이중 표적 척추 전이암의 체부정위방사선치료 시 Halcyon LINAC의 치료 유용성 평가

삼성서울병원 방사선종양학과

정희주 · 안예찬 · 박병석 · 박명환 · 박용철

목 적: 이중 표적 척추 전이암의 체부정위방사선치료 시 Halcyon 선형가속기의 용적변조회전치료 계획의 질 및 전달 효율을 평가하고자 한다.

대상 및 방법: 본원의 이중 표적 척추 전이암 환자 12명을 선정하여 Dual Layer MLC를 장착한 Halcyon®과 High Definition MLC를 장착한 Truebeam® 을 이용하여 단일치료중심 척추 SBRT 계획을 수립하였다. 모든 치료 계획은 Eclipse를 이용하여 동일한 조건 및 최적화 과정을 통해 생성하였으며, 치료계획 비교를 위해 C.I, H.I, G.I(Gradient Index), 척수 선량 및 저선량 영역을 평가하고, 전체 MU를 비교하였다. 또한 BOT(Beam On Time)를 측정하여 치료 시간을 비교하였다.

결 과: C.I 와 H.I에서는 통계적으로 유의한 차이는 보이지 않았다. 다만, G.I의 평균은 Halcyon이 4.64으로 Truebeam에 비해 5.5%로 감소하였으며($P<0.001$), Halcyon의 50% 및 25% isodose volume 평균은 각각 487.56 cc (−3.82%, $P<0.001$), 1859.45 cc (−4.75%, $P<0.001$) 으로 Truebeam보다 축소된 용적을 보였다. 또한 척수 선량 평가에서는 Overlap volume이 1 cc이하인 표본집단에서 Halcyon의 평균 선량 및 V_{10}의 평균은 6.802 Gy (−3.504%, $P=0.067$), 5.766±1.683 cc (−8.199%, $P=0.002$)으로 Truebeam보다 낮았다. MU와 각 장비의 최대선량률을 사용한 BOT는 Halcyon에서 증가했으나, 동일한 선량률로 조사 시 Halcyon의 평균은 648.33 sec (−1.74%, $P<0.001$)으로 단축되었다.

결 론: 이중 표적 척추 전이암의 SBRT 시 Halcyon의 치료 계획은 Truebeam의 치료 계획과 유사한 타겟 내 선량 분포 및 척수 보호효과를 가지면서, 가파른 선량 기울기로 저선량 영역에서 이점을 보였다. 이를 통해 이중 표적 척추 전이암 SBRT 시 Halcyon의 적용은 선량학적으로 향상된 치료계획을 제공함을 알 수 있다.

▶ **핵심용어:** Spine SBRT, SIMT-VMAT, Halcyon, Dual layer MLC, Truebeam, High definition MLC

서 론

척추 전이암은 전이암을 지닌 환자의 70%가 진단받을 만큼 대부분 암의 흔한 합병증이다.[1, 2] 이는 요통을 수반하여 환자의 삶의 질을 떨어트리며, 적절한 시기에 치료되지 않을 경우 척수 압박과 같은 심각한 신경적 합병증까지 초래할 수 있다.[1, 3, 4] 이에 대해 고식적인 외부 방사선 치료는 척추 전이암 환자들에게 완화적 방사선 치료 요법으로 사용되어 왔으나, 체부정위방사선치료(Stereotactic Body Radiation Therapy, SBRT)의 경우 적용 초기에는 방사선량의 증가로 방사선 골수 장애와 같은 합병증으로 인해 사용이 제한적이었다.[2, 5] 하지만 정교한 선량 계산 알고리즘의 개발 및 영상유도방사선치료(Image-Guided Radiation Therapy, IGRT)의 발전으로 16 – 24 Gy 범위 내에서의 고 선량을 표적 내에 정확한 전달이 가능해지면서, 체부정위방사선치료 시 대략적으로 90% 이상의 고통 완화를

책임저자: 정희주, 삼성서울병원
서울 강남구 일원로 81
Tel: 02) 3410-2596
E-mail: heeju96.jeong@samsung.com

보여 고식적인 방사선 치료의 고통 완화 비율인 약 50% 보다 상대적으로 높게 보고되고 있다.[1, 6, 7] 이러한 특징 때문에 체부정위방사선치료는 신경학적으로 온전 하거나 미미한 결손을 가진 초기 단계의 척추 전이암이나 소수전이암을 일차적으로 제어하는데 효과적인 치료법으로 적용되고 있다. 또한 고식적인 방사선 치료를 받은 후 수개월 내에 통증 악화를 보이는 약 20%의 척추 전이암 환자에게 재 방사선 치료로도 사용되고 있다.[1, 2, 3, 8] 체부정위방사선치료는 한 번에 고 선량을 전달하기 때문에 표적 및 척수와 같은 주변 신경 조직의 정확한 용적의 설정 필요하며, 이를 통해 표적에 높은 선량을 일치시키고 표적 외에는 가파른 선량 기울기를 적용하여 주변 인접 장기의 손상을 최소화하는 것이 요구된다.[3, 9] 추가적으로 재 방사선 치료의 경우 척수에 전달되는 초과 선량을 막고, 저선량 영역의 축소를 통해 인접한 정상 장기의 누적 선량을 줄이는 것이 중요하다.

최근 Varian사에서 나온 Halcyon®(Varian Medical system, Palo Alto, CA)은 Jaw가 없는 중첩된 구조의 Dual Layer MLC를 장착하고 있다. 이는 Truebeam®(Varian Medical system, Palo Alto, CA)의 High Definition MLC보다 두꺼워진 엽의 두께와 0.1 ㎜의 매우 작은 DLG(Dosimetric Leaf Gap)를 가지고 있으며, 더 빠른 MLC 속도를 보인다. 이는 Dual Layer MLC가 반음영과 더불어 누설 선량 및 투과 선량을 줄일 수 있게 하였으며, 빠른 빔 모양 변형이 가능하게 하였다.

여러 선행 연구들은 이미 다양한 치료 부위에 Halcyon을 적용하여 이의 품질을 평가하였다. Pokhrel 등은 초기 전립선 암의 체부정위방사선치료 시 Halcyon의 치료 계획이 Millennium 120 MLC를 장착한 Truebeam의 치료 계획보다 감소된 저선량 및 중간선량 유출과 단축된 전체 치료 시간을 바탕으로 임상 적용 가능성을 보고 하였으며, Li 등은 다중 표적 뇌전이암을 단일치료중심으로 정위방사선치료 시 지름이 1 ㎝이 넘는 다중표적에 대해서 High Definition MLC를 장착한 Truebeam과 유사한 선량 합치와 더불어 정상 뇌조직에 저선량 감소를 발표하였다.[10, 11] 또한 Li 등은 단일 척추 전이암에 대해서 체부정위방사선치료 시 1 ° 이상의 자세잡이(Set up) 오류만 주의한다면, High Definition MLC를 장착한 Truebeam의 치료 계획과 유사한 치료 계획의 품질을 제공할 수 있다고 보고하였다.[12]

이와 같은 Halcyon의 특징을 단일치료중심으로 소수전이된 척추 전이암 체부정위방사선치료 계획에 적용하였을 때, 이중 표적 사이에 Jaw tracking이 불가한 영역에 전달되는 선량의 감소와 표적 외 영역에서의 누설 선량 및 투과 선량을 감소로 인한 저선량 영역의 축소가 기대된다. 본 연구를 통해 이중 표적 척추 전이암의 체부정위방사선치료 시 Dual Layer MLC를 장착한 Halcyon과 High Definition MLC를 장착한 Truebeam의 치료 계획의 질과 치료 효율성을 비교해보고자 한다.

대상 및 방법

1. 환자 선택

본원에서 2020년 2월부터 2022년 4월까지 방사선 치료를 받은 척추 전이암 환자 중 흉추와 요추 부위 내에 분리된 두 개의 척추뼈에 전이 암이 존재하는 환자 12명을 대상으로 하였다(Fig. 1). 모든 환자들의 체위는 바로 누운 자세를 취하였으며, 자세 고정을 위해 Vac-lock을 이용하였다. 전산화단층촬영 CT Simulator(Discovery CT590 RT, GE, USA)는 2.5 ㎜ 두께로 획득되었으며, 이는 높은 해상도를 가지는 자기공명영상(Philips Medical System, Best, Netherlands)과 영상 융합을 시행하였다. 육안적종양체적(Gross Tumor Volume, GTV)과 인접한 주요 장기(Organ at risks, OARs)인 척수는 전산화단층촬영 영상과 자기공명 영상을 활용하여 설정하였다. 타겟 설정은 영상에서 육안으로 확인한 종양을 GTV로 설정하고, GTV

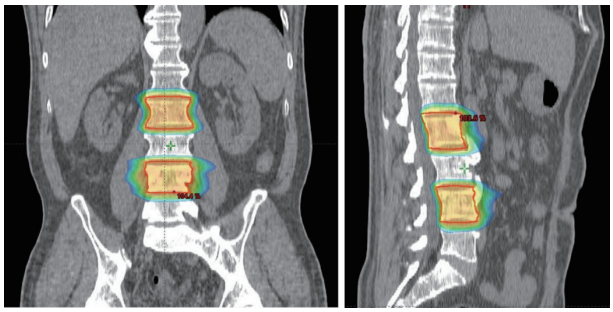


Fig. 1. Coronal and Sagittal image of Single isocenter plan for double vertebral segment SBRT

의 위치 및 범위에 따라 임상표적체적(Clinical Target Volume, CTV)을 설정하였다. 치료계획용적(Planning Target Volume, PTV)는 CTV에 0 ㎜ 에서 3 ㎜ 이내의 마진을 확장하여 정의하였다. 관상면(Coronal plane)을 기준으로 두정부(Cranial) 방향에 위치한 PTV를 PTV1, 꼬리(Caudal) 방향에 위치한 PTV를 PTV 2로 정의하였다. 척수는 PTV의 위 및 아래 방향으로 5 ㎜ 에서 6 ㎜ 까지로 체적을 정의 하고, 척수의 PRV(Planning organ at Risk Volume)는 척수 체적에 2 ㎜ 를 확장하여 생성하였으며 PTV에서 PRV를 제외한 체적을 치료 계획에 사용하였다.

2. 치료 시스템

본 연구에는 Dual-layer MLC를 장착한 Halcyon®(Varian Medical system, Palo Alto, CA)과 High Definition MLC를 장착한 Truebeam®(Varian Medical system, Palo Alto, CA)이 사용되었다. Truebeam의 High Definition MLC의 경우 단일 층으로 구성되어 있으며, MLC의 각 엽은 69 ㎜ 의 두께 및 2.5 ㎜ 의 넓이를 보인다. 본 연구에 사용된 에너지 6MV의 무편평화여과기선질(Flattening Filter Free, FFF)에서 1.36%의 누설 선량을 나타낸다. 또한 MLC 엽의 속도는 2.5 ㎝/s로 작동되며, Gantry의 속도는 1 rpm(revolution per minute)이다.

Halcyon의 Dual-layer MLC의 경우 이중으로 쌓여진 구조를 이루고 있으며, 각 층의 MLC가 빔 모양 형성에 독립적으로 사용되어 원래 엽의 넓이인 10 ㎜ 이 벌충되어 5 ㎜ 의 넓이를 가질 수 있다. MLC의 각 엽은 77 ㎜ 의 두께로 에너지 6MV-FFF에서 0.01%의 누설 선량을 나타낸다. 또한 MLC 엽의 속도는 5.0 ㎝/s로 작동되어 Truebeam보다 2배 빠르며, Gantry의 속도는 4 rpm으로 Truebeam보다 4배 빠르게 작동이 가능하다.

3. 치료 계획

방사선 치료 계획은 Eclipse Treatment Planning Systems(Version 16.1.0, Varian Palo Alto USA, CA)을 이용하여 시행되었으며, 선량 계산을 위한 알고리즘은 Acuros External Beam(Version 16.1.0)을 적용하였다. 각 장비의 치료 계획은 PTV에 20 Gy 의 처방선량으로 1회 진행하였으며, 회전반경으로 360 °를 가지는 동일 평면상의 4개의 Arc를 이용하였다. 2Arc는 콜리메이터 각도를 0 °로 적용하고, 나머지 2Arc는 누설 선량을 최소화하기 위해 콜리메이터 각도를 각각 20 °와 340 °로 적용하였다. Truebeam과 Halcyon을 이용한 모든 치료 계획은 최적화 과정에서 발생할 수 있는 선량 차이를 최소화하기 위해 동일한 최적화 과정 및 가중치를 사용하여 같은 조건 하에 단일치료중심의 용적변조회전치료(Volumetric Modulated Arc Therapy, VMAT) 기법으로 계획을 수립하고, PTV의 처방 선량에 대한 볼륨을 80%로 정규화하였다. 인접 장기인 척수는 최대점체적선량(maximum point volume dose)이 14 Gy가 넘지 않도록 하고, 10 Gy 이상을 받는 용적이 10% 이상이 되지 않도록 치료 계획을 수립하였다. 추가적으로 Truebeam의 치료계획은 누설 선량을 최소화하기 위해 Jaw Tracking 기법을 사용하였다. 각 장비의 MLC 특성을 유일한 변수로 보기 위해 Eclipse TPS에서 제공하는 최적화 과정 외에 임의로 조건 값을 변화시키지 않고 치료 계획하였다. Halcyon 치료 계획의 경우 에너지 6MV-FFF를 장비의 최대선량률로 조사하였으며, Truebeam 치료 계획은 동일한 에너지를 이용하여 장비의 최대선량률로 조사하였다.

4. 선량 검증

각 치료 계획은 Halcyon과 Truebeam에 장착된 전자포탈영상장치(Electronic portal imaging device, EPID) 및 SunCHECKTM 3.2.0을 이용하여 Portal Dosimetry QA 측정을 진행하였다. 2%/2 ㎜ 의 감마 평가 기준과 10%의 최소 역치를 사용하여 선량 검증을 시행하였으며, 이를 통해 치료 계획을 실제 적용하였을 때 본원의 허용 기준을 충족하는 신뢰도를 보이는지 확인하였다.

5. 평가 지표

PTV에 대한 선량 분포 평가를 위해 The Radiation Therapy Oncology Group(RTOG)에 정의된 방사선 치료 계획의 합치를 평가하는 지표인 Conformity Index(CI) [식1]와 타겟 내 균질성을 평가하는 지표인 Homogeneity Index(HI) [식2]를 확인하였다. 또한 체부정위방사선치료의 경우 가파른 선량 기울기가 요구되기 때문에 선량 기울기를 평가하는 지표인 Gradient Index(GI)

[식3]를 구하였다.

$$CI = \frac{PIV}{TV} \quad \text{[식1]}$$

(PIV, prescription isodose volume; TV, target volume)

$$HI = \frac{Imax}{RI} \quad \text{[식2]}$$

(I_{max}, maximum isodose in the target; RI, reference isodose)

$$GI = \frac{PIV_{50\%PIV}}{RI} \quad \text{[식3]}$$

($PIV_{50\%PIV}$, 50% prescription isodose volume; PIV, prescription isodose volume)

인접 장기의 선량 평가를 위해 척수에 조사되는 최대선량(D_{max})과 평균선량(D_{mean})을 비교하였다. 또한 척수에 10 Gy가 조사되는 용적(V_{10})을 비교하였다. 저선량 영역을 평가하기 위해 처방 선량의 50%가 들어가는 용적과 처방 선량의 25%가 들어가는 용적을 구하였다. 전달 효율을 평가하기 위해 각 치료 계획의 전체 MU(Monitor Unit)값을 확인하였다. 또한 각 장비의 최대선량률로 조사하였을 때의 치료 시간을 파악하기 위해 DQA 과정 중 Beam On Time(BOT, sec)를 측정하였다.

6. 통계 평가

통계 평가는 SPSS 27 Data Analysis software(IBM, New York, NY USA)를 활용하였으며, 표본수가 12명이므로 각 평가 지표의 정규성을 평가하기 위해 Kolomogorov-Smirnov 및 Shapiro-Wilk 정규성 검정을 시행하였다. 하나의 정규성 검정만 만족하여도 정규분포를 따른다고 가정하였다. 장비 간 차이를 분석하기 위해 정규성 검정을 만족한 경우 대응 표본 T 검정(Paired samples t-test)를 시행하였으며, 두개의 정규성 검정을 만족하지 못한 평가 지표의 경우 비모수적인 방법인 Wilcoxon rank 검정을 진행하였다. 또한 PTV 사이에 존재하는 척추뼈의 개수, 총 PTV 길이 및 총 PTV 용적에 따른 GI에 대한 영향을 확인 하기 위해 일원 배치 반복 측정 분산분석(One-way RM ANOVA)을 시행하였다. 유의 수준0.05 미만을 유의한 차이가 있는 것으로 설정하였다.

결 과

1. 환자 별 특징

환자 별 특징과 PTV에 관한 정보는 Table 1. 과 같으며, 평균 전체 PTV의 용적는 110.65 ± 59.98 cc, 평균 전체 PTV의 길이는 12.01 ± 3.08 ㎝이다.

Table 1. Clinical information of all patients for spine stereotactic body radiation therapy

Patient No.	Tumor Location	PTV Volume (cc)	PTV Length (cm)	# of Vertebral Body (Between PTV1 and PTV2)	CTV to PTV margin (mm)
1	L1/L4	137.62	14.08	2	0
2	T12/L2	87.26	10.94	1	0
3	T10/L1	88.81	13.75	2	0
4	L1/L3	158.01	10.54	1	2
5	T11/L2	57.45	12.49	2	0
6	T4/T6	33.14	8.76	1	3
7	T6/T8	21.07	6.07	1	0
8	L2/L5	232.44	13.23	2	0
9	T12/L2	99.34	10.07	1	0
10	L2/S1	196.32	18.11	3	0
11	L2/L4	106.22	10.51	1	0
12	T8/T11	110.1	15.58	2	0

Table 2. Average parameters and Significance probability of PTV and Low dose spill

	Parameters	Truebeam VMAT	Halcyon VMAT	*P*–value
PTV	Conformity Index (C.I)	0.984±0.06	1.004±0.83	0.126
	Homogeneity Index (H.I)	1.092±0.21	1.102±0.01	0.97
	Gradient Index (G.I)	4.911±0.51	4.641±0.41	〈0.001
Low dose spill	50% low dose area (cc)	506.91±243.86	487.56±236.23	〈0.001
	25% low dose area (cc)	1952.21±882.54	1859.45±857.25	〈0.001

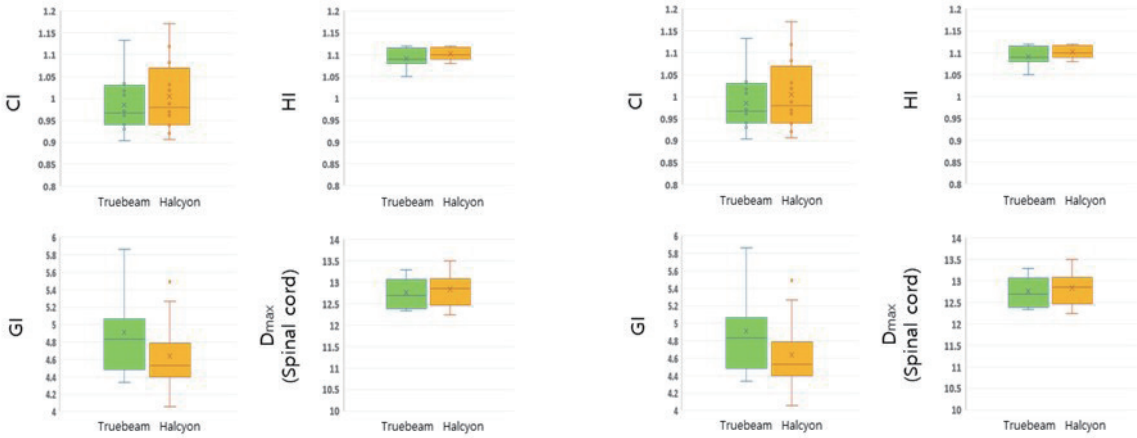


Fig. 2. Box plot of all parameters

2. PTV 선량 평가 및 저선량 영역 평가

PTV 선량 평가를 위한 CI, HI 및 GI와 저선량 영역 평가를 위한 50% 등가 선량 용적과 25% 등가 선량 용적을 비교하였다(Table 2, Fig. 2). CI의 평균±표준편차는 Truebeam이 0.984 ± 0.063, Halcyon이 1.004 ± 0.828 (*P*=0.126), HI는 Truebeam이 1.092 ± 0.212, Halcyon이 1.103 ± 0.014 (*P*=0.97)이며, GI는 Truebeam이 4.911 ±0.510, Halcyon이 4.641±0.407 (−5.50%, *P*〈0.001)으로 산출되었다. 저선량 영역 평가에서의 50% 등가 선량 용적은 Truebeam이 506.91 ± 243.86 cc, Halcyon이 487.56 ± 236.23 cc (−3.82%, *P*〈0.001)이며, 25% 등가 선량 용적은 Truebeam이 1952.21 ± 882.54 cc, Halcyon이 1859.45 ± 857.25 cc (−4.75%, *P*〈0.001)로 저선량 영역 평가에서 모두 Halcyon이 감소된 값을 보였다. GI에 대해 PTV1과 PTV2 사이에 존재하는 척추뼈의 개수, 총 PTV 길이 및 총 PTV의 용적이 미치는 영향에 대한 유의 확률은 각각 0.505, 0.196, 0.236으로 확인하였으며, GI에 대하여 각 지표의 상호작용이 유의하지 않다(Table 3).

Table 3. Significance probability of Correlation between GI and Parameters

Parameters	*P*–value
# of Vertebral body (Between PTV1 and PTV2)	0.505
Total PTV Length	0.196
Total PTV Volume	0.236

3. 결정 장기 선량 평가

결정 장기인 척수의 선량 평가를 위해 D_{max}, D_{mean}, V_{14}, V_{10} 비교하였다(Table 4, Fig. 2). D_{max}의 평균±표준편차는 Truebeam이 12.769±0.358 Gy, Halcyon이 12.847±0.383 Gy (0.61%, *P*=0.11)으로 Truebeam이 Halcyon보다 낮았으며, D_{mean}은 Truebeam이 7.096±0.354 Gy, Halcyon이 6.902±0.425 Gy (−2.73%, *P*=0.45) 으로 Halcyon에서 더 낮게 나왔다. V_{14}은 모든 치료 계획에서 0.03cc 미만으로 두 장비 모두 선량 제한을 만족하였다. V_{10}은 Truebeam이 6.512±1.212 cc, Halcyon이 6.365±2.05 cc (−2.26%, *P*=0.79)으로 두 장비의 치료 계획 모두 선량 체

적이 10%미만으로 만족하였으나, Halcyon이 더 낮았다.

4. 전달 효율 평가

두 장비의 치료 계획을 임상적으로 적용할 때의 전달 효율을 평가하기 위해 전체 MU와 DQA 과정 중 BOT을 비교하였다(Table 5, Fig. 2). 모든 치료 계획은 선량 검증을 통해 Gamma index가 95%이상으로 본원의 허용 기준을 만족하는 신뢰도를 나타냄을 확인하였다. 전체 MU의 평균 값은 Truebeam이 8201, Halcyon이 8911 (8.65%, $P<0.001$)으로 Halcyon이 더 높았다. BOT은 각 장비의 최대선량률로 조사하였을 경우 Truebeam이 383.16 sec, Halcyon이 648.33 sec (69.23%, $P<0.001$)으로 Halcyon에서 더 긴 BOT가 소요되었다.

Table 4. Average parameters and Significance probability of spinal cord

Spinal cord Parameters	Truebeam VMAT	Halcyon VMAT	*P*-value
D_{max} (Gy)	12.769±0.358	12.847±0.383	0.11
D_{mean} (Gy)	7.096±0.354	6.902±0.425	0.45
V_{14} (cc)	0	0	–
V_{10} (cc)	6.512±1.212	6.365±2.05	0.79

Table 5. Average parameters of MU and Beam on time

Delivery efficiency Parameter	Truebeam VMAT	Halcyon VMAT	*P*-value
Total monitor units (MU)	8201	8911	<0.001
Beam On Time (sec)	383.16	648.33	<0.001

고찰 및 결론

Halcyon은 기존 C-Arm LINAC과 다른 MLC의 구조적인 특징 및 작업 흐름을 효율적으로 가능하게 한 장비 시스템 등을 가지고 있다. 이 때문에 다양한 부위의 체부정위방사선치료 계획에 대해 C-arm LINAC과 비교 평가가 이루어지고 있으며, 이에 따른 치료 유용성이 보고되고 있다. 본 연구는 이중 표적 척추 전이암의 체부정위방사선치료 시 Halcyon의 치료 계획과 High Definition MLC를 장착한 Truebeam의 치료 계획을 비교함으로써 Halcyon의 유용성을 평가하고자 하였다.

본문에는 다루지 않았지만, 특정 환자에서만 Halcyon의 척수 D_{mean}과 척수 V_{10}이 유사하거나 높은 것을 확인하였고, PTV와 척수의 근접 정도에 따른 척수 선량에 대해 추가적인 고찰을 진행하였다. PTV와 척수 PRV 간의 공통용적 (Overlap volume)을 기준으로 근접 정도를 확인하였다(Fig. 3). 그 결과, 4번과 8번 환자에게서만 1 cc 이상의 공통용적을 보였으며 그 외의 나머지 환자들은 0.4 cc 이하의 값을 보였다(Table 6). 4번과 8번 환자를 제외한 환자들을 대상으로 척수 선량 평가를 진행하였다. 그 결과, D_{mean}은 Truebeam이 7.049±0.392 Gy, Halcyon 6.802±0.419 Gy (−3.504%, P=0.067) 으로 Halcyon이 유의하게 낮은 값을 보였으며, V_{10}은 Truebeam이 6.281±1.248 cc, Halcyon이 5.766±1.683 cc으로 Halcyon (−8.199%, P=0.002) 이 유의하게 낮은 값을 보였다(Table 7).

결과적으로 Halcyon 치료 계획과 Truebeam 치료 계획을 비교하였을 때, 표적 내 선량 분포에 있어서는 큰 차이를 보이지 않아 대등한 종양억제확률을 보일 것으로 사료된다. 다만 GI와 저선량 영역에 있어서는 개선 효과가 나타났으며, 이를 통해 표적 주변으로 가파른 선량 기울기가 형성되어 인접 장기의 적분 선량이 감소하였다. 또한 척추 체부정위방사선치료의 경우 방사성 척수염과 같은 방사성 장애를 억제하기 위해서는 주변 인접 조직인 중요 신경 계통 내에 선량 노출을 줄이는 것이 중요하다. 본 연구의 모든 표본에 대해서는 Halcyon이 척수 내 선량 분포에 있어서는 큰 이점 없이 유사한 척수 보호 효과를 보였으나, PTV와 척수의 근접 정도에 따라 공통용적이 1 cc가 초과하는 4번과 8번 환자를 제외한 표본에 대해서는 유의미한 선량 감소로 Halcyon에서 향상된 척수 보호 효과를 확인할 수 있었다(Fig. 4). 결과적으로 본 연구에서는 PTV와 척수 사이의 거리(PTV-Cord)가 적어도 2 mm 이상 유지되는 환자에 대해서 Halcyon이 안정적으로 향상된 치료 계획을 질을 가졌으며, 추후 논의를 통해 척추 체부정위방사선치료 시 장비 별 PTV-Cord 거리에 따른 척수 선량의 상관 관계가 평가되어야 할 것이다.

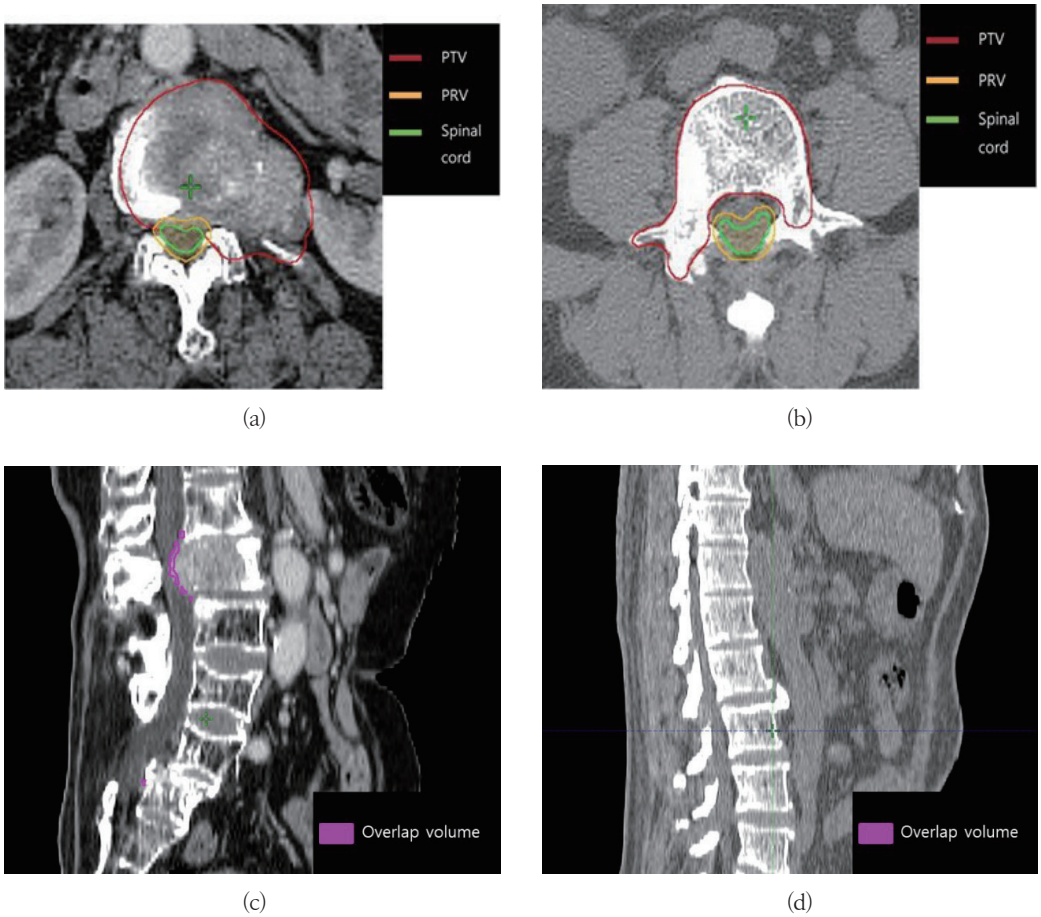
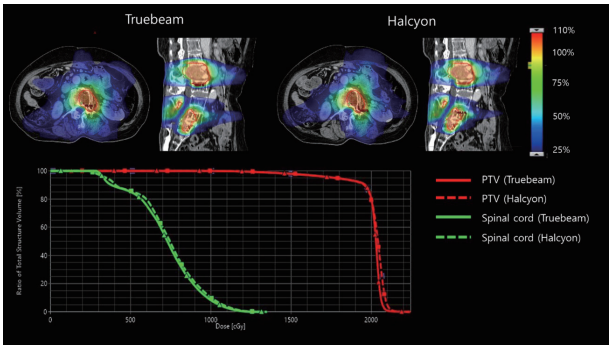


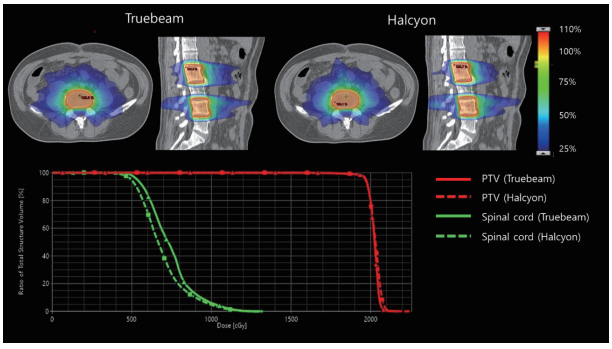
Fig. 3. a) PTV and PRV contour in # 8 patient (Overlap volume 〉 1cc)
b) PTV and PRV contour in # 11 patient (Overlap volume 〈 1cc)
c) Overlap volume in # 8 patient (Overlap volume 〉 1cc)
d) Overlap volume in # 11 patient (Overlap volume 〈 1cc)

Table 6. Overlap volume and parameter of spinal cord of all patients

Patient No.	Overlap volme between PTV and PRV (cc)	D_{mean} (Gy)		V_{10} (cc)	
		Truebeam	Halcyon	Truebeam	Halcyon
1	0.3	6.39	6.28	3.96	3.96
2	0.4	6.67	6.41	6.93	6.29
3	0.1	7.43	7.21	6.99	5.43
4	1	7.45	7.45	7.14	8.63
5	0.2	6.90	6.68	7.54	7.62
6	0	6.70	6.54	6.26	5.56
7	0	7.42	7.17	5.36	4.67
8	1.8	7.18	7.36	8.2	10.09
9	0	6.88	6.55	5.32	4.53
10	0.2	7.53	7.29	6.14	5.29
11	0	7.39	6.89	5.97	4.75
12	0.3	7.14	7.22	8.34	9.56



(a)



(b)

Fig. 4. a) Comparison of Dose distribution in CT of # 8 patients from Truebeam and Halcyon (Overlap volume is 1.8ccin # 8 patients)
b) Comparison of Dose distribution in CT of # 11 patients from Truebeam and Halcyon (Overlap volume is 0ccin # 11 patients)

전달 효율 평가에서는 각 장비의 최대선량률로 조사를 하였을 때, Truebeam이 현저히 단축된 BOT을 보였다. 하지만 실제 임상에선 척추 체부정위방사선치료를 진행 할 시 척수 외의 인접한 다양한 손상 위험 장기로 인해 Truebeam의 최대선량률을 모든 제어 포인트에 적용하지 못한다. 그렇기에 추가적으로 동일한 선량률 (800MU/min)로 전달 효율 평가를 진행하였다. 동일한 선량률로 조사 시에는 Truebeam이 659.66 sec으로 Halcyon (−1.74%, P〈0.001)이 더 단축된 BOT을 보였다. 또한 Halcyon의 경우 갠트리 회전 속도가 Truebeam에 비해 현저히 빠르고, 효율적인 작업 흐름을 가질 수 있기 때문에 전체 치료 시간에서는 이점을 보일 것으로 기대된다.

본 연구의 한계점은 병변의 위치가 흉추부터 요추로 상이하여 척수 외 인접 장기(Lung, Kidney, Esophagus 등)가 고려되지 않은 것이다. 이는 환자마다 다른 인접 장기가 설정되면 일부 치료 계획 과정에서 추가적인 최적화 과정을 필요로 하게 되어, 계획이 동일한 조건 하에 생성되지 않아 객관성을 가지기 어렵기 때문이다. 추후에 본 연구에서 발전하여 척추의 같은 레벨에 병변이 존재하는 환자들을 대상으로 척수 외 인접 장기의 선량 평가와 전달 효율 평가가 추가적으로 시행된다면 이를 통해 척추 체부정위방사선치료에 대한 Halcyon의 정확한 임상 적용을 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Samuel R, Hannah Yoon, Alexander S et al. Contemporary treatment with radiosurgery for spine metastasis and spinal cord compression in 2015. Radiation oncology journal, 2015, 33.1: 1

2. Hiroaki O, Kei I, Takuya S et al. Re-irradiation for painful bone metastases using stereotactic body radiotherapy. Acta Oncologica, 2018, 57.12: 1700-1704

3. Sten M, Arjun S, Motohiro H et al. Reirradiation spine stereotactic body radiation therapy for spinal metastases: systematic review: International Stereotactic Radiosurgery Society practice guidelines. Journal of Neurosurgery: Spine, 2017, 27.4: 428-435

Table 7. Average parameter of spinal cord excepting particular patients

Spinal cord Parameter	Truebeam VMAT	Halcyon VMAT	P-value
D_{max} (Gy)	12.727±0.348	12.781±0.356	0.316
D_{mean} (Gy)	7.049±0.392	6.802±0.419	0.067
V_{14} (cc)	0	0	–
V_{10} (cc)	6.2810±1.248	5.7660±1.683	0.002

4. Antonio P, Luciana C, Fabiana B et al. Cumulative dose, toxicity, and outcomes of spinal metastases re-irradiation. Strahlentherapie und Onkologie, 2021, 197.5: 369-384

5. Joe HC, Franzcr AS, Renee K et al. Positional accuracy of treating multiple versus single vertebral metastases with stereotactic body radiotherapy. Technology in Cancer Research & Treatment, 2017, 16.2: 231-237

6. Orit G, Annette EK, Rojano K et al. Influence of rotations on dose distributions in spinal stereotactic body radiotherapy (SBRT). International Journal of Radiation Oncology* Biology* Physics, 2009, 73.5: 1596-1601

7. Peter CG, Ehud M, yoshiya Y. Radiotherapy and radiosurgery for metastatic spine disease: what are the options, indications, and outcomes?. Spine, 2009, 34.22S: S78-S92

8. Arjun S, David AL, Eric LC. Stereotactic body radiosurgery for spinal metastases: a critical review. International journal of radiation oncology, biology, physics, 2008, 71.3: 652-665

9. Stanley HB, Kamil MY, David F et al. Stereotactic body radiation therapy: the report of AAPM Task Group 101. Medical physics, 2010, 37.8: 4078-4101

10. Damodar P, Tanner T, Joseph S et al. Prostate SBRT using O Ring Halcyon LINAC—Plan quality, delivery efficiency, and accuracy. Journal of Applied Clinical Medical Physics, 2021, 22.1: 68-75

11. Taoran L, Peyton I, Haisong L et al. Dosimetric performance and planning/delivery efficiency of a dual-layer stacked and staggered MLC on treating multiple small targets: A planning study based on single-isocenter multi-target stereotactic radiosurgery (SRS) to brain metastases. Frontiers in Oncology, 2019, 7

12. Fang L, Jeonghoon P, Ron L et al. Is Halcyon feasible for single thoracic or lumbar vertebral segment SBRT?. Journal of Applied Clinical Medical Physics, 2022, 23.1: e13458

Feasibility study of using Halcyon LINAC for Double-target spine stereotactic body radiation therapy

Department of Radiation Oncology, Samsung Medical Center

Jeong Hee Ju, An Ye Chan, Park Byung Suk, Park Myung Hwan, Park Yong Chul

Objectives: The purpose is to evaluate dosimetric performance and delivery efficiency of VMAT with Halcyon LINAC for double target spine SBRT

Materials and Methods: 12 patients with spine oligometastases were retrospectively studied. Single-isocenter spine SBRT plans was established using Halcyon® with Dual Layer MLC and Truebeam® with High Definition MLC. All patients' plans were created in Eclipse TPS through the identical conditions and optimization. C.I, H.I, G.I (Gradient Index), maximal and volumetric doses to spinal cord and low dose area were evaluated for comparison of both plans. Also, total MU and BOT(Beam On Time) were evaluated.

Results: Halcyon plans was no Statistical differences in C.I and H.I. However, the average of G.I was 4.64 for Halcyon, which decreased to 5.5% compared to Truebeam (P←0.001). Halcyon plans demonstrated statistically significant reduced G.I. The average of 50% and 25% isodose volume was 487.56 cc (-3.82%, P←0.001), 1859.45 cc (-4.75%, P←0.001) in Halcyon, respectively. Significantly reduced low dose spill were observed in Halcyon plans. In the evaluation of the spinal cord, the average of Dmean and V10 of Halcyon plans in the sample group with an overlap volume of less than 1 cc was 6.802 Gy (-3.504%, P=0.067), 5.766±1.683 cc (-8.199%, P=0.002), respectively. Halcyon plans demonstrated statistically significant reduced D_{mean} and V10. For delivery efficiency, MU and BOT(maximum dose rate for each machine), on average, increased in Halcyon plans. However, the average of BOT(800MU/min for each machine) was 648.33 sec for Halcyon (-1.74%, P←0.001).

Conclusion: Halcyon plan for double-target spine SBRT demonstrated advantages in the low dose area with a steep dose gradient, while having dosimetrically equivalent target dose distribution and spinal cord protective effect. As a result, Halcyon LINAC produced a dosimetrically improved plan for double-target spine SBRT.

▸ **Keywords:** Spine SBRT, SIMT-VMAT, Halcyon, Dual layer MLC, Truebeam, High definition ML