

<원저>

토모테라피에서 쌀 볼루스 팬텀의 유용성 평가: 팬텀연구

김대건^{1,2)}·정재홍¹⁾¹⁾순천향대학교 부천병원 방사선종양학과·²⁾가천대학교 일반대학원 보건과학과

Evaluating the Usefulness of Rice Bolus Phantom in Tomotherapy: Phantom Study

Dae-Gun Kim^{1,2)}·Jae-Hong Jung¹⁾¹⁾Department of Radiation Oncology, Soonchunhyang University Bucheon Hospital²⁾Department of Radiologist Science, Gachon University Graduate School

Abstract The purpose of this study was to evaluate the usefulness of the rice bolus for upper-lower extremity radiation therapy by Tomotherapy. The computed tomography images were obtained for air, water, and rice bolus. The average and standard deviation of the Hounsfield unit (HU) were measured for image evaluation. The conformity index (CI) and homogeneity index (HI) were calculated for dose distribution of the planning target volume (PTV) which was treated by direct mode with gantry angle (90 and 270 angle). The point dose of a total of ten axial planes was measured to confirm the different regions. The mean of HU was -999.72 ± 0.72 at the air, The water and rice bolus were -0.13 ± 1.65 and -170 ± 27.2 , respectively. The CI (HI) of PTV was 0.96 (1.36) at the air, 0.95 (1.04) at the water bolus, and 0.95 (1.04) at the rice bolus. The maximum dose for air was 136 cGy which is about 32% higher than 103 cGy for water and 104 cGy for rice bolus. There was a statistical difference for point dose between air and water including rice bolus ($p=0.04$), however, no statistical difference between water and rice bolus ($p=0.579$). The rice bolus phantom for extremities radiation therapy could be not only the optimized dose distribution but also the convenience and equipment safety at Tomotherapy. However, additional research will be necessary to more accurately verify the clinical usefulness of rice bolus phantom due to not enough examination.

Key Words: Radiation therapy, Tomotherapy, Bolus, Rice, Water

중심 단어: 방사선치료, 토모테라피, 볼루스, 쌀, 물

1. 서론

방사선치료는 전신의 다양한 부위를 대상으로 치료 가능하며 종양에 원하는 방사선량을 전달하고 정상조직에는 선량을 최소화하여 보호하는 것이 목적이다[1]. 피부에 발생하는 종양은 전자빔 치료가 효과적이다. 그러나 상·하지(upper-lower extremity)에 넓게 분포하는 종양은 치료 범위가 커지게 되고, 표면이 불규칙하고 두께의 변화가 크다. 따라서 전자빔 치료는 여러 개의 조사면을 사용해야 하므로 선량분포를 조절하기가 어렵고 치료 시간이 길어지며, 과소

(cold spot) 또는 과도(hot spot)한 선량이 발생할 가능성이 크기 때문에 고에너지 엑스선(광자선)과 조직등가물질인 볼루스(bolus)를 조합하여 치료를 진행한다[2-4].

고에너지 엑스선치료는 특정 깊이에서 최대선량 지점이 형성되는 선량증가(build-up) 현상에 의해 피부 선량이 최대선량 지점보다 낮아지는 특성이 있다. 이러한 이유로 상·하지에 발생한 종양은 굴곡이 있고 원형 또는 타원형의 형태이기 때문에 균등한 선량분포를 얻기 힘들다[5, 6]. 그러므로 불균등한 선량분포를 보완하는 방법으로 물 또는 쌀 등과 같은 볼루스를 사용하여 치료 부위의 굴곡을 직사각형

Corresponding author: Jae-Hong Jung, Department of Radiation Oncology, Soonchunhyang University Bucheon Hospital, 170, Jomaru-ro, Wonmi-gu, Bucheon, Gyeonggi-do 14584, Republic of Korea / Tel: +82-32-621-5880/ E-mail: jjh-3450@hanmail.net

Received 14 October 2021; Revised 10 December 2021; Accepted 18 December 2021

Copyright ©2021 by The Korean Journal of Radiological Science and Technology

의 형태로 만들고 균일한 선량이 전달될 수 있도록 하여 치료에 도움을 준다[7-10].

볼루스 재료로서 물은 밀도가 1.0 g/cm^3 (4°C)이며, 인체 연부조직과 유사하여 우수한 방사선 선량분포를 얻을 수 있다. 그러나 물은 관리 소홀로 치료기에 침투되면 고가의 장비를 수리해야 하는 상황이 발생할 수 있고, 치료 부위 피부에 직접 닿아 감염의 위험성이 존재하며 환자 자세에 제한점이 있다[3, 6]. 대조적으로 쌀 볼루스는 물에 비해 취급이 쉽고, 치료기에 안정적이며, 치료 부위를 고정할 수 있는 장점이 있다. 그러나 밀도가 일정하지 않으며, 부피가 있어서 낱알 사이에 공기층이 존재하는 단점이 있다[6].

상·하지 방사선치료 시 사용되는 수조(water tank) 형태의 쌀과 물 볼루스에 관한 연구는 주로 선형가속기(linear accelerator; LINAC) 기반이며 현재까지 토모테라피(Tomotherapy)와 관련된 연구가 보고된 바 없다. 선형가속기의 경우 최대 조사야가 $40 \times 40 \text{ cm}^2$ 로 제한되어 있지만, 토모테라피는 치료 시 치료대(couch)가 이동하면서 치료하기 때문에 상·하지와 같이 넓은 부위의 종양을 조사면의 분할 없이 한 번에 치료가 가능한 장점이 있다.

토모테라피는 회전하면서 치료를 할 수 있는 회전방식(helical mode) 또는 특정 각도에서 치료하는 고정방식(direct mode)으로 선택할 수 있다. 수조 형태의 볼루스를 사용하는 경우에는 갠트리(gantry) 각도를 설정하여 3차원 입체조형치료(three-dimensional conformal radiation therapy; 3D-CRT)으로 정상조직 균형(normal tissue homogeneity)과 조직 보상(tissue compensation)을 적용할 수 있다[11].

본 연구는 상·하지 부위의 종양에 대해서 토모테라피 전산화치료계획을 통해 수조 볼루스의 유용성을 평가하고자 하였다.

II. 대상 및 방법

1. Phantom and CT images

본 연구를 위해 물질이 위치할 수조 팬텀(phantom)인 $21 \times 30 \times 19 \text{ cm}^3$ (두께 3 mm) 크기의 아크릴 상자를 준비했다. Fig. 1(a)은 수조 팬텀과 함께 비닐로 감싸져 있는 돼지 앞다리(Pig's front leg)를 보여주고 있다. 돼지 앞다리의 길이는 27 cm, 최대지름은 7 cm이며, 변질을 방지하기 위해 Fig. 1(b)와 같이 비닐로 감쌌다. 선량평가를 고려하여 Fig. 2(c)와 같이 1.5 cm 간격으로 총 10개의 관심 영역

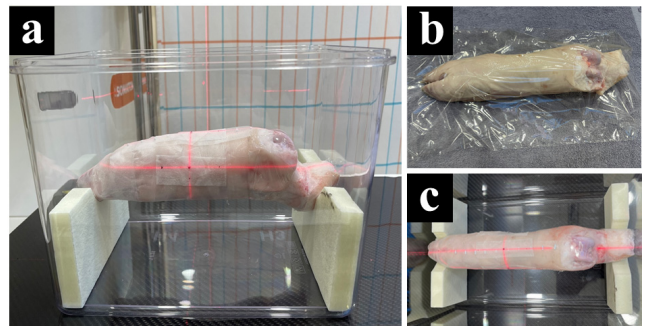


Fig. 1. Pig's front leg at the water tank phantom. (a) Side view for setting water tank phantom and reference point. (b) Pig's front leg wrapped by wrap. (c) Front view for setting water tank phantom and reference point.

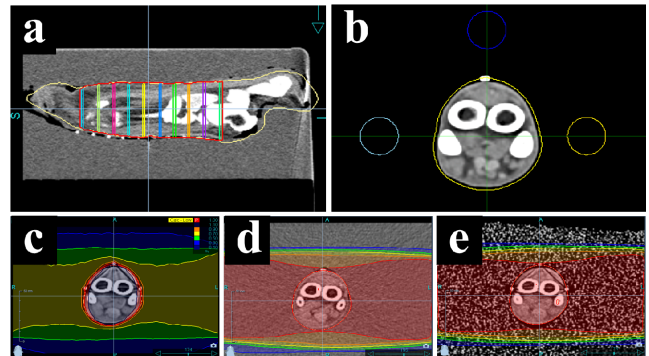


Fig. 2. Measured various materials. (a) Sagittal plane images of Pig's front leg with ten region of interests at water bolus, (b) measured a Hounsfield unit with region of interests and (c) the dose distribution three cases with air, (d) water, and (e) rice bolus by direct mode beams at Tomotherapy

(region of interests; ROIs)을 와이어(wire)로 표시했다. 돼지 앞다리는 흔들리지 않도록 스티로폼 지지대에 고정했다.

전산화단층모의치료기(SOMATOM Confidence, SIEMENS, Erlangen, Germany)를 이용하여 조건(120 kVp, 24 mA, FOV 500 mm, slice-thickness 1 mm)으로 촬영했다. 세 가지 경우인 볼루스가 적용되지 않는 상태(공기), 볼루스가 적용된 상태(물 또는 쌀)에서 총 323장의 전산화단층촬영 영상을 얻었다.

2. Hounsfield Unit (HU)

전산화단층촬영 영상은 영상평가와 계획표적체적(planning target volume; PTV)을 설정하기 위해 MIM Software (ver.6.6.14, MIM Software Inc, Cleveland, OH, USA)로 전송했다. Fig. 2(a)는 총 10개의 관심 영역을 포함한 팬텀의

시상면(sagittal plane)을 보여주고 있다. 영상평가를 위해 하운드필드(hounsfield unit; HU)값은 Fig. 2(b)에서 보는 바와 같이 지름 20 mm 크기로 된 세 개의 원형 관심 영역을 이용하여 10회 반복 측정했다. HU의 평균(average), 표준편차(standard deviation; SD), 최소(minimum; Min), 최대(maximum; Max)값을 구했다. 영상평가는 볼루스가 적용되지 않은 공기와 적용된 물과 쌀 볼루스에서 모두 수행되었다.

3. Treatment planning

선량평가를 위해 MIM Software에서 그려진 계획표적체적과 관심 영역을 토모테라피 전산화치료계획 시스템인 Precision (ver.2.0.1.0, accuray Inc, Sunnyvale, CA)로 전송했다. 전산화치료계획은 direct mode에서 jaw width 2.5 cm, dynamic mode 조건으로 갱트리 각도 270°와 90° 방향으로 계획했다. 계획표적체적에 대한 처방선량(prescription dose)은 평가의 용이성을 위하여 1회 100 cGy로 설정했다.

계획표적체적의 선량체적지수(dose volume index)를 확인하기 위해 선량균질지수(homogeneity index; HI)와 처방선량지수(conformity index; CI)를 계산했다[12]. 수식 1과 2는 각각 선량균질지수와 처방선량지수를 보여주고 있다. 선량균질지수는 계획표적체적 내에서 선량분포의 균일 정도를 나타내는 지표로써, D₅와 D₉₅는 각각 계획표적체적 전체의 용적에 대한 5%와 95%에 해당하는 부피에 전달되는 선량의 비(ratio)이다[13, 14].

$$HI = \frac{D_{5\%}}{D_{95\%}} \quad (Eq. 1)$$

처방선량지수는 계획표적체적 내에서 선량이 잘 전달되는지 알아보는 적합도를 나타내는 지표로써, V_{PTV}는 계획표적체적이며 V_{95%}는 처방선량의 95%가 조사되는 체적이다 [14-16].

$$CI = \frac{V_{95\%}}{V_{ptv}} \quad (Eq. 2)$$

선량균질지수와 처방선량지수는 1에 가까울수록 각각 선량분포가 균일하거나 계획표적체적에 전달되는 선량이 적합하다고 판단한다. 추가적으로 부위별 선량 차이를 확인하기 위하여 총 10개의 단면(axial plane)에 관심 영역을 설정하여 점 선량(point dose)을 측정했다(Fig. 2(a)). 선량평가

는 볼루스가 적용되지 않은 상태(air)와 적용된 물과 쌀 볼루스에서 모두 수행되었다.

4. Statistical analysis

전산화치료계획 후 관심 영역의 선량을 SPSS (ver.26, IBM, US) 통계분석 프로그램을 이용하여 비교하였다. 볼루스를 적용하지 않은 상태와 물과 쌀을 적용한 상태의 선량 차이는 Wilcoxon signed rank test를 통해 각각 시행하였고, 물과 쌀의 선량 차이는 Wilcoxon rank sum test를 통해 비교했다. 유의 수준은 95%를 기준으로 p-value가 0.05 이하면 통계적으로 유의하다고 판단했다.

III. 결과

1. Hounsfield Unit

Table 1은 세 가지 물질(공기, 물, 쌀)에 대한 10회 반복 측정한 HU 값을 보여주고 있다. 볼루스가 적용되지 않은 공기 상태에서 HU의 평균과 표준편차는 -999.72 ± 0.72였다. 볼루스가 적용된 물과 쌀에서는 각각 -0.13 ± 1.65와 -170.12 ± 27.2였다.

2. Treatment planning

Table 2는 세 가지 물질(공기, 물, 쌀)에 대한 계획표적체적의 선량과 선량균질지수, 처방선량지수 결과를 보여주고 있다. 계획표적체적에 대해 공기에서 처방선량지수는 0.96이고, 선량균질지수는 1.36이었다. 물 볼루스에서 처방선량지수는 0.95이고, 선량균질지수는 1.04였다. 쌀 볼루스에서 처방선량지수는 0.95이고, 선량균질지수는 1.04였다. 계획표적체적의 평균선량은 공기에서 115 cGy, 물 볼루스에서 101 cGy, 쌀 볼루스에서 101 cGy였다. 최대선량은 공기에서 136 cGy로 물과 쌀 볼루스에 비해 약 32% 높았다.

Table 3은 총 10개의 단면 관심 영역에서 얻은 점 선량의 10회 반복측정 값을 보여주고 있다. 볼루스를 적용하지 않은 상태의 평균선량과 표준편차는 117.4 ± 0.97 cGy이며, 물 볼루스와 쌀 볼루스를 적용했을 때는 각각 100.6 ± 0.52 cGy와 100.7 ± 0.67 cGy로 전반적으로 볼루스를 적용하지 않은 전산화치료계획의 선량은 물과 쌀보다 높았다. 위치가 다른 관심 영역별 점 선량은 큰 차이가 없었다.

Table 1. HU value measured for air, water, and rice materials.

| | Air (HU) | Water (HU) | Rice (HU) |
|--------------|----------------|---------------|----------------|
| Min | -1001.42 | -2.89 | -226.93 |
| Max | -998.02 | 3.51 | -131.14 |
| Average ± SD | -999.72 ± 0.72 | -0.13 ± 1.65 | -170.12 ± 27.2 |

Min: minimum value, Max: maximum value, SD: standard deviation.

Table 2. Target coverage with CI and HI index, and PTV dose by the treatment planning at Tomotherapy.

| Material | Min (cGy) | Average (cGy) | Max (cGy) | CI | HI | Coverage (%) |
|----------|--------------|------------------|--------------|------|------|-----------------|
| Air | 84 | 115 | 136 | 0.96 | 1.36 | 95 |
| Water | 98 | 101 | 103 | 0.95 | 1.04 | 95 |
| Rice | 98 | 101 | 104 | 0.95 | 1.04 | 95 |

Min: minimum value, Max: maximum value, CI: Conformity index, HI: Homogeneity index.

Table 3. Point dose in ten ROIs for three materials (air, water and rice).

| Material | Point dose (cGy) | | |
|----------|------------------|--------------|---------|
| | Minimum | Average ± SD | Maximum |
| Air | 116.0 | 117.4 ± 0.97 | 119.0 |
| Water | 100.0 | 100.6 ± 0.52 | 101.0 |
| Rice | 99.0 | 100.7 ± 0.67 | 101.0 |

SD: standard deviation.

Table 4. Statistical analysis according to bolus application.

| Material | | D | p-value* |
|----------|-------|--------------|----------|
| pre | post | (pre - post) | |
| Air | Water | 16.8 ± 1.32 | 0.004 |
| | Rice | 16.7 ± 1.16 | 0.004 |
| Rice | Water | 0.1 ± 0.57 | 0.579 |

D: difference

*Wilcoxon signed rank test was performed when comparing before and after application of bolus (air-water, air-rice).

Wilcoxon rank sum test was performed when comparing bolus materials (rice vs. water).

3. Statistical analysis

Table 4는 볼루스의 적용과 재료에 따른 관심 점 선량의 통계분석 결과다. 볼루스가 없는 상태(air)의 선량과 물 볼루스를 적용한 상태의 점 선량에 유의한 차이가 있었고 ($p=0.04$), 쌀 볼루스 적용에서도 유의한 차이를 보였다 ($p=0.04$). 물과 쌀 볼루스에 대한 재료별 관심 점 선량은 유의한 차이를 보이지 않았다($p=0.579$).

IV. 고찰

상·하지에 발생한 암은 치료 범위가 넓고 두께와 형태가 다양하고 표면이 불균질하기 때문에 균일한 선량분포를 얻기 힘들다. 가장 많이 사용되는 상용화된 볼루스인 Superflab의 경우 치료 시 재현성과 정확성을 유지하기가 어렵고 볼루스 아래 공기층이 발생할 가능성이 높다. 따라서, 볼루스를 정확하게 적용하지 않는다면 종양에 과소 선량이, 정상조직에는 과다 선량이 전달될 수 있다. 볼루스 적

용 시 고려해야 할 일반적인 조건으로는 환자에게 독성(toxicity)이 없고 감염의 위험이 없어야 하며 생산이 쉽고, 물과 근육조직과 같은 조직등가물질로서 방사선 감쇠 및 산란에 동일한 특성을 가져야 한다. 따라서 볼루스를 선택하고 정확하게 사용하는 것은 매우 중요하며 이를 통해 치료 부위의 선량을 증가시키고 표재성 종양의 재발 위험을 줄일 수 있다[17-20].

본 연구에서 선량평가는 계획표적체적 기준으로 처방선량 지수는 공기, 물, 쌀에서 각각 0.96, 0.95, 0.95로 차이가 없었다. 그러나 선량균질지수는 공기, 물, 쌀에서 각각 1.36, 1.04, 1.04로 공기가 물과 쌀에 비해 약 30.8% 선량이 균일하지 못했다. 즉, 볼루스를 적용하지 않으면 고에너지 엑스선의 선량증가 현상 때문에 선량이 균등하지 못하다. 10개의 관심 영역을 이용하여 얻은 계획표적체적의 점 선량은 공기, 물, 쌀에서 각각 -117.4 ± 0.97 cGy, 100.6 ± 0.52 cGy, 100.7 ± 0.67 cGy로 공기가 물 또는 쌀에 비해 약 15.8% 높았다. 최대선량은 공기에서 136 cGy로 물과 쌀에 비해 약 32% 높았다. 공기는 평균 밀도가 낮기 때문에 고선량 영역이 발생되고 계획표적체적에 균일한 선량전달이 어려웠다.

쌀 볼루스는 공기층이 생길 수 있다. 서 등의 연구에 따르면 국내산 쌀의 경우 낱알의 크기는 5.0 mm이고, 낱알 사이에 존재하는 공기층이 선량의 균질성에 영향을 줄 수 있다고 언급 한 바 있다[21]. 안 등의 연구에서 물과 쌀의 밀도는 각각 0.992 ± 0.01 g/cm³과 0.852 ± 0.11 g/cm³로 서로 약 14% 차이가 있고, 170 cGy를 처방 선량으로 설정하여 EDR 2 (extended dose range 2) 필름을 이용하여 측정된 결과에서 쌀은 177.3 ± 1.5 cGy고 물의 경우 170.4 ± 0.9 cGy로 차이를 보고한 바 있다[8]. 전동민 등은 진공 고정 기구 안에 쌀을 넣고 열형광선량계(thermo-luminescent dosimeter; TLD)를 이용하여 건조된 쌀(dry-rice), 젖은 쌀(wet-rice), 쌀 보상체 고정기구(Vac-Lock)에 대해 총 11개 부위의 관심 영역을 설정하여 선량을 측정했다[9]. 이 연구를 통해 같은 쌀 재질이어도 건조상태와 적용방식에 따라서 흡수선량의 표준편차가 차이가 있다고 보고한 바 있다. 본 연구에서 HU는 물과 쌀에서 각각 -0.13 ± 1.65 와 -170.12 ± 27.2 였고 쌀의 경우 낱알 사이의 공기층의 영향이 있었음에도 관심 영역의 평균 선량과 표준편차는 물과 쌀 모두 101 ± 1 cGy로 차이가 없었다. 이는 토모테라피의 경우 사전 설정된 최적화 알고리즘을 사용하여 빔의 각도 (beam angle), 계획표적체적, 정상조직체적(normal tissue volume), 처방선량만 결정하는 장점과 함께 조직 보상 기능을 통해 계획표적체적 보상과 선량 균질성을 동시에 얻을 수 있기 때문이라고 예상한다[22].

고에너지 엑스선의 단점인 상·하지 방사선치료 시 뼈와 중심부의 선량 증가는 섬유증, 부종, 같은 합병증이 발생한다. 이런 기술적인 단점을 극복하기 위해 김 등은 광자선이 아닌 전자빔을 이용한 원호 형태의 빔 전달 방식을 이용해 치료하는 기술을 보고했다[23]. 전자빔의 몬테카를로 모델링(monte-carlo modeling)과 전자빔을 산란시키는 원형팬텀(cylindrical acrylic phantom)을 이용한 상·하지의 피부 표면 치료 기술을 통해 피부 아래 기저 정상 장기의 선량 감소, 넓은 범위의 병변에 균일하게 선량전달, 환자자세 재현의 장점을 제시했다. 그러나 광자선에 비해 적합성과 균질성이 떨어지며 균일한 선량을 전달하기 위해서는 팬텀이 충분히 커야 해서 단점이 존재한다. 본 연구에서는 돼지 팬텀의 전체를 계획표적체적으로 설정해서 중심부 선량의 보화를 위한 대안을 제시하지 못했다. 수조 볼루스와 함께 상·하지 방사선치료 시 뼈와 중심부 선량을 줄이는 추가 연구가 필요하다.

최신의 치료기법인 체적변조회전방사선치료(volumetric modulated arc therapy; VMAT)는 균질한 선량 전달을 통해 넓은 범위의 피부 종양에 선량 전달의 문제를 해결할 수 있다. 그러나 체적변조회전방사선치료에서도 피부 쪽 선량 전달을 위해서는 볼루스 적용을 고려해야 하며 볼루스 아래 공기층의 발생은 선량 전달의 부정확성을 10% 이상 올릴 수 있다고 보고된 바 있다[24]. 체적변조회전방사선치료와 함께 3D 프린터를 이용한 볼루스를 적용하면 기존에 상용화되어 사용하던 볼루스와 달리 일관된 두께를 얻을 수 있고, 딱딱한 재질의 3D 프린터 볼루스가 환자 셋업 시간을 줄일 수 있는 장점도 있다. 그러나 넓은 부위의 3D 프린팅 볼루스는 제작 시간이 오래 걸리며 부종 발생 시 다시 제작해야 하고, 조사면의 크기 제한으로 치료 시간이 길어지는 단점이 있다. 추가적으로 회전치료의 특성상 반대쪽 부위가 빔에 겹치지 않도록 하는 과정에서 환자가 유연하지 않거나, 과체중, 나이가 많은 경우는 적용하기 어렵다[25].

본 연구는 최신 치료기법에 비해 비교적 간단하고 쉽게 적용할 수 있는 재료와 함께 넓은 범위 치료의 장점을 가진 토모테라피 치료의 용이성을 제안하고자 하였다. 본 연구의 제한점은 돼지 앞다리 전체를 계획표적체적으로 설정하여 정상조직 균질성을 평가할 수는 없었고 전산화치료계획만으로 평가한 점이다.

V. 결론

본 연구는 상·하지 부위에 대한 토모테라피 방사선치료

에서 물과 쌀 볼루스의 유용성을 전산화치료계획으로 평가하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 도출했다.

첫째, 토모테라피를 이용한 상·하지 방사선치료 시 수조를 이용한 물 또는, 쌀 볼루스를 적용해야 선량을 효과적으로 전달할 수 있다.

둘째, 토모테라피 Direct mode에서 물 또는 쌀 볼루스 적용은 재질 차이가 있음에도 계획표적체적 보상과 선량 균질성을 얻을 수 있고, 동일한 선량을 전달할 수 있었다.

셋째, 물에 비해 취급이 쉽고, 누수 위험에서 안전한 쌀 볼루스는 임상적으로 보다, 정확히 유용성을 검증하기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

REFERENCES

- [1] Khan FM, Gibbons JP. Khan's the physics of radiation therapy. Lippincott Williams & Wilkins. 2014; 1-570.
- [2] Kim SW, Kwak JW, Cho BC, Song SY, Lee SW, Jeong CY. Clinical implementation of 3D printing in the construction of patient specific bolus for photon beam radiotherapy for mycosis fungoides. *Prog Med Phys.* 2017;28(1):33-8.
- [3] Majithia L, Rong Y, Siddiqui F, Hattie T, Gupta N, Weldon M, et al. Treating cutaneous T-cell lymphoma with highly irregular surfaces with photon irradiation using rice as tissue compensator. *Front Oncol.* 2015;5(49).
- [4] Nicolini G, Abraham S, Fogliata A, Jordaan A, Clivio A, Vanetti E, et al. Critical appraisal of volumetric-modulated arc therapy compared with electrons for the radiotherapy of cutaneous Kaposi's sarcoma of lower extremities with bone sparing. *Br J Radiol.* 2013;86(1023):20120543.
- [5] Seo JM. A study on dose sensitivity according to position variance in extremities radiation therapy with water bolus. *J Korea Saf Manag Sci.* 2015; 17(4):199-206.
- [6] Lee HH, Kim CK, Song KS, Bang MK, Kang DY, Sin DH, et al. Evaluation of a colloid gell(Slime) as a body compensator for radiotherapy. *J Korea Soc Radiat Ther.* 2018;30(1,2):191-9.
- [7] Butson MJ, Cheung T, Yu P, Metcalfe P. Effects on skin dose from unwanted air gaps under bolus in photon beam radiotherapy. *Radiat Meas.* 2000; 32(3):201-4.
- [8] Ahn SK, Kim YB, Lee IJ, Song TS, Son DM, Jang YJ, et al. Evaluation of a water-based bolus device for radiotherapy to the extremities in Kaposi's sarcoma patients. *J Korean Soc Ther Radiol Oncol.* 2008;26(3):189-94.
- [9] Jeon DM, Kim CU, Kim BJ, Kim HN, Song IH, Jang HS, et al. Evaluation of the usefulness of a rice compensator fixing device applied to the treatment of chloroma metastasized to the upper extremity. *Korean Associ Radiat Protec.* 2011;20-1.
- [10] Lee H, Mauceri TC, Bhagwat MS, Patel CG. Water bath radiation for extensive, extremity-based cutaneous disease of mycosis fungoides. *Adv Radiat Oncol.* 2020;5(6):1370-4.
- [11] Cho KC, Kim JH, Kim HK, Ahn SK, Lee SK, Yoon JW, et al. Clinical application analysis of 3D-CRT methods using Tomotherapy. *J Radio Sci and Tech.* 2013;36(4):327-35.
- [12] Kang DG, Jung JY, Shin YJ, Min JW, Shim JG, Park SH. Evaluation of dose volume and radiobiological indices by the dose calculation grid size in nasopharyngeal cancer VMAT. *J Radio Sci and Tech.* 2020;43(4):265-72.
- [13] Kim TW, Yoo SM, Jeon SD, Yoon IH, Back GM. Evaluation of the usefulness for VMAT of multiple brain metastasis using jaw tracking. *J Korea Soc Radiat Ther.* 2018;30:73-81.
- [14] Lim JH, Chang NJ, Seok JY, Jung YJ, Won HS, Jung HY, et al. Comparison and evaluation of radiotherapy plans by multi leaf collimator types of linear accelerator. *J Korea Soc Radiat Ther.* 2018; 30(1,2):129-38.
- [15] Xu Y, Deng W, Yang S, Li P, Kong Y, Tian Y, et al. Dosimetric comparison of the helical Tomotherapy, Volumetric-modulated arc therapy and fixed-field intensity-modulated radiotherapy for stage IIB-IIIB non-small cell lung cancer. *Sci Rep.* 2017;7(1):1-9.
- [16] Kataria T, Sharma K, Subramani V, Karrthick KP, Bisht SS. Homogeneity Index: An objective tool for assessment of conformal radiation treatments. *J*

Med Phys, 2012;37(4):207-13.

[17] Podgorsak EB. Radiation Physics for Medical Physicists, Vol. 1, Berlin: Springer; 2006.

[18] Moyer RF, McElroy WR, O'Brien JE, Chamberlain CC. A surface bolus material for high-energy photon and electron therapy. Radiology, 1983;146(2): 531-2.

[19] Bahhous K, Zerfaoui M, Rahmouni A, El Khayati N. Enhancing benefits of bolus use through minimizing the effect of air-gaps on dose distribution in photon beam radiotherapy. Journal of Radiotherapy in Practice, 2021;20(2):210-6.

[20] Miescke A. Bolus in radiation therapy: The versatility of water. Radiat Therap, 2016;25(1):22-7.

[21] Seo JM. A study on dose sensitivity according to rice cultivar in extremities radiation therapy with rice bolus. J Korean Soc Radiol, 2020;14(6):741-6.

[22] Borca VC, Franco P, Catuzzo P, Migliaccio F, Zenone F, Aimonetto, et al. Does TomoDirect 3DCRT represent a suitable option for post-operative whole breast irradiation? A hypothesis-generating pilot study. Radiat Oncol, 2012;7(1):1-10.

[23] Kim SW, Kim C, Cho MS, Noh S, Lee M, Jeong C, et al. Clinical implementation of a wide-field electron arc technique with a scatterer for wide-spread Kaposi's sarcoma in the distal extremities. Scientific Reports, 2020;10(1):1-11.

[24] Potter A, Price M, Papworth D, Melven L, Shaw I, Hayles M, et al. A technique for treating extended skin field cancerisation using volumetric modulated arc therapy. Int J Radiat Radiat Ther, 2019;6(4):111-9.

[25] Obeid JP, Gutkin PM, Lewis J, Skinner L, Wang EB, Khodadoust MS, et al. Volumetric modulated arc therapy and 3-dimensional printed bolus in the treatment of refractory primary cutaneous gamma delta lymphoma of the bilateral legs. Prac Radiat Oncol, 2019;9(4):220-5.

| 구분 | 성명 | 소속 | 직위 |
|------|-----|-----------------------------|-------------|
| 제1저자 | 김대건 | 순천향대학교부속부천병원 가천대학교 일반대학원 | 방사선사/박사대학원생 |
| 교신저자 | 정재홍 | 순천향대학교 부천병원 | 방사선사/박사 |