방사선방어학회지
제6권 제1호 1981

電離 放射線의 線量과 單位

延世大學校 醫科大學 放射線科學敎室

秋 成 實

Ⅰ. 緖 論

放射線의 單位는 每年마다 조금씩 變更되고 있지만 最終的인 決定은 國際 放射線 單位 및 測定委員會(International Commission on Radiation Units and Measurements, ICRU)에서 遂行하게 된다.

ICRU는 1925年에 創設되었으며 重要한 任務는 放射線과 放射能의 量 및 單位를 決定하여 物理學과 醫學 및 生物學等 모든 分野에 있어서 放射線의 適用과 測定 또는 放射線 障害防禦에 對한 勸告 및 決定을 履行하는 國際的 모임이다.

放射線과 物質間의 相互作用은 放射線種類와 에너지 및 構成物質에 따라 서로 매우 다른 性質을 가졌기 때문에 放射線量의 決定은 統計的인 用語로 表現될 수 밖에 없다.

이와같이 放射線의 量은 推定的인 量이 大部分으로서 모든 다른 科學分野에서도 共通的으로 使用이 可能한 定義를 내리기가 어려웠다.

放射線 單位에 對한 硏究檢討가 反復됨에 따라 ICRU에서는 이들 單位를 漸次 國際單位系(Intenational System of Units, SI)의 基本單位로서 表現하려고 努力하여 왔다.

國際 基本單位(Systéme International d' Unités, SI)는 m, k, s 單位系를 根幹으로 하여 표 1과 같은 基本單位와 표 2와 같은 誘導單位로 表示한다.

그러나 같은 基本單位로서 次元(dimension)이 같은 物量일지라도 專門分野에 따라 各各 相異한 特性을 가진 量들이 많으며 이를 同一한 基本單位로 묶을 수는 없다.

例를 들면 周波數를 表示하는 單位, 헬쯔(Hertz)와 放射能을 表示하는 單位, 큐리(Curie)는 똑같은 時間의 逆數로 된 次元으로 이루어져 있지만 周波數와 放射能은 各各 다른 特性의 物量이므로 이들은 서로 다른 分野의 特定單位로서 表現하게 되었다.

이와같은 理由로 ICRU에서는 放射線 分野에 特別히

〈표 1〉 SI 單 位

分 類	單 位 名	表 記	物 理 的 量
基本單位	meter	m	길이
	Kilogram	kg	무게
	second	s	시간
	ampere	A	電流
	Kelvin	K	절대온도
	mole	mol	物質의 量
	candela	cd	光度
追加單位	radian	rad	平面角
	steradian	sr	立體角

〈표 2〉 誘 導 單 位

單 位 名	表 記	物 理 的 量
hertz	Hz	주파수
newton	N	힘
Joule	J	에너지
watt	W	역율
coulomb	C	전기량
volt	V	전압
farad	F	정전용량
ohm	Ω	전기저항
Weber	Wb	자기속
tesla	T	자속밀도
henry	H	자기유도
lumen	lm	광속
lux	lx	조도
pascal	Pa	압력
siemens	S	전기전도성

〈표 3〉 방사선량과 단위

名 稱	記 號	S I 단 위	特定單位
1. 積分吸收線量 Energy imparted	ε	J	g rad
2. 比에너지 Specific energy	z	J kg^{-1}	rad
3. 吸收線量 Absorbed dose	D	J kg^{-1}	rad
4. 吸收線量率 Absorbed dose rate	$\dot{D}$	J $kg^{-1}S^{-1}$	rad S^{-1}
5. 粒子束 Fluence	Φ	m^{-2}	
6. 粒子束密度 Flux density	φ	$m^{-2}S^{-1}$	
7. 에너지束 Energy Fluence	Ψ	J m^{-2}	
8. 에너지束密度 Energy flex density	Ψ	J $m^{-2}S^{-1}$	
9. 케르마 Kerma	K	J kg^{-1}	rad
10. 케르마率 Kerma rate	$\dot{K}$	J $kg^{-1}s^{-1}$	rad S^{-2}
11. 照射線量 Exposure	X	C kg^{-1}	R
12. 照射線量率 Exposure rate	$\dot{X}$	A kg^{-1}	R S^{-1}
13. 質量減弱係數 Mass attenuation coefficient	μ/ρ	m^2kg^{-1}	
14. 質量에너지附與係數 Mass energy transfer coefficient	μ_{tr}/ρ	m^2kg^{-1}	
15. 質量에너지吸收係數 Mass energy absorption coefficient	μ_{en}/ρ	m^2kg^{-1}	
16. 質量阻止能 Total mass stopping power	S/ρ	J m^2kg^{-1}	
17. 線型에너지附與 Linear energy transfer	$L\Delta$	J m^{-1}	KeVμm^{-1}
18. 線型에너지 Lineal energy	y	J m^{-1}	KeVμm^{-1}
19. 이온對當 平均에너지 Mean energy expended per ion pair	$\overline{W}$	J	eV
20. 放射能 Activity	A	S^{-1}	Ci
21. 比감마線定數 Exposure rate constant	Γ	Cm^2kg^{-1}	$Rm^2h^{-1}Ci^{-1}$

適用되는 特定單位를 決定했으며 그중 放射線 吸收線量을 表示하는 래드(rad)와 放射能을 表示하는 큐리(Curie)單位는 이미 國際單位系(SI unit)로 定해졌다.

現在 利用되고 있는 放射線의 量과 單位는 1971年 "ICRU Report 19" "Radiation Quantities and Units"에 依하여 決定되었으며 放射線量과 單位는 表 3과 같다.

特히 放射線 分野에만 限定된 4個의 放射線 特定單位(Special Units)는 다음과 같다.

1. 래드(rad)……吸收線量(Absorbed dose)
2. 랜트겐(Roentgen)……照射線量(Exposure)
3. 큐리(Curie)……放射能(Activity)
4. 렘(rem)……生物學的 線量(Dose equivalent)

이상과 같이 4種類의 特定單位와 이들 相互間의 關係 및 새로 命名된 放射線의 單位를 放射線의 表現量에 따라 簡單히 記述하면 다음과 같다.

Ⅱ. 吸收線量(Absorbed dose)

吸收線量은 任意의 電離 放射線에 依하여 被照射 物質의 單位質量에 附與되는 平均 吸收에너지를 말한다.

이와같은 吸收線量의 特定單位(Special Unit)를 래드(rad)라고 한다

$$1rad=10^{-2}Jkg^{-1}\cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

J는 에너지의 單位인 Joule이고 記號는 "rad"로 表示하며 復數일때는 "rads"로 表示한다.

래드單位는 吸收線量뿐 아니라 放射線의 比에너지, Kerma等의 放射線量을 定하는 單位로도 使用한다.

Kerma란 Kinetic energy released in material의 略字로서 物質의 單位體積當 間接 電離粒子에 依해 放出되는 全 荷電粒子의 初期運動에너지의 總和를 말한다.

Ⅲ. 照射線量(Exposure)

光子(photon)에 依하여 空氣의 單位質量에 生成되는 全體의 電荷를 말하며 照射線量의 特定單位는 렌트겐(Roentgen)이고 記號는 "R"로 表示하며

$$1R=2.58\times10^{-4}Ckg^{-1}\cdots\cdots\cdots\cdots(2)$$

이다. 여기서 C는 電氣量의 單位인 Coulomb을 表示

한다.

이와같이 照射線量의 單位는 (2)式과 같이 렌트겐으로 表示되며 從來의 定義인 標準空氣1cm³ (0.001293g) 當 1esu(靜電單位)의 電荷로 表示하던 값과 數値的으로는 同一하다.

또한 光子의 에너지가 數 KeV以下 또는 3MeV以上에서는 電子平衡이 成位되지 않으므로 이와같은 에너지 範圍에서는 照射線量을 測定하기가 困難하다.

또한 렌트겐 單位는 X線이나 γ線과 空氣에서만 使用되고 래드單位처럼 X, γ線은 勿論 電子, 中性子等 모든 電離放射線과 모든 物質內에서 使用할 수 없다.

그러나 電子平衡이 成立되는 條件下에서 렌트겐單位로 測定된 값으로부터 吸收線量(rad)을 求할 수가 있다. 即 空氣中의 照射線量 R은 동일 地點에서의 物質의 吸收線量 D_m로 換算할 수 있으며

$$Dm=0.869\ \frac{(\mu en/\rho)m}{(\mu en/\rho)air}\ R=fR \cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

로 주어진다.

여기서 $(\mu en/\rho)m$는 物質의 質量에너지 吸收係數이고 $(\mu en/\rho)$ air는 空氣의 質量에너지 吸收係數이며 f는 R/rad 變換係數로서 表 4와 같다.

〈표 4〉 R/rad 變換係數

Photon Energy(MeV)	Water to air	compact bone to air	Muscle to air
.01	.903	3.62	.918
.02	.871	4.18	.903
.04	.883	3.95	.912
.06	.912	2.84	.933
.08	.937	1.92	.944
.1	.950	1.44	.951
.2	.964	.976	.957
.4	.967	.931	.959
^{137}Cs .662	.968	.923	.958
1.0	.967	.922	.957
^{60}Co 1.25	.966	.922	.957
2	.965	.925	.954
4	.958	.933	.948
6	.954	.943	.943
8	.949	.955	.937
10	.945	.956	.929

Ⅳ. 放射能(Activity)

放射能이란 放射性 同位元素가 單位時間當 變換(nuclear transformation)하는 放射性 核種의 數를 말하며 放射能의 特定單位는 큐리(Curie)이고 記號는 Ci이며

$$1Ci=3.7\times10^{10}S^{-1}$$

이다. 普通 1Ci는 1g의 라디움(Ra)과 放射平衡에 있는 라돈(Rn)의 量을 말하며 이 狀態에서는 每秒 崩壞하는 Rn의 原子數와 每秒 崩壞하는 Ra의 原子數가 同一하므로 Ra 1g와 Rn 1Ci는 같은 量의 放射能을 가졌다.

放射能은 放射性 同位元素의 崩壞速度로서 放射性元素 自體의 絕對的 單位이며 rad와 R等과 같은 放射線强度는 放射性 物質의 에너지, 放射能 및 相對物質의 構造와 位置에 따라 變化하는 相對的 單位이다.

이와같이 放射能과 放射線 强度의 相互關係를 比감마線定數(Specific gamma ray constant)라 하고 記號는 Γ(gamma) factor로 表示된다.

이 factor는 放射性 核種의 崩壞圖와 그 量을 알면 計算에 의해서 求할수 있으며 濾過板이 없는 一定量의 點線源으로부터 一定 距離에서 γ線의 照射線量率(exposure rate)을 求할 수가 있다.

表 5는 放射性 同位元素別 Γ factor이며 이 表에서 ^{226}Ra의 境遇는 普通 白金濾過板을 包含하고 있고 그 單位도 $Rcm^2h^{-1}\ mg^{-1}$이며 그外 다른 同位元素는 $Rcm^2h^{-1}m\ Ci^{-1}$로 表示한다.

〈표 5〉 比감마線定數(Γ factor)

核種	放出光子에너지(MeV)와 放出確率	R·cm²/mCi·h
^{24}Na	1.37(1) 2.75(1)	18.7
^{59}Fe	0.191(0.03) 1.098(0.57) 1.289(0.43)	6.8
^{60}Co	1.173(1) 1.332(1)	13.1
^{131}I	0.08(0.02) 0.28(0.05) 0.36(0.80) 0.51(0.01) 0.64(0.09) 0.72(0.03)	2.23
^{137}Cs+^{137m}Ba	0.66(0.81)	3.4
^{198}Au	0.41(0.95) 0.68(0.01)	2.32
^{226}Ra 0.5mm Pt filter	Many lines	8.25 ($Rcm^2/mg.h$)

Ⅴ. 生物學的 等價線量(Dose equivalent)

이것은 放射線 障害防護의 目的에는 使用되는 量으로서 放射線 種類와 照射條件 및 被照射體의 特性에 따라 주어진 吸收線量의 生物學的 效果를 나타내며 單位는 "렘"(rem, roentgen equivalent man)이고 記號는 "rem"이며

〈표 6〉 Quality factor(Q)

LET(kev/μ)	Q	Type of Radiation	Q
3.5 or less	1	X-rays, γ-rays	1.0
7.0	2	β-rays with Emax>.03MeV	1.0
23.	5	β-rays with Emax<.03MeV	1.7
53.	10	Neutrons and protons up to 10 MeV (for the eye 30)	10
175	20	Naturally occurring α particles	10
		Heavy recoil nuclei	20

$$H(rems)=D(rads)\times Q\times N$$

여기서 D는 吸收線量, Q는 線質係數(quality factor)로서 表 6과 같이 放射線의 種類와 에너지에 따라 變하며 N는 修飾係數(modifying factor)로서 內部照射等으로 線源이 不均一하게 分布될때 生物學的 效果가 서로 다름을 表示하는 係數이고 外部照射時는 N=1이 된다.

放射線 障害防護에 使用되었던 從來의 렘(rem)單位는

$$rem=RBE\times rad$$

이고 REB(relative biological effectiveness)는 生物學的 效果比로서 지금은 生物學에서만 使用되며 이것은 어떤 種類의 放射線에 依한 生物學的 作用이 基準 放射線과 同一한 生物學的 變化를 일으키는데 必要한 吸收線量의 逆比로 表示하며 基準放射線은 200kV의 X線 또는 γ線(LET=3.5KeV/μ)을 約 10rads/min의 線量率로 投與했을 때의 放射線을 말한다.

Ⅳ. 새로 命名된 電離 放射線의 特定單位

放射線 單位에 對한 새로운 槪念은 1974年 7月에 開催된 ICRU會議에서 論議 決定한 後 이 새로운 槪念이 SI單位를 制定하여 國際重量 및 測定委員會(International Committee of Weights and Measurements, CIPM)의 同意를 받았다.

電離放射線 單位에 對한 ICRU의 새로운 槪念은 放射線의 SI單位中 吸收線量의 表示인 킬로그람當 줄(Joule per Kilogram J/kg)과 放射能의 表示인 時間의 逆數(reciprocal second S^{-1})에 對하여 特定한 名稱(special name)을 採擇한 것이며 이와같은 槪念은 1975年 3月에 開催된 國際 原子力機構(International Atomic Energy Agency, IAEA)의 生醫學的 線量測定을 進前(Advances in Biomedical Dosimetry)에 關한 Symposium에서도 充分히 討議되었고 國際重量 및 測定委員會(CIPM)는 길이의 單位인 메타 使用協定(meter convention)의 100周年 記念祝賀를 兼한 第15次 重量 및 測定會議(General Conference of Weights and Measures, CGPM 1975年 6月 開催)에서 ICRU의 提案이 正當하다고 議決하고 다음과 같은 두가지 決議事項을 發表하였다.

決議 1.

第15次 重量 및 測定會議(Conférence Générale des Poids et Mesures, CGPM)는 放射線醫學의 硏究와 實際 適用에 必要한 SI單位의 確保가 切實히 必要하고 可能한 널리 使用할 수 있는 簡單明瞭한 單位를 制定할 必要가 있으며 放射線 治療에 있어서 매우 危險하고 重要한 放射線 誤差(errors)를 줄이기 위해서 放射能(activity)에 對한 SI單位의 特別한 名稱을 베큐렐(becuqerel)로 定하고 記號는 Bq로 表記하며 內容은 時間(秒)의 逆數(Second to the power minus one, S^{-1})로 定義하였다.

決議 2.

第15次 重量 및 測定會議(CGPM)는 決議 1의 內容과 같은 理由로 電離 放射線에 對한 SI單位의 特別 名稱을 그레이(gray)로 定하고 記號는 Gy로 表記하며 킬로그람當 줄(J/kg)과 同一한 次元으로 定義하였다.

여기에서 그레이(gray) 單位는 吸收線量(absorbed dose)의 SI單位일뿐 아니라 電離 放射線 分野에서 Kerma等 킬로그람當 줄로 表示되는 다른 모든 物理的 量에도 똑같이 適用되며

$$1Gy=100rad=1J/kg$$

로 定議된다.

또한 放射能(Radioactivity)에 對한 時間逆乘의 SI單位는 베큐렐(becquerel)로 命名되고 記號는 Bq이며

$$1Bq=1S^{-1}\approx 2.703\times 10^{-11}Ci$$

$$1Ci=37G\ Bq$$

로 定議되며 10의 제곱승수는 표 7과 같은 文字로 表示된다.

이와같은 特別한 名稱은 放射線 分野에 赫赫한 功을 세운 科學者들의 이름으로서 Becquerel은 1896年 放射

〈표 7〉 승수와 기호

승수	기호	승수명	승수	기호	승수명
10^{12}	T	tera	10^{-6}	μ	micro
10^{9}	G	giga	10^{-9}	n	nano
10^{6}	M	mega	10^{-12}	p	pico
10^{3}	k	kilo	10^{-15}	f	fento
10^{-3}	m	milli	10^{-18}	a	alto

能(radioactivity "rayans de Bequerel")을 發見하여 1903年 Marie와 Piérre Curie와 함께 노벨 物理學賞을 받은 Antonie Henri Becqueral(1852~1908)이며 gray란 名稱은 放射線 測定에서 가장 基本的인 分布原理인 "Bragg-Gray Principle"을 提唱한 Louis Harold Gray (1905~1965)의 이름이다.

이와같이 ICRU는 現在까지 使用하고 있는 rad와 röntgen 및 curie의 單位를 各各 gray(Gy), Coulomb per Kilogram(C/kg)과 becquerel(Bq)로 全部 代置하기로 決定하였으며 앞으로 10年이란 準備期間을 둠으로써 모든 國家와 國際團體가 效果的이고 安全하며 쉽게 使用할 수 있도록 하였다.

한편 放射線의 生物學的 效果線量인 렘(rem)의 單位는 吸收線量의 SI單位化함에 따라 生體의 電氣的 性質을 규명한 R. Sievert의 이름으로 改稱하였다.

1Sv=100rems

이상과 같이 모든 單位系나 定義는 항상 簡單하고 便利한 方向으로 變遷되어 나가고 있으며 이와같은 새로운 槪念을 正確히 認識하고 使用함으로서 放射線 分野의 向上을 圖謀하여야 한다.

References

1. Johns, H.E., The Physics of Radiology, Charles C. Thomas (1969)
2. Liden, K., The new special names of SI units in the field of ionizing radiations, the ICRU-letter, Sweden (1975)
3. International Commission on Radiation units and measurements, to Report 19, ICRU. Wasington D.C. (1973)
4. International commission on Radiological protection, Recommendations of the international commission on Radiological protection ICRP 9 (1966)
5. RBE Committee, Report of the RBE committee to ICRP and ICRU, *Health Physics* 9, 357(1963)
6. Kenneth R.K. and Walter R.N., Concepts of radiation dosimetry, Pergamon, 1978.
7. Glenn F.K., Radiation defection and measurement, John Wiley & Sons, 1979.