

솔레노이드 형태의 RF 칩 인덕터에 대한 연구

A Study for Solenoid-Type RF Chip Inductors

김재욱*, 윤의중*, 정영창*, 홍철호*

(Jae-Wook Kim*, Eui-Jung Yun*, Young-Chang Jung*, Chol-Ho Hong*)

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 $1.5 \times 1.0 \times 0.7$ mm³, $2.1 \times 1.5 \times 1.0$ mm³, and $2.4 \times 2.0 \times 1.4$ mm³ and copper (Cu) wire with 40 μ 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 33 to 100 nH and exhibit the self-resonant frequency (SRF) of 2.6 to 1.1 GHz. The SRF of inductors decreases with increasing the inductance and the inductors have the quality factor of 60 to 80 in the frequency range of 300 MHz to 1.1 GHz. In this study, small-size solenoid-type RF chip inductors with high inductance and high quality factor were fabricated successfully. It is suggested that the thin film-type inductor is necessary to fabricate the smaller size inductors at the expense of inductance and quality factor values.

Key Words(중요용어) : Solenoid, RF, Chip Inductor, Q-factor, Inductance

1. 서 론

칩 인덕터는 노트북 컴퓨터, 캠코더, 호출기, 셀룰러 폰 등과 같은 최신 전자제품의 회로에서 필수적인 수동소자 중의 하나이다¹⁻⁷⁾. 칩 인덕터의 중요 응용 분야로는 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 300 MHz 이상에서 급속

히 감소하는 문제점을 지니고 있다⁸⁾. 또한 최근 고주파 영역인 GHz 영역에서의 코어 재료로서 주목을 받고 있는 Y-hexagonal ferrite⁹⁾가 있으나 소결과정 중 이상이 생기기 쉽고 Curie 온도가 110°C로 낮은 단점이 있으므로 본 논문에서는 제조공정이 간단하고 용이한 Al_2O_3 를 코어 물질로 사용하여 Y-hexagonal ferrite에 버금가는 특성을 가진 인덕터 제작에 주력하였다.

최근 실리콘을 기초로 한 RF 칩 인덕터의 일반적인 형태는 솔레노이드 형태가 아닌 박막 spiral 형태이다. 그러나 이와 같은 박막 spiral 형태의 인덕터는 반도체 substrate에서의 에너지 분산으로 인하여 높은 주파수에서 품질계수가 감소하는 경향(substrate effect)을 나타낸다¹⁰⁾. 그러므로 substrate로부터 인덕터를 분리함으로써 전체적인 성능을 향상시킬 수 있다.

* 호서대학교 전기공학부

(충남 아산시 배방면 호서대학교,

Fax: 041-548-2932

E-mail : jaewook@opentown.net)

2000년 8월 17일 접수, 2000년 9월 25일 심사완료

솔레노이드 형태의 칩 인덕터는 위에서 언급한 원하지 않는 substrate effect를 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 인덕터를 제작하였고 그들의 RF 성능을 비교 분석하였다.

2. 실험

그림 1은 본 논문에서 제작된 초소형($1.5 \times 1.0 \times 0.7$ mm) 솔레노이드 형태의 RF 칩 인덕터 구조를 나타낸 것이며, Al_2O_3 코아 물질은 직경 40 μm 의 Cu 코일로 감겨져 있다. 크기가 각각 $1.5 \times 1.0 \times 0.7$ mm, $2.1 \times 1.5 \times 1.0$ mm, $2.4 \times 2.0 \times 1.4$ mm인 3가지 형태의 인덕터를 제작하였고 권선수(N)는 1~7이었다.

본 논문의 인덕터의 코아 재료는 기존의 ferrite가 아닌 1 GHz에서 7.48의 낮은 유전율 상수와 4.89×10^{-5} 의 낮은 loss tangent를 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 0.7~1.4 mm로 변화시켰다.

그림 1 RF chip 인덕터의 상측부 모양
($1.5 \times 1.0 \times 0.7$ mm)

Fig. 1 Top view of the RF chip inductor
($1.5 \times 1.0 \times 0.7$ mm)

코일은 chip 인덕터의 skin-effect의 원인이 되는 metal loss를 줄이기 위해 전도성이 우수한 약 40 μm 의 직경인 Cu를 사용하였다. 외부전류원은 코일의 양단을 코아 하층부의 양끝 단자에 본딩한 후 인가

하였다. 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 막(두께=200 μm)을 적층시켰다.

인덕터의 인덕턴스, 품질계수, 임피던스 크기와 위상에 대한 주파수 특성과 각 인덕터들의 등가회로 파라미터는 RF Impedance/Material Analyzer (HP-16193A test fixture가 장착된 HP4291B)로 측정하였고, 자기공진주파수 (SRF)는 Network Analyzer (HP8719D)로 측정하였다. 또한 코아 물질의 loss tangent와 상대투자율은 각각 HP16453A와 HP-16454A test fixture를 HP4291B에 장착하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

세 가지 크기($1.5 \times 1.0 \times 0.7$ mm, $2.1 \times 1.5 \times 1.0$ mm, $2.4 \times 2.0 \times 1.4$ mm)의 칩 인덕터가 제작되었다. 권선수가 7인 인덕터들의 인덕턴스와 SRF는 표 1에 요약되어져 있다. 표 1은 $1.5 \times 1.0 \times 0.7$ mm 크기의 샘플이 33 nH의 인덕턴스와 2.6 GHz의 SRF를 갖고, $2.1 \times 1.5 \times 1.0$ mm 크기의 샘플은 56 nH의 인덕턴스와 1.9 GHz의 SRF를 갖는다. 그리고 $2.4 \times 2.0 \times 1.4$ mm 크기의 샘플은 100 nH의 인덕턴스와 1.1 GHz의 SRF를 갖는다. 이와 같이 인덕터의 크기가 증가함에 따라 인덕턴스도 증가하고 SRF가 감소하는 경향을 나타낸다.

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

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

Sample No.	Size of Inductor (mm ³)	Inductance (nH)	SRF (GHz)
1	$1.5 \times 1.0 \times 0.7$	33	2.6
2	$2.1 \times 1.5 \times 1.0$	56	1.9
3	$2.4 \times 2.0 \times 1.4$	100	1.1

그림 2는 코아의 단면적 (A_c)/솔레노이드의 길이 (l) 비에 따른 인덕턴스의 변화를 나타낸다. 이때 점선은 다음과 같은 식에 의해 계산된 인덕턴스를 나타낸다¹²⁾.

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

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

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

표 2 본 논문에서 사용된 인덕터들의 구조 파라미터

Table 2 The structure parameters of inductors used in this paper

Size (mm)	A_c (m ²)	l (m)	a (m)
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

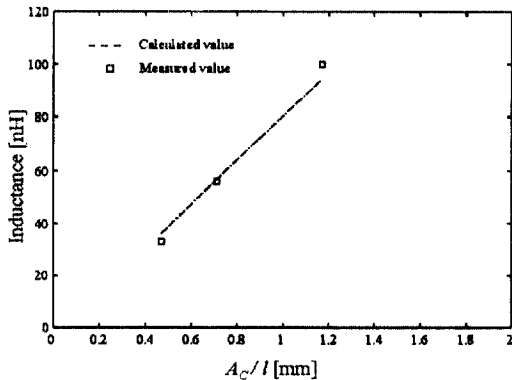


그림 2 RF 칩 인덕터의 인덕턴스 (L)와 A_c/l 사이의 관계

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

그림 3은 3가지 크기의 인덕터들에 대한 대표적인 인덕턴스-주파수 특성을 나타낸다. 그림에서 인덕턴스는 약 800 MHz 까지 거의 일정하였으며 33 nH, 56 nH, 100 nH의 높은 값을 갖는다. 또한 800 MHz 이상의 주파수 영역에서는 크기가 큰 인덕터일수록 더 낮은 주파수에서 인덕턴스가 급격히 증가하는 경향을 나타내는데, 이는 동일 권선수에 대하여 인덕터의 크기가 클수록 A_c/l 의 비가 커지므로(그림 2참조) 인덕턴스가 커지게 되며, 인덕턴스가 커짐에 따라 SRF가 감소하게 됨을 나타낸다. 또한 그림 3에서 크기가 2.4×2.0×1.4 mm³인 샘플 경우에는 1.1 GHz 정도에서 SRF가 나타남을 알 수 있다. 이러한 인덕턴스와 SRF 사이의 관계는 Network Analyzer로 얻어진 표 1의 관계와 일치함을 알 수 있다.

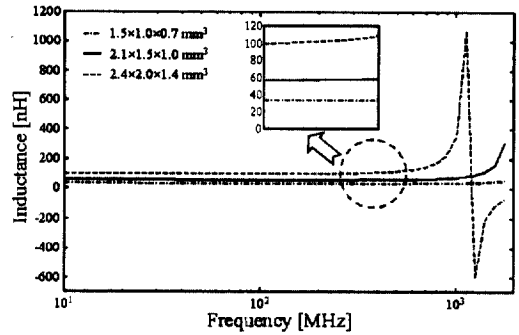


그림 3 RF 칩 인덕터들의 대표적인 인덕턴스-주파수 특성

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

그림 4는 3가지 크기의 인덕터들에 대한 대표적인 커패시턴스-주파수 특성을 나타낸다. 각 인덕터들의 커패시턴스가 SRF 부근에서 옴의 값으로부터 양의 값으로 전위됨을 나타낸다. 또한 인덕터의 크기가 클수록 더 낮은 SRF에서 커패시턴스가 양의 값으로 전위되어 inductive 상태에서 capacitive 상태로 변한다는 것을 나타내며, 이는 인덕터의 크기가 클수록 더 낮은 주파수에서 분산커패시턴스 효과가 나타남을 알려준다.

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

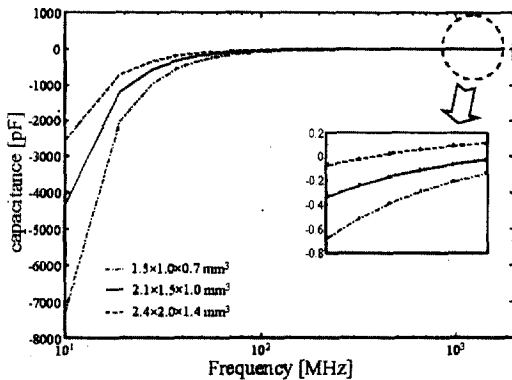


그림 4 RF 칩 인덕터들의 대표적인 커패시턴스-주파수 특성

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

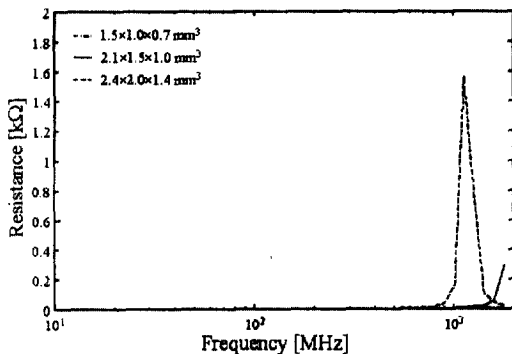


그림 5 RF 칩 인덕터들의 대표적인 저항-주파수 특성

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

그림 6은 Ahn and Allen¹³⁾과 Yue and Wong¹⁰⁾에 의해 보고된 소형 RF 칩 인덕터의 등가회로를 나타낸다. 여기서 R 은 Cu 코일에서 skin effect 때문에 발생하는 에너지 손실인 금속 저항을 의미하고, C 는 도선의 감김 사이에 생긴 분산 커패시턴스를 나타낸다. 표 3은 HP4291B로 얻어진 각 인덕터들의 등가회로 파라미터를 요약하였다. 표 3에서 L 은 표 1의 L 과 거의 일치하였으며, 분산 커패시턴스는 fF 정도의 작은 값을 가지므로 사용 주파수 범위에서 무시될 정도의 작은 효과를 갖는다.

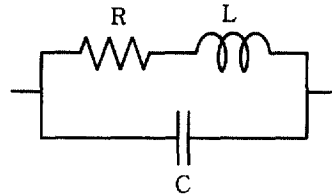


그림 6 회로 파라미터 분석에 사용된 RF 칩 인덕터의 등가회로

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

표 3 RF 칩 인덕터의 등가회로 파라미터

Table 3 The equivalent circuit parameters for RF chip inductors

Size (mm ²)	L (nH)	R (mΩ)	C (fF)
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

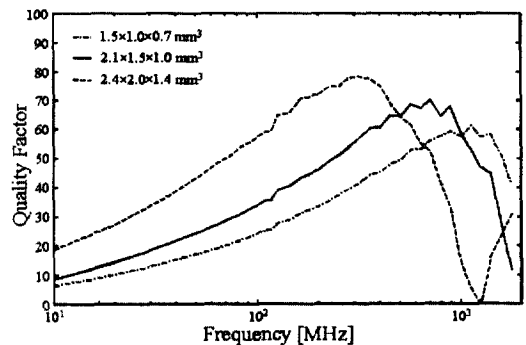


그림 7 RF 칩 인덕터들의 대표적인 quality factor-주파수 특성

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

그림 7은 칩 인덕터들의 대표적인 quality factor-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 코어 크기의 감소로 동일 권선수(7회)에 대해 코일간의 간격이 좁

아저서 분산 커패시턴스의 영향이 증가하였기 때문이다. 일반적으로 품질계수는 식 (2)와 같이 표현된다^{10,14,15}.

인덕터는 SRF에서 peak magnetic 에너지와 peak electric 에너지가 같기 때문에 인덕터의 품질계수는 SRF에서 0의 값을 갖는다¹⁰. 따라서 그림 7에서 품질계수가 0이 될 때의 주파수를 인덕터들의 SRF로 간주할 수 있고, 이 SRF 값은 $2.4 \times 2.0 \times 1.4 \text{ mm}$ 크기의 샘플일 때 약 1.1 GHz가 됨을 알 수 있다. 또한 Q는 300 MHz~1.1 GHz 주파수 범위에서 최대 60~80의 값을 갖음을 알 수 있다. 그림 6에서의 등가회로에 대하여 magnetic energy와 electric energy는 각각 식 (3), (4)와 같이 표현될 수 있고, 한 주기의 에너지 손실은 주기 $T = 2\pi/\omega$ 에 회로의 분산 전력을 곱한 것이므로 식 (5)와 같이 표현될 수 있다.

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

여기서 $\omega L/R$ 은 저장된 자기에너지와 저항 R 에서의 ohmic 손실을 나타내며, self-resonant factor는 주파수 증가에 따라 peak electric 에너지가 증가하고 따라서 자기공진주파수에서 Q 가 0이 되는 효과 때문에 생기는 자기공명요소이다.

그림 8은 $2.4 \times 2.0 \times 1.4 \text{ mm}$ 크기의 100 nH 인덕터에 대하여 주파수에 따른 quality factor의 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 Q 의 변화를 예측하는데 식 (6)이 유용하게 사용될 수 있다. 낮은 주파수에서는 식 (6)의 self-resonant factor가

거의 1 정도의 값을 갖기 때문에 $\omega L/R$ 로써 묘사될 수 있다. 하지만 주파수가 증가함에 따라 self-resonant factor가 급격히 감소하므로 Q 값이 감소하게 된다.

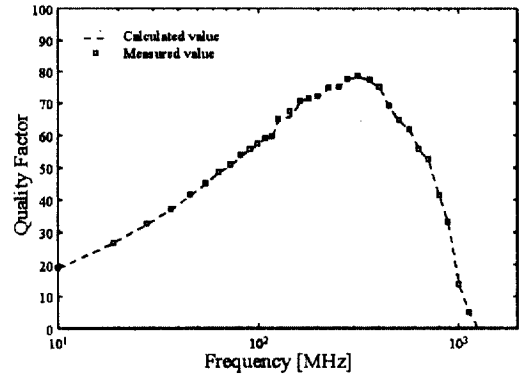


그림 8 RF 칩 인덕터의 주파수에 따른 quality factor 변화 (크기: $2.4 \times 2.0 \times 1.4 \text{ mm}$)

Fig. 8 Variation of quality factor with frequency for RF chip inductor (size: $2.4 \times 2.0 \times 1.4 \text{ mm}$)

그림 9는 $2.4 \times 2.0 \times 1.4 \text{ mm}$ 크기의 인덕터에 대한 임피던스 크기-주파수 특성을 나타낸다. 그림 9에서 임피던스의 크기는 1 GHz 정도에서 급속히 증가하는 경향을 나타내며 1.1 GHz에서 최대가 됨을 나타낸다. 인덕터의 임피던스가 SRF에서 최대가 되므로 SRF는 1.1 GHz가 된다. 그림 6의 등가회로에 대해 임피던스 크기는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$Q = 2\pi \times \frac{\text{peak magnetic energy} - \text{peak electric energy}}{\text{energy dissipated by the circuit in one period}} \quad (2)$$

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

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

$$\text{Energy loss in one period} = \frac{2\pi}{\omega} \cdot \frac{V^2}{2} \cdot \left[\frac{R}{R^2 + (\omega L)^2} \right] \quad (5)$$

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

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

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.

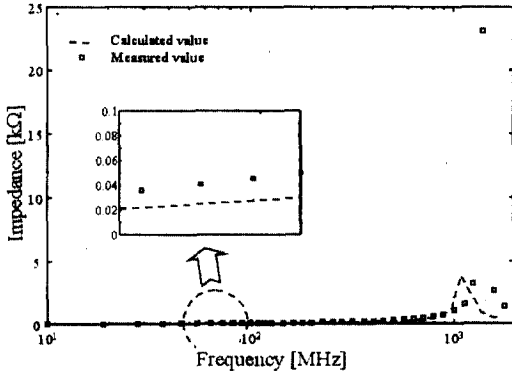


그림 9 RF 칩 인덕터의 일반적인 임피던스-주파수 특성

Fig. 9 Typical impedance-frequency characteristic for the RF chip inductor of 100 nH

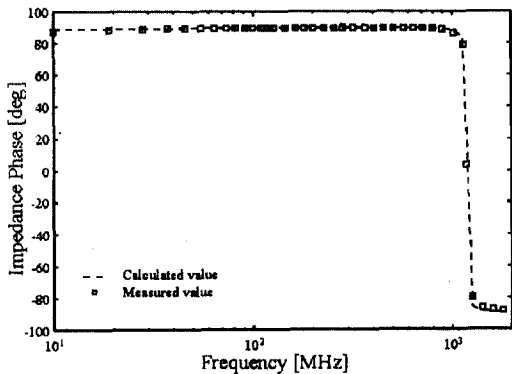


그림 10 RF 칩 인덕터의 일반적인 임피던스 위상-주파수 특성

Fig. 10 Typical impedance phase-frequency characteristic for the RF chip inductor of 100 nH

그림 10은 2.4×2.0×1.4 mm 크기의 인덕터에 대한

임피던스 위상-주파수 특성을 나타낸다. 인덕터의 임피던스 위상은 SRF 이하에서 +90° (유도성), SRF에서 0° (순저항), 그리고 SRF 이상에서 -90° (용량성)가 되며 유도성-용량성 전환점에서 공진주파수를 알아내는 중요한 역할을 한다¹⁰⁾. 따라서 그림 10으로부터 2.4×2.0×1.4 mm 크기의 100 nH 인덕터는 1.1 GHz 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.

4. 결 론

7.48의 낮은 유전율 상수와 1 GHz에서 약 4.89×10⁻⁵의 낮은 loss tangent를 갖는 Al₂O₃ 코어 재료를 이용한 솔레노이드 형태의 여러 가지 크기의 RF 칩 인덕터를 비교 분석하였다. (1) 제안된 인덕터의 크기는 각각 1.5×1.0×0.7 mm, 2.1×1.5×1.0 mm, 2.4×2.0×1.4 mm이며, 코일로 사용된 Cu의 직경은 약 40 μm였다. (2) 권선수를 7회로 하였을 때 33~100 nH 범위의 인덕턴스를 갖고, 2.6~1.1 GHz의 SRF를 갖는다. (3) 인덕턴스가 증가함에 따라 SRF가 감소하였으며, 인덕터의 Q는 300 MHz~1.1 GHz의 주파수 범위에서 최대 60~80까지 얻어졌다. (4) 인덕터에 대한 R, L, C의 고주파 특성으로부터 추론된 SRF는 Network Analyzer로 측정된 값과 잘 일치하였다.

본 연구에서는 큰 인덕턴스와 큰 Q 값을 갖는 최소형 솔레노이드 형태의 RF 칩 인덕터를 성공적으로 제작하였다. 더 작은 크기의 인덕터를 제작하기 위해서는 인덕턴스와 Q 값이 저하되는 것을 감수하더라도 박막형태로의 전환이 필요하다고 사료된다.

참고 문헌

[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 Ba(OH)₂, Zn(OH)₂ and 6Fe(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.