저온소성 다층 세라믹 기판에 로고스키코일을 내장한 전류센서에 관한 연구

박성현 · 김은섭* · 신병철†

A study on the application of Rogowski coil on the LTCC

Sung Hyun Park, Eun-Sup Kim*, and Byoung-Chul Shin†

Abstract

Rogowski coil which detects magnetic flux on current changes. It is used for digital integration with watt-hour meter's current sensor, because, Rogowski coil has non-cored or non-magnetic core structure, so that, it cannot be saturated magnetically. This is a study for inventing accurate electric current sensors that have been applied on multi-layer ceramic substrate. We have confirmed its properties from each different layer's materials and pattern sizes by MWS 3D Electromagnetic field analysis program. And, after sensor manufacturing on multi-layer ceramic substrate, we confirmed its sensing quality is reliable as accurate electric current sensor for watt-hour meter.

Key Words : current transformer, rogowski coil, LTCC

1. 서 론

일반적으로 전력트랜스듀서에 사용되는 기존 변류기(current transformer)는 자성체코어 재료를 이용한 전류 센서가 대부분이다. 이러한 전류센서는 전류계측 시스템에서 부하에 흐르는 대전류를 취급이 용이한 저전류로 바꾸어 준다^[1]. 그런데 대전류가 저전류로 변환될 때 1차 전류의 일부는 자성체코어를 자기화 시키는 데 필요하게 되어 2차전류는 1차에 공급된 양보다 적은 값이 출력되어 오차를 발생시킨다. 이는 자성코일을 이용해서 생기는 문제로 보고 있다^[2-4].

상기 변류기가 가지고 있는 문제를 해결하기 위해 무자성 코어를 이용한 CT연구가 진행되고 있으며, 그 중에 로고스키코일을 이용한 CT 연구가 진행되고 있으나, 평판형으로 제작하여 PCB에 온보드 할 수 있는 타입의 CT는 국내에 없다.

본 연구에서는 자성체 코어나 자기센서를 사용하지 않고, 로고스키코일의 원리를 적용하여 전자식 전력량계에

사용되는 전류감지 센서를 연구하였다. 이를 다층 세라믹 기판(multi layer ceramics board: MLCB) 내부에 로고스키코일을 탑재할 수 있도록 LTCC(low temperature cofired ceramic) 공정기술을 적용하여 센서를 구현하였다.

전류 측정 방법은 측정 전류에 비례하는 전압을 얻는 로고스키코일 방식을 응용하였다. 실질적인 구현에 앞서 3차원 전자기장 해석 프로그램인 CST사의 MWS(microwave studio)를 사용하여 이론적인 결과를 얻었으며 이론을 바탕으로 부분적인 실험을 하여 얻은 결과와 비교하여 그 특성을 알아보았다.

2. 이론적 배경

2.1. 로고스키코일

로고스키코일은 전류 측정 영역이 광범위하며, 중심이므로 자속의 포화가 없어 오차가 적으며, 비접촉형 전류센서로 절연성이 우수한 장점이 있다. 또한 전류측정에 있어 중요한 요소인 선형성이 우수함으로 전류감지소자로서 새롭게 각광받고 있다^[1-5].

Fig. 1은 로고스키코일 전류감지구조를 나타낸 그림이다. 코일을 Torus 형태로 만들고 Torus의 한쪽 끝의 도선을 Torus의 내부를 통하여 다른 한쪽 끝으로 돌아오도록 만든다.

전류 $I(t)$ 가 로고스키 코일의 중심을 지나간다는 가

동의대학교 나노공학과(Department of Nano Engineering, Dong-Eui University)

*(주)유니코코리아NI

†Corresponding author : shinbc@deu.ac.kr

(Received : June 30, 2010, Revised : October 15, 2010

Accepted : November 23, 2010)

Fig. 1. Principal of Rogowski coil.

정으로 암페어의 법칙을 적용하면,

$$\oint \vec{B}(t) dl = \mu I(t) \quad (1)$$

$$\vec{B}(t) = \frac{\mu I(t)}{2\pi a} \quad (2)$$

로 표현되며 여기서 a 는 토러스의 반경, $I(t)$ 는 코일의 중심으로 통과하는 전류, l 은 토러스의 길이, μ 는 코아의 투자율(공심일 경우 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}$ 또는 T m/A)이다. 그리고 자기장의 플럭스는

$$\Phi = \oint B da \quad (3)$$

이므로

$$\Phi(t) = \frac{\mu I(t) A}{2\pi a} \quad (4)$$

가 되고, 코일의 양단에서 유도되는 기전력은

$$\varepsilon(t) = \frac{d\Phi}{dt} = \left(\frac{\mu A n}{2\pi a} \right) \frac{dI}{dt} \quad (5)$$

가 된다. 여기서 A 는 코일의 도선이 감싸는 원의 단면적이며, n 은 감은 수이다. [식.5]에서 로고스키 코일을 통하여 측정되는 전압 $\varepsilon(t)$ 는 전류 미분 값이며, 이는 전류 측정회로 내에 적분기를 사용함으로써 $I(t)$ 값을 측정할 수 있다.

로고스키 코일에서 한쪽 끝의 도선을 토러스 내부를 통하여 회귀시키는 것은 로고스키 코일의 토러스 방향으로 흐르게 되는 전류 $i(t)$ 에 의해 유도되는 자기장에 의한 오차를 줄이기 위함이다.

2.2. 저온소성 다층 세라믹 기판

최근 고정밀 고집적 산업의 발전에 따라 전기, 전자 제품은 점점 소형화, 경량화 되고 있는 추세이다. 이에 대응하여 관련 부품들의 고기능화와 집적화가 요구되고 있는 상황에서, 부품의 소형화를 가능하게 하는 LTCC(low temperature cofired ceramic) 기술이 주목

받고 있다.

LTCC 기술은 유전체 세라믹층과 은, 구리 등과 같은 전도도가 높은 내장 전극이 조합된 형태를 취하는 복합 구조로, 고집적 회로 제작이 가능하고, 전기적인 고성능, 고신뢰도, 회로 소형화가 가능하다. LTCC공정을 이용하면 3차원적인 회로 구현이 가능하므로 수평적인 회로를 구현하는 기존 PCB(printed circuit board) 기판에 비하여 월등히 높은 집적도와 우수한 전기적 특성을 갖는 집적기판 제작이 가능하여, 칩 커패시터, 칩 안테나, FEM(front end module), PAM(power amplifire module) 등 다기능성 모듈의 제작이 이루어지고 있다^[5-9].

3. 실 험

3.1. 로고스키코일의 원리를 적용한 전류센서 설계

3.1.1. 전류센서의 구성

전류센서의 구성은 크게 로고스키코일을 다층 세라믹 기판에 내장한 사각형의 기판과 감지할 전류가 입력되는 부하 도전체로 이루어진다. Fig. 2는 로고스키코일이 적용된 센서의 구성을 나타낸다.

3.1.2. 로고스키코일이 내장된 기판

로고스키코일의 패턴은 전류센서모듈의 구성요소 중

Fig. 2. Rogowski coil application for sensor.

Fig. 3. Pattern of Rogowski coil.

가장 핵심이 되는 요소이며, 이에 Fig. 3과 같은 유형의 나선형 금속코일패턴을 설계하고 이의 시뮬레이션 분석을 통하여 각기 다른 유형에 따른 전자기적 특성을 비교하였다.

본 코일은 동일한 평면에 배치되는 복수의 나선형 도전성 권선을 갖고 있고, 자기중심을 갖고 실제 유기된 전압을 측정하는 센싱부 코일과 외부 자계의 영향을 차단하는 외부코일인 소거부가 직렬로 접속되며 공통 배정 교변 자계에 의해 내측 및 외측 감지 코일에 서로 반대 되는 기전력(EMF)이 작용하며 이들 사이에 다층 세라믹 기판이 자체적으로 절연층을 형성한다.

입력된 AC 전류는 구리재질의 부하 도전체의 루프(loop)부를 통과하여 흐르고, 감지코일 주위에서 자계를 생성하여 전류에 비례해 코일 내에 기전력이 유도되어 반대방향으로 감지된 센싱부와 소거부의 기전력은 정반대가 된다. 센싱부에 유도되는 기전력은, 외부 시변(time varying) 자계에 응답하여 소거부에 유도된 기전력으로 동일하게 소거되어 외부 간섭에 영향을 받지 않는다.

3.2. 전자기장 해석

3.2.1. 선폭과 선간거리에 따른 해석

식 (1)로부터 전류를 감지하는 로고스키 코일의 단면적이 센싱감도의 중요한 요소가 되므로 동일한 나선형 금속코일 패턴의 로고스키 코일을 설계하고 그 선폭과 선간거리를 달리하여 CST MWS 전자기장 해석틀을 이용하여 다양한 유형에 따른 전자기적 특성을 분석하였다.

코일의 외경은 130 mm 내경은 50 mm이며, 센서부와 소거부의 비율은 3:1로 고정하였다. 변수는 선폭을 0.1 mm에서 0.3 mm로, 선간거리(gap)를 0.1 mm에서 0.3 mm로 설정하였다. 각각의 경우를 60 Hz 주파수에 5A 전류를 입력하여, 출력되는 미세신호를 20,000배 증폭하는 조건으로 전자기장 해석하였으며, 그 출력값(mV)을 알아보았다.

Table 1은 선폭과 선간거리를 달리하여 전자기장 해석을 한 조건을 나타낸 것이다.

Table 1. Conditions of wideness and gap

Gap(mm) : Wideness (mm)			
0.1 : 0.1	0.15 : 0.1	0.2 : 0.1	0.3 : 0.1
0.1 : 0.15	0.15 : 0.15	0.2 : 0.15	0.3 : 0.15
0.1 : 0.2	0.15 : 0.2	0.2 : 0.2	0.3 : 0.2
0.1 : 0.3	0.15 : 0.3	0.2 : 0.3	0.3 : 0.3

Table 2. Conditions of gap and ratio of parts

Gap(mm) : Ratio of sensing and erasing part			
0.1 : (1:1)	0.15 : (1:1)	0.2 : (1:1)	0.3 : (1:1)
0.1 : (2:1)	0.15 : (2:1)	0.2 : (2:1)	0.3 : (2:1)
0.1 : (3:1)	0.15 : (3:1)	0.2 : (3:1)	0.3 : (3:1)

Table 3. Condition of simulation for linearity

Type	조건	Gap (mm)	Wideness (mm)	Ratio of sensing and erasing part
Type1		0.1	0.1	3:1
Type2		0.15	0.15	2:1
Type3		0.1	0.1	2:1
Type4		0.15	0.15	3:1

3.2.2. 센싱부와 소거부의 비율에 따른 해석

로고스키코일을 구성함에 있어 유기된 전압을 측정하는 내부코일인 센싱부와 외부 자계의 영향을 차단하는 외부코일인 소거부가 있는데, 이들의 길이의 비율이 센싱감도에 어떤 영향을 미치는지 알아보기 위하여 센싱부와 소거부의 길이의 비율을 달리하여 전자기장 해석 하여 그 값을 알아보았다.

Table 2는 선간거리와 센싱부와 소거부의 길이의 비율을 달리하여 전자기장 해석을 한 조건을 나타낸 것이다. 센싱부와 소거부의 코일의 길이 및 비율을 제외한 소재와 조건은 상기와 동일하다.

3.2.3. 출력전압 선형성 해석

로고스키코일을 활용한 센서를 가정용 전력량계에 적용시키기 위해 중요한 요소중에 하나인 선형성을 알아보기 위하여, 선폭과 선간거리, 센서부와 소거부의 비율을 달리 설계한 로고스키 코일에 도전체를 올리고 5 A~40 A까지 5 A 단위로 전류를 점진적으로 흘려주고 그 출력값의 미세신호를 20,000배 증폭한 값의 선형성을 조사해 보았다.

Table 3은 선폭, 선간거리, 센서부와 소거부의 비율, 등을 달리 설계하여 4가지 Type으로 구분하여 전자기장 해석을 한 조건을 나타낸 것이다.

3.3. 다층 세라믹 기판 전류센서 제작

3.3.1. 다층 세라믹 기판 공정

세라믹 기판은 LTCC 공정으로 제작하였으며 절연층을 포함하여 14층의 sheet로 이루어져 있다. Fig. 4는 sheet를 적층한 세라믹 기판의 단면을 나타내었다.

LTCC 공정을 통한 세라믹 기판 제조의 개괄적인 과정을 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 4. Cross section of ceramic board.

Fig. 5. Flow sheet for LTCC.

3.3.2. 다층 세라믹 기판 제작

전자기장 해석을 통하여 세라믹 기판에 로고스키코일을 구현함으로써 전류를 감지해 내는 기능이 있음을 확인하여 실제로 세라믹 기판에 로고스키코일을 설계하여 전류센서를 제작하였다. 선폭이 0.1 mm이고 선간 거리가 0.2 mm이며 센싱부와 소거부의 비율이 2:1인 경우에 제작이 용이하며, 출력값도 비교적 높게 나온 것을 감안해 LTCC 공정으로 로고스키코일이 내장된 다층 세라믹 기판 전류센서를 제작하였다. 전류센서의 사시도를 Fig. 6에 나타내었으며 제작된 모습을 Fig. 7에 나타내었다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 전자기장 해석 결과

4.1.1. 선폭과 선간거리에 따른 해석 결과

Table 1에 나타낸 조건으로 선폭과 선간거리를 달리

Fig. 6. Projection layers of ceramic boards.

Fig. 7. Ceramic board.

Fig. 8. MWS data by gap and wideness.

Fig. 10. Data by gap and wideness.

Fig. 9. MWS Data by Ratio of sensing and erasing part.

하여 로고스키코일을 설계하였으며, 60 Hz 주파수에 5 A 전류를 입력하여 출력되는 미세신호를 20,000배 증폭하는 조건으로 해석하여 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

선폭이 0.1 mm, 0.15 mm, 0.2 mm, 0.3 mm의 각각의 경우에 선간거리가 0.1 mm, 0.15 mm, 0.2 mm, 0.3 mm로 시뮬레이션을 하였는데 그 결과 선폭이 0.1 mm이며, 선간거리가 0.1 mm일 때 출력값이 가장 높게 나왔으며, 선폭이 0.3 mm이며, 선간거리가 0.3 mm일 때 출력값이 가장 낮게 나왔다.

시뮬레이션 결과에 의하면 로고스키코일의 선폭이 좁을수록, 선간거리가 짧을수록 그 출력값이 높게 나온다는 것을 알 수 있다.

4.1.2. 센싱부와 소거부의 비율에 따른 해석 결과

코일의 선간거리와 센싱부와 소거부 비율 외에 모든

조건을 동일하게 설정하고, Table 2의 조건으로 선폭과 선간거리를 달리하여 로고스키코일을 설계하여 각각 60 Hz 주파수에 5 A 전류를 입력하여 출력되는 미세신호를 20,000배 증폭하고 그 출력되는 값(mV)을 해석하여 Fig. 9에 나타내었다.

전자기장 해석 결과에 의하면 선간거리가 0.1 mm일 때는 센싱부와 소거부의 비율이 1:1이면 출력값이 가장 높게 나오며, 선간거리가 0.15 mm일 때는 센싱부와 소거부의 비율이 3:1이 가장 높게 나오며, 0.2 mm 이상일 때는 센싱부와 소거부의 비율이 2:1이 될 때 상대적으로 높은 출력값이 나옴을 알 수 있다.

4.1.3. 출력전압 선형성 해석 결과

선폭과 선간거리, 센서부와 소거부의 비율을 달리 설계한 로고스키 코일에 도전체를 올리고 5 A~40 A까지 5 A 단위로 전류를 점진적으로 증가시켜 출력값의 선형성을 조사해 보았다. 선폭과 선간거리, 센서부와 소거부의 비율 등을 달리 설계하여 4가지 Type으로 구분하여 Table 3의 조건으로 해석하여 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

Table 3의 조건으로 해석한 결과 type1, type2, type3, type4 모두 출력값의 차이는 있지만 안정적인 선형성을 나타내었다.

4.2. 전류 측정

로고스키코일이 내장된 다층세라믹기판이 완성되고 증폭회로를 구성하여 도전체를 체결한 후 전류를 흘려주어 그 출력되는 전압을 측정하는 모습을 Fig. 11에 나타내었다. 계측장비는 전류공급기에 체결하여 0 A~40 A까지 5 A 단위로 입력하여 전류센서에서 증폭회로를 거

Fig. 11. Measurement electric sensor.

Fig. 12. Data of output voltage.

쳐 나온 전압을 디지털 Lock in amp(NF LI 5640)를 사용하여 출력값을 측정하여 Fig. 12에 나타내었다.

0 A~40 A까지 5 A 단위로 전류를 입력하여 출력된 전압을 측정한 결과 40 A 입력시 출력값이 약 12 mV가 나온다는 것을 확인하였다. 선형성이 대체로 보장되는 것을 확인하였으며 선형성 오차는 최대 약 6%이다. 이를 Table 4에 나타내었다.

4.3. 실측값과 해석값 비교

본 실험에서 제안한 전류센서의 실측값과 전자기장

Table 4. Data of output voltage and relative error

입력전류 (A)	출력전압 (V,실측값)	출력전압 (V,비교값)	오차율 (%)
0	0	0	0
5	1.57	1.48	5.6
10	2.98	2.97	0.1
15	4.44	4.46	0.5
20	5.91	5.95	0.6
25	7.48	7.43	0.5
30	9.01	8.92	1
35	10.68	10.41	2.6
40	12.08	11.9	1.5

Fig. 13. Comparison measured value & simulation.

해석값을 비교하여 Fig. 13에 나타내었다.

기존 자성체 코어재료를 이용한 40 A용 전류센서(current transformer)와 마찬가지로 저온소성 다층 세라믹 기판에 로고스키 코일을 적용한 전류센서 또한 입력전류가 증가할수록 선형적으로 출력값이 나타남을 알 수 있다.

전자기장 해석을 통해 알아본 출력값의 선형성은 0%의 오차를 보였으나 실측값은 약 6% 정도의 오차를 보인다. 이는 외부자계의 영향과 계측장비의 노이즈의 영향으로 오차가 나타난 것으로 생각한다.

4. 결 론

본 연구에서는 다층세라믹기판상에 로고스키코일을 구현하여 전류감지 센서코일을 설계하였으며, 설계된 내용으로 전류센서모듈을 제작하여 0 A에서 40 A까지 5 A 단위로 전류를 흘려주어 전류센서에서 나온 전압(V)을 측정하였다. 로고스키코일의 평면상 구현에 있어 LTCC 세라믹 기판에서도 구현 할 수 있다는 것을 확인하였다.

특히 전자기장 해석을 통해 도선의 선평이 좁을수록, 선간거리가 짧을수록 출력전압이 큼을 알게되었다. 또한 소거부와 센싱부의 비율관계에 있어서도 소거부를 센서부의 1/2 길이만큼 감을 때에 가장 좋은 민감도와 선형성을 보였다.

또한 1차측 도체와 전기적으로 연결되어 있지 않아 단락전류에 강하고 출력이 전압의 형태이므로 다른 디지털 보호 릴레이를 구동시킬 수도 있기 때문에 고온 플라즈마 발생장치 및 고속 스위칭 전력전자회로 등에서 전류 측정센서로서 활용이 가능하다.

따라서 로고스키코일의 원리를 다층 세라믹 기판(LTCC)에 적용함으로써 전류센서로서의 기능을 다할 수 있음을 확인하였다.

본 연구를 통해 전자구조의 집적화와 고성능화를 기대해보며 전자센서소자 분야에 있어 로고스키코일을 이용한 보다 안전하고 편리한 측정을 제공하리라 본다.

감사의 글

이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임.(KRF-2007-313-D00291)

참고 문헌

- [1] Y. Suzuki, A. Hirabayashi, and K. Yamasawa, "Analysis of a zero-flux type current sensor", *IEEE transactions on magnetics*, vol. 29, no. 6, pt. 1, pp. 3183-3185, 1993.
- [2] Y. Yoshida and A. Tayaoka, "Precise current sensor by means of small-angle magnetization rotation using amorphous wire and its industrial application", *IEEE transactions on magnetics*, vol. 29, no. 6, pt. 1, pp. 3180-3182, 1993.
- [3] Y. Kashiwagi, T. Kondo, and K. Mitsui, "300 A current sensor using amorphous wire core(invertor control of AC motors)", *IEEE transactions on magnetics*, vol. 26, no. 5, pp. 1566-1568, 1990.
- [4] Y. Kashiwagi, T. Kondo, and K. Mitsui, "300 A current sensor using amorphous wire core", *Magnetics Conference*, 1990. 1990 Digests of INTERMAG '90. International, pp. BD-04-BD-04, 1990.
- [5] Donald G. Pellinen, "Two-megavolt divider for pulsed high voltages in vacuum", *Review of scientific instruments*, vol. 51, no. 1, pp. 70-73, 1980.
- [6] D. Amey and P. Barnwell, "Ceramic technology for integrated packaging for wireless", *IEEE Integrated Circuits Symposium*, p. 63, 1999.
- [7] C.Q. Scrantom and J. C. Lawson, "LTCC technology: Where we are and where we're going", *IEEE Symposium on Technologies for wireless applications*, P. 193, 1999.
- [8] 강남기, 이우성, 김준철, 박종철, "수동소자 내장형 LTCC 개발동향", *세라미스트*, 제8권, 제3호, p. 12, 2005.
- [9] 신효순, 여동훈, 김효태, 김종희, "차세대정보통신과 세라믹스", *세라믹스*, 1월호, p. 71, 2007.
- [10] 곽훈, 전형도, 김환, 이원재, 신병철, 김일수, "Glass-Al₂O₃ 복합소재를 원료로 한 LTCC 다층회로 기판의 제조", *한국전기전자재료학회논문지*, 제21권, 제6호, pp. 509-516, 2008.
- [11] F. Harashima, H. Inaba, and K. Tsubio, "A closed-loop control system for the reduction of reactive power required by electronic converters", *IEEE Trans.*, IECI-23, 1976.
- [12] 박영태, 권성원, 이진호, 유광민, "전력측정을 위한 전자보상 전류센서에 관한 연구", *센서학회지*, 제4권, 제3호, pp. 1-8, 1995.

박 성 현

- 2001년 02월 부경대학교 전자공학과 (공학박사)
- 2003년 03월~2003년 12월 동명대학 정보통신계열 겸임교수
- 2004년 09월~2005년 12월 경성대학교 전자전기메카트로닉스공학과 겸임교수
- 2003년 03월~2005년 12월 엔알디테크 주식회사 기술연구소 선임연구원
- 2006년 03월~현재 동의대학교 나노공학과 강의전담교수
- 2008년 03월~현재 동의대학교 전자세라믹센터 운영위원회 책임연구원
- 주관심분야: SiC epilayer growth, SiC Schottky Barrier Diode, Piezoelectric device, Rogowskicoil current sensor process, Gas sensor process

김 은 섭

- 2006년 02월 경성대학교 전기전자공학과 (공학박사)
- 2010년 02월 동의대학교 나노공학과 (공학석사)
- 2006년 07월~현재 (주)유니크코리아NI과장
- 주관심분야: Piezoelectric device, Rogowskicoil current sensor process, Gas sensor process

신 병 철

- 1998년 02월 KIIST 재료공학 (공학박사)
- 1990년 02월~1990년 08월 미국 펜실베니아 주립대MRL 방문연구원
- 1991년 10월~1992년 12월 일본 東京大學 RCAST 객원연구원
- 1988년 09월~1996년 02월 포천 RIST 신소재연구부문 책임연구원
- 1996년 03월~현재 동의대학교 나노공학과 교수
- 2001년 03월~현재 동의대학교 전자세라믹스센터 소장
- 주관심분야: ZnO나노와이어, ZnO박막, SiC 단결정 성장, 센서 소자