

선형가속기의 품질관리를 위한 2차원이온전리함배열의 유용성

— Feasibility of Two Dimensional Ion Chamber Array for a Linac Periodic Quality Assurance —

건국대학교병원 건국대학교 의학전문대학원 방사선종양학교실¹⁾
고려대학교 보건과학대학 방사선학과²⁾ · 가톨릭대학교 의과대학 의공학교실³⁾

이정우^{1,3)} · 홍세미¹⁾ · 박병문¹⁾ · 강민영¹⁾ · 김유현²⁾ · 서태석³⁾

— 국문초록 —

본 연구의 목적은 방사선치료용 선형가속기의 품질관리를 수행하기 위한 2차원이온전리함배열의 유용성을 검증하기 위함이다. 물팬톰과 필름으로 수행하던 기존의 품질관리 방법을 2차원이온전리함배열(MatriXX, Wellhofer Dosimetrie, Germany)을 이용하여 유용성을 검증하였다. MatriXX는 1,020개의 평판형 전리함(용적 : 0.08 cm³, 직경 : 4.5 mm, 높이 : 5 mm, 배열간격 : 7.62 mm)이 일정한 간격으로 24×24 cm²의 면적에 배열 되어있다. MatriXX의 유용성을 검증하기 위해 연속된 5개월에 걸쳐 선량균등도, 에너지(TPR_{0.10}), 그리고 절대 선량을 측정하여 물팬톰과 0.65 cm³ (FC65G, Wellhofer Dosimetrie, Germany) Farmer형 이온전리함을 통해 얻은 값과 비교, 분석하였다. MatriXX 측정 시 폴리스틸렌 고체 팬텀(ρ : 1.18 g/cm³)을 이용하였으며, MatriXX 고유의 커버 물질의 밀도와 두께(ρ : 1.06 g/cm³, t: 0.36 cm)를 물과 등가의 값으로 환산하여 적용하였다. 또한, 기하학적 점검을 위한 예비실험에서 콜리메이터의 회전축과 하프빔의 접합부를 필름측정의 결과와 비교하였다. 선량계측학적 실험 결과, MatriXX로 얻은 데이터와 물팬톰의 결과가 모든 항목에서 $\pm 1\%$ 이내의 일치를 보였다. 기하학 품질관리의 예비 실험 결과 기존의 필름방식과 유사한 결과를 얻었으며, 기하학적 품질관리의 정량적 분석 가능성을 제시하였다. 본 연구를 통해 주기적인 선형가속기의 품질관리에서 물팬톰과 필름을 대체할 수 있는 MatriXX의 유용성을 확인하였으며, 향후 비용절감과 시간과 인력을 절감할 수 있는 품질관리의 새로운 방법을 제시하였다.

중심 단어 : 2차원이온전리함배열(MatriXX), 품질관리, 선량균등도, 에너지, 절대선량

I. 서 론

방사선 치료를 위한 선형가속기의 품질관리는 장비의

성능을 점검하고 평가하여 조치하는 일련의 일을 포함한다. 주기적인 점검을 통해 치료의 안전성을 확보하는 작업은 치료의 성패를 결정할 수 있는 중요한 요소 중의 하나이다. 선형가속기의 품질관리는 크게 선량계측학적 측면과 기하학적 측면으로 나눌 수 있다. 선량 계측학적 측면의 품질관리는 방사선의 분포를 점검하는 선량균등도, 선량대칭도, 에너지를 나타내는 선질, 방사선의 양을 결정짓는 출력 안정성 등이 있으며, 기하학적 측면의 품질관리에는 각각의 갠트리, 콜리메이터, 테이블의 회전축 점검과, 하프빔의 접합면 점검, 광조사면 대 방사선 조사

* 접수일(2008년 4월 30일), 심사일(2008년 5월 28일), 채택일(2008년 5월 29일)
- 이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. M20706000007-08M0600-00710).

책임저자: 서태석, (137-701) 서울시 서초구 반포동 505
가톨릭대학교 의과대학 의공학교실
TEL : 02-590-2414
E-mail : suhsanta@catholic.ac.kr

면의 일치성 검사, 레이저 정확도 등 많은 부분의 상세한 점검항목을 포함하고 있다¹⁾. 미국의학물리학회(AAPM: American Association of Physicists in Medicine)의 Task Group-40(TG-40) 보고서에서는 의료용선형가속기의 품질관리를 일간, 월간, 연간으로 나누어 세부항목과 허용오차를 권고하고 있으며, 이러한 값들은 선량계측학적 전체 불확도 $\pm 5\%$ 와 공간적 불확도 $\pm 5\text{ mm}$ 를 근거로 임상적으로 허용할 수 있고, 기술적으로 가능한 불확도를 정의한 것이다²⁾. 일반적으로 방사선의 절대선량의 결정 및 안정성의 점검은 물팬텀과 이온전리함을 이용하고 있으며, 기하학적 점검은 육안적 방법이나 필름 또는 특별히 고안된 장비를 사용하기도 한다. 하지만 기존의 방법은 물팬텀의 설치가 비교적 번거롭고 측정에 소요되는 시간과 인력이 많이 권고안대로 시행하기에는 다소 업무부담이 되고 있다. 최근에는 Picture Archiving Communication System(PACS)가 도입되면서 필름의 사용이 일부 제한되면서 품질관리에 다소 어려움이 가중되고 있다. 세기변조방사선치료(IMRT: Intensity Modulated Radiation Therapy)가 보편화됨에 따라 기존의 장비 품질관리 외에 각 환자의 비균일 플루언스를 검증하기 위한 환자맞춤형 방사선 치료 품질관리가 매 환자별로 치료 전에 수행되고 있으며, 이를 위한 측정 장비와 측정 기술, 분석 방법 등이 고안되고 있다. 최근 Poppe 등³⁾과 Spezi 등⁴⁾은 729개의 이온 전리함 배열 측정기를 이용하여 장비의 선량특성과 IMRT 선량분포를 분석하였으며, Jursinic 등⁵⁾과 Letourneau 등⁶⁾은 2차원적 다이오드 배열을 이용하여 IMRT의 품질관리를 시행하였으며, IMRT의 품질관리의 유용성을 입증한 바 있다. 국내에서는 이정우 등⁷⁾이 2차원이온전리함과 폴리스틸렌 고체 팬텀을 이용하여 선량 직선성, 선량률 의존성, 출력계수, 동적범위 등에 관한 기본 특성을 분석하고, IMRT 품질관리의 유용성을 제시한 바 있다.

본 연구의 목적은 주기적인 선형가속기의 품질관리에서 물팬텀과 필름을 대체할 수 있는 MatriXX의 성능을 평가하고, 향후 비용절감과 효과적인 품질관리의 새로운 방법을 제시하기 위함이다.

II. 재료 및 방법

본 실험에 사용된 2차원이온전리함배열(MatriXX, Wellhofer Dosimetrie, Germany)은 $24 \times 24\text{ cm}^2$ 범위에 1,020개의 평판형 전리함(용적: 0.08 cm^3 , 직경: 4.5 mm, 높이: 5 mm, 배열간격: 7.62 mm)이 일정한 간격으로 배열되어 있

며, 최소 샘플링 시간이 20 msec이다. 품질관리에 이용된 선형가속기는 Varian사의 21EX 모델이며, 광자선 6 MV, 15 MV, 전자선 6, 9, 12, 16, 20 MeV의 여섯 가지 에너지를 선택할 수 있다. 팬텀으로는 Wellhofer사의 SP33 (White polystyrene solid phantom, $\rho: 1.18\text{ g/cm}^3$)이 사용되었다. 비교측정용 측정기로는 0.65 cm^3 Farmer형 이온전리함(FC65G, Wellhofer Dosimetrie, Germany), 0.1 cm^3 표준 지두형 전리함(CC13, Wellhofer Dosimetrie, Germany)과 물팬텀으로는 Wellhofer사의 Blue phantom이 사용되었고, 기하학적 점검에는 확장된 선량범위 필름(EDR2, Kodak, USA)이 사용되었다. 출력의 안정성과 선량대칭도의 장기간 항상성(Long term constancy)을 조사하기 위해 5개월에 걸쳐 변화 결과를 분석하였다.

1. 선량계측학적 품질관리

1) 광자선 에너지 측정

선형가속기로부터 산출된 광자선의 에너지는 고에너지 전자가 가속관을 통해 가속된 후 표적물질에 충돌하여 생긴 제동방사선의 스펙트럼을 가지고 있으므로 단일 인자로 표현 쉽지 않다⁸⁾. 따라서 광자선의 에너지를 결정하는 방법으로 간접적인 측정방법이 사용되는데 본 실험에서는 세계원자력기구(IAEA: International Atomic Energy Agency)의 TRS-277⁸⁾이 사용되었으며, 측정기로는 CC13이 사용되었다. TPR_{20,10}은 선원-중심거리(SAD: Source to axis distance)를 100 cm로 고정 시킨 상태에서 조사면을 $10 \times 10\text{ cm}^2$ 으로 설정하고 20 cm, 10 cm에서의 조직-팬텀 흡수선량비(TPR: Tissue to Phantom Ratio)를 측정하였다. 물팬텀과의 비교 시 폴리스틸렌과 MatriXX의 Build-up 판의 밀도를 물과 동가의 두께로 환산하여 적용하였다(Fig. 1).

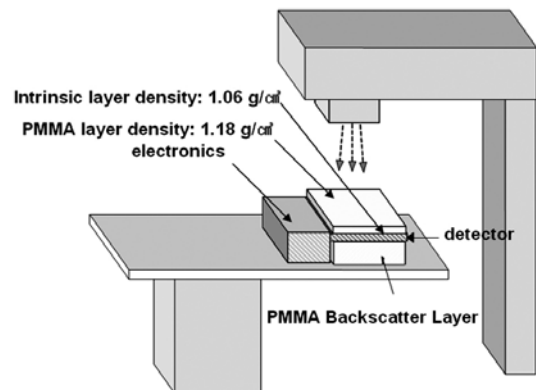


Fig. 1. Schematic diagram of MatriXX measurement setup. The physical thickness of Intrinsic layer is 0.36 cm

2) 절대흡수선량 향상성

본원의 선형가속기 21EX의 절대선량교정에 에너지를 결정하는데 이용되었던 IAEA TRS-277 프로토콜이 사용되었다. 교정용 이온전리함으로는 Farmer-type 이온전리함인 FC65G가 사용되었으며, 2차 표준기관인 식약청에서 N_k 교정계수(공기-커마교정계수)를 받아 프로토콜에 따라 장비를 교정하였다. 이미 교정된 21EX를 이용하여 각 에너지 별로 MatriXX를 교정하였다. MatriXX의 상대감도에 대한 교정은 제조사에서 교정된 상수를 근거로 계산되었으며 중심부에 위치한 4개의 평판형 이온전리함의 평균값으로 교정을 한다(Fig. 2). 또한, 내장된 온도, 기압 센서를 이용하여 매회 온도, 기압 보정을 하도록 설계되어 있다.

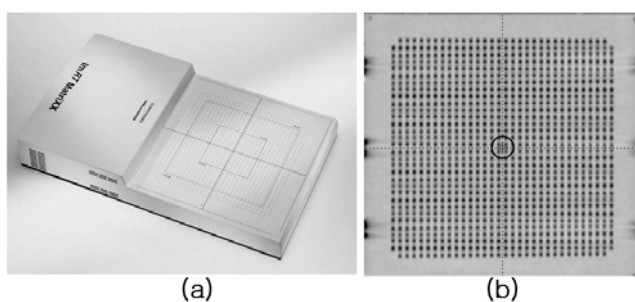


Fig. 2. (a) is MatriXX appearance, and (b) is reconstructed coronal image of MatriXX from CT scanning. 1020 parallel plate chambers are on the matrix plate, spacing 0.762 cm interval

3) 선량대칭도

선량대칭도는 선량프로파일을 측정된 후 중심점을 기준으로 선량분포가 균등하게 분포하는가를 나타내는 척도이다. 본원의 품질관리 기준은 TG-40²⁾을 근거로 광자선, 전자선 모두 2% 이내의 허용오차를 설정하여 분석하였다. 선량대칭도의 측정은 MatriXX의 특성상 절대흡수선량과 동시에 측정되도록 측정표를 구성하였다.

2. 기하학적 점검

기하학적 점검을 위한 예비실험에서 콜리메이터의 회전축과 하프빔의 접합부를 필름측정의 결과와 비교하였다. 콜리메이터의 회전축 측 측정을 위해서는 $0.4 \times 10 \text{ cm}^2$ ($X \times Y$) 조사면을 이용하여 0° , 45° , 270° , 315° 로 콜리메이터의 각도를 변화시켜 조사하여 누적선량의 분포를 비

교하였다. 하프빔의 접합부 측정에서는 첫 번째 반조사면을 $10 \times (0+10) \text{ cm}^2 [X \times (Y_1+Y_2)]$ 로 설정하여 조사한 후 두 번째 반조사면을 $20 \times (10+0) \text{ cm}^2 [X \times (Y_1+Y_2)]$ 로 설정하여 조사한 후 접합부의 선량분포를 분석함으로써 기하학적 인자에 의한 불일치를 점검하였다. MatriXX와 EDR2를 동일한 측정 조건으로 측정하여 비교, 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

TPR_{20,10}을 MatriXX와 물팬텀에서 측정한 결과, 6 MV의 경우 MatriXX에 대해 0.682, 물팬텀에 대해 0.688, 15 MV 경우 MatriXX는 0.779, 물팬텀은 0.772로 나타났다. 따라서 6 MV, 15 MV에서의 TPR_{20,10}의 차이는 각각 0.87%, 0.51%로 1% 이내의 오차를 보였다. 절대선량과 선량대칭도의 5개월간의 장기간 향상성 측정결과, 절대선량과 선량대칭도 모두 $\pm 1\%$ 이내의 우수한 결과를 보였다(Fig. 3). Figure 4는 MatriXX와 폴리스틸렌 팬텀만을 이용하여 구성된 선형가속기의 선량계측학적 품질관리를 한 예를 보여주고 있다. 광자선의 에너지를 나타내는 지표인 TPR_{20,10}을 얻기 위해 최대선량지점의 선량과 물 등가 깊이 10 cm(SP33 8.2 cm), 20 cm(SP33 16.6 cm)에서의 선량을 측정 후 TPR₂₀, TPR₁₀을 얻은 후 각각의 에너지별 비를 계산하였다. 또한 절대 흡수선량의 출력과 선량대칭도를 얻기 위해 각 에너지별 선량최대점에서 각각 2회에 걸쳐 측정하여 기록하였다. 이때 2차원 배열의 특성상 x축과 y축의 선량대칭도를 함께 얻어 기록하였다. 팬텀의 경우 설치부터 측정까지의 소요시간이 평균 약 5시간이었고 MatriXX의 경우 약 2시간 이내로 시간과 인력의 소모를 줄일 수 있었다. 인력과 시간을 줄일 수 있는 가장 큰 이유는 물팬텀을 사용 시 발생하는 급수와 배수에 할애되는 시간과 부피가 큰 팬텀과 깨지기 쉬운 이온전리함을 신중히 다루는데 소모되는 시간과 인력이 MatriXX의 측정에서는 현저히 감소된다는 점이다. 또한, Letourneau 등⁶⁾이 실험하였던 2차원 다이오드배열과는 달리 MatriXX는 이온전리함을 이용한 장치이므로 장기간 사용 시 나타날 수 있는 출력변화에 따른 재 교정의 가능성이 매우 적고 신뢰성이 높다는 점이 본 실험을 통해 입증되었다. 더불어 기하학적 점검에서 필름을 대체할 수 있는 예비 실험 결과, 필름 측정 시 정성적인 평가 한계를 벗어나 선량을 기반으로 한 정량적인 분석의 가능성을 보여주었다(Fig. 5, 6). Figure 5는 방사선 콜리메이

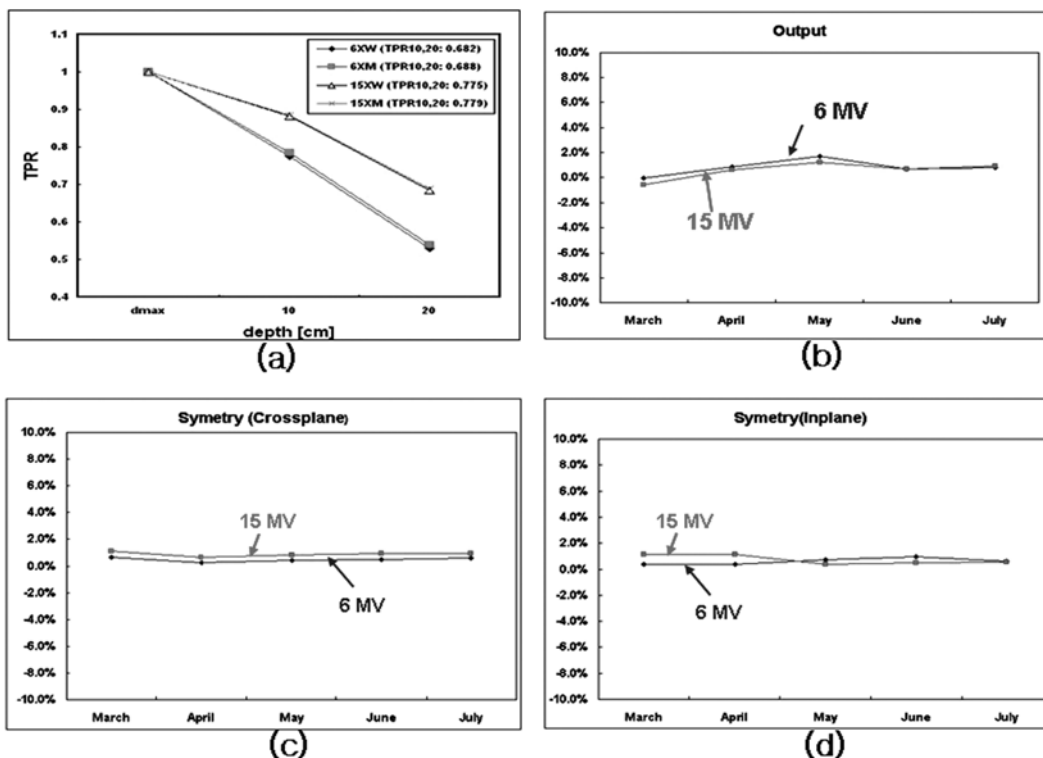


Fig. 3. (a) TPR_{20,10} comparison data, Water phantom Vs. MatriXX, (b) Output constancy during five months, (c) and (d) are dose symmetry checks of crossplane and inplane for 6 MV and 15 MV respectively. All the data show good agreements and stable constancy within $\pm 1\%$

CL 21EX Monthly QA (MXX)

Warning up: Background compensation, 15s irradiation, Measurement: 10s
 Mode: On line, Sampling time: 1,000 samples, Number of Measurement: 1, F.S: 2404 of, Sample time: 30,000 samples, Number of Measurement: 1

1. Photon Energy (Tolerance: $\pm 3\%$)

Item	Beam Energy	Depth (cm)	Dose			TPR/Ref.		
			Dmax	8.2 cm (W _{0,10})	16.6 cm (W _{0,20})	TPR	6 MV	15 MV
6 MV	1	103.04	81.10	55.63	TPR ₁₀	0.786 / 0.784	0.884 / 0.882	
		103.19	81.07	55.63	Diff.	0.3%	0.2%	
		Avg. 103.12	81.09	55.64	TPR ₂₀	0.540 / 0.539	0.688 / 0.685	
		105.67	93.41	72.72	Diff.	0.1%	0.4%	
15 MV	2.1	105.73	93.50	72.67	TPR _{10,10}	0.686 / 0.687	0.778 / 0.777	
		Avg. 105.70	93.46	72.70	Diff.	-0.1%	0.1%	

QFS: 10x10 cm, 5 AD: 100 cm, Dose: 100 MU

2. Beam Output & Symmetry

Item	Beam Energy	Thickness (cm)	Output (Tolerance: $\pm 2\%$)			Symmetry (Tolerance: $\pm 2\%$, $E: \pm 3\%$)			
			Reading (cGy)	Avg./Ref.	Difference	Reading	Crossplane	Inplane	Reading
6 MV	1	100.730	100.78	100	0.8%	100.6	100.6	100.6	100.6
		100.830	Diff.	0.6%	0.6%	0.6%			
15 MV	2.1	100.868	100.909	100	0.9%	100.9	100.9	100.6	100.6
		100.950	Diff.	0.9%	0.6%	0.6%			
6 MeV	0.7	99.840	99.858	100	-0.1%	100.5	100.5	100.5	100.5
		99.932	Diff.	0.5%	0.5%	0.5%			
9 MeV	1.4	100.788	100.889	100	0.9%	100.6	100.6	100.8	100.8
		100.990	Diff.	0.8%	0.8%	0.8%			
12 MeV	2	100.697	100.81	100	0.8%	100.8	100.8	100.8	100.8
		100.922	Diff.	0.5%	0.5%	0.5%			
16 MeV	2.2	99.983	100.012	100	0.0%	100.7	100.7	100.6	100.6
		100.039	Diff.	0.7%	0.6%	0.6%			
20 MeV	1.8	101.831	101.866	100	1.9%	101.0	101.0	100.5	100.5
		101.900	Diff.	1.0%	0.5%	0.5%			

QFS: 7.5: 10x10 cm, Electron 15 cm, SSD 100 cm, Protocol for symmetry:
 $T_{20,10} = (D_{max} - Int. Log_{10}(0.35 cm) \times D_{max} (1.06 g/cm^3)) / D_{20,10} (1.18 g/cm^3)$

3. Comments:

Date: _____ Dosimetrist: _____ (sign) Physicist: _____ (sign)

Fig. 4. An example of CL 21EX Monthly QA sheet with MatriXX as substitute for water phantom system. Upper section includes photon beams energy measurements(TPR_{20,10}) and lower section covers dose profiles and output constancy checks for photon and electron beams

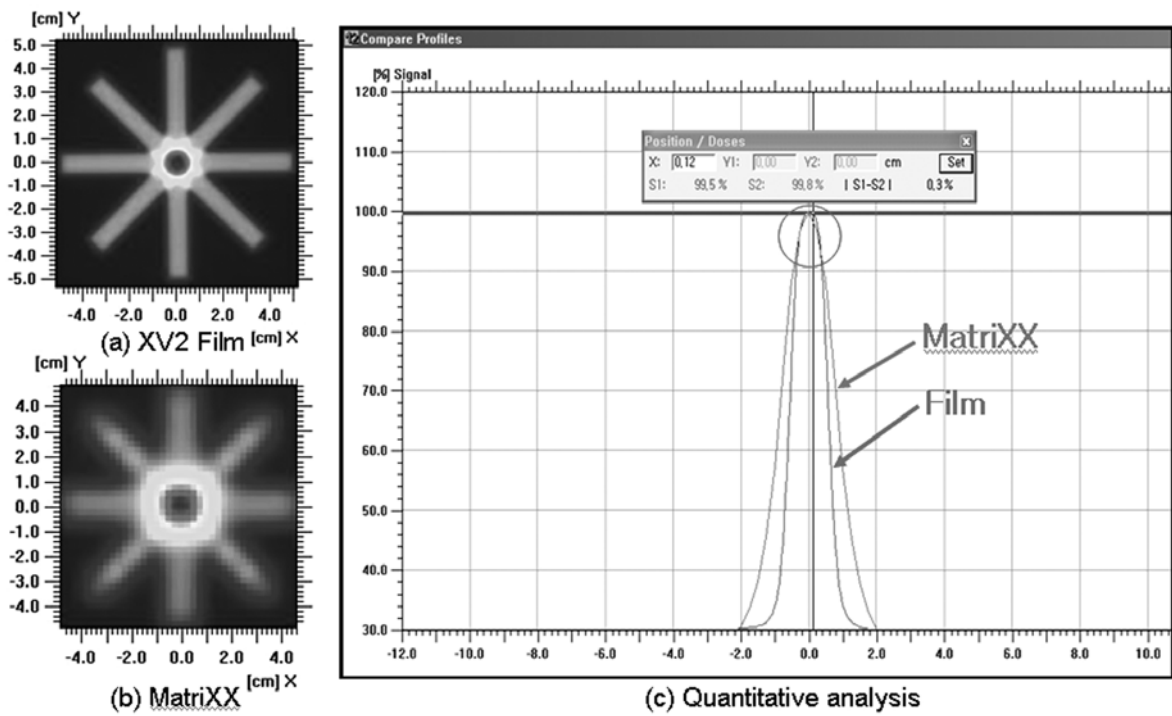


Fig. 5. Comparison of collimator rotation axis checks from Kodak XV2 film (a) and MatriXX measurements (b), (c) is a quantitative result of comparison

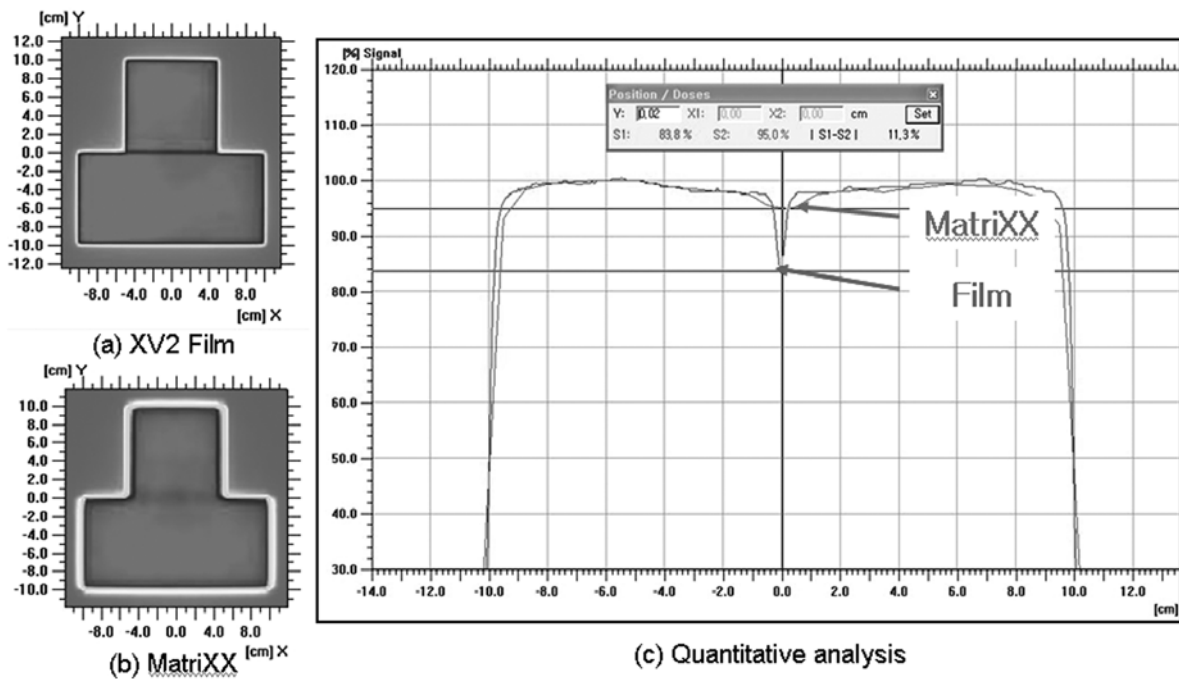


Fig. 6. Comparison of half beam junction test from Kodak XV2 film (a) and MatriXX measurements (b), (c) is a quantitative result of comparison

터의 회전축에 관한 정량적 분석 결과의 예를 보여주고 있으며, 4 mm 너비의 조사면이 각 각도마다 겹쳐서 나타나는 선량의 농도 중심점과 기하학적 중심을 비교한 결과를 보여주고 있다. 필름과 MatriXX가 각각 99.5%, 99.8%로 기하학적 중심부(100%)에 비해 0.5%, 0.2% 만큼 이탈된 결과를 나타내었다. 반면 반조사면 인접부 검사(Fig. 6)에서는 필름과 MatriXX에서 각각 83.8%, 95%로 나타나 비교적 큰 차이를 나타내었다. 이는 MatriXX 내의 평판형 이온전리함의 물리적 해상도(중심간격: 0.762 cm, 단일 평판형 이온전리함 직경: 0.45 cm)에 기인된 결과로 인접 조사면에 위치한 측정기 사이의 과잉 선량 보간에 따른 것으로 추정된다. 따라서 정밀도를 요구하는 일부 기하학적 점검에는 해상도의 제한이 있음을 알 수 있었다.

IV. 결 론

본 연구를 통해 MatriXX를 이용한 선형가속기의 품질 관리가 물팬텀이나 필름을 이용한 전통적인 방법에 비해 간편성과 신뢰성을 갖는 다는 것을 알게 되었다. 특히 선량계측학적 측면의 품질관리에서 소요되는 시간과 인력을 약 1/2 이상 줄일 수 있었으며, 정확도나 장기간 항상성도 $\pm 1\%$ 이내의 일치를 보였다. 또한 MatriXX의 고유 기능인 IMRT 환자 맞춤형 품질관리와 더불어 활용함으로써 여러 가지 측정기와 팬텀을 중복으로 설치하고 해체하는 소모적인 절차를 간소화할 수 있는 가능성을 제시하였다. 결론적으로, 본 논문을 통해 품질관리의 정확도와 정밀도를 유지하면서도 매우 효율적인 품질관리의 한 방법론을 제시할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Podgorsak EB: Review of Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 335-370, 2003
2. AAPM Report No. 46: Comprehensive QA for Radiation Oncology, American Association of Physicists in Medicine, New York, 1994
3. Poppe B, Blechschmidt A, Djouguela A et al.: Two-dimensional Ionization Chamber Arrays for IMRT Plan Verification, Medical Physics 33(4), 1005-1015, 2006
4. Spezi E, Angelini AL, Romani F, Ferri A: Characterization of a 2D Ion Chamber Array for the Verification of Radiotherapy Treatments, Physics in Medicine and Biology 50, 3361-3373, 2005
5. Jursinic PA, Nelms BE: A 2-D Diode Array and Analysis Software for Verification of Intensity Modulated Radiation Therapy Delivery, Medical Physics 30(5), 870-879, 2003
6. Letourneau D, Gulam M, Yan D, Oldham M, Wong JW: Evaluation of a 2D Diode Array for IMRT Quality Assurance, Radiotherapy & Oncology 70, 199-206, 2004
7. 이정우, 홍세미, 김연래 등: 세기변조방사선치료 선량분포 확인을 위한 2차원적 이온전리함 배열의 특성 분석, 의학물리 17(3), 131-135, 2006
8. IAEA Technical Reports Series No. 277: Absorbed Dose Determination in Photon and Electron Beams, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 1997

• Abstract

Feasibility of Two Dimensional Ion Chamber Array for a Linac Periodic Quality Assurance

Jeong-Woo Lee^{1,3)} · Semie Hong¹⁾ · Byung-Moon Park¹⁾
Min-Young Kang¹⁾ · You-Hyun Kim²⁾ · Tae-Suk Suh³⁾

¹⁾*Department of Radiation Oncology, Konkuk University Medical Center,
School of Medicine, Konkuk University*

²⁾*Department of Radiologic Science, College of Health Science, Korea University*

³⁾*Department of Biomedical Engineering, School of Medicine, The Catholic University of Korea*

Aim of this study is to investigate the feasibility of 2D ion chamber array as a substitute of the water phantom system in a periodic Linac QA. For the feasibility study, a commercial ion chamber matrix was used as a substitute of the water phantom in the measurement for a routine QA beam properties. The device used in this study was the I'm RT MatriXX (Wellhofer Dosimetrie, Germany). The MatriXX consists of a 1,020 vented ion chamber array, arranged in 24×24 cm² matrix. Each ion chamber has a volume of 0.08 cm³, spacing of 0.762 cm. We investigated dosimetric parameters such as dose symmetry, energy (TPR_{20,10}), and absolute dose for comparing with the water phantom data with a Farmer-type ionization chamber (FC65G, Wellhofer Dosimetrie, Germany). For the MatriXX measurements, we used the white polystyrene phantom (ρ : 1.18 g/cm³) and also considered the intrinsic layer (ρ : 1.06 g/cm³, t : 0.36 cm) of MatriXX to be equivalent to water depth. In the preliminary study of geometrical QA using MatriXX, the rotation axis of collimator and half beam junction test were included and compared with film measurements. Regarding the dosimetric QA, the MatriXX has shown good agreements within $\pm 1\%$ compared to the water phantom measurements. In the geometrical test, the data from MatriXX were comparable with those from the films. In conclusion, the MatriXX is a good substitute for water phantom system and film measurements. In addition, the results indicate that the MatriXX as a cost-effective novel QA tool to reduce time and personnel power.

Key Words : 2D ion chamber array (MatriXX), quality assurance, symmetry, energy, absolute dose