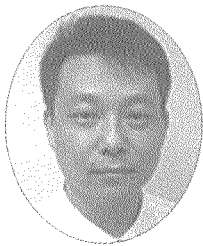


조사시설 구축의 의의 국내 저선량 / 저선량을 방사선



진 영 우

방사선보건연구원
방사선영향연구팀 팀장

1. 들어가며

방사선이 암을 일으킬 수 있다는 것은 잘 알려져 있지만, 사실 발암이 역학적 연구로 증명된 것은 원폭 생존자 또는 방사선 치료 등과 같이 일시적 고선량 방사선 피폭에 한정되어 있으며, 원전종사자 또는 고배후 방사선지역 (High Background Radiation Area) 등 만성 저선량 방사선 영역에 있어서는 암의 초과 발생 여부가 뚜렷하지 않아 다양한 논의가 진행되고 있는데, 현재 이 영역의 위험도 값이 과소 추정되어 있다고 보는 이론부터 오히려 생물학적 긍정효과가 존재한다는 이론까지 폭넓은 스펙트럼을 이루고 있다.

이런 논의는 사실 방사선 영역 뿐만이 아니라 다른 화학물질의 독성에 대해서도 저농도 영역에서는 마찬가지로 진행되고 있고 이를 밝히기 위한 많은 연구가 이루어지고 있으며 연구자들 사이에서도 많은 논란이 있다.

특히 방사선의 경우 이 논의가 더욱 중요한데 그 이유는 위해도 평가결과가 환경과 관련한 법과 제도 등은 물론 일반 사람들의 공중보건학적 인식에도 많은 영향을 미쳐 원자력발전소의 건설 및 운영, 동위원소를 이용한 의학, 공학적 연구 등 방사선과 관련한 활동과 아주 밀접한 연관을 가지고 있기 때문이다.

외국의 경우 일찍이 이런 논의를 위한 연구가 이루어져 왔으며 특히 미국의 경우 원자력의 이용과 우주시대를 대비하여 에너지부와 NASA에서 저선량 방사선에 관한 연구를 지원하고 있으며, 일본의 경우 환경과학연구소 등에서 국가의 지원하에 연구가 이루어지고 있으며, 일본전력회사들이 지원하는 전력중앙연구소 등에서 또한 연구가 이루어지고 있다.

우리나라의 경우 독성학적 관점에서 저선량 방사선에 관한 연구는 1990년 원전 역학조사로부터 시작되었다. 이후 저선량 방사선의 연구 필요성에 대해서는 많은 공감 이 이루어졌으나 실제 지금까지는 저선량 방사선에 대한 생물학적 연구를 진행하는데는 근본적인 한계가 있었

는데, 이는 다양한 저선량과 저선량률의 영향을 볼 수 있는 저선량 조사장치가 없었기 때문이다.

한국수력원자력(주) 방사선보건연구원에서는 2004년 12월 국내 최초로 저선량 방사선 조사시설을 완공하여 운영할 예정에 있다. 저선량 방사선영향 연구는 그 생물학적 결과의 모호함 등 많은 난관을 극복하여야 하는 과제인 만큼 보다 많은 연구자들이 같이 고민하고 토의하는 저선량 방사선영향 연구 공유의 장이 되었으면 하는 바램이다.

여기서는 먼저 현재 방사선 영역에서 가장 중요한 이슈인 저선량 방사선에서의 선량반응 관계에 대해 특히 일반인들이 잘 알지 못하는 방사선의 긍정적 생물학적 효과 즉 호메시스 효과로부터 이야기를 시작해 보고자 한다. 이어 외국의 저선량 방사선영향 연구에 대해 자세히 알아보고 마지막으로 방사선보건연구원의 저선량 조사시설과 향후 방사선영향연구의 방향에 대해 논의해 보고자 한다.

2. 저선량 방사선에서의 선량반응 관계

<그림 1>은 현재까지 진행되고 있는 저선량 방사선 영역에서의 선량 반응관계를 요약하고 있다(Brenner 등, 2003).

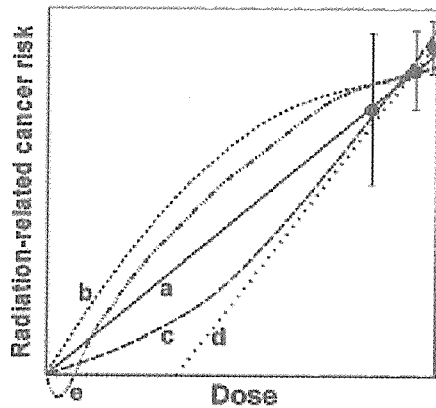
먼저 a는 저선량 영향을 현재의 보수적 관점에서 수용하고 있는 일차선형 모형이며 일본 원폭 생존자의 고형암 발생이 이 모형과 대체적으로 일치하고 있으며, c는 이차 선형 모형으로 일본 원폭 생존자의 백혈병 발생이 이 모형과 일치하는 것으로 보고되고 있다.

d는 일정 선량 이하 즉 역치 이하에서는 암 발생이 일어나지 않을 것으로 보는 모형으로

원폭 생존자와 고선량 방사선 치료자의 골육종 발생이 예가 될 수 있으며, 그 이유는 이 조직이 더이상 분열 안하는 조직이기 때문으로 생각된다.

b는 현재의 저선량 영역의 선량 반응 모형은 실제 위험보다 낮게 추정되어 있다고 주장하는 초선형모형인데 특정암에 대해 민감한 유전자를 가진 집단에 대해서는 이런 추정이 가능하며, 실제 피폭받은 세포보다 그 주위 세포에서 보다 많은 형질 전환 또는 세포 손상이 생긴다는 bystander 효과 또한 많은 연구 결과들을 통해 이런 모형의 근거를 제공하고 있다.

마지막으로 e 곡선은 저선량에서는 오히려 방사선과 관련한 암의 위험도가 낮아진다고 주장하는 소위 호메시스 효과를 나타내고 있으며, 이를 뒷받침하는 많은 연구 결과들이 있는데, 이에 대해서는 뒤에 자세히 소개하고자 한다.



<그림 1> 방사선과 암의 선량 반응 모형

한편 과연 얼마정도의 방사선이면 우리가 용인할 수 있을 것인가에 초점을 맞춘 연구들

도 있는데 <표 1>은 자연발생적인 DNA의 손상과 방사선 1cGy에 의한 DNA 손상을 비교한 것으로 소위 용인가능한 선량의 고민에 대한 하나의 답이 될 수 있을 것으로 보여 소개한다. 이 연구에 의하면 자연발생적으로는 우리 몸의 호흡과 각종 대사작용에 의해서 세포당 1시간에 약 5천개, 1년 동안에는 무려 4.4×10^7 개의 단일가닥 손상이 발생하는데

비해 방사선 1cGy에 의해서는 약 10개의 단일가닥 손상이 일어난다고 한다. 암 발생에 있어 보다 중요한 이중가닥 손상의 경우 1cGy의 방사선은 0.4개의 손상을 준다고 한다(Billen, 1990). 이 추정을 확대하면 실제 사람에게서 이 영역 이하의 방사선은 무시할 정도의 수준으로 볼 수도 있을 것이다.

<표 1> 자연발생 DNA 손상과 방사선에 의한 DNA 손상의 비교

Character of event	Spontaneous DNA damage events			DNA damage/cGy
	Per second	Per hour	Per year	
Single-strand breaks	1.4	$\sim 5 \times 10^3$	$\sim 4.4 \times 10^7$	10
Double-strand breaks				0.4
Depurination and/or base lesions	0.8	$\sim 1.5 \times 10^3$ $\sim 1.25 \times 10^3$	$\sim 1.4 \times 10^7$ $\sim 1.1 \times 10^7$	9.5
Total events	2.2	$\sim 8.0 \times 10^3$	$\sim 7 \times 10^7$	~ 20
cGy equivalents (1 cGy = 100 events)	0.022	8.0×10^1	7×10^5	

3. 방사선 호메시스

호메시스(hormesis)는 그리스어의 hormaen(to excite, 흥분하다.)에서 유래된 단어로 독물학(toxicology)적으로 다량인 경우 생물학적 대사 과정을 억제하는 물질도 미량인 경우 생물학적 대사과정을 촉진할 수 있다는 의미로 사용되며 동종요법(homeopathy)의 약리학적 원칙으로서 낮은 농도의 독소에 노출되면 이에 대한 반응으로 해독작용 및 회복작용이 증진되어 다음에 독소에 노출되더라도 이의 위해를 최소화함으로써 세포나 생체 더 나아가 종에 유익한 방향으로 그 영향이 나타난다는 의미로 사용된다. 실생활

에서 호메시스 효과의 실례를 볼 수가 있는데, 그 예는 수없이 많지만 식이성 지방, 음주, 운동, 스트레스 등만 소개한다.

고지방 식이는 심장병과 유방암 등의 몇 개의 암과 관련되어 있으나 식이성 지방의 적절한 섭취는 적절한 영양과 건강에 필수적이다.

과도한 음주는 중독, 위궤양, 간질환, 그리고 암을 일으킬 수 있으나, 적당한 음주(하루 1~2잔)가 심장질환으로 인한 사망을 감소시키고, 수명을 증가시킨다는 긍정적 영향에 대한 고려할 만한 증거들이 축적되어 있다.

심한 운동은 적응되지 않은 개인에게는 심장질환의 위험요소이며 또한 일시적 면역 저하를 가져오지만 적절한 규칙적인 운동은 심

폐 기능을 증진시키고, 정신사회학적 스트레스를 낮추며, 면역기능의 증가를 가져오는 등 긍정적인 영향을 미친다는 사실은 잘 정립되어 있다.

극단적 스트레스(예, 걱정이나 사별)가 감정적 이상(예, 우울, 수면장애, 자살) 그리고 육체적 장애(위장관계 이상, 두통)을 가져온다는 것은 잘 인식되어 있다. 그러나 긍정적 스트레스는 성취감과 만족감을 제공하고, 생리학적 기능을 돕는다. 이런 양면성은 작업 현장에서도 보여지는데, 장시간 극심한 스트레스는 정신적 육체적 피로감을 가져오지만, 적당한 압력은 지루함을 예방하고 긍정적 자극을 가져온다.

19세기에 Schultz는 여러 화학물질은 저선량에서 하등 동물의 성장을 촉진하지만 고선량에서는 성장을 막는다는 사실을 보고했다. 20세기에 들어 저선량에서의 긍정적 자극 효과에 대한 보고가 많아졌으며, 고등동물에서도 이런 현상이 발생되며, 실험실 연구와 인간에 대한 호메시스 효과가 보고되었다.

Lucky 교수는 19세기 말부터 1250여편의 방사선 생물학 연구를 고찰한 결과 이끼류부터 돼지 등의 동물에 이르기까지 저선량 방사선에 의한 생물학적 긍정효과 또는 적응반응을 관찰하였으며, “Hormesis with Ionizing Radiation”을 출간하였는데 여기에서 방사선 호메시스라는 용어를 처음 사용하였으며, 1982년 Health Physics에 논문을 기고하면서부터 본격적인 논의가 시작되었다.

이후 호메시스에 대한 다양한 연구 결과 미량의 방사선인 경우 1) 방사선에 의하여 하나의 단일가닥 손상이 발생한 후 또 하나의 단

일가닥 손상이 동일 장소에 발생하기 전에 복구됨으로써 완전한(회복 불가능한) 손상에 필요한 이중가닥 손상으로 진행되지 못하며 2) 세포내 복구과정이 유도되고 3) 면역 반응 등에 의한 위해 방어 요소가 작용하는 것으로 생각되고 있다.

매우 낮은 양의 방사선에 피폭되면 회복기전에 필요한 새로운 단백질을 생성하는 유전자가 유도되는 적응반응(adaptive response)을 함으로써 후에 더 높은 양의 방사선에 피폭될 경우 이의 효과를 감소시켜 세포의 손상이 감소된다는 적응반응 또한 방사선 호르메시스의 이론적 근거 중 하나이다.

실제 10cGy 이하의 저선량 피폭후 1Gy 이상의 고선량 피폭을 받으면 직전에 저선량을 받지 않은 대조군에 비해 실험군에서 세포손상이나 돌연변이율이 훨씬 줄어들음을 관찰한 많은 적응반응 연구 결과들이 있다.

저선량 방사선에 피폭되고 난 후의 반응이 완전히 활성화되는 데에는 4시간 내지 6시간이 소요되는 것으로 알려지고 있는데 이 기간 동안 단백질 합성이 억제된다면 적응반응이 일어나는 것을 방해할 수 있다는 것이 알려졌다. 이것은 필수 효소가 유도된다는 것을 의미하며, 후속 연구에서는 1cGy와 2cGy 사이의 방사선에 피폭된 세포에서 분리된 새로운 단백질이 방사선에 의해 손상받은 DNA에 특이하게 결합한다는 것이 알려졌다.

사람의 경우에도 오사카 대학의 콘도 교수 등은 일본의 미사사 라돈 온천이 있는 마을과 기타 마을의 암 발생률을 비교한 결과 이 지역 사람들의 암 발생률이 주위지역이나 일본의 다른 지역에 비해 통계적으로 유의하게 낮다고 보고한 바 있다.

이런 결과에 대해 국제방사선방호위원회는 1990년 권고에서 “방사선이 성장과 회복을 포함한 세포 기능을 다양하게 증가시킨다는 실험적 증거가 있고, 자연 방어기전을 증가시킬 수 있다.”고 까지 나타내고 있으나 이를 호메시스로까지 해석할 수 없으며, 명확하지 않은 경우 사람을 보호해야하므로 여전히 역치가 없는 선형모형이 방호시 적용되어야 한다고 권고하고 있다.

4. 외국의 저선량 방사선 인체영향연구 현황

가. 미국

미국은 건강, 자연 환경과 장래 에너지를 위하여 기초 생물학과 환경과학에 대한 연구를 목적으로 하는 연구기금 속에 저선량 방사선 연구 분야가 포함되어 있다.

220개 이상의 국가 및 사설 연구소와 16개의 DOE 실험실에서 2275명의 연구진으로 하여금 저선량 방사선과 자발적 활성산소에 의한 손상도 차이 비교, 저선량 방사선과 자발적 활성산소에 의한 생물학적 반응, 저선량 발단선량의 존재 가능성 연구, 저선량 방사선에 대한 개인적 감수성에 있어서 유전학적 차이 연구 그리고 연구결과와 발표 및 대중에의 전달법 연구를 해오고 있다.

본격적으로는 1990년 이후부터 연구가 진행되어 오고 있으며, 그 결과 2003년 Nature와 Science에 저선량 방사선의 긍정적 영향에 대한 코멘트가 실리는 성과를 올렸다.

이는 비로소 기존 과학계에서 저선량 방사선의 긍정적 영향에 대해 진정으로 고민하기 시작했다는 것을 의미하는 중요한 대목인데, 미국은 향후의 저선량 영향 연구를 위해 매년

약 2000만 달러의 예산을 준비하고 있다.

나. 일본

일본 환경과학기술연구소는 로카쇼무라에 위치해 있는데, 이 지역은 일본의 원자력산업체들과 원전수거물 관리시설이 들어서있는 지역으로서 원자력산업의 저선량 영향에 대한 국민적 이해를 위해 국가와 현에서 설립하여 지원, 운영하는 연구소이며 저선량 방사선이 생물에 미치는 영향에 대하여 실증적 연구 수행 및 지식 보급이 주요 설립목적 중 하나이다.

저선량 방사선의 생물 영향에 관한 연구를 수행하는 생물영향 연구부의 주요 연구영역은 저선량 방사선이 수명 및 발암에 미치는 영향, 유전적 영향, 세포에 미치는 영향, 유전자에 미치는 영향 등인데, 이 연구소는 대규모 저선량 방사선 조사시설을 갖추고 1999년부터 2003년까지 저선량 방사선이 수명에 미치는 영향을 관찰하여 누적선량 0.4Gy에서 20일, 8Gy에서 100일의 수명단축을 확인, 보고하였으며 그 외에 선량 의존성 조혈세포 감소 및 염색체 이상 유발과 P53의 선량별 발현양상 차이 등을 보고한 바 있다.

일본전력중앙연구소는 일본의 전력회사에서 설립, 지원하고 있는 기관으로 저선량 조사시설을 구축하고 연구를 통해 저선량 방사선의 긍정적 영향 규명에 노력하고 있다.

저선량 방사선의 생물학적 영향, 방사선방호기준의 문제점, 방사선의 의료적 적용가능성 탐색 등을 목표로 하고 있으며 이를 위하여 세포고사 경향 연구, DNA손상과 회복, DNA손상에 의한 정보전달기구, 항산화물질 유도, 저선량 방사선에 의한 면역기구의 향

진 효과, 활성산소 관련 질환의 제어효과, 라돈 온천의 효능 연구 등을 진행하고 있으며, 그 결과 활성산소 가설의 제안, 노화제어효과 세포기능의 활성화, 당뇨병 증상의 발증 제어 등의 연구 성과를 거두었다.

5. 방사선보건연구원 저선량 방사선 조사 시설

저선량 방사선의 인체 영향을 가장 잘 보여 줄 수 있는 연구는 역학적 연구이나 실제적으로 이 영향을 추정하기 위해서는 우리나라 인구를 피폭집단으로 간주하더라도 향후 10년 정도를 추적해야만 할 정도이며, 따라서 국제적으로 자료를 모아서 분석하는 연구가 국제암연구기구를 중심으로 10년 정도 진행되고 있으나 아직까지 결론을 내릴 수 없다. 따라서 동물과 세포 연구를 통해 발암과 유전적 영향을 파악하고 특히 민감 집단에 대한 연구를 진행해야 한다.

한국수력원자력(주) 방사선보건연구원은 2001년 7월 일본 전력중앙연구소 답사를 시작으로 저선량 방사선 조사시설에 대한 준비를 시작하였으며, 드디어 2004년 12월 30일에 저선량 동물/세포 조사시설 (^{137}Cs , 0.005~50mGy/시간)을 완공할 예정이며, 이 선량은 적어도 방사선작업종사들의 연간 허용기준 2cGy를 감안하고, 기존 연구자들의 적응 반응과 호메시스를 보인 선량을 반영한 것이다. <그림 2>

주요 조사장비는 자동조사거리 조절 시스템을 갖춘 단기 세포조사 설비와 동물 개체 선량평가 시스템을 갖춘 장기 동물조사 설비가 있으며, 무엇보다도 중요한 연구자들의

안전을 위해 방사선차폐설비, 원격제어 및 모니터링실, 안전도어 시스템 그리고 지문인식 도어 및 모니터링을 통한 방사선구역 출입 관리 통제시스템을 도입하였다. 특히, 이 시설은 특정 병원균 부재 시설이 첨가되어 있기 때문에 장기적으로 마우스를 사육하면서 방사선의 영향을 평가하는 경우 문제가 될 수 있는 바이러스, 세균, 곰팡이 오염 위험성을 배제할 수 있어서 방사선만의 영향을 순수하게 증명할 수 있게 되었다.

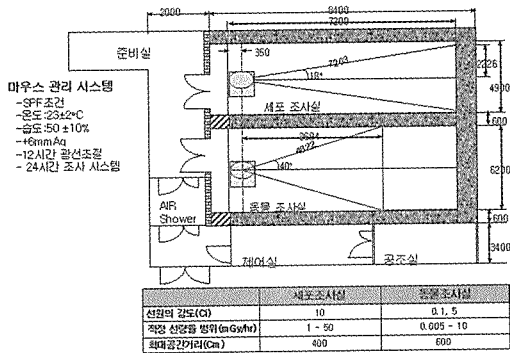
저선량 방사선의 올바른 이해를 위해서는 크게 분자수준, 세포수준, 개체수준에 대한 연구가 이루어져야 할 것이며, 이를 통해 합리적인 방호개념을 확립하고 나아가 의료적 산업적 활용이 가능할 것으로 생각된다. 분자수준의 연구는 소위 활성산소와 유전자 발현에 대해, 세포의 생존과 사멸을 관장하는 세포주기, 세포고사, 면역 등은 세포수준에서, 그리고 이를 인간에게 보다 잘 적용할 수 있는 개체수준의 연구가 이루어질 때 비로소 저선량 방사선에 대한 실마리를 잡을 수 있을 것으로 기대된다. 이는 일개 연구소에서는 이루어질 수 없는 것으로 따라서 방사선보건연구원은 이 저선량 조사시설을 매개로 저선량 영향 연구의 연구그룹 네트워크를 제안하며 많은 연구자들의 관심과 참여를 기대한다.

6. 맺으며

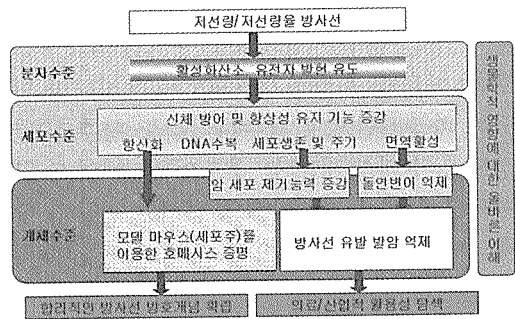
저선량 방사선의 위험성에 대해서는 연구자들간에 다양한 이견이 존재하고 있으며 지금도 선진국을 중심으로 많은 연구가 진행되고 있다. 한편 현재의 방사선에 대한 부정적 인식들은 다양한 측면에서 국가와 개인에 대

해 심리적 경제적 손실을 끼치고 있으며, 따라서 저선량 방사선에 대한 국가적 차원의 연구가 이루어져야 했음에도 불구하고 그동안 우리나라에서는 관련연구에 대한 지원의 부족과 연구의 기초가 되는 저선량 방사선 조사 시설의 부재로 연구가 이루어지지 못했다. 방사선보건연구원에서는 이 연구를 위해 2004

년 12월 30일부터 저선량 조사시설을 구축하여 운영할 것이며, 이를 이용하여 다양한 선량과 디자인의 연구가 가능할 것이다. 방사선 보건연구원은 이 시설과 그 연구 결과에 대한 많은 사람들의 관심을 바라며, 또한 저선량 방사선의 생체 영향에 대해 관심있는 연구자들의 많은 이용을 기대한다. **KRIA**



〈그림 2〉 방사선보건연구원의 방사선 조사시설



〈그림 3〉 저선량 방사선의 연구 개요

[참고문헌 및 자료]

- [1] 저선량 방사선 영향에 관한 국제 심포지엄. 2003년 9월.
- [2] 진영우 등. 대한방사선방어학회 2003년 추계 학술발표회. 2003년 11월.
- [3] DJ Brenner et al. (2003) PNAS. 100(24). 13761-13766
- [4] 신 방사선의 신체에 미치는 영향. 일본보건물리학회, 일본 방사성동위원소 협회, 1999.
- [5] 近藤平宗. 인간은 왜 방사선에 약한가? 構淡社, 1998.
- [6] ATOMICA, 생명과 방사선, 방사선과 생물의 적응응답반응(09-02-01-02).
- [7] <http://lowdose.tricity.wsu.edu>
- [8] <http://www.nirs.go.jp>
- [9] <http://www.ies.or.jp>