

도농복합지역 지하수 함양과 배출에 대한 연구

이병선^{1,3} · 홍성우¹ · 강희준¹ · 이지성¹ · 윤성택² · 남경필^{3*}

¹한국농어촌공사 경기지역본부

²고려대학교 지구환경과학과

³서울대학교 건설환경공학부

Groundwater Recharge and Discharge in the Urban-rural Composite Area

Byung Sun Lee^{1,3} · Sung Woo Hong¹ · Hee Jun Kang¹ · Ji Seong Lee¹ · Seong Taek Yun²
Kyoungphile Nam^{3*}

¹Gyeonggi Regional Headquarters, Korea Rural Community Corporation

²Dept. of Earth and Environmental Sciences, Korea University

³Dept. of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

ABSTRACT

This study was conducted to identify groundwater recharge and discharge amounts of a representative urban-rural composite area located in Yongin city, Kyonggi-do, Korea. Groundwater recharge would be affected by mainly two processes in the study area: rainfall and leakage from public water pipelines including water-supply and sewage system. Groundwater recharge rate was estimated to be 13.5% by applying annual groundwater level data from two National Groundwater Monitoring Stations to the master regression curve method. Subsequently, the recharge amounts were determined to be $13,253 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{yr}$. Leakage amounts from water-supply and sewage system were estimated to be $3,218 \times 10^3$ and $5,696 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{yr}$, respectively. On the whole, a total of the recharge amounts was $22,167 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{yr}$, of which 60% covers rainfall recharge and 40% pipeline leakage. Groundwater discharge occurred through three processes in the composite area: baseflow, well pumping, and discharge from urban infrastructure including groundwater infiltration into sewage pipeline and artificial extraction of groundwater to protect underground facilities from submergence. Discharge amounts by baseflow flowing to the Kiheung agricultural reservoir and well pumping were estimated to be 382×10^3 and $1,323 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{yr}$, respectively. Occurrence of groundwater infiltration into sewage pipeline was rarely identified. Groundwater extraction amounts from the Bundang subway line as an underground facility were identified as $714 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{yr}$. Overall, a total of the discharge amounts was determined to be $2,419 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{yr}$, which was contributed by 29% of artificial discharge. Even though groundwater budget of the composite area was identified to be a surplus, it should be managed for a sound groundwater environment by changing deteriorated pipelines and controlling artificial discharge amounts.

Key words : The urban-rural composite area, Groundwater, Recharge, Discharge

1. 서 론

지하수 함양이란 지하수면에 도달하여 대수층의 저유량을 증가시키는 수직적인 물의 흐름으로 정의되며, 강우의 지표 침투, 비포화대 내 배수, 포화대 내 재분포 또는 누적 과정을 통해 발생한다. 이러한 일련의 물리적 과정은

비포화대에서의 물의 흐름을 통하여 지표면에 가해진 수리적 스트레스를 해소하고 평형상태로 되돌아가려는 자연 현상으로 이해될 수 있다(구민호와 이대하, 2002). 지하수 배출이란 내륙에 함양된 지하수가 주어진 시간동안 대수층 수두의 상향성분 지역으로 이동하다가 배수경계면과 접하게 되면 기저유출, 누수, 샘, 또는 증발산의 형태로

*Corresponding author : kpnam@snu.ac.kr

원고접수일 : 2012. 2. 17 심사일 : 2012. 3. 28 게재승인일 : 2012. 4. 2

질의 및 토의 : 2012. 6. 30 까지

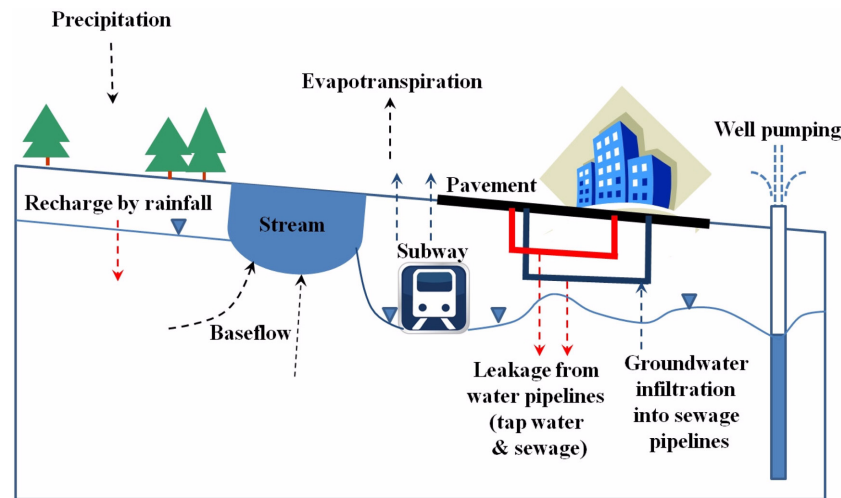


Fig. 1. Groundwater hydrologic cycle in the urban-rural composite area.

유출되는 것을 의미한다(Fetter, 1991). 이러한 두 가지 과정은 수문순환의 일부이며, 고전적 의미의 지하수 함양과 배출이라 한다. 그러나 경제인구 증가에 따라 도시가 형성되고 이에 따른 산업기반시설이 설치되면 고전적인 의미의 함양과 배출은 도시화 요소에 의해 영향을 받아 새로운 형태의 지하수 함양과 배출이 형성된다. 즉, 불투수성 피복의 증가에 따른 강우 함양 감소, 상·하수도 누수에 따라 기대하지 않았던 지하수량 증가, 상수도 확충에 따른 지하수 관정이용량 감소, 각종 지하시설물의 침수방지를 위한 강제적인 지하수 배출, 하천제방 정비에 따른 기저유출량 감소 등으로 지하수 물수지가 변화된다(Fig. 1). 이 때, 각 지역마다 도시화 요인들의 영향이 각기 다르기 때문에, 어느 한 지역의 지하수 시스템을 이해하기 위해서는 수리지질학적 특성은 물론 해당 도시화 요소들을 합리적으로 고려한 연구가 이루어져야 한다(조현조와 김준모, 2009). 그 동안 국내·외에서는 도시화 요인으로 인한 지하수 시스템 변화 연구가 몇몇 연구자들에 의해 수행된 바 있지만(이진용과 구민호, 2007; 조현조와 김준모, 2009; 정상용, 2010; Foster et al., 1998; Geake et al., 1986; Kim et al., 2001; Lawrence et al., 1998; Lee et al., 2005, 2007; Morris et al., 1997; Otto et al., 2002; Slonecker et al., 2001), 도시와 농촌이 공존하는 1개 도농복합지역을 대상으로 지하수 함양과 배출을 분석한 연구는 드문 편이다. 이 연구는 대표적인 도농복합지역인 경기도 용인시 수지·기흥구 지역을 대상으로 도시화 확장에 따른 지하수 함양과 배출을 분석하여 도농복합지역의 지하수 물수지에 대하여 살펴보고자 하였다.

2. 도시화 요소에 의한 지하수 함양과 배출

도시화에 의한 불투수성 지표면의 증가는 강우의 지표 침투를 저해하는 결과를 초래한다. 강우에 의한 지하수 함양은 기존의 자연녹지 내지 농지에 한정되기 때문에 지하수 함양량은 필연적으로 감소하게 된다. 대표적인 불투수성 지표면은 도로, 택지, 주차장, 주거지 등이며, 이 가운데 도로가 평균 60%를 차지한다(이진용과 구민호, 2007). 또한 비포장 표면일지라도 운동장, 공원부지, 인공잔디밭, 정원 등의 압밀표면 등은 지하수 함양의 저해요인으로 작용한다(Slonecker et al., 2000; Otto et al., 2002). 한편, 도시화 진행에 따라 상수도 시설도 확충되는데, 상수도 배관의 균열, 접합부 접지 결함, 노후화 등은 상수도 누수를 초래하는 원인이 된다. 이러한 상수도 누수는 지하수량을 증가시키는 새로운 지하수 함양 요인으로 작용한다. 국내 상수도 통계(환경부, www.me.go.kr)를 살펴보면, 2010년 말 현재 전국 상수도 누수량은 총급수량의 약 11%(638백만 m^3/yr)이다. 이는 전국 지하수 함양량(16,300 백만 m^3/yr ; 국가지하수정보센터, www.gims.go.kr)의 약 4%에 해당되는 수량이다. 따라서 국토 전면적 대비 총 상수도 누수량은 지하수 물수지에 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 생각될 수 있다. 그러나 대부분의 상수도 시설은 도시 지역(국토면적의 약 5%; 국가통계포털, www.kosis.kr)에 집중되어 있으므로, 도시 지역의 경우 상수도 누수량이 지하수 함양량을 증가시키는 요인이 될 수 있다. 상수도 외에도 노후된 하수관거를 통해 누수가 발생하면 하수에 의한 지하수 함양이 발생된다. 국내 도시 택지지역의 하수관은 평균 7.3 m 당 한 곳의 결함이 있는 것으로 알려져

있고(이진용과 구민호, 2007), 대구광역시 칠곡지구의 경우 하수관 누수율은 31%(구민호 외, 2006)에 이르는 것으로 보고되고 있다. 이러한 하수의 함양은 지하수량을 증가시키기도 하지만 오히려 지하수 내 영양염류, 각종 유기화합물의 오염을 초래하는 주요 원인이 되며, 이에 대해서는 국내·외 여러 연구자들에 의해 보고된 바 있다(이평구 외, 2001; 이인호 외, 2002; 원종석 외, 2004; 이진용과 구민호, 2007; Yang et al., 1999; Vázquez-Suñé et al., 2005).

도시화 이후 지하수 배출은 고전적인 지하수 관정이 용량 외에도 지하 시설물(지하철, 터널, 대형건물, 전력구·통신구 등)의 침수방지를 위한 강제 배출이 포함된다. 지하수법에서는 이를 유출지하수라고 명명한다. 서울특별시를 예로 들면, 지하철 8개 노선(1~8호선)에서 약 3,498 만 m^3/yr , 대형건물에서 약 300 만 m^3/yr , 전력구·통신구 및 건설공사장 등에서 약 349 만 m^3/yr 등 총 4,147 만 m^3/yr 이 유출지하수로 배출된다(정상용, 2010). 이는 서울특별시 지하수 관정 이용량(3,210 만 m^3/yr)을 상회(129%)하는 막대한 수량이다. 또한 서울특별시 유출지하수량과 관정 이용량의 합(7,357 만 m^3/yr)은 지하수 개발가능량(5,060 만 m^3/yr)을 초과(146%)하여 지하수위 강하, 불용공 증가(전국 불용공의 29%) 문제를 초래하고 있다(국가지하수정보센터, www.gims.or.kr). 유출지하수 외에도 도시화 지역 지하수는 하수관 침입수의 형태로 배출되기도 한다. 하수관 침입수란 합류식 및 분류식하수관거 시스템에서 관거(분류식에서는 오수관거)로 유입되는 하수 이외의 지하수 유입수로서, 주로 지하수위 변동으로 인해 지하수가 하수관거의 균열부로 유입되는 것을 의미한다(환경부, 2008). 그런데 도시지역 지하수면은 하수관보다 깊은 심도에 위치하기 때문에, 지하수위 변동에 의해 지하수가 하수관거 균열부로 유입된다는 개념은 사실상 개연성이 적다고 생각된다. 한 편, 서울 지하철 1~4호선에서 발생하는 유출지하수의 약 22%(2010년 현재 700 만 m^3/yr , 서울메트로, www.seoulmetro.co.kr), 5~8호선의 약 19%(2009년 현재 408 만 m^3/yr , 서울도시철도공사, www.smrt.co.kr)는 강제 배출 후 하수관으로 직접 방류되는 것으로 보고되고 있다. 또한 수원시 물순환관리 기본계획 지하수 현황 조사 보고서(수원시, 2011)에서는 하수관으로 배출되는 유출지하수와 관련하여, 수질이 양호한 유출지하수의 하수관 방류로 인해, 하수처리장에서는 BOD 설계치에 모자라는 지하수가 유입됨에 따라 생물학적 처리 공정에 애로가 발생될 가능성을 지적한 바 있다. 이를 토대로 추론해 보면, 하수관 침입수

는 지하수위 변동에 의한 하수관거 유입 지하수라기보다는, 양수·이용 후 하수관으로 직접 방류되는 지하수(관정 이용 지하수 및 유출지하수)를 비롯하여, 하천수 이용 후 하수관 배수, 홍수방지를 위해 하수관으로 차집된 계곡수 등 다른 요인에 의한 것으로 생각하는 것이 타당할 수 있다. 한편, 강제 지하수 배출 등에 의한 도시지역 지하수위 강하는 도심 소하천으로 지하수의 기저유출을 저해하여 자연적인 지하수 배출을 감소시키기는 원인이 되기도 한다.

3. 연구지역

연구지역은 도시와 농촌의 특성이 공존하는 도농복합지역으로, 행정구역상 용인시의 2개 구청(기흥구 및 수지구), 19개 법정동으로 구성되어 있으며, 수문경계상 1개 소유역(용기지구)을 구성한다. 연구지역은 인근에 위치한 성남시 분당구와 수원시 영통구의 주거기능 포화에 따라 인구가 주변도시로 분산되어 형성된 택지개발지구이다. 연구지역은 용인시 전체 면적(591 km^2)의 약 21%(124 km^2)에 불과하지만 용인시 총인구(854천명)의 약 75%(643천명)가 밀집하여 거주한다(2009년 12월 현재, 국가통계포털, www.kosis.kr). 2009년 12월 현재 연구지역의 총 인구는 약 643천명이었고 평균 인구밀도는 5,196명/ km^2 이다. 도시화 지역인 죽전동, 풍덕천2동 등의 인구밀도는 19,012~27,071명/ km^2 으로 연구지역 평균 인구밀도의 4~6 배를 상회함에 비해, 농촌 지역인 동천동, 신봉동 등은 1,547~3,927명/ km^2 에 그쳐 도농에 따른 인구편차가 크게 나타난다. 토지이용현황을 살펴보면 농경지 약 11%(13.7 km^2), 도시 및 주거지 약 38%(47.1 km^2)로서, 도시화에 따른 유입인구의 증가로 도시화 지역은 매년 확장되는 반면 농경지는 감소하는 추세이다(Fig. 2). 2009년 12월 현재, 자연적인 강우 함양에 불리한 조건인 토지 피복율은 총면적의 38%(47 km^2)이고, 상수도 및 하수도 보급율은 각기 95%, 91%에 이른다. 연구지역 내 사업체는 2009년 12월 현재 20,074 개소가 입지하며 매년 꾸준한 증가 추세를 보인다(국가통계포털, www.kosis.or.kr).

연구지역 내에는 안성천의 제 3지류인 수원천을 비롯한 14개 지방하천이 유하한다. 이 가운데 6개 지방하천은 연구지역 북부에 위치한 한강의 제1지류인 탄천으로 합류하고, 나머지 하천들은 남부에 위치한 기흥저수지로 합류한다. 수원기상대의 최근 10년간 자료에 의하면 연구지역의 연평균 강수량은 1,268 mm, 연평균 기온은 11.6(최난월 29.8°C, 최한월 -7.4°C), 연평균 상대습도는 72.2%이다.

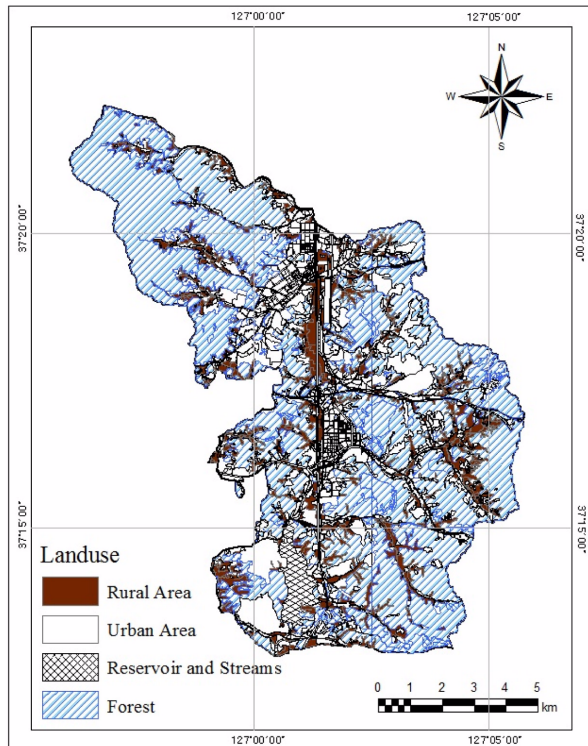


Fig. 2. Landuse map of the study area (11% rural area, 38% urban area).

월별 최고 강수량은 8월에 306 mm이며, 6~9월까지 4개월간 강수의 약 69%(875 mm)가 집중된다. 지형상 100 m 이하 고도 지역이 약 42%, 지형경사 10° 이하 지역이 약 51%로서 저구릉성 지형을 보여 자연적인 지하수 함양에 유리한 조건을 보인다. 수문지질상 지하수 산출성이 ‘소(小)’인 선캠브리아기 경기변성암복합체가 전체면적의 80.4%를 차지하며, 지하수 산출성이 ‘대(大)’인 4기 충적층(18.4%)이 이를 부정함으로 덮고 있다(오인섭과 윤영, 1972; 오인섭과 박석환, 1973).

4. 연구방법

4.1. 함양량 산출 방법

연구지역 지하수 함양량은 크게 강우에 의한 함양량, 도시 기반시설에 의한 함양량(상수도, 하수도) 등 2개 요인으로 구분하여 산출 후, 이들을 합산하여 총 함양량을 산출하였다(Eq. 1, Table 1).

$$\text{용기지구 함양량} = \text{강우에 의한 함양량} + \text{도시 기반시설에 의한 함양량} \quad (1)$$

강우에 의한 지하수 함양량은 지표에 도달한 강우 중, 토양을 침투하여 대수층(포화대)까지 내려가 지하수를 이루는 강우량으로 정의할 수 있고, 일반적인 산출방법은 (Eq. 2)와 같다.

$$\text{강우에 의한 함양량} = \text{지하수 함양율} \times \text{강우량} \times \text{해당지역 면적} \quad (2)$$

강우에 의한 지하수 함양량을 산출하기 위하여, 우선 연구지역 인근의 농촌지역에 위치한 국가지하수관측소(용인 남사 및 용인마평)의 2009년 지하수위 관측자료 및 기상청 강우 자료를 지하수위 강하곡선법(Master Regression Curve)으로 해석하여 강우에 의한 지하수 함양율을 산출하였다. 지하수위 강하곡선법은 국가 지하수관리 기본계획(건설교통부, 2007)에서 채택한 방법으로, 비교적 정확하게 측정된 지하수위 변동 자료만을 이용하여 함양율을 추정하므로 국가지하수관측소 등에서 측정한 장기 수위 관측자료에 적용이 가능하다(구민호와 이대하, 2002). 이 방법은 무강우시 지하수위 최대 강하량과 1개월 강하량의 비율로 정의되는 지하수위 강하율과 지하수 함양율 사이에 직접적인 비례관계가 있음을 기본 개념으로 한다(Eq. 3). 지하수 함양율을 결정하는 변수로는 비례상수 $\delta(C = -1/\ln\delta)$ 를 결정하는 함수값을 들 수 있다. 그런데 이 값은

Table 1. Descriptions of groundwater recharge and discharge sources in the urban-rural composite area

Classification	Source		Occurrence
Recharge	Rainfall		Fields, Forest
	Leakage from public water pipelines	Water-supply pipelines	Urban area
		Sewage pipelines	Urban area
Discharge	Baseflow		Reservoir, Streams
	Well uses		Rural and urban area
	Discharge from underground facilities	Groundwater infiltration into sewage pipelines	Urban area
		Artificial extraction of groundwater to protect underground facilities from submergence	Urban area

개념적인 측면에서 수리지질학적으로 명확하지 않고 물리적인 의미가 없는 한계를 지닌다(구민호와 이대하, 2002). 최병수와 안중기(1998)는 타당한 δ 값을 확보하기 위하여, 우리나라 지하수 함양율이 약 18%라는 가정과 사례지구인 베르네친 유역에 대한 SCS-CN 함양율이 20.2%임을 기준으로, δ 값의 범위(0.005~0.01)를 추정하여 제시한 바 있다. 이에 대하여 조재경(2008)은 SCS-CN에서 산출된 함양율은 엄밀하게는 개념상 지표침투율이고, 이는 불포화대를 지나 지하수면에 도달하는 실제 함양율에 비해 과다 산정되는 값이므로, 실제적으로 권역별 지하수 함양율은 13% 이내일 것이며, 따라서 δ 값을 0.001 이내로 조정해야 한다고 하였다. 이 연구에서는 조재경(2008)의 의견을 토대로 0.001을 적용하였다.

$$\text{함양율}(\alpha) = \frac{S_{30}}{\text{modified } S_m} \times C \quad (3)$$

S_m : 무강우시 지하수위 최대 강하량

S_{30} : 무강우시 월수위 강하량

C : 비례상수

연구지역 지하수 함양량을 산출하기 위해, 지하수위 강하곡선법으로 도출한 지하수 함양율은 토지 피복지를 제외한 내대지(77 km²)에만 적용하였고, 도로·포장지·수체 등(47 km²)에는 강우함양이 발생하지 않은 것으로 가정하여 0%의 함양율을 적용하였다. 강우량은 연구지역 최인근에 위치한 수원기상대의 1973~2010년 관측자료 평균값(1,275 mm/yr)을 적용하였다.

도시 기반시설에 의한 함양량은 연구지역 내 상수도 및 하수도 누수량의 합으로 판단하였다(Eq. 4). 상수도 누수량은 2010년 용인시 상수도 통계(국가통계포털, www.kosis.or.kr) 중 연구지역(수지와 기흥구)에서 발생하는 누수량 자료를 활용하였다. 하수관 누수량은 지자체 해당부서에서 구하기가 어렵거나, 파악조차도 안 된 경우가 대부분이다(조현조와 김준희, 2009). 그런데, 용인시 수질오염총량관리계획 시행계획(안)(2008.05.27 용인시청 보도자료)에 의하면, 연구지역 동쪽에 위치한 용인시 처인구 지역의 하수관거 누수율을 2011년에 11.1% 이하로 한다는 목표가 세워져 있다. 이를 근거로, 연구지역의 하수도 누수량은 연구지역 내 6개 하수처리장에서 발생하는 총 하수량을 88.9%로 정하고, 나머지 약 11.1%를 누수량으로 가정하여 하수도 누수량을 산출하였다.

$$\text{도시 기반시설에 의한 함양량} = \text{상수도 누수량} + \text{하수도 누수량} \quad (4)$$

4.2. 배출량 산출 방법

연구지역 지하수 배출량을 산출하기 위해, 배출요인을 우선 수문순환에 의한 자연배출인 기저유출량, 수자원이 용 목적에 따른 지하수 관정 이용량, 그리고 도시 기반시설에 의한 배출량(하수관 침입수량, 유출지하수량) 등 3개 요인으로 구분하여 산출 후, 이들을 합산하여 연구지역 총 배출량을 산출하였다(Eq. 5, Table 1).

$$\text{용기지구 배출량} = \text{기저유출량} + \text{지하수 관정 이용량} + \text{도시 기반시설에 의한 배출량} \quad (5)$$

연구지역 내 소규모 지류 하천들은 홍수 시 범람을 방지하고자 대부분 하천변에 제방을 설치하였거나 복개를 한 경우가 대부분이다. 따라서 하천바닥으로의 지하수의 기저유출은 기대하기 힘들거나 설사 발생할 지라도 이를 산출하기란 쉽지 않다. 따라서 연구지역의 기저유출은 연구지역 남부의 대규모 수체인 기흥저수지의 기저유출량만을 산출하였다. 기저유출율은 한강유역의 평균 유출율(12.96%)을 적용하였고(이정환 외, 2010), 강우량은 수원기상대의 1973~2010년 관측자료 평균값(1,275 mm/yr)을 이용하였다. 기저유출 발생 면적은 본래 기저부의 면적을 대입해야 하나 대규모 농업용 저수지의 기저부 면적 측정은 어렵기 때문에, 이 연구에서는 기흥저수지의 만수면적이 기저면의 면적과 유사하다고 가정하여 대입하였다(Eq. 6).

$$\text{기저유출량} = \text{기저유출율} \times \text{강우량} \times \text{기저부 면적} \quad (6)$$

지하수 관정 이용량을 산출하기 위하여, 우선 연구지역 내에서 정상이용 중인 총 2,273개 지하수 관정 중 807개 관정에 대하여 2011년 3, 4월에 관정현황조사를 실시하였다. 이 가운데 지역적 대표성을 띄는 60개 관정을 선별하여 유량계 실측을 총 5회(2011년 5, 6, 7, 8, 9월, 매월 말 시행) 실시하였고, 각 관정별로 5개월 간 배출된 지하수 이용량을 산출하였다. 이 후, 용도별(농·어업용, 생활용, 공업용, 기타)로 구분하여 1일 평균 이용량을 산출하였다. 용도별 연간 이용량은 농·어업용 관정의 경우 연간 90일, 이 외의 관정은 365일 이용하는 것으로 가정하여 관정 1개소 당 연간 이용량을 추정하였다(한국농어촌공사 농어촌연구원, 2009). 최종적으로 용도별 연간 이용량을 관정 개소수와 곱하여 각 용도별 총 연간이용량을 산출하였고, 이들을 합산하여 연구지역 내 총 지하수 관정 이용량을 산출하였다(Eq. 7). 이용량 산출 시 행정자료의 폐공과 현장조사결과 밝혀 낸 불용공의 이용량은 제외하였다.

지하수 관정 이용량 = Σ 용도별 연간 이용량(농·어업 용, 생활용, 공업용, 기타) (7)

(용도별 연간 이용량 = 1일 평균이용량 \times 사용일수 \times 관정 개소수)

도시 기반시설에 의한 배출량인 하수관 침입수량은 다음과 같은 방법으로 산출하였다. 용인시 하수도 정비 기본계획 변경 보고서(용인시, 2006)에 의하면, 연구지역의 하수관 침입수량은 일최대 생활오수량원단위의 약 10%에 해당되는 35 L pcd로 산출한 바 있다. 따라서 상기 원단위에 365일을 곱하고 여기에 연구지역 인구수를 곱하여 연구지역에서 발생하는 연간 총 하수관 침입수량을 산출하였다(Eq. 8).

하수관 침입수량 = 일최대 생활오수량원단위의 10% \times 365일 \times 인구 수 (8)

또 다른 도시 기반시설에 의한 배출량인 유출지하수량의 경우 크게 지하철 배출 지하수량과 대형건물·전력구·통신구 배출 지하수량 등으로 나눌 수 있다. 연구지역 내에는 오리-수원 간 복선전철이 2013년 준공을 목표로 건설 중이며, 현재 5개역(지상구간 1개, 지하구간 4개)이 분당선 연장으로 개통되어 있다. 이 가운데 4개 지하구간 역사(보정~기흥역) 인근에서는 지하철 침수방지를 위해 유출지하수를 배출하고 있다. 지하철 유출지하수 자료는 한국철도시설공단에서 용인시 기흥구청에 허가·신고

한 유출지하수량 자료(2011.08 자료)를 적용하였다. 그러나 대형건물 등 기타 유출지하수 자료는 신고조차 하지 않은 경우가 대부분이어서 파악이 힘들었다. 이에 따라 이 연구에서는 유출지하수 자료를 부득이하게 지하철 유출지하수로만 한정하여 산출하였다.

5. 연구결과

5.1. 도농복합지역 지하수 함양량

강우에 의한 지하수 함양량 산출을 위하여, 우선 각 관측소(용인남사 암반(심도 70 m) 및 충적관정(12 m), 용인마평 암반(63 m) 및 충적관정(9.5 m))의 무강우 지속기간 지하수위 자료를 이용하여 지하수위 강하곡선을 작성하여 함양율을 산출하였다. 지하수위 강하곡선 작성 시, 관측 장비 점검이나 기록의 이상으로 판단되는 값은 분석에서 제외하였다. 지하수위 강하곡선을 토대로 추정한 용인남사 암반 및 충적, 용인마평 암반 및 충적 관측소의 함양율은 각 11.9%, 13.7%, 13.9%, 14.3%로 산출되었다(Fig. 3). 최종적으로 연구지역의 함양율은 상기 4개 함양율의 평균인 13.5%로 정하였다. 이렇게 산출된 함양율(13.5%)과 강우자료(1,275 mm/yr), 그리고 내대지 면적(77 km²)을 Eq. 3에 적용한 결과, 강우에 의한 연구지역 지하수 함양량은 약 13,253 천 m³/yr로 산출되었다(Table 2).

도시 기반시설에 의한 함양량 산출을 위해, 우선 연구지역 내 상수도 누수량을 분석하였다(Table 2). 우선 용인

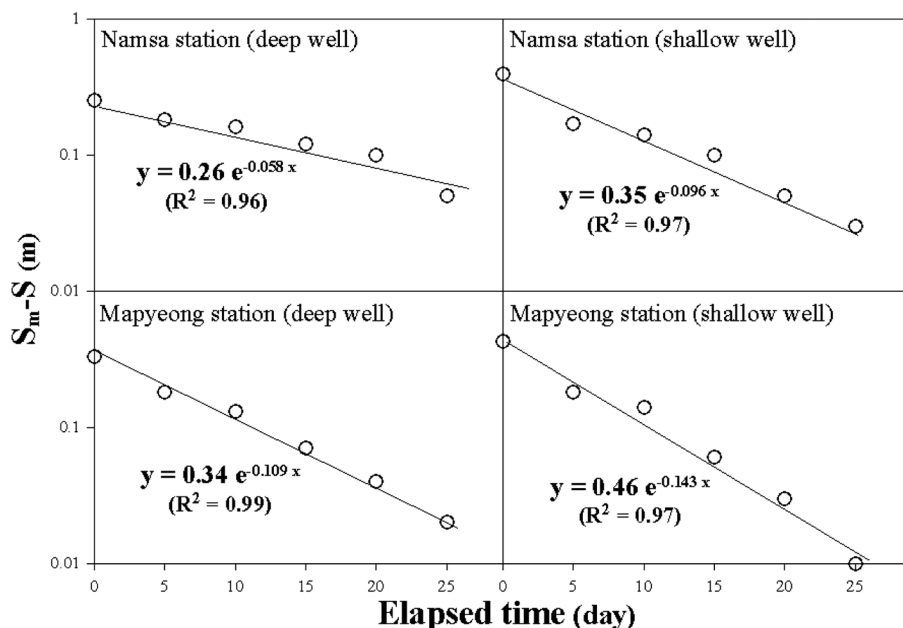


Fig. 3. Master regression curves to identify groundwater recharge rate for the national groundwater monitoring wells.

Table 2. Groundwater budget of the study area

Classification	Source	Amounts (10 ³ m ³ /yr)	Method
Recharge	Rainfall	13,253	· recharge rate × annual rainfall × area
	Water-supply pipelines	3,218	· direct application from leakage amounts data
	Sewage pipelines	5,696	· leakage rate × total sewage amounts
	Subtotal	22,167	
Discharge	Baseflow	382	· discharge rate × rainfall × surface area of reservoir
	Well uses	1,323	· sum of annual well-pumping amounts
	Groundwater infiltration into sewage pipelines	N.D. ¹	· 10% of maximum personnel sewage amount per day × 365 days × population number
	Bundang subway line	714	· direct application from monitored artificial extraction data
	Subtotal	2,419	
Groundwater budget		19,748	

¹ Not determined values due to little amounts able to be measured

시 전체를 살펴보면, 용인시는 급수인구 약 813천명(용인시 인구의 약 95%)에 대하여 90,158 천 m³/yr의 상수를 공급한다. 이 가운데, 최종 수요자에게 도달하지 못하고 관로에서 누수되는 상수도 누수량은 약 4,067 천 m³/yr (4.5%)으로 분석된다. 이러한 통계자료를 토대로 연구지역 급수인구(643천명)에 대한 상수도 누수량을 비례식으로 환산하면 약 3,218 천 m³/yr의 상수가 누수되는 것으로 산출되었다. 그리고 하수도 누수량의 경우, 연구지역 내 6개 하수처리장에서 발생하는 하수량(45,618 천 m³/yr)을 전체 하수량의 88.9%라고 한다면, 누수량은 11.1%인 약 5,696 천 m³/yr에 해당한다(Table 2). 따라서 연구지역 도시 기반시설인 상·하수도 누수에 의한 함양량은 약 8,914 천 m³/yr으로 산출되었다.

종합하면, 연구지역의 강우에 의한 함양량은 약 13,253 천 m³/yr, 도시기반시설에 의한 함양량은 약 8,914 천 m³/yr(상수도 누수량 약 3,218 천 m³/yr, 하수도 누수량 약 5,696 천 m³/yr)으로서, 총 함양량은 약 22,167 천 m³/yr으로 산출되었다. 이 가운데 도시 기반시설에 의한 함양량은 총 함양량의 약 40%에 해당하였다(Fig. 4).

5.2. 도농복합지역 지하수 배출량

연구지역 남부에 위치한 기흥저수지는 농업용수개발사업의 일환으로 1964년에 준공한 제1종 저수지로서, 총저수량 11,659 천 m³, 수해면적 12.3 km²의 규모이며, 용인시 내에서는 이동저수지 다음으로 가장 큰 농업용 저수지이다(한국농어촌공사 농업기반시설관리시스템, <http://10.11.51.231>). 수문순환에 의한 지하수 기저유출량 산출을 위해, 기흥저수지의 만수위 면적 2.312 km², 기저유출

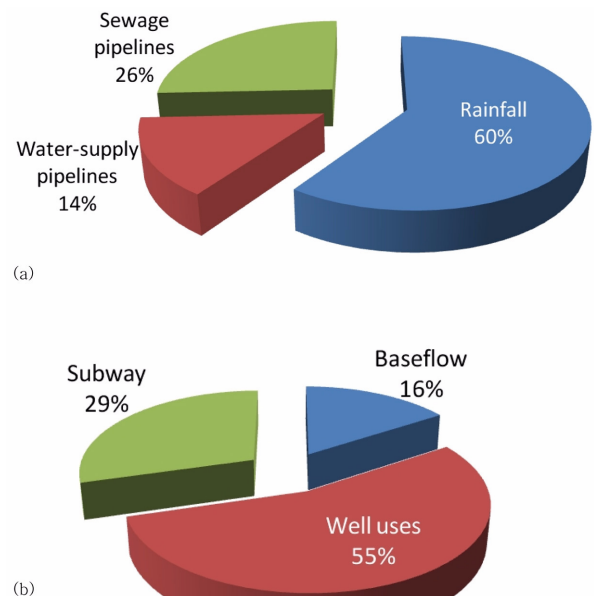


Fig. 4. Interpretation of groundwater recharge and discharge; (a) Recharge, (b) Discharge, In the discharge diagram, groundwater infiltrating amounts into sewage pipeline were excluded.

율 12.96%, 그리고 평균 강우량 1,275 mm/yr을 이용한 결과, 지하수의 기흥저수지로의 기저유출량은 약 382 천 m³/yr으로 산출되었다(Table 2).

연구지역 내 정상이용 중인 지하수 관정은 2011년 3월 현재 2,273공으로, 대부분 생활용 관정(94.6%, 2,150공)으로 이용 중이며, 농·어업용 100공(4.4%), 공업용 19공(0.8%), 기타 4공(0.2%) 순이다. 연구지역 지하수 이용량 산출결과, 총 이용량은 약 1,323 천 m³/yr으로, 생활용 약

Table 3. Groundwater discharge amounts from wells in the study area

Classification		Well numbers	Use ($10^3 \text{ m}^3/\text{yr}$)
Kiheung-gu	Agricultural uses	Farm fields	8
		Paddy fields	18
		Livestock	1
	Domestic uses	Personnel houses	385
		Substitution for tap water	3
		Apartment houses	34
		Commercial uses	615
		Schools	8
	Industrial uses	14	14
	Others	3	5
	Subtotal	1,048	1,092
Suji-gu	Agricultural uses	Farm fields	0.4
		Paddy fields	0.3
		Livestock	0.05
	Domestic uses	Personnel houses	152
		Substitution for tap water	0.3
		Apartment houses	9
		Commercial uses	66
		Schools	0.3
	Industrial uses	5	1
	Others	1	0.3
	Subtotal	1,225	230
Total amounts		2,273	1,323

1,274 천 m^3/yr (96.3%), 농·어업용 약 28 천 m^3/yr (2.1%), 공업용 약 15 천 m^3/yr (1.1%), 기타 약 5 천 m^3/yr (0.4%)로 구분되었다(Table 2, Table 3). 생활용 지하수 이용량은 일반용(목욕탕, 세차장, 수영장, 공원, 도서관 등) 53%(약 681 천 m^3/yr), 가정용 46%(약 538 천 m^3/yr)로서 상기 두 용도가 대부분을 차지하였다. 농·어업용 지하수의 경우, 답작용 65%(약 18 천 m^3/yr), 전작용 31%(약 9 천 m^3/yr), 기타 원예·축산·양어장용 4%(약 1 천 m^3/yr)였다. 행정구역별로 살펴보면, 기흥구 약 1,092 천 m^3/yr (83%), 수지구 약 230 천 m^3/yr (17%)로 기흥구가 수지구보다 지하수 이용량이 많았다. 농·어업용 지하수의 경우, 기흥구 약 27 천 m^3/yr (97%), 수지구 약 1 천 m^3/yr (3%)로 농경지 면적이 상대적으로 넓은 기흥구가 수지구보다 지하수를 많이 이용하였다. 이 연구에서 수행한 유량계 실측방법에 의한 지하수 이용량은 지하수 조사연보(국토해양부, 2010)에 기재된 이용량의 약 1/6 수준이었다. 연구지역처럼 상수도 보급률이 높고 농경지 면적이 도시화에 따라 시간이 지날수록 줄어들어 농어업용 지하수 이용량이 지속적으로 감소되는 지역은 지하수 이용량이

더 적게 나타날 가능성이 있다. 반면, 전적으로 농어촌지역이고, 지하수 의존도가 높은 가평군 가북지구(가평읍 및 북면)에 대하여 동일기간에 동일방법으로 수행한 결과를 살펴보면, 상수도 보급률이 낮고 농지면적이 넓은 가평군은 지하수 의존도가 높아서, 국토해양부 조사연보의 약 9/10에 해당하는, 즉 국토해양부 조사연보와 거의 유사한 양을 사용함을 알 수 있었다(농림수산식품부, 2011). 결과적으로, 가평군의 조사결과와 연결하여 판단해보면, 연구지역의 지하수 이용량이 조사연보 이용량의 1/6 정도로 산출된 것은 타당한 것으로 생각된다.

도시 기반시설에 의한 지하수 배출량 중 하수관 침입수량을 산출하기 위하여 Eq. 8에 연구지역의 인구 수(643천 명)를 대입한 결과, 연구지역 하수관 침입수량은 약 5,696 천 m^3/yr 로 산출되었다(Table 2). 이는 지하수위 변동에 의해 하수관거로 유입되는 지하수량을 의미한다. 그런데 용인시 하수도 정비 기본계획 변경 보고서(용인시, 2006)에 따르면, 연구지역 내에 설치된 하수관거 일부(16,530 m)에 대한 관거 내부 상태 조사 결과, 총 584건의 결함(평균 28.3 m 당 1곳의 결함) 중 지하수에 의한

하수관 침입수가 목격된 것은 단 1건에 불과하였다. 이를 토대로 추정해 보면, 연구지구 내에서 지하수의 하수관 침입은 거의 발생하지 않고, 그 수량 역시 무시할 만큼 적을 것으로 추정된다. 이에 따라, 이 연구에서는 하수관 침입수량을 $0 \text{ m}^3/\text{yr}$ 으로 가정하였다(Table 2). 또 다른 도시 기반시설에 의한 지하수 배출량인 지하철 유출지하수량은 약 714 천 m^3/yr 으로 산출되었다(기흥구청 지하수 행정자료, 2011.08 현재). 연구지역 내 지하철 유출지하수 배수 지점은 3개소로서 보정동, 신갈동, 구갈동 지점에서 위치하며, 각 153 천 m^3/yr , 267 천 m^3/yr , 294 천 m^3/yr 의 지하수를 배출한다. 이렇게 배출된 지하철 유출지하수의 총량은 연구지역 지하수 총 관정이용량의 약 54%에 해당되는 막대한 양이다(Table 2).

종합하면, 연구지역의 기저유출량은 약 382 천 m^3/yr , 지하수 관정이용에 따른 배출량은 약 1,323 천 m^3/yr 로 산출되었으며, 하수관 침입수량은 무시할 만큼 적다고 판단되어 $0 \text{ m}^3/\text{yr}$ 으로 가정하였고, 유출지하수량은 약 714 천 m^3/yr 으로 산출하였다. 이로써 연구지역 총 배출량은 약 2,419 천 m^3/yr 으로 산출되었다. 이 가운데 도시 기반시설에 의한 배출량은 총 배출량의 약 29%에 해당하였다(Fig. 4).

결과적으로 현재까지 연구지역은 함양량이 배출량보다 약 19,748 천 m^3/yr 더 많은 것으로 계산되었다. 그러나 이는 어디까지나 통계 자료와 수식에 근거하여 계산된 값이다. 또한 이 연구에서는 도농복합지역에서 도시기반시설의 영향이 지하수 함양과 배출에 얼마만큼 영향을 주는지를 살펴보기 위한 분석만 수행되었다. 그런데, 지하수는 동적 평형을 이루기 위해 시공간적으로 끊임없이 이동하므로, 이 연구에서 산출한 함양과 배출특성에 향후 광역적으로 지하수 유동 요소를 추가하게 되면, 최종적으로 연구지역에서는 지하수 함양과 배출의 평형을 이룰 것이다.

6. 결론 및 제언

도농복합지역인 경기 용인시 수지·기흥구(용기지구)에 대하여 연간 지하수 함양과 배출 특성을 분석하였다. 최종적으로 지하수 함양량은 약 22,167 천 m^3/yr , 배출량은 약 2,419 천 m^3/yr 로 산출되어서, 지하수 고갈의 우려는 적은 것으로 판단되었다. 그러나 도시 기반시설인 하수관 결함에 따른 하수의 지하수계로의 함양은 지하수 수질을 악화시켜 오히려 음용수 내지 생활용으로 이용 가능한 지하수 수량을 부족하게 만들 수 있다. 그리고 상수관 누수에 따른 지하수 함양은 지하수 수량을 풍부하게 만드는

긍정적인 효과는 있지만, 누수 발생은 곧 상수 생산 및 분배 과정에 투입되는 국가 예산 낭비와 결부되고, 상수도 누수에 의한 지하수 수질의 교란은 학술적으로 해당 지역의 고유한 지하수-토양-미생물 반응 등을 이해하는데 어려움을 초래할 수 있다. 따라서 노후 상·하수관 정비 사업 등으로 청정한 지하수 환경을 보전할 필요가 있다. 그리고 향후 연구지역의 대형건물, 공공 내지 시설 토목 공사장, 전력구·통신구 등에서 발생하는 유출지하수량 자료를 확보하여 배출량에 추가한다면 총 배출량은 분명히 증가할 것이며, 이에 따른 지하수 수량 문제도 발생할 가능성이 있다. 또한 연구지역의 도시화 진행 속도가 더 빨라지게 되어 농경지가 축소되고 도시가 확장된다면, 도시 기반시설에서 배출하는 유출지하수량은 더욱 증가할 것으로 예상되므로, 좀 더 적극적인 지하수 이용량 및 유출지하수 관리가 필요하다.

이 연구에서는 통계 수치만을 활용하여 도농복합지역의 지하수 함양과 배출을 분석하였으므로, 광역적인 지하수 유동이 반영된 종합적인 물수지를 평가하지 못하는 한계가 있다. 따라서, 향후 연구지역 내에 지하수위 관측공을 설치하여 장기 수질·수위 모니터링 분석 등이 이루어지고, 이를 토대로 지하수 유동이 반영된 모델이 구축될 수 있다면 좀 더 정확한 자료산출이 가능할 것이며, 보다 정확한 지하수 물수지 평가가 이루어질 것으로 기대된다. 나아가, 이 연구에서 시행한 방법을 지하수법, 농어촌정비법, 기타 관련 법 및 지자체 조례 등에 의거하여 시행되는 시도 내지 시군 지하수관리계획, 농어촌지하수관리조사, 지하수전수조사, 지하수영향조사 등 각종 지하수 사업 보고서에 해당 지자체의 특성에 적합하게끔 반영하여 활용할 수 있다면, 이는 도농복합지역은 물론 기타 여러 시군의 지하수 수량 평가를 좀 더 정밀하게 하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 기대한다.

사 사

이 연구는 농림수산식품부 지하수자원관리사업의 연구비 지원으로 수행되었다. 건설적인 심사평을 주신 강원대학교 이진용 교수님과 두 분의 익명의 심사위원님, 그리고 서울대학교 공학연구소의 기술적 지원에도 감사드린다.

참 고 문 헌

건설교통부, 2007, 지하수관리 기본계획, p. 149.
구민호, 이대하, 2002, 지하수위 변동법에 의한 지하수 함양량 산

- 정의 수치해석적 분석, *지질학회지*, **38**(3), 407-420.
- 구민호, 이진용, 박광일, 2006, 택지사업지구내 지하수의 지속적 활용 사례 및 조사기법 연구, *군환경보전학술대회*, 국방부군사시설국.
- 농림수산식품부, 한국농어촌공사, 2011, 가북지구 농촌지하수관리 보고서, p. 227.
- 수원시, 2011, 수원시 물순환 관리 기본계획 지하수 현황 조사 보고서, p. 373.
- 오인섭, 박석환, 1973, 국립지질광물연구소-오산 지질도(1:50,000)
- 오인섭, 윤운영, 1972, 국립지질조사소-수원 지질도(1:50,000)
- 용인시, 2006, 용인시 하수도 정비 기본계획 변경 보고서
- 원종석, 우남철, 김윤중, 2004, 도시화 지역에서 GIS를 이용한 지하수 질산성질소 분포 영향요인 분석, *자원환경지질*, **37**(6), 647-655.
- 이인호, 조병옥, 이병대, 성익환, 임용수, 2002, 광주광역시 지하수의 수리지화학적 특성 연구, *지하수토양환경*, **7**(3), 115-132.
- 이정환, 함세영, 정재열, 정재형, 박삼규, 김남훈, 김규범, 2010, 가흥터널 건설에 따른 지하수 변화 수치모델링, *지질공학*, **20**(4), 449-459.
- 이진용, 구민호, 2007, 도시화가 지하수에 미치는 영향 및 도시지역 지하수 문제 고찰, *지질학회지*, **43**(4), 517-528.
- 이평구, 박성원, 전치완, 신성천, 2001, 서울시 도로변 빗물과 지하수의 VOCs 오염, *지하수토양환경*, **6**(3), 73-91.
- 정상용, 2010, 서울시 지하철 유출지하수에 의한 지하수 장애와 대책, *지질학회지*, **46**(1), 61-72.
- 조재경, 2008, 지하수 함양량 산정법의 구분과 적용성 검토, UN이 정한 지구의 해 선포식 및 지구과학 한마당 논문집.
- 조현조, 김준모, 2009, 한국 부산광역시 수영구 지역 해안 대수층 내의 지하수 유동 및 염분 이동에 대한 도시화의 영향 삼차원 수치 모의, *지하수토양환경*, **14**(6), 1-18.
- 최병수, 안중기, 1998, 지역단위 지하수 자연함양률 산정방법 연구, *지하수환경*, **5**(2), 57-65.
- 한국농어촌공사 농어촌연구원, 2009, 농촌지하수 표준이용량 산정기법 연구, p. 106.
- 환경부, 2008, 하수관거 침입수 및 유입수 산정 표준 매뉴얼, p. 78.
- Fetter, C.W., 2001, *Applied Hydrogeology*, 4th edition. Prentice Hall. New Jersey.
- Foster, S., Lawrence, A., and Morris, B., 1998, Groundwater in urban development: assessing management needs and formulating policy strategies. Technical paper no. 390, The World Bank, Washington, D.C., p. 55.
- Geake, A.K., Foster, S.S.D., Nakamatsu, N., Valenzuela, C.F., and Valeverde, M.L., 1986, Groundwater recharge and pollution mechanisms in urban aquifers of arid regions. BGS hydrology research report 86/11, British Geology Survey, Wallingford, U.K.
- Kim, Y.Y., Lee, K.K., and Sung, I.H., 2001, Urbanization and the groundwater budget, metropolitan Seoul area, Korea, *Hydrogeol. J.*, **9**, 401-412.
- Lawrence, A.R., Morris, B.L., and Foster, S.S.D., 1998, Hazards induced by groundwater under rapid urbanization, *Geol. Soc. Eng. Geol. Sp.*, **15**, 319-328.
- Lee, J.Y., Choi, M.J., Kim, Y.Y., and Lee, K.K., 2005, Evaluation of hydrologic data obtained from a local groundwater monitoring network in metropolitan city, Korea, *Hydrol. Process.*, **19**, 2525-2537.
- Lee, J.Y., Yi, M.J., Moon, S.H., Cho, M., Won, J.H., Ahn, K.H. and Lee, J.M., 2007, Causes of the changes in groundwater levels at Daegu, Korea: the effect of subway excavation, *B. Eng. Geol. Environ.*, **66**, 251-258.
- Morris, B.L., Lawrence, A.R., and Foster, S.S.D., 1997, Sustainable groundwater management for fast-growing cities: mission achievable or mission impossible? In: Chilton, J. (ed.), *Proceedings of the XXVII IAH Congress on Groundwater in the Urban Environment*, Balkema, Rotterdam, 1-14.
- Otto, B., Ransel, K., Todd, J., Lovaas, D., Stutzman, H., and Baily, J., 2002, Paving our way to water shortages: how sprawl aggravates the effects of drought. American Rivers, Natural Resources Defense Council, Smart Growth America, Washington, p. 31.
- Slonecker, E.T., Jennings, D.B., and Garofalo, D., 2001, Remote sensing of impervious surfaces: a review, *Remote Sensing Review*, **20**, 227-255.
- Vázquez-Sunñé, 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, *Hydrogeol. J.*, **13**(3), 522-533.
- Yang, Y., Lerner, D.N., Barrett, M.H., and Tellam, J.H., 1999, Quantification of groundwater recharge in the city of Nottingham, UK, *Environ. Geol.*, **38**(3), 183-198.