

<원저>

토모테라피에서 통계적공정관리를 이용한 EBT 필름 기반의 선량품질보증의 치료계획 가이드라인

장경환

극동대학교 방사선학과

Treatment Planning Guideline of EBT Film-based Delivery Quality Assurance Using Statistical Process Control in Helical Tomotherapy

Kyung Hwan Chang

Department of Radiological Science, Far East University

Abstract The purpose of this study was to analyze the results from statistical process control (SPC) to recommend upper and lower control limits for planning parameters based on delivery quality assurance (DQA) results and establish our institutional guidelines regarding planning parameters for helical tomotherapy (HT). A total of 53 brain, 41 head and neck (H & N), and 51 pelvis cases who had passing or failing DQA measurements were selected. The absolute point dose difference (DD) and the global gamma passing rate (GPR) for all patients were analyzed. Control charts were used to evaluate upper and lower control limits (UCL and LCL) for all assessed treatment planning parameters. Treatment planning parameters were analyzed to provide its range for DQA pass cases. We confirmed that the probability of DQA failure was higher when the proportion of leaf open time (LOT) below 100 ms was greater than 30%. LOT and gantry period (GP) were significant predictor for DQA failure using the SPC method. We investigated the availability of the SPC statistic method to establish the local planning guideline based on DQA results for HT system. The guideline of each planning parameter in HT may assist in the prediction of DQA failure using the SPC statistic method in the future.

Key Words : Statistical Process Control, Delivery Quality Assurance, Helical Tomotherapy, Planning Guideline, Leaf Open Time

중심 단어 : 통계적공정관리, 선량품질보증 토모테라피, 치료계획 가이드라인, 엽열린시간

1. 서론

체적조절회전방사선치료(Volumetric modulated arc therapy: VMAT), 정위체부방사선치료(Stereotactic body radiation therapy: SBRT) 및 나선형 단층치료(Helical tomotherapy: HT) 치료기법들과 같은 최신 방사선치료에서의 정확한 선량 전달 검증을 위해서 환자 맞춤형 선량품질보증(Delivery quality assurance: DQA)이 필수적이다 [1-5]. 따라서, 환자에게 방사선을 정확하게 전달하기 위해 치료 장비의 성능이 지정된 허용 오차 범위 이내에 들어오

는 것을 확인하기 위한 품질관리(Quality control: QC)는 중요하다[6,7].

선량품질보증 과정에서, 품질관리는 측정된 선량 및 선량 분포와 계산된 선량 및 선량 분포의 차이를 정량화한다. 통계적 공정 관리(Statistical process control: SPC)는 품질관리가 권고된 허용 오차 수준에서 작동하는지 확인하기 위해 품질관리 과정을 모니터링 및 제어하기 위한 통계적 방법이고, 품질관리의 변동성과 안정성을 평가하는 품질관리 방법 중 하나이다[8,9]. 가장 잘 알려진 통계적 공정 관리 방법은 공정관리 전체 시간 동안 획득한 샘플을 기반으로 하

Corresponding author: Kyung Hwan Chang, Department of Radiological Science, Far East University, 76-32 Daehak-gil, Gamgok-myeon, Eumseong-gun, Chungbuk, 27601, Republic of Korea / Tel: +82-43-880-3825 / E-mail: nightholicmp@gmail.com

Received 16 August 2022; Revised 25 August 2022; Accepted 23 September 2022

Copyright ©2022 by The Korean Journal of Radiological Science and Technology

여, 개별 값과 이동범위를 모니터링 하는 데 사용하는 개별 값(individual, X)과 이동 범위(Moving range: MR) 관리도 차트이다. 개별 값 관리도는 개별 측정값의 변화를 나타내고, 이동범위 차트는 두 개의 연속 측정 값 사이의 변동성을 나타낸다[9]. 이것들은 시간 경과에 따른 변동을 줄이기 위해서 설계되었다. 그리고, 공정능력지수(Process capability index: C_p)와 공정적합지수(Process acceptability index: C_{pk})가 특정 범위내에서 품질관리가 잘 관리되고 있는지를 측정하기 위해서 사용된다.

다수의 연구자들은 토모테라피를 이용하여 방사선 치료 시, 최적의 치료계획의 질을 유지하기 위한, 피치(pitch), 조사야 넓이(Field width: FW), 변조 계수(Modulation factor: MF) 간의 최적의 치료 계획 매개변수를 제시하였다[11-16]. 최근에, 방사선치료에서 사용하는 장비, 기계적인 품질보증 및 세기조절방사선치료 품질보증(Intensity modulated radiation therapy: IMRT) 결과를 분석하기 위해서 통계적 공정 관리를 사용하였다[10, 17-22]. Binny 등은 토모테라피에서, 통계적 공정 관리를 이용하여, 최적의 치료계획 매개변수를 예측하기 위해서 계획된 다엽콜리메이터(Multileaf collimator: MLC) 분포와 치료계획매개변수를 조사하였다. 뇌(23명), 두경부(28명), 골반(19명) 부위에서, ArcCHECK 3차원 다이오드 배열 측정기(ArcCHECK 3D diode array, Sun Nuclear Corporation (SNC), Melbourne, FL, USA)를 이용하여 DQA 통과 한 결과를 분석하였다[19]. 그러나, 많은 기관들이 여전히, 선량품질보증을 진행하기 위해서, EBT 필름과 이온 전리함을 사용하고 있다. 그리고, 통계적 공정 관리 방법을 이용하여 EBT 필름과 이온 챔버를 이용하여 선량품질보증 결과를 분석하여, 치료 계획 매개변수에 대한 가이드라인을 발표하지는 않았다.

본 연구의 목적은 토모테라피 치료 시, 통계적 공정 관리 방법을 이용하여, EBT 필름과 이온 전리함을 이용한 선량 품질보증 결과를 기반으로 다양한 치료계획 매개변수에 대한 관리 상한 및 하한을 권고하고, 다양한 임상 증례에서 각 치료 계획 매개변수에 대한 가이드라인을 제안하는 것이다.

II. 대상 및 방법

1. 환자 특성

본 연구는 선량품질보증 결과가 통과 또는 실패한 총 145명의 환자를 대상으로 하였다. 환자 케이스는 뇌(Pass: 45명/Failure: 8명), 두경부(Pass: 32명/Failure: 9명), 골반(Pass: 39명/Failure: 12명) 암 대상으로 하였다(Table 1-3).

대상 환자들은 토모테라피 장비(TomoHDA, Accuracy Inc., Sunnyvale, CA, USA)를 이용하여 치료받았다.

2. 토모테라피에서의 환자 맞춤형 DQA 과정

대상 환자들은 토모테라피 치료계획시스템(Accuracy Inc., Sunnyvale, CA, USA)을 이용하여 치료계획이 세워졌다. 선량품질보증 계획을 만들기 위해서 원통형의 고체 물 팬텀("Cheese phantom", Accuracy Inc., Sunnyvale, CA, USA)을 사용하였다. Cheese 팬텀의 중심부에 위치한 이온 전리함(Exradin AISL, Standard Imaging, Middleton, WI, USA)은 타겟 체적내의 선량의 경사가 낮은(Low dose gradient) 부분으로 옮겼다. 토모테라피 치료계획에서, 절대 점 선량과 감마값을 측정하기 위하여 이온 전리함과 EBT 필름(International Specialty Products, Wayne, NJ, USA)을 Cheese 팬텀에 삽입하여 사용하였다. 모든 환자에서 절대 점 선량 오차(Absolute point dose difference: DD)와 글로벌 감마 통과율(Gamma passing rate: GPR)을 분석하였다. 절대 점 선량 오차의 허용기준은 ±5% 이내였고, 감마 통과율은 3%/3 mm의 기준으로 90% 이상으로 하였다. 만약, 두 종류의 값 중 하나만이라도 허용 오차 범위 이내에 들어오지 않는다면, 선량품질보증 결과는 실패한 것으로 하였다[23,24].

3. 통계적공정관리(Statistical process control: SPC)

모든 치료계획 매개변수들에 대해서 관리상한(Upper control limit: UCL)과 관리하한(Lower control limit: LCL)을 평가하기 위해 관리도(Control chart)를 사용하였다. 중심선(Center line: CL)은 각 치료계획매개변수들의 평균값을 나타낸다. 관리상한과 관리하한은 중심선의 ±3 표준편차로 설정하였고, 이는 데이터 포인트들의 99.7%가 공식(1-3)에 나타낸 것과 같이 정규분포 데이터 세트의 관리 수준 내에 들어오는 것을 의미한다[10,18,19].

$$UCL = \bar{X} + 3 \frac{\overline{mR}}{d_2 \sqrt{n}} \tag{1}$$

$$CL = \bar{X} \tag{2}$$

$$LCL = \bar{X} - 3 \frac{\overline{mR}}{d_2 \sqrt{n}} \tag{3}$$

여기에서, \bar{X} 는 평균값, R 은 각 매개변수에 대한 범위, \overline{mR} 은 두 개의 연속된 측정 값의 절대적인 차이값 또는 이동형 범위의 평균값, d_2 는 n 번 측정하는 연속 세트에 의존하는 상수값이다. 데이터세트는 각 분석을 위한 한 그룹으

로서 고려되어졌으며, 따라서, n 은 1, d_2 는 1,128로 고정하였다[8,19].

4. 분류 및 회귀 나무 모형(Classification and Regression Tree, CART)

CART(Classification and regression tree) 알고리즘은 각각 종속 변수가 범주 또는 숫자인지 여부에 따라 분류 또는 회귀 나무 중 하나를 생성하는 비모수적 결정 나무 학습 방법이다. CART 알고리즘은 분할규칙에 근거하여 의사결정 나무 분석을 수행하는데 가장 일반적인 알고리즘이다[25]. 선량품질보증 실패에 대한 가장 중요한 매개변수를 찾기 위해 CART 알고리즘을 사용하였다. 15개의 치료계획 매개변수를 독립 변수로 고려하였고, 선량품질보증 실패에 대한 예측 변수로서 고려하였다. 선량품질보증 실패 사례가 적기 때문에 부트스트랩(bootstrapping) 방식을 이용하여 실패 횟수를 3배 증가시켜 분석하였다. 모든 통계분석은 Minitab (Minitab Inc., State College PA, USA)을 사용하여 분석하였다.

III. 결과

1. 치료계획매개변수와 선량품질보증 결과 분석

세 종류의 임상 증례에 대한 환자 특성과 종양체적, 총 분할횟수, 총 선량, 분할 선량, 피치, 조사야 넓이, 계획 변조계수(Planning modulation factor, MF), 실제 변조계수(actual MF), 갠트리 회전 수, 갠트리 회전 시간, 치료시간, 테이블 이동 거리, 테이블 이동 속도, 총 모니터 유닛, 엽열린시간들의 치료계획매개변수 특징들은 Table 1-3에서 나타내고 있다. 선량품질보증 결과 통과 및 실패한 경우는 각각 116명(80.0%), 29명(20.0%)을 나타내었다.

2. 선량품질보증 실패와 치료계획매개변수들과의 상관관계(Correlation between DQA failure and treatment planning parameters)

Fig. 1에서 치료계획변수에 대한 상대 변수 중요도를 나타내었다. 모든 대상 환자들에서, 가장 유의미한 상위 3개 변수는 엽열린시간, 갠트리 회전 주기, 테이블 속도순위였

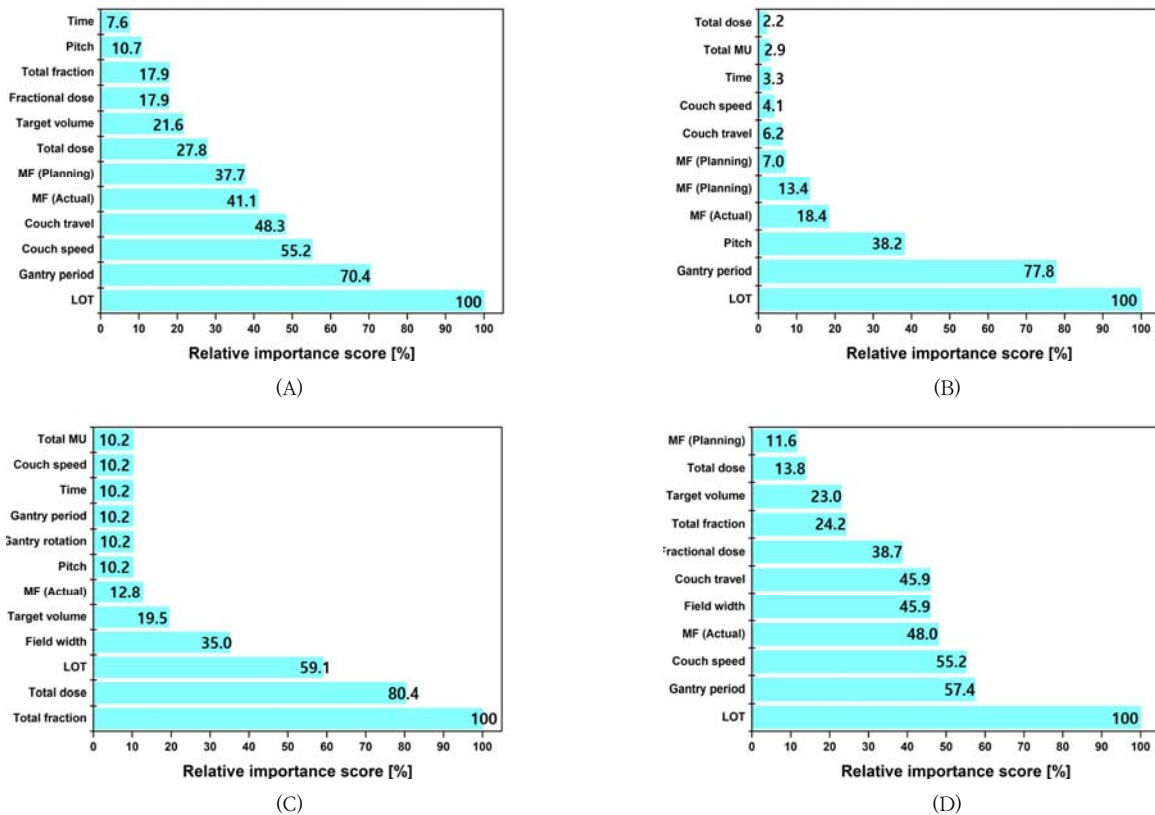


Fig. 1. Variable importance of parameters influencing delivery quality assurance (DQA) failure. Classification and regression tree (CART) were used to identify variable importance. Treatment planning parameters were considered as predictor variables and DQA failure as the predictive variable. (A: All cases, B: Brain cases, C: Head and neck cases, D: Pelvis cases)

다(Fig. 1(A)). 뇌종양의 경우, 유의미한 상위 3개 변수는 엽열린시간, 갠트리 회전 주기, 피치였다. 두경부 종양에서는, 총분할횟수, 총선량, 엽열린시간 순으로 기록되었다. 골반암의 경우, 엽열린시간이 상대적으로 가장 유의미하였고, 갠트리 회전 주기와 테이블 속도 순서로 기록되었다.

3. 각 임상 증례에서의 통계적공정관리 분석 결과

1) Brain case

Table 1은 뇌종양에서의 치료계획 매개변수의 특징과 선량품질보증의 결과를 보여준다. 선량품질보증 결과가 통과된 경우에서, 절대 점 선량 오차와 감마통과율은 각각, $1.41 \pm 1.54\%$ 와 $96.16 \pm 1.75\%$ 를 보여주었고, 실패한 경우에서의 절대 점 선량와 감마통과율은 각각, $1.39 \pm 1.08\%$ 와 $86.78 \pm 1.94\%$ 를 나타내었다.

Accuray 사에서는, 다엽콜리메이터 오류 증가 위험으로 인해 100ms 미만의 엽열린시간비율을 30% 미만으로 유지하도록 권장하고 있다[15]. 합격과 불합격 사례의 경우 엽열린시간이 100ms 미만인 경우의 비율은 각각 $22.74 \pm 10.35\%$ 와 $38.03 \pm 13.89\%$ 를 기록하였다(Table 1). Accuray 회사는 최적의 갠트리 회전 주기를 20초로 권장하였다[26]. 합격 및 불합격의 평균 갠트리 회전 주기는 각각 17.76초와 14.82초로 Accuray 벤더가 권장하는 것보다 낮게 기록되었

다. 합격과 불합격의 평균 피치는 각각 0.36 ± 0.05 과 0.31 ± 0.05 이었다. 합격자와 불합격자의 경우 갠트리 회전 수는 각각 17.66 ± 5.59 과 20.99 ± 5.67 를 기록하였다.

2) Head and neck case

Table 2는 두경부종양에서의 치료계획 매개변수의 특징과 선량품질보증의 결과를 보여준다. 선량품질보증 결과가 통과된 경우에서, 절대 점 선량 오차와 감마통과율은 각각, $1.97 \pm 1.14\%$ 와 $96.90 \pm 2.11\%$ 를 보여주었고, 불합격한 경우에서의 절대 점 선량오차와 감마통과율은 각각, $0.40 \pm 1.70\%$ 와 $84.03 \pm 8.38\%$ 를 나타내었다. 모든 경우에서의 총 분할횟수는 27.32 ± 5.96 이었고, 합격과 불합격의 경우는 각각, 29.38, 20.00이었다. 총 선량은 모든 두경부암 사례에서 약 5478 cGy였으며, 통과 및 불합격 사례 모두에서 각각 5831 cGy 및 4224 cGy였다. 엽열린시간이 100 ms 미만인 모든 두경부암 사례의 비율은 $29.4 \pm 11.2\%$ 였고 관리상한 및 관리하한은 각각 46.29 및 11.61를 나타내었다. 합격과 불합격의 경우에서의 100 ms 미만의 LOT 비율은 각각 $26.7 \pm 3.32\%$ 와 $38.9 \pm 31.63\%$ 였다. 갠트리 회전 주기는 모든 경우에서 18.28 ± 5.33 이었고, 합격 및 불합격의 경우 각각 17.48 ± 4.67 및 21.12 ± 7.02 이었다. 두경부암은 모두 갠트리 회전 주기가 15.34 ± 3.48 였고, 합격과 불합격은 각각 15.66 ± 3.76 과 14.21 ± 2.38 이었다.

Table 1. Summary of the statistical analysis for brain cases

Treatment planning parameters	All cases (Average ± SD)	UCL	LCL	Passed cases (45, Average ± SD)	Failed cases (8, Average ± SD)
Target volume [cc]	977.57 ± 709.48	2637.21	2081.24	943.51 ± 723.21	1169.20 ± 591.19
Total fractions	19.66 ± 9.64	44.75	-5.55	19.60 ± 9.58	20.00 ± 10.00
Total dose [cGy]	4394.34 ± 1423.45	8729.56	22.26	4375.56 ± 1396.70	4500.00 ± 1561.25
Fractional dose [cGy]	248.57 ± 62.85	421.29	84.58	248.31 ± 62.25	250.00 ± 66.14
Pitch	0.35 ± 0.06	0.52	0.21	0.36 ± 0.05	0.31 ± 0.05
Field width [cm]	2.40 ± 0.39	3.01	1.67	2.38 ± 0.42	2.51 ± 0.00
MF [Planning]	2.51 ± 0.31	3.08	1.87	2.48 ± 0.29	2.68 ± 0.35
MF [Actual]	2.04 ± 0.32	2.83	1.20	2.02 ± 0.32	2.16 ± 0.30
GR [number of rotation]	18.16 ± 5.73	32.04	3.28	17.66 ± 5.59	20.99 ± 5.67
GP [s]	17.31 ± 3.39	27.63	7.88	17.76 ± 3.30	14.82 ± 2.76
Treatment time [s]	313.54 ± 113.16	645.71	-15.90	314.94 ± 118.58	305.65 ± 75.27
Couch Travel [cm]	17.31 ± 19.68	25.55	3.43	17.61 ± 21.30	15.64 ± 2.95
Couch speed [cm/s]	0.06 ± 0.06	0.09	0.01	0.06 ± 0.07	0.05 ± 0.01
Total MUs	4461.44 ± 1727.57	9352.84	-377.01	4487.61 ± 1808.16	4314.24 ± 1164.54
LOT [%]	25.05 ± 12.25	59.37	-13.89	22.74 ± 10.35	38.03 ± 13.89
DD [%]	1.40 ± 1.48	5.42	-2.61	1.41 ± 1.54	1.39 ± 1.08
GPR [%]	94.75 ± 3.80	101.85	90.48	96.16 ± 1.75	86.78 ± 1.94

SD, standard deviation; UCL, upper control limit; LCL, lower control limit; FW, field width; MF, modulation factor; GR, gantry rotations; GP, gantry periods; MU, monitor units; LOT, the percentage of leaf open time below 100 ms; DD, dose difference; GPR, gamma passing rate.

Table 2. Summary of the statistical analysis for head and neck cases

Treatment planning parameters	All cases (Average ± SD)	UCL	LCL	Passed cases (45, Average ± SD)	Failed cases (8, Average ± SD)
Target volume [cc]	305.17 ± 151.18	794.20	-212.35	291.04 ± 149.99	355.39 ± 162.24
Total fractions	27.32 ± 5.96	38.90	19.85	29.38 ± 3.25	20.00 ± 7.98
Total dose [cGy]	5478.37 ± 1256.88	8787.25	2876.54	5831.25 ± 913.01	4223.67 ± 1644.48
Fractional dose [cGy]	201.34 ± 18.56	247.85	148.74	198.25 ± 19.38	212.33 ± 11.66
Pitch	0.41 ± 0.06	0.47	0.37	0.42 ± 0.01	0.37 ± 0.10
Field width [cm]	2.51 ± 0.00	2.51	2.50	2.51 ± 0.00	2.51 ± 0.01
MF [Planning]	2.33 ± 0.14	2.63	2.05	2.34 ± 0.13	2.31 ± 0.20
MF [Actual]	1.72 ± 0.20	2.31	1.10	1.71 ± 0.20	1.77 ± 0.21
GR [number of rotation]	18.28 ± 5.33	29.95	5.00	17.48 ± 4.67	21.12 ± 7.02
GP [s]	15.34 ± 3.48	23.53	7.78	15.66 ± 3.76	14.21 ± 2.38
Treatment time [s]	271.65 ± 65.69	437.07	95.12	266.07 ± 62.70	291.47 ± 79.46
Couch Travel [cm]	18.43 ± 4.68	30.80	5.90	18.35 ± 4.68	18.71 ± 5.20
Couch speed [cm/s]	0.07 ± 0.01	0.09	0.04	0.07 ± 0.01	0.07 ± 0.01
Total MUs	3650.31 ± 1001.67	6335.25	767.58	3551.15 ± 987.90	4002.89 ± 1086.79
LOT [%]	29.37 ± 11.19	34.98	18.40	26.69 ± 3.32	38.92 ± 21.63
DD [%]	1.62 ± 1.40	5.24	-1.31	1.97 ± 1.14	0.40 ± 1.70
GPR [%]	94.07 ± 6.74	102.85	90.96	96.90 ± 2.11	84.03 ± 8.38

SD, standard deviation; UCL, upper control limit; LCL, lower control limit; FW, field width; MF, modulation factor; GR, gantry rotations; GP, gantry periods; MU, monitor units; LOT, the percentage of leaf open time below 100 ms; DD, dose difference; GPR, gamma passing rate.

Table 3. Summary of the statistical analysis for pelvis cases.

Treatment planning parameters	All cases (Average ± SD)	UCL	LCL	Passed cases (45, Average ± SD)	Failed cases (8, Average ± SD)
Target volume [cc]	756.72 ± 587.52	1864.25	-6.32	660.20 ± 538.25	1172.92 ± 776.95
Total fractions	17.90 ± 6.98	38.55	-2.82	16.74 ± 7.25	20.36 ± 5.71
Total dose [cGy]	4239.02 ± 748.56	6049.28	2404.51	4168.97 ± 777.94	4278.57 ± 773.78
Fractional dose [cGy]	279.22 ± 121.71	617.30	21.62	299.49 ± 132.84	220.00 ± 42.79
Pitch	0.31 ± 0.08	0.58	0.12	0.31 ± 0.08	0.32 ± 0.06
Field width [cm]	3.86 ± 1.28	6.83	0.30	3.56 ± 1.28	4.87 ± 0.68
MF [Planning]	2.42 ± 0.39	3.22	1.30	2.38 ± 0.41	2.56 ± 0.31
MF [Actual]	1.76 ± 0.30	2.59	1.10	1.81 ± 0.32	1.61 ± 0.16
GR [number of rotation]	19.87 ± 6.36	35.31	4.07	20.12 ± 6.56	19.08 ± 6.57
GP [s]	18.57 ± 3.97	30.60	8.79	19.69 ± 3.69	15.52 ± 2.87
Treatment time [s]	366.09 ± 133.46	619.54	66.23	391.30 ± 132.21	296.33 ± 126.86
Couch Travel [cm]	22.26 ± 8.76	41.75	-0.26	20.45 ± 7.95	28.66 ± 9.35
Couch speed [cm/s]	0.07 ± 0.04	0.15	-0.03	0.06 ± 0.03	0.10 ± 0.02
Total MUs	5074.44 ± 1924.94	8543.29	930.56	5446.85 ± 1910.21	4032.14 ± 1770.28
LOT [%]	22.57 ± 8.43	40.32	-0.76	19.78 ± 7.25	31.33 ± 5.21
DD [%]	1.40 ± 1.70	4.00	-1.78	1.10 ± 1.44	1.40 ± 1.67
GPR [%]	92.16 ± 4.53	101.23	86.37	93.80 ± 2.63	92.78 ± 4.14

SD, standard deviation; UCL, upper control limit; LCL, lower control limit; FW, field width; MF, modulation factor; GR, gantry rotations; GP, gantry periods; MU, monitor units; LOT, the percentage of leaf open time below 100 ms; DD, dose difference; GPR, gamma passing rate.

3) Pelvis case

Table 3은 골반암에서의 치료계획 매개변수의 특징과 선량품질보증의 결과를 보여준다. 선량품질보증 결과가 통과된

경우에서, 절대 점 선량오차와 감마통과율은 각각, 1.10 ± 1.44%와 92.78 ± 4.14%를 보여주었고, 불합격한 경우에서의 절대 점 선량오차와 감마통과율은 각각, 1.40 ± 1.67%와

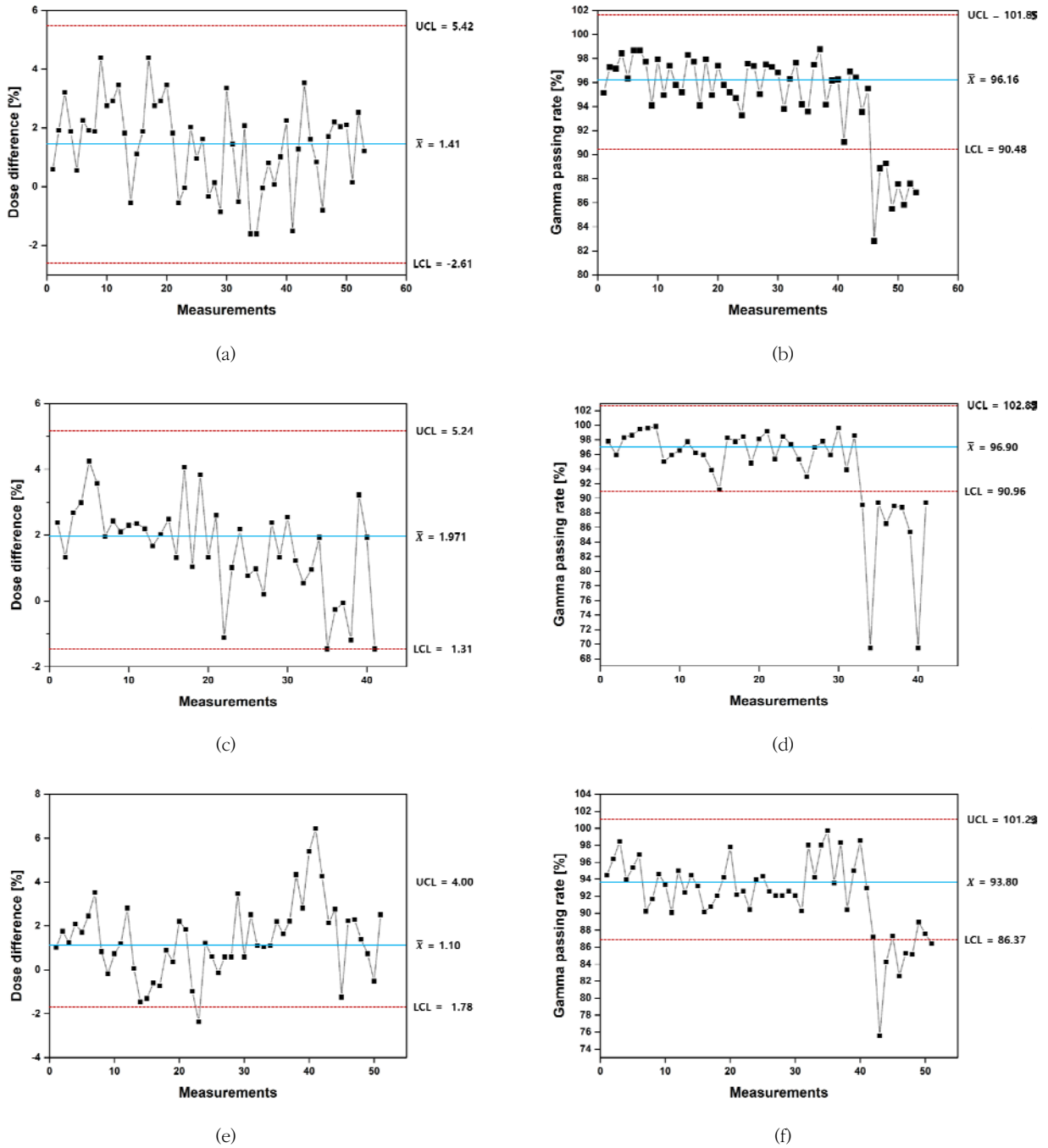


Fig. 2. Control charts of dose difference and gamma passing rate for brain, head and neck and pelvis cases. The means are plotted as blue lines, and the upper and lower control lines are plotted as red lines.

(a and b: Control chart of dose difference and gamma passing rate for brain cases, c and d: Control chart of dose difference and gamma passing rate for head and neck cases, e and f: Control chart of dose difference and gamma passing rate for pelvis cases)

92.78 ± 4.14%를 나타내었다. 100ms 미만의 엽열린시간 비율은 22.57 ± 8.43%였으며, 합격 및 불합격의 경우 100ms 미만의 엽열린시간 비율은 각각 19.78 ± 7.25% 및 31.33 ± 5.21%를 나타내었다. 전체적인 갠트리 회전 주기의 평균

값은 18.57 ± 3.97이었고, 합격 및 불합격 경우에는 각각 19.69 ± 3.69 및 15.52 ± 02.87였다. 평균 테이블 속도는 모든 골반암 사례에서 0.07 ± 0.04였으며, 합격 및 불합격 사례는 각각 0.06 ± 0.03 및 0.10 ± 0.02이었다.

Table 4. Summary of treatment planning parameters using statistical process control for delivery quality assurance (DQA)

Treatment planning parameters	Anatomical site	Planning guideline (No limits: expect approx.)
LOT	Brain	59.37 ~ -13.89
	Head and neck	34.98 ~ 18.40
	Pelvis	40.32 ~ -0.76
Gantry period [s]	Brain	27.63 ~ 7.88
	Head and neck	23.53 ~ 7.78
	Pelvis	30.60 ~ 8.79
Couch speed [cm/s]	Brain	0.09 ~ 0.01
	Head and neck	0.09 ~ 0.04
	Pelvis	0.15 ~ -0.03
Couch Travel [cm]	Brain	25.55 ~ 3.43
	Head and neck	30.80 ~ 5.90
	Pelvis	41.75 ~ -0.26
MF [Actual]	Brain	2.83 ~ 1.20
	Head and neck	2.31 ~ 1.10
	Pelvis	2.59 ~ 1.10
MF [Planning]	Brain	3.08 ~ 1.87
	Head and neck	2.63 ~ 2.05
	Pelvis	3.22 ~ 1.30
Total dose [cGy]	Brain	8729.56 ~ 22.26
	Head and neck	8787.25 ~ 2876.54
	Pelvis	6049.28 ~ 2404.51
Target volume [cc]	Brain	2637.21 ~ 2081.24
	Head and neck	794.20 ~ -212.35
	Pelvis	1864.25 ~ -6.32
Fractional dose [cGy]	Brain	421.29 ~ 84.58
	Head and neck	247.85 ~ 148.74
	Pelvis	617.30 ~ 21.62
Total fraction	Brain	44.75 ~ -5.55
	Head and neck	38.90 ~ 19.85
	Pelvis	38.55 ~ -2.82
Pitch	Brain	0.52 ~ 0.21
	Head and neck	0.47 ~ 0.37
	Pelvis	0.58 ~ 0.12
Treatment time [s]	Brain	645.71 ~ 15.90
	Head and neck	437.07 ~ 95.12
	Pelvis	619.54 ~ 66.23

IV. 고 찰

본 연구에서는 선량품질보증 결과를 기반으로 계획 매개 변수에 대한 관리상한 및 관리하한을 제안하기 위해 통계적 공정관리의 결과를 분석하고, 토모테라피 선량품질보증에

대한 계획 매개변수에 대한 가이드라인을 제시하였다. 각 임상 사례에 대한 선량품질보증의 통과 사례를 분석하고 각 계획 매개 변수의 범위를 Fig. 2와 Table 4에 요약했다.

본 연구에서는 모든 치료 부위에서 100 ms 미만 엽열린 시간의 비율을 Table 4에 요약했다. Accuray 사는 다엽콜

리미터 오류 및 선량품질보증 실패 증가의 위험으로 인해 100 ms 미만 엽열린시간 비율을 30% 미만으로 유지하도록 권고했다[15]. 본 연구에서는 모든 임상증례에서, 선량품질보증 통과와 관련하여 100 ms 미만의 엽열린시간 비율이 30% 이내였고, 불합격의 경우 엽열린시간 비율이 30% 이상이 되는 것을 확인하였다. 이 결과는 Accuray 사의 권고사항과 일치하는 것을 확인하였다.

Binny 등은 뇌, 두경부, 골반 사례에서 통계적공정관리를 사용하여 7가지 계획 매개변수(%LOT < 100 ms, 투영수, 변조계수, 갠트리 회전 주기, 테이블 이동, 사이노그램 세그먼트)의 지침을 조사하여 아래와 같은 결과들을 도출하였다[19]. 뇌, 두경부 및 골반의 경우 %LOT < 100 ms 값은 각각 27-41%, 19-44% 및 37-70%였다. 연구자들은 또한 3개 부위에 대한 엽열린시간에 대한 절대 점 선량오차와 감마통과율 변화가 상관관계를 나타내지 않는다고 제시하였다[18]. 그러나, 다른 연구에서 비록 환자 수는 6명의 환자에 불과했지만, 작은 엽열린 시간이 선량품질보증 실패 확률을 증가시키는 것으로 보고되어졌다[27].

선량품질보증 실패 사례에서 타겟 체적은 모든 치료의 경우에서, 선량품질보증 통과 사례의 타겟 체적 보다 큰 것으로 확인되었다. 또한, 선량품질보증 불합격 경우에서 치료 시간, 테이블 이동 및 총 모니터 유닛이 증가했음을 확인하였다. 타겟이 축 방향으로 길고 크면, 테이블이 종축 방향으로 많이 이동하는 경우 이동의 불확실성이나 나선 조사가 접합 부분 때문에 thread 효과로 인한 산란선의 영향으로 선량품질보증 결과가 상대적으로 낮을 것으로 예상된다. 또한, 일반적으로 선량이 증가함에 따라 모니터 유닛이 증가하게 되면, 다엽콜리메이터의 열림과 닫히는 다엽콜리메이터가 증가하여 불확실성이 증가할 수 있다고 예측할 수 있다[27,29].

치료 계획 매개변수의 값은 통계적공정관리를 사용하여 선량품질보증 통과 확률을 개선하기 위해 치료 전에 변경할 수 있다. 토모테라피 치료계획시스템에는 다양한 치료계획 매개변수가 있기 때문에 이러한 다양한 매개변수를 변경하기 위해 재계획 및 환자별 품질 보증을 결정하는 데 시간이 많이 소비되고, 반복적인 작업이 될 수 있다. 따라서, 선량계측사 및 의학물리사가 다양한 치료 부위에 대한 각 치료계획 매개변수의 가이드라인을 따르면 선량품질보증 결과를 미리 예측할 수 있을 것으로 예상할 수 있다. 하지만, 치료계획매개변수 변경 시에는 반드시, 치료 계획의 질이 치료계획매개변수 변경 전과 동일하게 유지할 수 있도록 치료계획을 세우는 것이 필요하다.

본 연구는 후향적 연구에 기반하여 한계점을 가지고 있다. 본 연구에서 모든 선량품질보증 측정은 EBT3 필름을 사용하

여 수행되었으며, 필름 스캐너 빛의 영향으로 인해 스캐너 램프의 온난화, 필름 균질성, 스캔 간 안정성, 장기 안정성을 비롯한 다양한 불확실성의 원인에 개입되었을 수 있다. 스캐너의 광 산란, 필름 보정, 팬텀 설정, 측정 위치 및 인적 오류. 이러한 불확실성은 선량품질보증의 정확도를 떨어뜨리는 원인이 될 수 있다[28]. 본 연구의 환자 수(145명)는 많지 않지만, 이전에 발표된 논문의 환자 수에 비해 상대적으로 많은 것으로 판단된다. Binny 등은 토모테라피에서 70명의 환자에 대한 통계적공정관리를 기반으로 하는 권장 최적 전달 매개변수에 대해 연구했다[19]. 따라서, 우리는 선량품질보증 불합격 데이터를 수집하고 있으며, 현재 선량품질보증 결과를 예측할 수 있는 모델을 개발하고 있다. 정확한 모델을 개발하기 위하여, 많은 수의 선택된 환자를 모집하고 있으며, 추가 예측 모델 검증에 대한 연구를 계획하고 있다.

V. 결론

토모테라피시스템에 대한 선량품질보증 결과를 기반으로 치료계획 가이드라인을 수립하기 위해 통계적공정관리의 유용성에 대해서 평가하였다. 통계적공정관리를 사용하여 선량품질보증 실패 확률을 줄이기 위해 토모테라피에서 각 치료계획 매개변수의 가이드라인을 제안하였다. 이러한 가이드라인을 참고하여 선량품질보증 실패를 줄이기 위해 치료 전에 치료계획 매개변수를 고려할 수 있도록 허용범위를 제안하였다. 100 ms 이하의 엽열린시간 비율이 많아지면 많을수록 선량품질보증 결과가 불합격이 될 확률이 높아지기 때문에, 치료계획시 엽열린시간이 빠른 부분을 줄이는 것이 선량품질보증 결과의 통과율을 높일 수 있을 것으로 사료된다. 일상적으로 임상에 직접적으로 통계적 분석을 사용하기는 어렵지만, 치료계획자나 선량계측사가 치료계획 매개변수에 따른 선량품질보증 결과를 미리 예측하는데 도움이 될 수 있을 것으로 사료된다.

REFERENCES

- [1] Chang KH, Ji Y, Kwak J, Kim SW, Jeong C, Cho B, et al. Clinical Implications of High Definition Multileaf Collimator (HDMLC) Dosimetric Leaf Gap (DLG) Variations. *Prog Med Phys.* 2016;27(3):111-6.
- [2] Ham IS, Cho PK, Jung KK. Dosimetric Comparison of Setup Errors in Intensity Modulated Radiation

- Therapy with Deep Inspiration Breath Holding in Breast Cancer Radiation Therapy. Korean Society of Radiological Science. 2019;42(2):137-43.
- [3] Kim DG, Jung JH. Evaluating the Usefulness of Rice Bolus Phantom in Tomotherapy: Phantom Study. Korean Society of Radiological Science. 2021;44(6):663-9.
- [4] Chang KH, Lee S, Jung H, Choo YW, Cao YJ, Shim JB, et al. Development of a 3D optical scanner for evaluating patient-specific dose distributions. *Physica Medica*. 2015;31(5):553-9.
- [5] Thiyagarajan R, Nambiraj A, Sinha SN, Yadav G, Kumar A, Subramani V, et al. Analyzing the performance of ArcCHECK diode array detector for VMAT plan. *Reports of Practical Oncology & Radiotherapy*. 2016;21(1):50-6.
- [6] Dong P, Lee P, Ruan D, Long T, Romeijn E, Low DA, et al. 4π noncoplanar stereotactic body radiation therapy for centrally located or larger lung tumors. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*. 2013;86(3):407-13.
- [7] Guckenberger M, Meyer J, Wilbert J, Baier K, Bratengeier K, Vordermark D, et al. Precision required for dose-escalated treatment of spinal metastases and implications for image-guided radiation therapy (IGRT). *Radiother Oncol*. 2007;84(1):56-63.
- [8] Montgomery DC. *Statistical quality control*. New York: Wiley; 2009.
- [9] Prins J. *Process or product monitoring and control*. NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods: National Institute of Standards & Technology, Gaithersburg; 2007.
- [10] Breen SL, Moseley DJ, Zhang B, Sharpe MB. Statistical process control for IMRT dosimetric verification. *Med Phys*. 2008;35(10):4417-25.
- [11] Chen M, Chen Y, Chen Q, Lu W. Theoretical analysis of the thread effect in helical TomoTherapy. *Medical Physics*. 2011;38(11):5945-60.
- [12] Shimizu H, Sasaki K, Tachibana H, Tomita N, Makita C, Nakashima K, et al. Analysis of modulation factor to shorten the delivery time in helical tomotherapy. *J Appl Clin Med Phys*. 2017;18(3):83-7.
- [13] Skorska M, Piotrowski T. Optimization of treatment planning parameters used in tomotherapy for prostate cancer patients. *Phys Med*. 2013;29(3):273-85.
- [14] Thomas SJ, Geater AR. Implications of leaf fluence opening factors on transfer of plans between matched helical tomotherapy machines. *Biomedical Physics & Engineering Express*. 2017;4(1):017001.
- [15] Vaden R, Schauer N. Efficient planning for efficient treatments on tomotherapy. *ASTRO*; 2016.
- [16] Boyd R, Jeong K, Tome WA. Determining efficient helical IMRT modulation factor from the MLC leaf-open time distribution on precision treatment planning system. *J Appl Clin Med Phys*. 2019;20(5):64-74.
- [17] Binny D, Lancaster CM, Trapp JV, Crowe SB. Statistical process control and verifying positional accuracy of a cobra motion couch using step-wedge quality assurance tool. *J Appl Clin Med Phys*. 2017;18(5):70-9.
- [18] Binny D, Aland T, Archibald-Heeren BR, Trapp JV, Kairn T, Crowe SB. A multi-institutional evaluation of machine performance check system on treatment beam output and symmetry using statistical process control. *J Appl Clin Med Phys*. 2019;20(3):71-80.
- [19] Binny D, Lancaster CM, Byrne M, Kairn T, Trapp JV, Crowe SB. Tomotherapy treatment site specific planning using statistical process control. *Phys Med*. 2018;53:32-9.
- [20] Mezzenga E, D'Errico V, Sarnelli A, Strigari L, Menghi E, Marcocci F, et al. Preliminary Retrospective Analysis of Daily Tomotherapy Output Constancy Checks Using Statistical Process Control. *PLoS One*. 2016;11(2):e0147936.
- [21] Meyers SM, Balderson MJ, Letourneau D. Evaluation of Elekta Agility multi-leaf collimator performance using statistical process control tools. *J Appl Clin Med Phys*. 2019;20(7):100-8.
- [22] Sanghangthum T, Suriyapee S, Srisatit S, Pawlicki T. Statistical process control analysis for patient-specific IMRT and VMAT QA. *Journal of Radiation Research*. 2013;54(3):546-52.

- [23] Chang KH, Kim DW, Choi JH, Shin HB, Hong CS, Jung DM, et al. Dosimetric Comparison of Four Commercial Patient-Specific Quality Assurance Devices for Helical Tomotherapy. *Journal of the Korean Physical Society*. 2020;76(3):257-63.
- [24] Chang KH, Lee YH, Park BH, Han MC, Kim J, et al. Statistical Analysis of Treatment Planning Parameters for Prediction of Delivery Quality Assurance Failure for Helical Tomotherapy. *Technology in Cancer Research & Treatment*. 2020;19:1-9.
- [25] Ko YS. The construction methodology of a rule-based expert system using CART-based decision tree method. *The Journal of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*. 2011;6(6):849-54.
- [26] TomoTherapy® Treatment System StatRT™ Guide. TomoTherapy Incorporated; 2010(177).
- [27] Westerly DC, Soisson E, Chen Q, Woch K, Schubert L, Olivera G, et al. Treatment planning to improve delivery accuracy and patient throughput in helical tomotherapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*. 2009;74(4):1290-7.
- [28] Martisikova M, Ackermann B, Jakel O. Analysis of uncertainties in Gafchromic EBT film dosimetry of photon beams. *Phys Med Biol*. 2008;53(24):7013-27.
- [29] Zhao YL, Mackenzie M, Kirkby C, Fallone BG. Monte Carlo calculation of helical tomotherapy dose delivery. *Med Phys*. 2008;35(8):3491-500.

구분	성명	소속	직위
제1저자/교신저자	장경환	극동대학교 방사선학과	조교수