

감마선의 소멸과정과 자유전자

주 승 환*

여러 가지의 방사선들 중에서 감마선은 우리의 몸속을 깊숙이 침투할 수 있다. 그런 감마선이 우리 몸을 투과할 때, 체세포를 이룬 수많은 원자들의 궤도전자들과 충돌로 소멸한다. 잘 알려진 것처럼, 우리는 그런 현상들을 ‘방사선의 물질과의 상호작용’이라 한다. 그런 작용들은 원자단위에서 일어나고 있다.

방사선이 우리의 몸을 이룬 체세포 원자들과 충돌하여 생기는 자유전자들은 얼마동안 몸속에 남게 되고, 그들은 몸속을 배회하면서 인체의 생명 현상을 유지시킬 생화학 작용의 기능들을 약화시키기도 하고, 또는 악성인 암세포들을 만들어 내기도 하므로 우리가 건강을 유지시키는데 아주 불리하게 작용한다. 따라서 감마선에 쪼여 원자궤도를 이탈한 자유전자들은 우리의 정상적인 건강 조건들을 해치는 주된 요소가 된다.

방사선의 물질과의 상호작용

필자는 본지의 전 호(제13권 제2호)에 “방사선을 어떻게 이해할 것인가?”를 투고한 적이 있었다. 그리고, 기술사 회지에 실렸던 세 편의 글들(주승환, 1996a와 b, 그리고 주승환·제원목, 1997) 등은 모두 방사선에 대한 얘기들이다. 우리의 생활과 밀접하게 연결된 방사선의 종류들, 그리고 방사선과 연결된

기초 개념들을 더 깊이 이해하면 할수록 우리의 건강을 유지시키는데 도움이 될 것이다.

이 글은 수없이 많은 종류의 방사선들 중에서도 특히, 방사성동위원소에서 튕겨나오는 감마선에 대한 이야기를 대상으로 하였다. 방사성동위원소에서 튕겨나올 방사선들은 ‘알파알갱이’, ‘베타알갱이’ 그리고 ‘감마선’ 등이 있고, 그들 중에서도 우리의 몸속을 자유롭게 투과할 수 있는 것은 오직 ‘감마선’ 뿐이다. 따라서 우리 건강과 관계된 방사선의 문제들은 외부에서 방사선이 우리몸에 쪼일 경우, 대체로 ‘감마선’의 영향을 주된 대상으로 삼게 된다.

그런 감마선들은 이웃한 다른 물질들을 이룬 원자들에 부딪쳐 소멸된다. 이웃한 원자들과의 부딪침은 그 원자들을 이룬 ‘궤도전자들’과의 충돌이며, ‘원자핵’의 속까지는 접근할 수 없다. 독자는 궤도전자에 대한 이야기를 이미 잘 아시겠지만, 감마선의 소멸과정은 궤도전자들과의 충돌이 주된 현상으로 알려져 있고 있다.

감마선이 물질에 부딪쳐 소멸하는 현상은 전문 용어로 쓰자면, ‘물질과의 상호작용’이다. 물질과의 상호작용은 개념으로는 어려운 표현이다. 쉽게 보면, ‘자석이 쇠붙이를 끌어당기는 에너지는 달라붙는 쇠붙이와 자석이 서로 에너지를 교환하는 현상이다. 자석만이 에너지를 가진 것은 아니고, 쇠붙이 쪽에서도

* 세안기술(주) 연구소장/공학박사/방사선관리 기술사

대응하는 에너지를 내보내야 서로 달라 붙는다'는 개념은 상호작용의 일면으로 볼 수 있을 것이다. 나무 조각은 자력에 대응할 에너지가 거의 없기 때문에 자력에 쉽게 끌리지 않는다. 유기 물질인 나무 조각과 금속등은 그들을 이룬 원자들의 배열(궤도전자들의 배치)이 서로가 전혀 다르기 때문에 나무 조각들은 자력에 이끌릴 만큼 자력과의 에너지 교환을 크게 할 수가 없는 것이다.

한편, 인간의 감정이나 정신 세계에서 상호작용의 예를 들자면, 청춘 남녀 사이에서 사랑을 속삭일 때, 서로에게 전류가 오가는 열정의 에너지에 비유될 수도 있을 것이며, 독실한 기독교 신자들이 하느님을 믿고, 영적으로 서로 교신하는 정신적 에너지도 상호작용의 일면으로 비유될 수 있다. 위대한 과학철학자의 한 사람이면서, 전류를 발견했던 앙드레 마리 앙페르(Ampere)는 칸트의 「세계관」으로 부터 물질 세계의 현상들과 실체들 사이에 존재하는 차이점을 인식하려고 사색을 하던 중, 모든 현상들 사이에는 rapports (영적 교통)란 상호관계가 있음을 알게 된다 (주승환, 1996c). 그런 현상들에 관한 그의 심오한 인식 능력은 보이지 아니하는 실체들 사이에서 일어나고 있는 상호작용으로 연결되었다. 그는 마침내 물질의 상호작용을 바탕으로 우리의 눈으로 볼 수 없는 전류를 발견, 인류에게 큰 공헌을 한 것이다.

‘원자탄’과 핵폭탄

제2차 세계 대전을 종식시키는데 결정적인 공헌을 했던 「원자폭탄」의 이야기는 이미 역사적인 사건이 되고 말았다. 이웃 나라가 당한 쓰라린 상처를 다시 건드릴 의도는 추호도 없지만, 일본이 패망하고, 우리가 독립을 되찾게 된 것도 「원자폭탄」의 덕택이었던 점을 우리는 잘 알고 있다. 일본 히로시마와 나가사키에 투하되기 바로 전에 「원자폭탄」은

「리틀보이(little boy)」라는 암호명이었다고 전한다(Morrison, 1995). 그런 폭탄이 연이어 투하된 후, 「리틀보이」의 가공할 파괴력에 온 인류가 놀랐었다. 그 후로는 그의 이름만 들어도 몸서리를 칠만큼, 「원자폭탄」은 인류에게 새로운 공포의 대상이 되고 말았다. 거의 반세기동안까지 원자폭탄은 냉전 시대의 공룡으로서 인류에게 항상 불안을 주었다.

그런 폭탄이 투하될 그 당시만 해도, 소수의 과학자들을 제외한 일반 사람들에게는 그런 가공스러운 파괴력이 어디에서, 그리고 어떻게 일순간에 만들어질 수 있는가(?)에 의문을 가지고 있었다. 그 당시의 폭탄 제조는 주로 다이ना마이트의 폭발력에 의존했던 시절이라, 봉황의 속을 참새가 알 수 없듯이, 「리틀보이」의 가공할 파괴력을 다이ना마이트의 이론으로 설명할 수가 없었다. 기존의 지식으로서는 도저히 설명할 수 없었던 그런 위력을 다이ना마이트의 폭발력과 차별성을 두게 한, 엉겁결에 붙여진 이름이 바로 「원자폭탄」이며, 지금도 그대로 쓰이고 있다.

사실, 다이ना마이트의 폭발 메커니즘은 원자의 궤도전자들이 일으키는 화학적 에너지를 일순간 이용하는 것이므로, 오히려 그런 폭발물을 「원자폭탄」으로 부르는 것이 원리적으로는 합당할 것이다. 지금 우리가 쓰고 있는 「원자폭탄」이란 이름은 「핵폭탄」이라 써야 옳바르다.

원자의 모습

아마도 원자를 모르는 이는 아무도 없을 것이다. 우리가 잘 알고 있듯이, 물질의 최소단위는 원자이다. 원자(atom)라는 낱말은 이미 B.C. 6세기 경부터 서양 사상을 주도하던 철학자들이 유물론 사상을 전개하면서 썼던 낱말이다. 그때, 원자의 의미는 지금 우리가 쓰는 그런 뜻과는 많은 차이가 있었을 것으로 짐작이 간다. 전해오는 유명한 문장들

중의 한 구절이라 독자도 기억하시겠지만, 철학자 데모크리토스(Demokritos)는 그의 「원자론」에서 ‘우주는 물질로 된 무한한 원자들로 구성되어 있다’는 짙은 문장을 남겼다. 그의 그런 문장은 현대적인 원자의 개념을 잘 표현하고 있다.

2천년 전, 그리스 과학자들이 처음 원자의 모습을 생각했던 대상은 물이었다. 물은 눈에 보이지 않는 작은 알갱이들로 뭉쳐진 물체로 보았으며, 그런 근거는 물속에 지팡이를 넣고 뜻대로 휘저어도, 물은 갈라지지 아니하고 그대로 다시 뭉치게 되는 현상을 관찰하면서, 그런 자연의 현상은 물이 작은 알갱이들로 뭉쳐있기 때문에 가능하다는 사실에서 원자의 개념을 도입하게 된 것으로 전해진다. ‘부부싸움은 칼로 물 베기’란 우리의 속담은 원자의 모습과는 다른, 부부 사이에 연결된 정신적인 결합을 유도하자는 의미일 것이다.

그로부터 2천여년 동안, 원자의 모습은 하나의 관념론의 범위에서 원자의 존재를 유추한 수준에 머물 수 밖에 없었을 것이다. 그러므로 이렇다 할 구체적인 원자의 모습을 한정시켜 놓을 수가 없었다.

19세기 말부터 영국 과학자 톰슨(J.J. Thomson)이 원자의 한 모델을 주장하면서부터, 원자의 모습이 차츰 윤곽을 그리면서 지금 우리가 믿고 있는 현재의 모습으로 알려지게 되었다.

원자의 모습은 마치 우주에 있는 태양계의 축소판의 모습과 비슷하다. 태양계는 태양을 중심축으로 주위에는 지구, 금성, 달, 인공위성, 태양계의 많은 별 등이 태양을 중심축으로 삼아 일정한 속도로 공전하고 있다. 한 개의 원자는 거기에 하나밖에 없는 원자핵이란 부분과, 원자의 종류에 따라 다르긴 하지만, 하나에서 여러 개의 궤도전자들로 이뤄지고 있다.

한 원자에서 원자핵과 궤도전자들이 서로

위치한 거리를 [그림 1]처럼 견줄 수 있다. 원자의 모습에서 원자의 중심은 태양계의 태양의 위치처럼 원자의 핵(원자핵)이 자리잡고 있고, 원자핵과 얼마 정도 떨어진 공간은 궤도전자들(위성들)이 애워싸고 있다. 원자를 이룬 궤도전자들이 움직임 없이 정지된 위치에 놓여져 있다는 지적도 있다(김계완, 1998). 하지만, 우리가 잘 알고 있는 원자에 관한 러더포드의 모형은 궤도전자들이 궤도를 따라 움직인다.

궤도전자들은 햇빛의 속도만큼이나 빠르게 원자핵 주위를 아주 규칙적으로 원 운동을 하고 있다. 운동하는 속도가 아주 빠르기 때문에 마치 정지된 상태로 원자핵을 애워싼 듯한 모습을 보여준다. 궤도전자들이 돌고 있는 궤도의 안쪽은 텅빈 공간이긴 하지만, 그 원자에 소속된 궤도전자가 운동하는 영역이므로 원자의 크기를 결정하는 기준이 된다.

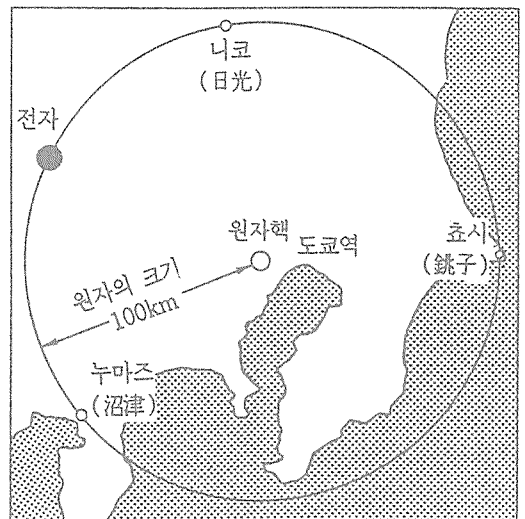


그림 1. 원자와 원자핵의 크기 비교.

원자핵을 1미터의 공이라 하여 도쿄역에 두면, 전자는 100킬로미터 바깥쪽을 돌고 있다. (임승원역, 1996, p.63)

따라서 원자란 우주 공간처럼 속이 텅빈 공간이기 때문에 X-선이나 감마선이 마음대로 원자들로 이뤄진 금속의 속 또는 우리몸 속을 자유롭게 통과할 수 있게 된다.

원자 번호

화학에서는 원자보다 ‘원소’라는 말을 많이 쓴다. 원소는 수소, 산소 등과 같은 이름으로 ‘수소 원소’, ‘산소 원소’…… 등과 같이 물질의 한 종류를 나타낸다. 잘 알려진 바와 같이 지구 위에 있는 원소들은 92개나 되고, 수소에서 우라늄에 이르기까지 그들은 모두가 ‘원자 번호’(‘원소 번호’라고는 쓰지 않음)라는 번호표를 달고 있다. ‘원자 번호’는 바로 그 원소가 갖는 정해진 궤도전자의 수효를 뜻한다. 예컨대, 수소의 번호표는 1번(궤도전자 수:1개), 헬륨은 2번(궤도전자 수:2개) 그리고 우라늄은 92번(궤도전자 수:92개) 등으로 구별되고 있다.

원소보다 큰 단위는 ‘분자’이다. 모든 물체들은 그들의 성질을 유지할 수 있는 가장 적

은 기본 단위가 있다. 그런 단위를 ‘분자’라 부르며, 분자는 화학적으로 더 이상 분리할 수 없다. 모든 분자들은 한 개의 원소로 된 경우(대체로 금속체들)도 있겠지만, 대체로 여러 개의 원소들과의 화학적 결합으로 우리의 눈에 보이는 물체를 이루고 있는 것이다. 원소이든, 여러 개의 원소들로 결합을 이루든, 분자를 이룬 원소들은 그들의 궤도전자들을 서로 주고 받으면서 어떤 한 덩어리로 뭉쳐진다. 궤도전자들 중에서도 ‘최외각’(다음에서 설명)의 전자들이 같은 원소나 다른 원소와 결합할 때, 중요한 역할을 하게 된다.

원소는 ‘원자’라는 단위로 다시 나뉠 수 있다. 그 기준은 같은 원소라 할지라도 그들 중에는 ‘원자핵’의 내용물이 서로 다른 것이 있기 때문에 나뉠 필요가 있다. 원자 단위로 표시하면, 원자의 핵을 따지기에는 아주 유리하다. 정리하면, 원소나 원자라는 이름은 물체를 구별할 때는 서로 같은 의미를 뜻하지만, 원자핵을 따질 경우, 원소 이름 대신 원자라는 이름을 쓴다. 같은 원소는 같은 화학적 성질을 가지고 있으므로 물체의 화학적 성질을 서로 견주려면, 아마도 원자들을 포함하는 원소라는 이름이 더 유리할 것이다.

궤도전자들의 배치

원자 번호는 그 원자의 궤도전자의 수효임을 바로 전에 얘기한 적이 있다. 그런 궤도전자들은 원자핵을 구심점으로 원 운동을 하지만, 놀랄만큼 정교하게 정해진 궤도를 따라서 충돌없이 움직인다. 충돌없는 이유는 전자들의 전기적 성질이 같으므로 서로 비껴나기 때문일 것이다. 양자역학은 궤도전자들이 돌고 있는 궤도의 에너지 준위(위치 에너지의 크기)를 셈으로 확인할 수 있게 한다. 지금 우리가 알 수 있는 것은 복잡한 수식으로 셈한 결과로 밝혀진 사실에 따라 원자의 모습을 따져간다. 즉, 궤도전자들이 돌고 있는

1) 주기를 표는 멘델레프가 원자의 모습을 알기 훨씬 먼저 만든 것이다. 그 때는 원소의 번호를 지정할 만한 근거를 발견하지 못했던 것이다. 1898년 영국이 낳은 위대한 과학자 J.J.Thomson이 원자의 모습에 관한 plum-pudding(포도가 섞인 요리 이름) 모델을 주창하게 되고, 13년 후에 Geiger와 Marsden이 알파 알갱이를 얇은 금포일(금박)에 쏘여 실험한 결과, 알파 알갱이들의 운동 방향에서 산란 현상이 나타나는 사실을 발견하였다. 그런 현상을 알게 된 세기의 물리학자 Rutherford는 Thomson의 모델과는 다른 새로운 원자의 모습을 가정하게 된다. 새로운 원자의 모습에는 지금 우리가 인식하고 있는 것과 아주 비슷한 원자핵(+)의 주위를 전자들(-)이 둘러싸고, 거기에 있을 전자의 수효는 원소의 종류에 따라 규칙적으로 증가하는 사실을 알게 되면서 ‘원자 번호’의 의미가 그 원자의 궤도전자의 수효를 뜻하는 것으로 밝혀지게 된 것이다. 지금도 우리는 ‘원소 번호’라는 이름일 듯 한데, 원자의 모습에 근거를 둔 ‘원자 번호’를 바른 명칭으로 쓰는 이유이다.

궤도들은 양파의 껍질처럼 여러 겹으로 되어 있고, 각각의 껍질에는 일정한 수의 궤도전자들이 배치된다는 사실을 알고 있다.

예컨대, 원자핵과 가장 가까운 껍질은 ‘최내각’이란 이름으로 일컬어지며, 전문용어로는 ‘K껍질’이라 한다. K껍질에는 궤도전자의 수효가 2개만 허용된다. 그 다음 궤도는 ‘L껍질’이며, 허용되는 전자의 수효는 8개이다. 그런 방법으로 ‘M껍질(8개)’, ‘N껍질(8개)’…… 등의 이름이 차례로 붙는다.

원자 번호의 수효에 따라 궤도전자가 들어갈 껍질이 정해진다. 어떤 원자는 그 원자의 궤도전자 수효를 위의 방법으로 순서대로 채워가면, 바깥 껍질에 궤도전자를 다 채우든지 또는 가득 채우질 못하는 경우가 있게 될 것이다. 그 때, 그 껍질이 바로 앞에서 말한 ‘최외각’이다. 어떤 원자라도 원자의 최외각에 있는 궤도전자 수효는 1개에서 8개 사이가 된다. 원소의 주기율 표는 위와 같은 주기적인 방법으로 만들어져 있다. 즉, 최외각의 궤도전자 수효가 1개면, 1족 원소, 2개면, 2족 원소…… 등으로 구분해서 8족까지 모든 원소의 자리를 정해 놓은 것이 주기율 표이다. 따라서 주기율 표는 원소들의 족보에 해당되므로 모든 원소들은 주기율 표에 그들의 자리가 정해져 있다. 그리고 주기율 표는 다른 원소들끼리 화학적 결합을 이룰 때, 서로가 교환할 궤도전자의 수효를 쉽게 알 수 있게 해 준다.

감마선의 3대 소멸 과정들

광전자 산란 효과:

이 글의 주제와는 다소 거리가 있는 이야기지만, 여기서 필자가 의도적으로 광전 효과를 보다 자세하게 설명하고 싶은 것은 광전자의 산란 효과는 다음과 같이 매우 중요한 내용과 연결되고 있기 때문이다.

지금 우리는 우리가 겪고 있는 에너지 문제를 해결하기 위하여 대체 에너지의 개발을 서두르고 있다. 우리의 미래 에너지 자원으로서는 햇빛을 이용할 태양광 발전이 우리의 눈앞에 보이는 시점이고, 그런 발전의 기본 원리의 바탕이 광전 효과의 현상을 이용하기 때문인 것이다. 태양광 발전에서 우선 전제가 되는 것은 특수 금속들(실리콘, 갈륨, 그리고 갈륨-아세나이드 합금 등)의 궤도전자들을 어떤 방식으로든, 그들로부터 최대의 자유전자들을 능률적으로 끄집어 내게 하는 기술이다. 아직 어떤 논문도 이런 언급은 없지만, 태양광 발전처럼, 인류는 방사선을 이용하는 발전 방식의 구상도 앞으로 하게 될 날이 오게 될 것이다.

광전 효과의 기원은 19세기 후반기에 일련의 실험에서 알려진 것이다. 어떤 물질의 표면(주로 알카리금속에서 쉽게 관찰됨)에 강한 햇빛(자외선)을 쬐일 때, 그 물질의 표면에서 전자들이 튀어나오는 현상을 발견하였다. 물리학에서는 이런 현상을 ‘광전 효과’(Photoelectric effect)라 한다.

앞에서 이야기한 원자를 이룬 궤도전자들은 보통때, 원자에 붙잡혀 있는 원자의 한 요소이므로 그것들이 소속된 원자를 쉽게 벗어날 수 없다. 그래서, 궤도전자들은 ‘속박된 전자(속박전자)’라는 이름을 붙인다. 햇빛에 쬐인 금속은 빛이 금속에 속박된 궤도전자를 내쫓는 ‘광전 효과’라는 현상을 통하여 금속 표면에서 전자들을 튕겨낼 수 있다. 그런 전자들은 ‘자유롭게 이동하는 전자’라는 뜻으로 ‘자유전자’라고 일컬어지나, 특별한 경우가 아니면, 그저 ‘전자’라고 한다.

감마선은 아주 높은 운동 에너지를 가진 전자파다. 따라서 어떤 한 종류인 빛의 성질을 갖는다. 감마선은 햇빛보다 광전 효과를 더욱 쉽게 일으킨다.

광전 효과는 [그림 2a]처럼 장치를 만들어

실험해 보면, 쉽게 확인할 수 있을 것이다. 실험 방법을 간단하게 설명하자면, 우선, 석영으로 된 유리관 속에 플러스 극(+)과 마이너스 극(-)을 서로 떨어지게 분리시킨다. (+)쪽에는 나트륨 금속 조각을 햇빛이 많이 와닿게 단면적을 크게 되도록 붙이고,

(-)쪽에는 보통의 구리 도체로 전극을 만들어 양쪽이 외부의 전선과 연결될 수 있도록 유리관 밖으로 나오게 한다. 유리관 속은 진공을 시킨 다음 밀봉을 한다. 양쪽의 전극에 그림처럼 전원과 전류계(A)를 연결시켜 놓는다.

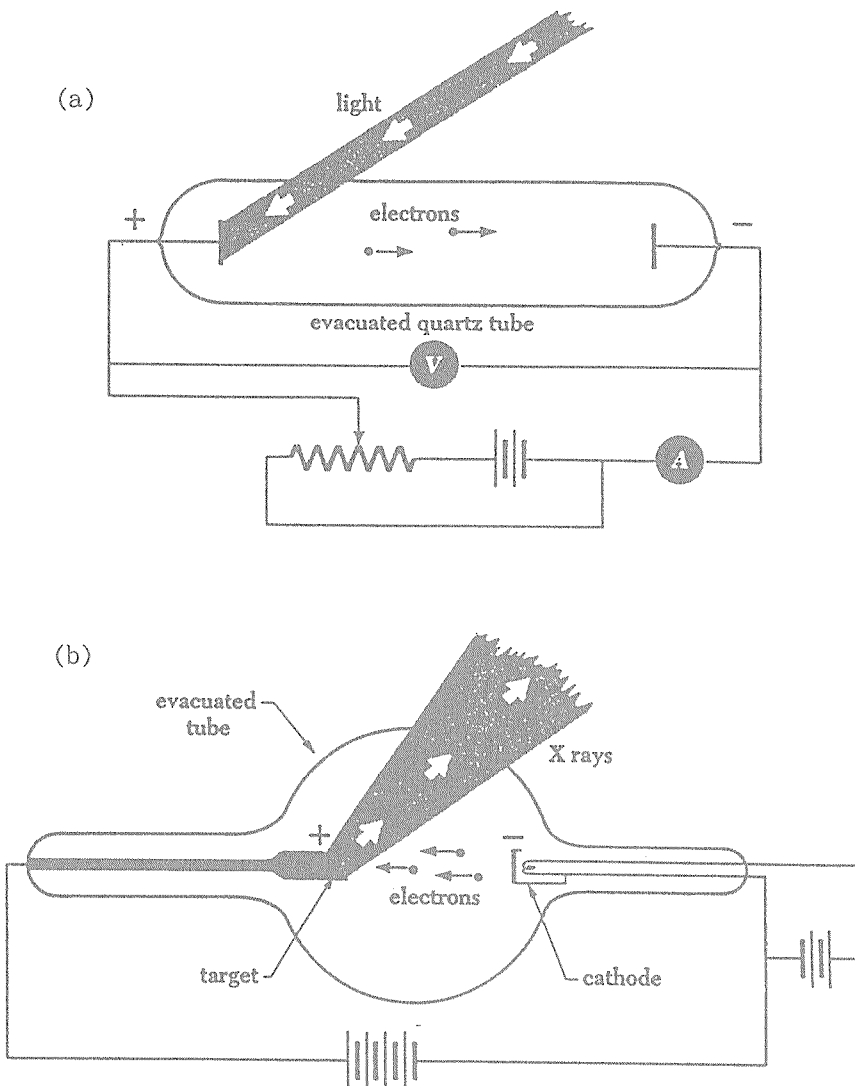


그림 2. a : 광전 효과의 모식도와 계도전자들의 이동 모식도
 b : X-선 발생 튜브와 발생하는 X-선의 진행 방향 모식도

처음 실험은 유리관을 검은 종이로 싸서 햇빛이 (+)극의 나트륨 금속에 와닿지 않도록 해 두면, 전류계(A)에는 전류가 흐르지 않는다. 그 사실을 확인하고 나서, 검정색 종이를 떼는 순간 전류계(A)에 검출할 만한 전류가 흐르고 있음을 알게 될 것이다. 전류는 나트륨 금속의 표면에서 광전 효과로 궤도전자들이 튕겨나와 (-)극으로 이동하는 전자들의 흐름이기 때문에 전류계(A)에 전류가 흐르게 된다. 위와 같은 실험은 전자공학의 초보적인 개념을 설명하기 위하여 자주 인용되고 있다.

나트륨 금속에서 튕겨나온 자유전자들이 (-)극에 도달하려면, 자유전자들이 운동에 필요한 충분한 운동에너지를 지녀야 한다. 그래서 전류계(A)에 전류의 흐름을 감지할 수 있을 것이다. 독자는 전기의 성질을 이해할 것이다. 전기는 전류와 전압으로 나뉜다. 전류의 세기는 이동하는 전자들의 수효로 결정이 되며, 전압은 전자들을 이동하도록 밀치는 힘이다.

위의 실험에서 눈여겨 봐야 될 주요 사실은 (+)극과 (-)극 사이에 걸리는 전압을 전압계(V)로 읽을 수 있다. 빛을 쬐이면서 서서히 전압을 올려줄 때, 과연 몇 볼트에서 전류계(A)에 전류가 흐르게 될 것인가? 하는 점은 아주 흥미롭다. 그런 전압은 쬐일 햇빛의 세기와는 상관이 없다는 사실을 알게 될 것이다(파장이 다른 빛에는 파장에 따른 각각의 고정된 전압이 따로 정해진다). 즉, (+)와 (-) 극들 사이에는 최소한의 전압을 유지시켜 주면 된다. 광전 효과에서 그런 전압의 표시는 V^0 로 나타낸다.

다른 이야기이긴 하지만, 독자가 병원에서 X-선 촬영을 받게 될 때, 이용되는 X-선의 발생 원리는 위의 실험을 거꾸로 하면 된다 [그림 2b]. 즉, 자유전자의 이동을 화살표 ([그림 2a]의 화살표)의 반대 방향으로 돌려

놓게 장치를 만들고, (+)극에 나트륨 금속 대신 텅스텐과 같은 금속으로 바꿔, 거기에 돌아선 전자를 쬐이게 하면, 햇빛이 진행하는 반대 쪽으로 방사선인 X-선이 나온다([그림 2b]).

방사선인 감마선이 물질의 원자 단위에서 일으키는 광전자 산란 현상을 좀더 자세히 살펴본다. [그림 3]은 원자의 모습을 그려서 감마선이 원자에 속박된 궤도전자들과 충돌할 수 있는 가능성(확률)을 한 모식도를 써서 설명하고 있다.

이 그림에서 원자의 중심에는 원자핵이 자리잡고, 주위는 궤도전자들이 원자핵을 중심으로 돌고 있다. 그런 궤도들의 이름들은 앞서 얘기처럼 K, L, M 등의 기호로 표시되고 있다. 감마선은 햇빛보다 파장이 아주 짧기 때문에 파장의 역수인 진동수는 매우 크므로 원자의 속까지 깊숙하게 파고 들어가서 K껍질의 궤도전자들과 충돌하게 될 것이다.

대체로 감마선에 의한 광전 효과는 K껍질의 궤도전자들과 충돌한다(햇빛은 감마선에너지의 세기보다는 약하므로 최외각 전자와 충돌함). 감마선과 충돌한 전자는 궤도전자의 위치에서 자유롭게 이동할 수 있는 자유전자의 위치로 바뀌면서 속박된 원자의 껍질을 벗어 날 수 있다. 정리하면, 감마선은 원자에 속박된 궤도전자를 감마선의 에너지로 해방시키는 역할을 하고 나서 소멸하고 만다. 이런 현상을 우리는 감마선의 ‘광전자 산란효과’라 한다.

원자단위에서도 에너지의 보존법칙은 성립한다. K껍질의 궤도전자가 감마선과 충돌하여 K껍질을 벗어나게 되면, 찰나의 순간에 L껍질의 전자가 K껍질의 궤도전자가 돌고 있던 궤도로 자동적으로 이동을 하면서 K껍질을 채운다.

양자역학은 궤도전자들이 각 궤도에 묶여 있는 것은 각 궤도가 정해진 일정 크기의 위

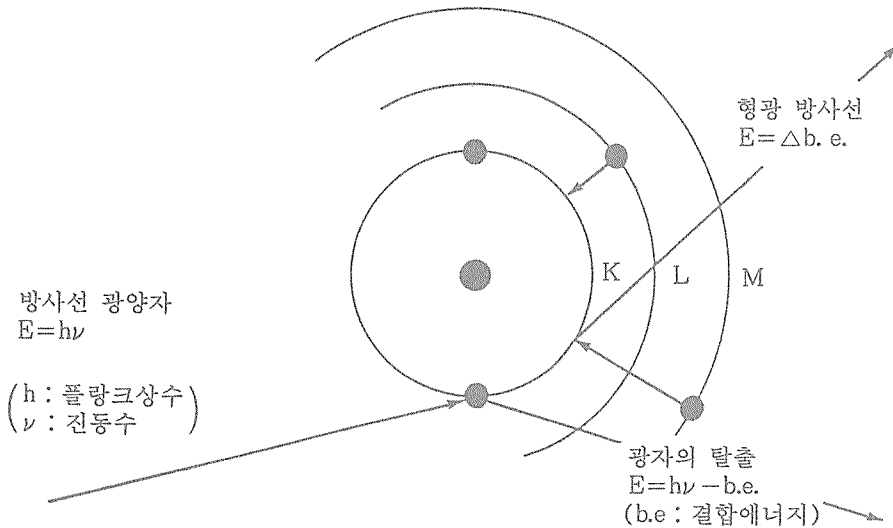


그림 3. 방사선인 한 광양자가 물질을 이룬 한 원자의 궤도 전자를 밀치는 광전자 산란 과정의 모식도(Alpen, 1990)

치 에너지를 가지고 있기 때문에 해석한다. 따라서 K, L 그리고 M껍질들의 위치 에너지들은 핵으로부터 멀리 떨어질수록 커진다. L껍질의 궤도전자가 K껍질로 이동하면, L껍질에서 가지고 있던 궤도전자의 에너지는 K껍질을 채우고도 여분의 에너지가 남게 되고, 그 에너지는 ‘형광’을 내면서 원자밖으로 발산해 버린다. 형광등, 나트륨등 그리고 할로겐등등은 모두 이런 원리를 바탕으로 두고 있다.

감마선이 원자의 궤도전자와 충돌하여 소멸하면서 일으키는 광전자 산란 효과에서 기억해야 할 중요한 개념은, 비록 감마선 자신은 궤도전자들과 1회의 충돌로 그의 에너지가 다른 자유전자를 탈출시키고 소멸하게 되지만, 에너지 불변의 법칙으로 다른 형태의 에너지(형광빛과 자유전자)로 남게 된다는 사실은 아주 중요하다. 앞으로 할 이야기에서 다른 메커니즘으로 생기는 자유전자들도 언급하게 되겠지만, 그들은 물질의 화학 작용에 많은 영향을 미치게 될 것이다. 그 이유는 자

유전자들의 역할이 방사선의 생물학적 효과를 해석하는데 매우 중요한 원리적 바탕이 되고 있기 때문이다.

컴프턴 산란 효과:

1920년대 컴프턴(Arthur H. Compton)은 양자역학에서 양자들이 물질과의 충돌을 수리적으로 처리할 수 있는 중요한 이론을 발표하였다.

[그림 4]는 감마선의 광자 한 개가 원자의 궤도를 벗어난 자유전자(궤도전자와는 다름)와 탄성 충돌하는 모식도이다. 컴프턴 산란의 이론은 그런 원리를 물리적인 수치로 아주 잘 설명해 준다. 앞에서 설명한 광전 효과에서, 궤도전자들이 궤도를 이탈하여 자유전자가 되면, 감마선은 컴프턴 산란 효과로 그런 자유전자를 때려 부수는 역할을 하게 된다. 이런 효과들(광전자 산란 효과, 컴프턴 산란 효과 그리고 전자쌍 생성 효과)은 감마선이 지나갈 물질 속에서 같은 시간에 함께 일어

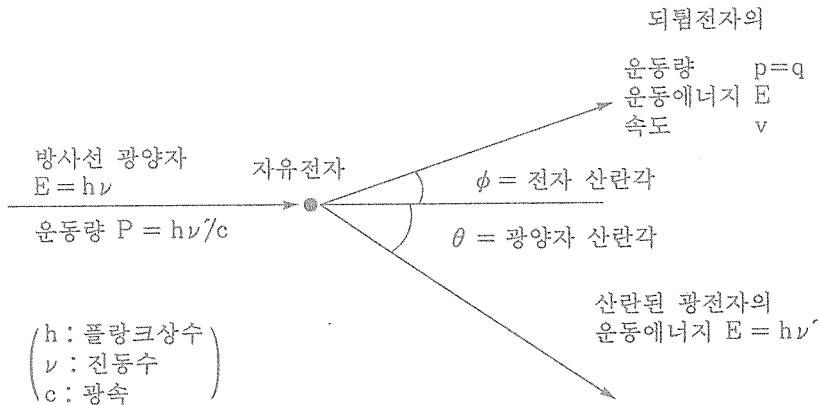


그림 4. 방사선인 광양자가 물질을 이룬 원자 주위의 한 자유 전자와 충돌하는 콤프턴 산란 과정의 모식도 (Alpen, 1990)

난다. 여기에서도 에너지의 보존 법칙은 성립되므로 감마선의 에너지는 다른 에너지로 전환될 뿐이지 완전히 소멸되는 것은 절대로 아니다. 감마선이 자유전자들과 충돌하면, 감마선의 에너지는 충돌된 전자의 운동 방향을 바꿔 놓게 되고, 다른 한 편으로는 그의 운동 에너지 일부를 자유전자의 운동 에너지에 보태게 된다. 그런 작용은 원자 단위에서 일어나는 현상이므로 헤일수 없이 많은 콤프턴 산란 효과가 잘나동안 되풀이 되고, 마치 연쇄 반응처럼 지속되면서, 감마선의 운동 에너지는 소멸한다. 앞의 광전자 산란 효과와 다른 점은 궤도전자들과의 충돌 현상이 아니므로 형광빛은 생겨날 수 없다.

콤프턴 산란으로 그와 같은 현상을 일으킨 감마선의 에너지가 충돌하는 자유전자들에 전달되는 에너지의 양은 여러 가지 제약 때문에 셈하여 내기는 어렵다. 쉽게 보면, 당구의 큐에 주는 인력은 정지했던 공을 움직이게 하는데 쓰이고, 굴러가는 공의 운동 에너지는 다른 정지된 표적의 공을 다른 각도로 움직이게 하는데 쓰일 것이다. 따라서 큐로

밀친 인력(밀어치기와 끌어치기의 힘)은 두 공들의 운동 에너지로 바뀔 것이므로, 이들의 운동 에너지를 각각 셈하여 서로 더한다면, 감마선의 운동 에너지를 개략적이거나 알 수 있게 될 것이다.

전자쌍 생성 과정:

필자는 에너지 자원을 얘기하면서 멀잖은 장래에 인류는 상업적으로 에너지의 자원이 될 '반입자'를 제조할 수 있으리란 전망을 한 적이 있다(주승환, 1996b). 그런 전망은 '전자쌍 생성'의 원리에 바탕한다.

우선 중심되는 개념은 전자를 다시 '음전자'와 '양전자'로 구별해야 되는 일이다. 지금까지 우리는 '전자'란 음전기를 띤 물질로만 이해하고 있었기 때문에, 전자를 양전기의 성질로 이해하기란 일반적으로 쉽게 받아들이기 어려운 개념일 것이다. 그렇지만, 자연의 조화에서는 전자들을 음성과 양성으로 구별해야 할 필요가 있게 된 것이다.

[그림 5]는 감마선이 양전자와 음전자를 만들어 내는 현상을 수소 안개 상자²⁾로 찍은 사진이다. 사진에서 약간 흰 직선들은 감마선

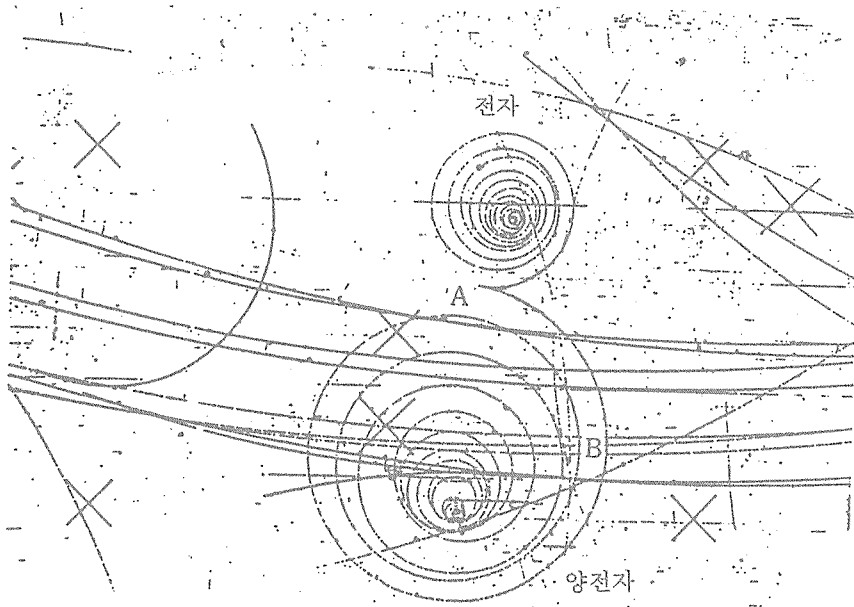


그림 5. 쌍생성. 왼쪽으로부터 감마선이 들어와서 A점에서 전자와 양전자가 쌍생성된 사진.
(임승원역, 1996, p.81)

의 궤적이고 A점을 경계로 하여 좀 떨어진 양쪽에 두 개의 소용돌이들이 양전자와 음전자의 모습들이다. 안개 상자 속에서는 전기적인 성질을 띄지 않는 중성인 입자들은 궤적을 남기지 않는다. 그러므로 안개 상자의 그림에서 중성 원자인 수소 핵의 위치는 나타나지 않는다. 아마도 A점 가까이 있을 것이다.

아직은 전자를 음양으로 구별하는 경우가 ‘소립자론’에서 아주 제한된 전자들에게만 허용되고 있다. 즉, 원자의 핵에서 튕겨져 나온 전자의 성질을 띤 ‘베타 알갱이’를 설명할 때

- 2) 수소의 안개 상자는 소립자 연구에 주로 쓰인다. 상온에서 기체인 수소는 섭씨 영하 270도에서 액체가 된다. 거기에 전하를 띤 입자가 들어가면 그의 에너지는 수소를 증발시키면서 입자가 지나가는 통로 주변에 안개처럼 기포들이 궤적을 이룬다. 이런 원리를 이용하여 만든 한 실험 상자이다.

와, 여기에서 설명하는 것처럼, 감마선이 강력한 전기력이 미치는 원자핵 주위의 공간(보통 쿨롱장 또는 전장)을 통과할 때, 감마선의 운동 에너지는 두 개의 쌍으로 된 ‘양전자’와 ‘음전자’로 탈바꿈하는 현상이 나타난다.

전자를 음양의 두 성질로 구별하면, 「전자 쌍」이란 이름으로 일컬어 진다. [그림 6]은 감마선인 한 광자가 원자의 핵력이 미치는 곳으로 지나갈 때, 원자핵을 둘러싼 강력한 쿨롱장의 저항력을 견디어 낼 수 없게 됨을 묘사한 그림이다. 그런 현상때문에 감마선의 운동은 곧바로 정지되므로 감마선의 운동 에너지란 없어지고, 그대신 에너지 보존의 법칙에 따라 같은 크기의 에너지는 음전자와 양전자로 갈라진 한 쌍의 두 전자의 ‘정지 에너지’들로 분리되어 찰나동안 보존될 수 있다.

감마선인 한 광자가 원자의 핵력이 미칠 쿨

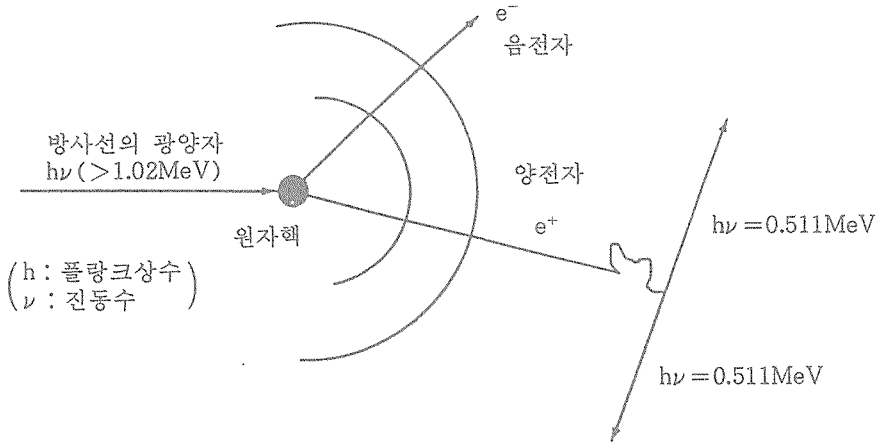


그림 6. 방사선인 광양자(1.02MeV보다 큰 에너지)가 물질을 이룬 한 원자의 핵에 접근했을때, 전자의 한 쌍으로 변하는 쌍생성 산란 과정의 모식도(Alpen, 1990)

룽장에 접근하려면, 일정한 규모 이상의 운동 에너지를 지니고 있어야 가능하다. 그와 같은 크기의 운동 에너지란, 두 전자들의 정지된 질량으로 에너지를 썬한 전자의 운동 에너지들이 각각 0.511MeV이므로, 감마선인 광자의 최소한 요구될 에너지는 두 전자들의 정지 에너지를 합친 1.02MeV(메가전자볼트)³⁾를 넘어야 된다.

한 쌍의 전자들은 같은 크기의 질량이므로 같은 크기의 정지 에너지를 가지나, 전기적 성질과 자성이 서로 다르다는 차이가 있다. 그래서 이들은 서로가 「반물질」의 관계를 이룬다. 이들은 쉽게 결합하여 소멸하면서 1.022MeV의 에너지를 남긴다. 이런 원리를 이용하면, 인류는 공해성 물질을 남겨 놓지 않을 깨끗한 에너지를 무한대로 얻을 수 있게 된다.

3) 전자볼트(eV)는 하나의 운동 에너지의 단위이다. 1볼트의 전압 차이가 있는 전장의 두 점 사이 공간에서 전자(e) 1개가 움직일 때, 소비되는 운동 에너지를 1전자볼트(1eV)라고 정한다. (1 메가전자볼트(1MeV) = 10⁶eV).

[그림 7]은 ‘양성자’와 ‘반양성자’가 충돌하여 소멸하는 그림이다. 만일, 위와 같은 원리를 문화의 기본 요소인 우리의 에너지 생산에 이용할 수만 있다면, 불꽃을 얻기 위하여 막대한 화석 연료를 태워 공해성 물질을 배출시키므로써 산성비를 내리게 할 필요도 없을 것이며, 골치 아픈 방사성 폐기물을 양산해 낼 원자력 발전소도 필요없게 될 것이다.

감마선이 일으키는 생물학적 효과

지금까지 독자와 함께 생각해 본 것은, 방사선들 중에서도 특별히 우리의 몸속을 꿰뚫고 지날 힘센 감마선의 이야기를 기본 원리에 따라 살펴본 내용들이다. 아울러 감마선이 원자 단위에서 물질과의 상호작용으로 소멸되는 현상들을 대충 살펴보았다.

생체의 조직에서 감마선의 생물학적 효과들은 감마선의 소멸과 어떤 관계를 가지고 있는지를 살펴본다. 원자의 세계는 나노(1/1,000,000,000) 단위의 세계이므로 우리의 눈

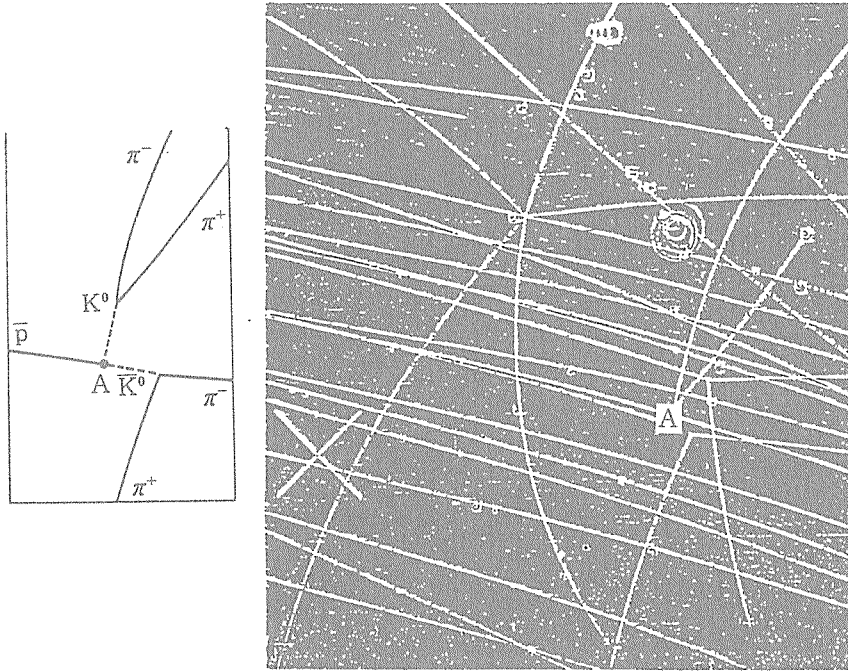


그림 7. 반양성자의 쌍소멸. 왼쪽에서 반양성자가 들어와서 A점에서 양성자와 쌍소멸했다. 거기서부터 중성의 K^0 메손, \bar{K}^0 메손이 발생하고 그것들이 거듭 π^+ , π^- 로 붕괴하는 사진(임승원역, 1996, p.82)

으로는 느끼지 못한다. 따라서 실감이 나지 아니함은 당연하다. 원자보다는 좀더 큰 단위인 분자의 세계에서 방사선이 물질과의 상호작용들을 생각해 보는 것은 우리의 건강—특히 방사선의 장해 방어—과 관련시켜 볼 수 있으므로 보다 유익할 것으로 생각된다.

우리가 알고 있는 것은 방사선이 원자 단위에서 궤도전자들을 자유전자로 이끌어 낼 수 있고, 그와 같은 현상으로 생겨난 자유전자들이 물질을 이루는 화학 분자들에 작용하여 그 물질의 화학적 특성을 좌우할 기능을 가진다는 사실이 주요한 과제가 된다.

방사선이 만든 전자가 물질의 화학적 결합에 영향을 주는 것을 연구하는 분야는 방사선 분해(Radiolysis)라는 학문이다. 이 분야

에는 방사선과 관계된 많은 현상들이 알려져 있다. 특히 고분자 화학 물질을 접합시켜 새로운 첨단 소재들을 만들어 내는 것은 이미 진부한 이야기일 것이다.

필자는 그런 분야의 구체적인 사례를 나열하기 보다는 방사선이 우리 몸에 쏘일 때, 나타날 생물학적인 효과에 대한 원리를 쉽게 설명하는 것이 독자가 방사선을 좀더 이해하는데 보탬이 되리란 생각을 해본다.

[그림 8]은 캘리포니아 대학 생물물리학과 교수인 에일펜(Alpen,1990) 박사의 자료를 인용한 것이다. 그 그림은 방사선이 우리 몸을 투과할 때, 일어날 여러 단계들을 구분하여 놓았으며, 각 단계마다 주요한 현상들을 요약한 내용들이다. 여러 단계들은 물리적 단

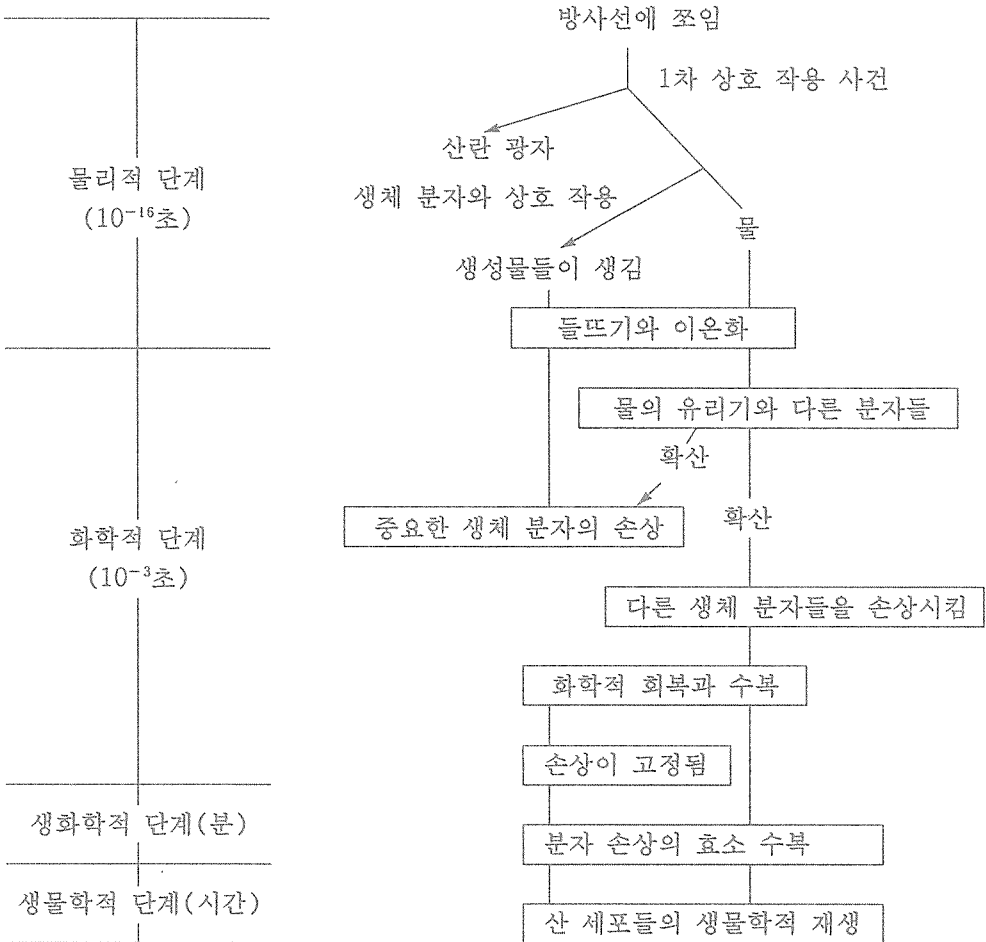


그림 8. 방사선이 그의 에너지를 산 세포 조직에 전달하는 과정들(자료 : Alpen, 1990)

계, 화학적 단계 그리고 생물학적 단계(분 동안의 현상들)과 생물학적 단계(시간 동안의 현상들)로 나뉘고 있다.

우선 물리적 단계부터 살펴본다. 우리 몸이 방사선에 쪼이면, 우리 몸을 이룬 생체 조직의 분자들과 10^{-16} 초 사이에 반응이 끝나 버린다. 일어날 주된 현상은 방사선에 쪼인 부분의 분자들을 이루고 있는 원자의 궤도전자를 자유전자로 만드는 역할이 그 전부이다. 방사선에 쪼인 원자의 모습은 정상이 아닌

상태로 흥분시켜 놓게 된다. 이런 현상을 우리는 분자의 '들뜨기(여기) 상태'라고 한다. 그리고, 궤도를 벗어난 자유전자가 원자의 속박을 벗어나는 현상을 '이온화'라 부른다. 정리하면, 물리적 단계에서는 원자의 정상적인 상태를 비정상적인 상태로 만드는 단계라 할 수 있다. 분자들의 상태가 비정상일 경우, 그로부터 일어날 화학적 반응들은 예측할 수 없는 상태(원자의 궤도전자가 그 궤도를 이탈할 일보 직전의 상태)로 진행되고 만다.

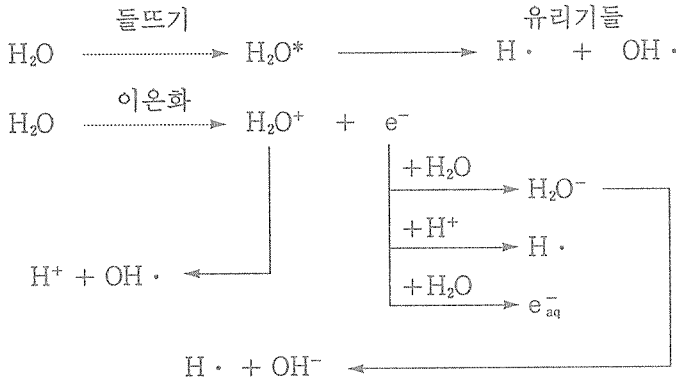


그림 9. 방사선에 쪼인 물 분자가 물리적 단계를 거쳐 유리기로 분해되는 화학 반응들을 보여줌(자료 : Alpen, 1990)

다음 단계는 화학적 단계에 이른다. 걸리는 시간은 10^{-3} 초 이다. [그림 9]는 물 분자가 방사선에 쪼일 때, 분자들의 화학적 상태가 다르게 나타날 한 모델을 보여준다.

물 분자인 H_2O 가 방사선에 쪼이면, 들뜨기 상태인 $\text{H}_2\text{O}^{*4)}$ 로 되고, 곧바로 그 분자는 수소 원자와 수산기의 유리기들($\text{H}\cdot$ 와 $\text{OH}\cdot$)로 분해한다. 그리고 또 다른 물 분자는 이온화($\text{H}_2\text{O}^+ + \text{e}^-$: 궤도전자 1개를, 1개의 자유전자로 만든 상태를 나타냄)를 한다. 곧바로 H_2O^+ 분자도 수소 이온(H^+)과 유리된 수산기(OH^-)로 분리된다. 들뜨기와 이온화는 같은 시간에 같이 일어난다.

위와 같이 방사선 때문에 진행된 상태([그림 9]의 모든 사건들)를 하나의 단위 계로 본다면, 그 속에는 여러 개의 이온들과 유리기들이 섞여 있게 될 것이다. 즉, H_2O^* , H_2O^+ , $\text{H}\cdot$, $\text{OH}\cdot$, e^- 등이 섞여져 있다. 이들은 화

학 반응들을 주도하는 중간 단계의 물질들이므로 다른 분자들보다 활성이 아주 높다는 특징을 가진다. 그러므로 이들은 서로 결합하기도 할 뿐만 아니라, 다른 분자들의 화학 결합이 잘 되도록 촉매로서의 역할도 할 수 있다. 이런 계를 한 단위로 볼 때, 10^{-3} 초 후에 결과적으로 나타날 그 계의 주된 분자들의 상태는 $\text{H}\cdot + \text{OH}\cdot$ 이고, 덧붙여 e_{aq}^- 가 남는다.

우리 몸의 수분은 체중의 90% 이상으로 알려져 있다. 우리 몸이 방사선에 쪼이게 되면, 위와 같은 모델([그림 9])의 화학 반응들이 연속적으로 일어나게 되고, 그런 이온들과 유리기들은 물 분자 이외의 유기 분자들 과도 화학적 반응을 일으켜, 다른 새로운 화학 물질들을 만들게 되므로, 돌연변이성 분자나 암을 유발시키는 어떤 악성 분자들도 생겨날 수 있을 것이다.

글을 마무리 하면서

이 글에서 줄곧 설명된 요점들은 감마선의 소멸 현상들에 집중되고 있다. 그런 현상들이 우리의 일상 생활에서 건강 관리에 중요한 의미를 가지는 것은, 우리의 몸이 방사선에

4) 다른 이름은 라디칼이라 일컬어지기도 한다. 대개는 분자가 열, 빛 그리고 방사선 등으로 화학 결합이 절단되면서 찢나 동안 분리된 상태이다. 여러 가지 화학 반응들에서 한 중간 물질로서 존재하는 경우가 대부분이다.

쪼였을 때, 우리의 몸에 침입한 방사선이 몸 속에서 물질과의 상호작용으로 소멸되면서 2차성의 부산물로 생겨난 달갑잖은 자유전자들을 우리의 체세포 조직 안에 남아 있게 한다는 그 점이다. 만일, 자유전자들을 남겨 놓지 않는다면, 생활 주변에서 쪼일 수 있는 보통 세기의 방사선의 피해는 없을 것이다. 방사선이 남겨 놓을 전자들은 몸속을 돌아다니면서 정상 세포들의 기능을 약화시키기도 하지만, 전혀 다른 비정상적 방향으로 화학적 반응들을 유도시킬 수도 있을 것이다.

필자는 이 글을 통하여, 방사선의 소멸로 생길 자유전자들이 우리 몸을 이루는 DNA와 같은 세포 분열에 민감한 유기 분자들과 작용, 그의 기능의 일부를 마비시킬 수도 있을 것이란 사실과, 활성이 아주 높은 유리기들을 새롭게 만들어 암세포와 같은 새로운 악성 세포들을 만들기도 한다는 사실 등을 강조한다. 방사선 방호에서 주창되는 “알라라” 개념은 방사선을 다루는 이들에게는 “알파와 오메가”이다.

참 고 문 헌

김제완, 1998, “웨이클의 방정식”, 생활과 원자력, 1998.7, PP. 24-25, 한국원자력문화재단.
 임승원 역, 1996, 질량의 기원, 전파과학사 간
 주승환, 1996a, “환경 방사선의 주범은 라돈 가스이다”, 기술사 Vol.29, No.5, PP.32-40, 한국기술사회의.
 주승환, 1996b, “방사선의 세기와 호르메시스”, 기술사 Vol.29, No.6, PP. 한국기술사회의.
 주승환, 1996c, “과학철학자 앙페르의 업적”, 기술사 Vol.29, No.3, PP.71-82, 한국기술사회의.
 주승환, 1996d, “불의 신과 꿈의 에너지”, 기술사 Vol.29, No.4, PP.22-25, 한국기술사회의.
 주승환, 1998, “방사선을 어떻게 이해할 것인가?”, 동위원소희보, 제13권, 2호, PP.24-27, 한국방사성동위원소협회.
 주승환 제원목, 1995, 라돈 방사능과 생활 환경, 계측문화사 간.
 주승환 제원목, 1997, “감마선은 어떻게 소멸하게 되는가?“, 기술사 Vol.30, 1, PP.5-15, 한국기술사회.
 Alpen E.L.,1990, “Radiation Biophysics”, PP.48-73, Fig.16-4, Prentice-Hall, International, Inc..
 Morrison P.,1995, “Recollection of a Nuclear War”, Scientific American August 1995, P.28.

광고 모집

동위원소희보는 년 4회(3, 6, 9, 12월)발간하는 계간지로서 방사성동위원소/방사선 등과 관련한 국내외 최신정보를 주내용으로 방사성동위원소 및 방사선발생장치 등을 사용하는 일반산업체, 비파괴업체, 판매업체, 교육기관, 연구기관, 의료기관 등과 동분야 관계자를 비롯, 정부 및 유관기관 등을 대상으로 배포되고 있습니다.

광고를 희망하는 기관은

협회 정보관리팀(담당: 최윤석, 전화: 02-566-1092)에 문의하시기 바랍니다.

<광고 게재료>

구 분	표 3	표 4	내 지
금 액	1,200,000원	1,500,000원	1,000,000원
비 고	컬러 인쇄(부가세, 원색분해비 별도)		2도 인쇄(부가세 별도)