

# 방사선사고에 있어서의 선량 평가

서울대학교 의과대학 치료방사선과

## 하 성 환

방사선 사고로 인하여 방사선에 피폭된 환자가 발생할 경우 환자가 받은 방사선량을 조속한 시일 내에 정확히 파악하는 것은 환자의 치료방침을 결정하고 예후를 판단하는데 필수적이다. 또한 방사선피폭량을 확인하는 것은 향후 발생할 수 있는 방사선의 만성 효과에 대한 예측과 방사선피폭이 원인일 가능성이 있는 질환의 발생시 이의 원인 규명 및 보상 책임 등의 문제와도 관련이 깊다.

방사선 피폭 후 환자의 증상 및 징후를 이용하여 임상적으로 선량 범위를 추정할 수 있으나 더 객관적이고 정확한 방법으로는 패용한 선량계를 이용하거나 피폭상황을 재구성하여 방사선량을 계산하는 물리학적 방법과 방사선에 의하여 유도된 인체의 변화를 측정하여 방사선량을 추정하는 생물학적 방법이 있다.

### 물리학적 선량 측정

#### 1. 개인선량계(personal dosimeter)

방사선 피폭자가 방사선 작업 종사자로서 개인 피폭 선량계를 패용한 상태에서 방사선에 피폭된 경우에는 선량계를 판독함으로써 비교적 쉽게 피폭 선량을 알 수 있다. 그러나 선량계를 착용하고 있지 않은 상태에서 피폭된 경우에는 이의 적용이 불가능하며 이외에도 피폭시 선량계가 직접 방사선에 노출되지 않은 경우, 패용하지 않은 상태에서 선량계가 방사선에 피폭된 경우, 선량계가 파손된 경우 등에는 환자의 피폭량을 정확히 반영하지 못하는 경우가 있다.

선량계의 측정 정확도도 고려하여야 할 점이다. ICRU Report 20에서는 maximum permissible dose (MPD) 전후에서 30%의 오차를 허용하였으며 ICRP Report 12에서는 MPD 전후에서 50%의 오

차를 허용하였다. 미국의 경우 ANSI N13.11-1983 American National Standard for Dosimetry- Personnel Dosimetry Performance-Criteria Testing은 저에너지 및 고에너지 photon의 경우 사고시 0.1 내지 5 Gy 범위에서 0.3의 tolerance level을 기준으로 하였다. 미국 NBS National Voluntary Laboratory Accreditation Program (NVLAP)은 ANSI N13.11에 따라 선량계 성능 인준 기준을 작성하였다. 그러나 이 경우 15개의 선량계를 사용하여 판단하므로 일부 선량계에서 50% 이상의 오차가 존재하더라도 기준을 통과할 수 있다는 한계가 있다.

#### 2. 선량계 대응 물질(opportunistic dosimeter)

개인 피폭 선량계외에 방사선에 피폭된 물건을 이용하여 물리학적 선량계의 역할을 대신할 수 있다. 미국의 Three Mile Island 원전 사고시 주변 가계의 카메라용 필름을 수거하여 이를 이용한 선량 측정을 시행하였으며 Mexico 의 Co-60 사고 시에는 투명한 유리가 변색된 것을 이용하여 선량 측정을 시행하였다. 일본에서는 원폭 투하지역 기와의 thermoluminescent signal을 이용하였다. 일본과 Norway에서는 피폭자의 시계속의 보석을 사용하여 같은 방법으로 선량을 측정하였다. 이러한 열형광을 이용하는 방법은 치아 충진에 사용한 porcelain으로도 가능하다. 이외에 근래 electron spin resonance (ESR)를 이용한 free radical 측정을 통한 선량 측정에는 피폭자가 소지하였던 nitroglycerine tablet 이나 절단된 다리의 뼈, 조개로 만든 단추가 이용되었다. 면섬유의 thermally stimulated exoelectron emission을 이용하는 방법이 개발되고 있다. 중성자 피폭의 경우 CR-39와 유사한 물질이 디지털 시계와 안경에 사용되고 있으므로 이를 이용한 중성자 선량 측정도 이용될 가능성이 있다.

### 3. 피폭상황의 재구성(reconstruction of accident)

피폭상황을 재구성하여 피폭선량을 계산하고자 하는 경우 방사선원과의 거리, 피폭자의 자세 및 피폭 시간의 불확실성으로 인하여 선량 계산의 오차가 발생할 소지가 크다. 방사선원과 피폭자의 거리가 2 meter 이상으로 피폭자의 위치 및 자세가 피폭중 일정한 경우에는 비교적 정확히 피폭 선량을 계산할 수 있다. 그러나 선원과 피폭자간의 거리가 짧고 피폭자가 계속 움직인 경우에는 위치에 따라 선량율이 변화하므로 방사선 피폭량을 계산하는데 어려움이 있다. 또한 방사선원과 피폭자 사이에 물체가 존재한 경우 신체 부위에 따라 방사선량이 크게 다르다. 피폭 시간을 추정하는 것이 피폭상황의 재현에서 가장 어려운 부분이다. 방사선 사고가 작업자가 일상적으로 수행하는 업무 중에 발생한 경우에는 time/motion study를 시행하여 피폭 시간을 알 수 있으나 그렇지 않은 경우에는 time/motion study가 크게 도움이 되지 않을 수 있다. 피폭자는 사고시의 상황에 대하여 비교적 간단한 내용조차도 기억해내지 못하는 경우도 있다.

#### 생물학적 선량 측정

방사선에 의하여 인체에 발생한 영향을 이용하여 유효방사선량을 측정하는 것을 말한다. 생물학적 선량 측정 방법으로 사용되기 위하여는 방사선에 민감하여야 하며 재현성이 높고 방사선 특이성을 갖추어야 한다. 또한 안정적이고 선량-반응 관계가 좋아야 하며 직접적으로 방사선의 영향을 측정하는 것이어야 한다. 시료의 채취가 비관혈적(비침습적)인 것이 좋으며 간단하고 비용이 적게 들며 시간이 짧게 소요되고 검사자 개인에 따른 차이가 적으면 바람직하다. 따라서 시료채취가 비침습적이고 쉬우며 시료의 배양 기간이 짧고 시험기기를 사용하는 자동 검사방법으로서 검사 소요시간이 짧고 측정 가능한 방사선량 범위가 넓으며 검사결과 해석이 쉽거나 해석을 필요로 하지 않는 방법이 가장 이상적인 생물학적 선량 측정법이라고 할 수 있다. 그러

나 이러한 요건을 모두 갖춘 측정법은 아직 없으며 각각의 측정법은 상당한 오차를 가지고 있다. 따라서 생물학적 측정법과 함께 물리학적 방법을 이용하고 환자의 임상 증상을 이용하여 종합적으로 판단할 필요가 있다.

#### 1. 혈액학적 검사(hematological indicators)

##### 1) 9 parameters (Thoma GE Jr & Wald N, 1959, 1961)

Hemoglobin, RBC count, hematocrit, WBC count, neutrophil, lymphocyte, platelet, reticulocyte ratio, ESR 등 9개의 parameter를 이용한다.

정상치로부터의 증가 또는 감소를 각각 4개의 rank로 구분하여 이를 점수화하고 9개의 점수를 합한 수를 hematologic injury score로 하며 방사선 손상 5개 group 즉 Injury Group I (survival assured), II (survival probable), III (survival possible), IV (survival improbable), V (survival impossible) 중 어디에 해당하는지 구분한다.

Fatal case (Injury group IV, V)의 경우 매우 급속히 score가 증가하며 2~3일 이내에 Injury Group의 구분이 가능하다.

##### 2) 3 parameters (Kindler H. et al, 1996)

Lymphocyte, serum amylase, reticulocyte count의 3개 parameter를 이용하며 피폭 후 36시간까지 1일 3회 측정하여 방사선 손상을 5개의 category로 구분할 수 있다(Table 1).

##### 3) 1 parameter (Andrews GA, et al, 1965)

피폭 후 24 내지 48시간의 lymphocyte 수를 이용하여 방사선피폭의 정도를 normal range 및 moderate, severe, very severe, lethal injury로 그룹화하는데 이용하였다.

##### 4) 1 parameter (Goans RE, et al, 1996)

Lymphocyte count의 감소 속도를 parameter로 이용한다.

100 내지 500 cGy 범위의 급성 방사선피폭시 직접적이고 빠른 검사법이며 2 내지 3시간 간격으로

3 내지 4회 측정하여 lymphocyte 감소 kinetics를 구하고 이로부터 선량을 추정한다(Table 2).

$$L(t)=L_0 e^{-K(D)t}$$

**2. 면역학적 검사(immunological indicators)**

lymphocyte cell surface의 IL-2 receptor의 over-expression을 측정하는 방법(Xu Y, et al, 1996), lymphocyte subtype (T, B, NK)과 관련된 surface receptor의 손상을 측정하는 방법(Greenstock CL,

et al, 1993) 등이 있으나 개인별 sensitivity의 차이가 크다.

**3. 세포유전학적 검사(cytogenetic indicators)**

**1) 염색체이상(chromosomal aberration)**

염색체의 형태학적 이상 즉 dicentric, ring, deletion 등의 빈도를 측정하여 이로부터 방사선량을 계산하는 방법은 전통적인 생물학적 선량측정법으로서 가장 많이 사용되며 신빙성이 높다. 그러나 많은 인적 노력을 필요로 하고 판독에 있어 개인적

**Table 1.** Laboratory Parameters to Roughly Estimate the Patients' Clinical Category

	Lymphocyte within 36 hrs ( $\times 10^9/l$ )	Serum amylase within 24 hrs (U/l)	Reticulocyte count ( $\times 10^9/l$ )
Category 1	~ 0.0	~ 2,500	~ 0
Category 2	~ 0.1	~ 2,200	~ 5
Category 3	~ 0.3	~ 1,500	~ 10
Category 4	~ 0.8	~ 500	~ 20
Category 5	~ 2.0	~ 100	~ 50

**Table 2.** Estimated Radiation Dose as a Function of K

K(D) (day-1)	Estimated dose (Gy)	Lower 99 % limit	Upper 99 % limit
0.00	0.0	0.0	0.0
0.05	0.65	0.50	0.80
0.10	1.24	0.98	1.50
0.15	1.78	1.44	2.12
0.20	2.27	1.87	2.68
0.25	2.78	2.27	3.18
0.30	3.15	2.66	3.63
0.35	3.53	3.02	4.05
0.40	3.90	3.36	4.43
0.50	4.54	3.97	5.12
0.60	5.11	4.50	5.73
0.70	5.61	4.95	6.28
0.80	6.06	5.33	6.79
0.90	6.46	5.66	7.25
1.0	6.82	5.95	7.69
1.5	8.18	6.90	9.46
2.0	9.09	7.43	10.74
2.5	9.73	7.76	11.71
3.0	10.22	7.98	12.45

인 차이가 있을 수 있다. 전신 피폭 및 부분 피폭시 선량 측정이 가능하며 피폭 후 시간이 경과한 후에도 이용이 가능하다. 실험실 및 관독자 개인에 따른 차이가 있으므로 실험실별로 표준 곡선을 작성하고 이에 따라 선량 측정을 시행한다.

근래 FISH 기법이 도입되어 translocation까지 관독할 수 있게 되었으나 비용면에서 매우 불리하며 아직 생물학적 선량 측정에 널리 이용되고 있지는 않다.

### 2) 미소핵검사(micronucleus assay)

세포의 정상 핵보다 작은 미소핵이 나타나는 숫자를 측정하는 것으로 대조군에서의 빈도 및 방사선 피폭 후의 빈도에서 관독자에 따른 차이가 있다. 0.2 Gy 이상에서 측정이 가능하며 방사선 측정 오차는 40% 이상으로 알려져 있다.

### 3) Apoptosis

TdT assay (in situ terminal deoxynucleotidyl transferase assay), FADU assay (fluorescence analysis of DNA unwinding assay) (Boreham DR et al, 1993) 등이 실험적으로 시도되고 있다.

### 4) 분자생물학적 검사(molecular biological indicators)

Halo assay (Vinograd J, et al, 1965, Roti Roti JL, et al, 1987), comet assay, halo comet assay (Rhee JG, et al, 1996) 등이 있으며 방사선에 의하여 세포핵 물질이 disaggregation된 양을 측정한다.

Halo assay는 DNA organization (supercoiling)의 변화를 측정하는 것으로 DNA repair 이전에는 2 Gy, 이후에는 10 Gy 이상에서 측정이 가능하다.

Halo comet assay의 경우에는 repair 이전 0.5 Gy, 이후 2 Gy 이상에서 측정이 가능하다.

이외에 alkaline 또는 neutral elution을 통한 single strand break 또는 double strand break를 측정하는 방법, ELISA, FIA 등을 이용하여 DNA의 site specific damage를 측정하는 방법이 있다.

### 5) 생화학적 방법(biochemical indicators)

Albumin adduct, thymidine product, enzyme (amylase, diamine oxidase), GSH adducts, specific nucleotide adducts, protein metabolite, hemoglobin adduct 등이 방사선 피폭 후 증가되는 것이 알려져 있으며 혈액 또는 소변에서의 농도를 측정한다.

### 6) 생물물리학적 검사(biophysical dosimetry)

방사선에 의하여 생성된 free radical이 solid material 내에 trap 되어 있으며 free radical의 숫자는 방사선량에 비례한다. 이는 DNA repair, adaptation 등의 생물학적 반응의 영향이 없다. 방사선의 선질(quality), LET, 분할피폭(fractionation), 선량율의 영향이 없다.

ESR (electron spin resonance)은 free radical spine의 수를 직접 측정하는 것으로 흡수된 방사선량에 비례한다.

사람의 모발, 치아, 손톱, 뼈를 대상으로 in vitro study가 되어 있으며 San Salvador의 Co-60 피폭자의 절단된 다리 뼈에서 in vivo study가 시행되었다 (Desrosiers MF, 1991).

치아의 enamel을 이용한 in vivo study가 개발중에 있다(Yamanaka C et al, 1993).

## References

- 1) Ricks RC, Fry SA. The medical basis for radiation accident preparedness II-Clinical experience and follow-up since 1979. New York, Elsevier, 1990.
- 2) Reeves GI, Jarrett DG, Seed TM, et al. Triage of irradiated personnel. Proceedings of an Armed Forces Radiobiology Research Institute Workshop (1996). Bethesda, AFRRI, 1998.
- 3) REAC/TS. Medical planning and care in radiation accidents-reference manual. REAC/TS ORISE.
- 4) 하성환. 외부피폭에 대한 생물학적 선량측정. In: 방사선 장애 검진 및 생물학적 선량 측정 방법 개발 연구보고서. 한국전력공사기술연구원 1994.