

NATM 공법에 의한 고속도로 터널 공사 중 라돈 노출 평가

유예지^{1,2} · 김형렬³ · 강모열³ · 최상준^{1,4*}

¹가톨릭대학교 보건의료경영대학원, ²고용노동부,
³가톨릭대학교 의과대학 직업환경의학교실, ⁴가톨릭보건의료경영연구소

Evaluation of Radon Exposure During Highway Tunnel Construction by New Austrian Tunneling Method

Ye-Ji Yu^{1,2} · Hyoun-Ryoul Kim³ · Mo-Yeol Kang³ · Sangjun Choi^{1,4*}

¹Graduate School of Public Health and Healthcare Management, The Catholic University of Korea

²Ministry of Employment and Labor, Occupational Safety and Health Office

³Department of Occupational and Environmental Medicine, Seoul St. Mary's Hospital,
College of Medicine, The Catholic University of Korea

⁴Catholic Institute for Public Health and Healthcare Management

ABSTRACT

Objectives: This study was conducted to measure the level of radon in the air at a highway tunnel construction site in a gneiss area using the New Austrian Tunneling Method (NATM) and to evaluate exposure levels by occupation.

Methods: Radon concentrations in the air were measured using E-PERM at points 300 m, 600 m, and 900 m from the tunnel entrance during the excavation and waterproofing work inside the tunnel. In addition, radon concentrations were measured during external excavation to compare with the inside of the tunnel. Personal exposure levels for major occupations including tunnel workers, construction equipment operators, waterproofer, shotcrete workers, and safety and health managers who participated in the construction were estimated using radon concentration measured in the work process area and working hours by occupation.

Results: As a result of a total of 77 radon measurements, the geometric mean (GM) concentration was 71.1 Bq/m³, and the maximum concentration was 127.3 Bq/m³, which was below the indoor air quality criteria. Radon concentration by process decreased in the order of the tunnel excavation process (GM=71.1 Bq/m³, GSD=1.2), waterproofing process (GM=73.35 Bq/m³, GSD=1.2), and outside excavating process (GM=45.28 Bq/m³, GSD=1.2). Processes inside the tunnel were significantly higher than outside excavating processes ($p<0.05$). There was no statistically significant difference in radon concentration measured inside by distance from the tunnel entrance, but the innermost point of the tunnel, 900 m (GM=79.24 Bq/m³, GSD=1.27), measured the highest.


Conclusions: The occupation with the highest individual exposure to radon was tunnel worker (64.16 Bq/m³), followed by construction equipment driver (64.04 Bq/m³) and waterproofer (63.13 Bq/m³).

Key words: gneiss, New Austrian Tunneling Method, radon

*Corresponding author: Sangjun Choi, Tel:02-2258-7379, E-mail: junilane@gmail.com
Graduate School of Public Health and Healthcare Management, The Catholic University of Korea, 222 Banpo-daero, Seocho-gu, Seoul, 06591, Korea
Received: February 6, 2023, Revised: April 7, 2023, Accepted: May 10, 2023

 Ye-Ji Yu <https://orcid.org/0000-0003-1485-0607>

 Mo-Yeol Kang <https://orcid.org/0000-0002-1682-865X>

 Sangjun Choi <http://orcid.org/0000-0001-8787-7216>

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.

I. 서 론

라돈은 우라늄과 토륨의 방사성 붕괴과정을 거친 후 생성된 무색무취의 가스로 인구집단이 노출될 수 있는 가장 큰 천연 방사성 노출원이다(UNSCEAR, 2000). 라돈(Rn^{222})은 상대적으로 긴 반감기(3.8일)를 갖고 있는 가장 흔한 라돈 방사성 동위원소이며, 인체에 호흡 노출 시 연속적인 붕괴 과정에서 발생하는 방사선에 의해 폐암을 일으키는 주요 발암성 인자로 알려져 있다(WHO, 2009).

광부들은 라돈에 고 노출되는 대표적인 직업군이다. Lubin et al.(1995)은 11개의 연구자료에서 라돈에 노출된 광부들 코호트 연구를 통합하여 총 65,000명의 광부에게서 발생한 2,700명의 폐암 사망 사례를 통합 분석한 결과 폐암 사망자의 약 40%가 라돈 노출에 의한 것이라고 보고했다. 최근 광부에 대한 다국적 코호트 연구에서는 낮은 농도의 라돈에 장기간 노출될 경우에도 폐암 발생과 강한 연관성을 보이기 때문에 라돈 노출을 최소화 할 필요가 있다고 강조하고 있다(Richardson et al., 2022).

터널 공사 환경도 환기가 잘 되지 않기 때문에 광부들과 유사하게 라돈에 고 노출 위험이 있다(Nang et al., 2019). Li et al.(2010)은 77개의 완성된 터널 내부에서의 라돈 농도를 측정했는데, 암반 형태에 따라 차이가 컸는데, 화강암(granite) 터널의 라돈 농도가 석회암(limestone) 터널보다 통계적으로 유의하게 높았다. 홍콩의 터널건설현장을 대상으로 한 라돈 관리방안 연구에서는 환기가 잘되지 않는 터널건설공사의 굴착공정에서 잠재적인 라돈 발생 위험의 문제를 제기하면서 최대 $30,000 \text{ Bq/m}^3$ 까지 라돈농도가 급증할 수 있음을 경고한 바 있다(Li & Chan, 2004). 그러나 터널 공사 작업장 작업자들의 라돈 노출평가 연구는 매우 제한적이다(Abundo et al., 1997; Gucchi et al., 2016). 특히 NATM(New Austrian Tunneling Method) 공법이 이루어지는 터널공사는 화약을 사용하여 대규모의 암석을 파괴하는 작업이 반복적으로 이루어지므로 라돈 및 그 딸핵종이 발생하여 터널작업자에게 노출될 수 있다(Ryu et al., 2003).

이에 본 연구는 NATM 공법으로 시행되는 고속도로 터널 공사 현장에서 작업하는 작업자들의 직무군별 라돈 노출 수준을 평가하고 유효 선량(effective dose)을 추정하여 그에 따른 관리 방안을 모색하기 위해 수행되었다.

II. 대상 및 방법

1. 평가 대상 공사 현장

평가 대상 공사 현장은 경기도 안성시 고속도로 건설을 위해 NATM 공법으로 양방향 동시 굴착 작업이 이루어졌다. NATM 공법은 지반을 발파에 의해 굴착하고 슛크리트로 록볼트를 보강하여 터널을 굴착하는 방법으로(Ryu et al., 2003), 터널의 작업공정은 크게 천공, 발파, 버력(muck) 처리, 록볼트 시공, 슛트타설인 터널 굴착공정(excavation)과 합성고무의 얇은 시트를 전기인두로 이용하여 접착하는 방식의 방수작업(water proofing)으로 구분된다. 터널 내 환기는 터널 굴착공사 시기에만 터널 굴착면까지 환기덕트를 연결하여 외부의 신선한 공기를 공급하는 강제 환기방식을 실시하였다.

2020년 4월부터 2021년 10월까지 총 1년 7개월 동안 굴착 공사가 진행되었고, 2021년 8월부터 9월까지 4회 반복하여 라돈 농도를 측정하였다. 굴착공정이 완료 후에 2022년 8월까지 10개월 동안 방수공정이 이루어졌다. 방수공정이 진행되는 22년 1월부터 3월까지 기간 동안 4회 반복하여 동일한 방법으로 라돈농도 측정을 진행하였다. 외부 터파기공정의 경우는 2017년부터 2022년 12월까지 공사가 진행되고 있으며, 라돈 농도측정은 2021년 10월 동안 2회 반복측정을 진행하였다. 측정대상 공사 현장의 기본 특성과 시료 채취 조건은 Table 1에 요약하였다.

2. 공기 중 라돈 농도 측정

공기 중 라돈농도 측정은 수동적분형 검출기인 E-PERM(Electret Passive Environment Radon Monitor, Rad Elec. Ltd, USA)을 사용하였다. E-PERM은 미국 산업안전보건청(Occupational Safety and Health Administration, OSHA)에서 권고하는 측정기이며, 공기 중 라돈은 여과된 흡입구를 통해 챔버 안으로 수동적으로 확산되며 붕괴과정에서 방출된 알파 입자는 공기 분자를 이온화하는데, 챔버 내부에서 발생하는 음이온은 양전하 충전막(electret)에 포집되어 표면전하를 감소시킨다(Rad Elec. Inc, 2021). 이러한 원리에 의한 충전막 표면의 전압강하 정도를 리더기로 측정하여 라돈농도를 계산하였다.

터널내부의 작업환경과 시설물 및 공사지점이 수시로 변하는 점을 감안하여 단기측정에 적합한 S-chamber

Table 1. Basic characteristics of the construction project and radon measurement condition

Classification	Process		
	Tunnel drilling	Tunnel waterproofing	Pit excavating
Construction project			
Construction period	April 2020 – October 2021	November 2021 – August 2022	January 2017 – December 2022
Bedrock	Gneiss	Gneiss	Gneiss
Work method	NATM*	Sheet waterproof	Excavating
Tasks	Drilling, Rock bolting, Charging, Blasting, Rock transport, Pumice arrangement, Supporting, Shotcrete	Sheet waterproof	Excavating
Number of workers	60	25	12
Working time	24 hours a day (2 groups, 2 shifts)	10 hours a day	10 hours a day
Ventilation	Mechanical ventilation	No mechanical ventilation	No mechanical ventilation
Measurement condition			
Sampling period	August 2021 – September 2021 (4 times)	January 2022 – March 2022 (4 times)	October 2021 (2 times)
Temperature, °C	25.1–26.2	3–3.5	16–17.2
Humidity, %	67.3–72.2	43.1–45.2	49.2–49.6
Number of samples	35	36	6

와 Short-term electret를 선택하여 2일간 단기측정을 실시하였다. 라돈측정기는 다음과 같은 조건을 고려하여 배치하였다.

- ① 측정기가 주변의 환경에 의해 방해받지 않도록 발파분진이 발생하는 터널의 가장 안쪽(터널공사지점)으로부터 떨어진 곳
- ② 갑작스런 기류 및 환기 등에 영향을 받지 않는 곳으로 터널 본선을 서로 연결하는 피난갱에서 90 cm 이상 떨어진 곳
- ③ 화기, 고습, 직사광선을 피할 수 있는 곳
- ④ 모든 외부의 벽, 다른 대상물로부터의 방해 또는 훼손을 받지 않도록 30 cm 이상 떨어진 곳
- ⑤ 바닥에서부터 최소 50 cm 이상 높게 위치한 곳

모든 측정기의 측정시료는 식별번호, 위치, 시작 및 종료날짜, 시간을 체크리스트에 기록하였다. 온도와 습도, 막장굴착공사 유무, 환기시스템 가동여부, 주변 지하수 유무 등 작업환경 특성을 파악하여 측정을 진행하였다. 또한 측정기의 분실을 방지하기 위하여 측정기에는 '라돈측정 중'이라는 경고표지를 부착하였다. 측정 장소에 대한 시료수를 산정하기 위해 터널의 면적 등 관련정보를 설계도를 통하여 확인하였으며, 터널 내 굴착과 방수공정은 Figure 1과 같이 터널 입구로부터 거

리별 300 m, 600 m, 900 m 지점당 3개의 측정기를 설치하였다. 외부터파기 공정은 굴착기 내부 3개소에서 1개씩 측정기를 설치하였다.

라돈 농도 계산을 위해 현장에서 측정기를 설치하기 전에 충전막(electret)의 초기전압을 리더기로 측정하고, 초기전압 측정 시 라돈농도 전압이 100 V 미만인 충전막(electret)은 전압이 낮아 정전기장이 약해져 성능이 떨어지므로 제외하고 100 V 이상으로 측정되는 충전막의 동일한 전압이 두 번 반복되는 전압값을 기록하였다. 측정 후 초기전압 측정과 동일한 방법으로 최종전압을 리더기로 읽어 충전막 표면의 전압강하 정도를 확인하였다. 리더기로 측정된 초기 및 최종 전압을 이용하여 라돈 평균 농도를 식 1과 같이 산출하였다.

$$C = \left(\frac{V_i - V_f - 0.066667 \cdot D}{K \cdot D} - B \cdot G \right) \cdot F \quad (1)$$

C : average radon concentration, pCi/L

V_i: initial electret voltage in volts

V_f: final electret voltage in volts

D: The number of days exposure, days

K: calibration factor

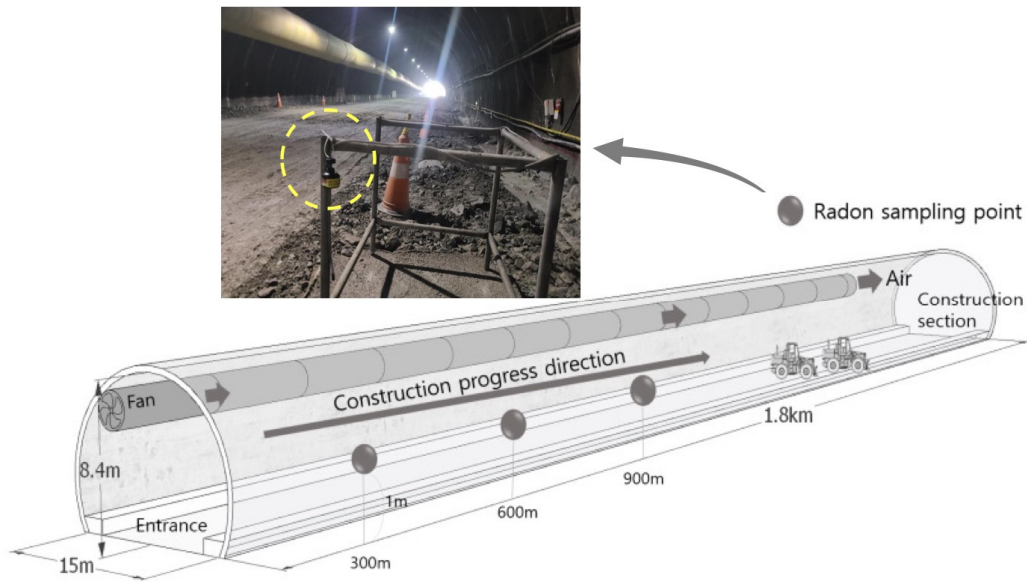


Figure 1. Schematic diagram of tunnel construction site.

B · G: the correction for background gamma radiation

F: elevation correction factor

3. 개인 라돈 노출량 평가

개인 라돈 노출량은 터널 내부에서 일하는 직종별 공정, 단위작업, 주작업 위치를 확인한 후, 단위작업에 따른 작업시간을 조사하여 추정하였다. 단위작업이 이루어지는 작업자의 주 작업 위치와 가장 가까운 측정지점에서의 라돈농도를 적용하였으며 각 직종별 개인 라돈 노출량은 식 2와 같이 시간가중평균값(Time Weighted Average, TWA)을 이용하여 추정하였다.

$$TWA = \frac{(C_1 \times T_1) + (C_2 \times T_2) + \dots + (C_n \times T_n)}{(T_1 + T_2 + \dots + T_n)} \quad (2)$$

C_n : airborne radon concentration measured at specific site, Bq/m³

T_n : working time at specific site, h

예를 들어, 터널공이 터널 내 가장 안쪽 지점에서 하루 평균 6시간동안 작업하고, 4시간은 터널 외부에서 작업한다면, 터널 내 가장 안쪽 지점에 근사한 터널 내 900 m 지점의 측정농도와 터널 외부 터파기 장소에서 측정된 라돈 농도를 각각 작업시간과 함께 식 2를 이용

하여 10시간 TWA를 추정할 수 있다. 이때 지역 측정 농도의 대푯값은 산술평균과 최대값을 이용하여 평균-최대 수준으로 추정하였다.

4. 직종 별 유효선량 추정

터널 공사에 참여한 직종별 공기 중 라돈 흡입 노출에 의한 연간 유효선량 추정은 원자력 방사선 영향에 관한 유엔과학위원회(United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR)의 지침서를 활용하였으며(UNSCEAR, 2020) 식 3과 같이 1일 평균 유효선량(effective dose, ED)을 계산하였다.

$$ED = EEC \times DCF \times ET \times 10^{-3} \quad (3)$$

ED : daily effective dose, μSv/day

EEC : equilibrium equivalent concentration, Bq/m³qjq

DCF : radon dose conversion factor, nSv/(h · Bq/m³)

ET : average exposure time per day, h/day

위 식에서 EEC는 평형등가농도(equilibrium equivalent concentration), DCF는 라돈 선량 환산 계수(radon dose conversion factor)이다. EEC는 동일한 잠재알파에너지를 가짐을 근거로 어떤 주어진 비평형혼합 상

태의 라돈농도를 단위당 자손과 평형상태에 있는 라돈 가스의 방사능 농도로 환산한 농도를 말하며, 공기 중 라돈 농도(C_{air})와 평형인자(equilibrium factor, F_{eq})를 알면 식 4와 같이 계산할 수 있다.

$$EEC = C_{air} \times F_{eq} \quad (4)$$

C_{air} : airborne radon concentration, Bq/m³

F_{eq} : equilibrium factor

C_{air} 는 개인 노출량으로 추정된 공기 중 라돈 농도, F_{eq} 는 평형인자이며 실내는 0.4, 실외는 0.6을 권고하고 있다. 터널 내부에서 측정된 공기 중 라돈 농도에 대한 평형인자는 0.4를 적용하였고, 실외 터파기 공정에 대한 측정농도는 평형인자 0.6을 적용하였다. 라돈 선량 환산계수(DCF)는 단위피폭 당 유효선량의 비로서 UNSCEAR의 권고에 따라 9.0 nSv/(h · Bq/m³)를 활용하였다(UNSCEAR 2020).

5. 자료 처리 및 통계분석

공기 중 라돈 측정농도의 분포는 Shapiro-Wilk test와 대수정규확률분포도를 작성하여 대수정규분포를 확인하였다. 작업공정별, 터널 입구에서 안쪽 거리별 위치에서 측정된 라돈농도는, 산술평균(arithmetic mean, AM), 표준편차(standard deviation, SD), 기하평균(geometric mean, GM)과 기하표준편차(geometric

standard deviation, GSD), 범위(range)로 요약하였다. 각 변수별 차이를 비교하기 위해 T-test와 분산분석을 이용하였으며 작업공정, 입구로부터의 거리가 터널공사의 공기 중 라돈농도에 영향을 미치는 알아보기 위해 다중회귀분석을 하였다. 각 자료들이 대수정규분포를 하였기 때문에 라돈 농도를 로그 변환 후 검정하였다. 통계 분석은 SPSS(IBM SPSS 28.0.1.1)를 이용하여 실시하였다.

III. 연구결과

1. 공기 중 라돈농도 분포

터널 공사 현장에서 채취한 총 77개의 공기 중 라돈 농도는 대수정규분포를 나타냈으며(Figure. 2) Table 2와 같이 GM과 GSD는 각각 71.07 Bq/m³, 1.27로 고용노동부의 라돈 노출기준인 600 Bq/m³를 초과하는 지점은 없었다. 라돈농도가 가장 높게 측정된 곳은 터널 방수공정의 가장 안쪽지점인 900 m 지점으로 최대 127.34 Bq/m³까지 측정되었다. 또한 평균농도가 가장 낮게 측정된 곳은 터널 방수공정 600 m 지점으로 69.81±6.21 Bq/m³이었다.

2. 공정별 라돈농도

터널 내 굴착공정은 35개, 방수공정은 36개 총 71개의 라돈농도를 측정하였고, 외부터파기 공정은 6개의 라돈농도를 측정하였다. 터널 내부에서 작업하는 굴착

Table 2. Summary of radon concentration by work process

Process	Sampling location	N	Radon concentration, Bq/m ³		
			AM(SD)	GM(GSD)	Range
Tunnel drilling	Sub-total	35	76.15(14.01)	74.91(1.20)	51.46~108.02
	300 m	12	73.76(10.57)	73.06(1.16)	56.86~92.10
	600 m	12	74.90(15.98)	73.32(1.24)	51.46~98.76
	900 m	11	80.13(15.41)	78.79(1.21)	59.74~108.02
Tunnel waterproofing	Sub-total	36	74.6(17.98)	73.35(1.24)	49.91~127.34
	300 m	12	71.28(16.41)	69.60(1.26)	49.91~104.45
	600 m	12	69.81(6.21)	69.55(1.09)	60.55~79.89
	900 m	12	82.82(24.70)	79.65(1.34)	52.91~127.34
Pit excavating	Excavator	6	45.87(7.9)	45.28(1.20)	33.64~55.12
Total		77	73.09(17.45)	71.07(1.27)	33.64~127.34

N: Number of samples, AM: Arithmetic mean, SD: Standard deviation, GM: Geometric mean, GSD: Geometric standard deviation

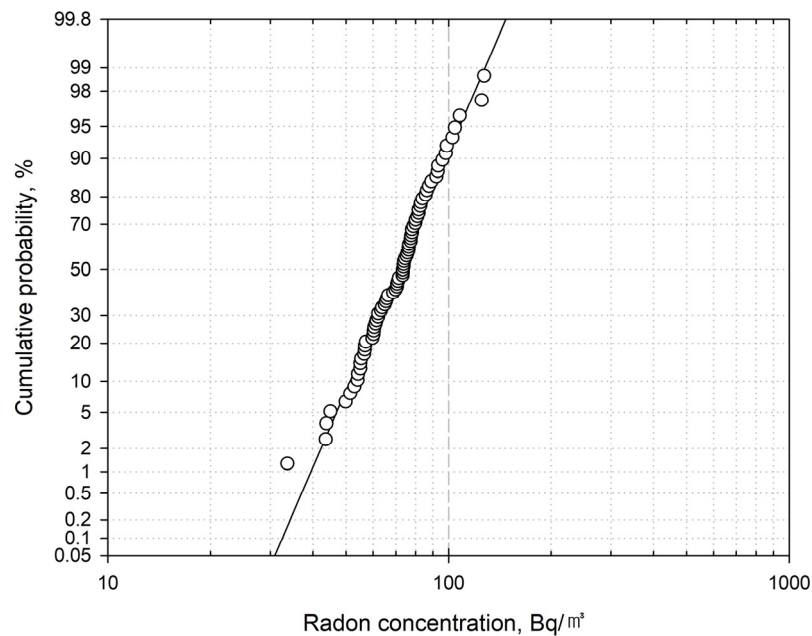
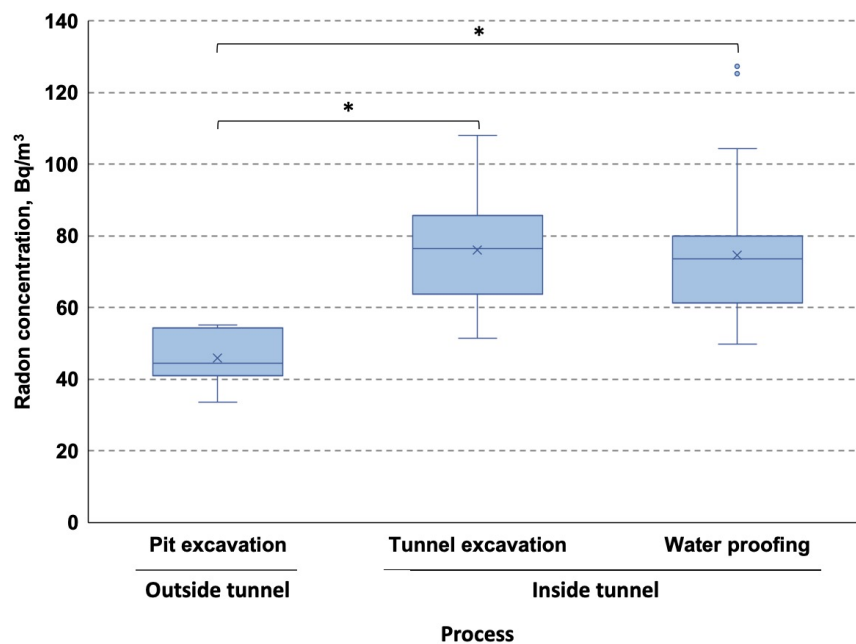


Figure 2. Log-normal distribution of airborne radon concentration.



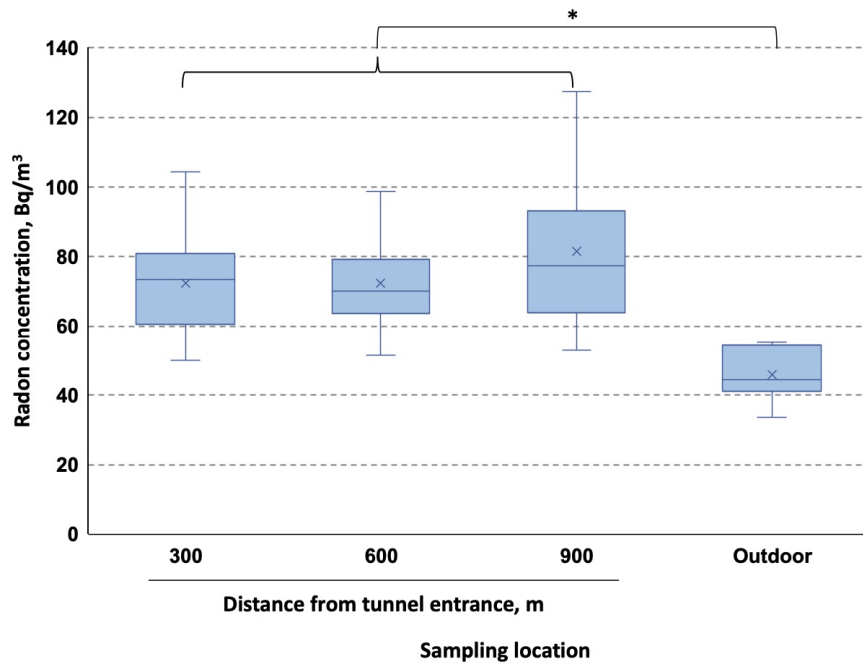
* $P < 0.05$, ANOVA or t-test

Figure 3. Comparison of radon concentration by work process.

공정($GM=74.91 \text{ Bq/m}^3$)과 방수공정($GM=73.35 \text{ Bq/m}^3$)이 외부터파기 공정($GM=45.28 \text{ Bq/m}^3$)보다 유의하게 높게 나타났으나($p < 0.05$) 터널 내 작업공정 간 라돈농도는 통계적으로 유의한 차이는 없었다($p=0.787$, Figure 3).

3. 측정 위치별 라돈농도

외부의 공기 유입여부를 고려하여 터널 입구로부터 300 m, 600 m, 900 m 지점에서 라돈농도를 비교하였다. 터널입구로부터 300 m 지점의 평균농도는 $72.52 \pm 13.56 \text{ Bq/m}^3$ ($49.91 \sim 104.45 \text{ Bq/m}^3$), 600 m 지점



* $P < 0.05$, ANOVA or t-test

Figure 4. Comparison of radon concentration by sampling location.

71.46±11.58 Bq/m³(51.46~98.76 Bq/m³), 900 m 지점은 81.00±20.68 Bq/m³(52.91~127.34 Bq/m³)였으며, 900 m 지점에서는 라돈농도가 높아지는 추세를 보였으나 통계적으로 유의한 차이는 없었다($p=0.387$, Figure 4).

4. 터널 내부 라돈농도에 미치는 요인 분석

터널 내부 라돈농도에 영향을 미치는 요인을 파악하기 위하여 독립변수로 터널작업공정, 입구에서부터의 거리, 종속변수를 라돈농도로 설정하여 다중회귀분석을 실시한 결과는 Table 3과 같다. 그 결과 터널 작업방법

에 따른 작업공정은 영향 요인이 아니었고, 입구에서의 거리(외부포함)가 터널 내 농도에 영향을 미치는 것으로 확인되었다($p < 0.05$).

5. 직종별 라돈 개인 노출 농도 및 유효선량 추정

터널내부공정과 외부 터파기공정의 라돈농도를 통하여 터널내부에서 작업할 수 있는 5개 직종에 대하여 작업자 개인 라돈 노출량 및 1일 유효선량을 추정하였다(Table 4). 각 지역에서 측정한 라돈 농도의 평균값으로 추정한 개인 라돈 노출량이 가장 높은 직종은 터널 공(AM=64.16 Bq/m³)이었고 다음으로 중장비운전공

Table 3. Factors affecting the radon concentration measured in tunnel

Dependent variable	Independent variable	β	t-value	p-value
Radon concentration measured in tunnel	<i>Process</i>			
	Tunnel drilling	0.64	0.649	0.518
	Tunnel waterproofing		Reference group	
	<i>Distance from the entrance</i>			
	300 m	0.852	4.658	<0.001
	600 m	0.855	4.674	<0.001
	900 m	1.045	5.777	<0.001
	Outside(Pit)		Reference group	

(AM=64.04 Bq/m³), 방수공(AM=63.13 Bq/m³), 숏트 공(AM=52.72 Bq/m³), 보건관리자(AM=48.82 Bq/m³) 순으로 나타났다. 직종별 유효선량은 1일 최대 3.14 μ Sv/day에서 3.94 μ Sv/day로 매우 낮게 추정되었다.

IV. 고 찰

터널작업은 협소하고 제한된 장소에서 암석을 굴진해 나가는 과정에서 지하수가 유입되거나 유해가스가 발생하므로 터널작업자에게 라돈 노출의 가능성이 있다(Ryu et al., 2003). 이에 본 연구는 작업방법에 따른 작업공정, 입구에서의 거리별 터널공사 라돈농도 수준을 파악하였으며, 이를 활용하여 터널 내 직종별 개인 라돈 노출량 및 유효선량을 알아보았다.

본 연구에서 터널 내 작업 중 측정한 라돈 평균농도는 75.39 Bq/m³, 최대 농도는 127.34 Bq/m³로 실내 환경 기준(148 Bq/m³) 보다도 낮았다(Fig. 2, Table 2). 산업안전보건연구원에서 터널 공사현장을 대상으로 한 연구(2003)에서는 지하암반으로부터 발생하는 라돈 농도 수준에 대한 평가를 실시하였으며, 미국 EPA의 실내 환경 기준인 148 Bq/m³와 비슷한 수준을 보였다(Ryu et al., 2003). 또한 산업안전보건연구원의 정책 연구(2019)에서 제시한 공사 중인 터널 공사현장 2개소의 라돈의 농도는 37.1~308.7 Bq/m³의 범위를 보였으며, 가장 높은 농도를 보인 곳은 터널입구로부터 가장 거리가 먼 1000 m 지점으로 308.7 Bq/m³으로 측정되었다(Seo et al., 2019). 한 곳은 터널입구와의 거리와 상관없이 불규칙하게 나타났으며, 다른 한 곳은 터널 입구에서부터 안으로 들어갈수록 라돈의 농도가 확연히 높게 나타났다(Seo et al., 2019). 홍콩의 지하수를 이송하는 수로를 건설하는 터널굴착 공정을 대상으로 한 라돈 관리연구에서는 라돈농도가 일정한 수치를 보이지 않았으며, 최대 30,000 Bq/m³까지 검출되었는데 이는 환기시스템의 오작동 때문이었다고 보고한 바 있다(Li & Chan, 2004). 본 연구에서 터널작업의 라돈 평균농도는 75.39 \pm 16.05 Bq/m³로 산업안전보건연구원의 연구결과보다 낮았는데 이는 본 연구대상의 터널은 3차선 도로공사로 비교적 공간이 넓고 본선 간 차량용 및 대인용 피난 연결로가 설치되어 있어 외부차량 및 중장비의 이동이 빈번했기 때문에 터널 내부에서도 공기의 순환이 원활했을 것으로 판단된다.

산업안전보건연구원의 연구에서는 터널 공사현장의

기반암 특성에 따른 라돈농도는 확인할 수 없었으나 기존의 국내·외 연구들은 라돈농도가 토양 중 지질분포에 따라 영향을 받으며 편마암보다는 화강암 체내에서 라돈농도에 영향을 줄 수 있는 우라늄 함량이 높다는 특성이 있다고 보고하였다(Li & Chan, 2004; Kwon et al., 2017). 홍콩의 터널 굴착 작업에 대한 라돈관리 연구(2004)에서는 화강암의 터널을 굴착할 경우 더 높은 라돈농도가 측정되었다고 보고한 바 있다(Li & Chan, 2004). 본 연구에서 공사가 진행된 안성지역은 지오빅 데이터 오픈 플랫폼(Geo Big Data Open Platform, 2022)을 통하여 편마암의 지질특성을 확인하였으며, 비교적 낮은 라돈농도를 보였다.

본 연구에서는 지질학적 특성 외에도 터널작업 시 라돈농도에 영향을 줄 수 있는 요인을 작업공정, 터널입구와의 거리로 구분하여 라돈농도를 측정하였다.

터널 굴착공정은 암석을 발파하는 작업으로 암반을 굴착하는 과정에서 라돈농도가 높게 측정될 것으로 판단되었으나 터널방수공정과 큰 차이가 없었다. 터널 굴착공사의 경우 환기시설을 설치하여 터널 굴착면까지 환기덕트를 연결하여 외부의 신선한 공기를 넣어주는 환기방식을 실시하였으나, 발파 시에는 환기시스템 성능에 영향을 줄 수 있어 일시적으로 사용을 중단하였다. 터널 방수공정에서는 환기시설은 없었으나 터널 관통(굴착공사)이 완료된 시점이었기 때문에 터널 양쪽 입구를 통한 환기가 일부 이루어졌을 것으로 판단된다. 반면에 터널공정과 외부 터파기공정은 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 터널작업은 일반 건설공사와 다르게 제한된 공간에서 이루어지므로 외부보다는 공기교환이 부족한 터널에서의 작업공정이 라돈농도가 높게 측정된 것으로 판단된다.

터널 입구로부터 거리별 300 m, 600 m, 900 m 지점의 라돈농도를 비교한 결과 통계적으로 유의한 차이는 없었으나 900 m 지점에서는 라돈농도가 높아지는 추세를 보였다. 방수공정의 900 m 지점에서는 라돈이 최고 127.34 Bq/m³까지 측정되었는데 이는 터널입구에서부터 안쪽으로 갈수록 환기량이 감소하여 신선한 공기의 유입이 어려운 지점에서는 라돈농도가 높아진 것으로 보인다. 국내 지하철 터널 내 라돈노출실태 연구(2009)에 따르면 지하철 터널농도에 기여하는 변수로 기반암석의 종류, 터널 형태, 지하수량, 깊이, 환기구수, 공사 횟수를 언급하였다(Khan et al., 2019). 지하철 터널 농도에 영향을 미치는 변수 중 라돈농도에 가장 큰 영향을 주는

변수는 터널 형태였다(Khan et al., 2019). 본 연구에서는 터널 입구로부터 거리, 즉 환기의 여부가 라돈농도에 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다.

또한 라돈은 지하수유무, 상대습도, 압력, 기온, 기류에 따라 실내 공기 중 라돈농도에 영향을 줄 수 있으나(Choi et al., 2016), 이에 따른 라돈농도는 확인 할 수 없었다. 터널공사의 경우 드릴링에 의한 암반 천공 등의 과정에서 폐수가 발생하며, 굴착 등에 따른 터널 내에서 지하수가 유입된다. 라돈의 경우 암석이나 토양보다 공극을 채우고 있는 물에 녹아들 가능성이 높아 지하수의 유입이 터널내부의 라돈농도에 영향을 미칠 수 있다(Li & Chan, 2004). Keith Y. K. Li(2004)의 연구논문에서는 터널공사 중 지하수 유입량이 라돈 배출과 상당한 관계가 있음을 언급하면서 지하수 양의 증가에 따라 라돈농도가 증가하는 것을 보고하였다(Li & Chan, 2004). 본 연구에서도 측정지점별 지하수 유무를 조사하였으나 지하수량이 라돈농도에 영향을 줄 정도로 많지 않았고, 굴착과 동시에 배수공사가 지속적으로 이루어져 작업환경이 수시로 변하는 점 때문에 지하수 유입에 따른 측정치로 확보에 한계가 있어 지하수 유무에 따른 라돈농도는 확인 할 수 없었다. 다만, 터널 내 굴착과정에서는 굴착 중 발생하는 지하수를 정화하여 일부 방류하는 작업을 실시하였다. 또한 사업장의 굴착공정은 하절기에, 터널 방수공정의 경우 동절기에 각각 공사가 진행되어 공사진행 시점에 따라 측정을 진행하였기 때문에 온도 및 습도 즉, 계절 등의 요인을 반영할 수 없었다.

터널 공사현장에서는 작업자의 작업위치가 일정하지 않고, 터널작업자가 주로 작업하는 위치에서 발파작업이 이루어져 실제로 작업하는 장소에서 라돈농도를 측정할 수 없었다. 이에 본 연구에서는 작업자의 주 작업 위치와 작업시간을 확인하여 직종별 개인 라돈노출량 및 1일 유효선량을 추정하였다. 터널작업자의 주 작업 위치는 발파가 이루어지는 터널 가장 안쪽지점으로 굴착공정 900 m지점의 라돈 평균농도를 적용하였고 작업위치가 일정하지 않은 직종의 경우 해당공정의 300 m, 600 m, 900m 지점의 평균 라돈 농도를 활용하였다. 외부에서의 작업대기 및 휴식시간은 외부 터파기 지점의 라돈농도를 적용하였다. 개인 라돈노출량이 가장 높은 직종은 터널의 가장 안쪽에서만 작업하는 터널 공과 터널내부에서 장시간 근로하는 방수공으로 나타났다. 직종별 유효선량 추정은 건설업의 경우 근무일수가

유동적이기 때문에 일괄적인 연간 유효선량을 평가하는데는 어려움이 있어 라돈에 의한 방사선의 영향을 1일 유효선량으로 추정하였다. 이는 공사현장의 직종별 근무일수를 고려했을 때 연간 누적노출량을 추정할 수 있다. 주요 5개 직종의 터널 내, 외부 작업 공간별 머물게 되는 평균 작업시간을 토대로 추정한 개인 1일 유효선량도 1일 최대 3.14 $\mu\text{Sv/day}$ 에서 3.94 $\mu\text{Sv/day}$ 로 매우 낮게 추정되었다(Table 4). 이는 작업자들이 연중 250일을 유사한 터널 작업을 반복한다고 가정했을 때 연간 최대 0.78 mSv/y에서 0.99 mSv/yr로 원자력안전법에서 허용하는 일반인의 연간 1 mSv/y 보다도 낮은 수준이다.

터널 건설현장의 경우 터널작업에서 노출되는 유해요인은 발파 및 굴착 시 발생하는 대량의 먼지와 일산화탄소 등의 유해가스가 복합적으로 노출되는 특성을 가지고 있다(Ryu et al., 2003). 따라서 터널공사 현장에서 낮은 수준의 라돈이 발생하더라도 다량의 먼지와 물방울에 부착되어 호흡으로 흡입할 경우 고형의 붕괴생성물이 폐 및 기도에 머무르면서 폐의 민감한 세포에 손상을 일으킬 수 있다(Choi et al., 2017). S.M. Khan의 라돈저감효과 연구에서는 실내 라돈에 대한 폐암 유병율을 감소시키기 위한 효과적인 라돈저감시스템을 소개한 바 있으며(Khan et al., 2019), 우리나라에서도 건축물 공법에 따라 라돈저감효과를 평가한 바 있다(Lee et al., 2014). 라돈저감에 가장 효율적인 시스템은 라돈이 배출되는 토양 근처에서 라돈을 실외로 배출하는 토양가스배기방법이다(Lee et al., 2014; Khan et al., 2019). 그러나 터널 공사에서는 공기를 배기할 수 있는 공간을 만들어야 하는 토양가스배기공법(Khan et al., 2019)을 적용하기가 쉽지 않으므로 외부의 공기를 유입하는 환기시스템의 설치가 가장 중요할 것으로 판단된다. 터널공사의 환기시스템의 경우는 신선한 공기를 불어 넣어주는 급기방식을 사용한다. 이는 구간이 짧은 터널은 작업자에게 신선한 공기를 공급하고 오염된 공기는 터널 입구로 밀려나가면서 밖으로 신속하게 배출하기 위함이며, 긴 터널의 경우는 산소량 부족과 긴급한 비상사태를 대비해서 송기장치의 설치가 고려되어야 하기 때문이다(Baeg et al., 2006). 따라서 터널 입구로부터 가장 안쪽지점에는 급기량을 보강하거나 추가적인 환기장치를 설치하는 환기시스템의 보완이 필요할 것으로 보인다. 터널작업에 적합한 환기시스템을 적용하려면 기술적인 연구에 앞서 관리자

Table 4. Estimation of personal radon exposure and effective dose by occupation

Job	Working position	Task	Working time, h	Radon concentration, Bq/m ³			Full-shift personal exposure to radon, Bq/m ³		Effective dose, μ Sv/day	
				Measurement point	AM	Max	AM	Max	AM	Max
Tunnel worker	Tunnel excavation	Preparation	1	Tunnel 900 m	80.13	108.02	64.16	83.37	2.69	3.46
		Rock Bolting	1	Tunnel 900 m	80.13	108.02				
		Charging	0.67	Tunnel 900 m	80.13	108.02				
		Supporting	0.67	Tunnel 900 m	80.13	108.02				
		Drilling	2	Tunnel 900 m	80.13	108.02				
Equipment operator	Outside the tunnel	Waiting for work	4.66	Pit excavator	45.87	55.12				
	Inside the tunnel	Rock waste transport	6	Tunnel 300–900 m	76.16	108.02	64.04	86.86	2.64	3.52
	Outside the tunnel	Preparation	4	Pit excavator	45.87	55.12				
Shotcrete	Tunnel excavation	Shotcrete	2	Tunnel 900 m	80.13	108.02	52.72	65.7	2.56	3.16
	Outside the tunnel	Preparation	8	Pit excavator	45.87	55.12				
Waterproof	Inside the tunnel	Sheet waterproof	6	Tunnel 300–900 m	74.64	127.34	63.13	98.45	2.60	3.94
	Outside the tunnel	Preparation	4	Pit excavator	45.87	55.12				
Health manager	Inside the tunnel	Inspection	1	Tunnel 300–900 m	75.39	127.34	48.82	62.34	2.50	3.14
	Outside the tunnel	Inspection	9	Pit excavator	45.87	55.12				

와 근로자의 인식변화와 함께 제도적인 지원도 마련되어야 할 것으로 보인다. 터널작업의 개인 라돈 노출량을 최소화하기 위하여 외부에서의 휴식 부여 등 관리적인 대책도 병행되어야 할 필요가 있다고 판단된다.

V. 결 론

본 연구는 편마암 기반 암석지대에서 NATM 공법으로 시행되는 고속도로 터널 공사 현장에서 작업하는 작업자들의 직무군별 라돈 노출 수준을 평가하고 유효 선량(effective dose)을 추정하였다. 터널 내 작업 중 측정한 라돈 평균농도는 75.39 Bq/m³, 최대 농도는 127.34 Bq/m³로 실내 환경 기준(148 Bq/m³)보다 낮았다. 주요 5개 직종의 터널 내, 외부 작업 공간별 머물게 되는 평균 작업시간을 토대로 추정한 개인 1일 유효선량도 1일 최대 3.14 μ Sv/day에서 3.94 μ Sv/day로 매우 낮게 추정되었으며, 개인 라돈 노출량이 가장 높은 직종은 터널공(AM=64.16 Bq/m³) 이었고 다음으로 증장비운전공(AM=64.04 Bq/m³), 방수공(AM=63.13 Bq/m³), 숏트공(AM=52.72 Bq/m³), 보건관리자(AM=48.82 Bq/m³) 순이었다. 터널공사 현장에서 낮은 수준의 라돈이 발생하더라도 다량의 먼지와 물방울에 부착되어 호흡으로 흡입할 경우 고형의 붕괴생성물이 폐 및 기도에

머무르면서 폐의 민감한 세포에 손상을 일으킬 수 있기 때문에 적절한 환기를 통해 노출을 최소화 할 필요가 있다.

References

- Baeg EK, Joo GD, Seong MS. Evaluation and improvement for the ventilation system using CFD : Focused on a tunnel workplace. Occupational Safety and Health Research Institute, Korea. 2006.
- Choi EH, Kim SG, Lee BK, Jung MH, Son HS. Study on measures for occupational exposure standard and management guidelines on radon. Occupational Safety and Health Research Institute, Korea. 2017.
- Choi HW, Kim CN, Won JU, Kim HK, Roh JH. A study on the radon concentration in the office. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2016;26:334–341. <http://dx.doi.org/10.15269/JKSOEH.2016.26.3.334>
- Cucchi G, Lisardi A, Mostacci D, Tositti L, Tugnoli F et al. Radiation protection issues in the excavation of road and railway tunnels, a preliminary assessment. Radiat Effects and Defects in Sol 2016;171:801–807
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources. Geo Big Data Open Platform, 2021, URL https://data.kigam.re.kr/mgeo/map/main.do?process=geology_tree(accessed 2 December 2021)

- Khan SM, Gomes J, Krewski DR. Radon interventions around the globe: A systematic review. *Heliyon* 2019;5(5):e01737. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01737>
- Korea Industrial Health Association. A study on radon exposure in subway tunnels and management plan. Korea. 2009. pp 61–62.
- Kwon MH, Lee JW, Kim SM, Lee JS, Jung JS. The research for relationships between concentration of indoor radon and distribution of soil geological map using GIS : Based on the Hwacheon and Jangsu areas. *J Kor Soc Occup Environ Hyg* 2017;27:333–351. <https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2017.27.4.333>
- Lee DH, Ryu SH, Jo JH, Seo SC. Evaluation for effectiveness of radon mitigation on dwellings and public buildings in Korea. *J Kor Soc Occup Environ Hyg* 2014;24:518–527. <http://dx.doi.org/10.15269/JKS OEH.2014.24.4.518>
- Li KY, Chan AT. Management of radon in tunnel drilling. *Constr Eng Manage* 2004;130:699–707. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2004\)130:5\(699\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2004)130:5(699))
- Lubin JH, Boice JD Jr, Edling C, Hornung RW, Howe GR et al. Lung cancer in radon-exposed miners and estimation of risk from indoor exposure. *J Natl Cancer Inst.* 1995;87(11):817–27.
- Maria-Lisa A, Natalie K, Jean M. OSHA Compliance Issues: Exposure to Radon Emissions from a Tunneling Project, *Appl Occup Environ Hyg* 1997;12:159–162, DOI: 10.1080/1047322X.1997.10389480
- Nang EK, Abuduxike G, Posadzki P, Divakar U, Visvalingam N et al. Review of the potential health effects of light and environmental exposures in underground workplaces. *Tunn Undergr Space Technol* 2019; 84:201–209. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.11.022>.
- Rad Elec, Inc. E-PERM System User's Manual, Version 3.3.1, URL <https://www.radelec.com/manuals.html> (accessed 2 December 2021)
- Richardson DB, Rage E, Demers PA. Lung cancer and radon: Pooled analysis of uranium miners hired in 1960 or later. *Environ Health Perspect* 2022; 130(5):057010. doi: 10.1289/EHP10669
- Ryu JJ, Jang JK, Lee BK. Exposure to hazardous factors of high-risk workers in the construction industry and work environment management plan- Targeted at tunnel construction work. Occupational Safety and Health Research Institute, Korea. 2003.
- Seo SC, Choi EH, Kim KY, Lim DS, Cho YM. A policy study for prevention of health disorders of radon-exposed worker. Occupational Safety and Health Research Institute, Korea. 2019.
- UNSCEAR. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. Report to the general assembly with scientific annexes. United Nations, New York 2000
- UNSCEAR. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 2019 report. United Nations, New York 2020
- WHO. WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective. WHO Press, Geneva. 2009

<저자정보>

유예지(석사과정), 김형렬(교수), 강모열(교수), 최상준(교수)