

## 온도보상회로를 부착한 개방형 전류측정기의 특성

구명환<sup>1</sup>, 박주경<sup>1</sup>, 차귀수<sup>1\*</sup>, 김동희<sup>2</sup>, 최종식<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>순천향대학교 전기공학과, <sup>2</sup>(주)비전테크놀로지

### Characteristics of Open-Loop Current Sensor with Temperature Compensation Circuit

Myung-Hwan Ku<sup>1</sup>, Ju-Gyeong Park<sup>1</sup>, Guee-Soo Cha<sup>1\*</sup>, Dong-Hui Kim<sup>2</sup>, Jong-Sik Choi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Electrical Engineering, Soonchunhyang University

<sup>2</sup>Vision Technologies

**요약** 개방형 전류측정기는 DC 모터 컨트롤러, AC 가변 컨트롤러, UPS(Uninterruptible Power System)에 주로 사용되며 최근 신재생 에너지의 성장과 전력망의 스마트 그리드화로 인하여 활용성이 점차 확대되고 있다. 이러한 신재생 에너지의 성장으로 관련 핵심기술의 보유여부가 중요해지고 있으며 대부분 수입에 의존하고 있는 개방형 전류측정기의 국산화 및 관련 기술의 확보를 필요로 한다. 본 논문에서는 일반 산업용 개방형 전류측정기의 제작과정과 특성을 측정된 결과를 기술하였다. 개방형 전류측정기를 구성하는 C형 철심의 공극자장분포 해석 및 형상 설계, 홀센서의 선정 및 특성시험, 정전류 전원공급회로와 신호처리회로의 회로설계 과정을 기술하며 DIP(Dual In-line Package) type과 SMD (Surface Mount Device) type의 100A급 개방형 전류측정기를 제작하고 특성을 측정했다. 제작된 전류측정기로 0~100A 범위에서 통전 실험을 실시한 했고 직류전류와 60Hz의 교류전류에서 특성을 측정된 결과 정밀도 오차 2% 이내, 선형도 오차 2% 이내의 성능을 만족하였다. 또한 부 특성 온도계수를 갖는 NTC(Negative Temperature Coefficient) 서미스터를 이용한 온도보상회로를 사용하여 -35~100℃의 범위에서 온도보상 효과를 확인하였다.

**Abstract** Open-type current sensors have been commonly used for DC motor controller, AC variable controller and Uninterruptible Power Supply. Recently they have begun to be used more widely, as the growth of renewable energy and smart-grid in power system. Considering most of the open-type current sensors are imported, developing the core technology needed to produce open-type current sensors is required. This paper describes the development and test results of open-type current sensors. Design of C type magnetic core, selection and test of a Hall sensor, design of current source circuit and signal conditioning circuit are described. 100A class DIP(Dual In-line Package) type and SMD(Surface Mount Devide) type open-type current sensors was made and tested. Test results show that the developed open-type current sensor satisfies the accuracy requirement of 2% and linearity requirement of 2% at 100 A of DC and AC current of 60Hz. Temperature compensation was carried out by using a temperature compensation circuit with NTC(Negative Temperature Coefficient) thermistor and the effect of the temperature compensation are described.

**Keywords** : current sensor, Hall sensor, open-loop, temperature compensation

### 1. 서론

전류는 분류기, CT, 홀 센서로 측정이 가능하며 홀센서와 자성철심을 이용한 전류측정기는 다른 방식에 비해

절연특성과 직류, 교류의 전류를 모두 측정할 수 있는 장점이 있다. 홀센서를 이용한 전류측정기는 개방형 회로로 구성되어 출력이 측정전류대비 출력전압으로 나타나 는 개방형과 폐쇄형 회로로 구성되어 자성코어의 특성에

본 논문은 중소기업청에서 지원하는 2014년도 산학연협력 기술개발사업(연구마을, 과제번호:C0220973)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

\*Corresponding Author : Guee-Soo Cha(Soonchunhyang University)

Tel: +82-10-3668-4001 email: gsoocha@sch.ac.kr

Received August 17, 2015

Revised (1st September 8, 2015, 2nd September 17, 2015, 3rd September 23, 2015)

Accepted December 4, 2015

Published December 31, 2015

따른 영향이 적은 폐쇄형으로 나뉘며 일반적으로 폐쇄형 전류측정기에 비해 개방형 전류측정기가 비교적 정밀도가 높으면서 가격이 저렴하여 일반산업용으로 많이 쓰인다.[1] 개방형 전류측정기는 DC 모터컨트롤러, AC 가변 컨트롤러, UPS에 주로 사용되는 전류측정기로 최근 전력망의 스마트그리드화, 신재생에너지의 성장으로 인하여 활용성이 점차 확대되고 있으나 대부분의 개방형 전류측정기를 외국에서 수입해서 사용하고 있다.[2]

본 논문에서는 구조가 간단하면서도 비교적 정밀도가 높은 개방형 전류측정기를 제작하고 그 특성을 측정할 결과를 기술한다. 개발하고자 하는 개방형 전류측정기는 최대 100A의 직류, 교류 전류를 측정하며 정밀도 오차 2% 이내, 선형도 오차 2% 이내의 성능을 갖는 것을 목표로 하였다. 전류 측정기의 특성에 큰 영향을 미치는 C형 철심의 특성 분석, 홀센서 특성 분석과 신호처리회로, 온도보상회로에 대해서 기술하였고, 개방형 전류측정기를 제작하여 특성을 측정할 결과를 기술했다.

## 2. 개방형 전류측정기의 설계

Fig. 1에 개방형 전류측정기의 기본구조를 나타내었다. 개방형 전류측정기는 전선에 흐르는 전류에 의해 발생하는 자기장의 세기를 홀 센서로 측정하고 이로부터 전류를 산정한다. 개방형 전류측정기의 구성요소인 C형 철심을 통과하는 전선에 전류가 흐르면 C형 철심에 자장이 발생한다. 발생하는 자장은 C형 철심의 공극에 위치한 홀센서를 이용하여 자장의 크기에 비례하는 전압신호로 변환된다. 전압신호는 홀 센서 출력에 연결된 신호처리회로에서 증폭부와 온도보상회로부를 거친다. 최종적으로 신호처리회로의 출력에서 전선에 흐르는 전류와 비례하는 출력전압을 얻을 수 있다.

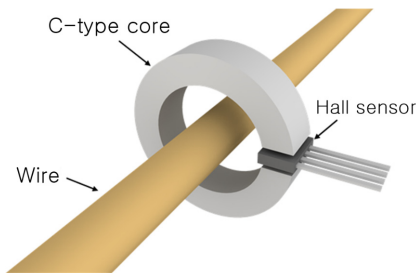


Fig. 1. Structure of a open-loop current sensor

### 2.1 자성철심 설계

자성재료로 제작되는 철심은 교류자장에 의해 발생하는 와전류를 감소시키기 위해 얇은 판재를 겹쳐 쌓는 형태로 사용되며 성층방법에 따라 권철심형과 적철심형으로 구분한다. 또한 철심에 인가되는 자장의 방향에 의해서 특성이 달라지는 지 여부에 따라 방향성 철심과 무방향성 철심으로 구분할 수 있다.

Fig. 2는 국내에서 시판되는 일반적인 방향성, 무방향성 규소강판 철심의 B-H 특성을 나타낸 것이다. 방향성 철심은 인가되는 자장의 방향이 철심의 방향성에 일치할 때에 무방향성 철심에 비해 투자율이 높다는 장점을 가진다. 방향성 철심을 사용해서 Fig. 1과 같은 C형 철심을 제작하기 위해서는 방향성을 유지하기 위해서 권철심 형태로 제작하는 것이 좋다. 무방향성 철심은 방향성 철심에 비해 투자율은 낮지만 철심을 제작할 때 인가되는 자장의 방향을 고려할 필요가 없어 적철심 형태로 제작이 가능하다.

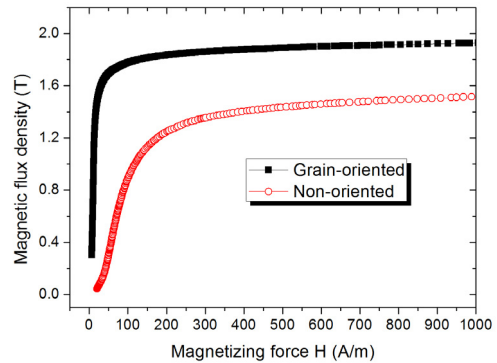


Fig. 2. B-H curve of grain-oriented and non-oriented ferromagnetic cores

전류센서에 사용되는 C형 철심의 자장특성을 알기 위해 3차원 유한요소해석을 실시하였다. C형 철심의 내경, 외경, 두께, 공극의 거리를 조절하며 다양한 형상에 대해 특성을 계산하였다. Fig. 3은 무방향성 철심을 사용한 C형 철심의 칫수가 내경 17mm, 외경 25mm, 두께 4.9mm 그리고 공극의 거리 2mm일 때의 공극에서의 자장 변화이다. 철심의 중심을 통과하는 전선에 직류 100A의 전류가 흐를 때 공극에서는 최대 61.6mT의 자장이 발생한다. 그림에서 X축 방향은 전선과 수직인 방향이고, Z축 방향은 전선과 나란한 방향이다. 공극에서의 자장은 공극의 가장자리로 갈수록 급격히 감소한다.

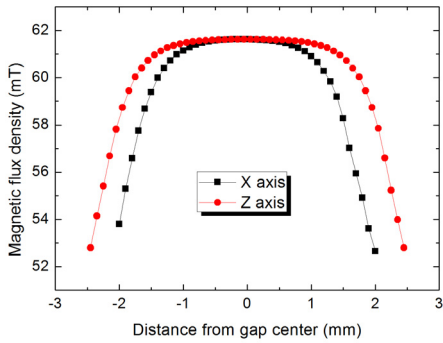


Fig. 3. Magnetic flux density at the center of the airgap, non-oriented core, 100 A

Fig. 4는 방향성 철심을 사용한 C형 철심의 치수가 내경 18mm, 외경 26mm, 두께 5mm 그리고 공극거리 2.2mm일 때 공극에서의 자장분포를 계산한 결과이다. 전선에 흐르는 전류가 100A일 때 공극에서 발생하는 최대 자장은 56.9mT이다. 자장분포는 무방향성 C형 철심과 유사하지만 X축 상에서 자장분포의 비대칭의 특성이 더 뚜렷하게 나타난다.

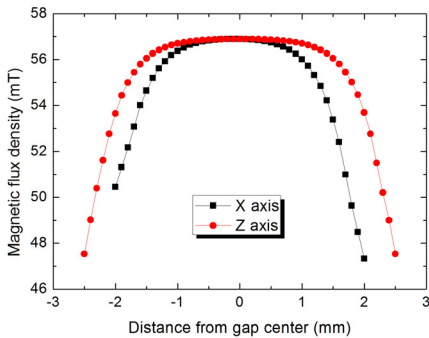


Fig. 4. Magnetic flux density at the center of the airgap, grain-oriented core, 100 A

무방향성 C형 철심과 방향성 C형 철심은 제작 방법 차이에 의해 형상이 약간 다르지만 두 경우 모두 공극의 자장크기가 홀센서로 측정하기에 충분한 것으로 확인되었다.

### 2.2 홀센서 선정 및 특성시험

개방형 전류측정기의 정밀도를 높이기 위해서는 적절한 홀센서를 선정하는 것이 중요하다. C형 철심의 공극 자장을 측정하는 홀 센서에는 자장의 크기에 비례하는 출력전압이 발생되어야 하고 동일 모델의 여러 제품에서

동작특성이 균일하여야 한다. 또한 반도체 물질로 제작되는 홀센서의 특성상 온도에 따라 홀센서의 특성이 변하는데 이때 온도에 따른 출력전압의 변화가 작은 것이 전류측정기에 사용되기에 적합하다.

홀센서의 성능(자장측정 범위, 선형성, 온도 범위), 가격, 수급의 용이성을 고려하여 선택하였다. 선택된 홀센서에서 자장을 측정하는 센서부의 크기는 가로 2.35mm, 세로 2.7mm 그리고 두께 0.95mm이다. 홀센서의 동작 온도범위는 -40~125°C이다. 홀센서는 동일한 모델에서도 각 제품의 특성이 조금씩 다르다. 특히 동일한 자장이 인가될 때 홀센서의 출력전압의 차이가 크면 전류센서의 성능을 감소시킬 우려가 있다. 선정된 홀센서 세 개를 대상으로 자장에 따른 홀 전압의 크기를 측정된 결과는 Fig. 5와 같다.

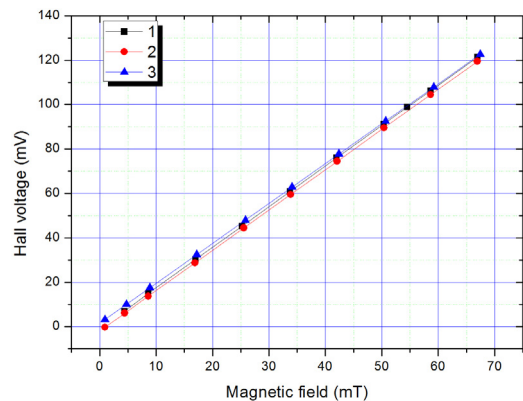


Fig. 5. Output voltage of the Hall sensors vs. magnetic field

### 2.3 회로 설계

개방형 전류측정기는 홀센서를 동작시키기 위한 정전류 공급부, 홀센서를 이용하여 공극의 자장을 측정하는 자장측정부, 홀센서 출력전압의 증폭을 위한 신호증폭부, 온도에 따른 홀센서의 특성 변화를 보상하기 위한 온도보상부, 노이즈 제거를 위한 필터로 구성된다. 전류측정기 회로의 기능을 블록다이어그램으로 표시하면 Fig. 6과 같다.

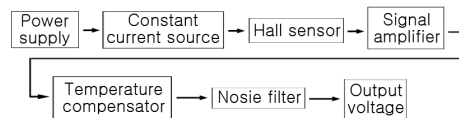


Fig. 6. Functional block diagram of the current sensor

### 2.3.1 정전류 공급부

본 연구에 사용된 홀센서는 GaAs 재료의 반도체 물질로 만들어져 있다. 따라서 온도가 증가함에 따라 출력 전압이 감소하는 부특성 온도계수를 갖는다. 이러한 온도특성은 전류측정기의 정밀도를 감소시키는 원인이 된다. 홀 센서에 전원을 공급하는 방식에 따라 전류측정기의 정밀도가 달라진다. 홀센서에 인가하는 전원으로 전압원 보다 전류원을 사용하면 온도에 따른 영향을 상당히 줄일 수 있다. 이에 따라 전류측정기에 Howland 정전류 회로를 사용하여 정전류를 공급하였다.[3]

### 2.3.2 자장측정부

자장측정부는 홀센서를 이용하여 C형 철심 공극에서의 자장을 측정하는 부분이다. 정전류가 공급되는 홀센서에 자장이 인가되면 자장의 크기에 비례하는 홀전압이 발생한다. 자장변화에 따른 홀전압의 크기는 Fig. 5과 같다.

### 2.3.3 신호증폭부

자장에 비례하여 발생하는 홀센서의 출력전압은 최대 110mV 정도여서 증폭이 필요하다. 본 연구에서는 OP-AMP를 이용한 차동증폭기 회로를 이용하여 전선에 100A의 전류가 흐를 때에 4V의 출력이 발생하는 회로를 설계하였다. Fig. 7은 신호증폭회로와 온도보상회로를 나타낸 것이다. 두 입력 신호의 차이를 증폭하는 차동증폭기의 증폭이득은 반전, 비반전 단의 저항과 부궤환 단 저항의 비율로 결정된다. 차동증폭기는 두 입력 신호에서 동상의 노이즈를 제거한다. 홀센서마다 조금씩 다른 출력특성을 보정하기 위해 가변저항을 사용하여 증폭이득을 조절할 수 있도록 설계하였다.[4]

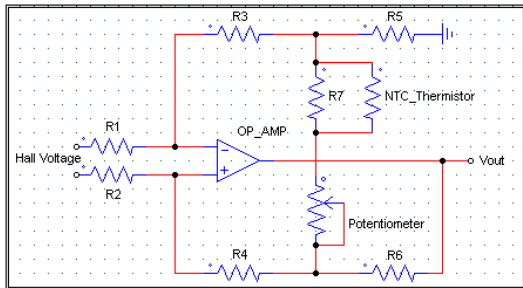


Fig. 7. Signal amplifier and Temperature compensator

### 2.3.4 온도보상부

홀센서는 온도가 증가함에 따라 출력이 감소하는 부 온도계수의 특성을 갖는다. 이를 보상하기 위해 온도가 상승하면 저항이 줄어드는 부특성 온도계수를 갖는 NTC (Negative Temperature Coefficient of Resistance) 서미스터를 이용한 온도보상 회로를 설계하였다. 서미스터는 Fig. 7의 차동증폭기에 연결되어 온도가 증가함에 따라 증폭이득을 증가시켜 감소하는 홀센서 출력전압의 영향을 보상한다. 일반적인 NTC 서미스터의 온도에 따른 저항특성은 식 (1)과 같다. 식에서  $R_0$ 는 상온  $T_0$ 에서 서미스터의 저항,  $R$ 은 온도  $T$ 에서 저항이고 상수  $B$ 는 서미스터의 온도에 따른 저항의 변화를 나타내는 값이다. 서미스터의 저항과 온도는 지수함수로 표현되므로 온도에 따라 저항의 변화가 급격하여 일반적으로 Fig. 7에 나와 있는  $R_T$ 과 같이 병렬로 저항을 연결하여 사용한다.

$$R = R_0 e^{-B\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)} \quad \text{식 (1)}$$

### 2.3.5 노이즈 제거부

전류측정기를 사용할 때 입력전원, 주변기기 등에서 노이즈가 유입될 수 있다. 이를 제거하기 위해 차단주파수가 50kHz인 R-C 저역통과필터(LPF)를 설계하였다. 필터의 주파수에 따른 동작특성은 Fig. 8에 나타낸 것과 같고 차단주파수 50kHz에서 출력전압이 3dB 감소한다. R-C 저역통과필터의 구조는 그림에 삽입된 회로와 같다.

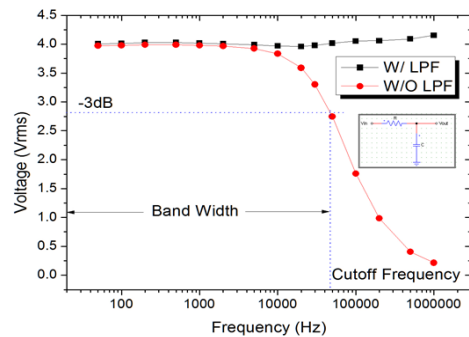


Fig. 8. Characteristics of the low pass filter (LPF)

### 3. 개방형 전류측정기 제작 및 실험

앞서 설명한 자성철심해석, 홀센서 선정, 회로설계 결과를 바탕으로 개방형 전류측정기를 제작하여 그 특성을 측정하였다. 먼저 DIP type의 소자를 이용하여 전류측정기를 제작하여 특성을 측정한 후 SMD type의 PCB로 전류측정기를 제작하여 특성을 측정하였다. 주요 측정항목은 직류전류 인가 시의 출력전압특성, 60Hz의 교류전류 인가 시 출력전압특성, -35~100℃의 온도에서 출력전압특성이다.

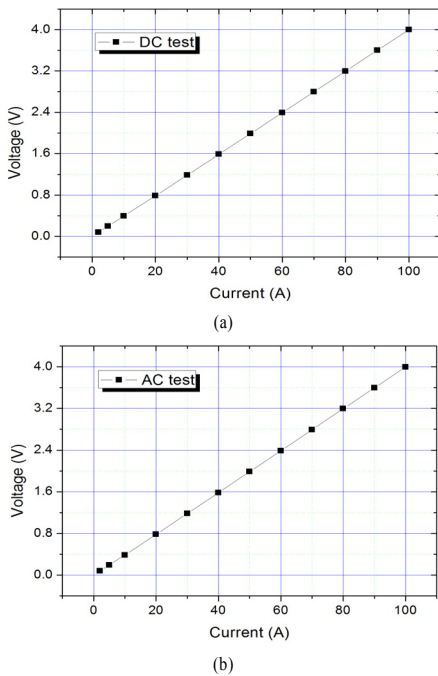


Fig. 9. DC and AC test of DIP type current sensor (a) DC test, (b) AC test

#### 3.1 DIP type

제작된 DIP type의 전류측정기에 직류전류를 통전하고 측정한 결과는 Fig. 9의 (a)와 같다. 직류 100A를 인가할 때 출력전압은 4V이고 정밀도 오차는 1.25%, 선형도 오차는 0.1% 이하이다. 60Hz의 교류전류를 통전하고 측정한 결과는 Fig. 9의 (b)와 같다. 측정된 정밀도 오차는 1.25%, 선형도 오차는 0.2% 이하로서 직류전류를 통전했을 때의 측정결과와 거의 차이가 없다.

전류측정기의 온도를 -35~100℃까지 변화시키며 출력전압을 측정하였다. 온도보상회로를 적용하기 전과 후

에 각각 출력전압을 측정하여 온도보상회로의 영향을 확인하였다.

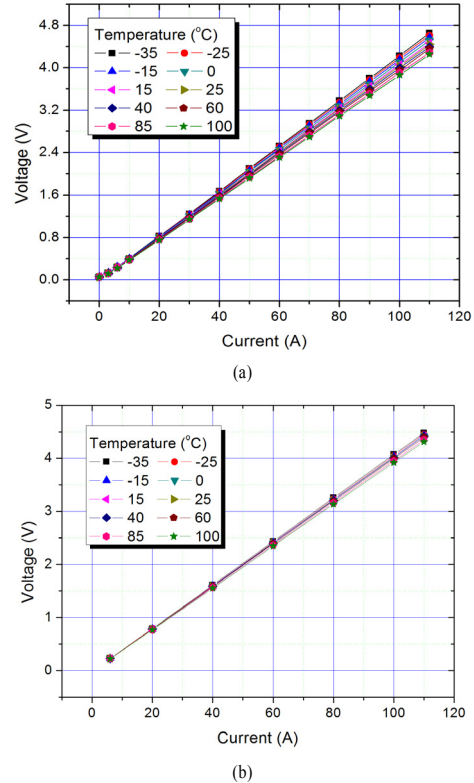


Fig. 10. Temperature variation vs. current (a) Without temperature compensator (b) With temperature compensator

온도보상회로가 없을 때의 출력전압 측정결과는 Fig. 10의 (a)와 같다. 출력전압은 전류가 100A이고 온도가 -35℃일 때 4.23V이고 온도가 100℃에서는 3.86V이다. 온도가 증가하면 출력전압이 감소하고 이는 홀센서의 부특성 온도계수의 영향이다. 온도보상회로를 적용했을 때의 실험결과는 Fig. 10의 (b)와 같다. -35℃에서 출력전압은 4.07V이고 100℃에서는 3.92V이다.

전류가 100A일 때 온도에 따른 출력전압의 오차를 Fig. 11에 나타내었다. 온도보상회로가 없을 때 -35~100℃의 온도범위에서 출력전압의 오차는 -4.2~4.8%이고 온도보상회로를 사용하였을 때의 출력전압의 오차는 -2.3~1.4%이다. 이 결과로 서미스터를 사용한 온도보상회로를 사용하였을 때 온도에 따른 출력전압의 변화가 크게 줄어든 것을 확인할 수 있다. 온도보상회로를 적용

하였을 때의 온도계수는  $0.03\%/^{\circ}\text{C}$  이하이다.

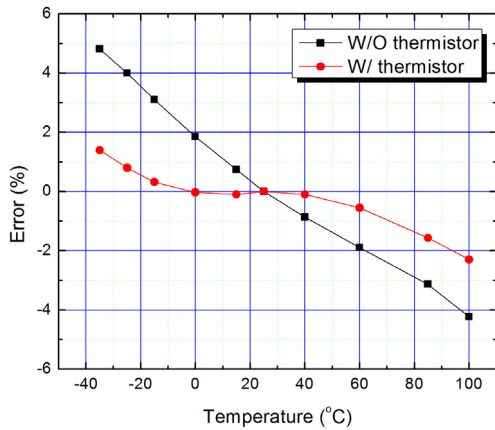


Fig. 11. Output error vs. temperature variation with or without thermistor at the DIP type current sensor

### 3.2 SMD type

전류센서를 개발하여 제품화하기 위해서는 SMD type의 PCB로 제작하여야 한다. 이를 위해서 개발된 전류센서를 SMD type의 PCB로 제작하였고 부품의 고정과 보호를 위한 케이스를 제작하였다. PCB, 철심, 케이스를 결합한 모습이 Fig. 12의 (a)와 같고 몰딩 후의 모습은 (b)와 같다.

제작된 전류측정기 중 3개를 골라 동일한 방법으로 출력전압을 측정하여 결과를 비교하였다.

직류전류가 흐를 때의 출력전압은 Fig. 13의 (a)와 같고 교류전류가 흐를 때의 결과는 (b)와 같다. 두 결과 모두 100A의 전류에서 4V에 매우 가까운 전압이 발생하였고 전류가 증가할 때 출력전압도 선형으로 증가한다. 실험결과를 바탕으로 계산한 전류측정기의 정밀도 오차는 1.25% 이하이고 선형도 오차는 0.13% 이하이다.

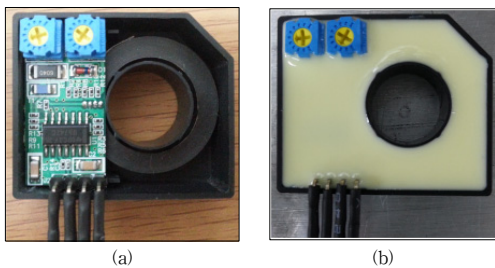
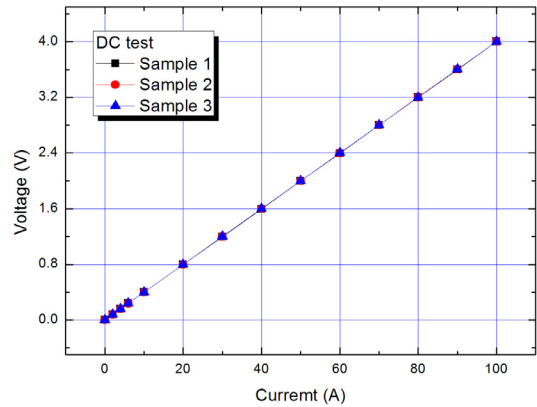
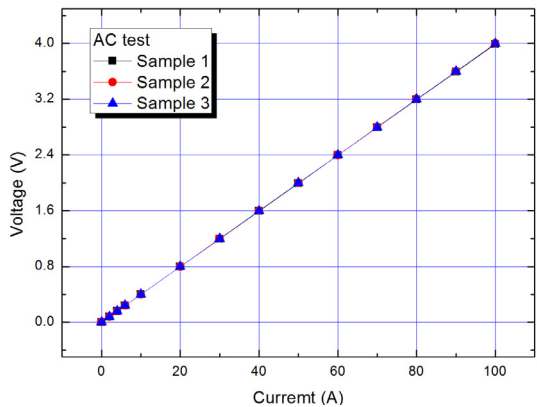


Fig. 12. Open-loop current sensor with SMD type (a) before molding, (b) after molding



(a)



(b)

Fig. 13. Output voltage at DC and AC current (a) DC current, (b) AC current

SMD type에서도 DIP type과 마찬가지로 온도에 따른 출력전압특성을 측정하였다. 전류측정기의 온도를  $-35\sim 100^{\circ}\text{C}$ 까지 변화시키면서, 온도보상회로를 적용하기 전과 후로 나누어 영향을 확인하였다. 출력전압을 측정한 결과는 Fig. 14와 같다. 온도보상회로가 없을 때  $-35\sim 100^{\circ}\text{C}$ 의 온도범위에서 출력전압의 오차는  $-8.5\sim 7.4\%$ 이고 온도보상회로를 사용했을 때는  $-7.0\sim 5.1\%$ 로 출력전압의 오차가 약간 감소하였다. 그러나 오차가 감소하는 정도는 DIP type에서의 오차가 감소하는 정도에는 미치지 못하였다.



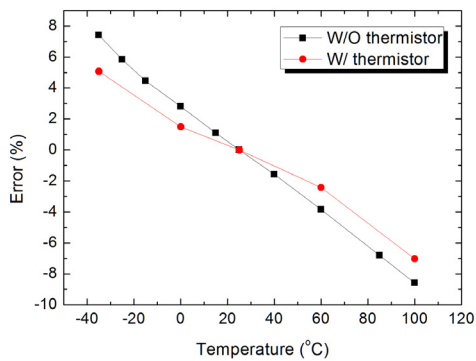


Fig. 14. Output error vs. temperature variation with or without thermistor at SMD type current sensor

#### 4. 결론

본 논문에서는 100A급의 개방형 전류측정기를 설계하고 제작해서 특성을 측정한 결과를 나타내었다. 개방형 전류측정기는 방향성 철심을 권철심 형태로 제작한 철심과 GaAs 계열의 홀센서를 사용하였고 차동증폭회로를 이용하여 홀센서의 출력전압을 증폭하였다. DIP type과 SMD type의 전류측정기를 제작하여 출력전압을 측정하고 결과 100A의 직류, 교류 전류에서 정밀도 오차 2% 이내, 선형도 오차 2% 이내의 성능을 만족하였다. 또한 부특성 온도계수 서미스터를 사용한 온도보상회로를 이용하여 -35~100°C의 범위에서 온도보상 효과를 확인하였다. 본 연구에서 얻은 결과는 국내에서 개방형 전류측정기를 개발할 때에 바로 활용될 수 있다.

#### References

- [1] Quan Zhang, Ji-Gou Liu, Yongcai Yang, "A new complementary symmetrical structure of using dual magnetic cores for open loop Hall-Effect current sensors," *PCIM Europe*, pp. 1904-1911, May, 2015.
- [2] Fu'an Li, Xiaobing Luo, Xingguo Cheng, Sheng Liu, "Impact of the winding area of enameled wire on packaging performance of a closed loop Hall effect current sensor," *IEEE Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, pp. 1631-1635, May, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ECTC.2012.6249055>
- [3] Edward Ramsden, "Hall-Effect Sensors," *Theory and Application*, pp. 35-57, Elsevier, 2006.
- [4] Thomas L. Floyd and David M. Buchla, "Electronic Fundamentals, Circuit," *Device and Applications*, pp. 845-884, Pearson, 2010.

#### 구 명 환(Ku-Myung Hwan)

[준회원]



- 2010년 2월 : 순천향대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2015년 2월 : 순천향대학교 전기공학과 (공학박사)
- 2015년 6월 ~ 현재 : 스태츠칩팩 코리아 개발부 책임연구원

<관심분야>

전기기계, 전자회로

#### 박 주 경(Ju-Gyeong Park)

[준회원]



- 2015년 2월 : 순천향대학교 전기공학과 (공학사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 전기공학과 (석사과정)

<관심분야>

전기기계, 전자회로

#### 차 귀 수(Guee-Soo Cha)

[정회원]



- 1987년 2월 : 서울대학교 전기공학과 (공학박사)
- 1987년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 전기공학과 교수

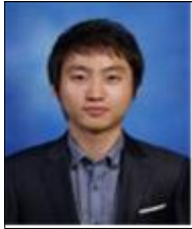
<관심분야>

전기기계, 에너지변환

---

**김 동 희(Dong-Hee Kim)**

[정회원]



- 2011년 3월 ~ 2013년 2월 : 공주대 대학원 융합신소재공학과 (공학석사)
- 2013년 7월 ~ 현재 : ㈜ 비전테크놀러지 주임연구원

<관심분야>  
재료 공학, 전기전자

---

**최 종 식(Jong-Sik Choi)**

[정회원]



- 1998년 2월 ~ 2006년 9월 : POSCO TMC
- 2012년 3월 ~ 2014년 2월 : 공주대 대학원 융합신소재공학과 (공학석사)
- 2007년 1월 ~ 현재 : ㈜ 비전테크놀러지 기술연구소장

<관심분야>  
금속 재료학