



# 국제단위계

(제9판)

Le  
Système  
international  
d'unités

The  
International  
System of  
Units



---

Bureau International  
des Poids et Mesures

국 제 단 위 계  
The International  
System of Units  
(SI)

제9판 2019

---



## 국제단위계 [제9판]

### 한국어판을 내면서

측정은 인류 사회에서 늘 이루어지는, 떼어낼 수 없는 요소이다. 교류의 근거이기 때문에 공동체 안에서는 측정의 결과를 서로 믿을 수 있어야 하며, 이를 위해 같은 단위와 표준을 사용한다. 역사 속의 여러 국가가 단위를 통일하고, 흐트러지는 표준을 때때로 바로 잡으려고 노력한 것도 이 때문이다.

측정의 역사에서 가장 극적인 사건으로 18세기 후반 미터법이 확립된 것을 꼽을 수 있다. 미터법 이전에는 같은 양에 대해서도 상호 연관성이 모자란 수많은 단위가 혼란스럽게 사용되었다. 미터법은 같은 양에 대해서는 같은 단위를 사용하도록 확립된 단위계이다. 1875년 맺어진 미터협약으로 이 미터법은 전 세계로 퍼져나갔다. 인류 단일 공동체의 토대가 마련된 것이다. 인류의 교류가 급속하게 확대된 것은 이 단일 단위계에 힘입은 바 크다고 할 것이다.

미터법에서 주목할만한 것 하나는 이 단위계가 과학자들이 참여하여 확립한 것이라는 점이다. 과학의 발전에 걸림돌이었던 혼란한 단위들을 대신할 과학적인 새로운 단위계를 과학자들이 직접 설계한 것이다. 미터협약 후 과학적인 새 단위계가 전 세계에서 공통으로 사용되면서 과학의 발전 속도가 눈부시게 빨라진 것은 당연하다. 오늘날 인류가 구가하고 있는 고도의 과학기술 문명이 이 미터법에 힘입은바 절대적이라고 해도 무리는 아닐 것이다.

한편, 과학기술의 발전은 거꾸로 단위계의 발전을 이끌었다. 미터와 킬로그램, 두 기본단위로 출발하였던 미터법은 암페어, 초 등 다섯 개의 기본단위를 추가하였고, 아울러 이 기본단위들의 정의도 더 과학적인 것으로 끊임없이 개선되었다. 이 단위계는 1960년 기본단위에 수많은 유도단위를 더하여 일관성을 가지는 ‘국제단위계’로 공식적으로 새롭게 탄생하였다. 18세기 과학이 만든 미터법이 후대의 과학에 의해 ‘국제단위계’로 진화한 것이다.

미터협약에 따라 설립된 국제도량형국은 ‘국제단위계’라는 제목을 가지는 국제단위계에 대한 소개 책자를 1970년 첫 번째로 발간한 이래 중요한 변화가 있을 때마다 갱신 발간한다. 국제단위계에는 최근 중요한 변화가 있었다. 2018년 국제도량형총회의 결정에 따라 ‘세계측정의 날’인 2019년 5월 20일을 기점으로 킬로그램을 비롯한 네 개 기본단위의 정의가 바뀌게 된 것이다. 국제도량형국은 이 중요한 변화를 반영하여 ‘국제단위계’ 제9판을 내놓았다. KRISS는 그동안 ‘국제단위계’ 제4, 제5, 제6, 제7, 제8판의 한국어판을 내놓은 바 있다. 이번에 제9판 영문본을 번역하여 한국어판을 발간한다.

한국어판을 준비하면서 우리말 용어의 선택이 쉽지 않음을 느꼈다. ‘국제 측정학 용어집(제3판, KRISS/SP--2008-022)’에 정리되어 있으면 그것을 따랐고, 그렇지 않으면 가장 합리적이라고 여겨지는 것을 택하였다. 향후 측정학 용어들에 대하여 이미 정리된 것들을 포함하여 폭넓게 검토할 기회가 있기를 바란다.

최선을 다하였으나 본 한국어판만으로는 이해가 부족한 부분이 있을 수 있겠다. 이런 경우 원문을 참고하기 바란다.

모쪼록 본 책자가 도움이 되길 바란다.

2020년 6월

국제단위계 제9판 한국어판 편집위원회

## 국제도량형국 그리고 미터협약

국제도량형국(BIPM, 프랑스어로 le Bureau international des poids et mesures, 영어로는 the International Bureau of Weights and Measures)은 1875년 5월 20일 파리에서 열린 미터 외교 회의의 최종회기에 17개국이 서명한 미터협약에 따라 설립되었다. 이 협약은 1921년에 개정되었다.

BIPM은 파리 근교 생끌루(Saint-Cloud) 공원 내 파비용 드 브레퇴유(Pavillon de Breteuil)에 본부를 두고 있다. 부지(43 520 m<sup>2</sup>)는 프랑스 정부가 기증한 것이다. BIPM의 운영을 위한 재정은 미터협약의 회원국들이 공동으로 부담한다.

BIPM의 과업은 측정의 세계적 통일을 이루는 것이며 그 목표는 다음과 같다.

- 수용성과 영향력을 극대화할 목적으로 범세계 측정 공동체를 대변
- 공동 경비 부담 기반의 국제 측정 비교를 위한 역량을 제공하기 위하여 회원국 사이 과학 기술 협력의 중심이 되는 것
- 측정 결과가 비교성과 국제적 수용성을 가질 수 있도록 범세계 측정체계의 조정자가 되는 것

BIPM은 국제도량형총회(CGPM, 프랑스어로 la Conférence générale des poids et mesures, 영어로는 the General Conference on Weights and Measures)의 지휘 아래 있는 국제도량형 위원회(CIPM, 프랑스어로 La Comité international des poids et mesures, 영어로는 the International Committee for Weights and Measures)의 전적인 감독 아래 운영되며, 수행한 업무를 CIPM에 보고한다.

모든 미터협약 회원국의 대표는 통상 4년마다 열리는 CGPM에 참석한다. 이 회의의 기능은 다음과 같다.

- 미터법의 현재 모습인 국제단위계(SI, International System of Units)의 보급과 개선에 필요한 조치의 논의 및 마련
- 측정학과 관련된 새로운 기본적 결정사항과 국제적 차원의 여러 과학적 결의사항의 확인
- BIPM의 재정, 조직 및 발전에 관한 주요 사항 결정

CIPM은 서로 다른 회원국 출신 18명의 회원으로 구성되며 매년 1회 회의가 개최된다. 이 위원회의 임원단은 BIPM의 행정 및 재정 상태에 관한 연례보고서를 회원국 정부에 제출한다. CIPM의 주된 과업은 측정단위를 세계적으로 동일하게 하는 것이다. 직접 행동하거나 CGPM에 제안서를 제출함으로써 이 과업을 수행한다.

2019년 5월 20일 현재  
다음 59개국이  
미터협약의  
회원국이다: 그리스,  
남아프리카공화국,  
네덜란드, 노르웨이,  
뉴질랜드, 대한민국,  
덴마크, 독일,  
러시아연방, 루마니아,  
리투아니아,  
말레이시아, 멕시코,  
몬테네그로, 미국,  
벨기에, 불가리아,  
브라질,

사우디아라비아,  
세르비아, 스웨덴,  
스위스, 스페인,  
슬로바키아,  
슬로베니아, 싱가포르,  
아랍에미리트,  
아르헨티나, 아일랜드,  
영국, 오스트리아,  
우루과이, 우크라이나,  
이라크, 이란,  
이스라엘, 이집트,  
이탈리아, 인도,  
인도네시아, 일본,  
중국, 체코공화국,  
칠레, 카자흐스탄,  
캐나다, 케냐,  
콜롬비아, 크로아티아,  
태국, 터키, 튀니지,  
파키스탄, 포르투갈,  
폴란드, 프랑스,  
핀란드, 헝가리, 호주

국가 및 경제주체를  
포함하여 CGPM의  
준회원은 42개국으로  
다음과 같다: 가나,  
나미비아, 대만,  
라트비아, 룩셈부르크,  
모리셔스, 몰도바,  
몰타, 몽골,  
방글라데시, 베트남,  
벨라루스, 보스니아  
헤르체고비나,  
보츠와나 볼리비아,  
북마케도니아, 세이셸,  
수단, 스리랑카,  
시리아, 아제르바이잔,  
알바니아, 에스토니아,  
에콰도르, 오만,  
우즈베키스탄,  
에티오피아, 자메이카,  
잠비아, 조지아,  
짐바브웨,  
카리브공동체  
(CARICOM), 카타르,  
코스타리카, 쿠바,  
쿠웨이트, 탄자니아,  
파나마, 파라과이,  
페루, 필리핀,  
홍콩(중국)

BIPM은, 초기에는 길이와 질량의 측정 및 이 양들에 관한 측정학 연구로 국한하였으나, 점차 전기(1927), 광도 및 복사도(1937), 전리방사선(1960), 시간척도(1988) 및 화학(2000)의 측정표준들로 활동을 확대하였다. 이를 위하여 1876~1878년에 건설되었던 초창기 연구실을 1929년에 확장하였고, 1963~1964년에는 전리방사선 실험실 용도로, 1984년에는 레이저 실험실 용도로, 1988년에는 도서실과 사무실 용도로 새로운 건물을 건립하였다. 2001년에는 워크숍, 사무실, 회의실용 건물을 준공하였다.

BIPM의 연구실에는 약 45명의 물리학과 기술자들이 일하고 있다. 이들은 주로 측정 과학기술 연구, 단위 구현에 대한 국제비교, 측정표준의 교정업무를 수행한다. 진행 중인 사업의 세부 내용은 국장의 연례보고서에 담는다.

1927년 BIPM의 업무가 확대되기 시작한 데 이어 CIPM은 산하에 여러 자문위원회(CC, Consultative Committee)를 설립하고 연구와 자문이 필요한 일을 맡겨 관련 정보를 제공하도록 하였다. 이들 자문위원회는 특정 주제의 연구를 위한 임시 또는 상설 작업반을 구성할 수 있으며, 각 분야에서 수행된 국제적인 연구 결과를 조정하고 단위와 관련된 권고사항을 마련하여 CIPM에 제안할 임무를 가진다.

자문위원회들은 공동 규정(CIPM-D-01 문서, CIPM이 설립한 자문위원회(CCs), CC 작업반 및 CC 워크숍의 운용에 관한 규정)을 가지고 있다. 이들은 또 비정기적으로 회의를 가진다. 각 자문위원회의 위원장은 CIPM이 지명하며 보통 CIPM의 위원이 지명된다. 자문위원회의 회원은 CIPM의 동의를 받은 측정연구기관(metrology laboratories) 및 전문기관들이며, 이 기관들은 대표를 선정하여 자문위원회에 참여한다. 아울러 CIPM이 임명한 개인 회원과 BIPM의 대표 한 명도 회원으로 참여한다(CIPM-D-01 문서, CIPM이 설립한 자문위원회(CCs), CC 작업반 및 CC 워크숍의 운용에 관한 규정). 현재는 열 개의 자문위원회가 있다.

1. 전기 및 자기 자문위원회(CCEM, Consultative Committee for Electricity and Magnetism): 1927년 설립된 전기 자문위원회(CCE, Consultative Committee for Electricity)의 명칭이 1997년에 변경됨
2. 광측정 및 복사측정 자문위원회(CCPR, Consultative Committee for Photometry and Radiometry): 1933년 설립된 광측정 자문위원회(CCP, Consultative Committee for Photometry)의 명칭이 1971년에 변경됨(1930년부터 1933년 사이에는 전기 자문위원회(CCE)가 광측정 분야를 담당하였음)
3. 온도측정 자문위원회(CCT, Consultative Committee for Thermometry): 1937년 설립됨
4. 길이 자문위원회(CCL, Consultative Committee for Length): 1952년 설립된 미터 정의 자문위원회(CCDM, Consultative Committee for the Definition of the Metre)의 명칭이 1997년에 변경됨
5. 시간 및 주파수 자문위원회(CCTF, Consultative Committee for Time and Frequency): 1956년 설립된 초 정의 자문위원회(CCDS, Consultative Committee for the Definition of the Second)의 명칭이 1997년 변경됨

6. 전리방사선 자문위원회(CCRI, Consultative Committee for Ionizing Radiation): 1958년 설립된 전리방사선측정표준 자문위원회(CCEMRI, Consultative Committee for Standards of Ionizing Radiation)의 명칭이 1997년 변경됨(1969년 이 위원회는 네 개의 분과를 두었음: 분과 I(X선,  $\gamma$ 선 및 전자), 분과 II(방사성 핵종의 측정), 분과 III(중성자 측정), 분과 IV( $\alpha$ -에너지 표준). 1975년에 분과 IV는 해체되고 분과 II가 이 분야를 담당하게 되었음)
7. 단위 자문위원회(CCU, Consultative Committee for Units): 1964년 설립(이 위원회는 1954년에 CIPM에 의해 설립된 ‘단위계 위원회’를 대체함)
8. 질량 및 관련량 자문위원회(CCM, Consultative Committee for Mass and Related Quantities): 1980년 설립됨
9. 물질량 자문위원회-화학 및 생물 분야 측정(CCQM, Consultative Committee for Amount of Substance: Metrology in Chemistry and Biology): 1993년 설립됨
10. 음향·초음파·진동 자문위원회(CCAUV, Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration): 1999년 설립됨

CGPM과 CIPM 회의의 기록은 BIPM이 다음의 문서 시리즈로 공개한다.

- CGPM 보고서(Report of the meeting of the General Conference on Weights and Measures)
- CIPM 보고서(Report of the meeting of the International Committee for Weights and Measures)

CIPM은 2003년, 자문위원회의 회의록을 더는 인쇄하지 않고 작성된 원문 형태로 BIPM 웹사이트에 게시하기로 하였다.

BIPM은 측정 관련 특정 주제에 관한 단행본도 발간하며, 단위에 관한 모든 결의 및 권고를 수록하는 ‘국제단위계(SI)’라는 제목의 책자를 때때로 갱신하여 발간한다.

*Travaux et mémoires du Bureau international des poids et mesures*(1881~1966년 사이에 22권 발간)와 *Recueil de travaux du Bureau international des poids et mesures*(1966~1988년 사이에 11권 발간) 모음집은 CIPM의 결정에 따라 발간을 중단하였다.

BIPM의 과학적 성과는 공개된 과학 문헌에 발표된다.

1965년 이래 CIPM의 주관으로 발간되는 국제 전문학술잡지인 *Metrologia*는 측정과학, 측정방법의 개선, 표준과 단위에 관한 연구 논문들을 게재하며, 아울러 미터협약에 근거하여 설립된 여러 조직의 활동, 결정사항 및 권고사항에 관한 보고서를 수록한다.

# 목 차

제9판의 머리말 .....	10
<b>1 서 론 .....</b>	<b>13</b>
1.1 SI와 정의 상수 .....	13
1.2 SI를 정의하기 위하여 정의 상수를 사용하게 된 동기 .....	13
1.3 SI의 적용 .....	14
<b>2 국제단위계 .....</b>	<b>15</b>
2.1 양의 단위 정의 .....	15
2.2 SI의 정의 .....	16
2.2.1 7개의 정의 상수의 본질 .....	17
2.3 SI 단위의 정의 .....	17
2.3.1 기본단위 .....	18
2.3.2 SI 단위의 실제적 구현 .....	23
2.3.3 양의 차원 .....	24
2.3.4 유도단위 .....	25
2.3.5 생물학적·생리적 효과를 표현하는 양에 대한 단위 .....	29
2.3.6 일반 상대성이론 틀 안에서의 SI 단위 .....	30
<b>3 SI 단위의 십진배수와 십진분수 .....</b>	<b>31</b>
<b>4 SI와 함께 사용하는 것이 인정되는 SI 이외의 단위 .....</b>	<b>33</b>
<b>5 단위기호와 단위명칭의 표기 및 양의 값의 표현 .....</b>	<b>35</b>
5.1 단위기호와 단위명칭의 사용 .....	35
5.2 단위기호 .....	35
5.3 단위명칭 .....	36
5.4 양의 값을 표현하기 위한 규칙 및 관례 .....	36
5.4.1 양의 값과 수치, 양의 계산법 .....	36
5.4.2 양의 기호 및 단위기호 .....	38
5.4.3 양의 값 표기 방식 .....	38

5.4.4	숫자 및 소수점의 표기 방식 .....	38
5.4.5	양의 값에 대한 측정불확도 표현 .....	39
5.4.6	양의 기호, 양의 값 또는 숫자의 곱하기와 나누기 .....	39
5.4.7	순수한 수인 양의 값의 표기 .....	39
5.4.8	평면각, 입체각 및 위상각 .....	40
<b>부록 1.</b>	<b>CGPM과 CIPM의 결정사항 .....</b>	<b>41</b>
<b>부록 2.</b>	<b>주요 단위들에 대한 정의의 실제적 구현 .....</b>	<b>93</b>
<b>부록 3.</b>	<b>광화학적, 광생물학적 양에 대한 단위 .....</b>	<b>94</b>
<b>부록 4.</b>	<b>SI와 그 기본단위의 발전에 대한 연혁 .....</b>	<b>95</b>
	1부. SI 단위 구현의 역사적 발전 .....	95
	2부. SI의 역사적 발전 .....	97
	3부. 기본단위에 대한 역사적 관점 .....	100
<b>약어 목록</b>	.....	<b>104</b>
<b>색 인</b>	.....	<b>107</b>

## 제9판의 머리말

국제단위계(SI)는 1960년 제11차 국제도량형총회(CGPM)의 결의사항으로 확립된 이래 세계적으로 통용되는 단위계이자 과학, 기술, 산업 및 교역에서의 기본 언어로 활용되고 있다.

국제도량형국(BIPM)은 SI를 설명하고 그 사용을 장려하기 위하여 이 책자를 발간한다. 이 책자는 1889년에 열렸던 첫 CGPM 회의 이후 지금까지 미터법과 관련하여 있었던 가장 중요한 CGPM 결의 및 국제도량형위원회(CIPM)의 결정사항을 담고 있다.

SI는 항상 최신의 과학 및 기술 발전을 활용하여 진화해온 실용적이고 동적인 체계였다. 특히, 지난 50년간 이룩된 원자물리학과 양자 측정학의 엄청난 발전은 초와 미터의 정의 그리고 전기단위의 실제 표현에 있어서, 각 단위 구현의 정확도 수준이 정의 자체가 아닌 기술적 역량에만 좌우되도록 원자 및 양자 현상을 이용하는 것을 가능하게 하였다. 과학에서 이러한 발전은, 측정기술의 발전과 함께, 이 책자의 이전 판들에서 설명되고 장려되어온 SI의 변화를 가져올 수 있게 하였다.

이 SI 책자 제9판은 CGPM 제26차 회의에서 채택된 커다란 변화를 반영하여 마련하였다. 그 회의에서는 일반적인 단위의 정의를 표현하는 것과 함께 특히 7개의 ‘정의하는 (defining)’ 상수의 수치를 고정함으로써 7개 기본단위의 정의를 표현하는 접근법을 도입하였다. 이들 상수에 플랑크 상수(Planck constant) 및 빛의 속력과 같은 자연의 기본상수들을 포함하여 단위 정의가 현재의 물리 법칙을 바탕으로, 또한 그것을 반영하여 이루어지도록 하였다. 비로소 인공물 척도, 물질의 성질 혹은 측정에 관한 서술을 참조하지 않는 정의들의 온전한 세트가 마련된 것이다. 이 변화로 인하여 모든 단위 구현의 정확도는 단위의 정의 자체가 아니라 궁극적으로 자연의 양자 구조 및 우리의 기술적 역량에 의한 한계만을 가지게 되었다. 이제 어느 단위를 구현하는 데 있어서 정의 상수를 해당 단위로 연결 짓는 어떠한 타당한 물리학 관계식도 활용할 수 있으므로, 기술 발전에 따라 어디에서나 더 높은 정확도로 구현할 수 있는 혁신의 가능성이 생겼다. 따라서 이번 재정의는 중요하면서도 역사적인 획을 긋는 진전이다.

이 변화 사항은 2018년 11월 CGPM에서 합의되었으며 2019년 5월 20일부터 발효된다. 5월 20일이 발효되는 날짜로 선정된 이유는 1875년 미터협약이 조인된 날을 기념하는 ‘세계 측정의 날’이기 때문이다. 이 변화의 향후 영향은 넓은 범위에 걸쳐 미칠 것이다. 다만 새로운 정의가 도입되는 시점에서는 이전 정의들과 일관성을 유지하도록 각별한 주의가 기울여졌다.

SI가 1960년 처음 확립된 이후, 국제단위계는 늘 축약어인 ‘SI’라고 불려 왔다. 이 원칙은 이 책자의 이전 여덟 판에서 지켜져 왔고, 이 책자의 제목을 간단히 ‘국제단위계’로 할 것을 확정된 CGPM 제26차 회의 결의사항 1에서 재확인되었다. SI라는 말을 일관되게 사용한 것은 SI 단위로 표현되는 측정값들의 연속성이 새로운 변화 후에도 유지되도록 CGPM과 CIPM이 기울인 노력을 반영하는 것이기도 하다.

이 책자는 SI에 대한 자세한 설명과 역사적 배경을 제공하기 위해 작성되었다. 또한 부록 4편을 수반한다.

부록 1은 1889년부터 CGPM과 CIPM이 측정단위 및 SI와 관련하여 공포한 모든 결정사항(결의사항, 권고사항, 선언문)을 시간 순서대로 재구성한 내용이다.

부록 2는 전자 문서로만 열람할 수 있다([www.bipm.org](http://www.bipm.org)). 이 부록은 일곱 개 기본 단위 및 그 외 각 분야 주요 단위의 실제적 구현에 관한 개요이다. 이 부록은 단위의 구현에 활용되는 실험 기술의 발전을 반영하기 위하여 정기적으로 갱신될 예정이다.

부록 3도 전자 문서로만 열람할 수 있다([www.bipm.org](http://www.bipm.org)). 여기에서는 광화학적 양과 광생물학적 양의 단위를 논한다.

부록 4는 SI 발전의 역사와 관련된 설명을 제공한다.

이 책자의 초고를 맡았던 CIPM 산하 단위자문위원회(CCU, 프랑스어로 Comité Consultatif des Unités, 영어로는 Consultative Committee for Units) 위원들에게 감사를 표하며 머리말을 마무리하고자 한다. CCU와 CIPM 양자가 이 문서의 최종본을 승인하였다.

2019년 3월



CIPM 위원장  
B. Inglis



CCU 위원장  
J. Ullrich



BIPM 국장  
M. J. T. Milton

### 본문에 대한 주석<sup>1</sup>

2003년 제22차 CGPM 회의에서는, 1997년의 CIPM 결정에 이어, “소수점 부호는 숫자 선상에 온점(period) 또는 반점(comma)이어야 한다”라고 결정하였다. 이 결정과 또 영어 및 프랑스어 두 언어 각각의 관습에 따라, 이 책자의 영문본에서는 온점을, 불문본에서는 반점을 소수점 부호로 사용한다. 소수점에 관한 이 내용은 영어 및 프랑스어 외 다른 언어로 번역할 때는 관련이 없다. 영어를 사용하는 나라들에서 철자가 경미하게 다른 경우들이 있다(예를 들어 ‘metre’ 와 ‘meter’, ‘litre’ 와 ‘liter’). 이에 대하여 이 책자의 영문본은 국제표준 ISO/IEC 80000 시리즈의 양 및 단위(Quantities and units)에 주어진 원칙에 따라 작성되었다. 그러나 이 책자의 SI 단위들의 기호는 언어와 관계없이 동일하다.

CGPM 회의와 CIPM 회의의 공식 기록은 프랑스어로 작성된 것임을 주목해야 한다. 이 책자는 영문본으로도 제공되지만, 권위 있는 참고문헌이 필요한 경우나 문서 해석상의 의문점이 존재할 경우 불문본을 사용하여야 한다.

---

<sup>1</sup> 편집자 주: 이 주석은 이 책자가 프랑스어와 영어, 2개 언어로 작성되었기 때문에 필요한 내용을 담고 있다. 따라서 한국어판에서 꼭 필요하다고 볼 수는 없다. 그럼에도 불구하고 어떤 독자들에게는 유용할 수도 있으므로 이 주석을 삭제하지 않고 한국어판에 포함하였다.

# 1 서론

## 1.1 SI와 정의 상수(defining constants)

이 책자는 SI(프랑스어 *Système international d'unités*의 약어에서 유래)라고 부르며 CGPM이 책임지고 있는 국제단위계의 정의와 그 활용에 대한 정보를 제공한다. CGPM은 1960년 제11차 회의에서 SI를 공식적으로 정의하여 확립하였고, 이후 사용자들의 요구와 과학 기술의 발전에 대응하여 때때로 개정해왔다. 제26차 CGPM 회의(2018)는 SI에 관한 가장 최근이자 확립 이후 가장 심대한 개정을 결정하였는데, 그 내용을 이 책자 제9판에 수록하였다. 미터협약 및 관련 단체인 CGPM, 국제도량형위원회(CIPM), 자문위원회(CC), 국제도량형국(BIPM)에 관한 설명은 이 책자 5페이지 ‘미터협약 그리고 국제도량형국’ 부분에 수록하였다.

SI는 국제 교역, 제조업, 보안, 보건 및 안전, 환경 보호, 그리고 이 모든 것의 근간이 되는 기초 과학 등 삶의 모든 측면에서 활용할 수 있는 일관성 있는 단위계다. SI의 기저를 이루는 양의 체계 및 양들을 서로 관계 짓는 관계식들은 자연에 대한 오늘날의 이해에 바탕을 두고 있으며 모든 과학자, 기술자, 그리고 공학자들에게 친숙한 것들이다.

SI 단위의 정의는 7개의 정의 상수 세트를 기초로 확립되었다. 온전한 단위계는 SI 단위로 표현된 이 정의 상수들의 정해진 값들로부터 도출할 수 있다. 이 7개 정의 상수들은 SI 전체의 정의에서 가장 핵심적인 요소이다. 이 상수들은 7개의 기본단위에 기반을 둔 기존 SI의 정의와 과학의 발전을 고려할 때 최고의 선택임이 확인되어 선정되었다.

단위의 정의는 CIPM의 자문위원회가 서술해 놓은 다양한 실험적인 방법을 통해 구현할 수 있다. 구현 방법에 대한 이 서술들을 ‘*mises en pratique*’라고 부른다. 새로운 실험적 발명이 이루어지면 구현 방법은 변경될 수 있다. 그래서 정의 구현 방법에 관한 서술들은 이 책자에는 포함하지 않았으며 BIPM 웹사이트에서 열람할 수 있도록 하였다.

## 1.2 SI를 정의하기 위하여 정의 상수를 사용하게 된 동기

역사적으로 SI 단위들은 *기본단위*(최근 7개) 세트의 관점으로 제시되었다. *유도단위*라 일컫는 모든 다른 단위는 기본단위의 거듭제곱의 곱으로 구성되었다.

기본단위에 대하여 여러 다른 유형의 정의들이 사용돼왔다. 킬로그램 단위를 정의하기 위한 국제킬로그램원기(IPK)의 질량처럼 인공물의 특정한 성질, 켈빈 단위 정의를 위한 물의 삼중점처럼 특정한 물리적 상태, 암페어 및 칸델라의 경우처럼 이상적인 실험 방안, 혹은 미터 단위 정의를 위한 빛의 속력과 같은 자연의 상수 등이 그것들이다.

단위가 실질적으로 활용되기 위해서는 정의되어야 할 뿐만 아니라 보급을 위하여 물리적으로 구현되어야 한다. 인공물의 경우에는 고대 선진 문명에서 추구된 방식처럼 단위의 정의와 구현이 같다. 이 유형은 단순하고 명확하다는 장점이 있으나, 인공물이 손실, 훼손 또는 변질될 위험성을 가지고 있다. 다른 유형의 단위 정의는 위에 서술된 순서대로 점점 더 추상적이거나 이상적이다. 이 경우에는 정의와 구현이 개념적으로 구분되며, 따라서 단위들은 원칙적으로 언제 어디서나 독립적으로 구현될 수 있다. 그리고 단위를 또다시 재정의하지 않고도 과학 기술이 발전함에 따라 새롭고 더 우수한 구현 방법들을 도입할 수 있다. 이 장점들은 인공물로부터, 원자의 기준 전이를 거쳐, 빛의 속력 수치의 고정으로 변해 온 미터 정의의 역사에서 분명하게 드러난다. 모든 단위를 정의 상수를 활용하여 정의하도록 한 결정은 이러한 장점들로 인한 것이다.

선택된 기본단위는 변하지 않는 고유한 것은 아니었고, 역사적으로 그 수가 증가하였으며 SI의 사용자들에게 익숙해졌다. 기본단위와 유도단위 관점의 이러한 설명은 현 SI 정의에서도 유지되나 정의 상수의 도입으로 인해 새로 서술되었다.

### 1.3 SI의 적용

CGPM에서 결정한 SI 단위의 정의는 SI로의 측정소급성을 위한 최상위 기준을 나타낸다. 전 세계 측정연구기관들은 SI로의 측정소급성 확보가 가능하도록 단위 정의에 대한 실제적 구현을 수행한다. 자문위원회는 측정소급성이 세계적인 조화를 이루도록 단위 구현의 동등성 확립을 위한 토대를 제공한다.

표준화 기구들은 이해관계자들의 필요에 따라 양과 단위에 관한 추가적 세부 내용 및 이들의 적용에 관한 규칙을 규정할 수 있다. SI 단위가 관련될 경우 이 표준들은 반드시 CGPM이 내린 정의를 참조하여 작성되어야 한다. 그러한 규정들의 예로 국제표준화기구(ISO, International Organization for Standardization)와 국제전기표준회의(IEC, International Electrotechnical Commission)에서 개발한 표준(ISO/IEC 80000 시리즈 국제표준)들을 들 수 있다.

각 국가는 일반적인 용도, 또는 상업, 보건, 공공 안전, 교육과 같은 특정한 분야에서의 단위 사용에 관한 규칙을 법제화하여 확립하고 있다. 이를 위한 법률은 대부분의 나라에서 SI를 바탕으로 제정한다. 국제법정계량기구(OIML, International Organization of Legal Metrology)는 이러한 법률의 기술적 사항에 대한 국제적 조화를 책임지고 있다.

## 2 국제단위계

### 2.1 양의 단위 정의

양(quantity)의 값(value)은 일반적으로 수와 단위의 곱으로 표현한다. 단위는 대상이 되는 양의 어느 한 특정한 예로 기준으로 사용되는 것이며, 수는 양의 값과 단위의 비율이다.

어느 특정한 양에 대하여 다른 단위들을 사용할 수 있다. 예를 들어, 어떤 입자의 속도  $v$ 의 값은  $v = 25 \text{ m/s}$  또는  $v = 90 \text{ km/h}$ 로 표현할 수 있는데, 여기서 미터 매 초와 킬로미터 매 시간은 이 속도이라는 양(quantity)의 같은 값에 대한 서로 다른 단위이다.

측정 결과를 표현할 때는 먼저 측정하는 양을 적절하게 묘사해야 한다. 이것은 어떤 강철봉의 길이와 같이 간단한 것일 수도 있지만, 높은 정확성이 요구되거나 온도와 같은 추가적인 매개 변수를 명시해야 할 때는 복잡해질 수 있다.

어떤 양에 대한 측정의 결과를 보고할 때는 측정량(측정하고자 하는 양)의 **추정값** 그리고 이 값과 결부된 **불확도**가 필요하다. 이 둘은 같은 단위로 표현된다.

예를 들어, 진공에서의 빛의 속력은  $c$ 로 표시되는 자연의 상수로, SI 단위로 나타낸 값은 관계식  $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$ 에 의해 주어지는데, 여기서 수치는  $299\,792\,458$ 이고 단위는  $\text{m/s}$ 이다.

### 2.2 SI의 정의

어떤 양과 마찬가지로 기본상수의 값도 수와 단위의 곱으로 표현할 수 있다.

아래의 정의들은 해당하는 SI 단위로 표현한 기본상수의 정확한 수치를 규정한다. 상수의 **수치**와 **단위**의 곱은, 불변이라고 전제되는 상수의 **값(value)**과 같아야 하므로, 상수의 수치를 고정하면 단위가 정의된다.

7개의 상수는 SI 단위들을 정의 상수 그 자체 또는 정의 상수의 곱이나 몫으로 표현할 수 있도록 선정되었다.

SI 단위의 몫은 빗금(/) 또는 음의 지수(-)를 사용해 표현할 수 있다

예를 들어,  
 $\text{m/s} = \text{m s}^{-1}$   
 $\text{mol/mol} = \text{mol mol}^{-1}$

국제단위계, 즉 SI는 아래를 만족하는 단위계이다.

- 세슘 133 원자의 섭동이 없는 바닥상태의 초미세 전이 주파수  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ 는  $9\,192\,631\,770 \text{ Hz}$
- 진공에서 빛의 속도  $c$ 는  $299\,792\,458 \text{ m/s}$
- 플랑크 상수  $h$ 는  $6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s}$
- 기본전하  $e$ 는  $1.602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$
- 볼츠만 상수  $k$ 는  $1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
- 아보가드로 상수  $N_A$ 는  $6.022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- 주파수가  $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$  인 단색광의 시감효능  $K_{\text{cd}}$ 는  $683 \text{ lm/W}$

여기서 Hz, J, C, lm, W라는 기호로 나타내는 단위인 헤르츠, 줄, 쿨롱, 루멘, 와트는 관계식  $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ ,  $\text{J} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$ ,  $\text{C} = \text{A s}$ ,  $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$ ,  $\text{W} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-3}$ 에 따라 s, m, kg, A, K, mol, cd라는 기호로 나타내는 단위인 초, 미터, 킬로그램, 암페어, 켈빈, 몰, 칸델라와 관련된다.

7개 정의 상수의 수치에는 불확도가 없다.

표 1. SI의 정의 상수 7개와 이로부터 정의되는 7개의 단위

정의 상수	기호	수치	단위
Cs의 초미세 전이 주파수	$\Delta\nu_{\text{Cs}}$	9 192 631 770	Hz
진공에서 빛의 속력	$c$	299 792 458	$\text{m s}^{-1}$
플랑크 상수	$h$	$6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$	J s
기본전하	$e$	$1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$	C
볼츠만 상수	$k$	$1.380\,649 \times 10^{-23}$	$\text{J K}^{-1}$
아보가드로 상수	$N_{\text{A}}$	$6.022\,140\,76 \times 10^{23}$	$\text{mol}^{-1}$
시감효능	$K_{\text{cd}}$	683	$\text{lm W}^{-1}$

국제단위계가 변경될 때는 연속성을 유지하는 것이 필수적인 요소로 늘 고려되었다. 정의 상수의 수치도, 과학과 지식의 진보가 허용하는 한도 내에서, 이전의 정의와 일관성을 가지도록 선정되었다.

### 2.2.1 7개의 정의 상수의 본질

정의 상수들의 본질은 자연의 기본상수부터 기술적 상수까지 다양하다.

상수를 사용하여 단위를 정의하면 단위의 정의와 구현이 구분된다. 이에 따라 정의를 바꾸지 않고도 기술의 발전에 따라 완전히 다르거나 혹은 더 우수한 실제적 구현 방법이 개발될 수 있다.

주파수  $540 \times 10^{12}$  Hz인 단색광의 시감효능인  $K_{\text{cd}}$ 와 같은 기술적 상수는 특정한 응용과 연관되어 있다. 원리적으로, 기술적 상수는 종래의 생리적 인자 또는 다른 가중치 인자를 포함하는 것과 같이 자유롭게 선택할 수 있다. 이와 반대로, 자연의 기본상수의 경우 일반적으로 이런 선택을 허용하지 않는데, 기본상수는 물리학 관계식에 의해 다른 상수들과 연관되어 있기 때문이다.

정의 상수 7개는 기본적으로 안정적이며 보편적인 기준을 제공하고, 동시에 가장 작은 불확도로 실제적 구현이 이루어질 수 있도록 선정되었다. 이에 관한 기술적인 규약과 상세규정에는 역사적인 발전 과정이 또한 반영되어 있다.

플랑크 상수  $h$ 와 진공에서의 빛의 속력  $c$ 는 둘 다 기본상수라고 묘사할 수 있다. 이 상수들은 각각 양자 효과와 시공간 특성들을 결정하며, 모든 규모 및 모든 환경에서 모든 입자와 장(field)에 동일하게 영향을 미친다.

기본전하  $e$ 는 미세 구조 상수  $\alpha = e^2/(2c\epsilon_0 h)$ 를 통하여 전자기력의 결합 세기에 관계한다. 여기서  $\epsilon_0$ 는 전기 상수라고도 부르는 진공 유전율이다. 어떤 이론들은  $\alpha$ 가 시간에 따라 변할 수 있다고 예측한다. 그러나  $\alpha$ 의 최대 가능 변화량에 대한 실험적 한계가 매우 작아, 실제 측정에 미치는 어떤 영향도 배제할 수 있다.

볼츠만 상수  $k$ 는 (켈빈을 단위로 사용하는) 온도와 (줄을 단위로 사용하는) 에너지 사이의 비례상수이고, 그 수치는 온도 눈금의 역사적인 규약으로부터 구해졌다. 어떤 계의 온도는 열에너지에 따라 달라지지만, 반드시 계의 내부 에너지에 비례하는 것은 아니다. 통계 물리학에서 볼츠만 상수는 방정식  $S = k \ln \Omega$ 를 통하여 엔트로피  $S$ 와 양자역학적으로 접근 가능한 상태의 개수인  $\Omega$ 를 연결한다.

세슘 주파수  $\Delta\nu_{Cs}$ 는 세슘 133 원자의 섭동이 없는 바닥 상태의 초미세 전이 주파수로, 원자 특성 상수의 성격을 가지며 전자기장과 같은 환경의 영향을 받을 수 있다. 그러나 이 전이는 잘 알려져 있고 안정적이며, 실제적 관점에서 기준 전이로서 좋은 선택이다.  $\Delta\nu_{Cs}$ 와 같은 원자 특성 상수의 채택은  $h, c, e, k$ 의 경우처럼 정의와 구현을 구분하지는 않지만, 기준을 규정한다.

아보가드로 상수  $N_A$ 는 (몰을 단위로 사용하는) 물질량과 ('일' (기호 1)을 단위로 사용하는) 구성 요소를 세는 것에 관한 양 사이의 비례상수이다. 그러므로 이 상수는 볼츠만 상수  $k$ 와 유사한 비례상수의 성격을 가진다.

주파수가  $540 \times 10^{12}$  Hz인 단색광의 시감효능인  $K_{cd}$ 는 기술적 상수로, 인간의 눈을 자극하는 복사출력의 순수한 물리적 특성(W)과,  $540 \times 10^{12}$  Hz의 주파수에 대한 표준 관찰자의 분광감응도로 인한 광선속에 의해 정의되는 광생물학적 반응(lm) 사이의 정확한 수치적 관계를 제공한다.

## 2.3 SI 단위의 정의

2018년에 채택된 정의 이전의 SI는 7개의 *기본단위*를 바탕으로 정의되었고 *유도단위*는 이 *기본단위*의 거듭제곱의 곱으로 구성되었다. 7개의 정의 상수의 수치를 고정하는 방식으로 SI를 정의하면 *기본단위*와 *유도단위*를 포함한 모든 단위를 정의 상수로부터 직접 구성할 수 있으므로 원리적으로는 기본단위와 유도단위의 구분이 필요 없게 된다. 그럼에도 불구하고, 기본단위와 유도단위의 개념은 유용한 면이 있고 또 역사적으로 잘 정립되어 있으므로 유지하기로 한다. 이것은 ISO/IEC 80000 시리즈의 표준에서도 여기서 정의하는 SI 기본단위 및 유도단위에 대응되는 기본량 및 유도량을 명시하고 있다는 점을 고려한 것이기도 하다.

### 2.3.1 기본단위

표 2는 SI 기본단위를 나타낸 것이다.

표 2. SI 기본단위

기본량		기본단위	
명칭	전형적인 기호	명칭	기호
시간	$t$	초	s
길이	$l, x, r$ 등	미터	m
질량	$m$	킬로그램	kg
전류	$I, i$	암페어	A
열역학 온도	$T$	켈빈	K
물질량	$n$	몰	mol
광도	$I_v$	칸델라	cd

양의 기호는 일반적으로 라틴 또는 그리스 알파벳 문자 한 개를 이탤릭체로 표기하며, 이것은 *권고사항*이다. 단위의 기호는 직립형태(로만)의 글자체로 표현하며 이것은 *강제사항*이다 (제5장 참조).

정의 상수의 정해진 수치를 기반으로 한 SI의 정의로부터 출발하여, 7개 기본단위의 정의는 다음과 같이 하나 또는 여러 개의 정의 상수를 적절히 사용함으로써 얻는다.

#### 초

초(기호: s)는 시간의 SI 단위이다. 초는 세슘 133 원자의 섭동이 없는 바닥 상태의 초미세 전이 주파수  $\Delta\nu_{Cs}$ 를 Hz 단위로 나타낼 때 그 수치를 9 192 631 770으로 고정함으로써 정의한다. 여기서 Hz는  $s^{-1}$ 과 같다.

이 정의는 정확한 관계식  $\Delta\nu_{Cs} = 9\,192\,631\,770\text{ Hz}$ 이 성립함을 의미한다. 이 관계식을 도치하면 정의 상수  $\Delta\nu_{Cs}$ 로부터 단위 초를 표현할 수 있다.

$$1\text{ Hz} = \frac{\Delta\nu_{Cs}}{9\,192\,631\,770} \quad \text{또는} \quad 1\text{ s} = \frac{9\,192\,631\,770}{\Delta\nu_{Cs}}$$

이 정의로 초는 섭동이 없는 바닥상태에 있는  $^{133}\text{Cs}$  원자의 두 초미세 준위 사이의 전이에 대응하는 복사선의 9 192 631 770 주기의 지속시간과 같게 된다.

섭동이 없는 원자를 기준으로 한 것은, SI 초의 정의가 주변의 흑체복사 등과 같은 어떤 외부의 장애 의해서 영향을 받지 않는 고립된 세슘 원자에 기반을 둔다는 점을 분명히 하기 위한 것이다.

이렇게 정의한 초는 일반 상대성이론에서 말하는 고유 시간(참 시간)의 단위이다. 협정시를 제공하기 위해서는, 서로 다른 위치에 있는 여러 개의 일차 표준 시계의 신호를 조합한 후, 상대론적 세슘 주파수 이동에 대한 보정을 시행하여야 한다(2.3.6절 참조).

CIPM은 원자, 이온, 분자의 선택된 몇몇 스펙트럼선에 기반을 둔 다양한 초의 이차적 표현을 채택했다. 섭동 받지 않은 이 스펙트럼선의 주파수는 세슘 133의 초미세 전이 주파수에 기반한 초를 구현할 때의 상대불확도보다 작지 않은 상대불확도로 결정할 수 있지만, 일부는 더 뛰어난 안정성으로 재현할 수 있다.

## 미터

미터(기호: m)는 길이의 SI 단위이다. 미터는 진공에서의 빛의 속력  $c$ 를  $\text{m s}^{-1}$  단위로 나타낼 때 그 수치를 299 792 458로 고정함으로써 정의한다. 여기서 초(기호: s)는 세슘 주파수  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ 로부터 정의된다.

이 정의는 정확한 관계식  $c = 299\,792\,458\text{ m s}^{-1}$ 이 성립함을 의미한다. 이 관계식을 도치하면 정의 상수  $c$ 와  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ 로부터 미터를 정확하게 표현할 수 있다.

$$1\text{ m} = \left( \frac{c}{299\,792\,458} \right) \text{s} = \frac{9\,192\,631\,770}{299\,792\,458} \frac{c}{\Delta\nu_{\text{Cs}}} \approx 30.663\,319 \frac{c}{\Delta\nu_{\text{Cs}}}$$

이 정의로 1 미터는 빛이 진공에서 1/299 792 458초 동안 진행한 경로의 길이가 된다.

## 킬로그램

킬로그램(기호: kg)은 질량의 SI 단위이다. 킬로그램은 플랑크 상수  $h$ 를  $\text{J s}$  단위로 나타낼 때 그 수치를  $6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$ 으로 고정함으로써 정의한다. 여기서  $\text{J s}$ 는  $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$ 과 같고, 미터(기호: m)와 초(기호: s)는  $c$ 와  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ 로부터 각각 정의된다.

이 정의는 정확한 관계식  $h = 6.626\,070\,15 \times 10^{-34}\text{ kg m}^2 \text{s}^{-1}$ 이 성립함을 의미한다. 이 관계식을 도치하면 3개의 정의 상수  $h$ ,  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ ,  $c$ 로부터 킬로그램을 정확하게 표현할 수 있다.

$$1\text{ kg} = \left( \frac{h}{6.626\,070\,15 \times 10^{-34}} \right) \text{m}^{-2} \text{s}$$

이는 다음과 같다.

$$1\text{ kg} = \frac{(299\,792\,458)^2}{(6.626\,070\,15 \times 10^{-34})(9\,192\,631\,770)} \frac{h\Delta\nu_{\text{Cs}}}{c^2} \approx 1.475\,5214 \times 10^{40} \frac{h\Delta\nu_{\text{Cs}}}{c^2}$$

이 정의로 (두 물리량 즉 작용과 각운동량의 단위인)  $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$ 이 정의된다. 초와 미터의 정의를 함께 사용하면, 이 정의로부터 플랑크 상수  $h$ 로 표현되는 질량 단위의 정의를 끌어낼 수 있다.

킬로그램의 이전 정의는 국제킬로그램원기의 질량  $m(K)$ 의 값을 정확하게 1 킬로그램으로 정했고, 플랑크 상수  $h$ 의 값은 실험으로 결정하여야 했다. 현재의 정의는  $h$ 의 수치를 정확한 값으로 고정하며, 원기의 질량은 이제 실험으로 결정되어야 한다.

이 정의에서 플랑크 상수의 수치로 선정된 수는, 이것이 채택될 당시에 킬로그램이  $1 \times 10^{-8}$ 의 상대표준불확도로 국제원기의 질량과 같게 하였는데( $m(K) = 1\text{ kg}$ ), 이 불확도는

그 당시 여러 플랑크 상수 추정값들을 결합하여 구한 최적 추정값의 표준불확도였다. 현재의 정의에 따르면 질량 눈금의 어느 지점에서든 일차 구현이 원리적으로 가능하다.

### 암페어

암페어(기호: A)는 전류의 SI 단위이다. 암페어는 기본전하  $e$ 를 C 단위로 나타낼 때 그 수치를  $1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$  으로 고정함으로써 정의한다. 여기서 C는 A s와 같고, 초(기호: s)는  $\Delta\nu_{Cs}$ 로부터 정의된다.

이 정의는 정확한 관계식  $e = 1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$  A s가 성립함을 의미한다. 이 관계식을 도치하면 정의 상수  $e$ 와  $\Delta\nu_{Cs}$ 로부터 암페어를 정확히 표현할 수 있다.

$$1\ \text{A} = \left( \frac{e}{1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19}} \right) \text{s}^{-1}$$

이는 다음과도 같다.

$$1\ \text{A} = \frac{1}{(9\ 192\ 631\ 770)(1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19})} \Delta\nu_{Cs} e \approx 6.789\ 687 \times 10^8 \Delta\nu_{Cs} e$$

이 정의로 1 암페어는 초당  $1/(1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19})$ 개의 기본전하의 흐름에 해당하는 전류가 된다.

암페어의 이전 정의는 전류가 흐르는 두 개의 도체 사이의 힘에 기반을 두었고, 진공투자율(자기상수라고도 함)  $\mu_0$ 의 값을  $4\pi \times 10^{-7}$  H m<sup>-1</sup> =  $4\pi \times 10^{-7}$  N A<sup>-2</sup>으로 정확하게 정하는 효과가 있었다. 여기에서 H와 N은 각각 일관성 있는 유도단위인 헨리와 뉴턴을 나타낸다. 암페어의 새로운 정의는  $\mu_0$  대신  $e$ 의 값을 고정한다. 그 결과,  $\mu_0$ 는 이제 실험적으로 결정되어야 한다.

또한 진공유전율(전기상수라고도 함)  $\epsilon_0$ 와 진공의 특성 임피던스  $Z_0$ , 진공의 어드미턴스  $Y_0$ 는 각각  $1/\mu_0 c^2$ ,  $\mu_0 c$ ,  $1/\mu_0 c$ 와 같기 때문에  $\epsilon_0$ ,  $Z_0$ ,  $Y_0$ 의 값도 이제는 실험적으로 결정되어야 하고,  $c$ 가 정확하게 정해진 값이기 때문에 이 값들은  $\mu_0$ 와 동일한 상대표준불확도의 영향을 받는다. 서로 곱한 값  $\epsilon_0 \mu_0 = 1/c^2$ 과 나눈 값  $Z_0/\mu_0 = c$ 는 여전히 정확한 값을 유지한다. 암페어에 대한 현재의 정의를 채택할 당시에  $\mu_0$ 는  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m이었고 상대표준불확도는  $2.3 \times 10^{-10}$ 이었다.

### 켈빈

켈빈(기호: K)은 열역학 온도의 SI 단위이다. 켈빈은 볼츠만 상수  $k$ 를 J K<sup>-1</sup> 단위로 나타낼 때 그 수치를  $1.380\ 649 \times 10^{-23}$ 으로 고정함으로써 정의한다. 여기서 J K<sup>-1</sup>은 kg m<sup>2</sup> s<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>과 같고, 킬로그램(기호: kg), 미터(기호: m)와 초(기호: s)는  $h$ ,  $c$ 와  $\Delta\nu_{Cs}$ 로부터 정의된다.

이 정의는 정확한 관계식  $k = 1.380\ 649 \times 10^{-23}$  kg m<sup>2</sup> s<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>이 성립함을 의미한다. 이 관계식을 도치하면 정의 상수  $k$ ,  $h$ ,  $\Delta\nu_{Cs}$ 로부터 켈빈을 정확히 표현할 수 있다.

$$1 \text{ K} = \left( \frac{1.380\,649}{k} \right) \times 10^{-23} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$$

이는 다음과도 같다.

$$1 \text{ K} = \frac{1.380\,649 \times 10^{-23}}{(6.626\,070\,15 \times 10^{-34})(9\,192\,631\,770)} \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}}h}{k} \approx 2.266\,6653 \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}}h}{k}$$

이 정의로 1 켈빈은 열에너지  $kT$ 를  $1.380\,649 \times 10^{-23}$  J만큼 변화시키는 열역학 온도의 변화와 같아진다.

켈빈의 이전 정의에서는 물의 삼중점의 온도  $T_{\text{TPW}}$ 를 정확히 273.16 K으로 정했었다. 켈빈의 현재 정의는  $T_{\text{TPW}}$  대신  $k$ 의 수치를 고정하기 때문에,  $T_{\text{TPW}}$ 는 이제 실험적으로 결정되어야 한다. 현재의 정의를 채택할 당시에  $T_{\text{TPW}}$ 는 재정의 이전에 측정된  $k$ 의 값에 기반을 두어 273.16 K이었고 상대표준불확도는  $3.7 \times 10^{-7}$ 이었다.

온도 눈금을 정의해오던 방식의 영향으로, 기호  $T$ 로 표시되는 열역학 온도는 여전히 어는점에 가까운 기준 온도인  $T_0 = 273.15$  K과의 차이로 나타내는 것이 일반적인 관례이다. 이 온도 차이를 섭씨온도(기호:  $t$ )라고 하며, 다음의 양 관계식으로 정의된다.

$$t = T - T_0$$

섭씨온도의 단위는 섭씨도(기호:  $^{\circ}\text{C}$ )이며, 정의에 의하여 켈빈과 눈금의 크기가 같다. 온도 차 또는 온도 간격은 켈빈이나 섭씨도로 표현할 수 있는데, 어느 경우든 온도 차의 수치는 같다. 그러나 섭씨도로 표현된 섭씨온도의 수치는 켈빈으로 표현된 열역학 온도의 수치와 다음과 같은 관계가 있다:

$$t/^{\circ}\text{C} = T/\text{K} - 273.15$$

(여기서 사용된 표기법에 대한 설명은 5.4.1 참조)

켈빈과 섭씨도는 1989년 CIPM 권고사항 5(CI-1989; PV, 57, 115)에서 채택한 국제온도 눈금(ITS-90)의 단위이기도 하다. ITS-90은 열역학 온도  $T$ 와  $t$ 에 근사적으로 대응되는 2개의 양  $T_{90}$ 과  $t_{90}$ 을 정의한다.

현재의 정의에 의하면 원리적으로 온도 눈금의 어느 지점에서든 켈빈의 일차 구현이 가능하다.

## 몰

몰(기호: mol)은 물질량의 SI 단위이다. 1 몰은 정확히  $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$ 개의 구성 요소를 포함한다. 이 숫자는  $\text{mol}^{-1}$  단위로 표현된 아보가드로 상수  $N_A$ 의 고정된 수치로서 아보가드로 수라고 부른다. 어떤 계의 물질량(기호:  $n$ )은 명시된 구성 요소의 수를 나타내는 척도이다. 구성 요소란 원자, 분자, 이온, 전자, 그 외의 입자 또는 명시된 입자들의 집합체가 될 수 있다.

이 정의는 정확한 관계식  $N_A = 6.022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ 이 성립함을 의미한다. 이 관계식을 도치하면 정의 상수  $N_A$ 로부터 몰을 정확하게 표현할 수 있다.

$$1 \text{ mol} = \left( \frac{6.022\,140\,76 \times 10^{23}}{N_A} \right)$$

이 정의에 따라 몰은  $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$ 개의 특정 구성 요소를 포함하는 어떤 계의 물질량이 된다.

몰에 대한 이전의 정의에서는 탄소 12의 몰 질량 값  $M(^{12}\text{C})$ 을 정확히 0.012 kg/mol로 고정하였다. 현재의 정의에 따르면  $M(^{12}\text{C})$ 는 이제는 정해진 값이 아니며, 실험적으로 결정되어야 한다. 선정된  $N_A$ 의 값은, 몰에 대한 현재의 정의를 채택할 당시에  $M(^{12}\text{C})$ 가  $4.5 \times 10^{-10}$ 의 상대표준불확도로 0.012 kg/mol이 되게 하는 값이다.

어떤 원자 또는 분자  $X$ 의 몰 질량은 여전히 다음 관계식을 사용하여 상대원자질량을 통해 구할 수 있다.

$$M(X) = A_r(X) [M(^{12}\text{C})/12] = A_r(X) M_u$$

그리고 어떤 원자 또는 분자  $X$ 의 몰 질량은 다음 관계식에 의해 구성 요소의 질량  $m(X)$ 와 관련이 있다.

$$M(X) = N_A m(X) = N_A A_r(X) m_u$$

이들 관계식에서  $M_u$ 는 몰 질량 상수로  $M(^{12}\text{C})/12$ 와 같으며,  $m_u$ 는 통합 원자 질량 상수로  $m(^{12}\text{C})/12$ 와 같다. 이들은 다음 관계식에 의해 아보가드로 상수와 연결된다.

$$M_u = N_A m_u$$

‘Amount of substance (물질량)’라는 명칭 속에 있는 ‘substance (물질)’라는 단어는 통상적으로 ‘amount of hydrogen chloride, HCl’이나 ‘amount of benzene, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>’의 예에서 처럼 특정 응용 분야의 관심 대상 물질을 지칭하는 단어로 대체된다. 몰의 정의에서 강조했듯이 관련된 구성 요소의 정의를 정확하게 제시하는 것이 중요한데, 가능하다면 관련된 물질의 분자화학식을 명시하여야 한다. ‘Amount’라는 단어에는 더 일반적인 사전적 정의가 있지만, 간결성을 위해 이를 ‘amount of substance’라는 명칭의 축약어로도 쓸 수 있다. 이것은 유도량에도 적용할 수 있는데, 예를 들어 ‘amount-of-substance concentration (물질량 농도)’은 간단히 ‘amount concentration’으로 부를 수도 있다. 임상 화학 분야에서는 ‘amount-of-substance concentration’을 일반적으로 ‘substance concentration’으로 줄여서 사용한다.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> 편집자 주: 이 부분은 영어 등 특정 언어에 적용되는 것으로 한국어에 그대로 적용하기에 모호한 면이 있다. 예를 들어 영어에서는 ‘amount of benzene’으로 쓸 수 있지만, 한국어에서는 ‘벤젠의 양’이라고 쓸 경우, ‘벤젠의 양’ 중 ‘양’이 몰을 단위로 가지는 것뿐만 아니라 킬로그램 혹은 그 외의 단위를 가지는 양으로도 해석될 수 있기 때문이다. 따라서 ‘amount of benzene’을 ‘벤젠의 물질량’으로 번역하여 사용하는 것이 바람직하다고 본다. ‘Amount concentration’도 마찬가지로 ‘물질량 농도’로 번역하는 것이 바람직하다고 본다. 이에 대해서는 추가적인 논의가 필요하다.

## 칸델라

칸델라(기호: cd)는 어떤 주어진 방향에서 광도의 SI 단위이다. 칸델라는 주파수가  $540 \times 10^{12}$  Hz인 단색광의 시감효능  $K_{cd}$ 를  $\text{lm W}^{-1}$  단위로 나타낼 때 그 수치를 683으로 고정함으로써 정의한다. 여기서  $\text{lm W}^{-1}$ 은  $\text{cd sr W}^{-1}$  또는  $\text{cd sr kg}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^3$ 과 같고, 킬로그램(기호: kg), 미터(기호: m)와 초(기호: s)는  $h$ ,  $c$ 와  $\Delta\nu_{Cs}$ 로부터 정의된다.

이 정의는 주파수가  $\nu = 540 \times 10^{12}$  Hz인 단색광에 대해 정확한 관계식  $K_{cd} = 683 \text{ cd sr kg}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^3$ 이 성립함을 의미한다. 이 관계식을 도치하면 정의 상수  $K_{cd}$ ,  $h$ ,  $\Delta\nu_{Cs}$ 로부터 칸델라를 정확히 표현할 수 있다.

$$1 \text{ cd} = \left( \frac{K_{cd}}{683} \right) \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ sr}^{-1}$$

이는 다음과도 같다.

$$1 \text{ cd} = \frac{1}{(6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34})(9\ 192\ 631\ 770)^2\ 683} (\Delta\nu_{Cs})^2 h K_{cd}$$

$$\approx 2.614\ 830 \times 10^{10} (\Delta\nu_{Cs})^2 h K_{cd}$$

이 정의에 따라 1 칸델라는 주파수가  $540 \times 10^{12}$  Hz인 단색광을 방출하는 광원의 복사도가 어떤 주어진 방향으로  $(1/683) \text{ W/sr}$ 일 때 이 방향에 대한 광원의 광도가 된다. 스테라디안의 정의는 표 4의 아래쪽에 나타나 있다.

### 2.3.2 SI 단위의 실제적 구현

단위의 구현을 위해 사용되는, 물리학의 관계식에 기반을 둔 가장 높은 수준의 실험적 방법을 단위 구현의 일차 방법이라고 한다. 일차 방법의 중요한 특징은, 어느 양을 어떤 특정한 단위로 측정할 수 있도록 하되, 그 단위가 포함되지 않는 양들의 측정만을 사용해야 한다는 점이다. 현재의 SI 구성에서는 단위 정의의 기반이 이전과는 달라서 SI 단위의 실제적 구현을 위한 새로운 방법들이 사용될 수 있다.

이제 특정한 조건이나 물리적 상태를 규정하며 구현의 정확성에 근본적인 한계가 있는 단위의 정의 대신, 정의 상수와 측정하고자 하는 양을 연결해주는 어떠한 물리학 관계식도 편의에 따라 선택할 수 있게 되었다. 이것은 측정의 기본단위를 정의하는 훨씬 더 일반적인 방법이다. 오늘날의 과학이나 기술에 의하여 제한을 받지 않으며, 향후 더 높은 정확도로 단위를 구현하는 새로운 방법이 등장할 수도 있다. 이러한 방식으로 정의될 때는 구현될 단위의 정확도에 원칙적으로 한계가 없다. 하지만, 초의 정의는 예외로 남아있는데, 당분간 원래의 세슘의 마이크로파 전이에 기반한 정의를 사용해야 한다. SI 단위의 구현에 대한 보다 포괄적인 설명은 부록 2를 참조한다.

### 2.3.3 양의 차원

물리량은 차원의 체계(system of dimensions)로 정리될 수 있는데, 이때 사용되는 체계는 관례에 따라 결정된다. SI에서 사용되는 7개의 기본량은 각각 고유한 차원을 가지는 것으로 간주한다. 기본량을 나타내기 위하여 사용되는 기호들과 그들의 차원을 나타내는데 사용되는 기호들은 표 3과 같다.

표 3. SI에서 사용되는 기본량과 차원

기본량	양을 나타내는 전형적인 기호	차원을 나타내는 기호
시간	$t$	T
길이	$l, x, r$	L
질량	$m$	M
전류	$I, i$	I
열역학 온도	$T$	Θ
물질량	$n$	N
광도	$I_v$	J

위 기본량 외의 다른 모든 양은 유도량이며(수효는 예외), 물리 관계식에 의해 기본량을 써서 나타낼 수 있다. 유도량의 차원은 해당 유도량과 기본량들 사이의 관계를 나타내는 관계식을 사용하여 기본량 차원의 거듭제곱의 곱으로 표현된다. 일반적으로 어떤 양  $Q$ 의 차원은 차원의 곱의 형태로 표현된다.

$$\dim Q = T^\alpha L^\beta M^\gamma I^\delta \Theta^\epsilon N^\zeta J^\eta$$

여기서 지수  $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon, \zeta, \eta$ 는 차원지수라고 부르는데, 일반적으로 작은 정수이고, 양, 음 또는 0이 될 수 있다.

차원 관계식에서 모든 차원지수가 0인 유도량  $Q$ 도 있다. 특히, 두 개의 같은 종류의 양의 비로 정의되는 양의 경우가 이에 해당한다. 예를 들어, 굴절률은 두 속력의 비이고, 상대유전율은 유전매질의 유전율과 자유공간의 유전율의 비이다. 이러한 양은 단순히 수이고, 관련된 단위는 ‘일’(기호: 1)이지만 명시적으로는 거의 표시하지 않는다(5.4.7 참조).

SI의 7개 기본량으로 표현되지는 않지만 셈(count)의 본질을 가지고 있는 양도 존재한다. 예를 들어, 분자의 개수, (특정 핵산 염기서열의 복사와 같은) 세포 또는 생체분자 구성 요소의 개수, 양자역학의 ‘축퇴(degeneracy)’ 등이다. 이러한 수효량 또한 단위 ‘일(1)’을 가지는 양이다.

단위 ‘일’은 어느 단위계에도 필연적이고 자동적으로 존재하는 중립적인 요소이다. 이 단위는 공식적 결정을 통해 도입할 필요는 없다. 그러므로 SI로의 소급성은 적절하고 유효성이 검증된 측정절차를 통하여 확립할 수 있다.

평면각과 입체각은 각각 라디안과 스테라디안으로 표시될 때 사실상 SI 내에서 단위 ‘일’을 가지는 양으로 취급된다(5.4.8 참조). 필요한 경우, 기호 rad와 sr은 라디안과 스테라디안에 대해 고려하고 있는 양이, 각각 평면각과 입체각이거나 그와 관련되어 있다는 것을 강조하기 위해 명시적으로 표기된다. 예를 들어, 스테라디안의 기호 sr은 광측정 및 복사측정에서 선속과 세기 단위 사이의 차이를 강조한다. 그러나 수학, 그리고 과학 전 분야에서  $\text{rad} = 1$ 과  $\text{sr} = 1$ 을 사용하는 것은 오래 지속되어 온 관습이다. 2.3.4 절에 설명된 바와 같이 라디안과 스테라디안은 역사적인 이유로 유도단위로 취급한다.

두 개의 같은 종류의 양의 비율(예를 들어 길이의 비나 물질량 분률) 또는 수효(예를 들어 광자나 붕괴의 개수)로 표현되는, 단위가 ‘일’인 양(5.4.7 참조)에 대해서는 명확한 설명을 하는 것이 매우 중요하다.

### 2.3.4 유도단위

유도단위는 기본단위의 거듭제곱의 곱의 형태로 정의된다. 이 곱의 수치 인자가 일(1)인 경우, 그 유도단위는 *일관성 있는 유도단위*라고 부른다. SI의 기본단위와 일관성 있는 유도단위는 *일관성 있는 세트*를 이루고, 일관성 있는 SI 단위 세트라고 명명된다. 여기서 ‘일관성 있는’이라는 표현은 양의 수치들 사이의 식이 양들 사이의 식과 정확히 같은 형태를 가진다는 뜻이다.

SI의 일부 일관성 있는 유도단위는 특별한 명칭을 가진다. 표 4에는 특별한 명칭을 가진 22개의 SI 단위가 열거되어 있다. 7개의 기본단위(표 2)와 함께 이 단위들은 SI 단위의 핵심을 이룬다. 기타 모든 SI 단위는 이 29개 중 일부의 조합이다.

7개의 기본단위와 특별한 명칭을 가진 22개의 SI 단위가 모두 7개의 정의 상수로 직접 구성될 수 있다는 사실을 주목할 필요가 있다. 실제로, 정의 상수의 단위는 기본단위와 유도단위를 모두 포함한다.

CGPM에서는 일관성 있는 SI 단위의 십진배수와 십진분수를 구성하기 위해 일련의 접두어를 채택하였다(3장 참조). 이를 사용하면 단위보다 훨씬 크거나 훨씬 작은 양의 값을 표현하기에 편리하다. 그러나 SI 단위에 접두어를 붙여 사용하는 경우, 접두어가 붙은 단위는 더는 일관성 있는 단위가 되지 않는다. 왜냐하면, 그 접두어로 인하여 일(1)이 아닌 수치 인자가 도입되었기 때문이다. 접두어는 기본단위 킬로그램을 제외한, 특별한 명칭을 가진 29개의 SI 단위 중 어떤 것과도 함께 쓰일 수 있으며, 관련 내용은 3장에 더 자세히 기술되어 있다.

표 4. 특별한 명칭과 기호를 가진 22개의 SI 단위

유도량	단위의 특별한 명칭	기본단위로 표시된 단위 <sup>(가)</sup>	기타 SI 단위로 표시된 단위
평면각	라디안 <sup>(나)</sup>	rad = m/m	
입체각	스테라디안 <sup>(다)</sup>	sr = m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	
주파수, 진동수	헤르츠 <sup>(라)</sup>	Hz = s <sup>-1</sup>	
힘	뉴턴	N = kg m s <sup>-2</sup>	
압력, 응력	파스칼	Pa = kg m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup>	
에너지, 일, 열량	줄	J = kg m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>	N m
일률, 전력, 복사선속	와트	W = kg m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>	J/s
전하, 전하량	쿨롬	C = A s	
전위차 <sup>(마)</sup>	볼트	V = kg m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>	W/A
전기용량, 정전용량	패럿	F = kg <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>	C/V
전기저항	옴	Ω = kg m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>	V/A
전기전도율	지멘스	S = kg <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>	A/V
자기선속	웨버	Wb = kg m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>	V s
자기선속밀도	테슬라	T = kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>	Wb/m <sup>2</sup>
인덕턴스	헨리	H = kg m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>	Wb/A
섭씨온도	섭씨도 <sup>(바)</sup>	°C = K	
광선속	루멘	lm = cd sr <sup>(사)</sup>	cd sr
광조도	럭스	lx = cd sr m <sup>-2</sup>	lm/m <sup>2</sup>
(방사성 핵종의) 방사능 <sup>(라, 아)</sup>	베크렐	Bq = s <sup>-1</sup>	
흡수선량, 커마	그레이	Gy = m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>	J/kg
선량당량	시버트 <sup>(자)</sup>	Sv = m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>	J/kg
촉매활성도	카탈	kat = mol s <sup>-1</sup>	

(가) 위 표에 나와 있는 기본단위 기호의 순서는 제8판과 다른데, 이는 뉴턴을 kg m s<sup>-2</sup>, 줄(joule)을 kg m<sup>2</sup> s<sup>-2</sup>, J s를 kg m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>로 표기했던 11차 CGPM(1960년)의 결의사항 12와 같은 순서로 돌아가자는 CCU의 21차 회의(2013년)의 결정에 따른 것이다. 이렇게 변경한 의도는, 비록 일부 복잡한 유도단위에 대해서는 가능하지 않지만, 각 양의 관계식의 기저에 있는 물리학을 반영하기 위함이다.

(나) 라디안은 평면각의 일관성 있는 단위이다. 1 라디안은 원의 반지름과 같은 길이의 호에 대한 원의 중심 각이다. 이는 또한 위상각의 단위이기도 하다. 주기적인 현상에 대해서 위상각은 1주기 당 2π 라디안씩 증가한다. 라디안은 원래 SI 보충단위였으나 이 분류는 1995년에 폐지되었다.

(다) 스테라디안은 입체각의 일관성 있는 단위이다. 1 스테라디안은 구의 중심에서 구의 반지름의 제곱과 같은 표면에 해당하는 입체각이다. 라디안과 마찬가지로, 스테라디안도 원래 SI 보충단위였다.

(라) 헤르츠는 오직 주기적인 현상에만 사용되어야 하며, 베크렐은 오직 어떤 방사성 핵종에 대한 방사능의 확률과정에만 사용된다.

(마) 전위차는 많은 국가에서 ‘전압(voltage)’이라 불리며, 일부 국가에서는 ‘electric tension’ 또는 간단히 ‘tension’이라 불리기도 한다.

(바) 섭씨도는 섭씨온도를 표시하기 위해 사용된다. 온도 차 또는 온도 간격의 수치는 섭씨도로 표시될 때나 켈빈으로 표시될 때나 동일하다.

(사) 광측정에서는 단위의 표현에 스테라디안이라는 명칭과 기호 sr이 흔히 사용된다.

(아) 방사성 핵종의 방사능(activity)은 간혹 방사능(radioactivity)으로 잘못 불리어진다.

(자) 시버트의 사용에 관한 CIPM 권고사항 2를 참조한다(PV, 2002, 70, 205).

7개의 기본단위와 특별한 명칭과 기호를 가진 22개의 단위는 다른 유도량의 단위를 표시하기 위해 서로 조합되어 사용될 수 있다. 양(quantity)의 수는 한이 없으므로 유도량과 유도단위의 온전한 목록을 제시하는 것은 불가능하다. 표 5는 유도량의 예와 이에 대응되는 일관성 있는 유도단위를 기본단위로 나타내고 있다. 부가적으로 표 6에는 명칭과 기호에 유도단위가 포함되어있는 일관성 있는 유도단위의 예시가 나와 있다. SI 단위의 온전한 집합은 일관성 있는 단위의 집합과 SI 접두어를 사용해 만들어진 십진배수와 십진분수를 모두 포함한다.

**표 5. 기본단위로 표시된, SI의 일관성 있는 유도단위의 예**

유도량	양에 대한 전형적인 기호	기본단위로 표시된 유도단위
넓이	$A$	$m^2$
부피	$V$	$m^3$
속력, 속도	$v$	$m\ s^{-1}$
가속도	$a$	$m\ s^{-2}$
파동수, 파수	$\sigma$	$m^{-1}$
밀도, 질량밀도	$\rho$	$kg\ m^{-3}$
표면밀도	$\rho_A$	$kg\ m^{-2}$
비(比)부피	$v$	$m^3\ kg^{-1}$
전류 밀도	$j$	$A\ m^{-2}$
자기장 세기	$H$	$A\ m^{-1}$
물질량 농도	$c$	$mol\ m^{-3}$
질량 농도	$\rho, \gamma$	$kg\ m^{-3}$
광휘도	$L_V$	$cd\ m^{-2}$

표 6. 특별한 명칭과 기호를 가진 일관성 있는 SI 유도단위가 명칭과 기호에 포함된 일관성 있는 SI 유도단위의 예

유도량	일관성 있는 유도단위의 명칭	기호	기본단위로 표시된 유도단위
점성도	파스칼 초	Pa s	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$
힘의 모멘트	뉴턴 미터	N m	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$
표면장력	뉴턴 매 미터	$\text{N m}^{-1}$	$\text{kg s}^{-2}$
각속도, 각주파수	라디안 매 초	$\text{rad s}^{-1}$	$\text{s}^{-1}$
각가속도	라디안 매 제곱초	$\text{rad/s}^2$	$\text{s}^{-2}$
열속밀도, 복사조도	와트 매 제곱미터	$\text{W/m}^2$	$\text{kg s}^{-3}$
열용량, 엔트로피	줄 매 켈빈	$\text{J K}^{-1}$	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$
비열용량, 비엔트로피	줄 매 킬로그램 켈빈	$\text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}$	$\text{m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$
비에너지	줄 매 킬로그램	$\text{J kg}^{-1}$	$\text{m}^2 \text{s}^{-2}$
열전도도	와트 매 미터 켈빈	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	$\text{kg m s}^{-3} \text{K}^{-1}$
에너지 밀도	줄 매 세제곱미터	$\text{J m}^{-3}$	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$
전기장 세기	볼트 매 미터	$\text{V m}^{-1}$	$\text{kg m s}^{-3} \text{A}^{-1}$
전하밀도	쿨롬 매 세제곱미터	$\text{C m}^{-3}$	$\text{A s m}^{-3}$
표면 전하밀도	쿨롬 매 제곱미터	$\text{C m}^{-2}$	$\text{A s m}^{-2}$
전기선속밀도, 전기변위	쿨롬 매 제곱미터	$\text{C m}^{-2}$	$\text{A s m}^{-2}$
유전율	패럿 매 미터	$\text{F m}^{-1}$	$\text{kg}^{-1} \text{m}^{-3} \text{s}^4 \text{A}^2$
투자율	헨리 매 미터	$\text{H m}^{-1}$	$\text{kg m s}^{-2} \text{A}^{-2}$
몰에너지	줄 매 몰	$\text{J mol}^{-1}$	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{mol}^{-1}$
몰엔트로피, 몰열용량	줄 매 몰 켈빈	$\text{J K}^{-1} \text{mol}^{-1}$	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{mol}^{-1} \text{K}^{-1}$
(x선 및 $\gamma$ 선의) 조사선량	쿨롬 매 킬로그램	$\text{C kg}^{-1}$	$\text{A s kg}^{-1}$
흡수선량률	그레이 매 초	$\text{Gy s}^{-1}$	$\text{m}^2 \text{s}^{-3}$
복사도	와트 매 스테라디안	$\text{W sr}^{-1}$	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-3}$
복사휘도	와트 매 제곱미터 스테라디안	$\text{W sr}^{-1} \text{m}^{-2}$	$\text{kg s}^{-3}$
촉매활성도 농도	카탈 매 세제곱미터	$\text{kat m}^{-3}$	$\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-3}$

각 물리량은 비록 특별한 명칭과 기호를 사용하여 여러 다른 형태로 표시될 수 있기는 하지만, 오직 하나의 일관성 있는 SI 단위만을 가진다는 사실이 특별히 강조된다.

하지만 이것의 역은 참이 아닌데, 그 이유는 일반적으로 여러 다른 양들이 같은 SI 단위를 사용하기 때문이다. 예를 들어 열용량뿐 아니라 엔트로피의 SI 단위도 줄 매 켈빈이다. 이와 유사하게, 기본량인 전류와 유도량인 기자력의 SI 단위는 모두 암페어이다. 따라서 어떤 양을 명시하기 위해 단위만을 사용하지 않는 것이 중요하다. 이것은 과학기술

문서뿐만 아니라 예를 들면 측정 장비에도 적용된다(즉, 측정 장비의 지시부는 단위와 측정된 양을 함께 표시하여야 한다).

실제로 어떤 양에 대해서는, 같은 차원을 가지는 다른 양들과의 구분을 쉽게 하기 위하여 어떤 특정 단위명칭을 우선적으로 사용한다. 이러한 재량권을 사용할 때에는 그 양이 정의된 과정을 상기하여야 한다. 예를 들어, 토크라는 양은 위치 벡터와 힘 벡터 사이의 외적이다. 그 SI 단위는 뉴턴 미터이다. 토크는 에너지(SI 단위: 줄)와 차원이 같지만, 토크를 표시하는 데 줄은 사용하지 않는다.

주파수의 SI 단위는 헤르츠이고, 각속도와 각주파수의 SI 단위는 라디안 매 초이며, 방사능의 SI 단위는 베크렐로, 모두 1초당 수효(counts per second)의 의미를 내포하고 있다. 이 세 가지 단위를 모두 역초(reciprocal second)로 써도 형식적으로는 옳지만, 다른 명칭을 사용하면 해당 양의 본질을 강조하게 된다. 주파수와 각주파수를 신중하게 구분하는 것은 특히 중요한데, 이 둘의 수치는 정의에 의해  $2\pi$  배<sup>3</sup>만큼 차이가 나기 때문이다. 이 사실을 무시하면  $2\pi$ 만큼의 오차가 발생할 수 있다. 일부 국가에서는 주파수 값을 관례적으로 SI 단위인 Hz 대신 SI 단위가 아닌 ‘cycle/s’나 ‘cps’로 표현한다. 또 rad/s로 표시되는 양에 주파수라는 용어를 권장하지 않는데도 그 용어를 사용하는 것을 흔히 볼 수 있다. 이 때문에 ‘주파수’, ‘각주파수’, ‘각속도’라고 불리는 양에 대해서는  $s^{-1}$ 가 아니라 항상 Hz 또는 rad/s 단위를 명시적으로 표시할 것을 권장한다.

전리방사선 분야에서는, 역초 대신 SI 단위인 베크렐을 사용한다. 흡수선량과 선량당량을 표시하기 위해서는 줄 매 킬로그램 대신에 SI 단위인 그레이와 시버트가 각각 사용된다. 특별한 명칭인 베크렐, 그레이, 시버트는 역초나 줄 매 킬로그램을 단위로 사용할 경우 양을 오인하는 실수를 범하여 인간의 건강에 위험을 끼칠 수 있기 때문에 특별히 도입된 단위이다.

온도 또는 온도 차이를 표시할 때는 특별한 주의를 기울여야 한다. 1 K의 온도 차이는 1 °C의 온도 차이와 같지만, 절대온도로 표시할 때는 273.15 K의 차이를 반드시 고려해야 한다. 단위 섭씨도는 온도 차이를 표시할 때만 일관성을 가진다.

국제전기기술위원회(IEC)는 바르(기호: var)를 무효 전력에 대한 특별한 명칭으로 도입하였다. SI 일관성 있는 단위로 나타내면, 바르는 볼트암페어와 동일하다.

### 2.3.5 생물학적·생리적 효과를 표현하는 양의 단위

표 2와 4에 나열된 4개의 SI 단위(칸델라, 루멘, 렉스, 시버트)는 생리적 가중 인자를 포함한다.

루멘과 렉스는 기본단위인 칸델라로부터 유도된다. 칸델라와 마찬가지로, 이들은 인간의 시력에 대한 정보를 지닌다. 일상생활에서의 빛의 중요성을 인정하여 칸델라는 1954년에 기본단위로 확립되었다. 광화학적·광생물학적 양의 정의에 사용되는 단위와 규약에 대한 자세한 정보는 부록 3에 있다.

<sup>3</sup> 세부사항은 ISO 80000-3을 참조

전리방사선은 조사된 사물에 에너지를 축적한다. 이 축적된 에너지와 질량의 비가 흡수선량  $D$  이다. 2002년 CIPM에서 결정된 바와 같이, 선량당량  $H = Q D$ 는 흡수선량  $D$ 와 방사선의 생물학적 효과를 고려하고 방사선의 에너지와 종류에 의존하는 수치인 선질계수  $Q$ 의 곱이다.

SI 단위가 아니면서 생물학적 효과를 표현하고 가중치 인자를 포함하는 양에 대한 단위들이 존재한다. 2개의 예시가 아래에 있다.

소리는 공기 중에 압력의 변동을 일으키며, 이것은 정상 대기압에 중첩되어 사람의 귀에 감지된다. 귀의 감도는 소리의 주파수에 의존하지만, 압력 변화나 주파수의 단순한 함수가 아니다. 그래서 음향학에서는 소리가 감지되는 방법과 근사하게 하기 위하여 주파수에 따른 가중치를 가진 양들이 사용된다. 예를 들면 청각 손상의 예방과 관련된 측정에서 이들이 사용된다. 의료 진단이나 치료에서 초음파의 영향에 대해서도 비슷한 고려가 필요하다.

의학적인 진단과 치료에 사용되는 물질들의 생물학적 활성도를 정량화하는 단위 중에는 아직 SI 단위로 정의되지 않은 부류가 있다. 정의가 없는 것은 이러한 물질 특유의 생물학적 효과에 관한 메커니즘을 생리-화학 변수로 정량화할 수 있을 만큼 아직 충분히 잘 이해하지 못하기 때문이다. 인류 보건과 안전을 위한 그러한 물질들의 중요성을 고려하여 세계보건기구(WHO, World Health Organization)는 그러한 물질들의 생물학적 활성도에 대한 세계보건기구 국제단위(IU, International Units)를 정의하는 책임을 맡고 있다.

### 2.3.6 일반 상대성이론 틀 안에서의 SI 단위

단위의 실제적 구현과 비교 과정은 이론적 설명의 틀 안에서 관계식 세트를 필요로 한다. 경우에 따라서 이러한 관계식은 상대론적 효과를 포함한다.

주파수 표준기의 경우에는 전자기 신호를 이용하여 원거리에서 비교하는 것이 가능하다. 그런데 지표에서 고도 차이 1 미터 당 약  $1 \times 10^{-16}$ 의 상대적 주파수 변화가 예측되기 때문에, 비교 결과를 해석하기 위해서는 일반 상대성이론이 필요하다. 이 정도 크기의 영향은 최상급 주파수 표준기를 비교할 때 반드시 보정되어야 한다.

단위의 실제적 구현을 국소적으로, 즉 작은 시공간 영역에서 비교할 때에는 일반 상대성이론에 의해 묘사되는 시공간 곡률에 의한 효과는 무시할 수 있다. 단위의 구현이 동일한 시공간 좌표(예를 들어, 동일한 운동과 가속도 또는 중력장)를 가지는 경우 상대론적 효과는 전적으로 무시할 수 있다.

### 3 SI 단위의 십진배수와 십진분수

$10^{24}$ 부터  $10^{-24}$  범위의 십진배수와 십진분수가 SI 단위와 함께 사용할 수 있도록 마련되어 있다. 이러한 배수 및 분수 접두어의 명칭과 기호가 표 7에 제시되어 있다.

접두어 기호는 단위기호와 마찬가지로 주변 문장의 글자체와 상관없이 직립형태의 글자체를 사용하여 쓰며, 접두어 기호와 단위기호 사이에 빈칸이 없도록 단위기호에 붙여야 한다. da(데카), h(헥토), 그리고 k(킬로)를 제외한 모든 배수 접두어 기호는 대문자이며, 모든 분수 접두어 기호는 소문자이다. 모든 접두어 명칭은 문장 서두를 제외하고는 소문자로 표현한다.

표 7. SI 접두어

인자	명칭	기호	인자	명칭	기호
$10^1$	데카	da	$10^{-1}$	데시	d
$10^2$	헥토	h	$10^{-2}$	센티	c
$10^3$	킬로	k	$10^{-3}$	밀리	m
$10^6$	메가	M	$10^{-6}$	마이크로	$\mu$
$10^9$	기가	G	$10^{-9}$	나노	n
$10^{12}$	테라	T	$10^{-12}$	피코	p
$10^{15}$	페타	P	$10^{-15}$	펨토	f
$10^{18}$	엑사	E	$10^{-18}$	아토	a
$10^{21}$	제타	Z	$10^{-21}$	zepto	z
$10^{24}$	요타	Y	$10^{-24}$	욕토	y

SI 접두어는 엄격히 10의 거듭제곱을 지칭한다. 이는 2의 거듭제곱을 나타내는데 사용해서는 안 된다. (예를 들어, 1 킬로비트는 1024 비트가 아닌 1000 비트를 나타낸다). 2의 거듭제곱과 함께 사용하기 위한 접두어의 명칭과 기호는 다음과 같이 권장된다.

키비	Ki	$2^{10}$
메비	Mi	$2^{20}$
기비	Gi	$2^{30}$
테비	Ti	$2^{40}$
페비	Pi	$2^{50}$
엑스비	Ei	$2^{60}$
제비	Zi	$2^{70}$
요비	Yi	$2^{80}$

접두어가 붙은 단위기호는 분리할 수 없는 새로운 단위기호를 구성하며(이들은 해당 단위의 배수 또는 분수 단위를 나타냄), 양 또는 음의 거듭제곱 연산이 가능하고, 다른 단위기호들과 결합하여 복합 단위기호를 구성할 수 있다.

예: pm (피코미터), mmol (밀리몰), G $\Omega$  (기가옴), THz (테라헤르츠)

$$2.3 \text{ cm}^3 = 2.3 (\text{cm})^3 = 2.3 (10^{-2} \text{ m})^3 = 2.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$1 \text{ cm}^{-1} = 1 (\text{cm})^{-1} = 1 (10^{-2} \text{ m})^{-1} = 10^2 \text{ m}^{-1} = 100 \text{ m}^{-1}$$

마찬가지로, 접두어의 명칭도 그 접두어가 붙어있는 단위의 명칭에서 분리하지 않는다. 예를 들면, 밀리미터, 마이크로파스칼, 그리고 메가뉴턴은 하나의 단어이다.

복합 접두어 기호 즉, 2개의 이상의 접두어 기호를 병기한 접두어 기호는 허용되지 않는다. 또한, 이 규칙은 2개 이상의 복합 접두어 명칭에도 적용된다.

접두어 기호는 단독으로 사용할 수 없으며, 단위 일의 기호인 숫자 1에 붙여서 사용할 수도 없다. 마찬가지로, 접두어 명칭은 단위 '1'의 명칭, 즉 단어 '일'에 붙여서 사용할 수 없다.

킬로그램은 역사적인 이유로 명칭과 기호에 접두어를 포함하는 유일한 일관된 SI 단위이다. 질량의 단위에 대한 십진배수와 십진분수는 단위명칭 '그램'과 단위기호 'g'에 각각 접두어의 명칭과 기호를 붙여서 사용한다. 예를 들어  $10^{-6}$  kg은 마이크로킬로그램,  $\mu\text{kg}$ 이 아니라 밀리그램, mg으로 표기한다.

## 4 SI와 함께 사용하는 것이 인정되는 SI 이외의 단위

SI는 국제적으로 합의된 기준을 제공하며, 이를 기준으로 그 밖의 모든 단위가 정의된다. 일관성 있는 SI 단위는 양 관계식의 어떤 양에 특정 값을 대입할 때 단위 환산이 필요하지 않다는 장점을 가지고 있다.

그럼에도 불구하고 몇몇 비SI 단위들이 널리 사용되고 있으며 향후 계속해서 사용될 것으로 예상된다. 그래서 CIPM은 일부 비SI 단위를 SI와 함께 사용하는 것을 인정했으며, 이들은 표 8에 정리되어 있다. 이러한 단위들이 사용되면 SI의 어떤 장점들은 상실된다는 것을 이해해야만 한다. SI 접두어들은 몇몇 이런 단위들과 함께 사용할 수 있지만, 예를 들어 시간의 비SI 단위들과는 함께 사용하지 않는다.

표 8. SI와 함께 사용되는 것이 인정되는 비SI 단위

양	명칭	기호	SI 단위로 나타낸 값
시간	분	min	1 min = 60 s
	시간	h	1 h = 60 min = 3600 s
	일	d	1 d = 24 h = 86 400 s
길이	천문단위 <sup>(가)</sup>	au	1 au = 149 597 870 700 m
평면각 및 위상각	도	°	1° = (π/180) rad
	분	'	1' = (1/60)° = (π/10 800) rad
	초 <sup>(나)</sup>	"	1" = (1/60)' = (π/648 000) rad
면적	헥타르 <sup>(다)</sup>	ha	1 ha = 1 hm <sup>2</sup> = 10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
부피	리터 <sup>(라)</sup>	l, L	1 l = 1 L = 1 dm <sup>3</sup> = 10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> = 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
질량	톤 <sup>(마)</sup>	t	1 t = 10 <sup>3</sup> kg
	돌턴 <sup>(바)</sup>	Da	1 Da = 1.660 538 86 (28) × 10 <sup>-27</sup> kg
에너지	전자볼트 <sup>(사)</sup>	eV	1 eV = 1.602 176 53 (14) × 10 <sup>-19</sup> J
로그비 양	네퍼 <sup>(아)</sup>	Np	주석 참조
	벨 <sup>(아)</sup>	B	
	데시벨 <sup>(아)</sup>	dB	

갈(단위: Gal)은  
측지학과  
지구물리학에서  
중력에 의한 가속도를  
표현하기 위해  
사용되는 가속도의  
비SI 단위이다.  
1 Gal = 1 cm s<sup>-2</sup>  
= 10<sup>-2</sup> m s<sup>-2</sup>

(가) 이는 제28차 국제천문연맹 총회에서 결정되었다. (2012년 결의안 B2)

(나) 천문학과 응용분야에서는 작은 각은 as 또는 "로 표기되는 아크초(즉, 평면각의 초), mas, μas, pas로 각각 표기되는 밀리아크초, 마이크로아크초, 피코아크초로 측정되는데, 여기서 아크초는 평면각의 초에 대한 다른 명칭이다.

- (다) 단위 헥타르와 기호 ha는 1879년 CIPM(PV, 1879, 41)에서 채택되었다. 헥타르는 토지 면적을 표현하는 데 사용된다.
- (라) 리터와 그 기호인 소문자 l은 1879년 CIPM(PV, 1879, 41)에서 채택되었다. 또 다른 기호 대문자 L은 제16차 CGPM(1979, 결의사항 6;S CR, 101 및 *Metrologia*, 1980, 16, 56-57)에서 문자 l(엘)과 숫자 1(일)과의 혼동을 피하고자 채택되었다.
- (마) 톤과 기호 t는 1879년 CIPM(PV, 1879, 41)에서 채택되었다. 몇몇 영어 사용 국가들에서 이 단위는 가끔 ‘메트릭 톤’으로 불린다.
- (바) 돌턴(Da)과 통합 원자 질량 단위(u)는 동일한 단위에 대한 두 가지 다른 명칭(과 기호)이며, 정지해 있고 바닥 상태에 있는 속박되지 않은 탄소 12 원자 질량의 1/12과 같다. 돌턴의 이 값은 CODATA 2014 조정안에 권고된 값이다. 이는 이제는 개정된 2017년 플랑크 상수  $h$  값을 반영하여 CODATA 2018 조정안에서 업데이트될 것이다. 이는 2014년 값의 불확도를 1/10 수준으로 감소시킬 것이다.
- (사) 전자볼트는 하나의 전자가 진공 중에서 1 볼트의 전위차를 통과할 때 얻게 되는 운동에너지이다. 전자볼트는 종종 SI 접두어와 결합된다.
- (아) 이 단위들을 사용할 때 양의 속성을 명시하고, 사용된 기준값도 명시하는 것이 중요하다.

표 8은 또한 로그비(logarithmic ratio) 양의 단위인 네퍼, 벨, 데시벨을 보여주고 있다. 이 단위들은 관련된 로그비 양의 특성에 대한 정보를 전달하는 데 사용된다. 네퍼(기호: Np)는 네퍼(또는, 자연) 로그  $\ln = \log_e$ 의 사용에 기반을 둔 수치를 가진 양의 값을 표현하는 데 사용된다. 벨(기호: B)과 데시벨(기호: dB)(여기서 1 dB은 1/10 B)은 십진 로그  $\lg = \log_{10}$ 의 사용에 기반을 둔 수치를 가진 로그비 양의 값을 표현하는 데 사용된다.  $L_x = m \text{ dB} = (m/10)B$  (여기서  $m$ 은 수)의 서술은  $m = 10 \lg(X/X_0)$ 을 의미하는 것으로 해석한다. 네퍼, 벨과 데시벨 단위는 SI와 함께 사용하기 위해 CIPM에 의해 인정되었지만 SI 단위는 아니다.

역사적 관심이 있거나, 특정 분야(예를 들면, 원유의 배럴)에서 여전히 사용하거나, 또는 특정 국가에서 사용하고 있는(인치, فوت, 야드) 비SI 단위가 더 많이 있다. CIPM은 현대 과학기술 작업에서 이 단위들을 반드시 사용해야 하는 사례를 찾지 못했다. 그러나 이 단위들과, 대응되는 SI 단위들과의 관계를 기억하는 것은 분명히 중요한 일이고 앞으로도 다년간 그러할 것이다.

## 5 단위기호와 단위명칭의 표기 및 양의 값의 표현

### 5.1 단위기호와 단위명칭의 사용

단위기호와 수의 표기에 관한 일반 원칙은 제9차 CGPM(1948, 결의사항 7)에서 처음으로 제시되었다. 그 후 이 원칙들은 ISO, IEC 및 다른 국제기구들에 의하여 정교하게 가다듬어졌다. 그 결과, 현재는 양의 기호뿐만 아니라, 접두어의 기호와 명칭을 포함하는 단위의 기호와 명칭에 대한 표기법 및 사용법과 양의 값을 표현하는 방법에 대한 일반적인 합의가 이루어졌다. 이러한 규칙과 표현양식에 관한 규약을 따르는 것은 과학기술 문서의 가독성을 높인다. 이 장에서는 이 규칙과 규약 가운데 가장 핵심적인 것들을 제시한다.

### 5.2 단위기호

단위기호는 주변 문장에 사용된 다른 글자체와 관계없이 직립형태의 글자체를 사용한다. 단위기호는 소문자로 표기하는 것이 원칙이며, 그 기호가 고유명사에서 유래한 경우에만 그 기호의 첫 글자를 대문자로 표기한다.

제16차 CGPM(1979년, 결의사항 6)에서 채택된 하나의 예외는 숫자 1(일)과 소문자 l(엘) 사이에 있을 수 있는 혼동을 피하기 위하여 리터의 경우 대문자 L과 소문자 l이 모두 허용된다는 것이다.

사용되는 십진배수 또는 십진분수의 접두어는 단위의 한 부분이며 구분 기호 없이 단위 기호 앞에 붙인다. 접두어는 단독으로 사용되지 않으며, 복합 접두어는 사용되지 않는다.

단위기호는 수학적 구성요소이지 약어(略語)가 아니다. 따라서 문장 끝에 놓일 때를 제외하고는 단위기호 끝에 온점을 붙이지 않는다. 단위기호는 복수형으로 사용해서는 안 되며, 단위명칭도 수학적 구성요소가 아니므로 하나의 표현에서 단위기호와 단위명칭을 혼용해서도 안 된다.

단위기호들이 곱이나 나누기의 형태를 구성할 때에는 대수의 곱하기와 나누기의 일반 규칙을 적용한다. 곱하기는 빈칸이나 가운데점(·)으로 나타내야 하는데, 그렇지 않으면 어떤 접두어들은 단위기호로 오독될 수 있다. 나누기는 수평선, 사선 또는 음의 지수로 나타낸다. 몇 가지 단위기호가 결합될 때는 괄호 또는 음의 지수를 사용하여 모호성을 없애도록 주의하여야 한다. 괄호가 없는 표기에서는 모호성을 피하기 위하여 사선은 한 번만 사용해야 한다.

단위기호나 단위명칭을 약어로 사용하는 것은 허용되지 않는데, 예를 들면, sec(s 또는 second에 대하여), sq. mm(mm<sup>2</sup> 또는 제곱 밀리미터에 대하여), cc(cm<sup>3</sup> 또는 세제곱센티

미터에 대하여), mps(m/s 또는 미터 매 초에 대하여) 등이 있다. 이 책자의 앞 장들에서 열거한 대로, SI 단위 또는 일반 단위에 대해 올바른 기호를 사용하는 것은 강제사항이다. 이렇게 함으로써 양의 값에 관한 모호성과 오해를 피할 수 있다.

### 5.3 단위명칭

단위명칭은 보통 직립형태의 글자체를 사용하여 쓰며 보통명사로 취급된다. 영어에서 단위의 명칭은 (단위기호가 대문자로 시작하는 경우라 하더라도) 소문자로 시작한다. 다만, 문장의 처음에 오거나, 제목과 같이 대문자로 써야 할 경우는 예외이다. 이러한 규칙에 따라서 기호 °C에 대한 단위명칭의 올바른 철자는 ‘degree Celsius’(단위 degree는 소문자 d로 시작하고 수식어인 Celsius는 고유명사이므로 대문자 C로 시작한다)이다.

비록 양의 값은 통상 숫자기호와 단위기호를 사용해 표현하지만, 어떤 이유로 단위기호보다 단위명칭이 더 적합한 경우에는 단위명칭은 모든 철자를 생략하지 않고 써야한다.

단위명칭이 십진배수 또는 십진분수의 접두어 명칭과 결합될 때 접두어명칭과 단위명칭 사이에는 빈칸이나 하이픈을 사용하지 않는다. 결합된 접두어명칭과 단위명칭은 한 단어이다. (제3장 참조)

유도단위의 명칭이 각각의 단위명칭의 병치로 만들어질 경우에는 각각의 단위명칭을 구분하기 위해 빈칸이나 하이픈을 사용한다.

## 5.4 양의 값을 표현하기 위한 규칙과 인쇄양식의 관례

### 5.4.1 양의 값과 수치, 양의 계산법

양의 기호는 일반적으로 이탤릭체로 쓴 한 개의 문자로 나타낸다. 다만, 아래첨자나 위첨자 또는 괄호를 붙임으로써 추가 정보를 부여할 수 있다. 예를 들어  $C$ 는 열용량의 권고 기호이며,  $C_m$ 은 몰열용량,  $C_{m,p}$ 는 정압 몰열용량,  $C_{m,v}$ 는 정적 몰열용량의 권고 기호이다.

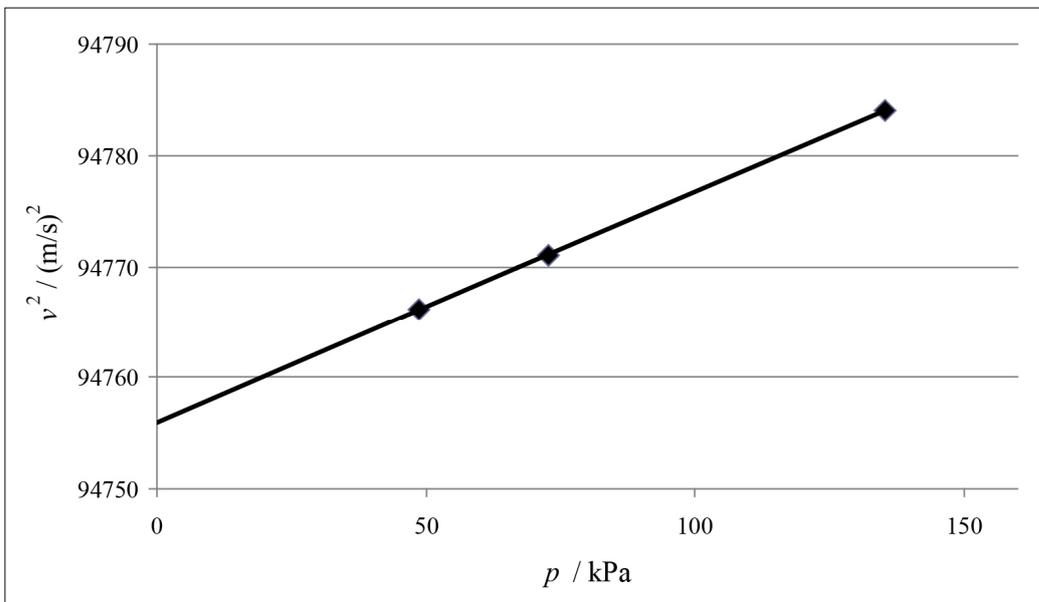
권고된 양의 명칭과 기호는 많은 표준참고문헌, 예컨대 국제표준화기구의 국제표준 ISO/IEC 80000 시리즈 ‘양 및 단위’, IUPAP SUNAMCO Red Book ‘물리학의 기호, 양 및 용어(Symbols, Units and Nomenclature in Physics)’, IUPAC Green Book ‘물리화학의 양, 단위 및 기호(Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry)’ 등에 열거되어 있다. 그러나 양의 기호는 권고사항이다(반면 단위기호에 대해서는 정확한 형태를 사용하는 것이 강제사항이다). 경우에 따라 양의 기호로 저자 스스로 선정한 기호를 사용할 때가 있는데, 두 가지 다른 양에 대해 동일한 기호를 사용함으로써 발생하는 충돌을

피하고자 할 때가 그런 예이다. 이런 경우, 해당 기호의 의미가 명확히 서술되어야 한다. 그러나 어떠한 양의 명칭이나 그것을 나타내는 기호가 특정한 단위의 선택을 암시해서는 안 된다.

단위의 기호는 수학적 구성요소로 취급된다. 어떤 양의 값을 수치와 단위의 곱으로 표현할 때 수치와 단위는 보통의 대수법칙에 따라 다를 수 있다. 이 과정은 양의 계산법 또는 양의 대수학을 사용하여 묘사된다. 예를 들어,  $p = 48 \text{ kPa}$  이라는 식의 동등한 표현으로  $p/\text{kPa} = 48$ 을 쓸 수 있다. 표에서 열의 제목을 쓸 때 이와 같이 양과 단위를 비의 형태로 표현하는 것이 일반적인 관례이며, 이렇게 함으로써 표에 들어가는 내용은 모두 단순한 숫자가 된다. 예를 들어, 압력과 속도 제곱의 비교표는 아래와 같은 모양으로 만들 수 있다.

$p/\text{kPa}$	$v^2/(\text{m/s})^2$
48.73	94 766
72.87	94 771
135.42	94 784

그래프의 축에 대해서도 위와 같은 방법을 적용하여 제목을 붙일 수 있으며, 이렇게 함으로써 아래 그래프에서처럼 눈금은 숫자로만 표기된다.



### 5.4.2 양의 기호와 단위기호

단위기호는 양에 관한 특정 정보를 제공할 목적으로 사용해서는 안 되며, 결코 양에 관한 유일한 정보가 되어서도 안 된다. 단위는 양의 특성에 관한 추가 정보로 결코 수식되어서는 안 된다. 양의 특성에 관한 추가 정보는 양의 기호에 붙여야 하며 단위기호에 붙여서는 안 된다.

예를 들면:  
 최대 전위차는  $U_{\max} = 1000 \text{ V}$ 로 표기하며  $U = 1000 \text{ V}_{\max}$ 로 표기해서는 안 된다. 실리콘 표본에 있는 구리의 질량분량은  $w(\text{Cu}) = 1.3 \times 10^{-6}$ 로 표기하며  $'1.3 \times 10^{-6} \text{ w/w}'$ 로 표기해서는 안 된다.

### 5.4.3 양의 값 표기 방식

수치는 항상 단위 앞에 쓰고, 수와 단위를 구분하기 위하여 항상 빈칸을 둔다. 그러므로 양의 값은 수와 단위의 곱이다. 수와 단위 사이의 빈칸은 (단위들 사이의 빈칸이 곱셈을 의미 하듯이) 곱셈 기호로 간주된다. 이 규칙의 유일한 예외로서 평면각의 도, 분, 초에 대한 단위기호인 °, ', "의 경우에는 수와 단위기호 사이에 빈칸을 두지 않는다.

질량의 기호로서  $m$ 을 사용할 때에는  $m = 12.3 \text{ g}$ 과 같이 쓰지만, 평면각의 기호로  $\varphi$ 를 사용할 때는  $\varphi = 30^\circ 22' 8''$ 로 표기한다.

이 규칙은 섭씨온도  $t$ 의 값을 표현할 때 섭씨도에 대한 기호 °C 앞에도 빈칸을 둔다는 것을 의미한다.

$t = 30.2 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $t = 30.2^\circ\text{C}$ 나  
 $t = 30.2^\circ \text{C}$ 가 아님

양의 값이 형용사로 사용될 때에도 수와 단위기호 사이에 빈칸을 둔다. 단위의 명칭이 사용될 때에만 일반적인 문법 규칙이 적용된다. 따라서 영어에서는 수와 단위를 분리하기 위해 하이픈이 사용된다.

10 kΩ 저항  
 35-millimeter 필름

어떤 표현에서도 단 하나의 단위만 사용한다. 이 규칙의 예외는 비SI 단위를 사용하여 시간과 평면각의 값을 표현할 때뿐이다. 그러나 평면각의 경우에는 도를 소수로 나누는 것이 일반적으로 바람직하다. 그러므로 항법, 지도 제작, 천문과 같은 분야와 미세 각도 측정의 경우를 제외하고는  $22^\circ 12'$ 보다는  $22.20^\circ$ 로 표기하는 것이 바람직하다.

$l = 10.234 \text{ m}$   
 $l = 10 \text{ m } 23.4 \text{ cm}$ 가 아님

### 5.4.4 숫자 및 소수점의 표기 방식

수의 정수부분과 소수부분을 구분하기 위하여 사용되는 부호를 소수점이라고 한다. 제 22차 CGPM(2003, 결의사항 10)에 따르면 소수점은 “선상에 온점 또는 반점이어야 한다”. 선택된 소수점은 언어와 문맥에서 관계적인 것이어야 한다.

수가 +1 과 -1 사이일 경우에는 소수점 앞에 항상 영을 쓴다.

-0.234  
 -.234가 아님

제9차 CGPM(1948, 결의사항 7)과 제22차 CGPM(2003, 결의사항 10)에 따라, 여러 자리의 수는 읽기에 편리하도록 3자리씩 묶어 빈칸으로 나누어 쓸 수 있으며, 세 자리의 묶음 사이에는 온점이나 반점이 삽입되지 않는다. 그러나 소수점 앞이나 뒤에 단지 네 개의 숫자 만 있을 경우에는 한 숫자를 분리하기 위한 빈칸은 사용하지 않는 것이 관례이다. 이러한 방식으로 숫자를 묶는 방식은 선택할 수 있는 사항이다. 공학도면, 재무제표 및 컴퓨터가 읽는 문서와 같이 전문적인 응용분야의 경우, 이 규칙을 항상 따라야 하는 것은 아니다.

43 279.168 29  
 43,279.168,29가 아님

표에 사용되는 숫자의 경우, 표기방식은 하나의 열 내에서는 다르지 않아야 한다.

3279.1683  
 또는 3 279.168 3

### 5.4.5 양의 값에 대한 측정불확도의 표현

양의 추정값과 관련된 불확도는 문서 JCGM 100:2008 (소폭 수정된 GUM 1995), 측정 자료의 평가 - 측정불확도 표현지침(*Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*)에 따라 평가되고 표현되어야 한다. 양  $x$ 와 관련된 표준불확도는  $u(x)$  로 나타낸다. 불확도를 나타내는 편리한 방법은 다음의 예와 같다.

$$m_n = 1.674\ 927\ 471\ (21) \times 10^{-27} \text{ kg}$$

여기서  $m_n$ 은 양(이 경우는 중성자의 질량)의 기호이고 괄호 안의 수는  $m_n$ 의 추정값에 대한 표준불확도의 수치인데, 이는 인용된 값의 마지막 자릿수들에 대응하는 값이다. 이 경우,  $u(m_n) = 0.000\ 000\ 021 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 이다. 만일 표준불확도  $u(x)$ 의 자리에 확장불확도  $U(x)$ 가 사용될 경우, 포함확률  $p$ 와 포함인자  $k$ 를 명시하여야 한다.

### 5.4.6 양의 기호, 양의 값 또는 숫자의 곱하기와 나누기

양의 기호를 서로 곱하거나 나눌 경우, 다음의 방법들을 사용할 수 있다.

$$ab, a\ b, a \cdot b, a \times b, a/b, \frac{a}{b}, ab^{-1}$$

양의 값끼리 곱할 때는 곱셈 기호  $\times$  나 괄호를 사용하여야 하고, 가운데점을 사용해서는 안 된다. 숫자끼리 곱할 때는 곱셈 기호  $\times$  만을 사용하여야 한다.

사선을 사용하여 양의 값을 나눌 때는 모호함을 피하기 위하여 괄호를 사용한다.

예:  
 질량과 가속도의  
 곱인 힘의 경우  
 $F = ma$   
 $(53 \text{ m/s}) \times 10.2 \text{ s}$   
 또는  $(53 \text{ m/s})(10.2 \text{ s})$   
 $25 \cdot 60.5$ 가 아니라  
 $25 \times 60.5$   
 $(20 \text{ m})/(5 \text{ s}) = 4 \text{ m/s}$   
 $a/b/c$ 가 아니라  $(a/b)/c$

### 5.4.7 순수한 수인 양의 값의 표기

2.3.3절에서 논의된 바와 같이 단위 일을 가지는 양의 값은 단순히 숫자로만 표기한다. 단위기호 1 또는 단위명칭 ‘일’은 명시적으로 표기하지 않는다. SI 접두어 기호들은 기호 1이나 명칭 ‘일’에 붙일 수 없으므로 현저히 크거나 작은 값을 표기하기 위하여 10의 거듭제곱을 사용한다.

같은 종류의 양의 비율인 양(예를 들면 길이의 비, 물질량 분률)은 표현하고자 하는 양에 대한 이해를 돕기 위해 단위(m/m, mol/mol)와 함께 표기할 수 있으며 필요에 따라 SI 접두어도 사용할 수 있다( $\mu\text{m}/\text{m}$ ,  $\text{nmol}/\text{mol}$ ). 수를 세는 것과 관련된 양은 이렇게 표기할 수 없으며, 단순히 수일 뿐이다.

국제적으로 인정된 기호 %(퍼센트)는 국제단위계와 함께 사용할 수 있다. 이때, 숫자와 기호 % 사이에는 빈칸을 둔다. 명칭 ‘퍼센트’보다는 기호 %를 사용하여야 한다. 그러나 문장 속에서 기호 %는 일반적으로 ‘백분의 일’의 의미를 가진다. ‘질량 백분율’, ‘부피 백분율’, 또는 ‘물질량 백분율’과 같은 문구는 사용해서는 안 된다. 대신에 양에 대한 추가

$n$ 이 굴절률에 대한 양의 기호일 때,  
 $n = 1.51 \times 10^1$ 이 아니라  $n = 1.51$

정보가 그 양에 대한 설명과 기호에 붙여져야 한다.

상대값  $10^{-6}$ ,  $10^6$ 분의 1, 또는 백만분의 일의 의미를 가지는 ‘ppm’이란 용어도 사용되고 있다. 이것은 백분의 일을 의미하는 퍼센트와 유사하다. ‘십억 분의 일과 조 분의 일 (parts per billion and parts per trillion)’이라는 용어와 이들의 약어 ‘ppb’, ‘ppt’도 사용되지만 그 의미는 언어에 따라 다를 수 있다. 이러한 이유로 약어 ppb와 ppt는 사용을 피해야 한다.

영어권 국가에서는 일반적으로 billion이  $10^9$ 을 trillion이  $10^{12}$ 을 의미하지만, 때때로 billion은  $10^{12}$ 을 trillion은  $10^{18}$ 을 의미하기도 한다. 또한 약어 ppt는 가끔 천분의 일(part per thousand)로 읽혀 혼란이 가중되기도 한다.

### 5.4.8 평면각, 입체각 및 위상각

평면각과 위상각에 대한 일관된 SI 단위는 라디안, 단위 기호 rad이며, 입체각의 단위는 스테라디안, 단위기호 sr이다.

라디안 단위로 나타내는 평면각은, 한 점에서 시작된 두 직선 사이를 그 점을 중심으로 길이  $r$ 인 반지름 벡터로 끌고 지날 때 생기는 원호의 길이  $s$ 를 반지름으로 나눈 값, 즉  $\theta = s/r$  rad로 정의된다. 위상각(흔히 ‘위상’이라고도 함)은 복소수의 편각을 말한다. 이것은 극좌표로 나타낸 복소평면에서 복소수의 반경이 양의 실수 축과 이루는 각도이다.

1 라디안은  $s = r$ 일 때의 각도이며, 따라서  $1 \text{ rad} = 1$ 이다. 직각을 라디안 단위로 나타내면 정확히 숫자  $\pi/2$ 와 같다.

역사적 관례로 사용되는 단위는 도(degree)이다. 라디안과 도 사이의 변환은 관계식  $360^\circ = 2\pi \text{ rad}$ 으로부터 구해진다. 여기서 주지할 사실은 기호  $^\circ$ 로 표기되는 도는 SI 단위가 아니라는 것이다.

스테라디안으로 나타낸 입체각은 반지름이  $r$ 인 구의 표면적  $A$ 와 반지름 제곱의 비에 해당한다.

즉,  $\Omega = A/r^2$  sr이다. 1 스테라디안은  $A = r^2$ 인 입체각에 해당된다. 즉  $1 \text{ sr} = 1$ 이다.

단위 rad과 sr은 각각 두 길이의 비와 두 길이 제곱의 비에 해당된다. 그러나 rad과 sr은 각도와 입체각을 나타내는 데만 사용해야 하며, 일반적인 두 길이의 비나 길이 제곱의 비를 표현하는데 사용해서는 안 된다.

1960년 제11차 CGPM에서 SI가 채택되었을 때, 라디안과 스테라디안을 수용하기 위해 ‘보충단위’라는 범주를 만들었다. 수십 년 뒤, CGPM은 다음과 같이 결의했다. (1) “SI의 보충단위, 즉 라디안과 스테라디안을 무차원의 유도 단위로 해석하며, 그 명칭과 기호는 다른 SI 유도 단위를 표현하는 데 사용할 수 있으나, 편리성에 따라 반드시 사용할 필요는 없다.” (2) 보충 단위라는 별도의 분류를 삭제한다(제20차 CGPM 결의안 8의 결정내용 (1995)).

## 부록 1. CGPM과 CIPM의 결정사항

이 부록은 SI 단위의 정의, SI의 일부로 사용되도록 정의된 접두어, 단위기호와 숫자를 표기하는 관례와 직접적으로 관련된 CGPM과 CIPM의 결정사항들을 수록한 것이다. 이 부록은 CGPM과 CIPM의 결정사항들 모두를 수록한 완전한 목록은 아니다. 완전한 목록은 여러 권으로 연속하여 출판되어온 *Comptes rendus des séances de la conférence générale des poids et mesures (CR)*과 *Procès-verbaux des séances du comité international des poids et mesures (PV)*를, 최근의 결정사항은 *Metrologia*를 참고해야 한다.

SI는 정제되어 있는 관례가 아니라, 측정과학의 발달에 따라 발전하기 때문에 어떤 결정사항은 폐기되기도 하고 수정되기도 하며, 다른 결정사항은 내용이 추가됨으로써 명확하게 되기도 하였다. 이러한 변화의 대상이 되었던 결정사항들은 별표(\*)로 표시하였으며 그 수정 결정에 대한 설명 주석과 연계시켰다.

각 결정사항의 원문(또는 이들의 번역문)은 보통 굵기의 다른 서체(고딕)로 나타내어 주문장과 구별하였다. 별표와 설명 주석은 문장의 이해를 돕기 위하여 BIPM이 추가한 것이며 원문의 일부는 아니다.

이 부록에는 1889년부터 2018년 사이의 CGPM 및 CIPM의 결정사항들이 연대순으로 수록되어 있는데, 이는 결정사항 채택의 연속성을 유지하기 위한 것이다. 그러나 특정한 주제와 관련된 결정사항을 쉽게 찾을 수 있도록 주제별 목차를 아래에 수록하였다. 목차에는 각 주제와 관련된 결정사항이 내려진 회의명과 페이지가 표시되어 있다.

## 부록 1의 목차

(편집자 주: 원문에서는 부록 1의 목차가 부록 본문 중의 소제목들로 정리되지 않았음.  
이 한국어판에서는 부록 1의 본문 중의 소제목으로 목차를 수정하였음)

<b>SI의 확립에 관한 결정사항</b>	<b>쪽</b>
제9차 CGPM, 1948: 실용 측정단위계의 확립을 위한 제안	49
제10차 CGPM, 1954: 실용 단위계	52
CIPM 1956: 국제단위계	52
제11차 CGPM, 1960: 국제단위계	53
CIPM, 1969: SI, 제11차 CGPM(1960) 결의사항 12의 적용에 관한 규칙	60
CIPM, 2001: ‘SI 단위’와 ‘SI의 단위’	71
제23차 CGPM, 2007: 국제단위계(SI)의 일부 기본단위 재정의 가능성	78
제24차 CGPM, 2011: 국제단위계, SI의 추후 개정 가능성	81
제25차 CGPM, 2014: 국제단위계, SI의 추후 개정	87
CIPM, 2017: 국제단위계, SI 재정의에 대한 진전사항	90
제26차 CGPM, 2018: 국제단위계, SI의 개정	90
<b>SI의 기본단위에 관한 결정사항</b>	
<b>길이</b>	
제1차 CGPM, 1889: 미터와 킬로그램에 대한 국제원기의 인준	47
제7차 CGPM, 1927: 국제원기에 의한 미터의 정의	48
제10차 CGPM, 1954: 미터를 기본단위로 채택	52
제11차 CGPM, 1960: 미터의 정의	53
제15차 CGPM, 1975: 빛의 속력에 대한 권고값	62
제17차 CGPM, 1983: 미터의 재정, 미터 정의의 구현에 대하여	65
CIPM, 2002: 미터 정의의 실제적 구현 개정	72
CIPM, 2003: 권고 복사선의 구현 방법에 관한 서술 목록의 개정	74
CIPM, 2005: 권고 복사선의 구현 방법에 관한 서술 목록의 개정	76
CIPM, 2007: 권고 복사선의 구현 방법에 관한 서술 목록의 개정	78
제23차 CGPM, 2007: 미터 정의의 구현 방법에 대한 서술(mise en pratique) 개정 및 신규 광주파수 표준 개발	78
CIPM, 2009: 표준 주파수 목록 업데이트	81
제24차 CGPM, 2011: SI 추후 개정 가능성	81

제24차 CGPM, 2011:	미터 정의의 구현 방법에 대한 서술(mise en pratique) 개정 및 신규 광주파수 표준 개발	81
CIPM, 2013:	표준 주파수 목록 업데이트	86
제26차 CGPM, 2018:	국제단위계, SI의 개정	90
<b>질량</b>		
제1차 CGPM, 1889:	미터와 킬로그램에 대한 국제원기의 인준	47
제3차 CGPM, 1901:	질량의 단위와 무게의 정의에 관한 선언, $g_n$ 의 협정값	47
제10차 CGPM, 1954:	킬로그램을 기본단위로 채택	52
CIPM, 1967:	질량단위의 십진배수 및 십진분수	57
제21차 CGPM, 1999:	킬로그램의 정의	70
제23차 CGPM, 2007:	국제단위계(SI)의 일부 기본단위 재정의 가능성	78
제24차 CGPM, 2011:	국제단위계, SI의 추후 개정 가능성	81
제25차 CGPM, 2014:	국제단위계, SI의 추후 개정	87
제26차 CGPM, 2018:	국제단위계, SI의 개정	90
<b>시간</b>		
제10차 CGPM, 1954:	초를 기본단위로 채택	52
CIPM, 1956:	시간 단위의 정의 (초)	52
제11차 CGPM, 1960:	시간 단위의 정의 (초)	53
CIPM, 1964:	원자 및 분자 주파수 표준	56
제12차 CGPM, 1964:	원자 주파수 표준	56
제13차 CGPM, 1967/68:	시간의 SI 단위 (초)	58
CCDS, 1970	TAI의 정의	60
제14차 CGPM, 1971	국제원자시, CIPM의 기능	61
제15차 CGPM, 1975	세계협정시 (UTC)	62
CIPM, 2006:	초에 대한 이차적 표현 관련	77
제23차 CGPM, 2007:	미터 정의의 구현 방법에 대한 서술(mise en pratique) 개정 및 신규 광주파수 표준 개발	78
CIPM, 2009:	표준 주파수 목록 업데이트	81
제24차 CGPM, 2011:	국제단위계, SI의 추후 개정 가능성	81
제24차 CGPM, 2011:	미터 정의의 구현 방법에 대한 서술(mise en pratique) 개정 및 신규 광주파수 표준 개발	81
CIPM, 2013:	표준 주파수 목록 업데이트	86
CIPM, 2015:	표준 주파수 목록 업데이트	88
제26차 CGPM, 2018:	국제단위계, SI의 개정	90

**전기 단위**

CIPM, 1946:	전기 단위의 정의	48
제10차 CGPM, 1954:	암페어를 기본단위로 채택	52
제14차 CGPM, 1971:	파스칼과 지멘스	61
제18차 CGPM, 1987:	볼트와 옴의 표현에 대한 향후의 조정	67
CIPM, 1988:	조셉슨 효과에 의한 볼트의 표현	67
CIPM, 1988:	양자 홀 효과에 의한 옴의 표현	67
제23차 CGPM, 2007:	국제단위계(SI)의 일부 기본단위 재정의 가능성	78
제24차 CGPM, 2011:	국제단위계, SI의 추후 개정 가능성	81
제25차 CGPM, 2014:	국제단위계, SI의 추후 개정	87
제26차 CGPM, 2018:	국제단위계, SI의 개정	90

**열역학 온도**

제9차 CGPM, 1948:	물의 삼중점, 단일 고정점을 가진 열역학적 눈금, 열량의 단위 (줄)	49
CIPM, 1948:	섭씨도의 채택	50
제10차 CGPM, 1954:	열역학 온도눈금의 정의	52
제10차 CGPM, 1954:	표준대기압의 정의	52
제13차 CGPM, 1967/68:	열역학 온도의 SI 단위 (켈빈)	58
제13차 CGPM, 1967/68:	열역학 온도의 SI 단위(켈빈)의 정의	69
CIPM, 1989:	1990년 국제온도눈금	76
CIPM, 2005:	열역학 온도 단위인 켈빈의 정의에 대한 명확화	78
제23차 CGPM, 2007:	열역학 온도 단위인 켈빈의 정의에 대한 명확화	76
제24차 CGPM, 2011:	국제단위계, SI의 추후 개정 가능성	81
제25차 CGPM, 2014:	국제단위계, SI의 추후 개정	87
제26차 CGPM, 2018:	국제단위계, SI의 개정	90

**물질량**

제14차 CGPM, 1971:	물질량의 SI 단위 (몰)	61
제21차 CGPM, 1999:	촉매활성도를 나타내는 SI 유도단위인 몰 매 초의 특수명칭, 카탈	70
제23차 CGPM, 2007:	국제단위계(SI)의 일부 기본단위 재정의 가능성	76
제24차 CGPM, 2011:	국제단위계, SI의 추후 개정 가능성	81
제25차 CGPM, 2014:	국제단위계, SI의 추후 개정	87
제26차 CGPM, 2018:	국제단위계, SI의 개정	90

**광도**

CIPM, 1946:	광측정 단위의 정의	48
제10차 CGPM, 1954:	칸델라를 기본단위로 채택	52
제13차 CGPM, 1967/68:	광도의 SI 단위 (칸델라)	58
제16차 CGPM, 1979:	광도의 SI 단위 (칸델라)	63
제24차 CGPM, 2011:	국제단위계, SI의 추후 개정 가능성	81
제26차 CGPM, 2018:	국제단위계, SI의 개정	90

**SI 유도단위와 보충단위에 관한 결정사항****SI 유도단위**

제12차 CGPM, 1964:	퀴리	56
제13차 CGPM, 1967/68:	SI 유도단위	58
제15차 CGPM, 1975:	전리방사선에 대한 SI 단위 (베크렐, 그레이)	62
제16차 CGPM, 1979:	선량당량의 SI 단위에 대한 특별한 명칭 (시버트)	63
CIPM, 1984:	시버트에 관하여	66
CIPM, 2002:	선량당량	72

**보충단위**

CIPM, 1980:	SI 보충단위 (라디안과 스테라디안)	64
제20차 CGPM, 1995:	SI에서 보충단위 부류의 삭제	70

**SI와 함께 사용되는 단위의 승인과 용어에 관한 결정사항****SI 접두어**

제12차 CGPM, 1964:	SI 접두어 펨토와 아토	56
제15차 CGPM, 1975:	SI 접두어 페타와 엑사	62
제19차 CGPM, 1991:	SI 접두어 제타, 켈토, 요타, 욱토	69

**단위기호 및 숫자**

제9차 CGPM, 1948:	단위기호와 숫자의 표기 및 인쇄	49
-----------------	-------------------	----

**단위명칭**

제13차 CGPM, 1967/68:	기존 결정의 폐기 (마이크론, 신축광)	58
---------------------	-----------------------	----

**소수점**

제22차 CGPM, 2003:	소수점 부호	75
------------------	--------	----

**SI와 함께 사용되는 것이 허용된 단위: 예, 리터**

제3차 CGPM, 1901:	리터의 정의에 관한 선언	47
제11차 CGPM, 1960:	세제곱 데시미터와 리터	53
CIPM, 1961:	세제곱 데시미터와 리터	56
제12차 CGPM, 1964:	리터	56
제16차 CGPM, 1979:	리터에 대한 기호	63

## 제1차 CGPM, 1889

## ■ 미터와 킬로그램에 대한 국제원기의 인준 (CR, 34-38)\*

국제도량형총회(CGPM)는,

- 국제미터위원회 프랑스분과와 CIPM의 공동연구에 의하여 현재 과학수준이 허용하는 최고의 정확성과 신뢰성을 가지고 미터와 킬로그램의 국제 및 국가원기에 대한 기본측정이 이루어 졌음이 ‘국제도량형위원회 위원장의 회의록’과 ‘CIPM 보고서’에서 설명된 것,
- 미터와 킬로그램의 국제 및 국가원기가 오차 0.0001 이내에서 10 퍼센트의 이리듬을 함유한 백금의 합금으로 만들어졌다는 것,
- 국제미터의 길이와 국제킬로그램의 질량이 프랑스 문서 보관국에 소장되어 있는 미터의 길이와 킬로그램의 질량과 동일하다는 것,
- 국가미터들과 국제미터 사이의 길이 차이가 0.01 밀리미터 이내이며 이 차이는 동일 조건이 보장되면 수소의 안정성 때문에 언제나 재현할 수 있는 수소온도계 눈금에 기초를 두고 있다는 것,
- 국가킬로그램들과 국제킬로그램 사이의 질량 차이가 1 밀리그램 이내라는 것,
- 국제미터와 국제킬로그램 그리고 국가미터들과 국가킬로그램들이 미터협약의 요구조건을 만족한다는 것을

## 고려하여

다음 사항들을 인준한다.

가. 국제원기에 대하여:

1. CIPM이 선정한 미터원기  
이제부터 이 원기는 얼음이 녹는 온도에서 길이의 미터단위를 나타낸다.
2. CIPM이 채택한 킬로그램원기  
이제부터 이 원기는 질량의 단위로 간주된다.
3. 미터원기의 관계식을 확립하는데 사용된 수소온도계의 백분눈금

나. 국가원기들에 대하여:

...

## 제3차 CGPM, 1901

## ■ 리터의 정의에 관한 선언 (CR, 38-39)\*

...

총회는 다음 사항을 선언한다.

1. 부피의 단위는 정확도를 높이기 위하여 질량 1 킬로그램의 순수한 물이 최대밀도와 표준 기압에서 차지하는 부피로 한다. 이 부피를 ‘리터’라 한다.
2. ...

\* 미터 정의는 1960년 제11차 CGPM에서 폐기되었다 (결의 사항 6, 53쪽 참조).

\* 이 정의는 1964년 제12차 CGPM에서 폐기되었다 (결의 사항 6, 56쪽 참조).

■ **질량의 단위와 무게의 정의에 관한 선언,  $g_n$ 의 협정값** (CR, 70)

킬로그램을 질량의 단위로 정의한 1887년 10월 15일 국제도량형위원회의 결정을 **고려하고**,  
1889년 9월 26일 국제도량형총회에서 만장일치로 승인된 미터계의 원기에 대한 인준에 포함된 결정사항을 **고려하고**,

무게라는 단어의 의미가 때로는 질량을, 때로는 역학적 힘을 나타내는데 사용되는 모호함을  
중식시킬 필요성을 **고려하여**,

**총회는 다음 사항을 선언한다.**

1. 킬로그램은 질량의 단위이며, 국제킬로그램원기의 질량과 같다.\*
2. ‘무게’라는 단어는 ‘힘’과 같은 성질의 양을 나타낸다. 한 물체의 무게는 그 질량과 중력가속도의 곱이며, 특히 한 물체의 표준 무게는 그 질량과 표준 중력가속도의 곱이다.
3. 국제도량형 지원본부에서 채택된 표준 중력가속도의 값은  $980.665 \text{ cm/s}^2$ 이고, 이 값은 이미 몇 나라의 법에 명기되어 있다.\*\*

\* 이 정의는 2018년 제26차 CGPM에서 폐기되었다 (결의사항 1, 90쪽 참조).

\*\* 이  $g_n$  값은 현재는 폐기된 단위인 킬로그램중을 계산하기 위한 협정 기준값이었다.

**제7차 CGPM, 1927**

■ **국제원기에 의한 미터의 정의** (CR, 49)\*

길이의 단위는 미터이며 이는 국제도량형국에 소장되어 있는 백금-이리듐 막대가 0°일 때 그 위에 표시되어 있는 두 중앙선의 축 사이의 거리로 정의되며 제1차 국제도량형총회 (CGPM)에서 미터원기로 선언되었고, 이 막대는 표준기압에서 서로 571 mm 떨어져서 동일 수평면 위에 대칭으로 위치해 있는 최소 직경이 1 센티미터인 두 원통 위에 놓여야 한다.

\* 이 정의는 1960년 제11차 CGPM에서 폐기되었다 (결의사항 6, 53쪽 참조).

**CIPM, 1946**

■ **광측정 단위의 정의** (PV, 20, 119-122)\*

**결의사항**

...

4. 광측정 단위는 다음과 같이 정의된다.

**신축광** (광도의 단위) - 신축광은 백금 응고점에서 완전 복사체의 밝기가 60 신축광 매 제곱 센티미터가 되는 값이다.

**신루멘** (광선속의 단위) - 신루멘은 1 신축광의 광도를 가지는 등방성 점광원에 의하여 단위 입체각 (스테라디안)으로 방출되는 광선속이다.

5. ...

\* 이 결의사항에 포함된 두 가지 정의는 1948년 제9차 CGPM에서 비준되었으며, 여기서 ‘신축광’에 주어진 명칭 칸델라를 승인하였다(CR. 54). 루멘의 경우, 수식어 ‘신’은 후에 폐기하였다. 이 정의는 1967년 제13차 CGPM에서 수정되었다 (결의사항 5, 59쪽 참조).

## ■ 전기단위의 정의 (PV, 20, 132-133)

### 결의사항 2

...

4. (가) 전기단위 정의의 구성 요소가 되는 역학단위의 정의 :

**힘의 단위** - 힘의 단위는 [MKS(미터, 킬로그램, 초)계에서] 1 킬로그램의 질량에 1 미터 매 제공초의 가속도를 주는 힘이다.

**줄** (에너지 또는 일의 단위) - 줄은 힘의 1 MKS 단위[뉴턴]의 작용점이 힘의 방향으로 1 미터의 거리를 움직일 때 한 일이다.

**와트** (일률의 단위) - 와트는 1초간에 1 줄의 에너지를 일으키는 일률이다.

(나) 전기단위의 정의. CIPM은 전기단위의 이론값을 정의하는 다음과 같은 제의를 수락한다 :

**암페어** (전류의 단위) - 암페어는 무한히 길고 무시할 수 있을 만큼 작은 원형 단면적을 가진 두 개의 평행한 직선 도체가 진공에서 1 미터의 간격으로 유지될 때 두 도체 사이에 매 미터당  $2 \times 10^{-7}$  힘의 MKS 단위[뉴턴]의 힘을 생기게 하는 일정한 전류이다.\*

**볼트** (전위차 및 기전력의 단위) - 볼트는 1 암페어의 일정한 전류가 흐르는 도선의 두 점 사이에서 소모되는 일률이 1 와트일 때 그 두 점 사이의 전위차이다.

**옴** (전기저항의 단위) - 옴은 기전력이 존재하지 않는 도체의 두 점 사이에 1 볼트의 일정한 전위차가 가해져서 1 암페어의 전류를 도체에 생기게 할 때 이 도체의 두 점 사이의 저항이다.

**쿨롱** (전기량의 단위) - 쿨롱은 1 암페어의 전류에 의해 1초 동안에 운반되는 전기량이다.

**패럿** (전기용량의 단위) - 패럿은 1 쿨롱의 전기량이 충전될 때 두 판 사이에 1 볼트의 전위차가 나타나는 축전기의 전기용량이다.

**헨리** (전기 인덕턴스의 단위) - 헨리는 전류가 1 암페어 매 초의 비율로 일정하게 변할 때 1 볼트의 기전력이 생성되는 폐회로의 인덕턴스이다.

**웨버** (자기선속의 단위) - 웨버는 1회 감긴 폐회로 속의 자기선속이 일정한 비율로 1초 동안에 소멸될 때에 그 회로에서 1 볼트의 기전력을 만드는 자기선속이다.

이 결의사항에 포함된 정의는 1948년 제9차 CGPM(CR, 49)에서 재가를 얻었으며, 또한 힘의 MKS 단위로서 뉴턴(결의사항 7, 51쪽 참조)이라는 명칭을 채택하였다.

1954년 제10차 CGPM(결의사항 6, 52쪽 참조)에서 국제적 사용을 위한 실용적 측정단위계가 구축되었다. 암페어는 이 단위계의 기본단위로 지정되었다.

\* 암페어에 대한 이 정의는 2018년 제26차 CGPM에 의해 폐기되었다 (결의사항 1, 90쪽 참조).

## 제9차 CGPM, 1948

### ■ 물의 삼중점, 단일 고정점을 가진 열역학적 눈금, 열량의 단위 (줄) (CR, 55 및 63)

#### 결의사항 3

1. 현재의 기술로 물의 삼중점은 얼음의 녹는점보다 더 정확한 온도 기준점이 될 수 있다. 따라서 온도측정 및 열량측정자문위원회(CCTC)는 백분법에 의한 열역학적 눈금의 영점은 순수한 물의 삼중점보다 0.0100 도 낮은 온도로 정의되어야 한다고 생각한다.

켈빈은 2018년 제26차 CGPM에서 재정의 되었다(결의 사항 1, 90쪽 참조).

2. CCTC는 현재 순수한 물의 삼중점을 단일 기본 고정점으로 하는 절대 열역학적 눈금의 원칙을 수락한다. 그 고정점의 절대온도는 후에 정할 것이다. 이 새로운 눈금의 도입은 실용 눈금으로 권고되어 있는 국제눈금을 사용하는 데는 전혀 영향을 주지 않는다.

3. 열량 단위는 줄(joule)이다.

주: 열량측정 실험의 결과는 가능한 한 줄로 표시하도록 한다. 열량측정 실험이 물의 온도상승과 비교함으로써 행해진다면(그리고 어떤 이유가 있어 칼로리를 사용하지 않을 수 없을 때에는) 줄로 환산하는데 필요한 정보를 반드시 제공하여야 한다. CIPM은 CCTC의 자문을 받아서 물의 비열에 관한 실험에서 얻을 수 있는 가장 정확한 값을 줄 매 도로 나타낸 표를 제공하여야 한다.

이 요청에 의하여 작성된 표는 1950년에 CIPM에서 승인되고 발간되었다 (PV, 22, 92).

#### ■ ‘섭씨도’의 채택 [CIPM, 1948 (PV, 21, 88) 및 제9차 CGPM, 1948 (CR, 64)]

온도를 나타내기 위하여 제안된 세 가지 명칭(‘백분도’, ‘백분법도’, ‘섭씨도’) 중에서 CIPM은 ‘섭씨도’를 선택하였다(PV, 21, 88).

이 명칭은 제9차 CGPM에서도 채택되었다(CR, 64).

#### ■ 실용 측정단위계의 확립을 위한 제안 (CR, 64)

##### 결의사항 6

국제도량형총회(CGPM)는,

- 국제도량형위원회(CIPM)가 국제물리학연맹(International Union of Physics)으로부터 국제적으로 통용될 실용 SI를 채택할 것을 요청받았으며, 또한 국제물리학연맹은 MKS계와 절대 실용 단위계 중 한 개의 전기단위를 추천하지만 물리학자들이 CGS계를 사용하지 말도록 권고하는 것은 아니라는 것,
- CGPM이 측정단위의 완벽한 명세를 확립하기 위한 토의의 기초자료로 사용될 초안과 함께 보내온 유사한 요구사항을 프랑스 정부로부터 접수한 것을

##### 고려하여

다음사항을 CIPM에 **지시한다**.

- 열의를 가지고 능동적으로 각국의 과학, 기술, 교육계에 공식적인 요청을 하여 의견을 조사할 것(그들에게 프랑스 정부의 문서를 기초자료로 제공함으로써),
- 답신을 회수하고 연구할 것,
- 미터협약에 가입한 모든 국가가 채택하기에 적합한 단일의 실용 측정단위계를 추천할 것.

■ 단위의호와 숫자의 표기 및 인쇄 (CR, 70)\*

결의사항 7

원 칙

일반적으로 직립형태의 소문자를 단위의 기호로 사용한다. 그러나 기호가 고유명사로부터 유래된 것이면 로마체(직립형태의 글자체) 대문자를 사용한다. 이들 기호 다음에는 마침표를 찍지 않는다.

숫자에서 반점(프랑스식)이나 온점(영국식)은 숫자의 정수 부분과 소수 부분을 나눌 때만 쓰인다. 숫자는 읽기에 편리하게 세 자리씩 묶어 써도 무방하지만 각 묶음 사이의 띄어 쓴 자리에 온점이나 반점을 사용해서는 안 된다.

\* CGPM은 단위와 용어에 대한 일부의 결정사항을 폐지하였는데, 특히 제13차 CGPM, 1967/68에서의 마이크로, 절대도 및 용어 'degree'와 deg'와(결의사항 7과 3, 60쪽과 58쪽 각각 참조) 제16차 CGPM, 1979, 에서의 리터(결의사항 6, 64쪽 참조) 등이 그것이다.

단 위	기 호	단 위	기 호
• 미터	m	암페어	A
• 제곱미터	m <sup>2</sup>	볼트	V
• 세제곱미터	m <sup>3</sup>	와트	W
• 마이크로	μ	옴	Ω
• 리터	l	쿨롱	C
• 그램	g	패럿	F
• 톤	t	헨리	H
초	s	헤르츠	Hz
에르그	erg	포아즈	P
다인	dyn	뉴턴	N
섭씨도	°C	• 칸델라(신축광)	cd
• 절대도	°K	럭스	lx
칼로리	cal	루멘	lm
바아	bar	스틸브	sb
시간	h		

주

1. 단위의 명칭 앞에 점이 있는 기호는 이미 CIPM의 결정에 따라 채택된 것이다.
2. 뿔나무의 부피를 나타내는 단위인 스테르의 기호는 'st'이며 종전에 CIPM이 정했던 's'가 아니다.
3. 어떤 한 온도가 아니고 온도 구간이나 온도 차를 나타낼 때는 단어 'degree'를 모두 쓰거나 약자인 'deg'를 사용하여야 한다.

제10차 CGPM, 1954

■ 열역학 온도눈금의 정의 (CR, 79)\*

결의사항 3

제10차 국제도량형총회(CGPM)는 물의 삼중점을 기본 고정점으로 선정하고, 그 온도를 정확히 273.16 켈빈도로 하는 열역학 온도눈금을 정의하기로 결정한다.

\* 1967년 13차 CGPM에서 켈빈을 명확하게 정의하였다 (결의사항 4, 59쪽 참조).

\* 켈빈은 2018년 제26차 CGPM에서 재정의 되었다 (결의사항 1, 90쪽 참조).

■ 표준대기압의 정의 (CR, 79)

결의사항 4

제10차 국제도량형총회(CGPM)는, 제9차 CGPM에서 사용된 표준대기압의 정의가 국제온도 눈금을 정의하는 과정에서 일부 물리학자들에게 표준대기압이 정확한 온도측정 작업에서만 유효하다고 믿게 만든다는 것에 주목하여 일반적으로 사용하도록 다음의 정의를 채택한다고 선언한다.

1 표준대기압 = 1 013 250 다인 매 제곱센티미터  
즉, 101 325 뉴턴 매 제곱미터

■ 실용 단위계 (CR, 80)\*

결의사항 6

국제적으로 사용될 실용 측정단위계의 확립에 관하여 제9차 국제도량형총회(CGPM)의 결정사항 6에서 제시된 요청에 따라 제10차 CGPM은 다음 단위들을 기본단위로 채택하기로 결정한다.

\* ‘켈빈도’의 단위명칭은 1967년에 ‘켈빈’으로 바뀌었다 (제13차 CGPM, 결의사항 3, 58쪽 참조).

길이 .....	미터
질량 .....	킬로그램
시간 .....	초
전류 .....	암페어
열역학 온도 .....	켈빈도
광도 .....	칸델라

CIPM, 1956

■ 시간 단위의 정의 (초) (PV, 25, 77)\*

결의사항 1

국제도량형위원회는 제10차 국제도량형총회의 결의사항 5에 의하여 그 권한을 위임받아,

1. 제9차 국제천문학연맹 총회(더블린, 1955)가 초를 태양년에 연관시키는데 찬성한다고 선언한 것,
2. 제8차 국제천문학연맹 총회(로마, 1952)의 결정사항에 따라 역표시(ET)의 초가 1900년 1월 0일 12시 ET에 대한 태양년의

\* 이 정의는 1967년에 폐기되었다(제13차 CGPM 결의사항 1, 58쪽 참조).

$$\frac{12960276813}{408986496} \times 10^{-9} \text{ 이라는 것을}$$

**고려하여**

“초는 역표시로 1900년 1월 0일 12시에 대한 태양년의 1/31 556 925.9747 이다”라고 **결정한다**.

**■ 국제단위계 (PV, 25, 83)****결의사항 3**

국제도량형위원회는,

- 미터협약을 따르는 모든 나라에서 채택하기에 적당한 실용 측정단위계의 확립에 관하여 제9차 국제도량형총회(CGPM)의 결의사항 6에 의하여 맡겨진 과제,
- 제9차 CGPM에 의해 요청된 질문에 응하여 21개국으로부터 받은 답변서,
- 확립될 단위계의 기본단위를 결정하는 제10차 CGPM의 결의사항 6을

**고려하여**

다음과 같이 **권고한다**.

1. 제10차 CGPM에서 채택된 기본단위를 바탕으로 이루어진 단위계에 ‘국제단위계’라는 명칭을 붙일 것 :  
[여기에 제11차 CGPM(1960)의 결의사항 12에 재록된 여섯 개 기본단위의 목록이 그 기호와 함께 실렸음]
2. 추후 추가될 수도 있는 다른 단위들도 배제하지 말고 아래 표에 실린 단위들을 사용할 것 :  
[여기에 제11차 CGPM(1960) 결의사항 12의 제4항에 다시 수록된 단위의 표가 실렸음].

**제11차 CGPM. 1960****■ 미터의 정의 (CR, 85)\*****결의사항 6**

제11차 국제도량형총회(CGPM)는,

- 국제원기가 현재 측정학에서 필요로 하는 정도의 충분한 정확도로 미터를 정의하지 못한다는 것,
- 자연현상을 이용한 불변의 표준을 채택하는 것이 더 바람직하다는 것을

**고려하여**

다음 사항을 **결정한다**.

1. 미터는 크립톤 86 원자의  $2p_{10}$ 과  $5d_5$  준위간의 전이에 대응하는 복사선의 진공에서의 1 650 763.73 파장과 같은 길이이다.
2. 1889년 이래 유효하였던, 백금-이리듐 국제원기에 기초를 둔 미터의 정의는 폐기한다.
3. 1889년 제1차 CGPM에서 인준된 국제미터원기는 1889년에 지정한 조건하에 BIPM에 보존한다.

\* 이 정의는 1983년에 폐기되었다(제17차 CGPM, 결의사항 1, 65쪽 참조).

■ 시간 단위의 정의 (초) (CR, 86)\*

결의사항 9

제11차 국제도량형총회(CGPM)는,

- 제10차 CGPM이 시간의 기본단위를 정의하도록 국제도량형위원회(CIPM)에 부여한 권한,
- 1956년 CIPM이 취한 결정사항을

고려하여,

다음 정의를 **비준한다**.

“초는 역표시로 1900년 1월 0일 12시에 대한 태양년의 1/31 556 925.9747 이다.”

\* 이 정의는 1967년에 폐기되었다(제13차 CGPM, 결의사항 1, 58쪽 참조).

■ 국제단위계 (CR, 87)\*

결의사항 12

제11차 국제도량형총회(CGPM)는,

- 국제적으로 사용될 실용 측정단위계를 확립하기 위하여 아래 6개의 기본단위를 채택한 제10차 CGPM의 결의사항 6 :

길이 .....	미터	m
질량 .....	킬로그램	kg
시간 .....	초	s
전류 .....	암페어	A
열역학 온도 .....	켈빈도	°K
광도 .....	칸델라	cd

- 1956년 국제도량형위원회(CIPM)가 채택한 결의사항 3,
- 단위계의 명칭에 대한 약칭과 단위의 십진배수 및 십진분수를 형성하기 위한 접두어에 관하여 1958년 CIPM에서 채택된 권고사항을

고려하여

다음 사항을 **결정한다**.

1. 상기 6개의 기본단위를 바탕으로 이루어진 단위계를 ‘SI’라 부른다.
2. 이 단위계 명칭의 국제적인 약칭은 SI이다.
3. 단위의 십진배수와 십진분수의 명칭은 다음의 접두어로 구성된다.

곱 할 인 자	접두어	기호	곱 할 인 자	접두어	기호
1 000 000 000 000 = 10 <sup>12</sup>	테라	T	0.1 = 10 <sup>-1</sup>	데시	d
1 000 000 000 = 10 <sup>9</sup>	기가	G	0.01 = 10 <sup>-2</sup>	센티	c
1 000 000 = 10 <sup>6</sup>	메가	M	0.001 = 10 <sup>-3</sup>	밀리	m
1 000 = 10 <sup>3</sup>	킬로	k	0.000 001 = 10 <sup>-6</sup>	마이크로	μ
100 = 10 <sup>2</sup>	헥토	h	0.000 000 001 = 10 <sup>-9</sup>	나노	n
10 = 10 <sup>1</sup>	데카	da	0.000 000 000 001 = 10 <sup>-12</sup>	피코	p

\* CGPM은 후에 결정사항 중 몇 가지를 폐기하고 접두어의 목록을 확장하였다. 다음의 주석 참조

열역학 온도의 단위명칭과 기호는 제13차 CGPM에서 수정되었다(1967-1968, 결의사항 3, 58쪽 참조).

일곱 번째 기본단위인 몰은 제14차 CGPM에서 채택되었다(1971, 결의사항 3, 61쪽 참조).

제12차 CGPM(1964, 결의사항 8, 57쪽 참조), 제15차 CGPM(1975, 결의사항 10, 63쪽), 제19차 CGPM(1991, 결의사항 4, 69쪽)에서 새로운 접두어가 채택되었다.

- 4. 추후에 추가될 지도 모르는 다른 단위들도 배제하지 않으면서 아래에 기재된 단위들은 이 단위계에서 사용된다.

**보충단위**

평면각 .....	라디안	rad	
입체각 .....	스테라디안	sr	

제20차 CGPM은 SI의 보충단위 부류를 폐기하였다(1995, 결의사항 8, 70쪽 참조). 현재는 이들은 유도단위로 간주된다.

**유도단위**

넓이 .....	제곱미터	$m^2$	
부피 .....	세제곱미터	$m^3$	
진동수, 주파수 .....	헤르츠	Hz	1/s
질량밀도(밀도) .....	킬로그램 매 세제곱미터	$kg/m^3$	
속력, 속도 .....	미터 매 초	m/s	
각속도 .....	라디안 매 초	rad/s	
가속도 .....	미터 매 제곱초	$m/s^2$	
각가속도 .....	라디안 매 제곱초	$rad/s^2$	
힘 .....	뉴턴	N	$kg \cdot m/s^2$
압력(역학적 응력) .....	뉴턴 매 제곱미터	$N/m^2$	
동적 점성도 .....	제곱미터 매 초	$m^2/s$	
점성도 .....	뉴턴-초 매 제곱미터	$N \cdot s/m^2$	
일, 에너지, 열량 .....	줄	J	$N \cdot m$
일률, 전력 .....	와트	W	J/s
전기량 .....	쿨롱	$CA \cdot s$	
전압, 전위차, 기전력 .....	볼트	V	W/A
전기장의 세기 .....	볼트 매 미터	V/m	
전기저항 .....	옴	$\Omega$	V/A
전기용량 .....	패럿	F	$A \cdot s/V$
자기선속 .....	웨버	Wb	$V \cdot s$
인덕턴스 .....	헨리	H	$V \cdot s/A$
자기선속밀도 .....	테슬라	T	$Wb/m^2$
자기장의 세기 .....	암페어 매 미터	A/m	
기자력 .....	암페어	A	
광선속 .....	루멘	lm	$cd \cdot sr$
휘도 .....	칸델라 매 제곱미터	$cd/m^2$	
조명도 .....	럭스	lx	$lm/m^2$

제13차 CGPM(1967, 결의사항 6, 59쪽 참조)은 이 목록에 추가되어야 할 다른 단위들을 명시하였다. 원칙적으로 유도단위의 목록에는 제한이 없다.

현재의 실용표현은 열량에 대하여 'quantity of heat' 대신에 'amount of heat'를 사용하는데, 이는 측정학에서 양(quantity)은 다른 의미를 가지기 때문이다.

현재의 실용표현은 전기량에 대해서 'quantity of electricity' 대신에 'amount of electricity'를 사용한다 (위의 주석 참조).

■ **세제곱 데시미터와 리터 (CR, 88)**

**결의사항 13**

제11차 국제도량형총회(CGPM)는,

- 세제곱 데시미터와 리터가 동일하지 않으며 약  $10^6$  분의 28만큼 차이가 있다는 것과,

- 부피측정과 관련된 물리량의 결정이 더욱 정확하게 이루어짐에 따라 세제곱 데시미터와 리터 사이에 혼동의 위험성이 증가되고 있다는 것을

**고려하여**

CIPM이 이 문제점을 연구 검토하여 그 결과를 제12차 CGPM에 제출하여 줄 것을 **요청한다.**

**CIPM, 1961**

- **세제곱 데시미터와 리터 (PV, 29, 34)**

**권고사항**

국제도량형위원회는 부피의 정확한 측정결과를 리터가 아니고 SI의 단위로 나타낼 것을 권고한다.

**CIPM, 1964**

- **원자 및 분자 주파수 표준 (PV, 32, 26)**

**선언사항**

국제도량형위원회는,

제12차 CGPM의 결의사항 5에 의하여 물리학에서 시간 측정에 잠정적으로 사용할 원자나 분자 주파수표준을 지정할 권한을 **위임받아,**

앞으로 사용할 표준은 외부 장(external field)에 의한 섭동이 없는 세슘 133 원자의 바닥상태  $^2S_{1/2}$ 의 초미세 전이  $F = 4, M = 0$ 와  $F = 3, M = 0$  간의 전이로 하며, 이 전이의 주파수를 9 192 631 770 헤르츠로 할 것을 **선언한다.**

**제12차 CGPM, 1964**

- **원자 주파수 표준 (CR, 93)**

**결의사항 5**

제12차 국제도량형총회(CGPM)는,

- 제11차 CGPM이 결의사항 10에서 정확한 측정학을 위하여 원자나 분자 시간 표준을 시급히 채택해야할 것을 언급한 것과
- 세슘 원자 주파수 표준기를 이용하여 이미 결과를 얻었지만 현재 진행 중인 연구로부터 새롭고도 주목할 만한 개선이 얻어질 것으로 예상되어 아직은 CGPM이 SI의 기본단위인 초의 새 정의를 채택할 시기가 아니라는 것을 **고려하고,**

또한, 물리학에서의 시간 측정이 원자나 분자 주파수 표준에 기초를 두게 하는 것을 더 이상 지연시키는 것이 바람직하지 못하다는 것을

**고려하여,**

당분간 사용할 원자나 분자 주파수 표준을 지정할 권한을 CIPM에 부여하며, 이 분야에 지식이 있는 기관이나 연구소가 초의 새로운 정의와 관계있는 연구를 계속할 것을 **요청한다.**

■ 리터 (CR, 93)

**결의사항 6**

제12차 국제도량형총회(CGPM)는,

1960년 제11차 CGPM에서 채택된 결의사항 13과 1961년 국제도량형위원회에서 채택된 권고사항을 **고려하여**

1. 1901년에 제3차 CGPM에 의하여 주어진 리터의 정의를 **폐기한다**.
2. '리터'라는 단어가 세제곱데시미터의 특별한 명칭으로 사용될 수 있음을 **선언한다**.
3. 리터라는 명칭을 정확도가 높은 부피측정에 대한 결과를 표시할 경우에는 사용하지 말 것을 **권고한다**.

■ 퀴리 (CR, 94)\*

**결의사항 7**

제12차 국제도량형총회(CGPM)는,

퀴리가 방사성 핵종의 방사능 단위로서 여러 나라에서 오랫동안 사용되어 오고 있음을 **고려하고**, SI에서 이 방사능의 단위는 초의  $-1$ 제곱( $s^{-1}$ )임을 **인정하여**, 퀴리는  $3.7 \times 10^{10} s^{-1}$ 의 값을 가지는 방사능의 단위로서 SI 이외에 병용단위로 계속 사용함을 **허용한다**. 이 단위의 기호는 Ci이다.

\* 명칭 '베크렐(Bq)'이 제15차 CGPM 회의 (1975, 결의사항 8, 62쪽 참조)에서 방사능의 SI 단위로 채택되었다 :  
1 Ci =  $3.7 \times 10^{10}$  Bq.

■ SI 접두어 펨토와 아토 (CR, 94)\*

**결의사항 8**

제12차 국제도량형총회(CGPM)는

제11차 CGPM, 결의사항 12, 제3항에서 채택된 단위의 십진배수 및 십진분수에 대한 명칭을 구성하기 위한 접두어의 목록에 다음 두 개의 새 접두어들을 추가하기로 **결정한다** :

곱할 인자	접두어	기호
$10^{-15}$	펨토	f
$10^{-18}$	아토	a

\* 제15차 CGPM (1975, 결의사항 10, 63쪽 참조)에서 새로운 접두어가 추가되었다.

CIPM, 1967

■ 질량단위의 십진배수 및 십진분수 (PV, 35, 29 및 *Metrologia*, 1968, 4, 45)

**권고사항 2**

국제도량형위원회는,

제11차 CGPM(1960)의 결의사항 12, 제3항에 있는 단위의 십진배수 및 십진분수의 명칭을 형성하는 규칙이 질량의 단위에 적용될 때는 다르게 해석될 수 있다는 것을 **고려하여**

제11차 CGPM 결의사항 12의 규칙이 킬로그램에는 다음 방법으로 적용됨을 **선언한다**: 질량단위의 십진배수 및 십진분수의 명칭은 '그램'이란 단어에 접두어를 붙여서 형성된다.

제13차 CGPM, 1967/68

■ 시간의 SI 단위 (초) (CR, 103 및 *Metrologia*, 1968, 4, 43)

결의사항 1

제13차 국제도량형총회(CGPM)는,

- 1956년 국제도량형위원회(CIPM)(결의사항 1)에서 채택되어, 제11차 CGPM(1960)의 결의사항 9에 의해서 비준되고 그 후 제12차 CGPM(1964)의 결의사항 5에 의해서 지지받은 초의 정의가 현재 측정학의 요구에는 적합하지 못하다는 것,
- 제12차 CGPM(1964)의 결의사항 5에 의해서 권한을 위임받은 CIPM이 이 요구를 충족시키기 위하여 1964년 회의에서 세슘 원자 주파수 표준을 잠정적으로 사용하도록 권고한 것,
- 충분한 시험을 거쳐 이 주파수 표준이 현재의 요구를 충족시킬 초의 정의를 제공하기에 충분히 정확하다고 증명된 것,
- 현재 SI의 시간의 단위로 사용 중인 정의를 이제는 원자 표준에 바탕을 둔 원자 정의로 대체할 때가 되었다는 것을

고려하여

다음 사항을 결정한다.

1. 시간의 SI 단위는 다음과 같이 정의된 초이다.  
 “초는 세슘 133 원자(<sup>133</sup>Cs)의 바닥상태에 있는 두 초미세 전이 사이의 전이에 대응하는 복사선의 9 192 631 770 주기의 지속시간이다.”
2. CIPM이 1956년 회의에서 채택한 결의사항 1과 제11차 CGPM의 결의사항 9는 이제 폐기한다.

1997년 CIPM 회의에서 이 정의는 열역학 온도 0 K에서 정지해 있는 세슘 원자에 적용된다는 것을 확실히 하였다. 초의 정의에 대한 표현은 2018년 제26차 CGPM에서 수정되었다(결의사항 1, 90쪽 참조).

■ 열역학 온도의 SI 단위 (켈빈) (CR, 104 및 *Metrologia*, 1968, 4, 43)\*

결의사항 3

제13차 국제도량형총회(CGPM)는,

- 제9차 CGPM(1948)의 결의사항 7과 제11차 CGPM(1960)의 결의사항 12 및 1962년에 CIPM에서 채택된 결정사항(PV, 30, 27)에 주어진 명칭 ‘켈빈도’와 ‘도’, 기호 ‘°K’와 ‘deg’ 및 이들의 사용에 관한 규칙과,
- 열역학 온도의 단위와 온도 구간의 단위가 하나이고, 단일명칭과 단일기호로 표시해야 하는 동일 단위라는 것을

고려하여

다음 사항을 결정한다.

1. 열역학 온도의 단위를 ‘켈빈’이란 명칭으로 나타내고, 그 기호는 ‘K’이며,\*\*
2. 온도 구간을 표시하는데 동일한 명칭과 기호를 사용하며,
3. 온도 구간은 섭씨도로도 표시할 수 있고,
4. 서두에서 언급한 열역학 온도 단위의 명칭 및 온도 구간이나 온도 차를 나타내는 단위의 기호 및 그 지정에 관한 결정은 폐기하나 이 결정들에 따른 사용은 당분간 허용한다.

\* 1980년 회의에서 CIPM은 기호 ‘°K’ 및 ‘deg’의 사용을 더 이상 허용하지 않아야 된다는 CCU의 7차 회의 보고서를 승인하였다.

\*\* 켈빈의 정의에 포함되어있는 물의 동위원소 조성에 대한 CIPM의 권고사항 2 (CI-2005), 76쪽 참조.

■ 열역학 온도의 SI 단위(켈빈)의 정의 (CR, 104 및 *Metrologia*, 1968, 4, 43)\*

\* 1990년 국제온도눈금에 대한 CIPM의 권고사항 5 (CI-1989), 69쪽 참조

**결의사항 4**

제13차 국제도량형총회(CGPM)는,

제10차 CGPM(1954)의 결의사항 3에 있는 열역학 온도 단위의 정의를 보다 명확하게 공식화하는 것이 유용하다는 점을 **고려하여**,

이 정의를 다음과 같이 표현하기로 **결정한다**.

“열역학 온도의 단위인 켈빈은 물의 삼중점에 해당하는 열역학 온도의 1/273.16이다.”

\* 켈빈은 2018년 제26차 CGPM에서 재정의 되었다(결의사항 1, 90쪽 참조).

■ 광도의 SI 단위 (칸델라) (CR, 104 및 *Metrologia*, 1968, 4, 43-44)\*

\* 이 정의는 제16차 CGPM에서 폐기되었다 (1979, 결의사항 3, 63쪽 참조).

**결의사항 5**

제13차 국제도량형총회(CGPM)는,

- 제9차 CGPM(1948)에서 비준되었고, 제8차 CGPM(1933)로부터 위임받은 권한으로 1946년 CIPM(PV, 20, 119)이 채택한 ‘광측정 단위 변경에 관한 결의사항’에 담겨진 광도 단위의 정의와

- 그 정의가 광도의 단위를 확고히 함에 관하여 만족스러우나, 그 문구가 비평의 여지가 있다는 것을

**고려하여**,

칸델라의 정의를 다음과 같이 표현하기로 **결정한다**.

“칸델라는 101 325 뉴턴 매 제곱미터의 압력 하에서 백금 응고점에 유지된 흑체의 표면 1/600 000 제곱미터의 수직 방향에 대한 광도이다.”

■ SI 유도단위 (CR, 105 및 *Metrologia*, 1968, 4, 44)\*

\* 방사능의 단위에는 제15차 CGPM 회의에서 특별한 명칭과 기호가 주어졌다 (1975, 결의사항 8, 62쪽 참조).

**결의사항 6**

제13차 국제도량형총회(CGPM)는,

제11차 CGPM(1960)의 결의사항 12, 제4항의 목록에 몇 개의 유도단위를 추가하는 것이 유용하다는 것을 **고려하여**

다음을 추가하기로 **결정한다**:

파동수 .....	1 매 미터	$m^{-1}$
엔트로피 .....	줄 매 켈빈	J/K
비열용량 .....	줄 매 킬로그램 켈빈	J/(kg · K)
열전도도 .....	와트 매 미터 켈빈	W/(m · K)
복사도 .....	와트 매 스테라디안	W/sr
(방사성 선원의) 방사능 .....	1 매 초	$s^{-1}$

■ 기존 결정의 폐기 (마이크론, 신축광) (CR, 105 및 *Metrologia*, 1968, 4, 44)

**결의사항 7**

제13차 국제도량형총회(CGPM)는,

SI에 관한 총회의 새로운 결정들이 제9차 CGPM(1948)의 결의사항 7의 일부와는 호환성이 없음을 **고려하여**

제9차 총회의 결의사항 7로부터 다음 사항을 삭제하기로 **결정한다**:

1. 단위명칭 '마이크론'과 그 단위의 기호 'μ', 이제는 'μ'는 접두어로만 사용됨.
2. 단위명칭 '신축광'

**CIPM. 1969**

■ 국제단위계, 제11차 CGPM(1960)의 결의사항 12의 적용에 관한 규칙 (PV, 37, 30 및 *Metrologia*, 1970, 6, 66)\*

**권고사항 1**

국제도량형위원회(CIPM)는,

SI에 관한 제11차 국제도량형총회(CGPM)(1960)의 결의사항 12가 일부 논의 사항을 야기 했다는 것을 **고려하여**

다음과 같이 **선언한다**.\*\*

1. 일관성 있는 집합을 형성하는 SI의 기본단위, 보충단위 및 유도단위들을 SI 단위라고 명명 한다.
2. SI 단위의 십진배수 및 십진분수를 형성하기 위하여 CGPM이 채택한 접두어를 'SI 접두어' 라고 부른다.

그리고 다음과 같이 **권고한다**.

3. SI 단위들과 SI 접두어에 의해서 그 명칭이 형성된 SI 단위의 십진배수 및 십진분수들을 사용할 것.

주: 제11차 CGPM의 결의사항 12(또한 이 권고사항)에 나타난 '보충단위'라는 명칭은 총회에서 기본단위인 지 유도단위인 지가 분명히 밝혀지지 않은 SI 단위에 대하여 주어졌다.

\* 제20차 CGPM은 SI의 보충단위 부류를 폐기하기로 결정하였다(1995, 결의사항 8, 70쪽 참조).

\*\* 2001년 CIPM은 'SI 단위'와 'SI의 단위'의 정의를 명확히 하는 CCU의 제안을 승인하였다(71쪽 참조).

이 정의는 1991년 국제천문연맹 결의사항 A4에 자세히 설명되어 있다: "TAI는 구현된 시간 눈금으로 이상적인 형태는 32.184 s의 일정한 오프셋을 배제한 지구시간(TT)인데, 지구시간은 지구중심 좌표계의 시간좌표인 지구중심 좌표시(TCG)와 일정한 비례 관계를 가진다." (Proc. 21st General Assembly of the IAU, *IAU Trans.*, 1991, vol. **XXIB**, Kluwer 참조.)

**CCDS, 1970 (In CIPM, 1970)**

■ TAI의 정의 (PV, 38, 110-111 및 *Metrologia*, 1971, 7, 43)

**권고사항 S 2**

국제원자시(TAI)는 SI의 시간 단위인 초의 정의에 따라 여러 기관에서 동작시키고 있는 원자 시계의 값들을 바탕으로 국제시보국(BIH)에서 확립한 시간의 기준좌표이다.

1980년 TAI의 정의는 다음과 같이 완성되었다. (CCDS의 선언: *BIPM Com. Cons. Déf. Seconde*, 1980, 9, S15 및 *Metrologia*, 1981, 17, 70).

TAI는, 회전하고 있는 지오이드에서 척도 단위로 구현된 SI 초를 가지고 지구 중심 기준계에서 정의된 협정시간 척도이다.

## 제14차 CGPM, 1971

## ■ 파스칼과 지멘스 (CR, 78)

제14차 국제도량형총회(CGPM)는 뉴턴 매 제곱미터의 SI 단위로서 ‘파스칼’(기호 Pa)을, 전기 전도도[역옴]의 SI 단위로서 ‘지멘스’(기호 S)를 채택하였다.

■ 국제원자시, CIPM의 기능 (CR, 77 및 *Metrologia*, 1972, 8, 35)

## 결의사항 1

제14차 국제도량형총회(CGPM)는,

- SI에서 시간의 단위인 초가 1967년 이래 자연의 원자 주파수로 정의되어 왔으며, 더 이상 천체운동에 의한 시간적으로 정의되지 않는다는 것,
- 국제원자시(TAI) 척도의 필요성은 초의 원자적인 정의에 따른 결과라는 것,
- 몇 개의 국제기구가 천체운동에 기초를 둔 시간척도의 확립을 보증해 왔고 아직도 성공적으로 보증하고 있으며, 특히 국제시보국(BIH)의 지속적인 지원에 감사하며,
- 특성을 인정받고 유용성이 증명된 원자시간 척도를 국제시보국이 확립하기 시작한 것,
- 초를 구현하는 원자 주파수 표준이 자문위원회의 도움을 받아 국제도량형위원회(CIPM)에 의해서 고려되었으며 또 계속 고려되어야 하고, 원자시간 척도의 단위간격이 원자적 정의에 따라 구현되는 초라는 것,
- 이 분야에서 활동하는 모든 능력 있는 국제 과학기구와 국립연구소가 CIPM과 CGPM이 국제원자시의 정의를 내려 주고, 국제원자시의 척도 확립에 기여해 주기를 희망한다는 의사를 표시한 것,
- 국제원자시의 유용성은 천체운동에 바탕을 둔 시간척도와 긴밀한 조정을 필요로 한다는 것을

## 고려하여

다음 사항을 CIPM에 요청한다.

1. 국제원자시의 정의를 내릴 것,
2. 관련 국제기구의 동의를 얻어 필요한 절차를 통하여, 현재 있는 모든 과학 능력과 설비를 국제원자시간 척도를 구현하는데 최선의 방법으로 사용하고, 국제원자시 사용자의 요구를 충족시킬 것.

TAI의 정의는 1970년 CCDS(현재는 CCTF)에서 정해졌다(CCDS 보고서 22쪽 참조).

■ 물질량의 SI 단위 (몰) (CR, 78 및 *Metrologia*, 1972, 8, 36)\*

## 결의사항 3

제14차 국제도량형총회(CGPM)는,

물질량의 단위를 정의할 필요성에 관한 국제순수응용물리연맹, 국제순수응용화학연맹과 국제표준화기구의 조언을 고려하여

다음과 같이 결정한다.

1. 몰은 탄소 12의 0.012 킬로그램에 있는 원자의 개수와 같은 수의 구성 요소를 포함한 어떤 계의 물질량이다. 그 기호는 ‘mol’이다.\*\*
2. 몰을 사용할 때에는 구성 요소를 반드시 명시해야 하며 이 구성 요소는 원자, 분자, 이온,

\* CIPM은 1980년 회의에서 “이 정의에서 탄소 12는 정지 상태이며 바닥상태에 있는 속박되어 있지 않은 원자를 가리킨다.”라고 명시한 CCU(1980)의 제7차 회의 보고서를 승인하였다.

\*\* 몰은 2018년 제26차 CGPM에서 재정의 되었다(결의사항 1, 90쪽 참조).

- 전자, 기타 입자 또는 이 입자들의 특정한 집합체가 될 수 있다.  
 3. 몰은 SI의 기본단위이다.

**제15차 CGPM, 1975**

■ **빛의 속력에 대한 권고값** (CR, 103 및 *Metrologia*, 1975, 11, 179-180)

**결의사항 2**

제15차 국제도량형총회(CGPM)는  
 가시광선 또는 적외선 영역에서 하나의 분자 흡수선에 안정화된 레이저 복사선들의 파장 측정 결과들이 미터 구현의 불확도인  $\pm 4 \times 10^{-9}$  정도로 서로 매우 잘 일치함을 **고려하고**,  
 또 몇 가지 복사선들의 주파수 측정 결과들이 잘 일치함을 **고려하여**,  
 진공에서 전자파의 진행 속력으로 그 결과값  $c = 299\,792\,458$  미터 매 초를 사용할 것을 **권고한다**.

여기에 주어진 상대불확도는 고려된 데이터의 표준편차의 3배에 해당된다.

■ **세계협정시 (UTC)** (CR, 104 및 *Metrologia*, 1975, 11, 180)

**결의사항 5**

제15차 국제도량형총회(CGPM)는,  
 ‘세계협정시(UTC)’라고 불리는 체계는 널리 사용되고 있고, 또한 대부분의 시간신호 방송을 통하여 전송되고 있으므로, 이와 같은 보편적인 보급으로 주파수 표준 뿐 아니라 국제원자시와 세계시(또는 평균태양시)의 근사값으로 많은 사용자들이 이용할 수 있게 된 것을 **고려하고**,  
 세계협정시가 일반인들을 위한 시간의 기반을 제공하고, 이를 사용하는 것이 대부분의 국가에서 합법적이라는 것을 **주목하여**,  
 이것의 사용을 강력히 추천할 수 있다고 **판단한다**.

■ **전리방사선에 대한 SI 단위 (베크렐, 그레이)** (CR, 105 및 *Metrologia*, 1975, 11, 180)\*

**결의사항 8과 9**

제15차 국제도량형총회(CGPM)는,  
 방사선 연구 및 응용에 SI의 사용을 확대하기 위하여 국제방사선 단위 및 측정 위원회(ICRU)에 의해서 표현된 절실한 요구와 또한 비전문가들에게 방사선 단위의 사용을 가급적 쉽게 하기 위한 필요성 때문에  
 방사선 치료 작업 중 범할 수 있는 중대 과오의 위험을 고려하여 방사능의 SI 단위에 대한 다음의 특수명칭을 **채택한다**:

기호가 Bq인 **베크렐**은 1 역초와 같다(결의사항 8).

전리방사선 분야의 SI 단위에 대한 다음의 특별한 명칭을 **채택한다**:

기호가 Gy인 **그레이**는 1 줄 매 킬로그램과 같다(결의사항 9).

주: 그레이는 흡수선량의 SI 단위이다. 또한 전리방사선 분야에서 그레이는 줄 매 킬로그램으로 표시된 다른 물리량들과 함께 사용될 수 있다: 단위자문위원회는 유능한 국제기구들과 협력하여 이러한 문제를 연구할 책임을 진다.

\* CIPM은 1976년 회의에서 ICRU의 권유에 따라 그레이가 비부여 에너지, 커마, 흡수선량의 표시에도 사용될 수 있음을 명시하며 제5차 CCU(1976) 회의의 보고서를 승인하였다.

■ SI 접두어 페타와 엑사 (CR, 106 및 *Metrologia*, 1975, 11, 180-181)\*

**결의사항 10**

제15차 국제도량형총회(CGPM)는

제11차 CGPM, 결의사항 12, 제3항에 의하여 채택된 배수에 사용되는 SI 접두어 목록에 다음 두 개의 접두어들을 추가하기로 **결정한다**:

곱할 인자	접두어	기호
$10^{15}$	페타	P
$10^{18}$	엑사	E

\* 1991년 제19차 CGPM에서 새로운 접두어가 추가되었다 (결의사항 4, 69쪽 참조).

**제16차 CGPM, 1979**

■ 광도의 SI 단위 (칸델라) (CR, 100 및 *Metrologia*, 1980, 16, 56)

**결의사항 3**

제16차 국제도량형총회(CGPM)는,

- 몇 연구소의 탁월한 노력에도 불구하고 현재의 흑체 원기에 기초를 둔 칸델라의 구현 결과들 사이에 너무 큰 차이가 여전히 존재하는 것,
- 복사측정기술이 빠르게 발전하고 있어서, 이미 광측정 기술에서와 동등한 정밀도를 얻을 수 있으며, 그러한 기술이 흑체를 제작하지 않고도 칸델라를 구현할 수 있는 방법으로 각 국립 연구소에서 이미 사용되고 있는 것,
- 광측정에서의 광량과 복사측정량 사이의 관계, 즉 주파수  $540 \times 10^{12}$  헤르츠 단색광의 분광 시감효능에 대해 683 루멘 매 와트라는 값이 1977년에 CIPM에서 채택된 것,
- 이 값은 밝은 빛 시감량에 대해 충분히 정확하다고 받아들여지고 있으며 어두운 빛 시감량에 대해서도 단지 3 % 정도의 변경만을 의미하기 때문에 만족스런 연속성 유지를 가능하게 하는 것,
- 광도표준 구현의 용이성과 정밀도를 개선할 수 있도록 하기 위해, 또한 밝은 빛 측광량과 어두운 빛 측광량에 모두 적용할 수 있고 앞으로 정의되어야 할 희미한 빛 시감측정 분야에도 적용할 수 있도록 하기 위한 칸델라의 새로운 정의를 내릴 시기가 된 것을

**고려하여,**

다음 사항을 **결정한다**.

1. 칸델라는 진동수가  $540 \times 10^{12}$  헤르츠인 단색광을 방출하는 광원의 복사도가 어떤 주어진 방향으로 매 스테라디안 당 1/683 와트일 때 이 방향에 대한 광도이다.
2. 1933년 제8차 CGPM의 위임을 받아 1946년에 CIPM에서 채택되었고, 1948년 제9차 CGPM에서 비준되고, 1967년 제13차 CGPM에서 수정된 칸델라(그 당시 신축광으로 불림)의 정의는 폐기한다.

칸델라의 정의에 대한 표현은 2018년 제26차 CGPM에서 수정되었다(결의 사항 1, 90쪽 참조).

밝은 빛 시감은 눈의 망막에 있는 원추세포에 의해서 감지되는데 원추세포는 높은 수준의 광휘도( $L > \text{약 } 10 \text{ cd/m}^2$ )에서 민감하며 낮 시간의 시감에 사용된다.

어두운 빛 시감은 눈의 망막에 있는 간상세포에 의해서 감지되는데 간상세포는 낮은 수준의 광휘도( $L < \text{약 } 10^{-3} \text{ cd/m}^2$ )에서 민감하며 야간 시감에 사용된다.

이들 두 값의 중간 수준의 광휘도에서는 원추세포와 간상세포 모두 사용되며 이를 희미한 빛 시감이라고 한다.

■ **선량당량의 SI 단위에 대한 특별한 명칭 (시버트)** (CR, 100 및 *Metrologia*, 1980, 16, 56)\*

\* 1984년 CIPM은 이 결의사항에 설명을 추가하기로 결정하였다(권고사항 1, 66쪽 참조).

**결의사항 5**

제16차 국제도량형총회(CGPM)는,

- 전리방사선 분야에 SI 단위를 도입하려고 경주한 노력,
- 과소평가된 방사선량의 인간에 대한 위험성과 흡수선량과 선량당량 사이의 혼동으로 일어날 수 있는 위험성,
- 특별한 명칭의 증가가 SI에 대한 일종의 위험을 의미하며 따라서 모든 가능한 방법을 동원하여 피하여야 하나, 인간의 건강에 대한 안전의 문제인 경우에는 이 원칙이 깨질 수도 있다는 것을

**고려하여**

방사선방호 분야에서 선량당량에 대한 SI 단위로서 기호가 Sv인 특별한 명칭 시버트를 **채택한다**. 시버트는 줄 매 킬로그램과 같다.

■ **리터에 대한 기호** (CR, 101 및 *Metrologia*, 1980, 16, 56-57)

**결의사항 6**

제16차 국제도량형총회(CGPM)는,

제9차 CGPM(1948)의 결의사항 7에서 단위기호 표기에 관하여 채택된 일반 원칙을 인정하고, 리터 단위에 대한 기호 l이 1879년 국제도량형위원회(CIPM)에 의해 채택되어 1948년의 동일 결의사항에서 확인되었음을 **고려하고**,

문자 l과 숫자 1의 혼동의 위험성을 피하기 위하여 여러 국가에서는 리터 단위에 l 대신 L을 채택하였음을 **고려하며**,

리터라는 명칭은 SI에 포함되어 있지는 않으나 이 단위계와 함께 일반적인 사용이 허용되어야 한다는 것을 **고려하여**

예외로, 리터 단위에 사용할 기호로 두 기호 l과 L을 채택하기로 **결정한다**.

또한 장래에는 두 기호 중 하나만을 사용하여야 함을 **고려하여**

이 두 기호가 사용되는 추세를 보아서 제18차 CGPM에 그 중 하나를 폐기할 수 있는 가능성에 대한 의견을 제시하도록 CIPM에 **요청한다**.

1990년에 CIPM은 리터에 대한 기호로 하나만을 선택하는 것이 아직 너무 이르다고 생각하였다.

**CIPM, 1980**

■ **SI 보충단위 (라디안과 스테라디안)** (PV, 48, 24 및 *Metrologia*, 1981, 17, 72)\*

\* SI 보충단위 부류는 제20차 CGPM의 결정(아래에 주어진 1995년 결의사항 8, 70쪽 참조)에 의하여 폐기되었다.

**권고사항 1**

국제도량형위원회(CIPM)는

1978년 ISO/TC 12에 의하여 채택된 결의사항 3과 제7차 단위자문위원회(CCU)에서 채택한 권고사항 U 1(1980)을 **고려하고**,

- 스테라디안이 다른 양에 대응되는 단위를 구별하는데 중요한 역할을 하는 광도측정에서와 같이 명확한 구별이 필요할 때 단위에 대한 표현으로 라디안과 스테라디안이란 단위가 보통 도입된다는 것,
- 관계식에서 일반적으로 평면각은 두 길이의 비로서, 입체각은 면적과 길이의 제곱 사이의 비로서 표현되므로, 이 두 개의 양은 무차원 양으로 취급된다는 것,
- 과학 분야에서 사용되는 공식들을 조사하여 보면 일관성과 편리성을 동시에 만족할 수 없으며, 평면각이나 입체각을 기본량으로 생각할 수 있는 분야도 존재하지 않음을 알게 된다는 것을

#### 고려하고, 또한

- 1960년 제11차 CGPM의 결의사항 12에서 도입되었던 보충단위 부류에 대하여 1969년 CIPM에 의해 내려진 해석은 라디안과 스테라디안을 SI 기본단위로 취급할 수 있는 자율성을 허용하였고,

- 그러한 가능성은 단지 7개의 기본단위를 근거로 한 SI의 내부적 일관성을 저하시킨다는 것을

#### 고려하여

SI 유도단위를 표현하는데 있어 CGPM이 사용의 가부에 관한 자율성을 허용한 SI의 보충단위 부류를 무차원 유도단위 부류로 해석하기로 **결정한다**.

### 제17차 CGPM, 1983

#### ■ 미터의 정의 (CR, 97 및 *Metrologia*, 1984, 20, 25)

##### 결의사항 1

제17차 국제도량형총회는

- 현재의 정의로는 모든 요구에 부응하는 충분히 정확한 미터의 구현이 불가능하며,
- 레이저 안정화의 발전으로 인하여 크립톤 86 램프로부터 방출되는 표준 복사선보다 더 재현성 있고 사용하기 쉬운 복사선을 얻을 수 있고,
- 이러한 복사선에 대한 주파수와 파장 측정의 진보로, 현재의 미터 정의의 구현에 의하여 주로 그 정확도가 제한되고 있는 빛의 속력에 대하여 현재의 빛의 속력에 일치하는 측정값들을 얻게 되었고,
- 주파수의 측정과 주어진 빛의 속력값으로부터 구한 파장이 크립톤 86 표준 복사선의 파장과 비교하여 얻을 수 있는 파장보다 월등한 재현성을 가지고 있고,
- 1975년 제15차 CGPM 결의사항 2에 권고되었던 빛의 속력값( $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$ )을 변화시키지 않고 유지하는 것이 특히 천문학과 측지학에 이점이 있으며,
- 권고된 값과 동일하고 정확한 빛의 속력값을 얻기 위한 새로운 미터의 정의가 다양한 방법으로 시도되었으며, 또한 현재의 미터 정의에서 최선의 구현값이 상대불확도  $\pm 4 \times 10^{-9}$  인 것을 고려할 때 이는 길이의 단위에 어떤 인지할 만한 불일치를 초래하지 않으며,
- 특정 시간 간격 동안 빛이 진행한 경로나 또는 측정되었거나 명시된 주파수를 가진 복사선의 파장을 기준으로 하는 이런 여러 방법들이 자문과 진지한 논의의 대상이 되어 왔으며,

미터의 정의에 대한 표현은 2018년 제26차 CGPM에서 수정되었다(결의 사항 1, 90쪽 참조).

여기에 주어진 상대불확도는 고려된 데이터의 표준편차 3배에 해당된다.

동등한 것으로 인정되었고, 그 중 첫 번째 것을 선호하는 의견의 일치가 이루어졌으며,

- 그러한 정의의 실제적인 구현을 위하여 이제 미터정의 자문위원회(CCDM)는 지금까지 표준으로 사용되어 왔던 크립톤 86의 오렌지 복사선의 사용을 포함할 수 있으며, 적당한 절차에 따라 확장하거나 개정할 수 있는 지침을 제공할 위치에 있다는 것을

**고려하여**

다음 사항을 결정한다.

1. 미터는 빛이 진공에서 1/299 792 458 초 동안 진행한 경로의 길이이다.
2. 1960년 이래로 시행되어 왔던 크립톤 86 원자의 2p<sub>10</sub>과 5d<sub>5</sub> 준위 사이의 전이에 기초한 미터의 정의는 폐기된다.

■ 미터 정의의 구현에 대하여 (CR, 98 및 *Metrologia*, 1984, 20, 25-26)

미터 정의의 실용적 구현의 개정에 관한 CIPM의 권고사항 1 (CI-2002) 72쪽 참조

**결의사항 2**

제17차 국제도량형총회는,

- 미터의 새로운 정의의 실제적 구현을 위한 지침 사항을 작성하고,
- 간섭계를 이용한 길이 측정을 위하여 표준파장으로 권고될 수 있는 복사선들을 선택하고, 그것들의 사용을 위한 지침 사항을 작성할 것과,
- 이 표준들을 개선하기 위하여 부여된 연구를 수행하도록 국제도량형위원회를 위촉한다.

**CIPM, 1984**

■ 시버트에 관하여 (PV, 52, 31 및 *Metrologia*, 1985, 21, 90)\*

\* 2002년 CIPM은 SI 책자의 선량당량의 설명을 바꾸기로 결정하였다 (권고사항 2, 74쪽 참조).

**권고사항 1**

국제도량형위원회는,

제16차 국제도량형총회(1979)에서 승인된 결의사항 5의 주제에 있어 여전히 혼동이 존재한다는 것을 **고려하여**

‘SI’ 책자에 다음의 설명을 도입하기로 **결정한다**:

선량당량  $H$ 라는 양은 전리방사선에 대한 흡수선량  $D$ 와 무차원 인자  $Q$ (선질계수)와 국제 방사선방호위원회에 의하여 규정된  $N$ (기타 다른 계수들의 곱)의 곱이다:

$$H = Q \cdot N \cdot D$$

따라서 주어진 방사선에 대하여 줄 매 킬로그램의 단위로 주어지는  $H$ 의 수학적 값은  $Q$ 나  $N$ 의 값에 따라 역시 줄 매 킬로그램의 단위로 주어지는  $D$ 와는 다를 수도 있다. 그러므로 흡수선량  $D$ 와 선량당량  $H$  사이의 혼동으로 인한 모든 위험을 피하기 위하여 각각의 단위를 위한 특별한 명칭이 사용되어야 한다. 즉, 흡수선량  $D$ 의 단위로는 줄 매 킬로그램 대신에 그 레이가, 선량당량  $H$ 의 단위로는 줄 매 킬로그램 대신에 시버트가 사용되어야 한다.

## 제18차 CGPM, 1987

■ 볼트와 옴의 표현에 대한 향후의 조정 (CR, 100 및 *Metrologia*, 1988, 25, 115)

## 결의사항 6

제18차 국제도량형총회는,

- 국가의 전기단위 표현이 세계적인 일치성과 장기적 안정성을 가지는 것은 기술적, 경제적인 관점에서 보아 과학과 상업 그리고 산업에 매우 중요하다는 것,
- 조셉슨 효과와 양자 홀 효과가 장기적 안정성에 대한 최선의 보장을 제공하기 때문에, 많은 국립 연구소가 볼트와 옴의 표현을 유지하기 위하여 볼트에는 조셉슨 효과를 이용하고 있고 옴에는 양자 홀 효과를 이용하기 시작하고 있는 것,
- 여러 물리량의 측정 단위들 사이에 일관성이 중요하기 때문에 이 단위들의 표현을 위하여 채택된 값들은 가능한 한 SI와 일치하여야 하는 것,
- 최근 및 현재의 실험 결과로부터, 전기단위와 관련이 있는 효과들에 관계되는 계수로서 SI와 충분한 호환성을 가지고 받아들여질 수 있는 값을 확립할 수 있게 된 것을

## 고려하여,

조셉슨 효과의 경우에 전압 대 주파수의 비와 양자 홀 효과의 경우에 전압 대 전류의 비의 값을 확립하는데 기여할 수 있는 연구소들에게 이를 위하여 적극적인 노력을 경주하고 그 결과를 지체 없이 국제도량형위원회에 통보하도록 **요청하며**,

그리고 가능한 한 빨리 이들 각각의 계수 값과 그 값들이 모든 나라에서 동시에 실시될 날짜를 추천할 것을 국제도량형위원회에 요청한다. 이 값들은 적어도 일 년 전에 공포되고 1990년 1월 1일에 채택된다.

## CIPM, 1988

■ 조셉슨 효과에 의한 볼트의 표현 (PV, 56, 44 및 *Metrologia*, 1989, 26, 69)\*

## 권고사항 1

국제도량형위원회는,

볼트와 옴의 표현에 대한 향후 조정에 관한 제18차 CGPM의 결의사항 6에 주어진 지시사항들에 따라 직무를 이행함에 있어,

- 최근의 측정 결과들에 대한 상세한 연구는 조셉슨 상수, 즉 조셉슨 효과에서  $n = 1$  단계에 해당하는 주파수를 전위차로 나눈 비,  $K_J$ 의 값으로 483 597.9 GHz/V를 제공하고,
- 이  $K_J$ 값과 함께 조셉슨 효과는 볼트에 대하여  $10^7$ 분의 4 정도의 1표준편차( $1\sigma$ )의 불확도와 상당히 좋은 재현성을 가지는 기전력의 참조표준을 확립하는데 사용될 수 있다는 것을

## 고려하여

- 정확히 483 597.9 GHz/V를 조셉슨 상수  $K_J$ 에 대한 협정값으로 채택하고  $K_{J-90}$ 으로 표시할 것과,

\* 2018년 제26차 CGPM(결의 사항 1, 90쪽 참조)에서  $K_J$ 에 대한 협정값 채택을 폐지하였다.

- 1990년 1월 1일부터 (그 이전은 아니 되며) 현재 사용 중인 값을 이 새로운 값으로 대체하여 사용할 것,
- 조셉슨 효과에 기초하여 기전력을 측정하는 모든 실험실이 그 날짜로부터 이 새로운 값을 사용할 것,
- 그 밖의 모든 실험실은 그 날짜로부터 그들의 참조표준값을 조정하여 새로이 채택된 값에 일치시킬 것을

**권고하며**

예측할 만한 장래에는 이 조셉슨 상수의 권고값에 변경이 필요치 않으리라는 **견해를 가지고**, 새로운 값은 1972년 전기 자문위원회의 선언사항 E-72에 주어진 값보다 3.9 GHz/V 또는  $10^6$ 분의 8만큼 크다는 사실에 대하여 실험실들의 **주의를 환기시킨다.**

■ 양자 홀 효과에 의한 옴의 표현 (PV, 56, 45 및 *Metrologia*, 1989, 26, 70)\*

**권고사항 2**

국제도량형위원회는,

볼트와 옴의 표현에 대한 향후 조정에 관한 제18차 CGPM의 결의사항 6에 주어진 지시사항들에 따라 직무를 이행함에 있어,

- 대부분의 기존 실험실 저항 참조표준이 시간에 따라 상당히 변하고 있다는 것,
- 양자 홀 효과에 기초한 저항의 실험실 참조표준은 안정하고 재현성이 있다는 것,
- 최근의 측정결과들에 대한 상세한 연구는 폰 클리칭 상수, 즉 양자 홀 효과에서 평탄 수  $i = 1$ 에 해당하는 홀 전압을 전류로 나눈 비,  $R_K$ 의 값으로 25 812.807  $\Omega$ 을 제공한다는 것,
- 이  $R_K$ 값과 함께 양자 홀 효과가  $10^7$ 분의 2 정도의 1표준편차의 불확도와 매우 좋은 재현성을 가지는 저항의 참조표준을 확립하는데 사용될 수 있다는 것을

**고려하여**

- 정확히 25 812.807  $\Omega$ 을 폰 클리칭 상수  $R_K$ 에 대한 협정값으로 채택하고  $R_{K-90}$ 으로 표시할 것,
- 양자 홀 효과에 기초를 두고 저항을 측정하는 모든 실험실들이 1990년 1월 1일부터(그 이전은 아니 되며) 이 새로운 값을 사용할 것,
- 그 밖의 모든 실험실은 그 날짜로부터 그들의 참조표준값을 조정하여  $R_{K-90}$ 과 일치시킬 것,
- 저항의 실험실 참조표준을 확립하기 위하여 양자 홀 효과를 사용할 때, 모든 실험실은 전기 자문위원회에 의해 작성되고 BIPM에 의해 출판된 양자 홀 저항의 신빙성 있는 측정을 위한 기술 안내서의 최신판을 따를 것을

**권고하고**, 예측할 만한 장래에는 이 폰 클리칭 상수의 권고값에 변경이 필요치 않으리라는 **견해를 가진다.**

2000년 제89차 회의에서 CIPM은 폰 클리칭 상수값의 사용에 대한 제22차 CCEM 회의의 선언을 승인하였다.

\* 2018년 제26차 CGPM(결의 사항 1, 90쪽 참조)에서  $R_K$ 에 대한 협정값 채택을 폐지하였다.

CIPM, 1989

■ 1990년 국제온도눈금 (PV, 57, 115 및 *Metrologia*, 1990, 27, 13)

**권고사항 5**

제18차 국제도량형총회(1987)의 결의사항 7에 따른 업무를 수행하는 국제도량형위원회(CIPM)는 1968년의 국제실용온도눈금(IPTS-68)을 폐지하고, 대신에 1990년의 국제온도눈금(ITS-90)을 채택하였다.

CIPM은, IPTS-68과 비교하여 볼 때, ITS-90이

- 0.65 K의 낮은 온도까지 확장되고, 따라서 EPT-76을 대체하며,
- 대응되는 열역학 온도와 상당히 잘 일치하고,
- 전체 영역에서 연속성, 정밀도, 재현성이 크게 개선되었으며,
- 사용하기가 매우 편리한 어떤 특정영역에서는 세부 온도눈금 및 다르게 선택할 수 있는 온도 눈금 정의를 가지고 있다는 것을 주목한다.

또한 CIPM은 ITS-90의 본문과 함께 두 개의 보충문서, ITS-90 보충 설명서(*The Supplementary Information for the ITS-90*)와 ITS-90 근사 기술(*Techniques for Approximating the ITS-90*)이 나올 것을 주목한다. 이 문서들은 BIPM에 의해 출판되고 주기적으로 갱신될 것이다.

CIPM은

- 1990년 1월 1일부로 ITS-90이 시행되며
- 그 날짜로부터 IPTS-68과 EPT-76을 폐지할 것을

권고한다.

켈빈은 2018년 제26차 CGPM에서 재정의 되었다(결의 사항 1, 90쪽 참조).

제19차 CGPM, 1991

■ SI 접두어 제타, 켈토, 요타 및 옥토 (CR, 185 및 *Metrologia*, 1992, 29, 3)

**결의사항 4**

제19차 국제도량형총회(CGPM)는

제11차 CGPM, 결의사항 12, 제3항, 제12차 CGPM, 결의사항 8과 제15차 CGPM, 결의사항 10에서 채택된 단위의 배수 및 분수에 사용되는 SI 접두어 목록에 다음의 접두어들을 추가하기로 결정한다:

곱할 인자	접두어	기호
$10^{21}$	제타	Z
$10^{-21}$	켈토	z
$10^{24}$	요타	Y
$10^{-24}$	옥토	y

명칭 켈토와 제타는 숫자 7 ( $10^3$ 의 7승)을 의미하는 켈토(septo)에서 유래하였으며 문자 'z'는 문자 's'가 기호로서 중복되어 사용되는 것을 피하기 위하여 's' 대신 쓰이고 있다. 명칭 옥토와 요타는 숫자 8 ( $10^3$ 의 8승)을 의미하는 옥토(octo)에서 유래하였으며 문자 'y'는 문자 'o'가 기호로 쓰이는 것을 피하기 위하여 추가되었는데 그 이유는 문자 'o'가 숫자 0과 혼동될 우려가 있기 때문이다.

## 제20차 CGPM, 1995

- SI에서 보충단위 부류의 삭제 (CR, 223 및 *Metrologia*, 1996, 33, 83)

### 결의사항 8

제20차 국제도량형총회(CGPM)는,

- 1960년의 제11차 총회가 SI를 확립할 때, 결의사항 12에서 기본단위, 유도단위와 보충단위의 세 가지 부류로 SI 단위를 구분하였고 라디안과 스테라디안을 조합하여 보충단위를 구성하였다는 것,
- 기본단위, 유도단위와의 관계에서 보충단위의 상태가 논란의 원인이 되었다는 것,
- 1980년 CIPM은 보충단위의 모호한 상태가 SI의 내부적 일관성을 저하시키고 있다는 것을 관찰하고, 권고사항 1(CI-1980)에서 보충단위를 SI에서 무차원 유도단위로 해석하였다는 것을

**고려하여**, 1980년 국제위원회에 의하여 내려진 해석을 **승인하며**

다음 사항을 **결정한다**.

- SI에서 보충단위, 즉 라디안과 스테라디안을 무차원의 유도단위로 해석하고, 이 보충단위의 명칭과 기호는 필수적이지는 않으나 편의에 따라 다른 유도단위에 대한 표현으로 사용할 수 있도록 한다.
- 그리하여 결과적으로 SI의 한 독립된 부류로서의 보충단위 부류를 삭제한다.

## 제21차 CGPM, 1999

- 킬로그램의 정의 (CR, 331 및 *Metrologia*, 2000, 37, 94)

### 결의사항 7

제21차 국제도량형총회(CGPM)는,

- SI의 장기안정도를 보증할 필요,
- SI의 기본단위 중의 하나인 질량을 정의하는 원기의 장기안정도의 고유불확도,
- 킬로그램에 의존하는 다른 3개의 기본단위인 암페어, 몰, 칸델라의 장기안정도에 미치는 결과적인 불확도,
- 기본상수 또는 원자상수에 질량의 단위를 연계시키기 위해 고안된 다양한 실험들의 이미 이루어진 진전,
- 이러한 연계시키는 방법을 한 가지 이상 확보하는 것이 바람직함을

**고려하여**,

각국 표준연구기관에서는 미래의 킬로그램의 재정의라는 관점에서 질량 단위를 기본상수나 원자상수에 연계시키는 실험을 다듬는 노력을 계속할 것을 **권고한다**.

- **촉매활성도를 나타내는 SI 유도단위인 몰 매 초의 특수명칭, 카탈** (CR, 334-335 및 *Metrologia*, 2000, 37, 95)

## 결의사항 12

제21차 국제도량형총회(CGPM)는,

- 인류의 건강과 안전을 위해서 의료 및 생화학 분야에서 SI 단위의 사용 촉진의 중요성과,
- 1964년 이후로 의료 및 생화학 분야에서는 촉매활성도를 표현할 때  $1 \mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1}$ 와 동일하고 SI와는 일관성이 없는 ‘단위’라고 불리는 비SI 단위(기호 U)를 폭넓게 사용해 왔다는 것,
- 일관성 있는 SI 유도단위인 몰 매 초에 대한 특별한 명칭의 부재로 임상측정결과에 다양한 단위가 사용되었다는 것,
- 의료 및 임상 화학분야에서의 SI 단위 사용이 이 분야의 국제연맹들에 의해 강하게 권고되고 있다는 것,
- 임상화학국제연맹은 SI 단위인 몰 매 초에 대해 특수명칭 카탈과 기호 kat을 권고할 것을 단위자문위원회에 요청하였다는 것,
- 특수명칭의 확산은 SI에 위협이 될 수 있지만, 인류의 건강과 안전에 관련하여 예외가 만들어졌다(제15차 총회, 1975, 결의사항 8과 9, 제16차 총회, 1979, 결의사항 5)는 것을

**고려하고,**

촉매활성도를 표현하는데 있어서 SI로 몰 매 초를 나타내는 카탈이라는 명칭과 기호 kat이 30년 넘게 사용되어 왔다는 것을 **주목하여,**

특히 의료 및 생화학 분야에서 촉매활성도를 표현하는 SI의 몰 매 초에 대해 특수명칭 카탈과 기호 kat의 채택을 **결정하며,**

카탈이 사용될 때는 측정절차를 참조하여 측정량을 명확히 기술할 것을 **권고한다**. 측정절차는 반드시 관련 반응을 명시해야 한다.

## CIPM, 2001

- **‘SI 단위’와 ‘SI의 단위’** (PV, 69, 120)

2001년 CIPM은 ‘SI 단위’와 ‘SI의 단위’에 관한 CCU의 다음 제안을 승인하였다.

“명칭 ‘SI 단위’와 ‘SI의 단위’는 기본단위와 일관성 있는 유도단위, 권고된 십진배수 및 십진 분수 접두어가 결합된 모든 단위를 포함하는 명칭으로 간주되어야 한다고 제안한다.

명칭 ‘일관성 있는 SI 단위’는 그 의미를 기본단위와 일관성 있는 유도단위로만 제한하고자 할 때 사용되어야 한다고 제안한다.”

## CIPM, 2002

■ 미터 정의의 실제적 구현 개정 (PV, 70, 194-204 및 *Metrologia*, 40, 103-133)

## 권고사항 1

국제도량형위원회는,

- 1983년 제17차 CGPM이 새로운 미터의 정의를 채택하였다는 것과
- 같은 해에 CGPM이 국제도량형위원회(CIPM)에
  - 미터의 실용적 구현을 위한 지침사항을 작성할 것,
  - 간섭계를 이용한 길이 측정을 위하여 표준파장으로 권고될 수 있는 복사선을 선택하고, 그것들의 사용을 위한 지침사항을 작성할 것,
  - 이 표준들을 개선하기 위하여 맡겨진 연구를 수행하고, 이에 따라 지침사항들을 확장 또는 개정할 것을 요청하였다는 것과
- 이러한 요청에 따라 CIPM은 권고사항 1(CI-1983)(미터정의의 구현 목록)을 채택하여
  - 미터는 반드시 다음에 기술한 방법들 중의 하나에 의하여 구현되도록 하였음과
    - (가) 시간  $t$  동안 평면 전자파가 진공에서 진행한 경로의 길이  $l$ 에 의하여, 이 길이는  $l = c_0 \cdot t$ 인 관계와 진공에서 빛의 속력  $c_0 = 299\,792\,458$  m/s를 사용하여, 측정된 시간  $t$ 로부터 얻어진다.
    - (나) 주파수  $f$ 인 평면 전자파의 진공에서의 파장  $\lambda$ 에 의하여, 이 파장은  $\lambda = c_0/f$ 인 관계와 진공에서 빛의 속력  $c_0 = 299\,792\,458$  m/s를 사용하여, 측정된 주파수  $f$ 로부터 얻어진다.
    - (다) 아래 목록의 복사선 중의 하나에 의하여, 주어진 규격 조건을 따르고 공인된 우수한 실험이 이루어진다면, 진공에서 명시된 파장이나 명시된 주파수 값을 표시된 불확도와 함께 사용할 수 있다.
- 위의 모든 경우에, 회절효과, 중력, 불완전한 진공 등과 같은 실제 조건을 고려하여 필요한 보정이 이루어지도록 하였음과
- 일반 상대성이론에서 미터는 고유길이 단위로 간주된다. 따라서 이 정의는 공간적인 영역이 충분히 작아 중력장의 비균일 효과가 무시될 수 있는 영역에서만 적용된다(주. 이 효과는 지표면에서 수직 방향으로 미터 당 약  $10^{16}$ 분의 1이다.). 이 경우 특수상대성효과만을 고려하면 된다. (나)와 (다)에서 추천한 미터 구현에 대한 국소적 방법들은 고유미터를 주지만 방법 (가)는 반드시 그렇지 않다. 따라서 방법 (가)는 일반 상대성이론으로 예측되는 효과가 구현 불확도에 비해 무시될 수 있는 충분히 짧은 길이  $l$ 로 사용이 제한되어야 한다. 이러한 경우가 아닌 측정결과의 해석에 대해 참고문헌이 필요하다면 측정학에 대한 일반 상대성이론의 적용에 관한 시간 주파수 자문위원회(CCTF) 작업반의 보고서(Application of general relativity to metrology, *Metrologia*, 1997, **34**, 261-290)를 참조하게 하였음과
- CIPM은 이러한 목적으로 복사선 목록을 권고하였음을

**상기하고** 또한 1992년과 1997년 CIPM이 미터 정의의 실제적 구현 방법을 개정한 것을 **상기하며**

- 과학과 기술 분야에서는 미터 구현에서 정확도 향상을 계속적으로 요구하고 있고
- 1997년 이후 국가표준기관, BIPM 및 기타 연구기관에서 새로운 복사선들과 이들을 보다 낮은 불확도로 구현할 수 있는 방법들이 규명되었으며
- 시간에 관련된 활동을 위한 광주파수 연구가 증가하고 있으며, 구현목록의 권고 복사선의 활용 범위가 치수 측정학과 미터 구현뿐만 아니라 고분해 분광학, 원자 및 분자 물리, 기본 상수, 통신까지 포함할 정도로 전반적으로 확대되고 있으며
- 고안정도 저온 원자나 이온 표준기로부터 감소된 불확도로 얻어진 많은 새로운 주파수값이 권고 복사선 목록에 기록되어 지금 이용이 가능하며, 최근 몇몇 새로운 종류의 저온 원자나 이온의 복사선의 주파수가 측정되었고, 광통신에 관련된 파장영역을 포함하는 가스셀에 기반을 둔 많은 광주파수 표준에 대해서 현저히 감소된 불확도를 가지는 새롭게 개선된 값들이 확정되었으며
- 새로운 펄스 레이저 광빔 기술은 고안정도 광주파수 표준기의 주파수를 SI 초를 구현하는 주파수표준기의 주파수에 연결하는데 있어서 분명한 중요성을 가지고 있으며, 이 기술은 SI로의 소급성을 제공하는 편리한 측정기술을 나타내며, 또한 광빔 기술은 측정기술 뿐만 아니라 주파수원을 제공할 수도 있는 것을

**고려하여**

광빔 기술이 시의 적절한 것으로 인정하며, 이 기술의 가능성을 충분히 조사하기 위하여 더 많은 연구를 **권고하며**

다른 주파수 사슬 기술과의 비교로 광빔 기술의 유효성이 확보된 것을 **환영하며**

국가측정표준기관과 연구소는 달성 가능한 최고 수준의 정확도의 광빔 기술을 추구하고, 폭 넓은 응용을 고무시키기 위해 간편한 방법을 찾을 것을 **촉구하며**

다음 사항을 **권고한다**.

- 1997년 CIPM(결의사항 1(CI-1997))의 권고 복사선 목록은 다음을 포함한 아래의 복사선 목록\*으로 대체할 것,
  - 저온 Ca 원자, H 원자, 포획된  $Sr^+$  이온의 개선된 주파수 값,
  - 포획된  $Hg^+$  이온, 포획된  $In^+$  이온, 포획된  $Yb^+$  이온을 포함한 새로운 저온 이온종의 주파수 값,
  - Rb 안정화 레이저,  $I_2$  안정화 Nd:YAG 레이저와  $I_2$  안정화 He-Ne 레이저,  $CH_4$  안정화 He-Ne 레이저, 10  $\mu m$ 의  $OsO_4$  안정화  $CO_2$  레이저의 개선된 주파수 값,
  - Rb 안정화 레이저 및  $C_2H_2$  안정화 레이저를 포함한 광통신 대역에 관련된 표준기의 주파수 값.

...

\* 권고 복사선 목록, 결의사항 1(CI-2002)은 PV, 70, 197-2004 및 *Metrologia*, 2003, 40, 104-115에 있다.

## ■ 선량당량 (PV, 70, 205)

## 권고사항 2

국제도량형위원회는,

- SI에서 선량당량(시버트)의 현재 정의는 국제 방사선방호위원회(ICRP)에서 규정한 " $N$ " (기타 다른 인자들의 곱) 인자를 포함하고 있는데,
- ICRP와 국제방사선 단위 및 측정 위원회(ICRU)는 더 이상 필요하지 않다고 간주되는 이  $N$  인자를 삭제할 것을 결정하였고,
- $H$ 의 현재 SI 정의는  $N$  인자를 포함하고 있어 약간의 혼동을 일으킬 수 있다는 것을

## 고려하여

'SI' 책자의 설명을 다음과 같이 바꿀 것을 결정한다.

선량당량  $H$ 라는 양은 전리방사선에 대한 흡수선량  $D$ 와 ICRU에 의하여 선형 에너지 전달 함수로 정의된 무차원 인자  $Q$ (선질계수)의 곱이다 :

$$H = Q \cdot D.$$

따라서 주어진 방사선에 대하여 줄 매 킬로그램의 단위로 주어지는  $H$ 의 수치는  $Q$ 의 값에 따라, 역시 줄 매 킬로그램의 단위로 주어지는  $D$ 와는 다를 수도 있다. 그러므로 위원회는 설명에서의 마지막 문장을 다음과 같이 유지할 것도 결정한다. 흡수선량  $D$ 와 선량당량  $H$  사이의 혼동으로 인한 모든 위험을 피하기 위하여 각각의 단위를 위한 특별한 명칭이 사용되어야 한다. 즉, 흡수선량  $D$ 의 단위로는 줄 매 킬로그램 대신에 그레이가, 선량당량  $H$ 의 단위로는 줄 매 킬로그램 대신에 시버트가 사용되어야 한다.

## CIPM, 2003

■ 권고 복사선의 구현 방법에 관한 서술(mise en pratique) 목록의 개정 (PV, 71, 146 및 *Metrologia*, 2004, 41, 99-100)

## 권고사항 1

국제도량형위원회는,

- 이미 권고 복사선 목록에 등재된 고안정도의 몇몇 저온 이온 표준의 복사선에 대해 개선된 주파수 값의 이용이 최근에 가능하게 되었다는 것,
- 이미 권고 복사선 목록에 등재되어 있는 광통신 영역의 적외선 가스셀 광주파수표준의 개선된 주파수값이 결정되었다는 것,
- 보조의 권고 광원들의 목록에 등재되어 있는 몇몇 요오드-셀 표준선들에 대한 펄스 레이저 광빔을 이용한 주파수 측정이 최근에 처음으로 이루어지고, 명백하게 그 불확도가 감소되었음을

## 고려하여

권고 복사선 목록이 다음 사항을 포함하도록 개정할 것을 제안한다.

- 포획된  $^{88}\text{Sr}^+$  단일 이온의 사중극 전이와 포획된  $^{171}\text{Yb}^+$  단일 이온의 팔중극 전이에 대한 개선된 주파수 값,
- 1.54  $\mu\text{m}$ 의  $\text{C}_2\text{H}_2$  안정화 레이저 표준선의 갱신된 주파수 값,
- 543 nm와 515 nm의  $\text{I}_2$  안정화 레이저 표준선의 갱신된 주파수 값.

## 제22차 CGPM, 2003

- **소수점 부호** (CR, 381 및 *Metrologia*, 2004, 41, 104)

### 결의사항 10

제22차 총회는,

- SI의 주목적은 전 세계에서 쉽게 이해할 수 있는 방식으로 양의 값을 표현할 수 있도록 하는 것이라는 것,
- 양의 값은 통상 숫자 곱하기 단위로 표현된다는 것,
- 양의 값을 표현하는 숫자는 종종 정수 부분과 소수부분을 포함한 여러 자리로 이루어진다 는 것,
- 1948년 제9차 총회의 결의사항 7에서 "숫자에서, 반점(프랑스식)이나 온점(영국식)은 숫자의 정수부분과 소수부분을 나누는 목적으로만 사용된다"라고 기술되어 있는 것,
- 제86차 CIPM(1997)의 결정에 따라 BIPM에서는 SI 책자(SI에 대한 국제 참조 결정판)의 모든 영어 출판물의 소수점은 온점(선상의 점)을 사용하고, 모든 불어 출판물에는 반점(선 상에)을 사용하고 있는 것,
- 그러나 영어 문서에서 소수점으로 선상에서 반점을 사용하는 국제단체도 있다는 것,
- 더 나아가 모든 언어에서 선상의 반점을 소수점으로 지정하는 국제단체(국제표준 기구를 포함)도 있는 것,
- 많은 언어에서 선상의 반점을 소수점으로 규정하는 것은 선상의 점을 소수점으로 하는 관 력적인 사용법과 상충한다는 것,
- 2개국 이상의 나라에서 모국어로 사용하고 있는 언어의 경우에는 나라에 따라 선상의 점이나 선상의 반점을 소수점으로 사용하고 있고, 2개 이상의 모국어를 가지고 있는 나라의 경우 에는 언어에 따라 선상의 점이나 선상의 반점을 소수점으로 사용하고 있다는 것을

### 고려하여

소수점 부호는 선상의 온점이나 선상의 반점 어느 쪽이든 될 수가 있다고 선언하고,

1948년 제9차 CGPM의 결의사항 7에 기술되어 있는 "숫자는 읽기에 편리하게 세 자리씩 묶어 써도 무방하지만 각 묶음 사이의 띄어 쓴 자리에 온점이나 반점을 사용해서는 안 된다"를 **재확인한다.**

CIPM, 2005

\* 켈빈은 2018년 제26차 CGPM에서 재정의 되었다 (결의 사항 1, 90쪽 참조).

- 열역학 온도 단위인 켈빈의 정의에 대한 명확화 (PV, 73, 235 및 *Metrologia*, 2006, 43, 177-178)\*

권고사항 2

국제도량형위원회(CIPM)는,

- 열역학 온도 단위인 켈빈이 물의 삼중점의 열역학 온도의 1/273.16로 정의된다는 것,
- 물의 삼중점 온도는 사용된 물속의 수소와 산소의 동위원소의 상대적인 양에 의존한다는 것,
- 이 효과는 물의 삼중점의 서로 다른 방법에 의한 구현 사이에서 관측되는 변동성의 주요 원인 중 하나라는 것을

고려하여

다음 사항을 결정한다.

- 켈빈의 정의는 특정한 동위원소 조성을 가진 물을 기준으로 한다.
- 이 조성은

$^1\text{H}$  1 몰 당  $^2\text{H}$  0.000 155 76 몰,  
 $^{16}\text{O}$  1 몰 당  $^{17}\text{O}$  0.000 379 9 몰,  
 $^{16}\text{O}$  1 몰 당  $^{18}\text{O}$  0.002 005 2 몰이며,

이는 "Atomic Weights of Elements: Review 2000"에서 IUPAC에 의해 권고된 국제원자력기구 참조물질 비엔나표준평균해수(VSMOW)의 조성이다.

- SI 책자의 켈빈 정의에 첨부된 주석에 이 조성을 다음과 같이 언급하여야 한다.  
 “이 정의는 정확히 다음과 같은 물질량 비의 동위원소 조성을 가지는 물을 기준으로 한다.  
 $^1\text{H}$  1 몰 당  $^2\text{H}$ 가 0.000 155 76 몰,  $^{16}\text{O}$  1 몰 당  $^{17}\text{O}$ 가 0.000 379 9 몰,  $^{16}\text{O}$  1 몰 당  $^{18}\text{O}$ 가 0.002 005 2 몰.”

- 권고 복사선의 구현 방법에 관한 서술(*mise en pratique*) 목록의 개정 (PV, 73, 236 및 *Metrologia*, 2006, 43, 178)

권고사항 3

국제도량형위원회(CIPM)는,

- 이미 권고 복사선 목록에 등재된 몇몇의 고안정도 저온 이온 및 원자 표준의 복사선의 개선된 주파수 값의 이용이 최근에 가능하게 되었다는 것,
- 이미 권고 복사선 목록에 등재되어 있는 광통신 영역의 적외선 가스셀 광주파수표준의 개선된 주파수값이 결정되었다는 것,
- 이미 보조권고 광원목록에 등재된 특정 요오드 가스셀 표준선의 개선된 주파수값이 결정되었다는 것,
- 새로운 저온 원자, 근적외선 영역의 원자, 광통신 영역의 분자의 주파수가 펨토초 레이저 광빔을 이용한 주파수 측정에 의해 처음으로 결정되었다는 것을

**고려하여**

권고 복사선 목록을 다음 사항이 포함되도록 개정할 것을 **결정한다**.

- 포획된  $^{88}\text{Sr}^+$  단일 이온의 사중극 전이, 포획된  $^{199}\text{Hg}^+$  단일 이온의 사중극 전이, 포획된  $^{171}\text{Yb}^+$  단일 이온의 사중극 전이에 해당하는 갱신된 주파수 값,
- Ca 원자 전이의 갱신된 주파수 값,
- 1.54  $\mu\text{m}$ 의  $\text{C}_2\text{H}_2$  안정화 레이저 표준선의 갱신된 주파수 값,
- 515 nm의  $\text{I}_2$  안정화 레이저 표준선의 갱신된 주파수 값,
- 698 nm의  $^{87}\text{Sr}$  원자 전이 추가,
- 760 nm의  $^{87}\text{Rb}$  원자 이광자 전이 추가,
- 1.54  $\mu\text{m}$ 의  $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$  ( $\nu_1 + \nu_3$ ) 띠,  $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$  ( $\nu_1 + \nu_3$ ) 띠, ( $\nu_1 + \nu_3 + \nu_4 + \nu_5$ ) 띠 추가

**CIPM, 2006**

■ **초에 대한 이차적 표현 관련** (PV, 74, 249 및 *Metrologia*, 2007, 44, 97)

**권고사항 1**

국제도량형위원회(CIPM)는,

- '미터의 실제적 구현 및 초의 이차적 표현이 포함된 적용을 위한 표준 주파수 권고 값'에 대한 공통 목록이 작성되어야 할 것,
- 미터 정의의 구현 및 초의 이차적 표현에 대한 CCL과 CCTF의 공동 작업반(JWG)이 2005년 9월 BIPM 회의에서 초의 이차적 표현 목록에 포함 가능한 후보를 논의한 것,
- CCL/CCTF JWG가 2006년 9월 세션에서 Hg 이온과 Sr 이온, Yb 이온, Sr 중성 원자 전이 주파수 값을 검토 및 업데이트 한 것,
- CCTF가 2004년 권고사항 1에서 초의 이차적 표현으로 이미  $^{87}\text{Rb}$ 의 비섭동 기저 상태 초미세 양자 전이 주파수를 권고한 것을

**고려하여,**

다음의 전이 주파수를 초의 이차적 표현으로 사용할 것과 '미터의 실용적 구현 및 초의 이차적 표현이 포함된 적용을 위한 표준 주파수 권고 값' 신규 목록에 포함할 것을 **권고한다**.

- 주파수  $f^{87}\text{Rb} = 6\,834\,682\,610.904\,324$  Hz 및 예측 상대표준불확도  $3 \times 10^{-15}$ 인  $^{87}\text{Rb}$ 의 비섭동 기저 상태 초미세 양자 전이
- 주파수  $f^{88}\text{Sr}^+ = 444\,779\,044\,095\,484$  Hz 및 상대불확도  $7 \times 10^{-15}$ 인  $^{88}\text{Sr}^+$  이온의 비섭동 광학 전이  $5s\ ^2S_{1/2} - 4d\ ^2D_{5/2}$
- 주파수  $f^{199}\text{Hg}^+ = 1\,064\,721\,609\,899\,145$  Hz 및 상대표준불확도  $3 \times 10^{-15}$ 인  $^{199}\text{Hg}^+$  이온의 비섭동 광학 전이  $5d^{10}\ 6s\ ^2S_{1/2} (F = 0) - 5d^9\ 6s^2\ ^2D_{5/2} (F = 2)$
- 주파수  $f^{171}\text{Yb}^+ = 688\,358\,979\,309\,308$  Hz 및 상대표준불확도  $9 \times 10^{-15}$ 인  $^{171}\text{Yb}^+$  이온의 비섭동 광학 전이  $6s\ ^2S_{1/2} (F = 0) - 5d\ ^2D_{3/2} (F = 2)$
- 주파수  $f^{87}\text{Sr} = 429\,228\,004\,229\,877$  Hz 및 상대표준불확도  $1.5 \times 10^{-14}$ 인  $^{87}\text{Sr}$  중성 원자의 비섭동 광학 전이  $5s^2\ ^1S_0 - 5s\ 5p\ ^3P_0$

## CIPM, 2007

## ■ 권고 복사선의 구현 방법에 관한 서술(mise en pratique) 목록의 개정 (PV, 75, 185)

## 권고사항 1

국제도량형위원회(CIPM)는,

- 표준 주파수 목록에 이미 기록된 광통신 영역 분자의 향상된 주파수값이 펨토초 광빔을 이용한 주파수 측정에 의해 결정된 것,
- 광통신 영역 분자 주파수가 처음으로 펨토초 광빔을 이용한 주파수 측정에 의해 결정된 것,
- 532 nm 광주파수 표준에 근접한 특정 요오드 가스셀 흡수 주파수가 처음으로 펨토초 광빔을 이용한 주파수 측정에 의해 결정된 것을

고려하여,

표준 주파수 목록에 다음 사항을 포함시켜 개정할 것을 제안한다.

- 1.54  $\mu\text{m}$ 의  $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$  ( $\nu_1 + \nu_3$ ) 밴드에 대한 주파수 값 업데이트 목록
- 1.54  $\mu\text{m}$ 의  $^{12}\text{C}_2\text{HD}$  ( $2\nu_1$ ) 밴드에 대한 주파수 값 추가
- 532 nm의 P(142) 37-0, R(121) 35-0, R(85) 33-0 요오드 전이 초미세 성분에 대한 주파수 값 추가

## 제23차 CGPM, 2007

## ■ 미터 정의의 구현 방법에 관한 서술(mise en pratique) 개정 및 신규 광주파수 표준 개발 (CR, 431)

## 결의사항 9

제23차 총회는,

- 광주파수 표준에 빠르고 중요한 개선사항이 있다는 것,
- 펨토초 광빔 기술이 이제는 단일 위치에서 광복사선과 전자파를 결부시키는 데에 일상적으로 사용된다는 것,
- 여러 국가측정표준기관이 단거리 광주파수 표준에 대한 비교기술을 연구하고 있다는 것,
- 원거리 비교기술이 국제적 차원에서 개발되어 광주파수 표준을 비교할 필요가 있다는 것을

고려하여,

- CCL/CCTF JWG가 초의 광학 기반 표현 주파수를 검토하기 위해 수행한 활동과
- CIPM이 2002년과 2003년, 2005년, 2006년, 2007년에 미터 정의의 실용적 구현 목록 및 권고 복사선 목록에 추가한 것,
- BIPM이 광주파수 표준 비교 방법에 대한 문제 제기를 위해 앞장선 것을

환영하며,

- NMI가 광주파수 표준 개발 및 그에 대한 비교를 위해 자원을 투입할 것과
- BIPM이 NMI의 참여와 함께 국제 프로젝트의 조율을 위해 힘쓰며 광주파수 표준 비교에 도움이 될 기술 연구를 지향할 것을

권고한다.

## ■ 열역학 온도 단위인 켈빈의 정의에 대한 명확화 (CR, 432)

켈빈은 2018년 제26차 CGPM에서 재정의 되었다 (결의 사항 1, 90쪽 참조).

### 결의사항 10

제23차 총회는,

- 열역학 온도 단위인 켈빈이 물의 삼중점의 열역학 온도의 1/273.16로 정의된다는 것,
- 물의 삼중점 온도는 사용된 물속의 수소와 산소의 동위원소의 상대적인 양에 의존한다는 것,
- 이 효과는 물의 삼중점의 서로 다른 방법에 의한 구현 사이에서 관측되는 변동성의 주요 원인 중 하나라는 것을

고려하여,

CIPM이 2005년 10월 온도측정 자문위원회의 권고에 대해 내린 다음의 결정을 주목하고 환영한다.

- 켈빈의 정의는 특정한 동위원소 조성을 가진 물을 기준으로 한다.
- 이 조성은

$^1\text{H}$  1 몰 당  $^2\text{H}$  0.000 155 76 몰,

$^{16}\text{O}$  1 몰 당  $^{17}\text{O}$  0.000 379 9 몰,

$^{16}\text{O}$  1 몰 당  $^{18}\text{O}$  0.002 005 2 몰 인데,

이는 ‘Atomic Weights of Elements: Review 2000’에서 IUPAC에 의해 권고된 국제 원자력기구 참조물질 비엔나표준평균해수(VSMOW)의 조성이다.

- SI 책자의 켈빈 정의에 첨부된 주석에 이 조성을 다음과 같이 언급하여야 한다.

“이 정의는 정확히 다음과 같은 물질량 비의 동위원소 조성을 가지는 물을 기준으로 한다.

$^1\text{H}$  1 몰 당  $^2\text{H}$ 가 0.000 155 76 몰,  $^{16}\text{O}$  1 몰 당  $^{17}\text{O}$ 가 0.000 379 9 몰,  $^{16}\text{O}$  1 몰 당  $^{18}\text{O}$ 가 0.002 005 2 몰.”

## ■ 국제단위계(SI)의 일부 기본단위 재정의 가능성 (CR, 434)

2018년 제26차 CGPM(결의 사항 1, 90쪽 참조)에서 SI 개정이 최종 승인되었다.

### 결의사항 12

제23차 총회는,

- 수년간 BIPM 뿐만 아니라 국가측정표준기관이 측정학의 경계를 확장하여 SI 기본단위가 자연의 불변량, 즉 기본물리상수의 측면에서 정의될 수 있도록 SI를 발전·개선시키고자 상당한 노력을 기울였다는 것,
- SI의 7개 기본단위 중, 킬로그램만이 여전히 물질 인공물, 즉 국제킬로그램원기(1889년 제2차 CGPM, 1901년 제3차 CGPM)의 관점에서 정의되며, 암페어와 몰, 칸델라의 정의가 킬로그램에 의존한다는 것,
- 1999년 제21차 총회의 결의사항 7에서 국가 연구소가 추후 킬로그램의 재정의를 목적으로 질량의 단위와 기본 또는 원자 상수를 연결하는 실험을 개선하기 위해 지속적인 노력을 기울여야 함을 권고한 것,

- 국제원기의 질량과 플랑크 상수  $h$  또는 아보가드로 상수  $N_A$ 를 결부시키는 실험에서 최근 수년간 많은 발전이 있었다는 것,
- 볼츠만 상수  $k_B$ 를 재결정하는 작업을 포함하여 여러 관련 기본 상수 값을 결정하고자 하는 계획,
- 최근 발전의 결과로 킬로그램과 암페어, 켈빈, 몰의 재정의에 대한 중요한 영향 및 잠재적 혜택이 있다는 것,
- 2005년 10월 CIPM의 권고사항 1(CI-2005) 및 SI 기본단위의 재정의에 대한 다양한 자문 위원회의 권고사항을

#### 고려하고

- SI 단위 정의에 발생하는 변동사항에는 자기모순이 없도록 통제되어야 한다는 것,
- 기본단위 정의는 쉽게 이해할 수 있어야 바람직하다는 것,
- CIPM과 여러 자문위원회의 작업,
- 관련 실험의 모니터링 필요성,
- 보다 폭넓은 과학계와 사용자 커뮤니티로부터의 적극적 의견·견해 수렴의 중요성,
- 2005년 CIPM이 킬로그램 및 암페어, 켈빈의 새로운 정의 준비와 몰 재정의 가능성을 원칙적으로 승인한 결정을

#### 주목하며

국가측정표준기관 및 BIPM이

- CIPM이 2011년 제24차 총회에서 기본상수 고정 값을 사용한 킬로그램과 암페어, 켈빈, 몰의 재정의가 가능할지에 대한 의견을 낼 수 있도록 관련 실험을 추진할 것,
- CIPM 및 자문위원회, 적절한 작업반과 함께 기본상수 고정 값에 기반을 둔 새로운 정의 구현의 실용적 방법을 연구하고, 각각의 정의에 대한 구현 목록을 준비하며, 사용자에게 새로운 정의를 설명하는 가장 적합한 방법을 고려할 것,
- 사용자 커뮤니티에 재정의 가능성을 알리는 캠페인을 시작하고 이와 같은 재정의 및 실용적 구현과 연관된 기술 및 입법적 영향을 신중히 논의하고 고려할 것을

#### 권고하고

CIPM이 2011년 제24차 총회에 이와 같은 사항을 보고하고 필요하다고 판단되는 준비사항을 책임져, 실험결과가 만족스럽고 사용자의 니즈가 충족되면 킬로그램과 암페어, 켈빈, 몰의 정의 변동에 대한 공식 제안이 제24차 총회에 상정될 수 있도록 할 것을 **요청한다**.

## CIPM, 2009

## ■ 표준 주파수 목록 업데이트 (PV, 77, 235)

## 권고사항 2

국제도량형위원회(CIPM)는,

- '미터의 실용적 구현 및 초의 부수적 표현이 포함된 적용을 위한 표준 주파수 권고 값'에 대한 공통 목록이 작성된 것과
- CCL-CCTF 주파수 표준 작업반(FSWG)이 목록에 포함시킬 몇 가지 유망 후보를 검토한 것을

## 고려하여

다음의 전이 주파수를 권고 표준 주파수 목록에 포함시키거나 업데이트할 것을 권고한다.

- 주파수  $f = 429\,228\,004\,229\,873.7$  Hz 및 상대표준불확도  $1 \times 10^{-15}$ 인  $^{87}\text{Sr}$  중성 원자의 비섭동 광학 전이  $5s^2\ ^1S_0 - 5s\ 5p\ ^3P_0$ (이 복사선은 CIPM이 초의 부수적 표현으로 이미 승인한 바 있다)
- 주파수  $f = 429\,228\,066\,418\,012$  Hz 및 상대표준불확도  $1 \times 10^{-14}$ 인  $^{88}\text{Sr}$  중성 원자의 비섭동 광학 전이  $5s^2\ ^1S_0 - 5s\ 5p\ ^3P_0$
- 주파수  $f = 411\,042\,129\,776\,393$  Hz 및 상대표준불확도  $4 \times 10^{-14}$ 인  $^{40}\text{Ca}^+$  이온의 비섭동 광학 전이  $4s\ ^2S_{1/2} - 3d\ ^2D_{5/2}$
- 주파수  $f = 642\,121\,496\,772\,657$  Hz 및 상대표준불확도  $6 \times 10^{-14}$ 인  $^{171}\text{Yb}^+$  이온의 비섭동 광학 전이  $^2S_{1/2} (F = 0) - ^2F_{7/2} (F = 3, m_F = 0)$
- 주파수  $f = 518\,295\,836\,590\,8648$  Hz 및 상대표준불확도  $1.6 \times 10^{-13}$ 인  $^{171}\text{Yb}$  중성 원자의 비섭동 광학 전이  $6s^2\ ^1S_0 (F = 1/2) - 6s\ 6p\ ^3P_0 (F = 1/2)$

## 제24차 CGPM, 2011

## ■ 국제단위계, SI의 추후 개정 가능성 (CR, 532)

## 결의사항 1

국제도량형총회(CGPM)는 제24차 회의에서,

- 여러 SI 단위 재정의의 중요성과 가치, 잠재적 혜택에 대한 국제적 합의,
- BIPM 및 국가측정표준기관이 지난 수십 년 동안 측정학의 경계를 확장하여 SI 기본단위가 자연의 불변량, 즉 기본물리상수 또는 원자의 성질 측면에서 정의될 수 있도록 SI를 발전 시키고자 상당한 노력을 마땅히 기울였다는 것,
- 그러한 노력이 성공으로 이어진 두드러진 사례가 길이의 SI 단위인 미터의 현 정의(1983년 제17차 CGPM, 결의사항 1)로, 진공  $c$ 에서의 빛의 속력의 정확한 값, 즉  $299\,792\,458$  미터 매 초라는 것,

2018년 제26차 CGPM (결의 사항 1, 90쪽 참조)에서 SI 개정이 최종 승인되었다.

- SI의 7개 기본단위 중, 킬로그램만이 여전히 물질 인공물, 즉 국제킬로그램원기(1889년 제1차 CGPM, 1901년 제3차 CGPM)의 관점에서 정의되며, 암페어와 몰, 칸델라의 정의가 킬로그램에 의존한다는 것,
- 국제원기가 1889년 제1차 CGPM 회의에서 인가된 이후로 과학 및 기술 분야에서 유용하게 사용되어왔으나, 자체적으로 여러 중요한 한계가 있으며 그 중 가장 중요한 문제는 그 질량이 자연의 불변량에 명확히 연결되지 않아 결과적으로 장기적 안정성이 확보되지 않았다는 것,
- 1999년 제21차 CGPM에서 결의사항 7을 채택하여 ‘국가 연구소가 추후 킬로그램의 재정의의 목적으로 질량의 단위와 기본 또는 원자 상수를 연결하는 실험을 개선하기 위해 지속적인 노력을 기울여야 함’을 권고한 것,
- 와트밸런스 및 실리콘 원자의 질량 측정법을 통하여 국제질량원기와 플랑크 상수  $h$ 를 결부시키는 데 있어서 최근 많은 발전이 있었다는 것,
- 킬로그램이  $h$ 의 정확한 수치에 연결되도록 재정의되고 암페어가 기본전하  $e$ 의 정확한 수치에 연결되도록 재정의 된다면, 조셉슨 효과 및 양자 홀 효과와 조셉슨 상수  $K_J$  및 폰 클리칭 상수  $R_K$ 에 의해 직간접적으로 구현된 모든 SI 전기단위의 불확도가 상당히 축소될 수 있다는 것,
- 켈빈이 현재는 물의 본질적 성질의 측면에서 정의되고, 자연의 불변량이지는 하지만 실질적으로는 사용되는 물의 순도와 동위원소조성에 의존한다는 것,
- 켈빈을 재정의하여 볼츠만 상수  $k$ 의 정확한 수치에 연결하는 것이 가능하다는 것,
- 물을 재정의하여 아보가르도 상수  $N_A$ 의 정확한 수치에 연결하는 것 또한 가능하고, 그렇게 되면 킬로그램이  $h$ 의 정확한 수치에 연결되도록 정의된다 해도 더 이상 킬로그램의 정의에 의존하지 않음으로써 물질의 양과 질량 사이의 차이를 강조할 수 있다는 것,
- $h$ 와  $e$ ,  $k$ ,  $N_A$ 가 SI 단위로 표현될 때 정확한 수치를 가진다면 기타 많은 중요 기본상수와 에너지 전환 요소 값의 불확도가 제거되거나 크게 축소될 수 있다는 것,
- 2007년 제23차 총회에서 결의사항 12를 채택하여 NMI와 BIPM, CIPM, 자문위원회가 수행해야하는 작업의 개요를 설명함으로써 기본상수의 관점에서 킬로그램, 암페어, 켈빈, 물의 새로운 정의가 채택되도록 한 것,
- 이 작업이 순조로운 진전을 보였으나 2007년 제23차 총회에서 채택된 결의사항 12에 제시된 요건이 모두 충족되지 않았기 때문에 CIPM이 아직 최종안을 제출할 준비가 되지 않았다는 것,
- 그럼에도 불구하고 제안 사항의 분명하고 상세한 설명이 이제는 제시될 수 있다는 것을

#### 고려하여

국제도량형위원회가 다음과 같이 SI 개정안을 제안하는 의도를 주목한다.

- SI는 다음의 단위를 포함하는 계이다.
  - 세슘 133 원자  $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$ 의 기저상태 초미세 분열 주파수는 정확히 9 192 631 770 헤르츠이다.

- 진공에서의 빛의 속력  $c$ 는 정확히 299 792 458 미터 매 초이다.
- 플랑크 상수  $h$ 는 정확히  $6.626\ 06X \times 10^{-34}$  줄 초이다.\*
- 기본전하  $e$ 는 정확히  $1.602\ 17X \times 10^{-19}$  쿨롱이다.
- 볼츠만 상수  $k$ 의는 정확히  $1.380\ 6X \times 10^{-23}$  줄 매 켈빈이다.
- 아보가드로 상수  $N_A$ 는 정확히  $6.022\ 14X \times 10^{23}$  역몰이다.
- 주파수  $540 \times 10^{12}$  Hz인 단색 복사선의 시감효능  $K_{cd}$ 는 정확히 683 루멘 매 와트이다.

\* 상수에 표기된  $X$ 는 결의사항 채택 당시에는 이 숫자가 미지수였다는 것을 의미한다.

여기서

(i)  $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ ,  $\text{J} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-2}$ ,  $\text{C} = \text{s A}$ ,  $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$ ,  $\text{W} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-3}$ 에 의하면, 헤르츠, 줄, 쿨롱, 루멘, 와트와 단위기호 Hz, J, C, lm, W는 각각 초, 미터, 킬로그램, 암페어, 켈빈, 몰, 칸델라 단위와 그 기호 s, m, kg, A, K, mol, cd와 관련 되고,

(ii) 이 결의사항 초안에서 기호  $X$ 는 가장 최근 CODATA 조정에 기반을 둔 값을 사용하여  $h$ 와  $e$ ,  $k$ ,  $N_A$ 의 수치에 더해지는 한 개 이상의 추가 숫자를 나타내며,

SI는 계속해서 현재의 기본단위 7개를 유지할 것이고, 특히

- 킬로그램은 계속해서 질량 단위로 쓰일 것이나 플랑크 상수 수치를 J s와 동일한 SI 단위인  $\text{m}^2 \text{kg s}^{-1}$ 로 표현할 때는 정확히  $6.626\ 06X \times 10^{-34}$ 와 동일하게 정함으로써 그 중요도를 설정할 것이다.
- 암페어는 계속해서 전류 단위로 쓰일 것이나 기본전하 수치를 C와 동일한 SI 단위인 s A로 표현할 때는 정확히  $1.602\ 17X \times 10^{-19}$ 와 동일하게 정함으로써 그 중요도를 설정할 것이다.
- 켈빈은 계속해서 열역학 온도 단위로 쓰일 것이나 볼츠만 상수 수치를 J  $\text{K}^{-1}$ 와 동일한 SI 단위인  $\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{K}^{-1}$ 로 표현할 때는 정확히  $1.380\ 6X \times 10^{-23}$ 과 동일하게 정함으로써 그 중요도를 설정할 것이다.
- 몰은 계속해서 특정 요소 입자 - 원자, 분자, 이온, 전자, 기타 입자나 그 입자의 특정 그룹 - 의 물질량 단위로 쓰일 것이나 아보가드로 상수 수치를 SI 단위  $\text{mol}^{-1}$ 로 표현할 때는 정확히  $6.022\ 14X \times 10^{23}$ 과 동일하게 정함으로써 그 중요도를 설정할 것이다.

국제도량형총회는

- 킬로그램과 암페어, 켈빈, 몰의 새로운 정의가 명시적 상수 형태가 되도록 의도된다는 것, 즉 잘 알려진 기본상수의 정확한 값을 명시함으로써 정의의 단위가 간접적으로 정의된다는 것,
- 미터의 현 정의가 역시 잘 알려진 기본상수인 진공 속 빛의 속력의 정확한 값에 연결된다는 것,
- 초의 현 정의가 역시 자연의 불변량인 세슘 원자의 명확한 성질의 정확한 값에 연결된다는 것,
- 칸델라의 현 정의가 기본상수에 연결되지는 않지만 자연의 불변량의 정확한 값에 연결된다고 간주할 수 있다는 것,
- SI의 모든 기본단위가 유사한 표현으로 이루어지면 그 이해도를 높일 수 있다는 것을

이유로

CIPM이 초, 미터, 칸델라의 기존 정의를 완전히 동등한 형태로 재구성하는 것을 제안할 것이며, 그 내용은 다음과 같다.

- 초(기호 s, 시간 단위)의 중요도는 세슘 133 원자(정지 상태와 0 K도일 때)의 기저 상태 초미세 분열 주파수 수치를 Hz와 동일한 SI 단위인  $s^{-1}$ 로 표현할 때 정확히 9 192 631 770과 동일하게 정함으로써 설정된다.
- 미터(기호 m, 길이 단위)의 중요도는 진공 속 빛의 속력 수치를 SI 단위  $m s^{-1}$ 로 표현할 때 정확히 299 792 458과 동일하게 정함으로써 설정된다.
- 칸델라(기호 cd, 정해진 방향에서 광도 단위)의 중요도는 주파수  $540 \times 10^{12}$  Hz인 단색 방사선의 시감효능 수치를  $lm W^{-1}$ 과 동일한 SI 단위인  $m^2 kg^{-1} s^3 cd sr$  또는  $cd sr W^{-1}$ 로 표현할 때 정확히 683과 동일하게 정함으로써 설정된다.

이러한 방식으로 전체 7개 기본단위의 정의가 위의 7개 상수로부터 자연스럽게 도출될 것이다.

그 결과로, SI 개정 시행일에

- 국제킬로그램원기(1889년 제1차 CGPM, 1901년 제3차 CGPM) 질량에 기반을 두어 1889년부터 시행된 킬로그램 정의는 폐지될 것이다.
- CIPM(1946년 결의사항 2)가 제안한 정의에 기반을 두어 1948년부터 시행된 암페어의 정의(1948년 제9차 CGPM)는 폐지될 것이다.
- 조셉슨 효과 및 양자 홀 효과를 사용한 볼트와 옴의 표현 구축을 위해 총회(1987년 제18차 CGPM, 결의사항 6)가 요청하여 (1988년 CIPM, 권고사항 1, 2)가 채택한 조셉슨 상수  $K_{J-90}$  및 폰 클리칭 상수  $R_{K-90}$ 의 협정값은 폐지될 것이다.
- 명시성이 약한 이전 정의(1954년 제10차 CGPM, 결의사항 3)에 기반을 두어 1967/68년부터 시행된 켈빈의 정의(1967/68년 제13차 CGPM, 결의사항 4)는 폐지될 것이다.
- 탄소 12의 몰 질량이 정확히  $0.012 kg mol^{-1}$  인 정의에 기반을 두어 1971년부터 시행된 몰의 정의(1971년 제14차 CGPM, 결의사항 3)는 폐지될 것이다.
- 제17차(1983년, 결의사항 1), 제13차(1967/68년, 결의사항 1), 제16차(1979년, 결의사항 3) CGPM에서 각각 채택되어 시행된 미터, 초, 칸델라의 현 정의는 폐지될 것이다.

국제도량형총회는 같은 날에

- 국제킬로그램원기 질량  $m(K)$ 가 1 kg이 될 것이나 상대불확도는 재정의 직전  $h$ 의 권고값과 동일하며 나중에 그 값이 실험적으로 결정될 것,
- 자기상수(진공 투자율)  $\mu_0$ 가  $4\pi \times 10^{-7} H m^{-1}$ 이 될 것이나 상대불확도는 미세 구조 상수 알파의 권고값과 동일하며 나중에 그 값이 실험적으로 결정될 것,
- 물의 삼중점의 열역학 온도  $T_{TPW}$ 가 273.16 K가 될 것이나 상대불확도는 재정의 직전  $k$ 의 권고값과 동일하며 나중에 그 값이 실험적으로 결정될 것,
- 탄소 12  $M(^{12}C)$ 의 몰 질량이  $0.012 kg mol^{-1}$ 이 될 것이나 상대불확도는 재정의 직전

$N_A h$ 의 권고값과 동일하며 나중에 그 값이 실험적으로 결정될 것을  
**추가적으로 주목한다.**

국제도량형총회는

- 국가측정표준기관 및 BIPM, 학문기관의 연구자들이 계속해서 노력하여 과학계 전반과 특히 CODATA에 상수  $h$ ,  $e$ ,  $k$ ,  $N_A$ 의 측정과 관련된 작업 결과를 알릴 것과
- BIPM이 유지하는 원기의 소급성을 국제킬로그램원기에 관련시키는 작업을 계속하고 질량 단위를 재정의할 시 보급을 용이하게 하기 위하여 사용 가능한 참조 표준을 개발할 것을

**권장하며**

- CODATA가 계속해서 모든 이용 가능한 관련 정보를 기반으로 기본물리상수 조정 값을 제공하고 이 값과 불확도가 개정 SI에 사용될 것이므로 각 단위 자문위원회를 통해 그 결과를 CIPM에 알릴 것,
- CIPM이 제23차 총회 결의사항 12의 권고사항, 특히 킬로그램과 암페어, 켈빈, 몰의 새로운 정의 구현 목록 준비가 이행 되는대로 SI 개정안을 제출할 것,
- CIPM이 기본상수 면에서 SI 기본단위 정의에 대한 개선된 공식 표시를 위한 작업을 계속하여 과학적 엄격함과 명료함은 유지하며 일반 사용자들이 가능한 한 더 쉽게 이해할 수 있는 표현을 사용할 것,
- CIPM, 자문위원회, BIPM, OIML, 국가측정표준기관이 노력을 크게 강화하여 사용자 커뮤니티와 일반 대중에게 다양한 SI 단위를 재정의하는 의도를 알리는 캠페인을 시작하고 그러한 재정의의 실용적, 기술적, 입법적 영향을 고려하게 함으로써 보다 폭넓은 과학계와 사용자 커뮤니티로부터 여러 의견 및 견해를 수렴할 것을

**요청한다.**

■ **미터 정의의 구현 방법에 대한 서술(mise en pratique) 개정 및 신규 광주파수 표준 개발**  
 (CR, 546)

### 결의사항 8

국제도량형총회(CGPM)는, 제24차 회의에서,

- 광주파수 표준 성능에 신속하고 중요한 개선사항이 있다는 것,
- 여러 국가측정표준기관이 단거리 광주파수 표준에 대한 비교기술을 연구하고 있다는 것,
- 원거리 비교기술이 국제적 차원에서 개발되어 광주파수 표준을 비교할 필요가 있다는 것을

**고려하여**

- CCL/CCTF JWG가 초의 광학 기반 표현 주파수를 검토하기 위해 수행한 활동과
- CIPM이 2009년에 '미터의 실용적 구현 및 초의 부수적 표현이 포함된 적용을 위한 표준 주파수 권고 값'에 대한 공통 목록에 더한 추가 사항,

- 선진 시간 주파수 전이 기술 개발 조정에 대한 CCTF 작업반 설립을

#### 환영하고

- 국가측정표준기관이 광주파수 표준 개발 및 그에 대한 비교를 위해 자원을 투입할 것과
- BIPM이 국가측정표준기관의 참여와 함께 국제 프로젝트의 조율을 지원하며 광주파수 표준 비교에 도움이 될 기술 연구를 지향할 것을

#### 권고한다.

### CIPM, 2013

#### ■ 표준 주파수 목록 업데이트 (PV, 81, 144)

#### 권고사항 1

국제도량형위원회(CIPM)는,

- ‘미터의 실용적 구현 및 초의 이차적 표현이 포함된 적용을 위한 표준 주파수 권고 값’에 대한 공통 목록이 작성된 것과
- CCL-CCTF의 FSWG가 목록에 포함시킬 몇 가지 후보를 검토한 것을

#### 고려하여

‘미터의 실용적 구현 및 초의 이차적 표현이 포함된 적용을 위한 표준 주파수 권고 값’ 목록에 다음의 변동사항을 반영할 것을 권고한다.

- 다음 전이 주파수를 목록에 추가
  - 주파수 1 128 575 290 808 162 Hz 및 예측 상대표준불확도  $1.7 \times 10^{-14}$ 인  $^{199}\text{Hg}$  중성 원자의 비섭동 광전이  $6s^2 \ ^1S_0 - 6s \ 6p \ ^3P_0$
- 다음 전이 주파수를 목록에서 업데이트
  - 주파수 411 042 129 776 395 Hz 및 예측 상대표준불확도  $1.5 \times 10^{-14}$ 인  $^{40}\text{Ca}^+$  이온의 비섭동 광전이  $4s \ ^2S_{1/2} - 3d \ ^2D_{5/2}$
  - 주파수 1 233 030 706 593 518 Hz 및 예측 상대표준불확도  $1.2 \times 10^{-14}$ 인  $^1\text{H}$  중성 원자의 비섭동 광전이  $1S - 2S$

주: 이 주파수는 1S와 2S 상태 사이의 에너지 차이의 절반에 해당한다.

- 다음 전이 주파수를 목록에서 업데이트하고 초의 이차적 표현으로 지지
  - 주파수 642 121 496 772 645.6 Hz 및 예측 상대표준불확도  $1.3 \times 10^{-15}$ 인  $^{171}\text{Yb}^+$  이온(팔중극자)의 비섭동 광전이  $6s \ ^2S_{1/2} - 4f \ ^{13}6s^2 \ ^2F_{7/2}$
  - 주파수 518 295 836 590 865.0 Hz 및 예측 상대표준불확도  $2.7 \times 10^{-15}$ 인  $^{171}\text{Yb}$  중성 원자의 비섭동 광전이  $6s^2 \ ^1S_0 - 6s \ 6p \ ^3P_0$
- 다음 전이 주파수를 초의 이차적 표현으로 목록에 추가
  - 주파수 1 121 015 393 207 857.3 Hz 및 예측 상대표준불확도  $1.9 \times 10^{-15}$ 인  $^{27}\text{Al}^+$  이온의 비섭동 광전이  $3s^2 \ ^1S_0 - 3s \ 3p \ ^3P_0$

- 다음 전이 주파수를 초의 이차적 표현으로 목록에서 업데이트
  - 주파수 1 064 721 609 899 145.3 Hz 및 예측 상대표준불확도  $1.9 \times 10^{-15}$ 인  $^{199}\text{Hg}^+$  이온의 비섭동 광전이  $5d\ ^{10}6s\ ^2S_{1/2} - 5d\ ^96s^2\ ^2D_{5/2}$
  - 주파수 688 358 979 309 307.1 Hz 및 예측 상대표준불확도  $3 \times 10^{-15}$ 인  $^{171}\text{Yb}^+$  이온(사중극자)의 비섭동 광전이  $6s\ ^2S_{1/2} (F = 0, m_F = 0) - 5d\ ^2D_{3/2} (F = 2, m_F = 0)$
  - 주파수 444 779 044 095 485.3 Hz 및 예측 상대표준불확도  $4.0 \times 10^{-15}$ 인  $^{88}\text{Sr}^+$  이온의 비섭동 광전이  $5s\ ^2S_{1/2} - 4d\ ^2D_{5/2}$
  - 주파수 429 228 004 229 873.4 Hz 및 예측 상대표준불확도  $1 \times 10^{-15}$ 인  $^{87}\text{Sr}$  중성 원자의 비섭동 광전이  $5s^2\ ^1S_0 - 5s\ 5p\ ^3P_0$
- 다음 전이 주파수를 초의 이차적 표현으로 업데이트
  - 주파수 6 834 682 610.904 312 Hz 및 예측 상대표준불확도  $1.3 \times 10^{-15}$ 인  $^{87}\text{Rb}$ 의 비섭동 기저상태 초미세 전이

주: 예측 표준불확도 값은 신뢰 수준 68 %에 해당한다고 추정한다. 그러나 이용 가능한 데이터의 수가 매우 한정적이므로 추후 확인 시에 이 값이 정확하지 않을 가능성도 있다.

## 제25차 CGPM, 2014

### ■ 국제단위계, SI의 추후 개정 (CR, 416 및 *Metrologia*, 2015, 52, 155)

2018년 제26차 CGPM(결의 사항 1, 90쪽 참조)에서 SI 개정이 최종 승인되었다.

#### 결의사항 1

국제도량형총회(CGPM)는, 제25차 총회에서,

- 2011년 제24차 CGPM에서 채택된 결의사항 10이 킬로그램, 암페어, 켈빈, 물의 정의를 각각 플랑크 상수  $h$ , 기본전하  $e$ , 볼츠만상수  $k$ , 아보가드로상수  $N_A$ 에 연결하는 국제도량형 위원회(CIPM)의 SI 개정안 제출 의도를 주목하고, 또한 시간, 길이, 질량, 전류, 열역학 온도, 물질량, 광도에 대한 SI 단위 정의의 표현을 포함하여 SI가 정의되는 방식을 개정함으로써 그 정의가 기반으로 하는 참조 상수를 명백하게 한다는 것,
- 결의사항 10에 요약된 바와 같이, 특히 킬로그램을 물질적 인공물의 질량이 아닌 자연 불변량에 연결함으로써 이와 같은 개정을 통해 과학, 기술, 산업, 상업 분야에 많은 혜택이 발생할 것이라는 점,
- 1999년 제21차 CGPM이 채택한 결의사항 7에서 국가측정표준기관이 킬로그램 재정의로 이어질 수 있는 연구를 하도록 권고한다는 것,
- 2007년 제23차 CGPM이 채택한 결의사항 12에서 NMI, BIPM, CIPM과 그 자문위원회(CCs)가 SI 개정 계획이 CGPM에 의해 채택되도록 하기 위한 작업의 개요를 설명한다는 것을

#### 상기하며

- CODATA의  $h$ ,  $e$ ,  $k$ ,  $N_A$ 의 필수 값을 얻기 위한 관련 데이터 확보 및 분석
- 개정 SI의 질량 단위 배포를 용이하게 하기 위한 BIPM의 질량 참고 표준 총체 구축

- 킬로그램, 암페어, 켈빈, 몰의 새로운 정의의 실용적 구현 준비를 포함하여 필수 작업 완료에서 상당한 진전이 있었음을 **고려하고**, 단위자문위원회(CCU), CIPM, BIPM, NMI, CC들의 추가적 작업이 다음 사항에 집중해야 한다는 것과
  - 사용자 커뮤니티 및 일반 대중에게 SI 개정안을 알리는 캠페인
  - 과학적 정확성을 유지하며 다양한 독자층이 이해할 수 있는 방식으로 개정 SI를 제공하는 SI 책자 제9판 준비
- 이러한 진전에도 불구하고 제25차 CGPM 회의에서 개정 SI가 채택될 수 있을 만큼 데이터가 아직은 충분히 탄탄하지 않다는 것을 **주목하여**
- NMI, BIPM, 학술기관이 필수 불확도와 함께  $h$ ,  $e$ ,  $k$ ,  $M_A$ 의 결정 관련 데이터 수집을 위한 노력을 지속할 것,
  - NMI가 CC를 통해 이 데이터를 계속해서 논의 및 검토할 것,
  - CIPM이 계속해서 자문위원회와 CCU를 통해 2011년 제24차 CGPM에서 채택된 결의사항 1을 이행하는 계획을 작성할 것,
  - CIPM이 계속해서 자문위원회, NMI, BIPM, 국제법정계량기구(OIML)와 같은 기타 기구들과 함께 노력을 기울여 데이터 양, 불확도, 일관성 정도가 만족스러울 경우, 제26차 CGPM에서 현 SI를 개정 SI로 대체하는 결의사항을 채택하는 데에 필요한 모든 작업을 완료할 것을 **권장한다**.

## CIPM, 2015

### ■ 표준 주파수 목록 업데이트 (PV, 83, 207)

#### 권고사항 2

국제도량형위원회(CIPM)는,

- ‘미터의 실용적 구현 및 초의 이차적 표현이 포함된 적용을 위한 표준 주파수 권고 값’에 대한 공통 목록이 작성된 것과
- CCL-CCTF의 FSWG가 목록을 업데이트할 몇 개 후보를 검토한 것을

#### 고려하여

다음의 전이 주파수를 표준 주파수 권고 값 목록에 업데이트할 것을 **권고하고**

- 주파수  $f_{199\text{Hg}} = 1\,128\,575\,290\,808\,154.8$  Hz 및 예측 상대표준불확도  $6 \times 10^{-16}$ 인  $^{199}\text{Hg}$  중성 원자의 비섭동 광전이  $6s^2\ ^1S_0 - 6s\ 6p\ ^3P_0$
- 주파수  $f_{171\text{Yb}^+}$ (팔중극자) =  $642\,121\,496\,772\,645.0$  Hz 및 예측 상대표준불확도  $6 \times 10^{-16}$ 인  $^{171}\text{Yb}^+$  이온의 비섭동 광전이  $6s\ ^2S_{1/2} - 4f^{13}\ 6s^2\ ^2F_{7/2}$ (이 복사선은 CIPM이 초의 이차적 표현으로 이미 승인한 바 있다)
- 주파수  $f_{171\text{Yb}^+}$ (사중극자) =  $688\,358\,979\,309\,308.3$  Hz 및 예측 상대표준불확도  $6 \times$

추가 업데이트 사항은 BIPM 웹사이트에서 찾아볼 수 있다.

$10^{-16}$ 인  $^{171}\text{Yb}^+$  이온의 비섭동 광전이  $6s\ ^2S_{1/2} (F = 0, m_F = 0) - 5d\ ^2D_{3/2} (F = 2, m_F = 0)$ (이 복사선은 CIPM이 초의 이차적 표현으로 이미 승인한 바 있다)

- 주파수  $f_{88\text{Sr}^+} = 444\ 779\ 044\ 095\ 486.6\ \text{Hz}$  및 예측 상대표준불확도  $1.6 \times 10^{-15}$ 인  $^{88}\text{Sr}^+$  이온의 비섭동 광전이  $5s\ ^2S_{1/2} - 4d\ ^2D_{5/2}$ (이 복사선은 CIPM이 초의 이차적 표현으로 이미 승인한 바 있다)
- 주파수  $f_{40\text{Ca}^+} = 411\ 042\ 129\ 776\ 398.4\ \text{Hz}$  및 예측 상대표준불확도  $1.2 \times 10^{-14}$ 인  $^{40}\text{Ca}^+$  이온의 비섭동 광전이  $4s\ ^2S_{1/2} - 3d\ ^2D_{5/2}$
- 주파수  $f_{1\text{H}} = 1\ 233\ 030\ 706\ 593\ 514\ \text{Hz}$  및 예측 상대표준불확도  $9 \times 10^{-15}$ 인  $^1\text{H}$  중성 원자의 비섭동 광전이  $1\text{S} - 2\text{S}$

주: 이 주파수는 1S와 2S 상태 사이의 에너지 차이의 절반에 해당한다.

- 주파수  $f_{87\text{Sr}} = 429\ 228\ 004\ 229\ 873.2\ \text{Hz}$  및 예측 상대표준불확도  $5 \times 10^{-16}$ 인  $^{87}\text{Sr}$  중성 원자의 비섭동 광전이  $5s^2\ ^1S_0 - 5s\ 5p\ ^3P_0$ (이 복사선은 CIPM이 초의 이차적 표현으로 이미 승인한 바 있다)
- 주파수  $f_{171\text{Yb}} = 518\ 295\ 836\ 590\ 864.0\ \text{Hz}$  및 예측 상대표준불확도  $2 \times 10^{-15}$ 인  $^{171}\text{Yb}$  중성 원자의 비섭동 광전이  $6s^2\ ^1S_0 - 6s\ 6p\ ^3P_0$ (이 복사선은 CIPM이 초의 이차적 표현으로 이미 승인한 바 있다)
- 주파수  $f_{87\text{Rb}} = 6\ 834\ 682\ 610.904\ 310\ \text{Hz}$  및 예측 상대표준불확도  $7 \times 10^{-16}$ 인  $^{87}\text{Rb}$ 의 비섭동 기저상태 초미세 전이(이 복사선은 CIPM이 초의 이차적 표현으로 이미 승인한 바 있다)

다음의 전이 주파수 또한 표준 주파수 권고 값 목록에 포함할 것을 권고한다.

- 흡수 분자  $^{127}\text{I}_2$ , 포화 흡수 a1 요소, R(36) 32-0 전이값

$$f_{a1} = 564\ 074\ 632.42\ \text{MHz}$$

$$\lambda_{a1} = 531\ 476\ 582.65\ \text{fm}$$

예측 상대표준불확도  $1 \times 10^{-10}$ , 외부 요오드 셀로 안정화된 이중 주파수 다이오드 분포 궤환형 (DFB, Distributed Feedback) 레이저 복사선에 적용

- 780 nm (D2 전이) 포화 흡수의 d와 f 초미세 요소 사이 흡수 원자  $^{87}\text{Rb}\ 5S_{1/2} - 5P_{3/2}$  크로스오버값

$$f_{d/f\ \text{crossover}} = 384\ 227\ 981.9\ \text{MHz}$$

$$\lambda_{d/f\ \text{crossover}} = 780\ 246\ 291.6\ \text{fm}$$

예측 상대표준불확도  $5 \times 10^{-10}$ , 외부 루비듐 셀 d/f 크로스오버에 안정화된 파장 가변 외부 공진기 다이오드 레이저 (ECDL, External Cavity Diode Laser) 복사선에 적용

주: 예측 표준불확도 값은 신뢰 수준 68 %에 해당한다고 추정한다. 그러나 제한된 데이터 가용성으로 추후 확인 시에 이 값이 정확하지 않을 가능성도 있다.

## CIPM, 2017

## ■ SI 재정의에 대한 진전사항 (PV, 85, 101)

## 결정사항 10

국제도량형위원회(CIPM)는 자문위원회들의 SI 재정의에 대한 권고사항을 환영하였다.

CIPM은 재정의 관련 합의 조건이 충족되었음을 주목하며, 제26차 CGPM에 결의사항 A 초안을 제출할 것과 킬로그램, 암페어, 켈빈, 몰의 재정의를 추진하는데 필요한 모든 기타 절차를 진행하기로 결정하였다.

## 제26차 CGPM, 2018

■ 국제단위계, SI의 개정 (CR, 출판중 및 *Metrologia*, 2019, 56, 022001)

## 결의사항 1

국제도량형총회(CGPM)는, 제26차 총회에서,

- 국제 무역, 첨단 제조업, 인간 보건 및 안전, 환경 보호, 세계 기후 연구와 이 모든 것을 뒷받침하는 기본 과학에서 전 세계적으로 동일하게 이용 가능한 SI의 필수 요건,
- SI 단위는 장기적으로 안정적이고, 내적으로 자기모순이 없어야 하며, 가장 높은 수준의 자연의 현재 이론상 설명에 기반을 두어야 한다는 것,
- 이러한 요건을 충족시키는 SI 개정안이 만장일치로 채택된 2011년 제24차 총회 결의사항 1에 설명되었으며, 이 개정안은 7개의 기본단위의 정의가 추론되는 기본물리상수 및 기타 자연 상수에서 도출된 7개의 정의 상수를 바탕으로 SI를 정의하는 새로운 방법을 상세하게 제시하였다는 것,
- 개정 SI가 채택되기 전에 제24차 총회에서 설정하고 제25차 총회에서 확정한 조건이 충족되지 않았다는 것을

## 고려하여

국제단위계, SI는 2019년 5월 20일부터 다음을 만족하는 단위계로 **결정한다**.

- 세슘 133 원자  $\Delta\nu_{Cs}$ 의 비섭동 기저상태 초미세 전이 주파수는 9 192 631 770 Hz이다.
- 진공에서의 빛의 속도  $c$ 는 299 792 458 m/s이다.
- 플랑크 상수  $h$ 는  $6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$  J s이다.
- 기본전하  $e$ 는  $1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$  C이다.
- 볼츠만상수  $k$ 는  $1.380\ 649 \times 10^{-23}$  J/K이다.
- 아보가드로 상수  $N_A$ 는  $6.022\ 140\ 76 \times 10^{23}$  mol<sup>-1</sup>이다.
- 주파수  $540 \times 10^{12}$  Hz인 단색 복사선의 시감효능  $K_{cd}$ 는 683 lm/W이다.

여기서 Hz = s<sup>-1</sup>, J = kg m<sup>2</sup> s<sup>-2</sup>, C = A s, lm = cd m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup> = cd sr, W = kg m<sup>2</sup> s<sup>-3</sup>에 의하면, 헤르츠, 줄, 쿨롱, 루멘, 와트와 단위기호 Hz, J, C, lm, W는 각각 초, 미터, 킬로그램,

암페어, 켈빈, 몰, 칸델라 단위와 그 기호 s, m, kg, A, K, mol, cd와 관련된다.

이 결정을 내리면서 총회는 SI 기본단위에 대한 제24차 총회의 결의사항 1에 제시된 결과를 그대로 주목하며 결의사항 자체와 동일한 효력을 지닌 다음 부록에서 이를 확정한다.

총회는 CIPM이 SI 전체를 기술한 SI의 신규 책자를 제작할 것을 요청한다.

### 부록 1. 기본단위의 이전 정의 폐지

위에 채택된 SI의 새로운 정의에 따라,

- 1967/68년부터 시행된 초의 정의(제13차 CGPM, 결의사항 1)는 폐지된다.
- 1983년부터 시행된 미터의 정의(제17차 CGPM, 결의사항 1)는 폐지된다.
- 국제킬로그램원기 질량에 기반을 두어 1989년부터 시행된 킬로그램의 정의(1889년 제1차 CGPM, 1901년 제3차 CGPM)는 폐지된다.
- CIPM이 제안한 정의(1946년 CIPM, 결의사항 2)에 기반을 두어 1948년부터 시행된 암페어의 정의(제9차 CGPM)는 폐지된다.
- 1967/68년부터 시행된 켈빈의 정의(제13차 CGPM, 결의사항 4)는 폐지된다.
- 1971년부터 시행된 몰의 정의(제14차 CGPM, 결의사항 3)는 폐지된다.
- 1979년부터 시행된 칸델라의 정의(제16차 CGPM, 결의사항 3)는 폐지된다.
- 조셉슨 효과 및 양자 홀 효과를 사용한 볼트와 옴의 표현 구축을 위해 총회(1987년 제18차 CGPM, 결의사항 6)가 요청하여 (1988년 CIPM, 권고사항 1, 2)가 택한 조셉슨 상수  $K_{J-90}$  및 폰 클리칭 상수  $R_{K-90}$ 의 협정 값 채택 결정은 폐지된다.

### 부록 2. 이전 정의에 사용된 상수 상태

위에 채택된 SI의 새로운 정의 및 정의 상수 값이 기반을 두는 2017 특별 CODATA 조정 권고값에 따라 이 결의안이 채택되는 때에,

- 국제킬로그램원기 질량  $m(K)$ 은 1 kg이며 상대표준불확도는 이 결의안 채택 시의  $h$ 의 권고 값, 즉  $1.0 \times 10^{-8}$ 과 동일하며 추후에 그 값이 실험적으로 결정될 것이다.
- 진공자기투자율  $\mu_0$ 은  $4\pi \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$ 이며 상대표준불확도는 이 결의안 채택 시의 미세 구조 상수  $\alpha$ 의 권고 값, 즉  $2.3 \times 10^{-10}$ 과 동일하며 추후에 그 값이 실험적으로 결정될 것이다.
- 물의 삼중점의 열역학 온도  $T_{TPW}$ 는 273.16 K이며 상대표준불확도는 이 결의안 채택 시의  $k$ 의 권고 값, 즉  $3.7 \times 10^{-7}$ 과 거의 동일하며 추후에 그 값이 실험적으로 결정될 것이다.
- 탄소 12  $M(^{12}\text{C})$ 의 몰 질량은  $0.012 \text{ kg mol}^{-1}$ 이며 상대표준불확도는 이 결의안 채택 시의  $N_A h$ 의 권고 값, 즉  $4.5 \times 10^{-10}$ 과 동일하며 추후에 그 값이 실험적으로 결정될 것이다.

### 부록 3. SI 기본단위

정의 상수의 고정 수치 측면에서 위에 채택된 SI의 정의부터 시작하여 7개 기본단위 각각의 정의는 한 개 이상의 이 정의 상수를 적절히 택함으로써 추정되며 다음의 정의를 내린다.

- 초(기호: s)는 시간의 SI 단위이다. 초는 세슘 133 원자의 섭동이 없는 바닥상태의 초미세 전이 주파수  $\Delta\nu_{Cs}$ 를 Hz 단위로 나타낼 때 그 수치를 9 192 631 770으로 고정함으로써 정의된다. 여기서 Hz는  $s^{-1}$ 과 같다.
- 미터(기호: m)는 길이의 SI 단위이다. 미터는 진공에서의 빛의 속력  $c$ 를  $m s^{-1}$  단위로 나타낼 때 그 수치를 299 792 458로 고정함으로써 정의된다. 여기서 초(기호: s)는 세슘 주파수  $\Delta\nu_{Cs}$ 를 통하여 정의된다.
- 킬로그램(기호: kg)은 질량의 SI 단위이다. 킬로그램은 플랑크 상수  $h$ 를 J s 단위로 나타낼 때 그 수치를  $6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ 으로 고정함으로써 정의된다. 여기서 J s는  $kg\ m^2\ s^{-1}$ 과 같고, 미터(기호: m)와 초(기호: s)는  $c$ 와  $\Delta\nu_{Cs}$ 를 통하여 정의된다.
- 암페어(기호: A)는 전류의 SI 단위이다. 암페어는 기본전하  $e$ 를 C 단위로 나타낼 때 그 수치를  $1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ 으로 고정함으로써 정의된다. 여기서 C은 A s와 같고, 초(기호: s)는  $\Delta\nu_{Cs}$ 를 통하여 정의된다.
- 켈빈(기호: K)은 열역학 온도의 SI 단위이다. 켈빈은 볼츠만 상수  $k$ 를  $J\ K^{-1}$  단위로 나타낼 때 그 수치를  $1.380\ 649 \times 10^{-23}$ 으로 고정함으로써 정의된다.  
여기서  $J\ K^{-1}$ 은  $kg\ m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$ 과 같고, 킬로그램(기호: kg), 미터(기호: m)와 초(기호: s)는  $h$ ,  $c$ 와  $\Delta\nu_{Cs}$ 를 통하여 정의된다.
- 몰(기호: mol)은 물질량의 SI 단위이다. 1 몰은 정확히  $6.022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ 개의 구성 요소를 포함한다. 이 숫자는  $mol^{-1}$  단위로 표현된 아보가드로 상수  $N_A$ 의 고정된 수치로서 아보가드로 수라고 부른다. 어떤 계의 물질량(기호:  $n$ )은 명시된 구성요소의 수를 나타내는 척도이다. 구성요소란 원자, 분자, 이온, 전자, 그 외의 입자 또는 명시된 입자들의 집합체가 될 수 있다.
- 칸델라(기호: cd)는 어떤 주어진 방향에서 광도의 SI 단위이다. 칸델라는 주파수가  $540 \times 10^{12}$  Hz인 단색광의 시감효능  $K_{cd}$ 를  $lm\ W^{-1}$  단위로 나타낼 때 그 수치를 683으로 고정함으로써 정의된다. 여기서  $lm\ W^{-1}$ 은  $cd\ sr\ W^{-1}$  또는  $cd\ sr\ kg^{-1}\ m^{-2}\ s^3$ 과 같고, 킬로그램(기호: kg), 미터(기호: m)와 초(기호: s)는  $h$ ,  $c$ 와  $\Delta\nu_{Cs}$ 를 통하여 정의된다.

## 부록 2. 주요 단위들에 대한 정의의 실제적 구현

부록 2는 전자문서 형태로만 출판하며, BIPM 웹사이트인 [www.bipm.org](http://www.bipm.org)에서 찾아볼 수 있다.

### 부록 3. 광화학적, 광생물학적 양에 대한 단위

부록 3은 전자문서 형태로만 출판하며, BIPM 웹사이트인 [www.bipm.org](http://www.bipm.org)에서 찾아볼 수 있다.

## 부록 4. SI와 그 기본단위의 발전에 대한 연혁

### 1부. SI 단위 구현의 역사적 발전

단위 구현을 위해 사용되는 실험적 방법 중 물리학 관계식을 사용하는 것을 일차적 방법이라 한다. 일차적 방법의 근본적 특징은 어떤 양을 특정 단위로 측정할 때 그 단위 자신을 포함하지 않는 양과 상수만을 사용하여 단위의 정의로부터 직접 측정하도록 하는 것이다.

전통적으로 하나의 양에 대한 단위는 일상적인 측정값이 편리한 크기의 수치를 가지도록 선택한 그 양의 특정한 예로 정하였다. 현대 과학이 등장하기 이전의 단위는 길이와 질량을 나타내는 미터와 킬로그램처럼 인공물로 정의되거나, 초를 지구의 자전을 이용하여 정의한 것과 같이 특정 물체의 속성으로 정의되었다. 18세기 말 미터법 태동기에 이미 길이 단위에 대한 바람직한 정의는 진자의 주기와 같이 자연의 보편적 속성에 기초할 수 있다고 인식되었다. 그러한 정의는 시간 및 장소와 관계없이 원칙적으로 전 세계에서 사용될 수 있었을 것이다. 하지만 당시에는 실용적인 고려를 통해 미터와 킬로그램에 대해서는 보다 단순한 인공물 정의가 사용되었고 초는 계속해서 지구의 자전과 관련되어 있었다. 1960년이 되어서야 비물질 정의가 처음으로 채택되었으며, 그 정의는 미터에 대한 특정 광학 복사선 파장이었다.

그 이후로 인공물에서 비롯되지 않은 암페어, 켈빈, 몰, 칸델라에 대한 정의가 채택되었다. 암페어의 경우는 특정 전자기력을 만드는데 필요한 특정 전류를 가리키고, 켈빈은 특정 열역학적 상태, 즉 물의 삼중점을 가리킨다. 초의 원자 정의조차도 세슘 원자의 특정 전이 측면에 기반하였다. 킬로그램은 여전히 인공물로부터의 전환에 저항하는 유일한 단위로 남아 눈에 띄었다. 진정한 보편성으로의 길을 연 정의는 1983년 미터에 대한 정의였다. 명시되지는 않았지만, 이 정의는 빛의 속력에 대한 고정된 수치를 의미했다. 그러나 그 정의가 종래의 형태로 표현되면서, 기본적으로 미터는 특정 시간 동안 빛이 이동한 거리로 명시되었다. 이러한 방식은 SI 기본단위의 다른 정의에도 반영되어 예를 들어 “암페어는 ...한 전류이다”와 “켈빈은 명시된 특정 온도의 부분이다”와 같이 동일한 형태를 가지게 되었다. 이러한 정의는 명시적 단위 정의라고 칭할 수 있다.

이러한 정의는 보편성 및 접근성에 대한 많은 요건을 충족하고 다양한 구현을 가능하게 하지만, 그럼에도 불구하고 실제적 구현은 각 정의에 명시된 특정 조건이나 상태에 직·간접적으로 연결되는 실험으로 제한된다. 결과적으로 이러한 정의의 구현은 정의에 명시된 특정 조건이나 상태 구현보다 결코 더 정확할 수 없다.

이는 세슘 원자의 마이크로파 전이에 기초한 현재의 초의 정의에서 특히 문제가 된다. 현재 다양한 원자와 이온의 광학 전이선 주파수가 세슘의 정의된 주파수보다 수십 배 더 재현성이 높은 것으로 입증되었다.

특정 조건이나 상태를 명시한 정의는 구현의 정확도에 기본적인 제약이 있는데, 이를 대신한 일련의 상수에 기초한 SI의 현 정의에서는 특정 상수와 측정하고자 하는 양을 연결하는 어떠한 편리한 물리적 관계식도 사용할 수 있다. 이는 기본 측정 단위를 정의하는 훨씬 더 일반적인 방법이다. 미래의 발전이 훨씬 더 정확하게 단위를 구현할 수 있는 다른 방식의 몰랐던 관계식을 끌어낼 수 있기 때문에, 이는 현재의 과학과 기술에 의해 제약을 받지 않는 방법이다. 이러한 방식으로 정의되면 원칙적으로는 단위 구현의 정확도에 한계가 없다. 초의 정의는 예외인데 세슘의 고유한 마이크로파 전이가 정의의 기초로 당분간은 유지될 것이기 때문이다.

명시적 단위 정의와 명시적 상수 정의 간의 차이는 고정된 빛의 속력에 의존한 미터의 두 가지 이전 정의와 켈빈의 두 가지 정의를 사용하여 분명하게 설명할 수 있다. 1983년 기존의 정의에서는 “미터는 빛이 진공에서 1/299 792 458 초 동안 진행한 경로의 길이이다”라고 되어있다. 새로운 정의에서 미터는 초를 정의하는 상수, 특정 세슘 주파수, 단위  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 표현되는 빛의 속력의 수치를 정함으로써 정의된다고 간단히 명시하고 있다. 따라서 물리학의 모든 관계식을 사용할 수 있는데, 여기에는 이전 정의가 말하는 바와 같이 천문학적 거리를 활용하여 주어진 거리를 이동하는 데 걸린 시간을 구하는 접근법은 물론, 주파수와 파장을 빛의 속력과 연결시키는 단순 관계식도 포함된다. 물의 삼중점 온도의 고정 수치를 기반으로 한 켈빈의 이전 정의는 궁극적으로 물의 삼중점에서 측정의 필요로 한다. 볼츠만 상수의 고정 수치를 기반으로 한 새로운 정의는 원칙적으로  $k$ 가 나타나는 모든 열역학적 관계식이 사용될 수 있고 온도 눈금 어느 지점에서라도 열역학 온도를 결정할 수 있다는 점에서 훨씬 더 일반적이라고 할 수 있다. 예를 들어 온도  $T$ 에서  $(2\pi^5 k^4/15c^2 h^3) T^4$ 인 흑체의 총 방사 방출도를  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 단위로 결정함으로써  $T$ 를 직접적으로 결정할 수 있다.

가장 근본적인 변화가 있었던 단위인 킬로그램은 질량, 플랑크 상수, 빛의 속도, 세슘 주파수를 연결하는 모든 물리학 관계식을 통해 구현이 가능하다. 이러한 관계식 한 가지는 이전에 와트밸런스라고 알려졌고 최근에는 키블<sup>4</sup> 저울로 알려진 전기기계식 저울의 작동을 설명한다. 이 장치를 이용하면 질량  $m$ , 중력에 의한 국지 가속  $g$ , 속도  $v$  등으로부터 측정되는 역학적 일률을 각각 양자 홀 효과와 조셉슨 효과로 측정되는 전류와 전압으로 측정되는 전기적 일률로 측정할 수 있다. 결과적 관계식은  $mgv = Ch$ 로 여기서  $C$ 는 측정한 주파수를 포함하는 교정상수이며  $h$ 는 플랑크 상수이다.

킬로그램의 일차적 구현에 사용되는 다른 방법은 실리콘 구(球)의 원자 수를 결정하고 다음 관계식을 사용하는 것이다.

4 브라이언 키블이 와트 저울을 발명했음을 인정하기 위함

$$m = \frac{8V}{a_0^3} \frac{2R_\infty h}{ca^2} \frac{m_{Si}}{m_e}$$

이때 구(약 1 kg)의 질량은  $m$ , 부피는  $V$ ,  $a_0$ 는 격자 상수,  $R_\infty$ 는 리드베리 상수,  $a$ 는 미세 구조 상수,  $m_{Si}$ 는 실리콘 원자 질량(구에 사용된 세 개 동위원소의 평균),  $m_e$ 는 전자 질량을 의미한다. 첫 번째 분수는 구의 원자 수, 두 번째 분수는 전자질량에 해당하고, 세 번째 분수는 (동위원소 평균) 실리콘 원자의 질량 대비 전자질량의 비율이다.

새로운 정의를 통해 질량을 측정하는 또 다른 방법은 미시적 스케일에서  $h/m$ 을 포함하는 관계를 이용하여 원자 반동을 측정하는 것이다.

이 모든 설명은 새로운 단위 정의 방법의 일반성을 명확히 잘 보여준다. 기본 단위 및 기타 단위의 구현에 대한 상세한 정보는 BIPM 웹사이트에서 찾아볼 수 있다.

## 2부. SI의 역사적 발전

제9차 CGPM(1948년, 결의사항 6; CR 64)은 CIPM에 다음 사항을 지시했다.

- 측정 단위에 대한 일련의 완전한 규칙 확립을 연구할 것
- 이러한 목적을 위해 모든 국가의 과학, 기술, 교육계에서의 지배적인 견해를 공식적인 질의를 통하여 조사할 것
- *미터협약* 참여국 모두가 채택하기에 적합한 측정 단위의 실용적 체계 구축에 대한 권고 사항을 제시할 것

또한 동 CGPM은 결의사항 7(CR 79)를 통해 ‘단위기호 표기에 대한 일반 원칙’을 마련하고 특별한 명칭이 부여된 일부의 일관된 유도단위를 열거하여 제시했다.

제10차 CGPM(1954년, 결의사항 6; CR 80)은 길이, 질량, 시간, 전류, 열역학 온도, 광도의 6개의 양과 그에 해당하는 미터, 킬로그램, 초, 암페어, 켈빈, 칸델라 등 6개의 기본단위를 이러한 실용적 체계의 기본량과 단위로 채택했다. 물리학자와 화학자 간의 오랜 논의 끝에, 제14차 CGPM(1971년, 결의사항 3, CR 78 및 *Metrologia* 1972, 8, 36)은 물질량과 몰을 일곱 번째 기본량 및 단위로 추가했다.

제11차 CGPM(1960년, 결의사항 12; CR 87)은 이와 같은 실용적 단위 체계를 국제적 약어 SI와 함께 국제단위계(*Système international d'unités*)로 명명하여 채택하고 접두어, 유도단위, 이전의 보충단위, 기타 사항에 대한 규칙을 마련함으로써, 측정 단위의 종합 설명서를 구축했다. 이후 CGPM과 CIPM 회의에서 과학의 발전 및 사용자의 변화하는 요구를 고려하여 SI의 초기 구조를 보충하거나 변경했다.

이러한 중요 결정사항으로 이어진 일련의 역사적 사건은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 프랑스 혁명 당시 십진미터법의 창조에 이어 1799년 6월 22일 파리의 공화국 문서 보관소에 공탁된 미터와 킬로그램을 나타내는 두 개의 백금 표준이 현재의 SI를 이끈 첫걸음이라고 볼 수 있다.
- 1832년 가우스(Gauss)는 천문학에 근거하여 정의된 초와 함께 물리학을 위한 일관성 있는 단위계로서 미터법의 활용을 크게 촉진시켰다. 가우스는 길이, 질량, 시간, 각각에 대한 3개의 역학적 단위인 밀리미터, 그램, 초를 기반으로 한 십진법에 의하여 지구 자기장의 절대 측정을 실시한 최초의 인물이었다. 이후에 가우스와 웨버(Weber)는 여기서 나아가 이것을 다른 전기적 현상의 측정에까지 확장하였다.
- 전기와 자기 분야에서의 이러한 활용은 1860년대에 들어서 맥스웰(Maxwell)과 톰슨(Thomson)의 활발한 주도로 영국과학진흥협회(BAAS)를 통하여 더욱 확대되었다. 그들은 기본단위와 유도단위로 구성된 일관성 있는 단위계의 요건을 체계화하였다. 1874년 BAAS는 세 개의 역학적 단위인 센티미터, 그램, 초에 근거한 3차원의 일관성 있는 단위계인 CGS계를 도입하였고, 마이크로(micro)에서 메가(mega)까지 접두어를 사용하여 십진분수와 십진배수를 표현하게 되었다. 이 CGS계는 이후 실험과학으로서의 물리학이 발전하는 데 큰 기반이 되었다.
- 전기와 자기 분야에서 일관성 있는 CGS 단위의 크기가 활용하기에는 불편하다는 사실이 입증됨에 따라 1880년대에 이르러 BAAS는 현재의 국제전기기술위원회(IEC)의 전신인 국제전기협의회(International Electrical Congress)와 함께 상호 일관성 있는 일련의 실용단위를 승인하였다. 여기에는 전기저항에 대한 옴, 기전력에 대한 볼트, 그리고 전류에 대한 암페어가 포함되었다.
- 1875년 5월 20일 미터협약의 체결로 BIPM과 CGPM, 그리고 CIPM이 탄생하였으며, 미터와 킬로그램에 대한 새로운 원기 구축에 착수하였다. 1889년에 개최된 제1차 CGPM에서 미터와 킬로그램에 대한 국제원기를 인준하였다. 이 단위들은 시간의 단위인 천문학적 초와 더불어 CGS계와 유사하지만 MKS계로 알려진 미터, 킬로그램, 초를 기본단위로 하는 3차원의 역학적 단위계를 형성하게 되었다.
- 1901년 지오르지(Giorgi)는 이 MKS계를 실용적인 전기단위와 결합하여 하나의 일관성 있는 4차원 체계를 형성할 수 있다는 사실을 보여주었다. 이것은 이 3개의 기본단위에 암페어나 옴과 같은 제4의 전기적 성질의 단위를 추가하고 또 전자기 분야에서 발생하는 관계식을 소위 유리화된 형태로 다시 고쳐 씌으로써 가능하였다. 지오르지의 제안은 많은 새로운 발전을 가져오는 길을 열었다.
- 1921년 제6차 CGPM에서 미터협약이 개정되어 BIPM의 활동 영역과 임무가 물리학의 다른 분야로까지 확장되고, 이어 1927년 제7차 CGPM에서 전기 자문위원회(CCE)가 설립된 이후, 지오르지의 제안은 IEC와 국제순수응용물리연맹(IUPAP), 그리고 기타 국제기구를 통하여 면밀히 검토되었다. 그 결과 1939년에 전기 자문위원회는 미터, 킬로그램, 초, 암페어에 근거한 4차원 체계인 MKSA계의 채택을 제안하였고, 이 제안은 1946년 CIPM에 의해 승인되었다.

- 1948년 BIPM은 전 세계에 걸쳐 의견조사를 시작하였고, 그 결과 마침내 1954년 제10차 CGPM은 열역학 온도와 광도에 대한 각각의 기본단위로서 켈빈과 칸델라를 도입하는 것을 승인하였다. 1960년 제11차 CGPM에서 이 국제단위계에 SI라는 명칭이 붙여졌다. 접두어와 유도단위, 이전의 보충단위, 기타 사항에 대한 규칙을 정했으며, 이렇게 하여 모든 측정 단위의 종합 설명서를 제공하게 되었다.
- 1971년 제14차 CGPM에서 새로운 기본단위 몰(기호 mol)이 물질량 측정을 위해 채택되었다. 이는 국제순수응용화학연맹(IUPAC)가 지지한 IUPAP의 기호, 단위, 전문용어 위원회(SUN Commission)의 제안에서 비롯된 국제표준화기구의 제안에 따른 것이다. 이로써 SI 기본단위의 수는 7개가 되었다.
- 그 이후로 SI 단위를 물리학의 기본상수와 원자의 성질과 같은 엄밀한 불변량과 연결시키는 데에 있어 대단한 발전이 있었다. 2011년 제24차 CGPM은 SI 단위를 그런 불변량에 연결하는 것이 중요함을 인식하고 그러한 일곱 개의 상수를 정의의 참조 기준으로 사용하여 SI의 새로운 정의 원칙을 채택했다. 제24차 CGPM이 열린 시기에는 당시 기본단위 측면에서 값을 정하는 실험이 완전히 일관적이지 않았으나 2018년 제26차 CGPM 당시에는 이 일관성이 달성되어 결의사항 1에서 SI의 새로운 정의가 채택되었다. 이것이 이 책자에 제시된 정의의 기반이며 SI를 정의하는 가장 단순하고 근본적인 방법이다.
- SI는 이전에 7개의 기본단위와 기본단위의 거듭제곱의 곱으로 구성되는 유도단위로 정의되었다. 7개의 기본단위는 나중에 SI가 된 미터법이 지난 130년 동안 진화하고 발전해 오면서 역사적인 이유로 선택된 것이다. 이 선택이 유일한 것은 아니었지만 SI를 기술하고 유도단위를 정의하는 체계를 제공함으로써 여러 해에 걸쳐 정착되었고 익숙해졌다. 기본단위의 역할은 SI 자체가 7개의 정의 상수로 정의된 지금도 계속된다. 그러므로 이 책자에서 7개 기본단위 정의를 여전히 찾을 수 있으나 이제는 7개의 정의 상수(세슘 초미세 주파수  $\Delta\nu_{Cs}$ , 진공  $c$ 에서의 빛의 속도, 플랑크 상수  $h$ , 기본전하  $e$ , 볼츠만 상수  $k$ , 아보가드로 상수  $N_A$ , 확정 가시 복사선의 시감효능  $K_{cd}$ )를 기초로 한다.

7개 기본단위의 정의는 7개의 정의 상수의 수치와 정확한 관계가 있다. 그러나 7개의 정의 상수와 7개 기본단위 사이에 일대일의 관련성은 없는데 그 이유는 많은 기본단위가 하나 이상의 정의 상수를 필요로 하기 때문이다.

### 3부. 기본단위에 대한 역사적 관점

#### 시간의 단위, 초

1960년 이전에 시간의 단위인 초는 평균 태양일의 1/86 400로 정의되었다. ‘평균 태양일’의 정확한 정의는 천문학자들에게 맡겨졌다. 그러나 지구의 불규칙한 자전으로 이 정의가 불충분하다는 것이 측정으로 밝혀졌다. 제11차 CGPM(1960년, 결의사항 9, CR, 86)은 시간의 단위를 좀 더 정밀하게 정의하기 위하여 국제천문연맹이 1900년도의 태양년을 기초로 하여 만든 정의를 채택하였다. 그러나 원자나 분자의 두 에너지 준위 사이의 전이에 기초를 두는 원자 시간 표준이 구현 가능하고 훨씬 더 정확하게 재현될 수 있다는 것이 이미 실험 결과로 증명되었다. 시간 단위의 매우 정밀한 정의가 과학과 기술에 필수 불가결하다는 점을 고려하여 제13차 CGPM(1967-68년, 결의사항 1, CR, 103 및 *Metrologia*, 1968, 4, 43)은 세슘 133 원자의 기저 상태 초미세 전이 주파수를 참조하여 초의 새로운 정의를 선택하였다. 2018년 제26차 CGPM의 결의사항 1에서는 현재 이 동일한 정의의 더 정밀한 개정 표현이 세슘 133 원자의 비섭동 기저 상태 초미세 전이 주파수의 고정 수치,  $\Delta\nu_{Cs}$  관점에서 채택되었다.

#### 길이의 단위, 미터

1889년의 미터 정의, 즉 백금-이리듐 국제원기의 길이는 1960년 제11차 CGPM에서 크립톤 86의 특정 전이에 해당하는 복사선의 파장에 근거를 둔 정의로 대체되었다. 이 변경은 미터 정의를 구현하는 정확도를 향상하기 위하여 채택되었으며, 이는 이동식 현미경이 장착된 간섭계를 사용하여 간섭무늬의 개수를 세어 광경로차를 측정함으로써 이루어졌다. 다음으로 이 정의는 1983년 제17차 CGPM(결의사항 1, CR, 97 및 *Metrologia*, 1984, 20, 25)에서 특정 시간 간격으로 빛이 진공에서 이동하는 거리를 참조하는 정의로 대체되었다. 1889년 제1차 CGPM(CR, 34-38)에서 인준된 최초의 국제미터원기는 1889년에 정해진 조건하에 아직도 BIPM에 보관되어 있다. 빛의 속력의 고정된 수치  $c$ 에 대한 의존성을 분명하게 하기 위하여 미터 정의의 표현이 2018년 제26차 CGPM의 결의사항 1에서 변경되었다.

#### 질량의 단위, 킬로그램

1889년의 킬로그램 정의는 간단히 백금-이리듐으로 만들어진 인공물인 국제킬로그램원기의 질량이었다. 이는 과거에도 그랬고 지금도 여전히 1889년 제1차 CGPM(CR, 34-38)에서 정해진 조건하에 BIPM에 보관되어 있으며, 당시 CGPM은 국제원기를 인준하고 “이제부터 이 원기를 질량의 단위로 삼는다”라고 선언하였다. 40개의 유사한 원기가 거의 동시에 만들어졌고 모두 국제원기와 똑같은 질량을 가지도록 가공되고 다듬어졌다. 1889년 제1차 CGPM에서 국제원기에 대한 교정 이후, 이러한 ‘국가원기’ 대부분은 미터 협약 회원국에 개별적으로 배정되었고 일부는 BIPM에도 맡겨졌다. 1901년 제

3차 CGPM(CR, 70)은 흔히 사용되고 있는 ‘무게’라는 단어가 가지는 뜻의 모호함을 없애기 위한 선언에서 “킬로그램은 질량의 단위이며, 국제킬로그램원기의 질량과 같다”라고 확인하였다. 이러한 선언 전체 내용은 상기 CGPM 의사록 70쪽에 나타나 있다.

1946년 국가원기의 두 번째 검증 당시에 평균적으로 이들 원기의 질량이 국제원기의 질량에서 벗어나는 것이 발견되었다. 이는 1989년에서 1991년 수행된 세 번째 검증에서도 확인되었으며, 1889년 제1차 CGPM이 인준한 최초의 원기에 대한 차이의 중간값은 약 25 마이크로그램이었다. 질량 단위의 장기 안정도를 확실히 하고, 양자 전기 표준기의 장점을 충분히 이용하며, 현대 과학에 더욱 유용하게 하기 위하여 선택된 기본상수인 플랑크 상수  $h$ 의 값에 기반을 둔 킬로그램의 새로운 정의가 2018년 제26차 CGPM의 결의사항 1에서 채택되었다.

### 전류의 단위, 암페어

전류와 저항에 대한 ‘국제단위’라 불리는 전기단위는 1893년 시카고에서 열린 국제전기총회에서 도입되었고, ‘국제 암페어’와 ‘국제 옴’의 정의는 1908년 런던국제회의에서 확정되었다.

1933년 제8차 CGPM 당시 ‘국제단위’를 소위 ‘절대단위’로 대체하자는 만장일치의 요구가 있었다. 그러나 일부 연구기관에서 국제단위와 절대단위 사이의 비율을 결정하는데 필요한 실험을 아직 끝내지 못했기 때문에 CGPM은 CIPM에게 권한을 부여하여 적절한 때에 이 비율과 새로운 절대단위를 시행할 일자를 정하도록 했다. CIPM은 1946년(결의사항 2, PV, 20, 129-137)에 이를 이행하여 새로운 단위를 1948년 1월 1일에 시행하는 것으로 결정하였다. 1948년 10월 제9차 CGPM에서 CIPM이 내린 결정을 승인하였다. CIPM이 택한 암페어의 정의는 전류를 나르는 평행 전선 사이의 힘을 참조하였으며 진공자기투자율  $\mu_0$ (자기상수로도 불림) 수치를 고정하는 효과를 지녔다. 진공전기 유전율  $\epsilon_0$ (전기상수로도 불림) 수치는 1983년 채택된 미터의 재정의의 결과로 그 때 고정되었다.

그러나 1948년의 암페어 정의는 구현하기 어려웠고, 볼트와 옴을 플랑크 상수  $h$ 와 기본 전하  $e$ 의 특정 조합에 연결하는 실용 양자 표준(조셉슨 효과 및 양자 홀 효과 기반)이 옴의 법칙(1987년 제18차 CGPM, 결의사항 6, CR 100)을 통한 암페어의 실제적 구현으로 거의 보편적으로 사용하게 되었다. 그 결과 실용적 양자전기표준을 SI와 정확히 일치시키기 위해 킬로그램 재정의를 위한  $h$  수치 고정 및 암페어 재정의를 위한  $e$  수치 고정이 당연하게 되었다. 기본 전하  $e$ 의 고정 수치에 기반을 둔 현재 정의는 2018년 제26차 CGPM의 결의사항 1에서 채택되었다.

### 열역학 온도의 단위, 켈빈

열역학 온도 단위의 정의는 1954년 제10차 CGPM(결의사항 3, CR 79)에서 정해졌는데, 여기서 물의 삼중점  $T_{TPW}$ 을 기본 고정점으로 선정하고 이 온도를 273.16 K로 정함으로

씨 켈빈을 정의했다. 1967-1968년 제13차 CGPM(결의사항 3, CR, 104 및 *Metrologia*, 1968, 4, 43)에서 이런 식으로 정의된 단위에 대해 ‘켈빈 도’(기호 °K) 대신 켈빈(기호 K)이라는 명칭을 채택했다. 그러나 동위원소 조성이 잘 알려진 순수한 물 시료가 필요하고 또 새로운 일차 온도측정법의 개발이 필요했기 때문에 이 정의를 구현하기가 실제적으로 어려웠고, 따라서 볼츠만 상수  $k$ 의 고정된 수치를 기반으로 한 켈빈의 새로운 정의를 채택하게 되었다. 이 두 가지 제약을 없앤 현 정의는 2018년 제26차 CGPM의 결의사항 1에서 채택되었다.

### 물질량의 단위, 몰

화학의 기본법칙이 발견된 이래 ‘그램-원자’, ‘그램분자’와 같은 단위들을 화학원소나 화합물의 양을 표현하는데 사용하여 왔다. 이들 단위는 실제로 상대적 원자 및 분자 질량인 ‘원자량’ 및 ‘분자량’과 직접적인 관계가 있었다. ‘원자량’의 첫 기록은 본래 그 당시 일반적으로 16으로 합의된 산소의 원자량에 연결되어 있었다. 물리학자가 질량분석기로 산소의 동위원소를 분리하여 그 중 하나에 16이란 값을 부여한 반면, 화학자는 자연에 존재하는 원소로 여겨진 산소 동위원소 16, 17, 18의 혼합물(약간 가변적인)에 동일한 값을 부여하였다. 1959년~1960년에 걸쳐 국제순수응용물리화학연맹(IUPAP)과 국제순수응용화학연맹(IUPAC) 사이의 합의에 의하여 이 이중성을 종결지었다. 물리학자와 화학자는 질량수가 12인 탄소 동위원소(탄소 12,  $^{12}\text{C}$ )의 소위 원자량, 올바른 표현으로는 상대원자질량  $A_r$ 에 정확히 12라는 값을 부여하는 데 합의하였다. 이렇게 얻어진 통일된 척도를 통하여 각각 원자량, 분자량이라고도 알려진 상대원자질량과 상대분자질량이 결정된다. 이 합의는 몰의 재정의에 의해 영향을 받지 않는다.

화학자들이 화학원소 또는 화합물의 양을 명시하는데 사용하는 양을 ‘물질량’이라고 부른다. 물질량(기호  $n$ )은 시료 중의 특정한 기본 개체 수  $N$ 의 개수에 비례하도록 정의되는데, 이 때 비례상수는 모든 개체에 대해서 동일한 보편상수이다. 보편상수는 아보가드로 상수  $N_A$ 의 역수로  $n = N/N_A$ 이다. 물질량의 단위는 몰(기호 mol)이라 불린다. IUPAP, IUPAC, ISO의 제안에 따라 CIPM은 1967년에 몰의 정의를 개발하고 탄소 12의 몰 질량은 정확히 0.012 kg/mol이라고 명시함으로써 1969년 이 정의를 확정하였다. 이로써 구성 요소  $X$ 로 이루어진 모든 순수한  $S$ 의 물질량  $n_S(X)$ 를 시료의 질량  $m_S$ 와 구성요소  $X$ 의 몰 질량  $M(X)$ 로부터 직접적으로 정의할 수 있게 되었는데, 여기서 몰 질량은 아보가드로 상수를 정확히 모르더라도  $n_S(X) = m_S/M(X)$  와  $M(X) = A_r(X)$  g/mol의 관계를 사용하여  $X$ 의 상대적원자질량  $A_r$ (원자량 또는 분자량)로부터 구할 수 있다. 따라서 몰의 이러한 정의는 킬로그램의 인공물 정의에 의존하였다.

이런 식으로 정의된 아보가드로 상수의 수치는 탄소 12의 12 그램 내의 원자 개수와 동일하였다. 그러나 최근 기술 발달로 인해 이 수는 이제 매우 정밀하게 알려져 보다 간단하고 보편적인 몰의 정의가 가능해졌는데, 즉 1 몰 내 구성 요소의 수를 정확히 명시함으로써 아보가드로 상수의 수치를 고정하게 되었다. 이는 몰의 새로운 정의와 아보가드로 상수 값이 더 이상 킬로그램의 정의에 의존하지 않는 효과를 가진다. ‘물질량’과

‘질량’이라는 근본적으로 다른 양 사이의 구분이 강조되었다. 아보가드로 상수  $N_A$ 의 고정된 수치에 기반을 둔 몰의 현재의 정의는 2018년 제26차 CGPM의 결의사항 1에서 채택되었다.

### 광도의 단위, 칸델라

1948년 이전에 여러 나라에서 사용되었던 불꽃이나 백열 필라멘트 표준에 기반을 둔 광도의 단위는 백금 응고점 온도의 플랑크 복사체(흑체)의 휘도에 기반을 둔 ‘신축광’으로 처음 대체되었다. 이러한 변경은 1937년 이전에 이미 국제조명위원회(CIE)와 CIPM에 의해 마련되었으며 그 결정은 1946년에 CIPM에 의해 공포되었다. 그 후 1948년 제9차 CGPM에서 비준되었는데 이때 광도 단위에 대한 새로운 국제명칭 칸델라(기호 cd)가 채택되었다. 1954년 제10차 CGPM에서 칸델라를 기본단위로 설정하였고, 1967년 제13차 CGPM(결의사항 5, CR, 104 및 *Metrologia*, 1968, 4, 43-44)에서는 이 정의를 수정하였다.

1979년에 고온에서 플랑크 복사체를 구현하기에는 어려움이 있었고 복사측정학에서 광학적 복사출력 측정이라는 새로운 가능성을 제공하였기 때문에 1979년 제16차 CGPM(결의사항 3, CR, 100 및 *Metrologia*, 1980, 16, 56)은 칸델라의 새로운 정의를 채택하였다.

칸델라의 현 정의는 주파수  $540 \times 10^{12}$  Hz인 단색 복사선의 시감효능  $K_{cd}$ 에 대한 고정 수치를 사용하며, 이는 2018년 제26차 CGPM의 결의사항 1에서 채택되었다.

## 이 책에서 사용된 약어 목록

### 1 연구소 및 위원회, 회의에 대한 약어

**BAAS**(영국과학진흥협회): British Association for the Advancement of Science

**BIPM**(국제도량형국): International Bureau of Weights and Measures/Bureau international des poids et mesures

**CARICOM**(카리브공동체): Caribbean Community

**CCAUV**(음향·초음파·진동 자문위원회): Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration/Comité consultatif de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations

**CCDS**(초정의 자문위원회, CCTF참조): Consultative Committee for the Definition of the Second/Comité consultatif pour la définition de la seconde, see CCTF

**CCE**(전기 자문위원회, CCEM참조): Consultative Committee for Electricity/Comité consultatif d'électricité, see CCEM

**CCEM**((CCE가 전신) 전기·자기 자문위원회): (formerly the CCE) Consultative Committee for Electricity and Magnetism/Comité consultatif d'électricité et magnétisme

**CCL**(길이 자문위원회): Consultative Committee for Length/Comité consultatif des longueurs

**CCM**(질량 및 관련량 자문위원회): Consultative Committee for Mass and Related Quantities/Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées

**CCPR**(광측정·복사측정, 광도·복사도 측정 자문위원회): Consultative Committee for Photometry and Radiometry/Comité consultatif de photométrie et radiométrie

**CCQM**(물질량 자문위원회): Consultative Committee for Amount of Substance: Metrology in Chemistry and Biology/Comité consultatif pour la quantité de matière: métrologie en chimie et biologie

**CCRI**(전리방사선 자문위원회): Consultative Committee for Ionizing Radiation/Comité consultatif des rayonnements ionisants

**CCT**(온도측정 자문위원회): Consultative Committee for Thermometry/Comité consultatif de thermométrie

- CCTF**(CCDS가 전신) 시간·주파수 자문위원회): (formerly the CCDS) Consultative Committee for Time and Frequency/Comité consultatif du temps et des fréquences
- CCU**(단위 자문위원회): Consultative Committee for Units/Comité consultatif des unités
- CGPM**(국제도량형총회): General Conference on Weights and Measures/Conférence générale des poids et mesures
- CIPM**(국제도량형위원회): International Committee for Weights and Measures/Comité international des poids et mesures
- CODATA**(과학기술데이터위원회): Committee on Data for Science and Technology
- CR**(국제도량형총회 보고서): *Comptes rendus* of the Conférence générale des poids et mesures, **CGPM**
- IAU**(국제천문연맹): International Astronomical Union
- ICRP**(국제방사선방호위원회): International Commission on Radiological Protection
- ICRU**(국제방사선단위 및 측정위원회): International Commission on Radiation Units and Measurements
- IEC**(국제전기기술위원회): International Electrotechnical Commission
- IERS**(국제지구자전 및 기준좌표계 구현국): International Earth Rotation and Reference Systems Service
- ISO**(국제표준화기구): International Organization for Standardization
- IUPAC**(국제순수응용화학연맹): International Union of Pure and Applied Chemistry
- IUPAP**(국제순수응용물리연맹): International Union of Pure and Applied Physics
- OIML**(국제법정계량기구): International Organization of Legal Metrology/Organisation Internationale de Métrologie Légale
- PV**(국제도량형위원회 회의록): *Procès-verbaux* of the Comité international des poids et mesures, CIPM
- SUNAMCO**(IUPAP의 기호, 단위, 전문용어, 원자질량, 기본상수 위원회): Commission for Symbols, Units, Nomenclature, Atomic Masses and Fundamental Constants, IUPAP
- WHO**(세계보건기구): World Health Organization

## 2 과학용어에 대한 약어

**CGS**(3개의 역학단위인 센티미터, 그램, 초에 근거한 3차원의 일관성 있는 단위계):

Three-dimensional coherent system of units based on the three mechanical units centimeter, gram and second

**EPT-76**(1976년 잠정 저온온도눈금): Provisional Low Temperature Scale of

1976/Échelle provisoire de température de 1976

**GUM**(측정불확도표현지침): Guide to the Expression of Uncertainty in

Measurement/Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure

**IPTS-68**(1968년 국제실용온도눈금): International Practical Temperature Scale of 1968

**ISQ**(국제적 양의 체계): International System of Quantities

**ITS-90**(1990년 국제온도눈금): International Temperature Scale of 1990

**MKS**(3개의 역학단위인 미터, 킬로그램, 초에 근거한 단위계): System of units based on the three mechanical units meter, kilogram, and second

**MKSA**(미터, 킬로그램, 초, 암페어에 근거한 4차원의 단위계): Four-dimensional system of units based on the meter, kilogram, second, and the ampere

**SI**(국제단위계): International System of Units/Système international d'unités

**TAI**(국제원자시): International Atomic Time/Temps atomique international

**TCG**(지구중심좌표시): Geocentric Coordinated Time/Temps-coordonnée géocentrique

**TT**(지구시간): Terrestrial Time

**UTC**(세계협정시): Coordinated Universal Time

**VSMOW**(비엔나표준평균해수): Vienna Standard Mean Ocean Water

## 색 인

### 가

가우스 Gauss, 98  
 각 angle, 25, 26, 33, 38, 40, 48, 55, 65  
 갈(Gal) gal (Gal), 33  
 과학기술데이터위원회 CODATA, 34, 83, 85, 87, 91  
 광도 luminous intensity, 6, 18, 23, 24, 48, 52, 54, 59, 63, 65, 84, 87, 92, 97, 99, 103  
 광생물학적 양 photobiological quantities, 11, 29, 94  
 광측정 단위 photometric units, 48, 59  
 국제단위계 SI International System of Unit(s) (SI), 3-5, 7, 10, 11, 13, 15, 39, 53, 54, 60, 79, 81, 87, 90, 97, 99  
 국제미터원기 international prototype of the meter, 53, 100  
 국제법정계량기구 OIML, 14, 85, 88  
 국제순수응용물리연맹의 기호, 단위, 전문용어, 원자질량, 기본상수 위원회 IUPAP SUNAMCO; 레드북 Red Book, 36  
 국제순수응용화학연맹 IUPAC; 그린북 Green Book, 36  
 국제양체계 International System of Quantities (ISQ), 17  
 국제원자시 International Atomic Time (TAI), 60-62  
 국제킬로그램원기 international prototype of the kilogram, 13, 19, 48, 79, 82, 84, 85, 91, 100, 101  
 국제표준화기구/국제전기기술위원회 80000 시리즈 ISO/IEC 80000 series, 12, 14, 17, 29, 36  
 국제표준화기구/기술위원회 12 ISO/TC 12, 64  
 그램 gram, 32, 51, 57, 98, 102  
 그램-원자, 그램-분자 gram-atom, gram-molecule, 102

그레이(Gy) gray (Gy), 26, 28, 29, 62, 66, 74  
 기본단위 base unit(s), 3, 4, 10, 11, 13, 14, 17, 18, 23, 25, 26-29, 56, 60, 62, 65, 70, 71, 79-85, 90-92, 95, 97-100, 103  
 기본단위의 정의 definitions of base units, 4, 10, 18, 84, 90, 99  
 기본량 base quantity, 17, 18, 24, 28, 65, 97  
 기본(물리)상수 fundamental constants (of physics), 10, 15-17, 70, 73, 79-83, 85, 90, 99, 101  
 기본전하 elementary charge, 15-17, 20, 82, 83, 87, 90, 92, 99  
 길이 length, 6, 15, 18, 19, 24-26, 33, 39, 40, 47, 48, 52-54, 65, 66, 72, 81, 84, 87, 92, 95-98, 100

### 나

네퍼(Np) neper (Np), 33, 34  
 뉴턴(N) newton (N), 20, 26, 28, 29, 49, 51, 52, 55, 59, 61

### 다

다인(dyn) dyne (dyn), 51, 52  
 단위(SI) unit (SI), 3, 6, 7, 10-41, 47-49, 51-67, 69-72, 74-76, 79-85, 87, 90-103  
 단위기호 unit symbols, 31, 32, 35, 36, 38-41, 51, 64, 83, 90, 97  
 단위명칭 unit names, 29, 32, 35, 36, 39, 52, 54, 60  
 단위에 관한 입법 legislation on units, 14  
 단위에 대한 특별한 명칭과 기호 special names and symbols for units, 25-28, 97

단위에 대한 필수기호 mandatory symbols for units, 18, 36

단위의 구현 realization of a unit, 11, 23, 30, 97

돌턴(Da) dalton (Da), 33, 34

데시벨(dB) decibel (dB), 33, 34

동적 점성도(스토크스) kinematic viscosity (stokes), 55

## 라

라디안(rad) radian (rad), 25, 26, 28, 29, 40, 55, 64, 65, 70

럭스(lx) lux (lx), 26, 29, 31, 51, 55

로그비 양 logarithmic ratio quantities, 33, 34

루멘(lm) lumen (lm), 16, 26, 29, 48, 51, 55, 63, 83, 90

리드베리 상수 Rydberg constant, 97

리터(L 또는 l) liter (L or l), 33-35, 47, 51, 55-57, 64

## 마

마이크로아크초( $\mu$ as) microarcsecond ( $\mu$ as), 33

맥스웰 Maxwell, 98

명시적 단위 정의 explicit unit definition, 95, 96

명시적 상수 정의 explicit constant definition, 96

메트릭 톤 metric ton, 34

몰(mol) mole (mol), 16-18, 21, 22, 54, 61, 62, 70, 71, 76, 79, 80, 82-85, 87, 88, 90-92, 95, 97, 99, 102, 103

몰 질량 molar mass, 22, 84, 91, 102

무차원 양 dimensionless quantities, 65

물, 동위원소 조성 water, isotopic composition, 58, 76, 79, 102

물의 삼중점 triple point of water, 13, 21, 49, 50, 52, 59, 76, 84, 91, 95, 96, 101

물질량 amount of substance, 17, 18, 21, 22, 24, 25, 27, 39, 61, 76, 79, 83, 87, 92, 97, 99, 102

미세 구조 상수 fine structure constant, 17, 84, 91, 97

미터(m) meter (m), 3, 10, 13, 14, 18-20, 23, 30, 47-49, 51-54, 62, 65, 66, 72, 73, 77, 78, 81, 83-86, 88, 90-92, 95-98, 100, 101

미터법 metric system, 3, 5, 10, 95, 98, 99

미터킬로그램초 단위계 MKS system, 49, 50, 98

미터킬로그램초암페어 단위계 MKSA system, 98

미터협약 Convention du Mètre, 3-5, 7, 10, 13, 47, 50, 53, 97, 98

밀리아크초(mas) milliarcsecond (mas), 33

## 바

바아 bar, 51

밝은 빛 시감 photopic vision, 63

방사성 핵종의 방사능 activity referred to a radionuclide, 26, 57

배수, 배수에 대한 접두어 multiples, prefixes for, 25, 27, 31, 32, 35, 36, 54, 57, 60, 63, 69, 71, 98

베크렐(Bq) becquerel (Bq), 26, 29, 57, 62

벨(B) bel (B), 33, 34

보충단위 supplementary units, 26, 55, 60, 64, 65, 70, 97, 99

볼츠만 상수 Boltzmann constant, 15-17, 20, 80, 82, 83, 92, 96, 99, 102

볼트(V) volt (V), 26, 34, 49, 51, 55, 67, 68, 84, 91, 98, 101

분(min) minute (min), 33

분수, 분수에 대한 접두어 submultiples, prefixes for, 25, 27, 31, 32, 35, 36, 54, 57, 60, 69, 71, 97, 98

분자량 molecular weight, 102

불확도 uncertainty, 15, 16, 19, 34, 39, 62, 67, 68, 70, 72, 73, 74, 82, 85, 88

비SI 단위 non-SI units, 33, 34, 38, 71

## 사

상대성 relativity, 18, 30

생물학적 양의 단위 units for biological quantities, 94

- 선량당량, 시버트 참조 dose equivalent, see sievert, 26, 29, 30, 64, 66, 74
- 섭씨온도 Celsius temperature, 21, 26, 38
- 섭씨도 degree Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ), 21, 26, 29, 38, 50, 51, 58
- 세 자리 숫자, 자릿수 묶음 digits in threes, grouping digits, 38, 51, 75
- 세계보건기구 국제단위 (IU) International Units (IU) WHO, 30
- 세계보건기구 WHO, 30
- 세계협정시 Coordinated Universal Time (UTC), 62
- 세슘원자의 초미세 분열 hyperfine splitting of the caesium atom, 82, 84
- 세슘 주파수 caesium frequency, 17-19, 92
- 센티미터그램초 CGS, 49, 98
- 소리, 소리에 대한 단위 sound, units for, 30
- 소수점 decimal marker, 12, 38, 75
- 수효량 counting quantities, 24
- 스테라디안(sr) steradian (sr), 23, 25, 26, 40, 48, 55, 64-66, 70
- 스틸브(sb) stilb (sb), 51
- 시간(지속시간) time (duration), 15, 17, 18, 24, 33, 38, 56, 58, 60-62, 65, 68, 72, 73, 84, 86, 87, 92, 95-98, 100
- 시간(h) hour (h), 33, 51, 52, 54, 58
- 시감효능 luminous efficacy, 15-17, 23, 63, 83, 84, 90, 92, 99, 103
- 시버트(Sv) sievert (Sv), 26, 29, 64, 66, 74
- 신루멘 new lumen, 48
- 신촉광 new candle, 48, 51, 60, 63, 103
- 실리콘 구 silicon sphere, 96
- 실용단위 practical units, 98
- 십진미터법 decimal metric system, 98
- 아**
- 아보가드로 상수 Avogadro constant, 15, 16, 17, 21, 22, 80, 83, 90, 92, 99, 102, 103
- 아보가드로 수 Avogadro number, 21, 92
- 아크초 arcsecond, 33
- 암페어(A) ampere (A), 3, 13, 16, 18, 20, 28, 29, 49, 51, 52, 54, 55, 70, 79, 80, 82, 83-85, 87, 88, 90-92, 95, 97, 98, 101
- 야드 yard, 34
- 양 quantity, 15, 27, 55
- 양에 대한 추천 기호 recommended symbols for quantities, 18
- 양의 값 표기 formatting the value of a quantity, 38
- 양의 값 value of a quantity, 15, 25, 34-39, 75
- 양의 계산법 quantity calculus, 36, 37
- 양의 기호 quantity symbols, 18, 35, 36, 38, 39
- 양의 수치 numerical value of a quantity, 25, 36
- 양자 표준 quantum standard, 101
- 양자 홀 효과 quantum Hall effect, 67, 68, 82, 84, 91, 96, 101
- 어두운 빛 scotopic, 63
- 에르그 erg, 51
- 연속성 continuity, 11, 16, 41, 63, 69
- 연혁 historical notes, 95
- 열역학 온도 thermodynamic temperature, 18, 20, 21, 24, 52, 54, 58, 59, 76, 79, 83, 84, 87, 91, 92, 96, 97, 99, 101
- 열역학 온도눈금 thermodynamic temperature scale, 52
- 열용량 heat capacity, 28, 36, 59
- 영국과학진흥협회 British Association for the Advancement of Science(BAAS), 98
- 옴( $\Omega$ ) ohm ( $\Omega$ ), 26, 31, 49, 51, 55, 61, 67, 68, 84, 91, 98, 101
- 와트(W) watt (W), 16, 26, 49, 51, 55, 83, 90, 96
- 와트밸런스 watt balance 키블 저울 참조, 82, 96
- 원자량 atomic weight, 102
- 웨버(Wb) weber (Wb), 26, 49, 55
- 웨버 Weber, 98
- 유도단위 derived unit(s), 3, 13, 14, 17, 25-28, 36, 55, 59, 60, 65, 70, 71, 97-99
- 유도량 derived quantity, 17, 22, 24, 26-28

인치 inch, 34  
 일(d) day (d), 33  
 일관성 있는 유도단위 coherent derived units, 20, 25, 27, 28, 71  
 일반 상대성이론 general relativity, 18, 30, 72  
 임상화학 clinical chemistry, 22, 71

**자**

자기상수, 진공 투자율 magnetic constant, permeability of vacuum, 20, 84, 101  
 전기단위 electrical units, 10, 49, 50, 67, 82, 98, 101  
 전류 electric current, 18, 20, 24, 27, 28, 49, 52, 54, 67, 68, 83, 87, 92, 95-98, 101  
 전리방사선 ionizing radiation, 6, 7, 29, 30, 62, 64, 66, 74  
 전자볼트(eV) electronvolt (eV), 33, 34  
 전자질량 electron mass, 97  
 절대단위 absolute units, 101  
 점성도 (포아즈) dynamic viscosity (poise), 28, 55  
 접두어 prefixes, 25, 31, 32, 35, 36, 41, 54, 57, 60, 63, 69, 97-99  
 정의 상수 defining constants, 10, 13-20, 22, 23, 25, 90-92, 99  
 조셉슨 상수 ( $K_J$ ,  $K_{J,90}$ ) Josephson constant ( $K_J$ ,  $K_{J,90}$ ), 67, 68, 82, 84, 91  
 조셉슨 효과 Josephson effect, 67, 68, 82, 84, 91, 96, 101  
 줄(J) joule (J), 16, 17, 26, 29, 49, 50, 55, 83, 90  
 중력가속도, ( $g_n$ )의 표준값 acceleration due to gravity, standard value of ( $g_n$ ), 48  
 지멘스 (S) siemens (S), 26, 61  
 지오르지 Giorgi, 98  
 진공에서 빛의 속도 speed of light in vacuum, 10, 13-17, 19, 62, 65, 72, 81, 83, 84, 90, 92, 95, 96, 99, 100  
 질량 mass, 18-20, 22, 24, 30, 32-34, 38, 39, 47-49, 52, 54, 57, 70, 79, 80, 82-85, 87, 91, 92, 95-98, 100-103

질량과 무게 mass and weight, 48

## 차

차원(양의) dimension (of a quantity), 24  
 천문단위 astronomical unit, 33  
 초(s) second (s), 3, 10, 16, 18-20, 23, 33, 38, 51-58, 60, 61, 73, 77, 78, 81, 83-92, 95-98, 100  
 측광량 photometric quantities, 63

## 카

카탈(kat) katal (kat), 26, 71  
 칸델라(cd) candela (cd), 13, 16, 18, 23, 29, 48, 51, 52, 54, 59, 63, 70, 79, 82-84, 91, 92, 95, 97, 99, 103  
 칼로리 calorie, 50, 51  
 켈빈(K) kelvin (K), 13, 16-18, 20, 21, 26, 49, 52, 58, 59, 69, 76, 79, 80, 82-85, 87, 88, 90-92, 95-97, 99, 101, 102  
 쿨롱(C) coulomb (C), 16, 26, 49, 51, 55, 83, 90  
 퀴리(Ci) curie (Ci), 57  
 키블 저울 Kibble balance, 96  
 키비바이트 kibibyte, 31  
 킬로그램 kilogram, 3, 4, 13, 16, 18, 19, 22, 23, 25, 32, 47-49, 52, 54, 57, 61, 70, 79, 80, 82-85, 87, 88, 90-92, 95-98, 100-102  
 킬로그램 검증 verification of the kilogram, 101  
 킬로그램의 배수(와 분수) multiples (and submultiples) of the kilogram, 32, 57

## 타

탄소 12 carbon 12, 22, 34, 61, 84, 91, 102  
 테슬라(T) tesla (T), 26, 55  
 톤 tonne, 33, 34, 51  
 톰슨 Thomson, 98

## 파

파스칼(Pa) pascal (Pa), 26, 61

- 패럿(F) farad (F), 26, 49, 51, 55
- 퍼센트 percent, 39, 40
- 포아즈(P) poise (P), 51
- 폰 클리칭 상수 von Klitzing constant ( $R_K$ ,  $R_{K-90}$ ),  
68, 82, 84, 91
- 표준대기압 standard atmosphere, 52
- 플랑크 상수 Planck constant, 10, 15-17, 19, 20, 34,  
80, 82, 83, 87, 90, 92, 96, 99, 101
- 푸트 foot, 34
- 피피비 ppb, 40
- 피피엠 ppm, 40
- 피피티 ppt, 40
- 하**
- 헤르츠(Hz) hertz (Hz), 16, 26, 29, 51, 55, 83, 90
- 헥타르(ha) hectare (ha), 33, 34
- 헨리(H) henry (H), 20, 26, 49, 51, 55
- 홀 효과(양자 홀 효과 포함) Hall effect (incl.  
quantum Hall effect), 67, 68, 82, 84, 91, 96,  
101
- 흡수선량 absorbed dose, 26, 29, 30, 62, 64, 66, 74
- 희미한 빛 mesopic, 63
- SI, 국제단위계 참조
- SI 접두어 SI prefixes, 25, 27, 31, 33, 35, 39, 45,  
54, 97, 98, 99
- SI 확립 establishment of the SI, 42, 97-99
- 1990년 국제온도눈금(ITS-90) International  
Temperature Scale of 1990 (ITS-90), 21, 59,  
69



국제단위계(SI) 제9판 (한국어판)  
편집위원회

위원장 : 조성재

위 원 : 강주식, 권택용, 김문석, 김병주, 남경희,  
박주근, 양인석, 유희겸, 이경범, 이광철,  
이동훈, 이정화, 이종화, 최종오

감 수 : 이호성, 황의진, 박승남

간 사 : 김지애

국 제 단 위 계

*Système international d'unités (SI)*

(제9판 - 2019)

---

2020년 7월 1일 인쇄

2020년 7월 7일 발행

발행인 : 박 현 민

발행처 : 한국표준과학연구원  
전화 (042) 868-5114

인쇄소 : 신 광 사  
전화 (042) 636-2370

---





