

<원저>

VMAT 기법을 활용한 HA-WBRT에서 빔 배열 변화에 따른 선량학적 인자 비교: 팬텀 연구

박성국¹⁾·김동현²⁾

¹⁾부산대학교병원 방사선종양학과 · ²⁾부산가톨릭대학교 보건과학대학 방사선학과

Comparison of Dosimetric Parameters Based on Beam Arrangement Changes in HA-WBRT by Using VMAT Technique: A Phantom Study

Sung-Kuk Park¹⁾·Dong-Hyun Kim²⁾

¹⁾Department of Radiation Oncology, Pusan National University Hospital

²⁾Department of Radiological Science, College of Health Sciences, Catholic University of Pusan

Abstract This study aimed to evaluate the impact of changes in beam arrangement and arc counts on dosimetric factors in volumetric modulated arc therapy (VMAT) inverse radiation therapy planning for hippocampal-avoidance whole brain radiation therapy (HA-WBRT) by using the Elekta Monaco radiation therapy planning system (RTPs). For coplanar VMAT, both the arc per beam (APB) method and the beam determined arc(BDA) method, which is determined by the number of beams, were applied. For non-coplanar VMAT, the BDA method was utilized, and a total of 9 treatment plans were established by varying the arc counts. All radiation therapy plans met the radiation oncology group (RTOG) 0933 protocol standards, and 14 dosimetric factors were compared and analyzed. The results showed that the BDA-NC VMAT method demonstrated superior performance in terms of planning target volume (PTV) coverage and protection of normal organs, while APB-VMAT was advantageous in terms of hippocampal protection, monitor unit and delivery time. This study is expected to contribute to the efficient establishment of HA-WBRT plans considering the changes in beam arrangement and rotation arc numbers in Monaco RTPs.

Key Words: HA-WBRT, VMAT, Hippocampus, Beam arrangement, Brain metastasis

중심 단어: 해마회피전뇌방사선치료, 체적조절호형방사선치료, 해마, 빔 배열, 다발성 뇌전이

I. 서론

전뇌 방사선치료(Whole brain radiation therapy, WBRT)는 다발성 뇌 전이로 인한 신경학적 증상 완화, 전이 종양의 통제 및 소세포암 환자의 뇌전이 예방 등을 위해 시행하는 전통적 2차원 방사선치료기술(2-Dimensional bilateral WBRT, 2D-WBRT)이다[1-4]. 최근 크기가 작고 10개 미만의 뇌전이 종양에 대해 정위적 방사선수술(Stereotactic radiosurgery, SRS) 또는 감마나이프 방사선수술(Gamma-knife radiosurgery,

GKRS)을 시행하는 추세이지만, 다발성 뇌전이 환자의 경우 완전한 절제(Surgical resection) 또는 전신 치료(Systemic therapy) 효과가 제한적이므로 여전히 WBRT 역할이 중요하다[5,6]. 방사선치료를 받은 환자 중 일부가 수개월에서 수년 사이에 신경학적 후유증(Neurologically sequelae)을 경험한다[7,8]. 특히 기억과 학습에 관련된 부작용은 방사선에 의한 해마(Hippocampus)의 미세환경변화, 신경전구세포(Neuronal progenitor cell)와 신경아교세포(Neuroglia)의 미성숙 또는 조속 분화 등이 원인으로 보고되고 있다[9,10]. 최근 이

Corresponding author: Dong-Hyun Kim, Department of Radiological Science, Catholic University of Pusan, 57, Oryundae-ro, Geumjeong-gu, Pusan-si, 46252, Republic of Korea / Tel: +82-51-240-7377 / E-mail: Lspine3@naver.com

Received 10 June 2024; Revised 24 June 2024; Accepted 4 July 2024

Copyright ©2024 by The Korean Journal of Radiological Science and Technology

리한 부작용 최소화를 위한 방법으로 해마회피전뇌방사선치료(Hippocampal-avoidance WBRT, HA-WBRT)가 시행되고 있으며, 이에 대한 임상시험을 radiation oncology group(RTOG) 0933 trial과 NRG-CC001 trial을 통해 진행하였으며, 세기 조절 방사선치료(Intensity modulated radiation therapy, IMRT)와 메만틴(Memantine) 병용요법으로 해마의 방사선에 의한 기억과 학습 능력 보호에 효과가 있다고 보고하였다[11,12].

HA-WBRT는 표적(전뇌)에 처방 선량을 충분히 전달하는 동시에 해마를 보호를 위한 급격한 선량 감소(Dose fall off) 차이가 요구되며, 이러한 선량 기울기(Dose gradient)를 구현하기 위하여 효율적인 빔 배열(Beam arrangement)과 필드(Field) 조절에 관한 연구가 활발하다[13-15]. Yuen AHL 등은 Varian사의 Eclipse 방사선치료계획 시스템(Radiation treatment planning system, RTPs)을 사용하여 HA-WBRT 치료계획 시 물리적 한계를 해결하기 위하여 부분 필드(Partial-field) 활용에 관한 연구를 수행한 바 있다[16]. Kalet 등은 Monaco RTPs를 활용하여 전립선, 방광, 직장 등의 골반부 방사선치료 시 표적의 형태에 따른 빔 배열에 관한 비교 연구를 수행한 바 있다[17]. 그러나 크고 복잡한 표적 치료 시 한계선량이 낮은 정상장기를 포함하고 있는 상황에서 빔 배열과 회전 원호 수 변화에 따른 modulation에 관한 연구가 부족한 실정이다.

본 연구에서는 Elekta사의 Monaco RTPs를 활용한 방사선 치료계획 시 동일면(Coplanar) VMAT에서 빔 스프레드시트(Spread sheet) 내 단일 빔에서 회전 원호 수를 결정하는 APB(Arc per beam) 방식과 빔의 개수로 회전 원호 수를 결정하는 BDA(Beams determined arcs) 방식 및 비동일면(Non-coplanar) VMAT의 BDA 방식에 대한 선량학적 인자(Dosimetric factor)를 비교 분석하고자 한다.

II. 대상 및 방법

1. 대상 및 윤곽화

인체 모의피폭체(Alderson RANDO phantom, radiation support devices, USA)를 대상으로 바로 누운 자세(Supine position)에서 전산화 단층촬영기(Brilliance CT big bore oncology, PHILLIPS, Netherland)를 이용하여 3 mm 두께의 영상을 획득하였다. 윤곽화(Delineation)를 위해 획득된 전산화 단층촬영 영상을 MIM maestro(Version 6.7.14, Cleveland, USA)로 전송하였다. 방사선치료계획을 위한 윤곽화는 RTOG 0933 protocol 기준을 적용하였다. 표적은 전뇌를 임상적표적

용적(Clinical target volume, CTV)으로 설정하였으며, 치료 계획용적(Planning target volume, PTV)은 CTV로부터 해마에서 균일한 방향으로 5 mm를 확장한 계획위험용적(Planning risk volume, PRV)을 제외하여 설정하였다[13]. 선량학적 평가를 위한 정상 장기로 해마, 시신경(Optic nerves), 시신경 교차(Optic chiasm)를 설정하였다.

2. 처방선량과 방사선치료계획

방사선치료계획은 Monaco RTPs(Elekta AB, Version 5.11.03, Stockholm, Sweden)을 이용하였다. 방사선치료계획 계산 알고리즘은 monte carlo photon photon algorithm을 사용하였다. 계산 인자는 grid spacing 0.3 cm, statistical uncertainty 1.0%, control points per arc 150, min, segment width 0.5 cm, increment 20.0, energy 6 MV(Megavolt) 등을 공통으로 적용하였다. 모든 VMAT 기법의 역방향치료계획(Inverse radiation therapy planning)은 빔 배열과 원호 수 변화에 따른 변화를 비교하기 위해 동일한 선량제약치(Constraints)를 적용하여 최적화(Optimization)을 수행하였다. 처방선량과 정상장기에 대한 기준은 RTOG 0933 protocol에 따라 설정하였으며 Table 1과 같다.

3. 빔 배열(Beam arrangement)

총 9개의 방사선치료계획을 진행하였으며 Table 2와 같다.

1) 동일면 체적조절호형방사선치료(Coplanar VMAT)

(1) 단일 빔 다중원호 체적조절호형방사선치료(Arc per beam VMAT, APB-VMAT)

APB-VMAT은 빔 스프레드시트 내 빔을 1개로 고정된 상태에서 최대 회전 원호 수 조건을 2, 3, 4(2APB, 3APB, 4APB-VMAT)로 변화하여 회전 원호 수를 변화하였다. 모든 동일면 방사선 치료계획은 한번 회전 시 반시계방향(Counter clock wise, CCW) 또는 시계방향(Clock wise, CW) 방향에서 시작하여 358°로 회전하였으며, collimator 및 couch angle은 0° 설정하였다.

(2) 다중 빔 단일원호 체적조절호형방사선치료

(Beams determined arcs VMAT, BDA-VMAT)

BDA-VMAT은 빔의 개수로 회전 원호 수를 변화시키는 방식으로 빔 개수를 2, 3, 4(2BDA, 3BDA, 4BDA-VMAT)로 변화하여 최대 원호 수를 변화하였다. 나머지 조건은 APB-VMAT과 동일하게 설정하였다.

Table 1. Dose criteria of RTOG 0933 protocol, dose prescription of 30 Gy in 10 fractions.

Parameter	Per protocol	Variation acceptable	Unacceptable deviation
PTV	$D_2 \leq 37.5 \text{ Gy}$	$D_2 > 37.5 \text{ Gy}, \leq 40 \text{ Gy}$	$D_2 > 40 \text{ Gy}$
	$D_{98} \geq 25 \text{ Gy}$	$V_{30} > 90\%$	$V_{30} \leq 90\%$
	$V_{30} \geq 95\%$		
Hippocampus	$D_{100} \leq 9 \text{ Gy}$	$D_{100} \leq 10 \text{ Gy}$	$D_{100} > 10 \text{ Gy}$
	$D_{\max} \leq 16 \text{ Gy}$	$D_{\max} \leq 17 \text{ Gy}$	$D_{\max} > 17 \text{ Gy}$
Optic chiasm and optic nerves	$D_{\max} \leq 37.5 \text{ Gy}$	$D_{\max} \leq 37.5 \text{ Gy}$	$D_{\max} > 37.5 \text{ Gy}$

PTV: planning target volume, D_2 : dose to 2% of the PTV, D_{98} : dose to 98% of the PTV, D_{100} : dose to 100% of the PTV, D_{\max} : maximum dose, D_{mean} : mean dose, V_{30} : percentage volume of the PTV receiving dose of at least 30 Gy.

Table 2. Gantry angles, collimator angles, couch angles and total number of arcs or beam arrangements considered.

Beam arrangements	Gantry angles (°)	Collimator angles (°)	Couch angles (°)	Total number of arcs	
Coplanar VMAT	2APB	a1: 181-179(CCW, CW)	0	0	2
	3APB	a1: 181-179(CCW, CW, CCW)	0	0	3
	4APB	a1: 181-179(CCW, CW, CCW, CW)	0	0	4
	2BDA	a1: 181-179(CCW)	0	0	2
		a2: 179-181(CW)	0	0	
	3BDA	a1: 181-179(CCW)	0	0	3
		a2: 179-181(CW)	0	0	
		a3: 181-179(CCW)	0	0	
		a4: 179-181(CW)	0	0	
	4BDA	a1: 181-179(CCW)	0	0	4
a2: 179-181(CW)		0	0		
a3: 181-179(CCW)		0	0		
a4: 179-181(CW)		0	0		
Non-coplanar VMAT	2BDA	a1: 181-179(CCW)	0	0	2 full and 2 half arcs
		a2: 179-181(CW)	0	0	
		a3: 181-0(CW)	290	70	
		a4: 0-181(CCW)	70	290	
	3BDA	a1: 181-179(CCW)	0	0	3 full and 2 half arcs
		a2: 179-181(CW)	0	0	
		a3: 181-179(CCW)	0	0	
		a4: 181-0(CW)	290	70	
	4BDA	a5: 0-181(CCW)	70	290	4 full and 2 half arcs
		a1: 181-179(CCW)	0	0	
a2: 179-181(CW)		0	0		
a3: 181-179(CCW)		0	0		
a4: 179-181(CW)		0	0		
a5: 181-0(CW)		290	70		
a6: 0-181(CCW)	70	290			

2) 비동일면 체적조절호형방사선치료(Non-coplanar VMAT)

arcs non-coplanar VMAT, BDA-NC VMAT)

(1) 다중 빔 비동일면 체적조절호형방사선치료(Beams determined

BDA-NC VMAT은 선행된 동일면 BDA-VMAT 치료계획

에 대하여 181°-0°(CW), collimator angle 290°, couch angle 70° 및 0°-181°(CCW), collimator angle 70°, couch angle 290° 2개의 half arcs를 추가하여 방사선치료계획을 수립하였다.

4. 방사선치료계획 평가

빔 배열에 따른 방사선치료계획별 선량분포는 Fig. 1과 같다. RTOG 0933 protocol에서 제시하는 기준에 따라 표적의 V_{30} , D_2 , D_{98} 을 평가하였으며, 정상장기에 대하여 해마의 D_{100} , D_{max} , 시신경과 시신경 교차는 D_{max} , D_{mean} 기준으로 치료 적합성을 판단하였다. 치료계획의 품질 비교분석을 위해 Eq. (1)와 Eq. (2)를 바탕으로 conformity index(CI)와 homogeneity index(HoI)를 산출하였다.

$$CI = \frac{V_{95\%}}{V_{PTV}} \quad (1)$$

$V_{95\%}$: 처방선량의 95%가 조사되는 표적 체적

V_{PTV} : 표적 체적

$$HoI = \frac{D_{2\%} - D_{98\%}}{D_{50\%}} \quad (2)$$

$D_{2\%}$: 표적에 대한 체적의 2% 선량

$D_{98\%}$: 표적에 대한 체적의 98% 선량

$D_{50\%}$: 표적에 대한 체적의 50% 선량

heterogeneity index(HoI), 기계적 선량 단위(Monitor Unit, MU), delivery time은 Monaco statistics에서 산출된 값을 이용하여 평가하였다.

III. 결과

동일한 제약조건을 적용하여 총 9개의 방사선치료계획에 대해 14개의 선량학적 인자를 이용하여 비교 분석하였다. 모든 치료계획은 RTOG 0933 protocol의 기준을 충족하였다.

1. 표적(Target)

PTV V_{30} 에서 2BDA-NC VMAT이 96.35%로 가장 높은 값, 2BDA-VMAT이 92.23%로 가장 낮은 값을 나타냈다. PTV D_2 에서 2BDA-VMAT이 35.33 Gy로 가장 낮은 값, 2BDA-NC VMAT이 35.96 Gy로 가장 높은 값을 나타냈다. PTV D_{98} 에서 2BDA-NC VMAT이 28.19 Gy로 가장 높은 값, 2BDA-VMAT이 24.84 Gy로 가장 낮은 값을 나타냈다. CI는 2BDA-NC VMAT이 0.81로 가장 높은 값, 3APB-VMAT이 0.71로 가장 낮은 값을 나타냈다. HoI, HeI은 2BDA-VMAT이 0.37, 1.23으로 가장 높은 값을 보였으며, 2BDA-NC VMAT과 3BDA-NC VMAT이 0.23, 3APB와 4APB-VMAT이 1.13으로 가장 낮은 값을 나타냈으며 Table 3과 같다.

2. 정상장기(Organ at risk)

해마의 D_{max} 와 D_{100} 은 2APB-VMAT이 15.99 Gy, 3APB-VMAT이 8.78 Gy로 가장 낮았고, 3BDA-NC VMAT이 16.68 Gy, 4BDA-NC VMAT이 10.0 Gy로 가장 높게 나타났다. 시신경의 D_{max} 와 D_{mean} 의 경우 2BDA-NC VMAT이 32.81 Gy, 2BDA-VMAT이 25.99 Gy로 가장 낮은 값, 2APB-VMAT이 35.29 Gy, 3APB-VMAT이 28.62 Gy로 가장 높은 값 나타났다. 시신경 교차의 경우 D_{max} 와 D_{mean} 은 4BDA-VMAT이



Fig. 1. Comparison of dose distributions for different beam arrangements in HA-WBRT (a) 2APB coplanar VMAT, (b) 2BDA coplanar VMAT, and (c) 2BDA non-coplanar VMAT.

Table 3. Results of dosimetric parameters in planning target volume using arcs per beam and beams determined arcs coplanar VMAT(APB, BDA-VMAT) plans and beams determined arcs non-coplanar VMAT(BDA-NC VMAT) plans.

Beam arrangements	V ₃₀ (%)	PTV											
		avg	D ₂ (Gy)	avg	D ₉₈ (Gy)	avg	CI	avg	HoI	avg	HeI	avg	
Coplanar VMAT	2APB	94.67	35.38		25.56		0.74		0.33		1.18		
	3APB	96.10	95.66	35.38	35.44	27.10	26.54	0.71	0.72	0.27	0.29	1.13	1.15
	4APB	96.22		35.55		26.97		0.72		0.28		1.13	
	2BDA	92.23		35.33		24.84		0.77		0.37		1.23	
	3BDA	94.26	93.76	35.63	35.44	25.12	25.37	0.74	0.75	0.36	0.35	1.20	1.20
	4BDA	94.78		35.35		26.16		0.75		0.31		1.17	
Non-coplanar VMAT	2BDA	96.35		35.96		28.19		0.81		0.23		1.16	
	3BDA	96.27	96.09	35.70	35.74	27.95	27.81	0.79	0.80	0.23	0.24	1.15	1.16
	4BDA	95.64		35.57		27.30		0.79		0.25		1.16	

PTV: planning target volume, V₃₀: percentage volume of the PTV receiving dose at least 30 Gy, D₂: dose to 2% of the PTV, D₉₈: dose to 98% of the PTV, CI: conformity index, HoI: homogeneity index, HeI: heterogeneity index, avg - represents average.

Table 4. Results of dosimetric parameters in normal organs and MUs and delivery times using arcs per beam and beams determined arcs coplanar VMAT(APB, BDA-VMAT) plans and beams determined arcs non-coplanar VMAT(BDA-NC VMAT) plans.

Parameter	Coplanar VMAT						Non-coplanar VMAT			
	APB-VMAT			BDA-VMAT			2BDA	3BDA	4BDA	
Hippocampus	D _{max} (Gy)	15.99	16.40	16.02	16.63	16.66	16.61	16.46	16.68	16.48
	average		16.14			16.63			16.54	
	D ₁₀₀ (Gy)	8.91	8.78	8.91	9.54	9.52	9.68	9.41	9.96	10.00
	average		8.87			9.58			9.79	
Optic nerves	D _{max} (Gy)	35.29	35.06	34.57	33.13	34.89	34.46	32.81	33.78	33.74
	average		34.97			34.16			33.44	
	D _{mean} (Gy)	26.97	28.62	28.37	25.99	27.65	27.46	26.58	27.09	27.30
	average		27.99			27.03			26.99	
Optic chiasm	D _{max} (Gy)	35.71	35.06	34.88	34.44	35.28	34.39	34.43	34.59	34.91
	average		35.22			34.70			34.64	
	D _{mean} (Gy)	28.67	30.66	30.23	28.82	29.17	29.76	31.93	30.72	31.17
	average		29.85			29.25			31.27	
Monitor Unit	(MU)	1707.29	1779.59	1882.90	1944.49	1867.53	2133.56	1807.24	2006.69	2030.60
	average		1789.93			1981.86			1948.18	
Delivery time	(s)	210.52	260.72	311.30	361.97	435.04	605.54	428.59	530.76	634.60
	average		260.85			467.52			531.32	

D_{max}: maximum dose, D_{mean}: mean dose, MU: monitor unit, avg: represents average.

34.39 Gy, 2APB-VMAT이 28.67 Gy로 가장 낮은 값, 2APB-VMAT이 35.71 Gy, 2BDA-NC VMAT이 31.93 Gy로 가장 높은 값을 나타냈다. 방사선치료계획별 평균 MU는 APB-VMAT, BDA-NC VMAT, BDA-VMAT 순서로 각각 1789.97 MU, 1948.18 MU, 1981.86 MU로 나타났다. Monaco

statistics로 산출된 평균 delivery time은 APB-VMAT, BDA-VMAT, BDA-NC VMAT 순서로 각각 260.85s, 467.52s, 531.32s로 나타났으며 Table 4와 같다.

IV. 고 찰

VMAT 기법은 역방향치료계획의 조절 변수(Parameter)에 따라 민감하게 반응하는 특성을 가지며, 특히 RTPs의 종류에 따른 빔 배열 특성을 파악함으로써 효율적인 방사선치료계획을 수행할 수 있다.

Coplanar VMAT의 ABP 방식은 BDA 방식과 비교 결과, PTV V_{30} , D_{98} 에서 평균 1.91%, 1.17% 증가, HoI, HeI에서 0.05, 0.05 개선, 해마의 D_{max} , D_{100} 에서 0.50 Gy, 0.71 Gy 감소, 일부 정상장기의 선량 감소 및 MU와 치료 시간에 대해 9.68%, 44.21% 개선된 결과를 나타냈다. Kalet 등의 Monaco RTPs를 활용한 동일면 APB 방식과 BDA 방식 비교 연구에서 APB 방식이 표적의 형태에 따라 MU와 control point 감소 및 정상장기 보호와 치료 시간 감소에 대한 이점을 보고한 바 있으며, 본 연구와 비슷한 경향성을 나타냈다[17]. 동일면에서 두 빔 배열의 차이는 Monaco RTPs BDA 방식에서 각 빔에 대한 독립된 modulation으로 MLC의 중복 및 island blocking 등에 의해 방사선치료계획 품질이 저하된 것으로 생각된다[18]. 이러한 한계를 개선하기 위해 비동일면 필드를 추가하여 개선할 수 있으며, 본 연구의 BDA-VMAT과 BDA-NC VMAT 비교에서 표적과 정상장기의 선량학적 개선을 확인할 수 있다. 그러나 BDA 방식에서 개별 빔에 대한 modulation 방식과 불연속적 조사로 인하여 전체 치료 시간의 증가 등과 같은 문제를 초래한다.

Chiang 등의 Eclipse RTPs를 활용한 선행연구에 따르면 HA-WBRT의 동일면과 비동일면 VMAT 방사선치료계획 비교에서 두 치료기법은 임상적으로 유사한 결과를 나타냈으며, 환자 정렬(Set-up) 및 전체 치료 시간 단축 등 HA-WBRT에서 동일면 VMAT 기법의 이점에 대해 보고하였다[2]. 이러한 결과는 본 연구에서도 비슷한 경향성을 나타냈으며, 동일면 APB 방식은 비동일면 BDA 방식과 비교 시 예상 조사 시간의 2.04 배 차이를 제외하고 표적과 정상 조직에서 비슷한 결과를 보였으며, 동일면 APB 방식의 유용성을 확인하였다.

마지막으로 방사선치료의 정밀성, 균일성 및 효율성 등의 향상과 관련하여 동일면 VMAT에서 최대 회전 원호 수와 관련된 다수의 선행연구가 보고 되고 있으며, 특히 복잡한 구조에서 다중 원호 적용에 관한 연구가 보고 되고 있다[17,19]. VMAT의 역방향치료계획에서 회전 원호 수가 증가는 곧 높은 자유도(Degree of freedom)를 활용하여 방사선치료가능비(Therapeutic ratio)를 높일 수 있다[20]. 그러나 조사 시간, MU 및 산란선 증가로 인한 환자 정렬 오차와 저선량 영역 확대와 같은 단점이 존재한다. 본 연구의 동일면 APB 방식에서 최대 원호 수를 증가함에 따라 표적에 대한 커버리지(Coverage) 향상과 시신경 및 시신

경 교차의 최대선량 감소에 대한 이점이 있지만, 낮은 선량의 퍼짐에 의한 해마의 선량과 정상장기의 평균 선량을 증가시키는 경향을 나타냈다. 따라서 해마회피전뇌방사선치료와 같이 한계선량이 낮은 정상장기가 표적에 인접한 상황에서 회전 원호 수 선택에 신중해야 할 것으로 사료된다.

본 연구의 한계점은 다양한 종류의 방사선치료계획시스템에 대한 빔 배열 방식의 비교가 부족한 것으로 생각된다. 대표적인 RTPs 중 하나인 Varian 사의 Eclipse RTPs는 빔 스프레드시트 내 빔의 개수에 따라 360° 또는 특정 각도의 회전 원호 수가 결정되는 BDA 방식을 사용한다. Adams 등은 Eclipse RTPs를 활용한 HA-WBRT 치료계획 시 partial-field와 spilt-arc를 이용하여 MLC와 collimator 등의 물리적 한계를 극복하는 BDA 방식의 유용성 연구를 진행한 바 있다[9]. 본 연구에서 사용된 monte carlo photon photon algorithm을 적용한 Monaco BDA 방식과 달리 anisotropic Analytical Algorithm을 이용한 Eclipse BDA 방식은 개별 빔에 대한 연속된 modulation 특성을 가진다[18,21]. 따라서 방사선치료계획시스템 종류별 빔 배열 방식 대한 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다.

V. 결론

체적조절호형방사선치료는 과거 2차원, 3차원 입체조형 방사선치료와 비교하였을 때, 방사선치료계획시스템 및 조절 변수에 민감하게 반응하며, 방사선치료계획 품질에 영향을 미치게 된다. 특히 방사선치료계획 시스템 종류에 따른 빔 배열 방식의 차이를 파악함으로써 치료 부위 및 상황에 따라 적절한 빔 배열을 적용함으로써 방사선치료가능비를 높이며 효율적인 방사선치료가 가능할 것으로 사료된다.

본 연구에서 해마회피전뇌방사선치료시 Monaco RTPs를 활용하여 빔 배열과 회전 원호 수에 따른 차이를 선량학적 인자로 비교 분석함으로써 고정밀 방사선치료계획에 대한 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

REFERENCES

- [1] de Ruiter MB, Groot PFC, Deprez S, Pullens P, Sunaert S, de Ruysscher D, et al. Hippocampal avoidance prophylactic cranial irradiation (HA-PCI) for small cell lung cancer reduces hippocampal atrophy compared to conventional PCI. *Neuro-oncology*. 2023;25(1):

- 167–76. DOI: 10.1093/neuonc/noac148
- [2] Chiang PY, Chang CC, Lee CY, Wang YW, Tsang YW, Hung CH, Hippocampal-sparing whole-brain radiotherapy under coplanar or noncoplanar VMAT. *Medical Dosimetry*. 2023;48(3):134–9. DOI: 10.1016/j.meddos.2023.02.002
- [3] Aijun J, Weipeng S, Fen Z, Zhenxuan W, Dongping S, Qingxi Y, et al. Dosimetric evaluation of four whole brain radiation therapy approaches with hippocampus and inner ear avoidance and simultaneous integrated boost for limited brain metastases. *Radiation Oncology*. 2019;14(1):1–8. DOI: 10.1186/s13014-019-1255-7
- [4] Alejandro P, Ana Isabel M, Eduardo C, Raúl D, Alejandro F, Gustavo P, et al. Dosimetric comparison of four volumetric-modulated arc therapy beam arrangements utilized for hippocampal-sparing whole-brain radiation therapy. *Journal of Medical Physics*. 2019;44(1):1–8. DOI: 10.4103/jmp.JMP_56_18
- [5] Trifiletti DM, Brown PD. The role of whole-brain radiation therapy in patients with cerebral metastases. *Cancer*. 2018;124(10):2072–4. DOI: 10.1002/cncr.31352
- [6] Lee YW, Cho HJ, Lee WH, Sonntag WE. Whole brain radiation-induced cognitive impairment: pathophysiological mechanisms and therapeutic targets. *Biomolecules & Therapeutics*. 2012;20(4):357–70. DOI: 10.4062/biomolther.2012.20.4.357
- [7] Kim SH, Kim HT. Functional neuroanatomy of learning and memory. *The Korean Journal of Sychopathology*. 1999;8(1):22–34. Retrived from <https://kiss.kstudy.com/Detail/Ar?key=1809894>
- [8] Xue J, Jin S, Zhang H, Zou K, Sheng J, Tang J, et al. A simplified non-coplanar volumetric modulated arc therapy for the whole brain radiotherapy with hippocampus avoidance. *Frontiers in Oncology*. 2023;13:1143564. DOI: 10.3389/fonc.2023.1143564
- [9] Yuen AHL, Wu PM, Li AKL, Mak PCY. Volumetric modulated arc therapy (VMAT) for hippocampal-avoidance whole brain radiation therapy: Planning comparison with Dual-arc and Split-arc partial-field techniques. *Radiation Oncology*. 2020;15(1):1–10. DOI: 10.1186/s13014-020-01488-5
- [10] Hogstrom KR, Almond PR. Review of electron beam therapy physics. *Physics in Medicine and Biology*. 2006;51(13):R455–R89. DOI: 10.1088/0031-9155/51/13/R25
- [11] Brown PD, Laack NN, Gondi V, Pugh S, Deshmukh S, Tome WA, et al. Hippocampal avoidance during whole-brain radiotherapy plus memantine for patients with brain metastases: Phase III trial NRG oncology CC001. *Journal of Clinical Oncology*. 2020;38(10):1019–29. DOI: 10.1200/JCO.19.02767
- [12] Gondi V, Rowley H, Pugh SL, Shi W, DeNittis A, Kanski AA, et al. Preservation of memory with conformal avoidance of the hippocampal neural stem-cell compartment during whole-brain radiotherapy for brain metastases (RTOG 0933): A phase II multi-institutional trial. *Journal of Clinical Oncology*. 2014;32(34):3810–6. DOI: 10.1200/JCO.2014.57.2909
- [13] Kazda T, Jancalek R, Pospisil P, Sevela O, Prochazka T, Vrzal M, et al. Why and how to spare the hippocampus during brain radiotherapy: The developing role of hippocampal avoidance in cranial radiotherapy. *Radiation Oncology*. 2014;9(1):1–22. DOI: 10.1186/1748-717X-9-139
- [14] Grosu AL, Frings L, Bentsalo I, Oehlke O, Brenner F, Bilger A, et al. Whole-brain irradiation with hippocampal sparing and dose escalation on metastases: Neurocognitive testing and biological imaging (HIPPORAD) – A phase II prospective randomized multicenter trial (NOA-14, ARO 2015-3, DKTK-ROG). *BMC Cancer*. 2020;20(1):1–13. DOI: 10.1186/s12885-020-07011-z
- [15] Nevelsky A, Kaidar-Person O, Bar-Deroma R, Nasrallah H, Ben-Yosef R, Kuten A, et al. Hippocampal-sparing whole-brain radiotherapy using the Elekta equipment. *J Appl Clin Med Phys*. 2013;14(3):113–20. DOI: 10.1120/jacmp.v14i3.4205
- [16] Yuen AHL, Wu PM, Li AKL, Mak PCY. Hybrid split-arc partial-field volumetric modulated arc therapy: an improved beam arrangement for linear accelerator-based hippocampal-avoidance whole brain radiation therapy. *Reports of Practical Oncology and Radiotherapy*. 2022;27(2):352–9. DOI: 10.5603/RPOR.a2022.0022

- [17] Kalet AM, Richardson HL, Nikolaisen DA, Cao N, Lavilla MA, Dempsey C, et al. Dosimetric comparison of single-beam multi-arc and 2-beam multi-arc VMAT optimization in the Monaco treatment planning system. Preprint. 2017;42(2):122-5. DOI: 10.1016/J.MEDDOS.2017.02.001
- [18] Pudsey LM, Cutajar D, Wallace A, Saba A, Schmidt L, Bece A, et al. The use of collimator angle optimization and jaw tracking for VMAT-based single-isocenter multiple-target stereotactic radiosurgery for up to six targets in the Varian Eclipse treatment planning system. J Appl Clin Med Phys. 2021;22(9):171-82. DOI: 10.1002/acm2.13360
- [19] Guckenberger M, Richter A, Krieger T, Wilbert J, Baier K, Flentje M. Is a single arc sufficient in volumetric-modulated arc therapy (VMAT) for complex-shaped target volumes? Radiotherapy and Oncology. 2009;93(2):259-65. DOI: 10.1016/j.radonc.2009.08.015
- [20] Chang DS, Lasley FD, Das IJ, Mendonca MS, Dynlacht JR, Chang DS, et al. Therapeutic ratio. Basic Radiotherapy Physics and Biology. 2021:307-12. DOI: 10.1007/978-3-030-61899-5_30
- [21] Shen J, Bender E, Yarpalvi R, Kuo HC, Basavatia A, Hong L, et al. An efficient Volumetric Arc Therapy treatment planning approach for hippocampal-avoidance whole-brain radiation therapy (HA-WBRT). Preprint. 2015;40(3):205-9. DOI: 10.1016/J.MEDDOS.2014.11.007

구분	성명	소속	직위
제1저자	박성국	부산대학교병원 방사선종양학과	방사선사
교신저자	김동현	부산기톨릭대학교 보건과학대학 방사선학과	교수