

조셉슨 전압표준

■ 김 문 석, 김 규 태 / 한국표준과학연구원

1. 서 론

전기 분야에 종사하지 않는 사람들에게도 볼트 (volt) 라는 전기 단위는 낯설게 느껴지지 않을 것이다. 또한 대개는 볼트로 나타낸 수치가 전기의 강약을 나타내는 척도라는 것도 경험적으로 인식하고 있을 것으로 짐작된다. 그러나 볼트라는 단위가 일상에서 아무런 문제없이 통용되기 위해서는 반드시 기준이 필요하고, 이러한 기준을 마련하고 또 유지하게 위해서는 많은 시간과 노력이 필요하다는 것을 아는 사람은 많지 않을 것이다. 어떤 전압이 수치화 되었을 때는, 그 값이 얼마만큼 정확한지, 바꾸어 말하면 얼마만큼 불확실한지가 함께 제시 될 수 있어야 한다. 이는 결국 측정의 위계, 즉 측정 표준의 소급성 (traceability) 과 연관이 된다. 따라서 우리가 일상에서 접하는 모든 전압 값들은 이미 소급성 체계 내에 있다고 해야 할 것이다. 이러한 소급성의 확보는 일차적으로 과학기술 발전의 밑거름이 될 뿐만 아니라 국가의 경쟁력의 밑바탕이 됨은 두말할 나위가 없을 것이다. 더욱이 나날이 발전하는 과학기술의 전 분야에서 정밀 전압 측정의 수요는 크게 증가하고 있다. 국가 전압표준 소급체계의 정점은 조셉슨 전압표준기 (Josephson voltage standard) 이다.

이는 모든 전기 단위들의 기반 표준이며, 국가 전기 표준의 국제적 신뢰성을 인정받기위한 핵심 표준이다. 이번호에서는 조셉슨 전압 표준기의 원리와 국내외 연구 동향, 전망 및 KRISS에서의 연구 현황을 소개하고자 한다.

2. 조셉슨 전압표준기의 원리 및 특징

전기저항이 없는 초전도체 (superconductor)는 거시적인 양자현상 (macroscopic quantum phenomenon)이 나타나는 물질로 잘 알려져 있다. 1962년 조셉슨 (Brain Josephson) 은 두 초전도체 사이에 얇은 장벽이 삽입되어 구성되는 조셉슨 접합에서의 전류-전압 관계 방정식을 유도하였다. 이 방정식이 예측하는 현상 가운데 하나는, 접합에 전압이 가해지면 전류-전압 곡선 상에서 전류가 변해도 전압이 일정한 전압스텝 (후에 샤피로 스텝으로 명명됨, Shapiro step) 이 나타난다는 것이었다. 조금 더 구체적으로 살펴보면, 조셉슨 접합에 직류전압을 걸어주면 전압에 비례하는 주파수를 갖는 교류전동이 발생한다. 여기에 주파수 f 의 마이크로파를 동시에 가해주면 인가전압에 의한 조셉슨 전동이 외부 마이크로파 또는 그 고조파에 동조되어 위상이 잠기

는 (phase lock) 현상이 나타난다. 이때, 외부 마이크로파의 한 주기당 위상의 변화가 2π 의 배수(n)가 되고 접합 양단전압의 시간적분은 정확히 양자자속 (flux quantum) Φ_0 의 배수가 된다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\int_t^{t+1/f} v(t)dt = n\Phi_0$$

위 식에서 전압의 시간 적분을 마이크로파의 한 주기로 나누어 주면, 평균 전압 즉 조셉슨 전압 (V_J) 이 된다. 이를 다시 식으로 표현하면

$$V_J = nf\Phi_0 = nf \frac{h}{2e}$$

이 된다. 여기서 h 와 $2e$ 는 각각 프랑크 상수 (Planck constant)와 기본 전하량 (elementary charge) 이다. 이 식은 오직 자연상수 (fundamental constant)만을 통하여 시간(진동수)과 전압의 관계를 규정한다. 조셉슨 전압은 위에서 언급했듯이 위상 고정으로 인한 양자상태에 있기 때문에 특정한 전류 영역 (step margin) 에서는 전류가 변해도 항상 일정하다. 그림 1에서 보듯이 이러한 특성은 전류-전압 곡선 상에서 전압스텝 (voltage step)으로 반영된다

이 조셉슨 스텝의 전압은 어떠한 전압 발생장치보다 정확할 뿐만 아니라 단지 마이크로파 주파수에만 의존할 뿐이므로 표준전지 (standard cell) 나 제너 다이오드 (Zener diode) 와 같은 인조물에서 나타나는 온도의존성, 경년변화 등이 나타나지 않는다. 단지 발생된 전압 표시 값의 통일을 위해 조셉슨 상수 $2e/h$ 를 무엇으로 쓰느냐가 문제될 뿐이다. 국제도량형위원회 (CIPM)은 1990년부터 $2e/h = 483\,597.9$ GHz/V를 사용하도록 권고하였고, 많은 표준기관 (National Metrology Institute, NMI) 들은 이 상수 값에 기초하여 조셉슨 전압표준을 구현하고 있다.

현재까지 전압표준기의 핵심인 조셉슨 접합은 두 초전도체 사이에 절연체가 삽입된 형태의 SIS (superconductor-insulator-superconductor) 접합이다. 보통 SIS 접합에서 안정된 스텝을 얻으려면 플라즈마 진동 (plasma frequency) 이라고 하는 접합의 고유 진동 영역을 충분히 벗어난 70 GHz 에서 90

GHz의 마이크로파가 필요하며, 이 때 발생하는 스텝은 영 (zero) 전류 축을 지난다 하여 zero-crossing step 이라고 불린다. 조셉슨 접합 1 개가 출력할 수 있는 전압은 70 GHz의 마이크로파에서 약 0.1 mV 수준에 불과하다. 따라서 실제적으로 유용한 수 V 수준의 전압을 출력하기 위해서는 접합을 직렬로 연결하여 접합 어레이를 제작하여야한다. 연결된 접합의 수가 많을수록 더 높은 전압을 얻을 수 있는데 보통 1 V 어레이는 약 2,500 개의 접합을 가지며, 10 V 어레이는 그 10배의 접합 개수를 갖는다.

3. 최근의 국제 연구 동향 및 AC 조셉슨 전압 표준

SIS 접합은 높은 표준전압을 얻기 위해 많은 수의 접합을 직렬로 연결하는 데 유리하다. 앞서 언급 했듯이 10 V 수준의 표준 전압은 약 20,000 개 정도로 구성된 SIS 접합 어레이를 이용해 구현할 수가 있다. SIS 접합 어레이의 또 다른 장점은 전압 출력 시 바이어스 장치로부터 회로를 분리시킬 수 있기 때문에 그만큼 잡음의 유입을 막을 수 있다는 것이다. 그러나 임의의 전압 값을 설정하는 것이 용이하지 않다는 것과 안정된 전압 출력을 유지하기 위해서는 항상 외부 잡음의 완벽한 차단이 필요하다는 것은 단점들로 지적될 수 있다.

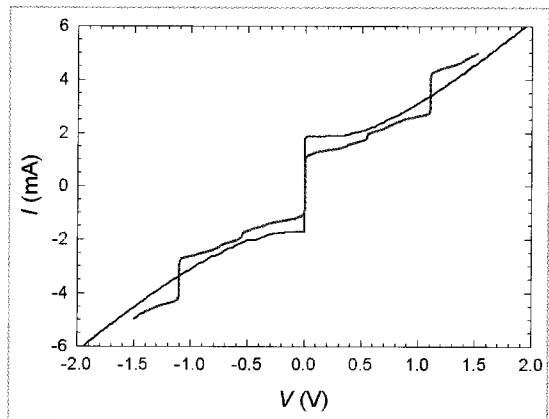


그림 1 조셉슨 접합 어레이 (SINIS chip) 의 전류-전압 특성. 검은 선과 붉은 선은 각각 마이크로파 (65.81 GHz) 가 인가되기 전후의 특성 곡선을 나타낸다. 소자의 총 접합수는 8191 개이며, 전압 스텝 (Shapiro step)은 1.104 011 351 V에서 나타난다.

프로그램머블 표준 전압 (programmable voltage standard) 소자로 불리고 비이력 (non-hysteretic) 전류-전압 특성을 보이는 초전도-금속-초전도 (superconductor-normal metal-superconductor, SNS) 접합 어레이 소자는 SIS 접합 어레이 소자가 가지는 장단점이 역전된 특성을 가진다. 즉, 접합의 특성이 더 균일해야 하며, 동일한 수준의 전압 출력을 위해서는 더 많은 수의 접합의 필요하고, 전압 출력 시 항상 바이어스가 가해져야하는 반면, 임의의 전압 값을 빠르게 설정할 수 있고, 출력 또한 매우 안정하다. 이러한 소자는 접합 특성에 따라서 크게 두 가지로 구분된다. 독일 표준기관 PTB에서 개발된 SINIS (superconductor-insulator-normal metal-insulator-superconductor) 형 소자는 장벽층으로 산화알루미늄/알루미늄을 사용한다. 70 GHz 수준의 마이크로파에서 작동을 하고, 1 V 소자는 8192 개의 접합을 가지고 있다. 이후 80,000 개 정도의 접합수를 가진 10 V 수준의 소자가 개발되었지만 전압 스템의 폭이 그다지 크지 않고, 소자의 수율이 낮아서 이를 개선하려는 노력이 계속되고 있다. 미국 표준기관 NIST에서 개발되고 있는 SNS형 소자는 접합장벽 층으로

MoSi₂를 사용한다. 20 GHz의 마이크로파 영역에서 작동이 되기 때문에 SINIS 소자와 같은 수준의 전압 출력을 얻기 위해서는 더 많은 수의 접합이 하다. 30,000 개 정도의 접합이 1 V 출력을 내며, 10 V 출력을 위해서는 그 10 배의 접합 수가 필요하다. 보다 높은 접합 집적도를 위해서 접합을 수직으로 쌓는 시도가 성공적으로 수행되었으며, 최근 10 V 소자가 개발되었고, 가까운 시일 내에 실제 표준전압 소자로 적용될 것으로 보인다.

프로그램머블 조셉슨 전압 소자의 또 다른 응용으로, NIST와 PTB를 중심으로 교류 전압 합성을 위한 연구가 약 10년 가까이 진행되어왔다. 사실 프로그램머블 조셉슨 전압 소자는 기본적으로 표준 교류전압을 합성하기 위해서 개발이 되었다. 프로그램머블 조셉슨 소자는 전체 어레이가 1, 2, 4, 8, 16, 32,... 등의 접합단위 (cell) 로 구획이 되어있다. 각 cell들 서로 독립적인 바이어스를 가해줄 수 있기 때문에 어레이의 출력전압을 매우 빠르게 변화 시킬 수 있다. 따라서 바이어스를 시간에 따라 조정해주면 원하는 교류 파형을 얻을 수 있다. 그러나 바이어스를 걸어주고 끊어주는 과정에서 발생하는 원치 않는 전압신호 (transient noise) 때문에 높은 주파수의 교류전압 합성을 위해서는 보다 많은 연구가 필요한 실정이다.

조셉슨 교류 전압은 계산이 가능하기 때문에 교류 측정을 필요로 하는 여러 전기표준 분야에 있어 획기적 발전의 전기가 될 수 있을 것으로 기대된다. 가장 직접적인 파급은 전력분야에서 이루어 질 것이다. 프로그램머블 조셉슨 소자를 이용하면 약 1 kHz 이하의 교류 파형을 아주 높은 정확도로 구현할 수 있기 때문에 전력의 기본과 및 고조파 전압을 낮은 불확도 측정할 수 있다. 이는 양자현상에 기반을 둔 새로운 전력표준 체계의 확립을 의미한다. 이밖에도 조셉슨 교류 표준전압은 현재의 교류 표준기인 열전압 변환기 (AC-DC thermal transfer standard)를 매우 낮은 불확도로 평가할 수 있을 것이며, 그 유용성은 앞으로 더욱 크게 증대될 것이다.

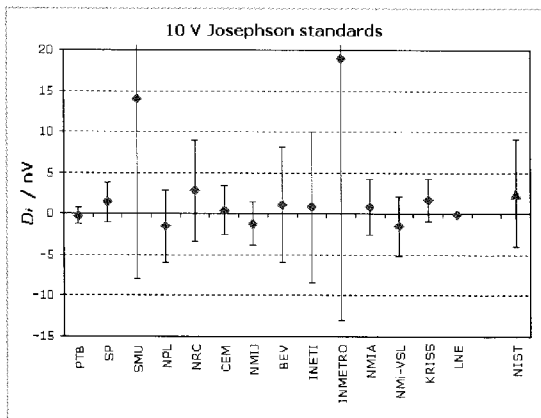


그림 2 국제 도량형국 (BIPM) 이 주관하는 10 V 조셉슨 전압 국제 비교 (BIPM.EM-K10.b, SIM.EM.BIPM-K10.b) 결과. 각 심벌은 BIPM과 각국이 보유한 표준기로 발생 시킨 전압의 차이와 불확도 (단위는 nV, 10-9 V) 를 나타낸다. 참고로 그림에서 PTB, NPL, NRC, NMIJ, INMETRO, NMIA, NIST는 독일, 영국, 캐나다, 일본, 호주 그리고 미국의 국가 표준 기관의 약칭이다.

4. KRISS의 연구현황

조셉슨 전압 표준이 이미 10년 이상 국가의 직류 전압 표준으로 자리 매김을 하고 있다. KRISS는 조셉슨 소자를 이용한 전압 소급체계를 갖추었을 뿐만 아니라, 1995 년과 2008 년에는 국제도량형국에서 주관하는 1 V 및 10 V 국제 비교에 참여하여 선진국 수준의 결과를 도출한 바가 있다 (그림 2). 이는 KRISS가 전압 표준의 국내의 수요를 모두 감당할 수 있음 물론이고 발행된 성적서는 국제적으로도 통용이 될 수 있음을 공인 받은 것이라고 할 수 있다. 작년에는 말레이시아 국가 표준기관으로부터 KRISS가 개발한 조셉슨 전압표준기에 대한 수출 의뢰를 받았으며, 올해 안에 시스템이 완성되어 수출이 될 예정이다.

이밖에도 국제적인 조류에 발맞추어, 조셉슨 소자를 이용한 표준 교류 전압 합성에 관한 연구를 약 4년간 진행해오고 있으며, 현재는 국제적인 수준의 교류 합성기를 개발한 상태이다 (그림 3). 앞으로의 연구는 크게 두 가지로 대별된다. 첫째, 프로그래머블 조셉슨 전압 표준기의 기본 개념대로 파형 합성기를 전압원 (source) 으로 이용하려는 연구가 진행될 것이며 이를 위해서는 전이 시간을 감소시키고, 최적 바이어스 조건을 찾는 연구가 필요하다. 둘째, 합성기를 교류 전압 (파형) 측정기의 기준 전압 (reference for meter) 으로 이용하려는 연구가 진행될 것이며 이는 측정하고자하는 (반도체 기반 합성

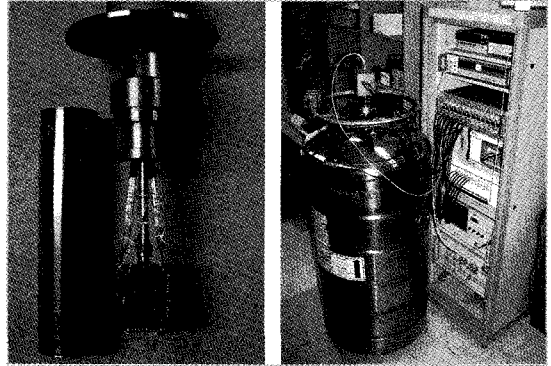


그림 3 한국표준과학연구원이 개발한 교류 조셉슨 전압 표준기. (좌) 저온 프로브에 장착된 프로그래머블 소자 (우) 고속 바이어스 장치 및 마이크로파 발생기등으로 구성된 교류 합성기.

기) 전압 파형과 같은 주파수, 같은 수준의 전압을 조셉슨 합성기로 합성하여 실시간으로 전압을 비교하는 것이 기본 개념이다. 이 때 두 전압의 비교는 계산 가능한 전압 스텝 구간에서만 이루어지므로 스텝간 전이 효과는 완벽하게 제거될 수 있다. 따라서 미세한 전압이나, 전력 신호에 수반되는 고조파등을 10⁻⁷이하의 불확도로 측정할 수 있게 될 것이다.

앞으로도 SI (국제단위계) 전기 단위를 구현하는 최상위 전기표준의 역할을 더욱 충실히 수행할 뿐만 아니라, 교류관련 여러 전기표준의 SI 소급성을 보다 확고히 하고, 정확도를 획기적으로 향상시키고 나아가 세계적으로 전기표준 분야를 실질적으로 선도해 나가는 데 기여할 수 있도록 조셉슨 측정기술의 혁신적 발전과 그 응용범위 확대를 위한 배전의 노력을 다할 것이다.