

육각 나선형 박막 인덕터의 주파수 특성에 관한 연구

김재욱*, 김희철**

Study on Frequency Characteristics of Hexagonal Spiral Thin-film Inductor

Jae-Wook Kim*, Hee-Cheol Kim**

요약 본 논문에서는 무선 신호전송을 위한 비접촉 방식의 AC 커플링 기반 육각 나선형 박막 인덕터의 주파수 특성을 분석하였다. 사각 나선형 인덕터와 육각 나선형 인덕터에 대하여 권선수 변화, 도체 선 폭 및 선 간격을 변화에 따른 주파수 특성을 비교·분석하였다. 육각 나선형 인덕터는 사각 나선형 인덕터와 비교하여 동일한 인덕턴스를 갖기 위하여 더 많은 권선수를 갖게 되지만 전체적인 도선의 길이는 짧아지게 된다. 이는 자기인덕턴스는 감소하고 상호인덕턴스가 증가하여 전체적인 인덕턴스는 같은 값을 가질 수 있다. 또한 전체적인 도선의 길이가 짧아지고 자기저항이 감소하므로 품질계수와 자기공진주파수의 성능을 확보할 수 있다. 제안된 육각 나선형 박막 인덕터는 2GHz에서 3.54nH의 인덕턴스와 5.0GHz에서 최댓값 14.00의 품질계수를 가지며, 약 11.3GHz에서 자기공진주파수를 가진다.

Abstract In this paper, we analyzed the frequency characteristics of hexagonal spiral thin-film inductor based on non-contact AC coupling for wireless signal transmission. We compared and analyzed the frequency characteristics of the rectangular spiral inductor and the hexagonal spiral inductor according to the number of turns, the line width and the line spacing of the conductor. Hexagonal spiral inductor has more number of turns to has the same inductance as rectangular spiral inductor, but the overall length of the conductors is shortened. This reduces the self inductance and increases the mutual inductance so that the overall inductance can have the same value. Also, since the overall length of the conductor is shortened and the magnetic resistance is reduced, the quality factor and the self-resonant frequency performance can be secured. The proposed hexagonal spiral thin-film inductor has the inductance of 3.54nH at 2GHz, the quality factor of max 14.00 at 5.0GHz and the self-resonant frequency at about 11.3GHz.

Key Words : Hexagonal, Inductor, Quality-factor, Spiral, Thin-film

1. 서론

최근 전자기기의 발전 동향을 살펴보면 표면실장기술(SMT: Surface mount technology)의 발달에 따라 경박 단소화가 진행되고 있다[1]. 무선통신 시스템의 효율적인 구현을 위해서는 다기능을 갖고 고성능 및 경제성이 있는 저가의 단일 기판 초고주파 직접회로(MMIC : monolithic microwave On-chip) 인덕터는 고주파 회로의 성능을 좌우하

는 수동소자 중의 하나로, LNA(low-noise amplifier), VOC(voltage controlled oscillator), 임피던스 매칭 등에 폭넓게 사용된다[2]. 또한 프린트 기판은 경박 단소화 추세에 따라 고밀도화 및 조립공정의 합리화가 진행되어 본격적인 SMT시대를 맞고 있다. 이와 같은 상황 하에서 기판 위에 직접 실장되는 chip 소자(SMD: Surface mount device)도 프린트 기판 위의 고밀도 실장을 위하여 소형화, 고성능화, 고신뢰성화, 다기능화가 지속적

*Corresponding Author : Department of Electronics Engineering, Namseoul University (jwkim@nsu.ac.kr)

**Department of Industrial & Management Engineering, Namseoul University

Received September 26, 2017

Revised October 19, 2017

Accepted October 19, 2017

으로 진행되고 있다[1].

각종 통신 및 전자기기의 소형·경량화 됨에 따라 인덕터의 소형화가 필수적인 요소가 되었다. 따라서 소형·경량이면서 높은 인덕턴스 및 품질계수를 요구하는 인덕터의 개발이 요구된다. 솔레노이드 타입의 칩 인덕터는 높은 인덕턴스와 품질계수를 구현할 수 있으나 형태적으로 볼 때 크기를 소형화 하는데 많은 제한이 따른다. 이에 기관효과로 인한 문제점이 제시된 평면형태의 인덕터가 크기를 줄이는데 있어서의 대안으로 제시되며, 높은 인덕턴스를 얻기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다.

표면 실장형 칩 인덕터는 박막형, 권선형, 적층형이 있는데 이 중 박막형 칩 인덕터는 적층형 인덕터의 기본 구조로서 품질계수 Q값과 사용주파수 대역이 다른 구조에 비해 높으며 박막공정기술을 이용하기 때문에 소형화에 유리한 장점이 있다. 이러한 특성으로 인해 고주파 영역에서 고정밀 용도로 주로 이용되고 있으며 고주파 무선 신호 전송을 위한 AC 커플링에도 활용 할 수 있다[3, 4].

본 논문에서는 일반적인 사각 나선형 박막 인덕터에 대하여 다양한 파라미터 변화에 따른 주파수 특성을 분석하고, 이를 토대로 한 무선신호전송 또는 무선전력전송의 기반이 되는 비접촉 방식 AC 커플링을 위한 육각 나선형 박막 인덕터의 주파수 특성을 분석하고자 한다. 2장은 본문으로서 권선수, 선 간격 및 선 폭 변화에 따른 육각 나선형 인덕터의 특성을 분석과 설계를 하였으며, 3장은 결론을 도출하였다.

2. 본론

2.1 육각 나선형 인덕터의 특성 분석

일반적인 사각 나선형 구조의 인덕터에 다양한 파라미터 변화를 통한 주파수 특성을 분석하고, 이를 토대로 하여 인덕턴스, 품질계수 및 공진주파수를 향상시킬 수 있는 육각 구조의 나선형 인덕터를 제안하고 HFSS(High Frequency Structure Simulator)를 사용하여 특성을 분석하였다.

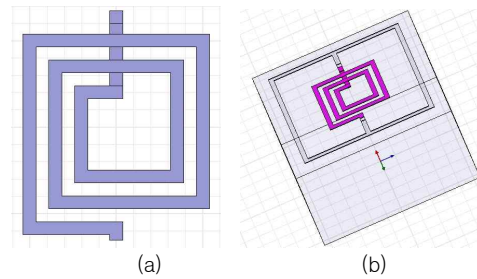


그림 1. 사각 나선형 박막 인덕터의 구조
(a)인덕터의 평면 그림 (b)인덕터의 3차원 그림
Fig. 1. Structure of rectangle spiral thin-film inductor
(a)Plane figure of inductor (b)A three-dimensional figure of inductor

그림 1은 $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ 의 Si 기판에 선 폭 $15 \mu\text{m}$, 선 간격 $15 \mu\text{m}$, 권선수 2.5회를 기준으로 한 일반적인 형태의 사각 나선형 박막 인덕터를 보여준다. 그림 1의 (a)는 인덕터의 평면 구조를 나타내며, (b)는 인덕터의 3차원 구조를 나타낸다. 인덕터는 내부 도선과의 연결을 위해 underpass와 feed를 갖으며 2개의 via를 사용한 형태를 가진다. 이 기준에서 선 폭, 선 간격, 권선수 등을 조절하여 각각의 주파수 특성을 비교·분석하였다.

그림 2는 그림 1과 동일한 조건을 갖는 육각형 구조의 나선형 인덕터를 보여준다. 그림 2의 (a)와 (b)는 육각 나선형 인덕터의 평면 구조와 3차원 구조를 나타낸다.

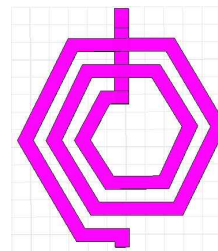
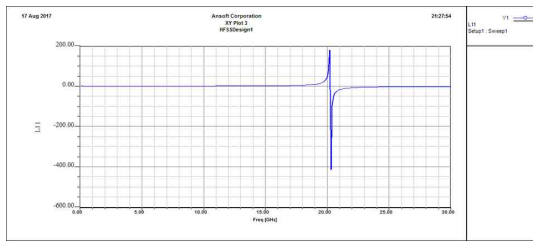
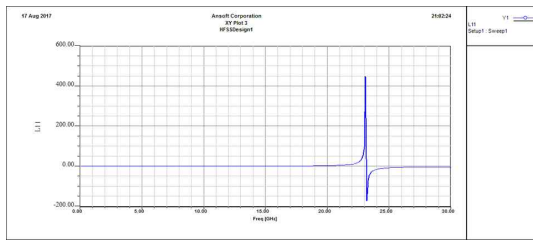


그림 2. 육각 나선형 박막 인덕터의 구조
Fig. 2. Structure of hexagonal spiral thin-film inductor



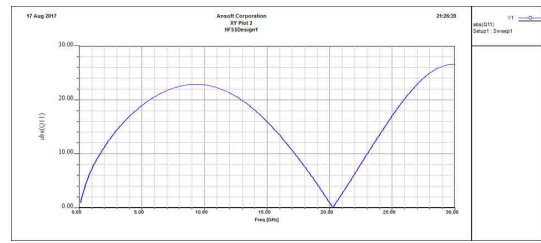
(a)



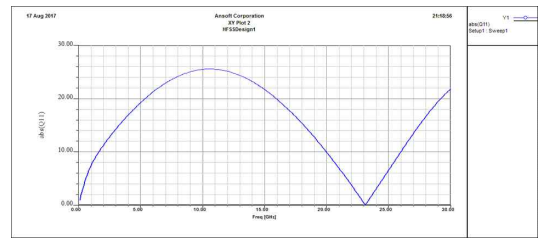
(b)

그림 3. 인덕턴스-주파수 특성
(a)사각 나선형 인덕터 (b)육각 나선형 인덕터
Fig. 3. Characteristics of inductance–frequency
(a)Rectangle spiral inductor (b)Hexagonal spiral inductor

그림 3은 위에 제시한 두 종류의 인덕터에 대한 주파수-인덕턴스 특성을 나타낸다. 그림 3(a)는 그림 1의 사각 나선형 인덕터에 대한 인덕턴스이며, (b)는 그림 2의 육각 나선형 인덕터에 대한 인덕턴스 특성이다. 그림 3(a)는 2GHz 주파수에서 1.44nH의 인덕턴스를 가지며, (b)는 1.28nH의 인덕턴스를 가진다. 이는 동일한 크기의 기판에 동일한 크기를 갖도록 설계한 두 종류의 인덕터에 있어서 육각 구조가 사각 구조보다 전체 내부 도선의 길이가 짧아짐으로 인하여 작은 인덕턴스를 갖게 된다. 그리고 인덕턴스가 양의 값으로부터 음의 값으로 전위되는 주파수를 자기공진주파수로 간주할 수 있으며, (a)는 약 20.2GHz에서 전위가 일어나고 (b)는 약 23.1GHz에서 전위가 일어난다. 육각 나선형 인덕터가 사각 나선형 인덕터보다 작은 자기공진주파수를 가지며, 이것은 인덕턴스와 자기공진주파수의 반비례 상관관계와 일치한다.



(a)



(b)

그림 4. 품질계수-주파수 특성
(a)사각 나선형 인덕터 (b)육각 나선형 인덕터
Fig. 4. Characteristics of quality factor–frequency
(a)Rectangle spiral inductor (b)Hexagonal spiral inductor

그림 4는 위에 제시한 두 종류의 인덕터에 대한 주파수-품질계수 특성을 나타낸다. 그림 4(a)와 (b)는 각각 그림 1의 사각 나선형 인덕터와 그림 2의 육각 나선형 인덕터에 대한 품질계수 특성이다. 그림 4(a)는 9.3GHz 주파수에서 최댓값 22.89의 품질계수를 가지며, (b)는 10.6GHz에서 최댓값 25.58의 품질계수를 가진다. 이는 육각 구조가 사각 구조보다 전체 내부 도선의 길이가 짧아짐으로 인하여 도선 자체의 내부 저항이 작아지고, 육각 구조가 사각 구조보다 나선형의 꺾임 부분의 각이 넓어져 저항이 작아짐을 유추할 수 있다. 그리고 품질계수가 0의 값을 갖는 주파수를 자기공진주파수로 간주할 수 있으며, (a)는 약 20.2GHz에서 (b)는 약 23.1GHz에서 0의 값을 가진다. 이것은 앞선 그림 3의 인덕턴스 특성과 일치함을 알 수 있다.

2.1.1 권선수 변화에 따른 특성

설계된 인덕터의 전체 크기를 $300 \times 300 \mu\text{m}^2$, 도체의 선 폭을 $15 \mu\text{m}$, 선 간격을 $15 \mu\text{m}$ 으로 고정하고 권선

수를 2회, 2.5회 및 3회로 변화시켜 그에 대한 인덕터의 인덕턴스(L), 품질계수(Q)와 자기공진주파수(SRF)의 특성을 분석하였다. 인덕터의 권선수는 입력단과 출력단의 위치가 서로 상반되도록 하기 위하여 n 및 n.5회가 되도록 설계하였다.

표 1은 인덕터의 권선수 변화에 따른 주파수 특성을 나타낸다. 사각 나선형 인덕터의 경우에 권선수를 2회, 2.5회 및 3회로 증가시켰을 때 인덕턴스는 2GHz의 주파수 대역에서 1.34nH, 1.44nH와 1.58nH로 증가하였다. 반면 자기공진주파수는 21.3GHz, 20.2GHz와 19.3GHz로 감소하였다. 또한 육각 나선형 인덕터의 경우에 권선수를 2회, 2.5회 및 3회로 증가시켰을 때 인덕턴스는 2GHz의 주파수 대역에서 1.09nH, 1.28nH와 1.43nH로 증가한 반면 자기공진주파수는 23.3GHz, 23.1GHz와 22.0GHz로 감소하였다. 이는 권선수가 증가할수록 사각 및 육각 나선형 인덕터 모두에 대하여 도선의 총 길이가 증가하고 이에 따라 인덕턴스가 증가함을 나타낸다. 또한 권선수가 증가할수록 권선 사이의 겹치는 면적이 증가하게 되므로 기생 캐패시턴스도 증가하여 자기공진주파수는 감소하게 되고 사용가능 주파수 영역도 감소한다.

육각 나선형 인덕터 중 권선수가 3회인 경우 1.43nH의 인덕턴스와 최댓값 23.02의 품질계수를 가짐으로서, 권선수 2.5회인 사각 나선형 인덕터와 유사한 인덕턴스와 품질계수를 가짐을 알 수 있다. 하지만 자기공진주파수에 있어서 22.0GHz를 가지며 20.2GHz인 사각 나선형 인덕터보다 우수함을 알 수 있다. 두 종류의 설계된 인덕터에 대하여 내부 도선의 총 길이를 측정된 결과, 권선수 2.5회인 사각 나선형 인덕터는 약 1,702.5 μ m, 권선수 3회인 육각 나선형 인덕터는 1,541.43 μ m를 가진다. 이는 육각 나선형 인덕터가 사각 나선형 인덕터에 비하여 전체적인 내부 도선의 길이는 짧지만 권선수에 따른 도선 간의 상호인덕턴스가 이를 보완해 줄 수 있음을 의미하며, 또한 짧아진 도선에 의한 자기저항 성분이 감소할 수 있으나 도선 간의 기생 캐패시턴스가 증가할 수 있음을 유추할 수 있다.

표 1. 권선수(N)의 변화에 따른 인덕터의 주파수 특성
Table 1. Frequency Characteristics of inductors due to change of number of turns(N)

Spec.	N	L[nH] @2GHz	Q	SRF [GHz]
Rectangular inductor	2	1.34	21.83 @10.0GHz	21.3
	2.5	1.44	22.89 @9.3GHz	20.2
	3	1.58	21.01 @9.0GHz	19.3
Hexagonal inductor	2	1.09	23.04 @10.8GHz	23.3
	2.5	1.28	25.58 @10.6GHz	23.1
	3	1.43	23.02 @10.0GHz	22.0

2.1.2 선 간격 변화에 따른 특성

설계된 인덕터의 전체 크기를 300 \times 300 μ m², 도체의 선 폭을 15 μ m, 권선수를 2.5회로 고정하고 선 간격을 5 μ m, 10 μ m, 15 μ m로 변화시켜 그에 대한 인덕터의 인덕턴스, 품질계수와 자기공진주파수의 특성을 분석하였다.

표 2는 사각 나선형 인덕터의 선 간격 변화에 따른 주파수 특성을 나타낸다. 선 간격을 5 μ m, 10 μ m와 15 μ m로 증가시켰을 때 인덕턴스는 2GHz의 주파수 대역에서 1.87nH, 1.52nH와 1.44nH로 감소하였다. 반면 자기공진주파수는 16.5GHz, 18.0GHz와 20.2GHz로 증가하였다.

표 2. 선 간 변화에 따른 사각 나선형 인덕터의 주파수 특성
Table 2. Frequency Characteristics of rectangular spiral inductors due to change of line space

Line space [μ m]	L[nH] @2GHz	Q	SRF [GHz]
5	1.87	22.74 @7.9GHz	16.5
10	1.52	23.34 @8.6GHz	18.0
15	1.44	22.89 @9.3GHz	20.2

표 3은 육각 나선형 인덕터의 선 간격 변화에 따른 주파수 특성을 나타낸다. 선 간격을 5 μ m, 10 μ m와 15 μ m로 증가시켰을 때 인덕턴스는 2GHz의 주파수

대역에서 1.59nH, 1.38nH와 1.28nH로 감소한 반면 자기공진주파수는 18.3GHz, 20.5GHz와 23.1GHz로 증가하였다.

표 3. 선 간 변화에 따른 육각 나선형 인덕터의 주파수 특성

Table 3. Frequency Characteristics of hexagonal spiral inductors due to change of line space

Line space [μm]	L[nH] @2GHz	Q	SRF [GHz]
5	1.59	22.19 @8.3GHz	18.3
10	1.38	22.26 @9.3GHz	20.5
15	1.28	25.58 @10.6GHz	23.1

표 2와 표 3의 결과로부터 도선의 간격이 커질수록 나선형 인덕터의 전체 도선 길이가 감소하고 이에 따라 인덕턴스가 감소함을 나타낸다. 또한 도선의 간격이 커질수록 도선 사이의 기생 커패시턴스가 감소함에 따라 자기공진주파수는 증가하게 되고 사용가능 주파수 영역도 증가한다.

2.1.3 선 폭 변화에 따른 특성

설계된 인덕터의 전체 크기를 $300 \times 300 \mu\text{m}^2$, 도체의 권선수를 2.5회로 고정하고 선 폭을 5 μm , 10 μm , 15 μm 로 변화시켜 그에 대한 인덕터의 인덕턴스, 품질계수와 자기공진주파수의 특성을 분석하였다. 선 간격은 선 폭 변화에 따라 선 폭이 5 μm 인 경우에는 25 μm , 선 폭이 10 μm 인 경우에는 20 μm , 선 폭이 15 μm 인 경우에는 15 μm 이 되도록 하였으며 전체적인 인덕터 크기에는 변화를 주지 않았다.

표 4는 사각 나선형 인덕터의 선 폭 변화에 따른 주파수 특성을 나타낸다. 선 폭을 5 μm , 10 μm 와 15 μm 로 증가시켰을 때 인덕턴스는 2GHz의 주파수 대역에서 1.86nH, 1.54nH와 1.44nH로 감소하였다. 반면 자기공진주파수는 17.7GHz, 18.5GHz와 20.2GHz로 증가하였다.

표 4. 선 폭 변화에 따른 사각 나선형 인덕터의 주파수 특성

Table 4. Frequency Characteristics of rectangular spiral inductors due to change of line width

Line width [μm]	Line space [μm]	L[nH] @2GHz	Q	SRF [GHz]
5	25	1.86	22.02 @7.1GHz	17.7
10	20	1.54	22.58 @8.4GHz	18.5
15	15	1.44	22.89 @9.3GHz	20.2

표 5는 육각 나선형 인덕터의 선 폭 변화에 따른 주파수 특성을 나타낸다. 선 폭을 5 μm , 10 μm 와 15 μm 로 증가시켰을 때 인덕턴스는 2GHz의 주파수 대역에서 1.46nH, 1.31nH와 1.28nH로 감소한 반면 자기공진주파수는 19.8GHz, 21.5GHz와 23.1GHz로 증가하였다.

표 5. 선 폭 변화에 따른 육각 나선형 인덕터의 주파수 특성

Table 5. Frequency Characteristics of hexagonal spiral inductors due to change of line width

Line width [μm]	Line space [μm]	L[nH] @2GHz	Q	SRF [GHz]
5	25	1.46	23.02 @9.8GHz	19.8
10	20	1.31	23.24 @10.0GHz	21.5
15	15	1.28	25.58 @10.6GHz	23.1

표 4와 표 5의 결과로부터 도선의 폭이 넓어질수록 나선형 인덕터의 도선 내에 흐르는 전류밀도의 불규칙한 분산이 커지고 이에 따른 내부 인덕턴스의 감소로 이어짐을 나타낸다. 또한 도선의 너비가 커질수록 도선과 도선사이의 겹치는 부분이 작아져 기생 커패시턴스 또한 감소하게 됨에 따라 자기공진주파수도 감소하게 되고 사용가능 주파수 영역대도 감소한다.

2.2 육각 나선형 인덕터의 설계

앞선 실험의 결과로부터 권선수 변화에 따라 권선수가 증가하면 인덕턴스가 증가하고, 선 간격 및 선 폭 변화에 따라 선 간격 및 선 폭이 좁아지면 내부 도선의 길이가 길어져 인덕턴스가 증가하였다. 이를 근거로 하여 동일 크기의 기판에 선 폭 10 μ m, 선 간격 5 μ m, 권선수 4.5회를 가지는 육각 나선형 박막 인덕터를 설계하였다. 그림 5는 제안된 육각 나선형 박막 인덕터의 평면 구조를 나타낸다.

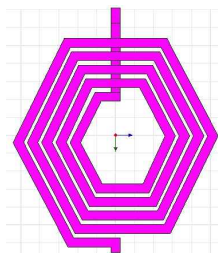


그림 5. 제안된 육각 나선형 박막 인덕터의 평면 구조
Fig. 5. Plane structure of proposed hexagonal spiral thin-film inductor

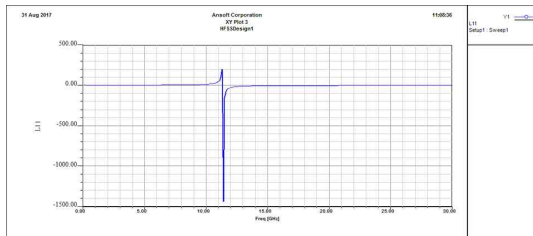


그림 6. 제안된 육각 나선형 인덕터에 대한 인덕턴스-주파수 특성
Fig. 6. Characteristic of inductance-frequency for proposed hexagonal spiral thin-film inductor

그림 6은 제안된 육각 나선형 박막 인덕터에 대한 주파수-인덕턴스 특성을 나타낸다. 그림 6은 2 GHz 주파수에서 3.54nH의 인덕턴스를 가지며, 인덕턴스가 양의 값으로부터 음의 값으로 전위되는 자기공진주파수는 약 11.3GHz이다.

그림 7은 제안된 육각 나선형 박막 인덕터에 대한 주파수-품질계수 특성을 나타낸다. 그림 7은 5.

0GHz 주파수에서 최댓값 14.00의 품질계수를 가지며, 품질계수가 0의 값을 갖는 자기공진주파수는 약 11.3GHz이다.

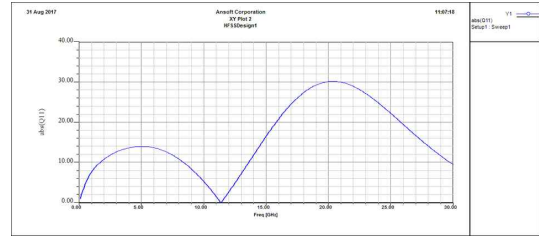


그림 7. 제안된 육각 나선형 인덕터에 대한 품질계수-주파수 특성

Fig. 7. Characteristic of quality factor-frequency for proposed hexagonal spiral thin-film inductor

3. 결론

본 논문에서는 접촉 방식 AC 커플링을 위한 육각 나선형 박막 인덕터의 주파수 특성을 확인하고자 하였다.

동일 크기에 사각 나선형 인덕터와 육각 나선형 인덕터에 대하여 권선수 변화, 도체 선 폭 및 선 간격을 변화하며 비교·분석하였다. 그 결과 육각 나선형 인덕터는 사각 나선형 인덕터와 비교하여 동일한 인덕턴스를 갖게 하기 위하여 더 많은 권선수를 갖게 되지만 전체적인 도선의 길이는 짧아지게 된다. 이는 자기인덕턴스는 작지만 상호인덕턴스가 증가하여 전체적인 인덕턴스는 같은 값을 가질 수 있다. 또한 전체적인 도선의 길이가 짧아져 자기저항이 감소하므로 품질계수와 자기공진주파수의 성능을 확보할 수 있다.

이를 근거로 하여 동일 크기의 기판에 선 폭 10 μ m, 선 간격 5 μ m, 권선수 4.5회를 가지는 육각 나선형 박막 인덕터를 설계하였다. 제안된 육각 나선형 박막 인덕터는 2GHz 주파수에서 3.54nH의 인덕턴스와 5.0GHz 주파수에서 최댓값 14.00의 품질계수를 가지며, 약 11.3GHz의 자기공진주파수를 가진다.

REFERENCES

- [1] Korea Electronics Technology Institute. *A study on the Development of SMD Type Chip Inductor*. Ministry of Information and Communication, 1996.
- [2] Han-Young Lee, Woo-Cheol Lee, "The Fabrication of On-chip Spiral Inductors Through 3-D Field Analysis", *The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers* 56(11), pp.1967-1971, 2007.
- [3] Sanjay K. Thakur, Rubin A. Parekhji, A. N. Chandorkar, "On-chip Test and Repair of Memories for Static and Dynamic Faults", *IEEE International test conference*, 2006.
- [4] John Wilson, Member, Stephen Mick, Jian Xu, Member, Lei Luo, Salvatore Bonafede, Alan Huffman, "Fully Integrated AC Coupled Interconnect, Using Buried Bumps", *IEEE Trans. Actionson Advanced Packing*, vol.30, no.2, pp.191-199, May 2007.

저자약력

김 재 욱(Jae-Wook Kim)

[정회원]



<관심분야>

- 1993년 2월 : 호서대학교 전자공학과 (공학사)
 - 1998년 8월 : 호서대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
 - 2003년 2월 : 호서대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
 - 2006년 3월 ~ 현재 : 남서울대학교 전자공학과 조교수
- 자동제어, 퍼지제어, chip inductor 개발, 자성박막 및 소자 개발

김 희 철(Hee-Cheul Kim)

[정회원]



<관심분야>

- 1992년 2월 : 동국대학교 통계학과 (이학석사)
 - 1998년 8월 : 동국대학교 통계학과 (이학박사)
 - 2000년 3월 ~ 2004년 2월: 송호대학교 정보산업계열 교수
 - 2005년 3월 ~ 현재 : 남서울대학교 산업경영공학과 교수
- 소프트웨어신뢰성 공학, 진산 통계, 웹프로그래밍