

# Comparison of Dose Distributions Calculated by Anisotropic Analytical Algorithm and Pencil Beam Convolution Algorithm at Tumors Located in Liver Dome Site

Byung Do Park, Sang Hoon Jung, Sung Ho Park, Jeong Won Kwak,  
Jong Hoon Kim, Sang Min Yoon, Seung Do Ahn

Department of Radiation Oncology, Asan Medical Center,  
University of Ulsan College of Medicine, Seoul, Korea

The purpose of this study is to evaluate the variation of radiation dose distribution for liver tumor located in liver dome and for the interest organs(normal liver, kidney, stomach) with the pencil beam convolution (PBC) algorithm versus anisotropic Analytical algorithm (AAA) of the Varian Eclipse treatment planning system. The target volumes from 20 liver cancer patients were used to create treatment plans. Treatment plans for 10 patients were performed in Stereotactic Body Radiation Therapy (SBRT) plan and others were performed in 3 Dimensional Conformal Radiation Therapy (3DCRT) plan. dose calculation was recalculated by AAA algorithm after dose calculation was performed by PBC algorithm for 20 patients. Plans were optimized to 100% of the PTV by the Prescription Isodose in Dose Calculation with the PBC algorithm. Plans were recalculated with the AAA, retaining identical beam arrangements, monitor units, field weighting and collimator condition. In this study, Total PTV was to be statistically significant (SRS:  $p=0.018$ , 3DCRT:  $p=0.006$ ) between PBC and AAA algorithm. and in the case of PTV, ITV in liver dome, plans for 3DCRT were to be statistically significant respectively ( $p=0.013$ ,  $p=0.024$ ). normal liver and kidney were to be statistically significant ( $p=0.009$ ,  $p=0.037$ ). For the predictive index of dose variation, CVF ratio was to be statistically significant for PTV in the liver dome versus PTV (SRS  $r=0.684$ , 3DCRT  $r=0.732$ ,  $p<0.01$ ) and CVF ratio for Tumor size was to be statistically significant (SRS  $r=-0.193$ ,  $p=0.017$ , 3DCRT  $r=0.237$ ,  $p=0.023$ ).

**Key Words:** Liver Dome, Lesion coverage factor (CVF), Heterogeneity, Pencil Beam Convolution, Anisotropic Analytical Algorithm

## 서 론

방사선치료 기술과 전자기기의 발달로 인하여 보다 나은 하지만 복잡한 방사선 치료를 정확하게 할 수 있게 됨으로써 정상 조직의 부작용(normal tissue complication)을 최소화하고, 종양제어(tumor control)를 최적화하여 치료효율을 높

일 수 있게 되었다.<sup>1,2)</sup> 또한, 최근 치료계획시스템에서 병변의 위치에 따른 불균질에 대한 정확한 치료선량을 구현 할 수 있도록 다양한 선량계산 알고리즘이 개발되고 있다. 특히 개개의 이차 전자에 대한 에너지 수송을 더욱 정확하게 적용시켜서 선량계산을 하는 몬테카를로(Monte Carlo) 선량계산법에 대한 논문이 많이 발표되고 있다. 하지만 실제 임상에서는 완전한 몬테카를로 방식의 선량계산법만으로는 선량계산의 정확도에 대하여 부담해야 하는 시간적인 부분이 합리적이지 않아 사용이 제한적인 실정이다. 본원에서 사용하고 있는 치료계획시스템(Eclipse V8.9, Varian)에서는 주로 pencil beam convolution (PBC) 알고리즘과 anisotropic analytical algorithm (AAA)이 선량계산에 사용되고 있다. PBC 알고리즘의 경우 불균질에 대한 영향이 이차 전자의 수송에서는 고려되지 않고 일차 광자 전송에서만 고려한 선량계산 알고리즘으로써 밀도가 낮은 영역 혹은 국소

이 논문은 2011년도 한국연구재단 기초연구과제(2011-0023063)의 지원을 받아 수행된 것임.

이 논문은 2012년 5월 4일 접수하여 2012년 6월 13일 채택되었음.

책임저자 : 광정원, (138-736) 서울시 송파구 올림픽로43길 88  
울산대학교 의과대학 서울아산병원 방사선종양학교실  
Tel: 02)3010-5731, Fax: 02)3010-6950  
E-mail: jwkwak0301@gmail.com  
정상훈, (138-736) 서울시 송파구 올림픽로43길 88  
울산대학교 의과대학 서울아산병원 방사선종양학교실  
Tel: 02)3010-5731, Fax: 02)3010-6950  
E-mail: sanghoon.jung@gmail.com

영역에서 정확하게 선량을 예측할 수 없다. AAPM Task Group 65에서는 수많은 이론적 해석과 실험을 통하여 PBC의 부정확성을 보고하고 있다.<sup>3)</sup> 특히, 정위적 방사선치료 (stereotatic body radiation therapy: SBRT)에 관하여 AAPM Task Group 101에서는 convolution/superposition과 같은 3-Dimensional scatter integration을 설명할 수 있고, 몬테카를로 전산모사를 통한 광자/전자 수송을 적용할 수 있는 알고리즘을 권고한다.<sup>4)</sup> Anisotropic analytical algorithm (AAA) 선량계산법은 Knoos 등<sup>5)</sup>과 Christopher 등<sup>6)</sup>에 의한 연구된 바 있으며, 광자선 및 산란에 의한 2차선 그리고 불균질 매질에 대한 영향을 고려함으로써 PBC 알고리즘 보다 정확한 선량계산을 제공하는 것으로 알려져 있다.<sup>7-10)</sup> 불균질 팬텀(Phantom)을 이용한 연구를 통하여 측정값과 다양한 선량 계산 알고리즘들에 의한 계산값들의 비교를 통하여 X선 에너지, 조사야의 크기 등의 조사 조건에 따른 차이가 보고되고 있는데, 선량분포에 있어서 측정값과 비교했을 때 PBC 알고리즘보다 AAA 선량계산법 경우에 더 넓은 반음영(penumbra) 영역이 형성되었다. 또한, 국소 폐암에 대한 SBRT 치료계획에서 최대흡수선량을 알고리즘에 따라 비교했을 때 AAA 선량계산법에 의한 값이 PBC 알고리즘에 의한 값보다 낮게 나오는 경향을 보고하고 있다. 반면, 심부선량백분율(percent depth dose: PDD) 측정의 경우, 선량보강(build-up) 영역에서 PBC 알고리즘에 의한 계산값이 낮게 나타났으며, 빔측면도(beam profile) 검사에 대해서 PBC 알고리즘에 의한 계산값이 반음영 영역에서 낮게 나타나는 것으로 보고하고 있다.<sup>11)</sup>

일반적으로 복부에 위치한 장기는 균질 매질의 특성을 가지고 있으나, 간원개(liver dome)에 위치한 병변은 폐부위와 인접하는 특수한 부위로 비균질 매질의 특징을 가장 크게 보이는 부위 중 하나이며 주로 15MV x-ray로 치료빔을 이용하여 치료를 하는데 이 같은 경우에는 AAA에 의한 선량 분포로도 임상적으로 의미가 없을 수 있다. 그리고 경계 부위에서 하위 쪽 또는 상위 쪽으로는 균질한 매질의 특성을 가지고 있어 종양의 여러 양상에 따라 실질적인 선량분포가 간단하게 나타나지 않은 부위로 호흡에 대한 고려와 함께 많은 임상적인 고려가 필요하다. 이에 간원개 부근에 종양이 위치한 간암환자의 경우 치료선량 분포에 대한 분석이 실시하였다.

본 연구에서는 간원개에 위치한 종양에 대하여 PBC 알고리즘과 AAA의 선량계산법을 적용시켰을 경우, 각 표적체적에 대하여 처방선량의 100%를 조사받는 체적( $V_{100}$ )을 구하고 lesion coverage factor (CVF)를 통하여 선량분포의

차이 및 주요 관심장기(정상 간, 신장, 위)에 전달되는 선량의 변화를 정량적으로 평가하였으며, 선량변화 예측인자로서 종양의 위치에 따른 유효 깊이, 간원개에 위치한 계획용 표적체적 그리고 종양의 크기에 대하여 두 알고리즘에 의한 CVF 비율을 분석하였다.

### 재료 및 방법

본 연구에서는 20명의 간암환자를 대상으로 하였고 이중 10명의 환자는 정위적 방사선치료 기술로, 나머지 10명의 환자에 대해서는 3차원 입체조형 방사선치료 기술로 치료를 받았다(Fig. 1). 간은 사람의 호흡에 따라 2~3 cm 정도의 움직임을 보이기 때문에 사차원 컴퓨터 단층촬영 (fore-dimensional computed tomography: 4DCT)을 통하여 호흡 주기에 따른 종양의 위치, 상태 변화 그리고 주변 정상 장기들의 상대적인 위치 정보를 수집하였다. 이를 통하여 호흡위상에서의 치료빔 조사시간에 대한 내부표적체적을 정하고 50% 호흡위상(End of Exhale)에서의 단층촬영 영상을 이용하여 치료계획을 수립하였다.

정위적 방사선치료를 받는 환자의 경우, 육안적종양체적은  $3.66 \text{ cm}^3$  ( $1.2 \sim 20.0 \text{ cm}^3$ ), 내부표적체적은  $7.30 \text{ cm}^3$  ( $3.05 \sim 30.32 \text{ cm}^3$ ), 계획용표적체적은  $24.67 \text{ cm}^3$  ( $12.20 \sim 64.58 \text{ cm}^3$ )의 중간값을 가졌으며, 3차원 입체조형 방사선치료를 받는 환자의 경우 육안적종양체적은  $45.16 \text{ cm}^3$  ( $6.91 \sim 179.41 \text{ cm}^3$ ), 내부표적체적은  $71.18 \text{ cm}^3$  ( $13.30 \sim 355.13 \text{ cm}^3$ ) 그리고 계획용표적체적은  $139.65 \text{ cm}^3$  ( $45.89 \sim 522.60 \text{ cm}^3$ )의 중간값으로 나타났다.

치료계획시스템은 Ecclipse V.8.9 (Varian, USA)를 사용하

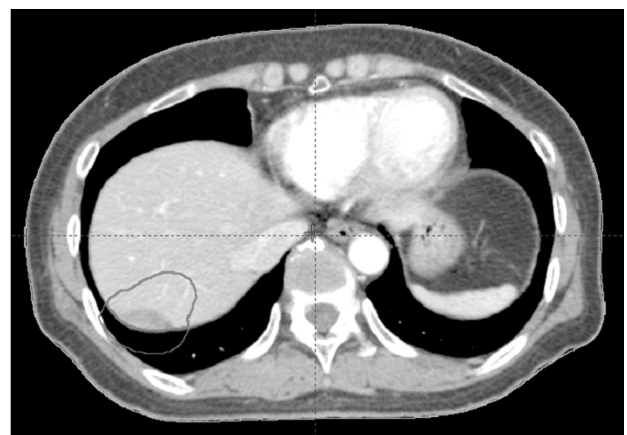


Fig. 1. PTV contour of tumor located in the liver dome.

박병도 외 6인 : 간원개에 위치한 종양에 대한 AAA와 PBC 알고리즘에 따른 전달선량 비교

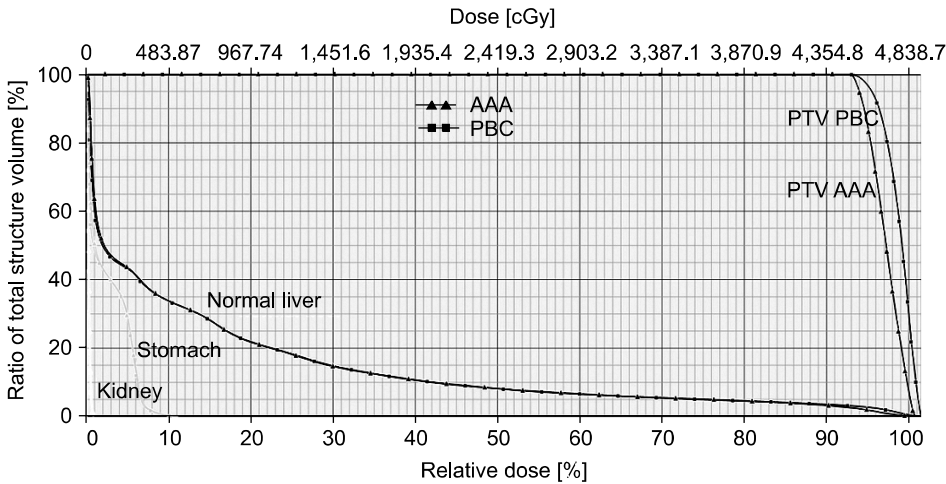


Fig. 2. Dose Volume Histogram of PTV, normal liver, stomach and kidney for both PBC (■) and AAA (▲).

였으며, 정위적 방사선치료를 받는 환자는 36~45 Gy (3분할)의 처방선량으로 7~10개의 조사문을 사용하였으며, 3차원 입체조형 방사선치료를 받는 환자는 45~50 Gy의 처방선량으로 4~7개의 조사문을 사용하였다. 1명을 제외한 19명의 환자에 대해서는 치료 중 호흡동조를 반영한 방사선치료(respiration gating radiation therapy : RGRT)를 시행하였다.

치료계획에 있어서 선량계산은 PBC 알고리즘을 사용하여 선량계산을 한 후, 동일한 치료계획(fraction, field, collimator condition, MU, field weight)으로 AAA 알고리즘을 적용하여 다시 계산하였다.

각각의 체적에 대한 lesion coverage factor (CVF)는 다음과 같이 표현된다.

$$\text{Lesion Coverage Factor (CVF)} = \frac{TV_{D_{pre}}}{TV} \quad (1)$$

여기서 TV는 표적체적,  $TV_{D_{pre}}$ 는 처방선량에 해당하는 표적체적을 나타낸다. 두 선량계산 알고리즘으로 육안적종양체적, 내부표적체적, 계획용표적체적에 대해서 처방선량의 100%를 조사받는 체적( $V_{100}$ )들을 구하고, 각 체적에서의 CVF를 피어슨의 적률상관(Pearson's product moment correlation)을 통하여 분석하였다(SPSS V18). 또한, 주요 관심장기에 조사되는 선량변화에 있어서 정위적 방사선치료를 받는 환자 중 9명에 대한 정상 간(normal liver), 6명에 대한 신장(kidney), 7명에 대한 위(stomach) 그리고 3차원 입체조형 방사선치료를 받는 환자 중 8명에 대한 정상 간, 9명에 대한 신장 및 위에 대하여 최대선량과 평균선량을 분석하였다. 그리고 두 알고리즘을 적용시켰을 때 선량의 변화를 일으킬 수 있는 예측인자로서 빔의 경로에 따른 유효경로

Table 1. Lesion coverage factor (CVF) calculated with PBC and AAA (r : Correlation coefficient, (Dome) : Volume only in the liver dome).

SBRT	CVF with PTV :	CVF with PTV (Dome) :
r	-0.288	-0.096
p-value	0.018	0.095
3DCRT	CVF with PTV :	CVF with PTV (Dome):
r	0.729	0.911
p-value	0.006	0.013
3DCRT	CVF with ITV :	CVF with ITV (Dome) :
r	-0.029	0.541
p-value	0.024	0.026

차이(Path length-Effective Path Length), 전체 PTV에서 간원개에 위치한 PTV의 비율( $PTV_{lung}/PTV$ ) 그리고 종양의 크기(GTV)에 대한 두 알고리즘의 CVF 비율 관계를 대응표본 T-검정(paired T-test)을 이용하여 분석하였다.

## 결 과

### 1. 체적에 대한 선량평가

치료계획에서 육안적종양체적, 내부표적체적 그리고 계획용표적체적에 대하여 두 알고리즘을 적용시켜 선량계산을 한 후, lesion coverage factor를 구하고 각각의 체적에 대한 두 알고리즘의 상관관계를 비교하였다. 먼저 선량-체적 히스토그램(dose volume histogram: DVH)을 통하여 각 표적체적 및 주변 관심장기(정상 간, 신장, 위)에 대한 두 알고리즘간의 차이를 확인하고 CVF를 구하여 상관계수(r)와 유의

Table 2. Volume to the 100% dose ( $V_{100}$ ) calculated with PBC and AAA (n : the number of patient, Ratio=AAA/PBC,  $PTV_{lung}$  : volume only in the lung).

SBRT (n=10)	GTV	ITV	PTV- $PTV_{lung}$	PTV
PBC	1.00±0.00	1.00±0.00	0.99±0.02	0.99±0.02
AAA	0.99±0.03	0.99±0.03	0.97±0.03	0.92±0.06
Ratio	0.99	0.99	0.98	0.93
p-value			0.095	0.018

3DCRT (n=10)	GTV	ITV	PTV- $PTV_{lung}$	PTV
PBC	1.00±0.00	0.99±0.01	0.90±0.11	0.90± 0.10
AAA	0.96±0.06	0.93±0.07	0.84±0.14	0.78±0.15
Ratio	0.96	0.93	0.93	0.87
p-value		0.024	0.013	0.006

확률(p-value)로써 상관관계를 분석하였다(Fig. 2). 정위적 방사선치료 기술에 의해 치료를 받는 환자의 경우 전체 계획용포적체적에 대한 두 알고리즘의 선량분포 관계에서 부적 상관(negative correlation)이 존재하였다( $r=-0.288$ ,  $p=0.018$ ). 반면 3차원 입자조형 방사선치료 기술에 의해 치료를 받는 환자의 경우 전체 계획용포적체적( $r=0.729$ ,  $p=0.006$ ), 간원개에서의 계획용포적체적( $r=0.911$ ,  $p=0.013$ ), 간원개에서의 내부포적체적( $r=0.541$ ,  $p=0.026$ )에 대한 두 알고리즘의 선량 분포 관계에서 정적 상관(positive correlation)이 존재하였으며, 전체 내부포적체적에 대하여 부적 상관( $r=-0.029$ ,  $p=0.024$ )이 존재하였다(Table 1, 2). 이는 각각의 체적에 포함 되는 폐의 영역의 비율이 증가할수록 처방선량이 차지하는 체적이 과대평가 될 수 있음을 의미한다.

### 2. 주요 관심장기에 대한 선량평가

복부에 위치한 장기들은 간 이외에도 위, 십이지장, 직장, 췌장, 신장 등이 존재한다. 방사선 치료계획을 세울 때는 이들 장기(organ at risk: OAR)들에게 조사되는 방사선량을 고려하여 정상 장기의 합병률을 최소화시켜야 한다. 본 연구에서는 간원개에 위치한 종양을 치료함에 있어 두 알고리즘에 따른 주요 관심장기들에게 흡수되는 최대선량( $D_{max}$ )과 평균선량( $D_{mean}$ )을 비교하였다. 신장의 경우 두 알고리즘에 대한 평균선량의 차이가 2 cGy 이하로 뚜렷한 차이를 관찰 할 수 없었으며, 위는 5 cGy 이하, 정상 간은 7.5 cGy 이하의 평균선량 차이를 넘지 않았다. 이는 간원개에 위치한 종양과의 거리가 떨어져 있고 호흡동조에 의한 치료를 하기 때문에 크게 영향을 받지 않은 것으로 추정된다. 하지만 정위적 방사선치료 기술에 의해 치료를 받는 환자들에 대해서 정상 간 조직과 신장에 조사되는 최대선량에

Table 3. Maximum and mean doses to interest organ calculated with PBC and AAA (n: the number of patient, Ratio=AAA/PBC).

SBRT		Normal liver n=9	Both kidney n=6	Stomach n=7
$D_{max}$	PBC	4,966.4 cGy	17.2 cGy	15.3 cGy
	AAA	4,878.6 cGy	22.5 cGy	16.0 cGy
	Ratio	0.98	1.31	1.05
	p-value	0.009	0.037	0.206

3DCRT		Normal liver n=8	Both kidney n=9	Stomach n=9
$D_{max}$	PBC	106.1 cGy	4.5 cGy	28.0 cGy
	AAA	105.4 cGy	5.2 cGy	28.4 cGy
	Ratio	0.99	1.16	1.01
	p-value	0.110	0.116	0.377

3DCRT		Normal liver n=8	Both kidney n=9	Stomach n=9
$D_{mean}$	PBC	47.1 cGy	0.7 cGy	5.5 cGy
	AAA	47.1 cGy	0.9 cGy	6.4 cGy
	Ratio	1.00	1.29	1.16
	p-value	0.186	0.142	0.063

대하여 두 알고리즘으로 계산한 값을 분석하였을 때 통계학적으로 유의한 상관관계(정상 간 조직:  $p=0.009$ , 신장:  $p=0.037$ )를 보였다(Table 3). 이는 한 번에 많은 선량을 조사하는 정위적 방사선치료 기술에 의하여 주변 장기에 분포되는 선량이 많아진 것으로 예측되어진다.

### 3. 선량변화 예측인자

본 연구에서 지정한 선량변화 예측인자에 대하여 대응포본 T-검정으로 분석하였다. 첫째, 방사선의 유효깊이(Effective depth)에 대한 CVF 비율과의 관계는 통계학적으로 무의미하였다(SRS:  $p=0.060$ , 3DCRT:  $p=0.906$ ) (Fig. 3). 이는 실제 경로와 유효깊이의 차이에 있어서 SBRT의 경우 평균  $3.38±3.53$  cm, 3DCRT의 경우 평균  $0.82±2.89$  cm로 두 알고리즘에 따른 차이를 발생시킬 만큼 크지 않았기 때문이다. 둘째, 간원개에 위치한 종양에 대하여 전체 계획용포적체적에서 폐부분을 제외한 체적의 비율( $PTV_{dome}/PTV$ )에 대한 두 알고리즘의 CVF비율과의 관계는 SBRT ( $r=0.684$ ,  $p<0.01$ ) 및 3DCRT ( $r=0.732$ ,  $p<0.01$ ) 기술에 의한 치료계획에서 정적 상관이 존재하였다(Fig. 4). 셋째, 종양의 크기에 있어서 두 알고리즘의 CVF비율과의 관계는 SRS 기술에 의한 치료계획의 경우 부적 상관( $r=-0.193$ ,  $p=0.017$ )이 존재

박병도 외 6인 : 간원개에 위치한 종양에 대한 AAA와 PBC 알고리즘에 따른 전달선량 비교

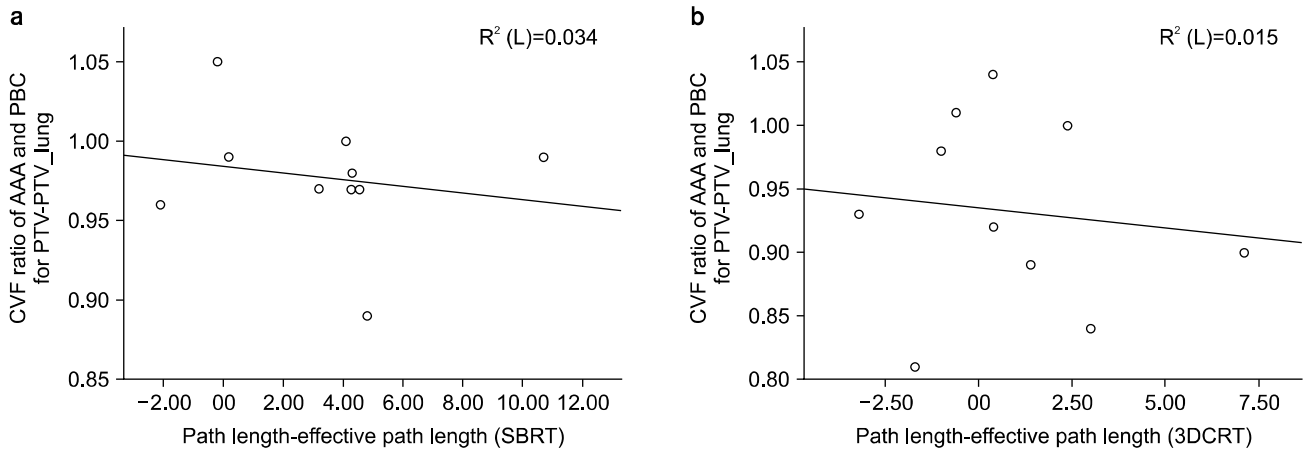


Fig. 3. The predictive index of dose variation :  $\Sigma$  (Path Length<sub>i</sub> - Effective Path Length<sub>i</sub>) i=number of field.

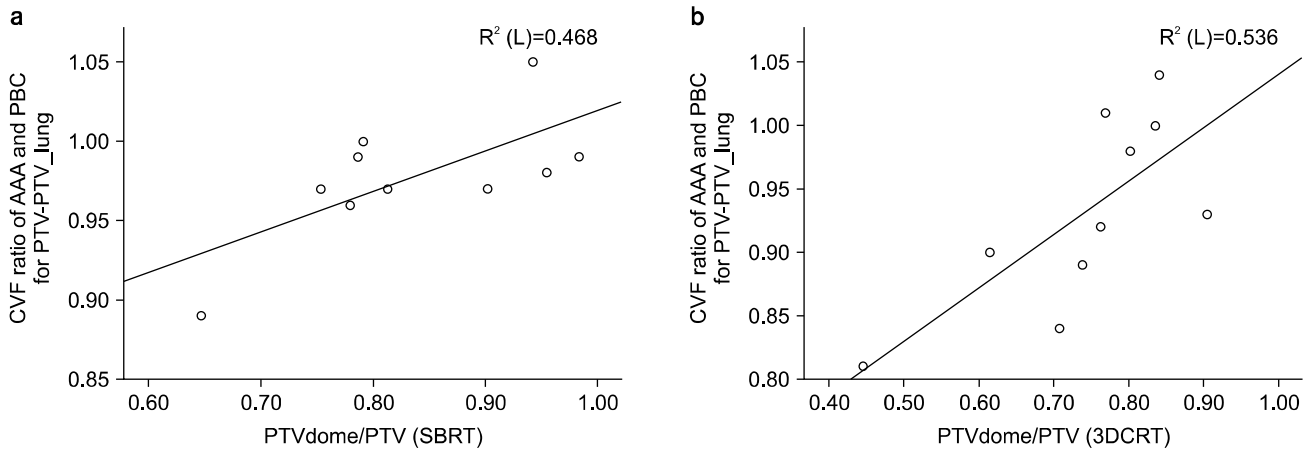


Fig. 4. The predictive index of dose variation :  $PTV - PTV_{lung} / PTV$  ( $PTV_{lung}$ : Volume only in the lung).

하고, 3DCRT 기술에 의한 치료계획의 경우 정적 상관 ( $r=0.237$   $p=0.023$ )이 존재하였다(Fig. 5).

### 고찰 및 결론

국제 방사선 단위 및 측정 위원회(International Commission on Radiation Units and Measurement : ICRU)의 보고서 24에서는 치료표적체적의 흡수선량은 부정확도가 5% 이상을 넘지 않도록 권장하고 있다.<sup>12)</sup> 또한 AAPM (American Association of Physicists in Medicine) 보고서 85는 선량계산에 있어서 2~3%의 오차가 발생하면 실제 치료에서는 5% 이상의 오차가 발생한다고 보고하고 있다.<sup>3)</sup> 최근의 연구 결과에서는 폐의 경우 밀도가 낮은 비균질의 병변에 대하여 측면 전자평형 조건의 고려 여부에 따른 선량계산값이

차이가 나타나며, 가장 적합한 치료계획 알고리즘으로 convolution/superposition이라고 보고하고 있다.<sup>13)</sup> 또한, RTOG 0236에서는 처방선량 60 Gy까지는 PTV의 95%에 전달되는 선량에 있어서 불균질에 대한 보정 없이 선량계산 알고리즘을 적용하였으나, Xiao 등은 convolution/superposition 알고리즘을 사용하여 20명의 치료계획에 대하여 다시 계산하여 55.9 Gy까지 떨어진다는 결과를 보고 하였다.<sup>14)</sup> 또한, SBRT 기술로 치료받는 폐암 환자를 대상으로 PBC 알고리즘과 AAA 법을 적용시켜 비교했을 때 AAA 법에 의한 최대 및 평균선량이 상당히 낮게 나타났으며,<sup>15)</sup> 세기 조절 방사선치료(intensity modulated radiation therapy : IMRT) 계획에 대하여 PBC 알고리즘과 AAA 선량계산법을 이용하여 비교했을 때, 전립선, 머리와 목 부위에 대해서는 큰 차이를 보이지 않았으나, 폐에서는 전자수송 코드의 정확성 관

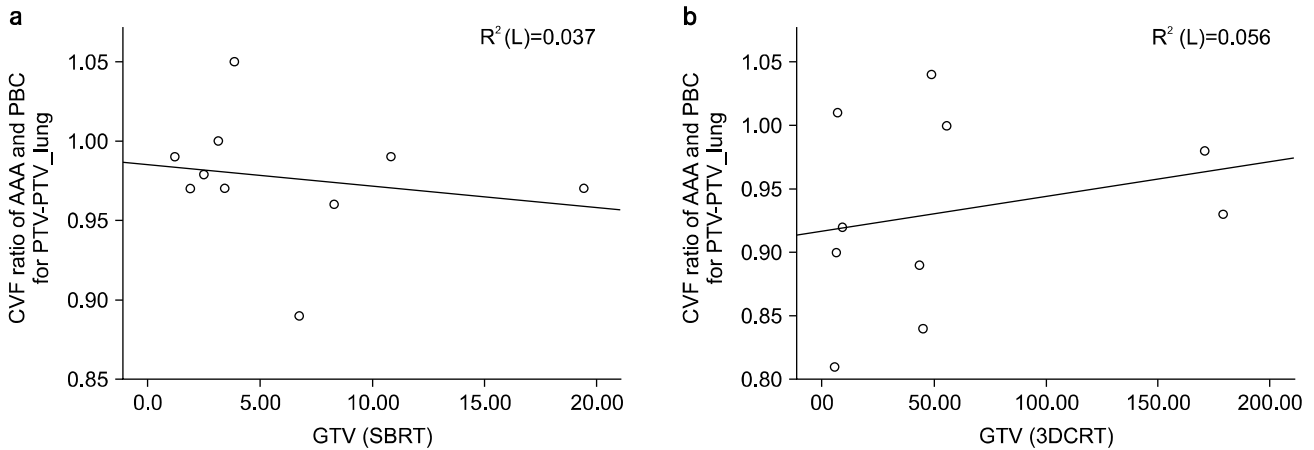


Fig. 5. The predictive index of dose variation: Gross Tumor Volume.

게로 AAA 법을 권장하는 결과가 보고되었다.<sup>6)</sup> 하지만 간원개와 같이 밀도 차가 발생하는 경계선상에 위치한 종양에 대한 정확한 선량계산은 이루어지지 않았다. 이와 같이 매질이 다른 장기를 접하고 있는 종양의 경우, 매질의 성질을 고려하지 않은 채 기존의 선량계산 알고리즘으로 치료계획을 수립한다면 치료의 정확도는 떨어지기 마련이다.

본 연구에서는 Eclipse Version 8.9 (VARIAN, USA)에 탑재된 두 선량계산 알고리즘(PBC, AAA)을 이용하여 간원개에 종양이 위치한 간암 환자를 대상으로 정위적 방사선치료 및 3차원 입체조형 방사선치료 기술을 적용한 각각의 치료계획에 대하여 선량계산을 하고, 두 알고리즘으로 처방선량 100%를 차지하는 체적( $V_{100}$ )을 계획용 표적체적에 대하여 CVF를 비교하였다. SBRT의 경우 간원개에만 존재하는 PTV에 대하여 PBC보다 AAA가 2% 낮게 나왔으며, 전체 PTV에 대해서는 AAA가 7% 낮게 나타났다. 또한 3DCRT의 경우 간원개에만 존재하는 PTV에서는 7%, 전체 PTV에 대해서는 13%의 차이를 보였다(Table 2). 이는 치료 부위에 대하여 PBC의 경우 lesion coverage factor가 더 높게 평가될 수 있으며, 흡수선량의 차이가 발생할 것으로 예측된다. 간원개에 위치한 종양의 치료계획에 있어서 주변 관심장기에 대하여 두 알고리즘을 적용시켰을 때의 선량차이를 조사하였다. SBRT의 경우 정상 간과 위에 대한 최대선량 및 평균선량에 대하여 두 알고리즘의 비율은 5% 이하였으며, 3DCRT의 경우에서도 뚜렷한 차이는 보이지 않았다. 하지만 신장의 경우 두 알고리즘에 의한 선량 차이가 발생하였으며, 특히 SBRT 환자들의 신장에 대한 평균선량이 두 배 이상으로 나타났는데 이는 한 명의 환자에 대하여 간 아래 신장의 위치에 의해 발생된 것으로 판단된다.

정상 간 및 신장에 흡수되는 최대흡수선량에 대한 두 알고리즘의 CVF 비율은 통계학적으로 유의미한 결과로 나타났다. 또한, 종양의 위치에 따른 선량변화를 정량적으로 분석하기 위해 예측인자와 두 알고리즘간의 상관관계를 검정하였다. 기존의 연구에서 폐를 통과하는 거리에 따른 PBC 알고리즘에 의한 오차는 증가하고 AAA의 경우는 측정값과 일치하는 것으로 보고되고 있다. 본 연구에서 선량변화 인자로 선택한 경로와 유효깊이의 차이에 대한 두 알고리즘의 CVF 비율과의 관계에서 유의한 상관관계를 발견하기 어려웠다. 하지만 간원개에서의 PTV만을 고려한 경우와 종양의 크기에 대한 두 알고리즘의 CVF 비율은 강한 상관관계를 보였다.

본 연구는 PBC 알고리즘과 AAA를 이용한 선량계산 및 국한된 선량변화 예측인자에 대하여 단편적인 결과만을 비교하였다. 따라서, 종양의 모양에 따른 체적에서의 선량변화, 종양의 다양한 위치 및 움직임 등을 고려하여 이를 바탕으로 두 알고리즘을 비교 분석한다면 더욱 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 또한, Monte Carlo 선량계산법 및 검출기를 이용한 측정값을 바탕으로 두 알고리즘의 차이를 비교하여 경계선상에 있는 종양에 대한 더욱 정밀한 분석이 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Timmerman R, McGarry R, Yiannoutsos C, et al: Excessive toxicity when treating central tumors in a phase II study of stereotactic body radiation therapy for medically inoperable early-stage lung cancer. J Clin Oncol 24:4833-4839 (2006)

2. **Timmerman R, Kavanagh B, Chinsoo Cho L, Papiez L, Xing L**: Stereotactic body radiation therapy in multiple organ sites. *J Clin Oncol* 25:947-952 (2007)
3. **AAPM Report 85**: Tissue inhomogeneity corrections for megavoltage photon beams. American Association of Physicists in Medicine. Medical Physics Publishing Madison (2004)
4. **Benedict SH, Yenice KM, Followill D, et al**: Stereotactic body radiation therapy : The report of AAPM Task Group 101. *Med Phys* 37:4078-4101 (2010)
5. **Knoos T, Wieslander E, Cozzi L, et al**: Comparison of dose calculation algorithms for treatment planning in external photon beam therapy for clinical situations. *Phys Med Biol* 51:5785-5807 (2006)
6. **Christopher MB, Wingate K, Conway J**: Clinical implications of the anisotropic analytical algorithm for IMRT treatment planning and verification. *Radiother Oncol* 86(2):276-284 (2008)
7. **Ulmer W, Harder D**: Applications of a triple gaussian pencil beam model for photon beam treatment planning. *Med Phys* 6:68-74 (1996)
8. **Sievinen J, Ulmers W, Kaissl W**: AAA photon dose calculation model in eclipse. Varian RandD #7170B. Palo Alto, CA, Varian (2005) pp.1-23
9. **Fogliata A, Nicolini G, Vanetti E, Clivio A, Cozzi L**: Dosimetric validation of the anisotropic Analytical algorithm for photon dose calculation: Fundamental characterization in water. *Phys Med Biol* 51:1421-1438 (2006)
10. **Kan MW, Cheung JY, Leung LH, Lau BM, Yu PK**: The accuracy of dose calculations by anisotropic Analytical algorithms for stereotactic radiotherapy in nasopharyngeal carcinoma. *Phys Med Biol* 56:397-413 (2011)
11. **Josefsson A**: Evaluation of the Anisotropic Analytical Algorithm (AAA) for 6MV photon energy, Master of Science Thesis, Department of Radiation Physics Göteborg University (2008)
12. **International Commission on Radiation Units and Measurements**: Determination of Absorbed Dose in a Patient Irradiated by Beams of X or Gamma Rays in Radiotherapy. ICRU Report 24 (1976)
13. **Carrasco P, Jomet N, Duch MA, et al**: Comparison of dose calculation algorithms in phantom with lung equivalent heterogeneities under conditions of lateral disequilibrium. *Med Phys* 31:2899-2911 (2004)
14. **Xiao Y, Papiez L, Paulus R, et, al**: Dosimetric evaluation of heterogeneity corrections for RTOG 0236 : Stereotactic body radiation therapy of inoperable stage I/II non-small cell lung cancer. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 73:1235-1242 (2009)
15. **Herman Tde L, Hibbitts K, Herman T, Ahmad S**: Evaluation of pencil beam convolution and anisotropic analytical algorithm in stereotactic lung irradiation. *J Med Phys* 36:234-238 (2011)

## 간원개에 위치한 종양에 대한 Anisotropic Analytical Algorithm과 Pencil Beam Convolution 알고리즘에 따른 전달선량 비교

울산대학교 의과대학 서울아산병원 방사선종양학교실

박병도 · 정상훈 · 박성호 ·곽정원 · 김종훈 · 윤상민 · 안승도

본 연구에서는 종양이 간원개에 위치한 환자들을 대상으로 Eclipse 치료계획시스템(treatment planning system V8.9 : TPS, Varian)에서 쓰이는 두 종류의 선량계산 알고리즘(pencil beam convolution : PBC, anisotropic Analytical algorithm : AAA)들을 적용하여 육안적종양체적(gross tumor volume : GTV), 내부표적체적(internal target volume : ITV), 계획용표적체적(planning target volume : PTV) 및 주요 관심장기에 전달되는 선량의 변화를 정량적으로 평가하고, 선량분포에 영향을 미칠 수 있는 인자들을 분석하고자 하였다. 본원에서 치료받은 간암환자 20명을 대상으로 하였고 그 중 10명의 환자들에 대해서는 정위적 방사선치료(stereotactic body radiation therapy : SBRT) 기술을 적용, 다른 10명의 환자들에 대해서는 3차원 입체조형 방사선치료(three-dimensional conformal radiation therapy : 3DCRT) 기술을 적용하여 치료하였다. 조사선량은 우선적으로 PBC 알고리즘을 적용하여 선량계산을 하였고 동일한 빔 정렬 및 콜리메이터(Collimator), Monitor Unit (MU) 그리고 Field 가중치를 적용시켜서 AAA 선량계산법으로 다시 계산 한 후, 두 알고리즘에 대한 처방선량 100%에 해당하는 체적( $V_{100}$ )의 lesion coverage factor (CVF) 들을 비교하였다. SBRT 기술을 이용한 환자들의 치료계획에서 전체 PTV에 대한 CVF의 경우, 두 선량계산 알고리즘사이 통계학적으로 유의한 상관관계( $p=0.018$ )를 보였다. 또한, 3DCRT 기술을 이용한 환자들의 치료계획에서는 전체 PTV ( $p=0.006$ ), 간원개에 위치한 PTV ( $p=0.013$ ), 전체 ITV ( $p=0.024$ )에 대하여 각각 통계학적으로 유의한 상관관계를 보였다. 복부에 위치한 주요 관심장기에 대하여 SBRT 기술을 이용한 환자들의 치료계획에서 정상 간과 신장에 조사되는 최대선량에 대하여 통계학적으로 각각 유의한 상관관계(정상간:  $p=0.009$ , 신장:  $p=0.037$ )를 보였다. 본 연구에서 선택한 선량변화 예측인자들에 대하여 대응표본 T-검정(paired T-test)을 시행한 결과, 전체 PTV에 대한 간원개에만 위치하는 PTV의 비율( $PTV_{\text{dome}}/PTV$ )과 두 알고리즘에 의한 CVF 비율의 상관관계에 있어서 통계학적으로 유의미한 상관관계를 보였다( $p < 0.01$ ). 또한, 종양의 크기에 대한 두 알고리즘의 CVF 비율에 있어서 통계학적으로 의미가 있는 상관관계를 보였다(SRS환자  $p=0.017$ , 3DCRT환자  $p=0.023$ ). 본 연구에서는 15MV x-ray beam으로 선량을 계산할 때 PBC와 AAA간의 선량계산 차이를 분석하여 선택한 선량변화 예측인자 중 간원개에 위치한 종양의 크기와 계획용 표적체적에 대한 관계성을 알아내었다. 일반적으로 15MV x-ray beam에 의한 선량분포를 정확하게 알아내는 것은 AAA으로도 불충분하다는 것이 일반적인 사실로 받아들여지고 있어 이를 AAA와 PBC간의 차이로 그 정확성을 간접적으로 유추하여 실질적인 선량분포에 대한 치료계획단계에서의 선량분포의 차이의 경향성을 보고자 하였다.

**중심단어:** 간원개, Lesion coverage factor (CVF), Heterogeneity, Pencil Beam Convolution, Anisotropic Analytical Algorithm