

《總設》

# 기후변화와 국내 지하수자원의 지속가능성 - 다음 10년을 위해서

우 남 철\*

연세대학교 지구시스템학과

## Climate Change and Groundwater Sustainability in Korea for Next Decade

Nam C. Woo\*

Dept. Earth System Sciences, Yonsei University

### ABSTRACT

Global climate changes affect the local hydrologic cycle, and subsequently, require changes in water resource management strategies of Korea. Variations in precipitation and urbanization have adverse effects on the reasonable and efficient utilization of groundwater resources. Groundwater management strategies of Korea have been implemented based on the evaluation of "sustainable yield", which is calculated from the amount of annual recharge. However, this sustainable yield has no consideration of natural discharge and dynamic equilibrium of the groundwater system. Therefore, for the effective groundwater management strategies of the following decades, we need representative and reliable observations, and have to develop methods for the systematic analysis and interpretations of the data to draw valid information in linkage of natural and societal environmental changes.

**Key words :** Climate change, Groundwater, Sustainability, Natural discharge, Dynamic equilibrium

### 1. 기후변화와 수문현상

날로 심각해지는 전 지구적 기후변화 현상은, 지구의 생태환경에 다양한 영향을 미치고 있으며, 특히 지구 전체를 통한 기후대의 변화는 지역적 물순환 체계의 변동과 함께 생존에 필수적인 물, 수자원의 이용과 관리 측면에서 중요한 변화를 초래하고 있다. 특히 이러한 기후변화는 한반도에서 상대적으로 빠르게 나타나고 있으며, 그로 인한 영향 역시 점차 증가하고 있다(Kim, 2011).

IPCC 4차 평가보고서가 제시한 절차에 따른 한반도 기후변화의 영향과 취약성을 평가한 결과, 1931~1960년보다 1961~1990년의 연평균 기온이 0.4°C 증가하였으며, 연평균 강수량 역시 장기적으로 증가하는 추세에 있다. 특히, 기후변화로 인한 물순환 과정의 변화는 여름철 강수량과 강우강도의 두드러진 증가와 겨울철 기온의 증가 등을 초래하고 있다(Lee and Kwon, 2004). 1904~2000년까지 국내 기온 관측자료를 분석한 결과 평균기온이

1.5°C 상승하여 전지구적인 온난화 추세를 앞지르고 있으며, 이는 자연적인 지구온난화와 더불어 우리나라의 도시화가 기온 상승에 약 20~30% 기여함으로 보고되었다(Kwon, 2005).

자연적인 요인 외에, 산업화와 개발에 따른 도시지역의 증가는 지표면을 통한 지표유출량의 증가와 함께, 강수의 침투를 방해하여 궁극적으로는 지하수 함양을 감소시키는 역할을 하게 된다. 따라서 강우강도의 증가와 여름철 강우량의 증가, 도시화에 따른 지표면의 침투력 저하 등은 복합적으로 작용하여 홍수로 인한 피해와 더불어 체계적인 지표수자원의 관리를 어렵게 할 뿐 아니라, 지하수 함양량의 감소를 초래하고 이는 결국 기저유출량의 감소에 따른 지표수자원의 감소로 이어지게 된다. 이러한 일련의 변화들은 자연적인 요인 뿐 아니라, 인위적인 요인과 연관되어 나타나게 되며, 그 결과는 영향을 받는 요소에 따라서 홍수와 지표유출의 변화처럼 단기적으로 나타나기도 하지만, 지하수의 변화와 같이 그 흐름속도가 느리고 지

\*Corresponding author : ncwoo@yonsei.ac.kr

원고접수일 : 2012. 2. 8 심사일 : 2013. 2. 19 게재승인일 : 2013. 2. 20  
질의 및 토의 : 2013. 4. 30 까지

속적인 요소의 경우에는 장기적으로 발생하게 된다.

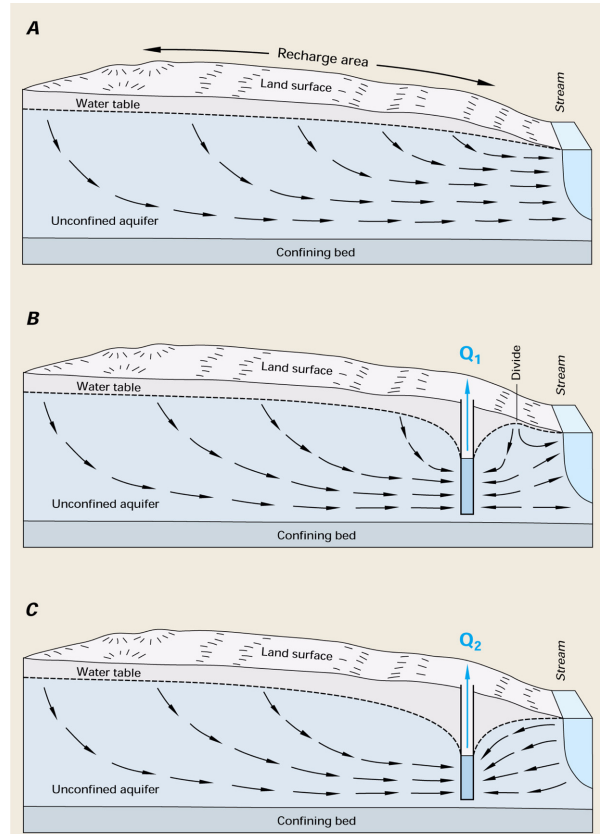
## 2. 지하수자원의 지속가능성(sustainability)

“지속가능한 개발(sustainable development)”이라는 용어는 “미래 세대의 수요에 영향을 주지 않는 현재 시점의 개발”로 정의되며(WCED, 1987), 이를 수자원에 적용시키는 경우에는 생태적, 환경적, 수문학적 건전성을 만족시켜야 한다는 전제가 포함된다(ASM, 1998). 결과적으로 수자원의 지속가능성이란 사회적, 생태학적 및 환경적 측면의 지속가능성과 직접적인 연계를 가지게 된다(Alley and Leake, 2004).

이러한 지속가능성에 대한 개념이 도입되기 전에, 지하수 분야에서는 이와 유사한 관점에서 “안전산출량(safe yield)”이라는 개념을 사용하여 왔다(Lee, 1915; Meinzer, 1923; Conkling, 1946; Todd, 1959). 이 개념은 “연평균 지하수 함양량과 개발에 의한 취수량 간에 평형을 이룬 값(the attainment and maintenance of a long-term balance between the amount of groundwater withdrawn annually and the annual amount of recharge)”으로 정의되어 왔으며, 국내에서는 이 개념을 그대로 “지하수 개발가능량”으로 사용하여 왔다(『지하수 개발가능량은 지하수의 함양과 유출이 평형을 이루는 상태에서 지속적으로 개발·이용 가능한 지하수 함양량을 의미』 MLTM, 2012).

그러나 이 개념에서는 지하수계에서 자연적으로 발생하는 자연배수(natural discharge)와 지하수계의 동력학적 평형(dynamic equilibrium) 특성을 고려하지 않고 있다. 지하수는 정체되어 있어 포장된(contained) 수자원이 아니라, 비록 그 이동의 속도는 대단히 느리지만, 끊임없이 유동하고 있는 수자원이다. 나아가 이러한 유동성이 동력학적 평형을 이루어가는 근본적인 힘이다. 예를 들면, Fig. 1 (Winter et al., 1998)에서 보이듯이, 인위적인 취수가 없는 자연 상태로 지하수가 주변의 하천이나 호수 등과 균형을 이루고 있는 상태에서(Fig. 1A), 매년 함양량만큼 지하수를 취수한다면, 자연배수량은 감소하게 될 것이고, 지하수 기저유출량이 감소하게 되어, 궁극적으로 하천이나 샘의 유출량도 감소하게 될 것이다(Fig. 1B).

또한 이러한 상황이 오랜 기간 지속된다면, 지하수계는 새로운 평형상태(a new balance)로 변화하게 된다. 이 새로운 평형상태에서는 초기의 지하수위보다 낮은 수위를 보이며, 하천으로 배출되는 지하수 기저유출량 역시 감소된 상태이다. 오히려 하천이나 지표수원 근처에서 지속적



**Fig. 1.** A schematic hydrologic setting with groundwater discharge to a stream under natural conditions (A), placement of a well pumping at a rate ( $Q_1$ ) near the stream (B), and induced recharge of groundwater from the stream because of continuous exploitation. (adapted from Winter et al., 1998).

으로 지하수를 개발하게 되면, Fig. 1C에서 보이듯이 하천수가 지하수로 유입되는 경우가 발생할 수 있다. 지하수 관점에서는 하천수의 유입부분이 “유도 함양(induced recharge)”으로 지하 저수량의 증가로 볼 수도 있으나, 대부분의 경우 지표수의 수질이 지하수질보다 악화되어 있으므로, 오염된 지표수의 지하수 유입은 청정 지하수질을 오염시키는 원인이 될 수도 있다. 따라서 오염된 하천이나 지표수원 근처에서 지하수를 청정수원으로 개발하는 경우에는 지표수의 지하수 유입 범위와 정도, 시간적·공간적 변화 등에 대한 명확한 이해가 선행되어야 한다.

Thomas(1951), Todd(1959) 등은 지하수계에서의 평형이란 끊임없이 일어나고 있는 현상이므로, 안전산출량이라는 용어를 폐기해야 한다고 주장한 바 있다. 나아가 Bredehoeft et al.(1982, 1997, 2002)은 지하수의 지속가능한 개발량(sustainable groundwater development)은 함양량이 아니라, 자연적으로 배수되는 지하수의 포획량으

로 평가되어야 한다고 주장하였다. 그러나 지하수의 지속가능성에 대해서는 아직도 지하수 이용자와 심지어는 전문가들 사이에서도 많은 혼동과 논란이 지속되고 있으며, 그 중요한 원인으로는 (1) 지하수자원의 지속가능성이란 용어가 물리적으로 정의된 용어가 아니며, 따라서 정량화하기가 곤란하다는 문제, (2) 지속가능성을 현장에 적용하기 위한 기초적인 근거 마련, (3) 지하수계와 지하수자원이 지속가능하다는 가정의 오류, (4) 유역 단위의 지속가능한 산출량(sustainable yield)과 양수시설 단위의 적정산출량(optimal yield)에 대한 혼동 등이 제시된 바 있다(Kalf and Woolley, 2005).

지하수의 지속가능한 개발과 관련하여 현장 기술자와 지하수 정책수립자 등이 가지고 있는 오해를 과학적으로 풀어놓은 논문들로 Wood(2001), Alley and Leake (2004), Devlin and Sophocleous(2005), Zhou(2009) 등을 들 수 있다. Wood(2001)는 지난 1세기동안 수자원 관리분야에서 지하수의 안전 산출량(safe yield)과 지속가능 개발량(sustainable yield)을 혼동하며 사용하여 왔다고 지적하였다. 나아가 지속가능성이란 단순히 수자원에만 국한되는 내용이 아니고 수자원을 이용하는 당시의 사회적, 경제적 환경과도 직접적인 연관이 있으므로, 과학적 문제(science)라기보다는 오히려 관리적 이슈(management)라고 주장하였으며, Alley and Leake(2004) 역시 수자원의 지속가능성은 순수한 과학적 문제라기보다는 과학적 분석을 요구하는 개념적 문제라고 제시하였다. 이에 더하여, Datta(2005)는 지하수자원에 대한 수요와 가용량 사이의 불균형, 수질과 수량 측면의 접근성과 개발가능성 등은 지하수의 효율적 관리에 다양한 윤리적인 문제들이 발생할 수 있다고 지적한 바 있다.

### 3. 국내 지하수자원의 지속가능성 확보를 위한 전제

전 세계적인 기후변화가 우리에게도 피부로 느낄 수 있을 정도로 전에 없던 폭설과 폭우, 극한의 추위와 더위 등 극명한 기후패턴의 변화를 보이고 있다. 이와 함께, 이러한 변화로부터 파생되는 수자원의 양적, 질적 변동은 국내 수자원의 적절하고 효율적인 관리에 많은 어려움을 초래하고 있다.

특히 지하수자원의 경우, 그 흐름의 특성 상, 지표에서의 급격한 반응도 지하수환경으로 유입되면서 그 변화의 속도가 늦어지게 되어, 지표 기후변화의 영향을 쉽게 인식할 수 없게 된다. 그러나 일단 지표의 변화에 따른 변

동이 지하수환경에서 관측되기 시작한다면, 그 영향은 지표에서의 시간적·공간적 변동성 보다는 훨씬 장기적으로 광범위하게 나타날 것이다. 따라서 미래 기후변화에 대비하여 수자원의 효율적 관리를 위해서는 지표수자원의 궁극적인 수원(source)인 지하수의 변동과 영향에 대한 지속적이며 체계적인 관측과 분석을 통한 관리대책이 필요하다. 국토해양부(MLTM, 2012)가 발간한 지하수관리 기본계획에도, 현재는 10년 빈도 가뭄시 강수량을 적용하여 지하수 함양량을 평가한 후, 이로부터 개발가능량을 산정하고 있으나, 향후에는 지표수와 지하수의 상호 작용, 사회·경제적, 법적, 생태학적 부분 등을 감안하여 지속가능한 산출량의 검토가 필요함을 제시하고 있다.

따라서 이러한 지속가능한 지하수자원의 평가를 위해서는, 지하수 흐름의 시간규모를 고려한 장기적 관측과 조사연구, 지하수의 공간적 분포와 대수층 특성의 차이를 고려한 체계적인 자료의 축적과 분석, 수자원의 이용과 개발을 기반으로 하는 사회·경제적인 요소들과 지하수와의 관계성 규명, 수문순환계에서 지하수의 생태적 기능에 대한 정량적 평가와 이해 등이 선결되어야 하는 과제이다. 한 예로, Glesson et al.(2010)은 지하수의 과잉개발로 인한 사회적, 환경적, 경제적 부작용을 방지하기 위해서는 50년 내지 100년 또는 그 이상의 시간규모에서 지속적으로 사용이 가능한 지하수의 양적, 질적 목표치를 설정하여 관리를 해야 한다고 제시하였다.

합리적이며 효율적인 정책은 신뢰할만한 정보에 근거하여야 하며, 그 정보는 대표성 있는 과학적 기초자료에서 도출된다. 따라서 기후변화에 대응하기 위한 적절한 지하수자원 관리정책의 기반은, 끊임없이 변화하고 움직이는 지하수에 대한 정확한 시공간적 기초자료의 수집과 분석이라고 할 수 있다. 지하수학(hydrogeology)의 한 분야로서 지하수의 흐름계를 모사하는 모델링(modelling)분야에서 유명한 격언이 있다. 『Garbage In, Garbage Out.』 신뢰할 수 있는, 그리고 대표성 있는 기초자료의 중요성은, 그러한 자료를 기반으로 도출되는 모든 정보와 그 정보에 근거하여 수립되는 모든 정책의 핵심임을 기억할 때, 아무리 강조해도 지나치지 않는다. UN World Water Assessment Programme의 코디네이터인 Olcay Ünver 조차도 “You cannot properly manage something that you don't know about.”이라는 표현을 통해 전 세계적으로 수자원의 효율적 관리에서 가장 큰 걸림돌이 수질과 수자원 이용량에 대한 신뢰할 만한 자료의 부족임을 지적하였다(Gilbert, 2012).

국내 지하수자원의 관측, 조사 및 활용 환경에 비추어

지하수의 정확한 기초자료의 필요성과 종합적 해석의 중요성에 관련된 몇 가지를 예로들면 다음과 같다. 국내 지하수자원 관련 자료와 정보에서는 지질적 특성에 의한 구분으로 층적 대수층과 암반 대수층을 사용하고 있는데, 이러한 구분은 지하수위나 수질 등을 과학적으로 분석하고 모델링을 통해 예측하는데 여러 가지 문제를 초래한다. 예를 들어, 암반 대수층과 층적 대수층을 어떻게 자유면 대수층과 피압 대수층으로 확정할 것인가? 퇴적층을 기본 모형으로 하는 대수층(aquifer)의 개념에서, 국내 대부분의 지역에서 나타나는 균열 암반 대수층(fractured aquifer)은 어떻게 해석하여야 하며, 이를 통한 지하수의 흐름과 수질의 시간적·공간적 변화는 어떻게 평가할 수 있는가? 또한 현재까지 관측된 지하수위의 변화 추세가 수위하강으로 나타나는 지역에서, 이러한 지하수위 하강이 주변 하천과 생태환경에 어떠한 영향을 미치고 있는지, 또 얼마나 오랜 기간 동안 현재와 같은 방식의 지하수자원의 이용과 개발이 지속적으로 가능한가? 더욱이 하천 인근 지역의 개발과 도로 및 지표면의 포장 등으로 지하수의 함양률을 갈수록 낮아지고 있는 형편이다. 그럼에도 불구하고 산업발전과 도시화는 끊임없이 지하수자원의 개발과 이용을 유도하고 있다. 지하수 배출지역인 하천변에서 지하수를 활용하는 경우 발생할 수 있는 하천수위 하강과 이로 인한 생태학적 변동과 영향이 예상된다. 그렇다면 이러한 영향을 어떻게 정량화 할 수 있는지, 그리고 그 영향의 어느 정도까지를 수용가능한 영향으로 설정해야 하는지 등에 대한 복합적인 조사와 연구가 필요하다.

양적으로는 풍부한 지표수자원을 보유하고 있음에도 불구하고 수질악화로 인해 추가적인 청정수자원의 확보가 필요한 시점이다. 시간이 갈수록 지하수자원의 중요성은 날로 높아져 가고 있음에도, 우리는 우리의 지하수자원에 대해서 얼마나 정확히 알고 있는지 되묻지 않을 수 없다. 지역적으로 기후변화에 따라 지하수위가 상승하는 지역도 있지만, 그 반대로 지하수위가 하강하는 지역도 있으며, 인위적 개발의 영향으로 수위의 하강이 더욱 가파르게 낮아지거나 대수층의 고갈이 염려되는 지역도 나타나고 있다. 따라서 독립된 수자원으로서의 지하수가 아니라, 수문순환을 통해서 지표생태계와 연계된, 하천과 해양 생태계와 연계된, 그리고 사회와 경제발전과 연계된 시스템의 한 부분으로 기능하고 있는 지하수계에 대한 과학적 관측·조사·평가가 필요하다.

지하수는 무한한 수자원이 아니다. 2012년부터 시작된 다음 10년의 지하수관리계획에서는 전 지구적 기후변화와 그에 따른 국지적 영향을 고려하여, 체계적이고 장기적 관

점에서 신뢰성과 대표성을 확보한 과학적 자료의 수집과 분석, 정보도출과 효율적 정책수립의 유기적 조합이 절실하다.

## 사 사

본 연구는 한국연구재단(National Research Foundation)의 기초과학지원 과제(2012-0002989)로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- Alley, W.M. and Leake, S., 2004, The Journey from Safe Yield to Sustainability, *Ground Water*, **42**(1), 12-16.
- ASTM, 1998, Sustainability criteria for water resource system. American Society of Civil Engineers Task Committee for Sustainability Criteria.
- Bredehoeft, J.D., 1997, Safe yield and the water budget myth, *Ground Water*, **35**(6), 929.
- Bredehoeft, J.D., 2002, The water budget myth revisited: Why hydrogeologists model. *Ground Water*, **40**(4), 340-345.
- Bredehoeft, J.D., Papadopoulos, S.S., and Cooper Jr., H.H. 1982, Groundwater: The water-budget myth, In: Geophysics Research Forum (ed.), *Scientific Basis of Water-Resource Management*, National Academy Press, Washington, D.C., 51-57.
- Conkling, H., 1946, Utilization of ground-water storage in stream system development, *Transactions, American Society of Civil Engineers*, **3**, 275-305.
- Datta, 2005, Groundwater ethics for its sustainability, *Current Science*, **89**(5), 812-817.
- Devlin, J.F. and Sophocleous, M., 2005, The persistence of the water budget myth and its relationship to sustainability, *Hydrogeology Journal*, **13**(4), 549-554.
- Gilbert, N. 2012, Water under pressure. *Nature*, vol.483, p.256-257.
- Glesson, T., VanderSteen, J., Sophocleous, M.A., Taniguchi, M., Alley, W.M., Allen, D.M., and Zhou, Y., 2010, Groundwater sustainability strategies, *Nature Geoscience*, **3**, 378-379.
- Kalf, F.R.P. and Woolley, D.R., 2005, Applicability and methodology of determining sustainable yield in groundwater system, *Hydrogeology Journal*, **13**, 295-312.
- Kim, M.K., 2011, Perspective of Climate Changes, In: *Korean Climate Change Assessment Report 2010*, National Institute of Environmental Research, NIER-2010-38-1213, 623 p.
- Kwon, W.T., 2005. Current Status and Perspectives of Climate Change Sciences, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sci-*

ences, **41**, 325-336.

Lee, C.H., 1915, The determination of safe yield of underground reservoir of the closed basin type, *Transactions, American Society of Civil Engineers*, **78**, 148-251.

Lee, S. and Kwon, W.T., 2004, A Variation of Summer Rainfall in Korea. *Journal of the Korean Geographical Society*, **39**(6), 819-832.

Meinzer, O.E., 1923, Outline of ground-water hydrology with definitions. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 494.

MLTM, 2012, Groundwater Management Plan (2012~2021). Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Seoul, Korea.

Thomas, H.E., 1951, The Conservation of Ground Water; a survey of the present ground-water situation in the United States, McGraw-Hill, New York, 358 p.

Todd, D.K., 1959, Ground Water Hydrology, John Wiley, New York, 336 p.

WCED, 1987, Our Common Future, The World Commission on Environment and Development, The United Nations, New York, 416 p.

Wood, W.W., 2001, Water Sustainability - Science or Management?, *Ground Water*, **30**(5), 641.

Winter, T., Harvey, J.W., Franke, O.L., and Alley, W.M., 1998, Ground water and Surface water : a single resource, *US Geological Survey circular* 1139, 79 p.

Zhou Y., 2009, A critical review of groundwater budget myth, safe yield and sustainability, *Journal of Hydrology*, **370**, 207-213.