

TOMO HDA와 Radixact 치료 계획 간 Transfer에 대한 유용성 평가 : Planning Study

삼성서울병원 방사선종양학과

안예찬·김종식·권동열·김진만·최병기

목 적 : iDMS(Integrated Database Management System, 통합 데이터베이스 관리 시스템) 내 TOMO-THERAPY 치료 계획을 ACCURAY Precision™ 1.1.1.1을 이용하여 본원의 TOMO HDA와 Radixact 장비 간 Transfer하였고 선량학적 차이를 분석하였으며, 이를 통해 치료 계획 Transfer의 유용성을 평가하였다.

대상 및 방법 : 두경부암 두 부위와 전립선암 두 부위의 치료를 가정하여 4개의 서로 다른 치료 계획을 세웠다. 각 치료 계획은 95 % 처방선량(Prescription dose)이 표적 체적의 99 % 이상 조사되도록 설계하였고, 정상장기 선량은 SMC tolerance dose protocol을 기준으로 하였다. 수립된 치료 계획은 각 장비로 Transfer 시켰으며 Transfer된 치료 계획의 DVH(Dose Volume Histogram) 분석을 통해 선량학적 차이를 비교 평가하였다.

결 과 : Transfer된 치료 계획에서 CTV 및 GTV의 Mean Dose는 증가 및 감소하였으나 유의할 만한 차이는 보이지 않았다. CTV 및 GTV 처방 선량의 Target Coverage는 HDA에서 Radixact로 Transfer 시 전부 감소하였으며, CTV에 대한 CI 및 HI 변화도 0.1 이내였다. Normal Organ Dose는 두 치료 계획 모두 HDA에서 Radixact로 Transfer 시 대부분의 항목에서 선량이 증가하였다.

결 론 : 본 실험의 결과에 따르면 Radixact에서 HDA 장비로 치료 계획 Transfer 시 Target Coverage는 기준 이상이었으며 Normal Organ Dose 또한 대부분 같거나 감소하였다. HDA에서 Radixact로 치료 계획 Transfer 시 Target의 Coverage는 감소하는 경향을 보였고, Normal Organ Dose는 Optic Chiasm(D_{max} 1.38 Gy 증가), Bladder(D_{max} 3.07 Gy 증가), Penile Bulb(D_{max} 1.14 Gy 증가) 등 부작용(side effects)을 일으킬 수 있는 장기에서 선량이 증가하였다. 이에 따라 치료 계획 Transfer 시 선량 변화에 주의해야 하며 장비 점검으로 인한 일회성 Transfer는 효율적인 방사선 치료를 위해 유용할 것이나, Transfer된 치료 계획으로 치료가 수회간 이어질 경우 치료 계획을 다시 세워 진행해야 할 것으로 사료된다.

▶ **핵심용어** : TOMO HDA, Radixact, Transfer, Plan Comparison

서 론

최근 방사선 치료 장비와 치료 계획 시스템의 거듭된 발전으로 동일 환자의 치료 계획을 서로 다른 장비에 Transfer 하여 치료하는 것이 가능해졌다. Plan Transfer는 치료 계획을 다시 세우는 것 보다 비교적 시간이 짧게 걸리고

간단한 과정을 필요로 한다. 때문에 장비 고장 또는 환자의 치료실 변경 요청 등의 이유로 인한 치료실 및 장비 변경 시, Plan Transfer를 활용한다면 빠른 시간 내에 효율적으로 방사선치료를 수행할 수 있다.

특히 항암치료와 방사선치료를 병행하는 CCRT (concurrent chemoradiation therapy)의 경우 항암치료 당일 방사선치료를 하는 것이 효과적이기 때문에⁽¹⁾, 기존 치료를 진행 중이던 장비가 고장 났을 시 다른 장비로의 Plan Transfer는 필수 불가결하다고 할 수 있다. 뿐만 아니라 장

책임저자: 안예찬, 삼성서울병원
서울시 강남구 일원로 81
Tel: 02)3410-1002
E-mail: ayc605@naver.com



Fig. 1. Accuray Precisin™ 1.1.1.1 Plan Transfer Function

SPECIFICATION	PERFORMANCE
Accelerator type	Standing Wave
• Length	0.3 meters
Microwave	2.5 MW
• Power	Magnetron
• Source	850 cGy/min
Nominal dose rate at Dmax**	1.5 cm
Nominal Dmax**	Typical 61.4%
Percentage depth dose at 10 cm**	Treatment plan dependent; system capable of efficiently delivering tens of thousands of beamlets which allows for very high fidelity intensity modulation.
Number of beamlets	6 MV, single energy
Nominal energy	2 mm
Nominal spot size	The 80% - 20% penumbra widths are approximately 4.9 mm, 4.6 mm, and 4.1 mm (respectively for the 5.0 cm, 2.5 cm, and 1.0 cm field widths).
Penumbra of treatment beam - IEC-y axis	Selectable 1.0 cm x 40 cm (fixed) 2.5 cm x 40 cm (fixed)
Field size range at isocenter - IEC-y x IEC-x	Helical Fan-beam
Geometry	0.5 - 3 cGy depending on resolution and body thickness
Dose per MVCT image (typical)	Single row xenon ion chamber array used for image acquisition
Detector configuration	512 x 512 (0.78 mm pixels)
Image resolution (xy)	1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 6 mm reconstruction intervals
Slice spacing available	Scan pitch dependent: Typically 2 minutes per 15 cm length at 3 mm slice spacing
Scan time	39 cm diameter
Field of view (FOV)	145 cm
Source to detector distance	60 cm
Isocenter to detector distance	2% - 4%
Image noise	Within 2.5%
Image uniformity	Nominal 0.5 lp/mm at 10% MTF
Spatial resolution	2% density for 2 cm object (typical)
Contrast resolution	Filtered backprojection
Image reconstruction algorithm	Real-time, slice-by-slice at time of acquisition
Image reconstruction time	MVCT/AVCT image overlay with adjustable checkerboard;
Image registration tools	
ATTRIBUTE	REQUIREMENTS
Accelerator type	Standing Wave
• Length	0.42 meters
• Power source	Magnetron
Nominal dose rate at 1.5 cm**	850 cGy/min or 1,000 cGy/min
Nominal Dmax**	1.5 cm
Percentage depth dose at 10 cm**	61.4%
Number of beamlets	Treatment plan dependent; system capable of efficiently delivering tens of thousands of beamlets which enables for very high fidelity intensity modulation.
Nominal energy	6 MV, single energy
Field size range at isocenter - IEC-Yf x IEC-Xf	Selectable 1.0 cm x 40 cm (fixed) 2.5 cm x 40 cm (fixed) 5.0 cm x 40 cm (fixed) 1.0-2.5 cm x 40 cm (optional dynamic) 1.0-5.0 cm x 40 cm (optional dynamic)
Treatment volume - TomoHelical™ Mode	Maximum treatment volume length is 135 cm. The MLC Multifield Collimator can deliver a 40 cm projection at isocenter which allows irradiation of all target areas within a 40 cm diameter cylinder around isocenter, throughout each 360° gantry rotation. Areas outside a 40 cm cylinder can be irradiated.
Geometry	Helical Fan-Beam
Imaging dose (absorbed)	0.5 - 3 cGy depending on acquisition pitch
Detector configuration	Single row xenon ion chamber array used for image acquisition
Image resolution (IEC Xf x Zf)	512 x 512 (0.76 mm pixels)
Slice spacing available (IEC Yf)	1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 6 mm reconstruction intervals
Scan time	Scan pitch dependent: 1 minute per 12 cm length at 3 mm slice spacing
Field of view (FOV)	39 cm diameter
Source to detector distance	140 cm
Isocenter to detector distance	55 cm
Image noise	≤ 2%
Image uniformity	Within 25HU
Spatial resolution (IEC Xf x Zf)	1.6 mm spatial resolution
Contrast resolution	2% density for 2 cm object
Image reconstruction algorithm	Iterative reconstruction
Image reconstruction time	Real-time, slice-by-slice at time of acquisition
Image registration tools	MVCT/AVCT image overlay with adjustable checkerboard;

Fig. 2. Comparison of Hardware differences between TOMO HDA and Radixact

비 고장이 지속되어 환자의 치료가 지연될 경우 분할조사에 의한 방사선 생물학적 효과가 떨어질 수 있기 때문에 이 경우 상대적으로 시간이 짧게 걸리는 Plan Transfer를 활용하여 치료를 진행할 수 있다.⁽²⁾ 선행 논문에서는 RaySearch RayStation Fallback(FB) planning module을 이용한 LINAC(Linear Accelerator) 장비와 helical Tomotherapy 장비 사이에 치료 계획을 Transfer하여 Normal Organ 및 Target의 Dose 분포를 비교하였고 임상적으로 유의함을 증명하였다.⁽³⁾

본원에서는 LINAC 장비 뿐만 아니라 Accuray사의 TOMO HDA와 Radixact 장비 사이에 치료 계획을 Transfer 하여 치료를 진행하고 있으며, 이는 Accuray Precision™ Version 1.1.1.1의 Plan Transfer Function을 통해 이루어진다(Fig. 1).

하지만 치료 계획 Transfer 시 두 장비의 기본적인 Hardware의 차이에 따른 Dose의 차이가 발생할 수 있다(Fig. 2). 두 장비는 서로 다른 Beam profile을 가지며 Dose rate 또한 각각 TOMO HDA 850 MU/min, Radixact 1150 MU/min으로, 이에 따른 반음영(penumbra)의 변화로 Normal Organ Dose 및 Target Dose에 차이가 날 수 있기 때문이다. 특히 치료 계획 Transfer 이후 기존 치료 계획보다 Normal Organ의 Dose가 증가하거나 Target의 Dose가 감소하는 경우 심각한 부작용(side effect)을 일으키거나 치료 효과가 감소할 수 있기 때문에 주의해야 한다.

따라서 본 연구에서는 본원에서 사용중인 Accuray사의 TOMO HDA 장비와 Radixact 장비 사이에 Plan Transfer를 진행하여 Target Dose 및 Normal Organ Dose의 변화를 관찰하고 그 양상을 파악함으로써 두 장비의 치료 계획 간 Transfer에 대한 유용성을 평가하고자 하였다.

대상 및 방법

1. CT scan

본원의 TOMOTHERAPY 장비를 사용하여 주로 치료하는 부위인 두경부암과 전립선암의 치료 계획을 비교하기 위해 인체모형팬텀(Anderson rando phantom,

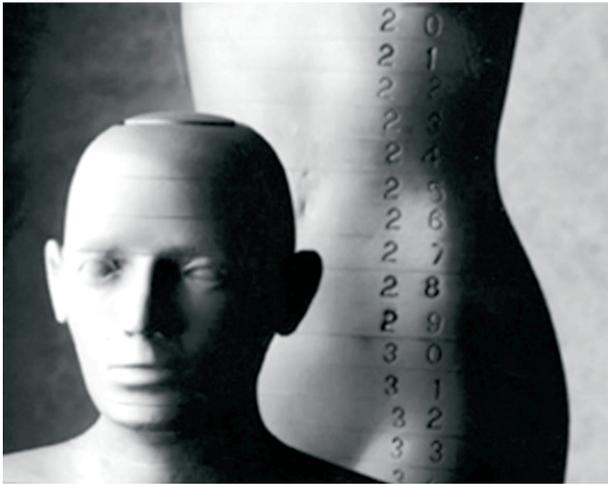


Fig. 3. Head & Neck and Pelvis site of Anderson Rando phantom

USA)을 두경부(Head and Neck)부터 골반부(Pelvis)까지 치료 계획용 CT(Computed Tomography)영상을 획득하였다(Fig. 3). 치료 계획용 전산화단층촬영장치는 본원의 CT(High Advantage, GE, USA)를 이용하였으며 Scan parameter 120 KV, 250 mA, Pitch 0.938:1, Slice thickness 2.5 mm 간격으로 Helical scan 영상을 획득하였다.

2. Treatment Plan and Plan Transfer

전산화단층촬영을 통해 획득한 인체모형팬텀의 영상을 바탕으로 Pinnacle(ver9.2, Philips, Palo Alto, USA) 시스템을 이용하여 두경부암에 대해서는 Oropharynx, Larynx 치료를 가정하여 육안종양체적(Gross Tumor Volume, GTV), 임상표적체적(Clinical Target Volume, CTV), 치료 계획표적용적(Planning Target Volume, PTV) 및 Spinal Cord, Brainstem, Brain, Both Lens, Both Optic Nerve, Optic Chiasm, Esophagus, Trachea, Both SMG, Both Parotid Gland 등의 주요 장기(Organ at risk, OAR)의 윤곽(Contour)를 그렸다. 또한 전립선암에 대해서는 Prostate, Pelvis, Whole 치료를 가정하여 동일하게 CTV, PTV 및 Both Femoral Head, Rectum, Bladder, Penile Bulb, Bowel 등의 주요 장기의 윤곽을 그렸다. 이후 TOMOTHERAPY의 전산화 치료 계획 시스템(Accuray Precision™ Version 1.1.1.1)으로 전

송하여 TOMO HDA 장비와 Radixact 장비에 각각 치료 계획을 세웠다.

각 치료 계획의 선량은 본원의 SMC Planning Guide Book Ver 1.0에 입각하여 수립하였다. Oropharynx와 Larynx의 치료 계획에 대해서 GTV Daily Dose 2.4 Gy씩 28회 분할조사(fractionated radiotherapy)하고 Total Dose 67.2 Gy의 95 % 선량이 볼륨에 99 % 이상 차지하며, CTV Daily Dose 2 Gy씩 28회 분할조사하고 Total Dose 56 Gy의 95 % 선량이 볼륨에 99 % 이상 차지하게 치료 계획을 수립하였다. Prostate와 Pelvis, Whole의 치료 계획에 대해서 Prostate Gland는 CTV daily Dose 2.5 Gy씩 28회

Table 1. SMC H&N Normal Organ Tolerance Dose

name	Constraints types	Constraints Dose (Gy)
p_cord	Max (Gy)	45
Brain Stem		50
Brain		60
RT Lens		10
LT Lens		10
RT Eyeball		50
LT Eyeball		50
RT Optic nerve		50
LT Optic nerve		50
Optic Chiasm		50
RT SMG		Mean (Gy)
LT SMG	30	
RT Parotid Gland	26	
LT Parotid Gland	26	

name	Constraints types	Volume (%)	Constraints Dose (Gy)
Rectum	MAX DVH (%)	7	70
		20	50
		50	25
		90	12
Bladder	MAX DVH (%)	25	60
		50	35
Penile Bulb	MAX DVH (%)	50	40
Femoral Head	MAX DVH (%)	10	45
	Max (Gy)	-	50

분할조사하고 Total Dose 70.0 Gy의 95 % 선량이 볼륨에 99 % 이상 차지하게 치료 계획을 수립하였고, Whole, Pelvis는 CTV daily Dose 1.8 Gy씩 28회 분할조사하고 Total Dose 50.4 Gy의 95 % 선량이 볼륨에 99 % 이상 차지하게 치료 계획을 수립하였다. 또한 모든 치료 계획의 가상의 주요장기(Organ at Risk, OAR) 선량은 본원의 SMC tolerance dose guideline에 입각하여 한계선량(constraints dose) 이내로 치료 계획을 수립하였다(Table 1).

이후 각 장비에 수립된 치료 계획을 Accuray Precision™ Version 1.1.1.1의 Plan Transfer 기능을 이용하여 Transfer를 진행하였다.

3. Comparison and Evaluation of Dose

두 치료 장비로 각각 Transfer된 치료 계획의 정량적 비교는 선량체적히스토그램(Dose Volume Histogram, DVH)을 통해 GTV 및 CTV의 선량분포 및 Target Coverage를 비교 평가하였다. Target Coverage는 처방 선량의 100 %에 대한 Volume의 백분율을 구하였고 그 차이를 비교평가 하였다. 또한 Target 부위의 최대선량(Max

dose), 최소선량(Min dose), 평균선량(Mean dose)을 구하여 비교하였고, 종양 조직 주변의 선량 조형성을 확인하기 위한 선량 조형성 지수(Dose Conformity Index, CI)와 종양 조직 내 선량 분포를 나타내는 선량 균일성 지수(Homogeneity Index, HI)를 비교 평가하였다.

또한 종양 부위 주위의 주요장기인 OAR(Organ at Risk, OAR)의 각 평가 지표에 따라 최대선량, 최소선량, 평균선량을 구하였고 변화를 비교평가하였다.

결 과

1. Comparison of Target Dose

1) 두경부암 치료 계획의 GTV, CTV에 대한 Mean Dose(평균선량)

TOMO HDA에서 Radixact으로 Nasopharynx 치료 계획 Transfer 시 CTV에 대한 Mean Dose는 63.03 Gy에서 63.22 Gy, GTV에 대한 Mean Dose 68.34 Gy에서

Table 2. Max dose, Min dose, and Mean Dose in Head and Neck cancer treatment plans

		Nasopharynx		Larynx	
name	Constraints types	Transferred	Original	Transferred	Original
CTV	Max Dose (Gy)	71.35	70.41	69.97	69.84
	Min Dose (Gy)	54.07	54.32	53.85	54.52
	Mean Dose (Gy)	63.22	63.03	59.1	59.2
GTV	Max Dose (Gy)	70.51	70.02	69.74	69.7
	Min Dose (Gy)	66.49	66.45	66.73	67.2
	Mean Dose (Gy)	68.55	68.34	68.28	68.48

* TOMO HD → Radixact (Original : TOMO HD, Transferred : Radixact)

		Nasopharynx		Larynx	
name	Constraints types	Transferred	Original	Transferred	Original
CTV	Max Dose (Gy)	70.76	71.49	70.00	70.04
	Min Dose (Gy)	54.13	54.51	54.90	54.45
	Mean Dose (Gy)	63.55	63.73	59.82	59.71
GTV	Max Dose (Gy)	70.45	71.03	70.00	70.04
	Min Dose (Gy)	66.54	66.62	67.51	67.08
	Mean Dose (Gy)	68.39	68.61	68.93	68.73

* Radixact →TOMO HD (Original : Radixact, Transferred : TOMO HD)

68.55 Gy로 증가하였다. Larynx 치료 계획 Transfer 시 CTV에 대한 Mean Dose는 59.2 Gy에서 59.1 Gy, GTV에 대한 Mean Dose는 68.48 Gy에서 68.28 Gy로 감소하였다(Table 2).

Radixact에서 TOMO HDA로 Nasopharynx 치료 계획 Transfer 시 CTV에 대한 Mean Dose는 63.73 Gy에서 63.55 Gy, GTV에 대한 Mean Dose는 68.61 Gy에서 68.39 Gy로 감소하였다. Larynx 치료 계획 Transfer 시 CTV에 대한 Mean Dose는 59.71 Gy에서 59.82 Gy, GTV에 대한 Mean Dose는 68.73 Gy에서 68.93 Gy로 증가하였다(Table 2).

2) 두경부암 치료 계획의 CTV, GTV에 대한 Target Coverage

TOMO HDA에서 Radixact으로 Nasopharynx 치료 계획 Transfer 시 CTV coverage는 99.3 %에서 98.9 %, GTV Coverage는 98.8 %에서 98.7 %로 감소하였고, Larynx 치료 계획 Transfer 시 CTV coverage는 97.1 %에서 93.7 %, GTV Coverage는 100 %에서 93.9 %로 감소하였다(Table 3).

Radixact에서 TOMO HDA로 Nasopharynx 치료 계획 Transfer 시 CTV coverage는 99.5 %에서 99.4 %, GTV Coverage는 99 %에서 98.3 %로 감소하였고, Larynx 치료 계획 Transfer 시 CTV coverage는 98.3 %에서

Table 3. Target Coverage of CTV and GTV in Head and Neck cancer treatment plans

		Nasopharynx		Larynx	
name	Constraints types	Transferred	Original	Transferred	Original
CTV	Dose (Gy)	56.00	56.00	56.00	56.00
	Dose (%)	100.00	100.00	100.00	100.00
	Volume (cm ³)	230.59	231.37	103.48	107.15
	Volume (%)	98.9	99.3	93.7	97.1
	Active-Ref (cm ³)	-0.78		-3.67	
GTV	Dose (Gy)	67.20	67.20	67.20	67.20
	Dose (%)	100.00	100.00	100.00	100.00
	Volume (cm ³)	14.32	14.32	1.47	1.57
	Volume (%)	98.7	98.8	93.9	100.0
	Active-Ref (cm ³)	-0.01		-0.09	

* TOMO HD → Radixact (Original : TOMO HD, Transferred : Radixact)

		Nasopharynx		Larynx	
name	Constraints types	Transferred	Original	Transferred	Original
CTV	Dose (Gy)	56.00	56.00	56.00	56.00
	Dose (%)	100.0	100.0	100.0	100.0
	Volume (cm ³)	231.63	231.86	109.47	108.56
	Volume (%)	99.4	99.5	99.2	98.3
	Active-Ref (cm ³)	-0.23		0.91	
GTV	Dose (Gy)	67.2	67.2	67.2	67.2
	Dose (%)	100	100	100	100
	Volume (cm ³)	14.26	14.35	1.57	1.55
	Volume (%)	98.3	99.0	100.0	98.6
	Active-Ref (cm ³)	-0.09		0.02	

* Radixact → TOMO HD (Original : Radixact, Transferred : TOMO HD)

99.2 %, GTV Coverage는 98.6 %에서 100 %로 증가하였다(Table 3).

3) 두경부암 치료 계획의 PTV에 대한 CI, HI

TOMO HDA에서 Radixact으로 Nasopharynx 치료 계획 Transfer 시 CI는 변화 없었으며, HI는 1.05에서 1.06으로 증가하였고, Larynx 치료 계획 Transfer 시 CI 및 HI는 변화 없었다(Table 4).

Radixact에서 TOMO HDA로 Nasopharynx 치료 계획

Transfer 시 CI는 변화 없었으며, HI는 1.06에서 1.05으로 감소하였고, Larynx 치료 계획 Transfer 시 CI 및 HI는 변화 없었다(Table 4).

4) 전립선암 치료 계획의 CTV에 대한 Mean Dose(평균선량)

TOMO HDA에서 Radixact으로 Prostate 치료 계획 Transfer 시 CTV에 대한 Mean Dose는 70.67 Gy에서 70.26 Gy로 감소하였다. Pelvis, Whole 치료 계획 Trans-

Table 4. CI and HI values of PTV in Head and Neck Cancer Treatment plans

name	Nasopharynx		Larynx	
	Transferred	Original	Transferred	Original
CI (P_GTV)	1.00	1.00	1.00	1.00
HI (P_GTV)	1.06	1.05	1.04	1.04
* TOMO HD → Radixact (Original : TOMO HD, Transferred : Radixact)				
name	Nasopharynx		Larynx	
	Transferred	Original	Transferred	Original
CI (P_GTV)	1.00	1.00	1.00	1.00
HI (P_GTV)	1.05	1.06	1.04	1.04
* Radixact → TOMO HD (Original : Radixact, Transferred : TOMO HD)				

Table 5. Max dose, Min dose, and Mean Dose in Prostate cancer treatment plans

name	Constraints types	Prostate		Pelvis, Whole	
		Transferred	Original	Transferred	Original
CTV (Prostate)	Max Dose (Gy)	74.47	74.36	75.97	75.66
	Min Dose (Gy)	68.41	69.2	69.01	69.46
	Mean Dose (Gy)	70.26	70.67	71.43	71.59
CTV (Whole, Pelvis)	Max Dose (Gy)	-	-	55.32	55.21
	Min Dose (Gy)	-	-	49.55	49.72
	Mean Dose (Gy)	-	-	51.43	51.49
* TOMO HD → Radixact (Original : TOMO HD, Transferred : Radixact)					
name	Constraints types	Prostate		Pelvis, Whole	
		Transferred	Original	Transferred	Original
CTV	Max Dose (Gy)	74.55	74.69	75.22	75.46
	Min Dose (Gy)	69.61	68.85	69.87	69.39
	Mean Dose (Gy)	71.16	70.77	71.73	71.57
CTV (Whole, Pelvis)	Max Dose (Gy)	-	-	54.82	54.94
	Min Dose (Gy)	-	-	49.57	49.47
	Mean Dose (Gy)	-	-	51.54	51.47
* Radixact → TOMO HD (Original : Radixact, Transferred : TOMO HD)					

fer 시 CTV(Prostate Gland)에 대한 Mean Dose는 71.59 Gy에서 71.43 Gy, CTV(Whole, Pelvis)에 대한 Mean Dose는 51.49 Gy에서 51.43 Gy로 감소하였다(Table 5).

Radixact에서 TOMO HDA로 Prostate 치료 계획 Transfer 시 CTV에 대한 Mean Dose는 70.77 Gy에서 71.16 Gy로 증가하였다. Pelvis, Whole 치료 계획 Transfer 시 CTV(Prostate Gland)에 대한 Mean Dose는 71.57 Gy에서 71.73 Gy, CTV(Whole, Pelvis)에 대한 Mean Dose는 51.47 Gy에서 51.54 Gy로 증가하였다(Table 5).

5) CTV에 대한 Target Coverage (Prostate cancer)

TOMO HDA에서 Radixact으로 Prostate 치료 계

획 Transfer 시 CTV coverage는 92.9 %에서 67.2 %로 감소하였고, Pelvis, Whole 치료 계획 Transfer 시 CTV(Prostate) coverage는 99 %에서 96.2 %, CTV(Whole, Pelvis) coverage는 97.7 %에서 96.7 %로 감소하였다(Table 6).

Radixact에서 TOMO HDA로 Prostate 치료 계획 Transfer 시 CTV coverage는 92.8 %에서 99.5 %로 증가하였고, Pelvis, Whole 치료 계획 Transfer 시 CTV(Prostate) coverage는 98.7 %에서 99.9 %, CTV(Prostate) coverage는 95.7 %에서 96.4 %로 증가하였다(Table 6).

Table 6. Target Coverage of CTV in Prostate cancer treatment plans

name	Constraints types	Prostate		Pelvis, Whole	
		Transferred	Original	Transferred	Original
CTV (Prostate)	Dose (Gy)	70.00	70.00	70.00	70.00
	Dose (%)	100.0	100.0	100.0	100.0
	Volume (cm ³)	21.35	29.52	30.56	31.47
	Volume (%)	67.2	92.9	96.2	99.0
	Active-Ref (cm ³)	-8.16		-0.91	
CTV (Whole, Pelvis)	Dose (Gy)	-	-	50.4	50.4
	Dose (%)	-	-	100	100
	Volume (cm ³)	-	-	181.89	183.78
	Volume (%)	-	-	96.7	97.7
	Active-Ref (cm ³)	-	-	-1.89	

* TOMO HD → Radixact (Original : TOMO HD, Transferred : Radixact)

name	Constraints types	Prostate		Pelvis, Whole	
		Transferred	Original	Transferred	Original
CTV	Dose (Gy)	70.00	70.00	70.00	70.00
	Dose (%)	100.0	100.0	100.0	100.0
	Volume (cm ³)	31.63	29.49	31.75	31.38
	Volume (%)	99.5	92.8	99.9	98.7
	Active-Ref (cm ³)	2.14		0.37	
CTV (Whole, Pelvis)	Dose (Gy)	-	-	50.4	50.4
	Dose (%)	-	-	100	100
	Volume (cm ³)	-	-	181.32	180.03
	Volume (%)	-	-	96.4	95.7
	Active-Ref (cm ³)	-	-	1.29	

* Radixact → TOMO HD (Original : Radixact, Transferred : TOMO HD)

Table 7. CI and HI values of PTV in Prostate Cancer Treatment plans

name	Prostate		Pelvis, Whole	
	Transferred	Original	Transferred	Original
CI (PTV)	1.06	1.06	1.04	1.03
HI (PTV)	1.06	1.03	1.09	1.08

* TOMO HD → Radixact (Original : TOMO HD, Transferred : Radixact)

name	Prostate		Pelvis, Whole	
	Transferred	Original	Transferred	Original
CI (PTV)	1.03	1.03	1.02	1.03
HI (PTV)	1.06	1.07	1.07	1.08

* Radixact → TOMO HD (Original : Radixact, Transferred : TOMO HD)

Table 8. Comparison of Normal Organ Dose of Head and Neck cancer treatment plans

name	Constraints types	Nasopharynx			Larynx		
		Transferred	Original	subtraction(Gy)	Transferred	Original	subtraction(Gy)
p_cord	Max (Gy)	37.28	37.42	0.14	30.41	30.25	-0.16
Brain Stem		42.22	41.96	-0.26	0.55	0.56	0.01
Brain		63.59	63.29	-0.30	0.58	0.55	-0.03
RT Lens		9.69	9.71	0.02	0.21	0.20	-0.01
LT Lens		9.51	9.45	-0.06	0.21	0.21	0.00
RT Eyeball		23.38	23.16	-0.22	0.23	0.23	0.00
LT Eyeball		23.47	23.01	-0.46	0.23	0.23	0.00
RT Optic nerve		51.04	50.59	-0.45	0.22	0.22	0.00
LT Optic nerve		49.45	49.02	-0.43	0.21	0.21	0.00
Optic Chiasm		39.48	38.10	-1.38	0.21	0.21	0.00
Esophagus	Mean (Gy)	10.27	10.20	-0.07	18.27	18.06	-0.21
Trachea		8.75	8.73	-0.02	19.58	19.36	-0.22
RT SMG		37.23	37.00	-0.23	7.42	7.46	0.04
LT SMG		31.72	31.21	-0.51	7.45	7.38	-0.07
RT Parotid Gland		23.49	23.33	-0.16	0.52	0.48	-0.04
LT Parotid Gland		22.33	22.15	-0.18	0.58	0.53	-0.05

* TOMO HD → Radixact (Reference : TOMO HD, Active : Radixact)

6) PTV에 대한 CI, HI (Prostate cancer)

TOMO HDA에서 Radixact으로 Prostate 치료 계획 Transfer 시 CI는 변화 없었으며, HI는 1.03에서 1.06으로 증가하였고, Pelvis, Whole 치료 계획 Transfer 시 CI는 1.03에서 1.04, HI는 1.08에서 1.09로 증가하였다(Table 7).

Radixact에서 TOMO HDA로 Prostate 치료 계획 Transfer 시 CI는 변화 없었으며, HI는 1.07에서 1.06으로

감소하였고, Pelvis, Whole 치료 계획 Transfer 시 CI는 1.03에서 1.02, HI는 1.08에서 1.07로 감소하였다(Table 7).

2. Comparison of Normal Organ Dose

1) 두경부암 치료 계획의 Normal Organ Dose

TOMO HDA에서 Radixact으로 Nasopharynx 치

Table 8. Comparison of Normal Organ Dose of Head and Neck cancer treatment plans (continue)

name	Constraints types	Nasopharynx			Larynx		
		Transferred	Original	subtraction(Gy)	Transferred	Original	subtraction(Gy)
p_cord	Max (Gy)	37.98	37.83	-0.15	29.52	29.64	0.12
Brain Stem		33.51	33.63	0.12	0.55	0.57	0.02
Brain		63.06	63.35	0.29	0.56	0.59	0.03
RT Lens		8.84	8.89	0.05	0.21	0.21	0.00
LT Lens		7.54	7.82	0.28	0.21	0.22	0.01
RT Eyeball		17.61	17.82	0.21	0.24	0.24	0.00
LT Eyeball		17.93	18.22	0.29	0.24	0.24	0.00
RT Optic nerve		44.98	45.28	0.30	0.23	0.23	0.00
LT Optic nerve		46.15	46.41	0.26	0.22	0.22	0.00
Optic Chiasm		34.31	35.43	1.12	0.21	0.21	0.00
Esophagus	Mean (Gy)	9.13	9.20	0.07	19.94	20.14	0.20
Trachea		7.71	7.75	0.04	20.25	20.76	0.51
RT SMG		34.86	35.12	0.26	7.49	7.44	-0.05
LT SMG		28.77	29.25	0.48	7.27	7.35	0.08
RT Parotid Gland		22.24	22.44	0.20	0.49	0.53	0.04
LT Parotid Gland		21.20	21.41	0.21	0.53	0.58	0.05

* Radixact → TOMO HD (Reference : Radixact, Active : TOMO HD)

Table 9. Comparison of Normal Organ Dose Prostate cancer treatment plans

name	Constraints types	Prostate			Pelvis, Whole		
		Transferred	Original	subtraction(Gy)	Transferred	Original	subtraction(Gy)
RT Femoral Head	Max (Gy)	21.26	21.39	0.13	28.53	28.4	-0.13
LT Femoral Head		21.28	21.32	0.04	34.13	33.95	-0.18
Rectum		72.96	72.09	-0.87	73.7	73.23	-0.47
Bladder		66.39	63.32	-3.07	64.38	64.13	-0.25
Penile Bulb		68.25	67.11	-1.14	68.05	66.85	-1.20
Bowel		2.13	1.94	-0.19	54.71	54.54	-0.17

* TOMO HD → Radixact (Reference : TOMO HD, Active : Radixact)

name	Constraints types	Prostate			Pelvis, Whole		
		Transferred	Original	subtraction(Gy)	Transferred	Original	subtraction(Gy)
RT Femoral Head	Max (Gy)	20.25	20.08	-0.17	28.25	28.34	0.09
LT Femoral Head		20.71	20.63	-0.08	33.93	34.17	0.24
Rectum		72.28	72.25	-0.03	72.42	72.87	0.45
Bladder		61.17	63.69	2.52	64.08	64.32	0.24
Penile Bulb		65.33	66.35	1.02	66.64	67.91	1.27
Bowel		1.89	2.08	0.19	54.43	54.48	0.05

* Radixact → TOMO HD (Reference : Radixact, Active : TOMO HD)

로 계획 Transfer 시 Spinal cord와 RT Lens를 제외한 14개의 정상 장기에서 평균 0.34 Gy의 선량이 증가하였고, 특히 Optic Chiasm에서 1.38 Gy의 선량이 증가하였다. Larynx 치료 계획 Transfer 시 Spinal cord, Brain, RT Lens, Esophagus, Trachea, LT SMG, Both Parotid Gland의 8개의 정상장기에서 평균 0.1 Gy의 선량이 증가하였다(Table 8).

반대로 Radixact에서 TOMO HDA로 Nasopharynx 치료 계획 Transfer 시 Spinal cord에서만 0.15 Gy 선량이 증가하였고, 특히 Optic Chiasm에서 1.12 Gy의 선량이 감소하였다. Larynx 치료 계획 Transfer 시 RT SMG에서만 0.05 Gy 선량이 증가하였고, 나머지 정상 장기에서는 선량이 감소하였다(Table 8).

2) 전립선암 치료 계획의 Normal Organ Dose

TOMO HDA에서 Radixact으로 Prostate 치료 계획 Transfer 시 Both Femoral Head를 제외한 Rectum, Bladder, Penile Bulb, Bowel에서 평균 1.32 Gy의 선량이 증가하였고, 특히 Bladder에서 3.07 Gy, Penile Bulb에서 1.14 Gy의 선량이 증가하였다. Pelvis, Whole 치료 계획 Transfer 시 모든 정상 장기에서 평균 0.4 Gy의 선량이 증가하였고, 특히 Penile Bulb에서 1.2 Gy의 선량이 감소하였다(Table 9).

반대로 Radixact에서 TOMO HDA로 Prostate 치료 계획 Transfer 시 Both Femoral Head, Rectum에서 평균 0.09 Gy의 선량이 증가하였고, Bladder, Penile Bulb, Bowe에서 각각 2.52 Gy, 1.02 Gy, 0.19 Gy의 선량이 감소하였다. Pelvis, Whole 치료 계획 Transfer 시 모든 정상 장기에서 평균 0.39 Gy의 선량이 감소하였고, 특히 Penile Bulb에서 1.27 Gy의 선량이 감소하였다(Table 9).

결론 및 고찰

본 실험의 결과에 따르면 두경부암 치료 계획과 전립선암 치료 계획 모두 TOMO HDA에서 Radixact로 치료 계획 Transfer 시 CTV 및 GTV에 대한 Target Coverage는 감소하는 경향을 보였다. 반대로 Radixact에서 TOMO

HDA로 치료 계획 Transfer 시 CTV 및 GTV에 대한 Target Coverage는 기준 이상이었다. CTV 및 GTV에 대한 Mean Dose와 PTV에 대한 HI(Homogeneity Index)와 CI(Conformity Index)는 각 항목마다 증가하거나 감소하였지만 유의할만한 차이는 나타내지 않았다.

Normal Organ의 경우 TOMO HDA에서 Radixact으로 Nasopharynx 치료 계획의 Transfer 시 cord와 Right Lens를 제외한 모든 Normal Organ에서 선량이 증가하였으며, Larynx 치료 계획의 Transfer 시 cord, Brain, Right Lens, Left SMG(Submandibular Gland), Right Parotid Gland, Left Parotid Gland에서 선량이 증가하였다. 반대로 Radixact에서 TOMO HDA로 Nasopharynx 치료 계획의 Transfer 시 cord를 제외한 모든 Normal Organ에서 선량이 감소하였으며, Larynx 치료 계획의 Transfer 시 Esophagus, Trachea, Right SMG를 제외한 모든 Normal Organ에서 선량이 같거나 감소하였다.

또한 Prostate 치료 계획을 TOMO HDA에서 Radixact으로 Transfer 시 Both Femoral Head를 제외한 모든 Normal Organ(Rectum, Bladder, Penile Bulb, Bowel)에서 선량이 증가하였고, Whole, Pelvis의 경우 모든 Normal Organ에서 선량이 증가하였다. 반대로 Prostate 치료 계획을 Radixact에서 TOMO HDA로 Transfer 시 Both Femoral Head와 Rectum을 제외한 Organ에서 선량의 감소가 있었으며, Pelvis, Whole의 경우 모든 Normal Organ에서 선량이 감소하였다. 이와 같은 본 실험 결과의 양상에 따르면 치료 계획 Transfer 시 Target에는 유의할만한 차이가 나타나지 않아 문제가 되지 않을 것으로 사료되나, TOMO HDA에서 Radixact으로 치료 계획 Transfer 시 많은 Normal Organ에서 선량이 증가하는 경향을 보였다.

특히 두경부암 치료 계획을 TOMO HDA에서 Radixact로 Transfer 시 Optic Chiasm의 선량이 1.38 Gy 증가하였고 반대의 경우 1.12 Gy 감소하였다. Optic Nerve 및 Optic Chiasm에 들어가는 선량은 시력이 감소하는 시신경병증(Optic Neuropathy) 등과 같은 부작용과 연관되어 있으므로 주의해야 한다.⁽⁴⁾ 뿐만 아니라 전립선암 치료 계획을 TOMO HDA에서 Radixact으로 Transfer 시 Penile Bulb와 Bladder에서의 선량이 각각 1.14 Gy, 3.07 Gy 중

가하였고, 반대의 경우 각각 1.02 Gy, 2.52 Gy 감소하였다. 선행 논문의 결과에 따르면 전립선암 치료 시 Penile Bulb에 들어가는 많은 선량은 Erectile Dysfunction과 같은 심각한 부작용(side effect)을 야기할 수 있다.⁵⁾ 또한 Bladder에 들어가는 많은 선량은 소변을 볼 때 통증, 빈뇨감, 혈뇨(blood in urine) 등과 같은 부작용을 야기할 수 있기 때문에 이는 치료 계획 Transfer 시 유의해서 봐야 할 사항이다.⁶⁾

다만 본 연구의 결과에서 제시한 수치는 치료 계획 Transfer 이후 전체 분할조사(fractionated radiotherapy)가 완료되었을 시의 결과이기 때문에 장비 고장 등으로 인한 일회성 치료 계획의 Transfer는 방사선 치료의 효율화를 위해 유용할 것으로 사료된다. 하지만 연속된 장비 고장 및 수리 지연으로 인해 Transfer된 치료 계획으로 계속해서 치료를 진행해야 하는 상황에서는 Target Dose의 Coverage 및 언급한 Optic Chiasm, Penile Bulb, Bladder 등을 포함한 다른 여러 Normal Organ Dose를 유의해서 봐야 할 것이며, 필요한 경우 치료 계획을 다시 세우 치료를 진행해야 할 것이다.

본 연구는 실제 환자의 Data로 이루어진 것이 아닌 Phantom Study로 진행하였기 때문에 실제 case와의 약간의 차이가 있을 수 있다. 또한 연구의 결과에 따르면 TOMO HDA에서 Radixact로 치료 계획 Transfer 시 Normal Organ의 선량이 증가하는 경향을 보였는데, 본 연구를 통해서 두 장비의 Hardware 차이(Beam Profile, Dose rate 등)와 선량학적 차이(dosimetric differences) 사이에 명확한 인과관계를 규명하진 못하였다. 하지만 본 연구를 토대로 추후 추가적인 연구가 이루어진다면 보다 더 안전하고 효율적인 방사선 치료가 이루어질 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Adelstein DJ, Li Y, Adams GL, Wanger H Jr, Kish JA, Ensley JF, Schuller DE, Forastiere AA: An Intergroup Phase III Comparison of Standard Radiation Therapy and Two Schedules of Concurrent Chemoradiotherapy in Patients With Unresectable Squamous Cell Head and Neck Cancer, *The Journal OF CLINICAL ONCOLOGY*, V,21, No. 1, 2003, pp. 92-98
2. John F. Fowler: The linear-quadratic formula and progress in fractionated radiotherapy, *The British Institute of Radiology*, Vo,62, 1989, Issue 740
3. Xin Zhang, Jose Penagaricano, Ganesh Narayanasamy, Peter Corry, TianXiao Liu, Maraboyina Sanjay, Nava Paudel, Steven Morrill: Helical Tomotherapy to LINAC plan conversion utilizing Raystation Fallback planning, *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, V,18, Issue 1, 2017, pp 178-185
4. WEI WANG, HUI YANG, LING GUO, HONGYU SU, SHIHUI WEI, XIULAN ZAHNG: Radiation-induced optic neuropathy following external beam radiation therapy for nasopharyngeal carcinoma: A retrospective case-control study, *Molecular and Clinical Oncology*, V,4, No,5, 2016, pp. 868-872
5. Mack Roach, III, Jiho Nam, Giovanna Gagliardi, Issam El Naqa, Joseph O. Deasy, Lawrence B. Marks: Radiation Dose-Volume Effects and the Penile Bulb, *V.76*, Issue 3, 2010, pp. 130-134
6. Daniel Liberman, Brian Mehus, Sean P. Elliott: Urinary adverse effects of pelvic radiotherapy, *Translational Andrology and Urology*, V,3, No. 2, 2014

Usability Assessment of Plan Transfer between TOMO HAD and Radixact : Planning Study

Department of Radiation Oncology, Samsung Medical Center

An Ye Chan, Kim Jong Sik, Kwon Dong Yeol, Kim Jin Man, Choi Byeong Ki

Purpose : To evaluate the usability of plan transfer between TOMO HD and Radixact, we compared the differences of dose in transferred plans by evaluating the dose of normal organ and target. TOMO HDA and Radixact. The completed plans were transferred each other and we compared the differences of dose by evaluating the DVH of each plans.

Materials and Methods : We planned 4 different plans assuming the treatment of 2 cases in Head and Neck Cancer and 2 cases Prostate cancer. Each plan was designed so that 95 % of the prescription dose was irradiated over 99 % of the target volume, and the normal organ constraints dose was based on the SMC tolerance dose protocol. Each plan was transferred to each equipment and DVH(dose volume histogram) analysis of the transferred plans was compared and evaluated.

Results : The Mean dose of CTV and GTV was increased and decreased in the transferred plans, but there was no significant differences. The target coverage of CTV and GTV was decreased in all cases of transferred plans from TOMO HAD to Radixact, and the change of CI and HI in CTV was within 0.1. Normal organ dose was increased in most cases when transferring from HAD to Radixact in both treatment plans.

Conclusion : According to the results of this experiment, the target coverage was above the standard and the normal organ dose was almost same or decreased when transferring the plans from Radixact to HDA equipment. However the target coverage was reduced when transferring the plans from HDA to Radixact and there was an increase in dose in normal organs that could cause sever side effects such as Optic Chiasm (D_{max} 1.38 Gy), Bladder (D_{max} 3.07 Gy), Penile Bulb (D_{max} 1.14 Gy). Therefore, it is necessary to pay attention to the dose change when transferring the plan and one-time transfer due to equipment inspection will be useful for efficient radiation therapy, but if the transferred treatment plans continue for several consecutive days, the treatment plan should be resumed.

▶**Keyword :** TOMO HD, Radixact, Plan Transfer, Plan Comparison