

방사선 치료용 MM-22 의학용 마이크로트론 가속기

원자력병원

이동훈 · 박주식

— Abstract —

MM-22 Medical Microtron Accelerator for Radiotherapy

Dong-Hun Lee and Joo-Shik Bak
Korea Cancer Center Hospital

The MM-22 medical microtron at Korea Cancer Center Hospital has been running for radiotherapy since it was installed in 1986.

The microtron is a very flexible radiation therapy device with excellent radiation field for photon or electron therapy. The microtron accelerates electrons from an energy of minimum 5.3MeV to an energy of maximum 22.5MeV. The electrons are led from the microtron to the treatment head via a beam transport system and are used for radiotherapy. Present paper describes the system structures and operating characteristics of the MM-22 microtron and its therapy unit.

I. 서 론

마이크로트론의 원리는 1944년 소련의 V.I. Veksler가 처음으로 제안한 이후 1970년대에 선형가속기와 베타트론의 장점을 모두 갖춘 가속기로서 마이크로트론이 부상하게 되었다. 약 2년간의 제작, 설치 및 특성시험 조사후 현재 가동되고 있는 MM-22 의학용 마이크로트론은 스웨덴 Scanditronix 사 제품으로 22 MeV의 비교적 높은 에너지까지 전자를 가속할 수 있어 전자선 및 X-선의 에너지 선택폭이 타기종보다 넓은 첨단 방사선 치료장비이다. 에너지의 변환은 규격화된 모듈에 의해 자동화 되어 있으며, 간단한 버튼 선택에 의해 수초이내에 11개의 에너지를 자유로이 선택할 수 있다. 마이크로트론에서 얻은 전자선은 에너지의 안정성 및 단색성이 우수하며 높은 빔 세기를 갖고 있기 때문에 전자선

치료에 매우 적당하다. 그리고 빔 수송장치를 사용하여 가속된 전자선을 임의의 치료실로 보낼수 있다. 그러므로 한대의 가속장치에 두대이상의 수송장치를 연결하여 복수치료기로 치료를 수행할 수 있어서 치료효율을 배가시킬 수 있다.

(그림 1)

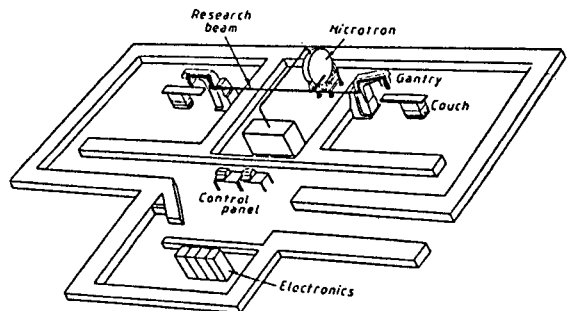


그림 1. Layout of MM-22 Microtron

선량은 전자선으로 1,000 rad/min(28×28 cm², SSD100 cm), X-선으로 300rad/min (21×21 cm², SSD 100 cm)의 최대선량을 가지고 단시간의 조사로서 환자의 고통을 줄여주고 효율이 좋은 조사 plan을 세울수가 있다. 마이크로트론은 전자를 가속시키는 마이크로트론 본체와 가속된 전자를 인도하는 수송장치, 에너지의 종류를 선택하는 조정판, 가속전압을 발생시키기 위한 Modulator, 코일 및 공진기 등에서 발생되는 열을 식히기 위한 수냉식 냉각장치, 장비를 제어 조정하는 전자회로기기, 360 °이상 회전하면서 종양의 위치에 따라 빔을 사용할 수 있는 치료기 등으로 구성되어 있다.

저자는 마이크로트론에서 전자가 가속되는 원리와 가속된 전자를 적절한 치료 빔으로 전환시켜 주는 치료기의 기능에 대하여 자세하게 기술하고자 한다.

II. 동작원리

전자총으로부터 발사된 전자들은 지면에 수직으로 작용하는 균일한 자장속에서 원궤적을 그리면서 회전한다. 한번 회전한 전자들은 다시 공기속을 통과하고 이때 마이크로트론에서 발생한 고출력의 마이크로파가 도파관을 통해서 공진기에 공급되어 높은 가속전압을 전자들에게 인가하게 된다.

전자들은 공진기를 통과할 때마다 공진작용에 의해 일정한 에너지 증분을 얻게 되고 더 큰 원궤적을 그리게 된다.(그림 2) 공진을 얻기 위한

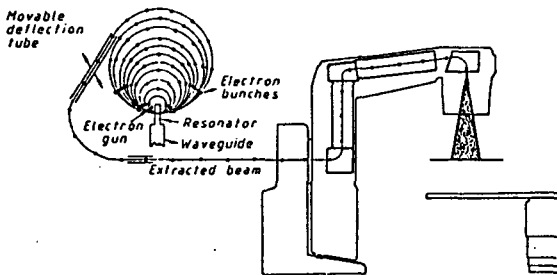


그림 2. Electron track of MM-22

중요한 요소들은 한번 회전당 에너지증분, 균일한 자장 및 마그네트론에서 공급되는 마이크로파 주파수 등이다. 기본적인 관계식은 원궤적을 돌때 작용하는 힘으로부터 얻게 된다.

전자의 전하를 e, 질량을 m이라 하고 지면에 수직, 안쪽으로 향하는 자장에 직각 방향으로 운동하는 전자의 속도 V와 반경 R일때 원궤적을 그리면서 운동하는 전자에 미치는 힘은 그림 3에 나타난 것처럼 작용한다. 즉,

$$eVB = \frac{mV^2}{R} \quad (1)$$

전자가 1회 회전하는데 소요되는 시간

$$T = \frac{2\pi R}{V} = \frac{2\pi}{eBC^2} \cdot E \quad (2)$$

그러므로 n번째 궤도에서는

$$Tn = \frac{2\pi}{eBC^2} \cdot En \quad (3)$$

에너지 En은 다음과 같다.

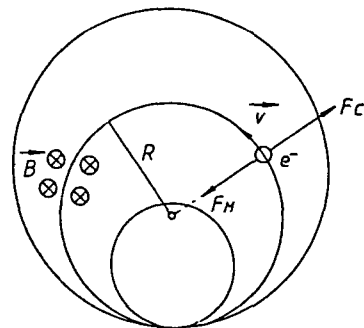
$$En = Eo + Ei + n \cdot Er \quad (4)$$

여기서

Eo : 정지에너지

Ei : 전자총에 의한 발사에너지

Er : 한번 회전당 에너지 증분이다.



$$\text{Magnetic Force: } F_m = e \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

$$\text{Centripetal Force: } F_c = \frac{mV^2}{R}$$

$$F_m = F_c$$

그림 3. Forces

공진 (Resonance) 은 다음의 두 조건을 만족 할때 얻을 수 있다.

(1) 첫번째 원궤도를 위한 공진시간은 마이크로파 주기의 정수배이어야 한다.

(2) 연속적으로 원궤도를 돌때 두 궤도의 공진시간차는 마이크로파 주기의 정수배 이어야 한다.

윗 조건으로부터

$$T_1 = \frac{2\pi E_1}{eBC^2} = \frac{b}{f} \quad (5)$$

$$T_{n+1} - T_n = \frac{2\pi Er}{eBC^2} = \frac{a}{f} \quad (6)$$

여기서

a, b : 정수

f : 마이크로파 주파수

n : 궤도의 수

그림 4 는 이 공진조건에 의한 전자의 원궤적과 도파관을 통해 공급되는 마이크로파의 주기가 정수배로 이루어져 있음을 알 수 있다. 또한 전자는 연속적으로 계속 가속되는 것이 아니라 마이크로파의 1, 3, 6 ... (그림 4) 부분에서만 가속된다. 즉 다발을 형성하면서 가속하게 되는 것이다. 윗식을 다시 정리하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$Er = \frac{a}{b-a} \cdot (E_0 + E_i) \quad (7)$$

$$B = \frac{2\pi f}{eC^2} \cdot \frac{1}{b-a} \cdot (E_0 + E_i) \quad (8)$$

이들 식으로부터 B의 최대값, 즉 최소의 궤적 지름을 얻기 위해서는 $b - a = 1$ 이어야 한다. 또한 $a = 1$ 일때 공진기에 최소의 가속 전압으로 전자를 가속시킬 수 있으므로 모우드 수는 $a = 1$ $b = 2$ 가 된다. 그러므로 n번째 궤도에서 총에너지는 다음과 같다.

$$E_n = (n+1) (E_0 + E_i) \quad (9)$$

MM-22 마이크로트론에서 전자총의 전압은 63 KV이고 전자의 정지질량에너지는 511 KeV 이므로 주어진 식 (9) 는 $E_n = (n+1) \cdot 574 \text{ KeV}$ 가 된다.

이 계산은 만약 공진기내에서 가속되는 공진폭이 0 이면 정확하게 이 조건을 표현하게 될 것이다. 그러나 위상여유폭을 부여해서 고전압 Break-down 을 없애기 위해서는 공진폭이 어느 정도 있어야 한다. 그러므로 마이크로트론에서의 궤도는 순수한 원이 아니라는 것을 의미하며 위의 계산은 정확하게 맞지는 않음을 뜻한다.

실질적으로 한번 회전할 때마다 에너지 증분은 535KeV이다.

그러므로 MM-22 의 전체 에너지는 15번째 궤도에서 $E_{15} = (15+1) \cdot 535 \text{ KeV} = 8.56 \text{ MeV}$ 이고 운동에너지는 전체 에너지에서 정지 에너지를 뺀 8.05 MeV가 된다. 최고 에너지는 42번째 궤도에서 운동에너지 22.495 MeV까지 인출할 수 있다.

그의 마이크로트론의 주요 특성표를 표 1, 2에 소개한다.

Ⅲ. 치료기의 구조와 특성

가속된 전자는 빔 수송장치를 통해서 치료기로 보내져 종양치료에 이용된다. 치료기는 360° 이상 회전하게 되었으며 Target, Filter, Scattering foil, Collimator, Wedge 및 Ion chamber 등으로 이루어져 있다. (그림 5) Vacuum window까지는 10^{-6} mbar의 고진공 상태를 유지하고 있으며 수송되어온 빔은 Vacuum window 을 통과하여 Photon 치료시는 Target으로, 전자선치료시는 1차 scattering foil이나 감속재 (흑연)로 입사된다. 이후 빔은 방사된다. Target, Scattering foil 및 감속재는 같은 메카니즘으로 함께 연결되어 있는 조정판에서 선택에 따라, 즉 X-선 치료나 전자선 치료에 따라 에너지 별로 선택할 수 있다.

10MV Photon target 은 금 1.25 mm, 동 2.00 mm, 물 6.50 mm, 스테인레스강 0.50 mm 로 구성되어 있다. 치료시 일정깊이의 조사면에서 선량이균

질해야 하며 깊이 변화에 따른 흡수선량 값은 매

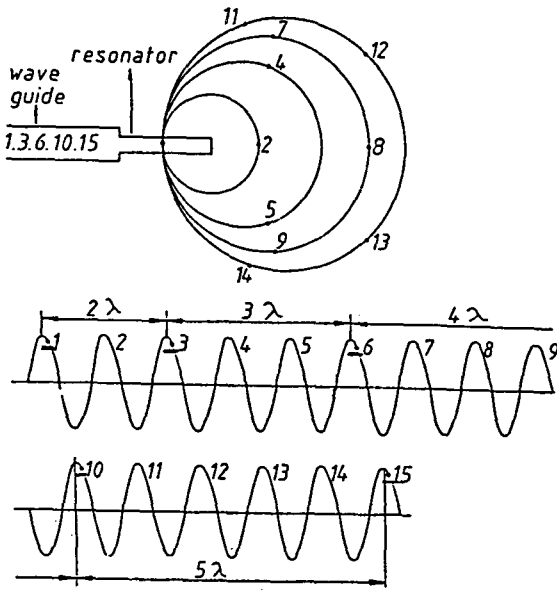


그림 4. Principle of Microtron

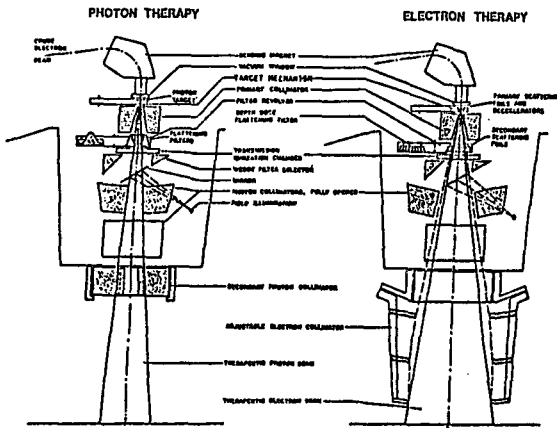


그림 5. MM-22 치료기의 구조

우 정확해야 한다. 방사범위는 첫번째 Collimator에서 제한되고 Photon 치료시 Photon target과 평활 필터에 의해서 균질한 분포를 갖는 빔을 내 놓을 수 있도록 설계돼 있다. 즉, Filter는 중심부에는 높은 원자번호의 물질로 그리고 주변부에는 낮은 원자번호의 물질로 구성된 혼합물질의 Filter로 이루어져 있다. 높은 원자번호의 물질로 그리고 주변부에는 낮은 원자번호의 물질로 구성된 혼합물질의 Filter로 이루어졌다.

높은 원자번호 물질은 상대적으로 평균 photon 에너지를 빔의 중심부에서 감소시키고 주변의 낮은 원자번호 물질은 평균 Photon 에너지를 증가시켜서 조사면의 모든 면에서 빔을 균질하게 한다. 21 MV Photon용 평활필터는 중심부분은 두께가 39mm이며 이중 하부 37mm는 납이고 상부 2mm는 알루미늄으로 구성돼 있다. 중심부에서 벗어 날수록 납의 두께는 감소되고 알루미늄의 두께는 두꺼워진다. 그림 6은 6 MV large filter의 모양과 크기를 보여 주고 있다.

MM-22 마이크로트론에서 Photon 치료시 3개의 Filter가 사용되고 있다. 6 MV에서 두 종류 및 10 MV나 21 MV을 선택하느냐에 따라 각각 한개의 Filter가 선택된다. 전자선 치료에서도 조사면내의 빔의 균질성은 마찬가지로 치료에 있어 매우 중요하다. 이런 작용은 1차 Scattering foil과 2차 Scattering foil을 갖는 이중 Scattering 구조에 의해 이루어지며 전자선의 에너지를 작게 분산시켜 빔을 모든 공간에서 균일하게 해주며 치료영역 외에서는 급격한 선량감소를 일으켜 정밀치료에 기여하게 된다. 2차 Scattering foil에는 두가지 종류의 Foil이 있다. 한 Foil은 3,5,7,9 MeV에 사용되고 다른 한개는 11,13,16,18,20,22 MeV에 사용된다.

그림 7은 3~9 MeV에 사용되고 있는 Scattering foil의 구조이다. 중심부분으로 갈수록 다층구조를 이루며 재질은 Cu이다.

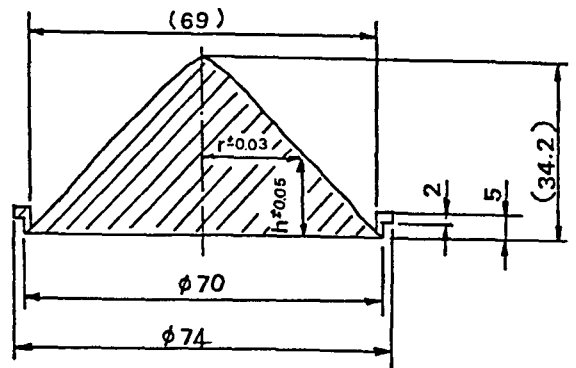


그림 6. MM-22 6MV large filter

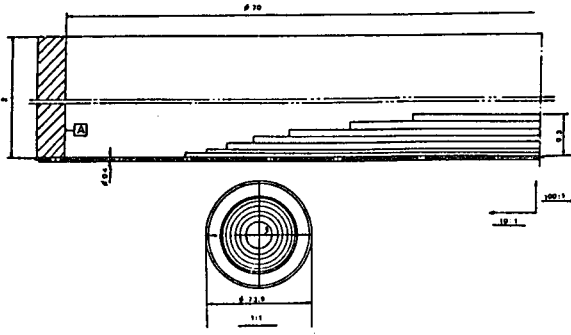


그림 7. MM-22 Scattering foil

Ion chamber는 두개의 반원 금속박막이 쌍으로 90° 위상차를 가지고 구성돼 있어서 X 및 Y 방향의 빔 이탈을 감지하여 정확한 위치로 빔을 다시 이동시키거나 집속할 수 있는 신호로써 이용되며 또한 조사된 선량의 측정에도 사용된다.

Photon 치료시에만 사용되는 Wedge filter는 20°와 45° 두 종류가 있으며 조정판에서 선택할 수 있다. 그림 8은 45° Wedge의 구조를 나타낸 것이다. 그밖에 조사면의 크기를 환자의 환부에 비추게 하는 거울과 쌍으로 상,하 구성되어 있는 Collimator block 등으로 치료기는 구성된다.

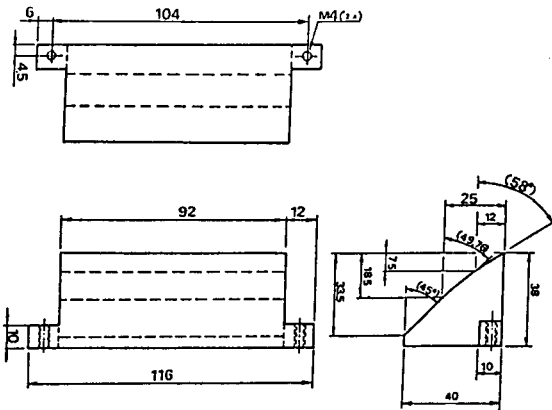


그림 8. MM-22 45° wedge

IV. 결 론

MM-22 마이크로트론 전자가속기의 구조와 가속원리 및 치료기에 대해 간략히 고찰해 보았다.

이런 가속방식에 의해 얻어진 전자선은 환자 치료를 위해 충분히 안정되어 있었으며 높은 선량으로 다양한 에너지를 손쉽게 선택하여 환자치료에 임할 수 있었다.

1986년 11월에 원자력병원에 설치된 이후 약 1년간은 설치후 발생하는 많은 전기적, 기계적 문제점을 거쳐 1988년부터 정상적인 환자 치료를 하는데 큰 기여를 해 오고 있다.

1988년도 총치료가능일수 224일중 161일을 치료하여 총 16,166명을 치료하였으며 평균가동율은 71.9%를 보였고 1989년도에는 총 치료가능일수 243일중 201을 치료하여 총 28,309명을 치료하였으며 평균 가동율은 82.7%로 전년도 보다 약 10%의 향상율을 보였다. 가동년수가 증가되면서 더욱더 안정되는 모습을 보여주고 있으며 MM-22 마이크로트론에서의 양질의 방사선 이용은 심부종양치료에 더 큰 기여를 해 나가리라 본다.

표 1. 웨도수와 가속에너지

웨도수	가속에너지(MeV)	SSD = 1m에서의 에너지 (MeV)
10	5.4	3.0 (감속제사용)
10	5.4	4.9
15	8.0	7.3
19	10.2	9.5
23	12.3	11.5
27	14.4	13.4
31	16.6	15.6
35	18.7	17.7
39	20.9	20.0
42	22.5	21.9

표 2. MM 22 마이크로트론의 특성표

특 성	값
사용가능한 에너지	5.3 - 22.5 MeV
1 회전당 얻는 에너지	535 KeV
자 장	0.112 Tesla
자 석 직 경	2.22 m
자 극 직 경	1.80 m
자 석 폭	0.45 m
에너지반폭치 (FWHM)	35 KeV
마이크로파 주파수	3.0 GHz
마이크로파 최대전력	2.0 MW
펄 스 폭	4 μ sec
입 사 전 류	1.5 A
진 공 도	10^{-6} mbar
전자선 선량을 ($28 \times 28 \text{ cm}^2$, SSD=1 m)	50 ~ 1,000 rad/min
X-선 선량을 ($21 \times 21 \text{ cm}^2$, SSD=1 m)	50 ~ 300 rad/min
조 사 면 (SSD = 1 m)	$0 \times 0 \sim 32 \times 40 \text{ cm}^2$
반 음 영 (X 선)	80 %와 20 %의 Isodose 간의 거리는 0.7 cm 이하
촉점크기 (선원직경)	약 2 mm
마이크로트론 본체의 크기	$2,460 \times 1,450 \times 3,130 \text{ mm}^3$
마이크로트론 본체의 중량	11.5 Ton
최대소비전력	35 kw
냉 각 수	50 l/min, 10-30°C