

Characteristic Analysis of Spiral Type Thin-Film Inductor Using Finite Element Method

河京鎬\* · 洪正杓\*\* · 宋在成\*\*\* · 閔馥基<sup>§</sup> · 金賢植<sup>§§</sup>  
 (Kyung-Ho Ha · Jung-Pyo Hong · Jae-Sung Song · Bok-Ki Min · Hyun-Sik Kim)

**Abstract** - The spiral type thin-film inductor performed in high frequency at 2-5[MHz] range is analyzed by 2-dimensional Finite Element Method(2D FEM). The features of micro thin-film inductor have complicated electromagnetic phenomenon such as skin effect, proximity effect and magnetic saturation. To develop miniaturized magnetic device considering these features, it is important to predict the property of the thin film inductor according to design parameter. In this paper, we present the 2D FEM analysis for the spiral type thin film inductor. The characteristics of inductor from point of view of inductance, resistance and quality factor are studied according to design parameter and various pattern construction.

**Key Words** : Spiral type thin film inductor, Skin effect, Proximity effect, Inductance and Quality factor

1. 서 론

정보사회의 발전에 따라 전자기기의 고성능화, 소형화 및 경량화의 필요성이 점점 부각되어 왔으며 이러한 요구들을 만족시키기 위한 IC소자나 자기소자 등의 기본 부품들에 대한 성능개선과 집적화에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다 [1-3]. 특히 최근에는 자기소자를 포함하는 전원회로의 개발에 관심이 집중됨에 따라 자기소자의 소형화는 필수적인 요소가 되고 있다[4].

전원회로의 소형화를 위해서는 전원주파수를 증가시켜야 한다. 종래의 벌크(bulk) 재료를 사용한 자기소자의 경우 주파수의 증가에 의해 자기소자의 효율과 성능에 지대한 영향을 미친다는 문제점이 있으며, 사용 주파수의 증가에 따라 도체에 유가 되어 흐르는 와전류에 의한 손실이 증가하므로 고주파용으로 사용하기에는 한계를 가진다. 따라서, 이러한 단점을 극복하고 성능을 개선하기 위해 박막 제조기술 및 미세 가공기술을 이용한 자기소자의 소형화, 평면화 및 수 MHz~GHz까지의 고주파에서 저 손실화를 실현할 수 있는 박형 자기소자에 관한 연구가 진행되고 있다[5,6].

박형 자기소자는 에칭에 의한 임의 형상의 설계가 가능하여 용도에 따른 적절한 형태를 선택할 수 있으며, 내부구조는 자성막, 절연막과 도체막 등의 여러 박막에 의한 자기회로를

구성할 수 있고 이들 구성 요소의 배치에 따라 성능에 큰 차이를 가진다. 또한 사용 주파수가 높아짐에 따라 저항이 증가하므로 와전류 손실과 온도 상승으로 설계상 많은 제약을 받는다[7]. 따라서, 누설을 억제하고 우수한 성능의 박막소자를 설계하기 위하여 소자의 특성에 큰 영향을 미치는 자성막과 코일막의 패턴이나 이들의 배치에 따른 전기적 특성 및 주파수 특성의 해석이 필수적이다.

국내에서는 하드디스크와 같은 박막자기기록의 자기헤드 등에 관한 연구가 일부 대기업이나 연구소를 중심으로 연구 개발되고 있으며 이러한 박형 자기소자를 소형, 경량화하기 위하여 재료의 개선이나 가공기술 등에 역점을 두고 있으므로 자기 소자를 설계하는 단계에서 특성을 정확히 예측하기 위한 해석 기술이 미흡한 실정이다.

자기소자들 중에 공심 인덕터와 같이 단순한 형상의 특성 해석은 미분방정식을 직접 푸는 해석적인 방법이 있다. 즉, 해석적인 방법을 이용하여 단순 형상에 대해서는 정해(正解)를 구할 수 있으나 일반적인 형상에 대한 해를 구한다는 것은 거의 불가능하다. 따라서, 형상에 따른 자속의 경로를 가정하는 퍼미언스법을 이용하여 근사적으로 해(解)를 구하는 방법들이 이용되고 있으나 표피효과나 근접효과를 정확하게 고려하기가 어려워 해석상의 많은 오차를 수반하게 된다[8,9].

임의 형상을 가진 박막 인덕터는 주파수의 증가에 따른 표피효과나 근접효과와 같은 복잡한 전자기 현상과 구조의 특이성 때문에 정확한 자기적 특성을 예측하기가 쉽지 않다. 따라서, 유한요소해석을 이용하여 박막 인덕터의 정확한 해석 결과를 예측하기 위해서는 실제 물리적 현상과 동일한 조건을 해석에 반영해야 하므로 3차원해석이 필요하다[10]. 그러나 고주파 영역에서 와전류의 영향을 정확히 평가하기 위해서는 요소 수의 증가로 인하여 컴퓨터 용량의 증대 및 방대한 계산시간이 소요되므로 현실적으로 거의 불가능하다.

\* 正 會 員 : 昌原大 電氣工學科 博士課程  
 \*\* 正 會 員 : 昌原大 電氣工學科 助教授 · 工博  
 \*\*\* 正 會 員 : 韓國電氣研究所 新素材應用研究그룹 責任研究員  
 § 正 會 員 : 韓國電氣研究所 新素材應用研究그룹 先任研究員  
 §§ 正 會 員 : 韓國電氣研究所 新素材應用研究그룹 先任研究員  
 接受日字 : 1999年 7月 14日  
 最終完了 : 1999年 10月 5日

따라서, 본 논문에서는 스파이럴형 박막 인덕터를 대상으로 2차원 유한요소법을 이용하여 효율적인 해석 방법을 제시하고 우수한 성능의 박막 인덕터를 설계하기 위하여 설계 파라메타가 인덕터의 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 정해를 가지고 있는 원통형 모델의 임피던스 특성과 유한요소 해석과 결과를 비교하여 해석 프로그램의 타당성을 검증하였다.

스파이럴 패턴의 박막 인덕터는 2차원 해석이 가능한 형상 및 전자기적 특성을 가지므로 자기적 대칭성을 이용하여 해석대상의 일부분만으로 유한요소 해석하였으며 파라메타 및 재질정수의 변화가 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 여기서 14턴,  $10 \times 10 [mm^2]$  크기를 가지는 스파이럴 박막 인덕터를 기준으로 설계 변수는 자성막의 도전율과 자성막의 투자율, 도체의 두께, 자성막의 두께, 패턴의 크기로서 이들을 변화시켜 주파수에 대한 저항, 인덕턴스, Quality factor 등의 전·자기적 특성변화를 해석하였다.

2. 해석모델

2.1 스파이럴형 박막인덕터

14턴을 감은  $10 \times 10 [mm^2]$  크기의 스파이럴형 박막 인덕터의 형상을 그림 1(a)에 나타내었다. 그림 1(b)는 그림 1(a)를 Z-X 평면으로 절단한 단면을 나타낸 것으로 도전율을 가지는 도체와 도전율과 투자율을 가지는 자성막으로 구성된 인덕터의 치수를 보이고 있다. 도체와 자성막은 절연되어 있지 않고 인가전류는 각 도체의 도전율에 비례하여 분산되어 입력되는 것으로 보았으며 자성막의 자기적 특성은 등방성으로 가정하였다. 표 1은 도체와 자성막의 재질정수를 나타내었다.

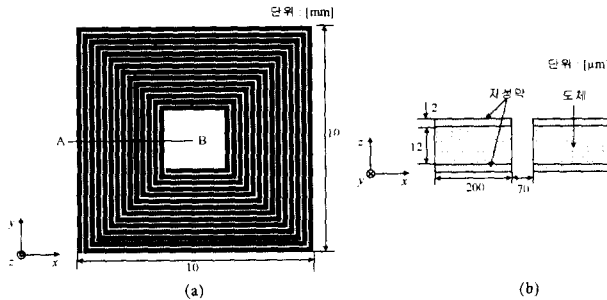


그림 1 스파이럴 박막 인덕터의 형상과 치수  
Fig. 1 Configuration and dimension of spiral type thin-film inductor

표 1 재질정수  
Table 1 Material property

항 목	값 / 치 수
자성막 도전율 [ $\sigma/m$ ]	$\sigma_{mag} = 8.333 \times 10^5$
도체 도전율 [ $\sigma/m$ ]	$\sigma_{con} = 4.0 \times 10^7$
최외측 도체 길이 [mm]	38.930
내측 도체 길이 [mm]	302.190
최내측 도체 길이 [mm]	11.05
전체 도체 길이 [mm]	352.17

기본 설계된 해석 모델의 운전주파수 영역은 2~5 [MHz]이며, 본 논문에서는 1~10 [MHz]까지를 해석하였다.

2.2 해석모델

스파이럴형 인덕터는 패턴의 중앙을 기준으로 오른쪽 14개의 도체는 +z방향, 왼쪽의 도체는 -z의 전류방향을 가진다. 해석을 위한 각 부분의 해석영역은 그림 2와 같다. 그림 2(a)는 그림 1(a)의 A-B 단면을 나타낸 그림이다.

도체 상호간의 영향은 도체의 위치에 따라 전자기 현상이 다르므로 해석을 하기 위해서는 도체의 위치마다 다르게 해석 영역을 설정하여야 한다. 본 논문에서는 해석 모델을 그림 2(b)와 같이 최외측 도체(1번), 내측 도체(2~13번), 최내측 도체(14번) 세 가지 영역으로 분류하여 해석하였다. 즉, 도체 1번과 연결된 최외각 1턴의 4번은 동일한 자기적 특성을 가진 것으로 하나의 도체로 연결되어 있으므로 각 변의 길이를 합산한 유효도체 길이를 계산하고 유한해석 결과에 곱하여 특성값을 산출하였다. 내측 도체 12턴과 최외각 도체 1턴도 동일한 방법으로 유효 도체 길이를 계산하였으며 도체 길이는 표 1에 나타내었다.

각 모델에 따른 해석영역은 자기적 대칭성을 이용하여 1번 도체와 14번 도체는 1/2, 내측 도체는 1/4만을 그림 2(b)와 같이 해석영역으로 설정하였으며 자기적 성질을 만족하는 경계조건을 부여하였다.

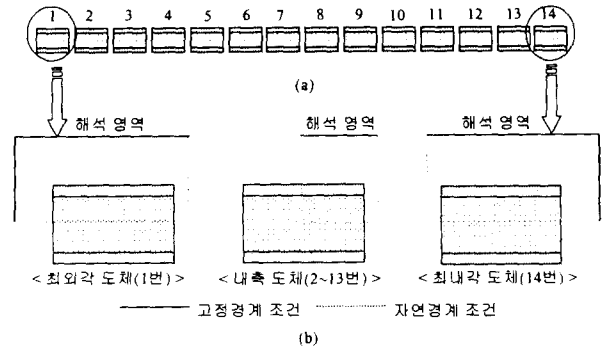


그림 2 해석 영역 및 경계 조건  
Fig. 2 Analysis region and boundary condition

3. 유한요소해석

3.1 특성방정식

자기벡터포텐셜을 계변수로 하고, 변위전류를 무시할 수 있는 준 정상상태의 특성방정식은 다음과 같이 맥스웰 전자 방정식으로부터 유도할 수 있다. 이때, 전류와 자기벡터포텐셜은 z축 성분만이 존재한다고 보았으며, 도전율 및 투자율은 등방성이다.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{1}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} \tag{2}$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \tag{3}$$

$$\vec{J}_e = \sigma \vec{E} \quad (4)$$

맥스웰 전자계 방정식으로부터 식 (2)에서 구동전류항  $\vec{J}$  는 입력전류  $\vec{J}_0$ 와 유도전류항  $\vec{J}_e$ 로 나누어진다.

자속밀도  $\vec{B}$ 와 자기벡터포텐셜  $\vec{A}$ 가  $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$ 라 는 관계를 이용하여 특성방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{1}{\mu} \nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = \vec{J} = \vec{J}_0 + \vec{J}_e \quad (5)$$

한편, 전자유도와 관련한 식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{A}) \quad (6)$$

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla \phi \quad (7)$$

따라서, 식 (4)의 관계로부터 식 (5)의 유도전류항은 다음 과 같이 쓸 수 있다.

$$\vec{J}_e = \sigma \left( -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla \phi \right) \quad (8)$$

여기에서 쿨롱 게이지(Coulomb gauge)  $\nabla \cdot \vec{A} = 0$  조건에 의해 식 (5)는 식 (9)와 같이 정리할 수 있으며, 입력전 류가 시간에 대해  $\omega$ 의 각속도로 변하고 있는 교류자계의 경 우 시간에 대한 편미분항  $\partial/\partial t$ 은  $j\omega$ 로 바꾸어 쓸 수 있으 므로 식 (10)과 같이 특성방정식을 표현할 수 있다[11].

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} = \vec{J}_0 - \sigma \left( \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla \phi \right) \quad (9)$$

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} = \vec{J}_0 - \sigma(j\omega \vec{A} + \nabla \phi) \quad (10)$$

### 3.2 특성 계산

해석모델에 저장된 자기저장에너지  $W_m$ 은 지배방정식의 각 절점에 대한 포텐셜값을 구하여 계산되는 자속밀도에 의 해 다음 식과 같이 계산할 수 있다.

$$W_m = \frac{1}{2} \int_V \frac{1}{\mu} \vec{B}^2 \cdot dV \quad (11)$$

해석모델의 인덕턴스  $L$ 은 유한요소법에 의한 자기저장에 너지에 의해 다음과 같이 계산한다.

$$L = \frac{2W_m}{I^2} = \frac{\int_V \frac{1}{\mu} \vec{B}^2 \cdot dV}{I^2} \quad (12)$$

또한, 코일의 저항  $R$ 은 직류전류가 흐르는 경우 코일의

길이  $l$ , 단면적  $S$ 와 도전율로써 계산 가능하나 입력전원이 높은 주파수를 갖는 교류의 경우 표피효과와 근접효과를 고 려하여 계산하여야 한다. 따라서, 교류 저항의 산정은 도체의 줄(Joule)손실과 저항의 관계를 이용하여 식 (13)과 같이 계 산한다.

$$R = \frac{\int_V \frac{1}{\sigma} \vec{J}^2 \cdot dV}{I^2} \quad (13)$$

여기서,  $\vec{J}$ 는 인가전류  $\vec{J}_0$ 와 와전류  $\vec{J}_e$ 의 합을 나타낸다.

박막 자기소자의 성능을 평가하는 요소 중 Quality factor 는 회로의 저항에 대한 리액턴스의 비를 나타내며 회로가 에 너지를 축적하는 효능, 회로의 주파수 선택도를 나타내는 중 요한 척도로 사용되어 진다.

$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad (14)$$

본 논문에서는 해석시에 도체 사이의 부유용량(stray capacitance)은 고려하지 않았다.

### 4. 해석결과

본 절에서는 먼저 유한요소법에 의한 해석결과의 타당성을 검증하기 위해 정해를 알고 있는 그림 3과 같은 원형 도체에 전류가 흐르는 경우의 임피던스 특성을 구하여 유한요소법에 의한 결과와 비교하였다[12].

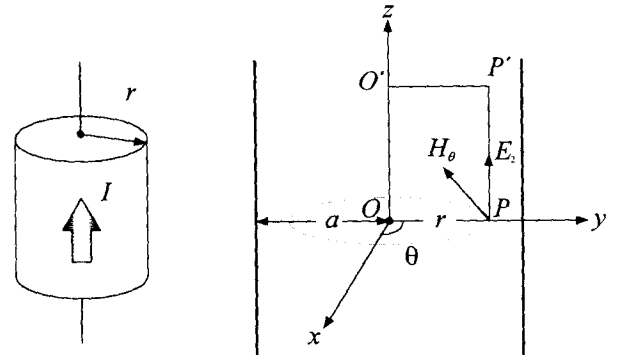


그림 3 원형 도체

Fig. 3 Analysis model of cylindrical conductor

그림 4는 원형 도체의 반경이 0.1 [mm]인 경우 외부의 인 가전류밀도  $J_0$ 가 1 [A/mm<sup>2</sup>]일 때 내부 인덕턴스와 저항에 대한 정해와 유한요소법에 의한 해석결과를 보여주고 있는 것으로 1 [MHz]이상의 주파수 대역에서 표피효과가 커져 도 체의 내부 인덕턴스는 감소하고 저항은 크게 증가하고 있으 며 두 결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

그림 1의 스파이럴 패턴의 설계변수에 따른 특성변화는 다 음과 같다.

4.1 재질정수에 따른 특성

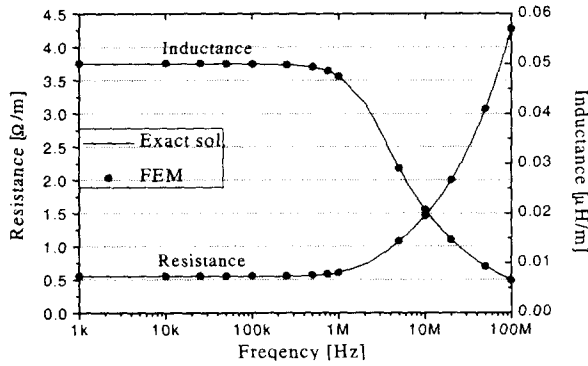
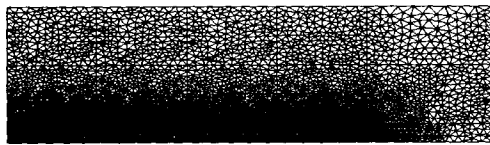


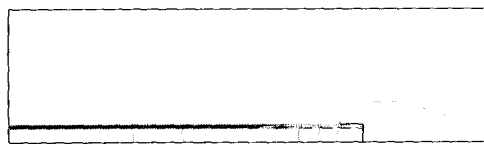
그림 4 R, L의 주파수 특성(원형 도체)

Fig. 4 Resistance and inductance as a function of frequency at cylindrical conductor

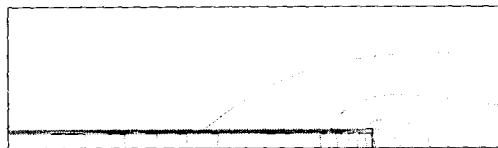
그림 5는 기본  $10 \times 10 [mm^2]$  인덕터의 내측 도체 모델을 유한요소 해석한 결과이다. 그림 5(a)는 그림 2(b)와 같이 내측 도체에 대한 1/4을 해석영역으로 요소 분할한 결과이며 그림 5(b)와 그림 5(c)는 각각 입력 주파수가 1 [MHz]와 10 [MHz]일 때 등포텐셜 분포도이다.



(a) 요소분할도  
(a) Thin-film inductor mesh



(b) 1 [MHz]에서의 등포텐셜 분포도  
(b) Equi-potential distribution at 1[MHz]



(c) 10 [MHz]에서의 등포텐셜 분포도  
(c) Equi-potential distribution at 10[MHz]

그림 5 기본모델 내측 도체의 유한요소 해석  
Fig. 5 FE analysis results in inner conductor of basic model

4.1.1 자성막 투자율의 변화

그림 6과 그림 7은 그림 1(b)에서의 자성막 투자율이 주파

수 영역에서 특성변화에 미치는 영향을 해석한 결과이다. 표피효과에 의하여 주파수가 증가함에 따라 저항이 증가하고 인덕턴스는 감소함을 알 수 있으며, 자성막의 투자율의 증가는 표피효과를 더욱 증가시키므로 투자율이 증가할수록 저항과 인덕턴스가 증가하는 결과를 나타낸다. 또한 리액턴스에 대한 저항의 비를 나타내는 Quality factor는 비투자율의 값에 큰 변화를 보이지 않으나 사용 주파수 영역 2~5 [MHz]에서 비투자율이 500일 때 크게 나타난다.

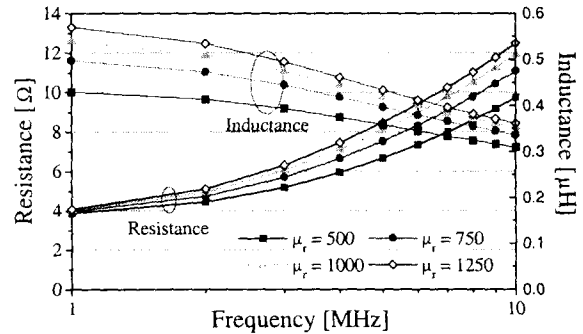


그림 6 자성막 투자율 변화에 따른 주파수 특성

Fig. 6 Frequency characteristics with the permeability of magnetic layer

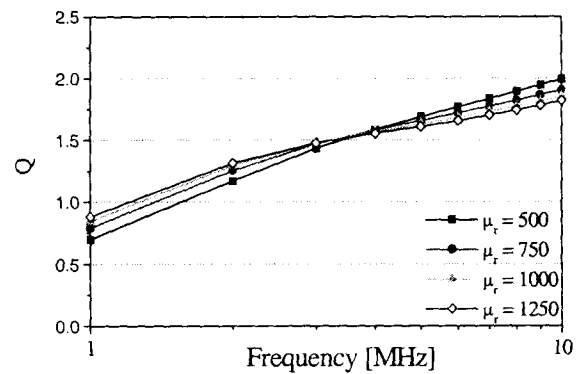


그림 7 투자율 변화에 따른 Quality factor

Fig. 7 Quality factor with the permeability of magnetic layer

4.1.2 자성막 도전율의 변화

그림 8과 그림 9는 투자율의 변화와 동일한 해석모델을 대상으로 자성막의 투자율을 500으로 두고 해석한 주파수 특성이다.

그림 8에서 자성막의 도전율이 증가할 수록 인덕턴스는 감소하나 저항은 큰 변화가 없다. 자성막에 유기된 와류에 의한 반자계의 영향이 증가하므로 유효 자속이 감소하기 때문이며 도전율이  $8.333 \times 10^4 [Ω/m]$  이하에서는 인덕턴스의 증가에 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 그림 9에서 도전율이 증가할수록 저항의 변화에 비하여 인덕턴스의 감소량이 크게 나타나기 때문에 Quality factor가 도전율이 증가할수록 작을 나타낸다.

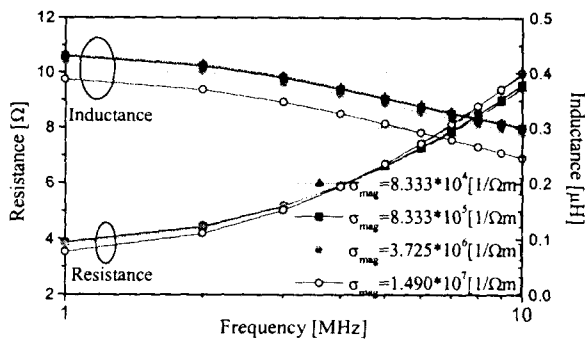


그림 8 자성막 도전율 변화에 따른 주파수 특성  
 Fig. 8 Frequency characteristics with the conductivity of magnetic layer

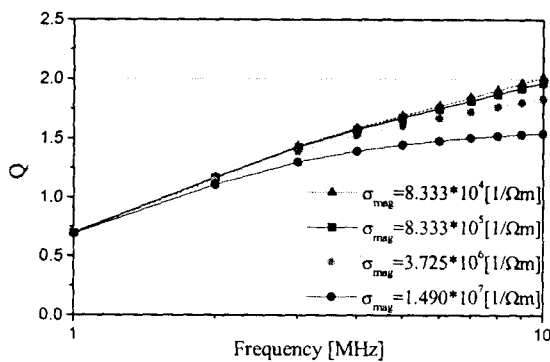


그림 9 자성막 도전율 변화에 따른 Quality factor  
 Fig. 9 Quality factor with the conductivity of magnetic layer

4.2 설계변수에 따른 특성

4.2.1 자성막의 두께 변화

그림 10과 그림 11은 자성막의 두께가 박막 인덕터에 미치는 영향을 분석한 결과로서 저항과 인덕턴스의 변화 양상이 투자율의 변화와 비슷한 양상을 보인다. 자성막 두께의 증가는 자성막을 지나는 자속의 양을 증가시키므로 인덕턴스는 증가하고 이에 따라 반자계 영향 역시 커지게 되어 와전류에 의한 손실이 증가하므로 저항은 증가하게 된다. 자성막의 증가는 인덕턴스와 저항을 증가시키지만 증가 수치의 변화 폭은 작아진다. 즉, 자성막이 8 [μm] 이상에서는 저항과 인덕턴스의 증가가 포화하게 되어 일정 자성막 두께 이상의 증가는 인덕터 성능에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

4.2.2 도체 두께의 변화

그림 12, 그림 13은 도체의 두께증가에 따른 인덕턴스, 저항 및 Quality factor의 변화양상을 보인 그림이다. 도체 두께의 증가는 인덕턴스와 저항을 감소시키는 반면 Quality factor는 증가하는 양상을 나타낸다. 도체 두께의 증가는 도체를 중심으로 상층 자성막과 하층 자성막 사이의 간격을 증가시키게 되므로 두 자성막 사이의 자기저항이 증가하기 때문에 채교 자속량은 감소하게 되어 인덕턴스가 감소하는 결과를 볼 수 있다. 또한 도체 두께의 증가는 도체 단면적을

증가시키므로 저항이 감소함을 알 수 있다. 그러나 도체 두께의 설계 파라메타는 자성막과 같이 일정 수치 이상에서는 인덕터의 특성에 큰 영향을 주지 않으므로 해석 결과로부터 적절한 설계가 필요하다. 그림 12에서 도체 두께 40 [μm]에서 저항과 인덕턴스가 감소하였으나 저항의 감소가 크기 때문에 가장 큰 Quality factor 값을 가진다.

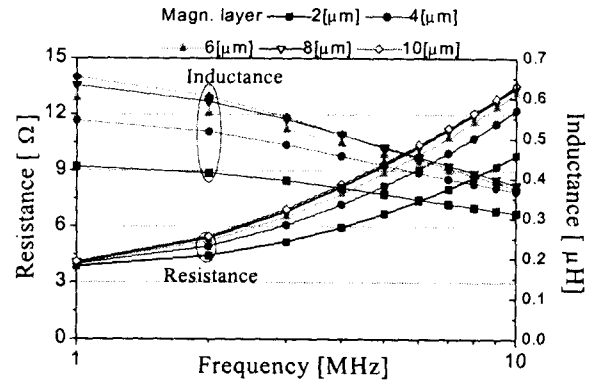


그림 10 자성막 두께에 따른 주파수 특성  
 Fig. 10 Frequency characteristics with the thickness of magnetic layer

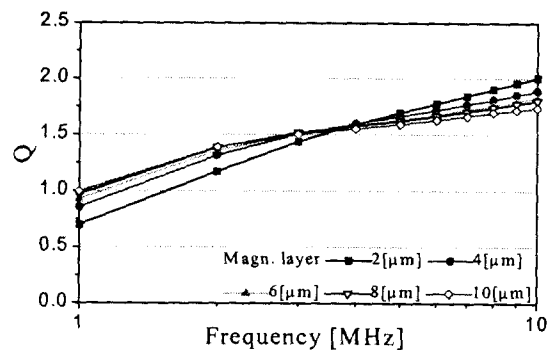


그림 11 자성막 두께에 따른 Quality factor  
 Fig. 11 Quality factor with the thickness of magnetic layer

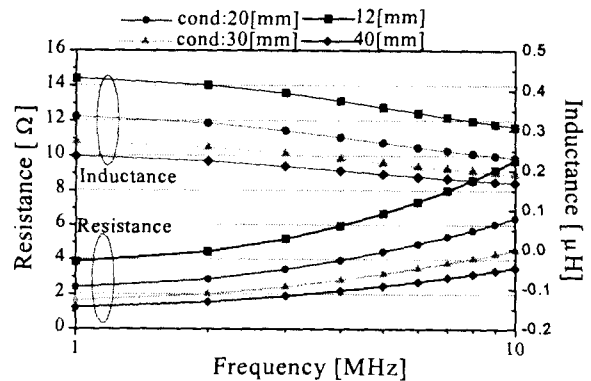


그림 12 도체의 두께 변화에 따른 주파수 특성  
 Fig. 12 Frequency characteristics with the thickness of conductor layer

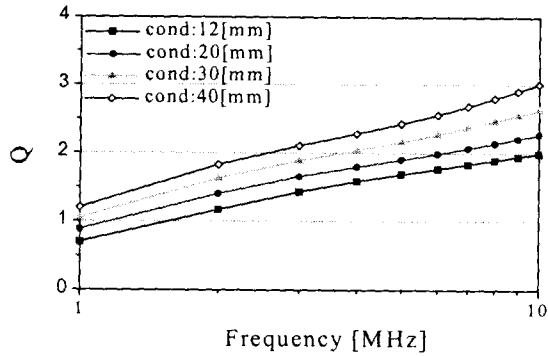


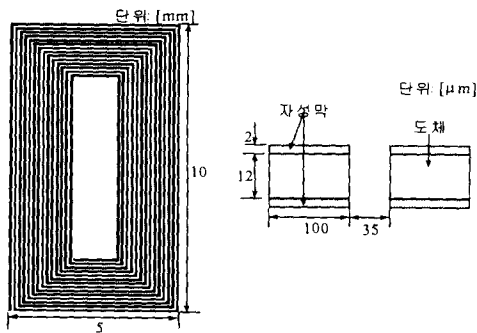
그림 13 도체의 두께 변화에 따른 Quality factor  
Fig. 13 Quality factor with the thickness of conductor layer

4.3 형상 및 패턴 변화

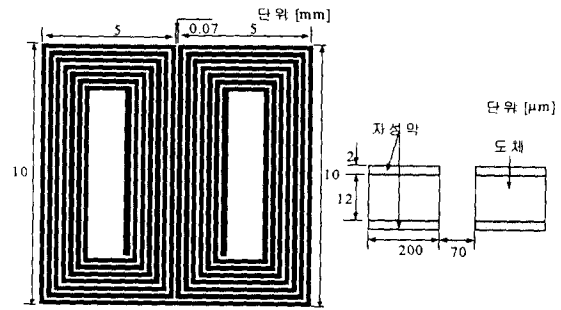
그림 14는 스파이럴 박막 인덕터의 크기와 패턴을 변경한 각각의 형상을 나타낸 그림이다. 그림 14(a)는 그림 1의 14턴  $10 \times 10 [mm^2]$  기본 설계된 모델에서 한 변의 길이를 5 [mm]로 줄임에 따라 도체 폭과 도체 간격을 줄인 14턴 박막 인덕터이다. 그림 14(b)는 7턴의 도체를 가지는  $10 \times 5 [mm^2]$  크기가 두 개로 직렬 연결되어 있는 모델이며 도체 폭 및 도체 사이의 간격은 그림 1의 기본모델과 동일하다. 그림 14(c)는 전체 크기와 도체 및 도체 사이의 간격을 기본 모델의 1/2로 축소한 치수이다. 이상의 3가지 패턴에서 자성막과 도체의 두께는 각각  $2 [\mu m]$ 와  $12 [\mu m]$ 로 기본모델과 동일하다. 표 2는 유한요소 해석 결과에 적용하기 위한 각 패턴의 유효 도체 길이를 나타낸 표이다.

유한요소 해석 결과를 얻기 위하여 해석 영역은 그림 2와 같이 기본모델과 같은 방법으로 설정하고 적절한 경계조건을 부여하여 동일한 해석과정을 수행하였다.

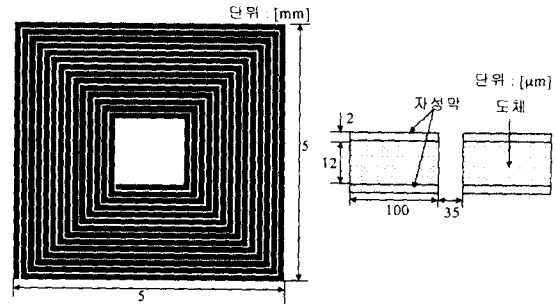
그림 15와 그림 16은 박막패턴의 종류에 따른 특성 해석결과를 나타낸 것이다. 해석 결과에서  $5 \times 5 [mm^2]$  크기의 인덕터는  $10 \times 10 [mm^2]$  크기의 인덕터보다 크기의 축소에 의한 유효도체와 도체 단면적이 감소하였기 때문에 저항과 인덕턴스가 작은 수치를 가진다. 또한 사용주파수 영역에서  $10 \times 5 [mm^2]$ 의 double 패턴이 single 패턴보다 저항과 인덕턴스 작게 나타나며  $5 \times 5 [mm^2]$  크기의 인덕터가 가장 작은 저항과 인덕턴스를 가진다.



(a)  $10 \times 5 [mm^2]$  single 스파이럴형 인덕터



(b)  $10 \times 5 [mm^2]$  double 스파이럴형 인덕터



(c)  $5 \times 5 [mm^2]$  single 스파이럴형 인덕터

그림 14 다양한 스파이럴 박막인덕터의 형상과 치수  
Fig. 14 Various configuration and dimension of spiral type thin-film inductor

표 2 유효 도체 길이

패턴의 종류	$10 \times 5$ (single)	$10 \times 5$ (double)	$5 \times 5$
최외측 도체	29.465	58.06	19.465
내측 도체	273.36	227.20	151.095
최내측 도체	15.61	32.68	5.525
전체 길이	318.385	317.94	176.085

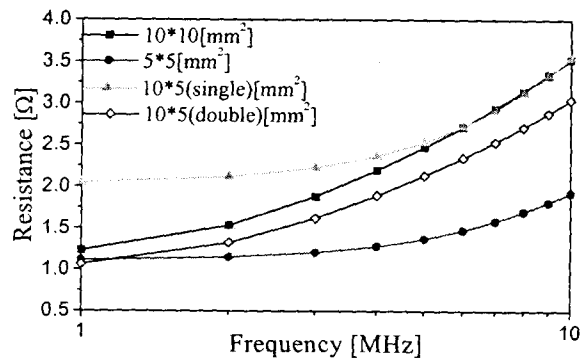


그림 15 박막의 크기에 따른 저항 특성  
Fig. 15 Resistance versus frequency for various configuration

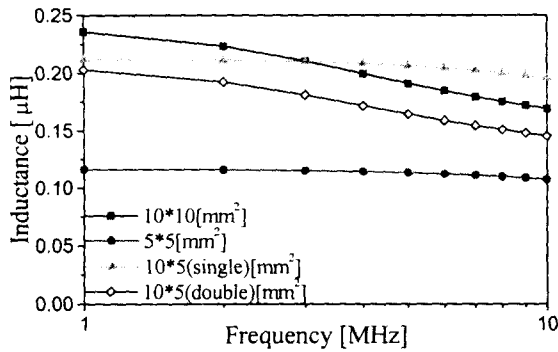


그림 16 박막 인덕터의 크기에 따른 인덕턴스 특성  
 Fig. 16 Inductance versus frequency for various configuration

5. 해석 결과의 고찰

스파이럴형 박막 인덕터의 자기회로를 설계하기 위하여 필요한 각종 설계 변수와 재질 정수 그리고 도체의 패턴 및 배치의 변화가 전자기 특성에 미치는 영향을 정량적, 정성적으로 분석하였다. 이상의 결과로부터 특정 고주파 사용 영역에서 와류에 의한 자기손실을 최소화하고 소형화 할 수 있는 박막 인덕터를 설계하기 위하여 5 [MHz]에서 설계 파라메타의 설정을 정리하면 다음과 같다.

• 자성막의 비투자율은 인덕턴스와 저항을 증가시키는 역할을 하므로 Quality factor는 큰 변화가 없다. 즉 비투자율이 500에서 1250으로 증가할 경우 저항은 1.33배, 인덕턴스는 1.25배 증가한다. 비투자율이 1250이상 이 되면 인덕턴스에는 큰 영향을 주지 않으므로 1250이하로 설정하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다. 한편, 10 [MHz] 이상의 고주파 영역에서는 투자율의 증가에 따라 저항의 증가가 현격하지만 인덕턴스 증가는 둔화되므로 일정 이상으로 투자율을 증가시킬 필요가 없다.

• 자성막 도전율의 감소는 저항에는 큰 영향을 주지 않으나 인덕턴스는 증가시킨다. 도전율이  $1.49 \times 10^7 [\Omega/m]$ 에서  $8.333 \times 10^5 [\Omega/m]$ 으로 감소하면 인덕턴스는 약 1.16배 가량 증가하지만 도전율이  $8.333 \times 10^5 [\Omega/m]$  이하에서는 인덕턴스의 증가가 포화되므로 성능의 향상에 크게 기여를 하지 않는다.

• 도체의 도전율 변화는 자성막의 도전율 변화가 특성에 미치는 영향과 동일한 양상을 가지므로 도전율을 높게 설계 하는 것이 인덕턴스의 감소에 큰 영향을 주지 않고 저항을 감소 시켜 손실 및 열의 발생을 억제 할 수 있을 것으로 판단된다.

• 자성막 두께가 2 [μm]에서 10 [μm]되면 인덕턴스는 1.3배, 저항은 1.5배 가량 증가할 수 있으나 그이상의 두께는 인덕턴스의 향상에 영향을 주지 않으므로 10 [μm]이내에서 설계하는 것이 바람직하다.

• 도체의 두께를 12 [μm]에서 40 [μm]로 증가하면 저항은 2.8배 가량 감소하므로 손실을 많이 줄일 수 있으며 Quality factor 또한 1.7배 증가할 수 있는 장점은 있지만 인덕턴스가 1.88배 가량 감소하는 단점도 있다. 따라서, 손실과

회로의 주파수 선택도 측면에서 도체의 두께가 두꺼울수록 좋으나 인덕턴스가 감소하므로 12~40 [μm] 사이에서 적절한 설계 치수를 고려해야 할 것이다.

•  $10 \times 10 [mm^2]$  패턴은  $5 \times 5 [mm^2]$  패턴 보다 유효 도체 길이가 2배가 길므로 저항과 인덕턴스가 2배 크게 나타나며 Quality factor는 동일하고  $10 \times 5 [mm^2]$  single 패턴은 double 패턴보다 저항이 1.2배, 인덕턴스가 1.29배 크게 나타나며 주파수가 증가할수록 double 패턴의 인덕턴스는 급격히 감소하였다.

6. 결 론

높은 주파수 대역에서 사용되고 있는 박막 인덕터를 설계 하기 위해서는 설계 파라메타가 특성에 미치는 영향을 정확히 해석하고 분석하는 것이 필수적이다. 즉, 고주파 손실을 줄이고 가능한 한 인덕턴스가 큰 값을 갖도록 인덕터를 설계 하여야 한다. 본 논문에서 2차원 유한요소법을 박막 인덕터 해석에 적용하기에 앞서 해석해를 가지는 원형 모델의 주파수에 따른 저항과 인덕턴스를 유한요소해석결과와 비교하여 타당성을 검증하였다. 또한 스파이럴형 박막 인덕터를 대상으로 도체와 자성막의 재질정수, 설계 변수 그리고 인덕터의 크기 및 패턴에 따라 저항과 인덕턴스 그리고 Quality factor의 주파수 특성 변화를 해석하고 분석하였다. 따라서, 소형화된 크기에서 저항 손실에 의한 열의 발생을 최소화할 수 있고 만족하는 인덕턴스 값을 갖는 박형 인덕터를 설계하기 위해서 적절한 수치의 설계 파라메타 범위를 제시하였다.

본 해석방법은 스파이럴형 뿐만 아니라 meander 패턴에도 적용이 가능하기 때문에 박막 인덕터의 설계와 특성해석에 좋은 참고자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 한국 전기연구소, 고주파 박형 자기소자 개발에 관한 1~3차 보고서, 통상산업부, 1996~1998.
- [2] 우창화, "HDD용 thin film head의 특성과 제조공정," 생산기술연구원, vol. 3, pp. 34~41, 1992.
- [3] H. Ogawa et al. "Development of thin film head ofr VCR," *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 31, pp. 2672~2674, 1995.
- [4] 김지원, 조순철, "초소형 전원용 자기박막 인덕터의 해석 및 제조," *대한전자공학회 추계학술대회 논문집*, pp. 1261~1264, 1996.
- [5] M. Yamaguch et al., "Characteristics analysis of a thin film inductor with closed magnetic circuit structure," *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 28, pp. 3015~3017, 1992.
- [6] C. H. Lee et al, "Fabrication of thin film inductors using FeTaN soft magnetic films," *Applied Physics*, vol. 85, pp. 4898~4900, 1999.
- [7] 白江 公輔 外 2人, *マイクロ磁氣デバイスのすべて*, 工業調査會, 1992.
- [8] M. Yamaguch et al., "Analysis of the inductance and

- stray capacitance of the dry-etched micro inductors," *IEEE Trans. on Magn.*, vol 27, pp. 5274~5276, 1991.
- [9] M. Yamaguchi, H. Okumaguchi and K. I. Arai, "Characteristic of magnetic thin film inductors at large magnetic field," *IEEE Tran. on Magn.*, vol. 31, pp. 4229~4231, 1995.
- [10] H. J. Ryu et al., "2D ad 3D simulation of toroidal type thin film inductors," *IEEE Tran. on Magn.*, vol. 34, pp. 1360~1362, 1998.
- [11] 임달호, *전기계의 유한요소법*, 동명사, 1992.
- [12] 竹山説三, *電磁氣學現象理論*, 丸善株式會社, 昭和 54년

## 저 자 소 개



하 경 호(河京鎬)

1972년 5월 19일생. 1997년 창원대 전기공학과 졸업. 1999년 전기전자제어 대학원 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정

Tel: 0551-279-7519

E-mail: haroom@netian.com

홍 정 표(洪正杓)

전기학회논문지 제48B권 9월호 참조

송 재 성(宋在成)

전기학회논문지 제48C권 5월호 참조

민 복 기(閔馥基)

전기학회논문지 제48C권 5월호 참조

김 현 식(金賢植)

전기학회논문지 제48C권 5월호 참조