

양성자 치료에서 Moving Phantom을 이용한 Single Scan PBS와 Layered Rescanning PBS의 선량비교

국립암센터 양성자치료센터

김경태 · 김선영 · 김대웅 · 김재원 · 박지연 · 전상민

목 적: 움직이는 장기에 취약한 Pencil Beam Scanning(PBS)을 보완하기 위해 고안된 Layered Rescanning PBS 기법을 Moving Phantom에 적용하여 Single Scan PBS와 선량비교를 통해 Homogeneity를 비교해 본다.

대상 및 방법: Matrix X(IBA, Belgium)와 Moving Phantom(standard imaging, USA)을 이용하였다. 가상의 tumor 10×10×5 cm에 AP 방향에서 200 cGy의 선량을 조사하였다. 치료계획은 single scan PBS, rescan 4, 8, 12회 총 4가지로 하였고 각 치료계획별로 3번씩 반복 측정하였다. 측정 시 Moving Phantom의 호흡주기는 한 cycle당 4초로 설정 후 S-I 방향 움직임 2 cm으로 설정하였다. 추가로 beam on time을 측정하였다.

결 과: PTV 내에서 D_{max} 의 평균값은 single scan, 4, 8, 12회 rescan 순서로 각각 246.47±18.8 cGy, 223.43±8.92 cGy, 222.47±7.7 cGy, 213.9±6.11 cGy D_{min} 의 평균값은 각각 165.53±4.32 cGy, 173.13±11.94 cGy, 184.13±8.04 cGy, 182.67±4.38 cGy으로 D_{mean} 192.77±6.98 cGy, 196.7±4.01 cGy, 198.17±4.96 cGy, 195.77±3.15 cGy으로 측정되었다. 그리고 rescan 횟수가 늘어날수록 Homogeneity Index가 1에 가까워졌으며, beam on time은 평균 2분 15초, 3분 15초, 4분 30초, 5분 37초로 rescan 횟수가 증가할수록 치료시간이 증가되었다. 측정하는 과정에서 MU가 낮은 선량 layer에서는 설정한 rescan 횟수만큼 실제로 rescan하지 못하는 문제점이 발견되었다.

결 론: 장기 움직임이 있는 종양 치료 시 Layered Rescanning PBS를 적용했을 때 single scan PBS보다 균일한 선량분포를 확인할 수 있었다. 그리고 rescan 횟수가 증가할수록 균일한 선량분포를 보였다. single scan PBS와 12회 Layered rescanning 비교 시 HI 수치가 0.32 향상되었다. 추후 연구를 통하여 호흡동조 방사선치료가 불가능한자에게 적용이 가능할 것으로 사료된다.

▶ **핵심용어:** 양성자치료, PBS, Layered Rescanning, Moving Phantom

서 론

일반적인 고 에너지 X-선 방사선치료와 달리 양성자 치료는 브래그피크(Bragg Peak)를 이용하여 정상조직의 손상을 최소화하고 종양조직에 최대의 선량을 전달한다. 그

러나 이러한 특성 때문에 종양의 움직임에 크게 영향을 받는다.⁽¹⁻⁴⁾

양성자 치료의 종류는 능동 스캔(Active Scanning)과 수동 산란(Passive Scattering) 두 가지로 나뉜다. Passive Scattering은 가장 기초적인 방법으로 산란으로 인한 에너지의 저하, 환자마다의 Custom Block과 Compensator 제작 및 보관의 불편함, 양성자와 황동인 Custom Block이 반응하면서 발생하는 2차 피폭과 같은 단점이 존재한다.⁽¹¹⁾ 이러한 단점을 보완하기 위해서 Active Scanning인 Pencil

책임저자: 김경태, 국립암센터 양성자치료센터
경기도 고양시 일산동구 일산로 323번지
Tel: 031) 920-0486
E-mail: casper@ncc.re.kr

Beam Scanning(PBS)이 적용되고 있다. PBS는 산란을 시키지 않고 자석을 이용하여 치료위치를 설정하며 층을 나누어 Pencil Beam의 형태로 전달하는 spot 치료이다. spot 치료인 점과, layer를 바꿀 때마다 energy switching time이 생기는 점 때문에 빔의 전달과 전달동안 발생하는 종양의 움직임으로 인해 오차가 발생하는 Interplay Effect가 발생한다. 그래서 lung cancer나 liver cancer와 같이 움직임이 큰 종양을 치료 시 PTV 내에 불균질한 선량 분포를 보여주는 한계점을 가지고 있다.⁽¹⁻⁸⁾

PBS의 이러한 단점을 보완하기 위해서 scanning 방식에 변화를 주고 있다. 한 field 치료 시 1/N 선량을 N번 반복하여 rescanning을 하는 Layered Rescanning PBS가 대표적인 방법이다. Layered Rescanning PBS란 다음 에너지 layer로 넘어가기 전에 처방선량을 연속적으로 rescanning하는 방식을 말한다.^(1,3)

2015년 Medical Physics에서는 lung cancer환자에 대해서 Layered Rescanning PBS를 적용하여 single scan PBS에 비하여 정상 lung 조직의 선량을 감소시켰고 Interplay Effect에 따른 불균질함을 완화시켰다는 논문을 발표한 적이 있다.⁽³⁾

본 연구에서는 Layered rescanning PBS가 single scan PBS에 비하여 PTV 내에 얼마나 균일한 선량분포를 보여줄 수 있는지 알아보고 rescan의 횟수를 변화함에 따라 어떻게 작용되는지 확인하고 횟수에 따른 Homogeneity Index의 차이를 비교하려 한다.

대상 및 방법

본 연구에서는 2가지 단계를 통해 Layered Rescanning PBS의 유용성을 평가하고자 하였다. 첫 번째로 Eclipse Proton Planning System(Version 13.7, Varian, USA)을 통해 치료계획을 수립하여 비교하였다. 두 번째로 측정을 실시하였다. Proton Therapy System(Proteus-235, IBA particle Therapy)를 이용하였고 25×25 cm 넓이에 7 mm마다 Ion Chamber가 정렬되어 있는 Matrix X(IBA, Belgium)와 일정한 주기로 S-I 방향으로 움직이는 Moving Phantom(Standard Imaging, USA), Solid Water

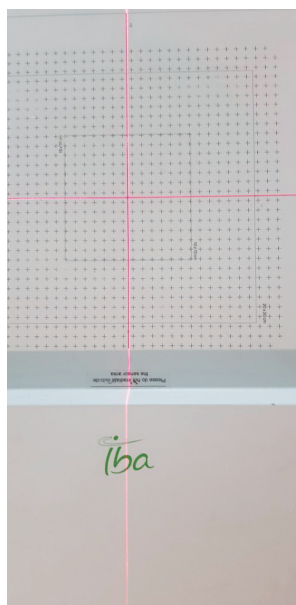


Fig. 1. Matrix X

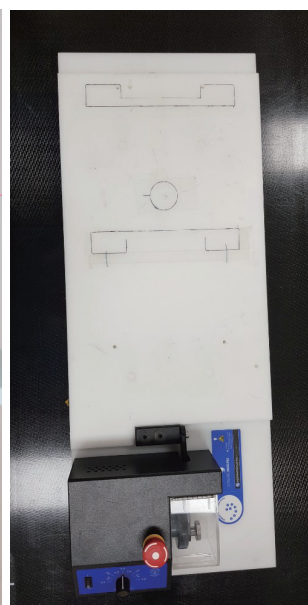


Fig. 2. Moving Phantom

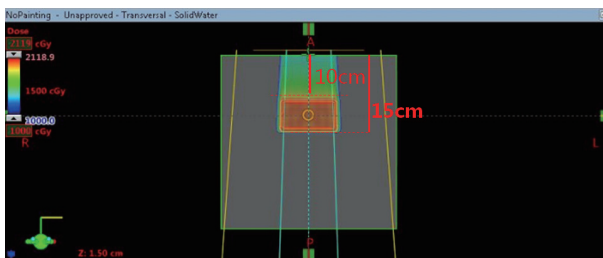


Fig. 3. Set the scope of the SOBP in the plan

Phantom(Standard Imaging, USA)을 이용하여 실험을 진행하였다(Fig. 1,2). Matrix X에서 획득되는 측정값을 통해 2D Distribution과 Homogeneity Index를 확인하였다. 추가로 beam on time을 측정하여 rescan 횟수에 따른 치료시간 차이를 확인하였다.

1. 치료계획수립

가상의 종양은 10×10 cm의 정사각형모양으로 depth는 5 cm으로 가정하였다. 이 때 Spread Out Bragg peak(SOBP)의 범위는 Water Phantom 10 cm에서 15 cm까지로 설정하였다(Fig. 3). Field는 AP 방향으로 계획하였고 PTV 마진은 S-I 방향으로 1 cm씩 설정하였으며, dose는 200 cGy로 설정하였다. 별도의 Range Shifter는 사용하지 않았으며 layer의 개수는 14로 구성하였다(Fig.

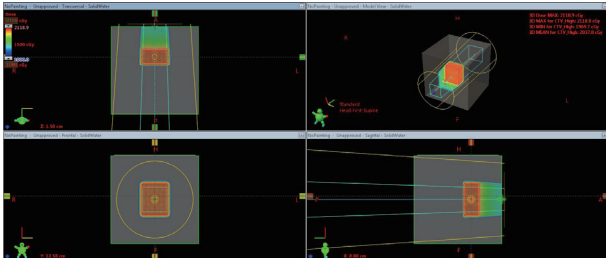


Fig. 4. Treatment plan distribution



Fig. 6. Experimental photograph 2

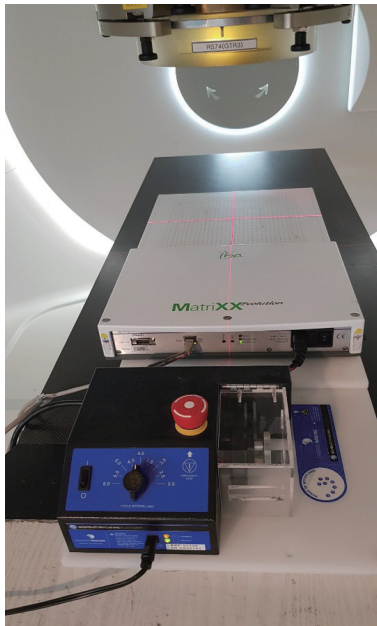


Fig. 5. Experimental photograph 1

4). rescanning 횟수는 4회, 8회, 12회로 3가지 경우로 각각 치료계획을 구성하였다.

2. 측정

측정은 single scan, rescanning 4회, 8회, 12회로 나누어 측정하였다. 각각 3번씩 반복 측정하였다. Moving Phantom의 움직임은 S-I 방향 2 cm로, 움직임 주기는 한 cycle당 4초로 설정하였다. Moving Phantom이 중간 위치 때 정지 상태에서 Setup을 실시하였다(Fig. 5). 중간 layer에서의 2D distribution을 확인하기 위해서 12 cm의 Solid Water Phantom을 Matrix X위에 올려놓았다(Fig. 6). initial phase는 임의로 측정하였다.

결 과

1. Dose measurement

Table 1은 각 plan마다 3번씩 반복 측정을 통하여 획득한 PTV 내에서 발생된 선량의 최대값과 최소값 그리고 범위 내 평균을 나타내고 있다(Table 1).

single scan부터 rescanning 4, 8, 12회 순으로 PTV 내의 D_{max} 의 평균값은 246.47 ± 18.8 cGy, 223.43 ± 8.92 cGy, 222.47 ± 7.7 cGy, 213.9 ± 6.11 cGy으로 D_{min} 의 평균값은 165.53 ± 4.32 cGy, 173.13 ± 11.94 cGy, 184.13 ± 8.04 cGy, 182.67 ± 4.38 cGy으로 D_{mean} 의 평균값은 192.77 ± 6.98 cGy, 196.7 ± 4.01 cGy, 198.17 ± 4.96 cGy, 195.77 ± 3.15 cGy 측정되었다. 모든 plan이 처방선량인 200 cGy보다 적은 선량으로 측정되는 것을 알 수 있었다. 그리고 D_{mean} 과 D_{min} 에서 8회 rescanning 측정 결과가 12회 rescanning의 측정 결과 보다 좋게 나온 이유는 initial phase를 어떻게 설정하느냐에 따라서 선량측정값에 영향을 받게 되는데 그 영향으로 사료된다.

2. Relative values of dose and Homogeneity Index

Table 2는 측정된 dose을 좀더 보기 쉽게 하기 위해서 200 cGy를 기준으로 하여 상대적인 수치를 퍼센트로 나타내었고 추가로 Homogeneity Index(HI)를 표시하였다(Table 2). HI를 구하는 공식은 dose의 최대값과 최소값을 이용하는 방법으로 산출하였다.

$$HI = \frac{D_{max}}{D_{min}}$$

Table 1. The maximum and minimum values of the does in the PTV obtained after repeated measurements 3 times for each plan. (unit: cGy)

	Single scan				x4 rescan			
	1	2	3	Avg	1	2	3	Avg
D _{max}	238.1	268	233.3	246.47±18.8	216.9	233.6	219.8	223.43±8.92
D _{min}	170.1	165	161.5	165.53±4.32	185.6	172	161.8	173.13±11.94
D _{mean}	191.2	200.4	186.7	192.77±6.98	199.9	198	192.2	196.7±4.01
	x8 rescan				x12 rescan			
	1	2	3	Avg	1	2	3	Avg
D _{max}	227.4	213.6	226.4	222.47±7.7	220.9	211.2	209.6	213.9±6.11
D _{min}	179	193.4	180	184.13±8.04	178	186.7	183.3	182.67±4.38
D _{mean}	192.6	202.1	199.8	198.17±4.96	195.6	199	192.7	195.77±3.15

Table 2. Relative values based on 200 cGy and Homogeneity Index (unit: %)

	Single scan			x4 rescan			x8 rescan			x12 rescan		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
D _{max}	119.1	134	116.7	108.5	116.8	109.9	113.7	106.8	113.2	110.5	105.6	104.8
D _{min}	85.1	82.5	80.8	92.8	86	80.9	89.5	96.7	90	89	93.4	91.7
HI	1.4893			1.295			1.2103			1.1716		

HI 수치는 single scan PBS, 4, 8, 12회 Layered rescaning PBS 순으로 1.4893, 1.295, 1.2103, 1.1716으로 확인되었다. HI 수치는 rescan 횟수가 증가함에 따라 1에 수렴하는 것을 알 수 있었다.

3. 2D distribution and Dose profile

Matrix X를 통해서 2D distribution과 dose profile를 획득하였다(Fig. 7-10).

profile의 비교를 통하여 Layered Rescanning PBS가 PTV 내에 더욱 균질한 선량분포를 보여주는 것을 확인하였다.

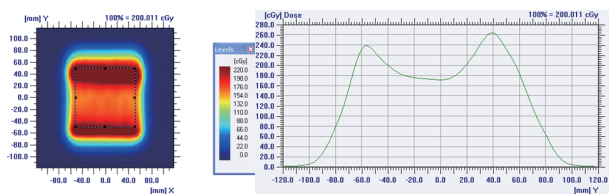


Fig. 7. 2D distribution and profile (single scan)

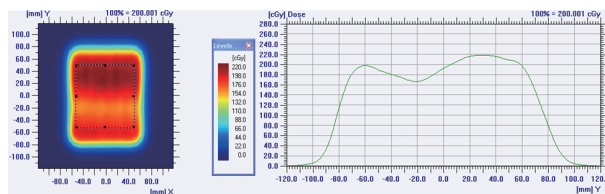


Fig. 8. 2D distribution and profile (x4 rescan)

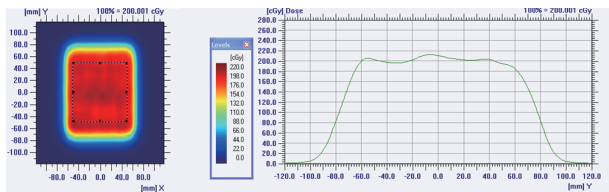


Fig. 9. 2D distribution and profile (x8 rescan)

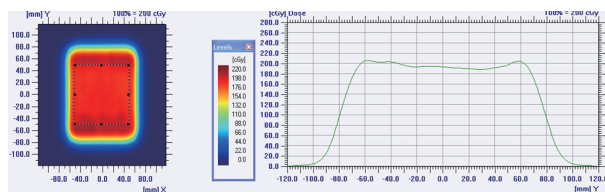


Fig. 10. 2D distribution and profile (x12 rescan)

Table 3. Beam on time and Relative values based on single scan plan

	Beam on time (sec)	Relative (%)
Single scan	2:32	100
x4 rescan	3:15	128.3
x8 rescan	4:30	177.6
x12 rescan	5:37	221.7

4. beam on time

beam on time은 single scan plan은 2분 32초 4, 8, 12회 rescan plan은 각각 3분 15초, 4분 30초, 5분 37초로 측정되었다. rescan 횟수가 증가할수록 beam on time 역시 증가하였다. 특히 12회 rescan의 경우 일반 PBS에 비하여 121.7 % 더 beam on time이 긴 것으로 측정되었다 (Table 3).

결론 및 고찰

양성자치료는 고 에너지 X선 치료보다 균일한 선량분포와 정상조직의 손상을 최소화 할 수 있는 치료방법이다. 그러나 그만큼 치료에서 발생하는 오차에 대해서 취약하다. 그중에서도 현재 PBS의 경우 많은 장점에도 불구하고 종양의 움직임 때문에 발생하는 Interplay Effect로 인하여 임상 적용 시 제약을 가지고 있다.⁽¹⁻¹⁰⁾

본 연구에서는 Matrix X를 이용하여 Layered Rescanning PBS와 single scan PBS의 2D distribution을 측정을 통해 HI와 profile을 측정하였다. 측정결과는 PTV 내에 homogeneity는 single scan PBS에 비해 Layered Rescanning PBS가 향상되었음을 확인하였다. rescan 횟수가 많아질수록 HI는 1에 수렴하였다. single scan과 12회 rescan을 비교 시 HI 수치는 0.32 향상됨을 확인하였다.

그러나 측정과정에서 표면 layer일수록 MU값이 줄어들게 되어 rescan의 횟수가 설정한 횟수보다 rescan 횟수가 줄어드는 문제점을 보여주었다. 이는 하드웨어적인 한계점으로 사료된다. 본원에서는 움직임이 많은 장기를 치료하는 환자의 경우 호흡동조를 이용한 double scattering

proton therapy 치료를 하는 것이 일반적이다. 그러나 호흡이 일정하지 못하신 고령 환자분들의 경우 호흡동조치료를 못하는 경우가 발생하기도 한다. 추후 추가적인 실험을 통해서 Layered Rescanning PBS가 위의 같은 상황에서 새로운 대안이 될 것이라고 사료된다.

참고문헌

1. K Bernatowicz, A J Lomax and Knopf, Comparative study of layered and volumetric rescanning for different scanning speed of proton beam in liver patients, *Physics Med*, 2013 7905-7920
2. Ye Zhang, Isabel Huth, Martin Wegner, Damien Charles Weber. An evaluation of rescanning technique for liver tumor treatments using a commercial PBS proton therapy system, *Int. J. Radiat. Oncol. Biol., phy* 121(2). 2016,11
3. Clemens Grassberger, Stephen Dowdell, Greg Sharp, Motion mitigation for lung cancer patients treated with active scanning proton therapy, *Medical Physics* 2015 2462-2469
4. Furukawa T.et.al., Respiratory Gating target irradiation with fast rescanning and gating in particle therapy, *Med.phys.* 37(9), 4874-4879 (2010). 10. 1118/1.3481512
5. Kooy H. M,et al. A case study in proton pencil beam scanning delivery, *Int. J. Radiat. Oncol. Biol., phys.* 76(2), 624-630 (2010),10.1016/j.jrobp.2009.06.065
6. Bert C and Durante M 2011 Motion in radiotherapy : particle therapy *Phys. Med. Biol.* 56 R113--44
7. Knopf A, Hong T and Lomax A 2011 Scanned proton radiography for mobile targets – the effectiveness of re-scanning in the context of different treatment planning approaches and for different motion char-

- acteristics *Phys. Med. Biol.* 56 7257--71
8. Lambert J, Suchowerska N, McKenzie D R and Jackson M 2005 Intrafractional motion during proton beam scanning *Phys. Med. Biol.* 50 4853--62
9. Zenklusen S, Pedroni E and Meer D 2010 A study of repainting strategies for treating moderately Respiratory Gating targets with proton pencil beam scanning at the new Gantry 2 at PSI *Phys. Med. Biol.* 55 5103--21
10. Seco J, Robertson D, Trofimov A and Paganetti H 2009 Breathing interplay effects during proton beam scanning:simulation and statistical analysis *Phys. Med. Biol.* 54 N283--94
11. sairos safai, christian Bula, David Meer, Eros Pedroni Improving the precision and performance of proton pencil beam scanning. TCR vol 1, no3 (2012, 10)

Comparison of Doses of Single Scan PBS and Layered Rescanning PBS Using Moving Phantom in Proton Therapy

Department of Proton Therapy Center, National Cancer Center, Ilsan, Korea

Kim Kyeong Tae, Kim Seon Yeong, Kim Dae Woong, Kim Jae Won, Park Ji Yeon, Jeon Sang Min

Purpose: We apply the Layered Rescanning PBS designed to complement the Pencil Beam Scanning(PBS), which is vulnerable to moving organs with the Moving Phantom, and compare the homogeneity with the single scan PBS.

Methods and materials: Matrix X (IBA, Belgium) and Moving Phantom (standard imaging, USA) were used. A dose of 200 cGy was measured in the AP direction on a hypothetical tumor 10x10x5 cm. The plan type was planned as 4 kinds of single scan PBS, rescan number 4, 8, 12 times. Were measured three times for each types. During the measurement, the respiratory cycle of the Moving Phantom was generally set to 4 seconds per cycle, and the movement radius in the S-I direction was set to 2 cm. In addition, beam on time was measured.

Results: The mean values of D_{max} in the PTV were 246.47±18.8 cGy, 223.43±8.92 cGy, and 222.47±7.7 cGy, 213.9±6.11 cGy and the mean values of D_{min} were 165.53±4.32 cGy, 173.13±11.94 cGy, 184.13±8.04 cGy, 182.67±4.38 cGy and the mean values of D_{mean} 192.77±6.98 cGy, 196.7±4.01 cGy, 198.17±4.96 cGy, 195.77±3.15 cGy respectively. As the number of rescanning increased, the Homogeneity Index converged to 1. The beam on time was measured as 2:15, 3:15, 4:30, 5:37 on average. In the measurement process, in the low dose layer of the MU, the problem was found that it was not rescanned as many times as the set number of rescan.

Conclusions: In the treatment of tumors with long-term movements, the application of layered rescanning PBS showed a more uniform dose distribution than single scan PBS. And as the number of rescan increase, the distribution of homogeneity is uniform. Compared with single scan plan and 12 rescan plan, HI value was improved by 0.32. Further studies are expected to be applicable to patients who can not be treated with respiratory synchronous radiation therapy.

► **Key words:** Proton therapy, PBS, Layered Rescanning, Moving Phantom