

우리나라와 선진국간의 지하수 수질기준에 관한 고찰

방상원* · 정재현

The study on the quality standards of groundwater in Korea in comparing
to the developed countries

Sang-Weon Bang* · Jae Hyun Jung

국문요약

본고는 다가올 미래의 대체 수자원인 지하수의 효율적인 관리·보전을 위하여 선진국인 미국(뉴욕주, 위스콘신주, 텍사스주), 오스트리아, 네덜란드, 캐나다, 일본, 영국의 지하수 수질기준과 국내의 지하수 수질기준을 상호 비교·분석함으로써 지하수 수질기준에 관한 선진화를 도모하고자 한다. 선진국에서는 음용수로써 지하수의 의존도가 70%이상에 달하며, 지하수 수질기준은 음용수 기준을 대체로 적용하고 있다. 그러나 각 국가간 자연환경 및 규제 접근방법이 달라 지하수 수질기준에 있어 큰 차이를 보이고 있다. 본고는 지표수자원의 심각한 오염과 용수공급의 부족현상으로 인해 점차 이용도와 관심이 증가하고 있는 우리나라의 지하수의 효율적인 관리와 보전을 위해 선진국들이 규제하고 있는 지하수 수질기준과 현재 국내에서 점차 지하수오염 문제를 야기할 수 있는 물질들에 관한 추가적 규제의 필요성을 제언하였다. 유류성 물질인 BTEX 기준항목의 경우, 항목을 세분화하여 생활용수뿐만 아니라 농업용수와 공업용수에 대한 추가적 기준의 적용이 요구되며, 발암성을 지닌 일부 PAHs에 대한 규제도 필요하다. 산업의 고도화로 인해 유해화학물질이 다양해지고 그 양도 해마다 증가하고 있는 현실에 대응하기 위해서는 기준항목의 추가도입과 엄격한 기준치의 적용이 요구된다. 지하수오염의 주요 원인인 질소의 오염으로 인한 피해를 방지하기 위하여 질소항목 기준을 더욱 세분화하여야 할 것이며, 인간이나 생태계에 치명적인 위해를 끼치는 방사성물질인 라돈 또한 일부 선진국에서 그에 대한 기준치를 설정하고 있고 국내에서도 그로 인한 피해사례가 발생하고 있으므로 라돈에 대한 규제의 필요성을 제언한다.

주제어 : 지하수, 지하수 수질기준, BTEX, PAHs, 질소, 라돈

ABSTRACT

In this study, we propose methods for the efficient management and integrity of groundwater in response to a diminishing supply. As an alternative water resource for the future, we investigated and comparatively analyzed the quality standards of groundwater in the US (New York, Wisconsin and Texas), Austria, Netherlands, Canada, Japan and United Kingdom.

These developed countries heavily depend on groundwater, more than 70%, for drinking water and apply those drinking water standards to groundwater quality. However, there exists few differences in the quality standards of groundwater among the countries, because each country possesses its own individual environment and management. In Korea, surface water pollution is getting serious and its water resources are diminishing. Therefore we propose several new quality criteria that many countries regulate at these days for their efficient management of groundwater. There is a need to divide BTEX criterion into Benzene, Toluene, Ethylbenzene and Xylene, individually.

In addition, it is needed to establish BTEX criteria into agricultural water and industrial water use standards as well as daily life use standards. Also, regulations for some PAHs, showing carcinogenicity, are required. Due to rapid industrialization various hazardous chemicals were utilized and their uses are increasing each year. Therefore, there is a strong need to introduce new standards and tighter regulations of the levels. At the same time, the criterion of nitrogenous compounds need to be regulated individually in order to prevent the damage incurred by the compounds. Several developed countries have established standards for radon, previously caused environmental accidents in Korea. Therefore, we propose the necessity of groundwater quality standards for radon in this study.

Keywords : groundwater, groundwater quality standards, BTEX, PAHs, nitrogenous compounds, radon

I. 서론

현재 전 세계적으로 물 부족, 물 오염, 물 재해 등의 물위기의 문제가 논의되고 있는 가운데 지하수 문제 또한 지표수 문제 못지않게 중요시 되고 있다. 지하수는 대장균 등의 세균의 오염이 없고 무기물의 함량이 풍부하고 수량의 급격한 변동이 없어 안정적인 뿐만 아니라 빗물이 땅속으로 흘러들어 가면서 더러운 물질들이 지층 내에서 자연 정화 되므로 하천수나 강물보다 깨끗하고 연중 온도의 변화가 거의 없어 수자원으로써 중요한 역할을 한다. 또한 땅 속을 흐르는 동안 지층내의 여러 가지 물질들과 접촉하고 반응하여 지표수보다 많은 광물질을 포함하며, 개발에 넓은 땅을 필요로 하지 않고 저수지나 댐과 같은 시설이 불필요하여 비용 측면에서도 경제적인 특징을 갖고 있다. 이를 통하여 지하수의 유용성을 알 수 있으며, 지하수는 지하에 부존된 자원 중에서 유일하게 재충전 될 수 있는 자연자원으로 알려져 있다(환경부, 2000).

그러나 산업화와 경제발전에 따른 환경오염은 지하수를 크게 오염시켜서 인간이 사용하기에 양적으로 부족하고 질적으로도 불량한 지하수가 되는 경우가 많다. 이러한 지하수는 지표수에 비해 환경변화에 대한 반응이 느릴 뿐만 아니라, 일단 훼손되거나 오염이 진행되면 자정능력이 약하기 때문에 회복이 느리므로 본래의 지하수로 회복시키기 위해서는 많은 시간과 비용이 소요된다. 이처럼 지하수 오염의 피해는 단기적으로 나타나지는 않지만 장기적으로 누적되어 작용함으로써 결국은 인간에게 건강상의 피해나 생태계 파괴를 가져오게 된다.

우리나라는 물 공급을 주로 지표수에 의존하였으나, 강수량에 직접적으로 영향을 받는 지표수의 안정적인 용수 공급의 어려움 및 댐에 의한 용수공급의 한계와 지표수의 오염, 물소비량의 증가 등으로 인하여 지하수의 이용량이 증가하고 있다(신희순, 2001).

우리나라의 지하수개발사업은 1960년대 후반부터 정부 주관의 농업용수개발사업의 일환으로 시작된 이래 점차 그 이용도가 증가되었다. 근래에는 농업용수 뿐만 아니라 생활용수, 공업용수의 공급에 이르기까지 용도에 따라 다양하게 개발·이용되었으나 개발위주 정책으로 지하수를 무분별하게 개발하면서 폐공 증가와 지하수오염 등 문제점이 발생하였다. 산업화와 공단집중화에 의한 각종 폐수와 유해물질, 도시화에 따른 생활오수와 쓰레기의 증가 등으로 불과 수십년 사이에 지하수 대수층이 극도로 오염되었다. 이로 인해 지하수 사용이 불가능하게 되거나 지하수 생태계가 파괴되고 있다(환경부, 2003).

국내 지하수 수질은 수질측정망 부족 및 측정시설의 부재로 인하여 전국적인 오염실태의 파악이 곤란한 상황이다. 전국에 산재된 약 백만 개의 지하수 개발·이용시설 중 상당수가 그간 인허가 및 신고대상에서 제외되었던 경미한 시설이다. 이러한 시설들은 지하수오염 방

지시설의 설치와 관리가 미흡할 뿐만 아니라 적절한 처리없이 방치된 폐공으로 인하여 대수층의 기능 저하와 수질오염을 초래하였다(건설교통부, 2002).

2003년 말 현재 지하수 개발·이용시설은 1,228천개에 달한다. 지하수 총 이용량은 2003년 말 기준 우리나라의 연간 지하수 개발 가능량 117억 m^3 /년에 비하여 32.1%(37억 m^3 /년, 지하염수 제외)에 머물러, 장래 물 부족에 대비한 대체수원으로서 지하수의 가치가 매우 높음을 알 수 있다(환경부, 2000). 그러나 지하수 수질이 악화 될 경우에는 국민보건과 건강에 막대한 손실과 치명적인 영향을 미치게 된다. 따라서, 오염된 지하수의 관리뿐만 아니라 지하수 오염방지를 위해 지하수 수질기준의 규제강화가 필요하다.

지표수자원의 심각한 오염현상과 용수공급의 부족현상이 나타남에 따라 지하수자원에 대한 중요성을 재인식 하여야 한다. 또한 지하수자원의 관리 및 보전에 관한 깊은 관심과 노력이 이루어져야 한다. 비상시의 대체용수이자 물 부족 문제의 대안인 지하수는 사람이 원하는 곳 어디에나 존재하지 않으므로 부존하는 지하수의 이용에 있어서 귀중한 자원으로 관리해 나가야 할 필요가 있다.

인구증가와 지속적인 경제성장에 따른 국민생활수준의 향상과 산업의 발전은 대량의 물을 필요로 하여 양적으로 지하수의 수요가 증대할 뿐만 아니라, 양질의 수자원을 요구하므로 지하수를 질적으로 효율적인 보전·관리를 도모하기 위해서는 더욱 강화된 지하수 수질기준 설정과 보전이 필요하다. 우리나라의 현행 지하수 수질기준과 외국의 지하수 수질기준을 비교·분석하고, 기준 설정추세 및 국내여건을 고려한 효율적인 지하수 관리를 위한 지하수 수질기준의 개선방안을 제언하고자 한다.

II. 우리나라의 지하수 수질기준

1. 우리나라 지하수의 이용현황

전국의 지하수 개발·이용현황은 총 시설 1,228천여 개소에서 약 37억 m^3 /년을 사용하고 있다. 용도별 지하수 이용현황을 살펴보면 생활용수 18억 m^3 /년(49%), 농업용수 17억 m^3 /년(46%), 공업용수 2억 m^3 /년(5%)이다. 위에서 알 수 있듯이 인간의 생활과 밀접한 관계가 있는 생활용수와 농업용수의 이용률이 가장 크다(환경부, 2004). 지하수법 제정 시행에 따라 1994년부터 공식적으로 실시된 지하수 이용실태 조사자료에 의하면 지하수 개발·이용시설 수는 매년 증가 추세를 나타내는 반면, 지하수 이용량은 1997년을 정점으로 다소 감소하였다. 이는 1997년 허가제 도입을 통한 지하수 개발·이용규제 강화, 상수도 보급 확대의 효과로 추정되

며 2000년에는 지하수 이용량이 다시 증가 추세로 전환되었다(한국건설기술연구원 등, 2003).

2004년도 지하수조사연보(2003년말 기준)에 제시된 지하수 개발가능량 대비 지하수 이용량에 의하면, 전체 개발가능량 117억 m^3 /년에 대하여 32.1%(37억 m^3)를 이용하고 있어 전체적으로는 아직도 지하수 개발의 여유가 있으나 지역적으로는 많은 곳에서 지하수 개발가능량에 비하여 상당한 양을 이용하고 있으며 특히 100%이상을 이용하고 있는 지역도 나타나 지하수 개발제한이 필요하다(농업기반공사, 2004).

2. 지하수 수질기준

우리나라는 건전한 수생태계를 유지하고 이수목적에 적합한 수질을 유지·확보하기 위한 목적을 토대로 국민의 건강을 보호하고 쾌적한 수환경을 조성하고자 한다. 이를 위하여 하천, 호소, 지하수 및 먹는물 등의 수질환경기준을 설정하고 있으며 이러한 목표를 달성하기 위하여 수질규제기준을 운영중에 있다. 이중 지하수 수질기준은 지하수를 이용하기 위한 목적 이외에도 지하수의 오염을 방지하기 위한 목적에 적합하도록 설정되었다. 국내 지하수 수질기준은 4차례에 걸쳐 변천되어 현재의 지하수 수질기준이 설정되었다. 1994년에 총리령 제416호로 「지하수의수질보전등에관한규칙」 중 지하수 수질기준 항목 및 기준치를 처음으로 정하여 지하수 수질기준의 기초를 제정하였다. 이후 1997년에는 1994년 제정된 수질기준에 어업용수 및 지하수의 이용 목적상 염소이온의 농도 기준 적용의 예외사항을 추가적으로 삽입하여 수질기준을 정하였다. 2003년 6월 18일에 「지하수의수질보전등에관한규칙」이 새로 개정되었는데 여기에는 지하수 수질기준에 지하수를 음용수로 사용하는 경우 먹는물의 수질기준을 준수하도록 명료화시켰다. 또한 생활용수에 일반세균 및 BTEX(벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌), 1,1,1-트리클로로에탄 등의 항목이 추가되었다. 「지하수의수질보전등에관한규칙」 제4조관련 지하수오염관리대상시설 중의 하나인 석유류의 제조 및 저장시설과 관련한 조사 항목인 벤젠·톨루엔·에틸벤젠·크실렌을 추가시키고 화학적 산소요구량(COD)을 삭제시켰다. BTEX를 추가한 이유는 유류로 인한 오염에 대비하기 위한 것이고 COD를 삭제한 이유는 대부분의 지하수 COD함량이 인체에 직접적인 영향을 주지 않을 정도로 검출되거나 지하수 자체 자정능력이 있어 무의미한 항목으로 여겨져 왔기 때문이다(환경부, 2003).

현재 지하수의 관리체계를 살펴보면 환경부, 건설교통부, 농림부, 행정자치부, 국방부 등 5개 부처에서 지하수 이용 목적별로 9개의 관련 법률에 따라 분산·관리하고 있다. 중앙정부에는 지하수 전담조직이 없으며 건설교통부 수자원기획관 및 환경부 토양지하수과에서 타 업무와 겸무하여 전국 지하수 업무를 총괄하고 있다. 전국적인 지하수 수질 현황과 수질변화

추세를 정기적으로 파악하기 위하여 지하수 수질측정망을 설치·운영하고 있다. 환경부 지하수 수질측정망의 2004년도 자료에 의하면 지하수 수질오염 총 조사시료 3,865개 중 212개 (5.4%)가 수질기준을 초과하였다. 측정항목별로는 일반세균 44%, NO₃-N 23%, 대장균 9%, TCE 8%, 페놀 8%, pH 4% 등의 순으로 수질기준을 초과하였으며 2001년 이후 지속적으로 하락하던 지하수 수질기준 초과율이 2004년 지하수 수질측정망 운영계획부터 생활용수 측정 항목에 일반세균이 추가됨으로써 2003년도 보다 상승되었다. 측정망을 운영함에 있어서 조사항목은 특정유해물질 15개 항목(카드뮴, 비소, 시안, 수은, 유기인, 페놀, 납, 6가크롬, 트리클로로에틸렌, 테트라클로로에틸렌, 1,1,1-트리클로로에탄, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌) 과 일반오염물질 5개 항목(수소이온농도, 대장균군수, 질산성질소, 염소이온, 일반세균)이며, 조사는 매년 상·하반기 2회로 나누어 실시된다.

우리나라의 지하수 수질기준은 생활용수, 농업 및 어업용수, 공업용수로 이용목적별로 구분하여 적용하며, 오염지하수 정화기준은 생활용수 기준으로 정화하도록 규정하고 있다. 농업용수, 공업용수 등으로 허가받은 경우에도 정화기준을 지하수의 사용용도와는 무관하게 생활용수 기준을 적용하고 있어 엄격한 정화기준을 만족시켜야하는 문제점이 있다(환경부, 2005).

Ⅲ. 외국의 지하수 수질기준 현황

선진국에서는 수질기준 설정의 근거인 대상 및 목표가 명확하며, 대체로 지하수질기준은 음용 목적인 경우에 한하여 먹는물 기준을 적용한다. 즉, 지표수를 처리하여 먹는물로 사용하기 보다는 맑은 물 개념의 지하수를 취수하여 사용하는 것이 경제적이기 때문이다. 또한 지하수의 경우 지표의 오염물질에 노출되어 있는 지표수에 비하여 자연적으로 오염물질로부터의 1차적인 오염방지가 이루어지기 때문이기도 하다. 한편, 지하수 수질기준을 별도로 정하는 것은 지하수의 오염방지뿐만 아니라 오염된 지하수의 처리를 위한 규제차원에서 설정하는 것이다(대한지하수환경학회, 1999).

세계 대부분의 국가가 지하수에 대하여 저마다 제도적인 규제 장치를 두고 있고 규제가 점차 강화되는 추세를 보이고 있다. 또한 지하수자원을 공공자산으로 여겨 일찍이 지하수 관련법을 제정하여 국가가 직접 관리하여 왔고 항구적인 보호·보전관리를 위하여 국가와 국민의 노력이 집중되어왔다.

1. 미국

미국에서는 지하수는 수자원 총 이용량 중 큰 비중을 차지하고 있다. 연방정부에서는 지하수 수질 보호를 담당하고 있는 중앙담당기구인 EPA의 수질기준항목(Water Quality Criteria)을 통하여 수질관리의 원칙만 제시하고 있으며 지하수 수질에 관한 독립된 기준은 설정하지 않고 있으며, 주정부는 오염된 지역의 정화와 정화기준 등에 대하여 독립적으로 운영하고 있다. 이는 각 주내에 분포되어 있는 수리지질특성과 잠재오염원들에 따라 설정하기 때문에 그 기준들에는 상당한 차이가 있다. 미국의 각 주정부에서 적용하고 있는 지하수 수질기준은 EPA나 주정부 차원의 음용수기준을 준용하고, 오염예방대책을 위한 기준으로서 PAL (Preventive Action Limits)을 정하고 있으며 오염정화기준은 각 주 정부의 주어진 여건에 따라 먹는물수질기준을 기초로 하여 결정하거나 위해성평가 결과치를 정화기준으로 설정·운영하고 있다(대한지하수환경학회, 1999).

미국은 지하수를 음용수로 사용하고 있기 때문에 먹는물수질기준은 지하수 수질을 평가하는데 있어 매우 중요한 역할을 하고 있다. 상수원으로 이용되는 지하수의 급수체계는 먹는물 기준에 의해 분석되어진 우물을 사용하기 때문에 미국 각주의 지하수 수질기준은 먹는물 기준에 기초를 두고 있다. 1974년 미국의회는 공공용수 보호의 중요성을 인식하고 안전음용수법(Safe Drinking Water Act: SDWA)을 설정하였다. 본 법령은 공중위생 보호 및 공공용수의 안정성을 확실하게 하는 계획을 수립하였다. 또한 1986년과 1996년에 법령을 제정하여 전국의 먹는물수질기준을 균일하게 맞추는 등의 규제를 US EPA에서 수행할 수 있도록 권한을 부여하였다. 따라서 US EPA에서는 인간의 건강 위해 정도와 음용수의 안전을 결정짓는 수계 시스템에 따라 먹는물수질기준(Drinkingwater Standards)을 설정하였으며 이러한 수질기준은 모든 수질 체계에 적용하도록 하였다(환경부, 2003).

1) New York주

New York주는 총 205개 항목의 오염물질에 대한 지하수 수질기준을 제정하여 운영하고 있다. 오염된 지하수의 정화목표를 결정할 때는 발암성 물질에 대한 인간건강위해성평가와 인간 건강을 기초로 하여 독성물질의 기준을 정하고 지하수를 보호할 수 있는 농도를 기준으로 음용수용 지하수의 수질 목표를 정한다(대한지하수환경학회, 1999).

2) Wisconsin주

위스콘신주는 자원관리국(Department of Natural Resources)에서 공시한 바 있는 「Public Health Groundwater Quality Standards」(1992)와 「Public Welfare Related Groundwater Standards」(1990) 그리고 「Indicator Parameter Groundwater Standard」를 중심으로 법을 제정하여 운영하고 있다. 기준 적용사항, 각 기준 초과 시 경고조치 및 대응책, 면제조항, 모니터링과 실험실 분석시의 통계적 요구사항의 내용을 법제화하고 있다. 「Public Health Groundwater Quality Standards」와 「Public Welfare Related Groundwater Standards」는 강제대책기준(Enforcement Standards)과 오염예방대책기준(Preventive Action Limits)으로 분류된다. 강제대책기준을 초과하는 경우, 지하수의 개발자 및 사용자는 오염된 지하수를 오염 예방대책기준까지 정화 복구시켜야 한다. 위스콘신주는 주민의 보건 건강을 기초로 해서 총 121개의 항목으로 지하수 수질기준을 설정하고 있다(환경부, 2003).

3) Texas주

Texas주는 지하수의 먹는물수질기준을 157종의 항목에 대해 US EPA의 최대오염허용한도(Maximum Contaminant Levels, MCL)기준치를 근거로 하여 제정하여 운영하고 있다. 또한 오염지하수를 정화할 때는 배경 지하수질 또는 주민 건강을 기초로 한 위해성 기준치 이내까지 위해성 감소 기준에 부합되도록 정화기준을 설정하고 있다(대한지하수환경학회, 1999; 환경부, 2003).

2. 오스트리아

오스트리아에서는 음용수자원의 99% 정도를 지하수에 의존하고 있으며 약 1%는 광천수나 지표수로 사용하고 있는 지하수 이용률이 매우 높은 나라 중 하나이다. 천연 지하수는 특별한 처리 없이도 음용수로 이용이 가능하기 때문에 자연상태의 깨끗한 수질을 유지하고 지하수의 오염을 예방한다는 원칙을 근거로 법령(Water Act 1959)을 수립·시행하고 있다. 먹는물 수질조례(Ordinance on the Quality of Drinking Water)는 오염원 확산에 대한 환경적 규제인 지하수 초기치 조례(Groundwater Threshold Value Ordinance)와 밀접한 관계가 있다. 오스트리아의 지하수 수질기준은 먹는물수질기준을 기본으로 설정하여 적용하고 있으며, 오염된 지역의 지하수정화기준은 먹는물 기준치를 만족해야 한다. 지하수의 초기 수질기준

은 지하수 자원을 보호하기 위하여 먹는물기준의 60%정도를 만족하도록 하고 있다.(환경부, 2003).

3. 네덜란드

유럽 국가 중 지하수의 수질기준이 가장 잘 정립된 국가 중 하나인 네덜란드에서는 공공으로 공급하는 용수 중 약 70%가 지하수로써, 지하수 이용량은 연간 10억³에 이른다. 지하수 수질검사는 47개의 항목에 대해 네덜란드 음용수법(Drinking Water Act)에 따라 분석한다. 1968년부터 수질자료를 보관하여 수질 악화나 경시별 수질성분 변화경향을 확인할 수 있으며, 지하수 취수정 주위에 여러개의 감시정을 설치하여 지하수 수질을 확인할 수 있도록 조기 경보체제를 강화하고 있다(농업기반공사, 2004). 네덜란드는 지하수 수질기준을 3종으로 구분하여 오염된 지하수에 대한 정화의 필요성을 결정하고 있다.

기준 A : 지하수의 음용수 수질기준

기준 B : 추가조사나 일부 정화가 필요한 중간정도로 오염된 지하수

기준 C : 정화해야하는 기준 한계치

4. 캐나다 Quebec주

캐나다는 세계에서 수자원을 많이 보유하고 있는 나라의 하나로써 음용수로서의 지하수 이용량은 총 물 사용량의 2/3를 차지하고 있다. 캐나다의 지하수관리는 맑고 깨끗한 물을 언제 어디서나 얻을 수 있도록 하는데 목표를 두고 있으며 캐나다 연방정부 및 각 주정부가 공동으로 관리하고 있다. Quebec지자체의 31%의 주민들은 지하수를 음용수자원으로 이용하고 있다. 지하수는 환경동물부가 관리하고 있으며 지하수 규제는 지하수 규칙과 환경질(Environmental Quality)법에 따라 시행되고 있다. 캐나다의 Quebec주의 지하수 수질기준은 크게 3가지로 구분된다(환경부, 2003).

기준 A : 지하수의 음용수 수질기준

기준 B : 추가조사나 일부 정화가 필요한 중간정도로 오염된 지하수

기준 C : 정화해야하는 기준 한계치

5. 일본

일본 환경청은 1997년 3월에 지하수의 보전을 위하여 지하수환경 수질기준을 수립하였고 지하수에 대한 독립된 수질기준은 존재하지 않으나, “수질오염방지법(1989)”에 근거하여 유해물질에 의한 지하수 오염을 규제하고 있다. 이외에 수질오염방지법(1990년 개정), 공업용수법(1972년 개정), 건축물용 지하수의 채취규제에 관한 법률(1971년 개정)에 의해 지하수가 관리되고 있다(한국건설기술연구원 등, 2003). 지하수 수질기준은 인간의 건강 보호 및 공공용수 보전기준의 항목과 동일하게 총 23개로 구성되어 있으며, 1999년 2월에 Nitrate nitrogen and Nitrite nitrogen, Fluorine, Boron 3개 항목이 추가되었다(환경부, 2003). 지하수를 생활·공업·농업용 등 각종 용도로 이용하고 있으며 더 나아가 지하수가 갖고 있는 항온성 등의 특성을 살려 양어용수, 냉각용수, 소설용수 등으로 사용하고 있다. 따라서 일본의 수질보전 정책은 지하수 수질기준 항목을 인체에 영향을 미치는 물질들로 설정하고 지하수 수질기준치를 유지하고 달성하는 것을 목표로 하고 있다. 1975년 후반에 트리클로로에틸렌(Trichloroethylene)등의 유해물질에 의한 지하수오염이 전국 각지에서 발생하여 1989년도부터 수질오염방지법에 의거하여 각 지방별로 지하수 수질의 오염상황을 상시 감시하며 매년 측정계획에 따라 지하수질을 측정하고 있다(농업기반공사, 2004).

6. 영국

영국에서는 지하수를 오염으로부터 보호해야 하는 중요한 자원으로 여기며, 지하수의 약 75%를 먹는물로 사용하고 있다. 오염물질의 배출을 통제하거나 샘, 우물과 시추공을 보호하여 지하수오염을 예방하고 있으며, 오염활동을 제한함으로써 지하수의 오염확산을 줄이려는 규제들을 설정하고 있다. 1980년에 제정된 「Groundwater Directive」는 「Water Framework Directive」(2000년)에 의해 새롭게 수립되었다. 「Groundwater Directive」를 실행하는 주요 규정에는 「Water Resources Act」(1991)와 「Groundwater Regulations」(1998)가 있다. 영국은 수질에 오염물질을 방류하는 것에 대해 「Water Resources Act」(1991)를 포함한 기존의 규제들을 확대 시행하여 지하수규제를 강화하고 있다. 또한 「Groundwater Regulations」의 규정에 의해 지하수를 오염시킬 가능성이 있는 활동이나 구역에 중점을 두어 지하수 관련 규약을 제정하고 있다(Guidance on the Groundwater Regulations, 1998).

다음의 표는 앞서 서술한 각국의 주와 나라들의 지하수 수질기준에 대한 현황을 요약한

것이다.

〈표 1〉 각국의 지하수 수질기준설정 현황

국가/주	지하수질 기준항목수	오염예방대책기준	기타 사항
Korea	25	-	이용목적별 4종으로 운용
U.S.A.	Wisconsin	121	강제대책기준의 10~50%
	New York	205	ND
	Texas	157	ND
Austria	39	ND	먹는물 기준의 60%만족
Netherland	47	ND	지하수질기준 3종으로 운용
Canada-Quebec	74	ND	지하수질기준 3종으로 운용
Japan	23	-	-
United Kingdom	79	-	-

* ND(Not Detected) : 불검출

IV. 우리나라 지하수 수질기준에 대한 고찰

우리나라의 지하수는 수차례 지하수법의 제도개선을 통해 관리·운영되어왔으나, 아직도 기준을 적용하는데 있어 지하수의 질적 관리체제측면이 미흡하여 수질기준의 재검토를 통한 보완이 요구된다. 환경부에서 지정한 지하수 수질기준은 지하수를 대수층의 위치와 수질상태에 따른 분류가 아닌 이용목적별로 규정하여 관리하는 것으로, 지하수를 농·공용수 정도의 수질로 악화시킬 수 있다는 우려를 내포하고 있다. 그 이유는 지하수의 이용용도별 수질 관리는 같은 대수층으로부터의 지하수라도 다양한 용도로 사용될 수 있고 또 그 용도를 자유롭게 전환시킬 수 있으므로 결과적으로 최하급인 농·공용수의 수질기준이 지하수 수질기준이 되는 결과를 초래할 수 있다는 주장이 있다(이강근, 1997). 환경부의 「지하수 수질보전 종합대책수립」(환경부, 2003)에 따르면 이용용도별 수질기준의 문제점을 해결하기 위해서는 농·어업 용수 및 공업용수 기준을 생활용수기준으로 일원화시킬 필요가 있다고 한다. 그러나 이것을 동시에 생활용수로 통합하여 시행하게 되면 무리가 발생할 수 있으므로 2단계를 걸친 일원화작업이 필요하다. 우선적으로 공업용수기준을 농·어업용수 기준으로 일원화한다. 2005년도 지하수 연보의 지하수 용도별 이용현황을 살펴보면 공업용수의 이용현황은 5.5%이고, 생활용수 및 농업용수의 이용현황은 각각 49.2%, 44.2% 로 대부분의 지하수가 생활용수 및 농업용수로 사용되고 있음을 알 수 있다. 따라서 공업용수의 기준치가 농·어업용

수의 기준치보다 약 2배정도 높으나 그 활용도가 낮으므로 점차적으로 농·어업용수기준으로 공업용수를 통합시킨 후 농·어·공업용수기준을 생활용수기준으로 일원화한다. 대부분의 항목에서 생활용수와 농·어업용수의 기준치가 일치하므로 농·어·공업용수기준을 생활용수기준과 통합하는데 무리가 없을 것이므로 지하수 수질기준을 음용수기준과 비음용수기준으로 설정하는 것이 제안된 바 있다.

앞서 살펴보았듯이 우리나라의 경우 지하수 수질기준은 음용수로 이용하는 경우 먹는물관리법 규정에 의한 먹는물기준을 적용하고 지하수를 생활용수, 농업용수, 어업용수, 공업용수로 이용하는 경우 15개의 항목으로 수질기준을 적용하고 있다. 지하수정화기준은 「지하수의 수질보전등에관한규칙」 제7조에 의해 생활용수의 특정유해물질에 관한 15개의 수질기준과 석유계총탄화수소에 대한 수질기준으로 총 16개의 항목으로 설정하고 있다. 미국의 경우 오염지하수 정화시 지하수정화기준과 위해성 평가를 병행하고 있다. 우리나라의 지하수는 농·어업용수, 공업용수 사용시 오염되었을 경우 이들 수질기준보다 엄격한 지하수정화기준인 생활용수 기준에 맞춰 정화해야 한다. 또한 음용수로 사용시 먹는물 수질기준보다 완화된 생활용수 기준에 맞추어 정화해야한다는 모순점이 있어 이에 대한 기준개정검토가 필요하다. 따라서 지하수의 수질기준이 용도별로 음용수, 생활용수, 농·어업용수, 공업용수로 분류되어 있으므로 지하수 오염시 생활용수 정화기준을 사용용도별 정화기준과 위해성평가에 의한 정화기준으로 규정하는 방안이 타당한 것으로 알려져 있다(환경부, 2003).

토양오염은 지하수 오염원 중의 하나로써 지하수를 오염시키며, 특히 지하수를 음용수나 용수로 사용하는 경우에 있어서는 건강상 및 재산상의 피해를 입게 된다. 이와 같은 토양과 지하수 오염의 연계성을 고려하였을 때 지하수 수질기준 항목 내에 현재 포함되어 있지 않은 토양오염기준항목들에 대한 면밀한 조사 및 향후 항목기준추가에 대한 준비가 이루어져야 할 것이다.

<표 2>는 현행 지하수 수질기준과 선진국들의 지하수 수질기준의 비교를 위하여 국내·외 지하수 수질기준 및 기준치를 나타내고 있으며, <표 3>은 국내에서는 미규제 물질이나 선진국에서 규제하는 항목을 나타내고 있다.

〈표 2〉 국내·외 주요 지하수 수질기준 및 기준치의 비교 (단위 : mg/l)

규제 물질	한 국			미 국			오스트리아			네덜란드			캐 나 다			일 분
	먹는물기준	생활용수	농업·어업용수	Wisconsin		New York	Texas	수질기준	정화기준	A	B	C	A	B	C	
				ES	PAL											
Aluminium	0.2	-	-	-	-	-	-	0.12	0.2	-	-	-	-	-	-	
Ammonia(as N)	0.5	-	-	-	-	-	-	0.3	-	0.2	1.0	3.0	0.2	1	3	
Arsenic	0.05	0.05	0.05	0.01	0.001	0.05	0.05	0.03	0.05	0.01	0.03	0.1	0.01	0.05	0.1	
Benzene	0.01	0.015	-	0.005	0.0005	0.0044	0.005	0.001	0.005	0.002	0.001	0.005	ND	0.001	0.005	
Boron	0.3	-	-	0.90	0.190	0.001	-	0.6	1	-	-	-	-	-	-	
Cadmium	0.005	0.01	0.01	0.005	0.0005	0.01	0.005	0.003	0.005	0.001	0.00025	0.01	0.001	0.005	0.02	
Carbaryl	0.07	-	-	0.90	0.192	0.0287	-	-	-	-	-	-	ND	0.07	0.15	
Carbon tetrachloride	0.002	-	-	0.005	0.0005	0.005	0.005	-	-	-	-	-	-	-	-	
Chlorine	250	0.05	250	-	-	-	-	60	-	-	-	-	-	-	-	
Chromium(VI)	0.05	0.05	0.1	-	-	0.05	0.1	-	-	-	-	-	ND	0.02	0.05	
Copper	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Cyanide	0.01	ND	ND	0.2	0.04	0.1	0.2	0.03	0.05	0.005	0.03	0.1	ND	0.1	0.2	
1,2-Dibromo-3-chloropropane	0.003	-	-	0.0002	0.00002	-	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	
1,1-Dichloroethylene	0.03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.02	
Diazinon	0.02	-	-	-	-	0.0007	-	-	-	-	-	-	ND	0.014	0.03	
Dichloromethane	0.03	-	-	-	-	0.005	0.005	-	-	-	-	-	-	-	-	
Ethylbenzene	0.3	0.45	-	0.7	0.14	0.005	0.7	-	-	0.0005	0.02	0.06	ND	0.05	0.15	
Fenitrothion	0.04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Fluorine	1.5	-	-	4	0.8	1.5	4	0.9	1.5	0.3	1.2	4.0	0.3	1.5	4.0	
Iron	0.3	-	-	-	-	0.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Lead	0.05	0.1	0.1	0.015	0.0015	0.025	0.015	0.03	0.05	0.2	0.05	0.2	0.02	0.05	0.1	
Malathion	0.25	-	-	-	-	0.007	-	-	-	-	-	-	ND	0.007	0.002	
Manganese	0.3	-	-	-	-	0.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Mercury	0.001	ND	ND	0.002	0.0002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.0002	0.0005	0.002	0.0002	0.001	0.02	
Nitrate(as N)	10	0.005	20	10	2	-	10	50	-	-	-	-	-	-	-	
Parathion	0.06	-	-	-	-	0.0015	-	-	-	-	-	-	ND	0.035	0.07	
Phenol	0.005	0.005	0.005	6	1.2	0.001	21.9	0.01	0.05	0.0005	0.015	0.05	ND	0.002	0.02	
Selenium	0.01	-	-	0.05	0.01	0.01	0.05	-	-	-	-	-	0.001	0.01	0.05	
Tetrachloroethylene	0.01	0.01	0.01	0.005	0.0005	0.005	0.005	-	-	-	-	-	-	-	-	
Toluene	0.7	1	-	1	0.2	0.0075	1	-	-	0.0005	0.015	0.05	ND	0.03	0.1	
1,1,1-Trichloroethane	0.1	0.15	0.3	0.5	0.2	0.005	0.2	-	-	-	-	-	-	-	1.0	
Trichloroethylene(TCE)	0.03	0.03	0.03	0.005	0.0005	0.005	0.005	-	-	-	-	-	-	-	0.03	
Xylene	0.5	0.75	-	10	1	0.005	10	-	-	0.0005	0.02	0.06	ND	0.02	0.06	
Zinc	1	-	-	-	-	0.3	-	1.8	-	0.05	0.2	0.8	0.02	5.0	10.0	

* ND(Not Detected): 발견불, -: 기준미정립 ** ES(Enforcement Standard): 강제대책기준, PAL(Preventive Action Limit): 오염예방대책기준
 *** 기준 A: 지하수의 음용수 수질기준, 기준 B: 추가조사나 일부 정화가 필요한 중간정도로 오염된 지하수, 기준 C: 정화해야하는 기준 한계치

음용수를 기준으로 하는 선진국들의 지하수 수질기준과 우리나라의 지하수 수질기준 중 음용수 기준을 비교해보면 국내의 카드뮴과 1.1.1-트리클로로에탄은 일본의 기준치보다 각각 2배, 10배 강화된 0.005ppm과 0.1ppm으로 적용하고 있다. 그러나 이 기준치는 미국의 Wisconsin주, 네덜란드, 캐나다와 비교했을 때 적게는 1.6배에서 많게는 20배정도 높은 기준치이다. 비소의 경우 국내에서 규제하는 기준치는 우리와 비슷한 산업구조형태를 지니고 있는 일본의 지하수 수질기준치의 5배 정도 높은 농도인 0.05ppm으로 규제하고 있으며, 이것은 오스트리아의 기준치의 1.6배, 네덜란드와 캐나다의 기준치보다 5배 높을 뿐만 아니라 미국의 Wisconsin주와는 50배의 차이를 보이고 있다. 현재 전 세계적으로 비소의 오염으로 인한 피해의 심각성으로 인해 비소의 규제가 점점 강화되는 추세이므로 비소에 대한 규제가 필요하다. 비소와 동일하게 납 또한 일본의 기준치보다 5배나 높은 농도인 0.05ppm으로 규제하고 있으며, 미국의 3개주와 2배~30배 이상의 차이를 보이고 있다. 또한 국내의 납 기준치는 오스트리아와는 1.6배, 캐나다와는 2.5배의 차이를 보이고 있는 반면 네덜란드보다 4배정도 강화된 기준치를 가진다. 우리나라와 일본은 벤젠을 0.01ppm으로 기준치를 적용하고 있으며 이것은 미국의 Wisconsin주의 기준치보다 20배가 초과한 농도이며 오스트리아와 네덜란드의 기준치보다도 5배~10배나 초과한 농도이고 캐나다는 벤젠을 불검출 항목으로 규제하고 있다. 따라서 이러한 3가지 물질의 기준치를 강화하여 선진국 수준의 지하수 수질기준이 되도록 하여야 할 것이다. 또한 지하수 수질기준의 강화를 위해서는 지하수오염에 대한 모니터링, 오염물질의 발생빈도, 노출위해성 등 여러 가지의 조건들에 대한 연구조사가 필요하므로 본고에서는 절대적 기준치는 제시하지 못하였으나, 안전하고 건강한 지하수의 관리를 위해서는 규제기준의 강화가 필요한 것으로 사료된다.

현재 우리나라에서 오염발생 문제가 되고 있는 몇 가지 물질들에 대해 좀 더 구체적으로 논하고자하며 이러한 항목에 대한 기준마련은 향후 국내의 환경여건, 정책적·기술적 발전 상황에 맞게 보완·추가가 필요할 것으로 사료된다.

1. 유류오염

유류오염 지하수의 위해성은 널리 알려져 있으며 그 종류가 다양하고 지중에 스며들면 그 성분들이 휘발, 흡착, 용해, 생분해 그리고 지하수 유동에 따른 확산 등 다양한 기작에 의해서 거동하게 되므로 이에 대한 충분한 이해가 필요하다(김영웅, 2001).

지하수 오염현상은 지하수내에 용존된 무기물 성분 조사를 위주로 분석되어 왔으며 유기화합물에 의한 오염현상에 대한 연구 및 조사는 거의 이루어지지 않고 있다. 그러나 전국도

처에 지하수의 잠재 오염원인 유류저장시설이나 지하시설물이 특별한 안전점검 없이 매설되어 있어 유류누출에 의한 지하수 오염사고가 빈번히 발생하고 있다. 이로 인한 오염이 필연적으로 광범위하게 발생하여 인근의 사용 중인 지하수 관정을 오염시킬 가능성이 있고 지하수가 지닌 고유한 물리적, 화학적 특성을 변화시키므로 이에 대한 대책을 마련하여 지하저장 시설이나 매설물에 의한 지하수 오염물질의 방지 대책을 수립해야 할 것이다.

현재 오염지하수의 규제기준에 유류성 물질인 BTEX¹⁾가 추가되어 있으나 생활용수에 대한 기준만 있을 뿐 농업용수·어업용수나 공업용수의 기준치가 제시되어 있지 않다. 그러나 농업지역의 농기계 사용 증대로 인한 연료사용량 증가 및 어업지역의 유류 누출사고 증대 등으로 인한 지하수의 오염이 가중되고 있어, 주로 천층지하수를 개발하여 이용하고 있는 농업용수 및 어업용수에도 BTEX 기준을 적용할 필요성이 있다. 토양환경보전법상 토양오염기준치에 '나'지역과 토양오염관리대상시설 및 토양오염사고 발생지역 등에 대해 BTEX기준치를 적용하고 있다. 따라서 토양이 오염될 경우 지하수가 오염될 개연성이 크므로 공업용수에도 BTEX기준을 적용하여야 한다. 또한 최근 도심지 개발 확대로 인하여 농업지역 및 공업지역 부지의 재개발에 의하여 토지용도가 고급지로 변경되는 경우가 빈번하게 발생하고 있다. 따라서 지하수를 상업지구 및 택지지구의 생활용수 및 음용수로 이용하고자 할 경우 BTEX 기준을 만족해야 하는 문제가 발생할 수 있다(환경부, 2003). 농업 및 공업용지 지하수가 수질기준을 초과할 시 오염정화기준은 생활용수 기준을 만족해야 하는데 이는 농업용지 및 공업용지에 대해서도 BTEX를 적용시켜야 한다는 근거가 충분하다고 볼 수 있다.

<표 2>를 살펴보면 오스트리아와 영국을 제외한 대부분의 나라와 주에서 BTEX에 대한 기준치가 지하수 수질기준에 포함되어 있다. 석유류 중에 함유되어 있는 발암성을 갖는 벤조피렌(Benzopyrene)과 안트라센(Anthracene)등의 PAHs(Polyaromatic Hydrocarbon)²⁾를 검사항목으로 추가하여야 한다. 우리나라와 영국을 제외한 미국, 오스트리아, 뉴질랜드, 캐나다, 일본에서는 PAHs(Benzopyrene, Anthracene, Naphthalene, Pyrene 등)의 물질들을 세분화하여 기준치를 적용하여 지하수를 관리하고 있다<표 3>.

-
- 1) BTEX(benzene, toluene, ethylbenzene, xylene): 석유류제조 및 저장시설의 저장탱크 또는 배관부식으로 인해 발생되며, aromatic탄화수소로서 물에 대한 용해도가 높고 유독한 성분으로 발암물질이다.
 - 2) PAHs(Polyaromatic Hydrocarbon): 다환방향족탄화수소는 기름의 주요 독성물질이며 토양에 침투했다가 서서히 용출되어 지하수 등에 잔존하게 된다. 생물체가 PAHs에 노출되면 체내에 농축되는 현상이 일어날 수 있으며, 생식능력 저하, 성장 또는 면역체계의 감소, 내분비 기능 저하, 기형아 탄생, 종양 발생 등의 악영향을 받을 수 있다.

2. 난분해성·유해성 화학물질

산업화의 부산물로 생성되는 대량의 유해 화학물질들에 의한 지하수 오염현상이 심각해지고 있는 실정이다(최상일, 1994). 우리나라는 산업화로 인한 새로운 오염물질의 등장으로 난분해성·유해성 화학물질이 다양화 되고 있다. 또한 현재 국내에 유통되는 화학물질은 36,000여종이고 매년 200-300여종씩 증가하고 있으며 그 사용량도 해마다 증가하고 있다. 따라서 15개의 항목으로 지하수의 특정유해물질기준이 한정되어 있는 현실은 국내화학물질의 사용변동에 대하여 적절히 대응하지 못하고 있다. 사회적으로 국민들에게 안전한 수원을 공급하기 위해서 화학물질사용의 다양화에 맞춰 단계적으로 기준항목을 확대해나가야 할 것이다. 유해화학물질에 대한 기준을 세분화하여 각 물질들이 지닌 위해성뿐만 아니라 우리나라에서 발생하는 다양한 배출처에 따라 사회적으로 위험한 물질들이 얼마나 배출되는지에 대한 현황파악이 필요하다. 지하수 수질기준항목으로 제시하고자 하는 물질은 국제적으로 엄격히 관리되어가고 있는 잔류성 유기오염물질(Persistent Organic Pollutants, POPs)³⁾ 중 각종 산업공정에서 부산물로 발생하는 헥사클로로벤젠(Hexachlorobenzene, HCB)⁴⁾과 산업용 화합물질 PCBs⁵⁾이다. 특히 PCBs(Polychlorinatedbiphenyl)는 우리나라와 영국을 제외한 미국, 오스트리아, 뉴질랜드, 캐나다, 일본에서 규제하고 있으며, HCB는 미국, 캐나다, 영국에서 엄격히 규제하고 있다<표 3>. 따라서 국제적으로 규제가 강화되고 있는 POPs 부산물의 국내 규제방안 마련이 매우 시급하다(박정규·이희선, 2000).

-
- 3) 국제적으로 생산 또는 사용을 금지하고자 하는 POPs 물질이란 환경 내에서 광화학적·생물학적 및 화학적 분해가 제대로 되지 않고, 먹이사슬을 통해 동식물의 체내에 축적되는 독성이 강한 유기오염 물질을 말한다. POPs 물질의 대표적인 환경상 특성은 높은 잔류성과 생물농축성, 장거리이동성, 독성 등이며, 이를 기준으로 UNEP는 12종의 물질을 POPs 규제대상물질로 선정하였다. ① 유기염소계 농약 : 알드린(Aldrin), 클로르단(Chlordane), DDT, 디엘드린(Dieldrin), 엔드린(Endrin), 헵타클로로(Heptachlor), 미렉스(Mirex), 톡사펜(Toxaphene) ② 산업공정의 부산물 : 다이옥신(Dioxins), 퓨란(Furans), HCB(Hexachlorobenzene) ③ 산업용 화합물질 : PCBs(Polychlorinatedbiphenyls)
 - 4) Hexachlorobenzene(HCB): 염소계수소화합물의 생산과정에서 발생하는 폐산물로써 몇 가지 농약의 오염물질로 존재하며, 화학적으로 안정하고 미생물에 의한 분해가 적어 잔류성이 크다. 대기, 오염된 음용수나 음식물섭취, 토양과의 접촉, 작업환경에 의해 주로 노출된다.
 - 5) PCBs(Polychlorinatedbiphenyl): 최근 PCBs는 PCBs 폐기물질과 생산물을 함유한 매립지나 도시쓰레기 및 하수슬러지의 소각, 폐쇄계의 변압기유 같은 PCBs물질의 부적절한 처리에 의해 환경중에 방출되고 있다. PCBs는 여러 가지 이성체의 혼합물로 염소화정도에 따라 환경중에서의 거동 메커니즘이 다르며 일반적으로 염소수가 증가할수록 잔류성은 증가한다. Mono-, di-, trichlorinatedbiphenyl은 비교적 빠르게 생물분해되고, tetrachlorinatedbiphenyls은 서서히 생물분해되며, 더 많이 염소치환된 화합물은 생물분해되기 어렵다. 생물분해는 토양과 수중에서의 궁극적인 분해과정이다.

3. 질소

질산성질소⁶⁾는 주로 폐기물매립장과 분뇨처리장 인근지역에서 생활오수와 축산폐수(농약, 축사분뇨), 폐기물 침출수 등이 지하로 침투하면서 지하수를 오염시키는 물질이다. 2004년 지하수 수질조사를 실시한 결과 지하침투로 오염되는 질산성질소의 기준치 초과율이 23%로 지하수 수질에 있어서 환경적인 문제점이 나타나고 있다(환경부, 2004). 참고로 1984년부터 1990년 기간동안 미국 EPA는 미국 전지역의 지하수에 대해 농약과 질산성질소로 오염된 지하수 현황조사를 실시한 바 있다. 이때 적용한 기준은 먹는물 기준(MCL)이나 건강권 고치(HAS)였으며, 이를 초과하는 율은 1.2%에서 2.4%였다. 이에 비하면 국내 지하수의 오염상태의 심각성을 짐작할 수 있다(대한지하수환경학회, 1999).

질산성질소는 영양염류의 하나로써 수질에서 중요시 다뤄지는 항목이다. 오염원인인 분뇨, 토양의 부식물 등의 단백질성분이 물에 가수분해되어 나타나는 것이 초기오염원인 암모니아성질소이며 더 진행되어 아질산성질소, 최종 오염물질인 질산성질소가 순차적으로 나타난다. 질소의 일부만이 토양에 흡착되거나 식물이 사용하며 나머지는 물에 녹아 지하수 내에서 유동성이 큰 질산염을 만들어 이것을 장기간 음용했을 때 사람이나 가축에 잠재적으로 유해하게 된다(이근상, 2004). 질산성질소의 인체에 대한 영향은 “청색아증(Blue Baby)”으로 1953~60년 사이에 체코에서 태어난 수백 명의 어린이가 푸른색으로 변하는 증상이 발생했다. 질산성질소의 질산이 혈액에서 헤모글로빈과 결합하여 산소운반을 방해함으로써 호흡으로 얻어진 산소가 신체 각 부위로 전달되지 못하여 몸이 푸른색으로 변하는 것이며 빈혈 등을 일으키기도 한다. 우리나라는 질소에 대해서 질산성질소의 항목만을 지하수 수질기준으로 적용하고 있다. 그러나 수질오탁을 표시하는 지표의 하나로 암모니아성질소의 산화나 질산염의 환원에 의해서 발생하는 아질산성질소는 주로 대·소변, 하수 등의 혼입에 의한 암모니아성질소의 빠른 산화에 의해 생산되므로 물의 오염을 추정할 수 있는 유력한 지표가 된다. 또한 아질산성질소를 함유한 물은 최근에 오염원이 유입되었음을 알려 준다(김종택 등, 2001). 따라서 아질산성질소를 규제함으로써 최종 오염물질인 질산성질소의 오염을 방지할 수 있을 것이라 사료된다. 미국의 위스콘신주와 텍사스주, 오스트리아에서는 질소에 대한 기준을 질산성질소와 아질산성질소로 세분화하여 기준치를 마련해놓고 이를 규제하고 있다<표 3>. 우리나라에서도 지하수의 심각한 오염물질인 질소에 대해 지하수 수질기준의 질산성질소의 항목뿐만 아니라 아질산성질소의 항목을 추가하여 질산성질소, 아질산성질소 각각에 대한 규제가 필요한 것으로 사료된다.

6) 질산성질소는 수용성이고 흡착성이 낮은 특성 때문에 비료나 퇴비사용에 의해 오염된 지표수의 지하용탈이 용이하게 일어나는 성분이다.

〈표 3〉 국내 비규제물질/ 국외 규제물질 항목 비교

국 가	염화탄화수소	폐놀류	중금속 및 무기물질	Pesticides/Herbicides and PCBs	디고리방향족탄화수소	다환방향족탄화수소 (PAHs)	방향족질소화합물	그 외 기타물질	
Wisconsin	Chloroform 1,2-Dibromoethane(EDB) 1,1-Dichloroethane 1,2-Dichloroethane 1,2-Dichloroethylene 1,2-Dichloroethylenic(cis) 1,2-Dichloroethylenic(trans) Monochlorobenzene 1,1,1,2-Tetrachloroethane 1,1,2,2-Tetrachloroethane Tetrachloroethylene 1,2,4-Trichlorobenzene 1,1,2-Trichloroethane		Antimony Arsenic Barium Beryllium Chromium Cobalt Nickel Silver Thallium Vanadium	Alachlor Anthracene Chlordane Endrin Heptachlor Heptachlor epoxide Hexachlorobenzene Lindane Methoxychlor Polychlorinated biphenyls (PCBs) Simazine	1,2-Dichlorobenzene 1,3-Dichlorobenzene 1,4-Dichlorobenzene	Anthracene Benzobifluoranthene Benzofluoranthene Chrysene Fluoranthene Naphthalene Pyrene	2,4-Dinitrotoluene 2,6-Dinitrotoluene	Aceton Methyl ethyl ketone Methyl isobuty ketone Nitrietas N) Nitrate+Nitrietas N) 1,2,3-Trichloropropane Vinyl chloride	
				Alachlor Aldrin Anthracene α-BHC Chlordane 2,4-D, Dieldrin Endosulfan sulfate Endosulfan I Endosulfan II Endrin Heptachlor Heptachlor epoxide Hexachlorobenzene Lindane Methoxychlor Parathion Polychlorinated biphenyls (PCBs) Simazine	Aniline Chlorobenzene(total) 1,2-Dichlorobenzene 1,3-Dichlorobenzene 1,4-Dichlorobenzene 2,3-Dichlorotoluene 2,4-Dichlorotoluene 2,5-Dichlorotoluene 2,6-Dichlorotoluene 3,4-Dichlorotoluene 2-Nitroaniline 3-Nitroaniline Nitrobenzene Pentachlorobenzene Xylene(mixed isomers)	Acenaphthylene Anthracene Benzobifluoranthene Benzofluoranthene Benzofluoranthene Chrysene Fluoranthene Indeno[1,2,3-cd]pyrene Naphthalene Perylene Phenanthrene Pyrene	2,4-Dinitrotoluene 2,6-Dinitrotoluene Nitrobenzene	Aceton Methyl ethyl ketone Methyl isobuty ketone 1,2,3-Trichloropropane Vinyl chloride	
New York	Chloroform 1,2-Dibromoethane(EDB) Dichloromethane 1,1-Dichloroethane 1,2-Dichloroethane 1,2-Dichloroethylenic(cis) Dichloroethylenic(trans) β-Hexachlorocyclohexane Δ-Hexachlorocyclohexane 1,1,1,2-Tetrachloroethane 1,1,2,2-Tetrachloroethane 1,2,4-Trichlorobenzene 1,1,2-Trichloroethane		Antimony Barium Beryllium Cobalt Silver Sulfate Thallium Vanadium	2-Chlorophenol 2,4-Dinitrophenol 2-Nitrophenol 4-Nitrophenol					

미 국

<표 3> 계속

국 가	염화탄화수소	페놀류	중금속 및 무기물질	Pesticides/Herbicides and PCBs	단고리방향족탄화수소	다환방향족탄화수소 (PAHs)	방향족질소화합물	그 외 기타물질
미 국	Chloroform 1,2-Dibromoethane(EDB) 1,1-Dichloroethane 1,2-Dichloroethanol 1,2-Dichloroethylene(cis) 1,2-Dichloroethylene(trans) Dichloroethylene(trans) β-Hexachlorocyclohexane 1,1,1,2-Tetrachloroethane 1,1,2,2-Tetrachloroethane Tetrachloroethylene 1,2,4-Trichlorobenzene 1,2,4,5-Trichlorobenzene 1,1,2-Trichloroethane	2-Chlorophenol 2,4-Dichlorophenol 2,4-Dimethylphenol 2,4-Dinitrophenol Pentachlorophenol Phnol 2,3,4,6-Tetrachlorophenol 2,4,5-Trichlorophenol 2,4,6-Trichlorophenol	Antimony Barium Beryllium Calcium Chromium Nickel Silver	Aldochlor Aldrin Anthracene α-BHC Chlordane 2,4-D Dieldrin Endosulfan II Erdrin Heptachlor Heptachlor epoxide Hexachlorobenzene Lindane Methoxychlor Polychlorinated biphenyls (PCBs) Simazine	Aniline Chlorobenzene(total) 1,2-Dichlorobenzene 1,3-Dichlorobenzene 1,4-Dichlorobenzene	Acenaphthylene Anthracene Fluoranthene Naphthalene Pyrene	Nitrobenzene	Aceton Methyl ethyl ketone Methyl isobutyl ketone Nitrite(as N) 1,2,3-Trichloropropane Vinyl chloride
	오스트리아		Calcium Chromium Cobalt Cyanide complex(total) Magnesium Sodium Nickel Sulfate	Polychlorinated biphenyls (PCBs)	Pentachlorobenzene	Benzonitrofluoranthene Phenylhydrazine		Nitrite(as N)
네덜란드	Chlorinated aliphatics(mvd) Chlorinated aliphatics(total) Total chlorinated hydrocarbons	Chlorophenol(mvd) Chlorophenol(total)	Barium Chromium Cobalt Nickel Tin	Chlorinated organic pesticides(mvd) Chlorinated organic pesticides(total) Polychlorinated biphenyls (PCBs)	Chlorobenzene(indiv) Chlorobenzene(total) Xylene(mixed isomers)	Anthracene Benzofluoranthene Fluoranthene Naphthalene Phenylhydrazine Pyrene		
캐나다	Chlorinated aliphatics(mvd) Chlorinated aliphatics(total)	Chlorophenol(mvd) Chlorophenol(total)	Barium Chromium Cobalt Cyanide complex(total) Nickel Silver Tin	Chlordane 2,4-D Erdrin Heptachlor epoxide Hexachlorobenzene Lindane Methoxychlor Parathion Polychlorinated biphenyls (PCBs)	Chlorobenzene(indiv) Chlorobenzene(total) Xylene(mixed isomers)	Anthracene Benzofluoranthene Chrysene Fluoranthene Indeno(2,3-cd)pyrene Naphthalene Phenylhydrazine Pyrene		

〈표 3〉 계속

국 가	염화탄화수소	폐물류	중금속 및 무기물질	Pesticides/Herbicides and PCBs	단고리방향족탄화수소	다환방향족탄화수소 (PAHs)	방향족질소화합물	그 외 기타물질	
일 본	1,2-Dichloroethane 1,2-Dichloroethylene(cis) 1,1,2-Trichloroethane		Cobalt	Polychlorinated biphenyls Simazine Aldrin Atrazine Azinphos methyl Azinphos-ethyl Bromoxynil Bromoxynil octanoate Chlordane Chlorfenvinphos Diazinon DDT Dichlorprop Dichlorvos Dicofol Dimethoate Diuron Etofosulfan Fenitrothion Fenitrothion Heptachlor Heptachlorbenzene Dieldrin Endrin Linduron Malathion Mevinphos Oxydemeton-methyl Parathion Parathion-methyl Pentachlorophenol Propanil Simazine Triazophos Trichlorfon Trichlorophenol Trifluralin		Anthracene			
영 국	1,3-Dichloropropene Hexachlorobutadiene(HCBD) Hexachloroethane Tetrachloroethylene 1,2,4-Trichlorobenzene Trichloroethylene	2-Chlorophenol 2,4-Dinitrophenol	Cadmium Mercury		2-Chloroaniline Chlorobenzene 1,2-Dichlorobenzene 1,3-Dichlorobenzene 1,4-Dichlorobenzene			Hexachlorocyclohexane Hexaconazole 3-Iodo-2-propionyl n-butyl carbamate Permethrin Tetrabutyltin Tributyl tin oxide Tributyl-phosphate Triphenyl-phosphate	

4. 방사성 물질

우리나라에서는 화학물질에 비해 지하수 중의 방사성물질에 대한 관심이 낮다. 지하수의 방사성 물질은 인위적인 오염에 의한 것이 아니고 자연발생적이라 할지라도 이를 최소화하기 위하여 국민의 건강과 안전을 고려한 지하수 중 방사성 물질 관리 방안을 마련할 필요가 있다(박선구, 2003).

라돈⁷⁾은 바위나 토양 속에 존재하는 라듐이 붕괴하면서 자연발생하므로 사실상 지구 어느 곳에서나 존재하는 방사성 원소의 하나이다. 무취, 무미, 무색의 비활성 기체로써 기체 상태의 원소 중 가장 무거운 비중의 방사성 물질⁸⁾이며, 우라늄 광석에 들어 있거나 광천, 온천, 지하수에 녹아서 들어 있다. 라돈 함량을 결정하는 주요 요소는 대수층의 암석종류인데, 일반적으로 화강암이 존재하는 지역의 지하수에서 최고치를 보이고, 우리나라 암석의 50% 이상이 화강암 및 화강편마암임을 감안할 때, 라돈에 의한 오염을 방지하기 위해서 라듐과 그 동위 원소에 대한 규제가 필요하다.

라돈은 폐암, 위암 등의 암을 유발시키는 중요한 요인이며, 인체 노출경로는 가정에서 물 사용 시 수중 라돈이 공기중으로 방출되어 호흡기로 흡입되는 것과 음용수 섭취 시 소화기관을 통한 직접 피폭인 두 가지 경우가 있다. 미국 환경보호청(EPA)은 라돈을 발암물질로 간주하고 있으며, National Research Council의 최근 조사에서는 실내공기 중의 라돈과 라돈의 딸원소에 노출되어 발생하는 폐암사망이 매년 미국에서 3,000~32,000건 정도 발생한다고 추정하고 있다(NAS, 1998). 이외에도 폐암 발생의 증가와 실내공기 중 라돈의 노출과 유의한 상관관계를 보인다는 연구결과가 제시되었을(Svensson 등, 1989; Lees 등, 1987) 뿐만 아니라 선진외국에서는 라돈에 대해서 수십년 동안 지속적인 조사연구와 관리운영의 결과로 수질기준치를 정하였고 현재에도 계속해서 조사연구를 진행하는 등 라돈의 오염관리에 중점을 두고 있다(박선구, 2003).

7) 라돈이란 이름은 '우라늄과 라듐을 연결시켜 그들과 함께 있는 가스'라는 뜻이 담겨져 있으며, 원소 기호는 Rn이고, 원자 번호는 86이며, 질량수는 222, 반감기는 3.8일이다.

8) 방사능(radioactivity)이란 불안정한 원소의 원자핵이 스스로 붕괴하면서 내부로부터 방사선(radiation)을 방출하는 현상을 말하는데, 이러한 성질을 가진 원자핵을 방사성핵종(radionuclides)이라 하고, 방사성핵종을 함유하는 물질을 방사성 물질이라고 한다. 자연계에서는 우라늄, 라듐을 비롯하여 원자 번호가 비교적 큰 40종에 이르는 원소의 원자핵이 이에 속한다. 일반적으로는 이들 방사성핵종이 α 선, β 선 혹은 γ 선을 방출하는 성질을 방사능이라고 한다. 방사선은 외기중에서는 그 위해의 크기가 $\gamma > \beta > \alpha$ 선의 순이나, 식품 등을 통하여 인체에 침투한 경우에는 반대로 α 선이 가장 큰 피해를 유발한다(한국소비생활연구원, 1998; RADNET, 1996).

〈표 4〉 국가별 먹는물 중 라돈에 대한 기준치

기준치 (pCi/L)	미 국		캐나다	뉴질랜드	오스트레 일리아	스웨덴	러시아	필란드	노르웨이
		AMCL 4,000	MCL 300	정립되지 않음	2,700	2,700	2,700	3,240	81,00

*AMCL(Alternative Maximum Contaminant Level) : 최대오염허용대체한도

**MCL(Maximum Contaminant Level) : 최대오염허용한도

지각에서 실내로 유입되는 라돈에 비하여 물을 통해 실내로 유입되는 라돈의 양은 대부분의 경우에 아주 적은 양이다. 그러나 지하수를 이용하여 샤워나 세척 및 세탁 등을 위해 가정 용수로 사용할 경우에는 지하수에 용해되어 있던 라돈이 우리가 호흡하고 있는 공기 중으로 방출되기 때문에 실내의 라돈농도가 높아 질 수 있다. 특히 우라늄을 많이 함유하고 있는 토양이나 암반 근처에서 뽑아 올린 지하수를 사용한다면 라돈의 농도는 더욱 높아질 것이다. 토양 중의 라돈가스가 지하수로 녹아들어 지하수를 식수로 사용하는 주민들에게 라돈은 오염 논란을 일으키기도 한 바 있다.⁹⁾ 국내의 경우 대덕 연구단지 지역주민이 이용하는 샘물에서 라돈과 우라늄 등 방사성 핵종의 농도가 미국 환경청의 음용수 수질기준치를 훨씬 상회하여 인체 유해성이 우려된다는 보도가 있었으며(연합통신, 1998) 경북구역 등 청와대 주변의 지하공간들이 라돈가스에 심하게 오염돼 대책 마련이 시급하다는 지적이 제기된 바 있다.¹⁰⁾

9) 「해럴드 생생뉴스」, 2005-09-12일자 보도.

서울과 경기, 대전 일부 지역의 마시는 지하수에서 우라늄과 라돈 등 방사성물질이 해외 기준치보다 10배 이상 많이 검출됐다는 주장이 제기됐다. 국회 환경노동위 소속인 장복심 열린우리당 의원은 12일 환경부로부터 넘겨받은 자료를 인용해 “지난 1999~2002년 환경부의 자체조사 결과 대전 일부 지역 지하수에서 검출된 우라늄과 라돈의 농도가 미국환경보호청의 먹는물 수질기준을 각각 13.4배 및 10배 초과했다”고 밝혔다. 우라늄과 라돈은 신장 손상을 유발하고 폐암과 위암 및 골육종 등을 일으키는 것으로 알려진 방사성물질이다. 장 의원이 공개한 자료에 따르면 대전지역 지하수의 우라늄과 라돈 평균농도는 미국환경보호청 수질기준의 2배에 달했다. 서울과 경기 일부 지역의 우라늄과 라돈 평균농도 역시 미국 기준을 각각 32배 및 1.7배 넘어선 것으로 나타났다. 그러나 평균농도는 미국 기준을 넘지 않았다. 장 의원은 “환경부는 지난 94년과 98년 두 차례나 먹는샘물의 수질기준에 방사성 물질 항목을 포함시키겠다고 발표하고도 지키지 않았으며, 2002년 실태조사가 끝난 지 3년이 지나도록 모니터링도 하지 않고 있다”며 “이른 시일 내에 방사성물질에 대한 먹는물수질기준을 설정해야 한다”고 지적했다.

10) 국회 교통위 이윤수의원(민주)은 “한양대 김윤신 교수팀의 측정 결과 독립문~종로3가 지하철역들의 대기 중 라돈 농도가 기준치 4.0(피코큐리/ℓ)보다 훨씬 높은 10.7까지 나타났다”며 청와대 주변 지하에 다량의 자연산 우라늄이 매장돼 있을 가능성이 있다고 주장했다. 이 의원은 또 “경북공·안국·종로3가역의 지하수 라돈 농도가 각각 5,406.3, 8,512.4, 5,071.8로 엄청나게 높게 나타났다”고 밝히고 라돈의 반감기가 사흘에 불과한 점을 고려할 때 라돈가스를 지속적으로 공급해주는 라듐이나 자연산 우라늄이 주변에 다량 매장돼 있을 가능성이 있다고 말했다. 전문가들은 지하수 라돈 농도가 5천 이상일 경우 폐암이나 위암을 일으킬 수 있다고 경고하고 있다. 서울시는 해마다 두 차례씩 시 보건환경연구원에 의뢰해 지하철역 공기오염도를 측정하고 있으나 11가지 측정항목 가운데 라돈은 들어 있지 않다.

이외에도 국내에서는 규제하고 있지 않는 물질이지만 일본의 지하수 수질기준 항목으로 적용되고 있는 염화탄화수소계의 일종인 1,2-Dichloroethane, 1,2-Dichloroethylene(cis), 1,1,2-Trichloroethane과 제초제의 일종인 Simazine는 미국의 세 개주(위스콘신주, 뉴욕주, 텍사스주)와 영국에서 규제하고 있으며, 코발트는 미국의 Texas주와 영국을 제외한 위스콘신주와 뉴욕주, 오스트리아, 네덜란드, 캐나다에서 지하수 수질기준 항목으로 적용하고 있다.

본고에서 제안한 오염물질들을 지하수 수질기준 항목으로 추가하고 체계적으로 관리하기 위하여 기초조사 자료의 수집을 통한 지하수 수질자료 통합 D/B구축이 시급하다. 국내의 지하수의 수질측정망 D/B와 오염물질 발생빈도 및 발생량, 위해성평가를 통하여 얻어진 지하수 오염물질에 대한 D/B구축과 지하수와 관련한 토양 자료 D/B는 지하수 관리 및 정책 결정에 중요한 수단으로 이용될 것이다. 따라서 국내의 지하수 수질기준 항목의 추가는 기존의 지하수 수질측정망 확충, 오염물질조사항목의 세분화, 관리체계강화 등을 포함한 D/B구축을 통하여 중·장기적으로 진행되어야 한다.

V. 결론

21세기에 우리나라는 이미 물부족 국가로 분류되고 있다. 우리나라의 지하수 이용량은 지하수 개발가능량의 32%에 지나지 않지만 지표수 오염 및 저수지 개발의 한계로 인한 물부족 문제를 해결할 수 있는 중요한 수자원으로써 지하수의 중요성이 대두되고 있다. 또한 다양한 용도로 그 이용이 지속적으로 증가하고 있어 경제적·사회적 관점에서 지하수를 물 문제 해결의 핵심으로 보고 있다. 지하수의 적극적인 개발·이용에 높은 관심을 보이고 있으나, 지하에 존재하는 특성 때문에 그 상태를 알기 힘들고 오염되기 쉬워 관리와 보전에 어려움이 있다. 오염된 지하수를 정화하기 위해서는 많은 비용과 시간이 소요되고 오염된 지하수의 사용은 인명피해와 생태계파괴를 야기할 수 있다. 그만큼 지하수의 오염은 심각한 것이며 정화에 따른 많은 비용이 지출되지 않도록 예방에 최선을 다해야 할 것이다.

본고는 새로운 대체수자원인 지하수에 대한 인식을 새롭게 하고, 국민의 건강 보호를 위하여 지하수를 보다 효율적으로 관리하고 있는 선진국들의 규제현황을 종합적으로 비교·분석하여 국내의 지하수 수질기준을 보완하고자 하였다. 또한 지하수 오염을 방지하기 위하여 선진국의 지하수 수질기준 비교·분석을 통하여 국내의 지하수 수질기준의 문제점을 도출하였다.

음용수를 기준으로하는 선진국들의 지하수 수질기준과 우리나라의 지하수 수질기준 중 음용수 기준을 비교해 보면 카드뮴과 1,1,1-트리클로로에탄에 대해서는 일본보다 더 강화된 기준치를 가지고 있으나 이 기준치에 대해 타 선진국들은 국내보다 더 강화된 기준치를 적용하

고 있다. 비소와 납의 경우는 일본을 포함한 타 국가들보다 더 높은 농도의 기준치를 적용하고 있으며, 벤젠은 일본과 동일한 기준치이나 그 외 국가들과 주에서는 더 강화된 기준치를 적용하고 있다. 우리나라의 현실을 고려하여 문제를 야기시킬 수 있는 오염물질들에 관한 추가적 규제의 필요성을 제언하고자 한다.

첫째, 농업지역 및 공업지역의 유류누출 사고 등으로 인하여 지하수의 오염이 가중되는 문제점이 있다. 또한 농업지역 및 공업지역 등의 부지가 고급용지로 토지용도가 변경될 경우 BTEX기준을 만족해야 하는 문제가 발생할수 있다. 따라서 BTEX 기준항목을 세분화하여 생활용수뿐만 아니라 농업용수 및 공업용수의 기준치 적용과 PAHs에 대한 항목추가가 필요할 것으로 사료된다.

둘째, 산업의 고도화에 따라 국내뿐만 아니라 전 세계적으로 다양한 유해화학물질들이 생산되고 있고 그 양도 해마다 증가하고 있는 현실에 비추어볼 때 국민들에게 안전한 수원을 공급하기 위해서는 기준항목이 확대되어야 할 것이다. 그러기 위해서 다양한 유해화학물질들의 종류, 배출처 및 배출량 파악이 필요하며 국제적으로 엄격히 관리하고자 하는 POPs의 규제물질 중 PCBs와 헥사클로로벤젠에 대한 규제가 요구된다.

셋째, 음용 시 인간과 생태계에 위해한 것으로 나타난 질소는 몇 년 전부터 우리나라에서 지하수오염의 주요 오염원으로 나타나고 있다. 선진국의 경우 이러한 질소항목 기준을 아질산성질소와 질산성질소로 세분화하여 관리하고 있다. 우리나라는 질산성질소에 대한 기준만 제시되어있으므로 질소에 의한 지하수오염의 피해를 방지하기 위하여 질소의 기준을 질산성질소뿐만 아니라 아질산성질소로 세분화할 필요가 있다.

마지막으로, 우리나라에서 지하수중의 방사성물질은 지금까지 큰 관심을 받지 못하였지만 국내 지하수에서의 방사성물질의 검출에 따라 환경문제로 이슈화되고 관심도 크게 증가하고 있다. 방사성물질에 대한 지하수 수질기준은 다른 항목들처럼 보편화되어 있진 않지만 미국 등 일부 선진국에서는 수 십년 동안의 조사연구를 수행하여 그에 대한 기준을 마련해놓고 있으며, 특히 라돈의 관리에 중점을 두고 있다(박선구 등, 2003). 라돈의 위해성은 인간에게 치명적인 것으로 나타나고 있으며 특히 음용수내의 라돈의 발암성은 높은 것으로 보고되고 있다. 따라서 지하수 수질기준 항목에 라돈을 포함할 것을 제언한다.

본고에서 제언한 오염물질들의 지하수 수질기준 항목의 추가와 효율적인 관리를 위하여 기초조사 자료의 지속적 확보에 의한 지하수 수질자료 통합 D/B구축이 시급하다. 즉, 국내의 지하수의 수질측정망 운영자료 D/B, 지하수 오염물질에 대한 D/B와 지하수와 관련된 토양자료 D/B를 상호·연계하여 종합적인 지하수 수질자료 D/B를 구축하고, 이를 바탕으로 한 중·장기적 지하수 수질기준의 개선이 요구된다.

참고문헌

- 강형석 외 5인. 2004. 3. 「지하수오염」 동화기술.
- 건설교통부. 2002. 12. 「지하수관리기본계획」.
- 건설교통부. 2005. 지하수조사연보.
- 김영웅. 2001. “유류오염 토양/지하수 환경복원 조사·설계사례.” 「한국물리탐사학회 특별심포지엄」.
- 김종택 외 2인. 2001. 7. 「수질오염 공정시험방법해설」. 신광출판사.
- 농업기반공사. 2004. 12. 「농촌지역 지하수보전구역 지정을 위한 지하수환경조사 방안 및 기본지침 연구」.
- 대한지하수환경학회. 1999. 11. “지하수 수질기준 타당성 검토 및 조정방안 연구.” 환경부.
- 박선구·김태호·이승준. 2003. 11. “외국의 지하수 중 방사성물질 관리에 대한 고찰.” 「대한상하수도학회·한국물환경학회 2003공동 추계학술발표회 논문집」.
- 류영창. 1997. 4. “개정된 지하수법의 정신과 개요.” 「지하수 정책 및 관계법 심포지엄」. 한국지구시스템공학회.
- 박영석. 2004. 4. 「우리나라 지하수 관리 정책과 외국의 사례」. 환경지질연구정보센터.
- 박정규·이희선. 2000. 12. 「잔류성 유기오염물질(POPs)의 관리현황과 대응방향」. KEI 연구보고서.
- 박홍룡. 1997. “우리나라의 지하수 개발 현황과 전망.” 「한국지구시스템공학회」.
- 성익환. 2000. “지하수자원 응용화를 위한 관리방안.” 「2000년 물 학술심포지엄」.
- 성익환. “지하수 자원의 보존 및 효율적 이용을 위한 대책.” 「한국정책자료」.
- 신희순. 2001. 12. 「우리나라 지하수자원의 특성」. 기술기사. 제2권 제4호.
- 「연합통신」. 1998년 5월 23일자 보도.
- 이강근. 1997. “현행 지하수법의 문제점.” 「환경법연구」.
- 이근상. 2004. 2. 「지하수 수리와 환경」. 구미서관.
- 이병호외 4인. 2003. “토양·지하수환경의 과거·현재와 미래.” 「한국폐기물학회 창립20주년 기념 특별심포지엄 및 추계학술연구발표회」.
- 최상일. 1994. “Rocky Mountain Arsenal 북쪽 외부지역에서의 지하수 정화대책.” 「대한토목학회」.
- 한국건설기술연구원·한국수자원학회. 2003. 5. 「물 관리 체제 개선방안 연구」.
- 한국소비생활연구원. 1998. 「먹는물의 방사능물질 유해성여부에 관한 대토론회」.

- 한규언. 2000. “한국의 지하수와 환경변화.” 「한국지구과학회 2000년도 추계학술발표 논문요약집」.
- 「해럴드」. 생생뉴스 2005-09-12일자 보도.
- 환경부. 2000. 6. 「지하수관리제도」.
- 환경부. 2003. 11. 「지하수 수질보전 종합대책수립」.
- 환경부. 2005. 「지하수 수질보전 종합대책」
- 환경부. 2004. 「지하수연보」.
- 환경부. 2005. 2. 「2005년 지하수 수질측정망 설치·운영계획」.
- NAS. 1998. *Risk Assessment of Exposure to Radon in Drinking Water*, Prepublication Copy.
- Lees, R. E., Steele, R. and Roberts, J. H.. 1987. *A case-control study of lung cancer relative to domestic radon exposure*. Int. H. Epidemiol. 16(7).
- Svensson, C., Pershagen, G. and Klominek, J.. 1989. *Lung cancer in women and type of dwelling in relation to radon exposure*. Cancer Res.. 49, 1861.
- 국가지하수정보센터 <http://www.gims.go.kr>
- 환경부 <http://www.me.go.kr/>
- <http://www.legis.state.wi.us/rsb/code/nr/nr140.pdf> (Chaper NR140. groundwawter quality)
- <http://www.env.go.jp/en/lar/regulation/gwp.html>
- <http://www.dec.state.ny.us/website/regs/part703.html>
- <http://dnr.wi.gov/org/water/dwg/health/haltable.htm>
- <http://www.defra.gov.uk/environment/water/ground/guidance.htm> (Guidance on the Groundwater Regulations 1998)