

Estimation of Secondary Scattered Dose from Intensity-modulated Radiotherapy for Liver Cancer Cases

Dong Wook Kim[†], Jiwon Sung^{*†}, Hyunho Lee^{*†}, Myonggeun Yoon^{*}, Weon Kuu Chung[†], Sun Hyun Bae[†], Dong Oh Shin[†], Kwangzoo Chung[§], Young Kyung Lim^{||}, Donho Shin^{||}, Se Byeong Lee^{||}

^{*}Department of Bio-convergence Engineering, Korea University, Seoul,

[†]Department of Radiation Oncology, Kyung Hee University Hospital at Gandong, Seoul,

[‡]Department of Radiation Oncology, Kyung Hee University Medical Center, Seoul,

[§]Department of Radiation Oncology, Samsung Medical Center, Seoul,

^{||}Proton Therapy Center, National Cancer Center, Goyang, Korea

We estimated secondary scattered and leakage doses for intensity-modulated radiotherapy (IMRT), volumetric arc therapy (VMAT) and tomotherapy (TOMO) in patients with liver cancer. Five liver patients were planned by IMRT, VMAT and TOMO. Secondary scatter (and leakage) dose and organ equivalent doses (OEDs) are measured and estimated at various points 20 to 80 cm from the iso-center by using radiophotoluminescence glass dosimeter (RPLGD). The secondary dose per Gy from IMRT, VMAT and TOMO for liver cancer, measured 20 to 80 cm from the iso-center, are 0.01~3.13, 0.03~2.34 and 0.04~1.29 cGy, respectively. The mean values of relative OED of secondary dose of VMAT and TOMO for five patients, which is normalized by IMRT, measured as 75.24% and 50.92% for thyroid, 75.14% and 40.61% for bowel, 72.30% and 47.77% for rectum, 76.21% and 49.93% for prostate. The secondary dose and OED from TOMO is relatively low to those from IMRT and VMAT. OED based estimation suggests that the secondary cancer risk from TOMO is less than or comparable to the risks from conventional IMRT and VMAT.

Key Words: Liver cancer, Scatter, Leakage, Intensity-modulated radiotherapy, Volumetric Arc therapy, Helical tomotherapy

서 론

간암은 국내에서 폐암 다음으로 높은 사망률(15.3%)을 가지는 암이며 암발생을 또한 갑상선암(18%)과 위암(15%), 대장암(13%), 폐암(10%) 다음으로 높은 8%에 이르는 매우 심각한 질환이다.^{1,2)} 간암의 표준적인 치료방법은 근치적 절제술이나 약 80%의 환자는 간경변 및 다발성 발현으로 인한 간기능이상으로 수술이 불가하다.³⁾ 이에 따라 수술이 불가한 환자에 대하여 간이식이나 고주파열치료 또는 방사

선치료가 그 대안으로 사용되고 있으나 원발성 간암 치료를 위한 표준적 치료로는 아직 적용되곤 있지 않다.⁴⁻⁷⁾ 다만, 간이식의 경우, Phase 3 연구에서 이미 진행 단계인 간암에 대해 생존율 증가가 있다고 검증되었다.⁸⁾ 이전에는 간암에 대한 방사선 치료의 효과는 간에 대한 방사선 부작용과 이에 따른 선량 제한에서 오는 결과로 간암에 대한 치료 효과가 크지 않다는 인식이 있었으나⁹⁾ 최근에는 진보된 방사선 치료기술과 더불어 이전의 고식적 치료에서 점차적으로 근치적 치료로 그 영역이 확대되어 가고 있다.¹⁰⁻²⁵⁾

일반적으로 방사선치료는 치료 표적인 종양에는 처방선량이 되는 높은 선량을 조사하고 방사선 부작용을 최소화하기 위하여 종양 주변의 정상 장기에는 최소 선량이 흡수되도록 치료계획을 구축한다. 하지만, 방사선이 직접적으로 조사되는 면이 아닌 조사영역 밖에 위치한 장기에서 산란 또는 누출에 의해 흡수되는 선량 평가 또한 방사선 치료에 기인할 수 있는 2차 암 발생 연구에 중요한 자료가 될 수 있을 것으로 사료된다.

이 논문은 2012년도 한국연구재단 기초연구사업 일반연구자 지원사업(NRF-2012R1A1A2003174, NRF-2013R1A1A2007630)과 방사선안전전과제(2011-31115), 지식경제부 전력산업연구개발사업(57311-12), 고려대학교 특별연구비의 지원을 받아 수행되었음.

이 논문은 2013년 12월 6일 접수하여 2013년 12월 16일 채택되었음.

책임저자 : 윤명근, (136-703) 서울시 성북구 정릉 3동 산 1

고려대학교 보건과학대학 바이오융합공학과

Tel: 02)940-2823, Fax: 02)940-2829

E-mail: radiyoon@gmail.com

최근까지 다양한 종류의 산란 및 누출 선량 평가에 대한 연구가 진행 되어 왔다.^{26,27)} 2003년에는 3차원 입체조형방사선치료(3DCRT, 3 dimension conformal radiation therapy)와 세기조절방사선치료간의 2차 산란선량을 비교한 연구에서 세기조절방사선치료가 방사선세기조절을 위하여 보다 많은 모니터단위(MU)을 사용함에 따라 상대적으로 2차 암의 발생 가능성이 높다고 보고하였다.²⁶⁾ 또한, 2011년에는 폐암 및 간암 환자에 대한 세기조절방사선치료와 양성자치료간의 2차 산란선량 평가를 통하여 등중심으로부터 20 cm에서 50 cm 떨어진 위치에서의 2차 산란선량이 PTV에 대한 단위 선량당(Gy) 최소 0.1에서 최대 5.8 mGy까지 측정되었다고 보고하였다.²⁷⁾

본 연구에서는 간암환자에 대한 세기조절방사선치료와 세기조절회전방사선치료 및 나선식토토치료들 간의 조사면 외 영역에서의 2차 산란 및 누출 선량을 평가하였다.

재료 및 방법

1. 환자 선택 및 치료 계획

본 연구는 세기조절회전방사선치료를 받은 총 5명의 간암 환자 데이터를 이용하여 수행되었다. 전체 대상 환자들은 치료계획을 위하여 컴퓨터단층촬영(CT, computed tomography, Brilliance CT Big Bore Oncology; Philips Medical System, The Netherlands)을 실시하였으며 Eclipse (Varian Medical Systems, Palo Alto, CA, USA)와 Hi-Art Tomo (TomoTherapy, Madison, WI, USA) 치료계획체계를 이용하여 세기조절방사선치료와 세기조절회전방사선치료 및 나선식단층치료 계획을 수행하였다. 본 연구의 환자 정보와 치료계획 정보는 Table 1과 2에 서술하였다. 환자의 성별은 4명의 남성과 1명의 여성환자로 구성되어있으며 연령은 42세에서 62세까지 분포하며 평균 연령은 53세이다. 전체 환자는 다발성이 아닌 원발성 간세포암으로 구성되어 있으며 PTV 체적은 최소 60 cc에서 최대 2,112 cc이다. PTV는 국제방사선단위측정위원회(ICRU, international commission on

Table 1. Patient information.

ID	Sex	Age	Disease	Stage	PTV volume (cm ³)
1	Male	62	Liver	III	483
2	Male	54	Liver	I	60
3	Male	59	Liver	III	421
4	Male	49	Liver	VI	2,112
5	Female	42	Liver	VI	214

radiation units and measurement) 보고서 50번에서 제시하는 권고에 따라 컴퓨터단층촬영 영상정보를 토대로 맨눈표적체적(GTV, gross target volume)을 그리고 임상표적체적(CTV, clinical target volume)으로 GTV주위에 존재하는 미소암세포를 고려한 확대된 체적을 만들고 최종적으로 CTV에서 0.7에서 1.0 cm의 추가적인 영역을 확장하여 계획표적체적(PTV)을 만들었다. 각 환자는 52에서 72 Gy의 처방선량이 PTV에 조사되도록 치료계획이 수행되었으며 각 치료계획은 세기조절방사선치료의 경우 8개의 치료빔으로, 세기조절회전방사선치료의 경우 2개의 활꼴(Arc)빔들로 나선식단층치료는 나선빔으로 구성하였다. 세기조절방사선치료와 세기조절회전방사선치료의 다엽콜리메이터 방식은 슬라이딩윈도우 방식을 사용하였다. Fig. 1은 3가지 다른 치료방법에 대한 1번 환자의 치료계획과 선량분포를 보여 준다.

2. 광자극 유리선량계(RPLGD, radioluminescence glass dosimeter)

본 연구에서는 광자극유리선량계(GD-302M, Asahi Techno Glass Co., JAPAN)를 이용하여 2차 산란 및 누출 선량을 측정하였다.²⁸⁾ 광자극유리선량계는 365 NM의 레이저 광선이 선량계에 입사될 때 발생하는 오렌지 빛의 광선(500~700 nm)을 측정함으로써 선량계에 입사된 방사선량을 측정하며 열형광선량계(TLD, thermoluminescence dosimeter)나 광자극선량계(OSLD, optically stimulated luminescence dosimeter)에 비해 상대적으로 재현성이 우수하고 200 KeV 이상의

Table 2. Treatment planning information.

ID	Modality	# of fields (or arcs)	MU/Gy
1	IMRT	8	543
	VMAT	2	291
	TOMO	n/a	1,814
2	IMRT	8	312
	VMAT	2	346
	TOMO	n/a	1,039
3	IMRT	8	597
	VMAT	2	345
	TOMO	n/a	1,435
4	IMRT	8	722
	VMAT	2	317
	TOMO	n/a	3,173
5	IMRT	8	384
	VMAT	2	304
	TOMO	n/a	1,553



Fig. 1. Treatment plan for patient #4 with different modalities; IMRT, VMAT and TOMO. The prescription dose 62.5 Gy with 25 fractions.

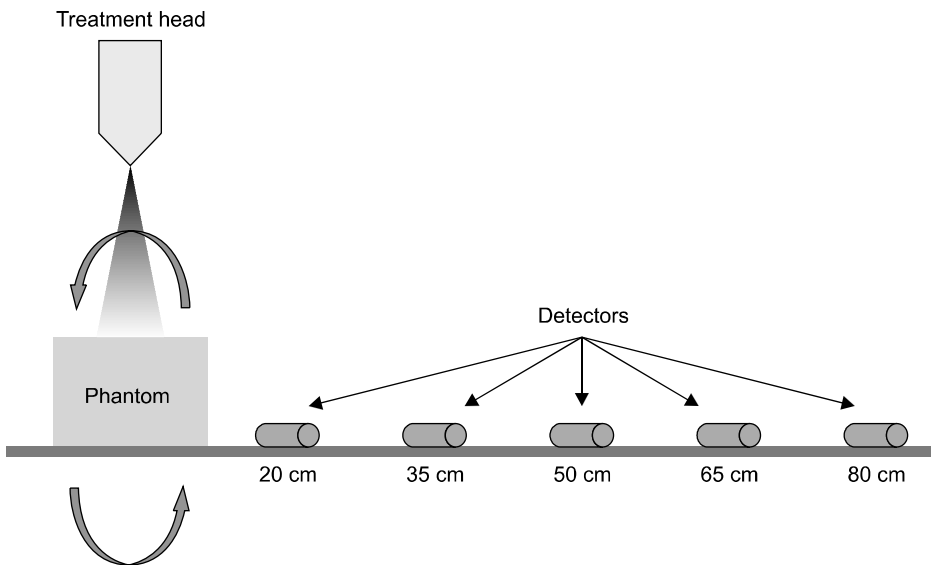


Fig. 2. Secondary scattered dose measurement set up. Measuring positions are 20, 35, 50, 65 and 80 cm from the iso-center. Two RPLGDs are positioned at each measuring point.

영역에서는 에너지 의존도가 낮으며 상대적으로 작은 입사각 의존성을 가진다.²⁹⁻³¹⁾ 길이는 0.85 cm이고 두께가 0.15 cm인 원통형막대형상이다.

광자극선량계의 보정을 위해 선원표면거리(SSD)가 100 cm인 위치 팬텀 내부의 최대선량깊이에 선량계를 놓고 10×10 cm² 조사빔을 조사하였을 때 선량계를 통해 측정된 선량간의 비교값을 측정하여 측정 보정값으로 사용하였다.

3. 측정 및 분석

6메가볼트(MV)와 10메가볼트(MV)의 광자선에 의해 발생하는 중성자의 기여도는 매우 작으므로, 본 연구에서는 2차 산란선량 측정에서 광자선에 의한 선량을 중심으로 측정하였다. 측정은 2개의 광자극유리선량계를 한 세트로서 등중심에서 20, 35, 50, 65, 85 cm 떨어진 위치에 놓고 선원

축거리(SAD)가 100 cm인 위치에 팬텀의 중심을 위치시키고 5명 환자 케이스에 대하여 세기조절방사선치료, 세기조절회전방사선치료, 나선식도모치료법의 3가지 방사선치료법에 따라 방사선을 조사하였을 때 유리선량계에 조사된 선량을 측정하는 방식으로 진행되었다. Fig. 2는 본 연구에서 사용한 측정 방법에 대한 도해를 보여준다.

4. 장기등가선량(OED, organ equivalent dose)

장기등가선량은 인체의 각 장기별 미치는 방사선 영향을 나타내는 것으로 국제방사선단위측정 위원회 보고서 60에 따르면 Table 3과 같이 각 장기별 가중치가 제시되고 있다. 장기별 가중치가 고려된 장기등가선량은 선형-선량반응모델의 하나인 한계수렴-선량반응모델(plateau dose-response model)에 따라 아래의 식과 같이 계산되었다.^{32,33)}

Table 3. At each points, the secondary scattered dose measurements as percentage of prescription dose.

ID	Modality\Distance	20 cm	35 cm	50 cm	65 cm	80 cm
1	IMRT	0.95	0.32	0.15	0.09	0.06
	VMAT	0.82	0.27	0.11	0.06	0.04
	TOMO	0.42	0.21	0.13	0.10	0.08
2	IMRT	0.44	0.11	0.07	0.04	0.01
	VMAT	0.24	0.85	0.05	0.04	0.03
	TOMO	0.16	0.09	0.06	0.05	0.04
3	IMRT	1.32	0.40	0.17	0.10	0.07
	VMAT	1.29	0.38	0.16	0.08	0.06
	TOMO	0.35	0.18	0.11	0.08	0.07
4	IMRT	3.13	1.10	0.68	0.27	0.14
	VMAT	2.34	0.66	0.25	0.13	0.08
	TOMO	1.08	0.46	0.25	0.19	0.15
5	IMRT	0.64	0.21	0.12	0.06	0.04
	VMAT	0.46	0.15	0.07	0.04	0.03
	TOMO	0.22	0.13	0.09	0.07	0.06

$$OED = \frac{1}{V} \sum_i V_i \left(\frac{1 - \exp(-\delta D_i)}{\delta} \right)$$

이 때, V 는 전체 부피이고 V_i 는 부피 요소이며 D_i 는 V_i 에 흡수된 선량 요소이다. 본 연구에서는 방사선에 기인한 2차 암 발생의 영향을 줄 수 있는 주요한 척도로써 2차 산란 및 누출 선량 측정값을 토대로 장기등가선량을 구하고 치료법에 따른 차이를 비교하였다.

결과 및 고찰

Table 2는 세기조절방사선치료와 세기조절회전방사선치료 및 나선식단층토모치료계획에 대해 보여준다. 세기조절방사선치료계획은 총 8개의 조사면으로 구성되며 PTV에 조사되는 단위선량(Gy) 당 필요한 모니터단위(MU)는 312에서 722 MU/Gy이며 2개의 회전범으로 이루어지는 세기조절회전방사선치료계획에서는 291에서 346 MU/Gy, 나선식토모치료계획은 1,039에서 3,173 MU/Gy이다. 세기조절방사선치료계획은 슬라이딩윈도우 방식의 다엽콜리메이터 방식이 사용되었으나 만약 스텝-앤-슛 방식이 사용 된다면 동일한 플랜에 대하여 모니터유닛이 약 10% 이상 작아질 수 있다. 마찬가지로 세기조절회전방사선치료계획의 경우에서도 본 연구와는 다르게 1개 혹은 3개의 회전범으로 치료계획을 구성하는 경우 모니터유닛이 본 연구에 비해 작거나 커질 수 있다. 나선식토모치료계획의 경우에서도 치료계획에서 Pitch 설정에 따라 치료에 필요한 총 모니터단

위(MU)와 세기조절 치료 정밀도가 변화한다. 본 연구에서 2.5를 사용하였으나 만약 pitch가 5.0으로 설정된다면 나선식토모치료계획의 모니터유닛은 50%가량 감소하게 된다. 본 연구에서는 세기조절방사선치료계획과 세기조절회전방사선치료계획 그리고 나선식토모치료계획 간의 모니터단위(MU) 비율은 1 : 0.7 : 3.5로 나선식토모치료계획이 가장 높게 나왔으며 세기조절회전방사선치료계획이 가장 적게 나왔다. 전체 모니터유닛의 크기는 치료가 같은 경우, 2차 산란 및 누출 선량의 크기와 연관이 있으므로 세기조절방사선치료계획에 비해 세기조절회전방사선치료계획이 상대적으로 적은 2차 산란 및 누출 선량을 가질 수 있음을 예측 할 수 있다. 나선식토모치료기의 경우 방사선 조사 부위의 방사선 차폐 정도가 기존 선형가속기와 다를 수 있으므로 모니터단위에 근거한 직접적인 2차 선량 예측은 부정확 할 수 있다.

Table 3과 Fig. 3은 5명 간암 환자 케이스의 치료기법에 따른 2차 산란 및 누출 선량을 보여준다. 등중심에서 각각 20, 35, 50, 65, 80 cm 떨어진 위치에서의 측정된 평균 산란 및 누출선량을 처방선량에 대한 백분율과 표준편차로 기술 하면 세기조절방사선치료가 1.29±0.97, 0.43±0.35, 0.24±0.22, 0.11±0.08, 0.06±0.04%, 세기조절회전방사선치료를 1.03±0.75, 0.31±0.20, 0.13±0.07, 0.07±0.03, 0.05±0.02%이고 나선식토모치료는 0.44±0.33, 0.21±0.13, 0.13±0.07, 0.10±0.05, 0.08±0.04%와 같다.

2차 산란 및 누출 선량은 치료부위에서 멀어질수록 그 크기가 감소함을 발견하였으며 상대적으로 단위가 세기조

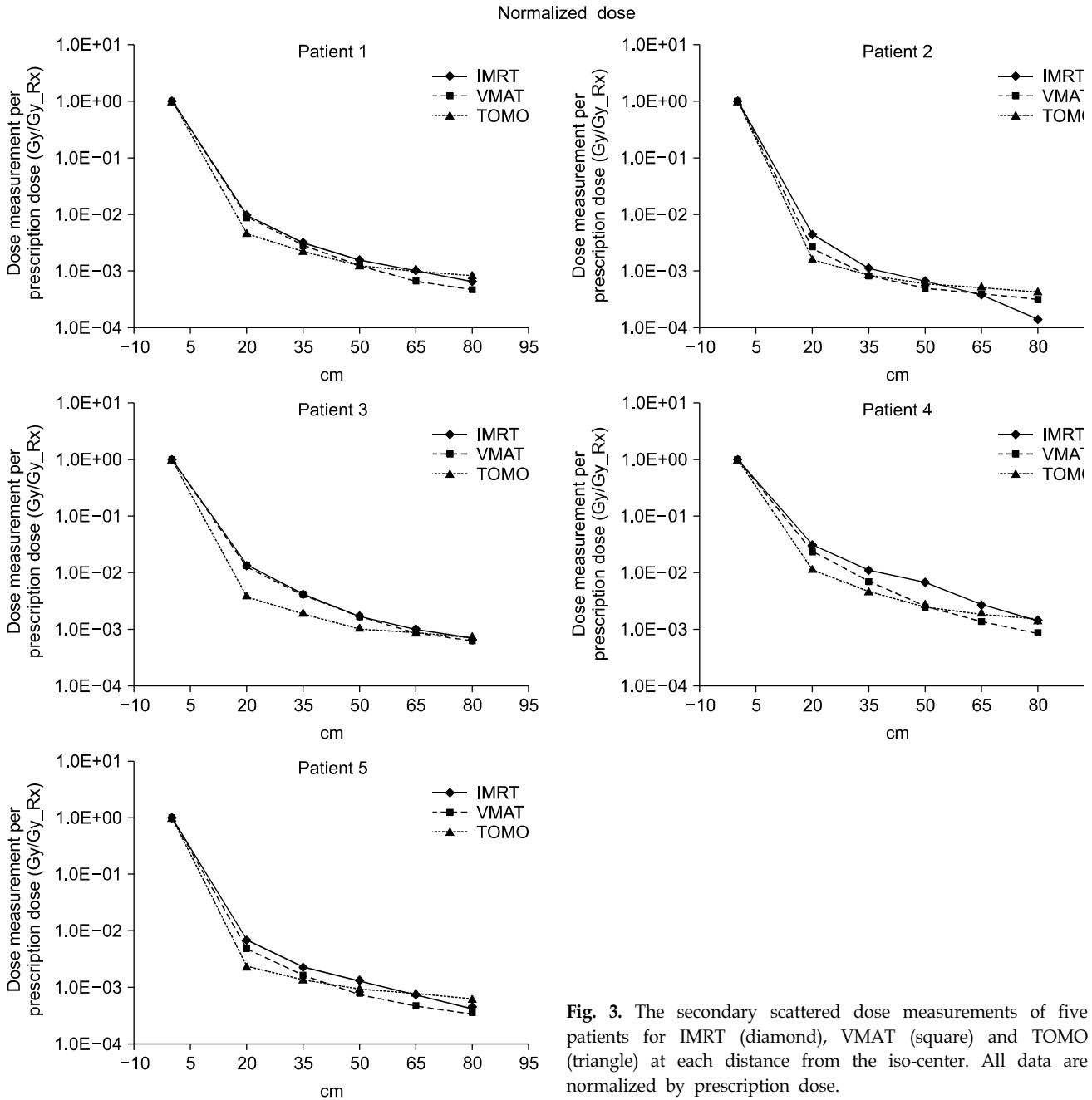


Fig. 3. The secondary scattered dose measurements of five patients for IMRT (diamond), VMAT (square) and TOMO (triangle) at each distance from the iso-center. All data are normalized by prescription dose.

절방사선치료계획에 비해 작았던 세기조절회전방사선치료 계획이 상대적으로 작은 2차 산란 및 누출 선량을 보였으며 나선식토모치료계획의 경우에는 가장 치료를 위한 총 모니터단위가 컸음에도 불구하고 전체적인 2차 산란 및 누출 선량은 작게 나왔다.

Table 4는 측정된 2차 산란 및 누출 선량값을 토대로 계산된 장기별 등가선량비를 보여준다. 갑상선과 대장, 직장

및 전립선에서의 총 처방선량에 대한 등가선량은 세기조절 방사선치료는 0.28, 0.48, 0.31, 0.30 Gy이고, 세기조절회전 방사선치료는 0.21, 0.35, 0.23, 0.23 Gy, 그리고 나선식토모 치료는 0.14, 0.20, 0.15, 0.15 Gy로 측정 되었다. 또한, 세기조절방사선치료를 100%로 했을 때 5명 환자에 대한 평균 값으로서 선량비는, 세기조절회전방사선치료계획이 각각 75, 75, 72, 76%, 나선식토모치료는 51, 41, 48, 50%로 나왔다.

Table 4. Organ equivalent dose (Gy/Gy_{Rx}) measurement per prescription dose at planning target volume.

ID	Modality\Site	Thyroid	Bowel	Rectum	Prostate/Cervix
1	IMRT	0.22	0.35	0.23	0.24
	VMAT	0.18	0.30	0.19	0.20
	TOMO	0.14	0.18	0.14	0.14
2	IMRT	0.09	0.16	0.10	0.10
	VMAT	0.07	0.09	0.07	0.07
	TOMO	0.06	0.07	0.06	0.06
3	IMRT	0.24	0.41	0.26	0.26
	VMAT	0.23	0.40	0.24	0.25
	TOMO	0.10	0.14	0.11	0.11
4	IMRT	0.66	1.21	0.79	0.70
	VMAT	0.45	0.82	0.50	0.48
	TOMO	0.32	0.46	0.34	0.33
5	IMRT	0.18	0.29	0.19	0.20
	VMAT	0.13	0.20	0.13	0.14
	TOMO	0.10	0.13	0.10	0.11

따라서, 본 연구를 통하여 간암환자에 대한 세기조절방사선치료에서 2차 산란 및 누출에 의한 장기별 등가선량은 치료부위에서 가까운 장기일수록 크고 그 크기는 0.14에서 0.48 Gy까지이며 치료방식에 따라 최소 50%까지 차이가 날 수 있음을 발견하였다. 다만, 본 연구에 있어서 환자 데이터가 5명의 케이스로 비록 다양한 PTV 크기를 가지는 환자로 구성되어있으나 환자 데이터베이스의 확충을 통하여 보다 통계적으로 유의미한 연구로 발전 시킬 수 있을 것이라고 사료된다. 또한, 광자극유리선량계를 실험상의 여건으로 인하여 적절한 Build up 물질을 사용하지 못한 상태에서 측정이 진행되어 실제 치료를 받는 인체의 경우와는 다르게 최대 선량 측정에서의 불확도가 상대적으로 클 수 있으며 또한 내부선량의 경우, 공기감쇠만 고려된 본 연구와는 달리 실제 치료에서는 등중심으로부터 멀어짐에 따라 연속적인 감쇠의 영향이 발생하므로 이를 보완하기 위하여 추후에 인체유사팬텀 내부에 선량계를 각 장기위치에 삽입 함으로서 보다 실제 치료와 유사한 상황에서의 선량 측정 연구를 할 수 있을 것으로 사료된다.

결 론

본 연구는 비다발성 원발형 간세포암 환자에 대한 세기조절방사선치료 중에 방사선 조사면 밖의 영역에서 발생하는 2차 산란 및 누출 선량을 평가하였다. 세기조절방사선치료와 세기조절회전방사선치료, 나선식토포치료 3가지 치료법에 대해 장기 별로 0.14에서 0.48 Gy의 등가선량이 산

란 및 누출 방사선에 의해 발생함을 측정 및 계산하였으며, 2차 방사선은 조사빔 영역에서 멀어질수록 그 크기가 감소하고 나선식토포치료에서 상대적으로 작은 선량을 가지는 것으로 평가 되었다. 다만 본 연구는 통계적인 데이터베이스를 확충하고 인체유사팬텀을 이용한 보다 실제치료에 근접한 측정을 통하여 추후 연구에서는 보다 유의미한 결과를 도출 할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 국가암정보센터: 암발생률 추세 분석, <http://www.cancer.go.kr>
2. 국가암정보센터: 성별 10대암 조발생률 2010, <http://www.cancer.go.kr>
3. Lau WY, Lai EC: Hepatocellular carcinoma: current management and recent advances. *Hepatobiliary & pancreatic diseases international: HBPD INT* 7(3):237-257 (2008)
4. Lencioni RA, Allgaier HP, Cioni D, et al: Small hepatocellular carcinoma in cirrhosis: randomized comparison of radio-frequency thermal ablation versus percutaneous ethanol injection. *Radiology* 228(1):235-240 (2003)
5. Lin SM, Lin CJ, Lin CC, et al: Radiofrequency ablation improves prognosis compared with ethanol injection for hepatocellular carcinoma < or =4 cm. *Gastroenterology* 127(6):1714-1723 (2004)
6. Cheng JC, Chuang VP, Cheng SH, et al: Local radiotherapy with or without transcatheter arterial chemoembolization for patients with unresectable hepatocellular carcinoma. *International journal of radiation oncology, biology, physics* 47(2):435-442 (2000)
7. Hawkins MA, Dawson LA: Radiation therapy for hepatocellular carcinoma: from palliation to cure. *Cancer* 106(8):

- 1653–1663 (2006)
8. **Llovet JM, Bruix J**: Systematic review of randomized trials for unresectable hepatocellular carcinoma: Chemoembolization improves survival. *Hepatology* 37(2):429–442 (2003)
 9. **Emami B, Lyman J, Brown A, et al**: Tolerance of normal tissue to therapeutic irradiation. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics* 21(1):109–122 (1991)
 10. **Liu MT, Li SH, Chu TC, et al**: Three-dimensional conformal radiation therapy for unresectable hepatocellular carcinoma patients who had failed with or were unsuited for transcatheter arterial chemoembolization. *Japanese Journal of Clinical Oncology* 34(9):532–539 (2004)
 11. **Giraud P, De Rycke Y, Dubray B, et al**: Conformal radiotherapy (CRT) planning for lung cancer: analysis of intrathoracic organ motion during extreme phases of breathing. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics* 51(4):1081–1092 (2001)
 12. **Fiveash JB, Hanks G, Roach M, et al**: 3D conformal radiation therapy (3DCRT) for high grade prostate cancer: a multi-institutional review. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics* 47(2):335–342 (2000)
 13. **Hoskin PJ**: Advances in IMRT: a clinical perspective. *The Lancet Oncology* 1:74 (2000)
 14. **Low DA, Mutic S**: A commercial IMRT treatment-planning dose-calculation algorithm. *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics* 41(4):933–937 (1998)
 15. **Teh BS, Woo SY, Butler EB**: Intensity modulated radiation therapy (IMRT): a new promising technology in radiation oncology. *The Oncologist* 4(6):433–442 (1999)
 16. **Vaarkamp J, Krasin M**: Reduction of target dose inhomogeneity in IMRT treatment planning using biologic objective functions. *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics* 49(5):1518–1520 (2001)
 17. **Ahamad A, Stevens CW, Smythe WR, et al**: Promising early local control of malignant pleural mesothelioma following postoperative intensity modulated radiotherapy (IMRT) to the chest. *Cancer J* 9(6):476–484 (2003)
 18. **Wieland P, Dobler B, Mai S, et al**: IMRT for postoperative treatment of gastric cancer: covering large target volumes in the upper abdomen: a comparison of a step-and-shoot and an arc therapy approach. *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics* 59(4):1236–1244 (2004)
 19. **Malhotra HK, Raina S, Avadhani JS, deBoer S, Podgorsak MB**: Technical and dosimetric considerations in IMRT treatment planning for large target volumes. *Journal of Applied Clinical Medical Physics/American College of Medical Physics* 6(4):77–87 (2005)
 20. **Brahme A, Roos JE, Lax I**: Solution of an integral equation encountered in rotation therapy. *Physics in Medicine and Biology* 27(10):1221–1229 (1982)
 21. **Otto K**: Volumetric modulated arc therapy: IMRT in a single gantry arc. *Medical Physics* 35(1):310–317 (2008)
 22. **Yu CX**: Intensity-modulated arc therapy with dynamic multileaf collimation: an alternative to tomotherapy. *Physics in Medicine and Biology* 40(9):1435–1449 (1995)
 23. **Welsh JS, Patel RR, Ritter MA, Harari PM, Mackie TR, Mehta MP**: Helical tomotherapy: an innovative technology and approach to radiation therapy. *Technology in Cancer Research & Treatment* 1(4):311–316 (2002)
 24. **Mackie TR**: History of tomotherapy. *Physics in Medicine and Biology* 51(13):R427–453 (2006)
 25. **Cao D, Holmes TW, Afghan MK, Shepard DM**: Comparison of plan quality provided by intensity-modulated arc therapy and helical tomotherapy. *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics* 69(1):240–250 (2007)
 26. **Hall EJ, Wu CS**: Radiation-induced second cancers: the impact of 3D-CRT and IMRT. *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics* 56(1):83–88 (2003)
 27. **Kim S, Min BJ, Yoon M, et al**: Secondary radiation doses of intensity-modulated radiotherapy and proton beam therapy in patients with lung and liver cancer. *Radiotherapy and Oncology: Journal of the European Society for Therapeutic Radiology and Oncology* 98(3):335–339 (2011)
 28. **Howell RM, Hertel NE, Wang Z, Hutchinson J, Fullerton GD**: Calculation of effective dose from measurements of secondary neutron spectra and scattered photon dose from dynamic MLC IMRT for 6 MV, 15 MV, and 18 MV beam energies. *Medical Physics* 33(2):360–368 (2006)
 29. **Corporation A**: RPL Glass Dosimeter/Small Element System Dose Ace. (2000)
 30. **Hsu SM, Yeh SH, Lin MS, Chen WL**: Comparison on characteristics of radiophotoluminescent glass dosimeters and thermoluminescent dosimeters. *Radiation Protection Dosimetry* 119(1–4):327–331 (2006)
 31. **KIM DW, Chung W**: Characteristic study of radiophotoluminescence glass rod detector for clinical usages: skin and inner body in-vivo verification. *J of Korean Phys Soc* 62(4):670–676 (2013)
 32. **Schneider U, Kaser-Hotz B**: Radiation risk estimates after radiotherapy: application of the organ equivalent dose concept to plateau dose-response relationships. *Radiation and Environmental Biophysics* 44(3):235–239 (2005)
 33. **Schneider U, Sumila M, Robotka J**: Site-specific dose-response relationships for cancer induction from the combined Japanese A-bomb and Hodgkin cohorts for doses relevant to radiotherapy. *Theoretical Biology & Medical Modelling* 8(1):27 (2011)

간암환자에 대한 세기조절방사선치료에서의 2차 산란선량평가

*고려대학교 바이오융합공학과, †강동경희대학교병원 방사선종양학과,
‡경희대학교병원 방사선종양학과, §삼성의료원 방사선종양학과, ||국립암센터 양성자치료센터

김동욱[†] · 성지원^{*†} · 이현호^{*†} · 윤명근^{*} · 정원규[†] · 배선현[†]
신동오[‡] · 정광주[§] · 임영경^{||} · 신동호^{||} · 이세병^{||}

간암 환자에 대한 세기조절방사선치료(IMRT, intensity modulated radiotherapy) 및 세기조절회전방사선치료(VMAT, volumetric arc therapy)와 나선식토모치료(TOMO, Helical Tomotherapy)에서 2차 암의 원인이 될 수 있는 산란 및 누출선량을 평가하였다. 5명의 간암 환자에 대해 IMRT와 VMAT, TOMO 치료계획을 실시하여 등중심(iso-center)으로부터 20, 40, 60, 80 cm 위치에서 유리선량계(RPLGD, radiophotoluminescence glass dosimeter)를 이용하여 선량을 측정하였다. 계획표적체적(Planning Target Volume, PTV)에 조사된 단위 선량(Gy)당 측정된 산란 및 누출선량은 IMRT의 경우, 최소 0.01에서 최대 3.13 Gy로 측정 되었고 VMAT에 대해서는 최소 0.03에서 최대 2.35 Gy까지, TOMO에 대해서는 최소 0.04에서 최대 1.30 Gy 까지 측정 되었다. 각 치료법에 대한 평균장기등가선량은 세기조절방사선치료에 대해 세기조절회전방사선치료와 나선식단층토모치료가 각각 갑상선에서 75%와 51%, 대장에서 75%와 41%, 직장에서 72%와 48%, 전립선에서 76%와 50%로 나왔다. 본 측정을 통하여 산란 및 누출선량은 치료 중심으로부터의 거리에 따라 감소함을 보았으며 TOMO 치료의 경우, 환자치료를 위해 사용하는 모니터단위(MU, monitor unit)가 타 치료법에 비해 상대적으로 큼에도 불구하고 산란 및 누출선량은 크지 않는 것으로 평가되었다.

중심단어: 간암, 산란, 누출, 세기조절방사선치료, 세기조절 회전치료, 나선식단층치료