

A Study for Frequency Characteristics of Solenoid-Type RF Chip Inductors

크기에 따른 솔레노이드 형태 RF 칩 인덕터의 주파수 특성 연구

Jae-Wook Kim*

김재욱*

Abstract

In this work, small-size, high-performance solenoid-type RF chip inductors utilizing a low-loss Al_2O_3 core material were investigated. The size of the chip inductors fabricated in this work were $0.86 \times 0.46 \times 0.45mm^3$, $1.5 \times 1.0 \times 0.7mm^3$, $2.1 \times 1.5 \times 1.0mm^3$, and $2.4 \times 2.0 \times 1.4mm^3$ and copper (Cu) wire with $27 \sim 40\mu m$ diameter was used as the coils. High frequency characteristics of the inductance, quality factor, and impedance of developed inductors were measured using an RF Impedance/Material Analyzer (HP4291B with HP16193A test fixture). It was observed that the developed inductors with the number of turns of 7 have the inductance of 13 to 100nH and exhibit the self-resonant frequency (SRF) of 6.4 to 1.1GHz. The SRF of inductors decreases with increasing the inductance and the inductors have the quality factor of 50 to 80 in the frequency range of 300MHz to 1.3GHz. In this study, small-size solenoid-type RF chip inductors with high inductance and high quality factor were fabricated successfully.

요약

본 논문에서는 저손실 Al_2O_3 코어 물질을 이용한 초소형 고성능 솔레노이드 형태 RF 칩 인덕터에 대하여 연구하였다. 본 논문에서 제작된 칩 인덕터의 크기는 $0.86 \times 0.46 \times 0.45mm^3$, $1.5 \times 1.0 \times 0.7mm^3$, $2.1 \times 1.5 \times 1.0mm^3$ 와 $2.4 \times 2.0 \times 1.4mm^3$ 으로 하였고, 코일은 $27 \sim 40\mu m$ 의 구리선을 사용하였다. 개발된 인덕터의 인덕턴스, 품질계수, 임피던스의 고주파수 특성은 HP16193A test fixture가 장착된 RF Impedance/Material Analyzer(HP4291B)를 이용하여 측정되었다. 7회 권선된 인덕터들은 13~100nH의 인덕턴스와 6.4~1.1GHz의 자기공진주파수를 가진다. 인덕터들의 자기공진주파수는 인덕턴스가 증가함에 따라 감소하고, 인덕터들의 직접쓰기는 300MHz~1.3GHz의 주파수 범위에서 50~80을 가진다. 본 연구에서는 높은 인덕턴스와 높은 직접쓰기를 갖는 초소형 솔레노이드 형태 RF 칩 인덕터가 성공적으로 제작되었다.

Key words : Solenoid, RF, Chip Inductor, Q-factor, Inductance

1. 서론

칩 인덕터는 노트북 컴퓨터, 캠코더, 호출기, 셀룰러 폰 등과 같은 최신 전자제품의 회로에서 필수적인 수

동소자 중의 하나이다[1-7]. 칩 인덕터의 중요 응용분야로는 커패시터와 결합하여 LC 필터로 사용하고, 트랜지스터를 위한 AC 초크로 사용하고, 회로정합에 사용하고, EMI 필터로 사용된다. 최근에는 고성능의 소형 무선통신제품을 실현하기 위하여 GHz 대역에서 동작하는 소형 RF 칩 인덕터의 필요성이 증가하는 추세에 있다. 기존에 많이 사용되어진 자성 페라이트 코어 재료는 투자율이 300MHz 이상에서 급속히 감소

* 남서울대학교 전자공학과

(Dep. of Electronics Engineering, Namseoul University)

接受日:2007年 5月 30日, 修正完了日: 2007年 11月 15日

하는 문제점을 지니고 있다[8]. 또한 최근 고주파 영역인 GHz 영역에서의 코아 재료로써 주목을 받고 있는 Y-hexagonal ferrite[9]가 있으나 소결과정중 이상이 생기기 쉽고 Curie 온도가 110°C로 낮은 단점을 가진다.

최근 실리콘을 기초로 한 RF 칩 인덕터의 일반적인 형태는 솔레노이드 형태가 아닌 박막 나선형 형태이다. 그러나 이와 같은 박막 나선형 형태의 인덕터는 반도체 기판에서의 에너지 분산으로 인하여 높은 주파수에서 품질계수가 감소하는 경향(기판효과)을 나타낸다[10]. 그러므로 기판으로부터 인덕터를 분리함으로써 전체적인 성능을 향상시킬 수 있다.

솔레노이드 형태의 칩 인덕터는 위에서 언급한 원하지 않는 기판효과를 제거할 수 있다[10,11]. 또한 점유 면적을 적게 증가시키면서 단순히 권선수를 증가함으로써 큰 인덕턴스를 얻을 수 있으며, 간단하고 일반적으로 잘 알려진 식을 사용하여 쉽게 인덕턴스를 계산하거나 설계할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 저손실 Al_2O_3 코아 물질을 이용하여 솔레노이드 형태를 갖는 여러 가지 크기의 RF 칩 인덕터에 대하여 주파수 특성을 측정 분석하였다.

II. 실험

그림 1은 본 논문에서 제작된 초소형(0.86×0.46×0.45mm) 솔레노이드 형태의 RF 칩 인덕터 구조를 나타낸 것이며, Al_2O_3 코아 물질은 직경 27 μ m의 Cu 코일로 감겨져 있다. 크기가 각각 0.86×0.46×0.45mm, 1.5×1.0×0.7mm, 2.1×1.5×1.0mm, 2.4×2.0×1.4mm인 4가지 형태의 인덕터를 제작하였고 권선수(N)는 7로 하였다.

본 논문의 인덕터의 코아 재료는 기존의 ferrite가 아닌 1GHz에서 7.48의 낮은 유전율 상수와 4.89×10^{-5} 의 낮은 손실탄젠트를 가지며 900°C 이하에서 소결된 Al_2O_3 물질을 사용하였다. 분말 형태의 유전체 물질을 유기용매, 결합제(PVB, poly-vinyl butyral), plasticizer(DOP, dioctyl phthalate), 미량의 다른 화합물 등과 혼합하여 Al_2O_3 paste를 제조하였으며, 두께를 0.45~1.4mm로 변화시켰다.

코일은 chip 인덕터의 표피효과의 원인이 되는 금속손실을 줄이기 위해 전도성이 우수한 약 27~40 μ m의 직경인 Cu를 사용하였다. 외부전류원은 코일의 양단을 코아 하층부의 양끝 단자에 본딩한 후 인가하였다. 양끝 단자는 P 7.2 wt%, Ni 32.6 wt%, W 60.2 wt%로 이루어진 박막층을 seed 층으로 사용하여 그 위에 도금처리 방식으로 Au 막을 적층시켰다.

인덕터의 인덕턴스, 품질계수, 레지스턴스, 커패시턴스, 임피던스 크기와 위상에 대한 주파수 특성과 각 인덕터들의 등가회로 파라미터는 RF Impedance/Material Analyzer(HP16193A test fixture가 장착된 HP4291B)로 측정하였고, 자기공진주파수 (SRF)는 Network Analyzer (HP8719D)로 측정하였다. 또한 코아 물질의 손실탄젠트와 상대투자율은 각 HP16453A와 HP16454A test fixture를 HP4291B에 장착하여 측정하였다.



Fig. 1. Top view of the RF chip inductor (0.86×0.46×0.45 mm)

그림 1. RF chip 인덕터의 상층부 모양 (0.86×0.46×0.45mm)

III. 결과 및 고찰

네 가지 크기(0.86×0.46×0.45mm, 1.5×1.0×0.7mm, 2.1×1.5×1.0mm, 2.4×2.0×1.4mm)의 칩 인덕터가 제작되었다. 권선수가 7인 인덕터들의 인덕턴스와 SRF는 표 1에 요약되어져 있다. 표 1은 0.86×0.46×0.45mm가 L=13nH와 $f_{SRF}=6.4$ GHz, 1.5×1.0×0.7mm가 L=33nH와 $f_{SRF}=2.6$ GHz, 2.1×1.5×1.0mm가 L=56nH와 $f_{SRF}=1.9$ GHz, 그리고 2.4×2.0×1.4mm가 L=100nH와 $f_{SRF}=1.1$ GHz를 갖는다. 이와 같이 인덕터의 크기가 증가함에 따라 인덕턴스도 증가하고 SRF가 감소하는 경향을 나타낸다.

Table 1. The inductance and SRF of various RF chip inductors with the number of turns of 7

표 1. 다른 크기의 코아에 7회 권선하였을 때 RF 칩 인덕터의 인덕턴스와 SRF

Sample No.	Size of Inductor [mm]	Inductance [nH]	SRF [GHz]
1	0.86×0.46×0.45	13	6.4
2	1.5×1.0×0.7	33	2.6
3	2.1×1.5×1.0	56	1.9
4	2.4×2.0×1.4	100	1.1

그림 2는 코아의 단면적(A_c)/솔레노이드의 길이(l_s) 비에 따른 인덕턴스의 변화를 나타낸다. 이때 점선은

다음과 같은 식에 의해 계산된 인덕턴스를 나타낸다 [12].

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 A_c}{2l_s} \left[\frac{z}{\sqrt{z^2 + a^2}} + \frac{l_s - z}{\sqrt{(l_s - z)^2 + a^2}} \right] \quad (1)$$

여기서 A_c 는 코아의 단면적, l_s 는 솔레노이드의 길이, z 는 솔레노이드의 한쪽 끝에서부터 솔레노이드 내부의 한 field 점까지의 거리, a 는 솔레노이드의 반경이고, μ_0 와 μ_r 는 각각 코아의 진공투자율과 상대투자율이다. 칩 인덕터의 인덕턴스를 계산하기 위하여 사용된 파라미터 값들은 표 2와 같다.

여기서 $z = l_s/2$ 이고 코아 물질의 상대투자율은 1로 측정되었으며, 식 (1)에 대입되었다. 그림 2에서 알 수 있듯이 계산된 값과 측정된 값이 거의 일치하고 있다.

Table 2. The structure parameters of inductors used in this paper

표 2. 본 논문에서 사용된 인덕터들의 구조 파라미터

Size (mm)	A_c (m ²)	l_s (m)	a (m)
0.86×0.46×0.45	0.12×10 ⁻⁶	0.38×10 ⁻³	0.2×10 ⁻³
1.5×1.0×0.7	0.7×10 ⁻⁶	1.0×10 ⁻³	3.3×10 ⁻³
2.1×1.5×1.0	1.5×10 ⁻⁶	1.3×10 ⁻³	4.9×10 ⁻³
2.4×2.0×1.4	2.9×10 ⁻⁶	1.5×10 ⁻³	6.0×10 ⁻³

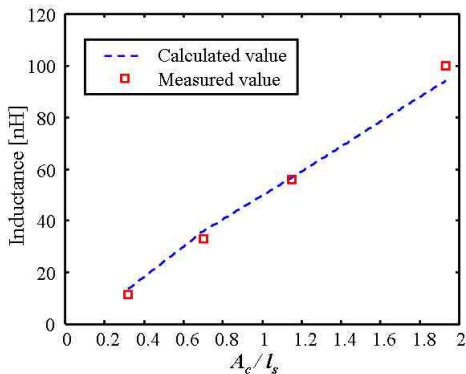


Fig. 2. Relation between the inductance(L) and the A_c/l_s of RF chip inductors

그림 2. RF 칩 인덕터의 인덕턴스 (L)와 A_c/l_s 사이의 관계

그림 3은 3가지 크기의 인덕터들에 대한 대표적인 인덕턴스-주파수 특성을 나타낸다. 그림에서 인덕턴스는 약 800MHz 까지 거의 일정하였으며 13nH,

33nH, 56nH, 100nH의 높은 값을 갖는다. 또한 800MHz 이상의 주파수 영역에서는 크기가 큰 인덕터일수록 더 낮은 주파수에서 인덕턴스가 급격히 증가하는 경향을 나타내는데, 이는 동일 권선수에 대하여 인덕터의 크기가 클수록 A_c/l_s 의 비가 커지므로(그림 2 참조) 인덕턴스가 커지게 되며, 인덕턴스가 커짐에 따라 SRF가 감소하게 됨을 나타낸다. 또한 그림 3에서 크기가 2.4×2.0×1.4mm인 샘플 경우에는 1.1GHz 정도에서 SRF가 나타남을 알 수 있다. 이러한 인덕턴스와 SRF 사이의 관계는 Network Analyzer로 얻어진 표 1의 관계와 일치함을 알 수 있다.

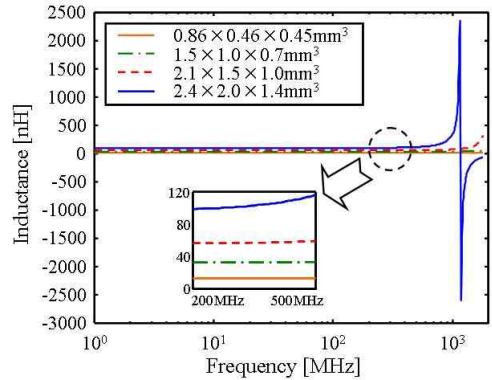


Fig. 3. Typical inductance-frequency characteristic of the RF chip inductors

그림 3. RF 칩 인덕터들의 대표적인 인덕턴스-주파수 특성

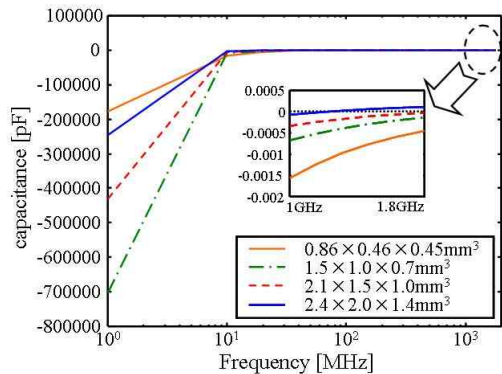


Fig. 4. Typical capacitance-frequency characteristic of the RF chip inductors

그림 4. RF 칩 인덕터들의 대표적인 커패시턴스-주파수 특성

그림 4는 4가지 크기의 인덕터들에 대한 대표적인

커패시턴스-주파수 특성을 나타낸다. 각 인덕터들의 커패시턴스가 SRF 부근에서 음의 값으로부터 양의 값으로 전위됨을 나타낸다. 또한 인덕터의 크기가 클수록 더 낮은 SRF에서 커패시턴스가 양의 값으로 전위되어 유도성 상태에서 용량성 상태로 변한다는 것을 나타내며, 이는 인덕터의 크기가 클수록 더 낮은 주파수에서 분산커패시턴스 효과가 나타남을 알려준다.

그림 5는 대표적인 저항-주파수 특성을 나타낸다. 2.4×2.0×1.4mm³ 크기의 샘플 경우에는 SRF인 1.1GHz 부근에서 급격히 증가하여 최대 피크 값을 갖는다.

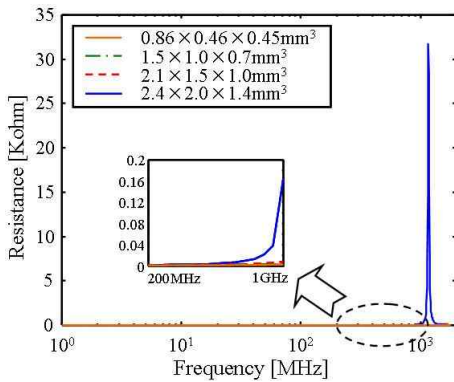


Fig. 5. Typical resistance-frequency characteristic of the RF chip inductors

그림 5. RF 칩 인덕터들의 대표적인 저항-주파수 특성

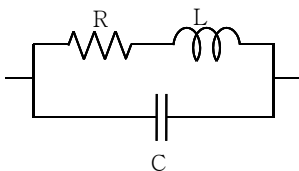


Fig. 6. The equivalent circuit of RF chip inductor used to analyze circuit parameters

그림 6. 회로 파라미터 분석에 사용된 RF 칩 인덕터의 등가회로

그림 6은 Ahn and Allen[13]과 Yue and Wong[10]에 의해 보고된 소형 RF 칩 인덕터의 등가회로를 나타낸다. 여기서 R은 Cu 코일에서 표피효과 때문에 발생하는 에너지 손실인 금속 저항을 의미하고, C는 도선의 감김 사이에 생긴 분산 커패시턴스를 나타낸다.

표 3은 HP4291B로 얻어진 각 인덕터들의 등가회로 파라미터를 요약하였다. 표 3에서 L은 표 1의 L과 거의 일치하였으며, 분산 커패시턴스는 fF 정도의 작은

값을 가지므로 사용 주파수 범위에서 무시될 정도의 작은 효과를 갖는다.

Table 3. The equivalent circuit parameters for RF chip inductors

표 3. RF 칩 인덕터의 등가회로 파라미터

Size [mm ³]	L [nH]	R [mΩ]	C [fF]
0.86×0.46×0.45	12.933	126.87	48.189
1.5×1.0×0.7	32.018	280.31	111.84
2.1×1.5×1.0	54.793	321.62	107.23
2.4×2.0×1.4	103.65	502.28	102.97

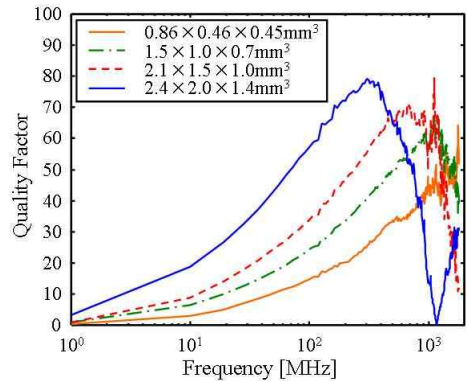


Fig. 7. Typical quality factor-frequency characteristic of the RF chip inductors

그림 7. RF 칩 인덕터들의 대표적인 품질계수-주파수 특성

그림 7은 칩 인덕터들의 대표적인 품질계수-주파수 특성을 나타낸다. 품질계수는 주파수가 증가함에 따라 증가하며 최대값에 도달하게 된다. 그 이상 주파수가 증가하게 되면 품질계수는 감소하게 된다. 또한 그림 7에서 인덕터의 크기가 작아짐에 따라 Q 값이 감소함을 알 수 있는데, 이는 코아 크기의 감소로 동일 권선수(7회)에 대해 코일간의 간격이 좁아져서 분산 커패시턴스의 영향이 증가하였기 때문이다. 일반적으로 품질계수는 식 (2)와 같이 표현된다[10,14,15].

$$Q = 2\pi \times \frac{\text{peak magnetic 에너지} - \text{peak electric 에너지}}{\text{한 주기 동안 회로에서 소비된 에너지}} \quad (2)$$

$$\text{Peak magnetic 에너지} = \frac{1}{2} LI^2 = \frac{LV^2}{2[R^2 + (\omega L)^2]} \quad (3)$$

$$\text{Peak electrical 에너지} = \frac{1}{2} CV^2 \quad (4)$$

한 주기 동안 회로에서 소비된 에너지 (5)

$$= \frac{2\pi}{\omega} \cdot \frac{V^2}{2} \cdot \left[\frac{R}{R^2 + (\omega L)^2} \right]$$

$$Q = \frac{\omega L}{R} \left[1 - \frac{R^2 C}{L} - \omega^2 LC \right] \quad (6)$$

$$= \frac{\omega L}{R} \times \text{self-resonant factor}$$

인덕터는 SRF에서 최대 자기 에너지와 최대 전기 에너지가 같기 때문에 인덕터의 품질계수는 SRF에서 0의 값을 갖는다[10]. 따라서 그림 7에서 품질계수가 0이 될 때의 주파수를 인덕터들의 SRF로 간주할 수 있고, 이 SRF 값은 2.4×2.0×1.4mm² 크기의 샘플일 때 약 1.1GHz가 됨을 알 수 있다. 또한 Q는 300MHz~1.3GHz 주파수 범위에서 최대 49~80의 값을 갖음을 알 수 있다. 그림 6에서의 등가회로에 대하여 자기 에너지와 전기 에너지는 각각 식 (3), (4)와 같이 표현되고, 한 주기의 에너지 손실은 주기 T=2π/ω에 회로의 분산 전력을 곱한 것이므로 식 (5)와 같이 표현될 수 있다.

여기서 V는 인덕터 양단의 최대 전압을 의미한다. 식 (3)-(5)를 식 (2)에 대입하면 식 (6)을 유도할 수 있다.

여기서 ωL/R은 저장된 자기에너지와 저항 R에서의 ohmic손실을 나타내며, 자기공진요소는 주파수에 따라 최대 전기 에너지가 증가하고 따라서 자기공진주파수에서 Q가 0이 되는 효과 때문에 생기는 자기공명요소이다.

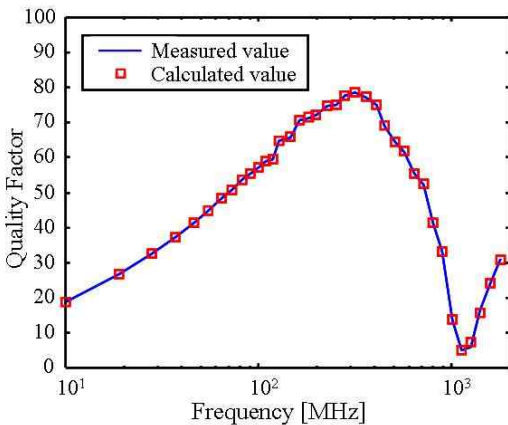


Fig. 8. Variation of quality factor with frequency for RF chip inductor (2.4×2.0×1.4 mm²)

그림 8. RF 칩 인덕터의 주파수에 따른 quality factor 변화 (2.4×2.0×1.4 mm²)

그림 8은 2.4×2.0×1.4mm² 크기의 100nH 인덕터에 대하여 주파수에 따른 품질계수의 변화를 나타낸다. 그림 8에서 계산 값은 그림 3, 4, 5의 인덕턴스, 커패시턴스, 저항을 이용하여 식 (6)에 대입함으로써 얻어진다. 그림 8의 측정된 값은 계산된 값과 잘 일치하므로, 칩 인덕터의 주파수에 따른 Q의 변화를 예측하는데 식 (6)이 유용하게 사용될 수 있다. 낮은 주파수에서는 식 (6)의 자기공진요소가 거의 1 정도의 값을 갖기 때문에 ωL/R로써 묘사될 수 있다. 하지만 주파수가 증가함에 따라 자기공진요소가 급격히 감소하므로 Q 값이 감소하게 된다.

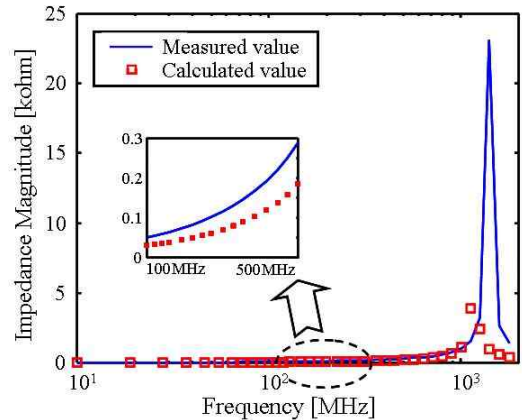


Fig. 9. Variation of impedance magnitude with frequency for RF chip inductor (2.4×2.0×1.4 mm²)

그림 9. RF 칩 인덕터의 주파수에 따른 임피던스 크기 변화 (2.4×2.0×1.4 mm²)

그림 9는 2.4×2.0×1.4mm² 크기의 인덕터에 대하여 주파수에 따른 임피던스 크기 변화를 나타낸다. 그림 9에서 임피던스의 크기는 1GHz 정도에서 급속히 증가하는 경향을 나타내며 1.1GHz에서 최대가 됨을 나타낸다. 인덕터의 임피던스가 SRF에서 최대가 되므로 SRF는 1.1GHz가 된다. 그림 6의 등가회로에 대해 임피던스 크기는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$|Z(j\omega)| = \sqrt{\frac{R^2 + (\omega L)^2}{(1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega RC)^2}} \quad (7)$$

그림 3, 4, 그리고 5의 데이터를 식 (7)에 대입하여 그림 9의 계산 값을 구하였다. 그림 9에 보여지는 것처럼 측정된 값과 계산 값이 거의 일치함을 알 수 있다.

그림 10은 $2.4 \times 2.0 \times 1.4 \text{mm}^3$ 크기의 인덕터에 대하여 주파수에 따른 임피던스 위상 변화를 나타낸다. 인덕터의 임피던스 위상은 SRF 이하에서 $+90^\circ$ (유도성), SRF에서 0° (순저항), 그리고 SRF 이상에서 -90° (용량성)가 되며 유도성-용량성 전환점에서 공진주파수를 알아내는 중요한 역할을 한다[10]. 따라서 그림 10으로부터 $2.4 \times 2.0 \times 1.4 \text{mm}^3$ 크기의 100 nH 인덕터는 1.1GHz 정도에서 SRF를 갖음을 확인할 수 있으며, 그림 6의 등가회로에 대해 임피던스의 위상은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\angle Z(j\omega) = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{\omega RC}{1 - \omega^2 LC}\right) \quad (8)$$

그림 3, 4, 5의 데이터를 식 (8)에 대입하여 그림 10의 계산값을 구하였고, 그림 10에서 측정된 값은 계산된 값과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

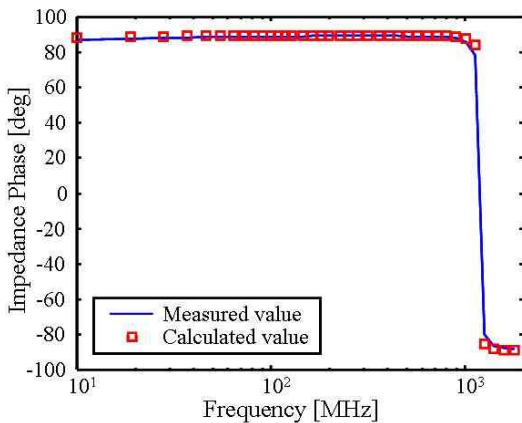


Fig. 10. Variation of impedance phase with frequency for RF chip inductor ($2.4 \times 2.0 \times 1.4 \text{mm}^3$)

그림 10. RF 칩 인덕터의 주파수에 따른 임피던스 위상 변화 ($2.4 \times 2.0 \times 1.4 \text{mm}^3$)

IV. 결론

7.48의 낮은 유전율 상수와 1 GHz에서 약 4.89×10^{-5} 의 낮은 loss tangent를 갖는 Al_2O_3 코어 재료를 이용한 솔레노이드 형태의 여러 가지 크기의 RF 칩 인덕터를 비교 분석하였다. (1) 제안된 인덕터의 크기는 각각 $0.86 \times 0.46 \times 0.45 \text{mm}^3$, $1.5 \times 1.0 \times 0.7 \text{mm}^3$, $2.1 \times 1.5 \times 1.0 \text{mm}^3$, $2.4 \times 2.0 \times 1.4 \text{mm}^3$ 이며, 코일로 사용된 Cu의 직경은 약 $27 \sim 40 \mu\text{m}$ 였다. (2) 권선수를 7회로 하였을 때 $13 \sim 100 \text{nH}$ 범위의 인덕턴스를 갖고, $5.2 \sim 1.1 \text{GHz}$ 의 SRF를 갖는다. (3) 인덕턴스가 증가함에

따라 SRF가 감소하였으며, 인덕터의 Q는 $300 \text{MHz} \sim 1.3 \text{GHz}$ 의 주파수 범위에서 최대 $49 \sim 80$ 까지 얻어졌다. (4) 인덕터에 대한 R, L, C의 고주파 특성으로부터 추론된 SRF는 Network Analyzer로 측정된 값과 잘 일치하였다.

참고문헌

- [1] Rob Groves, David L. Hareme, Dale Judus, "Temperature Dependence of Q and Inductance in Spiral Inductors Fabricated in a Silicon-Germanium/BiCMOS Technology," IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 32, no. 9, pp. 1455-1459, Sep, 1997.
- [2] I. Wolff and H. Kapusta, "Modeling of Circular Spiral Inductors for MMICs," IEEE MTT-s Digest, pp. 123-126, 1987.
- [3] Y. Kobayashi, S. Ishibashi, K. Shirakawa, J. Toriu, H. Matsuki, 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, pp. 3012-3014, Sep, 1992.
- [4] W. H. Hayt Jr., "Engineering electromagnetics," 5th ed. New York : McGRAW-Hill, 1989.
- [5] R. F. Soohoo, "Magnetic Thin Film Inductors for Integrated Circuit Applications," IEEE Trans. on Magnetics, vol. MAG-15, 1803, 1979.
- [6] Chong H. Ahn, Mark G. Allen, "Micro-machined Planar Inductors on Silicon Wafers for MEMS Applications," IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 45, no. 6, pp. 866-876, Dec, 1998.
- [7] M. Yamaguchi, K. Suezawa, K. I. Arai, Y. Takahashi, S. Kikuchi, Y. Shimada, W. D. Li, S. Tanabe, and K. Ito, "Microfabrication and characteristics of magnetic thin-film inductors in the ultrahigh frequency region," J. Appl. Phys., vol. 85, no. 11, pp. 7919-7922, 1999.
- [8] Takanori Tsutaoka, Teruhiro Kasagi, Kenichi Hatakeyama, "Magnetic Field Effect on the Complex Permeability for a Mn-Zn Ferrite and its Composite Materials," Journal of the European Ceramic Society, pp. 1531-1535, 1999.
- [9] Tae-Ok Kim, Uoung-Woo Oh, "The Formation Process of the Hexagonal Ferrite During Calculating the Mixture of $\text{Ba}(\text{OH})_2$, $\text{Zn}(\text{OH})_2$ and $6\text{Fe}(\text{OH})_3$," Journal of the Korean Ceramic Society, vol. 17, no. 3, pp. 121-128, 1980.

- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] C. H. Durney and C. C. Johnson, "Introduction to Modern Electromagnetics," New York : McGRAW-Hill, Chap. 2, pp. 101, 1969.
- [13] Chong H. Ahn, Mark G. Allen, "A New Toroidal-Meander Type Integrated Inductor With A Multilevel Meander Magnetic Core," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 30, no. 1, pp. 73-79, Jan, 1994.
- [14] K. Shirakawa, K. Yamaguchi, M. Hirata, T. Yamaoka, F. Takeda, K. Murakami, and H. Matsuki, "Thin Film Cloth-Structured Inductor for Magnetic Integrated Circuit," IEEE Trans. on Magnetics, pp. 2262-2264, 1990.
- [15] H. Matsuki, N. Fujii, K. Shirakawa, J. Toriu, K. Murakami, "Magnetic-Multi-Turn Planar Coil Inductor," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 27, no. 6, pp. 5438-5440, Nov, 1991.

저 자 소 개

김 재 욱 (정회원)


1993년 : 호서대학교 전자공학과
졸업 (공학사)

1998년 : 호서대학교 대학원
전자공학과 (공학석사)

2003년 : 호서대학교 대학원
전자공학과 (공학박사)

2006년 3월~현재 : 남서울대학교
전자공학과 전임강사

<주관심분야> 자동제어, 피지제어, chip inductor 개발,
자성박막 재료 및 소자의 개발