

The Comparative Analysis of External Dose Reconstruction in EPID and Internal Dose Measurement Using Monte Carlo Simulation

Joo-Young Jung, Do-Kun Yoon, Tae-Suk Suh

Department of Biomedical Engineering, Research Institute of Biomedical Engineering,
School of Medicine, The Catholic University of Korea, Seoul, Korea

The purpose of this study is to evaluate and analyze the relationship between the external radiation dose reconstruction which is transmitted from the patient who receives radiation treatment through electronic portal imaging device (EPID) and the internal dose derived from the Monte Carlo simulation. As a comparative analysis of the two cases, it is performed to provide a basic indicator for similar studies. The geometric information of the experiment and that of the radiation source were entered into Monte Carlo n-particle (MCNPX) which is the computer simulation tool and to derive the EPID images, a tally card in MCNPX was used for visualizing and the imaging of the dose information. We set to source to surface distance (SSD) 100 cm for internal measurement and EPID. And the water phantom was set to be 100 cm of the source to surface distance (SSD) for the internal measurement and EPID was set to 90 cm of SSD which is 10 cm below. The internal dose was collected from the water phantom by using mesh tally function in MCNPX, accumulated dose data was acquired by four-portal beam exposures. At the same time, after getting the dose which had been passed through water phantom, dose reconstruction was performed using back-projection method. In order to analyze about two cases, we compared the penetrated dose by calibration of itself with the absorbed one. We also evaluated the reconstructed dose using EPID and partially accumulated (overlapped) dose in water phantom by four-portal beam exposures. The sum dose data of two cases were calculated as each 3.4580 MeV/g (absorbed dose in water) and 3.4354 MeV/g (EPID reconstruction). The result of sum dose match from two cases shows good agreement with 0.6536% dose error.

Key Words: MCNPX, Monte Carlo simulation, EPID dose-reconstruction, Internal dose measurement, Calibration

서 론

최근 방사선 치료 중 세기 조절 방사선 치료(intensity modulated radiation therapy, IMRT) 및 회전 방사선 치료(arc-therapy)와 같은 기법은 dynamic multileaf collimator (DMLC)를 이용하여 다각도 방사선 치료와 동시에 electronic portal imaging device (EPID) 장치를 이용하여 실시간

으로 선량에 대한 정보와 portal image 정보를 얻을 수 있다.¹⁻³⁾ 이 경우, 표적에 대하여 정확한 선량 전달과 정상 조직에 누적되는 불필요한 선량을 줄이는데 효과적인 부분은 이미 많은 선행 연구가 진행되었다.^{4,5)} 하지만 현재까지도 방사선 계획용 팬텀이 아닌 생체 조직 내에 직접적인 내부 흡수선량 측정은 어려운 부분이 있으며 현재 EPID를 이용하여 체외로 나온 방사선량을 측정, 선량 재구성을 통하여 간접적으로 타겟에 들어간 선량 예측으로 내부 선량의 영향을 평가하고 있다.⁶⁾

본 연구는 이러한 일련의 과정들을 몬테카를로 전산 모사 툴인 Monte Carlo n-particle (MCNPX)을 이용하여 내부 선량 평가를 구체화 하였다. 몬테카를로 전산 모사는 전 임상과 연구 분야에서 방사선 입자 수송을 구현하는데 가장 유용한 툴이다.⁷⁾ 예를 들어 상용화된 방사선 치료 계획 장치(radiation treatment planning system, RTPS)의 취약검사

본 연구는 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단 원자력연구개발사업(2013043498, 정상조직 선량감축을 위한 융합기술 기반 모션팬텀 개발) 및 한국연구재단 해외우수연구기관유치사업(2009-00420)의 연구비 지원으로 수행되었음.

이 논문은 2013년 10월 16일 접수하여 2013년 12월 5일 채택되었음.

책임저자 : 서태석, (137-701) 서울시 서초구 반포4동 505

가톨릭대학교 의과대학 의공학교실

Tel: 02)2258-7232, Fax: 02)2258-7506

E-mail: suhsanta@catholic.ac.kr

(commissioning)를 위한 dosimetric 정보를 제공하고⁸⁾, 방사선 치료실의 중성자 차폐 연구⁹⁾ 및 콜리메이터와 같은 부가 장치의 산란 정도 및 검증¹⁰⁾에 사용되고 있다.

가상의 물 팬텀을 생성하여 EPID 모듈은 물론 방사선 치료 장치(linear accelerator)의 겐트리 헤드 부분과 소스를 MCNPX 내에 전산모사를 하고 선량 추정 계수를 구하기 위한 calibration 작업을 먼저 수행하였다. Calibration으로부터 나온 기준 데이터를 토대로 선량 재구성이 이루어지기 때문에 이 과정은 본 연구에 있어서 핵심적인 부분이라 할 수 있다. Calibration 후 정해진 기준 데이터에 따라 EPID에서 물 팬텀을 통과해 나온 선량만으로 물 팬텀 내에 특정 타겟에 흡수된 선량을 계산하고 이를 전산모사 상에서 뽑은 물 팬텀 내부 흡수 선량 데이터를 추출하였다.

연구의 최종 방향은 CT 데이터를 기반으로 직접 전산모사에 지오메트리 정보로 활용하여 *in-vivo* dosimetry를 하고자 하는 목적에서 기본적인 기준 데이터를 제시하고자 본 연구가 시행되었다. 또한 실제 기기에서는 단일 에너지가 아닌 여러 에너지를 수반하는 스펙트럼 형태의 에너지를 갖는 빔이 나오는데 에너지에 따라 흡수 또는 투과되어 나오는 정도가 모두 다르고 실제기기에서 단일 에너지만을 방출시키기가 어렵기 때문에 전산모사를 통해 기준이 되는 에너지와 그 에너지를 이용하여 내부선량 계측과 EPID를 이용한 계산 선량을 비교해볼 필요가 있었다. 이 데이터가 기준이 되면 다른 에너지를 이용하여 똑같은 조건에서 얼마나 다른 결과가 초래되는지 혹은 여러 에너지를 한꺼번에 사용하여 전산모사 혹은 실험을 했을 때의 결과가 얼마나 차이가 나는지를 정량적으로 가늠할 수 있어 본 연구가

시행되었다.

본 연구의 목적은 앞서 정의한 특정 타겟 부위에서의 흡수 선량을 비교하여 적절한 계수를 찾고, 그 계수를 이용하여 역으로 계산하였을 때 실제 흡수된 선량과의 비교 평가이다.

재료 및 방법

전산모사 상에서 정의된 물 팬텀(24.2×24.2×24.2 cm³)은 실제 물과 동일한 원자 정보와 물질 정보를 기반으로 설정하였다. EPID의 경우 물 팬텀 아래 10 cm에 표면이 오도록 위치하였고 디텍터의 사이즈는 24.2×24.2×3 cm³ (a-Si, 4.51 g/cm³)로 정의되었고 121×121의 픽셀 어레이로 지정하여 각각의 픽셀마다 tally 값을 도출할 수 있도록 하였는데 이는 각 픽셀마다의 흡수 선량을 도출하여 영상을 얻을 수 있고 선량 프로파일을 도출할 수 있기 때문이다. 물 팬텀 역시 내부 선량 계측을 위하여 디텍터와 동일한 크기와 픽셀수로 나누었고 물질은 물로 채웠으며 역시 tally값을 주어 각 픽셀마다 흡수된 선량을 도출할 수 있도록 지정하였다. 겐트리 헤드와 소스(광자선, 2 MeV 단일에너지, NPS: 40,000,000)에 관한 정보는 Clinac IX (Varian Medical System, Palo Alto, USA)모델의 일부를 전산 모사하여 크기와 선질 조건 등을 동일하게 모사하였다.¹¹⁾ 본 실험에서는 6 MV 광자선을 기준으로 평균 1.5~2 MeV의 에너지 영가 최대 빔출 에너지 중 각각의 평균 전산모사 소요 시간은 124분 정도였다. 본 실험에서 수행한 전체적인 모습은 Fig. 1과 같이 나타내었다.

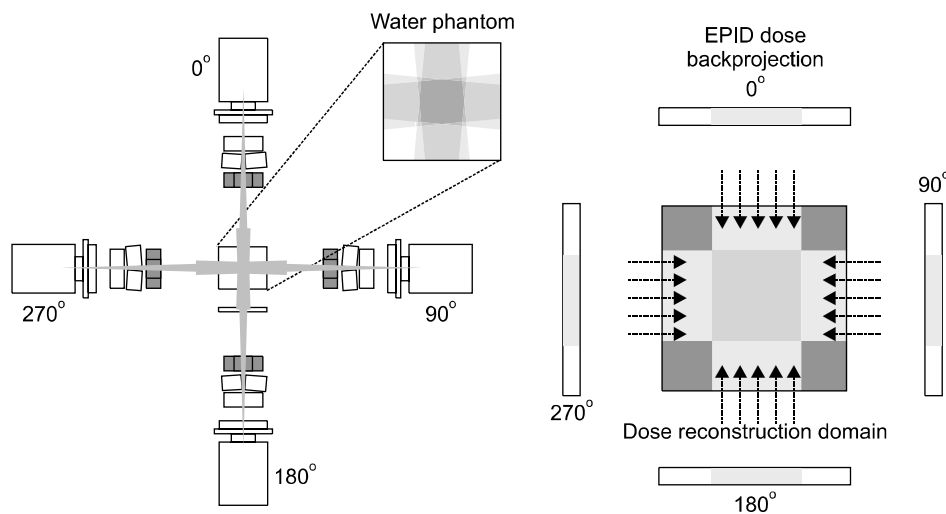


Fig. 1. The scheme of this study. The absorbed dose data both Water phantom and EPID were acquired from four-portal exposure.

1. Calibration

Calibration은 기준이 될 수 있을 만한 데이터를 추출하고 그 기준 데이터를 토대로 선량 재구성 방법을 구현하기 위하여 도출하였다. 본 연구에서 사용된 calibration 데이터는 범용적으로 쓰이는 절대값이 아닌 전산 모사 자체에서 비교를 위한 상대적인 값이다. 크게 두 가지 데이터에 대하여 calibration을 실시하였는데, 첫째로 얻은 데이터는 물 팬텀 자체에서 획득한 선량 프로파일이다. 일반적으로 깊이 선량 백분율(percent depth dose, PDD)로 선량에 관한 정보를 획득할 수 있다. 이 물에 관한 PDD를 얻기 위하여 물 팬텀을 여러 개의 복셀로(121×121) 나누고 이 복셀로부터 추출한 흡수 선량을 깊이에 따라 나열하였다. 본 연구에서 지정하는 물 팬텀의 관심 영역은 중앙으로부터 x축, y축 각 ±4 cm 영역으로, 64 cm²에 해당하는 영역인데, 이것에 해당하는 선량 정보를 PDD로부터 추출하였다. PDD 곡선으로부터 방정식을 얻어내고 해당 구간의 일부를 추출한 수식(1)에 따라 적분하여 전체 영역(물 팬텀의 최종 흡수 선량)에 대한 비(ratio)와 평균 값을 도출하고 선량 재구성 시 하나의 연산 계수로 계산하여 재구성을 하였다.

$$y = A \cdot B \cdot x + C \tag{1}$$

단, A, B, C는 각 PDD에 의존하는 계수, x는 깊이, y는 상대선량이다.

두 번째로 EPID에서 받아내는 흡수 선량 데이터에 관한 calibration을 시행하였다. 본 과정에서 calibration은 EPID에서 받아내는 선량만으로 물 팬텀 자체에서 흡수된 선량을 예측하기 위함인데 이것 역시 여러 번의 전산모사(53 sampling)를 통하여 값을 비교적 정량화 할 수 있었다. 우선, 물 팬텀이 없는 상태에서 EPID에서 선량을 모두 받아내고, 물 팬텀이 존재하는 상태에서 PDD를 물로부터 추출함과 동시에 물 팬텀을 투과한 선량을 EPID에서 추출하였다. EPID 디텍터 역시 물 팬텀과 동일하게 흡수 선량에 대한 tally를 지정하였고 a-si 재질 정보를 전산 모사에 넣었다. 물 팬텀이 있을 때 얻은 평균 EPID 선량과 없을 때의 평균 선량을 토대로 물 팬텀에 흡수되는 선량을 대표 값이 되는 하나의 계수 값으로 산출하였다. 이 계수 역시 선량 재구성에서 연산 계수로 작용할 수 있기 때문에 평균값으로 정량화 한 뒤 하나의 계수 값으로 구성하였다.

2. Dose reconstruction

선량 재구성(dose reconstruction)은 calibration을 통하여 얻은 정보를 토대로 0°, 90°, 180°, 270°의 4문 조사에서 얻은 EPID에 계측된 선량을 역으로 투사하여 합산하는 방식으로 선량 재구성을 시행하였다.^{12,13} 기본적으로 0°, 90°, 180°, 270°의 4문 조사에서 얻어진 EPID 누적 선량에 calibration에서 얻어진 두 가지 계수를 함께 연산하여 다음 수식(2)에 따라 표현하였다.

$$D_{Pro}(S, d) = \int_{D(b)}^{D(a)} D_{EPID}(S, d, L) \cdot \zeta_{PDD} \cdot \phi_{abs} dD_l \tag{2}$$

단, D_{Pro}는 선량 재구성 시 프로젝션을 위한 라인 행렬, S는 SSD, d는 깊이에 따른 선량 계수, D(a)와 D(b)는 위치에 따른 선량의 주소 값, D_{EPID}는 EPID에서 계측된 흡수 선량, L은 라인 주소 값, ζ_{PDD}는 PDD에서 뽑은 선량 방정식 표준 비례 계수, φ_{abs}는 해당 구간의 흡수 선량 일반화 계수이다.

역 투사를 위한 재구성 프로파일이 완성되면 역 투사를 실시하여 누적되는 영역에 한하여 64 cm² 영역에 해당하는 선량을 모두 획득하였다. 또한 물 팬텀 역시 4문 조사 시 누적되는 선량이 있게 되므로 물 팬텀에서 누적된 선량 정보 또한 얻어내고 이 두 데이터에 관하여 해당 관심영역에 대한 선량 정보를 다음 수식(3)과 같이 비교하였다.

$$D_{sum}(S, d) = \int_{D(x)}^{D(-x)} \int_{D(y)}^{D(-y)} D_{tl}(S, d, a, b) dD_y dD_x \tag{3}$$

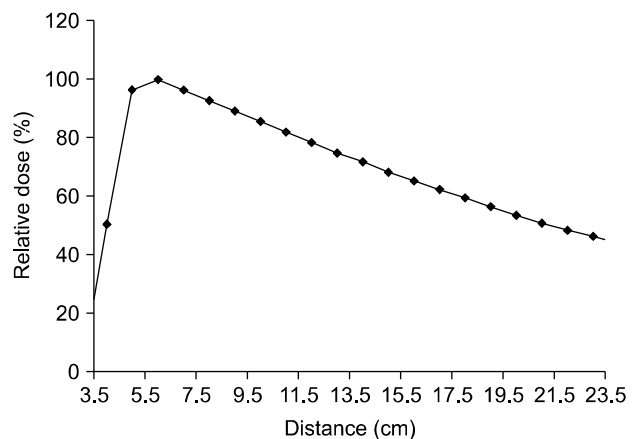


Fig. 2. Percent depth dose (PDD) the voxel with water phantom (24.2×24.2×24.2 cm³) using 2 MeV photon source. Region of interesting set 8-16, equation of this section was adapted for calibration.

단, D_{sum} 은 최종 선량의 합계, D_{it} 은 흡수 선량, a, b 는 흡수 선량의 주소 값, D_y 와 D_x 는 위치에 따른 선량의 주소 값이다.

결 과

1. 선량 프로파일 calibration

첫 번째로 시행한 calibration의 경우 Fig. 2와 같이 2 MeV 광자선에 대한 PDD를 획득하였다. 본 연구에서 관심 영역으로 지정한 구간에 대한 수식은 수식 (1)과 같으며 이 수식을 토대로 해당 구간 영역을 적분, 전체 영역인 물 팬텀의 최종 흡수 선량에 대한 선량 비를 53개의 모델에 관하여 정리한 결과 0.2894의 positive 계수를 얻을 수 있었다. 획득한 계수는 EPID에서 얻어진 선량 프로파일에 곱하여, EPID에 흡수된 선량으로부터 물 팬텀에서 흡수된 선량 중 관심 영역에서 흡수된 선량만으로 한정 지을 수 있게 하였다.

두 번째로 시행한 calibration의 경우, 물 팬텀의 유무에 따라 EPID에서 얻어진 선량 차이로 물 팬텀 자체에서 흡수된 선량만을 계산하는 계수를 구하기 위한 과정이며 Fig. 3과 같이 두 가지 모델에 대한 선량 프로파일을 비교하였다. 물 팬텀이 있을 경우 평균적으로 30% 대의 선량 값을 기록하였으며 이를 토대로 물 팬텀에 흡수된 선량 계산을 위하여 EPID에서 추출한 선량에서 계수 값인 2.1629를 곱해주어 계산하였다. 본 데이터는 53 sampling에 관하여 0.0705의 표준오차를 가졌다.

2. 관심영역에 대한 누적 선량 비교

본 연구에서 0°, 90°, 180°, 270°의 4문 방향에서 방사선

조사를 실시하고 그에 대한 물 팬텀의 누적 흡수 선량과 EPID에서 얻어진 흡수 선량을 토대로 앞서 계산한 계수 값과 함께 역으로 투사 후 선량을 재구성하는 방법으로 두 모델을 비교 분석하였다. Fig. 4의 (a)는 물 팬텀으로부터 얻은 0°, 90°, 180°, 270° 4문 조사의 누적 선량에서 관심 영역에 해당하는 64 cm² 영역의 단면 분포도이다. 그림에서처럼 방사선이 퍼져 나가는 모양은 물론 관심 영역에 빨간색의 형태로 선량이 누적된 모습이 보여지고 있다. 점선 표시가 된 곳이 본 연구에서 이용한 관심 영역이며 이곳에 해당하는 모든 흡수 선량 정보를 모두 추출하였다. 추출한 선량에 대하여 선량 합산을 해본 결과 평균 3.4580 MeV/g

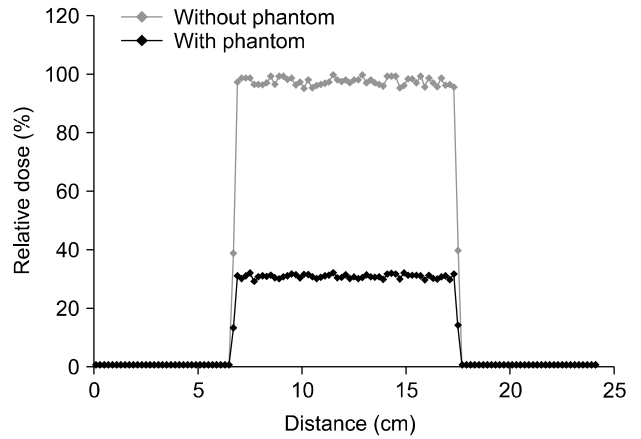


Fig. 3. Lateral dose profile from EPID (without phantom; lower line, with phantom; upper line) [m1]. This figure is calibration data by calculation absorbed dose factor and EPID extraction dose factor.

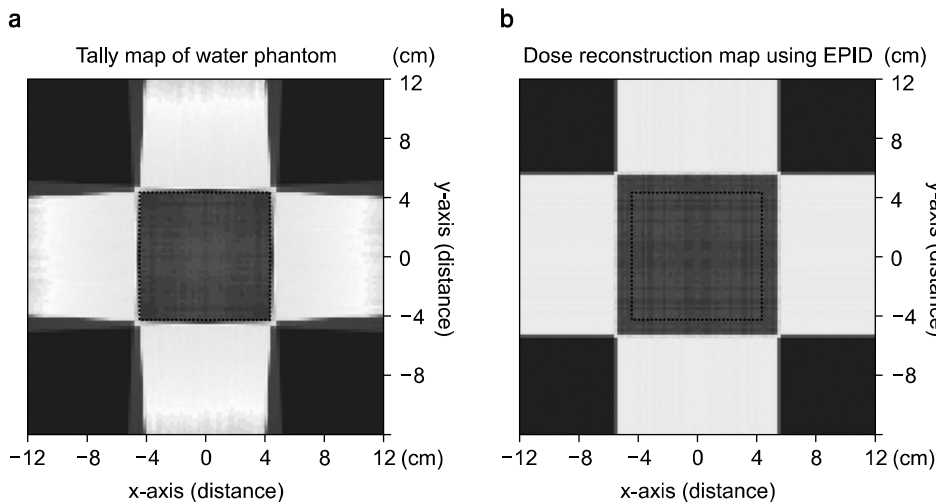


Fig. 4. Accumulated dose diagram of four-portal beam exposures. (a) absorbed dose of water phantom (b) dose reconstruction diagram of EPID dose with calculation factor using back-projection.

의 흡수 선량이 도출되었다.

EPID로부터 얻은 선량 프로파일에 앞서 구한 두 가지의 계수 값을 곱하고 이를 다시 역으로 투사하여 4문으로 겹친 뒤, 해당 관심 영역에서의 흡수 선량을 얻을 수 있었다. EPID에 계측 되는 선량 영역은 물 팬텀 내부의 흡수 영역 보다 크기 때문에 기하학적 감소 부분 역시 계산하였다. 이 계산 법은 단순한 co-relation 방법을 통하여 계산하였으며 물 팬텀 내부에서 계측 된 부분과 동일한 부분만으로 한정하였다. Fig. 4의 (b)는 계수 값이 모두 곱해진 EPID 선량 프로파일에 대하여 0°, 90°, 180°, 270°의 4 방향 역 투사가 이루어진 그림이고 검은색 점선이 관심 영역이다. 역시 물 팬텀의 경우와 동일하게 관심 영역의 누적 선량을 계산해 본 결과 평균 3.4354 MeV/g의 흡수 선량이 검출되었다. 이는 앞서 계측 된 물 팬텀 내부의 누적 선량과 0.6536% 선량 오차를 보였다.

고찰 및 결론

본 연구에서는 방사선 치료 시 얻어지는 EPID 선량 계측으로부터 내부 흡수 선량 예측을 위한 계수 값을 계산해 보고 그 계수 값을 토대로 선량 재구성을 실시하여 실제 내부에 흡수된 흡수 선량과 비교 평가하였다.

본 연구는 일반적인 전산모사를 이용한 연구이고 절대값을 제공하는 것이 아닌 상대적인 비교 값을 제공하여 실제 실험에서 본 연구에서 시행한 calibration 작업이 반드시 수반되어야 한다. Calibration을 토대로 EPID에서 얻어진 선량 값에 계수 값을 함께 연산하여 선량 재구성을 할 수 있는데, 본 연구는 전산모사를 통하여 방법과 척도를 제시하고자 하였다.

Fig. 4(a)에서 물 팬텀에서 획득한 tally map과 Fig. 4(b)의 EPID를 이용한 선량 재구성 map에서 64 cm²로 지정한 관심 영역의 크기는 동일하였으나 Fig. 4(b)가 더 크게 나오는 것을 확인할 수 있었다. 이는 실제 EPID의 위치는 물 팬텀 보다 아래에 위치하며 전산 모사 상에서 10 cm의 거리 차이를 두었는데, 선원으로부터 거리의 역자승 법칙에 의하여 EPID에서 역 투사하고 선량 재구성한 것은 더 많은 정보를 가지므로 커지게 된다.

전산모사에서 일반적인 기하학적 정보는 실제와 동일하게 하였지만 소스 정보에 있어서 2 MeV의 단일 에너지를 사용하였다는 점에서 오차 결과가 작게 나온 것을 볼 수 있었다. 실제 실험에서는 6 MV 기준으로 1.5~2 MeV 정도의 광자선이 가장 빈출되며 이것이 재구성에 있어서 가장

많은 영향을 줄 수 있기 때문에 대표적인 사례만으로 선정하여 전산 모사한 연구이다. 실질적으로 소스 정보를 입력하게 되면 본 연구에서 도출된 오차보다 더 크게 도출될 것으로 예상된다. 하지만 본 연구를 통하여 EPID와 calibration만으로 선량 재구성 시 어느 정도의 계수 값이 필요하지와 계산된 계수 값을 적용하였을 때 어느 정도의 오차를 가질 수 있는지를 전산모사로 알아본 의미 있는 연구라 판단되며, 이를 토대로 다른 에너지 영역 대의 광자선까지 모사가 된다면 선량 재구성에 있어서 한 층 더 정확한 평가가 이루어질 것이라 사료된다.

참 고 문 헌

1. Chang J, Obcemea CH, Sillanpaa J, Mechalakos J, Burman C: Use of EPID for leaf position accuracy QA of dynamic multi-leaf collimator (DMLC) treatment. *Med Phys* 31(7): 2091-2096 (2004)
2. Parent L, Seco J, Evans PM, Dance DR, Fielding A: Evaluation of two methods of predicting MLC leaf positions using EPID measurements. *Med Phys* 33(9):3174-3182 (2006)
3. Vial P, Greer PB, Hunt P, Oliver L, Baldock C: The impact of MLC transmitted radiation on EPID dosimetry for dynamic MLC beams. *Med Phys* 35(4):1267-1277 (2008)
4. Greer PB, Cadman P, Lee C, Bzdusek K: An energy fluence-convolution model for amorphous silicon EPID dose prediction. *Med Phys* 36(2):547-555 (2009)
5. McDermott LN, Wendling M, van Asselen B, et al: Clinical experience with EPID dosimetry for prostate IMRT pre-treatment dose verification. *Med Phys* 33(10):3921-3930 (2006)
6. Spezi E, Lewis DG: Full forward Monte Carlo calculation of portal dose from MLC collimated treatment beams. *Phys Med Biol* 47:377-390 (2002)
7. Paganetti H, Jiang H, Lee SY, Kooy HM: Accurate Monte Carlo simulations for nozzle design, commissioning and quality assurance for a proton radiation therapy facility. *Med Phys* 31(7):2107-2118 (2004)
8. Newhauser W, Fontenot J, Zheng Y, et al: Monte Carlo simulations for configuring and testing an analytical proton dose-calculation algorithm. *Phys Med Biol* 52(15):4569-4584 (2007)
9. Titt U, Newhauser WD: Neutron shielding calculations in a proton therapy facility based on Monte Carlo simulations and analytical models: criterion for selecting the method of choice. *Radiat Prot Dosim* 115(1-4):144-148 (2005)
10. Titt U, Zheng Y, Vassiliev ON, Newhauser WD: Monte Carlo investigation of collimator scatter of proton-therapy beams produced using the passive scattering method. *Phys Med Biol* 53(2):487-504 (2008)
11. Baumgartner A, Steurer A, Maringer FJ: Simulation of photon energy spectra from Varian 2100C and 2300C/D Linacs:

- Simplified estimates with PENELOPE Monte Carlo models. Appl Radiat Isot 67(11):2007-2012 (2009)
12. Partridge M, Ebert M, Hesse BM: IMRT verification by three-dimensional dose reconstruction from portal beam measurements. Med Phys 29(8):1847-1858 (2002)
13. Wendling M, Louwe RJW, LN McDermott, Sonke JJ, van Herk M, Mijnheer BJ: Accurate two-dimensional IMRT verification using a back-projection EPID dosimetry method. Med Phys 33(2):259-273 (2006)

몬테 카를로 전산모사를 통한 EPID의 외부적 선량 재구성과 내부 선량 계측과의 비교 및 분석

가톨릭대학교 의과대학 의공학교실, 가톨릭대학교 생체의학연구소

정주영 · 윤도균 · 서태석

본 연구의 목적은 electronic portal imaging device (EPID)를 통하여 방사선 치료를 받는 환자로부터 투과해 나오는 선량으로 외부적인 선량 재구성과 몬테카를로 전산모사로부터 도출되는 내부 선량 계측과의 관계를 도출하고 이를 분석하기 위한 연구로 진행되었다. 본 연구는 전산모사 연구로써 두 가지의 경우를 비교 분석하고 이와 비슷한 연구에 대한 기본적인 지표를 제공하고자 시행되었다. 실험에 관한 기하학적 정보와 방사선 소스에 대한 정보를 몬테카를로 전산모사 툴인 Monte Carlo n-particle (MCNPX)에 입력하였고 EPID 이미지 도출을 위하여 MCNPX 내에 tally카드를 이용하여 선량 정보를 도출하고 이를 영상화 할 수 있도록 하였다. 또한 내부적인 계측을 위하여 물 팬텀을 소스와 표면의 거리(source to surface distance, SSD)가 100 cm이 되도록 설정하였으며, 그보다 10 cm 아래에 EPID를 위치시켰다. 내부 계측은 물 팬텀 자체에서 흡수되는 흡수 선량을 mesh tally로 수집하였고, 4문 조사를 통하여 중첩된 선량에 대한 데이터를 획득하였다. 그와 동시에 EPID에서 물을 투과해 나오는 선량을 획득 한 뒤 역 투사 방법을 사용하여 선량 재구성을 하였다. 이들의 경우를 비교하기 위해 자체적인 교정(calibration)을 통하여 투과해 나온 선량과 흡수된 선량과의 관계를 비교하고 4문 조사를 통하여 물 팬텀 내의 특정 부분에 대한 중첩된 선량 데이터와 EPID를 통해 재구성한 선량 데이터를 분석하였다. 물 팬텀과 EPID에서 획득한 누적 선량의 합은 각각 평균 3.4580 MeV/g과 3.4354 MeV/g이었다. 이는 앞서 계측된 물 팬텀 내부의 누적 선량과 0.6536% 선량 오차를 보였다.

중심단어: MCNPX, 몬테카를로 전산모사, EPID 선량 재구성, 내부 선량 계측, 교정