

Precision Measurement Technique of DC Voltage/Resistance Ratio

金奎泰* · 劉玟民**
(Kyu-Tae Kim and Kwang Min Yu)

Abstract - We developed 1:1 resistance ratio measurement system for precision measurement of a series-resistor type dc voltage divider. By using active guard technique and exchange technique, any leakage effects, which are one of the most critical error sources, were successfully removed. The best measurement uncertainty with the developed ratio measurement system was estimated to be approximately 10^{-8} for 10 kΩ and 100 kΩ.

Key Words : 표준, 정밀측정, 전압, 저항, 직류비율, 누설

1. 서 론

세계 여러 국가측정기관에서 저항형 분압기는 SI (국제단위계 [1]) volt를 표현하는 원기인 조셉슨 전압 표준기 (1 V 또는 10 V)로부터 1000 V 범위까지 전압표준을 확립하기 위한 비율표준으로 활용되고 있다. 이 경우 전압표준의 SI 소급 정확도는 분압기 비율의 정확도에 의해 결정된다. 가장 정확도가 뛰어난 직렬저항형 분압기의 경우 3:1, 10:1, 100:1 등의 분압비는 저전압 측 기준 저항(또는 저항군)에 대한 상위 단자들의 각 1:1 저항비율들의 합으로 구해진다. 1:1 저항비율 측정 방법 가운데 가장 정확한 방법은 전류비교기를 이용하는 방식이다. 그러나 10 kΩ이상의 저항범위에 대해서는 사용 전류의 크기가 작아지므로 전류 비교기 등에서 사용되는 전류감지 방식보다는 potentiometry 등에서 사용되는 전압 감지방식이 더 정확하다. 본 연구에서는 비교적 높은 전압까지도 활용할 수 있도록 10 kΩ이상의 저항범위에 대해서 잘 알려진 potentiometry[2],[3] 원리를 적용하였다. 즉 공칭값이 같은 2개 저항 R_m 과 R_1 을 직렬로 연결한 상태에서 동일한 전류를 흘릴 때 각 저항의 전압강하의 비율, V_m/V_1 을 구하는데 정확도를 높이기 위해 해당 강하 전압 근방의 전압 V_0 를 갖는 더미(dummy) 기준전압기를 이용하여 각 전압강하의 차전압을 측정한다. 이 측정 원리를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$V_m/V_1 = 1 + (V_m - V_1)/V_1 = 1 + (\Delta V_m - \Delta V_1)/V_1 \quad (1)$$

여기서 ΔV_m 은 $V_m - V_0$ 를 의미한다. 두 전압강하를 직접 측

정하는 대신 더미에 대한 차전압을 측정하는 이유는 μV 이하 몇 자리까지 정확히 측정하기 위해서이다. 예컨대 10 kΩ에 대해 1 mA를 사용할 경우 V_m 은 10 V 근처이므로 직접 측정할 경우 μV 이하 자리까지 정확히 측정하기가 어렵다. 그러나 10 V 더미를 사용할 경우 작은 차전압만을 측정하면 되므로 μV 이하 자리까지 정확히 측정하기가 용이하다. $(\Delta V_m - \Delta V_1)/V_1$ 의 크기가 대략 10^{-5} 이므로 V_1 의 측정은 대략 0.1% 정도면 충분하다. 즉, 대부분의 표준 분압기의 경우 V_1 이 10 V 일 때 $\Delta V_m, \Delta V_1$ 는 대략 0.1 mV 이하이므로 V_1 의 측정 불확도가 δV_1 이라 하면 이것이 V_m/V_1 측정에 미치는 효과는 대략 $(0.1 \text{ mV}/10 \text{ V}) \times (\delta V_1/V_1)$ 정도에 불과한 것이다. 따라서 $\Delta V_m, \Delta V_1$ 만 정확히 측정하면 1:1 비율을 정확히 구할 수 있게 된다. 식 (1)의 분자에 더미 전압 V_0 는 서로 상쇄되므로 V_0 의 정확한 값은 알 필요 없고 대신 측정하는 동안 안정도만 충분히 보장되면 된다.

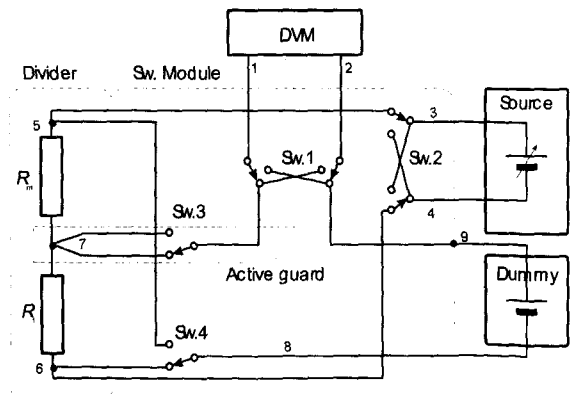


그림 1 개발된 비율 측정장치의 회로도. DVM은 digital voltmeter를 뜻함.

Fig. 1 Circuit diagram of developed 1:1 ratio measurement system.

* 正 會 員 : 韓國標準科學研究院 責任研究員, 理學博士
 ** 正 會 員 : 韓國標準科學研究院 先任研究員
 接受日字 : 2001年 10月 16日
 最終完了 : 2002年 2月 10日

그런데 저항 비율 측정에서 가장 중요한 오차요인의 하나인 누설효과는 10 kΩ 이상의 범위에서 매우 중요하게 된다.[4] 개발된 측정장치는 새로운 교환측정 기술 및 능동 가드 기술을 적용하여 누설영향을 원천적으로 제거할 수 있었으며 잡음이 매우 적어 짧은 시간 안에 매우 정확한 측정값을 얻을 수 있었다.

2. 개발된 비율 측정 장치

2.1 측정장치

본 장치에서 사용되는 주요 장비에는 전류공급기, 더미 기준기, 전압계 등이 있으며 측정 회로는 스텝모터 로 구동되는 고전압 스위치들로 구성된다(그림 1). 본 실험에서는 전류공급기로는 직류전압조정기를, 더미기준기로는 제너전압표준기 또는 또 다른 직류전압조정기를, 전압계로는 8½ 디지털 멀티미터를 사용하였다. 그림 2는 교환방식을 적용한 비율 측정과정을 나타내고 있다. 모든 측정과정은 PC를 통해 자동으로 이루어지도록 프로그램되었다. 교환 측정방법 및 능동가드를 사용하기 전의 구 측정시스템에서는 각 전압강하의 차전압 ΔV_m 과 ΔV_1 측정을 위해 그림 2 (b)의 전압계(D) 1번도체와 8번 도체가 R_m 과 R_1 사이를 평행 이동하는 방식이어서 다음과 같은 문제가 있었다.

- ΔV_m 및 ΔV_1 측정에 따라 등가회로가 달라지므로 누설효과를 정확히 평가하기가 어려웠다.
- ΔV_m 및 ΔV_1 측정에 따라 전압계가 보는 접지구성이 달라지며 일반적인 방식대로 R_1 의 하단을 접지로 사용할 경우 ΔV_m 측정시 common mode potential에 기인한 잡음이 증가한다.

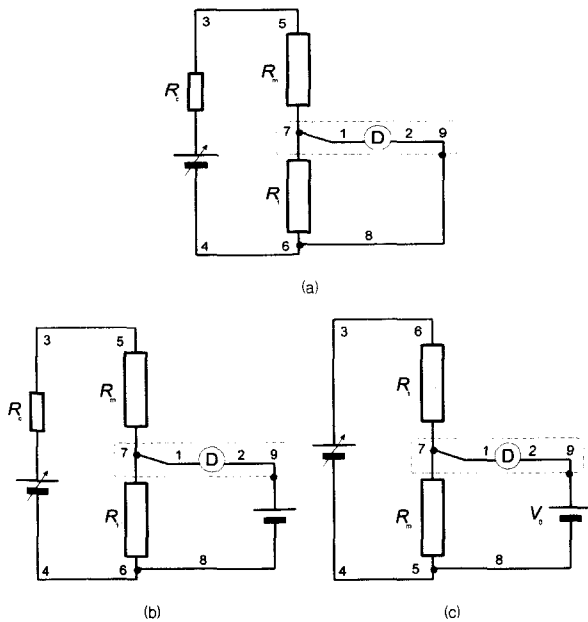


그림 2. 비율 자동측정과정.

Fig. 2. Automated ratio measurement procedure.

- 100 V 이상의 고전압에서 전압계의 입력단자와 전압계 케이스 단자 사이에 허용전압 이상이 걸려 전압계가 손상될 가능성이 있다.

다음은 이러한 문제를 해결하기 위해 새로 개발된 장치에서 사용한 두 가지 핵심 기술인 교환측정방법 및 능동가드에 대해서 기술한다.

2.2 교환측정방법

교환측정에서는 ΔV_m 및 ΔV_1 을 동일한 회로에서 측정할 수 있도록 R_m 및 R_1 의 위치를 교환하여 측정한다. 교환과정은 그림 1의 스위치 sw.2, sw.3 및 sw.4를 동시에 작동시킴으로써 이루어진다. 교환 측정 방식은 단지 R_m 및 R_1 만 위치가 바뀌는 것외에는 ΔV_m 및 ΔV_1 을 동일한 회로에서 측정하므로 측정회로에 누설이 있어도 그 영향이 ΔV_m 및 ΔV_1 측정시 동일하게 작용하므로 상쇄되는 경향이 있을 뿐 만 아니라 접지구성이 측정과정중 바뀌는 일이 없어 최적 접지구성이 용이하다. 본 장치에서 접지점은 더미 출력 상단으로 선정하였으며 모든 shield 및 케이스가 이곳에 연결된다. 이러한 접지구성에서는 전압계의 입력하단과 케이스간의 전압이 항상 측정하는 차전압 수준을 유지하므로 100 V 이상에서 측정하더라도 과전압이 걸리는 일이 없어 안심하고 사용할 수 있다. 그러나 이러한 교환 측정 방식에서는 그림 1의 sw.2 의 두 선택 위치간 접촉저항 차이로 인한 오차가 발생하며 정확한 보상이 필요하다. 다행히 이러한 영향은 10 kΩ 이상의 저항 측정에 대해서는 충분히 작다. 여기에 대해서는 불확도 분석에서 자세히 논의할 것이다.

2.2 능동가드

교환 측정방식이 모든 누설을 제거할 수 있는 것은 아니다. 즉 그림 2에서 도체 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9 는 교환 측정과정 중 변하지 않으므로 이들간의 누설은 일정하다. 그러나 피측정 저항에 붙어있는 도체 5, 6 번은 교환과정에 따라 위치가 변하므로 이들을 포함한 누설경로의 효과는 다른 방법으로 제거해야한다. 이를 위해 누설경로들을 살펴 볼 필요가 있다. 먼저 도체 5, 6 중 하나와 도체 3, 4, 8 들간의 누설은 측정에 영향을 미치지 않음을 쉽게 알 수 있다. 왜냐하면 누설 병렬저항은 최악의 경우 100 GΩ 정도이며 전류원의 출력저항 및 연결도선으로 이루어진 직렬 등가 저항은 1 Ω 이하에 대해 최대 10^{-11} 정도의 상대오차를 유발할 뿐이기 때문이다. 따라서 문제가 되는 누설 경로는 도체 5 또는 6과 도체 1, 2, 7, 9 사이의 누설이다. 즉 도체 1, 2, 7, 9 를 누설취약 도체라고 부를 수 있다. 이들 문제의 누설 경로들은 그림 1 및 그림 2에서 점선 상자로 나타낸 능동가드를 사용함으로써 완전히 차단된다. 즉 이들 누설 취약도체들을 완전히 둘러싸고 있는 가드가 전술한 접지점에 연결됨으로써 그 전위가 이들 도체와 동일하게 되고 따라서 누설전류는 실제로 0이 되는 것이다. 단, 더미 출력 하단과 가드 사이의 누설은 능동 가드로도 차단이 안될 것이다. 그러나 이 누설 저항은 최악의 경우 100 GΩ 정도로서 더미의 출력저항 및 연결도선으로 이루어진 직렬 등가 저항 1 Ω 이하에 대해 최대 10^{-11} 정도의 상대오차를 유발할 뿐이다.

3. 측정 결과

새로 개발된 측정 장치의 능동 가드의 효과를 시험해 보기 위해 고의로 100 GΩ의 누설 저항 2개를 삽입하여 100 kΩ 저항의 1:1 비율을 측정해 보았다. 삽입위치는 누설 취약 도체 7과 능동가드 사이 및 능동가드와 도체 6 사이이다. 그림 3에서 삼각형은 고의 누설을 연결하기 전 능동가드를 작동시킨 정상상태의 측정결과이며, 마름모는 고의 누설을 삽입하고 가드를 접지와 연결함으로써 능동가드를 작동시켰을 때의 측정 결과이며 정사각형은 고의누설을 삽입하고 능동 가드를 사용하지 않았을 때의 측정 결과이다, 능동가드를 사용했을 때 고의 누설의 존재 유무에 따른 두 측정 결과사이의 차이는 0.01×10^{-6} 이하로서 표준편차 약 0.03×10^{-6} 이내에서 매우 잘 일치하였다. 반면 능동가드를 사용하지 않았을 때(가드를 접지와 분리) 고의 누설로 인해 1:1 비율 측정값은 약 $+0.26 \times 10^{-6}$ 만큼 증가한 모습을 보여준다. 따라서 능동 가드는 매우 효과적으로 작용하고 있음을 알 수 있다. 고의 누설에 의한 오차가 + 방향으로 나타난 것은 고의 누설이 주로 그림 2의 R_1 에 병렬누설로 작용한 때문이다. 측정 회로에 고의 누설 외의 다른 누설이 없다고 가정하였을 때 예상된 비율 증가분은 $+0.5 \times 10^{-6}$ 이었다. 누설 회로 분석 결과 $+0.26 \times 10^{-6}$ 만큼 증가분을 만들기 위해서는 능동가드를 사용하지 않았을 때 실제로 측정회로에는 약 수 백 GΩ~ 수 TΩ의 균일한 누설이 내재하는 것으로 추정되었다. 능동가드를 사용할 때 이러한 누설의 영향은 완벽히 배제됨이 실험을 통해 확인된 셈이다. 그림 4는 비슷한 실험을 10 kΩ 표준저항 (ESI SR104)에 대해서 수행한 결과이다. 역시 능동 가드를 사용했을 때 고의 누설의 영향은 표준편차 약 0.03×10^{-6} 이내에서 전혀 발견되지 않았으나 능동가드를 사용하지 않았을 때 약 $+0.03 \times 10^{-6}$ 의 누설효과가 나타났다. 예상했던 대로 100 kΩ에 대해서 얻은 결과에 비해 약 10배 적은 효과이다.

그림 5는 100 kΩ 표준저항에 대해 표준기급 상용 전류비교기(DCC: Guildline 6675) 및 본 측정장치(DCVR)로 각기 1:1 비율을 측정한 결과이다. 두 측정값 평균의 차이는 약 0.07×10^{-6} 으로서 DCC 측정의 표준편차 약 0.43×10^{-6} ($n=25$) 이내에서 잘 일치하였다.

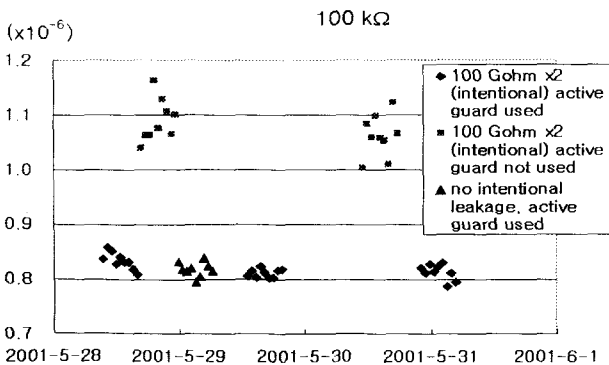


그림 3 여러가지 누설조건에서 측정한 100 kΩ 표준저항 (Datron 4902S, 0.3 mA) 1:1 비율의 1에 대한 편차.
 Fig. 3 Deviation of measured 1:1 ratios from unity for 100 kΩ standard resistors (Datron 4902S) under various leakage conditions with current of 0.3 mA.

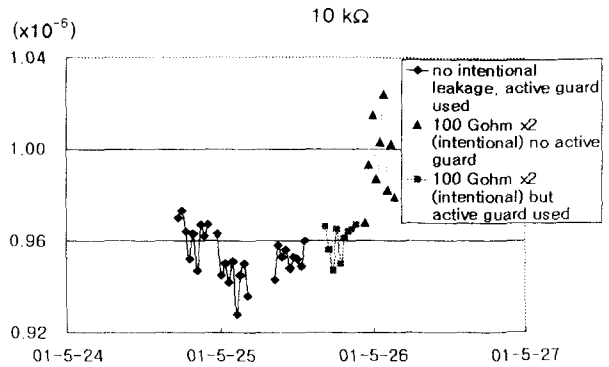


그림 4 여러가지 누설조건에서 측정한 10 kΩ 표준저항 (Datron 4902S) 1:1 비율의 1에 대한 편차. 측정전류는 0.3 mA.

Fig. 4 Deviation of measured 1:1 ratios from unity for 10 kΩ standard resistors (Datron 4902S) under various leakage conditions with current of 0.3 mA.

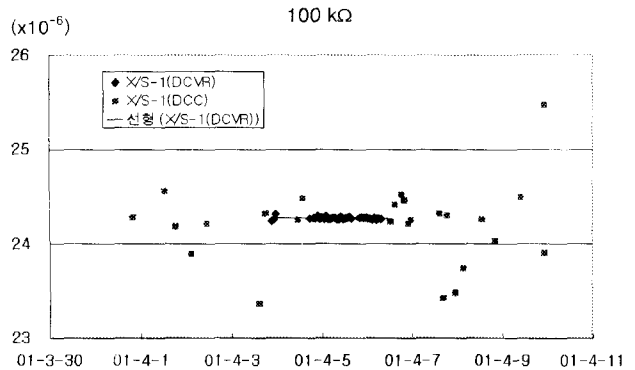


그림 5 100 kΩ 표준저항의 1:1 비율 비교측정 결과. DCC는 상용 직류전류비교기이며, DCVR은 본 연구에서 개발한 장치이다. 측정전류는 0.3 mA 이다.

Fig. 5 Comparison measurement of 1:1 ratio for 100 kΩ standard resistors at 0.3 mA. DCC means commercially available direct current comparator, and DCVR means the developed ratio measurement system.

4. 측정 장치의 불확도

본 실험에서 불확도에 영향을 주는 요인으로는 전류공급기, 더미, 전압계 등의 측정 중 안정도, 전술한 sw.2의 접촉 저항 차이, 전압계 offset의 측정중 변화, 측정회로 및 스위치의 열기전력 offset 등이 있다. 여기서 측정회로의 누설효과는 무시가가능하므로 고려하지 않기로 한다. 이들 여러 요인중 안정도에 관한 불확도는 이상적인 피 측정 저항에 대해 반복 측정한 A형 불확도로 평가하기로 하고 (이 A형 불확도에는 측정 장치의 안정도 뿐 아니라 피 측정 저항의 안정도도 포함되어 있으나 본 실험에서 사용한 표준기급 저항의 경우 그 안정도 영향은 매우 작다.) 나머지는 B형 불확도로 평가하기로 한다.[5]

4.1 A형 불확도, u_A

반복측정의 표준편차는 총 9회의 측정에 대하여 100 kΩ 및

10 kΩ 공허 약 0.03×10^{-6} 으로서 A형 불확도는 약 0.03×10^{-6} / $\sqrt{9} = 0.01 \times 10^{-6}$ 정도이다.

4.2 B형 불확도-접촉저항, u_{B1}

Sw.2의 접촉저항 차이는 교환측정과정에서 두 직렬 저항에 공급되는 전류의 차이를 유발하여 비율오차를 일으킨다. 측정된 접촉저항의 차이는 약 $0.4 \text{ m}\Omega \sim 0.8 \text{ m}\Omega$ 으로서 10 kΩ 측정시 약 $+0.02 \times 10^{-6} \sim +0.04 \times 10^{-6}$ 의 오차를, 100 kΩ 측정시 약 $+0.002 \times 10^{-6} \sim +0.004 \times 10^{-6}$ 의 오차를 유발한다. 이것을 보상하는 과정에서 접촉저항 측정의 불확실성으로 인한 불확도를 u_{B1} 으로 둔다. 접촉저항 측정 값의 확률분포를 중앙값이 0.6 mΩ 이고 반 범위가 0.2 mΩ인 균일한 직각 확률분포로 가정하면 해당 표준 불확도는 반범위 나누기 $\sqrt{3}$ 이므로 10 kΩ 측정의 경우 $u_{B1} = 0.012 \times 10^{-6}$, 100 kΩ 측정의 경우 $u_{B1} = 0.0012 \times 10^{-6}$ 이 된다.

4.3 B형 불확도-전압계 offset, u_{B2}

ΔV_m 및 ΔV_1 측정값에 각기 포함되어 있는 전압계의 offset은 식 (1)에서 알 수 있듯이 서로 상쇄되므로 문제가 안되나 측정중 offset이 변하면 오차를 유발하게된다. 측정중 최대 offset 변화는 약 $\pm 0.1 \mu V$ 로서 이를 직각확률분포의 반범위로 가정하면 100 kΩ 측정의 경우 전압강하 30 V에 대하여 $u_{B2} = 0.002 \times 10^{-6}$, 10 kΩ 측정의 경우 전압강하 3 V에 대하여 $u_{B2} = 0.02 \times 10^{-6}$ 이 된다.

4.4 B형 불확도-열기전력 offset, u_{B3}

측정회로 및 스위치 접점에서 발생하는 접촉전위인 열기전력의 재현성이 오차를 유발한다. 그 재현 범위는 본 장치에 사용한 스위치의 경우 최대 약 $\pm 20 \text{ nV}$ 에 불과하다. 그림 1에서 보듯이 차전압 측정회로에는 sw.1, sw.3 및 sw.4의 3개의 스위치가 사용된다. 만일 각 스위치가 동일한 정도의 열기전력 offset 재현성을 갖고 있다면, 차전압 측정시 $\pm (20 \text{ nV}) \times \sqrt{3}$ 범위의 오차를 줄 수 있다. 그런데 식 (1)에는 두 개의 차전압이 포함되므로 총 $\pm (20 \text{ nV}) \times \sqrt{3} \times \sqrt{2}$ 범위의 오차가 생길 수 있을 것이다. 이것을 직각확률분포의 반범위로 놓으면 100 kΩ 측정의 경우 전압강하 30 V에 대하여 $u_{B3} = 0.001 \times 10^{-6}$, 10 kΩ 측정의 경우 전압강하 3 V에 대하여 $u_{B3} = 0.01 \times 10^{-6}$ 이 된다.

4.5 최종불확도

이상의 불확도를 종합정리하면 최종불확도 $u_c(k=1)$ 를 $(u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2)^{1/2}$ 과 같이 구하면, 100 kΩ 측정의 경우 $u_c = 0.016 \times 10^{-6}$, 10 kΩ 측정의 경우 $u_c = 0.025 \times 10^{-6}$ 이 된다.

5. 결 론

1 kV 까지의 직류 전압 표준의 SI 소급성을 확보하기 위해 필수적인 전압/저항 비율 측정 장치를 새로 개발하였다.

교환측정법과 능동가드를 사용함으로써 과거에 비해 신뢰성 있는 측정이 가능해졌으며 불확도 분석이 단순 명료해 질 수 있었다. 본 측정 장치의 성능을 시험해 보기 위해 고의 누설 저항을 삽입해서 측정해본 결과 능동가드의 작동이 매우 효과적임을 확인하였다. 또한 표준기급 직류전류비교기와 비교 측정을 수행한 결과, 100 kΩ의 고저항 영역에서 본 장치는 탁월한 성능을 발휘함을 확인할 수 있었다.

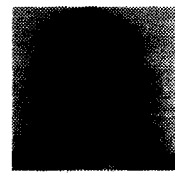
감사의 글

본 연구는 한국표준과학연구원의 기본사업인 국가표준 유지향상연구를 통해 수행된 것입니다.

참 고 문 헌

- [1] 국제단위계, 제7 개정판, KRISS-99-101-SP,1999.
- [2] T.J. Witt, D. Reymann and D. Avrons, "An accurate 10-kΩ resistance measurement," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol.40, pp.271-273, Apr. 1991.
- [3] L. Bliiek et al., "Measurements of the quantized Hall resistance h/e^2 with a reproducibility of 10^{-8} and its application for a novel determination of the ohm," *PTB-Mitt.*, vol.93, pp.19-20 and pp.44-45, 1988.
- [4] K.-T. Kim, S.I. Park, Y.M. Cho and S.-W. Kwon, "Common error sources in using a series-resistors type voltage divider below level of 0.01 ppm," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol.44, pp. 318-321, Apr. 1995.
- [5] ISO "Guide to the expression of uncertainty in measurements," 1991.

저 자 소 개



김규태 (金奎泰)
 1960년 김포출생. 1983년 인하대학교졸업. KAIST에서 석사(1983) 및 박사(1989) 취득. 1989년부터 한국표준과학연구원에서 조셉슨 국가전압표준 확립, 조셉슨 어레이 소자개발 등을 수행. 현 전기자기그룹장.

Tel : 042-868-5157
 Fax : 042-868-5018
 E-mail : ktkim@kriss.re.kr



유광민 (劉珖民)
 1960년 부산출생. 1983년 부산대학교졸업. 부산대학교에서 석사(1985) 취득. 1986년부터 한국표준과학연구원서 전기 저항표준유지 및 향상 연구를 하고 있음.

E-mail : kmyu@kriss.re.kr