

NiZn 페라이트를 내장한 LTCC 인덕터 개발 및 응용

원유준 김희준
한양대학교

An LTCC Inductor Embedding NiZn Ferrite and Its Application

Yu June Won Hee Jun Kim
Hanyang Univ.

Abstract - An integrated inductor using the low-temperature co-fired ceramics(LTCC) technology for low-power electronics was fabricated. In the inductor NiZn ferrite sheet($\mu_r=230$), was embedded to increase inductance. The inductor has Ag spiral coil with 14 turns(7turns×2layers), a dimension of 0.6mm in width, 10um in thickness, and 0.15mm pitch. To evaluate the inductance, including the parasitic resistance, the fabricated inductor was calculated and measured. It was confirmed that calculated values were very close to the measured values. Finally as an application of the LTCC integrated inductor to low power electronic circuits, a LTCC buck DC/DC converter with 1W output power and up to 0.5MHz switching frequency using the inductor fabricated was develop.

1. 서 론

최근 들어 통신 및 디지털 전자 기기는 점점 더 소형화되고 있다. 그런 까닭에 이들의 전원회로부분을 담당하고 있는 DC-DC 컨버터 역시 소형화가 요구되고 있다. 그러나 DC-DC 컨버터의 중요한 구성요소 중 하나인 자성 소자 및 용량성 소자로 대표되는 수동소자가 차지하는 공간으로 인하여 소형화에 장애가 되고 있는 실정이다. 따라서 이러한 장애를 극복할 수 있는 한 방법으로서 LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramics)기술을 전원 회로에 적용하였다. LTCC의 다층 세라믹 기판의 효용성을 이용하여 자성 소자뿐만 아니라 용량성 소자, 저항 소자등 가능한 한 많은 부분을 내장화(embedded)시킴으로써 초소형 DC-DC 컨버터의 구현이 가능할 것으로 기대되고 있다. 이미 다층 원형 맴돌이(spiral)구조로 된 LTCC 마이크로 인덕터가 제작된 적이 있다[1]. 그러나 자성체가 없었기 때문에 인덕턴스 값이 매우 작았다. 그래서 본 논문에서는 기존에 제작한 다층 원형 맴돌이(spiral)구조로 된 LTCC 마이크로 인덕터 [1]보다 더 큰 인덕턴스 값을 얻기 위해 NiZn 페라이트를 내장한 LTCC 마이크로 인덕터의 구현에 관하여 논의 하였으며, 실제로 제작된 인덕터의 인덕턴스 값이 기존의 LTCC 마이크로 인덕터보다 더 큰 값을 갖는 것을 확인하였으며, 인덕터의 특성이 이론에 의한 특성과 거의 유사한 특성을 갖는 것을 알 수 있었다. 또한 그 결과를 토대로 하여 제작된 마이크로 인덕터를 이용하여 초소형 LTCC DC-DC 컨버터 모듈을 제작하였다.

2. 본 론

2.1 NiZn을 내장한 LTCC 마이크로 인덕터의 구조

그림 1은 내부에 자성체(NiZn)를 내장한 LTCC 인덕터의 구조를 보여준다. 인덕터는 3개의 NiZn 페라이트($\mu_r=230$)층과 2개의 LTCC 층으로 이루어져 있으며, 2층 N턴의 직각 맴돌이 코일이 각각 NiZn 층 사이에 위치하고 있다.

2.1.1 인덕턴스

그림 2(a)는 그림 1의 세로방향의 단면도를 나타내고 있다. 인덕턴스를 구하기 위해 구하기 위해 단면도를 4개의 블록으로 나누었는데 그림 2(b)는 그것들 중 한 블록을 나타낸 것이다. 그림 2(b)에서 i번째 코일에 흐르는 전류 I에 의해 생성된 자속(magnetic flux)은 a, b, 그리고 c의 영역에서 암페어의 법칙(Ampere's Law)을 이용하여 식(1)~(3)과 같이 표현할 수 있다.[2]

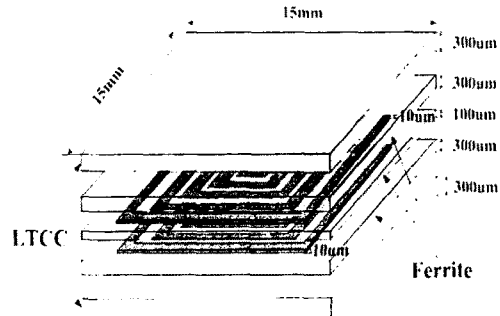
$$\phi_a = A_a e^{x/\lambda_a} + B_a e^{-x/\lambda_a} \tag{1}$$

$$\phi_b = A_b e^{x/\lambda_b} + B_b e^{-x/\lambda_b} + \alpha l \tag{2}$$

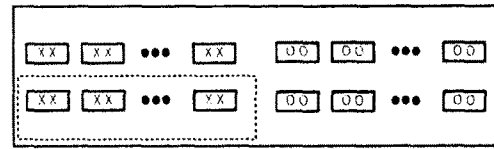
$$\phi_c = A_c e^{x/\lambda_c} + B_c e^{-x/\lambda_c} \tag{3}$$

위 식에서

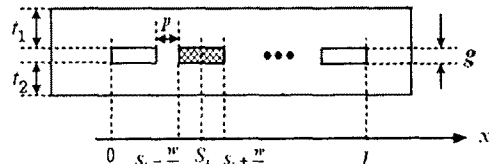
$$\lambda_a = \sqrt{\frac{\mu_r g t_1 t_2}{t_1 + t_2}}, \quad \lambda_b = \sqrt{\frac{g t_1 t_2}{t_1 + t_2}}, \quad \alpha = \frac{\mu_0 \mu_r t_1 t_2 D_c}{w(t_1 + t_2)}$$



<그림 1> 마이크로 인덕터의 구조



(a) 세로방향의 단면도



(b) 세로방향 단면도의 한 블록

region a : $0 \leq x < s_j - \frac{w}{2}$, b : $s_j - \frac{w}{2} \leq x \leq s_j + \frac{w}{2}$, c : $s_j + \frac{w}{2} < x \leq l$

<그림 2> LTCC 인덕터의 단면도

여기서 μ_r 은 NiZn의 투자율(permeability), g 는 코일의 두께, t_1 은 윗 쪽 NiZn 페라이트 층의 두께, t_2 는 아랫 쪽 NiZn 페라이트 층의 두께, w 는 코일의 폭, 그리고 D_c 은 한 블록에서 i 번째 코일의 길이이다.

식(1)~(3)은 여섯 개의 파라미터를 가지고 있으며, 그것들은 경계 조건들을 통하여 결정할 수 있다.[2], [3]

또한 마이크로 인덕터의 한 블록에서 인덕턴스 값을 다음과 같이 나타낼 수 있다.[2],[3]

$$L_i = \sum_{j=1}^N \frac{1}{wI} \int_{s_j - \frac{w}{2}}^{s_j + \frac{w}{2}} \sum_{j=1}^N \phi_{ij}(x) dx \tag{4}$$

여기서 I 는 N턴 코일에 흐르는 전류, $\phi_{i,j}$ 는 i 번째 코일에 흐르는 전류에 의한 자속, $\phi_{i,j < i}$ 는 i 번째 코일의 a영역에 있는 코일에 흐르는 전류에 의한 자속, 그리고 $\phi_{i,j > i}$ 는 i 번째 코일의 c영역에 있는 코일에 흐르는 전류에 의한 자속이다. 따라서 식 (14)는 다음과 같이 나타내수 있다.

$$L_i = \sum_{i=1}^N \frac{1}{wI} \int_{s_i - \frac{w}{2}}^{s_i + \frac{w}{2}} \left(\sum_{j=1}^{i-1} \phi_c + \phi_b + \sum_{j=i+1}^N \phi_a \right) dx \tag{5}$$

처음적으로 마이크로 인덕터의 4개의 블록에 식(5)를 적용하여 모두 합함으로써 마이크로 인덕터의 총 인덕턴스 값을 구할 수 있다.

2.1.2 저항

인덕터의 저항은 다음과 같이 해석할 수 있다. 주파수가 증가하면 도체의 표피효과에 의해 저항 값 $R_{ac}(f)$ 가 증가한다. 주변 코일에서 생성된 자속에 의해 와전류(eddy current)가 발생하며, 이것에 의한 저항분을 $R_m(f)$ 로 정의하고, 인덕터 권선을 따라 흐르는 DC 전류에 의한 부분을 R_{dc} 로 정의 할 때 전체 저항은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R_r(f) = R_{dc} + R_{ac}(f) + R_m(f) \quad (6)$$

제작된 LTCC 인덕터의 경우 표피효과에 의한 침투 깊이가 패턴의 두께에 비해 매우 크기 때문에 표피효과에 저항 $R_{ac}(f)$ 는 무시할 수 있다.

R_{dc} 는 코일의 길이 l , 두께 t , 폭 w , 코일의 고유 저항 ρ 에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{DC} = \rho \frac{l}{tw} = R_{sheet} \frac{l}{w} \quad (7)$$

인덕터의 i 번째 코일에서의 와전류에 의한 저항은 다음과 같이 나타낼 수 있다.[4],[5]

$$R_{mi} = 2P_m D_m^2 (t_1 + t_2) \quad (8)$$

위 식에서

$$P_m = \pi f \mu_0 \mu_r H_{mi}^2$$

여기서 P_m 은 자성체에서 고주파 자기 손실, f 는 주파수, μ_r 는 복소 투자율의 허수 부분이다.

μ_r 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.[4],[5]

$$\mu_r = \mu_r' \frac{1 - \frac{\sinh(Z) - \sin(Z)}{Z \cosh(Z) + \cos(Z)}}{\quad} \quad (9)$$

위 식에서

$$Z = \frac{t_m}{S_k}, \quad S_k = \frac{1}{2\pi \sqrt{\mu_r f / \rho_m}}$$

여기서 S_k 는 자성체의 침투 깊이, t_m 은 자성체의 두께, ρ_m 은 자성체의 고유저항이다. 최종적으로 식(7)과 (8)을 적용하면 인덕터의 등가 저항 R_S 를 다음식과 같이 구할 수 있다.

$$R_S \approx R_{dc} + \sum_{i=1}^N R_{m,i} \quad (10)$$

2.2 파라미터 측정

7-turn 2-layer의 마이크로 인덕터를 LA, 5-turn 2-layer의 마이크로 인덕터를 LB라고 정의 했을 때 인덕턴스 LS는 식(5)에 의해 LA의 경우 5.21[uH], LB의 경우 2.05[uH]를 얻었다. 측정치는 Impedance Analyzer 4194A를 이용하여 측정한 결과 LA의 경우 5.28[uH], LB의 경우 2.03[uH]를 얻음으로써 계산치와 매우 근접한 결과를 보임을 알 수 있었다. 또한 마이크로 인덕터의 등가 저항을 7-turn 2-layer의 경우 RA, 5-turn 2-layer의 경우 RB라고 정의 했을 때 등가 저항 RS는 식(23)에 RA의 경우 $l=227[\text{mm}]$, $t=10[\mu\text{m}]$, $\sigma = 6.17 \times 10^7 [\text{S/m}]$, $f=1[\text{MHz}]$, RB의 경우 $l=409[\text{mm}]$, $t=10[\mu\text{m}]$, $\sigma = 6.17 \times 10^7 [\text{S/m}]$, $f=1[\text{MHz}]$ 를 대입하여 계산치로서 각각 3.43[Ω], 1.03[Ω]을 얻었다. 측정치는 Impedance Analyzer 4194A를 이용하여 측정한 결과 RA의 경우 1.09[Ω], RB의 경우 3.38[Ω]을 얻음으로써 계산치와 매우 근접한 결과를 보임을 알 수 있었다.

〈표 1〉 마이크로 인덕터의 인덕턴스와 저항의 계산치 및 측정치

	LS[uH]		RS[Ω]	
	LA	LB	RA	RB
계산치	5.21	2.05	3.43	1.03
측정치	5.28	2.03	3.38	1.09

3. 마이크로 인덕터를 이용한 DC-DC 컨버터

그림 3는 제작된 DC-DC 컨버터의 사진을 나타낸다. 컨버터의 체적은 15[mm]×15[mm]×2.3[mm]로 주어져, 그림 3에 제작된 인덕터의 윗면에 단자패드를 만들어 제어 IC와 R, C를 실장 함으로써 제작 하였다.

그림 4은 제작된 DC-DC 컨버터의 회로도를 나타낸다. 컨버터의 회로 형태로는 정보통신 단말기 등의 전원회로로 많이 사용되고 있는 Boost(승압형) 컨버터를 선택하였으며 그림에서 *로 표시된 부분은 LTCC 기술에 의해 내장된 부분을 나타낸다. 제작된 컨버터의 전기적 사양은 입력전압 2.7[V], 출력전압 3.3[V], 출력전력 1[W], 스위칭 주파수는 최대 0.5[MHz]로 하였다.

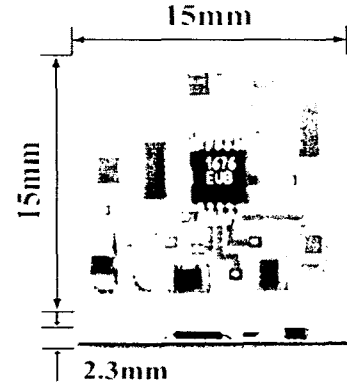
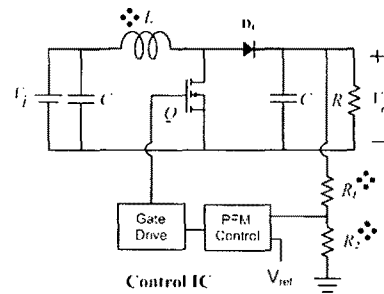
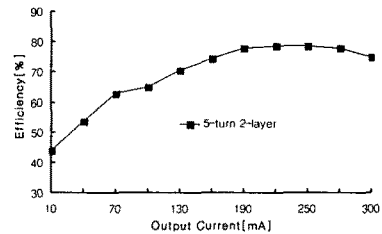


그림 3. 제작된 DC-DC 컨버터의 사진



〈그림 4〉 제작된 DC-DC 컨버터의 회로도



〈그림 5〉 컨버터의 측정효율

끝으로 그림 5는 이 컨버터의 측정 효율을 나타내는데, 최대 78%의 효율을 보임을 알 수 있다.

4. 결 론

기존에 구현된 저온 동시 소성 세라믹(LTCC) 인덕터의 인덕턴스 값보다 더 큰 인덕턴스 값을 얻기 위해 LTCC 인덕터의 내부에 자성체를 포함한 인덕터를 구현 하였으며, 해석을 통하여 인덕턴스 및 등가 저항의 계산법을 완성함으로써 이론적 설계 바탕을 마련하였다. 또한 구현된 인덕터를 내장시킨 1[W]의 초소형 DC-DC 컨버터 모듈을 제작하고 실험을 통하여 정상동작을 확인함으로써 제안된 LTCC 인덕터의 효용성을 입증하였다. 향후 더 높은 전력 밀도를 갖는 초소형 DC-DC 컨버터의 제작을 위해서는 같은 인덕턴스 값을 갖고 있으면서 더 작은 사이즈를 갖는 LTCC 인덕터에 대한 연구가 필요 할 것이다.

〔참 고 문 헌〕

- [1] C. Y. Kim, H. J. Kim, J. R. Kim, "An Integrated LTCC Inductor", *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 41, pp. 3556-3558, Oct. 2005.
- [2] R. E. Jones Jr, "Analysis Of The Efficiency And Inductance Of Multiturn Thin Film Magnetic Recording Head", *IEEE Trans. Magnetics*, vol. MAG-14, NO. 5, pp509-511, Sep. 1978.
- [3] P. C. Ciureanu, "Efficiency And Inductance Analysis Of A Three Region Thin Film Head", *IEEE Trans. Magnetics*, vol. MAG-22, no. 1, pp26-32, Jan. 1986.
- [4] T. Sato, H. Tomita, A. Sawabe, T. Inoue, T. Mizoguchi, M. Sahashi, "A Magnetic Thin Film Inductor And Its Application To A MHz Switching DC-DC Converter", *IEEE Trans. magnetics*, vol. 30, no. 2, pp217-223, Mar. 1994.
- [5] Richard M. Bozorth, *Ferromagnetism*, IEEE press, 1993.