

국내 마을상수도 지하수의 라돈 자연저감

조병욱¹ · 윤 옥¹ · 추창오^{2*}

¹한국지질자원연구원, ²안동대학교 지구환경과학과

Natural Radon Removal Efficiency of Small-scale Water Supply System

Byong-Wook Cho¹, Uk Yun¹ and Chang-Oh Choo^{2*}

¹Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon, Korea

²Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong, Korea

The purpose of this study was to understand the degree of natural radon removal efficiency of small-scale water supply systems. Six sites were selected for this study, and data on well characteristics (depth, pumping rate, water tank capacity, distance from well to tap water) were obtained. Water samples both from raw water and three tap waters at each site were collected and analyzed for radon concentration. Average radon removal efficiency of the five sites (A-E) in Nov. 2006 was 26.0% while that of the same sites in Dec. 2006 was 45.6% indicating seasonal difference in natural radon removal efficiency. Meanwhile short-term (April 23, April 30, May 8, 2007) radon removal efficiency from the site F was 44.1-49.0%, implying only a little difference in natural radon removal efficiency. The degree of radon removal at tap water was influenced mainly by pumping rate rather than distance from the well and water tank capacity.

Key words : radon, removal efficiency, alternative maximum contaminant level (AMCL), small-scale water supply system, tap water

마을상수도 지하수의 라돈의 자연저감 정도를 파악하기 위하여 6개 지점을 대상으로 지하수공의 체원, 저수조의 크기, 지하수 사용량, 원수로부터 꼭지수까지의 거리를 측정하고 원수와 3개 꼭지수의 라돈함량을 분석하고 비교하였다. 5개 마을상수도 지하수(A-E)에서 2회에 걸친 원수와 꼭지수의 라돈 자연저감은 2006년 11월에는 26.0%, 2006년 12월에는 45.6%로 나타나 계절별 지하수 사용량에 따른 자연저감율에 차이가 있는 것으로 나타났다. 그러나 마을상수도 F에서 2007년 4월 일주일 간격으로 3회 분석된 꼭지수의 라돈함량은 원수의 44.1-49.0%로 나타나 단기간에 걸친 라돈 자연저감에는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 한편 꼭지수에서의 라돈의 저감은 원수로부터의 거리, 저수조의 크기보다는 지하수의 사용량에 더 영향을 받는 것으로 나타났다.

주요어 : 라돈, 저감효율, 권고치, 마을상수도, 꼭지수

1. 서 언

라돈은 반감기가 3.82일로 짧은 무색, 무취의 불활성 가스로서 Ra-226의 붕괴 과정 중에 발생하는 자연방사성물질이다. 지표수보다는 지하수의 라돈 함량이 높으며, 특정 지질지역 지하수에서 라돈함량이 상대적으로 높게 나타난다. 라돈은 인간에게 피폭되는 총 방사선량의 50% 이상을 차지하며 흡연에 이어 두 번째의 폐

암 발병인자로 알려져 있다(Joo and Je, 1995). 라돈 인체 위해성의 약 80%는 실내공기 중 라돈의 흡입에 기인하나(NRC, 1999), 지하수의 라돈도 음용시의 호흡과 섭취에 의해 인체에 폐암과 위암 발생 가능성을 높인다(EPA, 1999b). 음용수중 라돈 함량에 대한 권고치(기준치)는 각 나라의 지질분포, 지하수 이용 특성, 경제, 인문사회학적 환경 등에 따라서 다르다(NIER, 2008). 예를 들면 미국 EPA의 음용수중 라돈 권고치(Alternative

*Corresponding author: mineralogy@paran.com

maximum contaminant level; AMCL)는 4,000 pCi/L 이나(EPA, 2003), 미국 각 주의 권고치는 지질 여건에 따라서 달라진다. New Hampshire의 라돈 권고치는 2,000 pCi/L이고, Vermont와 Maine는 4,000 pCi/L이나 화강암의 분포면적이 상대적으로 높은 Connecticut과 Rhode Island는 5,000 pCi/L, Massachusetts의 권고치는 10,000 pCi/L이다(NIER, 2008). 한편 국토의 절반 이상이 화강암류로 이루어진 핀란드의 경우 공공급수시설에 대해서는 8,100 pCi/L를, 개인 지하수에 대해서는 27,000 pCi/L (Stuk, 2005)를, 노르웨이의 경우는 13,500 pCi/L을 Action Level로 정하고 있다(NIER, 2002).

미국, 스웨덴 등 외국의 지하수 중 라돈 연구는 1960년대 말부터 시작되던 비해서 국내 지하수의 라돈 함량에 대한 연구는 1990년대 중반부터 이루어져 왔다(NIER, 2008년). 즉, 대전지역 19개 지하수에 대한 우라늄, 라돈 전알파함량(Han and Park, 1996) 연구가 있었고, 대전지역 일부 지하수에서 미국 EPA의 권고치를 넘는 자연방사성물질이 검출되었다는 보도가 있는 후인 1999년부터는 전국적이고 체계적인 조사가 이루어졌다. 그 뒤 옥천대지역 지하수내 라돈 연구(NEMA, 2006) 등의 특정지역에 대한 소규모 연구가 있었다. 1999년부터 2002년까지의 전국 대상 615개 지하수에 대한 라돈함량 조사결과는 국내 지하수의 라돈 함량은 지질과 관계가 있으며 국내와 지질여건이 비슷한 외국의 지하수중 라돈 함량에 비해서 상대적으로 낮은 것으로 알려졌으며(NIER, 2002), 조사 대상 지하수중에서도 상수도의 보급이 여의치 않은 지역의 다중이 사용하는 마을상수도 지하수의 라돈 함량에 대해서 관심이 집중되었다. 마을상수도는 광역상수도의 공급이 어려운 농촌지역이나 산간지역에 음용 및 생활용수를 공급하기 위하여 개발된 수원으로서 용천수, 계곡수도 일부 있으나 대부분은 심도 100m 내외의 지하수공이다. 2004년 말 현재 전국 마을상수도 수는 10,824개이고 이중에서 지하수를 원수로 사용하는 지점은 8,671개 지점이고 1개 마을상수도당 급수인구는 평균 50명 내외이다(Ministry of Environment, 2005). 미국의 경우 1999년 현재 급수시설(community groundwater system)은 42,749개로서 급수인구가 100인 미만은 전체의 32.5%인 14,232개이나 22%는 급수인구가 1,000명 이상이다(EPA, 1999c).

지하수의 라돈 함량은 일반적으로 천부 지하수보다는 심부 지하수에서 높게 검출되는데 이는 지하수가 암석 틈에 갇혀 있기 때문에 라돈 개스가 쉽게 도망가

지 못하기 때문이다. 실제로 지하수공의 심도가 깊은 마을상수도 지하수에서 일반 지하수보다도 라돈의 함량이 높게 검출되고 있다. 지하수의 라돈 함량은 모양내 라듐-226의 함량특성, 기상학적 요인뿐만 아니라 굴진 심도, 케이싱 심도, 지하수 사용량 등 지하수공의 제원에 의해서도 시, 공간적으로 영향을 받는다(Loomis et al., 1988). 2006년 현재 국내에서 라돈 함량이 조사된 지하수 시료 수는 700여 개에 불과해 미국의 200,000, 스웨덴의 40,000, 핀란드의 35,000개 이상(NIER, 2006)에 비하면 적어서 전국적인 함량분포 파악을 위한 실태조사가 우선적으로 수행되어야 한다. 그럼에도 불구하고 지하수를 마을의 음용수원으로 이용하고 있는 마을 상수도 지하수에서 라돈의 함량이 일정 수준 이상 검출되었을 때에는 아직까지 국내 라돈의 음용 권고치가 없지만 라돈 함량을 일정수준 이하로 낮추어 사용해야할 필요성이 제기된다. 지하수의 라돈을 제거 또는 저감하는 대표적인 방법은 처리량이나 라돈의 농도에 따라서 다르지만 폭기(aeration)와 활성탄(granular activated carbon; GAC)이다. 이들 방법은 라돈의 저감효율은 높지만 시설의 운영, 유지 등의 부대비용이 소요된다. 반면에 자연저감은 저감효율은 낮지만 운영비용이 거의 들지 않는다는 장점이 있다. 일반 지하수에 비해서 마을상수도는 수증펌프로 양수한 지하수 원수를 일정 거리 떨어진 지상의 저수조에 저장하였다가 중력배수로 각 가정에 공급하기 때문에 자연저감이 있어서 유리한 편이다. 본 연구의 목적은 공공급수시설인 마을상수도 지하수의 라돈의 자연저감 정도를 파악함에 있으며 이를 위하여 6개 마을상수도 지하수의 공급시스템을 조사하였고 원수와 꼭지수의 라돈 함량을 측정하여 자연저감 효율을 계산하였다.

2. 연구 방법

2.1. 마을상수도의 제원과 수질

연구지역 마을상수도 꼭지수에서의 라돈의 자연저감은 마을상수도의 시설구조에 의한 것으로 저감 정도는 마을상수도의 시설과 지하수의 사용량과 관계가 있다. 즉, 취수정에서 양수된 지하수가 지상의 저수조를 거쳐서 각 가정의 꼭지수까지 도달하는 시간, 지하수공에서 양수된 지하수가 지상 저수조에 저장시의 Free fall aeration 효과, 저수조내에서의 정지에 의해 결정된다.

지하수중 라돈의 자연저감 시험을 위한 조사 대상은 2006년 9월 조사된 마을상수도중에서 라돈 함량이 4,000 pCi/L 이상인 지하수공(NIER, 2006) 중에서 6개

Table 1. Summary of the six small-scale water supply systems chosen for the radon mitigation test.

Well	Latitude	Longitude	Depth (m)	Pumping rate (m ³ /d)	Water tank capacity (m ³)	Geology
A	38°08'06"	128°15'50"	100	18		Jur. Gr.
Tap water 1	38°08'06"	128°15'49"				
Tap water 2	38°08'06"	128°15'50"				
Tap water 3	38°08'07"	128°15'56"				
Water tank	38°08'08"	128°15'57"			30	
B	36°21'31"	126°53'55"	80	21		PC Gn
Tap water 1	36°21'31"	126°53'54"				
Tap water 2	36°21'28"	126°53'51"				
Tap water 3	36°21'24"	126°53'53"				
Water tank	36°21'34"	126°53'58"			30	
C	37°43'50"	127°42'28"	100	20		PC Gn
Tap water 1	37°43'52"	127°42'27"				
Tap water 2	37°43'45"	127°42'33"				
Tap water 3	37°44'13"	127°42'22"				
Water tank	37°44'33"	127°42'27"			15	
D	37°46'27"	127°37'40"	110	32		PC Gn
Tap water 1	37°46'26"	127°37'41"				
Tap water 2	37°46'28"	127°37'50"				
Tap water 3	37°46'28"	127°37'59"				
Water tank	37°46'22"	127°37'40"			30	
E	37°12'39"	127°31'52"	100	44		Jur. Gr
Tap water 1	37°12'41"	127°31'56"				
Tap water 2	37°12'34"	127°31'47"				
Tap water 3	37°12'45"	127°31'43"				
Water tank	37°12'32"	127°31'54"			60	
F	36°54'44"	128°48'35"	100	20		Cre. Gr
Tap water 1	36°54'45"	128°48'27"				
Tap water 2	36°54'45"	128°48'27"				
Tap water 3	36°54'45"	128°48'33"				
Water tank	36°54'53"	128°48'25"			30	

Jur. Gr: Jurassic Granite; PC Gn: Precambrian Gneiss; Cre. Gr: Cretaceous Granite

지점이 선정되었다(Table 1). 6개 마을상수도 지하수공이 관통한 지질은 화강암과 편마암이며, 심도는 80-110 m 범위이다. 지하수의 pH는 5.50-7.05의 약산성 내지는 중성이고, 전기전도도는 111-487 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 넓은 범위를 보인다. 질산염의 함량은 최저 7.02 mg/L에서 최고 28.5 mg/L을 보여서 조사 마을상수도 지하수공들은 음용수로 이용되고 있음에도 불구하고 천부 지하수의 유입이 일어나고 있음을 지시한다(NIER, 2006).

이들 지하수공에는 5-10마력 내외의 수증펌프가 설치되어 있다. 수증펌프로 양수된 지하수는 배관을 거쳐서 보통 지하수공의 위치보다 높은 곳에 설치된 직육면체 형태의 저수조(15-60 m³ 내외)에 저장된다. 이

저수조내 지하수의 수질과 라돈의 함량은 양수시의 천부지하수와 암반지하수의 혼합비율, 지하수공 내에 저유되어 있는 물의 양(well bore storage), 양수시간 등과 밀접한 관계가 있는 것으로 보고되고 있다(Harris et al., 2006). 지하수공과 저수조의 거리는 보통 200 m 내외이다(Table 1). 이 저수조에 저장된 지하수는 다시 중력배수로 각 가정으로 공급된다. 즉, 각 가정에서의 지하수 사용으로 말미암아 저수조에 저장된 지하수가 일정량 이하로 줄어들면 저수조내의 센서가 이를 감지하여 자동으로 지하수공에 설치된 수증펌프를 가동시켜 저수조에 지하수를 채운다. 6개 마을상수도 지하수공에서 각 가정으로 공급하고 있는 지하수의 양은

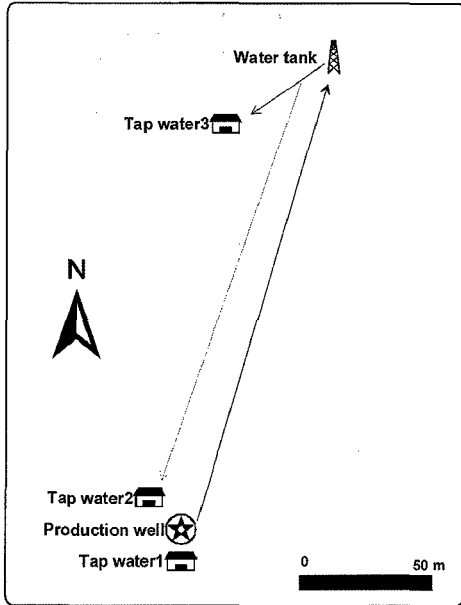


Fig. 1. A schematic diagram of small-scale water supply system D.

2006년 9월에 약 18-44 m³/d로 추정된다(NIER, 2006). 저수조의 용량이 작고 지하수 사용량이 많으면 지하수의 순환속도가 빨라져서 즉, 저수조에 머무르는 시간이 짧아지기 때문에, 라돈의 자연적감 효과는 적어질 것이다. Fig. 1은 마을상수도 D의 취수정, 저수조, 3개 가정의 꼭지수의 공간적인 분포를 보여주고 있다.

2.2. 시료채취 및 분석

현장에서 마을상수도 지하수의 라돈함량 분석을 위한 시료채취는 원수의 경우는 5-10분간의 양수를 거쳐 수온과 수질이 안정을 이룬 다음(Barcelona *et al.*, 1985)이루어졌다. 지하수의 라돈은 휘발성기체이므로 와류(turbulent flow)에 의한 폭기가 일어나지 않도록 주의 하면서 지하수 시료 8 ml를 채취하여 준비된 22 ml vial에 주입하였다. 22 ml의 vial에는 이미 12 ml의 설파광용액(Optiphase HiSafe3) 들어 있으며 8 ml의 지하수를 주입한 후에는 마개를 밀봉한 후 흔들어서 설파광용액과 지하수가 골고루 섞이도록 하였다. 라돈의 반감기는 3.83일이기 때문에 시료채취와 분석시간의 차이만큼 붕괴 감소에 대하여 보정하였다. 꼭지수의 경우는 일반 가정에서 사용하는 방식에 따라서 채취하였으며 역시 와류에 의한 폭기가 일어나지 않도록 주의 하였다. 지하수의 이동 거리에 따른 라돈의 방사능 강도 변화를 파악하기 위하여 지하수공, 저수조, 3개 꼭

Table 2. Radon concentrations (pCi/L) and reduction rates of the three tap waters at each small-scale water supply system.

Well	2006-09-01	2008-11-09	2008-12-22
A	4090	2810	5570
Tap water1		2850(-1.4)	3470(37.7)
Tap water2		2500(11.0)	3910(29.8)
Tap water3		2640(6.0)	1580(71.6)
Average		2663(5.2)	2987(46.4)
B	5540	5740	7450
Tap water1		4720(17.8)	2890(61.2)
Tap water2		4400(23.3)	2060(72.3)
Tap water3		3460(39.7)	2540(65.9)
Average		4193(26.9)	2497(66.5)
C	32600	31300	25500
Tap water1		14000(55.3)	16600(34.9)
Tap water2		16700(46.6)	16600(34.9)
Tap water3		13700(56.2)	16200(36.5)
Average		14800(52.7)	16467(35.4)
D	4000	2220	3180
Tap water1		1350(39.2)	1760(44.7)
Tap water2		1390(37.4)	1510(52.5)
Tap water3		1330(40.1)	1660(47.8)
Average		1357(38.9)	1635(48.3)
E	9890	8080	9510
Tap water1		7710(4.6)	6550(31.1)
Tap water2		7410(8.3)	6610(30.5)
Tap water3		8050(0.4)	6480(31.9)
Average		7723(4.4)	6547(31.2)
Total average		(25.6)	(45.6)

(): removal efficiency (%)

지수의 좌표를 Garmin GPS III plus로 측정하여 지하수공으로부터 저수조, 수도꼭지간의 상대적인 거리를 구하였다. 채취된 원수와 꼭지수 시료들은 가급적 빠른 시간내에 한국지질자원연구원 실험실로 운반하여 α선과 β선 분리측정 기능을 가진 액체설파광계수기(Quantulus 1220TM, Perkin-Elmer Co.)로 최적 분석조건을 확립한 다음 분석하였다. PSA 준위 100에서 300분간 계측했을 때 검출 하한치는 약 3.3 pCi/L였다(NIER, 2006).

3. 결 과

3.1. 5개 마을상수도의 원수와 꼭지수의 라돈 함량
5개 마을상수도에서는 2006년 11월 9일과 12월 22

일 2회에 걸쳐 각 마을상수도당 원수 1개와 꼭지수 3개를 채취하여 지하수의 라돈함량을 분석하였다(Table 2). 즉, 지하수공에서 수중펌프로 양수된 지하수 원수가 지상의 저수조에 저장되었다가 중력 배수로 각 가정집의 수도꼭지에 도달하기까지 어느 정도로 라돈 함량이 줄어드는지 파악하고자 하였다. 2006년 11월 9일에 측정된 5개 마을상수도 원수의 라돈 함량은 2,220-31,300 pCi/L로 2006년 9월의 4,000-32,600 pCi/L보다 대체로 낮은 편이다(Table 2). 5개 마을상수도 꼭지수의 평균 라돈 함량은 원수 함량의 약 74.4%(저감효율 25.6%)를 보였는데 마을상수도 C에서 원수대비 43.7%로 가장 낮으며(저감효율 52.7%), 마을상수도 E에서 95.6%(저감

효율 4.4%)로 가장 높다. 즉, 마을상수도 A의 꼭지수에서의 평균 라돈 함량은 원수의 라돈 함량과 거의 같은 95-101%의 범위로 산출되는데, 이러한 꼭지수의 라돈 함량은 원수에서 꼭지수까지의 체류시간과 저수조에서의 일종의 폭기 현상 등에 의해 라돈의 자연저감이 일어나지만 양수시기별로도 지하수의 라돈 함량에 차이가 있음을 의미한다. Table 1에서 보는 바와 같이 마을상수도 C의 저수조 용량이 15 m³로 가장 작고 마을상수도 E의 저수조 용량이 60 m³로 가장 크어도 불구하고 마을상수도 C의 저감효율이 더 높게 나타났다. 2006년 12월 22일에 측정된 5개 마을상수도 원수의 라돈 함량은 3,180-25,500 pCi/L로 1차인 11월 9일보

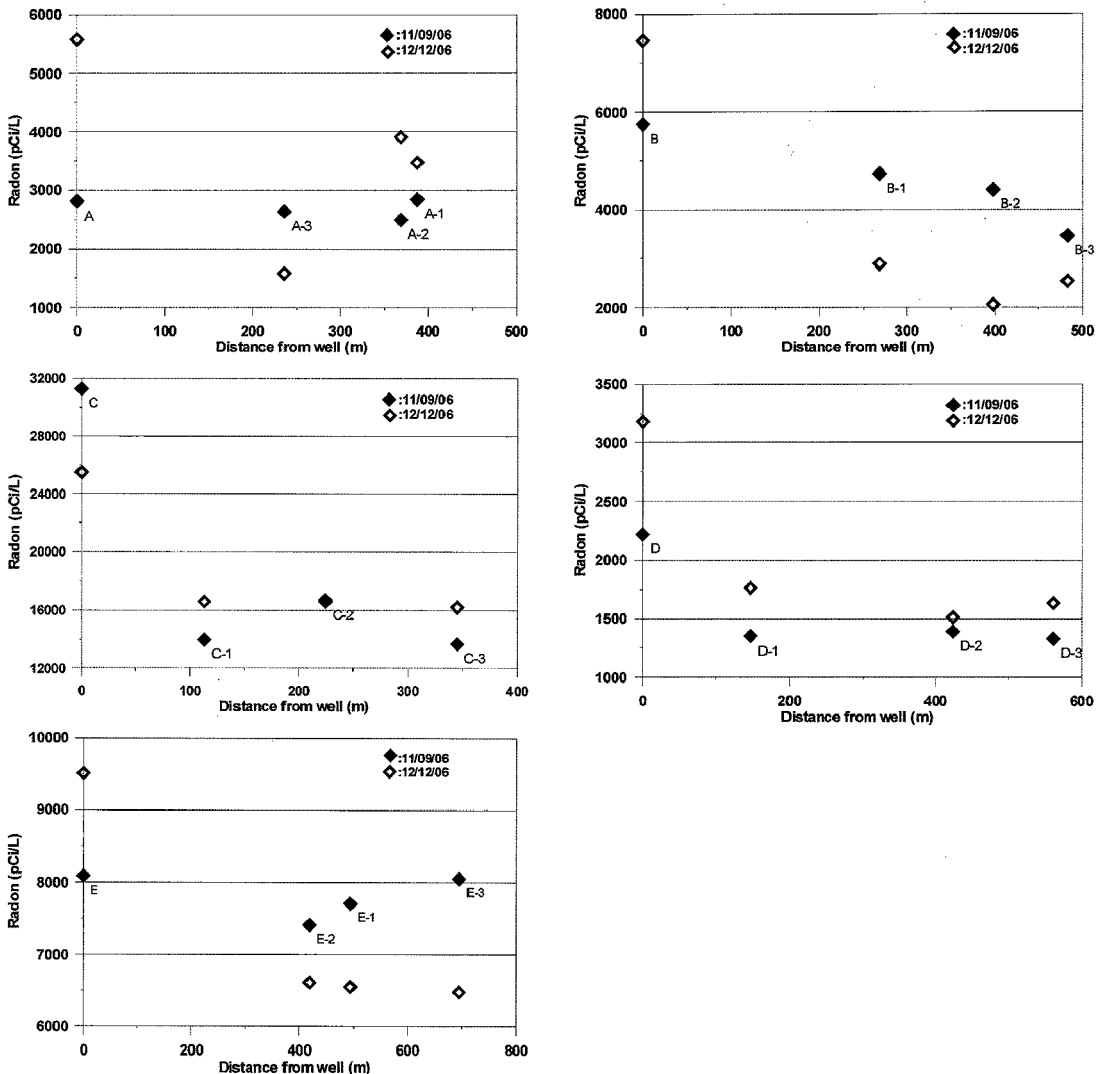


Fig. 2. Radon removal efficiencies of the tap waters with distance from the production well.

다는 약간 높으며 9월 1일과는 비슷한 함량을 보인다. 그러나 5개 마을상수도 꼭지수의 평균 라돈 저감율은 45.6%로 1차 조사(2006년 11월)의 25.6%에 비해서 훨씬 높으며, 2008년에 조사된 17개 마을상수도 꼭지수의 라돈 저감률 49.8%(NIER, 2008)와 비슷한 값을 보인다. 꼭지수에서의 평균 라돈 저감율은 마을상수도 B에서 원수대비 66.5%로 가장 크며, 마을상수도 C에서 35.4%로 가장 낮다.

3.2. 저수조의 크기와 취수점으로부터의 거리에 따른 라돈저감

5개 마을상수도에는 취수점에서 양수된 지하수를 각 가정으로 공급하기 위한 저수조가 설치되어 있는데 그 크기는 Table 1에서 보는 바와 같이 15-60 m³ 규모이다. 마을상수도 C의 저수조 용량이 가장 작아서 15 m³ 이고 마을상수도 E의 저수조는 가장 큰 60 m³로이다. 마을상수도 C의 꼭지수에서의 라돈 저감률은 35.4-52.7%이고 저수조의 크기가 가장 큰 마을상수도 E의 꼭지수에서의 라돈저감률은 4.4-31.2%에 불과하여 저수조의 크기와 라돈 저감률과는 관계가 없는 것으로 나타났다(Table 2).

취수정과 꼭지수와의 거리에 따른 라돈저감효과를 알아보기 위하여 Fig. 2와 같이 나타내었다. 여기서 취수정과 꼭지수와의 거리란 취수정으로부터 저수조까지의 직선거리와 저수조에서 꼭지수까지의 직선거리를 더한 것으로 취수정에서 꼭지수까지의 거리가 멀면 이동하는데 시간이 더 걸려서 라돈의 자연저감 정도가 크리라고 판단하였기 때문이다. 물론 라돈의 자연저감 정도는 저수조의 크기, 지하수의 수질, 산출심도, 지하수의 이용 특성 등에 의해 영향을 받지만 Fig. 2에서 보는 바와 같이 마을상수도 A의 2006년 11월, 12월, 마을상수도 B의 2006년 11월의 꼭지수의 라돈 함량은 취수정으로부터 거리가 멀어질수록 오히려 꼭지수의 라돈함량이 증가하고 있음을 보여준다.

3.3. 마을상수도 꼭지수의 단기간의 라돈 함량변화

비교적 단기간에 걸친 라돈의 자연저감 정도를 파악하기 위하여 마을상수도 F에 대하여 2007년 4월 23일, 4월 30일, 5월 8일 3회에 걸쳐 7-8일 간격으로 원수와 3개 꼭지수의 라돈함량을 관측하였다(Table 3). 마을상수도 F는 Table 1에서 보는 것처럼 지하수공의 심도는 100 m이고 저수조는 지하수공으로부터 약 400 m 떨어진 지점에 위치하며 저수조의 용량은 30 m³이다. 원수로부터 꼭지수까지의 거리는 900-1,000 m 사이이다(Fig. 3). 1차 라돈함량 분석시(4월 23일) 원수의 라돈 함량은 9,400 pCi/L으로서 2006년 9월에 측정된 원수의 라돈 함량 6,770 pCi/L에 비해서 약 1.4배 높다. 3개 꼭지수의 라돈 함량은 각각 4,870, 4,790, 4,710 pCi/L로 꼭지수의 라돈저감율은 48.2-49.9%(평균 49.0%)이다. 2차 라돈함량 분석은 1차 분석일보다 7일 후인 2007년 4월30일에 이루어졌다. 원수의 라돈 함량은 9,000 pCi/L이고 3개 꼭지수의 라돈 함량은 각각 4,920, 4,780, 4,530 pCi/L로 꼭지수에서의 라돈 저감율은 45.3-49.7%이고 평균 저감율은 47.3%이다. 3차 라돈함량 분석은 2차 조사일보다 8일 후인 2007년 5월 8일에 이루어졌으며 원수의 라돈 함량은 7,500 pCi/L이고 3개

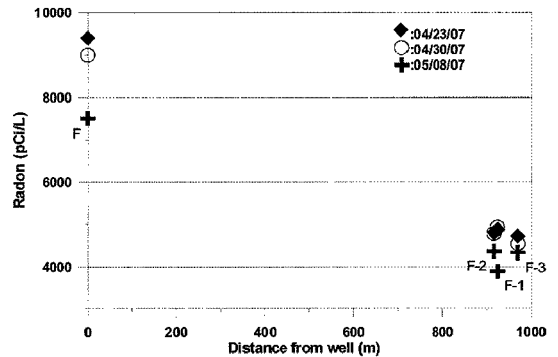


Fig. 3. Radon removal efficiencies of the tap waters with distance at the small-scale water supply system F.

Table 3. Radon concentrations and removal efficiency at the water supply system F and tap water F1, F2, and F3.

Date	F (pCi/L)	F1 (pCi/L)	F2 (pCi/L)	F3 (pCi/L)	Average (pCi/L)
2006-09-01	6770				
2007-04-23	9400	4870(48.2)	4790(49.0)	4710(49.9)	4790(49.0)
2007-04-30	9000	4920(45.3)	4780(46.9)	4530(49.7)	4743(47.3)
2007-05-08	7500	3890(48.1)	4360(41.9)	4320(42.4)	4190(44.1)
Average		3840(47.2)	3940(45.9)	3880(47.3)	3887(46.8)

(): removal efficiency (%)

꼭지수의 라돈함량은 각각 3,890, 4,360, 4,320 pCi/L로 꼭지수의 라돈 저감율은 41.9-48.1%(평균 44.1%)이었다(Fig. 3). 3회에 걸친 3개 꼭지수의 평균 라돈 저감율은 46.8%로서 이 저감율은 5개 마을상수도(A-E)의 2차 조사시기의 원수대비 꼭지수의 평균 라돈저감율인 45.6%와 비슷하며, 2008년 경기도 이천지방 등의 17개 마을상수도 꼭지수에서의 라돈저감을 49.8%(NIER, 2008)와도 비슷하다.

4. 토 의

4.1. 지하수의 라돈저감 방법

지하수의 라돈을 저감 또는 제거하는 방법으로는 크게 폭기와 활성탄, 정치(storage)의 방법이 있다(EPA, 1999b). 각 방법에 대해서 간단히 살펴보면 다음과 같다. 폭기의 제거 효율은 공기와 물의 비율(기액비)에 영향을 받는다. 대표적인 폭기방법인 Packed Tower Aeration, Diffused Bubble Aeration의 저감효율은 각각 78-99.9%, 71-99.9%로 알려져 있다(EPA, 1999b). 폭기에 의한 지하수의 라돈 저감은 일반적으로 중규모 크기 이상의 급수시설, 지하수층 라돈 함량이 높은 (20,000 pCi/L 이상) 급수시설에 주로 이용된다(NIER, 2008). 급수인구가 적은 경우 활성탄 방법에 비해서 유지비용이 많이 든다. 특히 국내 마을상수도의 경우는 취수정에서 수중펌프로 양수된 지하수가 지상의 저수조에 바로 저장되는 구조를 가지고 있는데 만일 폭기 시설을 설치하면 폭기에 의해 지하수의 라돈을 제거한 후 저수조에 올리기 위한 추가 동력시설이 필요하다.

활성탄에 의한 라돈제거는 지하수가 활성탄칼럼을 통과하는 동안 활성탄의 표면에 라돈이 흡착되는 경우와 활성탄에 흡착된 라돈이 붕괴되는 경우이다(NIER, 2002). 일반적으로 활성탄에 의한 라돈 저감은 소규모의 급수시설, 15,000-20,000 pCi/L 이하의 라돈 농도에 적합하며(NIER, 2008), 공상체류시간(empty bed contact time; EBCT) 30-130분일 때의 라돈 저감효율은 70-

99%로 알려져 있다(EPA, 1999b). 활성탄에 의한 라돈의 제거는 우리나라 동시에도 제거될 수 있으며 이 경우 아직까지 국내에는 이의 저장, 운반, 처분에 대한 관련법이 미비한 상태이기 때문에 문제가 된다(NIER, 2008).

정치(atmospheric storage)는 지하수의 라돈 농도가 비교적 낮을 경우 일정기간 용기에 저장하여 라돈을 저감하는 방법이다. 정치는 대기와 접촉면이 있는 상태에서 이루어지기 때문에, 그 제거는 붕괴에 의한 감소뿐만 아니라 기액 계면에서의 물질이동에 의해서도 결정된다. 따라서 지하수의 수질, 수온, 유입수의 농도, 계면의 면적 등이 라돈제거 영향인자로 작용하지만 폭기나 활성탄에 비해 라돈 제거 비용이 거의 들지 않는다(NIER, 2002, 2008). 일부 외국처럼 지하수를 대규모 상수원으로 이용하는 나라와는 달리 우리나라와 같이 지하수 사용인구가 100인 내외이고 저수조가 설치되어 있는 마을상수도나 소규모급수시설의 경우 가장 고려할 만한 방법이다.

4.2. 외국의 라돈 음용 기준치와 국내 지하수의 라돈 함량

라돈의 농도가 일정수준 이상인 음용수를 장기간 복용시 폐암을 유발시킬 수 있기 때문에 일부 국가에서는 라돈의 음용 기준치(권고치)를 가지고 있으나 각 나라마다 다르다(Table 4). 즉, 미국의 음용수중 라돈 권고치는 4,000 pCi/L이고 캐나다는 권고치가 없다. 국토의 대부분이 결정질암으로 이루어져 있어서 지하수중 라돈 함량이 높은 노르웨이와 핀란드는 각각 500 Bq/L와 300 Bq/L인 Action Level를 가지고 있으며(SSI, 1999), 유럽공동체의 권고치는 1,000 Bq/L이다(Euratom, 2001). 여기서 주목할 것은 음용수의 라돈 기준치(권고치)는 각 나라의 지질학적, 사회 경제학적 여건에 따라서 달라진다는 점이다. 외국의 일부 국가에서는 다중이 이용하는 공공급수시설에 대해서는 라돈의 규제치(action level)가 있지만 개인 지하수에 대해서는 소유

Table 4. Action levels and AMCL of radon in groundwater of some countries.

US ¹⁾	Canada ²⁾	Norway ³⁾	Finland ³⁾	EC ⁴⁾
4000 pCi/L ⁵⁾	-	500 Bq/L ⁶⁾	300 Bq/L ⁶⁾	1,000 Bq/L ⁶⁾

¹⁾US EPA (2003) National Primary Drinking Water Standards
²⁾Health Canada (2006) Guidelines for Canadian Drinking Water Quality
³⁾SSI (1999) Radon Legislation and National Guidelines
⁴⁾Euratom (2001) Radon Legislation and National Guidelines
⁵⁾Alternative maximum contaminant level
⁶⁾Action level

주가 직접 저감노력을 하도록 계도하고 있다. 아직까지 국내 음용수의 라돈함량 권고치를 제안할 정도로 충분한 조사가 이루어지지 않았지만 현실적으로는 전국 실태조사 과정에서 외국의 권고치를 넘는 지하수, 특히 마을상수도에 대해서는 라돈의 제거, 저감 조치가 필요한 실정이다.

국내 지하수의 라돈함량에 대한 연구는 1999년부터 2002년까지 전국 615개 지하수를 대상으로 한 예비적인 연구가 이루어졌는 바 지질환경이 비슷한 외국에 비해서 낮은 함량을 보여 평균값과 중앙값은 각각 1,862 pCi/L와 920 pCi/L에 불과하다(조병욱 외 2007). 615개 지하수중에서 라돈의 함량이 미국 EPA의 AMCL인 4,000 pCi/L를 넘는 시료수는 전체의 11.2%이나, 6,200 pCi/L를 넘는 시료는 5.8%인 37개, 핀란드의 Actional Level인 8,100 pCi/L을 상회하는 지하수는 3.4%인 21개에 불과하다(NIER, 2002). 만일 국내 라돈의 음용 권고치가 4,000 pCi/L이고 라돈의 자연 저감률은 앞에서 설명한 5개 마을상수도의 2회 분석 평균치인 35.6% 정도라고 가정하면 전체 지하수의 5.8%만을 폭기나 활성탄의 방법으로 저감시키고 나머지는 자연저감에 의해 4,000 pCi/L 이하로 낮출 수 있을 것으로 추정된다.

4.3. 폭기수에서의 라돈 자연저감을 변화와 요인

라돈은 반감기가 짧으며 지하수의 이동은 느리고 이동거리가 짧다는 사실을 고려하면, 지하수의 라돈 농도는 지하수공이 관통한 대수층에 영향을 받는다. 또한 라돈은 기체이기 때문에 저수조에서의 자연 폭기와 환기정도, 저수조에서의 체류시간 등에 따라 방사능 강도가 달라질 수 있다. 보통 지하수 공급시스템에서의 이동이나 저장탱크에서의 정지로 인한 라돈 저감효과는 10-20%로 보고되고 있다(NRC, 1999). 따라서 자연저감의 효율을 높이기 위해서는 저장탱크내의 지하수가 공기와 접촉할 면적을 높이는 방법 즉, 가로와 세로의 길이를 크게 하고 높이를 낮게 하는 방법과, 저수조내의 공기를 바깥으로 배출시킬 수 있도록 환기장치를 설치하는 방법도 고려할 수 있다(EPA, 1999a).

5개 마을상수도의 폭기수에서 2회에 걸쳐 측정된 라돈 저감율은 측정 시기별 차이가 있음을 보였다. 2006년 11월 9일의 1차 조사시의 라돈 자연저감에 비해서 2006년 12월 22일 2차 조사시 라돈의 자연저감 효과가 더 크게 나타난 것은 계절적으로 보아서 11월에 비해서 12월의 지하수의 사용량이 적어서 지하수가 저수조에 머무른 시간이 더 길었기 때문으로 판단된다. 그

러나 1차 조사시 라돈 저감율이 가장 높은 마을상수도(C의 52.7%)가 2차 조사시(B의 66.5%)와 다르게 나타나 라돈의 자연저감율은 계절별 지하수 사용량뿐만 아니라 각 마을상수도 지하수의 이용량에 의해서도 달라짐을 의미한다. 마을상수도 E의 경우 1, 2차 조사 모두 5개 마을상수도 중 라돈 저감률이 가장 낮으며, 3개 폭기수의 저감률에도 차이가 적어서 지하수 사용량이 많음을 지시하다.

한편 마을상수도 A에서의 1차 라돈함량 분석시 폭기수 A1의 라돈 함량이 원수보다 오히려 높게 나타났고(101.4%), 3개 폭기수의 평균 라돈 저감율은 5.2%에 불과하여 일반적으로 지하수가 저수조내로 이동, 유입으로 인한 자연 저감률로 알려진 10-20%(NRC, 1999)보다도 낮다. 따라서 지하수 공급시스템내에 농축된 Ra-226으로 인해서 원수보다 폭기수에서 일시적으로 라돈의 농도가 높아지는 경우로도 추측할 수 있으나(Alabdula'aly, 1994; NRC, 1999), 2차 함량분석(2006년 12월 22일)에서는 폭기수의 평균 라돈함량이 원수의 62.3%에 불과해 지하수 공급시스템내에 농축된 Ra-226에 의해 지하수의 라돈함량이 증가한 것보다는 양수시기별 라돈함량 차에 기인하리라고 판단된다(Harris *et al.*, 2006).

5개 마을상수도 폭기수에서의 43일간의 시간간격을 둔 라돈의 자연저감 시험과는 달리 마을상수도 F에서는 7-8일 간격의 단기간의 라돈 자연저감 변화를 파악하였다. 2007년 3차례에 걸쳐 분석된 마을상수도 F의 원수의 라돈함량은 2006년 9월 7일의 6,770 pCi/L에 비해서 최저 1.11배에서 최고 1.39배의 함량변화를 보이지만 폭기수의 평균 함량은 원수의 51.0%에서 55.9%의 함량을 보여 차이가 없는 것으로 보인다(Table 3, Fig. 3). 정확한 지하수 사용량을 알기 어렵지만 2007년 5월 8일 3개 폭기수의 평균 라돈 함량이 원수의 55.9%로 4월 23일의 51.0%, 4월 30일의 52.7%에 비하여 약간 높은 것은 5월 8일이 어버이날이었기 때문에 지하수 사용량이 평상시보다 많아서 자연저감 효과가 줄어들었기 때문으로 판단된다. 3 차례에 걸친 폭기수 F1, F2, F3에서의 평균 라돈함량도 각각 원수의 52.8%, 54.1%, 52.7%로 거의 차이가 없음을 보여서 단기간에 걸친 라돈 자연저감율에는 큰 변화가 없는 것으로 판단된다.

저수조의 크기가 크면 정지효과가 더 커지기 때문에 라돈의 자연저감효과가 더 크다. 저수조의 크기와 폭기수에서의 라돈 자연저감 정도를 파악하기 위하여 5개 마을상수도의 저수조의 크기와 라돈 저감율을 비교

한 결과 저수조 용량이 15 m³로 가장 작은 마을상수도 C의 꼭지수의 라돈 저감률은 35.4-52.7%인 반면에 저수조의 용량이 60 m³로 가장 큰 마을상수도 E의 꼭지수의 라돈 저감률은 4.4-31.2%에 불과한 것으로 나타났다. 이는 마을상수도 E의 저수조의 용량이 크지만 지하수의 이용량이 많아서 저수조 내 체류시간이 짧아져서 자연저감이 덜 일어난 것으로 판단된다. 따라서 꼭지수에서의 라돈 저감율에 있어서 저수조의 크기가 미치는 영향은 미약한 것으로 판단된다. 취수정부터 꼭지수까지의 거리에 따른 라돈저감 효과는 각 마을상수도간에도 큰 차이가 없었으며(Fig. 2의 마을상수도 A와 E), 한 마을상수도의 꼭지수에서의 라돈저감정도도 분석시기별로 다른 값을 보여주기도 하였다(Fig. 2). 따라서 꼭지수에서의 라돈저감 정도는 저수조의 크기나 원수로부터의 거리에 의한 영향보다는 지하수 사용형태, 이용량 등에 더 영향을 받으리라 해석된다. 즉, 마을상수도 E처럼 저수조가 크지만 지하수의 사용량이 많아서 저수조내에 머무르는 시간이 적으면 지하수의 라돈 저감효율이 떨어지는 것으로 보인다. 마을상수도 지하수의 정확한 라돈 자연저감 정도를 파악하기 위해서는 측정시기별, 계절별, 지하수 이용특성별, 지하수의 수질, 저수조의 크기, 지하수의 이동거리 등을 고려한 자연저감에 대한 연구가 필요하다.

5. 결 론

국내 마을상수도 지하수중 라돈의 자연저감 정도를 파악하기 위하여 라돈 함량이 4,000 pCi/L 이상인 6개 마을상수도에서 지하수공의 채원, 공급시스템을 파악한 후 원수와 꼭지수의 라돈함량을 비교, 분석하였다. 5개 마을상수도에서 2회에 걸쳐 분석한 꼭지수의 라돈 자연저감률은 2006년 11월 9일의 25.60%에 비해 2006년 12월 22일에는 45.6%로 높아서 계절별 지하수의 사용량 차이가 라돈 자연저감율에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 취수정으로부터 꼭지수까지의 이동거리, 저수조에서의 정치보다는 지하수의 사용량이 라돈의 자연저감에 미치는 영향이 더 큰 것으로 나타났다. 1개 마을상수도에서 7-8일 간격으로 3회에 걸쳐 원수와 꼭지수의 라돈 함량을 분석한 결과 꼭지수의 라돈저감율은 44.1-49.0%로 나타나 단기간의 라돈 자연저감율에는 큰 차이가 없었다. 마을상수도 원수의 라돈함량이 5,500 pCi/L 이하이면 꼭지수에서의 라돈 함량은 미국 EPA의 AMCL인 4,000 pCi/L 이하로 자연저감될 것으로 판단된다. 그러나 마을상수도 꼭지수의

라돈 자연저감 정도는 측정시기, 사용량, 저수조의 크기, 이동거리 등에 영향을 받기 때문에 이들을 고려한 자연저감에 대한 추가 연구가 필요하다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 국가연구개발사업인 ‘지구환경변화대응 지하수 확보 통합솔루션 개발(10-3414)’ 사업과 국립환경과학원의 용역과제인 ‘지하수 중 자연방사성물질 정밀조사(I) 과제’의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

조병욱, 성익환, 조수영, 박선구 (2007) 국내 지하수의 라돈함량 예비조사. 지하수토양환경학회지, v.12, n.5, p.98-104.

Alabdula'aly, A.I. (1994) Radon levels in a water distribution network. Jour. Environmental Radioactivity, v.37, p.215-221.

Barcelona, M.J., Gibb, J.P., Helfrich, J.A. and Garske, E.E. (1985) Practical guide for groundwater sampling. SWS Contract Report, 374p.

EPA (1999a) National primary drinking water regulations; Radon-222 Proposed rule. Federal Register, v.64, n.211, FR 59246.

EPA (1999b) Technologies and costs for the removal of radon from drinking water.

EPA (1999c) Radon in drinking water health risk reduction and cost analysis. 64 Federal Register 9560.

EPA (2003) National Primary Drinking Water Standards.

Han, J.H. and Park, K.H. (1996) Abundances of uranium and radon in groundwater of Taejeon area. Econ. Environ. Geol, v.29, n.5, p.589-595.

Harris, S.A., Billmeyer, E.R. and Robinson, M.A. (2006) Evaluation of repeated measurement of radon-222 concentration in well water sampled from bedrock aquifers of the Piedmont near Richmond, Virginia, USA: Effects of lithology and well characteristics. Environment Research, v.101 p.323-333.

Health Canada (1995) Guidelines for Canadian drinking water quality: Supporting documentation.

Joo, S.H. and Je, W.M. (1995) Radon radioactivity and environment, Kechugmunhwa Publisher. 288p.

Loomis, D.P., Watson, J.E. and Crawford-brown, D.J. (1988) Predicting the occurrence of radon-222 in groundwater supplies, Environmental Geochemistry and Health. v.10 n.2, p.41-50.

National Research Council (1999) Risk assessment of radon in drinking water. National Academies Press, Washington.

Ministry of Environment (2005) Statistics of the small-scale water supply system (2004).

NEMA (2006) Development of risk assessment and mitigation technique for uranium and radon from geologic environment. NEMA-04-NH-03, 212p.

- NIER (2001) Study on the radionuclides concentrations in the groundwater(3). NIER Report, 388p.
- NIER (2002) Study on the radionuclides concentrations in the groundwater(4). NIER Report, 357p.
- NIER (2006) A study on the radionuclides concentrations in the groundwater. NIER Report, 200p.
- NIER (2008) A detailed study of the radionuclide concentration in the groundwater. NIER Report, 293p.
- SSI (1999) Radon legislation and national guidelines.
- STUK (2005) 238U-series radionuclides in Finnish groundwater-based drinking water and effective doses. STUK-A123.

2010년 1월 8일 원고접수, 2010년 2월 20일 게재승인