전기의 단위 및 측정표준

▌김 규 태 / 한국표준과학연구원 전기 · 자기센터장

1. 서 론

얼마 전 민주씨는 우연히 아파트 문 밖의 전력량계를 보게 되었는데, 앞 집에 비해 훨씬 빨리 돌아가는 것이 눈에 띄었다. 전기요금이 인상된다는 소식을 접한 터라 혹시 잘못된 전력량계 때문에 전기요금을 더 많이 내고 있는 것은 아닐까? 하는 우려와 함께 전력량계의 신뢰성에 대해 관심을 두게 되었다. 평소 이런 문제에 무관심했던 민주씨는 자신이 내고 있는 전기요금의 이면에 '표준' 이 중요한 역할을 하고 있음을 새삼 깨닫게 되었다고 한다. 적산전력량계는 정확도와 신뢰도가 높은 기준적산전력량계와 서로 비교 측정하여 그 성능을 확인한 후 생산하는 것을 법으로 규정하고 있으므로 이를 사용하고 있는 일반 사용자들은 크게 염려하지 않아도 된다. 이때 사용되는 기준적산전력량계는 한국표준과학연구원에서 국가측정표준과 연결하여 그 성능을 유지하고 있다. 일반적으로 '표준' 하면 떠오르는 것이 성문표준이라 불리는 규격이지만, 실제로 이러한 표준이 우리 일상생활에서 제대로 활용되기 위해서는, '표준화 (Standardization)', '적합성평가 (Conformity Assessment)', '측정표준 (Measurement Standard)'의 세가지 업무분야가 서로 유기적으로 제 역할을 해주어야만 한다. '표준화' 란 한 마디로 규격 즉 성문표준을 만드는 일이고, '적합성평가' 란 제품이나 시스템 등이 정해진 규격을 만족함을 확인하고 실증하는 일이라면, '측정표준' 이란 이 두 가지를 기술적으로 가능하게 하는 기본 하부구조라 할 수 있다. 좀 더 형식을 갖춘 표현을 빌리자면 "기준으로 사용되는,

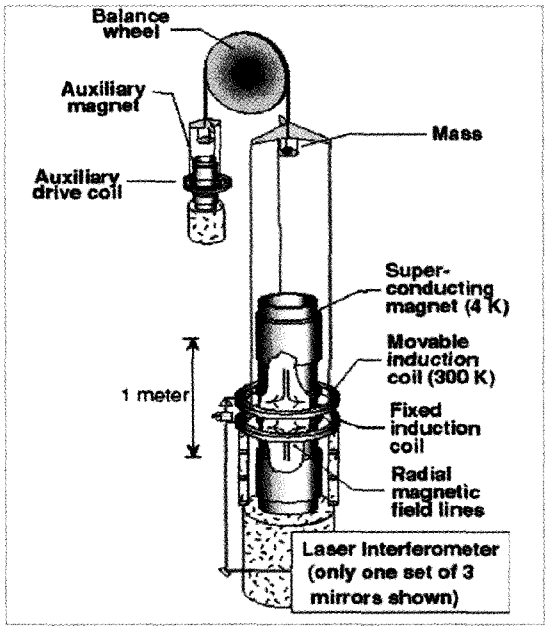

그림 1 전력천칭 (Watt Balance)의 구조 – 미국 NIST의 예

명시된 양의 값 및 연계된 측정불확도를 가지는, 주어진 양의 정의에 대한 구현이다"[1]. 즉 측정 단위들의 크기를 정의대로 정확히 구현하고 이를 바탕으로 산업과 무역 등에서 요구되는 모든 측정의 기준을 제공하는 역할을 한다. 만일 측정표준이 없다면 제품의 생산 및 상거래 과정에서 측정결과를 상호 비교할 기준이 없어 사회에 심각한 혼란이 발생할 것이다. 따라서 거의 모든 나라가 국가 측정표준을 책임질 측정표준 기관을 설립 운영하고 있는 데 선진국의 경우 그 역사는 오래된 경우 200년에 이르고 있다. 독일의 PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt), 미국의 NIST (National Institute of Standards and Technology, 구 NBS), 영국의 NPL (National Physics Laboratory), 러시아의 VNIIM (멘델레에프계량연구소)와 같은 기관이 여기에 해당한다. 개발도상국가의 경우 측정표준 기관은 비교적 짧은 역사를 갖고 있으나, 선진국의 경험과 기술을 효과적으로 수용하여 빠른 성장을 보이고 있다. 근년에는 표준의 국제상호인정(MRA) 협약이 전세계적으로 확산되면서, 국가 측정표준기관들이 그 나라를 대표하는 국가측정표준대표기관 (NMI: National Metrology Institute)로서 MRA에 참여하고 있다. 우리나라의 경우 35년정도의 짧은 연한에도 불구하고 한국표준과학연구원(KRISS)이 NMI로서 선진국 수준으로 괄목할 발전을 이룩하였다는 것이 국내외의 일반적인 평가이다.

2. 전기단위 정의 및 발전동향

그러면 우리가 매일 접하는 전기단위들은 어떻게 그 크기가 정의되고 구현되며 보급되는 걸까? SI 단위계는 7개의 기본단위 (base unit)을 정의하고 있는데 그 중 전류의 단위 암페어 (A)는 1948년 제 11차 국제도량형총회 (CGPM)에서 "무한히 길고 무시할 수 있을 만큼 작은 원형단면적을 가진 두 개의 평행한 직선도체가 진공 중에서 1 미터 간격으로 유지될 때, 두 도체 사이에 매 미터당 2×10-7 뉴턴(N)의 힘을 생기게 하는 일정한 전류"로 정의된다[2]. 이렇게 정의함으로써 진공의 대표적 전자기 특성인 진공의 유전율 (permittivity) 및 투자율 (permeability)이 불확도가 없는 상수가 되었다. 이것은 위 암페어의 정의와 전자기학 공식을 적용하여 계산해 보면 쉽게 이해되는 재미있는 사실이다. 일단 전기의 SI 기본단위인 암페어가 만들어 지면 다른 모든 전기단위들은 암페어와 나머지 SI 기본단위들로부터 유도하여 만들 수 있게 된다. 예를 들어 전압의 단위 볼트 (V)는 kg · m2/(s3 · A)를 나타내는 유도단위이다.

그러나 SI 암페어를 정의된 이론대로 구현하는 일은 첨단기술을 보유한 세계 선진 측정표준 기관들에게도 힘겨운 도전과제였다. 초창기에는 두 개의 솔레노이드 코일 사이에 발생한 힘을 정밀 측정하는 전류천칭 (Ampere Balance: 그림 1)이 50여년전에 시도되었다. 전류천칭에 있어 가장 큰 문제는 솔레노이드 코일에서 발생한 자기장을 정확히 알기 어렵다는 점이었다. 이러한 문제점이 1983년경

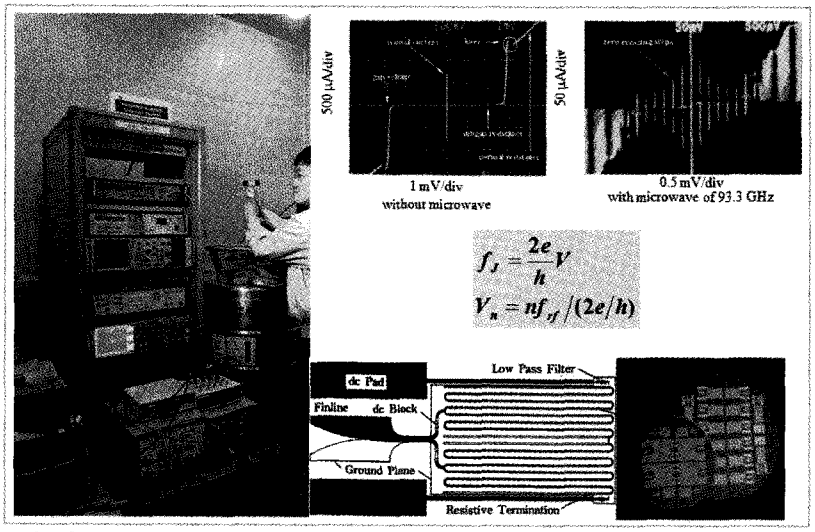

그림 2 한국표준과학연구원에서 자체기술로 확립하여 운용중인 조셉슨 전압표준 시스템

에 영국에서 전력천칭 (Watt Balance: 그림 2)이 등장함으로써 일대 개선이 이루어지게 된다. 그 후 약 20년 후 미국에서 전력천칭 장치가 성공적으로 완성되었고 현재는 높은 정확도로 SI 와트가 구현되고 있으며, 프랑스, 스위스 등에서도 전력천칭의 정확도 향상을 위한 노력이 활발히 경주되고 있다. 와트(W)는 암페어의 제곱(I2) 곱하기 오옴(Ω) 인데 크로스 커페시터 (Cross Capacitor)와 쿼드브리지 (Quadrature Bridge)를 이용하여 오옴을 구현하는 기술이 이미 알려져 있었으므로 SI 와트를 구현할 수 있음은 곧 SI 암페어를 구현할 수 있음을 의미하게 되는 것이다. 이와 같이 SI 전기단위를 구현하기위한 힘겨운 연구가 진행되던 중 다른 한편에서는 양자물리학의 등장으로 전기 측정표준에 새로운 변화의 흐름이 밀려오게 된다. 조셉슨 효과와 양자홀 효과의 발견은 전기 측정표준이 인공물 (artefact)이 아닌 자연현상에 의해 구현될 수 있음을 성공적으로 보여주었다. 더구나 조셉슨효과에 의해 구현한 전압의 표준과 양자홀 효과에 의해 구현한 저항의 표준은 재현 정확도가 전력천칭에 비해 매우 뛰어나고, 일단 적절히 구현만 되면 온도, 압력, 시간 등에 무관하게 항상 일정한 표준을 제공하는 등 실용적인 장점이 풍부하였다. 이러한 이유로 실제의 국가표준에서는 전기의 국가표준으로 조셉슨효과 전압표준 측정장치와 양자홀효과 저항표준 측정장치를 지정하고 있다. 이들 두 장치들의 표준값은 모두 플랑크상수 (h)와 기본전하상수(e)에 의해 표현되는 데 이에 대해서는 나중에 기회가 되면 좀더 자세히 소개하기로 한다.

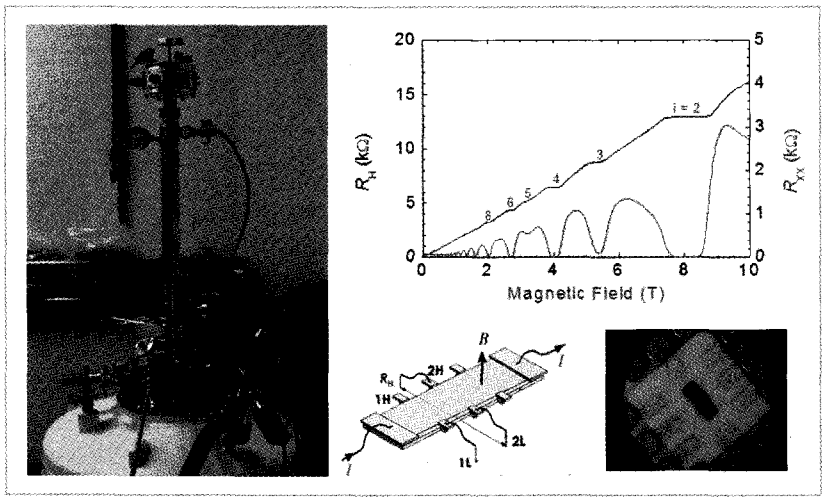

그림 3 한국표준과학연구원에서 자체기술로 확립하여 운용중인 양자홀 저항 표준 시스템

이제 전기단위의 미래 발전 전망에 관한 이야기로 SI 단위에 대한 설명을 마무리하기로 한다. SI 단위계는 당연히 단위 하나당 하나의 정의만을 허용하고 이미 잘 정의된 암페어로서 모든 전기 유도단위들이 명확히 표현되었는데, 나중에 양자효과의 발견으로 등장한 조셉슨 전압표준과 양자홀 저항 표준은 기존 SI 표준과 모순은 없는 것일까? 이러한 문제는 조셉슨 전압표준과 양자홀 저항표준에 간여하는 두 물리상수인 플랑크상수 (h)와 기본전하상수(e)의 지위와 관련된다. 현재의 SI에서는 이 두 물리상수는 측정을 통해 그 값이 정해지는 값이다. 다시 말하면 불확도를 갖는 상수이며, 이에 따라 조셉슨 전압표준 및 양자홀 저항표준은 아무리 완벽하게 구현한다 해도 기본적으로 SI 에 대한 불확도를 내포하게 되는 것이다. 예컨대 전압의 경우 현재 이것에 의한 기본 불확도는 4×10-7에 이르고 있다. 그러나 SI에 의해 부여된 법정 불확도를 제외하면, 조셉슨 장치의 재현 불확도는 보통 1×10-10 수준이어서, 마치 펜티엄 급 컴퓨터에 DOS 운영체제만을 사용하도록 규정해 놓은 것에 비유할 수 있을 것이다. 더구나 최근 계측기 기술의 발달로 상용 전압계의 분해능이 1×10-8에 이르고 있어 기존 암페어의 정의는 하이테크 산업계 사용자에게도 더 이상 수용할 수 없는 한계에 다다르고 있다. 다행스러운 점은 최근 국제도량형 위원회를 중심으로 SI 단위들의 재정의에 관한 논의가 최근 활발히 전개되고 있다는 점이다.

사실 SI 재정의에 대한 필요성은 kg과 관련하여 훨

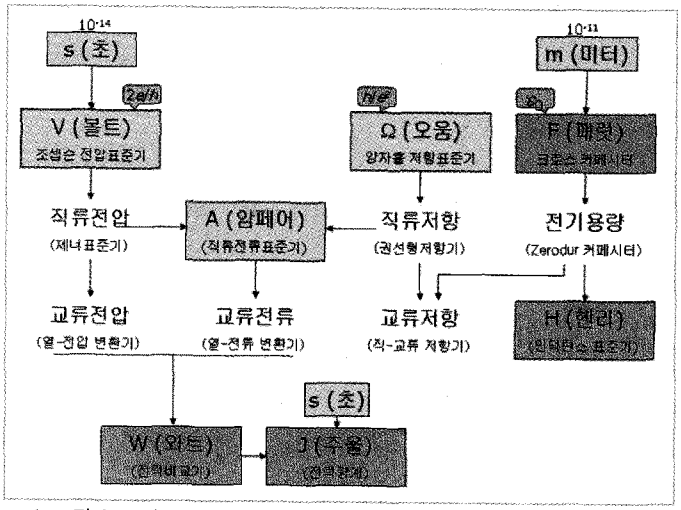

그림 4 전기표준의 소급체계도

씬 이전부터 제기되어 오던 것이었다. SI 기본단위 중 유일하게 오직 artefact 만으로 표준이 정의된 kg은 국제도량형국 (BIPM)이 보관하고 있는 실린더모양의 작은 귀금속 덩어리의 질량이다. 이 kg 국제원기가 플랑크 상수나 기본전하상수와 같은 자연상수를 표현하거나 암페어를 구현하는 데 지대한 영향이 미치고 있다. 만일 kg 원기의 질량이 사고로 변하면 우리가 사용하는 플랑크 상수의 값은 물론 거의 모든 전기단위가 변하게 되는 것이다. 이러한 불합리성을 개선하고자 kg도 불변의 자연현상에 기초하여 표현하는 방식으로 재정의 해야 한다는 목소리가 높아지고 있다. 즉 플랑크 상수 또는 아보가드로 상수와 같은 자연상수를 고정시키는 방향으로 kg을 재정의하자는 주장이 설득력을 얻고 있다. 예컨대, 앞서 소개한 전력천칭을 이용하면 플랑크상수로 표현된 kg을 구현할 수 있게 된다. 아보가드로상수로 kg을 구현하는 방법도 시도되고 있으나 불확도가 전력천칭보다 더 큰 상황이다. 아직은 기존 kg의 정의에 익숙한 많은 사람들이 새로 제안된 kg 구현방안들을 아직 선뜻 수용하지 못하고 있다. 하지만 자연상수에 기초한 kg 구현 기술들이 계속 발전 중에 있으므로 빠르면 2011년 국제도량형총회 혹은 그 근방의 시기에 SI 단위들이 재정의될 가능성이 엿보인다. SI 재정의 과정에는 다양한 의견을 가진 여러 구성원들의 국제적 합의가 필요하기 때문에 단기간에 쉽사리 결론에 이를 수 없는 것인 만큼, 금번 기회에 kg과 이외에, A, mole, K, cd 에 대해서도 재정의 논의가 함께 진행되고 있는 것이다. 전기단위의 경우 기본전하상수를 고정하는 방향으로 전류의 단위 암페어도 재정의하는 것이 유력한 방안의 하나로 논의 중이다. 만일 kg이 플랑크상수로 재정의 되고 A가 기본전하상수로 재정의 되면, 플랑크상수와 기본전하상수가 불확도가 0인 고정상수가 되고, 이들 상수로 표현되는 전기 표준도 현재의 법정 불확도의 굴레를 벗어날 수 있을 것이다. 가까운 미래에 펜티엄급의 양자전기표준에 걸맞는 합리적인 운영체제가 허용되기를 희망해 본다.

3. 국가전기표준의 확립 및 보급 체계

몇해전 전력 계측에 사용되는 장비를 생산하는 기업에서 수출을 앞두고 KRISS에 긴급히 도움을 요청한 적이 있었다. 해당 장비 제작에 들어가는 어떤 부품의 기준값이 공급업체들 마다 제각각 다르게 맞추어져 있어서 어느 부품이 적합한 것인지 알 수 없다는 것이었다. 일반적으로 상용 부품이거나 계측기이면 무조건 그 값이 맞을 것이려니 하고 생각하고 일을 진행하다가는 예상치 않은 난관에 봉착하는 경우가 많다. 모든 부품이나 재료, 측정장치 들은 온도, 습도, 압력과 같은 외부환경과 사용시간에 따라 계속 변하기 때문이다. 만일 해당 표준이 확립되어 있지 않다면, 멀리 해외 기관에 많은 비용을 주고 측정을 의뢰해야 한다. 시간과 비용 손실 뿐 아니라 기술유출의 염려도 생긴다. 국내에서 만이 아니라 국제적으로도 통용되는 신뢰성 있고 정확한 측정표준이 가까운 어딘가에 있다면 이러한 문제는 쉽게 극복될 수 있으나, 국제적으로 신뢰성을 인정받는 정확한 측정표준을 확립하는 일은 그리 녹녹하지 않다. 전기 단위의 경우 많은 유도단위들이 산업 현장과 화

학 및 생명 등 새로운 측정분야에 쓰이고 있는데 이들 모든 단위의 표준이 환경조건 변동과 시간경과에 따른 영향이 거의 없도록 개발되어서 국제적 수준으로 측정표준 체계가 확립되어야 한다. 국가측정표준 체계의 확립은 많은 시간과 돈이 드는 일로서 국가에서 투자해서 공공재로 확립하고 여러 산업에서 같이 활용하는 것이 효율적인 일이다. 한국표준과학연구원은 국가의 지원을 받아 측정표준을 선진국 수준으로 확립해 왔고, 교정 및 시험 서비스를 통해 이를 국내 교정기관 및 산업체에 보급함으로써 국가표준체계의 큰 축을 담당하고 있다. 그림 2는 KRISS 전기분야 소급체계도이다. 측정표준이 선진국과 동등함을 증명하는 가장 명확한 방법은 국제비교를 통한 검증이다. 우리나라가 보유한 최고 국가 측정표준이 해외 선진국의 국가 측정표준과 잘 일치함을 비교측정을 통해 검증하는 것이다. 국제도량형위원회는 국제적으로 공인된 비교 프로그램을 운영하고 있는데 KRISS는 전기분야 핵심비교 프로그램에 다수 참여하여 성공적인 결과를 도출하고 있다. 그 결과는 국제도량형국이 운영하는 웹사이트 (kcdb.bipm.org)에 공개되어 전세계 누구나 열람할 수 있게 되어 있다. 이러한 국제비교에 참여하려면 국제도량형위원회 산하 자문위원회의 정회원국이 되어야 하며 보유하고 있는 측정표준의 정확도 수준이 발전하고 있는 선진국 수준을 유지해야 한다.

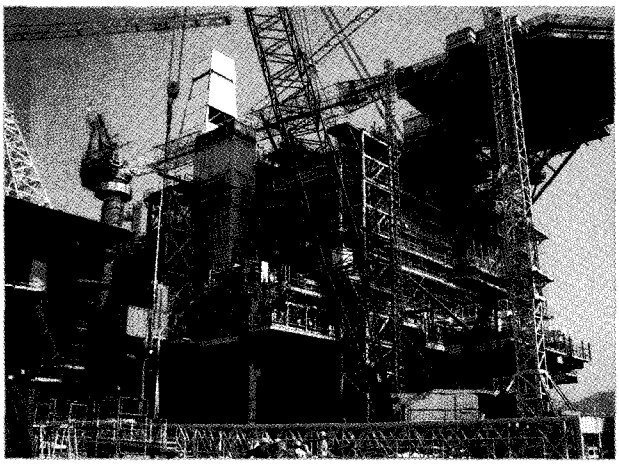

그림 5 사할린 프로젝트용으로 국내에서 수주한 세계 최대 해양 플랫폼 건설현장

4. 결 론

얼마전 국내 모 대기업이 러시아 사할린 에너지 개발 프로젝트에 쓰일 세계최대규모의 플랫폼 2기를 수주하였으나, 러시아 법에 의해 모든 제어회로들에 대해 러시아 정부관리 입회하에 검정을 받거나 러시아 인정기구의 인증을 받은 기관으로부터 검정을 받아야 할 형편이었다. 이에 대한 해결방안을 요청받은 한국표준과학연구원 (KRISS)는 러시아 측정표준 대표기관 (VNIIM: 멘델레에프계량연구소)이 국제도량형위원회가 주관하는 상호인정협약에 KRISS와 함께 가입되어 있는 점에 착안하여, KRISS 측정결과가 VNIIM에서 측정한 것과 동등함을 상호인정하는 양해각서를 KRISS-VNIIM간에 체결함으로써 납기지연을 예방하고 약 11억 불의 경제적 효과를 거둔 바 있다. 국가측정대표기관으로 국가 측정표준의 수준은 그 나라 기술수준의 척도라는 상징적 중요성을 가질 뿐 아니라, 현실적으로도 우리의 상품이 해외시장을 개척해 나가는데 있어 매우 중요한 역할을 하고 있음을 보여주는 사례이다. KRISS의 측정표준을 선진국 수준으로 지속적으로 향상시켜야 하는 중요한 이유이다. 한국의 측정 결과가 국제적으로 점점 더 널리 통용되는 성과가 나타나는 것을 보는 것은 측정표준 종사자의 입장에서 크게 보람있는 일이다. 최근에는, 태국, 말레이시아, 인도네시아, 베트남 등 많은 개발도상국이 KRISS에 교정을 의뢰하고 있다. 이러한 해외 교정지원이 앞으로 이들 신흥시장에 우리 기업이 진출하는데도 큰 힘이 될 것으로 기대하면서 전기 단위의 국가측정표준의 정확도 향상과 신산업분야 측정표준 확립에 더욱 매진할 것을 다짐해 본다.

[1] 국제측정학 용어집 (VIM), ISO/IEC 99 (2007).

[2] 국제단위계-8판, "The International System of Units", www.bipm.org/en/si (2006).