ORIGINAL ARTICLE

정위적 척추 방사선 치료계획 시 최적의 빔 방향과 기법에 관한 연구

김은석

순천향대학교 의과대학 천안병원 방사선종양학과

Study for Optimal Beam Angle Optimization in Planning Technique of Spinal Stereotactic Body Radiation Therapy

Eunseog Kim

Department of Radiation Oncology, Soonchunhyang University Cheonan Hospital, Soonchunhyang University College of Medicine, Cheonan, Korea

Objective: It is to find the optimum beam angle by comparing the proper directional beam angle with various methods at time of treatment plan of stereotactic spinal radiation therapy. Also, it is to increase the therapy efficiency of spinal stereotactic body radiation therapy (SBRT) by providing the optimal target coverage through the therapy plan establishing various kinds of direction of beams and by decreasing the integral dose.

Methods: The object patients of treatment plan in this study have targeted 10 persons of thoracic spine bone metastasis patients. The treatment plan of prescription dose with 3 fraction of each 8 Gy has been established, it has been normalized so that it may be $D_{95} = 2,400$ cGy. Total 4 groups of treatment plan: the physical factor has been compared for the part for the target and the critical organ by establishing the treatment plan respectively in intensity-modulated radiation therapy (IMRT) and RapidArc therapy in (1) 1 group of IMRT (9 pieces of beam at 40 degrees equispaced angle intervals), (2) 2 groups of IMRT (9 pieces of half beam of non-equispaced angle), (3) arc 1 group (full arc), (4) arc 2 groups (half 2 arc) and eclipse planning (ver. 8.9). The physical factor for the target has been analyzed for the target coverage, maximum dose, minimum dose, maximum dose/prescribed dose (MD/PD). The maximum dose, mean dose, dose by each volume, and therapy time have been compared and analyzed for the spinal cord and esophagus adjacent to the target.

Results: The maximum dose of patients group of IMRT 1 group has appeared lower by 15% compared with the full arc and half arc plan as the analysis result of therapy plan for the object patients of thoracic spine. There has been no big difference in maximum dose of IMRT 1 group and 2 group. The full arc plan of conformity index showed the best result with the average 1.06, half arc plan of conformity index showed the highest result value with the average 1.15. Half arc plan of MD/PD showed the best value with the average 1.12. The half IMRT in D_1 of planning target volumes showed the lowest value with the average 2,605 cGy; it showed the difference from the average from as small as 1% to as big as 11% as the comparison result with other groups. The plan of IMRT group of non-equispaced angle in D_{95} (cGy) showed the best value with the average 2,287.56 cGy. The IMRT of non-equispaced angle in D_{max} of spinal cord showed the lowest with the average 1,779.9 cGy, $D_{0.1cc}$ and D_{1cc} as well showed the lowest value with the average 1,605.19 cGy and 1,272.63 cGy. The IMRT plan of non-equispaced angle in throat showed the lowest value. The full arc (2 arc) of equispaced angle in therapy time was the shortest with 3.54 minutes, full IMRT of equispaced angle showed the longest time with the average 8.08 minutes.

Conclusion: The treatment plan for IMRT of non-equispaced angle showed all good value in the target and critical organ as the analysis result of proper beam angle according to the respective therapy technique at time of treatment plan of spinal SBRT. It could find that the good therapy plan satisfactory to all target and critical organ at time of using the beam between 80 degrees and 280 degrees.

Keywords: Stereotactic body radiation therapy; Spine; Radiation plan

Correspondence to: Eunseog Kim

Department of Radiation Oncology, Soonchunhyang University Cheonan Hospital, Soonchunhyang University College of Medicine, 31 Suncheonhyang 6-gil, Dongnam-gu, Cheonan 330-930, Korea

Tel: +82-41-570-3551, Fax: +82-41-570-3550, Email: radio@schmc.ac.kr

Received: May 21, 2014 / Accepted after revision: Jul. 17, 2014

© 2014 Soonchunhyang Medical Research Institute

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>).

서론

척추 악성종양은 암의 전이에 있어 대부분 나타나고 있으며, 모든 뼈 전이의 70% 이상을 차지하고 있다[1]. 방사선 치료는 척추 전이의 치료에 있어 좋은 치료방법으로 역할을 해왔으나 기존의 방사선 치료의 효과는 척추의 제한선량에 의해 치료의 제한이 있었다. 척추 전이의 정위적 체부 방사선 치료기술은 높은 선량의 정형성을 선량의 변조와 정위적 위치잡이를 통해 정확하게 종양에 선량을 전달할 수 있고 이 한계를 극복할 수 있다. 척추 정위적 방사선 치료는 척추나 식도와 같은 치명적인 장기가 근접해 있음에도 불구하고 척추 종양치료 시 매우 효과적인 치료방법으로 부각되고 있다. 정위적 체부 방사선 치료는 전이성 척추질환을 치료하는 데 주로 이용되고 있으며 최근 치료에 있어 증가 추세에 있다[2-4]. 정위적 체부 방사선 치료는 매우 높은 정확도를 필요로 하기 때문에 ExacTrac (BrainLAB, Feldkirchen, Germany), Cone-Beam Computed Tomography (CBCT); Varian Medical System, CA, USA 등과 같이 영상을 통해 확인할 수 있는 시스템이 포함되어있는 영상 유도장치가 요구된다[5-10]. 치료계획에 있어 체적에 대해 작은 경계를 가지고 매우 급격한 선량경사도와 입체조형 선량분포(conformal dose distribution)에 도달하기 위해서 세기 변조 방사선 치료(intensity-modulated radiation therapy, IMRT)와 입체적 세기 변조 회전 치료(volumetric modulated arc therapy, VMAT) 기술이 이용된다. 척추 체부 방사선 치료 시 여러 기술을 사용함에 있어 가장 민감한 장기인 척추의 제한 선량에 최소한의 선량 접근을 할 수 있는 기술을 찾아야 한다. 같은 IMRT라 할지라도 방사선 빔의 방향을 몇 개를 줄 것인가 어느 방향에서 줄 것인가에 따라 척추에 들어가는 선량은 급격하게 달라지게 된다. 입체적 VMAT 시 회전을 1회 할 것인가 또는 2회 할 것인가에 따라 선량분포의 변화가 있고, 전체 회전 치료계획을 사용할 것인가 부분적인 회전 치료계획을 사용할 것인가에 따라 민감한 장기인 척추가 받는 선량과 주변의 다른 민감 장기에도 영향을 미친다. 본 연구의 목적은 척추 정위적 방사선 치료계획 시 적절한 방향의 빔 각도를 다양한 방법의 치료계획을 세워 비교함으로써 최적의 빔 각도와 치료기술을 찾아내기 위함이다. 또한 여러 가지 빔의 방향을 설정한 치료계획을 통해 최적의 표적 포함도(target coverage)를 제공하고 적산 선량(integral dose)을 줄임으로써 정위적 척추 체부 방사선 치료의 효율을 증대시키는 데 있다.

대상 및 방법

본 연구는 척추 체부 환자 중 흉추에 국소적으로 전이된 환자를 대상으로 하였다. 일반적으로 임상표적체적(clinical target volume)은 육안적 종양체적(gross tumor volume)을 포함하도록 하였으며

Fig. 1. Dose distributions for in thoracic spine region: (A) full arc, (B) half arc, (C) full IMRT, (D) half IMRT. IMRT, intensity-modulated radiation therapy.

추간판(intervertebral disc)과 뒤쪽 영역을 제외한 추체(vertebral body)만을 영역으로 설정하였다. 환자의 직교영상은 독립적인 정확도검사를 위해 획득을 하였다. 환자의 치료 전 확인 영상은 CBCT와 ExacTrac의 두 영상장치를 통해 평행 오차(translation error)는 1 mm 이하, 회전 오차(rotation error)는 2° 이하의 범위 내로 확인하도록 하였다[8].

Novalis Tx (Varian Medical Systems and BrainLAB) 시스템은 HD-120 MLC (high definition multi-leaf collimator, Varian Medical Systems) 2.5 mm 64개의 내부 제한기(collimator)와 5.0 mm 56개의 외부 제한기(collimator)로 구성되어 있으며 IMRT와 VMAT 치료기술의 선량학적 차이를 비교하는 데 이용되었다. 또한 eclipse (8.9 Platform, Varian Medical System)는 종양(tumor)에 최대한의 선량을 전달하고 주변의 민감 장기에는 최소한의 선량을 전달하기 위한 치료계획시스템으로써 각 치료기술별로 비교분석하는 데 이용되었다.

민감 장기인 건초낭(the cal sac)이 10 Gy 이상 받는 선량이 0.1 mL가 넘지 않도록 하며 최대점 체적 선량(maximum point volume dose)은 12 Gy가 넘지 않도록 치료계획을 수립하였다. 주변의 민감 장기인 식도는 18 Gy 이상 받는 선량이 0.1 mL가 넘지 않도록 하며, 최대점 체적 선량은 20 Gy가 넘지 않도록 치료계획을 수립하였다. 치료계획은 총 4개 그룹으로 나누어 계획을 수립하였다(Fig. 1).

1. Equispaced angle intensity-modulated radiation therapy plan

등간격(equispaced) 각도의 IMRT 치료계획은 0-360까지 40도 간격으로 빔 방향을 설정하였으며 콜리메이터는 45도로 설정하여 계획을 수립하였다. 방사선 치료 전달방법으로는 미닫이창기법(sliding window method)으로 콜리메이터 움직임의 계산을 수행하였다. 치료계획시스템에 있어 선량계산은 비등방성 분석알고리즘(anisotropic analytical algorithm)을 사용하였다. 2.5 mm 격자

사이즈와 비균질성 보정을 선량계산에 적용하였다.

2. Non-equispaced angle intensity-modulated radiation therapy plan

비등간격 각도의 IMRT 치료계획은 80도에서 280도까지의 80, 110, 130, 150, 180, 210, 230, 250, 280의 거의 half angle의 빔 방향을 설정하였다. 콜리메이터는 45도로 설정하여 계획을 수립하였다. 방사선 치료 전달방법으로는 sliding window로 하여 콜리메이터 계산을 수행하였다. 선량계산은 비등방성 분석알고리즘을 사용하였으며 비균질성 보정을 적용하였다.

3. Full arc plan

Full 아크는 200-160 방향의 시계방향과 반대로 160-200의 반시계 방향의 2 아크를 이용하였으며 콜리메이터 각도는 45도, 315도로 설정하여 계획을 수립하였다. 선량계산 또한 역시 IMRT와 마찬가지로 비등방성 분석 알고리즘을 통해 계산을 수행하였다.

4. Half arc plan

Half 아크는 180.1-270, 270-180.1, 179.9-90, 90-179.9도로 4개의 부분으로 나누어 계획을 수립하였다. 콜리메이터 각도는 45도, 315도로 설정하여 계획을 수립하였다. 선량계산은 비등방성 분석 알고리즘을 통해 계산을 수행하였다.

처방 선량은 8 Gy씩 3분할로 치료계획을 수립하였으며, D95 = 2,400 cGy가 되도록 규격화하였다. 각각의 치료계획에 대한 선량계산은 치료계획시스템의 선량-체적 그래프(dose volume histogram, DVH)를 통해 분석하였으며, IMRT와 VMAT 치료계획을 각각 수립하여 종양에 대한 부분과 민감 장기에 대해 나누어 분석하였다. 종양에 대한 물리적인 인자는 일치성 지수(conformity index, CI), 균질성 지수(homogeneity index, HI), 표적 포함도(target coverage), 최대 선량(maximum dose), 최소 선량(minimum dose), 최대 선량/처방 선량(maximum dose/prescribed dose)에 대해 분석하였다. CI는 표적 범위에서의 품질을 평가하기 위해 사용되었다. CI는 Nedzi 등[11]에 의해 다음과 같이 정의되었다.

$$CI = \frac{V_{RI}}{TV}$$

여기서 V_{RI} 는 기준 등선량(reference isodose)의 체적이고, TV는 표적 체적(target volume)이다.

HI는 TV의 균일성(uniformity)를 평가하는 인자로 표적 범위 내에서 어느 정도의 선량이 균질성이 있는지 평가하는 데 사용된다. Oliver 등[12]은 라디칼 선량 균질성 지수(radical dose homogeneity index, rDHI)와 감속 균질성 지수(moderate homogeneity index, mDHI)로 표현하였다.

$$rDHI = \frac{D_{min}}{D_{max}}$$

D_{min} 는 표적 체적 내에서의 최소 선량을 의미하며, D_{max} 는 표적 체적 내에서의 최대 선량을 의미한다.

$$mDHI = \frac{D_{\geq 95\%}}{D_{\geq 5\%}}$$

$D_{\geq 95\%}$ 는 TV의 95% 선량을 의미하며, $D_{\geq 5\%}$ 는 TV의 5% 선량을 의미한다. 표적에 인접한 민감 장기인 척수와 식도에 대해 최대 선량, 평균 선량, 1 mL와 0.1 mL가 받는 선량을 각각 민감 장기에 대해 비교분석하였다.

Fig. 2. Dose parameter and dosimetric parameter in PTV. (A) Dose parameters for each technique. (B) Dosimetric parameters for each technique. PTV, planning target volumes; FA, full arc; HA, half arc; FI, full angle IMRT; HI, half angle IMRT; CI, conformity index; MD/PD, maximum dose/prescribed dose; rDHI, radical dose homogeneity index; mDHI, moderate homogeneity index; IMRT, intensity-modulated radiation therapy.

결 과

흉추 전이 대상환자의 치료계획을 분석한 결과 non-equispaced IMRT (half IMRT)의 환자군의 타겟 최대선량은 2,685.4 cGy로써 equispaced IMRT (full IMRT) 치료계획과는 차이를 보이지 않았다. 반면 equispaced full 아크(full arc)와 non-equispaced half 아크 치료계획(half arc)에 비해 15% 적게 나왔다. D_{99} 의 선량은 non-equispaced IMRT가 2,287.6으로 가장 높게 나와 좋은 DVH 곡선에서 높은 어깨 값을 보였다. Equispaced IMRT는 2,186.8 cGy로써 가장 낮은 값을 보였다. DVH 곡선의 끝 부분인 D_5 , D_1 은 non-equispaced IMRT가 2,565.4 cGy, 2,605.4 cGy로써 급격하게 감소함을 보여주었다. 다른 그룹과 비교해본 결과 작게는 평균 1%에서 크게는 11%까지 차이를 보였다(Fig. 2).

TV의 CI는 equispaced 아크 치료계획이 1.06으로 가장 좋은 결과를 보였으며, half 아크 치료계획은 1.15로 가장 높은 결과값이 나왔다. MD/PD는 non-equispaced 아크 치료계획이 1.12로 가장 좋은 값을 보였다. D_{99} (cGy)는 non-equispaced 각도의 IMRT 그룹의 치료계획이 2,287.6 cGy로 가장 좋은 값을 보였다. TV의 균질성을 결정하는 HI를 분석한 결과 rDHI는 equispaced IMRT 치료계획이 0.74로 높은 값을 보였고, equispaced 아크 치료계획이 0.64로 가장 낮은 값을 보였다. mDHI 역시 equispaced IMRT 치료계획이 0.94로 좋은 값을 보였고 non-equispaced 아크 치료계획이 0.85로 가장 낮은 값을 보였으며, equispaced 아크 치료계획과 equispaced IMRT 치료계획은 0.91과 0.92로 비슷한 값을 보였다(Fig. 2). Fig. 3은 흉추 영역의 정위적 체부 방사선 치료기술에 있어 표적 체적과 주변의 민감 장기에 대한 equispaced 그룹의 IMRT와 VMAT plan

Fig. 3. DVH for full IMRT, half IMRT, full arc, and half arc techniques in the thoracic spine region. (A) DVH of planning target volumes. (B) DVH of critical organs. DVH, dose volume histogram; IMRT, intensity-modulated radiation therapy; FA, full arc; HA, half arc; FI, full angle IMRT; HI, half angle IMRT.

Fig. 4. Dose parameters in thoracic sites, (A) spinal cord (B) esophagus. IMRT, intensity-modulated radiation therapy.

과 non-equispaced IMRT와 VMAT의 DVH를 보여주고 있다.

척추와 식도에 대해 각각의 플랜을 비교한 결과 척추의 D_{max} 는 non-equispaced 각도의 IMRT가 평균 1,779.9 cGy로 가장 낮았고, $D_{0.1cc}$ 와 D_{1cc} 또한 평균 1,605.19 cGy와 1,272.63 cGy로 가장 낮은 값을 보였다. 식도는 non-equispaced 각도의 IMRT plan이 가장 낮은 값을 보였다(Fig. 4). 치료시간은 equispaced 각도의 full arc (2 arc)가 평균 3.54분으로 가장 짧았고, equispaced 각도의 full IMRT가 평균 8.08로 가장 긴 시간을 보였다.

고 찰

척추 악성 종양의 정위적 체부 방사선 수술은 최근의 기계적인 발달로 인해 주변의 민감한 정상 조직에 최소한의 방사선량을 전달함과 동시에 척추 종양에는 최대한의 방사선을 전달할 수 있다. 현존하는 최고의 HD-120 다엽 콜리메이터는 폭이 2.5 mm로써 치료계획 수립 시 선량분포에 있어 급격한 선량경사도를 만들 수 있기 때문에 민감 장기가 종양 근처에 있다 할지라도 많은 선량을 종양에 집중시킬 수 있다. 실제 환자 치료 시 IMRT 또는 VMAT 기술의 환자 치료 계획은 열점(hot spot)과 냉점(cold spot)을 줄이기 위해 인공구조를 이용하여 여러 번 최적화를 실시한다. 그러나 본 연구에서 치료계획의 객관성을 높이기 위해 IMRT와 VMAT의 치료방법 사이의 최적화에 따른 차이를 최소화하기 위해 최적화를 위한 계산은 한 번 수행하였다.

본 연구에서 non-equispaced와 equispaced IMRT의 치료계획에 있어서 큰 값의 차이는 보이지 않았지만 non-equispaced와 equispaced 회전치료에 있어서 15%의 차이를 보이며 종양에 낮은 선량값을 보이게 되었다. 선량-체적 히스토그램을 비교분석한 결과 99%의 선량이 종양에 들어가는 값은 non-equispaced IMRT가 가장 좋은 값을 보였다. 높은 어깨 값의 표현은 표적 체적을 포함하는 선량값이 높음으로써 표적 체적에 최대한의 선량값이 전달된다는 의미로 해석할 수 있다.

선량-체적 히스토그램의 끝 부분의 차이는 평균 1%에서 11%까지 큰 차이를 보였는데 이는 낮은 선량값이 종양 근처에 얼마나 분포하는지 여부를 파악하기 위해 적용하였으며 이 또한 non-equispaced IMRT가 가장 좋은 값을 보임으로써 종양 주변에 낮은 선량값이 많지 않음을 보여주었다. 불규칙한 표적 모양의 일치성은 다른 치료계획기법에 비해 VMAT 치료가 더 효과적이며 낮은 선량의 분포들이 표적 주변으로 잘 형성되고 있으며 정상조직에 적은 선량값이 들어가고 있다.

치료시간은 equispaced 각도의 full arc (2 arc)가 평균 3.54분으로 가장 짧았고, equispaced 각도의 full IMRT가 평균 8.08분으로 가장 긴 시간을 보여 IMRT 치료가 빔 각도를 변화하는 데 걸리는 시간과 기계적인 선량값이 높게 나오게 되어 치료시간의 효율성을 따져 치

료할 시에는 체적 변조 회전 치료기법이 치료시간의 효율성 면에서 뛰어남을 알 수 있었다.

Wu 등[7]에 따르면 척추 정위적 체부 방사선 치료 시 IMRT 치료기법이 대부분의 사이트에서 VMAT 치료기술에 비해 최대 척추 선량값을 줄이는 데 효과적이라고 한다. 본 연구와 비교해 볼 때 non-equispaced 각도의 IMRT 치료기법이 표적에 근접해 있는 민감 장기의 선량을 최소화함과 동시에 종양에 최대한의 선량값을 전달함으로써 정위적 체부 방사선 수술 시 좋은 치료효과를 기대할 수 있었다.

결론적으로, 본 연구에서 우리는 일반적으로 정위적 척추 체부 방사선 치료의 처방선량인 24 Gy/3 fx를 이용해 최근의 치료기법인 IMRT와 VMAT을 이용하여 equispaced 그룹과 non-equispaced 그룹으로 나누어 치료계획을 비교했다. AAPM TG-101의 보고서와 부분적인 볼륨 허용 오차에 지정된 척추의 허용 오차를 만족시키면서 IMRT와 VMAT 기술 모두 종양에 높은 균일한 선량분포를 제공하였다. 척추 정위적 방사선 치료계획 시 각각의 치료기술에 따른 적절한 빔의 각도를 분석한 결과 non-equispaced angle의 IMRT의 치료계획이 target과 critical organ의 선량학적인 측면에서 모두 효과적임을 알 수 있었다. 척추 정위적 방사선 치료계획 시 민감 장기가 받는 선량을 최소화하면서 종양에 최대한의 선량을 전달하기 위한 적절한 치료계획은 non-equispaced angle의 IMRT의 치료계획이 좀 더 우수함을 알 수 있었다.

REFERENCES

1. Ecker RD, Endo T, Wetjen NM, Krauss WE. Diagnosis and treatment of vertebral column metastases. *Mayo Clin Proc* 2005;80:1177-86.
2. Benedict SH, Yenice KM, Followill D, Galvin JM, Hinson W, Kavanagh B, et al. Stereotactic body radiation therapy: the report of AAPM Task Group 101. *Med Phys* 2010;37:4078-101.
3. Matuszak MM, Yan D, Grills I, Martinez A. Clinical applications of volumetric modulated arc therapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2010;77:608-16.
4. Sahgal A, Larson DA, Chang EL. Stereotactic body radiosurgery for spinal metastases: a critical review. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2008;71:652-65.
5. Kuijper IT, Dahele M, Senan S, Verbakel WF. Volumetric modulated arc therapy versus conventional intensity modulated radiation therapy for stereotactic spine radiotherapy: a planning study and early clinical data. *Radiother Oncol* 2010;94:224-8.
6. Nelson JW, Yoo DS, Sampson JH, Isaacs RE, Larrier NA, Marks LB, et al. Stereotactic body radiotherapy for lesions of the spine and paraspinal regions. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2009;73:1369-75.
7. Wu QJ, Yoo S, Kirkpatrick JP, Thongphiew D, Yin FF. Volumetric arc intensity-modulated therapy for spine body radiotherapy: comparison with static intensity-modulated treatment. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2009;75:1596-604.
8. Wang H, Shiu A, Wang C, O'Daniel J, Mahajan A, Woo S, et al. Dosimetric effect of translational and rotational errors for patients undergoing image-guided stereotactic body radiotherapy for spinal metastases. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2008;71:1261-71.

9. Sahgal A, Ma L, Gibbs I, Gerszten PC, Ryu S, Soltys S, et al. Spinal cord tolerance for stereotactic body radiotherapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2010;77:548-53.
10. Gutfeld O, Kretzler AE, Kashani R, Tatro D, Balter JM. Influence of rotations on dose distributions in spinal stereotactic body radiotherapy (SBRT). *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2009;73:1596-601.
11. Nedzi LA, Kooy HM, Alexander E 3rd, Svensson GK, Loeffler JS. Dynamic field shaping for stereotactic radiosurgery: a modeling study. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 1993;25:859-69.
12. Oliver M, Chen J, Wong E, Van Dyk J, Perera F. A treatment planning study comparing whole breast radiation therapy against conformal, IMRT and tomotherapy for accelerated partial breast irradiation. *Radiother Oncol* 2007;82:317-23.