

실은 저항브리지를 이용한 전기저항 측정의 국가표준 기술

유광민, 박영태, 강전홍, 김한준, \*임국형  
 \*한국표준과학연구원 전기.자기그룹, \*충남대학교 물리학과

National Measurement Standard of Electrical Resistance using a Room Temperature Resistance Bridge

Yu kwang min, Park young tae, Kang jeon hong, Kim han jun, \*G. Ihm  
 Korea Research Institute of Standards and Science, \*Chungnam National University

**Abstract** - Establishment of the Quantum Hall Resistance(QHR) Standard as national resistance standard using a room temperature DCC resistance bridge is described. A simple method are used to obtain the current dependence and error of 10:1 ratio of the bridge instead of the method using a cryogenic resistance bridge. Measurement uncertainty of the system is estimated as  $0.14 \times 10^{-6}$  and it is confirmed that the QHR standard is agreed well with the QHR of other NMIs using the cryogenic resistance bridge within the uncertainty. More improvement about performance of the QHR device and 10:1 ratio accuracy is still under progress.

1. 서 론

SI 전기단위는 종래의 척관법과는 달리 1960년 CGPM(국제 도량형 총회)을 통하여 국제 단위계로 채택되어 전세계 모든나라의 모든 분야에서 통일하여 사용되고 있다. 이들 단위는 자연현상에 기초하거나 혹은 인위적으로 만들어진 체계를 통하여 실현되고 유지된다. 자연현상을 통한 단위실현을 예로 들면, 시간의 단위 초는 세슘 원자의 바닥상태에 있는 두 초미세 준위간의 전이에 대응하는 복사선의 고정된 주기 수의 지속시간으로 정의된다. 또한, 길이의 단위 미터는 진공에서 빛이 1/299 792 458 초 동안 진행한 경로의 길이로 정의된다. 이들 정의에서 물리학의 가장 기본적인 상수인 빛의 속도가 사용되므로 이들 단위는 주위환경과 같은 외적 변수에 의존하지 않는다. 특히, 단위유지에 가장 중요한, 시간과 장소에 따라 변하지 않아 안정도와 정확도가 확실히 보장된다는 장점이 있으므로 세계 여러기관에서 동시에 그 단위를 실현 할 수 있게 되어 여러나라 들간의 일치성과 연계체계를 더욱 확고하게 할 수 있게 되었다. 전기저항 단위의 경우, 1980년 양자홀 효과(QHE, Quantum Hall Effect)가 발견되기 전까지 자국의 측정표준기관(NMI, National Metrology Institute)들은 인위적으로 만든 표준저항의 그룹의 평균값을 유지단위로 사용해 왔었다. 그러나, 그 표준저항들은 시간과 장소 및 외적 변수에 따라 변하는 성질을 가지고 있으므로, 전기저항 단위의 자체유지를 위하여 지속적인 측정을 하여 그 시간 변화율을 결정하여야 되고, NMI간의 비교를 통하여 그 변화율의 정확성을 확인하여야 한다. 또한, 측정정확도에서도 자연현상에 기초한 것보다도 훨씬 떨어진다. 반면, QHE는 2차원 전자가스(2DEG, 2 Dimensional Electron Gas)층을 형성하는 반도체 소자에 수 T 이상의 고자장을 가하고, 1.5 K의 극저온하에서 홀(Hall) 전자들에 의한 홀 저항이 물리적으로 양자화 되는 것이고, 그때의 홀 저항은 단지 전하  $e$ 와 플랑크 상수  $h$ 로 주어지므로 시간과 장소에 무관하고,

성능이 같은 양자홀 소자 두 개를 동시에 비교하였을 때 하나의 양자홀 소자가 가지는 안정도는 현재의 측정한계인  $10^{-10}$  정도 이상임이 실험적으로 증명되었다. 그래서, 측정 전문가들은 QHE를 전기저항 표준에 활용하기 위하여 매우 정열적인 활동을 하였다. 그런 노력의 결과로, 1990년 이후부터는 종래의 인위적인 것 대신에 QHE에 기초한 전기저항 표준 즉, 양자홀 저항표준을 전세계적으로 사용하는 것으로 약속하였으며, 국제적으로 합의된 측정불확도는  $0.2 \times 10^{-6}$ 이다. 그 이후, 저자가 소속한 KRISS에서도 양자홀 저항표준을 확립하여 그 불확도 이하 수준에서 유지하고 있으며, 몇몇 NMI들은  $0.01 \times 10^{-6}$  수준의 측정불확도를 가지고 있다. 각 NMI의 양자홀 저항 측정시스템은 양자홀 저항을 발생시키는 반도체 소자와 저온, 고자장을 발생시키는 장치 및 저항측정 기기로 구성된다. 수년전까지 측정기기는 4.2 K의 액체헬륨 온도에서 동작되는 CCC(Cryogenic Current Comparator) 저항 브리지를 사용하여 왔으나, 주위 잡음에 매우 민감하여 동작이 쉽지 않고 유지비용이 많이 드는 단점이 있다. 그래서, 최근에는 상온에서 비슷한 정도의 측정불확도로 양자홀 저항 측정이 가능한 전위차 측정방식과 DCC(Direct Current Comparator) 저항 브리지 방식들이 연구되고 있다. KRISS에서는 CCC 저항 브리지를 사용하여 양자홀 저항 측정표준을 유지하고 있으나, 저온에서의 단점들이 없는 두 상온 방식 중 비교적 장치가 복잡하지 않은 DCC 저항 브리지 방식을 택하여 양자홀 저항을 측정하는 기술을 연구하고 있으며, 그 연구결과를 나타내고자 한다.

2. 본 론

2.1 양자홀 저항 측정 시스템  
 2.1.1 저온, 고자장 발생 장치

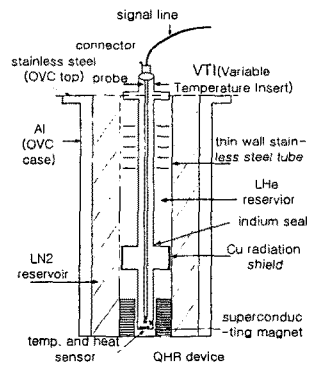


Fig. 1 Structure for cryogenic and high magnetic field

양자홀 효과를 얻기 위하여 액체헬륨 온도의 극저온과 수 T 이상의 고자장을 발생시키는 cryo-magnetic 장치(Oxford S12/14L-40-13)를 사용하였으며, 그림 1에 그 구조를 나타내었다. 이 장치의 base 온도는 1.5 K이며, 자기장은 약 12 T까지 가능하다.

### 2.1.2 양자홀 소자 구조 및 특성

양자홀 저항을 발생시키는 양자홀 소자는 그림 2(위)와 같고, QHE의 특성상 외부 잡음과 열 충격에 아주 약하므로 측정 전후 특성유지에 대한 점검이 필요하다. 특히, 그 소자의 중요한 특성인 반도체와 접촉하는 금속 전극 사이의 접촉저항과 완전 양자화를 약화시키는 dissipation은 필수 점검항목이다. 그 두 특성을 측정하는 방법은 그림 2(아래)의 8 개의 전극에 대하여 잘 알려진 CCEM Guideline에 따라 측정한다. 접촉저항의 경우, 측정대상의 접촉단자(j)와 두 전류단자 중 하나 사이에 0.5  $\mu$ A의 전류를 흘리고, j와 같은 홀전압을 가지는 이웃한 접촉단자사이의 전압을 측정한다. 이때, 소자가 dissipation이 없는 상태라면 두 전류단자 사이의 전압은 수십 nV 이하로서 거의 무시되므로 순수하게 측정단자의 접촉저항만 측정된다. 또한, dissipation 측정은 두 전류단자 사이에 양자홀 저항 측정에 흘려주는 전류와 같은 전류를 흘려주고, 그림 2의 2번과 4번 전압단자 사이 혹은 6번과 8번 전압단자 사이의 longitudinal 전압을 측정하면 된다.

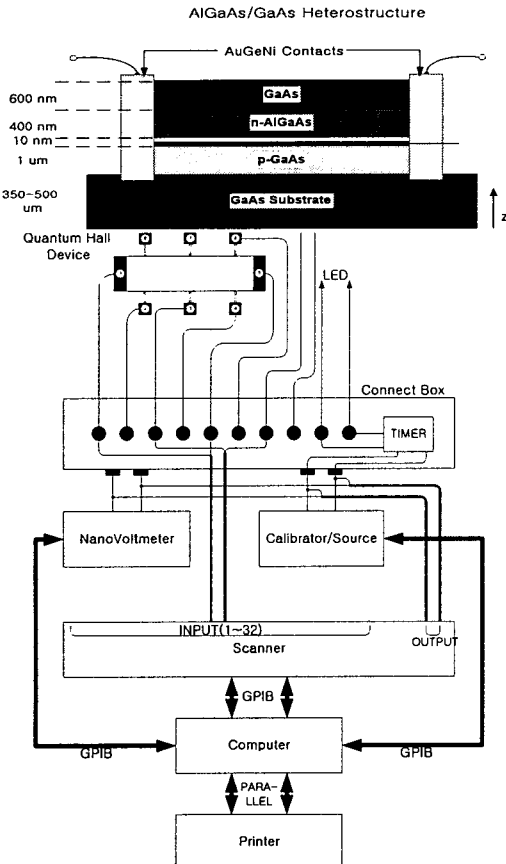


Fig. 2 Structure of the QHR device and its characterization method

### 2.1.3 상온 DCC 저항 브리지

상온 DCC 저항 브리지는 표준저항들을 서로 비교 측정하는 저항 브리지로서 상용 저항측정 기기 중 가장 정확도가 높다. 본 연구에서는 그 브리지를 양자홀 저항 소자에서 나오는 양자홀 저항값(6 453.20 175  $\Omega$ )과 표준저항(1  $\Omega$  ~ 1 k $\Omega$ )을 비교 측정 하는데 사용하였고, 원리는 다음 그림 3과 같다.

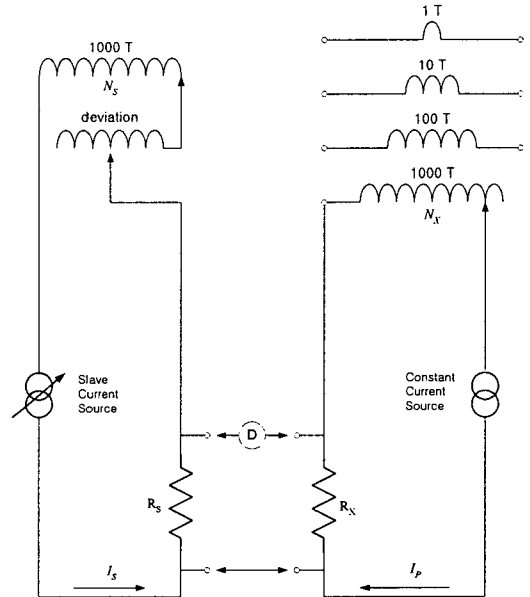


Fig. 3 Schematic diagram of a DCC bridge

이 그림에서 권선수 1,000 T와 1 T ~ 1,000 T는 각각 2차 측과 1차측으로 나누어 감긴 direct current comparator(일종의 직류 전류변성기)를 나타내고, 1, 2차측 직류 전류원으로부터, 비교되는 두 저항에 원하는 전류가 공급되며, 1차측(오른쪽) 전류원에서 나오는 전류는 일정하지만, 그 권선수를 가변하여 전류를 미세하게 조절한다. 그 전류와 권선수에 의하여 자속이 발생하게 되고, 2차측에 발생된 자속과의 차이가 없게끔 2차측 전류가 가변하게 된다. 이것을 자속 balance라고 하며,  $N_X I_P = N_S I_S$ 로 주어진다. 동시에, 그 두 전류에 의하여 비교하는 두 저항 양단에 생긴 전압 차이가 없어 질때까지 1차측 권선수를 조절한다. 이것을 전압 balance라고 하며,  $R_X I_P = R_S I_S$ 로 주어진다. 두 balance에 의하여 구하고자 하는 저항값은

$R_X = \left(\frac{N_X}{N_S}\right) R_S$ 로 주어진다. 이러한 관계로부터  $R_S$ 가 양자홀 저항일때, 권선비만 정확하게 교정이 되면 다른 표준저항들의 저항값을 높은 정확도로 얻을 수 있다.

### 2.2 비교측정 결과 및 논의

상온에서 1.5 K로 온도를 내리기 위하여 우선 그림 1의 액체헬륨 용기에 액체질소를 넣어 약 100 K 부근까지 온도를 서서히 내린후, 액체헬륨을 그 용기에 넣는다. 그 다음, 그림 1의 VTI 용기에 뚫린 작은 구멍의 밸브 조절을 통하여 온도를 4.2 K까지 (열 충격을 막기 위하여)수 K/분 정도로 서서히 떨어뜨린다. 그 다음으로 최저 온도인 1.5 K까지는 로터리 진공펌프로서 내린

다. 그 후, 1.5 K를 유지하면서 그림 1의 초전도 자석을 가동시켜서 필요한 5.2 T를 양자홀 소자에 가한다. 이런 조건하에서 양자홀 저항값(6 453.20 175 Ω)이 나오지만, 이 값은 소자의 상태가 최상일때이므로 양자홀 저항 측정 전후에 그 소자의 접촉저항과 dissipation을 측정하여 그 상태를 먼저 점검하였다. 위의 2.1.2절에서 언급한 절차대로 측정을 하였으며, 소자의 전류단자(1번과 5번) 및 측정 전압단자(3번과 7번)들의 접촉저항은 1.2 Ω으로 나타났으며, dissipation(longitudinal resistivity) 측정결과는 다음 표 1과 같다.

Table 1 Longitudinal resistivity of the QHR

current (μA)	longitudinal resistivity(ρ <sub>2-1</sub> ) (mΩ)				
	9/6 (+B)		9/7 (+B)		9/7 (-B)
	before	after	before	after	after
30	0.33	0.27	0.20	<0.4	<0.08
50	0.60	0.32	0.32	0.40	0.08
70	0.71	0.34	0.48	0.46	0.23
90	0.89	0.48	0.62	0.52	0.51
100	1.30	0.60	0.84	0.60	0.82

device

일반적으로 dissipation에 의한 길이방향 비저항(longitudinal resistivity)이 0.1 mΩ 이하인 경우 dissipation에 의한 양자화(Quantization) 정확도는  $1 \times 10^{-8}$  혹은 그 이하이며, 1 mΩ 이하이면  $1 \times 10^{-7}$  이하가 된다. 본 연구의 정량적 목표는 전체 측정정확도가  $1 \times 10^{-7}$ 이므로 위 표 1의 결과는 그 수준내에서 소자의 성능은 이상없음을 보여준다. 그런 성능을 가지는 소자와 표준저항을 비교측정하는 순서는 다음과 같다. 우선, 상온 DCC 브리지의 10 : 1 비율을 이용하여 양자홀 저항값을 1 kΩ 표준저항과 비교하고, 같은 비율로 100 Ω, 10 Ω을 거쳐 1 Ω까지 내린다. 다음 그림 4는 양자홀 저항값과 1 kΩ 표준저항을 비교측정한 결과를 나타낸다.

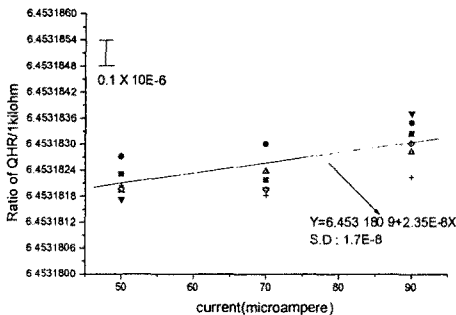


Fig. 4 Measurement results of QHR:1 kΩ ratio

이 측정에서 양자홀 소자에 흘려준 전류는 50-90 μA 이나, 사용된 DCC 브리지의 최고 측정정확도는 316 μA 이므로 그 사이의 전류에 대한 비율오차의 보정이 필요하다. 다음 그림 5는 그 316 μA에 상대적인 비율을 측정하여 그 오차를 보정한 결과를 나타낸다.

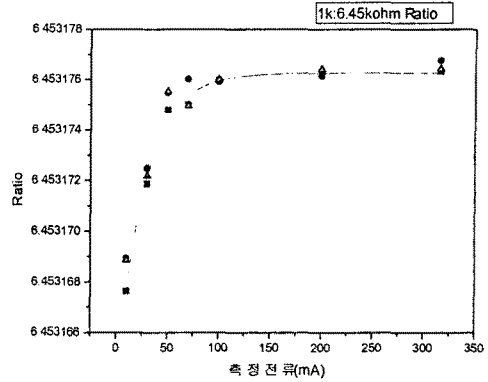


Fig. 5 Determination of Current dependence of QHR:1 kΩ ratio using a DCC bridge

이렇게 보정하였을 때의 보정불확도는 거의  $10^{-8}$  정도였다. 이렇게 얻어진 표준저항 1 kΩ의 교정값은 국가 저항표준인 양자홀 저항값에 기초한 SI 단위로 표현되어지며, 그 1 kΩ 값은 DCC 브리지의 10:1 비율을 사용하여 100 Ω, 10 Ω을 거쳐 1 Ω과 비교된다. 그렇게 하여 그 1 Ω의 교정값은 양자홀 저항값에 기초한 SI 단위로 표현되어지며, 다음 표 2에 그 비교측정 결과를 나타내었다.

Table 2 Measurement results of 1 kΩ:1 Ω using 10:1 ratio of the DCC bridge

nominal value	serial no.	resistance(Ω)	standard deviation ( $\times 10^{-6}$ )
1 Ω (NML)	64158	1.000 011 14	-
10 Ω (Tinsley)		9.999 767 571	0.005
100 Ω (Tinsley)	253682	99.999 083 98	0.012
1 kΩ (Tinsley)	250585	1 000.002 693	0.010

이 결과에 대한 측정정확도에 영향을 미치는 중요한 요인은 DCC 브리지의 10 : 1 비율의 정확도이다. 그림 6과 같은 Vishay 1 kΩ 저항 10 개를 직렬로 연결하여 각각의 저항값을 4단자 측정법으로 측정한 후, 10개의 직렬값을 역시 4단자 측정법으로 측정하면 그 차이 값은 비율 보정값으로서 각각의 10:1 비율 측정시  $0.1 \times 10^{-6}$ 이 얻어졌고, 보정 정확도는  $0.06 \times 10^{-6}$ 이었다. 이 비율보정 이외에, 흘러준 전류에 의한 power 효과는 1 kΩ:1 Ω 비교시  $-0.11 \times 10^{-6}$ 으로 나타났으므로 이들 보정값을 고려하면 1 Ω 교정값은 1.000 011 43 Ω으로 주어진다. 이렇게 보정된 1 Ω 교정값은 본 연구실에서 직접 측정된 결과이고, 다른 NMI가 측정된 결과와 비교하여 그 일치도를 확인하는 것이 필요하다. 본 실험에 사용된 NML 1 Ω은 1990년 이후, 양자홀 저항표준을 이미 가지고 있었던 NMI들 즉, BIPM(국제도량형국, 프랑스), ETL(일본 표준연구소),

### 3. 결 론

기존의 극저온 저항 브리지 대신에 상온 DCC 브리지를 사용하여 국가 저항 표준인 양자홀 저항표준을 확립하는 연구결과를 나타내었다. 극저온 저항 브리지 대신 간단한 방법으로 10:1 비율 오차와 전류 의존성을 구하였으며, 전체 측정불확도는  $0.14 \times 10^{-6}$ 으로 산출되었고, 그 불확도 범위내에서 국제적 일치도를 가졌다. 현재 양자홀 소자의 성능을 개선하고, 10:1 비율을 더욱 정확하게 측정하여 전체 측정불확도를  $0.05 \times 10^{-6}$  이하로 향상시키는 연구를 하고 있다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] Landwehr G. "The discovery of the quantum Hall effect," Metrologia, Vol. 22, 118-127, 1986
- [2] B.N.Taylor and T.J.Witt, Metrologia, vol. 296, p. 47, 1989
- [3] Bernd Schumacher, "Automated Quantum Hall Resistance Standard," IEEE IM, vol. 44, No. 2, 199-200, 1995
- [4] A. Dave Inglis, "A Cheaper, Simpler Quantized Hall Resistance Standard," IEEE, IM, vol. 48, No. 2, 289-292, 1999
- [5] F. Delahaye, "Technical Guideline for Reliable Measurements of the Quantized Hall Resistance," Metrologis, vol. 26, 63-68, 1989
- [6] MacMartin M.P. and Kusters N.L., "A direct current comparator ratio bridge for four-terminal resistance measurements," IEEE, IM, vol. 15, 212-220, 1966
- [7] B Jeckelmann and B Jeanneret, "The quantum Hall effect as an electrical resistance standard," Rep. Prog. Phys. vol. 64, 1603-1655, 2001
- [8] Kwang Min Yu, Young Tae Park, Kwon Soo Han, Kyung-Hwa Yoo, "Effect of Temporary Temperature Change on Drift Rate of KRIS Legal Ohm," CPEM 98 Digest, THPA3-4, 524-525, 1998

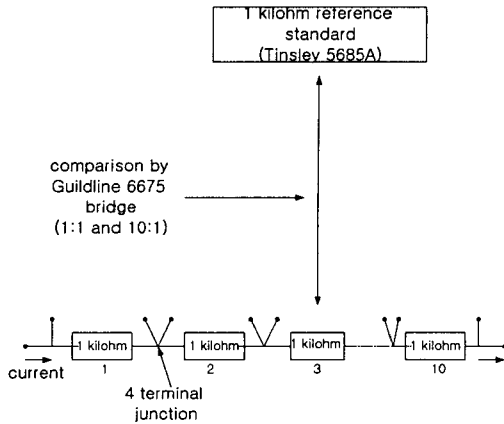


Fig. 6 Measurement method for the corrections of 10:1 ratio error of the DCC bridge

NIST(미국 표준연구소) 등과의 비교측정을 통하여 시간에 따른 저항변화율을 알고 있으므로 본 실험을 한 시점에서의 저항값은 1.000 011 35  $\Omega$ 으로 나타났다. 이 저항값을 본 실험으로 얻은 저항값과 비교를 하면,  $0.08 \times 10^{-6}$ 의 차이를 보이고 있다. 그리고, 실제로 측정을 통하여 분석된 불확도 산출 결과는 다음 표 3과 같다.

Table 3 Uncertainty budget for the comparison of the QHR standard with 1  $\Omega$

Type A	
QHR(90 $\mu$ A) to 1 $\Omega$ ratio	$0.04 \times 10^{-6}$
current effect of the ratio	$0.05 \times 10^{-6}$
Type B	
10 : 1 ratio correction (QHR to 1 $\Omega$ )	$0.12 \times 10^{-6}$
QHR-GND shunt leakage	$0.03 \times 10^{-6}$
QHR leakage	$0.01 \times 10^{-6}$
temperature correction	$0.02 \times 10^{-6}$
Combined standard uncertainty (1 $\sigma$ )	$0.14 \times 10^{-6}$

앞에서 언급한 그 차이값이 표 3에서 나타난 불확도 이내에 있으므로 상온 DCC 브리지를 이용한 양자홀 저항 표준은 그 측정불확도 이내에서 국제적 일치도를 가지고 있음을 알 수 있다.