J.Korean Asso. Radiat. Prot.
Vol.24 No.3 : 131-142(1999)

▣論 文▣

Methodology on the Safety Goal Setting of Reactor Operation based on the Radiogenic Excess Cancer Risk in Korea

Si-Young Chang, Woon-Kwan Chung*
Korea Atomic Energy Research Institute,
Chosun University

한국인의 초과 방사선 암 위험도 평가에 근거한 국내원전의 안전목표치 설정 방법론

장시영 · 정운관*
한국원자력연구소, *조선대학교

(1999년 7월 1일 접수, 1999년 9월 10일 채택)

Abstract - By using the Korean demographic data and the modified relative risk projection model given in the Committee on the Biological Effect of Ionizing Radiation (BEIR) report-V under the U.S. National Academy of Science, the radiogenic excess risk in Korean population has been evaluated. On the basis of this risk, a safety goal for the safe operation of domestic nuclear power plants has been further derived in terms of personal dose The baseline risk of death due to all causes in Korea and the trivial risk level, which the society considers safe, were estimated to be 5.2×10^{-3} and 5.2×10^{-6}, respectively. The radiogenic excess cancer risk in Korea has been estimated to be 5.5×10^{-3} for the case of acute exposure to 0.1 Gy and 3.7×10^{-3} for the case of chronic lifetime exposure to 1.0 mGy/y. On the basis of these risks estimate, the resulting safety goal for one year opeation of a reactor was 0.05 mSv, which is quite identical with the ALARA guideline prescribed by the USNRC in the Appendix I, 10CFR50.
Key words : standard life table, annual statistics of death, cancer risk, excess cancer risk, relative risk projection model, baseline risk, trivial risk, safety goal

요 약 - 통계청에서 최근에 발표한 한국인 인구통계 자료와 미국 학술원 산하 '방사선의 생물학적 영향 위원회'의 최근 보고서(BEIR-V)의 수정 상대위험 투사모델을 적용하여 한국인의 방사선 피폭에 의한 초과 암발생 위험도를 평가하였다. 인구통계 자료로부터 유도한 사소위험도(trivial risk) 및 계산된 방사선유발 초과 암 위험도를 비교한 후 사소위험도의 수준으로 개인의 피폭선량을 유지하기 위한 국내 원전의 안전운영 목표치를 유도하였다. 방사선 피폭 유발 초과 암 위험도는 0.1 Gy의 단일피폭의 경우에는 5.5×10^{-3}, 1.0 mGy/y로 생애연속 피폭 시엔 3.7×10^{-3}인 것으로 평가되었다. 한국인의 모든 원인에 의한 기저사망 위험도 및 사소위험도는 각각 5.2×10^{-3} 및 5.2×10^{-6}인 것으로 예상되었다. 한국인의 사소위험도 및 방사선 위험도 평가 결과로부터 유도한 국내 원전운영의 안전목표치는 대략 0.05 mSv/y로, 이 값은 미국 원자력규제위원회(USNRC)가 연방규제법 10CFR50 부록 I에서 제시하고 있는 ALARA 지침값과 거의 동일한 값으로 밝혀졌다.
중심어 : 표준생명표, 사망통계, 기저사망위험(도), 사소위험(도), 초과위험(도), 상대위험, 안전목표

서 론

방사선 피폭으로 인한 확률적 발암영향 및 현상은 방사선에 의한 생체 영향 중에서 가장 중요한 것으로 관심을 끌고 있다. 저선량의 방사선 피폭에 의한 발암효과를 예측하고 평가하기 위하여 세계 각국에서는 방사선 작업종사자 들에 대한 역학 조사 연구 및 일반인들에 대한 방사선 영향 연구 등을 지속적으로 진행해 왔다. 이러한 연구들 중 주요한 것은 일본 히로시마 대학 방사선영향 연구재단(Radiation Effect Research Foundation, RERF)

의 일본 원폭피해 생존자들에 대한 역학조사연구[1], 직업상 피폭자와 방사선 치료환자들에 대한 여러 역학조사연구들이 있다. 특히 일본 히로시마 및 나가사키 원폭 피해 생존자들에 대한 자들에 대한 선량평가, 위험도평가 및 역학조사 연구를 수행하고 있는 일본 히로시마 대학의 방사선영향연구재단(RERF)의 보고서는 인체의 방사선 피폭영향 연구의 주요한 기초자료를 제공하고 있다.

이러한 기본적인 방사선 역학조사 연구결과들을 근거로 국제연합 방사선영향평가 위원회(United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR) [2~4], 미국 학술원 산하의 전리방사선의 생물학적 영향평가 위원회(Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation, BEIR)[5,6], 미국 보건연구소(NIH)[7], 미국 환경방호청(EPA)[8]에서 저선량 방사선 피폭의 인체영향, 특히 발암영향에 대한 위원회 또는 기관의 종합적인 평가결과를 발표하고 있다.

최근 UNSCEAR의 88년 보고서[4]와 BEIR-V 보고서[6]는 일본 히로시마 대학의 RERF 연구결과[1]를 반영하여 저선량 방사선피폭의 인체위험을 종합적으로 재평가하였으며, 결과적으로 국제방사선방호위원회(ICRP)는 이러한 인체 위험도의 재평가 결과에 근거하여 1990년에 권고 60에서 방사선작업종사자 및 일반인의 연간선량한도를 대폭적으로 하향 권고한 바 있다[9].

본 연구에서는 이와 같은 방사선 위험도의 재평가 결과를 기초로 한국인의 경우 방사선 피폭의 위험도가 어떻게 나타나는 지를 알기 위하여 최근에 통계청에서 발표한 한국인의 표준생명표[10]와 사망원인 통계연보 자료[11]와 BEIR-V 보고서에서 사용한 수정 상대위험 투사모형[6]을 도입하여 한국인의 방사선 피폭에 의한 초과 발암 위험도를 평가하였다. 또한 본 연구의 결과를 이용하여 미국 원자력규제위원회(USNRC)에서 적용하고 있는 원자력발전소(이하 원전)의 운영에 대한 안전목표(safety goal) 설정개념[12]과 ICRP의 선형-무문턱치(Linear Non-Threshold, LNT) 개념의 선량-영향의 관계[9]를 도입하여 국내의 원전에 대한 안전목표를 개인선량 값으로 설정할 수 있는 지를 검토하였다.

한국인의 기저 사망위험

표준 생명표 및 사망원인 통계 분석

표준 생명표는 동시에 태어난 한 출생집단이 나이를 먹어감에 따라 어떻게 소멸되는지를 나타내는 자료로서, 전체 인구를 대상으로 전체 사망원인을 놓고 국민의 사망수준을 측정하기 위해 사망확률, 생존 수, 평균 기대여명 등을 나타내기 때문에 국민의 사망수준측정이나 국제비교지표, 인구추계작성 등에 이용될 뿐 아니라 보험료율 책정, 연금정책 수립, 인명피해보상비 산출 및 직장에서의 정년결정 등의 기초자료로 널리 활용되고 있다[10].

통계청에서는 1964년에 1955~1960년의 표준생명표를 처음 작성한 이래 약 3~5년 간격으로 표준 생명표를 발표하고 있으며, 1997년에는 1995년 인구동태 통계결과의 성별·연령별 사망률과 사망원인 등의 통계자료를 바탕으로 성별·연령별 사망확률, 앞으로의 기대수명 등을 산출하여 1995년 표준생명표[10]를 발표하였는데, 이 자료에 의하면 1995년 현재 한국인의 평균수명은 73.5세(남자 69.5세, 여자 77.4세)로 보고되었다. 표 1은 1995년도 기준 한국인의 생잔율, 인구분포 및 기대여명 등의 생명표 자료를 나타내고 있으며, 그림 1은 1995년 현재의 사망 수준이 그대로 유지된다고 가정할 경우 동시에 출생한 인구집단이 각 연령층까지 생존할 사람의 비율(생잔율) 및 인구분포를 보여준다.

Table 1. Korean Standard Life Table (1995) [10]

Age	Survival Rate		Population Distribution		Life Expectancy	
	Male	Female	Male	Female	Male	Female
0세	100.000	100.000				
1 - 4세	99.084	99.220	8.15%	7.24%	67.29	75.39
5 - 9세	98.810	98.966	7.28%	6.62%	67.04	75.17
10 - 14세	98.577	98.803	8.56%	8.10%	63.33	71.47
15 - 19세	98.377	98.673	8.89%	8.45%	58.54	66.65
20 - 24세	97.868	98.437	10.01%	9.31%	53.69	61.77
25 - 29세	97.274	98.146	9.30%	9.28%	48.97	56.95
30 - 34세	96.509	97.828	9.60%	9.39%	44.31	52.15
35 - 39세	95.574	97.464	9.41%	9.15%	39.71	47.36
40 - 44세	94.175	96.957	7.07%	6.72%	35.16	42.59
45 - 49세	92.035	96.192	5.64%	5.42%	30.71	37.87
50 - 54세	88.943	95.068	4.60%	4.66%	26.50	33.24
55 - 59세	84.497	93.360	4.13%	4.46%	22.53	28.74
60 - 64세	78.307	90.800	3.01%	3.70%	18.78	24.36
65 - 69세	69.859	86.819	1.88%	2.81%	15.28	20.13
70 - 74세	58.375	80.191	1.31%	2.11%	12.12	16.13
75 - 79세	43.900	69.211	0.72%	1.33%	9.39	12.50
80 - 84세	28.233	53.180	0.32%	0.79%	7.08	9.34
85세 이상	14.147	33.698	0.13%	0.47%	5.25	6.69

1998년에 통계청이 발표한 한국인의 사망원인 통계연보[11]에 의해, 1997년 총 신고사망자(240,862명)중 사인분류가 가능한 자(238,714명 : 99.1%)를 대상으로 19개장의 대분류 기준으로 사망원인 구조를 분석하여 1995~1996년 사이의 한국인 남녀

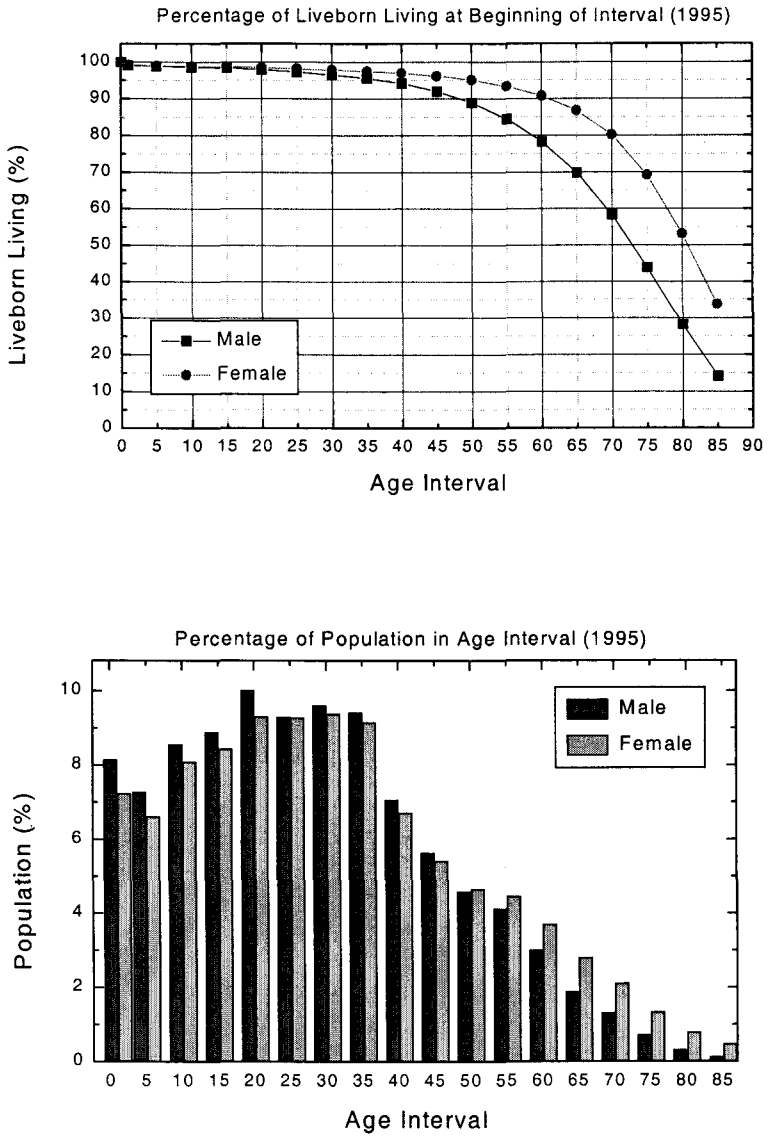

Fig. 1. Survival rate(upper) and Population Distribution(lower) in Korea(1995)

인구 10만 명당의 주요 자연 치사율 및 주요 암종에 대한 기저 사망위험도를 도출,평가하여, 표 2에 정리하였다. 표 2 에서 보는 바와 같이 1995년 ~ 1997년 사이의 우리 나라 사람의 총 사망률은 인구 10만 명당 평균 520.2 명으로 총 사망 위험도는 5.2×10^{-3} 정도인 것으로 평가되었다. 따라서 본 연구에서는 이를 한국인의 기저 사망위험도(baseline risk of mortality)로 고려하였다.

또한, 표준생명표자료를 이용하여 BEIR-V에서 적용한 암종 분류(백혈병, 호흡기암, 소화기암, 유방암, 기타 나머지 암)에 따라 한국인 남,녀 및 연령군별 주요 암 사망율을 분석하여 표 3에 정리하

Table 2. Statistics of Main Causes of Korean Death (1995~1997) [11]

(per 10^5 person)

Main Causes	1995	1996	1997	Average
특정 감염성 및 기생충성 질환	11.6	10.7	10.8	11.0
신생물	112.1	111.9	115.3	113.1
혈액, 조혈기관 질환 및 면역기전을 침범 하는 특정장애	0.9	0.9	0.8	0.9
내분비, 영양 및 대사 질환	18.7	18.7	20.2	19.2
정신 및 행동 장애	11.4	13	14.1	12.8
신경계 질환	4.9	4.6	5.1	4.9
눈 및 눈 부속기 질환	0	0	0	0.0
귀 및 유양돌기의 질환	0	0	0	0.0
순환기계 질환	138.6	127	121.3	129.0
호흡기계 질환	24.3	23.2	24.4	24.0
소화기계 질환	39.2	36.1	34.4	36.6
피부 및 피하조직의 질환	0.4	0.4	0.4	0.4
근 골격계 및 결합조직의 질환	4.5	4.4	4.1	4.3
비뇨생식기계 질환	4.9	4.8	5.3	5.0
임신, 출산 및 산욕	0.7	0.6	0.5	0.6
주산기에 기원한 특정 병태	35.9	37.3	37	36.7
선천성 기형·변형 및 염색체 이상	2.2	2.1	1.8	2.0
달리 분류되지 않은 증상·징후	76.2	82.4	88.9	82.5
사망의 외인	75.4	75.1	70.5	73.7
총 사 망 (Total)	526.3	516.1	518.3	520.2
기저사망 위험도 (Baseline Mortality Risk)	5.26×10^{-3}	5.16×10^{-3}	5.18×10^{-3}	5.20×10^{-3}

Table 3. Cancer Mortality Rate in Korean (1995, 1996)

(per 10^5 person)

Age	Leukemia		Respiratoty		Digestive		Breast	All Others	
	M	F	M	F	M	F	F	M	F
0 -4	2.11	1.96	0.11	0.09	0.25	0.25	-	2.58	2.68
5 -9	2.40	1.43	0.00	-	0.09	0.17	-	2.00	1.60
10 -14	2.27	2.06	0.08	-	0.24	0.08	-	2.01	1.72
15 -19	2.31	2.11	0.30	-	0.01	0.83	-	3.27	1.81
20 -24	2.06	1.94	0.25	0.19	1.52	1.55	0.19	3.06	21.8
25 -29	2.77	1.94	0.53	0.39	4.55	4.88	0.97	3.61	3.33
30 -34	2.21	1.61	1.42	0.49	11.41	8.59	2.62	4.80	5.90
35 -39	2.90	2.31	3.71	1.01	27.70	13.32	4.65	6.61	10.93
40 -44	2.79	2.41	9.78	2.46	58.80	21.59	7.58	13.36	16.43
45 -49	2.81	2.83	20.61	4.53	113.12	35.83	9.31	22.79	27.69
50 -54	4.37	3.67	53.16	7.03	215.23	60.49	13.24	45.05	42.61
55 -59	5.41	4.60	110.54	12.90	319.45	92.04	12.73	73.73	55.87
60 -64	8.76	5.24	190.81	20.51	448.70	137.88	11.26	114.74	76.40
65 -69	11.88	5.78	330.27	33.66	622.75	209.43	11.15	179.86	109.93
70 -74	12.94	8.00	432.42	63.15	808.15	294.55	10.66	256.39	141.30
75 -79	13.08	7.11	464.18	92.57	943.00	392.82	12.53	333.65	173.12
80 -84	14.73	8.86	418.85	112.98	888.21	410.18	10.86	371.84	180.08
≥85	15.86	1.93	357.77	117.93	763.13	412.28	14.50	377.16	168.20

- M : Male, F : Female

고 이를 방사선 유발암 위험도 평가의 기초자료로 활용하였다.

Table 4. Relative Risk Functions and Values of Coefficients[5]

Cancer	Relative Risk Function	Latency	Remarks
Leukemia	$R(D,a_0,t)=(0.243D+0.271D^2)e^{\gamma(a_0,t)}$ γ = 4.885, $t \le 15$, $a_0 \le 20$ = 2.380, $15 \le t \le 25$, $a_0 \le 20$ = 2.367, $t \le 25$, $a_0 > 20$ = 1.638, $25 \le t \le 30$, $a_0 > 20$	2 y	ICD 204 ~ 207
Respiratory	$R(D,a_0,t,s)=0.636De^{(-1.437\ln(\frac{t}{20})+\gamma)}$ γ = 0 (Male) = 0.711 (Female)	10 y	ICD 160 ~ 163
Breast	$R(D,a_0,t,s)=1.22De^{(\gamma_1-0.104\ln(\frac{t}{20})-2.212\ln^2(\frac{t}{20})-\gamma_2(\frac{t}{20}))}$ γ_1 = 1.385, $a_0 < 15$, = 0, $a_0 \ge 15$ γ_2 = 0, $a_0 < 15$, = 0.0628, $a_0 \ge 15$.	10 y	ICD 174
Digestive	$R(D,a_0,t,s)=0.809De^{(\gamma_1-\gamma_2)}$ γ_1 = 0 (Male) = 0.553 (Female) γ_2 = 0, $a_0 < 25$, = 0.198(a_0 -25), $25 < a_0 \le 35$. = 1.98, $35 < a_0$.	10 y	ICD 150 ~ 159
All Others	$R(D,a_0,t,s)=1.220De^{-\gamma}$ γ = 0 $a_0 < 10$, = 0.0464(a_0 -10), $a_0 > 10$	10 y	ICD 140 ~ 209

- ICD : Internaltional Classification of Desease, 국제 질병 분류기준 [10, 11].

방사선 유발 초과 암 위험 평가 모형

미국 학술원산하 방사선의 생물학적 영향위원회 (Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation)의 최근 보고서(BEIR-V)에서는 수정 상대위험도 모델을 채택하여 피폭후의 경과시간에 따라 다르게 나타나는 암의 상대적 위험을 평가하였다[5]

이 모델에서는 방사선 유발 초과암 위험도(암 사망율) ε를 다음과 같이 자연적 사망율 ε_0과 연간 암 종별 및 성별 사망율 R의 곱으로 표현하고 있다.

$$\varepsilon(D,a_0,a,s)=\varepsilon_0(a,s)\cdot R(D,a_0,a,s) \quad \cdots\cdots (1)$$

여기서, D는 피폭선량(Gy), a_0는 피폭시의 연령(세), a는 평가시의 연령(세), s는 성별을 나타내고, ε_0는 자연사망율(기저 사망율), R은 상대 위험도이다. 식 (1)에서 보는 바와 같이 방사선 유발 초과 암의 위험도 평가를 위해서는 모든 종류의 암에 대한 자연적인 발생율 및 이에 따른 사망 확율 자료를 필요로 하게 된다.

초과 발암 위험도를 도출하기 위한 상대 위험도 R은 다음과 같은 일반모형으로 정의된다.

$$R(D,a_0,a,s)=\alpha(a_0,a,s)\cdot D+\beta(a_0,a,s)\cdot D^2 \quad \cdots\cdots (2)$$

BEIR-V에서 적용한 백혈병, 호흡기 암, 유방암, 소화기 암 및 기타의 암 종의 상대 위험도의 모형 및 계수들은 각 암 종에 따라 다르게 정의되며 표 4에 이를 정리하였다.

고려되는 인구집단의 전생애기간의 방사선유발 암 위험은 연령별 기저 사망률 및 생잔율 및 방사선 피폭유발 사망률 고려하여 다음 식과 같이 전 생애에 걸쳐 위험도를 합산하여 평가된다.

$$U(a_0,D,s)=\sum_a \frac{N(a)}{N(a_0)}\varepsilon_0(a)\cdot R(D,a_0,a,s) \quad \cdots\cdots (3)$$

여기서, $N(a_0)$ 는 피폭 연령 a_0에서의 자연적인 생잔율이며, $N(a)$ 는 평가연령 a에서의 생잔율이다. 또한, 전체 피폭 집단에서의 초과 암 위험도는 피폭인구집단의 평균 생애 암 사망율을 계산하게 되며, 다음 식과 같이 정의된다.

$$\overline{U}(a_0, D, s) = \sum_{a_0} U(D, a_0, s) \cdot F(a_0, s) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4)$$

여기서, F 값은 해당 연령의 인구 구성비를 나타낸다.

한국인의 방사선 유발 초과 암 위험

본 연구에서는 앞에서 구한 한국인의 자연 암 사망율 자료와 BEIR-V보고서의 수정 상대 위험 평가모델[6]을 토대로 한국인의 단기간, 장기간 및 직업인의 작업종사기간 방사선 피폭시 예상되는 방사선 유발 초과 암 위험을 평가하고, 분석하였다.

(1) 단일 급성 피폭 조건 (single, acute exposure ; 0.1 Gy)

한국인 표준 인구집단 10 만명이 0.1 Gy의 방사선량에 일시 피폭되었을 경우의 초과 발암 위험

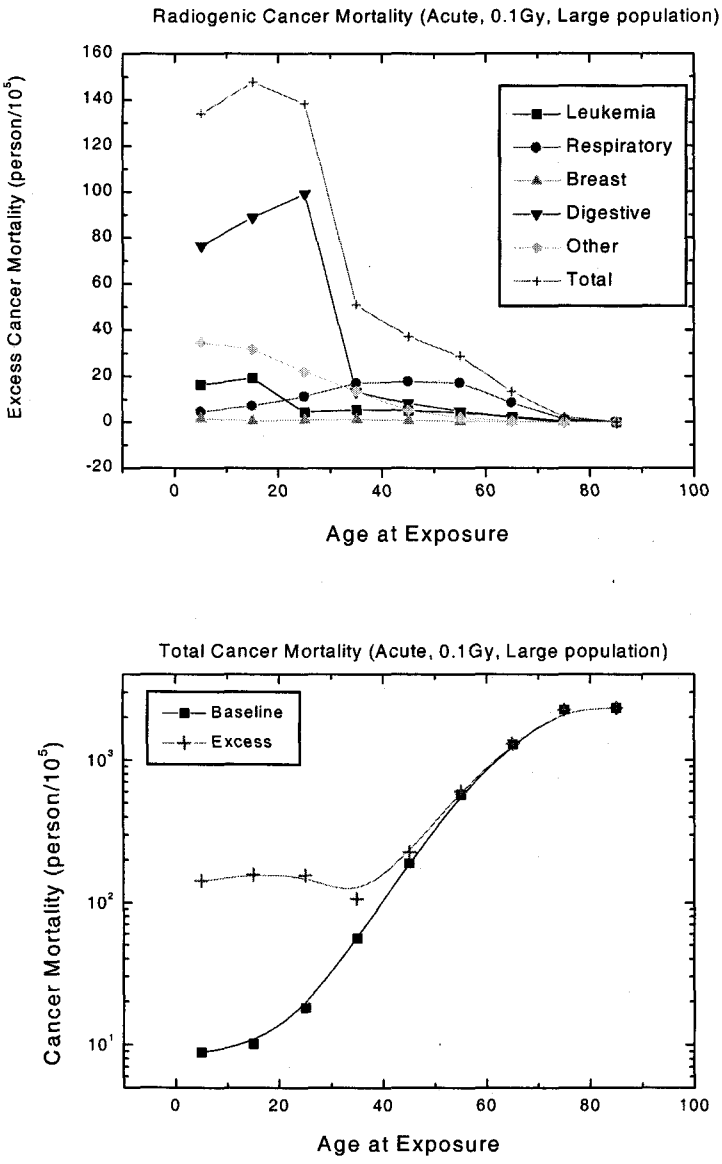

Fig. 2. Radiogenic Excess Cancer Risk in Korean (Acute, Single Exposure, 0.1 Gy).

을 평가하여 그림 2에 나타내었다. 그림 2에 도시된 바와 같이 초과 암 사망율 평가에서는 전반적으로 30 세 이전의 피폭에 의한 초과 위험도가 크게 나타나며, 40 세 이후에는 점차 감소하여 70 세 이후에는 기저 사망 위험도와 거의 동일한 위험도를 나타내었다.

(2) 생애 연속 피폭 조건
(chronic, lifetime exposure ; 1.0 mGy/y)

원자력 시설 주변에 거주하는 일반인의 장기간 피폭조건을 고려하여 인구집단 10 만명이 1.0 mGy/y의 방사선량에 생애 피폭한 경우에 대해 초과 발암 위험을 평가하여 그림 3에 나타내었다. 1.0 mGy/y의 장기간 피폭으로 인한 초과 발암 위험의 분포는 단일 피폭의 경우와 유사한 경향을 보였으며 백혈병이 중요한 암 종으로 나타났다.

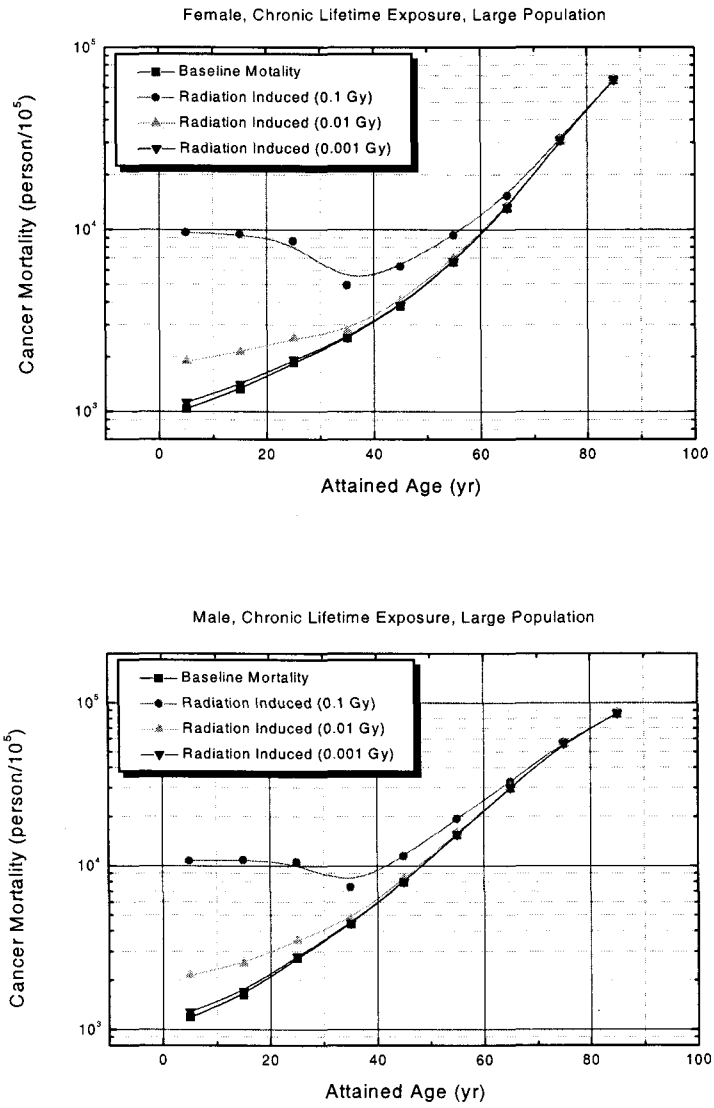

Fig. 3. Radiogenic Excess Cancer Risk in Korean (Chronic, Lifetime Exposure, 1.0 mGy/y)

피폭선량의 변화에 따른 위험도의 변화는 그림 3에 도시된 바와 같이 1.0 mGy/y 정도의 피폭에서는 기저 사망위험과 거의 비슷한 위험도 추이를 나타낸 반면, 0.1 Gy/y의 선량에서는 10 만명당 최고 1 만명의 초과 발암 위험을 보이는 것으로 나타났다.

(3) 직업상 피폭 조건
(occupational exposure ; 10 mGy/y)

20 세부터 60 세까지 매년 평균 10 mGy의 방사선량에 피폭하는 직업인에 대한 방사선 유발 초과 암위험을 평가하여 그 결과를 그림 4에 정리하였다. 그림 4에서 보면 초과암 위험은 저선량(0.001 Gy/y)에서는 기저사망 위험과 거의 같다가 선량 및 연령이 증가할수록 같이 증가하고 있다.

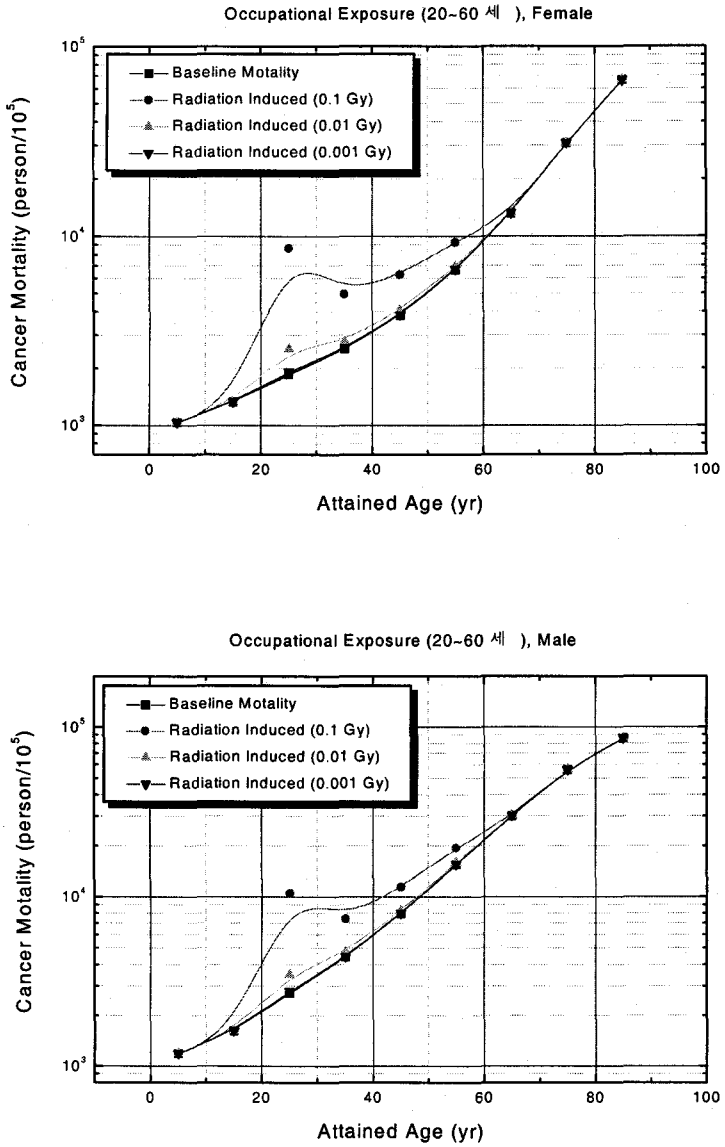

Fig. 4. Radiogenic Excess Cancer Risk in Korean (Occupational exposure, 0.1 Gy, 0.01 Gy, 0.001 Gy/y for age of 20 ~ 60)

다음의 표 5는 BEIR-V의 상대 초과위험 평가 모형에 의하여 여러 피폭 상황에서 예상한 한국인의 초과 발암 위험을 미국인 및 가상 ICRP 인구집단[9]의 경우와 비교한 결과이다.

0.1 Gy한국인의 초과 발암 위험도 5.5 x 10^{-3}는 미국인의 위험도 4.4 x 10^{-3}보다 120 %정도 컸다. 이것은 한국인에서 백혈병의 기여가 낮은 반면 소화기 암 등의 기여가 상대적으로 큰 것에 기

Table 5. Comparison of Radiogenic Excess Cancer Risk between American and Korean Population under Same Exposure Condition by BEIR-V Risk Projection Model.

(per 10^5 persorns)

Exposure Condition	Cancer type	Excess Cancer Risk		
		USA[5]	Korea	ICRP[1)]
• General Public Single, Acute Exposure to 0.1 Gy	Leukemia	95	58	-
	Non-leukemia	348	495	-
	Total	443	553	500
• General Public Chronic, Lifetime Exposure to 1.0 mGy/y	Leukemia	65	40	-
	Non-leukemia	248	331	-
	Total	313	371	350
• Radiation Worker Occupational Exposure to 10 mGy/y - USA, ICRP : 18 ~ 64 - Korea : 20 ~ 60	Leukemia	355	130	-
	Non-leukemia	2620	1487	-
	Total	2975	1617	1800

1) calculated on the basis of risk of fatal cancer (total) for hypothetical population [9]
- General public : 5.0 x 10^{-2}/Sv
- Worker : 4.0 x 10^{-2}/Sv

인하기 때문이다. 한 편, ICRP 권고-60의 선형-무문턱치(Linear Non-Threshold) 개념의 선량-영향 관계에 의한 명목상의 치사암 위험계수 5.0 x 10^{-2}/Sv와 를 이용하여 구한 0.1 Gy의 단일 급성 피폭시 ICRP 가상 인구집단의 초과 발암 위험도는 5.0 x 10^{-3}로 한국인의 초과 발암 위험도 보다 다소 낮았으나, 인구통계 및 위험평가 모델에 관련된 오차 요인을 고려하면 거의 동일한 값으로 고려하였다.

0.1 mGy/y의 연간선량으로 생애 연속 피폭한 한국인의 초과 발암 위험도는 3,7 x 10^{-3} 로 미국인의 위험도 3.1 x 10^{-3} 보다 다소 높게 나타났다. 이것은 전술한 단일 급성 피폭의 경우와 마찬가지로 한국인에서 백혈병의 기여가 미국인보다 낮지만 소화기 암의 기여는 미국보다 상대적으로 큰 것에 기인하기 때문이다. 또한 1.0 mGy/y의 연간 선량에 피폭한 가상 ICRP 인구집단의 초과 발암 위험도는 3.7 x 10^{-3} 였으나, 전술한 이유로 해서 이 값은 한국인의 초과 발암 위험도와 거의 동일한 값으로 고려하였다.

연평균 10 mGy/y의 선량율로 고용기간동안(20 ~ 60 세: 40년) 피폭한 한국인 방사선작업종사자의 초과 발암 위험도는 1.6 x 10^{-2}으로 미국인 작업자의 위험도인 3.0 x 10^{-2} 보다는 다소 낮게 나타났다. 이 것은 미국의 작업자가 18 ~ 65 세의 연령층으로 구성된 데 비하여 한국인 작업자는 한국의 직업 및 경제활동 여건상 20 ~ 60 세의 인구분포만을 고려하였기 때문으로 보인다. 따라서 18세 ~ 65 세의 연령층 분포 및 사망통계 자료를 이용하여 적절히 보정할 경우에는 한국인 방사선 작업종사자의 초과 발암 위험도는 이보다 다소 증가할 것이다. ICRP 권고 방사선 작업종사자 집단(18세 ~ 64세)의 치시암 위험계수 4.0 x 10^{-2}/Sv로부터 10 mGy/y의 연간선량에 피폭한 가상 ICRP 방사선 작업종사자 집단의 초과 발암 위험도는 1.9 x 10^{-2}로 한국인의 1.6 x 10^{-2}보다 컸으나 인구분포를 한국의 경우와 같이 20 ~ 60세로 고려할 경우에는 1.6 x 10^{-2}이 되어 한국인 방사선 작업종사자의 위험도와 동일하였다.

따라서, 표 8에서 한국인 집단과 가상 ICRP 인구집단의 방사선 초과 발암 위험도가 거의 동일하다는 것은, 인구 통계 및 방사선 위험평가 모형에 내재된 오차의 요인을 고려할 때, 고유한 특성을 가지고 있는 어떤 인구집단에 대해서도 ICRP에서 권고하고 있는 명목상의 방사선 위험계수를 적용하여 방사선 발암 위험평가를 무리없이 수행

할 수 있음을 의미한다.

국내 원전운영의 안전목표 설정

미국의 원자력규제위원회(USNRC)는 TMI 원전사고 이후 여러 청문회에서 원전의 안전성을 분석하기 위해서는 확률론적 위험 분석기법(PRA)의 도입이 확대되어야 하며 안전성 판단의 기준으로 정량적 위험의 기준제정이 필요하다는 권고에 따라 정상 운전되는 원전의 안전목표(safety goal)로서 『정상 운전되는 원전의 주변지역(50 마일 이내)에 거주하는 인구집단의 암 사망위험은 다른 모든 원인에 의한 암 사망위험의 총합의 0.1 %를 넘을 수 없다』 고 제안하였다[12],

원전 운영의 안전목표를 설정하기 위해서는 한 사회에서 인구집단이 겪게 되는 모든 사망원인 및 위험에 대한 통계조사는 물론 이를 방사선 피폭으로 인하여 부가되는 초과 발암위험의 평가를 기본적으로 요구하게 된다. 따라서 본 연구에서는 원전의 운영으로 인하여 개인에게 부가될 수 있는 초과 발암 위험을 ALARA 방사선방호 개념에 의거하여 사회에서 합리적으로 충분히 수용가능한 낮은 위험의 수준인 사소위험 또는 규제면제 위험준위 (trivial risk, de minimis risk) 개념(미국의 경우, 정상위험의 0.1 %[12], 국내의 경우 10^{-6} 정도[13])을 도입하면 원전운영의 안전목표를 이론적으로 정량화할 수 있다고 고려하였다. 결국 원전운영의 안전 목표 설정의 기본 배경은 원전의 정상적 운영으로 인하여 부가될 수 있는 방사선 위험의 정도가 사회에서 충분히 안전한 것으로 용인되는 사소 위험도의 수준보다 훨씬 낮다는 것을 정량적으로 보여주는 것이라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 위에서 설명한 미국의 안전목표 설정방법을 고려하여 우리 나라에서의 위험도 인식 및 수용에 대한 조사결과[13]를 근거로 표 2에서 유도한 한국인 기저사망 위험도 5.2×10^{-3}의 0.1 %인 5.2×10^{-6}을 사소위험도로 정하였다. 또한 ICRP-60 권고에서 채택하고 있는 선형-무문턱치(Linear Non-Threshold, LNT) 개념의 선량-영향 관계, 명목상의 방사선위험계수[9]를 고려하면 일반인의 연간 선량한도(1.0 mSv)로 생애 피폭한 것이 대략 연평균 5×10^{-5}의 위험도에 상당한다고[9] 판단하여 한국의 사소위험도 5.2×10^{-6} 에 대응하는 개인선량은 1.0 mSv/y일 것이며 평가하였다.

한 편 미국의 안전목표 설정 원칙[10]을 도입하여 국내 기저 암사망 위험의 0.1 %를 국내 원전의 정상운영시의 개인선량 안전목표치로 설정할 경우 표 2에서 한국인의 안전목표 암사망 위험도는 1.13×10^{-6}/y이므로 이 위험도에 대응하는 개인선량은 전술한 LNT 개념의 명목 위험계수[9]를 도입하면 0.02 mSv/y가 된다. 그러나 본 연구에서는 국내 암사망 통계의 오차 및 위험평가 모형의 불확실성을 고려할 경우 이 값이 달라질 수 있기 때문에 개인선량 안전목표의 정량화를 위해서는 국내 사망원인 통계 특히 정확한 암 사망 통계자료의 확보가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 국내의 사소 위험도 수준(5.2×10^{-6})에 대응하는 개인선량 1.0 mSv/y와 정상운전 원전의 안전목표로 고려되는 국내의 기저 암사망 위험도(1.13×10^{-6})에 대응하는 개인선량 0.02 mSv/y 사이의 중앙값(median)에 해당하는 0.05 mSv/y를 국내 원전 운영의 안전목표를 설정하는 것이 합리적일 것으로 고려하여 0.05 mSv/y를 국내 원전 운영의 개인선량 안전목표치로 제안하고자 한다. 참고로 표 6에는 여러 나라의 원전 운영에 대한 개인선량 설계목표치, 제약치 및 안전목표를 비교자료로 첨부하였다.

Table 6. Suggested Personal Doses given as Design Objective, Dose Constraints, or Basic Safety Objective in Several Countries.

Country	Personal Dose (mSv/y)	Described as
U.S.A.	0.05	Design Objective[14]
U.K.	0.02	Basic Safety Objective[15]
Sweden,	0.1	Dose Constraint[16]
Italy	0.1	Dose Constraint[16]
Russia	0.25	Dose Constraint[16]
This Study	0.05	Safety Goal

현재 우리 나라에서는 미국 연방규정 10 CFR 50 부록 I[14]의 규정에 따라 0.05 mSv/y를 경수로형 원전의 설계목표치로 활용하고 있기 때문에 동 개인선량 제한치는 원전 설계 및 운영의 안전목표로 같이 활용될 수 있을 것이다.

결 론

최근의 한국인의 인구 통계자료로부터 예상한 한국인의 기저 사망 위험도는 5.2×10^{-3} 이었다. 표준 생명표 자료 및 BEIR-V의 수정상대 위험 평가모형을 이용하여 예상한 한국인의 방사선 피폭으로 인한 초과 발암 위험은 0.1 Gy의 단일 피폭의 경우에는 5.5×10^{-3}, 1.0 mGy/y 연간 선량으로

생애 연속 피폭의 경우에는 3.7×10^{-3}, 그리고 10.0 mSv/y의 연 평균선량으로 직업상 피폭하는 경우에는 1.6×10^{-2}인 것으로 나타났다. 그러나 실제로 일반인 및 직업인의 연평균 방사선 피폭선량이 각각 1.0 mGy/y 및 10 mGy/y보다 훨씬 낮게 유지됨을 고려하면 이들의 방사선피폭 유발 초과 암 위험은 본 연구에서 예상한 위험보다 훨씬 더 낮을 것으로 평가된다.

본 연구에서 유도한 한국인의 방사선 위험도는 일반인의 경우는 5.2×10^{-5}/mSv, 방사선 작업자의 경우는 4.0×10^{-5}/mSv로 나타났으며, 이 위험도는 ICRP에서 권고하고 있는 명목상의 방사선 위험도와 거의 동일하였다. 이 것은 어떤 인구 집단에 대해서도 ICRP에서 권고한 방사선 위험계수를 단순 적용하면 동 인구집단의 방사선 위험도를 쉽게 평가할 수 있다는 것을 의미한다.

방사선 위험 평가결과와 국내 사망원인 통계자료를 근거로 유도한 국내 원전운영의 개인선량 안전목표는 대략 0.05 mSv로 예상되었다. 이 값은 미국 원자력규제위원회(NRC)가 연방규정 10CFR50 부록 I에서 경수로형 원전의 안전설계 목표치로 제시한 값과 동일한 값으로 국내 원전에서도 이 값을 무리없이 적용할 수 있는 것으로 판단된다.

본 연구에서 제시한 개인선량 안전목표 설정 방법론은 향후 국내 원전에 대한 방사선방호의 정량적 ALARA 이행요건의 정량적 설정 및 논의 시에 도움이 될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 한국원자력안전기술원에서 시행한 차세대 원자로 안전규제 기술 개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Y.Shimuzu, H. et.al., *Life Span Study Report II, Part 2, Cancer Mortality in the Years 1950-85 Based on the Recently Revised Doses(DS86)*, RERF-TR5-88, RERF, Hiroshima(1988).
2. UNSCEAR, *Sources and Effects of Ionizing Radiation,* United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation, United Nations, New York(1977).
3. UNSCEAR, *Sources and Effects of Ionizing Radiation,* United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation, United Nations, New York(1982).
4. UNSCEAR, *Sources and Effects of Ionizing Radiation,* United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation, United Nations, New York(1988).
5. National Academy of Science, Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation, *The Effects on Populations of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation,* The BEIR-III report, National Academy Press, Washington(1980).
6. National Academy of Science, Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation, *Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation,* The BEIR-V report, National Academy Press, Washington(1990).
7. NIH, Report of the National Institute of Health ad hoc Working Group to develop Radioepidemiological Tables, NIH Publication 85-2748, National Institute of Health, Dept. of Health and Human Services, Washington, D.C.(1985).
8. U.S. EPA, *Estimating Radiogenic Cancer Risks,* EPA 402-R-93-076, U.S. EPA, Washington D.C.(1994).
9. ICRP, *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection,* ICRP Publication-60, Annals of the ICRP2, No.1-3, Pergamon Press, Oxford(1991).
10. 통계청, *1995년 한국인의 표준 생명표,* 서울(1995).
11. 통계청, *사망원인 통계연보,* 서울 (1995~1997).
12. USNRC, *Safety Goals for Nuclear Power Plant Operation,* Discussion Paper, NUREG-0880, USNRC, Washington D.C. (1983).
13. 윤기돈, *위험에 대한 사회적 수용준위에 근거한 방사선 규제면제 준위 평가,* 석사학위 논문, 한양대학교(1998).
14. U.S. Code of Federal Regulation 10CFR50 Appendix I, *Numerical Guides for Design Objectives and Limiting Conditions for Operation to Meet the Criterion 'ALARA' for Radioactive Material in Light-Water Cooled Nuclear Power Reactor Effluents",* USNRC, Washington D.C.(1994).
15. U.K. Health and Safety Executive, *Safety*

Assessment Principles for Nuclear Plants, (1982).
16. IAEA, *Establishment of Source Related Dose Constraints for Member of the Public,* IAEA-TECDOC-664(1992).