

電子加速管에 對하여

— Linear Accelerator 中에서 —

한양대학병원

정 칠 · 김병욱

I. 序 論

근래 한국에 많은 선형가속치료 장치가 도입되어 암치료에 응용되고 있으나 이들의 구조 및 電子의 加速理論等이 자세히 記述된 冊字의 구독이 어려워 實務에 從事해 오면서 궁금하고 답답할때가 많았다.

또한 많은 時間과 努力을 경주해야 비로소 Linear Accelerator의 復雜한 구조를 理解할 수 있고 電子加速의 原理等을 알 수 있다고 생각해서 우선 여러분과 함께 공부하고 배우는 자세로 다음에 열거하는 內容들을 다루기로 하겠다. 먼저 첫번째 1920년대에 교류전압을 사용 하전입자를 加速하므로써 필요로 하는 Energy를 얻을수 있다는 電子加速原理에 對하여, 알아보고 두번째 Wave Theory를 다루고 세번째로 현재 사용되고 있는 선형가속기의 부분을 이루는 가속관(Accelerating Wave Guide)을 Travelling Wave Guide와 Standing Wave Guide로 나누어 설명하고 네번째로 이들을 통하여 나오는 Electron Energy와 Electron Beam Current가 治療X-선과 電子線이 生産되는 바로 直前까지 다루도록 하겠다.

II. 本 論

1. 최초의 전자가속원리

그림 1에서 보는 바와같이 연속적으로 놓여진 Flight tube들은 교류전압을 공급할수 있도록 연결되어 있다. 그림에서 하전입자들이 길게 연속적으로 이어진 Flight tube의 장축을 따라 이동되는 동안에 지시된 방향으로 가속된다. 하

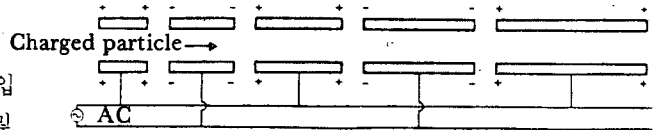


Fig. 1. Use of an alternating voltage supply (AC) to accelerate a charged particle through a series of flight tubes.

전입자가 첫번째와 두번째의 tube 사이를 지날 때에 Flight tube의 전압은 직류전압과 같으므로 하전입자를 각 Flight tube의 전위차 만큼 가속할 수 있다. 이때 하전입자가 첫번째 Flight tube를 지나 두번째 Flight tube의 끝단까지 지나는데 필요한 시간은 공급된 교류전압의 반Cycle에 해당 하므로 반Cycle이 지난 후 두번째와 세번째의 Flight tube 전압은 극이 바뀌면서 하전입자를 지시된 방향으로 가속한다. 이러한 힘은 하전입자가 연속적으로 이어진 Flight tube들의 사이를 통과 할때마다 입자에 energy를 주게된다. 앞서 말한바와같이 가속된 입자들의 통과시간은 공급되는 교류전압의 반Cycle과 같으므로 연속된 Flight tube의 길이는 점점더 증가시켜 주어야 한다.

그러므로 이러한 기술은 電子와 같이 가벼운 입자를 가속하는데는 사용할 수 없었다. 왜냐하면 電子와 같이 가벼운 입자들은 RF-frequency를 사용하여 입자를 가속하는 방법에서는 엄청나게 긴 Flight tube를 사용해야 우리가 필요로 하는 높은 운동에너지를 얻을 수 있기 때문에 양자와 같이 무거운 입자를 가속하는데 이 용되어 왔다. RF-frequency를 사용하여 입자를 선형으로 가속하는 가속원리는 Wideroe (1928)과 Sloan과 Lawrence (1931)에 의하여

설명되어 졌다.

먼저 Flight tube 사이의 \bar{E} -Field를 살펴 보자.

① 하전입자는 Flight tube 사이의 전위차 만큼 가속을 받는다.

② 서로 마주보고 있는 전도면에 걸리는 전압의 크기는 같으므로 전자는 Flight tube의 한 가운데, 축을 따라 가속을 받는다.

③ 하전입자는 Flight tube 안에서는 등가 속도 운동을 한다. (그 이유는 Flight tube 内에는 \bar{E} Field가 존재하지 않기 때문이다.) * \bar{E} Field = 전장

2. Waveguide Theory

다음의 그림은 전자를 가속하기 위한 선형가속기의 가속관 구조를 그림으로 나타내므로 電子를 어떻게 가속 하는지 이해 하는데 도움을 주고있다.

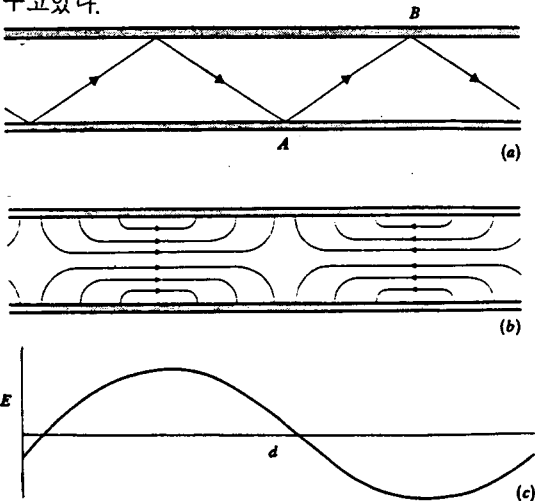


Fig. 2. (a) Central ray of an electromagnetic wave being reflected between parallel conducting surfaces. (b) instantaneous electric field distribution when distance AB in (a) is one wavelength. The arrows indicate the direction of the field. (c) Instantaneous electric field distribution along the axis of symmetry between the conducting planes. E is the electric field strength and d the distance along axis.

먼저 그림 2(a)에서 보여지는 바와같이 micro wave가 conducting plane (전도면)에 보내지게 되면 이들 사이에는 서로 간섭하여 그림과 같이 반사하게 될 것이다. 만약에 micro wave가 전도면과 간섭하는 상태에서 반사하지 않고 흡수 되던가 회절하는 현상이 일어나게 되면 micro wave는 가속관을 따라 진행할 수 없다. 이와같이 wave들이 반사면과 사이에서 순간적으로 간섭하는 (반사하는) 형태가 일정하다면 energy는 가속관의 한가운데를 따라서 이동하게 될 것이다. 그림 2(a)의 A, B 즉, path length는 반사되어 하나의 짝수인 파장을 이룰때 energy가 이동하는 현상이 일어난다. 그림 2(b)는 이러한 상황 F에서 순간적인 \bar{E} Field를 나타낸 것이며 그림 2(c)는 축을 따라 대칭되는 \bar{E} Field를 나타낸 것이다. 이러한 것들은 다음과 같이 설명 할 수 있다.

i) 전도면의 특별한 분리상태 F에서 length A, B와 대칭축과의 사이에 수많은 다른 각도에 대하여서 짝수의 반파장인 상태에 직면하게 되며 이러한것을 mode라고 정의 하는바 이 mode에 의해서 가속관을 따라 energy를 보낸다.

ii) 그러한 mode들은 전도면의 간격이 of the order of (순차적으로 넓어지거나 또는 순차적으로 낮아짐) 이거나 파장보다 더 클때만이 가능하다. 이러한것은 Terman (1943)의해 설명 되어진 것이다. 그림 2(b)의 중심축을 따라 움직이는 전자를 생각해 보면 그것은 \bar{E} Field 内 위치에 따라서 가속 혹은 감속이 된다. 가속관이 에너지를 왼쪽→오른쪽으로 보내고 있는한 Field pattern은 같은 방향으로 움직인다. 만약 電子가 항상 \bar{E} Field와 같은 속도로 움직인다면 처음부터 왼쪽에서 오른쪽으로 힘을 받는 위치에 놓여진 전자는 계속해서 \bar{E} Field로부터 에너지를 받는다.

이 과정은 micro wave energy가 wave guide을 따라서 transmitt되는 동안 그에 따르는 양을 조절할 필요가 생기며, Field velocity는 가속된 전자속도와 보조를 맞출수 있도록 증가 되어야만 한다는것 등을 내포하고 있다.

어떤 Transmission Line System이든지 전달되는 에너지의 양은 단위 길이당 Capacity를 변화시킴으로서 조절할 수 있으며 Circular section accelerating wave guide의 경우는 그림 3에서와 같이 가속관을 Conducting irise와 discs에 맞춤으로서 조절 될수있다.

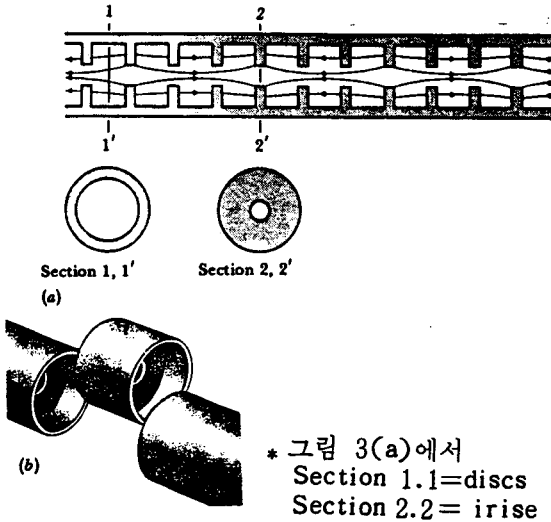


Fig. 3. (a) Sections through a dislocated waveguide, showing arrowed electric field lines; (b) perspective diagram of (a).

그림 3(a)는 순간적으로 일어나는 전장의 분포상태를 나타내며 그림 3(b)는 disc-loaded wave guide의 절단면을 나타낸다. irises의 내경과 간격은 Wave의 속도를 조절하는데 이용된다. 그림 3의 Wave guide는 다음에 기술한 두가지중의 한가지를 선택하여 이용할 수 있다.

i) Accelerating wave guide에서 마주하고 있는 양쪽의 끝단으로 부터 energy가 아무런 반사없이 부드럽게 흐를 수 있는 Travelling Wave 장치.

ii) Accelerating wave guide의 양끝단에서 energy가 반사하여 Wave guide 전체를 통하여 Frequency를 일정하게 조절할 수 있는 Standing wave 장치.

II - 1 The travelling wave accelerator

그림 4(a)는 Travelling wave accelerator의 기하학적인 구조를 보여주고 있다. 가속관은 왼쪽 끝으로 부터 약 0.4C의 속도로 Wave가 진행하도록 설계되어져 있다. (여기서 C는 광속도를 의미함) Wave가 가속관으로 떠나기전까지는 이 속도로 진행하며, 가속관 길이의 처음 약 30cm 정도에서 C의 속도로 증가 되도록 설계되어져 있다. 전자총의 음극은 음전하를 띤 전압펄스를 공급하고 있으며, 그와 동시에 그펄스는 micro generator에 활력을 주는 역할을 담당한다. 그러므로 거의 0.4C의 속도를 가진 전자들이 가속관 안으로 주입됨과 동시에 micro wave pulse도 주입되도록 되어있다.

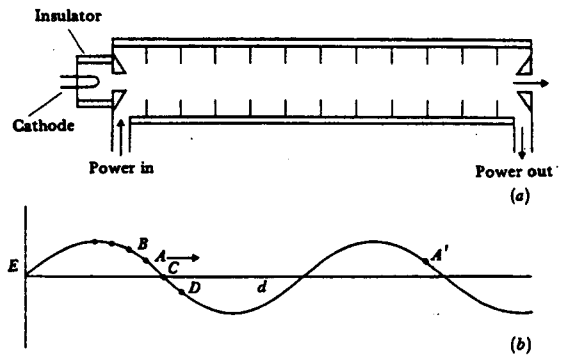


Fig. 4. (a) Travelling wave accelerator; (b) travelling wave, points indicate position of electrons on the wave, E is the electric field strength and d the distance along axis.

그림 4(b)는 가속관의 장축을 따라 일어나는 순간적인 전장의 형태를 파의 모양으로 나타낸 것이며 전장의 세기를 파의 형태인 위상차로 나타냈을때 전장에 관계된 전자들은 Wave상에 점들로 나타내고 있다. A점에 있는 하나의 전자를 놓고 생각해 보면 그 전자는 진폭의 크기만큼 전장으로 부터 힘을받아 지시된 방향으로 가속된다. 여기서 B는 A보다 더 큰힘을 C는 A보다 적은 힘을 받게돼 A'에서 전자束을 이루게됨을 알수있다. 여기서 Wave의 진폭은 최초의 전자속도와 Wave 속도에 관계됨을 알수있다.

A' 를 (buncher section) 집속부분이라 칭한다. 이 집속부분의 밑에서 전자束들은 광속도와 같은 속도를 얻게되며, 전자束들은 이러한 속도로 accelerating wave guide 를 통과한다.

전자들은 가속관의 길이와 집속부분의 위치에 해당하는 전장의 세기를 받아 가속한다. 이러한 energy 의 증가는 대체로 상대론적인 전자질량의 증가로 표현할 수 있다.

그림 3 (a)에서 보는 바와같이 그들은 집속전자를 가속하는데 적합하다.

여기서 전자들은 방사성 모양으로 확산하여 벽 쪽으로 분산 하려는 경향이 있는데, 이러한 산란은 축상으로 하나의 자장을 걸어주므로써 조정할 수 있다. 자장은 전자들이 방사형으로 확산하는 것을 방해하여 전자들을 가속관의 한가운데로 집속하는 힘을 제공하고 있다. 전자파가 가속관을 따라 지나갈때 전자파는 가속관의 구조상 자체저항 손실에 의하여 얼마간 약해지나 대부분의 에너지는 전자를 가속하는데 사용하고 있다. 이상적인 가속관에서는 micro wave 의 모든 에너지가 하전입자를 가속하는데 사용되어야 한다. 그러나 가속관내에서 전자파의 진폭은 처음에는 높은 에너지를 갖고 있으나 가속관의 끝으로 향할수록 에너지는 0으로 감소하는 현상이 나타난다. 이러한 것은 실제 전자가속에 있어서 유용한것이 못된다. 왜냐하면 전자들은 가속관에서 단위길이당 에너지를 얻게 되는데 처음에는 높은 에너지를 얻지만 가속관의 끝으로 갈수록 에너지가 작아지기 때문이다. 이러한 이유로 전자들은 가속관의 단위길이당 최대의 에너지를 얻을수 있도록 설계 되어져야 한다. 그러한 것은 전자들이 가속관 밖으로 지나갈때까지, 전자파는 상대적으로 큰 진폭을 가지고 전자에게 에너지를 전하는 것이 필요하기 때문이다.

Travelling wave guide 에서는 전자총의 끝 부분으로부터 accelerating wave guide 안으로 micro wave radiation 이 들어가야만 하는데 이러한 것은 micro wave 가 높은에너지를 갖고 가속관 안으로 들어와, 가속관을 따라 끝까지 진행하도록 되어 있으며 남아있는 에너지는 가속

관의 끝 (즉, 출력측) 에서 반사함이 없이 흡수 되어야 한다. 그림 4 (a)에서 보는 바와같이 micro wave energy 는 가속관과 직각을 이루며 전자총의 끝으로 (즉, 입력측) 공급되고 있다. micro wave 가 가속관 안으로 들어와, 반사를 하면서 가속관내를 진행하기 위해 그림 4 (a)에서 보여지는 "door knob" transformer 가 이용되고 있으며, 이것을 mode transformer 라고도 한다. 이것의 모양은 여러번의 시행착오를 거친 경험으로 만들어진 것이다. 또한 "door knob" transformer 는 남아있는energy 를 wave guide 의 끝부분에서 밖으로 내보내는데 사용된다. 한편 밖으로 반사된 에너지는 저항 load 에 의하여 흡수된다. 다음에 열거하는 두가지중에 한가지 방법을 선택하여 wave guide 내에 남아있는 에너지를 처리하고 있다.

i) 반사되어 나온 에너지를 보강하여 phase shift 로 알맞는 상을 만들어 가속관의 입력측으로 다시 돌려보내 사용한다.

ii) 가속관의 끝단에 저지급속 iries 을 만들어 남아있는 micro wave energy 을 직접 흡수한다.

2-2 The standing wave accelerator

Wave guide 의 양끝에는 conducting disc 로 끝을 이루고 있으며, micro wave power 는 Wave guide 끝에서 conducting disc 에 의하여 $\frac{\pi}{2}$ (2분의파이) 만큼 상이 바뀌어 반사한다. 그러므로 standing wave 는 Wave guid 안에서 build-up 될수 있다. 그림 5(b)는 이러한 standing wave 의 기본적인 mode 를 나타내고 있다. 그림 5(b)에서 Cavity 2, 4, 6 들은 가속관 안에서 nodes (절절) 이고, Cavity 1, 3, 5 는 anti-node (꼭지점) 들이다. Cavity 1, 3, 5 를 지나 는 하전입자들은 화살표 방향으로 힘을 받아 가속 되지만 Cavity 2, 4, 6 을 지나 는 입자들은 0 (제로) 의 energy 를 받는다. 그리고 그림 5(b)에서 보는 바와같이 Wave 가 반Cycle 이 더 지난후에는 스스로 역전하여 완전한 Curve 로

나타난다. 만약 Cavity 1에서 Cavity 3으로 입자가 진행하는데 필요한 시간이 반Cycle이라면 양쪽의 Cavity는 모두 입자를 같은 방향으로 가속할 수 있다. 입자가 Accelerating Wave guide을 통하여 지나는 동안 하나 건너의 Cavity로 부터 energy를 받고있다. 다시말하면 그것은 가속관의 standing wave로부터 가속된다.

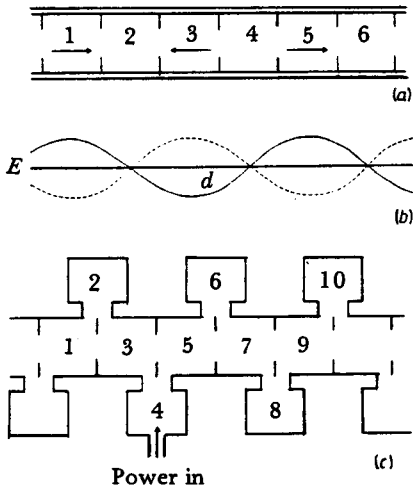


Fig. 5. (a) Standing wave accelerator; (b) standing waves; (c) sidecoupled cavities.

그림 5(a)에서 보는것과 같이 가속하려는 입자가 Cavity 2, 4, 6을 통하여 지나는 동안에는 에너지를 받지 못하므로 이 Cavity들을 그림 5(c)에서 보여지는 바와같이 밖으로 움직여 side에 놓을 수 있다. 밖으로 돌출하고 있는것을 coupling cavity라 하며, coupling cavity와 accelerating cavity를 한 set로 구성 한다면 가속관의 구조를 줄이는데 결정적인 역할을 한다. Standing wave accelerator의 구조는 전체적인 한 단위로서 Standing wave를 만들기 위해 reflection (반사)을 제공해주는 end plate (conducting plane)에 맞추어질 필요가 있다. 이들 end plate들은 가속관 안으로 electron beam이 들어오고 나갈수 있도록 축상으로 구멍이 나있다. micro wave가 가속관 안으

로 들어와 가속관을 따라 공급될때 Standing Wave의 진폭은 가속관 내에서의 자체 손실을 보상하고 electron beam을 가속관을 따라 지나가게 하는데 필요한 충분한 energy를 제공해주므로써 build-up된다. Standing wave의 진폭은 가속관 전체를 통하여 항상 일정하다. Standing wave guide에서의 집속기능은 가속관의 축의 길이를 조절 함으로서 가능하며, 각각의 Cavity들에 보내지는 시간은 일정하게 반주기가 되도록 유지하여야 한다. 그렇게 하므로서 전자속도는 증가하여 광속도에 도달한다. Travelling Wave guide의 경우에는 Gun의 끝에서 가속기 안으로 micro power가 공급되는 것이 절대적으로 필요하지만 이러한것은, Standing wave guide와 같은 경우에는 적용되지 않는다. 그 이유는 Standing wave accelerator의 경우, 진폭은 가속관 전체를 통하여 항상 일정하기 때문에 언제든지 편리한 곳에서 power를 공급할 수 있기 때문이다. 그림 5(c)에서 보여지는 바와같이 어느 한 coupling cavity안으로 직접 power를 항상 공급할 수가 있다.

3. Electron energy and electron beam current.

Travelling wave accelerator에서 micro power level과 Frequency를 일정하게 조정 하지만, electric field amplitude는 wave가 가속관을 따라 지나감에 따라서 감약하고 있다. 이 감약되는 비율은 전자를 가속 시키는데 보내지는 energy의 양에 거의 전적으로 의존하고 있다. 다시말하면 감약율은 electron beam current에 의존하고 있는 것이다. 결과적으로 하나의 전자에 평균 전장이 걸리는 것을 알 수 있다. 그림 1, 6에서 보여지는 바와같이 electron beam current가 증가하는 만큼 electron energy는 감소되는 것을 볼 수 있다.

Standing wave accelerator에서 electric field amplitude는 accelerating wave guide를 통하여 항상 일정하므로 amplitude는

micro wave guide 内の 손실과 incoming micro wave power 사이의 balance 에 의존하고 있지만 거의 모든 원인은 electron beam 으로 전도되는 energy 에 기인하고 있다. 다시말하면 전자 한개에 작용하는 전장은 평균전장 이므로 앞에서 말한 바와같이 electron beam current 가 증가하는 만큼 electron energy 는 감소한다.

가속된 전자가 Target 에 부딪쳐서 발생하는 X - ray electron beam current 가 증가함에 따라 증가하는 성향이 있으나 그것 또한 electron energy 가 떨어지므로 해서 매우 급격히 감소하고 있음을 알수있다. 그림 6 에 주어진 그래프에서 보는 바와같이 기계의 특성에 따르는 최대점의 한계를 잘 결정하므로 이용 효율을 극대화 시킬 수 있다.

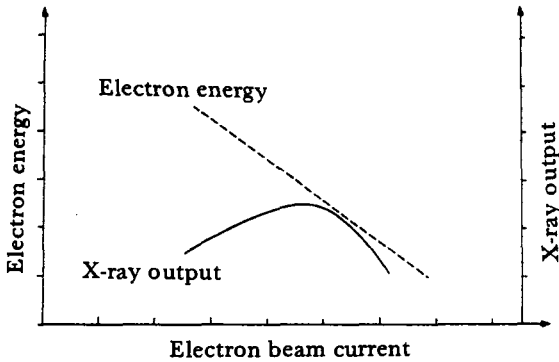


Fig. 6. Relationship between electron beam current, electron energy and x-ray output in a linear accelerator.

Ⅲ. 結 論

이상에서 記述한것을 總定理하면 1920 년대 이후 Winderow 와 Sloan and Lawrence 에 의해 하전입자 가속원리가 뒷받침 됐고 1940 년 이후 Wave Theory 가 定立되면서 Micro Wave generator 의 發明과 더불어 電子와 같은 가벼운 입자를 加速할 수 있는 accelerating wave guide 장치가 생겨 났으며 이해를 돕기위해 Travelling Wave Accelerator 와 Standing Wave Accelerator 로 구분하여 說明했으며 Electron Energy 와 Electron beam current 를 잘 조정하여 선형가속기의 효율을 높일수 있는 방법을 說明했다.