

## 의료용 디지털 선형가속기의 빔조정 인자변화가 선량분포특성에 미치는 영향

경기대학교 의학물리학과\*  
원자력병원 방사선종양학과†

박현주\*, 이동훈+, 이동한+, 권수일\*, 류성렬+, 지영훈+

임상에서 사용되는 가속기의 설계특성변화가 빔 출력변화에 미치는 영향을 알아봄으로써 보다 효율적인 정도관리를 수행하고자 한다. 선형가속기를 구성하고 있는 여러 가지 요소 중에서 빔 조정 인자들인 이온원부의 입사전류 (INJ-I), 이온원부의 입사전압 (INJ-E), 가속전압 (PFN), 휨자석 전류 (BMI), 펄스반복주파수 (PRF)를 선택하여 디지털 메바트론 제어프로그램 상에서 선형가속기가 자동 제어되는 허용범위를 조사한 후 그 영역내에서 전류값들을 변화시켜가면서 선량에 어떠한 영향을 미치는지 알아보았다. 이온함을 사용하여 흡수선량을 측정하고 오실로스코프를 사용하여 빔 출력의 파형을 분석하였으며 방사선 계측장치로 대칭성과 평평도를 계측하였다. 방사선 가속 장치는 선형가속기(Mevatron MD, Siemens, Germany)를 이용하였으며, 계측장치로는 RFAplus (Scanditronix, Sweden)를 사용하였다. 그리고 가속기의 설계특성변화 즉, 빔 조정 인자들의 변화가 선량분포특성에 변화를 주는 것을 측정하기 위해 0.6cc 이온함(Capintec PR06C, USA), 미소전위계(Capintec192, USA)와 오실로스코프(Tektronix, USA)를 사용하였다. 선형가속기의 선량률과 에너지변화에 영향을 미치는 인자들인 INJ-I, INJ-E, PFN, BMI, PRF의 전압과 전류값들을 변화시켰을 때 인자들마다 차이는 있었지만, 이온함을 사용하여 측정했을 때와 오실로스코프로 출력펄스의 변화를 보았을 때는 선량률의 변화를 확인할 수 있었다. 그러나 RFAplus로 에너지와 대칭성 등에 관한 그래프를 그렸을 때는 거의 동일한 결과를 나타내었다. 인자 INJ-I, INJ-E, PFN, BMI, PRF들의 D10/D20은 0~0.02, 대칭성은 0.1~0.2%, 평평도는 0.1~0.4%의 미세한 변화를 보였다. 디지털화 된 각 인자들의 전류와 전압값들을 변화시킬 때 선량률에는 미세한 영향을 미치게 되지만, 기계자체에서 기준값에 맞추기 위해 자동 제어가 되어 선량분포에는 크게 영향을 미치지 못하는 것으로 평가되어졌으나 빔 조정 인자들의 특성을 파악함으로써 정도관리의 기초자료를 확보하였다.

**중심단어** : 선형가속기, 설계특성변화, 빔조정인자

### 서 론

현재 종양치료는 의료용 방사선 가속장치를 이용하여 고에너지, 고선량의 광자선과 전자선 치료가 이루어지고 있다. 이 장치는 이온원부, 초고주파부, 가속관부, 방사선량측정 및 제어부, 컴퓨터제어부, 방사선량측정부 등의 최첨단 장비로 구성된 복합기기 장치이다.<sup>1)·2)</sup>

무엇보다 정확한 환자 치료를 위해서는 최적의 정확성 및 정밀도가 요구되는 치료장비의 정도관리가 필요하다. 따라서 가속기 자체의 특성을 파악하는 기술과 선량측정기술이 상호 유기적인 관계를 유

지하여야 한다. 그러기 위해서는 정밀한 장비들 각각의 특성에 영향을 미치는 요인들을 찾아서, 그 값들을 변화시켜감에 따라 선량분포가 나타내는 특성이 어떠한 관계를 가지고 있는지 분석할 필요가 있다.

현재 가속기를 이용한 방사선 치료시 방사선이 조사된 인체내의 선량분포특성에 관한 방사선 측정기술에 대해서는 많은 연구가 수행되고 있으나 고장 및 사용 년수 경과에 따른 가속장치 자체의 설계특성변화가 빔의 출력변화에 미치는 영향에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다.<sup>3)~9)</sup>

본 연구에서는, 가속기를 구성하고 있는 이온원

부, 초고주파부, 가속관부, 치료기부들의 기본적인 특성을 파악한 후, 설계특성 중 빔 조정인자들의 변화에 따라 선량분포가 어떠한 영향을 받는지 알아보았다. 빔 조정인자 중 일정한 출력의 선량률을 유지할 수 있도록 조정하는 이온원부의 입사전류(injection current, INJ-I), 이온원부의 입사전압(injection voltage, INJ-E), 펄스 반복 주파수(pulse repetition frequency, PRF)와 출력에너지를 결정하는 휨자석 전류(bending magnet current, BMI)와 가속전압(pulse-forming network, PFN)을 선택하여 각 인자들의 디지털화 된 전류값을 변화시킬 때 흡수선량, 대칭성, 평평도 등의 변화값들을 비교 분석하였다.

이러한 특성변화를 이용하여 임상에서 사용되는 가속기의 고장 및 사용 년수 경과에 따른 설계특성변화가 빔 출력변화에 미치는 영향을 알아봄으로써 보다 효율적인 정도관리를 수행하고자 한다.<sup>10)</sup>

## 재료 및 방법

### 1. 실험 과정

방사선 가속장치는 선형가속기(Mevatron MD, Siemens, Germany)를 이용하였으며, 계측장치로는 RFAplus(Scanditronix, Sweden)를 사용하였다. 그리고, 가속기의 설계특성 변화 즉, 빔 조정 인자들의 변화가 선량분포특성에 변화를 주는 것을 측정하기 위해 0.6cc 이온함(Capintec PR06C, USA), 미소전위계(Capintec192, USA)와 오실로스코프(Tektronix, USA)를 사용하였다. 선형가속기를 구성하고 있는 여러 가지 요소 중에서 빔 조정 인자들인 입사전류(INJ-I), 입사전압(INJ-E), RF주파수조정인자(PFN), 휨자석전류(BMI), 펄스반복주파수(PRF)를 선택하여 디지털 메바트론 제어프로그램 상에서 선형가속기가 자동 제어되는 허용범위를 조사한 후 그 영역내에서 전류값들을 변화시켜가면서 선량에 어떠한 영향을 미치는지 알아보았다. 표 1은 선형가속기의 빔 조정 인자특성을 나타낸 것이다. 이온함을 사용하여 흡수선량을 측정하고 오실로스코프를 사용하여 빔 출력의 파형을 분석하였으며 방사선계측장치로 대칭성과 평평도를 계측하였다.

Table 1. Beam tuning parameters of digital linear accelerator.

Adjustment	Parameter	Characteristics
Dose Rate	INJ-I	Controls the dose(number of electrons) per pulse.
	INJ-E	Controls the initial energy of the injected electrons; also affects beam diameter, X-ray leakage and penumbra.
	PRF	The rate at which output is produced. Adjust for rated output at the specified PRF.
Energy	BMI	Controls the strength of the magnetic field of the bending magnet via the current flow through the bending magnet coils, and sets the "Window" which allows only electrons of the desired energy to pass through.
	PFN	Controls the amount of rf power in the accelerating waveguide, and so controls the amount of energy gained by the accelerated electrons.

## 2. 선형가속기의 선량분포 특성

### 1) 선량률 측정

선형가속기의 제어프로그램이 서비스모드에서 작동하도록 조절하였다. SSD 100 cm, 조사면 20×20 cm<sup>2</sup>, 측정깊이 5 cm인 고체 물팬텀을 이용하여 디지털화 되어있는 전압과 전류값들을 변화시키면서, 이를 이온함과 오실로스코프를 이용하여 선량률의 변화와 출력펄스의 변화를 관측하였다. 그리고, 인자들을 변화시킬 수 있는 허용 범위를 측정하였다. 이 때 출력펄스는 선형가속기의 콘솔박스에서 동축케이블을 사용하여 선형가속기로부터 받은 신호를 오실로스코프에 연결하여 펄스변화를 보았다.

### 2) 평평도 및 대칭성 측정

이온함으로 측정된 허용 범위값을 참고로 하여 빔 조정 인자들의 디지털화 된 전압과 전류값들을 변화시켰다. 그리고, 방사선 계측장치인 RFAplus를 사용하여 SSD 100 cm, 조사면 20×20 cm<sup>2</sup>, 측정깊이 10 cm에서 빔의 안정성과 균일성을 확인 할 수 있는 평평도와 대칭성을 측정하였다.

### 3) 깊이에 따른 흡수선량 측정

빔 조정 인자들의 전압과 전류값들을 변화시키면

서, 방사선계측장치인 RFAplus를 사용하여 SSD 100 cm, 조사면 20×20 cm<sup>2</sup>, 측정깊이를 30 cm에서 표면까지 스캔하여 깊이에 따른 흡수선량곡선을 비교하였다.

**결과 및 고찰**

선형가속기의 선량률과 에너지변화에 영향을 미치는 인자들인 INJ-I, INJ-E, PFN, BMI, PRF의 전압과 전류값들을 변화시켜가며 선량분포의 변화를 살펴보았다. 선형가속기가 허용범위에서만 작동이 되기 때문에 실험중에 기계가 정지되는 것을 고려하여 디지털화 된 인자들의 전압과 전류값들을 변화시키면서 허용범위를 먼저 조사하였다.

그림 1, 2는 이온함과 미소전위계를 사용하여 선량률을 측정하였을 때 선량률의 변화를 나타낸 것이다. 그림 1은 INJ-I를 수치변화 시켰을 때 선량률이 1~18%가 변화되었고 수치 4236 mV에서 가장 큰

변화를 보였다. 그림 2에서 INJ-E를 수치변화 시켰을 때는 1.8~13.4%가 변화되었고 수치 8000 mV에서 가장 큰 변화를 보였다. PRF와 PFN을 수치변화 시켰을 때의 선량률은 각각 0~17%, 2~10%의 변화를 보였다. PRF는 수치 2751 mV에서 PFN은 수치 5283 mV에서 가장 큰 변화를 나타내었다. 마찬가지로 방법으로 BMI를 수치변화 시켜가며 선량률을 측정 한 결과 4~20.4%의 변화를 보였으며 가장 큰 변화는 수치 3354 mV에서 나타났다. 그래프를 살펴보면, 현재 장비의 최적값으로 설정되어 있는 값들이 대체적으로 높은 선량률을 나타낸다.

그림 3은 동축케이블을 콘솔박스의 각 단자에 연결하여 빔 출력 타겟의 전류를 파형으로 관측할 수 있었다. 그림의 좌표값은 가로축은 시간을 나타내고, 세로축은 전압을 나타낸다. 여기서 가로축의 한 눈금은 1 μs, 세로축의 한 눈금은 500 mV를 나타낸다. 현재 최적값으로 설정된 INJ-E의 전류값이 8501 mV 일 때의 파형을 다른 것들과 비교해 볼 때 가장 안정되어 있고 전류값이 높아질수록 파형의 아랫부분이 매우 불안정해지는 것을 알 수 있다.

그러나, RFAplus로 흡수선량곡선과 대칭성에 대하여 측정하였을 때 D10/D20은 0~0.02, 평평도는 0.1~0.4%, 대칭성은 0.1~0.2%의 변화를 확인할 수 있었다. PFN값을 변화시켰을 때 대칭성은 0.1~0.2%, 평평도는 0.2~0.4%의 변화를 보였고(그림 4), 그림 5는 BMI값을 변화시켰을 때의 대칭성과 평평

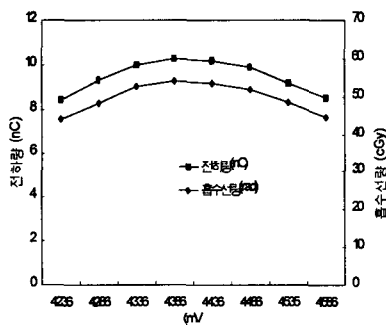


Fig. 1. The value measured by the ion chamber when INJ-I was changed.

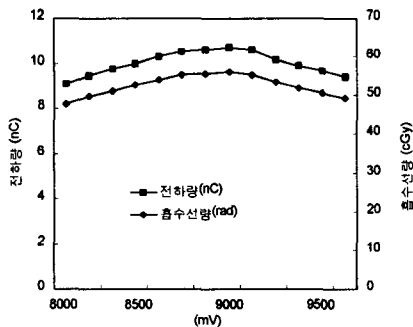


Fig. 2. The value measured by the ion chamber when INJ-E was changed.

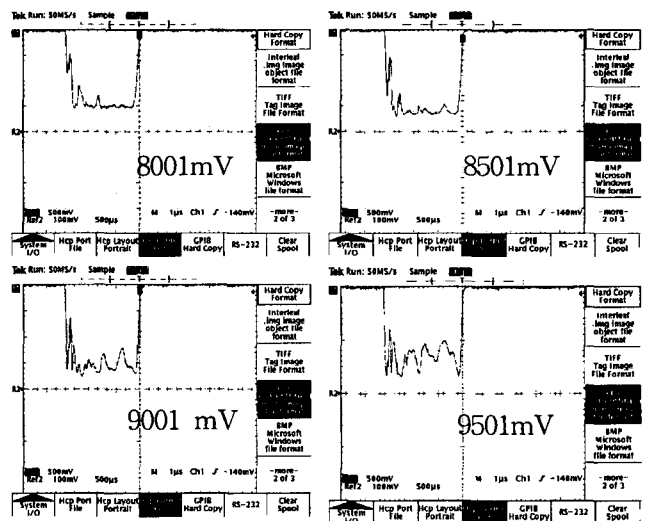


Fig. 3. The waveform when INJ-E was changed to 8001mV, 8501mV, 9001mV and 9501mV.

도를 나타낸 것인데 대칭성은 0.1%, 평평도는 0.1~0.4%의 변화를 보였다. INJ-E값을 변화시켰을 때의 대칭성과 평평도는 각각 0.1%, 0.2~0.3%의 변화를 나타내었고 INJ-I값을 변화시켰을 때의 대칭성과 평평도의 변화는 0.1~0.2%, 0.1~0.3%로 나타났다. PRF값을 변화시켰을 때의 대칭성은 0.1%, 평평도는 0.2~0.3%의 작은 변화를 보였다. 각 인자들 중 PFN과 BMI의 흡수 선량을 분석한 결과를 변화된 전류값과 측정깊이에 따라 나타내었다(표 2~3). 각 기준값에 대하여 변화값들의 변화정도를 구하여 최대값과 최소값으로 나누었다. PFN은 100 mm에서 1.16%의 최대변화, 160 mm에서 0.13%의 최소변화를 나타내었고(표 2), BMI는 10 mm와 60 mm에서 1.32%의 최대변화, 250 mm에서 0.05%의 최소변화를 보였다(표 3). INJ-E는 120 mm에서 1.62%의 최대변화, 250 mm에서 0.07%의 가장 작은 변화를 나타내었고 INJ-I는 40 mm에서 1.04%의 최대변화, 180 mm에서 0.1%의 최소변화를 보였으며, PRF는

20 mm에서 1.24%의 최대변화, 60 mm과 100 mm에서 0.2%의 최소 변화값을 볼 수 있었다.

각각의 흡수 선량을 비교하였을 때는 어느 정도의 변화가 있는 것으로 나타나지만 결과적으로 에너지변화에는 영향을 거의 미치지 못한다는 것을 알 수 있었다. 10 cm와 20 cm에서의 선량비를 비교한 D10/D20의 값들을 살펴보면 에너지가 거의 변하지 않았다는 것을 알 수 있었다. 대칭성과 평평도의 변

Table. 2. The percent depth dose when PFN was changed.

mm \ mV	4683	4883 (기준값)	5083	오 차	
				최대값	최소값
10	98.32	<b>98.06</b>	97.19	0.87	0.26
20	98.67	<b>99.21</b>	97.98	1.23	0.54
30	95.48	<b>95.59</b>	95.00	0.59	0.11
40	92.03	<b>92.14</b>	93.24	1.10	0.11
50	88.75	<b>89.59</b>	88.41	1.18	0.84
60	85.74	<b>86.05</b>	86.13	0.31	0.08
70	82.64	<b>81.99</b>	82.09	0.65	0.10
80	78.92	<b>78.99</b>	78.49	0.50	0.07
90	75.55	<b>75.02</b>	75.07	0.53	0.05
100	72.98	<b>72.37</b>	71.81	0.61	0.55
120	66.61	<b>66.37</b>	65.58	0.79	0.24
140	60.50	<b>59.93</b>	60.05	0.57	0.12
160	55.27	<b>55.08</b>	55.14	0.19	0.06
180	49.60	<b>49.96</b>	49.34	0.62	0.36
200	45.50	<b>45.63</b>	45.13	0.50	0.13
250	35.43	<b>35.04</b>	35.21	0.39	0.17
D10/D20	0.62	<b>0.63</b>	0.63		

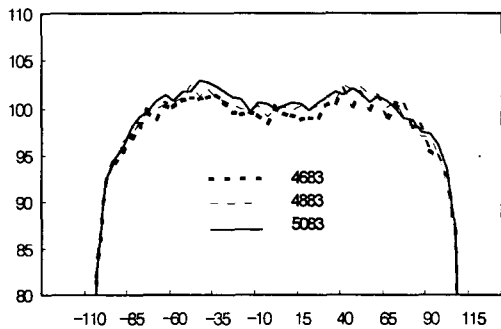


Fig. 4. The symmetry and the flatness when PFN was changed.

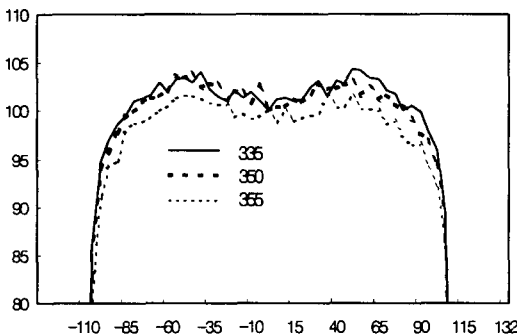


Fig. 5. The symmetry and the flatness when BMI was changed.

Table. 3. The percent depth dose when BMI was changed.

mm \ mV	3354	3504 (기준값)	3554	오 차	
				최대값	최소값
10	98.05	<b>97.41</b>	96.73	0.68	0.64
20	97.79	<b>97.99</b>	98.91	0.92	0.20
30	95.16	<b>94.57</b>	95.39	0.82	0.59
40	92.69	<b>91.81</b>	92.62	0.88	0.81
50	88.11	<b>88.88</b>	89.10	0.77	0.22
60	85.81	<b>84.87</b>	84.49	0.94	0.38
70	82.58	<b>81.19</b>	82.73	1.54	1.39
80	78.59	<b>78.51</b>	79.04	0.53	0.08
90	75.62	<b>75.33</b>	76.11	0.78	0.29
100	72.05	<b>72.16</b>	72.00	0.16	0.11
120	66.27	<b>65.80</b>	66.81	1.01	0.47
140	60.24	<b>59.62</b>	60.77	1.15	0.62
160	54.63	<b>54.93</b>	55.74	0.81	0.30
180	49.45	<b>49.75</b>	49.96	0.30	0.21
200	45.11	<b>45.23</b>	45.52	0.29	0.12
250	35.09	<b>34.95</b>	36.04	1.09	0.14
D10/D20	0.63	<b>0.63</b>	0.63		

화는 구분하기 어려울 정도의 변화를 보였기 때문에 상대흡수 선량을 80%부터 나타내었다. 그 중에서 변화를 가장 잘 볼 수 있었던 인자는 BMI와 PFN으로써 그림 4, 5에서 보면 전류의 변화에 따라 에너지결정에 아주 민감하였다. 특히 BMI는 전류값이 변화함에 따라 에너지를 조절하는 자기장의 세기가 달라지게 되므로 다른 인자들에 비해 변화 폭이 크게 나타났다으며 그 외 다른 인자들은 에너지 결정에는 큰 영향을 미치지 못하였다.

## 결 론

본 연구에서는 디지털 가속기의 빔 조정 인자를 변화시켰을 때 선량분포에 어떠한 영향을 미치게 되는지 알아보았다. 선형가속기의 선량률과 에너지변화에 영향을 미치는 인자들인 INJ-I, INJ-E, PFN, BMI, PRF의 전압과 전류값들을 변화시켰을 때 인자들마다 차이는 있었지만, 이온함을 사용하여 측정했을 때와 오실로스코프로 출력펄스의 파형을 보았을 때 선량률은 0.9~20%가 변화되었다. 그러나, RFAplus로 흡수선량 곡선과 대칭성에 대하여 측정하였을 때 D10/D20은 0~0.02, 평평도는 0.1~0.4%, 대칭성은 0.1~0.2%로 거의 변화되지 않았다.

따라서 가속기의 빔 조정 인자가 변화될 때에 선량률의 변화는 크게 나타나지만 허용범위내의 변화에 대해서는 기계자체에서 빔 에너지와 선량분포를 자동 제어한다는 것을 알 수 있었다. 그리고 디지털 제어 프로그램에서 값들을 변화시켜가며 측정해 본 결과 현재 설정되어져 있는 값이 거의 최적의 값에 가깝다는 것을 알 수 있었고, 가속기의 허용범위를 넘게 되어 기계에 무리가 가해지면 가동이 자동적으로 정지되었다.

기계자체의 허용범위 내에서는 기준값에 맞추기 위해 자동제어가 되어 선량분포에는 크게 영향을 미치지 못하지만 인자들의 각각의 특성과 선량분포와의 관계를 파악할 수 있었다. 각각의 빔 조정 인자들의 변화에 따른 특성을 파악함으로써 가속기의 정도관리를 위한 기초자료를 확보하였다.

## 참고문헌

1. Greene D.: *Linear Accelerators for Radiation Therapy* 2th, Medical Science Series., (1997)
2. Karzmark C.J., Nunan C.S., Tanabe E.: *Medical Electron Accelerators*. McGraw-Hill, New York, (1993)
3. Almond, P.R., Bjarngard, B.E.: Quality assurance of linear accelerators. *Med. Phys.* 5:6 (1989)
4. Blad B., Jacobsson L., Wendel P.: The influence of the magnetron frequency, the servo settings and the gantry angle on the flatness and the dose calibration of a linear accelerator. *J. Med. Eng. Tech.* 22:185 (1998)
5. Schultheiss T.E., Boyer A.L., Horton J.L.: Calibration frequency as determined by analysis of machine stability. *Med. Phys.* 16:84 (1989)
6. 森口勇介, 田中常徳: 高エネルギー電子, X線の發生機構及びエネルギー設定. *日本放射線技術學會誌*, 52:412 (1996)
7. AAPM: A protocol for the determination of absorbed dose from high energy photon and electron beams. A report of Task Group 21, Radiation Therapy Committee. *Med. Phys.* 10: 741 (1983)
8. Hrejsa A.F., Soen J., Jankowiak P.: Temperature-pressure compensation for a linear accelerator electron beam dosimeter. *Med. Phys.* 12:260 (1985)
9. Horton J.L.: Dosimetry of the Siemens Mevatron 67 linear accelerator. *Int. J. Rad. Oncol. Biol. Phys.* 9:1217 (1983)
10. Metcalfe P., Kron T., Hoban P.: *The Physics of Radiotherapy X-Rays from Linear Accelerators*. Medical Physics Publishing, Madison, WI, pp6(1997)
11. Siemens: *Mevatron manual*, Siemens Training Dept., (1997)
12. Khan F.M.: *The Physics of Radiation Therapy* 2nd ed., Williams & Wilkins, Baltimore, pp51 (1994)

13. Lloyd M.D., Lane R.G., Laxton J., et al.: Long term variation in beam symmetry as a function of gantry angle for a computer-controlled linear accelerator. *Med. Phys.* 16:614 (1989)
14. Bjarngard B.E., Shackford H.: Attenuation in high-energy x-ray beams. *Med. Phys.* 21:1069 (1994)

## The Effects on Dose Distribution Characteristics by Changing Beam Tuning Parameters of Digital Linear Accelerator in Medicine

Hyun Joo Park<sup>\*\*</sup>, Dong Hoon Lee<sup>+</sup>, Dong Han Lee<sup>+</sup>, Soo-Il Kwon<sup>\*</sup>,  
Seong Yul Yoo<sup>+</sup>, Young Hoon Ji<sup>+</sup>

*\*Dept. of Medical Physics, Kyonggi University*

*+Dept. of Radiation Oncology, Korea Cancer Center Hospital*

INJ-I, INJ-E, PFN, BMI, and PRF were selected among the various factors which constitute a digital linear accelerator to find effects on the dose distribution by changing current and voltage within the permitted scale which Mevatron automatically maintained. We measured the absorbed dose using an ion chamber, analyzed the waveform of beam output using an oscilloscope, and measured symmetry and flatness using a dosimetry system. An RFA plus (Scanditronix, Sweden) device was used as a dosimetry system. Then an 0.6cc ion chamber (PR06C, USA), an electrometer (Capintec192, USA), and an oscilloscope (Tektronix, USA) were employed to measure the changes on the dose distribution characteristics by changing the beam-tuning parameters. When the currents and the voltages of INJ-I, INJ-E, PFN, BMI, and PRF were modified, we were able to see the notable change on the dose rate by examining the change of the output pulse using the oscilloscope and by measuring them using the ion chamber. However, the results of energy and flatness graph from RFA plus were almost identical. The factors had fine differences: INJ-I, INJ-E, PFN, BMI, and PRF had 0.01~0.02% differences in D10/D20, 0.1~0.2 % differences in symmetry, and 0.1~0.4% differences in flatness. Since Mevatron controlled itself automatically to keep the reference value of the factor, it was not able to see large differences in the dose distribution. There were fine differences on the dose rate distribution when the voltage and the currents of the digitized factors were modified. Nonetheless, a basic operational management information was achieved.

**Keyword : linear accelerator, Mevatron, dose distribution characteristics,  
beam-tuning parameter**