

Estimation of Dose Distribution on Carbon Ion Therapy Facility using Monte Carlo Simulation

Yongkeun Song,^{1,4} Seunguk Heo,¹ Gyuseok Cho,² Sanghyun Choi,² Moojae Han,¹ Jikoon Park,^{3,*}

¹Department of Biomedical Engineering, Inje University

²Department of Radiation Instrument, Korea Institute of Radiological and Medical Sciences

³Department of Radiological Science, International University of Korea

⁴Gimhae Biomedical Center, Gimhae Industry Promotion and Biomedical Foundation

Received: October 27, 2017. Revised: November 23, 2017. Accepted: November 30, 2017

ABSTRACT

Heavy ion therapy has a high cure rate for cancer cell. So many countries are introducing heavy ion therapy facility. When treating a cancer using heavy ion therapy, neutrons and gamma rays are generated and affect electronic equipment. A budget of about KRW 200 billion is needed to build a heavy ion therapy facility, and it takes more than five years to build it. Therefore it is important to observe the dose distribution in the treatment room using the monte carlo simulation before construction. In this study, we used the FLUKA of monte carlo simulation to investigate the dose distribution in the heavy ion treatment room.

Keywords: Heavy Ion Therapy, Radiation Therapy, Monte Carlo Simulation, FLUKA

I. INTRODUCTION

중입자 치료는 피부 안쪽 깊숙이 자리 잡은 암 세포에 중입자를 발사하여 치료기에서 미리 조절된 깊이에 다다르면 주변 암세포를 파괴하고 사라지는 치료이다. 꿈의 암치료기라고 불리는 중입자 치료기는 간암 90%, 전립선암 100%, 폐암 80%, 재발된 암도 약 42% 완치율을 보이고 있다. 중입자 치료기는 브래그픽 효과로 인해 암세포 살상력은 높으나 부작용이나 고통이 거의 없는 장점을 가지고 있다.^[1]

치료실까지 수송된 중입자 빔은 환자의 암세포에 입사하여 암세포만을 사멸시키고 사라지는데 이때 중입자의 분열로 인하여 중성자 및 감마선이 발생된다.^[2] 치료실에서 발생한 중성자 및 감마선은 안전한 차폐 설계를 통해 치료실 밖의 환자 및 운영인력에는 영향을 미치지 않지만, 치료실 내 일

정시간동안 분포하여 영상장비 및 치료 장비, 그 밖의 전자장비에 지속적인 영향을 끼쳐 고장의 원인이 될 수 있다. 치료실 내 여러 장치들이 동작불능상태가 되면 치료시간이 길어지고 환자를 치료할 수 없게 될 것이며 그에 따른 손실이 발생하게 된다.^[3] 이러한 손실들은 환자 및 환자 가족들에게 신뢰를 잃고 환자 수 감소로 이어지게 되어 중입자 치료센터의 막대한 손해를 끼치게 될 것이다.

중입자 치료시설은 가속기, 치료시스템, 건축 포함하여 대략 2000억 원 가량 소요 되는 것으로 알려져 있고 그 중 가속기와 건축을 제외한 치료시스템을 구축 하는 것만 1,000억 원 가량이다. 이처럼 막대한 예산이 필요하고 구축 기간도 5년 이상 소요되는 만큼 중입자 치료시설을 계획하고 건립할 때 환자나 종사자들의 위험요소를 제거하고 시설의 효율을 극대화 하여 구축하기 위한 방사선 몬테카를로 시뮬레이션 수행이 필수적이다. 대부분의

* Corresponding Author: Jikoon Park

E-mail: radiopjk@iuk.ac.kr

Tel: +82-55-751-8301

중입자 치료시설은 구축 전 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하고 있으며 새로운 치료기법이나 방법을 연구하는데 사용되고 있다.^[4]

본 연구에서는 중성자 및 감마선에 의한 치료실 내 장비동작 불능상태를 미연에 방지하고자 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 치료실 내 선량 분포를 확인하고자 한다. 본 연구에서 이용할 몬테카를로 시뮬레이션 툴은 FLUKA(FLUKtuierende KAskade)^[3]로서 유럽원자핵공동연구소(CERN)에서 개발한 것이다. FLUKA는 현재 다양한 물리모형을 적용하고 있으며 그에 따른 정확도가 입증된 코드이다. 특히, 차폐 분야에서는 미국의 Los Alamos National Laboratory에서 개발한 MCNP(몬테카를로 N-Particle Extended)와 함께 벤치마킹코드로 인기가 높다.

II. MATERIAL AND METHODS

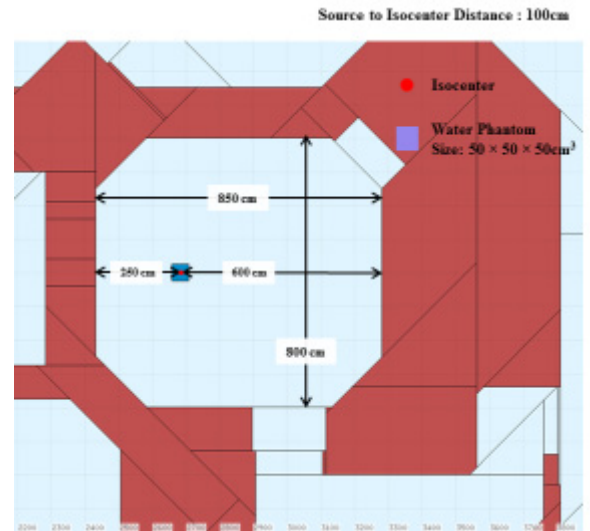
FLUKA를 포함한 대부분의 방사선 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 지오메트리 구성, 빔 구성, 검출기 구성, 계산, 데이터 분석 단계를 거쳐야 한다. 그 중 지오메트리 구성은 가장 기본적으로 수행하여야 할 항목으로 실제의 방사선 노출 및 조사 환경을 각각의 시뮬레이션 코드에 적합하게 작성하는 것을 의미한다.

본 연구에서는 부산시 기장군에 구축 중인 의료용 중입자 가속기 치료센터의 치료실 내부의 선량과 중성자 분포를 확인하는 것이므로 건축 설계 도면을 토대로 Fig. 1과 같이 FLUKA에 적합한 지오메트리로 구성하였다.

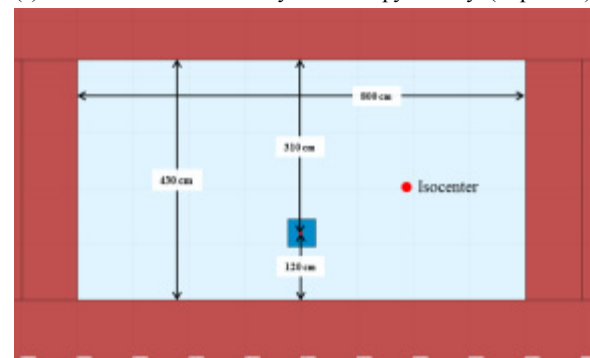
의료용 중입자 가속기 치료센터는 1개의 가속기실, 3개의 치료실, 1개의 연구실로 구성되어 있다. 치료실의 크기는 850 cm (W) × 800 cm (D) × 430 cm (H)이며 빔 조사가 되는 치료중심점은 빔 라인이 입사하는 벽면으로부터 250 cm, 바닥으로부터 120 cm 떨어진 지점에 위치하고 있다. 환자 치료시 환부를 치료중심점으로 위치하기 때문에 본 연구에서는 인체와 가장 비슷한 50 cm × 50 cm × 50 cm Water phantom을 치료중심점에 배치하였다.

의료용 중입자 가속기 치료센터의 사용하고자 하는 빔은 탄소 빔으로서 에너지는 150 MeV/n 부

터 430 MeV/n 까지 사용할 계획이다. 에너지가 높을수록 고선량과 중성자가 발생할 확률이 높고 중성자에 의한 전자기기의 미치는 영향을 파악하는 것이 본 연구의 목적이므로 최대 에너지 사용을 가정하여 빔 구성을 완료하였다.



(a) Treatment room of heavy ion therapy facility (Top view)



(b) Treatment room of heavy ion therapy facility (Sectional view)

Fig. 1. Treatment room using FLUKA

Table 1. Beam information for 몬테카를로 시뮬레이션

Beam Information	
Ion	Carbon-12
Energy	430 MeV/n
Shape	Rectangular
Size	20 cm × 20 cm
Source to Isocenter	100 cm
Primary Particle	2 × 10 × 5 cycle

본 연구에서 얻고자 하는 것은 중입자 치료실 내

부의 선량 및 중성자 분포를 확인하는 것으로서 FLUKA의 내장되어 있는 USBIN 카드를 이용하였다. USBIN 카드는 FLUKA에서 가장 많이 사용되는 Scoring 카드로서 선량 및 중성자 분포를 확인하는데 적합한 카드이다.

USBIN 카드를 설정하기 위해서는 우선 Scoring 할 영역의 구조부터 정하여야 한다. 직육각형 형태 및 실린더 형태, 사용자 영역에 대한 설정 등 다양하게 설정할 수 있지만 본 연구에서 결과에 적합한 형태는 좌표를 이용한 직육각형 형태이므로 치료실을 충분히 둘러싸게 설정한다.

Table 2. Scoring setting for monte carlo simulation

Scoring Information	
Type	USBIN
Binning Size	10 cm × 10 cm × 10 cm
Acquisition	Dose Equivalent
Conversion Set	AMB74

III. RESULT

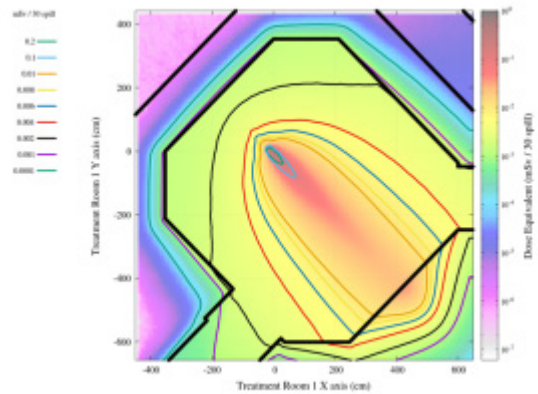
1. 중입자 치료실의 선량 분포 추정

치료실 1번부터 3번까지 치료실 선량 분포에 대해 GNUPLOT을 이용하여 2D 그래프를 작성하였다. FLUKA에서 선량(Dose Equivalent)의 기본 단위는 pSv로서 mSv로의 단위 변환과 분당 Particle 개수를 적용한 Normalize Factor를 계산하였다.

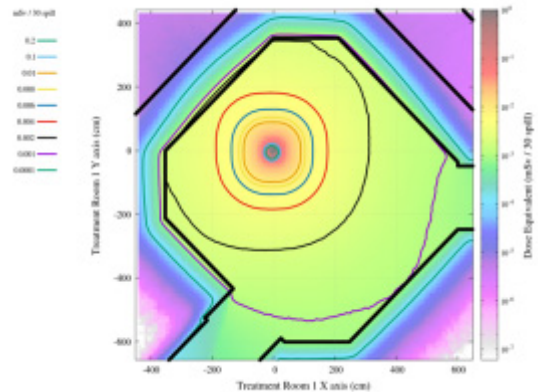
중입자 치료에서 요구되는 조사선량은 5 GyE/min/liter 로서 이는 2 Gy 조사선량과 2.5의 생물학적효과비(RBE)의 곱으로 표현되어진다. 1분 동안 1 리터의 2 Gy 선량을 조사하기 위해서는 4×10^8 pps (particle per spill)의 Particle이 조사되어야 하고 1 Spill 은 2초당 1번이므로 1분당 30번의 Spill이 발생되게 된다. 따라서 4×10^8 pps 에 30 Spill을 곱하면 치료중심점에서 분당 조사되는 Particle의 개수는 1.2×10^9 개 이다.

FLUKA는 계산 결과 값을 도출할 시 1개의 Particle이 입사하였을 때의 결과 값을 돌려주므로 분당 조사되는 Particle의 개수를 곱하여 결과를 예

측하여야 한다. 따라서 FLUKA 선량 결과에 1.2×10^9 개의 Particle을 곱하면 1분당 발생하는 선량을 알 수 있다. 본 연구에서는 선량 단위를 mSv 단위로 정하였기 때문에 최종적으로 Normalize Factor는 1.2가 되고 FLUKA 결과 데이터에 모두 1.2를 곱함으로써 1분당 중입자 빔이 조사되었을 때의 치료실의 선량을 구할 수 있었다.



(a) Dose distribution of treatment room 1 (Horizontal beam irradiation)



(b) Dose distribution of treatment room 1 (Vertical beam irradiation)

Fig. 2. Dose distribution of horizontal and vertical beam irradiation in treatment room 1

의료용 중입자 가속기 치료센터는 모든 치료실이 회전 갠트리(Rotation gantry)가 아닌 고정 빔(Fixed beam) 형태로 설치될 것을 가정하였다. 치료실 1번과 2번은 수평 및 수직 빔, 치료실 3번은 수평 빔으로 구성하였다. 치료중심점의 좌표는 (0, 0)이며, 인체를 대신하여 설정해 둔 Water Phantom의

중심 좌표 또한 (0, 0)이다. 치료실 벽면은 쉽게 알아보게 하도록 위하여 굵은 선으로 표현하였으며 2D 그래프의 컬러바는 로그스케일로 설정하였다.

치료실 1번의 수평빔 조사시 선량 분포를 살펴보면 1분당 30 Spill의 조사가 이루어 졌다고 가정할 시 치료중심점에서는 대략 0.1 mSv 정도 측정된다. 치료중심점에서 멀어질수록 선량은 점점 더 약해지기 시작하고 치료실 안쪽 벽면에 다가가면 1 pSv 정도 측정됨을 알 수 있다. 치료실 벽은 약 1.5 m의 두꺼운 콘크리트로 구성되어 있으며 벽면 안에서는 0.1 pSv 정도 측정됨에 따라 1분 동안 중입자 빔 조사시 치료실 밖은 안전하다고 할 수 있다.

수직 빔을 조사했을 때 평면도를 살펴보면 치료중심점으로부터 원형으로 퍼져나가는 형태로 선량 분포가 이루어지고 있으며, 중입자 빔이 입사되는 벽면에 2 pSv의 선량이 영향을 미치고 있다. 1.5 m 두께의 콘크리트 벽 초입부의 선량은 1 pSv 이지만 콘크리트 벽체 중앙, 대략 70 cm 지점에서는 0.1 pSv가 측정됨에 따라 10배 정도 감쇠 현상이 일어나는 것을 관찰 할 수 있었다.

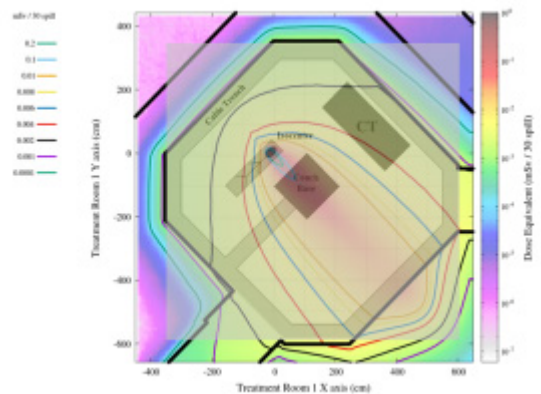
2. 중입자 치료 시 전자 장치에 미치는 선량 분포 추정

중입자 특성상 해당 부위에 최대 에너지를 발산하여 암세포를 사멸하는 방식으로 치료하게 되는데, 환자의 중입자 조사되는 방향이 맞지 않게 되면 정상 장기에 치명적인 손상이 발생하게 된다. 중입자 치료는 암에 대한 살상력이 높은 반면 잘못된 환자 위치로 치명상을 입을 수 있는바 전 세계의 중입자 치료 센터는 이러한 위치 검증 과정을 필수적으로 수행하고 있다. 위치 검증 과정을 수행하기 위해서는 치료실 내 X-선 및 CT 촬영을 통해 암 부위를 확인하여야 한다. 치료실 내 Sliding CT가 설치되어 있다는 가정 하에 선량분포를 관찰하였다.

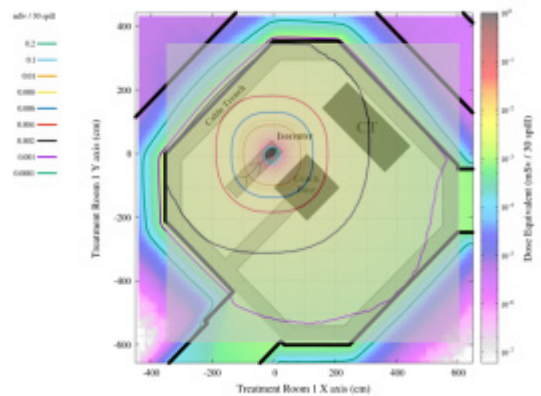
환자 치료 시 중입자 빔이 조사되므로 앞선 선량 분포 결과와 설치 될 Sliding CT의 위치를 일치시켰다. Fig. 3(a)는 1번 치료실에서 수평 빔으로 치료시 Sliding CT에 미치는 영향을 보여준다. Sliding CT에서 Couch base 방향으로는 약 6 pSv 정도의 선량이 영향을 미칠 것으로 예상되며, 약 2 ~ 4 pSv가

Sliding CT에 직접적인 영향이 있을 것으로 판단된다.

Fig. 3(b)는 1번 치료실에서 수직 빔으로 치료시 Sliding CT에 미치는 영향으로서 수평 빔을 조사했을 때 보다 좀 더 적은 영향이 있을 것으로 예상된다. Sliding CT 앞쪽으로는 약 4 pSv, 직접적인 영향은 약 1 ~ 2 pSv 정도로 관찰되었다.



(a) Analysis of sliding CT on horizontal beam irradiation



(b) Analysis of sliding CT on vertical beam Irradiation

Fig. 3. Analysis of sliding CT on horizontal and vertical beam irradiation in treatment room 1

IV. DISCUSSION

의료용 중입자 가속기 치료센터의 중입자 치료시 중입자에 의한 선량 분포에 대해 몬테카를로 시뮬레이션 Tool인 FLUKA를 이용하여 관찰하였다. 치료실 내 선량은 수평빔 조사시 약 0.1 mSv에서 2 pSv 까지 측정되었으며 치료실을 감싸고 있는 콘크

리트 벽에서는 약 0.1 pSv의 선량이 관측되었다.

또한 치료실 내 구축 장비들의 영향을 파악하기 위하여 Sliding CT를 구현하였다. 중입자 1분 치료 시 Sliding CT에는 약 1~2 pSv 정도 직접적인 영향이 있을 것으로 판단된다.

V. CONCLUSION

본 연구는 몬테카를로 시뮬레이션 Tool인 FLUKA를 이용하여 중입자 치료실의 선량 분포에 대해 알아보았다. 중입자 치료시설의 설계도면을 토대로 지오메트리를 구성하였으며 중입자 치료 시 사용될 빔을 추정하여 실제와 최대한 비슷한 환경을 구축하여 시뮬레이션을 수행하였다.

그 결과 중입자 빔 1분 치료 시 치료실 내에는 약 0.1 mSv에서 2 pSv의 선량이 분포될 것으로 파악되며 Sliding CT에는 약 1~2 pSv 정도의 선량이 영향을 미칠 것으로 관찰되었다.

본 연구의 결과를 토대로 중입자 치료실 내 효율적인 장비 배치 및 부분적인 차폐를 제안할 수 있고 중입자 치료센터의 원활한 환자 치료에 참고 자료로 쓰일 것이라 기대한다.

Reference

- [1] Dieter Schardt, Thilo Elsasser, Daiela Schulz-Ertner, "Heavy-ion tumor therapy: Physical and radiobiological benefits", *Reviews of modern physics*, vol. 82, No. 1, pp. 383-425, 2010
- [2] Jun-Kui Xu, You-Wu Su, Wu-Yuan Li, Wei-Wei Yan, Xi-Meng Chen, Wang Mao, Cheng-Guo Pang, "Evaluation of neutron radiation field in carbon ion therapy", *Chinese Physics C*, Vol. 40, No. 1, 2016
- [3] Stephen F. Kty, Jennifer L. Johnson, R. Allen White, Rebecca M. Howell, Rajat J. Kudchadker, Michael T. Gillin, "Neutron-induced electronic failures around a high-energy linear accelerator", *Medical Physics*, vol. 38, No. 1, pp. 34-39, 2011
- [4] Pang Cheng-guo, Su You-Wu, Wang Wen-Jun, Luo Xiao-Ming, Xu Jun-Kui, Li Wu-Yuan, Yuan Jiao Yao Ze-En, "Monte Carlo Simulation of carbon ion radiotherapy for the human eye", *Chinese Physics C*, Vol. 39, No. 1, 2015

몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 중입자 치료실의 선량분포 추정

송용근,^{1,4} 허승욱,¹ 조규석,² 최상현,² 한무재,¹ 박지균,^{3,*}

¹인제대학교 의용공학부

²한국원자력의학원 방사선기기부

³한국국제대학교 방사선학과

⁴김해산업진흥의생명융합재단 김해의생명센터

요 약

꿈의 암치료기라고 불리는 중입자 치료는 환자의 암세포에 입사하여 암세포만을 사멸하고 사라지는데 이때 중성자 및 감마선이 발생되어 치료실 내 영상장비, 그 밖의 전자장비에 영향을 미치게 된다. 중입자 치료시설을 구축하기 위해서는 약 2,000억 원 가량의 예산이 필요하며 구축기간도 5년 이상 소요된다. 따라서 구축 전 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 치료실 내 선량 분포에 대해 관찰하여 적절한 대비를 하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 몬테카를로 시뮬레이션 툴인 FLUKA를 이용하여 중입자 치료 시 치료실 내 선량분포에 대해 알아보았으며 1분 치료 시 치료실 내에는 약 0.1 mSv에서 2 pSv 정도의 영향이 있을 것으로 파악되었다.

중심단어: 중입자 치료, 방사선 치료, 몬테카를로 시뮬레이션, 플루카