The Journal of Engineering Geology
pISSN : 1226-5268 eISSN : 2287-7169

Vol. 30, No. 3, September, 2020, pp. 215-222
https://doi.org/10.9720/kseg.2020.3.215

REVIEW

해외사례조사를 통한 우리나라 지하수 관리의 개선방향

김민수[1] · 정교철[2] · 이정우[3] · 정일문[4*]

[1]대림산업 상무, [2]안동대학교 지구환경과학과 교수, [3]한국건설기술연구원 국토보전연구본부 연구위원,
[4]한국건설기술연구원 국토보전연구본부 선임연구위원

Improvement Plan for Groundwater Management in Korea by Examining Overseas Cases

Minsoo Kim[1] · Gyocheol Jeong[2] · Jeongwoo Lee[3] · Il-Moon Chung[4*]

[1]Director, Daelim Industrial Co., Ltd.
[2]Professor, Department of Earth and Environmental Science, Andong National University
[3]Research Fellow, Department of Land, Water and Environment Research, KICT
[4]Senior Research Fellow, Department of Land, Water and Environment Research, KICT

Abstract

This study aims to suggest an improved groundwater management plan for future policy decisions in Korea by examining representative groundwater management cases abroad. In the United States, the Ground Water Resources Program is operated both locally and regionally. In order to manage appropriate levels of groundwater in Japan, groundwater resource management programs are conducted according to small, medium, and large watersheds. In Europe, the watershed unit manages groundwater and surface water by way of an integrated approach. In Korea, groundwater development at the national level is designated and managed in a top-down manner, whereas in the United States and Japan, groundwater is managed from small-scale regional units to large-scale watersheds. In order to evaluate the sustainability of groundwater resources, groundwater must be evaluated through a dynamic process including continuous monitoring, groundwater flow analysis, and management priorities.

Keywords: groundwater development, groundwater recharge, overseas case, groundwater management plan, policy decision

초 록

본 연구에서는 미국, 일본, 유럽 등 해외의 지하수 관리 사례를 조사하여 향후 우리나라 지하수 관리 개선 방향을 제시하였다. 미국에서는 지하수자원 프로그램(GWRP)이 국지적-권역별로 운영된다. 일본에서는 적정지하수 이용을 관리하기 위해 소규모, 중규모 및 대규모 유역에 따라 서로 다른 지하수자원 관리 프로그램이 수행되었다. 유럽에서는 지하수가 지표수와 동일하게 평가되며, 유역 단위로 지표수와 지하수를 통합 관리하고 있다. 우리나라에서는 국가차원에서 지하수 개발가능량을 하향식으로 지정하고 관리하지만 미국과 일본에서는 소규모 지역 단위에서 대규모 유역까지 범위를 확장하며 관리하는 차이가 있다. 또한 지하수 자원의 지속 가능성을 평가하려면 지속적인 지하수 관측과 조사, 데이터 분석, 지하수 개발 우선순위 결정 등을 포함하는 역동적 지하수 활용 프로그램을 운영해야 한다.

주요어: 지하수 관리 사례, 지하수자원 프로그램, 개발가능량

OPEN ACCESS

***Corresponding author:** Il-Moon Chung
E-mail: imchung@kict.re.kr

Received: 14 July, 2020
Revised: 29 July, 2020
Accepted: 13 August, 2020

Ⓒ 2020 The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

우리나라의 연평균 수자원 총량은 1,323억 m^3이며 연간 총 이용량은 28%인 372억 m^3로 이는 비홍수기 평균 유출량인 212억 m^3의 170%에 해당한다(Ministry of Environment, 2020). 홍수 시 유출은 수자원 총량의 41%인 548억 m^3/년으로 많은 양의 수자원은 홍수기에 집중적으로 흘러나간다. 따라서 우리나라의 수자원은 댐 등의 저류시설을 통해 저장하는 방식으로 주로 이용되고 있다. 반면, 연간 지하수의 이용량은 총 이용량의 7.7%인 29억 m^3/년에 불과하다. 이 같은 원인은 우리나라의 수자원 정책이 지표수 위주의 개발에 역점을 두었고 지하수는 보전해야 할 차세대 수자원으로 분류되어 왔기 때문이다. 하지만 수돗물의 불신과 수처리 비용 등 지표수자원에 대한 취약성이 제기되면서 보다 양질의 수자원에 대한 요구가 점증하고 있다. 지하수는 깨끗한 수질과 원위치 공급가능성 측면에서 지표수에 대한 대안으로 매우 적합하다.

현재 우리나라 전체 지하수 개발가능량은 약 130억 m^3/년으로 이 중에서 약 22.4%인 29.1억 m^3/년이 실제로 이용되고 있다(Ministry of Environment, 2020). 개발가능량 대비 전국 또는 시도별 이용률은 저조하지만, 시군구 단위로는 지하수 이용량이 개발가능량을 초과하는 지역이 존재하는 등 지역에 따라 이용률 편차가 심하다. 이는 지역별 지하수 이용 의존도의 차이에서도 기인하지만, 지하수 관리의 기준값인 개발가능량이 국가 지하수 관리 기본계획에 따라 10년 빈도 갈수 시 지하수 함양량으로 일괄적으로 설정되었기 때문이다. 이와 같이 우리나라는 획일적으로 설정된 지하수 개발가능량을 기준으로 지하수 이용·관리를 하고 있지만, 이에 반해 미국, 일본 등 해외에서는 지표수원과의 관계, 지하수원의 규모를 고려하는 등 지역특성을 반영한 지하수관리를 수행하고 있다. 본 연구에서는 해외의 대표적인 지하수 관리 사례를 조사·검토하여 향후 국내 지하수 관리 정책의 합리적인 개선 방향을 제시하고자 한다.

해외의 지하수 관리 현황

미국

미국의 지하수는 인구 절반과 전국 농촌 인구 전체의 음용수원이며, 농업용수의 공급량도 매우 큰 부분을 차지한다. 지속적인 지하수 양수로 인한 장기 수위저하로 정의되는 지하수 고갈은 지하수 사용과 관련된 핵심 현안이다. 미국 대다수 지역은 현재 지하수 고갈을 겪고 있다.

지하수 개발 이전의 지하수 시스템은 장기간 평형을 유지한다. 즉, 배출량과 함양량은 같고 저수량은 상대적으로 안정세를 유지한다. 하지만 양수가 시작되면, 이 같은 평형은 변화를 겪고 지하수위는 감소한다. 은행 계좌에 잔액이 있어야 하듯이, 양수를 통한 대수층의 취수는 함양량 증가나 배출량 감소, 저수량 제거(혹은 고갈)를 통해 균형을 유지해야 한다. 지하수 저수량은 양수에 대응하여 미국 전역에서 감소하고 있으며 지속적인 양수로 인해 지하수 고갈이 확대되고 있다. 지하수 고갈로 인해 양수 비용 증가, 수질 악화, 하천 및 호수 유량 감소, 지반 침하 등의 부작용이 생기고 있다. 지하수 양수는 자연 상태에서는 지표수체로 배출되는 지하수 유출을 차단하거나 지표수역에서 대수층으로 이동하는 유량을 증가시켜 대수층과 하천, 호수, 습지의 유량변화를 초래한다. 어느 경우이든 결과적으로 지표수 유량의 감소를 초래하지만, 전체적인 효과가 나타나는 데는 수년이 걸릴 수 있다. 지하수 양수가 과도해 지면 천변이나 습지 초목이 생존하는데 필요한 수심 이하로 지하수위가 저하되어 하안 생태계의 침해가 발생한다(Sophocleous, 2000). 지반침하는 토양 물질의 지표하 이동으로 인한 지표면의 점진적 혹은 급격한 침하를 뜻하는데 미국에서 발생하는 침하의 80퍼센트 이상은 지하수 취수와 관계가 있다(Galloway et al., 1999). 또한 내륙 대수층의 상층부에서 양질의 수자원을 취수할 경우 해수가 상류로 이동하여 수질을 악화시킴으로써 내륙 대수층의 수질이 악화되거나 다른 지표수가 대수층에 유입될 수 있다. 이에 따라 미국에서는 국지적, 지역적으로 지하수자원 활용 프로그램(Ground Water Resources Program, GWRP)을 가동하고 있다(National

Research Council, 2000, 2001; USGS, 2001).

지하수자원 활용 프로그램은 지역 대수층 체계 분석(Regional Aquifer-System Analysis, RASA) 프로그램에서 발전한 것이다. RASA 연구(1987-95)는 주로 전국 주요 대수층의 고갈량을 비롯하여, 해당 대수층에 대한 지하수 부존량을 계량화하기 위한 것이었다. GWRP는 RASA 연구를 업데이트 및 강화하고 있다. 데이터 수집과 프로세스 기반의 지하수문학적 분석을 통해 지하수 공급량의 장기 가용성을 평가하는 한편, 지하수 개발이 토지 및 지표수 자원에 미치는 환경 영향력을 다루고 있다. GWRP의 우선순위는 지역 및 전국의 주요 지하수 현안에 대한 과학적 평가, 현장 여건을 반영한 연구방법 정립 및 모델 개발, 기초 지하수 데이터 접근성 개선 등을 포함한다.

GWRP의 중점 사항은 전국적으로 중요 대수층에 대해 수문학적 분석과 지하수 유동 모델링을 통해 지역의 지하수 가용성을 평가하는 것이다. 이러한 평가는 인간의 활동이 지하수위와 지하수 저수량, 지하수 유출량, 기타 지표수체에 미치는 영향력을 정량화한다.

미국에서도 지하수 함양량의 시공간적 변동성을 파악하는 사안이 매우 중요하다. 이와 같은 변동성에 대한 지식은 물관리자가 수자원 가용성을 평가하여 도시화나 한발 확대로 인해 물수요가 집중되는 취약 대수층을 보호하는데 도움이 된다. 미국의 미네소타주와 노스캐롤라이나, 펜실베니아, 위스콘신 주에서 국소규모의 함양량을 구하기 위해 지하수위 변동법과 물수지방정식, 추적자를 이용한 방법 등을 적용한 결과 강수량 대비 평균함양량은 12%에서 최대 66%까지 산정되었다. 또한 유역규모의 함양량을 계산하기 위해 기저유출분리법과 Rorabaugh방정식을 적용한 결과 19~29%의 범위를 나타냈다(Delin et al., 2007).

GWRP는 학자와 엔지니어가 지하수계에서 일어나는 다양한 유동현상을 모의하는데 도움이 되는 MODFLOW(McDonald and Harbaugh, 1988)의 개선을 지원하고 있으며, 지하수와 유역 연계 모델 개발에 주안점을 두고 유역 차원에서 지하수 및 지표수 상호작용 모의를 개선하기 위해 노력하고 있다.

일본

일본에서는 고도경제성장기에 과잉 지하수 채수가 심각한 지반침하를 초래한 경험 때문에, 그것이 광역적인 지반침하의 원인이 된다는 것에 대해서는 공통인식이 형성되어 있다. 또한 유역전체를 대상으로 물순환계의 건전화를 위한 방안을 모색하고 있으며, 특히 물순환계의 하나인 지하수의 보전과 이용 측면에서 균형적인 최적 관리가 필요하다. 지하수는 지표수와 비교해서 각종 정량데이터가 충분히 정비되어 있지 않고, 행정상으로도 조직적으로 데이터를 축적·분석하는 체계가 확립되어 있지 않으므로 실제로는 물순환계 전체로서 지표수에 호응해서 지하수를 통합적으로 보전·이용할 수 있는 상황은 아니다. 이 때문에, 지하수에 관한 정량 데이터를 정비할 수 있는 체계, 예를 들면 지하수의 수자원으로서의 기본데이터(지하수위·수두, 채수량, 지질주상도, 이용실태, 수문 등)의 전자데이터화 추진이 필요하다는 데에 공감대를 갖게 되었다. 또한 토지이용 변화 등을 고려하여 지표수와 지하수를 연계 분석하는 연구를 수행하였다(Jia et al., 2002).

한편, 지하수자원의 분포와 이용형태는 지형, 지질, 기후, 식생 등의 자연조건과 인구, 토지이용, 산업, 역사·문화 등의 사회경제조건에 의해 지역별로 크게 다르며, 다양성·고유성이 뚜렷하다는 특징도 고려해야 한다. 예를 들면 일본에서 주요 대수층은 평야와 분지에 분포하고 있는데 관동평야처럼 대규모인 것부터 단일 지자체에 속한 소규모 평지와 선상지 등에서 지하수가 이용되고 있다. 또 물이용 전체에서의 지하수의 의존도와 생활용수, 공업용수, 농업용수의 용도별 비율도 지역에 따라 제각각이다.

지하수자원의 고갈과 지하수장해·오염 등을 발생시키지 않고, 지속가능한 형태로 지하수의 보전과 이용을 최적으로 관리해 가기 위해서는 「적정채수량」 범위 내에서 지하수자원의 보전과 이용의 최적 관리를 실현해 가는 것이 중요하다.

어떤 대수층에서 어떤 일정 기간에 이용가능한 지하수의 양(대개 함양량보다 작고 지하수장해를 일으키지 않는 양)을 「적정채수량」이라 하면, 적정채수량과 실제 채수량의 관계는 다음과 같이 설명할 수 있을 것이다. 채수량이 적정채수량을 웃도는 경우에는 지하수장해와 지하수자원의 고갈이 염려되므로, 채수량이 적정채수량을 넘지 않는 범위 내에서 이용해 갈 것이 필요조건이 된다. 한편으로 지역에 따라서는 지하수위가 너무 올라가지 않도록 관리하는 것도 중요한 과제가 된다. 이와 같은 적정채수량을 고려하여 일본에서는 규모별 지하수 관리를 수행하고 있다.

지하수자원 관리의 목적과 절차는 그 대상지역의 지형 · 지질특성에 따라 달라지지만, 여기서는 지역특성에 관계없이 공통적이고 기본적인 기획 · 검토절차에 대해서 대표적인 사례를 소개하였다(Sato, 2005).

① 국소규모 수준의 지하수자원 관리

국소규모(1 km^2정도)의 지하수자원 관리는 주로 소규모 지하수원의 확보(우물의 착정)에 있어 개별 양수우물의 배치와 채수량의 설정이 대상이 된다. 이 경우, 대상이 되는 지역의 범위는 대수층이라 부르는 것이 적합한 규모이다.

국소규모 지하수 개발에 있어서는 필요한 채수량을 지속적으로 확보하는 것과 지하수 양수에 의한 영향(주변우물 고갈, 지반침하의 발생 등)이 주변에 미치지 않게 하는 것이 중요하다. 이 때문에 필요한 채수량을 확보함에 있어 기존 주변우물의 영향과 지반침하를 방지하면서 양수우물의 적정심도와 적정배치(적정한 우물 간의 거리), 개개 우물의 적정채수량을 결정해야 하고, 우물설치 신청에 있어서도 어떠한 허가제도와 허가기준을 설정하는지 또한 중요하다. 이에 대한 검토방법으로서는 물수지와 수리학적인 검토가 요구되며 양수정이론을 이용한 정량적 검토가 필요하다. 관측 · 모니터링 시에는 채수량, 지하수위, 지반 변동량 등이 지표가 된다.

② 소규모 수준 지하수자원 관리

소규모(수 km^2~수십 km^2정도)의 지하수자원 관리는 주로 소규모 지자체 행정구역내에 포함된 소유역이 대상이 되는데 인근에 걸쳐진 평야와 분지의 일부지역이 대상이 되는 경우도 있다. 국소규모 수준 관리처럼 개별우물 별이 아니고, 일정한 범위를 가진 지역을 대상으로 복수의 양수정을 집합체로서 파악해, 대상지역 내에서의 지하수 물수지와 지하수 채수량의 지역배분 등을 다루며, 대상지역 외의 인근 지자체에 지하수자원개발의 영향을 미치지 않게 하면서 필요한 채수량을 확보하는 것이 지하수자원 관리의 핵심이 된다.

이를 위해 지하수 균형이 유지되는 범위 내의 적정채수량 산정과 함께 대상지역 내에서의 적정한 지역배분과 용도별 배분, 채수허가방법 등을 명확히 할 필요가 있다. 검토방법으로서는 지하수 모델링을 이용해서 대수층과 지하수 부존량을 모델화한 후, 물수급의 현황과 장래 전망에 근거한 모의를 수행하여 가용지하수자원량과 적정채수량, 양수우물의 분포와 밀도, 안전지하수두와 안전채수량 등을 설정한다.

③ 중규모 수준의 지하수자원 관리

중규모(수십~수백 km^2정도)의 지하수자원 관리는 주로 중규모 지자체 수준으로 예를 들면 구마모토 지역 등이 대상이 된다. 지하수자원 관리 시에는 대상이 되는 지역 내에서, 지하수 밸런스가 유지되는 범위 내에서 또 지하수자원 개발에 따라 지하수 장해 등의 악영향을 방지하면서 필요한 채수량을 확보하는 것이 중요하게 된다.

이를 위해 계획 시는 지하수자원량과 그 지역배분을 적정화하는 것과 광역적인 지하수의 관측 · 모니터링(지하수위, 지반변동량 등)을 통한 지반침하의 방지대책이 중요한 과제가 된다. 검토방법은 ②에서 기술한 소규모 지하수자원 관리에서의 정량적 영향 평가 방법을 따른다.

④ 대규모 수준의 지하수자원 관리

대규모 지하수자원 관리에 있어서는 대규모 지하수원이 분포하는 지역(칸토평야, 노비평야, 오사카평야 등)이 대상이 된다. 여기서의 중점은 중규모 지하수자원 관리와 거의 일치하는데, 국가의 관계부처와 지자체가 연계해서 광역적인 대처를 해야 한다.

유럽

유럽에서는 고대 로마시대부터 지표수보다도 지하수를 우선해서 사용해왔던 역사가 있다. 그 전통은 현재에도 특히 생활용수 부분에 계승되었으며 지하수원의 보전을 향한 유럽선진국의 방침 속에 계승되었다. 2000년 유럽연합에서는, 가맹국에 통일된 지침으로 유역단위의 물관리를 지향하는 '유럽연합 물관리지침(EU Water Framework Directive)'이 새롭게 발효되었다(EU, 2000). 물관리지침 제정의 배경이 된 유럽 물문제의 상황에 대해서 물관리지침에서는 이하 각 사항이 거론되고 있다.

- 유럽연합의 지표수 20%는 심각한 오염 위기에 처해있다.
- 유럽 음료수의 약 65%는 지하수로 조달되고 있다.
- 유럽도시의 60%는 지하수자원을 과잉으로 채수하고 있다.
- 습지대의 50%는 지하수의 과잉개발에 의해 「위기적 상황」이다.
- 1985년 이후, 남유럽 관개지가 20% 증가했다.

유럽연합에서는 지금까지도 주로 물을 보호하기 위한 법률이 책정되어 왔지만, 「유럽연합의 환경-1995」에서는 상기와 같은 배경에 입각하여 유럽연합 내의 물에 대해서 양적뿐만 아니라 질적으로도 보호조치가 필요하다는 것이 지적되고 있다.

수역을 양호한 상황으로 만드는 것을 목적으로 제정된 물관리지침은 정식명칭을 「물정책분야에서의 공동체 액션 틀을 구축하는 2000년 10월 23일의 유럽의회 및 평의회 지침 2000/60/EC」(Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for the Community action in the field of water policy)이라 하고, 2000년 12월에 발효했다(EU, 2000).

물관리지침은 지표수와 지하수 등 모든 수자원을 대상으로 하고 있으며 유럽 전체에서 지하수와 지표수의 통합적인 관리를 보인 최초의 지침이다. 물관리지침에 따라 각 유럽연합 가맹국은 지역성에 따른 관리 계획 등을 작성해서 그것에 근거한 대책을 강구함으로서 유럽연합 전체에서 물환경의 보전·관리를 추진해 가는 구조로 되어 있다. 지하수의 평가는 지표수와 동등하며 특히, 제17조에서는 지하수로 특화해서 오염대책이 기재되어 있다. 물관리지침의 특징으로서 정치·행정적 경계가 아니라 하천유역 단위에서의 정화 및 관리방안을 도입하고 있다는 것을 들 수 있다. 각국은 우선 지침의 대상이 되는 하천유역을 지정하고, 적절한 관할당국을 포함한 행정정비를 할 것이 의무화 되어 있다. 국제하천유역에 대해서도 관계국 사이에서 조정하고 같은 식의 지정을 해야 한다. 이 하천유역들에는 당연히 지하수가 포함된다.

또한, 물관리지침에서는 물환경의 유지와 개선을 목적으로 하고 있으며, 주된 대상은 수질이다. 수량의 조절은 수질대책의 부수적인 요소로 되어 있으며, 양질의 물을 확보하기 위해서는 각 국에서 질과 동시에 양에 관한 대책도 마련해야 한다고 되어 있다. 양호한 지하수상태란 지하수의 양적상태, 화학적 상태 양쪽이 양호하다는 것을 가리킨다. 그 중에서 지하수와 관련된 중요한 항목은 다음과 같다.

- 가맹국은 중점물질에 의한 오염을 서서히 줄이고 우선적 위험물질의 배출, 방류, 손해를 배제 혹은 서서히 배제하기 위해서 필요한 대책을 강구해야 한다.
- 가맹국은 오염물질이 지하수로 들어가는 것을 막거나 혹은 제한하고 지하수 전체의 상태가 악화하지 않도록 하기 위해 필요한 대책을 강구해야 한다.
- 가맹국은 본 지침 발효 후 적어도 15년간은 양호한 지하수상태를 달성할 것을 목표로 모든 지하수체를 보전, 정화, 회복시키고 지하수의 양수량과 함양량의 밸런스를 유지해야 한다.
- 가맹국은 인간활동의 영향으로 인해 지하수중의 오염물질 농도가 현저히 혹은 지속적으로 증가하는 경향을 보이는 경우 지하수 오염 저감에 필요한 대책을 강구해야 한다.

또한, 물관리지침에서는 물환경의 유지와 개선을 목적으로 하고 있으며, 주된 대상은

- 하천유역의 특성파악
- 지표수 혹은 지하수에 대한 인간활동의 영향 파악
- 물 사용의 경제성 분석
- 음료수로서 취수하는 물(1일평균 공급량이 10 m^3을 넘거나 또는 50인을 넘는 사람에게 공급) 또는 장래 음료수로서 사용될 물의 모니터링

또, 음료수로서 취수하는 수원은 보호지역으로서 등록이 의무화 된다.

본 지침에 따라 각 국은 발효 후 6년 이내 물상태의 모니터링 프로그램을 설정해 실시해야 한다. 지하수에 대해서는 화학적 상태 및 양적 상태의 파악이 요구되고 있다.

이에 따라 유럽위원회는 2001년 1월 물 프레임워크 지침의 최초 규제대상으로서 지정하는 32종류의 「우선물질」 리스트를 제안, 같은 해 11월에 채택되었다. 특정 유해물질에 대해서는 20년 이내에 수역으로의 배출을 단계적으로 금지하게 되어 있다.

지하수에 대해서는, 제17조에 기술되어 있는데 지하수의 오염방지, 조절에 대한 전략으로서, 유럽의회와 평의회는 ① 양호한 지하수 화학상태를 평가하기 위한 기준 마련, ② 중대한 계속적 상승경향의 확인 및 경향이 역전된 지점의 정의를 포함한 제한을 할 것이 의무화되어 있다. 또, 제8조에서는 각국이 책정하는 물 상태의 모니터링 프로그램 대상으로서 지하수에 대해서는 화학적 상태, 양적상태가 포함되어 있다.

2003년 9월, 유럽위원회는 물정책지침의 제17조에 근거해, 지하수오염방지에 관한 EU지침안(Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the protection of groundwater against pollution 2003/0210(COD))(이하 「지하수 지침」)을 발표했다. 「지하수지침」은 가맹국에 대해 지하수질의 모니터링을 의무화시켜 EU의 기존 법령기준의 준수상황을 파악하도록 요구하고 있다. EU의 법령에서 대상으로 하지 않는 물질에 대해서는 가맹국이 2006년 6월까지 상한치를 설정하게 되어 있다. 오염의 정도가 '기간'과 '환경상의 중대성'관점에서 일정 수준을 넘는 경우 가맹국은 오염악화를 방지하는 대책을 강구해야 한다. 수질기준치 또는 상한치의 75%를 넘는 경우는 환경상 중대한 상황에 있다고 본다. 이 외에 지하수 오염을 막기 위해, 유해물질의 간접적인 배출(지면과 토양 중으로의 배출)을 금지 또는 제한하는 조항도 포함돼 있다.

토 의

미국에서는 지하수자원 프로그램(GWRP)이 국지적-권역별로 운영된다. RASA프로그램을 통해 개발된 GWRP는 주로 전국의 주요 대수층 고갈을 포함하여 대수층의 지하수 부존량을 측정을 목표로 하고 있다. 일본에서도 적정지하수 이용량을 관리함에 있어 탑다운 방식보다는 상향식 지하수자원 관리 프로그램이 수행되고 있다. 반면 우리나라의 지하수 관련 최상위 계획인 지하수 관리 기본계획에서는 전국단위 지하수 함양량을 산정하고 10년 빈도 갈수시의 함양량을 개발가능량으로 설정하여 고시하는 하향식 지하수 관리를 하고 있다. 방법론은 NRCS-CN법, 모델링에 의한 방법, 지하수위 변동법 등을 사용하고 있으나 적용기법에 대한 구체적인 기준 및 일관성은 다소 결여되어 있다. 또한 기법별 함양량을 구한 후 개발가능량에 적용하는 기법을 최종 선택하는 과정에서 명확한 기준이 제시되지 않고 있다. 예를 들면, 지하수위 변동곡선법의 경우 분석 가능영역이 '관측정 중심 영향반경'으로 한정되어 있어 해당 소유역 전체의 대푯값으로 환산하기에는 무리가 따르지만 현행 지하수 영향조사서 등 실무에서는 국가의 최상위 계획에 나온 수치를 적용하는 경우가 대부분이다. '지하수 기초조사 및 지하수 지도 제작·관리 지침(Ministry of Environment, 2019)'에서는 함양량 평가를 위해 아래에 제시된 방법 중 2가지 이상 방법을 적용하여 결과를 비교, 확인하도록 되어 있다.

- 지하수 수위 변동곡선 해석방법
- 수문학적 물수지 분석방법
  - 강수량으로부터 증발산량, 유출량 등 수문평형식을 구성하는 요소들의 값을 구하여 지하수 함양량 산정
- 수문곡선 해석을 통한 기저유출 분리방법
- 지하수, 지표수 및 강우 등의 염소이온 함량을 이용한 방법
- 지하수연령 측정(3H, CFCs, SF6, 14C 등)을 이용한 방법
- 물리기반의 분포형 또는 준분포형 모형에 의한 방법(SWAT, SWAT-K, GS-FLOW, PRMS, MODFLOW 등)

소유역, 행정구역 등을 기준으로 지하수 개발가능량 산정함에 있어 위에서 구한 함양량에 10년 빈도 가뭄 시 강수량을 적용하여 산정하도록 규정하고 있다. 그러나 실제로는 지하수 관리 기본계획 혹은 지자체 지하수 관리계획에 나온 중권역 또는 대권역 별 함양률을 사용하는 경우가 많아 지역의 특성을 반영하는데는 많은 어려움이 있다. 이는 지자체 지하수 기초조사 시 보다 세부적인 지역특성 자료를 반영하여 소유역별 지하수 개발가능량을 산정함으로써 극복될 수 있을 것이다. 또한 지하수 개발가능량은 인위적인 영향요소가 많아 실제 모델링을 통해 평가해야 하고 최종 결정과정에 있어서 지역사회의 요구와의 부합성을 고려하는 의견수렴도 거쳐야 한다.

결 론

우리나라에서는 국가차원에서 지하수 개발가능량을 설정하여 지하수를 관리하는 하향식 방식을 채택하고 있지만, 미국과 일본에서는 소규모 지역 단위에서 대규모 유역까지 범위를 확장하며 상향식으로 관리하는 차이가 있다. 대수층 조건, 지하수 부존량, 지하수 의존도 등 다양한 지역적 특수성을 고려해 볼 때 우리나라도 상향식 방식의 지하수 관리체계의 도입이 검토되어야 할 것이다. 또한 국가계획에서 정해진 지하수 함양률을 지역의 지하수 현안에 적용하는 탑다운 방식의 설계가 현장에서 반영되고 있는 실정이며, 지자체의 계획과 서로 다른 함양률 값이 제시되는 혼란도 발생하고 있다. 따라서 이러한 문제를 해결하는데 있어 미국, 일본과 같은 상향식 방식의 지하수 관리체계가 유리할 수 있다.

물관리 일원화에 따라 지하수의 수량과 수질을 통합관리해야 하므로 지하수의 수질을 반영한 지역 지하수 보전관리 등의 현안도 검토되어야 할 것이다. 또한 지속가능한 지하수 활용을 위해 지속적인 지하수 관측· 조사 및 관련기술 고도화, 과학적이고 체계적인 지하수 수량· 수질 연계관리, 지하수 건강성 증진을 위한 유역통합관리 등 선진적 지하수 관리 프로그램을 운영해야 할 것이다.

사 사

본 연구는 한국환경산업기술원의 수요대응형 물공급 서비스사업(#146515)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

Delin, G.N., Healy, R.W., Lorenz, D.L., Nimmo, J.R., 2007, Comparison of local- to regional-scale estimates of groundwater recharge in Minnesota, USA, Journal of Hydrology, 334(1-2), 231-249.

EU, 2000, Article 4.4. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 Establishing a Framework for Community Action in the Field of Water Policy; Official Journal of the European Communities: Brussels, Belgium, 22 December 2000, p.10.

Galloway, D.L., Jones, D.R., Ingebritsen, S.E., 1999, Land subsidence in the United States, U.S. Geological Survey Circular 1182, 177p.

Jia, Y., Ni, G., Yoshitani, J., Kawahara, Y., Kinouchi, T., 2002, Coupling simulation of water and energy budgets and analysis of urban development impact, Journal of Hydrologic Engineering, 7(4), 302-311.

McDonald, M.G., Harbaugh, A.W., 1988, A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model, USGS Water Resources Investigations Rep, Chapter A1, Book 6, 528p.

Ministry of Environment, 2020, Water and future, 453p.

Ministry of Environment, 2019, Guidelines of integrated groundwater survey and groundwater map production and management, 174p.

National Research Council, 2000, Investigating groundwater systems on regional and national scales, National Academy Press, 143p.

National Research Council, 2001, Future roles and opportunities for the U.S. Geological Survey, National Academy Press, 179p.

Sato, K., 2005, Groundwater environment and resources management, Saitama Univ. Publishers, 268p.

Sophocleous, M., 2000, From safe yield to sustainable development of water resources-the Kansas experience, Journal of Hydrology, 235(1-2), 27-43.

USGS, 2001, U.S. Geological Survey Groundwater Resources Program, USGS Fact Sheet 056-01.