

원자력 발전소 피폭자 건강영향평가 사례보고

이정은, 양광희, 장윤균, 정미선, 진영우, 김종순*

방사선보건연구원, 한국원자력의학원

2007년 6월 15일 접수 / 2007년 7월 30일 채택

원자력 발전소의 중수누출에 따른 삼중수소 농도증가에 의한 방사선 내부피폭과 이에 대한 건강영향평가를 실시하였다. 전체 22명 가운데 13명에 대하여 검사를 실시하였으며, 이들의 내부피폭량은 0~4.44 mSv 였다. 일반혈액검사 중 백혈구수치의 변화를 이용하여 평가한 결과에서 결정적 영향에 대한 특이사항은 나타나지 않았으며, 생물학적 선량평가 방법을 이용한 체내피폭량은 0~37 mGy로 확인되었다. 결론적으로 방사선 피폭은 허용한도를 초과하지 않았으며, 결정적 영향인 임상적 증상이 보이지 않았다. 이와 같이 의학적 징후와 선량평가 추정치와의 일치성은 사고시 특히 물리적·생물학적 선량평가가 유용함을 보여 준다.

중심어 : 원자력발전소, 물리적·생물학적 선량평가, 삼중수소 피폭

1. 서론

원자력 발전소(이하 "원전")에서 계획정비 기간 중 1999년 10월 4일 중수가 누출되어 공기 중 삼중수소의 농도가 증가하는 사건이 발생하였다. 사건발생 당시 현장에서 작업중이던 3명의 작업자가 즉시 철수하였고, 이중 2명이 삼중수소 호흡기를 착용하고 격리밸브 차단을 위한 긴급작업에 투입되어 약 3 mSv의 피폭이 발생되었다. 중수회수 및 제염을 위하여 투입된 19명과 작업자 1명은 1.37 mSv 이하의 수준으로 외부피폭되었고 소변을 이용한 체내 피폭범위는 0~3.34 mSv이었으며, 피폭이력 데이터베이스인 원전 방사선 안전관리 시스템 (NRS)에 정리되었다. 피폭자들에 대한 건강영향평가를 위하여 백혈구수 및 선량평가를 실시하였다.

2. 대상 및 방법

- 1999년 10월 4일에 삼중수소에 피폭된 22명중 3 mSv 정도의 체내 피폭을 받은 2명을 포함하여 13명에 대해 혈액채취를 하여 평가를 실시하였다.
- 검사는 일반혈액검사로써 백혈구 수의 변화를 추적 관찰하였고, 생물학적 선량평가로써는 염색체 이상 검사 (이동원체, 환형 등 이상염색체 유무 및 빈도)를 실시하였다. 선량-반응식의 표준곡선을 확립은 국제원자력기구(IAEA)의 권고에 의거하여[3] 방사선보건연구원에서 방사선량과 이동원 및 환상 염색체를 지표로 선량-반응관계를 관찰하고

정리하였으며, 단위는 실험을 위해 채취한 혈액에 대해 직접적으로 방사선조사를 하였기 때문에 Gy를 사용한다. 저선량 영역 (100 cGy이하)에 대한 선량-반응식은 $Y_{dr} = 4.218 \times 10^{-4} + 4.49 \times 10^{-4} D + 3.78 \times 10^{-6} D^2$ 이었다 (Fig. 1a). 고선량 영역(100 cGy이상)에 대한 선량-반응식은 $Y_{dr} = 9.484 \times 10^{-4} + 1.254 D + 5.18 \times 10^{-2} D^2$ 이었다 (Fig. 1b). 문진과 진찰은 산업의학전문의에 의해 실시되었다.

- NRS 자료와 97년 이후의 방사선방호검진에 대한 검사 결과를 수집하여 이번 중수누출에 의한 체내피폭 및 전체 피폭, 최근 1년 누적 피폭, 3년 누적피폭, 전체 누적피폭을 구하였다.

3. 결과

연령은 평균 30.54세 (26-42세)였으며, 흡연력은 평균 4.12 이었다. 총 평균 누적 피폭량은 7.566 mSv (0.17-50.73 mSv), 3년 누적 피폭량은 2.829 mSv (0.05-9.45 mSv), 1년 누적 피폭량은 1.12 mSv (0-4.04 mSv), 사고에 의한 총 피폭량은 0.828 mSv (0-3.34 mSv), 사고발생 시 흡입에 의한 피폭량은 0.764 mSv (0-3.34 mSv) 이었다. 발전소의 방사선 안전부에서 평가를 실시한 뇨 (urine)를 이용한 흡입선량평가를 보면 11명에서는 흡입선량이 0 mSv에서 0.7 mSv 이었지만, 긴급작업에 투입된 2명에서는 각각 2.76 mSv 와 3.34 mSv의 흡입선량이 나타났다. 이것은 최초 중수누출을 막기 위해 초기 투입인원으로 긴급 상황에서 착용시간이 필요한 산소마스크 대신 삼중수소 마스크 (얼음마스크)를 착용하여 신속한 현장 조치를 한 결과이였으며, 그 외 중수 회수 및 제염작업자 등 11명은 산소마스크를 착용한 결과 낮은 피폭선량을 보여주었다 (Table 1).

책임저자 : 진영우, ywjin@khnp.co.kr, 방사선보건연구원
서울시 도봉구 쌍문3동 388-1 방사선보건연구원 방사선영향연구팀

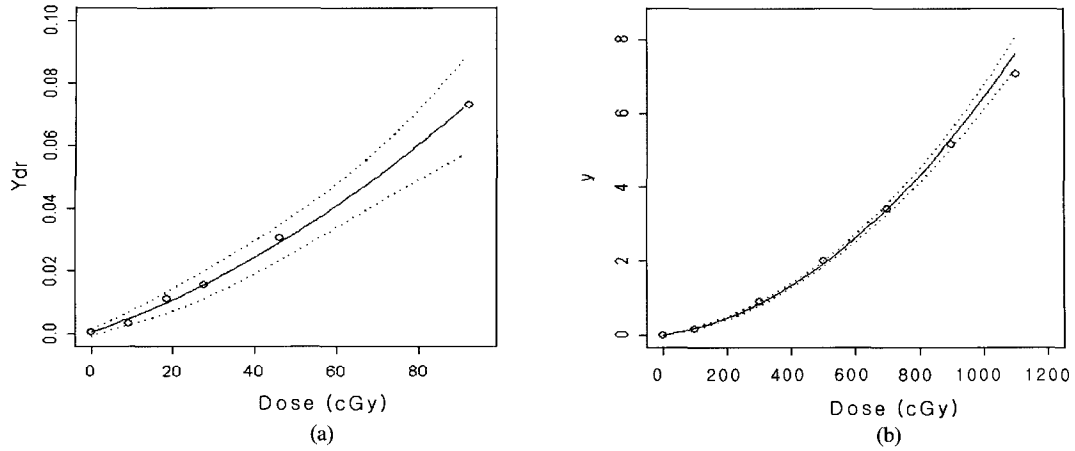


Fig 1. The standard dose-response curve of chromosomal aberration
 (a) Dose-response curve under 100cGy. (b) Dose-response curve above 100cGy

Table 1. General character and exposure dose

Name	Age	Smoking ^{a)} (pk-yr)	Accumulation dose(mSv)					First date for provided with TLD ^{g)}
			Total Dose ^{b)}	The last three years ^{c)}	The last one year ^{d)}	Recent dose ^{e)}	Recent internal dose ^{f)}	
A	38	0	0.47	0.16	0	0	0	'91.01.10
B	40	0	50.73	0.72	0.64	0.48	0.4	'85.03.01
C	27	0	6.93	6.93	4.04	3.34	3.34	'97.05.02
D	27	0	9.45	9.45	0.54	0.54	0.49	'96.01.01
E	30	0	6.26	1.64	0.22	0.22	0.18	'93.06.09
F	28	2.25	1.41	1.41	1.33	0.81	0.66	'97.12.01
G	26	3.5	5.93	5.93	1.04	0.76	0.65	'96.10.01
H	26	7	1.45	1.45	1.45	0.83	0.7	'98.12.18
I	28	10	4.95	4.95	3.78	2.84	2.76	'97.07.18
J	29	2.45	0.17	0.17	0.17	0.04	0.04	'96.08.01
K	42	6.6	0.46	0.16	0.07	0.07	0.03	'85.12.01
L	27	15	6.53	0.05	0.01	0.01	0.01	'85.09.25
M	29	6.75	3.63	3.63	1.27	0.82	0.67	'98.11.09
Average	30.54	4.12	7.66	2.82	1.12	0.83	0.76	

^a Average number of smoking a cigarette per day × smoking period (year)

^b Total accumulated dose after working in the company.

^c Accumulated dose during the last three years (from 1997 to 1999).

^d Accumulated dose during the last one year (from Jan. 1999 to Oct. 1999).

^e Total accidental exposed dose.

^f Accidental exposed inhalation dose.

^g First date of initial accumulate dose measurement after working in the company.

백혈구수의 증감이상이 발견된 근로자는 없었는데 (Table 2), 97년, 98년, 99년에 본 연구원에서 실시한 방호검진 결과와 이번에 실시한 검진 결과를 비교해본 결과 차이를 발견할

수 없었으며, 개인적으로 해마다의 백혈구수를 비교한 결과 역시 차이가 없는 것으로 나타났다.

생물학적 선량평가의 결과 (Table 3)와 일반특성 및 피폭

Table 2. Changing a number of leukocytes during the last three years

Name	'99.10	Accident time	Accident time (retry)	'99.6	'98.4	'97.4	Remark
A	5,500			7,300	5,700	6,000	
B	4,000			6,200	6,200	4,900	
C	4,500	3,900	4,000	5,200	5,200	6,300	
D	4,100			4,800	4,900	52,00 ('97.11)	3,900 ('97.10)
E	4,200			6,100	4,400		
F	5,900	6,300		5,400	7,500	6,300	
G	6,200			5,400	6,700		
H	9,400				7,800		
I	6,300	7,000		10,800	8,500	7,800	
J	4,700			4,700	5,900	5,600	
K	7,100			8,900	10,000	8,000	
L	5,300			6,100	7,000	5,900	
M	6,700			7,500			

선량 데이터 (Table 2)를 비교해서 보면, E는 흡연을 하지 않았고 최근 내부피폭 선량도 0.18 mSv으로 비흡연인 L를 제외한 다른 작업자에 비하여 낮았다. 그러나 선량-반응 표준곡선에 의한 추정선량은 37.948 mGy로 높게 나타났다. 흡연력이 6.75인 M은 최근 내부피폭 선량이 0.67 mSv이며, 추정선량 역시 31.232 mGy로 높게 나타났다. 또한, 이번 사고에서 긴 급작업자로 투입된 C와 I, 2명의 작업자는 흡입선량이 3.34 mSv과 2.76 mSv으로 높았으나, 추정선량은 5.3844 mGy와 0 Gy로 낮게 나타났다.

4. 결론 및 고찰

방사선에 의한 생물학적 영향은 크게 결정적 영향과 확률적 영향으로 나누어 볼 수 있다.

결정적 영향은 생존 가능한 세포들의 증식에 의해 방사선의 피해가 보상될 수 없을 정도로 많은 세포치사가 야기되는 전체적 (whole body) 혹은 국부적인 (partial body) 피폭의 결과로 발생된다. 결과적으로 과도한 세포의 손실은 조직이나 장기의 기능에 중대하고 임상적으로 감지될 수 있는 장애를 유발할 수 있다.

반면, 피폭량이 매우 적어서 세포의 손실이 너무 적을 때는 조직이나 장기의 기능 손상을 일으키지 못하여 기능 이상이 감지되지 않는다. 즉 방사선 피폭에 의한 백혈구의 수 또는 백분율의 이상과 같은 영향이 나타나기 위해서는 최소한의 발단치를 가지고 있으며, 이 최소한의 발단치 이하에서는 영향을 나타내지 않는다는 것을 의미한다. 이러한 최소한의 발단치는 0.50-1 Gy로 알려져 있는데, 이번 중수 누출에 의한

피폭 근로자 중에는 이 정도의 수치를 가진 사람은 없었다. 또한 원자력법에서 정한 선량한도 (연간 50 mSv를 넘지 아니하는 범위에서 5년간 100 mSv)[1]를 넘은 종사자는 없었다.

생물학적 선량평가는 고선량과 고선량률에 의한 염색체변이를 잘 반영한다[2]. 그러나, 정상인에서도 몇 개 이상이 발견되는 등의 자연적으로 발생하는 최소한의 확률을 가지고 있다. 또한 염색체에 영향을 줄 수 있는 담배, 술, 그리고 여러 가지 작업환경, 예를 들면, 벤젠 등의 유기용제의 영향을 받을 수 있으나 개인의 면역체계에 따른 변수도 가정되어야 한다.

생물학적 선량평가방법은 국제원자력기구 (IAEA)에서 인증하는 의학적 처치의 기초자료로 사용된다[3]. 또한 방사선작업과 상관없는 일반인에서 불안정염색체이상이 자연적으로 발생되는 데 그 빈도는 1.3/1000 cell[4], 2/1000 cell[5]이다. 급성 과피폭이 아닌 저선량(률)에 의한 피폭인 경우 개체의 방사선에 대한 적응반응 유도 가능성 및 개체의 항상성으로 인해 생물학적 선량평가가 실제 물리적 선량평가에 비해 낮게 추정되었을 것으로 생각된다[6]. 극소량의 전리방사선 등에 노출되면 염색체 회복반응이 유도되어져 항상성을 유지하게 된다. 체내의 항상성유지를 위해 활성화된 생체는 그 이후에 가해지는 급성 방사선 피폭이나 약제 등에 의한 손상, 치사효과, 돌연변이 효과에 대한 항상성 및 내성을 갖게 된다 [7~11]. 위의 Table 3의 결과에서 언급했듯이 E, M, C 그리고 I의 결과를 보면 흡연과의 상관성은 개개인의 차이가 많이 나타나는 것을 볼 수 있다. Table 1에서 보면, 흡연자의 평균 흡연이력은 6.694이었으며, 평균 추정선량은 0 mGy인 4명을 포함하여 7.914 mGy이었다. 반면 비흡연자의 평균 추정선량은 10.095 mGy로 흡연자보다 높았다. 또한 구체적으로 살펴

Table 3. Biological dosimetry using Chromosome aberration about Dicentric. and ring methods

Name	Dicentric	Ring	D+R	Total Cell No.	Ydr	estimated dose(mGy)	Recent internal dose mGy)	Smoking (pk-yr)
A	-	-	-	732	0	0	0	0
B	-	-	-	800	0	0	0.4	0
C	1	-	1	800	0.0013	5.844	3.34	0
D	1	-	1	700	0.0014	6.685	0.49	0
E	6	-	6	740	0.0081	37.948	0.18	0
F	-	-	-	600	0	0	0.66	2.25
G	-	-	-	684	0	0	0.65	3.5
H	-	-	-	665	0	0	0.70	7
I	-	-	-	800	0	0	2.76	10
J	1	-	1	700	0.0014	6.685	0.04	2.45
K	1	-	1	600	0.0016	7.806	0.03	6.6
L	3	-	3	800	0.0038	17.591	0.01	15
M	4	-	4	600	0.0067	31.232	0.67	6.75

보면 다음과 같다. M은 흡연이력이 6.75일 때 추정선량이 31.232 mGy인 반면, I는 흡연이력이 10일 때 추정선량이 0 mGy 이었으며, E는 흡연이력이 0일 때 추정선량이 37.948 mGy인 반면, A는 흡연이력이 0일 때 추정선량 역시 0 mGy 이었다. 이러한 결과를 보면 H. Thierens et al[12]에서 염색체 변이와 흡연과의 상관성이 없다고 이야기 했듯이 이번 결과 에서 역시 흡연과 추정선량은 서로 연관성이 없어 보인다. 그러나 흡연자들 중에서 추정선량이 나타난 사람들은 평균 추정선량이 15.828 mGy로 나타났으며, 비흡연자들 중에서 추정선량이 가장 높게 나온 한 사람을 제외한 평균 추정선량은 3.132 mGy로 상당히 낮았다.

물리적 선량평가에 비해 높은 선량으로 추정된 경우는 TLD 미착용이나 피조사거리, 방향 등 실제 피조사 선량을 제대로 반영하지 못하는 경우를 고려해야 될 것이다. 선량평가 결과, 연간 한계선량인 50 mSv 이하에서 피조사 되었다[1]. 10명은 방사선 관련 업무경험이 없는 일반인과 같은 정상수치를 보였다. 3명에 대해서는 향후에 잔존하는 염색체 이상이 정상인의 수치로 수복되었는지 확인이 필요하다. 실제 방사선이 인체에 미치는 영향에 대한 평가 결과, 물리적 선량평가 시 최대 피조사량을 기록한 사람이 오히려 별 영향이 없었던 것으로 나타났다. 이는 이번 중수누출에 의하여 발생한 삼중 수소 피폭에 의한 영향은 없는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 대한민국 원자력법 시행령 제 2조 제 5호
2. Darroudi F, Fomina J, Meijers M and Natarajan AT. Kinetics of the formation of chromosome aberrations in

- X- irradiated human lymphocytes, using PCC and FISH. *Mutat. Res.* 1998;404(1-2) :55-65.
3. Darroudi, Fenech, Koteles, Lloyd and Turai. International Atomic Energy Agency, Technical Reports Series No.405. IAEA, 2001.
4. Bender MA, Awa AA, Brooks AL, Evans HJ, Groer PG, Littlefield LG, Pereira C, Preston RJ, Wacholz BW. Current status of cytogenetic procedures to detect and quantify previous exposures to radiation. *Mutat. Res.* 1988;196: 103-159.
5. Tawn EJ. Translocation frequencies in lymphocytes of long term radiation workers. *J. Radiol. Prot.* 1995;15:197-202.
6. Chankova GS, Matos JA, Simoes F, Bryant PE. Adaptive response of a new radioresistant strain of chlamydomonas reinhardtii and correlation with increased DNA double-strand break rejoining. *Int. J. Radiat. Biol.* 2005;81(7):509-514.
7. Shadley JD, Afzal V, Wolff S. Characterization of the adaptive response to ionizing radiation induced by low doses of X-rays to human lymphocytes. *Radiat. Res.* 1987;111:511-517.
8. Ikushima T. Chromosomal response to ionizing radiation reminiscent of an adaptive response in cultured Chinese hamster cells. *Mutat. Res.* 1987;180:215-221.
9. Shadley JD, Wiencke JK. Induction of the adaptive response by X-ray is dependent on radiation intensity. *J. Radiat. Biol.* 1989;56:107-118.
10. Liu SZ, Cai L, Sun SQ. Induction of cytogenetic adaptive response by exposure of rabbits to very low dose-rate gamma- radiation. *Int. J. Radiat. Biol.* 1992;62:187-190.
11. Lu C, Ming QY. Studies on the induction of cross-resistance by low dose radiation or by low concentration of chemicals. *Biomed. Environ. Sci.* 1994;7:241-247.

12. Thierens H, Vral A, Ridder L. A cytogenetic study of radiological workers: effect of age, smoking and radiation

burden on the micronucleus frequency. *Mutat. Res.* 1996;360:75-82

Cytogenetic and Medical Examination Report of Accidental Exposure of Nuclear Power Plant Worker using Multiple Assays

Jung Eun Lee, Kwang Hee Yang, Yun Kun Jang, Meeseon Jeong, Young Woo Jin and Chong Soon Kim*
Radiation Health Research Institute, *Korea Institute of Radiological & Medical Sciences

Abstract - A deuterium oxide leakage accident occurred on October 4, 1999, at nuclear power plant in Korea. The concentration of tritium in air increased and 22 workers were exposed by tritium at that time. It is well known that tritium causes internal exposure. Therefore, we examined complete blood cell count, physical and biological dosimetry for 13 workers among whole 22 workers to check the health effect and to evaluate the dose estimation of tritium exposure. The leukocyte count test, one of general blood test, was normal. The estimated doses were 0 - 4.44 mSv by physical dosimetry and 0-37 mGy by biological dosimetry. This dose does not exceed radiation dose limit, and the clinical symptoms of the exposed workers were not shown. The consistency between clinical sign and estimated dose means that physical and biological dosimetry were very useful especially in accident evaluation.

Keywords : Nuclear power plant, Physical and biological dosimetry, Tritium, Internal exposure