

뇌암 및 두경부암 체적변조방사선치료시 Jaw-Tracking 기법의 선량학적 유용성 평가

인하대학교병원 방사선종양학과

김희성·문재희·김군주·서정민·이정진·최재훈·김성기·장인기

목 적 : 체적변조회전방사선치료(VMAT)는 종양의 모양에 맞게 균일하면서도 정밀한 방사선 조사를 하면서 동시에 정상조직의 방사선 손상위험을 줄이는 장점이 있어 뇌암, 두경부암 및 전립선암 등의 종양과 정상장기가 가까운 암의 치료에 사용되고 있다. 본 연구의 목적은 뇌암 및 두경부암 환자의 VMAT 방사선 치료 시 Jaw-Tracking technique(JTT)의 선량학적 유용성을 평가하고자 한다.

대상 및 방법 : 본원에서 VMAT 치료기법으로 방사선치료를 받은 뇌암 및 두경부암 환자 8명을 선택하였다. 환자의 종양 및 정상 장기의 윤곽그리기(contouring) 정보를 Velocity(Varian, USA)의 deformable registration을 이용하여 Rando phantom에 fusion하였다. Varian Eclipse(ver 15.5, Varian, USA)를 사용하여 Jaw-Tracking 사용 유무를 제외하고 환자 치료 시 사용한 beam parameter와 동일하게 치료계획을 진행하였다. 평가 지표로써 target과 OAR의 최대선량, 평균선량을 사용하여 비교하였고 치료계획 검증을 위해 Portal dosimetry를 시행하였다.

결 과 : JTT를 사용했을 경우는 Static-Jaw technique(SJT)을 사용하였을 경우보다 OAR의 상대 선량이 각각 평균선량은 5.24 %, 최대선량은 7.05 % 감소한 것으로 나타났다. 다양한 OAR에서 평균선량과 최대선량의 감소의 범위는 각각 0.01~3.16 Gy, 0.12~6.27 Gy로 나타났다. Target의 경우는 JTT의 경우가 SJT보다 GTV, CTV, PTV의 최대선량이 각각 0.17 %, 0.43 %, 0.37 % 감소하였으며, 평균선량은 0.24 %, 0.47 %, 0.47 % 감소하였다. 감마분석은 3%/3 mm, 통과율 95 % 이상을 통과 기준으로 설정하였고 JTT, SJT 통과율은 각각 98±1.73 %, 97±1.83 %이었다. 실험에 적용된 모든 OAR의 선량을 비교해 보았을 때, JTT를 사용하였을 경우가 SJT보다 MLC 외에 추가적인 jaw 차폐로 인하여 선량이 유의미하게 줄어들었다는 것을 알 수 있었다.

결 론 : VMAT 치료계획을 이용한 방사선 치료시 뇌암, 두경부암과 같이 종양과 정상 장기가 인접한 경우와 MLC를 통한 누설선량을 증가시킬 수 있는 넓은 조사야 및 높은 에너지의 사용을 필요로 하는 방사선 치료 시 JTT를 적용함으로써 종양주변 정상조직의 피폭선량을 낮추고 이로 인해 PTV의 target coverage를 높일 수 있을 것이라 판단된다.

▶ **핵심용어** : 체적변조회전방사선치료(VMAT), Jaw-Tracking 기법, 치료계획

서 론

다양한 조사면을 단시간에 쉽고 편리하게 만들 수 있는 다엽 콜리메이터(Multileaf collimator, MLC)는 3D-

CRT(3-Dimensional conformal radiation therapy)⁽¹⁾, IMRT(Intensity-Modulated Radiation Therapy)⁽²⁾, VMAT(Volumetric Modulated Arc Therapy) 등 방사선 치료계획에 쓰이며 종양에는 고 선량을 집중 조사하여 종양 제어 확률(Tumor Control Probability)을 높이고, 정상조직에는 최소한의 선량을 조사하여 정상조직 합병증 확률(Normal Tissue Complication Probability)

책임저자: 김희성, 인하대학교병원
인천시 중구 인항로 27
Tel: 032)890-3087
E-mail: khstar89@naver.com

을 낮추어 방사선 치료효율(Therapeutic Ratio)을 높일 수 있는 장점이 있다. 특히 뇌암, 두경부암, 전립선암과 같이 임계장기와 종양의 거리가 매우 가까운 부위 치료 시에 더 유용하게 쓰일 수 있다. 하지만 방사선의 확산(beam divergence)과 잘 부합되는 조사면을 만들 수 없으므로, 치료면의 크기와 모양에 따라 정도의 차이는 있지만 조사면 경계에서 반음영의 크기가 증가하고 누설선량으로 인해서 100 % 차폐가 불가능하다. 누설선량을 증가시키는 요인은 크게 3가지가 있다.³⁾ 첫 번째 요인은 MLC로만 이루어진 조사야 크기가 증가하는 경우, 두 번째 요인은 방사선 빔 에너지가 증가할 경우, 세 번째 요인은 MLC의 모양이나 특성으로 인한 의도치 않은 누설선량이다. LoSasso⁴⁾는 MLC를 통한 의도치 않은 누설선량은 jaw 조사면 크기와 빔의 에너지의 증가에 따라 비례하여 증가한다고 하였다. Cadman⁵⁾은 연구에서 jaw와 MLC에 의해 차폐가 될 경우 원래 beam의 강도와 비교해서 0.1 %보다 낮은 누설선량만을 허용하지만 MLC만으로 차폐가 이루어지는 경우는 jaw만을 이용해 차폐하는 경우 또는 jaw와 MLC를 동시에 이용하여 차폐할 경우와 비교하여 의도치 않은 전달로 인하여 선량률이 0.9~4.4 %(6 MV) 또는 1.14~7.0 %(15 MV)까지 증가한다고 보고하였다. 이러한 결과들은 MLC를 통한 누설선량을 줄이기 위해서는 빔이 조사될 때 MLC만으로 조사야 차폐가 이루어지는 영역을 최소한으로 제한하는 것이 필요하다는 것을 알 수 있다. 기존에 많이 사용되어진 선형가속기를 이용한 VMAT 치료 시 jaw의 조사야는 회전치료 중 MLC가 열리는 가장 큰 범위를 기준으로 고정되어 있었다. 이러한 단점을 보완하기 위해서 최신의 선형가속기 Vitalbeam(Varian Medical Systems, Palo Alto, CA)은 Jaw Tracking Technique(JTT)을 지원한다. 이 기법은 VMAT 치료를 위해 실시간으로 움직이는 MLC의 영역을 jaw가 계속해서 따라가며 MLC가 열린 끝부분까지 차폐가 가능하도록 해주는 기능이다. 이에 본 연구의 목적은 종양과 정상장기의 위치가 가까운 뇌암 및 두경부암 치료 환자를 대상으로 JTT의 사용 유무에 따른 PTV(Planning target volume)와 OAR(Organ at risk)의 선량을 비교하고 그 유용성을 평가하고자 한다.

대상 및 방법

1. 환자 선택 및 변형영상정합(Patients selection and deformable registration)

본원의 VitalBeam을 이용하여 VMAT 치료기법으로 방사선 치료를 받은 뇌암 및 두경부암 환자 각각 4명씩 총 8명을 선택하였다(Fig. 1). Rando Phantom을 CT scanner(Light peed 16 channel RT, GE, USA)를 이용하여 촬영하였고, 환자의 윤곽그리기(contouring) 정보 및 해부학적 정보를 Velocity(Varian Medical Systems, Palo Alto, CA)의 변형영상정합을 통해 Rando Phantom CT image에 구현하였다(Fig. 2).



Fig. 1. Vitalbeam(Varian Medical Systems, Palo Alto, CA)

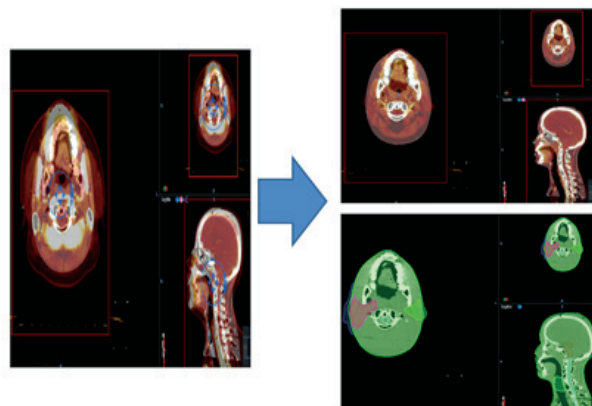


Fig. 2. Velocity(Varian Medical Systems,USA)를 통한 변형영상정합(Deformable registration)

2. 치료계획(Treatment planning)

Phantom에 맞도록 변형된 윤곽그리기 정보 및 해부학적 정보를 바탕으로 실제 치료에 적용했던 치료계획과 동일한 빔 parameter를 적용하여 치료계획을 Varian Eclipse(ver 15.5, varian, USA)를 이용하여 진행하였다. 치료계획은 기계적 제한사항을 충족하면서 동시에 각 환자의 다양한 target 크기와 모양을 충분히 포함하며 정상장기를 보호하도록 하였다. JTT의 사용유무를 제외한 모든 치료 parameter가 동일한 치료계획을 한 환자 당 두개씩 만들었다(Fig. 3, 4).

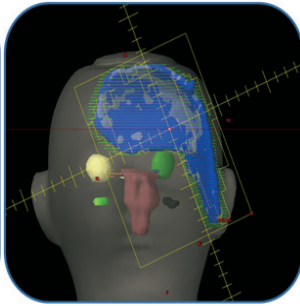
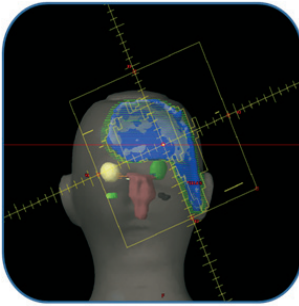


Fig. 3. Static Jaw Technique (SJT) BEV Fig. 4. Jaw Tracking Technique (JTT) BEV

3. 치료계획 검증

치료계획의 검증을 위해 IMRT verification QA(Gamma test)를 실시하였다. QA는 VitalBeam의 전자영상유도장치(Electronic Portal Imaging Device, EPID)를 사용하여 portal dosimetry를 실시하였다. 3차원 감마분석에 의해 확인하였고 감마분석은 3 mm/3 %, pass rate 95 % 이상을 통과 기준으로 설정하였다.

4. 치료계획 비교

DVH(Dose-Volume Histogram) 데이터를 기반으로 JTT와 jaw tracking 기법을 사용하지 않은 경우(Static Jaw Technique, SJT)에 대하여 target 선량, OAR의 최대 선량(Maximum dose)과 평균선량(Mean dose)을 비교 분석하였다.

결 과

1. 치료계획 확인

Portal dosimetry를 기반으로 3차원 감마분석을 한 결과 임의로 수정된 jaw를 이용한 치료계획이 실행가능하다

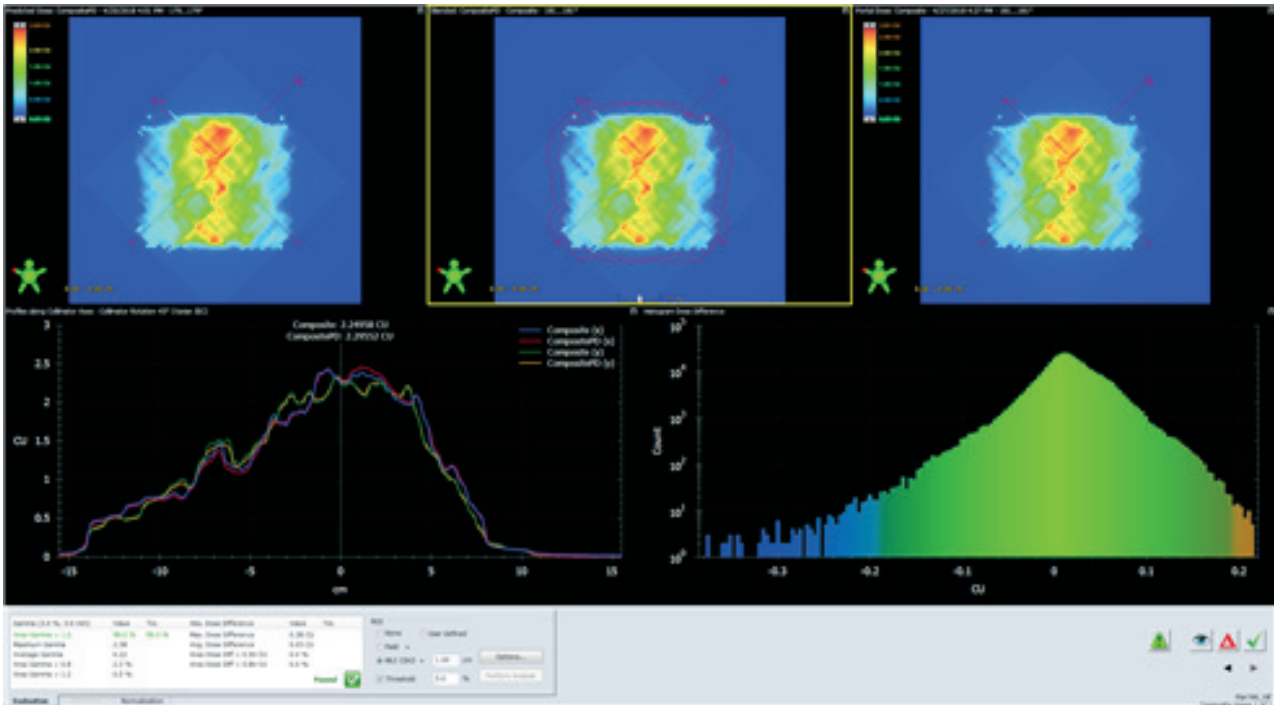


Fig. 5. Portal Dosimetry application(Varian Medical Systems, USA)

Table 1. Relative dose reduction ($\Delta = (\text{Fixed}-\text{Tracking})/\text{Tracking} \times 100\%$) to the OARs using jaw-tracking technique than the fixed jaw plans

OAR	ΔD_{max} (%)	ΔD_{mean} (%)
	Mean \pm SD	Mean \pm SD
Rt Lens	2,28 \pm 1,70	2,62 \pm 2,59
Lt lens	5,17 \pm 7,09	7,87 \pm 11,80
Rt optic n	0,84 \pm 0,98	1,21 \pm 1,11
Lt optic n	1,53 \pm 2,13	2,34 \pm 2,70
Rt cochlea	63,11 \pm 80,89	23,97 \pm 36,76
Lt cochlea	14,14 \pm 15,94	11,78 \pm 12,46
Rt eye	1,60 \pm 2,14	3,65 \pm 4,87
Lt eye	0,71 \pm 0,86	0,11 \pm 0,15
Brainstem	1,94 \pm 1,40	11,05 \pm 11,64
Body	1,55 \pm 2,5	4,82 \pm 3,97
Rt SMG	0,40 \pm 0,75	0,39 \pm 0,84
Lt SMG	0,22 \pm 0,42	0,79 \pm 1,60
Spinal cord	0,81 \pm 0,50	3,17 \pm 3,01
Larynx	3,06 \pm 4,32	9,48 \pm 15,52
Rt parotid	28,80 \pm 51,51	4,03 \pm 1,19
Lt parotid	2,26 \pm 3,29	2,68 \pm 0,48
Oral cavity	0,69 \pm 0,68	0,05 \pm 2,24
(NS) control	2,25 \pm 1,82	1,26 \pm 1,26
평균	7,05 \pm 15,56	5,24 \pm 6,56

는 것을 증명하였다. 실험에서 jaw tracking을 사용한 경우와 하지 않은 경우의 방사선의 투과율은 각각 98 \pm 1.73 %와 97 \pm 1.83 %이었다. 두 치료계획 모두 통과 기준을 만족하였다.

2. 선량학적 비교

jaw tracking을 사용하지 않았을 경우보다 사용하였을 경우의 선량 비교를 보다 직관적이고 객관적으로 평가할 수 있도록 상대선량감소를 다음 공식과 같이 (F-T) / T * 100 계산하였다(F: fixed jaw, T: tracking jaw)(Table 1).

추가적인 jaw 차폐로 인한 OAR의 상대선량감소의 크기는 최대선량은 0.22 %~63.11 %, 평균선량은 0.05 %~23.97 %으로 나타났으며, 모든 OAR의 평균적인 감소량은 최대선량이 7.05 \pm 15.56 %, 평균선량은 5.24 \pm 6.56 %로 나타났다. Table 2는 각 OAR의 절대선량을 나타낸다. 치료계획에 포함된 다양한 OAR에서 최대선량과 평균선량의 감소의 범위는 각각 0.12~6.27 Gy, 0.01~3.16 Gy이다.

Table 3는 target 선량 결과이다. OAR의 경우와 마찬가지로 jaw tracking 사용 시가 사용하지 않았을 경우보다 target의 선량이 감소하였다. 상대선량감소의 크기는

Table 2. Relative dose reduction and Absolute maximum and mean dose to critical structures in jaw-tracking and fixed jaw plans

OAR	Maximum Dose(Gy)		Mean Dose(Gy)	
	SJT	JTT	SJT	JTT
Rt Lens	6,29 \pm 1,28	6,14 \pm 1,15	4,96 \pm 0,33	4,83 \pm 0,21
Lt lens	6,23 \pm 1,87	5,96 \pm 1,98	5,22 \pm 1,37	4,92 \pm 1,59
Rt optic n	27,48 \pm 13,91	27,30 \pm 13,92	17,01 \pm 3,18	16,83 \pm 3,33
Lt optic n	24,88 \pm 13,14	24,65 \pm 13,26	15,79 \pm 5,55	15,53 \pm 5,79
Rt cochlea	17,92 \pm 16,85	11,64 \pm 10,76	8,77 \pm 6,62	7,78 \pm 6,92
Lt cochlea	11,46 \pm 11,43	10,74 \pm 11,42	7,43 \pm 7,81	6,89 \pm 7,81
Rt eye	21,79 \pm 0,94	21,44 \pm 0,48	10,21 \pm 0,49	9,85 \pm 0,01
Lt eye	18,12 \pm 1,73	18 \pm 1,88	8,90 \pm 0,02	8,89 \pm 0,07
Brainstem	31,55 \pm 14,46	30,98 \pm 14,25	7,61 \pm 1,80	6,96 \pm 2,00
Body	64,38 \pm 10,24	63,36 \pm 9,68	9,99 \pm 7,29	9,36 \pm 6,72
Rt SMG	54,31 \pm 12,57	54,10 \pm 12,57	32,28 \pm 19,26	32,12 \pm 19,03
Lt SMG	59,72 \pm 9,47	59,61 \pm 9,68	38,28 \pm 27,50	38,25 \pm 27,66
Spinal cord	41,51 \pm 0,46	41,17 \pm 0,36	24,51 \pm 9,20	23,70 \pm 8,85
Larynx	63,52 \pm 1,65	61,73 \pm 3,72	36,54 \pm 5,16	33,38 \pm 0,71
Rt parotid	43,61 \pm 28,29	35,55 \pm 26,20	14,04 \pm 9,08	13,43 \pm 8,68
Lt parotid	48,79 \pm 31,79	48,46 \pm 31,62	14,94 \pm 9,70	14,53 \pm 9,44
Oral cavity	60,56 \pm 15,29	60,14 \pm 15,10	36,16 \pm 23,09	35,82 \pm 22,52
(NS) control	38,36 \pm 32,64	37,90 \pm 32,26	23,85 \pm 20,71	23,40 \pm 20,26

Table 3. Absolute maximum and mean dose to target in jaw-tracking and fixed jaw plans

Target	Maximum Dose			Mean Dose		
	SJT(Gy)	JTT(Gy)	상대선량감소(%)	SJT(Gy)	JTT(Gy)	상대선량감소(%)
GTV	56.78	56.7	0.17	51.94	51.84	0.24
CTV	66.34	66.05	0.43	63.25	62.95	0.47
PTV	63.42	63.16	0.37	58.99	58.72	0.47

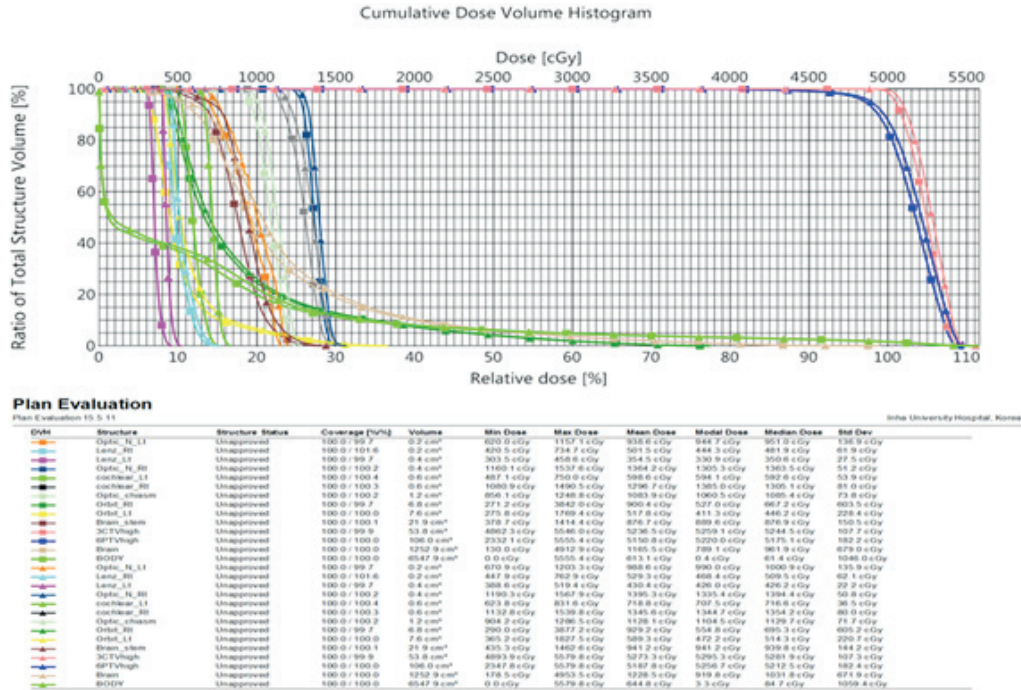


Fig. 6. Dose-Volume Histograms (DVHs) of brain cancer patient

최대선량과 평균선량이 각각 GTV가 0.17 %, 0.24 %이며, CTV는 0.43 %, 0.47 %, PTV는 0.37 %, 0.47 %이다. JTT와 SJT 두 치료계획 모두 처방선량의 95 % 이상을 만족시켰다.

jaw tracking 사용 유무를 제외한 MU(Monitor Unit), 치료시간을 포함한 기타 치료계획 인자의 변화는 없었으므로 전달효율은 두 치료계획이 동일했다.

결론 및 고찰

JTT와 SJT 두 치료계획은 Jaw의 고정유무를 제외한 모든 parameter들은 동일하였다. portal dosimetry를 통해 선형가속기를 통하여 치료계획이 어떠한 물리적 제한이나

위반 없이 실행 가능함을 확인하였다. JTT는 SJT와 비교하여 정상장기의 피폭선량을 줄여 뛰어난 보호 능력을 보였다. jaw를 유일한 변수로 제한함으로써 이 연구에서 관찰된 OAR의 선량감소가 추가적인 jaw 차폐로 인하여 OAR의 선량이 감소할 것이라는 실험 전 이론적인 예측과 일치하였다. jaw tracking을 사용했을 때 PTV의 선량이 증가하는 Schmidhalter의 이론적 계산⁽⁶⁾과는 반대로 target과 OAR 모두 선량이 감소되었는데 target 선량이 줄어든 이유는 jaw tracking으로 인하여 target 주위 OAR의 추가적인 jaw 차폐로 인하여 가까운 정상조직을 통해 target으로 조사되는 산란선의 감소가 원인으로 생각된다.⁽⁷⁾ 하지만 SJT와 비교했을 때 target의 상대선량 감소는 0.5 %로 미비하였으며 처방선량을 만족시켰다. OAR의 상대선량이 상대적으로 유의미하게 감소하였으므로 JTT의 사용이

SJT보다 이점이 더 크다고 사료된다. Zhongsu Feng의 연구에서도 jaw tracking으로 인하여 정상조직의 저 선량 영역을 줄일 수 있다고 보고하였다.⁽⁸⁾

뇌암, 두경부암, 전립선암과 같이 종양과 정상장기가 인접하고 복잡한 경우 또는 넓은 치료 조사야, 고 에너지의 방사선 사용으로 인하여 MLC를 통한 누설선량의 증가가 우려되는 경우는 jaw tracking 기법을 사용함으로써 종양 주변 정상조직의 피폭선량을 낮출 수 있다는 것을 이번 연구를 통해 확인하였다.⁽⁹⁾ 또한 주변 정상조직을 보호할 수 있는 만큼 PTV의 범위(target coverage)도 높일 수 있어 종양 제어 확률을 증가시켜 종양에 보다 고 선량을 조사하는 것이 가능하다. 따라서 jaw-tracking의 사용이 'ALARA' 원칙(As Low As Reasonably Achievable)을 준수하며 잠재적으로 환자의 방사선 치료 성적을 증가시킬 수 있을 것이라 사료된다.

참고문헌

1. Powlis WD, Smith AR, Cheng E, et al, Initiation of multileaf collimator conformal radiation therapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 1993;25(2):171-79
2. Boyer AL and Yu CX. Intensity-modulated radiation therapy with dynamic multileaf collimators. *Semin Radiat Oncol*, 1999;9(1):48-59
3. Mark R, Arnfield. A method for determining multileaf collimator transmission and scatter for dynamic intensity modulated radiotherapy. *American Association of Physicists in Medicine*, (2000)
4. LoSasso T, Chui CS, Ling CC. Physical and dosimetric aspects of a multileaf collimation system used in the dynamic mode for implementing intensity modulated radiotherapy. *Med Phys*, 1998;25(10):1919-27
5. Mohan R, Jayesh K, Joshi RC, Al-idrisi M, Narayana-murthy P, Majumdar SKD. Dosimetric evaluation of 120-leaf multileaf collimator in a Varian linear accelerator with 6-MV and 18-MV photon beams. *J Med Phys*, 2008;33(3):114-18
6. Schmidhalter D, Fix MK, Niederer P, Mini R, Manser P. Leaf transmission reduction using moving jaws for dynamic MLC IMRT. *Med Phys*, 2007;34(9):3674-87
7. Hao Wu, A comparative study of identical VMAT plans with and without jaw tracking technique. *JOURNAL OF APPLIED CLINICAL MEDICAL PHYSICS, VOLUME 17, NUMBER 5, 2016*
8. Zhongsu Feng, Dosimetric comparison between jaw tracking and static jaw techniques in intensity-modulated radiotherapy. *Radiation Oncology* (2015) 10:28 DOI 10.1186/s13014-015-0329-4
9. Jin-Young Kim, Catholic University of Korea, Seoul, Clinical Assessment of the Jaw-tracking Function in IMRT for a Brain Tumor

Evaluation of the Jaw-Tracking Technique for Volume-Modulated Radiation Therapy in Brain Cancer and Head and Neck Cancer

Department of Radiation Oncology, Inha University Hospital

**Kim Hee Sung, Moon Jae Hee, Kim Koon Joo, Seo Jung Min,
Lee Joung Jin, Choi Jae Hoon, Kim Sung Ki**

Purpose : Volumetric Modulated Arc Therapy (VMAT) has the advantage of uniformly and precisely irradiating the tumor to the shape of the tumor while reducing the risk of radiation damage to normal tissues, such as brain cancer, head and neck cancer and prostate cancer. It is being used for treatment. The purpose of this study is to evaluate the usefulness of the Jaw-Tracking technique (JTT) in VMAT for brain and head and neck cancer.

Materials and Methods : We selected eight patients with brain and head and neck cancer (4 Brain, 4 head and neck) who were treated with the VMAT treatment technique. Contouring information of the patient's tumor and normal organ was fused to the Rando phantom using the deformable registration of Velocity (Varian, USA). A treatment plan was developed using the Varian Eclipse (ver 15.5, Varian, USA) with the same patient actual beam parameters except for the use of jaw-tracking. As the evaluation index, the maximum dose and mean dose of target and OAR were compared and a portal dosimetry was performed for the treatment plan verification.

Results : When using JTT, the relative dose of OAR decreased by 5.24 % and the maximum dose by 7.05 %, respectively, compared with the Static-Jaw technique (SJT). In the various OARs, the mean dose and maximum dose reduction ranges ranged from 0.01 to 3.16 Gy and from 0.12 to 6.27 Gy, respectively. In the case of the target, the maximum dose of GTV, CTV, PTV decreased by 0.17 %, 0.43 %, and 0.37 % in JTT, and the mean dose decreased by 0.24 %, 0.47 % and 0.47 %, respectively. Gamma analysis The JTT and SJT passing rates were 98 ± 1.73 % and 97 ± 1.83 % on the basis of 3 % / 3 mm, respectively. Comparing the doses of all OARs applied to the experiment, it was found that the use of JTT resulted in a significant decrease in dose due to additional jaw shielding besides MLC than SJT.

Conclusion : In radiation therapy using VMAT treatment plan, we can apply JTT in the case of adjacent tumor and normal organs such as brain cancer and head and neck cancer, and in radiotherapy required large field and high energy caused increase leakage dose through MLC. It is considered that the target dose of PTV can be increased by lowering the dose of normal tissue surrounding the tumor.

► **Key words :** Volumetric Modulated Arc Therapy (VMAT), Jaw-Tracking technique (JTT), Treatment plan