

하나로 원자로 BNCT 열중성자 조사장치에 대한 선량특성연구

원자력의학원 *방사선의학연구센터, †방사선종양학과,
‡한국원자력연구소 하나로이용연구단, §광운대학교 전자물리학과

이동한* · 김미숙† · 서소희* · 지영훈* · 최문식* · 박재홍† · 김금배*
류성렬† · 김명섭† · 이병철† · 천기정† · 조재원§

최대출력 30 MW, 하나로(HANARO) 다목적 연구용 원자로의 접선 중성자공에 붕소중성자포획치료(Boron Neutron Capture Therapy, BNCT)를 위한 열중성자 조사장치가 개발되었다. BNCT 조사장치에서는 서로 다른 물리적 특성과 생물학적 효과비를 가진 여러 성분의 방사선이 방출되기 때문에 정확한 투여선량을 결정하기 위해서는 각 성분의 정량적 분석이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 방사화 분석, 열형광선량계 및 이온전리함 등 여러 유형의 검출기를 사용하여 BNCT 조사장치에서 방출되는 열중성자 및 감마선 혼합장의 선량 성분을 분리, 측정하였다. 선량측정은 물 속에 함유된 불순물과 중성자의 이차반응을 최소화하기 위해 증류수를 채운 물팬텀을 이용하였다. 그리고 측정 결과는 MCNP4B 전산계산의 결과와 상호 비교하였다. 측정 결과 열중성자속은 물팬텀 10 mm와 20 mm 깊이에서 각각 1.02E9 n/cm²·s과 6.07E8 n/cm²·s이었고, 고속중성자선량율은 10 mm 깊이에서 0.11 Gy/hr로 미세하였다. 감마선량률은 물팬텀 20 mm 깊이에서 5.10 Gy/hr로 나타났다. 측정된 중성자와 감마선량값은 MCNP의 결과와 5% 이내로 잘 일치하였고, 열중성자속은 14%의 비교오차를 나타내었다. 이러한 결과들은 중성자 검출의 난이도를 고려할 때 충분히 신뢰할 수 있는 수준이라 판단되며, BNCT 임상 연구를 위한 선량평가 자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

중심단어: 중성자포획치료, 하나로 원자로, 중성자 선량측정, 이온전리함

서 론

붕소중성자 포획치료(Boron Neutron Capture Therapy, BNCT)는 세포 단위에서 암세포를 선별적으로 죽일 수 있는 유망한 암치료법으로 전 세계적으로 많은 연구가 진행되고 있다.^{1,2)} 종양에 친화력이 있는 보론-10을 함유한 무독성의 화합물을 미리 주사한 뒤 0.025 eV의 저에너지 열중성자 또는 열외중성자 빔을 조사하면 중성자가 포획되면서 헬륨과 리튬이 생성되고, 이 과정에서 방사선 생물학적 영향이 매우 큰, MeV 단위의 강력한 에너지를 가진 알파선과 리튬 그리고 즉발감마선이 나온다. 보론-10은 중성자 흡수 단면적이 매우 크고, 반응 후 생성된 알파와 리튬 원자핵은 전리작용이 매우 강하며 그 투과범위가 5~9 μm로 붕소를 함

유하고 있는 종양세포에만 에너지가 전달된다는 특징이 있다. BNCT의 주된 대상은 악성 뇌신경교종과 피부암인 흑색종이고, 그밖에 간암과 폐암 등에 대해서도 연구가 활발하게 진행되고 있다.³⁾

우리나라에서도 1990년대 중반부터 붕소 화합물 개발, 중성자원 개발 및 치료계획 전산 프로그램 등 다양한 관련 연구가 진행되어 왔으나, 최근에 본격적인 임상 연구를 위해 하나로(HANARO) 원자로에 BNCT를 위한 중성자 조사 설비를 개발하였다. BNCT 중성자원의 세계적 추세는 중성자의 생물학적 효과를 고려하여 에너지 10 KeV 이하의 열외중성자를 이용하는 것이다. 하지만 하나로 원자로는 열중성자 및 고속중성자를 이용하는 다목적 연구용 원자로의 설계 특성상 임상연구에 필요한 충분한 열외중성자를 얻기는 불가능하였다. 이에 수 년 간의 개념 설계를 통해 하나로 원자로의 접선 중성자공(tangential beam port)에 실리콘과 비스무스 단결정으로 여과장치를 설치하여 열중성자는 최대한 투과시키고 고속중성자와 감마선을 가장 효율적으로 차폐시킨 열중성자 조사장치를 개발하였다.⁴⁾

BNCT 조사장치에서는 서로 다른 물리적 특성을 가진 여러 성분의 방사선이 방출되고 이들 성분의 생물학적 효과

본 연구는 2006년도 과학기술부 주관 원자력중장기 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

이 논문은 2007년 3월 26일 접수하여 2007년 6월 4일 채택되었음.

책임저자 : 김미숙, (139-240) 서울시 노원구 공릉동 215-4

원자력의학원 방사선종양학과

Tel: 02)970-1264 Fax: 02)970-2406

E-mail: mskim@koch.re.kr

비가 엄격히 차별되기 때문에 정확한 투여선량을 결정하기 위해서는 각 성분의 정량적 분석이 필수적이다. 그러므로 본 연구에서는 임상 시험에 앞서 여러 유형의 검출기를 사용하여 투여선량 계산의 기본 요소인, 하나로 원자로의 열중성자 조사장치에서 방출되는 열중성자속(thermal neutron fluence)과 고속중성자 및 감마선 혼합장의 선량 성분을 분리, 측정하였다. 그리고 측정 결과들은 전산계산 결과와의 비교를 통해 신뢰도를 검증하고 선량평가의 기본적 자료로 활용하고자 한다.

재료 및 방법

1. BNCT 조사장치의 시설 개요

하나로 원자로의 중성자 빔 튜브는 접선 중성자공(tangential beam port)의 형태로 개발되었기 때문에 열중성자 이용에 적합하다. 그러므로 열외중성자를 이용하는 BNCT 조사장치의 개발은 사실상 불가능하다고 판단되었다. 아울러 중성자공에서 방출되는 빔은 고속중성자와 감마선을 다량 함유하고 있기 때문에, BNCT 임상연구를 위해서는 이들 성분을 최소화시킬 필요가 있다. 이에 단면적이 작고 긴

중성자공의 특성을 고려하여 여과법을 사용하여 BNCT 조사장치를 개발하였다. 실리콘과 비스무스 단결정으로 구성된 여과장치를 설치하여 고속중성자와 감마선을 효율적으로 제거하고 열중성자를 최대한 투과하도록 하였다(Fig. 1). 여과장치는 액체질소로 냉각하여 열중성자의 투과력을 높이고 선속을 증가시켜, 임상 연구 시 치료 시간을 단축할 수 있도록 하였다. 중성자공 내부에는 물셔터(water shutter)를 설치하여 원자로가 운전 중인 상태에서도 자유로이 빔을 개폐할 수 있도록 하여, 다른 수평공의 이용에 간섭이 없도록 하였다. 빔 인출부에는 리튬-6 농축도 95.6%의 ${}^6\text{Li}_2\text{CO}_3$ 와 고밀도 폴리에틸렌(polyethylene)의 부피비를 1:1로 혼합한 차폐체로 구성된 원형의 빔 콜리메이터를 설치하였으며, 크기는 직경이 14 cm와 10 cm의 두 종류로 제작하였다.⁴⁾

2. 선량측정법

BNCT에 사용할 중성자빔은 아주 낮은 고속중성자를 함유한(1% 이하) 고순도의 열중성자빔이므로 정확한 선량측정을 위해서는 각 검출기의 열중성자 감도 결정이 중요한 요인이 된다. 하지만 국제방사선단위위원회(International Commission on Radiation Units and Measurements, ICRU)와 미국의 학물리학회(American Association of Physicists in Medicine, AAPM)에서 권고하는 중성자선과 감마선 혼합장에서의 선량측정 프로토콜은 중성자 치료에 이용되는 고속중성자 선량측정에 적합하도록 개발되었기 때문에, 열중성자와 검출기 구성 물질과의 상호 반응에 의한 선량 기여에 대해서는 고려되어 있지 않다.^{5,6)} 따라서 본 측정에서는 Raaijmakers 등^{7,8)}이 제안한, 검출기의 열중성자 감도를 추가한 새로운 측정 프로토콜을 사용하여 각 선량 성분을 결정하였다. 일반적으로 중성자선의 선량측정은 중성자에 대한 측정감도가 서로 다른 두 개의 검출기를 사용하며, 다음 식을 사용하여 중성자와 감마선에 대한 흡수선량을 계산할 수 있다.

$$R_u = h_u D_g + k_u D_n + k'_u \phi \quad (1)$$

$$R_t = h_t D_g + k_t D_n + k'_t \phi \quad (2)$$

여기서 D_g 는 감마선량, D_n 는 열외중성자 및 고속중성자 선량이며 ϕ 는 열중성자속을 의미한다. 첨자로 표시된 u 는 중성자선에 민감하지 않은 측정장비, t 는 중성자선과 감마선에 거의 비슷한 감도를 보이는 측정장비를 나타내며 k_u , k_t 는 검출기의 교정 감마선에 대한 중성자선의 상대적 측정감도, h_u , h_t 는 검출기의 교정 감마선에 대한 감마선의 상대적 측정감도(h_u , $h_t=1$)를 나타낸다. 그리고 교정인자 k'_u , k'_t

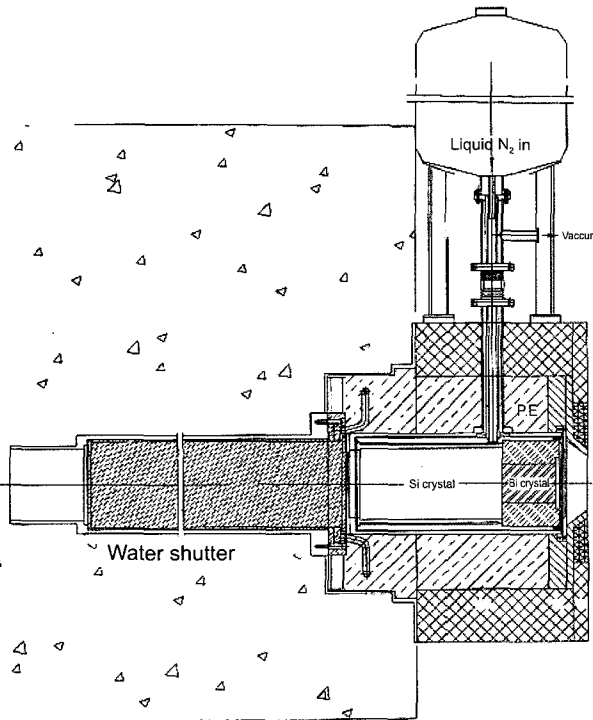


Fig. 1. Thermal neutron irradiation facility for boron neutron capture therapy at HANARO reactor. P.E: polyethylene.

는 열중성자 선속(flux)에 대한 검출기의 열중성자 감도를 나타낸다. 본 측정에서는 TE(TE) 이온전리함의 k_i 값은 0.955, Mg(Ar) 이온전리함과 TLD-700 열형광선량계의 k_u 값은 0.01을 사용하였다. 그리고 검출기의 열중성자 감도는 MCNP 전산계산의 결과와 Raaijmakers 등⁸⁾의 실험 결과를 참고하여 TE(TE) 이온전리함의 k_i' 값은 0.43, Mg(Ar), 이온전리함과 TLD-700 열형광선량계의 k_u' 값은 각각 0.37, 1.80로 결정하였다.

통상 중성자는 에너지에 따라 열중성자(<0.5 eV), 열외중성자(0.5 eV ~ 10 KeV) 및 고속중성자(>10 KeV)로 구분되고, 각각 생물학적 효과비가 다르기 때문에 전체 흡수선량에서 각 성분들을 분리하여 측정해야 한다. 열중성자의 경우에는 단일 에너지를 갖기 때문에 선속을 측정하면 계산에 의해 정확한 선량을 유추할 수 있다. 하지만 열외중성자와 고속중성자는 현실적으로 성분을 분리하여 측정하기는 거의 불가능하다. 측정에 앞서 시행된 MCNP 전산계산의 결과, 여과장치를 통과하여 물팬텀에 입사하는 중성자빔의 선속 분포를 보면 10 KeV 이상의 고속중성자 선속이 열중성자 선속에 비해 1% 이하로 매우 작고, 열외중성자와 매질 성분과의 양성자 탄성충돌에 의해 발생하는 선량이 속중성자선량에 비해 미약하기 때문에 이들을 하나의 성분으로 간주해도 무방할 것으로 판단되었다. 따라서 본 실험에서는 열외중성자선량과 고속중성자선량을 별도로 구분하지 않고, 0.5 eV 이상 중성자 에너지에서의 흡수선량을 고속중성자선량으로 정의하였다.

3. 측정장비 및 방법

하나로 원자로 열중성자 조사장치의 선량평가 항목으로는 팬텀 매질 내 깊이에 따른 열중성자 및 고속중성자 선속율과 고속중성자 및 감마선의 흡수선량으로 구분하였고, 조사장치 인출부에서 방출되는 중성자빔의 편평도를 통한 선질 검증을 위해 열중성자속과 감마선량의 빔 프로파일을 측정하였다. 선량측정은 임상치료 시간 단축을 위해 원자로 최대출력인 30 MW에서 수행되었고, 여과장치를 액체 질소로 냉각하지 않은 상태에서 측정하였다. 이는 전산계산의 결과 여과장치를 액체 질소로 냉각할 경우 열중성자속이 약 30% 정도 증가되는 효과⁹⁾가 있지만 감마선량도 같은 비율로 증가되기 때문에, 액체 질소로 냉각하지 않은 중성자빔이 임상실험을 위한 충분한 조건을 갖추고 있는지를 평가하기 위함이다. 그리고 콜리메이터는 직경 14 cm와 10 cm의 두 종류 중에서 임상실험에 주로 사용될 14 cm 직경의 콜리메이터를 설치하였다.

열중성자 선속 측정을 위해 직경 0.1 mm의 Au wire를 이용한 방사화 분석을 수행하였고, 카드뮴(cadmium)은 0.8 mm 두께의 박막을 사용하였다. HPGe 검출기(High purity germanium, Canberra, USA)로 측정된 절대 방사능으로부터 물서터의 총, 배수 시간을 고려하여 중성자속을 구하였으며, 직경 0.1 mm Au wire의 자체 흡수인자(0.9402)를 고려하여 최종 중성자속을 구하였다. 고속중성자 및 감마선량 측정은 중성자에 서로 다른 감도를 가지는 두 이온전리함을 기본 선량계로 하였다. 중성자에 민감한 검출기로 조직 등가 물질인 A-150 플라스틱으로 제작된 TE (Tissue Equivalent) 이온전리함인 Spokas Thimble T2 (Exradin, USA)와 Spokas Parallel Plate 11 TW를, 중성자에 민감하지 않은 검출기로는 비수소계의 Magnesium 이온전리함인 Spokas Thimble M2와 열형광선량계(TLD-700, Harshaw, USA)를 사용하였다. 그리고 선량 측정을 위해 이온전리함들은 Co-60 표준선원에 대해 검교정 작업을 시행하였고, 열형광선량계는 검교정 작업을 3회 시행하여 감도 오차범위 3% 이내의 소자만 선별하여 각 소자별로 감도 보정계수를 산출하여 측정에 사용하였다. 선량측정과 교정계수 산출 시 이온전리함에는 고순도의 TE 기체(gas) 와 Ar 기체를 분당 5 cc로 주입(flushed)하였다. 여기서 TE 기체의 질량 구성비는 ICRU 권고안에 따라 CH₄: 64.4%, CO₂: 32.4%, N₂: 3.2% 분압비로 하였고,⁶⁾ 전기계는 Unidos 10005 (PTW, Germany)를 사용하였다. 모든 선량측정은 5 mm 두께의 PMMA로 제작된 물팬텀(43×43×30 cm³)을 사용하여 측정하였으며, 물 속에 함유된 불순물과 중성자의 이차반응을 최소화하기 위해 증류수를 사용하였다. 그리고 측정 결과는 MCNP (Monte Carlo N-Particle) 4B 전산계산 결과와 상호 비교하였다.

4. MCNP 전산 계산

BNCT 열중성자 조사장치의 중성자 및 감마 예측에는 MCNP 4B 수송코드를 이용하였다. 노심과 BNCT 조사장치를 모두 포함하여 계산하기에는 모델의 크기가 크므로 여과기 바깥의 환자 조사 위치에서 계산 결과의 표준 편차(fractional standard deviation, fsd)가 클 것으로 예상되어 두 단계로 나누어 분석하였다. 즉, 노심 및 반사체를 포함하는 영역을 대상으로 노심 계산을 하여 BNCT 조사장치가 설치된 IR 수평공 선단에서의 중성자와 감마 스펙트럼과 선속을 구한 후, 이들을 선원으로 이용하여 IR 수평공 내에서 중성자 및 감마 분포를 계산하였다. 선원의 스펙트럼으로는 열중성자의 경우 맥스웰 분포, 열외중성자의 경우는 1/E 분포를, 그리고 고속중성자의 경우에는 Watt 핵분열 스펙

트럼을 가정하였다. 그리고 IR공 선단에서 중성자공으로 나가는 성분은 전산 계산의 결과, 고체각(4π)에 대한 평균에 대해 열중성자는 1.107, 고속중성자는 0.964, 그리고 감마선은 0.828의 비율로 보정하였다.

결 과

BNCT를 위한 열중성자 조사장치의 열중성자 선속 및 선량측정을 위해 방사화 분석, 이온전리함과 열형광선량계를 사용하였다. Co-60 감마선으로 교정을 실시한 결과 Spokas Thimble T2, Spokas Thimble M2 및 Spokas Parallel Plate 11TW 이온전리함 각각에 대해서 공기 커마 교정계수(N_K)는 5.006 cGy/nC, 3.909 cGy/nC, 3.390 cGy/nC이었고, 공기 흡수선량 교정계수($N_{D,air}$)는 4.741 R/nC, 3.702 R/nC, 3.211 R/nC이었으며, 조직에 대한 흡수선량 교정계수(N_T)는 5.422 cGy/nC, 4.233 cGy/nC, 3.671 cGy/nC 등으로 나타났다(Table 1).

방사화 분석 결과 열중성자속은 물팬텀 10 mm와 20 mm 깊이에서 각각 $1.01E9 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 과 $5.99E8 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 이었고, 고속중성자속은 10 mm 깊이에서 $7.38E6 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 로 미세

Table. 1. Co-60 calibration factors of the exradin spokas ionization chambers.

Chamber	$N_{D,air}$ (cGy/nC)	N_K (cGy/nC)	N_T (cGy/nC)
Spokas thimble T2	4.741	5.006	5.422
Spokas thimble M2	3.702	3.909	4.233
Spokas parallel plate 11TW	3.211	3.390	3.671

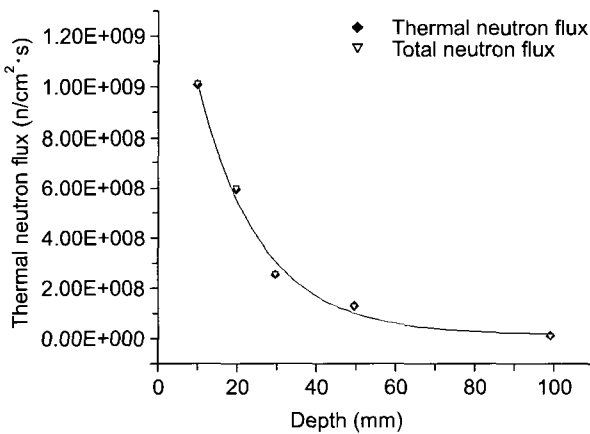


Fig. 2. The distribution of thermal and total neutron flux in water phantom measured by activation analysis using Au wire of 0.1 mm diameter.

하였다(Fig. 2). 열중성자 선속은 깊이에 따라 급격하게 감소하고 있고 열중성자 에너지 이상 열외중성자 및 고속중성자속의 함유 정도는 매우 낮은, 고순도의 열중성자 빔 특성을 보이고 있었다. MCNP 전산계산 결과 열중성자속은 물팬텀 10 mm 깊이에서 $1.16E9 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ (fsd 0.0178)로 나타나 측정값 보다 14% 정도 높게 나타났다(Fig. 3). 그리고 깊이 10 cm 이상에서 방사화 분석에 의한 측정값은 거의 검출이 불가할 정도로 미세하였으나, 계산값은 $1.00E6 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ (fsd 0.0248)의 선속을 보이고 있다.

Fig. 4는 이온전리함과 열형광선량계로 측정한 고속중성자 및 감마선량을 분포이다. 감마선량율은 물팬텀 20 mm 깊이에서 5.10 Gy/hr로 나타났고, 측정 결과는 MCNP 계산

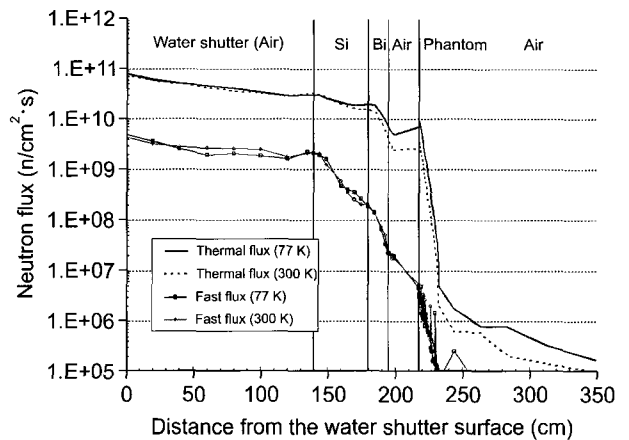


Fig. 3. The distribution of thermal and fast neutron flux in water phantom calculated by MCNP transport code 4B.

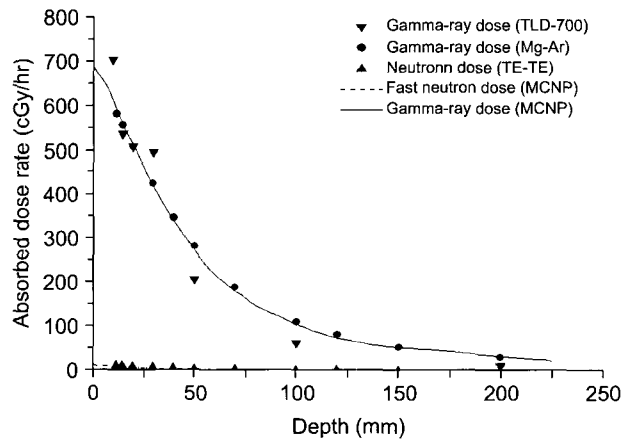


Fig. 4. The distribution of fast neutron and gamma-ray dose rate in water phantom measured by paired ionization chambers and TLD-700.

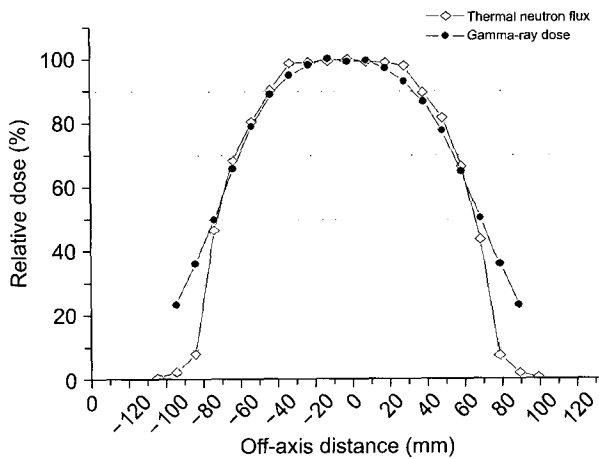


Fig. 5. The dose profile characteristics of thermal neutron flux and gamma-ray dose rate at 20 mm depth in water phantom measured by Au activation analysis and TLD-700.

결과인 5.15 Gy/hr (fsd 0.0199)와 5% 편차 이내로 잘 일치하고 있다. 그러나 열형광선량계로 측정된 감마선량율은 깊이 40 mm 이내에서는 고평가되다가 이보다 깊은 영역에서는 저평가되는 경향을 보이고 있다. 고속중성자선량율은 전체 영역에서 0.1 Gy/hr로 무시할 정도로 낮게 나타났다. Fig. 5는 물팬텀 20 mm 깊이에서의 열중성자 선속과 감마선량의 빔 프로파일 특성을 보여주고 있다. 콜리메이터 중심을 기준으로 ±35 mm 영역에서 5% 이내의 편평도를 보이고 있으며, 콜리메이터 크기(140 mm)와 동일한 ±70 mm 지점에서 열중성자 선속과 감마 선량 모두 약 50% 정도의 상대선량을 보이고 있다.

고찰 및 결론

열중성자 및 열외중성자빔의 선량 측정은 고속중성자와 달리 검출기의 각종 결정 인자에 대한 연구가 전 세계적으로 수행된 바가 거의 없고, 측정 방법도 매우 어려운 것으로 알려져 있다. 따라서 측정 결과의 신뢰 수준을 높이기 위해서는 전산 계산의 결과와 비교하는 것이 가장 좋은 방법으로 알려져 있고, 중성자 측정의 난이도를 감안할 때 결과 비교오차가 10% 이내이면 연구결과에 신뢰성을 부여할 수 있는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서 측정된 선량값은 대부분의 항목에서 MCNP 전산계산의 결과와 5% 이내에서 잘 일치하였다. 하지만 열중성자속의 결과는 최대 14% 정도의 오차가 발생되었고, 50 mm 이상의 깊이에서는 거의 검출이 불가할 정도로 미세하였다. 이는 전체 중성자속

에서 열중성자속을 선별 산출하기 위해 Au wire의 차폐체로 사용한 카드뮴 박막이, 차폐하지 않은 시료의 감도에 간섭 현상을 유발시켜 측정 결과가 전산 계산의 결과 보다 적게 나타난 것으로 판단되었다. 이와 같은 결과는 열형광선량계의 경우에도 비슷한 양상을 보여 물팬텀 40 cm 이상의 깊이에서 계산값 보다 적은 결과를 보이고 있다. 이와는 반면에 팬텀 표면에서 가까운 40 cm 이내의 열형광선량계 측정값은 이온전리함 측정값과 MCNP 계산값에 비해 10% 내외로 높게 나타났다. 이와 같은 결과는 두 가지 원인에 기인하는 것으로 판단된다. 첫째, 일반적으로 TLD-700 열형광선량계의 사용범위는 10 Gy까지로 알려져 있지만 고밀도 열중성자장에서 과도한 응답특성(supra-lineality)이 나타나는 것으로 판단된다. 열중성자 조사장치를 통해 팬텀으로 입사되는 중성자장에는 연속적 에너지를 갖는 감마선이 동반되어 있어, 1 MeV 이하의 저에너지 감마선에 의한 과도 응답의 에너지 의존특성이 발생된 것으로 보인다. 둘째, TLD-700 열형광선량계의 교정 감마선에 대한 중성자선의 상대적 측정감도(k_w)를 열중성자를 기준으로 하여 0.01로 결정하였지만, 이 값은 중성자에너지에 비례하여 증가하는 경향을 보인다. 전체 중성자속에서 고속중성자속의 존재 비율이 1% 미만이지만 상대적 측정감도는 열중성자에 비해 수 배 정도 높다. 보고⁵⁾에 의하면 1 MeV 고속중성자에 대한 TLD-700 열형광선량계의 k_w 값은 0.05 정도이다.

실험의 결과는 앞서서도 언급했듯이 고순도의 열중성자장의 특성을 잘 나타내고 있다. 다만 BNCT 임상연구를 위한 최소의 열중성자 선속을 $1E9 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 정도로 간주할 때, 이 조건을 만족하는 매질 내 깊이는 15 mm 내외가 될 것이다. 이번 측정은 액체질소로 여과장치를 냉각하지 않은 상태에서 진행되었다. 본 실험에 앞서 수행된 열중성자 조사장치의 기본특성 평가를 통해 액체질소로 여과장치를 냉각할 경우 열중성자 선속이 약 30% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 열중성자속의 증가와 함께 감마선속도 같은 비율로 증가하기 때문에 치료 시간을 단축할 수는 있지만, 정상조직에 불필요한 선량이 많이 조사되는 단점이 있어 임상 연구에서 여과장치를 냉각할 것인지는 의료진과의 충분한 논의가 필요할 것으로 보인다.

이번 연구와 같이 고밀도 열중성자장에서의 중성자 및 감마선량 측정은 각 검출기들의 열중성자 감도 결정이 매우 중요하다. 이와 같은 실험을 위해서는 검출기를 열중성자로부터 차폐할 ${}^6\text{LiF}$ 나 ${}^6\text{Li}_2\text{CO}_3$ 와 같은 Li-6 함유 차폐체를 이용한 실험이 수행되어야 하지만, 전략 물질로 구분되어 있기 때문에 재료의 수급이 어려워 실험을 수행하지 못

하였다. 대신에 MCNP 전산계산의 결과와 Raaijmakers 등의 실험 결과를 참고하여 검출기의 열중성자 감도를 결정하였다. 하지만 BNCT 임상 효과를 향상시키기 위해서는 재료의 수급을 통한 추가적인 실험으로 각 검출기의 보다 정확한 열중성자 감도 결정이 이루어져야 할 것이다. 결론적으로 본 실험의 결과는 BNCT 임상 연구를 위한 기초 자료 및 선량 평가 자료로 충분히 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 아울러 열중성자 조사장치를 설계 및 제작하는 시점에서 충분히 예견했듯이 BNCT 임상 실험을 위해서는 두개부(skull)를 절개(resection)하는 외과적 수술은 필수적이며, 종양의 위치나 크기에 따라 제한적으로 진행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Barth RF, Coderre JA, Vicente MH, et al: Boron neutron capture therapy of cancer: Current status and future prospects. Clin Cancer Res 11:3987-4002 (2005)
2. Sauerwein W: Principles and history of neutron capture therapy. Strahlenther Onkol 169:1-6 (1993)
3. Bartelink H, Mijnheer B: Is there a future for neutron capture therapy. Int J Rad Oncol Biol Phys 36:267-268 (1996)
4. 전병진, 이창훈, 김종경 등: 하나로를 이용한 암치료 장치 개발 및 붕소중성자포획 치료 연구. KAREI/RR-2364/2002 (2002)
5. ICRU 26: *Neutron Dosimetry for Biology and Medicine*. International Commission on Radiation Units and Measurements. Bethesda, Maryland (1976)
6. ICRU 45: *Clinical Neutron Dosimetry Part I: Determination of Absorbed Dose in a Patient Treated by External Beams of Fast Neutrons*. International Commission on Radiation Units and Measurements. Bethesda, Maryland (1989)
7. Raaijmakers CJ, Konijnenberg MW: Determination of dose components in phantoms irradiated with an epithermal neutron beam for boron neutron capture therapy. Med Phys 22:321-329 (1995)
8. Raaijmakers CJ, Nottelman PD, Verhagen HW: The neutron sensitivity of dosimeters applied to boron neutron capture therapy. Med Phys 23:1581-1589 (1996)

1. Barth RF, Coderre JA, Vicente MH, et al: Boron neutron capture therapy of cancer: Current status and future prospects.

Dosimetric Characteristics of a Thermal Neutron Beam Facility for Neutron Capture Therapy at HANARO Reactor

Dong-Han Lee*, Mi-Sook Kim[†], Soheigh Suh*, Young Hoon Ji*, Moon-Sik Choi*, Jae-Hong Park[†],
Kum-Bae Kim*, Seung-Yul Yoo[†], Myong-Seop Kim[‡], Byung-Chul Lee[‡],
Ki-Jung Chun[‡], Jae-Won Cho[§]

*Radiation & Medical Science Research Center, [†]Department of Radiation Oncology,
Korea Institute of Radiological & Medical Sciences, [‡]HANARO Application Research Center,
Korea Atomic Energy Research Institute, [§]Department of Electrophysics, Kwang Woon University

A thermal neutron beam facility utilizing a typical tangential beam port for Neutron Capture Therapy was installed at the HANARO, 30 MW multi-purpose research reactor. Mixed beams with different physical characteristics and relative biological effectiveness would be emitted from the BNCT irradiation facility, so a quantitative analysis of each component of the mixed beams should be performed to determine the accurate delivered dose. Thus, various techniques were applied including the use of activation foils, TLDs and ionization chambers. All the dose measurements were performed with the water phantom filled with distilled water. The results of the measurement were compared with MCNP4B calculation. The thermal neutron fluxes were $1.02E9$ n/cm² · s and $6.07E8$ n/cm² · s at 10 and 20 mm depth respectively, and the fast neutron dose rate was insignificant as 0.11 Gy/hr at 10 mm depth in water. The gamma-ray dose rate was 5.10 Gy/hr at 20 mm depth in water. Good agreement within 5%, has been obtained between the measured dose and the calculated dose using MCNP for neutron and gamma component and discrepancy with 14% for fast neutron flux. Considering the difficulty of neutron detection, the current study support the reliability of these results and confirmed the suitability of the thermal neutron beam as a dosimetric data for BNCT clinical trials.

Key Words: Neutron capture therapy, HANARO reactor, Neutron dosimetry, Ionization chamber