

# 단층 나선형 인덕터에 대한 주파수 특성 연구

김재욱\*

## Study on Frequency Characteristics for Single-Layer Symmetric Spiral Inductor

Jae-Wook Kim\*

**요약** 일반적인 나선형 인덕터의 경우에 비대칭 구조를 가짐에 따라 포트의 방향에 영향을 받게 된다. 본 논문에서는 단층이면서 대칭 구조를 가질 수 있는 나선형 인덕터를 제안하고 시뮬레이션 및 주파수 특성을 분석하였다. 일반적인 나선형 인덕터는 포트의 기준에 따라 주파수-인덕턴스 특성, 주파수-품질계수 특성, 자기공진주파수가 큰 차이를 보이는 반면에, 제안된 대칭 나선형 인덕터는 포트에 변함없이 2.7nH의 인덕턴스, 약 7.86의 품질계수, 약 14.1GHz의 자기공진 주파수를 가진다. 이는 기존 일반적인 나선형 인덕터가 포트에 따라 큰 차이를 갖는 것과 비교하여 포트의 방향에 대한 영향이 적은 것을 확인할 수 있었다. 다만, 코일의 점유 면적에 비하여 상호 인덕턴스가 줄어들어 낮은 인덕턴스를 가지며, 인덕턴스 증가보다 코일의 저항이 더 증가하여 품질계수 또한 낮아짐을 확인할 수 있었다. 향후에는 2층 대칭 나선형 구조를 통하여 인덕턴스와 품질계수를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

**Abstract** In the case of a general spiral inductor, the orientation of the port is affected as it has an asymmetric structure. In this paper, a single-layered spiral inductor that can have a symmetrical structure is proposed, and the simulation and frequency characteristics are analyzed. The general spiral inductor shows a large difference in frequency-inductance characteristics, frequency-quality factor characteristics, and self-resonant frequency according to the standard of the port, while the proposed symmetric spiral inductor has an inductance of 2.7nH, a quality factor of about 7.86, and a self-resonant frequency of about 14.1GHz without changing the port. Compared to the general spiral inductor having a large difference depending on the port, it was confirmed that the influence on the port direction was small. However, it was confirmed that the mutual inductance decreased compared to the occupied area of the coil, resulting in a low inductance, and the resistance of the coil increased more than the increase in the inductance, and the quality factor was also lowered. In the future, it is expected that inductance and quality factor can be improved through a 2-layer symmetrical spiral structure.

**Key Words** : Inductance, Inductor, Single-layer, Spiral, Symmetric

### 1. 서론

무선통신 시스템의 발전과 그를 응용한 시장의 계속적인 확대에 따라 무선통신 회로나 소자들에 대한 관심이 커지고 있다[1].

실리콘 공정을 기반으로 한 RF IC는 고주파 대역(GHz)에서 점차 경쟁력을 갖추고 있다. 공정기술의 개선에 따라 실리콘 공정은 RF IC 응용(예를 들면, 800MHz~2.5GHz)에서 높은 성능을 제공하고 있다. 그러나 이러한 기술진보에도 불구하고, 저가격, 저전

Funding for this paper was provided by Namseoul University year 2019.

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

Received September 24, 2020

Revised October 5, 2020

Accepted October 5, 2020

압, 저전력손실, 저잡음 RF IC 응용에 대해서는 수동 소자의 낮은 품질계수가 주요 장애 요인으로 작용하고 있다. 집적형 나선형 인덕터는 저잡음 증폭기, 주파수 변환기, 전압 제어 발진기 등의 여러 초고주파 및 RF 집적회로에 이용되고 있다. 집적형 인덕터는 on-chip 정합회로망, 수동 필터, 유도성 부하, 변압기, balun 등을 구현하기 위해 이용되고 있다. 실리콘 공정기술이 RF IC 시장에서 큰 비중을 차지함에 따라 높은 품질계수를 갖는 집적형 인덕터에 대한 요구가 증가하였으며, 이에 실리콘 기반의 집적형 나선형 인덕터 설계기술에 대한 주요한 진보로 이어지고 있다[2~5]. 이러한 진보에도 불구하고, 상업용 RF IC가 상용화로 이루어지고 있지 못한 실정이며, 이는 가격이 기술을 결정짓는 중요한 요소이기 때문이다. 집적형 나선형 인덕터는 die 면적을 넓게 차지하여 IC 가격의 증가 요인이 되므로, 외장형 인덕터를 채택하고 있다. 이러한 관점에서 보면, 집적형 인덕터가 연구용을 넘어서 상업용으로 채택하기 위해서는 고품질계수보다 면적 효율이 먼저 해결해야 할 주요 과제이다[6].

RF IC에서 일반적으로 사용되어지는 나선형 인덕터(spiral inductor)는 구조가 간단하고, 전력 소모가 적다는 장점이 존재한다. 하지만 나선형 인덕터는 회로 점유 면적이 크며, 긴 선로 길이로 인하여 직렬 저항 성분이 추가되어 낮은 Q-지수를 갖는다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 자이레이터(gyrator) 구조의 접지형 능동 인덕터가 연구되어 왔다[7]. 하지만 기존의 접지형 능동 인덕터는 높은 Q-지수를 갖는 주파수 대역폭이 좁고, 한 쪽 단자가 접지되어 있어서 직렬 회로에는 사용할 수 없다는 단점이 있다[8]. 또한 일반적으로 대칭 구조의 수동소자를 이용할 수 있는 것은 매우 유용하며, 전압제어 발진기 등과 같은 일부 RF 집적회로 설계에 있어서는 대칭 구조의 인덕터가 필수적이다[9].

본 논문에서는 일반적인 단층 나선형 인덕터[10]와 비교하여 방향적 차이점을 극복할 수 있는 대칭 구조의 단층 나선형 인덕터를 제시하고 비교 분석하였다. 대칭 단층 나선형 인덕터의 경우, 기존의 단층 나선형 인덕터와 비교하여 포트의 방향에 관계없이 유사한 주파수 특성을 나타내었다.

## 2. 인덕터의 시뮬레이션 및 분석

### 2.1 인덕터의 구조

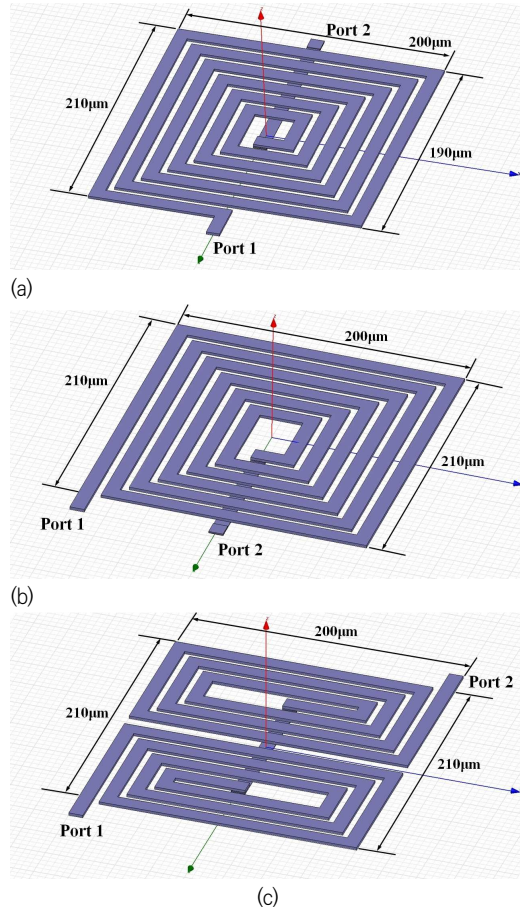


그림 1. (a) 일반적인 비대칭 인덕터(양방향), (b) 일반적인 비대칭 인덕터(단방향), 그리고 (c) 제안된 대칭 인덕터의 구조  
 Fig. 1. The structure of (a) general asymmetric inductor (both direction), (b) general asymmetric inductor (one direction), and (c) proposed symmetric inductor

그림 1(a)와 (b)는 일반적인 단층 나선형 인덕터의 구조로서 포트의 방향이 양방향과 단방향인 경우를 나타낸다. 시뮬레이션을 위하여 HFSS (High Frequency Structure Simulator)를 사용하고 2-포트 Driven Terminal 방식을 이용하였다. 그림에서와 같이 권선수는 6이고 금속선의 폭과 두께는 각각 10µm과 2µm, 금속선 간의 간격은 10µm이다. 인덕터의 최외각 크기는 210×200µm<sup>2</sup>이다.

그림 1(c)는 본 논문에서 제안하는 대칭 단층 나선형 인덕터의 구조를 나타낸다. 이는 일반적인 나선형 인덕터가 비대칭적인 구조로 이루어진 것과 비교하여 대칭적인 구조를 가지고 있으며, 금속선의 폭과 두께, 금속선 간의 간격, 최외각 크기 등과 같은 파라미터를 동일하게 하였다.

### 2.2 인덕터 시뮬레이션

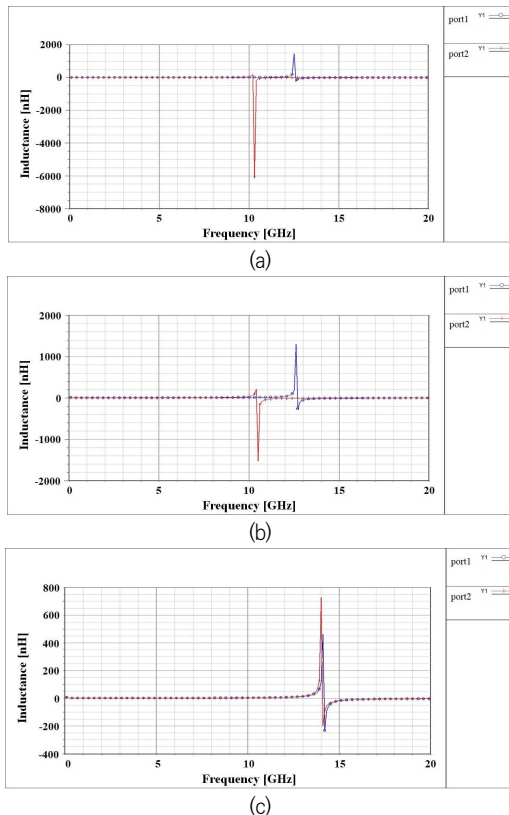


그림 2. 그림 1의 3가지 타입 인덕터에 대한 주파수-인덕턴스 특성  
 Fig. 2. The frequency-inductance characteristic for 3-type inductors of Fig.1

그림 2는 그림 1에 제시된 3가지 종류의 인덕터에 대한 주파수-인덕턴스 특성을 나타낸다. 각 그림의 범례에서 port1은 그림 1의 포트 1을 기준으로 한 인덕턴스를 나타내고, port2는 포트 2를 기준으로 한 인덕턴스를 나타낸다. 그림 2(a)의 경우

10.3GHz에서 큰 변화를 보이는 곡선이 포트 2를 기준으로 했을 때의 인덕턴스이며, 12.5GHz에서 변화를 보이는 곡선이 포트 1을 기준으로 했을 때의 인덕턴스이다. 그림 2(b)의 경우 10.5GHz에서 큰 변화를 보이는 곡선이 포트 2를 기준으로 했을 때의 인덕턴스이며, 12.6GHz에서 변화를 보이는 곡선이 포트 1을 기준으로 했을 때의 인덕턴스이다. 이와 같이 그림 2(a)와 (b)는 비대칭적인 구조에 따라 포트를 달리함에 의해 큰 차이를 나타낸다.

그림 2(c)는 두 곡선이 14GHz 부근에서 변화를 나타내고 있으며, 앞선 14GHz 주파수에서 변화하는 곡선이 포트 2를 기준으로 했을 때이고 조금 높은 14.1GHz 주파수에서 변화하는 곡선이 포트 1을 기준으로 했을 때의 인덕턴스를 나타낸다. 이는 대칭적인 구조를 가짐에 따라 그림 2(a) 및 (b)와 비교하여 큰 차이점을 가진다.

표 1. 그림 2의 3가지 타입 인덕터에 대한 인덕턴스와 주파수 범위  
 Table 1. The inductance and the frequency range for 3-type inductors of Fig. 2.

Type		Inductance (L)[nH]	Frequency Range [GHz]
Structure of Fig.1(a)	port 1	3.9	1.1~3.1
	port 2	4.0	2.1~2.9
Structure of Fig.1(b)	port 1	4.0	0.9~3.5
	port 2	4.0	0.9~2.6
Structure of Fig.1(c)	port 1	2.7	1.3~4.7
	port 2	2.7	1.3~4.7

표 1은 그림 2의 주파수-인덕턴스 특성을 정리하여 나타내었다. 그림 1에서 일정한 인덕턴스를 유지하는 것에 대한 인덕턴스 값과 그때의 주파수 범위를 나타낸다. 표에서 그림 1(a)와 (b)는 0.9~3.5GHz의 주파수 범위 내에서 4nH 정도의 값을 유지하고 있으나, 비대칭적인 구조에 의하여 포트 1과 포트 2의 주파수 범위에 차이가 나타난다. 반면에 그림 1(c)는 1.3~4.7GHz의 주파수 범위에서 2.7nH로 포트 1과 포트 2를 기준으로 했을 때 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 이는 대칭적인 구조에 의해 어느 포트를 기준으로 하든지 변화가 적음을

알 수 있다. 다만, 대칭적인 구조를 구성함에 있어 상호 인덕턴스가 감소하게 되어 인덕턴스는 감소하게 된다.

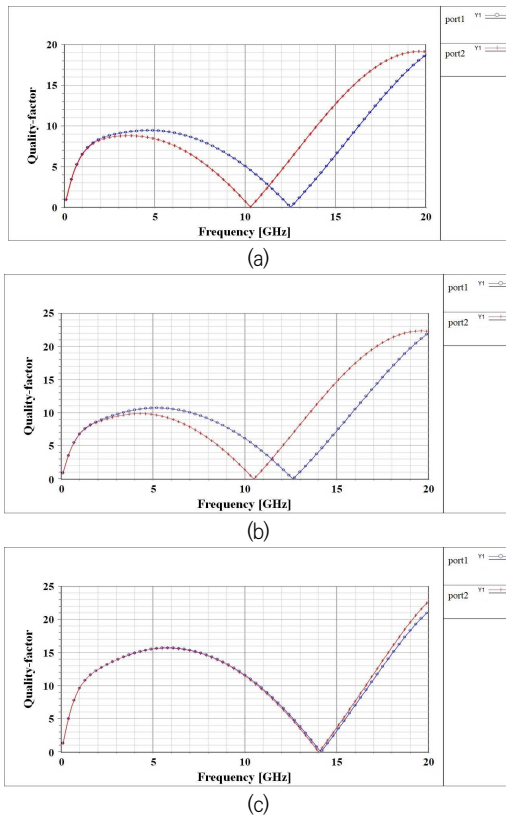


그림 3. 그림 1의 3가지 타입 인덕터에 대한 주파수-품질계수 특성

Fig. 3. The frequency-quality factor characteristic for 3-type inductors of Fig.1

그림 3은 그림 1에 제시된 3가지 종류의 인덕터에 대한 주파수-품질계수 특성을 나타낸다. 각 그림의 범례에서 port1은 그림 1의 포트 1을 기준으로 한 품질계수를 나타내고, port2는 포트 2를 기준으로 한 품질계수를 나타낸다. 그림 3(a)의 경우 port1이 4.7GHz에서 9.44의 최대 품질계수를 가지며, port2가 3.6GHz에서 8.79의 최대 품질계수를 가진다. 그림 3(b)는 port1이 5.2GHz에서 10.73의 최대 품질계수를 가지며, port2가 4.3GHz에서 9.88의 최대 품질계수를 가진다. 이와같이 그림(a)와

(b)는 port1과 port2가 상당한 차이를 가지며, 이는 비대칭적인 구조에 따라 어떠한 포트를 기준으로 하느냐에 대한 방향적인 특성이 있음을 나타낸다. 그림 3(c)는 port1과 port2가 5.8GHz에서 각각 7.86과 7.84의 최대 품질계수를 가지며, 이는 대칭적인 구조에 의해 어느 포트를 기준으로 하던 방향적인 특성의 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다.

표 2. 그림 3의 3가지 타입 인덕터에 대한 품질계수와 자기공진 주파수

Table 2. The quality factor and the self-resonant frequency for 3-type inductors of Fig. 3.

Type		Q-Factor (max)	SRF [GHz]
Structure of Fig.1(a)	port 1	9.44 @4.7GHz	12.5
	port 2	8.79 @3.6GHz	10.3
Structure of Fig.1(b)	port 1	10.73 @5.2GHz	12.6
	port 2	9.88 @4.3GHz	10.5
Structure of Fig.1(c)	port 1	7.86 @5.8GHz	14.1
	port 2	7.84 @5.8GHz	14.0

표 2는 그림 3의 주파수-품질계수 특성을 정리하였다. 표의 최대 품질계수는 그림 2로부터 SRF 이전의 최댓값을 나타낸다. SRF는 자기공진주파수로서 그림 3의 품질계수가 0이 되는 지점을 나타내고, 또한 그림 2의 인덕턴스가 양의 값으로부터 음의 값으로 전이되는 지점을 나타낸다. 그림 1(a)와 (b)의 비대칭 구조에 대해서는 포트 1과 포트 2의 기준에 따라 SRF가 큰 차이를 가지는 반면에, 그림 (c)의 대칭 구조에 대해서는 포트 1과 포트 2의 기준에 따라 SRF가 유사함을 알 수 있다. 이 또한 대칭적인 구조는 어느 포트를 기준으로 하던 방향적인 특성에 영향을 받지 않는다는 것을 나타낸다.

### 2.3 제안된 인덕터의 분석

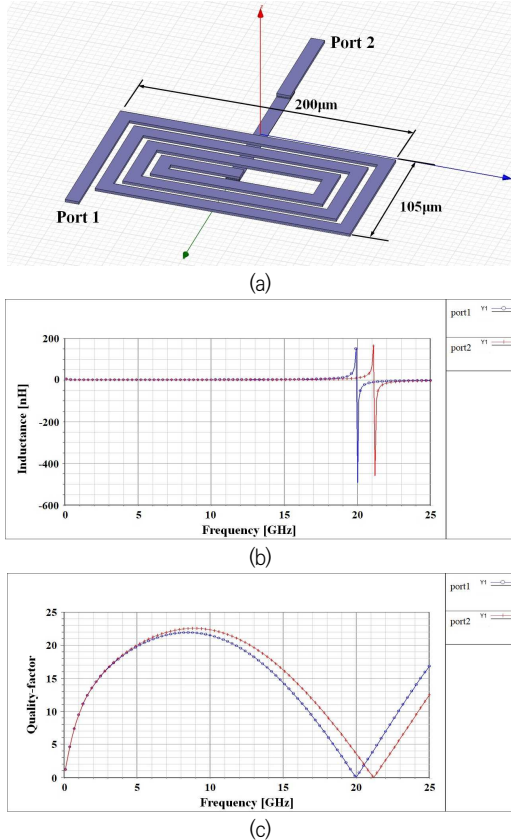


그림 4. 제안된 대칭 나선형 인덕터의 단면 부분으로 구성된 인덕터: (a) 인덕터의 구조; (b) 주파수-인덕턴스 특성; (c) 주파수-품질계수 특성

Fig. 4. Inductor consisting of cross-sectional parts of proposed symmetric spiral inductor: (a) the structure of inductor; (b) the frequency-inductance characteristic (c) the frequency-quality factor characteristic

그림 4(a)는 그림 1(c)의 본 논문에서 제안하는 대칭 나선형 인덕터의 비교·분석을 위한 한쪽 단면만으로 구성된 인덕터의 구조를 나타낸다. 이는 제안된 나선형 인덕터가 기존의 나선형 인덕터와 비교하여 작은 인덕턴스를 가짐에 따른 원인 분석을 위한 것으로서, 금속선의 폭과 두께, 금선선 간의 간격, 포트의 위치 등과 같은 파라미터는 그림 1(c)와 동일하며, 나선형 코일의 최외각 크기만 그림 1(c)의 절반 크기에 해당한다.

그림 4(b)는 주파수-인덕턴스 특성을 나타낸 것으로서, 표 3은 이에 대한 인덕턴스와 주파수 범위를 정리하였다. 그림 4(b)와 표 3으로부터 포트 1을 기준으로 한 경우 2.2~5.0GHz 주파수에서 1.4nH의 인덕턴스를 가지며, 포트 2를 기준으로 한 경우 2.1~5.5GHz 주파수에서 1.4nH의 인덕턴스를 가진다. 이는 그림 2(c)와 표 1에 언급된 제안된 대칭 나선형 인덕터의 인덕턴스 2.7nH에 절반 정도 값을 나타낸다. 제안된 대칭 나선형 인덕터는 점유 면적에 비하여 상호 인덕턴스의 효과가 적어 전체적인 인덕턴스의 향상을 기대할 수는 없으나, 포트의 방향에 영향이 적음을 확인할 수 있다.

그림 4(c)는 주파수-품질계수 특성을 나타낸 것으로서, port1이 8.5GHz에서 10.96의 최대 품질계수를 가지며, port2가 8.9GHz에서 11.28의 최대 품질계수를 가진다. 이는 그림 3(c)와 표 2에 언급된 제안된 대칭 나선형 인덕터의 품질계수 7.86, 7.84와 비교하여 차이가 발생한다. 제안된 대칭 나선형 인덕터는 인덕턴스의 증가보다 나선형 코일이 2배 정도 증가함에 따른 것이다.

표 3. 그림 1(a)의 제안된 대칭 나선형 인덕터와 그림 1(a)의 단면 부분으로 구성된 인덕터에 대한 인덕턴스와 주파수 범위 Table 3. The inductance and the frequency range for the proposed symmetric spiral inductor of Fig. 1(a) and the inductor consisting of cross-sectional parts of Fig. 1(a)

Type		Inductance (L)[nH]	Frequency Range [GHz]
Structure of Fig.1(c)	port 1	2.7	1.3~4.7
	port 2	2.7	1.3~4.7
Structure of Fig.4(a)	port 1	1.4	2.2~5.0
	port 2	1.4	2.1~5.5

### 3. 결론

본 논문에서는 단층 구조의 대칭 나선형 인덕터를 제안하였고, 기존의 일반적인 비대칭 나선형 인덕터들과 주파수 특성을 비교 분석하였다. 대칭 나선형 인덕터는 포트의 방향에 상관없이 1.3~4.7GHz의 주파수 범위에서 2.7nH의 인덕턴스로 동일한 결과

값을 가지며, 최대 품질계수는 5.8GHz에서 7.86과 7.84를 갖고 SRF는 14.1GHz와 14.0GHz로 유사한 값을 나타내었다. 이는 기존 일반적인 나선형 인덕터가 포트에 따라 큰 차이를 갖는 것과 비교하여 포트의 방향에 대한 영향이 적은 것을 확인할 수 있었다.

다만, 코일의 점유 면적에 비하여 상호 인덕턴스가 줄어들어 낮은 인덕턴스를 가지며, 인덕턴스 증가보다 코일의 저항이 더 증가하여 품질계수 또한 낮아짐을 확인할 수 있었다. 이에 향후에는 2층 대칭 나선형 구조를 통하여 인덕턴스와 품질계수를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

### REFERENCES

[1] Jageon Koo, Seongho Jung, Yongchae Jeong, "CMOS Symmetric High-Q 2-Port Active Inductor", *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering & Science*, vol. 27, no. 10, pp. 877-882, Oct. 2016.

[2] R. Long, M. A. Copeland, "The Modeling, Characterization, and Design of Monolithic Inductors for Silicon RF IC's", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 32, no. 3, pp. 357-369, March, 1997.

[3] K. B. Ashby, I. A. Koullias, W. C. Finley, J. J. Bastek, S. Moinian, "High Q inductors for Wireless Applications in a Complementary Silicon Bipolar Process", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 31, no. 1, pp. 4-9, 1996.

[4] In-Gab Hwang, "Analysis and Design Technique of a Spiral Inductor for a Wireless Charging of Electric Vehicle", *The Journal of Korea Institute of Information, Electronics, and Communication Technology*, vol. 12, no. 2, pp. 142-149, April 2019.

[5] M. Danesh, J. R. Rong, R. A. Hadaway, D. L. Harame, "A Q-factor Enhancement Technique for MMIC Inductors", *IEEE RFIC Symposium*, pp. 217-220, 1998.

[6] Gook-Ju Ihm, Sang-Gug Lee, "Design and Analysis of Spiral Inductors for RF Integrated Circuits", *Proc. of Symp. of the Korean Institute of Communications and*

*Information Sciences*, pp. 2010-2013, 1997.

[7] H. H. Hsieh, "A Compact Quadrature Hybrid MMIC using CMOS Active Inductors", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol.99, pp. 1-7, 2007.

[8] S. Seo, N. Ryu, H. Choi, and Y. Jeong, "Novel High-Q Inductor using Active Inductor Structure and Feedback Parallel Resonance Circuit", in *Proc. of IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium*, pp. 467-470, 2007.

[9] J. Crannickx, M. Steyaert, H. Miyakawa, "A Fully Integrated Spiral-LC CMOS VOC Set with Prescaler for GSM and DCS-1800 Systems", *IEEE 1997 CICC*, pp. 403-406, 1997.

[10] Jae-Wook Kim, Hee-Cheol Kim, "Study on Frequency Characteristics of Hexagonal Spiral Thin-film Inducto", *The Journal of Korea Institute of Information, Electronics, and Communication Technology*, vol. 10, no. 5, pp. 402-408, Oct. 2017.

### 저자약력

김재욱(Jae-Wook Kim)

[정회원]



- 1993년 2월 : 호서대학교 전자공학 (공학사)
- 1998년 8월 : 호서대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
- 2003년 2월 : 호서대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 남서울대학교 전자공학과 부교수

<관심분야> 자동제어, 퍼지제어, chip inductor 개발, 자성박막 및 소자 개발