

지각방사선(라돈) 참조준위별 저감 대책에 따른 비용 편익 분석

최은희¹ · 정은교^{2*} · 김수근³ · 정명희⁴

¹울지대학교 간호학과, ²안전보건공단 산업안전보건연구원,
³강북삼성병원 직업환경의학과, ⁴영진전문대학교 간호학과

Cost-benefit Analysis on Occupational Reference Levels for Radon

Eun-Hi Choi¹ · Eun Kyo Chung^{2*} · Su-Geun Kim³ · Myung-Hee Jung⁴

¹Dept. of Nursing, Eulji University

²Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA

³Dept. of Occupational and Environmental Medicine, Kangbuk Samsung Hospital,
Sungkyunkwan University School of Medicine

⁴Dept. of Nursing, Yeungjin University

ABSTRACT

Objective: The purpose of this study is to propose the benefits of reduction measures according to the occupational radon reference level in order to present basic data for radon management guidelines considering domestic circumstances.

Methods: This study uses radon data measured in the subway stations from 2015 to 2016. Of the total of 4,643 cases, 4,231 cases were analyzed excluding the 412 cases where the values were below 300 Bq/m³.

Results: Cost-Benefit analysis was done on the results of the field survey on subway work sites. At the exposure level of 400 Bq/m³, the ratio between the cost and the benefit was highest at 1 : 1.81(the cost was KRW 1,398,568,032, while the benefit KRW 2,5248,772,841). At the exposure level of 600 Bq/m³, the ratio of cost and benefit was 1 : 1.80, at 300 Bq/m³ it was 1.72, at 800 Bq/m³ it was 1.71, at 200 Bq/m³ it was 1.54, and at 100 Bq/m³ it was 1.40.

Conclusions: Radon management in the workplace provides economic benefits and appropriate reduction strategies are needed. In addition, it is necessary to establish and distribute radon exposure assessment procedures and guidelines for the safety and health of employees when exceeding the exposure standard, and guidelines for radon management in the workplace should be established.


Key words: cost-benefit analysis, radon, reference level

I. 서 론


세계보건기구(World Health Organization, WHO) 산하 국제암연구센터(International Agency of Research on Cancer, IARC)에서는 라돈을 1급 발암물질로 규정하고 흡연 다음의 폐암유발 원인으로 제시하고 있으며, 모든 폐암환자 중 약 3~14%가 라돈에 기인한 것으로

평가하고 있다(WHO, 2009). 라돈(Radon, 원소기호 ²²²Rn)은 주기율표상 86번 원소이고, 우라늄(uranium)과 토륨(thorium)의 방사선 붕괴를 통하여 자연적으로 형성되는 가스 형태의 방사성 동위원소이다. 라돈은 공기·바위·물·토양에 존재하는 천연 방사성물질로 불활성으로서 다른 물질과 화학적으로 반응하지 않으며, 무색·무취의 방사선을 방출한다. ²²²Rn는 우라늄

*Corresponding author: Eun Kyo Chung, Tel: +82-52-703-0881, E-mail: jungek60@kosha.or.kr
Occupational safety and health research institute. KOSHA. 400 Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan, 44429
Received: February 18, 2019, Revised: March 18, 2019, Accepted: March 19, 2019

 Eun-Hi Choi <http://orcid.org/0000-0002-5175-0210>

 Su-Geun Kim <http://orcid.org/>

 Eun Kyo Chung <http://orcid.org/0000-0001-7899-7081>

 Myung-Hee Jung <https://orcid.org/>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

-238 붕괴계열에 기원하며 3.82일의 반감기를 가지며, 사람의 일상생활 환경에 어느 곳이나 존재하고, 분진에 붙어 공기 중으로 이동할 수 있다. 라돈은 토양에서 유발되며, 건물 바닥의 균열된 틈으로 유입되는 것으로 알려져 있다(Wilkening, 2016).

일반인을 대상으로 한 기존 연구에서 라돈농도가 증가할수록 폐암 위험률이 유의하게 증가 하는 것으로 나타나 관련성이 있다고 하였다(Oh et al., 2011). 2011년 일본의 후쿠시마 원자력 사고 발생 이후 방사선에 대한 국민적 관심이 증가하면서 지각방사선 라돈을 포함한 생활주변방사선 안전관리법이 제정이 되었다. 환경부에서는 2011년에서부터 2012년까지 전국 주택 8,000호에 대하여 라돈을 조사하고, 2015년 「실내공기질 관리법」에 실내라돈관리 계획·시행을 도입하였다. 2018년 침대 매트릭스의 라돈 방출과 매트릭스를 수거하는 근로자에 대한 노출 등으로 라돈에 대한 대중적 공포는 커지고 있는 상황이다.

우리나라 국민의 라돈으로 인한 초과사망은 1년 총 1,968명, 전체 폐암 사망자 중 12.6%가 라돈으로 인한 것이라고 추정하고 있다(Shin et al., 2014). 이와 관련한 우리나라의 라돈 관련 규정은 실내공기질관리법 시행규칙이 있으며, 라돈에 대한 실내공기질을 148 Bq/m^3 (4 pCi/L)이하로 설정하여 관리하고 있다. 기준치는 미국 환경보호청(Environmental Protection Agency, EPA)에서 일생동안 노출될 경우 폐암으로 사망할 확률이 약 1~2%라고 추정하여 권고한 수치이다 (EPA, 2003).

지하광산에서 일하는 광부 약 60,000명에 대해 평균 누적 라돈 노출기간 5.7년 동안 총 2,674명의 폐암으로 사망한 것과의 유의한 상관관계가 있다는 것이 밝혀지면서 라돈이 폐암 유발인자라는 것이 밝혀졌다(Oh et al., 2011). 우리나라는 2013년 7월 지하 등 환기가 잘되지 않는 장소에서 근무하는 경우 ^{222}Rn 또는 그 붕괴 물질에 노출되어 발생한 폐암을 업무상 질병으로 새롭게 채택되었다(KLIC, 2019). 또한 2015년 4월 폐암으로 사망한 지하철 근로자가 라돈으로 인한 것으로 확인돼 국내 최초로 산재 판정을 받음으로서 직업병 유해인자로 라돈이 주목 받게 되었다.

이후 사업장 내 직장인의 라돈 및 그 붕괴산물의 노출로 인한 부분이 예측되고 있어, 라돈에 의한 방사선 노출을 줄이기 위한 국가의 라돈 노출기준 마련과 작

업장에서 위험이 큰 부분에 대한 조치기준 제도화에 대한 요구도가 증가하였다. 2018년 3월 고용노동부(Ministry of Employment and Labor, MoEL)에서 사업장의 라돈 노출기준을 600 Bq/m^3 으로 신설하였다. 국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection, ICRP)에서는 노출기준을 마련하고자 할 때 국가별로 사회·경제적 상황을 고려하여 연간 방사선 노출선량이 10 mSv 이내로 설정하도록 권고하고 있는데 우리나라 라돈의 노출기준은 이에 부합된다고 볼 수 있다. 실내 공기질 관리값보다 높은 이유는 실내는 유소년, 청소년, 노약자 등 다양한 계층을 포함하고 있고, 사업장의 경우 건강한 성인 근로자를 기준으로 하고 있기 때문이다(KOSHA, 2015).

라돈에 대한 다른 나라의 경우를 살펴보면 영국의 경우 라돈 노출에 대하여 사업장에서 잠재적인 위험을 평가하여 라돈 수준을 파악하도록 하고 있다(HSE, 2019). 캐나다에서는 라돈 취약 사업장을 분류하여 주기적인 라돈 측정을 하도록 하는 라돈관리 프로그램을 운영하고 있다(Health Canada, 2011).

고용노동부에서는 라돈 노출기준별 관리가 필요하여 사업장에서 필요한 라돈노출 수준별 관리가이드를 마련 중에 있다.

ICRP(1993)에서는 라돈 노출기준으로 조치준위(action level)와 참조준위(referene level)을 구분하고, 조치준위란 노출농도가 어느 level 이상이면 감축조치를 시행하도록 하고, 참조준위는 필요에 따라 참조준위 아래에서도 방사선 방호를 위한 최적화 과정이 적용되어야 한다고 하였다. 즉, 조치준위는 직무노출을 관리해야 할 진입점으로 연간 유효선량 10 mSv 를 설정하여 노출감축을 위한 조치가 필요한 준위이고, 참조준위는 선량기준으로 연간 3-10 mSv 범위에 있도록 설정한 준위를 말한다. 따라서 근로자의 건강보호를 위해서는 라돈농도의 노출기준 지정 뿐 아니라 선량의 참조준위 설정도 지정하여 관리하는 것이 중요하다고 볼 수 있다.

본 연구는 2015년에서 2016년의 전국 지하철에서 측정된 라돈 농도값을 이용하여 참조준위를 설정하고, 참조준위별 저감대책에 대한 비용과 이에 대한 편익을 살펴보고자 한다. 이에 대한 연구는 향후 라돈 가이드 설정 시 기초자료로 사용될 수 있을 것이다.

II. 연구방법

1. 연구대상

본 연구는 2015년~2016년 동안 광주, 대구, 대전, 부산, 수도권(서울 매트르, 도시철도, 9호선, 신분당선, 일산선-용산선, 수인선, 분당선)의 대도시 지하철에서 측정된 라돈 농도값이다.

2. 자료수집

라돈 측정 방법은 단기간 측정법(48시간 측정)과 장기간 측정(90일 이상 측정)한 곳이 지역별로 다르며, 단기간 측정법은 충전막 전리함 측정기 E-Perm을, 장기간 측정법은 ATD, α -track detector, 실리콘 검출법 실시간 연속 모니터링 등을 사용하였다. 측정 시기는 1월부터 12월까지 다양하게 있었다. 측정 위치는 집수정(배수펌프실), 지하철역사, 터널로 3곳으로 분류하였다. 분석 자료는 원데이터로만 분석하였으며, 공시료와 중복시료, 2차 추가자료를 제외하였다. 총 4,643건 중 300 Bq/m^3 이하는 수치를 제시하지 않은 구간 412건을 제외하고, 4,231건을 분석하였다. 라돈 측정 후 300 Bq/m^3 이상인 69곳을 대상으로 환기 및 차폐 등 저감 대책을 실시하였다. 저감 대책 후 라돈 측정 값이 제시된 것은 2곳이었다.

3. 분석방법

비용편익 분석은 국가자원의 비용과 국민경제 측면에서의 편익을 파악하여 의사결정에 도움을 주기위한 방법이다(Kim, 2012). 이 때 모든 가치들은 화폐가치로 환산된다. 본 연구에서 비용편익 분석으로는 참조 수준별 저감대책에 소요되는 비용과 저감대책으로 인한 건강 영향을 편익으로 파악하였다.

1) 비용분석

비용에 대해서는 직접비용과 간접비용으로 구분하였다. 직접비용은 저감대책으로 KOSHA(2015)에서 제시된 라돈 농도 측정, 환기, 유입원 차단, 보호구 착용 4가지에 대하여 참조수준별 저감에 필요한 구입 비용을 적용하였고, 간접비용은 환기시설 운영에 들어가는 전기세, 교육으로 소요되는 시간으로 인한 생산성 감소 등의 간접비용으로 구분하였다.

라돈 수준별 위험도를 추정은 WHO에서 흡연과 비흡연자로 구분하여 라돈 수준별로 추정한 폐암 사망 위험

도에 의하여 폐암 사망 인원수를 구하였다. 이를 위하여 다음 세 가지를 가정하였다. 첫째, 측정위치별로 전국 지하철 근로자가 동일한 수로 근무한다. 둘째, 지하철 근로자 흡연율은 질병관리본부(Korea Centers for Disease Control and Prevention, KCDC)에서 2015년 만 19세-44세 현재 남성 흡연율 43.8%과 동일하다. 지하철 근로자의 성별의 비율이 제시된 통계는 없으나, Kim(2007)의 연구에서 지하철 근로자 대상 석면노출관련 설문조사 시 남성이 97.5%이어서 남성 흡연율 기준으로 하였다.

2) 편익분석

편익은 직접편익과 간접편익으로 구분하였다. 저감 대책으로 인한 라돈의 건강영향을 고려하였다. 지하 광부의 역학연구결과 라돈 노출수준에 따라 폐암으로 인한 사망자수에 유의한 영향(Oh et al., 2011)을 미치는 때문에 저감대책 수준에 대한 폐암으로 인한 사망자수의 감소를 편익으로 하였다. 즉, 폐암 발생으로 인한 산재진료비+폐암 사망으로 인한 장의비, 유족급여 감소를 직접편익으로 하였으며, 간접편익으로는 치료를 받기 위한 생산성 하락, 외래 이용 시 보호자 시간비용을 적용하였다.

조치준위는 현재 MoEL에서 지정한 600 Bq/m^3 미만을 포함하여 800 Bq/m^3 , 400 Bq/m^3 , 300 Bq/m^3 , 200 Bq/m^3 , 100 Bq/m^3 을 지정하였다. 이에 대한 조치준위 기준은 WHO에서 제시한 라돈 수준별 위험도 제시에 의하여 구분하였다.

본 연구에서는 폐암 진단 시 기본 2년은 생존한다는 가정으로 폐암 사망자수 감소에 대한 편익을 구하였다.

3) 비용편익분석

비용과 편익의 기준선 설정이 필요한데 기준선은 비용과 편익의 추정 대상이 되는 업종과 직종에 근무하는 근무자의 수는 2016년 이후 일정하고, 측정 지점의 라돈 수준은 연간 변화가 없다고 가정하였다. 비용 후 건강에 대한 편익은 지연효과가 있고, 질병 발생의 시기 지점을 알 수 없기에 분석기간은 10년으로 설정하였다.

III. 연구결과

1. 지하철 라돈 수준별 빈도와 위험도 추정

전국 지하철 라돈 수준별 빈도는 $0-100 \text{ Bq/m}^3$ 미만이

전체 87.8%(3,714지점)이었다. 지하철 역사는 0-100 Bq/m³ 미만인 98.1%(1,476지점), 100-200 Bq/m³ 미만 구간은 1.3%(19지점), 200-300 Bq/m³ 미만은 0.5%(8지점), 300-400 Bq/m³ 미만은 0.1%(2지점)이었다.

터널의 경우 300-400 Bq/m³ 미만 지점은 1.8%(21지점), 400-600 Bq/m³ 미만은 1.3%(15지점), 600-800 Bq/m³ 미만은 1.5%(17지점), 800 Bq/m³ 이상은 0.3%(4지점)이었다.

WHO에서 제시한 라돈 수준별 위험도 추정에 대한 공식은 다음과 같다.

$$1. \text{폐암사망 추정위험자수} = \text{측정 지점별}^1) \text{근로자수}^2) * \text{흡연율}^3) * \text{라돈 수준별 폐암사망위험율}^4) + \text{측정 지점별 근로자수} * \text{비흡연율} * \text{라돈 수준별 폐암사망위험율}$$

$$2. \text{측정지점별 근로자수} = \text{지하철역사 측정 수} * (\text{총 측정 지점 수} / \text{지하철 총 근로자 수}) + \text{터널 측정 수} * (\text{총 측정지점 수} / \text{지하철 총 근로자 수}) * 0.5^5) + \text{집수정 측정 수} * (\text{총 측정지점 수} / \text{지하철 총 근로자 수}) * 0.5$$

¹⁾ 전국 측정 총 지점수 4,643건
²⁾ 전철 및 지하철 실 근로자 수 총 25,114명(KOSTAT, 2019)
³⁾ 남성 흡연율 43.8%(KCDC, 2016)
⁴⁾ WHO 라돈농도에 따른 폐암으로 인한 사망 누적위험도
⁵⁾ 지하철 역사는 1일 8시간, 즉 1년 2,000시간 근무하고, 터널과 집수정의 경우 일일 근무시간은 지하철 운행이 종료되는 새벽 1시부터 개시되는 새벽 5시 중 총 4시간 근무

전국지하철 라돈에 의한 폐암사망자수는 0-100 Bq/m³ 미만에서 흡연자 620.9명, 비흡연자 32.3명으로 653.3명이었고, 100-200 Bq/m³ 미만 구간에서는 52.9명, 200-300 Bq/m³ 미만은 15.8명, 300-400 Bq/m³ 미만은

5.1명, 400-600 Bq/m³ 미만 3.6명, 600-800 Bq/m³ 미만 3.6명, 800 Bq/m³ 이상 1.1명이었다(Table 1).

2. 라돈 조치준위별 저감대책에 따른 추정위험 감소

라돈 조치준위별 저감대책에 따른 추정위험도 감소는 Table 2에 정리하였다.

저감대책 라돈 농도 측정, 환기, 유입원 차단, 보호구 착용 4가지는 라돈 노출수준에 따라 적합하게 적용할 수 있다. 먼저 라돈 위험 사업장으로 지정 되는 경우 라돈 농도 측정은 가장 기본적인 항목이다. 라돈 측정주기는 정해진 바가 없어 800 Bq/m³ 이상인 경우 1년 마다 1회 측정, 800 Bq/m³ 미만인 경우 2년마다 1회 측정하는 것으로 하였다. 라돈의 가장 먼저 적용한 저감대책은 환기이었으며, 두 번째 적용은 유입원 차단, 마지막으로 보호구 착용이었다.

환기는 지하철의 경우 자연환기가 어렵기 때문에 국소배기장치를 해야 한다. Park et al.(2000)의 연구에서는 환기시설이 급기와 배기가 모두 되는 경우 대합실은 급기만 돌린 경우 1.5 pCi/L에서 0.7 pCi/L로 저감된다고 하였다. 이를 Bq/m³로 변환하여 계산하면 1pCi/L는 37 Bq/m³에 해당하므로 55.5 Bq/m³에서 25.9 Bq/m³로 저감되어 53.3%가 저감된다. 환기시설이 도입되는 경우 라돈농도의 농도가 53.3%가 저감되는 것으로 적용하였다.

유입원 방지를 위해서 지하의 경우 고무덮개를 사용하는데, 이에 대한 효과를 측정한 연구는 없다. Jeon et al.(2011)의 연구에서 스크린도어 설치로 라돈이 56%의 감소를 나타낸다고 하여, 고무덮개도 차단

Table 1. Frequency and risk estimates by subway radon level concentration

Level (Bq/m ³)	Measuring position				M±S.D.	Estimated number of workers	Estimated number of smokers	Estimated number of non-smokers	Measuring position/1,000		Number of lung cancer death estimators		
	Subway Station	Tunnel	Drainage well	Total					Smoker	Non-Smoker	Smoker	Non-Smoker	Total
0-99.9	1,476(98.1)	1,323(84.6)	915(78.7)	3,714(87.8)	34.4±21.0	14,036.4	6,147.9	7,888.5	101	4.1	620.9	32.3	653.3
100-199.9	19(1.3)	186(11.9)	142(12.2)	347(8.2)	138.9±29.6	989.8	433.5	556.3	116	4.7	20.3	2.6	52.9
200-299.9	8(0.5)	45(2.9)	48(4.1)	101(2.4)	231.5±25.2	294.8	129.1	165.7	116	4.7	15.0	0.8	15.8
300-399.9	2(0.1)	6(0.4)	21(1.8)	29(0.7)	348.5±28.7	83.8	36.7	47.1	131	5.4	4.8	0.3	5.1
400-599.9	-	3(0.2)	15(1.3)	18(0.4)	482.0±52.8	48.7	21.3	27.4	160	6.7	3.4	0.2	3.6
600-799.9	-	1(0.1)	17(1.5)	18(0.4)	695.4±63.9	48.7	21.3	27.4	160	6.7	3.4	0.2	3.6
≤800	-	-	4(0.3)	4(0.1)	1,439.8 ±1,132.5	10.8	4.7	6.1	216	9.3	1.0	0.1	1.1
	1,505	1,564	1,162	4,231	57.5±118.1	15,513.0					698.8	36.5	735.3

Table 2. Decreased the number of lung cancer deaths due to reduction strategy by radon reference level

Reference Level	Bq/m ³	Position	Reduction Strategy*	M±S.D.	Decreased the number of lung cancer deaths
800	0-799.9				
	≤800	4	1,2,3,4	96.2±75.6	1.1
600	0-599.9				
	600-799.9	18	1,2	324.7±29.8	
	≤800	4	1,2,3,4	96.2±75.6	4.7
400	0-399.9				
	400-599.9	18	1,2	225.1±24.7	
	600-799.9	18	1,2	324.7±29.8	
	≤800	4	1,2,3,4	96.2±75.6	8.3
300	0-299.9				
	300-399.9	29	1,2	162.7±13.4	
	400-599.9	18	1,2	225.1±24.7	
	600-799.9	18	1,2,3	142.9±13.1	
	≤800	4	1,2,3,4	96.2±75.6	13.4
200	0-199.9				
	200-299.9	101	1,2	108.1±11.8	
	300-399.9	29	1,2	162.7±13.4	
	400-599.9	18	1,2,3	99.0±10.9	
	600-799.9	18	1,2,3	142.9±13.1	
	≤800	4	1,2,3,4,5 [†]	96.2±75.6	29.2
100	0-99.9				
	100-199.9	347	1,2	64.8±13.8	
	200-299.9	101	1,2,3	47.6±5.2	
	300-399.9	29	1,2,3	71.6±5.9	
	400-599.9	18	1,2,3,4	32.2±3.5	
	600-799.9	18	1,2,3,4	46.4±4.3	
	≤800	4	1,2,3,4,5 [‡]	96.2±75.6	82.1

*1= Measurement of Radon Concentration

2= Ventilation

3= Inbound blocking

4= Wearing protector

5= Working Limit

[†] Working Limit on 2 point

[‡] Working Limit on 3 point

의 효과도 동일하다고 보아 이를 적용하였다.

두 가지 저감대책으로도 참조수준 이하로 감소되지 않는 경우는 근로자에게 방진마스크 착용하도록 하였다. 라돈 노출 시 방진 마스크 사용으로 라돈 저감 효과를 측정하는 연구는 없다. Kim et al.(2001)의 연구에서는 유독가스용 방독마스크를 착용한 경우와 착용하

지 않은 경우 근로자의 톨루엔 요충마노산 배설이 1.51 g/L에서 0.49 g/L로 감소하여 67.5%의 저감 효과를 보았다는 연구가 있어 이를 적용하였다.

라돈 노출수준을 800 Bq/m³ 미만으로 지정하는 경우 800 Bq/m³ 이상이 되는 곳은 4곳이며, 저감대책으로는 환기, 라돈유입 방지, 보호구 착용 3가지가 적용

되어야 모든 구간이 800 Bq/m³ 미만으로 감소하며 평균 라돈은 96.2 Bq/m³이었다. 또한, 폐암사망추정 1.1명이 감소한다.

라돈 노출수준을 600 Bq/m³ 미만으로 지정하는 경우 600 Bq/m³ 이상이 되는 곳은 22곳이며, 저감대책은 구간별로 다르게 적용하였다. 즉, 600-800 Bq/m³ 미만의 경우 환기만 적용해도 노출수준 이하로 유지되며 평균 324.7 Bq/m³으로 유지되며, 폐암사망추정 4.7명이 감소된다.

라돈 노출수준을 400 Bq/m³ 미만으로 지정하는 경우 400 Bq/m³ 이상이 되는 곳은 40곳이며, 폐암사망추정 8.3명이 감소된다.

라돈 노출수준을 300 Bq/m³ 미만으로 유지하는 경우 폐암사망추정은 13.4명이 감소되며, 노출수준이 200 Bq/m³ 미만으로 유지하는 경우 29.2명, 100 Bq/m³ 미만으로 유지하는 경우 82.1명이 감소된다.

3. 비용편익 분석

1) 비용분석

라돈의 노출기준에 따라 관리에 대한 비용이 소요된다. 비용소요는 직접비용과 간접비용으로 구분하여 Table 3에 정리하였다.

라돈 직접 비용으로는 측정비용, 환기, 유입원 차단

을 위한 고무덮개, 특급 방진마스크, 필요 시 근무제한 비용을 구하였다. 측정비용은 2015년~2016년 지하철 라돈 측정 용역비를 계산하였다. 지하철 라돈 측정에 대한 용역비가 제시되어 있는 경우는 전체 3곳으로 3곳의 총 용역비 29,215,600원을 측정건수 568건으로 나누어 1건당 51,435원이 계산되었다. 이 비용에는 전체 측정건수의 중복시료 10%와 공시료 5%비용이 포함된 가격이다. 또한, 용역비에는 측정으로 소요되는 인건비가 포함되어 있어 측정비용에는 간접비용을 따로 산출하지 않았다.

환기시설 비용은 2015년~2016년 지하철 라돈 보고서 중 1개소에서 제시한 금액이 있어 이를 참고하였다. 6개 집수정에 국소배기장치 설치 및 공사비용은 73,000,000원이 소요가 되어, 1개에 12,166,167원으로 설정하였다. 이에 대하여 산업용전력 고압A를 요금적용전력 20 KW로 한 달 300 kWh를 사용하였을 때 한국전력공사에서 2016년 1년간 제시한 총 금액은 2,097,040원이었다 (KEPCO, 2019).

유입원 차단에 대하여 일개 지하철 라돈 보고서에서 6개 집수정에 비닐 및 고무덮개를 재시공한 소요 금액이 2,000,000원으로 제시되어 있어 1개 집수정에 유입원 차단 비용은 333,333원으로 계산하였다. 용역비로 소요한 금액으로 인건비가 포함되어 있어 간접

Table 3. Costs for measures to reduce radon and expenses for lung cancer deaths by Unit (Unit:₩)

Category	Details	1 person or 1ea	Basis of calculation	Total			
Cost	1. Measurement	Cost for measurement*	51,435	1time/1yrs/1point	51,435		
	2. Ventilation	Ventilation facility	12,166,167	1ea/1point	12,166,167		
	Direct	3. Inbound blocking	Rubber cover*	333,333	1time/1yrs/1point	333,333	
		4. Wearing protector	Dustproof Mask (60ea/1yrs)	240,000	5.4인/1yrs/1point	1,296,000	
	Indirect	Education	1 Educator	100,000	1time, 1hour/1yrs	100,000	
		1. Electric costs in ventilation		2,097,040	1year/1point	2,097,040	
		2. Reduced productivity due to training (1hour)		21,372	5.4per/1yrs/1point	115,408	
		3. Reduced productivity due to work restrictions (4hours/1day)		85,488	5.4per/20days /1yrs/1point	9,232,704	
	Benefit	Direct	1. Medical	Admission 1time	2,696,887	3.4times/1yrs	9,169,416
				Outpatient 1time	201,594	11times/1yrs	2,217,534
Indirect		2. Funeral	1time	12,143,275	1times	12,143,275	
		3. Survivor's pension		17,367,557	1per/1yrs	17,367,557	
		1. Productivity loss		43,684,054	1yrs	43,684,054	
		2. Loss of protector productivity		4,355,287	43.3days/1yrs	4,355,287	

* Costs include direct and indirect costs

비용을 따로 산출하지 않았다.

보호구 착용에 대한 비용은 지하철 라돈 용역보고서에서 보호구 1급은 1개 2,000원, 2급은 1천원, 특급은 4천원으로 1인당 1년 1주일에 1개씩 60개를 지급한 것으로 적용하였다. 1개 지점에 근로자 수는 측정 지점수 4,643건에 대해 지하철 근로자 25,114명으로 나누어 5.4명이었다. 보호구를 착용하는 경우 근로자에 대해 라돈 교육을 동시에 실시하는 것으로 하여 교육 강사 1년에 1시간 교육으로 강사 1인당 100,000원 지급과 간접비용으로 교육으로 인한 생산성 감소 비용을 적용하였다. KOSTAT(2019)에서 제시한 도시철도 운송업 정비공 급여액을 기준으로 11,947명의 정비공이 총 745,562,000,000원을 지급받아 1인 62,405,792원을 받는다. 이를 365일로 나누어 1일 급여액을 계산하고, 다시 8시간으로 나누어 1시간 급여를 계산하였다. 즉, 1시간 급여는 21,372원이다. 교육시간을 1시간으로 하여 5.4명이 1년 1회 교육비는 115,408원으로 하였다.

라돈 농도가 높은 경우 환기, 유입원 차단 등으로 라돈 저감이 된 후 근무하는 것으로 하여 저감될 때까지 저감은 최대 한 달 20일 동안 일시적 근무제한으로 하여 1일 4시간(지하철 운행 새벽 1시-새벽 5시 제한) 85,488원이 5.4인으로 20일 9,232,704원이 생산성 감소 비용으로 계산되었다.

2) 편익분석

라돈의 노출기준에 따라 관리되는 편익이 발생한다. 편익은 직접편익과 간접편익으로 구분하여 Table 3에 정리하였다.

직접편익은 폐암 발생부터 사망까지 이르는 동안의 진료에 소요되는 비용감소를 들 수 있다. 폐암진단으로 인한 진료비용과 사망 시에 산재보험으로 적용받는 장의비, 유족급여를 직접편익으로 하였으며, 간접편익으로는 치료를 받기 위한 생산성 하락, 외래 이용 시 보호자 시간비용을 적용하였다.

라돈으로 인한 폐암 진단 시 입원환자와 통원환자에 대한 진료비를 받을 수 있다. 2016년 건강보험심사평가원에 따르면 폐암의 경우 1년 3.4회 입원을 하며, 1회 입원일수는 9.5일이었다. 즉, 1년 폐암으로 인하여 32.3일을 입원하는 것이다. 또한, 1년 동안 외래 방문 횟수는 평균 11.0회이었다. 폐암으로 1회 입원비용은 2,696,887원이었으며, 1회 외래비용은 201,594원이었다(Ministry of Health and Welfare[MoHW], 2017).

이를 1년에 지급한 비용은 입원회수×1회 입원비용은 9,169,416원이고, 외래방문횟수×1회 외래방문비용은 2,217,534원이다.

폐암으로 인한 사망으로 인하여 받는 장의비는 2016년 2,052명에게 24,918,000,000원을 지급하여 1인당 12,143,275원이 지급되었다.

산재보험에서 유족급여는 연금으로 지급하는 것이 원칙으로 2016년 유족연금은 25,418명에게 441,448,551,510원이 지급되어 수급자 1인당 1년에 17,367,557원이 지급되었다.

간접편익은 일을 할 수 있는 근로자의 생산성 손실 감소로 폐암을 진단받은 근로자가 입원과 외래 방문으로 인하여 업무를 수행하지 못하는 것이다. 산재보험에서는 요양으로 인하여 업무를 하지 못하는 경우 평균임금의 70%를 휴업급여로 지급하도록 되어있다. 폐암을 진단 받는 경우 1년 생존 시 근무를 하지 못하는 것으로 보고 지하철 근로자의 1년 평균 급여 62,405,792원 중 70%를 생산성 손실감소로 적용하였다. 또한, 폐암 입원과 외래방문 시 보호자가 동반되는 것으로 가정하여 보호자의 업무를 수행하지 못하는 것으로 보고 입원일 32.3일과 외래 11일을 보호자 생산성 손실 비용으로 보았다. 지하철 근로자가 대부분 남성이라는 것을 가정할 때, 보호자는 대부분 여성으로 가정하여 2016년 여성의 시간당 임금은 12,573원으로 이를 8시간 근무 43.3일이 손실되어 4,355,287원이 손실된다.

3) 비용편익분석

라돈 농도 저감대책으로 10년간 유지하였을 때 편익이 발생하는 것으로 하여 라돈 노출 기준에 대한 비용편익을 Table 4에 정리하였다.

비용은 참조준위별로 저감대책이 필요한 지하철 지점 수와 참조준위 미만으로 감소시키기 위한 방안의 개수를 구하여 비용을 계산하였다.

800 Bq/m³ 미만의 참조준위의 경우 800 Bq/m³이상의 지점 수는 4곳이고, 저감을 위한 직접비용은 1년에 1회 라돈측정, 환기시설 1회/10년, 유입원 차단 1회/10년, 보호구 착용 20일/1년×10년 및 교육 1회×10년이 필요하다. 간접비용으로는 환기시설 가동으로 인한 전기세 10년, 보호구 착용에 따르는 근로자에게 라돈관련 1시간 교육으로 생산성 손실 10년으로 4개 지점 라돈의 800 Bq/m³미만 유지에 필요한 비용은 196,393,320원이다.

Table 4. Costs and benefits of reduction strategy by radon reference levels

Level	Category	Cost						Benefit			
		100-199.9	200-299.9	300-399.9	400-599.9	600-799.9	≤800	Total	Category	Total	
800	Strategy						1,2,3,4				
	Point						4	Number	1.1		
	Direct						107,895,400	Direct	229,452,019		
	Indirect						88,497,920	196,393,320	Indirect	105,686,550	335,138,569
600	Strategy					1,2	1,2,3,4				
	Point					18	4	Number	4.7		
	Direct					223,620,156	107,895,400	Direct	980,385,900		
	Indirect					377,467,200	88,497,920	797,480,676	Indirect	451,569,805	1,431,955,705
400	Strategy				1,2	1,2	1,2,3,4				
	Point				18	18	4	Number	8.3		
	Direct				223,620,156	223,620,156	107,895,400	Direct	1,731,319,780		
	Indirect				377,467,200	377,467,200	88,497,920	1,398,568,032	Indirect	797,453,061	2,528,772,841
300	Strategy			1,2	1,2	1,2,3	1,2,3,4				
	Point			29	18	18	4	Number	13.4		
	Direct			360,276,918	223,620,156	229,620,150	107,895,400	Direct	2,795,142,778		
	Indirect			608,141,600	377,467,200	377,467,200	88,497,920	2,372,983,544	Indirect	1,287,454,339	4,082,597,116
200	Strategy		1,2	1,2	1,2,3	1,2,3	1,2,3,4,5*				
	Point		101	29	18	18	4	Number	29.2		
	Direct		1,254,757,542	360,276,918	229,620,150	229,620,150	107,895,400	Direct	6,090,908,142		
	Indirect		2,118,010,400	608,141,600	377,467,200	377,467,200	106,963,328	5,770,219,888	Indirect	2,805,497,514	8,896,405,657
100	Strategy		1,2	1,2,3	1,2,3,4	1,2,3,4	1,2,3,4,5†				
	Point		347	101	29	18	18	4	Number	82.1	
	Direct		4,310,899,674	1,288,424,175	369,943,575	480,900,150	480,900,150	107,895,400	Direct	17,125,464,3321	
	Indirect		7,276,728,800	2,118,010,400	608,141,600	398,240,640	398,240,640	106,963,328	17,945,288,532	Indirect	7,888,059,792

* Working Limit on 2 point
 † Working Limit on 3 point

참조준위가 600 Bq/m³미만을 유지하기 위한 10년 비용은 797,480,676원이고, 400 Bq/m³미만은 1,398,568,032원, 300 Bq/m³미만은 2,372,983,544원, 200 Bq/m³미만은 5,770,219,888원, 100 Bq/m³미만은 17,945,288,532원이 필요하다.

KCDC(2017)에서는 폐암의 경우 남성 1년 생존이 44.5%, 2년 27.8%, 3년 21.7%, 4년 18.8%, 5년 17.2%, 10년 13.7%이라고 하였다. 폐암 진단 후 72.2%는 2년 이내에 사망하고, 5년 이내는 82.8%가 사망하는 것이다.

800 Bq/m³ 미만의 참조준위의 경우 800 Bq/m³이상의 지점 수는 4곳에 폐암 사망 자 1.1명이 감소된다고 보고 이에 대한 진료비, 생산성 손실감소, 보호자 시간 비용이 2년간 감소되고, 사망으로 인한 장의비는 1회 지급되는 것으로 하였다. 또한, 우리나라 2016년 기대여명은 82.4세로 폐암사망이 52세인 경우 유족연금은 30년이 지급되나 본 연구에서는 10년이 지급되는 것

로 계산하였다. 800 Bq/m³ 미만으로 라돈을 관리하는 경우 편익은 335,138,569원이다. 참조준위가 600 Bq/m³ 미만을 유지하게 되는 경우 편익은 1,431,955,705원이고, 400 Bq/m³미만은 2,528,772,841원, 300 Bq/m³미만은 4,082,597,116원, 200 Bq/m³미만은 8,896,405,657원, 100 Bq/m³미만은 25,013,524,124원의 편익이 된다.

참조준위별 비용편익에 대한 순편익과 편익/비용비는 Table 5에 정리하였다.

참조준위가 800 Bq/m³ 미만인 경우 비용은 196,393,320원 편익은 335,138,569원으로 순편익은 138,745,249원이고, 편익/비용비는 1.71이다. 참조준위가 600 Bq/m³ 미만인 경우 순편익은 634,475,029원이고, 편익/비용비는 1.80이며, 참조준위가 400 Bq/m³ 미만인 경우 순편익은 1,130,204,809원이고, 편익/비용비는 1.81이다. 참조준위가 300 Bq/m³ 미만인 경우는 편익/비용비는 1.72이고, 200 Bq/m³ 미만은 1.54, 100 Bq/m³ 미만은 1.40이었다.

Table 5. Net benefit and benefit/cost by radon reference level

(Unit: Won)

Reference Level	Cost	Benefit	Net benefit (Benefit-Cost)	Benefit/Cost
800	196,393,320	335,138,569	138,745,249	1.71
600	797,480,676	1,431,955,705	634,475,029	1.80
400	1,398,568,032	2,528,772,841	1,130,204,809	1.81
300	2,372,983,544	4,082,597,116	1,709,613,572	1.72
200	5,770,219,888	8,896,405,657	3,126,185,769	1.54
100	17,945,288,532	25,013,524,124	7,068,235,592	1.40

IV. 고 찰

본 연구는 전국 지하철 라돈 측정 자료를 이용하여 사업장에서 라돈의 참조준위에 따른 경제성 평가를 수행하였다.

본 연구 결과 라돈에 참조준위별로 가장 높은 편익/비용은 400 Bq/m³, 600 Bq/m³에서 1.81, 1.80이었다. 즉, 사업장에서 라돈의 농도를 400 Bq/m³ 미만으로 유지할 때 저감대책으로 소요되는 비용보다 편익이 1.81배 더 크다는 것을 의미한다.

Gray et al.(2009)의 연구에서는 라돈 농도에 대한 적절한 조치를 취하는 경우 삶의 질 보정 생존연수(Quality Adjusted Life year, QALYs)당 얻을 수 있는 비용이 £11,200 비용(원화 약 16백만원)이 경제적 이득으로 적극적인 라돈 관리방안 및 저감대책이 중요하다 하여 본 연구결과와 일치하였다.

Shin et al.(2014)의 연구에서도 실내 라돈 농도의 기준치를 10.8 pCi/L에서 4 pCi/L까지 강화하고, 모든 주택에 기준을 적용하였을 때 초과폐암사망자수는 691명/년에서 1,016명/년 감소하고, 편익은 792억 원/년에서 6,238억 원/년으로 증가하였다. 즉, 400 Bq/m³에서 148 Bq/m³으로 기준치를 강화하였을 때 폐암사망자수와 순 편익이 크게 증가하였다. 기준치가 본 연구에서 보다 낮은 이유는 대상을 전 연령대로 구분하여 실내에 머무는 시간을 하루 최소 12.8시간에서 최대 24시간으로 규정하였고, 본 연구에서는 성인 남자 근로자의 지하에서 근무하는 시간을 최소 4시간에서 8시간까지로 규정하여 노출량이 달라지기 때문이다.

본 연구에서 참조준위별 저감대책은 라돈의 농도 측정, 발생원 차단, 환기, 호흡보호구 착용, 정보제공을 고려하였다. 환기의 경우 Park et al.(2000)의 연구를 근거로 라돈농도가 53.3%가 감소된다고 하였는데, 본 연

구 데이터에서 349.1 Bq/m³ 측정된 지점에서 환기량을 늘린 경우 1달 후 62.9 Bq/m³로 82.0% 감소되어 환기로 인한 라돈 저감은 적정하다고 볼 수 있다. 유입원 차단 56%, 마스크 차단 67.5%의 저감은 이 중 1-2가지 방법을 사용해도 200 Bq/m³ 이하로 감소되나 본 연구에서 4,643건 중 2건이 3,000 Bq/m³ 이상 측정되어 3가지 이상까지 저감대책의 적용이 필요하였다. 우리나라에서 시행된 기존 연구는 지하철(Jeon, & Kim, 2006; Jeon et al., 2007; Jeon et al., 2012), 지하상가(Kong, & Kim, 2016), 제조업(Chung, 2015)에서는 모두 148 Bq/m³ 이하이었으나, Jeon et al.(2007)의 연구에서는 일부 지하철 집수정에서 207.1 pCi/L를 나타내어 본 연구의 결과와 비슷한 결과를 나타내었다. Baek et al.(2006)은 일부 지역에서 라돈농도가 높게 나타나는 이유는 지역의 기반암이 대보화강암이어서 우라늄 함량이 높은 지역의 영향이라고 하였다. 국내 라돈 연구에서는 일부 지역(Ko et al., 2013)과 건축자재에서 라돈 방출이 높게 나타났다는(Kim et al., 2014). 이러한 특성이 근로자의 라돈 노출로 바로 연결이 되는 것은 아니나 현재 우리나라의 라돈 고위험 사업장 실태 파악 시 기초자료가 될 것으로 보인다.

라돈의 농도는 지역, 시간, 계절의 영향을 받는데, Jeon et al.(2007)의 연구에서는 계절의 변화와 시간의 영향을 받는데, 계절의 변화는 0.6 pCi/L를 넘지 않으며, 시간은 환기의 영향을 보인다고 하였다. 본 연구에서 지하철 역사의 경우 터널 및 집수정보다 낮게 나타났는데, 서울 지하철의 경우 2009년부터 4년 동안 스크린 도어를 설치하여 터널 내부에서 오는 라돈을 차단한 후 측정결과이기 때문이다(Jeon et al., 2012). 스크린도어 설치 후에도 지하철 역사에서 높게 나타나는 이유는 스크린 도어 개폐 시 터널에서 오는 라돈의 효과라고 하여 고농도 출현한 지하철 역에 대해서는 역사의 특성

을 고려한 개선방안이 필요하다고 하였다. 즉, 높은 라돈 농도를 보이는 터널과 집수정의 라돈 저감은 근로자 뿐만 아니라 지하철을 이용하는 국민 전체에 건강에도 긍정적 영향을 미친다는 것이다.

라돈에 대한 건강영향은 WHO와 EPA에서는 흡연자와 비흡연자를 구분하여 폐암사망위험도를 제시하고 있다. ICRP에서는 광부에 대한 역학연구를 통합 분석하여 위험모델을 제시하였는데, 생애초과절대위험 2.8×10^{-4} /WLM을 넘지 않도록 하였다(ICRP, 1993). 1 WLM(working level month)은 1WL(200 pCi/L)의 농도에서 170시간 노출되는 것을 말하며, 생애절대초과 위험이란 한 개인에게 주어진 연령까지 누적위험으로 방사선노출이 넘지 않도록 하는 것이다. 2011년 도시철도공사에서 근무하던 근로자가 원발성 폐암으로 사망하였는데, 라돈에 의한 업무상 질병으로 인정되었다. 이는 근로자가 15년간 지하철이 운행되지 않는 심야에 배수펌프장과 환기실에서 근무하여 환기가 제대로 이루어지지 않아 라돈 노출에 의한 것으로 보았기 때문이다.

Oh et al.(2011)의 연구에서는 라돈 노출로 인하여 폐암 외 백혈병, 임파종, 다발성골수종이 증가하고, 다발성경화증이 라돈 농도와 관련성이 있을 수 있지만 아직 일관된 연구결과는 아니라고 하였다. 이들 건강문제의 유병률은 폐암 유병률에 비하여 낮기 때문에 대규모 연구로 지속적인 연구가 되어야 상관성이 나타날 것이나, 라돈이 폐암 뿐 아니라 다른 건강문제에도 영향을 미치는 것을 배제할 수는 없다. 본 연구에서 나타난 지하철 측정 지점의 라돈 수치는 48시간 단기간 측정과 90일 이상 장기간 측정이 혼재되어 있으며, 측정기간의 평균으로 제시된 수치이다. 라돈은 현재 개인노출 측정방법이 없으므로 관심지역에 대해서 심야 및 주간시간을 포함하여 측정한 공기 중 평균라돈농도이다. 그러므로 실제노출은 작업 상황에 따라 달라질 수 있으며, 심야시간에 근무하는 지하철 시설 설비보수 근로자의 경우 라돈 노출 농도가 현재 노출 추정치보다 더 높아질 것으로 추정된다. Kwak et al.(2015)은 지하철 설비 유지보수 근로자는 지하철 운행이 종료된 심야시간에 근무하기 때문에 일반인에 비하여 라돈 고농도에 노출이 되며, 직무에서도 비상 시적으로 다른 위험요인이 가중되어 실제 누적노출량과 유효선량은 더 높을 것으로 추정한다고 하였다.

라돈에서의 다른 건강 영향 및 근로자가 접하는 다

른 유해인자와 라돈이 건강위해에 가중될 것으로 예상되는 부분에 보면 본 연구에서의 라돈 폐암 위험 추정 감소에 대한 편익은 최소한으로 구성되어 있다. 또한, 본 연구에서 이용한 지하철 라돈 측정은 600 Bq/m^3 이상 측정 지점이 많지 않고, 근무시간 설정도 1일 4시간, 주 5일 20시간으로 설정하고 있어서, 터널 공사 및 라돈 농도가 높은 지역의 건설업 근로자의 경우 라돈 노출 농도는 더 높아질 가능성이 있어 실제 편익은 더 증가할 것으로 보인다. 라돈의 참조준위가 낮아질수록 순편익이 증가하여 600 Bq/m^3 미만에서도 사업장 관리가 필요하다고 할 수 있겠다.

본 연구의 제한점으로는 규제에 따른 효과는 불확실하다는 것이다. 또한, 폐암으로 인한 사망 발생 기간도 개인마다 다르다. WHO에서는 폐암에 걸릴 위험 기간을 평생으로 설정하였는데 라돈 유효선량이 고려된 것이다. 본 연구에서 지하철 근로자는 야간 4시간만 라돈에 노출되는 것으로 설정하였으나, 주간에도 실내 라돈에 노출되어 있으므로 라돈 유효선량 파악이 어려운 부분이 있어 위험도의 기간은 10년으로 설정하였다.

따라서 이러한 불확실한 상황을 인정하고 의사결정에 이를 성실히 반영하도록 불확실성의 정도와 각각의 내용을 비교적 상세히 기술하려고 노력하였다. 그럼에도 불구하고 규제에 따른 준수율 등과 같은 문제, 라돈에 노출될 수 있는 다양한 작업과 전체 노동자가 아닌 지하철에서 근무하는 노동자들에 대한 라돈 노출자료만을 토대로 비용편익분석을 할 수밖에 없었던 점과 어느 정도 주관적인 입장에서 비용 및 편익의 내용을 결정한 분석으로 나타날 수 있는 편차를 간과할 수 없다. 그래서 본 연구에서는 해당 분야 전문가 뿐만 아니라 노·사·정 등 실무자들의 의견을 수렴하여 분석의 정확도를 높이려는 노력을 실시하였다.

이러한 제한점에도 불구하고 본 연구는 근로자의 라돈 노출에 대한 노출기준 뿐 아니라 참조준위로 저감대책의 중요성을 제시하는 기초데이터로서 중요한 의미를 지닌다고 생각된다.

V. 결 론

본 연구는 전국 지하철 라돈 측정 자료를 이용하여 사업장의 라돈 참조준위를 800 Bq/m^3 , 600 Bq/m^3 , 400 Bq/m^3 , 300 Bq/m^3 , 200 Bq/m^3 , 100 Bq/m^3 으로 하

여 경제성 평가를 수행한 것이다.

본 연구결과 참조준위 중 편익/비용비가 가장 높은 것은 400 Bq/m³이 1.81으로 가장 높았고, 다음은 600 Bq/m³은 1.80이었다. 800 Bq/m³의 경우 1.71이었으며, 300 Bq/m³은 1.72, 200 Bq/m³은 1.54, 100 Bq/m³은 1.40이었다. 순편익은 800 Bq/m³의 경우 138,745,249 원이었으며, 참조준위가 낮아질수록 순편익이 증가하여 100 Bq/m³에서는 순편익이 7,068,235,592 원이었다.

본 연구결과를 통해 사업장의 라돈 관리는 경제적 편익을 제공하므로 적절한 저감조치가 필요하다 하겠다. 또한, 라돈 노출평가 및 노출기준 초과 시 사업주의 안전보건상의 조치사항 등에 관한 제도와 작업장에서 라돈 노출관리를 위한 지침을 마련하여 보급하는 것이 필요하다.

References

- Baek SA, Lee TJ, Kim DS. Spatial distribution analysis of radon concentration in seoul using GIS. J Environ Health Sci Proceeding of the 41st Meeting of KOSAE 2006. p. 432-433
- Chung EK, Jang JK, Kim KB, Park HD, Song SW. A study for occupational exposure and OELs of radon. Korea Occupational Safety & Health Agency Report 2015
- Environmental Protection Agency(EPA). EPA assessment of risks from radon in homes. Office of Radiation and Indoor Air United States Environmental Protection Agency Washington, DC 20460. 2003
- Gray A, Read S, McGale P, Darby S. Lung cancer deaths from indoor radon and the cost effectiveness and potential of policies to reduce them. BMJ 2009; 338:a3110, <http://dx.doi:10.1136/bmj.a3110>
- Jeon JS, Kim DC. Distribution of 222 Rn concentration in seoul subway stations. J Korean Soc Environ Eng 2006; 28(6):588-595
- Jeon JS, Kim DC, Lee JY. Temporal variations and sources of 222 Rn in subway stations. J Korean Soc Environ Eng 2007;29(11):1231-1242
- Jeon JS, Yoon JC, Lee HC, Eom SW, Chae YZ. A noticeable change in indoor radon levels after platform screen doors installation in seoul subway station. J Korean Soc Atmos Environ 2012;28(1):59-67. <http://dx.doi:10.5572/KOSAE.2012.28.1.059>
- Health and Safty Executive(HSE). Radon in the workplace. [cited 2019 February 05]. Available from: <http://www.hse.gov.uk/radiation/ionising/radon.htm>
- Tiefenbach W, Hughes G, Rodgerson C, Chen J, Theriault B et al. Canadian Guidelines for the Management of Naturally Occurring Radioactive Materials(NORM). Health Canada. : The Canadian NORM Working Group of the Federal Provincial Territorial Radiation Protection Committee. 2011
- Health Insurance Review & Assessment Service. Medical Statistics Index for 2016 Available from: <https://www.hira.or.kr/bbsDummy.do?pgmid=HIRAA02004503000&brdScnBltno=4&brdBltNo=2381&pageIndex=1#none>
- International Commission on Radiological Protection(ICRP). Protection against radon-222 at home and at work. ICRP Publication 65. Ann ICRP 1993;23(2)
- Kim BS, Park CY, Yim HW, Kim HA, Oh SY. Effects of respirator use evaluated by urinary hippuric acid concentration in toluene-exposed workers. Ann Occup Environ Med 2001;13(4):461-469
- Kim CB, Ju YJ, Dong KR. The concentration measurement of radon/thoron radiated from construction materials. J of Advanced Engineering and Technology 2014;7(3): 143-148
- Kim DI. Assessment of health effects due to asbestos exposure in Seoul Metro workers. Korea Occupational Safety & Health Agency Report 2007
- Kim DK. Cost benefit analysis(4th). Seoul:Pakyoungsa 2012
- Ko HJ, Sin SH, Hu CG, Kim WH, Kang CH et al. Time-series variation of atmospheric radon concentrations at gosan site, Jeju Island. J. KOSAE 2013;29(1):86-96, <http://dx.doi/10.5572/KOSAE.2013.29.1.86>
- Kong JS, Kim Y. Indoor radon risk assessment by applying measurement concentrations and exposure times for military facilities and underground shopping malls near subway stations. J Environ Health Sci 2016;42(5): 345-351,<http://dx.doi/10.5668/JEHS.2016.42.5.345>
- Korea Centers for Disease Control and Prevention(KCDC). 2015 Health Behavior and Chronic Disease Statistics. 2017
- Korea Electric Power Corporation(KEPCO). Electricity bill calculator. [serial online] 2015 [cited 2019 February 06]; Available from: <http://cyber.kepco.co.kr/ckepco/front/jsp/CY/J/A/CYJAPP000.jsp>
- Korea Law Information Center. Enforcement decree of the industrial accident compensation insurance act (No. 29354). Ministry of Government Legislation 2019
- Korea Occupational Safety and Health Agency. Guide to protecting workers' health from radon. 2015-H-428
- Kwak HS, Kim BW, Lee KM, Choi BS, Park DY et al. Estimation of cumulative exposure of radon in subway facility maintenance workers. Proceeding of the 55th

- Meeting of Korean J Occup Environ Med 2015:345-346
Korea Institute of Nuclear Safety(KINS). Surrounding radiation information service: Act on Protective Action Guidelines against Radiation in the Natural Environmen. Available from: <http://cisran.kins.re.kr/law/krContent.do>
- Ministry of Employment and Labor(MoEL). Workers' compensation insurance book in 2016. 2017
- Ministry of Employment and Labor(MoEL). Salary and working hours by type of employment. Available from: <http://laborstat.moel.go.kr>
- Ministry of Health and Welfare(MOHW). Annual report of cancer statistics in Korea in 2015. 2017
- Oh SS, Koh SB, Yong SJ. Radon and environmental diseases. J Korean Med Assoc 2011;55(3):223-229, <http://dx.doi/10.5124/jkma.2012.55.3.223>
- Park DS, Jung WS, & Jung BC. Influence of Ventilation on the Subway Radon Level. JKSR 2000;3(2):97-102
- Public notice of the Ministry of Employment and Labor. Exposure limit for chemical substances and physical factors. Ministry of Employment and Labor 2018
- Shin Y, Lim J, Kim SD, Cho SK. Estimation of the risk reduction and health benefit of regulating radon level in indoor air quality. Korea Environment Institute Report 2014
- Statistics Korea(KOSTAT). Salary based on industry / worker Size / job type [serial online] 2015 [cited 2019 February 05]; Available from: http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1I90011
- Statistics Korea(KOSTAT). 24 carcinomas / timing of cancer development / 5 year relative survival by sex.. [serial online] 2016 [cited 2019 February 07]; Available from: http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=117&tblId=DT_117N_A00021&conn_path=I3
- Wilkening M. Radon, 2nd ed. (Jun JS, Seo YM Trans). Gyeonggi;Yeamoonsa. 2014/2016
- World Health Organization(WHO). WHO Handbook on Indoor Radon. WHO Press. Geneva; 2009.p.1-94

<저자정보>

최은희(교수), 정은교(연구위원), 김수근(교수), 정명희(교수)