

양측 유방암 방사선치료 시 토모테라피와의 비교를 통한 Halcyon VMAT 치료계획의 유용성 평가

삼성서울병원 방사선종양학과

임준택 · 박주영 · 박수연 · 전성진 · 박태양 · 황다진

목적: 양측 유방암 방사선치료 시 토모테라피와 Halcyon 선형가속기를 이용한 치료계획을 비교하여 Halcyon 치료 계획의 유용성을 평가.

대상 및 방법: 양측 유방암 환자 10명을 대상으로 Helical Mode를 사용하여 조사면 고정 너비(Field Width, FW) 5.0-cm, 피치(Pitch) 0.287, 변조 지수(Modulation Factor) 2.4 조건의 토모테라피(Helical Tomotherapy, Accuray, USA)와 6Arc 및 8Arc의 Halcyon(Varian Medical System, Palo Alto, CA, Version 3.0 USA)을 이용한 용적변조회전치료(Volumetric Modulated Arc Therapy, VMAT)치료계획을 수립하였다. 총 처방 선량 42.4Gy/16회로 치료계획용적(Planning Target Volume, PTV)의 $V_{40.3Gy}$ 이 90% 이상이 되도록 하였다. 종양 및 정상 장기의 선량을 비교하여 치료 계획의 질을 평가하였고 Total MU와 Beam On Time을 비교하여 효율성을 평가하였다.

결과: 대상 환자들의 3개 치료계획 (Tomotherapy, Halcyon 6Arc VMAT, Halcyon 8Arc VMAT)의 평가 항목 평균 값은 PTV의 H.I (Homogeneity Index)는 각각 1.07, 1.10, 1.11, PTV의 C.I (Conformity Index)는 각각 1.21, 1.16, 1.17 이었다. 정상 장기의 선량 평가 항목 평균 값은 BOTH LUNG의 V_{5Gy} 는 각각 36.3%, 31.2%, 29.7% 이며, V_{15Gy} 는 각각 18.6%, 15.5%, 14.6% 이었다. HEART의 평균 선량(Gy)은 각각 4.17, 2.69, 2.51 이었다. Total MU의 평균 값은 각각 7498.6, 2494.2, 2471.5 이며 Beam On Time (sec)의 평균 값은 각각 462.5, 195.4, 198 로 토모테라피와 비교하여 Halcyon VMAT 치료계획이 Beam On Time과 Total MU가 감소하였다.

결론: Halcyon VMAT은 토모테라피와 비교하였을 때 유사한 치료 계획의 질을 보여주며 정상 장기의 더 높은 보호 효과를 나타내었다. 또한 Beam On Time과 Total MU의 감소로 방사선치료의 효율성이 증가하였다.

핵심용어: Helical IMRT, VMAT, Tomotherapy, Halcyon

서론

전 세계적으로 유방암은 여성에게 가장 흔한 암으로 여성 암의 25.2%를 차지하고 있으며 여성 암 중 최다 발생률을 보이며 사망원인 2위를 차지하고 있다⁽¹⁾. 국내 유방

암은 여성에서 발생하는 암중 가장 흔한 암으로 보건복지부의 국가암등록사업 보고에 따르면 2019년 유방암은 전체 여성암의 20.6%를 차지한다⁽²⁾. 그 중에서도 양측 유방암(Bilateral breast cancer) 환자는 드물게 발생되는데 전체 유방암 환자의 약 2.1%에 해당된다⁽³⁾. 양측 유방암 환자의 방사선 치료 시 국소 전이가 없는 양쪽 유방만을 치료할 경우 전통적인 접선조사치료가 가능하다. 하지만 종괴 절제술 강이 중앙에 위치한 경우 내유 림프절을 포함하는 경우 유방의 부피가 크고 두꺼운 경우 전통적인 방법으

책임저자: 박주영, 삼성서울병원
서울 강남구 일원로 81
Tel: 02) 3410-2656
E-mail: smcjy.park@samsung.com

로는 목표 종양의 선량 전달 불균일성과 심장과 폐의 보호 정도가 떨어진다. 또한 각 편측 유방의 두 개의 치료계획 중심점을 적용할 경우 치료위치잡이시 두 치료 계획의 겹치는 부분의 오차가 발생할 수 있다. 이러한 이유로 본원에선 하나의 치료계획중심점을 사용하여 양측 유방을 한번에 치료하는 토모테라피로 양측 유방암 환자의 방사선 치료에 적용하고 있다. 토모테라피는 영상유도 방사선 치료 (Image-Guided Radiotherapy)가 가능하며 세기변조 방사선 치료 (Intensity-Modulated Radiotherapy)를 시행하는 장비로서 64개의 2열 대립형 다중잎 콜리메이터 (Binary Multi-Leaf Collimator)를 통해 종양에 최적의 선량 분포를 전달하며 정상 조직에 적은 선량을 전달하여 보호효과를 가진 치료법이지만 Beam On Time이 길며 높은 MU (Monitor Unit)는 2차 암 발생 확률을 높인다^(4, 5). Halcyon 선형 가속기는 Jawless의 구조와 단일 6MV FFF(Flattening-Filter-Free) X선을 제공하는 Varian 사의 장비다. Halcyon은 Jawless의 구조, 이중형 다중잎 콜리메이터, 충돌위험이 없는 O-Ring Bore 구조, 빠른 겐트리 회전 및 영상유도 방사선 치료와 같은 기존 C-arm LINAC과 많은 차이점이 있다. Halcyon 선형 가속기를 통한 두경부암, 뇌암, 유방암 및 자궁경부암 방사선 치료 시 우수한 선량 분포와 효율을 나타낸다^(6, 7). 본 연구는 이러한 장비의 특성들을 이용하여 Halcyon 선형 가속기를 통한 용적변조회전치료(Volumetric Modulated Arc Therapy, VMAT) 치료계획이 양측 유방암 치료 계획의 질과 선량 전달 효율성을 향상시킬 수 있음을 연구하였다.

대상 및 방법

1. 실험재료

- Precision® Treatment Planning System (Version 1.1.1.1, Accuray, USA)
- Eclipse treatment planning system (version 16.1, Varian Medical Systems, Palo Alto, CA, USA)
- TomoHDA™(Version 1.1.0.1, Accuray, USA)
- TomoRADIXACT™(Version 1.1.0.2, Accuray, USA)

- Halcyon™(Version 3.0, Varian Medical System, Palo Alto, CA, USA)
- SPSS Data Analysis Software (Version 18.0.0, International Business Machines, USA)

2. 실험방법

1) 환자 선택 및 볼륨 규정

2021년 3월부터 2022년 1월까지 본원 토모테라피로 유방 보존 수술 후 방사선 치료를 받은 양측 유방암 환자 10명의 CT(Computed tomography) 영상을 사용하였다. CT 영상은 Wing board와 Vaclock, L-S + Knee pillow를 사용하여 자신의 몸에 맞게 바로누운자세(SUPINE POSITION)으로 5.0mm 슬라이스 두께로 자유로운 호흡으로 시행되었다. 임상 표적 용적(Clinical Target Volume)은 국소 림프절 부위를 제외한 양측 유방 조직을 포함한 환자 4명과 국소 림프절 부위와 양측 유방 조직을 포함한 환자 6명을 선정하였다. 치료 계획 용적은 임상 표적 용적에서 5mm를 확장하되 체표면으로부터 체부 방향으로 3mm 작게 설정하였다. 치료 계획 용적의 평균 용적은 1210.75cm³이다. 각 치료계획(Tomotherapy, Halcyon

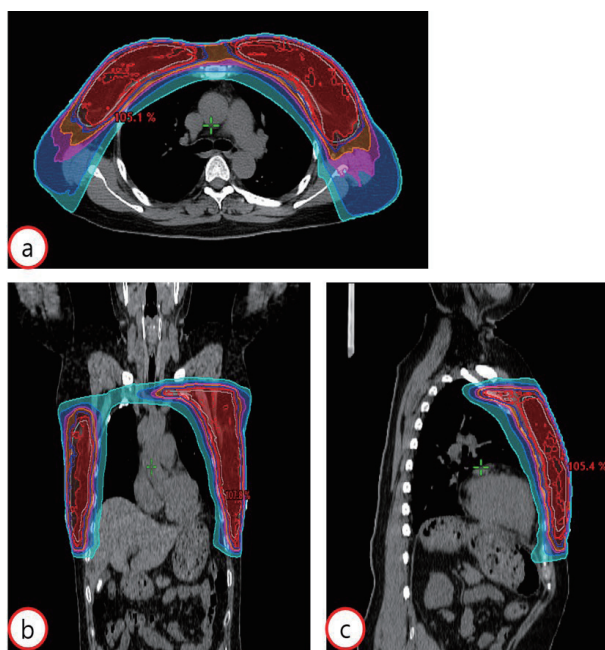


Fig. 1. Halcyon VMAT PLAN (a) Coronal image, (b) Axial image, (c) Sagittal image

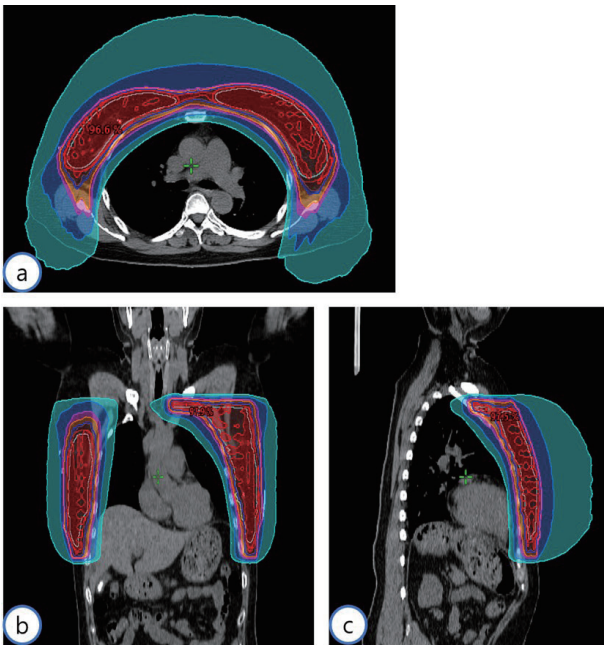


Fig. 2. Tomotherapy PLAN (a) Coronal image, (b) Axial image, (c) Sagittal image

6Arc VMAT, Halcyon 8Arc VMAT)은 총 처방 선량 42.4 Gy/16회로 치료 계획 용적의 V 40.3Gy이 90% 이상이 되도록 설계하였다 (Fig. 1, 2). 치료 계획 용적과 손상위험장기의 선량 제약은 RTOG(Radiation Therapy Oncology Group) 해부 윤곽 가이드라인에 준수하여 계획하였다⁽⁸⁻¹⁰⁾.

2) 치료계획

토모테라피 치료계획은 Precision[®] Treatment Planning System (Version 1.1.1.1, Accuray, USA)로 조사면 고정너비(Field Width, FW) 5.0-cm, 피치(Pitch) 0.287, 변조 지수(Modulation Factor) 2.4의 조건으로 치료계획을 진행하였다. Halcyon VMAT(6Arc, 8Arc)의 치료계획은 Eclipse treatment planning system (version 16.1, Varian Medical Systems, Palo Alto, CA, USA)로 계획하였으며 6Arc VMAT의 빔은 시계 방향 겐트리 200°- 160°와 반시계 방향 겐트리 160°- 200° 시계 방향으로 콜리메이터 각도가 각각 85°, 90°로 구성된 2개의 Arc와 좌측 유방 방향으로 시계 방향 겐트리 10°- 160°와 반시계 방향 겐트리 160°- 10°로 콜리메이터 각도가 5°, 355°인 2Arc, 우측 유방 방향으로 시계 방향 겐트리 200°- 350°와 반시

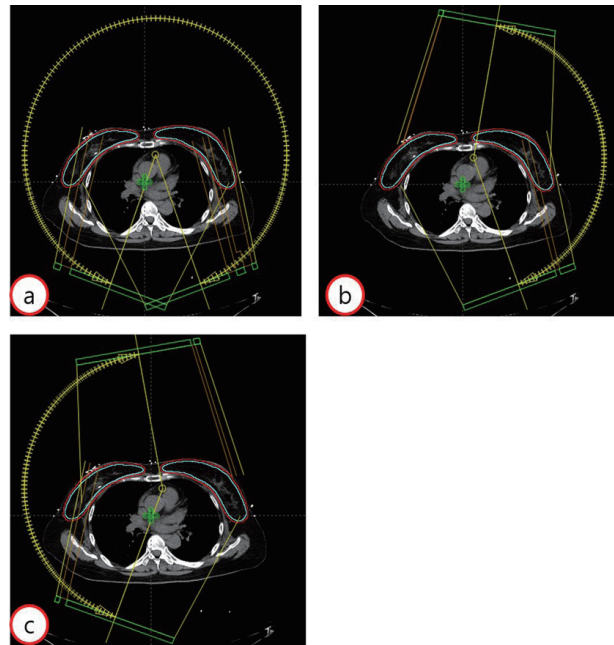


Fig. 3. Halcyon VMAT Arc (a) Gantry angle 200° ~ 160°, Collimator angle 85°(CW), Gantry angle 160° ~ 200°, Collimator angle 90°(CCW), (b) Gantry angle 10° ~ 160°(CW), Collimator angle 5°, Gantry angle 160° ~ 10°, Collimator angle 355°(CCW), (c) (b) Gantry angle 200° ~ 350°, Collimator angle 5°(CW), Gantry angle 350° ~ 200°, Collimator angle 355°(CCW)

계 방향 겐트리 350°- 200°로 콜리메이터 각도가 5°, 355°인 2Arc로 총 6Arc를 적용하였다 (Fig. 3). 8Arc VMAT은 앞서 기술한 6Arc와 동일한 구성에 더하여 각 편측 유방에 좌측은 시계 방향 겐트리 10°- 160°에 콜리메이터 15°로 구성한 1Arc와 우측은 시계 방향 겐트리 200°- 350°의 콜리메이터 각도 15°를 가진 1Arc를 추가하여 구성하였다 (Table 1). 모든 치료계획은 치료계획용적의 선량 적용 범위를 만족함과 동시에 양측 폐와 심장의 선량을 최소화하는 것을 목표로 동일한 최적화한 조건 값을 적용하였다.

3) 평가 항목

3개의 치료계획 (Tomotherapy, Halcyon 6Arc VMAT, Halcyon 8Arc VMAT)에 대한 평가는 치료계획용적에 대한 H.I (Homogeneity Index), C.I (Conformity Index)를 평가하였다 [Eq. 1, 2]. C.I는 선량 볼륨 히스토그램 생

성 후 필요한 파라미터를 사용하여 선량을 계산하였다. C.I 는 ICRU에 따른 95% isodoseline 과 치료계획용적의 볼륨의 비율이다.

$$H.I = \frac{D_{max}}{D_x} \text{ ----- [Eq.1]}$$

Dmax: Dose of Target Volume Max

Dx: Prescription Dose

$$C.I = \frac{V_{RI95}}{TV} \text{ ----- [Eq.2]}$$

V_{RI95}: Volume of the reference isodose (reference isodose = 95%)

TV: Target Volume

H.I는 처방선량과 최대선량의 비율을 나타낸다. H.I. 와 C.I. 값은 1에 가까울수록 이상적인 값이다⁽¹¹⁾. 손상위험장기의 평가로 양측 폐에 대해 평균 선량과 V_{5Gy}, V_{10Gy}, V_{15Gy}, V_{20Gy}, V_{30Gy}을 각각 비교하였다. 심장에 대한 V_{5Gy}, V_{10Gy}, V_{20Gy}, V_{30Gy} 및 평균 선량을 각각 비교하였다. 치료계획의 효율성 평가를 위해 Beam On Time과 각 치료계획의 Total MU를 비교하였다 (Table 2, 3).

Table 1. Halcyon VMAT Beam Parameter

Halcyon VMAT		
	Gantry Rtn(deg)	Collimator Rtn(deg)
Beam_1	200,0 - 160,0	85,0
Beam_2	160,0 - 200,0	90,0
Beam_3	10,0 - 160,0	5,0
Beam_4	160,0 - 10,0	355,0
Beam_5	200,0 - 350,0	5,0
Beam_6	350,0 - 200,0	355,0
Beam_7	10,0 - 160,0	15,0
Beam_8	200,0 - 350,0	15,0

Table 2. Average Beam On Time (sec)

	Beam On Time
Tomotherapy	462,5
Halcyon 6Arc VMAT	195,2
Halcyon 8Arc VMAT	198,0

4) 통계분석

3개의 치료계획 (Tomotherapy, Halcyon 6Arc VMAT, Halcyon 8Arc VMAT)에 대하여 치료계획용적과 양측 폐와 심장의 평균 비교를 통해 통계적 유의성을 검토하였다. 평균 비교는 각각 Halcyon 6Arc VMAT-Halcyon 8Arc VMAT, Halcyon 6Arc VMAT-Tomotherapy, Halcyon 8Arc VMAT-Tomotherapy 간 시행하였다. 10명의 치료계획결과를 바탕으로 SPSS Data Analysis Software (Version 18.0.0, International Business Machines, USA)을 이용하여 정규성 검정을 시행하였다. 또한 모든 항목에 대해 유의 확률 (p-value) > 0.05를 넘어 정규성을 따르므로 모수적 검정을 선택하였다. 모수적 검정 평균 비교 방법 중에 하나인 대응 표본 t-검정 (Paired t-test)을 이용하였다.

결 과

1. 치료계획용적 평가: C.I (PTV), H.I (PTV)

대상 환자들의 3개 치료계획 (Tomotherapy, Halcyon 6Arc VMAT, Halcyon 8Arc VMAT)의 C.I는 각각 1,21, 1,16, 1,17 이었다. Halcyon 6Arc VMAT이 가장 1에 가까운 값을 보여주었고 토모테라피가 가장 1에 먼 값인 1,21의 결과를 나타내었다. Halcyon 6Arc와 8Arc의 C.I 값은 유의미한 차이를 보이지 않았으나 토모테라피보다 1의 값에 근접하였다. PTV의 H.I (Homogeneity Index)는 평가 항목 평균 값은 각각 1,07, 1,10, 1,11 로 토모테라피가 1,07로 1에 가장 가까운 값을 보여주었고 Halcyon 6Arc와 8Arc는 각각 1,10, 1,11 로 비슷한 값을 나타내었다. 통계 결과의 CI는 Halcyon 6Arc VMAT-Tomotherapy와 Halcyon 8Arc VMAT-Tomotherapy에서 p (p-value) = 0,05와 유사한 평균의 유의미한 결과를 얻었다. HI는 Halcyon 6Arc

Table 3. Average Total MU

	Total MU
Tomotherapy	7498,6
Halcyon 6Arc VMAT	2494,2
Halcyon 8Arc VMAT	2471,5

VMAT-Halcyon 8Arc VMAT 간 유의미한 결과를 얻지 못했지만 Halcyon 6Arc VMAT-Tomotherapy와 Halcyon 8Arc VMAT-Tomotherapy는 평균의 p (p-value) < 0.001의 결과로 유의미한 결과를 얻었다 (Table 4).

2. 손상위험장기 평가(OAR) : BOTH LUNG, HEART

대상 환자들의 3개 치료계획 (Tomotherapy, Halcyon 6Arc VMAT, Halcyon 8Arc VMAT)의 치료 계획 용적의 V_{40.3Gy}이 본원의 기준을 참고하여 90%가 되도록 동일하게 설정하여 양측 폐에 대해 평균 선량과 V_{5Gy}, V_{10Gy}, V_{15Gy}, V_{20Gy}, V_{30Gy}을 선량 볼륨 히스토그램을 통해 비교하였다. 양측 폐의 평균선량은 각각 7.44, 6.67, 6.38 로 토모테라피가 가장 높은 평균선량을 나타내었으며 Halcyon 8Arc VMAT이 가장 낮은 평균선량을 나타내었다. V_{5Gy}는 각각 36.31%, 31.18%, 29.68% 로 토모테라피가 가장 높은 값을 나타내었으며 Halcyon 8Arc VMAT 이 가장 낮은 값인 29.68%의 결과를 보였다. V_{10Gy}는 각각 26%, 21%, 19.67% 로 토모테라피가 가장 높은 값 26%을 나타내었으며 Halcyon 8Arc VMAT 이 가장 낮은 값인 29.68%의 결과를 보였다 V_{15Gy}는 각각 18.6%, 15.51%, 14.6% 로 토모테라피가 가장 높은 값을 나타내었으며 Halcyon 6Arc와 8Arc VMAT 은 비슷한 결과를 보였다. V_{20Gy}는 각각 12.79%, 11.61%, 10.91% 로 3가지 치료계획이 비슷한 결과를 나타내었지만 토모테라피가 가장 높은 값을 나타내었다. V_{30Gy}는 각각 4.54%, 5.38%, 5.01% 로 Halcyon 6Arc VMAT 이 가장 높은 값인 5.38%를 나타내었으며 토모테라피가 가장 낮은 값을 나타내었다. 심장에 대해 평균 선

량과 V_{5Gy}, V_{10Gy}, V_{20Gy}, V_{30Gy}을 선량 볼륨 히스토그램을 통해 비교하였다(Fig. 4). 심장의 평균선량은 각각 4.17, 2.69, 2.51 로 토모테라피가 가장 높은 평균선량을 나타내었으며 Halcyon 8Arc VMAT이 가장 낮은 평균선량을 나타내었다. V_{5Gy}는 각각 17.81%, 9.32%, 7.63% 로 토모테라피가 가장 높은 값을 나타내었으며 Halcyon 8Arc VMAT 이 가장 낮은 값인 7.63%의 결과를 보였다. V_{10Gy}는 각각 9.3%, 3%, 2.37% 로 토모테라피가 가장 높은 값 9.3%을 나타내었으며 Halcyon 8Arc VMAT 이 가장 낮은 값인 2.37%의 결과를 보였다. V_{15Gy}는 각각 4.93%, 1.31%, 0.92% 로 토모테라피가 가장 높은 값을 나타내었으며 Halcyon 6Arc와 8Arc VMAT 은 비슷한 결과를 보였다. V_{20Gy}는 각각 2.5%, 0.52%, 0.36% 의 결과를 나타내었다. 양측 폐의 V_{15Gy}와 평균선량의 통계분석 결과는 V_{15Gy}에선 Halcyon 6Arc VMAT-Halcyon 8Arc VMAT과 Halcyon 8Arc VMAT-Tomotherapy에서 p (p-value) < 0.05로 유의미한 결과를 나타내었고 평균선량도 마찬가지로 Halcyon 6Arc VMAT-Halcyon 8Arc VMAT과 Halcyon 8Arc VMAT-Tomotherapy에서 p (p-value) < 0.05로 유의미한 결과를 나타내었다 (Table 5). 심장의 V_{5Gy}와 평균선량의 모든 대응에서 p (p-value) < 0.05로 유의미한 결과를 나타내었다 (Table 6).

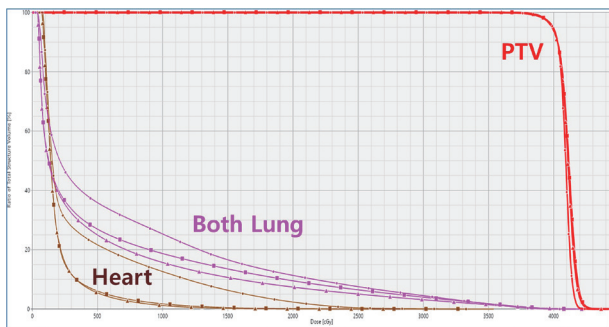


Fig. 4. Comparison of Heart and Both Lung DVH (● : Tomotherapy, ■ : Halcyon 6Arc VMAT, ▲ : Halcyon 8Arc VMAT)

Table 4. Average H.I, C.I value and Statistics

	Target	
	H.I.* (PTV)	C.I.† (PTV)
Tomotherapy	1.07	1.21
Halcyon 6Arc VMAT	1.10	1.16
Halcyon 8Arc VMAT	1.11	1.17
Statistics (p-value)		
	H.I.* (PTV)	C.I.† (PTV)
Halcyon 6Arc VMAT-Halcyon 8Arc VMAT	0.297	0.563
Halcyon 6Arc VMAT-Tomotherapy	< 0.001	0.02
Halcyon 8Arc VMAT-Tomotherapy	< 0.001	0.052

*Homogeneity Index, †Conformity Index

Table 5. Average BOTH LUNG Dose (Gy) and Statistics

BOTH LUNG						
	V5*	V10*	V15*	V20*	V30*	Dmean †
Tomotherapy	36.31	26.0	18.60	12.79	4.54	7.44
Halcyon 6Arc VMAT	31.18	21.0	15.51	11.61	5.38	6.67
Halcyon 8Arc VMAT	29.68	19.67	14.60	10.91	5.01	6.38
Statistics (p-value)						
	V15*		Dmean †			
Halcyon 6Arc VMAT- Halcyon 8Arc VMAT	0.004		0.002			
Halcyon 6Arc VMAT- Tomotherapy	0.066		0.103			
Halcyon 8Arc VMAT- Tomotherapy	0.018		0.027			

*V XGy (OAR Volume(%) receiving X Gy), † Mean Dose(Gy)

Table 6. Average HEART Dose (Gy) and Statistics

HEART DOSE					
	V5*	V10*	V15*	V20*	Dmean †
Tomotherapy	17.81	9.3	4.93	2.5	4.17
Halcyon 6Arc VMAT	9.32	3.0	1.31	0.52	2.69
Halcyon 8Arc VMAT	7.63	2.37	0.92	0.36	2.51
Statistics (p-value)					
	V5*		Dmean †		
Halcyon 6Arc VMAT- Halcyon 8Arc VMAT	0.024		0.025		
Halcyon 6Arc VMAT- Tomotherapy	0.011		0.008		
Halcyon 8Arc VMAT- Tomotherapy	0.008		0.005		

*V XGy (OAR Volume(%) receiving X Gy), † Mean Dose(Gy)

3. Beam On Time, Total MU

대상 환자들의 3개 치료계획 (Tomotherapy, Halcyon 6Arc VMAT, Halcyon 8Arc VMAT)의 Beam On Time의 평균 값을 실제 빔을 조사하여 측정하였고 평균은 각각 462.5, 190.8, 207.8 로 토모테라피가 Halcyon VMAT(6Arc, 8Arc)보다 2배 이상의 시간이 소요되었다. Total MU는 각각 7498.6, 2494.2, 2471.5 로 토모테라피가 가장 높은 값을 나타내었으며 Halcyon VMAT은 비슷한 결과를 보였다.

고찰 및 결론

양측 유방암은 큰 C형 치료계획 볼륨을 가지고 있으며 국소 림프절 부위를 포함한 경우 3DCRT를 이용한 치료 계획은 이러한 특징으로 인해 표적 범위의 한계와 불균일한 선량 분포의 한계가 있다. 이전에 많은 연구를 통해 양측 유방암 방사선 치료에 여러 치료 기법이 비교되었으며 3DCRT보다 다른 치료계획 방법이 권고된다^(12, 13). 토모테라피와 Halcyon VMAT을 비교하였을 때 Halcyon VMAT이 심장과 양측 폐의 낮은 평균선량과 낮은 선량 부피의 이점을 보여주었다. 양측 폐의 3가지 치료계획(Tomotherapy,

Halcyon 6Arc VMAT, Halcyon 8Arc VMAT)의 V_{5Gy} 는 각각 36.31%, 31.18%, 29.68% 로 가장 높은 토모테라피와 Halcyon 8Arc VMAT 의 차이는 약 6.6%의 차이를 보였다. V_{15Gy} 는 각각 18.6%, 15.51%, 14.6% 로 약 4%의 차이를 보였고 평균선량은 7.44, 6.67, 6.38 로 토모테라피와 Halcyon 8Arc VMAT 간 차이는 약 1.06Gy의 차이를 보였다. 해당 결괏값을 바탕으로 유방암 방사선치료 후 부작용으로 방사선폐렴과 방사선폐섬유증의 연관성에 관한 연구를 참고하여 폐의 V_{20Gy} 이 1% 증가할 때마다 방사선폐렴의 발생 위험이 6% 증가하였고, 평균선량이 1Gy 증가할 때마다 방사선폐렴의 발생 위험이 12% 증가한다고 하였다⁽¹⁴⁾. 앞서 기술한 바와 같이 양측 유방암 같은 경우 치료계획용적과 양측 폐의 근접한 구조로 인해 효과적인 선량 전달이 필수적이다. 유방암 치료 시 폐에 전달되는 선량과 관련한 부작용 연구를 바탕으로 본 연구에선 Halcyon VMAT이 토모테라피와 비교하여 폐의 선량을 효과적으로 줄일 수 있어 보다 우수한 치료계획으로 활용될 것을 제안했다^(15, 16). Darby et al. 은 심장의 평균선량과 허혈성 심장질환 발병률 사이에 선형 관계를 발견했으며 평균선량이 1Gy 증가할 때마다 발병률이 7.4%씩 증가했다고 한다⁽¹⁷⁾. 3가지 치료계획(Tomotherapy, Halcyon 6Arc VMAT, Halcyon 8Arc VMAT)의 심장의 평균선량은 각각 4.17, 2.69, 2.51 로 가장 높은 토모테라피와 가장 낮은 Halcyon 8Arc VMAT 의 차이는 약 1.6Gy로 유의미한 결과를 나타내었다.

본문에선 자세히 다루지 않았지만 유방 조직의 경우 CBCT는 3차원의 연조직 및 뼈의 해부학적 정보를 제공함으로써 이미지 가이드를 통해 정확한 치료를 가능하게 한다. VMAT 치료기법으로 치료될 때 CBCT의 매칭이 권장된다⁽¹⁸⁾. 토모테라피의 MVCT와 선형가속기(Linac)를 이용한 KV CBCT와 비교하였을 때 imaging dose의 경우 KV energy를 사용하는 CBCT보다 MV energy를 사용하는 MVCT 경우 thorax에서 1.22배 높게 나타났다⁽¹⁹⁾. 본원에서는 현재 양측성 유방암 Halcyon 치료 시 Daily KV CBCT를 시행하고 있으며 토모테라피를 통한 양측성 유방암은 Daily MVCT를 시행하고 있다. CBCT와 MVCT의 소요 시간에서도 상당한 차이를 보인다. 대상 환자들의 3개 치료계획 (Tomotherapy, Halcyon 6Arc VMAT, Halcyon 8Arc VMAT)의 Beam On Time의 평균 값을 실제 빔을

조사하여 측정하였고 평균은 각각 462.5, 190.8, 207.8 로 Halcyon VMAT이 토모테라피보다 약 58%의 짧은 시간이 소요되었다. 이처럼 Halcyon으로 방사선 치료를 진행할 경우 영상유도로 인한 시간과 선량 또한 치료 시간의 이점이 존재한다. 손상위험장기에선 양측 폐의 통계분석 결과로 통계적으로 Halcyon 8Arc VMAT이 좋은 결과를 보였으며 6Arc와 토모테라피는 비슷한 결과를 보였다. 심장의 통계 분석 결과로는 Halcyon VMAT 치료계획이 토모테라피보다 통계적으로 우수한 결과를 나타내었다.

손상위험장기의 선량적인 측면에서 8Arc 치료계획이 6Arc에 비해 이점이 있었고 Beam On Time과 MU를 비교하였을 때 유의미한 차이를 보이지 않았다. 10명 중 6명의 환자에 대해서 6Arc와 8Arc를 비교하였을 때 8Arc가 Beam On Time과 MU가 감소하는 결과를 나타내었는데 이는 복잡성 지수와 연관이 있을 것으로 예상된다. 일반적으로 세기조절방사선치료의 복잡성은 기계적 변화를 매개변수로 하여 계산된 복잡성 지수가 제안되었다⁽²⁰⁾. Li 와 Xing 는 용적변조회전치료는 세기조절방사선치료와 달리 다엽조준기의 이동, 겐트리 회전 속도, 선량률이 동시에 변조되어 선량 분포를 형성하므로 각각의 변조의 정도를 평가하는 도구로 이것이 포괄된 변조 지수(Modulated index, MI Li & Xing)를 제안하였다⁽²¹⁾. 6Arc가 8Arc보다 상대적으로 Treatment Planning System의 치료계획 Optimization 과정에서 복잡성이 증가함에 따라 변조 지수가 증가하여 MU가 증가하였고 그에 따라 Beam On Time이 증가한 것으로 예상된다. 본 연구에선 다루지 않았지만 해당 내용은 추후 보다 자세한 분석으로 기계적인 요소를 방사선 치료에 적용하여 효율성이 증대하는 것에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

이 논문은 몇 가지 제한점이 있다. 첫째, 토모테라피의 경우 Field Width, Modulation Factor 조절을 통해 Beam On time을 줄인 치료계획과 비교 할 수 있었으나 본 연구에서는 진행하지 못하였다. 또한 흔하지 않은 한정된 건수로 인해 기존의 TomoHDA™, TomoRADIXACT™ 두 치료기에서 치료를 진행한 환자의 치료계획과 비교하였는데 두 치료기의 DOSE RATE의 차이로 Beam On Time에 오차가 발생할 수 있다. 치료계획용적이 크고 손상위험 장기와 인접한 치료 부위가 있다면 본 연구를 바탕으로 양측 유

방암을 포함하여 타 부위의 치료계획에 있어 효과적인 방법이 될 것이라 사료된다

참고문헌

1. American Cancer Society. Cancer Facts & Figures 2018. Atlanta: American Cancer Society. 2018;3-12
2. 암종별 발생 현황. National Cancer Information Center, KOSIS, 2019
3. P. Jardel, J. Thariat, P. Blanchard, et al.: Nasopharyngeal cancers, an overview. *Bulletin du Cancer*, 2014;101(5):445-454
4. Yi Rong, James S Welsh: Dosimetric and clinical review of Tomo tomotherapy. *Expert Review of Anti-cancer Therapy*. 2011;11(2):309-320
5. Jie Qiu, Zhikai Liu, Bo Yang, Xiaorong Hou, et al.: Low-Dose-Area-Constrained Tomo Tomotherapy-Based Whole Breast Radiotherapy and Dosimetric Comparison with Tangential Field-in-Field IMRT. *BioMed Research International*, 2013;10.1155.
6. Barsky AR, O'Grady F, Kennedy C, et al. Initial clinical experience treating patients with breast cancer on a 6-MV flattening-filter-free o-ring linear accelerator. *Adv Radiat Oncol*. 2019;4(4):571-578
7. Michiels S, Poels K, Crijs W, et al. Volumetric modulated arc therapy of head-and-neck cancer on a fast-rotating o-ring linac: plan quality and delivery time comparison with a c-arm linac. *Radiother Oncol*. 2018;128(3):479-484.
8. Radiation Therapy Oncology Group (RTOG) 1005 A phase III trial of accelerated whole breast irradiation with hypofractionation plus concurrent boost versus standard whole breast irradiation plus sequential boost for early-stage breast cancer (2014)
9. S. Rudra, H.A. Al-Hallaq, Feng C., et al. Effect of RTOG breast/chest wall guidelines on dose-volume histogram parameters *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* (2014);15(2):127-137
10. S.K. Moon, Y.S. Kim, S.Y. Kim, et al. A dosimetric analysis of IMRT and multistatic fields techniques for left breast radiotherapy *Med. Dosim.* (2011);36(3):276-278
11. Deva Petrova , Snezana Smickovska , Emilija Lazarevska, et al Conformity Index and Homogeneity Index of the Postoperative Whole Breast Radiotherapy Open Access *Maced J Med Sci*. (2017);5(6):736-739.
12. Sung JinKimM.S, Mi JoLeeMD, Seon MinYounMD, et al. Radiation therapy of synchronous bilateral breast carcinoma (SBBC) using multiple techniques. (2018);43 (1):55-68
13. Tao Sun, Xiutong Lin, Guifang Zhang, et al. Treatment planning comparison of volumetric modulated arc therapy with the trilogy and the Halcyon for bilateral breast cancer. (2021);16(35)
14. Karlsten Jarle, Tandstad Torgrim, Sowa Piotr, et al. Pneumonitis and fibrosis after breast cancer radiotherapy: occurrence and treatment-related predictors. *Acta oncologica* (2021);60(12):.1651-1658
15. Byung Min Lee, Jee Suk Chang, Se Young Kim, et al. Hypofractionated Radiotherapy Dose Scheme and Application of New Techniques Are Associated to a Lower Incidence of Radiation Pneumonitis in Breast Cancer Patients. *Frontiers in Oncology*. Frontiers Media SA. (2020);00124.
16. Marc D. Piroth, René Baumann, Wilfried Budach, et al. Heart toxicity from breast cancer radiotherapy. *Strahlenther Onkol*. (2019);195:1-12

17. Darby S, Ewertz M, McGale P, et al. Risk of ischemic heart disease in women after radiotherapy for breast cancer. *N Engl J Med.* (2013);368(11):987–998.
18. Rossi M, Boman E, Skyttä T, et al. Dosimetric effects of anatomical deformations and positioning errors in VMAT breast radiotherapy. *J Appl Clin Med Phys.* (2018);19(5):506–516.
19. 윤보름, 홍미란, 안중호 등: Tomotherapy MVCT와 Linac CBCT의 Imaging dose 비교평가 Compare to Evaluate the Imaging dose of MVCT and CBCT. *The Journal of Korean Society for Radiation Therapy.* (2014);26(1):83–89
20. 김성진: 최신 방사선치료에서의 방사선 세기 변조 복잡성 분석. 국내박사학위논문 영남대학교 대학원, 2020.
21. Li R, Xing L. An adaptive planning strategy for station parameter optimized radiationtherapy (SPORT): Segmentally boosted VMAT. *Med Phys.* (2013);40:050701.

Evaluation of the usefulness of Halcyon VMAT treatment plan through comparison with tomotherapy in bilateral breast cancer radiation therapy.

Department of Radiation Oncology, Samsung Medical Center

**LIM JUN TAEK, PARK JU YOUNG, PARK SU YEON, JEON SEONG JIN,
PARK TAE YANG, HWANG DA JIN**

Purpose: To evaluate usefulness of Tomotherapy and Halcyon VMAT treatment in radiation therapy for bi-breast cancer

Materials and Methods: For 10 patients with bi-breast cancer, volumetric modulated arc therapy(VMAT) treatment plan was established using helical Tomotherapy(Accuray, USA) with field width of 5.0-cm and pitch of 0.287, and Halcyon(Varian Medical System, Palo Alto, CA, Version 3.0 USA) of 6arc and 8arc. Prescribed dose was 42.4 Gy/16, and $V_{40.3Gy}$ of Planning Target Volume(PTV) was 90%. The quality of plan was evaluated by comparing the dose to tumor and normal organs, and the efficiency was evaluated by comparing total MU and beam on time.

Results: About three treatment plans(Tomotherapy, Halcyon 6Arc VMAT, Halcyon 8Arc VMAT) , the mean homogeneity index(H.I) of PTV were 1.07, 1.10, 1.11, and the mean conformity index(C.I) of PTV were 1.21, 1.16, 1.17, respectively. The average value of the dose assessment item for a normal organ is $V_{5Gy}(\%)$ of both lung was 36.3, 31.2, 29.7, and $V_{15Gy}(\%)$ were 18.6, 15.5, 14.6, respectively. The mean heart dose(Gy) were 4.17, 2.69, 2.51. Total MU were [7498.6, 2494.2, 2471.5], and beam on time(sec) were 462.5, 195.4, 198.0.

Conclusion: Halcyon VMAT showed similar quality of treatment plan compared to helical Tomotherapy, while also protecting normal organs. In addition, the efficiency of radiotherapy increased due to a decrease in Beam On Time and MU.

▶ **Keyword:** Helical IMRT, Tomotherapy, Halcyon VMAT