

X선의 발견 및 이용

1. X선의 발견과 역사

2. 원자

- 1) 핵
- 2) 궤도 전자

3. 방사선

- 1) 입자방사선
- 2) 전자기방사선

4. 방사능

5. X선

6. X선 발생장치

- 1) X선관
- 2) 전원
- 3) 정류
- 4) 제어판

7. X선의 발생

- 1) 저지방사선
- 2) 특성방사선
- 3) X선 스펙트럼

8. X선속

- 1) X선속의 강도
- 2) X선속의 감쇠
- 3) 선감쇠계수
- 4) 반가층

9. X선속을 조절하는 요인

- 1) 관전압
- 2) 노출시간
- 3) 관전류
- 4) 여과
- 5) 시준
- 6) 거리

10. X선과 물질 간의 상호작용

- 1) 고전산란
- 2) 광전효과
- 3) 콤프톤산란

11. 방사선 측정 단위 및 측정

- 1) 방사선 측정 단위
- 2) 방사선 측정

제1장

X선의 발견 및 이용

1. X선의 발견과 역사

고에너지 음극선관을 이용하여 음극선의 성질을 연구하던 독일의 뢰트겐(Wilhelm Conrad Röntgen, 1845~1923)은 1895년 11월 8일, 두꺼운 흑색 마분지로 음극선관을 완전히 둘러싸고 방을 어둡게 한 후 높은 전압을 음극선관에 유입시켰을 때, 90cm 정도 떨어진 시안화백금바륨(barium platinocyanide)이 도포된 스크린(형광판)에서 형광이 발생하는 것을 관찰하였다. 그리고 음극선관과 형광판 사이에 여러 종류의 물체를 위치시켰을 때 형광의 밝기가 달라 이 광선의 투과 정도가 물체마다 다르다는 것을 알게 되었고 자신의 손을 넣어 골격 구조가 형광판에 나타나는 것을 확인하였다. 1895년 12월 22일에는 부인의 손을 촬영하여 최초의 X선사진을 획득하였다. 뢰트겐은 1895년 12월 28일 이 결과를 'Über eine neue Art von Strahlen (On a New Kind of Rays)'라는 제목의 논문에서 최초로 발표하였고 미지의 광선을 X선이라 명명하였다.

뢴트겐은 X선이 직선으로 진행되는 것을 관찰하였고, 이 광선이 자기장에 의해 반사 또는 굴절되지 않는다는 것을 알았으며, 이 광선이 흡수되고 이차방사선을 형성하며 공기 중에 산란됨을 발견하였다. 그 후 그는 상을 기록할 수 있는 영상판의 개발에 관심을 기울여 X선 흡수 정도가 다양한 여러 가지 물체의 상을 얻었다. 뢰트겐은 X선을 발견한 공로로 1901년 제1회 노벨물리학상을 수상하였으며, 육안으로 관찰할 수 없는 인체 내부를 영상으로 획득할 수 있게 함으로써 의료 분야의 혁명을 이루었다.

X선 발견이 발표된 직후에 독일의 치과 의사 발코프

(Otto Walkhoff)는 검은 종이와 고무로 싼 유리 사진판을 자신의 구강 내에 위치시킨 후 25분 동안 X선에 노출시켜 최초의 구내방사선사진을 촬영하였다. 같은 해에 뉴욕에서 물리학자 모튼(W.J. Morton)은 미국에서 최초로 두개골을 치과 방사선사진으로 촬영하였고, 미국 뉴올리언스의 치과 의사였던 켈(Edmund Kells)은 최초로 환자의 구내방사선사진을 촬영하였다. 그는 환자를 촬영하기 전에 적당한 노출량을 정하기 위하여 자신의 손에 방사선을 노출시켰는데, 수년 동안 거의 매일 방사선에 손을 노출시켜 손에 암이 발생하고 계속 재발하여 손가락, 손, 결국에는 팔을 잘라야 했다. 보스턴의 치과 의사였던 롤린스(William H. Rollins)는 최초의 치과용 X선 유닛을 개발했다. 초기 치과 의사들은 촬영 중 뜨거운 X선관에 의해 손에 화상을 자주 입었고, 이를 계기로 금속관으로 X선관을 싼 제품을 출시하게 되었다. 이후 방사선방어에 대한 관심을 가지게 되었으며, 방사선의 위험성에 대한 논문이 발표되었다. 뉴욕의 치과 의사였던 베르트(Frank Van Woert)는 구내방사선촬영에 처음으로 필름을 이용하였다. 미국 인디애나대학의 교수였던 레이퍼(Howard Riley Raper)는 처음으로 치과대학에 방사선학과정을 개설하였고, 우리나라에서는 서울대학교의 안형규 교수가 1958년 치과방사선과를 개설하였다.

2. 원자(Atom)

모든 물질은 원자로 구성되어 있으며, 원자는 물질의 화학적 성질을 갖고 있는 최소의 기본 단위로서 그 의미

는 분할할 수 없다는 뜻이다. 한편 원소(element)는 ‘원자번호가 동일한 원자의 집합으로 된 물질종’이다. 자연 상태에서 발견되는 원소는 92가지로 알려져 있고 인공적으로 만들어 낸 원소를 포함하면 100종 이상의 원소가 발견되었는데, 그 중 수소가 가장 간단하고 가볍다.

X선의 발생 및 X선과 물질 간의 상호작용 등은 아원자 수준(subatomic level)에서 나타나므로 원자구조에 대한 이해가 필요하다. X선의 기전을 설명하기에는 1913년 닐스 보어(Niels Bohr)가 제안한 원자모형이 적합하다. 보어의 원자모형은 원자를 축소된 태양계 시스템으로 간주한다. 즉 중앙에는 태양과 같은 원자핵이 있고 주위에는 태양을 중심으로 공전하는 행성과 같은 전자들이 고속으로 핵 주위를 회전한다(그림 1-1). 원자의 직경은 핵 직경의 약 100,000배로 원자의 대부분은 빈 공간으로 이루어져 있다. 원자의 종류에 따라 핵의 구성이나 전자의 수와 배열이 서로 다르며 이에 따라 원자는 각기 고유한 특성을 나타낸다.

1) 핵(Nucleus)

수소 원자를 제외한 모든 원자의 핵은 주로 양성자(proton)와 중성자(neutron)로 이루어져 있으며 이러한 양성자와 중성자를 핵자(nucleon)라 한다. 가장 간단한

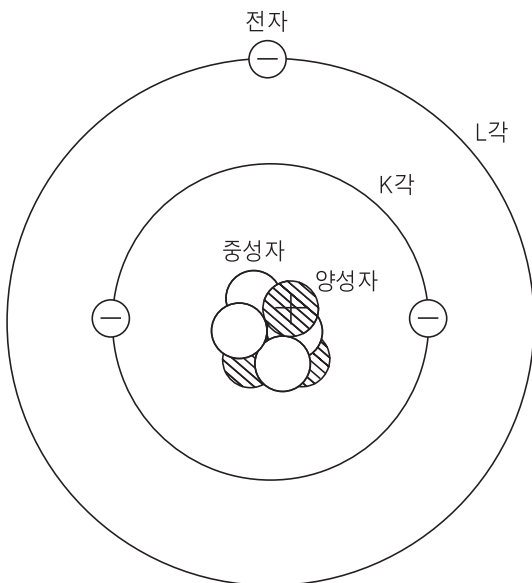


그림 1-1. 리튬의 원자구조.

수소 원자의 핵은 중성자가 없이 하나의 양성자로 구성되어 있으며, 가벼운 원소들은 양성자와 중성자의 수가 거의 같지만 무거운 원소일수록 중성자가 양성자보다 많다. 양성자는 전기적으로 양전하를 띠고 중성자는 전하를 띠고 있지 않다. 따라서 핵은 양전하를 띠게 되며 전하의 크기는 양성자의 개수로 표현한다.

원자는 안정된 상태에서 전기적으로 중성이므로 양전하를 띤 양성자의 수와 음전하를 띤 전자의 수는 동일하다. 양전하를 띤 양성자 간의 반발력보다 핵력이 크기 때문에 핵자들이 흩어지지 않고 핵이 온전히 존재할 수 있다. 양성자와 중성자의 질량은 서로 비슷하며 전자 질량의 약 1,840배로 원자 질량의 대부분을 차지한다.

원자핵 내에 존재하는 양성자의 수를 ‘원자번호’라 하고 기호 Z 로 나타내며 각 원자마다 고유의 원자번호가 있어 원자의 화학적, 물리적 성질을 결정한다. 원자핵 내에 존재하는 양성자와 중성자를 합한 개수를 ‘질량수’라 하며 기호 A 로 나타낸다. Z 와 A 를 표시할 때 일반적으로 Z 는 원자의 화학기호의 좌측 하부에 표시하며 A 는 좌측 상부에 표시한다.

2개의 원소가 원자번호(Z)는 같지만 질량수(A)가 다른 경우, 즉 양성자의 수는 동일하지만 중성자의 수가 다른 경우 그들을 동위원소(isotope)라 하는데, 동위원소들은 화학적 성질은 같으나 물리적 성질은 다르다.



X: 원소 기호, A: 원자량, Z: 원자번호

2) 궤도 전자(Orbital electron)

음전하를 띤 전자는 핵 주위를 거의 빛과 같은 속도로 회전하고 있다. 이때 전자는 핵과 일정한 거리를 유지하고 있는 궤도(전자각) 내에 존재하게 되며 전자각의 명칭은 원자핵에서 가까운 것부터 차례대로 K각, L각, M각, N각, O각, P각, Q각이라 한다. 현재까지 8개의 전자각을 갖는 원자는 없는 것으로 알려져 있다. 전자가 전자각에 존재할 수 있는 이유는 서로 반대 전하를 띤 핵-전자 사이의 견인력과 빠른 속도로 회전하고 있는 전자의 원심력이 서로 균형을 이루고 있기 때문이다. 전자가 궤

도(전자각)를 이탈하지 않고 전자각 내에 존재할 수 있게 만들어 주는 에너지를 전자의 '결합에너지'라고 한다. 한편 하나의 전자를 궤도에서 이탈시키는 데 필요한 에너지를 '이온화에너지'라고 하며 이는 전자의 결합에너지와 동일하다. 결합에너지는 원자에 따라 다르고 동일한 원자 내에서도 전자각마다 다르다. 원자의 전자각마다 고유의 결합에너지를 가지며 이 결합에너지는 원자번호, 즉 핵의 양전하의 크기가 클수록, 그리고 핵에 가깝게 있는 전자각일수록 크다(그림 1-2).

3. 방사선(Radiation)

방사선이란 에너지가 한 곳에서 다른 곳으로 이동하는 현상, 또는 그때의 이동하는 에너지를 의미한다.

방사선 중 피사체를 구성하는 원자의 궤도전자를 이탈시킬 수 있을 정도의 고에너지 방사선을 전리방사선(이온화방사선, ionizing radiation)이라 하며 알파선, 베타선, 중성자선, 우주선, X선, 감마선 및 자외선 중 에너지가 높은 일부 자외선이 전리방사선에 포함된다. 반면 전리를 일으킬 수 없는 정도의 저에너지 방사선을 비전리방사선(non-ionizing radiation)이라 하며 대부분 영역의 자외선, 가시광선, 적외선, 전자파, 라디오파 등이 포함된다.

한편 방사선은 입자방사선과 전자기방사선으로 분류한다.

1) 입자방사선(Particulate or corpuscular radiation)

충분한 운동에너지를 지니고 이동하는 원자핵이나 아원자입자(양성자, 중성자, 전자 등)로 구성되어 있으며 매우 작지만 질량을 갖고 있다. 입자방사선에는 알파선, 베타선 및 중성자선 등이 있으며 이들은 주로 방사성붕괴 시 방출된다. 원자를 전리(이온화)시키는 능력은 입자의 질량, 속도 및 전하에 의해 결정된다. 입자방사선이 물질을 통과하면서 주위의 원자를 전리시킬 때 운동에너지를 잃게 된다. 입자의 물리적 크기 및 전하가 클수록 그리고 속도가 낮을수록 더 많은 선에너지전달(linear energy transfer)이 일어난다.

(1) 알파선(α ray)

알파선은 2개의 양성자와 2개의 중성자로 구성되어 있는 알파 입자의 흐름을 의미하며 이는 헬륨의 원자핵과 동일한 구성을 지닌다. 알파선은 주로 방사성물질의 붕괴 과정에서 방출되는데 +2가의 전하를 띠고 질량이 크기 때문에 투과하는 물질의 원자들을 쉽게 전리시킨다. 따라서 알파선은 에너지를 쉽게 잃게 되어 인체에서는 수 μm 정도, 공기 중에서는 수 cm 정도를 투과할 수 있을 뿐이므로 보통 종이 1장으로라도 차단시킬 수 있다. 그러므로 직접 섭취하거나 흡입하지 않는 한 일반적으로 위험성이 적지만 일단 체내에 흡수되면 매우 위험하다. 알파선이 물질과의 상호작용으로 2개의 전자를 얻으면 중성인 헬륨 원자가 된다.

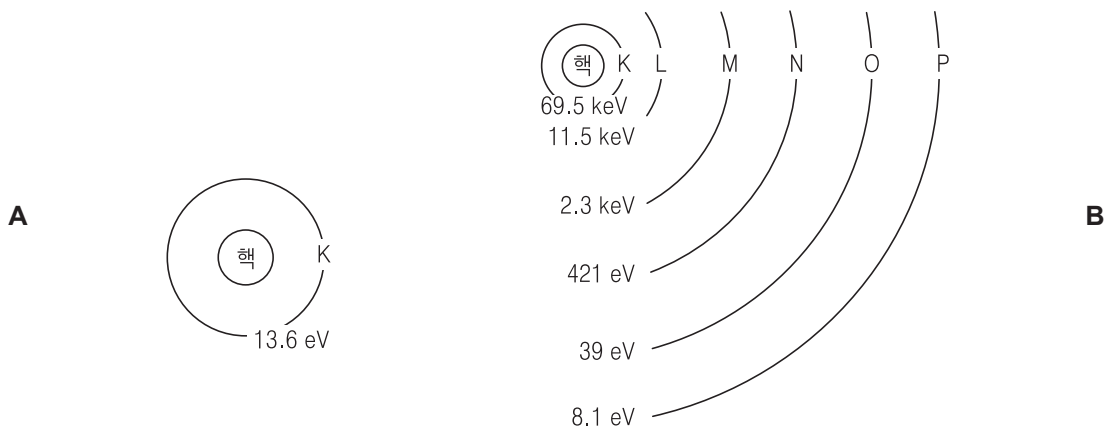


그림 1-2. A. 수소 원자 궤도전자의 결합에너지. B. 텅스텐 원자의 K각에서 P각까지의 궤도전자 및 결합에너지.

(2) 베타선(β ray)

베타선과 음극선(cathode ray)은 고속으로 운동하고 있는 전자의 흐름을 의미하는데, 이들의 발생 기전이 다르다. 베타선은 방사성동위원소의 방사성붕괴 과정에서 방출되는 고에너지, 즉 고속의 전자 또는 양전자 입자이고, 음극선은 음극선관 또는 X선관과 같이 인위적으로 만든 장치에서 발생한다. 베타선은 전자의 흐름이므로 전기적으로 음전하를 띠지만(negatron, β^-), 간혹 양전자의 흐름으로 양전하를 띠기도 한다(positron, β^+). 그러나 양전자(positron)는 매우 불안정하여 순간적으로만 존재한다. 베타선은 알파선에 비해 물질을 좀 더 투과할 수 있는데, 이는 베타선이 -1 가의 음전하를 띠고 비교적 가벼우므로 물질과의 상호작용을 할 수 있는 확률이 낮기 때문이다. 공기 중에서는 $10\sim 1,000\text{cm}$ 정도를, 연조직에서는 $1\sim 2\text{cm}$ 정도를 투과할 수 있다.

2) 전자기방사선

(Electromagnetic radiation)

전자기방사선은 전장과 자장의 결합 상태로 에너지가 공간을 이동하는 것이며, 전하를 띤 입자의 속도가 변할 때 발생된다. 감마선(γ ray), X선, 자외선, 가시광선, 적외선, 극초단파 및 라디오파 등이 전자기방사선의 예이다(그림 1-3). 모든 전자기방사선은 가시광선과 같은 속도(약 30만 km/초)로 직진하며 전장이나 자장에 영향을 받지 않는다. 그러나 개개의 전자기방사선은 고유의 물리적 특성을 갖고 있는데 이것은 전자기방사선이 가지고 있는 에너지가 서로 다르기 때문이다. 전자기방사선의 특성은 파동설 또는 입자설에 의하여 설명된다.

(1) 파동설(Wave theory)

파동설에 의하면 전자기방사선은 물결처럼 사인(sine) 곡선을 그리며 전파한다. 이러한 파는 진동하는 전기장 및 자기장에 대하여 직각 방향으로 진행한다(그림 1-4). 파동설은 방사선을 묶음으로 간주하여 설명할 때 유용하며 굴절, 반사, 회절, 간섭, 편광 등의 현상을 설명하는데 유용하다. 모든 전자기방사선은 진공상태에서 빛과 같은 속도로 진행하나 파장과 주파수는 방사선의 종류에 따라 다르다. 파장(λ)은 하나의 파동에서 정점과 정점 또는 골과 골 사이의 거리를 의미하고(그림 1-5), 주파수(진동수, ν)는 단위시간 동안 파동이 진동하는 수를 나타내며 단위는 hertz($1\text{ hertz} = 1\text{ cycle/second}$)이다. 파장과 주파수의 관계는 다음과 같다.

$$\lambda \times \nu = c = 3 \times 10^8 \text{ m/sec}$$

$\lambda(\text{m})$: 파장, $\nu(\text{hertz})$: 주파수, $c(\text{m/sec})$: 광속도

(2) 입자설(양자설, Quantum theory)

입자설에 의하면 전자기방사선은 광자(photon) 또는 양자(quantum)의 흐름으로 이동한다. 광자라 함은 전하나 질량이 없는 일단의 에너지를 말하는데, 각 광자는 빛의 속도로 움직이며 일정량의 에너지를 갖고 있다. 입자설은 방사선과 원자 간의 상호작용, 광전효과, X선의 발생 등을 설명할 때 유용하다. 광자에너지의 단위는 eV(electron volt)이며 1eV는 1volt의 전위차에 의해 가속되는 전자의 에너지의 양을 의미한다. 광자에너지와 파장 간의 관계는 다음과 같다. 참고로 가시광선의 광자에너지는 약 $1.8\sim 3.6\text{eV}$ 이며, X선의 광자에너지는 1keV보다 크다.

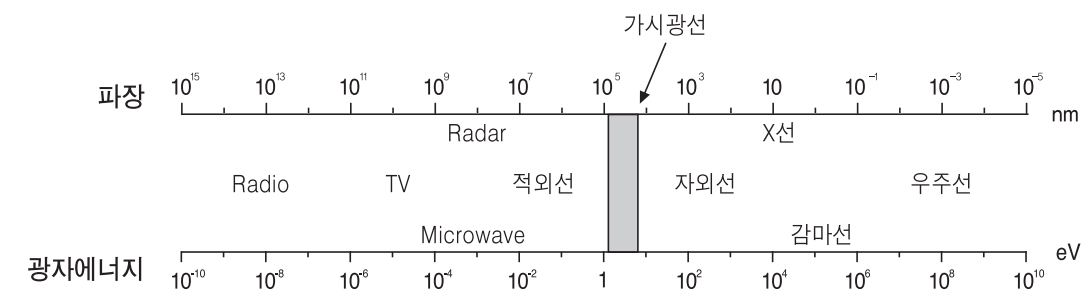


그림 1-3. 파장 및 광자에너지에 따른 전자기방사선의 종류.

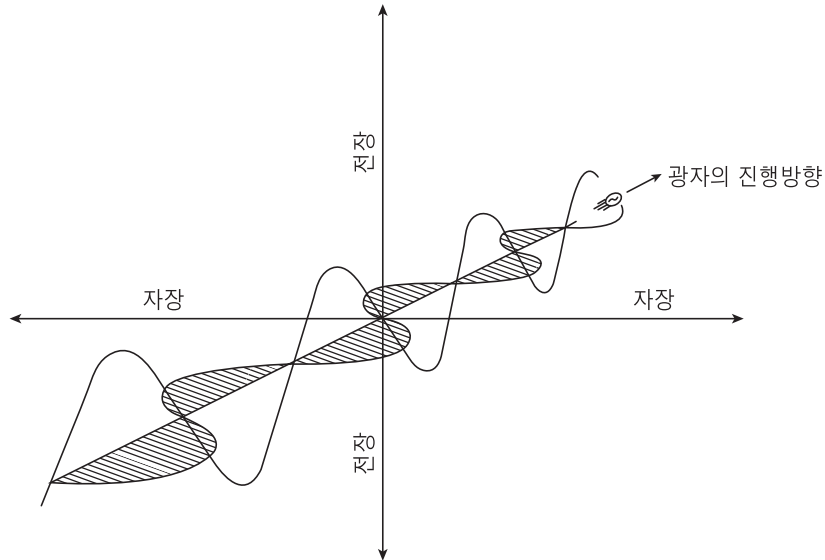


그림 1-4. 전장과 자장의 결합 상태로 이동하는 전자기방사선.

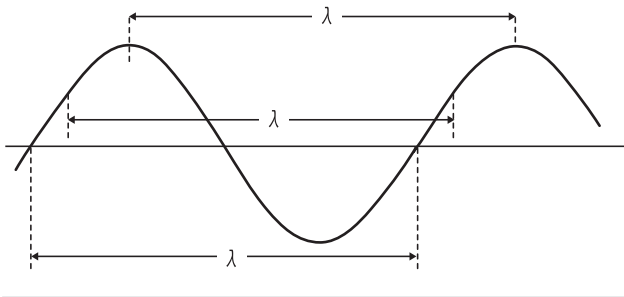


그림 1-5. 전자기방사선의 파장(λ).

$$E = h \times \nu = h \times c/\lambda = 1.24/\lambda$$

$E(\text{keV})$: 광자에너지, $\lambda(\text{nm})$: 파장, h : Planck 상수 ($4.136 \times 10^{-18} \text{keV} \cdot \text{s}$ 또는 $6.626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$)

4. 방사능(Radioactivity)

흔히 방사선과 방사능을 혼동하는 경우가 있다. 방사선은 방사성물질 또는 X선관에서 생성되어 방출되는 에너지의 형태로 알파선, 베타선, 감마선, 중성자선, X선 등을 포함하며, 방사능(radioactivity)은 방사성물질이 방사성붕괴에 의하여 방사선을 방출할 수 있는 능력, 이와 같은 현상 또는 이때 방출되는 방사선의 양을 의미한다.

X선이 발견된 직후인 1896년 2월 24일 베크렐(A.H. Becquerel)이 우라늄 화합물에서 자연방사선이 방출되는 현상을 최초로 발견하였고, 이후 퀴리부인(Marie S. Curie)이 우라늄 외에 다른 방사성물질을 찾는 실험을 하여 폴로늄(Po, polonium)과 라듐(radium)이 방사능을 가진 물질이라는 것을 발표하였는데, 이때부터 방사능이라는 용어가 사용되기 시작하였다. 방사능의 국제(SI) 단위인 Becquerel(Bq)과 과거 단위인 Curie(Ci)는 이들의 이름을 따서 만들어졌다.

대부분 원자의 핵은 안정된 상태로 존재한다. 핵의 중성자와 양성자 간의 수적 균형이 핵의 안정성에 기여한다. 중성자가 너무 적거나 너무 많은 동위원소는 불안정하여 안정된 상태가 되려 하는데, 이러한 변화 과정에서 입자 또는 전자기파의 형태로 에너지를 방출하는 방사성붕괴(radioactive decay 또는 disintegration)가 일어난다. 동위원소 중에서 방사성붕괴를 일으키는 원소를 방사성동위원소(radioactive isotope 또는 radioisotope)라고 하며 이와 같이 방사능을 가지는 핵종을 방사성핵종(radionuclide)이라고 한다.

여기서 핵종(nuclide)이란, 원자핵의 양성자 및 중성자의 수에 따라 분류하는 방식을 의미하는데, 예를 들어 질량수가 동일한 핵종, 양성자수가 다르고 중성자수가 동일

한 핵종, 중성자수가 다르고 양성자수가 동일한 핵종 등과 같이 표현할 수 있다.

방사성동위원소는 자연적으로 발생할 수 있으나 대부분 인위적으로 만들어지며, 방사성동위원소가 안정된 상태로 붕괴되는 과정에는 기본적으로 알파(α) 붕괴, 베타(β) 붕괴, 감마(γ) 붕괴가 있다.

방사성물질의 수명은 반감기(half life)로 표현되는데, 이것은 처음에 존재한 방사성동위원소의 원자수가 방사성붕괴에 의해 본래의 절반이 될 때까지 소요되는 시간을 의미한다. 즉, 어떤 방사성물질의 양이 1/2까지 감소되는데 소요되는 시간이다. 달리 말하면, 방사능이 절반으로 감소할 때까지 소요되는 시간이라고도 할 수 있다. 방출되는 에너지는 알파(α)선, 베타(β)선, 감마(γ)선 등의 방사선이다.

5. X선(X-ray)

X선은 전자기방사선의 한 종류로서 고속의 전자나 미립자가 어떠한 형태의 물질과 충돌하여 갑자기 감속되었을 때 발생된다. 진단용 방사선 영역에서 사용되는 X선의 파장은 약 0.1~0.001nm이다. X선과 가시광선의 동일한 특징은 다음과 같다.

- ① 직진한다.
- ② 초당 약 30만 km를 전파한다(2.998×10^8 m/s).
- ③ 전장이나 자장에 의해 굴절되지 않는다.
- ④ X선필름에 대한 감광작용이 있다.
- ⑤ 가시광선과 유사한 방법으로 물체의 음영을 투사한다.

반면 가시광선과 다른 특징은 다음과 같다.

- ① 눈에 보이지 않는다.
- ② 파장이 극히 짧아 물질을 투과할 수 있다.
- ③ 특정한 화학물질과 작용하여 형광을 발생시킬 수 있다.
- ④ 원자를 전리(이온화)시킬 수 있다.

6. X선 발생장치(X-ray machine)

X선관두(tube head) 내에 X선관(X-ray tube)과 변압기를 포함한 전원공급장치가 들어 있다. X선관은 X선을 발생시키며 변압기는 X선 발생에 적절한 전원을 공급하는 역할을 한다. X선관두 내에는 X선관에서 발생한 열을 효과적으로 방출하기 위하여 절연유(insulating oil)를 채워 넣으며, 방사선영상의 질을 향상시키기 위해 X선관을 X선관두 뒤쪽에 위치시킨다. 제어판(control panel)은 X선의 노출시간과 에너지 등을 조절한다.

1) X선관(X-ray tube)

현재 사용되고 있는 X선관은 1913년 Coolidge가 최초로 고안하여 'Coolidge tube' 또는 'hot cathode tube'라고도 한다. X선관은 기본적으로 음극(cathode)과 양극(anode)으로 구성되어 있고, 이것이 용융점이 높고 X선 흡수가 낮은 유리로 둘러싸여 금속으로 만들어진 X선관두 내에 위치한다(그림 1-6). X선관의 내부는 진공상태로 되어 있는데 이는 전자의 이동 속도를 감소시키지 않도록 하여 효율적으로 X선을 발생시키고, 필라멘트의 산화를 방지하여 X선관의 수명을 연장시키기 위한 것이다. 만약 X선관의 내부에 공기나 기체가 존재하면 음극에서 발생한 전자가 양극으로 이동하는 동안 기체분자와 충돌하여 조절이 불가능한 이차전자가 발생되므로 X선관을 흐르는 전류가 불안정해질 수 있다.

(1) 음극(Cathode)

음극은 집속컵(focusing cup) 내에 나선형의 필라멘트가 붙어 있는 구조이다(그림 1-7). X선 발생을 위하여 양극의 텅스텐 타겟에 충돌할 전자를 형성하는 역할을 한다.

① 필라멘트(Filament)

필라멘트는 X선 발생에 필요한 전자의 공급원으로서 텅스텐 코일(tungsten coil)로 구성된다. 텅스텐을 사용하는 이유는 용융점이 매우 높고(약 3,422°C), 가느다란

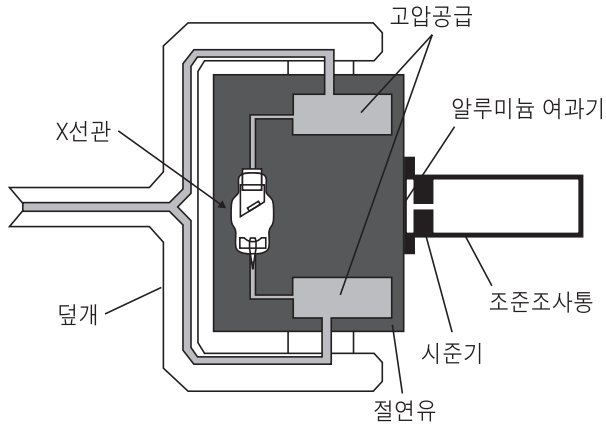


그림 1-6. X선관두의 구조.

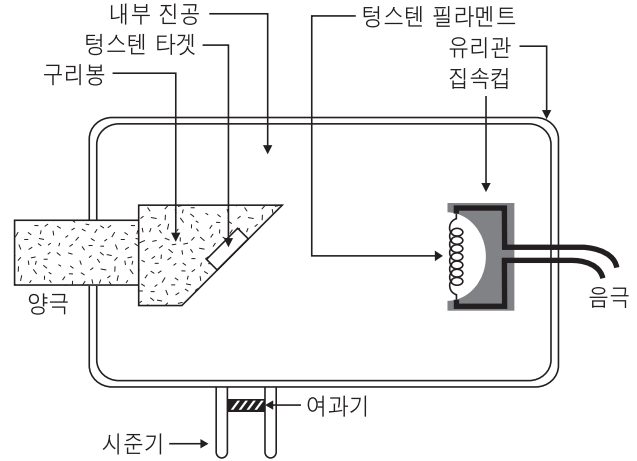


그림 1-7. X선관의 구조.

철사로 만들기 용이하며, 고온에서 기화되는 정도가 적기 때문이다. 치과용 방사선 촬영기의 경우에는 하나의 필라멘트를 사용하나 용량이 큰 촬영기의 경우에는 서로 다른 크기의 두 필라멘트로 구성된 음극을 사용하며, 보다 많은 X선이 필요한 경우에는 긴 쪽의 필라멘트를 사용한다. 필라멘트에 전류가 흘러 최소한 2,200℃ 이상으로 가열되면 텅스텐 원자의 일부 전자각으로부터 전자가 방출된다. 이러한 현상을 ‘열전자방출(thermionic emission)’이라 하며 이때 방출된 전자를 ‘열전자’라 한다. 열전자가 방출되면 필라멘트는 양의 극성을 띠므로 열전자는 즉시 다시 필라멘트로 돌아오게 되어 필라멘트 주위에는 끊임없이 열전자가 방출되었다가 다시 필라멘트로 돌아오는 과정이 되풀이된다. 이와 같은 과정에 의하여 필라멘트 주위에는 전자구름(electron cloud)이 형성되는데 이를 ‘공간전하(space charge)’라 한다.

필라멘트는 저압회로에서 3~5V의 낮은 전류를 공급받아 가열되며 방출되는 열전자의 수는 필라멘트의 온도에 비례한다. 오래 사용한 X선관을 보면 유리관이 청동색으로 변색되어 있는 것을 볼 수 있는데 이는 주로 필라멘트의 기화, 즉 기화된 텅스텐이 유리관 내벽에 붙기 때문이다. 이러한 필라멘트의 기화는 X선관 파손의 가장 큰 원인이 된다. 경우에 따라서는 텅스텐 필라멘트에 1~2%의 토륨(thorium)을 첨가하여 열전자방출의 효율성을 높이고 X선관의 수명을 연장시키기도 한다.

② 집속컵(Focusing cup)

집속컵은 음전하를 띤 몰리브덴(molybdenum)으로 만들어진 오목한 반사컵으로 그 안쪽에 필라멘트가 위치하고 있다. 집속컵은 필라멘트에서 방출된 열전자를 양극의 타겟(target) 방향으로 모아 주는 역할을 한다. 만약 집속컵을 사용하지 않으면 전자 상호 간의 반발력에 의해서 서로 흩어진 상태에서 양극으로 이동하므로, 넓은 부위에서 타겟과 충돌하여 초점(focal spot: 타겟 중 실제로 X선이 방출되는 부위)이 커지는 결과가 된다. 초점이 작을수록 양질의 방사선영상을 획득할 수 있으므로 이러한 결과는 바람직하지 못하다.

(2) 양극(Anode)

양극은 텅스텐 타겟과 구리봉(copper stem)으로 구성된다. 타겟은 음극으로부터 고속으로 이동해 온 전자의 운동에너지를 X선광자로 전환시킨다. 이때 99% 이상의 운동에너지가 열로 전환되며, 구리봉은 이때 발생된 열을 효과적으로 제거하는 역할을 한다.

X선 발생장치의 타겟으로 사용하기 위한 물질은 다음과 같은 조건을 구비해야 한다.

- 원자번호가 커야 한다. 원자번호가 크면 물질의 밀도가 높아 전자의 운동에너지가 효과적으로 X선 에너지로 전환될 수 있다.
- 용융점이 높아야 한다. X선이 발생할 때 전자가 가진

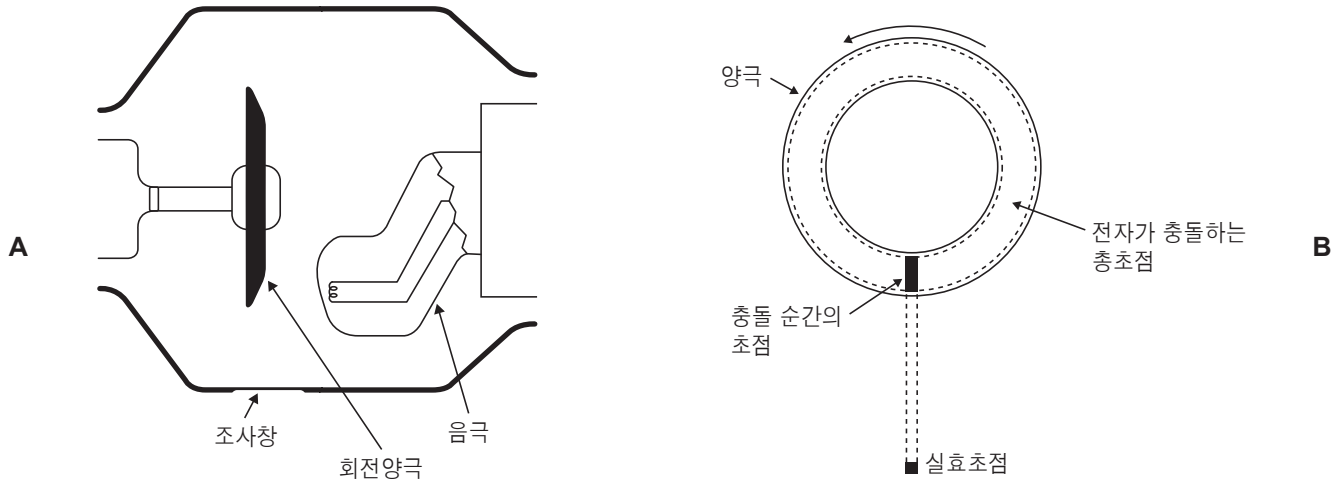


그림 1-8. A, 회전양극을 가진 X선관의 구조. B, 회전양극의 원리. 양극이 회전하여 열을 효과적으로 분산한다.

운동에너지의 대부분이 열로 전환되므로 이를 견디기 위하여 용융점이 충분히 높아야 한다. 많은 열이 발생하는 이유는 대부분의 전자가 타겟을 구성하는 원자의 낮은 결합에너지를 지닌 바깥쪽 궤도전자와 작용하기 때문이다. 백금(원자번호 78)과 납(원자번호 82)은 텅스텐(원자번호 74)보다 원자번호는 크지만 용융점이 낮아 타겟으로 적절하지 않다.

- 높은 온도에서 증기압이 낮아야 한다. 증기압이 높으면 타겟의 표면이 거칠어지고 기포가 발생할 수 있으며 X선관의 진공상태를 유지하기가 어렵게 될 수 있다.
- 열전도성이 좋아야 한다. 이는 X선 발생 시 발생하는 많은 열을 효과적으로 제거하기 위함이다. 텅스텐의 열전도성은 비교적 낮으므로 이를 보상하기 위하여 열전도성이 좋은 구리에 매식하여 사용한다. 이때 텅스텐 타겟의 실제 크기는 전자가 충돌하는 곳, 즉 초점보다 충분히 커야만 텅스텐 타겟에 인접한 구리가 열에 의해 용융되는 것을 방지할 수 있다.

구내방사선촬영기의 양극은 2~3mm 두께의 고정양극을 사용하나 용량이 큰 촬영기에는 회전양극을 사용한다. 회전양극은 지름 7.5~10cm 정도의 경사진 텅스텐 원판으로, X선관을 작동시킬 때 원판이 회전하여 전자가 보다 넓은 면적에 충돌하게 됨으로써 열을 효과적으로 분산시킬 수 있다. 회전속도는 대부분 3,000rpm 이상이다(그림 1-8).

① 선초점원리(Line focus principle)

X선원 또는 초점의 크기가 클수록 방사선영상의 선예도(sharpness)는 감소한다. 그러므로 초점의 크기는 가능하면 작은 것이 좋지만 초점의 크기가 작으면 단위면적당 발생하는 열은 증가한다. 따라서 넓은 면적의 초점으로 보다 작은 초점의 효과를 얻기 위하여 타겟을 경사지게 위치시킴으로써 실효초점(effective focal spot)이 실초점(actual focal spot)보다 작게 되도록 하는 것을 선초점원리라 한다.

대부분의 촬영기에서 타겟의 경사도는 발생하는 중심선(central ray)에 대해 약 15~20°이다. 예를 들어 실초점의 크기가 약 1 × 3mm일 때 선초점 원리에 의하여 실효초점의 크기는 약 1 × 1mm가 되어 단위면적당 발생하는 열이 감소하면서 보다 많은 X선을 발생시킬 수 있으며, 방사선영상의 선예도를 향상시킬 수 있다(그림 1-9).

② 힐효과(Heel effect)

선초점원리에 따라 양극의 각도가 작아질수록 실효초점의 크기는 감소되어 상의 선예도가 향상되지만, 양극의 각도는 힐효과에 의하여 제한을 받는다.

그림 1-10과 같이 초점 내부에서 발생한 X선광자가 텅스텐 타겟을 통과하여 진행할 때 양극의 경사 때문에 텅스텐 타겟을 통과하는 거리에 차이가 있다. 즉 초점 내부에서 발생한 X선이 타겟 경사면에 대하여 수직 방향으로

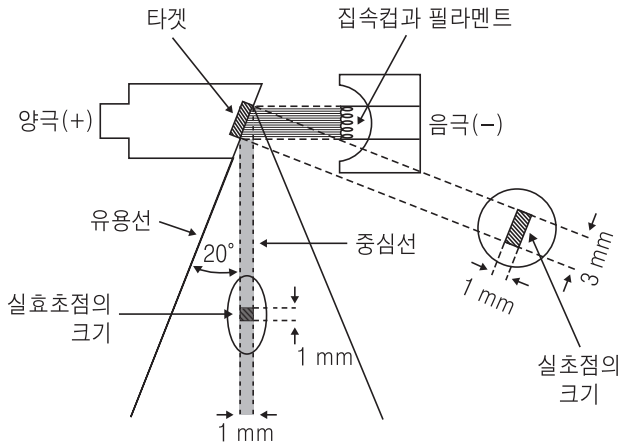


그림 1-9. 선초점 원리.

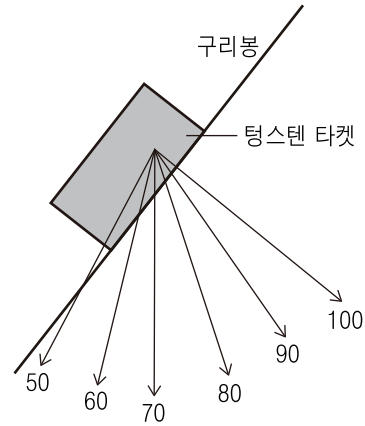


그림 1-10. 텅스텐 타겟 내부에서 발생한 X선의 상대적 강도.

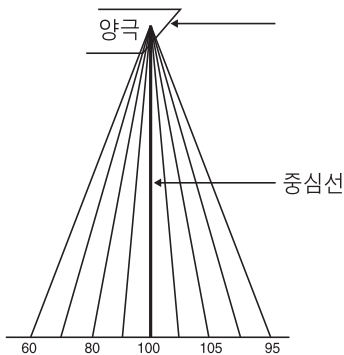


그림 1-11. 힐효과. 중심선보다 우측, 즉 음극 쪽의 X선 강도가 크다.

진행할 때 텅스텐 타겟을 가장 짧게 통과하므로 X선 강도가 가장 높다. 따라서 X선관의 음극 쪽이 타겟 자체에 의해 흡수되는 X선량이 적기 때문에 음극 쪽의 X선 강도는 양극 쪽에 비해 크다. 한편 필름 부위에 따라 양극까지의 거리가 서로 다르며 이에 따라 양극에서 흡수되는 양도 다르므로 결국 X선의 강도(intensity)는 부위에 따라 다르다(그림 1-11). 이러한 현상을 힐효과라 한다. 양극의 각을 작게 할수록 힐효과는 증가하지만 임상적으로 초점-필름(센서) 간 거리가 길거나 구내방사선촬영과 같이 크기가 작은 필름을 사용하는 경우에는 큰 문제가 되지 않는다.

2) 전원(Power supply)

전원은 X선관에 전력을 공급하는 장치로 일반용 전기(220V 또는 110V의 60Hz 교류)를 X선관 작동에 적절하

게 바꾸는 역할을 한다. 공급된 전력은 (1) 음극의 필라멘트를 가열하여 전자구름을 형성하고, (2) 형성된 전자구름을 음극에서 양극으로 고속으로 이동시키기 위하여 음극과 양극 간의 높은 전위차를 제공하기 위하여 사용된다. 이와 같은 목적을 위하여 기본적으로 두 가지 전기회로가 필요한데, 전자를 위한 필라멘트회로(저압회로)와 후자를 위한 양극-음극 회로(고압회로)로 구성된다(그림 1-12). X선관과 변압기는 X선관두 내에 위치하고 있으며 절연유로 둘러싸여 있다.

(1) 관전류(Tube current)

관전류는 X선관 내부의 음극 필라멘트에서 발생한 열전자가 양극으로 이동하는 전자의 흐름을 의미하며 단위는 mA를 사용한다. 음극의 필라멘트에 흐르는 전류가 증가하면 필라멘트 주위에 발생하는 전자구름이 많아지므로 X선관 내부를 흐르는 열전자의 흐름, 즉 관전류가 증가하여 발생하는 X선의 양이 증가한다. 즉, 필라멘트에 공급되는 전류를 조절함으로써 X선관의 관전류를 조절하는 것으로, 필라멘트에 흐르는 전류를 조절하기 위한 회로를 필라멘트회로(filament circuit)라고 한다.

우리나라 일반 가정용 전기는 220V의 교류이므로 이를 필라멘트를 가열하기 위한 적정 전압인 10V 이내(3~5V)로 감소시키기 위하여 강압변압기(또는 체강변압기, step-down transformer)를 사용한다. 한편 가감저항기(rheostat)는 강압변압기의 1차 코일에 흐르는 전류를 조