

<원저>

소프트웨어 기반 정도관리 시스템을 이용한 부피세기조절회전치료 환자 별 정도관리의 유용성 평가

강동진¹⁾·정재용¹⁾·신영주¹⁾·민정환²⁾·김연래³⁾·권경태⁴⁾

¹⁾인제대학교 상계백병원 방사선종양학과·²⁾신구대학교 방사선과

³⁾춘해보건대학교 방사선과·⁴⁾동남보건대학교 방사선과

Evaluation of the Utility of a Volumetric Modulated Arc Therapy Specific Patient Quality Assurance using Software-based Quality Assurance System

Dong-Jin Kang¹⁾·Jae-Yong Jung¹⁾·Young-Joo Shin¹⁾·Jung-Whan Min²⁾·Yon-Lae Kim³⁾·Kyung-Tae Kwon⁴⁾

¹⁾Department of Radiation Oncology, Inje University Sanggye Paik Hospital

²⁾The Shingu University College of Korea, Seongnam, Korea

³⁾Department of Radiologic Technology, Choonhae College of Health Sciences

⁴⁾Department of Radiologic Technology, Dongnam Health University

Abstract The purpose of this study is to evaluate the usefulness of a software-based quality assurance system based on Volumetric Modulated Arc Therapy treatment plan. Evaluate treatment plan through the DVH analysis, PTV mean dose (D_{mean}) and PTV 95% dose(D_{95}) compare the MFX based on original treatment plan, Average error rate was $0.9\pm 0.6\%$, $1.0\pm 0.8\%$, respectively. Measuring point dose using phantom and ion chamber, the average error rate between the ionization chamber and MFX was $0.9\pm 0.7\%$, $1.1\pm 0.7\%$ (high dose region), $1.1\pm 0.9\%$, $1.2\pm 0.7\%$ (low dose region). The average gamma though of MFX and Delta^{4PT} is $98.7\pm 1.2\%$, $98.4\pm 1.3\%$, respectively. Through this study, A software based QA system that simplifies hardware based QA procedures that involve a lot of time and effort. It can be used as a simple and useful tool in clinical practice.

Key Words : Software-based quality assurance, Log file, Gamma index, Patient specific quality assurance, Delivery quality assurance

중심 단어 : 소프트웨어 기반 정도관리, 로그 파일, 감마지표, 환자 별 정도관리, 선량전달 정도관리

I. 서 론

부피세기조절회전치료(volumetric modulated arc therapy; VMAT)와 같이 복잡하고 정교한 치료 기법을 이용한 방사선 치료 시에는 치료계획의 정확성 평가가 매우 중요하다. 이 때문에 환자별 치료계획의 정도관리에 대한 관심이 점차 증가하고 있다[1, 2].

부피세기조절회전치료는 종양의 크기와 모양에 최적의

선량분포를 형성하여 보다 더 효율적으로 표적에 선량을 집중하고 정상조직에 선량을 분산할 수 있는 장점이 있지만 비균일 플루언스(non-uniformity fluence)로 선량분포를 생성하는 특성 상 치료계획부터 최종적으로 환자에게 선량 전달의 정확성 확인이 매우 중요하다[3, 4].

일반적으로 치료 계획 후 계획대로 선속이 조사 되는지 확인하기 위해 환자 별 정도관리(patient specific quality assurance)로 선량전달 정도관리(delivery quality assurance;

Corresponding author: Jae-Yong Jung, Department of Radiation Oncology, Inje University Sanggye Paik Hospital, Dongil-ro 1342, Nowon-gu, Seoul, 01757, Korea / Tel: 82-2-950-1223 / E-mail: achinara@paik.ac.kr

Received 20 January 2018; Revised 21 February 2018; Accepted 21 February 2018

Copyright ©2018 by The Korean Journal of Radiological Science and Technology

DQA)를 수행한다.

임상에서 주로 사용되는 DQA 방법은 팬텀과 전리함을 이용한 관심 부위에서 측정된 선량(measured dose)과 치료계획시스템에서 계산된 선량(calculated dose)을 비교해 오차가 허용범위 내에 있는지 확인하는 일차원 선량검증(dose verification)과 필름 및 검출기배열(detector array)을 통한 선량분포 측정을 하는 이차원 선량검증으로 이루어져 있다.

하지만 이 방법은 국소 영역의 정확성(local accuracy)만을 대표하는 한계점이 있어 치료계획에 대한 전반적인 선량-부피 히스토그램(dose-volume histogram; DVH)분석도 요구된다[5].

Qian J 등의 연구에 의하면 팬텀을 비롯해 전리함이나 검출기 배열 등의 물리적인 계측 시스템에 따른 많은 시간과 노력, 검출효율의 한계 등의 단점을 보완하고, 치료계획에 대한 전반적인 선량-부피 히스토그램 분석을 하기 위해 로그파일(Log file)을 이용한 소프트웨어 기반 정도관리 기술이 활발히 연구되고 있다[6,7].

최근 모비우스(Mobius Medical system, Houston, ver 2.1.0, USA)사에서 출시한 정도관리 소프트웨어 M3D(Mobius 3D system)와 MFX(Mobius FX system)는 기존의 로그파일을 이용한 정도관리 방법과 달리, 치료계획 DICOM 파일과 동적다엽콜리메이터 로그파일(dynamic collimator log file)을 이용하여 독립적인 알고리즘을 사용하여 선량분포를 재구성한 후, 원래의 치료계획(origin treatment plan)과 선량분포(dose distribution), 표적포함(target coverage), 선량-부피 히스토그램(DVH), 감마지표(gamma index)등을 이용하여 비교 분석함으로써 부피세기조절회전치료 환자의 치료계획에 대한 정도관리와 선량전달에 관한 정도관리를 치료 전(pre)과 치료 중(during), 치료 후(post)에도 수행할 수 있는 특징이 있다[8,9].

이에 본 연구에서는 치료계획시스템의 알고리즘이 아닌 독립적인 알고리즘을 사용하고 로그파일을 이용하여 선량

전달에 관한 정도관리 뿐만 아니라, 치료계획에 관한 정도관리가 가능한 모비우스(Mobius) 시스템이 본원의 장비를 바탕으로 임상에서 기존의 전리함이나 검출기 배열 등을 이용한 물리적인 정도관리 시스템을 대체 가능한지 그 유용성에 대해 평가하고자 하였다.

II. 대상 및 방법

1. 환자 선택

서울소재 S병원에서 VMAT 치료를 받은 환자 중 뇌 전이(brain metastasis), 유방(breast), 총담관(common bile duct; CBD), 직장(rectum), 전립선(prostate), 자궁경부(cervix)로 분류해 각 경우 별 5명씩 30명을 무작위로 선택하였다(Table 1).

모든 치료계획은 Oncentra MasterPlan VMAT(Nucletron BV, Veenendaal, Netherlands)를 사용하여 수립하였고, 최적화 알고리즘은 DAO(direct aperture optimization), 선량계산 알고리즘은 CCC(collapsed cone convolution), 선량계산 격자 크기(dose calculation grid size)는 모든 방향에서 2 mm를 사용하였다. 선량전달은 120개의 다엽콜리메이터(millennium multileaf collimator)가 장착된 선형가속기 Clinac ix(Varian Medical System, Palo Alto, CA)를 사용하였다.

2. 모비우스(Mobius) 시스템

치료계획 후 디지털 의료 영상 전송(digital imaging and communications in medicine; DICOM)포맷의 치료계획(RT plan, RP), 치료구조(RT structure, RS), 치료선량(RT dose, RD)파일이 생성된다. 이 중 치료계획(RP)파일은 갠트리 각도, 콜리메이터 각도, 조사영역의 수, 각 조사영역

Table 1 Treatment information for VMAT patients

	Modality	Energy(MV)	Arc	Number of Patients
Brain(m)	VMAT	6	2	5
Breast	VMAT	6 or 10	2	5
CBD ¹⁾	VMAT	6 or 10	2	5
Rectum	VMAT	6 or 10	2	5
Prostate	VMAT	10	2	5
CX ²⁾	VMAT	6 or 10	2	5

abbreviation

1) CBD : common bile duct

2) CX : cervix

당 세그먼트 수, 갠트리 조절점 당 다엽콜리메이터의 위치 (Leaf position) 등 환자 치료 시 선량을 전달하기 위한 전반적인 치료계획 정보(Plan parameter)를 포함하고 있다.

M3D는 원래의 치료계획(original RP) DICOM파일을 이용하여 치료계획시스템의 알고리즘과는 별도로 독립적인 선량계산 알고리즘(collapsed cone convolution superposition; CCCS)으로 선량을 재계산하여 재구성 치료선량(reconstructed RD)파일을 생성 후 가상의 선량전달을 시행하고 갠트리 충돌(gantry collision), 최적화 오류(optimization error), 데이터전송 오류(data transfer error) 등 치료계획 데이터(treatment plan data)에 관한 전반적인 오류를 확인하여 선량-부피 히스토그램(DVH), 표적포함(target coverage), 3D 감마지표(gamma index), 자료 전송(data transfer)등을 통해 치료계획에 대한 정도관리를 시행한다(Fig. 1).

또한 미국 방사선종양학임상연구회(Radiation Therapy Oncology Group; RTOG)와 미국 의학물리협회(American Association of Physicists in Medicine; AAPM)에서 권고하고 있는 프로토콜이 내장되어 있어 치료계획의 DVH 목표(DVH objective)와 비교한다[7].

M3D에서 독립적으로 사용하는 알고리즘의 정확성은 여러 연구에서 정확성이 입증된 바 있다. C. L. Nelson 등의 연구에 의하면 팬텀에서 M3D에 의해 계산되고, 실제 측정된 선량 사이의 가장 큰 차이가 조사면 3×3 cm²에서 0.58%였고, 다른 모든 측정치는 0.35% 미만이라 보고한 바 있다 [10].

MFX는 치료계획에 의해 생성된 의료용 디지털 영상 및 통신 표준(DICOM) 파일과 로그파일(log file)을 사용하고, 로그파일은 선량전달 시 갠트리 움직임(gantry motion)과 엽의 위치(leaf position), 전달된 모니터선량(delivered MU), 콜리메이터의 움직임(collimator motion), 테이블의 움직임(couch motion), 선속 에너지(beam energy) 등 선

량전달에 따른 정보가 조절기에 의해 50 msec단위로 저장된다.

MFX는 선량전달 후 생성되는 재구성 치료계획(reconstructed DICOM RP)파일을 독립적인 선량계산 알고리즘을 이용하여 선량을 재계산하여 재구성 치료선량(reconstructed DICOM RD)파일을 생성하였다.

이를 이용하여 치료계획과 비교 분석하여 선량-부피 히스토그램(DVH), 표적포함(target coverage), 3D 감마지표, RMS 오류(root mean square error), 제조사에서 제공된 MVP 고체등가팬텀내의 점 선량(point dose) 분석 등을 통해 선량전달에 대한 정도관리를 수행한다.

3. MFX를 이용한 선량전달에 대한 정도관리

우선 본원의 선형가속기는 미국의학물리학회(American Association of Physicists in Medicine; AAPM)의 품질관리지침서(TG-142)에 따라 주기적인 정도관리를 하였다[11].

치료계획에 대한 정도관리를 위해 30명의 치료계획을 치료계획시스템에서 선량전달 정도관리 프로그램(MFX)으로 전송하였다.

모비우스(Mobius) 시스템은 사용자가 빔 데이터를 변화하여 사용할 수 있지만, 독립적인 품질관리를 위해 제조사의 권고사항에 따라 표준 범용 빔 데이터를 수정하지 않고 사용하였다[8].

1) 선량-부피 히스토그램(DVH) 분석

치료계획에 관한 전반적인 평가는 DVH 분석을 통해 이루어졌다. 계획표적용적(PTV) 95% 부피에 도달하는 선량(D₉₅)과 전체 부피에 도달하는 평균 선량(D_{mean})을 치료계획 시스템과 MFX의 값을 서로 비교하였다.

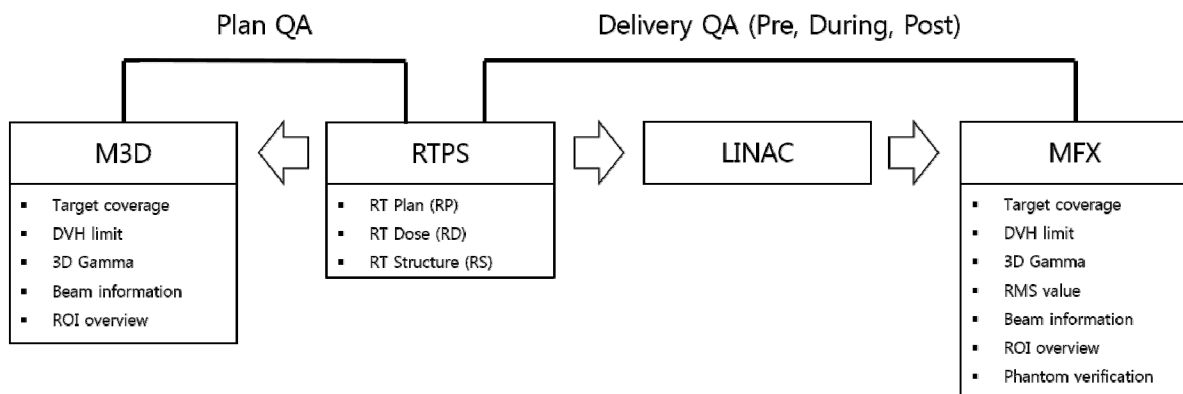


Fig. 1 Scheme for software based QA

2) 점 선량(Point dose) 분석

하드웨어 기반 정도관리(hardware-based QA)와 소프트웨어 기반 정도관리(software-based QA)의 비교를 위해 팬텀과 전리함 CCl3(IBA dosimetry, Uppsala, Sweden)을 이용해 점 선량을 측정하여 측정값과 계산 값을 비교하였다.

점 선량 분석을 위해 전산화단층촬영을 이용해 MVP (Mobius verification phantom) 팬텀을 스캔한 후 영상을 치료 계획시스템에 입력하였다. MVP 팬텀은 가로 23 cm, 세로 26 cm, 높이가 각각 4 cm, 6 cm인 고체등가물질(Virtual Water™)로 이루어져 있으며, 점 선량 분석을 위해 전리함을 위치시킬 수 있는 7개의 공간이 있다. 또한 팬텀 사이에 필름을 이용하여 선량분포 분석도 가능하다(Fig. 2).

측정 전에 10×10 cm²의 조사면으로 선량을 전달하고, 전리함을 통해 전하량을 측정하여 선량과 전하량의 비를 구하였고, 각 환자 별 치료계획으로 2번씩 선량 전달을 하였으며, 선량이 가장 높은 선량 영역(High dose region)과 가장 낮은 선량 영역(Low dose region)에서 측정하였다.

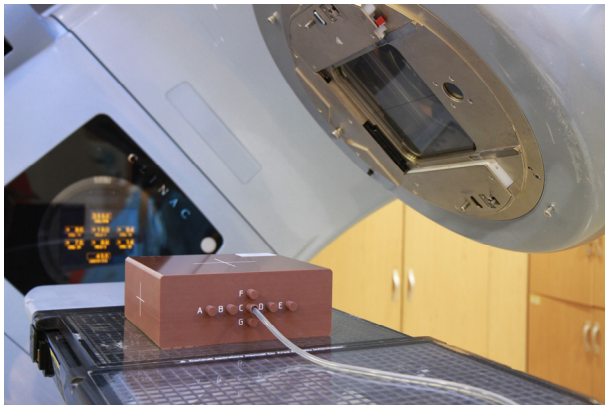


Fig. 2 Mobius MVP(Mobius MVP with seven available ionization chamber position)

3) 선량분포(Dose distribution) 분석

선량분포 분석의 경우 감마지표 평가 방법을 사용하였으며, 임상에서 주로 사용되는 3%/3 mm의 허용기준(acceptance criteria)을 적용하였다. 2차원의 모든 지점에서 감마지표가 계산되어 지고, 이 중 감마지표가 1 이하인 지점의 개수의 비율이 허용 오차를 통과한 비율(passing rate)이 되는데 이 비율이 허용 값 95%보다 큰 지 확인하는 방법이다[12].

표적(target)과 주요장기(critical organ)를 포함해 치료 부위 전체 부피의 감마지표를 소프트웨어 분석방법으로 MFX를, 하드웨어 분석방법으로 반도체 검출기 배열Delta^{4PT} (Scandidos AB, Uppsala, Sweden)을 이용하여 각각 측정하

였고, 허용기준 3%/3 mm를 적용해 통과 비율을 이용해 이를 정량적으로 분석하였다.

III. 결 과

1. 선량-부피 히스토그램(DVH) 분석

Table 2는 DVH를 분석한 결과이다.

PTV 전체 부피에 도달하는 평균 선량(D_{mean})을 치료계획 시스템에서 계산된 선량을 기준으로 MFX와의 상대 오차율을 비교한 결과 뇌전이 0.9±0.7%, 유방 1.0±0.6%, 총담관 0.6±0.3%, 직장 0.7±0.5%, 전립선 1.2±0.9%, 자궁경부 0.9±0.7%로, 평균 오차율은 0.9±0.6%였다(Fig. 3).

PTV 95% 부피에 도달하는 선량(D₉₅)을 치료계획시스템에서 계산된 선량을 기준으로 MFX와의 상대 오차율을 비교한 결과 뇌전이 0.7±0.4%, 유방 0.9±0.6%, 총담관 0.6±0.6%, 직장 0.9±0.4%, 전립선 1.6±1.2%, 자궁경부 1.5±0.9%로, 평균 오차율은 1.0±0.8%였다(Fig. 3).

2. 점 선량(Point dose) 분석

Table 3은 점 선량을 분석한 결과이다.

고 선량 영역에서 치료계획시스템에서 계산된 점 선량을 기준으로 MFX와의 상대 오차율을 비교한 결과 뇌전이 1.2±1.0%, 유방 0.3±0.2%, 총담관 1.5±0.7%, 직장 0.7±0.4%, 전립선 0.9±0.8%, 자궁경부 0.9±0.6%로, 평균 오차율은 0.9±0.7%였다(Fig. 4).

고 선량 영역에서 치료계획시스템에서 계산된 점 선량을 기준으로 전리함 측정값과의 상대 오차율을 비교한 결과 뇌전이 1.2±1.1%, 유방 0.4±0.4%, 총담관 0.6±0.4%, 직장 1.5±0.6%, 전립선 0.6±0.5%, 자궁경부 0.9±0.3%로, 평균 오차율은 1.1±0.7%였다(Fig. 4).

저 선량 영역에서 치료계획시스템에서 계산된 점 선량을 기준으로 MFX와의 상대 오차율을 비교한 결과 뇌전이 1.1±0.8%, 유방 0.9±0.7%, 총담관 1.0±0.9%, 직장 0.9±1.0%, 전립선 0.9±0.8%, 자궁경부 1.6±1.4%로, 평균 오차율은 1.1±0.9%였다(Fig. 5).

저 선량 영역에서 치료계획시스템에서 계산된 점 선량을 기준으로 전리함 측정값과의 상대 오차율을 비교한 결과 뇌전이 1.0±0.4%, 유방 1.1±0.9%, 총담관 1.7±0.9%, 직장 1.3±0.9%, 전립선 0.6±0.4%, 자궁경부 1.4±0.6%로, 평균 오차율은 1.2±0.7%였다(Fig. 5).

Table 2 DVH results compared against MFX based on calculated dose by RTPS(%)

		Average	Max	Min	SD ¹⁾	
DVH	MFX	D _{mean}	0,9	2,3	0,0	0,6
		D ₉₅	1,0	3,0	0,0	0,8

abbreviation

1) SD : standard deviation

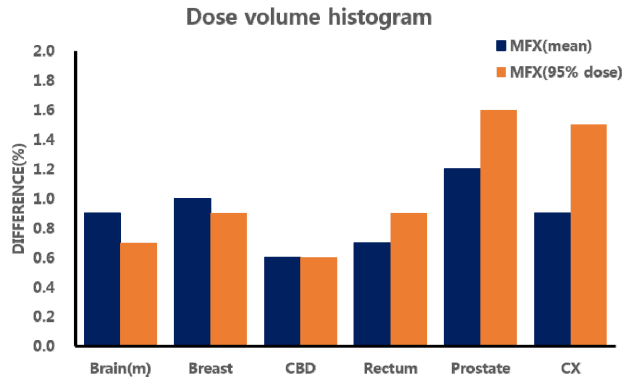


Fig. 3 Comparison of relative error rates with MFX based on RTPS

Table 3 Comparison of patient point dose results in MFX and Ionization chamber(%)

		Average	Max	Min	SD ¹⁾	
Point dose	MFX	High	0,9	2,7	0,1	0,7
		Low	1,1	3,5	0,0	0,9
	Chamber	High	1,1	2,7	0,0	0,7
		Low	1,2	3,0	0,1	0,7

abbreviation

1) SD : standard deviation

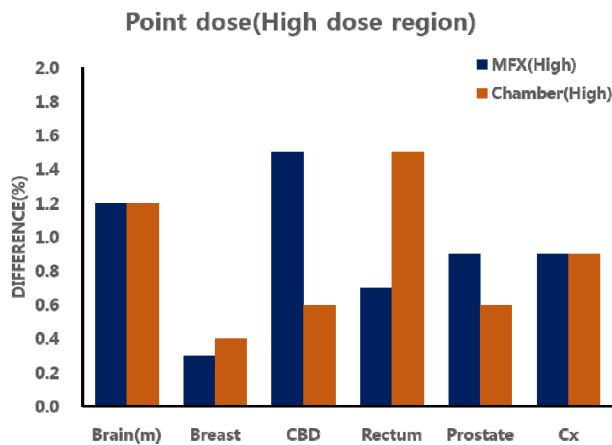


Fig. 4 Comparison of the relative error rate with MFX and chamber based on RTPS(High dose region)

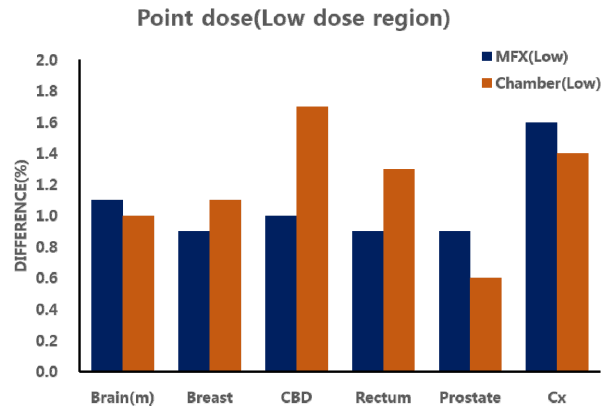


Fig. 5 Comparison of the relative error rate with MFX and chamber based on RTPS(Low dose region)

Table 4 Comparison of patient dose distribution results in MFX and Delta^{4PT}(%)

		Average	Max	Min	SD ¹⁾
Dose distribution	MFX	98,7	100,0	96,4	1,2
	Delta ^{4PT}	98,4	100,0	96,1	1,3

abbreviation

1) SD : standard deviation

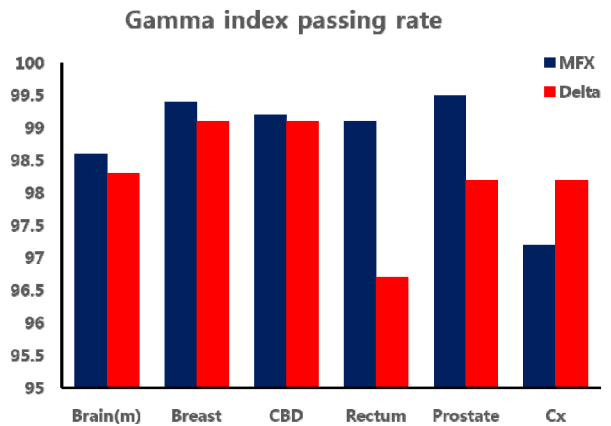


Fig. 6 Comparison of patient dose distribution calculated by MFX and Delta^{4PT}

3. 선량분포(Dose distribution) 분석

Table 4는 선량분포를 분석한 결과이다.

MFX를 이용하여 측정된 감마지표 통과율은 뇌전이 98.6±1.5%, 유방 99.4±0.9%, 총담관 99.2±0.8%, 직장 99.1±0.7%, 전립선 99.5±0.8%, 자궁경부 97.2±1.1%로, 평균 98.7±1.2%였다(Fig. 6).

Delta^{4PT}를 이용하여 측정된 감마지표 통과율은 뇌전이 98.3±0.3%, 유방 99.1±0.8%, 총담관 99.1±0.7%, 직장

96.7±1.2%, 전립선 98.2±1.9%, 자궁경부 98.2±1.1%로, 평균 98.4±1.3%였다(Fig. 6).

MFx와 Delta^{4PT}의 감마지표 통과율 평균 오차는 1.5±1.3%였다.

IV. 고찰 및 결론

부피세기조절회전치료는 기존의 입체조형방사선치료(conformal radiation therapy; CRT)에 비해 치료 계획 복잡성의 증가 때문에 전반적인 수행과정에서 발생할 수 있는 오차를 줄이기 위해 매우 정확하고 효율적인 정도관리가 필요하다.

기존의 팬텀이나 전리함을 이용할 경우 많은 시간과 노력, 비용이 요구되는 단점을 보완하기 위해 최근 연구가 활발한 소프트웨어 기반 정도관리의 임상에서 유용성을 평가하고자 하였고[13-15], 본 연구의 결과 원래의 치료계획과 점 선량과 선량분포, DVH 분석 결과 3% 이내 오차범위를 보이며 근접하게 일치함을 보였다.

Dewayne 등의 연구에 의하면 로그파일 기반 소프트웨어 정도관리 방법은 몇 가지 보완할 점이 있다[16,17].

첫째, 로그파일은 인수검사(commissioning) 당시 장비의 기초자료(beam data)를 이용하기 때문에 결과 값을 신뢰하기 위해서는 장비에 대한 주기적인 정도관리가 정확하다는 전제가 따른다.

둘째, 본 연구에 사용한 동적 다엽콜리메이터 로그 파일(dynalog file)에는 실제 환자에게 전달된 모니터선량(monitor unit) 정보가 기록되지 않고, 갠트리 각도 오류(gantry angle error)나 미세한 다엽콜리메이터의 오류(MLC deviation error) 감지에는 한계가 있다.

이러한 단점에도 불구하고 모비우스 시스템의 장점은 첫째, 효율성(efficiency)과 정확성(accuracy)이다. 치료 전(pre)과 치료 중(during), 치료 후(post) 시간과 노력, 비용 면에서 효율적으로 치료계획 또는 선량전달에 대한 정도관리를 실시하며 실시간 검증할 수 있다. 제조사에서 제공하는 다른 기관의 연구에 따르면 소요되는 시간을 70~75% 줄일 수 있고, 공간 해상도(spatial resolution)면에서 물리적인 검출기 배열(detector array)에 비해 100배 이상의 해상도로 분석이 가능하다는 결과 보고도 있다[18].

둘째, 실시간 DVH 분석을 해 준다는 점이다. Nelms 등의 연구에 의하면 선량전달이 제대로 되었는지 확인하기 위해 일반적인 DQA 방법으로 감마지표 평가를 사용하는데, 감마지표 통과율과 임상적인 선량 지표 사이에 관련성이 제

한적이라 보고된 바 있다[5]. 모비우스 시스템이 제공하는 DVH 분석은 임상적으로 표적(target)과 주요장기(critical organ)에 대해 사용자가 치료계획을 평가함에 있어 많은 이점을 준다.

셋째, 독립적인 알고리즘을 사용한다는 점이다. 이전 여러 연구에서는 로그파일을 재구성하여 치료계획시스템의 알고리즘으로 계산하는 한계점이 있다. 하지만 모비우스 시스템은 독립적인 알고리즘을 사용함으로써 가상의 선량전달을 통해 치료계획에 관한 전반적인 오류를 미리 확인할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 선형가속기와 치료계획시스템의 주기적인 정도관리가 되어 있다는 전제 하에 소프트웨어 기반 정도관리 시스템인 모비우스(Mobius)가 기존의 물리적 선량계측 시스템과 비교해서 임상에서의 유용성을 평가한 결과 만족할만한 결과를 보였고, 이를 이용해서 적응 방사선 치료의 효과적이고 정확한 기초 자료로 사용될 수 있다고 사료된다.

REFERENCES

- [1] Lee L, Le QT, Xing L, RETROSPECTIVE IMRT DOSE RECONSTRUCTION BASED ON CONE-BEAM CT AND MLC LOG-FILE, Int J Radiat Oncol Biol Phys, 70(2), pp.634-644, 2008.
- [2] Han YY, Review on the Pre-treatment Quality assurance for intensity modulated radiation therapy, Progress in MEDICAL PHYSICS, 24(4), pp.213-219, 2013.
- [3] So-Yeon P, Yang-Kyun P, Jongmin P, et al., MU fluence reconstruction based-on delivered leaf position for IMRT quality assurance, JOURNAL OF RADIATION PROTECTION, 38(1), pp.28-34, 2011.
- [4] Maria N, Antoniette V, Mary K, et al., Calibration and quality assurance for rounded leaf-end MLC systems, Med Phys, 28(11), pp.2227-2223, 2001.
- [5] Nelms B.E, Zhen H, Tome W.A, Per-beam, planar IMRT QA passing rates do not clinically relevant patient dose error, Med Phys, 38(2), pp.1037-1044, 2011.
- [6] Qian J, Lee L, Liu W, et al., Dose reconstruction for volumetric modulated arc therapy (VMAT) using cone-beam CT and dynamic log files, Phys Med Biol, 55(13), pp.3597-3610, 2010.

- [7] Markus A, Sara B, Carios De W, et al., Guidelines for the verification of IMRT, European Society for Radiotherapy and Oncology, 2008.
- [8] Mobius 3D USER GUIDE: MOBIUS MEDICAL SYSTEM, 2015.
- [9] Gary A, Jay W, Nesrin D, et al., IMRT commissioning: Multiple institution planning and dosimetry comparisons, a report from AAPM Task Group 119, 2009.
- [10] Nelson C. L, Mason B. E, Robinson R. et al., Commissioning results of an automated treatment planning verification system, JOURNAL OF APPLIED CLINICAL PHYSICS, 15(5), pp.57-65, 2014.
- [11] Klein E, Hanley J, Bayouth J, et al., Task Group 142 report: Quality assurance of medical accelerators, Med. Phys, 36(9), pp.4197-4212, 2009.
- [12] Dahl P, Yong Ho K, Won Taek K, et al., A Method to calculate a pass rate of the γ -index Analysis in Tomotherapy Delivery Quality Assurance, Progress in MEDICAL PHYSICS, 21(4), pp.340-347, 2010.
- [13] Olasolo-Alonso J, Vazquez-Galinanes A, Pellejero-Pellejero S, et al., Evaluation of MLC performance in VMAT and dynamic IMRT by log file analysis, Phys Med, Vol. 33, pp.87-94, 2017.
- [14] Prabaker S, Sriram P, Prakash J, et al., A study on dosimetric properties of electronic portal imaging device and its use as a quality assurance tool in volumetric modulated arc therapy, Rep Pract Oncol Radiother, 16(6), pp.248-255, 2011.
- [15] Krzysztof S, Marta S, Barbara B, et al., EPID in vivo dosimetry in RapidArc technique, Rep Pract Oncol Radiother, 15(1), pp.8-14, 2010.
- [16] Dewayne L, Sotirios S, Joseph E, et al., Investigation of error detection capabilities of phantom, EPID and MLC log file based IMRT QA methods, J Appl Clin Med Phys, 18(4), pp.172-179, 2017.
- [17] Dharanipahy R, Mingyao Z, Deshan Y, et al., Catching errors with patient-specific pretreatment machine log file analysis, Practical Radiation Oncology, 3(2), pp.80-90, 2013.
- [18] Mobius3D Software based IMRT QA, MOBIUS MEDICAL SYSTEM, 2015.