ISSN (Print) 1598-5385
ISSN (Online) 2233-6648
≪해설논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society 25(6), 208-218 (2015) http://dx.doi.org/10.4283/JKMS.2015.25.6.208

A Comparative Study on the Head and Neck Radiation Therapy for Dynamic Conformal Arc Therapy and Volumetric Modulated Arc Therapy

Deok-Ki Kim
Department of Radiation Oncology, Catholic University, Bucheon St. Mary's Hospital, Bucheon 14647, Korea
Department of International Radiology, Hallym University of Graduate Studies, Seoul 06198, Korea

CheonWoong Choi
Department of Respiratory and Critical Care Medicine, Kyung hee University Hospital at Gangdong Seoul 05278, Korea

Jae-hyock Choi
Department of Proton Therapy Center, National Cancer Center, Koyang 10408, Korea

Hui-su Won
Department of Radiation Oncology, Seoul National University, Bundang Hospital, Bundang 13620, Korea

Cheol-soo Park*
Department of Radiological Science, Hallym Polytechnic University, Chuncheon 24210, Korea

(Received 12 November 2015, Received 16 December 2015, Accepted 16 December, 2015)

Recently, radiation therapy is used in the CT existing conventional two-dimensional radiation image, and set the size and location of the tumor in a manner that the image is going to change the treatment plan. After using the simulation using CT, radiation therapy it is four-dimensional or three-dimensional treatment made possible. and radiation therapy became the more effective ever before. High technology radiation therapy such as the treatment of SRS,IMRT, IGRT, SBRT, is a need to try contemplating the possibility to apply appropriate analysis and situation, so it has its own characteristics. and then it is believed that it is necessary to analyze and try it worries the proper applicability of the situation. The configuration of the various treatment that is applicable in many hospitals is necessary to try to determine how to practically apply the patients. Critical organs surrounding tumor give a small dose to avoid side effects and then the tumor has the therapeutic effect by providing a larger dose than before the radiation treatment.

Keywords : radiation therapy, intensity modulated radiotherapy, volumetric radiation arctherapy, dynamic conformal therapy, dose distribution

두경부 방사선 치료 시 입체조형동적회전조사치료와 용적변조회전조사치료에 관한 연구

김덕기
가톨릭대학교 부천성모병원 방사선종양학과, 경기 부천시 원미구 소사로 327, 14647
한림국제대학원대학교 국제방사선학과, 서울시 강남구 역삼로 405, 06198

최천웅
강동경희대병원 호흡기내과, 서울시 강동구 동남로 892, 05278

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.
*Corresponding author: Tel: +82-033-240-9350,
Fax: +82-033-240-9354, e-mail: pcs3109@hsc.ac.kr

최재혁
국립암센터 양성자치료센터, 경기 고양시 일산동구 일산로 323, 10408

원희수
분당서울대학교 방사선종양학과, 경기 성남시 분당구 구미로 173번길 82, 13620

박철수*
한림성심대학교 방사선학과, 강원 춘천시 동면 장학길 48, 24210

(2015년 11월 12일 받음, 2015년 12월 16일 최종수정본 받음, 2015년 12월 16일 게재확정)

최근 방사선치료는 치료 장비에 있어 고도화되고 방법 또한 다양해지고 있다. 기존의 방사선치료의 경우 다엽콜리메이터의 두께가 치료계획에 있어서 중요한 요인으로 생각되었지만 세기변조방사선치료의 개념에서는 그 중요성이 다소 떨어진다. 이 시점에서 보다 정밀한 치료를 시행할 때 다엽콜리메이터와 더불어 어떤 방식으로 치료계획을 세우고 치료하느냐를 고민할 시점이 되었다고 본다. 따라서 본 연구는 5 mm 다엽콜리메이터를 적용한 용적변조회전조사치료(Volumetric modulated arc therapy, VMAT) 치료계획과 2.5 mm 다엽콜리메이터를 적용한 입체조형동적회전조사치료(Dynamic conformal arc therapy, DCAT) 치료계획을 여러 가지 모양을 지닌 가상의 표적용적에 따라 나타나는 치료선량분포를 확인하고 실제 환자치료에 적용하여 보다 효율적인 방사선치료를 구상하는데 그 목적이 있다. 본 연구의 목적은 치료계획 시 전산화 단층촬영영상과 자기공명영상과의 융합을 통해 영상의 재현성 및 유용성을 평가하고 획득한 영상에서 타겟 선량을 비교, 분석하고자 자체개발한 팬톰을 사용하여 수행하였다. 전산화단층촬영을 한 팬톰의 영상과 각기 다른 자장의 세기로 촬영한 팬톰의 자기공명영상에서 팬톰 내에 존재하는 작은 홀의 크기 및 용적의 재현성을 비교하고, 임의의 타겟에서 선량 변화를 비교, 분석하였다.

주제어 : 방사선치료, 세기변조방사선치료, 용적변조회전조사치료, 입체조형동적회전조사치료, 선량분포 및 선량평가

I. 서 론

방사선은 1895년 뢴트겐(Wilhelm Conrad Röntgen) 박사가 발견하여 120년이 지난 현재까지 인류의 건강을 지키는데 커다란 힘이 되었다. 이후로 방사선 진단학, 핵의학 그리고 방사선치료분야로 나뉘어서 발전되었다. 현대적의미의 방사선치료는 1950년대에 Co-60을 사용한 고에너지 방사선치료기가 개발되면서 시작되었다. 1990년대 중반 이후로 3차원 입체조형치료가 도입되고, 세기변조방사선치료(Intensity modulated radiothrapy, IMRT)로 발전되었다. 이에 맞춰 Tomotherapy나 Cyber knife와 같은 특수 장비에 이르기까지 방사선치료의 기술이나 치료 장비 모두 다양화되고 고도화되어 이제는 정교함을 우선으로 하는 암 수술의 영역까지 분야가 확대되었다[1].

현재 대한민국 사망원인 1위가 악성 신생물, 즉 암으로 나타났다. 암은 크게 악성종양과 양성종양으로 나눌 수 있는데, 우리가 흔히 두려워하고 고치기 힘든 병은 악성종양의 범주에 속한다. 또한 국민의 연령구조가 점점 고령화 사회로 진입해 가고 있고, 이에 따라 암의 발생률도 증가하는 추세이다.

암의 발생률은 2015년 현재, 대한민국 국민의 3명 중 1명꼴로 생애 기간 중에 암이 발생한다고 알려져 있다. 그동안 암은 쉽게 치료하지 못하는 불치병으로 인식하여 걸리면 삶을 포기하는 사람이 많았지만 십 수 년 전부터는 치료방법의 다양화와 치료기술의 발달로 암환자의 절반이상이 완치되는 경지에 이르렀다.

일반적으로 암의 치료법은 크게 4가지로 분류할 수 있는데 수술, 항암요법, 면역요법, 방사선치료이다. 이중에 방사선치료는 현대에 들어 가장 발전한 부분으로 기존의 방사선치료 패러다임을 뒤집을 만큼 혁신적인 치료방법을 개발했다.

최근 방사선치료는 기존의 전통적인 2차원적인 방사선치료에서 CT를 이용하여 영상을 획득하고 이 영상에 종양의 크기 및 위치 등을 설정하고 치료계획을 하는 방식으로 바뀌어 가고 있다. CT를 이용한 모의치료법이 전파되면서 기존의 전통적인 방식의 치료보다 3차원적 혹은 4차원의 방사선치료가 가능하게 되어 보다 효율적인 치료가 가능하게 되었다[2, 3].

현재 방사선치료방법은 많이 나와 있지만 가장 획기적인 변화는 선량분포를 기존의 방사선치료와 다르게 만들어내고 있다는 점이다. 특히, 세기변조방사선치료(IMRT)의 경우 일반적인 세기변조방식인 고정식 Step-and-shoot방식에서 세기변조 회전 방사선치료(Intensity modulated arc therapy, IMAT) 방식으로 주로 사용하고 있다. 강도변조 회전 방사선치료는 선형가속기의 갠트리가 둥근 호를 그리면서 방사선을 조사하여 빔의 분포를 만들어 내는 방식이고, 용적세기변조 회전 방사선치료(Volumetric modulated arc therapy, VMAT) 도 역시 선형가속기의 갠트리가 회전하면서 용적의 개념적 정의를 가지고 세기변조를 시행하여 선량분포를 만들어내는 치료방법이다.

그리고, 다엽콜리메이터(Multi-leaf collimator, MLC)는 차폐 블록을 대체하기 위해 개발되었고, 그 두께가 줄어들면서

보다 정교한 방사선치료에 일조하였다. 하지만 전통적인 방사선치료에서 치료방법의 개념이 바뀐 지금 MLC의 두께와 더불어 선량분포를 좌우하는 인자인 갠트리(Gantry)의 속도와 방사선의 선량률, MLC의 움직이는 속도가 조합되었을 때 어떠한 결과를 나타내는지 확인할 필요가 있다.

한편, 방사선을 이용한 치료목표는 정상 조직의 장해 확률(Normal Tissue Complication Probability, NTCP)은 가능한 작게 하고, 종양 조직에 처방된 방사선량은 증가시킴으로써 종양 치유 확률(Tumor Control Probability, TCP)을 증가시키는 것이다[4].

이를 위해 세기변조방사선치료(Intensity modulated radiotherapy, IMRT)와 영상유도방사선치료(Image guided radiotherapy, IGRT), 정위적체부방사선치료(Stereotactic body radiotherapy, SBRT), 정위적방사선수술(Stereotactic radiosurgery)와 같은 새로운 기법의 첨단 치료기술이 가능해지면서 환자에게 안전하고 정확한 치료가 시행되고 있다[1].

이 시점에서 가늠 해볼 때, IMRT, IGRT, SBRT, SRS와 같은 고 차원적인 치료법 및 치료 장비는 각각의 특성을 갖추고 있으므로 이를 분석하고 상황에 알맞은 적용가능성을 고민해볼 필요가 있다고 사료된다. 많은 병원에서 적용하고 있는 다양한 치료기법 및 치료 장비의 구성으로 실질적으로 어느 방법이 환자에게 효율적으로 적용할 수 있는가를 판단해 볼 필요가 있다. 최신 방사선치료의 경우 앞서 말한바와 같이 종양 주변에 임계장기에 적은 선량을 주고, 종양에는 이전의 방사선치료보다 더 큰 선량을 부여함으로써 치료효과를 높이는 동시에 그에 따른 부작용을 나타낼 개연성도 충분히 보이고 있기 때문이다. 따라서 최근 시행되고 있는 특수방사선치료의 특징을 살펴보고, 이것을 활용하여 상황에 알맞은 치료방법 및 장비를 선택할 필요가 있다.

최근 방사선치료는 치료 장비에 있어 고도화되고 방법 또한 다양해지고 있다. 기존의 방사선치료의 경우 다엽콜리메이터의 두께가 치료계획에 있어서 중요한 요인으로 생각되었지만 세기변조방사선치료의 개념에서는 그 중요성이 다소 떨어진다. 이 시점에서 보다 정밀한 치료를 시행할 때 다엽콜리메이터와 더불어 어떤 방식으로 치료계획을 세우고 치료하느냐를 고민할 시점이 되었다고 본다.

따라서 본 연구는 5 mm 다엽콜리메이터를 적용한 용적변조회전조사치료(Volumetric modulated arc therapy, VMAT) 치료계획과 2.5 mm 다엽콜리메이터를 적용한 입체조형동적회전조사치료(Dynamic conformal arc therapy, DCAT) 치료계획을 여러 가지 모양을 지닌 가상의 표적용적에 따라 나타나는 치료선량분포를 확인하고 실제 환자치료에 적용하여 보다 효율적인 방사선치료를 구상하는데 그 목적이 있다.

본 연구를 통하여 다음과 같은 사항을 연구 분석하여 고정밀 방사선치료 시 보다 정확하고 효율적인 치료가 가능 하도록 한다.

첫째, 원형의 표적용적을 적용했을 때 나타나는 선량분포를 평가한다.

둘째, 사각형의 표적용적을 적용했을 때 나타나는 선량분포를 평가한다.

셋째, 2개의 표적용적이 산재해 있을 때, 나타나는 선량분포를 평가한다.

넷째, D타입(D-Shape)의 표적용적을 적용했을 때 나타나는 선량분포를 평가한다.

다섯째, C타입(C-Shape)의 표적용적을 적용했을 때 나타나는 선량분포를 평가한다.

II. 대상 및 방법

두경부 암은 조직이나 기관이 이루어진 복잡한 해부학적 구조 때문에 치료에 어려움을 겪는다. 특히, 뇌 실질조직 근처에 존재하는 뇌척수, 이하선, 안구 등은 방사선 감수성도 높은 조직에 속하게 되므로 더욱 조심할 필요가 있다[6-10].

그래서, 최근에 가장 활발하게 사용되어지고 있는 방사선치료법인 세기조절방사선치료(Intensity modulated radiotherapy, IMRT)를 바탕으로 보다 진화된 치료법인 용적세기조절방사선치료(Volumetric modulated arc therapy, VMAT)는 효율적인 치료법이다. 이번 연구에서 적용할 장비는 Elekta사의 INFINITY 선형가속기이고, 이 장비는 5 mm의 leaf를 사용한다. VMAT 치료 시에는 연속적으로 환자를 중심으로 회전하며 치료 빔의 분포를 형성한다(Fig. 1, 2).

한편, 빔의 분포를 좌우하는 중요한 인자인 leaf은 간과 할 수 없는 부분이다. 따라서 5 mm leaf을 적용하는 경우와 비교하기 위해 적용할 장비는 Elekta사의 INFINITY 장비를 기

Fig. 1. (Color online) Elekta (Sweden) INFINITY.

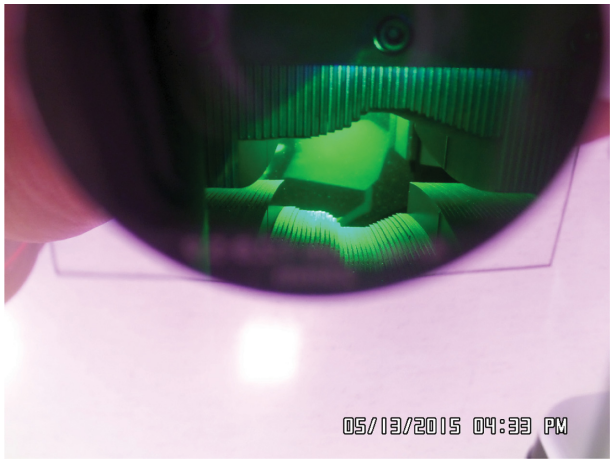

Fig. 2. (Color online) INFINITY multi-leaf collimator.

Fig. 3. (Color online) Elekta (Sweden) INFINITY with APEX.

Fig. 4. (Color online) APEX Multi-leaf collimator.

본으로 갠트리에 추가적으로 2.5 mm leaf을 장착한 Apex system을 설치하고, 이를 활용하여 치료 빔의 분포를 만든다

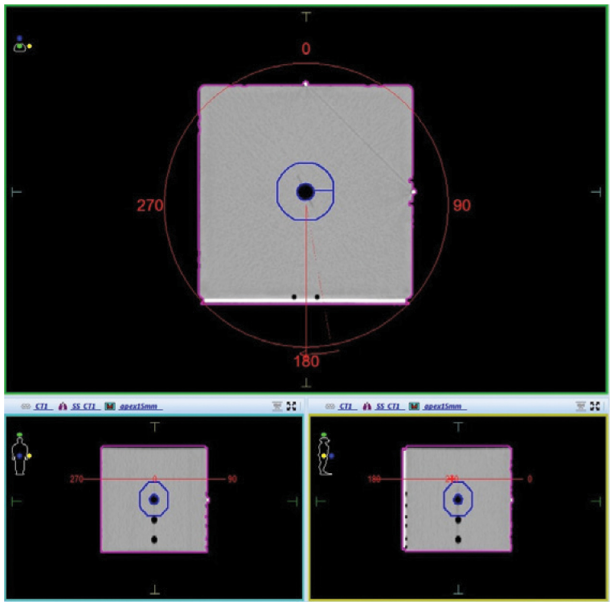

Fig. 5. (Color online) 5 mm Circular shape of the tumor target.

(Fig. 3, 4).

본 연구는 그동안 각각의 목적에 맞게 사용되어왔던 두 가지의 치료방법이 최근 치료기기의 발전으로 인하여 치료 분야에 있어서 중첩되는 부분이 발생되었다. 이는 환자에게 보다 효율적이고 적용 가능한 치료방법을 찾아내는 의료의 본질적인 목적에 따라 보다 효율적인 방사선치료가 적용될 수 있도록 하는 것에 그 목적이 있다.

전산화 치료계획을 실시하기 위하여, 정육면체 모양의 QA용 팬텀을 CT 모의치료기(Big bore CT, Philps)를 이용하여 3 mm 두께로 스캔한다. 이후 획득한 영상데이터를 MIM 소프트웨어를 사용하여 가상의 치료범위를 설정하고, 설정된 데이터를 다시 치료계획장비(MONACO 5.0, Elekta)로 전송한다. 얻어진 영상과 설정된 윤곽도(contour)를 이용하여 치료계획을 생성한다.

전산화치료계획을 생성하기 위하여 얻어진 CT 영상데이터와 윤곽도를 치료계획장비(MONACO 5.0, Elekta)로 전송하여 치료계획을 실시한다. 치료 계획시 팬텀의 중앙에 위치한 13 mm의 공동(空洞)을 기준으로 이것을 감싸고 있는 15 mm 두께의 임의의 타겟을 설정한다.

첫째, 공동을 감싸고 있는 15 mm의 두께를 지닌 원형의 띠 모양으로 된 타겟을 설정하여 치료계획을 시행하였다(Fig. 5).

둘째, 위와 마찬가지로 공동을 감싸고 있는 15 mm의 두께를 지닌 직사각형의 외형을 지닌 정육면체 형태로 된 타겟을 설정하여 치료계획을 시행하였다(Fig. 6).

셋째, 공동을 감싸고 있는 5 mm의 두께를 지닌 원형의 띠 모양으로 된 타겟과 함께 근처에 존재하는 다른 공동을 같이

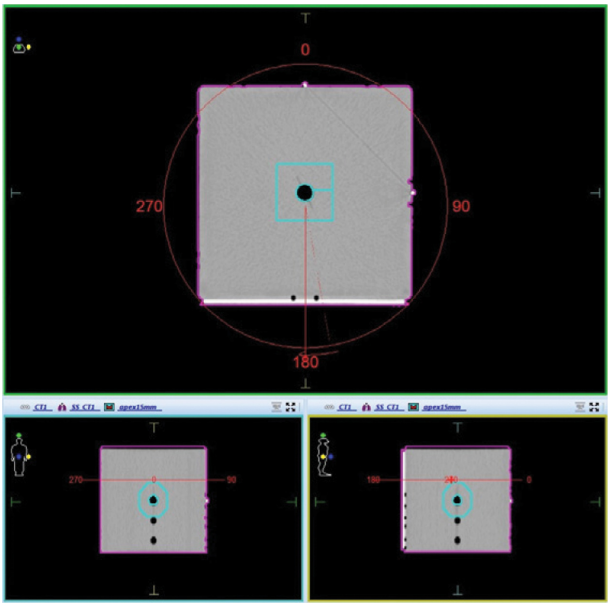

Fig. 6. (Color online) 15 mm Circular shape of the tumor target.

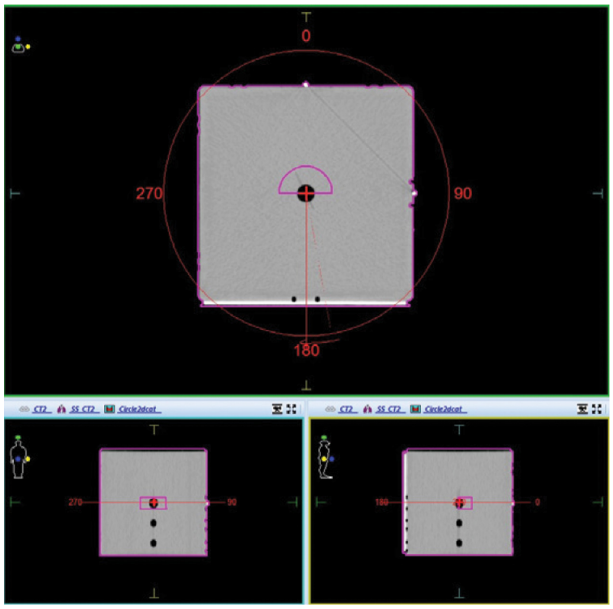

Fig. 8. (Color online) D-shaped form of the tumor target.

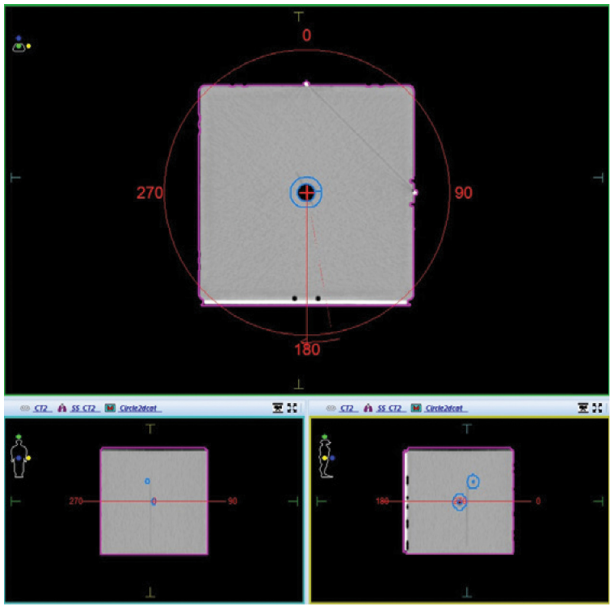

Fig. 7. (Color online) Two types of the tumor target.

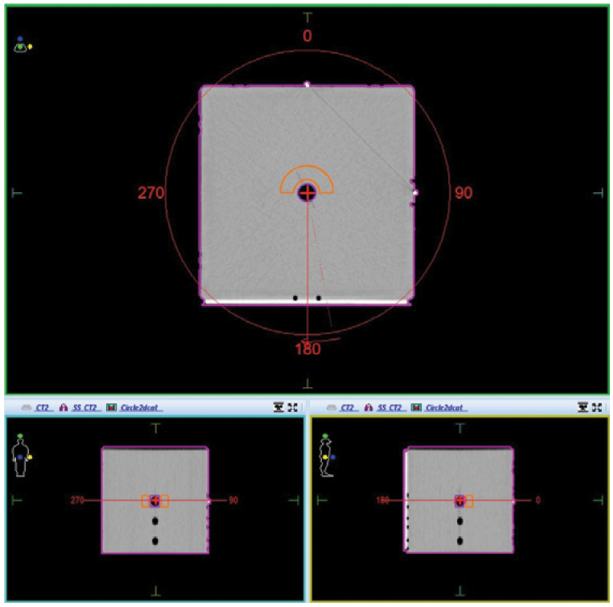

Fig. 9. (Color online) C-shaped form of the tumor target.

치료한다고 가정하고, 새로운 공동 역시 5 mm의 원형의 띠로써 타겟을 설정한다. 따라서 중앙의 공동과 새로운 공동에 동일한 선량을 처방하고 치료계획을 실시하였다(Fig. 7).

넷째, 중앙의 공동을 기준으로 반달 모양의 D자형의 타겟을 설정하고 치료계획을 시행하였다(Fig. 8).

다섯째, 중앙의 공동을 임계장기(Critical organ)로 설정하여, 처방된 선량을 넘지 않도록 제한을 두고, 이것을 둘러싼 C자형의 타겟을 설정한 뒤에 치료계획을 시행하였다(Fig. 9).

모든 치료계획은 일반적으로 뇌정위적방사선수술에 주로 사용하는 선량인 2000 cGy를 처방하고, 1회 조사를 기준으로 최적화된 치료계획을 시행하였다. 치료계획은 뇌정위적 방사선수술(Stereotactic radiosurgery, SRS) 치료계획을 위해 Dynamic conformal arc 방법으로 계산하고, VMAT 치료계획에 Segment shape optimization(SSO) 법을 이용하여 계산한다. 각각의 상황에 알맞게 SRS와 VMAT 치료계획을 시행한다.

각 치료방법에 따라 가상 종양의 체적을 계산하고 타겟 내 최저 선량값(Min. dose), 최대 선량값(Max. dose), 평균 선량

Table I. Tumor target size in each of treatment plan.

Structure	Volume (cm^3)
Circular 15 mm	53.241
Rectangular 15 mm	64.263
Two of circles 5 mm	10.866
D-shape	11.397
C-shape	8.718

값(Mean dose), Conformity index(CI), Homogeneity index (HI) 값을 통하여 비교분석한다.

타겟별 치료계획의 평가를 위해 Conformity Index(CI)와 Homogeneity Index(HI)를 사용한다. CI의 정의는 다음과 같다.

$$CI = \frac{PTV_{PIV}^{2}}{PTV \times PIV}$$

PTV_{PIV}는 처방된 isodose 표면에 의해 체적을 감싼 PIV 내에 PTV를 포함하는 체적이다. HI는 PTV 내에 선량분포의 균일성을 나타내는 지표이다. HI의 정의는 다음과 같다.

$$HI = \frac{D_5}{D_{95}}$$

D_5와 D_{95}는 PTV에서 5 %와 95 %를 받는 용적을 나타낸다. 특히, 이하선이나 척수 등과 같은 임계 장기 등에 들어가는 최대선량을 평가하기 위하여 사용한다(Table I)[11].

III. 결 과

모든 실험은 2000 cGy, 1회 조사로써 치료계획이 세워졌고, 결과는 다음과 같다.

1. 15 mm 원형 타겟의 경우, 정육면체 팬텀 내에 타겟의 체적은 53.241 m^3로 계산되었다. Dynamic conformal arc (DCAT)로 계산하였을 때, 최소 선량값(Min. dose)은 1945.5 cGy, 최대 선량값(Max. dose)은 2178. 6 cGy, 평균 선량값 (Mean dose)은 2056.1 cGy, CI는 0.76, HI는 1.04로 나타났다. Segment shape optimization(SSO) 법을 적용한 VMAT 치료 계산하였을 때, 최소 선량 값은 1971.8 cGy, 최대 선량 값은 2146.4 cGy, 평균 선량 값은 2064.0 cGy, CI는 0.83, HI는 1.03으로 나타났다. 두 가지 치료계획은 모두 2000 cGy를 기준으로 DCAT은 99.88 %, VMAT은 97.12 %로 앞선 경우가 오차 범위 내에서 더 나은 결과를 보였다. 그러나 선량분포에서도 확인할 수 있듯이 두 치료계획은 큰 차이를 보이지 않았다(Table II)(Fig. 10, 11, 12).

2. 팬텀의 중심을 기준으로 만들어진 직사각형 타겟의 경우, 팬텀 내 타겟의 체적은 64.263 cm^3이다. Dynamic conformal arc로 계산하였을 때 최저 선량 값은 1956.7 cGy, 최대 선량 값은 2160.8 cGy, 평균 선량 값은 2063.3 cGy, CI는 0.8, HI는 1.03으로 나타났다. VMAT with SSO로 계산 시, 최소 선량 값은 1971.8 cGy, 최대 선량 값은 2146.4 cGy, 평균 선량 값은 2064.0 cGy, CI는 0.7, HI는 1.04로 계산되었다. 이

Table II. 15 mm Circular target dose values (cGy) CI, HI.

	Circular 15 mm DCAT	Circular 15 mm VMAT
Min. Dose	1945.5	1971.8
Max. Dose	2178.6	2146.4
Mean. Dose	2056.1	2064.0
Conformity Index (CI)	0.76	0.83
Homogeneity Index (HI)	1.04	1.03

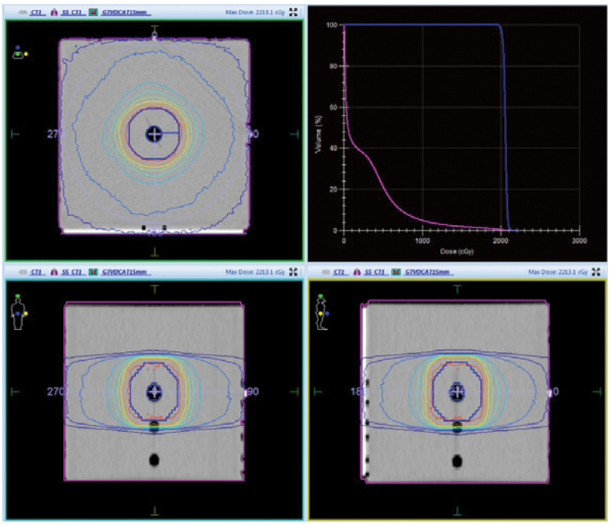

Fig. 10. (Color online) 15 mm Circular target dose distribution, dynamic conformal arc calculation.

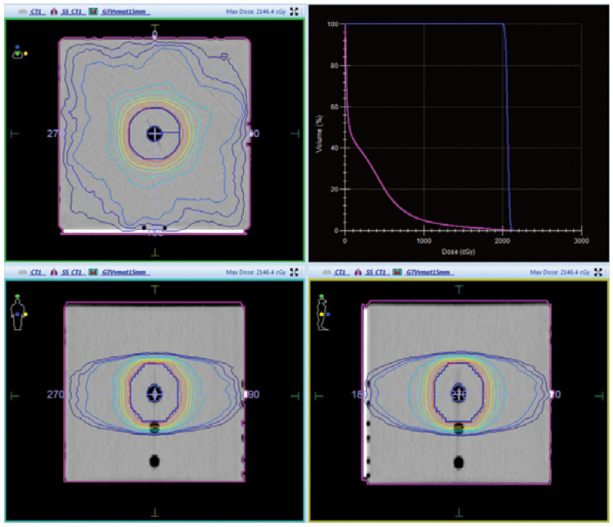

Fig. 11. (Color online) 15 mm Circular target dose distribution, VMAT with SSO calculation.

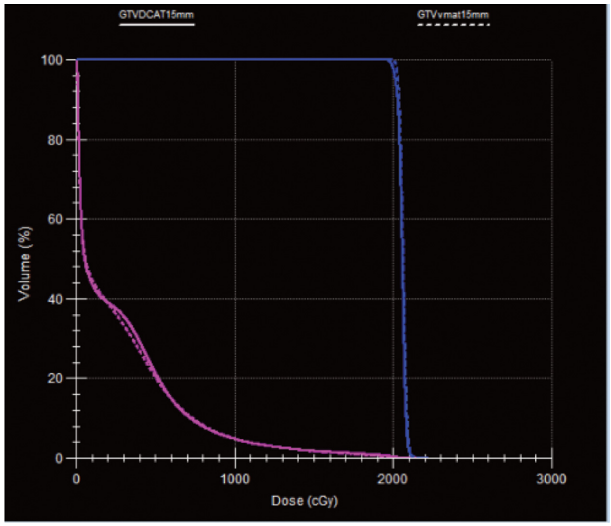

Fig. 12. (Color online) 15 mm Circular target Dose volume histogram, DCAT vs VMAT.

Table III. 15 mm Rectangular target dose value (cGy) CI, HI.

	Rectangular 15 mm DCAT	Rectangular 15 mm VMAT
Min. Dose	1956.7	1948.3
Max. Dose	2160.8	2171.5
Mean. Dose	2063.3	2056.3
Conformity Index (CI)	0.80	0.70
Homogeneity Index (HI)	1.03	1.04

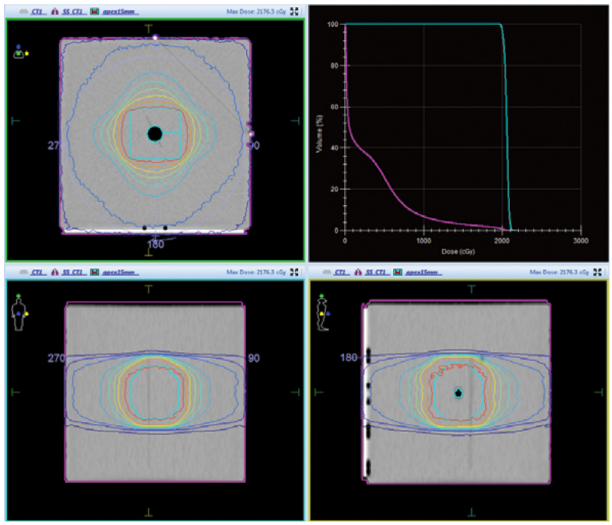

Fig. 13. (Color online) 15 mm Rectangular target dose distribution, Dynamic conformal arc calculation.

경우 최대 선량 값과 최소 선량 값의 차이가 상대적으로 VMAT 치료계획의 경우가 더 낮았고, 선량분포를 확인하였을 때 보다 타겟의 형태를 보다 효과적으로 선량분포를 나타내고 있었다. 타겟의 주변에 임계장기가 존재한다면, 문제점을

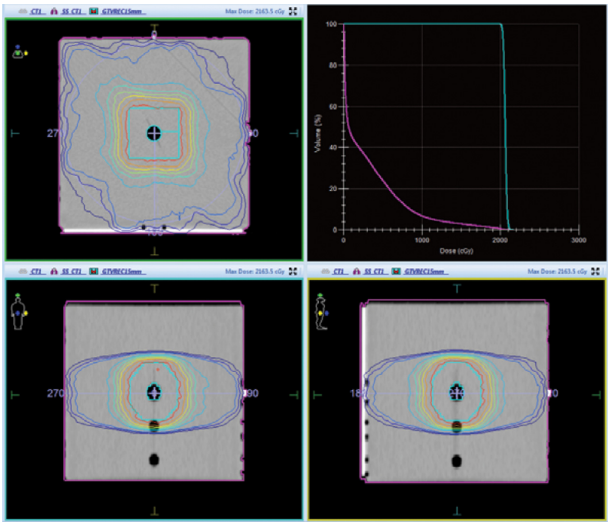

Fig. 14. (Color online) 15 mm Rectangular target dose distribution VMAT with SSO calculation.

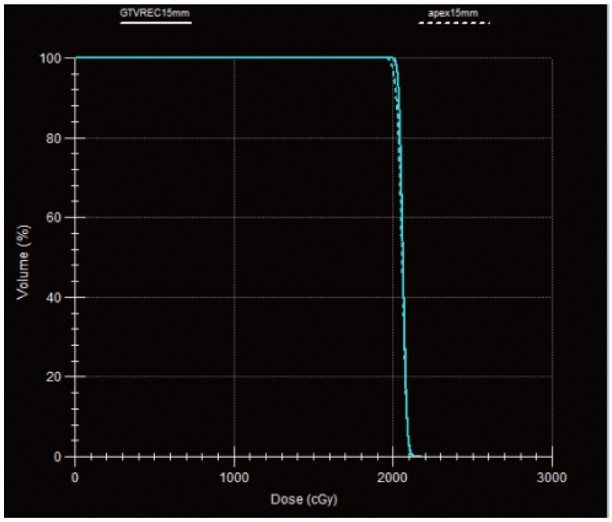

Fig. 15. (Color online) 15 mm Rectangular target Dose volume histogram, DCAT vs VMAT.

발생시킬 여지는 있으나, 타겟의 적용범위를 감안할 경우에는 유의하지 않은 결과를 나타냈다(Table III)(Fig. 13, 14, 15).

3. 이번에는 2개의 5 mm 원형 타겟을 적용하여 치료계획을 시행하였고, 이 경우 팬텀 내 타겟의 체적은 10.866 cm^3이다. Dynamic conformal arc로 계산하였을 때 최저 선량 값은 1769.4 cGy, 최대 선량 값은 2062.7 cGy, 평균 선량 값은 1931.5 cGy, CI는 0, HI는 1.06으로 나타났다. VMAT with SSO로 계산 시, 최소 선량 값은 1965.5 cGy, 최대 선량 값은 2236.9 cGy, 평균 선량 값은 2118.5 cGy, CI는 마찬가지로 0을 나타내었고, HI는 1.05로 계산되었다. 여러 개의 타겟을 치료하는 경우, VMAT으로 계산하였을 때 평균 선량 값이 처방선량(2000 cGy)에 더욱 가깝게 계산되었고, 타겟을

Table IV. 5 mm Two circular target dose vlaue (cGy) CI, HII.

	Two of circles 5 mm DCAT	Two of circles 5 mm VMAT
Min. Dose	1769.4	1965.5
Max. Dose	2062.7	2236.9
Mean. Dose	1931.5	2118.5
Conformity Index (CI)	0	0
Homogeneity Index (HI)	1.65	1.05

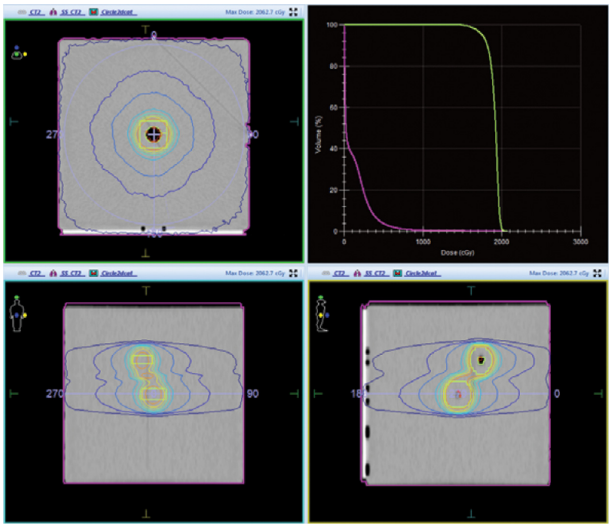

Fig. 16. (Color online) 5 mm Two circular target dose distribution dynamic conformal arc calculation.

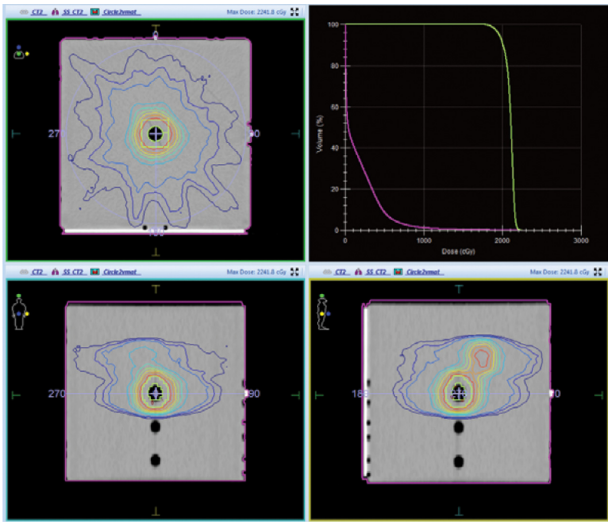

Fig. 17. (Color online) 5 mm Two circular target dose distribution VMAT with SSO calculation.

처방선량 범위에서 99.55 % 포함하였다. 그러나 DCAT 치료계획은 상대적으로 평균 선량 값이 처방선량에 못 미치는 결과를 나타내었고, 타겟을 90 % Isodose curve line에 이르러서야 겨우 타겟을 포함하였다(Table IV)(Fig. 16, 17, 18).

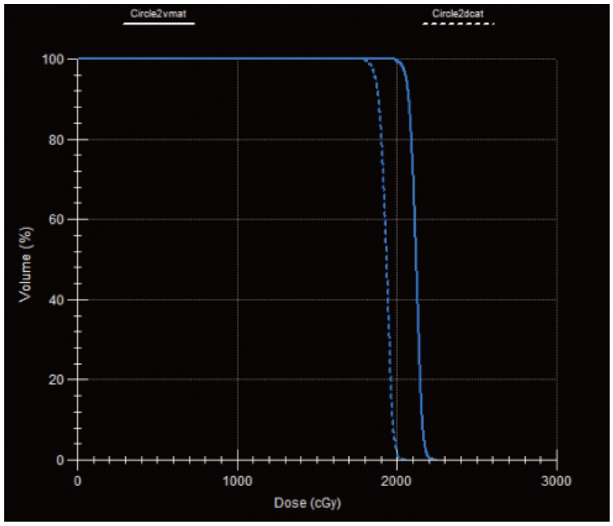

Fig. 18. (Color online) 5 mm Two circular target Dose volume histogram, DCAT vs VMAT.

Table V. D-shaped target dose value (cGy) CI, HI.

	D-Shape DCAT	D-Shape VMAT
Min. Dose	1302.7	1945.0
Max. Dose	2022.7	2242.4
Mean. Dose	1885.8	2118.5
Conformity Index (CI)	0	0
Homogeneity Index (HI)	1.09	1.06

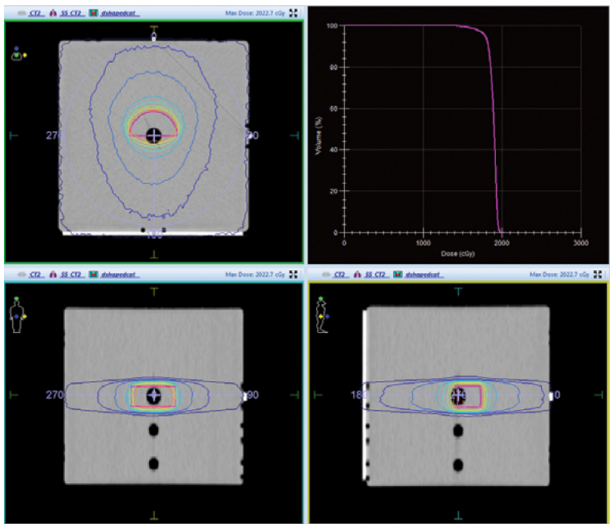

Fig. 19. (Color online) D-shaped target dose distribution, dynamic conformal arc calculation.

4. 팬텀의 중심을 기준으로 D형의 가상 타겟을 설정했을 경우, 팬텀 내 타겟의 체적은 11.397 cm^3이다. Dynamic conformal arc로 계산하였을 때 최저 선량 값은 1302.9 cGy, 최대 선량 값은 2022.7 cGy, 평균 선량 값은 1885.8 cGy, CI는 0, HI는 1.09로 나타났다. VMAT with SSO로

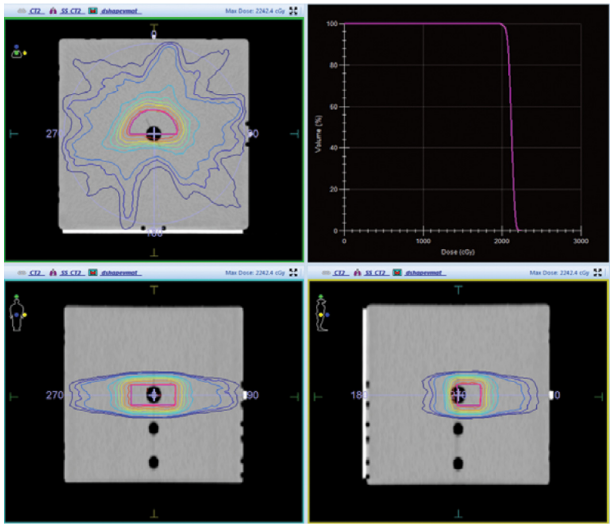

Fig. 20. (Color online) D-shaped target dose distribution VMAT with SSO calculation.

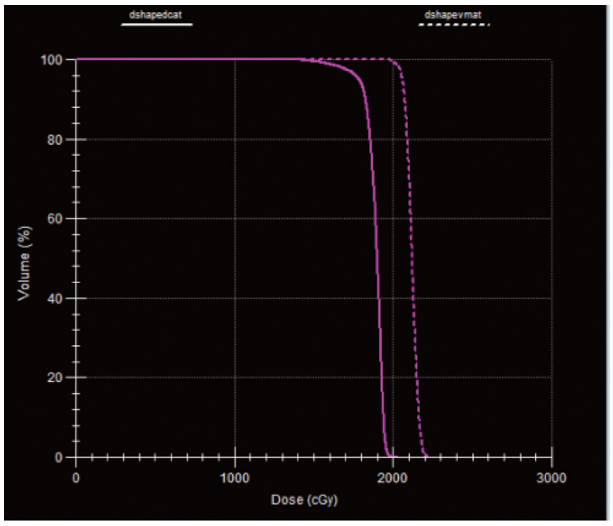

Fig. 21. (Color online) D-shaped target dose volume histogram, DCAT vs VMAT.

계산 시, 최소 선량 값은 1945.0 cGy, 최대 선량 값은 2242.4 cGy, 평균 선량 값은 2118.5 cGy, CI는 0, HI는 1.06으로 계산되었다 DCAT의 치료계획은 평평한 부분에 중요한 장기가 밀접해있을 경우, 선량분포의 어려움으로 고 선량을 받는 것을 피하기 어려운 것으로 보인다. VMAT은 상대적으로 DCAT의 경우보다 저 선량 범위가 더 넓지만, 반달 형태의 타겟을 보다 효율적으로 선량분포를 구성하고 있고, 평평한 부위에 중요장기가 밀접해있을 경우, 상대적으로 저 선량을 부여할 수 있다(Table V)(Fig. 19, 20, 21).

5. 팬텀의 중심에 척수와 같은 장기가 C자형의 치료 타겟을 파이프 모양으로 관통하는 경우를 상정해보았다. 팬텀 내

Table VI. C-shaped target dose value (cGy) CI, HI.

	C-Shape DCAT	C-Shape VMAT
Min. Dose	366.7	1484.2
Max. Dose	921.9	2481.3
Mean. Dose	768.0	2140.5
Conformity Index (CI)	-	0.61
Homogeneity Index (HI)	1.78	1.29

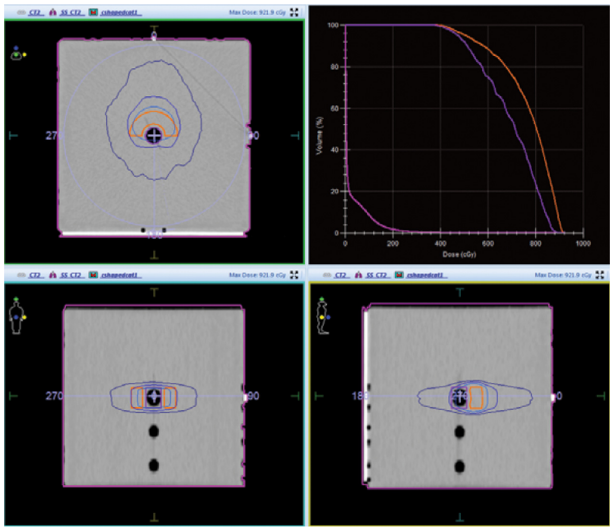

Fig. 22. (Color online) C-shaped target dose distribution, dynamic conformal arc calculation.

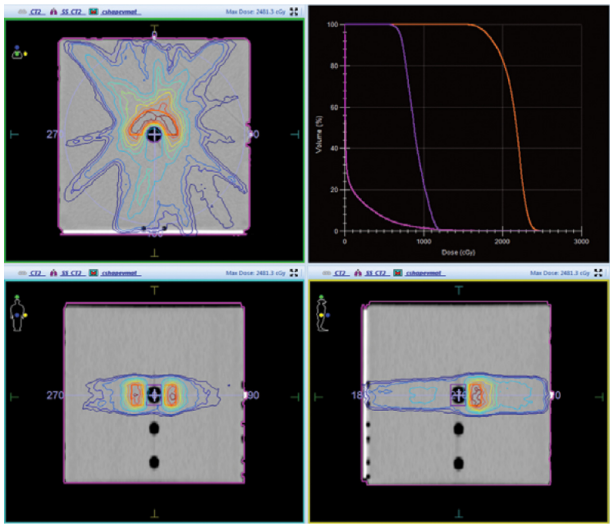

Fig. 23. (Color online) C-shaped target dose distribution VMAT with SSO calculation.

타겟의 체적은 8.718 cm^3이다. 척수를 가정한 중심부의 체적은 1000 cGy를 넘지 못하도록 제한을 걸었다. 이 시점에서, Dynamic conformal arc로 계산하였을 때 최저 선량 값은 336.7 cGy, 최대 선량 값은 921.9 cGy, 평균 선량 값은

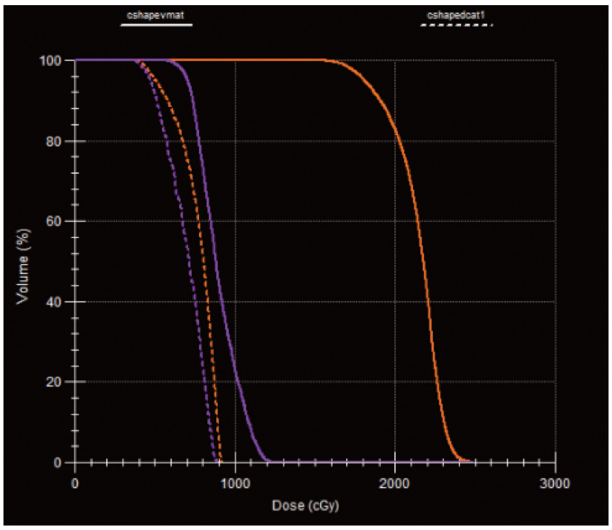

Fig. 24. (Color online) C-shaped target Dose volume histogram, DCAT vs VMAT.

768.0 cGy, HI는 1.78로 나타났다. CI는 처방선량과 선량분포 사이의 값의 차이가 상당하여 계산할 수 없었다. VMAT with SSO로 계산 시, 최소 선량 값은 1484.2 cGy, 최대 선량 값은 2481.3 cGy, 평균 선량 값은 2140.5 cGy, CI는 0.6, HI는 1.29로 계산되었다. 제한 선량 값을 부가하였을 때 DCAT의 경우, 처방선량에 해당하는 선량분포를 전혀 만들어 낼 수 없었고 이 때문에 우리가 원하는 선량분포는 더욱이 만들어 낼 수 없었다. VMAT의 경우에는 C자형 타겟을 적절하게 감싸고 있었고, HI값이나 CI값 또한, DCAT의 경우보다 더 나은 결과 값을 나타내었다(Table VI)(Fig. 22, 23, 24).

IV. 고찰 및 결론

최근의 방사선치료는 두경부를 포함하여 체부에 이르기까지 이전의 방사선치료보다 정확함을 요구한다. 뇌정위적 방사선수술(Stereotactic radiosurgery, SRS)이나 정위적체부방사선치료(Stereotactic radiotherapy, SBRT)는 가장 성장가능성이 높은 치료기법이다. 이 치료기법들은 외부방사선치료를 통한 local control과 환자의 생존율을 증가시키는데 이바지 하고 있다[12].

이번 연구의 목적은 SRS나 SBRT를 시행할 때, Dynamic conformal arc를 이용한 치료계획과 Volumetric modulated arc therapy를 이용한 치료계획이 얼마나 정상조직을 보호하는데 유용하는가를 평가하기 위함이다. 두 개의 치료계획은 2000 cGy, 1회 조사를 기준으로 시행하였고, 이를 최저 선량 값, 최대 선량 값, 평균 선량 값, Conformity index(CI), Homogeneity index(HI)로 분석하였다.

IMRT에서 MLC는 중요한 의미를 지닌다. 세기 변조된 치료 빔으로부터 정상조직을 보호하는 역할과 빔의 조사야 내에서 빔의 세기분포를 만드는 역할을 한다. 그렇기 때문에 기존의 방사선치료의 상식과는 다르게 IMRT에서는 MLC의 두께가 결정적인 영향을 나타내지 않는다. 이와 더불어 연속회전조사치료의 경우, 선형가속기의 선량률, 갠트리의 회전속도, MLC의 이동속도가 선량분포를 결정하는 인자이다.

INFINITY 선형가속기를 이용한 Volumetric modulated radiotherapy(VMAT)의 치료계획을 좌우 하는 인자는 선형가속기의 선량률과 갠트리의 회전속도, MLC의 이동속도 모두 변화시켜 빔의 선량분포를 적절하게 사용한다. 이 실험에 사용한 INFINITY 장비로 VMAT 치료 시 비록 leaf의 크기가 5 mm로 APEX가 지닌 2.5 mm leaf에 비해 열악하지만, 앞서 열거한 3가지의 인자를 모두 사용하여 치료조사야 내의 방사선의 분포를 세밀하고 가공하게 되어, D자형 타겟이나 C자형 타겟의 치료 시 보다 효율적이고 빠른 치료가 가능하게 되었다.

APEX는 VMAT보다 얇은 2.5 mm leaf을 탑재하여 상대적으로 VMAT 치료보다 더 나은 결과를 나타낼 것으로 생각되었다. 하지만, APEX를 이용한 치료를 하기 위해서는 Dynamic conformal arc therapy(DCAT)를 이용하여 치료계획을 세우는데, DCAT을 이용하여 치료계획을 세울 때 바꿀 수 있는 변수는 오직 MLC의 속도만 변화시킬 수 있고, 다른 인자들은 일정하게 유지되는 약점을 지니고 있다.

15 mm 원형 타겟의 경우, 타겟의 형태를 비추어볼 때 갠트리의 속도나 타겟의 모양 등을 생각해보면 MLC의 leaf 크기가 치료결과를 나타내는 가장 중요한 변수로 떠오른다. 따라서 Dose volume histogram(DVH)에서나 치료계획의 선량분포도를 보면 가상 종양 타겟에 선량이 집중되어있음에도 불구하고, VMAT보다 DCAT이 주변 조직에 적은 선량을 나타낸다. 그러나 VMAT의 경우에도 비록 저 선량 범위가 더 크다는 단점은 있지만 종양 타겟을 기준으로 생각했을 때 그다지 낮은 결과를 나타내지는 않았다.

두 번째, 15 mm 직사각형 타겟의 경우, 선량분포는 직사각형의 꼭짓점부근을 잘 감싸고 주변 조직이 있을 것으로 생각되는 부위에 최대한 선량을 적게 하는 것이 주된 관점이다.

VMAT은 선량분포를 만드는 3가지 인자를 사용하여 종양 타겟의 모양을 이상적으로 배열하였고, 처방선량에 대하여 적합한 치료결과를 나타내었다. DCAT의 경우는 종양 타겟에 대한 선량은 적절하였지만, 선량분포를 나타내는 인자의 제한점으로 선량분포가 원형으로 나타나는 특징이 있어 각진 꼭짓점 부위를 이상적으로 선량분포를 나타내기는 부족함이 있다.

세 번째, 2개의 종양 타겟의 경우, VMAT은 타겟의 모양을 전체적으로 인식하여 CT slice 간 상호 간섭하여 선량분포를 만드는 반면, DCAT은 한 개의 CT slice 마다 계산을

하고 이어 붙이는 방법을 사용한다. 이에 따라 2개의 타겟이 근처에 산재하여 있을 때 선량분포는 DCAT의 경우가 계산이 더욱 어려워지는 결과를 초래하는데, 여기에 방사선 선량률이나 갠트리의 속도 등을 제어할 수 없기에 상대적으로 처방선량에 가까운 100 % 선량이 타겟을 감싸지 못하고 90 % 선량분포에서야 타겟에 적용할 수 있다. VMAT은 2개의 타겟을 적정하게 포함하고, 100 % 선량분포 또한 99 % 이상으로 타겟에 적용하였다.

네 번째, D자형 타겟은 둥근 부분과 평평한 부분을 모두 지닌 가상의 종양으로 원형의 타겟치료에 효율적인 DCAT이 얼마나 평평한 부분을 잘 표현할 수 있는가가 요점이다. 그러나 DCAT 치료계획에서 보면 HI값은 VMAT에 비하여 떨어지고, 종양 타겟을 100 % 선량분포로 감싸는데도 실패했다. 반면, VMAT의 경우 상대적으로 적절한 선량분포를 나타내었고, 100 % 선량분포도 99 % 이상 적용 가능하였다.

다섯 번째, C자형 타겟은 앞서 열거한 실험에 비해 가장 드라마틱한 결과를 나타내었다. DCAT의 치료계획은 종양에 처방한 선량을 제어하지 못하고 따라서 중심에 임계장기로 설정한 내용을 충족하지 못했다. 이에 반해, VMAT은 임계장기선량을 충족할 경우 비록 90 % 선량분포가 95 % 체적에 적용 가능하긴 하지만, DCAT에 비하여 뛰어난 결과를 나타낸다.

SRS나 SBRT는 일반적으로 시행하는 방사선치료에 비하여 상당히 작은 부위를 치료하기 때문에 종양의 선량분포가 상당히 중요하다. 또한 1회에서 5회 정도의 분할조사를 시행하므로 1회조사당 선량도 일반 방사선치료에 비하여 높다.

이를 기준으로 볼 때, 종양부위에 대 선량을 조사하고 주변조직에 낮은 선량을 조사하는 것이 목적으로 한다면, 종양의 크기나 모양, 위치, 배열 등에서 적절한 장비의 적용이 필요하다.

이 연구의 제한점은 치료계획을 임상적인 경험을 바탕으로 임의로 변형하여 의도적으로 선량분포가 타겟에 맞추도록 하지 않아 기존의 치료계획에 비하여 다소 결과 값이 차이가 있을 수도 있다는 점이다.

또한, 팬텀을 사용함으로써 환자에 적용된 데이터가 아니므로 종양의 위치나 형태, 그리고 주변조직의 존재유무, 문턱값 선량에 따라 의료진에 의해 다른 결과를 나타낼 수 있다.

이 연구에서 두경부와 같은 임계장기가 둘러싼 종양의 경우, 방사선 치료 시 기존의 관습에서 벗어나 보다 큰 범위에서 생각해볼 필요가 있다고 사료된다. SRS와 SBRT와 같은 정밀한 치료 빔의 선량분포는 단지 MLC나 빔의 에너지와 같은 단순한 요소로 만들어지지 않는다. 따라서 효율적인 선량분포는 선량분포를 만드는 각각의 요소를 시의적절하고 사용하고 그에 따라 분배할 필요가 있다.

그러므로, 기존의 방사선치료의 경우 MLC의 두께가 치료빔의 해상력을 결정하여 치료결과에 영향을 주었다면 IMRT 영역에서는 그보다 선량분포를 만들어내는데 필요한 다양한 조건들, 예를 들어 회전조사치료시에 사용되는 갠트리의 속도 조절이나, MLC의 동작 및 구성 등 역시 중요해짐에 따라 MLC의 두께보다는 다양한 인자들을 고려하여 환자의 치료에 대한 유용성을 평가하고 그에 따라 알맞은 장비 사용의 적정성을 고려해야한다고 본다.

References

[1] J. H. Kim, J. Korean Med. Assoc. 2008 **51**, 612 (2008).

[2] Y. B. Kim and C. O. Suh, J. Korean Med. Assoc. 2008 **51**, 604 (2008).

[3] S. Jo, M. Chun, M.-H. Kim, Y.-T. Oh, S. Kang, and O K. Noh, KOSRO 201 **28**, 177 (2010).

[4] C. X. Yu, Phys. Med. Biol. **40**, 1435 (1995).

[5] A. Piermattei, A. Fidanzio, S. Cilla, F. Greco, L. Azario, D. Sabatino, G. Mattia, M. Cozzolino, and V. Fusco, Med. Biol. Eng. Comput. **48**, 79 (2009).

[6] B. Longobardi, E. De Martin, C. Fiorino, I. Dell'oca, S. Broggi, G. M. Cattaneo, and R. Calandrino, Radiother. Oncol. **77**, 148 (2005).

[7] C. A. Kristensen, F. Kjaer-Kristoffersen, W. Sapru, A. K. Berthelsen, A. Loft, and L. Specht, Acta Oncol. **46**, 214 (2007).

[8] T. Gupta, J. Agarwal, S. Jain, R. Phurailatpam, S. Kannan, S. Ghosh-Laskar, V. Murthy, A. Budrukkar, K. Dinshaw, K. Prabhash, P. Chaturvedi, and A. D'Cruz, Radiother. Oncol. **104**, 343 (2012).

[9] A. Al-Mamgani, P. Van Rooij, L. Tans, D. N. Teguh, and P. C. Levendag, Technol. Cancer Res. Treat. **12**, 123 (2013).

[10] Lambrecht, D. Nevens, and S. Nuyts, Strahlenther. Onkol. **189**, 223 (2013).

[11] C.-S. Hong, S. G. Ju, M. Kim, J.-i. Kim, J. M. Kim, T.-S. Suh, Y. Han, Y. C. Ahn, D. H. Choi, H. Nam, and H. C. Park, Med. Physics **41**, 021712 (2014).

[12] Kempen, Angela M., Volumetric modulated arc therapy versus Dynamic arc stereotactic radiosurgery for untracranial lesions, The Graduate School University of Wisconsin-La Crosse La Crosse, WI (2013).