristics of RF chip inductors developed(N=6).

제작된 초소형 RF 칩 인덕터에 대한 등가회로는 그림 11과 같다[7-9]. 여기서 R 과 C_s는 각각 코일의 구리손실 과 도선의 감김 사이에 생긴 분산 커패시턴스(stray capacitance)를 의미하며, 이러한 제작된 인덕터 등가회로의 파라미터들은 E4991A로 측정되었고 그 결과는 표 2에 요약되어 있다. 표 2의 L 값들은 그림 9의 L 값들과 거의 일치하였으며, C_s는 fF 정도의 아주 작은 값을 가지므로 사용 주파수 영역에서 무시될 정도의 작은 효과를 가져 본 논문에서 개발된 칩 인덕터들은 고성능, 고주파 전자기기 내의 유도성 소자로서 사용이 가능함을 알 수 있다. 또한, 표 2는 계산된 SRF 결과를 요약한다. SRF 계산 값을 얻기 위하여 사용되어진 SRF 계산식은 그림 11의 등가회로의 합성 임피던스의 허수부를 0으로 놓음으로써 얻어졌고 다음과 같이 표현할 수 있다[8,9].

$$f_{\text{SRF}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_s}} \sqrt{1 - \frac{(C_s R^2)}{L}} \quad (1)$$

따라서 SRF 계산 값은 표 2에 있는 L, R, C_s 측정 값들을 식 (1)에 대입함으로써 얻어졌다. 표 2에서 알 수 있듯이 제작된 인덕터는 8.03GHz의 SRF 계산 값을 가짐으로써 CoilCraft의 경우(7.46GHz)와 비교하여 비슷한 SRF를 가진다. 이 7.46GHz는 CoilCraft사의 제품 사양에서 제공하는 SRF 측정값인 7.20GHz와 유사하였다[11]. 또한 표 2의 SRF 결과는 그림 9와 10의 "Simulation"결과로부터 예측된 SRF값 7.9GHz와도 유사함을 알 수 있다.

따라서 본 논문에서 제작된 인덕터와 Coilcraft의 샘플에 대한 SRF의 경우는 표 2의 등가회로 파라미터 측정값들과 식 (1)을 이용하여 계산된 SRF를 활용함으로써 예측할 수 있다.

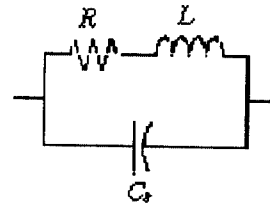


그림 11. 제작된 초소형 RF 칩 인덕터 등가회로.
 Fig. 11. The equivalent circuit of the ultra-small size RF chip inductors developed.

표 2. 초소형 RF 칩 인덕터(N=6)에 대한 등가 회로 파라미터 측정 값 및 SRF 계산 값.

Table 2. The measured values of equivalent circuit parameters and the calculated SRF values for ultra-small size RF chip inductors. (N=6).

| Sample | L [nH] | R [mΩ] | C _s [fF] | SRF [GHz] |
|--------------------|--------|--------|---------------------|-----------|
| Developed Inductor | 10.796 | 243.72 | 36.357 | 8.03 |
| Coilcraft Inductor | 10.813 | 201.26 | 42.086 | 7.46 |

4. 결론

높은 인덕턴스, 고품질계수와 높은 SRF를 갖는 초소형 RF 칩 인덕터를 설계하기 위하여 Ansoft의 HFSS를 이용하여 동일조건에서 시뮬레이션을 수행하여 코아의 재료 및 형태, 코일의 직경 및 위치, 그리고 솔레노이드의 길이를 변화시킨 결과, 코아 재료와 형태가 각각 96% Al₂O₃ 와 I형 이고, 코일 직경과 위치가 각각 40μm 와 중앙(center)이며 솔레노이드의 길이가 0.35mm인 RF 칩 인덕터의 최적 구조를 도출하였고 이에 따라 1.0×0.5×0.5mm 크기의 극소형 솔레노이드 RF 칩 인덕터를 6-12회 권선하여 제작하였다.

제작된 인덕터는 250MHz의 주파수에서 10.99 nH의 인덕턴스와 22.33의 품질계수를 가지며, 900MHz와 1.7GHz의 주파수에서 각각 10.78nH와 11.29nH의 인덕턴스, 49.12와 65.68의 품질계수를 가진다. 이 결과는 검증된 Coilcraft의 샘플 측정 결과와 유사하였으며, 계산된 SRF와 측정된 주파수 특성 곡선으로부터 3GHz 이상의 SRF를 가지므로 900MHz 대역의 무선전화기나 1.7GHz 대역의 휴대용 단말기뿐만 아니라 2GHz 이상의 차세대 무선 통신 기기와 같은 장비에 대한 중요한 수동 소자로서 활용될 수 있다.

본 논문에서는 박막 형태에서 발생할 수 있는 기판에서의 에너지 분산 효과를 제거하고 잘 알려진 식들을 이용하여 인덕터의 설계가 가능한 솔레노이드 형태를 사용하였고, 기존의 소형 RF 칩 인덕터의 성능을 유지하면서 소형 경량의 박막 인덕

터의 장점도 살릴 수 있는 극소형의 RF 칩 인덕터가 성공적으로 설계 제작되었고 그 성능도 검증되었다.

감사의 글

이 논문은 한국산업기술재단의 지역전략산업 석·박사 연구인력 양성사업의 연구비 지원 및 한국과학재단 지정 지역협력연구센터 인 호서대학교 반도체 제조장비 국산화연구센터의 연구비 지원에 의해 연구되었음.

참고 문헌

- [1] Rob Groves, David L. Hareme, and Dale Jadus, "Temperature dependence of Q and inductance in spiral inductors fabricated in a silicon-germanium/BiCMOS technology", IEEE J. of Solid-State Circuits, Vol. 32, No. 9, p. 1455, 1997.
- [2] Chong H. Ahn and Mark G. Allen, "Micromachined planar inductors on silicon wafers for MEMS applications", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 45, No. 6, p. 866, 1998.
- [3] Y. Kobayashi, S. Ishibashi, K. Shirakawa, J. Toriu, H. Matsuki, and K. Murakami, "New type micro cloth-inductor and transformer with thin amorphous wires and multi-thin coils", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 28, No. 5, p. 3012, 1992.
- [4] V. Joshi, K. Kimura, H. Kiyokawa, J. Norgard, and C. Araujo "Absorption frequency tuning with double layer ferrite stacks", IEEE, p. 587, 1998.
- [5] T. Nakamura, "Low-temperature sintering of Ni-Zn-Cu ferrite and its permeability spectra", J. of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 168, p. 285, 1997.
- [6] Jen-Yan Hus, Hon-Chin Lin, Hon-Dar Shen, and Chi-Jen Chen, "High frequency multilayer chip inductors", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 33, No. 5, p. 3325, 1997.
- [7] C. Patrick Yue, and S. Simon Wong,

- "On-chip spiral inductors with patterned ground shields for Si-based RF IC's", IEEE J. of Solid-State Circuits, Vol. 33, No. 5, p. 743, 1998.
- [8] Myung-Hee Jung, Jae-Wook Kim, and Eui-Jung Yun, "Development of high-performance solenoid-type RF chip inductors utilizing low-loss Al_2O_3 core materials", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 39, Part 1, No. 8, p. 4772, 2000.
- [9] Jae-Wook Kim, Eui-Jung Yun, Young-Chang Jung, and Chol-Ho Hong, "A study for solenoid-type RF chip inductors", J. of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 13, No. 10, p. 840, 2000.
- [10] Jun-Bo Yoon, Bon-Kee Kim, Chul-Hi Han, Eui-Sik Yoon, Kyu-Ro Lee, and Choong-Ki Kim, "High-performance electroplated solenoid-type integrated inductor (SI^2) for RF applications using simple 3D surface micromachining technology", IEEE IEDM, Vol. 98, p. 544, 1998.
- [11] Coilcraft, "Inductors transformers filters catalog," May 2001.