

Concepts, Quantities, Units and Terminology for Non-Ionizing Radiation

Soo Yong Lee
Depart. of Physics, College of Science,
Hanyang University

비이온화방사선에 대한 제반 개념 양, 단위 및 용어

李 秀 容
한양대학교 이과대학 물리학과

Abstract—Protection against non-ionizing radiation(NIR) is the subject of an increasing interest, but the use of very different concepts depending on the type of radiation or application, makes it rather difficult to compile studies and the data obtained in an uniformity in this field.

The main object of the present paper is to summarize and provide an inventory of concepts, quantities, units and terminology currently used for purposes of NIR protection.

Furthermore a systematic classification and comparison of these quantities is given, and in particular the concepts used to quantify exposure limitation and radiation protection standards are summarized and discussed.

초록—비이온화방사선(NIR)에 대한 방어는 증가되는 관심의 주제가 되고 있지만, 방사선의 유형이나 그 적용간의 의존되는 아주 다른 개념의 사용은 이 분야에서의 통일된 방법의 자료편집에 어려움을 주고 있다. 이 논문의 주된 목적은 비이온화방사선 방어의 목적으로 확실하게 사용하는 개념, 양, 단위 및 전문용어를 제공하기 위해서이다. 그 외에 방사선방어의 표준과 피폭한도를 양으로 나타내는데 사용되는 특별한 개념과 주어진 양들의 체계적인 분류와 비교를 요약하고 또 논하였다.

서 론

비이온화방사선(NIR)은 물질과의 주된 상호작용 형태가 이온화작용이 아닌 전자기복사(electromagnetic radiation)의 전형태에 일반적으로 적용되는 용어이다. 때문에 NIR(non-ionizing radiation)은 파장이 10 nm 이상인, 또는 양자에너지가 12 eV 이하에 해당한다.¹⁾ 즉 주파수가 근자외선(near ultraviolet) 주파수 이하인 복사선원(radiation sources) 스펙트럼을 포함하고 있다. 실질적인 방사선방어의 목적으로 초음파(ultrasound)와 초저주파음(infrasound)과 같은 역학적인 진동형태로 전달되는 에너지뿐만 아니라 정전기장과 자기장도 NIR로 간주한다.

방어목적으로는 전자기 NIR을 다음과 같이 몇개의 파장(λ) 또는 진동수(ν) 범위로 세분할 수 있다.

- 자외선(UV), $100 \text{ nm} \leq \lambda \leq 400 \text{ nm}$ (광학방사선)
- 가시광선 $400 \text{ nm} \leq \lambda \leq 760 \text{ nm}$ (광학방사선)
- 적외선(IR), $760 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1 \text{ mm}$ (광학방사선)
- 마이크로파(MW)를 포함하는 고주파(RF), 300 Hz
 $\nu = 300 \text{ GHz}(1000 \text{ km} \geq \lambda \geq 1 \text{ mm})$
- 극저주파(ELF)장($\nu \leq 300 \text{ Hz}$), 실제적으로는 주로 50-60 Hz의 출력주파수의 영역

이것도 유일한 분류는 아니며 실제적으로 특수한 필요에 따라 여러 가지 다른 분류도 이용할 수 있다. ITU(International Telecommunication Union)가입국에 의한 국제협약은 0-3 THz까지의 범위를 12가지의 특정 주파수대로 나누고 어떤 주파수대에 대해 특별한 용도를 부여하고 있다[1]

NIR에 대한 방어는 많은 연구와 간행물의 주제가 되고 있지만, 용어와 방어개념의 적용은 합의가 불충분하여 여러 연구결과를 비교하거나 자료를 통일되게 편집하는데 어려움을 주고 있다. 또한 방어기준이나 규정의 개발과 방어에 대한 공공요구가 용어, 양 및 단위 등 통일성의 부족으로 방해받고 있다.

이러한 문제의 해결을 위해 CGPM, CIPM, ISO, ITU, IEC, IRPA 등 국제기구 및 학술단체들은 비이온화방사선 관련 용어, 양 및 단위의 체계를 정립하기 위해 지난 10여년간 노력해 오고있다. 다음 절들의 내용을 편집하는 데에도 IRPA의 비이온화방사선 분과위원회(INIRC)의 보고서[2]를 주로 참고하였다.

양 및 단위

물리량은 양적인 면으로 물리적 현상을 기술하거나 특정하는데 쓰인다. 방사선방어 목적으로서의 물리량은 방사선원, 방사선장 및 물질과의 상호작용을 하는데 필요하게 된다. 어떤 양은 비이온화방사선(NIR)에 대한 인체의 피폭(선량계측량)을 기술하는데 필요할 수도 있기 때문에 특별한 중요성을 가지며 선량계측량의 중요한 용도는 피폭한도를 설정하는데 있다.

어떤 물리량의 값은 일반적으로 선택된 단위의 배수로 표시한다. 국제단위(SI)의 사용은 원칙적으로 오늘날 일반적으로 수용된다[3]. SI단위는 기본단위, 유도단위 및 보조단위의 세부류로 구분된다. 기본단위는 길이, 질량, 시간, 전류, 열역학적 온도, 물질의 양 및 빛의 세기에 대한 것들인데, 각각 meter, kilogram, second, ampere, kelvin, mole 및 candela로 표현된다. 보충적인 평면각과 입체각에 대한 각각의 보조단위는 라디안(radian)과 스테라디안(steradian)이다. 유도단위는 양의 대수적 관계에 따라서 기본단위와 보조단위를 결합함으로써 형성된다.

표준화에 대한 일반적인 개요는 국제표준화기구(ISO)에 의해 설정되는데 전형적인 방사선량도, 이를테면 다음과 같은 것들로 ISO 82에 포함된 여러국제표준에 주어져 있다.

- * 주기현상과 관련된 양(ISO 31/2-1978) ;
- * 전기와 자기(ISO 31/5-1979) ;
- * 빛 및 전자기복사에 관련된 양(ISO 31/6-1980) ;
- * 음향학(ISO 31/7-1978) .
- * 핵반응과 이온화방사선(ISO 31/10-1980) ;

주) 스웨덴에서는 1988년 이래 정확하게 12.4 eV를 채택하고 있으며, 이를 채택하게 된 배경이 합리적인 듯 하다. Health Physics, 60(5), p. 733(1991).

여기서는 ISO Standard Handbook 2에서 권고된 많은 양과 단위들이 채택되었다. ISO 권고서는 전적으로 방사선방어를 목적으로만 쓰여진 것은 아니므로 방사선방어에 관련이 적은 물리량은 제외하였다. 방사선방어에 중요하나 ISO 권고서에는 포함되어 있지 않은 양은 추가하였다.

그렇지만 여기 실린 내용이 완전한 것일 수도 없고 확정적일 수도 없다. 체계의 완성에는 아직 시간이 걸릴 것이지만 기본적 틀을 만든다는 것이 의미가 있으며 이를 통해 관계된 개인이나 기관이 표준화를 위해 노력하는 자세를 촉구하는 것이 중요하다.

이 자료의 편집체계는 ISO Standard Handbook No. 2, “측정단위(Units of Measurement[4])”에서 택한 체계에 준한다. 부록 A[2]에서 하나의 표에 양을 체계적으로 정의하고 해당 기호와 단위를 나타내는데, 이 표는 매우 간결한 개념, 정의를 수록하고 있다. 이것은 독자들이 물리적인 기초개념과 이에 사용되는 일반적인 양과 단위에 대해 알고있다는 가정에 이다.

같은 양에 대해 기호가 한개 이상인 경우는, 첫번째 기호가 일반적으로 택해진다. 때로는 하나의 기호가 다른 물리량을 일컫는데 사용되는 수도 있는데 이는 불가피한 경우이다. 단위의 10진 배수를 나타내는 다음의 보기에서와 같은 접두어를 포함해서 SI단위 체계를 쓴다.

동일한 국제표준 또는 다른 국제표준에서 같거나 유사한 양에 대해 다른 명칭이 사용되기도 하는데 이를 테면, ISO 31/2에서는 $\omega = 2\pi f$ 를 각진동수(angular frequency), 원진동수(circular frequency), 또는 펄스 텀스(pulsatance)라 일컬으며 ISO 31/2는 에너지선속 밀도(energy flux density)와 에너지플르엔스율(energy fluence rate)을 사용하며, ISO 31/2는 복사에너지플르엔스율(radian energy fluence rate)이라는 용어가 사용되는 반면에 ISO 31/5에서는 포인팅벡터(Poynting Vector)의 크기가 에너지선속밀도를 특정 하는데 사용된다.

양의 분류 및 비교

방사선방어에 실제적으로 필요한 경우를 고려하면, 부록 A[2]에 편집된 양들은 다음의 세가지 기준에 따라 분류할 수 있다.

접두어 단위의 역수를 표현한 보기

역수 (multiple)	접두어 (name of prefix)	기호 (symbol)
10 ¹⁵	exa	E
10 ¹²	tera	T
10 ⁹	giga	G
10 ⁶	mega	M
10 ³	kilo	k
10 ²	hecto	h
10	deca	da
10 ⁻¹	deci	d
10 ⁻²	centi	c
10 ⁻³	mili	m
10 ⁻⁶	micro	μ
10 ⁻⁹	nano	n
10 ⁻¹²	pico	p
10 ⁻¹⁵	femto	f
10 ⁻¹⁸	atto	a

- * 접두어에 대한 기술들은 접두어와 단위에 대한 기호간의 빈틈이 없는 로마자 타입으로 표현해야 한다.
- * 복합 접두어는 사용되지 않는다.
예) mμm 대신에 nm(nanometer)로 쓴다.

1. 선원과 흡수체를 고려한 방사선장의 물리적 특성. (복사계측량)
2. 비이온화방사선과 물질과의 상호작용[예를 들면, 상호작용계수]
3. 생체의 비이온화방사선 노출을, 특정짓기 위한 적절한 양[선량계측량]

ICRU는 이온화방사선에 대해 위와 유사한 분류를 하고 있다[5]. 그러나 이와 같은 형식적 유사성이 NIR분야의 선량계측량이 반드시 복사계측(radiometric)의 양과 상호작용계수의 곱으로 이루어져야만 된다는 것은 아니다. 이온화방사선과 비이온화방사선을 물리적 상호작용의 현상과 생물학적 반응기구에 큰 차이가 있을 뿐만 아니라 측정기술도 다르고 경우에는 지식의 부족함도 상당하며 실제로 NIR에 대한 특별한

선량계측량을 선택해야 하는 경우도 있다.

양과 단위의 조화는 체계적이고 실용적인 관점에서 바람직하지만[6] 실제적인 상황에서 고려되어야 할 사항들을 제한하는 경우도 있다. 광범위한 장이 될수록 더 많은 추상적 개념(abstraction)의 필요성이 생기면서 다른 [divergent]관례와 전문적인 관심은 고려하여야 하며 측정기술의 차이점과 생물학적 기구의 차이점의 실제적 배려가 필요하므로 획일적인 접근은 적당하지 않다.

선원(source) 및 장(fields)의 특성에 관한 양

복사계측량(radiometric quantities)

표 1 및 표 2는 비이온화방사선과 이온화방사선 측정에 관계된 양에 대한 이들 사이의 여러 가지 관계를 보여주기 위해서 부록 A[2]로부터 선택된 몇가지 필수적인 양이다. 이 표들은 또한 여러 방사선 종류에 관계된 양들 간에 존재하는 용어의 차이점, 복사계측량과 광도계측량의 비교, 또 여러 정의로 고려되어야 하는 면적소 dA에 대한 비교를 명확히 보여주고 있다. 표 1은 비이온화방사선의 여러 세부분야에서 사용되는 선량계 측정량과 단위를 포함한다. 여덟가지 일반적 항목(에너지; 시간당 에너지; 면적당 에너지; 부피당 에너지; 시간·면적당 에너지; 시간·입체각당 에너지; 시간·면적·입체각당 에너지; 면적·입체각당 에너지)는 전자기복사(특히 무선주파수), 광학방사선(자외선, 적외선을 포함), 소리(특히 초음파)에서 중요시 여긴다. 이온화방사선도 이 분야에서의 접근의 유사성과 표준화의 정도를 보여주기 위해 포함시켰다.

열들은 에너지와 시간, 표면, 부피, 입체각 사이의 관계의 복잡성 순서로 배열한 것이다. 에너지량과 그 시간미분, 에너지전속 또는 출력(표 1의 2, 3)열은 선원을 특정짓는데 가장 자주 적용된다. 어떤 분야에서는 이들은 복사에너지(radiant energy) 및 복사출력(radiant power)으로 불린다. 이런 양들의 기본개념과 정의는 비이온화 및 이온화방사선 분야에서 전반적으로 동일하다.

매체내의 어떤 주어진 공간의 한점에서 공간 에너지밀도(부피당 에너지)와 공간을 통한 에너지 수열(면적당 에너지 또는 시간·면적당 에너지)은 표 1의 4, 5, 6열에 기술되어 있다.

모든 복사계측량은 다중방향성 방사선에 적용될 수 있으므로 방사장에 대한 선원과 피사체(receiver)의 표면배향에 상당히 주의해야 한다[7]. 기존의 틀을 이러한 기하학적 특성 세가지 방법으로 접근하는데 실제적인 적용에서는 주의 깊게 구별되어야 할 것이다.

방사선의 방향에 직각을 이루는 면소.

단일방향 방사선이나 주어진 방향의 작은 입체각에 의해 제한된 다중방향 방사선장의 일부와 관계된 양에 대한 면소 dA는 이 방향과 직각을 이루게 한다. 이 접근법은 에너지 방사량(이온화방사선) 방사량(radiance) 및 시간직접방사량 및 광학방사선에 실제적으로 사용된다.

구(sphere)의 단면적

에너지 플르언스 및 에너지 플르언스율(이온화방사선), 표면출력(surface power)밀도 또는 에너지전속 밀도(전자기복사), 복사에너지 플르언스율(광학방사선), 및 음향세기[optical intensity(초음파)] 등의 정의에 대해서, 기준(reference) 표면은 고려중인 점을 둘러싼 작은 구의 단면적 dA로 한다. 구는 입사된 각 방향과 직각되는 곳에 형성되므로 구의 단면적이 입사방향과 독립적이라는 것은 모든 방향에 같은 비중을 둘을 의미한다.

복사의 방향과 직각을 이루지 않는 면소

광학방사선 노출에서 물질내 투과깊이는 일반적으로 매우 작다. 그러므로, 복사체로부터의 방출은 주어진 표면적으로부터 방사된 에너지량에 따라 특정되며 또, 생물학적 영향의 정도는 어떤 주어진 표면에 입사된 복사에너지의 양에 따라 결정된다. 그러므로, 관련된 양은 방출 또는 흡수되는 표면의 면소 dA의 법선방향과 복사선이 임의각 θ 를 이룰 수 있다.

면적당 에너지(energy per area)란 일반적인 용어는 두가지 방법으로 사용되어 왔다.

a) 작은 구의 단위 면적당 에너지투과량(이온화방사선의 "에너지 플르언스", 이를테면 광생물학

Table 1. Synopsis of comparable radiometric quantities (numbers in brackets refer to item numbers of Appendix A in Ref. 2)

Type of radiation	Generic term					
	Energy (j)	Energy time (W)	Energy time · area (J/m ²)	Energy volume (J/m ³)	Energy time · area (W/m ²)	Energy time · area · solid angle (W/m ² sr)
Ionizing radiation	Radiant energy	Energy flux	Energy fluence*		Energy fluence rate,	Energy radiance**
	R	$R = \frac{dR}{dt}$	$\Psi = \frac{dR}{dA}$		energy flux density* $\psi = \frac{d\psi}{dt}$ $= \frac{d^2R}{dA dt}$	$I = \frac{d\psi}{d\Omega}$ $= \frac{d^2\psi}{dA dt d\Omega}$ $= \frac{d^3R}{dA dt d\Omega}$
Radiofrequency electromagnetic radiation	Radiant energy	Radiant power, radiant energy flux		Electromagnetic energy density $W = \frac{dQ}{dt}$	Surface power density, Energy flux density* $\psi = \frac{d^2Q}{dA dt}$	Power per solid angle $I = \frac{d^2Q}{dt d\Omega}$
	Q (2.32)	$P = \frac{dQ}{dt}$ (2.33)		(2.34)	(2.36)	(2.37)
Optical radiation (radiometric quantities)	Radiant energy	Radiant power, radiant energy flux	Radiant exposure***	Radiant energy density $W = \frac{dQ}{dV}$	Radiant energy fluence rate* $\phi = \frac{d^2Q}{dA dt}$	Radiant intensity $I = \frac{d^2Q}{dt d\Omega}$
	Q (3.1)	$P = \frac{dQ}{dt}$ (3.3)	H = $\frac{dQ}{dA}$ (receptor surface) (3.18)	(3.7)	(3.5)	(3.9)
Ultrasound	Acoustic energy	Acoustic power	Acoustic intensity*		Radiant exitance*** $M = \frac{d^2Q}{dA dt}$ (source surface) (3.14)	Time-integrated radiance** $A = \frac{d^2Q}{dt d\Omega}$
	energy	$P = \frac{dQ}{dt}$ (4.9)	density (4.8)		Irradiance*** $E = \frac{d^2Q}{dA dt}$ (receptor surface) (3.16)	(3.11)

* The area dA is taken as the cross section of a sphere on which the radiation is incident at the point under consideration.

** The area dA is taken as perpendicular to the direction of radiation.

*** The normal on area dA forms an angle θ with the direction the radiation.

(photobiology)에서의와 같은 광학방사선의 “플르 언스”

- b) 흡수표면을 통한 단위 면적당 에너지의 양(광학방사선에서 “복사노출(radiation exposure)”은 전통적으로 광생물학에서는 “선량(dose)”이라 한다.)

시간 · 면적당 에너지(energy per time and area)란 용어는 세가지 방법으로 사용된다.

- a) 작은 구의 단위 단면당 복사출력(radiant power) (에너지 플르엔스율, 복사에너지 플르엔스율, 에너지 선속밀도, 표면출력밀도, 음향세기)
- b) 선원표면적의 단위 면적당 복사출력(광학방사선에 대한 “복사 exitance”)
- c) 흡수표면의 단위 면적당 복사출력(광학 “irradiance”)

각에 의존되는 복사선원은 단위 입체각당 받는 복사출력(radiant power) [“복사세기(radiant intensity)”], 단위 면적 및 단위 입체각당 받는 복사출력(방사량 “radiance”), 또는 단위 면적과 단위 입체각당 받는 복사에너지(radiant energy)에 의해 특징된다. 위의 내용은 표 1의 7, 8, 9 열에 나타나 있다. 방사량(radiance)은 광학빔(optical beam) 전체에 걸쳐 일정한데 이것은 선원으로부터 나오거나 중간매체의 임의의 표면을 통과하거나, 흡수체 표면에 입사하는 비감쇠복사의 일반적 기술에 거의 똑같이 적용된다.

복사계측량(radiometric quantities)과 광도계측량(photometric quantities)

광학방사선에 대한 복사계측(radiometric)량과 광도계측(photometric)량의 비교는 표 2에서 기술하였으며, 전자는 이미 표 1에서 논의했지만 표 2에서 광도계측량과 대비하여 보였다.

복사계측량(첨자 e)과 광도계측량(첨자 v) 사이의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$\Phi_{v\lambda} = Km V(\lambda) \Phi_{e\lambda} \quad (1)$$

여기에서

$$\Phi_{e\lambda} = \text{스펙트럼 발광선속(spectral luminous flux)}$$

$\Phi_{e\lambda}$ = 스펙트럼 복사능(spectral radiant power)

Km = 최대 스펙트럼 발광능률(maximum spectral luminous efficacy)

$V(\lambda)$ = 스펙트럼 발광효율(spectral luminous efficiency)

광도계측량은 단지 복사선의 성질에만 근거하는 것이 아니다. 왜냐하면 이는 빛에 적응된 육안(light-adapted eye)에 관련된 반응함수 $V(\lambda)$ 로 가중된 복사계측량을 나타내기 때문이다. 이들은 특정 유형의 램프나 전사장치(visual display)의 사용과 관련된 장애의 평가와 제어에서 유용한 개념으로 알려져 있다[8]. 발광선속과 복사출력, 발광출력(luminous power)과 복사세기, 발광(luminous) exitance와 복사 exitance 등은 광학선원의 특성화를 위한 전형적인 짝들 이다.

방사량(radiance)과 휘도(luminance), 복사에너지 플르엔스율(radiant energy fluence rate)과 광선속밀도(luminous flux density), 복사에너지밀도(radiant energy density)와 발광밀도(luminous density) 등은 광학방사선(optical radiation)장내 임의의 위치에서 보편적으로 사용되는 것들이다. 광학적 표면조사물체는 양의 작은 광휘(irradiance)와 조명도(illuminance) 및 복사노출(radiant exposure)와 빛노출(light exposure)이다.

적용의 한계

에너지, 출력 및 유도복사계측량의 개념은 방사선의 파장이 길어지면 불충분하게 된다.

입사선은 반사, 투과, 산란 및 생물학적인 구조에 의해서 흡수될 수도 있기 때문에 이 특성은 (a) 피폭체가 없는(자유장) 공간에서 방사선장 (b) 피폭체가 있는 방사선장간의 분명한 구별이 이루어져야 한다. 두번째 경우에는 피폭체 내부에서의 방사선장과 그 주변을 구별하는 것이 필요하다.

파장이 피폭체의 크기와 비슷해지면 아마 투과깊이를 정의하는 것은 불가능할지도 모르며 장의 세기를 내부와 외부로 구분해 보는 것이 좋을 수 있다.

상호작용과정의 특성에 관한 양

산란, 감쇠, 투과, 반사, 굴절, 및 회절의 개념은 매질과 그 경계에서 방사선의 거동을 다루는 물리이론으로부터 잘 알 수 있다. 입사방사선과 명백한 관련없이

Table 2. Comparison of radiometric and photometric terms (numbers in brackets refer to item numbers of Appendix A in Ref. 2)

Radiometric term		Photometric term	
Quantity	unit	Quantity	unit
Radiant energy	Joule (J)	Quantity of light(3.24) (talbot)	lumen-second(lm*s)
Radiant energy density (3.7)	Joule per cubic metre($J \cdot m^{-3}$)	Luminous density*	lumen-second per cubic metre ($lm \cdot s \cdot m^{-3}$) (talbot oer cubic metre)
Radiant power (radiant energy flux (3.3)	Watt (W)	Luminous flux (3.22)	lumen (lm)
Radiant intensity (3.9)	Watt per steradian ($W \cdot sr^{-1}$)	Luminous intensity (3.21)	lumen per steradian (cd or $lm \cdot sr^{-1}$)
Radiant exitance (3.14)	Watt per square metre ($W \cdot m^{-2}$)	Luminous exitance (3.26)	lumen per square metre ($lm \cdot m^{-2}$)
Radiant energy fluence rate (3.5)	Watt per square metre ($W \cdot m^{-2}$)	Luminous flux density*	lumen per square metre ($lm \cdot m^{-2}$)
Radiance (3.11)	Watt per steradian and per square metre ($W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$)	Luminance (3.25)	candle per square metre ($cd \cdot m^{-2}$)
Irradiance (3.16)	Watt per square metre ($W \cdot m^{-2}$)	Illuminance (3.27)	lumen per square metre ($lm \cdot m^{-2}$), lux (lx)
Radiant exposure (3.18)	Joule per square metre ($J \cdot m^{-2}$)	Light exposure (3.28)	lux-second (lx · s)

* Stated here for comparison only. Not in appendix A 3.

정의될 수 있는 물질의 기본 전자기적, 기계적 성질 (이를 테면 전도도, 유전율, 투과율, 분극작용 등)의 강조도 부록 A[2]의 2절에 포함되어 있다.

상호작용 과정을 기술한 양들은 표 3에 요약되어 있다. 반면에 감쇠, 흡수 및 산란은 매질내의 어떤 점에서 규정할 수 있으나 반사는 두 매질간의 경계에만 관련된 양이다. 간략화를 위해 굴절(refraction)은 반사(reflection)로써 같은 항목에 넣었다.

표 3에서 감쇠, 흡수, 산란, 방사, 굴절로 기술되는 양들은 표 1에 비교된 것과 유사하게 이온화방사선, 전자기 고주파방사선, 광학방사선 등과 비교되었다. 상호작용 과정의 기술에서 이온화방사선과 비이온화방사선 간의 유사성은 물리적 상호작용 과정의 기초가 되는 서로 다른 특성때문에 한계가 있다.

NIR 경우 유전상수, 전도율(도), 압축률 및 평균밀도와 같은 덩어리(bulk) 성질이 관심의 대상이 되는 중요한 양이다.

결과적으로 표적 생물체(target biological structures)의 물질구성과 기하학적 성질, 특히 경계면(interfaces)은 중요한 인자가 된다.

감쇠개념(attenuation concepts)

질량감쇠계수, μ/ρ 은 대전되지 않은 방사선인 경우 ρdl 에 대한 dN/N 의 몫이다[5]. 여기서 dN/N 은 밀도가 ρ 인 물질에서 dl 을 지나는 동안 상호작용을 하는 입자의 비이다. RF(고주파 또는 무선주파)에 대해서 감쇠항은 진폭(예를 들면, 전기장의 세기와 같은)과 출력 등에 적용할 수 있다. 광학방사선에 대해 감쇠는 단지 출력에 적용되는 반면, 초음파에 대해 감쇠는 음향압력(acoustic pressure)의 진폭에 또한 적용된다.

계수(coefficients)

“계수”(coefficient)와 용어는 산란계수, 흡수계수에 서와 같이 일반적으로 충분히 작은 층을 지날 때 상호작용 과정에 기인하는 복사계측량의 상대적 감소를 그 층의 두께로 나눈 값이다.

상호작용계수의 단위는 미터의 역수(m^{-1})이다. 상호작용계수가 진폭감소(진폭계수) 또는 출력감소(출력계수)라는 말로 정의될 수 있다는 점에 주의해야 한다. 만일 진폭준위와 출력준위가 각각 진폭과 출력 대신으로 생각한다면 대응하는 준위계수는 dB/m 의 단위로 측정된다.

상호작용계수에 대조하여 “인자 또는 율”(factor)이라는 용어는 반사율, 투과율 및 후방산란인자이든 지간에 복사계측량의 차원이 없는 비를 마련해 준다. 복사계측량의 차원이 없는 비에 대한 것으로 광학에서 사용되는 스펙트럼 흡수도(spectral absorptance), 반사도(reflectance), 및 투과도(transmittance)와 같은 다른 명칭으로도 쓰이고 있다.

이들 용어는 본질적으로 평면파와 무한 매체를 가정한 이상적인 조건에 적용될 수 있다는 사실에 주목해야 한다. 집속빔이나 유한 매질에서는 상당한 수정이 필요할 수도 있다.

비이온화방사선 노출을 특정짓기 위한 양(선량계측량)

넓은 의미에서 “선량계측이란 용어는 방사선피폭량을 정량화하는데 쓰였다. 방어기준과 피폭한도를 구성하는 목적을 위하여 적당한 양을 써서 정량적으로 표현해야 한다. 그 양은 방사선의 생물학적 영향과 밀접한 물리적 과정들을 나타내야 한다. 이온화방사선의 경우에서와 같이 조직에 주는 에너지의 양에 관련시키는 것이 좋은지 또는 장의 세기와 같은 다른 양이 좀더 적당한지가 비이온화방사선 선량계측에서 가장 중요한 질문들 중의 하나이다.

이온화방사선피폭 및 특성에 대해서 가장 중요한 양은 그레이(gray) 단위로 측정된 흡수선량이다. 시버트(sivert)단위의 선량당량이나 유효선량과 같이 생물학적 영향을 더 잘 나타내는 양을 얻기 위해 Q(선질계수)와 같은 적당한 계수로써 흡수선량을 수정할 수 있다.

NIR의 경우는 방사선에 따라서 상호작용 매커니즘에서부터 측정기술과 조건, 생물학적 반응메커니즘에 이르기까지 다른 여러 특성으로 인해 사용량의 다양성을 유발한다.

일반적으로 NIR 스펙트럼을 통틀어서 노출의 시간 특성이 극히 중요하고 주변요소들의 기여도 고려되어야 한다. 예를 들면, 열영향의 한도에 대해서 강조한다면 RF영역에 대한 많은 데이터는 이온화방사선의 경우에 흡수선량과는 다른 에너지 부여 시간율(energy deposition rate)에 근거된 노출한도(exposure limits)의 도입을 뒷받침한다. 음향장도 누적 에너지 아닌 양들이 노출한도를 규정하는 예이다.

비이온화방사선에 대한 노출한도를 특정짓는데 선

Table 3. Selected quantities describing interactions of radiations with matter (numbers in brackets refer to item numbers of Appendix A in Ref. 2)

Radiation	Attenuation	Absorption	Interaction process	Reflection and related phenomena	
Ionizing radiation	Linear attenuation coefficient μ_m (m^{-1})	Linear energy absorption coefficient μ_{en} (m^{-1})	Atomic cross sections for Compton scattering, Rayleigh scattering, elastic nuclear scattering, electron-electron scattering (m^2)	Backscattering factor	
	Mass attenuation coefficient μ_{en}/ρ (m^2/kg)	Mass energy absorption coefficient μ/ρ (m^2/kg)			
	Half-value thickness $d_{1/2}$ (m)				
Radiofrequency electromagnetic radiation	Transmission factor τ (2.39)	Dissipation factor (loss tangent) $\tan \sigma = \epsilon''/\epsilon'$	Scattering cross section (m^2)	Reflection factor Γ (2.39)	
	Attenuation coefficient α (2.40) (m^{-1})	Absorption coefficient a_s (m^{-1}) (2.40)	Scattering coefficient α_s (m^{-1}) (2.40)		
	Depth of penetration $1/\alpha$ (m) (2.40)				
Optical radiation	Spectral transmittance $\tau(\lambda)$ (3.34)	Spectral absorbance $a(\lambda)$ (3.32)	Spectral radiance factor $\beta(\lambda)$ (3.35)	Spectral reflectance $\rho(\lambda)$ (3.33)	
	Spectral linear attenuation coefficient $\mu(\lambda)$ (m^{-1}) (3.36)	Spectral linear absorption coefficient $\alpha(\lambda)$ (m^{-1}) (3.37)			Spectral refractive index $n(\lambda)$ (3.39)
		Spectral molar absorption coefficient $\kappa(\lambda)$ ($m^2/mole$) (3.38)			
Ultrasound	Pressure transmission factor t (4.21)	Amplitude absorption coefficient a_a (m^{-1}) (4.25)	Amplitude scattering coefficient α_s (m^{-1}) (4.25)	Pressure reflection factor γ (4.20)	
	Intensity transmission factor T (4.23)	Level absorption coefficient α'_a (dB/m) (4.27)			Intensity reflection factor R (4.22)
	Amplitude attenuation coefficient α (m^{-1}) (4.24)				Intensity backscattering coefficient B ($m^{-1}sr^{-1}$) (4.28)
	Level attenuation coefficient α' (dB/m) (4.26)				

Table 4. Selected quantities for the specification of limits of exposure to non-ionizing radiation (dosimetric quantities)

Radiation type	Field parameters	Generic term			
		Energy area	Energy time · area	$\frac{\text{Energy}}{\text{time} \cdot \text{area} \cdot \text{solid angle}}$	$\frac{\text{Energy}}{\text{area} \cdot \text{solid angle} \cdot \text{mass}}$
Ionizing radiation				Absorbed dose (Gy)	Absorbed dose rate (Gy/s)
				Dose equivalent* (Sv)	Dose equivalent rate* (Sv/s)
Radiofrequency	Effective electric field strength (V/m) (2.5)		Surface power density (W/m ²) (2.36)	Specific absorption (J/kg) (2.41)	Specific absorption rate (W/kg) (2.42)
	Effective magnetic field strength (A/m) (2.15)				
ELF	Electric field strength (V/m) (2.5)				
	Magnetic field strength (A/m) (2.15)				
Optical		Radiant exposure (J/m ²) (3.18)	Irradiance (W/m ²) (3.16)	Radiance (W · m ⁻² · sr ⁻¹) (3.12)	Time-integrated radiance (J · m ⁻² · sr ⁻¹) (3.12)
			Effective irradiance (W/m ²)		
Ultrasound			Acoustic intensity (W/m ²) (4.10)		
Ultrasound (airborne)			Acoustic pressure level (dB) (4.16)		

* Quantity involving a biological weighting factor

택된 양들은 다음의 표 4와 같고 각종 복사에 관련지어 적용시킬 수 있으며 이들 양은 이온화방사선에 대해서 선택된 양들과 비교될 수 있다.

고주파스펙트럼(radiofrequency spectrum)에서는 특성노출에 대한 매개변수로서의 에너지흡수의 사용은 비흡수율(specific absorption rate), SAR(단위: W/kg)이라는 양으로 분명해진다. 이온화방사선의 경우의 흡수선량률과 마찬가지로 SAR은 부분적으로(작은 양의 조직에 대해서) 정의된 양이다. 또, 이 개념은 일시적인 최대 SAR뿐만아니라 공간 최대 SAR까지 광범하며 전신이나 기관의 여러 부분까지 평균한 값이다. SAR의 개념은 주로 생물학적 행동의 열메카니즘(thermal mechanism)과 부합된다[9~10].

방사선방어의 실제적인 목적에 대해서 자유공간에서 10 MHz 이상의 고주파수에 대한 노출한도는 한정된 노출보다 더 높은 한도가 고려되어야 하고, Wm²으로 나타내는 “표면 출력밀도”(surface power density)란 양으로 주어진다. 이 실제의 한도는 Youmans와 Ho에 의해서 평가되었다[11]. 이와 같은 이유로 고주파에 대한 노출한도에 대해서 IRPA는 SAR로 표현되는 기본한도(basic limits)와 표면출력밀도로 표현되는 유도한도(derived limits)를 정하게 되었다[10].

10 MHz 이하인 고주파(radiofrequencies)에 대하여 기본한도는 유효전기장의 세기 E_{eff}(effective electric field strength)와 유효자기장의 세기(effective magnetic field strength) H_{eff}로 나타낸다. 그러므로 장의 근처에서 장의 세기와 방향성분 사이에서의 위상관계는 일반적으로는 알려져 있지 않다. “유효장의 세기”(effective field strengths)는 진폭의 수직성분과 수평성분을 제곱한 후 또 이 합의 제곱근을 구함으로써 얻을 수 있으며 이 세기는 자유공간, 즉 흡수체 또는 산란체가 없는데서 결정된다.

앞에서와 같은 이유로 표면출력밀도, 비흡수율(SAR), 및 비흡수량들은 대단히 긴과장 때문에 극저주파(ELF: extremely low frequency)장과 같은 경우에는 실용적이지 못하다. 상호작용 메카니즘의 이해부족때문에 선량계측(dosmetric)개념은 ELF장(field)으로 완전히 발전되지 못하였다.

광학방사선(optical radiation)의 경우, 이 상태는 더 복잡하다. 일반적으로 눈이나 피부의 노출은 다른 형태로 기술할 수 있다. 피부노출은 단위 면적당 입사에너지(Jm²)로 표현할 수 있으며 또 복사노출(radiant

exposure)로 불리운다.

투과깊이(penetration depth)와 같은 매개변수의 상호작용에 의하여 특정되거나 되지않을 수도 있다. 광생물학에서의 전통적인 용어인 “선량”(dose)은 이 양을 널리 사용한 것이다. 피부조사(skin irradiation)의 전후관계에서 노출은 때때로 최소홍반(紅斑)선량[minimum erythema dose(MED)]의 다중되는 양으로 정량화 된다. Jm²으로 표현되는 MED는 또한 파장에 관계된다. 이런 다중도는 일반적으로 선량당량(does equivalent)이라는 양의 의미로 이온화방사선의 피폭의 정량화와 부합된다.

눈(시각상)의 노출특성에 대하여는, 몇가지 복사계측량[radiant exposure(Jm²)] irradiate(Wm²), 방사량(radiance)(W m² · sr), 시간집적방사량(time integrated radiance)(J m² · sr)이 사용되기도 하는데 뒤의 두 양은 방사선원의 확장된 양으로 사용된다. 노출시간은 특정되었고 스펙트럼투과도(spectral transmittance)의 상태는 역시 유용하게 될 수 있다. 그러므로 모든 광도계측량(photometric quantities)은 빛에 적응된 육안(light adapted eye, 식 (1)를 참조)과 관계되는 반응함수 v(λ)로써 가중된 복사계측량과 동등하며 이것은 특수 광학선원과 관계된 방사선방어 목적으로 사용될 수 있으며 더 세부적인 것은 [8]에서 밝혀져 있다.

눈과 피부에 대한 UV의 노출한도는 넓은 띠 선원(broadband source)의 밝기(irradiance)가 스펙트럼 유효함수(spectral effectiveness function) S_λ로 가중되는 것에 대해서 유효광휘(밝기) “effective irradiance”라는 표현을 쓸 수 있다.[12~13]

초음파(ultrasound)에 대한 노출 준위는 음향압력(acoustic pressure)이 짧은 펄스의 초음파에 대해 더 유용함이 증명되었지만 노출한도를 특성화하는데 생체기관의 관심점 및 노출시간에 따라 음향세기(acoustic intensity, Wm²)로 표현된다. 노출제어의 실제적인 목적에 대해서는 수중에서 자유장 시간평균 음향세기(free-field time averaged acoustic intensity)와 노출시간은 종종 측정되고 설명된다.

공중초음파(airborne ultrasound)에 대한 노출한도는 음향압력준위^{*)} “acoustic pressure level”(L_p = 20 log₁₀(p/p₀)의 표현으로 특성화된다. 이 식에서 p₀는 공기중에서 음향세기인 I₀=10⁻¹² W m²와 동등한 음향압력(20 μPa)의 제곱근을 의미하는 것이다[14].

결 론

본고에서는 이 NIR방어의 모든 영역에 사용되는 단위와 양에 대한 개념의 포괄적인 면을 조사하였다. 비이온화방사선의 물리적 현상들은 고전 전자기학인 광학과 음향학에 속하였으나 이들 용어는 NIR방어의 목적으로 이용될 수 있다. 표준화된 양들의 명칭, SI 단위와 관련된 정의도 부록 A에 제시되었다.

표 1에서는 주로 복사계측 물리적 개념과 양들의 명칭에 약간의 차가 있기는 해도 물리적 개념으로 잘 이해될 수 있으며 이들 양을 이온화방사선에 쓰이는 양들과 비교함으로써 정할 수 있다.

광학에서는 표 2에서와 같이 복사계측(radiometric) 량과 광도계측(photometric) 량 사이에서의 이종성은 여전히 존재하지만, 각 종류의 양들간의 상응하는 명백한 체계때문에 취급하기는 쉽다(표 2).

표 1의 음향세기(acoustic intensity)와 복사세기(radiant intensity)를 비교해 볼 때 초음파량에 대한 용어는 일관성이 있으나 단지 다른 복사에 대한 양과 완벽한 조화를 이루지 못하고 있다.

상호작용계수(interaction coefficient)는 다른 과학 분야(표 3)에서 상호작용 메카니즘의 정도가 더 높은 특성을 갖는다. 비균일성은 복사계측의 경우가 더 크며 또 용어의 전문화를 위해서는 더 많은 작업을 해야 할 것이다. 표 4에서 노출량(exposure quantities)[선량 계측량]은 큰 상이성과 비균일성을 보인다고 결론지을 수 있다.

결론적으로 적어도 현시점에서 비이온화방사선에 대한 제반·개념, 양, 단위 및 용어 등의 본질적이고도 실제적인 문제는 적어도 범위와 목적에 대한 다른 양과의 공존상태와 병행하여 더욱 정리할 필요가 있다. 때문에 서 다른 세부 전문분야간에 조화를 이루려는 목적으로 본고에서는 이점에 관계되는 점을 논하였다. 그러므로 국제비이온화방사선위원회(INIRC)의 개념상의 관점과 실제적인 방사선방어로부터의 더 큰 단일화의 도입을 위한 노력에 부응하여 NIR 분야에서의 상기한 여러 면에서의 가능성에 대한 연구가 더 필요할 것이다.

참고문헌

1. International Telecommunication Union *Radio Regulations, Revision*(Geneva : ITU)(1981).
2. International Radiation Protection Association/International Non-Ionizing Committee, "Review of Concepts, Quantities, Units, and Terminology for Non-Ionizing Radiation Protection." *Health Phys.* **49**(3), 1329 - 1362(1985).
3. Bureau International des Poids et Mesures, *Le Système International d'Unités(SI)*(Sèvres : BIPM). Translated into English as SI(1973) *The International System of Units* (National Physical Laboratory, Her Majesty's Stationery Office, London(1977).
4. International Organization for Standardization, "Units of Measurement", *ISO Standard Handbook 2* (2nd edn)(Geneva : ISO Central Secretariat)(1982)
5. Internationale Commission on Radiation Units and Measurement, "Radiation Quantities and Units", ICRU Report 33(Bethesda, MD : ICRU)(1980).
6. C. S. Rupert and R. Latarjet "Toward a nomenclature and dosimetric scheme applicable to all radiations", *Photochem. Photobiol.* **28**, 3-5(1977).
7. H. Mohr and E. Schäfer "Uniform terminology for radiation : a critical comment : *Photochem Photobiol.* **29**, 1061-1062(1979).
8. D. Sliney and M. Wolbarsht "Safety with Laser and Other Optical Sources, pp. 693-761, New York and London ; Plenum Press (1980)
9. World Health Organization, Regional Office for Europe, "Non-ionizing radiation protection", *European Series No. 10*(edited by J. Suess)(Copenhagen : WHO Regional Publications)(1982).
10. International Radiation Protection Association/International Non-Ionizing Radiation Committee, "Interim guidelines on limits

- of exposure to radiofrequency electromagnetic fields in the frequency from 100 kHz to 300 GHz”, *Health Phys.* **46**, 975–984 (1984).
11. H. D Youmans and H. S. Ho “Development of dosimetry for RF and microwave radiation. I. Dosimetric quantities for RF and microwave electromagnetic fields”, *Health Phys.* **29**, 313–316(1975).
 12. International Radiation Protection Association/International Non-Ionizing Radiation Committee, “Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation)”, *Health Phys.* **49**, 331–340(1985).
 13. International Radiation Protection Association/International Non-Ionizing Radiation Committee, (Guidelines on limits of exposure to laser radiation of wavelengths between 180 nm and 1 μ m)”, *Health Phys.* **49**, 341–359(1985).
 14. International Radiation Protection Association/International Non-Ionizing Radiation Committee, “Interim guidelines on limits of human exposure to airborne ultrasound”, *Health Phys.* **49**, 969–974(1984).

부 록

비이온화 방사선에 관련된 양과 단위

여기에 제시된 우리말 용어는 한국물리학회 용어집 등을 참조하여 작성한 것으로 필자가 제안하는 것이며 따라서 이들 용어는 가변적이며 독자의 적극적인 검토와 제안을 기대하고 있다.

영 어	한 글	기호	수 식	비고
absorption coefficient(2.40)	흡수계수			
acoustic energy density(4.8)	음향에너지밀도	w	$w = \frac{1}{2} \rho \overline{v^2} = \frac{1}{2} \frac{\overline{p^2}}{\rho c^2}$	
acoustic energy flux(4.9)	음향에너지선속	I _{SPPA}		
acoustic intensity ^{주2)} (4.10)	음향세기	I		
acoustic particle acceleration(4.4)	음향입자가속	a	$a = \frac{\partial v}{\partial t}$	
acoustic particle displacement(4.2)	음향입자변위	ξ		
acoustic particle velocity(4.3)	음향입자속도	v	$v = \frac{\partial \xi}{\partial t}$	
acoustic power(4.9)	음향출력	P		
acoustic power level(4.17)	음향출력준위	L _p	$L_p = 10 \log_{10}(p/p_0)$	
acoustic pressure(4.6)	음향압력	P		
acoustic pressure level(4.16)	음향압력준위	L _p , L	$L_p = 20 \log_{10}(p/p_0)$	
acoustic radiation pressure(4.7)	음향복사압력	P _{rad}		
ampere(4.7)	암페어	A		
ampere meter squared(2.22)	암페어-미터 제곱	Am ²		
ampere per meter(2.15, 2.23)	미터당암페어	Am ⁻¹		
ampere per square meter(2.14)	면적당암페어	Am ⁻²		
amplitude absorption coefficient ^{주1)} (4.25)	진폭흡수계수	α _a		
amplitude attenuation coefficient ^{주1)} (4.24)	진폭감쇠계수	α		
amplitude level difference ^{주1)} (1.13)	진폭준위차이	L _F		

주1) ISO 31/7 - 1978(ISO 82)에는 없다.

주2) ISO 37/7 - 1978(ISO 82)에는 없다. AIOM/NEMA 에서 채택(AIUM/NEMA 81)A

영 어	한 글	기호	수 식	비고
amplitude scattering coefficient ^{주1)} (4.25)	진폭산란계수	α_s		
angle(1.1)	각	$a. \psi$		
angular frequency(1.7)	각진동수	ω		
attenuation coefficient(2.40)	감쇠계수			
bandwidth(1.8)	띠너비, 띠폭	Δf		
candela(3.21)	칸델라[단위]	cd		
candela per square meter(3.25)	제곱미터당 칸델라	$cd\ m^{-2}$	$1\ sb = 1\ cd/m^2\ (stilb)$	
capacitance(2.8)	전기용량	C		
center frequency*(1.9)	중심(간)진동수	f_c		
circular wave number(1.12)	원형파<동>수	k	$k = 2\pi r$	
conductance (to direct current) (2.25)	전도도(직류에 대한 컨덕턴스)	G	$G = 1/k$	
conductivity(2.27)	전도율, 전도도	γ	$\gamma = 1/\Omega$	
coulomb(2.2)	쿨롱	C	$1\ C = 1\ A \cdot s$	
coulomb meter(2.13)	쿨롱미터	C.m		
coulomb per cubic meter(2.4)	세제곱미터당 쿨롱	$C.m^{-3}$		
coulomb per square meter (2.3, 2.7, 2.12)	제곱미터당 쿨롱	$C.m^{-2}$		
current density(2.14)	전류밀도	\bar{J}		
damping coefficient(1.15)	감쇠계수	δ		
decibel(1.13, 1.14, 4.16, 4.27)	데시벨	dB		
decibel per metre(4.26, 4.27)	미터당 데시벨	$dB\ m^{-1}$		
displacement(2.7)	변위			
duty factor ^{주3)} (1.5)	담당률	d	주) ISO 82에는 없다.	
electric charge(2.2)	전하	Q		
electric constant(2.9)	전기상수			
electric current(2.1)	전류	I		
electric dipole moment(2.13)	전기쌍극자모멘트	\bar{P}		
electric field strength(2.5)	전기장(의)세기	\bar{E}		

주1) ISO 31/7 - 1978(ISO 82)에는 없다.

주3) ISO 31/5 - 1979 (ISO 82)에는 없다(NCRP 81).

영 어	한 글	기호	수 식	비고
electric flux density(2.7)	전기선속밀도	\bar{D}		
electric polarization(2.12)	전기분극작용	\bar{P}	$\bar{P} = \bar{D} - \epsilon \bar{E}$	
electric potential(2.6)	전기퍼텐셜	ψ		
electric susceptibility(2.11)	전기감수율	X_e	$X_e = \epsilon_r^{-1}$	
electromagnetic energy density (2.34)	전자기에너지밀도	w		
electromagnetic moment(2.22)	전자기모멘트	\bar{m}		
emissivity(3.20)	복사율(輻射率)	ϵ		
energy flux density ^{주3)} (2.36)	에너지선속밀도	Φ		
farad(2.8)	패럿	F	$1 F = 1 C V^{-1}$	
farad per meter(2.9)	미터당 패러드	$F m^{-1}$	$F s^{-1}$	
field level difference(1.13)	장준위차			
frequency(1.6)	진동수	f, ν	$f = 1/T$	
frequency interval(1.10)	진동수간격			
henry(2.18)	헨리[단위]	H	$1H = 1 WbA^{-1} = 1 V \cdot sA^{-1}$	
henry per meter(2.19)	미터당 헨리	Hm^{-1}	$1H = 1 Wb/(A \cdot m)$ $= 1 V \cdot s/(A \cdot m)$	
hertz(1.6, 1.8, 1.9)	헤르츠[진동수의 단위] Hz			
illuminance(3.27)	조명도	E		
impedance (complex impedance) (2.29)	임피던스 (복소 임피던스)	Z	$Z = Z ^{j\phi} = R + j^x$	
intensity backscattering coefficient (4.28)	세기후방산란계수	B		
intensity reflection factor(4.22)	반사세기율	R		
intensity transmission factor(4.23)	투과세기율	T		
irradiance(3.16)	광휘(밝기, 光輝)	E		

주3) ISO 31/5 - 1979 (ISO 82)에는 없다(NCRP 81).

영 어	한 글	기호	수 식	비고
joule(2.32, 3.1)	줄[단위]	J	$1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$ 로 환산	
joule per cubic meter(2.34, 3.7, 4.8)	세제곱미터당 줄	Jm^{-3}		
joule per cubic meter nanometer (3.8)	세제곱미터, 나노미터당 줄	$\text{J}/(\text{m}^{-3} \cdot \text{nm})$		
joule per kilogram(2.41)	킬로그램당 줄	Jkg^{-1}		
joule per nanometer(3.2)	나노미터당 줄	J/nm	$1 \text{ erg}/\text{A}^0 = 10^{-6} \text{ J}/\text{nm}$	
joule per square meter(3.18)	제곱미터당 줄	J m^{-1}		
joule per square meter nanometer (3.19)	미터제곱 나노미터당 줄	$\text{J m}^{-1}(\text{nm})^{-1}$		
joule per square meter steradian (3.12)	미터제곱 스테라디안당 줄	$\text{J m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$		
level absorption coefficient ^{주4)} (4.27)	준위흡수계수	α'_a		
level attenuation coefficient ^{주4)} (4.2)	준위감쇠계수	α'		
level scattering coefficient ^{주4)} (4.27)	준위산란계수	α'_s		
light exposure(3.28)	빛노출	H		
linear extinction coefficient(3.36)	선형흡광계수	$\mu(\lambda)$		
logarithmic decrement(1.13)	로그감소, 로그감쇠도	Λ		
loudness level(4.18)	[물][기]소리의 크기 준위	L_N	$L_N = 20 \log_{10}(P_{\text{eff}}/P_0)_t$ kHz	
lumen(3.22)	루멘	lm		
lumen per nanometer(3.23)	나노미터당 루멘	lm/nm		
lumen per square meter(3.26)	제곱미터당 루멘	lm/m^2		
lumen per watt(3.30, 3.31)	와트당 루멘	lmW^{-1}	$1 \text{ lm} \cdot \text{h} = 3600 \text{ lm} \cdot \text{s}$	
lumen second(3.24)	루멘 초	$\text{lm} \cdot \text{s}$		
luminance(3.25)	[물][전자]휘도(輝度) [밝기]	L		
luminous exitance(3.26)	발광엑시턴스	M		
luminous flux(3.22)	광선속(빛다발)	Φ		
luminous intensity(3.21)	발광세기	I		
lux(3.27)	럭스	lx	$1 \text{ lx} \cdot \text{h} = 3600 \text{ lx} \cdot \text{s}$	
lux second(3.28)	럭스초	$\text{lx} \cdot \text{s}$		
magnetic constant(2.19)	자기상수			
magnetic dipole moment(2.22)	자기쌍극자 모멘트			
magnetic field strength(2.15)	자기장의 세기	\vec{H}		
magnetic flux(2.17)	자기선속, 자기다발	Φ		
magnetic flux density(2.16)	자기선속밀도	\vec{B}		
magnetic induction(2.16)	자기유도			

주4) ISO 31/7 - 1978(ISO 82)에는 없다.

영 어	한 글	기호	수 식	비고
magnetic susceptibility(2.21)	자기감수율	X_m	$X_m = \mu_r - 1$	
magnetization(2.23)	자기화	\bar{M}	$M = (\bar{B}/\mu_0) - \bar{H}$	
maximum spectral luminous efficacy (3.30)	최대스펙트럼 발광능률	K_m		
meter(1.11, 4.2)	미터	m		
meter per second(2.31, 4.1, 4.3)	초당 미터(속도)	ms^{-1}		
meter per square second(4.4)	초제곱당 미터(가속도)	ms^{-2}		
meter to the power minus one (1.12)	10^{-1} 미터	$10^{-1}m$		
modulus of impedance (impedance) (2.29)	임피던스율(임피던스)	$ Z $	$ Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	
mutual inductance(2.18)	상호인덕턴스	L_{12}		
octave(1.10)	옥타브			
ohm(2.42, 2.29, 2.38)	오옴[단위]	Ω	$1 \Omega = 1 V/A$	
ohm meter(2.26)	오옴미터	$\Omega \cdot m$		
pascal(4.5, 4.6, 4.7)	파스칼	Pa	$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$	
pascal second per meter(4.19)	미터당 파스칼·초	Pa · s/m		
period, periodic time(1.3)	주기, 주기의 시간	T		
permeability(2.19)	투과도	ϵ	μ	
permeability of vacuum(2.19)	진공중의 투과성	ϵ_0	μ_0	
permittivity(2.9)	유전율	ϵ		
permittivity of vacuum(2.9)	진공중의 유전율	ϵ_0		
phase difference(2.28)	위상차	ϕ		
phase displacement for alternating current (2.28)	위상변위(교류에 대한)			
phon(4.18)	폰			1 폰(phon)은 $20 \log_{10}(P_{\text{eff}}/P_0)$ dB = 1 인 때의 소리의 크기 이다.
potential difference(2.6)	전위차, 퍼텐셜 차이	U		
power attenuation coefficient*(2.40)	전력감쇠계수	α	$\psi = \psi^0 e^{-\alpha x}$	
power level difference(1.14)	출력준위차이	L_p		
power (of an alternating current) (2.30)	전력(교류의)	P		$\begin{cases} U(t) = U_m \cos wt \text{ 이고} \\ I(t) = I_m \cos(wt - \phi) \text{ 일때} \\ UI \text{ 는 순간출력이다.} \\ \text{Im}U_m/2 \text{ 는 유효기출력이고(apparent power) 이고} \\ \text{Im}U_m/2 \cos \phi \text{ 는 능동(active power) 이다} \end{cases}$
power per solid angle****(2.37)	입체각당 출력	I		

영 어	한 글	기호	수 식	비고
power (surface) density*(2.36)	출력(표면)밀도	ψ		
Poynting vector(2.35)	포인팅벡터	\vec{S}		
pressure reflection factor ^{주5)} (4.20)	압력반사율	r	$r = P_r/P_i$	
pressure transmission factor(4.21)	압력투과율	t		
quantity of electricity(2.2)	전기량	Q		
quantity of light(3.24)	광량, 빛의 양	Q		
radian(2.28)	[수]라디안, 호도(弧度)	rad		
radiance(3.11)	방사량	L	$L = \int L_\lambda d_\lambda$	
radiant energy(2.32, 3.1)	복사에너지	Q, W	$Q = \int W_\lambda d_\lambda$	
radiant energy density(3.7)	복사에너지밀도	w	$w = \int w_\lambda d_\lambda$	
radiant energy fluence rate*(3.5)	복사에너지 플르엔스율	ψ	$\psi = \int \psi_\lambda d_\lambda$	
radiant exitance(3.14)	복사엑시턴스	M	$M = \int M_\lambda d_\lambda$	
radiant exposure ^{주5)} (3.18)	복사노출	H		
radiant flux(2.33, 3.3)	복사선속	Φ		
radiant intensity(3.9)	복사세기	I	$I = \int I_\lambda d_\lambda$	
radiant power(2.33, 3.3)	복사출력	P	$P = \int P_\lambda d_\lambda$	
reactance(2.29)	리액턴스	X	$X = L\omega - \frac{1}{C\omega}$	
reciprocal meter (1.12, 2.40, 3.36, 4.24, 4.25)	역미터 또는 미터반비례	m^{-1}		
reciprocal meter per steradian(4.28)	스테라디안당 역미터	$m^{-1}Sr^{-1}$		
reciprocal second (1.7, 1.15)	역 초	s^{-1}		
reflection factor ^{주5)} (2.39)	반사율	Γ		
relative permeability(2.20)	상대투과성	μ_r	$\mu_r = \mu/\mu_0$	
relative permittivity(2.10)	상대유전율	ϵ_r	$\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$	

주5) ISO 31/5 - 1979(ISO 82)에는 없다. (NVRP 81)부터 채택
주) * (CIE 70)

영 어	한 글	기호	수 식	비고
resistance(2.29)	저항, 전기저항	R		
resistance (to direct current)(2.24)	저항(직류)	R		
resistivity(2.26)	비저항	ρ		
scattering coefficient(2.40)	산란계수			
second(1.3, 1.4)	초	s		
self inductance(2.18)	자체인덕턴스	L		
siemens(2.25)	지멘스[단위] (導傳率의 단위) 양:	S	1 S = 1 A/V 1 S = Ω^{-1}	
siemens per meter(2.27)	미터당 지멘즈	S m ⁻¹		
solid angle(1.2)	입체각	Ω		
spatial average-pulse average intensity (4.14)	공간평균 - 펄스평균세기			
spatial average-temporal average intensity (4.15)	공간평균 - 시간평균세기			
spatial peak-pulse average intensity (4.12)	공간최대 펄스평균세기			
spatial peak-temporal average intensity (4.13)	공간최대 시간평균세기			
spatial peak-temporal peak intensity (4.11)	공간최대 시간최대세기			
specific absorption*(2.41)	비흡수	SA		
specific absorption rate*(2.42)	비흡수율	SAR	SAR = d/dt(SA) = d/dt(dw/dm) = d/dt(dw/ ρ dv)	
specific acoustic impedance ^{주6)} (4.19)	비음향임피던스	Z		
spectral absorptance ^{주7)} (3.32)	스펙트럼 흡수도	$a(\lambda)$		
spectral irradiance(3.17)	스펙트럼 밝기	E_λ	$E_\lambda = dE/d\lambda$	
spectral linear absorption coefficient (3.37)	스펙트럼 선형 흡수계수	$a(\lambda)$		
spectral linear attenuation coefficient (3.36)	스펙트럼 선형 감쇠계수	$\mu(\lambda)$		
spectral luminous efficacy(3.31)	스펙트럼 발광효율	$K(\lambda)$	$K(\lambda) = K_m V(\lambda)$	
spectral luminous efficiency(3.29)	스펙트럼 발광효율	$V(\lambda)$		
spectral luminous flux(3.28)	스펙트럼 발광선속	Φ_λ		
spectral molar absorption coefficient (3.38)	스펙트럼 몰 흡수계수	$k(\lambda)$	$k(\lambda) = a(\lambda)/c$ 단, c는 몰농도 이다.	
spectral radiance(3.18)	스펙트럼 발광	L_λ	$L_\lambda = dL/d\lambda$	
spectral radiance factor(3.35)	스펙트럼 발광률	$\beta(\lambda)$		
spectral radiant energy(3.2)	스펙트럼 복사에너지	Q_λ, W_λ	$Q_\lambda = d\Omega/dA$	

주6) ISO 31/7 - 1978(ISO 82)에서는 특성임피던스(characteristic impedance)라 지칭되었다.

영 어	한 글	기호	수 식	비고
spectral radiant energy density (3.8)	스펙트럼복사에너지 밀도	W_{λ}		
spectral radiant energy fluence rate (3.6)	스펙트럼 복사에너지 플르엔스율	ψ_{λ}		
spectral radiant exitance(3.15)	스펙트럼 복사 엑시턴스	M_{λ}	$M_{\lambda} = dM/d\lambda$	
spectral radiant exposure(3.19)	스펙트럼 복사노출	H_{λ}	$H_{\lambda} = dH/d\lambda$	
spectral radiant intensity(3.10)	스펙트럼 복사세기	I_{λ}	$I_{\lambda} = \int I_{\lambda} d_{\lambda}$	
spectral radiant power(3.4)	스펙트럼 복사출력	$P_{\lambda}, \Phi_{\lambda}$	$P_{\lambda} = dP/d\lambda$	
spectral reflectance(3.33)	스펙트럼 반사계수	$\rho(\lambda)$		
spectral refractive index(3.39)	스펙트럼 굴절률	$n(\lambda)$		
spectral transmittance(3.34)	스펙트럼 투과계수	$\tau(\lambda)$		
spherical irradiance*(3.35)	구면광휘(光輝)	Φ		
square meter per mole(3.38)	몰당 제곱미터	m^2/mol		
static pressure(4.5)	정지압력	P_s		
steradian(1.2)	스테라디안[입체각의 단위]Sr			
surface density of charge(2.3)	전하의 표면밀도	σ		
tension(2.6)	장력			
tesla(2.16)	테슬라[단위]	T	$1 T = 1 N(A^{-1}m^{-1})$ $= 1 Wb m^{-2}$ $= 1 V \cdot s m^{-2}$	
time constant of exponential varying quantity (1.4)	지수(적)변화량의 시간상수	τ		
time intergrated radiance**(3.12)	시간집적 방사량	k		
transmission factor**(2.39)	투과인자	τ		
velocity of propagation of electromagnetic waves (2.31) (invacuum and in any medium)	전자기파의 전파속도	C_0 (진공중의), C (매질중의)	$C_0 = \frac{1}{\sqrt{(\epsilon_0 \mu_0)}}$ $= (2.997\ 924\ 58 \pm 0.000\ 000\ 0(2) \times 10^8 ms^{-1})$	주: ISO 82 IUPA P 78 은 기호 c를 진공중에서 전자 기파의 전파속도로 권고했다.
velocity of second(4.1)	초속도	c(음향파의 속도)		
volt(2.6)	볼트[단위]	V		
voltage(2.6)	전압			
volt per meter(2.5)	미터당 볼트	$V m^{-1}$		
volume density of charge(2.4)	전하의 체적밀도	ρ		
watt(2.30, 2.33, 3.3, 4.9)	와트	W	$1 W = 1 Js^{-1} = 1 V \cdot A$	
watt per kilogram(2.42)	킬로그램당 와트	Wkg^{-1}		
watt per nanometer(3.4)	나노미터당 와트	$W(nm)^{-1}$		
watt per square meter (2.35, 2.36, 3.5, 3.14, 3.16 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15)	미터제곱당 와트	Wm^{-2}		

영 어	한 글	기 호	수 식	비고
watt per square meter nanometer (3.6, 3.15, 3.17)	제곱미터 나노미터당 와트	$W/(m^2 \cdot nm)$		
watt per steradian(2.37, 3.9)	스테라디안당 와트	$W sr^{-1}$		
watt per steradian nanometre (3.10)	제곱미터 나노미터당 와트	$W/(sr \cdot nm)$		
watt per square meter steradian (3.11)	제곱미터 스테라디안당 와트	$W/(m^2 \cdot Sr)$		
watt per square meter steradian nanometre (3.13)	제곱미터 스테라디안 나노미터당 와트	$W/(m^2 \cdot Sr \cdot nm)$		
wave impedance (of an electromagnetic wave)* (2.38)	파동임피던스(전자기파의) Z			
wavelength(1.11)	파장	λ		
wave number(1.12)	파<동>수	$\sigma = 1/\lambda$		
weber(2.17)	웨버[단위]	Wb	$1 Wb = 1 V \cdot s$	

주) * ISO 31/5 - 1979 에는 없으며 (NCRP 81)부터 채택.

** ISO 31/5 - 1979 에는 없고, G. Joos, Lehrbuch der Theoretischen Physik, Leipzig 1345 (Jo 45)에서 채택.(NCRP 81)에서 이들 양은 반사계수(reflection coefficient) 및 투과계수(transmission coefficient)라 부른다.

**** 광도계측(photometry)에서는 위의 것에 해당하는 비(比)를 각각 스펙트럼 반사계수(spectral reflectance) 및 스펙트럼 투과계수(spectral transmittance)(3.32 항 및 3.33 항을 참조.)라 부른다.