

한국인의 실내 라돈-222 자핵종 피폭으로 인한 초과 폐암위험

장시영, 하정우*, 이병헌**

한국원자력연구소 *한국원자력안전기술원 **한양대학교

요 약

실내 라돈-222 자핵종의 농도에 피폭되므로서 유발될 수 있는 한국인의 초과 폐암위험을 방사선피폭의 확률론적 위험예측 모형을 이용하여 정량적으로 평가하였다. 1989년 기준 표준 생명표와 사망원인 통계연보 자료로 부터 유도한 한국인의 폐암 사망률은 남, 여별로 각각 $22.4/10^5$ -년 및 $9.5/10^5$ -년으로 추정되었다. 이 폐암 사망율을 근거로 수학적으로 예상한 모든 사망원인하의 기저 폐암사망위험은 남, 여별로 각각 0.047(4.7%) 및 0.019(1.9%)로 1984년도 미국의 0.067(6.7%) 및 0.025(2.5%)보다 낮았다. 방사선 피폭의 확률론적 수정 상대위험 예측모형을 사용하여 예상한 한국인의 라돈자핵종 피폭당의 초과 폐암위험 계수는 남자 ; 0.022/WLM, 여자 ; 0.009/WLM 및 평균 ; 0.017/WLM로 나타났으며 이로부터 추정된 한국인의 평균 수명중 라돈자핵종 피폭유발 초과 폐암의 사망빈도는 $230/10^6$ 인-WLM으로 최근 외국의 관련연구에서 보고한 $120\sim 450/10^6$ -WLM의 거의 중간치 (median) 정도에 해당하는 것으로 평가되었다.

Key words : 라돈자핵종 피폭, 기저 폐암사망 위험, 위험평가, 초과 폐암위험, 계수 및 빈도.

서 론

최근 10여년 이상동안 인간환경중의 천연 방사성 라돈기체(특히 Rn-222)와 그 자핵종들의 호흡피폭과 이로 인한 인체의 영향에 대한 학문적 연구가 국제방사선방어위원회(ICRP)를 비롯한 국제기관[1-5] 및 미국환경보호청(USEPA) 등의 국가기관[6-10]에서 활발히 수행되어 왔

며, 최근에는 일반인들 사이에서도 이에 대한 관심 및 우려가 점증하고 있다. 이러한 관심과 우려는 여러나라에서 우리나라 광부들에 대한 집중적인 역학조사결과 이들의 폐암사망률이 일반인들의 폐암사망률보다 매우 높았으며, 그 원인은 단반감기의 라돈자핵종들의 호흡피폭에 기인하였다는 조사결과[1, 3, 9]에 근거하고 있다.

라돈자핵종들은 생물학적 상대효과(RBE)가

큰 알파방사선을 방출하며 (1.0Bq의 라돈자핵 중당 대략 ~34,600MeV의 잠재 알파에너지 방출[2,3]), 호흡시 폐에 침적하여 기도의 상피조직(bronchial epithelium)내 기저세포(basal cell)[6,9]에 방사선 손상을 일으키며 결과적으로 화학독성물질인 아스베스토스, 석면 또는 벤젠증기 등과 같이 폐암을 유발한다[9,11].

따라서 USEPA[10]이나 ICRP[3]에서는 실내의 라돈자핵종들의 호흡피폭으로 인한 일반인의 폐암위험을 공식적으로 발표하고 있으며, 특히 IAEA에서는 “인간환경중의 라돈”이라는 제목으로 국제공동연구[5]를 수행하고 있다.

본 연구에서는 경제기획원 통계청에서 발표한 1989년 기준 한국인의 표준생명표[12]와 사망원인통계년보[13]를 토대로 하여 한국인의 폐암사망율과 기저폐암사망위험을 추정한 후, 1990년

도에 하정우등[14]이 수행한 국내 주거환경의 라돈농도 자료와 ICRP[3] 및 미국학술원의 “전리방사선의 생물학적 영향평가 제4위원회(BEIR-IV)”의 발표자료[9]를 이용하여 한국인에게서 예상되는 라돈자핵종 피폭유발 초과폐암 위험을 정량적으로 평가하였다.

라돈자핵종의 인체피폭 위험

표 1은 1980년대까지 미국, 캐나다, 체코연방 및 프랑스 등에서 대략 30,000여명의 우라늄 광부들에 대한 역학조사결과를 요약한 것이다[1,3,9]. 역학조사결과 우라늄 광부들의 누적 라돈자핵종 피폭량과 관측된 초과 폐암사이에는 매우 강한 통계학적 선형 무발단치 개념(linear non-threshold concept)의 상관관계가 있는 것

Table 1. Summary of main results of epidemiology study for U-miners in the USA, the CSSR, Canada and France[3].

Contents	USA	CSSR	Canada	France
	Colorado 1950-77	Bohemia 1948-75	Ontario 1955-81	1947-83
Number of miners	3366	2433	13400	1957
Av. follow-up periods(y)	19	26	15	25.9
surviving fraction(%) at end of follow-up	72	-	80	81
Median age at start of work(y)	30	35-40	25	30
Av. work of period(y)	9	10	2	11.4
Number of person-years at risk(PYR)	62556	60000	202795	50784
Mean cumulative exposure (CWLM)	820	310	60±25	-
Fraction of chronic cigarette smokers(%)	70	70	50-60	70
Number of lung cancer cases during follow-up,				
· observed	194	250	82	36
· expected	40	50	57	18.8
· excess	154	200	25	17.2
Relative risk,				
· observed/expected	4.8	5.0	1.45	1.9

으로 평가되고 있다[1, 3, 5, 6, 9].

라돈자핵종에서 방출하는 알파에너지의 피폭에 의한 초과 폐암발생의 잠재력은 광산에서나 일반 실내에서도 동일하므로 우리나라 광부들에 대한 피폭-영향 상관 관계를 주거환경의 저농도 피폭범위로 외삽, 보정하고[3], 적절한 수학적 위험 평가모형[3, 4, 9]을 도입할 경우 일반 주거환경내의 라돈자핵종농도에 누적피폭되는 일반 대중의 초과 폐암위험(excess lung cancer risk)을 정량적으로 예측할 수 있다. 이를 위해서는 위험이 평가되는 인구집단의 폐암사망율, 총사망율, 생존율과 같은 인구통계자료가 기본적으로 필요하다.

1. 기저 폐암사망 위험의 예측

일반적으로 어떤 인구집단의 연령별 폐암 사망율, 전체 사망률, 사망확률 및 생존률 등의 인구통계자료로부터, 모든 원인하에서 i-1년까지 생존했던 사람이 다음 연령인 i세에 폐암으로 사망할 확률로 주어지는 연령별 기저 폐암사망위험은 다음의 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$R_{o,i} = \frac{h_i}{d_i} S(1, i) Q_i$$

$$S(1, i) = P_1 \times P_2 \times \dots \times P_{i-1}$$

$$S(1, 0) = 1.0, S(1, \infty) = 0.0$$

여기서 $R_{o,i}$ 는 모든 사망원인(d)하에서 폐암(h)으로 사망할 연령별 기저 폐암사망 위험이며, h_i 는 연령별 폐암사망률(명 /10⁵-년), d_i 는 연령별 총사망률(명/10⁵-년), Q_i 및 $P_i (= 1-Q_i)$ 는 연령별 사망확률 및 생존확률, $S(1, i)$ 는 0세에서 생존한 사람이 연령 i까지의 누적 생존확률(생존율)이다.

따라서 동 인구집단 내의 한 사람이 모든 사망원인 중에서 폐암으로 사망할 총 기저폐암사망위험 R_o 는 각 연령별 사망위험의 합으로 주어진다.

2. 초과 폐암위험의 예측

본 연구에서 한국인의 라돈자핵종 피폭유발 초과폐암사망위험을 정량적으로 예상하는 데에 고려한 주요 가정 및 전제조건은 다음과 같다.

- 1) 한국인은 연간 일정한 라돈자핵종의 농도에 일생동안 연속 피폭된다.
- 2) 한국인의 표준생명표 자료에는 흡연자와 비흡연자간의 구별이 없다. 따라서 폐암의 주요 원인으로 고려되는 흡연에 대한 라돈자핵종의 폐암발생의 상승효과(synergism)[3, 6, 9]는 본연구에서는 고려되지 않는다.
- 3) 기저 폐암사망 위험(R_o)에서 라돈자핵종의 피폭은 고려하지 않는다[3, 9].
- 4) 피폭후의 상대위험은 피폭후의 경과시간에 따라 변화하며[6, 9], 피폭에 의한 상대 초과 폐암 위험은 남자와 여자에게서 같다[3, 9, 15].
- 5) 폐암환자는 진단후 5년 이내에 거의 90%정도 사망하므로[16], 폐암위험은 결과적으로 폐암 사망위험을 의미한다.
- 6) 폐암의 최소잠복기는 5년을 고려한다[3, 9].
- 7) 라돈자핵종에서 방출하는 알파에너지에 의한 초과폐암의 잠재력은 우리나라 광산이나 일반 주택에서 동일하다[3, 8].
- 8) 위험평가를 위하여 라돈자핵종의 누적피폭량 대 초과 폐암간에는 선형 무발 단치개념의 상관관계를 고려한다[1, 3, 5, 6, 9].

미국 학술원산하의 “방사선의 생물학적 영향 평가 제 4 위원회(BEIR-IV 위원회)”에서 채택 사용한 라돈자핵종 피폭의 인체위험을 수학적으로 정량화하는 수정 상대위험의 예측모형(modified relative risk projection model)[9]의 일반형태는 다음과 같다.

$$R_{e,i} = R_{o,i} (1 + e_i)$$

$$e_i = \rho_i \beta_i F_i(D)$$

$\rho_i = 1.2$	$i < 55$
1.0	$55 < i < 64$
0.4	$i > 65$

여기서 $R_{t,i}$ 는 연령별 라돈자핵종 피폭유발 폐암사망위험, $R_{o,i}$ 는 연령별 기저폐암사망위험, e_i 는 라돈자핵종의 피폭에 의한 상대 초과 폐암 사망위험이며, ρ_i 는 피폭후의 경과시간에 따른 상대위험의 변화[9]를 보정하는 시간경과 보정인자, β_i 는 기저위험에 대하여 피폭자에게서 나타나는 위험의 상대값으로 정의되는 상대 위험계수[3, 9]이며, $F_i(D)$ 는 최소한(피폭년령 + 최소잠복기)까지의 누적라돈자핵종 피폭량이 다.

상대위험 예측모형에서는 방사선피폭에 의한 초과위험의 발생이 기저위험의 발생에 비례하는 것으로 고려하므로[3, 9] 폐암사망률이 h_i 인 일

반인들의 라돈피폭($h_i e_i$)으로 인한 총폐암사망률(H_i)은 $h_i(1+e_i)$ 가 되며, 라돈피폭을 포함하여 모든 원인에 의한 총사망률(D_i)은 기저사망률(d_i)에 라돈피폭에 의한 폐암사망률($h_i e_i$)이 더해진 양인 $d_i+h_i e_i$ 와 같다. 따라서 $i-1$ 까지 생존했던 한 개인이 라돈자핵종의 피폭으로 인하여 연령 i 에서 유발될 수 있는 폐암사망위험의 계산식은 다음과 같으며[3, 9],

$$R_{t,i} = \frac{H_i}{D_i} S(1, i) \{1 - P_1 \exp(-h_i e_i)\} \exp\left(-\sum_k^{i-1} h_k e_k\right) \quad (3)$$

Table 2. 1989 lung cancer and all death rate in Korean males and females based on MD's diagnosis.

Age group	No. of all death		No. of lung cancer death		Rate(cases/10 ⁵ -y)			
					All death		Lung cancer death	
	M	F	M	F	M	F	M	F
0	692	585	-	-	309.66	298.24	-	-
1	911	681	-	-	112.70	97.96	-	-
5 ^{a)}	800	455	-	-	72.55	52.98	-	-
10 ^{b)}	591	306	-	-	53.78	37.83	-	-
15	1543	617	3		120.14	53.17	0.24	-
20	2318	898	6	6	151.66	75.24	0.40	0.50
25	3123	1021	7	7	204.28	82.77	0.46	0.58
30	3288	1146	12	10	249.87	101.52	0.91	0.89
35	3381	1134	32	12	371.68	146.66	3.52	1.55
40	3867	1347	73	29	535.35	202.37	10.89	4.36
45	5497	1941	147	45	909.93	333.83	24.33	7.74
50	6270	2413	231	62	1245.20	467.75	45.88	12.25
55	5483	2607	320	76	1645.26	686.32	96.02	20.01
60	5172	2977	378	100	2594.58	1074.81	189.63	36.10
65	5553	3620	382	115	4225.67	1835.79	290.70	58.32
70	4493	3892	281	110	6720.88	3397.83	420.34	96.03
75	3539	3801	160	90	11095.35	5898.17	501.62	139.65
80+	2601	5479	68	59	22313.84	12650.43	592.20	159.32
계	59122	34920	2100	721	626.67	458.41	22.39	9.46

M : Male, F : Female

^{a)} 5 denotes age group between 5~9 years old.

^{b)} 10 denotes age group between 10~14 years old.

전 인구집단에서 라돈자핵종의 피폭으로 인한 총 폐암사망 위험(R_c)은 R_{ci} 를 전 연령층에 대하여 더한 값과 같다.

한국인의 라돈자핵종 피폭위험 예측

1. 폐암 사망률 및 기저 폐암사망 위험

1990년에 통계청에서 발표한 1989년도 기준 한국인의 표준생명표[12]와 사망원인 통계연보[13]로부터 추정된 한국인 남녀의 연령별 폐암 및 전체사망률은 표 2와 같았다.

표 2에 의하면 1989년도 한국인의 폐암 사망률 및 전체 사망률은 남자에게서 $22.4/10^5$ -년

및 $626.7/10^5$ -년, 여자에게서 $9.46/10^5$ -년 및 $458.41/10^5$ -년으로 여자가 남자보다 낮았다. 표 3은 본 연구의 폐암 사망률 추정결과와 국내 타 연구자들의 발표자료를 비교한 것이다. 본 연구에서 추정한 폐암 사망률은 서울대학의 이 무송 등이 경남지역주민을 대상으로 조사한 $23.70/10^5$ -년[17]와 서울대학병원에서 영광원전 주변 주민에 대한 역학조사결과 발표한 폐암 발생률인 $20.90/10^5$ -년[18]과 10%의 오차범위내에서 잘 일치하고 있다.

표 2의 자료의 식(1)을 사용하여 유도한 한국인의 기저 폐암사망 위험은 표 4 및 그림 1과 같았다. 이유도결과에 의하면 모든 사망위험중에서 한국인이 일생중 폐암으로 사망할 위험은,

Table 3. Comparison of domestic lung cancer rate in Korea.

Age group	This study		S.N.U.H ¹		L.M.S ²	
	Male	Female	Male	Female	Male	Female
0	-	-	-	-	-	-
1	-	-	-	-	-	-
5 ^{a)}	-	-	-	-	-	-
10 ^{b)}	-	-	-	-	-	-
15	0.24	-	-	-	-	-
20	0.40	0.50	-	-	-	-
25	0.46	0.58	0.57	3.11	-	-
30	0.91	0.89	2.0	2.64	-	-
35	3.52	1.55	4.67	6.26	<0.4	<0.4
40	10.89	4.36	8.18	10.58	9.9	5.4
45	24.33	7.74	24.17	10.96	20.9	0.0
50	45.88	12.25	61.92	16.39	19.4	0.0
55	96.02	20.01	127.09	35.67	75.7	10.6
60	189.63	36.10	247.97	41.09	208.6	32.0
65	290.70	58.32	325.94	52.32	390.6	33.1
70	420.34	96.03	338.13	69.51	219.2	34.5
75	501.62	139.65	243.93	66.86	469.9	91.7
80+	592.20	159.32	-	-	-	-
Rate	22.386	9.46	23.70	8.90	20.90	4.70

¹ Seoul National University Hospital
² Lee Mu-Song and Ahn Yoon-Ok
^{a)} 5 denotes age group between 5~9 years old.
^{b)} 10 denotes age group between 10~14 years old.

모든 사망위험을 1.0(100%)로 두었을 때 남자 0.0468(4.7%), 여자 0.0188(1.9%)로 남자가 폐암으로 사망할 위험이 여자보다 대략 2.5배 높은 것으로 예상되었다. 표 4에는 한국인의 기저 폐암사망 위험을 미국인[9] 및 ICRP의 가상 참고인구집단의 기저 폐암 사망위험[3]과 비교한 자료를 함께 제시하고 있다. 이 표 4에 의하면 1989년 기준 한국인의 기저 폐암사망 위험은

1984년 미국과 1987년 ICRP에서 예상한 기저 폐암사망 위험보다 훨씬 낮았으며, 미국의 자료와 비교할 때 남자는 30%, 여자는 25%정도 낮은 것으로 나타났다.

2. 라돈자핵증 피폭유발 초과 폐암사망 위험

Table 4. Baseline lung cancer risk in Korean and comparison with American and ICRP reference data. (per 10⁵)

Age group	This study (1991)		USA ¹ (1988)		ICRP ² (1987)	
	Male	Female	Male	Female	Male	Female
0	-	-	-	-	-	-
1	-	-	0.06	0.04	-	-
5 ^{a)}	-	-	0.01	0.04	-	-
10 ^{b)}	-	-	0.03	0.03	-	-
15	0.90	-	0.03	0.04	-	-
20	1.90	2.40	0.14	0.02	-	-
25	2.20	3.10	0.39	0.02	<0.1	<0.5
30	4.40	4.30	1.24	0.78	1.2	0.5
35	13.50	7.80	5.79	3.29	4.0	1.5
40	48.50	23.00	19.25	10.42	12.0	3.0
45	102.30	37.00	49.56	23.66	30.0	7.0
50	194.90	57.20	101.33	43.06	60.0	13.0
55	400.90	96.50	170.76	61.34	120.0	20.0
60	694.50	162.20	263.87	84.02	200.0	30.0
65	909.20	249.70	364.52	100.91	280.0	40.0
70	941.70	346.60	457.69	104.84	360.0	50.0
75	731.80	391.40	497.01	98.71	400.0	60.0
80	631.40	496.20	473.91	87.06	350.0	64.0
85	-	-	368.01	91.92	320.0	67.0
90	-	-	368.01	91.92	300.0	70.0
95	-	-	368.01	91.92	300.0	70.0
100	-	-	368.01	91.92	-	-
105	-	-	368.01	91.92	-	-
110+	-	-	368.01	91.92	-	-
Total risk	4678	1877	6734	2500	6000	1200

¹ BEIR-IV(1988)

² ICRP-50(1987)

^{a)} 5 denotes age group between 5~9 years old.

^{b)} 10 denotes age group between 10~14 years old.

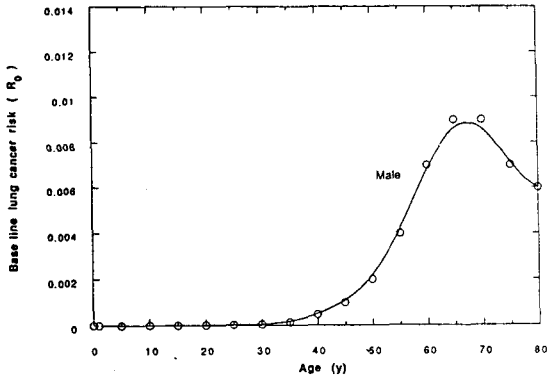


Fig. 1. Lifetime baseline lung cancer risk (R₀) in Korean males.

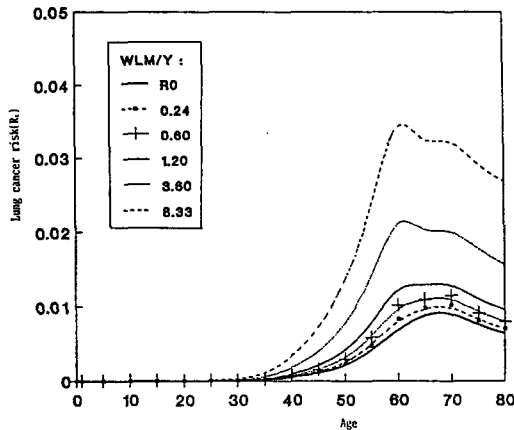


Fig. 2. Lifetime lung cancer risk (R_t) in Korean males due to indoor radon daughters exposure with annual residence of 7,500 h/y.

앞에서 추정한 한국인의 연령별 폐암 및 모든 원인에 의한 사망율, 기저 폐암 사망위험 자료를 근거로 미국학술원의 “진리방사선의 생물학적 영양평가 제 4 위원회 (BEIR-IV)”에서 채택한 수정 상대위험 예측모형 [9]을 도입하여 예상한 한국인의 실내 라돈자핵종 피폭유발 초과폐암 위험의 예측결과는 다음과 같았다.

표 5 및 6은 한국인의 연간 실내 거주시간을 7,500시간으로 고려했을 때 각 연령층에 대한 라돈자핵종 피폭유발 폐암사망 위험을 계산한

결과이다. 이 표에 의하면 라돈자핵종의 피폭에 의한 총폐암위험 (R_t)은 라돈자핵종의 누적 피폭량이 커질수록, 연령이 높아질수록 기저 폐암 사망 위험 (R₀)보다 증가함을 알 수 있다. 그림 2는 표 5의 일부결과를 그림으로 나타낸 것이다.

표 7은 표 5 및 6의 결과를 기초로 한국인의 라돈자핵종 피폭유발 상대 초과폐암 위험 (relative excess risk ; RER) [3, 9]를 계산하고 이를 외국의 발표결과와 비교한 것이다. 이 비교자료에 의하면 라돈자핵종 피폭유발 상대 초과폐암위험은 성별에 상관없이 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있으며 그림 3은 표 7의 결과를 도시화한 것이다. 표 7 및 그림 3에서 보이는 바와 같이 한국인의 라돈자핵종 피폭에 의한 상대 초과폐암 위험은 1984년도 미국의 평가결과와 거의 비슷하여 ICRP의 자료와는 대략 10% 정도의 차이를 보였다. 그러나 ICRP의 자료가 세계 각국의 폐암사망통계 자료를 기초로 예상한 것임을 [4] 고려하면 본 계산의 결과가 충분한 건전성을 갖고있는 것으로 평가하였다.

한편, 표 5 및 6에서 라돈자핵종 피폭 (WLM) 당의 상대 초과폐암 위험은 남, 녀별로 거의 비슷하게 나타난다. 이것은 곧 라돈자핵종 피폭량의 크기에 관계없이 라돈자핵종의 피폭당 초과폐암의 위험이 거의 일정하다는 것을 의미한다. 이 양을 초과 폐암위험 계수 (relative excess lung cancer risk coefficient ; f_{LC}) [3, 9]라 하며 다음식과 같이 정의된다.

$$f_{LC} = \frac{R_t - R_0}{E} \text{ (cases/WLM)} \quad (4)$$

표 8은 한국인의 라돈자핵종 피폭당의 초과 폐암위험 계수를 나타낸 것으로, 한국인의 라돈자핵종 피폭당 초과 폐암위험 계수는 평균 남자 0.0224/WLM, 여자 0.009/WLM 그리고 남녀 평균 0.017/WLM로 거의 일정함을 알 수 있다. 이 값은 1987년에 ICRP가 가상의 참고인 구집단에 대하여 유도한 남자 0.026/WLM, 여

Table 5. Lifetime lung cancer risk in Korean males due to annual constant indoor radon daughters exposure.

Age Group	$R_{0,i}$	Lung cancer risk ($R_{t,i}$) (per 10^6 person)							
		Annual constant exposure (WLM)							
		0	0.12	0.24	0.60	1.20	3.60	5.60	8.33
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5 ^{a)}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10 ^{b)}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	9	9	9	11	12	20	27	35	
20	19	20	21	24	28	48	65	87	
25	22	23	25	29	36	63	86	117	
30	44	47	51	60	76	138	190	261	
35	135	146	157	189	242	452	624	851	
40	485	528	570	696	903	1700	2335	3146	
45	1023	1122	1218	1506	1976	3748	5114	6809	
50	1949	2152	2349	2936	3885	7357	9927	12993	
55	4009	4375	4731	5784	7465	13393	17574	22344	
60	6945	7615	8265	10274	13175	23350	30162	35796	
65	9092	9472	9844	10593	12759	19493	24614	30878	
70	9417	9840	10253	11488	13499	21014	26745	33776	
75	7318	7673	8021	9065	10773	17257	22313	28650	
80	6314	6644	6967	7939	9537	15698	20604	26883	
Total	46780	49666	52479	60852	74365	123730	160380	204426	
RER	0	0.062	0.122	0.301	0.590	1.645	2.428	3.370	

· RER : relative excess risk

^{a)} 5 denotes age group between 5~9 years old.

^{b)} 10 denotes age group between 10~14 years old.

자 0.006/WLM, 남여평균 0.016/WLM의 값과 비슷한 것으로 나타났으며 그리 4는 이를 도시화한 것이다. 이 그림에서 라돈자핵종의 누적 피폭량이 증가할수록 초과 폐암위험이 감소하는 것은 방사선 피폭의 결정론적 효과(deterministic effect)로 개체의 사망[3, 15]에 의한 것으로 보인다.

따라서 한국인의 평균기대수명을 남자, 여자 및 전체에 대하여 각각 67.0세, 75.0세 및 71.0세로 고려했을 경우[20], 연간 7,500시간동안 실내의 라돈자핵종 농도에 피폭되는 한국인 남, 여 및 전체의 예상초과 폐암사망 빈도(excess

lung cancer frequency : F_e/E)는 다음의 식으로 계산되었다.

$$\frac{F_e}{E} = \frac{R_t - R_0}{E} \times \frac{1}{L_0} \quad (\text{cases/WLM-y}) \quad (5)$$

표 9는 식 (5)로 부터 예상된 한국인의 연간 초과폐암사망의 빈도를 나타낸 것이다. 이 자료에 의하면 연간 1.0WLM의 라돈자핵종에 일생 동안 피폭될 때 이로 인한 연간 예상초과 폐암사망 빈도는 남자; 334/ 10^6 -WLM, 여자; 120/ 10^6 -WLM, 남여평균; 227/ 10^6 -WLM였다. 이

Table 6. Lifetime lung cancer risk in Korean females due to annual constant indoor radon daughters exposure.

Age Group	$R_{0,i}$	Lung cancer risk ($R_{t,i}$) (per 10^6 person)							
		Annual constant exposure(WLM)							
		0	0.12	0.24	0.60	1.20	3.60	5.60	8.33
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5 ^{a)}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10 ^{b)}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	24	25	27	31	37	62	83	112	
25	31	33	34	40	50	87	118	160	
30	43	46	49	58	73	133	182	248	
35	78	84	90	109	139	259	357	487	
40	230	250	270	329	426	800	1094	1468	
45	370	406	441	546	717	1369	1877	2515	
50	572	632	691	866	1153	2229	3056	4077	
55	965	1056	1145	1411	1846	3475	4724	6263	
60	1622	1786	1946	2424	3199	6062	8210	10866	
65	2497	2606	2712	3033	3561	5608	7251	9371	
70	3466	3627	3786	4262	5048	8098	10552	13727	
75	3914	4109	4300	4875	5824	9512	12513	16403	
80	4962	5227	5487	6272	7575	12727	16986	22651	
Total	18770	19886	20977	24255	29648	50431	67006	88288	
RER	0	0.059	0.117	0.292	0.579	1.686	2.569	3.703	

· RER ; relative excess risk

^{a)} 5 denotes age group between 5~9 years old.

^{b)} 10 denotes age group between 10~14 years old.

예상결과는 표 10에서 보이는 바와 같이 최근 해외의 여러 기관에서 발표[19]하고 있는 $120\sim 450/10^6$ -WLM범위의 중간치(median) 정도에 해당하고 있는 것 같았다.

한편, 1990년도에 하 정우 등이 예상한 전국 12개지역 340여실내의 평균 라돈자핵종 농도인 $20.0\text{Bq}/\text{m}^3$ [14]을 한국인이 연간 7,500시간동안 호흡한 것으로 고려했을 때, 이로 인하여 예상되는 한국인의 연간 라돈자핵종 피폭량은 ; $20.0\text{Bq}/\text{m}^3 \times 7500\text{h}/\text{y} = 150,000\text{Bq h m}^{-3}/\text{y} = 0.24\text{WLM}/\text{y}$ 가 된다.

따라서 표 8의 초과 폐암위험 계수와 표 9의

예상초과 폐암사망 빈도자료로 부터 한국인의 연간 라돈자핵종 피폭량인 0.24WLM 로 예상되는 연간 초과 폐암 사망자수는 남자 10만명당 80명, 여자 10만명당 30명 그리고 남녀 10만명당 55명으로 예상되었다. 이를 1989년말 기준의 전체 인구수에 대하여 외삽하면, 총남자인구 21.36×10^6 명당 1,700여명, 총여자인구 21.02×10^6 명당 600여명 그리고 총인구 42.38×10^6 명당 대략 2,300여명정도가 실내의 라돈자핵종의 피폭으로 인하여 유발될 수 있는 초과폐암으로 사망할 위험이 있는 것으로 예상할 수 있고, 확률적 개념으로 대략 5.4×10^{-5} 의 사망확율이 있는

Table 7. Lifetime relative excess lung cancer risk due to indoor radon daughters exposure in Korean, American and ICRP reference population.

Annual Exposure ¹		Relative excess risk (e)		
WLM	Bq h m ⁻³ (×10 ³)	KOREA (89)	USA (84) ²	ICRP (87) ³
0.12	0.75	0.062	-	0.045
0.18	1.23	-	-	0.067
0.20	1.28	-	0.099	-
0.24	1.50	0.122	-	-
0.50	3.15	-	0.244	-
0.60	3.75	0.301	-	0.223
0.83	5.25	-	-	0.312
1.00	6.30	-	0.475	-
1.20	7.50	0.590	-	0.446
1.79	11.25	-	0.869	-
2.00	12.60	-	-	0.906
2.40	15.00	1.137	-	0.890
3.60	22.50	1.645	-	-
4.00	25.13	-	1.664	-
5.00	31.50	-	2.002	-
5.60	35.15	2.428	-	-
6.00	37.50	-	-	2.217
7.00	44.00	-	2.612	-
8.33	52.50	3.370	-	3.096
10.00	63.00	-	3.402	-

¹ Annual indoor occupancy : 7,500h

² BEIR-IV (1988)

³ ICRP-50 (1987), based on the WHO statistics.

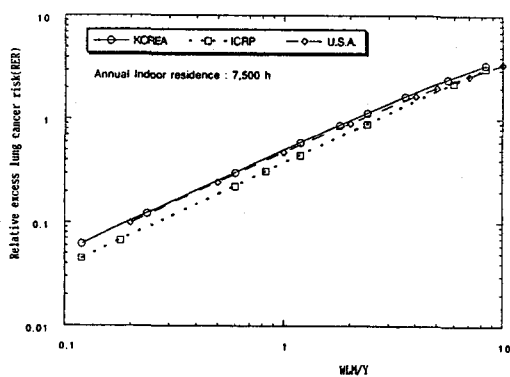


Fig. 3. Comparison of relative excess lung cancer risk among Korean, American and the ICRP reference population.

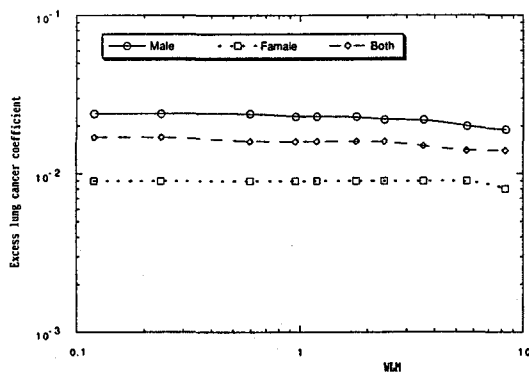


Fig. 4. Excess lung cancer risk coefficient per indoor radon daughters exposure in Korean.

것으로 해석할 수 있다. 이러한 초과폐암사망 위험은 굳이 비교한다면 1989년에 통계청에서 발표한 사망원인 통계연보[13]중 교통사고 사망률 3.2×10^{-4} /년의 1/6정도이며, 동년의 불의의 익사사고 사망율인 5.5×10^{-5} /년과는 비슷하다.

결 론

1989년의 인구통계 자료를 근거로 추정된 한국인의 폐암사망율은 남자 $22.4/10^5$ 인-년, 여자 $9.5/10^5$ 인-년 이었으며, 이로부터 유도한 한국인의 일생중 기저 폐암사망 위험(lifetime baseline lung cancer risk)은 남자 0.047(4.7%), 여자 ; 0.019(1.9%)로 밝혀졌다.

한국인의 라돈자핵종 피폭당의 초과 폐암위험 계수는 1.0WLM/y의 피폭당 남자 0.022(2.2%), 여자 0.009(0.9%), 남여평균 0.017(1.7%)로 나타났으며, 이로 인하여 예상되는 한국인의 라돈자핵종 피폭당 초과 폐암사망 위험은 연간 남자 $330/10^6$ 인-WLM, 여자 $120/10^6$ 인-WLM 그리고 남여평균 $230/10^6$ 인-WLM 정도로 평가된다. 이 결과는 현재까지 외국에서 발표되고 있는 $120 \sim 450/10^6$ 인-WLM의 중간치(median) 정도에 해당하는 것처럼 보인다.

1990년도에 하 경우등에 의하여 예상된 340여 실내의 평균 라돈자핵종의 농도인 20Bqm^{-3} 을 연간 7,500시간동안 호흡 피폭한다고 가정할 경우 이로 인한 연간 0.24WLM의 라돈자핵종의 피폭시 남자 $80/10^6$ 인, 여자 $30/10^6$ 인, 남여 전

Table 8. Estimate of lifetime excess lung cancer risk coefficient in Korean per constant ^{222}Rn daughters exposure.

Annual Exposure (WLM)	$(R_t - R_0)/E$ (cases/WLM)		
	Male	Female	Both sexes ¹
0.12	0.024	0.009	0.017
0.24	0.024	0.009	0.017
0.60	0.024	0.009	0.016
0.95	0.023	0.009	0.016
1.20	0.023	0.009	0.016
1.80	0.023	0.009	0.016
2.40	0.022	0.009	0.016
3.60	0.022	0.009	0.015
5.60	0.020	0.009	0.014
8.33	0.019	0.008	0.014
Average	0.022	0.009	0.017
ICRP ²	0.026	0.006	0.016

¹ Assume 50/50 composition

² ICRP-50(1987)

Table 9. Estimate of excess lung cancer frequency in Korean per annual constant indoor ^{222}Rn daughters exposure.

Annual Exposure		Frequency (cases/ 10^6 -y)		
WLM	Bq hm^{-3} (X 10^6)	Male $L_0 : 67.0$	Female 75.0	Both ¹ 71.0
0.12	0.75	40	15	27
0.18	1.23	60	23	41
0.24	1.50	80	29	55
0.36	2.27	120	43	82
0.60	3.15	200	72	136
1.00	6.30	334	120	227
1.20	7.50	400	143	270
6.00	37.50	1990	715	1353

L_0 : life-expectancy

¹ Assume 50/50 composition

체 55/10⁶인정도의 초과 폐암사망 위험이 있으며, 이를 총인구수에 대하여 확장하면 남자 1,700명, 여자 600명 그리고 남녀전체 2,300명 정도의 초과 폐암사망의 위험이 있는 것으로 예상된다.

본 연구에서 수학적 방법으로 처음 시도한 실내 라돈자핵종의 호흡피폭으로 인한 초과폐암 사망 위험의 예상결과는 최근 사회적으로 일부 문제로 제기되기 시작하는 실내의 라돈 및 자핵종에 대한 참고자료 또는 지침으로 활용될 수 있을 것이다. 또한 이러한 수학적 위험평가 기술은 앞으로 라돈이외의 전리방사선에 의한 인체의 발암위험 또는 발암의 인과확률(probability of causation)를 과학적으로 예측하고 평가하는 데에도 유용하게 쓰일 수 있을 것이다.

참고문헌

1. International Commission on Radiological Protection, "Limits for inhalation of radon daughters by workers", ICRP publication 32, Annals of the ICRP 6(1) (1981).
2. Nuclear Energy Agency/Organization for Economic Co-operation and Development, "Dosimetry aspects of exposure to radon and thron daughter products", report by a group of experts, NEA/OECD, Paris(1983).
3. International Commission on Radiological Protection, "Lung cancer risk from indoor exposure to radon and radon daughters", ICRP publication 50, Annals of the ICRP 17(1) (1987).
4. United Nations, "Sources, effects and risks of ionizing radiations", United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 1988 report to the General Assembly, with Annexes, United Nations, New York(1988).
5. Interantional Atomic Energy Agency, Proposal for the co-ordinated research programme on radon in the human environment, IAEA, Vienna(1989).
6. National Council on Radiation Protection and Measurements, "Evaluation of occupational and environmental exposures to radon and daughters in the United States", NCRP report 78, Bethesda(1984).
7. United States Environmental Protection Agency, "A citizen's guide to radon: What it is and what to do about it", USEPA, OPA-86-004, Washington, D. C. (1986).
8. National Council on Radiation Protection and Measurements, "Measurement of radon and radon daughters in air", NCRP report 97, Bethesda(1988).
9. National Research Council, "Health risks of radon and other internally deposited alpha emitters", report of the Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation(BEIR-IV), National Academy Press, Washington, D.C. (1988).
10. United States Dept. of Energy, "Radon research programs: FY-1989", USDOE/ER-0488 P, USDOE, Washington, D.C. (1990).
11. National Council on Radiation Protection and Measurements, "Comparative carcinogenicity of ionizing radiation and chemicals", NCRP report 96, Bethesda (1989).
12. 통계청, "1989년도 한국인의 표준생명표", (1990).
13. 통계청, "1989년도 사망원인통계년보: 인구

- 동태신고에 의한 집계”, (1990)
14. 하정우, 장시영 외, “대기중의 라돈방사능에 의한 인체피폭선량 평가”, 연구보고서, KAERI/RR-951/90, 한국원자력연구소 (1991).
 15. International commission on Radiological Protection, “1990 recommendations of the International Commission on Radiological Protection”, ICRP publication 60, ICRP(1987).
 16. D.Bodansky, K. Jackson, “Calculated lung cancer mortality due to radon”, In : Indoor radon and its hazards, D. Bodansky, M.Robkin and D. Stadler, (eds), pp.112-120, University of Washinton Press, Seattle(1989).
 17. 이무송, 안운옥, 개인자료(1990).
 18. 서울대학병원, “영광원전 주변주민에 대한 건강실태 및 역학적 기초조사 보고서”, (1991).
 19. J.Fabrikant, “Radon and lung cancer : The BEIR-IV report”, *Heal. Phys.*, Vol.59, pp.88(1990).

Evaluation of Excess Lung Cancer Risk in Korean due to Indoor Exposure to Natural ^{222}Rn Progenies

Si-Young Chang, Chung-Woo Ha* and Byung-Hun Lee**

Korea Atomic Energy Research Institute

**Korea Institute of Nuclear Safety*

***Han-Yang University*

ABSTRACT

An excess risk of lung cancer mortality among Koreans, attributable to indoor ^{222}Rn daughters exposure, were quantitatively evaluated by applying a stochastic health risk projection model on the radiation exposure. The lung cancer rate in Korean males and females, based on the 1989 demographic data, were estimated to be $22.4/10^5\text{-y}$ and $9.5/10^5\text{-y}$, respectively. The lifetime baseline lung cancer risks, deduced from these rates, appeared to be 0.047 and 0.019 for males and females, respectively, and were lower than the corresponding 1984 values of 0.067 and 0.025 in the U.S.A. The excess risk coefficients, derived by modified relative risk projection model of the BEIR-IV Committee under the US National Academy of Science, per annual 1.0 WLM of exposure to indoor radon daughters were estimated to be 0.022/WLM for males, 0.009/WLM for females, and 0.017/WLM for both sexes. The resulting annual frequency of excess lung cancer mortality for the life expectancy in the Korean population appeared to be $230/10^6\text{-WLM}$, which was an approximate median of $120\sim 450/10^6\text{-WLM}$ reported so far in the world.

Key words : Indoor radon daughter exposure, Baseline lung cancer risk, Risk projection, Excess lung cancer risk, coefficient and frequency.