

# 소아백혈병의 전신방사선조사 시 조직보상체의 두께변화에 따른 선량평가

## Total Body Irradiation of Childhood Leukemia

dose Evaluation due to Changes in the Thickness of the Tissue Compensators

이동연, 김창수, 김동현, 김정훈  
부산가톨릭대학교 방사선학과

Dong-Yeon Lee(gymnist@naver.com), Chang-Soo Kim(cszzim@cup.ac.kr),  
Dong-Hyun Kim(dhkim@cup.ac.kr), Jung-Hoon Kim(donald@cup.ac.kr)

### 요약

전신방사선조사(Total Body Irradiation; TBI)는 백혈병의 치료방법 중의 하나인 조혈모세포 이식법의 전처치로 쓰인다. 2013년 장기이식관리센터 자료에 의하면 조혈모세포이식법의 건수는 계속 늘어나고 있다고 보고되었다. 하지만 현재 TBI 시행하기에 앞서 선량에 대한 평가는 미미한 실정이다. 특히 소아의 경우 방사선감수성이 민감하기 때문에 TBI 시행 전 정확한 선량평가가 시행되어야 할 것으로 판단된다. 이에 본 연구는 TBI 시행 시 사용되는 조직보상체의 두께의 변화에 따라 표면선량과 심부장기선량에 대하여 선량평가를 한 후 가장 이상적인 조건을 찾고자 하였다. 그 결과, 표면선량은 에너지 4 MV, SSD 280 cm, 조직보상체의 두께가 0.5 cm일 때 5.84 mGy/min 으로 가장 높은 수치를 나타내었다. 또한 조직보상체의 두께가 1 cm 이하였을 때 TBI에서 가장 이상적인 선량분포를 나타냄을 알 수 있었다.

■ 중심어 : | 소아백혈병 | 전신방사선조사 | MCNPX |

### Abstract

Total body irradiation use one of the pre-treatment as hematopoietic stem cell transplantation in the treatment of leukemia. According to the study of Korean network for organ sharing 2013 report, continue to increase the number of hematopoietic stem cell transplantation. however, the current dose evaluation fall short before treatment. So purpose of this study is Surface dose and deep organ dose evaluation and then find the most ideal conditions when change of the thickness on tissue compensator in TBI. Result, surface dose in 4 MV, SSD 280 cm, compensators thickness 0.5 cm, was measured the highest dose 5.84 mGy/min. And the ideal dose showed when compensator thickness less than 1 cm.

■ keyword : | Leukemia | Total body Irradiation | MCNPX |

## 1. 서론

소아백혈병의 치료방법으로 쓰이는 조혈모세포이식법은 골수, 말초혈, 제대혈 세 가지로 분류한다[1]. 2012

년 질병관리본부의 통계연보에 의하면 조혈모세포이식법의 전체 수는 증가하고 있다고 보고되었다[1][2]. 조혈모세포이식법의 전처치로서 항암화학요법과 전신방사선조사(Total Body Irradiation; TBI) 두 가지가 있다.

접수일자 : 2014년 01월 14일

수정일자 : 2014년 02월 24일

심사완료일 : 2014년 03월 12일

교신저자 : 김정훈, e-mail : donald@cup.ac.kr

항암화학요법과 비교하였을 때 TBI는 투여 자체가 어렵지 않으며, 경제적이고, 다른 항암제와의 교차 내성이 없으며, 혈류량과 관계없이 전신에 균일하게 조사할 수 있어 항암제처럼 침투가 어려운 조직이나 기관이 없다는 장점이 있다[3]. 단점으로는 방사선으로 인한 부작용이며, 특히 소아의 경우 방사선 감수성이 높기 때문에 방사선으로 인한 부작용의 위험이 크다[4]. 그렇기 때문에 TBI 시행 시 정확한 선량평가가 이루어져야 한다. TBI의 총 처방선량은 12 Gy~16 Gy이며, 한번에 2 Gy~3 Gy를 하루에 2번 정도 3~4 일 동안 총 5~6 회 분할조사하며, 표면선량에 처방선량의 90 %이상을 처방해야한다[5]. 또한 전신을 포함해야 하기 때문에 선원과 환자와의 거리(source surface distance; SSD)의 확보는 필수적이다. 하지만 현재 임상에서는 공간 확보 때문에 치료실의 크기에 제약이 있다. 이에 조직보상체를 사용하여 표면선량을 높이고 있으며, 조직보상체 사용의 경우, 현재 그 기준이 명확히 제시되어 있지 않다. 다만 이론적으로 조직보상체의 두께는 아크릴 재질 사용 시 1~2 cm 정도 사용하고 환자에게는 가능한 근접하여 사용하기를 권고하고 있다[5]. 그러나 실제 임상에서는 조직보상체와 환자사이의 거리를 이론만큼 근접하기에는 불가능 하다. 이에 본 연구는 실제 임상에서 선량계를 이용하여 인체 장기의 선량을 평가하는데 한계가 있기 때문에 컴퓨터를 이용한 가상의 공간에서 소아용 모의피폭체를 사용하여 모의실험 하였다[6]. 먼저 조직보상체를 사용하지 않고 광자의 에너지와 SSD의 변화에 따른 장기의 선량평가를 한 후, 조직보상체와 환자와의 거리는 30 cm로 고정하고 방사선의 에너지, SSD, 그리고 조직보상체의 두께 변화에 따른 선량의 변화가 어떠한지 평가하고자 하며, 이를 바탕으로 소아 백혈병의 TBI 시행 시 조직보상체의 조건에 따라 변하는 표면선량과 각 장기별 선량에 대해 가장 이상적일 때의 기하학적 조건을 제안하고자 한다.

## II. 실험 및 방법

### 1. MCNPX(Monte carlo N-particle)

MCNP- code는 가상의 공간에서 모의실험을 하는 프로그램이다. 몬테칼로 기법을 이용한 계산코드 중 하나로서 미국의 핵무기 연구소인 로스알라모스 국립연구소에서 개발한 프로그램이다. 전자, 광자, 중성자, 양성자 등 총 34개의 입자 수송이 가능하고 광자의 경우 1 keV에서 100 GeV 까지의 수송해석이 가능하다[7]. 다양한 종류의 계산 결과와 선원향을 정의할 수 있도록 되어 있으며, 3차원적 모사실험도 가능하도록 되어 있다[8]. 또한 Tally 명령어를 사용하여 입자에 대한 플루언스 에너지 분포 등의 물리량을 계산 할 수 있다. 단점으로는 통계적, 확률적 오차를 믿을 만한 범위까지 줄이기 위해서 많은 전산 시간이 소요된다는 점이다[9].

### 2. 선량 평가 방법

일반적으로 MIRD형 모의피폭체는 인체의 장기를 타원, 원뿔, 평면 및 원통 등으로 구성한다. 또한 인체의 장기를 2차원 수학방정식을 이용하여 3차원 공간 내에 표현하였다. 일반적 방정식은 다음 식 (1)과 같다[10]. 이때 Z-축은 발에서 머리방향, X-축은 오른쪽에서 왼쪽방향, Y-축은 앞면에서 뒷면으로 가는 방향으로 지정하였다. 이 때  $A_t$ 와  $B_t$ ,  $C_t$ 는 각각 X, Y, Z 축 방향의 최대값을 나타낸다. 부등호( $\leq$ )는 각각의 수식에 정의되는 표면의 안쪽에 위치한 점들과 그 면 위에 존재하는 점들을 포함한다[11].

$$\left(\frac{x}{A_t}\right)^2 + \left(\frac{y}{B_t}\right)^2 \leq 1, 0 \leq z \leq C_t \quad (1)$$

본 연구에서 사용한 소아용 모의 피폭체는 변형된 MIRD형 모의피폭체로서 UF-Rivised라는 이름을 가지고 있다. UF-Rivised 모의피폭체는 1960년대부터 인체 내부장기의 피폭선량을 측정하기 위해 ORNL (Oak Ridge National Laboratory)에서 MIRD형 모의피폭체를 개발한 것을 바탕으로 Florida 대학에서 수정하여 표현하였다. 기존의 ORNL 모의피폭체보다 인체의 장기의 구성을 총 22가지의 물성으로 더 세분화하여 표현하였고, 또한 성별도 구별하였으며 연령도 신생아, 1세, 5세, 10세, 15세, 성인으로 나누어 표현하였다[12]. 모의

피폭체의 모습은 [Fig. 1]으로 표현하였다.

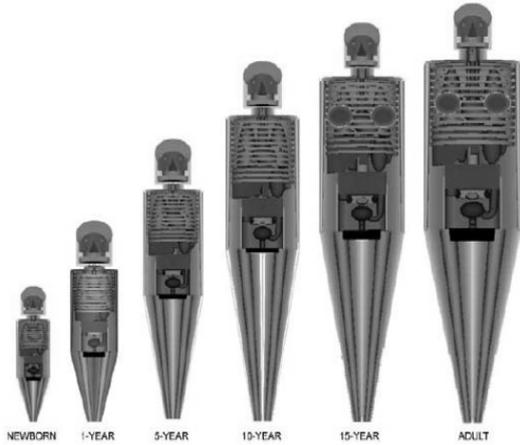


Fig. 1. UF-Revised MIRD Phantoms

장기의 물성은 국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection; ICRP) 89[13], 국제 방사선 단위 측정 위원회(International Commission on Radiation Units and Measurements; ICRU) 46[14]를 바탕으로 표현하였다. 각 장기별 구성된 물질은 수소, 탄소, 질소, 산소를 기본으로 구성되었고 나트륨, 인, 황, 염소, 칼륨 등이 사용되어 장기의 물성을 표현하였다. 각 장기별 물질 구성 비율은 수소, 탄소, 질소, 산소가 99% 안에서 비율이 각기 달랐고, 그 외의 성분들은 1% 안에서 구성 비율이 각기 달랐다. 표현된 인체 장기들의 밀도 및 부피는 인체와 흡사하게 각각 다르게 표현하였다. 대표적으로 피부 밀도 1.09 g/cm<sup>3</sup>, 부피 514.74 cm<sup>3</sup>, 폐 밀도 0.26 g/cm<sup>3</sup>, 부피 980 cm<sup>3</sup>, 뼈 밀도 1.04 g/cm<sup>3</sup>, 부피 7152.24 cm<sup>3</sup>로 표현되었다.

본 연구에서 사용한 모의피폭체는 소아백혈병이 가장 많이 발생하는 5세용 모의피폭체이며, 키는 110 cm, 몸무게는 18 kg 이다.

이를 바탕으로 광자의 에너지는 4, 10 MV, SSD 280 cm, 320 cm, 360 cm 세 가지 조건, 조직보상체와 환자와의 거리 30 cm로 설정하였다. 조직보상체의 두께 0.5 cm, 1 cm, 1.5 cm, 2 cm, 3 cm 다섯 가지 조건을 실험하였다. 또한 사용한 조직보상체는 Plexiglas (C<sub>5</sub>O<sub>2</sub>H<sub>8</sub>, 밀도 1.16 g/cm<sup>3</sup>)를 선택하였다. 이후 모의실험 조건에 따른 표면 선량 및 각 장기별 선량을 평가하였다.

### III. 결 과

#### 1. 전신방사선조사에 따른 표면선량 측정

조직보상체 두께, 에너지 및 환자와의 거리에 따른 표면선량 측정 결과 [Fig. 2][Fig. 3]과 같다. 에너지 4 MV이며, SSD는 280 cm 이고 조직보상체의 두께는 0.5, 1, 1.5, 2, 3 cm의 순서로 표면선량의 값은 5.84, 5.73, 5.62, 5.52, 5.37 mGy/min 으로 나타났다. SSD가 320 cm 에서는 5.04, 4.95, 4.83, 4.76, 4.62 mGy/min 으로 나타났다. SSD가 360 cm 에서는 4.40, 4.29, 4.21, 4.15, 4.03 mGy/min 으로 나타났다. 에너지가 10 MV의 경우 SSD는 280 cm 에서 표면선량의 값은 조직보상체의 두께 순서대로 4.52, 4.49, 4.39, 4.34, 4.20 mGy/min으로 나타났다. SSD 320 cm에서는 4.03, 3.98, 3.92, 3.88, 3.73, mGy/min으로 나타났다. SSD가 360 cm 에서는 3.60, 3.57, 3.49, 3.45, 3.28 mGy/min으로 선량이 나타났다.

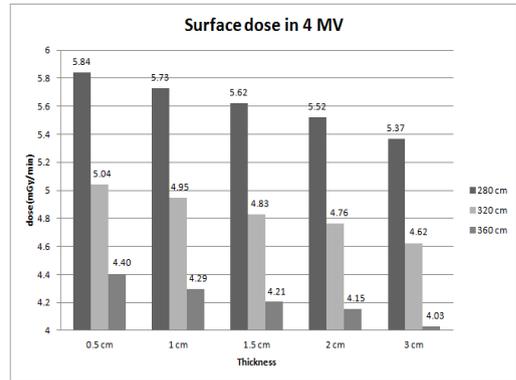


Fig. 2. Surface dose in 4 MV

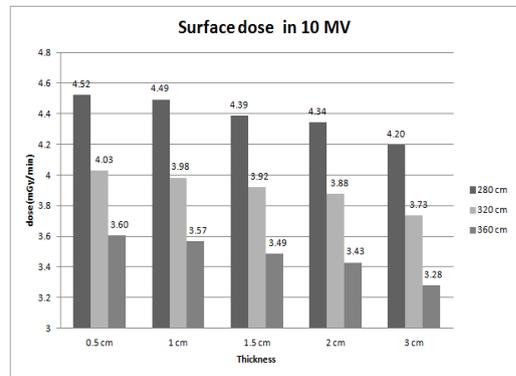


Fig. 3. Surface dose in 10 MV

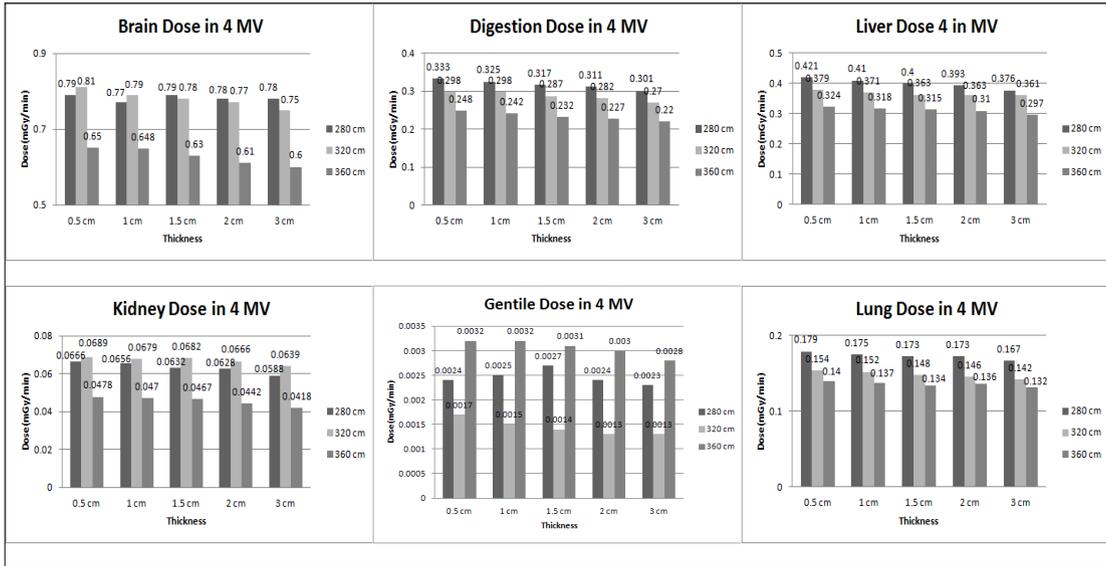


Fig. 4. Organ Dose in 4 MV

2. 심부장기선량

조직보상체와 환자와의 거리를 30 cm로 고정하고 에너지 4 MV 와 10 MV 두 가지 경우에 대하여 SSD는 280, 320, 360 cm 그리고 조직보상체의 두께는 0.5, 1, 1.5, 2, 3 cm에 대하여 모의실험 하였다. 그 결과는 [Fig. 4][Fig. 5]로 표현하였다. 선량은 두경부, 소화기계, 간, 폐, 신장, 생식선의 순서로 선량이 많이 나왔다. 4 MV 일 때 심부장기 중 두경부 에서 평균 0.74 mGy/min으로 가장 높은 선량을 보였다. 그 중 에서도 SSD는 320 cm 그리고 조직보상체의 두께가 0.5 cm일 때 0.813 mGy/min로 가장 높은 선량을 보였다. 반면에 생식선에서는 평균 0.0023 mGy/min으로 심부장기 중 가장 낮은 선량을 나타냈다. 생식선의 경우 에너지와 SSD, 조직보상체의 두께에 따른 선량변화는 미미 하였다. 10 MV 의 경우 두경부에서 평균 0.634 mGy/min으로 장기 중 가장 높은 선량을 나타냈으며, 선원과 환자와의 거리가 280 cm, 조직보상체의 두께는 0.5 cm일 때 0.7201 mGy/min으로 가장 높은 선량을 나타내었다.

IV. 고 찰

본 연구는 전신방사선조사에 따른 표면선량과 각 심부

장기에 대한 선량을 컴퓨터 프로그램을 이용한 가상의 공간에서 수학적 모의피폭체를 사용하여 평가 하였다.

그 결과 표면선량과 각 심부장기에 대한 선량이 에너지와 SSD, 그리고 조직보상체의 두께변화에 따라 변하는 것을 볼 수 있었고, 일정한 경향성을 가지고 있는 것을 알 수 있었다. 표면선량을 보면 에너지의 변화에 따른 경우 10 MV 보다는 4 MV에서 선량이 높게 나타났다. 그리고 SSD는 짧을수록 선량이 높게 나타났다. 조직보상체의 두께의 변화에 따른 선량은 두께가 두꺼워질수록 선량이 낮아지는 경향이 나타났다. 또한 4 MV 보다 10 MV 일 때 SSD의 변화에 따른 선량변화 차이가 작게 나타났다. 마찬가지로 조직보상체의 두께에 따른 선량의 변화 역시 4 MV 보다 10 MV 일 때 두께에 따른 선량 차이가 작게 나오는 경향을 보였다. 심부장기 선량의 경우 에너지와 SSD, 조직보상체의 변화에 대한 경향성은 표면선량과 유사했다. 하지만 심부장기 중 생식선과 신장에서는 경향성을 찾기 힘들었다. 생식선의 경우 일정한 선량을 보였다. 이는 상대적으로 작은 질량을 가졌기 때문으로 사료된다. 그리고 신장에서 다른 장기와는 달리 에너지 4 MV, SSD가 320 cm 일 경우가 선량이 더 높게 나왔다. 이는 신장의 경우 후복막에 위치해 있기 때문에 경향성이 나타나지 않은 것으로

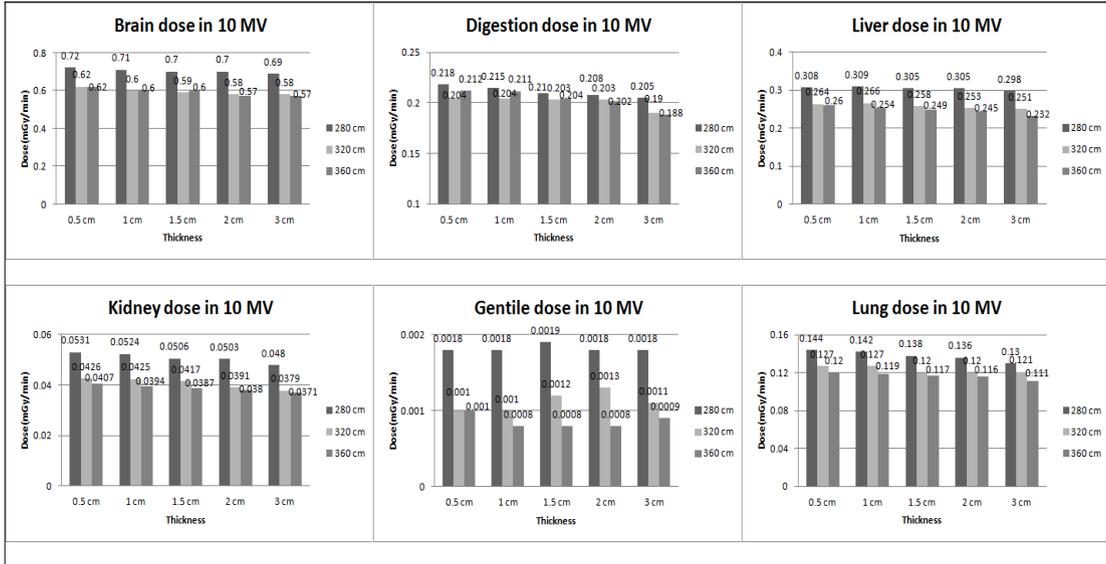


Fig. 5. Organ Dose in 10 MV

사료된다. 본 실험에서 나타난 경향성은 사용된 X선과 조직보상체인 Plexiglas와의 상호작용에 의한 것으로 판단되며, 에너지가 높을수록 선량차이가 작게 나타나는 것은 낮은 에너지에서 광전효과로 인한 차폐효과가 더 크기 때문인 것으로 사료된다. 기존의 논문 삼성서울병원의 연구[15]는 6 MV X선을 이용하여 조직등가고체팬텀(30×30×30 cm)과 평형평판형 전리함 및 전위계를 사용하여 산란판과 조직보상체의 거리에 따른 선량을 보았다. 결과 산란판과 조직등가고체팬텀사이의 거리가 50 ~ 60 cm일 때 가장 이상적인 결과를 보였다. 위 논문<sup>[15]</sup>은 조직보상체의 역할을 하는 산란판과 환자와의 거리에 대한 연구를 하였다. 본 연구와의 차이점은 가상의 공간에서 모의실험을 하였다는 것과 사용한 피폭체가 다르다는 것, 그리고 조직보상체의 두께의 변화에 따른 선량을 평가하였다는 것이다. 마지막으로 기존의 조직보상체의 두께에 관한 이론은 아크릴의 경우 1~2 cm 정도의 두께를 사용하기를 권고하고 있다[4]. 하지만 본 연구 결과 소아에서는 0.5 cm 을 사용하였을 때가 TBI 시행 시 더 좋은 선량분포를 보이는 것으로 판단되었다.

## V. 결론

본 연구는 소아백혈병 치료 시 조혈모세포 이식의 전 처치로 사용되는 전신방사선 조사에 대하여 에너지의 변화, SSD의 변화 그리고 조직보상체의 변화에 따른 표면 선량 및 각 장기별 선량을 평가하였다. 평가 결과 조직보상체의 두께에 따라 표면선량과 심부장기 선량이 차이가 있었고 경향성을 가지는 것으로 분석되었다. 또한 표면선량에서는 조직보상체의 두께가 0.5 cm을 기준으로 1 cm 와 2 cm 로 변할 때 선량의 변화는 약 0.2~0.3 mGy/min 의 선량 변화가 있었고 심부장기 선량에서는 부위에 따라 약 0.0001~0.001 mGy/min 의 선량 변화가 있는 것으로 나타났다. 이는 조직보상체의 두께가 0.5 cm정도 유지될 때 가장 이상적인 선량분포가 나오는 것으로 평가되었다. 그리고 저에너지를 사용한다면 조직보상체의 두께를 0.5 cm을 필히 사용해야 할 것으로 사료된다. 끝으로 본 연구는 조직보상체의 두께의 변화에 따른 선량을 평가하였다. 이에 본 연구를 토대로 조직보상체의 종류, 조직보상체와 환자와의 거리, 두경부와 폐, 신장, 생식선에 차폐까지 고려하여 실험을 한다면 더욱 정량적인 선량을 평가할 수 있을 것이다.

참고 문헌

[1] 질병관리본부 장기이식관리센터, 2012 장기이식 통계연보, 2013

[2] S. H. Kim and I. Y. Yu, *Identification of symptoms by treatment phases in children with leukemia*, The graduate school of nursing Yonsei University, 2009.

[3] S. J. Kim, D. G. Han, and H. J. Baek, "Comparison of Total Body Irradiation (TBI) or Non-TBI as conditioning Regimen for Stem Cell Transplantation (SCT) in Pediatric Leukemia patient," Korean Journal of Pediatrics, Vol.53, No.4, pp.538-547, 2010.

[4] 이정근, 장성주, 장영일, "소아 CT 촬영시 방사선 피폭과 저감화 방법", 한국콘텐츠학회논문지, Vol.14, No.1, pp.356-363, 2014.

[5] Faiz M. Khan, *The Physics Of Radiation Therapy-Fourth Edition*, Lippincott Williams & Wilkins Pub, 2003.

[6] 김상태, "영·유아의 입사피부선량 측정을 위한 몬테카를로 시뮬레이션", 한국콘텐츠학회논문지, Vol.12, No.6, pp.346-352, 2012.

[7] Los Alamos National Laboratory, *User's manual version 2.5.0*, 2005

[8] 최보열, 원전 내 고방사능 입자의 피부오염에 대한 선량 평가, 한양대학교 원자력공학과 석사학위논문, 2008

[9] 나정현, 소듐냉각고속로 핵설계 방법론의 타당성 평가 연구, 경희대학교 원자력공학과 석사학위논문, 2013

[10] M. Cristy, *Mathematical phantoms representing children of various ages for use in estimates of internal dose*, Oak Ridge National Laboratory USA, 1980

[11] 김정훈, 한국 표준인의 갑상선을 선원영역으로 한 방사선 옥소의 S-Value 및 체내잔류시간 연구, 경희대학교 원자력공학과 박사학위논문,

2007.

[12] E. Y. Han, Wesley E. Bolch, and Keith F. Eckerman, "Revisions to the ORNL serie of adult and pediatric computational phantoms for use with the MIRD schema," University of Florida Health Phys, Vol.90, pp.337-356, 2006.

[13] "ICRP Publication 89, *Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection Reference Values*," Ann. ICRP 32 (3-4), Elsevier Publishing Company, 2002.

[14] "ICRU Report NO. 46, *Photon, electron, proton and neutron interaction data for body tissues*", Oxford Univ. Pr. UK, 1992.

[15] 최중환, 김종식, 최지민, "진신방사선조사시 Beam Spoiler와 환자 간의 거리에 관한 고찰", 대한방사선치료학회지, Vol.19, No.1, pp.51-54, 2007.

저자 소개

이동연(Dong-Yeon Lee)

정회원



- 2011년 3월 ~ 현재 : 동남권원자력의학원 방사선종양학과
- 2014년 2월 : 부산가톨릭대학교 방사선학과(이학석사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 부산가톨릭대학교 방사선학과 박사과정

<관심분야> : 방사선치료물리학, 방사선량 평가

김창수(Chang-Soo Kim)

정회원



- 2003년 2월 : 한국해양대학교 전자통신공학과(공학석사)
- 2006년 2월 : 한국해양대학교 전자통신공학과(공학박사)
- 2005년 3월 ~ 현재 : 부산가톨릭대학교 방사선학과 조교수

<관심분야> : 영상 평가, U-Healthcare, Computer Aided Detection(CAD)

김 동 현(Dong-Hyun Kim)

정회원



- 2009년 2월 : 부산대학교 대학원 의공학과 졸업(공학박사)
- 1994년 ~ 2011 2월 : 부산대학교병원 영상의학과
- 2011년 ~ 현재 : 부산가톨릭대학교 방사선학과 조교수

<관심분야> : 자기공명영상학, 방사선관리학

김 정 훈(Jung-Hoon Kim)

정회원



- 2003년 2월 : 경희대학교 원자력공학과(공학석사)
- 2007년 2월 : 경희대학교 원자력공학과(공학박사)
- 2009년 3월 ~ 현재 : 부산가톨릭대학교 방사선학과 조교수

<관심분야> : 방사선량 평가, 문항개발 및 분석