

# 두경부 토모테라피 치료 시 CT scan range에 따른 치료계획의 정확성 평가

삼성서울병원 방사선종양학과

권동열 · 김진만 · 채문기 · 박태양 · 서성국 · 김종식

**목 적:** 두경부 토모테라피 치료 시 다양한 이유로 CT scan range가 부족한 상황이 발생한다. CT scan range는 정확한 선량 계산에 영향을 주기 때문에 Re-CT Simulation이 좋지만 환자의 피폭선량 증가와 불편함, 치료 일정 변경 등 문제점을 갖는다. 이에 본 저자는 기존 CT scan range에서 Plan setup parameter 변화를 통해 Re-CT Simulation 없이 정확한 치료계획에 필요한 최소한의 CT scan range를 평가해보고자 한다.

**대상 및 방법:** CT simulator(Discovery CT590 RT, GE, USA)와 In House Head & Neck Phantom을 이용하였고, Target의 끝단에서 0.25~3.0cm까지 0.25cm씩 증가시켜 CT scan range 별 이미지를 획득하였다. Target과 정상 장기를 Head & Neck Phantom에 등록하고 ACCURAY Precision® 이용하여 치료계획을 설계하였다. 처방 선량은 Daily 2.2Gy, 27 Fxs, Total Dose 59.4Gy, Target은 처방 선량의 95~107%, 정상 장기는 SMC Protocol에 맞춰 치료계획을 설계하였다. 동일한 치료계획 조건에서 Field Width(FW)와 Jaw 모드를 고려한 5가지 방법(Fixed-1cm, Fixed-2.5cm, Fixed-5cm, Dynamic-2.5cm Dynamic-5cm)과 2가지 Pitch(0.43, 0.287)의 Plan Setup parameter로 치료계획을 설계하였다. 각 치료계획에 대한 선량 전달의 정확성은 EBT3 film과 RIT(Complete Version 6.7, RIT, USA)를 이용하여 분석하였다.

**결 과:** Target의 처방 선량과 정상 장기의 견딜선량(Tolerance dose)을 만족한 치료계획(SMC Protocol)은 Fixed-1cm은 0.25cm 이상, Fixed-2.5cm는 0.75cm 이상, Dynamic-2.5cm는 1cm 이상, Fixed-5cm과 Dynamic-5cm인 경우는 1.75cm 이상의 Scan range가 있어야 정확한 치료계획을 할 수 있었다. 선량 전달의 정확성은 RIT로 분석한 결과 SMC Protocol을 만족한 치료계획에서 3% 미만의 오차였다.

**결 론:** 두경부 토모테라피 치료 시 CT scan range가 부족한 경우 Plan Setup Parameter 중 Field Width(FW)를 조절하여 정확한 치료계획을 설계할 수 있었다. 이에 본 저자가 추천한 Plan Setup Parameter를 CT scan range에 따라 적용하고 Re-CT 여부를 판단한다면 업무의 효율성 및 환자의 피폭선량을 감소시킬 수 있을 것으로 사료된다.

▶ **핵심용어** : CT scan range, Tomotherapy®, Radixact®, Field Width, Dynamic Jaw

## 서 론

현대의 방사선 치료는 컴퓨터 단층촬영(kilovoltage-computed tomography, kvCT)을 통해 얻은 영상을 바탕으로 정상 장기를 최대한 보호하면서 종양 조직에 정밀

하게 방사선을 조사할 수 있는 고정밀 방사선치료(high-precision radiotherapy)가 가능하다.

고정밀 방사선 치료를 대표하는 토모치료기인 RADIXACT® Treatment Delivery System(X9, Accuray, Sunnyvale, CA, USA)는 원형 회전 갠트리를 사용하여 빔 조사의 자유도를 높임으로써 정교한 선량 전달이 가능하고 부채꼴 빔(fan beam)을 빗면 조사(tangential beam)함으로써 두경부(head and neck) 방사선 치료에

책임저자: 권동열, 삼성서울병원  
서울 강남구 일원로 81  
Tel: 02)6190-5203  
E-mail: dy82.kwon@samsung.com

유용하다. 또한 최신 토모치료기인 RADIXACT®는 선량률(1000MU/min)까지 향상되어 두경부 치료 시 다양한 모양의 종양을 세기조절방사선치료(intensity modulated radiation therapy, IMRT) 모드로 빠르게 치료할 수 있다.<sup>(1-3)</sup>

하지만 방사선 암 치료의 가장 중요한 부분은 최적의 치료계획과 정확한 전달에 있다. 최적의 치료계획은 kvCT를 통해 얻은 Axial 이미지에 종양(Target)과 정상 장기(organ at risk, OAR)를 정확한 위치에 3차원적 체적(Volume)을 고려하여 윤곽작업(Delineation)을 해야 한다. 이때 Target 및 정상 장기의 Dose constraint은 DVH(Dose Volume Histogram)를 이용하여 평가한다.<sup>(4)</sup> 이때 적절한 CT scan range는 정확한 선량계산 위하여 매우 중요하다. Target의 끝 단(End of PTV)에서 긴 CT scan range는 계산의 정확도는 높여 주지만 환자의 피폭 선량이 증가한다.<sup>(5)</sup> 반대로 Neck Node의 종양이 의심되어 PTV를 연장하면 CT scan range가 부족하여 선량계산이 부정확해진다(Fig. 1). 이에 올바른 치료계획을 위해서는 Target의 끝 단(End of PTV)에서 필요한 CT scan range를 알아야 한다. Khan 등<sup>(6)</sup>은 일반적 방사선치료 시 PTV에서 조사면까지 최소 2cm 이상의 CT range을 추천하고 있으며 3차원 치료시 그 이상의 CT range가 필요하다. Pinnacle planning system(Version. 9.10, Philips, Madison, USA)의 경우 ‘Top/Bottom slice of CT’를 이용하여 마지막 slice를 길게 연장할 수 있는 기능이 있다. 현재 토모치료기의 최신 치료계획 장비 Precision® Treatment Plan-

ning System(Version 1.1.1.1, Accuray, Sunnyvale, CA, USA)에 경우 ‘Top/Bottom slice of CT’ 기능이 존재하지 않아 이미지 연장을 할 수 없다. 또한 IMRT 치료 시 필요한 CT scan range에 대한 국내의 논문 및 규정이 없어 CT range 부족 시 Re-CT Simulation을 하고 있다. 하지만 Re-CT Simulation은 환자에게 불편함 및 피폭선량 증가,<sup>(7)</sup> 치료일정 변경 등 문제점이 발생하며 재 치료계획으로 인해 방사선종양학과 구성원 모두에게 업무량을 증가시킨다.

이에 본 저자는 토모테라피 치료계획 시 기존 CT range에서 Plan setup parameter인<sup>(8-11)</sup> Field Width(1cm, 2.5cm, 5cm) 크기 변화, Dynamic Jaw 사용(Fixed, Dynamic) 유무 및 Pitch 값(0.430, 0.287) 변화를 통해 Re-CT Simulation없이 정확한 치료계획에 필요한 최소한의 CT scan range를 알아보고 DQA(Delivery Quality Assurance)를 통해 정확성을 검증하고자 한다.

## 대상 및 방법

### 1. 실험재료

- CT Simulator(Discovery CT590 RT, GE, USA)
- In House Head and Neck phantom(SMC, Seoul, KOREA)
- Precision® Treatment Planning System(Version 1.1.1.1, Accuray, Sunnyvale, CA, USA)

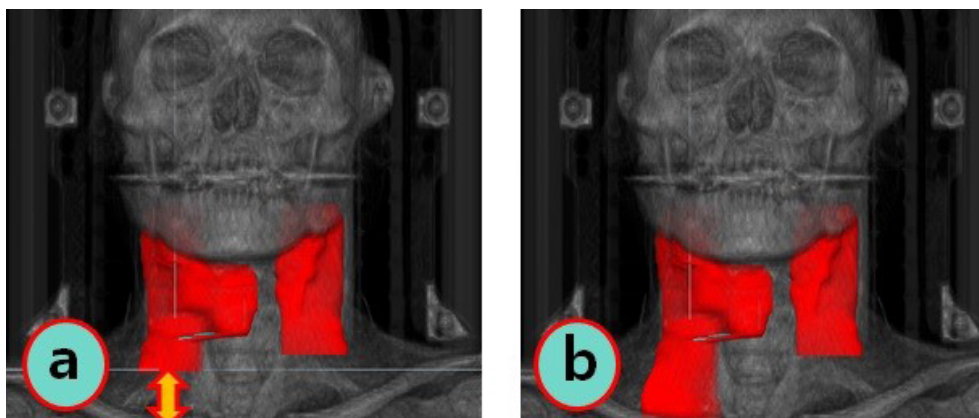


Fig. 1. (a) General CT scan range, (b) Lack of CT scan range for plan

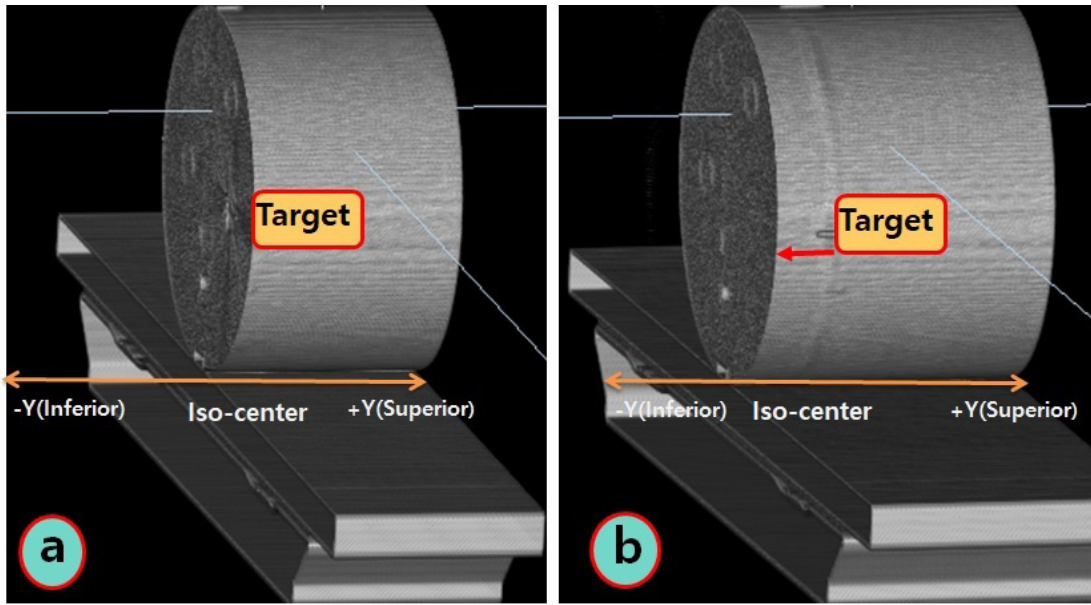


Fig. 2. CT scan of In house Head and Neck Phantom (a) CT scan from superior top to isocenter(end of PTV), (b) Increase scan range at regular intervals from the isocenter(end of PTV)

Table 1. CT scan range and Plan setup parameter

		Parameter										
CT scan range*(cm)		0	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2	3	Full
Plan setup parameter	Field Width & Jaw(cm)	Fixed 1	Fixed 2,5	Fixed 5	Dynamic 2,5			Dynamic 5				
	Pitch	0,43						0,287				

\*Increasing scan range at the end of PTV

- RADIXACT® Treatment Delivery System(X9, Accuray, Sunnyvale, CA, USA)
- Exradin A1SL thimble ionization chamber (Standard imaging, Madison, WI, USA)
- TomoElectrometer(Standard imaging, Middleton, WI, USA)
- Gafchromic™ EBT3 radiochromic film(Ashland Advanced Materials, Bridgewater, NJ, USA)
- RIT(Complete Version 6,7, RIT, USA)
- Rex(Version 1,0, Rexsoft, Seoul, KOREA)

## 2. 실험방법

### 1) CT Scan

CT simulator(Discovery CT590 RT, GE, USA)를 이용하여 Scan 조건 120kv, 250mA, Scan type은 Helical full, Rotation time은 0.8sec, Detector rows는 8, Slice thickness는 2.5mm 간격으로 In House Head & Neck phantom(SMC)을 CT scan하였다. Target(Planning Target Volume, PTV) 기준 Full range 및 Target의 끝단(End of PTV)인 Isocenter(Fig. 2a)에서 0~3.0cm까지 일정하게 증가(Fig. 2b)시키며 CT scan range별 이미지(0cm, 0.25cm, 0.5cm, 0.75cm, 1cm, 1.25cm, 1.5cm, 1.75cm, 2cm, 3cm)를 총 11종류 획득하였다(Table 1).

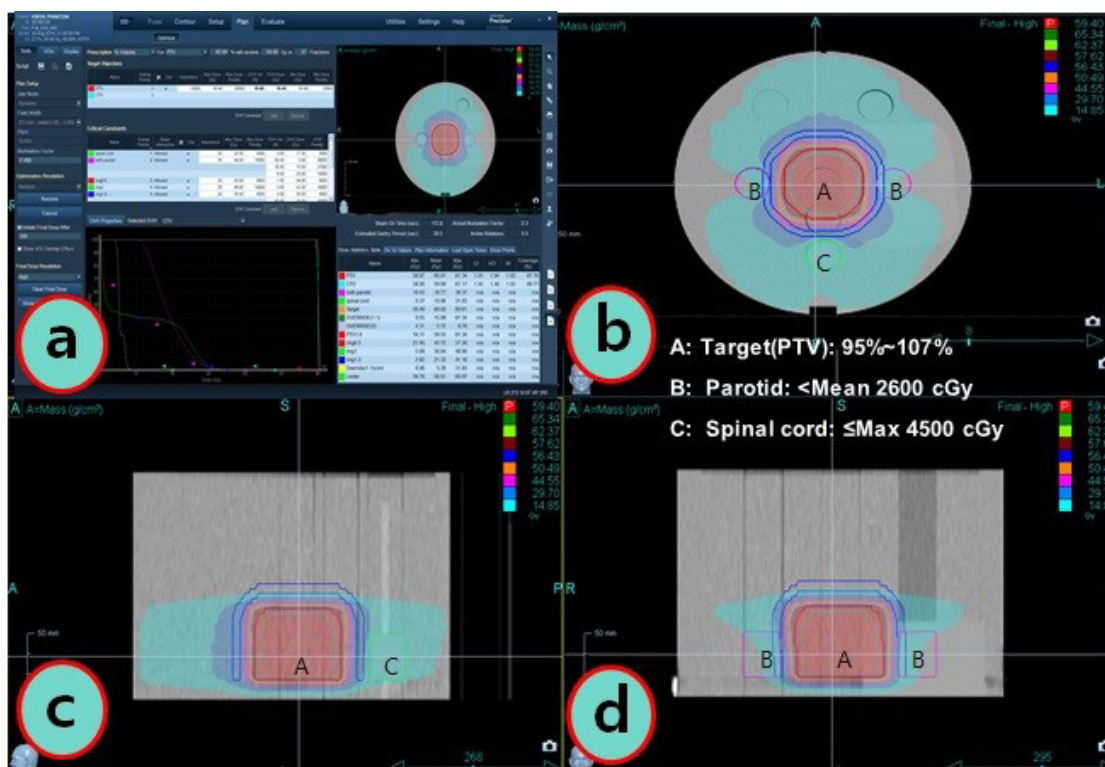


Fig. 3. Precision® Treatment Planning System(Version 1.1.1.1) (a) Treatment plan for virtual Hypopharynx Patients, (b) Axial image, (c) Sagittal image, (d) Coronal image

## 2) 치료계획

ACCURAY의 Precision® Treatment Planning System에 가상의 Hypopharynx(HPX)를 대상으로 이미지를 등록하고 CTV(Clinical Target Volume)를 윤곽작업(Delineation) 후 3mm margin을 더하여 PTV(Planning Target Volume)인 Target(A)을 만들었고 정상 장기는 In House Head and Neck Phantom의 원형 홀에 인체의 해부학 위치를 고려해 위치시켰다. Fig. 3과 같이 Target(A: 56.8cm<sup>3</sup>)와 가상의 Both Parotid(B: 13.3cm<sup>3</sup>) 및 Spinal cord(C: 29.5cm<sup>3</sup>)를 hole 크기에 맞추어 동일하게 그렸다. 처방 선량은 Daily Dose 2.2Gy, 27Fxs, Total Dose 59.4Gy로 설정하고 Target(A)은 처방 선량의 95~107%, 정상 장기는 Both Parotid(B) Mean 26Gy 미만, Spinal cord(C) Max 45Gy 이하로 설정한 후 동일한 하중 계수 및 Iteration(200회)을 적용하여 치료계획(SMC Protocol)을 설계하였다(Table 2).

CT scan range(11종류)별 Plan setup parameter는 Table 1과 같이 적용했다. 첫 번째, Field Width(FW:

Table 2. Head and Neck SMC Protocol

	H&N SMC Protocol (Dosimetric Criteria)
Target	95%~107%
Parotid(Mean)	< 26Gy
Spinal cord(Max)	≤ 45Gy
CI*	< 1.1
HI†	< 1.1

\*Conformity Index(CI), †Homogeneity Index(HI)

Fixed-1cm, Fixed-2.5cm, Fixed-5cm)의 크기를 다르게 적용했다. 두 번째, Fixed 1cm의 효과(edge effect)를 알아보려고 Dynamic Jaw(Dynamic-2.5cm Dynamic-5cm)를 적용했다. 세 번째, Kissick 등이 제안한 magic number인 Pitch(0.430, 0.287: 0.86/n, n; integer) 값을 적용했다.<sup>(12)</sup> Parameter를 변경하며 반복 실험을 하여 총 110개의 치료계획을 얻었고 SMC Protocol 만족 여부를 조사하였다(Table 2).

**Table 3.** Homogeneity Index

Homogeneity Index	$D_{max}/D_x$
	$D_x$ : Prescription Dose

**Table 4.** Conformity Index

Conformity Index	$V_{RI}/TV_{RI}$
	$V_{RI}$ : Total tissue volume that receives the prescription isodose
	$TV_{RI}$ : Tumor volume that receives the prescription isodose

3) 치료계획기준; SMC Protocol

두경부 SMC Protocol은 Emami paper와 QUANTEC (Quantitative Analysis of Normal Tissue Effects in the Clinic) paper를 참고하여 제작되었다(Table 2).<sup>(13-14)</sup> SMC Protocol 기준을 만족하는 치료계획(Pass Plan)을 설정해보면 Target의 Min dose가 D95% Isodose인 56.4Gy 이상이어야 하며 Max dose는 107% 이하인 63.56Gy 이하이어야 한다. 가상의 Parotid는 Mean dose 26Gy 미만이며 가상의 Spinal Cord는 Max dose 45Gy 이하이어야 한다. HI(Homogeneity Index)는 처방선량에 대한 최대선량을 나타냈고(Table 3), CI(Conformity Index)는 처방선량이 받은 종양 볼륨에 대한 처방선량이 받은 총 조직의 볼륨을 나타냈다(Table 4).<sup>(15)</sup> HI 및 CI 값은 1에 가까울수록 이상적이며 SMC Protocol 기준으로 1.1 이하를 만족해야 Pass Plan으로 평가하였다.

4) Dose delivery verification: Full range Plan

치료계획에 대한 선량 전달의 정확성 평가를 위해 Dynamic 모드와 사용 빈도가 높은 FW 2.5cm를 조합한 Dynamic-2.5cm을 DQA(Delivery Quality Assurance) 하였다.<sup>(11)</sup> 표준(Standard)을 평가를 위해 Phantom의 전체를 scan한 Full CT Plan에 대한 DQA를 먼저 진행하였다.

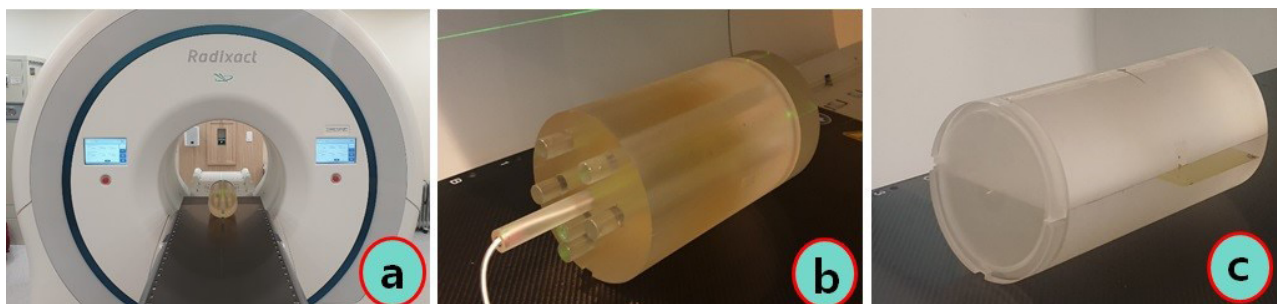
Absolute 측정은 Exradin A1SL thimble ionization chamber(Standard imaging, Madison, WI, USA)와 본원에서 자체 제작한 In House Head & Neck Phantom(SMC: Absolute)을 이용하여 Tomo Electrometer(Standard imaging, Middleton, WI, USA)로 Absolute 값을 얻었다(Fig. 4b).

Relative 측정은 Gafchromic™ EBT3 radiochromic film(Ashland Advanced Materials, Bridgewater, NJ, USA)을 In House Head & Neck Phantom(SMC: Relative)에 Coronal 방향으로 삽입하여 DQA를 진행하였으며 선량 농도 분석 시스템인 RIT(Complete Version 6.7, RIT, USA)로 분석하여 Relative 값을 얻었다(Fig. 4c).

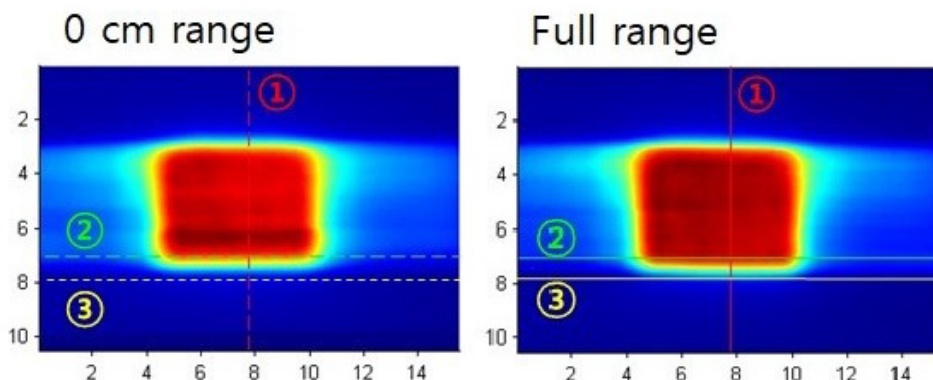
Full CT range의 DQA결과는 Absolute Dose(AD)는 Difference 2.3%이고 Relative Dose(RD) 3%/3mm DTA(Distance to agreement)에서 Gamma pass rate 98% 이상으로 본원의 기준(AD: 3% 이하, RD: 95% 이상)을 모두 만족하였다.

5) Dose delivery verification: Range별 CT Plan (EBT3 film 비교)

Full CT Plan 대비 Range 별(0cm, 0.25cm, 0.5cm, 0.75cm, 1cm, 1.25cm, 1.5cm) CT Plan의 선량 전



**Fig. 4.** DQA analysis tool (a) Radixact® Treatment Delivery System, (b) In House Head & Neck Phantom(Absolute phantom), (c) In House Head & Neck Phantom(Relative phantom)



**Fig. 5.** Comparison between full range EBT Film and 0cm range EBT Film using RIT(Complete Version 6.7, RIT, USA) (1) Vertical Profile, (2) Horizontal Profile(end of PTV), (3) Horizontal Profile(50% Isodose)

달의 정확성을 평가하였다. In House Head & Neck Phantom(SMC: Relative)에 Coronal 방향으로 EBT3 film을 삽입하여 Delivery 후 디지털 평판 스캐너(Expression 10000XL, EPSON, USA)를 이용하여 RIT 프로그램에 입력하였다.

RIT를 이용하여 두 EBT film을 Fusion하여 동일 위치에 놓고 Fig. 5와 같이 (1) Vertical Profile 위치, (2) Horizontal Profile(end of PTV) 위치, (3) Horizontal Profile(50% Isodose) 위치에서 MD(Mean Difference)와 SD(Standard Deviation)을 비교하였다.

### 6) 통계분석

Fig. 5의 Profile 위치 (1), (2), (3)에서 비교를 통해 얻은 MD(Mean Difference)와 SD(Standard Deviation)는 Rex Version 1.0(Rexsoft, Seoul, KOREA)을 사용하여 통계 분석하였다. 이는 Excel 기반에 통계 분석 소프트웨어인 R Version 3.6.1을 사용하는 Rexsoft에서 개발된 통계 분석 프로그램이다. 본 저자는 r을 추정하여 두 변수의 상관성에 대해 알아보는 상관분석기법(r: 상관계수)을 이용하였다.

## 결 과

### 1. Field Width(FW) & Dynamic Jaw: Pass CT range

SMC Protocol(Table 2) 중에서 Target(Min dose 56.4Gy 이상), Parotid(Mean dose 26Gy 미만), Spinal Cord(Max dose 45Gy 이하)는 모든 플랜에서 Dose constraint을 만족했다. SMC Protocol의 Fail Plan의 원인은 HI 및 CI가 1.1 이상이거나 Max dose가 107% (63.56Gy)를 초과하는 경우였다.

SMC Protocol을 만족시키는 최소의 CT scan range는 Fixed-1cm은 0.25cm 이상, Fixed-2.5cm는 0.75cm 이상, Dynamic-2.5cm는 1cm 이상, Fixed-5cm과 Dynamic-5cm인 경우는 1.75cm 이상이었다(Table 5). 이에 따라 Fixed-1cm을 기준했을 때 Fixed-2.5cm는 0.5cm의 CT range, Fixed-5cm은 1.5cm의 CT range를 더 필요로 했다.

Dynamic Jaw를 사용하면 Target의 위쪽과 아래쪽 부분이 Fixed 1cm와 비슷한 반음영(Penumbra)를 가졌다.<sup>9)</sup> 하지만 SMC Protocol을 만족시키는 CT scan range는 Dynamic 모드를 사용하여도 줄어들지 않았으며 Dynamic-2.5cm의 경우 Fixed-2.5cm보다 0.25cm CT range가 더 필요했다(Table 5).

### 2. Pitch: Pass CT range

Kissick가 제안한 magic number( $0.86/n$ , n; integer)

**Table 5.** CT scan range value satisfying SMC Protocol(Pitch: 0,430)

	Pass CT Range* (cm)	Max dose (107%: 63.56Gy)	Parotid (Gy)	Spinal cord (Gy)	CI†	HI‡	Time (sec)
Fixed 1cm	0.25	61.66	19.47	28.20	1.02	1.04	218
Fixed 2.5cm	0.75	63.01	20.24	28.61	1.06	1.06	102.6
Fixed 5cm	1.75	62.80	19.95	30.69	1.05	1.06	68.9
Dynamic 2.5cm	1	61.43	19.10	28.12	1.02	1.04	111.6
Dynamic 5cm	1.75	61.79	19.55	29.04	1.05	1.04	81.5

\*Minimum distance required at the end of PTV, †Conformity Index, ‡Homogeneity Index

**Table 6.** CT scan range value satisfying SMC Protocol(Pitch: 0,287)

	Pass CT Range* (cm)	Max dose (107%: 63.56 Gy)	Parotid (Gy)	Spinal cord (Gy)	CI†	HI‡	Time (sec)
Fixed 1cm	0.25	61.41	19.40	28.03	1.02	1.03	218.2
Fixed 2.5cm	0.75	62.76	20.28	28.58	1.06	1.06	102.5
Fixed 5cm	1.75	63.56	20.17	28.57	1.07	1.07	69.2
Dynamic 2.5cm	1	61.10	20.27	28.64	1.01	1.03	112
Dynamic 5cm	1.75	63.50	19.95	29.00	1.09	1.07	81.4

\*Minimum distance required at the end of PTV, †Conformity Index, ‡Homogeneity Index

**Table 7.** Treatment time analysis

	Treatment Time(Radixact: 0.43, MF2.4)											(sec)
	0cm	0.25cm	0.5cm	0.75cm	1cm	1.25cm	1.5cm	0cm	2cm	3cm	full	
F5cm*	71.8	67.4	66.6	67.2	67.7	68.7	68.9	68.9	69.6	71.8	71.8	69.1
F2.5cm*	104.2	101.5	102	102.6	104.5	106	105.4	105.4	105.4	105.4	105.4	104.3
F1cm*	220.2	218	218.2	218.2	217.2	217.2	217.2	217.2	217.2	216.2	217.2	217.6
D5cm†	94.4	81.6	77.1	78.6	79.3	80.5	80.9	81.5	82.6	84.1	84.1	82.2
D2.5cm†	113.7	107.2	107.5	109.4	111.6	113.2	113.2	113.2	113.2	113.2	113.2	111.7

\*Fixed Jaw, †Dynamic Jaw

를 이용하여 두 개의 Pitch 0,430과 Pitch 0,287을 적용하여 SMC Protocol(Table 2)을 만족하는 CT scan range를 조사하였다. Table 5와 Table 6을 보면 두 Pitch의 모든 부분에서 차이가 없었고 치료계획에 필요한 최소한의 CT scan range도 같았다.

### 3. 치료시간

동일한 Target(PTV)과 정상 장기를 이용하여 동일 하중

계수(Important & Penalty), 일정 조건(Pitch 0,430, MF 2.4)에서 반복(Iteration 200회)하여 Table 1의 Plan setup parameter(FW & Dynamic Jaw)를 적용한 Plan(55개)의 치료시간(sec)을 조사하였다(Table 7).

Table 7의 5개의 모드(Fixed-1cm, Fixed-2.5cm, Fixed-5cm, Dynamic-2.5cm Dynamic-5cm)의 평균 치료시간을 보면 Fixed-5cm은 평균 69.1sec, Fixed-2.5cm은 평균 104.3sec, Fixed-1cm은 217.6sec,

**Table 8.** DQA comparison analysis

		EBT film according to CT range							Statistics	
		0cm	0.25cm	0.5cm	0.75cm	1cm	1.25cm	1.5cm	r <sup>†</sup>	p-value
(1) Vertical	MD <sup>*</sup>	-0.99%	0.34%	-1.05%	-0.55%	0.46%	0.97%	0.25%	0.54	0.24
	SD <sup>†</sup>	7.20%	4.22%	3.74%	2.68%	1.73%	1.66%	1.23%	1	< 0.01
(2) Horizontal (end of PTV)	MD <sup>*</sup>	3%	1.46%	-1.41%	-1.59%	2.40%	1.49%	1.65%	0	1
	SD <sup>†</sup>	7.43%	3.25%	4.31%	2.37%	1.83%	1.37%	0.90%	0.96	< 0.01
(3) Horizontal (50% Isodose)	MD <sup>*</sup>	-10%	-4.53%	-4.82%	-3.51%	2.06%	1.35%	0.74%	0.82	0.03
	SD <sup>†</sup>	11.03%	4.22%	5.02%	2.63%	1.39%	1.13%	0.53%	0.96	< 0.01

Abbreviations: Full EBT film vs. EBT film according to CT range(Fig. 5). All statistical computations were performed with Rex Version1.0(Rexsoft, Seoul, KOREA). \*Mean Difference, †Standard Deviation, ‡Correlation analysis

Dynamic-5 cm은 82.2 sec, Dynamic-2.5 cm은 111.7sec였다. 같은 FW라도 Fixed-2.5cm(104.3sec)에서 edge 기능을 갖는 Dynamic-2.5cm(111.7sec) 사용할 경우 치료시간이 7.1% 증가하였고 Fixed-5cm(69.1sec)에서 Dynamic-5cm(82.2sec) 사용할 경우 치료시간이 19% 증가했다.

**4. EBT film 비교 및 통계분석**

RIT를 이용하여 Full CT Plan의 EBT3 Film를 DQA한 결과 본원 기준인 3%/3mm에서 95%(Gamma pass) 이상을 만족했다. Full CT Plan의 EBT3 Film을 표준(Standard) Reference로 선정하였고, 각 Range별 CT Plan의 EBT3 Film와 비교를 통해 Fig. 5의 (1) Vertical Profile 위치, (2) Horizontal Profile(end of PTV) 위치, (3) Horizontal Profile(50% Isodose)에서 Mean Difference(MD)와 Standard Deviation(SD)을 비교했다. Table 8에서 볼 수 있듯이 CT scan range가 0.75cm보다 클 때 3% 미만의 Standard Deviation(SD)를 가지며 p-value도 0.01 이하였고 두 변수의 r(상관계수)값이 0.96 이상으로 매우 강한 상관관계를 가졌다(Table 8). CT scan range가 1cm보다 클 때 Standard Deviation(SD) 뿐만 아니라 Mean Difference(MD)값도 3% 미만이었다. 특히 (3) Horizontal Profile(50% Isodose) 부분의 p-value는 0.03으로 낮아 의미있는 결과를 얻었으며 r(상관계수)값도 0.82로 강한 상관관계 값을 얻었다(Table 8).

선량 전달의 정확성을 분석한 결과 CT scan range가

길어지면 정확도도 높아지는 선형관계(Linear Relationship)를 가졌으며 SMC Protocol을 만족한 치료계획인 CT scan range 1cm 이상에서 DQA(Full CT DQA vs. Range 별 CT)값을 비교 시 3% 미만 오차로 정확성이 높았다.

**고 찰**

본 연구는 최신 토모치료기인 Radixact®와 치료계획 장비 Precision®을 이용하여 Helical 토모테라피 치료 시 Plan setup parameter(FW, Jaw mode, Pitch)에 따라 치료계획에 필요한 CT scan range를 분석한 첫 논문이다. Eclips(Version.15.6, Varian, Palo Alto, USA) 및 Pinnacle(Version.9.10, Philips, Madison, USA) planning system의 경우 ‘Top/Bottom slice of CT 기능으로 마지막 slice를 길게 연장할 수 있지만 실제 환자의 해부학적 구조와는 차이가 있고 토모테라피는 CT 이미지 연장 기능이 존재하지 않아 치료계획 시 어려움이 있다.

본 저자는 Re-CT Simulation의 불편함 없애기 위해 Plan setup parameter(FW, Jaw mode, Pitch)를 조절하였다. FW(Field Width)는 송주영 등<sup>(8)</sup> 연구결과를 보면 50% 선량지점이 FW가 1cm일 때와 비교하여 FW 2.5cm은 1.6cm 넓은 선량분포, FW 5cm은 4.2cm 더 넓은 선량분포를 보였다. 본 연구에서도 Fixed 모드에서 FW 1cm와 비교하여 FW 2.5cm은 4배, FW 5cm은 7배 긴 CT



range가 필요했다.

Dynamic Jaw에 대한 Lee 등<sup>(9)</sup> 연구에 의하면 Target (PTV)의 양 끝 단에 Dynamic Jaw 적용 시 FW 2.5cm의 경우 Penumbra를 1.73cm에서 1.02cm로 줄일 수 있으며 FW 5cm의 경우 3.32cm에서 0.96cm로 줄일 수 있어 양 끝 단에 edge효과를 보여준다고 밝힌 바 있다. 본 저자는 FW 2.5cm과 FW 5cm에 Dynamic Jaw(edge)를 적용하면 Penumbra 영역이 Fixed-1cm처럼 줄어들어 짧은 CT range로 SMC Protocol(Table 2)을 만족할 것이라 기대했다.<sup>(10)</sup> 하지만 Dynamic Jaw를 사용하여도 CT range를 줄일 수 없었으며 오히려 Dynamic-2.5cm의 경우 Fixed-2.5cm보다 0.25cm 긴 CT scan range가 필요했다(Table 5). 이는 Dynamic Jaw를 통한 Target의 위와 아래의 끝 단(End of PTV)에 fall-off가 생기며 Penumbra 영역을 줄일 수는 있지만 Target 내 Conformity나 정상장기의 보호(sparing)를 위해서는 Fixed처럼 긴 CT scan range가 필요함을 알 수 있다.<sup>(9)</sup>

Kissick 등<sup>(12)</sup>이 제안한 magic number( $0.86/n$ , n: integer)인 Pitch 0.430과 Pitch 0.287 적용은 치료계획(SMC Protocol)을 만족하는 CT scan range의 차이가 없었다(Table 5, 6). Pitch 0.430에서 Pitch 0.287로 변경 시 회전에 따른 이동거리가 줄었지만 Gantry Rotation Period의 회전속도가 빨라져 두 치료계획의 치료시간을 동일하게 만들었다.<sup>(16)</sup> 하지만 두경부 치료계획 시 Gantry Rotation Period가 11.8초 보다 작은 경우는 치료시간이 증가하므로 Pitch를 올려 주어야 하며 Thread effect가 발생하는 경우는 작은 Pitch와 작은 FW를 사용할 것을 권고하고 있다.<sup>(12)</sup>

Sugie 등<sup>(17)</sup>은 토모테라피의 Breast 환자에 대한 치료 시간 연구를 통해 동일 환자의 경우 Dynamic Jaw의 사용은 6%의 치료시간을 증가 보고한 바 있다. 본 연구에서도 5개의 모드(Field Width & Jaw)에 대해 동일한 하중 계수(Important & Penalty)와 Iteration을 적용한 두경부 치료계획(55개)에 대한 치료시간을 분석한 결과 Dynamic Jaw 사용 시 FW 2.5cm일 때 7% 증가하였고, FW 5cm 19% 증가하였다(Table 7). 이에 통해 Dynamic Jaw 사용 시 CT range를 줄일 수 없을 뿐 아니라 치료시간이 증가할 수 있음을 알 수 있다.

통계 분석에 이용한 Rex Version 1.0(Rexsoft, Seoul, KOREA)은 통계 분석 소프트웨어인 R Version 3.6.1을 Excel 기반으로 사용하도록 개발되어 손쉽게 통계 분석이 할 수 있었다(Table 8). Fig. 5의 (2) Horizontal Profile(end of PTV) 위치에서 Mean Difference(MD)의  $p$ -value가 높아 의미 있는 값을 얻지 못했고 이는 측정위치가 PTV 끝단으로 Fall off가 크게 나타났기 때문으로 사료된다. 이에 반해 (3) Horizontal Profile(50% Isodose)의 Mean Difference(MD)는  $p$ -value도 0.03으로 낮고  $r$ 값(0.82)이 강한 상관관계인 값을 나타냈다. 특히 Low Dose의 선량부분(50% Isodose)에서 CT range(1cm)가 잘 맞는 것은 의미 있는 결과였다. 또한 모든 치료계획의 Standard Deviation(SD)은  $p$ -value 0.01 이하로 선량 전달의 정확성을 분석한 결과 값과 SMC Protocol의 만족하는 치료계획 결과 값이 잘 부합되었다.

이 논문의 제한점으로는 첫째, 치료계획의 정확성(DQA) 평가 시 사용빈도가 높은 Dynamic 2.5cm만을 대상으로 하여 다른 FW와 Jaw 모드에 대한 추가적 검증이 필요하다.<sup>(11)</sup> 둘째, 호흡의 영향이 있는 상 복부 치료 시 FW 선택에 주의를 해야 한다. 정원석 등<sup>(18)</sup>은 움직임이 큰 장기의 토모테라피 치료 시 FW가 작을수록 계산된 선량과 측정된 선량 간 오차가 커진다고 언급했고, 특히 움직임이 많은 폐암, 간암, 복부 암의 경우는 주의해야 한다. 셋째, 본 논문을 통해 두경부 Target의 하단 끝에 대한 실험 및 결과를 얻었지만 움직이는 부위 및 Target 상단의 CT range 필요여부도 검증이 필요하다. 이는 후속 논문에서 좀 더 자세히 진행할 예정이다.

암 환자는 암 진단 과정, 방사선 치료계획의 위치 확인(Image Guided Radiation Therapy, IGRT) 그리고 암 치료 후 결과 확인 과정에서 많은 피폭선량을 받게 된다. 최근의 연구 결과에서는 저 에너지 X-선을 사용하는 X-ray 촬영이나 kvCT, kvCBCT(kv cone beam-computed tomography)의 경우 상대적 생물학적 효과(relative biology effectiveness)가 megavoltage X-선 흡수 선량보다 1.8배 높다고 한다.<sup>(19-20)</sup> 특히, 저에너지 X선은 이차암 발생위험(secondary cancer risk)을 증가시킨다는 연구<sup>(5,20)</sup>도 발표되고 있어 CT 촬영 시 주의를 요구하며 적절한 mA 및 사용 횟수 최소화가 필요하다.<sup>(7)</sup>

**Table 9.** Plan setup parameter according to CT scan range

Kwon-Recommend Table (Radixact®, H&N, Pitch: 0.430 & 0.287, MF: 2.4)	
Minimum CT range	Field Width & Jaw mode
0cm	NA <sup>‡</sup>
0.25cm	F1 <sup>*</sup>
0.5cm	F1 <sup>*</sup>
0.75cm	F1 <sup>*</sup> , F2.5 <sup>†</sup>
1cm	F1 <sup>*</sup> , F2.5 <sup>†</sup> , D2.5 <sup>†</sup>
1.25cm	F1 <sup>*</sup> , F2.5 <sup>†</sup> , D2.5 <sup>†</sup>
1.5cm	F1 <sup>*</sup> , F2.5 <sup>†</sup> , D2.5 <sup>†</sup>
1.75cm or more	F1 <sup>*</sup> , F2.5 <sup>†</sup> , F5 <sup>*</sup> , D2.5 <sup>†</sup> , D5 <sup>†</sup>

\*Fixed Jaw(cm), †Dynamic Jaw(cm), ‡Not Available

이에 본 저자는 환자의 피폭선량을 줄이기 위해 Re-CT Simulation 대신 기존 CT를 이용하여 Scan range별 Plan setup parameter(FW & Jaw)를 적용할 것을 추천하여 Table 9를 통해 정리하였다. 이 Table 9는 본 저자의 성을 따서 Kwon-Recommend Table이라 명하였다.

### 결론

본 연구를 통해 두경부 환자의 최신 토모치료기인 RA-DIXACT® 치료 시 치료계획을 만족(Pass plan)하는 CT scan range 획득했다. FW를 작게 할수록 Target 끝 단(End of PTV)에서의 CT scan range 줄일 수 있었다. 하지만 Dynamic Jaw를 사용한다고 해서 FW 1cm와 같이 CT scan range 줄이는 효과는 없었다. CT scan range가 0.25cm 미만 시 치료계획은 불가능하며 PTV 끝 단(End of PTV)에서 0.25~1.75cm 사이의 CT scan range를 갖는다면 본 저자의 Kwon-Recommend Table(Table 9)을 통해 알맞은 5가지 모드 중 선택하길 추천한다. Kwon-Recommend Table은 의사에게 Re-CT 여부를 빠르게 판단하고 Target을 다시 그리는 업무(Delineation)를 줄일 수 있게 해주며 선량설계사는 Re-Plan 없는 올바른 FW를 선택 가능하게 한다. 마지막으로 환자에게는

Re-CT로 인한 피폭 선량 감소와 불편함과 줄일 수 있어 치료 시 많은 유용성을 제공할 것으로 사료된다.

### 참고문헌

1. Mackie TR: History of tomotherapy. *Phys Med, Biol.* 2006 Jul 7;51(13):427-53.
2. Saibishkumar EP, Jha N, Scrimger RA et al.: Sparing the parotid glands and surgically transferred submandibular gland with helical tomotherapy in post-operative radiation of head and neck cancer: a planning study. *Radiother Oncol.* 2007 Oct;85(1):98-104.
3. Hong CS, Oh D, Ju SG, et al.: Carotid-sparing tomohelical 3-dimensional conformal radiotherapy for early glottic cancer. *Cancer Res Treat.* 2016;48:63-70.
4. 김진성, 윤명근, 박성용 등: 방사선치료 관련 연구를 위한 선량 체적 히스토그램 분석 프로그램 개발. *대한방사선종양학회지.* 2009;27:240-248.
5. Brenner DJ, Hall EJ: Computed tomography—an increasing source of radiation exposure. *N Engl J Med.* 2007 Nov 29;357(22):2277-84.
6. Khan FM: Khan의 방사선치료 물리학. 제5판. 바이오메디북. 2016;428.
7. 신정석, 한영이, 주상규 등: 영상유도 및 호흡동조 방사선치료에서의 영상장비에 의한 흡수선량 분석. *대한방사선종양학회지.* 2009;27:42-48.
8. 송주영, 나병식, 정웅기 등: 토모테라피에서 계획용표적제적 설정 시 필드 폭 영향 분석. *Korean journal of medical physics.* 2010;21(4):323-331.
9. Lee FK, Chan SK, Chau RM et al.: Dosimetric verification and quality assurance of running-start-stop(RSS) delivery in tomotherapy. *J Appl Clin Med*

- Phys. 2015 Nov 8;16(6):23-29.
10. Sterzing F, Uhl M, Hauswald H et al.: Dynamic jaws and dynamic couch in helical tomotherapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*. 2010 Mar 15;76(4):1266-73.
  11. Shimizu H, Sasaki K, Kubota T et al.: Interfacility variation in treatment planning parameters in tomotherapy: field width, pitch, and modulation factor. *J Radiat Res*. 2018 Sep 1;59(5):664-668.
  12. Kissick MW, Fenwick J, James JA et al.: The helical tomotherapy thread effect. *Med Phys*. 2005 May;32(5):1414-23.
  13. Marks LB, Yorke ED, Jackson A et al.: Use of normal tissue complication probability models in the clinic. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*. 2010 Mar 1;76(3):S10-S19.
  14. Emami B: Tolerance of Normal Tissue to Therapeutic Radiation. *Radiother Oncol*. 2013;1(1):25-48.
  15. Feuvret L, No I G, Mazeron JJ et al.: Conformity index: a review. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*. 2006 Feb 1;64(2):333-342.
  16. Moldovan M, Fontenot JD, Gibbons JP: Investigation of pitch and jaw width to decrease delivery time of helical tomotherapy treatments for head and neck cancer. *Med Dosim*. 2011 Winter;36(4):397-403.
  17. Sugie C, Manabe Y, Hayashi A et al.: Efficacy of the Dynamic Jaw Mode in Helical Tomotherapy With Static Ports for Breast Cancer. *Technol Cancer Res Treat*. 2015 Aug;14(4):459-465.
  18. 정원석, 백종걸, 신령미 등: 선속 폭(Field Width) 변화에 따른 종축선량 분석. *대한방사선치료학회지*. 2011;23(2):109-117.
  19. Hill M: The variation in biological effectiveness of X-rays and Gamma rays with energy. *Radiat Prot Dosimetry* 2004;112:471-481.
  20. Joiner MC, Marples B, Lambin P et al.: Low-dose hypersensitivity: current status and possible mechanisms. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2001;49:379-389.
  21. Schneider U: Mechanistic model of radiation-induced cancer after fractionated radiotherapy using the linear-quadratic formula. *Med Phys*. 2009 Apr;36(4):1138-43.

# Accuracy evaluation of treatment plan according to CT scan range in Head and Neck Tomotherapy

Department of Radiation Oncology, Samsung Medical Center

**Kwon Dong Yeol, Kim Jin Man, Chae Moon Ki, Park Tae Yang, Seo Sung Gook, Kim Jong Sik**

**Purpose:** CT scan range is insufficient for various reasons in head and neck Tomotherapy®. To solve that problem, Re-CT simulation is good because CT scan range affects accurate dose calculations, but there are problems such as increased exposure dose, inconvenience, and a change in treatment schedule. We would like to evaluate the minimum CT scan range required by changing the plan setup parameter of the existing CT scan range.

**Materials and methods:** CT Simulator(Discovery CT590 RT, GE, USA) and In House Head & Neck Phantom are used, CT image was acquired by increasing the image range from 0.25cm to 3.0cm at the end of the target. The target and normal organs were registered in the Head & Neck Phantom and the treatment plan was designed using ACCURAY Precision®. Prescription doses are Daily 2.2Gy, 27 Fxs, Total Dose 59.4Gy. Target is designed to 95%~107% of prescription dose and normal organ dose is designed according to SMC Protocol. Under the same treatment plan conditions, Treatment plans were designed by using five methods(Fixed-1 cm, Fixed-2.5cm, Fixed-5cm, Dynamic-2.5cm Dynamic-5cm) and two pitches(0.43, 0.287). The accuracy of dose delivery for each treatment plan was analyzed by using EBT3 film and RIT(Complete Version 6.7, RIT, USA).

**Results:** The accurate treatment plan that satisfying the prescribed dose of Target and the tolerance dose in normal organs(SMC Protocol) require scan range of at least 0.25cm for Fixed-1 cm, 0.75cm for Fixed-2.5cm, 1 cm for Dynamic-2.5cm, and 1.75cm for Fixed-5cm and Dynamic-5cm. As a result of AnalysisAnalysis by RIT. The accuracy of dose delivery was less than 3% error in the treatment plan that satisfied the SMC Protocol.

**Conclusion:** In case of insufficient CT scan range in head and neck Tomotherapy®, It was possible to make an accurate treatment plan by adjusting the FW among the setup parameter. If the parameter recommended by this author is applied according to CT scan range and is decide whether to re-CT or not, the efficiency of the task and the exposure dose of the patient are reduced.

▶ **Keywords** : CT scan range, Tomotherapy®, Radixact®, Field Width, Dynamic Jaw