

# 전압변성기 비교 측정 장치의 비오차 및 위상각 오차의 직선성 평가기술

論 文

53C-9-4

## Evaluation Technique of Linearity of Ratio Error and Phase Angle Error of Voltage Transformer Comparison Measurement Equipment

鄭 在 甲\* · 權 聖 遠\* · 朴 榮 泰\*

(Jae Kap Jung · Sung Won Kwon · Young Tae Park)

**Abstract** - Both ratio error and phase angle error in voltage transformer(VT) depend on values of burden of VT used. A method of evaluation for linearity of ratio error and phase angle error in VT measurement equipment have been developed using the standard resistance burdens, with negligible AC-DC resistance difference less than  $10^{-6}$ . These burden consists of five standard resistors, with nominal resistance of 100  $\Omega$ , 1 k $\Omega$ , 10 k $\Omega$ , 100 k $\Omega$ , and 1 M $\Omega$ . The developed method has been applied in VT measurement equipment of industry and the validity of the developed method has been verified by showing the consistency of the result of linearity obtained using VT with wide ratio error.

**Key Words** : Voltage Transformer, Ratio Correction Factor, Ratio Error, Phase Angle Error, Burdens, Linearity

### 1. 서 론

전압변성기(voltage transformer, VT)를 생산하는 산업체나 교정시험기관에서는 VT의 특성을 평가 또는 교정시험하기 위하여 전압변성기 비교 측정 장치(오차 측정 장치)를 사용하여 피측정 전압변성기의 비오차(ratio error)와 위상각 오차(phase angle error)를 측정한다. 피측정 VT는 오차의 등급에 따라 0.1 급, 0.2 급, 0.5 급, 1 급 및 3 급의 총 5개 등급으로 나누고 있으며[1], 상기의 등급에 따라 허용되는 오차는 각각 약  $\pm 0.1\%$ ,  $\pm 0.2\%$ ,  $\pm 0.5\%$ ,  $\pm 1\%$  및  $\pm 3\%$  정도이다. 전압변성기 비교 측정 장치는 앞서 언급한  $\pm 3\%$  범위까지 오차를 정확하게 측정할 수 있어야 한다. 한편 전압변성기 비교 측정 장치는 작은 범위의 오차를 갖는 피측정 VT의 오차는 비교적 정확하게 측정할 수 있는데 반해, 큰 범위의 오차를 갖는 피측정 VT를 측정할 때 오차 측정 눈금이 약간 틀어져(0.1 % 정도) 있다면 정확한 측정이 어려워 보정(correction)을 요한다. 이를 위해서 전압변성기 비교 측정 장치에서 측정된 작은 범위( $\pm 0.2\%$  이내)의 오차 측정값이 넓은 범위까지도 직선성을 그대로 유지하고 있는가를 평가하는 것은 아주 중요하고, 이는 곧 측정 장치 교정(calibration)의 중요한 핵심기술이다.

한편 산업체에서 활용되고 있는 전압변성기 비교 측정시스템은 크기가 크고, 무거워서 운반하기가 힘들뿐만 아니라, 제품의 품질관리 및 교정시험용으로 빈번히 사용되기 때문에 이 장치를 교정시험기관으로 운반하여 성능을 평가(교정)받기는 거의 불가능하다. 이러한 이유에서 산업체의 전압

변성기 비교 측정시스템의 평가를 위해서는 이동이 용이한 현장용 표준기를 개발하여 이를 산업체로 가져와서 현장에서 직접 전압변성기 측정장치를 평가하는 방법이 절실히 요구된다.

따라서 본 연구는 피측정 전압변성기의 2차 측에 걸리는 정밀저항부담(precise resistance burden)을 이용하여 전압변성기 비교 측정 장치에서 측정된 비오차와 위상각 오차의 직선성을 평가할 수 있는 기술을 최초로 개발했다. 정밀저항부담은 작고 무게가 가벼워, 이를 산업체로 운송하여 현장에서 측정 장치를 평가할 수 있는 장점이 있다. 이 기술은 다양한 정격변환비를 갖는 모든 전압변성기에 공통으로 적용할 수 있는 방법으로서, 이를 산업체의 전압변성기 비교 측정 장치에 적용하여 그것의 직선성을 평가했다. 또한 넓은 범위의 비오차를 갖도록 제작한 전압변성기(wide ratio error VT)에서의 직선성 평가결과와 비교하여 정밀부담 방식의 직선성 평가기술의 유효성을 검증하였다.

### 2. 전압변성기의 비오차 및 위상각 오차의 부담 효과의 이론적 고찰

전압변성기는 철심에 1차 코일과 2차 코일을 감은 변압기의 일종이다. 내부오차가 전혀 없을 때 2차측 저전압( $V_s$ )에 대한 1차측 고전압( $V_p$ )의 비는 2차측 권선수( $n_2$ )에 대한 1차측 권선수( $n_1$ )의 비와 같다. 그러나 실제로는 VT가 오차(error)( $\delta$ )를 가지고 있기 때문에 식 (1)과 같이 쓸 수 있다 [2].

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{n_1}{n_2} + \delta = N + \delta \quad (1)$$

여기서  $N$ 은 전압변성기의 정격변환비 혹은 권선비(nominal ratio 또는 turn ratio)이다. 실제 VT는 철심에 자

\* 교신저자, 正會員 : 한국표준과학연구원 선임연구원

E-mail : jkjung@kriss.re.kr

\* 正 會 員 : 한국표준과학연구원 책임연구원

接受日字 : 2004년 6월 9일

最終完了 : 2004년 7월 20일

기 포화 현상과, 1차 측과 2차 측에서 누설 임피던스가 발생하여 전압강하가 일어나기 때문에 비오차(ratio error, RE)와 위상각 오차(phase angle error,  $\Gamma$ )를 가지고 있다.

임피던스  $Z_b$ 인 부담  $b$ 가 전압변성기에 연결될 때의 등가회로는 아래 그림 1과 같다.

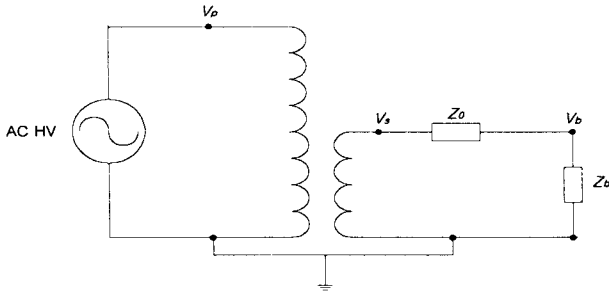


그림 1. 부담  $Z_b$ 가 있을 때의 전압변성기의 등가회로

Fig. 1. An equivalent circuit for the voltage transformer with burden  $Z_b$

전압변성기의 2차 측에 부담이 연결되어 있을 때와 없을 때의 비 보정 인자(ratio correction factor, RCF)와 위상각 오차(phase angle error,  $\Gamma$ )의 관계는 아래 식 (2), (3)과 같이 주어진다[3-4].

$$RCF_b = RCF_0 \left[ 1 + \frac{(R_0 R_b + X_0 X_b)}{R_b^2 + X_b^2} \right] \quad (2)$$

$$\Gamma_b \doteq \Gamma_0 - \frac{(X_0 R_b - X_b R_0)}{R_b^2 + X_b^2} \quad (3)$$

식 (2), (3)의 각 인자들은 아래와 같다.

$RCF_0$  : 부담이 없을 때의 비 보정 인자

$RCF_b$  : 부담  $b$ 가 있을 때의 비 보정 인자

$\Gamma_0$  : 부담이 없을 때 1차측에 대한 2차측 전압벡터의 위상각의 차이

$\Gamma_b$  : 부담  $b$ 가 있을 때 1차측에 대한 2차측 전압벡터의 위상각의 차이

$Z_0 = R_0 + jX_0$  : 전압변성기의 누설 출력 임피던스 (leakage output impedance)

$Z_b = R_b + jX_b$  : 부담의 임피던스

전압변성기의 권선비에 의한 비오차는 식 (4)와 같이 정의된다.

$$RE \doteq 100 \cdot \left[ \frac{(NV_s - V_p)}{V_p} \right] [\%] \quad (4)$$

비 보정 인자(RCF)와 비오차(RE)와의 관계는 아래와 같다.

$$RCF = 1 - (RE/100) \quad (5)$$

식 (5)를 이용하여 식 (2)를 비오차에 관한 식으로 바꾸면 식 (6)과 같다.

$$RE_b = RE_0 + (RE_0 - 100) \cdot \left( \frac{R_0 R_b + X_0 X_b}{R_b^2 + X_b^2} \right) \quad (6)$$

식 (6)에서  $RE_b$ 와  $RE_0$ 는 각각 부담이 있을 때와 없을 때의 비오차이다.

부담 ( $Z_b = R_b + jX_b$ )은 저항의 직류-교류 차이가 거의 없는, 즉  $\frac{X_b}{R_b} < 10^{-6}$ 인 영국 Tinsley사의 표준저항을 사용하였다[5]. 따라서 식 (6), (3)은 각각 식 (7), (8)과 같이 간단히 쓸 수 있다.

$$RE_b \doteq RE_0 + (RE_0 - 100) \cdot R_0 \cdot \left( \frac{1}{R_b} \right) \quad (7)$$

$$\Gamma_b \doteq \Gamma_0 - X_0 \left( \frac{1}{R_b} \right) \quad (8)$$

$RE_0$ ,  $R_0$ ,  $\Gamma_0$  및  $X_0$ 가 상수이므로, 식 (7)의 부담이 있을 때의 비오차( $RE_b$ )와 식 (8)의 부담이 있을 때의 위상각 오차( $\Gamma_b$ )는 부담의 저항값에 반비례한다( $\sim \frac{1}{R_b}$ ). 즉  $RE_b$ 와  $\Gamma_b$ 가  $\frac{1}{R_b}$ 에 비례하는 일차함수이다. 따라서  $R_b$ 의 값을 변화시켜 가면서 얻은  $RE_b$ 와  $\Gamma_b$ 를  $\frac{1}{R_b}$ 의 함수로 프라팅 하여 국내 회사에서 보유하고 있는 전압변성기 비교 측정 장치의 비오차와 위상각 오차의 직선성을 평가할 수 있다.

### 3. 전압변성기 비교 측정 장치의 비오차 및 위상각 오차의 직선성 평가결과 및 논의

국내 산업체에서 보유하고 있는 전압 변성기 비교 측정 시스템 구성도를 그림 2에 나타내었다. 기준 전압변성기(reference voltage transformer)와 피측정 전압변성기(test voltage transformer)의 1차측에 동일한 전압을 병렬로 공급하고, 두 전압변성기의 2차측 전압을 전압 변성기 비교 측정 장치를 이용하여 비교한다. 여기서 전압변성기 비교 측정 장치는 비오차와 위상각 오차를 측정하는데, 두 전압변성기의 2차측 전압을 비교하여 비오차와 위상각 오차 다이얼로 평형을 맞추어 피측정 전압변성기의 비오차와 위상각 오차를 측정한다. 국내 회사에서 활용하고 있는 전압변성기 비교 측정 장치는 모두 외국회사의 제품으로 미국 Knopp사, 스위스 Tettex사, 일본의 Soken사 등이고 측정원리와 방법은 서로 유사하다.

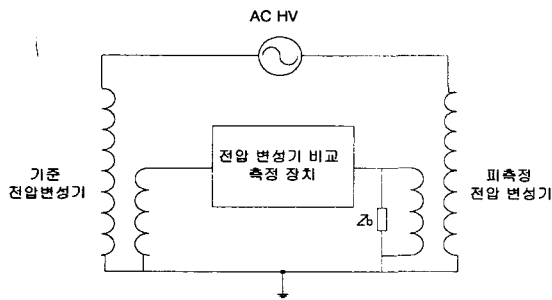


그림 2. 전압변성기 비교 측정 시스템의 구성

Fig. 2. Constitution of voltage transformer comparison measurement system

국내 회사에서 보유하고 있는 전압변성기 비교 측정 장치의 비오차와 위상각 오차 눈금의 직선성을 피측정 전압변성기의 2차측에 연결하는 표준저항부담( $Z_b$ )을 변화하여 평가하였다. 여기서 비오차와 위상각 오차의 직선성은 각각 식 (7)과 식 (8)을 이용하여 평가하였다. 사용한 표준저항부담은 영국 Tinsley 사의 제품으로서 정격이 각각 100  $\Omega$ , 1 k $\Omega$ , 10 k $\Omega$ , 100 k $\Omega$ , 1 M $\Omega$  이고, 정격용량은 모두 10 W 이다. 여기서 사용한 피측정 전압변성기는 YEW사의 모델 2262를 사용하였고, 1차측 전압이 6600 V 이고, 2차측 전압은 110 V로서, 2차 전압을 30 V로 유지하면서 측정하였다. 30 V에서 측정한 이유는 100  $\Omega$  표준저항의 정격용량이 10 W 이기 때문에 30 V 이상의 전압을 가할 수가 없고, 100  $\Omega$  이상의 다른 표준저항에서도 동일한 전압에서 측정해야 되기 때문에 30 V로 통일하여 측정을 하였다.

국내 4개 회사에서 보유하고 있는 전압변성기 비교 측정 장치를 이용하여 표준저항으로 구성된 부담을 변화시키면서 측정한 피측정 전압변성기의 비오차에 대한 결과를 그림 3 (a)에 나타내었다. 그림 3 (a)에서 표준저항부담 100  $\Omega$  1 M $\Omega$  범위에서 측정된 비오차의 범위는 -1.57 % ~ +0.16 % 이고, 그림 3 (a)의 실선들은 식 (7)을 이용하여 최소제곱법으로 분석한 결과이다. 부담저항이 1 M $\Omega$  ~ 1 k $\Omega$  ( $x = 0.000$  001  $\Omega^{-1}$  ~ 0.001  $\Omega^{-1}$ )까지는 직선성이 잘 유지되다가 100  $\Omega$  즉  $x = 0.01$   $\Omega^{-1}$ 에서 직선성이 약간 벗어나 있다는 것을 알 수 있다.

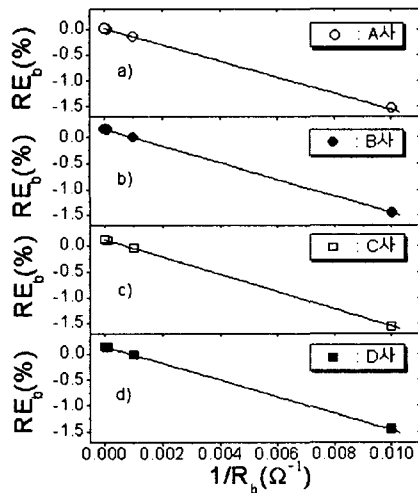


그림 3 (a). 표준저항 부담값에 따른 비오차의 변화

Fig. 3 (a). A change of ratio error as a function of standard resistance burden

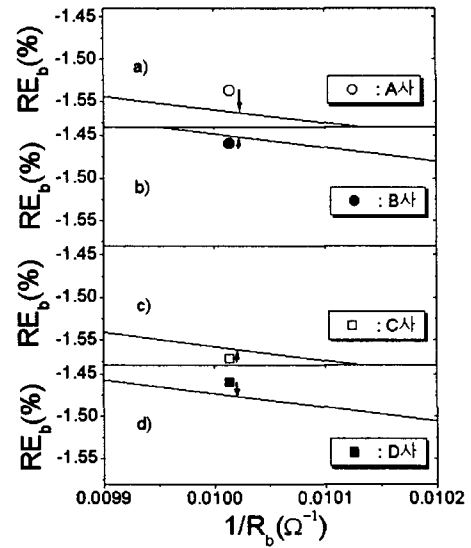


그림 3 (b). 그림 3 (a)의 0.01  $\Omega^{-1}$  근처에서 확대한 표준저항 부담값에 대한 비오차

Fig. 3 (b). Ratio error for standard resistance, enlarged near 0.01  $\Omega^{-1}$  in Fig 3 (a)

그림 4는 국내 4개 회사에서 보유하고 있는 전압변성기 비교 측정 장치를 이용하여 표준저항으로 구성된 부담을 변화시키면서 측정한 피측정 전압변성기의 위상각 오차를 나타낸 것이다. 그림 4의 실선들은 식 (8)을 이용하여 피팅한 결과를 보여주는데 부담저항이 1 M $\Omega$  ~ 1 k $\Omega$  ( $x = 0.000$  001  $\Omega^{-1}$  ~ 0.001  $\Omega^{-1}$ )까지는 직선성이 잘 유지되다가 부담저항 100  $\Omega$  ( $x = 0.01$   $\Omega^{-1}$ )에서 직선성이 약간 벗어나 있다는 것을 알 수 있다. 부담저항 100  $\Omega$ (위상각 오차가 약 -0.5 % 근처에 해당)에서 A사, B사, C사, D사의 경우 위상각 오차의 값이 직선성으로 부터 각각 +0.014 %, +0.017 %, +0.065 %, +0.212 % 정도 벗어나 있다. 따라서 위상각 오차 눈금 -0.5 % 에서 각각 상기의 벗어난 크기의 반대방향(화살표 방향)으로 보정해야 한다.

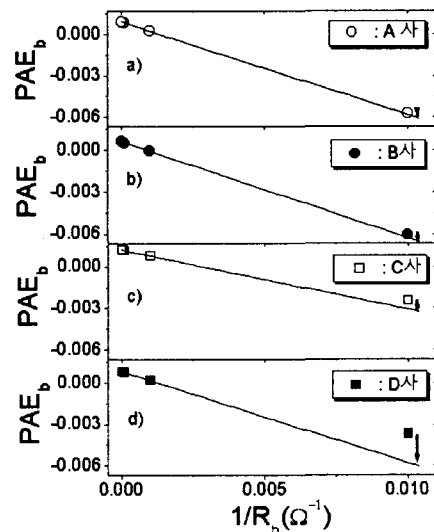


그림 4. 표준저항 부담값에 따른 위상각 오차의 변화

Fig. 4. A change of phase angle error as a function of standard resistance burden

한편 표준저항의 부담효과를 이용한 직선성 평가방법의 유효성을 확인하기 위하여 넓은 범위의 비오차를 갖는 전압변성기(wide ratio error VT)를 제작 활용하였다. 이 wide ratio error VT는 이론적인 계산값과 정확히 일치하는 비오차를 갖도록 제작한 것으로서,  $0 \sim \pm 1\%$  사이의 비오차 측정값과 계산값 사이의 일치도를 비교할 수 있도록 한 것이다. 그림 5에 wide ratio error VT의 내부결선도를 보였다.

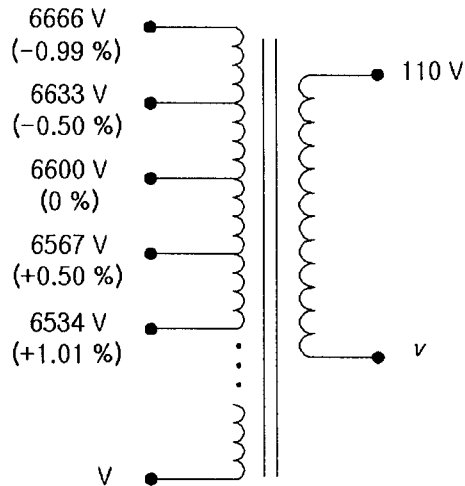


그림 5. 넓은 범위의 비오차를 갖는 전압변성기의 내부회로  
Fig. 5. Internal circuit of wide ratio error VT

그림 5의 wide ratio error VT는 2차측의 권선수에 대한 1차측의 권선수를 달리하여 넓은 범위의 비오차를 얻을 수 있게 제작한 것으로서, 비오차 측정값을 표1의 두 번째 열에 나타내었고, 측정된 비오차는 아래의 두 가지 요인으로 발생된다.

Wide ratio error VT의 비오차 측정값

$$= \text{자체 비오차} + \text{권선비에 따른 비오차} \quad (9)$$

여기서 자체 비오차는 자기 포화 현상과, 1차 측과 2차 측에서 누설 임피던스에 의해 생기는 내부오차로서,  $-0.03\%$ 로 측정되었다. 권선비에 의한 비오차는 권선비가 달라서 생기는 비오차이다. 식 (9)에서 권선비에 따른 비오차(실험값)는 비오차 측정값-자체 비오차이므로 이를 계산하여 표1의 3 번째열에 나타내었다.

반면 wide ratio error VT에서 각 권선비에서 생기는 비오차(이론값)는 그림 5의 1차측 전압이  $V_p = 6666 \text{ V}, 6633 \text{ V}, 6600 \text{ V}, 6567 \text{ V}, 6534 \text{ V}$  이고, 2차측 전압  $V_s = 110 \text{ V}$ , 정격변압비가  $N = 60$ 이다. 따라서 식 (4)에 의해 계산된 비오차가  $-0.99\%, -0.50\%, 0\%, +0.50\%, +1.01\%$  이고, 이를 표1의 네 번째 열과 그림 5의 괄호안에 나타내었다. 결론적으로 권선비에 의한 비오차의 실험값이 권선비에 의한 비오차의 이론값과 동일해야 한다. 이 두값의 차이[권선비에 의한 비오차(이론값)-권선비에 의한 비오차(실험값)]를 표1의 마지막 열에 나타내었다. 이 차이가 전압변성기 비교 측정 장치의 비오차의 보정값을 의미한다. 표 1은 B사의 측정 결과인데 비오차  $+0.5\%$ 와  $-0.5\%$ 는 이론값과 실험값이 일

치하여 보정이 필요없고, 비오차  $1.00\%$ 와  $-1.00\%$ 인 경우는 모두 양의 방향으로(윗방향)  $+0.01\%$  만큼 B사의 전압변성기 비교 측정 장치가 보정되어야 한다. 이는 부담효과방식의 비오차 직선성을 평가한 그림 3(b)의 B사의 결과와 동일하다. 이 결과로부터 부담효과를 이용한 전압변성기 비교 측정 장치의 비오차 직선성 평가기술에 대한 유효성을 wide ratio error VT 방법으로부터 확인할 수 있었다. 반면 전압변성기 비교 측정 장치의 위상각 오차의 직선성 평가기술에 대한 유효성을 검증하지는 못했는데 이 방법도 지금 개발중에 있다.

표 1. wide ratio error VT 전압비에 따라 계산된 비오차와 측정된 비오차의 비교(B사).

Table 1. Comparison between calculated and experimental ratio errors for the various voltage ratios of wide ratio error VT(B company).

(단위 : %)

1차 권선수/2차 권선수 (1차전압/2차전압)	비오차 (측정값)	권선비에 따른 비오차a (실험값)*	권선비에 따른 비오차b (이론값)	차이 (b-a)
6666/110	-1.03	-1.00	-0.99	+0.01
6633/110	-0.53	-0.50	-0.50	0.00
6600/110	-0.03	+0.00	+0.00	0.00
6567/110	+0.47	+0.50	+0.50	0.00
6534/110	+0.97	+1.00	+1.01	+0.01

\* 권선비에 따른 비오차(실험값)는 비오차 측정값을 정규화하여 얻은 권선비에 따른 순수한 비오차이다.

#### 4. 결 론

피측정 전압변성기의 2차측에 걸리는 저항값의 직류-교류 차이가 거의 없는 표준저항으로 구성된 부담을 이용하여 전압변성기 비교 측정 장치의 비오차와 위상각 오차의 직선성을 평가할 수 있는 기술을 개발했다. 이 방법을 산업체에 보유하고 있는 전압변성기 비교 측정 장치에 적용한 결과 비오차가 약  $-1.5\%$ 에서 최대  $-0.023\%$ 의 보정이 필요하고, 위상각 오차가  $-0.5\%$  근처에서 최대  $-0.212\%$  정도의 보정이 필요함을 알았다. 또한 넓은 범위의 비오차를 갖는 전압변성기(wide ratio error VT)를 이용하여 비오차의 직선성을 평가하였는데 부담을 이용한 결과와 서로 일치하였다. 앞으로 전압변성기 비교 측정 장치의 오차측정범위의 최대값인  $\pm 5\%$ 까지의 직선성을 평가하기 위하여 넓은 범위의 저항부담 ( $100 \Omega$  이하)과  $\pm 5\%$ 까지의 비오차를 갖는 전압변성기를 제작하여 종합적으로 직선성을 평가해야 할 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 계기용변성기, KSC 1706
- [2] J. L. Settles, W. R. Farber, and E. E. Connor, "The

analytical and graphical determination of complete potential transformer characteristics," IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. 79, No. 51, pp. 1213-1218, 1961.

- [3] 정재갑, 권성원, 김규태, 김명수, "외부부담이 전압변성기의 비오차와 위상각오차에 미치는 영향에 대한 연구," 대한전기학회지, Vol. 53C, No. 3, pp. 137-142, 2004.
- [4] William E. Anderson "A Calibration Service for Voltage Transformers and High-Voltage Capacitors" NBS Measurement Services Special Publication 250-33, 1988.
- [5] Tinsley "Precision Resistance Measurement", Tinsley Precision Instruments 1995.

## 저 자 소 개



### 정재갑 (鄭在甲)

1965년 7월 4일생. 1998년 고려대 물리학과 졸업 박사. 2001년~현재 한국표준과학연구원, 전자기표준부 전기자기그룹 선임연구원  
Tel : 042-868-5152, Fax : 042-868-5018  
E-mail : jkjung@kriss.re.kr



### 권성원 (權聖遠)

1952년 1월 19일생. 1974년 한국항공대 전자공학과, 1978년~현재 한국표준과학연구원 전자기표준부 전기자기그룹 책임연구원  
Tel : 042-868-5155, Fax : 042-868-5018  
E-mail : swkwon@kriss.re.kr



### 박영태 (朴榮泰)

1952년 10월 31일생. 1997년 국립충남대학교 전기공학과 졸업 박사. 1983년~현재 한국표준과학연구원 전자기표준부 전기자기그룹 책임연구원  
Tel : 042-868-5158, Fax : 042-868-5018  
E-mail : pyt@kriss.re.kr