

공심코어를 사용한 교류전류 센서

박영태* · 정재갑

한국표준과학연구원, 전자기표준부

(2005년 1월 21일 받음, 2005년 2월 4일 최종수정본 받음)

본 연구는 미래의 가정에 설치될 전자식 전력량계의 정밀 전류측정용 센서 개발에 관한 내용이다. 전류센서는 공심코어 원리를 사용하기 때문에 일반 변류기(current transformer)의 자기포화와 비선형 오차의 한계 영향이 적다. 개발된 센서는 저전류 범위에서 선형도의 개선과 함께 공심코어를 사용하므로 제작이 간단한 장점을 가지고 있다. FEM solver를 사용하여 자기장 해석을 하였으며 실제 측정된 값과 계산에 의한 값을 비교하였다.

주제어 : 전류센서, 전자식 전력량계, 공심코어, 로고스키 원리, 유한요소 해석프로그램

I. 서 론

전류 측정센서는 기본적으로 자성체 코어와 코일 혹은 자기센서들로 구성되어 있다. 교류전류를 측정하기 위하여 자성체 코어에 코일을 감아 코일에 유기되는 기전력을 측정하는 트랜스포머 방법과 자성체 코어와 홀 소자와 같은 자기센서를 결합하여 측정하는 방법이 일반적이다[1]. 홀 소자를 이용할 경우 온도 특성이 나쁘며 저 전류 측정에는 선형도가 떨어지는 단점을 가지고 있다. 근래에는 자기저항(MR)이나 거대자기임피던스(GMI)를 이용하여 저 전류를 측정하는 측정 소자로 상용화하려는 연구가 계속되고 있다[2-4]. 전류측정 센서로 이용하고 있는 자기센서들은 강한 바이어스 자기장이 필요하며, 우수한 측정 감도에 비해 측정 범위가 좁고 바이어스 전류 주파수를 수백 kHz에서 수 MHz 까지 공급해야 한다. 높은 주파수의 공급은 신호처리회로 구성을 복잡하게 하고 신호의 정밀 측정을 위한 전자소자들의 선택을 어렵게 한다. 자성체 코어와 코일 혹은 자기센서들은 주파수가 낮은 측정 전류와 주파수가 높은 측정 전류에 따라 사용재질이 다르며 바이어스 전류 주파수도 다르게 공급해야 한다. 뿐만 아니고 코어와 자기센서를 사용함으로써 생기는 경제적인 부담과 이들 스스로가 가지고 있는 제한영역 때문에 이러한 방식의 전류측정센서 대신 다른 방식의 저가 센서를 요구하고 있다.

국내에서 상용되고 있는 전류측정 센서는 거의 대부분 CT (current transformer)로서 CT에 사용되는 자성체 코어의 철심은 자기포화와 측정범위 대 크기의 한계로 인하여 규정 오차 범위 내에서 측정할 수 있는 전류 범위는 극히 제한되어 있다. 또 명목전류의 수십~수백 배에 이르는 사고전류를 정확히 검출하기는 불가능하고, 현재의 전력기기는 전력전자와 필

스파워 기술의 발달로 수 Hz에서 수백 kHz에 이르는 주파수 범위를 갖는 전류를 사용하는 예가 많으나 CT는 상용주파 전류 이외의 주파수 전류를 측정하는 데는 한계가 있다. 이러한 문제들로 인하여 현재 외국에서는 로고스키 코일이 많이 사용되고 있다[5-10]. 정확한 전류의 양을 측정하는 문제는 가정이나 공장에서 경제적인 문제와 바로 직결이 된다. 사용전류에 따른 전력의 양을 정확히 검침하는 전력량계는 전류센서의 성능에 좌우된다.

IEC에서 요구하는 가정용 전력량계의 정밀도는 $\pm 2\%$ 이고 전자식 전력량계나 전력변환기(power transducer)는 $\pm 1\%$ 수준이며 이 정밀도 범위에서 전류측정용 센서의 측정 전류 범위는 0.5 A - 40 A로 정하고 있다.

본 연구에서는 자성체 코어나 자기센서를 사용하지 않고 가정용 전자식 전력량계에 사용되는 전류측정 센서를 개발하였으며 정밀도가 $\pm 0.4\%$ 보다 더 좋은 결과를 얻었다. 전류 측정 방법은 측정 전류에 비례하는 전압을 얻는 로고스키 코일(Rogowski coil) 방식을 응용하였다. 일반적인 로고스키 코일 방식의 저 전류 부분에서 선형도가 악화되는 문제를 해결하였으며 FEM 해석을 통하여 이론적인 결과와 실험적인 결과를 비교하여 그 특성을 평가하였다.

II. 전류센서 및 FEM해석

2.1 로고스키 코일의 원리

N 턴이 감긴 1차와 n 턴이 감긴 2차 트로이덜 형태의 일반 CT는 2차측으로부터 1차측 전류에 비례하는 출력을 얻는다. 1차측 전류에 의하여 발생되는 교류자속은 전류 변화율에 비례하여 코일에 전압을 유기시킨다. 유기된 전압 e 는

$$e = M \frac{di}{dt} \tag{1}$$

*Tel: (042)868-5158, E-mail: pyt@kriss.re.kr

여기서 $M = v_o v_r \left(\frac{A}{L_c} \right) n N$ 이고 코일의 상호 인덕턴스를 나타

낸다. 또 A 는 코일이 감긴 포머의 단면적을 나타내고 L_c 는 자속의 경로를 나타낸다. 그리고 di/dt 는 전류 변화율을 나타낸다. 만약 코어가 공심, 즉 공기라면 $v_r = 1$ 이 되고 로고스키 코일이라고 부르는 형태의 식으로 표현된다. 따라서 로고스키 코일은 전류가 흐르는 도체 주위에 트로이덜 형태의 공심코어에 코일을 감은 것으로 트랜스포머에 사용되는 자성체 코어가 없는 형태를 말한다. Fig. 1에 로고스키 코일에 의하여 전류를 측정하는 원리를 나타내었다. 일차 교류전류를 감지한 공심코어 센서는 전류의 변화율에 비례하여 코일에 이차전류를 발생시키며 입력주파수에 90도의 위상차를 지니고 있어서 적분기를 사용하여 위상차를 보상하게 한다. 로고스키 코일의 출력은 전자회로로 구성된 적분기를 통하면 전류 변화율에 대한 완전한 전압이 얻어진다. 따라서 원리적으로 입력 전류의 주파수에 무관한 값을 얻을 수 있다. 식(1)로부터 전자적 분기의 출력 V_{out} 는

$$V_{out} = \frac{1}{T} \int e \cdot dt \quad (2)$$

으로 표현되고 $T=RC$ 로 나타내는 적분기의 시정수를 의미한다.

로고스키 코일은 인버터용접기, 기중차단기, 가스절연차단기, 모터컨트롤을 모니터링, 원격용접기, 전기모터, 발전기의 전류계측, 전자식 전력량계 등에 많이 활용되며 특히 전력 변환기와 전자식 전력량계의 전류측정 센서로 활용 가능성이 매우 높다.

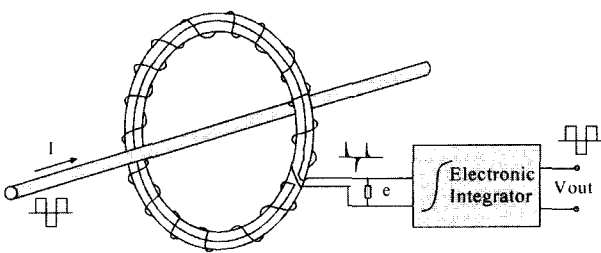


Fig. 1. Principle of Rogowski coil.

2.2 개발된 센서의 모델

2.2.1 개발된 센서와 로고스키 코일

Fig. 2는 로고스키 코일(a)과 개발된 센서(b) 그리고 차후에 제안할 다른 두 종류의 센서들을 (c), (d)에 나타내고 각각 다른 점을 간략히 그림으로 나타내었다. 로고스키 코일의 경우 원형으로 감겨진 코일 중간으로 측정 전류가 흐를 경우 고유의 출력 값에 대한 선형도를 유지할 수 있으나 측정 전류가 흐르는 도체의 위치가 다를 경우 선형도는 떨어지는 단점을 가진다. 또 측정 전류가 작은 경우 선형도가 떨어지는 형태를 가지고 있다. 이러한 문제를 개선하기 위하여 (b)와

같은 형태의 센서를 개발하였다. 이 경우 측정 전류가 흐르는 도체는 원형으로 감겨진 코일의 안쪽에 고정되어 있어 도체의 위치에 대한 문제뿐만 아니라 작은 측정 전류에 대한 선형도 악화 문제가 해결되는 장점을 가지고 있다. 또 감도를 크게 할 경우 일차 측 코일의 수를 증가시켜 감으면 된다. Fig. 2에 나타낸 (c)는 1차 전류를 2차 코일이 감긴 외부에 설치한 것으로 (b)와 같은 결과를 얻을 것으로 기대되지만 1차 코일에 의하여 발생하는 자속이 저 전류에서 선형도가 떨어질 것으로 생각된다. 그러나 제작이 간단하다는 장점을 가지고 있다. (d)의 경우는 (b)와 (c)를 혼합한 것으로 2차측에 출력되는 전압이 다른 것들에 비해 크게 발생하며 감도가 우수할 것으로 생각된다. 그러나 제작이 까다롭다는 단점을 가지고 있다. (c)와 (d)는 FEM 해석으로부터 개발된 센서와 동일한 특성을 얻은 것으로 평가 되었으며 여기서는 또 다른 새로운 제안으로만 나타내었다.

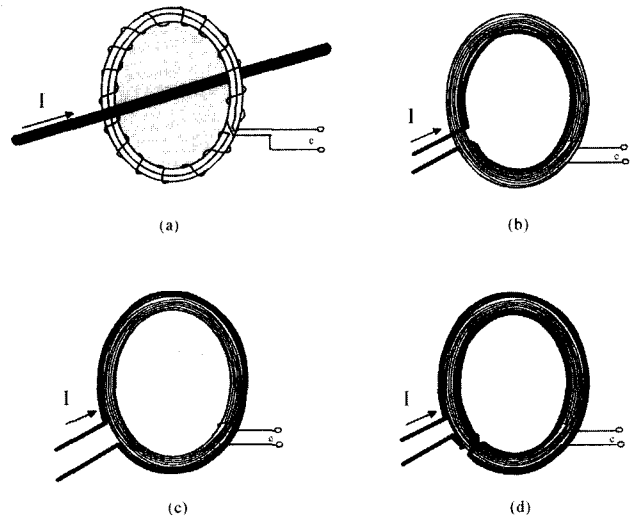


Fig. 2. Rogowski coil (a), the developed sensor (b) and proposed sensors (c),(d).

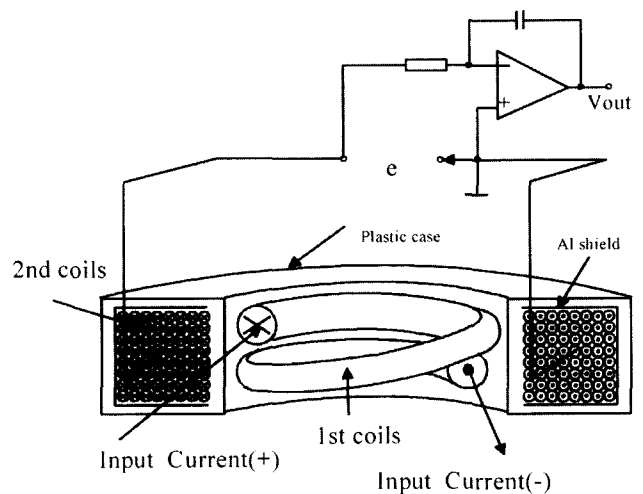


Fig. 3. Model of the developed sensor.

2.2.2 센서모델

개발된 전류측정 센서에 대한 모델은 Fig. 2(b)이며 Fig. 3에 간단히 나타내었다. 1차 코일(1st coil)은 측정 전류를 감지하기 위한 코일로 2차 코일(2nd coil)의 인쪽에 설치되어 있으며 전류가 공급되는 방향은 2차 코일에 발생되는 2차 전류와 동일한 방향으로 감겨 있다. 1차 코일의 두께는 최대 50 A를 흘릴 수 있는 크기로 하고 구리를 사용하였다. 1차 코일의 입력 선(Input Current +, Input Current -)들은 플라스틱 케이스에 각각 수직되게 설치하여 측정 전류를 공급한다. 2차 코일을 감는 포머는 플라스틱으로 그림과 같이 원형으로 케이스를 만들고 그 속에 코일을 감았다. 코일과 코일 사이는 전기적 절연이 높은 우레탄 코팅이 된 코일을 사용하였다. 그리고 외부에서의 전자기적 영향을 최소화하기 위하여 알루미늄 테이프를 자기차폐에 이용하였다. 2차 코일은 전자증폭기를 사용한 액티브 적분기에 연결하여 출력 V_{out} 를 얻는다.

2.3 센서모델의 FEM 해석

Fig. 4는 Fig. 3의 모델을 FEM 해석 툴을 사용하여 얻은 결과를 나타내었다. 결과는 1차측의 전류에 의하여 2차측 코일 내부에 존재하는 자속밀도의 크기를 나타내었다. 해석 툴은 Maxwell 3D를 이용하였다. 입력전류의 크기는 0.5, 5, 50 A로 하였으며 주파수는 60, 500, 1000, 5000 Hz로 하였으나 실제 센서는 60 Hz에서 특성 측정이 이루어졌으므로 그 이상의 주파수에서도 시험할 예정이다.

해석을 위하여 센서의 1차측은 2턴의 구리선을 사용하였으며, 권선저항을 0.001 Ω 이라 가정하였다. 2차측은 구리선을 2000턴 감았으며, 권선저항은 10 Ω 이라 가정하였다. 센서의 외경은 32 mm, 두께는 10 mm로 하였다. 해석 과정에서 알루미늄 차폐에 대한 요소는 고려하지 않았다. 1차 코일과 2

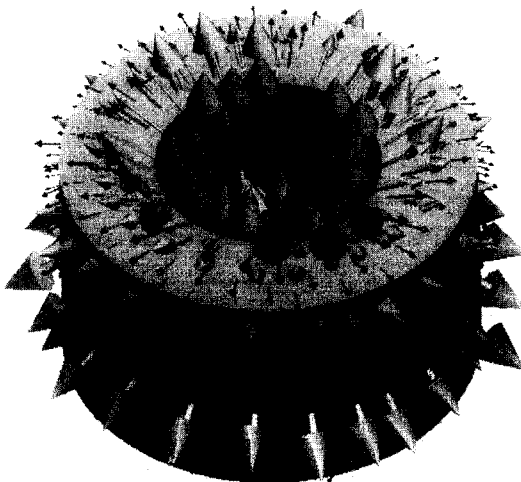


Fig. 4. Magnetic flux density of model by FEM.

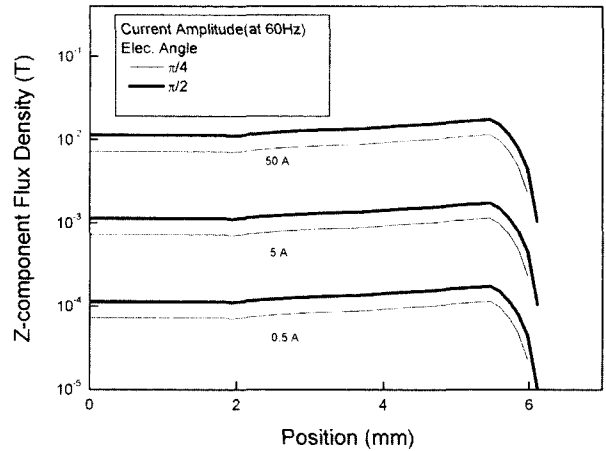


Fig. 5. Magnetic flux density versus radius position by a phase and amplitude of 1st current.

차 코일 등이 감긴 부분의 치수는 실측치를 사용하였으며 코일과 코일 사이의 공간은 무시하였다.

Fig. 5는 이론적 해석에 의하여 1차측 전류의 위상과 크기에 따른 반경방향 자속밀도를 나타내었다. 센서의 1차측 코일 두께의 중심에서 5.5 mm 까지 전류의 크기와 위상의 변화에 대해 동일한 자속 분포를 가지고 있음을 알 수 있다. 다만 1차측 전류의 크기에 따라 자속은 증가하는 것을 알 수 있다.

III. 실험결과

센서의 1차측에 전류와 주파수를 인가한 경우 2차측에 발생하는 전류 값을 전압으로 환산하여 Table 1에 나타내었다. FEM 해석으로부터 얻은 결과는 이론값(V)으로 나타내고 실제로 측정된 값은 실제값(V)으로 나타내었다. 실제 측정에 사용된 장비는 전력공급원으로 사용되는 ROTEK 8000 (출력범위: 0.01 - 50 A, 정확도 $\pm 0.03\%$)을 1차측 공급 전류원으로 사용하였고 2차측 출력 전압은 WAVETEK사의 Precision digital multimeter 1281(정확도: 0.01%)을 사용하였다. 실제로 센서의 출력에 나타나는 전류는 100 Ω 를 사용하여 전압으로 변환하여 나타내었다. Fig. 6은 이론적 결과와 실험적 결과에 대한 출력을 그래프화한 것으로 낮은 1차전류에서 실제 시험으로 얻어진 출력 값이 이론적 출력값에 비해 떨어지는 것을 알 수 있다.

이것은 1차측 코일에서 발생하는 누설 인덕턴스의 영향으로 생각되지만 목표로 하는 성능에 비해 작게 나타나는 것으로 평가된다. Table 1과 Fig. 6의 결과에 의하면 실험적 결과와 이론적 결과는 0.4% 내에서 일치하는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 실험적 결과와 이론적 결과에 대한 비선형 오차를

Table 1. Theoretical values by FEM and experimental values

60 Hz 입력전류 (A)	모델 (b)	
	이론값 (mV)	실제값 (mV)
0.5	0.289	0.2915
1	0.5824	0.5823
2	1.1601	1.1639
5	2.9101	2.9056
10	5.8302	5.8105
20	11.700	11.623
30	17.500	17.433
40	23.301	23.242
50	29.101	29.056

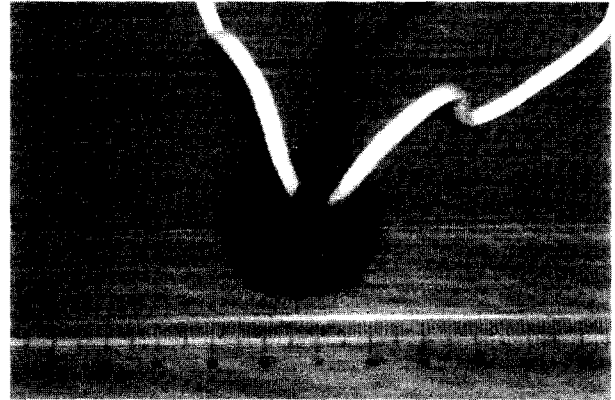


Fig. 8. Configuration and dimension of the developed sensor.

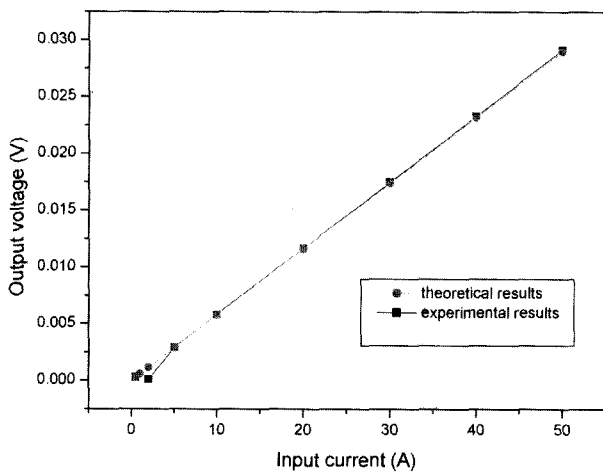


Fig. 6. Output of the theoretical and experimental values.

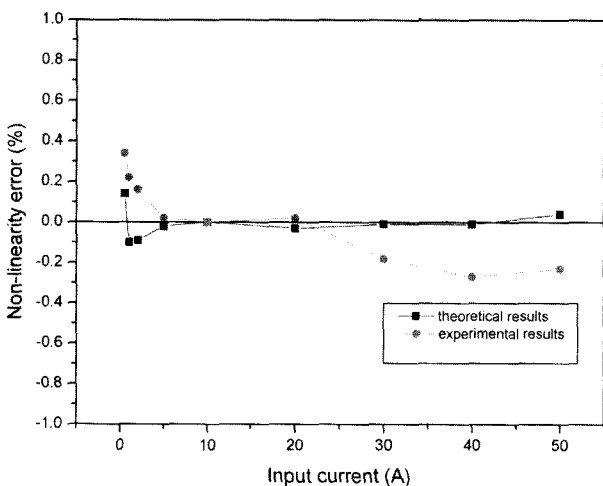


Fig. 7. Non-linearity error of the theoretical and experimental results.

나타내었다. 이론적 결과는 입력전류 0.5 - 50 A 범위에서 비선형 오차가 $\pm 0.2\%$ 보다 우수함을 나타내고 실제의 측정 결과는 $\pm 0.4\%$ 보다 우수함을 알 수 있다. 이론적 결과에 의하면 0.5 A와 1 A 부근에서 약간의 오차를 보이지만 그 이후

50 A 까지는 거의 오차가 없는 출력 특성을 보이고 있다. 이것은 센서 설계에서 코일의 크기와 반경, 그리고 센서 두께 등의 치수가 적절했음을 나타내고 있다. 실제 측정 결과에 의하면 0.5 A에서 2 A, 그리고 30 A에서 50 A 사이는 비선형도에 대한 극성이 바뀐다와 함께 오차의 폭도 커진 것으로 나타났다. 이것은 이상적인 이론적 해석과 비교한 결과이고 실제 사용되는 전자식 전력량계의 전류 센서로서 매우 우수한 것으로 판단된다.

Fig. 8은 실제 제작된 센서의 크기와 모양을 나타내었다. 사진에서 적색과 흑색은 센서의 2차측 출력선이고 직사각 모양의 백색은 1차측 측정 전류 입력선을 나타낸다.

IV. 실험결과에 대한 고찰

개발된 전류센서에 대한 FEM 해석 결과와 실험적 결과를 분석해보면 0.4% 내에서 일치하는 것을 알 수 있다. 해석 결과와 실험 결과에 대한 약간의 차이는 실험과정에서 발생한 누설이나 상호유도 자속 영향, 그리고 치수와 경계 조건에 대한 오차 등의 요인이 해석 과정에서 무시된 것으로 생각되어진다. 실제 측정 결과에 의하면 10 A에서 20 A 범위를 중심으로 낮은 전류측정 범위 0.5 A에서 2 A, 그리고 높은 전류측정 범위 30 A에서 50 A에서는 비선형도에 대한 극성이 반전되어 균형을 이루고 있다. IEC에서 요구하는 2 급가정용 전력량계의 측정 전류는 0.5 A - 40 A 범위에서 $\pm 2\%$ 로 유지하도록 정하고 있어 개발된 센서는 전자식 전력량계의 전류센서로 사용하는데 매우 성능이 우수한 것으로 판단된다.

일반적인 로고스키 코일 방식의 저 전류 부분에서 선형도가 악화되는 문제를 해결하고 기술적으로나 경제적인 장점이 있는 전류센서의 개발은 최저가로 국내 시장을 잠식하고 있는 중국산 전자식 전력량계에 대응 할 수 있는 길을 열어 줄 것으로 판단된다. 또 제안으로만 제시한 센서 모델

(c), (d)에 대한 실험을 통하여 보다 나은 경제적 센서를 개발 할 예정이다.

V. 결 론

로고스키 코일과 같이 자성체 코어를 사용하지 않고 전류를 측정하는 소자를 개발하였으며 FEM 해석을 통하여 이론적인 결과와 실험적인 결과를 비교하여 그 특성을 평가하였다. FEM 해석 결과 측정 0.5 A에서 50 A의 전 범위에 걸쳐 비선형도 $\pm 0.2\%$ 의 결과를 얻었으며 실제 실험에 의한 결과는 $\pm 0.4\%$ 로 평가되었다. 해석 결과와 실험 결과의 차이는 실험과정에서 발생한 누설이나 상호유도 자속에 대한 요인이 해석 과정에서 무시된 것으로 해석되어진다. 그러나 개발된 전류측정센서는 1%의 특성을 가지는 전자식 전력량계의 전류측정 CT (current transformer) 대신 사용하는데 문제가 없는 것으로 평가된다.

참 고 문 헌

- [1] Y. Suzuki, A. Hirabayashi, and K. Yamasawa, IEEE Trans. Mag, **29**(6), 3183(1994).
- [2] Y. Yoshida and A. Tayaoka, IEEE Trans. Mag, **29**(6), 3180(1993).
- [3] Y. Kashiwagi, T. Kondo and K. Mitsui, IEEE Trans. Mag. **26**(5), 1566(1990).
- [4] 박영태, 김철기, 한국표준과학연구원-충남대학교연합동보보고서, 2002.
- [5] W. Rogowski and W. Steinhaus, Archiv fur Elektrotechnik **1**(4), 141(1912).
- [6] V. Nassisi and A. Luches, Rev. Sci. Instrum. **B**(7), 900(1979)
- [7] Donald G. Pellinen, et al., Rev. Sci. Instrum, **51**(11), 1535(1980).
- [8] H. W. Meier, US Patent. No.6731193B2 (2004).
- [9] Kojovic et al., US Patent. No.6313623B1 (2001).
- [10] D. Kustera et al., US Patent. No.6094044 (2000).

AC Current Sensor Using Air Core

Young TaePark* and Jae Kap Jung

Korea Research Institute of Standards and Science
Electromagnetic Metrology Division

(Received January 21 2005, in final form February 4 2005)

This paper describes a current sensor for precision current measurement of an electronic watt-hour meter that is going to install in houses in the future. As the current sensor is based on an air cored principle (the Rogowski principle) it is not subject to usual limitations of saturation and non-linearity of general current transformers. An advantage of the developed current sensor is that non-linearity error in low current range is improved and the construction can be kept simple using an air core. We present a magnetic field analysis of the sensor using a finite-element solver. We compared the measured values versus the calculated values.

Key words : a current sensor, an electronic watt-hour meter, an air core, Rogowski principle, a finite-element solver