



감마선은 어떻게 소멸하게 되는가?

How does Gamma - Radiation Disappear within a Matter

朱 昇 煥*1

Choo, Seung Hwan

諸 元 穆*2

Je, Won Mok

•차 례•

상호작용	원자의 모습
궤도전자들의 배열	광전자 산란 효과
컴프턴 산란 효과	전자쌍 생성 과정
감마선이 물질과의 상호 작용은 어떻게 이뤄질까?	

방사선들 중에서 감마선은 우리의 몸 속을 깊숙이 침투할 수 있다. 그런 감마선이 우리 몸을 투과할 때, 체세포를 이룬 원자들의 궤도전자들과 충돌하면서 소멸된다. 우리는 그런 현상들을 '물질과의 상호작용'이라 부른다. 방사선과 물질과의 상호작용은 원자의 단위에서 일어난다. 감마선이 물질과의 상호작용들은 물리적으로는 '광전자 산란 효과', '컴프턴 산란 효과' 그리고 '전자쌍 생성 효과' 등으로 구분하여 설명된다.

방사선이 우리의 몸 속에서 체세포의 원자와 충돌하여 생기는 자유전자들은 몸 속에 남게 되고, 그들은 몸 속을 상당 기간 동안 배회하면서 인체의 생명 현상을 유지시킬 생화학 작용의 기능들을 약화시키기도 하고, 악성인 암세포들을 만들어내기도 하므로 건강 유지에 불리하게 작용한다. 따라서 감마선에 쬐여 생긴 자유전자들은 우리의 정상적인 건강 조건들을 해치는 주된 요소가 된다.

제2차 세계대전을 종식시키는 데 결정적인 공헌을 했던 「원자폭탄」의 이야기는 이미 역사적인 사건이 되고 말았다. 이웃 나라가 당한 쓰라린 상처를 다시 건드릴 의도는 추호도 없지만, 일본이 패망하고, 우리의 독립을 되찾게 된 것도 「원자폭탄」의 덕택이었던 점을 우리는 잘 알고 있다. 일본 히로시마와 나가사키에 투하되기 바로 전에 「원자폭탄」은 「리틀보이(little boy)」라는 암호명으로 불려졌다고 전한다(Morrison, 1995). 그런 폭탄이 연이어 투하된 후, 「리틀보이」의 가공할 파괴력은 온

인류를 경악케 하고도 남았었다. 그 후로는 그의 이름만 들어도 인류는 전율을 느낄 만큼, 「원자폭탄」은 인류에게 새로운 공포의 대상이 되고 만 것이다. 그런 사건이 있고 난 후로부터 얼마 전까지 계속된, 거의 반세기 동안, 원자폭탄은 냉전 시대의 공룡으로서 인류에게 항상 불안을 가져다 주었던 것이다.

그런 폭탄이 투하될 그 당시만 해도, 소수의 과학자들을 제외한 일반 사람들에게는 그런 가공스러운 파괴력이 어디에서, 그리고 어떻게 일순간에 만

*1 放射線管理技術士, 工學博士(원자력공학), 한국자원연구소 자원탐사부 책임연구원.

*2 한양대학교 원자력공학과 명예교수.

들어질 수 있는가(?)에 의문을 품기 시작했었다. 그 당시의 폭탄 제조는 주로 다이너마이트의 폭발력에 의존했던 시절이라, 봉황의 속을 참새가 알 수 없듯, 「리틀보이」의 가공할 파괴력을 다이너마이트의 이론으로 설명할 수가 없었다.

기존의 지식으로써는 도저히 설명할 수 없었던 그런 위력을 다이너마이트의 폭발력과 차별성을 두게 한, 엉겁결에 불리진 이름이 바로 「원자폭탄」이며, 지금도 그 같은 잘못된 이름이 그대로 쓰이고 있다.

사실, 다이너마이트의 폭발 메커니즘은 원자의 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 바르다.

이 글은 방사선의 소멸 현상에 대하여 쓰고 있다. 방사선의 소멸은 원자 단위에서 일어나는 현상임을 독자는 이미 잘 알고 있을 것이다. 그런 현상들에 쉽게 접근하려면, 우리는 먼저 개략적이거나, 원자의 모습을 이해할 필요가 있을 것이다. 다소 지루하겠지만, 독자와 함께 원자의 모습부터 알아보려 한다. 원자의 모습으로부터 필자가 앞에서 지적한 「원자폭탄」을 ‘핵폭탄’으로 바르게 써야될 의미도 쉽게 이해될 것이다.

상호작용

본지에 투고한 두 편의 글(주승환, 1996a,b)을 읽어본 독자는 우리의 생활과 밀접하게 연결된 방사선의 종류들, 그리고 방사선과 연결된 기초 개념들을 이해하고 계실 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 중에서 우리의 몸 속을 자유롭게 투과할 수 있는 것은 오직 ‘감마선’ 뿐이다. 따라서 방사선의

문제들은 외부에서 방사선이 우리 몸에 쏘일 경우, 대체로 ‘감마선’의 영향을 주된 대상으로 삼게 된다.

그런 감마선들은 이웃한 다른 물질의 원자들에 부딪쳐 소멸된다. 이웃 원자와의 부딪침은 그 원자를 이룬 ‘궤도전자들’과의 충돌이며, ‘원자핵’ 속까지 접근하지는 못한다. 독자는 궤도전자에 대한 이야기를 이미 잘 아시겠지만, 방사선의 소멸 현상이란, 궤도전자들과의 충돌을 주된 현상으로 꼽을 수가 있으므로 필자는 다시 한번 궤도전자의 배열 체계를 되풀이 해 볼 것이다.

감마선이 물질에 부딪쳐 소멸하는 현상은 전문 용어로 쓰자면, ‘물질과의 상호작용’이다. 물질과의 상호작용은 개념적으로 어려운 표현일 수도 있다. 쉽게 보면, ‘자석이 쇠붙이를 끌어당길 에너지는 달라붙는 쇠붙이와 자석이 서로 에너지를 교환하는 현상이다. 자석만이 에너지를 가진 것은 아니고, 상대방인 쇠붙이 쪽에서도 대응하는 에너지를 내보내야 서로 달라붙는다’는 개념은 ‘서로 작용한다’는 의미인 상호작용의 일면으로 볼 수 있을 것이다. 나무조각은 자력에 대응할 에너지가 거의 없기 때문에 자력에 쉽게 끌리지는 않는다. 유기물질인 나무조각과 금속은 그들을 이루는 원자들의 배열(궤도전자들의 배치)이 서로 전혀 다르기 때문에 나무조각들은 자력과 에너지 교환을 자력에 끌릴 만큼, 크게 할 수가 없는 것이다.

한편, 인간의 감정이나 정신 세계에서 상호작용의 예를 들자면, 청춘 남녀 사이에서 사랑을 속삭일 때, 만일 짝사랑이 아니라고 한다면, 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 사람으로서 인류최초로 전류를 발견했던 앙드레 마리 앙페르(Ampere)는 칸트의 「우주관」으로부터 물질 세계의 현상들과 실체들 사이에 존재하는 차이점을 인식하려고 사색을 하던 중, 여러 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 연결되며, 마침내 그가 인류에게 공헌한 위대한 업적 중의 하나로 인정받는, 우리의 눈으로 볼 수 없는 에너지인 전류를 상호작용의 원리를 기초로 삼아 발견하게 된다.

원자의 모습

물질의 최소 단위는 원자이다. 원자(atom)라는 낱말은 이미 B.C. 6세기경부터 서양의 철학 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 구성되어있다’는 짙막한 문장을 남겼다. 그의 그런 문장은 현대적인 원자의 개념을 잘 표현하고 있다.

그리스 과학자들이 최초로 원자의 모습을 생각했던 대상은 물이었다. 물은 눈에 보이지 않는 작은 알갱이들로 뭉쳐진 물체로 보게 된 근거는 물 속에 지팡이를 넣고 뜻대로 휘젓고 나도, 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. ‘부부 싸움은 칼로 물 베기’란 우리의 속담은 원자의 모습과는 다른, 부부 사이에서 잠시나마 멀어졌던 상호간의 정신적인 결합을 유도하자는 의미일 것이다. 필자들의 생각을 덧붙인다면, 쌀알을 쌓아 놓고 막대기로 마음대로 휘젓고 나서도, 쌀알들이 다시 원상대로 모일 수 있는 것은 낱알들이 서로 모여있기 때문일 것이다.

그로부터 2000여 년 동안, 원자의 모습은 하나의 관념론의 범위에서 원자의 존재를 유추한 수준에

머물 수밖에 없었을 것이다. 그러므로 이렇다 할 구체적인 원자의 모습을 한정시켜 놓을 수가 없었다.

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

원자의 모습은 마치 우주에 있는 태양계의 축소판의 모습과 비슷하다. 태양계는 태양을 중심 축으로 주위에는 지구, 금성, 달, 인공위성 등, 태양계의 많은 별들이 태양을 중심 축으로 삼아 일정한 속도로 공전하고 있다. 한 개의 원자는 거기에 하나밖에 없는 원자핵이란 부분과, 원자의 종류에 따라 다른 길이지만, 하나에서 여러 개의 궤도전자들로 이뤄지고 있다. 원자의 모습에서 원자의 중심은 태양계의 태양의 위치처럼 원자의 핵(원자핵)이 자리잡고 있고, 원자핵과 얼마 정도 떨어진 공간은 궤도전자들이 에워싸고 있다.

궤도전자들은 햇빛의 속도만큼이나 빠르게 원자핵 주위를 아주 규칙적으로 원 운동을 하고 있다. 운동하는 속도가 아주 빠르기 때문에, 궤도전자들은 마치 정지된 상태로 원자핵을 에워싼 듯한 모습을 보여준다. 궤도전자들이 돌고 있는 궤도의 안쪽은 텅빈 공간이긴 하지만, 그 원자에 소속된 궤도전자가 운동하는 영역이므로 원자의 크기를 결정하는 기준이 된다. 따라서 원자란 우주 공간처럼 속이 텅 빈 공간이기 때문에 X-선이나 감마선이 마음대로 원자들로 이뤄진 금속의 속 또는 우리 몸 속을 자유롭게 통과할 수 있게 된다.

화학 분야에서는 원자보다 ‘원소’라는 말을 많이 쓴다. 원소는 수소, 산소 등과 같은 이름으로 ‘수소 원소’, ‘산소 원소’ 등과 같이 물질의 한 종류를 나타낸다. 지구 위에 있는 원소들은 92개나 되고, 수소에서 우라늄에 이르기까지 그들은 모두가 ‘원자 번호’(원소 번호라고 쓰지 않음)라는 이름표를 달고 있다. ‘원자 번호’는 바로 그 원소가 갖는 정해진 수의 궤도전자 수효를 뜻한다. 예컨대, 수소는 1번(궤도전자 수:1개), 헬륨은 2번(궤도전자 수:2개)

그리고 우리들은 92번(궤도전자 수:92개) 등으로 구별되고 있다.

모든 물체들은 그들의 성질을 유지할 수 있는 가장 적은 기본 단위가 있다. 그런 단위는 '분자'이며, 분자는 화학적으로 더 이상 분리할 수 없다. 모든 분자들은 한 개의 원소로 된 경우(대체로 금속체들과 기체인 물질들)도 있겠지만, 대체로 여러 개의 원소들과의 화학적 결합으로 우리의 눈에 보이는 물체를 이루고 있는 것이다. 원소이든, 여러 개의 원소들로 결합을 이루든, 그들은 그들의 궤도전자들을 서로 주고받으면서 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 핵(양성자, 중성자 그리고 중간자 등으로 이뤄짐)을 따지는데 아주 유리하다. 정리하면, 원소나 원자라는 이름은 물체를 구별할 때는 서로 같은 의미를 뜻하지만, 원자핵을 따질 경우, 예컨대 핵을 이루는 양성자와 중성자의 수효를 따질 경우, 원소 이름 대신 원자라는 이름을 쓴다. 같은 원소는, 비록 원자핵의 내용이 서로 다를지라도, 같은 화학적 성질을 가지고 있으므로 물체의 화학적 성질을 따지는 데, 원자들을 포함하는 원소라는 이름이 더 유리하다.

궤도전자들의 배열

원자 번호는 그 원자의 궤도전자의 수효를 나타

낸다고 앞에서 말한 적이 있다. 그런 궤도전자들은 원자핵을 구심점으로 원 운동을 하지만, 놀랄만큼 정교하게 정해진 궤도를 따라 움직인다. 양자역학은 궤도전자들이 돌고 있는 궤도의 에너지 준위(위치 에너지의 크기)를 셸으로 확인할 수 있게 한다. 지금 우리가 알 수 있는 것은 복잡한 수식으로 셸한 결과, 밝혀진 사실에 따라 원자의 모습을 따져간다. 즉, 궤도전자들이 돌고 있는 궤도들은 양파의 껍질처럼 여러 겹으로 되어있고, 각각의 껍질에는 일정한 수의 궤도전자들이 배치된다는 사실을 알고 있다.

예컨대, 원자핵과 가장 가까운 껍질은 '최내각'이란 이름으로 불리며, 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 껍질의 수효도 따라서 정해진다. 어떤 원자는 그 원자의 궤도전자 수를 위의 방법으로 채워가면, 바깥 껍질에 궤도전자를 다 채우던가 또는 가득 채우질 못하는 경우가 있게 될 것이다. 그 때, 그 껍질이 바로 앞에서 말한 '최외각'이 된다. 모든 원자의 최외각에 있는 궤도전자 수효는 1에서 8개 사이가 된다. 원소의 주기율표는 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 주기율표이다. 따라서 주기율 표는 원소들의 족보에 해당되므로 모든 원소들은 주기율 표에 그들의 자리가

- 1) 주기율표는 멘델레프가 원자의 모습을 알기 훨씬 먼저 원소의 주기적 성질을 바탕으로 하여 만든 것이다. 그 때는 원소의 번호를 지정할만한 근거를 발견하지 못 했던 것이다. 1898년 영국이 낳은 위대한 과학자 J.J. Thomson이 원자의 모습에 관한 plum-pudding(포도가 섞인 요리 이름) 모델을 주창하게 되고, 13년 후에 Geiger 와 Marsden이 알파 알갱이를 얇은 금포일(금박)에 쪼여 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. 그가 주창한 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 이유가 여기에 있다.

정해져 있다. 그리고 주기를 표는 다른 원소들끼리 화학적 결합을 이룰 때, 서로가 교환할 궤도전자의 수효를 쉽게 알 수 있게 해준다.

서두에서 설명하다 만, 다이내마이트의 폭발은 한 원자의 모습에서 궤도전자가 들고 있는 껍질과 그 껍질 속에 들어 있는 궤도전자들이 다른 원자의 그것들과 엄청난 속도로 뭉치는 현상이 에너지로 표출되는 원리에 해당한다. 따라서 원자의 핵과는 아무런 관계가 없다. 이런 원리로 보면, 「원자폭탄」은 다이내마이트의 폭탄 쪽이 더 가까운 이름일 것으로 여겨진다. 「리틀보이」로 불렸던 폭탄은 원자의 한 모습에서 중심에 자리잡은 원자핵이 쪼개지는 현상을 이용한 것이므로 ‘핵폭탄’이 바로 이름이다.

감마선은 원자의 핵 속에서 나온 물질이긴 하지만, 사람이 기계적인 힘을 감마선에 보태지 아니하면, 감마선이 가진 본래의 타고난 천연적인 에너지 만으로는 다른 원자핵 속으로 끼여들지 못 한다. 이 글의 주제인 감마선의 소멸은 원소들의 궤도전자들과의 충돌에서 그의 에너지를 잃게 되고, 결국은 소멸된다.

앞으로 할 이야기는 감마선이 궤도전자들과의 충돌로 소멸되는 과정들을 물리적 현상에 따라 3가지 유형으로 구별하여 독자와 함께 알아보게 될 것이다. 그런 과정들은 전문용어로는 ‘광전자 산란 효과’, ‘컴프턴 산란 효과’ 그리고 ‘전자쌍 생성 효과’ 등으로 불려진다. 아마도 이런 이름들은 일반 독자들에게는 낯설게 느껴질 수도 있을 것이다.

광전자 산란 효과

19세기 후반기에 일련의 실험으로 알려진 사실은 어떤 물질의 표면(주로 알칼리금속에서 쉽게 관찰됨)에 강한 햇빛(자외선)을 쬐일 때, 그 물질의 표면에서 전자들이 튀어나오는 현상을 발견하였다. 물리학에서는 이런 현상을 ‘광전효과’(Photoelectric effect)라 부른다.

앞에서 이야기한 원자를 이룬 궤도전자들은 보통

때, 원자에 붙잡혀 있는 원자의 한 구성요소이므로 그들은 그들이 속속된 원자를 쉽게 벗어날 수 없다. 그래서 궤도전자들은 ‘속박된 전자(속박전자)’라는 이름을 붙인다. 햇빛에 쬐인 금속은 빛이 금속에 속박된 궤도전자를 내어쫓는 ‘광전효과’라는 현상을 통하여 금속표면에서 전자들을 튕겨내며, 그런 전자들은 ‘자유롭게 이동하는 전자’라는 뜻으로 ‘자유전자’라 부르나, 특별한 경우가 아니면, 그저 ‘전자’라고 한다. 감마선은 아주 높은 운동 에너지를 가진 전자파이고, 어떤 한 종류의 빛에 해당되므로 햇빛보다는 광전효과를 더욱 쉽게 일으킨다.

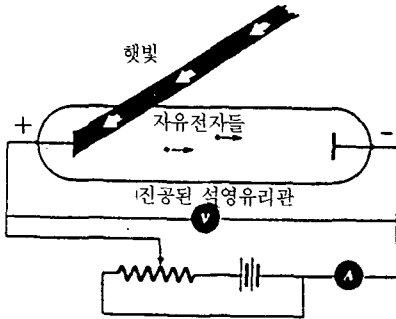
광전효과는 <그림 1>의 (a)처럼 장치를 만들어 실험해 보면, 쉽게 확인할 수 있을 것이다. 실험 방법을 간단하게 설명하자면, 우선, 석영으로 된 유리관 속에 플러스 극(+)과 마이너스 극(-)을 서로 떨어지게 분리시킨다. (+)쪽에는 나트륨 금속 조각을 햇빛이 많이 와 닿게 단면적을 크게 되도록 붙이고, (-)쪽에는 보통의 구리 도체로 전극을 만들어 양쪽이 외부의 전선과 연결될 수 있도록 유리관 밖으로 나오게 한다. 유리관 속은 진공을 시킨 다음 밀봉을 한다. 양쪽의 전극에 그림처럼 전원과 전류계(A)를 연결시켜 놓는다.

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

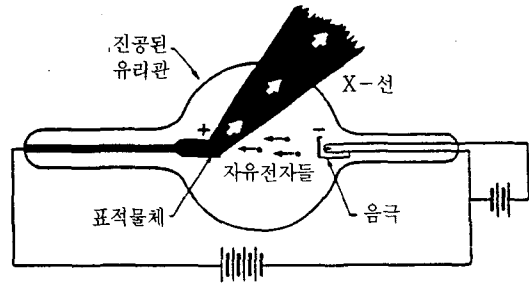
나트륨 금속에서 튕겨나온 자유전자들이 (-)극에 도달하려면, 자유전자들이 운동에 필요한 충분한 운동 에너지를 지녀야 한다. 그래야 전류계(A)에 전류의 흐름을 감지할 수 있을 것이다. 독자는 전기의 성질을 이해하실 것이다. 전기는 전류와 전압으로 나뉜다. 전류의 세기는 이동하는 전자들의

수효로 결정이 되며, 전압은 전자들을 이동하도록 밀치는 힘이다. 전기는 우리의 눈으로 볼 수는 없다. 쉬운 예로, 상수도에서 물이 나오는 양과 수압을 전기에 견준다면 알기 쉽다.

위의 실험에서 눈여겨 봐야 될 주요 사실은 (+)극과 (-)극 사이에 걸리는 전압을 전압계(V)로 읽을 수 있고, 빛을 쬐이면서, 두 극들 사이에 전압을 과연 몇 볼트로 높여 줄 때, 전류계(A)에 전류가 흐르게 될 것인가? 하는 점은 아주 흥미롭다. 그런 전압은 쬐일 햇빛의 세기와는 상관이 없다는 사실을 알게 될 것이다(파장이 다른 빛의 종류에는 파장에 따른 각각의 고정된 전압이 따로 정해진다). 즉,



(a) 광전효과의 원리



(b) X-선 발생장치에 이용되는 X-선 발생관의 원리

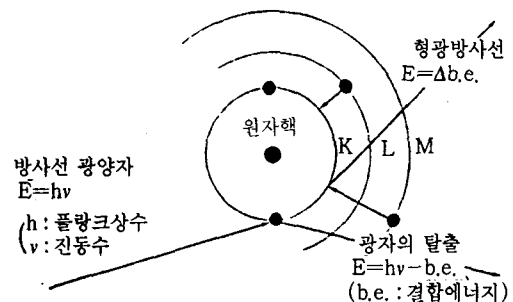
<그림 1> 광전효과(a)와 X선 발생튜브(b)

이 글의 주제와는 다소 거리가 있는 이야기지만, 필자들이 의도적으로 광전효과를 보다 자세하게 설명하고 싶은 뜻의 저변에는 다음과 같이 매우 중요한 내용과 연결되고 있기 때문이다. 지금 우리는 우리에게 당면한 에너지 문제를 해결하기 위하여 대체 에너지 개발을 서둘러야 한다. 우리의 미래 에너지 원으로서 햇빛을 이용할 태양광 발전이 우리의 눈앞에 보이는 시점이고, 그런 발전의 기본 원리의 바탕이 광전효과의 현상을 이용하기 때문이다. 기회가 있을 때, 태양광 발전에 대한 이야기를 하게 되겠지만, 태양광 발전에서 우선 전제가 되는 것은 특수 금속들(실리콘, 갈륨, 그리고 갈륨아세나이드 합금 등)의 반도체들을 어떤 방식을 이용하든, 그들로부터 최대의 자유전자들을 능률적으

(+)와 (-) 두 극점들 사이에는 최소한의 전압을 유지시키면 된다. 광전효과에서 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 1)의 (b)). 즉, 자유전자의 이동을 화살표(그림 1)의 (a)에서 빛이 들어오는 방향 화살표의 반대 방향으로 돌려놓게 장치를 만들고, (+)에 나트륨 금속 대신 텅스텐과 같은 금속으로 바꿔, 거기에 돌아선 전자를 쬐이게 하면, 햇빛이 진행하는 방향과는 달리 반대쪽으로 방사선인 X-선이 나온다(그림 1)의 (b)).

로 꼬집어내게 하는 기술이다. 태양광 발전의 효율을 높인다면, 1제곱미터(m^2) 면적에서 약 1kwh의 깨끗한 전력을 뽑아 쓸 수 있다. 태양광 발전처럼,



<그림 2> 방사선인 한 광양자가 물질을 이룬 한 원자의 궤도 전자를 밀치는 광전자 산란 과정의 모습 (Alpen, 1990).

방사선을 이용하는 발전 방식의 구상도 앞으로 하게 될 날이 오게 될 것이다.

방사선인 감마선이 물질의 원자 단위에서 일으키는 광전자 산란 현상을 좀더 자세히 살펴보자! (그림 2)는 원자의 모습을 그려놓고, 감마선이 원자에 속박된 궤도전자들과 충돌할 수 있는 가능성(확률)을 보여준다.

그 그림에서 원자의 중심에는 원자핵이 자리잡고, 주위는 궤도전자들이 원자핵을 중심으로 돌고 있는 일부를 보여주고 있다. 그런 궤도들의 이름들은 K, L, M 등의 기호로 표시되고 있는 일부를 보여주고 있다. 감마선은 햇빛보다는 파장이 아주 짧기 때문에 파장의 역수인 진동수는 매우 크므로 원자의 속까지 깊숙하게 파고 들어가서 K껍질의 궤도전자들과 충돌하게 될 것이다. 대체로 감마선에 의한 광전효과는 K껍질의 궤도전자들과 충돌한다. 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 산란 효과'라 부른다.

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

양자역학은 궤도전자들이 각 궤도에 묶여 있는 것은 각 궤도가 정해진 일정 크기의 위치 에너지를 가지고 있기 때문으로 해석한다. 따라서 K, L 그리고 M껍질들의 위치 에너지들은 핵으로부터 멀리 떨어질 수록 커진다. L껍질의 궤도전자가 K껍질로 이동하면, L껍질에서 가지고 있던 궤도전자의 에너지는 K껍질을 채우고도 여분의 에너지가 남게 되고, 그 에너지는 '현광'을 내면서 원자 밖으로 발산해 버린다. 형광등, 나트륨등 그리고 할로겐등 등은 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, 그런 자유전자들은 물질의 화학작용에 많은 영향을 미치게 될 것이다. 그 이유는 자유전자들의 역할이 방사선의 생물학적 효과를 해석하는데 매우 중요한 원리적 바탕이 되고 있기 때문이다.

컴프턴 산란 효과

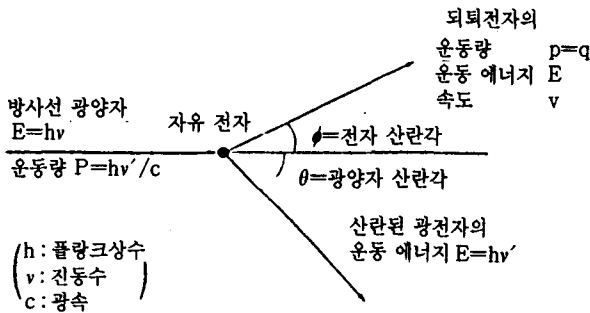
감마선이 물질과의 상호작용을 하는 데, 두 번째로 중요한 현상으로 알려진 컴프턴 산란을 알아본다. 1920년대 컴프턴(Arthur H. Compton)은 양자역학에서 양자들이 물질과의 충돌을 수리적으로 처리할 수 있는 주요한 이론을 발표하였다.

독자는 당구실력이 높으시겠지만, 필자는 아직 큐를 잡아본 역사가 없다. 컴프턴 산란 이야기만 나오면, 당구를 배우지 못했던 것을 아쉬워한다. 자기의 공이 표적이 될 공과 충돌 후, 움직일 방향은 밀어 치는 큐의 각도(방향)와 밀치는 힘의 크기로 결정된다고 한다.

(그림 3)은 감마선의 광자 한 개가 자유전자(궤도전자와는 다름)와 충돌할 때, 충돌한 자유전자의 산란 과정을 컴프턴의 효과로 나타낸 그림이다. 컴프턴 산란은 그런 원리를 물리적인 수치로 아주 잘 설명해 준다. 앞에서 설명한 광전효과에서, 궤도전자들이 궤도를 이탈하여 자유전자가 되면, 광전자 산란과정에 참여치 않았던 감마선의 일부인 다른 광전자는 컴프턴 산란 효과로써 그런 자유전자를 때려부수는 역할을 하게 된다. 이런 효과들(광전자 산란 효과, 컴프턴 산란 효과 그리고 전자쌍 생성 효과)은 원자 단위에서 같은 시간에 함께 일어난다.

감마선은 어떻게 소멸하게 되는가? / 11

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 편으로는 그의 운동에너지 일부를 자유전자의 운동 에너지에 보태게 된다. 그런 작용은 원자 단위에서 일어나는 현상이므로 헤일 수 없이 많은 콤프턴 산란 효과가란 효과가 잘나 동안 되풀이되면서 마치 연쇄반응처럼 잘나 동안 지속되면서 감마선의 운동 에너지는 소멸한다. 앞의 광전자 산란 효과와 다른 점은 궤도전자들과의 충돌 현상이 아니므로 형광 빛은 생겨날 수 없다.



〈그림 3〉 방사선인 광양자가 물질을 이룬 원자 주위의 한 자유 전자와 충돌하는 콤프턴 산란 과정의 모습 (Alpen, 1990).

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 사람의 힘은 정지했던 공을 움직이게 하는 데 쓰이고, 굴러가는 공의 운동 에너지는 다른 정지된 표적의 공을 다른 각도로 움직이게 하는 데 쓰일 것이다. 따라서 큐로 밀친 인력은 두 공들의 운동 에너지로 바뀔 것이므로, 두 공들의 운동 에너지를 각각 셈하여 서로 더한다면, 감마선의 운동 에너지를 개략적이나마 알 수 있게 될 것이다.

전자쌍 생성 과정

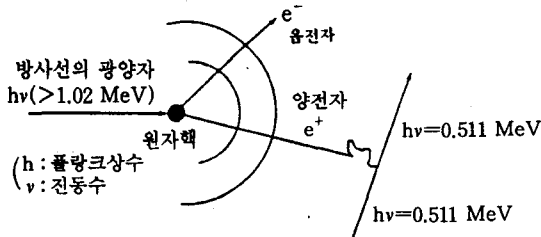
감마선이 물질과의 상호작용으로 소멸되는 세 번째 과정인 '전자쌍 생성'은 필자들이 특별히 관심을 두고 있는 부문이다. 따라서 우리는 이런 설명을 할 때마다 신들린 사람처럼 흥이 절로 난다.

주승환(1996d)은 본지에 투고한 미래의 에너지 원을 얘기하면서 밑잡은 장래에 인류는 상업적으로 에너지의 새로운 원천이 될 '반입자'를 제조하는 데 성공하리란 전망을 한 적이 있다. 인류는 미래의 에너지 원으로써 반입자를 이용할 수 있다는 근거가 바로 여기에 소개하는 '전자쌍 생성'의 원리에 터잡고 있다.

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. 아직은 전자를 음과 양으로 구별하는 경우는 아주 제한된 전자들에게만 허용되고 있다. 즉, 원자의 핵에서 튕겨 나오는 전자의 성질을 띤 '베타 알갱이'를 설명할 때와, 여기에서 설명하는 것처럼, 감마선이 원자핵에 접근할 때, 원자핵 주변에 작용하는 강력한 전기력이 미치는 공간(보통 쿨롱장 또는 전장)에서 감마선은 그런 힘에 의하여 운동이 저지되고, 그래서 정지되면서 그의 운동 에너지는 두 개의 쌍으로 된 '양전자'와 '음전자'로 탈바꿈하는 현상을 설명하는데 쓰이고 있는 것이다.

전자를 음과 양의 두 성질로 구별하면, 「전자쌍」이란 이름으로 불려진다. 〈그림 4〉는 감마선인 한 광자가 원자핵력이 미치는 곳으로 지나갈 때, 원자핵을 둘러싼 강력한 쿨롱장의 저항력을 견디어 낼 수 없게 된다. 그런 현상 때문에 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 찢나 동안 보존 될 수 있다.



〈그림 4〉 방사선의 광양자(1.022MeV보다 큰 에너지)가 물질을 이룬 한 원자의 핵에 접근했을 때, 전자의 한 쌍으로 변하는 쌍생성 산란 과정의 모습(Alpen, 1990).

감마선인 한 광자가 원자핵력이 미칠 쿨롱장에 접근하려면, 일정한 규모 이상의 운동 에너지를 지니고 있어야 가능하다. 그와 같은 크기의 운동 에너지란, 두 전자들의 정지된 질량으로 에너지를 썬한 전자의 운동 에너지들이 각각 0.511 Mev(메가전자볼트)²⁾이므로, 감마선인 광자의 최소한 요구될 에너지는 두 전자들의 정지 에너지를 합친 1.022 Mev를 넘어야 된다.

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

만일, 위와 같은 원리를 인류 문화의 기본 요소인 우리의 에너지 생산에 이용할 수만 있다면, 불꽃을 얻기 위하여 막대한 화석연료를 태워 공해성 물질을 배출시키므로써 산성비를 내리게 할 필요도 없을 것이며, 골치 아픈 방사성 폐기물을 양산해 낼 핵발전소도 필요 없게 될 것이다. 필자가 미래 에너지

를 전망했던 확실한 근거도 바로 이런 원리에 터 잡고 주장된 논리였던 것이다.

감마선이 물질과의 상호 작용은 어떻게 이뤄질까?

지금까지 독자와 함께 생각해 본 것은, 기본 원리에 따라 방사선들 중에서도 특별히 우리의 몸 속을 꿰뚫고 지날 힘센 감마선의 이야기를 살펴본 내용들이고, 아울러 감마선이 원자 단위에서 물질과의 상호 작용으로 소멸되는 현상들을 대충 살펴보았다. 원자의 세계는 나노(1/10 000 000 000) 단위의 극 미세의 세계이므로 우리의 눈으로는 느끼지 못한다. 따라서 실감이 나지 아니함은 당연하다. 원자 보다는 좀더 큰 단위인 분자의 세계에서 방사선이 물질과의 상호 작용들을 생각해 보는 것은 우리의 건강과 관련시켜 볼 수 있으므로 보다 유익할 것으로 생각된다.

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

방사선이 만든 전자가 물질의 화학적 결합에 영향을 주는 것을 연구하는 분야는 방사선분해(Radiolysis)라는 학문이다. 이 분야에는 방사선과 관계된 많은 현상들이 알려져 있다. 특히 고분자 화학 물질을 중합시켜 초경도(엔지니어링 플라스틱 물질의) 새로운 첨단 소재들을 만들어 내는 것은 이미 진부한 이야기일 것이다.

필자들은 그런 분야의 구체적인 사례를 나열하기 보다는 방사선이 우리 몸에 쏘일 때, 나타날 생물학적인 효과에 대한 원리를 쉽게 설명하는 것이 독자가 방사선을 좀더 쉽게 이해하는 데 보탬이 되리란

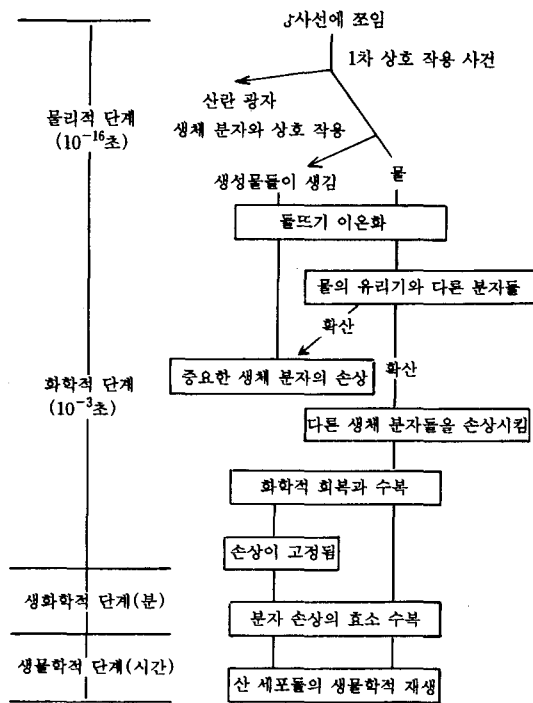
2) 전자볼트(eV)는 한 운동 에너지의 단위이다. 1 볼트의 전압 차이가 있는 전장의 두 점 사이 공간에서 전자(e) 1개가 움직일 때, 소비되는 운동 에너지를 1 전자볼트(1 eV)라고 정한다.

(1 메가전자볼트(1 MeV) = 10⁶eV).

생각을 해본다.

여기에 소개된 내용들은 대체로 필자들이 쓴 「라돈 방사능과 생활 환경」에서 이야기한 기본 원리들을 바탕으로 하고 있다.

〈그림 5〉는 캘리포니아 대학 생물물리학과 교수인 에일펜(Alpen, 1990) 박사의 자료를 우리의 책에 인용했던 내용들을 이 글에서 다시 한 번 인용한다. 〈그림 5〉는 방사선이 우리 몸을 투과할 때, 일어날 여러 단계들을 구분하여 놓았으며, 각 단계마다 주요한 현상들을 요약한 내용들이다. 여러 단계들은 물리적 단계, 화학적 단계 그리고 생화학적 단계(분 동안의 현상들)와 생물학적 단계(시간 동안의 현상들)로 나뉘고 있다.



〈그림 5〉 방사선이 그의 에너지를 산 세포 조직에 전달하는 과정들(자료: Alpen, 1990).

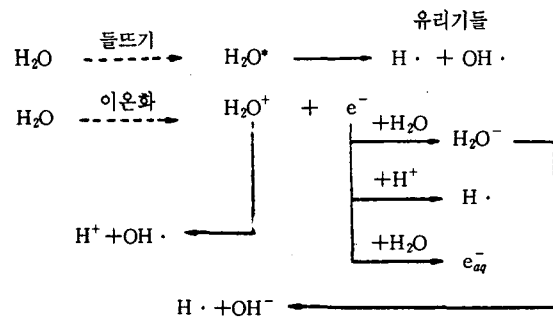
우선 물리적 단계부터 살펴본다. 우리 몸이 방사선에 쪼이면, 우리 몸을 이루는 생체 조직의 분자들과 10⁻¹⁶ 초 사이에 반응이 끝나 버린다. 일어날 주된

현상은 방사선에 쪼인 부분의 분자들을 이루고 있는 원자의 궤도전자를 자유전자로 만드는 역할이 그 전부이다. 방사선에 쪼인 원자의 모습은 정상과 다른 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 상태로 진행되고 만다.

다음 단계는 화학적 단계에 이른다. 걸리는 시간은 10⁻³ 초이다. 〈그림 6〉은 물 분자가 방사선에 쪼일 때, 분자들의 화학적 상태가 다르게 나타날 한 모델을 보여준다.

물 분자인 H₂O가 방사선에 쪼이면, 들뜨기 상태인 H₂O*로 되고, 곧바로 그 분자는 수소 원자와 수산기의 유리기들(H·와 OH·)로 분해한다. 그리고 또 다른 물 분자는 이온화(H₂O⁺ + e⁻: 궤도전자 1개를, 1개의 자유전자로 만든 상태를 나타냄)를 한다. 곧바로 H₂O⁺ 분자도 수소 이온(H⁺)과 유리된 수산기(OH·)로 분리된다. 들뜨기와 이온화는 같은 시간에 같이 일어난다.

위와 같이 진행된 상태(그림 6의 모든 사건들)를 한 단위 계로 본다면, 그 속에는 여러 개의 이온들과 유리기들이 섞여 있게 될 것이다. 즉, H₂O*,



〈그림 6〉 방사선에 쪼인 물 분자가 물리적 단계를 거쳐 유리로 분해되는 화학 반응들을 보여줌 (자료: Alpen, 1990).

H_2O^+ , $H\cdot$, $OH\cdot$, e^- 등이 섞여져 있다.

이들은 화학 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 $H\cdot + OH^-$ 이다.

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

글을 마무리하면서, 이 글에서 줄곧 설명된 요점들은 감마선의 소멸 현상들에 집중되고 있다. 그런 현상들이 우리의 일상 생활에서 건강관리에 중요한 의미를 가지는 것은, 우리의 몸이 방사선에 쪼였을 때, 우리의 몸에 침입한 방사선이 몸 속에서 물질과의 상호 작용으로 소멸되면서 2차성의 부산물로 생겨난 달갑잖은 자유전자들을 우리의 체세포 조직 안에 남겨놓게 된다는 사실인 것이다. 만일, 자유전자들을 남겨 놓지 않는다면, 생활 주변에서 쪼일 수

있는 보통 세기 정도인 방사선으로서는 우리몸이 입게 될 극심한 피해는 없을 것이다. 방사선이 남겨 놓을 전자들은 몸 속을 돌아다니면서 정상 세포들의 기능을 약화시킨다.

필자들은 이 글을 통하여, 방사선의 소멸로 생길 자유전자들이 우리 몸을 이루는 DNA와 같은 세포 분열에 민감한 유기 분자들과 작용, DNA의 기능의 일부를 마비시킬 수도 있을 것이란 사실과, 그리고 그같은 전자들은 활성이 아주 높은 유리기들을 새롭게 만들어 내면서 암세포와 같은 새로운 악성 세포들을 만들기도 한다는 사실들을 강조한다.

•참고문헌

- 주승환, 1996a, "환경 방사선의 주범은 라돈 가스이다", 「기술사 Vol.29, No.5」, PP.32-40, 한국기술사회.
- 주승환, 1996b, "방사선의 세기와 호르메시스", 「기술사 Vol.29, No.6」, PP. 한국기술사회.
- 주승환, 1996c, "과학철학자 앙페르의 업적", 「기술사 Vol.29, No.3」, PP.71-82, 한국기술사회.
- 주승환, 1996d, "불의 신과 꿈의 에너지", 「기술사 Vol.29, No.4」, PP.22-25, 한국기술사회.
- 주승환, 제원목, 1995, "라돈 방사능과 생활 환경", 계축 문화사 간.
- 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.

(原稿接受日 1996. 12. 19)