



방사선의 세기와 호르메시스

(Radiation Does and Hormesis)

朱 昇 煥*
Choo, Seung Hwan

<목 차>

선량과 주량	선량과 생물학적 효과와의 관계
흡수선량이란?	초파리와 호소 이야기
방사선의 생물학적 효과	등가선량과 그 단위
방사선의 양면성	호르메시스의 논의
흡수선량의 단위	방사선방어에서 최적화 기술
방사선에 대한 스트레스와 호르메시스 현상	원자력 정책에 대한 아쉬움

“방사선은 우리 몸에 이로운가?
해로운가? 그리고,
국민들은 두 질문 중에서 어느 쪽을 선택할 것인가?”

서두의 문제들은 필자가 평소에 하고 싶었던 질문들이다. 원자력 발전소의 이야기만 나오면, 한번쯤은 누구나 스스로에게 같은 질문을 해볼 것이다. 필자는 지금 위와 같은 질문을 새삼스럽게 해야 할 기분이다. 혹시라도 독자가 ‘방사선’이 나오는 무슨 상관이나고 반문한다면, 이 글은 독자에게 아무런 흥미도 주지 못 할지도 모른다. 흥미가 없는 글은 누구라도 읽기가 거부스럽다. 하지만 우리는 방사선을 멀리하고서는 살아갈 수는 없다. 그러므로 방사선의 지식은 삶에 유익할 것임엔 분명하고, 어떤 점에서는 삶의 질을 높이는데 도움을 줄 것이다.

원자력 가족들은 대체로 방사성 물질의 속성을 잘 알고 있을 것이다. 모르긴 해도, 그들은 그런 물질들이 위험하다는 사실을 보통 사람들보다야 더 잘 알고 있을 것이기에 ‘해롭다’는 대답을 선택하는

데 주저할 이유가 없다. 방사성 물질에서 튕겨나올 방사선들 중에는 우리의 몸속을 쉽게 뚫을 정도로 투과력이 센 종류들도 포함되어 있기도 하므로 우리들은 방사성 물질을 위험 물질로 구별하고, 따로 법으로 그들의 한도량을 정해 놓고 관리하고 있는 것이다.

독자는 이미 익숙하시겠지만, 방사성 동위원소에서 튕겨나오는 「방사선」은 우리의 눈과 코로서는 식별하지 못한다. 에너지의 모습들은 대체로 그렇다. 우리의 주변에서 쉽게 접할 수 있는 에너지의 모습들을 한번 살펴보자! 예컨대, 전류, 열, 빛, 전자기파, 방사선. 그리고 어떤 점에서는 초능력이라 할 정신작용인 영감과 텔레파시와 같은 전달 매체들도 모두가 에너지의 한 모습이기에, 우리의 눈과 코로서는 감지할 수 없는 것들이다. 자석이 쇠붙이

*방사선관리 기술사, 공박, 한국자원연구소 책임연구원.

를 끌어당기는 힘도 알고 보면 방사선의 한 모습인 것이다.

선량과 주량

방사선들 중에는 빛에 버금가는 속도로 움직이는 알갱이들도 있다. 그러나 대부분은 텔레비전이나 라디오의 전자파처럼 알갱이는 아니면서 파도가 밀려오듯 파동의 힘으로 어떤 물질 속을 햇빛보다는 더 강력하고 빠르게 통과하는 전자기파들이다.

전자현미경으로도 식별해 내지 못할 아주 작은 알갱이들이 빛의 속도만큼이나 빠르게 움직이고 있을 때의 운동 에너지나, 혹은 전자기파들의 파동으로 생긴 운동 에너지를 포함, 그런 에너지들이 흘러가는 한 줄기의 흐름에서 어떤 한 묶음의 다발을 방사선의 전형이라고 생각하면 기억하기 편해진다. 그렇다면, 그런 한 뭉치 방사선들의 크기는 어떤 물리적인 수치로 표시할 수가 있을 것이다. 그런 세기를 나타내는 용어로서 「선량(dose)」이란 말을 쓰고 있다.

「선량」이란 표현이 독자에게 좀 낯설게 들린다면, 술꾼들에게 회자되는 「주량」이란 낱말을 머리 속에 떠올리면, 발음이 서로 비슷하여 오히려 우리 곁에 더 가까워질 이야기로 들린다. “술은 우리의 건강을 해친다”고 아무리 소리쳐도 애주가들에게야 써나 먹힐 소리일까?

선량의 의미는 주량과는 그 뜻이 아주 다르긴 하다. 다른 예를 들어보자! 몸이 아파 약국에서 약을 지어 올 때, 약사들이 여러 개의 알약들을 여러 봉지들로 나눠싸고 주면서 식후에 한 봉지씩 복용하라고 일러준다. 그런 약 봉투에 든 각 봉지는 그 약의 약효를 적당하게 묶어 둔 약의 호형을 나타낼 ‘용량’일 께다. 약효의 한 단위를 나타내는 뜻으로 쓰이는 용어가 영어로는 바로 dose인 것이다. 방사선의 세기를 나타내는 ‘선량’의 유래는 따지고 보면, 약의 약효에서 따온 dose와 어떤 점에서는 비슷한 뉘앙스를 풍긴다.

약국에서 약을 지을 때, 약사는 맨 먼저 환자의 나이를 꼭 묻는것이 관행이다. 약의 양을 환자의 체중에 알맞게 조절하는 데 필요하기 때문일 것이다. 약의 효과를 체중에 맞게 조절하기 위한 뜻이라고 본다면, 방사선의 선량도 체중과 관계가 있어야 한다. 그래서 우리 몸에 쏘인 방사선의 세기인 ‘선량’의 표시는 항상 체중처럼 무게와 견주게 된다. 즉, 1그램당, 또는 1킬로그램당 방사선의 세기가 얼마라는 표시를 한다.

흡수 선량이란?

“도대체 건강에 이상을 일으키는 방사선의 세기는 얼마나 될까?” 이런 질문에 답하려면, 우리 몸을 꿰뚫고 지나간 방사선이 우리 몸에 남길 그의 에너지를 알 필요가 있다. 방사선이 우리의 몸속을 지날 때, 그들은 빠른 속도로 움직이는 에너지의 한 묶음이므로 그들이 운동하는 데 필요한 ‘운동 에너지’를 반드시 가지고 움직인다.

그런 움직이는 에너지 덩어리가 우리 몸에 침투하면, 물체를 이루고 있는 어떤 장소의 생체 조직에 부딪치게 된다. 그럴 경우, 에너지 묶음 덩어리의 일부는 통과한 우리 몸의 조직에 빼앗기게 되고, 빼앗긴 양만큼 우리 몸의 어디엔 가에 남게 될 것이다. 마치 뜨거운 불덩이가 살갗에 가까이 접근할 때, 우리의 피부가 불꽃에 닿지 않을지라도 우리의 피부는 불덩이에서 내뿜는 복사열이 피부에 흡수되면서 화상을 입게 된다. 불덩이가 뿜는 열 에너지는 방사선처럼 강력한 투과력이 없기 때문에 우리의 피부를 깊숙히 뚫고 지나갈 수 없을 것이며, 우리의 피부층에서 모두 흡수되고 말 것이다. 흡수될 열량의 크기에 따라 1도, 2도 그리고 3도 화상을 입게 될 것이다. 우리는 요즈음 자판기의 혜택을 입고 있다. 급할 때, 자판기에서 뽑아 마실 뜨거운 커피 맛은 자판기의 전자파(방사선) 에너지로 커피물을 덩여 놓은 열 에너지인 것이다.

그런 커피물의 열처럼, 우리 몸을 스친 방사선의 에너지가 남긴 열을 물리적인 수량으로 나타내려

면; 우리는 「흡수된 선량」 또는 「흡수 선량」이라 불러지는 어떤 수량으로 표시하게 된다. 물론, 약의 양을 체중에 견주듯이 '흡수 선량'도 모두 단위 무게당으로 표시한다.

방사선의 생물학적 효과

몸에 흡수된 방사선의 양(흡수 선량)은 방사선이 지나간 통로인 몸의 조직 상태, 방사선의 세기와 종류 그리고 방사선에 쬐이는 기간에 따라 달라진다. 우리의 몸체를 이룬 물질들은 대체로 90% 이상의 물과 유기분자들로 이뤄져 있으므로 개인에 따라 몸의 조직 상태는 크게 달라질게 없다. 그리고 방사선의 종류에서도 몸을 뚫고 지날 수 있는 것들은 중성자를 제외하면, 대체로 엑스선과 감마선을 들 수 있다. 그러므로 몸에 남을 방사선의 에너지 덩어리의 일부는 몸을 뚫고 지나갈 방사선의 세기와 쬐이는 기간에 따르게 된다.

예컨대, 화상을 입게 될 경우, 불꽃의 세기와 불꽃의 종류 그리고 불에 태인 기간에 따라 입게 될 화상의 정도가 아주 다르게 나타나 듯이, 몸에 남을 방사선의 운동 에너지의 양(흡수 선량)은 방사선의 선량과 쬐이는 기간에 따라 정해진 것이다.

방사선으로 몸의 조직이 입게 될 손상은 당연히 방사선의 흡수 선량이 클 수록 커진다. 이런 현상을 우리는 「방사선의 생물학적 효과」라고 부른다. 전문가들도 방사선에 쬐일 때, 우리의 몸이 입게 될 신체적 장애를 짐작하기란 아주 어렵다.

방사선의 양면성

필자는 본지의 지난 호에 라돈 방사능에 관한 이야기를 하면서 우리가 방사선을 무조건 피하는 것은 지혜롭지 못한 태도라고 말한 적이 있다(주승환, 1996). 원자력 발전소, 병원 그리고 연구실 등에는 방사선을 만드는 시설이나 또는 방사성 물질들을 보관할, 특별히 관리해야 될 위험이 예상되는 시설이 따로 정해져 있다. 그런 장소들은 예외 없이 「방

사선 구역」으로 지정하여 일반인의 출입을 제한하고 있다. 물론 방사선 구역을 정하는 자세한 규정은 법에 따른다.

그런 구역을 출입하는 모든 사람들은 방사선의 위험이 거기에 도사리고 있다는 생각부터 먼저 해야하며, 만일의 사고에 대비한 일상적인 수칙으로서 방사선의 선량을 감시하는 「선량계」를 몸에 달고 그 곳을 출입한다. 그런 수칙은 원자력법이 정한 규율이다. 어느 일정한 기간 동안 방사선 구역을 드나들고 나서, 그가 착용했던 선량계에 나타난 방사선의 양을 읽고 나면, 선량계에 표시된 수량이 위험한 수준인지를 따져 봐야 한다. 그런 일은 '방사선 선량 평가'이다.

방사선의 선량 평가에는 표준이 될 기준이 있다. 지금 우리가 방사선에 대한 안정성을 확보하기 위하여 '방사선 선량 평가'의 표준으로 삼고 있는 것은 대체로 유엔(UN)의 자문기구인 국제방사선방호위원회(ICRP)가 정해 놓은 권고 기준에 따르게 된다. 그런 권고를 담고 있는 것이 바로 「ICRP 보고서」이며, 일련 번호가 붙어 있다. 우리 나라 원자력법에서 채택된 방사선에 관한 안전성의 평가 기준도 ICRP-9를 골격으로 하면서, 거기에서 ICRP-26의 일부 내용들을 추가시킨 것으로 이해하고 있다.

방사선을 다루는 전문가들은, 마치 판사가 법조문에 근거를 두고 판결을 내리 듯, 우리 원자력법에서 정한 기준에 맞춰 방사선을 평가하므로써 우리의 건강을 보호한다.

원자력 가족들이라면 누구나 잘 알고 있는 이야기지만, 인류는 이미 100 년 전에 방사선을 알게 되었다. 그런 방사선들은 지구의 모든 생명들에게 일종의 스트레스를 제공하는 공동의 적이 된다는 사실을 안 것도 이미 80 년도 넘어서었다. 그런 이야기를 또 다시 들추기란 필자로서는 내키지 않는 일이다.

그 동안 우리는 한편으로는 방사선과의 전쟁을 치르면서도 다른 편으로는 방사선의 이용 방법을 개발하려고 노력해 온 것이다. 전쟁과 평화의 두 얼굴을 상징한다는 희랍 신화의 야누스처럼, 방사선

의 경우도 역기능과 순기능이란 양면성의 속성을 함께 지닌다. 인간은 방사선의 부정적인 얼굴을 잘 알면서도 다른 얼굴인 평화적 이용 분야를 개발하려고 애써 온 것은 인류복지를 위한 나름대로의 합리적인 명분이 있는 것이다.

독자도 잘 아시겠지만, 우리는 원자력 산업을 통하여 다른 수단으로서는 도저히 해낼 수 없는 일들을 할 수 있다. 방사선의 독특한 속성인 순기능들을 인류 복지에 이용하고 있는 것이다. 예컨대, 불치의 암치료, 건강관리, 방사성동위원소의 산업적 이용 그리고 원자력 발전 등 헤일 수 없이 많은 곳에 방사선이 이용되고 있다. 하지만, 잘못 다룰 경우, 방사선은 우리의 몸속을 뚫고 지나갈 수 있는 강력한 투과력을 지니고 있기에 위험 물질로 취급됨은 그 역기능의 한 단면인 것이다. 방사선의 역기능과 순기능의 조화는 보는 입지에 따라선 다르게 주장될 수도 있겠지만, 필자는 그런 논의를 잠시 유보한다.

흡수 선량의 단위

우리는 살아가면서 어디에서나 방사선과 자주 마주쳐야 한다. 방사선을 쬐이려고 찾는 곳은 아닐 테지만, 우리의 건강관리를 위하여 건강한 사람은 주기적으로, 그리고 몸에 이상이 있다고 느껴지면 곧바로 서둘러 찾는 곳이 있다. 그런 곳들은 병원, 보건소, 치과의원, 안과의원 그리고 건강관리소 등일 것이다. 처음 병원을 찾게 되면, 누구나 맨 먼저 방사선인 X-선으로 가슴 촬영부터 해야 된다. 그런 촬영을 할 때, 찰나에 한 번 찍는 X-선이 우리 몸을 뚫고 지나면서 우리 몸에 남길 에너지의 양은 물리적인 에너지 단위로 표시하면, 1 에르그(erg) 정도이다.

독자는 알고 있으시겠지만, 방사선의 흡수 선량 단위는 처음부터 래드(rad: radiation dose rate의 약자)를 기본 단위로 써왔던 적이 있다. 1 래드의

크기는 100 에르그(erg)의 수량으로 정해 놓았다. 예컨대, X-선으로 가슴 촬영을 연속해서 100 번을 찍고 나서, 곧바로 우리 몸에 흡수된 에너지를 모두 합쳐야 1 래드의 수량이 된다.

1 에르그 = 1/100 래드 즉, 10 밀리래드(mrad)¹⁾의 방사선 에너지가 1 회의 X-선 촬영으로 우리 몸에 전달된다. 전달이라기 보다는 우리의 몸에 「흡수된다」는 표현이 적절하다. 그런 양은 성에 차지 않을 아주 적은 것이다. 그렇지만, 우리는 임산부의 태아를 보호하기 위하여 임산부의 경우, X-선 촬영을 극도로 제한하고 있다. 제한하는 것은 그와 같이 적은 선량이라도 태아의 몸을 이룰 조직 세포들이 활발하게 분열하는 동안 잘못 되면 태아에게 돌연변이를 일으킬 위험이 따르기 때문이다. 동식물의 품종을 개량하기 위하여 방사선을 쬐일 경우, 세포 분열이 활발한 시점을 택하는 이유도 바로 거기에 있다.

그런 연약한 방사선의 에너지는 임산부를 제외한 건강한 이들의 몸에 당장 어떤 흔적을 보이는 증상이 나타나지 않는다. 피부에 붉은 반점이 생길 일도 없고, 혈관 속으로 흐르는 피의 적혈구를 파괴시켜 헛구역질이 나게 하지도 못한다. 그런 사실은 우리의 경험으로 잘 알고 있다. 필자의 터무니없는 공상이긴 하겠지만, 만일 1 회 가슴 촬영을 받을 때마다 그와 같은 증상들이 나타났다면, 아마도 지금처럼 X-선의 이용을 일상화시키지 못한 것은 말할 것도 없고, 피지 못해 가슴 촬영을 해야 할 때마다 환자들은 팬스레 주저하게 되고, 의사들은 환자를 설득시키는 데 꽤나 애를 태워야 했을 것이다.

그 정도의 선량을 쬐일 때, 아무런 증상이 우리의 몸에 나타나지 않는다는 사실은 정말 다행이다. 하지만 우리는 가슴 촬영과 같은 아주 낮은 방사선이라도 우리의 가슴속을 지나갈 때, 우리 몸에 어떤 나쁜 영향을 주게 되거나 않을까? 하는 의문을 가질 때가 가끔 있다.

1) 1 래드는 1000밀리래드임.(1 rad=1000mrad)

“우리의 건강에 해가 될 가장 낮은 선량의 기준을 얼마로 정하는 것이 합리적입니까?” 이런 질문은 지극히 자연스럽고, 그리고 과학적으로 바탕이 될 근거를 필요로 하기 때문에 과학자는 그런 질문에 소신껏 답을 줘야 한다. 하지만, 아직은 누구도 정확한 대답을 주지 못한다. 인류는 그와 같은 질문에 대답할 과학적인 근거에 접근하지 못한 것이다. 필자의 판단이지만, 그 원인은 방사선에 대응하는 생체 조직 기능의 다양성 때문일 것임은 의심의 여지가 없다.

생명체가 아닌 물체들인 물이나 공기 속에서는 방사선이 지나 갈 때, 거기에 흡수될 방사선의 에너지는 이미 잘 알려져 있다. 그와 같은 사실은 필자의 판단에 도움을 준다.

방사선에 대한 스트레스와 호르메시스 현상

나의 몸은 지구 위에서 단 하나 뿐이고 고귀하다. 그래서 건강에 도움이 된다면, 살맛 나는 세상을 좀더 오래 살고 싶어서, 물불을 가리지 않는 세태가 되고 만 것이다. 우리 몸의 일부 조직들은 사람이 만든 장기(신체 조직)들과 다른 사람의 장기로 대체하기도 한다지만, 그런 일들은 또 다른 문제일 것이다. 방사선이 나의 몸 조직을 뚫고 지나갈 때, 몸의 조직에서 일어나게 될 보이지 않는 어떤 현상에 대하여 궁금증을 가지는 것은 지극히 자연스럽고 지당하다.

방사선이 우리 몸에 보약이 될 것인지(?), 아니면 몸을 허약하게 만들 씨가 될런지(?)는 좀더 논리적으로 따져 봐야 한다. 예컨대, 일상적으로 햇빛을 다 함께 쬐어도 대부분의 사람들은 멀쩡하다. 그러나 사람의 체질에 따라 매일 쬐이는 햇빛에서도 피부암(그림 1))을 일으킬 조건을 타고 난 사람이 개중에 있는 것은 조물주의 조화이다.

뿐만 아니라, 생체 조직을 이룬 수많은 세포들은 방사선으로 손상된 세포의 기능을 재빠르게 회복시킬 능력들을 자체에 지니고 있다. 만일 방사선에 의한 손상이 곧바로 찰나의 순간에 정상의 체질로 회

복되는 경우, 방사선의 피해를 주장할 법적 근거는 완벽하게 소멸되고 말 것이다.

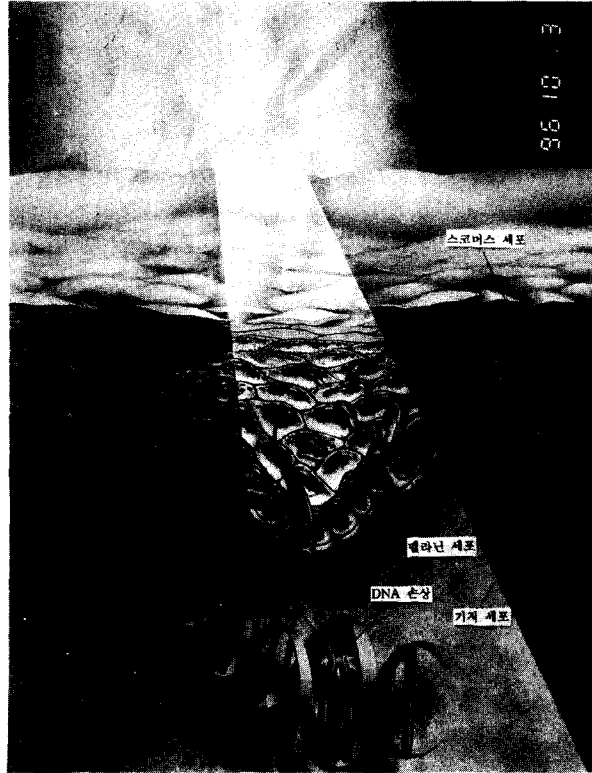
좀 전문적인 설명이 되겠지만, 우리의 몸은 약 65조 개의 세포들로 이뤄지고, 세포를 이룬 유기분자들은 연약한 화학적 결합인 고리로서 분자들끼리 서로 연결된다고 한다. 그리고 단위 세포들은 다시 서로를 다른 고리들로 연결하면서 우리의 몸통과 같이 거대한 한 분자인 생명체를 이룬다.

그런 결합들은 외부에서 침입한 적은 양의 에너지일지라도 아주 민감하게 저항(대응)한다. 분자들이 저항하는 힘이 침입된 방사선의 에너지를 당해 내지 못하는 경우, 대체로 분자들의 저항 에너지를 이겨낸 방사선의 에너지들은 여분의 에너지로서 유기분자들의 화학적 결합을 부분적으로 끊어 놓게 되고, 끊긴 일부분(라디칼)은 다른 이웃한 유기분자들과 다시 화학반응을 일으키는데 그런 반응 순간은 수백만 분의 1 초 동안인 찰나에 완성된다. 다시 정리하면, 방사선이 우리의 몸속을 지나갈 때, 흡수 선량의 크기는 획일적으로 그 한계를 지정하기 어렵게 된다. “그런 방사선을 무력하게 막을 방법은 없을까?”

우리 몸을 이룬 세포들이 방사선에 쬐임으로 받게 될 방사선에 대한 스트레스를 효과적으로 막는 기본 원칙은 우리에게 오래 전부터 잘 알려져 왔다. 「가능하면 방사선에 적게 쬐이자」는 대명제로부터 방사선의 방호는 시작된다.

그런데 어찌된 영문인지 그러한 대명제를 뿌리째 흔들어 놓은 또 다른 주장이 나왔다. 아무튼 방사선을 쬐이면 오히려 건강에 도움이 된다는 논리가 등장한 것이다. “방사성 폐기물로 인류의 수명을 연장한다”의 표제에 담긴 이야기도 그들 중의 하나이다. 그런 표제들은 필자를 당혹스럽게 만든다.

그 글은 서두에서 우리가 잘 알고 있는 국제방사선방호위원회(ICRP)의 방사선 관리 지침인 ICRP-26과 -60의 선량 한도의 체계, 그리고 그런 체계와는 대조를 이루는 미국 미조리 대학의 T.D. 러키(Rucky, 1991)교수의 ‘호르메시스(Hormesis) 현상’에 관한 논문을 바탕으로 국제방사선방호위원회



〈그림 1〉 사람의 살갓 내부를 해부하고, 확대한 단면도이다. 우리의 피부는 세 개의 주된 세포들로 짜져있다. 그들은 모두 햇빛을 쬐이면 암 세포로 바뀔(전이) 수 있다. 표피 밀부분에 기저 세포가 둥글게 놓이고, 평탄한 표피층과의 사이에 스코머스 세포(squamous cell)가 얹게 자리잡고 있다. 피부의 보호 색소 멜라닌을 만드는 멜라닌 세포들은 기저 세포와 스코머스 세포 사이에 넓게 퍼져있다. 햇빛의 자외선이 피부를 뚫고 지나가면, 그 세포들에 들어있던 DNA 분자는 침투한 자외선에 아주 민감하게 반응하면서 DNA 분자 속의 유전자들을 파괴한다. 그림에서 용수철처럼 꼬여져 밑으로 처진 그림은 한 세포 속의 한 DNA 분자의 위치를 표시하면서, DNA 분자의 모습을 확대하여 보여주고 있다. 그 DNA 분자를 이루는 'p53' 이름을 가진 한 개의 유전자가 자외선에 쬐여 파괴된 모습을 확대하여 나타낸 것이다.(Leffell & Brash, 1996)

*p53 유전자는 이중성을 가지고 있다. 건강이 정상일 때, p53 유전자는 돌연 변이성 암 세포의 발생을 억제하는 기능을 하지만, 일단 유사시(그림처럼 자외선으로 파괴 될 때)는 돌변하여 암을 촉진시키는 쪽으로 작용을 하게 된다(필자 주).

의 권고 내용과 다른 점(사실, 두 개의 토픽들은 서로 별개임)을 살펴본다고 적고 있다.

전체적인 글의 전개는 저자의 해박한 지식을 바탕으로 치밀한 자료를 뒷받침하여 현재의 보건물리 분야가 겪고 있는 어려운 문제점들을 자세하게 지적하고 있다. 그러나 필자의 아쉬움은 저자의 합리적인 논리 전개에 있다기보다는 사족이 붙은 오해의 소지가 있을지도 모를 표제와 같은 표현들이다. 그 글은 필자도 읽었고, 많은 독자들도 읽었을 것으로 짐작된다.

“그런 글을 읽고 난 독자들의 반응들은 어떠했을까?” 그 글을 읽은 지가 십여 개월이 지나긴 하였지만, 글은 살아있고, 또 다른 이들이 읽을 때, 어떤 반응을 보일지가 몹시 궁금하다. 아마도 필자처럼 그 글을 읽고나서 땀대(땀대를 잘 내는 이를 혈죽(血竹)이라 한다?) 올린 독자였다면, 아마도 이 글의 주제인 ‘호르메시스’ 모델을 한 번이라도 살펴본 경험을 가지고 있을 것이다. 필자가 이 글의 표제를 ‘호르메시스’로 택한 것은 독자와 함께 방사선에 대한 아주 기초적인 사고를 바탕 삼아 ‘호르메시스 모델’에 쉽게 접근해 보자는 데 그 목적이 있다. 앞에서 방사선의 생물학적 효과에 대한 이야기가 길어진 점, 독자에게 양해를 바란다.

선량과 생물학적 효과와의 관계

앞에서 지적한 것처럼, 방사선이 생물의 조직에 미치는 효과는 생물체 조직이 갖고 있는 다양한 기능들 때문에 방사선의 세기인 물리적인 수량으로 그 한계를 정하기란 쉽지 않다. 방사선이 생체 조직에 미치는 영향을 설명하는 학설로는 세 가지 주장들이 있다. 독자에게 혼돈을 줄 우려가 있거나 않을까 주저되지만, 그런 개념들은 한 세트로 묶어서 살펴본다면, 이 글의 제목인 호르메시스의 의미를 바로 이해하는데 얼마 정도는 도움이 되리란 생각을 해본다.

셋 중에서 가장 먼저 주장된 이론은 일명, ‘확률적 효과 모델’로 알려지기도 한다. 좀더 설명을 덧붙

붙인다면, 쪼일 방사선의 양과 그리고 그 동안 계속해서 몸에 흡수된 누적된 방사선 에너지의 총합으로 표시된 선량에 따라 생체 조직에 나타나는 그의 영향은 직선적으로 비례한다는 ‘직선형 모델’이다.

두 번째는, 비슷한 시기에 나온 이론이며, ‘결정론적 효과 모델’이란 이름도 있다. 방사선이 생체에 주는 효과는 「어떤 선량」을 고비로 하여 그 값을 초과하는 선량부터 생체에 영향을 준다는 ‘직선-이차곡선형 모델’이다. 두 번째 모델의 특징이라면, 낮은 선량에서 나타나는 생물학적 효과는 앞의 ‘직선형 모델’에 따르고, 높은 선량에서는 ‘어떤 선량」을 고비로 해서 그 값을 초과하는 선량에 대한 생물학적 효과는 이차함수인 곡선에 따르고 있는 점이다.

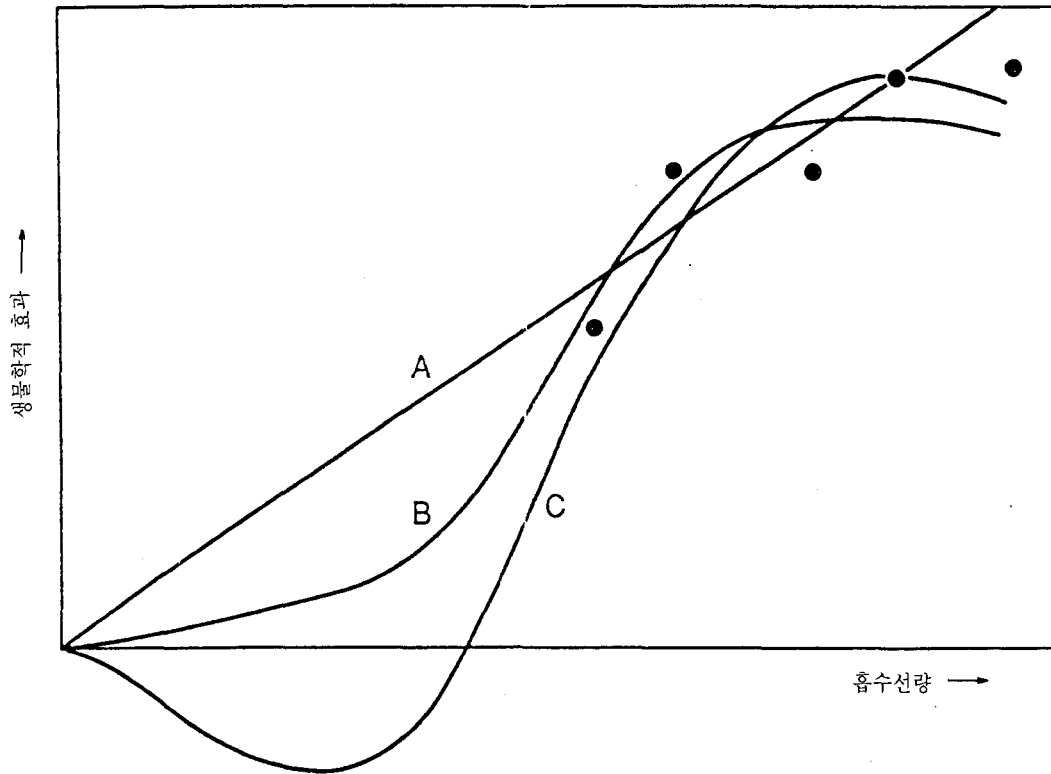
즉, ‘직선형 모델’과 ‘이차곡선형 모델’이 합쳐진 한 모델로 볼 수 있을 것이다. 여기서 ‘어떤 선량’은 ‘문턱 선량’ 또는 ‘발단 선량’이라 쓰기도 한다.

그리고, 마지막 주장인 세 번째의 것은 럭키 교수가 발표한 문제의 「호르메시스형 모델」이다. 호르메시스란, 낮은 방사선에 쪼일 경우, 방사선 때문에 생체 조직에 면역과 저항력이 생겨나서 조직의 기능이 증진되므로, 해롭기보다는 오히려 우리 몸이 방사선으로 건강해 진다는 뜻을 담고 있다. 그러므로 호르메시스는 약리학적 표현을 방사선의 생물학적 효과에 도입한 용어라고 할 수 있을 것이다.

우리 주변에서 호르메시스와 같은 현상을 찾아본다. 양봉하는 이들은 벌에 쏘이려고 찾아오는 이들에게 돈을 받고 서비스를 제공해 준다. 벌에 쏘일 경우, 감기를 이겨낼 체질에 이른다고 하는데 과학적인 근거가 있는지는 알 수 없다.

아무튼 그런 묘한 행동으로 효험을 얻으려는 발상은 건강을 위해서 호르메시스 현상을 이용하는 하나의 다른 모습일지도 모른다.

세 가지 모델들을 그림으로 서로 견주면 <그림 2>와 같다. <그림 2>는 미국 오클리지국립연구소의 방사선방호부 R. L. Mlekodaj(1995) 박사의 논문에서 필자가 복사한 그림이다. 그림 중앙에 넓게 칠한 부분은 필자의 주장을 쉽게 구분할 수 있게 필



〈그림 2〉 방사선이 우리 몸을 뚫고 지날 때, 그의 에너지가 우리 몸인 생체 조직 안에서 흡수된 흡수 선량(X-축)과 그 흡수 선량으로 생체 조직에 손상을 입히는 생물학적 효과(Y-축)를 그림으로 보여준다. 그림에서 세 가지 모델들을 서로 견주어 보여주고 있다(A: 직선형 모델, B: 직선-이차곡선형 모델 그리고 C: 호르메시스형 모델). 검게 칠한 구역은 세 모델들이 흡수 선량-생물학적 효과의 상관관계가 잘 조화를 이루는 영역임.(Mlekodaj R.L.,1995).

자가 색으로 표시한 부분이다.

그 그림에서 직선형 모델은 (A)로, 직선-이차곡선형 모델은 (B)로 그리고 호르메시스형 모델은 (C)로 각각 대표된다. Y-축의 좌표는 X-축의 흡수 선량(방사선이 생체 조직에 남긴 에너지의 양)이 생체 조직에 주는 나쁜 영향의 정도를 개념적인 수치로 나타낸 것이다. X-축의 수량은 방사선이 생체 조직에 남긴 에너지를 흡수 선량으로 수량화한 것이며, 어떤 기간동안 누적돼 온 양을 대표하기도 한다. 이들 그림들은 모두 개념적으로 모델화 된 것이며, 실제적인 실험으로 얻어진 직선과 곡선들은 아

니다.

이 글에서, 필자는 이들 중에서 세 번째인 호르메시스형 모델에 대한 방사선의 생물학 효과에 초점을 맞춰, 방사선이 인체에 미치는 기본적인 효과를 살펴보고자 한다.

호르메시스의 모델(C)에서 X-축의 밑쪽(Y-축의 마이너스 영역)으로 곡선이 지나 가고 있는 뜻은 방사선의 영향이 생체에 이롭게 되는 현상을 그림으로 표현한 것으로 이해될 수 있다. 그 이유는 수학에서 마이너스에 마이너스가 곱해지면 플러스로 바뀌는 원칙에 따른 것일지도 모른다. Y-축의 의미

는 Y-축의 영점이 생체 조직에 아무런 영향이 없는 상태이고, 플러스 방향인 위로 오를 수록 방사선의 역기능이 커지며, 그 영점 아래인 마이너스 방향은 반대로 방사선이 건강에 도움을 준다는 의미가 된다. '건강해진다'는 개념은 방사선 방호에서 새로운 발상이라 할 수 있다. '호르메시스' 이론이 이를 뒷받침하고 있다.

호르메시스형 모델(그림 2)인 곡선을 따라 가다가 생체 조직에 영향을 미치기 시작하는 X-축의 좌표를 자르는 점(Y-축의 영점)의 선량은 선량 평가에서 매우 중요한 뜻이 있다. 그 점은 방사선이 생체에 아무런 영향을 주지 않는 값이기도 하며, 호르메시스형 모델에서 문턱 선량이 되기도 한다. 그와 같이 주요한 의미를 지닌 값이긴 해도 현대 과학은 아직 그 값에 접근하지 못하고 있다.

카톨릭대학교 윤세철 교수(1995)는 호르메시스형 모델이 적용되는 선량은 1~50 센티그레이(1 센티 그레이는 1 래드와 같음)²⁾ 사이라고 한다. 그 수량은 흉곽 X-선에 100~5000 회를 쬐었을 때, 우리 몸에 남게 될 흡수 선량의 에너지와 같다.

초파리와 효소 이야기

필자는 술을 마시지 못 한다. 주위의 친구들은 술을 적당하게 마신다면, 몸에 이롭다는 충고가 있다. 「적당하게」라는 표현에 어떤 물리적 수치를 부여하기란 쉽지 않을 것이다. 앞에서 인용한 「주량」은 개인이 건강에 아무런 탈없이 마실 수 있고, 몸에서 소화시킬 수 있는 술의 양을 의미한다. 「흡수 선량」의 의미도 「주량」의 뉘앙스를 조금은 풍긴다 해도 무방할 것이다. 「주량」은 다만 「흡수 선량의 한도량」에 근접하는 의미가 있을 뿐이다. 「주량」은 사람의 체질에 따라 많은 차이가 있다.

필자는 강원대학교 생물학과 권오길(1996) 교수가 최근에 펴낸 『생물의 다살이』에서 「술 좋아하는 초파리」 제목의 글을 얼마 전에 흥미롭게 읽은 적

이 있다. 그의 글에서 초파리는 알코올분해효소를 지니고 있기 때문에 술을 좋아한다는 재미있는 내용을 담고 있다. 필자의 경우, 술에 관한 한 초파리 보다는 한발 뒤쳐지는 인생이다. 술을 못 마시는 주제를 “알코올분해효소가 나에게는 부족한 「알코올 분해효소결핍증 환자」일 테지!”라고 나름대로 토를 달고 살아간다.

“쇠뿔도 단 김에 빼랬다.” 「효소」라는 용어가 나온 김에 우리의 몸을 이룬 조직들이 만들어지는 기본 틀을 한번 음미해 보자. 기능적으로 본다면, 세 가지로 나뉠 수 있는 데, 그들은 유전자를 품고 있는 DNA 분자들, 20 가지 아미노산으로 된 단백질 그리고 셀 수 없을 정도로 많은 종류의 효소들이 있다. 우리 몸을 이루고 있는 모든 조직들은 그들 중에서 단백질이 그들의 건축 재료이고, 효소들은 노동자의 역할로써, 우리 몸의 영양분인 단백질이란 자재를 써서 우리 몸에 필요한 조직을 만드는 일만 한다. 그리고, 효소는 다만 생명체의 기본 단위인 DNA 분자의 명령에 따라 아주 정밀하게 그 명령을 수행하는 기능만을 하고 있을 뿐이다. 즉, 부모로부터 유전 받은 DNA 분자들은 생체 조직을 건설하는 데 필요한 건축의 설계 도면이고, 단백질은 효소가 DNA의 설계도면에 맞춰 필요한 조직을 만드는 데 쓸 건축 자재인 것이다. TV에서 한 때, 반영된 슈퍼맨도 원리적으로는 DNA 분자의 조작으로 적합한 효소들을 만들 수만 있다면, 가능할 것이다.

방사선이 우리 몸에 주는 스트레스는 앞에서 지적한 유기분자의 화학적 결합을 끊어 버릴 물리화학적 변화를 일으키는 일 뿐만 아니라, 또 다른 가능성은 개개인의 몸 속에 들어 있는 DNA 분자의 명령을 수행하는 정상적인 효소의 기능 활동을 방해할 수도 있는 것이다.

따라서 방사선에 대한 효소들의 저항력은 개체마다 다를 것이며, 그 구체적인 특성은 효소들의 기능

2) 1 그레이(Gy)는 100래드와 같다.(1 Gy=100 rad).

에 의하여 만들어진 개재인의 체질에서 나타나게 될 것이다. 그러므로 방사선의 생물학적인 효과를 저울질하려면, 새로운 단위를 도입해야 된다.

등가 선량과 그 단위

1994년 5월 13일 대한방사선방호학회 춘계 학술 발표에서 호르메시스 현상에 관한 논문(윤세철, 1994)이 소개된 적이 있다. 필자뿐만 아니라 국내 방사선 전문가들에게도 '호르메시스형 모델'은 새로운 논의를 덧붙여야 할 주제가 되고 있다. 물론 호르메시스를 처음 주장한 럭키 교수의 논문이 보여주는 호르메시스적인 효과들은 많은 실험 자료들에서 어떤 공통된 경향들이 나타나는 현상들에 터잡고 있다.

그러나 문제는 가장 낮은 선량의 한계(그림 2)에서 X-좌표를 자르는 수량을 어떻게 정할 것인가에 초점이 집중되고 있다. 럭키 교수의 자료(윤세철, 1994; 결론 부분에서 인용)에 의하면, 호르메시스의 영향권에 들 '등가 선량'은 대체로 1 시버트(Sv)³⁾ 정도라고 한다.

새로운 용어를 또 쓰게 된 점 독자에게 양해를 구한다. '선량'이란 이름 앞에다 '성씨'를 따로 붙여 나타내는 용어들은 이들 말고도 '조사 선량'과 '유효 선량' 등이 많이 쓰인다. 그 밖에 특수한 경우에 쓰이는 '예탁 등가 선량', '예탁 유효 선량', '연간 유효 선량', '집단 선량', '축적 선량' 등, 아주 다양하다. 이와 같이 다양한 용어로 표현해야 할 사정은 아마도 방사선의 생물학적 효과의 다양성에도 한 원인이 있을 것이다.

'등가 선량(Dose Equivalent)'이란? 흡수 선량인 래드(rad)나 그레이(Gy)로 표시된 어떤 세기의 방사선이 우리 몸에 와 닿을 경우, 그 방사선이 우리 몸의 유기분자들과 작용, 피해를 주게 될 피해의 규모를 상대적 크기인 숫자로 나타낸 것이다. 피해의 정도는 방사선이 우리 몸의 유기분자들과 작용하여 이온화를 일으킬 능력 그리고 방사선이 만들어 낸 '이온쌍'의 수효로 결정된다. 그런 이온화의 능력은

방사선의 세기 그리고 방사선의 종류에 따라 달라진다.

여러 종류의 방사선들에서 그러한 서로 다른 점들을 연구하여 밝혀낸 일정한 정수('하중 계수'라고 부름: 종전에는 '선질 계수'로 알려졌은 것이며, '선질 계수'로 쓸 때는 등가 선량을 '선량 당량'으로 불렀음)를 흡수 선량(래드 또는 그레이 단위로 표시된 양)에 곱하면 '등가 선량'이 된다. 기본 단위는 램(rem)을 써왔었지만, 국제 단위로 통일되면서 흡수 선량이 그레이로 표시되면서 지금은 시버트(Sv : 1 Sv = 100 rem)를 쓰고 있다. 예컨대 X-선이나 감마선일 경우, 하중 계수는 1 이므로 1 래드의 선량이 우리 몸을 통과하면, 1 램(rem)으로 표시된다. 그러나 알파 알갱이일 경우, 1 래드의 세기라도 하중 계수가 20 이므로 20 램이 된다. 방사선의 선량을 평가할 때, 대체로 시버트(Sv) 단위를 쓴다.

국내에서 호르메시스 모델이 소개된 이후, 어떤 방사선 치료의학 전문가는 호르메시스 현상에 관한 궁금증들을 명확하게 밝혀 줄 근거를 기회 있을 때마다 관련학회 회원들에게 주문해 온 것으로 이해하고 있다. 지루하겠지만, 호르메시스에 관한 이야기를 좀더 계속하는 것은 독자가 방사선의 효과를 이해하는데 좀더 도움이 된다는 필자의 고집스럽고 독단적인 판단에서 이다.

호르메시스의 논의

문제의 호르메시스 현상은 미국 캘리포니아 대학의 생리학과 교수인 S. 윌프(Wolff, 1989) 박사가 설명하는 그 뜻을 참고할 필요가 있을 것이다.

그는

「호르메시스라는 말은 약학에서 처음으로 썼던 용어이며, 낮은 농도의 유해 물질에 노출될 때, 일어나는 일종의 자극을 뜻하는 말로서 지금은 잘 쓰이지 않는 용어이다. 그러나 최근에는 그의 의미를 다르게 고쳐, 새로 부활되어 자극뿐만 아니라 유의한 효과를 뜻하게 된 것이다. 추측컨대, 호르메시스는 유해 물질의 적은 양의 1 회 복용이 좋다는 어

3) 시버트(Sv)는 선량 당량이라 한다. 방사선의 종류에 따라 인체에 흡수되는 방사선의 세기가 다르게 표시된다.

떤 가치 판단의 다른 의미를 암시함을 부연하고 있다.」라고 쓰고 있다.

필자는 낮은 방사선에 대한 호르메시스 효과를 학문적으로 왈가왈부할 처지는 못 된다. 다만, 앞서 말한 「술의 적당량」의 의미를 곱씹어 보면서, 성실한 방사선의 안전관리 기술자로서 방사선 관리를 적법하게 수행하는데 호르메시스 모델을 참고할 입장일 뿐임을 밝힌다.

독자는 미국이 세계적으로 원자력 산업을 주도하는 국가들에 포함돼 있음을 잘 알고 있을 것이다. 그 곳에서도 한 때, 낮은 방사선에 관한 호르메시스 효과를 토론의 주제로 다룬 적이 있었으며, 그 내용이 사이언스(Science)의 정책 토론란(Policy Forum)에 실린 적이 있다(Wolff, 1989 와 Sagan, 1989). 낮은 방사선에 쬐이면 인체의 면역 현상 때문에 이롭다는 논리와, 생명의 기본 단위로 알려진 DNA 분자의 일부가 파괴되므로 해롭다는 두 주장이 맞선 것이다.

한 입장은, 낮은 선량을 쬐이면 신체의 조직 세포에 면역 기능들이 생겨나서 오래 살 수 있다는 주장과, 다른 반대 입장은, 낮은 선량인 0.5 cGy(0.5 센티그레이; 0.5 rad, 가슴 촬영 X-선에 50회 쬐인 양)의 선량에도 인체의 일부 림프구와 V79 Chinese hamster 세포의 DNA가 파괴된다고 주장한다.

그들은 세계적인 명성을 얻고 있는 전문가들이면서도, 한편으로는 자기들의 주장이 아닌, 관련 분야를 주도하는 다른 전문가들의 연구 결과들을 뒷받침하여 주장했던 하나의 정책 토론이란 점 때문에 무게가 실려 있다. 보건물리 분야, 특히 낮은 방사선의 선량 효과에 흥미 있는 독자는, 비록 짧은 내용의 글이긴 하지만, 위에 소개한 자료는 독자의 연구에 참고가 될 것이다.

이들 주장들은 낮은 방사선을 쬐었을 때, 나타나는 생물학적 효과의 실험 자료에 의한 접근일 뿐이다.

(그림 2)에서 나타나는 주요한 현상은 그림의 중간을 경계로 아래위가 뚜렷한 차이를 보여준다.(옆에 칠한 부분) 위쪽 부분의 직선과 곡선들은 서로가

어떤 선량의 범위(검게 칠한 부분) 안에서 조화를 이룬다. 아래쪽의 그들은 대조적으로 심한 불균형을 이루고 있다. 조화를 이룬다는 것은 세 가지 이론들이 공통적으로 잘 맞는 영역이란 의미이다.

보통 방사선구역에서 사고가 일어난다면, 튕겨나올 가장 낮은 방사선의 선량이라 할지라도 대체적으로 세 가지 이론들이 잘 조화를 이루는 위쪽의 구역이 포함된, 더 높은 선량 구역으로 확대될 것이다. 따라서, 방사선 구역에서 사고가 일어날 경우, 호르메시스의 영향권과는 거리가 멀게 될 것이 뻔하다. 그러므로 방사선 구역에서는 세 가지 이론들이 서로 조화를 이루고 있는 조건에서 논리를 전개할 필요가 있다. 그렇다면, 방사선 구역 안에서 방사선의 영향을 따지는 데는 그들의 차이가 크게 문제 될 수 없다는 결론이 나온다.

방사선 방어에서 최적화 기술

현장인 방사선 구역에서 지금 우리가 방사선을 다루는데 이용하는 모든 기본 단위들과 한도량의 수량들은 방사선 방호의 한 최적화 기술(장시영 외, 1994)에 의하여 결정된 ICRP의 선량 한도 기준에 따르고 있다. 그렇게 정해진 단위들과 기준들은 국제적으로 통용되고 있다. 최적화 기술이란:

「인간은 매일의 일상활동 중에서 이익과 불이익(또는 손해)을 저울질하면서 살아 가고 있으며 주어진 여건 하에서 최상의 행위를 당연히 선택하고 결정하려 한다. 이렇게 어떤 특정 행위에서 이익과 불이익을 고려하면서 최상 또는 최적의 해를 구하는 일련의 행위를 보통 “최적화(optimization)”라고 부른다.」 -장시영 외(1994)-

원자력 정책에 대한 아쉬움

마지막으로, 방사선의 호르메시스 현상과 관계 지워 하고 싶은 말은 금년 초 정부가 발표한 원자력 정책에 대한 필자의 의견이다. 독자의 입장에서 판단할 때, 필자가 이 절에서 말하려는 어떤 내용들

은 이 글의 주제를 크게 벗어날 수도 있을 것이다.

잘 알고 있는 바와 같이 원자력 산업에 대한 정부의 새로운 방침은 기존에 해오던 방사성 물질의 처분사업을 한국전력이 주도하도록 한 특단의 조치이다. 방사성 물질의 생산과 관리를 모두 한국전력에 세트 상품처럼 도매로 맡긴 것은 일단의 개혁이며, 놀라운 일이다. 그런 중대한 정책이 하루아침에 불거져 나온 까닭은 필자로서는 잘 알지 못한다. 정책은 언제나 미래 지향적이므로 필자가 알지 못할 어떤 불가피했던 사정이 있었을 것임을 짐작할 수 있다.

방사선의 순기능 쪽에 따르는 문제들을 접어놓고서, 반대되는 역기능 쪽으로 필자의 초점을 맞춘다면, 인류가 방사선의 위험을 알고 난 이후, 방사선을 연구해 온지가 이미 80 년도 더 된다. 그러나 아직도 우리는 낮은 선량에 대한 호르메시스 효과를 논의하는 수준에 있는 점이 지적된다. 그리고 이 글에서 언급되지 아니한 방사성 폐기물의 저장과 연구 처분에 따르는 문제들도 아직은 해결의 실마리가 보이질 않는다. 그 원인은 방사선이 인체에 미칠 생물학적인 효과가 물리, 화학 그리고 생물학적 논의들을 포함하는 아주 다양한 분야들에 걸쳐져 있기 때문일 것이다.

그렇다면, 전망될 수 있는 미래의 연구 환경이란, 여러 분야의 전문 기관들이 각자가 정성스럽게 쌓아 놓은 연구 자료들, 학문적 전통과 권위를 최대한 유지시킬 수 있는 분위기일 것으로 생각된다.

독자는 이미 잘 아시겠지만, 과학은 정치 논리와는 다른 점이 있다. 합리성의 논리가 과학을 지배하므로 끊임없는 반대 주장이 아주 자연스럽게 수용되는 곳이다. 보통 사람들은 과학을 주도하는 이들을 과학자라고 부른다. 그들은 공통적으로 자기의 전공분야에서 스스로가 새로운 문제들을 제기해야 될 의무가 있다. 그 뿐만은 아니다. 다른 편으로는 자기가 제기한 문제들의 바른 해답을 찾기 위하여 그들에게 접근할 권리도 있다. 과학자는 오로지 그러한 의무와 권리를 위하여 자기의 모든 인생을 걸 도박을 자청한다. 어떤 한쪽의 이해 관계에 힘의 논

리로 밀어붙여 권위와 전통을 인정하지 않는 특이 있는 정치판과는 다른 일면이다.

과학은 끝없는 연구로 그 맥을 이어가야 한다. ‘어떤 때는 이쪽, 다른 때는 저쪽’은 분명히 과학적 사고에는 용납되지 않는다. 더구나 과학에서 교통정리란 합리성 외에는 다른 용단이 끼일 틈이 없다.

글을 끝내면서 서두에서 미리 던져진 “방사선은 우리 몸에 이로운가? 해로운가?”의 질문에 대한 정답은 이 글의 주제인 호르메시스의 한정된 생물학적 효과에서 발견할 수 있을 것이다. 호르메시스의 효과에 바탕을 둔 “방사성 폐기물로 수명을 연장한다”는 논리는 방사선에 대한 오해를 불러일으킬 소지가 있음이 분명하다. 그런 주장에 따르면, 내 몸에 방사선을 쪼이려고 원자력 발전소 입구에 열을 짓고 서야한다. 분명한 것은 방사선을 내 몸에 쪼이려고 자청도, 그리고 원자력 발전소에서 방사선에 쪼이려고 내 차레를 기다려야 할 이유는 없다.

•참고문헌

- 권오길, 1996, “술 좋아하는 초파리”, *생물의 다살이*, P.59, 지성사.
- 윤세철, 1994, “Radiation Hormesis”, 대한방사선방어학회 1994년도 춘계심포지움 (1994.5.13). 「환경과 라돈」 P.93-110.
- 장시영, 서경원, 윤석철, 이태영, 윤여창, 김장열, 김봉한, 정덕연, 이상윤, 이기창 그리고 김중수, 1994, “방사선방어 및 측정기술 개발”, KAERI/RR-1328/93, P.181, 한국원자력연구소.
- 주승환, 1996, “환경 방사선의 주범은 라돈 가스이다”, *기술사*, Vol. 29, No.5.
- Leffell D.J. and Brash D.E., 1996, “Sunlight and Skin Cancer”, *Scientific American July 1996*, PP.38-43.
- Lucky T.D.,1991, *Radiation Hormesis*, CRC Press, Boca Raton, FL.
- Mlekodaj R.L.,1995, “Basic Units and Concepts in Radiation Exposures”: In *Radiation and Public Perception: Benefits and Risks*, eds Young J.P. and Yalow R.S., American Chemical Society.
- Sagan L.A., 1989, “On Radiation, Paradigms, and Hormesis”, *Science*,245, P.574.
- Wolff S.,1989, “Are Radiation-Induced Effects Hormetic?”, *Science*,245, P.575.