

<Review>

지표피복 및 토지이용 변화에 따른 지하수 수위 변동 - 리뷰

정제나¹ · 고동찬² · 고경석² · 이정훈^{1,*}

¹이화여자대학교 과학교육과

²한국지질자원연구원

요 약

지하수는 수자원으로서의 가치가 높을 뿐만 아니라 특히 전세계에서 식수로써 활용되고 있다. 하지만 인구의 증가로 인해 지표 환경이 빠르게 변화하면서 물 수지의 변동은 피할 수 없는 문제로 다가왔다. 한국은 OECD 국가 중 자연지 손실이 가장 큰 국가이지만 국내에서는 상대적으로 토지 피복 및 이용을 포함한 지표 환경과 지하수의 관계에 관한 연구가 많지 않다. 따라서 본 논평에서는 지표변화가 지하수 수위에 어떤 영향을 주는 지에 관해 세 가지 경우로 나누어 논의하였다. 첫째, 토지 개발로 인해 지표면의 투수율이 낮아지면, 지역적 함양이 감소하고 이에 따라 부족한 지하수를 광역적 함양이 보충할 수 있다. 따라서 하천과는 반대로 지하수 수문곡선의 최대점은 낮아지고 지연시간은 증가한다. 둘째, 자연지가 농경지로 바뀌거나 개발을 위해 산림을 제거해 식생의 변화가 생기는 경우이다. 식물 개체수 변동에 의한 증발산량의 변화는 지표 유출량, 함양량 등의 변수가 되어 지하수 수위의 증감을 야기한다. 마지막으로 도시화로 인해 지표 아래에 도시 기반 시설이 생길 경우 인공적인 투수 환경이 만들어질 수 있다. 여기에서 발생한 누수는 대수층으로 유입되고 이는 수위 상승과 더불어 수질의 저하까지 이어질 수 있다. 이렇듯 불투수성 덮개의 증가, 산림/농업 지역 면적의 변화, 그리고 지표 아래에 생기는 도시 기반 시설들은 지하수 수위에 변동을 가져온다. 따라서 지하수의 보전을 위해서는 토지 개발 이전에 이러한 요소들을 사전에 파악하여 꾸준한 모니터링으로 대비해야 한다.

주요어: 지하수 수위, 지표변화, 토지피복변화, 지하수 함양, 수문곡선

Jena Jeong, Dong-Chan Koh, Kyung-Seok Ko and Jeonghoon Lee, 2020, A review on the effects of changes of land cover and land use on groundwater-level variations. Journal of the Geological Society of Korea. v. 56, no. 3, p. 387-394

ABSTRACT: Groundwater is not only valuable as resources, but it is also used as drinking water over the world. However, as the land cover changes rapidly due to population growth, there are inevitable changes in the water budget. In Korea, there has been a huge loss in natural land among OECD countries, but relatively little research has been executed for the relationship between surface changes and groundwater. In review, we discuss how the land surface changes affect on groundwater level. First, as the ground surface is made less permeable by economic growth, local recharge can be diminished so that regional recharge can affect on groundwater level. As a result, the peak flow decreases and the lag time increases in groundwater hydrograph as compared to that of stream. Second, when natural land converts to agricultural land and there are changes in vegetation by removing forests for development, the increase or decrease in groundwater level can be caused by changes in the amount of evapotranspiration. Finally, an artificial groundwater flow can be created if urban infrastructures are constructed below the surface due to regional development such as urbanization. Leakage water from this structure flows into the aquifer, but this may lead to groundwater table increase and contamination. These factors, increases in impervious cover, changes in agricultural land/forest areas and urban infrastructures, cause fluctuations in groundwater level. Therefore, for the preservation of groundwater, these factors should be identified in advance and prepared by constant monitoring.

Key words: groundwater level, land surface change, land cover change, groundwater recharge, hydrograph

(Jena Jeong and Jeonghoon Lee, Department of Science Education, Ewha Womans University, Seoul 03760, Republic of Korea; Dong-Chan Koh and Kyung-Seok Ko, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea)

* Corresponding author: +82-2-3277-3794, E-mail: jeonghoon.d.lee@gmail.com

1. 서론

인류는 지구의 지표 특성을 바꾸는 주요 지형학적 요소(geomorphic agent)가 될 수 있다(Sherlock, 1922). 직접적 또는 간접적으로, 인간은 현재 전 지구적 규모에서 땅 위의 상태를 결정하는 데 중요한 역할을 한다(Skole, 1994). 미국을 대상으로 토지 정보를 제공하는 NLCD (the National Land Cover Database)를 바탕으로 조사한 미국의 토지 피복 변화율을 보면, 2001년부터 2011년까지 토지변화량은 2.96%로, 162,024 km²에 해당하는 면적이 변화하였다. 2001년부터 2006년까지는 1.63%, 2006년부터 2011년까지는 1.77%의 면적이 변화한 것을 보면 점차 가속화되고 있다는 것을 알 수 있다(Homer *et al.*, 2015). 2018년 OECD에서 발표한 지표변화 모니터링 자료에서는 OECD국 기준 자연지가 농업지로 바뀐 비율이 66%, 인공적인 건축물로 바뀐 비율이 16%를 기록했다(OECD, 2018). 자연지 손실이 가장 큰 국가는 한국으로, 16%의 감소 2%의 증가를 보여 종합적으로 손실률 1위를 보였다. 이처럼 국내 지표 환경은 빠르게 변화하고 있으며 이는 세계적으로도 굉장히 높은 속도이다.

지표의 변화는 인간 활동이 지하수 시스템에 주는 부정적 영향 중 하나이다(Calder, 1993). 지하수는 전 세계에서 식수로 활용할 수 있는 주요 수자원 중 하나이지만 인구의 증가, 농업 지역의 확대, 경제 성장 등은 지하수의 수위 및 수질을 모두 변화시키고 있으며(Wada *et al.*, 2010), 이는 지하수 시스템의 안정성에 치명적인 영향을 끼친다(Geherels *et al.*, 2001). 자연지(natural land)에서 변화한 지표가 불투수 면적을 상당량 증가시킨다면, 이는 지표수 유출(surface water runoff)량의 증가로 이어진다는 사실은 일반적으로 잘 알려져 있다(Leopold, 1968). 지표수 유출량의 증가는 지하수 함양률의 감소를 의미하기 때문에 지표 변화는 지하수 수위에도 큰 영향을 미친다. 따라서, 토지 피복 변화가 지하수 함양에 주는 영향을 파악하는 것은 지속 가능한 수자원 관리를 위해 중요하다. 하지만 현재 지표의 변화가 지하수에 어떤 방식으로 영향을 주는지에 대해서는 정확하게 파악되지 않았으며, 많은 연구가 진행 중이다(Owuor *et al.*, 2016). 1993년 국제수문지질학회(International Association of Hydrogeologists, IAH)에서 도시 지

역의 지하수를 다루는 위원회를 설립한 것을 시작으로 전 세계의 많은 연구, 워크숍, 회의 등에서 지하수의 보존을 논하고 있다(Vázquez-Suñé *et al.*, 2005).

하지만, 앞서 언급했듯 세계적으로 빠른 지표 변화를 겪고 있음에도 국내에서는 그에 대한 대비가 체계적으로 이루어지고 있지 않다. 본격적인 지하수 개발은 1960년대부터 이루어졌음에도 불구하고 1990년대까지 국내 지하수자원에 대한 종합적인 오염도 조사가 시행되지 않았다. 또한, 지하수 자원을 온천, 먹는샘물, 지하수 등으로 구분해 각각 다른 정책이 시행되고 있으며 법률 또한 지하수법, 온천법, 먹는물관리법 등으로 분산되어 있다(Ham, 2010). 지하수 자원을 각 기관에서 나누어 담당하고 있어 통합적인 관리가 이루어지지 않고 있으며 이는 지하수의 변화가 체계적으로 관찰되고 있지 않다는 것을 의미한다. 일반적으로 국내에서의 지하수 관리는 도시가 새롭게 조성되거나 특정 용도로 지표를 개발한 경우, 개발 이후의 지하수 상태를 보는 것에 초점이 맞추어져 있다. 하지만 지하수의 변화, 특히 지하수 수위의 변동을 살펴보려면 지표 개발 이전의 자료는 필수적이다.

인구가 증가함에 따라 토지 개발의 필요성은 점점 늘어가는 추세이며 지하수 수요 또한 증가하고 있기 때문에, 토지 피복 변화와 지하수 간의 관계에 대한 이해가 필요하다. 이는 물 순환 시스템에 대한 이해를 높여 안정적인 수자원을 확보하는데 매우 중요하다. 따라서 이 논평에서는 해외 및 국내 사례를 통해 지표 개발의 형태를 크게 다음의 세 가지 경우, 1) 지표면 불투수면적의 변화, 2) 지표면 식생의 변화, 3) 지표 아래 도시 구조물 생성으로 나누어 지하수 수위와의 관계를 살펴보고자 한다.

2. 지표 위 불투수면적의 변화

인구가 증가하면 토지 이용량의 증가로 자연지를 개발하게 되고, 이는 지표의 특성을 바꾼다. 가장 대표적인 사례는 불투수면적의 증가이다. 도시가 생기면서 땅 위에 빌딩, 도로 등이 건설되고 이들의 무게로 인하여 토양은 다져짐 작용(compaction)을 받게 된다. 이러한 과정들은 지표의 투수율을 낮추는 역할을 한다(Carlson *et al.*, 2011). 도시화로 인한 불투수면적의 증가가 주변 수문 시스템에 미치는 영향은

크게 다섯 가지로 밝혀져 있다: (1) 상당량의 강수가 지표표를 따라 유출된다; (2) 하천 유역의 지체 시간 (lag time)이 짧아진다; (3) 하천의 최대 유량이 증가한다; (4) 지하수 저장량이 감소해 하천의 최저 유량은 더욱 낮아진다; (5) 지표수의 유입으로 인해 하천 수질이 오염된다(Shaw, 1994). 여기서 지체 시간이란 강우의 질량 중심선과 하천 침투유량 지점 사이의 간격을 뜻한다.

도시화와 하천 유량 간의 관계에 대해서는 많은 연구가 이루어졌으며 뚜렷한 상관관계가 증명되었다. Rose and Peters (2001)는 조지아 애틀랜타 지역의 유역을 대상으로 1958년에서 1996년까지 도시화 정도가 높은 지역, 낮은 지역, 도시화가 진행되지 않은 지역의 하천 유량을 비교했다. 그 결과 도시화가 가장 많이 진행된 지역의 하천에서 다른 지역보다 30~100% 높은 최대 유량을 나타냈으며 지체 시간은 다른 지역의 50~60% 작은 값을 보였다(Rose and Peters, 2001). Miller *et al.* (2014)의 연구에서는 잉글랜드 남부 윌트셔지역의 유역을 대상으로 1960년에서 2010년까지의 지표 변화 데이터와 하천 수위 데이터를 함께 살펴본 결과, 불투수면적과 지표수 유출량이 양의 상관관계를 보이며 하천 유량이 강수에 더욱 빠르고 높은 반응을 보였다. 국내에서는 Park *et al.* (2005)가 경안천 유역의 토지피복 변화에 따른 유출특성을 연구하였고, 20년 동안에 3개에 토지피복도를 사용하여 분석한 결과, 유출량은 도심지의 증가와 산림의 감소에 영향을 받아 전체적으로 증가하였다. Han and Yang (2009)는 제주도 외도 유역을 대상으로 토지이용변화에 따른 하천유역의 유출량을 산정하였다. 연구 결과 과거와 현재 중, 상류부의 토

지피복변화는 크지 않았지만, 하류부의 불투수성 도시화 면적은 과거에 비하여 현재에 2배 이상 증가하였고, 이에 따라 직접 유출량 또한 8%가량 증가였다.

동일한 상황에서 지하수는 하천과는 다른 반응을 보인다. 지표가 불투수면적으로 덮이면서 제거되는 증발산량의 변화가 강수의 직접 함양량에 비해 미미하다고 가정했을 때, 물 순환 시스템은 그림 1과 같이 변화한다. 유출량이 많아졌다는 것은 함양의 감소를 뜻하고, 이는 대수층으로 유입되는 물의 감소로 이어진다. 따라서 지하수의 지역적 함양(local recharge)은 감소하고 광역적 함양(regional recharge)에 의해 지하수 수위가 변화하는데, 이로 인해 지하수 수위 곡선은 하천의 수위 곡선과는 다른 모습을 보인다. 우선, 강수는 투수율이 낮은 지표표를 통과하지 못하고 그대로 유출되어 하천으로 흘러들어간다. 이때, 강수는 지표표를 빠른 속도로 이동하여 하천 수문곡선의 최고점은 이전에 비해 높고 빠르게 관측된다(그림 2a). 하지만 지하수의 경우 불투수면적이 직접적인 함양을 방해하기 때문에 지하수 수위는 이전보다 느린 속도로 상승한다(그림 2b). 따라서 단기적으로 봤을 때 대수층의 높이는 전과 비교하여 낮게 관측된다. 하지만, 불투수면적으로 덮이지 않은 산간 지역 등에서 함양되는 물이 이동하여 해당 지역의 지하수를 보충 할 수 있다. 따라서 장기적으로 본다면 지표 변화 이전과 이후 수문곡선을 적분한 면적은 같으며 지하수 수문곡선의 최고점은 상대적으로 낮고 느리게 관측된다. 하지만 이러한 광역적 함양이 발생하지 않는 경우 수위는 하강한 상태로 유지되며 해당 지역 지하수자원의 감소로 이어질 수 있다.

지표 특성과 하천 유량의 관계를 이용하여 지하

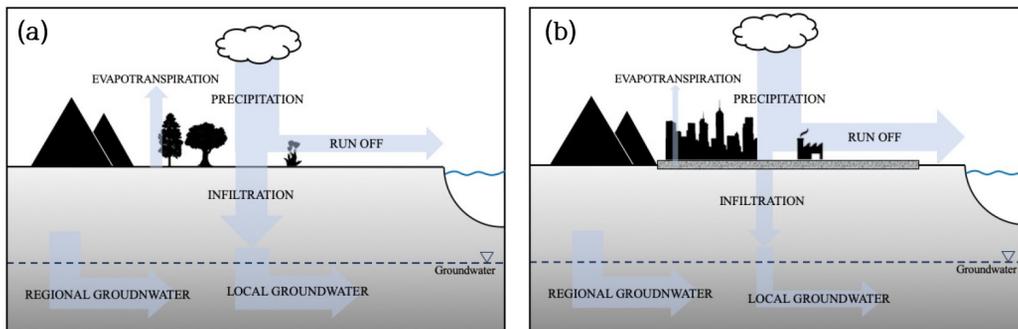


Fig. 1. A change of water budget before and after the land-cover change. Surface runoff has increased (b) after the land-cover change compared to (a) before the change, resulting in a decrease in infiltration.

수 수위의 변화를 예측할 수 있지만, 하천과는 달리 지하수는 지표 면적과의 명확한 관계가 충분히 연구되지 않았다. 그 이유는 강수가 대수층으로 유입되기까지 다양한 경로를 거치기 때문인데, 지하수 수위에 변화가 발생하더라도 그 원인을 특정 짓기 어렵다. 인류의 토지 개발은 불투수성 덮개의 변화뿐만 아니라 식생의 변화, 도시 구조물의 생성 등 다양한 변화를 수반한다. 각각의 경우는 모두 지하수 수위에 다른 영향을 미치며 서로 유기적으로 연결되어 있다.

3. 지표 위 식생의 변화

토지 개발은 일반적으로 식생의 변화를 수반한다. 산림이 제거되거나 자연지가 농업 지역으로 변화하는 것은 식물의 증산 작용을 감소, 증가시킬 뿐만 아니라 증발 작용까지 변화시킨다. 현재 전 세계는 엄청난 식생의 변화를 겪고 있으며 따라서 증발산이 지하수에 미치는 영향을 정량화하는 것은 지하수와 큰 규모의 지표 순환 사이의 관계를 알아봄에 있어 중요하다(Evaristo and McDonnell, 2017). Tilman et al. (2001)의 연구에서는 50% 증가한 인구수와 그에

따른 식량 수요 증가로 10⁹ 헥타르(ha)의 자연지가 2050년에는 모두 농경지로 바뀔 것이라고 예상하였다. 이후 2018년에 나온 OECD 지표 모니터링 자료에서는 1992년부터 2015년까지 OECD와 G20 국가에서 손실된 자연지의 면적이 프랑스의 국토 면적(636,000 km²)과 비슷하다고 발표하였다. 손실된 면적의 66%는 농경지로 바뀌었으며 한국은 이 중에서 손실률 1위로 15%를 기록하였다. 2위인 인도는 8%, 3위인 에스토니아는 7.5%로 한국은 2, 3위보다 2배 가까이 되는 변화율을 보였다(OECD, 2018). 식생의 변화는 예상과 같이 빠르게 진행되었고, 보다 효율적인 토지 사용을 위해 개발이 지속된다면 미래에도 중요한 환경 문제로 남을 것이다. 식물 개체수의 변화는 눈에 보이는 변화 뿐만 아니라 해당 지역의 전반적인 환경 변화를 가져오기 때문에 사전에 대비하지 않을 경우 예상치 못한 결과를 초래할 수 있다. 따라서 이 장에서는 농경지가 증가하고 산림이 감소하는 경우 물 순환 시스템에 어떤 영향을 주는지에 대해 해외 연구를 바탕으로 살펴본다.

우선 자연지가 농경지로 개발되는 경우 두 가지 변화가 나타난다. 첫 번째는 지하수 사용량의 변화이다. 농업용수를 지표수에서 끌어오는 경우 농업 지역 밑에 위치한 대수층에 추가적인 물이 공급되어 지하수 수위를 상승시킨다. 이 경우 지하수량은 증가하지만, 불포화대의 토양에서 상대적으로 많은 양의 염분이 유입되며 비료의 사용으로 수질이 저하된다. 반대로 지하수를 이용한 농작의 경우 용수로 인해 지하수 수위는 하강하며 많은 나라에서 이와 같은 문제를 겪고 있다(Kurtzman and Scanlon, 2011). 두 번째는 지하수 함양을 결정하는 요소들(기후, 토양, 식생)의 변화이다. 넓은 농경지가 생기면 자연지였을 때보다 식물이 증가하기 때문에 증산 작용이 증가하고, 경작에 물을 이용하면서 증발산량도 같이 증가한다. 이 두 가지 변화는 복합적으로 작용하여 해당 지역의 물 순환 시스템을 변화시킨다. 이 논평에서는 지하수 수위와의 관계를 알아보는 것이 목적이므로 지하수를 사용하는 농경지를 중심으로 살펴보았다.

일반적으로 농사를 위해 지표를 개발할 경우 지하수의 사용량이 증가할 뿐만 아니라 증발산의 급격한 증가로 지하수 수위는 상당량 감소한다. 농경지에서 지하수를 사용하고, 이 때문에 지하수량이 감소한다는 것은 많이 알려져 있으며 관련 법률또한

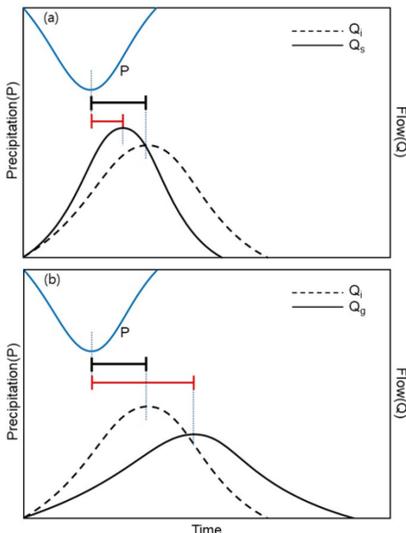


Fig. 2. A hydrograph of stream (a) and groundwater (b); (Q_i) represents hydrograph of normal circumstance, (Q_s) and (Q_g) indicate stream and groundwater after the increase in imperviousness, respectively. Peak flow of Q_s is higher and lag-time is shorter than Q_i while Q_g shows lower peak flow and longer lag-time. This figure modified from Lee (2017).

존재한다. 하지만 농경지의 증발산 효과에 대한 인식은 상대적으로 낮은 편이다. 농경지에서는 지하수를 끌어올려 식물의 생명 활동에 사용하기 때문에 농업용수로써 사용된 지하수의 10% 정도만이 다시 지표수로 돌아오고 나머지 90%는 대기로 유출된다(Moore and Rojstaczer, 2002). 그만큼 농사는 증산, 증발 작용으로 수자원의 큰 손실을 가져오는 주요인 중 하나이다. Kendy *et al.* (2004)의 연구에서는 중국 환청 현(Luancheng County)을 대상으로 지하수 수위 변화를 조사하였다. 1960년대부터 환청 현에는 농업지가 증가하였고, 농업 용수의 수요 증가와 맞물려 강수량이 증발산량보다 적어지는 현상이 발생하였다. 이로 인해 지하수 수위는 끊임없이 감소하였고 국가는 수위 하강에 영향을 주는 주원인인 증발산량을 감소시키는 노력을 시도하였다. 식물 개체수를 줄이는 것이 가장 이상적인 해결책이지만, 농업 생산량을 줄일 수 없어 지하에 설치한 파이프에서 식물에 바로 물을 공급하는 방법을 선택하였다. 이 방법은 증발량을 상당량 줄일 수 있어 환청 현에서도 20%의 농경지에서 사용 중이다. 하지만 이 또한 파이프 설치 비용이 들 뿐만 아니라 농작물이 자라는 시기에는 끊임없이 지하수를 공급 해주어야 하는 것은 같기 때문에 여전히 지하수 수위 하강에 영향을 주고 있다(Kendy *et al.*, 2004). 따라서 자연지를 농경지로 바꾸는 것은 지하수 사용량의 변화와 식물에 의한 증산량, 농업 용수의 증발량 증가 등 많은 요소를 변화시키므로 개발 이전에 해당 지역에 관한 충분한 수문학적 연구가 우선시 되어야 한다.

증발산량의 측면에서, 산림을 제거하는 것 또한 같은 결과를 가져온다. 산림의 제거는 토지 활용의 기초 단계로서 많이 행해진다. 관목, 수목, 교목과 같은 큰 식물은 물 순환 시스템에서 중요한 역할을 하는 만큼, 산림의 제거가 수자원에 미치는 영향은 그동안 활발히 조사되어왔다. Yasuda *et al.* (2013)은 식물이 지하수 수위 변동에 영향을 준다는 것을 보여주었는데, 중국 산서성 지방의 리우다오(Liudaogo, China) 유역의 관정을 대상으로 식물에 의한 지하수 수위 변동을 연구하였다. 관목으로 둘러싸인 관정에서 계절적 변화와 일주기 변화를 관찰한 결과 식물의 성장기인 4~9월과 식물의 생명 활동이 활발한 낮 시간에 지하수 수위가 낮아지는 것을 확인하였다. 이는 관목의 증산 작용이 대수층에 영향을 준

다는 것을 뜻하며 물 순환 시스템에 중요한 역할을 수행하고 있음을 시사한다. 식물은 토양수를 사용하여 생명 활동을 함으로써 지하수 수위를 낮출 수 있지만 동시에 강수가 토양으로 쉽게 함양될 수 있도록 하여 유출량을 낮춘다. Jones and Grant (1996)는 미국 서부 오리건주의 5개 유역 쌍을 대상으로 150~375개의 강수에 대한 반응을 연구하였고, 산림 제거가 유출 최대량을 작은 유역(60~101 ha)에서 50%, 큰 유역(60~600 ha)에서 100%가량 증가시킨다고 보고하였다. 이후 Thomas and Megahan (1998)은 같은 지역을 조사하여 가장 작았던 침두유역들은 식생 변화 이후 90%까지 그 값이 증가한다고 밝혔다. 산림을 제거하는 것은 주위 하천유역에 큰 변화를 초래할 수 있으며 하천의 상류에서 유량이 급속도로 증가할 경우 하류 지역의 자연재해로까지 이어질 수 있다. 식물은 이처럼 지하수와 하천 사이에서 유량의 균형을 잡는 역할을 한다. 따라서 물 순환 시스템의 주요 요소인 식물을 제거하는 것은 수자원 측면에서 부정적인 결과를 가져올 수 있다.

지표가 불투수층으로 덮이는 경우, 일반적으로 식생 또한 같이 제거된다. 2장에서 언급했듯이 불투수면적은 강수의 유출량을 증가시키지만 동시에 식생이 제거되며 증발산량이 감소한다(Lerner, 1990). 따라서 불투수층의 균열을 통과한 물의 함양은 오히려 증가할 가능성이 존재한다. 이처럼 자연지를 개발하는 것은 단순히 하나의 요소를 바꾸는 것이 아니라 대수층으로 들어오는 물의 유입원을 복잡하게 만든다. 또한 토지가 도시로 개발된 이후에는 인구의 증가로 인해 각종 도시기반시설이 만들어지게 되는데, 이러한 건축물들은 대수층에 추가적인 물을 공급하고 도시 지하수 수위 상승, 하강 및 수질 저하의 원인이 된다. 4장에서는 지표 밑에 건설되는 시설들이 지하수 함양에 어떤 영향을 미치는지 살펴본다.

4. 지표 아래 도시 구조물의 생성

도시가 생기면 지표 아래에 다양한 시설들이 건축된다. 도시의 효과적인 빗물 배수를 위해 배수 시스템이 생기며 상수도, 하수도 시설 등 다양한 수관들이 설치된다. 이러한 시설들은 설치 이전과 이후 대수층에 각기 다른 영향을 미친다(그림 3). 우선, 시설을 만드는 과정에서는 지하수 수위를 인공적으로

내린 이후에 지표 밑에 건축해야 하므로 지하수 수위가 하강하는 것은 필수적이다(그림 3a). 한 가지 예로, 주차지를 건축할 경우 지하주차장 등 건물 밑 시설의 손상을 막기 위해 지하수를 끌어올려 다른 곳으로 이동시킨다. 건물뿐만 아니라 터널, 지하철 등도 같은 경우이다. 이렇게 국부적으로 하강한 지하수 수위는 결국 해당 지역의 전체 지하수 수위를 하강시킨다.

시설이 건축된 이후에는 일반적으로 반대의 양상이 나타난다. 도시에 설치되는 배수관은 유틸리티 트렌치(utility trench)라는 특정 구조를 갖는다(그림 3b). 파이프를 중심으로 아래부분에는 높은 투수율을 가진 모래, 자갈들이 깔리며 그 위에는 일반적인 토양이 덮인다. 파이프구조 안 부분과 바깥 부분 토양의 투수 계수를 비교했을 때 파이프 주변 토양이 더 높은 값을 보인다(Sharp, 2010). 따라서 땅 아래 묻혀있는 배수 시설들은 물이 지표 밑으로 이동할 공간(infiltration galleries)을 제공하며 배수관 자체의 균열을 통해 물이 빠져나가 이 공간을 통해 이동하기도 한다. 이러한 공간들은 지표 밑에 댐을 형성하고 기존의 지하수 흐름을 대체하는 새로운 물의 흐름을 만든다. 홍콩이 그 대표적인 경우로, 지표 및 깊숙이 설치한 도시 기반 시설들로 인해 지하수의 흐름이 4가지로 나뉘었고 높은 투수계수를 가진 층(HKZ, High hydraulic conductivity zone)을 통해

막대한 양의 물이 이동하고 있다는 것이 밝혀졌다(Jiao *et al.*, 2006). 이러한 물은 대수층으로 이동하게 되어 수위를 높인데, 일반적으로 수질의 저하가 수반된다. 오래된 도시에서는 도시 형성 초기에 만들어진 오래된 관들이 관리되지 않은 채 방치되어 복잡한 2차 투수층을 만들기도 한다.

이처럼 배수관, 하수관과 같은 관(pipe)구조물은 도시 밖으로 물을 내보내기 위해 설치되었지만, 결론적으로는 도시 밑 대수층에 물을 공급하여 지하수 수위 변동에 영향을 준다(Welty *et al.*, 2007). 관에서 누출된 물의 양은 그 양이 상당히하여 불투수층이 방해하는 지표의 함양량을 상쇄하기도 한다(Lerner, 1986). 따라서, 자연지 개발이 시작되고 단순히 도로의 평탄화 작업만 이루어질 때, 지하수 수위는 하강할 수 있다. 하지만 도시 개발이 심화됨에 따라 인구 증가로 인해 다양한 도시 기반 시설이 생길 경우, 지하수의 양은 오히려 증가한다. 이렇게 증가한 지하수는 수자원의 측면에서 양적으로 증가할 수 있지만 각종 오수로 인한 오염을 보인다. 또한, 일반적이지 않은 지하수 수위의 흐름을 만들어 지반의 약화, 토양 오염 등의 문제를 일으킬 수 있다.

5. 결론

산림을 제거하고, 농경지를 만들고, 도시를 건설

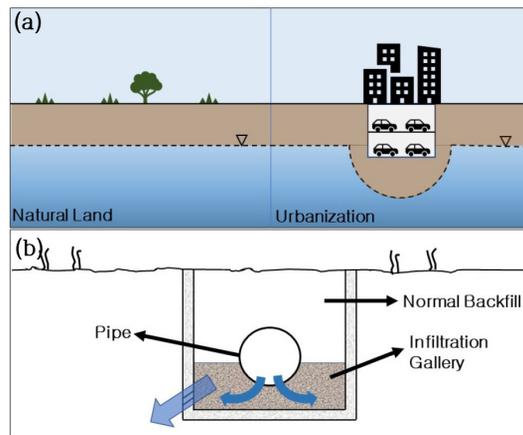


Fig. 3. Two forms of the urban infrastructure. (a) A groundwater table is decreased by pumping in terms of stability of the underground facilities (tunnel, parking lot, etc). This lead to groundwater-level decrease in overall region. (b) Leakage from pipes flow toward the infiltration gallery which consists of high permeable material such as sand, gravel. Eventually this may result in a rise in the water-level and contamination of the aquifer. This figure modified from Sharp (2010).

하면서 인류는 끊임없이 지표층을 변화시켜 왔다. 지표층의 변화는 곧 강수의 함양과 직접적으로 연결되고, 이는 지하수에 영향을 준다. 따라서 지표 특성에 따른 지하수 수위 변동을 아는 것은 수자원 보존에 있어 매우 중요하다. 도시화는 식생의 손실을 수반하며 토양을 불투수면적으로 바꾸고 강수의 유출량을 증가시킨다. 따라서 대수층으로의 유입이 감소해 강수 질량 중심선과 지하수 수위 곡선의 사이의 지체시간이 증가한다. 농업 지역으로의 개발 또한 증발산량의 급격한 변화를 가져오며 농업을 위한 다양한 관개 시설은 지하수 수위 변동의 추가적인 변수가 될 수 있다. 나무가 제거되는 경우 식물의 토양수 소비가 감소하여 강수의 유출량은 상승하고 농경지가 생길 경우 자연지에 비해 증발산량이 증가하여 지하수 수위는 감소한다. 또한, 도시화로 인해 지표 밑에 도시 기반 시설이 건설될 경우 시설의 안정성을 위하여 지하수 수위를 내리거나 이후 관에서 누출된 물로 인해 수위가 상승한다. 이렇게 다양한 물 순환 시스템의 변화는 지하수 수위의 예상치 못한 변동을 일으키며 이는 환경 문제로 이어질 수 있다.

효과적인 국토 이용을 위해서 토지 개발은 과거부터 지금까지 이어져 왔으며, 앞으로도 계속 될 것이다. 하지만 토지 피복 변화와 지하수 수위 관계에 대한 이해없이 개발을 진행한다면 개발이 환경에 미치는 영향을 정확히 파악할 수 없다. 국내에서는 이와 같은 사전 대비에 취약한 편이다. 개발과 동시에 관정을 설치하여 지하수를 관리하기 때문에 변화 이전과 이후를 비교하기 어렵고, 관정의 수가 적어 세세한 지역별 변화를 파악하는 것 또한 쉽지 않다. 예상치 못한 지하수 수위의 변동은 싱크홀, 지반 침하, 생태계의 급격한 변화 등을 야기할 수 있으며 한번 오염되거나 적어진 지하수는 다시 복구하기가 매우 까다롭다. 일본 연구팀의 경우 쿠마모토현 규슈 지역(22×29 km)을 대상으로 지표 피복 데이터는 Landsat 위성 5호의 테마틱 매퍼(Thematic Mapper, TM)를, 수위 데이터는 국가, 도시 관측망을 이용하여 토지 피복 변화와 지하수 수위를 다변량회귀 분석을 통해 연결시켰다. 해당 방법은 원인 분석 뿐만 아니라 특정 피복 조건이 변화할 때 지하수위를 예측하는데 사용될 수 있다. 제한된 관측 데이터를 이용해 모델을 만드는 것은 이를 예측에 활용함으로써 앞으로 관정 설치 필요한 지역을 알아내는데도 도움을 준다(Moukuna

and Koike, 2008). 효과적인 지하수 관리를 위해 모니터링 시스템을 구축하는 연구는 일본 이외에도 중국(Ottinger *et al.*, 2013), 미국(Cherkauer and Ansari, 2005) 등에서 다양하게 진행되고 있다. 이처럼 국내에서도 인공 위성 자료를 통해 지표의 변화를 꾸준히 살펴보고 국가지하수정보센터에서 제공하는 국가지하수관측망을 이용하여 다양한 상황에 대한 대비가 필요할 것이다. 지속 가능한 수자원을 위해서는 토지 개발의 각 경우와 지하수 수위 간의 관계를 파악하는 것이 필수적이며 개발 이전에 충분한 대비를 통해 지하수를 보호해야 한다.

감사의 글

이 연구는 국가과학기술연구회 창의형 융합연구사업(CAP-17-05-KIGAM)의 지원을 받아 수행되었습니다. 원고를 검토하고 좋은 의견을 주신 편집위원장님과 편집위원님, 그리고 두 심사위원님께 감사의 말씀을 드립니다.

REFERENCES

- Calder, I.R., 1993, Hydrologic effects of land-use change. Handbook of hydrology, 13.1-13.50.
- Carlson, M.A., Lohse, K.A., McIntosh, J.C. and McLain, J.E.T., 2011, Impacts of urbanization on groundwater quality and recharge in a semi-arid alluvial basin. Journal of Hydrology, 409, 196-211.
- Cherkauer, D.S. and Ansari, S.A., 2005, Estimating groundwater recharge from topography, hydrogeology, and land cover. Groundwater, 43, 102-112.
- Evaristo, J. and McDonnell, J.J., 2017, Prevalence and magnitude of groundwater use by vegetation: A global stable isotope meta-analysis. Scientific Reports, 7, 1-12.
- Gehrels, H., Peters, N.E., Hoehn, E., Jensen, K., Leibundgut, C., Griffioen, J., Webb, B. and Zaadnoordijk, W.J., 2001, Impacts of human activity on groundwater dynamics. Proceedings of a symposium held during the Sixth IAHS Scientific Assembly, Maastricht, Netherlands, 18-27 July 2001, IAHS Press.
- Ham, T.-S., 2010, A legal study of systematic conservation management of groundwater. Study of Environmental Law, 32, 476-506 (in Korean with English abstract).
- Han, W.-K. and Yang, S.-K., 2009, A runoff simulation using SWAT model depending on changes to land use in Jeju island. Journal of the Environmental Sciences, 18, 1057-1063 (in Korean with English abstract).

- Homer, C., Dewitz, J., Yang, L., Jin, S., Danielson, P., Xian, G., Coulston, J., Herold, N., Wickham, J. and Megown, K., 2015, Completion of the 2011 National Land Cover Database for the conterminous United States-representing a decade of land cover change information. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 81, 345-354.
- Jiao, J.J., Wang, X.S. and Nandy, S., 2006, Preliminary assessment of the impacts of deep foundations and land reclamation on groundwater flow in a coastal area in Hong Kong, China. *Hydrogeology Journal*, 14, 100-114.
- Jones, J.A. and Grant, G.E., 1996, Peak flow responses to clear-cutting and roads in small and large basins, western Cascades, Oregon. *Water Resources Research*, 32, 959-974.
- Kendy, E., Zhang, Y., Liu, C., Wang, J. and Steenhuis, T., 2004, Groundwater recharge from irrigated cropland in the North China Plain: Case study of Luancheng County, Hebei Province, 1949-2000. *Hydrological Processes*, 18, 2289-2302.
- Kurtzman, D. and Scanlon, B.R., 2011, Groundwater recharge through verti sols: Irrigated cropland vs. natural land, Israel. *Vadose Zone Journal*, 10, 662-674.
- Lee, J., 2017, A review on hydrograph separation using isotopic tracers. *Journal of the Geological Society of Korea*, 53, 339-346 (in Korean with English abstract).
- Leopold, L., 1968, *Hydrology for Urban Land Planning - A Guidebook on the Hydrologic Effects of Urban Land Use*. Geological Survey Circular, 554, 1-21.
- Lerner, D.N., 1990, Groundwater recharge in urban areas. *Atmospheric Environment Part B: Urban Atmosphere*, 24, 29-33.
- Lerner D.N., 1986, Leaking pipes recharge ground water. *Groundwater*, 24, 654-662.
- Miller, J.D., Kim, H., Kjeldsen, T.R., Packman, J., Grebby, S. and Dearden, R., 2014, Assessing the impact of urbanization on storm runoff in a peri-urban catchment using historical change in impervious cover. *Journal of Hydrology*, 515, 59-70.
- Moore, N. and Rojstaczer, S., 2002, Irrigation's influence on precipitation: Texas High Plains, U.S.A. *Geophysical Research Letters*, 29, 2-1-2-4.
- Moukoka, J.A. and Koike, K., 2008, Geostatistical model for correlating declining groundwater levels with changes in land cover detected from analyses of satellite images. *Computers and Geosciences*, 34, 1527-1540.
- OECD, 2018, Monitoring land cover change. <http://oe.cd/land-cover>, 16 April 2018, 16 p.
- Ottinger, M., Kuenzer, C., Liu, G., Wang, S. and Dech, S., 2013, Monitoring land cover dynamics in the Yellow River Delta from 1995 to 2010 based on Landsat 5 TM. *Applied Geography*, 44, 53-68.
- Owuor, S.O., Butterbach-Bahl, K., Guzha, A.C., Rufino, M.C., Pelster, D.E., Diaz-Pines, E. and Breuer, L., 2016, Groundwater recharge rates and surface runoff response to land use and land cover changes in semi-arid environments. *Ecological Processes*, 5, 16.
- Park, M.-J., Kwon, H.-J. and Kim, S.-J., 2005, Analysis of impacts of land cover change on runoff using HSPF model. *Korea water resources association*, 38, 495-504 (in Korean with English abstract).
- Rose, S. and Peters, N.E., 2001, Effects of urbanization on stream flow in the Atlanta area (Georgia, USA): A comparative hydrological approach. *Hydrological Processes*, 15, 1441-1457.
- Shaw, E., 1994, *Hydrology in Practice*. Chapman and Hall, London, 569.
- Sharp, J.M., 2010, The impacts of urbanization on groundwater systems and recharge. *AQUAmundi*, 1, 51-56.
- Sherlock, R.L., 1922, *Man as a Geological Agent: an account of his action on inanimate nature*. H.F. & G. Witherby, London, 372 p.
- Skole, D.L., 1994, Data on global land-cover change: acquisition, assessment and analysis. *Changes in land use and land cover: a global perspective*, 437-471.
- Thomas, R.B. and Megahan, W.F., 1998, Peak flow responses to clear-cutting and roads in small and large basins, western Cascades, Oregon: A second opinion. *Water Resources Research*, 34, 3393-3403.
- Tilman, D., Fargione, J., Wolff, B., D'Antonio, C., Dobson, A., Howarth, R. and Swackhamer, D., 2001, Forecasting agriculturally driven global environmental change. *Science*, 292, 281-284.
- Vázquez-Suñé, E., Sánchez-Vila, X. and Carrera, J., 2005, Introductory review of specific factors influencing urban groundwater, an emerging branch of hydrogeology, with reference to Barcelona, Spain. *Hydrogeology Journal*, 13, 522-533.
- Wada, Y., Van Beek, L.P.H., Van Kempen, C.M., Reckman, J.W.T.M., Vasak, S. and Bierkens, M.F.P., 2010, Global depletion of groundwater resources. *Geophysical Research Letters*, 37, L20402.
- Welty, C., Miller, A.J., Belt, K.T., Smith, J.A., Band, L.E., Groffman, P.M., Scanlon, T.M., Warner, J., Ryan, R.J., Shedlock, R.J. and McGuire, M.P., 2007, Design of an environmental field observatory for quantifying the urban water budget. *Cities of the Future: Towards Integrated Sustainable Water and Landscape Management*, London: International Water Association, 72-88.
- Yasuda, H., Berndtsson, R., Hinokidani, O., Huang, J., Saito, T., Zheng, J. and Kimura, R., 2013, The impact of plant water uptake and recharge on groundwater level at a site in the Loess Plateau of China. *Hydrology Research*, 44, 106-116.

Received : April 1, 2020
 Revised : April 29, 2020
 Accepted : May 6, 2020