

엑스선의 발생

Reading Assignment : ch. 3.1, 3.3~3.6

소개

- 1) **X-선**: 의료에서 영상진단으로 가장 많이 쓰이는 방법 중에 하나임.
- 2) 인구 1000명당 약 650번의 x-선 검사가 매년 진행됨.
- 3) **X-선은 높은 에너지의 전자**가 **물질과 상호작용**할 때 발생됨.
- 4) 이 때 **전자의 운동에너지**는 상호작용에서 **전자기파에너지**(x-선)로 전환되어 방출됨.



X-ray of
Bertha Roentgen's
Hand



방사선의 역사 1

- 1895: Wilhelm Conrad Röntgen in Würzburg (Germany) discovers X-rays.
- 1895: First therapeutic attempt to treat a local relapse of breast carcinoma by Emil Grubbe (Chicago)
- 1896: Discovery of natural radioactivity from Uranium compound by Henri Becquerel in Paris
- 1896: First use of X-Rays for stomach cancer by Victor Despeignes (Lyon - France)
- 1896: Irradiation of a skin tumour in a 4-year-old by Léopold Freund (Vienna - Austria)
- 1897: Thomson identifies the electrons for creating X-Rays
- 1898: Discovery of radium by Pierre et Marie Curie in Paris (Becquerel's research assistant)
- 1899: First real proof of cure by X -Rays (two pictures taken at an interval of 30 years)
- 1901: First therapeutic use of radium for skin 'brachytherapy' by Dr Danlos (Hôpital Saint-Louis - Paris)
- 1903: First scientific description of the effect of radiotherapy on lymphoma nodes (Drs Senn et Pusey)
- 1904: First treaty on radiotherapy by Joseph Belot in Paris
- 1905: Discovery of the sensitivity of seminoma to X-Ray by Antoine Béchère in Paris
- 1913: Institut du Radium by Marie Curie-Sklodowska and Claudius Regaud
- 1915: The atomic model by Ernest Rutherford (Cambridge - UK) : radioactive active disintegration

방사선의 역사 2

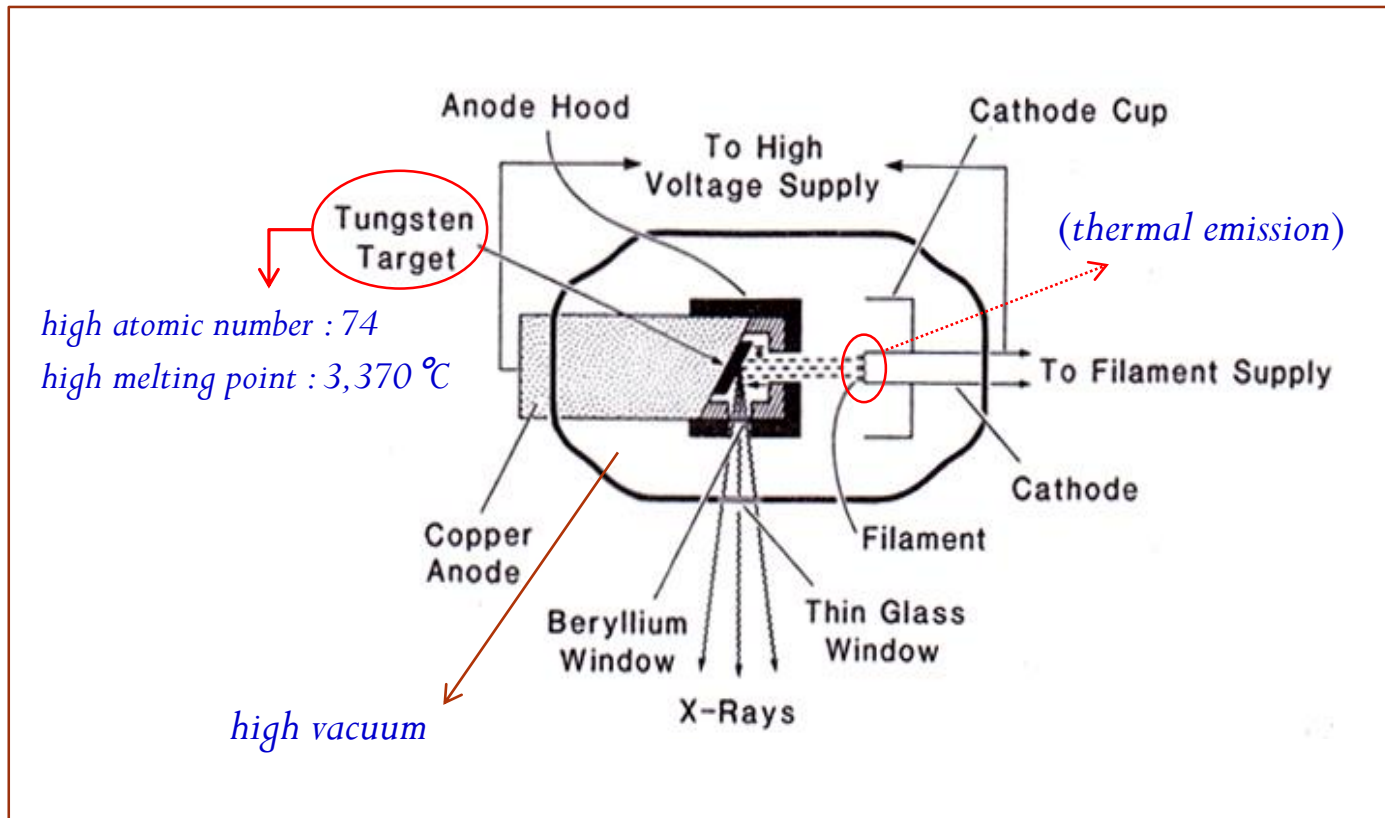
- 1920: Structuration of French Radiotherapy by Marie Curie-Sklodowska: Institut du Radium
- 1921: Foundation of the Institut du Cancer in Villejuif (Institut 'Gustave Roussy' - who was a pathologist) with the brachytherapy unit of Jean Pierquin, Georges Richard and Simone Laborde.
- 1930: Institut Curie works on fractionation (Claudius Regaud, Henri Coutard, Antoine Lacassagne).
- 1932: Discovery of neutrons by Sir James Chadwick (Cambridge UK)
- 1934: Death of Marie Curie from pernicious anaemia (myelodysplasia)
- 1934: Discovery of artificial radio-elements by Irène and Frédéric Joliot-Curie (Paris)
- 1934: Publication of 23% cure rate in head and neck cancer by X-Rays (Dr Henri Coutard - Institut Curie)
- 1936: François Baclesse (Institut Curie) begins his work on conservative treatment of breast cancer
- 1948: first ZOE nuclear reactor (Frédéric Joliot) : productions of artificial radioelements
- 1951: First cobalt installation (Victoria Hospital - London - Ontario)
- 1952: First linear accelerator (Henry S. Kaplan in Stanford - California)
- 1960: The 'Paris system' for brachytherapy with afterloading (Bernard Pierquin)
- 1973: Scanner invention par G.N. Hounsfield (UK)
- 1990: First use of scanner and computers for IMRT
- 2000: One in two cured cancer patients owes his/her recovery, at least partly to radiotherapy

X-선과 관련한 노벨상

1901	W.C.Roentgen	Physics	Discovery of x-ray
1914	M.von Laue	Physics	x-ray diffraction from crystal
1915	W.H.Bragg & W.L.Bragg	Physics	Crystal structure derived from x-ray diffraction
1917	C.G.Barkla	Physics	Characteristic radiation
1924	K.M.G.Siegbahn	Physics	x-ray spectroscopy
1927	A.H.Compton	Physics	Scattering of x-ray by electron
1936	P.Debye	Chemistry	Diffraction of x-ray & electron in gases
1962	M.Perutz & J.Kendrew	Chemistry	Structure of hemoglobin
1962	J.Watson, M.Wilkins & F.Crick	Medicine	Structure of DNA
1979	A.M.Cormack & G.N.Hounsfield	Medicine	CT
1981	K.M.Siegbahn	Physics	High resolution electron spectroscopy
1985	H.Hauptman & J.Karle	Chemistry	Direct methods to determine x-ray structure
1988	J.Deisenhofer, R.Huber & H.Michel	Chemistry	Structures of proteins that are crucial to photosynthesis

1. X-선관 (X-ray Tube)

- 엑스선관은 _____(Bremsstrahlung)와 _____(Characteristic radiation)이라는 메커니즘을 통해 x-선이 발생하는 관임.

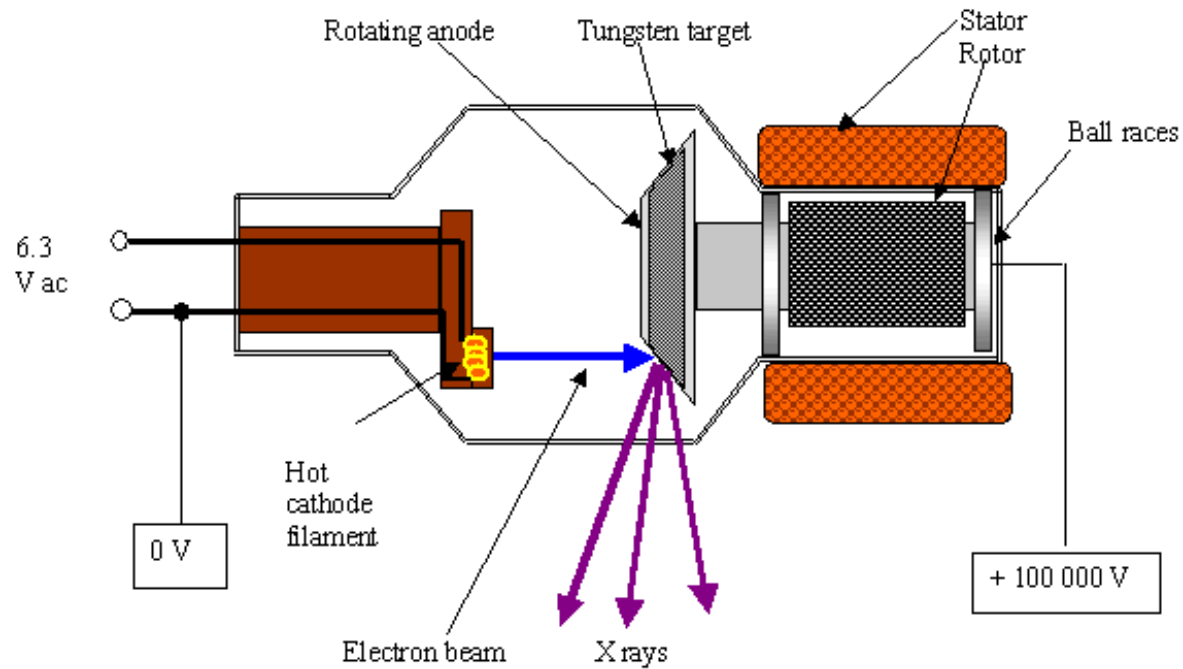


A conventional x-ray tube

X-선관의 주요 부품들

- 1) (Cathode): 전자 제공, 음의 전압 제공
- 2) (Anode) : 양의 전압, 가속전압 제공
- 3) 회전자/고정자 (Rotor/stator) : 전자가 충돌하는 target holder
- 4) 유리관 (Glass envelope): 진공으로 이루어진 관

X-선관의 개략도



주요 작동 조건:

- 1) 가속전압: 20 to 150 kV
- 2) 전류: 1 to 5 mA (**continuous operation**), 0.1 to 1.0 A (**short exposures**)

A. 양극 (Anode)

- 1) 양극은 _____ (**target**) 임.
- 2) 음극에 비해 양의 전압을 유지함. → **전자가 음극에서 양극으로** 향함.
- 3) 충돌시,
→ 전자가 충돌을 하고 _____(**scattering**)과 _____(**excitation**)를 통해 에너지를 잃음.
→ _____과 _____을 발생시킴.
- 4) 전자의 운동에너지 중 약 _____가 X-선으로 변함.

5) 낮은 x-선 발생효율 & 대부분의 에너지는) ____ (heat)로 전환됨.

➡ 열 발생이 X-선 발생장치의 주요 한계임.

➡ 높은 x-선 발생효율과 높은 녹는점이 표적(target)의 필수조건임.

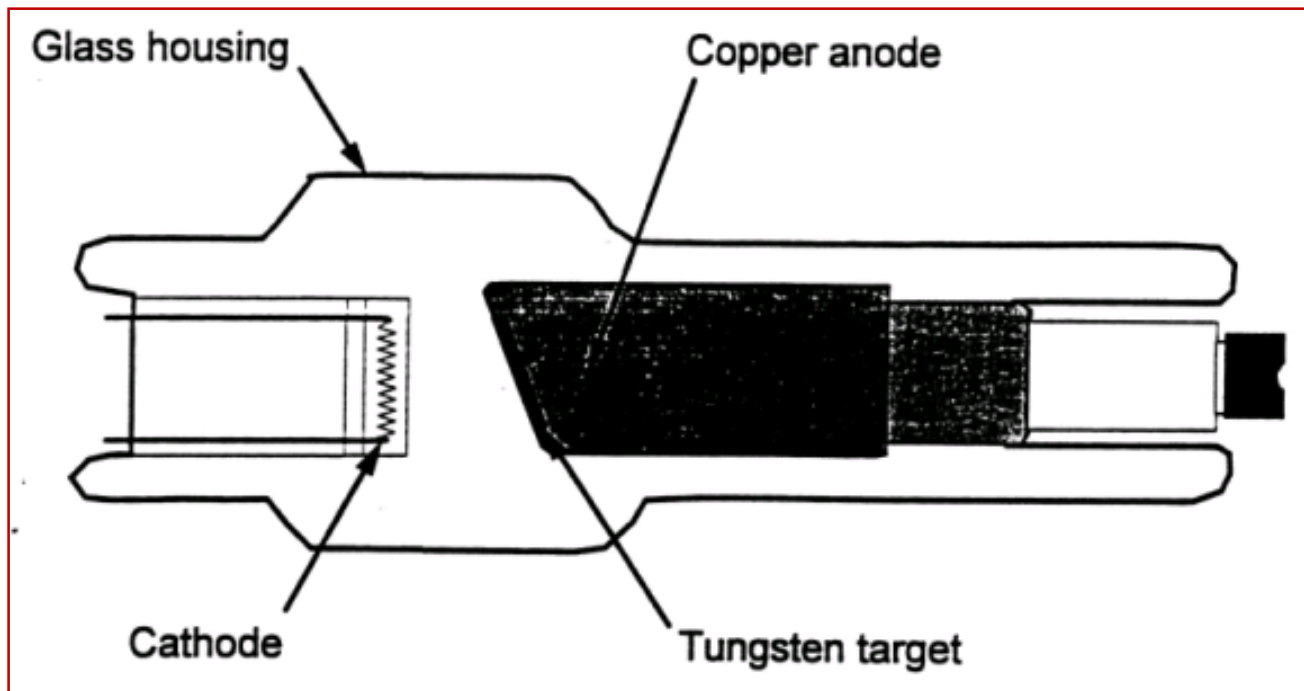
6) 표적물질로써 ____ (Tungsten)이 좋은 후보물질 중 하나임.

✓ 높은 방사선 발생효율

✓ 높은 녹는점(melting point)

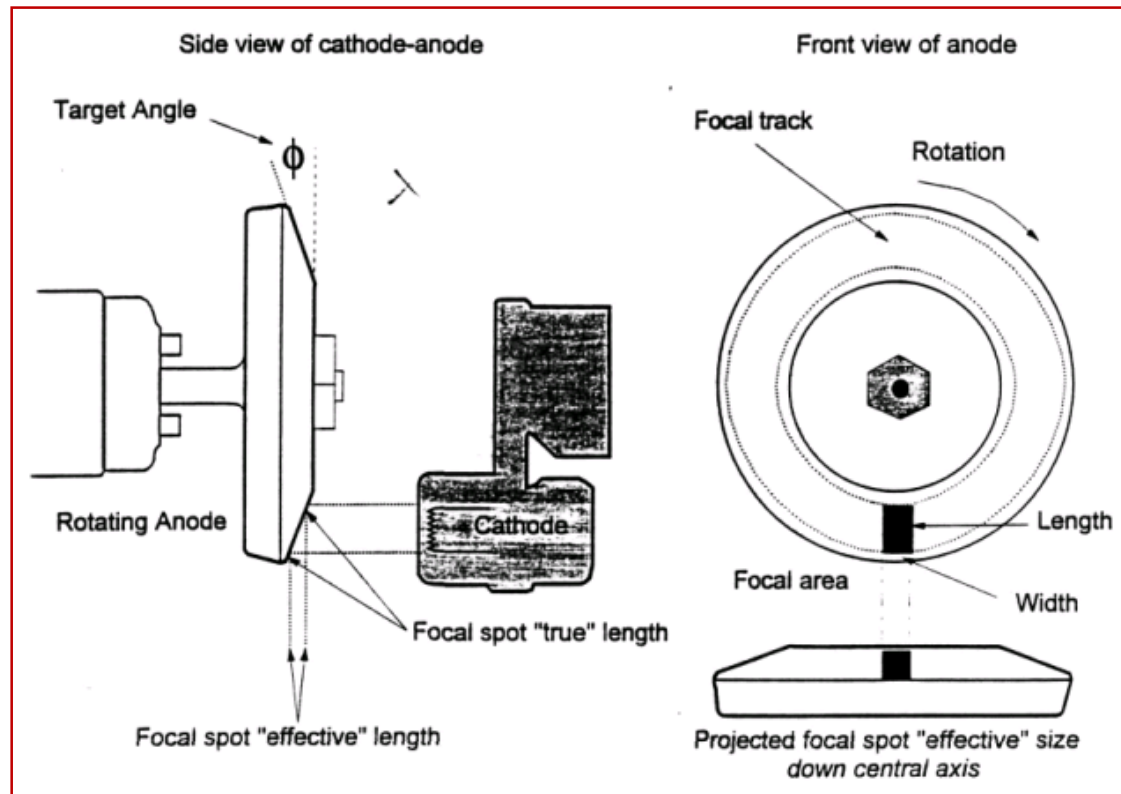
고정양극 vs. 회전양극 (Stationary anode vs. Rotating anode)

7) _____: 텅스텐 표적(tungsten target)과 copper block (heat sink)



8) _____

- ✓ 회전 가능한 텅스텐 디스크 사용
- ✓ 열 분산과 열 손실(heat loss or heat sink)을 야기시킴.

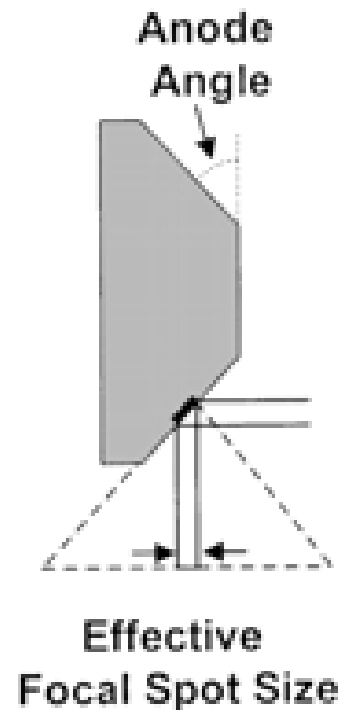


9) _____ (or target angle): 표적 표면 (target surface)과 전자선 방향의 수직에 대한 각도

10) _____ (Focal spot size): 전자에 의해 충돌된 양극의 면적

11) 유효초점크기

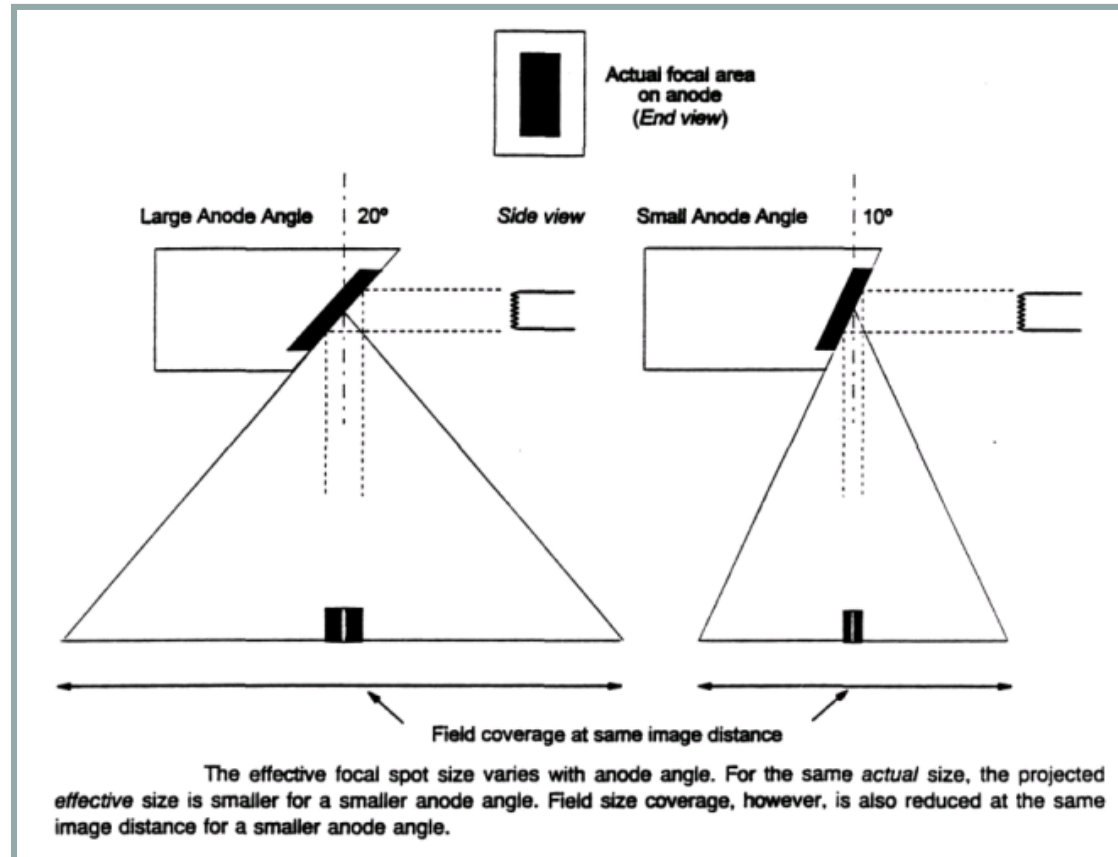
$$\text{effective focal spot size} = \text{focal spot size} \cdot \sin\theta$$



12) 표적면적의 이상적인 크기

- ✓ 분해능이 좋은 영상을 얻기 위해서는 작아야 함.
- ✓ 작은 초점일 경우 열이 많이 발생해서 전류와 조사시간에 제한이 발생하게 되어 x-선 발생장치의 기능에 한계가 생김.

Typical angles are: $\theta = 10$ to 20° .

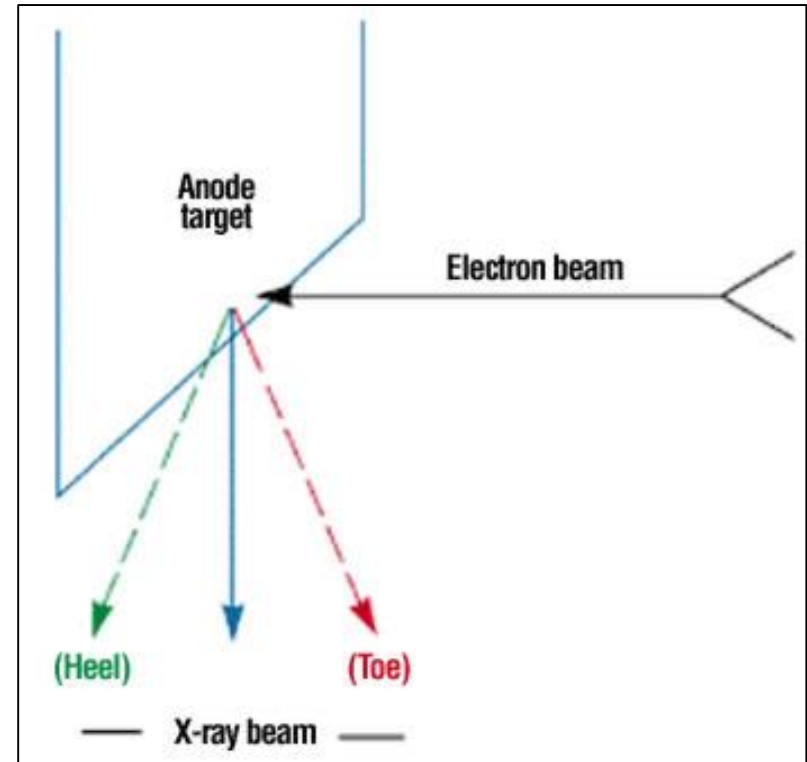


- 13) 양극각도는 **높은 해상도**를 위해서는 **작은 각도**(작은 초점)가 좋지만 **큰 영상**을 얻기 위해서는 **큰 양극각도**가 필요함.

뒤꿈치 효과 (Heel Effect)

14) 양극에 있는 표적에서 발생한
X-선은 양극에 의해 감소됨.

- ✓ X-선의 강도가 위치에 따라
다름.
- ✓ 빔 강도(intensity)는 _____에
서 _____방향으로 **감소함**.



15) 높은 _____(kV_p)은 전기장의 세기를 크게 하고 이는 전자의 운동 에너지를 높임.

16) 발생한 X-선은 전자의 운동방향과 직각방향임.

17) 발생한 X-선중 에너지가 낮은 X-선은.....

- ✓ 사람 몸속을 통과할 때 다 흡수되므로 유용한 정보를 제공하지 못함.
- ✓ 하지만, 환자에게 많은 양의 방사선피폭을 야기시킴.
- ✓ 그러므로 보통 알루미늄 또는 구리 흡수체를 이용하여 걸러 냄.

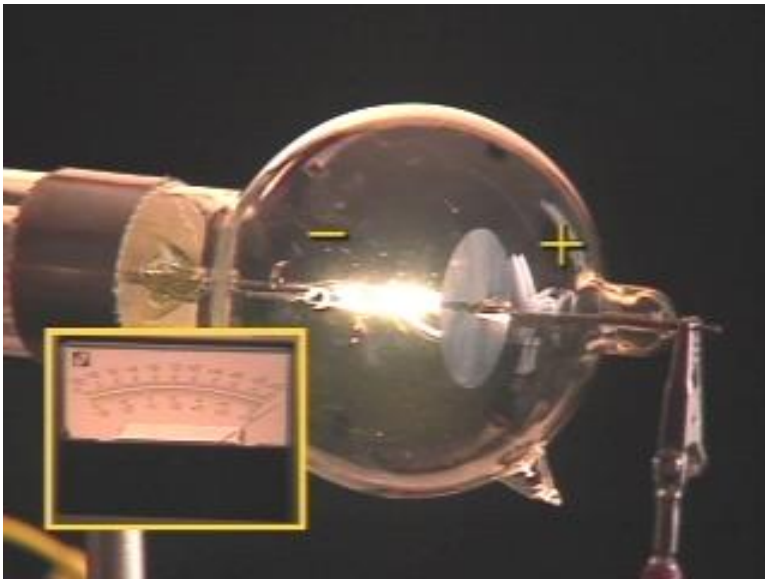
B. 음극 (Cathode)

1) _____(Filament)

- ✓ 낮은 전기저항을 갖는 나선모양의 텅스텐 전선으로 전자 방출을 위한 것임.
- ✓ 필라멘트 전류에 의해 가열됨 $I = V / R$. ($V \approx 10 \text{ V}$, $I \approx 3\text{-}6 \text{ A}$)
- ✓ _____(thermionic emission)에 의해 전자를 방출함.
- ✓ 방출된 열전자의 양은 _____(전류)에 의해 결정됨.
- ✓ 관전류(tube electron current)는 보통 필라멘트 전류의 5-10 배정도 작음.

2) _____은 음의 전압을 이용하여 전자를 집중(또는 한점에 모임) 시킴.

열전자 방출 (Thermionic Emission)



CATHODE HEATED UP TO AT LEAST 2,200 °C

2.&3. X-ray Circuit and Voltage Rectification

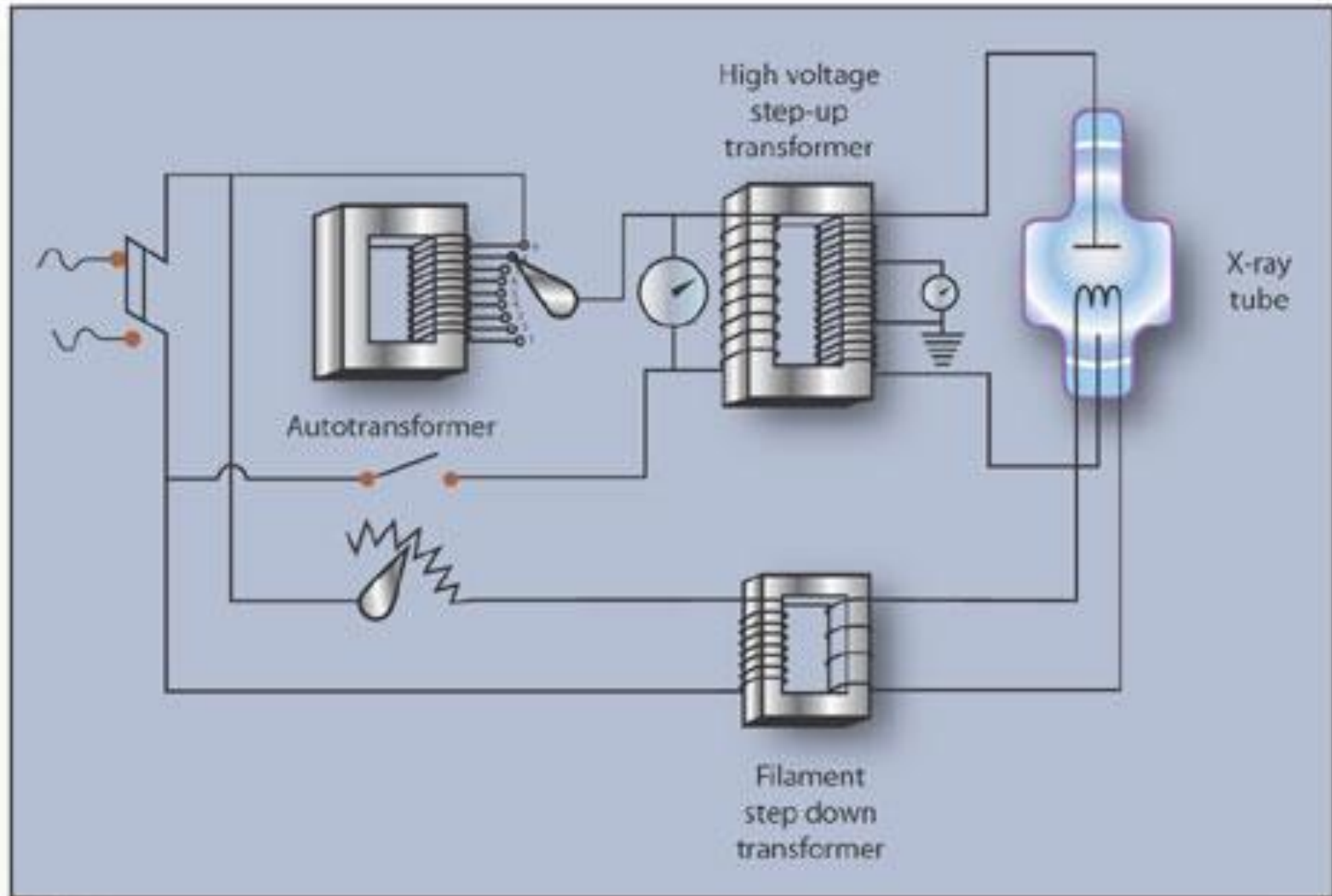
1) X-선 발생관에서 **전력이 필요한 부분**

- ✓ 열전자를 방출하는 **필라멘트 부분**
- ✓ 전자를 음극에서 양극으로 **가속하는 부분**
- ✓ 방사선 **조사량을 조절하는 부분**

2) 관련 회로

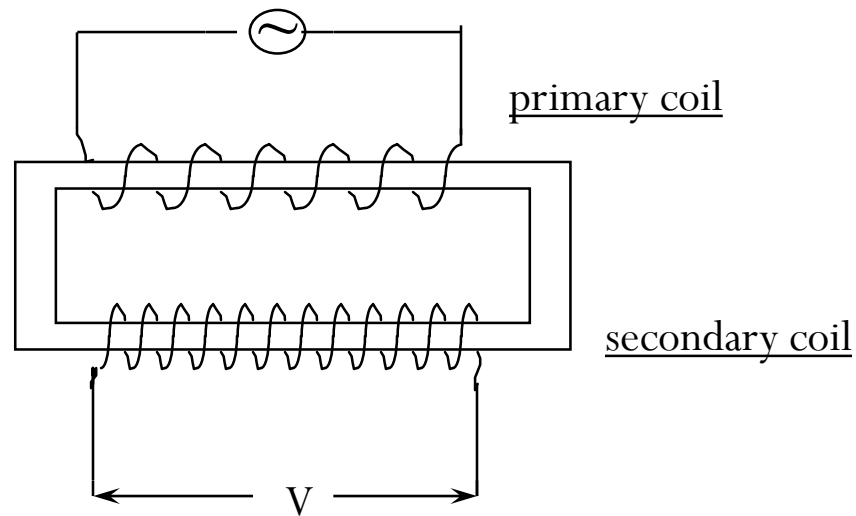
- ✓ 필라멘트 회로 (Filament circuit)
- ✓ 고전압 회로 (High-voltage circuit)
- ✓ 시간 회로 (Time circuit)

X-선 발생관에 있는 회로의 개략도



- 3) _____ (Step down transformers): **필라멘트용 저전압** (~ 10 V) 제공
- 4) _____ (Step up transformers): **관전류용 고전압** (~ 150, 000 V) 제공

$$V_p / V_s = N_p / N_s$$



- 5) **변압기의 원리:** _____ (변화하는 자기장은 전류를 유도함)을 이용.

전압 정류 (Voltage Rectification)

6) _____ (self-rectification)

- ✓ 전압주기의 절반만 양극의 전압이 양의 값을 갖게 함.
- ✓ 양극의 전압이 양의 값일 때만 관전류가 발생함.

7) 자기정류의 단점

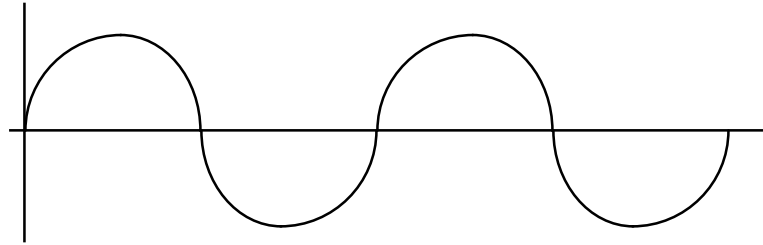
- ✓ 전압주기의 절반에 해당하는 시간은 X-선이 발생하지 않음.
- ✓ 따라서 출력 효율이 떨어짐.
- ✓ 양극이 음의 전압을 가질 경우에는 전자가 양극에서 음극으로 이동하게 되고 필라멘트와 충돌하는 경우에는 필라멘트를 손상시킬 수 있음.



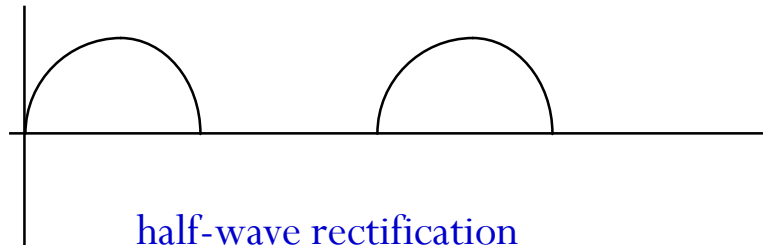
전압정류가 필요함 !!!

반파정류 및 전파정류

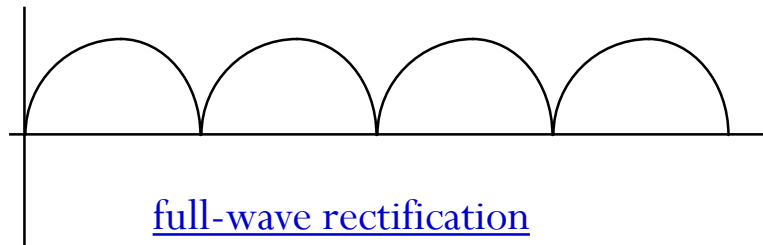
(Half-wave and full-wave rectification)



input wave form



half-wave rectification

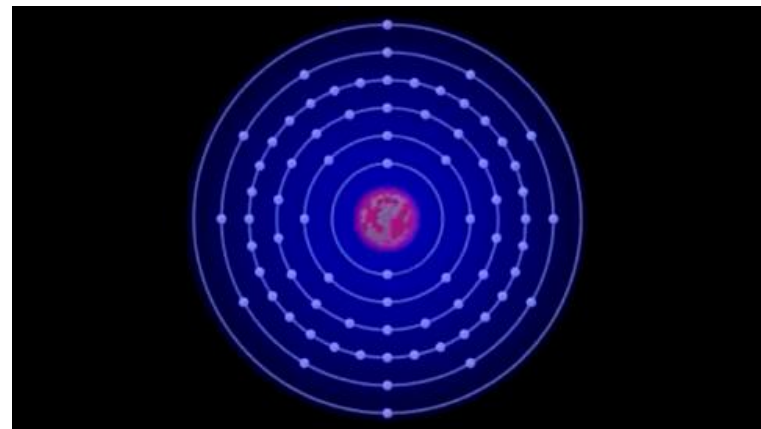
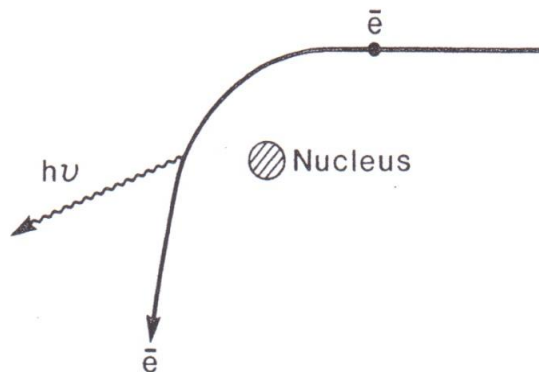


full-wave rectification

4. X-선 발생의 물리학

A. _____

- 1) 독일어로 "**breaking radiation**"을 의미함.
- 2) 고에너지 **전자와 원자핵간의 상호작용**에 의해 생김.
- 3) 원자핵 주변을 진행하는 **전자**는 Coulomb force에 의해 **진행방향이 편향**됨.
 - ✓ 이러한 편향은 **전자의 가속운동**을 야기시킴.
 - ✓ **전하를 띠고 있는 입자가 가속**을 하게 되면 _____하게 됨.



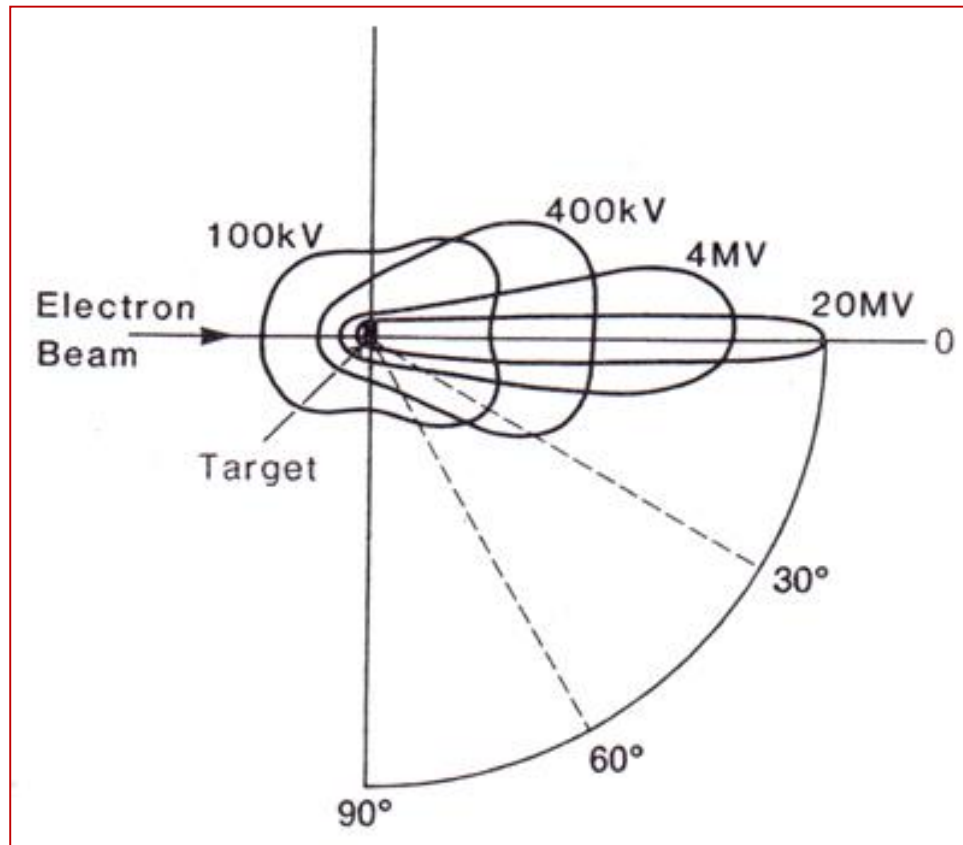
4) 전자가 완전히 멈추기 전에 **한번 또는 여러 번의 제동복사**가 발생할 수 있음.

➤ 결과적으로.....초기에 전자가 가지고 있던 에너지 부터 작은 양의 에너지까지 **다양한 에너지의 X-선이 발생할 수 있음.**

➤ 따라서, **제동복사에 의한 x-선 에너지**는 _____이 분포를 나타냄.

5) 제동복사에 의해 **발생된 X-선의 공간적 분포**

- ✓ 저 에너지 ($< 100 \text{ keV}$) X-선: _____ (all directions)
- ✓ 에너지가 커지면서 전자의 운동방향과 **같은 방향으로 X-선이 발생됨.**



X-선 발생의 효율

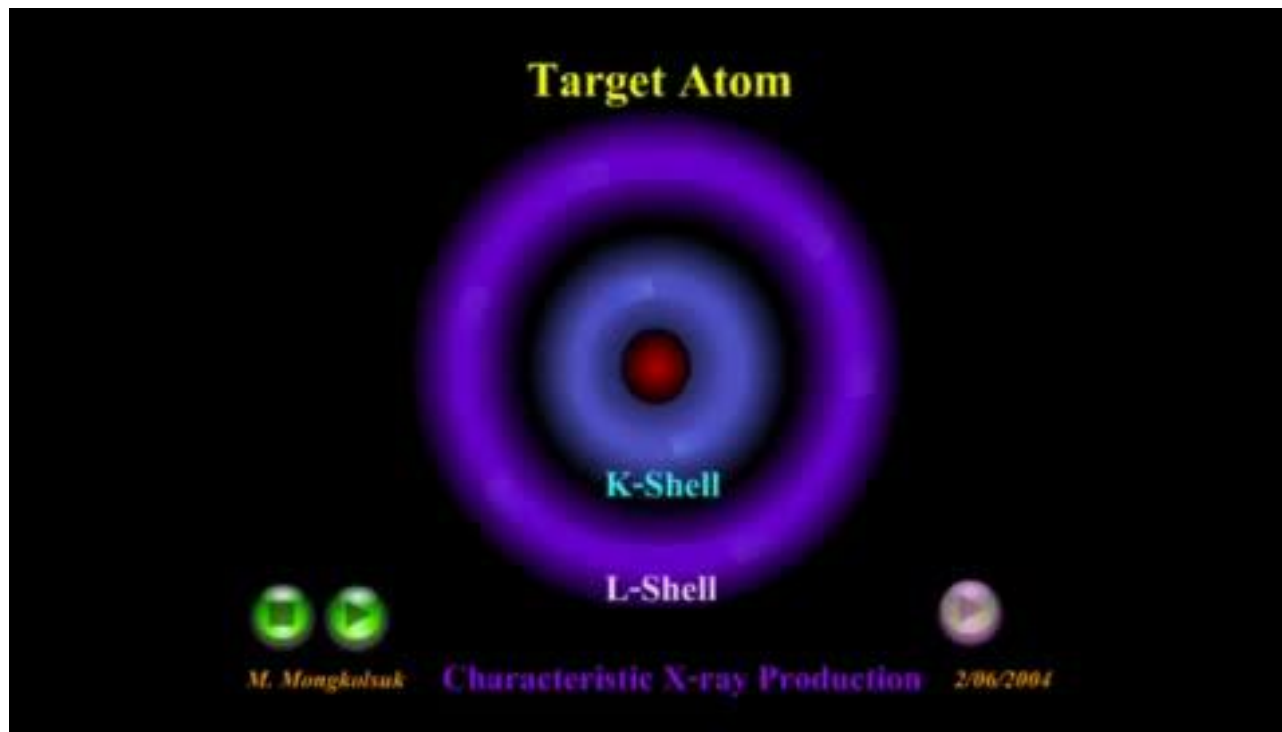
6) _____ : 전자에 의해 흡수된 에너지 대비 X-선으로 방출된 에너지의 비율

7) 효율은 표적물질의 _____ (Z) 와 _____ (V) 에 비례함.

$$\text{Efficiency} = 9 \times 10^{-10} ZV \quad (Z: \text{atomic number of target, } V: \text{tube voltage})$$

B. 특성 X-선 (Characteristic X-rays)

- 1) **입사전자**가 _____와 **충돌**하여 궤도전자가 방출될 때 일어나는 현상임.
- 2) 궤도전자의 방출 → **빈 궤도** → **외각전자가 채움** → **특성 x-선 발생**



3) 충돌 전후의 **입사전자 에너지 변화**

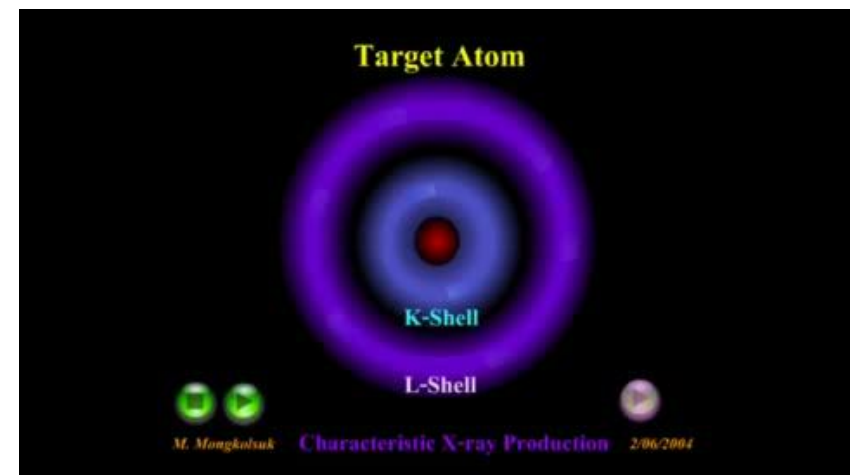
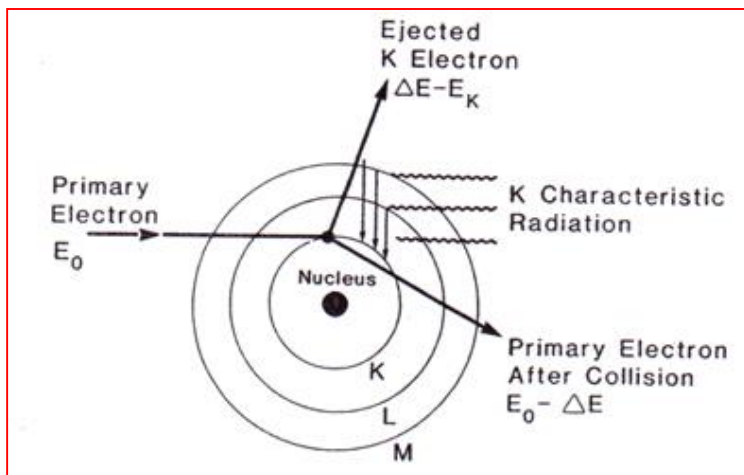
➔ 입사전자의 **초기 운동에너지**: E_0

➔ 입사전자로부터 궤도전자에 **전달된 에너지**: ΔE

➔ 입사전자는 **충돌 후** (산란된 후) **에너지**: $E_0 - \Delta E$

4) 충돌한 **궤도전자의 변화**

- ✓ 방출된 전자가 K각 전자일 때, 방출된 **전자의 에너지**는 $\Delta E - E_k$ (여기서, E_k 은 K각의 속박에너지)
- ✓ K각의 **빈 궤도**는 더 **외각에서 돌고 있는 전자에 의해 채워짐**.



5) 특성X-선은 _____ (discrete energy)를 방출함.

Series	Lines	Transition	Energy (keV)
K Series	$K\beta_2$	$N_{III} - K$	69.09
	$K\beta_1$	$M_{III} - K$	67.23
	$K\alpha_1$	$L_{III} - K$	59.31
	$K\alpha_2$	$L_{II} - K$	57.97
L Series	$L\gamma_1$	$N_{IV} - L_{II}$	11.28
	$L\beta_2$	$N_V - L_{III}$	9.96
	$L\beta_1$	$M_{IV} - L_{II}$	9.67
	$L\alpha_1$	$M_V - L_{III}$	8.40
	$L\alpha_2$	$M_{IV} - L_{III}$	8.33

6) X-선관에서 발생한 **X-선의 대부분은** _____이며 그 중 **일부가 특성 X-선임**.

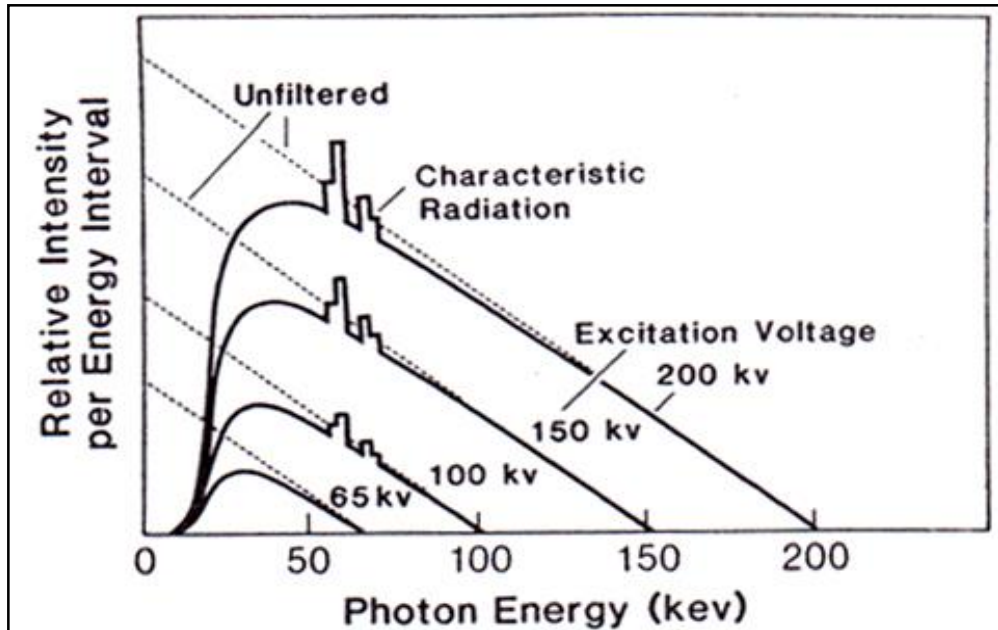
7) 궤도전자를 방출하기 위한 **문턱에너지** (threshold energy)를 critical absorption energy 라고 함.

Level	Element											
	H	C	O	Al	Ca	Cu	Sn	I	Ba	W	Pb	U
Z	1	6	8	13	20	29	50	53	56	74	82	92
K	0.0136	0.283	0.531	1.559	4.038	8.980	29.190	33.164	37.41	69.508	88.001	115.59
L				0.087	0.399	1.100	4.464	5.190	5.995	12.090	15.870	21.753

5. X-선 에너지 스펙트럼

- 1) X-선 발생장치에 의해 발생된 **X-선은 에너지 분포**를 가짐.
- 2) 입사 전자의 _____가 발생하는 x-선의 _____.
- 3) 대부분의 **저에너지 X-선**은 X선관에 의해 **흡수됨**.
- 4) X-선의 에너지 스펙트럼
 - ✓ _____ → **Continuous energy distribution**
 - ✓ _____ → **Discrete energies**

X-선 에너지 스펙트럼



Dotted curves : no filtration, Solid curves : filtration of 1mm Al

5) 필터가 없을 경우, 에너지 스펙트럼은 _____ 이 됨.

Kramer's equation $I_E = KZ(E_m - E)$

I_E : 에너지 E 를 갖는 X-선의 강도, E_m : 최고 에너지, Z :원자번호, K :상수

7) _____ (absorption in target, glass walls, thin Be window) :

0.5~1.0 mm Al filtration에 해당됨.

8) _____ : 방출된 X-선의 에너지분포를 조절하기 위해 **추가된 필터**

9) Added **filtration**:

- ✓ 주로 방출된 X-선의 저에너지 부분에 영향을 미침.
- ✓ **저에너지 부분을 흡수하여 에너지분포에서 고에너지 부분을 증가**시킴.
- ✓ 이런 경우 X-선이 _____ 되었다고 말함.

10) x-선 에너지 스펙트럼은 다음에 의해 결정됨.

✓ _____

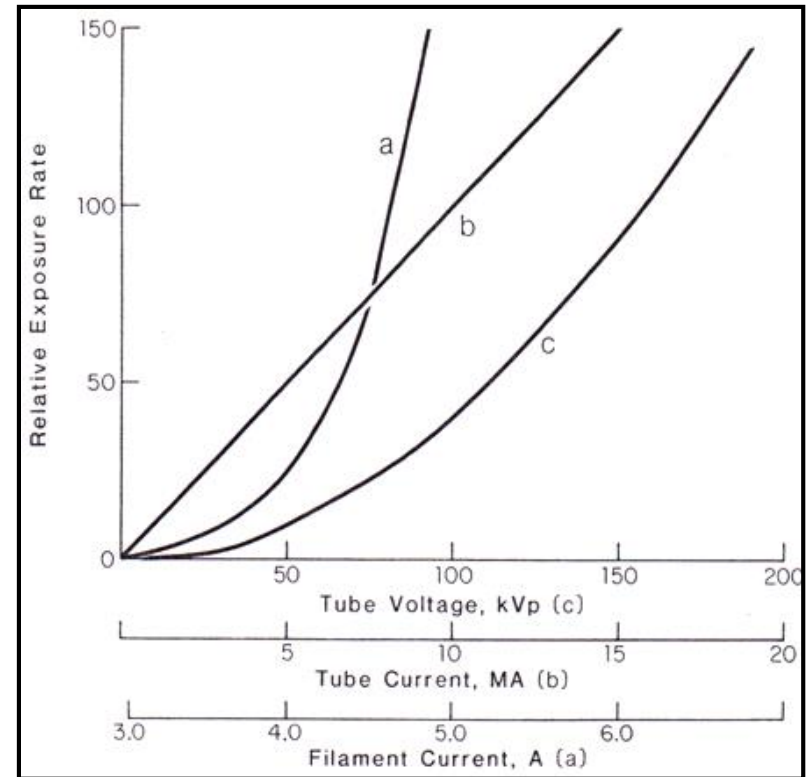
✓ 표적물질안에서 입사전자의 **multiple** _____

✓ _____ in the beam

11) X-선 에너지의 평균은 **최고에너지(kV_p)** 의 약 _____

6. 동작특성

- 1) X-선 **효율**은 **필라멘트 전류**에 가장 **민감함**.
- 2) 일정한 X-선 발생량을 만들기 위해서는 **필라멘트 전류의 항상성** 유지가 필수적임.
- 3) X-선 발생률은 **관전류와 선형적**으로 비례함.
- 4) X-선 발생률은 **관전압과 비선형적**으로 비례함.



The relationships between x-ray output, filament current, tube current, and tube voltage

CT의 원리: Back-projection

