

# A Cohort Study on Cancer Risk by Low-Dose Radiation Exposure among Radiation Workers of Nuclear Power Plants in Korea

Young-Khi Lim · Keun-Young Yoo\*

Radiation Health Research Institute, KHNP

\*Seoul National University College of Medicine

## 저준위 방사선 노출의 암 유발에 관한 국내 원전종사자 코호트 연구

임영기 · 유근영\*

한국수력원자력(주) 방사선보건연구원

\*서울대학교 의과대학 예방의학교실

(2005년 12월 23일 접수, 2006년 6월 7일 채택)

**Abstract** - The increased risk of cancer with exposure to low-dose radiation was estimated through longitudinal study for radiation workers at the nuclear power plants in Korea. The radiation dose data were collected from the Radiation Safety Management System(RSMS) of the Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd(KHNP). The cancer risks with radiation exposure were evaluated in terms of relative mortality ratios(RMR) and relative incidence ratios(RIR) to the unexposed employees at the nuclear power plants, and of the standardized mortality ratios(SMR) and standardized incidence ratios(SIR). There were no significant increases of cancers of all sites in the exposed group either in RIR[1.08, 95% confidence interval(CI) 0.74-1.58] or in RMR[1.21, CI 0.70-2.08]. Neither SIR[0.81, CI 0.28-0.96] nor SMR[0.86, CI 0.66-1.10] significantly deviated from 1.0 for cancers of all sites. The trend analysis did not identify evident dose-response relationship due to insufficient numbers of the cases. Consequently, it is concluded that increases in cancer risks in the radiation worker group exposed to low doses at the nuclear power plants in Korea are not identified at this time.

**Key words** : *cancers, cohort study, low-dose radiation, occupational exposure, radiation workers*

**요약** - 원전 종사자를 대상으로 경시적인 코호트 연구를 통하여 저준위 방사선 노출과 암 발생 위험도를 규명하고자 하였다. 방사선 노출에 관한 정보는 한국수력원자력(주)의 방사선 관리 DB에서 수집하였고, 암 발생에 관한 정보는 한국인 중앙 암 등록 자료를, 암 사망에 관한 정보는 통계청 사망원인 자료를 이용하여 수집하였다. 방사선 노출과 암 발생 위험도는 표준화 암 사망비(SMR)와 표준화 암 발생 비(SIR)로 평가하였다. 노출 군에서 암 발생에 대한 상대위험도는 1.08로 평가되었으나 전체 암에 대한 SIR은 0.81로 유의성이 관찰되지 않았다. 암 사망에 대한 상대위험도는 1.21 이었으나 전체 암에 대한 SMR도 0.86으로 역시 유의성은 관찰되지 않았다. 암 유형별 양상은 우리나라 일반인과 유사한 결과를 보였으며, 방사선량 증가에 따른 양-반응 관계 또한 확인되지 않았다.

**중심어** : 방사선 노출, 암, 원전 종사자, 저준위 방사선, 코호트 연구

## 서 론

방사선 노출에 따라 암 위험이 증가함은 1945년의 일본 원폭피해생존자, 1954년 영국 윈드스케일 원자로 화재사고 피해자, 그리고 1986년 체르노빌 원전사고 피해자 등 비교적 단시간에 많은 선량을 피폭한 집단에 대한 역학연구[1-3]를 통해 입증된 바 있다. 그러나 정상적인 방사선 취급과정에서 종사자들이 피폭하는 저선량 방사선에서도 암 위험이 증가하는지에 대한 직접적 증거는 없으며 따라서 국제방사선방호위원회(ICRP)는 신중한 입장에서 낮은 선량에서도 문턱 없이 위험이 선량에 비례할 것으로(linear no-threshold hypothesis) 가정하고 있다[4]. 그러므로 저선량에서 암의 유의한 증가가 있는지에 대한 연구는 방사선방호에서 지속적인 관심사이다.

저준위 방사선과 암 발병과의 위험도를 추론하는 연구 방법은 동물실험과 고 선량 방사선의 위험도를 외삽하는 방법 등이 있으나, 저준위 방사선에 노출된 집단의 위험도 추론은 불확도가 크다. 그러므로 사상의 낮은 빈도로 인해 통계적 분석력에 지장이 있지만 저선량을 피폭한 정규 방사선작업 종사자에 대해 역학연구를 통해 지속적으로 추적할 가치가 있다. 이러한 맥락에서 우리나라의 원전 종사자는 대형 사고 없이 약 27년의 운영 기간 동안 원전이외의 타 기관으로 이동이 매우 적고, 생활환경과 사회 경제적 여건이 유사하며, 방사선 노출 이력이 안정적으로 관리되어 역학연구 대상으로 적합하다. 1977년부터 2001년 말 까지 연구 대상이 평균 7.7년 동안 직업상 노출된 방사선량의 평균은 15.7 mSv이며, 노출군의 71%가 10 mSv미만에 분포하고 있어 전형적인 저준위 방사선 노출 집단이다.

따라서 본 연구에서는 경시적인 관찰을 통하여 저준위 방사선과 암 발병 위험도와와의 관련성을 분석하는 코호트 연구를 수행함으로써 우리나라 원전 종사자가 받은 방사선의 노출 수준에서 암 발생의 위험도가 일반 인구집단에서의 암 발생에 위험도에 비해 증가하는 지를 규명하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 연구대상의 선정

원전 종사자의 방사선 노출량 및 개인 정보에 관한 자료는 한국수력원자력 [주]에서 보유하고 있는 원전의 방사선 관리 데이터베이스(RSMS,

Radiation Safety Management System)를 이용하였다. RSMS는 원자력발전소 운영 원년인 1977년부터 정리되어 있으며, 방사선 노출량의 평가도 원자력법에서 정하는 품질관리 요건을 충족하고 있으므로 데이터의 신뢰성이 확보되어 있다. 또한 원전 종사자에 대한 방사선 노출량의 평가는 열형광 선량계(TLD)를 사용하고 있고, 과학기술부 선량계측 품질요건을 충족하는 방법으로 판독한 결과를 매월 수집하여 RSMS시스템으로 자동 입력되고 있어 완전성과 신뢰성이 높다. RSMS에는 원전의 방사선 작업 종사자로 지정된 개시년도부터 조사 시점까지의 근무 기간, 근무 장소, 방사선 작업내용, 방사선 장해검진 결과, 월별, 분기별, 연도별로 누적된 방사선량 등이 포함되어 있다. RSMS는 국내 전체 원전(4개 원전 본부, 19개호기)에서 생성된 방사선 노출 자료를 한국수력원자력 [주] 본사의 주 전산기에 실시간 베이스로 자동 저장 및 종합된 것으로 연구에 필요한 방사선 노출 총량의 특성에 따른 정보를 입수하였다. 그 내용은 주민등록번호, 나이, 성별 등의 인적사항과 종사 기간, 근무지, 작업 내용 등의 이력 사항, 연도별 방사선 노출 총량 및 최근 1년, 최근 3년, 최근 5년간의 방사선 노출 총량 및 ICRP의 권고에 따라 국내 원자력법에서 정한 연간 선량 한도인 50 mSv 초과 사항 등이다.

종사자가 근무한 원전은 가압경수로형(PWR, 15기)과 가압중수로형(PHWR, 4기)로서 PHWR 종사자의 경우 트리튬에 의한 내부피폭 기여가 상당하다. 그러나 모두 LET가 낮은 방사선이므로 원자로형이나 피폭의 모드(내부 또는 외부)를 구분하지는 않았다.

연구 모집단은 원전 종사자 이면서, 추적 개시 시점인 1992년 1월 1일부터 2001년 12월 31일까지 방사선 작업 종사자로 등록된 전 수 19,911명을 대상으로 하였다. 외국인과 일시 방문객 및 자료 불충한 자를 일차로 제외하고, 최종적으로 여성과 20세 미만은 대상 수가 적어 연구 대상에서 제외한 총 19,695명을 연구 대상으로 하였다.

연구 대상은 노출군(exposed group)과 비 노출군(unexposed group)으로 구분하였으며, 비노출군은 노출군에 비해 가설 원인(방사선)에 노출되지 않았다는 사실 이외에는 거의 동등한 상황에 있는 집단으로서 같은 원전에 근무하지만 방사선 작업에 종사하지 않는 직원들이다.

연구에 입적한 년도를 기준으로 한 연령 분포는 5년 단위로 구분하여, 20-24세 군이 8,270명으로 전체 연구 대상의 42%로 가장 많았다. 다음이

25-29세 군 4,035명(20.5%), 30-34세 군 3,179명(16.1%), 35-39세 군 2,098명(10.7%), 40-44세 군 1,111명(5.6%), 45-49세 군 536명(2.7%), 50-54세 군 328명(1.7%), 55-59세 군 120명(0.6%), 60세 이상 군이 18명(0.1%)이다.

방사선 노출량을 기준으로 한 연구 대상 분포는 비 노출 군이 6,733명(34.2%)이며, 10 mSv 미만 군 9,193명(46.7%), 10-49 mSv 군 2,641명(13.4%), 50 mSv 이상 군 1,128명(5.7%)으로 구성되어 있다. 노출 군이 받은 방사선 노출 총량은 203.9 manSv 이고, 개인당 평균 노출량은  $15.7 \pm 35.5$  mSv로 최저 0.01 mSv부터 최고 441.94 mSv까지 분포하고 있다.

연구 대상의 근무 기간 특성은 5년 미만인 10,987명(55.8%), 5-9년 3,991명(20.3%), 10-14년 2,150명(10.9%), 15-19년 1,770명(9.0%), 20년 이상 797명(4.0%)으로 분포되어 있다. 노출 군의 최초 방사선 작업 시점부터 2001년 12월 31일까지 종사한 평균 기간은  $7.7 \pm 6.5$ 년이다.

#### 암 발생 및 암 사망 자료 분석

암 발생의 확인을 위해 1992년부터 2002년도의 한국 중앙 암 등록 자료를, 암 사망확인은 1992년부터 2002년도의 통계청 사망 원인 사인 자료를 이용하였다. 암 발생과 암 사망 위험도 분석을 위해 발생률과 사망률을 구하였고, 세계 인구로 표준화한 연령 보정 암 발생률, 연령 보정 암 사망률을 구하였으며, 표준화 암 발생 비(SIR)와 표준화 암 사망 비(SMR)를 구하였다. SIR을 구하기 위한 표준발생률은 IARC 보고서(1993-1997 서울)를 이용하였고, SMR을 구하기 위한 표준 사망률은 통계청 사망자료(1997)를 이용하였다. 기대 사망/발생 값은 연령대별로 추적인·년을 산출하여 구하였다.

#### 방사선노출량에 따른 암 발생 및 사망위험도 분석

연구 대상의 방사선 노출량에 따른 암 발생 및 사망의 선량-반응 관계를 규명하기 위한 경향 분석은 방사선 노출 총량별로 0, 10 mSv미만, 10 mSv이상 50 mSv미만, 50 mSv이상 네 그룹으로 구분하고, 각각에 대해 SIR 및 SMR을 구하여 일반인구와 대외비교하였다. SIR과 SMR 유의성 해석을 위한 95% 신뢰구간은 Byar's 근사를 이용하였다[5]. 통계 분석은 SAS 통계 프로그램을 이용하였다.

## 결 과

#### 방사선 노출량에 따른 암 발생 및 사망 위험도

추적 관찰 종료시점 기준, 연구대상의 연령분포는 30-34세 군이 5,044명으로 전체 연구 대상의 25.6%로 가장 많고, 다음이 35-39세 4,029명(20.5%), 40-44세 3,181명(16.2%), 45-49세 2,100명(10.7%), 50-54세 1,106명(5.6%), 20-24세 576명(2.9%), 55-59세 533명(2.7%), 60세 이상 450명(2.3%)이었다.

연구 대상의 총 추적 관찰 기간은 5년 미만 6,178명(31.4%), 5년 이상 10년 미만 7,268명(36.9%), 10년 이상이 6,249명(31.7%)이었다.

연구 대상의 방사선 노출 총량 분포는, 비 노출자 6,733명(34.2%), 10 mSv미만 9,193명(46.7%), 10-50 mSv미만 2,641명(13.4%), 50 mSv이상이 1,128명(5.7%)이었다.

추적 관찰 기간은 총 133,272 인·년(P-Y, Person-Years)이며, 노출 군 91,168P-Y, 비 노출군 42,104P-Y이었다. 노출 량 별로는 10 mSv 미만 61,143P-Y, 10-50 mSv미만 20,989P-Y, 50 mSv이상 9,036P-Y이었다.

#### 연령별 전체 암 발생률

연구 대상에 대해 1992년부터 2002년말 까지 암 발생을 추적 확인한 결과 표 1과 같이, 총 127명이 발생하였고, 20-24세에서 1명, 30-34세에서 9명, 35-39세에서 8명, 40-44세에서 22명, 45-49세에서 19명, 50-54에서 23명, 55-59세에서 16명, 60세 이상에서 29명 발생하였다.

발생된 암 종의 분포는 위암 37명(비 노출군 11명 포함)이 가장 많았으며, 다음으로 간 담도계암 34명(비 노출군 9명 포함), 폐암 12명(비 노출군 5명 포함) 순이었으며, 식도암, 결장 직장암, 췌장암, 비장 인후암, 피부암, 복막암, 전립선암, 비뇨기계암, 뇌암, 갑상선암 등이 확인되었다.

연구 대상의 암 발생 양상은 우리나라 3대 주요 암인 위암, 간암, 폐암 발생이 전체 암 발생률의 65.3%로 대부분을 차지하고 있으며, 우리나라 일반인의 암 발생 양상과 유사한 결과를 보였다.

연구 대상 전체에 대한 조발생률은 10만 인·년 당 95.29명이었다. 세계 인구로 표준화한 연령 보정 발생률(ASIR)은 10만 인·년 당 247.81명(95% 신뢰구간 180.14-315.48)이었다. 이는 서울시 1993-1997년 같은 연령군의 ASIR 281.1명과 비슷한 값이다.

Table 1. Age-standardized incidence rates(ASIR) for all sites of cancers among radiation workers of nuclear power plants in Korea, 1992-2002.

Age at termination	No. of cohorts	Person -years	No. of cancer cases	IR <sup>1)</sup>	ASIR <sup>2)</sup> (95% CI)
20-24	576	7,223	1	13.84	
25-29	2,676	26,762	0	0.00	
30-34	5,044	33,380	9	26.96	
35-39	4,029	27,169	8	29.45	
40-44	3,181	18,523	22	118.77	
45-49	2,100	10,350	19	183.57	
50-54	1,106	5,389	23	426.80	
55-59	533	2,793	16	572.86	
60 +	450	1,683	29	1723.11	
Total	19,695	133,272	127	95.29	247.81 (180.14-315.48)

<sup>1)</sup> Incidence rate per 100,000 person-years

<sup>2)</sup> Age-standardized incidence rate per 100,000 person-years to world population

Table 2. Number of cancer incidences by sites according to cumulative doses observed among radiation workers cohorts of nuclear power plants in Korea, 1992-2002.

Sites of cancer	Cumulative doses (mSv)				Total(%)
	0	< 10	10-49	50≤	
Lip,oral cavity and pharynx	0	0	3	0	3 ( 2.4)
Esophagus	0	1	1	0	2 ( 1.6)
Stomach	11	14	7	5	37 (29.1)
Small intestine	0	1	0	0	1 ( 0.8)
Colorectum	4	2	1	0	7 ( 5.5)
Liver & biliary duct	9	19	2	4	34 (26.8)
Pancreas	1	1	0	1	3 ( 2.4)
Nasal cavity & larynx	0	0	0	1	1 ( 0.8)
Lung	5	6	0	1	12 ( 9.4)
Hematopoietic	2	0	1	0	3 ( 2.4)
Skin	0	1	0	0	1 ( 0.8)
Connective, subcutaneous	0	1	0	0	1 ( 0.8)
Peritoneum	0	0	1	0	1 ( 0.8)
Prostate gland	0	1	0	0	1 ( 0.8)
Urinary tract	3	6	0	0	9 ( 7.1)
Brain	0	1	0	1	2 ( 1.6)
Thyroid	3	0	2	1	6 ( 4.7)
Non Hodgkins lymphoma	0	1	0	0	1 ( 0.8)
Ill defined	0	1	1	0	2 ( 1.6)
Total	38 (39.9)	56 (44.1)	19 (15.0)	14 (11.0)	127 (100.0)

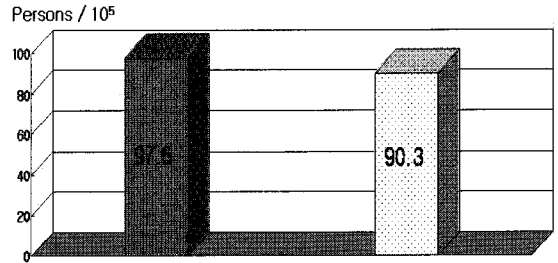
방사선 노출 정도별 암 발생률

연구 대상의 방사선 노출에 따른 암 발생 결과는 표 2와 같다.

노출 군과 비 노출 군의 암 발생은 전체 127명 중 각각 89명과 38명이 확인되었으며, 노출 군에서 방사선 노출 총량별 암 발생은 10 mSv미만 군 56건, 10 mSv이상 50 mSv미만 군 19건, 50 mSv이상 군 14건이었다.

조발생률은 노출 군에서 10만 인·년당 97.6명, 비 노출 군에서 90.3명으로 분석되어, 방사선 노출군의 상대 위험도는 그림 1에서 보는 바와 같이 1.08(95% 신뢰구간 0.74-1.58)로 통계적인 유의성이 없었다.

서울시 암 발생 수준에 대한 표준화 암 발생비(SIR)는 표 3에서 보는 바와 같이, 본 연구 집단의 SIR이 0.81(95% 신뢰구간 0.68-0.96)로 서울시 암 발생 수준에 비해 유의하게 낮았다. 암 종별 비교에서는 일반인구와 비교해 유의한 차이가 없었다. 주요 암들에 대한 SIR은 위암의 경우



Exposed Group			Un-Exposed Group			Relative Risk (95%CI)
Person-Year	No. of cancer cases	CIR †	Person-Year	No. of cancer cases	CIR †	
91,168	89	97.6	42,104	38	90.3	1.08 (0.74-1.58)

† Crude incidence rate per 100,000 person-years

Fig. 1. Relative risk of all sites of cancer incidence between exposed and unexposed group among radiation workers cohorts of nuclear power plants in Korea, 1992-2002.

Table 3. Standardized incidence ratios of cancer occurrence by sites among radiation workers cohorts of nuclear power plants in Korea, 1992-2002.

Sites of cancer	No. of cases		SIR <sup>†</sup>	95% CI
	Observed	Expected		
All sites	127	156.75	0.81	(0.68-0.96)
Lip,oral cavity and pharynx	3	3.76	0.80	(0.16-2.34)
Esophagus	2	2.30	0.87	(0.10-3.14)
Stomach	37	39.73	0.93	(0.66-1.28)
Small intestine	1	0.63	1.59	(0.02-8.83)
Colorectum	7	14.23	0.49	(0.20-1.01)
Liver & biliary duct	34	38.87	0.87	(0.61-1.22)
Pancreas	3	3.32	0.90	(0.18-2.63)
Nasal cavity & larynx	1	2.51	0.40	(0.01-2.22)
Lung	12	15.94	0.75	(0.39-1.32)
Hematopoietic	3	5.78	0.52	(0.10-1.52)
Skin	1	1.74	0.57	(0.01-3.18)
Connective, subcutaneous	1	.12	0.89	(0.01-4.97)
Prostate gland	1	0.92	1.09	(0.01-6.05)
Urinary tract	9	7.99	1.13	(0.51-2.14)
Brain	2	3.73	0.54	(0.06-1.94)
Thyroid	6	2.53	2.37	(0.87-5.16)
Non Hodgkins lymphoma	1	5.27	0.19	(0.00-1.06)
Ill defined	2	2.77	0.72	(0.08-2.61)

† Standardized incidence ratio

Table 4. Trend analysis by cancer incidence during the observation period 1992-2002 among radiation workers cohorts of nuclear power plants in Korea.

Sites of cancer	Cumulative dose(mSv)				P for trend
	0	< 10	10-49	50≤	
All sites	38 0.69(0.49-0.95)	56 0.85(0.64-1.10)	19 0.84(0.51-1.31)	14 1.06(0.58-1.77)	0.25
Lip,oral cavity and Pharynx	0 0.00(0.00-2.82)	0 0.00(0.00-2.32)	3 5.45(1.10-15.94)	0 0.00(0.00-11.46)	0.25
Esophagus	0 0.00(0.00-4.03)	1 1.05(0.01-5.86)	1 3.70(0.05-20.61)	0 0.00(0.00-21.58)	0.69
Stomach	11 0.79(0.40-1.42)	14 0.84(0.46-1.41)	7 1.21(0.49-2.50)	5 1.47(0.47-3.42)	0.18
Small intestine	0 0.00(0.00-17.47)	1 (0.05-20.61)	0 0.00(0.00-36.68)	0 0.00(0.00-73.36)	0.71
Colorectum	4 0.80(0.21-2.04)	2 0.34(0.04-1.21)	1 0.49(0.01-2.73)	0 0.00(0.00-3.03)	0.38
Liver & biliary duct	9 0.67(0.30-1.27)	19 1.18(0.71-1.85)	2 0.35(0.04-1.26)	4 1.12(0.30-2.88)	0.97
Pancreas	1 0.83(0.01-4.64)	1 0.72(0.01-4.00)	0 0.00(0.00-7.97)	1 3.57(0.05-19.87)	0.24
Nasal cavity & larynx	0 0.00(0.00-3.94)	0 0.00(0.00-3.49)	0 0.00(0.00-11.12)	1 5.00(0.07-27.82)	0.00
Lung	5 0.84(0.27-1.96)	6 0.90(0.33-1.96)	0 0.00(0.00-1.79)	1 0.80(0.01-4.45)	0.63
Hematopoietic	2 1.07(0.12-3.86)	0 0.00(0.00-1.41)	1 1.12(0.01-6.25)	0 0.00(0.00-8.95)	0.83
Skin	0 0.00(0.00-6.32)	0 0.00(0.00-4.89)	1 3.70(0.05-20.61)	0 0.00(0.00-24.45)	0.47
Connective, Subcutaneous	0 0.00(0.00-9.91)	1 2.04(0.03-11.35)	0 0.00(0.00-21.58)	0 0.00(0.00-40.76)	0.31
Prostate gland	0 0.00(0.00-9.65)	1 2.50(0.03-13.91)	0 0.00(0.00-40.76)	0 0.00(0.00-73.36)	0.81
Urinary tract	3 1.06(0.21-3.11)	6 1.80(0.66-3.92)	0 0.00(0.00-3.22)	0 0.00(0.00-5.32)	0.19
Brain	0 0.00(0.00-3.63)	1 0.61(0.01-3.39)	0 0.00(0.00-6.22)	1 3.45(0.05-19.19)	0.06
Thyroid	3 3.70(0.74-10.82)	0 0.00(0.00-3.30)	2 4.88(0.55-17.61)	1 5.00(0.07-27.82)	0.27
Non-Hodgkins lymphoma	0 0.00(0.00-2.11)	1 0.44(0.01-2.44)	0 0.00(0.00-4.53)	0 0.00(0.00-8.53)	0.71

<sup>1)</sup> Observed number of cancer incidences in the upper row

<sup>2)</sup> O/E ratio(95% confidence interval) in the lower row

Table 5. Age-standardized mortality rates for all sites of cancers among radiation workers of nuclear power plants in Korea, 1992-2002.

Age at termination	No. of cohorts	Person -years	No. of cancer deaths	DR <sup>1)</sup>	ASDR <sup>2)</sup> (95% CI)
20-24	576	7,223	1	13.84	
25-29	2,676	26,762	0	0.00	
30-34	5,044	33,380	4	11.98	
35-39	4,029	27,169	5	18.40	
40-44	3,181	18,523	10	53.99	
45-49	2,100	10,350	12	115.94	
50-54	1,106	5,389	12	222.68	
55-59	533	2,793	12	429.65	
60 +	450	1,683	9	534.76	
Total	19,695	133,272	65	48.77	97.60 (58.79-136.40)

<sup>1)</sup> Death rate per 100,000 person-years

<sup>2)</sup> Age-standardized death rate per 100,000 person-years to world population

0.93(95% 신뢰구간 0.66-1.28), 간 담도계 암의 경우 0.87(95% 신뢰구간 0.61-1.22), 폐암의 경우 0.75(95% 신뢰구간 0.39-1.32) 등으로 통계적인 유의성은 없었다.

표 4는 방사선 노출량에 따른 암 발생의 양-반응 관계를 분석한 결과이다. 모든 암에서 양-반응 관계가 관찰되지 않았다(*P for trend* > 0.05). 각각의 방사선 노출 총량별 일반 인구 발생 수준에 대한 SIR은 비 노출 군 0.69(95% 신뢰구간 0.49-0.95), 10 mSv미만 군 0.85(95% 신뢰구간 0.64-1.10), 10-49 mSv 군 0.84(95% 신뢰구간 0.51-1.31), 50 mSv이상 군 1.06(95% 신뢰구간 0.58-1.77)으로 관찰되어, 비 노출 군에서만 유의하게 낮은 결과를 보였고, 노출 군에서는 통계적 유의성이 관찰되지 않았다. 암 종별 선량-반응관계에 대한 경향 분석 결과에서도 유의성이 관찰되지 않았다(*P for trend* > 0.05).

연령별 전체 암 사망률

연구 대상에 대해 1992년부터 2002년말 까지 암 사망을 추적한 결과는 표 5과 같이, 총 65명이 확인되었고, 20-24세 1명, 30-34세 4명, 35-39세 5명, 40-44세 10명, 45-49세 12명, 50-54세 12명, 55-59세 12명, 60세 이상 9명이 확인 되었다.

암 종별 분포는 위암16명(비 노출 군 5명 포함), 간 담도계 암 18명(비 노출 군 4명 포함), 폐

암 9명(비 노출 군 4명 포함) 순이었으며, 결장 직장암, 식도암, 췌장암, 비강 인후암, 비뇨기계암 등이 확인되었다.

연구 대상의 암 사망 양상은 우리나라 3대 주요 암인 위암, 간암, 폐암 사망이 전체 암 사망률의 66.1%로 대부분을 차지하고 있어, 우리나라 일반인의 암 사망 양상과 유사한 결과를 보였다.

조사망률은 10만 인·년 당 48.77명이었다. 세계 인구로 표준화한 연령 보정 사망률(ASDR)은 10만 인·년 당 97.6명(95% 신뢰구간 58.79-136.4)이었다. 이는 서울시 1993-1997년 같은 연령 군의 ASDR 120.05명과 비슷한 값이다.

방사선 노출 정도별 암 사망률

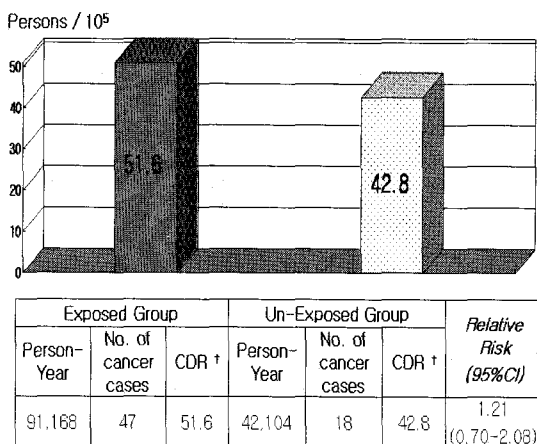
연구 대상의 방사선 노출 정도별 암 사망 분포는 표 6과 같다.

방사선 노출 군과 비 노출 군의 암 사망은 전체 65명 중 각각 47명과 18명이었으며, 방사선 노출 총량별 암 발생은 10 mSv미만 군 34건, 10 mSv이상 50 mSv미만 군 7건, 50 mSv이상 군 6건으로 분포되었다.

조사망률은 노출 군에서 10만 인·년당 51.6명, 비 노출 군에서 42.8명으로 분석되어, 노출 군의 상대 위험도는 그림 2에서 보는 바와 같이 1.21(95% 신뢰구간 0.70-2.08)로 통계적인 유의성이 없었다.

Table 6. Number of cancer deaths by sites according to cumulative doses observed among radiation workers cohorts of nuclear power plants in Korea, 1992-2002.

Sites of cancer	Cumulative doses (mSv)				Total(%)
	0	<10	10-49	50≤	
Lip,oral cavity and pharynx	0	0	1	0	1 ( 1.5)
Stomach	5	9	1	1	16 (24.6)
Esophagus	0	1	0	0	1 ( 1.5)
Colorectum	2	1	1	0	4 ( 6.2)
Liver & biliary duct	4	11	1	2	18 (27.7)
Pancreas	1	2	0	1	4 ( 6.2)
Nasal cavity & larynx	0	1	0	0	1 ( 1.5)
Lung	4	4	0	1	9 (13.8)
Hematopoietic	1	0	1	0	2 ( 3.1)
Peritoneum	0	1	0	0	1 ( 1.5)
Urinary tract	0	2	0	0	2 ( 3.1)
Non-Hodgkins lymphoma	1	1	1	0	3 ( 4.6)
Ill defined	0	1	1	1	3 ( 4.6)
Total	18 (27.7)	34 (52.3)	7 (10.8)	6 (9.2)	65 (100.0)



† Crude death rate per 100,000 person-years

Fig. 2. Relative risk of all sites of cancer mortality between exposed and unexposed group among radiation workers cohorts of nuclear power plants in Korea, 1992-2002.

일반 인구의 암 사망 수준과 비교한 연구 대상의 SMR은 표 7과 같이, 0.86(95% 신뢰구간 0.66-1.10)으로 통계적인 유의성이 관찰되지 않았으며, 암 종별로도 일반인구와 비교해 유의한 차이가 없었다. 주요 암들에 대한 SMR은 위암의 경우 0.99(95% 신뢰구간 0.57-1.61), 간 담도계 암의 경우 1.02(95% 신뢰구간 0.60-1.61), 폐암의 경우 0.99(95% 신뢰구간 0.45-1.88) 등으로 일반인구와 유의한 차이를 보이지 않았다.

표 8은 방사선 노출량에 따른 암 사망의 양-반응 관계를 분석한 결과이다. 모든 암에서 양-반응 관계가 관찰되지 않았다(P for trend > 0.05). 일반 인구 암 사망 수준에 대한 방사선 노출 총량별 각각의 SMR은 비 노출 군 0.69(95% 신뢰구간 0.41-1.09), 10 mSv 미만 군 1.17(95% 신뢰구간 0.74-1.49), 10-49 mSv 군 0.63(95% 신뢰구간 0.25-1.30), 50 mSv 이상 군 0.93(95% 신뢰구간 0.34-2.02)으로 통계적인 유의성이 관찰되지 않았다. 암 종별 경향 분석 결과에서도 양-반응 관계가 관찰되지 않았다(P for trend > 0.05).



Table 7. Standardized mortality ratios of cancer occurrence by sites among radiation workers cohorts of nuclear power plants in Korea, 1992-2002.

Sites of cancer	No. of cases		SMR †	95% CI
	Observed	Expected		
All Sites	65	75.5	0.86	(0.66-1.10)
Lip, oral cavity and pharynx	1	0.8	1.25	(0.02-6.94)
Stomach	16	16.1	0.99	(0.57-1.61)
Colorectum	4	4.2	0.95	(0.25-2.42)
Liver & biliary duct	18	17.7	1.02	(0.60-1.61)
Pancreas	4	2.4	1.67	(0.45-4.27)
Nasal cavity & larynx	1	0.6	1.60	(0.02-8.88)
Lung	9	9.1	0.99	(0.45-1.88)
Hematopoietic	2	3.2	0.62	(0.07-2.24)
Urinary tract	2	0.3	6.51	(0.73-23.49)
Non-Hodgkins lymphoma	3	1.6	1.85	(0.37-5.40)
Ill defined	3	1.5	1.95	(0.39-5.70)

† Standardized mortality ratio

Table 8. Trend analysis by cancer deaths during the observation period 1992-2002 among radiation workers cohorts of nuclear power plants in Korea.

Sites of cancer	Cumulative dose(mSv)				P for trend
	0	< 10	10-49	50≤	
All sites	18 0.69(0.41-1.09)	34 1.17(0.74-1.49)	7 0.63 (0.25-1.30)	6 0.93 (0.34-2.02)	0.97
Lip,oral cavity and Pharynx	0 0.00(0.00-13.24)	0 0.0 (0.00-10.92)	1 8.43(0.11-46.91)	0 0.00(0.00-52.40)	0.47
Stomach	5 0.90(0.29-2.10)	9 1.32(0.60-2.50)	1 0.42 (0.01-2.33)	1 0.74(0.01-4.11)	0.52
Colorectum	2 1.37(0.15-4.96)	1 0.56(0.01-3.11)	1 1.60(0.02-8.91)	0 0.00 (0.00-10.16)	0.68
Liver & biliary duct	4 0.65(0.18-1.68)	11 1.50(0.75-2.69)	1 0.38(0.00-2.11)	2 1.21(0.14-4.38)	0.95
Pancreas	1 1.14(0.01-6.36)	2 2.01(0.23-7.24)	0 0.00 (0.00-11.25)	1 4.94(0.06-27.48)	0.39
Nasal cavity & larynx	0 0.0 (0.00-15.28)	1 3.83(0.05-21.32)	0 0.00 (0.00-47.76)	0 0.0(0.00-75.63)	0.75
Lung	4 1.20 (0.32-3.08)	4 1.05 (0.28-2.69)	0 0.0 (0.00-3.00)	1 1.34 (0.02-7.46)	0.83
Hematopoietic	1 0.95 (0.01-5.31)	0 0.00 (0.00-2.53)	1 2.00 (0.03-11.13)	0 0.00 (0.00-15.94)	0.87
Urinary tract	0 0.00(0.00-32.15)	2 15.59(1.75-56.28)	0 0.00 (0.00-92.40)	0 00.00 (0.00-144.98)	0.63
Non-Hodgkins lymphoma	1 1.87(0.02-10.43)	1 1.41 (0.02-7.83)	1 3.98 (0.05-22.14)	0 0.00 (0.00-28.77)	0.91

<sup>1)</sup> Observed number of cancer deaths in the upper row<sup>2)</sup> O/E ratio(95% confidence interval) in the lower row

## 결론 및 고찰

모든 암 질환에 대한 표준화 암 발생 비(SIR)와 표준화 암 사망 비(SMR)는 연구 대상과 일반인구와의 차이가 없었다. 세계 인구로 표준화한 연령 보정률에서도 유의한 차이가 없었고, 방사선량 증가에 따른 암 발생 및 사망의 양-반응 관계를 규명하기 위한 경향성 분석도 유의수준을 보이지 않았다. 또한 우리나라 국민의 주요 암 질환 양상과도 유사한 분포를 보여 방사선에 특이적으로 관련성을 갖는 암 종의 증가도 관찰되지 않았다.

따라서, 원전 종사자가 2001년 말까지 평균 7.7년 동안 직업적으로 방사선에 노출된 양(평균 15.7±35.5 mSv, 최저 0.01 mSv에서 최고 441.9 mSv) 정도에서 방사선 노출이 암 위험도를 증가시키는 징후를 발견할 수 없었다.

우리나라와 유사한 방사선 노출량 분포를 갖고 있는 일본의 경우, 1986년부터 1997년까지 2단계로 나누어 일본 원자력산업계 전반의 방사선 작업 종사자를 대상으로 수행한 역학 연구 결과에서도 방사선 작업 종사자에게서 암 발생 및 사망률이 일반인에 비해 오히려 더 낮은 결과를 보였다[6]. 미국의 Rocketdyne/Atomics International (RAI) 연구소 종사자에 대한 암 사망률 조사 결과에서도 일본의 연구결과와 같이 일반인구에 비해 낮은 암 사망률을 보인다고 보고하고 있다[7]. 세계에서 가장 큰 규모의 방사선작업종사자 코호트인 영국 방사선 방호청의 NRRW(National Registry for Radiation Workers)는 영국내 원자력 산업계 종사자 대상으로 1992년부터 1998년까지 수행한 연구결과 역시 연구대상에서 낮은 암 사망을 보였다[8]. 비록 ICRP에서는 국제기구 특성상 방사선 노출에 대한 보수적인 입장 때문에, 방사선 노출과 암 발생에 대한 비 문턱 가설을 지지하고는 있지만, 많은 나라들에서 저준위 방사선 노출 집단의 코호트 연구결과에서 방사선 노출과 암 발생 위험도 증가에 대해 유의성이 없다고 보고하고 있다[9].

본 연구 대상은 개인당 방사선 노출 총량 기준으로 볼 때, 0.5%만이 200 mSv 미만에 노출되고 있고, 특히 일시에 고 방사선에 노출되는 것이 아닌 수명기간 동안 나누어서 만성적으로 받고 있으며, 200 mSv이상의 노출 자에 대해서 백혈병의 발병이 한 건도 없었으므로 양-반응 관계를 단정적으로 지지할 만한 근거는 없다. 특히, 모든 암과 각각의 암 종에 대해서도 양-반응 관계가 관찰되지 않아 원전 종사자가 받고 있는 방사선의 노출 양상과 노출 수준에서는 암 발생 위험도 증가와의 관련성은 없다

고 판단한다.

## 참고문헌

1. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Source and effects of ionizing radiation, UNSCEAR Reports. United Nations, New York, 2000.
2. Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations(BEIR V), National Research Council, National Academy of Sciences. Health effects of exposure to low levels of ionizing radiation. Washington DC, National Academy Press, 1990.
3. Douglas AJ, Omar RZ and Smith PG. Cancer mortality and morbidity among workers at the Sellafield plant of British Nuclear Fuels. *Br J Cancer* 1997;70:1232-43.
4. ICRP, The International Commission on Radiological Protection. 1990 Recommendations of the ICRP, ICRP Publication 60. ICRP 1991.
5. Breslow NE, Day NE. Statistical methods in cancer research, vol. II - the design and analysis of cohort studies. IARC Scientific Publication, 1987.
6. Iwasaki, Tamiko, Murata, Motoi, Ohshima, Sumio, Miyake, Toshio, Kudo, Shin-ichi, Inoue, Yasushi, Narita, Minoru, Yoshimura, Takesumi, Akiba, Suminori, Tango, Toshiro, Yoshimoto, Yasuhiko, Shimizu, Yukiko, Sobue, Tomotaka, Kusumi, Shizuyo, Yamagishi, Chikao, Matsudaira, Hiromichi, Second Analysis of Mortality of Nuclear Industry Workers in Japan, 1986 - 1997. *Journal of Radiation Research* 1998;159: 228-238.
7. Ritz B, Morgenstern H, et al. Effects of exposure to external ionizing radiation on cancer mortality in nuclear workers monitored for radiation at Rocketdyne/Atomics International. *American Journal of Industrial Medicine* 1999;35:31.
8. Muirhead CR, Goodill AA, Haylock RGE, et al. Occupational radiation exposure and mortality: second analysis of the National Registry for Radiation Workers. *J. Radiol.*

- Prot. 1999;19:3-26.
9. Kendall GM, Murhead CR, MacGibbon BH, et al. First analysis of the National Registry for Radiation Workers. *BMJ* 1992;304:220-5.