

## 대전 입자들의 초기 이온화비에 관한 연구 I

남궁미선\*, 김부길\*, 김정홍\*\*  
진북대학교 의용생체공학과\*  
진북대학교 물리학과\*\*

### 초 록

생물체의 조직내에서 방사선에 의해 유도된 손실을 정확히 측정하기 위해 선형 에너지 전달(LET)계산 방법을 보완한 초기 이온화비(SPI)계산 방법을 도입하였다.

총 저지능으로 LET를 고찰하고, 물에 입사된 전자·양성자· $\alpha$ -입자의 총이온화 단면적(TICS)으로 SPI를 계산하여 다른 자료와 비교 토의하였다.

SPT 계산에 있어, 전자의 운동 에너지가 1keV 이상일 때는 상대론적 효과를 고려하였고, 연구의 결과가 최근의 이론적 계산치와 잘 일치함을 알수 있었다.

### 1. 서 론

방사선에 관한 연구 및 응용은 여러분야에서 많은 관심의 대상이 되고 있다. 특히 생물체의 조직내에서 방사선에 의해 유도된 효과를 규정하기 위한 연구는 매우 중요하다. 이 효과는 방사선이 물질을 통과할 때 잃어버리는 에너지로 나타낸다. 이와 같은 에너지 손실은 일반적으로 선형에너지 전달(Linear Energy Transfer : LET)이나 초기 이온화비(Specific Primary Ionization : SPI)로 계산 및 측정될 수 있다. 현재는 LET측정방법이 주로 연구 활용되고 있지만, LET는 꼬리가 긴  $\delta$ -선을 포함시킬 수 없는 단점이 있다. 이 방법에 의하면 방사선의 진도 중심축에서 10mm범위내의  $\delta$ -선에 의한 에너지 손실은 계산될 수 있지만, 에너지를 많이 갖는 전자에 의해서 형성된 꼬리가 긴  $\delta$ -선에 의한 에너지 손실은 측정될 수 없기 때문이다. 따라서 LET방법에 의해서는 방사선이 물질을 통과 할 때 잃어 버리는 에너지를 전부 계산할 수 없다. 그러므로 이러한 단점을 극복하기 위해서 방사선이 물질속을 진행하는 단위 경로 길이당 유도된 초기 이온화 수로 정의되는 SPI를 도입하므로써 에너지 손실을 보다 정확히 계산할 수 있다.

본 연구에서는 방사선(특히 대전입자)들이 물질내에서 상호작용에 의한 에너지 손실과 이온화 단면적으로부터 SPI를 계산하고 실험치와 비교해 볼 것이다.

### 2. 대상 및 방법

어떤 물질내에서 대전입자의 LET는 대전입자가 물질내의 거리  $dl$ 을 지나는 동안 충돌에 의하여 어떠한 특정한 값  $\Delta$ 이내의 에너지를 그 물질이 전환하면서 잃는 평균 에너지 손실  $dE$ 를  $dl$ 로 나눈 값이다.

$$L\Delta = \left\{ \frac{dE}{dt} \right\} \Delta$$

에너지 손실은 때때로 위치상으로 나누어진 에너지라 한다. 이 정의에서  $\Delta$ 는 비정 절단(range cuff)이 아니고, 에너지 절단(energy cut off)을 의미한다. 에너지 절단은  $\delta$ -선 효과를 어느 범위까지 취하느냐를 나타내는 것이다.

대전입자는 이온화 여기와 관련되는 충돌과정에 의해 물질에서 그들의 대부분의 에너지를 전달한다. 이러한 제1차 충돌(1차 전리)은 대전입자들의 경로를 따라 일어난다. 대전입자의 생물학적인 효과는 초기 사건에 의한 공간적 분포의 차이가 영향을 준다.

그러므로 보다 정확한 생물학적 효과를 측정함에 있어서, 상당히 많은 에너지를 갖는 2차 전자가 대전입자의 경로에서 벗어나서 그 에너지를 잃어 버리면서 방출되는  $\delta$ -선을 무시할 수 없다.

입자들의 경로를 따라 발생하는 상호작용의(이온화-여기)형태는 그림 1에서 도식화 되어진다. 두가지 중요한 형태로 구별되는데 이온화시키는 입자의 경로안에서 집중된 이온화 및 여기, 그리고 더 이온시키는 충돌들을 생성하기에 충분한 에너지를 가진 원자내 전자가 유도하는 큰 에너지 전이가 있다. 후자의 경우 이온쌍의 무리를 형성하고,  $\delta$ -선으로 알려진 분리된 경로를 형성한다.

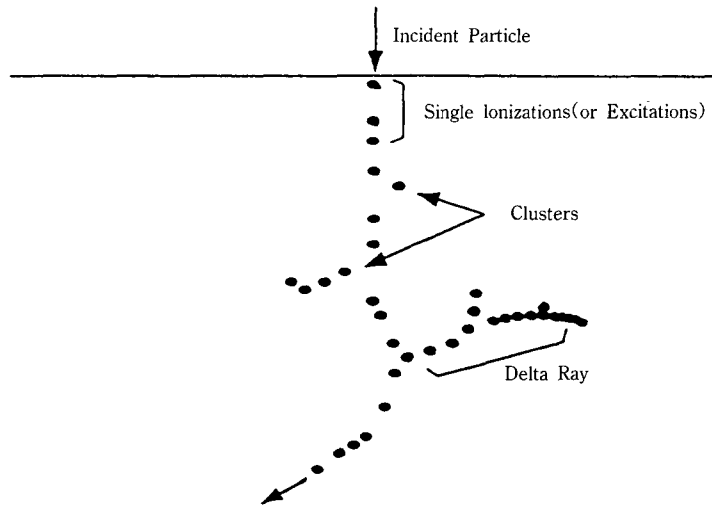


그림 1. 입자가 물질에서 움직이는 경로에 대한 모델

반면, SPI는 방사선이 물질속에서 이온화시키면서 진행하는 길이당 유도된 이온쌍의 수이다. 그러므로 SPI는 LET에서 제외된  $\delta$ -선에 의한 에너지 손실로 측정한다.

초기 이온화비는

$$SPI = \left\{ \frac{dE}{dx} \right\}_{ion} / \epsilon \quad (2.2)$$

$$= \frac{(E/\epsilon)}{dx} = \frac{dN}{dx} \sigma_{tot} n$$

로 주어지고, 여기에서  $\epsilon$ 는 한 쌍의 이온을 만드는데 필요한 평균 에너지이고,  $\sigma_{tot}$ 는 총

이온화 단면적(Total Ionization Cross Section : TICS)이며,  $n$ 는 단위 체적( $\text{cm}^3$ )당 물질의 분자의 수이다.

물에서 전자들에 의하여 경로( $\mu\text{m}$ )당 유도된 SPI는

$$SPI = \frac{dN}{dx} = \sigma_{tot} n \times 10^{-4} \quad (2.3)$$

$n_w$ 는 단위 체적( $\text{cm}^3$ )당 물 분자의 수이다. 즉,  $n_w = (N_A/M_{H_2O})\rho$ ,  $N_A$ 는 Avogadro의 수이며,  $M_{H_2O}$ 는 물 분자량으로  $18(\text{g/mole})$ 이므로  $n_w = 0.334 \times 10^{23} (\#/ \text{cm}^3)$ 이다.

### 1) SPI의 계산 방법

#### ① 전자의 경우

Bethe(1930)의 이론을 Mille와 Platzman 이 수정한 전자가 물속에서 잃어 버리는 에너지에 대한 총 이온화 단면적은

$$\sigma_{tot} = (4\pi a_0^2 R/T) M_i^2 \ln c_i T \quad (2.4)$$

이다. 여기에서 Bohr 반경  $a_0$ 는  $0.529 \times 10^{-8}(\text{cm})$ 이고,  $R$ 는 Rydberg 에너지  $1.606(\text{eV})$ 이다. 그리고  $T$ 는 운동 에너지이고,  $M_i^2$ 은 광학 진동자 세기의 상수로  $3.14$ 이고,  $c_i$ 는 실험 상수로  $0.075(\text{eV}^{-1})$ 이다.  $M_i^2$ 와  $c_i$ 는 실험적으로 정의한 상수이다. 광학 진동자 세기 상수와 광 이온화 단면적의 관계으로 주어진  $M_i^2$ 은

$$M_i^2 = 0.12396 \int_0^{\lambda_0} \sigma_{ph}(\lambda) d\lambda / \lambda \quad (2.4a)$$

이고, 여기에서  $\sigma_{ph}(\lambda)$ 은 광 이온화 단면적이고,  $\lambda_0$ 은 수증기의 한계파장으로  $985\text{\AA}$ 이다. 식(2.4)은  $0.5 \text{ KeV}$  이상인 전자 에너지의 경우 잘 적용되지만, 전자의 운동 에너지가  $1 \text{ KeV}$  이상일때는 상대론적 효과를 고려해주어야 한다.

#### ② 양성자의 경우

물에 입사한 양성자의 총이온화 단면적은

$$\sigma_{tot, p} = \frac{1}{\left\{ \frac{1}{\sigma_l} + \frac{1}{\sigma_h} \right\}} \quad (2.5)$$

이고, 여기에서  $\sigma_l$ 는 저 에너지 충돌에 의한 단면적으로

$$\sigma_l = 4\pi a_0^2 C_x^D \quad (2.5a)$$

이며,  $\sigma_h$ 는 고에너지 충돌에 의한 단면적

$$\sigma_h = 4\pi a_0^2 (A \ln(1+x) + B) / x \quad (2.5b)$$

이다. 여기에서  $x = T/R$ 이며,  $T = E_p/1836$  이고,  $E_p$ 는 양성자의 운동에너지이다.

$A, B, C, D$ 는 실험 상수이다. ( $7\text{keV} < E_p < 4\text{MeV}$ 의 경우 :  $A = 2.98$ ,  $B = 2.42$ ,  $C = 1.48$ ,  $D = 0.75$ ) 우리는 식(2.5)에서  $A$ 가  $M_i^2$  상용 하는것을 주시해야 한다.

③ 알파입자의 경우

고에너지 입자들에 대한 Bethe<sup>(6)</sup> 정리에 의해 알파입자에 대한 총 이온화 단면적을 계산할 수 있다.

만일 알파입자의 속도( $V_a$ )가 양성자의 속도( $V_p$ )와 같다면

$$E_a \propto m_a v_a \propto 4m_p v_p$$

하므로, 알파입자의 총 이온화 단면적( $\sigma_{tot,a}$ )이 양성자의 총 이온화 단면적( $\sigma_{tot,p}$ )의 4배가 된다. 즉,

$$\sigma_{tot,a} \approx 4\sigma_{tot,p} = \sigma_{tot,p} z_a^2 \quad (z_a=2, \text{알파 입자의 전하}) \quad (2.6)$$

이 된다.

3. 결과 및 토의

물에 입사된 전자, 양성자, 알파입자에 대한 SPI의 계산 결과가 표 1-3에서 보여진다. 전자는 0.5KeV에서 1000KeV, 양성자는 0.01MeV에서 10MeV, 그리고 알파입자는 1MeV에서 10MeV까지의 운동 에너지 영역을 취하였다. 이 에너지영역은 방사생물학 실험에서 자주 사용되는 영역이다. 에너지에 대한 SPI의 관계를 그림 2-4에서 보면, 물에 입사된 전자의 운동 에너지(T)가 0.5KeV에서 SPI는  $3.64 \times 10^2 \#/\mu m$ 이고, T가 증가할수록 SPI는 감소하여 1000KeV에서 SPI는  $1.17 \times 10^2 \#/\mu m$ 이 된다. 알파입자도 운동 에너지( $E_a$ )가 증가할수록 SPI가 감소하여 1MeV와 10MeV에서 SPI는 각각  $45.75 \times 10^2 \#/\mu m$ 와  $8.51 \times 10^2 \#/\mu m$ 이다. 전자와 알파입자의 경우는 에너지가 커질수록 SPI는 감소하는데, 양성자는 운동 에너지( $E_p$ )가 0.06MeV에서 0.07MeV범위에서 최대치를 갖는다. 이때 SPI는  $18.2 \times 10^2 \#/\mu m$ 이다. 이와같이 SPI는 에너지에 의존한다.

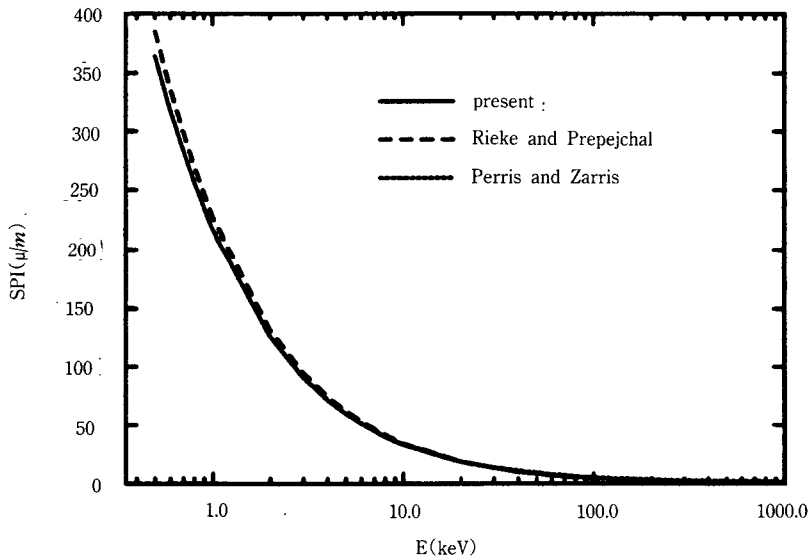


그림 2. 물에 입사된 전자의 SPI에 대한 비교

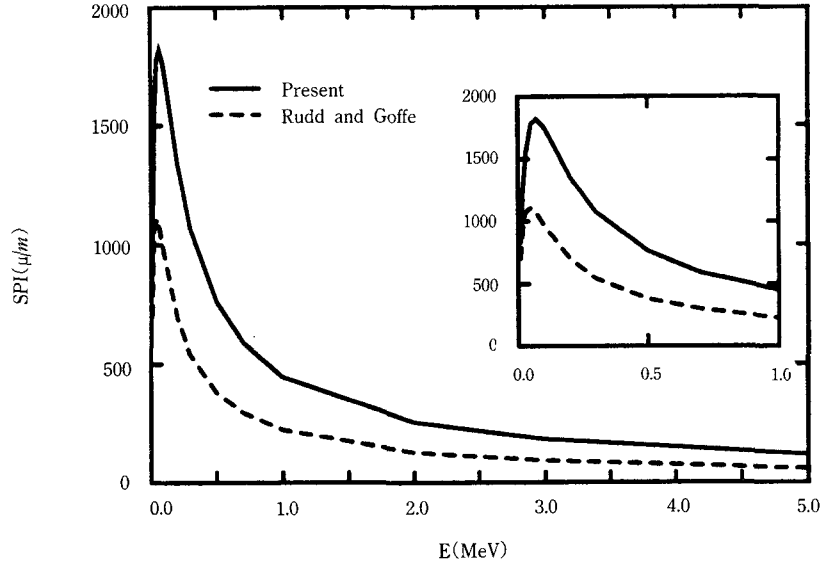


그림 3. 물에 입사된 양성자의 SPI에 대한 비교

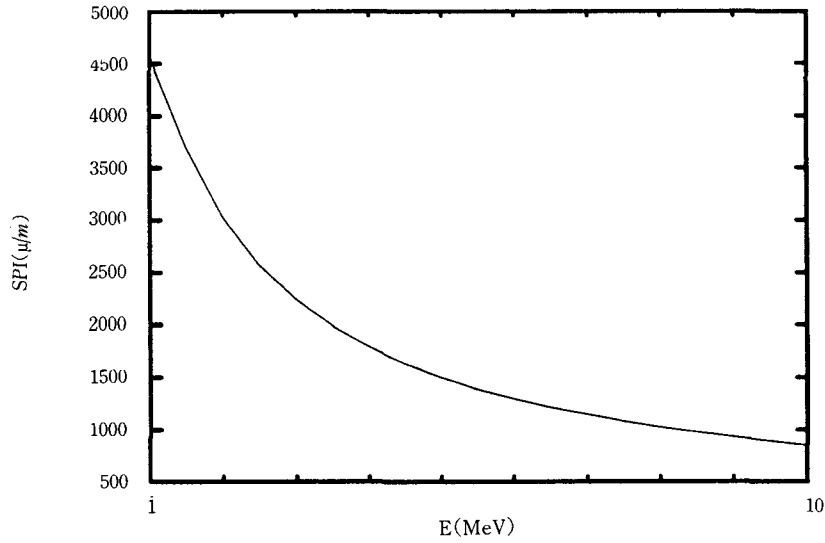


그림 4. 물에 입사된  $\alpha$ -입자의 에너지에 따른 SPI

그림 2는 본 논문의 SPI와 Rieke<sup>(9)</sup>, Perris<sup>(3)</sup>의 SPI를 비교하여 나타낸다. 그림 2에서 보면 전자 운동에너지가 (T)가 30KeV보다 작은 영역까지는 아주 잘 일치하다가 그 이상의 에너지에서는 점차적으로 우리의 값과 다르다. 결과적으로 1000KeV에서 약 50%의 오차가 생긴다. 에너지가 1KeV이상일때 상대론적인 효과를 생각해주어야 한다. 에너지가 증가할수록 오차가 커지는것은 큰 에너지일수록 상대론적 효과가 크기 때문이다. 양성자는 운동 에너지( $E_p$ )가 그림 3에서 보면 0.06MeV에서 0.07MeV범위에서 SPI는 최대치 18.2

$\times 10^2 \#/\mu m$ 인 것처럼 Rudd의 SPI<sup>(11)</sup>는 0.05MeV에서  $11.1 \times 10^2 \#/\mu m$ 값으로 최대치를 갖는다. 고 에너지 입자들에 대한 Bethe의 이론에 의해 알파입자의 TICS도 양성자의 TICS식을 이용하여 계산할 수 있다. 이때 알파입자의 질량이 양성자의 4배가 되는 것을 고려하여 양성자의 TICS와 관계시킬 수 있다. 알파입자의 SPI는 이미 양성자의 TICS로 계산하여 표 3에서 보여졌다.

표 1. 물에 입사된 전자의 SPI

Energy (KeV)	Number of primar ionizations( $\mu m^{-1}$ )	Energy (KeV)	Number of primar ionizations( $\mu m^{-1}$ )
0.5	$3.64 \times 10^2$	40.0	10.04
0.6	$3.18 \times 10^2$	50.0	8.67
0.7	$2.84 \times 10^2$	60.0	7.46
0.8	$2.57 \times 10^2$	70.0	6.57
0.9	$2.35 \times 10^2$	80.0	5.90
1.0	$2.17 \times 10^2$	90.0	5.36
2.0	$1.26 \times 10^1$	200.0	2.91
3.0	$9.08 \times 10^1$	200.0	2.91
4.0	$7.18 \times 10^1$	300.0	2.20
5.0	$5.97 \times 10^1$	400.0	1.84
6.0	$5.14 \times 10^1$	500.0	1.62
7.0	$4.52 \times 10^1$	600.0	1.47
8.0	$4.04 \times 10^1$	700.0	1.36
9.0	$3.66 \times 10^1$	800.0	1.28
10.0	$3.35 \times 10^1$	900.0	1.22
20.0	$1.87 \times 10^1$	1000.0	1.17
30.0	$1.33 \times 10^1$		

표 2. 물에 입사된 양성자의 SPI

Energy (KeV)	Number of primar ionizations ( $\#/\mu m$ )	Energy (MeV)	Number of primar ionizations ( $\#/\mu m$ )
0.01	$8.3 \times 10^2$	0.6	$6.62 \times 10^2$
0.02	$12.7 \times 10^2$	0.7	$5.90 \times 10^2$
0.03	$15.4 \times 10^2$	0.8	$5.32 \times 10^2$
0.04	$16.9 \times 10^2$	0.9	$4.86 \times 10^2$
0.05	$17.8 \times 10^2$	1.0	$4.48 \times 10^2$
0.06	$18.2 \times 10^2$	2.0	$2.56 \times 10^2$
0.07	$18.2 \times 10^2$	3.0	$1.83 \times 10^2$
0.08	$18.1 \times 10^2$	4.0	$1.43 \times 10^2$
0.09	$17.8 \times 10^2$	5.0	$1.19 \times 10^2$
0.10	$17.5 \times 10^2$	6.0	$1.02 \times 10^2$
0.20	$13.5 \times 10^2$	7.0	$0.89 \times 10^2$
0.30	$10.7 \times 10^2$	8.0	$0.79 \times 10^2$
0.40	$8.9 \times 10^2$	9.0	$0.72 \times 10^2$
0.50	$7.6 \times 10^2$	10.0	$0.65 \times 10^2$

표 3. 물에 입사된  $\alpha$ -입자의 SPI

Energy (MeV)	Number of primar ionizations ( $\mu m^{-1}$ )	Numbergry (MeV)	Number of primar ionizations ( $\mu m^{-1}$ )
1.00	45.75x10 <sup>2</sup>	5.50	13.89x10 <sup>2</sup>
1.50	36.98x10 <sup>2</sup>	6.00	12.95x10 <sup>2</sup>
2.00	30.26x10 <sup>2</sup>	6.50	12.14x10 <sup>2</sup>
2.50	25.70x10 <sup>2</sup>	7.00	11.42x10 <sup>2</sup>
3.00	22.39x10 <sup>2</sup>	7.50	10.80x10 <sup>2</sup>
3.50	19.88x10 <sup>2</sup>	8.00	10.24x10 <sup>2</sup>
4.00	17.91x10 <sup>2</sup>	8.50	9.74x10 <sup>2</sup>
4.50	16.32x10 <sup>2</sup>	9.00	9.92x10 <sup>2</sup>
5.00	15.00x10 <sup>2</sup>	10.00	8.51x10 <sup>2</sup>

#### 4. 결 론

대전 입자가 물질을 통과할때 물질과의 상호작용으로 인한 에너지 손실을 선형에너지 전달(LET)과 초기 이온화(SPI)비로 논의하였다. 이러한 방사선의 효과를 측정함에 있어서, LET는 입사 진로 중심으로부터 10nm범위내의 에너지 손실만을 나타내는 즉, 꼬리가 긴  $\delta$ -선을 포함하지 못하는 단점이있다. 이 LEI개념의 한계를 보완한 SPI의 방법으로 대전 입자들(전자, 양성자, 알파입자)을 입사시켜 보다 정확히 방사선 효과를 측정하였다. 전자의 경우 운동 에너지가 11KeV이상일때는 상대론적 효과를 고려해주어야 하고, 양성자의  $\alpha$ 가 실험에서 조절 인자 F를 접근법을 사용하기 때문에 양성자의 운동 에너지가 꺾일수록 상당히 큰 오차가 생겼다.

SPI의 방법을 도입한다면 보다 세밀한 생물학적 영향 및 선량분포에 대한 평가가 이루어 질 것으로 기대된다.

#### 참 고 문 헌

- (1) R. J. Cannel and D. E. Watt : Biophysical mechanisms of by hast ions to mammalian cells in vitro : Phys. Med. Bio, 30, 255-258(1985)
- (2) A.M.Kellerer and D. Chmelevsky : Crteria for the applicability of LET Radiat : Res, 63, 226-234(1975).
- (3) A. Perris and G. Zarris : Specifec primary ionization for electrons protons and alpha parucles incident on water : Phys. Med. Biol, 34, 1113-1118(1989).
- (4) R. D. Evans : The Atomic Nucleus : McGraw-Hill, New York(1972), pp.567-589
- (5) J. F. Fowler : Nuclear Particles in Cancer Treatment : Page Bros(Norwich) Ltd(1981),pp. 5-12
- (6) H. Bethe : Zur Theorie des Durchhanges Scneller Korpuskularstrahlerdurch Materie : Ann. Phys, 5, 325-400(1930).

대전 입자들의 초기 이온화비에 관한 연구 I

- (7) W. F. Miller and R. L. Platzman : On the theory of the inelastic scattering of electrons by helium atoms : Proc. Phys. Soc A. 70, 299-303(1957)
- (8) J. Schutten, F. J. De Heer, H. R. Moustafa, A. j. h. Boerboom and J. Kistemaker : Gross and partial ionization cross section for electrons in water vapor in the energy range 0.1-20 keV : J. Chem. Phys, 44, 392-398(1966).
- (9) F. F. Rieke and W. Prepejchal : Ionization Cross sections of gaseous atoms and molecules for high-energy electrons and positrons : Phys. Rev. A, 6, 1507-1519(1972).
- (10) M. A. Bolorizadeh and M. E. Rudd : Angular and energy dependence of Cross sections for ejection of electrons from water vapor I. 50-2000 keV electron impact : Phys. Rev, 30, 882-887(1986)
- (11) R. D. Rudd, T. V. Goffe, R.D DuBois, L. H. Toduren : Cross sections for ionization of water vapor by 7-4000keV protons : Phys. Rev. A, 31, 492-494(1985).



남궁미선, 김부길, 김정홍

## A Study on Linear Energy Transfer and Specific Primary Ionization for Charged Particles Incident on Water

M. S. NamGung\*, B. K. Kim\*, J. H. Kim, Ph. D\*\*

Dept. of Bio-medical Eng, Chonbuk National University, Chonju 560-756\*

Dept. of physics, Chonbuk National University, College of Natural Sciences,

Chonju

560-756\*

### Abstract

In order to accurately treat damage induced by ionizing radiation in biological system on the cellular or subcellular level with physical parameters characterising the radiation, specific primary ionization (SPI) is introduced as the parameter which does not suffer from limitation of linear energy transfer (LET). In this present study, we calculate specific primary ionization with total ionization cross section (TICS) of electrons, protons and alpha particles incident on water. The used energy ranges cover those that have been frequently used in radiobiological experiments. For electrons above 1 keV, we have relativistic corrections and also compare the results with other data. For electrons energies below 100keV, our results are in excellent agreement with theoretical calculations published recently by (Perris and Zarris 1987). These results may be easily applied by the interested radiobiologists.