

탄소입자 치료 시 열가소성 고정기구의 공기층에 따른 선량 변화 평가

연세암병원 방사선종양학과

나예진 · 장지원 · 장세욱 · 박효국 · 이상규

목적: 환자 체표면과 고정기구 사이에 발생하는 공기층 두께에 따른 선량 변화를 치료 계획을 통해 알아보고자 한다.

대상 및 방법: 팬텀과 열가소성 고정기구 사이에 5 mm 두께의 Bolus를 0, 1, 2, 3장을 놓아 공기층의 두께를 조절하였고 고정기구를 씌워 총 4가지 조건으로 전산화 모의단층촬영을 시행하였다. 430 cGy (Relative Biological Effectiveness, RBE)씩 6번이 조사 되도록 계획하였으며, 임상표적체적의 95% 부피에 전달된 선량이 2580 cGy (RBE)가 되도록 치료 계획을 수립하였다. 임상표적체적의 선량은 Lateral dose profile의 반치폭값으로 평가하였고 피부 선량은 선량 체적 곡선으로 평가하였다.

결과: 임상표적체적에서 Lateral dose profile 반치폭 값은 4.89, 4.86, 5.10, 5.10 cm로 나타났다. 피부에서 4가지 조건의 선량의 평균값은 $D_{95\%} 3.25 \pm 1.7$ cGy (RBE), $D_{30\%} 1193.5 \pm 10.2$ cGy (RBE)의 차이를 보였으며 처방 선량 1%에서의 피부 부피 값 평균은 $83.22 \pm 4.8\%$ 이내의 차이를 확인하였다. 공기층 두께 변화에 따른 임상표적체적과 피부에서의 선량 모두 큰 변화를 보이지는 않았다.

결론: 탄소입자 치료를 위해 Solid 형태의 고정기구 제작 시 약간의 공기층은 CTV의 선량 적용 범위를 벗어나지 않는다.

▶ **핵심용어:** 탄소입자 치료, 공기층, 임상표적체적, 선량체적곡선, 열가소성 고정기구

서론

방사선 치료의 궁극적 목표는 치료하고자 하는 병소에 최대의 방사선량을 조사하여 국소적 완치율을 높이고 정상조직에 대한 조사선량은 극소화하여 방사선 치료에 따른 부작용을 최소화하는 것이다.⁽¹⁾

기존 방사선 치료는 전자를 가속시킨 후 지수함수적으로 용량을 감소시키지만 입자 치료는 무거운 입자를 가속시킨 후 에너지를 유지하다 종양의 범위에 근접하였을 때 브래그 피크(Bragg peak)에 도달하여 최대의 에너지를 sharp 하

게 방출시킨다.⁽²⁾ 또한 많은 연구에서 입자 치료 시에는 이온빔에 의해 전달되는 흡수선량이 광자에 의해 전달되는 동일한 흡수선량보다 생물학적으로 더 효과적이라는 것이 밝혀졌다.⁽³⁻⁶⁾ 입자 치료는 광자 치료보다 상대 생물학적 효과(Relative Biological Effectiveness, RBE)가 더 높는데 그 이유는 선형에너지 전달(Linear Energy Transfer, LET)가 더 높기 때문이다. 브래그 피크(Bragg peak)에 의한 영향으로 입자 이온의 체내 침투 깊이에 따라 LET가 최대값까지 증가하고 이온화 밀도 또한 높아져 세포 구조에 더 심각한 손상이 발생한다. 이러한 물리적 특성으로 종양에 높은 선량 분포를 전달할 수 있고 정상조직에는 부작용을 최소화하여 한 치료가 가능해 전 세계적으로도 늘고 있는 추세이다.⁽⁷⁾ 이처럼 물리적, 생물학적인 관점에서 이상적인 특성을 가지지만 더 높은 세포 살상능력을 가지는 만큼,⁽⁸⁾ 더 정교

책임저자: 나예진, 연세암병원 방사선종양학과
서울특별시 서대문구 연세로 50-1 중입자치료센터
Tel: 02-2228-8075
E-mail: nj1129@yuhs.ac

한 환자의 자세 재현성 또한 요구된다.

본원에서는 환자의 자세 고정력을 높이기 위하여 전립선 환자들에게 Solid type pelvic fix mask(Klarity, China)를 사용하여 골반을 덮고 Pelvic base plate(Klarity, China)와 결합시켜 환자의 몸을 고정한다(Fig. 1). 고정기구 제작 시 Pelvic base plate와 Pelvic fix mask의 결합부위 특성으로 인해 환자 체표면과 고정기구 사이에 공기층이 형성된다(Fig. 2). 하지만 공기층을 없애기 위하여 고정기구를 임의로 변형을 주어 제작하지 않는 방식으로 고정기구 제작을 하고 있다. 그 이유는 첫 번째, 환자 몸과 완전히 밀착하는 고정기구를 만들기 위해서는 제작 난이도가 높아져 일정한 형태로 제작되지 않을 가능성이 있다. 두 번째, 공기층 없이 제작하기 위해 고정기구를 충분히 이완시키면 결합 부위의 탄성이 약해져 환자 고정력을 떨어트릴 수 있을 고려하였다. 세 번째, 고정기구에 임의로 변형을 주어 표면의 형태를 만들면 손으로 인한 표면 굴곡이 표현될 수 있다. 일반적인 입자 치료는 빔 조사 방향에 굴곡이 있거나 매질이 달라지는 경우 Range shift가 발생하기 때문에 이러한 상황을 만들지 않는 것이 중요하다.⁹⁾

이에 본 연구는 환자 체표면과 Pelvic fix mask 사이에 생기는 공기층에 의한 선량을 치료 계획상에서 평가하고자 한다.

대상 및 방법

1. 대상 및 실험 재료

실험의 대상은 현재 탄소입자 치료를 진행하고 있는 전립선 환자와 동일한 조건으로 치료 계획을 하기 위하여 인체 팬텀인 란도 팬텀(Rando phantom)을 사용하였다. 팬텀(Phantom)의 골반을 고정하기 위하여 Vaclock을 사용하였다.

2. 고정기구 제작

Rando phantom과 Pelvic fix mask 사이의 공기층 두께를 임의로 조절하기 위하여 고정기구 제작실에서 빔 조사 부분에 5 mm 볼루스(Bolus)를 대지 않은 것, 1장 놓은 것, 2장 놓은 것, 3장 놓은 것 총 4가지 조건을 만들었다.

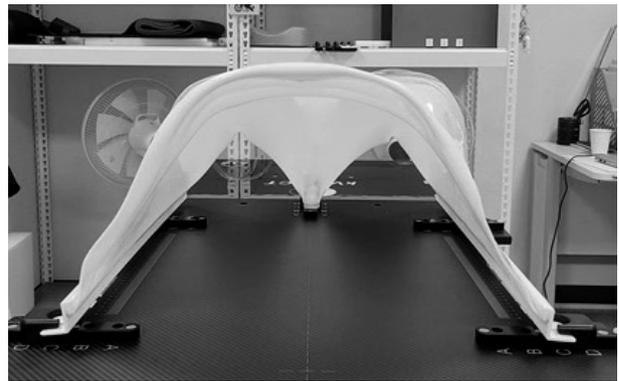


Fig. 1. Combined of pelvic base plate and pelvic fix mask

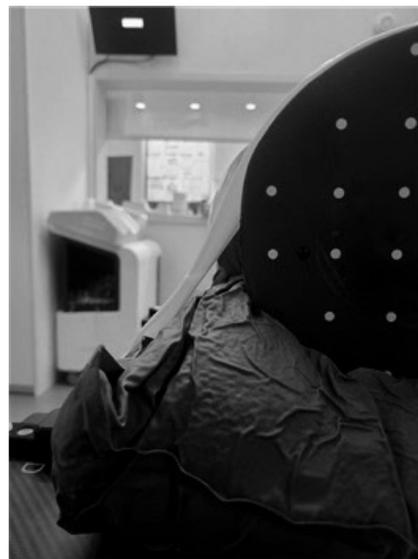


Fig. 2. Airgap due to binding site characteristics of pelvic base plate and pelvic fix mask

각 조건을 다르게 한 Rando phantom에 Pelvic fix mask를 제작하여 4개의 고정기구를 제작하였다. 환자 체표면에서의 빔 조사 방향 범위는 일반적인 환자들의 전립선 범위를 포함하는 대퇴골 머리(Femur head) 지점에서 대퇴골 목(Femur neck)이 포함되는 부분으로 지정하였다.

3. 전산화단층촬영(Computed Tomography, CT) 영상 획득

Rando Phantom에 부착하였던 Bolus를 떼어내고 CT (Aquilion one CT, Canon, Japan) simulation을 시행하였다. 제작된 Pelvic fix mask를 팬텀에 번갈아 씌워 2 mm로 재구성된 CT영상을 획득하였다(Fig. 3).

4. 치료 계획

영상을 Raystation(Version 11B, Ray Search Laboratories, Sweden)으로 보내어 기존 전립선암 환자 치료와 똑같은 조건으로 치료 계획을 하였다. 치료 계획의 조건은 팬텀의 오른쪽 방향으로 임상 표적 용적(Clinical Target Volume, CTV) 95%에 430 cGy(RBE)씩 6 회로 총 2580 cGy(RBE)가 조사되도록 수립하였다. 피부의 지점은 각 CT마다 동일 관심 영역(Region Of Interest, ROI)을 설정하기 위하여 두께를 체표면으로부터 체내 쪽으로 2 mm, 높이는 CTV에서 전방-후방(Anterior-Posterior) 방향으로 1 cm씩 margin을 이어 체표면에 닿는 부분으로 설정하였다. 이는 선량 1% 영역을 포함하는 영역이다.

5. 치료 계획의 평가

치료 계획 평가의 대상은 CTV와 피부로 지정하였다. CTV는 본원의 기준에 맞춰 95% volume에 동일하게 선량을 설정하였기에 공기층의 두께에 따른 선량 변화를 가장 객관적으로 판단하기 쉬운 부분이 CTV라 판단하였다. 피부는 광자선의 경우 표면에 가까울수록 Rebuild up 현상으로 인한 선량 증가가 있다고 보고되어 있어⁽⁴⁰⁾ 평가하였다. CTV의 평가 방법은 산란선에 의한 영향을 위해서 Lateral dose profile을 사용하였다. 모든 치료 계획의 등 선량 중심지점에 동일하게 선을 그려 Lateral dose profile의 반치폭(Full Width At Half Maximum, FWHM)값과 Lateral penumbra값을 평가하였다(Fig. 4, 5). 추가로 CTV의 선량 일치도(Conformity index, CI)도 평가하였다. 이는 CI 값이 1.0에 가까울수록 표적에 이상적인 선량 분포임을 나타낸다[식 1].

$$CI = \frac{V_{RI}}{TV} \text{----- [식 1]}$$

여기서 V_{RI} 는 Volume of the reference isodose, TV 은 Target Volume 이다.

피부의 평가 방법은 선량 체적 곡선(Dose Volume Histogram, DVH)으로 선량을 평가하였다.

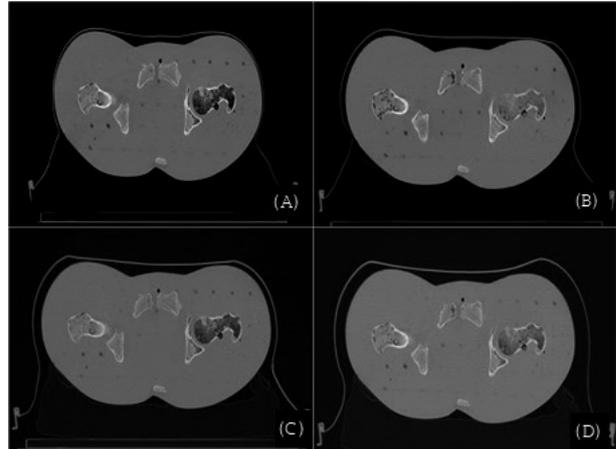


Fig. 3. Variations in CT image obtained by changing the thickness of the air gap.
 (A) CT image without an air gap,
 (B) CT image with 5 mm air gap,
 (C) CT image with 10 mm air gap,
 (D) CT image with 15 mm air gap

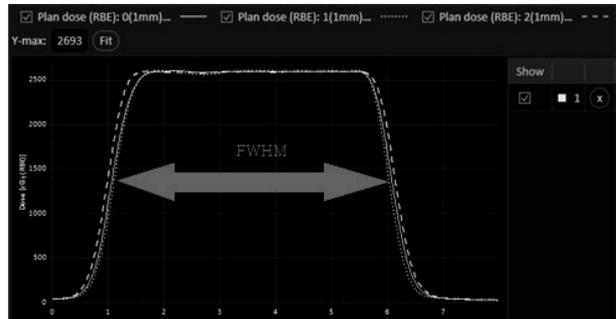


Fig. 4. FWHM according to airgap thickness

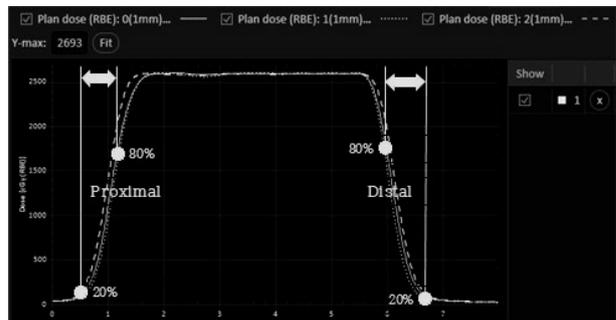


Fig. 5. Lateral penumbra at 20–80% points

결과

1. 임상표적용적(Clinical target volume, CTV)의 선량 평가

1) Lateral dose profile에서의 반치폭 평가

공기층의 두께 변화에 따른 Lateral dose profile에서의 FWHM 값은 4.89 cm, 4.86 cm, 5.10 cm, 5.10 cm로 평균은 $4.99 \text{ cm} \pm 0.13$ 으로 나타났다(Table. 1).

2) Lateral dose profile 에서의 Lateral penumbra 평가
공기층의 두께 변화에 따른 Lateral dose profile 20%, 80% 지점에서의 Lateral penumbra의 Proximal 값은 0.78 cm, 0.79 cm, 0.71 cm, 0.7 cm로 평균은 $0.75 \text{ cm} \pm 0.04$, Distal 값은 0.49 cm, 0.48 cm, 0.43 cm, 0.48 cm로 평균 $0.47 \text{ cm} \pm 0.03$, 으로 나타났다(Table. 2).

3) 선량 일치도(Conformity index, CI) 평가

공기층의 두께 변화에 따른 CI 값은 $V_{95\%}$ 54.6 cc, 54.9 cc, 54.7 cc, 53.9 cc, TV 57.5 cc, 57.8 cc, 57.6 cc, 56.7 cc로 모두 0.95로 같게 나타나 1과 0.05 차이를 보였다 (Table. 3).

2. 피부의 선량 평가

피부는 $D_{95\%}$ 4 cGy (RBE), 1 cGy (RBE), 5 cGy (RBE), 3 cGy (RBE)로 평균 $3.3 \text{ cGy (RBE)} \pm 1.7$, $D_{2\%}$ 는 1513 cGy (RBE), 1496 cGy (RBE), 1518 cGy (RBE), 1497 cGy (RBE)로 평균 $1506 \text{ cGy (RBE)} \pm 11.1$, $V_{258\text{cGy}}$ 는 67.6%, 62.3%, 68.8%, 68.0%로 평균 $66.7\% \pm 2.9$, $V_{26\text{cGy}}$ 은 84.8%, 76%, 86.8%, 85.2%로 평균 $83.2 \pm 4.8\%$ 로 나타났다(Table. 4).

고찰 및 결론

본원에서 사용 중인 고정기구의 체결방식의 특성상 발생하는 환자 체표면과 고정기구 사이에 공기층이 치료계획상의 선량에 유의미한 결과를 주는지 알아보기 위하여 본 연구를 진행하였다.

Table 1. Dose evaluation of Clinical Target Volume by Full Width Half Maximum

Airgap (mm)	FWHM (cm)
0	4.89
5	4.86
10	5.10
15	5.10
Average \pm SD	4.99 ± 0.13

SD: Standard Deviation

Table 2. Dose evaluation of Clinical Target Volume by lateral penumbra

Airgap (mm)	Proximal (cm)	Distal (cm)
0	0.78	0.49
5	0.79	0.48
10	0.71	0.43
15	0.70	0.48
Average \pm SD	0.75 ± 0.04	0.47 ± 0.03

Table 3. Conformity Index values according to changes in the thickness of the air gap

Airgap (mm)	$V_{95\%}$ (cc)	TV (cc)	CI
0	54.6	57.5	0.95
5	54.9	57.8	0.95
10	54.7	57.6	0.95
15	53.9	56.7	0.95

CI: Conformity Index

$V_{95\%}$: Volume of the 95% isodose

TV : Target Volume

치료계획상에서 CTV는 공기층의 두께 변화에 따라 Lateral dose profile에서의 FWHM, Lateral penumbra의 표준편차 값 모두 미세한 차이를 가졌고 CI값도 1에 가까운 수치를 나타내 선량과의 일치도가 높음을 보여 주고 있다. 피부의 선량은 각 결과의 수치들이 경향성이 없고 표준편차 또한 매우 미세하여 유의미한 결과를 나타내지 않았다. 추가적으로 공기층이 없는 치료 계획과 15 mm 공기층을 적용시킨 치료 계획을 각각 적용하여 두 가지 경우를 비교해 본 결과 CI값은 0.02의 차이를 나타내었다. 이는 본 연구에서 실험한 공기층의 두께 변화로는 CTV에 목표료하는 선량에 영향을 주지 않는 것을 확인할 수 있었다.

Table 4. Dose evaluation of skin by Dose Volume Histogram

Airgap (mm)	D _{95%} (cGy(RBE))	D _{2%} (cGy(RBE))	V _{258cGy} (%)	V _{26cGy} (%)
0	4	1513	67,6	84,8
5	1	1496	62,3	76,0
10	5	1518	68,8	86,8
15	3	1497	68,0	85,2
Average ± SD	3.3 ± 1.7	1506 ± 11.1	66.7 ± 2.9	83.2 ± 4.8

D_{95%} : Dose delivered to 95% of the CTV

D_{2%} : Dose delivered to 2% of the CTV

V_{258cGy} : Volume of the 258cGy of the CTV

V_{26cGy} : Volume of the 26cGy of the CTV

환자와 Pelvic fix mask를 고정하면서 불가피하게 만들어지는 공기층을 없애기 위해서는 Pelvic fix mask의 변형이 필요하다. Pelvic fix mask를 체표면과 완전히 밀착하게 하기 위해서는 빔 조사 방향 Mask 표면에 일정하지 않은 굴곡을 형성하게 한다. 입자 치료의 특성상 불규칙한 매질의 변화가 존재 시 선량의 Range shift에 영향을 준다.⁽¹¹⁾

이에 본 저자는 공기층으로 인한 선량 변화의 차이는 목표표로 하는 선량에 영향을 미치지 않기에 고정기구 변형으로 인한 영향을 고려하여 고정기구를 제작할 것을 권고한다. 추후에 고정기구 변형으로 인한 Range shift의 영향에 관한 추가적인 연구가 이루어진다면 고정기구 제작 시, 선량적으로 유용한 결과를 얻어낼 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Emami B, Lyman J, Brown A, et al.:Tolerance of normal tissue to therapeutic irradiation, International Journal of Radiation Oncology Biology Physics 1991;21:109-122
2. Grau C , Durante M, Langendijk JA, et al.:Particle therapy in Europe. Molecular Oncology 2020;14:1492-1499.
3. Karger CP, Peschke P, Sanchez-Brandelik R, et al.:Radiation tolerance of the rat spinal cord after 6 and 18 fractions of photons and carbon ions: Experimental results and clinical implications, International Journal of Radiation Oncology Biology Physics 2006;66:1488-1497.
4. Weyrather WK, Ritter S, Scholz M, et al.:RBE for carbon track-segment irradiation in cell lines of differing repair capacity. International Journal of Radiation Biology 1999;75:1357-1364.
5. Kanai T, Furusawa Y, Fukutsu K, et al.:Irradiation of mixed beam and design of spread-out Bragg peak for heavy-ion radiotherapy. Radiation Research 1997;147:78-85.
6. Phillips TL, Ross GY, Goldstein LS, et al.:In vivo radiobiology of heavy ions. International Journal of Radiation Oncology Biology Physics 1982;8:2121-2125.
7. Karger CP, Glowa C, Peschke P, et al.:The RBE in ion beam radiotherapy: In vivo studies and clinical application. Zeitschrift für Medizinische Physik 2021;31:105-121.
8. Mohamad O, Sishc BJ, Saha J, et al.:Carbon Ion Radiotherapy: A Review of Clinical Experiences and Preclinical Research, with an Emphasis on DNA Damage/Repair, Multidisciplinary Digital Publishing Institute Cancer Journal 2017;9:66.
9. Nichiporov D, Moskvina V, Fanelli L, et al.:Range shift and dose perturbation with high-density materials

- in proton beam therapy. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 2011;269:2685-2692.
10. 김연래, 서태석, 고신관 등:공동(air cavity)의 존재 시 실험적 선량분포와 치료계획상의 선량분포 비교. 대한방사선기술학회지:방사선기술과학 2010;33:261-268.
11. Paganetti H.:Range uncertainties in proton therapy and the role of Monte Carlo simulations, Physics in Medicine & Biology 2012;57:99-117.

Evaluation of Dose Variation according to Air Gap in Thermoplastic Immobilization Device in Carbon Ion

Department of Radiation Oncology, Yonsei University Yonsei Cancer Center

Ye-jin Na, Ji-Won Jang, Se-Wuk Jang, Hyo-Kuk Park, Sang-Kyu Lee

Purpose: The purpose of this study is to find out the dose variation according to thickness of the air gap between the patient's body surface and immobilization device in the treatment plan.

Materials and Methods: Four conditions were created by adjusting the air gap thickness using 5 mm bolus, ranging from 0 mm to 3 mm bolus. Immobilization was placed on top in each case. And computed tomography was used to acquire images. The treatment plan that 430 cGy (Relative Biological Effectiveness, RBE) is irradiated 6 times and the dose of 2580 cGy (RBE) is delivered to 95% of Clinical Target Volume (CTV). The dose on CTV was evaluated by Full Width Half Maximum (FWHM) of the lateral dose profile and skin dose was evaluated by Dose Volume Histogram (DVH).

Result: Results showed that the FWHM values of the lateral dose profile of CTV were 4.89, 4.86, 5.10, and 5.10 cm. The differences in average values at the on the four conditions were 3.25 ± 1.7 cGy (RBE) among $D_{95\%}$ and 1193.5 ± 10.2 cGy (RBE) among $D_{95\%}$ respectively. The average skin volume at 1% of the prescription dose was $83.22 \pm 4.8\%$, with no significant differences in both CTV and skin.

Conclusion: When creating a solid-type immobilization device for carbon particle therapy, a slight air gap is recommended to ensure that it does not extend beyond the dose application range of the CTV.

► **Key words:** Carbon ion therapy, Airgap, CTV, DVH, Thermoplastic immobilization device