

## 홀소자와 자기코어를 이용한 하이브리드 및 전기자동차용 전류센서 제작

연교흠 · 김시동

(주)오토산업, 서울시 구로구 구로3동 235번지 한신IT타워 14층, 152-050

손대락\*

한남대학교 물리학과, 대전시 대덕구 오정동 133번지, 306-791

(2013년 3월 6일 받음, 2013년 4월 16일 최종수정본 받음, 2013년 4월 22일 게재확정)

전류센서는 하이브리드 및 전기자동차의 배터리 충·방전과 모터컨트롤러의 모니터링 시스템에 적용되는 중요한 부품이다. 본 연구에서는 자기코어의 공극에 홀센서를 위치시켜 측정전류에 의해 생성된 자기장을 감지하는 구조를 가진 open loop type의 전류센서를 개발하였다. 코어는 방향성규소강판을 사용하여 제작한 후 공극이 3 mm되게 절단하였다. 공극에서의 자기장 측정을 위하여 GaAs 홀센서를 적용하였다. 개발한 전류센서는 측정범위가  $-400 \sim +400$  A에서 선형도 0.03 %를 확보하였으며, 온도보상회로를 적용하여 동작온도영역인  $-40 \sim +105$  °C에서 전류센서의 온도특성을 향상시켰다. 전류센서의 동특성 향상을 위하여 공기자속을 제어하였다. 주파수대역폭 측정은  $40 \text{ A} \cdot \text{turn}$ , 100 Hz~100 kHz의 사인파형으로 측정하여 100 kHz의 대역폭을 갖는 것으로 평가되었으며, 반응속도는  $40 \text{ A} \cdot \text{turn}$ 의 5 kHz 구형파로 측정하여  $2 \mu\text{s}$  이하의 성능을 갖는 것으로 측정되었다.

주제어 : 전류센서, 인버터, 전기자동차, HEV, EV, Hall sensor

### I. 서 론

최근 지구환경 및 석유자원 고갈문제로 하이브리드 및 전기자동차 등과 같은 친환경자동차에 대한 관심이 커지고 있다. 기존 내연기관 중심에서 친환경차 중심으로 세계시장이 변화함에 따라 친환경차의 개발보급이 필요하다. 그 중 전기자동차는 자동차산업에 있어서 저탄소, 친환경, 자원절약 등 녹색성장전략에 부흥하는 중요한 부분을 차지하며, 미래의 자동차의 최종목표로써 독자적인 기술개발이 필요한 산업분야이다[1].

하이브리드 및 전기자동차는 구동모터, 인버터, 배터리 등으로 구성되며 각 구성부는 고전류로 운용된다. 따라서 이를 제어하는 시스템은 차량의 효율 향상과 안전을 위하여 전체 시스템을 실시간으로 모니터링 한다. 이를 위해 고전류 측정이 가능한 고성능의 전류센서가 적용된다. 전류센서는 구동모터, 인버터, 배터리 제어시스템에 적용되어 운용 전류의 크기 및 파형을 상시 모니터링 하는 핵심 전장부품이다. 일반적으로 전류센서는 크게 shunt, CT와 Hall sensor 및 자기코어를 사용하는 open loop type, close loop type의 네 가지로 나뉜다[2]. Shunt 방식의 전류센서는 절연문제, 전선과 shunt

접점부의 허용전력 등의 문제가 있으며, CT 방식의 전류센서는 직류전류를 측정하지 못하여, 자동차용 모터의 경우 효율 향상을 위하여 PWM(Pulse Width Modulation) 방식으로 모터를 제어하기 때문에 적용이 어려운 실정이다[3, 4]. 따라서 홀센서를 이용한 open loop type과 close loop type의 전류센서가 하이브리드 및 전기자동차에 적용되고 있으며, 이중 open loop type의 전류센서는 close loop type의 전류센서에 비해 가격이 저렴하여, 하이브리드 및 전기자동차에 많이 적용되고 있다.

전기자동차의 핵심은 고효율이며 이를 위해서 차량의 중량이 감소되어야 하므로 모터의 무게를 낮추기 위하여 제어주파수가 수십 kHz 이상으로 높아지고 있는 추세이며 이를 측정하는 전류센서의 측정 주파수대역은 수백 kHz 이상 확보되어야 한다.

본 연구에서는 출력 선형도 특성이 우수하며, 응답속도가 빠르고, 측정주파수 대역이 높은 open loop type 전류센서에 관한 연구를 하였다.

### II. 전류센서의 제작

본 연구에서 개발한 open loop type 전류센서 구조는 Fig. 1과 같이 링코어에 공극을 내고 공극 내에 홀소자를 위치시켜 Ampere의 법칙에 의하여 피측정 전류에 의하여 발생하는 자

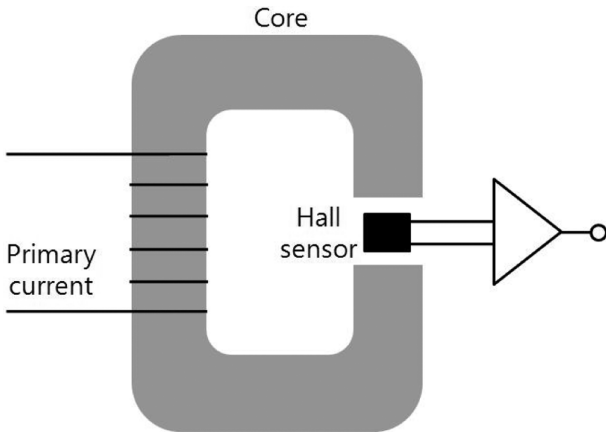


Fig. 1. Structure of open loop type current sensor with magnetic core, hall sensor and primary winding.

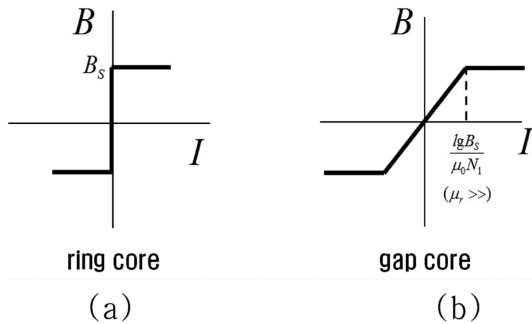


Fig. 2. Principle of the current sensor. (a) close loop and (b) open loop magnetic circuit.

기장을 코어를 사용하여 공극에 자기장을 발생시켜서 이 자기장을 홀소자를 이용하여 측정함으로써 피측정 전류를 측정하게 된다.

Fig. 2는 센서의 원리를 나타낸 것으로, Fig. 2(a)와 같은 자기이력곡선을 갖는 링코어에 공극을 만들면 Fig. 2(b)와 같이 되며 포화자속밀도에 도달하는 전류  $I_S$ 는 다음과 같다.

$$I_S = k \frac{B_S}{\mu_0 N_1} l_g \quad (1)$$

- $I_S$ : 코어가 포화자속밀도에 다다른 전류, A
- $k$ : 비례상수
- $l_g$ : 코어 공극의 길이, m
- $B_S$ : 포화자속밀도, T
- $\mu_0$ : 투자율, H/m
- $N_1$ : 권선수

여기서 코어부분에서의 자기저항은 무시하였으며,  $k$ 는 공극에서의 누설자속과 불균일한 자기장분포에 의한 비례상수이다. 따라서  $I_S$ 가 전류의 측정범위가 되고, 이는 공극에 비례하게

된다.

전류센서의 주요사양은 일반적으로 선형도와 반응속도 및 주파수대역이 요구되나 차량의 경우 온도환경이 중요하기 때문에  $-40 \sim +105^\circ\text{C}$ 의 동작온도 특성을 가져야 한다. 전류센서의 선형도는 Fig. 2(b)의 자기이력곡선에서 B-I 곡선의 선형도와 관계가 있기 때문에, 본 연구에서는 HGO급의 방향성규소강판(M90-23P 5)을 선택하였으며, 두께가 0.23 mm인 전기강판을 폭이 10 mm되게 슬리팅하여 두께가 3 mm가 되게 권취를 한 후  $800^\circ\text{C}$ 의 비산화성 분위기에서 1시간 열처리 한 후 몰딩을 한 다음 3 mm 공극을 만들었다.

홀센서는 GaAs 계열의 HG-302A를 적용하였다. 일반적으로 GaAs 홀센서는 온도계수가 작고 주파수특성이 좋으며, 고자기장까지 측정이 가능하다.

하이브리드 및 전기자동차에서 요구하는 사양에 적합한 출력특성을 확보하고자 최소전류에서 최대측정전류의 측정 범위에서 전류센서의 출력이 0.5~4.5 V까지 변화되도록 설계하였으며, 온도보상회로를 설계 및 반영함으로써 차량의 운용환경에 적합한 출력특성을 갖는 전류센서를 제작하였다.

인버터는 PWM 형태로 구동이 되며, 이를 모니터링 하기 위해서는 전류센서의 주파수특성과 반응속도가 중요하다. 제작한 전류센서는 연산증폭기를 이용하여 홀전압을 30배 증폭하도록 설계되었다. 홀센서의 출력핀이나 PCB상에서 연산증폭기 입력 측의 패턴이 페루프를 형성하게 되면, 페루프에 의해서 공기자속이 형성되고, Faraday의 전자기 유도법칙에 의해서 기전력이 발생된다. 이 기전력은 홀센서의 출력신호와 더해져 증폭이 되어 주파수대역폭 특성을 나쁘게 한다. 이를

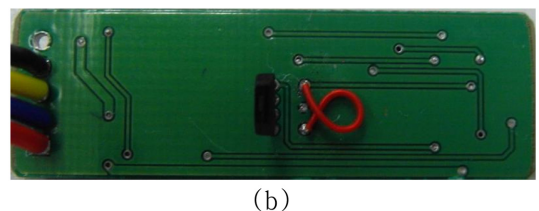
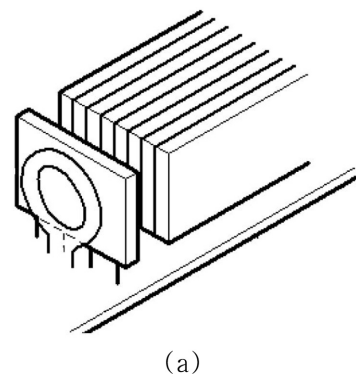


Fig. 3. (Color online) The air flux compensation wire; (a) near Hall sensor, (b) on PCB.

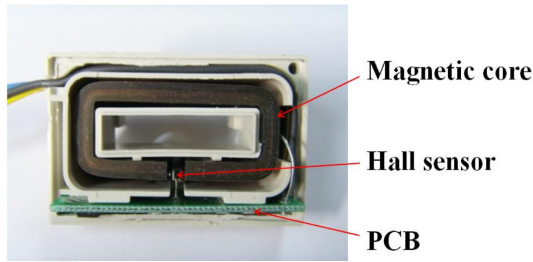


Fig. 4. (Color online) Internal structure of developed current sensor.

개선하기 위하여 Fig. 3과 같이 구조물을 장착하여 공기자속을 상쇄시킴으로써 전류센서의 주파수대역 특성을 개선하였다[5].

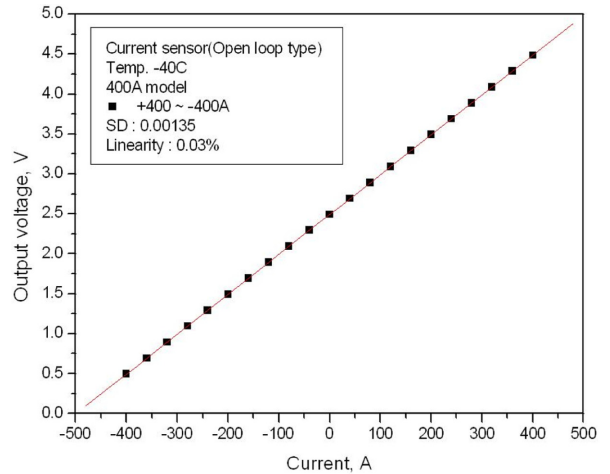
DC 출력 특성인 선형도 시험을 위하여 10 kW 급의 고용량의 전원공급장치와 전기부하를 구성하여 -400~+400 A의 대전류 운용이 가능하도록 하였으며, 0.05 %, 1000 A shunt를 적용하여 측정 전류의 정확도를 확보하였다.

주요 지표항목인 동특성은 측정 가능한 주파수대역과 반응속도로 구분되며 동특성 측정을 위하여 800 kHz 출력의 전력증폭기와 인덕턴스가 유도되지 않는 shunt를 이용하였다. 측정주파수를 100 Hz~100 kHz로 변화시키면서 40 A·turn의 전류를 인가하여, 측정전류 대비 센서의 출력전압 변화율을 측정하였으며, 반응속도는 5 kHz, 40 A·turn의 구형파를 인가하여 측정전류와 센서 출력전압 간 도달 시간의 시간차를 측정하였다.

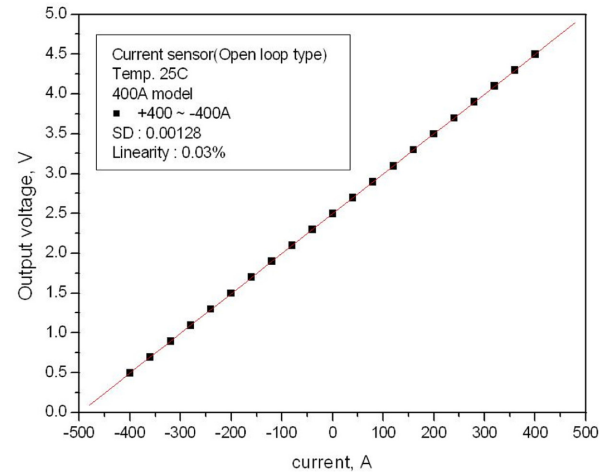
### III. 센서 특성 측정

Fig. 5는 온도에 따른 선형도 특성을 보여준다. 자동차에서 요구하는 전류센서의 동작온도 영역은 -40~+105 °C이며, -400~+400 A의 직류전류를 인가하여 센서의 선형도를 측정하였다. 측정 결과 측정온도영역 전 구간에서 0.03 %의 선형도를 유지하는 것으로 나타났다.

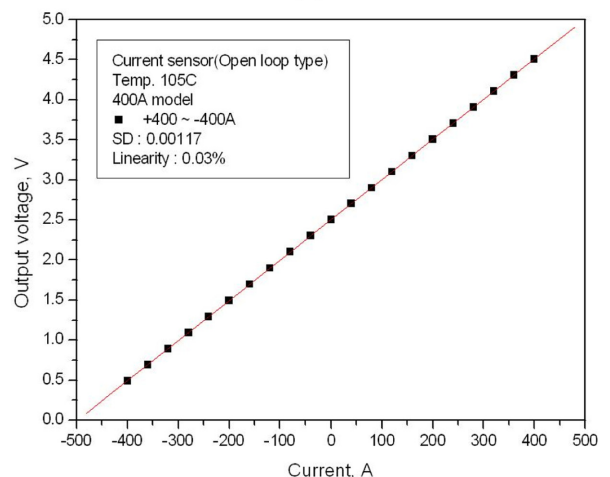
반면 온도가 증가함에 따라 전류센서의 민감도가 감소하는 경향을 보이는데, 이는 온도 변화 시 홀센서의 민감도가 감소하여 전류센서의 민감도가 낮아지기 때문이다. 온도보상회로를 적용하기 전의 전류센서 민감도변화는 -0.649(mV/A)/°C이며, 자기장의 세기를 일정하게 유지하고 측정온도를 -40~+105 °C으로 변화를 주면 홀센서의 온도특성에 따라 홀전압의 감소가 나타난다. 따라서 +0.5(mV/A)/°C의 온도특성을 갖는 Zener 다이오드를 사용한 회로를 구성하여 홀센서에 인가되는 전류를 보상함으로써, 동작온도 내에서 전류센서의 출력전압 변화율을 최소화하였다. Fig. 6는 온도보상회로를 적용한 전류센서의 민감도 변화를 나타내며 동작 온도 내에서 전류센서 민감도 변화는 -0.155(mV/A)/°C로 측정되었다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 5. (Color online) Linearity of current sensor at different temperature; (a) -40 °C, (b) +25 °C, and (c) +105 °C.

Fig. 7(a)는 공기자속에 의한 전류센서의 주파수대역폭 특성을 나타낸다. 공기자속에 의해 전류센서의 주파수대역폭 특

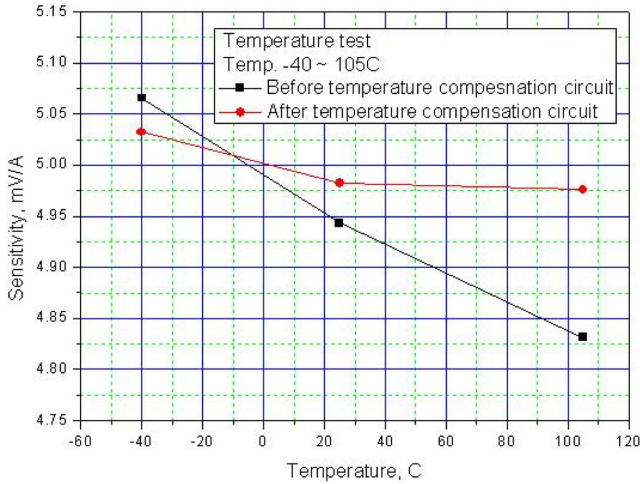
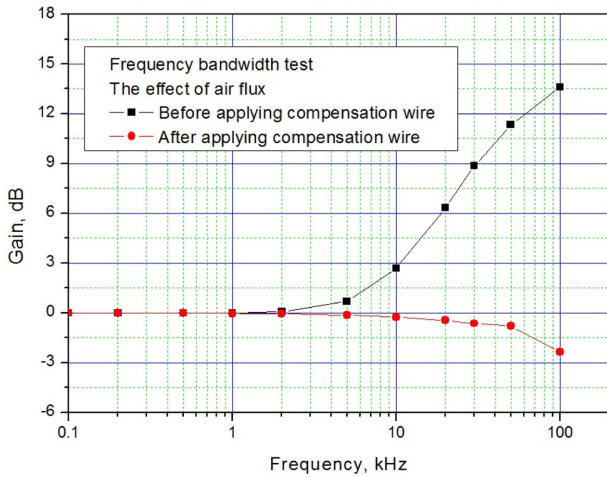
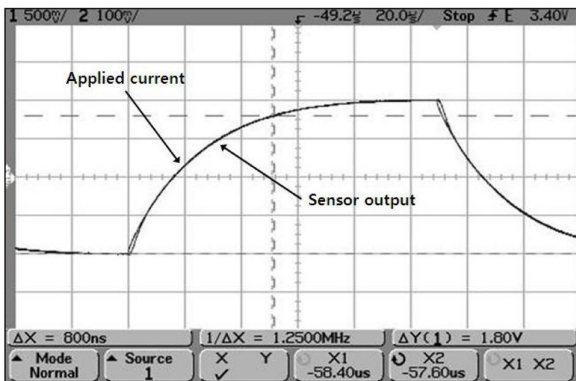


Fig. 6. (Color online) The sensitivity change of current sensor after temperature compensation circuit.



(a)



(b)

Fig. 7. (Color online) Dynamic characters of the developed sensor; (a) Frequency bandwidth (b) response time.

성이 나쁘게 되는데, compensation wire를 이용하여 공기자속을 적절하게 제어함으로써 전류센서의 주파수대역 특성을 개선할 수 있었다. Compensation wire를 적용하여 개발한 전류센서의 주파수대역폭 측정 결과로써 100 kHz(cut off, -3 dB)의 대역을 갖는 것으로 측정되었다. 주파수 특성이 개선됨에 전류센서의 반응속도도 향상되는 결과를 가져왔으며, 40 A · turn의 5 kHz 구형파로 측정시 측정전류 최대값의 90 % 영역에 도달하는 전류센서의 출력전압의 반응속도는 2 μs 이하였다(Fig. 7(b)).

#### IV. 결 론

본 연구에서는 HGO급의 방향성규소강판과 GaAs 홀센서를 이용하여 하이브리드 및 전기자동차용 전류센서를 개발하였다.

측정하고자 하는 전류 및 자기장의 세기와 전기적 특성을 고려하여 홀센서를 선정하였고, 측정전류범위에서의 선형성을 고려하여 코어를 설계 및 제작하였다. 온도보상회로를 설계 및 적용하여 동작온도 구간에서의 환경 신뢰성을 확보하였다. 하이브리드 및 전기자동차의 운용환경을 고려하여 PWM 제어에 용이하도록 air flux를 제어하여 전류센서의 주파수특성과 반응속도를 향상시켰다. 개발한 전류센서의 동작온도 범위 내에서 선형도는 0.03 %이며, 주파수특성 100 kHz, 반응속도 2 μs로 평가되었다.

#### 감사의 글

이 논문은 울산광역시와 교육과학기술부에 의해 투자된 울산과학연구단지 연구개발의 지원으로 수행하였습니다.

#### 참고문헌

- [1] 권태석, 이현동, 전력전자학회지 **14**, 28 (2009).
- [2] J. G. Webster, "Measurement, Instrumentation and Sensors", IEEE press (1999) pp. 38-1~18.
- [3] R. Boll and K. J. Overshott, Sensors **5** "Magnetic sensors", VCH (1991) pp. 76~81.
- [4] 박영태, 정재갑, 한국자기학회지 **15**, 49 (2005).
- [5] 김시동, 손대락, 연교흠, 대한민국특허청, 10-1131997 (2012).

## Construction of Current Sensor Using Hall Sensor and Magnetic Core for the Electric and Hybrid Vehicle

**Kyoheum Yeon and Sidong Kim**

*Auto Co. 14F Hanshin IT Tower, Guro-dong 235 Guro-gu, Seoul 152-050, Korea*

**Derac Son\***

*Dept. of Physics, Hannam University, Ojeong-dong 133 Daedeok-gu, Daejeon 306-791, Korea*

(Received 6 March 2013, Received in final form 16 April, 2013, Accepted 22 April 2013)

A current sensor is one of important component which is used for the electrical current measurement during charge and discharge of the battery, and monitoring system of the motor controller in the electric and hybrid vehicle. In this study, we have developed an open loop type current sensor using GaAs Hall sensor and magnetic core has an air gap. The Hall sensor detect magnetic field produced by the current to be measured. The 3 mm air gap core was made by HGO electrical steel sheets after slitting, winding, annealing, molding, and cutting. Developed current sensor shows 0.03 % linearity within DC current range from -400 A to +400 A. Operating temperature range was extended to the range of -40~105 °C using temperature compensating electronic circuit. To Improve frequency bandwidth limit due to the air flux of PCB (Printed Circuit Board) and Hall sensor, We employed an air flux compensating loop near Hall sensor or on PCB. Frequency bandwidth of the sensor was 100 kHz when we applied sine wave current of 40 A · turn in the frequency range from 100 Hz to 100 kHz. For the dynamic response time measurement, 5 kHz square wave current of 40 A · turn was applied to the sensor. Response time was calculated time reach to 90 % of saturation value and smaller than 2  $\mu$ s.

**Key words :** Current sensor, Inverter, Electric vehicle, HEV, EV Hall sensor