

# C-type의 소형 고성능 Solenoid RF Chip 인덕터의 설계 및 구현에 관한 연구

윤의중, 김용석, 정영창, 홍철호, 김재욱, 이태범  
호서대학교 전기정보통신공학부  
전화 : 041-549-6778 / 핸드폰 : 011-259-8258

## A Study for Design and Implementation of C-type Micro, High-Performance Solenoid RF Chip Inductors

Eui-Jung Yun, Yong-Seok Kim, Young-Chang Jung, Chol-Ho Hong, Jae-Wook Kim, Tae-Bum Lee  
Div. of Electrical, Information and Communication Eng., Hoseo University  
E-mail : yong3733@korea.com

### Abstract

This paper has been designed and fabricated C-type micro, high-performance solenoid RF chip inductors with the size of  $1.58 \times 0.82 \times 0.94 \text{mm}^3$ . The high frequency characteristics of simulated results obtained by HFSS were compared to those of measured results obtained by RF Impedance/Material Analyzer (HP16193A). Although the simulated inductance values were two times larger than the measured values and there are discrepancies in SRFs between simulated and measured values, it was observed that the Q-factor values for fabricated inductors could be predicted from the simulated values.

### I. 서론

칩 인덕터는 최신 전자제품의 회로에서 필수적인 수동소자 중의 하나로써, 커패시터와 결합한 LC 필터, 트랜지스터를 위한 AC 초크, 회로정합, EMI 필터 등의 분야에 사용된다. 또한 고성능의 소형 무선통신제품을 실현하기 위하여 GHz 대역에서 동작하는 소형 RF 칩 인덕터의 필요성이 증가하는 추세에 있다[1-4].

RF 칩 인덕터의 인덕턴스(L)는 코아의 구조형태, 권선수, 권선 간격 등에 의해 결정된다. 인덕터의 quality factor(Q-factor)는 소자의 에너지 저장 능력의 척도이다[1]. 그러므로 고성능의 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 극대화시키는 힘들다[2,3]. 따라서 L 과 Q-factor를 동시에 극대화시키기 위해서는 Maxwell 3D simulator tool(HFSS)을 사용하여 가능한 모든 조건을 고려한 Simulation을 반복 수행하여 RF 칩 인덕터의 최적 구조를 도출하고 이 최적 구조를 가장 실제적으로 구현하는 것이 중요하다.

본 논문에서는 loss가 적은  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 를 코아 재료로, Cu를 코일재료로 사용하고, HFSS Simulator Tool을 통한 반복적인 Simulation을 수행하여 RF 칩 인덕터의 최적구조를 도출하였고, 정교한 winding 기술을 응용하여 C형태의 코아 모양을 가진 소형, 고성능의 솔레노이드형 RF 칩 인덕터를 설계·제작하였다. 측정된 주파수 특성은 Simulation 결과와 비교·분석하였다.

### II. 실험

그림 1(a)은 본 논문에서 제작된  $1.58 \times 0.82 \times 0.94 \text{mm}^3$  크기의 C-type 솔레노이드형 RF 칩 인덕터 구조를,

그림 1(b)는 HFSS를 이용한 Simulation수행시 사용된 RF 칩 인덕터의 3차원 구조를 나타낸 것이다. C형태의 코아 모양을 가진 인덕터에 대해 권선수(N)은 4와 6회로 변화 시켰다.

본 논문의 인덕터의 코아 재료는 기존의 ferrite가 아닌 1GHz에서 7.48의 낮은 유전율 상수와  $4.89 \times 10^{-5}$ 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 제조하였다.

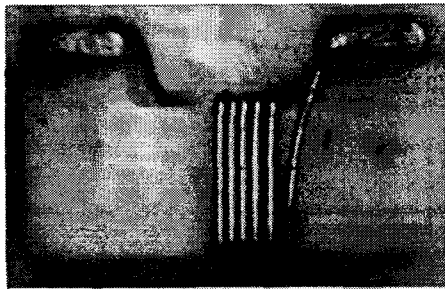
조물 전자계 해석 Simulation Tool인 HFSS(High Frequency Structure Simulator)와 RF 및 무선 통신 회로 해석·설계 Simulation Tool인 Serenade를 이용하여 비교·분석하였다.

인덕터의 인덕턴스, 품질계수, 임피던스 크기와 위상에 대한 주파수 특성은 RF Impedance/Material Analyzer (HP16193A test fixture가 장착된 HP4291B)로 측정하였고, 코아 물질의 loss tangent와 상대투자율은 각각 HP16453A와 HP16454A test fixture를 HP4291B에 장착하여 측정하였다.

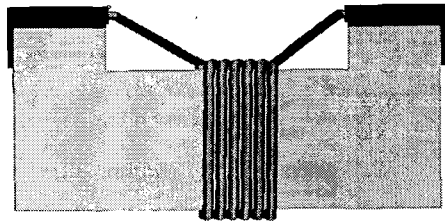
### III. 결과 및 고찰

C-type (1.58×0.82×0.94mm) 솔레노이드 형태의 RF 칩 인덕터는 권선수를 4회와 6회로 하여 Simulation되고, 제작되었으며, Simulation 과 측정 결과에 대한 고주파 특성을 서로 비교 분석하였다.

그림 2는 인덕터들의 인덕턴스-주파수 특성을 나타낸다. 칩 인덕터의 권선수를 4회로 하였을 때 측정 결과는 10nH 정도이고 Simulation 결과는 20nH 정도의 값을 가진다. 권선수를 6회로 하였을 때 측정 결과는 22nH 정도이고 Simulation 결과는 48nH의 인덕턴스를 가진다. Simulation 결과의 인덕턴스 값이 측정된 인덕턴스 보다 약 2배정도 더 큰 값을 가짐을 알 수 있다. 또한, Simulation 결과는 6회 권선의 경우 900MHz에서, 4회 권선의 경우 1.6GHz에서 각각 인덕턴스 반전이 일어날 것을 예측하고 있는 반면에 측정된 인덕턴스는 1.8GHz이내에서 반전이 일어나지 않음을 나타내고 있다. 이는 실제로 제작된 인덕터의 경우 자기공진주파수(SRF)가 더 높은 값을 갖게 되어, 더 좋은 주파수 특성을 나타낸다는 것을 의미한다.



(a) Chip Inductor Fabricated



(b) 3-Dimensional Chip Inductor Structure used for Simulation

그림 1. C형 솔레노이드 RF 칩 인덕터의 구조 (권선수=6)

Fig. 1. Structure of the C-type solenoid RF chip Inductor (Number of turns=6)

코일은 칩 인덕터의 skin-effect의 원인이 되는 metal loss를 줄이기 위해 전도성이 우수한 약 40 $\mu$ m의 직경인 Cu를 사용하였다. 외부전류원은 코일의 양단을 코아 하층부의 양끝 단자에 본딩한 후 인가하였다. 양 끝 단자는 P 7.2wt%, Ni 32.6wt%, W 60.2wt%로 이루어진 박막층을 seed 층으로 사용하여 그 위에 도금 처리 방식으로 Au 막(두께=200 $\mu$ m)을 적층시켰다.

Simulation은 Ansoft사의 RF 및 무선 통신용 3차원 구

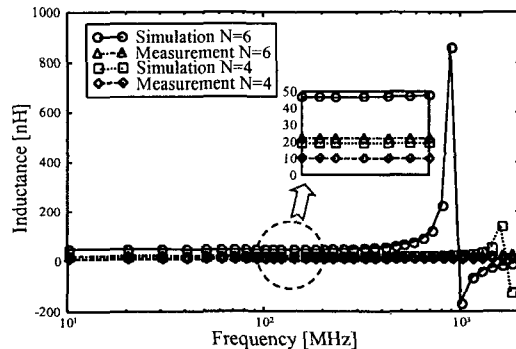


그림 2. RF 칩 인덕터들의 인덕턴스-주파수 특성  
Fig. 2. Inductance-frequency characteristic of the RF chip inductors

그림 3은 인덕터의 quality factor-주파수 특성을 나타낸다. RF 칩 인덕터의 Q-factor는 주파수가 증가함에 따라 증가하며 최대값에 도달하게 된다. 그 이상 주파수가 증가하게 되면 Q-factor의 값은 감소하게 된다. 일반적으로 Q-factor는 다음과 같이 표현할 수 있다[5,6,7].

$$Q = 2\pi \cdot \frac{\text{peak magnetic 에너지} - \text{peak electric 에너지}}{\text{한 주기 동안 회로에서 소비된 에너지}} \quad (1)$$

인덕터는 SRF 에서 peak magnetic 에너지와 peak electric 에너지가 같기 때문에 인덕터의 Q-factor는 SRF에서 0의 값을 갖는다[5]. 따라서 그림 3에서 Q-factor가 0이 될 때의 주파수를 인덕터들의 SRF로 간주할 수 있다. 따라서 N=6일 경우, Simulation 결과의 SRF는 약 900MHz, 측정 결과의 SRF는 약 1.8GHz 이상이 됨을 알 수 있어 서로 차이가 있음을 확인하였다. 그러나 Q는 500MHz~1.8GHz 주파수 범위에서 최대 55~87의 값을 갖음을 알 수 있었고, SRF의 영향을 무시하면 Simulation 결과와 측정된 결과는 서로 잘 일치하여 Simulation 결과로 Q 값을 어느 정도 예측이 가능함을 알 수 있었다.

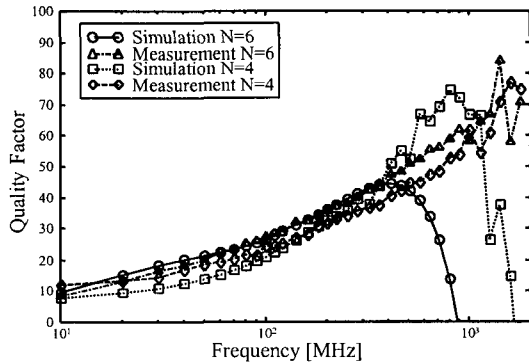


그림 3. RF 칩 인덕터들의 Quality factor-주파수 특성  
Fig. 3. Quality factor-frequency characteristic of the RF chip inductors

그림 4는 인덕터들의 저항(R)-주파수 특성을 나타낸다. 권선수 6일 때, Simulation 결과의 저항 크기는 900MHz 정도에서 급속히 증가하여 최대가 되며, 측정된 결과는 1.8GHz 이상의 주파수정도에서 최대가 됨을 추측할 수 있다. 일반적으로 SRF에서 저항이 최대가 된다는 사실은 잘 알려져 있으므로 N=6일 경우 Simulation시 사용된 인덕터 구조의 SRF=900MHz, 실제

제작된 인덕터의 SRF=1.8GHz 이상임을 알 수 있다. 이러한 결론은 그림 2-3에서 유추된 결론들과 잘 일치하고 있다.

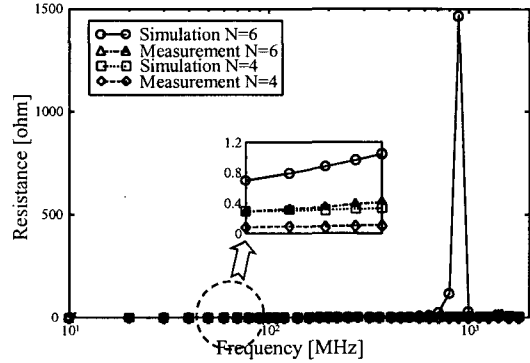


그림 4. RF 칩 인덕터들의 저항-주파수 특성  
Fig. 4. Resistance-frequency characteristic of the RF chip inductors

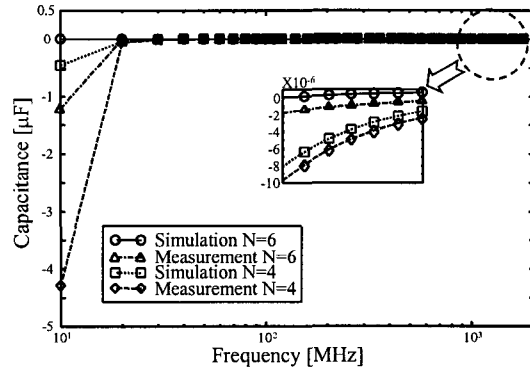


그림 5. RF 칩 인덕터들의 캐패시턴스-주파수 특성  
Fig. 5. Capacitance-frequency characteristic of the RF chip inductors

그림 5은 커패시턴스-주파수 특성을 나타낸다. 그림에서 각 인덕터들의 커패시턴스가 SRF 부근에서 음의 값으로부터 양의 값으로 전위됨을 알 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 저항 값이 가장 최대가 되는 지점에서 유도성인 인덕터의 특성이 용량성으로 전환되기 때문에 커패시터는 이점에서 양의 값으로 전위된다. 제작된 인덕터에서는 권선수 N=4~6인 경우 전위현상이 1.8GHz까지 관찰되지 않았으나, Simulation 구조에서는 권선수 N=4와 6인 경우 각각 1.6GHz 와 900MHz에서 커패시턴스가 음에서 양의 값으로 전위됨을 확인하였다. 이 결과로부터 Simulation시 사용된 3D 인덕터 구조는 실제 제작된 인덕터 구조에 비해 (1)경계조건이 불완전하고(코일과 공기사이), (2)대칭성이 떨어지고,

(3)코일 사이의 거리가 더 짧은 특성들을 가지고 있어 더 낮은 주파수 대역에서 분산(기생)커패시턴스 효과가 더 빠르게 나타남을 알 수 있다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 C-type (1.58×0.82×0.94mm) 솔레노이드 형태의 RF 칩 인덕터의 권선수를 4회와 6회로 하여 HFSS를 이용하여 Simulation하고, 그 결과를 바탕으로 실제 칩 인덕터를 제작하여 Simulation결과와의 관계성을 도출하고 이를 통해 더 미세한 구조를 가진 칩 인덕터에 대한 설계환경을 도출하고자 하였다.

Simulation 결과의 인덕턴스 값이 측정된 인덕턴스 보다 약 2배정도 더 큰 값을 가짐을 알 수 있었다. Q는 500MHz~1.8GHz 주파수 범위에서 최대 55~87의 값을 갖음을 알 수 있었고, SRF의 영향을 무시하면 Simulation 결과와 측정된 결과는 서로 잘 일치하여 Simulation결과로 Q 값을 어느 정도 예측이 가능함을 알 수 있었다.

N=6일 경우 Simulation시 사용된 인덕터 구조의 SRF=900MHz, 실제 제작된 인덕터의 SRF=1.8GHz 이상임을 알 수 있었다. 이러한 차이는 Simulation시 사용된 3D 인덕터 구조가 실제 제작된 인덕터 구조에 비해 불완전한 특성들을 가지고 있어 더 낮은 주파수 대역에서 분산(기생)커패시턴스 효과가 더 빠르게 나타나 발생한다고 추측할 수 있다.

#### 참고문헌(또는 Reference)

- [1] Rob Groves, David L. Hareme, Dale Jadus, "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 Magnetism, vol. 28, no. 5, pp. 3012-3014, Sep, 1992.
- [4] R. F. Soohoo, "Magnetic Thin Film Inductors for Integrated Circuit Application," IEEE Trans. on Magnetism, Vol. MAG-15, 1803, 1979.
- [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 Circuits, vol. 33, no. 5, pp. 743-752, May 1998.
- [6] 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 Magnetism, pp. 2262-2264, 1990.
- [7] H. Matsuki, N. Fujii, K. Shirakawa, J. Toriu, K. Murakami, "Magnetic-Multi-Turn Planar Coil Inductor," IEEE Trans. on Magnetism, vol. 27, no. 6, pp. 5438-5440, Nov, 1991.