

세기변조방사선치료 선량분포 확인을 위한 2차원적 이온전리함 배열의 특성분석

*건국대학교병원 방사선종양학과, †가톨릭대학교 의과대학 의공학교실, ‡아주대학교병원 방사선종양학과,
§분당서울대학교병원 방사선종양학과, ||국립암센터 방사선종양학과

이정우*[†] · 흥세미* · 김연래* · 최경식[†] · 정진범^{§†} · 이두현^{||†} · 서태석[†]

본 연구의 목적은 2차원적 이온전리함 배열의 특성을 분석하고 세기변조방사선치료 선량분포 확인의 유용성을 평가하기 위함이다. 본 실험에 사용된 2차원적 이온전리함 배열(MatriXX, Scanditronix-Wellhofer, IBA, Germany)은 24×24 cm² 범위에 1,024개의 평판형 전리함(용적: 0.08 cm³, 직경: 4.5 mm, 높이: 5 mm, 배열간격: 7.62 mm)이 일정한 간격으로 배열되어 있다. MatriXX의 특성분석을 위해 선량 직선성, 선량을 의존도, 출력 계수, 단기 선량재현성을 분석하였으며, 선량분포 확인의 신뢰도를 평가하기 위해 Varian사의 동적썰기와 세기변조 방사선치료의 선량분포를 분석하였다. 선량 직선성의 범위는 1~800 cGy이었으며, 1% 미만의 오차를 보였다. 선량률 의존성(범위: 100~600 MU/min)은 300 MU/min을 기준으로 했을 때 모든 선량률 범위에서 0.4% 미만의 선량변화를 보였다. 또한, 물팬텀에서 0.1 cc 지두형 전리함으로 측정된 출력계수와 폴리스틸렌 팬텀에서 MatriXX로 측정된 출력계수를 비교하였다. 이 실험의 결과, 3×3~24×24 cm² 범위에서 0.5% 미만의 일치를 나타내었다. 단기 출력재현성 확인을 위하여 15분 간격으로 6회 측정된 결과, 0.5% 내의 차이를 보였다. 동적썰기와 세기변조 방사선 조사면의 일치성 실험에서도 치료계획장치의 계산값과 필름측정값이 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다. 본 연구를 통해 MatriXX의 물리적인 특성을 분석하였으며 세기변조방사선치료의 품질관리를 위한 유용성을 확인하였다.

중심단어: 2차원적 이온전리함배열(MatriXX), 세기변조방사선치료

서 론

방사선치료의 최대 목표는 치료표적에 선량을 최대화하면서도 인접된 정상장기에는 선량을 최소화하는 데 있다. 이러한 목표를 달성하기 위해 역방향 치료계획을 기반으로 한 세기변조방사선치료(intensity modulated radiation therapy, IMRT)가 최근 많이 이용되고 있다.^{1,2)} 역방향 치료계획은 치료 표적이나 결정 장기의 용적, 제한선량설정, 우선정도 등의 변수를 이용하여 비음함수를 계산함으로써 최적화된 비균일 플루언스를 만들어내어 선량분포를 형성하게 된다.^{3,4)} IMRT를 환자에게 적용하기 위해서는 치료 장비 자체의 품질관리⁵⁾ 외에 각 치료계획에 따른 선량분포 확인

및 절대선량 측정 등이 반드시 병행되어야 한다. IMRT의 환자선량 품질관리를 위해서는 단순화된 기하학적 팬텀을 이용하여 치료계획장치에서 선량분포를 재현한 뒤, 다양한 측정 장비를 이용하여 공간선량분포와 절대선량을 확인할 수 있다.⁶⁾ 관심 부위의 점선량을 측정하기 위해서는 이온전리함, 열형광계 또는 다이오드를 이용하며, 선량 분포를 검증하기 위해서는 다양한 선량 범위의 필름을 이용한다.⁷⁾ 하지만 이러한 방법들은 비교적 복잡한 처리과정이 요구되며, 많은 인적, 물적 자원이 소요되는 문제점을 갖고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Jursinic과 Nelms⁸⁾, Letourneau 등⁹⁾은 2차원적 다이오드 배열을 이용하여 IMRT의 품질관리를 시행하였으며, 절대선량과 선량분포 확인을 위한 좋은 도구임을 입증한 바 있다. 이 실험에 사용된 다이오드 배열은 22×22 cm²의 유효 측정 범위 내에서 안쪽 10×10 cm² 범위의 다이오드 해상도가 7.07 mm이고, 외부 범위는 14.14 mm로 선량 경사도가 급격한 부분의 비균일 플루언스의 선량 측정에는 오차가 발생할 가능성을 갖고 있다. 최근 Poppe 등¹⁰⁾과 Spezi 등¹¹⁾은 729개의 이온 전리함 배열 측정기를 이용하여 장비의 선량특성과 IMRT 선량분포를 분

본 연구는 서울시 산학연 협력사업(10550) 연구비 지원에 의해 수행되었음.

이 논문은 2006년 6월 12일 접수하여 2006년 7월 20일 채택되었음.

책임저자: 서태석, (137-040) 서울시 서초구 반포동 505

가톨릭대학교 의과대학 의공학교실

Tel: 02)590-2414, Fax: 02)532-1779

E-mail: suhsanta@catholic.ac.kr

석하였다. 27×27 cm²의 넓은 범위를 적용할 수 있는 장점은 있으나 이온전리함의 간격이 10 mm로 비교적 낮은 해상도로 인한 조사면 가장자리에서의 반응영이 넓어지는 단점을 갖고 있다.

본 연구는 최근 Scanditronix-Wellhofer사에서 개발한 2차원적 1,024개의 이온전리함 배열(MatriXX, Germany)의 기본적인 선량계 특성분석과 동적썰기와 IMRT에서 사용하는 비균일 플루언스 조사면을 분석함으로써 선량품질관리 측정기로서의 유용성을 평가하고자 한다.

재료 및 방법

본 실험에 사용된 2차원적 이온전리함 배열(MatriXX, Scanditronix-Wellhofer, IBA, Germany)은 24×24 cm² 범위에 1,024개의 평판형 전리함(용적: 0.08 cm³, 직경: 4.5 mm, 높이: 5 mm, 배열간격: 7.62 mm)이 일정한 간격으로 배열되어 있다. MatriXX의 특성분석을 위해 선량 직선성, 선량률 의존도, 출력 계수, 단기 선량재현성을 분석하였으며, 선량 분포 확인의 신뢰도를 평가하기 위해 Varian사의 동적썰기와 세기변조 방사선 선량분포를 분석하였다. 선원으로는 선형가속기(CL 21EX, Varian, Palo Alto, USA)의 광자선 6 MV를 이용하였으며, 폴리스티렌 팬텀과 물팬텀이 사용되었다. 측정 전 사전 예열을 위하여 30분 전에 전원을 넣고 500 MU를 조사하였다. 또한 선원-검출기 거리(Source to Detector Distance, SDD)를 100 cm, 폴리스티렌 1.5 cm 깊이에서 MatriXX 자체에서 측정한 온도, 기압으로 보정하여 절대선량교정을 하였다. 선량 직선성 실험은 교정된 선량 1~800 cGy 범위에서 분석되었다. 선량률 의존도는 100, 200, 300, 400, 500, 600 MU/min에서 조사되었으며, 선량률 300 MU/min을 기준으로 선량 변화량을 분석하였다. 출력 계수는 SDD 100 cm, 6 MV 광자선의 최대선량 깊이 1.5 cm에서 측정되었으며, 0.1 cm³ 표준 지두형 전리함(CC13, Scanditronix-Wellhofer, IBA, Germany, CC13)과 물팬텀을 이용하여 측정한 값과 비교하였다. 출력계수는 MatriXX의 유효범위를 고려하여 3×3~24×24 cm²에서 측정, 비교되었다. 단기 선량 재현성을 조사하기 위해 15분 간격으로 자체 온도, 기압을 보정한 뒤 6회 측정하였다. 더불어 비균일 플루언스의 선량분포를 확인하기 위해 Varian사의 동적썰기(Enhanced Dynamic Wedge, EDW) 60°와 IMRT 조사면에 대해 실험하였다. 6 MV 광자선에 관한 60° EDW의 선량분포의 검증을 위하여 SAD 100 cm, 깊이 5 cm에서 생성된 프로파일을 Eclipse 계산값과 MatriXX 측정값에 대해 비교하

였다. IMRT의 선량 분포 확인을 위해 임의의 비균일 플루언스를 만든 후 확장된 선량범위 필름(EDR2, Kodak, USA)과 MatriXX를 이용하여 SAD 100 cm, 5 cm 깊이에서 측정 한 후 IMRT 분석 프로그램(OP-IMRT, ver. 1.4.3.3, Scanditronix-Wellhofer, IBA, Germany)으로 분석하였다. IMRT의 선량분포 분석방법은 Ma 등¹²⁾이 제안한 정량적인 선형 상관 계수(linear correlation coefficient)를 이용하였다.

$$r = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X_i - \bar{X})^2(Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

여기서, X_i는 어떤 점에서 측정된 선량이고 \bar{X} 는 선량 평균이다. 또한 Y_i는 계산값이며, \bar{Y} 는 계산 평균값이다. 따라서 상관계수값 r이 1에 가까울수록 두 조사면의 선량이 일치함을 나타내고 0에 가까울수록 통계적 일치도가 낮음을 의미한다.

결 과

선량 직선성의 범위는 1~800 cGy이었으며, Fig. 1의 도표에서 나타난 바와 같이 1% 미만의 오차율을 보였다. MatriXX의 반응값은 교정용 이온전리함을 통해 흡수선량으로 변환하였으며, 측정 시 MatriXX 자체에 내장된 온도, 기압 센서를 이용하여 매회 교정한 값을 사용하였다. Fig. 1의 그래프는 Linear fitting 함수를 이용하였으며, 1 cGy의 낮은 선량부터 800 cGy의 고선량 범위까지 직선성이 되화되지 않음을 알 수 있었다. 선량률 의존성(범위: 100~600

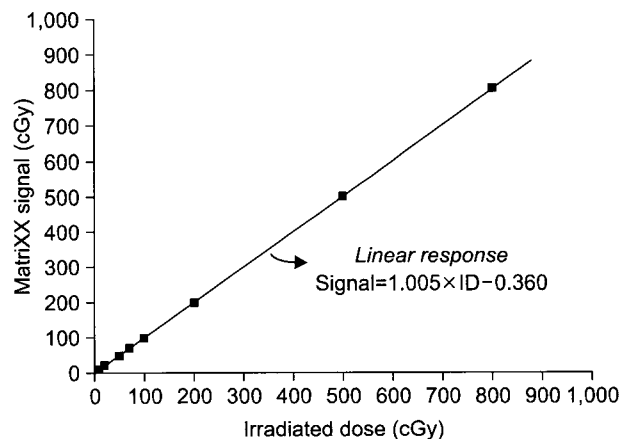


Fig. 1. Dose linearity ranging from 1 to 800 cGy for 6 MV photon. Response of the MatriXX as a function of the delivered dose. The MatriXX signals are an average of the four ion chambers in the center of the MatriXX.

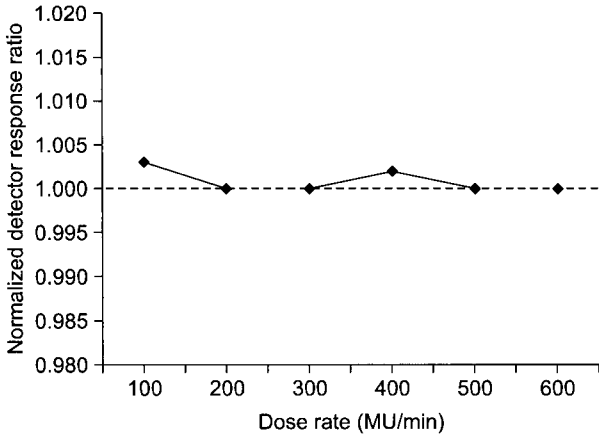


Fig. 2. Dose rate dependency ranging from 100 to 600 MU/min for 6 MV photon.

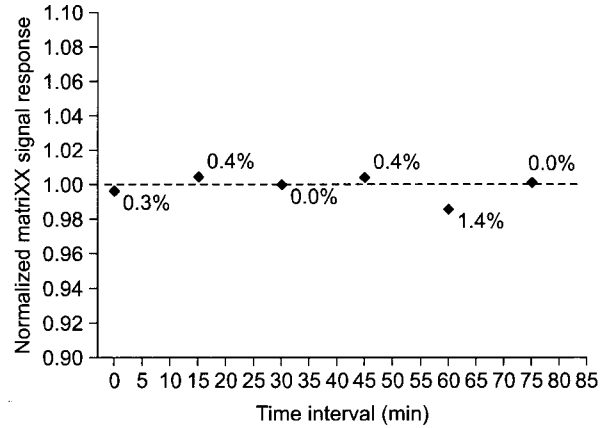


Fig. 4. Short term reproducibility with 15 minute interval, calibrated by temperature and pressure before each measurement.

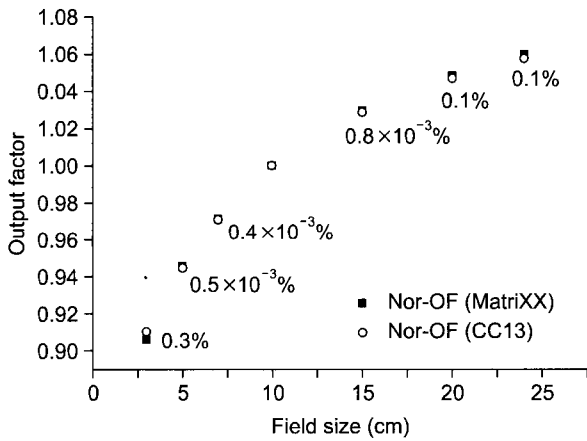


Fig. 3. Comparison of output factor measured by an CC13 cylindrical ionization chamber in a water phantom and with 2D MatriXX.

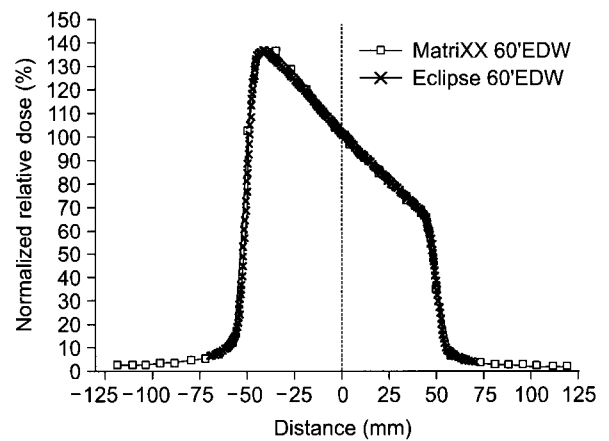


Fig. 5. Comparison of Varian enhanced dynamic wedge profiles measured with the 2D-MatriXX and calculated with the Varian Eclipse planning system.

MU/min)은 300 MU/min을 기준으로 했을 때 모든 선량률 범위에서 0.4% 미만의 선량변화를 보였다(Fig. 2). Fig. 3은 물팬텀에서 0.1 cc 지두형 전리함으로 측정된 출력계수와 폴리스틸렌 팬텀에서 MatriXX로 측정된 출력계수를 비교한 결과를 나타내었다. 3×3~24×24 cm² 범위에서 0.5% 미만의 일치를 나타내었다. Stasi 등¹³⁾은 금속성분의 중심전극에 의해 발생한 광전 효과에 의해 이온전리함의 과잉 반응값을 지적한 바 있으나 Spezi 등¹¹⁾의 실험에서는 PTW사의 2차원적 이온전리함 배열(2D Array model 729, PTW, Germany)과 pinpoint chamber (용적: 0.01 cm³, PTW, Germany)을 이용하여 출력 계수를 비교하였으며, 그러한 효과가 크지 않음을 입증한 바 있다. 본 시험에서는 0.1 cm³의 표준

용적 이온전리함과 출력계수를 비교하였으며, 금속물질의 중심전극에 의한 영향이 크지 않음을 알 수 있었다. Fig. 4는 시간에 따른 단기 출력재현성을 나타낸 그래프이다. 단기 출력재현성을 확인하기 위해 15분 간격으로 6회 측정된 결과 0.5% 미만의 편차를 보였다. 본 실험에서는 MatriXX를 이용하여 비균일 플루언스의 선량분포 측정을 통해 선량계의 신뢰성을 확인하였다. 동적췌기의 선량분포 비교를 위하여 Eclipse의 계산값을 기준으로 MatriXX의 측정값을 비교하였다. Fig. 5에서 나타난 바와 같이 MatriXX의 측정값과 Eclipse의 계산값이 1% 이내로 매우 잘 일치함을 알 수 있었다. Fig. 6a, b는 각각 MatriXX와 확장된 선량범위 필름(EDR2, Kodak, USA)을 이용하여 IMRT 조사면을 측정

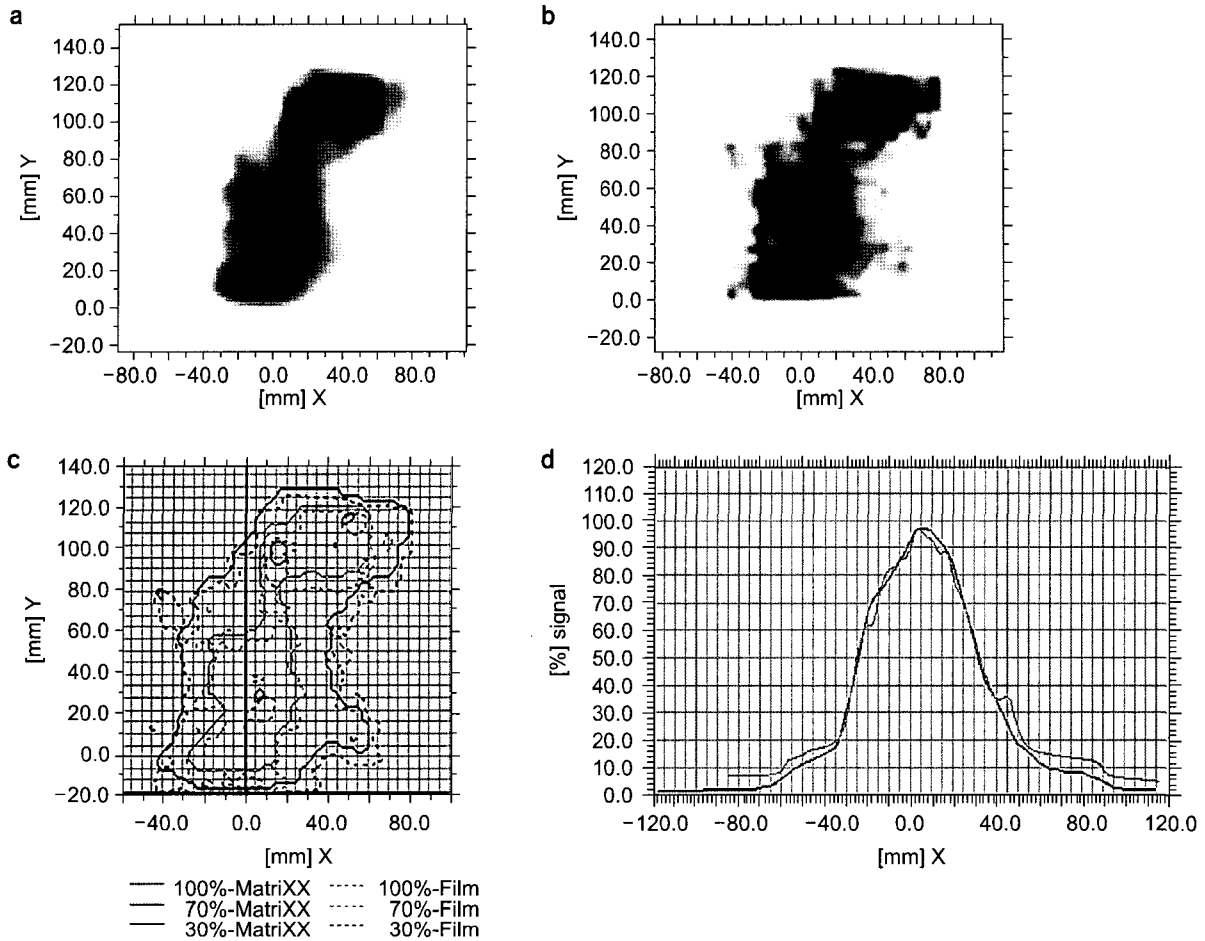


Fig. 6. The irradiated IMRT fluences on the MatriXX (a) and EDR2 film (b) respectively, and (c) represents the 2D comparison of dose distribution from the MatriXX and EDR2 film. (d) Illustration of IMRT fluence profiles of the MatriXX and EDR2 at the level of normalization. Red line stands for the MatriXX and green line for EDR2 film.

한 선량분포를 나타내고 있다. Fig. 6c는 MatriXX와 EDR2 필름의 측정값을 직접 비교한 그래프이며, 100%, 70%, 30%를 비교하였다. 선량 분포를 정량적으로 분석한 결과, 상호상관계수 값이 0.9695로 상당히 잘 일치함을 알 수 있었다. 또한, IMRT 조사면의 프로파일을 분석한 그래프를 Fig. 6d에 나타내었다. 필름 선량측정값의 경우 높은 해상도로 인한 조밀한 선량값을 반영할 수 있는 반면 MatriXX의 경우 비교적 낮은 해상도(7.62 mm)에 기인한 완만한 선량곡선을 나타냄을 알 수 있었다. 낮은 선량 영역에서는 산란 광자에 의해 '영향을 받은'⁷⁾ 필름선량계의 측정값이 MatriXX의 측정값보다 과잉평가되는 양상을 보였다.

결론

본 연구를 통해 2D-MatriXX의 일반적인 특성을 분석한 결과, 기존의 표준 이온전리함 또는 필름과 Setup 오차 범위(1% 미만) 내에서 잘 일치하였다. 비균일 플루언스를 사용하는 IMRT에서는 매 환자마다 치료선량분포와 절대선량을 확인하는 품질관리절차가 필수적이다. 2차원적 이온전리함배열인 2D-MatriXX를 사용함으로써 많은 시간과 노력이 수반되는 IMRT 품질관리절차를 간소화할 수 있으며, 절차의 편이성과 신뢰성이 보장된 IMRT 품질관리를 수행할 수 있다. 또한, MatriXX의 특성분석을 통해 일반적인 선형가속기의 품질관리에도 이용될 수 있는 가능성을 제시하였다.

참 고 문 헌

1. Webb S: *Intensity-Modulated Radiation Therapy*. 1st ed. IOP Publishing, Bristol, (2001), pp. 298-352
2. Purdy JA: Intensity-modulated radiation therapy: current status and issues of interest. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 51:880-914 (2001)
3. Alber M, Nusslin F: Optimization of intensity modulated radiotherapy under constraints for static and dynamic MLC delivery. *Phys Med Biol* 46:3229-3239 (2001)
4. Ezzell GA: *Clinical Implementation Of IMRT Treatment Planning. Intensity-Modulated Radiation Therapy: The State of the Art*. AAPM 2003 Summer School, Colorado (2003), pp. 475-493
5. LoSasso TJ: *IMRT Delivery System QA. Intensity-Modulated Radiation Therapy: The State of the Art*. AAPM 2003 Summer School, Colorado (2003), pp. 561-591
6. Xia P, Chuang C: *Patient-Specific Quality Assurance In IMRT. Intensity-Modulated Radiation Therapy: The State of the Art*. AAPM 2003 Summer School, Colorado (2003), pp. 495-514
7. Yeo IJ, Kim JO: *A Procedural Guide to Film Dosimetry With Emphasis on IMRT*. Medical Physics Publishing, Madison, Wisconsin (2004)
8. Jursinic PA, Nelms BE: A 2-D diode array analysis software for verification of intensity modulated radiation therapy delivery. *Med Phys* 30:870-879 (2003)
9. Letourneau D, Gulam M, Yan D, Oldham M, Wong JW: Evaluation of a 2D diode array for IMRT quality assurance. *Radiother Oncol* 70:199-206 (2004)
10. Poppe B, Blechschmidt A, Djouguela A, et al: Two-dimensional ionization chamber arrays for IMRT plan verification. *Med Phys* 33:1005-1015 (2006)
11. Spezi E, Angelini AL, Romani F, Ferri A: Characterization of a 2D ion chamber array for the verification of radiotherapy treatments. *Phys Med Biol* 50:3361-3373 (2005)
12. Ma L, Phaisangittisakul N, Yu CX, Safaraz M: A quality assurance method for analyzing and verifying intensity modulated fields. *Med Phys* 30:2082-2088 (2003)
13. Stasi M, Baiotto B, Barboni G, Scielzo G: The behavior of microionization chambers in small intensity modulated radiotherapy fields. *Med Phys* 31:2792-2795

Dosimetric Characterization of an Ion Chamber Matrix for Intensity Modulated Radiation Therapy Quality Assurance

Jeong-Woo Lee*[†], Semie Hong*, Yon-Lae Kim*, Kyoung-Sik Choi[†],
Jin-Beom Jung[§]†, Doo-Hyun Lee^{||}†, Tae-Suk Suh[†]

*Department of Radiation Oncology, Konkuk University Hospital,

[†]Biomedical Engineering, School of Medicine, The Catholic University of Korea,

[‡]Department of Radiation Oncology, Ajou University Hospital,

[§]Seoul National University Bundang Hospital, ^{||}National Cancer Center

A commercial ion chamber matrix was examined the characteristics and its performance for radiotherapy quality assurance. The device was the 1mRT 2D-MatriXX (Scanditronix-Wellhofer, Schwarzenbruck, Germany). The 2D-MatriXX device consists of a 1020 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 and minimum sampling time of 20 ms. For the investigation of the characteristics, dose linearity, output factor, short-term reproducibility and dose rate dependency were tested. In the testing of dose linearity, it has shown a good signal linearity within 1% in the range of 1-800 cGy. Dose rate dependency was found to be lower than 0.4% (Range: 100-600 MU/min) relative to a dose rate of 300 MU/min as a reference. Output factors matched very well within 0.5% compared with commissioned beam data using a ionization chamber (CC01, Scanditronix-Wellhofer, Schwarzenbruck, Germany) in the range of field sizes 3×3~24×24 cm². Short-term reproducibility (6 times with a interval of 15 minute) was also shown a good agreement within 0.5%, when the temperature and the pressure were corrected by each time of measurement. In addition, we compared enhanced dynamic wedge (EDW, Varian, Palo Alto, USA) profiles from calculated values in the radiation planning system with those from measurements of the MatriXX. Furthermore, anon-uniform IMRT dose fluence was tested. All the comparison studies have shown good agreements. In this study, the MatriXX was evaluated as a reliable dosimeter, and it could be used as a simplistic and convenient tool for radiotherapy quality assurance.

Key Words: 2D-MatriXX, IMRT