

# Portal dose image prediction과 anisotropic analytical algorithm을 사용한 환자 특이적 정도관리 결과 비교 분석

서울대학교병원 방사선종양학과

안범석 · 김보겸 · 이제희

**목 적:** 전자포탈영상장치 기반의 환자특이적 정도관리를 위한 portal dose image prediction (PDIP)와 anisotropic analytical algorithm (AAA)을 비교하여 성능을 분석하고, AAA를 사용한 portal dosimetry의 임상적 사용 가능성을 평가하고자 한다.

**대상 및 방법:** 폐암 환자 15명과 간암 환자 17명, 총 32명의 환자를 후향적으로 선정하였다. PDIP와 AAA를 사용하여 검증용 치료계획을 생성하였다. 계산된 분포와 측정된 분포를 비교한 감마통과율(Gamma passing rate, GPR)과 다엽콜리메이터(Multileaf collimator, MLC) 위치 차이를 얻었다.

**결 과:** 폐암 환자군의 GPR 평균값은 PDIP 사용시 3%/3 mm에 대해  $99.5\% \pm 1.1\%$ , 1%/1 mm에 대해  $90.6\% \pm 5.8\%$ 였다. AAA 사용시 3%/3 mm에 대해  $98.9\% \pm 1.7\%$ , 1%/1 mm에 대해  $87.8\% \pm 5.2\%$ 였다. 간암 환자군의 GPR 평균값은 PDIP 사용시 3%/3 mm에 대해  $99.9\% \pm 0.3\%$ , 1%/1 mm에 대해  $96.6\% \pm 4.6\%$ 였다. AAA 사용시 3%/3 mm에 대해  $99.6\% \pm 0.5\%$ , 1%/1 mm에 대해  $89.5\% \pm 6.4\%$ 였다. MLC 위치 차이는  $0.013\text{ mm} \pm 0.002\text{ mm}$ 로 적었으며, 감마통과율과 상관관계를 보이지 않았다.

**결 론:** 전자포탈영상장치 기반 환자특이적 정도관리를 수행할 때 AAA를 임상적으로 portal dosimetry 계산 알고리즘으로써 사용할 수 있다.

▶ **핵심용어:** 환자특이적 정도관리, portal dosimetry, PDIP, AAA

## 서론

세기조절방사선치료(intensity modulation radiotherapy, IMRT) 및 체적조절호형방사선치료(volumetric modulated arc therapy, VMAT)는 많은 방사선량을 치료 체적에 전달함과 동시에 인접한 정상장기에는 적은 방사선량을 전달하는 최신 방사선치료 기술이다. 이러한 방사선치료 기술은 다엽콜리메이터(multileaf collimator, MLC), 선량률, 갠트리 속도를 변조시키는 복잡한 기술이

기 때문에 방사선치료의 전달정확도를 평가하는 것은 매우 중요하다. 환자특이적 정도관리(patient-specific quality assurance, PSQA)는 방사선치료 전달정확도를 평가하는 대표적인 방법이다<sup>(1,2)</sup>. 임상에서 PSQA는 환자 치료 전 수행함으로써 계획된 방사선 분포와 실제 전달된 방사선 분포를 비교하여 얻어진 감마통과율(gamma passing rate, GPR) 값을 토대로 전달정확도를 평가한다<sup>(3-5)</sup>.

PSQA를 수행할 수 있는 방사선 측정 기기로는 MapCHECK2과 ArcCHECK (Sun Nuclear Corporation, Melbourne, FL, USA), MatriXX와 Dolphin (IBA Dosimetry, Schwarzenbruck, Germany) 등과 같은 2차원 배열 검출기 (2D array detector)가 있으며, Gafchromic EBT film (ISP, Wayne, NJ, USA)와 같은 방사선크롬 필

책임저자: 안범석, 서울대학교병원 방사선종양학과  
서울특별시 종로구 대학로 101  
Tel: 02-2072-2525  
E-mail: bring0486@gmail.com

름도 있다<sup>(6-8)</sup>. 최근에는, 방사선치료기기에 부착된 전자포탈영상장치(electronic portal imaging device, EPID)를 사용하여 방사선 분포를 측정하는 portal dosimetry를 PSQA로 널리 사용되는 추세이다. 이러한 이유는 EPID로 방사선 측정 시, 공간 분해능이 뛰어나며 추가적인 측정기기를 설치하지 않는 편리함 때문이다<sup>(9, 10)</sup>.

현재 상용화된 방사선치료계획 시스템(radiation therapy planning system, RTPS)인 Eclipse™ (Varian Medical System, Palo Alto, CA, USA)는 portal dosimetry 계산 알고리즘으로 portal dose image prediction (PDIP)를 제공한다. PDIP는 EPID 검출기 깊이에서의 portal dose image kernel과 계산된 플루언스를 합성곱(convolution)하여 PSQA를 위한 계산된 방사선 분포를 얻을 수 있다. 최근 Eclipse™ version 15 이상부터 6 MV 무여과기(flattening-filter free, FFF) 광자선에 한하여 방사선량 계산 알고리즘인 anisotropic analytical algorithm (AAA)을 portal dosimetry 계산 알고리즘으로 사용할 수 있도록 개발하였다. AAA는 대표적인 광자선에 대한 방사선량 계산 알고리즘이다. 광자선 및 산란에 의한 2차선 그리고 불균질 물질에 대한 영향을 고려하여 높은 방사선량 정확도를 제공하므로 실제 임상에서 환자 체내 선량 계산을 위해 널리 사용되고 있다. Portal dosimetry를 위한 AAA는 환자 체내 선량 계산용 AAA와 동일한 계산 모델을 사용하지만, 계측기의 선량 반응도(dose response)를 정확하게 예측하기 위하여 영상장치의 섬광물질(scintillator material)에서 오는 2차 산란 kernel을 고려하여 방사선 분포를 계산한다.

Halcyon (Varian Medical System, Palo Alto, CA, USA)을 이용하여 PSQA를 수행할 때 사용되는 AAA의 경우 여러 연구들을 통해 검증이 되었다. 다양한 환자군에 대하여 AAA를 사용한 portal dosimetry 결과, 다양한 측정 도구들을 사용한 결과와 비슷하게 우수한 결과를 보였다. 또한 체계적 오류와 비체계적 오류에 대한 민감도와 특이도 역시 뛰어난 것으로 나타났다<sup>(11, 12)</sup>. 하지만 C-arm 형태의 선형가속기에서 portal dosimetry에 사용할 수 있도록 제공된 AAA의 성능을 검증하는 연구는 아직 부족하다<sup>(13)</sup>.

따라서 본 연구에서는 EPID 기반의 PSQA를 위해서 새로 추가된 AAA를 기존에 사용했던 PDIP와 비교하여 성

능을 평가하고자 하였다. 또한 각 알고리즘에서 얻어진 GPR과 치료 오차 값의 상관관계를 분석하여 알고리즘에 따른 방사선치료 전달정확도 예측 여부를 평가하고자 한다. 이를 기반으로 AAA를 사용하는 portal dosimetry의 임상적 적용 가능성을 평가하고자 한다.

## 대상 및 방법

### 1. 환자 선택

본원에서 2022년 4월부터 2022년 8월까지 TrueBeam STx (Varian Medical System, USA)의 6 MV FFF 에너지를 사용하여 VMAT 치료를 받은 폐암 환자 15명과 간암 환자 17명으로 총 32명의 환자를 후향적으로 선정하였다. 현재 AAA를 사용한 portal dosimetry는 6 MV FFF 에너지에만 사용이 가능하다. 본원에서는 6 MV FFF 에너지를 사용하여 정위방사선수술 및 정위체부방사선치료를 수행하고 있다. 이 중 C-arm 형태의 TrueBeam STx를 사용하는 것은 정위체부방사선치료이며 정위체부방사선치료를 진행하는 대부분의 경우는 폐암과 간암이었다. 따라서 대상 환자가 폐암과 간암 환자로 한정되었다. 모든 환자는 2 arcs를 사용하였으며, 2 partial arcs 혹은 2 full arcs가 사용되었다. Portal dosimetry로 환자특이적 정도관리를 진행한 환자 중 2%/1 mm의 감마통과율이 본원에서 정하는 90% 이상인 환자만을 대상으로 하였다.

### 2. 검증용 치료계획 생성

각 환자마다 PDIP와 AAA를 사용하는 환자특이적 정도관리 치료계획을 생성하였다. 전산화 치료계획시스템은 Eclipse (Version 16.1), portal dosimetry 알고리즘은 PDIP (Version 16.1), AAA (Version 16.1)를 이용하였다. 각각의 검증용 치료계획은 선원과 영상장치간 거리 (Source to Imager Distance, SID)를 제조사의 권고대로 100 cm로 설정하였다. AAA의 Calculation resolution은 0.15 cm으로 하였으며, Heterogeneity correction은 ON으로 설정하였다.

### 3. EPID를 이용한 선량 분포 측정 및 결과 분석

환자특이적 정도관리를 수행하기 전에 EPID에 대한 Dark field correction, Flood field correction을 시행하였다. SID를 100 cm으로 위치시키고 각 환자의 검증용 치료계획을 전달하여 선량 분포를 측정하였다(Fig. 1). 각 치료계획을 1회 전달한 후 얻은 선량 분포를 텍스트 파일로 변환한 후 PDIP와 AAA 알고리즘으로 생성된 필드에 적용하여 동일한 전달 정보를 비교하고자 하였다.

PDIP와 AAA로 계산된 방사선량 분포와 측정된 방사선량 분포를 비교한 감마통과율(gamma passing rate, GPR)을 분석하였다(Fig. 2). 평가기준은 3%/3 mm, 2%/2 mm, 1%/2 mm, 2%/1 mm, 1%/1 mm로 하였다.

### 4. Log file을 이용한 MLC 차이값 계산

Truebeam은 방사선이 조사될 때, 20 ms 간격으로 계획된 정보와 실제 전달된 정보를 trajectory log file로 저장한다. 여기에는 갠트리 각도, 콜리메이터 각도, 턱(jaw)의 위치, 치료테이블 위치, 전달된 MU, control points, carriage 위치, MLC 엽(leaf) 위치 등이 포함된다. Matlab (R2022a, MathWorks, Natick, MA, USA)을 사용하여



Fig. 1. Linear accelerator and electronic portal imaging device for portal dosimetry. Source to imager distance = 100 cm.

trajectory log file에 저장된 정보 중 계획된 MLC 엽 위치 값과 실제 전달된 MLC 엽 위치 값을 추출하였다. 120개 MLC의 모든 차이에 대한 평균값을 얻었다.

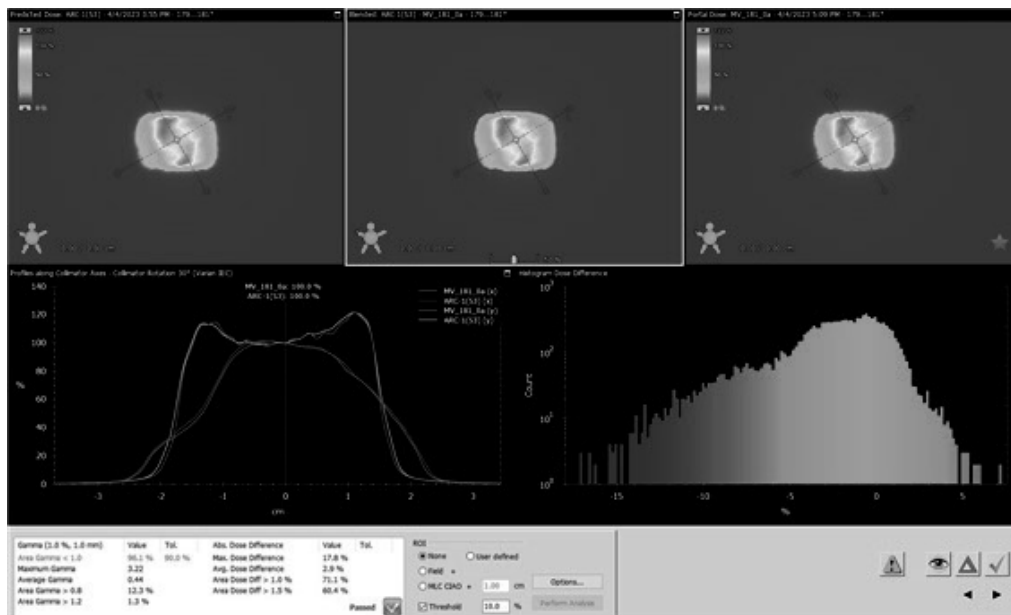


Fig. 2. Gamma passing rate analysis using Varian portal dosimetry software. It analyze gamma passing rate by comparing the predicted dose and portal dose.

### 5. 통계적 분석

알고리즘마다 3%/3 mm, 2%/2 mm, 1%/2 mm, 2%/1 mm, 1%/1 mm 기준으로 얻은 GPR 값과 각 필드마다 얻은 MLC 엽 위치 차이에 대한 정규성 검정을 위해 Shapiro-Wilk test를 사용하였다.

서로 대응하는 기준의 GPR 값 간에 차이가 있는지 판별하기 위해 Wilcoxon signed rank test를 사용하였다.

MLC 엽 위치 차이의 평균값과 GPR 값 사이의 상관관계를 분석하기 위해 Spearman's rank correlation analysis를 사용하였다. 모든 분석은 SPSS version 14.0 (SPSS Inc., Chicago, IL)을 사용하였다.

### 결과

폐암 환자군의 GPR 평균값은 PDIP를 사용했을 때 3%/3 mm, 2%/2 mm, 1%/2 mm, 2%/1 mm, 1%/1 mm 기준에 대하여 각각 99.5% ± 1.1%, 98.6% ± 2.0%, 97.7% ± 2.5%, 94.2% ± 4.7, 90.6% ± 5.8%였다. AAA를 사용했을 때 3%/3 mm, 2%/2 mm, 1%/2 mm, 2%/1 mm, 1%/1 mm 기준에 대하여 각각 98.9% ± 1.7%, 97.6% ± 2.7%, 96.4% ± 3.1%, 92.0% ± 4.6%, 87.8% ± 5.2%였다. 간암 환자군의 GPR 평균값은 PDIP를 사용했을 때 3%/3 mm, 2%/2 mm, 1%/2 mm, 2%/1 mm, 1%/1 mm 기준에 대하여 각각 99.9% ± 0.3%, 99.2% ± 1.5%, 98.4% ± 2.2%, 96.6% ± 4.6%였다. AAA를 사용했을 때 3%/3 mm, 2%/2 mm, 1%/2 mm, 2%/1 mm, 1%/1 mm 기준에 대하여 각각 99.6% ± 0.5%, 98.7% ± 1.5%, 97.7% ± 2.1%, 93.8% ± 5.0%, 89.5% ± 6.4%였다(Table 1). AAA를 사용한 1%/1 mm 기준의 GPR 평균값은 90% 이하였으며, 다른 기준에서는 대부분 90% 이상의 값을 얻었다. AAA를 사용한 GPR 평균값이 전반적으로 PDIP를 사용한 GPR 평균값보다 낮았다. PDIP를 사용했을 때 폐암과 간암 환자군 GPR 평균값 차이는 3%/3 mm, 2%/2 mm, 1%/2 mm, 2%/1 mm, 1%/1 mm 기준에 대하여 0.365%, 0.56%, 0.655%, 2.62%, 2.862%로 간암 환자군의 GPR 평균값이 모든 기준에서 높게 나타났으며 더 엄격한 기준일수록 그 차이는 더 크게 나타났다. AAA를 사용했을 때 폐암과

**Table 1.** Gamma passing rates and p-values of Wilcoxon signed rank test for PDIP and AAA

Treatment site	Criteria	PDIP	AAA	p-value
Lung	3%/3 mm	99.5 ± 1.1	98.9 ± 1.7	<0.001
	2%/2 mm	98.6 ± 2.0	97.6 ± 2.7	<0.001
	1%/2 mm	97.7 ± 2.5	96.4 ± 3.1	<0.001
	2%/1 mm	94.2 ± 4.7	92.0 ± 4.6	0.005
	1%/1 mm	90.6 ± 5.8	87.8 ± 5.2	0.002
Liver	3%/3 mm	99.9 ± 0.3	99.6 ± 0.5	<0.001
	2%/2 mm	99.2 ± 1.5	98.7 ± 1.5	<0.001
	1%/2 mm	98.4 ± 2.2	97.7 ± 2.1	<0.001
	2%/1 mm	96.6 ± 4.6	93.8 ± 5.0	<0.001
	1%/1 mm	93.5 ± 5.9	89.5 ± 6.4	<0.001

간암 환자군 GPR 평균값 차이는 3%/3 mm, 2%/2 mm, 1%/2 mm, 2%/1 mm, 1%/1 mm 기준에 대하여 0.755%, 1.115%, 1.3%, 1.79%, 1.761%로 PDIP와 마찬가지로 간암 환자군의 GPR 평균값이 모든 기준에서 높게 나타났으며 더 엄격한 기준일수록 더 커지는 양상을 보였다.

폐암 환자군의 MLC 위치 차이 평균값은 0.013 mm ± 0.002 mm였다. 간암 환자군의 MLC 위치 차이 평균값은 0.013 mm ± 0.002 mm였다(Table 2).

모든 GPR 값과 MLC 위치 차이값에 대해 Shapiro-Wilk 검정을 시행한 결과 p<0.001로 정규성이 없는 것으로 확인하였다.

GPR 값이 정규성이 없는 것으로 나타났으므로 비모수 검정 방법인 Wilcoxon signed rank 검정을 시행하였다. PDIP와 AAA의 각 기준별 GPR 값에 대해 시행한 결과, 모든 기준에서 p<0.05로 나타났으며, 이를 통해 두 알고리즘의 GPR 결과 사이에는 유의한 차이가 있음을 확인하였다(Table 1).

GPR 값과 MLC 위치 차이값 사이의 상관관계 분석을 위해 Spearman correlation analysis를 시행한 결과 간암 환자의 1%/1 mm GPR에서만 p<0.05로 상관관계가 있는 것으로 나타났으며, 나머지 모든 경우에는 p>0.05로 상관관계가 없는 것으로 확인되었다(Table 3).

**Table 2.** MLC differences for lung and liver cases

	Lung	Liver
MLC difference (mm)	0.0132 ± 0.0025	0.0133 ± 0.0020

### 고안 및 결론

AAA를 사용한 portal dosimetry 결과는 기존에 사용해 왔던 PDIP의 GPR 값보다는 전반적으로 낮게 나타났으나, 그 값은 TG-218에서 권고하는 기준(≥95%, 3%/2 mm)<sup>(2)</sup>을 모두 만족하였으며, 본원에서 사용하는 기준(≥90%, 2%/1 mm) 또한 만족하였다. 따라서 C-arm 형태의 선형가속기를 사용하여 EPID 기반 PSQA를 수행할 때 AAA를 임상적으로 portal dosimetry 계산 알고리즘으로써 사용할 수 있다.

두 알고리즘의 GPR 결과, AAA 1%/1 mm 기준의 GPR 평균값을 제외하고 대부분 90% 이상의 값을 확인하였다. 본원에서는 정위방사선수술의 경우 Halcyon을 사용하여 1%/1 mm 기준을 적용하는데, Truebeam을 사용했을 때 AAA의 GPR 결과에 대해서도 분석해볼 필요가 있을 것이다.

MLC 위치 차이값이 상당히 작았고, 이는 선량 분포에

크게 영향을 미치지 않았다. 방사선 치료 전달정확도에 영향을 미치는 요인으로 기계적 구동 불확실성을 꼽을 수 있고 여기에는 갠트리 속도, MLC 위치, 선량률 등이 있다. Park et al의 연구에서는 그 중에서 MLC 위치 오류가 큰 영향을 차지한다고 보고했다<sup>(14)</sup>. 본원의 Truebeam 6 MV FFF를 사용하는 환자 대부분의 치료 용적이 작았으며 따라서 본 연구에서 선정환자군의 필드 크기 역시 작았다. 그에 따라 MLC 움직임의 범위도 크지 않았기 때문에 MLC 위치 차이의 평균값이 0.013 mm 정도로 낮게 나왔다. 이를 통해 더 나은 민감도를 보이는 알고리즘을 구별할 수는 없었다. 따라서 MLC 위치 오류에 따른 두 알고리즘의 민감도와 특이도를 비교해 보고자 MLC 위치에 의도된 오류를 가하여 이를 분석하는 추후 연구를 진행할 예정이다.

Portal dosimetry를 PSQA의 적절한 도구로써 평가한 연구들은 대부분 PDIP를 사용하여 수행되었으며 이를 토대로 임상에서는 다양한 연구를 통해 검증된 PDIP를 사용하여 portal dosimetry를 사용하고 있다. Halcyon에서 AAA를 사용하는 PSQA에 대하여 그 성능이 우수한 것으로 연구된 바 있으므로, C-arm 형태의 선형가속기에서 AAA를 사용하는 portal dosimetry에 대하여 다양한 연구가 이루어지면 PSQA를 수행함에 있어 좋은 선택지가 될 것으로 기대한다.

**Table 3.** Spearman's rank correlation coefficients (r) between gamma passing rates and MLC differences and their corresponding p-values

Treatment site	Criteria	PDIP		AAA	
		rs	p-value	rs	p-value
Lung	3%/3 mm	-0.351	0.057	-0.299	0.108
	2%/2 mm	-0.341	0.065	-0.246	0.190
	1%/2 mm	-0.262	0.162	-0.235	0.212
	2%/1 mm	-0.340	0.066	-0.155	0.414
	1%/1 mm	-0.256	0.173	-0.057	0.765
Liver	3%/3 mm	0.162	0.361	-0.052	0.769
	2%/2 mm	0.261	0.137	0.079	0.658
	1%/2 mm	0.308	0.077	0.134	0.451
	2%/1 mm	0.143	0.420	0.267	0.127
	1%/1 mm	0.250	0.154	0.345	0.045

## 참고문헌

1. Osman AFI, Maalej NM: Applications of machine and deep learning to patient-specific IMRT/VMAT quality assurance. JACMP 2021;22:20-36
2. Miften M, Olch A, Mihailidis D et al.: Tolerance limits and methodologies for IMRT measurement-based verification QA: Recommendations of AAPM Task Group No. 218. Med Phys, 2018;45:e53-e83
3. Low DA, Harms WB, Mutic S et al.: A technique for the quantitative evaluation of dose distributions. Med Phys, 1998;25:656-661
4. Yu L, Tang TLS, Cassim N et al.: Analysis of dose comparison techniques for patient-specific quality assurance in radiation therapy. JACMP 2019;20:189-198
5. Low DA, Dempsey JF: Evaluation of the gamma dose distribution comparison method. Med Phys, 2003;30:2455-2464
6. James S, Albasheer A, Elder E et al.: Evaluation of commercial devices for patient specific QA of stereotactic radiotherapy plans. JACMP 2023:e14009
7. Kim YL, Chung JB, Kim JS et al.: Comparison of the performance between portal dosimetry and a commercial two-dimensional array system on pretreatment quality assurance for volumetric-modulated arc and intensity-modulated radiation therapy. J. Korean Phys. Soc, 2014;64:1207-1212
8. Son JM, Baek TS, Lee BR et al.: A comparison of the quality assurance of four dosimetric tools for intensity modulated radiation therapy. Radiol Oncol, 2015;49:307-313
9. 이충원, 박도근, 최아현 등: EPID (Electronic Portal Imaging Device)의 유용성에 관한 고찰. 대한방사선치료학회지 2013;25:57-67
10. Alharthi T, Arumugam S, Vial P et al.: EPID sensitivity to delivery errors for pre-treatment verification of lung SBRT VMAT plans. Phys. Med, 2019;59:37-46
11. Laugeman E, Heermann A, Hilliard J et al.: Comprehensive validation of halcyon 2.0 plans and the implementation of patient specific QA with multiple detector platforms. JACMP 2020;21:39-48
12. Razinskas G, Schindhelm R, Sauer OA et al.: Sensitivity and specificity of Varian Halcyon's portal dosimetry for plan-specific pre-treatment QA. JACMP 2023:e14401
13. Paula K.: Comparison of dosimetric quality assurance methods for stereotactic treatment plans. Tampere University, MS thesis 2019
14. Park JM, Kim JI, Park SY: Modulation indices and plan delivery accuracy of volumetric modulated arc therapy. JACMP 2019;20:12-22

# Comparison Analysis of Patient Specific Quality Assurance Results using portal dose image prediction and Anisotropic analytical algorithm

Department of Radiation Oncology, Seoul National University Hospital

**BEOMSEOK AHN, BOGYOUM KIM, JEHEE LEE**

**Purpose:** The purpose of this study is to compare the performance of the anisotropic analytical algorithm (AAA) and portal dose image prediction (PDIP) for patient-specific quality assurance based on electronic portal imaging device, and to evaluate the clinical feasibility of portal dosimetry using AAA.

**Subjects and methods:** We retrospectively selected a total of 32 patients, including 15 lung cancer patients and 17 liver cancer patients. Verification plans were generated using PDIP and AAA. We obtained gamma passing rates by comparing the calculated distribution with the measured distribution and obtained MLC positional difference values.

**Results:** The mean gamma passing rate for lung cancer patients was  $99.5\% \pm 1.1\%$  for 3%/3 mm using PDIP and  $90.6\% \pm 5.8\%$  for 1%/1 mm. Using AAA, the mean gamma passing rate was  $98.9\% \pm 1.7\%$  for 3%/3 mm and  $87.8\% \pm 5.2\%$  for 1%/1 mm. The mean gamma passing rate for liver cancer patients was  $99.9\% \pm 0.3\%$  for 3%/3 mm using PDIP and  $96.6\% \pm 4.6\%$  for 1%/1 mm. Using AAA, the mean gamma passing rate was  $99.6\% \pm 0.5\%$  for 3%/3 mm and  $89.5\% \pm 6.4\%$  for 1%/1 mm. The MLC positional difference was small at  $0.013 \text{ mm} \pm 0.002 \text{ mm}$  and showed no correlation with the gamma passing rate.

**Conclusion:** The AAA algorithm can be clinically used as a portal dosimetry calculation algorithm for patient-specific quality assurance based on electronic portal imaging device.

► **Key words:** Patient-specific quality assurance, portal dosimetry, PDIP, AAA