

## 대동맥림프절 종양에 대한 세기조절방사선치료, 양성자치료, 양성자회전치료의 선량 비교평가

- Dosimetric Comparison of Intensity Modulated Radiation, Proton Beam Therapy and Proton Arc Therapy for Para-aortic Lymph Node Tumor -

건양대학교병원 방사선종양학과

김정훈

### — 국문초록 —

현재 상용화되어 있는 양성자치료의 치료계획장비를 이용하여 방사선회전조사와 같은 치료계획을 양성자치료에 사용하여 대동맥 주위 림프절 종양에 대해 양성자회전치료와 양성자치료, 세기조절방사선치료를 이용하여 선량 평가를 하였다.

대동맥주위 림프절 종양 환자 9명을 대상으로 양성자회전치료, 양성자치료, 세기조절방사선치료의 방사선치료계획을 세워 각각의 선량 체적 히스토그램을 이용하여 선량 평가를 하였다. 양성자회전치료의 치료계획방법으로는 250~120까지 5도 간격으로 48개의 빔을 사용하였으며, 양성자치료와 세기조절방사선치료는 각각 2~3, 4~5개의 빔을 사용하였다. 모든 방사선 치료계획 시스템은 Eclipse planning system(Varian Medical system, Inc., Palo Alto, CA, USA)을 사용하였으며, 양성자회전치료는 아직 개발이 안된 치료장치이므로 치료계획방법에서 기계적, 물리적인 요소를 양성자치료계획과 동일하게 시행하였다. 선량분석방법으로는 정상장기(간, 신장, 소장, 위, 십이지장)와 종양의 선량 체적 히스토그램(dose-volume histogram: DVH)을 이용하여 생물학적 인자인 normal tissue complication probabilities(NTCP), organ equivalent dose(OED)와 mean dose를 각각의 치료계획방법을 비교 분석 평가하였다.

그 결과 양성자회전치료가 복부에 위치한 small bowel, duodenum, stomach의 볼륨 90%가 받는 선량에서의 결과는 다른 치료계획에 비해 높은 결과를 나타내고 있다.

NTCP의 결과에서 양성자회전치료가 liver를 제외한 나머지 장기에서 가장 낮은 결과를 보여주고 있다. 하지만 복부에 위치한 정상장기에 받는 선량이 다른 치료계획에 비해 높아 치료계획 시 주위가 요하며, 물리적, 기계적인 요소는 양성자치료와 동일하다는 전제조건으로 양성자회전치료와 유사한 장비가 제작되어 상용화 되었을 때에 본 연구의 결과와는 다를 거라 사료된다. 현실적으로 아직 불가능한 치료방법이지만 앞으로 추가적인 양성자회전치료의 연구와 기술개발이 되어 상용화가 되면 기존의 특수방사선치료인 세기조절방사선치료, 양성자치료, 세기조절회전치료보다 효과적이고 안전한 치료방법이 될 거라고 사료된다.

**중심 단어:** 양성자치료, 양성자회전치료, 세기조절방사선치료

\* 접수일(2014년 10월 29일), 심사일(2014년 11월 1일), 확정일(2014년 11월 12일)

교신저자: 김정훈, (302-718) 대전 서구 관저동로 158  
 건양대학교병원 방사선종양학과  
 Tel : 042-600-6757, C.P. : 010-8839-6252  
 E-mail : medduck@kyuh.ac.kr

## I. 서 론

기존의 3차원 입체조형치료가 빔의 입사 방향에 따라 치료면 모양을 병변 모양과 일치시키는데 반해, 세기조절 방사선치료기법은 이와 더불어 조사 빔이 진행해 가는 방향으로 병변과 주변장기의 배치에 따라 조사 빔의 세기를 위치에 따라 조절함으로써 얻어진다<sup>1)</sup>. 다른 치료방법으로는 방사선 회전치료(arc therapy)이며, 환자의 종양 중심에 360도 회전하면서 방사선을 조사하는 방법이다<sup>2)</sup>.

이러한 치료기법의 결과적인 문제점은 종양 주변에 위치한 정상 조직에 낮은 선량이 넓은 범위에 걸쳐 적산선량이 증가한다. 정상조직에 적산선량이 늘어나면 몇 년 후에 2차 악성종양이 발생할 확률이 높게 된다<sup>3,4)</sup>. 방사선치료계획을 수립하는데 있어서 선량 체적 히스토그램(Dose volume histogram, DVH)은 단순히 치료를 위한 목적으로 이용될 뿐만 아니라 실제적인 임상연구 및 다양한 분야의 기본적인 자료로 사용이 되며, 특정 선량이 들어가는 조직의 체적, 조직의 특정 체적에 분포되는 선량을 비롯하여 normal tissue complication probability (NTCP), organ equivalent dose(OED) 등을 구할 수 있다<sup>5-9)</sup>.

양성자 빔을 이용한 회전 치료는 아직까지 불가능한 단계에 있지만 앞으로 장치의 소형화와 기술개발이 되어 양성자회전치료가 가능하게 된다는 가설 하에 여러 가지 변수인 물리적, 기계적, 생물학적인 요소를 배제하여 단순 양성자치료계획을 응용하여 양성자회전치료<sup>11)</sup>, 양성자치료, 세기조절방사선치료의 선량분석을 하였다. 분석 방법으로 국립암센터에서 개발된 선량 체적 히스토그램 분석프로그램을 이용하여 Normal tissue complication (NTCP), organ equivalent dose(OED), mean dose와

$D_{30\%}$ (Gy),  $D_{60\%}$ (Gy),  $D_{90\%}$ (Gy),  $V_{30\%}$ (%),  $V_{60\%}$ (%),  $V_{90\%}$ (%)을 비교분석 하였다<sup>12)</sup>.

## II. 재료 및 방법

이 연구는 9명의(6명 여자, 3명 남자) para-aortic lymph node tumor 환자를 대상으로 양성자회전치료, 양성자치료, 세기조절방사선 치료계획을 시행하였다. 9명의 환자 자세는 supine position으로 환자 고정 장치(immobilized)를 하지 않고(free-breathing computed tomography, contrast, 2.5 mm slice thickness) 자연스러운 호흡으로 컴퓨터단층촬영(RT 16 PRO CT Simulator, General Electrics Systems, Cleveland, OH)을 시행했다. CT영상 획득 방법으로는 2.5 mm 간격으로 T11 spine부터 대퇴골 소전자까지 영상을 획득 하였고 같은 방법으로 자기공명영상(MRI)을 얻어 치료계획장비로 보내어 CT영상과 MRI영상을 image fusion을 하였다<sup>13)</sup>. 정상장기는 code, RT kidney, LT kidney, liver, small bowel, duodenum, stomach을 delineation 했다.

**Target definition and Treatment planning:** 치료계획 방법으로 forward method는 양성자회전치료와 양성자치료이고 세기조절방사선치료는 inverse method로 하였으며, 치료계획장비로는 Eclipse planning system(EPS, Varian Medical system, Inc., Palo Alto, CA, USA)를 사용하였다(Fig. 1). Planning Target volume(PTV)의 delineation은 image fusion된 MRI 영상을 이용하여 종양(gross tumor volume: GTV)보다 상하좌우 모두 1cm간격으로 확장시켰으며 각각의 치료계획 선량은 60 Gy(2 Gy-30 fx)로 PTV에 치료처방을 했다. 정상장기가 가지고 있

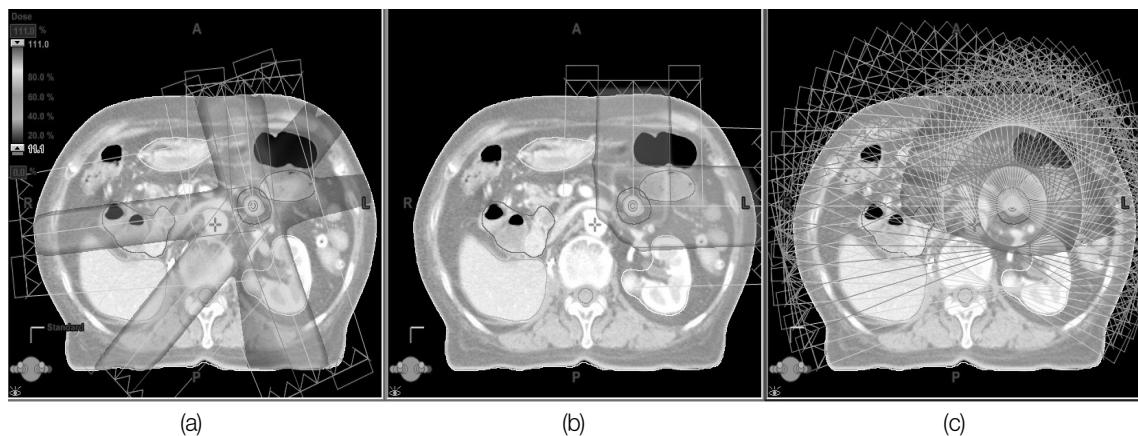


Fig. 1 Each plan method dose distribution (a: IMRT, b: PBT, c: PAT)

는 tolerance dose의 범의에서 constraints를 적용해 최적의 치료계획이 되도록 하였다(Table 1). 모든 치료계획의 계산방법은 조직 불균등(tissue heterogeneities) 방법으로 시행하였고 계산범위의 간격은 2.5 mm로 하였다. 위장관(gastrointestinal tract) 부위에 위치한 공기로 되어있는 부분은 주변조직과 같은 CT number로 채워서 공기에 대한 값을 보정시켰다.

**Table 1** Dose objectives and constraints

Target volumes	Objectives	95%
PTV	V60 Gy	
Organs at risk	Constraints	
Liver	Mean dose	< 30 Gy
Stomach	Max dose	< 54 Gy
Duodenum	Max dose	< 60 Gy
Small bowel	V50-54 Gy	< 2%
Kidney	V20 Gy	< 33%

**세기조절방사선치료(Intensity modulated radiation therapy):** 치료계획은 forward planning방법으로 환자마다 종양의 위치에 따라서 5~6개의 빔을 사용하였다. 위에서 언급했듯이 IMRT는 일반적인 proton therapy planning 비해 고 선량 분포가 나타나는 부분이 있다. 그래서 중요장기인 GI track인 stomach, large-bowel, small-bowel에는 많은 경험에서 얻은 data를 이용하여 높은 dose constraint를 주었으며, target volume coverage는 PTV에 95%선량이 들어가게 치료계획을 했다<sup>1,4,19</sup>).

**양성자치료(Proton beam therapy: PBT):** 치료계획방법은 마찬가지로 EPS를 사용하였고, 치료계획 알고리즘은 pencil beam algorithm을 사용 하였다. 모든 환자의 snote(block) size는 100 mm를 사용하며, 성분으로는 Cu-57.4%, Pb-3.2%, Fe-0.2%의 물질을 함유를 하고 있는 brass로 제작되었다. 빔마다 air gap은 20 mm로 고정하였고 2~3개의 빔을 사용하였다. 빔 각도는 0, 270, 90을 사용하지만 빔이 통과하는 곳에 중요장기가 있으면 어느 정도의 낮은 선량을 받기 때문에 +, -10도 조정을 했다. 각각의 빔마다 compensator, block을 설정해 주었고 target margin은 distal end 0 cm, proximal end 0.3 cm으로 설정했다<sup>10,14,15</sup>).

**양성자회전치료(proton arc therapy: PAT):** 우선 양성자회전치료는 아직 실현 가능한 치료기법이 아니기 때문에 물리적인 효과나 기계적인 효과를 배제했으며 선행되었던 연구에 의하면 Alderson Rando phantom을 회전

시켜 양성자회전치료를 구현하였고 chest wall dose를 electron arc therapy와 비교한 연구였다<sup>11</sup>. 본 연구에서 사용된 방법은 치료계획장비를 이용하여 양성자회전치료를 구현했으며, 선량체적히스토그램을 사용하여 선량 분석을 하였다. Treatment delivery system은 양성자치료에서 사용되는 passive beam scattering을 사용했으며, Planning system은 양성자치료와 동일한 Eclipse treatment planning system을 사용했다. snote size 100 mm, air gap은 각 port 마다 동일하게 20 mm를 적용했으며, 치료계획시스템은 양성자전용 Arc-therapy method가 되지 않기 때문에 gentry angle을 5도 간격으로 250~120도, 48 beam port를 사용하였다. 각각의 beam port마다 compensator, block을 설정해 주었고 target margin은 distal end margin 0 cm, proximal end margin 0.3 cm으로 각각 설정했다.

**Evaluation tools:** 방사선 치료 시 환자에 조사되는 선량분포를 정확히 예측하기 위해서는 컴퓨터 단층영상을 이용한 3D 모델 기반으로 방사선을 조사하는 치료계획 시스템이 사용되고 있다. 이렇듯 방사선치료계획을 수립하는데 중요한 역할을 하는 것은 환자에 분포된 선량을 확인 할 수 있는 dose volume histogram(DVH)이다. 이번 연구에서는 DVH를 이용하여 PTV의 최소선량과 최대 선량을 알 수 있는 D<sub>2%</sub>, D<sub>98%</sub>(dose received by the 98% and 2% of the volume)을 이용하며, 복부에 위치한 정상 장기의 분석방법은 mean Dose, D<sub>30%</sub>, D<sub>60%</sub>, D<sub>90%</sub>, V<sub>30%</sub>, V<sub>60%</sub>, V<sub>90%</sub>를 이용하였으며, Liver, stomach, small bowel, duodenum은 model of kall mann의 Normal Tissue Complication Probability(NTCP)를 이용하여 분석 하였다<sup>7-9</sup>). 하지만 실제 planning system에서는 이러한 분석을 자유롭게 할 수 없어 치료계획 시스템에서 얻은 DVH를 MATLAB기반으로 개발한 tool을 이용하여 data분석을 하였다<sup>12</sup>).

**Normal tissue complication probability(NTCP):** 생물학적 모델링에 사용되고 있는 파라미터로 많은 연구에 의해서 m(slope), n(volume), D<sub>50</sub>값이 정해져 있으며 이를 통해 NTCP가 계산이 된다. 사용된 수식은 Lyman-Kutcher-Burman(LKB) 모델로 아래와 같다<sup>6,9</sup>).

$$NTCP = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-t^2/2} dt$$

$$u = (d_{ref} - TD_{50}(v_{eff})) / (m \cdot TD_{50}(v_{eff}))$$

d<sub>ref</sub>는 reference dose로 일반적으로 DVH에서 가장 큰 선량 값으로 정의되며, v<sub>eff</sub>는 partial effective

volume의 합으로 LKB모델에서 방사선조사를 받은 체적  $v(j=1, \dots, k)$  조사된 선량  $d_j$ 와  $d_{ref}$ 를 통해 계산되며 식은 다음과 같다.

$$v_{eff} = \sum_{j=1}^k v_j \cdot \left( \frac{d_j}{d_{ref}} \right)^{1/n}$$

Organ equivalent dose(OED): 방사선 치료 시 경우에 따라 필요이상으로 정상조직에 방사선이 조사되어 다른 암을 유발하는 가능성이 있다고 조사되고 있으며 다양한 연구가 이루어지고 있고 그 중에 하나의 인자로 제안되고 있는 것이 OED이다. 이 변수는 방사선 치료 시에 조직에 분포된 선량을 바탕으로 계산되는 총 3가지 모델 Linear, Bell shaped, Plateau model이 존재한다.

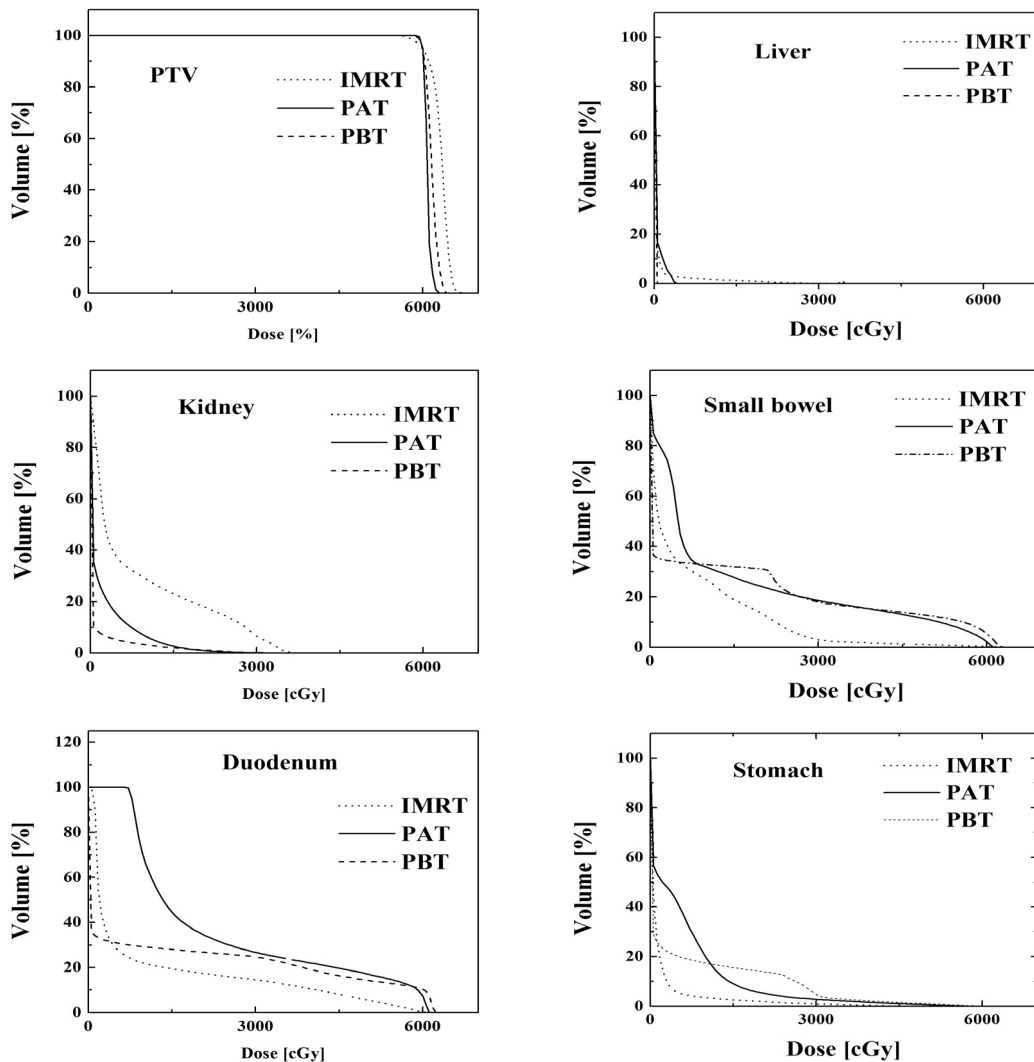
$v_i, D_i$ 는 DVH상에서의 각각의 체적과 선량을 의미하며,  $\alpha$ 와  $\delta$ 는 Table 2에 나와 있듯이 각 조직마다 정의되는 인자이다<sup>16-18)</sup>.

**Table 2** Model parameters for OED (organ equivalent doses)

Model parameter for OED		
Organ	$\alpha$	$\delta$
Liver	0.487	1.14
Stomach	0.149	1.2
GI-Tract (Small bowel, Duodenum)	0.131	0.57

### III. 결 과

Fig. 1에서 보여주듯이 9명의 para-aortic lymph node tumor 환자 대상으로 PTV에 대한 동일한 선량치 방과 세기조절방사선치료, 양성자치료, 양성자회전치료의



**Fig. 2** Each plan method (IMRT, PAT, PBT) compare for organ at risk

빔 조사 방식을 적용하여 도출된 치료계획의 DVH를 이용하여 비교해본 결과는 Fig. 2와 Table 4와 같다.

PTV의 전체 볼륨 2%에 조사되는 선량(D<sub>2%</sub>(Gy))은 최대선량 값을 나타내는 지표이다. 세기조절방사선치료는 65.7±0.5(Gy)로 가장 높게 나타났으며, 양성자치료는 63.1±0.8(Gy) 양성자회전치료는 61.1Gy±0.3(Gy)의 선량이 나타났다. 전체 볼륨의 98 %에 조사되는 선량(D<sub>98%</sub>(Gy))은 최소선량을 나타내는 지표로 세기조절방사선치료는 57.3±0.8(Gy), 양성자치료 58.6±0.6(Gy) 양성자회전치료가 59.1±0.4(Gy)로 나타났다(Table 3).

**Table 3** Each plan method compare for PTV (IMRT, PAT, PBT)

Abbreviations: Dx=dose to x% of the total volume in dose-volume histogram; Vx=percentage of volume receiving more than x% of prescribed dose.

	PTV		
	IMRT	PBT	PAT
D2%(Gy)	65.7(0.5)	63.1(0.8)	61.1(0.3)
D98%(Gy)	57.3(0.8)	58.7(0.6)	59.1(0.4)
Dmean(Gy)	63.3(0.6)	62.5(0.7)	60.8(0.4)

3가지 치료계획방법의 PTV의 DVH를 이용하여 HI, CI의 결과 값은 Table 3에서 나와 있듯이 양성자회전치료(mean, 12.1)의 HI가 3가지 치료계획방법 중에 좋은 결과를 보여주고 있으며, 양성자치료(mean, 13.1)도 비슷한 결과 값을 나타내고 있다. 세기조절방사선치료(mean, 21.5)는 가장 높은 수치를 보여주었으며, 선량분포의 균일지수가 가장 낮은 것으로 나타났다. 종양 조직의 주변의 선량 조형성을 확인하기 위한 지수인 CI는 양성자치료(mean, 1.23), 양성자회전치료(mean, 1.21)는 비슷한 수치를 보이지만 세기조절방사선치료(mean, 1.47)가 약간 높은 결과 수치를 보여주고 있다(Table 4).

**Table 4** Intensity modulated radiation (IMRT), proton beam therapy (PBT), proton arc therapy (PAT)의. Homogeneity index와 Conformity index

Index	IMRT		PBT		PAT	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Homogeneity index	21.5	4.7	13.1	2.3	12.1	2.1
Conformity index	1.47	0.19	1.23	0.07	1.21	0.07

**Table 5** IMRT, PBT, PAT의 organ at risk의 비교(V<sub>30%</sub>, V<sub>60%</sub>, V<sub>90%</sub>, D<sub>30%</sub>, D<sub>60%</sub>, D<sub>90%</sub>, Dmean)

	IMRT	PBT	PAT	IMRT	PBT	PAT
	Liver			Kidney		
V30%(%)	4.3(0.9)	8.7(3.7)	8.2(1.1)	12.0(6.3)	0.7(0.4)	1.6(0.5)
V60%(%)	2.3(0.7)	4.7(0.6)	6(0.7)	4.6(3.9)	0	0
V90%(%)	1.4(0.4)	3.3(0.3)	3.2(0.3)	0.4(1.4)	0	0
D30%(Gy)	0.5(0.4)	0	0	0.6(0.3)	0	0
D60%(Gy)	1.1(0.3)	0.2(0.5)	0.2(0.2)	1.3(0.8)	0	0
D90%(Gy)	2.7(0.5)	6.6(1.2)	7.1(1.5)	5.7(2.4)	0.4(0.4)	3.1(0.7)
Dmean(Gy)	0.4(0.3)	4.9(0.9)	7.6(1.2)	7.2(2.9)	0.5(0.3)	3(0.6)
	IMRT	PBT	PAT	IMRT	PBT	PAT
	Duodenum			Stomach		
V30%(%)	28.1(9.5)	59.1(20.5)	57.1(18.2)	22.7(4.1)	39.9(14.3)	32.6(12.1)
V60%(%)	17.7(4.3)	31.8(12.9)	39.0(5.3)	12.6(1.5)	11.4(6.4)	10.1(5.6)
V90%(%)	9.9(1.3)	14.7(3.2)	17.5(1.3)	5.1(0.4)	4.5(2.1)	3.4(0.9)
D30%(Gy)	0.1(0.1)	0.1(0.2)	0	0.8(0.3)	0	0
D60%(Gy)	0.2(0.4)	10.6(1.4)	16.3(4.2)	2.4(0.3)	1.8(0.5)	7.8(6.8)
D90%(Gy)	15.1(1.7)	25.2(5.3)	44.4(19.4)	12.9(1.6)	13.7(7.9)	19.3(11.2)
Dmean(Gy)	15.9(2.1)	16.1(3.6)	26.7(6.0)	12.8(1.6)	9.9(5.2)	14.4(8.4)
	IMRT	PBT	PAT	Small bowel		
	V30%(%)	29.3(7.5)	39.7(10.2)	27.3(4.2)		
V60%(%)	14(4.2)	14.8(4.3)	12.2(1.1)			
V90%(%)	3.6(1.3)	6.8(1.2)	5.1(0.4)			
D30%(Gy)	0.8(0.4)	2.36(0.4)	6.7(0.6)			
D60%(Gy)	3.8(0.6)	11.3(0.7)	9.6(1.3)			
D90%(Gy)	17(2.1)	12.7(2.6)	16.9(3.6)			
Dmean(Gy)	14.2(1.1)	14.12(2.9)	17.3(1.9)			

Table 5에서는 각각의 치료계획 방법을 이용하여 처방 선량의 30%(18 Gy), 60%(36 Gy), 90%(54 Gy)가 받는 장기의 볼륨과 각 장기의 전체 볼륨의 30%, 60%, 90%가 받는 선량을 나타내고 있다. 복부에 위치한 Small bowel, duodenum, stomach의 양성자회전치료의 Dmean(standard deviation) 값은 각각 17.3(Gy), 26.7(Gy), 14.4(Gy)로 다른 방법인 양성자치료 14.12(Gy), 16.1(Gy), 9.9(Gy)와 세기조절방사선치료 3.8(Gy), 15.9(Gy), 12.8(Gy) 방법보다 높게 나왔으며, 복부 후면에 위치한 kidney는 양성자치료 0.5(Gy), 양성자회전치료 3(Gy)의 빔의 간섭을 덜 받아 세기조절방사선치료 7.2(Gy)보다 Dmean 선량이 낮게 나타났다.

전체선량의 30%, 60%, 90%가 받는 liver의 볼륨의 경우 양성자회전치료가 세기조절방사선치료보다 3.9%, 3.7%, 1.8% 높게 조사되었고, 양성자치료는 -0.5%, 1.3%, -0.1%로 조사되었으며, duodenum과 stomach도 비슷한

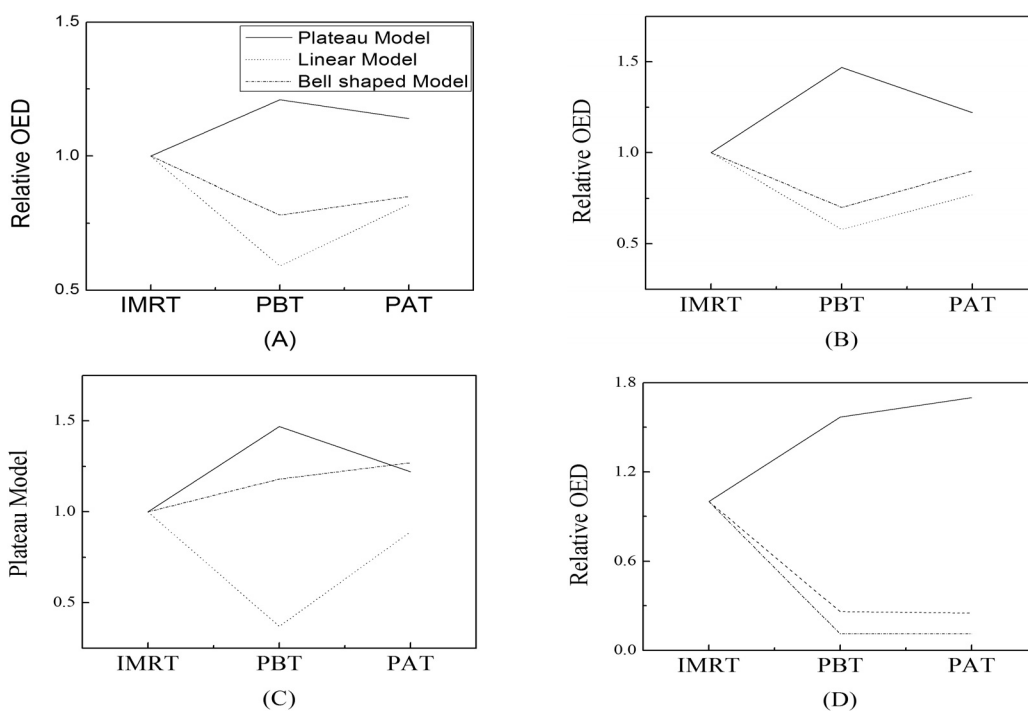


Fig. 3 Each plan method (IMRT, PAT, PBT) compare for OED(A: Liver, B: Stomach, C: SM bowel, D: Duodenum)

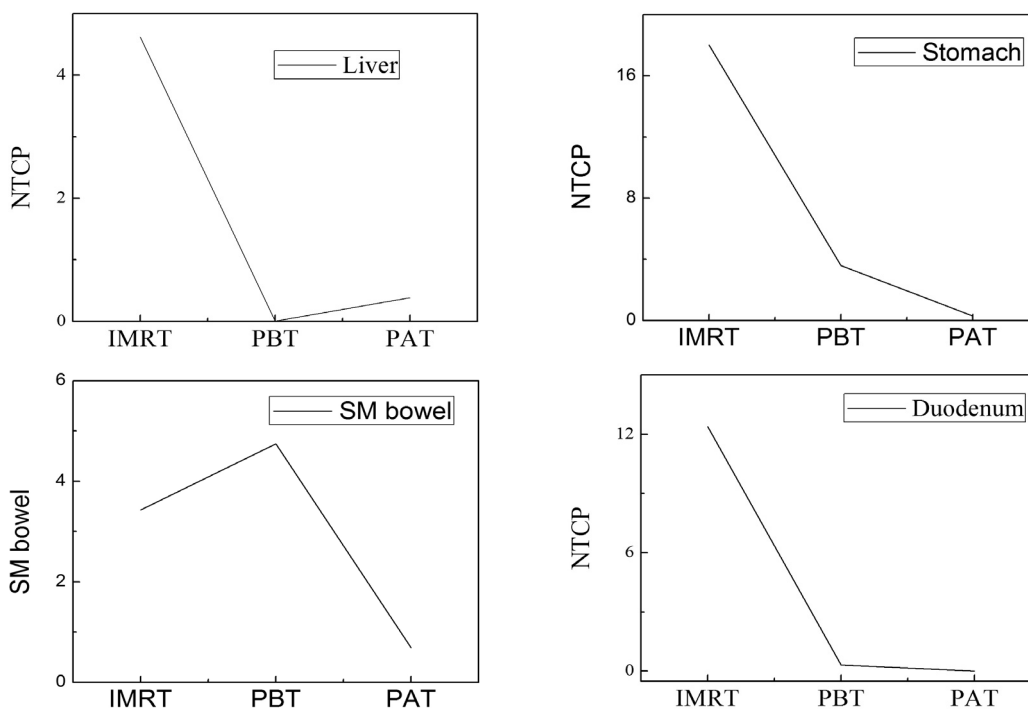


Fig. 4 Each plan method (IMRT, PAT, PBT) compare for NTCP

결과를 보여주고 있다. kidney의 경우에는 전체선량 30%의 경우 양성자회전치료가 세기조절방사선치료보다 10.4% 적게 조사되었다. Small bowel은 선량 30%일 때 양성자치료가 세기조절방사선치료, 양성자회전치료보다 각각 10%, 12.4% 높게 조사되었다.

Fig. 3의 OED 결과 값은 세기조절방사선 결과 수치에 양성자치료, 양성자회전치료의 OED 결과 수치를 정규화한 그림이다. Liver, stomach, small bowel, duodenum 모두 Plateau model에서 세기조절방사선치료가 가장 낮은 결과 값이 나왔으며, Linear model, Bell shaped에서는 반대로 세기조절방사선치료 결과 값이 가장 높게 나타나고 있다.

Fig. 4은 방사선이 조사 되었을 때 정상조직에 부작용을 나타내는 척도인 NTCP의 경우 liver를 제외한 GI track에 있는 장기(SM bowel, duodenum, stomach) 모두 양성자회전치료의 치료계획방법이 가장 적게 나왔으며 오히려 small bowel에서는 양성자치료가 가장 높은 결과 수치를 보이고 있다.

#### IV. 결 론

본 연구는 방사선 치료계획시스템(RTP)에서 양성자회전치료구현이 가능하지 않지만 방사선 회전치료와 유사한 방법으로 치료계획을 하여 양성자회전치료의 치료방법에 대한 선량평가를 비교, 분석하고 향후 양성자치료에서 새로운 치료기술로 구현 가능한지 여부를 목표로 하였다.

선량 비교방법으로는 세 가지의 치료계획방법을 각각 장기전체 볼륨의 30%, 60%, 90%가 받는 선량과 치료선량의 30%(18 Gy), 60%(36 Gy), 90%(54 Gy)이 받는 장기의 볼륨을 실험한 결과, 복부에 위치한 small bowel, duodenum, stomach에서 양성자회전치료의 볼륨 90%가 받는 선량에서의 결과는 다른 치료계획에 비해 높은 결과를 보여주었으며, Dmean값도 다른 치료계획방법에 비해 적게는 20%에서 많게는 65%까지의 선량을 더 받는 결과를 보여주었다. 즉, 이 결과는 복부전체 360도 회전하면서 종양외의 정상장기에 낮은 선량이 들어가므로 치료계획 시 정상장기의 임계선량을 고려해 치료계획을 세우는 주의가 필요하다.

PTV는 Radiation Therapy Oncology Group(RTOG)에서 권고하는 방법으로 치료 처방 선량은 종양표적의 95%를 포함하여야 하며, 최대선량과 최소선량(D<sub>95%</sub>-PTV, D<sub>2%</sub>-PTV)을 동시에 획득하여 치료계획을 분석하는 방법

을 사용하였다<sup>18)</sup>. PTV의 결과에서 세기조절방사선치료의 최대선량은 65.7 Gy이었으며, 최소선량은 57.3 Gy이었다. 양성자치료의 최대선량은 63.1 Gy, 최소선량은 58.7 Gy, 양성자회전치료의 최대선량은 61.1 Gy 최소선량은 59.1 Gy의 결과를 보였으며, 동시에 종양 조직에 들어가는 선량의 균일성과 조양 조직 주변의 선량 조형성을 확인하기 위해 HI, CI을 이용 하였다. HI의 결과에서는 양성자회전치료 12.1, 양성자치료는 13.1, 세기조절방사선치료가 21.5로 나타났으며, CI의 결과도 양성자회전치료 1.21, 양성자치료는 1.23, 세기조절방사선치료가 1.47로 나타났다.

PTV에 대해 비교 인자를 평가했을 때 양성자회전치료의 HI와 CI가 다른 치료계획에 비해 적은 결과를 보여주어, 종양표적 처방선량의 선량분포의 균등도와 종양 주변의 선량 조형성이 낮아 정상장기에 대한 저선량의 분포가 감소하여 현저하게 좋은 선량분포를 보여주고 있다.

OED는 방사선 조사 후 이차적인 암을 유발할 수 있는 인자로 방사선 치료 시 조직에 분포된 선량을 바탕으로 3가지 모델(Linear, Bell shaped, Plateau model)로 계산이 되며, Yoon M 등에 선행되었던 연구에 의하면 뇌척수종양의 방사선치료 시 양성자치료의 OED 결과는 3D conformal radiotherapy와 tomo-therapy보다 낮게 나타나는 보고가 있었으며<sup>20)</sup>, Schneider 등은 전립선 치료의 경우도 양성자치료가 제일 낮은 결과를 보고하였다<sup>16)</sup>. 본 연구의 결과 양성자회전치료와 비교했을 경우 linear 모델에서는 liver, stomach, small bowel, duodenum에서 양성자치료가 0.12, 0.59, 0.37, 0.26으로 낮은 결과가 나타났다. 이 결과는 복부에 위치한 정상장기의 볼륨 90%가 받는 선량이 다른 치료계획보다 적게 선량이 들어가므로 OED의 결과가 낮게 나타나므로 이차적인 암 발병률이 적을 것으로 사료된다.

NTCP는 Lyman-Kutcher-Burman(LKB) 모델을 이용하여 계산이 되며, 방사선을 조사받은 정상장기의 부작용을 나타내는 척도로 Cozzi 등은 cervix cancer환자 대상으로 세기조절방사선치료와 세기조절회전조사 방법의 RapidArc로 NTCP<sub>rapidarc</sub>/NTCP<sub>IMRT</sub>의 연구결과는 1보다 작은 결과로 RapidArc로 치료받는 환자의 정상 장기는 세기조절방사선치료보다 부작용이 낮다는 연구 결과를 보고하였다<sup>2)</sup>. 본 연구의 NTCP의 경우 Fig. 4에서와 같이 양성자회전치료가 0.38(liver), 0.29(stomach), 0.69(small bowel), 0.002(duodenum)로 liver를 제외한 나머지 장기에서 가장 적은 것으로 나타났다. 실험한 결과에서 양성자회전치료는 생물학적 인자 중 정상장기의 부작용과 암 유발가능성이 가장 낮은 결과를 도출하였고, PTV의 종양표적은

다른 치료계획보다 높은 결과를 나타내었다. 하지만 복부에 위치한 정상장기에 받는 선량이 다른 치료계획에 비해 높게 나타났다.

## V. 고 찰

양성자회전치료의 물리적, 기계적인 요소를 배제하고 양성자치료계획을 사용하였기 때문에 본 연구의 결과는 정확한 것은 아니라고 사료가 되며, 양성자회전치료의 유사한 장비가 제작되어 상용화 되었을 때의 결과 또한 본 연구의 결과와는 다를 거라 사료됩니다. 하지만 치료계획 방법을 이용하여 가상의 결과이지만 양성자회전치료가 다른 치료계획에 비해 종양과 정상장기에 들어가는 선량은 좋은 결과를 나타내었다. 현실적으로 아직 불가능한 치료 방법이지만 앞으로 추가적인 양성자회전치료의 연구와 기술개발이 되어 상용화가 되면 기존의 특수방사선치료인 세기조절방사선치료, 양성자치료, 세기조절회전조사 보다 효과적이고 안전한 치료방법이 될 거라고 사료된다.

## 참고문헌

- Intensity Modulated Radiation Therapy Collaborative Working Group.: Intensity-modulated radiotherapy: current status and issues of interest In International journal of radiation oncology, biology, physics, 51,880-914, 2001
- Cozzi, L., Dinshaw, K., & Shrivastava, S.: A treatment planning study comparing volumetric arc modulation with RapidArc and fixed field IMRT for cervix uteri radiotherapy. Radiotherapy and Oncology, 89, 180-191, 2008
- Hall EJ.: Intensity modulated radiation therapy, protons, and the risk of second cancers. Int J Radiat Oncol Biol Phys 65, 1-7, 2006
- Menkarios, C., Azria, D., Laliberté, B., et al.: Optimal organ-sparing intensity-modulated radiation therapy (IMRT) regimen for the treatment of locally advanced anal canal carcinoma: a comparison of conventional and IMRT plans. Radiation oncology (London, England), 2(1), 41, 2007
- Drzymala, R., Mohan, R., Brewster, L., & Chu, J.: Dose-volume histograms. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 21, 71-78, 1991
- Pan CC, Dawson LA, McGinn CJ, Lawrence TS, Haken RKT.: Analysis of radiation induced gastric and duodenal bleeds using the Lyman-Kutcher-Burman model. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 57, 217-218, 2003
- Fay M, Tan A, Fisher R, et al.: Dose-volume histogram analysis as predictor of radiation pneumonitis in primary lung cancer patients treated with radiotherapy. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 61, 1355-1363, 2005
- Kallmann P, Agren A, Brahme A.: Tumour and normal tissue responses to fractionated non-uniform dose delivery. Int J Radiat Biol, 62, 249-62, 1992
- Jones LC, Hoban PW.: Treatment plan comparison using equivalent uniform biologically effective dose(EUBED). Phys Med Biol, 45, 159-170, 2000
- Levin, W. P., Kooy, H., Loeffler, J. S., & Reznick Editors, R.: Proton beam therapy. British Journal of Cancer, 93(8), 849-854, 2005
- G.A. Sandison, E.Papiez, C.Bloch, J.Morrhis: Phantom assessment of lung dose from proton arc therapy. Int.J.Radiatin Oncology Biol.Phy, 38, 891-897, 1997
- Kim, J. S., Yoon, M., Park, S. Y. et al.: A Dose Volume Histogram Analyzer Program for External Beam Radiotherapy. The Journal of the Korean Society for Therapeutic Radiology and Oncology, 27(4), 240-248, 2009
- Stanescu, T., Jans, H., & Pervez, N.: A study on the magnetic resonance imaging (MRI)-based radiation treatment planning of intracranial lesions. Phys. Med. Biol, 53, 3579, 2008
- Moyers MF, Miller DW, Bush DA, et al: Methodologies and tools for proton beam design for lung tumors. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 49, 1429-1438, 2001
- Urie M, Goitien M, Wagner M.: Compensating for heterogeneities in proton radiation therapy.



- Phys Med Biol, 29, 553-66, 1983
16. Schneider U, Lomax A, Besserer J, *et al*: The impact of IMRT and proton radiotherapy on secondary cancer incidence. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 68(3), 892-897, 2007
  17. Schneider U, Lomax A, Timmermann B.: Second cancers in children treated with modern radiotherapy techniques. *Radiother Oncol*, 89, 135-140, 2008
  18. Schneider U.: Mechanistic model of radiation induced cancer after fractionated radiotherapy using the linear-quadratic formula. *Med Phys*, 36, 1138-1143, 2009
  19. Eisbruch A, Chao KS, Garden AS. RTOG H-0022: Phase I/II study of conformal and intensity modulated irradiation for oropharyngeal cancer. Radiation Therapy Oncology Group, 2010
  20. Yoon, M., Shin, D. H., Kim, J., *et al*.: Craniospinal Irradiation Techniques: A Dosimetric Comparison of Proton Beams with Standard and Advanced Photon Radiotherapy International journal of radiation oncology biology physics, 78(2), 390-397, 2010

•Abstract

## Dosimetric Comparison of Intensity Modulated Radiation, Proton Beam Therapy and Proton Arc Therapy for Para-aortic Lymph Node Tumor

JungHoon Kim

*Department Radiation Oncology, Konyang University Hospital*

To test feasibility of proton arc therapy (PAT) in the treatment of para-aortic lymph node tumor and compare its dosimetric properties with advanced radiotherapy techniques such as intensity modulated radiation therapy (IMRT) and conventional 3D conformal proton beam therapy (PBT).

The treatment plans for para-aortic lymph node tumor were planned for 9 patients treated at our institution using IMRT, PBT, and PAT. Feasibility test and dosimetric evaluation were based on comparisons of dose volume histograms (DVHs) which reveal mean dose,  $D_{30\%}$ ,  $D_{60\%}$ ,  $D_{90\%}$ ,  $V_{30\%}$ ,  $V_{60\%}$ ,  $V_{90\%}$ , organ equivalent doses (OEDs), normal tissue complication probability (NTCP), homogeneity index (HI) and conformity index (CI).

The average doses delivered by PAT to the liver, kidney, small bowel, duodenum, stomach were 7.6%, 3%, 17.3%, 26.7%, and 14.4%, of the prescription dose (PD), respectively, which is higher than the doses delivered by IMRT (0.4%, 7.2%, 14.2%, 15.9%, and 12.8%, respectively) and PBT (4.9%, 0.5%, 14.12%, 16.1% 9.9%, respectively). The average homogeneity index and conformity index of tumor using PAT were 12.1 and 1.21, respectively which were much better than IMRT (21.5 and 1.47, respectively) and comparable to PBT (13.1 and 1.23, respectively). The result shows that both NTCP and OED of PAT are generally lower than IMRT and PBT.

This study demonstrates that PAT is better in target conformity and homogeneity than IMRT and PBT but worse than IMRT and PBT for most of dosimetric factor which indicate that PAT is not recommended for the treatment of para-aortic lymph node tumor.

**Key Words:** intensity modulated radiation, proton beam therapy, proton arc therapy