

접합부를 포함한 PAN-전골반암 VMAT 치료 계획 시 콜리메이터 각도의 영향에 관한 고찰

분당서울대학교병원 방사선종양학과

김현영 · 장남준 · 정해윤 · 정윤주 · 원희수 · 석진용

목 적: 대동맥 주위 림프절(PAN)을 포함한 전골반암의 다중치료 중심점(multi-isocenter) 용적 변조 회전 방사선 치료 계획 시 콜리메이터 각도의 변화가 치료 계획의 질, 접합부에서의 선량 재현성, 그리고 접합부의 환자 자세 오차에 미치는 영향에 대해 알아보려고 한다.

대상 및 방법: PAN을 포함한 전골반암 환자 10명을 대상으로 하였다. Eclipse(version 13.7) 치료계획 시스템에서 HD MLC가 장착된 Truebeam STx를 사용하여, 기본으로 설정된 콜리메이터 각도인 10° 외에 20°, 30°, 45°로 변화시키고, 그 외 모든 치료 계획 조건은 동일하게 설정하여 치료 계획을 수립하였다. 수립된 치료 계획은 계획표적용적의 coverage와 조사범위지표(CVI), 균질성 지표(HI)를 평가하였고, 정상조직은 각 부위별로 임상에서 사용하고 있는 지표로 비교하였다. 접합부의 선량 재현성 평가를 위해 파머형 전리함을 삽입한 고체물 팬텀을 이용하여 절대 선량을 측정하였다. 환자 자세 오차에 따른 영향을 알아보기 위해 치료계획 시스템에서 각도별로 등중심점의 위치를 종축방향(in, out)으로 1~3mm 임의로 이동하고 접합부에 가상의 체적을 설정하여 선량 변화를 평가하였다.

결 과: CVI 평균값은 45°에서 PTV-45 0.985±0.004, PTV-55 0.998±0.003, HI 평균값은 45°에서 PTV-45 1.140±0.074, PTV-55 1.031±0.074로 1에 가장 가까운 값을 보였다. 결정 장기는 10°와 비교하여 45°에서 콩팥의 V_{20Gy}이 9.66%, 방광의 평균선량과 V₃₀이 1.88%, 2.16% 감소하였다. 치료 계획과 실측정한 접합부의 선량값의 차이는 0.3% 이내로 모두 허용오차범위 내에 들어왔다. 환자 자세 오차로 인한 접합부에서 선량 변화량은 in 3mm 이동시 최대 선량은 10°, 20°, 30°, 45°에서 14.56%, 9.88%, 8.03%, 7.05%로 증가하였으며, out 3mm 이동시 최소 선량은 10°, 20°, 30°, 45°에서 13.18%, 10.91%, 8.42%, 4.53%로 감소하였다.

결 론: PTV의 CVI, HI 및 결정 장기 보호 면에서 콜리메이터 각도가 증가할수록 전반적으로 개선된 수치를 보였다. 접합부의 환자 자세 오차 영향은 각도가 커질수록 그 차이가 줄어들어 환자 자세 오차에 대한 불안함을 어느 정도 개선하는데 도움이 될 것이라 생각한다. 결론적으로 콜리메이터 각도는 다중치료 중심점 VMAT 치료 계획의 질 및 접합부 선량에 영향을 줄 수 있는 인자임을 인지하고 치료계획 시 콜리메이터 각도 설정에 신중을 기해야 할 것으로 사료된다.

▶ **핵심용어:** 콜리메이터 각도, plan quality, junction, 다중치료 중심점(multi-isocenter) VMAT

서 론

용적변조회전치료(volumetric modulated arc therapy, VMAT)는 갠트리를 회전시키면서 선량률을 조정하고 동시에 다엽콜리메이터(multi leaf collimator, MLC)를 움직이는 기법으로, 세기변조방사선치료(intensity modu-

책임저자: 김현영, 분당서울대학교병원 방사선종양학과
경기도 성남시 분당구 구미로 173번길 82
Tel: 031)787-2906
E-mail: 20369@snuh.org

lated radiaton, IMRT)에 비해 MU(monitor unit)과 치료 시간은 단축하면서 보다 정교한 선량 분포를 만들어 낼 수 있다.⁽¹⁻³⁾

MLC는 빔의 강도를 조절하고(beam modulation) 표적(target) 볼륨에 정확한 선량을 전달함과 동시에 정상 조직과 결정 장기에 들어가는 선량을 적절하게 차폐하여 최소한의 선량을 조사하는데 중요한 역할을 하므로 치료 계획의 질에 영향을 미친다.⁽⁴⁻⁵⁾ VMAT 치료 계획 시 엽 간 누설선량(interleaf leakage)의 영향을 최소화하기 위해 콜리메이터 각도를 돌려 설정하는 것이 일반적이며,⁽⁶⁻⁷⁾ 콜리메이터 각도의 변화는 MLC가 표적에 접근하는 방향을 바꾸기 때문에 치료 계획에 영향을 줄 수 있다.⁽⁸⁻¹¹⁾

최근 선형가속기는 2.5mm와 5mm로 구성된 고선명도 MLC(high-definition MLC, Varian Medical System, Palo Alto, CA, HD MLC)를 적용하여 분해능이 높아지고 기존보다 세분화된 선량분포를 얻을 수 있다.⁽¹²⁾ 그러나 종축(cranio-caudal)의 길이가 중앙부 8cm, 양쪽 가장자리 14cm, 총 22cm으로 제한되어 뇌척수조사(cranio-spinal irradiation)나 대동맥 주위 림프절(para-aortic lymph node, PAN)을 포함한 전골반암(whole pelvis) 치료와 같이 비교적 긴 표적을 갖는 VMAT 치료에 어려움이 있다.

MLC가 한 번에 포함할 수 없는, 종축으로 긴 표적의 치료 계획 시 임상에서는 다중치료중심점(multi-isocenter) VMAT을 적용하고 있다.⁽¹³⁻¹⁷⁾ 이는 하나의 긴 표적에 종축 방향으로 2개 이상의 등중심점을 설정하고 각 등중심점의 필드 사이에 접합부(junction)를 두어 동시에 최적화(optimization)하는 방법이다. 접합부는 상하 등중심점 두 필드의 영향을 모두 받기 때문에⁽¹⁸⁻¹⁹⁾ superior field로부터 처방선량을 기준으로 dose gradient를 만들고, 부족한 부분을 inferior field에서 채워주어 접합부에 균등한 처방선량이 들어가도록 한다.⁽²⁰⁾

하지만 다중치료 중심점 VMAT을 사용하는 경우 방사선 치료 과정에서 종축 방향으로 등중심점 이동이 필요하기 때문에 환자 자세 에러에 대해 민감하게 영향을 받아 접합부에서 선량 과다(hot spot) 혹은 선량 부족(cold spot)이 발생할 수 있어 주의가 필요하다.⁽²¹⁾

Varian사의 Eclipse 치료계획 시스템은 Arc-geometry

tool을 사용하여 다중치료 중심점 VMAT을 설정할 수 있으며, 기본으로 설정된 콜리메이터 각도는 10°이고 다른 각도로 변경할 수 있다. 콜리메이터 각도의 변화는 표적과 정상조직에 입사하는 MLC 방향의 변화를 가져오고, 이는 서로 다른 등중심점을 갖는 상·하부 인접한 두 필드 사이의 접합부 볼륨 변화를 야기하며 치료 과정 중에 발생할 수 있는 환자 자세 에러에 의한 영향도 달라질 수 있다.⁽²²⁾

이에 본 논문에서는 한 필드에 포함이 어려운 긴 표적인 PAN을 포함한 전골반암을 대상으로 하는 다중치료 중심점 VMAT 계획 시 콜리메이터 각도의 변화가 치료 계획의 질, 접합부에서의 선량 재현성, 그리고 접합부의 환자 자세 오차에 미치는 영향에 대해 알아보려고 한다.

대상 및 방법

1. 환자 선택

PAN을 포함한 전골반암 VMAT을 시행한 환자 중 표적의 종축 길이(Y축 길이)가 평균 29cm(27~32.8cm)인 환자 10명을 선정하였다. 전산화 단층 촬영(Brilliance big bore 16-slice, Philips, Netherland)은 wing board를 이용하여 환자는 바로 누워 양팔을 위로 올린 자세로 하고, 골반과 다리는 knee, feet fix로 고정한 상태에서 조영제를 주입하여 3mm 두께로 스캔하였다. 획득한 환자의 CT 영상에 RTOG 가이드라인을 준수하여 임상표적용적(clinical target volume, CTV), 계획표적용적(planning target volume, PTV) 및 결정장기(organ at risk, OAR)의 윤곽을 그렸다.

2. 치료계획

치료계획 시스템은 Eclipse(version 13.7, Varian Medical system, Palo Alto, CA)를 사용하였고, HD MLC(Varian Medical System, Palo Alto, CA)가 장착된 True-beam STx(Varian Medical system, Palo Alto, CA)의 10MV 광자선을 이용하여 치료계획을 수립하였다. 콜리메이터 각도 변화에 따른 영향을 알아보기 위해 Eclipse의 Arc-geometry tool을 이용하여 기본 각도인 10° 외에 20°, 30°, 45°를 선택하였다. MLC의 엽 간 누설

선량이 중복되는 영역을 최소화하기 위해 콜리메이터 각도를 10°와 350°, 20°와 340°, 30°와 330°, 45°와 315°로 하여 1개의 등중심점 당 2 full arc 씩, 총 4 full arc로 하는 다중치료 중심점 VMAT 테크닉을 사용하였다. 선량 처방은 일일 선량을 180cGy, 220cGy로 하여 25회에 걸쳐 총 4500cGy(PTV-45), 5500cGy(PTV-55)를 동시차등조사(simultaneous integral boost, SIB)하였다. 콜리메이터 각도 외에 다른 조건은 동일하게 설정하여 동일한 선량 체적 제한(dose volume constraints)을 적용하고, 주변 정상 조직의 선량을 줄이는 동시에 PTV에 처방선량이 분포하도록 PO(photon optimization, version 13.7.6) 알고리즘을 사용하여 최적화하였으며, 선량 계산을 위한 알고리즘은 AAA(anisotropic analytical algorithm, version 13.7.6)를 적용하였다.

3. 치료계획 평가 지표

콜리메이터 각도를 변화시켜 최적화한 각 계획의 선량 용적 히스토그램(dose-volume histogram, DVH)에서 PTV-45, PTV-55 각각의 최대 선량, 평균 선량을 산출하여 PTV coverage를 확인하였고, 처방선량의 95%가 조사되는 PTV 체적과 PTV 체적의 비인 조사범위지표(coverage index, CVI, $V_{95\%}/V_{PTV}$)⁽²⁵⁾, PTV 5% 체적에 조사되는 선량과 95% 체적에 조사되는 선량의 비인 균질성 지표(homogeneity index, HI, $D_{5\%}/D_{95\%}$)를 비교하였다. 또한 OAR 평가를 위해서 방광의 평균선량, 30Gy가 조사되는 방광의 용적(V_{30}), 직장의 평균 선량 25Gy가 조사되는 직장의 용적(V_{25}), 콩팥의 평균 선량 20Gy가 조사되는 콩팥의 용적(V_{20})을 비교하였다.

4. 환자 자세 오차에 따른 접합부의 선량적 영향 비교

콜리메이터 각도별로 종축 방향의 환자 자세 오차가 접합부 선량에 미치는 영향을 평가하기 위해 전산화 단층 촬영 영한 고체 물 팬텀(solid water phantom)을 이용하여 다중치료 중심점 VMAT 치료계획을 수립하고, 2개의 등중심점 치료계획에서 하부 등중심점의 위치를 안쪽(in), 바깥쪽(out)으로 1~3mm 임의로 이동하여 선량계산을 하였다. 접합부의 선량을 비교하기 위해 접합부가 있는 부분에 PTV 중앙부를 기준으로 8cm의 볼륨을 생성하였고 최대

선량, 최소 선량을 산출하여 평가하였다.

5. 치료계획 검증

1) 전체 치료계획의 검증

환자 10명의 수립한 multi-isocenter VMAT 치료계획의 검증을 위해 전자영상유도장치(electronic portal imaging device)를 사용하여 PDQA(portal dosimetry quality assurance)를 실시하였고, Gamma pass rate는 3mm, 3%로 설정하고 통과 기준은 95% 이상으로 하였다.

2) 접합부의 선량 재현성 평가

각도별로 접합부의 선량 재현성 평가를 위해 파머형 전리함(farmer type ion chamber, TN 30013, PTW, Germany)을 삽입한 고체 물 팬텀(solid water phantom)을 2mm 두께로 전산화 단층 촬영하였고 verification plan을 수립하여 접합부의 선량을 평가하였다.

결 과

1. PTV coverage와 선량지표

각도별로 PTV-45의 최대 선량은 10° 5775.00±51.54 cGy, 20° 5785.68±48.07 cGy, 30° 5780.79±39.29 cGy, 45° 5774.04±45.38 cGy이고, 평균 선량은 10° 4660.81±57.03 cGy, 20° 4660.63±57.57 cGy, 30° 4659.02±55.22 cGy, 45° 4653.69±56.11 cGy이었다. PTV-55의 최대 선량은 10° 5783.16±52.26 cGy, 20° 5779.96±49.98cGy, 30° 5775.37±35.06cGy, 45° 5775.67±49.30cGy이고, 평균 선량은 10° 5572.79±23.65 cGy, 20° 5574.29±20.66 cGy, 30° 5555.80±58.86 cGy, 45° 5774.03±12.65cGy이었다(Table 1). PTV-45의 경우, CVI 평균값은 10° 0.971±0.010, 20° 0.978±0.007, 30° 0.979±0.006, 45° 0.985±0.004이고, HI 평균값은 10° 1.159±0.073, 20° 1.151±0.072, 30° 1.146±0.072, 45° 1.140±0.074이었다(Table 2, Fig. 1). PTV-55의 경우, CVI 평균값은 10° 0.996±0.004, 20° 0.997±0.003, 30° 0.998±0.003, 45° 0.998±0.003이고, HI 평균값은 10° 1.039±

Table 1. Maximum and mean dose of PTV-45, PTV-55 by each collimator angles (cGy)

collimator angle		10°	20°	30°	45°
		D _{max} , D _{mean}			
PTV45	D _{max}	5775.00±51.54	5785.68±48.07	5780.79±39.29	5774.04±45.38
	D _{mean}	4660.81±57.03	4660.63±57.57	4659.02±55.22	4653.49±56.11
PTV55	D _{max}	5783.16±52.26	5779.96±49.98	5775.37±35.06	5775.67±49.30
	D _{mean}	5572.79±23.65	5574.29±20.66	5555.80±58.86	5574.03±12.65

Values are mean ± standard deviation for PTV-45, PTV-55, D_{max}: maximum dose, D_{mean}: mean dose

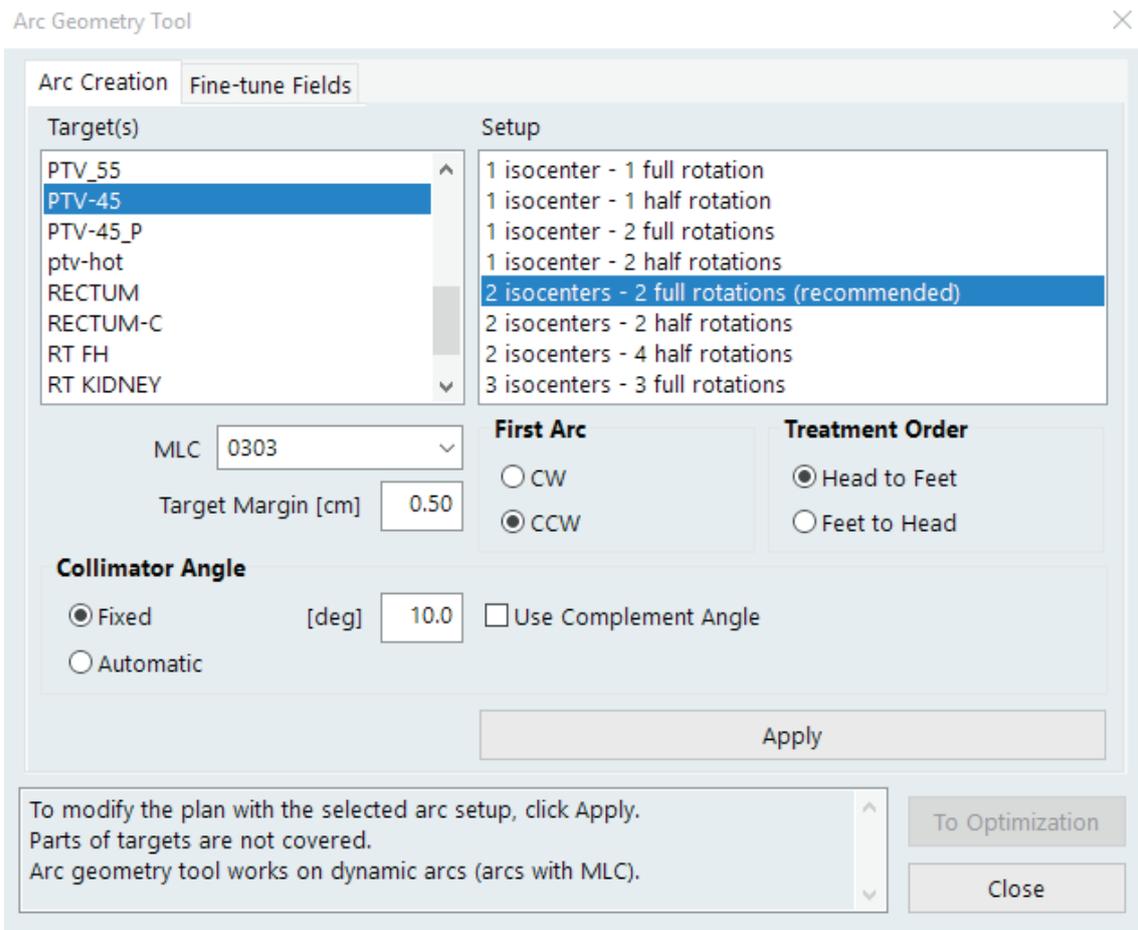


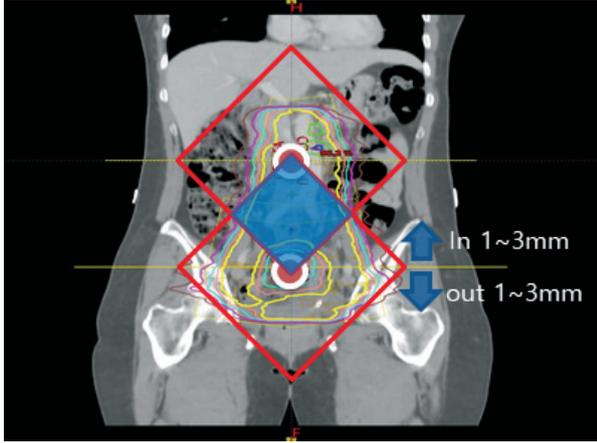
Fig. 1. Change collimator angle using Arc Geometry Tool in Eclipse

Table 2. CVI and HI of PTV-45, PTV-55 as each collimator angles

collimator angle		10°	20°	30°	45°
CVI, HI					
PTV45	CVI	0.971±0.010	0.978±0.007	0.979±0.006	0.985±0.004
	HI	1.159±0.073	1.151±0.072	1.146±0.072	1.140±0.074
PTV55	CVI	0.996±0.004	0.997±0.003	0.998±0.003	0.998±0.003
	HI	1.039±0.014	1.036±0.072	1.035±0.072	1.031±0.074

CVI: coverage index(volume of PTV receiving 95% of Prescription dose / volume of PTV), HI: homogeneity index(dose to 5% volume of PTV / dose to 95% volume of PTV) for PTV-45, PTV-55

0.014, 20° 1.036±0.072, 30° 1.035±0.072, 45° 1.032±0.074이었다(Table 2, Fig. 2).



(a)



(b)

Fig. 2. (a) Move the position of the lower isocenter in and out 1~3mm and (b) Set up the virtual volume(in 8cm vertical length from the junction center) to evaluate the junction dose changes occurred by set-up error

2. OAR 평가 지표

콜리메이터 각도 변화에 따른 방광의 평균 선량은 10° 3373.30±900.32 cGy, 20° 3347.19±892.98 cGy, 30° 3341.90±890.91 cGy, 45° 3309.93±892.19 cGy이었으며, 방광의 V₃₀은 10° 200.76±176.29 cc, 20° 199.78±176.15 cc, 30° 200.35±177.02 cc, 45° 196.42±172.50 cc로 나타났다. 직장의 평균 선량은 10° 3572.84±934.93 cGy, 20° 3575.59±929.15 cGy, 30° 3577.92±913.15 cGy, 45° 3571.95±918.70 cGy이었고, 직장의 V₂₅는 10° 62.97±24.98 cc, 20° 63.04±24.62 cc, 30° 63.31±24.73 cc, 45° 62.84±24.17 cc이었다. 신장의 평균 선량은 10° 1088.65±126.34 cGy, 20° 1090.36±125.78 cGy, 30° 1090.08±124.20 cGy, 45° 1074.60±128.00 cGy이고, 신장 V₂₀은 10° 16.98±11.85 cc, 20° 18.07±13.40 cc, 30° 17.91±13.55 cc, 45° 16.35±12.33 cc이었다(Table 3).

3. 환자 자세 오차에 따른 접합부의 선량적 영향 비교

origin plan의 경우, 최대 선량은 10° 4794.50 cGy, 20° 4795.80 cGy, 30° 4781.30 cGy, 45° 4788.20 cGy이었고, 최소 선량은 10° 4104.00 cGy, 20° 4090.20 cGy, 30° 4115.60 cGy, 45° 4052.30 cGy으로 나타났다. in 방향으로 1mm 이동한 plan의 경우, 최대 선량은 10° 5056.60 cGy, 20° 4943.40 cGy, 30° 4869.40 cGy, 45° 4891.10 cGy이었고, in 방향으로 2mm 이동한 plan은 10° 5237.50 cGy, 20° 5093.30 cGy, 30° 5002.20 cGy, 45° 4998.80 cGy이었으며, in 방향으로 3mm 이동한 plan은 10° 5492.80 cGy, 20° 5269.40 cGy, 30° 5165.40 cGy, 45° 5125.90 cGy이었다. 또한, out 방향으로 1mm 이동한 plan의 최소 선량은

Table 3. OAR results of Bladder, Rectum, Kidney (cGy, cc)

OAR	collimator angle	10°	20°	30°	45°
	D _{mean} (cGy)				
Bladder	D _{mean} (cGy)	3373.30±900.32	3347.19±892.98	3341.90±890.91	3309.93±892.19
	V ₃₀ (cc)	200.76±176.29	199.78±176.15	200.35±177.02	196.42±172.50
Rectum	D _{mean} (cGy)	3572.84±934.93	3575.59±929.15	3577.92±913.15	3571.95±918.70
	V ₂₅ (cc)	62.97±24.98	63.04±24.62	63.31±24.73	62.84±24.17
Kidney	D _{mean} (cGy)	1088.65±126.34	1090.36±125.78	1090.08±124.20	1074.60±128.00
	V ₂₀ (cc)	18.09±13.96	18.07±13.40	17.91±13.55	16.35±12.33

Values are mean ± standard deviation, D_{mean}: mean dose, V₃₀: volume of bladder receiving 30Gy, V₂₅: volume of rectum receiving 25Gy, V₂₀: volume of kidney receiving 20Gy

Table 4. Maximum and minimum dose of original plan and shifted plan as each collimator angles (cGy)

		dose(cGy)	10°	20°	30°	45°
origin plan		D _{max}	4794,50	4795,80	4781,30	4788,20
in	1 mm	D _{max}	5056,60	4943,40	4869,40	4891,10
	2mm		5237,50	5093,30	5002,20	4998,80
	3mm		5492,80	5269,40	5165,40	5125,90
origin plan		D _{min}	4104,00	4090,20	4115,60	4052,30
out	1 mm	D _{min}	3979,50	3975,90	4012,90	4003,60
	2mm		3825,50	3877,20	3914,50	3953,80
	3mm		3562,90	3644,00	3769,10	3868,90

D_{max}: maximum dose, D_{mean}: mean dose

Table 5. Average values of Gamma pass rate of multi-isocenter VMAT plan as each collimator angles for 10 patients

	Multi-isocenter VMAT plan
10°	99,63%
20°	99,69%
30°	99,61%
45°	99,60%

All plans indicated over 99% of gamma pass rate (3mm, 3%) in portal dosimetry quality assurance.

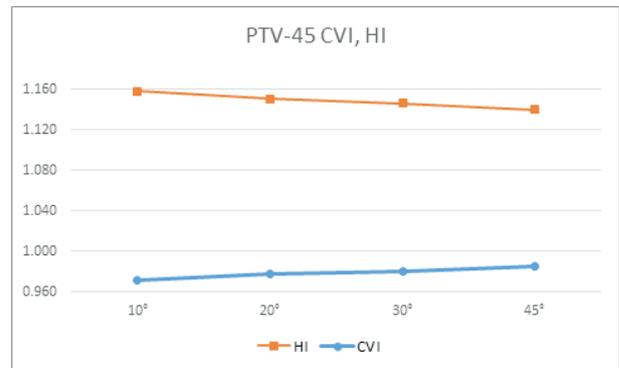


Fig. 4. Coverage index (CVI) and Homogeneity index (HI) of PTV-45

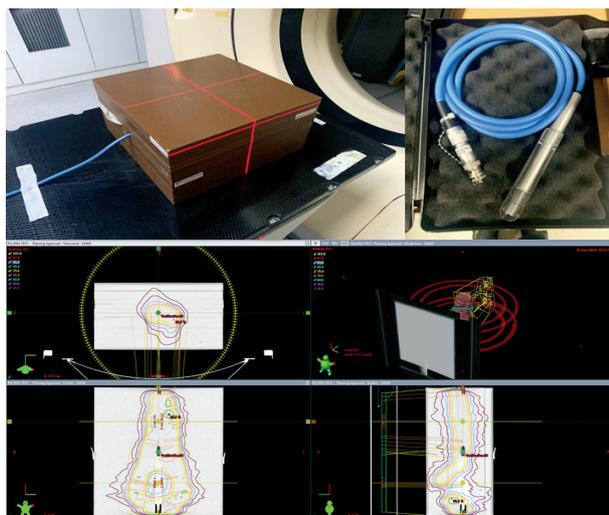


Fig. 3. Absolute dose measurement using a Falmer type ionization chamber to evaluate dose reproducibility at the junction

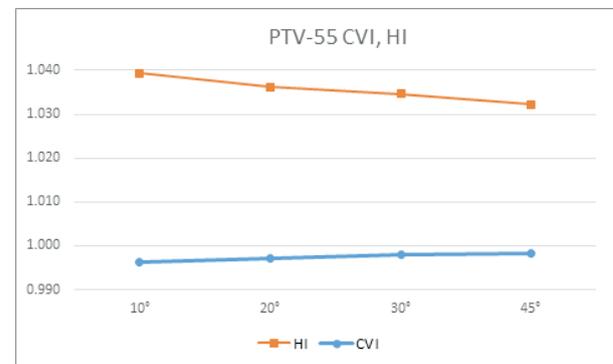


Fig. 5. Coverage index (CVI) and Homogeneity index (HI) of PTV-55

10° 3979.50cGy, 20° 3975.90cGy, 30° 4012.90cGy, 45° 4003.60cGy이었고, out 방향으로 2mm 이동한 plan은 10° 3825.50cGy, 20° 3877.20cGy, 30° 3914.50cGy, 45° 3953.80cGy이었으며, out 방향으로 3mm 이동한 plan은 10° 3562.90cGy, 20° 3644.00cGy, 30° 3769.10cGy, 45° 3868.90cGy이었다(Table 4).

4. 치료계획 검증

1) 전체 치료계획의 검증

환자 10명을 대상으로 하는 치료계획의 PDQA를 진행한 결과 10°, 20°, 30°, 45°에서 gamma pass rate(3mm, 3%)은 각각 평균 99.63%, 99.69%, 99.61%, 99.60%이었다(Table 5).

2) 접합부의 선량 측정값 비교

측정 결과, 치료계획상 접합부의 point dose는 10° 180.80 cGy, 20° 185.20 cGy, 30° 184.00 cGy, 45° 180.50 cGy이었고 실제 측정된 point dose는 10° 180.88 cGy, 20° 185.73 cGy, 30° 184.19 cGy, 45° 180.66cGy이었다.

결론 및 고찰

본 연구에서는 PAN을 포함한 전골반암 다중치료 중심점 VMAT 계획 시 콜리메이터 각도의 변화가 치료 계획의 질, 접합부에서의 선량 재현성, 그리고 접합부의 환자 자세 오차에 미치는 영향에 대해 확인해보았다.

PAN을 포함한 전골반암 10명의 다중치료 중심점 VMAT 치료 계획에서 PTV의 최대 선량과 평균 선량은 콜리메이터 각도별로 큰 차이를 보이지 않았다. CVI와 HI의 평균값은 각도가 증가할수록 개선된 값을 얻을 수 있었으며, 모두 45°에서 1에 가장 가까운 값을 나타냈다. 결정 장치의 선량 평가에서는 신장의 V_{20} 이 10도를 기준으로 45도에서 9.66%, 방광의 평균선량, V_{30} 이 1.88%, 2.16% 감소하였으며 신장의 평균선량, 직장의 평균 선량, V_{25} 는 각도별로 비슷한 값을 보였다. 기존의 단일 등중심점 VMAT을

이용한 Isa M 등과 Li M 등의 연구에서는 콜리메이터 45°가 PTV의 CI(Conformity index), HI 값을 개선하는데 이점이 있으며, OAR 선량을 낮출 수 있다고 하였다.^(9,11) 이번 다중치료 중심점 VMAT을 이용한 연구 결과도 기존의 연구들과 같은 경향을 보였으며, 이는 콜리메이터 각도가 회전하는 정도가 클수록 한 개의 CT slice modulation에 관여하는 MLC leaf 수가 많아지면서 PTV coverage 향상과 함께 결정 장치에 들어가는 선량을 최소화시키기 때문이라고 생각한다.^(11,24)

수립한 PAN을 포함한 전골반암 다중치료 중심점 VMAT 전체 치료계획의 PDQA 결과는 Gamma pass rate을 3mm, 3%로 설정하여 10명의 치료계획에서 평균 99.6% 이상으로 통과 기준을 만족하였다. 접합부의 선량 재현성을 평가하기 위해 치료계획과 실측정한 접합부의 선량값을 비교한 결과, 모든 콜리메이터 각도에서 0.3% 내의 차이를 보여 각도 변화에 따른 접합부에서의 선량 재현성에는 차이가 없는 것으로 확인되었다.

다중치료 중심점 VMAT 기법을 다룬 기존 연구들은 특히 치료 시 발생할 수 있는 종축 방향의 환자 자세 오차에 대한 주의를 언급하였다.^(20,23) 본 연구에서는 접합부에서 환자 자세 오차에 따른 선량변화를 평가하기 위해 종축 방향으로 1~3mm의 환자 자세 오차를 임의로 발생시켜 이동 전의 치료계획(origin plan)과 비교해보았다. 접합부에서의 선량 변화량은 이동수치가 커질수록 증가하여 3mm에서 가장 큰 차이를 보였고, 접합부에서의 종축방향의 환자 자세 오차에 대해 주의를 기울여야 한다는 기존의 연구들과 동일한 결과를 얻었다. 이러한 결과를 바탕으로 다중치료 중심점 VMAT 치료시 환자 자세 오차에 대한 영향을 줄이기 위해서는 자세 재현성이 안정적인 환자에 대해 제한을 두거나, 인접한 두 등중심점 간 couch 이동시 정해진 수치로 이동하는 등의 주의가 필요할 것이라 생각된다.

콜리메이터 각도별로 환자 자세 오차에 의한 접합부에서 선량 변화는 in 방향으로 3mm 이동시 최대 선량이 10°, 20°, 30°, 45°에서 14.56%, 9.88%, 8.03%, 7.05%로 증가하였으며, out 3mm 이동시 최소 선량은 10°, 20°, 30°, 45°에서 13.18%, 10.91%, 8.42%, 4.53%로 감소하여 콜리메이터 각도가 커질수록 환자 자세 오차에 따른 접합부에서의 선량 변화량이 적은 것을 확인할 수 있었다. 이와 관련

하여 Strojnik 등은 위, 아래 인접한 두 필드 간 공유하는 접합부의 면적이 넓을수록 환자 자세 오차로 인한 선량적인 영향이 더 적다고 보고한 바 있고,⁽²⁰⁾ 본 연구의 결과도 마찬가지로 콜리메이터 각도가 커질수록 두 필드 간 공유하는 접합부의 면적이 넓어지게 되어 환자 자세 오차에 대한 영향을 적게 받는 것이라 사료된다.

이번 환자 자세 오차에 의한 접합부 선량 변화량의 결과 값에 대해 부족한 부분은 고체 물 팬텀에 새로운 플랜을 만들어 오차를 재현했다는 것이다. 실제로는 이번 연구에 적용한 10명의 환자 치료계획 데이터를 사용하여 환자 자세 오차에 대한 결과를 얻어야 했으나, 처방선량을 45Gy, 55Gy로 하여 동시차등조사 하였기에 접합부에서의 최대 선량과 최소 선량을 명확히 구분하여 정량화 하는데 어려움이 있었다. 추후 단일 처방선량을 갖는 환자를 선택하여 이 부족한 부분에 대해서 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각한다. 또한, 치료계획 시스템 상에서만 오차를 재현하였고 실제 검증은 이뤄지지 않았다는 점이다. 점 선량(point dose) 측정 결과로 접합부에서 선량 재현성에는 문제가 없는 것으로 판단 할 수 있으나, 보다 정확한 확인을 위해서는 추후 공간분해능(spatial resolution)이 높은 필름 선량측정(film dosimetry)을 통해 각도 변화에 따른 접합부에서의 환자 자세 오차로 인한 선량 변화량에 대해 직접적인 검증이 필요할 것으로 사료된다.

본 연구는 PAN을 포함한 전골반암 다중치료 중심점 VMAT 치료 계획시 콜리메이터 각도의 변화를 주고 비교해본 결과, PTV의 CVI, HI는 콜리메이터 각도가 증가할수록 전반적으로 개선된 수치를 보이는 것을 확인하였다. 접합부의 환자 자세 오차 영향은 각도가 커질수록 그 차이가 줄어드는 경향을 보여 환자 자세 에러에 대한 불안함을 어느 정도 개선하는데 도움이 될 것이라 생각한다. 결론적으로 콜리메이터 각도는 다중치료 중심점 VMAT 치료 계획의 질 및 접합부 선량에 영향을 줄 수 있는 인자임을 인지하고 치료계획 시 콜리메이터 각도 설정에 신중을 기해야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Otto, Karl. "Volumetric modulated arc therapy: IMRT in a single gantry arc." *Medical physics* 35.1 (2008): 310-317.
2. Zhang, Wu-Zhe, et al. "A Dosimetric study of using fixed-jaw volumetric modulated arc therapy for the treatment of nasopharyngeal carcinoma with cervical lymph node metastasis." *PloS one* 11.5 (2016).
3. Otto K, Clark BG. Enhancement of IMRT delivery through MLC rotation. *Phys Med Biol.* 2002; 47: 3997.
4. Tas, B., Bilge, H., & Ozturk, S. T. (2016, March). An investigation of the dose distribution effect related with collimator angle for VMAT method. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1722, No. 1, p. 150003). AIP Publishing LLC.
5. Kim, J. I., Ahn, B. S., Choi, C. H., Park, J. M., & Park, S. Y. (2018). Optimal collimator rotation based on the outline of multiple brain targets in VMAT. *Radiation Oncology*, 13(1), 88.
6. Kim, Yong Ho, et al. "Effect of collimator angles on the dosimetric results of volumetric modulated arc therapy planning for patients with a locally-advanced nasopharyngeal carcinoma." *Journal of the Korean Physical Society* 70.5 (2017): 539-544.
7. Son, Sang Jun, et al. "Evaluating efficiency of Co-axial MLC VMAT plan for spine SBRT." *The Journal of Korean Society for Radiation Therapy* 26.2 (2014): 313-320.
8. Tas, B., Bilge, H., & Ozturk, S. T. (2016). An investigation of the dose distribution effect related with collimator angle in volumetric arc therapy of prostate cancer. *Journal of Medical Physics/Association of Medical Physicists of India*, 41(2), 100.

9. Li, M. H., Huang, S. F., Chang, C. C., Lin, J. C., & Tsai, J. T. (2018). Variations in dosimetric distribution and plan complexity with collimator angles in hypofractionated volumetric arc radiotherapy for treating prostate cancer. *Journal of applied clinical medical physics*, 19(2), 93–102.
10. DIMITRI, F. Y., et al. Organ at risk dose verification in nasopharyngeal cancer VMAT planning with collimator comparison between single arc and double arc. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2018. p. 012024.
11. Isa M, Ur Rehman J, Afzal M, Chow J. Dosimetric dependence on the collimator angle in prostate volumetric modulated arc therapy. *Int J Cancer Ther Oncol*. 2014; 2: 020419.
12. Śłosarek, K., Brąclik, I., Leszczyński, W., Kopczyńska, J., Osewski, W., & Wendykier, J. (2019). IMRT/VMAT dose distributions generated for HD® and Millennium® collimators TrueBeam® and Clinac® accelerators. *Reports of Practical Oncology & Radiotherapy*, 24(1), 20–27.
13. Lee, Y. K., Brooks, C. J., Bedford, J. L., Warrington, A. P., & Saran, F. H. (2012) Development and evaluation of multiple isocentric volumetric modulated arc therapy technique for craniospinal axis radiotherapy planning. *International Journal of Radiation Oncology* Biology* Physics*, 82(2), 1006–1012.
14. Murtaza, G., Mehmood, S., Rasul, S., Murtaza, I., & Khan, E. U. (2018). Dosimetric effect of limited aperture multileaf collimator on VMAT plan quality: A study of prostate and head-and-neck cancers. *Reports of Practical Oncology & Radiotherapy*, 23(3), 189–198.
15. Kim, J. I., Ahn, B. S., Choi, C. H., Park, J. M., & Park, S. Y. (2018). Optimal collimator rotation based on the outline of multiple brain targets in VMAT. *Radiation Oncology*, 13(1), 88.
16. Zeng, G. G., et al. “A two isocenter IMRT technique with a controlled junction dose for long volume targets.” *Physics in Medicine & Biology* 52.15 (2007): 4541.
17. Meyer, J., Richter, A., Pfreundner, L., Guckenberger, M., Krieger, T., Schwab, F., & Flentje, M. (2009). An interlaced IMRT technique for elongated tumor volumes. *Medical Dosimetry*, 34(2), 170–178.
18. Lin, H., Ding, X., Kirk, M., Liu, H., Zhai, H., Hill-Kayser, C. E., ... & McDonough, J. (2014). Supine craniospinal irradiation using a proton pencil beam scanning technique without match line changes for field junctions. *International Journal of Radiation Oncology* Biology* Physics*, 90(1), 71–78.
19. Wang, K., Meng, H., Chen, J., Zhang, W., & Feng, Y. (2018). Plan quality and robustness in field junction region for craniospinal irradiation with VMAT. *Physica Medica*, 48, 21–26.
20. Strojnik, Andrej, Ignasi Méndez, and Primož Peterlin. “Reducing the dosimetric impact of positional errors in field junctions for craniospinal irradiation using VMAT.” *Reports of Practical Oncology & Radiotherapy* 21.3 (2016): 232–239.
21. Lee, Seungchul, and Youngjae Kim. “The Effect of Dose Distribution under Treatment Techniques on Cerebrospinal Irradiation.” *Journal of the Korean Society of Radiology* 10.1 (2016): 21–28.
22. McVicar, Nevin. “Improved Volumetric Modulated Arc Therapy Field Junctions Using In Silico Base Plans: Application to Craniospinal Irradiation.” *Journal of Medical Imaging and Radiation Sciences* 49.3 (2018): 301–308.
23. Myers, Pamela, et al. “Evaluation of localization errors for craniospinal axis irradiation delivery using volume modulated arc therapy and proposal of a technique to minimize such errors.” *Radiotherapy*

and Oncology 108.1 (2013): 107–113.

24. Otto K. Letter to the Editor on ‘Single–Arc IMRT?’
phys Med Biol2009;54:L37–41.

25. MOON, Sun Young, et al. Comparison of Dosimetric Parameters of Patient with Large and Pendulous Breast Receiving Breast Radiotherapy in the Prone versus Supine Position, Prog Med Phys DE, 2015, 26: 234–240.

A study on the effect of collimator angle on PAN-Pelvis volumetric modulated arc therapy (VMAT) including junction

Department of Radiation Oncology, Seoul national university bundang hospital, Gyeonggi-do, Korea

Kim Hyeon Yeong, Chang Nam Jun, Jung Hae Youn, Jeong Yun Ju, Won Hui Su, Seok Jin Yong

Purpose: To investigate the effect of collimator angle on plan quality of PAN-Pelvis Multi-isocenter VMAT plan, dose reproducibility at the junction and impact on set-up error at the junction.

Material and method: 10 adult patients with whole pelvis cancer including PAN were selected for the study. Using Trubeam STx equipped with HD MLC, we changed the collimator angle to 20°, 30°, and 45° except 10° which was the default collimator angle in the Eclipse(version 13.7) and all other treatment conditions were set to be the same for each patient and four plans were established also. To evaluate these plans, PTV coverage, coverage index(CVI) and homogeneity index (HI) were compared and clinical indicators for each treatment sites in normal tissues were analyzed. To evaluate dose reproducibility at the junction, the absolute dose was measured using a Falmer type ionization chamber and dose changes at the junction were evaluated by moving the position of the isocenter in and out 1~3mm and setting up the virtual volume at the junction.

Result: CVI mean value was PTV-45 0.985 ± 0.004 , PTV-55 0.998 ± 0.003 at 45° and HI mean value was PTV-45 1.140 ± 0.074 , and PTV-55 1.031 ± 0.074 at 45° which were closest to 1. V_{20Gy} of the kidneys decreased by 9.66% and average dose of bladder and V_{30} decreased by 1.88% and 2.16% at 45° compared to 10° for the critical organs. The dose value at the junction of the plan and the actual measured were within 0.3% and within tolerance. At the junction, due to set-up error the maximum dose increased to 14.56%, 9.88%, 8.03%, and 7.05%, at 10°, 20°, 30°, 45°, and the minimum dose decreased to 13.18%, 10.91%, 8.42%, and 4.53%, at 10°, 20°, 30°, 45°

Conclusion: In terms of CVI, HI of PTV and critical organ protection, overall improved values were shown as the collimator angle increased. The impact on set-up error at the junction by collimator angle decreased as the angle increased and it will help improve the anxiety about the set up error. In conclusion, the collimator angle should be recognized as a factor that can affect the quality of the multi-isocenter VMAT plan and the dose at the junction, and be careful in setting the collimator angle in the treatment plan.

► **Key words:** collimator angle, plan quality, junction, multi-isocenter VMAT