

클램프 형 직교류 저 전류 측정 센서

A Clamp Type Sensor for AC/DC Low Current Measurement

박영태*, 유광민**

(Young-Tae Park* and Kwang-Min Yu**)

Abstract

This paper describes characteristics of the developed current sensor by means of two identically wound magnetic cores forming a clamp like for measurement of a low DC, or AC current. This sensor consists of peak value detectors, a sensor of an electrically compensated current transformer type, a reference alternating voltage, precision measuring circuits to measure the output signals of sensor with harmonics, and can be measured up to 2 A at DC, or AC current. The current sensor shows a measurement accuracy of less than 0.3 % in the frequency range 40 Hz - 10 kHz. The resolution and sensitivity of the sensor were evaluated 0.1 mA and 10 mV/mA, respectively.

Key Words : Peak value detector, An electrically compensated current transformer, Reference alternating voltage, Harmonics

1. 서 론

도선을 흘러가는 전류를 측정하기 위하여 여러 형태의 전류측정 센서가 오래 전부터 사용되었다. 특히 클램프형 전류센서는 도선을 절단하지 않고 측정하는 장점이 있으므로 모터, 인버터, 전력변환기 등의 전류를 측정하는데 광범위하게 사용되고 있다. 최근 들어 사용되는 부하의 기능들이 교류뿐만 아니라 직류전류를 동시에 측정하는 경우가 많이 있고 자동차 엔진 및 전기 기기의 누설전류와 같은 저 전류를 정밀하게 측정해야 할 필요가 생겼다. 대부분의 클램프형 직류 교류전류 측정기는 홀 소자를 이용하여 측정되고 있다[1].

홀 소자를 이용할 경우 온도 특성이 나쁘며 저

전류 측정에는 선형도가 떨어지는 단점을 가지고 있다. 근래에는 홀 소자에 비하여 주위 온도 변화에 강하고 측정감도가 우수한 자기센서가 부분적으로 전류측정 소자로 사용되고 있다[2,3]. 홀 센서 이외의 자기저항을 이용한 센서 역시 강한 바이어스 자기장이 필요하며, 우수한 측정 감도에 비해 측정 범위가 좁고 바이어스 전류의 주파수가 수백 kHz에서 수 MHz를 요구하기 때문에 아직 실용화는 어려우며 현재 많이 연구되고 있는 단계에 있어 아직까지 클램프형의 휴대용 기기로 상용화하는데 어려움이 있다. 고전적 방법으로 인식되고 있는 CT(current transformer) 형의 교류와 직류를 측정하는 클램프 미터는 대부분 대 전류 측정용으로 사용된다[4-6].

일반적으로 계기용 CT는 교류를 정밀하게 측정하는 소자이며 형태가 크고 대개 실험실이나 정밀 전류측정용 계측기에 사용된다. 직류전류를 측정하기 위하여 변압기형으로 사용할 경우 자성체 코어의 비 선형 특성을 이용한다. 자성체 코어의 비 만들어 측정하는 zero-flux CT를 사용한다[7]. 이

* : 한국표준과학연구원 전자기표준부 전기자기그룹
(대전광역시 유성구 도룡동 1번지)
Fax: 042-868-5018
E-mail : pyt@kriss.re.kr

** : 한국표준과학연구원 전자기표준부 전기자기그룹
2002년 7월 4일 접수, 2002년 8월 12일 1차 심사완료,
2002년 9월 12일 최종 심사완료

방법의 단점은 자화전류가 비대칭일 때 출력을 zero 만들기 위하여 안정된 전압 원과 첨예한 대역 필터가 사용되는데 이러한 필터를 만들기는 어렵고 사용 부품의 성능이 우수해야하므로 사용이 간단한 휴대용(hand-held type)으로 제작하기에는 어려움이 있다. 그리고 교류와 직류 저 전류를 감지하는 CT가 on-off되는 클램프형이 아니고 트로이덜형이기 때문에 CT에 사용되는 자성체 코어를 자기포화 시키는데는 어렵지 않으나 on-off되는 클램프형에서는 코어를 자기포화 시키기에는 매우 어렵고 많은 포화전류가 필요하다. 또 교류신호를 발생시키는 변조기의 변조 신호는 전자회로와 자성체 코어의 주파수 특성을 고려해야하기 때문에 수백 Hz미만으로 동작시켜야 한다. 이 때문에 높은 주파수의 교류전류 측정은 불가능하다. 자기포화는 자성체 코어의 재질과 교류신호를 발생시키는 변조기의 진폭, 그리고 주파수에 의존한다. 배터리로 동작하는 휴대용으로 제작해야하므로 센서를 포화시키는 전류와 회로에서 소비되는 소비전류의 최소화, 경제성을 생각한 저가의 전자부품 사용, 그리고 회로의 소형화 등과 같은 많은 제약을 해결해야 한다.

본 연구에서는 중간이 분리된 동일한 2개의 클램프 형 자성체 코어를 사용하여 교류전류와 직류전류를 감지할 수 있는 전류센서를 개발하고 신호회로와 함께 휴대용의 저 전류 측정용 클램프 미터를 개발하였다. 교류전류 측정의 경우 종래에 많이 사용하던 zero-flux CT 방법에서 교류신호를 발생시키는 변조기의 변조 신호를 사용하지 않고 절환 스위치를 통하여 2단 CT(2stage current transformer)[8-12] 형태를 이용하고, 이 형태에 전자회로를 부가하여 정확도를 높였다. 직류전류의 경우 기준교류전압원으로 제작된 변조기의 자화전류와 함께 변조된 출력전류로부터 측정하였다. 특히 직류의 경우 자화 전류가 비대칭일 때 출력을 zero로 만들기 위하여 사용하는 필터대신 쌍으로 된 2개의 피크검출기(peak value detector), CT 형의 센서, 기준교류전압원으로 제작된 변조기와 동기된 신호를 이용하여 많은 고조파가 함유된 신호의 정밀측정 회로개발, 및 소비전류의 최소화 회로를 개발하였다. 이와 같이 센서와 전자회로의 소형화를 통하여 교류/직류 저 전류 측정용 휴대용 클램프 미터의 제작을 용이하게 하였다. 이 클램프 미터는 2 A 미만의 직류, 교류전류를 측정하는데 사용하고자 한다. 교류 측정 전류의 주파수는 40 Hz에서부터 10 kHz에서의 측정이 가능하며 분해

능은 0.1 mA, 감도 10 mV/mA의 특성을 가지고 있다.

2. 센서 및 회로구성

2.1 전류측정 센서의 구성

전류 측정 센서는 반이 잘려진 트로이덜 형태의 두 쌍으로 구성되어 있다. 1차 코일과 2차 코일들이 감겨진 자성체 코어가 대칭으로 그림 1과 같은 형태로 이루어져 있다.

T1, T2는 자성체 코어를 나타내고 W1은 측정하고자 하는 전류의 권선인 1차측 권선을 나타내며 권선 수는 1회이다. 자성체 코어 T1에 감겨진 권선 W3과 자성체 코어 T2에 감겨진 권선 W4는

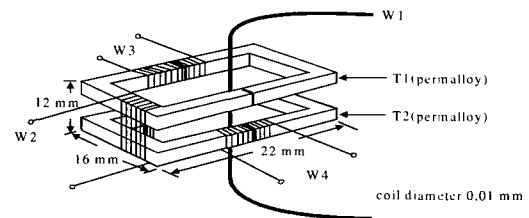


그림 1. 센서의 구조.

Fig. 1. Structure of the sensor.

T1, T2의 코어를 겹쳐 동시에 코일을 감은 W2와 함께 2차측 권선으로 구성된다. 이때 2차 측 권선 수는 모두 동일하게 감는다. 권선 수는 코어의 투자율에 따라 다르지만 여기에서는 200회를 감았다. 그림 2는 직류전류와 교류전류를 측정할 때 동일한 센서로 동작되는 자성체 코어의 권선 모양과 신호 처리 회로의 연결 위치를 나타내었다.

2.2 직류전류 측정 센서

직류전류 측정 센서는 동일한 형태의 두 쌍으로 이루어진 코어가 대칭으로 포화된 상태에서 zero 출력을 유지하다가 직류전류가 W1으로부터 공급되면 이 전류에 비례하는 값으로 나타난다. 그림 2(a)는 센서를 구성하고 있는 코어와 권선 형태를 나타내었다. 두 코어의 재료는 퍼멀로이를 사용하였으며 사각에 가까운 히스테리시스 특성을 가지고 있다. 권선 W3과 W4에 자화전류를 발생시키기 위하여 변조기, G1의 교류 변조신호를 공급한다.

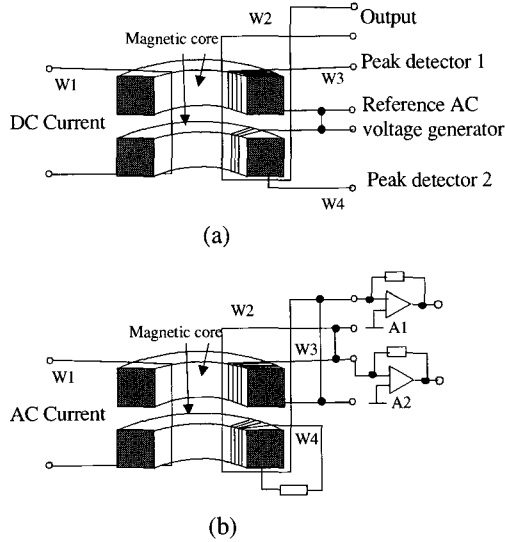


그림 2. 전류측정 시 권선의 결선 (a) 직류전류, (b) 교류전류.

Fig. 2. Connections of winding for the current measurement (a) DC current, (b) AC current.

변조신호는 안정된 기준교류전압원으로써 양 쪽 권선 W3, W4의 한 쪽에 같이 연결되어 있다. 두 코어에서 발생하는 자속은 변조기의 기준교류전압원에서 공급하는 자화전류의 크기와 주파수에 따라 달라진다. 코어에 연결된 기준교류전압원에 의하여 발생하는 변조전류는 양 코어가 동일한 특성을 가지고 있기 때문에 변조전류에 의하여 유도된 전류는 상쇄되어 측정에는 영향을 미치지 못하는 것이다. 기준교류전압원에서 발생하는 변조 신호는 순수한 사인파를 사용하거나 사각파를 사용하는데 여기에서는 사각파를 사용하였다. 권선 W2 양단에 발생하는 전압의 크기와 극성은 코어의 포화상태와 입력 직류전류의 방향에 따라 바뀐다. 그림 3은 직류전류를 측정하는 자세한 원리를 나타내었다. 직류전류가 코일 W1을 통하여 a에서 b로 흐른다고 하면 사각파를 발생하고 있는 G1의 신호에 의해 자성체 코어 T1과 T2는 측정 직류전류 흐름의 방향에 따라 그림 3 (b)와 (c)에 나타낸 히스테리시스 곡선과 같은 특성을 나타낸다. 즉, 직류전류 흐름의 방향과 같은 방향일 경우 그림 3 (c)와 같은 특성을 가지며, 반대 방향일 경우 그림

3(b)와 같은 히스테리시스 곡선 특성을 가진다. 그림 3(b)의 중간에 나타낸 점선 형태의 그림은 측정 전류인 직류전류가 없을 때 기준교류전압원 G1의 신호에 의하여 W3과 W4의 코일을 통하여 R1과 R2에 나타나는 신호 형태를 나타내었다. 이때 W1를 통하여 측정 직류전류가 공급되면 공급의 방향과 같은 T1의 자화 형태는 그림 3 (c)의 형태를 가지게 되며 직류전류의 방향과 반대인 T2의 자화 형태는 그림 3(b)에 나타낸 실선 모양을 가지지만 피크검출기 출력 값이 줄어든다. 따라서 부하저항 R1과 R2에 나타나는 신호의 크기는 비대칭을 이루며 비대칭의 크기는 측정 직류전류의 크기에 비례한다.

직류 입력전류가 W1를 통하여 공급되면 G1에 의하여 공급되는 전류에 의해 한쪽 코어에서 가파른 포화 방향으로 기울어지는 자화곡선과 함께 자화전류는 갑자기 코어의 포화지역에서 증가하게 되는데 이것은 2차 권선의 자기유도가 급격히 떨어지는 현상으로 나타나기 때문이다. 만약 자화전류가 대칭이라면 정(+)과 부(-)의 주기는 동일한 모양을 가진다. 반주기의 피크값 정류와 이론적으로 정류된 신호의 합이 대칭일 경우 피크검출기 출력신호는 zero가 된다. 그러나 자화전류가 대칭이 아닐 경우, 반주기 동안의 정류된 신호와 합에 의한 출력 신호는 zero가 되지 않는다. 출력신호의 극성과 크기는 자화의 크기와 방향에 대응된다.

기준교류전압원에 의하여 발생하는 비대칭 자화전류는 피크 검출기를 사용하여 검출한다. 부하저항 R1과 R2에 나타나는 신호는 사인파나 사각파가 아닌 고조파가 함유된 왜곡된 신호이므로 일반적인 방법으로 측정하면 큰 오차를 일으킨다. 이러한 오차를 줄이기 위하여 R1과 R2에 나타나는 신호의 피크값을 측정 후, 두 신호의 차를 피드백 권선인 W2로 공급하여 측정하는 방법을 사용한다. 그림 3(b)와 (c)의 마지막 그림 파형은 각각의 피크 검출기의 출력 파형을 나타내었다.

피크 검출기의 사용은 고조파를 검출하는 데 장점을 가지고 있다. 그리고 고조파 뿐만 아니고 기준교류전압원과 함께 발생하는 자신의 자화전류가 대칭을 통하여 상쇄된다. 이것은 정확하게 사인파, 혹은 사각파 모양의 기준교류전압원을 얻기 위하여 저가의 밴드 필터, 동기 정류기와 부가의 회로를 사용할 수 있다는 의미이다. 그러나 피크 검출기와 함께 사용된 회로의 단점은 실제로 순수하게 대칭 자화전류의 경우에도 항상 기준교류전

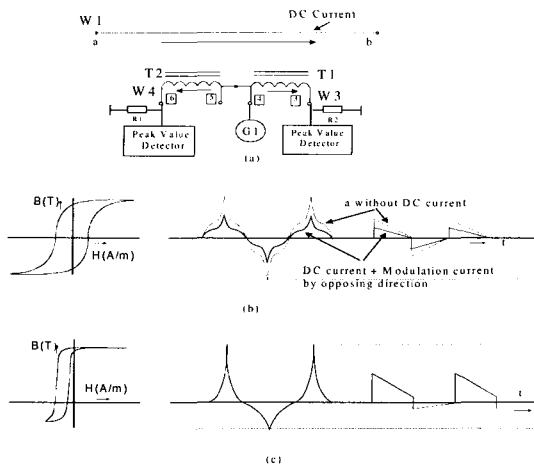


그림 3. 직류전류의 측정원리. (a) 측정전류와 변조전류의 방향, (b) 측정전류가 없을 때와 반대 방향의 변조전류에 의한 자화전류, (c) 측정전류가 있을 때와 같은 방향의 변조전류에 의한 자화전류.

Fig. 3. Principle of the DC current measurement. (a) Direction of the DC current and the modulation current (b) Magnetized current by a without DC current and opposing direction of a modulation current (c) Magnetized current by a DC current and the same direction of a modulation current.

압원의 주파수와 동일한 주파수를 가진 리플 전압이 발생된다. 이 리플 전압의 크기는 회로의 응답 시간에 의하여 결정된다. 빠른 응답 특성을 얻기 위하여 피크 검출기는 가능한 작은 시정 수를 가져야 한다. 이것은 피크 검출기에 저장되는, 그리고 자화전류의 피크값에 비례하는 전하가 상대적으로 급히 방전되어야 함을 의미한다. 그러나 이것은 출력에 리플을 증가시키는 결과를 가져온다.

기준교류전압원에 의하여 발생하는 비대칭 자화전류와 출력에 나타나는 리플 전압을 개선하기 위하여 W3의 출력에 2개의 피크 검출기를 사용하였다. 한 주기 동안 정(+)과 부(-)의 신호를 각각 2개의 피크 검출기에 공급하고 검출기의 출력신호를 합하여 차동 증폭기의 한쪽 입력신호로 사용한다. W4의 출력도 같은 방법을 통하여 차동 증폭기의 다른 한쪽 입력신호로 사용한다.

대칭 자화전류와 함께 2개의 피크 검출기의 출력신호는 정확하게 동일하면 이들 신호의 차 신호

에는 어떠한 리플도 포함되지 않는다. 1차 권선에 유도되는 전류를 제거하기 위하여 두 개의 코어는 기준교류전압원에 의하여 반대 방향으로 자화되거나 이 코어들을 통과하는 자화전류, 혹은 2개의 피크 검출기의 출력신호가 180° 까지 상호간에 위상변이를 일으킨다.

2개의 피크 검출기의 출력신호는 차동 증폭기에서 차를 검출하여 이 신호를 다시 트랜지스터를 사용한 전류 증폭기에서 증폭한 후 권선 W2에 피드백되어 공급된다. W2에 공급된 전류는 1차 권선에 공급되는 측정 직류전류에 비례한 전류가 흐르며 부하저항을 통하여 측정 직류전류에 비례한 전압으로 측정된다.

2.3 교류전류측정 센서

일반적으로 교류전류를 측정할 때 CT를 사용하는데 측정전류가 1차 코일을 통하여 자성체 코어를 통과하면 전류의 일부분은 코어를 자화시키는데 사용될 뿐만 아니고 철손과 같은 손실들이 발생되고, 2차 전류는 1차에 공급된 양보다 권선수에 비례하는 작은 값을 출력하게 된다. 또 2차 측에 사용되는 burden의 저항 값에 따라 2차 측 코일의 내부 임피던스에서 발생하는 전압에 영향을 미쳐 오차를 일으키는 원인이 된다. CT의 오차 원인은 대부분 자화전류와 권선 결선의 정전용량에 의한 전류, 그리고 burden의 저항 값에 따른 2차 코일 내부전압 때문인 것으로 알려져 있다. 특히 낮은 주파수에서는 자화전류에 의하여 오차가 발생하고 높은 주파수에서는 정전용량 전류에 의해서 발생된다. 자화전류를 줄이기 위해 투자율이 크고 면적이 큰 자성재료의 코어를 사용하거나 권선의 수를 많이 하면 된다. 그러나 이 경우 권선 면적과 정전용량을 증가시켜 정전용량에 의한 전류가 흐르게 된다. 전력 주파수에서는 정전용량 전류에 의한 오차보다 자화전류에 의한 오차가 주원인이 된다. 또한 경제적, 실용적인 면과 소형 클램프형이 요구되는 곳에서는 코어의 크기가 제한되는 경우가 많다.

자화전류와 정전용량에 의한 오차를 줄이기 위하여 초기 투자율이 높은 코어를 사용하는 동시에 2단 CT로 구성하여 사용하였다. 또 burden의 영향을 줄이기 위하여 2차 권선 수를 줄이면서 출력을 2개의 전류 증폭기를 사용하여 2차 코일의 내부임피던스에 의한 영향을 줄였다.

그림 2(b)에 교류전류 측정센서를 구성하고 있는

코어와 권선 형태를 나타내었다. 권선 W2와 W3의 양쪽을 각각 같이 연결하고 2개의 전자증폭기 A1과 A2의 입력에 연결하였다. 이들의 출력을 합한 교류전압을 실효치 직류전압으로 변환시키는 true rms converter를 통하여 측정 입력교류전류에 비례하는 값으로 읽는다. 동일한 센서를 사용하여 교류전류와 직류전류를 측정해야하므로 교류전류를 측정할 때 T2의 코어에 감긴 W4는 사용하지 않는다. 그러나 W4의 코일 내부 임피던스에 의해 코일 양단에 전압이 발생하여 측정 오차를 일으킨다. 이것을 방지하기 위하여 적절한 보상 burden을 사용하여 코일 양단 전압을 상쇄 시켰다. 교류전압으로 변환된 교류전류는 true rms converter를 통하여 직류 값으로 변환되어 검출된다.

교류전류를 측정하기 위하여 연동으로 동작하는 스위치의 위치를 그림에 표시한 것과 같이 교류(AC) 쪽으로 절환하면 된다. 교류전류도 직류전류를 측정하는 방법과 동일하게 사용할 수 있으나 기준교류전압원으로 사용하는 변조주파수보다 높은 주파수의 교류측정은 불가능하며 안정도와 정확도가 떨어지는 단점을 가진다. 일반적으로 기준교류전압원으로 사용하는 변조주파수는 600 Hz 미만이며 대부분 60 Hz인 전력주파수에서의 교류전류를 측정하는데 사용된다. 40 Hz에서 10 kHz까지의 교류전류를 측정하는데 활용하기 위하여 직류전류를 측정하는 방법과 동일하게 사용할 수 없다. 높은 주파수의 교류전류를 측정하기 위해 다채널 연동 스위치를 사용하여 직류전류를 측정하는 것과 분리하여 사용한다.

2.4 전류측정 센서와 전자회로

그림 4는 직류와 교류전류를 측정하는 센서와 전체의 전자 회로도를 나타내었다. 연동으로 동작하는 다채널 스위치의 위치를 선택함에 따라 직류와 교류전류 모드로 활용되게 하였다. 직류전류 측정의 경우, 쌍으로 된 2개의 피크 검출기의 출력신호는 차동 증폭기에서 차를 검출하여 이 신호를 다시 트랜지스터를 사용한 전류 증폭기에서 증폭한 후 권선 W2에 피드백하여 공급하는데 전류 증폭기 A5에 의하여 입력 직류전류에 비례한 전압 신호가 검출된다. 그러나 이 신호는 직류 전압과 고조파가 함유되어 있어서 교류전류를 측정하는 경우와 같이 true rms converter를 사용할 수 없다. 잡음이 많이 섞여 있는 신호를 검출할 때 신호와 동기된 신호를 가하여 위상 차에 비례한 출

력을 얻는 PSD(phase sensitive detection) 방법을 사용하였다. 25 kHz의 발진 주파수를 가진 발진기 G2는 권선 W2를 통하여 피드백 된 신호를 충실히 감지하기 위하여 아날로그 스위치를 컨트롤하는 신호로 사용한다. G2의 주파수와 입력 직류전류를 측정하기 위하여 사용하는 기준교류전압원 G1 신호는 동기 되어 있다. 이 신호가 그림에서 PSD로 나타낸 아날로그 스위치를 거쳐 저역필터를 통과하면 잡음이 제거된 깨끗한 직류신호를 얻을 수 있다. 이 방법은 잡음이 많이 섞여 있는 신호, 혹은 crest factor가 큰 신호를 검출하는데 큰 장점을 가진다.

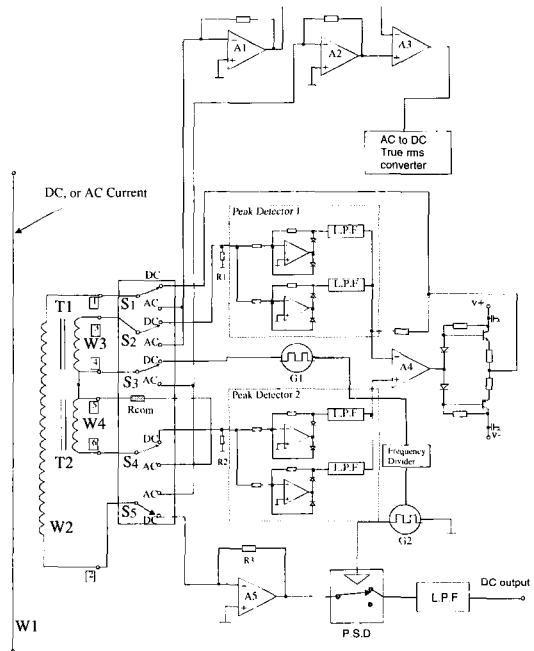


그림 4. 전류센서와 전자회로.
Fig. 4. Current sensor and an electronic circuit.

3. 특성실험 및 고찰

3.1 직류전류의 특성

그림 5와 그림 6은 센서와 전자회로의 특성을 측정하기 위한 측정 시스템을 나타내었다. 시험을 위하여 직류전류공급원으로 Fluke 5520A(직류 공급전류의 정확도 : 0.03 %)를 기준이 되는 표준기로 사용하였으며 측정 전류는 0.001 A에서 2 A까지

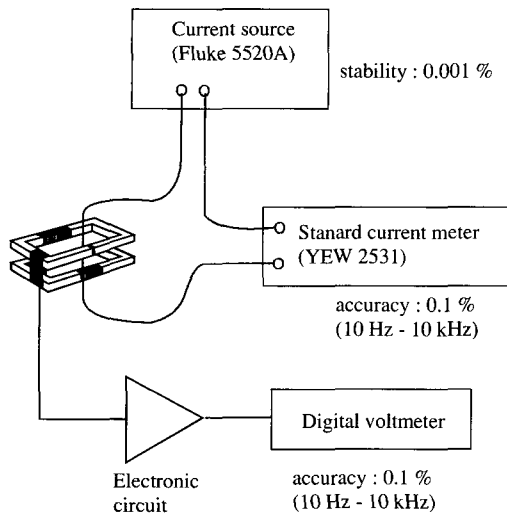


그림 5. 센서시험 방법.

Fig. 5. Method of the sensor test.

측정하였다. 그림 5에서 전류공급원의 출력 단자에 연결한 전류센서는 “C”자 형태의 코어 두 개가 서로 마주보고 있는 형태로 제작되었다. 센서의 직경은 22 mm이고 두께는 약 12 mm, 폭 16 mm 정도가 된다. 직류전류 측정인 경우 그림 5에 나타난 “Standard current meter”는 사용하지 않는다. 왜냐하면 직류전류공급원으로 사용하는 Fluke 5520A의 정확도가 0.03 %이므로 이 정도로 센서의 특성을 평가하는데 충분하기 때문이다. 그림 6에 나타난 센서 옆의 시험 보드는 전자회로를 구성한 것으로 시험이 완료되면 축소하여 휴대용의 클램프 미터에 적용할 수 있게 한다. 표 1은 직류전류에 대한 측정 특성을 나타내었다. 표에서 “Polarity +”와 “Polarity -”는 전류센서에 흐르는 측정 전류의 방향을 나타내었다. 전류의 방향에 따라 나타나는 최대 차이는 ± 0.25 %를 넘지 않았다. 그리고 직류전류 측정센서의 정확도는 온도 $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, 습도 55 ± 5 % R.H에서 ± 0.3 %의 특성을 나타내었다.

3.2 교류전류의 특성

교류전류공급원으로 Fluke 5520A(안정도 : 0.001 %)를 사용하였다. 기준이 되는 표준기는 “Standard

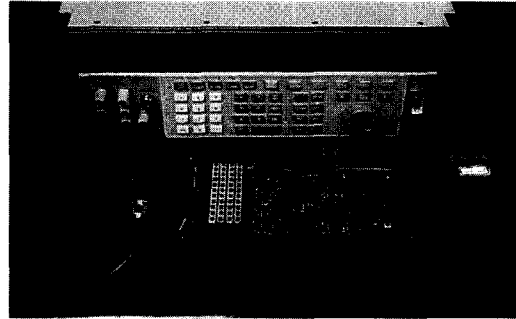


그림 6. 특성 측정을 위한 시스템과 센서 및 회로시험 보드.

Fig. 6. System for the testing and sensor, circuit test board.

표 1. 직류전류 측정의 특성.

Table 1. Characteristic of the DC current measurement.

| Input current (A) | Measured value (A) | |
|-------------------|--------------------|--------------|
| | Polarity (+) | Polarity (-) |
| 0.001 | 0.001 | -0.0009 |
| 0.010 | 0.009 | -0.010 |
| 0.050 | 0.049 | -0.500 |
| 0.100 | 0.099 | -0.100 |
| 0.200 | 0.199 | -0.200 |
| 0.300 | 0.300 | -0.300 |
| 0.400 | 0.400 | -0.401 |
| 0.500 | 0.500 | -0.501 |
| 0.600 | 0.600 | -0.601 |
| 0.700 | 0.700 | -0.701 |
| 0.800 | 0.800 | -0.801 |
| 0.900 | 0.900 | -0.901 |
| 1.000 | 1.000 | -1.001 |
| 1.100 | 1.100 | -1.101 |
| 1.200 | 1.200 | -1.201 |
| 1.300 | 1.300 | -1.300 |
| 1.400 | 1.400 | -1.400 |
| 1.500 | 1.500 | -1.500 |
| 1.600 | 1.600 | -1.600 |
| 1.700 | 1.700 | -1.699 |
| 1.800 | 1.800 | -1.799 |
| 1.900 | 1.900 | -1.898 |
| 2.000 | 2.000 | -1.998 |

current meter(YEW2531: 정확도 0.1 %)”를 사용하였다. 교류의 경우 교류전류공급원으로 사용하는 Fluke 5520A가 10 kHz에서 특성이 나빠므로 표준기로 YEW2531를 사용하여 시험하였다. 표 2는 센서의 교류전류출력 특성을 나타내었다. 측정 교류전류는 40, 50, 60, 100, 200, 400, 1000, 2000, 3000,

표 2. 교류전류 측정의 특성.

Table 2. Characteristics of the AC current measurement.

| Input current (A) | Measured value (A) | | | | | | | | | | |
|-------------------|--------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Frequencies (Hz) | | | | | | | | | | |
| | 40 | 50 | 60 | 100 | 200 | 400 | 1000 | 2000 | 3000 | 5000 | 10000 |
| 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 |
| 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 |
| 0.010 | 0.010 | 0.010 | 0.010 | 0.010 | 0.010 | 0.010 | 0.010 | 0.010 | 0.010 | 0.010 | 0.010 |
| 0.020 | 0.019 | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.020 |
| 0.030 | 0.030 | 0.030 | 0.030 | 0.030 | 0.030 | 0.030 | 0.030 | 0.030 | 0.030 | 0.030 | 0.030 |
| 0.050 | 0.0499 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.0501 | 0.0501 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 |
| 0.080 | 0.0799 | 0.080 | 0.080 | 0.0801 | 0.0801 | 0.0801 | 0.0801 | 0.0801 | 0.0801 | 0.0801 | 0.080 |
| 0.100 | 0.0999 | 0.100 | 0.100 | 0.1001 | 0.1001 | 0.1001 | 0.1001 | 0.1001 | 0.1001 | 0.1001 | 0.100 |
| 0.120 | 0.1199 | 0.120 | 0.1201 | 0.1201 | 0.1202 | 0.1202 | 0.1202 | 0.1202 | 0.1202 | 0.1202 | 0.1201 |
| 0.130 | 0.1299 | 0.130 | 0.1301 | 0.1302 | 0.1302 | 0.1302 | 0.1302 | 0.1302 | 0.1302 | 0.1302 | 0.1301 |
| 0.150 | 0.1499 | 0.150 | 0.1501 | 0.1502 | 0.1503 | 0.1503 | 0.1502 | 0.1503 | 0.1502 | 0.1502 | 0.1501 |
| 0.170 | 0.1699 | 0.170 | 0.1701 | 0.1703 | 0.1703 | 0.1703 | 0.1703 | 0.1703 | 0.1703 | 0.1703 | 0.1701 |
| 0.190 | 0.1899 | 0.190 | 0.1901 | 0.1903 | 0.1903 | 0.1904 | 0.1903 | 0.1903 | 0.1903 | 0.1903 | 0.1900 |
| 0.300 | 0.299 | 0.300 | 0.300 | 0.300 | 0.300 | 0.300 | 0.300 | 0.300 | 0.300 | 0.300 | 0.300 |
| 0.500 | 0.499 | 0.500 | 0.500 | 0.500 | 0.500 | 0.501 | 0.501 | 0.501 | 0.501 | 0.501 | 0.500 |
| 0.800 | 0.799 | 0.800 | 0.800 | 0.801 | 0.801 | 0.801 | 0.801 | 0.801 | 0.801 | 0.801 | 0.800 |
| 1.000 | 0.998 | 1.000 | 1.000 | 1.001 | 1.002 | 1.002 | 1.002 | 1.002 | 1.002 | 1.002 | 1.001 |
| 1.300 | 1.298 | 1.299 | 1.300 | 1.302 | 1.302 | 1.303 | 1.303 | 1.303 | 1.303 | 1.302 | 1.301 |
| 1.500 | 1.497 | 1.500 | 1.500 | 1.502 | 1.503 | 1.503 | 1.503 | 1.503 | 1.503 | 1.503 | 1.501 |
| 1.700 | 1.697 | 1.699 | 1.700 | 1.702 | 1.703 | 1.703 | 1.703 | 1.703 | 1.703 | 1.703 | 1.700 |
| 1.900 | 1.896 | 1.899 | 1.900 | 1.902 | 1.904 | 1.904 | 1.904 | 1.903 | 1.903 | 1.903 | 1.900 |
| 2.000 | 1.996 | 1.999 | 2.000 | 2.002 | 2.005 | 2.005 | 2.005 | 2.004 | 2.003 | 2.003 | 2.001 |

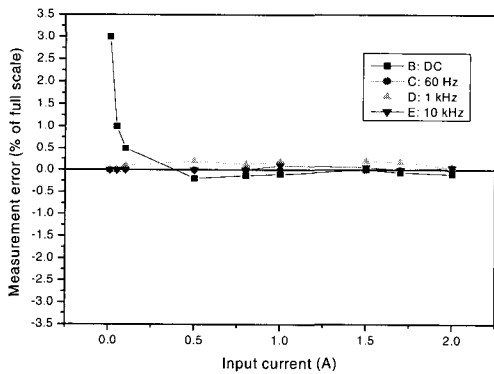


그림 7. 센서의 측정오차.

Fig. 7. Measurement error of the sensor.

5000, 10000 Hz의 교류전류 주파수를 변화 시켜가며 측정하였다. 이 센서는 100 kHz 까지 측정이 가능하지만 코어의 자성체 특성이 고주파에서 약

간 떨어지는 경향이 있고 시험에 사용되는 교류전류공급원인 Fluke 5520A의 공급주파수가 최대 10 kHz 까지 사용되므로 그 이상의 특성평가는 이루어지지 못했다.

일반적으로 2단 CT는 코어의 자성재료 선택, 권선 방법, 차폐기술 및 전자회로를 통한 보상 방법에 의하여 측정의 정확도를 수 ppm 까지 얻을 수 있다. 여기에서 사용한 센서의 자성재료는 높은 주파수와 낮은 주파수에서 출력의 차이를 조금 나타내었지만 W4에 보상 저항을 사용함으로써 출력의 안정도와 함께 주파수 변화에 대한 특성도 개선할 수 있었다. 측정 전류는 0.001 A에서 2 A 까지 측정하였으며 직류전류 측정의 경우와 마찬가지로 센서의 정확도는 온도 $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 습도 $55 \pm 5\%$ R.H에서 $\pm 0.3\%$ 의 특성을 나타내었다. 회로 전체를 동작시키는데 필요한 소모전류는 15 mA이며 주변의 표시장치와 컨트롤러 등을 합하여 소모되는 전류는 대략 25 mA를 넘지 않았다. 직류와 교류전류에서의 분해능은 0.1 mA, 감도 10 mV/mA의 특성을 나타내었다. 센서의 온도, 습도

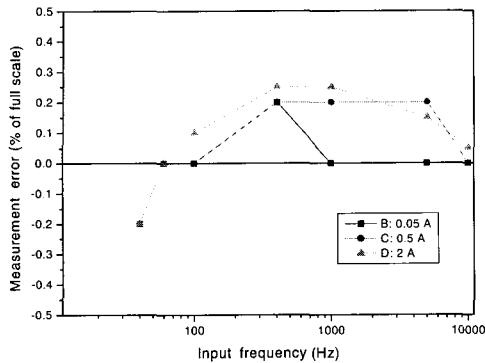


그림 8. 주파수에 의한 센서의 측정오차.
 Fig. 8. Measurement error of the sensor by frequencies.

변화 특성은 센서의 자성체 코어의 특성에 의존하며 이 경우 사용범위는 0 °C에서 50 °C, 습도 80 % R.H 이하의 범위에서 사용 가능할 것으로 판단된다. 차후 온도, 습도 영향에 대한 평가를 계속할 것이며 완성될 제품의 수출을 위하여 전자기파 내성시험에 대한 평가 및 보완이 이루어질 것이다. 그림 7은 표1과 표2에 나타난 결과를 DC, 주파수 60 Hz, 1 kHz, 10 kHz에서의 측정오차를 대표적으로 나타내었으며 그림 8은 주파수 변화에 대한 오차를 나타내었다.

4. 결론

동일한 2개의 클램프 형 자성체 코어를 사용하여 동일한 센서로부터 교류전류와 직류전류를 감지할 수 있는 전류센서를 개발하고 신호회로와 함께 휴대용의 저 전류 측정용 클램프 미터를 개발하였다. 교류전류 측정의 경우 2단 CT 형태에 보상회로를 구성하여 측정 정확도를 높였으며, 직류전류 측정의 경우 기준교류전압원으로 제작된 변조기의 자화전류에 의하여 변조된 신호로부터 측정하였다. 특히 직류의 경우 자화 전류가 비대칭일 때 출력을 zero로 만들기 위하여, 전자보상 CT형의 센서, 2개의 쌍으로 된 검출기, 많은 고조파가 함유된 신호의 정밀 측정회로와 소비전류를 최소화할 수 있는 회로를 개발하였다. 이와 같이 센서와 전자회로의 소형화를 통하여 교류/직류 저 전류 측정용 휴대용 클램프 미터의 제작을 용이하게 하

였다. 이 클램프 미터는 2 A 미만의 직류, 교류전류를 측정하는데 사용하며 교류 측정 전류의 주파수는 40 Hz에서부터 10 kHz이며 온도 23 °C ± 5 °C, 습도 55 ± 5 % R.H에서 측정의 정확도는 0.3 %의 특성을 나타내었다.

참고 문헌

- [1] Y. Suzuki, A. Hirabayashi, and K. Yamasawa, "Analysis of a zero-flux type current sensor", IEEE Trans. Mag., Vol. 29, No. 6, p. 3183, 1994.
- [2] Y. Yoshida and A. Tayaoka, "Precise current sensor by means of small angle magnetization rotation using amorphous wire and its industrial application". IEEE Trans. Mag., Vol. 29, No. 6, p. 3180, 1993.
- [3] D. Son and J. D. Sievert, "A new current sensor based on the measurement of the apparent coercive field strength", IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 38, No. 6, p. 1080, 1989.
- [4] E. So, S. Ren, and D. A. Bennett, "High current precision openable-core DC and AC/DC current transformers", IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 42, No. 2, p. 571, 1993.
- [5] J. D. Ramboz, "A highly AC accurate, hand-held clamp-on current transformer", IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 45, No. 2, p. 445, 1996.
- [6] T. Watanabe and T. Aizawa, "DC large current measurement using DC CT", 電氣檢定研技報, 第25卷, 4号,
- [7] L. Lissner and A. J. Walter, "Zero-flux current transformer for wide-band precision measurement in AC and DC HV system", IEEE fourth international Conf. AC and DC HV power transmission, London 23-26, p. 229, 1985.
- [8] D. Zhang and Y. Jia, "A precision transformer used for an audio frequency power standard," IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. IM-39 No. 3, p. 547, 1990.
- [9] T. M. Souders, "Wide band two stage

- current transformers of high AC accuracy,"
IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. IM-21,
No. 4, p. 340, 1972.
- [10] J. L. West and P. N. Miljanic, "An
improved two stage current transformer,"
IEEE Trans. Instrum.Meas., Vol. IM 40, No.
3, p. 633, 1991.
- [11] 박영태, 장석명, "정밀급 전력트랜스듀서개발
을 위한 전자보상형 분류기에 관한 연구," 대
한전기학회, 44권, 7호, p. 948, 1995.
- [12] P. N. Miljanic, E. So, and J. M. Moore, "An
electronically enhanced magnetic core for
current transformers," IEEE Trans. Instrum.
Meas., Vol. IM-40, No. 2, p. 410, 1991.