코일직경에 따른 H-type 솔레노이드 RF chip 인덕터 성능 비교에 관한 연구

윤의중, 이태범, 김재욱, 김용석, 홍철호, 정영창
호서대 전기정보통신공학부

A Comparison Study of performance of H-type Solenoid RF Chip Inductors on the diameter

Eui-Jung Yun, Tae-Bum Lee, Jae-Wook Kim, Yong-Suk Kim, Chol-Ho Hong, Won-Chang Seo
School of Electrical, Information and Communication Eng..Hoseo Univ.

Abstract

본 논문에서는 1.58 × 0.82 × 0.94 mm^3크기의 H 형태의 솔레노이드형 RF 칩 인덕터를 코일의 직경과 권선수를 변화시키면서 제작하였고, 그들의 고주파 성능을 비교 분석하였다. 저손실 Al_2O_3재료를 코아로 30㎛ ~ 40㎛의 여러 직경을 가진 Cu를 코일로 사용하였다. 인덕터의 인덕턴스(L), 품질계수(Q), 저항(R), 임피던스(Z) 그리고 커패시턴스(C) 등의 주파수 특성은 HP4291B로 측정하였다.

실험결과 동일권선수에 대해 코일직경이 작을수록 L, Q, R, 그리고 |Z|등이 증가하였고, 그 증가폭은 권선수가 클수록 커지는 경향이 있음을 알 수 있었다. 그러나 코일직경이 작을수록 기생 커패시턴스 효과가 빨리 나타나 자기 공진주파수 효과가 감소하는 경향을 보이고 있음을 확인하였다.

코일직경이 35㎛이고 권선수가 6인 경우에 대표적인 값들은 다음과 같다.
L=31.4nH(at 250MHz), Q=49.6(at 700MHz),
R=0.362Ω(at 1MHz)

1. 서 론

우수한 성능을 지니며 소형·경량화 된 무선통신기(호출기, PCS, 휴대폰, PDA 단말기, IMT-2000 등)와 최신 전자제품(노트북 컴퓨터, 캠코더 등)을 구현하기 위하여 GHz 대의 고주파에서 동작하는 소형 RF 칩 인덕터는 무선통신 장비의 사용자가 증가함에 따라 그 수요량이 증가되고 있다. 또한 무선통신 장비뿐만이 아니라 여러 장비들의 소형 경량화 추세에 따라 RF 칩 인덕터의 수요가 폭발적으로 증가하고 있다.

RF 칩 인덕터의 인덕턴스는 코아의 크기, 권선수, 권선 간격 등에 의해 결정된다. 인덕터의 quality factor (Q-factor)는 소자의 에너지 저장 능력의 척도이다[1]. 그러므로 고성능 인덕터는 Q-factor가 높아야만 한다. 또한 높은 Q-factor를 얻는 것과 동시에 인덕턴스를 증가시키기 위해서는 권선수를 증가시키는 방법이 가장 효과적이나 제한된 면적 내에 코일을 감기 위해서는 권선의 간격이 좁아지므로 도체의 저항이 증가하여 Q-factor가 감소하게 된다. 결과적으로 인덕턴스와 Q-factor를 동시에 극대화시키기는 힘들다[2, 3]. 또한 코일직경은 코일의 손실과 연결되어 Q-factor에 영향을 주므로 높은 Q값을 얻기위해서는 반드시 고려할 중요한 변수가 되고 있다.

따라서 본 논문에서는 Al_2O_3 (8.8의 낮은 유전율 상수와 0.0006의 낮은 loss tangent를 갖는다[4]) 코아재료를 이용한 RF chip 인덕터를 제작하여 코일의 직경(ϕ)을 변화시키면서, 그들의 고주파 성능을 비교 분석하였다.

2. 실 험

그림 1은 본 논문에서 제작된 H 형태의 Solenoid RF chip 인덕터를 나타내고 있다.

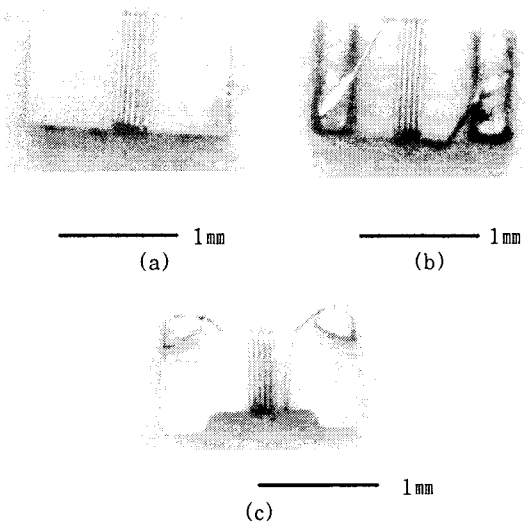

그림 1. RF chip 인덕터 구조 (권선수 : 6turn)
(a) 윗면도 (b) 밑면도
(c) 측면도

크기는 1.58 × 0.82 × 0.94 mm^3이고, 코아재료는 저손실 Al_2O_3를 사용하였다. 코일로는 Cu를 사용하였고, 코일의 직경은 30㎛ ~ 40㎛의 범위에서 가변하였고, 권선수는 2 ~ 6의 범위에서 가변 하였다.

그림 1.(c)에 나타난 대로 옆모양이 H 형태 이므로 본 논문에서는 H 형태의 chip인덕터라는 용어를 사용하였다.

인덕터의 인덕턴스, 커패시턴스, Q-factor, 저항, 임피던스 크기와 위상에 대한 주파수 특성은 RF Impedance/Material Analyzer(HP16193A test fixture가 장착된 HP4291B)로 측정하였다.

3. 실험결과

표 1은 본 논문에서 제작된 RF chip 인덕터들의 특정 주파수에 따른 인덕턴스, 저항, Q-factor 등과 같은 특성들을 요약하여 나타낸다.

Sample No.	1	2	3	4	5	6
Coil diameter (㎛)	35	40	35	40	35	40
Turns	2	2	4	4	6	6
Inductance (nH, 250MHz)	4.74	4.07	15.8	10.7	31.4	21.1
R (Ω, 1MHz)	0.142	0.08	0.258	0.236	0.362	0.267
Q (500MHz)	27	25.9	39.4	33.8	44.5	43.9

표 1. 본 논문에서 제작된 RF chip 인덕터에 대한 특성

표 1에서 알 수 있듯이 동일 권선수에 대해 코일 직경이 작을수록 L, R 그리고 Q등이 증가하였고, 그 증가폭은 권선수가 클수록 커지는 경향이 있음을 알 수 있다.

그림 2는 인덕터의 코일직경과 권선수 변화에 따른 커패시턴스-주파수 특성을 나타낸다.

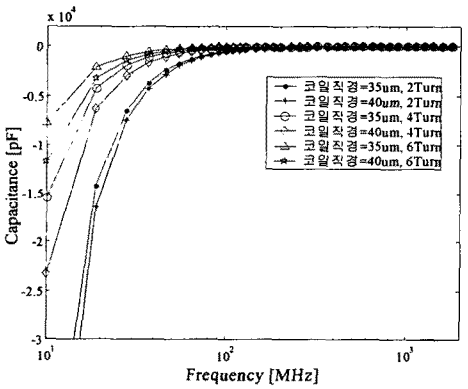

그림 2. RF chip 인덕터들의 코일직경과 권선수 변화에 따른 커패시턴스-주파수 특성

그림에서 보는 바와 같이 권선수가 많을수록, 코일직경이 가늘수록 더 낮은 자기공진주파수(SRF)에서 커패시턴스가 양의 값으로 전위되어 Inductive 상태에서 Capacitive 상태로 변한다. 이는 권선수가 많을수록 코일직경이 가늘수록 더 낮은 주파수에서 분산(기생) Capacitance 효과가 나타남을 알 수 있다.

그림 3은 인덕터의 코일직경과 권선수 변화에 따른 인덕턴스-주파수 특성을 나타낸다. 동일 권선수에 대하여 코일의 직경이 가늘수록 인덕턴스 값은 증가하였고, 권선수가 많을수록 인덕턴스 값의 증가폭도 증가하였다.

그림 4는 인덕터의 코일직경과 권선수 변화에 따른 저항-주파수 특성을 나타낸다. 동일 권선수에 대해 코일직경이 클수록 저항값은 감소하였으며, 감소율은 주파수가 커질수록 커진다. 직류저항(DCR)과 권선수 및 코일직경 사이의 관계는 다음과 같은 일반적인 식으로 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{\rho N l}{\pi (\frac{\phi}{2})^2} \qquad (1)$$

여기서 N은 권선수, l은 권선수가 1일때의 코일길이, ϕ는 코일직경, ρ는 코일의 비저항을 각각 나타낸다. (1)식에서 알 수 있듯이 N이 일정할 때 ϕ가 클수록 R은 작아짐을 알 수 있고, 이는 그림 4에서 확일 할 수 있었다.

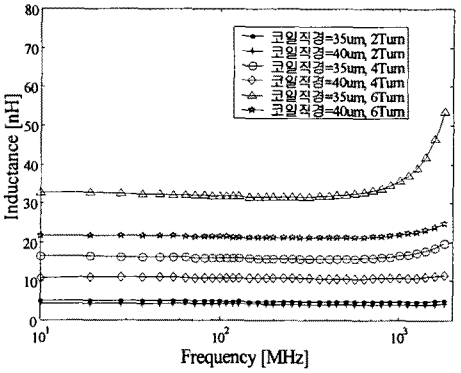

그림 3. RF chip 인덕터들의 코일직경과 권선수 변화에 따른 인덕턴스-주파수 특성

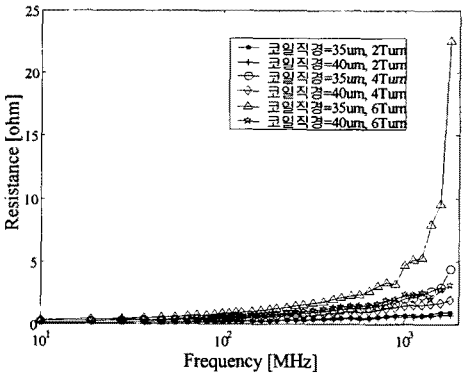

그림 4. RF chip 인덕터들의 코일직경과 권선수 변화에 따른 저항-주파수 특성

그림 5는 인덕터의 코일직경과 권선수 변화에 따른 Q-factor - 주파수 특성을 나타낸다. 그림에서 동일 주파수에서 코일직경이 가늘수록 Q값이 더 큰 경향이 있지만, SRF는 감소하는 경향을 알 수 있다.

그림 6은 인덕터의 코일직경과 권선수 변화에 따른 임피던스-주파수 특성을 나타낸다. 그림에서 주파수가 증가함에 따라 |Z|가 증가함을 알 수 있다.
특히 권선수가 작으면(N=2), 코일직경에 따른 |Z|의 변화는 작았으나, N이 커질수록 코일직경이 가늘수록 고주파에서 |Z|의 증가율은 커졌다. 그 이유는 다음과 같은 식으로부터

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \qquad (2)$$

코일직경이 가늘수록, R과 L이 모두 증가하기 때문이다.

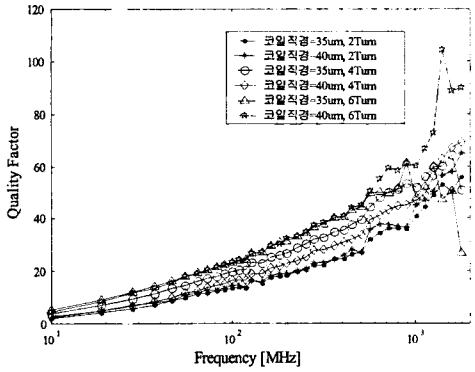

그림 5. RF chip 인덕터들의 코일직경과 권선수 변화에 따른 Q-factor - 주파수 특성

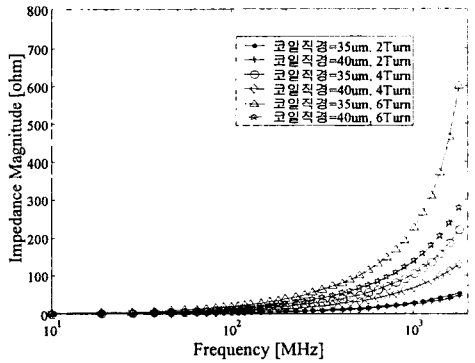

그림 6. RF chip 인덕터들의 코일직경과 권선수 변화에 따른 임피던스-주파수 특성

그림 7은 RF chip 인덕터들의 코일직경과 권선수 변화에 따른 임피던스 위상값의 변화를 나타낸다

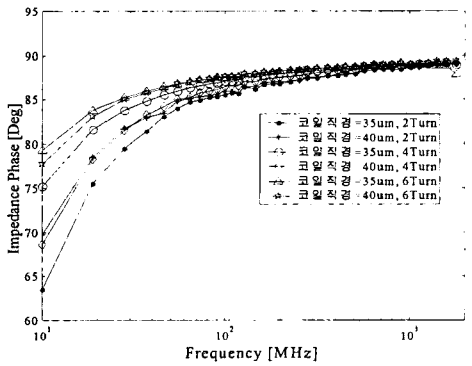

그림 7. RF chip 인덕터들의 코일직경과 권선수 변화에 따른 임피던스 위상-주파수 특성

일반적으로 인덕터들의 임피던스 위상은 자기공진주파수 보다 작은 주파수 영역에서 +90° (유도성), 자기공진주파수에서 0° (순 저항 성분), 그리고 자기공진주파수 보다 큰 주파수 영역에서 −90° (용량성)가 되어 유도성-용량성 전환점에서 자기공진주파수를 알아내는데 중요한 역할을 한다[5], 따라서 그림 7로부터 코일직경이 35㎛(6Turn)인 인덕터는 1.8GHz 정도에서 공진이 발생함을 예측할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 저손실 Al_2O_3 세라믹 코아 재료를 이용한 solenoid 형태의 소형·고성능 RF chip 인덕터를 코일직경과 권선수를 가변하여 제작하였고 그 주파수 특성을 비교하였다. 제작한 RF chip 인덕터의 크기는 1.58 × 0.82 × 0.94 mm^3였고, 코일로 사용된 Cu의 직경은 약 30㎛ ~ 40㎛이었다.

실험 data의 분석결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 동일권선수에 대하여 코일직경이 작을수록 L, R, Q 그리고 |Z|등이 증가하였고, 그 증가폭은 권선수가 많을수록 커지는 경향이 있음을 알 수 있었다.

(2) 코일직경이 작을수록, 권선수가 많을수록 기생 커패시턴스 효과가 더 낮은 주파수에서 나타나 SRF가 감소하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있었다.

(3) 코일직경이 35㎛이고 권선수가 6인 chip 인덕터의 경우, L=31.4nH(at 250MHz), Q=49.4(at 700 MHz), R=0.362Ω(at 1MHz)이었고, SRF는 1.8 GHz 정도 임을 추론할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

[1] Rob Groves, David L. Harame, Dale jadus, "Temperature Dependence of Q and Inductance in Spiral Inductors Fabricted 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 of MMICs", IEEE MTT-s Digest, pp. 123-126, 1987.

[3] Y. Kobayashi, S. Ishibashi, K. Shirakawa, J. Toriu, H. Matsuki, K. Murakami, "New Tupe 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] 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 Circuit, vol. 33, no. 5. 743-752, May 1998