

전립선암의 세기조절 방사선치료 시 조사문수별 중성자선량 평가

이주아¹, 손순룡^{2*}, 민정환³, 최관우², 나사라², 정희원⁴
¹가톨릭대학교 인천성모병원 방사선종양학과, ²서울아산병원 영상의학과
³신구대학교 방사선과, ⁴백석문화대학교 방사선과

Neutron dosimetry depending on the number of portals for prostate cancer IMRT(Intensity-Modulated Radiation Therapy)

Joo-Ah Lee¹, Soon-Yong Son^{2*}, Jung-Whan Min³, Kwan-Woo Choi², Sa-Ra Na²,
Hoi-Woun Jeong⁴

¹Department of Radiation Oncology, Catholic University, Incheon St.Mary's Hospital

²Department of Radiology, Asan Medical Center

³Department of Radiology, Shin-Gu University

⁴Department of Radiology, Baekseok Culture University

요약 본 연구는 방사선치료를 시행한 환자를 대상으로 치료계획을 재수립한 다음, 세기조절 방사선치료를 이용하여 조사문수별 주변조직과 위치별 중성자 선량을 측정하여 차이를 비교하여 치료계획 수립에 있어 기초 자료를 제공하고자 하였다. 2013년 9월부터 2014년 1월까지 전립선암을 진단받아 방사선치료를 받은 20명의 환자를 대상으로 하였으며, 조사문수 변화에 따른 중성자의 선량 분포를 측정하기 위하여 각 연구대상자별 치료계획을 재수립하였다. 연구방법은 조사문수를 5문, 7문, 9문으로 구분하여 조사야 중심에서 20cm와 60cm 거리에 광자극 발광선량계를 위치시킨 다음, 15 MV 에너지로 220 cGy의 치료선량을 조사하여 중성자선량을 비교하였다. 연구 결과, 복부 위치에서 선량은 평균 4.34 ± 1.08 로 나타났고, 조사문수가 증가할수록 높은 경향을 보였으며, 통계적으로 유의한 차이를 보였다($p < .05$). 갑상선위치의 평균 선량은 $2.71 \pm .37$ 로 나타났으며, 조사문수에 따라 증가하는 경향을 보였으나, 통계적인 유의성은 없었다. 조사문수와 위치별 중성자선량 발생은 복부위치에서 매우 유의한 양의 상관관계를 보였다. 선형회귀분석 결과, 조사문수가 1단계 증가할 때마다 평균적으로 중성자량이 .416 배로 유의하게 증가하였다. 결론적으로 조사문수별 주변 조직에 중성자선량의 차이가 발생하므로 치료계획 설계에 있어서 효율적인 조사문수의 선택이 필요하리라 사료된다.

Abstract The aim of this study was provide basic information and establish the criteria in radiation therapy planning by measuring the absorbed neutron dose of normal tissues and lesions according to the number of portals. From September 2013 to January 2014, 20 patients who were diagnosed with prostate cancer and were previously treated with radiation therapy were replanned retrospectively to measure the absorbed neutron dose distribution according to the number of portals. The absorbed neutron dose was measured in each of the 5, 7 and 9 portals using a 15 MV energy, which meant a therapeutic dose of 220 cGy. The optical stimulation luminescence dosimeter was separated by 20cm and 60cm away from the center of the field of view. As a result, the average radiation dose in the abdomen appeared to have a positive relationship with the number of portals, which was statistically significant ($p < .05$). The average radiation dose was 4.34 ± 1.08 . The average radiation dose in the thyroid was $2.71 \pm .37$. Although it showed a positive relationship with the number of portals, it did not have statistical significance. The number of portals and the neutron dose depending on the position showed a significant positive relationship, particularly in the abdomen. As a result of linear regression analysis, as the number of the portal increased in steps, the average volume of the neutrons increased significantly (0.416 times). In conclusion, efficient selection of the number of portals is needed considering the difference in the absorbed neutron dose in the normal tissues depending on the number of the portals.

Key Words : IMRT, OSLD, Photonuclear reaction, Number of portal, MU

*Corresponding Author : Soon-Yong Son(Asan Medical Center)

Tel: +82-10-3230-6281 email: son6392@hanmail.net

Received February 14, 2014

Revised (1st March 17, 2014, 2nd March 24, 2014)

Accepted June 12, 2014

1. 서론

방사선치료는 상대적으로 높은 에너지의 방사선을 투여하여 정상 조직에는 피해를 최소화 하면서 종양(tumor)을 괴사시키기 위해 시행한다. 이를 위해 최적화된 치료 계획을 수립하여 종양의 치료 효과를 높이고, 최소한의 선량으로 주위 정상조직의 부작용을 감소시켜야 한다[1].

치료에 이용되는 에너지는 목적부위에 따라 6, 10, 15 MV(mega voltage)가 이용되는데, 전립선암의 치료에는 10 MV 이상의 고 에너지 방사선을 조사한다.

그러나 고 에너지 방사선조사는 광핵반응(photo nuclear reaction)에 의하여 광중성자(photoneutron)가 발생되므로 문제점으로 지적되고 있다[2]. 특히 방사선하중 계수(radiation weighting factor)가 X선 보다 커서 적은 선량에도 주위 조직에 미치는 영향이 큰 것으로 보고되고 있다[3].

그러나 방사선치료 장비 및 기법은 치료효과 향상에 초점을 두고 개발되고 있는 것이 현실이다. 즉 과거에는 3차원 입체조형치료 (three-dimensional radiotherapy : 이하, 3D CRT)가 주를 이루었으나, 주위 정상조직에 과다한 선량 조사로 인하여 세기조절 방사선치료(Intensity Modulated Radiotherapy : 이하, IMRT)로 대부분 대체되었다[4]. IMRT는 전립선암에 선량을 집중할 수 있는 기법으로서 방사선치료 분야에서 우수한 장점을 가지고 있으나, 치료효과에 비해 국내에서는 비급여 항목으로 분류되어 치료비용상 활용도가 높지 않았다. 최근(2011년 7월) 전립선암, 뇌종양, 두경부암, 척추암, 재발암과 함께 국민건강보험 급여가 적용되면서 폭발적으로 증가하고 있는 실정이다[5].

IMRT의 특징은 통상적인 방사선치료 기법과 달리 방사선이 조사되는 시간 동안 다엽콜리메이터(multi-leaf collimator : MLC)가 역동적으로 작동한다. 이는 치료 효과를 향상시키는 장점이 있지만, 반면에 광중성자 발생을 증가시키는 요인으로 작용한다[6].

또한 3D CRT에 비해 상대적으로 많은 monitor unit (이하, MU)가 요구되므로 광중성자의 발생량도 그만큼 많은 것으로 보고되고 있다[7]. 현재의 의학적 장비개발 수준에서 볼 때, 이러한 광중성자 발생을 획기적으로 감소시키기에는 어려움이 있다고 할 수 있다. 그러나 과거 3D CRT에서 적용하였던 4조사문(portal)수 보다 조사문

수를 크게 늘려 적용하고 있는 실정이다. 조사문수를 늘리면 치료 효과가 좋지만, MU가 증가함에 따라 치료시간이 길어져 움직임에 의한 정확성이 저하될 우려가 높다. 특히 광중성자 발생이 상대적으로 높아 그로 인한 주위 정상조직에 대한 피해가 우려된다[8].

통상 전립선암 환자의 치료는 한 번의 치료로 종료되는 것이 아니라, 25회 이상을 반복적으로 치료하는 특징이 있으므로 심각성은 매우 높다고 할 수 있겠다.

AAPM(American Association of Physicist in Medicine)에서는 고에너지 X-ray 주변에서 광중성자 측정에 대한 표준안을 제시하고 있으나[9], 대다수의 의료기관에서는 조사문수 증가에 따른 MU 증가 및 광중성자를 고려하지 않고 치료에 임하고 있으며, 관련 연구도 전무한 실정이다. 이에 본 연구에서는 전립선암으로 실제 치료한 환자를 대상으로 치료계획을 재수립한 후, IMRT를 이용하여 조사문수별 주변조직과 위치별로 중성자 측정이 가능한 OSLD를 활용하여 선량을 측정하여 그 정도를 비교 분석하였다. 이를 토대로 조사문수별 중성자선량에 따른 치료계획 수립에 있어 기초자료를 제공하고자 하였다.

2. 연구대상 및 방법

2.1 연구대상 및 방법

연구대상은 2013년 9월부터 2014년 1월까지 전립선암을 진단받아 방사선치료를 받은 20명의 환자를 대상으로 하였다.

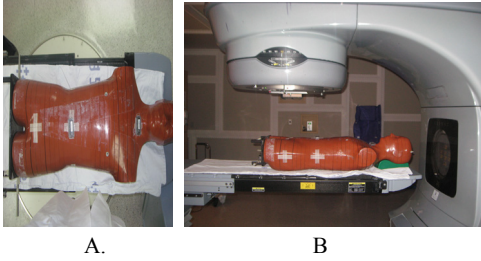
2.2 치료계획 수립

IMRT 조사문수 변화에 따른 중성자의 선량분포를 측정하기 위하여 각 연구대상자별 치료계획을 수립하였다. 계획용 표적체적(planning target volume : 이하, PTV)에 220 cGy의 치료선량을 33회씩 조사하는 것으로 설정한 후, 조사문수는 5, 7, 9문으로 하였으며, 조사각도는 5문(0, 70, 140, 220, 290°), 7문(0, 50, 100, 150, 210, 260, 310°), 9문(0, 40, 80, 120, 160, 200, 240, 280, 320°)으로 각각 치료계획을 수립하였다.

2.3 실험방법

치료계획을 바탕으로 Rando Phantom을 의료용 선형

가속기의 치료대에 위치시킨 후, 조사야를 중심으로 북부에 해당하는 20cm와 갑상선의 60cm 거리에 각각 광자극 발광선량계(optically stimulated luminescence dosimeter : 이하, OSLD)를 위치시켰다[Fig. 1].



A) Distance measurement for OSLD inside the Rando phantom. B) Phantom and OSLD inside the LINAC [Fig. 1] Photograph shows Rando phantom set up positions

치료계획에 의거 15 MV 에너지로 220 cGy의 치료선량을 5분, 7분, 9분으로 변경하면서 각각 조사하였다. 조사문수 변경 시 마다 OSLD를 교체하여 한 개의 OSLD에는 1회의 선량이 조사되도록 하여 판독하였다. 치료용 선형가속기는 TrueBeam STx (Varian Medical systems, Palo Alto, CA, USA)을 사용하였다.

2.4 중성자선량 획득방법

조사된 OSLD에서 선량을 획득하기 위하여 중성자선량 전용판독기, microStar (Landauer Inc., Glenwood, IL, USA) OSLD는 중성자 측정이 가능한 것으로 선정하였다 [Fig. 2].



[Fig. 2] Photograph shows OSLD and Microstar dosimetry reader

2.5 분석방법

측정된 자료는 부호화 과정과 오류 검토를 거쳐 SPSS version 18.0(SPSS Inc, Chicago, IL)을 이용하여 통계 분석하였다. 분석을 위하여 복부와 갑상선 부위에서 선량을 분류하여 비교하였으며, 일원배치 분산분석(one way ANOVA)을 통하여 조사문수별 중성자선량의 차이를 각

각 분석하였다. 또한 조사문수와 중성자선량의 상관관계를 알아보고, 단순선형회귀분석을 통하여 중성자선량의 회귀식을 작성하여 조사문수가 한 단계 증가할 때마다 중성자선량의 변화를 알아보았다.

3. 연구결과

3.1 연구대상자의 인구사회학적 특성

연구대상자의 인구사회학적 특성은 Table 1과 같다. 대상자의 전체적인 평균연령은 67.55±7.86세이었고, 체중은 65.56±11.03kg, 신장은 167.6±7.45cm 이었다.

[Table 1] Socio-demographical variables

Classification	Frequency	Percent(%)	
Age	60 under	4	20.0
	61~70	10	50.0
	71 up	6	30.0
Height (cm)	165 under	9	45.0
	166~170	4	20.0
	171 up	7	35.0
Weight (kg)	60 under	5	25.0
	61~70	9	45.0
	71 up	6	30.0

3.2 실험대상자의 중성자 측정 결과

중성자선량 측정 결과, 복부위치의 중성자량은 평균 4.34±1.08로 나타났고, 5조사문수에서 3.35±.84, 7조사문수에서 4.65±.74, 9조사문수에 5.02±.88로 조사문수가 증가할수록 높은 경향을 보였으며, 통계적으로 매우 유의한 차이를 보였다($p<.01$). 갑상선위치의 평균 중성자량은 2.71±.37로 나타났으며, 5조사문수에서 2.64±.22, 7조사문수에서 2.68±.52, 9조사문수에서 2.81±.29로 증가하는 경향을 보였으나, 통계적인 유의성은 없었다[Table 2].

[Table 2] The absorbed neutron dose by the number of the portals (mSv)

Classification		Measurement (mean±St.D)	P-value
Abdomen	5P	3.35± .84	.000
	7P	4.65± .74	
	9P	5.02± .88	
	Mean	4.34±1.08	
Thyroid	5P	2.64± .22	.308
	7P	2.68± .52	
	9P	2.81± .29	
	Mean	2.71± .37	

3.3 조사문수와 위치별 중성자량의 연관성

조사문수와 위치별 중성자량 발생의 상관분석 결과, 갑상선 위치에서는 유의한 상관관계가 없었으며($p>.05$), 복부위치에서는 매우 유의한 양의 상관관계를 보였다($p<.01$), [Table 3].

[Table 3] Correlation analysis of number of portals and photon neutron dose by location

Specific character	Number of portal	Abdomen	Thyroid
Number of portal	1		
Abdomen	.632**	1	
Thyroid	.191	.310*	1

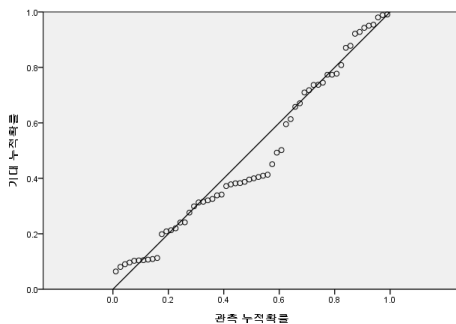
* $p<.05$, ** $p<.01$

조사문수와 유의한 상관관계를 보인 복부위치의 중성자량의 분석 결과, 수정된 R제곱 통계량이 0.590으로 회귀모형이 59.0%의 설명력을 가지고 있음을 알 수 있으며, 분산분석결과 F검정 통계량이 38.643으로 통계적으로 매우 유의하므로($p<.01$) 종속변수에 영향을 주는 하나 이상의 유의한 조사문수가 포함되어 있음을 알 수 있다 [Table 4].

[Table 4] Model summary and ANOVA

adjusted R square	F	Sig.
0.590	38.643	.000

회귀모형의 잔차분석 결과 Durbin-Watson이 2에 가까운 1.907로 나타나 오차의 독립성이 만족되며, P-P도표에서 정규성이 만족되어 회귀모형의 기본가정에 만족함을 알 수 있다[Fig. 3].



[Fig. 3] Basic assumption test in regression analysis(P-P chart)

3.4 중성자량의 회귀식

선형회귀분석 결과, 회귀 절편이 2.179이고 기울기가 .312임을 이용하여 회귀식을 작성하였으며, 이는 조사문수가 1단계 증가할 때마다 평균적으로 중성자량이 .312 배로 유의하게 증가함을 의미한다(식 1).

$$y = 2.719 + .312X + \varepsilon \tag{1}$$

y: neutron dose
X: number of portal
 ε : error

4. 고찰 및 결론

의료용 선형가속기에서 발생하는 고에너지 X-선은 심부선량률이 높고 표면선량률이 낮아 방사선치료에 널리 이용되고 있다[10]. 그러나 10 MV 이상의 고 에너지 X-선은 광핵반응에 의해 중성자를 방출하는 문제점이 제기되어 왔으며[11-13], 실제로 중성자선량의 측정에 많은 연구들이 이루어져 왔다[14,15].

이 연구들은 대부분 중성자 에너지 분포와 물 흡수선량, 기하학적 조건 등에 관한 몬테칼로 계산을 통한 간접적인 방법에 국한된 특징이 있다. 이에 반해, 본 연구는 중성자선량을 직접 계량적으로 측정할 수 있는 OSLD를 이용하였다는 점에서 진일보한 연구라고 할 수 있다. 물론, OSLD의 특성상 40 KeV~5 MeV의 중성자선량만을 측정한다는 제한점이 있으나, 방사선치료에서 발생하는 중성자중 환자에게 주로 영향을 미치는 에너지 범위는 fast neutron이 아닌 5 MeV 이하이기 때문에 측정에 무리가 없다고 볼 수 있다.

OSLD의 중성자 측정은 6 Li가 중성자(n)를 흡수하여 삼중수소(3H)와 알파(4He) 입자를 생성하며, 쿨롱 작용을 거쳐 Al2O3:C에 영향을 주어 이루어진다[16].

OSLD는 중성자 측정에 있어 다른 소자에 비해 화학적, 기계적 특성상 안정적이므로 본 연구에서도 활용하게 되었다. 본 연구는 방사선치료 방법 중 IMRT를 설정하였다. 이는 치료계획의 알고리즘에 따른 MU 증가와 더불어 중성자 발생요인으로 작용하는 동적 콜리메터의 영향이라는 Rebecca 등[6]의 연구뿐만 아니라, IMRT의 전립선암에 대해 국민건강보험 급여가 적용(2011년 7월) 되면서 수요가 날로 증가하기 때문이다. 이에 반해, Yang 등[7]은 방사선 치료기법별 중성자 선량을 비교하

였다는 차이점이 있다. 이는 다양성이라는 측면에서는 긍정적이지만, 장비나 기법간의 조건과 특성 등 다양한 변수들이 반영되지 않은 면이 있다. 이에 반해 본 연구는 최신의 동일한 장비를 토대로 조사문수의 변화에 따른 중성자선량의 평가라는 깊이 있고, 획기적이고 새로운 연구라는 측면에서 가치가 있다고 하겠다.

IMRT의 중성자선량 평가 결과, 조사야에서 근접한 복부 위치의 선량은 평균 $4.34 \pm 1.08 \text{mSv}$ 였고, 상대적으로 거리가 먼 갑상선 위치에서는 $2.71 \pm 0.37 \text{mSv}$ 로 나타났다. 이는 IMRT 7문조사로 고정하여 연구한 Yang 등[7]의 결과(복부 4.85, 갑상선 3.81mSv)와 단순 비교하기에는 무리가 있으나, 상대적으로 낮게 나타났다. OSLD 위치 선정과 치료계획의 차이에서 기인한 것으로 예측된다.

측정 결과, $4.34 \pm 1.08 \text{mSv}$ 와 $2.71 \pm 0.37 \text{mSv}$ 의 중성자선량은 인체에 위해가 미미하다고 할 수 있지만, 서론에서 언급하였듯이 X-선에 비해 방사선하중계수가 커서 적은 선량에도 주변 조직에 미치는 영향이 크므로 각별한 주의가 요구된다.

실제로 방사선 피폭의 위해성 논란에 전산화단층촬영 (computed tomography : 이하, CT)이 지속적으로 회자되고 있다. 그러나 Son[17]의 연구에 의하면, 복부 CT에서 검사(600회 단면)한 선량을 전부 합하면 $716.53 \text{mGy} \cdot \text{cm}(1.5 \text{mSv})$ 정도라고 하였다. 이는 본 연구에서 1회 조사한 중성자선량 $4.34 \pm 1.08 \text{mSv}$ 보다 오히려 적은 선량임에도 불구하고 국내외적으로 매우 민감하게 반응하고 있는 실정이다. 이에 비하면 CT보다 선량이 높고, 암환자 치료의 특성상 30회 이상을 조사하는 점을 감안하면, 본 연구의 중성자선량은 매우 위해하므로 결코 간과해서는 안될 것이다. 더욱이 동일한 부위의 반복 치료라는 의미에서 위해성은 더욱 중요하리라 사료된다.

조사문수별 중성자선량의 비교를 보면, 5문에서 9문으로 조사문수가 증가할수록 선량이 높게 나타났다. 특히 인접한 복부위치에서는 조사문수별로 평균 선량의 차이가 통계적으로도 유의하게 나타났다. 일반적으로 조사문수를 증가시키면 주변조직에는 위해를 줄이면서 종양에는 집중적으로 치료를 가할 수 있어 치료계획에서 장점으로 알려져 있으나, 실제로 증명된 바는 없다. 오히려 본 연구에서 알 수 있듯이 조사문수를 늘리면 주변 조직에 중성자선량이 증가하는 것으로 나타나 조사문수만을 늘리는 것이 치료효과에 긍정적이라고 단언하기에는 무리가 따른다고 볼 수 있다. 더욱이 MIU의 증가에 따른 장비

가동시간의 증가와 장시간 고정자세에 따른 환자의 불편함 가중 등 어려움이 있으므로 조사문수의 선정은 치료 계획에서 매우 중요하다고 하겠다. 또한 복부 위치보다 갑상선 위치에서 중성자선량이 감소함은 방법과 측정 위치는 상이하지만, 조사야 중심에서 멀어질수록 거리에 비례하여 중성자선량이 감소하였다는 Yang 등[7]의 결과와 유사하였다. 또한 IMRT의 치료 계획의 알고리즘과 동적 콜리메타의 영향이라 추정된 Gudowska 등[8]의 연구와 X-선량의 기본 원리인 거리역자승의 법칙[18]과도 일치하는 결과이다. 이는 조사야에서 멀리 떨어짐에 따른 선량 위해가 상대적으로 적다는 의미일 뿐, 무시할 수 있는 선량은 아니라고 판단된다.

중성자선은 투과력이 강하므로 치료시설의 차폐 및 작업 종사자에 관하여 엄격한 규제와 관리가 이루어지고 있으나, 환자에게 의료의 이득이 손실보다 크다는 이유로 소홀히 다루어지고 있는 실정에 있다[19].

IMRT는 방사선치료 기법에 있어 기존의 치료법에 비해 획기적인 기법임에는 이견이 없지만, 치료계획 설계에 있어서 중성자선량을 고려한 효율적인 조사문수의 선택이 필연적으로 수반되어야 할 것이다. 본 연구는 중성자 측정 전용 OSLD 확보와 판독의 어려움으로 많은 실험을 하지 못한 아쉬움이 있지만, 조사문수에 따른 중성자선량의 실질적인 정량적 측정이라는 새로운 시도였다는 데에 의미를 둘 수 있겠다. 향후, 보급화를 통한 다양한 연구로 전립선암 환자의 치료에 있어 조사문수별 중성자선량 가이드라인이 마련되어 치료계획에 반영할 수 있기를 바라며, 본 연구가 초석이 되기를 기대한다. 아울러 중성자선량에 의한 인접조직의 차폐 방법에 관한 전향적인 연구가 필요하리라 사료된다.

References

- [1] Furlow, Bryant, "Prostate cancer and radiation therapy", *Radiation Therapist*, 21, 1, pp.29-56, 2012.
- [2] Ing H, Nelson WR, Shore RA, "Unwanted photon and neutron radiation resulting from collimated photon beams interacting with the body of radiotherapy patients", *Medical Physics*, 9, 1, pp.27-33, 1982.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1118/1.595137>
- [3] Alberts WG, Hollnagel RA, "Radiation weighting factor and quality factor for neutrons", *Radiation Protection Dosimetry*, 46, 4, 291-293, 1993.

- [4] Bakiu E, Telhaj E, Kozma E, Ruçi F, Malkaj P, "Comparison of 3D CRT and IMRT Treatment Plans", *Acta Inform Med.*, 21, 3, pp.211-2. 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5455/aim.2013.21.211-212>
- [5] HS Kim, "Anticancer drug use and out-of-pocket money burden in Korean cancer patients: A questionnaire study", *Korean journal of clinical pharmacy*, 22, 3, pp.239-250, 2012.
- [6] Rebecca M. Howell, Michele S. Ferenci, Nolan E. Hertel, and Gary D. Fullerton "Investigation of secondary neutron dose for 18 MV dynamic MLC IMRT delivery" *Medical Physics*, 32, 786, 2005.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1118/1.1861162>
- [7] ON Yang, "Study on the Photoneutrons Produced in 15 MV *Medical Linear Accelerators*, 35, 4, 2012.
- [8] Gudowska I, Brahme A, Andreo P, Gudowski W, Kierkegaard J, "Calculation of absorbed dose and biological effectiveness from photonuclear reactions in a bremsstrahlung beam of end point 50 MeV", *Phys Med Biol.*, 44, 9, pp.2099-125, 1999.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/44/9/301>
- [9] AAPM, "American Association of Physicist in Medicine: Neutron measurements around high energy X-ray radiotherapy machine", AAPM 19, 1986.
- [10] JO Lee, "24 MV medical linear accelerator generated neutrons Study", *Korean Society of Medical Physics*, 16, 2, 2005.
- [11] Levinger JS, Bethe HA, "Neutron yield from the nuclear photo effect", *Phys Rev*, 5, pp.221-222, 1952.
- [12] D'Errico F, Nath R, Silvano G, Tana L, "In vivo neutron dosimetry during high-energy Bremsstrahlung radiotherapy", *Int J Radiat Oncol Biol Phys.*, 41, 5, pp.1185-92, 1998.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-3016\(98\)00162-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-3016(98)00162-X)
- [13] Hall EJ, Wu C, "Radiation-induced second cancers the impact of 3D-CRT and IMRT", *Int J Radiation Oncology Biol Phys.*, 56, pp.83-88, 2003.
- [14] Zanini A, Durisi E, Fasolo F: "Monte Carlo simulation of photoneutron field in linac radiotherapy treatments with different collimation system". *Phys Med Biol.*, 49, 2, pp.571-2582, 2004.
- [15] Rivera JC, Falcao RC, deAlmeida CE, "The measurement of photoneutron dose in the vicinity of clinical linear accelerators", *Radiation Protection Dosimetry*, 130, 403-409, 2008.
- [16] Passmore C, Kirr M, "Neutron response characterisation of an OSL neutron dosimeter", *Radiat Prot Dosimetry*, 144, 1-4, pp.155-60, 2011.
- [17] SY Son, A Study on Analyzing Factors Influencing on the Integrated Bolus Peak Timing in Contrast-enhanced Brain Magnetic Resonance Angiography and Bolus Tracking Computed Tomographic Angiography, Hanyang university, 2013.
- [18] FW Spiers, "Inverse Square Law Errors in Gamma-ray Dose Measurements", <http://dx.doi.org/10.1259/0007-1285-14-161-147>. 1941.
- [19] CS Park, "A Study on the Neutron Dose Distribution in Case of 10 MV X-rays Radiotherapy", *Korean society of radiological science*, 31, 4, pp.415-427, 2008.

이 주 아(Joo-Ah Lee)

[정회원]



- 2012년 2월 ~ 현재 : 고려대학교 의용과학대학원 의학물리학과 석사과정
- 2009년 8월 ~ 현재 : 가톨릭대학교 인천성모병원 방사선종양학과

<관심분야>
방사선치료, 의학물리

손 순 룡(Soon-Yong Son)

[정회원]



- 1999년 2월 : 단국대학교 보건행정학과졸업 (보건행정학석사)
- 2013년 8월 : 한양대학교 보건학과졸업 (보건학박사)
- 1990년 6월 ~ 현재 : 서울아산병원 영상의학과

<관심분야>
방사선영상학, 디지털영상학, 보건학, 연구조사방법론

민 정 환(Jung-Whan Min)

[정회원]



- 2005년 2월 : 고려대학교 의용과학대학원 (의공학석사)
- 2013년 2월 : 가톨릭대학교 의학 물리공학 (이학박사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 신구대학교 방사선과 조교수

<관심분야>
디지털영상처리, 의학물리

정 희 원(Hoi-Woun Jeong)

[정회원]



- 2004년 8월 : 고려대학교 의용과학대학원 (이학석사)
- 2010년 2월 : 히로시마국제대학교 의료공학 (이학박사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 백석문화대학교 방사선과 조교수

<관심분야>
방사선영상학, 디지털영상학, 의용영상공학

최 관 우(Kwan-Woo Choi)

[정회원]



- 2010년 7월 : 고려대학교 의용과학대학원 의료영상공학과 (공학석사)
- 2013년 3월 : 한양대학교 보건학과 박사과정
- 2001년 2월 ~ 현재 : 서울아산병원 영상의학과

<관심분야>
자기공명영상학, 보건학, 방사선영상학, 의료영상공학

나 사 라(Sa-Ra Na)

[정회원]



- 2010년 2월 : 고려대학교 보건과학대학 방사선학과 졸업
- 2010년 2월 ~ 현재 : 서울아산병원 영상의학과
- 2013년 3월 ~ 현재 : 한양대학교 보건학과 석사 과정

<관심분야>
자기공명영상학, 방사선영상학, 디지털영상학