

Construction of voxel head phantom and application to BNCT dose calculation

Choon-sik Lee, Choon-ik Lee and Jai-ki Lee
Hanyang University

Voxel머리팬텀 제작 및 붕소중성자포획요법 선량계산에의 응용

이춘식 · 이춘익 · 이재기
한양대학교 원자력공학과

(2001년 4월 1일 접수, 2001년 6월 1일 채택)

Abstract - Voxel head phantom for overcoming the limitation of mathematical phantom in depicting anatomical details was constructed and example dose calculation for BNCT was performed. The repeated structure algorithm of the general purpose Monte Carlo code, MCNP4B was applied for voxel Monte Carlo calculation. Simple binary voxel phantom and combinatorial geometry phantom composed of two materials were constructed for validating the voxel Monte Carlo calculation system. The tomographic images of VHP man provided by NLM(National Library of Medicine) were segmented and indexed to construct voxel head phantom. Comparison of doses for broad parallel gamma and neutron beams in AP and PA directions showed decrease of brain dose due to the attenuation of neutron in eye balls in case of voxel head phantom. The spherical tumor volume with diameter, 5cm was defined in the center of brain for BNCT dose calculation in which accurate 3 dimensional dose calculation is essential. As a result of BNCT dose calculation for downward neutron beam of 10keV and 40keV, the tumor dose is about doubled when boron concentration ratio between the tumor to the normal tissue is $30 \mu\text{g/g}$ to $3 \mu\text{g/g}$. This study established the voxel Monte Carlo calculation system and suggested the feasibility of precise dose calculation in therapeutic radiology.

Key words : voxel Monte Carlo, voxel head phantom, MCNP, BNCT, dose calculation

요약 - 해부학적으로 단순한 수학적인형팬텀의 한계를 극복하기 위한 voxel머리팬텀을 제작하고 BNCT(Boron Neutron Capture Therapy) 시행 시 선량분포를 계산하였다. 일반목적 몬테칼로 코드인 MCNP4B의 반복구조 알고리즘을 이용하여 voxel몬테칼로 계산체계를 수립하였고 두 가지 물질로 구성된 예시적 voxel팬텀과 기하체조합팬텀의 계산값 비교를 통해 계산체계를 검증하였다. 미국 NLM(National Library of Medicine)에서 제공하는 VHP man 인체단층사진에 대한 분할 및 색인작업을 통해 voxel머리팬텀을 제작하여 AP 및 PA 방향에서 입사하는 넓고 평행한 광자 및 중성자빔에 대한 선량값을 MIRD팬텀의 계산값과 비교한 결과 중성자빔 AP방향조사 시 MIRD팬텀에서는 볼 수 없는 안구로 인한 중성자 감쇠현상을 확인할 수 있었다. 3차원 정밀계산이 필요한 BNCT 시술 시 선량분포계산을 위해 뇌 종양에 직경 5cm의 구형 뇌종양 체적을 정의하고 뇌와 종양의 붕소 함량을 조정하여 10keV 및 40keV 상부입사 중성자에 의한 장기별 흡수선량을 계산한 결과 종양에 $30 \mu\text{g/g}$, 정상세포에 $3 \mu\text{g/g}$ 의 붕소를 주입한 경우 붕소함량이 없을 때에 비해 2배 가량 큰 선량을 보였다. 본 연구를 통해 voxel몬테칼로기법을 이용한 선량평가체계를 수립하였고 정밀한 선량계산에 필요로 하는 치료방사선분야 선량계산에 실제 인체에 가까운 voxel팬텀의 응용가능성을 제시하였다.
중심어 : voxel몬테칼로, voxel머리팬텀, MCNP4B, BNCT, 선량계산

서 론

국제방사선방호위원회(ICRP)가 권고하는 방사선

방호량인 유효선량[1] 평가를 위해서는 방사선에 대한 장기별 선량분포를 알아야하며 이를 위해 수학적인형팬텀을 이용한 몬테칼로 계산방법이 사용

되어 왔다. 대표적 수학적인형팬텀인 MIRD인형팬텀[2]은 대수방정식을 이용하여 인체 외형 및 내부 각 장기의 기하학적 형태를 단순화하여 표현한 것으로 연령 20-30세, 체중 70kg 그리고 신장 170cm의 ICRP23 표준인[3]에 근거하여 제작되었으며 많은 연구자들이 이를 이용하여 다양한 방사선방호 선량계산을 수행하였다. 하지만 개발 당시 컴퓨터 계산속도의 한계로 인한 계산시간 단축을 위해 단순화된 수학적 인형팬텀은 인체의 모양을 그대로 묘사해주지 못한다는 본질적인 한계점을 안고 있다. 그림1은 MIRD인형팬텀의 머리단면과 실제 머리의 MR영상이다.

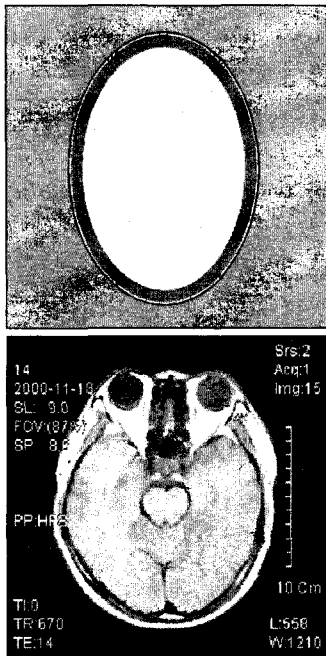


Fig. 1. Comparison between simplified MIRD head(upper) and MRI of real human head(lower).

컴퓨터 연산속도의 급격한 진보로 더 이상 단순화된 인형팬텀을 이용한 계산에 머물러 있을 필요가 없게 되었고 인체 단층영상기술의 발달로 CT나 MR영상을 이용하여 인체를 수 백만개의 미소 입방체의 집합체로 나타낸 voxel팬텀에 대한 방사선수송계산을 수행하는 voxel몬테칼로기법이 개발되었다. Voxel팬텀은 단순화된 수학적팬텀과는 달리 실제 인체에 가까운 장기모양 및 위치 등을 묘사할 수 있으며 수학적팬텀에서 묘사할 수 없었던 적색골수와 같은 중요장기도 묘사할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 일반목적의 몬테칼로 코드인 MCNP4B[4]를 이용하여 voxel몬테

칼로 계산체계를 수립하고 voxel머리팬텀을 제작하여 정확한 선량계산이 필요한 의료상 응용가능성을 타진하기 위해 BNCT(Boron Neutron Capture Therapy) 선량계산을 수행하였다.

재료 및 방법

Voxel 몬테칼로 계산체계

일반목적의 MCNP4B코드는 몬테칼로 계산기법을 사용하는 대표적인 방사선수송코드로서 광자 및 중성자를 수송할 수 있으며 4B버전부터는 전자까지도 수송할 수 있게 되었다. 본 연구에서는 voxel몬테칼로 계산을 위해 MCNP4B버전과 ENDF 감마선 단면적자료 및 RMCCS 중성자 단면적자료를 이용하였다[5]. MCNP4B의 반복구조 알고리즘(repeated structure algorithm)을 응용하여 물체를 단위 voxel로 구성된 3차원 행렬로 표현한 뒤 각 voxel에 서로 다른 물질 및 밀도를 부여한 뒤 방사선수송을 수행할 수 있도록 하였다. 계산체계의 검증을 위해 두개골과 뇌의 두 가지 성분으로 구성된 $3 \times 3 \times 3$ 행렬의 voxel팬텀(그림 2)과 기존의 기하체 조합(combinatorial geometry) 방식을 이용한 팬텀을 각각 제작하여 계산결과를 비교하였다.

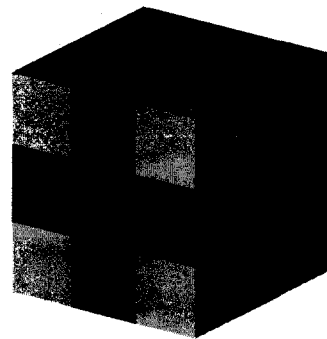


Fig. 2. An imaginary $3 \times 3 \times 3$ binary phantom composed of two material (brain and skull) for the validation of voxel Monte Carlo calculation.

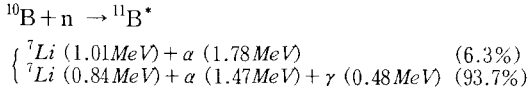
Voxel 머리팬텀

미국 NLM(National Library of Medicine)의 VHP(Visible Human Project)의 결과물로 제공되는 인체단층사진을 입수하여 voxel머리팬텀을 제작하였다[6]. NLM에서는 미국 텍사스주에서 사형

후 기증된 신장 186cm, 체중 90kg인 38세 남성 사체를 냉동시켜 1mm 간격으로 절단하여 컬러단층사진, CT 및 MR영상을 얻어낸 뒤 고해상도 그래픽파일 형태로 제공하고 있다. 본 연구에서는 머리끝부터 4mm 간격으로 55번째 절단면까지의 단층사진을 선택하여 voxel머리팬텀을 제작하였으며 제작된 voxel머리팬텀과 기존의 수학적팬텀인 MIRD인형팬텀간의 선량계산 상의 차이를 확인하기 위해 넓고 평행한 광자빔과 중성자빔을 AP 및 PA방향으로 조사시킬 때 각 팬텀의 선량분포를 계산하였다.

BNCT선량계산

BNCT는 열중성자와의 반응단면적이 큰 붕소를 종양에 집적시킨 뒤 중성자빔을 조사시켜 중성자와 붕소의 핵반응으로 방출되는 방사선을 이용하여 종양세포를 사멸시키는 기술이다. 이 때 일어나는 붕소와 중성자의 반응식은 다음과 같다.



반응 시 생성되는 ^7Li 과 알파 입자는 평균적으로 2.339MeV의 운동에너지를 가지고 있으며 각각의 비경은 $\sim 9\mu\text{m}(\text{Li})$ 와 $\sim 5\mu\text{m}(\alpha)$ 로서 일반 동물세포의 직경인 10~20 μm 보다 작아 이들 에너지의 대부분은 반응이 일어나는 종양세포에 흡수되어 종양세포를 파괴한다[7]. 그러므로 붕소를 종양세포에 선별적으로 집적시키는 기술과 함께 종양과 정상세포가 받는 정확한 선량계산이 필수적이다. 본 연구에서는 뇌속에 직경 5cm의 종양체적을 정의하였고(그림5) 1989년 MIT에서의 Workshop[8]에서 제안된 값인 30 $\mu\text{g g}^{-1}$ (종양 세포)과 3 $\mu\text{g g}^{-1}$ (정상 세포)의 붕소 집적도를 가정한 뒤 10keV와 40keV 직경15cm의 상부입사 중성자빔에 대하여 BNCT계산을 수행하였다.

결과 및 논의

Voxel 몬테칼로 계산체계

계산체계검증을 위해 뇌와 두개골의 두 가지 물질로 제작된 3×3×3 이원 voxel팬텀과 기하체조합방식(combinatorial geometry) 팬텀에 AP방향으

로 2MeV 넓고 평행한 광자빔을 조사시켜 9개 정육면체에 대해 광자플럭스를 계산하여 두 팬텀의 계산결과를 비교하였다. 그림3을 통해 두 팬텀 모두 정확하게 같은 결과값을 보임을 확인할 수 있으며 voxel 몬테칼로 계산체계에 대한 검증이 이루어졌다.

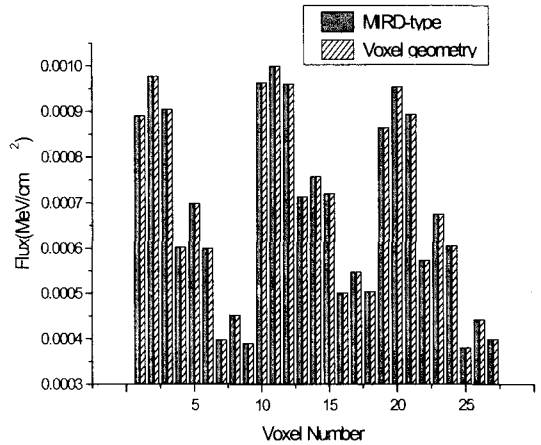
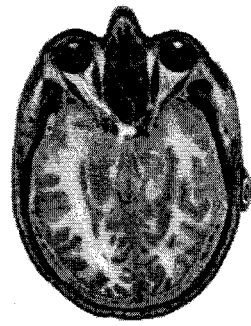


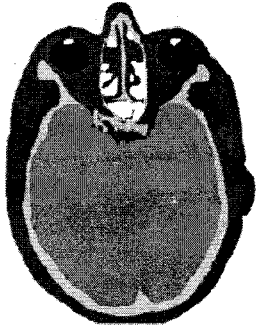
Fig. 3. Comparison of calculation result between voxel and MIRD-type phantom.

Voxel 머리팬텀

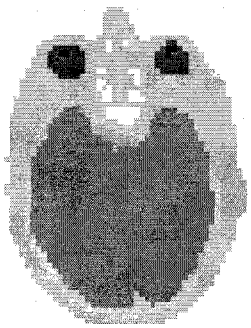
인체 해부학적 지식과 전문 그래픽 프로그램을 이용하여 55장의 단층사진에 대한 분할(segmenting)작업을 하였고 이어서 두개골, 연조직, 뇌, 안구, 수정체의 5개 장기와 공기부분을 각각 음영을 달리하여 표현하는 색인(indexing)작업을 수행하였다(그림4). 분할작업이 이루어진 단층사진에 대해 하나의 픽셀이 4mm×4mm의 정사각형이 되도록 그래픽 파일의 크기를 변환시킨 뒤 55장의 단층 영상파일을 수직으로 쌓아올려 52×66×55의 행렬로 이루어진 voxel팬텀을 제작하였다. 표1은 voxel머리팬텀의 장기별 체적 및 질량을 MIRD인형팬텀의 값과 비교한 것이며 그림5는 기존의 MIRD팬텀의 머리부분 단면과 voxel머리팬텀의 단면을 비교한 그림이다. 완성된 이진(binary)파일 형태의 voxel행렬은 비주어베이스 6.0으로 코딩된 선처리프로그램을 통해 MCNP4B의 입력문으로 변환되어 몬테칼로 계산을 수행할 수 있도록 준비되었다. 몬테칼로 계산에 사용된 물질 별 원소구성 및 비율은 표2에 제시되어 있다. 계산된 값의 상대오차를 10% 이하로 줄이기까지 모사실험 이력(history) 최대 500,000의 범위로 계산하였다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4. Steps of constructing voxel phantom (a) Transverse photo of VHP man's human head (b) Gray scale image of human head after segmenting and indexing (c) 52×66 voxel slice composed of $4\text{mm} \times 4\text{mm}$ square.

Table 1. Specification of the voxel head phantom and comparison with MIRD phantom.

Organ	Voxel phantom				MIRD phantom	
	# of voxel	Volume (cm^3)	Density (gcm^{-3})	Mass (g)	Volume (cm^3)	Mass (g)
Eye lens	8	0.5	1.00	0.5	N/A	N/A
Eye	253	16.2	1.00	16.2	N/A	N/A
Soft tissue ^{a)}	47814	3060.1	1.04	3182.5	N/A	N/A
Skull	12497	799.8	1.64	1311.7	846	1369
Void ^{b)}	103375	6616.0	0.00129	8.5	N/A	N/A
Brain	24813	1588.08	1.09	1731.0	1470	1470

^{a)} Visual nerve included

^{b)} Void in and out of phantom

Table 2. Elemental composition of 5 materials (weight fraction)

	Skull	Brain	Scalp	Air	Water
H	0.05	0.107	0.1	0.00012	0.111
C	0.212	0.145	0.204		
N	0.04	0.022	0.042	0.75	
O	0.435	0.712	0.645	0.232	0.888
Na	0.001	0.002	0.002		
Mg	0.002				
P	0.081	0.004	0.001		
S	0.003	0.002	0.002		
Cl		0.003	0.003		
K		0.003	0.001		
Ca	0.176			0.0128	

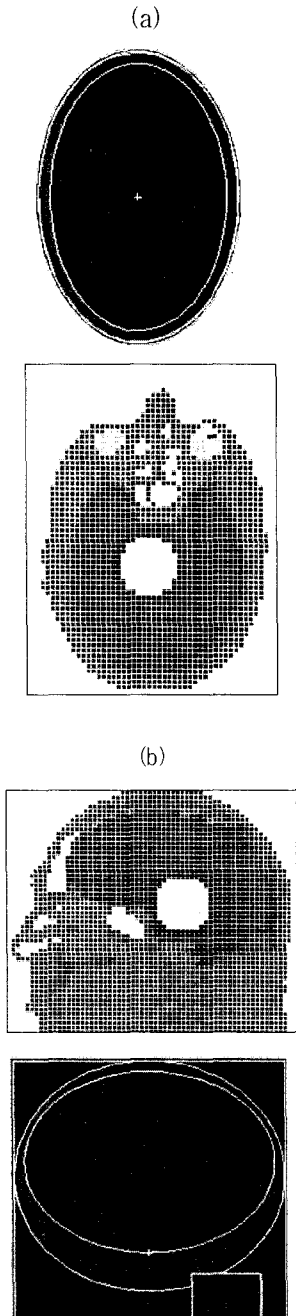


Fig. 5. Comparison of slices at (a) z=0 plane and (b) x=0 plane of voxel and MIRD phantom.

(a) slices at z=0 plane of voxel head(lower) and MIRD(upper) phantom. Tumor volume is included in voxel head phantom.

(b) Slices at x=0 plane of voxel head(lower) and MIRD(upper) phantom. Tumor volume is included in voxel head phantom.

MIRD팬텀과 voxel머리팬텀의 계산 결과 비교

Voxel머리팬텀과 MIRD팬텀 간의 비교계산을 통해 선량계산상의 차이점을 고찰하기 위해 AP와 PA방향으로 입사하는 넓고 평행한 중성자(0.04MeV) 및 광자빔(2MeV)에 대해 각각의 팬텀에서 뇌와 두개골이 받는 흡수선량을 계산하였다(표3). 계산결과를 살펴보면 MIRD팬텀의 경우 단순한 구조(그림5)로 인하여 AP와 PA방향에 관계없이 뇌선량과 두개골선량에 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 하지만 voxel팬텀의 경우 실제 인체의 머리구조와 흡사하므로 전방중성자빔 입사 시 MIRD팬텀에서는 볼 수 없는 안구로 인한 중성자 감쇄로 인해 AP와 PA방향에 따라 뇌선량에 차이가 있음을 알 수 있다(그림6). 광자빔의 경우에는 안구의 영향을 비교적 받지 않으므로 뇌선량 차이는 거의 없다. 그 밖에도 두 팬텀간의 구조 및 구성물질 차이로 인한 약간의 선량차이를 확인할 수 있다.

Table 3. Comparison of absorbed doses between MIRD and voxel phantom for broad and parallel beams.

		Absorbed Dose (10^{-15} Gy)			
		AP		PA	
		Voxel	MIRD	Voxel	MIRD
Brain	Neutron (0.04MeV)	1.584	1.910	2.251	2.039
	Photon (2MeV)	8.745	9.213	9.397	9.189
Skull	Neutron (0.04MeV)	1.241	1.353	1.242	1.341
	Photon (2MeV)	8.836	8.480	8.547	8.458

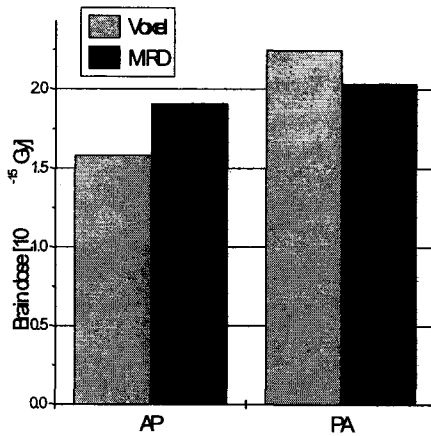


Fig. 6. Comparison of brain dose of voxel and MIRD phantoms for neutron from AP and PA directions.

BNCT 선량계산

Voxel머리팬텀의 의료상 응용가능성을 제시하기 위해 정밀한 선량계산이 요구되는 BNCT 시술 시 중성자빔으로 인한 선량계산을 수행하였다. Voxel 팬텀의 뇌중양에 직경 5cm 구형 종양체적을 정의 하였고 종양세포와 정상세포(종양을 제외한 뇌)에 각각 30 $\mu\text{g g}^{-1}$ 와 3 $\mu\text{g g}^{-1}$ 의 붕소 집적도를 가정 하였다. 일반적으로 두개골 비개방형 BNCT에서는 종양의 깊이에 따라 4eV~40keV의 열외중성자를 사용하고 있으므로[11] 본 연구에서는 10keV 및 40keV의 직경 15cm 상부입사 중성자빔을 사용하여 선량계산을 수행하였다(표4, 그림7).

정상세포에 비해서 높은 붕소 집적도를 가지는 종양의 경우 붕소를 주입한 이후 중성자를 조사했을 경우 주입 이전에 비해 10keV와 40keV 에너지 모두 약 2배 이상의 높은 흡수선량을 보이고 있다. 반면 뇌의 정상세포의 경우 붕소의 함량이 낮으므로 붕소 주입 후에도 흡수 선량이 크게 증가하지 않는다. 눈과 수정체의 경우에도 붕소 주입 이후 낮은함량의 붕소로 인한 선량상승을 볼 수 있으나 두개골의 경우에는 붕소주입 이후에도 붕소가 들어가지 않으므로 선량에 변화가 없다. 본 계산은 voxel머리팬텀의 의료상 응용가능성을 확인하기 위한 예시적 계산이며 실제 BNCT 시술 시 적용하기 위해서는 중성자에너지 및 빔크기 등에 대한 고려가 필요하다.

Table 4. Tissue doses for 10 and 40keV plane neutron beam($\phi=15\text{cm}$).

Organs	Boron-free		Boron-injected ^{a)}	
	10keV	40keV	10keV	40keV
Brain ^{b)}	2.460	2.662	2.737	2.910
Skull	1.152	1.455	1.147	1.441
Eyes	0.874	1.040	0.974	1.132
Lenses	0.860	0.935	0.898	1.035
Tumor	1.903	1.982	4.149	4.361

^{a)} 30 $\mu\text{g/g}$ of boron is injected to tumor and 3 $\mu\text{g/g}$ to normal cells except for skull.
^{b)} Tumor volume is excluded.

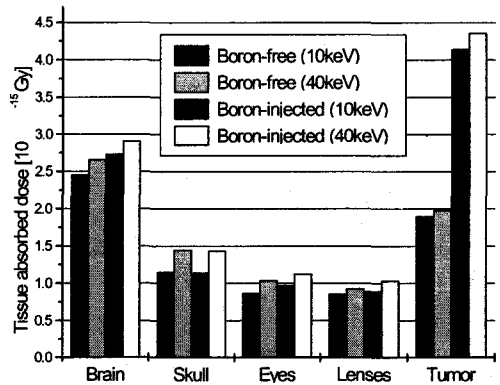


Fig. 7. Organ doses for 10 and 40keV plane neutron beam($\phi=15\text{cm}$) with boron concentration.

결론

Voxel머리팬텀을 제작하고 MIRD팬텀과의 비교 계산을 수행했으며 의료상 응용을 위한 예시적 계산으로 BNCT선량계산을 수행하였다. VHP man의 머리단층 영상자료를 이용하여 voxel머리팬텀을 구성하여 MIRD팬텀과의 비교계산을 수행한 결과 단순화된 MIRD팬텀에 비해 voxel팬텀에서 실제 인체구조를 반영한 정확한 선량계산이 이루어짐을 확인하였다. BNCT선량계산을 위해 voxel머리팬텀 내 종양체적을 정의하고 붕소함량 변화에 따른 선량변화를 관찰한 결과 붕소주입 이후 정상조직의 선량에는 큰 변화가 없는 반면 종양의

선량은 2배가량 증가함을 확인하였다.

본 연구를 통해 voxel팬텀을 이용한 voxel몬테칼로 계산체계를 수립하였고 기존의 단순화된 수학적팬텀을 이용한 계산으로는 부족한 치료방사선 분야에서의 정밀계산을 위해서는 인체를 보다 근접하게 모사해주는 voxel팬텀이 이용될 수 있을 것으로 보이며 나아가 전신voxel팬텀제작을 통해 인체의 다양한 장기에 대한 선량계산 및 특정 치료행위에 대한 선량계산이 수행될 수 있을 것이다.

Research Reactor(MITR-II)," in: *Neutron Beam Design, Development and Performance for Neutron Capture Therapy*, (O.K. Harling, J.A. Barnard, and R.G. Zamenhof, eds., Plenum, New York(1990).

참고문헌

1. International Commission on Radiological Protection, *1990 Recommendation of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 60, Pergamon Press(1990).
2. W.S.Snyder, M.R.Ford and G.G.Warner, "*Estimates of specific absorbed fraction for photon sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom*", Society of nuclear medicine, New York, MIRD Pamphlet No.5. Revised(1978).
3. International Commission of Radiological Protection, "*Report of the Task Group on Reference Man*", ICRP Publication 23, Pergamon Press(1975).
4. LANL Group X-6, "*MCNP-A General Monte Carlo Code N-Particle Transport Code Version 4B*", LA-12625-M(1997).
5. J.H.Hubbell, W.J.Veigele, E.A.Briggs, R.T. Brown, D.T.Cromer and R.J.Howerton, "Atomic Form Factors, Incoherent Scattering Functions, and Photon Scattering Cross Sections", *J. Phys. Chem.*, Ref.Data 4,471(1975).
6. Victor M. Spitzer, David G. Whitlock, *Atlas of the Visible Human Male*, pp. xi-xvii, Jones and Bartlett Publishers, London(1998).
7. 방사선종합연구소, *가속기를 이용한 BNCT용 열의중성자빔의 개발*, 한양대학교 방사선종합연구소 최종보고서(1997).
8. S.D. Clement, J.R. Choi, R.G. Zamenhof, J.C. Yanch, and O.K. Harling, "Monte Carlo Methods of Neutron Beam Design for Neutron Capture Therapy at the MIT