

잉크젯 프린터를 이용한 나선형 인덕터 설계

김정우, 조영훈, 정하경¹

건국대학교 전기기계 및 전력전자연구실, 건국대학교 기계설계학과¹

Design of the spiral inductor using inkjet printer

Jeongwo Kim, Younghoon Cho, Hakyung Jeong¹

Electric Machine and Power Electronics Lab., Konkuk Univ.

Mechanical Design and Production Engineering, Konkuk Univ.¹

ABSTRACT

In this paper, a spiral inductor is designed and its inductance is calculated by the expended Grover method. To verify this, a rectangular planar inductor is printed by inkjet printer using conductive ink and the calculated inductance value is compared with its measured value.

1. 서론

최근 웨어러블 시스템을 위한 어플리케이션들이 개발되면서 인쇄전자 기술을 이용해 전자기기를 개발하는 연구가 늘고 있다. 특히, 잉크젯 프린터를 이용하는 경우 다양한 패턴을 낮은 가격으로 인쇄할 수 있기 때문에 잉크젯 프린터를 사용하여 평면 안테나, 다이오드, 박막 트랜지스터 등의 소자들을 인쇄하는 연구도 늘고 있다.^[1]

본 논문에서는 저전력 필터 회로에 적용하기 위한 평면 인덕터를 수식적으로 설계하였고, 전도성 잉크와 잉크젯 프린터를 사용하여 설계한 인덕터를 인쇄하였다.

2. 나선형 인덕터 설계

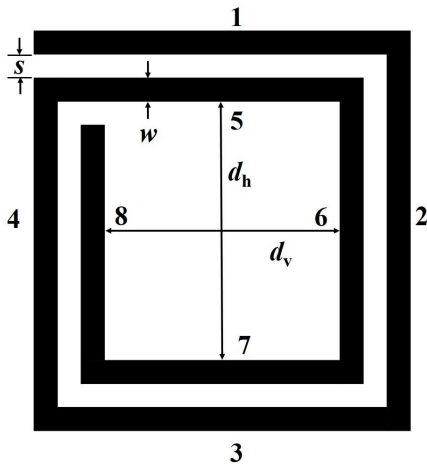


그림 1 직사각 나선형 인덕터
Fig.1 Rectangular spiral inductor

표 1 직사각 나선형 인덕터의 길이

Table 1 length of the rectangular spiral inductor

Parameter	Value
d_h (mm)	12.1
d_v (mm)	11
w (mm)	1.2
s (mm)	1

2.1 Grover의 인덕터 설계 기법^[2]

본 논문에서 설계하고자 하는 직사각 평면 인덕터는 그림 1과 같고, 식 (1)의 Grover가 제시한 평면 인덕터의 설계 기법을 이용하여 설계하였다.

$$L_T = L_0 + \sum M \quad (1)$$

식 (1)에서 L_T 는 평면 인덕터의 전체 인덕턴스이고, L_0 는 평면 인덕터의 모든 변에서의 자기 인덕턴스 합, $\sum M$ 은 평행한 모든 변 사이의 상호 인덕턴스 합이다. 또한, 그림 1에 도식된 평면 인덕터의 자기 인덕턴스와 상호인덕턴스는 각각 식 (2)와 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$L_0 = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6 + L_7 + L_8 \quad (2)$$

$$\sum M = M_+ - M_- \quad (3)$$

식(3)의 M_+ 는 양의 상호 인덕턴스, M_- 는 음의 상호 인덕턴스를 나타낸다. 상호 인덕턴스는 인덕터의 평행한 두 변에 흐르는 전류의 방향에 따라 극성이 달라지므로, 두 변에 같은 방향으로 전류가 흐르면 양의 값을 띄고, 두 변에 다른 방향의 전류가 흐르면 음의 값을 띈다. 또한, 두 변 a와 b에 쇄교하는 상호 인덕턴스는 이상적으로 M_{ab} 와 M_{ba} 의 합으로 나타낼 수 있고, 두 상호 인덕턴스의 크기는 같다. 따라서 식 (3)의 두 상호 인덕턴스 성분은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$M_+ = 2(M_{1,5} + M_{2,6} + M_{3,7} + M_{4,8}) \quad (4)$$

$$M_- = 2(M_{1,3} + M_{1,7} + M_{2,4} + M_{2,8} + M_{3,5} + M_{4,6} + M_{5,7} + M_{6,8})$$

한편, 식 (2)의 각 변의 자기 인덕턴스는 식 (5)를 통해 구할 수 있고, 식 (4)의 상호 인덕턴스는 식 (7)을 통해 구할 수 있다.

$$L_x = 2l_x \ln[2l_x/(w+t)] + 0.50049 + [(w+t)/3l_x] \quad (5)$$

$$R = \rho \frac{l}{wt} \quad (6)$$

$$M_{a,b} = 2l_a Q_a \quad (7)$$

식 (5)에서 w 는 인덕터 패턴의 선폭, t 는 인덕터 패턴의 높이를 뜻한다. 높이 t 는 너비가 1.2mm, 길이가 14mm인 패턴을 네 번 인쇄한 뒤, 네 패턴의 평균 저항, 식 (7), 그리고 사용한 잉크의 비저항 값을 이용하여 계산하였다. 계산결과 높이 t 는 378nm이다.

한편, 식 (7)에서 l_a 는 a 변의 길이, Q 는 a 변의 상호 인덕턴스 파라미터를 나타낸다. 또한, 상호 인덕턴스 파라미터는 식 (8)과 같다.

$$Q = \ln(l/GMD) + [1 + (l/GMD)^2]^{\frac{1}{2}} - [1 + (GMD/l)^2]^{\frac{1}{2}} + (GMD/l) \quad (8)$$

식 (8)에서 GMD는 인덕터 두 변의 기하학적 평균 거리로 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln GMD = \ln d - [1/12(d/w)^2 + [1/60(d/w)^4] + [1/168(d/w)^6] + [1/360(d/w)^8] + [1/660(d/w)^{10}] + \dots]$$

$$GMD = \frac{d}{e^{[1/12(d/w)^2 + [1/60(d/w)^4] + [1/168(d/w)^6] + [1/360(d/w)^8] + \dots]}} \quad (9)$$

식 (9)에서 d 는 한 패턴의 중간에서 다른 패턴의 중간까지의 거리를 나타낸다.

본 논문에서 설계한 평면 인덕터는 그림 1과 같이 직사각형의 형태를 갖고, 턴 수가 2이므로 평행한 두 변 a 와 b 의 길이가 다르다. 따라서 이 경우에는 두 변 a , b 의 차이에 해당하는 상호 인덕턴스 값이 총 상호 인덕턴스 값에서 빠져야 하고, 이는 식 (10)으로 나타낼 수 있다.

$$2M_{a,b} = (M_a + M_b) - M_{a-b} \quad (10)$$

식 (10)에서 M_a 는 변 a 에 의한 상호 인덕턴스이고, M_b 는 변 b 에 의한 상호 인덕턴스, M_{a-b} 는 변 a 와 변 b 의 길이 차이에 해당하는 상호 인덕턴스이다. 식 (10)의 각 상호 인덕턴스는 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_a = 2l_a Q_a$$

$$M_b = 2l_b Q_b$$

$$M_{a-b} = 2l_{ab} Q_{a-b} \quad (11)$$

식 (11)에서 l_{ab} 는 l_a 와 l_b 의 차이이고, Q_{a-b} 에도 l_{ab} 를 적용하여 M_{a-b} 를 구할 수 있다.

그림 1의 직사각 나선형 인덕터의 인덕턴스를 Grover의 설계 기법을 이용하여 구하면 95.3nH이다.

3. 잉크젯 프린터를 이용한 인쇄

2.1 인쇄 환경 및 인쇄 결과

본 논문에서는 그림 2에 나타난 Dimatix의 Drop Material Printer(DMP) 2831를 사용하여 직사각 평면 인덕터를 인쇄하였다. DMP 2831은 피에조 방식의 잉크젯 프린터로 전용 카트리지인 Dimatix Material Cartridge(DMC) 11601/11610을 이용하

여 다양한 종류의 잉크젯용 잉크를 사용할 수 있다.

인덕터의 전도성 패턴을 인쇄하기 위해 잉크젯 프린터에서 분사가 가능한 은 나노 잉크(ANP, DGP 40LT 15C)를 전도성 잉크로 사용하였고, 은 나노 잉크의 특성은 표 2와 같다.

인덕터의 기판으로는 내열성이 높은 Poly Ethylene Terephthalate(PET) 필름을 사용하였고, 잉크 드롭과 잉크 드롭 사이의 간격을 30 μ m로 설정하여 인덕터를 인쇄하였다. 인쇄된 인덕터는 그림 2와 같고, 120 $^{\circ}$ C에서 10분간의 소결과정을 거친 뒤 LCR 미터(LCR 821)에 의해 인덕턴스 값과 저항값이 측정되었으며, 측정된 인덕턴스 값과 저항값은 100nH와 27.39 Ω 이다.

표 2 은 나노 잉크 특성(ANP, DGP40LT-15C)
Table 2 Silver nano ink specification(ANP, DGP40LT-15C)

Parameter	Value
Solid Content(%)	30~35
Viscosity(cPs)	10~17
Surface Tension(dyn/cm)	35~38
Curing Temp.($^{\circ}$ C)	120~150
Specific Resistivity($\mu\Omega$ *cm)	11~12

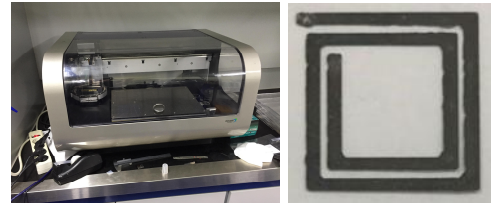


그림 2 DMP 2831과 인쇄된 직사각 나선형 인덕터
Fig. 2 DMP 2831 and printed rectangular spiral inductor

4. 결론

본 논문에서는 Grover 기법에 의해 직사각 나선형 인덕터가 설계되었고, 잉크젯 프린터를 이용하여 설계한 인덕터를 인쇄하였다. 설계한 인덕터의 인덕턴스는 95.3nH이고, 인쇄된 인덕터의 인덕턴스 측정값은 100nH이다. 설계값과 측정값의 오차는 4.9%이다. 오차의 원인으로서는 30 μ m로 설정한 잉크의 드롭 간격이 너무 좁아 잉크 드롭과 잉크 드롭이 겹친 점을 들 수 있다. 잉크 드롭이 겹치면 패턴이 번져 패턴 너비가 고르지 않게 된다. 따라서, 향후 연구에서는 잉크가 번지지 않도록 드롭 간격을 최적화할 계획이다.

본 연구는 2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.(NO.20174030201660)

참고 문헌

- [1] B. S. Cook, B. Tehrani, J. R. Cooper and M. M. Tentzeris, "Multilayer Inkjet Printing of Millimeter Wave Proximity Fed Patch Arrays on Flexible Substrates," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 12, pp. 1351-1354, 2013.
- [2] H. Greenhouse, "Design of Planar Rectangular Microelectronic Inductors," in IEEE Transactions on Parts, Hybrids, and Packaging, vol. 10, no. 2, pp. 101-109, Jun 1974.