

[총설]

외국에서의 지하수 중 방사성물질 관리에 대한 고찰(II) - 라돈 -

박선구* · 임연택

국립환경연구원 물환경연구부

International Trends for Radionuclides Management in Groundwater

Sun-ku Park* · Yeon-taek Rim

Water Quality Research Department, The National Institute of Environmental Research Incheon, 404-170, Korea

1. 머리말

먹는물의 수원을 대부분 지표수에 의존하여 왔으나 지표수의 수질오염증가 추세 등에 따라 지표수를 정수처리하여 수돗물을 먹는물로 이용하는 비율이 감소하고 있는 실정이다. 그리고 편안하고 안락한 생활을 추구하고 건강에 대한 관심이 크게 증가함에 따라 다양한 형태의 먹는물에 대한 국민들의 관심으로 인하여 지하수를 먹는물로 이용하는 비율이 크게 증가하고 있다.

지하수 이용과 관심이 증가됨에 따라 지하수의 수질기준을 개선하고 새로이 제정¹⁾하는 등 지하수 수질관리에 제도적으로 개선하고 보완하여 왔다. 그러나 지금까지 지하수의 인위적인 오염에 대하여 커다란 관심을 가져왔지만 지질학적인 환경여건에 의하여 자연적으로 이미 형성되어 있는 방사성물질에 대한 관심은 미흡하였다. 1998년 5월 대전지역의 지하수와 먹는샘물에서 방사성물질인 우라늄이 검출되었다는 조사결과가 보도됨에 따라 지하수 중 방사성물질에 대하여 그 관심도가 크게 증가하기 시작하였다. 따라서 국가차원에서 이들의 관리방안을 마련하기 위하여 '98~'02년까지 4년 동안 지하수 중 방사성물질 함유실태조사를 실시하였으며 그 관리방안을 마련한 바 있다. 그 조사결과로 인하여 지하수 중 방사성물질이 화학물질처럼 인위적인 오염에 의하여 발생하는 것이 아니라 자연적으로 발생하는 물질임을 일반 국민들이 인식하게 하는데 크게 기여하게 되었다.

먹는물로 이용하는 지하수 중 방사성물질에 대한 수질기준 등의 관리는 다른 수질오염물질과는 달리 세계적으로 보편화되어 있지 않고, 일부 선진국에서만 기준치로 설정되어 있거나 제안치로 제시되고 있는 실정이다.

특히, 방사성물질 중 라돈은 미국 등 선진 외국에서도 우라늄 등 다른 방사성물질과는 달리 수질기준 설정 과정과 관리가 훨씬 더 복잡하고 어렵기 때문에 그 관심도가 매우 크고, 환경정책적으로도 중요한 비중을 차지하고 있다. 또한 일부 유럽국가에서는 우라늄에 대한 수질기준이 없고

대신에 라돈의 관리방안과 조사연구도 지속적으로면서 매우 체계적으로 하고 있다.

따라서 본 고에서는 지하수 중 우라늄에 대한 외국에서의 관리동향 고찰에 이어 라돈에 대한 일반적 특성과 미국 등 선진 외국에서의 수질기준 설정과정과 관리동향을 파악하고 검토하여 기술하고자 한다.

2. 라돈의 특성

2.1. 라돈(Radon)의 붕괴

^{222}Rn , ^{219}Rn 및 ^{220}Rn 은 각각 ^{238}U , ^{235}U 및 ^{232}Th 의 붕괴 계열로부터 생성되는 딸 핵종(daughter nuclide)들이다(Fig 1). ^{222}Rn 은 ^{226}Ra 의 방사성 붕괴과정에서 형성되며 ^{222}Rn 의 반감기는 3.82일이다. 짧은 반감기 때문에 라돈의 딸원소는 라돈 모원소와 방사성 평형에 빠르게 도달되며, 토양에서 라돈으로부터 형성되는 대부분의 라돈은 그대로 지구상에 잔류하게 된다.

0.03 Bq/g의 라돈을 포함하는 일반적인 토양은 1제곱미터에서 1000~2000 Bq의 라돈을 매일 대기 중으로 방출한다. 라돈의 또 다른 근원지로는 지하수가 라돈을 함유하는 암석과 토양을 통하여 흐르는 경우가 해당된다.

2.2. 라돈의 용해 특성

라돈에는 세 개의 동위원소가 있는데 이들은 무색, 무취이고 화학적으로 비활성기체이며 알파선을 방사한다. 물에서 라돈의 용해도는 온도에 반비례하여 온도가 증가할수록 급격하게 감소한다. 또한 라돈은 휘발성이 강하기 때문에 물에서 쉽게 방출된다. 지하수 중 라돈 함량은 지하수의 유동체계의 대수층 암석의 균열폭과 관련되는 경우가 흔하다.

화강암지역 지하수에서 라돈의 용해과정을 살펴보면 화강암은 원래부터 우라늄의 함량이 다른 암질에 비하여 높지만 화강암의 물리적 특성에 의하여 우라늄의 용해정도가 결정되는 경우가 흔하다. 특히 화강암과 같은 화성암은 결정화 작용, 냉각, 침식 과정 등에서 열적, 지각 균형설에 따른 변화를 수반하게 된다. 이에 따른 압력이 방출됨으로써 미세균열(micro-fracturing)이 발달하게 된다. 이 같은 균

* To whom correspondence should be addressed.
nierpsk@hanmail.net

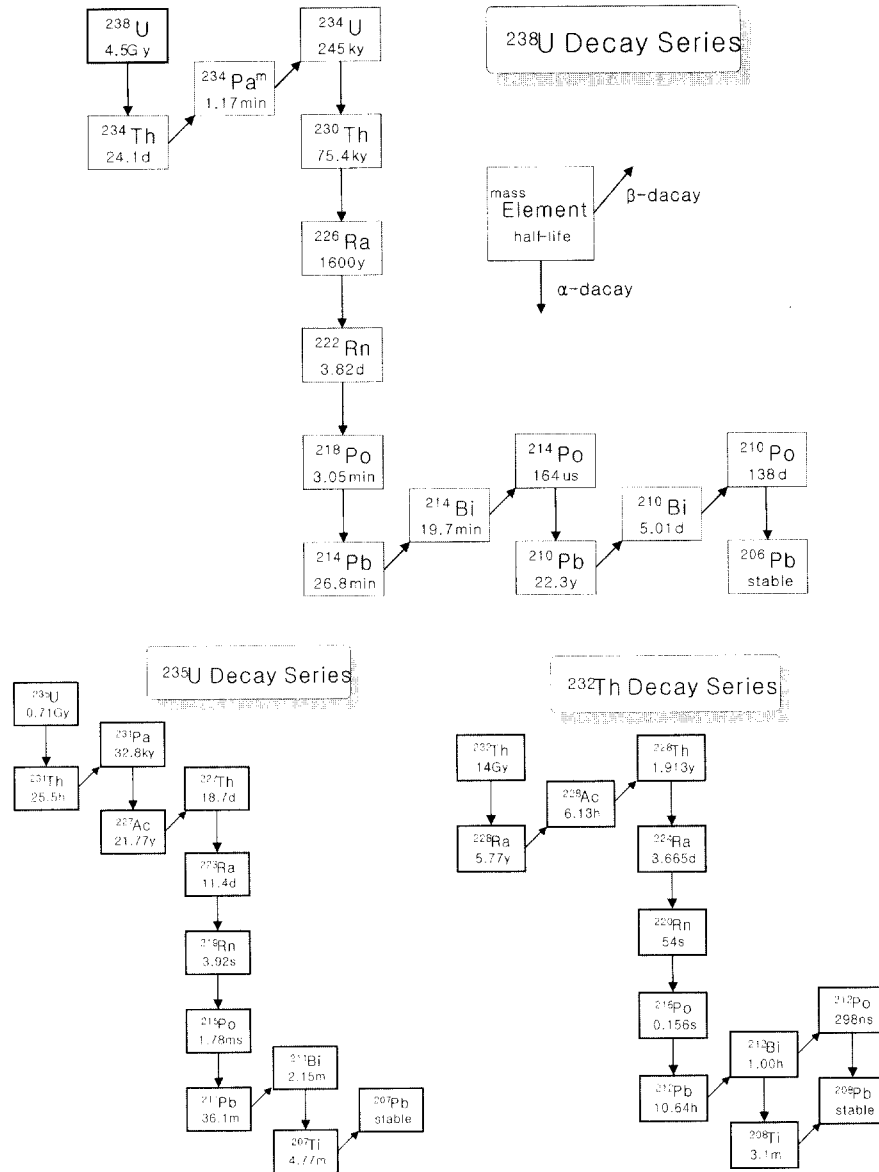


Fig. 1. U-238, U-235, and Th-232 decay series. showing the principal mode of decay of each radionuclides.

열의 틈은 경우에 따라서는 최소 10 μm 정도로 작고 대개는 불연속적인데, 이들 가운데서 균열이 서로 연결되는 경우에는 암석으로부터 라돈의 확산이 일어날 수 있다. Andrews 등(1989)²¹⁾의 연구에 따르면 균열의 폭은 20~250 μm 범위를 보이는데, 이 같은 균열폭을 고려하면 천부 지하수가 심부로 쉽게 유입이 되어 수십년내에 심부 지하수와 혼합이 일어날 수 있다. 특히 입자경계나 미세균열에 따라서 라돈의 확산이 일어나기 때문에 화강암의 표면으로부터 쉽게 라돈이 유입된다.

자연수에서 라돈의 이동은 화학적 과정 보다는 물리적 과정에 더 영향을 받는다. 라돈은 수용액에서 이온화가 되지 않을 뿐만 아니라 고체상에도 침전이 일어나지 않으며, 또한 유기물에 흡착되기도 하지만 대부분의 광물에는 흡착이 일어나지 않는다.

지하수 중 라돈 함량은 모핵종인 라듐보다 수 배가 높지만 용해된 라돈 농도는 수용액에 존재하는 라듐에 의해 거의 영향을 받지 않는데, 그 이유는 라듐은 주로 고체와 암석-물 작용이 일어나는 표면에 존재할 때 라돈이 지하수로 빠져나와 용해되기 때문이다.

3. 외국의 방사성물질 중 라돈의 관리동향

3.1. 미국

3.1.1. 설정배경

1) 1991년 이전의 규정

1974년 안전한 음용수법(Safe Drinking Water Act; 이하 SDWA)에 방사성물질에 대한 규제안이 추가되면서 방사성 물질에 대한 관리가 시작되었다.

그 후 1986년에 개정된 SDWA의 요구에 따라 미국환경보호청(US Environmental Protection Agency)에서는 상수도에서 발생한다고 알려졌거나 발생될 가능성이 있는 오염물질에 대해서 수질목표치인 최대오염허용농도 목표(Maximum Contaminant Level Goal, MCLG)와 잠정적인 일차 먹는물 규제안(National Primary Drinking Water Regulations, NPDWRs)을 설정하였으며, 그 해 1986년 9월에 EPA는 라돈-222와 기타 방사성 물질들에 대하여 Advance Notice of Proposed Rulemaking(ANPRM)을 발표하였다. ANPRM에는 이들의 유용한 분석방법과 처리기술 뿐만 아니라 방사성 물질들의 발생, 건강 영향, 위해도 등에 관한 내용들을 언급하고 있으며, 추가적인 데이터와 EPA의 규제방향 등의 계획에 대해서도 설명을 하고 있다. 1990년 여름 동안에는 ANPRM에 대한 재검토를 실시하였고, 수정된 내용은 1991년 Notice of Proposed Rulemaking(NPRM)에 제시하였다.

2) 1991년 Notice of Proposed Rulemaking

1991년 7월에 EPA는 1986년 ANPRM에서 제시된 내용을 보완하여 라돈에 대한 최대오염허용농도 목표 MCLG, 최대오염허용농도(Maximum Contaminant Level, MCL), 최적처리기술(Best Available Technology, BAT), 모니터링, 보고 사항과 상수도내 라돈 농도 공개 등이 제안되었다. 그 내용을 살펴보면 최대오염허용농도 목표(MCLG)를 0 pCi/L로 제안하였고, 최대오염허용농도(MCL)는 300pCi/L로, 최적처리기술(BAT)은 폭기(aeration)방법을 제안하였다. 이는 모든 방사성 물질을 발암물질로 보고 MCLG를 0 pCi/L로 설정하였으며, 라돈의 섭취 및 호흡으로 인한 위해도 평가를 근거로 1 pCi/L 노출시 1×10^{-7} 의 위해 수준을 고려하여 MCL을 제안하였다. 제안된 NPRM에서는 지하수를 상수원수로 사용하는 모든 공공급수시설(Community Water Systems, CWSs)과 학교나 음식점과 같이 공동으로 물을 이용하는 급수시설이 아닌 일시적이고 비공공급수시설들(Non-Transient Non-Community Water Systems, NTNCWSs)은 각 특정 지점에서 라돈 농도를 1년에 4회의 모니터링을 수행하도록 하고 있다. 또한 NPRM에서는 년 4회의 모니터링 결과를 산술 평균하도록 되어 있으며, 만일 배수 급수 시설내 1지점이라도 MCL를 초과하였을 경우에는 유입수를 처리하거나 다른 상수원수를 이용하도록 하고 있다. 이러한 NPRM은 단속 비용 및 경제성 평가 뿐만 아니라 MCL 시행시 얼마나 위해성이 감소되는가에 대한 평가도 포함되어 있다. EPA에서 1991년 제안했던 MCL 적용에 따라 미칠 수 있는 영향에 대하여 다음과 같이 추정할 수 있다. 첫째로 음용수 중 라돈으로 인해 10,000명당 2명이 발암 가능성이 있을 것이며, 둘째 연간 80명이 발암 가능성을 피할 수 있으며, 셋째 대략 27,000개의 정수처리장에 영향을 끼칠 수 있으며, 넷째 연간 약 180,000만 달러의 총 비용이 소요될 것이다.

3) 1994년 라돈의 다매체 위해성 및 비용평가(Multimedia Risk and Cost Assessment of Radon)

1992년 국정보고회에서 EPA는 라돈의 노출에 의한 다매체 위해성(multimedia risk)을 제어하기 위한 비용과 라돈 제거 및 처리에 관하여 기술하였다. 따라서 EPA에서는 1994년 국정 보고회에 라돈의 위해성, 치명적인 암 증상, 암 증상을 피하기 위한 방법과 물이나 실내 공기로 인한 위해성을 저감시키기 위하여 소요되는 비용에 관한 보고서를 제출하였다. 이 보고서에서 EPA는 라돈에 의한 암 발생 등의 위해성은 공기와 물, 둘 다 높다고 제시하였으나 대체로 공기가 물에 비해 매우 높지만 음용수에 의한 발암을 고려할 경우, 먹는물 내 어떠한 오염물질보다도 라돈에 의한 발암성이 높다고 하였다. 이러한 이유로 인하여 EPA에서는 음용수내 라돈의 위해성에 대한 양적인 불확실성 분석(quantitative uncertainty analysis)도 실시하였다.

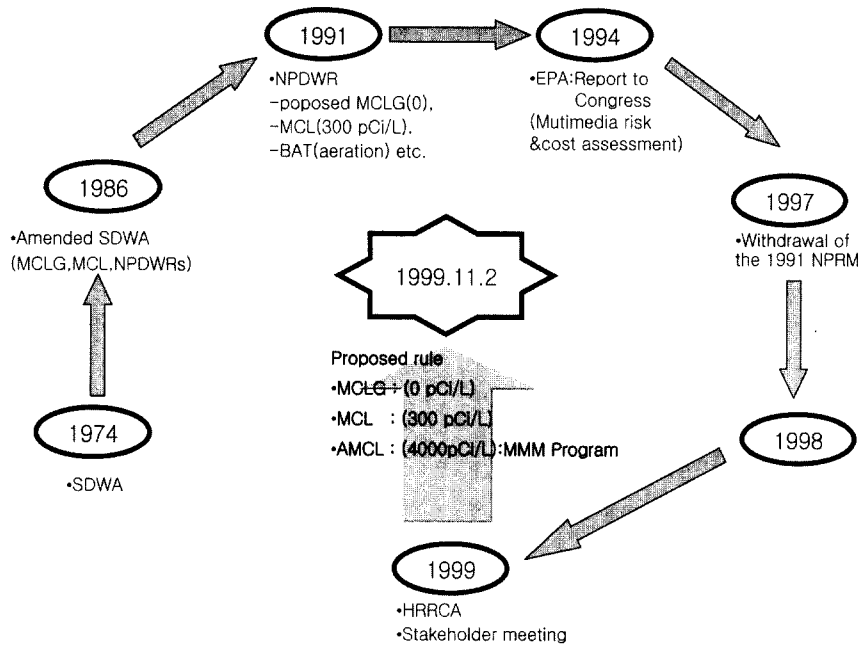
1994년 국정보고서에 따르면 규제 대상 산업체에서는 MCL인 300 pCi/L의 규제치를 만족하기 위해서 EPA에서 제시한 비용(연간 2억 7천 2백만 달러)보다 많은 비용이 지출된다고 하였다.

4) 1997년 라돈-222에 관한 1991년도의 NPRM의 철회

1997년 방사성으로부터 건강을 보호하고, 물과 실내공기 중의 라돈을 제거하는데 소요되는 비용에 관하여 평가를 실시하였으며, 이를 토대로 1996년 SDWA를 개정하였고, 1997년에는 1991년에 제안되었던 규제안을 모두 철회하였다. 그 주된 이유는 1991년에 제안되었던 MCL은 300 pCi/L 였으나, 39% 이상의 지역에서 이보다 높은 수준의 라돈 농도가 검출되어 이것이 현실적인 문제로 제기되었다. 따라서 MCL 300 pCi/L은 부적합 하다는 결론을 내렸고, 결국은 전면적인 재검토를 하게 되었다. 또한 1998년 라돈에 관한 규제를 설명하기 위하여 소사업지검토위원회(Small Business Advocacy Review Panel, SBARP)과 EPA 소속의 대표적 위원회인 관리부, 정보 예산부, 규제 위원회, 소기업 관리 변호부에서 이 법률 제정에 관련된 기술적 배경에 대하여 재조사를 실시하였다. 또한 SBARP는 어떻게 하면 EPA가 소규모 실체(entity)에 미치는 영향을 최소화하면서 환경 목표치(environmental goal)를 만족시킬 수 있는 적절한 권고치 도출에 대한 집중적인 논의와 토의를 하여, 이 내용이 함유된 권고문을 행정담당관에게 제출하였다.

5) 1999년 AMCL 도입

1999년 2월에는 SDWA 개정안에 따라 인체위해성 감소 및 비용·분석(Health Risk Reduction and Cost Analysis, HRRCA)에 관한 내용을 발표하였고, 같은 해 3월 HRRCA와 다매체완화체제[Multi-Media Mitigation(MMM) framework]에 대한 설명회를 개최하였다. 그 이후 국민 건강을 보호하면서 보다 효과적으로 인체 위해도를 저감시키고, 궁극적으로 음용수에 의한 위해성을 감소시키고 동시에 상대적으로 위해도 기여율이 높은 실내공기에 의한 노출을 감소시키고자 MMM framework을 적극 도입하였고, 이로 인해 정부의 라돈 관리는 탄력적인 운영을 가능하게 하였다. 위와 같은 내용들을 적극 반영하여 라돈으로부터 국민의 건



- AMCL : Alternative MCL
- EPA : Environmental Protection Agency
- MCL : Maximum Contaminant Level
- MMM program : Multi-media Mitigation program
- NPDWRs : National Primary Drinking Water Regulations
- BAT : Best Available Technology
- HRRCA : Health Risk Reduction and Cost Analysis
- MCLG : Maximum Contaminant Level Goal
- NPRM : Notice of Proposed Rulemaking
- SDWA : Safe Drinking Water Act

Fig. 2. Regulatory history of radon of drinking water in USA.

강 위해성을 감소시키기 위해서 1999년 11월에 새로 제안된 규정을 공포하였다. 이의 내용을 살펴보면 라돈으로 인한 인체 위해도 및 비용·편익 분석 결과를 고려하여 MCL을 300 pCi/L로 제안하였고, MCLG를 0으로 제안하였다. 또한 자연 발생적인 실외공기 중의 라돈 농도보다 높지 않은 수준으로 실내공기 중의 라돈 농도를 증가시키지 않는 물 중의 라돈 농도를 고려하여 Alternative Maximum Contaminant Level(AMCL)을 4,000 pCi/L로 제안하였다.

미국에서 실외공기에 대한 라돈 농도를 조사한 결과 평균농도가 0.4 pCi/L로 나타났으며, 물 중으로부터 실내공기 중으로의 라돈의 전환계수 10^{-4} 를 적용하여, 이에 상응하는 물 중 라돈 농도를 4,000 pCi/L를 도출하였다. 이의 제안치는 실내공기 중 라돈에 대한 저감을 행하고 있는 각 주(州, state)에 대해서 적용되며, 실내공기 중 라돈에 대한 저감을 행하지 않는 주에 대해서는 MCL 300 pCi/L을 적용하고 있다. 즉 각 주(州)에서 MMM 프로그램과 4,000 pCi/L의 AMCL을 채택하도록 규정하고 있으며, 이것은 라돈의 위해성 감소 측면에서 효과적인 방법일 뿐만 아니라 EPA에서는 대부분의 주(州)에서 이러한 방법을 채택하도록 권장하고 있다. 만일 특정한 주(州)가 EPA가 승인한 MMM 프로그램 계획을 갖고 수행할 경우, 그 주(州) 내의 모든 공동(지역)급수시설(Community Water System, CWS)은 AMCL을 따르게 된다. 주(州)에 승인된 MMM 프로그램이 없을 경우, 소규모 CWS(급수 인구 10,000명 미만)에 한하여 AMCL을 따를 수 있지만 주택이나 건물의

지반으로부터 라돈가스가 유입되는 지역에서는 실내공기 중 라돈으로 인한 위해성을 저감시키기 위해서 MMM 프로그램 계획을 개발하고 이행하여야 한다. 또한 소규모 CWS의 경우 지역 MMM 프로그램 개발 대신 MCL(300 pCi/L)를 적용해도 된다.

AMCL/MMM 적용은 소규모 CWS에서 MCL을 적용하는 것 보다 훨씬 경제적이기 때문에 EPA에서 권고하는 규정이다. EPA가 승인한 MMM 프로그램 계획이 없을 경우, 대규모 CWS(급수 인구 10,000명 이상)에서는 MCL을 따르거나, AMCL과 주(州)가 승인한 MMM 프로그램을 적용하든지 둘 중 하나를 선택해야만 한다. 만일 주(州)에 승인된 MMM 프로그램 계획이 있을 경우 먹는물 중 라돈의 규제는 제안된 4,000 pCi/L의 기준을 적용하게 된다.³⁾

3.1.2. 다매체완화 프로그램[Multimedia Mitigation(MMM) Program]

MMM 프로그램이란 1996년 SDWA 개정안에 따라 위해도 측면을 고려하여 라돈을 관리하고자 대두된 방법⁴⁾으로 먹는물에서 비롯되는 라돈으로 인한 위해성은 실내공기 중 라돈의 위해성보다 상대적으로 매우 적다는 사실에 기초하여, 물 보다는 실내공기로부터의 라돈으로 인한 위해를 감소시키는 것이 비용-효과적인 면에서 보다 효율적인 것이라 하여, 미국 EPA에서 적극 권장되고 있는 방법이다.³⁾

1) MMM program의 설정 배경

1986년 SDWA 개정안에 따라 EPA는 라돈-222와 다른 방사성물질과 관련된 내용을 ANPRM(Advance Notice of Proposed Rulemaking)에 제안하였고, 1991년 그에 대한 NPDWRs를 제안하였다. 그 후 1992년 의회에서 라돈 제거를 위해서 처리에 따른 위해도, 노출 저감 비용 및 라돈 노출로 인한 다매체 위해도를 보고하도록 하였다. 이에 1994년 EPA가 의회에 물과 실내공기 중에서 라돈 저감의 비용 및 위해도, 치명적 발암건수, 저감된 암 건수 등을 추정하였으며, 그 결과 공기 중 라돈 위해도는 물에 비해 매우 높은 것으로 나타났다는 내용의 보고서를 제출하였다. 1996년 SDWA가 재차 개정됨에 따라 1997년 8월에 EPA는 1991년 라돈에 대한 제안 규정들을 철회하였다. 또한 국립과학회(National Academy of Science, NAS)에서는 먹는물 중 라돈에 대한 위해성을 평가한 결과와 실내공기 중 라돈 저감을 위한 여러 조치에 따른 인체 위해도 감소 및 편익의 영향을 평가한 결과를 고려하도록 하였다. 1999년 EPA는 HRRCA를 출판하였고, 대중과의 논의를 개최한 후 HRRCA와 MMM framework을 제시하게 되었다. 이와 같은 논의 과정을 통해 먹는물 중 라돈 관련 법규에 AMCL과 MMM program이라는 2가지 새로운 요소가 삽입되었다.⁵⁾

MMM program은 먹는물로부터의 라돈으로 인한 위해도(단위 위해도 : 6.6×10^{-7})는 실내공기 중 라돈으로 인한 위해도(단위 위해도 : 5.9×10^{-3})보다 매우 적다는 사실에 기초하여, 위해도의 측면에서 라돈을 관리하고자 대두되었다. 실내공기로부터의 라돈으로 인한 위해도를 감소시키는 것이 비용-효과적인 측면에서 보다 효율적이며, 즉 동일한 수준의 편익이 발생할 때 먹는물 만을 처리하여 MCL을 달성하는 경우보다 MMM 프로그램을 실행하는 경우가 비용이 적게 소모되므로 비용적인 측면에서 훨씬 효과적이다.

2) AMCL(Alternative MCL) 기준의 설정

물 중 라돈 농도 10,000 pCi/L가 실내공기 중 1 pCi/L로 전이된다는 물-공기 전이요인(water-air transfer factor)과 실외 공기 중 라돈 농도 조사결과 평균농도가 0.4 pCi/L라는 것에 기초⁶⁾하여 실외 수준 이상으로 실내공기 중의 농도를 증가시키지는 않는 물 중 라돈 농도라는 의미에서 AMCL을 4,000 pCi/L로 설정하였다. MMM 프로그램을 수행하는 경우, 먹는물의 제안된 기준치인 AMCL을 적용할 수 있으며, 라돈 관리에 대한 탄력성을 부여하고자 한 것이다.

3) MMM program의 적용

MMM program은 크게 두 단계로 나누어 볼 수 있다.

(1) AMCL을 채택하고, EPA가 공인한 MMM 프로그램을 이행한다.

(2) 지역공공급수시설에서 MMM 프로그램을 개발하고 이를 주 정부가 승인하여 AMCL을 채택하거나, MCL 300 pCi/L를 채택하는 방법이다.

MMM 프로그램은 만명 미만에 공급하는 소규모의 급수시설에 대해서는 권고사항이 되며, 만명 이상에 공급하는 대규모의 급수시설에 대해서는 의무사항이 됨을 의미한다.

즉, 만명 미만에 물을 공급하는 소규모의 급수시설의 경우, EPA는 AMCL을 채택하고, 주정부가 공인한 MMM 프로그램을 이행할 것을 제안하고 있다. 그 이유는 MCL을 따르는 것보다 비용-편익 측면에서 MCL보다 더욱 효과적으로 위해도를 저감시키기 때문에 결국은 소규모의 CWSs의 재원을 올바르게 사용하는 것이라 생각하기 때문이다. 이것은 라돈 위해도 저감에 대하여 좀더 비용-효과적인 MMM 접근 방법을 강조함으로써 대중의 건강 보호를 증대시키고 동시에, 많은 수의 소규모 CWSs의 경제적 부담을 최소화하고자 하는 EPA의 의도가 반영된 것이라 할 수 있다. 그러나 그렇지 못할 경우, 급수시설별 임의로 지역공동 수준의 MMM 프로그램을 개발하거나 또는 MCL 300 pCi/L을 채택할 수도 있다(Table 1.).

만명 이상에 물을 공급하는 대규모 급수시설의 경우에는 주정부가 MMM 프로그램을 개발하고 EPA가 공인한 경우 AMCL 적용이 가능하다. 그러나 주(州) 정부가 MMM 프로그램을 개발하지 않았거나, CWSs 역시 주(州) 정부가 공인한 수준의 MMM 프로그램을 개발·이행하고자 하지 않는다면, MCL 300 pCi/L를 적용하도록 하고 있다. 대규모의 급수 시설은 반드시 제안된 MCL에 부합해야 하거나 또는 AMCL에 부합해야 하고, EPA에 의해 공인된 주(州) 정부의 MMM 프로그램 계획이 없는 경우 주(州) 정부가 공인한 CWSs MMM 프로그램 계획을 이행해야 한다(Table 2, Fig 3 참조)³⁾.

4) MMM program의 내용

MMM 프로그램은 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 현존 가구에 대하여 환기 팬, 토양 감압 시설을 통해 라돈을 집 밖으로 배출하는 라돈 저감 장치를 설치하는 것과 가구를 새로 신축할 때는 라돈에 영향을 받지 않도록 설계하여 건축하는 것으로 라돈 내성형 건축물을 짓는 것이다. 이것은 가구 하부에 라돈 가스 차단막이나 외부로의 배출관 등을 설치하거나 틈새나 균열을 막는 등의 라돈에 영향을 받지

Table 1. Proposed regulatory expectation for system that serve 10,000 or fewer people (small CWS)

Does State develop MMM program?	Does CWS develop MMM program?	CWS Complies with:
Yes	not needed	AMCL : 4000 pCi/L*
No	Yes**	AMCL : 4000 pCi/L

* Small system may elect to comply with MCL of 300 pCi/L.

** Small system may elect to comply with MCL of 300 pCi/L, instead of developing a local MMM program

Table 2. Proposed regulatory expectation for system that serve more than 10,000 (large system)

Does State develop MMM program?	Does CWS develop MMM program?	CWS Complies with:
Yes	not needed	AMCL : 4000 pCi/L*
No	Yes	AMCL : 4000 pCi/L
No	No	MCL : 300 pCi/L

* Large system may elect to comply with MCL of 300 pCi/L

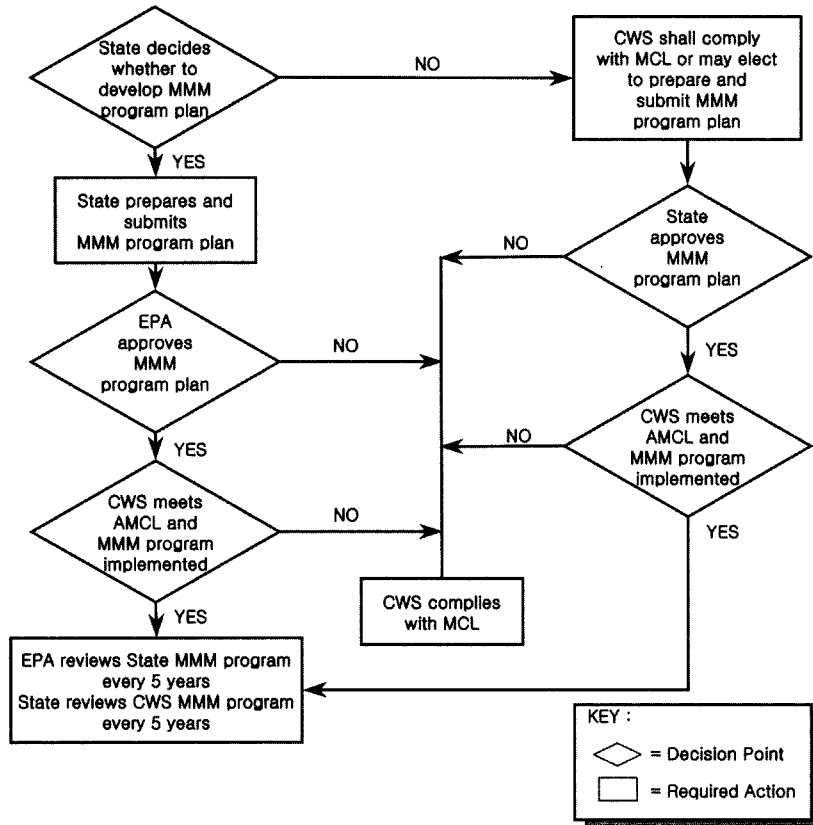


Fig. 3. Conceptual model for MCL, AMCL, and MMM program (Large systems)

않도록 설계·건축하는 방법이다. 이 방법이 라돈 저감에 더욱 효율적인 것으로 알려져 있다.⁷⁾

5) MMM program의 개발 기준

MMM 프로그램을 개발하기 위한 4가지 기준은 각 주정부마다 일괄적인 기준을 적용하지 않고, 프로그램의 원활한 운영을 목적으로 한다.

첫째, 개발 기준은 계획 개발과정에서의 대중 참여로 MMM program 개발 과정에 대중 및 공동급수시설 이용자를 포함해야 하는 것이다. 또한 이를 위해서 주(州) 정부가 어떠한 노력을 하였는지, 대중들의 의견은 무엇인지 등의 내용을 상세히 기술해야 한다.

둘째는 정량적 목표 달성(setting quantitative goals) 과정으로 현존 가구에 대한 저감 이행 및 라돈 내성형(radon-resistant) 주택 신축에 대한 내용을 주요 골자로하여 이들에 대한 정량적 목표 수립을 필요로 한다. 구체적으로 몇 가구에 대하여 저감을 실시할 것인지, 또 라돈 내성형의 주택을 얼마나 신축하여 얼마만큼의 위해도를 달성할 것인지

지의 구체적인 목표가 수치나 비율로서 결정되어야 한다.

셋째는 목표 달성을 위한 전략으로 정량적 목표를 달성하기 위하여 어떠한 활동을 할 것인지에 대한 계획을 수립해야 한다. 주로 공공 교육 프로그램, 라돈 테스트 키트(kits) 공급, MMM 이행과정에 정부 공무원의 참여를 유도하기 위한 네트워크 구성 등을 이용하여 대중에 대한 홍보 및 교육을 통해 현존 가구에 대한 시험 및 저감을 증진하거나, 신축 건물 건설 과정에서 라돈 내성형의 기술 이용을 증진시키는 등의 전략이 있을 수 있다. 또한 이 과정에서는 MCL에 부합하는 경우보다 제안된 정량적 목표 수준에서 더 큰 편익이 발생한다는 내용이 기술되어야 한다.

넷째는 결과 추적 및 보고를 위한 계획 과정으로 결과 평가 및 목표 달성 과정을 평가하기 위한 내용이 포함되어야 한다.

6) MMM program의 작용

MMM 프로그램은 EPA와 주(state) 및 자치구가 수행한 미국 실내공기 중의 라돈 프로그램을 모방하였다. 라돈 측

정결과 높은 값에 대한 저감방법이 포함된 실내 라돈 프로그램은 자발적인 공공 실천을 통해서 위험 감소를 많이 달성하였다. 미국의 실내 라돈 프로그램은 다양한 프로그램의 전략을 통하여 실내의 라돈을 감소시키는데 성공적으로 적용하였다.

이것을 토대로 EPA가 제안한 다매체 완화(MMM) 프로그램 계획수립을 하는데 있어서 밑바탕이 되었다. 실내공기 중의 라돈을 감소시키기 위해 보완된 주택수의 추정치와 1986년 미국 실내 라돈 프로그램에 의해 건축된 라돈 차단 주택 수를 기초로, 그리고 현존하는 연방 및 주(州)의 실내 라돈 프로그램하에서, 실내공기 중 라돈으로 인한 위험 제거 노력을 통하여 2000년까지 약 2500명 이상의 생명이 구해졌다고 EPA는 추정한다. 높은 라돈 수치의 주택이 보완되고 라돈 차단이 된 새로운 주택이 증가함에 따라 인명의 구제율은 매년 증가하고 있었으며 2000년 한해, 현존 주택의 보완과 라돈 차단 주택으로 인하여 라돈과 관련된 폐암 사망률은 연간 약 350명이나 줄일 수 있다고 EPA는 추정하였다.

주(州, 또는 CWS ; 지역 급수 체제)는 먹는물 중 라돈의 최대 수치를 줄이도록 하는 반면, 토양에서 발생한 실내 공기의 라돈 문제를 해결하기 위한 노력을 함으로써 MMM/AMCL 접근법은 라돈 위험 제거에 좀 더 경제적인 대안을 제공하도록 고안되었다. 대부분의 주(州)가 주(州) 규모의 MMM 프로그램을 가장 경제적인 접근법으로 개발할 것이라고 EPA는 예상하고 있다. 대부분의 주(州)는 현재 토양에서 방출된 라돈을 다루는 동시에 MMM 프로그램 합의 아래, 주(州)의 실내 라돈 프로그램이 수행되기를 요구한다. 10,000명 이하의 공동(지역) 급수 시설(CWS)의 규제 가능성은 다음과 같다.

1. 대안적인 AMCL의 충족
2. 주(州)가 개발하고 EPA에서 승인하였거나, CWS가 개발하고 주(州)가 승인한 CWS의 MMM 프로그램 계획과의 관련성.

오늘날 주(州) 정부의 규정은 라돈 노출 제어에 관한 양자택일적 대안을 제공하고 있다. 주(州) 정부는 먹는물 중 라돈의 최대오염 허용농도인(AMCL) 4,000 pCi/L의 대안 개발과 함께 실내 공기 중 라돈의 위해성을 감소시키기 위한 MMM 프로그램을 개발하고 있다. 만약 주(州) 정부가 어떤 선택도 하지 않을 경우, 주(州) 정부 내 CWS를 개발하고 지역 MMM 프로그램 또는 MCL 300 pCi/L을 병행해야 한다.³⁾

3.2. 캐나다와 WHO

3.2.1. 캐나다

현재 라돈의 인체건강 위해성 평가에 필요한 관련된 실험 데이터 또는 역학연구에 대한 자료가 거의 없는 실정이며, 특히 동물 연구결과를 통하여 섭취에 의한 위해성은 흡입에 의한 것에 비해 위험성이 적은 것으로 결론지어졌다. 더욱이 실내공기에 존재하는 라돈농도에는 물로부터 공기 중으로 발산되는 보통 1~2% 정도 수준으로, 실내공기

를 통한 라돈의 노출은 먹는물 중 라돈을 섭취하고 흡입하는 경로에 의한 노출을 훨씬 증가하기 때문에, 캐나다는 먹는물 중 라돈에 대한 최대수용농도(maximum acceptable concentration, MAC)를 설정할 필요성이 없다는 결론을 내렸다. 대신 실내공기 중의 라돈의 초과허용 농도는 일반 주거지역의 경우 연평균 농도를 800Bq/m³ (=21.6pCi/L; 1Bq=27pCi)으로 설정하였고, 이 기준치를 초과하거나 높은 농도로 라돈을 함유하고 있을만한 가능성을 가진 해당 지역의 지하수에 대해서는 조사를 실시하고 있다. 따라서, 캐나다에서는 먹는물 중 라돈에 대한 MAC가 아직 구체적으로 정립되어 있지 않은 상태이다.⁸⁾

3.2.2. WHO

세계보건기구(World Health Organization, WHO)에서 라돈은 다른 방사성물질과는 달리 유효선량(effective dose)을 제시하는데 어려움을 호소하고 있다. 이는 라돈의 특성 때문인데 라돈이 가스상 물질로서 물 중에 함유되어 있다 하더라도 공기 중으로 확산되기 때문에 라돈의 문제는 실내 공기와의 연계선 상에서 해석되어야 하며, 물을 섭취하더라도 소비되는 형태(예, 물을 끓일 경우 공기 중으로 배출) 등을 고려하여야 한다고 하고 있다. 또한 라돈의 노출은 생활형태, 집의 구조 및 종류 등과 밀접한 관련이 있고, 나라마다 다양하기 때문에 WHO에서 권고수준을 제시하는 것은 거의 불가능한 것으로 보고 있다. 다만 모든 오염원으로부터 발생하는 라돈의 호흡을 통한 노출량은 약 0.1mSv로서 이것은 자연적인 총 방사능 노출량의 약 반을 차지하는 수준으로 보고 있다.⁹⁾ 이러한 노출량의 0.1mSv 참고농도 수준을 만족하기 위한 이러한 모든 요인들이 국지적으로 혹은 국가적으로 적절하게 평가되어야 하며, 이를 위해서는 통합적인 접근방법을 통해 적절한 조치를 취하도록 하고 있다.

3.3. 일부 유럽 국가

3.3.1. 스웨덴

스웨덴의 방사성보호연구소(Swedish Radiation Protection Institute, SSI)는 물에서의 라돈으로 인한 발암 위해도를 평가하는 기초로서 미국 NAS의 연구결과가 가장 적당하다고 하였다. 스웨덴 자체에서 물 중 라돈으로 인한 위해도를 평가하기 위한 자료는 실내공기 중 라돈을 평가하는 경우보다 자료가 현저히 부족한 실정으로, 좀더 신뢰성 있는 위해성 평가 결과를 얻기 위해서는 많은 연구가 필요할 것이라 하였다.¹⁰⁾

먹는물 중 평균 라돈 농도는 약 1,000pCi/L 수준이며, 토양 대수층내 지하수 중의 평균 농도는 270~8,100pCi/L 정도, 암반을 뚫어서 만든 우물의 경우는 1,350~13,500pCi/L 정도(최대농도 2,403,000pCi/L)로 조사된 바 있다.

이러한 먹는물 중 라돈 관리를 위해서 1997년 국립식품행정당국(National Food Administration)은 2,700pCi/L의 규제치(Action Level)로 설정하였다. 이는 공공 급수시설에 대해서는 규제력을 갖지만, 개인 급수시설에 대해서는 권고

수준(advisory level)으로서 적용된다. 이에 따라 2,700pCi/L 이하의 지하수는 사용 가능하나 2,700~27,000pCi/L의 라돈이 검출된 먹는물의 경우 사용 유보를 권고하고 있고, 27,000pCi/L 이상 검출시에는 사용을 금지하고 있는 실정이다.^{11),12)} 또한 이에 더불어 가정 주택에서의 실내 라돈 문제를 해결하기 위한 관리를 더욱 엄격하게 실행하고 있는데, 이것은 물 중의 라돈은 자연적으로 급수시설내 공기나 가정의 실내 공기로 방출되며 실제로 인체에 미치는 영향은 섭취를 통한 라돈 노출에 비해 공기 중 라돈을 흡입할 때 더욱 크기 때문이다.¹²⁾

3.3.2. 노르웨이

스웨덴과 인접한 북유럽 국가 중 하나인 노르웨이의 경우 현재 대부분의 가정에서 지표수를 수원으로 사용하고 있으며, 약 10% 이하의 가정만이 지하수를 사용하고 있다. 하지만 유럽에서 가장 먹는물의 수질이 좋지 않아 국민의 약 25% 정도가 기준 미달인 물을 마시고 있어 수인성 질병으로 인해 매년 100,000일 정도의 작업 시간이 손실되고 있다는 문제가 지적되었으며, 이를 해결하기 위해서 노르웨이 정부는 지표수보다 값이 저렴하고 원수의 질이 상대적으로 좋은 지하수를 사용할 것을 권장하고 있는 추세이다.

따라서 노르웨이에서도 지질대에 따라 지하수에 대하여 광범위한 실태 조사 연구가 수행 중에 있으며, 그 결과 특히 선캄브리아기 화강암 지질대(Precambrian granite)에서 높은 농도로 라돈이 나타난 바 있다. 이러한 실태 조사와 외국의 관리 실태를 바탕으로 권고치(advisory level)를 13,500pCi/L로 설정하여 권고하고 있다.¹³⁾

3.3.3. 그 외 유럽지역 국가

유럽 위원회(European Commission)에서 먹는물 중 라돈의 기준은 공공 급수시설이 아닌 개별 급수 시설의 경우 물 중으로부터 라돈의 노출은 실내공기 중으로부터 노출되는 것과 거의 유사한 영향을 유발한다고 생각하였고, 흡입

및 섭취 경로를 모두 고려하여 27,000pCi/L의 기준을 적용할 것을 권고하였다. 또한 대중들에게 물을 공급하는 공공 급수 시설의 경우 소비자가 개별 급수시설 처럼 노출량을 조절한다든지 하는 어떠한 조치를 할 수 없기 때문에 인체 건강에 유해하지 않을 절대적 수준으로 농도를 규제해야 한다고 하였다. 그 결과 좀더 엄격한 기준이 적용되어 2,700pCi/L의 기준을 적용할 것을 권고하고 있다.¹⁴⁾

또한 스웨덴의 SSI에 의해 수행된 한 연구 결과를 살펴보면 유럽 지역에서의 전반적인 라돈 관리 실태를 잘 알 수 있는데 1998년말 15개의 EU(Europe Union) 회원국가, 17개의 EU 비회원국가, 10개의 비유럽국가를 대상으로 라돈 관련 법률에 관한 설문조사를 실시하였다(Table 3). 그 주된 내용은 거주공간(dwelling), 작업장(workplaces), 음용수(drinking water)중 라돈에 관한 참고치(reference levels)와 건축자재(building materials) 등에 대한 규제안 또는 권장안에 대한 것이었다.

대부분의 유럽국가와 비유럽국가는 작업장과 주거공간에 대한 권고기준(recommended level)을 갖고 있었다. 그러나 먹는물 중 라돈에 대해서는 앞서 설명한 일부 국가(미국, 스웨덴, 노르웨이)들을 포함하여 핀란드, 체코, 루마니아, 러시아, 슬로바키아만이 물 중 라돈에 대한 규제치를 갖고 있었으며, 7개의 국가는 도입예정이라 하였다(Table 4). 그리고 먹는물 중 라돈에 대한 기준은 공공급수시설에 대해서는 1,350~13,500pCi/L, 개인급수시설에서는 5,400~27,000pCi/L 수준이었다. 이들 국가에서는 대부분 암반(crystalline bedrock)에 구멍을 뚫어 우물을 파고 물을 사용하고 있는데, 대부분의 모암이 우라늄 함량이 높은 화강암으로 라돈 농도가 27,000pCi/L을 초과하는 우물이 다수 존재하고 있으며, 일부에서는 5,400,000pCi/L 이상의 농도로 검출되었기 때문에 먹는물 중 라돈을 관리하고자 참고치를 도입하게 되었다.¹¹⁾

국가별 기준치를 구체적으로 살펴보면 핀란드는 공공급수시설에 대한 규제치는 8,100pCi/L로 제안하고 있으며, 체

Table 3. Countries responding to the questionnaire.

EU member states (15)	Non-EU European countries (17)	Non-European countries (10)
Austria	Albania	Canada
Belgium	Belarus	USA
Denmark	Croatia	Mexico
Finland	Czech Republic	
France	Estonia	Zimbabwe
Germany	Hungary	
Greece	Latvia	Israel
Ireland	Lithuania	Syria
Italy	Normay	
Luxembourg	Poland	Japan
The Netherlands	Rumania	Hong Kong
Portugal	The Russian Federation	
Spain	Slovak Republic	Australia
Sweden	Slovenia	New Zealand
United Kingdom	Switzerland	
	Turkey	
	Fed. Repub. of Yugoslavia	

Table 4. Radon protection standards for drinking water.

EU Member States		Non-EU European Countries	
Yes (2)	Shall (3)	Yes (4[1])	Shall (4)
Finland	Austria	Czech Republic	Latvia
Sweden	Germany	Russia	Slovenia
	Greece	Slovak Republic	Turkey
		Romania	Yugoslavia
		[Norway]	

[] : advisory level

코의 경우 공공급수시설의 규제치는 8,100pCi/L로, 권고치는 1,350pCi/L로 구분하여 적용하고 있으며, 개인 급수시설에 대해서는 저감 조치 여부에 따라 5,400pCi/L 또는 27,000pCi/L 2개의 권고치를 적용하고 있다. 러시아는 이용 형태 구분없이 모든 먹는물 급수시설에 대해 3,240pCi/L를 참고치로 설정하고 있다. 슬로바키아는 모든 급수시설에 대해서 1,350pCi/L의 권고치와 27,000pCi/L의 규제치를 제시하고 있으며, 루마니아는 5,400pCi/L의 규제치를 제시하고 있다. 또한 영국은 가이드라인으로서 2,700pCi/L를 적용하고 있다.¹¹⁾

3.4. 기타 국가

3.4.1. 오스트레일리아

오스트레일리아의 먹는물 급수시설에 대한 라돈 조사 자료가 미흡하여 현재 발생수준을 정확히 파악하고 있지 못한 실정이다. 그러나 먹는물로부터 실내공기로의 전이에 따른 건강영향까지 고려하여 먹는물 중 라돈에 대한 기준을 2,700pCi/L으로 제안하였다. 제안농도는 상수원으로부터의 물이 저장 및 처리, 이동 과정에서 자연붕괴로 인한 농도가 저감되는 것을 반영하여 먹는물 이용 지점의 농도에 대해서 적용한다고 명시하고 있다.¹⁵⁾

라돈에 대한 기준치 도출 근거는 먹는물 중 라돈은 인체에 막대한 영향을 미칠 만큼 위해하지 않다는 사실과 실내 공기 중 라돈의 주원인은 지표면과 건축자재이므로 물 중 라돈은 보통 그 기여도가 매우 낮다는 것이다. 또한 물 중

의 라돈이 공기로의 전이 비율은 보통 10,000 : 1로서 제안 기준치인 물 중 라돈 농도 2,700pCi/L는 공기 중 라돈 0.27pCi/L에 기여한다. 이는 국립건강의약연구협의회(National Health & Medical Research Council, NHMRC)의 공기 중 라돈에 관한 기준치의 5% 수준에 해당되며 제안 기준치 수준에서는 먹는물 중 라돈 농도가 실내공기 중 라돈에 큰 기여를 하지 않을 것이라 확신하고 있다.

3.4.2. 뉴질랜드(New Zealand)

뉴질랜드는 먹는물 중 대중건강의 위험요인이 되는 수준으로 나타나는 방사성물질의 농도를 저감하고자 하는 목적으로 기준치인 최대허용값(Maximum Acceptable Values, MAVs)을 제안하게 되었다. MAVs는 현 지식 수준에 기초하여 평생동안 그 물을 소비한 사람에게서 유해한 건강상의 영향을 나타내지 않을 것이라 생각되는 먹는물 중 오염물질에 대한 농도로 정의되며, 1998년 WHO의 먹는물 수질가이드라인(Guidelines for Drinking-Water Quality)⁹⁾에 기초하여 라돈에 대한 MAVs는 2,700pCi/L로 도출되었다.

3.5. 각 국가별 라돈의 기준치에 대한 비교

지금까지 여러 국가별 먹는물 중 라돈에 대한 기준치 및 참고치에 대하여 기술하였으며, 이들 내용을 집약적으로 정리하면 다음과 같다(Fig. 4). 미국 EPA는 1999년 먹는물 중 라돈에 대한 기준치를 MCL 300pCi/L로 제안하였으며, 실내공기 중 라돈의 위해를 고려하여 이에 대한 저감을 실

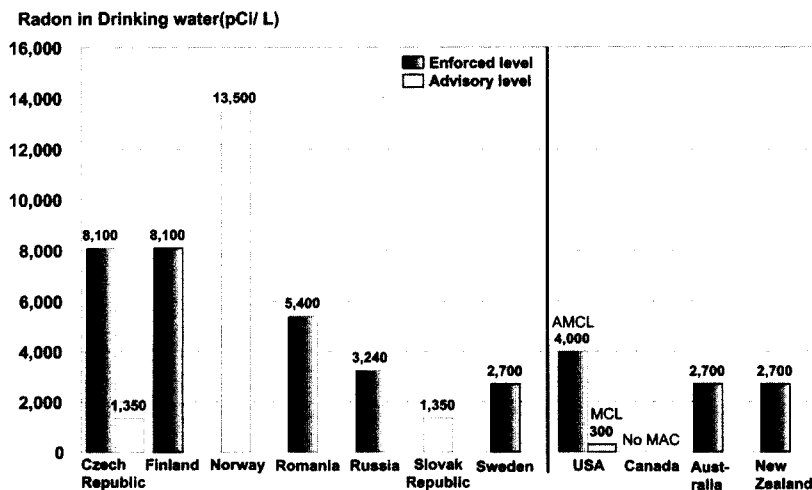


Fig. 4. Comparison of MCLs or reference values for radon in various countries.

시하는 경우, 즉 MMM(multi-media mitigation) 프로그램을 실시하는 경우에는 AMCL인 4,000pCi/L를 적용할 수 있도록 하였다. 북유럽 국가 중 스웨덴은 공공급수시설에 대해서 2,700pCi/L를, 노르웨이는 13,500pCi/L를, 핀란드는 8,100pCi/L를 제안하고 있으며, 오스트레일리아와 뉴질랜드는 2,700pCi/L를 기준으로 제안하고 있다.

4. 방사성물질 관리

미국 EPA는 공공급수시설(public water systems)의 먹는 물에 대하여 라돈 농도를 규제할 것을 제안하고 있으며, 개인급수시설(private well)에 대해서는 규제하지 않고 있다. 그러나 정부에서는 개인급수시설에서도 물 중 라돈 농도를 측정할 것을 권장하고 있다.³⁾

또한 급수 시설(Water systems)에서의 라돈 측정 농도가 제안된 기준치에 부합하지 못한다면 사업자는 그 결과를 소비자들에게 측정농도뿐만 아니라 이로 인해 발생할 수 있는 영향요인, 사용가능한 물의 소비형태, 즉 먹는물이나 목욕물, 또한 어떤 조치후 사용가능한지(예를 들면, 끓인 후 마시면 안전하다든지, 저장한 후 사용하면 괜찮다든지) 등에 대해서 알려야 한다. 이때 보고서는 쉽게 서술되어야 하고, 우편이나 직접 통보를 통해 알릴 수도 있다.³⁾

실내공기 중 라돈에 대해서도 현재 어떠한 규제안(regulations)은 없지만, 실내공기 중 라돈 농도가 4pCi/L이상이라면 라돈 저감을 위해 어떠한 조치(예를 들어, 토양감압 방법(Active Soil Depressurization, ASD)이나 환기를 위한 팬(fan) 설치)을 취할 것을 권장한다. 또한 모든 가구(또한 3층 이하의 아파트)는 라돈농도를 조사하고, 대부분의 가정에서 라돈 농도를 2pCi/L이하로 감소시키기를 권장하고 있다. 특히 고농도 검출지역에서 신축되는 건물은 라돈 내성형(radon-resistant)으로 짓도록 하고 있다.

그 외에도 라돈 저감을 행하는 임대주택(rental house)에 대해서는 보조금이나 대출, 세금 공제 등의 경제적인 이익을 주거나, 이에 저감 도구를 쓴 값이나 무료로 제공하여 직접적으로 저감하도록 하여 소유주 스스로 라돈을 저감(self-help mitigation)하도록 적극 장려하고 있다.¹⁶⁾

즉 미국에서는 라돈의 위해가 크다고 알려져 있기 때문에 라돈의 행정적 규제수준을 설정하는 데 있어 가능한 많은 모든 변수 및 정보를 고려하고자 지속적인 검토를 신중하게 진행중에 있다. 또한 시행하려는 규제수준을 설정하기에 앞서 우선 대중들에게 라돈이 무엇인지, 어떤 영향을 미치는지를 알리고, 대중들의 적극적 저감 행위를 유도하고자 하기 위해 주(州) 별로 라돈 관련 센터를 운영하여 라돈에 대한 위해를 관리하고 있다.

스웨덴은 1997년 먹는물 중 라돈에 대한 기준치(action level)를 공포한 후 1998년과 1999년 2년 동안 공공급수 시설과 개인 급수시설 소유자에게 기준치 달성을 위한 저감조치에 대한 비용을 보상하기 위해 경제적인 지원을 하였다. 이때 공공 급수시설의 경우에는 소요 비용 100% 모두 지원 받을 수 있었던 반면, 개인 소유자의 경우에는 소

요 비용의 50%, 최대 5,000SEK(한화 60만원)정도를 지원 받을 수 있었다.

실내공기 중 라돈에 대해서는 보조금의 형태나 세금 저감을 통해 저감조치에 대한 재정적인 지원으로 저감 비용의 50%, 최대 1,700EUR(한화 204만원; 1EUR=1,200원)까지 보조금을 지급하고 있다. 신축 건물에 대한 실내공기 중 라돈에 대한 목표 기준은 5.4pCi/L로 하고 있으며, 라돈 농도가 기준치인 10.8pCi/L를 넘는 현존 가구에 대해서는 저감조치를 통하여 농도를 저감시키도록 한다. 만약 저감 조치를 하지 않는다면, 보건상 위해한 주택으로 공표될 수 있으며 소유자에게 대응책을 강구하도록 강요할 수 있다.¹⁸⁾

다른 유럽의 국가들 중 아일랜드의 경우 저감 비용의 50%로 최대 800EUR(한화 96만원)까지 보조금을 지급하고 있다. 노르웨이의 경우에는 저감 비용의 50%로 최대 1,800EUR(한화 216만원)까지 보조금을 지급하고 있으며, 소요 비용이 3,600EUR(한화 432만원)을 초과하는 경우 7,200EUR(한화 864만원)까지 빌려주고 있다. 스위스는 세금을 감면시켜주고 있으며, 독일은 평균 가구에서의 라돈 농도가 27pCi/L를 초과하면 저감소요 비용의 30%정도의 보조금을 지급하고, 만약 대상 건축물이 정부 관리 기관(유치원, 학교 등)이라면 80%까지 보조금을 지급하는 등 제도를 통해 저감조치에 대한 재정적 지원을 행하고 있다.¹⁷⁾

오스트레일리아의 먹는물 중 방사성물질에 대한 수질 기준은 의무(강제)적인 것이 아니고, 단지 수질기능이 허용 가능한 수준인지 확인하기 위한 수단으로서 적용하고 있다. 수질에 관한 모니터링은 지표수의 경우는 매 5년마다, 지하수의 경우는 매 2년마다 하고 있으며 기준을 초과한 경우 더 자주 측정하도록 하고 있다.¹⁵⁾

뉴질랜드는 먹는물 중 방사성물질 농도가 MAVs(Maximum Acceptable Values)의 절반을 초과하는 경우 급수시설은 그에 기여하는 방사성물질을 분석해야 하고, 국립 방사성 연구소(National Radiation Laboratory, NRL)에 의해 그에 대한 평가를 받아야 한다. NRL은 먹는물에 대한 분석 시험, 방사성물질의 자문 서비스 등을 담당하고 있는 기관으로 만약 alpha-radioactivity(라돈-222 제외)가 2.7pCi/L를 초과한다면, ²³⁸U, ²³⁴U, ²²⁶Ra에 대해 분석을 실시하고 방사성에 대한 평가를 수행해야 한다. 또한 방사성물질에 대한 MAVs를 초과한 경우, NRL은 의학건강사무실(Medical Officer of Health)과 물 공급자에게 수행가능한 저감 조치에 대해 통보하도록 하고 있다.

5. 맺음말

선진 외국의 방사성물질 중 라돈에 대한 수질기준 등 관리동향을 고찰해 본 결과 규제 기준치 또는 권고치를 정하는데 수십 년 동안의 지속적인 조사연구와 관리운영 결과를 토대로 수차례에 걸쳐 수정하거나 보완하여 왔음을 알 수 있었다. 특히, 미국에서의 방사성물질인 라돈을 관리하는데 있어서 효과적으로 비용·편익분석을 하고 보다 효율적인 위해도 측면을 고려한 다매체완화(MMM) 프로그램

개발에 의한 AMCL 도입으로 더욱 탄력성을 받게 되었다. 즉 물에 의한 라돈 보다는 다매체를 고려한 특히, 실내공기에 의한 라돈 관리에 훨씬 더 중요하게 다루고 있음을 알 수 있었다.

특히, 중요한 것은 수질기준 설정시 수십년간에 걸친 조사연구 결과와 이에 대한 관련 전문가들의 지속적인 의견 교환 등의 비교·분석을 통하여 수행하였고, 시행 후의 그 문제점에 대하여 국민의 건강을 보호하고 안전한 삶의 질을 향상시키기 위한 방향으로 지속적으로 개선하고 보완하고 있다.

이처럼 선진외국에서의 방사성물질 중 특히 라돈의 관리에 중점을 두고 있었으며, 현재에도 계속 조사연구를 진행하고 있음을 알 수 있었다. 따라서 국내에서도 4년간의 조사연구를 이미 수행하였으나 국민들에게 먹는물로 이용하는 지하수의 안전성과 신뢰성을 확보하고 국민들의 의식수준에 부응하기 위하여 지속적으로 선진외국의 관리동향을 파악하고, 우리의 조사연구결과와 연계한 비교·분석을 하여 먹는물로 이용하는 지하수원에 대하여 보다 효율적인 방사성물질 관리를 위한 노력이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 환경부, 지하수 수질보전 등에 관한 규칙 (2002).
2. Andrews, J. N., Ford, D. J., Hussain, N., Trivedi, D., and Youngman, M. J., Natural radioelement solution by circulating groundwaters in the Stripa granite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **53**, pp. 1791-1802 (1989).
3. US EPA, Federal Register, National Primary Drinking Water Regulations; Radon-222; Proposed Rule, **64**(211) (1999).
4. US EPA, Cancer Risk Coefficients for Environmental Exposure to Radionuclides. Federal Guidance Report-13, (1999).
5. US EPA, HRRCA for Radon in Drinking Water (1999).
6. NAS, Risk assessment of radon in drinking water, National Academy Press. Washington, D. C. (1999).
7. US EPA, Office of Air and Radiation, Building Radon Out, A Step-by-Step Guide on How to Build Radon-Resistant Homes (2001).
8. Health Canada, Summary of Guidelines for Canadian Drinking Water Quality (2001).
9. WHO, Guidelines for Drinking Water Quality, Geneva, Addendum to 2. (1998).
10. SSI, Cancer risks from radon in indoor air and drinking water in Sweden, NRE VII Symposium in Rhodes, Greece, (2002).
11. SSI, Radon Legislation and National Guidelines (1999).
12. SSI, The radon situation in Sweden, Paper printed at the 13. Statusgespräch des BMU "Forschung zum Problemkreis Radon" am 24/25 Oktober 2000 in Berlin (2000).
13. David banks et al., Is pure groundwater safe to drink : national 'contamination' of groundwater in Norway, *Geology today*, May-June pp. 104-113 (1998).
14. Official Journal of the European Communities, Commission : Commission recommendation of 20 December 2001 on the protection of the public against exposure to radon in drinking water supplies (2001).
15. NHMRC(National Health & Medical Research Council) & ARMC(Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand), ADWG(Australian Drinking Water Guidelines) (2001).
16. ELI(Environmental law Institute), Center for public health and law, Radon in rental Housing : Legal and Policy Strategies for Reducing Health Risks (1994).
17. SSI, Radon Legislation and National Guidelines (1999).
18. SSI, The radon situation in Sweden, Paper printed at the 13. Statusgespräch des BMU "Forschung zum Problemkreis Radon" am 24/25 Oktober 2000 in Berlin (2000).