UN WATER

unesco

2022년 유엔 세계물개발 보고서

지하수
보이지 않는 것을 보이게

요약보고서



2022년 UN 세계물개발보고서(World Water Development Report, WWDR)는 지하수 분야를 집중조명하고, 수자원 개발, 관리 및 거버넌스에서 지하수의 역할과 위협, 기회에 이목을 집중시키기 위한 목적으로 발간되었다.

지하수는 지구에 존재하는 담수의 약 99%를 차지하고, 균일하지는 않지만 지구 전체에 분포되어 있으며, 기후변화 적응을 포함한 다양한 사회적, 경제적, 환경적 이점을 제공할 잠재력을 지니고 있다. 지하수는 이미 전 세계 생활용수의 절반 정도를, 그리고 38%의 관개 농경지에 공급할 수 있는 전체 농업용수의 약 25%를 공급하고 있다. 이러한 중요한 역할에도 불구하고, 지하수는 종종 잘못 이해되고, 과소평가되거나 잘못 관리되며, 심지어 남용되고 있다. 물 부족 현상이 세계 곳곳에서 심화되는 가운데, 지하수의 막대한 잠재력과 세심한 관리의 필요성은 더 이상 간과될 수 없다.

물 부족 현상이 세계 곳곳에서 심화되는 가운데, 지하수의 막대한 잠재력과 세심한 관리의 필요성은 더 이상 간과될 수 없다

지하수의 다양한 기능

지하수가 제공할 수 있는 다양한 기능은 지리적 특성에 따라 달라지며, 자연 및 인간 활동에 밀접한 영향을 받는다.

지하수가 제공하는 기능은 다음과 같다:

- 용수의 취수원을 제공하는 공급 기능
- 대수층의 완충 능력이 반영되는 지하수량 및 수질의 제어를 위한 규제 기능
- 지하수의존생태계(groundwater-dependent ecosystems, GDEs) 및 지하수 관련 환경 요소들을 위한 지원 기능
- 여가 활동, 전통, 종교 등 지역적 특성과 밀접한 문화적 기능

그 외에도 지하수는 지열 에너지 공급 확대, 물 안보를 위한 저수 능력 강화 및 기후변화 적응과 같은 많은 추가적 기회를 제공한다.

위협 요인

지하수 고갈은 지하수 유출이 함양을 초과할 때 발생한다. 기후 변동성과 기후변화가 이에 영향을 미칠 수 있지만, 장기간 지하수가 고갈되는 경우는 대부분 무분별한 지하수 개발로 인해 발생하였다.
21세기 초 기준으로 전 세계 지하수 저장량 고갈 속도는 연간 100~200㎦(연간 총 지하수 개발량의 약 15~25%에 해당)로 추정되며, 이는 상당히 큰 값이다.

지하수 오염은 식수로서의 적합성을 떨어뜨리며, 지하수의존생태계에도 영향을 미친다.

인위적 지하수 오염의 원인은 여러 가지가 있는데, 이러한 오염원은 대부분 지표면이나 지표면 인근에 있지만, 몇몇 오염원은 지표면 아래 더 깊은 곳에서 오염물질을 방출한다. 농업지역의 오염은 광범위하게 발생되고 있으며, 많은 양의 질산염, 살충제 및 기타 화학물질 오염을 일으킨다.
지하수 오염은 사실상 비가역적 과정으로, 한번 오염된 대수층은 회복되지 못하는 경향이 있다.

지하수 거버넌스

지하수 거버넌스는 지하수 관리, 계획 및 정책 실행을 가능하게 하며, 다양한 지역적 혹은 범국가적 (transboundary) 규모 및 수준에서 일어난다. 지하수 관리는 실질적인 이행과 일상적인 운영에 중점을 두는 행동 지향적인 성격을 내포하고 있다. 주로 미시 수준(micro-level)과 중간 수준(meso-level)에서 더욱 빈번하게 발생한다.

지하수는 종종 사적 자원으로 인식되는 경우가 많아(토지 소유와 밀접하게 관련되어 있으며 일부 국가에서는 사유 재산으로 인정된다), 규제와 하향식 거버넌스 및 관리가 어렵다. 정부는 지하수의 공유재 측면을 고려하여 자원 관리자로서 역할을 담당해야 한다.

사하라 사막 이남의 아프리카에서는 그 비율이 5%에 불과하여 광범위하게 부존되어 있는 천층 지하수가 거의 활용되지 못하고 있음을 보여주고 있다

국가의 법과 규제는 지하수에 대한 접근뿐만 아니라 지하수 수질에 영향을 미치는 인간의 활동도 제어한다. 추가적인 관련 법적 제도에는 아래와 같은 항목들이 포함된다.

- 인권 문제로서 기본적으로 필요한 물 접근성 보장
- 생계 및 소규모 생산에 필요한 지하수 접근성 보장
- 자연 지하수 함양 및 유출 과정에 유해한 영향을 미치는 토지 이용에 대한 규제
- 지하수 분배, 모니터링, 정책적 책임 부문 관련자로 구성된 협회의 형성과 역할에 대한 규제

법적 프레임워크는 유출 및 함양 구역과 상수원 우물 주변 지역의 보호, 지속 가능한 표준 개발량, 개발 통제, 연계 이용 규제 등을 포함할 필요가 있다.

일부 국가에서는 지하수가 강을 포함한 지표수와 함께 규제된다. 지하수 권리와 지표수 권리가 상충될 경우(예를 들어 인근의 집중적인 지하수 개발로 인한 하천 건천화 또는 그 반대의 경우), 지표수-지하수 연계 관리가 필요하다.

점오염은 유출수 및/또는 배경수 수질 기준과 허가를 통해 규제될 수 있다. 분산되어 있거나 불분명한 오염원으로 인한 비점오염은 토지 이용의 규제 및/또는 최적의 농업 및 환경 관리 기술의 도입과 같은 예방조치가 필요하다.

농업

지하수는 관개농업, 축산업, 식량 생산 등의 농업 활동에 필수적인 자원이다. 2012년 대비 50% 증가할 것으로 추정되는 2050년 식량, 사료 및 바이오 연료 수요 충족을 위하여, 전 세계적으로 물과 농작물 수요가 증가할 것으로 예상된다. 이를 위해 농업생산 과정에서 물 발자국(water footprints)과 환경 발자국(environmental footprints)을 줄이면서 지하수의 지속가능한 증산을 통해 농업 생산성을 높이는 것이 매우 중요하다.

지속적이고 신뢰할 수 있는 천층 지하수가 있는 경우, 지하수는 소규모 자작농민에게 중요한 수원이 될 수 있다. 관개를 위한 지하수 의존도가 높은 지역인 북미와 남아시아에서는 관개시설이 구비된 농경지의 각각 59%와 57%에서 지하수가 사용되고 있다. 그러나 사하라 사막 이남의 아프리카에서는 그 비율이 5%에 불과하여 광범위하게 부존되어 있는 천층 지하수가 거의 활용되지 못하고 있음을 보여주고 있다.

농업 오염이 정착지 오염과 산업 오염을 넘어 내륙과 연안 오염의 주요 원인인 것으로 추정된다. 화학 비료와 유기 비료로부터 비롯된 질산염은 전 세계적으로 가장 널리 퍼진 지하수 인공 오염물질이다. 부적절하게 살포되거나 폐기된 살충제, 제초제, 살균제는 발암물질과 기타 독성물질로 지하수를 오염시킬 수 있다.

농업으로 인한 지하수 오염을 방지하고 제한하기 위한 법과 규제(특히 시행 부문)가 충분하지 않다는 증거들이 제시되고 있다. 농업 분야에서 수질 오염을 다루는 정책은 국가, 하천 유역 및 대수층 규모의 상위 농업 및 물 정책 프레임워크의 일부가 되어야 한다.

농촌 지역 전력 공급은 지하수 개발의 주요 동인이 되었다. 특히 경유 또는 풍력 에너지에 의존하던 농촌 지역은 전기가 공급되면서 지하수 개발이 두드러지게 나타났다. 또한 태양광 기술의 발전에 따라 태양열 관개시스템이 농업에 적용되기 시작하였다. 그러나 태양열 관개시스템이 적절하게 운영되거나 관리되지 않을 경우 물을 지속적으로 사용하지 못할 위험이 있다.

인간정주

오늘날 지하수가 전 세계 도시 인구의 거의 50%를 공급하는 것으로 추정될 정도로 도시의 지하수 의존도는 심화되고 있다. 그리고, 도시 빈곤층이 많이 거주하는 도시 근교에는 공공 물 관련 기반시설과 서비스가 제공되지 않고, 무계획적이며 법적 제도도 부족하다.

지하수는 상수도를 공급받지 못하는 전 세계 대부분의 농촌 주민에게, 유일하게 실현 가능하고 감당할 수 있는 비용으로 기본적인 물 접근성을 확장하기 위한 방법이 된다

개발도상국에서는 최근 몇 년 동안 자급을 위한 개인 우물 사용이 급증했다. 이러한 현상은 불규칙하거나 불충분한 상수도 공급에 대처하기 위해 시작되었으며, 이후 높은 수도요금을 내지 않기 위한 비용 절감 방안으로 영구적으로 계속되었다.

불충분하거나 부적절한 위생이 지하수에 미치는 영향은, 하수도 보급이 낮으며 대부분의 가정용 배설물이 수거되지 않고 토양으로 배출되는 도시 지역에서 나타난다. 수도 사업자는 공공의 건강을 보호하고 용수공급 비용을 줄이기 위해, 지하수 함양 지역에서 농업용 농작물 재배와 주택 개발을 제한하여 중요한 우물과 수원을 보호하는 데에 더욱 일관된 노력을 기울여야 한다.

지하수는 상수도를 공급받지 못하는 전 세계 대부분의 농촌 주민에게, 유일하게 실현 가능하고 감당할 수 있는 비용으로 기본적인 물 접근성을 확장하기 위한 방법이 된다. 특히 농촌 인구가 많지만 분산된 사하라 이남 아프리카와 남아시아가 대표적인 사례이다.

오염 발생 현장의 오폐수 처리와 지하수 공급의 공존은 천층 지하수에 더욱 심각한 문제를 일으킨다. 전체 농촌 지하수 공급 시설의 약 30%가 병원균으로 인한 지속적인 오염에 영향을 받는 것으로 추정된다. 이와 같은 오염은 주로 소외된 사람들(여성들과 소녀들은 종종 하폐수에 노출되어 병원체와 독성 물질로 질병에 걸릴 위험이 더 높은 경향이 있다)에게 더 큰 영향을 미칠 것이다.

이주민들의 임시 거주지와 영구 거주지에 대한 특별한 논의가 필요하다. 이 거주지들은 높은 인구밀도에도 불구하고 도시와 농촌 범주의 사이에 위치하게 된다. 이러한 경우에는 설계가 잘된 우물을 설치하고, 오폐수 시설을 잘 관리하는 것이 필수적이다.

산업

지하수를 사용하는 산업으로는 제조업, 광업, 석유·가스, 에너지 발전, 엔지니어링, 건설업 등이 있다. 지하수 의존도가 높은 산업으로는 의류와 식음료 분야가 있다. 지하수는 지표수 가용량이 제한적이고 수질이 중요한 다양한 산업 공정에 사용된다.

석유, 가스 및 광산업은 다양한 조사를 통해 대수층의 위치와 범위, 그리고 그 특성에 대한 풍부한 데이터를 확보하고 있을 수 있다

처리되지 않거나 부분적으로 처리된 산업 폐수의 방류 및 침투는 지하수를 오염시킬 수 있다. 적절하게 설계되지 않고 오래된 산업 쓰레기 폐기장과 기존 광산에서 비롯된 토양 오염과 침출은 인간의 건강과 환경에 큰 위험을 초래할 수 있다.

많은 생산 공정의 마지막 단계에서 제품을 세척하고 잔여 화학물질을 제거하기 위해 대량의 물이 필요하다. 냉각 목적의 지하수 사용은 산업의 위치와 유형에 따라 매우 다르므로 국가별로 다양한 형태를 이룬다. 터널과 같은 지하 구조물에서는 대체로 일시적 혹은 영구적인 지하수 배수 작업이 필요하다.

많은 경우 광산 운영을 위해 빈번하거나 지속적인 배수가 필요하며, 이런 행위는 식수의 수원이 될 수 있는 그 지역 대수층을 오염시킬 수도 있다. 또한 광업 활동으로 오염된 물을 처리하는데도 어려움이 따른다. 그렇지만, 석유, 가스 및 광산업은 다양한 조사를 통해 대수층의 위치와 범위, 그리고 그 특성에 대한 풍부한 데이터를 확보하고 있을 수 있다. 이러한 데이터는 수문지질학자, 정부 및 수도 사업자에게 매우 유용하게 활용될 수 있다.

에너지 산업은 또한 지하수 수질에 커다란 영향을 미칠 수 있다. 석탄을 화력 발전에 사용할 경우, 발생하는 석탄재 폐기물 처리장의 침출수는 지하수 수질에 상당한 영향을 미칠 수 있다. 천연 가스 개발을 위한 수압파쇄법은 지하수 오염의 상당한 위험을 초래할 수 있으며, 얕은 대수층은 이에 더 취약하다. 오염원은 형성수, 환류수, 시추액 및 수압 파쇄 유액에서 발생하는 폐수를 포함한다.

금융 부문은 현재 지속가능한 투자에 상당한 영향력을 행사하고 있으며, 이는 지하수를 지속가능하게 사용하는 산업 및 에너지 부문의 고객을 우선하고, 다른 이들도 그렇게 하도록 장려하는 연쇄 효과를 가져올 것이다.

생태계

지하수의존생태계는 높은 산골짜기에서 대양의 해저, 심지어 사막까지 다양한 곳에서 찾아볼 수 있다.

지하수 유출은 건기에 하천과 강의 건천화를 방지하는 기저유량을 유지하는 데 도움을 준다. 식물이 지하수에 접근가능한 육지 생태계의 모든 생물군계는 지하수에 의존한다. 건조한 지역의 물웅덩이는 종종 지하수로 채워지기 때문에 사바나와 같은 건조한 환경의 복잡한 먹이 그물을 유지하는 데 결정적인 역할을 한다. 강변 지역, 습지 및 기타 지표수 수역은 때때로 지하수에 의존한다.

또한, 지하수의존생태계는 생태계에 중요한 서비스를 제공한다. 수상 및 육지 지하수의존생태계는 서식지가 될 수 있으며, 생물 다양성을 지원하고, 홍수 및 가뭄의 완충작용을 하며, 식량을 제공하고, 문화 서비스의 공간이 될 수 있다. 지하수의존생태계는 물리적 분리를 보장하고, 여과, 생분해 및 오염물질의 흡착과 같은 생물물리학적 과정을 가능하게 하고, 자연적인 재충전을 촉진하고 보호함으로써 오염에서 대수층을 보호하는 데 중요한 역할을 한다.

지하수, 생태계 및 인간의 공동 번영은 지하수 관리, 물과 토지의 연계 관리, 자연기반해법, 생태계 보호 강화로 증진될 수 있다. 지하수 관리가 지하수와 대수층 자체에 집중되는 경우가 많지만, 주요 생태계의 보호를 위하여 지하수와 생태계를 함께 관리할 필요가 있다.

기후변화

기후변화는 계절성 하천, 습지, 호수를 포함한 지표수의 유출과 강수량을 변화시키며, 이에 따라 지하수의 자연적 함양에 직접적인 영향을 미친다. 그러나 기후변화가 지하수 함양에 미치는 영향의 정도에 대한 전 지구적 전망에는 상당한 불확실성이 존재한다.

지하수 보충에 광범위한 영향을 미치는 기후변화의 한 요인은 강수량의 증가이다. 위생시설이 불충분한 지역에서는 폭우가 발생하면 배설물 미생물 병원체와 화학물질이 얇은 토양층을 통과해 지하수면으로 유입될 수 있다.

기후변화에도 탄력적인 물 공급을 위해서는 세계의 많은 지역에서 지하수를 강, 호수 및 저수지와 함께 연계 운영하여야 할 것이다

더욱이, 전 세계적인 해수면 상승은 해안대수층에 해수 침투를 유발하고 있다. 그러나 해수 침투에 대한 해수면 상승의 영향은 대체로 지하수 개발의 영향에 비해 크지 않다. 기후변화가 지하수에 미치는 가장 큰 영향은 증발산량의 증가로 인한 관개용수 수요의 변화일 것이다.

기후변화에도 탄력적인 물 공급을 위해서는 세계의 많은 지역에서 지하수를 강, 호수 및 저수지와 함께 연계 운영하여야 할 것이다. 기후변화 적응을 위하여 계절적 또는 일시적인 잉여 용수를 저장할 수 있고 광범위하게 분포된 대수층 시스템의 저장능력을 활용할 수 있다. 또한 지하수 기반 기후변화 적응 방법에서는 지상 댐과 같은 전통적인 기반시설보다 증발 손실이 훨씬 적다.

지속가능한 에너지원인 지열 에너지의 개발은 이산화탄소 배출량을 줄이는 데 중요한 역할을 한다. 또한 심층 대수층은 대기 중의 이산화탄소 축적을 억제하기 위한 탄소 포집 및 격리를 위해 활용될 수 있다.

지역별 관점

사하라 이남 아프리카 지역

아프리카는 막대한 지하수 자원을 보유하고 있다. 개발이 가능한 지하수 저장량을 정확히 추산하기는 어렵지만, 그 양은 연간 갱신 담수 자원의 100배 이상이 될 것으로 추정된다. 지하수 개발은 사하라 사막 이남의 아프리카 전역에서 주민의 생존과 경제발전을 촉진하기 위해 급속히 증가하고 있는 물 수요를 충족시킬 수 있는 큰 가능성을 지니고 있다. 사하라 사막 이남 아프리카에서 거주하는 약 4억 명의 사람들은 여전히 기본적인 물 서비스조차 받지 못하고 있다.

서부 및 중앙 아프리카에 있는 국가 대부분은 지하수 부존량이 많지는 않지만 연간 강수량이 많아 주기적으로 함양된다. 반대로, 동부 및 남부 아프리카의 많은 국가에서는 매우 낮은 함양 수준에도 불구하고 상당히 많은 지하수가 부존되어 있다. 이러한 지하수 부존량은 현재의 지하수 개발이 지역 지하수 시스템에 영향을 미치기 전에 상당한 완충 역할을 한다. 하지만, 현재의 지하수 개발방식은 궁극적으로 미래 세대를 희생시킬 것이다.

사하라 사막 이남의 아프리카 전체 경작지의 3%만이 관개용수를 활용하고 있으며, 그중 5%의 경작지에서만 지하수가 이용된다. 지하수 개발은 관개 면적을 증가시켜 농업 수확량과 작물 다양성을 증가시킴으로써 경제 성장의 촉매 역할을 할 수 있다. 사하라 사막 이남 아프리카의 지하수 개발 부재의 주요 원인은 지하수 부존량의 부족이 아닌 관련 기반시설, 기관, 숙련된 전문인력 및 수자원 관련 지식 등에 대한 투자 부족으로 인한 결과이다.

유럽 및 북미 지역

유럽과 북미 지역 간과 지역 내에서의 지하수 자원의 특성과 가용성은 다양하며, 이는 지질학 및 수문학적 차이에서 기인한다. 전체 물 이용량에서 지하수가 차지하는 비율 또한 국가에 따라 크게 변한다.

유럽의 많은 국가에서 지하수는 주로 식수에 사용되며, 따라서 잠재적으로 건강에 위협이 될 수 있기 때문에 수질 관리는 매우 중요하다. 유럽연합 국가에서 가장 보편적으로 수질을 화학적으로 저하시키는 오염물질은 질산염과 살충제이다. 농업 활동에 따른 오염물질이 대부분이지만, 광산에서 나온 산업 화학물질 또한 여러 유역에서 지하수의 화학적 오염을 유발한다. 신규 오염물질에 관한 더 많은 정보가 필요하다.

특정 국가 내 다양한 용수 사용자 간의 협력 필요성 외에도, 많은 지하수 자원의 범국가적 분포와 그에 따른 관할권에 관한 협력 필요성에 대한 인식이 증가하고 있다.

지하수 모니터링 및 전문 지식은 일반적으로 전문 기관들이 보유하는 반면, 물 정책 제도의 실행에는 기관들 간의 협력이 필요하다. 실제로 지하수와 지표수에 가해지는 많은 압력과 동인은 동일하다. 지하수와 지표수의 일관성을 이루고자 많은 통합 정책 개발과 노력은 계속되고 있다.

라틴 아메리카 및 카리브해 지역

강수량이 매우 적은 아랍 지역의 지하수 자원은 대부분 재생이 불가하기 때문에 지하수는 한정되어 있는 자원이라는 사실에 기반하여 관리해야 한다

라틴 아메리카와 카리브해 지역에서는 지표수가 상대적으로 풍부하여 물 사용량의 30% 미만이 지하수로 공급된다. 지하수 의존도가 더 높은 국가에서는 지하수 개발량의 약 절반이 관개 용수로 사용되고 나머지 3분의 1은 가정 용수, 그 외는 산업 용수로 사용된다.

이 지역 전체에 걸쳐 지하수 보호 및 모니터링 시스템에 문제가 있어, 지하수의 남용 및/또는 오염이 발생할 여지를 주게 된다. 이는 궁극적으로 지하수를 식수로 사용하는 취약계층의 지하수 접근성과 지하수의 지속가능성에 큰 위협이 된다.

라틴 아메리카에서 지하수가 항상 주요 수원은 아니지만, 여전히 라틴 아메리카 대부분 도시의 물 공급 시스템에서 중요한 역할을 한다. 또한 산업 부문에서 사용되는 물의 50%를 차지한다.
지표수가 상대적으로 부족한 카리브 제도 지역에서는 물 이용량의 약 50%가 지하수로 공급된다.

지역 생태계, 사회 개발, 경제 활동을 위한 대수층의 중요성은 미래에도 나날이 더욱 증대될 것이기 때문에 라틴 아메리카 지역은 국내외적으로 의사결정, 모니터링 및 지하수 관리체제를 조화시키는 방향으로 정치적 과정을 진전시켜야 한다.

아시아·태평양 지역

아시아·태평양 지역은 세계에서 가장 많은 양의 지하수를 개발하는 지역이며, 전 세계에서 가장 많은 지하수를 개발하는 10개국 중 7개국(방글라데시, 중국, 인도, 인도네시아, 이란, 파키스탄, 터키)이 이 지역에 포함되어 있다. 이들 7개 국가가 전 세계 지하수 개발량의 약 60%를 사용하고 있다.

지하수 사용의 사회경제적 이익은 농업 부문에 특히 중요하다. 산업 및 지방 자치 단체도 중요한 사용자이다. 지하수는 대부분의 지역에서 풍부하지만 중앙아시아, 중국, 남아시아 및 몇몇 동남아시아 도시 지역에서는 지하수 고갈로 지속가능성에 대한 우려가 제기되고 있다.

인위적인 그리고 지질 기원의 과정으로 인한 지하수 오염 또한 우려 사항이다. 기후변화 영향으로 인한 강수량의 변동성은 지하수 자원에 악영향을 끼치는데, 특히 반건조지역, 건조지역 그리고 군소도서개발국(small island developing states)에서 더욱 그러하다.

지하수 문제를 해결하기 위한 관리 관행, 제도적·법적 장치와 규제가 존재하지만, 지역의 많은 국가에서 제한 없이 지하수에 접근할 수 있기 때문에 지하수 거버넌스는 어려움을 겪고 있다. 일반 시민들의 지원과 더불어 공적 집행 능력을 갖추고 있는 발전된 형태의 지하수 거버넌스가 절대적으로 필요하다.

아랍 지역

아랍 지역은 전 세계에서 물 부족이 가장 극심한 지역 중 하나이며, 지하수는 22개 아랍 국가 중 최소 11개 국가에서 제일 중요한 수원이다. 많은 아랍 지역, 특히 인구밀도가 높고 농업 중심적인 지역에서 지하수를 과도하게 이용함에 따라 지하수위는 점차 낮아지고 있다. 특히 상수도에 접근 불가한 취약 집단에게 지하수는 주요 수자원이기 때문에 더 큰 우려를 낳는다. 지속가능하지 않은 농업, 산업 활동, 그리고 도시화는 지하수 수질에 상당한 영향을 미친다.

강수량이 매우 적은 아랍 지역의 지하수 자원은 대부분 재생이 불가하기 때문에 지하수는 한정되어 있는 자원이라는 사실에 기반하여 관리해야 한다. 그러나, 새로운 기술의 개발에도 불구하고 지하수 사용을 모니터링하는 것은 여전히 어렵다. 지하수 관리는 이러한 이유로 매우 복잡해지며, 특히 국경지역의 지하수 관리에는 더욱 많은 어려움이 존재한다. 불행하게도 아랍 지역의 국가 간 지하수 협력 사례는 극소수에 불과하다.

기후변화로부터 아랍 지역의 물 안보를 위한 지하수 보호는 정책 및 법률 시행, 혁신적인 관리 방식 및 기술 적용, 인식 증진을 위한 예산 확보, 강화된 지역 간 협력을 통한 개선된 거버넌스가 필요하다.

공적 자금을 통해 수집된 지하수 데이터는 자유롭게 접근 가능해야 한다

지식 기반 구축 및 개선

여섯 번째 지속가능개발목표 관련 유엔의 중간보고서(UN Summary Progress Update for Sustainable Development Goal No. 6)에서는 지하수 관련 데이터와 모니터링 이니셔티브의 부재 문제를 제기하며 지하수 모니터링이 '간과된 영역'임을 강조하고 있다.

대수층의 거동과 상태를 파악하고 과잉 개발, 함양량 감소(기후변화 영향 포함) 및 오염과 같은 부정적인 변화를 인지하기 위해 지하수의 수량과 수질은 시간에 따라 모니터링되어야 한다. 지하수 함양량은 일반적으로 직접 측정하기는 어려우며, 추정을 통해 산정된다. 사람과 환경에 서비스를 제공하는 취약한 대수층일수록 더욱 빈번하게 모니터링되어야 한다.

수문지질학에 대한 과학적 지식, 이용 가능한 방법 및 도구는 대부분의 지하수 관리 문제를 해결하기에 충분하다. 문제는 특정 지역 지하수의 평가 및 시나리오 분석을 위한 신뢰할만한 데이터 부족에 있다. 모든 대수층과 그 경계 조건은 고유하기 때문에 지하수의 지식 기반 정책과 자원 관리를 위해서는 현장 중심으로 지하수 자원을 평가하는 것이 중요하다.

지하수 모니터링은 상대적으로 많은 비용이 소요되지만, 초기 단계에서 문제를 인식하며 이후 발생할 비용을 절감하고 더 큰 사태를 방지할 수 있으므로 현명한 투자로 볼 수 있다. 지역 주민의 현장 지식은 전통적인 방식의 모니터링 프로그램을 향상시킬 뿐 아니라 수리지질학적 특성과 지하수 시스템의 평가에도 활용할 수 있다. 원격 감지 기술은 지하수 자원의 추정과 모니터링 기술을 개선하기 위해 과학계에서도 사용되어 왔다.

저소득 국가에서는 데이터와 정보의 공유가 부족한 경우가 많다. 공적 자금을 통해 수집된 지하수 데이터는 자유롭게 접근 가능해야 한다. 민간 기업은 지하수의 평가 및 관리체계를 개선할 수 있는 관련 데이터 및 정보를 공개해야 한다. 예를 들어, 석유 및 가스 탐사 중에 수집한 지구 물리학 및 시추공 관련 데이터는 대수층의 범위와 매개변수에 대한 지식을 향상시킬 수 있다.

많은 중저소득 국가에서 지하수가 전체 수자원 중 가장 큰 부분을 차지함에도 불구하고, 수문지질학적 능력은 결핍되어 있다. 이러한 결핍은 기술 및 제도적 역량 모두에 해당된다.

정책 및 계획수립

지하수 관련 정책을 수립할 때 흔히 개발 후 활용 방법에 중점을 둔다. 이것은 건전한 대수층 관리와는 거리가 먼 방식이다. 대수층 관리를 위해서는 토지 이용, 지하수의 보충, 보호 및 관련 조치의 이행 등에 주의를 기울여야 한다.

여러 지하수 관리 도구를 효율적으로 사용하기 위해서는 먼저 도구들의 사용 및 집행에 대한 권한을 부여하는 법적·제도적 체계 확립이 선행되어야 한다

모든 국가의 '지하수 관리 비전'에는 지하수의 지역 이용자부터 기술자, 과학자, 정책 결정자, 투자자에 이르기까지 다양한 주체의 의견이 반영하여야 하며, 수자원에 대한 국가 차원의 비전과 그 방향과 일치하여야 한다. 지하수 정책은 법적 지위와 지하수 소유권의 성격(공공 또는 민간 부문)뿐만 아니라 물 이용자, 연관된 지표수의 특성, 대수층 함양 지역의 토지 이용과 같은 여러 요인에 따라 달라져야 한다. 또한 지하수 정책은 지하수 자원과 대수층 시스템에 대한 통합된 의사결정을 제공하고 사회경제적 발전, 양성평등 및 빈곤 완화, 식량 및 에너지, 생태계, 기후변화, 인류의 건강과 같은 물 부문을 넘어선 사회의 다른 부문과 영역까지도 연결되어야 한다.

정책, 전략 및 계획은 지역 주민의 우선순위와 수요에 따라 지역적 맥락에 맞게 수립되어야 하며, 명확한 과학적 증거에 기반을 두어야 한다. 정책은 중앙행정기관, 지방자치단체 및 이해당사자 간 공동협력을 통해 수립될 수 있으며, 과정과 결과에 대해 주인의식을 함양할 수 있도록 대화와 포괄적인 기술지원(예: 참여 매핑)에 기반하여야 한다. 이러한 과정은 모니터링 가능한 요소와 더불어 시기별 이행계획, 평가 가능한 결과 및 영향을 포함한 공식 문서를 생산한다.

지하수 관리

지하수 관리는 지하수 개발 및 수질을 관리하고 지하수 개발이 생태계, 지표수, 지반 침하 등에 초래하는 영향에 대응하는 것을 목표로 한다. 지하수 관리의 가장 중요한 요소 중 하나는 대수층에서 개발 지점과 개발량을 제어하는 것이다.

여러 지하수 관리 도구를 효율적으로 사용하기 위해서는 먼저 도구들의 사용 및 집행에 대한 권한을 부여하는 법적·제도적 체계 확립이 선행되어야 한다. 그러나 지하수 관리가 모두 정부 주도로 이루어지는 것은 아니다. 지역공동체 및/또는 지하수 이용자들 또한 독립적으로 우물터를 관리하고 지하수를 개발할 수 있다.

지하수 수질 관리에 대하여 가장 지속가능하고 비용 효율적인 접근 방식은 지하수를 적절히 보호하여 오염을 방지하는 것이다. 이는 취약성 맵핑, 지하수 보호 구역 설정, 토지 이용계획 수립을 통해 달성될 수 있다.

우리는 지표수 및 지하수 자원의 연계 관리와 자연기반해법의 잠재력에 주목할 필요가 있다. 환경, 토지 이용, 지하 공간 및 자원 관리는 모두 통합적인 관리를 위한 중요한 요소이다.

'대수층 인공 함양(Managed Aquifer Recharge, MAR)'은 저수용 댐을 보완하고, 증발량 및 환경 영향을 최소화하며, 비용 효율적인 대안을 제공하는 통합적 접근 방식이다. 또한 대수층 인공 함양은 집수되지 않은 도시 빗물과 재활용된 물을 저류하여, 필요할 때 생산적으로 사용할 수 있도록 한다. 유역 규모의 대수층 인공 함양은 환경 용수의 흐름과 가용성을 유지하는 데 사용될 수 있으며, 강수가 하천에 도달하는 시간을 지연하는 역할을 한다. 대수층 인공 함양 기술의 적용은 지난 60년 동안 10배가량 증가했지만, 앞으로도 연간 10 ㎦에서 연간 약 100 ㎦까지 추가적으로 확장될 수도 있는 큰 잠재성을 가지고 있다.

범국가적 대수층

대수층에는 국경선을 설정할 수 있지만, 지하수는 그에 구애받지 않고 흐른다. 이러한 지하수가 부존하는 대수층을 범국가적 대수층이라고 일컫는다. 한 국가의 과도한 지하수 개발 또는 오염은 국경 건너편 국가의 지하수에 중대한 영향을 미칠 수 있다.

다수의 공유하천유역 개발 협정에서 다뤄지는 범국가적 대수층의 비중이 증대하고 있다

범국가적 대수층을 관리하는 데 있어서, 관련 기관의 의지 결여와 자료 수집을 위한 자원 부족으로 어려움을 겪는 경우가 많은데, 특히 지역 단위에서 더욱 그러하다. 인접 국가 간 협력의 첫 번째 단계는 데이터의 조정, 조화 및 공유이다. 이러한 조치는 대수층의 신뢰 가능한 개념 모델에 대해서 합의를 이루는 데 필수적이며, 관리 계획을 수립할 때 필요한 전제 조건이다. 범국가적 협력에 있어서 성별을 고려하면 사회적으로 더욱 평등한 지하수 관리 체제를 수립할 수 있다.

국제수법은 처음에는 지표수를 위해 만들어졌지만, 다수의 공유하천유역 개발 협정에서 다뤄지는 범국가적 대수층의 비중이 증대하고 있다. 이는 범국가적 대수층의 중요성에 대한 인식이 나날이 높아지고 있음을 보여준다.

범국가적 대수층에 관련된 기술적인 프로젝트 프레임워크 안에서의 과학 협력 이니셔티브는 전 세계적으로 존재한다. 이니셔티브는 다양한 범위를 포괄하며, 그중 일부는 특정 문제의 관리를, 다른 일부는 공동의 과학적 평가를 목표로 한다. 이러한 경우, 특히 국가 간의 역량, 지식 및 정보 면에서 동등하지 않거나 신뢰가 부족할 때, 지역 단체, 국제기구 및 공여자의 역할은 대단히 중요하다.

자금 조달

흔히 자본 비용이 공공 부문에서 조달되는 지표수 개발과는 달리 지하수 개발 기반시설은 일반적으로 산업, 가정, 농부 또는 지역 사회와 같은 최종 사용자가 자금을 조달한다. 사용자들은 직접적이고 분산된 방식으로 지하수 자원에 접근한다. 최종 사용자는 일반적으로 지하수를 이용하기 위해 우물을 파는데 필요한 초기 비용과 지하수를 퍼 올리기 위한 변동 비용이 포함된 개인 자본을 투자한다. 일부 국가에서는 취수 수수료 또는 지하수 요금이 있기도 하지만, 이러한 수수료 및 요금이 현실화되어 있는 경우는 거의 없다.

정부는 지역별 상황이 고려된 지하수 자원의 지속가능성의 촉진을 위한 정부의 잠재적 역할을 평가하고, 그 역할을 수용해야 하며, 맞춤형 이니셔티브를 통해 제한된 예산을 보다 효율적으로 사용해야 한다. 중앙정부는 최소한 수질과 수량, 운영 및 유지관리 비용을 포함한 지하수 모니터링에 예산을 지원하여야 하며, 초기 탐사 및 관리 이니셔티브에 대한 자금 지원을 통해 민간 투자를 유발해야 한다.

다른 분야의 프로젝트 및 이니셔티브의 일환으로 지속가능한 지하수 개발 및 관리를 더 효율적으로 통합할 수 있는 방법도 있다. 예를 들어, 수자원의 계절적 변동에 대한 물 공급의 안전성과 유연성 확보 목적으로 지하수 저장 및 개발은 도시 물 공급 시스템의 일부로 포함될 수 있다. 이러한 관점에서 공적개발원조, 상하수도 요금, 그리고 심지어는 민관합작투자사업의 자금을 지하수 분야에 활용할 수 있다. 농업 등 다른 부문의 수수료와 세금도 지하수 관련 이니셔티브에 자금을 지원하고 잠재적인 부정적 외부 효과를 줄이는 데 도움이 될 수 있다.

많은 국가에서는 다른 부문에 대한 정부의 재정 지원이 지하수 자원의 고갈 또는 오염을 촉진시킨다. 예를 들어, 전기 보조금은 지하수의 과도한 개발을 유발할 수 있고, 농업 보조금은 물 수요가 많은 농작물 생산을 장려하는 잘못된 유인 요소가 될 수 있다. 이렇듯 유해한 보조금 제도를 개정하고 지하수 정책과 일관성을 맞추는 것은 물 관련 자금 운영 부문에 있어서 의제가 되어야 한다.

앞으로 가야 할 길

국가들이 지하수 거버넌스를 위해서 합당하고 효과적인 프레임워크를 개발하는 데 전념하는 것이 필수적이다

유엔 총회와 인권이사회는 안전하고 깨끗한 식수와 위생시설에 대한 공평한 접근이 고유한 인권의 한 부분이라고 인식하고 있다. 지하수는 특히 물 공급 및 위생의 필수 구성 요소이기 때문에, 유엔 회원국들은 지하수 보호와 대수층 함양을 위한 행동 계획이나 전략을 통해 안전한 식수와 위생 문제에 대한 인간의 기본 권리를 충족시킬 수 있을 것으로 기대된다.

국가들이 지하수 거버넌스를 위해서 합당하고 효과적인 프레임워크를 개발하는 데 전념하는 것이 필수적이다. 이를 위해서 정부는 관련 전문 지식, 제도적 역량, 법과 규정 및 집행, 정책과 계획, 이해 당사자의 참여, 적정 수준의 자금 조달이 포함된 원활히 작동되는 거버넌스 체계를 수립하고 지속하는 데 앞장서서 책임을 다해야 한다. 지하수 관리 관련 국가의 정책과 계획이 온전히 이행되도록 하는 것도 국가의 책무이다. 정부가 지하수의 공유재 및 공공재 측면을 고려하여 자원 관리인으로서 역할을 수행하고, 지하수에 대한 접근성과 지하수 자원의 혜택을 공평하게 분배하며, 미래 세대를 위해 자원의 지속가능성을 보장하는 것은 필수적이다.

맺음

지구는 엄청난 양의 담수를 지하수로 보유하고 있다. 지표수 자원이 부족한 가운데 물의 수요가 증가하고 있는 세계에서, 수천 년 동안 인간 사회가 번영할 수 있게 한 자원인 지하수의 진정한 가치를 모든 사람이 점차 재평가하고 있다.

그러나 전반적으로 풍부한 자원임에도 불구하고, 지하수는 여전히 고갈과 오염에 취약하여 지하수 자원과 그 가용성에 치명적인 영향이 미칠 수 있다. 지하수의 잠재력을 최대한 활용하기 위해 지하수를 지속가능하게 관리하고 사용하려는 강력하고 일치된 노력이 필요하다. 그리고 이 모든 것은 보이지 않는 것을 보이게 하는 것에서부터 시작한다.

WWAP 제작 | Richard Connor and Michela Miletto
이 출판물은 UN-Water를 대표하여 WWAP가 제작함
표지 일러스트 Davide Bonazzi
번역 UNESCO i-WSSM
디자인 UNESCO WWAP 및 도서출판 피어나

© UNESCO and i-WSSM, 2022

원제목: Executive Summary of the United Nations World Water Development Report 2022 - Groundwater: Making the invisible visible

전체 보고서인 *United Nations World Water Assessment Development Report 2022 - Groundwater: Making the invisible visible*은 https://en.unesco.org/themes/water-security/wwap/wwdr에서 찾아보실 수 있습니다.

이 출판물 전반에 걸쳐 사용된 명칭과 자료에 대한 언급은 국가, 영토, 도시, 지역 또는 그 당국의 법적 지위나 국경의 경계에 관하여 유네스코가 어떠한 의견을 표현한 것이 아님을 밝힙니다. 이 출판물에 표현된 생각과 의견은 저자들의 것입니다. 따라서 유네스코의 입장과 다를 수 있으며, 유네스코에는 이에 대한 책임이 없습니다.

저작권 및 상업적 권리에 대한 자세한 내용은 https://en.unesco.org/wwap에서 제공하는 보고서를 참조하시기 바랍니다.

UNESCO World Water Assessment Programme
Programme Office for Global Water Assessment
Division of Water Sciences, UNESCO
06134 Colombella, Perugia, Italy
Email: wwap@unesco.org
https://en.unesco.org/wwap

unesco
World Water Assessment Programme

이 출판물은 이탈리아 정부와 움브리아 지방의 후원으로 출판되었습니다.

Regione Umbria

i-WSSM
International Centre for Water Security and Sustainable Management under the auspices of UNESCO

이 출판물의 한국어 번역은 유네스코 물 안보 국제연구교육센터(UNESCO i-WSSM)의 소중한 지원으로 제공되었습니다.

SC-2022/WS/3