

Solenoid 형태의 초소형 SMD RF 칩 인덕터에 대한 주파수 특성

김재욱^{1*}

Frequency Characteristics for Micro-scale SMD RF Chip Inductors of Solenoid-Type

Jae-Wook Kim^{1*}

요약 본 논문에서는 비정질 Al_2O_3 코어 재료를 응용한 단순 solenoid 형태의 소형·고성능 RF 칩 인덕터를 연구하였다. 인덕터 크기는 $0.86 \times 0.46 \times 0.45 \text{mm}^3$ 이고, $27 \mu\text{m}$ 직경의 Cu를 코일로 사용하였다. RF 칩 인덕터의 인덕턴스(L), 양호 인자(Q), 임피던스(Z), 커패시턴스(C)와 등가회로 파라미터 등의 주파수 특성은 RF impedance/Material Analyzer (HP16193A test fixture가 장착된 HP4291B)로 측정되었다. 9~12회의 권선수를 가진 RF 칩 인덕터들의 인덕턴스 값은 21~34nH 범위를 가진다. 이들의 자기공진주파수 (SRF)는 5.7~3.7GHz 영역을 나타낸다. 또한 자기공진주파수가 증가함에 따라 인덕턴스 값이 감소하는 경향을 보이고 있다. 인덕터의 SRF는 인덕턴스가 증가함에 따라 감소하며, Q의 값은 900MHz~1.7GHz 주파수 범위에서 최대 38~49까지 얻어졌다.

Abstract In this work, micro-scale, high-performance solenoid-type RF chip inductors utilizing amorphous Al_2O_3 core material were investigated. The size of the chip inductors was $0.86 \times 0.46 \times 0.45 \text{mm}^3$ and copper (Cu) wire with $27 \mu\text{m}$ diameter was used as the coil. High frequency characteristics of the inductance(L), quality factor(Q), impedance(Z), and equivalent circuit parameters of the RF chip inductors were measured and analyzed using an RF impedance/ material analyzer (HP4291B with HP16193A test fixture). It was observed that the RF chip inductors with the number of turns of 9 to 12 have the inductance of 21 to 34nH and exhibit the self-resonant frequency (SRF) of 5.7 to 3.7GHz. The SRF of inductors decreases with increasing the inductance and inductors have the quality factor of 38 to 49 in the frequency range of 900MHz to 1,7GHz.

Key Words : Chip Inductor, RF, Inductance, Quality-factor, Al_2O_3

1. 서론

우수한 성능을 가지며 소형·경량인 무선통신기기(호출기, PCS, 휴대폰, ITM2000 등)와 최신 전자제품(노트북 컴퓨터, 캠코더 등)을 구현하기 위해서 GHz 대의 고주파수에서 동작하는 소형 RF 칩 인덕터의 개발은 중요한 연구분야가 되어왔다. 칩 인덕터의 응용분야로는 캐패시터와 결합하여 LC 필터로서의 사용, 능동소자를 위한 AC 초크로서의 사용, 회로정합과 EMI 필터로서의 사용되고 있다. 최근 많이 사용되는 자성 ferrite 코어 재료는 300MHz 이상의 주파수영역에서 자화율이 급속하게 감소하여 그 이상인 500MHz에서 수 GHz의 RF 범위에 응

용하는데 한계가 있다.

RF 칩 인덕터의 인덕턴스는 코어의 크기, 권선수, 권선 간격 등에 의해 결정된다. 인덕터의 양호 인자 (Q-인자)는 소자의 에너지 저장 능력의 척도이다[1]. 그러므로 고성능의 인덕터는 Q-인자가 높아야만 한다. 또한 높은 Q-인자를 얻는 것과 동시에 인덕턴스를 증가시키기 위해서는 권선수를 증가시키는 방법이 가장 효과적이거나 제한된 면적 내에 코일을 감기 위해서는 권선의 간격이 좁아 지므로 도체의 저항이 증가하여 Q-인자가 감소하게 된다. 결과적으로 인덕턴스와 Q-인자를 동시에 극대화시키는 힘들다[2,3].

따라서 본 논문에서는 비정질 Al_2O_3 세라믹 코어 재료를 응용하여 인덕턴스와 Q-인자를 동시에 극대화시킨 단순 solenoid 형태의 소형·고성능 RF 칩 인덕터에 대한 주파수 특성을 연구하였다.

¹남서울대학교 전자공학과

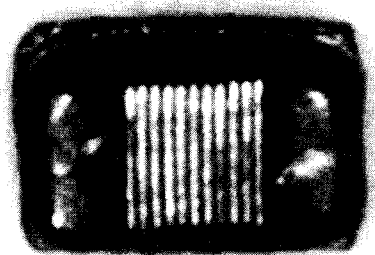
*교신저자: 김재욱(jwkim@nsu.ac.kr)

2. 실험

그림 1은 본 논문에서 사용된 대표적인 solenoid 형태의 RF 칩 인덕터의 측면부와 하층부 구조를 나타내었다. 크기는 $0.86\text{mm} \times 0.46\text{mm} \times 0.45\text{mm}$ 이다. 코아의 재료로는 기존의 ferrite가 아닌 Al_2O_3 alumina를 사용하였다. EDX를 이용하여 분석한 결과, 코아의 성분은 그림 2에 보여지는 바와 같으며 Al 28%, O 72%로 구성되었다. 본 논문의 인덕터의 코아 재료로 사용된 Al_2O_3 는 8.8의 낮은 유전율 상수와 0.0006의 낮은 loss tangent를 갖는다[4].



(a) 측면부 (인덕턴스=21nH, 권선수=9)



(b) 하층부 (인덕턴스=34nH, 권선수=12)

그림 1. RF 칩 인덕터의 구조

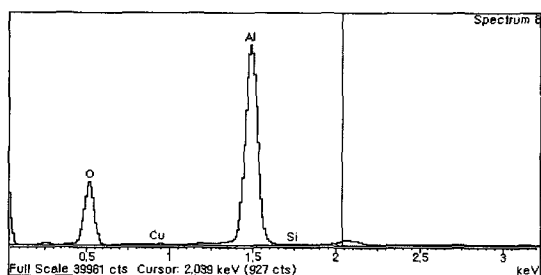


그림 2. EDX를 이용한 Al_2O_3 분석 결과

유전체 물질 분말은 비수용성 용매, 접합제 (PVB, poly-vinyl butyral), plasticizer (DOP, dioctyl phthalate) 등과 미량의 다른 화합물을 혼합하여 900°C 미만의 sintering 온도를 사용하여 Al_2O_3 paste를 만들었다. 두께

는 약 0.3mm 로 고정시켰다. 코일은 칩 인덕터의 skin-effect의 원인이 되는 metal loss를 줄이기 위해 전도성이 우수한 약 $27\mu\text{m}$ 의 직경인 Cu를 사용하였다. 외부전류원은 코일의 양단을 코아 가장자리에 도금처리 방식으로 적층된 Au 막에 분당시킨 후 인가하였다.

인덕터의 인덕턴스, Q-인자, 임피던스 크기와 위상, 그리고 커패시턴스에 대한 주파수 특성은 RF Impedance/Material Analyzer (HP16193A test fixture가 장착된 HP4291B)로 측정하였고, DC 저항 (DCR)은 RF LCR Meter (HP4286A)로 측정하였다.

3. 측정 결과

표 1은 본 논문에서 사용된 RF 칩 인덕터들의 권선수와 DC 저항 등과 같은 특성들을 요약하였다.

표 1. RF 칩 인덕터의 DC 저항과 자기공진주파수

Sample No.	1	2	3
Inductance (nH)	21	29	34
Number of Turns	9	11	12
DCR (ohm)	0.37	0.47	0.53

칩 인덕터의 DC 저항은 코일의 길이에 의해 결정된다. 그러므로 코일의 더 많은 권선수는 더 긴 코일의 길이에 상응하고 인덕턴스 뿐만 아니라 DC 저항을 더 크게 하는 결과가 된다. 그림 3에서 알 수 있듯이 인덕턴스와 권선수 사이의 관계로부터 인덕턴스는 권선수에 비례한다. 이는 다음과 같은 표현식으로 나타낼 수 있다[5,6,7].

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

여기서 N 은 권선수, A_c 는 Al_2O_3 코아의 단면적, l_s 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 진공투자율과 Al_2O_3 코아의 상대투자율을 나타낸다.

그림 3에서 계산을 위한 파라미터들은 솔레노이드 칩 인덕터의 구조로부터 $A_c = 0.12[\text{mm}^2]$, $a = 0.195[\text{mm}]$, $z = l_s/2$ 의 값을 가지며, 코아 물질의 투자율은 $\mu_r = 1$ 로 측정된 결과값을 사용하였다. 또한 l_s 는 15nH와 21nH의

경우 0.38[mm], 29nH와 34nH의 경우 0.42[mm]로 하였다. 솔레노이드의 반경 a 는 $\sqrt{A_c/\pi}$ 로 계산되어졌다.

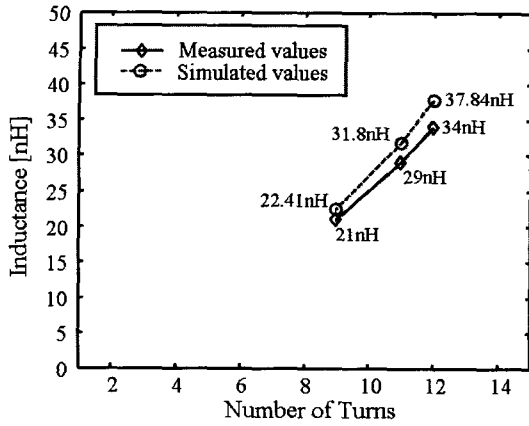


그림 3. 인덕턴스와 권선수 사이의 관계

그림 4는 표 1에 나타난 4가지 인덕터들의 대표적인 인덕턴스-주파수 특성을 나타낸다. 그림 4는 인덕턴스가 클수록 테스트 주파수 범위 내의 고주파수에서 급속히 증가함을 보이는데, 이는 인덕턴스가 클수록 공진주파수가 감소하게 됨을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 인덕턴스 값은 1GHz 까지 거의 일정하였으며 21~34nH 범위의 높은 값을 가진다.

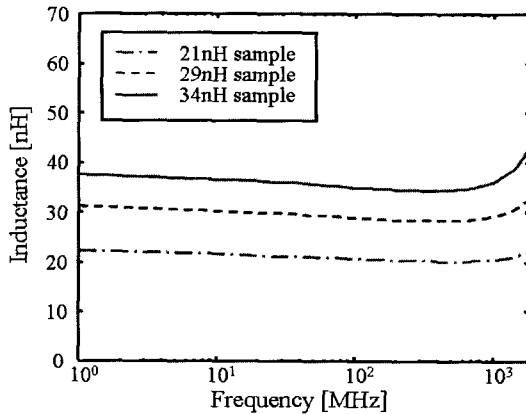


그림 4. RF 칩 인덕터들의 대표적인 인덕턴스-주파수 특성

그림 5는 측정된 인덕터들의 대표적인 커패시턴스-주파수 특성으로, 음의 정전 용량은 인덕터가 유도성 특성을 잘 유지하고 있음을 나타낸다. 1MHz의 주파수에서 15nH는 $-0.591\mu\text{F}$, 21nH는 $-0.18\mu\text{F}$, 29nH는 $-0.147\mu\text{F}$, 그리고 34nH는 $-0.141\mu\text{F}$ 의 커패시턴스를 가진다. 이는 권선수가 증가함에 따라 권선 간의 분산 커패시턴스가 증

가함을 나타낸다. 또한 음의 값으로부터 양의 값으로 전위되는 지점이 유도상태에서 용량상태로 변하여 인덕터의 특성을 상실하게 되는 SRF를 나타내는데, 측정주파수 범위인 1.8GHz 이내에서는 전위점이 존재하지 않으므로 인덕터의 특성을 잘 유지하고 있다.

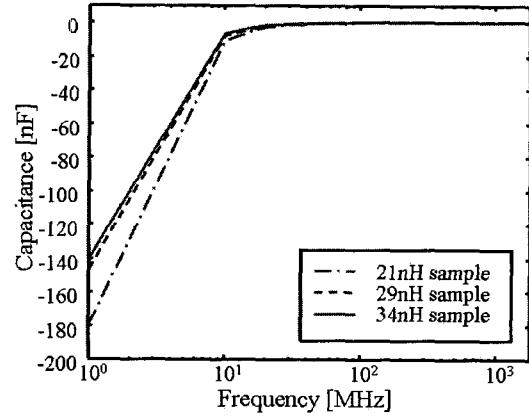


그림 5. RF 칩 인덕터들의 대표적인 커패시턴스-주파수 특성

그림 6은 Ahn and Allen[7]과 Yue and Wong[8]에 의해 보고된 소형 RF 칩 인덕터의 등가회로를 나타낸다. 여기서 R은 Cu 코일에서 표피 효과 때문에 발생하는 에너지 손실인 금속 저항을 의미하고, Cs는 도선의 감김 사이에 생긴 분산 커패시턴스를 나타낸다. 표 2는 HP4291B로 얻어진 각 인덕터들의 등가회로 파라미터를 요약하였다. 표 2에서 L은 표 1의 L과 거의 일치하였으며, 분산 커패시턴스는 fF 정도의 작은 값을 가지므로 사용 주파수 범위에서 무시될 정도의 작은 효과를 갖는다.

SRF는 인덕터 뿐만 아니라 여러 소자에서도 중요하게 여겨지는 주파수 특성 중의 하나이다. SRF가 일어나는 지점은 인덕터의 특성이 유도성에서 용량성으로 전위되는 지점으로 SRF 부근에서는 인덕터의 특성을 보장할 수 없으며 SRF 이상이 되면 더 이상 인덕터로서의 성능을 발휘할 수 없다. 따라서 인덕터의 사용 주파수 대역을 극대화하기 위해서는 SRF의 주파수 대역을 높여야 하며, SRF를 높이는 방법으로는 코일과 코어 사이, 그리고 코일 간의 사이에서 발생하는 분산 커패시턴스를 최소화함으로써 구현할 수 있다. 일반적인 SRF를 구하기 위한 식은 그림 6의 등가회로로부터 다음과 같이 표현된다.

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

일반적인 솔레노이드 칩 인덕터의 SRF는 소자의 인덕턴스 크기에 반비례하기 때문에 인덕턴스가 작을수록 인덕터의 사용 주파수 영역이 넓어진다. 식 (2)에 표 2의 등가회로 파라미터 값을 대입함으로써 21nH는 5.71GHz, 29nH는 4.48GHz, 34nH는 3.68GHz와 같은 계산 결과를 얻을 수 있다.

또한, 계산 결과로부터 자기공진 주파수가 21nH인 첫 번째 샘플에서 5.71GHz로 가장 크고, 34nH인 세 번째 샘플에서 3.68GHz로 가장 낮은 값을 갖는다. 이로부터 자기공진주파수는 인덕턴스가 증가함에 따라 감소함을 나타낸다.

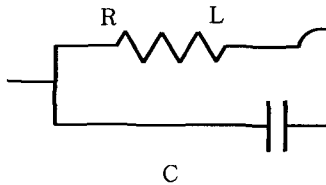


그림 6. 솔레노이드 RF 칩 인덕터의 등가회로

표 2. 측정된 등가회로 파라미터와 계산된 SRF 값들의 요약

	R[mΩ]	C[fF]	L[nH]	SRF[GHz]
21nH sample	325.07	38.891	19.96	5.71
29nH sample	418.5	45.797	27.592	4.48
34nH sample	463.98	56.912	32.876	3.68

그림 7은 측정된 인덕터들의 대표적인 양호 인자-주파수 특성을 나타낸다. RF 칩 인덕터의 Q-인자는 주파수가 증가함에 따라 증가하며 최대값에 도달하게 된다. 그 이상 주파수가 증가하게 되면 Q-인자의 값은 감소하게 된다. 일반적으로 Q-인자는 다음과 같이 표현할 수 있다 [8,9,10].

$$Q = 2\pi \cdot \frac{\text{peak magnetic 에너지} - \text{peak electric 에너지}}{\text{한 주기 동안 회로에서 소비된 에너지}} \quad (3)$$

$$\text{Peak magnetic 에너지} = \frac{1}{2} LI^2 = \frac{LV^2}{2[R^2 + (\omega L)^2]} \quad (4)$$

$$\text{Peak electrical 에너지} = \frac{1}{2} CV^2 \quad (5)$$

한 주기 동안 회로에서 소비된 에너지

$$= \frac{2\pi}{\omega} \cdot \frac{V^2}{2} \cdot \left[\frac{R}{R^2 + (\omega L)^2} \right] \quad (6)$$

$$Q = \frac{\omega L}{R} \left[1 - \frac{R^2 C}{L} - \omega^2 LC \right] = \frac{\omega L}{R} \times \text{self-resonant factor} \quad (7)$$

인덕터는 자기공진주파수에서 최대 자기 에너지와 최대 전기 에너지가 같기 때문에 인덕터의 Q-인자는 공진 주파수에서 0의 값을 갖는다. 그림 7에서 Q-인자가 900MHz~1.7GHz 범위에서 최대 38~49의 값을 가진다.

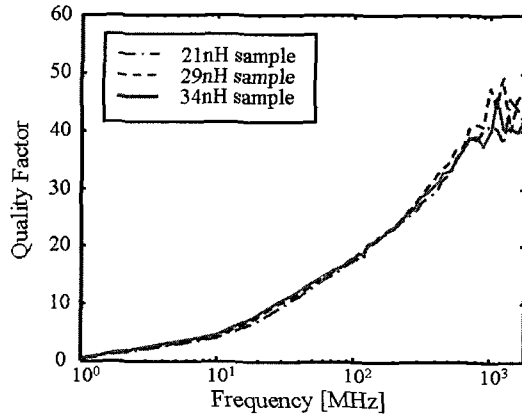


그림 7. RF 칩 인덕터들의 대표적인 양호 인자-주파수 특성

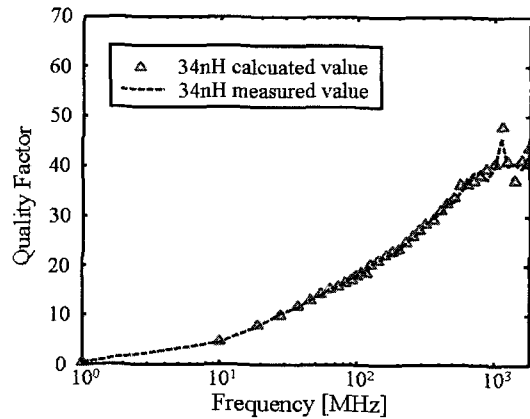


그림 8. RF 칩 인덕터의 주파수에 따른 양호 인자 변화

그림 8은 34nH 인덕터에 대하여 주파수에 따른 양호 인자의 변화를 나타낸다. 그림 8에서 계산 값은 식 (7)을 이용함으로써 얻어진다. 그림 8의 측정된 값은 계산된 값과 잘 일치하므로, 칩 인덕터의 주파수에 따른 Q의 변화를 예측하는데 식 (7)이 유용하게 사용될 수 있다. 낮은 주파수에서는 식 (7)의 자기 공진 인자가 거의 1 정도의 값을 갖기 때문에 $\omega L/R$ 로써 묘사될 수 있다. 하지만 주

파수가 증가함에 따라 자기 공진 인자가 급격히 감소하므로 Q 값이 감소하게 된다.

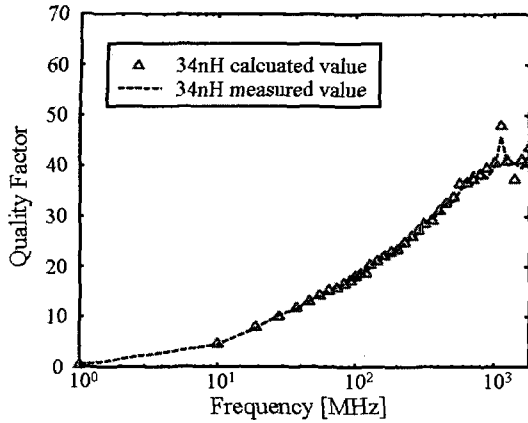


그림 8. RF 칩 인덕터의 주파수에 따른 양호 인자 변화

그림 9는 측정된 인덕터들의 대표적인 임피던스-주파수 특성을 나타낸다. 그림 9에 따르면 주파수가 증가함에 따라 임피던스가 급격히 증가함을 알 수 있다. 이때 같은 주파수에서 인덕턴스가 증가할수록 임피던스 크기가 증가함을 알 수 있으며, 그림 9에서도 확인할 수 있다. 인덕터의 임피던스 크기는 그림 6의 등가회로를 이용하여 다음과 같은 일반적인 식으로 나타낼 수 있다.

$$|Z(j\omega)| = \sqrt{\frac{R^2 + (\omega L)^2}{(1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega RC)^2}} \quad (8)$$

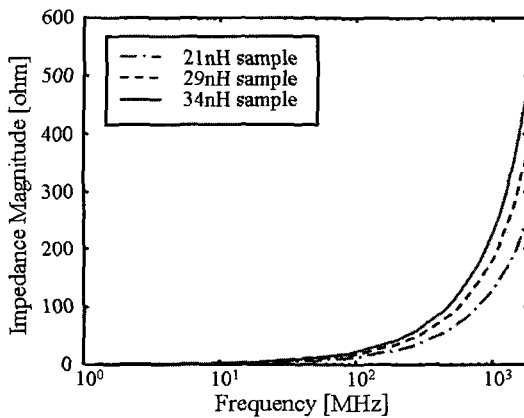


그림 9. RF 칩 인덕터들의 대표적인 임피던스 크기-주파수 특성

그림 10은 34nH 인덕터의 주파수에 따른 임피던스 크기 변화를 나타낸다. 계산 값은 식 (8)을 이용하여 계산되

었다. 그림 9에 보여지는 것처럼 측정된 값과 계산 값이 거의 일치함을 알 수 있다.

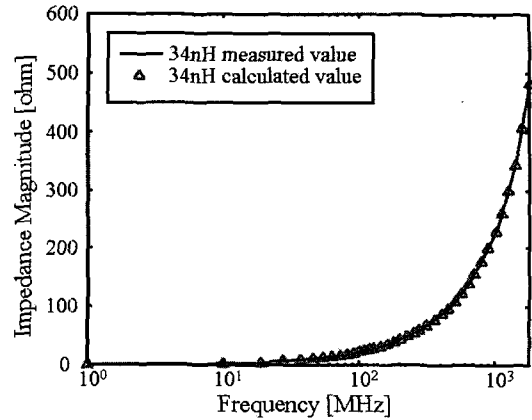


그림 10. RF 칩 인덕터의 주파수에 따른 임피던스 크기 변화

그림 11은 측정된 인덕터들의 대표적인 임피던스 위상-주파수 특성을 나타낸다. 일반적으로 인덕터들의 임피던스 위상은 자기공진주파수 보다 작은 주파수 영역에서 +90도 (유도성), 자기공진주파수에서 0도 (순 저항 성분), 그리고 자기공진주파수 보다 큰 주파수 영역에서 -90도 (용량성)가 되어 유도성-용량성 전환점에서 자기공진주파수를 알아내는데 중요한 역할을 한다. 그림 6의 등가회로에 대해 임피던스의 위상은 다음과 같은 식으로 표현 된다.

$$\angle Z(j\omega) = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{\omega RC}{1 - \omega^2 LC}\right) \quad (9)$$

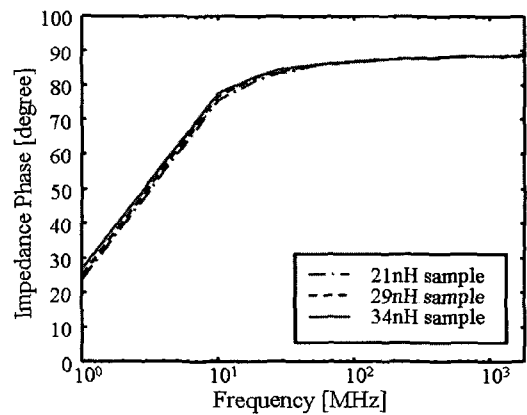


그림 11. RF 칩 인덕터들의 대표적인 임피던스 위상-주파수 특성

그림 12는 34nH 인덕터의 주파수에 따른 임피던스 위상 변화를 나타낸다. 계산 값은 식 (9)를 이용하여 계산되었다. 그림 12에 보여지는 것처럼 측정된 값과 계산 값이 거의 일치함을 알 수 있다.

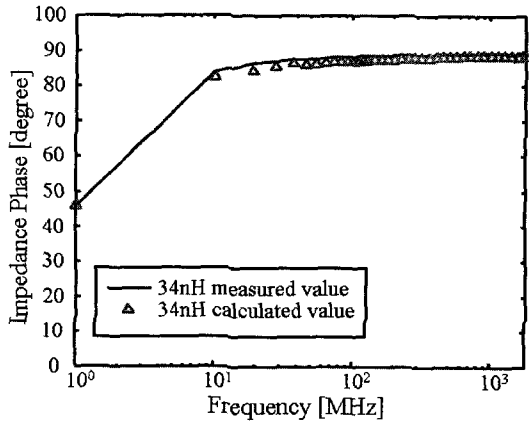


그림 12. RF 칩 인덕터의 주파수에 따른 임피던스 위상 변화

4. 결론

8.8의 낮은 유전율 상수와 0.0006의 낮은 loss tangent를 갖는 Al_2O_3 세라믹 코어 재료를 이용한 인덕터가 본 논문의 실험에 사용되었다. 이 칩 인덕터의 크기는 $0.86\text{mm} \times 0.46\text{mm} \times 0.45\text{mm}$ 이며, 코일로 사용된 Cu의 직경은 약 $27\mu\text{m}$ 이다. 실험에 사용된 3가지 샘플은 각각 21~34nH의 인덕턴스를 가지며, Q-인자의 값은 900MHz~1.8GHz 범위에서 최대 38~48까지 얻어졌다. 자기공진주파수는 측정 결과로부터 1.8GHz 이상의 값을 가지며, 식을 이용하여 계산한 결과 3.7~5.7GHz가 되었다.

결과적으로 본 논문에서 사용한 단순 solenoid 형태의 RF 칩 인덕터는 큰 인덕턴스와 높은 Q-인자를 동시에 극대화시킬 수 있는 특성을 지님을 확인할 수 있었다.

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, "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.
 [7] Chong H. Ahn, Mark G. Allen, "Micromachined Planar Inductors on Silicon Wafers for MEMS Applications," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 45, no. 6, pp. 866-876, Dec, 1998.
 [8] 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.
 [9] 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.
 [10] 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.

김재욱(Jae-Wook Kim)

[정회원]



- 1993년 2월 : 호서대학교 전자공학과 (공학사)
- 1998년 8월 : 호서대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2003년 8월 : 호서대학교 전자공학과 (공학박사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 남서울대학교 전자공학과 전임강사

<관심분야> : 자동제어, 퍼지제어, chip inductor 개발, 자성박막 재료 및 소자의 개발