

2층 나선형 박막 인덕터의 주파수 특성

김재욱^{1*}, 유창근¹
¹남서울대학교 전자공학과

Frequency Characteristics of 2-Layer Spiral Planar Inductor

Jae-Wook Kim^{1*} and Chang-Keun Ryu¹

¹Department of Electronic Engineering, Namseoul University

요약 본 논문에서 기존 underpass와 via를 갖는 단층 나선형 박막 인덕터를 확장하여 제한된 점유면적 내에서 인덕턴스를 증가시킬 수 있는 하층 나선형 코일과 via를 갖는 2층 나선형 박막 인덕터의 구조를 제안하고 주파수 특성을 확인하였다. 인덕터의 구조는 Si를 300 μm , SiO₂를 7 μm 으로 하였으며, Cu 코일의 폭과 선간의 간격은 각각 20 μm 으로 설정하여 3회 권선하였다. 나선형 박막 인덕터의 성능을 나타내는 인덕턴스, quality-factor, SRF에 대한 주파수 특성을 HFSS로 시뮬레이션 하였다. 2층 나선형 박막 인덕터는 0.8~1.8GHz 범위에서 3.2nH의 인덕턴스, 2.5GHz에서 최대 8.2 정도의 품질계수를 가지며, SRF는 5.8GHz로 시뮬레이션 결과를 얻었다. 반면에 단층 나선형 박막 인덕터는 0.8~1.8GHz 범위에서 1.5nH의 인덕턴스, 8GHz에서 최대 18 정도의 품질계수를 가지며, SRF는 19.2GHz로 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있었다.

Abstract In this study, we propose that the structures of 2-layer spiral planar inductors have a lower spiral coil and via increasing inductance in limited possession are and confirm the frequency characteristics. The structures of inductors have Si thickness of 300 μm , SiO₂ thickness of 7 μm . The width of Cu coils and the space between segments have 20 μm , respectively. The number of turns of coils have 3. The performance of spiral planar inductors was simulated to frequency characteristics for inductance, quality-factor, SRF(Self-Resonance Frequency) using HFSS. The 2-layer spiral planar inductors have inductance of 3.2nH over the frequency range of 0.8 to 1.8 GHz, quality-factor of maximum 8.2 at 2.5 GHz, SRF of 5.8 GHz. Otherwise, 1-layer spiral planar inductors have inductance of 1.5nH over the frequency range of 0.8 to 1.8 GHz, quality-factor of maximum 18 at 8 GHz, SRF of 19.2 GHz.

Key Words : Spiral, Planar, Inductor, SRF, Quality-factor

1. 서론

최근의 정보기술의 도래와 더불어 이러한 자성소자들의 소형 경량화 및 고주파수화가 요구되고 있다. 인덕터는 고집적 RF 회로에서 필수적인 수동 소자 중의 하나로써, 커패시터와 결합한 LC 필터, 트랜지스터를 위한 AC 초크, 회로정합과 EMI 필터 등에 적용하여 개인통신서비스, 무선 LAN, 위성통신과 GPS에 등에 사용된다[1-3].

Si VLSI 기술의 극적인 진보로 인해 실리콘 기반의 고주파 집적회로는 급격히 성장한 무선통신 어플리케이션

을 만족시키기 위한 대안으로 최근에 대두되고 있다[4]. 그리고 실리콘을 기반으로 한 고주파 집적회로들은 0.9GHz의 GSM (Global System for Mobile) 시스템과 1.8GHz의 DCS(Digital Cordless System), 그리고 2.4GHz 대역의 블루투스 시스템과 같은 저 GHz의 주파수 범위에서 광범위하게 사용되고 있다[5].

본 논문에서는 underpass와 via를 갖는 일반적인 단층 나선형 박막 인덕터의 구조를 확장한 하층 나선형 코일과 via를 갖는 2층 나선형 박막 인덕터의 구조를 제시하고, 그에 따른 인덕터의 성능을 나타내는 인덕턴스,

이 논문은 10년도 남서울대학교 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

*교신저자 : 김재욱(jwkim@nsu.ac.kr)

접수일 11년 08월 11일

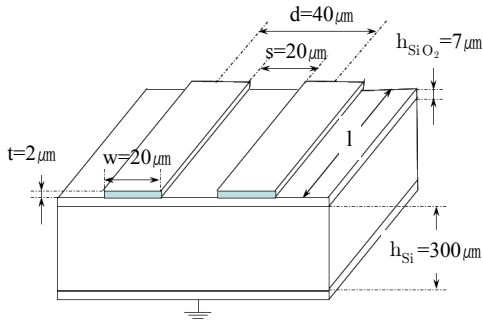
수정일 11년 08월 30일

게재확정일 11년 09월 08일

Quality-factor, SRF(자기공진주파수)에 대한 주파수 특성을 HFSS로 시뮬레이션하여 기존의 단층 나선형 박막 인덕터와 비교 분석하였다.

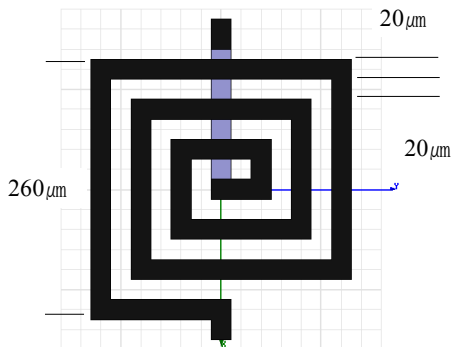
2. 인덕터의 설계

그림 1은 일반적인 나선형 박막 인덕터의 단면을 나타낸다. 인덕터는 2층 금속 공정을 기반으로 하고 있다. 인덕터의 구조는 300 μm 두께의 Si에 7 μm 두께의 SiO₂를 적층하였다. 인덕터의 금속선 사이 간격은 20 μm 으로, 금속선의 폭과 높이는 20 μm 과 2 μm 으로 하였다.



[그림 1] 나선형 박막 인덕터의 단면
[Fig. 1] A cross section of spiral planar inductor

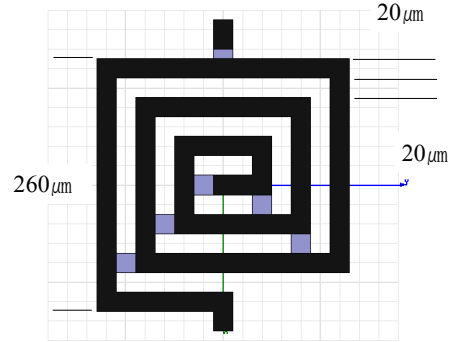
그림 2는 underpass와 via를 갖는 일반적인 형태의 단층 나선형 박막 인덕터의 레이아웃을 나타낸다.



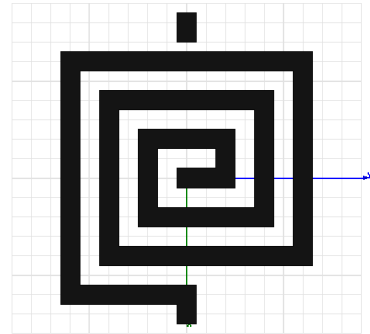
[그림 2] underpass를 갖는 일반적인 단층 나선형 박막 인덕터의 레이아웃 구조
[Fig. 2] Layout structure of general 1-layer spiral planar inductor with underpass

그림 3(a)는 일반적인 형태를 확장한 하층 나선형 코

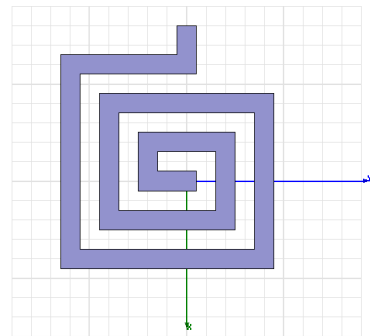
일과 via를 갖는 2층 나선형 박막 인덕터의 전체 레이아웃을 나타내며, 그림 3(b)와 (c)는 상층 나선형 코일과 하층 나선형 코일의 레이아웃을 나타낸다.



(a) 전체 레이아웃



(b) 상층 나선형



(c) 하층 나선형

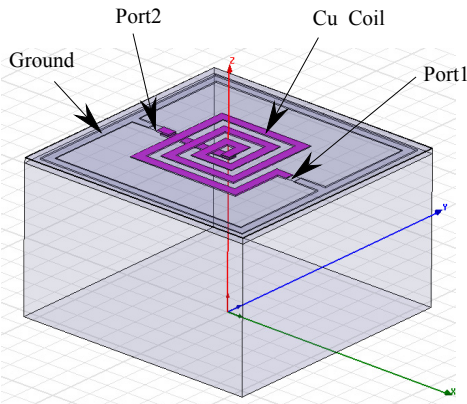
[그림 3] 하층 나선형 코일을 갖는 2층 나선형 박막 인덕터의 레이아웃 구조
[Fig. 3] Layout structure of 2-layer spiral planar inductor with low-layer spiral coil

그림 2와 3에서 알 수 있는 바와 같이, 인덕터의 레이아웃은 간단하며, 2층 금속 공정을 기반으로 하고 있다. 두 종류의 인덕터 최외각 크기는 540 μm 으로 고정하였다.

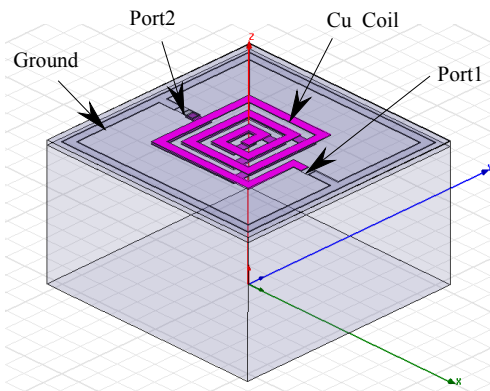
RF 주파수에서는 금속층의 두께가 품질계수를 결정짓는 주요 요소 중의 하나이며, 인덕터 중심의 공간은 품질계수를 향상시키는데 있어 도움을 준다.

3. 시뮬레이션 및 분석

시뮬레이션을 위하여 안소프트 사의 HFSS를 사용하였다. 그림 4는 underpass를 갖는 일반적인 형태의 단층 나선형 박막 인덕터의 시뮬레이션 구조를 나타낸다. 그림 5는 일반적인 형태를 확장한 하층 나선형 코일을 갖는 2층 나선형 박막 인덕터의 시뮬레이션 구조를 나타낸다.



[그림 4] underpass를 갖는 일반적인 단층 나선형 박막 인덕터의 시뮬레이션 구조
 [Fig. 4] Simulation structure of general 1-layer spiral panar inductor with underpass

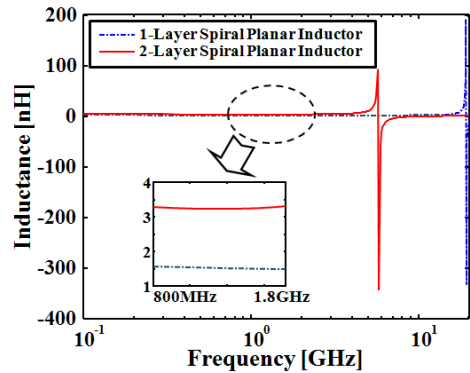


[그림 5] 하층 나선형 코일을 갖는 2층 나선형 박막 인덕터의 시뮬레이션 구조
 [Fig. 5] Simulation structure of 2-layer spiral panar inductor with low-layer spiral coil

그림 4와 5에 대하여 음영부분은 Cu로 이루어진 나선형 코일을 나타내며, 외각의 회색 패턴은 시뮬레이션을 위하여 바이어스를 인가하기 위한 접지(ground)로 설정하였다. 포트는 2-포트의 lumped port를 사용하였다. 우선 인덕터의 설계 변수로써는 권선수, 도체폭, 도체간의 간격, 도체 두께, 유효 면적 등이 있다. 여기에서는 우선 외부 크기와 도체폭, 그리고 도체간의 간격, 권선수를 고정하고, underpass를 갖는 단층 나선형 박막 인덕터와 하층 나선형 코일을 갖는 2층 나선형 박막 인덕터의 인덕턴스, Q(Quality-factor) 값과 SRF를 비교 분석하였다.

3.1 인덕턴스

인덕터의 외부 크기를 $260\mu\text{m}$, 도체폭과 도체간의 간격을 각각 $20\mu\text{m}$ 과 $20\mu\text{m}$ 으로 고정하고, $10\Omega\text{-cm}$ 실리콘 기판을 사용하였으며 기판 두께를 $300\mu\text{m}$ 으로 하였다. 기판과 spiral 사이의 유전물질의 두께를 $7\mu\text{m}$ 으로 하였다. 도체 두께를 $2\mu\text{m}$ 으로 하여 3회 권선하였다.



[그림 6] 인덕턴스-주파수 특성
 [Fig. 6] Inductance-frequency characteristic

그림 6은 underpass를 갖는 단층 나선형 박막 인덕터와 하층 나선형 코일을 갖는 2층 나선형 박막 인덕터의 인덕턴스-주파수 특성을 나타낸다. 그림으로부터 800MHz ~1.8GHz 주파수에서 단층 나선형 박막 인덕터의 경우는 1.5nH, 2층 나선형 박막 인덕터의 경우는 3.2nH 정도의 인덕턴스를 가지며, 2층 나선형 박막 인덕터가 2배 이상의 우수한 특성을 나타낸다. 그림에서 인덕턴스가 양의 값으로부터 음의 값으로 전위되며 0인 지점을 지나는 주파수가 SRF를 나타낸다. 단층 나선형 박막 인덕터의 경우는 19.2GHz, 2층 나선형 박막 인덕터의 경우는 5.8GHz 정도에서 SRF가 발생한다.

인덕턴스는 Greenhouse 방법을 이용하여 간단히 계산할 수 있다. Greenhouse 방법은 spiral의 전체 인덕턴스가

각 선로 세그먼트의 자기 인덕턴스와 모든 가능한 선로 세그먼트 쌍의 양, 음의 상호 인덕턴스의 합으로서 계산될 수 있다. 두 선로 사이의 상호 인덕턴스는 교차점, 길이, 갈라진 틈의 각도에 의존한다. 서로 다른 수직인 두 선로는 그들의 자속이 결합되어 있지 않으므로 상호 결합이 없다. 선로에서 전류 흐름 방향이 결합 부호를 결정한다. 두 선로에서 전류가 같은 방향이면 결합은 양이고, 방향이 다르면 음이다. N-turn 사각 나선형 인덕터의 전체 인덕턴스를 계산하기 위해서, 그것은 4N의 자기 인덕턴스 형태와 2N(N-1)의 양의 상호 인덕턴스 형태, 그리고 2N2의 음의 상호 인덕턴스 형태로 나타난다. 비록 다양한 실험식이 나선형 인덕터의 인덕턴스를 추정하기 위해 문헌에 존재할지라도 Greenhouse 방법이 우수한 정확성을 제공한다. 여기서 인덕턴스 계산을 위한 Greenhouse 방법을 사용한다[6].

Greenhouse의 자기 인덕턴스 식을 보면 아래와 같다 [7].

$$L_{self} = 2l[\ln(2l/GMD) - 1.25 + AMD/l + (\mu/4) T] \quad (1)$$

여기서, L_{self} 는 자기 인덕턴스로 단위는 nH이고, GMD 과 AMD 는 각각 도체 단면적의 기하학적 평균거리와 산술적 평균거리이다. l 은 선로의 길이로 단위는 cm이며, μ 는 도체의 투자율이고 T 는 주파수 보정 파라미터로 고주파수에서는 1의 값을 갖는다.

두 개의 병렬 선로 사이에서 상호 인덕턴스는 식 (2)를 사용하여 계산할 수 있다.

$$M = 2lQ(2)$$

여기서, M 은 nH 단위를 가지는 상호 인덕턴스이고, l 은 선로 길이로 단위는 cm, 그리고 Q 는 상호 인덕턴스 파라미터로 아래와 같이 계산된다.

$$Q = \ln \left[\frac{l}{GMD} + \sqrt{1 + \left(\frac{l}{GMD} \right)^2} \right] - \sqrt{1 + \left(\frac{GMD}{l} \right)^2} + \frac{GMD}{l} \quad (3)$$

식 (3)에서 GMD 는 선로 사이의 기하학적 평균거리를 의미하며 여기에서는 선로의 정점과 거의 같다. GMD 에 대한 더 정확한 표현은 다음과 같다.

$$\ln GMD = \ln d - \left[\frac{w^2}{12d^2} + \frac{w^4}{60d^4} + \frac{w^6}{168d^6} + \dots \right] \quad (4)$$

여기서 w 와 d 는 각각 선로의 폭과 정점간의 거리로 단위는 cm이다.

[표 1] Mathcad를 이용한 단층 나선형 박막 인덕터의 기하학적 수치

[Table 1] Geometric values of 1-layer spiral inductor using Mathcad

Thickness $t(\mu\text{m})$	2
Space between segments $s(\mu\text{m})$	20
Width $w(\mu\text{m})$	20
Outer length $l(\mu\text{m})$	260
Number of turns	3
Total Inductance $L(\text{nH})$	1.4377

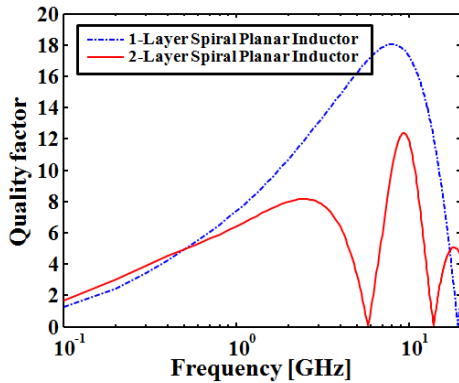
그러므로 나선형 박막 인덕터의 전체 인덕턴스는 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L = L_{self} \pm M \quad (5)$$

표 1은 Mathcad를 이용한 단층 나선형 박막 인덕터의 기하학적 수치를 나타낸다. 표의 Total Inductance는 Greenhouse 식을 이용한 계산 결과로써, HFSS를 이용한 시뮬레이션 결과와 거의 일치함을 알 수 있다.

3.2 품질계수(Quality-factor)

그림 7은 underpass를 갖는 단층 나선형 박막 인덕터와 하층 나선형 코일을 갖는 2층 나선형 박막 인덕터의 Q-주파수 특성을 나타낸다. 인덕터의 성능을 평가하는 요소로 Q-factor를 들 수 있다. 그림으로부터 단층 나선형 박막 인덕터의 경우는 8GHz에서 약 18, 2층 나선형 박막 인덕터의 경우는 2.5GHz에서 약 8.2 정도의 최대 Q 값을 가진다. 단층 나선형 박막 인덕터가 2층 나선형 박막 인덕터보다 더 나은 특성을 나타내는데, 이는 하층 나선형 코일에 의하여 인덕턴스가 증가하는 반면에 저항 손실을 증가함으로써 단층 나선형 박막 인덕터가 더 우수한 품질계수를 나타낸다.



[그림 7] Q-주파수 특성
[Fig. 7] Q-frequency characteristic

Q-factor에 대한 일반적인 정의를 살펴보면, 인덕터에서 한 주기당 저장하는 에너지에 대한 소비하는 에너지의 비로 나타내며, 다음 식으로 주어진다[8].

$$\begin{aligned}
 Q &= \frac{W_s}{W_D} \\
 &= 2\pi \frac{\text{peak magnetic energy} - \text{peak electric energy}}{\text{energy loss in one oscillation cycle}} \\
 &= 2\pi \frac{\text{stored energy}}{\text{energy loss in one oscillation cycle}} \\
 &= -\frac{\text{Im}(Y_{11})}{\text{Re}(Y_{11})}
 \end{aligned}$$

(6)

여기서 W_s 는 인덕터가 한 주기당 저장하는 에너지이고 W_D 는 인덕터가 한 주기당 소비하는 에너지이다. 저장하는 에너지를 자계와 전계의 에너지 차로 나타낸 것은 인덕턴스가 자속과 전류의 비이므로 인덕터는 자계에 의해 에너지가 저장된다. 그러나, 실제 인덕터에서는 기생 커패시턴스가 발생하므로 이 커패시턴스에 저장되는 전계 에너지가 인덕터에 역효과를 준다. 따라서 자계에 저장되는 에너지와 전계에 의해 저장되는 에너지의 차이가 정확하게 고려된 저장 에너지가 되는 것이다. 그리고 Y_{11} 은 측정된 S 파라미터로부터 변환시킬 수 있다. 또한 시뮬레이션에서 Q 값을 어드미턴스로 구한다.

그림에서 보면 Q 값이 0이 되는 지점이 SRF를 나타낸다. 단층 나선형 박막 인덕터의 경우는 19.2GHz 정도에서 0의 값을 가지며, 2층 나선형 박막 인덕터의 경우는 5.8GHz 정도에서 0의 값을 가지므로, 이때의 주파수가 SRF를 의미한다. 이는 앞선 그림 6에서의 결과와도 잘 일치함을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서 실리콘 상에 이루어진 평면 나선형 박막 인덕터를 확장하여 하층 나선형 코일을 추가하여 설계함으로써, 제한된 점유면적 내에서 인덕턴스를 증가시키기 위한 구조를 제안 하였다. 이에 대하여 안소프트 사의 HFSS를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과인 인덕턴스, Q-factor, SRF에 대하여 기존의 일반적 형태인 underpass를 갖는 단층 나선형 박막 인덕터와 비교하여 하층 나선형 코일을 갖는 2층 나선형 박막 인덕터의 형태를 도출하였다.

우선 외부 크기(260 μ m)와 도체폭(20 μ m), 도체간의 간격(20 μ m), 도체의 두께(2 μ m), 권선수는 3회로 고정하고 underpass를 갖는 단층 나선형 박막 인덕터와 하층 나선형 코일을 갖는 2층 나선형 박막 인덕터에 대하여 비교하였다. 단층 나선형 박막 인덕터의 경우는 L(인덕턴스)=1.5nH, Q=18, SRF=19.2GHz이고, 2층 나선형 박막 인덕터의 경우는 L=3.2nH, Q=8.2, SRF=5.8GHz 정도를 가진다. 이는 하층 나선형 코일을 추가함으로써 동일한 점유면적 내에서 인덕턴스는 향상되나 저장 손실이 증가하여 품질계수가 감소하게 된다.

References

- [1] Minda Denesh, John R. Long, "Differentially Driven Symmetric Microstrip Inductors", IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, vol. 50, no. 1, pp. 332-341, Jan. 2002.
- [2] I. Wolff and H. Kapusta, "Modeling of Circular Spiral Inductors for MMICs", IEEE MTT-s Digest, pp. 123-126, 1987.
- [3] Myung-Hee Jung, Jae-Wook Kim, Eui-Jung Yun, "Development of High-Performance Solenoid-Type RF Chip Inductors", Jpn. J. Appl. Phys, vol. 39 (2000), pp. 4772-4776, Part 1, No. 8, August 2000.
- [4] Larson Le, "Integrated Circuit Technology Options for RFIC's Present Status and Future Directions", IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 33, pp. 387-399, 1998.
- [5] Mikkelsen JH, Kolding TE, "RF CMOS Circuits Target IMT-2000 Applications", Microwave & RF, pp. 99-107, July 1998.
- [6] C. Patrick Yue, S. Simon Wong, "Physical Modeling of Spiral Inductors on Silicon", IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 47, no. 3, pp. 560-567, March 2000.

- [7] H. M. Greenhouse, "Design of Planar Rectangular Microelectronic Inductors", IEEE Transactions Parts, Hybrids, Pack, vol. PHP-10, pp. 101-109, June 1974.
- [8] 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.
-

김 재 욱(Jae-Wook Kim)

[정회원]



- 1998년 8월 : 호서대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
- 2003년 8월 : 호서대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 남서울대학교 전자공학과 교수

<관심분야>

자동제어, 피지제어, chip inductor 개발, 자성박막 재료 및 소자의 개발

유 창 근(Chang-Keun Ryu)

[정회원]



- 1981년 2월 : 단국대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
- 1983년 2월 : 단국대학교 전자공학과 졸업 (공학석사)
- 1993년 2월 : 단국대학교 전자공학과 졸업 (공학박사)
- 1994년 3월 ~ 현재 : 남서울대학교 전자공학과 교수

<관심분야>

Petri nets and grafcet, 마이크로 프로세서 응용기술, 고속 전철 신호제어