

**C-type과 H-type 솔레노이드 RF 칩 인덕터의 특성 비교**

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

**Characteristic Comparison of C-type and H-type Solenoid RF Chip Inductors**

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

**Abstract** - 본 논문에서는  $1.62 \times 1.0 \times 0.88\text{mm}^3$  크기의 C-type과  $1.58 \times 0.82 \times 0.94\text{mm}^3$  크기의 H-type RF 칩 인덕터를 제작하고 그들의 고주파 특성을 비교하였다. 본 연구에서는 저손실  $\text{Al}_2\text{O}_3$  코아 물질과 직경  $40\mu\text{m}$ 의 구리(Cu) 코일을 사용하였다. 권선수를 2~14 회로 하여 인덕턴스(L), 품질계수(Q), 임피던스의 크기와 위상, 커패시턴스(C)를 HP4291B Impedance/Material Analyzer로 측정하였다. 10회 권선시 C-type은 55nH, H-type은 67nH, 14회 권선시 C-type은 100nH, H-type은 122nH 정도로 측정되었다. 실험 결과 H-type이 C-type보다 동일 권선수에 대하여 높은 인덕턴스와 높은 자기공진주파수(SRF)를 나타냄을 확인하였다. 또한 최대 품질계수는 두 형태가 거의 비슷한 값(55~87)을 가짐을 관찰하였다. 따라서 H-type이 C-type보다 우수한 성질을 나타냄을 알 수 있다.

**2. 실 험**

그림 1은 본 논문에서 제작된 초소형( $1.62 \times 1.0 \times 0.88\text{mm}^3$  크기의 C-type과  $1.58 \times 0.82 \times 0.94\text{mm}^3$  크기의 H-type) 솔레노이드 형태의 RF 칩 인덕터 구조를 나타낸 것이며,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  코아 물질은 직경  $40\mu\text{m}$ 의 Cu 코일로 감겨져 있다. C-type과 H-type의 인덕터에 대해 권선수(N)은 2~14이었다.

본 논문의 인덕터의 코아 재료는 기존의 ferrite가 아닌 1GHz에서 7.48의 낮은 유전율 상수와  $4.89 \times 10^{-5}$ 의 낮은 loss tangent를 가지며  $900^\circ\text{C}$  이하에서 소결된  $\text{Al}_2\text{O}_3$  물질을 사용하였다. 분말 형태의 유전체 물질을 유기용매, 결합제 (PVB, poly-vinyl butyral), plasticizer (DOP, dioctyl phthalate), 미량의 다른 화합물 등과 혼합하여  $\text{Al}_2\text{O}_3$  paste를 제조하였다.

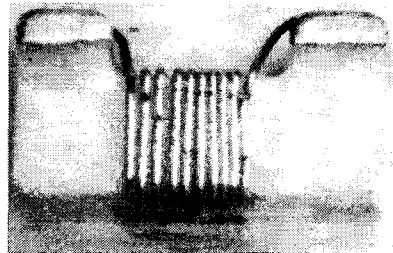
**1. 서 론**

칩 인덕터는 노트북 컴퓨터, 캠코더, 호출기, 셀룰러 폰 등과 같은 최신 전자제품의 회로에서 필수적인 수동 소자 중의 하나로서, 커패시터와 결합한 LC 필터, 트랜지스터를 위한 AC 초크, 회로정합, EMI 필터 등의 분야에 응용된다. 최근에는 고성능의 소형 무선통신제품을 실현하기 위하여 GHz 대역에서 동작하는 소형 RF 칩 인덕터의 필요성이 증가하는 추세에 있다.

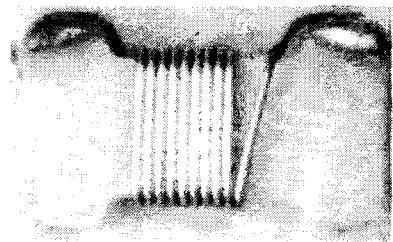
RF 칩 인덕터의 인덕턴스는 코아의 구조형태, 권선수, 권선 간격 등에 의해 결정된다. 인덕터의 quality factor(Q-factor)는 소자의 에너지 저장 능력의 척도이다[1]. 그러므로 고성능의 인덕터는 Q-factor가 높아야만 한다. 또한 높은 Q-factor를 얻는 것과 동시에 인덕턴스를 증가시키기 위해서는 권선수를 증가시키는 방법이 가장 효과적이거나 제한된 면적 내에 코일을 감기 위해서는 권선의 간격이 좁아지므로 도체의 저항이 증가하여 Q-factor가 감소하게 된다. 결과적으로 인덕턴스와 Q-factor를 동시에 극대화시키는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

Solenoid 형태의 칩 인덕터는 이와 다른 형태의 인덕터들에 비해 다음과 같은 장점을 가지고 있다[4,5] : (1) planar 형태의 인덕터에서 인덕턴스와 Q-factor 값을 저하시키는 중요한 요인의 하나인 substrate effect를 제거할 수 있고, (2) 차지하는 면적을 적게 증가시키면서 단순히 권선수를 증가시킴으로써 큰 인덕턴스를 얻을 수 있으며, (3) 간단하고 일반적으로 잘 알려진 식을 사용하여 쉽게 인덕턴스를 계산하거나 설계할 수 있다.

본 논문에서는 loss가 적은 최적상태의  $\text{Al}_2\text{O}_3$  코아 재료를 이용하였고, 균일한 두께의 Cu 코일 및 정교한 winding 기술을 응용하여 기존의 칩 인덕터보다 인덕턴스와 Q-factor를 동시에 극대화시킨 단순 솔레노이드 형태의 소형·고성능 RF 칩 인덕터를 제작·연구하였다. 코아의 모양은 C-type과 H-type으로 나누어 제작하였고 그들의 고주파 특성을 비교하였다.



(a) C-type



(b) H-type

그림 1. RF 칩 인덕터의 구조 (권선수=10)  
Fig. 1. Structure of the RF chip inductor

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

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

### 3. 결과 및 고찰

C-type (1.62×1.0×0.88mm)과 H-type (1.58×0.82×0.94mm) 솔레노이드 형태의 RF 칩 인덕터가 제작되었으며, 권선수가 8, 10, 그리고 14에 대해 고주파 특성을 비교하였다.

그림 2는 인덕터들의 인덕턴스-주파수 특성을 나타낸다. 그림에서 동일 권선수에 대하여 H-type 칩 인덕터의 인덕턴스가 C-type보다 더 큰 값을 갖는 경향을 나타낸다. 권선수를 10회로 하였을 때 C-type은 55nH, H-type은 67nH의 인덕턴스를 갖고, 권선수를 14회로 하였을 때 C-type은 100nH, H-type은 122nH의 인덕턴스를 가진다. 또한 권선수가 많을수록 H-type의 인덕턴스 증가폭이 더 큰 것을 알 수 있다. 권선수가 14일 때, H-type 인덕터의 경우 인덕턴스 반전이 1.8GHz에 나타나고, C-type 인덕터의 경우 인덕턴스 반전이 1.7GHz에 나타나므로 H-type의 인덕터가 C-type보다 높은 SRF를 가진다는 것을 추정할 수 있다.

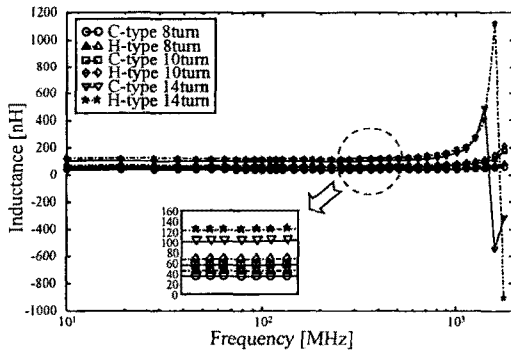


그림 2. RF 칩 인덕터들의 인덕턴스-주파수 특성  
Fig. 2. Inductance-frequency characteristic of the RF chip inductors

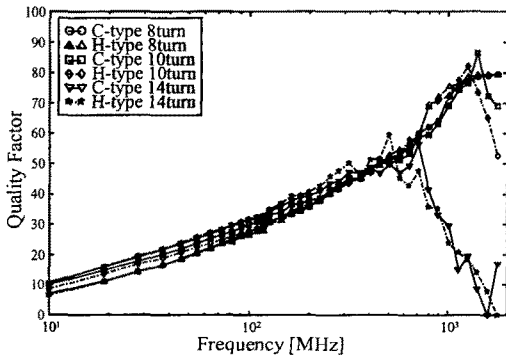


그림 3. RF 칩 인덕터들의 Quality factor-주파수 특성  
Fig. 3. Quality factor-frequency characteristic of the RF chip inductors

그림 3은 측정된 인덕터들의 quality factor-주파수 특성을 나타낸다. RF 칩 인덕터의 Q-factor는 주파수가 증가함에 따라 증가하며 최대값에 도달하게 된다. 이상 주파수가 증가하게 되면 Q-factor의 값은 감소하게 된다. 일반적으로 Q-factor는 다음과 같이 표현할 수 있다[4,6,7].

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

인덕터는 SRF에서 peak magnetic 에너지와 peak electric 에너지가 같기 때문에 인덕터의 Q-factor는 SRF에서 0의 값을 갖는다[4]. 따라서 그림 3에서 Q-factor가 0이 될 때의 주파수를 인덕터들의 SRF로 간주할 수 있다. 따라서 권선수가 14일 때, SRF는 H-type의 경우 약 1.8GHz, C-type의 경우 약 1.7GHz가 됨을 알 수 있다. 또한 Q는 500MHz~1.8GHz 주파수 범위에서 최대 55~87의 값을 갖음을 알 수 있다.

그림 4는 인덕터들의 임피던스 크기-주파수 특성을 나타낸다. 권선수 14일 때, H-type의 임피던스 크기는 1.8GHz 정도에서 급속히 증가하여 최대가 되며, C-type은 1.7GHz 정도에서 최대가 됨을 나타낸다. 인덕터의 임피던스가 SRF에서 최대가 되므로 H-type의 인덕터가 C-type보다 높은 SRF를 가지게 된다.

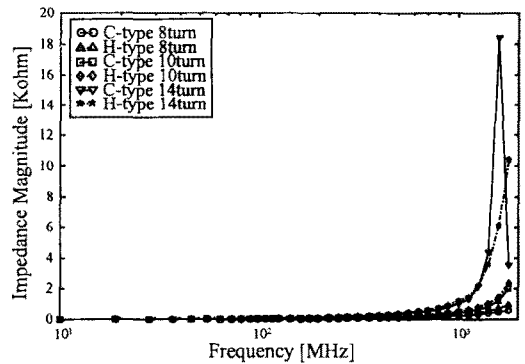


그림 4. RF 칩 인덕터들의 임피던스 크기-주파수 특성  
Fig. 4. Impedance amplitude-frequency characteristic of the RF chip inductors

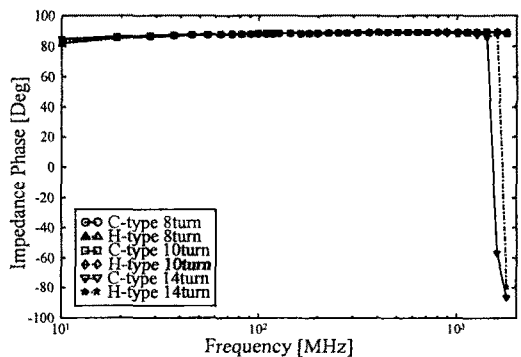


그림 5. RF 칩 인덕터들의 임피던스 위상-주파수 특성  
Fig. 5. Impedance phase-frequency characteristic of the RF chip inductors

그림 5는 인덕터들에 대한 임피던스 위상-주파수 특성을 나타낸다. 인덕터의 임피던스 위상은 SRF 이하에서  $+90^\circ$  (유도성), SRF에서  $0^\circ$  (순저항), 그리고 SRF 이상에서  $-90^\circ$  (용량성)가 되며 유도성-용량성 전환점에서 공진주파수를 알아내는 중요한 역할을 한다 [4]. 권선수가 14일 때, H-type의 경우 1.8GHz정도, C-type의 경우 1.7GHz정도에서 위상반전이 일어남을 확인하였다. 이 결과는 그림 2~4에서 얻은 SRF의 추정 값들과 잘 일치하고 있다.

그림 6은 3가지 크기의 인덕터들에 대한 대표적인 커패시턴스-주파수 특성을 나타낸다. 각 인덕터들의 커패시턴스가 SRF 부근에서 음의 값으로부터 양의 값으로 전위됨을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 권선수가 8~10인 경우 전위현상이 1.8GHz까지 관찰되지 않았으나, 권선수가 14인 경우 H-type은 1.8GHz, C-type은 1.7GHz에서 커패시턴스가 음에서 양의 값으로 전위됨을 확인하였다. 이 결과는 H-type의 경우가 더 높은 주파수에서 분산(기생)커패시턴스 효과가 나타남을 보여준다.

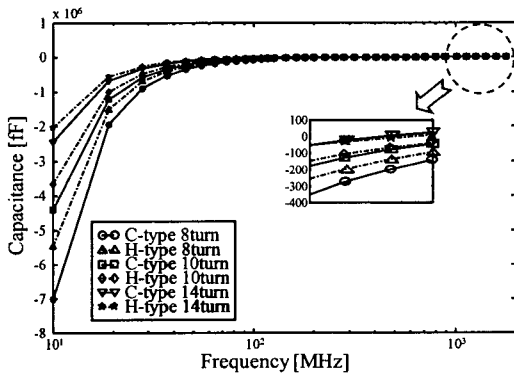


그림 6. RF 칩 인덕터들의 커패시턴스-주파수 특성  
Fig. 6. Capacitance-frequency characteristic of the RF chip inductors

#### 4. 결 론

7.48의 낮은 유전율 상수와 1GHz에서 약  $4.89 \times 10^{-5}$ 의 낮은 loss tangent를 갖는  $Al_2O_3$  코어 재료를 이용한 C-type과 H-type 솔레노이드 RF 칩 인덕터를 비교 분석하였다. (1) 제안된 인덕터 크기는 C-type의 경우  $1.62 \times 1.0 \times 0.88mm^3$ , H-type의 경우  $1.58 \times 0.82 \times 0.94mm^3$ 이며, 코일로 사용된 Cu의 직경은 약  $40\mu m$ 였다. (2) 권선수를 10회로 하였을 때 C-type은 55nH, H-type은 67nH의 인덕턴스를 갖고, 권선수를 14회로 하였을 때 C-type은 100nH, H-type은 122nH의 인덕턴스를 가진다. 따라서 동일 권선수에 대하여 H-type이 C-type보다 높은 인덕턴스를 가지며, 권선수가 클수록 C-type보다 H-type의 인덕턴스 증가폭이 커짐을 알 수 있다. (3) 모든 고주파 특성 결과로부터 권선수가 14일 때 H-type의 SRF는 1.8GHz, C-type의 SRF는 1.7GHz 정도로 측정되었다. 즉 H-type이 C-type보다 높은 SRF를 가짐을 알 수 있다. (4) 최대 품질계수는 두 형태가 500MHz~1.8GHz 범위에서 거의 비슷한 55~87 정도를 가짐을 관찰하였다.

본 연구 결과는 H-type의 인덕터가 C-type의 인덕터보다 동일 권선에 대하여 높은 인덕턴스와 높은 SRF를 가지며 비슷한 정도의 품질계수를 가짐을 확인할 수 있었다. 따라서 H-type의 RF 칩 인덕터가 더 우수한 성능을 나타낸다. 또한 구조적인 측면에서도 C-type의 경우 코일을 보호하기 위하여 코팅이나 보호캡을 씌울

때 크기가 더 커지는 반면, H-type의 경우는 코팅을 하더라도 크기에 영향을 미치지 않으므로 PCB와 같은 곳에 더 효율적으로 이용될 수 있는 장점을 가진다.

#### (참 고 문 헌)

- [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 Magnetics, vol. 28, no. 5, pp. 3012-3014, Sep, 1992.
- [4] 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.
- [5] 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 Photo-resist," Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 37, pp. 7081-7085, Part1, No. 12B, Dec 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 Magnetics, pp. 2262-2264, 1990.
- [7] 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.