

KOSHA GUIDE

H - 127 - 2019

라돈 노출 근로자의 암 예방지침

2019. 10

한국산업안전보건공단

안전보건기술지침의 개요

- 작성자 : 성균관대학교 의과대학 직업환경의학과 김수근
- 개정자 : 한국산업안전보건공단 사업기획본부 산업보건부

- 제·개정 경과
 - 2013년 11월 산업보건관리분야 제정위원회 심의(제정)
 - 2019년 9월 산업보건일반분야 제정위원회 심의(개정)

- 관련규격 및 자료
 - IARC(2012) Internalized α -Particle Emitting Radionuclides. In: IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risk to humans. Radiation. IARC monographs, Vol. 100D. Lyon, France: World Health Organization. International Agency for Research on Cancer, 241-283
 - ICRP Publication 115. Lung Cancer Risk from Radon and Progeny, 이재기 역. ICRP 간행물 115 라돈과 자핵종에 의한 폐암위험. 대한방사선 방어학회, 2011
 - 한국산업안전공단 산업안전보건연구원. 근로자 건강진단 실무지침: 제3권 유해인자별 건강장해, 물리적인자-3 전리방사선. 보건분야-기술자료 연구원 2010-107-955
 - KOSHA GUIDE W-1-2019, 산업환기설비에 관한 기술지침
 - KOSHA GUIDE H-62-2012 전리방사선 노출 근로자 건강관리지침

- 관련법규·규칙·고시 등
 - 산업안전보건법 제24조(보건조치)
 - 산업안전보건법 제39조(유해인자의 관리 등)
 - 산업안전보건법 제43조(건강진단)
 - 산업안전보건기준에 관한 규칙 제3편 제7장(방사선에 의한 건강장해의 예방)

- 기술지침의 적용 및 문의

이 기술지침에 대한 의견 또는 문의는 한국산업안전보건공단 홈 페이지 안전보건기술지침 소관 분야별 문의처 안내를 참고하시기 바랍니다.

공표일자 : 2019년 10월 1일

제 정 자 : 한국산업안전보건공단 이사장

라돈 노출 근로자의 암 예방지침

1. 목 적

이 지침은 산업안전보건법(이하 “법”이라 한다) 제24조(보건조치), 제 39조(유해 인자의 관리 등) 및 산업안전보건기준에 관한 규칙(이하 “안전보건규칙”이라 한다) 제3편(보건기준) 제7장(방사선에 의한 건강장해의 예방)의 규정에 의하여 작업장에서 라돈을 취급하거나 노출되는 근로자의 암 발생을 예방하기 위한 기술적인 사항을 정하는 것을 목적으로 한다.

2. 적용범위

이 지침은 라돈에 노출되는 사업장에 적용한다.

3. 용어의 정의

(1) 이 지침에서 사용하는 용어의 정의는 다음과 같다.

(가) “발암물질”이란 암을 일으키거나 그 발생을 증가시키는 물질이다.

(나) “베크렐(Bq)”이란 방사선 양의 국제단위(SI)로, 1 Bq은 1초 동안 하나의 방사성 붕괴가 일어나는 양이며, “퀴리(Ci)”란 방사능을 나타내는 단위로 1Ci는 1g의 라듐(^{226}Ra , $t_{1/2}=1600\text{년}$)이 1초 동안 붕괴할 때 나오는 방사선 양으로 3.7×10^{10} 개/초의 원자가 붕괴할 때 나오는 방사선 양과 같다. 따라서 $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ 이다. 공기 중의 라돈 농도는 Bq/m^3 나 pCi/L 로 표시하며, 1 pCi/L 는 37 Bq/m^3 에 해당한다.

(다) “작업수준월(working level month)”이란 라돈의 피폭량을 나타내는 단위이다. 1 WL은 라돈-222와 그 자핵종이 평형을 이루는 상태의 방사선 양인 200 pCi/L 에 해당되며, 누적 노출량으로서 1WL의 농도에서 170시간 노출된 경우를 1WLM (working level month)이라 한다.

(라) “시버트(Sv)”란 방사선이 살아있는 조직에 대한 영향이 방사선의 종류에 따라 다른 것을 참작하기 위하여 그레이(Gy)로 표시하는 방사선의 흡수선량에 방사선의 종류에 따른 가중계수를 곱한 방사선의 단위로 등가성량이라고 하며, 1 Sv는 1000 mSv와 같다.

(2) 그 밖에 이 지침에서 사용하는 용어의 정의는 이 지침에 특별한 규정이 있는 경우를 제외하고는 산업안전보건법, 같은 법 시행령, 같은 법 시행규칙, 산업안전보건기준에 관한 규칙 및 관련 고시에서 정하는 바에 의한다.

4. 라돈의 물리화학적 특성

(1) 라돈은 지각을 구성하는 암석이나 토양 중에 천연적으로 존재하는 우라늄(^{238}U)과 토륨(^{232}Th)의 방사성 붕괴에 의해서 만들어진 라듐(^{226}Ra)이 붕괴했을 때에 생성되는 가스이다.

(2) 라돈은 반감기가 3.8일의 희유가스 원소로 지하공간은 물론 우리의 생활 공간의 어디에도 존재하는 무색, 무미, 무취의 방사능을 띤 불활성 기체이다.

(3) 라돈과 그 동위원소들은 모두 α 붕괴를 하여 폴로늄(Po)이 되고, 최종적으로는 납(Pb) 동위원소가 되는데, 중간 생성물로 여러 방사성 동위원소들이 생긴다. 동위원소들은 반감기가 짧기 곧 바로 붕괴되기 때문에 반감기가 긴 ^{222}Rn 가 월등하게 높은 농도로 존재한다.

(4) 원자번호 86번의 원소 라돈(radon, Rn)은 강한 방사선을 내는 비활성 기체 원소로, 자연에 존재하는 라돈은 거의 전적으로 질량수가 222인 ^{222}Rn 이며, 물리화학적 특성은 다음 <표 1>과 같다.

<표 1> 라돈의 물리화학적 특성

항목	내용
화학식	Rn
원자량	222
상태	색, 냄새, 맛이 없는 방사성 기체
밀도	9.73 g/L(공기보다 약 8배 무겁다.)
녹는점	-71.15 °C(1기압)
끓는점	-61.85 °C(1기압)
용해도	물에 약간 녹고, 유기용매에는 보다 잘 녹는다.
반응성	화학 반응성은 거의 없으나, 산화력이 큰 원소들과의 화합물 몇 가지가 알려져 있다. 가장 잘 알려진 라돈 화합물은 플루오르화물인데, 1962년에 라돈과 플루오린(F ₂)과의 반응에서 고체로 얻어졌으며 방사성 붕괴에 의해 노랑색 빛을 낸다.
주요 동위원소	²¹⁰ Rn(합성), ²¹¹ Rn(합성), ²¹⁹ Rn, ²²⁰ Rn, ²²³ Rn, ²²⁶ Rn

5. 라돈노출

- (1) 라돈은 인간에 피폭되는 총 방사선피폭 중에 단일 피폭원으로는 가장 크다. 한 사람 당 연간 자연방사선 피폭량은 2.4 mSv이며, 라돈이 50% 이상으로 1.3 mSv이다.
- (2) 라돈은 분진에 붙어서 공기 중으로 이동할 수 있고, 사람의 일상생활 환경 즉, 공기, 물, 땅 등에 어느 곳이나 존재하는 물질이다. 밀폐된 공간 특히, 지하 작업 공간(광부 또는 빌딩의 지하 작업자 등)에서 일하는 사람들은 높은 농도의 라돈에 노출될 수 있다. 또 지하수와 우물물 등을 통해서 라돈에 노출될 수 있다.
- (3) 지각에서 생성된 라돈은 암석이나 토양의 틈새에 존재하다가 확산 또는 압력차에 의해 지표나 공기 중으로 방출된다. 라돈의 80~90%는 토양이나 지반의 암석에서 발생된 라돈 기체가 건물바닥이나 벽의 갈라진 틈을 통해 들어온다. 따라서 환기가 잘 되지 않는 사업장의 건물 실내나 지하 작업장에는 외부 대기에서보다 월등히 높은 농도로 라돈이 축적될 수 있다.

(4) 통상적으로 라돈가스가 실내로 유입되는 경로는 다음과 같다.

① 건물 하부의 갈라진 틈	⑦ 몰타르 이음새
② 벽돌과 벽돌 사이	⑧ 접합이 느슨한 파이프의 사이
③ 벽돌내의 기공	⑨ 출입문의 틈새
④ 바닥과 벽의 이음새	⑩ 건축 자재
⑤ 건물에 직접 노출된 토양	⑪ 지하수의 이용
⑥ 우수 배관로	

(5) 사업장에서 라돈노출이 높아질 수 있는 경우는 첫째 사업장이 라돈발생이 높은 지역에 있을 때이고 둘째는 지하광산이나 동굴 탐험 및 관광업과 같이 작업장이 지하공간에 위치할 때이다. 셋째는 환기가 잘 안 되는 밀폐 공간이나 사업장 건물 내에서 라돈의 농도는 옥외환경보다 수십 배, 내지 수백 배 이상 높을 수 있다.

(6) 1990년에 국제방사선방호위원회(ICRP)는 자연 방사선원에 의한 방사능 노출 중 다음과 같은 특정의 사업장이나 근로자들에 대해서는 그것을 직업적 방사능 노출로 간주하도록 권고하였다.

(가) 광부들의 라돈에 대한 직업적 피폭에 의하여 폐암이 증가한다.

(나) 밀폐된 공간이나 지하 작업 공간에서 일하는 근로자들은 높은 농도의 라돈에 노출될 수 있다. 따라서 광산이 아닌 일반 사업장에서의 피폭에도 주의를 기울일 필요가 있다.

(다) 근로자들은 1년 중 약 2000시간을 직장에서 보내고 있으므로 라돈이 높은 지역에 있는 작업장에서는 라돈의 농도와 거동을 조사하는 것이 필요하다.

(7) 광부, 지하철 종사자 등의 일부 특정 직업군과 지역 및 거주지 상태에 따라서 비교적 높은 농도의 라돈에 노출될 수 있다. 라돈 피폭이 높을 가능성이 있는 작업 활동은 다음과 같다.

(가) 인광을 이용하는 경우(인산염의 처리, 비료 제조)

(나) 광사의 채굴과 정련

(다) 광물의 이용(티탄 안료, 내화성의 토륨 혼합물의 제조, 시멘트 생산)

(라) 화석연료 추출(석유·가스의 추출에 사용되는 물에 방사능이 농축됨)

(마) 화석연료의 연소(예, 화석연료를 이용한 발전소)

(바) 건재의 골재 등으로 이용(토탄 흙, 용광로의 슬러그, 플라이 에쉬)

(사) 폐기물의 이용(스크랩 메탈 산업)

(아) 굴착작업자

(자) 온천 근무나 지하수 처리를 하는 작업

(차) 천연가스나 원유채취 및 정유

(8) 라돈의 이용은 핵 붕괴 생성물에서 방출되는 강한 방사선을 이용하는 것이다. 보통 수명이 짧은 라돈을 바로 분리하여 이용하기 보다는 ^{226}Ra 를 사용하여 라돈을 계속 발생시켜 사용한다.

(가) 과거에는 라돈을 암의 방사선 치료나 기체 누출 검사에 사용하기도 하였으나, 지금은 보다 효율적이고 안전한 방사성 동위원소들로 대체되었다.

(나) 라돈은 또한 다른 기체나 액체에 첨가되어, 기체가 새는 것을 검출하는데도 사용되었다.

(다) 라돈은 기름과 같은 물질에 잘 흡착되기 때문에 기름으로 오염된 토양의 연대 측정에 사용되었다.

(라) 지금은 라돈이 실용적으로 거의 사용되지 않으며, 다만 ^{222}Rn 검출기 보정용으로 라돈의 전구물질인 라듐 용액이 가끔 사용될 뿐이다.

6. 라돈의 발암성

- (1) 국제암연구기구(IARC)에서는 과거 광산에서 일하는 광부들을 대상으로 한 코호트연구에서 흡연자이든 비흡연자이든지 상관없이 모두에서 일관되고 뚜렷하게 폐암이 증가한다는 보고와, 동물실험연구 등에서도 암 발생이 증가한다는 것을 근거로 라돈을 폐암에 대하여 인간에게 명확한 발암물질 (group I)로 분류하였고, 백혈병과 임파종에 대하여는 limited evidence가 있는 것으로(group 2A) 분류하였다.
- (2) 라돈의 직접적인 생물학적 역할은 없으나, 라돈 자체 혹은 이의 방사성 붕괴 생성물들이 내는 강한 방사선 때문에 인체에 매우 해로운 원소이다. 라돈은 자체에서 나오는 방사선 때문에 건강에 위험한 기체로, 미국환경보호청(EPA)은 라돈 흡입이 흡연 다음가는 주요 폐암 원인이라고 경고하고 있다.
- (3) 호흡을 통해 인체에 흡입된 라돈과 자핵종(반감기 30분 미만)은 붕괴를 일으키면서 알파(α)선을 방출한다. 방출된 알파(α) 선은 폐세포와 조직을 파괴하고, 이것이 폐암을 유발하는 주요 원인이다.
- (4) 세계보건기구(WHO)는 라돈을 흡연 다음으로 폐암 발병원인으로 간주하며, 폐암의 3~14% 차지한다고 보고하고 있으며, 미국 환경보호청(EPA)은 미국에서 연간 폐암 사망자의 10% 이상인 약 20,000명 정도가 라돈에 의한 것이며, 폐암을 유발시키는 제2의 원인으로 지목하고 있다.
- (5) 미국 환경보호청(EPA)에서는 4 pCi/L의 라돈 농도를 규제기준으로 제시하고 있으며, 이 농도가 유지되는 실내공간에서 평생 동안 생활하면 흡연자인 경우 1000명중 약 62명(6.2%)이 폐암의 위험이 있다고 하였다<표 2>.

<표 2> 경우 라돈에 의한 인체영향

라돈농도	흡연자의 폐암 생률(1,000명당)	비 흡연자의 폐암 발생률(1,000명당)
20 pCi/L	260명	36명
10 pCi/L	150명	18명
8 pCi/L	120명	15명
4 pCi/L	62명	7명
2 pCi/L	32명	4명
1.3 pCi/L	20명	2명
0.4 pCi/L	3명	-

※ 자료출처 : EPA Assessment of Risk from Radon in Homes(EPA 402-R-03-003)

7. 라돈에 의한 암 발생 예방대책

7.1 일반적 관리

- (1) 라돈은 자연적으로 발생하는 것이므로 어쩔 수 없다거나 누가 책임질 수 있는 것이 아니라고 하여 방치해 둘 수 있는 것은 아니라 사업장의 실내 공기 중 라돈으로 근로자들이 피폭하는 것은 직업피폭이므로 사업주는 작업공간에서 라돈의 농도를 가능하면 낮추는 노력을 해야 한다.
- (2) 사업장에 있어서의 라돈 피폭은 전리 방사선에 의한 위험 중에서 가장 큰 것의 하나이며, 라돈은 타당한 비용으로 제어할 수 있는 자연 방사선원이다.
- (3) 흙, 시멘트, 지반의 균열 등에서 방출되는 라돈 기체가 환기가 잘되지 않은 사업장 건물, 특히 지하작업장이나 밀폐공간에 농축되는 경우가 생기지 않도록 해야 한다.
- (4) 광부, 지하철 종사자 등과 같은 일부 특정 직업군과 지역 및 사업장의 건물 상태에 따라서 비교적 높은 농도의 라돈에 노출될 수 있다. 직업피폭으로 주목받는 곳은 광산이나 지하공간이지만 지상 건물에도 라돈 농도가 높을 수 있으므로 먼저 상황을 파악해야 하기 위해서는 작업장의 라돈 농도를 측정하도록 한다.
- (5) 현재 직업피폭 관리는 진단 X선 종사자의 경우에는 식품의약품안전청에서, 원전 등 기타분야 종사자는 원자력안전위원회에서 관리하고 있는데, 사업장에서 라돈 피폭도 직업피폭이므로 다른 방사선원으로 인한 직업피폭과 일체로 관리되어야 한다.

7.2 작업장의 라돈노출기준

- (1) 국제방사선방호위원회(ICRP 103, 2007)에서는 사업장 안전표준으로 1,000 Bq/m³를 권고하고 있다. 사업주는 근로자가 선량제한치를 초과하여 피폭하지 않도록 관리해야 한다.

- (2) 영국 산업보건안전청(HSE)에서는 전리방사선법령(Ionising Radiation Regulation 1999)에 따라 400 Bq/m^3 이상이 되는 작업장에 대해서는 라돈 농도를 낮추어서 근로자들의 건강보호를 위한 조치를 취하도록하고 있다.
- (3) 라돈과 그 딸핵의 직업적 노출기준은 작업수준월(working level month)로 표시하며, 미국산업위생전문가협회의 노출기준(TLV)은 4 WLM/year 으로 제시하고 있다. 한편, 근로자들의 연간 노출 상한치인 연간 약 10 mSv 에 해당하는 1500 Bq/m^3 를 제시하고 있다.
- (4) 미국 환경보호청(EPA)은 실내공간 기준치로 $4 \text{ pCi/L}(=148 \text{ Bq/m}^3)$, 0.02 WL 이하로 규제하고 있다. 우리나라 역시 지하역사나 지하상가 등 17개 다중이용시설군과 학교(지하교실) 등에 대하여 실내 라돈 권고기준을 4 pCi/L 로 제시하고 있다.
- (5) 우리나라는 작업장 농도기준을 600 Bq/m^3 로 설정하고 있다.

7.3 라돈농도 측정

- (1) 라돈농도 측정은 비교적 수행하기 간단하지만, 정확하고 일관성 있는 측정을 보장하기 위한 표준화된 프로토콜에 기반하도록 한다.
- (2) 실내 라돈 농도는 건물의 구조와 환기의 습관에 따라 변동하고, 계절에 따라 크게 변동 할뿐만 아니라, 매일 또는 매시간도 변화한다. 이러한 변화 때문에, 작업장의 실내 공기의 라돈 농도의 연간 평균치의 추정은 적어도 3개월 이상 하도록 한다.
- (3) 측정기술은 라돈 또는 자핵종으로부터 방출되는 알파선, 베타선, 또는 감마선을 검출하는 것이다. 라돈 검출기의 종류에는 수동형 라돈 측정장치(passive radon measurement)로 사용법이 간단하며 대부분 가격이 저렴하고 외부 전원이 필요 없는 방식을 채택하고 있다. 능동형 라돈 측정장치(active radon measurement)는 연속적으로 라돈 농도를 측정하기 때문에 공기 중 라돈 농도를 시간대별로 체크할 수 있다. 측정하기 용이한 수동형 검출 장비로는 알파 비적검출기(alpha track detectors)가 대표적이다.

7.4 라돈 저감 방안

(1) 실내에 존재하는 라돈을 제어하는 방법에는 크게 발생원의 제거, 발생원을 조절, 그리고 공기를 청정하는 방법이 있다.

(가) 발생원을 제거하기 위해, 토양 내의 라듐의 농도가 높을 경우 건물 아래의 토양을 교환하는 것과 고려할 수 있다.

(나) 실내에 사용되는 건축자재 중의 라돈 방출 수준을 평가하여, 가능하면 라돈 발생량이 적은 자재를 사용하도록 한다.

(다) 토양과 건축물 사이에 물리적 장벽을 설치하여 토양과 건물의 기초가 직접 접촉하는 것을 방지하거나 토양 중 라듐의 농도가 낮은 곳을 건축지로 선택한다.

(라) 발생원을 조절하는 방법에는 라돈의 유입 경로(배수구, 속이 빈 콘크리트 벽, 벽과 바닥의 교차 부분과 바닥재의 이음새, 열에 의한 팽창과 재료들의 수축에 의한 틈, 지하실 바닥의 틈, 건물의 갈라진 틈 등)를 차단한다.

(마) 배출파이프를 지하실 슬라브(slab) 밑에 넣어 환기를 시켜 준다. 이것은 가장 효과적인 라돈 경감 대책 중의 하나이다.

(바) 지하실에서 지상으로 라돈이 유입되는 것을 방지하기 위해 지하실 쪽으로 약 3~4 Pa 정도의 약한 압력을 걸어주어 지상 실내의 라돈 농도를 4 pCi/L 이하로 감소시킬 수 있다.

(사) 실내 공기를 순환시킬 때는 반드시 실내분진의 농도를 낮추어 가능한 한 라돈의 자핵종들이 부착되지 않도록 한다.

(2) 가장 효과적이고, 손쉬운 라돈 저감방법은 ‘환기’이다. 주기적인 환기를 통해 농도를 크게 낮출 수 있다.

(3) 라돈농도 측정 결과 만약 기준치를 초과했다면, 먼저 바닥이나 벽 등에 갈라진 틈이 있나 확인해 본다. 건물의 바닥틈새 등을 메우는 것도 좋은

방법이다. 보강재 등을 이용해 갈라진 틈새만 잘 막아도 실내 농도저감에 큰 효과를 볼 수 있다.

(4) 만약 이러한 조치로도 충분한 저감효과를 거두지 못했다면, 건물 밑 토양에 라돈 배출관을 설치한다. 배출관은 토양 중의 라돈가스를 모아서 실내를 거치지 않고 바로 건물 외부로 배출시킨다. 배출관 중간에 환기팬을 설치하면 효과를 더욱 높일 수 있다.

(5) 외부공기 유입장치도 유용한 수단이다. 공기유입용 장치를 통해 실내공기의 압력을 건물 하부보다 인위적으로 높이면 압력차이 때문에 라돈가스가 작업장의 실내로 들어오지 못하게 된다.

(6) 토양 중 라돈 농도가 높은 지역은 건축물을 지을 때부터 건물 하부에 차단막을 깔면 예방할 수 있다. 신축 건물의 경우, 처음부터 라돈 저감 시공법을 활용하면 비용 대비 최고의 저감효과를 얻을 수 있다. 건물을 올리기 전에 다음과 같은 조치를 한다.

(가) 토양에 자갈을 깔고 토양라돈 배출관을 설치한다.

(나) 플라스틱 시트를 깔고 틈새가 없도록 밀봉한다.

(다) 라돈 배출관을 건물 지붕 위로 올라가게 설비하면, 토양에서 발생한 라돈이 바로 외부로 나가게 된다.

(라) 추후 저감 효율을 높일 목적으로 환기팬을 설치하도록 한다.

7.4 건강관리

(1) 라돈 농도가 높은 사업장에서는 “전리방사선 노출 근로자 건강관리지침 (KOSHA GUIDE H-62-2012)”에 따른 노출 근로자에 대하여 배치전 및 주기적 건강진단을 실시한다.

(2) 근로자 건강진단에서 관찰 하고자 하는 주요 소견은 눈, 피부, 조혈기 장애와 관련된 증상, 징후 및 검사소견이다.

- (3) 건강진단 실시 주기, 건강진단항목, 산업의학적 평가(건강관리구분, 업무수행 적합성 여부 평가, 사후관리)에 대한 구체적인 사항은 “근로자 건강진단 실무지침: 제2권 유해인자별 특수건강진단 방법, 물리적인자-3 전리방사선. 산업안전보건연구원. 2018-연구원-903”를 참고한다.