

## Development of a Calculable Potential Transformer with Wide Ratio Error

權 聖 遠<sup>†</sup> · 鄭 在 甲<sup>\*</sup> · 李 相 和<sup>\*\*</sup> · 金 明 壽<sup>\*\*\*</sup>

(Sung-Won Kwon · Jae-Kap Jung · Sang-Hwa Lee · Myungsoo Kim)

**Abstract** - A calculable potential transformer (PT) with nominal ratio error in wide range of -10 % to +10 % has been developed on basis of theoretical calculation of ratio error by the number of windings. The developed PT can be used to evaluate the linearity and accuracy of the PT comparator by comparing both the theoretical and experimental values of the PT which have exactly same ratio errors in nominal and calculated values. The PT has been applied for calibration and correction of the PT comparator up to wide ratio error range of -10 % to +10 %. This portable PT is very convenient to carry to the power industry for the on-site calibration of the PT comparator.

**Key Words** : Calculable potential transformer(PT), Wide ratio error PT, PT comparator, On site calibration, linearity

### 1. 서 론

전압변성기(potential transformer : PT)는 수 백 V ~ 수 백 kV의 고전압을 안전하고 정밀측정이 가능하도록 낮은 전압으로 변환하는 일종의 변압기이다. PT를 생산하는 산업체나 교정시험기관에서는 PT의 비오차를 평가하기 위하여 전압변성기 비오차 측정시스템(이하 PT comparator)을 사용한다.<sup>[1]</sup> 실용되고 있는 PT는 오차의 등급에 따라 0.1 급 ~ 3.0 급의 총 5개 등급으로 나누고 있으며, 등급에 따라 허용되는 비오차는  $\pm(0.1 \sim 3) \%$  이하의 성능을 갖도록 규정하고 있다.<sup>[2]</sup> 이와 같은 요구를 충족시키기 위해서는 PT의 비오차를 정밀측정하는 PT comparator 비오차의 정확도와 직선성을 상기의 요건을 보증할 수 있도록 유지하여야 한다. 대부분의 PT comparator는  $\pm 20 \%$ 의 비오차 범위까지 측정할 수 있도록 설계되었으며, 주기적으로 전체의 비오차 범위에 대한 교정을 실시하여 비오차 측정결과에 대한 유효성을 확보하는 것은 PT의 품질관리 및 교정시험 검사에서 대단히 중요하다.

지금까지 발표된 wide ratio error PT(이하 WRE PT)<sup>[3,4]</sup>는 (-9 ~ +11) %의 명목 비오차를 갖고 있으며, PT

comparator의 정확도 및 직선성을 평가하는데 매우 유용하게 활용되고 있다. 그러나 2차측의 권선수를 고정시키고, 1차측의 권선수를 변화시켜 설계 제작하였기 때문에 명목 비오차가 이론적인 계산 비오차와 정확히 일치하지 않는다<sup>[4]</sup>. 예를 들면 명목 비오차가 +1.0 % 및 -1.0 %인 경우 계산 비오차는 각각 +1.0093 % 및 -0.9893 %이다. 이러한 계산 비오차를 갖고 있는 WRE PT를 비오차 표준기로 활용하여 PT comparator를 평가하고 분석하기 위해서는 WRE PT의 명목 비오차에 대한 성적서와 일일이 대조해야만 하는 불편함이 따랐다.

위와 같은 불편을 없애기 위하여 1차측의 권선수를 고정시키고, 2차측의 권선수를 변화시켜서 (-10 ~ +10) % 범위에서 명목 비오차가 계산 비오차와 정확히 일치하도록 설계한 새로운 방식의 PT를 개발하였다. 예를 들면 명목 비오차가 +1.0 % 및 -1.0 %인 경우 계산 비오차는 각각 +1.0000 % 및 -1.0000 %이 되도록 하였다. 이런 방식으로 설계 제작한 WRE PT의 명목 비오차가 계산 비오차와 정확히 일치하기 때문에, PT comparator를 교정할 때 표준값인 계산 비오차를 참조하기 위해서 별도의 성적서와 일일이 대조할 필요가 없는 장점을 갖고 있다.

본 논문에서는 (-10 ~ +10) % 범위의 명목 비오차를 갖고, 명목 비오차와 이론적인 계산 비오차가 정확히 일치하는 WRE PT를 이용한 PT comparator 비오차의 정확도 평가에 관한 측정기술을 다룬다. 새로운 방식의 WRE PT의 비오차 측정값과 이론적인 계산 비오차 사이의 일치도를 분석함으로써 종전의 WRE PT를 활용할 때 보다 PT comparator 비오차의 정확도를 보다 편리하게 평가할 수 있다. 개발된 WRE PT는 1차측 전압이 1100 V, 2차측 전압이 110 V로써 정격변환비가 10이며, 이 경우의 비오차가 영(零)이 되도록 설계하였다.

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 韓國標準科學研究院 基盤標準部, 電磁氣센터 責任研究員

E-mail : swkwon@kriss.re.kr

<sup>\*</sup> 正會員 : 韓國標準科學研究院 基盤標準部 電磁氣센터 責任研究員

<sup>\*\*</sup> 正會員 : 韓國標準科學研究院 基盤標準部 電磁氣센터 研究員

<sup>\*\*\*</sup> 正會員 : 韓國標準科學研究院 標準普及部長

接受日字 : 2008年 1月 23日

最終完了 : 2008年 4月 22日

## 2. 전압변성기의 원리 및 비오차 계산

전압변성기는 철심에 1차 코일과 2차 코일을 감은 변압기의 일종으로서 등가회로를 그림 1에 나타내었다.  $Z_0$ 는 전압변성기의 누설 출력 임피던스(leakage output impedance)이다. 전압변성기의 2차측 저전압( $V_s$ )에 대한 1차측 고전압( $V_p$ )의 비는 2차측 권선수( $n_2$ )에 대한 1차측 권선수( $n_1$ )의 비와 같으므로 아래와 같이 쓸 수 있다.<sup>[5,6]</sup>

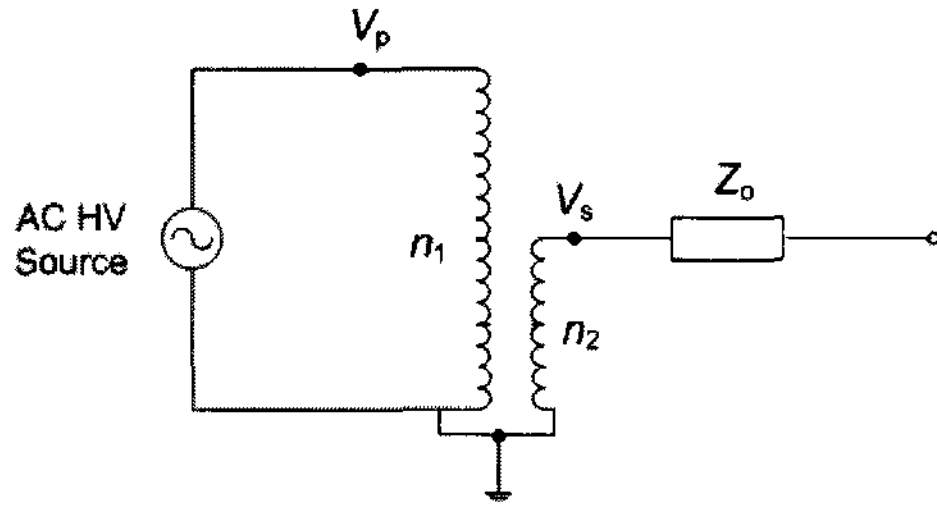


그림 1 전압변성기의 등가회로  
Fig. 1 An equivalent circuit of the potential transformer

식 (1)은 오차가 없는 이상적인 변압기에 해당되는 정격 변환비( $N$ , rated transformation ratio)에 대한 식이며, 실제의 PT는 고유한 오차(error)( $\delta$ )를 가지고 있기 때문에 식 (2)와 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{n_1}{n_2} + \delta \quad \text{혹은} \quad V_p = V_s \left( \frac{n_1}{n_2} + \delta \right) \quad (2)$$

한편 전압변성기의 비오차(ratio error, RE)는 아래와 같이 정의된다.

$$RE \equiv 100 \cdot \left[ \frac{(NV_s - V_p)}{V_p} \right] [\%] \quad (3)$$

여기서  $N$ 은 전압변성기의 정격 변환비이다. 식 (2)의 오른쪽의 수식을 이용하여 식 (3)을 다시 쓰면

$$RE \equiv 100 \cdot \left( \frac{N - \frac{n_1}{n_2} - \delta}{\frac{n_1}{n_2} + \delta} \right) \cong 100 \cdot \left( \frac{Nn_2 - n_1}{n_1} \right) + \epsilon_s [\%] \quad (4)$$

이다. 식 (4)에서 우변의 첫 번째 항은 권선비에 의한 비오차이고 두 번째 항은 자체 비오차로서 각각 아래와 같다.

$$\text{권선비에 의한 비오차 : } \epsilon_t = 100 \cdot \left( \frac{Nn_2 - n_1}{n_1} \right) \quad (5)$$

$$\text{자체 비오차 : } \epsilon_s = 100 \cdot \left( -N\delta \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2 \right) \quad (6)$$

식 (4), (5), (6)에서와 같이 정격 변환비( $N$ )와 권선비(turn ratio)가 동일한 경우,  $N = \frac{n_1}{n_2}$  일때의 비오차는 자체 비오차만을 가지고 있으나, 권선비가 정격변환비와 다를 경우에는 권선비에 의한 비오차와 자체 비오차를 함께 포함하고 있음을 알 수 있다.

## 3. 전압변성기 비오차 측정시스템의 구성

그림 2는 산업체 등에서 활용하고 있는 PT comparator 시스템의 원리도이다. 고전압 발생원으로부터 표준 전압변성기(standard PT)와 피측정 전압변성기(test PT)의 1차측에 동일한 전압을 병렬로 공급하고, 두 전압변성기의 2차측 전압을 전압비교기에 연결하여 비오차를 측정한다. 이 시스템에서는 비오차가 0.1 % 이하인 이상적인 PT가 표준 전압변성기로 사용되며, 상용의 PT comparator의 비오차 범위는 대부분 최대  $\pm 20\%$  이다. 국내의 산업체에서 활용되고 있는 PT comparator는 독일의 Zera, 스위스의 Tettex, 일본의 Soken의 것이 대표적인 제품으로서, 측정원리와 방법은 서로 유사하다.

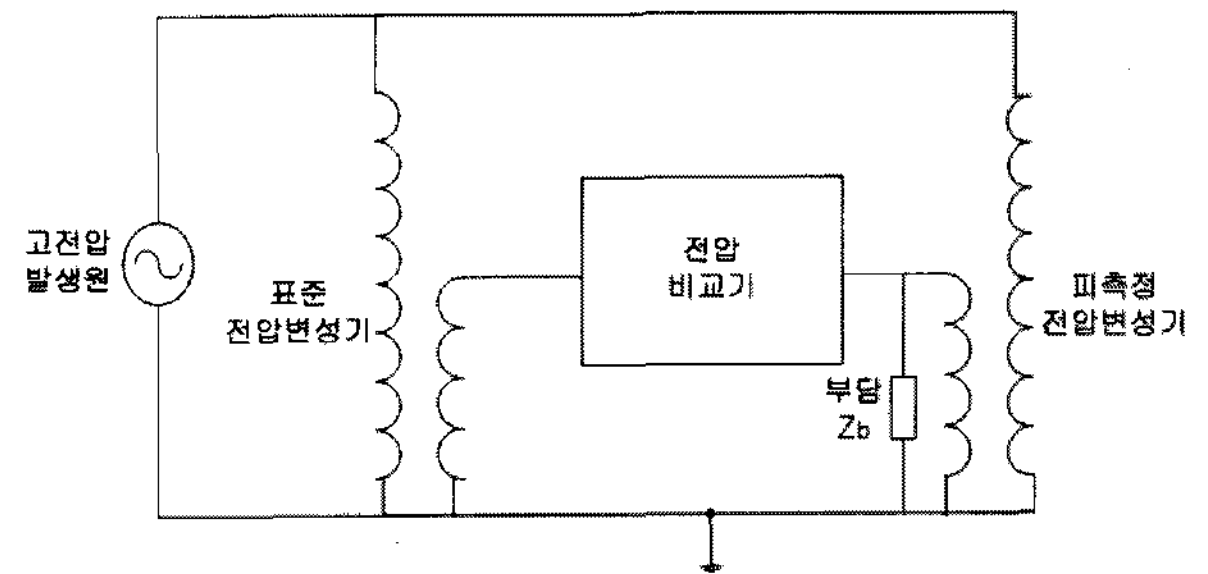


그림 2 PT comparator 시스템의 원리도.  
Fig. 2 Principal diagram of the potential transformer comparator system.

## 4. Wide Ratio Error PT를 이용한 PT Comparator의 비오차 직선성 평가

### 4.1 Wide Ratio Error PT의 설계 제작

PT comparator의 현장교정용으로 활용하기 위해서 개발한 calculable WRE PT는 명목 비오차를 0%,  $\pm 0.1\%$ ,  $\pm 0.2\%$ ,  $\pm 0.5\%$ ,  $\pm 1\%$ ,  $\pm 3\%$ ,  $\pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$ 가 되도록 하였으며, 그림 3은 계산형 WRE PT의 권선도이다. 이 WRE PT는 피시험 PT의 1차측 전압이 2000 V 이하인 PT comparator의 비오차의 직선성을 평가할 수 있도록 1차측 및 2차측 전압이 각각 1100 V 및 110 V가 되도록 하였으며, 규소강보다 투자율이 큰 니켈 코어를 사용하였기 때문에 무게가 상대적으로 가벼워서 표준기로 작업현장에서 활용하기에 편리하도록 제작하였다.

그림 3에서 2 차측의 권선수가 1000회인 단자의 경우 1차측의 권선수가 10000회이고, 정격 변환비(N)가 10 이므로 식 (5)에 따른 권선비에 의한 계산 비오차는 영(零)이다. 다른 단자의 경우는 1차측의 권선수를 10000회로 고정시키고, 2차측의 권선수를 각각 90회, 950회, 970회, 990회, 995회, 998회, 999회, 1001회, 1002회, 1005회, 1010회, 1030회, 1050회, 1100회 가 되도록 권선하였다. 이들 단자들의 권선비에 의한 비오차는 식 (5)를 이용하여 계산하면 각각 -10.0000 %, -5.0000 %, -3.0000 %, -1.0000 %, -0.5000 %, -0.2000 %, -0.1000 %, +0.1000 %, +0.2000 %, +0.5000 %, +1.0000 %, +3.0000 %, +5.0000 %, +10.0000 % 가 된다. 이들 단자에 대한 비오차를 계산할 때 정격변환비(N)는 항상 10을 사용한다. 이와 같이 계산한 권선비에 의한 비오차(계산 비오차)를 표 1의 세 번째 열에 나타내었다.

**4.2 Wide Ratio Error PT의 권선비에 의한 비오차의 측정값**

그림 2의 PT comparator에서, WRE PT를 피측정 PT의 위치에 연결하고 비오차를 측정하였으며, 이 결과를 표 1의 네 번째 열에 나타내었다. WRE PT의 비오차 측정값은 식 (4)와 같이 두 가지 요인으로 나타낼 수 있다. 즉 WRE PT의 비오차 측정값은 권선비에 의한 비오차와 자체 비오차의 합이다.

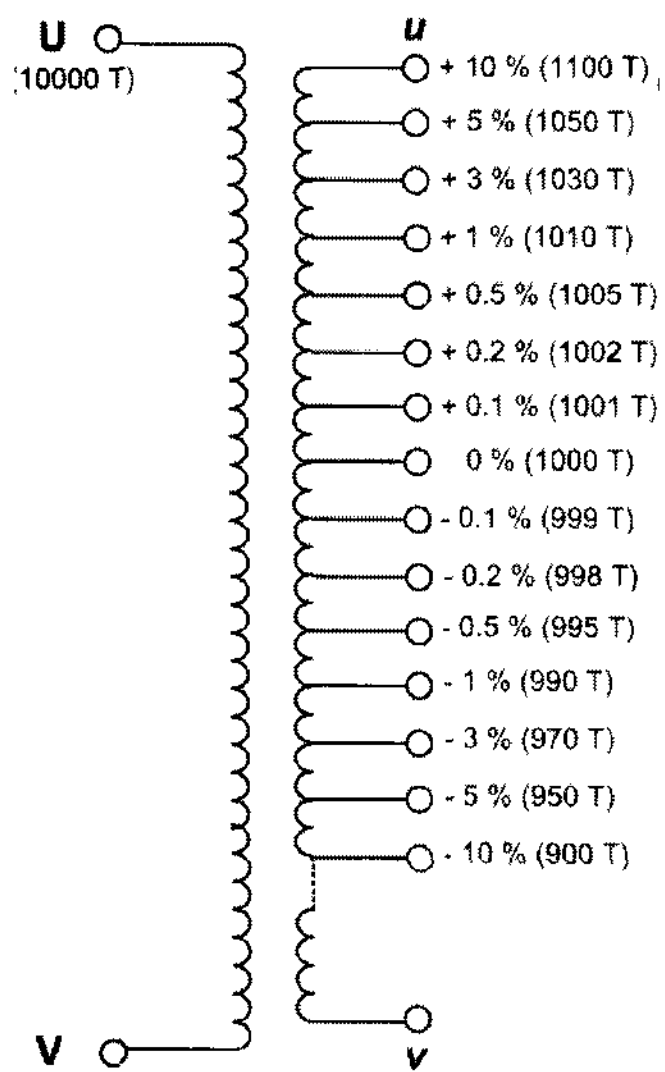


그림 3 넓은 범위의 비오차를 갖는 계산형 전압변성기의 권선도 (T : 권선수)

Fig. 3 Wiring of the calculable PT with wide ratio error (T: number of winding).

자체 비오차는 자기 포화 현상과, 1차측과 2차측의 누설 임피던스에 의해 생기는 내부오차로서, - 0.1142 % 로 측정되었다. 자체 비오차는 권선비에 의한 비오차가 전혀 없는

전압변성기가 자체적으로 가지고 있는 비오차로서, N=10 이고, 2차측 권선수에 대한 1 차측 권선수의 비가 10000/1000 인 권선비에서 측정된 오차에 해당한다. 이는 식 (6)에서

$$\epsilon = 100 \cdot \left( -10\delta \frac{1000^2}{10000^2} \right) = -0.1142 \% \text{ 에 해당되므로 여기서}$$

$\delta$ 를 계산하면  $\delta=0.01142$  에 해당된다. 다른 단자에 대해서도  $\delta=0.01142$ 와 식 (6)을 이용하여 계산된 자체 비오차 값을 계산하여 표 1의 다섯 번째 열에 나타내었다. 따라서 권선비에 의한 비오차의 측정값은 식 (4)에 의해 [CWRE PT의 비오차 측정값-자체 비오차] 이므로, 이를 계산하여 표 1의 여섯 번째 열에 나타내었다.

**4.3 PT Comparator 비오차의 직선성 평가결과의 논의**

PT comparator의 비오차의 정확도 및 직선성이 정확하게 유지된다면, WRE PT의 각 단자의 권선비에 의한 비오차의 측정값은 계산값과 동일해야 한다. 이 두 값의 차이, 즉 [권선비에 의한 비오차(계산값)-권선비에 의한 비오차(측정값)]가 PT comparator의 비오차에 대한 보정값이며, 이 보정값을 표 1의 마지막 열에 나타내었다.

표 1에서 보는 바와 같이 명목 비오차 - 0.5 % ~ + 0.5 % 범위에서는 계산값과 측정값의 차이가  $\pm 0.0007 \%$  이하이고, 명목 비오차  $\pm 1 \%$  에서는 계산값과 측정값의 차이가 최대  $\pm 0.0014 \%$  이다. PT comparator의 불확도<sup>[7]</sup>가  $\pm 0.002 \%$  이므로 위의 비오차 범위에서는 PT comparator의 비오차를 보정할 필요가 없다. 명목 비오차가 큰 범위에서는 차이가 점점 증가하여, -10 %에서는 + 0.0108 % 만큼, +10 %에서는 -0.0145 % 만큼 PT comparator 비오차의 측정값을 보정해야 정확한 측정결과를 얻을 수 있다(표 1의 e 참조).

여기서 보는 바와 같이 개발된 WRE PT를 이용하여 분해능이 0.0001 % 로 우수한 PT comparator의 비오차를 -10 % ~ +10 % 범위에서 정확히 평가할 수 있게 되었으며, 표 1의 첫 번째 열 및 네 번째 열에서 보는 바와 같이 명목 비오차가 계산 비오차와 정확히 일치하므로 PT comparator 측정결과를 분석할 때 별도의 참조용 성적서와 대조할 필요가 없고, WRE PT의 명목 비오차를 표준값으로 직접 사용하면 된다.

그림 4는 개발된 WRE PT의 명목 비오차에 따른 권선비에 의한 비오차의 이론적인 계산값 및 측정값(Y축의 왼쪽)과 PT comparator의 비오차 보정값(Y축의 오른쪽)을 나타낸 것이다. 여기서 보는 바와 같이 비오차 범위 -10 % ~ +10 % 범위에서 직선성이 우수하며, 또한 PT comparator의 보정값은 명목 비오차  $\pm 5 \%$  이하에서는 최대  $\pm 0.0069 \%$  이하이며, 비오차  $\pm 10 \%$ 에서는 최대  $\pm 0.0145 \%$  이하로 나타났다. 이와 같이 개발된 WRE PT를 활용하여 PT comparator의 비오차의 정확도와 직선성을 평가하는데 매우 간편하게 사용할 수 있다.

표 1 Wide ratio error PT 변수 및 PT comparator의 보정 값.

Table 1 Parameters of the WRE PT and correction of the PT comparator. (단위 : %)

명목 비오차 (%)	권선비 ( $n_1/n_2$ )	권선비에 의한 비오차 계산값 <sup>a</sup>	비오차 <sup>b</sup> (측정값)	자체 비오차 <sup>c</sup>	권선비에 의한 비오차 측정값 <sup>d</sup> (b-c)	보정값 <sup>e</sup> (a-d)
- 10	10000/900	-10.0000	-10.1033	-0.0925	-10.0108	+0.0108
- 5	10000/950	-5.0000	-5.1088	-0.1031	-5.0057	+0.0057
- 3	10000/970	-3.0000	-3.1109	-0.1075	-3.0034	+0.0034
- 1	10000/990	-1.0000	-1.1131	-0.1119	-1.0012	+0.0012
- 0.5	10000/995	-0.5000	-0.6136	-0.1131	-0.5005	+0.0005
- 0.2	10000/998	-0.2000	-0.3140	-0.1137	-0.2003	+0.0003
- 0.1	10000/999	-0.1000	-0.2141	-0.1140	-0.1001	+0.0001
0	10000/1000	0.0000	-0.1142	-0.1142	0.0000	0.0000
+ 0.1	10000/1001	+0.1000	-0.0143	-0.1144	+0.1001	-0.0001
+ 0.2	10000/1002	+0.2000	+0.0856	-0.1147	+0.2003	-0.0003
+ 0.5	10000/1005	+0.5000	+0.3854	-0.1153	+0.5007	-0.0007
+ 1	10000/1010	+1.0000	+0.8849	-0.1165	+1.0014	-0.0014
+ 3	10000/1030	+3.0000	+2.8830	-0.1212	+3.0042	-0.0042
+ 5	10000/1050	+5.0000	+4.8810	-0.1259	+5.0069	-0.0069
+ 10	10000/1100	+10.0000	+9.8763	-0.1382	+10.0145	-0.0145

- a : 식 (5)에 의해 계산된 권선비에 의한 비오차.
- b : PT comparator로 측정한 WRE PT의 비오차(영부담)
- c : WRE PT에서  $\delta=0.01142$ 와 식 (6)을 이용하여 계산된 자체 비오차.
- d : [WRE PT의 비오차 측정값 - 자체 비오차]
- e : PT comparator의 보정값

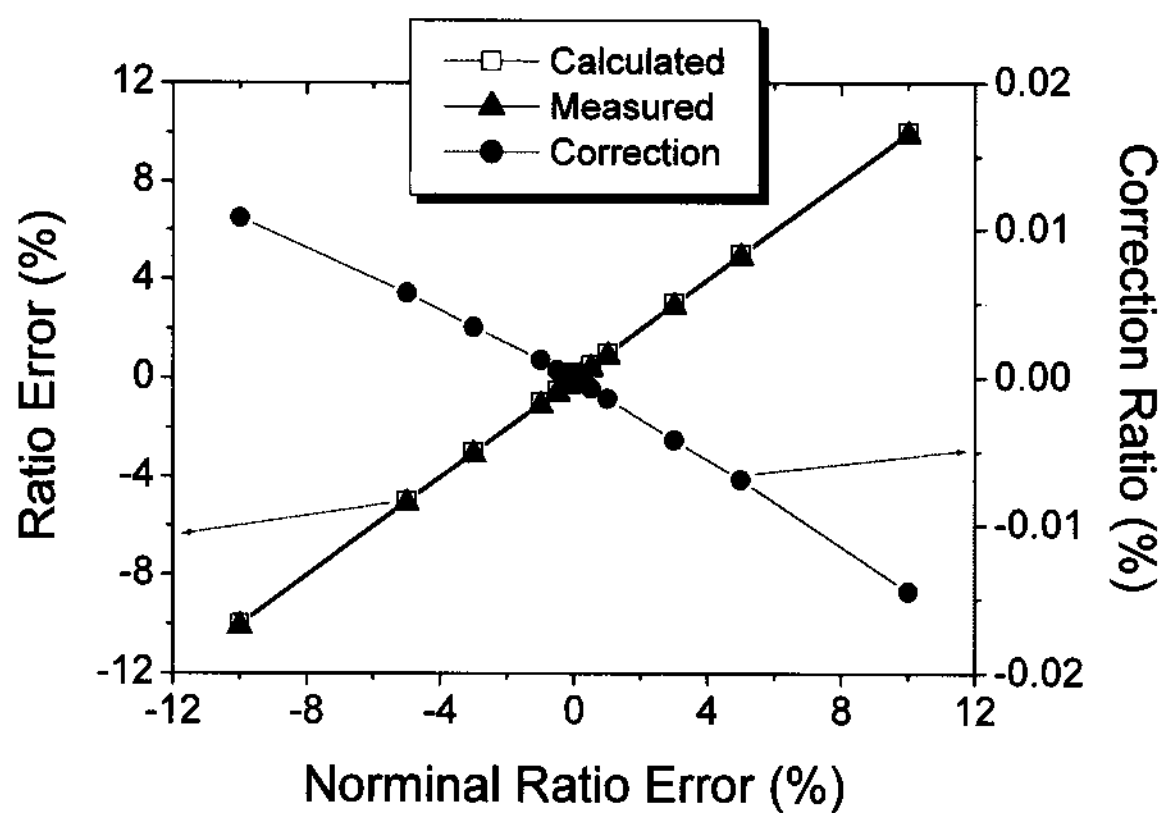


그림 4 명목 비오차에 따른 권선비에 의한 비오차의 이론값 및 측정값과 PT comparator의 비오차 보정값.

Fig. 4 Theoretically calculated and measured ratio errors depend on nominal ratio error, and correction value of the ratio error for PT comparator.

## 5. 결 론

명목 비오차가 권선비에 의한 비오차 계산값과 정확히 일치하고, (-10 ~ +10) % 범위의 비오차를 갖는 광범위 비오차 전압변성기(wide ratio error PT, 이하 WRE PT)를 설계 제작하였으며, 이 WRE PT를 이용하여 (-10 ~ +10) %의 비오차 범위에서 PT comparator 비오차의 정확도 및 직선성을 평가할 수 있는 기술을 개발했다.

개발한 WRE PT를 사용하여 PT comparator의 비오차 직선성을 평가한 결과를 보면, 명목 비오차 -0.5% ~ +0.5% 범위에서는 보정값이 약  $\pm 0.0007$  % 이하이고, 명목 비오차  $\pm 1$  % 에서는 보정값이 최대  $\pm 0.0014$  % 이다. PT comparator의 불확도가  $\pm 0.002$  % 이므로  $\pm 1$  % 이하의 비오차에서는 PT comparator의 비오차를 보정할 필요가 없다. 명목 비오차가 큰 범위에서는 차이가 점점 증가하여, -10% 에서는 +0.0108% 만큼, +10% 에서는 -0.0145% 만큼 PT comparator 비오차의 측정값을 보정해야 정확한 측정결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 여기서 보는 바와 같이 새로운 WRE PT를 이용하여 분해능이 0.0001% 인 PT comparator의 비오차를 (-10 ~ +10) % 범위에서 정확히 평가할 수 있게 되었으며, 명목 비오차가 이론적인 계산 비오차와 정확히 일치하므로 PT comparator 측정결과를 분석할 때 개발된 본 WRE PT의 명목 비오차를 표준값으로 직접 사용할 수 있게 되었다.

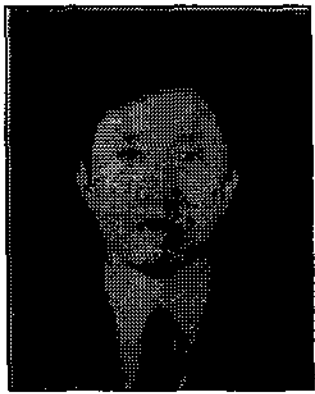
일반적으로 PT comparator는 크고, 무거워서 운반이 쉽지 않으며, 생산제품의 품질관리 또는 교정시험용으로 빈번히 사용되므로 이 시스템을 외부의 교정시험기관에 보내서 교정을 받기는 여러 가지로 애로 사항이 많다. 그러나 개발된 WRE PT를 이용한 PT comparator의 비오차의 직선성 평가기술은 이동이 용이한 WRE PT를 산업체로 이동하여 현장에서 PT comparator의 정확도와 직선성을 평가할 수 있는 장점이 있기 때문에 산업체 등에서 크게 활용될 수 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] 정재갑, 권성원, 김규태, 김명수, "외부부담이 전압변성기의 비오차와 위상각오차에 미치는 영향에 대한 연구", 대한전기학회지, vol. 53C, No. 3, pp 137-142, 2004.
- [2] 계기용변성기, KSC 1706.
- [3] 정재갑, 권성원 등, "넓은 범위의 비오차를 갖는 전압변성기를 이용한 계기용 변성기 비교측정 장치의 비오차 직선성 평가기술", 대한전기학회지, vol. 53C, No. 3, pp 137-142, 2004.
- [4] 권성원, 정재갑 등, "초정밀 광범위 비오차 전압변성기의 개발 및 그 응용", 대한전기학회지, vol. 55C, No. 6, pp 317-322, 2006.
- [5] 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.

- [6] IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers, American National Standards Institute, ANSI/IEEE C57, No. 13, pp. 45-46, 1978.
- [7] Certificate of the PT comparator, Zera model WM 303U, PTB, 2005.

**저 자 소 개**



**권 성 원 (權 聖 遠)**

1952년 1월 19일생. 1974년 한국항공대학교 전자공학과 졸업.  
1974년~1977년 공군정밀측정시험소 전기전자시험과장.  
1978년~현재, 한국표준과학연구원 책임연구원  
Tel : 042-868-5155  
Fax : 042-868-5018  
E-mail : swkwon@kriss.re.kr



**정 재 갑 (鄭 在 甲)**

1965년 7월 4일생. 1998년 고려대 물리학과 졸업(이학박사). 1999~2001 아이오아 주립대 박사후 연수. 2001년~현재 한국표준과학연구원 책임연구원  
Tel : 042-868-5152  
Fax : 042-868-5018  
E-mail : jkjung@kriss.re.kr



**이 상 화 (李 相 和)**

1967년 1월 26일생. 1994년 한밭대 전자공학과 졸업. 1986년~현재 한국표준과학연구원 연구원  
Tel : 042-868-5151  
Fax : 042-868-5018  
E-mail : shlee@kriss.re.kr



**김 명 수 (金 明 壽)**

1954년 8월 26일생. 1977년 서울공대 화공과 졸업.  
1986년 미국 미주리대(공학박사).  
1977년~1982년 국방과학연구소.  
1987년~현재: 한국표준과학연구원, 표준보급부장  
Tel : 042-868-5040  
Fax : 042-868-5439  
E-mail : mkim@kriss.re.kr