

3D 프린터를 이용하여 제작한 맞춤형 Si-Bolus의 위치 오차 효과 평가: 자궁경부암 방사선 치료

계명대학교 동산병원 방사선종양학과

홍성표 · 정지오 · 이승재 · 최병진 · 김청모 · 정수일 · 신운성

목 적: 본 연구에서는 자궁경부암이 자궁과 함께 몸 밖으로 돌출되었을 때 맞춤형 Bolus를 사용하는 것이 치료 계획에서 선량 전달에 미치는 영향을 평가하고 환자 set-up에서의 재현성을 평가하고자 한다.

대상 및 방법: 치료 계획은 Eclipse Treatment Planning System (Version 15.5.0, Varian, USA)을 사용했으며 치료기는 VitalBeam (Varian Medical Systems, USA)을 사용하였다. 방사선 치료 기법은 3D-CRT로 AP/PA 방향으로 6MV 에너지를 이용하였다. 처방 선량은 1.8 Gy/fx이고 총 선량은 50.4 Gy/28 fx이다. 이온 챔버는 Semiflex TM31010 (PTW, Germany)을 사용하였으며, 각 위치 이동 및 종양 중심 선량에 따른 계획 선량과 측정된 선량을 비교하여 선량 분포를 분석 및 평가하였다. 첫 번째 측정은 팬텀에 맞춤형 Bolus를 적용하여 중심에서 수행하였으며, 위치 오차를 가정하여 중심에서 X, Y, Z축 방향으로 -2 cm ~ +2 cm 범위에서 이동하면서 측정하였다. 0.5 cm 간격으로 측정하였으며, Y축 방향은 ±3 cm까지 측정하였고 Bolus가 잘못 set-up된 상황도 측정하였다. 측정된 선량은 팬텀의 air cavity 대신 실리콘의 CT Hounsfield Unit (HU) 240으로 보정된 선량을 기준으로 비교하였다.

결 과: 위치 오차는 모든 X, Y, Z축에서 최대 ±2 cm까지 약 -1%이다. Y축의 경우 +3 cm의 차이가 발생했을 때 -9.73%의 오차가 발생하였다. 그리고 Bolus가 피부에 올바르게 부착되지 않았을 때 -2.6%, 완전히 제거되었을 때 3.92%의 오차가 있었다.

결 론: 맞춤형 Bolus를 사용한 경우 치료 선량 분포가 균일했으며, 위치 오차가 발생한 경우에도 처방 선량과 실제 측정값 사이에 큰 차이가 없었다. 기존 시트형 Bolus는 몸 밖으로 튀어나온 불규칙한 모양의 종양을 보완하기는 어렵지만 맞춤형 Bolus는 치료 선량을 균일하게 전달하는데 유용한 것으로 확인된다.

▶ **핵심용어:** 3D 프린팅, Bolus, 방사선치료

서론

종양의 발생부위는 매우 다양하며 피부에 직접 발생한 종양과 피부표면으로부터 얇은 깊이에 위치한 종양의 경우 종양치료 선량을 높이고 치료 부위에 선량 분포를 균

일하게 만들기 위해 Compensator를 적용할 수 있다. Compensator는 여러 종류의 물질을 사용할 수 있고, 바세린 또는 시트형 Bolus를 사용할 수 있다. 하지만 치료대상체의 형체가 피부 밖으로 심하게 돌출되거나 불규칙하고 함몰된 형태를 포함하고 있다면 기존의 시트형 인체 등가 Bolus를 적용하는 것이 쉽지 않다(1-2). 이에 3D 프린터로 맞춤형 Si-Bolus를 제작한 뒤 방사선 치료를 진행할 경우, 맞춤형 Si-Bolus의 치료 선량 전달 정확성을 확인하고자 실제 환자와 동일한 모양의 팬텀을 제작해 실험하였다.

책임저자: 홍성표, 계명대학교 동산병원 방사선종양학과
대구광역시 중구 달성로 56
Tel: 053-250-7983
E-mail: hspyo1230@naver.com

대상 및 방법

2022년 11월 Cervical cancer로 본원에 내원한 84세 여성 환자로, 자궁경부에 발생한 종양이 자궁경부와 함께 뒤집혀 외부로 밀려나온 환자이다 (Fig. 1).

1. 환자 CT 영상 획득 및 3D 모델링

환자 맞춤형 Si-Bolus 제작과 치료 계획된 선량의 Dosimetry 평가에 사용할 팬텀 제작을 위해서 Computed Tomography (SOMATOM Definition AS, Siemens, Germany)로 영상을 획득하였다. 이후 획득한 영상의 디지털 의료 영상 전송 장치 (Digital imaging and communication in medicine, DICOM)파일을 Radiotherapy Treatment Planning (RTP) system에 불러들여 종양과 주변장기의 외곽을 Contour한 후에 Structure 정보를 DICOM파일로 저장했다. 이 파일을 Open source 프로그램 (Meshmixer, Autodesk, Inc., California, U.S)을 이용하여 3D-CAD 작업이 가능한 형태인 STL (Stereolithography) 파일로 변환시켜 저장했다. STL 파일을 3D 프린팅이 가능하도록 Slicing 소프트웨어인 Ultimaker Cura 5.3.0 Version을 이용하여 작업을 진행하였다.

2. 3D 프린팅 및 Mold 출력

환자의 Body 모형 팬텀과 종양 모형 팬텀을 실리콘으로 성형할 Bolus mold를 제작하기 위해 3D 프린터 (Ultimaker S5, Ultimaker, Netherlands)를 이용했다. 출력 시 사용한 필라멘트는 친환경 소재인 PLA (Polylactic acid) 필라멘트를 사용했다. 사용한 3D 프린터는 밑에서부터 위로 쌓아 올리는 적층제조법 (FDM) 방식이므로 종양 모양 mold는 중간에 생성되는 지지대로 인하여 빈 공간을 유지할 수 없기 때문에 두 개의 조각으로 나누어 출력했다. 출력 후에 지지대를 제거해 주는 작업이 따로 필요하다. 지지대를 제거한 뒤에 나누어 출력한 종양모양 mold를 하나로 결합하였고 종양모양 mold 내부에 실리콘을 넣기 위해서 한쪽 표면에 지름 3 cm 이하의 구멍을 따로 만들어 주었다 (Fig. 2).

3. 맞춤형 Si-Bolus와 모형 팬텀 제작

출력한 환자 맞춤형 Si-Bolus mold에 실리콘을 부어 성형하였다. Si-Bolus는 환자 Set-up 시 쉽게 적용할 수 있도록 위/아래 2개로 나누어 제작하였다. 또한 선량 측정 시 이온 챔버를 삽입할 공간을 따로 만들어 주었다. 제작에 사용한 실리콘(비중 1.07g/cc)은 모두 피부접촉 안전 인증 (OECD TG 439)를 받아 실제 환자 치료 시에도 적용에 문제가 없는 제품을 사용했다 (Fig. 3).

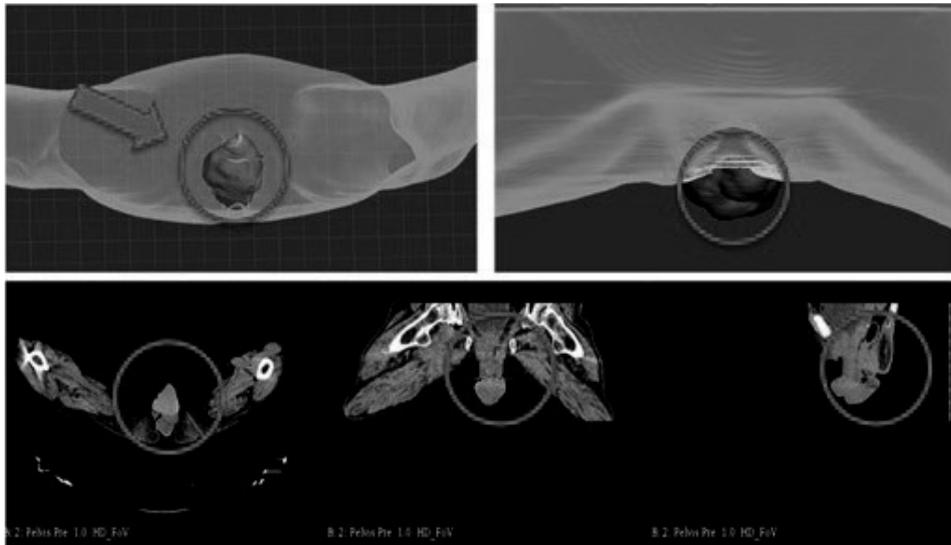


Fig. 1. Patient 3D CAD image and CT image

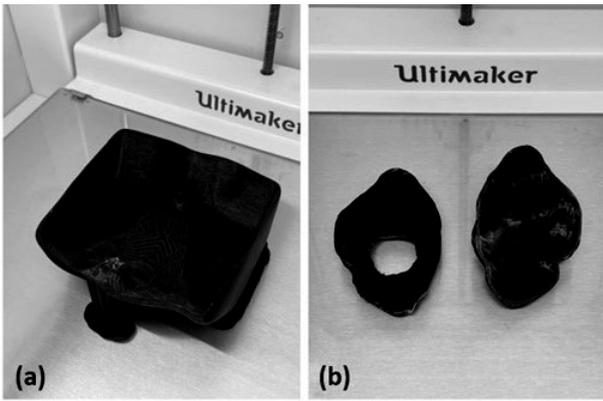


Fig. 2. 3D printed mold: (a) Patient body (b) Patient tumor.

4. 치료계획 및 측정

치료계획을 세우기 위한 CT simulation을 진행하였고 팬텀 Set-up 시 고정을 위한 RT Cradle (MeV-Green)을 제작하였다. Eclipse Treatment Planning System (Version 15.5.0, Varian, USA)을 사용하여 치료계획 하였고 방사선 치료 기법은 삼차원 입체조형 방사선치료 (3D-CRT)이며 치료 방향은 AP/PA 방향 각각 98 MU, 107 MU로 치료계획을 생성하였다. 사용한 에너지는 6 MV X선이고, 처방 선량은 1.8 Gy/fx에 총 선량은 50.4 Gy/28 fx으로 계획하였으며 GTV (Gross Tumor Volume)의 margin은 1.5 cm의 여유를 주었다 (Fig. 4). 측정 시 사용한 치료기는 VitalBeam (Varian, USA)을 사용하였고 측정 전에 Beam output calibration을 진행하여 선량 오차를 최소화

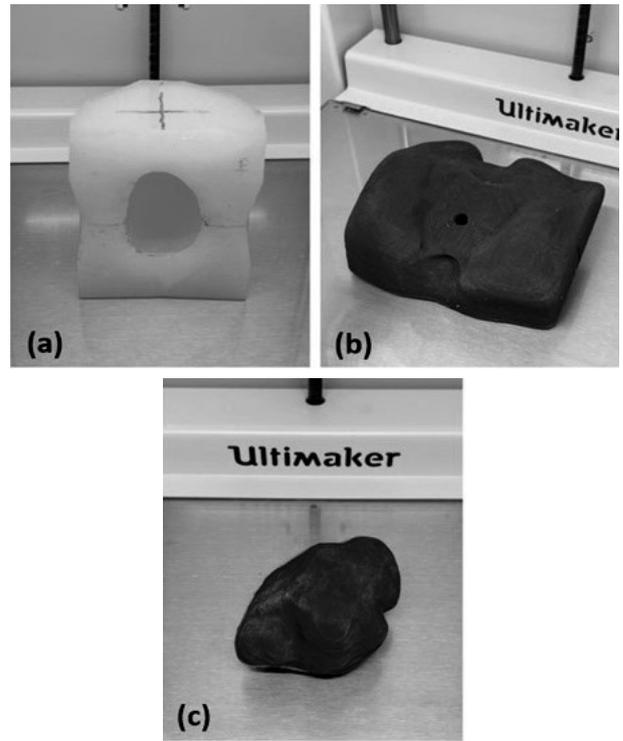


Fig. 3. (a) Customized Si-Bolus (b) Patient body phantom (c) Patient tumor phantom

화했다. 측정에 사용한 이온 챔버는 Semiflex TM31010 (PTW, Germany)이고 전류계는 Unidos Dosimeter (PTW, Germany)를 사용하였다 (Fig. 5). 측정을 위해 팬텀을 iso center에 맞추어 Set-up하였고 센터에서 먼저 측정한 뒤 X, Y, Z축 각각 -2 cm ~ +2 cm 범위 내에서 0.5 cm 간격으로 이동시키며 3회씩 반복 측정하여 평균값을 구했다. (Fig. 6).

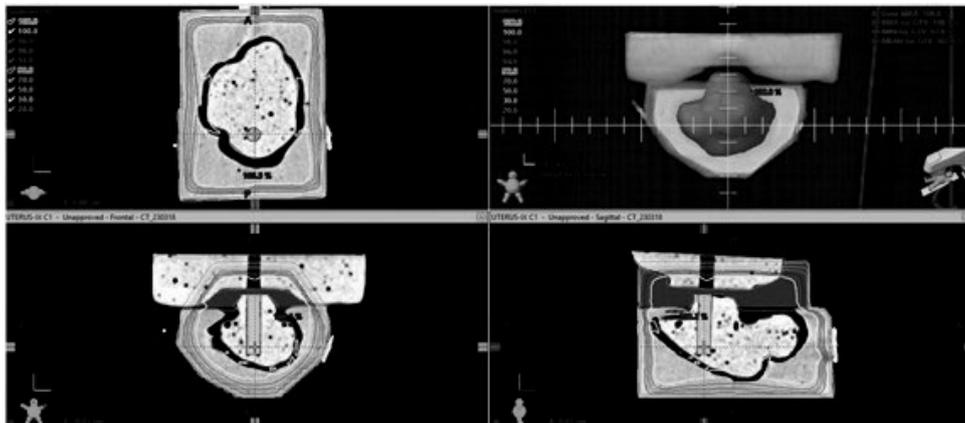


Fig. 4. Iso-dose lines and 3D-Treatment plan image

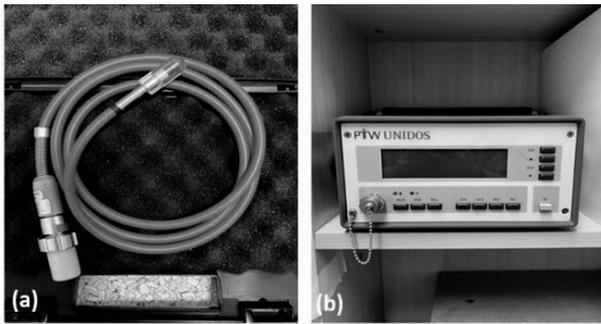


Fig. 5. Ion chamber and dosimeter:
 (a) Semiflex TM31010 (PTW, Germany)
 (b) Unidos dosimeter (PTW, Germany).



Fig. 6. CT simulation schematic photograph

Y축 방향의 경우는 극한의 상황을 가정하여 ±3 cm까지 측정하였고 센터에서 맞춤형 Si-Bolus가 잘못 Set-up된 경우를 가정하여 Si-Bolus가 피부에 정확히 밀착되지 않고 간격이 벌어진 상황, Si-Bolus의 윗부분이 완전히 제거된 상황을 추가로 측정했다.

5. 선량 평가

중앙 중심에 챔버를 삽입할 공간을 만들고 CT simulation을 진행했기 때문에 발생한 air cavity 오차를 줄이기 위해, 실리콘 팬텀의 CT Hounsfield Unit (HU)값인 240을 적용하여 재계산한 치료계획 선량과 측정 선량값을 비교했다.

결과

X축 방향의 경우 센터에서 측정했을 때 측정값이 186.96 cGy가 나왔으며 보정된 값과 비교했을 때 -0.76%의 차이가 발생하였고 -2.0 cm- +2.0 cm 범위 내에서 0.5 cm 간격으로 position shift한 경우 측정값이 185.9-186.96 cGy로 나와 보정된 값과 -1% 내외의 차이가 발생하였다 (Table 1). Y축 방향도 -2.0 cm-+2.0 cm 범위 내에서 0.5 cm 간격으로 position shift하였을 때 측정값이 184.33-186.51 cGy로 나와 보정된 값과 비교하였을 때 -1% 내외의 차이가 발생하였고 (Table 2), Z축 방향도 동일하게 위치 변화시킨 결과 측정값이 185.75-187.54 cGy가 나와 -1% 정도의 차이가 발생하였다 (Table 3). 그러나

Table 1. X-axes position shift measurement results.

	Planned (cGy)	HU corrected (cGy)	Measured (cGy)	Dose Difference (%)
-2,0 cm	183,5	188,0	185,90	-1,12
-1,5 cm	184,0	188,4	186,30	-1,11
-1,0 cm	184,2	188,7	186,33	-1,26
-0,5 cm	184,2	188,7	186,42	-1,21
0 cm	184,1	188,4	186,96	-0,76
+0,5 cm	184,3	188,7	186,96	-0,92
+1,0 cm	184,3	188,6	186,81	-0,95
+1,5 cm	184,0	188,3	186,69	-0,86
+2,0 cm	183,8	188,0	186,45	-0,82

Table 2. Y-axes position shift measurement results.

	Planned (cGy)	HU corrected (cGy)	Measured (cGy)	Dose Difference (%)
-2,0 cm	183,9	188,1	186,45	-0,88
-1,5 cm	183,9	188,1	186,51	-0,85
-1,0 cm	184,0	188,2	186,48	-0,91
-0,5 cm	183,8	188,1	186,36	-0,93
+0,5 cm	184,5	188,9	186,42	-1,31
+1,0 cm	184,4	188,8	186,30	-1,32
+1,5 cm	183,8	188,2	185,78	-1,29
+2,0 cm	182,9	187,2	184,33	-1,53

Table 3. Z-axes position shift measurement results.

	Planned (cGy)	HU corrected (cGy)	Measured (cGy)	Dose Difference (%)
-2.0 cm	183.4	187.9	185.75	-1.14
-1.5 cm	183.6	188.0	185.87	-1.13
-1.0 cm	183.7	188.2	186.02	-1.16
-0.5 cm	183.9	188.4	186.21	-1.16
+0.5 cm	184.3	188.8	186.57	-1.18
+1.0 cm	184.7	189.1	186.81	-1.21
+1.5 cm	185.1	189.5	187.08	-1.28
+2.0 cm	185.4	189.8	187.54	-1.19

Y축 방향의 경우, 치료 field를 벗어났을 경우를 가정하여 추가로 측정된 +3 cm의 position error가 발생하였을 때 측정값이 158.42 cGy가 나와 보정한 값과 -9.73%의 차이가 발생하였으며 (Table 4), Bolus가 피부에 밀착되지 않고 간격이 벌어진 경우는 -2.6%, Bolus가 완전히 제거된 경우는 +3.92%의 차이가 발생했다 (Table 5).

결론

불규칙한 모양의 치료부위나 선량의 분포를 균일하게 전달하기 위해 Bolus는 임상에서 많이 사용되고 있으며 이와 관련된 많은 연구들이 이루어지고 있다(3-6). 본 연구는 피부 표면에서 돌출된 종양의 특수성으로 인해 3D 프린터로 제작한 맞춤형 Si-Bolus가 position error에 의해서 실제 치료 시 선량 분포에 어떠한 영향을 미치는지 알아보 고자 하였다. 측정결과 맞춤형 Si-Bolus 사용 시 선량분포는 균일하게 나타났고, position error에도 선량 분포에는 큰 차이가 발생하지 않았다. 또한, 맞춤형 Si-Bolus가 종양을 고정시키는 역할을 하였고, 주변 피부를 선량분포 공간 밖으로 밀어내서 피부보호 역할도 했다. 하지만 맞춤형 Si-Bolus는 제작과정에 추가적인 시간과 비용이 요구되는 단점이 있다. 향후 다양한 종양에 3D 프린터를 이용한 맞춤형 Si-Bolus의 적용이 가능한지 추가 연구가 필요하다.

Table 4. Y-axes additional position shift measurement results.

	Planned (cGy)	HU corrected (cGy)	Measured (cGy)	Dose Difference (%)
-3.0 cm	182.8	187.3	184.51	-1.49
-2.5 cm	179.6	184.2	180.19	-2.18
+3.0 cm	169.8	175.5	158.42	-9.73

Table 5. Incorrectly set-up bolus measurement results.

	Planned (cGy)	Measured (cGy)	Dose Difference (%)
Bolus incorrectly positioned	184.1	179.31	-2.67
Lid bolus removed	184.1	191.32	+3.92

참고문헌

1. Kyung-Tae Kwon, Yong-Ki Lee, Young-Jin Won. Usefulness of Silicon Bolus Using 3D Printing of Head and Neck Patients. "J. Korean Soc. Radiol., Vol. 13, No. 7, December 2019" <https://doi.org/10.7742/jksr.2019.13.7.909>
2. Yi-Seong Lee, Jeong-Koo Kim. Manufacturing a Functional Bolus Using a 3D printer in Radiation Therapy. Journal of Radiological Science and Technology, 43(1), 9-14 <http://dx.doi.org/10.17946/JRST.2020.43.1.9>
3. Yu, S.; Ahn, S.H.; Choi, S.H.; Ahn, W.S.; Jung, I.-h. Clinical Application of a Customized 3D-Printed Bolus in Radiation Therapy for Distal Extremities. Life 2023, 13, 362. <https://doi.org/10.3390/life13020362>
4. Nichakan Chatchumnan, Sakda Kingkaew, Chuan-chom Aumnate, Taweap Sanghangthum, Development and dosimetric verification of 3D customized bolus in head and neck radiotherapy, Journal of Radiation Research, Volume 63, Issue 3, May 2022, Pages 428-434, <https://doi.org/10.1093/jrr/rrac013>

5. Kim SW, Shin HJ, Kay CS, Son SH. A customized bolus produced using a 3-dimensional printer for radiotherapy. PLoS One, 2014 Oct 22;9(10):e110746. doi: 10.1371/journal.pone.0110746. PMID: 25337700; PMCID: PMC4206462.
6. Kim S-W, Shin H-J, Kay CS, Son SH. A Customized Bolus Produced Using a 3-Dimensional Printer for Radiotherapy. PLoS ONE,2014;9(10):1-8. doi:10.1371/journal.pone.0110746

Evaluation of the effect of a Position Error of a Customized Si-Bolus Produced using a 3D-Printer: Cervical Cancer Radiation Treatment

Department of Radiation Oncology, Keimyung University Dongsan Hospital, Daegu, South Korea

**Seong Pyo Hong, Ji Oh Jeong, Seung Jae Lee, Byung Jin Choi,
Chung Mo Kim, Soo Il Jung , Yun Sung Shin**

Purpose: In this study, we evaluated the effect of using a customized bolus on dose delivery in the treatment plan when cervical cancer protruded out of the body along with the uterus and evaluated reproducibility in patient set-up.

Materials & Methods: The treatment plan used the Eclipse Treatment Planning System (Version 15.5.0, Varian, USA) and the treatment machine was VitalBeam (Varian Medical Systems, USA). The radiotherapy technique used 6 MV energy in the AP/PA direction with 3D-CRT. The prescribed dose is 1.8 Gy/fx and the total dose is 50.4 Gy/28 fx. Semiflex TM31010 (PTW, Germany) was used as the ion chamber, and the dose distribution was analyzed and evaluated by comparing the planned and measured dose according to each position movement and the tumor center dose. The first measurement was performed at the center by applying a customized bolus to the phantom, and the measurement was performed while moving in the range of -2 cm to +2 cm in the X, Y, and Z directions from the center assuming a positional error. It was measured at intervals of 0.5 cm, the Y-axis direction was measured up to ± 3 cm, and the situation in which Bolus was set-up incorrectly was also measured. The measured doses were compared based on doses corrected to CT Hounsfield Unit (HU) 240 of silicon instead of the phantom's air cavity.

Result: The treatment dose distribution was uniform when the customized bolus was used, and there was no significant difference between the prescribed dose and the actual measured value even when positional errors occurred. It was confirmed that the existing sheet-type bolus is difficult to compensate for irregularly shaped tumors protruding outside the body, but customized Bolus is found to be useful in delivering treatment doses uniformly.

► **Keywords:** 3D printing, Bolus, Radiotherapy