

속중성자선의 선량분포에 관한 연구

지영훈**, 이동한*, 류성렬*, 권수일[†], 신동오[‡], 박성용[‡]
원자력병원 방사선종양학과*
경기대학교 이과대학 물리학과[†]

초 록

속중성자선을 임상에 이용하기 위해서는 속중성자선의 선량 및 선량분포를 정확히 측정하는 것이 매우 중요하다. 현재 속중성자선의 측정법은 크게 나누어 American Associations of Physicists in Medicine, European Clinical Neutron Dosimetry Group 및 International Commission on Radiation Units and Measurements 에 의하여 제시되고 있으나 측정의 복잡함으로 인하여 서로 약간씩 다른 방법을 제시하고 있다. 따라서 본 연구에서는 중성자 치료장치에서 방출되는 속중성자선의 방출선량 및 물질 내 선량분포 등의 측정을 통하여 독자적인 측정기술을 확보하고, 우리 실정에 알맞은 표준측정법을 개발하고자 하였다. 속중성자선의 선량 및 물질 내 선량 분포 측정에는 조직등가물질인 A-150 플라스틱으로 제작된 IC-17 및 IC-18 이온함, 마그네슘으로 제작된 IC-17M 이온함, TE 기체, Ar 기체 및 RDM 2A electrometer 등을 사용하였다. 연구 결과 중성자선에 혼합되어 있는 γ 선의 오염도는 기준조사면 깊이 5cm에서 약 13%로 나타났으며, 깊이가 깊어질수록 증가하였다. 기준 조사면에 대하여 중심축선상의 최대 선량 깊이는 1.32cm 이었으며, 50% 선량 깊이는 14.8cm 로 나타났다. 표면선량을 전 조사면에 걸쳐서 41.6%~54.1% 이었으며 조사면가 커질수록 증가하였다. Beam profile 은 2.5cm 깊이에서 7.5% 정도 horn effect 가 나타났으며 10cm 깊이에서 가장 평탄하였다.

서 론

속중성자선에 의한 방사선치료는 1940년대 초 영국의 Hammer Smith Hospital 로부터 시작된 이후¹⁾, 지금까지 세계 여러 나라에서 시행되고 있다. 속중성자선을 외부 방사선 치료에 사용하기 위해서는 치료시간 및 인체 내 선량 분포 등을 고려하여 높은 에너지와 선량율의 중성자원이 요구된다²⁾. 국내에서는 한국원자력연구소 원자력병원(KCCH)에서 1986년 10월부터 스웨덴 Scanditronix 사의 MC-50 싸이클로트론과 NT-50 중성자치료기가 가동되어 암환자의 치료에 이용되고 있다.^{3,4)} 원자력병원이 보유하고 있는 중성자치료장치는 싸이클로트론에서 가속된 양자를 중성자치료기의 Be 표적에 충돌시켜 ${}^9\text{Be}(p,n){}^{10}\text{B}$ 핵반응에 의해 속중성자선을 발생시키며, 현재 방사선치료에는 최대 에너지가 50 MeV 인 속중성자선을 사용하고 있다. 속중성자선을 임상에 이용하기 위해서는 속중성자선의 선량 및 선량분포를 정확히 측정하는 것이 가장 우선되어야 할 과제이다. 그러나 중성자치료장치에서 발생하는 속중성자선의 정확한 선량측정기술은 속중성자와 물질과의 상호작용이 X-선 또는 전자선과는 매우 다르고, 속중성자선 내에 γ 선 및 중하전입자 등이 혼합되어 있어⁶⁾

매우 복잡하다. 현재 속중성자선의 측정법은 크게 나누어 미국의 American Associations of Physicists in Medicine, Task Group 18(AAPM)⁷⁾, 유럽의 European Clinical Neutron Dosimetry Group(ECNEU)⁸⁾ 및 International Commission on Radiation Units and Measurements(ICRU)⁹⁾에 의하여 제시되고 있으나 측정의 복잡함으로 인하여 서로 약간씩 다른 방법을 제시하고 있다.

원자력병원에서는 중성자치료장치 도입 초기에 50 MeV 속중성자선에 대하여 외국 의 학물리학과와 공동으로 측정을 실시한바 있으나 그 후 인적, 시간적 제약 등으로 인하여 활발히 진행되지 못하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 중성자치료장치에서 방출되는 속중성자선의 방출선량 및 물질내 흡수선량을 평가하여 KCCH 표준 규정을 정하고자 하였다.

대상 및 방법

1. NT-50 중성자치료기의 물리적 특성

NT-50 중성자치료기의 구조는 크게 나누어 양자 수송장치, 중성자 발생장치 및 collimator 등 3가지로 구성되어 있으며, Fig. 1 은 중성자치료기의 구조를 나타낸 그림이다. Fig. 1 에서 보는 바와 같이 양자수송장치에는 70° 및 160° 로 조합된 자석이 있으며 최대 자장의 세기는 1.6 Tesla 정도이다. 중성자를 발생시키는 표적장치는 10.5mm Be, 0.3mm Ag Cu, 1.5mm H₂O, 2.5mm C, 1.5mm H₂O 및 3.0mm Fe(stainless steel)로 구성되어 있다. 중성자는 ¹⁰Be(p,n)¹⁰B 의 핵반응에 의해 발생되며 50.3MeV 양자선이 입사하였을 때 발생하는 속중성자선의 최대 및 평균 에너지는 49.3MeV 와 34.4MeV 이다. 핵반응에 의해 발생된 속중성자선을 방사선치료에 적합한 형태로 만들기 위하여 중성자 발생장치 하단부에는 flattening filter, wedge 및 collimator가 설치되어 있다. Flattening filter 는 조사면 크기에 따라 12×12cm² 이하에서 사용할 수 있는 것(small filter)과 30×30cm² 까지 사용할 수 있는 것(large filter)의 2가지 종류가 있으며 연철로 제작되었다. Wedge 는 30°, 45° 및 60° 의 3가지 종류가 있으며 텅스텐으로 제작되었다. Wedge 상단에는 속중성자선의 선량을 측정하기 위한 이온함기 설치되어 있다. Collimator 의 구조는 “Book-end” 형의 5개 층으로 이루어져 있으며 상부 3개 층은 13cm 연철로 제작되어 있고, 하부 2개 층은 11cm 의 연철, 폴리에틸렌 수지 및 Boron 합성물로 제작되어 있다. Collimator 에 의해 조절할 수 있는 조사면 크기는 선원 으로부터 150cm 거리(SSD)에서 5×5cm²~30×30cm² 이다. Collimator 하단에는 속중성자선에 의해 방사화 된 collimator 내부장치로부터 나오는 γ 선을 차폐하기 위하여 2cm 두께의 납유리가 설치되어 있다. 중성자치료기의 gantry 는 $\pm 185^\circ$ 회전이 가능하다.

2. 이온함에 의한 속중성자선의 선량측정

중성자선의 선량을 측정하는 방법에는 calorimeter 에 의한 측정,^{9,10,11)} 이온함에 의한 측정,^{2,3,6,7,8,12)} 반도체나 TLD 와 같은 고체 검출기 등에 의한 측정, 방사화나 핵분열을 이용한 측정 및 화학선량계에 의한 측정방법이 있다. 위에서 열거한 측정방법중 calorimeter 에 의한 측정방법은 선량을 결정하는데 있어서 가장 불확정성이 적은 방법이지만 측정상의 어려움 등으로 의하여 임상에 직접 적용하기에는 적합하지 않다. 반면 이온함에 의한 측정방법은 비교적 간편할 뿐만 아니라 calorimeter 에 의한 측정방법을 제외한 다른 측정

방법과 비교하여 보다 정확한 측정을 할 수 있어 대부분의 중성자 치료시설에서는 이 방법을 이용하고 있다.^{13,14,15)}

가. 이론적 배경

일반적으로 임의의 방사선이 이온함에 조사되었을 때 이온함 공동 내부의 기체에 대한 흡수선량은 다음과 같이 주어진다.

$$D_{g,X} = Q_X \cdot \frac{\bar{W}_X}{e} \cdot \frac{1}{M_g} \quad 2-1$$

여기서 Q_X 는 이온 재결합에 의한 손실을 보정한 측정 전하량(coul), \bar{W}_X/e 는 공동 내에서 이온쌍 생성에 필요한 평균 에너지(J/coul), M_g 는 공동 내부의 기체 질량이다. 첨자X는 임의의 방사선에 대한 표시이다.

한편, 이온함 벽물질에 대한 흡수선량은 2-1 식에 기체에 대한 이온함 벽의 선량변환 계수를 곱하여 주면 구할 수 있다. 선량변환계수는 기체에 대한 이온함 벽물질의 유효 질량 저지능 비, $(S_{w,g})_X$,로 주어진다. 마지막으로 이온함의 재질을 근육조직이나 조직 등가 물질로 대체한다면 조직에 대한 흡수선량은 이온함 벽물질에 대한 근육조직의 질량 에너지 흡수 계수의 비 K_X 를 한 번 더 곱하여 얻는다. 이때 광자($X=G$)에 대해서는 $K_G = [(\mu_{en}/\rho)/(\mu_{en}/\rho)_w]_G$ 로 주어지며, 중성자에 대해서는 중성자 kerma 계수의 비, $K_N = K_N/K_w$,로 주어진다. 따라서 이온함에 중성자와 광자가 혼합되어 있는 방사선이 조사되었을 때의 총 흡수선량은 다음과 같이 주어진다.

$$D_{t,NG} = \frac{Q_{NG}}{M_g} \cdot \frac{\bar{W}_{NG}}{e} \cdot (S_{w,g})_{NG} \cdot K_{NG} \cdot d_{NG} \quad 2-2$$

여기서 d_{NG} 는 팬텀 물질 내에 이온함을 설치함에 따라 야기되는 팬텀 물질의 변위에 따른 입사 방사선의 감쇠나 산란에 대한 차이를 보상하기 위한 교란 보정 계수이다. 만약, 공기등가벽의 전리함으로 공기 내에서 측정이 이루어졌다면 이 계수의 값은 1이다. 중성자와 광자가 혼합되어 있는 방사선의 조사면 내에서 모든 물리적 변수가 조사 깊이에 대하여 일정하고, 하나의 이온함으로 측정된 전체 이온 전하량을 중성자와 광자의 성분으로 분리 가능($Q_T = Q_N + Q_G$)하다고 가정하면, 총 흡수선량($D_{t,T} = D_{t,NG}$)은

$$D_{t,T} = \left[\frac{Q_N}{M_g} \cdot \frac{\bar{W}_N}{e} \cdot S_N \cdot K_N + \frac{Q_G}{M_g} \cdot \frac{\bar{W}_G}{e} \cdot S_G \cdot K_G \right] \cdot d_{NG} \quad 2-3$$

$$D_{t,T} = K_N \cdot S_N \cdot \bar{W}_N \cdot d_{NG} \cdot \frac{Q_T}{M_g} \left[1 - \left(1 - \frac{k_T}{h_T}\right) \cdot \frac{Q_G}{Q_T} \right] \quad 2-4$$

여기서 $S_N = (S_{w,g})_N$

$S_G = (S_{w,g})_G$

$$k_T = \frac{\bar{W}_C}{\bar{W}_N} \cdot \frac{S_C}{S_N} \cdot \frac{K_C}{K_N}$$

$$h_T = \frac{\bar{W}_C}{\bar{W}_G} \cdot \frac{S_C}{S_G} \cdot \frac{K_C}{K_G}$$

으로 나타낼 수 있다.

위 2-2 식에 의해서 흡수선량을 결정하기 위해서는 이온함 공동 내부의 기체 질량, M_g , 을 구하여야 하는데 이것은 이온함의 교정검사를 통하여 얻을 수 있다. 일반적으로 방사선치료분야에서 이용되는 이온함의 교정검사에는 Co-60 이 표준선원으로 사용된다. 이 이온함의 조사선량 교정계수, $N_c(R/coul)$, 는 다음 식으로³⁾ 주어진다.

$$N_c = \frac{X}{Q_c} \quad 2-5$$

여기서 X 는 Co-60 의 조사선량이고, Q_c 는 이온 재결합, 온도 및 기압 등의 보정을 거친 측정된 전하량이다.

Co-60 γ 선이 이온함에 조사되었을 때 전자평형이 이루어진 상태에서 이온함 벽물질의 흡수선량은 Bragg-Gray 공동 이론에 의해서 다음과 같이 주어진다.

$$D_{w,c} = \frac{Q_c}{M_g} \cdot \frac{\bar{W}_c}{e} \cdot (S_{w,g})_c \quad 2-6$$

만약, 이온함을 근육조직과 질량이 같은 재질로 대체하였다면 근육조직에 대한 흡수선량은

$$D_{t,c} = \left[\frac{(\mu_{en}/\rho)_t}{(\mu_{en}/\rho)_w} \right]_c \cdot D_{w,c} \quad 2-7$$

가 된다.

또한, 조사선량으로부터 흡수선량을 계산하는 방법에 따르면^{16,17)} 이온함의 흡수선량은

$$D_{w,c} = f_{w,c} \cdot X \cdot A_{w,c} \quad 2-8$$

이다. 여기서 $f_{w,c}$ 는 조사선량-흡수선량 변환계수이며, Co-60 γ 선에 대하여

$$f_{w,c} = 0.876 \left[\frac{(\mu_{en}/\rho)_w}{(\mu_{en}/\rho)_{air}} \right]_c \quad 2-9$$

로 주어진다. 그리고 $A_{w,c}$ 는 build-up cap 과 이온함 벽에서 일어나는 광자의 감쇠 및 산란에 대한 보정계수이다. $A_{w,c}$ 값은 전자평형이 이루어지는 build-up cap 과 이온함 벽의 두께에 따라 결정되며, 정확한 값을 구하기는 매우 어렵다. 1978년 Bond, Nath 및 Schultz 가 Monte Carlo 방법을 이용하여 일반적으로 많이 사용되는 이온함들의 Co-60 γ 선에 대한 $A_{w,c}$ 값을 계산하였으며, 이온함의 벽 두께가 0.5 g/cm^2 이고 공동의 부피가 1 cc 또는 그 이하인 A-150 TE 플라스틱 구형 이온함의 $A_{w,c}$ 값은 0.985 이었다⁷⁾. 그후 Nath 등¹⁸⁾ 과 Rogers 등³⁾ 이 동일한 방법으로 계산한 벽두께 0.59 g/cm^2 , 부피 1 cc 인 A-150 TE 이온함의 $A_{w,c}$ 값은 0.983 이었다. 이온함의 벽물질을 근육조직으로 대체한다면 2-8 식은

$$D_{t,c} = f_{t,c} \cdot X \cdot A_{t,c} \quad 2-10$$

이 된다. 여기서 TE 이온함에 대하여 $A_{t,c} = A_{w,c}$ 로 가정할 수 있다.

식 2-5에서 2-10 으로부터 기체 질량, M_g , 는

$$M_g = \frac{1}{N_C \cdot f_{t,C} \cdot A_{w,C}} \cdot \frac{\bar{W}_C}{e} \cdot (S_{w,g})_C \cdot \left[\frac{(\mu_{en}/\rho)_t}{(\mu_{en}/\rho)_w} \right]_C \quad 2-11$$

이다.

따라서 싸이클로트론에서 발생되는 중성자와 광자가 혼합되어 있는 속중성자선의 근육조직에 대한 전체 흡수선량은

$$D_{t,T} = N_C \cdot A_{w,C} \cdot f_{t,C} \cdot d_{NG} \cdot \frac{(S_{w,g})_N}{(S_{w,g})_C} \cdot \frac{\bar{W}_N}{\bar{W}_C} \cdot \frac{K_N}{K_C} \cdot Q_T \quad 2-12$$

이다.

중성자치료기에서 나오는 속중성자선에는 중성자선에 의해서 방사화 된 표적, 차폐물질, collimator 및 펜텀 등에서 발생된 γ 선이 항상 동반되어 있으며 이 두 가지 방사선은 생물학적 효과비가 다르기¹⁹⁾ 때문에 전체 흡수선량을 중성자선과 γ 선에 의한 성분으로 나눌 필요가 있다. 일반적으로 사용되는 방법은 중성자에 대한 측정감도가 서로 다른 두 개의 이온함을 사용하는 것이다. 중성자선과 γ 선에 대한 흡수선량의 성분은 다음 식을 사용하여 계산할 수 있다.

$$R'_T = k_T D_N + h_T D_G \quad 2-13$$

$$R'_U = k_U D_N + h_U D_G \quad 2-14$$

여기서 R_T 는 중성자선에 민감한 측정장비의 실제 측정값, R_U 는 중성자선에 둔감한 측정장비의 실제 측정값, k_T , k_U 는 교정 γ 선에 대한 중성자선의 상대적 측정감도 및 h_T , h_U 는 교정 γ 선에 대한 γ 선의 상대적 측정감도($h_T = h_U = 1$)를 나타낸다. 식 2-13 과 2-14 로부터 중성자선의 흡수선량 D_N , 과 γ 선의 흡수선량 D_G 는 각각

$$D_N = \frac{h_U R'_T - h_T R'_U}{h_U k_T - h_T k_U} \quad 2-15$$

$$D_G = \frac{k_T R'_U - k_U R'_T}{h_U k_T - h_T k_U} \quad 2-16$$

이 된다.

나. 물 질

TE 이온함은 전기적으로 전도성이 있으며, 조성이 근육조직과 같은 A-150 이라는 플라스틱으로 제작되어 있다. A-150 플라스틱은 폴리에틸렌, 나일론, 탄소 및 칼슘 플루오르라이드의 균일한 혼합물 형태로 구성되어 있다²⁰⁾. A-150 의 기본적인 질량 구성비는 Table 1 과 같으며, ICRU 근육에²¹⁾ 비해 탄소의 비율이 매우 크기 때문에 두 물질간의 kerma 비를 고려해야 한다. A-150 의 밀도는 1.127 ± 0.005 g/cm 이며, 성형 방법이나 크기에 따라 밀도가 변하지는 않는다²²⁾. TE 기체는 전체 흡수선량측정을 위해 이온함에 주입하는 것으로 기본적인 질량 구성비는 Table 1 에 나타내었으며, CH₄ : 64.4%, CO₂ : 32.4%, N₂ : 3.2% 의

분압비로 되어 있다³⁾. Mg 이온함은 중성자에 대한 측정감도를 감소시키기 위하여 마그네슘으로 제작되어 있다. 아르곤 기체(Ar gas)는 비수소계 이온함인 Mg 이온함에 주입하기 위하여 사용하였다.

Table 1. Elemental composition by weight of ICRU muscle, A-150 plastic and TE gas.

Element	ICRU muscle	A-150 plastic	TE gas
H	10.2	10.2	10.2
C	12.3	76.8	45.6
O	72.9	5.9	40.7
N	3.5	3.6	3.5
Ca	0.007	1.8	—
F	not listed	1.7	—
Others	1.1	—	—

다. 선량계산에 이용되는 물리적 변수

치료용 속중성자선의 선량계산에 이용되는 물리적 변수는 다음의 5가지로 나누어 볼 수 있다.

- 1) 기체 내에서 이온쌍 생성을 위하여 필요한 평균 에너지(W_x)
- 2) 기체에 대한 이온함 벽의 선량 변환계수($S_{w,g}$)
- 3) 중성자 kerma 계수 비(K_N)
- 4) 교정 γ 선에 대한 중성자선의 상대적 측정감도(k_r, k_c)
- 5) 교란 보정계수(d_{nc})

속중성자선의 흡수선량을 정확히 결정하기 위해서는 표준 중성자선의 스펙트럼으로부터 구한 기본적인 변수 값들을 이용할 필요가 있다. 그러나 20 MeV 이상의 속중성자선에 대하여는 단면적에 대한 자료의 부족으로 인하여 불확정도가 증가한다. 본 연구에서는 선량계산을 위한 물리적 변수들의 값으로 AAPM에서 작성한 자료를 주로 사용하였으며 부분적으로 ECNEU와 ICRU 보고서의 자료를 사용하였다. TE 기체를 분당 5cc 씩 주입한 TE 이온함(TE : TE 이온함)에 대한 W_x 는 Co-60 γ 선 및 중성자선에 대해 29.2J/coul과 30.5J/coul, $S_{w,g}$ 는 각각 0.994와 1.013을 사용하였다. K_N 는 근육조직과 조직 등가 물질과의 중성자에 대한 kerma 비로 0.95를 권장하고 있다. k_r 는 TE : TE 이온함의 교정 γ 선에 대한 중성자의 상대적 측정감도로 0.993을 사용하였으며, k_c 는 비수소계 이온함의 교정 γ 선에 대한 중성자의 상대적 측정감도로 Ar 기체를 분당 5cc 씩 주입한 Mg 이온함(Ar : Mg 이온함)에 대해 0.219를 사용하였다. d_{nc} 는 팬텀 물질 내에 이온함을 설치함에 따라 야기되는 팬텀 물질의 변위에 따른 입사 방사선의 감쇠나 산란에 대한 차이를 보정하기 위한 것으로 이온함의 부피가 1cc, 0.1cc 일 때 각각 0.970과 0.987로 계산하였다. Table 2는 선량계산을 위하여 사용한 물리적 변수들을 나타낸 표이다.

3. 측정

가. γ 선 교정

속중성자선의 선량을 측정하기 위해서 Co-60 γ 선으로 IC-17, IC-18 및 IC-17M 이온함(Far West technology)에 대하여 교정검사를 실시하였다. 교정검사는 기준이 되는 IC-17 이온함(1

cc)에 대해서는 국립보건원에 의뢰하여 실시하였으며 다른 이온함들은 IC-17 이온함을 기준으로 원자력병원에서 자체적으로 실시하였다. IC-17 이온함은 구 형태이며 IC-18 이온함(0.1cc)은 실린더 형태로 되어 있고, 재질은 조직등가물질인 A-150 플라스틱으로 제작되었으며 이온함 속으로 TE 기체를 주입할 수 있도록 설계되어 있다. IC-17M 이온함(2cc)은 구 형태이며 마그네슘으로 제작되어 있고, Ar 기체를 주입할 수 있도록 설계되어 있다. Table 3 은 본 연구에서 사용한 이온함들의 재원을 나타낸 표이다. 교정검사를 실시하는 동안 이들 이온함에 TE 기체와 Ar 기체를 분당 5cc 씩 주입하였다.

Table 2. Physical parameter for neutron beam dosimetry.

Parameter	Gas : Chamber	Value
$\frac{\overline{W}_c}{e}$	TE : TE	29.2 J/coul
	Ar : Mg	26.2 J/coul
$\frac{\overline{W}_N}{e}$	TE : TE	30.5 J/coul
	Ar : Mg	26.4 J/coul
$(S_{w,g})_c$	TE : TE	0.994
	Ar : Mg	1.140
$(S_{w,g})_N$	TE : TE	1.013
K_N	—	0.95
K_c	—	1.004
k_T	TE : TE	0.993
k_U	Ar : Mg	0.219
d_{NG}	1 cc chamber	0.970
	0.1 cc chamber	0.987

Table 3. Specification of ionization chamber.

Model	IC-17 (Far west)	IC-18 (Far west)	IC-17M (Far west)	EIC-1 (Far west)
Type	spherical gas flow	cylindrical gas flow	spherical gas flow	extrapolation gas flow
Material	TE plastic (A-150)	TE plastic (A-150)	Magnesium	TE plastic (A-150)
Cavity Volume	1 cc	0.1 cc	2 cc	—
Inside Diameter	12.7 mm	4.6 mm	16.6 mm	—
Wall Thickness	5.1 mm	1.6 mm	3.1 mm	—

나. 선량측정

중성자치료기에서 방출되는 속중성자선의 선량측정에는 TE : TE 이온함(IC-17)과 The-rados 사의 RDM 2A electrometer 및 RFA-3 field analyzer system 을 이용하였다.

다. γ 선 오염도

속중성자선의 γ 선 오염도를 결정하기 위해 TE : TE 이온함(IC-17)과 Ar : Mg 이온함(IC

17M), RDM 2A electrometer 및 RFA-3 field analyzer system 을 이용하였다. 조사면 크기는 $10 \times 10 \text{cm}^2$ 및 $20 \times 20 \text{cm}^2$, SSD 는 150cm 로 하였으며 각각의 이온함을 RFA-3 에 부착하여 물 펜텀의 2.5cm, 5cm, 10cm 및 20cm 깊이에서 측정하였다. Flattening filter 는 조사면 크기가 $10 \times 10 \text{cm}^2$ 인 경우 small filter 를 사용하였으며, $20 \times 20 \text{cm}^2$ 인 경우 large filter 를 사용하였다. 각 깊이의 전리량은 Table 2의 물리적변수를 이용하여 흡수선량으로 환산하고 식 2-15 와 2-16에 따라 중성자와 감마선에 의한 흡수선량으로 분리하였다.

라. 깊이-선량 백분율

속중성자선의 조사면 중심축상의 깊이-선량 백분율 측정에는 TE : TE 이온함(IC-18)과 RDM 2A electrometer 및 RFA-3 field analyzer system 을 이용하였다. 조사면 크기는 small filter 를 사용한 $6 \times 6 \text{cm}^2 \sim 12 \times 12 \text{cm}^2$, large filter 를 사용한 $10 \times 10 \text{cm}^2 \sim 30 \times 30 \text{cm}^2$ 에서 1cm 씩 증가시켰다. SSD 는 150cm 로 하였으며 깊이선량은 이온함을 RFA-3 에 부착시켜 1.5cm, 2cm에서 30cm 까지 1cm 씩 이동하면서 측정하였다. 최대선량점 깊이는 extrapolation 이온함 (EIC-1) 및 TE 플라스틱 판을 이용하여 폴리스틸렌 펜텀 내에서 측정하였다. TE 플라스틱 판은 $26.35 \text{mg/cm}^2 \sim 1121 \text{mg/cm}^2$ 두께인 8장의 얇은 판으로 되어 있으며 서로 조합하여 EIC-1 이온함 전면에 부착하였다. EIC-1 이온함에도 TE 기체를 분당 5cc 씩 주입하였다.

마. Output factor

조사면 크기에 따른 기준 깊이에서의 선량변화는 TE : TE 이온함(IC-18), RDM 2A electrometer 및 RFA-3 field analyzer system 을 이용하여 물 펜텀 내 선량최대깊이인 1.5cm 깊이에서 측정하였다. 조사면 크기는 150cm SSD에서 small filter 를 사용한 경우 $6 \times 6 \text{cm}^2 \sim 12 \times 12 \text{cm}^2$, large filter 를 사용한 경우 $10 \times 10 \text{cm}^2 \sim 30 \times 30 \text{cm}^2$ 에서 각 변을 2cm 씩 증가시켰다.

바. 표면선량을

표면선량은 외삽형 이온함(EIC-1) 과 TE : TE 이온함(IC-18)을 이용하여 결정하였다. EIC-1 이온함은 폴리스틸렌 펜텀 내에 설치하였으며, 이온함의 표면이 펜텀의 표면과 일치하도록 하였다. TE : TE 이온함(IC-18)은 물 펜텀 내 1.5cm 깊이에 설치하였다. 표면선량은 SSD 150 cm에서 측정되었으며, 조사면 크기를 small filter 를 사용한 $6 \times 6 \text{cm}^2 \sim 12 \times 12 \text{cm}^2$, large filter 를 사용한 $10 \times 10 \text{cm}^2 \sim 30 \times 30 \text{cm}^2$ 에서 2cm 씩 증가시키면서 RDM 2A electrometer 로 측정된 값을 서로 비교하여 계산하였다. SSD 는 150cm 로 하였다.

사. Beam profile

beam profile 은 TE : TE 이온함(IC-18)과 RDM 2A electrometer 를 이용하여 작성하였다. 이온함을 물 펜텀 내 2.5cm, 5cm, 10cm 및 20cm 깊이에서 수평 방향으로 0.5cm 씩 이동해 가면서 측정하였다. SSD 는 150cm 로 하고 조사면 크기는 $10 \times 10 \text{cm}^2$ 로 하였다.

결과 및 고찰

중성자치료기에서 방출되는 속중성자선의 선량 및 선량 분포를 측정하기 위하여 조직 등가물질인 A-150 플라스틱으로 제작된 IC-17 이온함, IC-18 이온함 및 마그네슘으로 제작된 IC-17M 이온함에 대해 TE 기체 및 Ar 기체를 분당 5cc 씩 주입하면서 Co-60 γ 선으로 교정을 실시한 결과 IC-17, IC-18, IC-17M 이온함 각각에 대해서 조사선량 교정계수(N_C)는 2.972 R/nC, 24.02R/nC, 0.949R/nC 이었고, 공기 kerma(N_K)는 2.613cGy/nC, 21.116cGy/nC, 0.834cGy/nC 이었으며, 조직에 대한 흡수선량 교정계수(N_T)는 2.803cGy/nC, 22.651cGy/nC,

0.895cGy/nC 로 나타났다.

속중성자선의 깊이에 따른 γ 선의 오염도는 2.5cm 에서 가장 적게 나타나 조사면 크기 $10 \times 10\text{cm}^2$ 및 $20 \times 20\text{cm}^2$ 각각에서 12.4% 및 13.4% 이었으며, 20cm 에서 보다 크게 나타나 $10 \times 10\text{cm}^2$ 및 $20 \times 20\text{cm}^2$ 모두에서 19.3% 이었다. 속중성자선의 깊이에 따른 γ 선의 오염도를 Fig. 2 에 나타내었다. 이 결과들로부터 속중성자선의 γ 선 오염도는 깊이가 깊어짐에 따라 증가하였으며, 조사면 크기가 커질수록 증가하였다. 측정된 γ 선의 오염도는 Jones 등의¹⁵⁾ 결과와 비교하여 약간 크게 나타났는데 이것은 본 실험에서 사용한 Ar : Mg 이온함(IC-17 M)의 k_v 값을 정하는데 있어서 정확도에 문제가 있었던 것으로 판단되며, 앞으로의 실험에 있어서는 비수소계 이온함으로 중성자에 대한 측정감도가 가장 낮은 Geiger-Muller counter를 사용하면 보다 정확한 측정을 할 수 있을 것으로 사료된다. 일반적으로 γ 선의 오염도 측정에 있어서 비수소계 이온함으로 중성자에 대한 측정감도가 낮은 것을 사용하는 것이 정확성이 가장 좋은 것으로 알려져 있다.

속중성자선에 대한 물 펜텀 내 중심축상에서의 깊이-선량 백분율을 Table 4 에 나타내었다. 최대 흡수선량점 깊이는 물에서 1.32cm 이었다. $10 \times 10\text{cm}^2$ 기준 조사면의 50% 선량 깊이는 14.8cm 이었다. 이것은 동일 기종을 보유하고 있는 미국의 워싱턴 대학병원과 잘 일치하였다. $6 \times 6\text{cm}^2$ 및 $30 \times 30\text{cm}^2$ 크기의 조사면에 대한 50% 선량 깊이는 각각 13.3cm 및 18.4cm 로 측정되었다. 속중성자선의 깊이-선량 백분율을 X-선과 비교해 보면 전체적으로는 6MV X-선과 비슷한 깊이-선량 백분율을 보였으며, 적은 조사면에서는 6MV X-선의 깊이-선량 백분율이 큰 반면 큰 조사면에서는 속중성자선의 깊이-선량 백분율이 크게 나타났다. 이것은 X-선에 비해 중성자선에서 후방 산란이 많이 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

Table 4. Central axis percent depth dose of neutron beam.

Depth(cm)	Field size(cm \times cm)							
	Small filter				Large filter			
	6 \times 6	8 \times 8	10 \times 10	12 \times 12	10 \times 10	14 \times 14	20 \times 20	30 \times 30
0	41.6	43.1	47.0	47.4	46.5	47.9	50.7	54.1
1.32	100	100	100	100	100	100	100	100
2	98.3	98.7	99.0	99.2	99.0	99.2	99.5	99.6
3	93.0	94.3	95.2	95.5	95.3	95.9	96.4	96.5
4	88.0	89.7	90.8	91.5	91.0	92.0	92.7	93.6
5	83.5	85.1	86.5	87.6	86.8	88.8	89.8	91.1
6	78.9	80.3	81.8	83.4	82.2	84.6	85.8	87.4
7	74.6	76.3	77.7	79.8	78.0	80.7	82.8	84.5
8	70.6	72.2	74.0	75.7	74.5	77.4	79.7	81.1
9	66.4	68.4	70.2	72.0	70.8	73.7	76.2	77.9
10	62.1	64.2	66.3	68.1	67.2	69.7	72.1	74.6
12	54.6	57.1	59.3	61.1	60.3	63.1	66.0	68.3
14	47.9	50.3	52.5	54.4	53.3	56.2	58.9	61.8
16	41.6	44.0	46.2	48.1	47.2	50.3	53.4	56.3
18	36.0	38.3	40.9	42.5	41.8	44.8	47.8	51.0
20	31.2	33.5	35.9	37.9	37.0	40.1	43.1	46.1
25	21.9	23.9	25.9	27.6	27.3	29.8	32.8	36.1
30	14.3	16.1	18.1	20.0	19.4	22.3	24.9	28.0

속중성자선의 선량분포에 관한 연구

Table 5는 조사면 크기에 따른 깊이 1.5cm 에서의 선량변화인 output factor 를 나타낸 것으로 small filter 를 사용한 $6 \times 6 \text{cm}^2 \sim 12 \times 12 \text{cm}^2$ 에 대하여 0.908~1.049 이었으며, large filter 를 사용한 $10 \times 10 \text{cm}^2 \sim 30 \times 30 \text{cm}^2$ 에서는 0.872~1.15 로 나타났다.

표면선량율은 $6 \times 6 \text{cm}^2 \sim 30 \times 30 \text{cm}^2$ 에서 최대 선량에 대하여 41.6%~54.1% 이었다(Table 6). Fig. 3 은 조사면 크기 $10 \times 10 \text{cm}^2$ 에서 2.5cm, 5cm, 10cm 및 20cm 깊이의 beam profile 을 그린 그림이다. 2.5cm 깊이에서는 horn effect 에 의해서 중심축 선량보다 중심축에서 4cm 거리의 선량이 7.5% 높게 나타났으며, 5cm 깊이에서는 5.7% 높게 나타났다. Flatness 는 10cm 깊이에서 가장 평탄하게 나타났다.

이상의 결과들로부터 속중성자선의 선량분포특성을 파악하였으며 앞으로는 속중성자선에 혼합되어 있는 γ 선 오염도를 낮추기 위한 연구를 실시하고자 한다.

Table 5. Output factor of neutron beam.

Field size(cm^2)	Output factor	
	Small filter	Large filter
6 × 6	0.908	—
8 × 8	0.955	—
10 × 10	1.000	0.872
12 × 12	1.049	0.921
14 × 14	—	0.960
16 × 16	—	0.995
18 × 18	—	1.025
20 × 20	—	1.050
22 × 22	—	1.072
24 × 24	—	1.092
26 × 26	—	1.112
28 × 28	—	1.130
30 × 30	—	1.150

Table 6. Percent surface dose of neutron beam.

Field size(cm^2)	Surface dose(%)	
	Small filter	Large filter
6 × 6	41.6	—
8 × 8	43.1	—
10 × 10	47.0	46.4
12 × 12	47.4	47.1
14 × 14	—	47.9
16 × 16	—	48.7
18 × 18	—	49.7
20 × 20	—	50.7
22 × 22	—	52.3
24 × 24	—	53.0
26 × 26	—	53.5
28 × 28	—	53.8
30 × 30	—	54.1

결 론

본 연구에서는 중성자치료장치에서 방출되는 최대 에너지 50MeV 인 속중성자선의 방출선량 및 물질 내 선량 분포 등의 측정을 통하여 독자적인 측정기술을 습득하였고, 현재 사용중인 속중성자선의 선량 및 선량 분포 자료의 정확성을 재평가하였다. 또한 우리 실정에 알맞은 표준측정법을 개발하기 위하여 세계적으로 널리 사용되고 있는 중성자 측정법들에 대한 연구를 실시하였다.

속중성자선의 선량 및 물질 내 선량 분포 측정을 위하여 조직등가물질인 A-150 플라스틱으로 제작된 IC-17 및 IC-18 이온함, 마그네슘으로 제작된 IC-17M 이온함, TE 기체, Ar 기체 및 RDM 2A electrometer 등을 사용하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 중성자선에 혼합되어 있는 γ 선의 오염도는 기준조사면 깊이 5cm에서 약 13%로 나타났으며, 깊이가 깊어질수록 증가하였다.
2. 기준 조사면에 대하여 중심축선상의 최대 선량 깊이는 1.32cm 이었으며, 50% 선량 깊이는 14.8cm 로 나타났다.
3. 표면선량율은 전 조사면에 걸쳐서 41.6%~54.1% 이었으며 조사면이 커질수록 증가하였다.
4. Beam profile 은 2.5cm 깊이에서 7.5% 정도 horne effect 가 나타났으며 10cm 깊이에서 가장 평탄하였다.

참고문헌

1. M. Catterall, C. Rogers, R. H. Thomlinson, S. B. Field, An investigation into the clinical effects of fast neutrons. Methods and early observations. Br J Radiol 44 : 603-611(1971).
2. International Commission on Radiation Units and Measurements. Neutron dosimetry for Biology and Medicine. ICRU Report 26, Washington DC, U.S. National Bureau of Standards(1976).
3. International Commission on Radiation Units and Measurements. Clinical neutron dosimetry part I : Determination of absorbed dose in a patient treated by external beams of fast neutrons. ICRU Report 45, Washington DC, U.S. National Bureau of Standards(1989).
4. S. Y. Yoo, K. H. Koh, C. K. Cho, Clinical experience of neutron therapy in various cancer. A preliminary report of short term result. J Kor Can Assoc 20 : 73-81(1988).
5. S. Y. Yoo, S. W. Noh, H. W. Chung, C. K. Cho, K. H. Koh, J. S. Bak, Eenmaa J. Dosimetric characteristics of the KCCH neutron therapy facility. J Kor Soc Ther Rad 6 : 85-91(1988).
6. D. K. Bewley, The physics and radiobiology of fast neutron beams. Bristol, Adam Hilger(1989)
7. American Associations of Physicists in Medicine. Protocol for neutron beam dosimetry. AAPM Report 7, New York, NY, American Institute of Physics (1980).
8. J. J. Broerse, B. J. Mijnheer, J. R. Williams, European protocol for neutron dosimetry for external beam therapy. Br J Radiol 54 : 882-898(1981).
9. J. C. McDonald, J. C. Ma, J. Liang, J. Eenmaa, M. Awschalom, J. B. Smathers, R. Graves, L. S. August, P. Shapiro Calorimetric and ionimetric dosimetry intercomparisons I : U.S. neutron radiotherapy centers. Med phys 8 : 39-43(1981a).
10. J. C. McDonald, J. C. Ma, B. J. Mijnheer, J. Zoetelief Calorimetric and ionimetric dosimetry

- intercomparisons II : d+T neutron source at the Antoni van Leeuwenhoek Hospital. Med phys 8 : 44–48(1981b).
11. S. R. Domen, Advances in calorimetry for radiation dosimetry. In : Kase KR, Bjarngard BE, Attix FH. eds. The dosimetry of ionizing radiation. Vol II. Orlando, FL, Academic Press : 245–320(1987).
 12. J. J. Broerse, J. T. Lyman, J. Zoetelief Dosimetry of External beams of nuclear particles. In : Kase KR, Bjarngard BE, Attix FH. eds. The dosimetry of ionizing radiation. Vol I. Orlando, FL, Academic Press : 229–290(1985).
 13. D. T. L. Jones, J. E. Symons, T. J. Fulcher, F. D. Brooks, M. R. Nchodu, M. S. Allie, A. Buffler, M. J. Oliver Neutron fluence and kerma spectra of a p(66)/Be(40) clinical source. Med phys 19 : 1285–1291(1992).
 14. B. J. Mijnheer, P. Wootton, J. R. Williams, J. Eenmaa, C. J. Parnell Uniformity in dosimetry protocols for therapeutic applications of fast neutron beams. Med phys 14 : 1020–1026(1987).
 15. D. T. L. Jones, S. Vynckier, M. Yudelev A comparison of the gamma component of two high energy neutron therapy beams. Strahlenther Onkol 166 : 745–748(1990).
 16. H. E. Johns, J. R. Cunningham The physics of radiology. 4th ed., Springfield, IL, Charles C Thomas(1983).
 17. F. M. Khan The physics of radiation therapy. 2nd ed., Baltimore, MD, Williams & Wilkins(1994).
 18. R. Nath, R. J. Schulz Calculated response and wall correction factors for ionization chambers exposed to ⁶⁰Co gamma-rays. Med Phys 8 : 85–93 (1981).
 19. E. J. Hall Radiology for the radiologist. 3rd ed. Philadelphia, PA, Lippincott (1988).
 20. J. B. Smathers, V. A. Otte, A. R. Smith, P. R. Almond, F. H. Attix, J. J. Spokas, W. M. Quam Goodman LJ. Composition of A-150 tissue-equivalent plastic. Med phys 4 : 74–77(1977).
 21. International Commission on Radiation Units and Measurements. Physical aspects of irradiation. ICRU Report 10b, Washington DC, U.S. National Bureau of Standards(1964).
 22. L. J. Goodman Density and composition uniformity of A-150 tissue-equivalent plastic. Phys Med Biol 23 : 753–758(1978).

Fast Neutron Beam Dosimetry

Young Hoon JI^{*†}, Dong Han Lee^{*}, Seong Yul Yoo^{*}, Soo Il Kwon[†], Dong Oh Shin[†], Sung Yong Park[†]

Dept. of Radiation Oncology, KCCH, Seoul, Korea.^{*}

Dept. of Physics, Univ. of Kyunggi, Suwon, Korea.[†]

Abstract

It is mandatory to measure accurately the dose distribution and the total absorbed dose of fast neutron for putting it to the clinical use. At present the methods of measurement of fast neutron are proposed largely by American Associations of Physicists in Medicine, European Clinical Neutron Dosimetry Group, and International Commission on Radiation Units and Measurements. The complexity of measurement, however, induces the methodological differences between them. In our study, therefore, we tried to establish a unique technique of measurement by means of measuring the emitted doses and the dose distribution of fast neutron beam from neutron therapy machine, and to invent a standard method of measurement adequate to our situation. For measuring the absorbed doses and the dose distribution of fast neutron beam, we used IC-17 and IC-18 ion chambers manufactured by A-150 plastic(tissue-equivalent material), IC-17M ion chamber manufactured by magnesium, TE gas and Ar gas, and RDM 2A electrometer. The magnitude of gamma-contamination intermingled with fast neutron beam was about 13% at 5cm depth of standard irradiated field, and increased as the depth was increased. At the central axis the maximum dose depth and 50% dose depth were 1.32cm and 14.8cm, respectively. The surface dose rate was 41.6–54.1% throughout the entire irradiated fields and increased as the irradiated fields were increased. Beam profile was that the horn effect of about 7.5% appeared at 2.5cm depth and the flattest at 10cm depth.