

Program for Estimating the Probability of Causation to Korean Radiation Workers with Cancer

Meeseon Jeong · Young-Woo Jin · Chong-Soon Kim

Radiation Health Research Institute, KHNP

국내 방사선작업종사자에게 발생한 암의 방사선 인과도를 평가하기 위한 인과확률 계산 프로그램

정미선 · 진영우 · 김종순

한국수력원자력(주) 방사선보건연구원

(2004년 5월 12일 접수, 2004년 11월 17일 채택)

Abstract - The probability of causation(PC) is the measure to ascertain the likelihood that a particular cancer may be attributed to a particular prior exposure to radiation. Since the PC is involved in several uncertainties, it is desirable to use the confidence limit for the PC, not a point estimate for determining whether to award compensation. We developed the program for estimating the PC to Korean radiation workers with cancer, the so-called RHRI-PEPC, which is based on the most reasonable model for radiation cancer risk and recent Korean baseline data. RHRI-PEPC gives us the upper confidence limit for the PC after adjusting several uncertainties and therefore we can assess more reasonably the causality of radiation exposure for cancer occurred in Korean radiation workers.

Key words : Probability of Causation, Uncertainty, Point Estimate, Upper Confidence Limit, Baseline Cancer Incidence Rate

요약 - 방사선작업종사자에게 발생한 암의 방사선 인과도를 평가하기 위한 통계적 측도로 인과확률(Probability of Causation)이 주로 이용된다. 인과확률의 계산 과정에는 다양한 형태의 불확실성이 존재하며, 따라서 인과확률은 하나의 점추정치(point estimate)가 아니라 여러 불확실성을 반영한 분포 또는 신뢰구간으로 평가되어야 한다. 본 연구에서는 국내 방사선작업종사자에게서 발생한 암의 방사선 인과도를 평가하기 위하여, 한국인의 기저자료를 반영하며 가장 최근에 발표된 NCI-CDC 모형에 근거하여 인과확률의 분포를 계산하도록 개발된 전산 프로그램 RHRI-PEPC를 소개한다. 또한 방사선작업종사자의 가상 피폭시나리오에 대한 모의실험을 통해, 인과확률의 점추정치와 불확실성 분포에 의한 방사선 인과도 평가 결과의 차이를 살펴보고 분포에 의한 평가의 경우 적절한 신뢰도 선택의 필요성을 제시한다.

중심어 : 인과확률, 불확실성, 점추정치, 신뢰상한, 기저암발생률

서 론

방사선 관련 작업종사자들의 증가와 업무상 질병(특히 암)에 대한 사회적 인식이 높아짐에 따라 방사선에 의한 업무상 질병 보상 요구가 증가하고 있으며, 이에 대한 합리적인 평가방법의 마련이 절실히 요구되고 있다. 일반적으로 암은 방사선과 관련된 특이적 양상을 보이지 않으므로 방

사선작업종사자에게 발생한 암이 방사선 피폭에 기인된 정도를 평가하기 위한 통계적 측도로 다음과 같이 정의된 인과확률(Probability of Causation, PC)이 이용된다

$$PC = \frac{RadRisk}{BasRisk + RadRisk} \times 100\% \quad (1)$$

여기서, *BasRisk*는 방사선에 피폭되지 않은 일반 인구집단의 기저암위험도(baseline cancer risk)를 나타내며, *RadRisk*는 방사선피폭에 의한 초과암위험도(excess cancer risk)를 나타낸다. 따라서 인과확률은 방사선에 피폭된 사람의 총 암위험도에 대해 방사선 피폭에 의해 증가된 암위험도의 비율을 측정하며, 일반적으로 그 값이 50%를 초과하면 발생한 암이 방사선 피폭에 기인된 것으로 간주한다.

방사선 피폭에 대한 인과확률을 계산하기 위하여 주로 일본 원폭생존자 코호트에 근거한 암위험률 모형(cancer risk model)이 이용되며 여기에는 성별, 피폭 당시의 나이, 피폭 선량, 피폭 후 경과시간 등의 정보가 이용된다. 하지만 이러한 암위험률 모형의 추정에는 통계적 불확실성이 따르며, 이용된 원폭생존자들의 선량에도 측정오차가 존재한다. 또한 고선량-고선량률 피폭 자료에 의한 결과를 외삽하여 저선량-저선량률 피폭에 대한 암위험률을 추정할 때 고려되는 선량-선량률 효과(Dose and Dose-Rate Effectiveness Factor, DDREF)에도 불확실성이 존재하며, 추정된 결과를 일본인과 기저암위험률이 다른 한국인으로 전이하는데도 오차가 수반된다. 따라서 인과확률은 이러한 불확실성을 고려하여 추정되어야 하며, 인과확률의 점추정치가 아닌 분포 또는 신뢰구간에 근거하여 발생한 암의 방사선 인과도를 평가하는 것이 바람직하다.

인과확률에 대한 최초의 연구보고서는 1985년 미국립보건원(NIH)에 의해 마련되었으며[9], 미국 보훈처(DVA)는 이 계산모형에 근거하여 인과확률의 불확실성을 고려한 신뢰도별 선별선량(screening dose)을 구하고, 이를 퇴역군인의 방사선 피해 보상 요구를 선별하는데 이용하도록 하였다[4]. 이후 BEIR V 모형[7]을 비롯하여 UNSCEAR 모형[11], EPA 모형[12] 등 다양한 형태의 인과확률 모형이 발표되었으며 채택한 가정과 모형 추정에 이용한 자료의 차이 등으로 인해 각 모형은 약간씩 다른 결과를 산출하고 있다. 2003년 미국 암연구소(NCI)와 질병예방통제센터(CDC)의 연구진에 의해 방사선과 발암에 대한 최신 연구 결과를 반영한 인과확률 연구보고서가 발표되었다[8]. NCI-CDC의 인과확률 모형은 기본 가정의 차이에 따라 서로 다른 결과를 제공하던 기존의 모형들과는 달리 상반되는 가정들을 랜덤하게 결합하여 채택하고 인과확률의 추정에 따르는 불확실성 요인들에 대한 보정 방법을 제시하여 가장 합리적이고 객관적인 모형으로 평가

되고 있다. 현재 미국 산업안전보건연구원(NIOSH)은 NCI-CDC 모형에 근거하여 인과확률 계산프로그램 NIOSH-IREP(www.niosh-irep.com/irep_niosh)를 개발하여 운영하고 있으며[10], 미국 노동부(DOL)는 인과확률의 99% 신뢰상한(upper confidence limit)에 근거하여 에너지부(DOE)나 핵무기시설 종사자들에 의해 제기되는 방사선에 의한 업무상 질병 보상요구를 판정하고 있다.

국내의 경우, 1999년 국내 방사선작업종사자에 게 적용하기 위한 인과확률 계산 프로그램 KORRAS[2]가 처음으로 개발되었다. KORRAS는 여러 모형([7],[9],[11],[12])하에 계산된 인과확률의 점추정치를 제공하며, 그 중 가장 큰 값을 암발생자에 대한 인과확률로 이용하도록 제안하고 있다. 2001년 서울대 의과대학 주관으로 수행된 “방사선작업종사자의 업무상 재해인정 범위 및 보상기준 설정에 관한 연구”[1]에 근거하여 과학기술부 고시(제2001-35호: “방사선작업종사자의 업무상 질병 인정범위에 관한 규정”)가 공표되었으나 인과확률의 불확실성은 반영되지 못하고 인과확률의 점추정치에 근거하여 업무상 질병을 평가하도록 하고 있다. 따라서 국내 암발생 방사선작업종사자에 의해 제기되는 업무상 질병 요청을 보다 합리적으로 판단하기 위하여 불확실성이 반영된 인과확률을 이용할 필요가 있다.

본 연구에서는 최신 NCI-CDC 모형에 근거하여 인과확률의 불확실성 분포를 평가하며 한국인의 기저자료를 반영하여 개발된 인과확률 계산 프로그램 RHRI-PEPC를 소개한다. 또한 방사선작업종사자의 가상 피폭시나리오에 대한 모의실험을 통해, 인과확률의 점추정치와 불확실성 분포(신뢰상한)에 의한 방사선 인과도 평가 결과의 차이를 살펴보고 신뢰상한에 의한 평가의 경우 적절한 신뢰도 선택의 필요성을 제시한다.

인과확률 계산 프로그램 RHRI-PEPC

한국인의 인과확률 계산 프로그램 RHRI-PEPC(Radiation Health Research Institute-Program for Estimating the Probability of Causation)는 웹상에서 구현되는 전산프로그램으로 개발되었다. 계산 알고리즘은 NCI-CDC의 인과확률 모형에 근거하였으며 프로그램 언어 Visual Fortran과 IMSL을 이용하여 코딩되었다. 인과확률의 분포는 각 불확실성 요인의 분포로부터 독립적으로 확률

표본(random sample)을 구하여 평가되었으며, 전체 3,000번의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여 그 분포(백분위수 혹은 신뢰상한)를 구하도록 설계되었다. RHRI-PEPC에서 이용한 인과확률 계산 모형 및 불확실성 요인의 보정절차는 다음과 같다.

인과확률 계산 모형

여러 가지 가능한 원인에 의한 암위험률에 대해 방사선피폭으로 인해 증가된 암위험률의 비율로 정의된 식(1)의 인과확률은 상대초과위험도(Excess Relative Risk, ERR)를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$PC = \frac{ERR}{1 + ERR} \times 100\% \quad (2)$$

여기서 $ERR = RadRisk/BasRisk$ 은 상대초과위험도를 나타내며, 성별, 피폭 시 나이, 피폭 후 경과시간, 피폭선량 등에 근거하여 암종류별로 추정된다. 피폭선량(단위:Sv)을 D , 단위선량당 상대초과위험도를 ERR_{Sv} 라고 할 때, 고형암(solid cancers)과 고-LET 방사선 피폭이나 저-LET 방사선의 만성피폭에 의한 백혈병의 경우에는 $ERR = D \times ERR_{Sv}$ 와 같은 선형 선량-반응(linear dose-response) 관계가 가정되고, 저-LET 방사선의 급성 피폭에 의한 백혈병의 경우에는 $ERR = (D + D^2) \times ERR_{Sv}$ 와 같은 선형-이차 선량-반응식(linear-quadratic dose-response)이 이용된다. 다중 피폭이력이 존재하는 암발생자의 경우, 각 피폭별 상대초과위험도를 구하고 이를 합하여 방사선에 의한 총 상대초과위험도를 구한 다음, 식 (2)에 의해 인과확률을 계산한다.

단위선량당 상대초과위험도 ERR_{Sv} 는 주로 일본 원폭 생존자의 암발생률 자료에 근거하여 암종류별로 추정되며, 성별과 피폭 시 나이, 암진단 시 나이 등에 의하여 표현된다. 인과확률 계산프로그램 RHRI-PEPC는 NCI-CDC 보고서[8]에서 제시한 방법에 의해 30개의 암종류에 대해 ERR_{Sv} 와 통계적 추정에 따르는 그 불확실성 분포를 계산한다.

불확실성 요인의 보정

RHRI-PEPC는 앞에서 고려된 암위험률의 추정과 관련된 통계적 불확실성 외에 여러 불확실성

요인을 추가로 보정하며, 최종 보정된 결과에 의해 인과확률을 계산한다. RHRI-PEPC에서 적용된 불확실성 요인의 보정 절차와 이때 이용된 한국인의 기저자료 추정법을 살펴본다.

먼저, 일본 원폭생존자의 선량측정 오차가 보정되어진다. 암위험률 평가를 위해 이용된 모형은 대부분 일본 원폭생존자 코호트에 근거하여 추정되었으며, 원폭생존자들의 선량추정치에는 개인 생존자들의 선량측정에서 나타나는 랜덤오차(random error)와 선량재구성 방법에 의해 발생하는 시스템오차(systematic error)로 인한 선량측정 오차가 존재한다. 따라서 이들 오차에 대한 불확실성 분포를 고려하여 원폭생존자의 선량측정 오차로 인한 암위험률의 불확실성을 보정하였다.

두 번째 보정은 인구집단 전이에 따르는 불확실성에 대해 실시되었다. 기저암발생률(baseline cancer incidence rate)은 인구집단에 따라 차이를 보이므로, 일본 원폭생존자 자료에 근거한 암위험률 모형을 한국인에 전이하여 적용하는데 있어서 그 불확실성이 고려되어야 한다. 인구집단 전이에 주로 이용되는 모형으로, 방사선에 의한 초과위험률은 인구집단의 기저위험률과는 독립이라고 가정하는 가법모형(additive model)과 기저위험률에 따라 방사선에 의한 초과위험률이 영향을 받는다 고 가정하는 승법모형(multiplicative model)이 있다. 암위험률 모형을 한국인으로 전이하는데 따르는 불확실성을 고려하기 위해 두 전이모형을 랜덤하게 선형결합(random linear combination)한 혼합모형을 적용하였다. 일본인의 기저암발생률로는 히로시마와 나가사키의 암발생률에 근거하여 추정되고 현재 NIOSH-IREP에서 적용되고 있는 자료를 이용하였다.

모집단 전이오차 보정을 위해 필요한 한국인의 기저암발생률은 IARC의 5개 대륙 암발생률 보고서[5]에 발표된 우리나라 4개 지역(서울,부산,대구,강화도)의 암발생률 자료를 이용하여 추정하였다. 인과확률 계산에 필요한 30개 암종류와 IARC 보고서에 나타난 암종류가 일치하지 않으며, 또한 IARC 보고서[5]에는 지역별 암발생률만 수록되어 있기 때문에 다음과 같은 절차에 따라 한국인의 기저암발생률을 추정하였다. 먼저, 30개 암종류와 일치하도록 IARC의 암종류를 분류한 다음, 각 지역에 대해 연령범주별 암발생률을 지역인구분포와 추적기간을 고려하여 발생자 수로 환산하고 4개 지역을 더하여 전체 발생자 수를 구하였다. 전체 인년(total person-year)을 구한 다음, 세계인구분포에 연령표준화(age standardization) 하여

Table 1. Korean(age≥20) cancer incidence rate used in RHRI-PEPC.

Cancer (ICD-10 code)	Korean cancer incidence rate (per 10 ⁵)	
	male	female
Oral cavity and pharynx (C00-14)	5.843	1.616
Esophagus (C15)	7.881	0.825
Stomach (C16)	68.776	28.761
Colon (C18)	12.687	8.404
Rectum (C19-20)	12.057	7.451
All digestive (C15-25)	167.081	71.323
Liver (C22)	47.736	13.514
Gallbladder (C23-24)	8.595	6.470
Pancreas (C25)	7.443	4.575
Trachea, bronchus and lung (C33-34)	48.999	12.665
Other respiratory (nasal cavity, larynx and other) (C30-32, C37-38)	6.943	1.293
Bone (C40-41)	0.779	0.527
Connective tissue (C47, C49)	1.155	0.805
Malignant melanoma (C43)	0.459	0.408
Non-melanoma skin (C44) - basal cell carcinoma	2.311	1.620
Non-melanoma skin (C44) - non-basal cell carcinoma	2.311	1.620
Breast-female (C50)	-	20.402
Breast-male (C50)	0.213	-
Ovary (C56)	-	4.931
Female genitalia except ovary (C51-55, C57-58)	-	25.801
All male genitalia (C60-63)	8.970	-
Bladder (C67)	10.625	1.718
Kidney and other urinary organs (C64-66, C68)	5.780	2.235
Eye (C69)	0.160	0.076
Brain and nervous system (C70-72)	2.827	2.169
Thyroid (C73)	1.783	7.753
Other endocrine glands (C74-75)	0.344	0.182
Other and ill-defined sites (O&U)	6.265	3.570
Lymphoma and multiple myeloma (C81-85, C88, C90, C96)	6.944	4.107
Leukemia, except chronic lymphocytic leukemia (C91-95 except C91.1)	4.063	3.049

한국인의 기저암발생률을 추정하였다(Table 1 참조). 단, 인과확률 계산프로그램의 적용대상이 방사선작업종사자인 점을 감안하여 20세 이상의 발생률에 대해 연령표준화를 실시하였으며, Table 1은 우리나라 20세 이상의 기저암발생률을 나타

낸다. 한편, 백혈병의 경우 골수성과 림프구성에 대한 자료만 주어지고 각각의 급·만성에 대한 정보가 존재하지 않아, 만성림프구성을 제외한 백혈병(C91-95 except C91.1)의 발생률은 모든 백혈병(C91-95)의 발생률로 추정되었으며 향후 자

료가 확보되면 보완할 계획이다.

세 번째는 저-LET 방사선에 대한 선량-선량률 효과의 보정이 이루어진다. 저-LET 방사선에 저선량-저선량률로 피폭되었을 때의 위험률은 고선량-고선량률에 피폭된 자료로부터 추정된 암위험률을 외삽하여 추정되어지며, 선형 선량-반응 관계를 따르는 고형암의 경우 선량-선량률효과(DDREF)가 고려된다. 일반적으로, 만성피폭과 총선량이 0.2 Gy 미만인 급성피폭에 대해, 암위험률은 DDREF=2 만큼 축소되어 추정된다[11]. 하지만 상수로 고려된 DDREF 값에 대해 불확실성이 존재하며, 급성피폭의 경우 0.2 Gy 미만에서의 급격한 암위험률의 변화는 비현실적인 것으로 평가된다. 따라서 만성피폭의 경우 DDREF의 가능한 여러 값에 대해 이산형 확률분포를 허용하였다. 급성피폭의 경우 선량이 감소함에 따라 완만하게 증가하는 함수를 고려하고, DDREF를 적용하기 시작하는 선량을 로그-일양(log-uniform) 분포로부터 랜덤하게 결정하여 DDREF에 대한 불확실성을 보정하였다.

폐암의 경우 방사선과 흡연의 교호작용 효과가 추가로 보정되었으며, 방사선에 의한 상대초과위험도가 흡연력에 의해 영향을 받는다는 가법교호작용 모형과 그렇지 않다는 승법교호작용 모형을 랜덤하게 결합한 혼합모형을 채택하여 방사선과 흡연의 교호작용 효과에 대한 불확실성을 보정하였다. 혼합교호작용 효과를 반영하기 위해서는 한국인의 흡연을 분포와 흡연범주별 폐암의 상대위험률을 고려한 흡연인자(smoking factor)가 추정되어야 한다. 한국인의 흡연을 분포는 한국갤럽과 금연운동연합회가 실시한 설문조사에 근거하여

발표된 자료[3]를 이용하였으며 흡연범주별 폐암의 상대위험률은 아직 국내에는 그 연구 자료가 존재하지 않아 NCI-CDC 보고서[8]에서 채택한 결과를 이용하였다. 이들 자료에 근거하여 추정한 한국인의 흡연인자 값이 Table 2에 주어져 있다.

흡연 이외 방사선과의 교호작용 효과가 의심되는 암위험요인으로 피부암에 있어서 인종(race), 여성 유방암에 있어서 첫 만삭분만 시 연령이 있다[8]. 우리나라는 서구의 경우와는 달리, 모형의 추정에 이용된 일본인과 동일 인종이므로 따로 인종의 효과를 반영할 필요가 없다. 또한 여성의 첫 만삭분만 시 연령과 방사선의 교호작용은 여러 연구에서 서로 상이한 결과를 보여 현재까지는 세계적으로 인과확률 계산 시 그 불확실성을 보정하지 않고 있다. 따라서 RHRI-PEPC에서 이 두 요인과 방사선의 교호작용 효과는 고려되지 않았다.

한편, 방사선에 피폭된 후 암이 발생하기까지의 최소 잠재기간(latent period)으로 백혈병에 대해 1년, 갑상선암 2년, 나머지 고형암의 경우 4년이 적용되었으며, 최소 잠재기간이 끝난 시점과 암위험률이 최대가 되는 연령 사이의 기간에 대해 상대초과위험도가 서서히 증가하도록 NCI-CDC 방법에 의한 조정인자를 적용하였다.

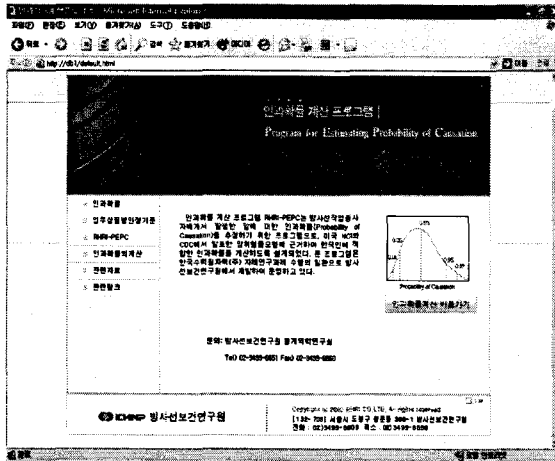
RHRI-PEPC의 주요 구성화면과 입·출력 정보

인과확률 계산 프로그램 RHRI-PEPC의 주요 구성 화면은 Figure 1과 같다. Figure 1의 (a)는 RHRI-PEPC의 초기 화면을 나타내며, (b)는 인과확률 계산을 위해 필요한 성별, 출생년도, 암진단

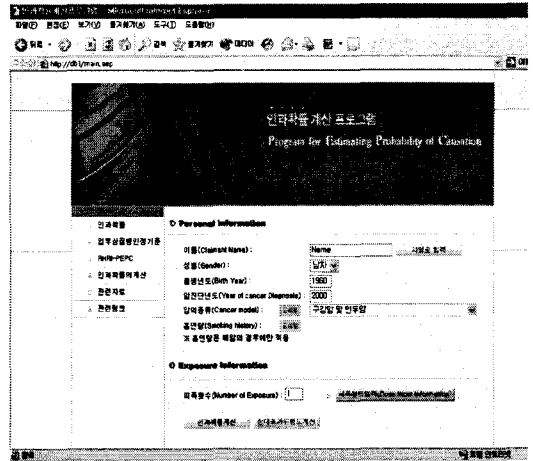
Table 2. Korean smoking factor for adjusting lung cancer risk in RHRI-PEPC

Smoking category	Relative risk for lung cancer ^{a)}	Smoking distribution for Korean (%) ^{b)}		Smoking factor for Korean	
		male	female	male	female
never smoker	1.00	13.9	95.6	8.652	1.372
former smoker	3.97	16.4	1.1	2.179	0.346
current smoker	11.28	69.7	3.3	0.767	0.122
< 10 cig/day	3.89	23.7	2.9	2.224	0.353
10-19 cig/day	9.63	39.1	0.4	0.898	0.142
20-39 cig/day	16.70	6.7	0.0	0.518	0.082
> 40 cig/day	23.70	0.2	0.0	0.365	0.058

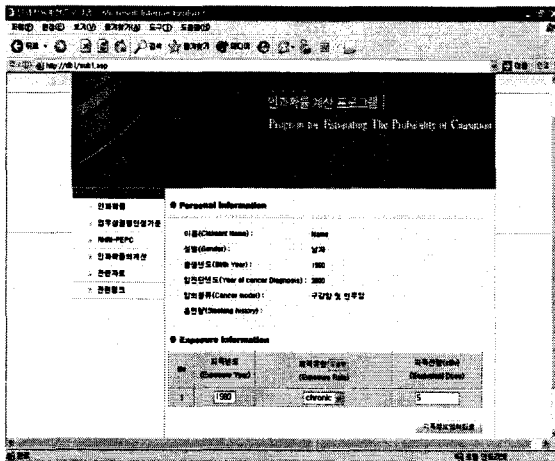
a) 자료출처 : Land et al.[8] b) 자료출처 : 허진재[3]



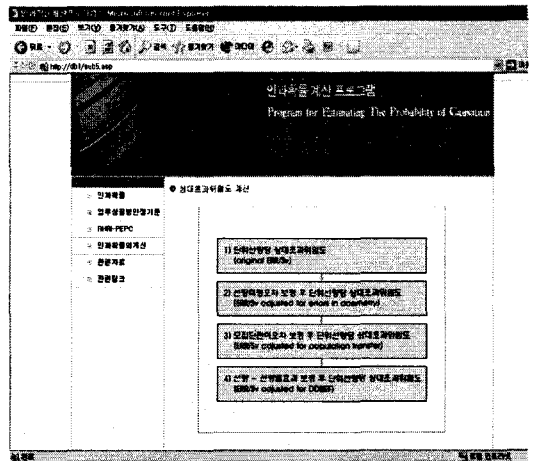
(a)



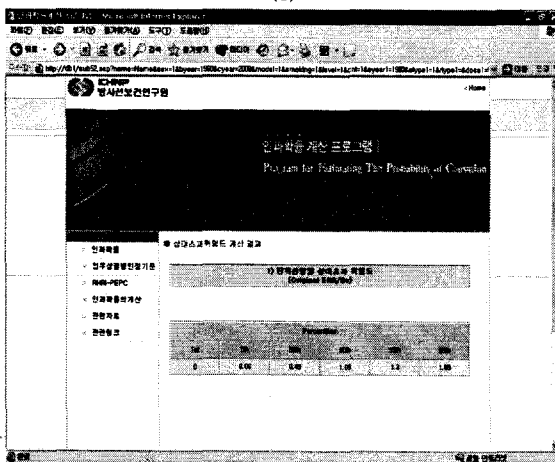
(b)



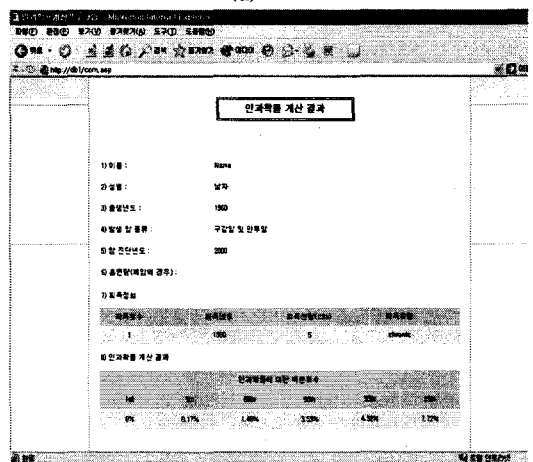
(c)



(d)



(e)



(f)

Figure 1. RHRI-PEPC : Program for estimating the probability of causation (a) the first screen of RHRI-PEPC (b) input page for personal information (c) input page for exposure information (d) page for ERR after adjusting uncertainty factors (e) output page for ERR (f) output page for the probability of causation.

년도, 발생암종류, 흡연유무와 같은 개인정보를 입력하는 화면이다. 총피폭횟수를 입력하고 '피폭 정보입력' 단추를 선택하면 Figure 1의 (c)와 같은 피폭정보 입력화면이 나타난다. 피폭년도별로 피폭유형(만성피폭 혹은 급성피폭)과 피폭선량(단위: cSv)을 입력하고 '피폭정보 입력완료'를 누르면 Figure 1의 (b)로 복귀하며 이때 '인과확률계산' 단추를 누르면 프로그램이 실행되어 인과확률이 계산된다. '상대초과위험도계산' 단추를 누르면 불확실성 보정 단계별로 상대초과위험도를 계산할 수 있는 Figure 1의 (d)가 나타난다. 1단계에서는 암위험을 추정에 따르는 통계적 불확실성과 방사선 피폭 후 암이 발생하기까지의 잠재기간에 대한 불확실성이 보정되어 Figure 1의 (e)와 같은 단위선량당 상대초과위험도를 보여준다. 2단계는 원폭 생존자들의 선량추정오차 보정 결과를 보여주며, 3단계에서는 랜덤 혼합모형에 의한 모집단전이 오차가 보정된다. 마지막으로 선량-선량률 효과(DDREF)의 불확실성과 폐암에 대한 방사선과 흡연의 교호작용 효과가 고려된 상대초과위험도를 확인할 수 있다.

암발생자의 개인정보와 피폭이력이 입력되면 인과확률에 대한 분포가 계산되며, RHRI-PEPC는 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 평가된 인과확률 분포의 제 1, 5, 50, 90, 95, 99 백분위수(신뢰상한)를 제공한다(Figure 1의 (f) 참조). 제50분위수는 계산된 인과확률 분포의 중앙값을 의미하며, 하나의 점추정치로 인과확률을 제시하고자 할 때 이용된다. 또한, 제95백분위수는 인과확률의 95% 신뢰상한에 해당하며, 예를 들어 제95백분위수가 4.92%인 경우 그 암발생자의 실제 인과확률이 4.92%보다 더 커질 가능성은 5%미만임을 의미한다.

모의실험 결과

인과확률 계산 프로그램 RHRI-PEPC를 이용하여 다음과 같은 가상 피폭시나리오에 대한 모의 실험을 실시하였다. 가상 피폭자는 남성으로 23세부터 방사선작업에 종사하여 20년 동안 매년 2 rem의 선량에 만성적으로 피폭되었다고 가정하였다. 이 남성이 50세가 되는 해에 특정 암이 발생하였다고 가정하고, 전체 30개 암 종류에 대해 인과확률을 계산하였다. 단, 여성암의 경우는 피폭자의 성별을 여성으로 가정하였으며, 폐암의 경우 비흡연자(never smoker)와 흡연자(current smoker)로 흡연범주를 구분하여 계산하였다.

Table 3은 위의 가상 피폭자에 대해 RHRI-PEPC를 수행하여 계산된 암종류별 인과확률 분포(백분위수 혹은 신뢰상한)를 나타낸다. 인과확률의 점추정치로 제50백분위수를 이용할 수 있으며, 불확실성을 고려하지 않는 현행 과학기술부 고시*를 적용하여 방사선 인과도를 평가하면, 백혈병(Leukemia, except CLL)은 제50백분위수가 59.61%로 기준치 33%를 초과하는 것으로 나타났으며, 제50백분위수가 기준치 50%를 초과하는 고형암은 없는 것으로 나타났다. 한편, 불확실성을 반영한 인과확률의 신뢰상한이 기준치 50%를 초과하는가에 따라 방사선 인과도를 평가하면, 인과확률의 90% 신뢰상한이 50%를 초과하는 암으로 비흑색종피부암(Non-melanoma skin-basal cell carcinoma)과 백혈병(Leukemia, except CLL)이 선택되었으며, 95% 신뢰상한이 50%를 초과하는 암으로는 갑상선암(Thyroid)이 추가되었다. 신뢰도를 99%로 높였을 때(즉, 그 값보다 더 커질 가능성을 1% 미만으로 한정할 때), 악성흑색종(Malignant melanoma)과 비흑색종피부암(Non-melanoma skin-basal cell carcinoma), 갑상선암(Thyroid) 및 백혈병(Leukemia, except CLL)에서 인과확률의 99% 신뢰상한이 50%를 초과하는 것으로 나타났다.

이상에서 살펴보았듯이, 방사선 피해 보상 요구를 보다 합리적으로 평가한다는 측면에서 인과확률의 점추정치(제50백분위수)보다 불확실성 분포(신뢰상한)에 근거하는 것이 더 바람직함을 알 수 있으며, 미국의 경우 이러한 원칙에 의해 에너지부(DOE)나 핵무기시설 방사선작업종사자의 피해 보상요구를 판정하고 있다. 또한 신뢰도(90%, 95%, 99%)에 따라 방사선 인과도의 기준치 50%를 초과하는 암종류는 다르게 나타나며, 신뢰도를 높일수록 더 많은 암종류에서 방사선 인과성이 인정됨을 알 수 있다. 하지만 신뢰도를 무한정 증가시킬 수는 없으며, 방사선작업종사자의 업무상 질병 평가기준으로 인과확률의 신뢰상한을 활용하기 위해서는 우리나라의 사회·경제적 여건, 향후 보상 규모의 측면, 통계적 오차 범위의 엄격성 및 해외 사례 등을 고려하고 각계 전문가들의 의견을 수렴하여 적절한 신뢰도를 선택하는 것이 필요하다.

* 과학기술부 고시 제2001-35호 제8,9조 : 방사선작업종사자에게 발생한 암에 대한 인과확률 값이 백혈병의 경우 33%, 나머지 고형암의 경우 50%를 초과하면 업무상질병으로 인정한다.

Table 3. Probability of causation by RHRI-PEPC under artificial exposure scenario.

Cancer	Probability of causation (%)					
	1st	5th	50th	90th	95th	99th
Oral cavity and pharynx	0.85	1.73	5.37	10.20	12.08	16.81
Esophagus	0.28	1.50	6.90	13.68	15.95	22.31
Stomach	0.31	0.86	2.60	4.93	5.98	7.90
Colon	4.26	7.08	16.49	27.35	31.55	38.64
Rectum	0.00	0.06	2.28	5.81	7.16	10.77
All digestive	1.35	1.88	4.51	8.79	10.63	14.41
Liver	1.79	2.58	6.57	13.33	16.32	22.10
Gallbladder	0.00	0.04	1.55	3.99	4.97	7.82
Pancreas	0.00	0.08	2.94	7.10	8.63	12.89
Trachea, bronchus and lung (never-smoker)	2.57	3.83	9.63	17.77	21.05	28.65
Trachea, bronchus and lung (current-smoker)	0.30	0.45	2.35	11.64	15.15	20.92
Other respiratory (nasal cavity, larynx and other)	0.00	0.03	1.47	4.81	6.34	10.31
Bone	3.85	5.20	10.35	16.76	18.99	24.39
Connective tissue	4.42	6.09	11.79	18.67	21.17	27.12
Malignant melanoma	3.32	7.22	23.90	43.20	48.99	60.16
Non-melanoma skin - basal cell carcinoma	5.03	11.07	34.20	57.82	63.93	74.49
Non-melanoma skin - non-basal cell carcinoma	0.00	0.00	0.00	7.57	11.52	21.87
Breast-female	8.32	11.62	25.39	38.77	42.63	49.83
Breast-male	6.78	8.89	19.60	30.70	34.35	40.77
Ovary	2.68	4.79	13.15	22.72	26.15	33.99
Female genitalia except ovary	0.00	0.00	0.26	0.79	1.15	2.23
All male genitalia	0.21	1.50	8.13	16.48	19.39	26.99
Bladder	3.36	5.05	11.49	18.97	21.73	27.84
Kidney and other urinary organs	5.82	7.80	14.24	21.85	24.59	30.15
Eye	6.80	9.16	18.25	28.88	33.12	39.90
Brain and nervous system	0.44	1.17	4.20	8.49	10.09	14.46
Thyroid	2.17	3.82	16.40	41.70	50.17	63.62
Other endocrine glands	5.35	7.41	14.33	22.37	25.80	31.70
Other and ill-defined sites	3.33	4.65	9.44	15.67	17.68	23.43
Lymphoma and multiple myeloma	0.00	0.53	5.67	14.47	17.73	26.71
Leukemia, except CLL	43.02	48.07	59.61	67.15	68.82	72.70

결론 및 고찰

한국인의 인과확률 계산 프로그램 RHRI-PEPC는 최신 인과확률 계산 모형에 근거하고 있으며 인과확률의 계산에 따르는 여러 불확실성을 고려하여 인과확률의 분포를 제공하는 프로그램이다. 하지만 인과확률의 계산 모형은 보다 합리적이고 과학적인 연구 결과에 근거하여 계속 수정되고 있으며, 한국인의 기저 자료도 시간이 지남에 따라 변화하므로 이를 반영하기 위하여 RHRI-PEPC에 대한 지속적인 수정과 보완이 필요하다.

암이 발생한 방사선작업종사자의 피폭선량으로 현재 고려되고 있는 선량계에 의해 기록된 선량(dosimetry dose) 외에 직업상 의료진단 피폭선량(occupational medical dose), 결측선량(missed dose) 및 환경선량(environmental dose)을 추가하여 선량을 재구성하고 이를 암이 발생한 조직선량(organ dose)으로 변환하여 평가하는 선량재구성 방법이 구축되어야 하며 향후 이에 대한 연구가 진행될 계획이다. 한편 피폭 방사선 종류와 그 에너지에 따른 개개인의 생물학적 효과의 차이에 대한 불확실성이 고려될 필요가 있으며 미국의 인과확률 계산프로그램 NIOSH-IREP는 Kocher *et al.*[6]의 연구결과를 바탕으로 방사선종류효과(Radiation Effectiveness Factor, REF)의 불확실성을 추가로 보정하고 있다. 따라서 본 연구에서 개발된 프로그램에 방사선종류효과(REF)의 불확실성을 반영하기 위해서는 먼저 방사선작업종사자의 피폭 기록에 근거하여 피폭 방사선 종류와 그 에너지를 선택할 수 있는 지침이 개발되어야 할 것이다.

모의실험 결과에서 제시한 바와 같이, 방사선 피해 보상 요구를 보다 합리적으로 평가한다는 측면에서 인과확률의 점추정치에 근거하고 있는 현행 과학기술부 고시는 인과확률의 불확실성 분포(신뢰상한)에 근거하여 방사선 인과도를 평가하도록 개정되어야 하며 현재 고시의 개선연구가 진행 중이다.

감사의 글

본 연구는 한국수력원자력(주)의 자체 연구과제(A02NS02)로 수행되었다. 인과확률 계산프로그램 RHRI-PEPC의 세부 알고리즘 수립 과정에 NIOSH-IREP의 개발자인 SENES Oak Ridge Inc.의 Dr. Apostoaei의 도움이 있었으며, 연구 자문위원으로 많은 조언을 해주신 한양대 이재기 교수님, 동국대의 임현술 교수님, 산업안전보건연구원 직업병연구센터 강성규 소장님께 감사드립니다.

참고 문헌

1. 과학기술부, 방사선작업종사자의 업무상 재해 인정 범위 및 보상기준 설정에 관한 연구, 과학기술부 정책과제 연구보고서 (2001)
2. 윤기돈, 김현기, 이재기, "PC값 계산을 위한 전산프로그램 개발 및 결과 분석," 대한방사선방어학회 '99 추계학술발표회 논문집, pp. 233-236, 1999.10.22, 대구 경북대학교.
3. 허진재. "우리나라 국민의 흡연실태 조사," AD Information, pp.157-162 (2001)
4. Committee on Interagency Radiation Research and Policy Coordination, Use of probability of causation by the Veterans Administration in the adjudication of claims of injury due to exposure to ionizing radiation, CIRRPC Science Panel Report No.6, ORAU 88/F-4(1988)
5. D.M. Parkin, S.L. Whelan, J. Ferlay, L. Teppo and D.B. Thomas, Cancer Incidence in Five Continents Vol. VIII, IARC Scientific Publication No.155(2002)
6. D.C. Kocher, A.I. Apostoaei and F.O. Hoffman, Radiation Effectiveness Factors (REFs) for Use in Calculating Probability of Causation of Radiogenic Cancers, Draft report submitted by SENES Oak Ridge, Inc., Oak Ridge, Tennessee, to the National Institute of Occupational Safety and Health (2002)
7. NAS/NRC Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations, *The Effects on Populations of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR V*, National Academy Press, Washington DC(1990)
8. C. Land, E. Gilbert and J.M. Smith, Report of the NCI-CDC Working Group to Revise the 1985 NIH Radioepidemiological Tables, NIH Publication No.03-5387(2003)
9. National Institute of Health, Report of the NIH ad hoc Working Group to Develop Radioepidemiological Tables, NIH publication No.85-2748(1985)
10. National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH-Interactive Radio-Epidemiological Program (NIOSH-IREP) Technical Documentation: Final Report,

- NIOSH, Office of Compensation Analysis and Support(2002)
11. United Nations, Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1994 Report to the General Assembly with annexes, United Nations sales publication E.94.IX.11, New York(1994)
12. U.S. Environmental Protection Agency, Estimating Radiogenic Cancer Risk, EPA Report 402-R-93_076(1994)