



저 선량 방사선영향에 관한 실험전망

1. 서론

방사선 위해(risk) 평가에 있어서 현재 문제가 되고있는 것 중 한가지는 저 선량영향에 관한 것이다. 저 선량영향이라면 거의가 발암 등 만발장해와 유전적 영향에 한정되며, 급성장해는 일반적으로 저 선량에 의해서는 발생되지 않는다. 원자력이나 방사선의 평화적 이용과 관련되어 만약에 방사선 피폭을 받는다면 그것이 사고상황이 아닌 한, 거의 모두 저 선량 연속피폭이라고 생각된다. 그러한 데이터를 사람집단을 대상으로 직접 얻어내려는 시도가 이미 몇 가지 있었다. 예를 들면 자연방사선준위가 높은 지역주민에 대한 조사결과나 원자력시설 또는 의료시설에서의 직업적 피폭 등에 관한 조사결과이다. 이러한 역학조사에는 간접인자(방사선외의 끄연, 식생활 차이 등의 영향)가 혼재 될 가능성이 있어서 인과관계의 확립을 사실상 어렵게 하기도 한다. 따라서, 이러한 역학조사데이터를 보완하기 위한 실

험적 연구가 필요하다.

저 선량의 수치에 관해서는 아직 전문가들 사이에 컨센서스가 이루어지지 않았으나 국제방사선방호위원회(ICRP) 및 국제연합과학위원회(UNSCEAR)가 제시하는 0.2 Gy이하의 선량이 하나의 기준처럼 되어있다. 이 값은 선량·선량을 효과계수를 적용하는 선량범위로 제시된 것이다. 이 계수는 고 선량·선량을 피폭에 비해 저 선량·선량을 피폭에서 단위 선량당 위해가 경감된다는 사실과 관련된 계수이다.

2. 난관 많았던 지난날의 실험

방사선 위해 평가를 위한 최초의 대규모실험은 Lorenz 등에 의해 미국 맨하튼 계획 추진 중에 수행된 생쥐, 기니아 피그, 토끼 등에 대한 γ 선 연속조사실험이었고, 동물의 전 생애에 걸쳐 0.11R/일로 지속적으로 이루어졌다는 점에서 유명하다. 0.1R/일은 1936년 미국이 채용한 허용



선량이었다. ICRP의 1934년 권고는 0.2R/일이었지만 미국에서는 선량측정법의 차이 등을 들어 그 절반 값을 채용했던 것이다. 당시의 허용선량에 대한 개념은 오랫동안 걸쳐 피폭되더라도 병리학적 변화가 없는 선량이라는 것이었다. 방사선작업일 경우 정상적으로는 하루 8시간 조사될 수 있지만 당시에조차 작업시간에 근거한 것이었는지는 확실치 않다. 동물 사육실은 공조장치에 의해 26~27℃로 유지되었으나 예외적으로 0.11R/일 조사 군 사육실은 공조장치가 안되어 있어서 여름철에는 29~32℃에 이르기까지 하였다. 이 조사 군(암·수 푸울 군)에 대해서 수명연장현상이 인정되었으나 통계적으로 유의한 것은 못되었다.

Lorenz 등은 그 수명연장 현상을 확인하기 위해 재차 대규모실험을 하였지만 실험을 시작한지 1년이 지났을 때 비 조사 대조 군에 피부염이 발생되었기 때문에 그 대조 군을 바꿀 수밖에 없었다. 동시 대조 군을 잃었기 때문에 그 실험결과는 무조건적으로는 인정될 수 없다(cannot be accepted without reservation)라고 원저자 스스로가 조건을 달았다.

한편, 1965년 영국 과학잡지에 다음과 같은 논문이 게재되기도 하였다. "1만 마리 이상의 생쥐를 써서 방사선에 의한 수명단축실험을 했는데 액트로메리아(생쥐의 病原바이러스의 일종) 감염사고가 발생했기 때문에 규모를 축소할 수밖에 없었다. 그러나 이러한 대규모실험이 가까운 장래에 재차 시도되기는 어려울 것이기 때문에 불완전한 데이터지만 발표한다"라는 것이었다. 실제로 그 실험은 재차 시도되지 못하였다.

3. 시급히 해결해야 할 문제

방사선장해의 전반적 양상을 그림 1에 나타내었다. 먼저, 피폭된 본인에 대한 영향과 자손에 대한 유전적 영향을 분류하였고 다음에 피폭시기를 나타내었다. 본인에 대한 영향으로는 피폭 후 일찍 나타나는 급성장해와 암 등 만발장해를 구분하였다. 자손에 대한 유전적 영향으로는 출생 전후에 나타나는 급성장해와 그 이외의 만발장해로 나누었다. 마지막으로 만발장해는 암과 암 이외의 장해로 나누었다.

본인에 대한 영향 중 암과 자손에 대한 영향 모두는 확률적 영향으로 분류되며 문턱 값(threshold value)은 없는 것으로 알려져 있다. 확률적 영향 이외에는 결정적 영향으로 분류되며 그것에는 문턱 값이 있는 것으로 알려져 있다. 그림 1을 보면 지금까지 해결되지 못한 많은 문제들이 있음을 알게 될 것이다. 그런 문제들 중에서 3가지만을 추려서 아래에 소개하기로 한다.

3.1 발암의 문턱 값

문턱 값과 관련되는 역학 데이터로는 히로시마·나가사키의 원폭피폭자에 대한 것이 있다. 피폭당시 30세였던 남성들에 대한 고형 암의 선량반응곡선은 3 Sv이하로 원점을 통과하는 직선이었고 50 mSv이상에서 유의한 증가를 보였다. 그런데, 마연 박사는 이 데이터가 문턱 값이 있음을 시사하는 것은 아니라고 하였다. 1999년 12월에 「방사선안전규제 방침과 과학의 융합」이라는 주제로 미국 버지니아주 와튼튼 시에서 국제 심포지엄이 열렸었다. 정치가와 과학자가 함께 했던 이 회의의 결론 중에는 문턱 값과 관련된 부

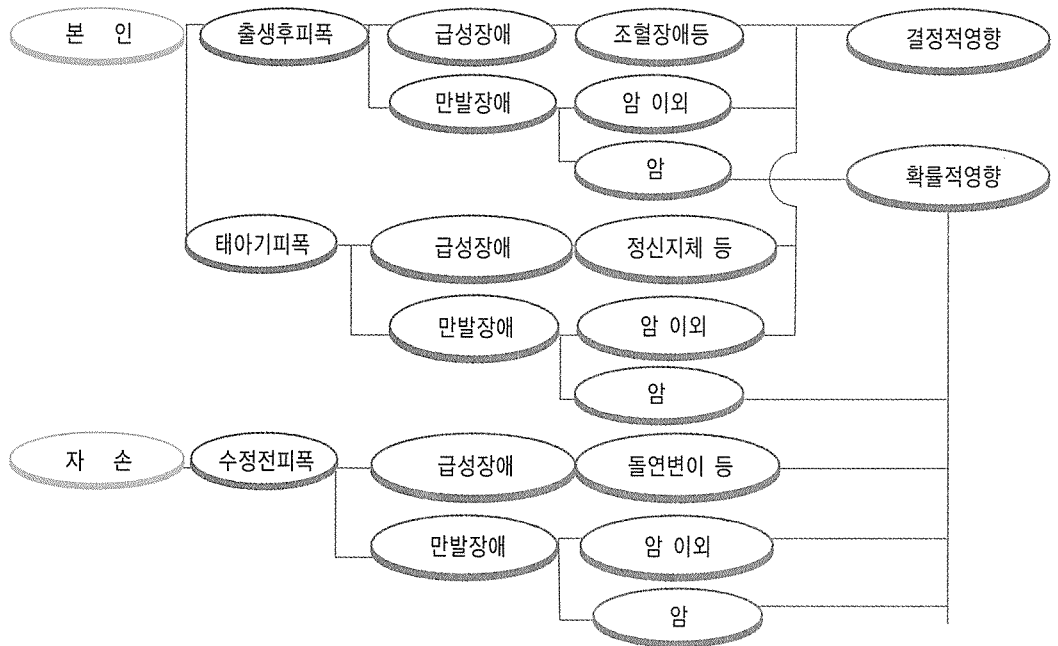


그림 1. 방사선장해의 전반적 양상

분이 다음과 같이 표시되어 있었다.¹⁾

“성인에 대한 발암 위험이 통계적으로 유의하게 되는 최저선량은 100 mSv이다. 그러나, 이 사실은 문턱 값의 존재를 시사하는 것은 아니다”.

이것은 매우 흥미 있는 결론이며, 두 번째 문장에서 100 mSv가 문턱 값으로 오해되지 않도록 하였다. 이러한 결론이 내려진 이유는 이론적 가능성으로 보아 비교적 큰 집단에 대해 조사한다면 100 mSv이하로도 유의하게 될 가능성이 있기 때문이다. 즉 이것은 통계검정의 본질에 따르는 문제이며 언제나 영향을 무시할 확률은 영(zero)이 아니기 때문이다(4절 참조).

이러한 역학연구는 통계적 and/or 방법론적 불확실성을 수반하기 때문에 생물학적 영향이 관

찰되지 않는다는 사실로부터 위험이 없다고 결론 내리지는 못한다.^{2),3)} 따라서, 현상론적 연구에서는 운용상 문턱 값이 제안되지만 참의 문턱 값은 메카니즘 연구에 의해 얻어질 수밖에 없다.⁴⁾ 참의 문턱 값 증명을 위해서는 추상적으로 다음과 같은 순서에 따라야 할 것으로 생각된다.

발암과정은 다단계과정이라고 본다. 그 많은 단계 중에서 하나이상의 단계가 확률과정이 아님을 증명하도록 한다. 확률과정이 아닌 각 단계에 관해 문턱 값 에너지를 추정하면 그들 중 최대 값이 발암 전과정의 문턱 값 에너지가 된다. 다음에 그 문턱 값 에너지를 문턱 값 선량(에너지 밀도)으로 변환시킨다. 또한 그 문턱 값 선량이 방사선 방호 상 의미 있는 크기임을 나타내야 하는데 그것이 곧 실현될 것 같지는 않다. 그러나 문턱 값



이 없는 직선모델에 대한 의문은 분명히 제기되어 있다.^{5),6)}

3.2 유전적 영향에 의한 발암

1990년에 영국의 웨라필드 핵연료 재 처리 시설 주변에서 젊은이들에 대한 백혈병이 증가되어 그것이 그들 부친의 직업피폭과 관련이 있다는 보고가 발표되었는데 이것이 유전적 영향에 의한 발암을 시사하는 최초의 보고이다. 이에 때맞추어 일본 등 여러 나라에서 비슷한 조사가 이루어졌으나 젊은이들의 백혈병 증가는 인정할 만한 것이 아니었다.

지금도 일본의 방사선영향연구소에서는 1946년 5월 1일 이후 피폭자로부터의 출생자를 대상으로 유전적 영향을 조사하고 있다. 그런데, 현재까지 사산, 기형, 체중이상, 성비이상, 염색체이상, 단백질 영동패턴 이상, 사망률 등에서 유전적 영향은 인지되지 않았다. 앞으로 피폭자의 자녀들이 고령화됨에 따른 만발성 질병의 추이를 주의 깊게 추적 조사할 필요가 있을 것이다. 2000년 5월에 열린 제 49회 UNSCEAR에서는 유전적 영향 보고서에 관한 합의가 이루어지지 않아 2000년도 보고서 간행을 포기할 수밖에 없었다.⁷⁾ 동물실험에서는 유전적 영향에 의한 발암을 긍정하는 보고와 부정하는 보고 등 양쪽이 있으며, 역학과 동물실험의 양 분야에서 유전적 영향에 따른 발암은 아직 미해결상태로 남아있다.

3.3 피폭자의 암 이외의 죽음

일본 방사선 영향연구소에서는 1992년 DS86 (1986년에 개정된 피폭선량)에 기초하여 암 이외의 사인에 의한 사망률을 발표하였다. 이에 따르면, 피폭 때 나이가 40세 이하의 집단에서 1965년이래 암 이외의 질환에 의한 사망률 증가

가 인정되어있다. 1999년에도 암 이외의 원인에 의한 사망률에 관한 발표가 있었다. 순환기계, 소화기계, 및 호흡기계의 사인이 증가경향이였다. 피폭 당시 연령 30세 남성들의 암 이외 사인에 의한 생애과잉상대위험도는 0.06/Sv이며 고형 암의 생애과잉상대위험도는 0.38/Sv이다. 생쥐를 이용한 실험결과 보고에서는 1990년에 방사선에 의한 수명단축이나 암 유발만으로는 설명되지 않는다고 하였다. 그 이후 ICRP (1991) 및 UNSCEAR (1993)은 “저 선량으로는 비 특이적 수명단축이 없다” 라는 견해를 나타내었다. 이러한 표현은 2중 부정이어서 이해가 쉽지 않아 달리 표현하면 “저 선량에 의한 수명단축은 특이적 암에 의한다” 라는 견해이다. 이러한 상황이 전개되어 동물실험에서조차 암 이외의 질병에는 별로 주목하지 않게 되었다. 그러나 앞으로 이러한 암 이외의 죽음이 저 선량으로는 일어나자 않는다는 사실을 동물실험을 통해 확인할 필요가 있을 것이다.

4. 환경과학기술연구소에서의 실험

일본 환경과학기술연구소에서는 1995년부터 2003년까지 9년간의 장기 연구과제로서 생쥐를 사용한 만발장해실험을 실시중이다. 그 실험목적은 저 선량 연속조사의 안전성을 재확인하기 위한 것이다. 이하 그 실험개요를 소개한다.

이 실험에서는 SPF(specific pathogen free)의 [C57BL/6JXC3H/He]=B6C3F1 생쥐를 쓰도록 하였다. 그 이유는 종양의 종류가 비교적 많고, 잡종강세이고, 유전적 해석이 가능하고, 방사선발암이나 화학발암실험에도 이 종류의 생쥐가 사용되기 때문이라고 한다. 동물의 수명이나 지발성 종양도 관찰키 위해 그 동물평생동안



을 사육키로 했다고 한다. 1군 당의 생쥐 수는 암수 각각 500마리 씩 이라 한다. 이 정도 크기의 표본을 쓰면 제1종 과오(과다 평가)확률을 5%, 제2종 과오(과소평가)확률을 10%로 할 때 0% : 3%, 1% : 5%, 5% : 11% 등 통계적으로 유의하게 된다. 조사시간은 조사 중 사망이 생기지 않는 최장기간을 예상하고 8주령부터 400일간 조사한다. 1회 조사실험과의 비교 등을 생각하면 연속조사에서 조사중단시간을 가능한 한 짧게 해야한다. 그래서, 생쥐의 관찰과 돌보기를 위해 2시간을 할애하고 나머지 22시간을 조사하도록 하였다. 이 연구소에는 Cs-137선원을 설치한 3개의 조사실이 있는데 그 방사능은 각각 74 GBq

(1994년 12월), 3.7 GBq(1994년 9월), 0.185 GBq(1994년 12월)이었다.

생쥐의 흡수선량은 TLD선량계를 복강에 삽입해서 실측하였다.⁸⁾ 조사실의 선량율은 각각 20 mGy/일, 1 mGy/일, 0.05 mGy/일이 되도록 생쥐의 틀이나 케이지 위치를 정하였다. 400일간의 조사로 측정선량은 각각 8,000 mGy, 400 mGy, 20 mGy가 된다. 이러한 실험군은 3군이고 비 조사 군이 1군 있어서 4군인데 암·수 생쥐를 씌므로 전체는 8군이었다(표 1 참조). 실험은 계속되고있으나 아직 발표될만한 결과는 얻어지지 않은 상황이며 2003년에 종결될 예정이다.

표 1. 일본 환경과학기술연구소에서의 실험계획

생쥐계통	생쥐 성	마리 수	선량율 (mGy/일)	조사시간 (시간/일)	조사기간 (일)	총 조사 선량(Gy)
B6C3F1	암컷	500	0	22	400	0
"	"	500	0.05	22	400	0.02
"	"	500	1.0	22	400	0.4
"	"	500	20.0	22	400	8.0
"	수컷	500	0	22	400	0
"	"	500	0.05	22	400	0.02
"	"	500	1.0	22	400	0.4
"	"	500	20.0	22	400	8.0



5. 결론

여기서 서술되지 못한 토픽으로는 인간이외의 생물들에 대한 영향, 높은 위해 그룹, 동물에 대한 영향의 인간에 대한 영향으로의 외삽, 다른 발암인자와의 혼합피폭, 적응응답, 염증과 암, 마이너스 선량을 효과, 다중 종양 등인 바, 이들에 대해 저자가 논의하기에는 역량이 부족한 듯 하

다. ICRP의 다음 번 권고는 종래의 권고보다 간결한 것이 될는지 모른다.⁹⁾ R. Clarke의 제안과¹⁰⁾ ICRP pub. 8 (1965)의 유사성은 놀라운 일이다. 과학보다는 관리상의 편의(administrative convenience)를 취하려는 것일까? 실험실 증위주의 과학자들에게는 매우 중요한 움직임이라고 생각된다. **KRIA**

참 고 문 헌

- 1) Final Report of International Conference on Bridging Radiation Policy and Science (2000)
- 2) Matsuhira, 방사선과학 44: 92~99 (2001)
- 3) UNSCEAR Report, Sources and Effects of Ionizing Radiation, Vol. II, Annex G, Para.539 (2000)
- 4) UNSCEAR Report, Sources and Effects of Ionizing Radiation, Vol. I, Report to the General Assembly, Para. 66 (2000)
- 5) Kondo, S, J. Nucl. Sci. Tech., 36: 1~9 (1999)
- 6) Tubiana, M., 방사선생물학 연구 34: 132~152 (1999)
- 7) Sasaki, 방사선과학 43: 234~240 (2000)
- 8) Shiragai, A. et al., Radioisotopes 46: 904~911 (1997)
- 9) Clarke, R. International Symposium on Scientific Bases for Low Dose Radiation Protection (2001)
- 10) Clarke, R., J. Radiol. Prot. 19: 107~115 (1999)

(이 보고의 원문은 일본 「Isotope News」 2001년 8월 호에 게재된 것이며, 재단법인 환경과학기술연구소의 사토문소 씨가 원저자임을 밝힙니다)