

제 1 장 기계계측의 기초

1.1 서론

기계적인 량의 계측

길이, 온도, 변형률, 유체유동, 음향, 운동관련, 질량, 시간

측정과정: standard 와 measured의 양적인 비교

계측계:

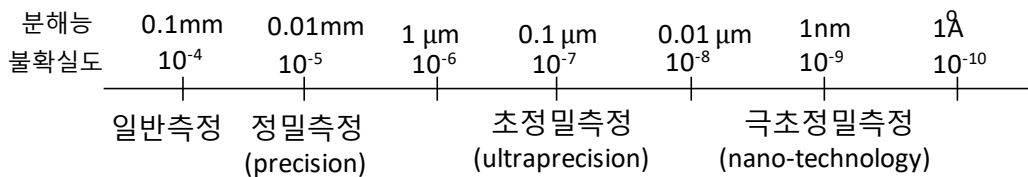
- (1) 기계적인 측정방법
- (2) 전기적인 요소(Transducer)를 이용한 방법

정밀측정 - 학문적 정의 (Precision Engineering Metrology)

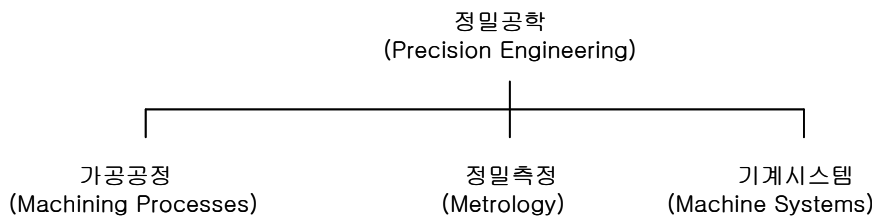
- * 정밀측정의 정의: 길이 및 이에 관련되는 물리량의 응용을 위한 측정
- * 학문적 어원: Metrology = Meter+Logy ; 길이측정 (Length Measurement); 정밀측정 (협의적인 의미)

- * 길이 관련 물리량: 가공품의 기하학적 정밀도 (Geometrical Tolerances)
가공표면의 미세조도 (Surface Roughness)
기계의 이송변위 정밀도 (Movement Accuracies)

* 측정대상의 단위에 따른 일반적 분류:



* 정밀공학과의 연계성:

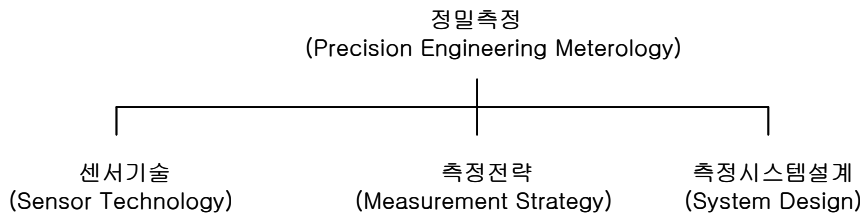


정밀측정-기술적 성격 (Precision Engineering Technology)

* 정밀측정의 기술적 성격:

- 전형적으로 Interdisciplinary한 복합기술
- 모든 기초과학(Science)과 응용공학(Engineering)분야에 전반적으로 요구됨.
- 순수과학의 연구결과가 응용공학분야로의 전환이 가장 빠른 학문분야임.
- 길이측정은 힘, 속도등 제반 측정의 기반이 되는 기초 측정기술임.

* 정밀측정의 3대 핵심 구성요소:



* 문제해결의 단계:

- (1) 측정의 수요 및 문제점 도출
- (2) 측정 전략의 확정
- (3) 측정 센서의 확보
- (4) 측정 시스템의 설계 및 구축
- (5) 국가표준에 준한 측정결과의 평가보완

* 측정의 용도에 따른 분류

- 표준 측정 (Standard Metrology)

측정의 한계를 극복하기 위한 국가적 사업으로 표준확립 추진

KRISS(한국표준과학연구원, 한국)

NIST(미국)

NPL(영국)

PTB(독일)

- 공학측정 (Engineering Metrology)

표준 측정을 근거로 현장에서 발생하는 응용공학분야에서 검사기술의 개발에 주력

한국표준과학연구원

- 헌법(1980. 10. 27) 제127조 제2항 “국가는 국가표준제도를 확립한다.”
- 국가표준기본법(1999. 2. 8) 제13조 (국가측정표준대표기관) 제1항, 동조 제2항 “한국표준과학연구원을 국가측정표준대표기관으로 한다.”
- 과학기술분야 정부출연연구기관 등의 설립/운영 및 육성에 관한 법률('04. 9. 23)

1.2 기계계측의 중요성

기계설계: 경험적, 합리적, 실험적 요소 포함
제어과정의 기본 요소
기계의 일상적인 조작에 필요

- * 현대사회에서 계측 기술의 어려운 점.
 - 신속한 측정
 - 대량 생산 체제에서 많은 개수의 측정
 - 위험한 환경에서의 물리량의 측정

1.3 측정의 기본 방법

- (1) 주(primary) 또는 부(secondary) 표준에 의한 직접비교법(direct comparison)
- (2) 교정된 계를 이용한 간접 비교법 (indirect comparison)

1.3.1 직접비교법(direct comparison)

주(primary) 또는 부 (secondary) 표준을 이용한 직접비교법
예) 강철자를 이용한 막대의 길이 측정

1.3.2 간접 비교법(indirect comparison)

변환기등이 포함된 계측계를 이용
특히, 동적 기계계측의 경우

1.4 일반화된 계측계

- (1) sensor-transducer 단계
- (2) signal conditioning 단계
- (3) readout-recoding 단계

1.4.1 sensor-transducer 단계

피측정량을 검출 감지,
여타 입력에 둔감해야함.
noise(잡음)
drift(표류)

1.4.2 signal conditioning 단계

진폭, 동력을 변화시켜줌.
필터

1.4.3 readout-recoding 단계

인간의 오감, 제어기에 적합하게 변화, 표시

상대변위; 지시침의 이동
디지털형

아날로그량; 시간적으로 연속적인 자연계에 존재하는 일반량
기계량을 변환기에 의하여 서로 닮은(analogous) 전기량으로

디지털계측; 비연속적인 량
표본화(sampling); 시간간격 t
양자화(quantizing);

디지털 계측의 장점

잡음에 강하다.

데이터 정리가 용이하다.

판독이 용이하다

주변 시스템과 연계가 용이하다.

1.5 입력량의 유형

1.5.1 시간 종속성

정적

동적

정상상태의 주기적

비주기적, 펄스, 연속적, 임의적

1.5.2 Analog and Digital

1.6 Measurement standards(측정표준)

교정(calibration)

Spring 저울의 교정 - 분동

1.7 Calibration(교정)

다점 교정

단일점 교정

(1) 계측계 제작 단계에서 눈금을 결정하는 작업

(2) 사용 중인 계측계의 오차를 보정하는 작업

1.8 불확실도 (uncertainty: accuracy of results)

Arnold O. Beckman

“과학에서 배울 수 있는 한 가지 사항은 완전한 해답도 완전한 측정도 존재하지 않는 것이다.“

불확실도: 오차의 상한값을 추정할 것

systematic (bias) error

precision (random) error

제 2 장 계측표준과 차원단위

2.1 서론

차원(dimension): 길이

단위(unit): meter

2.4 SI 단위계

Systeme International d'Units
International System of Units

기본단위

보조단위

유도단위

* 기본 및 보조단위

구분		단위명, 기호
기본단위	길이	meter (m)
	질량	kilogram (kg)
	시간	second (s)
	전류	ampere (A)
	온도	kelvin (K)
	농도	mole (mol)
	광도	candele (cd)
보조단위	평면각	radian (rad)
	단위입체각	steradian (sr)

기본량

중력단위계 m, s, kgf

M.K.S. 단위계 m, s, kg

C.G.S. 단위계 cm, s, g

* SI 접두어 (표2.4)

인자	명칭	기호	인자	명칭	기호	인자	명칭	기호	인자	명칭	기호
10^{24}	yota	Y	10^9	giga	G	10^{-24}	yocto	y	10^{-9}	nano	n
10^{21}	zeta	Z	10^6	mega	M	10^{-21}	zepto	z	10^{-6}	micro	μ
10^{18}	exa	E	10^3	kilo	k	10^{-18}	atto	a	10^{-3}	milli	m
10^{15}	peta	P	10^2	hecto	h	10^{-15}	femto	f	10^{-2}	centi	c
10^{12}	tera	T	10^1	deca	da	10^{-12}	pico	p	10^{-1}	deci	d

2.5 길이표준

* 참조: <http://www.kriss.re.kr> -> “표준이란“

1 meter:

지구둘레의 4천만분의 1

platinum-iridium 막대에 그어진 길이

빛을 이용한 정의:

1960년

Kr (krypton-86) : $2p_{10} \rightarrow 5d_5$ 일 때 발생시키는 빛의 파장을 λ 라 할 때

$$1 \text{ m} = 1,650,763.73 \times \lambda$$

1983년10.20 현재

정의;

“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.“

옥소 안정화 헬륨 네온 레이저가 가장 널리 보급됨.

현시:

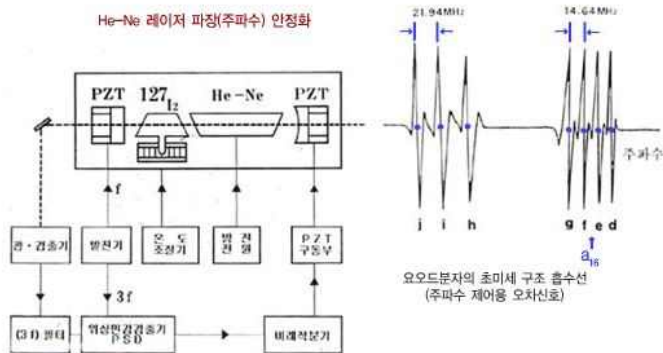
요오드(옥소 $^{127}\text{I}_2$) 안정화 헬륨 네온 레이저를 이용하며, 그 진공 속에서 파장의 길이를 사용한다. 미터는 요오드(옥소) 안정화 헬륨 네온 레이저 진공파장 (λ_{16} 또는 f)의 1,579,800.792 배와 같다.

현재의 국가길이표준기인 요오드안정화 헬륨-네온레이저



01. 주파수기준선 : 요오드분자($^{127}\text{I}_2$)의 포화흡수분광선에 주파수안정화하여 사용
02. 포화흡수분광선 : $6^3\Pi_{61} \rightarrow X^1\Sigma_g^+$ 전자전이, 11-5진동전이 밴드, R(127)전자전이선의 초미세구조선(a_{16} , f)
03. 주파수 불확도 : 2.1×10^{-11} , 주파수안정도 : 3×10^{-13} (gate time: 1000 s)
04. 진공파장 : 632 991 212.5f fm 주파수 : 473 612 353.604 MHz

● 요오드 안정화 헬륨-네온레이저(Iodine Stabilized He-Ne Laser)



(출처: 한국표준과학연구원)

길이표준의 보급



(출처: 한국표준과학연구원)

* meter - inch 변환

1 in. = 2.540 005 08cm (1893.45 Mendenhall 법령)

1 in. = 2.54 cm (exactly)

2.6 질량표준

* 기존 정의:

한국의 질량표준 킬로그램 원기; 국제고유번호 No.72

실린더 형태 (높이 = 직경 = 39mm)

platinum 90%-iridium 10% 원기의 질량

130년이 지난 현재 원기 질량 자체가 수십 μg (마이크로그램)가량 변했다는 사실이 밝혀졌다.



한국표준과학연구원서 보유하고 있는 킬로그램원기 / 한국표준과학연구원 제공

* 새로운 정의:

2018.11.16. (제26차)의결, 2019.05.20. 시행

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

키블 저울을 이용하여 실현

In April 2007, the NIST's implementation of the Kibble balance demonstrated a combined relative standard uncertainty (CRSU) of 36 μg .

물체에 작용하는 중력을 전자기력을 이용한 kibble 저울로 측정하여 환산함.

$$mgv = \frac{V^2}{R} = cf^2h$$

v : 속도

V : 전압

R : 저항

c : 빛의 속도

f : 빛의 주파수

h : 플랑크 상수



키블 저울 [한국표준과학연구원 제공]



Silicon sphere for Avogadro project

실리콘 공을 이용한 정의:

The kilogram being defined as "the mass equal to that of $1000/12 \cdot 6.02214 \times 10^{23}$ atoms of ^{12}C ".

1 lb avoirdupois = 453.592 422 7g (1893년, Mendenhall법령)

(advp. 또는 avoir.)

1 lb avoirdupois = 453.592 37g (1959.7.1 NIST)

16 oz = 1 lb

참고:

캐럿 (carat) = 0.2 그램 (g)

2.7 시간과 주파수

시간은 7가지의 기본물리량(시간, 길이, 질량, 온도, 전류, 광도, 물질량)중 하나로서 다른 어떠한 물리량보다도 가장 정확하게 측정할 수 있는 양이다. 시간은 우리 인간 생활과 밀접한 관계를 가지고 있으며 첨단산업 및 과학기술에 있어서도 매우 중요하다. 그리고 다른 측정표준(예; 길이, 전압 등)의 기초로 사용되고 있어서 "표준의 표준"이라고 일컫는다.

(출처: <http://timing.kriss.re.kr/>)

시간의 단위인 "초"의 정의는 역사적으로 다음과 같이 변천되어 왔다.

: 1956년 이전

자전주기를 1년간 평균한 평균태양시(UT0)

초는 평균 태양일의 86,400 분의 1이다.

지구의 자전에 기초한 평균태양시는 지구의 자전속도의 불규칙성으로 인한 여러 가지 오차가 존재.

: 1956-1967

1956년에 열린 국제도량형위원회(CIPM)에서 지구의 공전을 기초로 한 역표시(Ephemeris Time : ET)를 시간의 표준으로 사용하기로 결정.

초는 역표시로 1900년 1월 0일 12시에 대한 태양년의 1 / (31 556 925.974 7) 이다.

: 1967-현재 1967.10.13. (제13차)

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. (제13차 CGPM(1967) 결의사항 1)

현재 한국표준과학연구원에는 온도 23 ± 1 °C, 상대습도 50 ± 5 % 로 유지되고 있는 항온실습실에 설치된 4대의 세슘원자시계와 2대의 수소메이저를 이용하여 시간주파수분야의 국가표준을 유지하고 있다. 이 중 1 대의 수소 메이저와 AOG를 이용하여 UTC(KRIS)를 생성 유지하고 있다. 이들의 비교데이터를 매월 BIPM에 보고함으로써 UTC 및 TAI 와의 소급성을 유지하고 있고, 이들의 비교데이터는 BIPM에서 정기적으로 발간하는 Circular-T 및 Annual Report에 발표되고 있다.

세슘원자시계: Cs(HP5071A)

수소메이저: H-Master (STSC 2002)



UTC(KRIS) 및 TA(KRIS)의 생성을 위한 장치의 구성도

각국의 표준기관에서는 세슘원자시계를 이용하여 자국의 표준시간척도를 유지하고 있는데, 세슘 원자시계의 tube 교체, 고장 등에 따른 시간척도의 불연속성을 방지하기 위하여 각 표준기관들은 3대 이상의 원자시계군을 유지하고 있으며 시간척도의 정확도, 안정도 및 신뢰도 유지를 위하여 적절한 algorithm을 이용하여 통계처리해서 원자시계들 각각의 안정도보다 높은 안정도를 갖는 시간척도를 생성유지하고 있다.

UTC(KRIS)는 GPS 수신에 의한 시각비교 데이터, UTC(KRIS)-GPS time 및 각 시계들간의 상호비교 데이터와 함께 매일 전자우편을 이용하여 BIPM에 발송하고 있다.

시간주파수 분야의 국제표준은 1987년 12월 31일까지는 국제시보국(BIH)에서 국제원자시 및 세계협정시의 결정, 지구자전요소의 계산등의 업무를 총괄하여 왔으나, 1988년 1월 1일부터는 국제도량형국(BIPM)의 Time Section 에서 국제 원자시 및 세계협정시의 결정업무를 담당하고 1988년 1월 1일부터 새로이 발족된 국제지구자전연구부(IERS)에서 지구자전요소의 결정 및 윤초의 결정과 통보 등의 업무를 담당하고 있다.

현재 프랑스 파리에 위치하고 있는 BIPM의 Time Section에서는 세계 각국의 표준기관들(30여개국 40여기관)이 보유하고 있는 200여대의 세슘원자시계 및 수소메이저의 상호비교 데이터를 수집, ALGOS 계산법을 이용하여 통계처리해서 가장 안정되고 신뢰성 있는 국제원자시(TAI) 및 세계협정시(UTC)를 생성하여 BIPM Annual Report 및 Circular-T를 통하여 보급하고 있다.

1958년 1월 1일에 원자시계와 UT1 시계를 서로 일치시켰다. 그런데 세월이 흐르면서 이 두 시계 사이에 차이가 나기 시작하였다. 왜냐하면 UT1은 태양을 기준으로 정한 것이기 때문에 지구의 운동 속도에 따라 시계가 가는 속도가 달라지기 때문이다. 다시 말하면, 지구의 자전속도는 점차 느려지고 있으므로 일년이라는 시간 속에는 원자시계에 의한 1초의 개수가 UT1 시계에 의한 1초의 개수보다 많게 된다.

이런 문제를 해결하기 위하여 도입된 것이 "윤초"이다. 이 두 시계가 0.9초 이내에서 일치하도록 6월 30일이나 12월 31일의 23시 59분 59초 뒤에 1초를 더하거나 빼는 것이 윤초이다. 그런데 지금까지는 모두 1초가 더해졌다.

원자시계에 의한 시간척도를 국제원자시(TAI)라고 하고, TAI와 UT1과의 시간차 이를 해소하기 위해 윤초를 도입한 시간척도를 세계협정시(UTC)라고 한다.

윤초가 처음 도입된 것은 1972년 1월이다. 이 때의 UTC와 TAI의 차이, 즉, TAI-UTC=10 초였다. 그 이후 거의 매년 윤초가 실시되어 1999년 현재 TAI-UTC=32 초이다.

2.8 온도표준

* 기존 정의:

1990년 국제온도눈금 (ITS-90)

몇 개의 고정점의 온도를 이용 정의; 물의 삼중점

금속의 평형점(고체, 액체)

절대 0도

국제온도눈금-90(ITS-90)의 기본 구조는 다음과 같다. (KRISS)

< 2. 국제온도눈금-1990 (ITS-90) >

온도영역	표준온도계	고정온도점
0.65 K~5.0 K	Vapour Pressure vs Temperature Relation	-
3.0 K~ 24.5561 K	Gas Thermometry	-
13.8033 K~961.78°C	Platinum Resistance Thermometer	삼중점 6개 용융점 1개 응고점 7개
Above 961.78°C	Optical Pyrometer or Radiation Pyrometer	Cu, Ag, Au 응고점 흑체

물의 삼중점

물의 고체, 액체, 수증기가 평형 상태를 이루며 공존 0.0100 °C

물의 삼중점이 동위원소의 비율에 따라 달라져 불안정하다는 문제가 발생

* 2018.11.16. (제26차)의결, 2019.05.20. 시행

“켈빈(기호: K)은 열역학 온도의 SI 단위이다. 켈빈은 볼츠만 상수 k 를 JK^{-1} 단위로 나타낼 때 그 수치를 $1.380\,649 \times 10^{-23}$ 으로 고정함으로써 정의된다.

여기서 JK^{-1} 은 $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$ 과 같고, 킬로그램(기호: kg), 미터(기호: m)와 초(기호: s)는 h , c 와 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ 를 통하여 정의된다.“

$$\frac{3}{2}\kappa T = \frac{1}{2}mv^2$$

κ : 볼츠만 상수

T: 절대온도

m: 질량

v : 분자들의 평균 속도

one kelvin is equal to the change of thermodynamic temperature that results in a change of thermal energy kT by $.380\,649 \times 10^{-23}$ J.

<https://www.bipm.org/metrology/thermometry/units.html>

Kelvin

물의 삼중점의 온도에 대한 1/273.16

섭씨온도

$$t = T - 273.15$$

물의 삼중점을 기본정점 (빙점보다 0.01 °C 높음); 273.16 K

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

* 참고:

0 °C

평균대기압에서 순수한 얼음과 포화된 순수한 물 사이의 평형온도

섭씨 (Celsius) 온도, 화씨 (Fahrenheit) 온도 변환:

$$^\circ\text{C} = (^\circ\text{F} - 32) \times (5/9)$$

섭씨: 0 ~ 100 °C 화씨: 32 ~ 212 °F

2.9 전기적 표준

* 기존 정의:

Ampere의 정의: 1 A: 전류가 흐르는 가는 병렬 도선의 쌍이 1 m 떨어져 있을 때 $2 \times 10^{-7} \text{N/m}$ 의 자기력을 발생시키는 크기.

* 새로운 정의:

2018.11.16. (제26차)의결, 2019.05.20. 시행

“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.”

양자점 단전자 펌프를 이용하여 실현 (한국표준과학연구원)

표준 전원

표준전지

Josephson junction effect를 이용한 표준전압 발생기, (1V, 10V)

https://en.wikipedia.org/wiki/Josephson_voltage_standard

표준저항

2.10 광도 (luminous intensity)

복사도(輻射度, radiant intensity): 관찰자를 고려하지 않고 빛의 세기를 나타내는 단위, 물리적 단위.

광도(光度, luminous intensity): 빛의 밝은 정도를 나타내기 위한 단위로 SI 단위 중 유일하게 사람이 어떻게 느끼는가 하는 관찰자 기준이 반영되어 있다.

따라서 광도 단위는 복사도 단위에 빛의 파장(색깔)에 대한 표준관찰자의 반응을 정량적으로 반영하여 줌으로써 정의할 수 있다.

1979년 제16차 국제도량형총회(CGPM)에서 제정되어 현재까지 국제적으로 통용되는 광도의 정의는 다음과 같다.

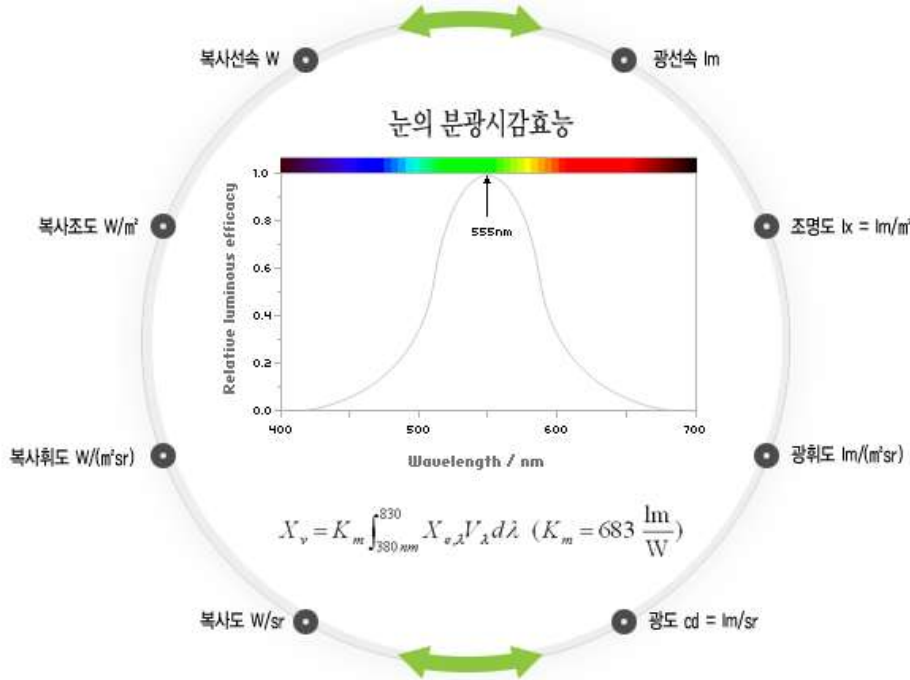
칸델라는 진동수 540×10^{12} 헤르츠인 단색광을 방출하는 광원의 복사도가 어떤 주어진 방향으로 매 스테라디안 당 $1/683$ 와트일 때 이 방향에 대한 광도이다.

“칸델라(기호: cd)는 어떤 주어진 방향에서 광도의 SI 단위이다. 칸델라는 주파수가 540×10^{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 $\text{cd sr kg}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^3$ 과 같고, 킬로그램(기호: kg), 미터(기호: m)와 초(기호: s)는 h , c 와 $\Delta\nu_{Cs}$ 를 통하여 정의된다.”

위 정의에 지정된 진동수를 가지는 단색광이란 사람 눈이 가장 민감하게 느끼는 파장 555 nm의 초록색 빛을 말한다.

복사도는 어떤 주어진 방향으로 단위 입체각 내에서 방출되는 시간당 복사에너지를 말하며 단위는 매 스테라디안 당 와트, 즉 W/sr이다. (스테라디안은 입체각을 나타내는 단위이다.) 따라서 광도 1 cd는 파장 555 nm에서 1/683 W/sr의 복사도와 같다.

하지만 측정하려는 빛이 파장 555 nm의 단색광이 아닐 경우는 어떻게 하나? 이 경우에는 먼저 빛을 색깔 별로 분리하여 각 파장에 따른 복사도를 측정하여야 한다. 여기에 파장에 따른 눈의 상대적인 감도를 나타내는 “분광시감효능”이라는 함수를 곱하고 이를 마지막에 파장에 대하여 다시 더하여 줌으로써 광도를 구하도록 정의되어 있다. 분광시감효능 함수는 국제조명위원회(CIE)가 정의한 것으로 광도측정 및 색채측정에서 “표준관찰자” 역할을 담당한다. 따라서 광도와 복사도는 물론 광측정(photometry) 및 복사측정(radiometry) 분야의 여러 단위들은 모두 분광시감효능 함수를 매개로 서로 연관되어 정의된다.

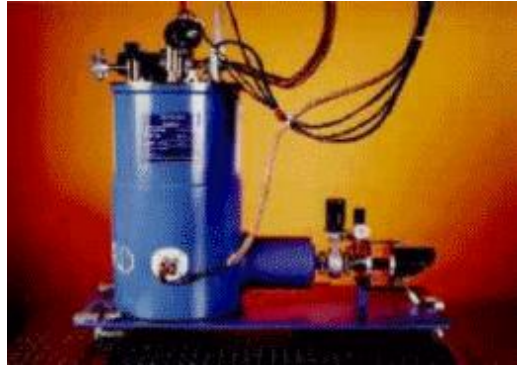


KRISS의 광도 원기인 극저온 절대복사계는 현재 상용화된 복사계 중에 정확도가 가장 높은 장비이다. 이 장비는 들어오는 빛 에너지를 검출 흑체가 흡수하여 온도가 올라가는 정도와 검출 흑체에 설치된 히터에 전력을 공급하여 올라가는 정도가 같은 때, 이 전력이 들어오는 빛 에너지 같다는 원리로 빛 에너지를 측정한다.

즉, 광학적 출력을 전기적 출력과 비교하여 측정하므로 전기치환 (electrical substitution) 방법이라고 한다. 이러한 전기치환 측정은 빛을 흡수하는 검출흑체의 온도가 낮을수록 정확해지므로 액체헬륨을 사용하여 - 260 °C 이하의 극저온에서 동작시키며, 복사출력의 절대값을 와트로 측정함으로써 절대복사계라는 이름이 붙었다. 극저온 절대복사계는 출력이 매우 안정된 레이저와 사용하여야 높은 정확도를 낼 수 있으므로 KRISS에서는 파장 400 nm와 700 nm 사이의 영역에서 동작하는 Ar-Kr 이온 레이저, He-Ne 레이저 등의 출력을 안정시켜 사용하고 있다.



Hatner 버너



극저온 절대복사계

2.11 유효자리수, 반올림과 버림

2.11.1 정의

유효자리; 결과에 참되고 실제적인 값을 줄 수 있는 자리

2.11.3 중요한 영값

$$f=1700\text{Hz (round from 1699.8)} \quad \Rightarrow f=1.700\times 10^3 \text{ Hz}$$

$$f=1700\text{Hz (round from 1696)} \quad \Rightarrow f=1.70\times 10^3 \text{ Hz}$$

$$f=1700\text{Hz (round from 1667)} \quad \Rightarrow f=1.7\times 10^3 \text{ Hz}$$

지수표시: 소수점 아래의 0 은 중요한 것

2.12 단위 변환

(1) 길이

cm	m	in	ft
1	0.01	0.3937	0.03281
100	1	39.37	3.281
2.540	0.0254	1	0.08333
30.48	0.3048	12	1

(2) 면적

cm ²	m ²	in ²	ft ²
1	0.0001	0.155	0.001076
1×10 ⁴	1	1550	10.76
6.452	0.000645	1	0.006944

(3) 체적

cm ³	m ³	in ³	ft ³
1	1E-6	0.06102	0.00003531
1E6	1	61020	35.31
16.39	0.00001639	1	0.0005787
28320	0.02832	1728	1

(4) 두량(斗量)

m ³	gal(UK)	gal(US)	ℓ
1	220.0	264.2	1000
0.004546	1	1.201	4.546
0.003785	0.8327	1	3.785
0.001	0.2200	0.2642	1

(注) 1gal(US)=231in³, 1ft³=7.48 gal(US)

(5) 질량

kg	t	lb	ton	sh tn
1	0.001	2.20462	0.0009842	0.0011023
1000	1	2204.62	0.9842	1.1023
0.45359	0.00045359	1	0.0004464	0.00055
1016.05	1.01605	2240	1	1.12
907.185	0.907185	2000	0.89286	1

(注) t:톤, ton:영국톤(long ton), tn :미국톤(short ton)

(6) 밀도

g/m ³	kg/m ³	lb/in ³	lb/ft ³
1	1000	0.03613	62.43
0.001	1	0.00003613	0.06243
27.68	27680	1	1728
0.01602	16.02	0.0005787	1

(注) 1g/cm³= 1t/m³

(7) 힘

N	dyn	kgf	lbf	pdl
1	1E5	0.101972	0.2248	7.233
1E-5	1	1.01972E-6	2.248E-6	7.233E-5
9.80665	9.80665E5	1	2.205	70.93
4.44822	4.44822E5	0.4536	1	32.17
0.138255	1.38255E4	0.01410	0.03108	1
(注) 1 dyn=1E-5N, 1 pdl(파운달) = 1ft·lb/s ²				

(8) 압력

kgf/cm ²	bar	Pa	atm	mH ₂ O	mHg	lbf/in ²
1	0.980665	0.980665E5	0.9678	10.000	0.7356	14.22
1.0197	1	1E5	0.9869	10.197	0.7501	14.50
1.0197E-5	1E-5	1	0.9869E-5	1.0197E-4	7.501E-6	1.450E-4
1.0332	1.01325	1.01325E5	1	10.33	0.760	14.70
0.10000	0.09806	9.80665E3	0.09678	1	0.07355	1.422
1.3595	1.3332	1.3332E5	1.3158	13.60	1	19.34
0.07031	0.06895	6.895E3	0.06805	0.7031	0.05171	1
(注) 1 Pa = 1 N/m ² , 1 bar= 1E5 Pa, 1lbf/in ² = 1 psi, 1 Pa = 7.5 E-3 torr						

(9) 응력

kgf/cm ²	kgf/mm ²	Pa	N/mm ²	lbf/ft ²
1	1E-2	0.980665E5	0.0980665	2048
1E2	1	0.980665E7	9.80665	2.048E5
1.0197E-5	1.0197E-7	1	1E-6	0.02089
10.1972	0.101972	1E6	1	2.089E4
0.0004882	4.882E-6	47.86	4.788E-5	1
(注) 1 N/mm ² = 1MPa				

(10) 속도

m/s	km/h	kn(미터법)	ft/s	mile/h
1	3.6	1.944	3.281	2.237
0.2778	1	0.5400	0.9113	0.6214
0.5144	1.852	1	1.688	1.151
0.3048	1.097	0.5925	1	0.6818
0.4470	1.609	0.8690	1.467	1
(注) kn : 노트, 미터법 1 노트= 1852 m/h				

(11) 각속도

rpm	rad/s
1	0.1047
9.549	1
(注) 1 rad=57.296° , rpm= r/min	

(12) 점 도

cP	P	Pa·s	kgf·s/m ²	lbf·s/m ²
1	0.01	0.001	0.00010197	1.449E-7
100	1	0.1	0.0101973	1.449E-5
1000	10	1	0.101973	1.449E-4
9806.65	98.0665	9.80665	1	0.001422
6.9E6	6.9E4	6.9E3	7.03E2	1

(注) 1P= 1dyn·s/cm²= 1g/cm·s, 1Pa·s= 1N·s/m², 1cP=1mPa·s, 1lbf·s/in²= 1Reyn =6.9E6cP

(13) 동점도

cSt	St	m ² /s	ft ² /s
1	1E-2	1E-6	0.00001076
100	1	1E-4	0.001076
1E6	1E4	1	10.76
92900	929.0	0.09290	1

(注) 1 St = 1 cm²/s

(14) 체적유량

ℓ/s	ℓ/min	m ³ /s	m ³ /min	m ³ /h	ft ³ /s
1	60	1E-3	0.06	3600	0.03532
0.01666	1	1.66666E-5	1E-3	6E-2	0.00059
1E3	6E4	1	60	3600	35.31
1.66666E1	1E3	1.66666E-2	1	60	0.5885
2.77777E-4	1.66666E1	2.77777E-4	1.66666E-2	1	0.00981
2.832E1	1.69833E3	2.832E-2	1.69833	101.9	1

(15) 일, 에너지 및 열량

J	kgf·m	kW·h	kcal	ft·lbf	Btu
1	0.10197	2.778E-7	2.389E-4	0.7376	9.480E-4
9.807	1	2.724E-6	2.343E-3	7.233	9.297E-3
3.6E6	3.671E5	1	860.0	2.655E6	3413
4186	426.9	1.163E-3	1	3087	3.968
1.356	0.1383	3.766E-7	3.239E-4	1	1.285E-3
1055	107.6	2.930E-4	0.2520	778.0	1

(注) 1J=1W·s, 1kgf·m=9.80665J, 1 W·h = 3600 W·s, 1 cal = 4.18605 J

(16) 일률

kW	kgf·m/s	PS	HP	kcal/s	ft·lbf/s	Btu/s
1	101.97	1.3596	1.3405	0.2389	737.6	0.9480
9.807E-3	1	1.333E-2	1.315E-2	2.343E-3	7.233	9.297E-3
0.7355	75	1	0.9859	0.1757	542.5	0.6973
0.746	76.07	1.0143	1	0.1782	550.2	0.7072
4.186	426.9	5.691	5.611	1	3087	3.968
1.356E-3	0.1383	1.843E-3	1.817E-3	3.239E-4	1	1.285E-3
1.055	107.6	1.434	1.414	0.2520	778.0	1

(注) W : SI 단위, 1 W=1J/s, 1kgf·m/s=9.80665W, PS:佛마력, HP : 英마력

(17) 열전도율

kcal/m·h·°C	Btu/ft·h·°F	W/(m·K)
1	0.6720	1.163
1.488	1	1.731
0.8600	0.5779	1

(注) W/(m·K) : SI단위, 1 cal(it)=4.1868J

(18) 열전도계수

kcal/m²·h·°C	Btu/ft²·h·°F	J/m²·h·°C	W/(m²·K)
1	0.2048	4187	1.163
4.882	1	2.044E4	5.678
2.389E-4	4.893E-5	1	2.778E-4
0.8598	0.1761	3599	1

(注) W/(m²·K) :SI단위, 1 cal=4.18605 J

(19) 비 열

J/(kg·K)	kcal/(kg·°C)	Btu/(lb·°R)
1	2.38889E-4	2.38889E-4
4.18605E3	1	1

(注) 1 cal = 4.18605 J

(20) 온 도

섭씨(°C) → 화씨(°F)	$^{\circ}\text{F} = \{(9/5) \times ^{\circ}\text{C}\} + 32$
화씨(°F) → 섭씨(°C)	$^{\circ}\text{C} = (5/9) \times (^{\circ}\text{F} - 32)$