

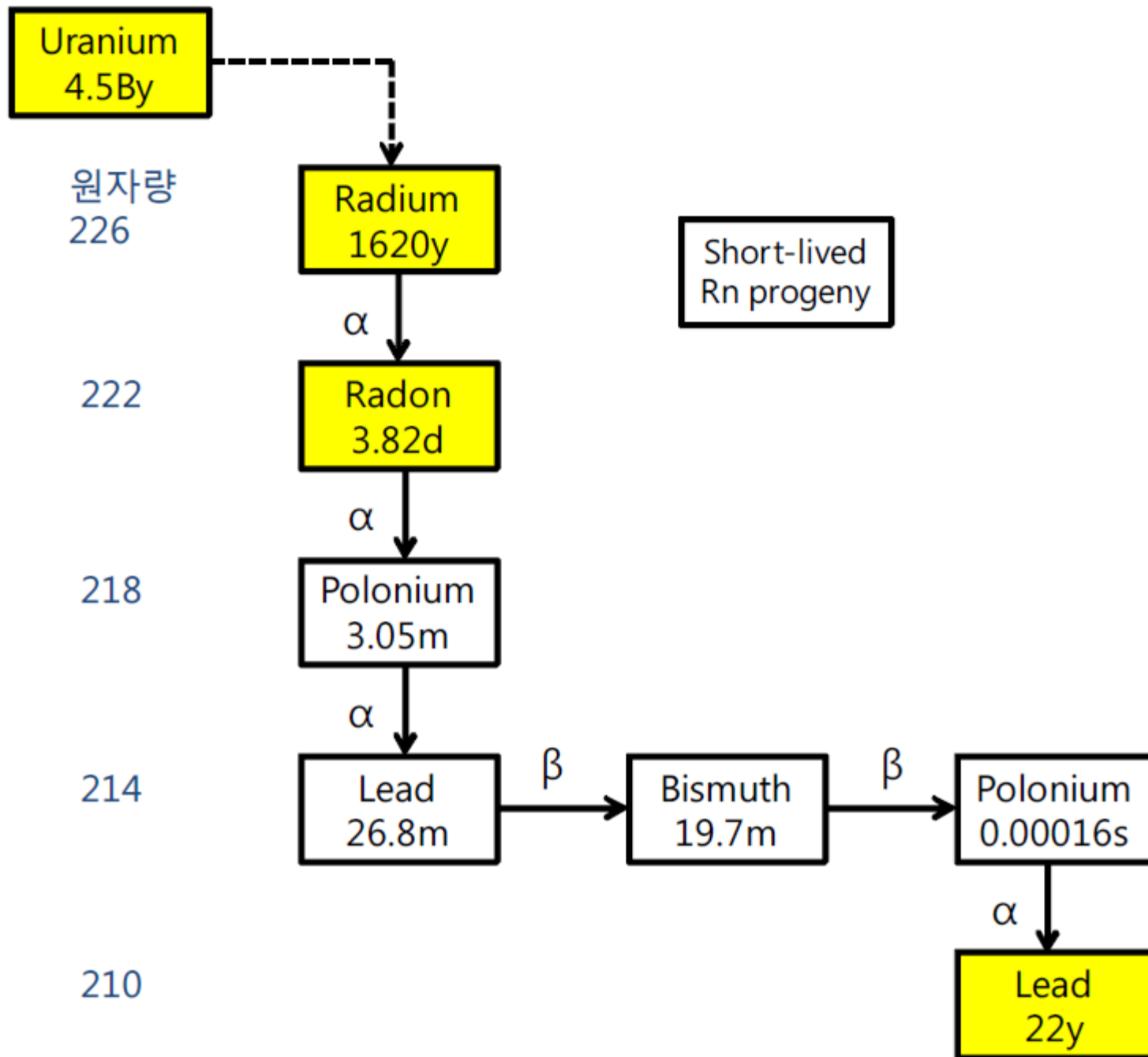
라돈의 건강영향

2015년 1차 환경복지연구회 워크숍
-충남발전연구원 2015.5.10-

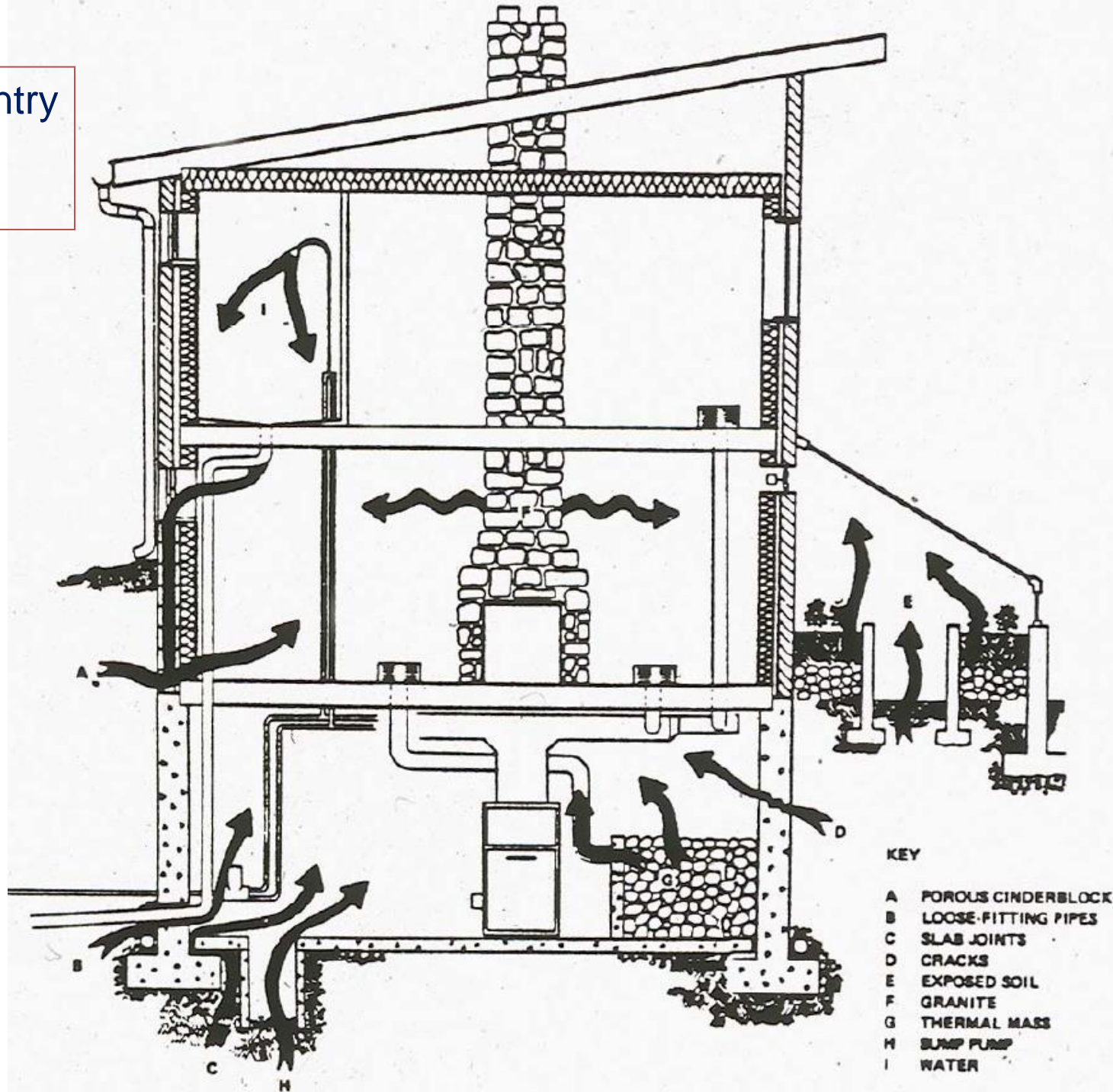
하 미 나
단국대학교 의과대학

라돈의 역사

- 1400's, 독일 Schneeberg 지역 광부에서 산의 병(Disease of Mountain) 발생
- 1879, 유럽 광부에서 폐암 최초 확인 (Harting & Hesse)
- 1899, Pierre & Marie Curie 라듐으로부터 방사성 기체 발생을 발견
- 1923, ICCE & IUPAC 에서 이 기체를 라돈으로 명명
- 1920's, Lorentz와 Ludvig에 의하여 광산지역 라돈 측정, 라돈에 의한 폐암의 가능성 제기(받아들여지지 않음)
- 1950's, Peller - First Review of Mining Related Cancers
- 1970's, 세계 각국의 가옥내 라돈 조사 실시, 연간 피폭선량의 약 50%가 라돈 (UNSCEAR)
 - Studies of Underground Miners
- 1980-1990's, 국가별로 전국 규모의 라돈 농도 조사 수행
 - Residential Radon Studies, pooling studies
 - 1999, NAS BEIR VI Report



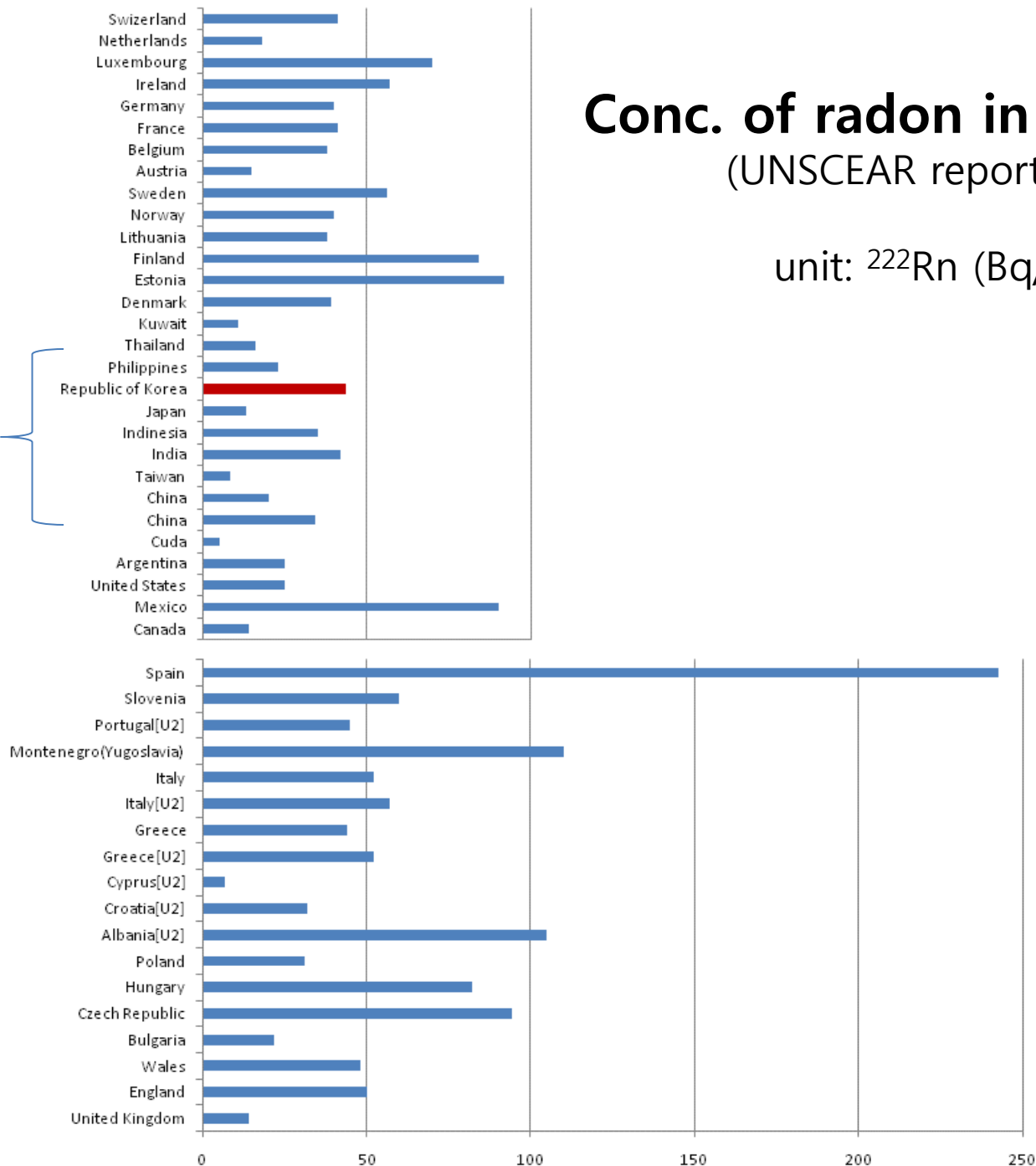
Route of entry Of Radon Into house



Conc. of radon in indoor air (UNSCEAR report 2006)

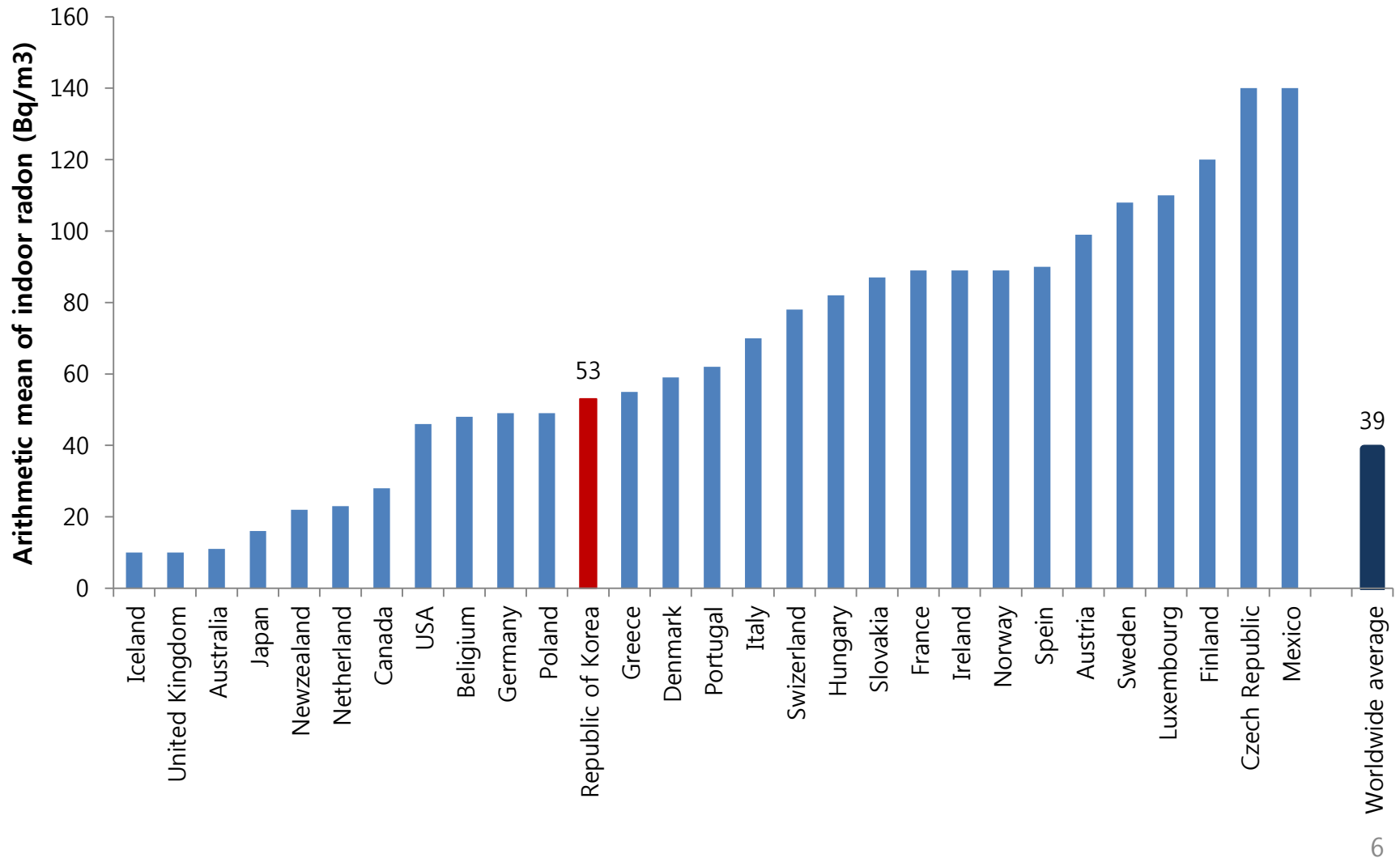
unit: ^{222}Rn (Bq/m³)

East Asia



OECD 국가의 실내 라돈 농도

(WHO, 2009)



우리나라의 라돈 농도 분포

(Kim et al, 2011, Rad Prot Dosim)

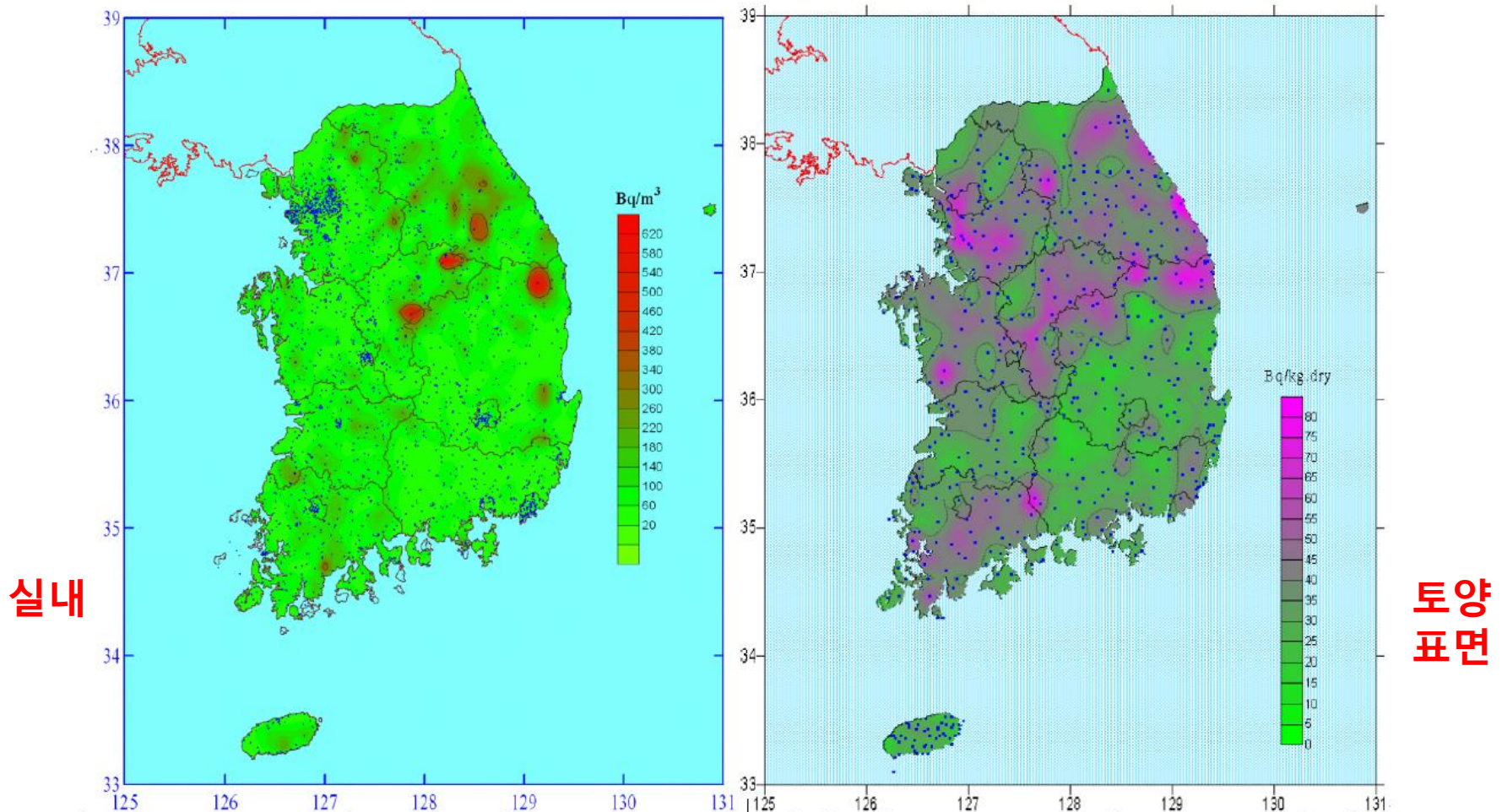
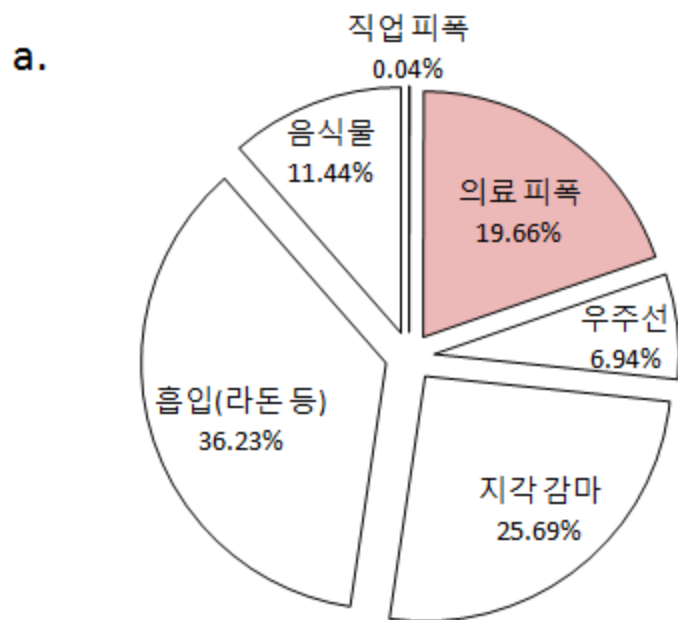
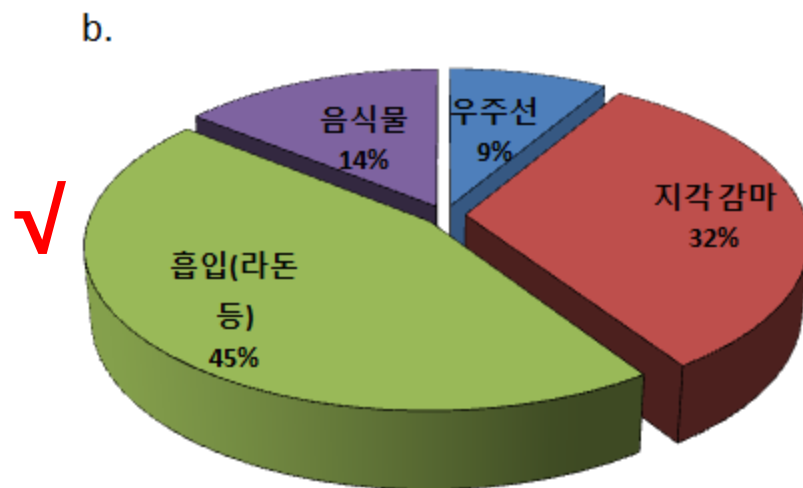


Figure 1. Distribution maps of indoor Rn (left) and ^{226}Ra concentrations in surface soil (right) in Korea.

우리나라 사람의 방사선 노출량



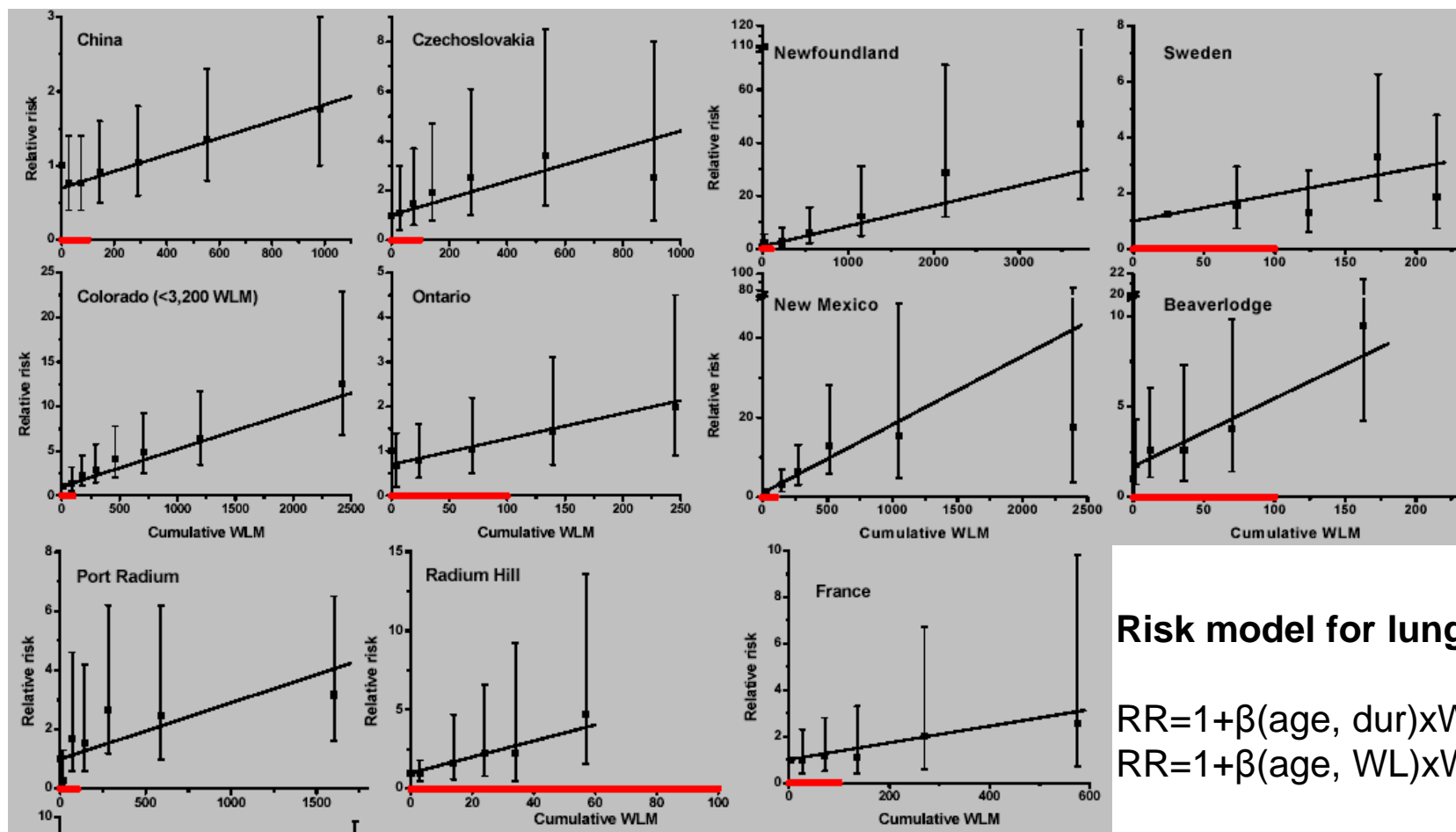
총 노출량 (인공+자연) 총 3.73mSv/year



자연방사선 노출량, 3.0 mSv/year

2007년. 한국원자력안전기술원자료

여러 나라 광부 연구에서 라돈노출량-폐암사망의 관계



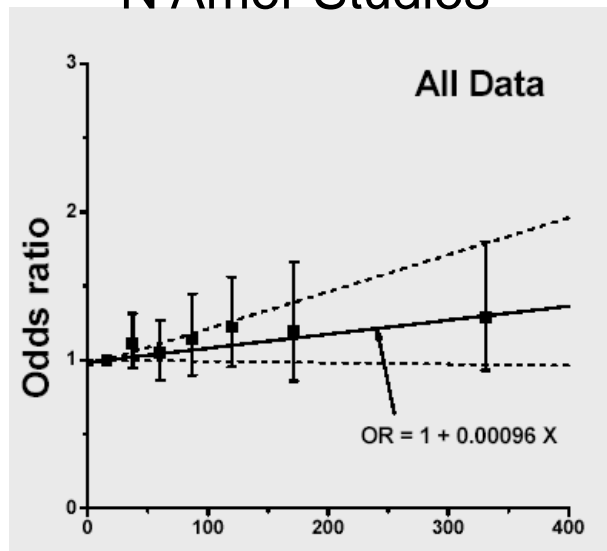
Risk model for lung cancer

$$RR=1+\beta(\text{age, dur})\times WLM$$

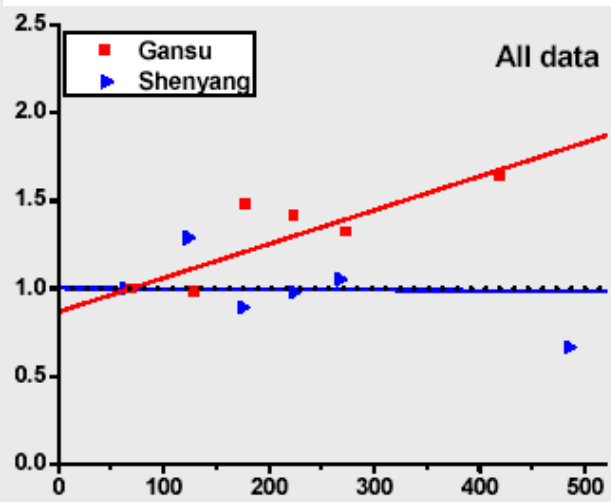
$$RR=1+\beta(\text{age, WL})\times WLM$$

거주지역 실내 라돈과 폐암 연구

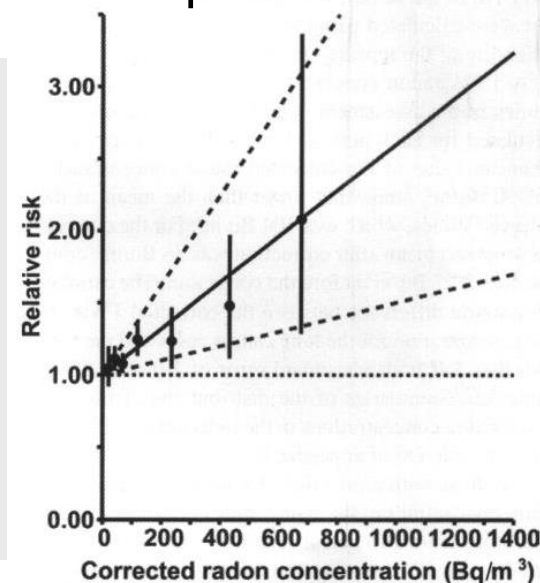
N Amer Studies



China



Europe



Rn concentration (Bq/m³)

(Krewski et al,
Epidemiology 2005)

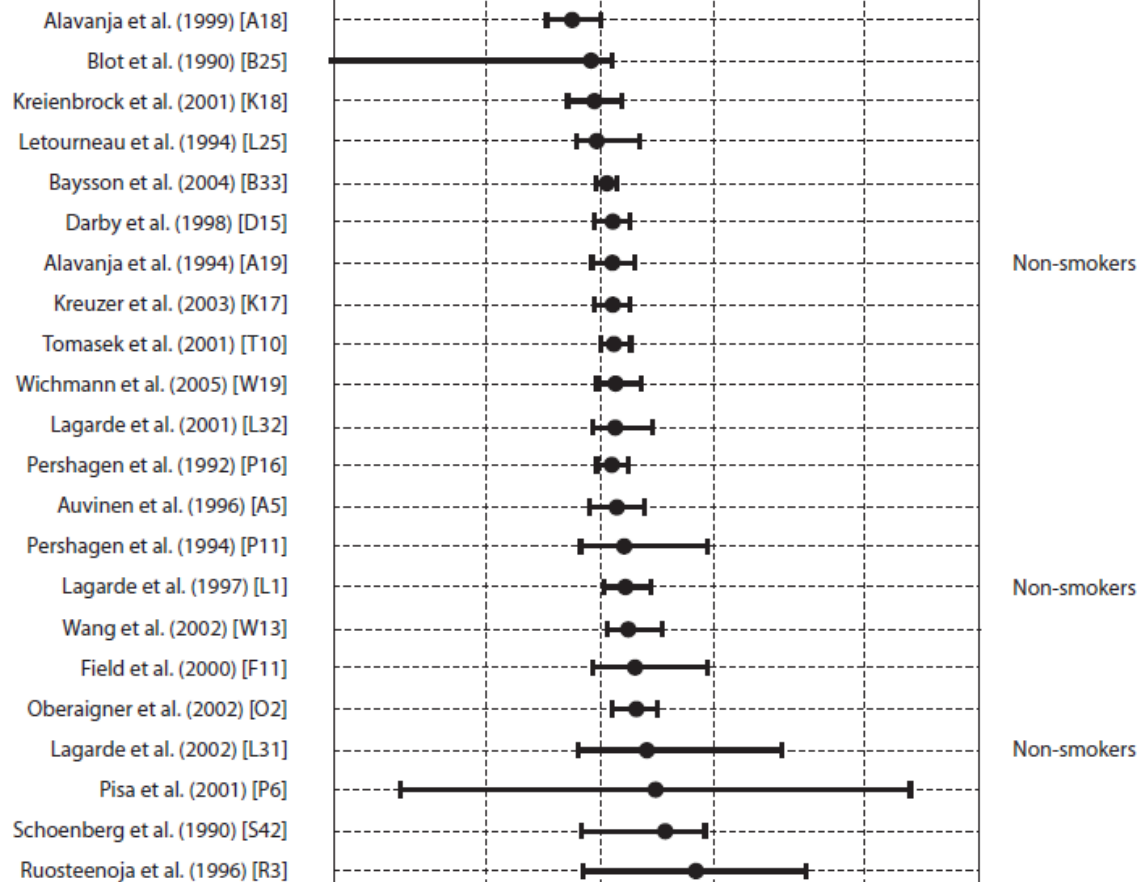
(Lubin et al,
IJC 2004)

(Darby et al,
SJWEH 2006)

Figure XVII. Risk estimates from residential radon studies [B29].

Shown are the summary relative risks for exposure at a radon concentration of 100 Bq/m³ (except for references [L4, P17] at 150 Bq/m³) the corresponding 95% confidence intervals.

INDIVIDUAL STUDIES



POOLED ANALYSES

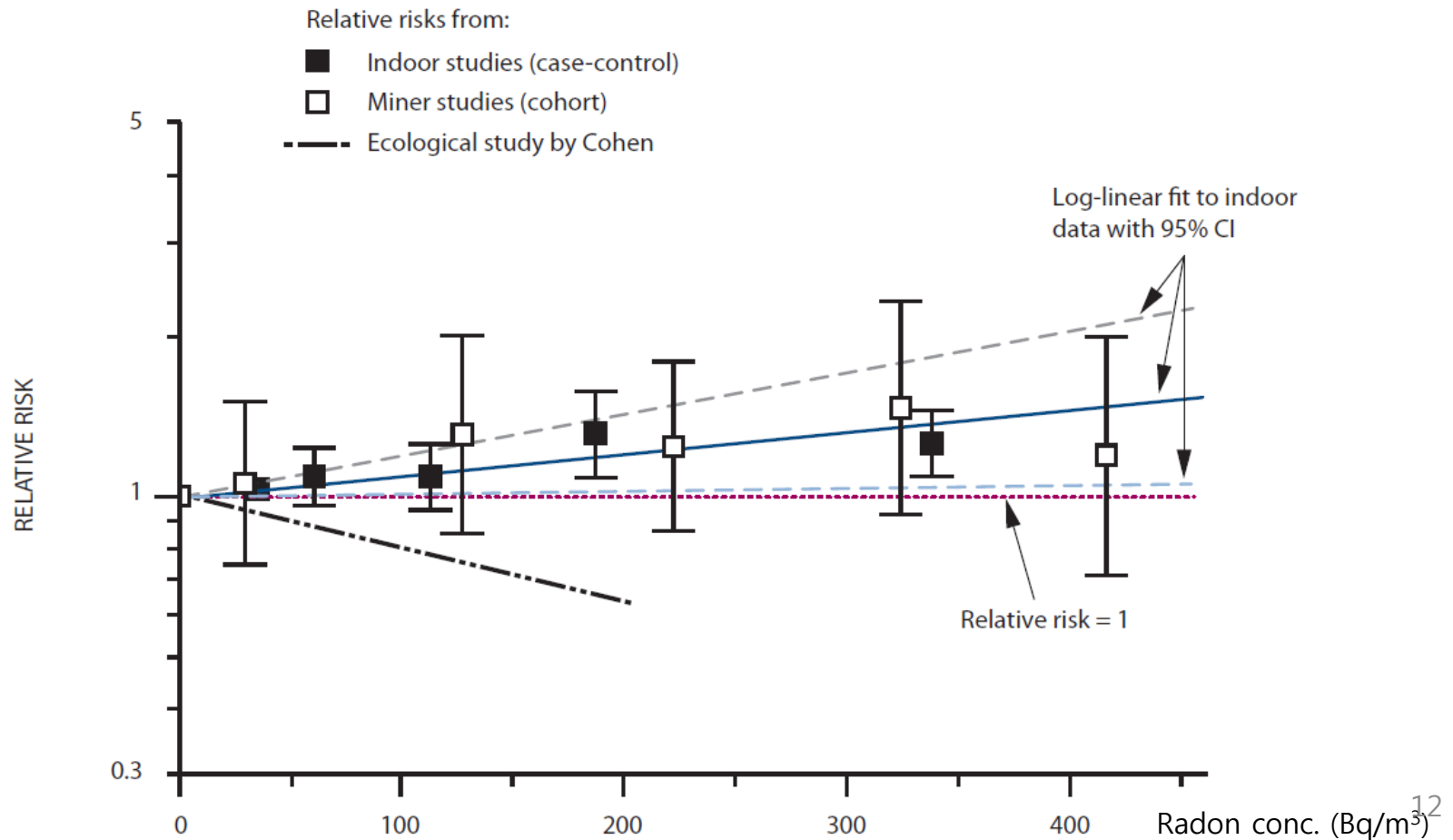


0.1 0.2 0.5 1 2 5 10
RELATIVE RISK (at 100 Bq/m³)

라돈과 폐암: 광부, 거주지역 연구

Figure XV. Risk estimates of lung cancer from exposure to radon (adapted from reference [L4]).

Shown are the summary relative risks from meta-analysis of eight indoor radon studies and from the pooled analysis of underground miner studies, restricted to RDP exposures of less than 50 WLM [L19], together with the estimated linear relative risk from the correlation study by Cohen [C24]. Note that references [L4] and [C20] both show Cohen's data extrapolated to beyond where they were actually analysed, about 200 Bq/m³. The figure has been adjusted to reflect this.



라돈 100Bq/m³ 증가당 폐암의 추가위험도 (ERR) 및 95% 신뢰구간 (거주지역 라돈)

Study		Primary analysis	Restricted analysis	Exposure adjusted for uncertainty
European	[Darby et al, 2005; Darby et al, 2006]	0.084 (0.03, 0.158)	0.094 (0.034, 0.175)a	0.16 (0.05, 0.31)c
North America	[Krewski et al, 2005; Krewski et al, 2006]	0.11 (0.00, 0.28)	0.18 (0.02, 0.43)a	
Chinese	[Lubin et al, 2004]	0.133 (0.01, 0.36)	0.319 (0.07, 0.91)b	
Combined		0.093 (0.04, 0.15)	0.11 (0.05, 0.19)	

a Only one or two residences and at least 20 years of coverage.

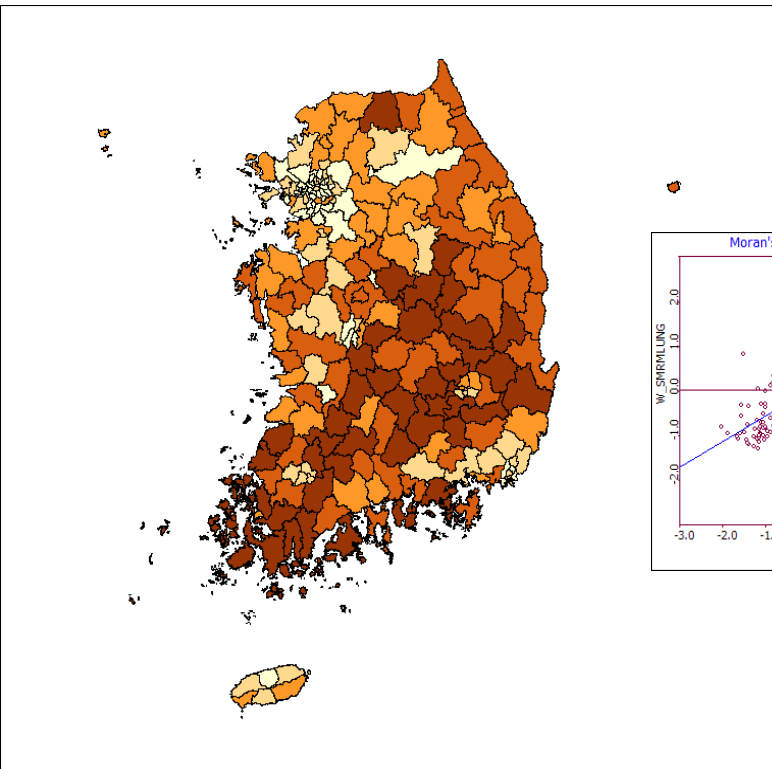
b Only one residence with complete coverage.

c Correction for measurement uncertainty.

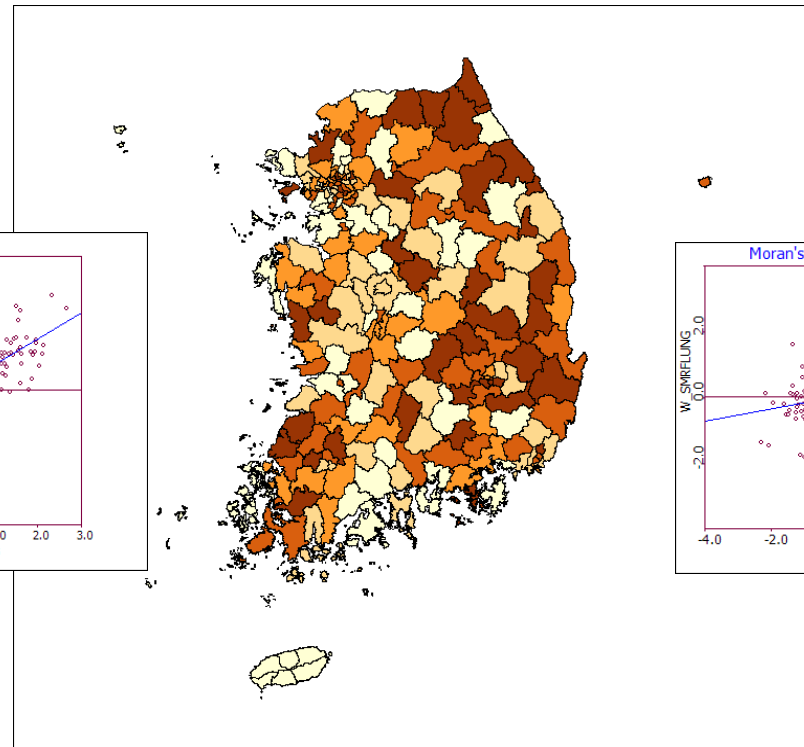
UNSCEAR 2006

우리나라 거주지역 라돈과 폐암

(KINS, 2010)



남자의 폐암 표준화 발생비
Moran's I=5.71 ($p<0.001$)

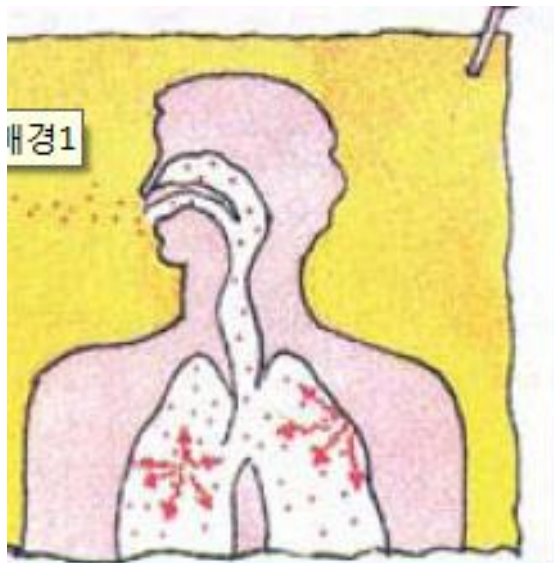


여자의 폐암 표준화 발생비
Moran's I=0.13 ($p=0.89$)

우리나라 거주지역 라돈과 폐암발생위험

(KINS, 2010)

라돈 농도(Bq/m3)	(시/군/수) 지역수	평균 표준화 발생비	단순(비보정)		박탈지수 보정		도시 농촌 보정	
			위험도		위험도		위험도	
			uRR	95% CI	aRR1)	95% CI	aRR2)	95% CI
여자								
<50	77	1	1	(기준)	1	(기준)	1	(기준)
50-<100	122	1.02	0.99	(0.94,1.03)	0.99	(0.95,1.03)	0.99	(0.95,1.04)
≥100	21	1.04	0.98	(0.91,1.06)	0.99	(0.91,1.07)	1	(0.92,1.08)
per 10 increase			1	(0.99,1.01)	1	(0.99,1.01)	1	(0.99,1.01)
남자								
<50	77	0.96	1	(기준)	1	(기준)	1	(기준)
50-<100	122	1.14	1.07	(1.03,1.12)	1.08	(1.03,1.13)	1.08	(1.03,1.12)
≥100	21	1.23	1.12	(1.04,1.20)	1.11	(1.04,1.20)	1.11	(1.03,1.20)
per 10 increase			1.01	(1.01,1.02)	1.01	(1.00,1.02)	1.01	(1.00,1.02)



- 국내 권고기준 : 가옥은 없음
- 환경부 다중이용시설에 대한 공기질 관리법 → 148 Bq/m^3
- 미국 가옥기준을 그대로 준용

국제방사선방호위원회 (권고 : 10 mSv 기준)

가 옥 : $7,000 \text{ hrs} \rightarrow < 300 \text{ Bq/m}^3$

작업장 : $2,000 \text{ hrs} \rightarrow < 1,000 \text{ Bq/m}^3$

라돈과 건강영향, WHO

-Factsheet 291, 2014-

- 라돈은 집안이나 작업장의 실내환경에서 발견되는 자연 방사능 가스
- 흡연 다음으로 중요한 폐암의 원인
- 각 나라별 평균농도에서 **폐암의 3~14%의 원인**을 차지
- 흡연자에서 폐암을 가장 많이 발생시키고, 비흡연자에서는 제일 중요한 폐암의 원인
- 노출의 역치가 없으므로, 라돈 농도를 낮추면 낮출수록 폐암위험은 감소

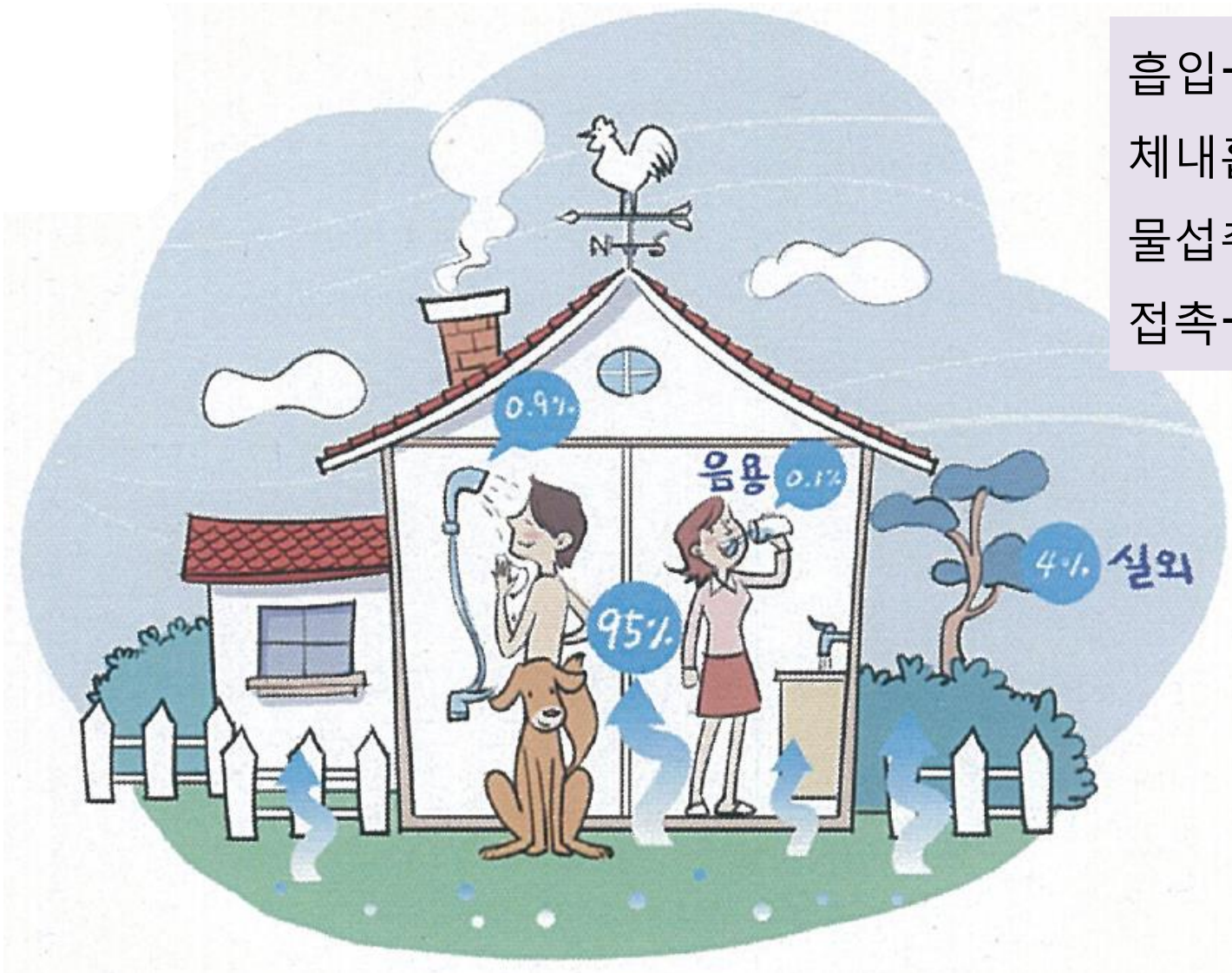
라돈 노출 경로

흡입 → 폐, 뇌

체내흡수 → 골수, 신장

물섭취 → 위

접촉 → 피부



적색골수는 자연방사선의 표적 장기

Committed equivalent dose

RBM dose, μSv , from exposure at age, y:

Radionuclide	1	5	10	15	Adult
Carbon-14	8.3	10.4	10.1	7.9	8.5
Potassium-40	130	140	150	130	130
Rubidium-87	3	3	3	3	3
Lead-210	167.9	142.5	141.9	155.1	78
Polonium-210	224.2	172.8	110.8	74.3	88.1
Radium-226	8.4	10.4	16.7	33	8.2
Radium-228	60.3	70.9	92.1	142.9	20.8
Thorium-228	0.5	0.6	0.4	0.3	0.4
Thorium-230	0.7	1.0	0.8	0.7	0.7
Thorium-232	0.3	0.5	0.4	0.4	0.4
Uranium-234	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2
Uranium-235	0	0	0	0	0
Uranium-238	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Total	604	552	527	548	338
Radon-220	21	19	17	12	12
Radon-222	80	80	80	80	80
External gammas	420	400	380	340	330
External cosmic rays	390	380	350	320	310
Grand total (rounded)	1520	1430	1350	1300	1070

Kendall et al., 2011



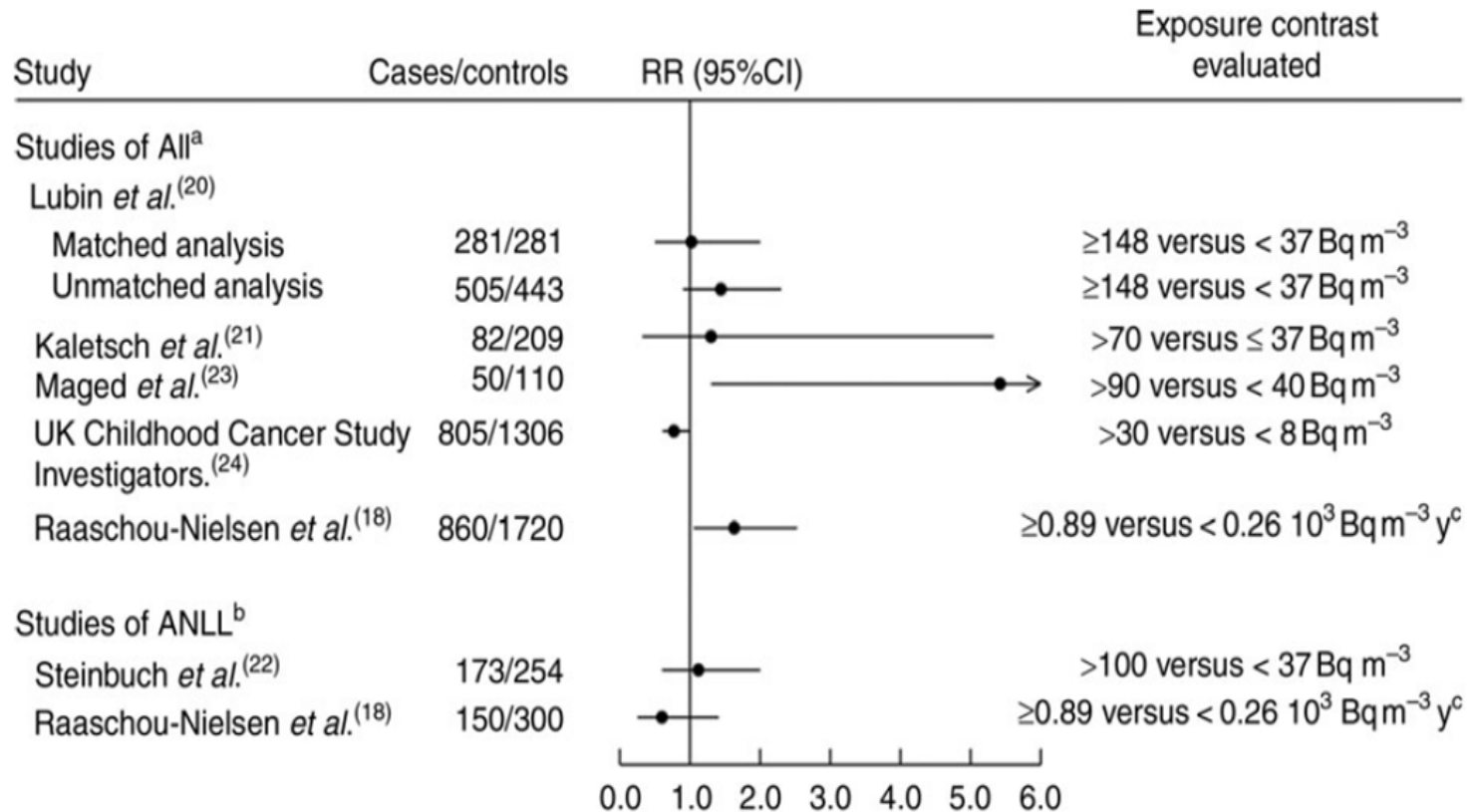
거주지역 라돈과 어린이백혈병

: 생태학적 연구 (12편), 11편 관련성유

Reference	Country	Type of leukaemia (number of cases)	Number of units	Direction of association	Significance
Lucie ⁽⁶⁾	UK	ALL (187)	22 counties	+	$p < 0.01$
Henshaw <i>et al.</i> ⁽⁷⁾	International	L	13 countries	+	$p < 0.02$
Butland <i>et al.</i> ⁽⁸⁾	International	L	7 countries	+	NS
Alexander <i>et al.</i> ⁽⁹⁾	UK	ALL	22 counties	+	$p < 0.005$
Muirhead <i>et al.</i> ⁽¹⁰⁾	UK	L	22 counties (459 districts)	+	NS
Collman <i>et al.</i> ⁽¹¹⁾	USA	L (1194)	Three groups (100 counties)	+	$p < 0.05$
Foreman <i>et al.</i> ⁽¹²⁾	UK	L (245)	Two groups (four counties)	-	NS
Richardson <i>et al.</i> ⁽¹³⁾	UK	L (6691)	402 districts	+	NS
Thorne <i>et al.</i> ⁽¹⁴⁾	UK	AML	Two groups	+	$p < 0.05$
Kohli <i>et al.</i> ⁽¹⁵⁾	Sweden	ALL (22)	13 municipalities (one county)	+	$p < 0.05$
Evrard <i>et al.</i> ⁽¹⁶⁾	France	ALL (3239) AML (697)	443 zones	ALL: + AML: +	ALL: $p = 0.49$ AML: $p = 0.004$
Evrard <i>et al.</i> ⁽¹⁷⁾	France	ALL (4346) AML (912)	95 departements	ALL: + AML: +	ALL: $p = 0.88$ AML: $p = 0.02$

거주지역 라돈과 어린이 백혈병

: 환자-대조군 연구 (6편)



^a Kaletsch *et al.* included all acute leukaemias, the majority of which would be ALL

^b Steinbuch *et al.* included only AML, which constitute the majority of ANLL.

^c For a 5-y-old child, this contrast in cumulated exposure would correspond to > 178 versus $< 52 \text{ Bq m}^{-3}$

우리나라 라돈과 조혈기계암

(KINS, 2012)

<만 20세미만>

비호지킨 림프종	남		여	
	비교 위험도	95% 신용구간	비교 위험도	95% 신용구간
라돈 농도(Bq/m ³)				
40미만	1	—	1	—
40~60미만	0.96	0.88 - 1.05	1.01	0.91 - 1.13
60~80미만	0.91	0.78 - 1.06	1.31	1.10 - 1.57
80이상	0.82	0.56 - 1.16	1.55	1.06 - 2.24

<전체 인구>

40미만	1	—	1	—
40~60미만	0.97	0.92 - 1.02	1.05	0.99 - 1.11
60~80미만	1.05	0.97 - 1.13	1.22	1.12 - 1.34
80이상	1.01	0.88 - 1.16	1.36	1.17 - 1.59

거주지역 라돈과 어린이 백혈병, 뇌종양



Epidemiology

British Journal of Cancer **111**, 1413-1420 (23 September 2014) | doi:10.1

Risk of leukaemia or cancer in the central nervous system among children living in an area with high indoor radon concentrations: results from a cohort study in Norway

R Del Risco Kollerud, K G Blaasaas and B Claussen

- 노르웨이 코호트 연구 (Kollerud and Claussen, BJC, 2014)
- 0-15세 어린이, 712,674명 (1967-2009년 출생)
- 437 백혈병, 427 뇌종양
- 백혈병: 관련성 없음
- 뇌종양: 위험도 증가 (통계적 유의성 없음)

Domestic Radon Exposure and Risk of Childhood Cancer: A Prospective Census-Based Cohort Study

Dimitri Hauri,^{1,2} Ben Spycher,³ Anke Huss,⁴ Frank Zimmermann,⁵ Michael Grotzer,⁶ Nicolas von der Weid,⁷ Damien Weber,⁸ Adrian Spoerri,³ Claudia E. Kuehni,³ and Martin Röösli,^{1,2} for the Swiss National Cohort and the Swiss Paediatric Oncology Group (SPOG)

¹Swiss Tropical and Public Health Institute, Basel, Switzerland; ²University of Basel, Basel, Switzerland; ³Institute of Social and Preventive Medicine, Bern, Switzerland; ⁴Institute for Risk Assessment Sciences, University of Utrecht, the Netherlands; ⁵Department of Radiation Oncology, University Hospital Basel, Basel, Switzerland; ⁶Department of Oncology, University Children's Hospital Zurich, Zurich, Switzerland; ⁷Pediatric Hematology and Oncology, University Children's Hospital Basel (UKBB), Basel, Switzerland; ⁸Radiation Oncology Department, Geneva University Hospital, Geneva, Switzerland

거주지역 라돈과 어린이 백혈병, 뇌종양

- 스위스 전향적 등록자료 기반 코호트 연구(Hauri et al., 2013, EHP)
- 2000년 현재 스위스에 살고 있는 16미만 어린이, 2008년말까지 암 발생 유무 추적
- 스위스 전역에서 45,000 지점에서 측정된 라돈 노출자료로 모델링 하여 노출평가
- 997어린이 암환자발생, 라돈 중간값(77.7Bq/m³) 미만을 기준으로 90%이상 고노출(139.9 Bq/m³)자의 위험도를 생존분석
- 전체암 0.93 (0.74-1.16), 전체백혈병 0.95(0.63-1.43), 급성임파구성 백혈병 0.90(0.56-1.43)
- 뇌종양 1.05(0.68-1.61)

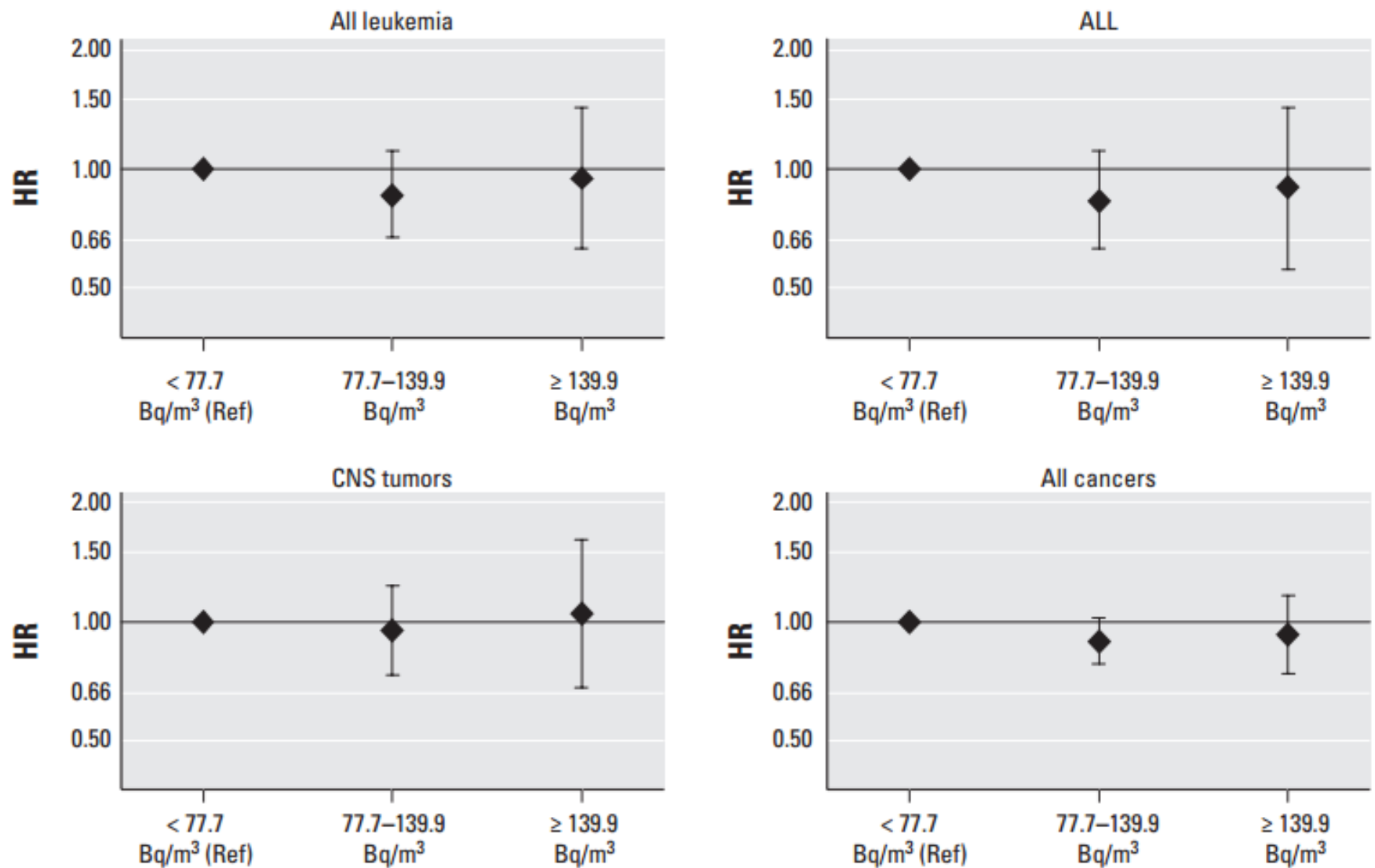




Figure 2. HRs and 95% CIs for associations between domestic radon concentrations at baseline and all leukemias, ALL, CNS tumors, and all cancers diagnosed among Swiss children during 2000–2008. Ref, reference. Models are adjusted for child sex, birth order, socioeconomic status of the parents, environmental gamma radiation, and period effects, in addition to using age as the underlying time scale.

라돈과 조혈기계암

Leukemia, lymphoma and multiple myeloma mortality (1950-1999) and incidence (1969-1999) in the Eldorado uranium workers cohort

(Article)

Zablotska, L.B.^a , Lane, R.S.D.^b, Frost, S.E.^c, Thompson, P.A.^b 

^a Department of Epidemiology and Biostatistics, School of Medicine, University of California, San Francisco, CA 94118, United States

^b Radiation and Health Sciences Division, Directorate of Environmental and Radiation Protection and Assessment, Canadian Nuclear Safety Commission, Ottawa, ON, K1P 5S9, Canada

^c Frost and Frost Consultants, Saskatoon, SK, S7H 0A1, Canada

- 캐나다 엘도라도 우라늄광산 광부 코호트연구 (Zablotska et al., 2014,ER)
- 1932-1980 에 채용된 광부
- 평균 100.2 WLM, 52.2mSV 총 누적감마노출량
- 101(사망), 160명(발생)의 조혈기계암환자
- 만성임파구성 백혈병(CLL), 호지킨병(HL), 비호지킨병(NHL) 의 위험 증가(통계적 유의성은 없음)

거주지역 라돈과 뇌종양

Residential Radon and Brain Tumour Incidence in a Danish Cohort

Elvira V. Bräuner^{1,2}, Zorana J. Andersen^{1,3}, Claus E. Andersen⁴, Camilla Pedersen¹, Peter Gravesen⁵, Kaare Ulbak⁶, Ole Hertel⁷, Steffen Loft³, Ole Raaschou-Nielsen^{1*}

¹Diet, Genes and Environment, Danish Cancer Society Research Centre, Copenhagen, Denmark, ²Construction and Health, Danish Building Research Institute, Aalborg University, Aalborg, Denmark, ³Department of Public Health, Faculty of Health Sciences, Copenhagen University, Copenhagen, Denmark, ⁴Center for Nuclear Technologies, Technical University of Denmark, Roskilde, Denmark, ⁵Geological Survey of Denmark and Greenland, Copenhagen, Denmark, ⁶National Institute of Radiation Protection, Herlev, Denmark, ⁷Department of Environmental Science, Aarhus University, Aarhus, Denmark

- 덴마크 코호트 연구(Brauner et al., 2015, Plos One)
- 57,053 (1993-1997에 모집), 2009년말까지 암발생 추적조사, 121명의 뇌종양환자 발생확인
- 1971-2009까지의 거주지 조사하여 기존에 측정된 라돈농도를 거주지역정보와 가옥구조를 고려하여 GIS 기법으로 할당, 개인별 노출량 산출
- 라돈 노출량 중간값 40.5 Bq/m³
- 뇌종양 위험
 - 100Bq/m³ 증가당 1.96 (95%CI: 1.07-3.58)

라돈, 지각감마와 어린이 백혈병

Leukemia

Leading Article

Leukemia (5 June 2012) | doi:10.1038/leu.2012.151

A record-based case-control study of natural background radiation and the incidence of childhood leukaemia and other cancers in Great Britain during 1980–2006

G M Kendall, M P Little, R Wakeford, K J Bunch, J C H Miles, T J Vincent, J R Meara and M F G Murphy

- 영국의 등록자료 기반 자연방사선과 어린이백혈병에 관한 환자-대조군 연구(Kendall et al, 2013, *Leukemia*)
- 국가 어린이암등록자료 활용
- 27,447백혈병환자(1980-2006년에 진단)와 짝지은 대조군
- 아기 임신시의 엄마의 거주지 라돈 농도와 지각감마선은 기 측정된 자료를 지역단위로 묶어 평균값으로 이용.
- 백혈병위험, 적색골수의
 - 누적 감마선 노출량 1mSv 증가당 ERR 0.12 (95%CI: 3, 22),
 - 라돈은 0.03 (-4, 11)로 유의하지 않음.

라돈과 피부암

Epidemiology:
January 2012 - Volume 23 - Issue 1 - p 44–52
doi: 10.1097/EDE.0b013e31823b6139
Cancer

Radon and Skin Cancer in Southwest England: An Ecologic Study

Wheeler, Benedict W.; Allen, James; Depledge, Michael H.; Curnow, Alison

- 영국의 암등록자료를 이용한 생태학적 연구 (Benedict et al., 2012, Epidemiology)
- 2000-2004년의 southwest England 287개 지역대 상
- Malignant melanoma, basal cell carcinoma, squamous cell carcinoma 지역 발생율과 가옥내 라돈 농도의 지역 평균농간 관련성 분석
- Squamous cell carcinoma 위험 증가
 - (230+ vs 0-39Bq/m3)
 - RR=1.76 (95%CI, 1.46-2.11)

라돈과 위암

Int. J. Cancer: 114, 109–113 (2005)

© 2005 Wiley-Liss, Inc.

Radon and other natural radionuclides in drinking water and risk of stomach cancer: A case-cohort study in Finland

Anssi Auvinen^{1,2*}, Laina Salonen¹, Juha Pekkanen³, Eero Pukkala⁴, Taina Ilus¹ and Päivi Kurttio¹

¹Research and Environmental Surveillance, STUK–Radiation and Nuclear Safety Authority, Helsinki, Finland

²School of Public Health, University of Tampere, Tampere, Finland

³Unit of Environmental Epidemiology, National Public Health Institute, Kuopio, Finland

⁴Finnish Cancer Registry, Helsinki, Finland

- 핀란드 코호트 연구(Auvien et al., 2005, IJC)
- 식수를 통한 라돈 노출과 위암위험 분석
- 1967-1981에 수도물공급을 받지 못한 사람 코호트 중 무작위로 4,590명 추출하여 전체를 대조군으로, 이 기간중 발생한 위암환자는 88명.
- 우물물의 농도 측정
 - 평균농도 : 라돈 (130Bq/L), 라듐-226 (0.007-0.01Bq/L), 우라늄 (0.07Bq/L)
- 위암발생위험 증가하지 않음
 - 라돈 0.68(0.29-1.59)
 - 라듐-226 0.69(0.33-1.47)
 - 우라늄 0.76(0.48-1.21)

라돈과 심혈관계 질환

Radiat Environ Biophys (2010) 49:177–185
DOI 10.1007/s00411-009-0249-5

ORIGINAL PAPER

Radon and risk of death from cancer and cardiovascular diseases in the German uranium miners cohort study: follow-up 1946–2003

Michaela Kreuzer · B. Grosche · M. Schnelzer ·
A. Tschense · F. Dufey · L. Walsh


- 독일 우라늄광부 코호트 연구(Kreuzer et al., 2010, REB)
- 58,987명의 광부 (1946-1989년 고용)의 사망률
- 폐암, 기도암은 라돈과 유의한 관련성
- 심혈관계사망률과는 유의한 관련성 없음
 - 관상동맥질환 ERR/WLN=0.0003%
 - 뇌혈관질환 ERR/WLM=0.001%

라돈과 심혈관계 질환

Scandinavian Journal of Work, Environment and Health

Volume 36, Issue 5, September 2010, Pages 373-383

Mortality from circulatory system diseases and low-level radon exposure in the French cohort study of uranium miners, 1946-1999 (Article)

Nusinovici, S.^a, Vacquier, B.^a, Leuraud, K.^a, Metz-Flamant, C.^a, Caër-Lorho, S.^a, Acker, A.^b, Laurier, D.^a  

^a Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire, DRPH/SRBE/LEPID, BP17, 92262 Fontenay aux Roses, France

^b AREVA NC, Coordination Médicale, Paris, France

- 프랑스 우라늄광부 코호트 연구(Nusinovici et al., 2010, SJWEH)
- 1946-1990에 고용되어 1년이상 근무한 근로자 5,086명, 평균 30.1년 추적기간
- 평균라돈 노출 36.6WLM
- 1411명 사망자, 319명 심혈관계질환으로 사망
- $ERR/100WLM=0.49\%(0.07-1.23)$
- 운동을 하면 위험도 감소

라돈과 심혈관계 질환

Radiat Environ Biophys (2007) 46:291–296
DOI 10.1007/s00411-007-0108-1

SHORT COMMUNICATION

**Coronary heart disease mortality and radon exposure
in the Newfoundland fluorspar miners' cohort, 1950–2001**

Paul J. Villeneuve · Rachel S. D. Lane ·
Howard I. Morrison

- 캐나다 Newfoundland 우라늄광부 후향적 코호트 연구(Villeneuve et al., 2007, REB)
- 2,070 명 근로자 (1933-1979에 고용)
- 사망신고서 추적
- 관상동맥질환, 전체 심혈관계, 뇌혈관질환, 급성심근경색 모두 뚜렷한 연관성 없음.

결론

- 라돈은 폐암의 두번째 중요 원인인자
- 백혈병 등 조혈기계암 (특히 어린이)의 위험에 대한 증거가 쌓이는 중
- 뇌종양 발생원인에 대한 보고가 축적되고 있는 중
- 피부암 1편 유의한 관련성
- 위암 1편 관련성 없음
- 심혈관계 질환 관련성 의심가능

감사합니다.