

몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 양성자 조사에 따른 Polymer Gel 내부의 선량 분포 특성 평가

- Estimation of the Characteristics for the Dose Distribution in the Polymer Gel by Means of Monte Carlo Simulation -

한국원자력의학원 방사선의학연구소 방사선안전관리팀 · 국가방사선비상진료센터 보건물리팀¹⁾ · 고려대학교 보건과학대학 방사선학과²⁾

박민석 · 김기섭 · 정해조 · 박세영¹⁾ · 최인석²⁾ · 김현지²⁾ · 윤용수²⁾ · 김정민²⁾

— 국문초록 —

본 연구는 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 양성자 빔을 피사체에 조사했을 때 발생하는 양성자, 즉발감마선 그리고 양성자 유발 중성자의 3차원적 공간분포를 polymer gel 선량계를 통해 구하고, 이를 물 팬텀에서 조사한 결과와 비교하여 3차원적 선량 분포의 정확성에 대해 알아보려고 한다. 본 연구에서 사용 된 polymer gel 선량계는 Gelatin, Methacrylic acid, Hydroquinone, Tetrakis 그리고 증류수로 이루어진 혼합물로 그 밀도는 1.04 g/cm³ 으로 물의 밀도인 0.9998 g/cm³ 과 유사하다. 본 시뮬레이션에서는 72 MeV, 116 MeV, 140 MeV 의 양성자 빔이 사용되었다. 양성자 빔은 팬텀의 핵과 반응을 하고 양성자 빔으로 인해 여기된 핵이 다시 안정하게 되기 위해 즉발감마선 그리고 양성자 유발 중성자를 방출한다. 양성자와 즉발감마선 그리고 양성자 유발 중성자는 polymer gel 선량계와 물 팬텀에서 각각 검출하였다. 3차원적 선량 분포를 얻기 위한 검출 간격은 2 mm로 하여 선량 분포를 획득하였다. Polymer gel 선량계에서의 양성자의 Bragg-peak를 구해 본 결과 Bragg-peak 지점이 물 팬텀에서의 경우와 유사하게 나타남을 확인 할 수 있었다. 72 MeV, 116 MeV, 그리고 140 MeV의 양성자 빔을 polymer gel 그리고 물 팬텀에 조사했을 때 그 내부에서의 양성자 그리고 즉발감마선의 선량 분포는 polymer gel, 물 팬텀 각각 유사한 선량분포를 가짐을 감마 인덱스 평균으로 확인 할 수 있었다. 하지만 양성자 유발 중성자의 경우 물 팬텀에서는 검출이 된 반면 polymer gel 선량계에서는 검출이 되지 않았다. Polymer Gel 선량계는 3차원적 선량 분포를 얻는데 유용한 선량계이지만 양성자 조사 시 그 유발 중성자의 검출에는 한계를 보임을 확인할 수 있었다.

중심 단어: Polymer gel 선량계, 양성자 빔, 즉발감마선, 양성자 유발 중성자, 몬테카를로 시뮬레이션

I. 서 론

현재, 양성자 빔을 이용한 암 치료는 점점 확대되는 추세

이다. 기존 선형가속기의 X-선을 이용한 치료법이 표피선량이 크고 표적 이후의 장기에도 영향을 주는데 반해 양성자 치료는 양성자 고유의 Bragg-peak를 이용하여 치료하기 때문에 치료 외 장기, 조직에 대한 방사선의 영향을 줄일 수 있고 X-선을 이용한 치료에 비해 더 효과적으로 방사선을 치료 목적장기에 집중시킬 수 있다¹⁾. Bragg-peak는 양성자, 알파입자와 같은 하전입자가 물질을 투과할 때 투과 중 비정 끝단에서 입자의 에너지를 대부분 잃는

* 접수일(2013년 4월 30일), 1차 심사일(2013년 5월 6일), 2차 심사일(2013년 6월 3일), 확정일(2013년 6월 12일)

교신저자: 정해조, (139-706) 서울시 노원구 공릉동 한국원자력의학원 방사선의학연구소 방사선안전관리팀
Tel : 02-970-1346, FAX : 02-970-1347
E-mail : haijo@kirams.re.kr

것으로 이는 하전입자의 에너지에 의존한다^{2,3)}.

양성자 빔의 선량분포 및 비정을 측정하는 방법으로는 직접 양성자 입자를 계측기로 측정하는 방법과 간접적으로 양성자와 물질의 상호작용에 따른 방사선 또는 입자를 계측기로 측정하는 방법이 있다. 양성자 빔을 직접 측정하는 장비로는 필름(Film), 이온 챔버(Ion Chamber), 다이오드(Diode) 선량계 등이 있다. 하지만 필름을 제외하고는 1차원적인 선량 분포를 얻기 때문에 양성자가 조사하는 분포를 알기에는 부적합하다. 필름의 경우에는 2차원적으로 선량 분포를 얻을 수 있지만 3차원적으로 선량분포를 얻기에는 무리가 있으며 분석에 부가적인 비용요소가 드는 단점이 있다⁴⁾. 양성자 빔 분포의 간접측정은 양성자와 물질의 핵자와의 상호작용으로 즉발감마선, 양성자 유발 중성자 그리고 양전자 등이 발생되어 이를 외부 계측장비로 측정하는 방법이다⁵⁻⁷⁾. 간접측정의 경우 양성자로 인해 유발된 입자를 검출하여 양성자의 분포를 추정하여야 하기 때문에 필름 또는 이온 챔버로 측정하는 직접측정값에 비해 부정확할 우려가 있다. 또한 유발된 입자들의 에너지가 강하여 검출 영상의 해상력이 떨어지게 되어 정확한 선량 분포 분석에 어려움이 있다^{7,8)}.

Polymer gel은 양성자 치료 시 양성자 빔의 조사에 따른 공간적 분포를 확인하기 위해 사용 가능성이 연구되고 있지만, 측정의 부정확성과 안정성에 관한 문제가 있었다⁹⁾. 하지만 현재 많은 연구개발에 힘입어 많은 기술적 발전을 이루었고 다른 선량계와 비교했을 때 3차원적 선량 분포를 구현할 수 있고 인체등가물질을 이용하여 자유로운 형태로 제작함으로써 선량 측정에 사용될 수 있다는 장점이 있어 방사선 치료분야에서 점차 사용되고 있다. Polymer gel 선량계는 방사선에 의해 자유기를 생성하는데, 이는 Gel 속에 균일하게 분포되어 있는 단량체가 중

합되어 중합체를 형성하는 원리를 이용한 것으로 방사선 량에 따라 중합되는 정도가 다른 차이를 이용하여 선량 분포 측정에 사용된다¹⁰⁻¹³⁾.

실제 제작한 polymer gel 선량계에 양성자 빔을 조사하여 3차원적 선량 분포를 얻는 것은 현재 연구가 되고 있지만 polymer gel 선량계 내부의 3차원적 선량 분포가 어떠한 입자의 분포를 많이 또는 적게 반영하는지는 실험으로 확인할 수 가 없다. 따라서 본 연구에서는 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 양성자 빔의 조사에 따른 polymer gel 선량계 내부의 3차원적 선량분포를 물 팬텀의 경우와 비교하여, 양성자 및 양성자 유발 2차 방사선과의 분포의 차이를 평가하고자 한다.

II. 실험재료 및 방법

Polymer gel의 제작에는 여러 가지 방법이 있고 그 종류 또한 다양하다. 본 연구에서는 경기대학교에서 제작한 Gelatin(300 Bloom, Sigma-Aldrich, USA), Methacrylic acid(MAA, Sigma-Aldrich, USA), Hydroquinone(HQ, Sigma-Aldrich, USA), Tetrakis(Hydroxymethyl phosphonium chloride, THPC, Sigma-Aldrich, USA) 그리고 증류수를 혼합하여 만든 gel 선량계의 재원을 바탕으로 연구를 진행하였다⁴⁾. Polymer gel 선량계의 밀도는 1.04 g/m^3 이었고 유효 원자번호는 7.10 이었다. Polymer gel 선량계를 물과 비교했을 때 물의 밀도 0.9998 g/m^3 , 유효 원자번호 7.21 의 값과 유사하였다. 또한 polymer gel과 물의 구성 원소 비율을 분석해 보면 polymer gel은 H: 10.55 %, C: 7.37 %, N: 1.1 %, O: 80.98 % 이고 물은 H: 11.20 %, O: 88.80 % 으로 구성 되어 있다⁴⁾. C 와 N 이 혼합물로 섞여 있는 것을 제외 하면 물과 polymer

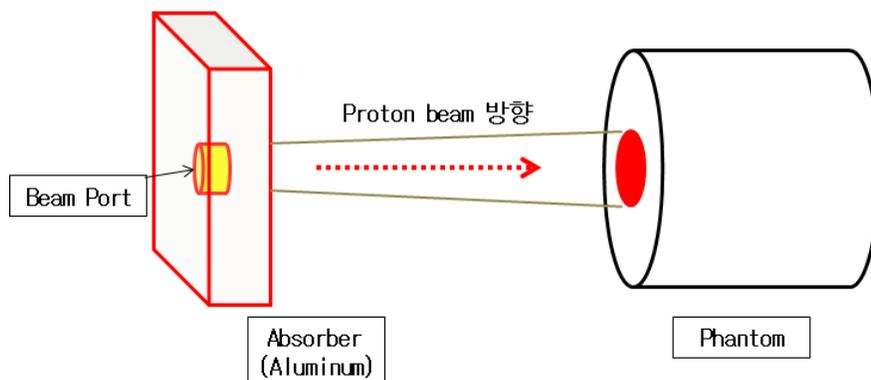


Fig. 1. Geometric representation of MonteCarlo Simulation

gel은 그 원소 구성 비율도 유사한 것을 확인 할 수 있다. 위 결과를 바탕으로 polymer gel 선량계는 물과 흡사한 물질이며 이는 빔의 선량분포 평가에서 인체와 유사한 내부 선량 분포를 gel 선량계로 평가 할 수 있음을 나타낸다.

양성자 빔 조사에 따른 polymer gel 내부의 선량분포를 모사하기 위해 본 연구는 Monte Carlo radiation transport code (MCNPX 2.7.0, Los Alamos National Laboratory)를 사용하였다. 실제 polymer gel 선량계에 빔을 조사하게 되면 양성자, 즉발감마선, 양성자 유발 중성자가 모두 검출이 되고 이를 분리해서 측정해 낼 수 없고 하나의 선량분포로만 나타나게 된다. 그래서 본 연구는 시뮬레이션을 통해 양성자, 즉발감마선, 양성자 유발 중성자를 분리 측정하였다. 시뮬레이션의 조건 및 기하학적 배치는 경기대에서 이루어진 polymer gel 선량계의 특성 평가를 위한 실제 양성자 조사 실험을 바탕으로 이루어 졌으며 이를 Fig. 1에 나타내었다^{4,11)}. Beam Port와 팬텀 사이의 거리는 150 cm이며 빔의 조사야는 원형으로 지름 5 cm로 균일하게 팬텀의 상단부로 조사하였다. 팬텀은 원통형으로 지름 6.2 cm, 높이는 16.2 cm 이다. 양성자 빔은 저에너지, 중에너지 그리고 고에너지의 경우를 비교하기 위해 72 MeV, 116 MeV 그리고 140 MeV의 에너지를 사용하였고 양성자의 조사와 그로인해 발생하는 양성자, 즉발감마선 그리고 양성자 유발 중성자는 polymer

gel, 물로 각각 채워진 팬텀 내부에서 측정을 하였고 X-Y 평면 그리고 Z 평면 분포로 나타내어 선량 분포를 비교하였다. 팬텀 내부의 검출 간격은 2 mm 이다.

Polymer Gel과 물팬텀 내부의 선량분포를 정량적으로 평가하기 위하여 gamma evaluation을 수행하였다. Gamma evaluation은 선량의 차이(ΔD)와 DTA(Distance to agreement)를 모두 평가하기 위해 사용되는 방법으로 D A Low, et al. 에 의해 처음 소개되었다¹⁴⁾. 본 연구에서는 2차원 gamma evaluation을 수행하였고 평가 후 산출되는 γ 값이 1보다 크면 ($\gamma > 1$) pass-fail로 두 선량 분포가 일치하지 않음을 나타내고, 반대로 γ 값이 1과 같거나 작으면 ($\gamma \leq 1$) pass로 두 선량 분포가 일치함을 나타낸다.

III. 실험 결과

양성자 조사에 따른 양성자, 즉발감마선, 양성자 유발 중성자의 3차원적 선량 분포를 시뮬레이션을 통해 구하였다. Polymer gel 그리고 물 팬텀 내부에서의 선량 분포는 조사한 양성자의 에너지별로 구분하여 나타내었고, 또한 X(Y)축, Z축의 경우 각각으로 나타내었다. Z축의 영상일 경우 양성자의 각각의 에너지에 따른 Bragg-peak 지점을

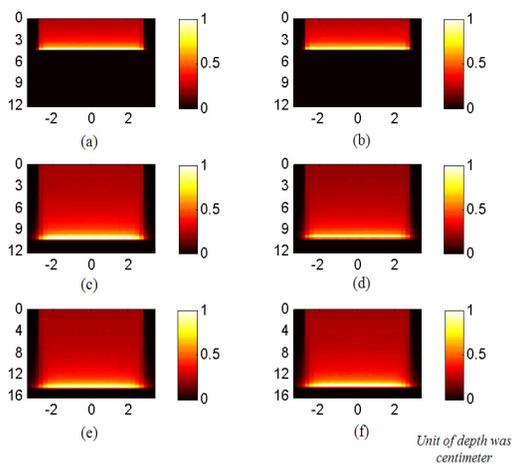


Fig. 2. Proton dose distribution for 72 MeV, 116 MeV and 140 MeV in X-Y Axis
(a) 72 MeV in polymer gel, (b) 72 MeV in water phantom, (c) 116 MeV in polymer gel, (d) 116 MeV in water phantom, (e) 140 MeV in polymer gel, (f) 140 MeV in water phantom

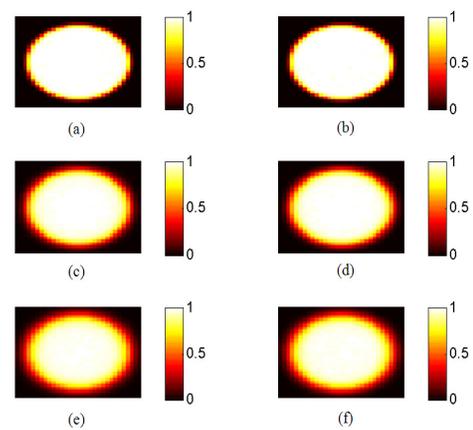


Fig. 3. Proton dose distribution for 72 MeV, 116 MeV and 140 MeV in Z Axis
(a) 72 MeV in polymer gel, (b) 72 MeV in water phantom, (c) 116 MeV in polymer gel, (d) 116 MeV in water phantom, (e) 140 MeV in polymer gel, (f) 140 MeV in water phantom

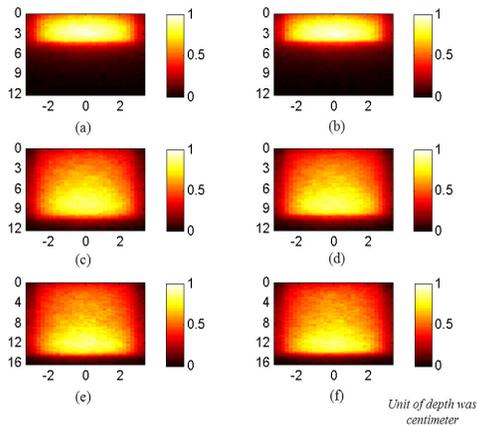


Fig. 4. Photon dose distribution for 72 MeV, 116 MeV and 140 MeV in X-Y Axis
 (a) 72 MeV in polymer gel, (b) 72 MeV in water phantom, (c) 116 MeV in polymer gel, (d) 116 MeV in water phantom, (e) 140 MeV in polymer gel, (f) 140 MeV in water phantom

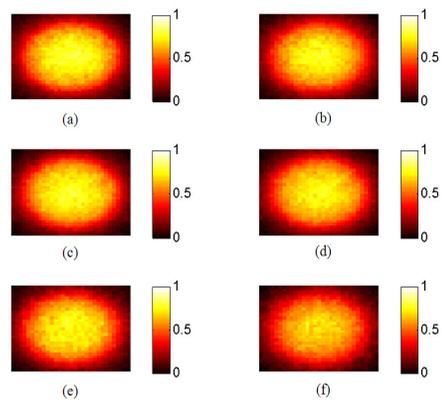


Fig. 5. Photon dose distribution for 72 MeV, 116 MeV and 140 MeV in Z Axis
 (a) 72 MeV in polymer gel, (b) 72 MeV in water phantom, (c) 116 MeV in polymer gel, (d) 116 MeV in water phantom, (e) 140 MeV in polymer gel, (f) 140 MeV in water phantom

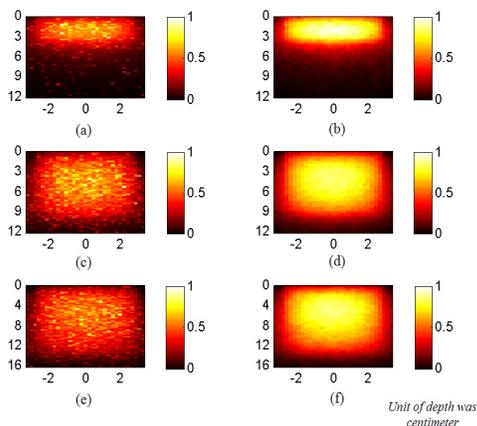


Fig. 6. Proton induced neutron dose distribution for 72 MeV, 116 MeV and 140 MeV in X-Y Axis
 (a) 72 MeV in polymer gel, (b) 72 MeV in water phantom, (c) 116 MeV in polymer gel, (d) 116 MeV in water phantom, (e) 140 MeV in polymer gel, (f) 140 MeV in water phantom

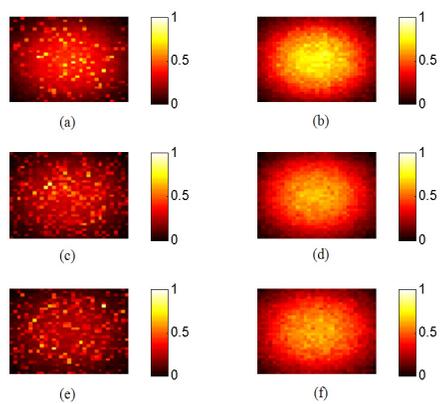


Fig. 7. Proton induced neutron dose distribution for 72 MeV, 116 MeV and 140 MeV in Z Axis
 (a) 72 MeV in polymer gel, (b) 72 MeV in water phantom, (c) 116 MeV in polymer gel, (d) 116 MeV in water phantom, (e) 140 MeV in polymer gel, (f) 140 MeV in water phantom

기준으로 영상을 구현하였다. 각각의 입자에 따른 선량 분포는 Normalization을 하여 영상으로 나타내었다.

Fig. 2과 Fig. 3은 팬텀 내부의 양성자의 선량분포를 나타낸다. Fig. 2에서 polymer gel과 물 팬텀을 비교했을 때 양성자의 Bragg-peak가 나타남을 확인할 수 있었고 72 MeV 일 때 그 위치는 물에서의 Bragg-peak와 polymer gel에서의 양성자 Bragg-peak는 44 mm 그리

고 46 mm에서 그 위치가 나타났다. 또한 116 MeV의 경우 100 mm 그리고 102 mm, 140 MeV 일 때 138 mm 그리고 140 mm로 각각 나타났다. 물과 polymer gel의 Bragg-peak 지점 차이는 시뮬레이션 팬텀의 검출 간격인 2 mm정도로 거의 차이가 나지 않음을 확인할 수 있었다. 또한 polymer gel 내부에서의 양성자의 선량분포가 물에서의 선량분포와 비교했을 때 거의 같은 선량 분포를 나타

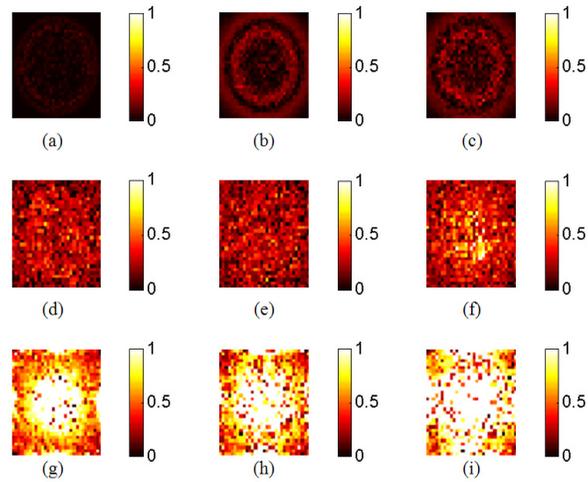


Fig. 9. Gamma evaluation for dose distribution of polymer gel and water phantom in Z Axis (a) Comparison of proton distribution in 72 MeV, (b) Comparison of proton distribution in 116 MeV, (c) Comparison of proton distribution in 140 MeV, (d) Comparison of prompt gamma distribution in 72 MeV, (e) Comparison of prompt gamma distribution in 116 MeV, (f) Comparison of prompt gamma distribution in 140 MeV, (g) Comparison of proton induced neutron distribution in 72 MeV, (h) Comparison of proton induced neutron distribution in 116 MeV, (i) Comparison of proton induced neutron distribution in 140 MeV

Table 1. Pass/Fail ratio of two-dimensional gamma evaluation

	72 MeV	116 MeV	140 MeV
Gamma value for proton distribution	0.045	0.170	0.182
Gamma value for prompt gamma distribution	0.403	0.401	0.530
Gamma value for proton induced neutron distribution	1.196	1.294	1.651

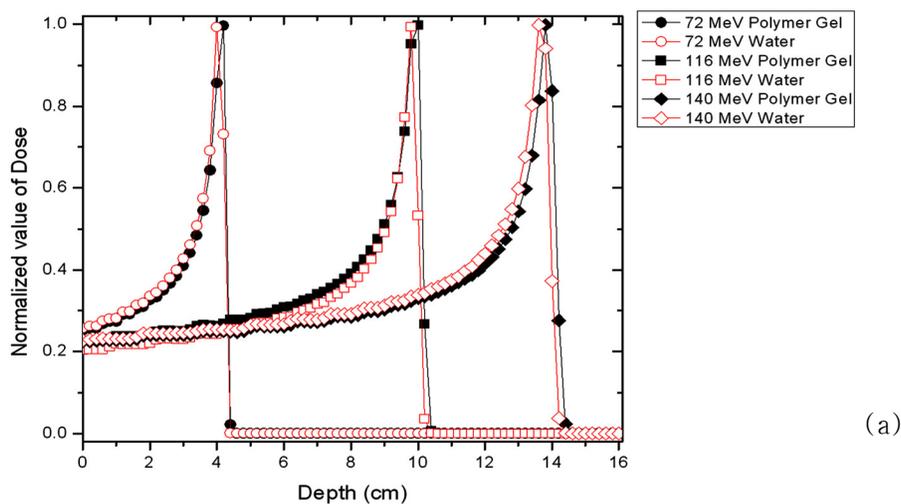
념을 확인할 수 있다.

Fig. 4과 Fig. 5는 팬텀 내부의 즉발감마선의 선량분포를 나타낸다. 영상에서 polymer gel과 물에서의 선량분포는 거의 같음을 확인 할 수 있고 양성자의 Bragg-peak 지점 이후도 별도의 선량 분포 없이 양성자의 선량 분포와 비슷하게 즉발감마선도 선량분포를 나타남을 확인할 수 있었다. 다만 팬텀 외부에서의 즉발감마선의 측정에서는 양성자의 비정을 즉발감마선으로 추정할 수 있고 그 지점 또한 일치하지만⁷⁾ 팬텀 내부에서 측정하는 경우에는 양성자의 Bragg-peak 지점과 다른 곳에 즉발감마선의 측정치가 최대가 됨을 확인하였다.

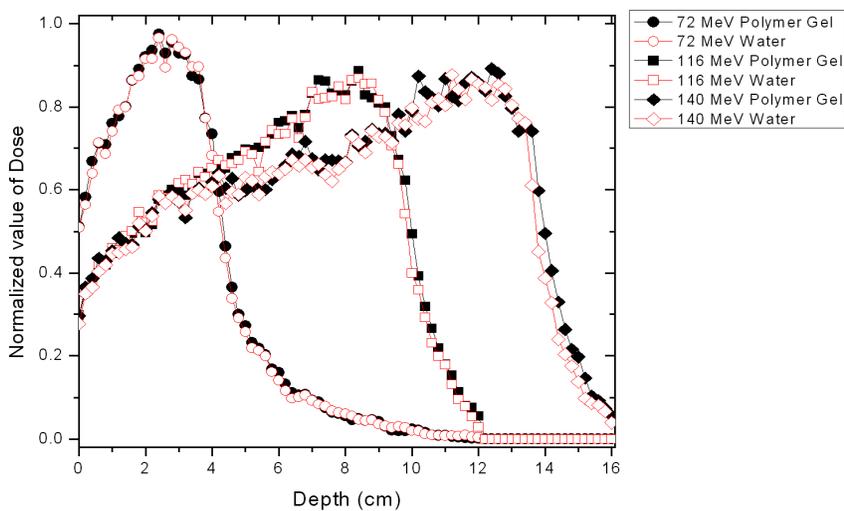
Fig. 6과 Fig. 7에 팬텀 내부의 양성자 유발 중성자의 선량분포를 나타내었다. 양성자 유발 중성자의 경우 물에서의 선량분포와 polymer gel에서의 선량분포가 전혀 다른 경향을 나타냄을 확인할 수 있다. 물 팬텀에서 측정

된 양성자 유발 중성자는 즉발감마선의 경우와 비교했을 때 선명하게 드러나지는 않지만 그 분포가 측정됨에 반해 polymer gel에서는 양성자 유발 중성자의 선량 분포가 나타나지 않음을 확인 할 수 있었다. Fig. 7의 Z축에서의 영상을 보면 선량분포의 차이를 더 명확하게 확인할 수 있는데 polymer gel에서는 물에서의 분포와 비교했을 때 분포의 피크지점도 불명확하게 나타남을 확인할 수 있었다.

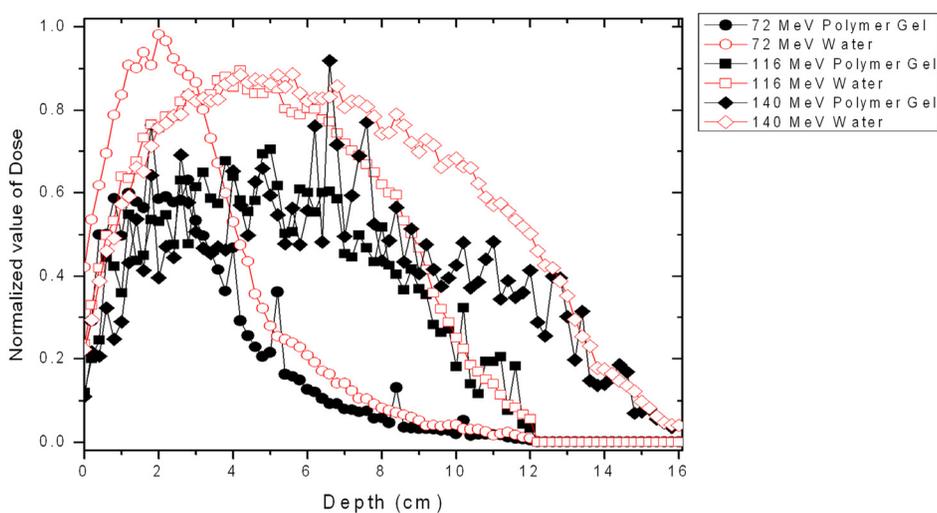
위의 선량분포를 정량적으로 평가하기 위하여 X-Y Axis 영상의 경우는 양성자, 즉발감마선 그리고 양성자 유발 중성자 분포의 Depth profile을 구하였고 Z Axis 영상의 경우 gamma evaluation을 하여 분포 일치 정도를 평가하였다. Fig. 8 은 양성자, 즉발감마선, 양성자 유발 중성자의 depth profile을 입자별 그리고 에너지별로 구분하여 나타내었다. 양성자 (Fig. 8(a))와 즉발감마선 (Fig. 8(b))의 경우 polymer gel 내부에서의 profile과 물



(a)



(b)



(c)

Fig .8. Depth profile for distribution of proton, prompt gamma rays and proton induced neutron in polymer gel and water phantom (X-Y Axis) (a) Proton depth profile for 72 MeV, 116 MeV, 140 MeV, (b) Prompt gamma depth profile for 72 MeV, 116 MeV, 140 MeV, (c) Proton induced neutron depth profile for 72 MeV, 116 MeV, 140 MeV

팬텀 내부에서의 프로파일은 각각의 에너지에 따라 같은 경향을 가짐을 확인 할 수 있었다. 하지만 양성자 유발 중성자 (Fig. 8(c))의 경우 물 팬텀 내부에서의 profile은 값의 요동이 적고 경향을 가짐을 확인 할 수 있으나 polymer gel 내부에서의 profile 값은 값의 요동이 크고 동시에 물 팬텀 내부에서의 profile과는 일치하지 않는 결과를 나타내었다.

Fig. 9는 polymer gel과 물 팬텀 내부에서의 (Z Axis) 양성자 및 그로 인한 2차 방사선의 선량 분포의 일치 정도를 정량적으로 평가하기 위하여 gamma evaluation을 한 결과이다. DTA(Distance To Agreement)는 3 mm 그리고 ΔD 는 3 % 로 하여 gamma evaluation을 수행하였다¹⁵⁻¹⁶. 양성자 분포에 대한 gamma evaluation은 Fig. 9(a, b, c)에 나타나 있다. 입사 양성자의 에너지가 증가할수록 값이 불일치 정도가 증가하지만 양성자의 분포의 경우 polymer gel과 물 팬텀이 매우 유사한 선량 분포를 가짐을 확인 할 수 있다. 즉발감마선의 분포에 대한 gamma evaluation은 Fig. 9(d, e, f)에서 확인 할 수 있다. 즉발감마선의 경우 양성자의 분포에 비해 polymer gel 그리고 물 팬텀에서의 분포의 차이가 더 많음을 확인 할 수 있지만 입사 양성자의 에너지가 140 MeV인 Fig. 9(f) 영상의 중앙부분을 제외하고는 모두 gamma value가 1 이하를 나타내어 선량 분포가 일치함을 확인 할 수 있었다. 하지만 양성자 유발 중성자의 경우 (Fig. 9(g, h, i)) 입사 양성자의 에너지와 무관하게 polymer gel 그리고 물 팬텀 내부에서의 선량 분포가 불일치함을 확인 할 수 있었다.

Table 1은 입사 양성자의 에너지 그리고 검출 입자 및 방사선에 따른 2차원 gamma evaluation 값을 보여주고 있다. 양성자 그리고 즉발감마선의 감마값은 세 가지 에너지 영역 모두 1 이하의 값을 나타내고 있어 polymer gel 그리고 물 팬텀에서의 선량 분포가 일치함을 확인 할 수 있다. 하지만 양성자 유발 중성자의 경우 1.196, 1.294, 1.651과 같이 1 이상의 값을 가지고 있어 선량 분포가 일치하지 않음을 확인 할 수 있었다.

IV. 고찰 및 결론

본 연구는 polymer gel 선량계와 물 팬텀에 양성자 빔을 각각 조사하였을 때 그 내부에서 양성자를 비롯한 양성자 유발 입자들의 선량 분포를 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 확인, 비교하고자 하였다. 양성자 빔을 물 팬텀 그리

고 polymer gel에 각각 조사하였을 경우 내부에서 나타나는 Bragg-peak 지점은 시뮬레이션 팬텀의 검출 간격만큼 차이가 날 정도로 작은 차이를 나타내었다. 물 팬텀 내부에서의 양성자 빔의 Bragg-peak 지점은 72 MeV 일 때 44 mm, 116 MeV 일 때 100 mm 그리고 140 MeV 일 때 138 mm 으로 이는 Geant4 코드 시뮬레이션으로 구한 양성자의 Bragg-peak 지점과 일치함을 확인 할 수 있었다¹⁷. 또한 gamma evaluation을 통한 정량적 평가에서도 polymer gel 내부의 양성자의 분포가 물 팬텀과 유사함을 확인 할 수 있었다.

즉발감마선의 경우도 팬텀 내부에서의 선량 분포가 polymer gel 그리고 물 팬텀의 경우 유사하게 나타남을 즉발감마선 분포 영상 및 gamma evaluation으로 확인 할 수 있었다. 하지만 팬텀 내부의 즉발감마선의 선량분포만으로 양성자의 Bragg-peak 지점을 측정 및 추정하기는 어려웠다. 이는 팬텀 내부의 즉발감마선 분포 측정을 위해 나누어준 공간에서 감마선은 Bragg-peak 지점에서 대부분의 에너지를 주고 사라지는 중입자 방사선원과 다르게 에너지를 잃으면서 진행하기 때문에 Bragg-peak 지점에서 최대 방사선 측정치를 나타내지 않았다.

양성자 유발 중성자의 경우 polymer gel과 물 팬텀에서의 선량 분포가 많은 차이를 나타내었다. 물 팬텀의 경우 양성자 유발 중성자가 검출이 되고 그 분포를 나타낸 반면 polymer gel의 경우 선량 분포를 나타내지 않았다. 정량적 평가에서도 그 양성자 유발 중성자의 분포 차이가 확연하게 나타남을 확인 할 수 있었다. 중성자의 경우 차폐 또는 검출의 경우 파라핀과 같이 수소(H)가 많은 부분을 차지하는 물질을 사용하여 차폐하거나 붕소(B)나 리튬(Li)을 이용하여 검출을 한다. Polymer gel과 물 팬텀의 원소비율 분석을 하였을 때 물 팬텀에서의 수소(H)의 비율은 11.20 % 이었고 polymer gel에서의 수소(H)의 비율은 10.55 % 로 큰 차이를 나타내지는 않았다. 이러한 작은 차이에도 불구하고 polymer gel에서는 양성자 유발 중성자를 검출 하지 못함을 확인하였다. 이는 중성자선이 고 LET(Linear energy transfer) 방사선임과 동시에 양성자로부터 유발되는 중성자 입자의 에너지도 높기 때문이다. Polymer gel 선량계는 고 LET 방사선의 검출에는 그 민감도가 떨어짐을 보여¹⁸⁻¹⁹ 본 연구에서 사용된 선량계는 산소제거 효과가 뛰어난 Tetrakis를 첨가하여 선량 반응비를 높이고자 하였지만 양성자 유발 중성자의 분포를 검출하기에는 부족하였다. 에너지가 0.5~100 eV 인 에피서멀 중성자(epithemal neutron)의 경우 Bang-3 polymer gel로 검출이 가능함을 확인하였지만²⁰ 양성자 유발 중성

자는 수 MeV 이상의 에너지를 가지기 때문에 검출에는 어려움이 있다.

종합적으로 양성자 빔의 조사에 따른 polymer gel의 선량 분포를 확인하였을 때 양성자 빔과 즉발감마선의 선량 분포는 물 팬텀과 동일하게 반영함을 확인하였다. 하지만 양성자 유발 중성자의 선량분포는 polymer gel과 물 팬텀 사이에서 큰 차이를 나타냄을 확인 할 수 있고 polymer gel에서의 profile 및 분포 영상을 보았을 때 물 팬텀 내부와는 달리 유발 중성자에 대한 정보를 반영하지 못함을 확인할 수 있었다. 본 시뮬레이션을 통해 양성자 조사 시 polymer gel 내부에서 양성자 유발 중성자의 선량 분포는 실제와 많은 차이가 있음을 확인 할 수 있었고 추후 연구에서 양성자로 인한 2차 방사선의 측정 정확도를 높이는 연구가 진행되었으면 한다.

참고문헌

1. A. Boyer, M. Goitein, A. Lomax, E. Pedroni : Radiation in the Treatment of Cancer, Phys. Today, 55(9), 34-36, 2002
2. H. Bethe : Moliere's Theory of Multiple scattering, Phys. Rev. 89, 1256-1266, 1953
3. F.M. Khan : The Physics of Radiation Therapy, 4th ed., Lippincott Williams & Wilkins, 54-70, 2010
4. J.H. Bong : Dosimetric Characteristics of a Polymer Gel for Proton beam, Kyonggi University, 2012
5. C.H. Min, C.H. Kim, M.Y. Youn, J.W. Kim : Prompt gamma measurements for locating the dose-fall-off region in the proton therapy, Appl. Phys. Lett., 89, 183517, 2006
6. C.H. Min, H.R. Lee, C.H. Kim, S.B. Lee : Development of array-type prompt gamma measurement system for in vivo range verification in proton therapy, Med Phys, 39, 2100-2108, 2012
7. M.S. Park, W.H. Lee, J.M. Kim : Estimation of proton distribution by means of three-dimensional reconstruction of prompt gamma rays, Appl. Phys. Lett., 97, 153705, 2010
8. K. Benzion, J.M. Ronald, R. Reuven : Nuclear deexcitation gamma ray lines from accelerated particle interaction, Astrophys. J. Suppl. Ser, 141, 523-541, 2002
9. K.B. McAuley : Fundamentals of Polymer Gel Dosimeters, 56, 35-44, 2006
10. J.H. Bong, K.S. Choi, S.C. Yu, S.I. Kwon, Y.R. Cho, C.H. Park, et al. : Raman Spectroscopy of Irradiated Normoxic Polymethacrylic Acid Gel Dosimeter, Bull. Korean Chem Soc., 32(2), 625-629, 2011
11. J.H. Bong, K.B. Kim, T.K. Yang, I.O. Ko, J.A. Park, K.M. Kim : Dosimetric Characteristics of a Polymer Gel for a 45 MeV Proton Beam, New Physics: Sae Mulli, 62(1), 84-88, 2012
12. C. Baldock, Y. De Deene, S. Doran, G. Ibbott, A. Jirasek, M. Lepage, et al. : Polymer Gels Dosimetry, Phys. Med. Biol., 55, R1-R63, 2010
13. S.Y. Chung, Y.B. Kim, Y.H. Kwon, S. Lee : A study on the evaluation of 3D Dose distribution using Normoxic Polymer Gel, J. Korean Soc. Radiotherapeutic Technol., 19(1), 7-17, 2007
14. D. A. Low, W. B. Harms, S. Mutic, J. A. Purdy : A technique for the quantitative evaluation of dose distributions, Med. Phys., 25(5), 656-661, 1998
15. J. B. Scherman : Development and evaluation of method for comparison of dose distributions in radiotherapy using calculated, synthetic and simulated measured dose distributions, Lund University, 2009
16. D. Park, Y.H. Kim, W.T. Kim, D.W. Kim, D.H. Kim, H.S. Jeon : A method to calculate a pass rate of the gamma-index Analysis in Tomotherapy delivery quality assurance (DQA), Korean Journal of medical physics, 21(4), 340-347, 2010
17. S. Handley, Y. Chen, S. Ahmad : Normalized Bragg Peak Curves for Various Proton Energies in a Cylindrical Water Phantom: A Simulation with MCNPX and GEANT4 Monte Carlo Codes, Med. Phys., 37, 3285, 2010
18. J. Uusi-Simola, S. Heikkinen, P. Kotiluoto, et al. : MAGIC polymer gel for dosimetric verification in boron neutron capture therapy, J. Appl. Med. Phys., 8(2), 114-123, 2007
19. A. Jirasek, C. Duzenili : Relative effectiveness of polyacrylamide gel dosimeters applied to proton

beams: Fourier transform Raman observations and track structure calculations, *Med Phys.* 29, 4, 569–577, 2002

20. J Uusi-Simola, S Savolainen, A Kangasmaki, S Heikkinen, J Perkio, U Abo Ramadan, et al.

:Study of the relative dose-response of BANG-3 polymer gel dosimeters in epidermal neutron irradiation, *Phys. Med. Biol.* 48(17), 2895–2906, 2003

•Abstract

Estimation of the Characteristics for the Dose Distribution in the Polymer Gel by Means of Monte Carlo Simulation

Min-Seok Park · Gi-Sub Kim · Hai-Jo Jung · Se-Young Park¹⁾ · In-Seok Choi²⁾ · Hyun-Ji Kim²⁾ · Yong-Su Yoon²⁾, Jung-Min Kim²⁾

Radiation Safety and Section, Korea Institute of Radiological & Medical Sciences

¹⁾*Health Physics Team, Korea Institute of Radiological & Medical Sciences*

²⁾*Department of Radiological Sciences, Korea University*

This study was the estimation of the dose distribution for proton, prompt gamma rays and proton induced neutron particles, in case of exposing the proton beam to polymer gel dosimeter and water phantom. The polymer gel dosimeter was composed of Gelatin, Methacrylic acid, Hydroquinone, Tetrakis and Distilled water. The density of gel dosimeter was 1.04 g/cm³ which was similar to water. The 72, 116 and 140 MeV proton beams were used in the simulation. Proton beam interacted with the nuclei of the phantom and the nuclei in excited states emitted prompt gamma rays and proton induced neutron particles during the process of de-excitation. The proton particles, prompt gamma rays, proton induced neutron particles were detected by polymer gel dosimeter and water phantom, respectively. The gap of the axis for gel was 2 mm. The Bragg-peak for proton particles in gel dosimeter was similar to water phantom. The dose distribution for proton and prompt gamma rays in gel dosimeter and water phantom was approximately identical in case of 72, 116 and 140 MeV for proton beam. However, in case of proton induced neutron particles for 72, 116 and 140 MeV proton beam, particles were not detected in gel dosimeter, while the Water phantom absorbed neutron particles. Considering the resulting data, gel dosimeter which was developed in the normoxic state attentively detected the dose distribution for proton beam exposure except proton induced neutron particles.

Key Words : Polymer Gel dosimeter, Proton beam, Prompt gamma rays, Proton induced neutron, Monte Carlo Simulation