인공구조물에 의한 하천 주변지역 지하수 시스템 변화의 수치 해석

이정환¹ · 함세영^{2*} · 이충모² · 이종진³ · 김형수⁴ · 김규범⁵

¹한국방사성폐기물관리공단 기술개발센터, ²부산대학교 지구환경시스템학부,

³한국수자원공사 조사기획처, ⁴중원대학교 에너지자원공학부, ⁵한국수자원공사 K-water연구원

Numerical Simulation of Groundwater System Change in a Riverside Area due to the Construction of an Artificial Structure

Jeong-Hwan Lee¹, Se-Yeong Hamm^{2*}, Chung-Mo Lee², Jong-jin Lee³,
Hyoung-Soo Kim⁴, and Gyoo-Bum Kim⁵

¹Technology Development Center, Korea Radioactive Waste Management Corporation

²Division of Earth Environmental System, Pusan National University

³Water Resources Investigation & Planning Dept., Korea Water Resources Corporation

⁴Department of Energy Resources Engineering, Jungwon University

⁵K-Water Institute, Korea Water Resources Corporation

본 연구는 지하수 수치 모델링을 통하여 인공 구조물 건설에 따른 하천주변 지역의 지하수 환경 변화를 평가하였다. 하성충적층의 지하수위는 강우 사건보다는 하천수위의 계절적인 변동에 민감하게 반응하며, 이것은 지하수가 하상퇴적층을 통해 하천수와 직접적으로 연결되어 있기 때문이다. 한편, 부정류 모델링 결과, 지하수위는 하성충적층 내부 저지대에 위치하는 독산의 남쪽과 동쪽 지역, 덩밀산 동쪽 지역에서 상승되고 있으며, 지하수위 상승폭은 6 m 이내로 평가되었다.

주요어 : 수치 모델링, 인공구조물, 하성충적층, 하상퇴적층, 지하수위

We performed numerical modeling to estimate the groundwater level around a riverside area following the construction of an artificial structure. The groundwater level of the alluvial deposit responded more rapidly to the river water level than to the rainfall event itself, indicating that the groundwater and river water are directly interrelated through the riverbed. Furthermore, transient modeling showed raised groundwater levels at the southern part of Mt. Dok and the eastern part of Mt. Dummit in an area of low plains. The artificial structure caused a rise in groundwater level of up to approximately 6 m.

Key words : numerical modeling, artificial structure, alluvial deposit, riverbed, groundwater

서 론

최근 수자원의 다변화에 따라 지하수와 하천수를 서로 연결된 단일 수자원으로 인식하는 경향성이 점점 높아지고 있으며(Winter et al., 1998; Winter, 1999; Kim et al., 2006a; Lee, 2012), 특히 하천 주변에서는 지하수와 하천수 중에서 어느 한쪽의 물리적 및 화학적 변화는 다른 한쪽에 직접적인 영향을 주게 된다. 이에

따라 하천 주변 대수층의 지하수와 하천수의 상호 연계성 연구가 수자원의 통합적 관리 차원에서 중요하게 대두되었다(Hamm et al., 2011). 지하수와 하천수의 상호 연계성 연구에서는 하성충적층의 형성 메커니즘, 오염물질의 이동 경로 파악, 지하수 유동시스템 분석, 물수지 분석, 유역 유황 분석 등이 중요하다(Kim et al., 2003; Hamm et al., 2005; Choi et al., 2007; Shin et al., 2007; Yun et al., 2009; Hwang et al., 2010; Oh et

*Corresponding author: hsy@pusan.ac.kr

al., 2010; Jeon and Kim 2011; Kang et al., 2011). 관련분야의 연구로는 하성충적층 주변의 지하수와 하천수의 연계 해석을 위한 수리지질학적 연구(Rossi et al., 1994; Woessner et al., 1998; Woessner, 2000; Alley et al., 2002; Hamm et al., 2002; Mayer et al., 2002; Cheong et al., 2003; Ha et al., 2006; Kim et al., 2006b; Cheong et al., 2008; Jeong and Kim, 2008; Kim et al., 2008), 지하수 수치모델링(Anderson, 2003; Hamm et al., 2004; Won et al., 2006; Kim, 2008; Kim and Jeong, 2009; Lee et al., 2010; Chung et al., 2011), 수질 오염 특성(Oh et al., 2002; Kang et al., 2006; Jeong and Moon, 2009; Park et al., 2009; Hwang et al., 2010; Choe et al., 2011), 지구화학적 특성 연구(Linderfelt and Turner, 2001; Oxtobee and Novakowski, 2002; Kim et al., 2003; Negrel et al., 2003; Hyun et al., 2006; Choi et al., 2007; Bower et al., 2009; Kim and Nam, 2009; Lee et al., 2009a; Burt et al., 2011) 등이 수행되었다. 아울러서 지하수와 하천수의 상호 작용은 하천 주변 대수층의 다양한 수리지질학적 경계 조건들에 의해서도 좌우된다(Anderson, 2005). 하상에 인공구조물이 건설되면, 이로 인해서 주변 대수층의 경계 조건이 변화되어 지하

수와 하천수의 물리적 거동에 변화를 초래하게 될 것이다(Graf, 2006). 기존 연구들은 주로 하천 주변에 분포되는 하성충적층과 하천 사이의 경계부에서 관측된 자료를 바탕으로 한 것으로서, 강을 가로지르는 인공구조물의 건설에 따른 하성충적층의 지하수위와 하천수위의 동시 변동 특성에 대한 연구는 거의 수행되지 않았다(Oh et al., 2007).

본 연구는 낙동강의 하성충적층 및 하상퇴적층의 수리지질, 지하수위 변동 특성, 낙동강 본류의 수위 및 유출량 자료를 이용하여 하상의 인공구조물 건설에 따른 낙동강 주변 지역의 지하수 환경 변화와 지하수 영향 범위를 수치 모델링을 통하여 평가하고자 하였다.

지형 및 지질

낙동강은 대한민국에서 가장 긴 유로(유로 연장 약 521 km)를 가지는 대하천으로서, 약 600만 명의 주민들에게 취수원을 제공한다(Kang, 2009). 그러나, 낙동강 유역의 산업 발달 및 강 주변의 개발에 따라 복잡하고 다양한 환경오염물질이 유입되고 있으며, 느린 유속 때문에 계절에 따라 정체되는 호소형 하천의 특성을 나타낸다(Choe et al., 2011).

Fig. 1. Location of the study area.

Fig. 2. Geological map of the study area (modified from Kim and Lee, 1969).

연구지역은 경상남도 합천군 덕곡면 일원으로서, 동경 128°20'19" ~ 128°21'48", 북위 35°36'21" ~ 35°38'42"에 속한다. 연구지역내에는 북에서 남으로 회천이 흐르고, 북서쪽에서 남동쪽으로 덕곡천이 흐르고 있으며, 연구지역의 남쪽 경계부에는 낙동강 본류가 동에서 서로 흐른다(Fig. 1). 연구지역의 지형은 전체적으로 서고동저형으로서, 연구지역 중앙에는 뚝밀산(해발 105.3 m)과 독산(해발 78.3 m)이 위치하고 있으며 독산을 기준으로 서쪽에는 산지가 그리고 동쪽에는 평야지대가 발달하고 있다.

연구지역의 층서는 하부에서 상부로 백악기 경상누층군의 진주층, 칠곡층, 신라역암층, 함안층으로 구성되며, 이들을 피복하는 제4기 충적층(대체로 미고결 하도퇴적물)이 낙동강 본류, 회천, 그리고 덕곡천 주변에 주로 분포하고 있다(Kim and Lee, 1969). 진주층은 회색~녹회색의 사암 내지 셰일, 암회색의 셰일, 갈색의 역질사암으로 구성되며, 부분적으로 석회암과 이암이 협재되기도 한다. 칠곡층은 자색의 셰일 및 이암을 협재하고 있으며, 녹회색, 암회색, 회갈색 사암과 회색, 암회색, 셰일 내지 사질셰일로 주로 구성되며, 석회암 결핵체를 포함한다. 신라역암층은 자색 또는 회갈색의 역암에서 사질역암으로 주로 구성되어 있고, 실트암과 석회암 결핵체가 협재된다. 신라역암 상위에 정합적으로 놓이는 함안층은 자색의 셰일 내지 사질셰일, 녹회색 사암, 이암, 실트스톤으로 구성된다(Fig. 2).

연구방법

지하수 수치모델링

직교좌표계에서 불균질 이방성 다공질 포화매체 내에서의 3차원 부정류 지배식은

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) \pm W(x, y, z, t) = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

과 같다(Fetter, 2001). h 는 수두(L), K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} 는 각각 x , y , z 방향의 수리전도도(L/T), S_s 는 비저류계수(1/L), W 는 영역내부의 공급원과 배출원(1/L), 그리고 t 는 시간(T)이다.

수치해석은 위의 지하수 흐름식을 근사식으로 바꾸어서 해석하는 것이다. 수치해석 방법은 불규칙하고 복잡한 대수층에 대해서 공간적인 수리적 특성을 고려할 수 있으며 대상 영역내에서 임의의 지점에서 지하수위를 정확하게 계산할 수 있다. 일반적으로 지하수 유동과 오염물질 거동현상을 규명하기 위해 적용되는 수치방법으로는 유한차분법(Finite Difference Method, FDM), 유한요소법(Finite Element Method, FEM), 경계요소법(Boundary Element Method, BEM), 해석요소법(Analytic Element Method, AEM), 특성법(Method of Characteristics, MOC) 등이 있다(Hahn, 1998). 본 연구에서는 지하수 유동식의 유한차분 근사식(Wang and Anderson, 1995; Hahn, 1998)을 이용한 3차원 지하수

유동 모델인 Visual MODFLOW (ver. 4.3)을 적용하였다. MODFLOW는 다공질 포화매체 내에서 지하수흐름을 모사하는 프로그램으로 유체의 흐름은 층상흐름이며, 유체의 온도와 밀도는 일정하다고 가정한다(McDonald and Harbough, 1988).

결과 및 고찰

수리지질특성 분석

하상퇴적층의 발달 상태 및 수리지질 특성을 규명하기 위해서 낙동강 본류 울지교 지역에 대해 총 24개 시추공 자료를 이용하여 분석하였다(Korea Water Resources Corporation, 2010). 시추 자료에 의하면, 최상부는 점토 섞인 실트질 물질로 주로 구성되며, 매우 연약~보통 조밀한 상대밀도를 가지며 암갈색 내지 담회색을 나타낸다. 그 아래는 주로 황갈색을 띠는 세립 내지 중립질 모래로 구성되며, 매우 느슨~느슨한 상대밀도를 나타낸다. 그 아래에는 주로 황갈색을 띠는 중립질 모래가 섞인 자갈로 주로 구성되며, 보통 조밀~매우 조밀한 상대밀도로 분포하고 있다. 맨 밑에는 절리와 단열들에 의해 파쇄된 기반암이 분포하고 있으며 보통 풍화내지 심한 풍화상태를 나타내고 있다. 하상퇴적층의 입도는 지표에서 하부로 갈수록 커지고 있다. 각 층의 두께는 낙동강 유수에 의해서 공간적으로 상당히 불균질하지만, 총 두께는 약 25 m 내외인 것으로 판단된다. 수리지질 층서는 지표로부터 1층은 실트층(두께 약 3 m), 2층은 중립질 모래층(두께 약 12 m), 3층은 모래자갈층(두께 약 8 m)으로 구성된다(Table 1).

연구지역내 농경지 하성충적층의 분포 특성 및 수리지질 특성을 낙동강 하천 개수공사 자료(Ministry of Construction & Transportation, 2003)와 신규 굴착공 8

개소 자료(W-1~W-4, OB-1~OB-4)로 분석하였다(Fig. 1). 최상부는 주로 실트질 점토와 세립질 모래로 구성되며 보통의 상대밀도를 가지고 있다. 그 아래는 실트질 모래에서 조립질 모래로 주로 구성되어 있으며, 상대밀도가 매우 느슨한 상태였다. 그 아래에는 중립 내지 조립질의 모래와 자갈이 혼합되어 분포하며, 상대밀도가 매우 조밀하였다. 맨 아래 기반암은 퇴적암의 풍화대로 구성되어 있으며, 절리와 단열의 발달이 우세한 심한 풍화상태를 보인다. 따라서 하성충적층의 입도는 지표에서 하부로 갈수록 입자의 커지고 있다. 각 층별 두께는 낙동강 유수에 의해서 공간적으로 상당히 불균질하게 분포하지만 총 두께는 약 20 m 내외인 것으로 판단된다. 따라서 수리지질 층서는 지표로부터 1층은 점토층(두께 약 10 m), 2층은 중립질 모래층(두께 약 4 m), 3층은 모래자갈층(두께 약 6 m)으로 구성된다(Table 1).

수리수문학적 특성

2011년 1월 1일부터 2011년 7월 2일까지 하성충적층의 지하수위, 낙동강 본류의 하천수위, 강우량 자료들을 분석하였다(Fig. 3). 연구지역의 낙동강 본류의 하천수위는 이방관측소(경남 창원군 이방면 장천리 울지교)에서 관측된 자료를 이용하였으며, 낙동강홍수통제소로부터 적포교 강우량 자료를 제공받아 분석하였다(<http://www.nakdongriver.go.kr>). 낙동강 본류의 평균 하천수위는 3.66 m이며, 최고 수위는 10.8 m, 최저 수위는 3.01 m로서(변동폭 7.78 m), 하천수위의 계절적인 변동이 뚜렷이 나타났다. 하성충적층의 지하수위는 A호공에서 평균 약 5.23 m이며, 최대 수위는 9.42 m, 최저 수위는 2.75 m이다. 지하수위는 1월부터 4월까지의 감소하는 경향성을 보이다가 5월초부터 증가하였다. 평상시에는 낙동강 본류의 수위가 하성충적층의 지하수위보

Table 1. Geology of the study area based on borehole data.

(unit: m)

Riverbed	Silt layer	Medium sand layer	Sand/Gravel layer	Bedrock layer
Max.	4.50	24.0	12.9	18.4
Min.	1.50	2.50	1.00	3.00
Mean	3.00	12.0	6.25	8.18
Alluvial deposit	Clay layer	Medium sand layer	Sand/Gravel layer	Bedrock layer
Max.	18.5	11.8	19.7	5.10
Min.	0.00	0.00	1.00	0.00
Mean	10.6	4.02	6.52	1.40

Fig. 3. Fluctuations in groundwater level, river water level, and rainfall in the study area.

다 낮기 때문에, 지하수가 하천으로 유출되는 이득하천을 보이지만, 집중호우에 따른 낙동강 본류의 급격한 수위 상승으로 인해 강의 수위가 하성충적층 지하수위보다 더 높게 되면 손실하천을 보인다. 따라서 하성충적층은 낙동강 본류의 계절적인 수위 변동에 의한 제방저류 효과(bank storage effect)를 가지고 있는 것으로 판단된다(Chen et al., 2006). 또한 하성충적층의 지하수위는 강우량의 변동 자체보다는 낙동강 본류의 수위 변동에 보다 민감하게 반응하였다(Fig. 3). 이는 하성충적층의 지하수위가 강우 사건에 의한 지표 침투보다, 낙동강 본류의 수위 상승에 따라서 주 대수층(모래자갈층)을 통한 하천수 유입에 의한 영향을 더 크게 받고 있음을 지시한다(Cheong et al., 2003; Ha et al., 2006; Lee et al., 2009b).

수리적 특성

수압시험, 양수시험을 실시하여 연구지역의 수리적 특성(수리전도도, 저류계수)을 평가하였다. 하상퇴적층의 총 23개 시추공에서 산정한 수리전도도(K)는 (Table 2),

1층의 실트층은 $2.43 \times 10^{-8} \sim 4.23 \times 10^{-5} \text{ m/sec}$ 이고, 기하평균값은 $3.72 \times 10^{-6} \text{ m/sec}$ 로서, 이는 실트질 모래($1.00 \times 10^{-7} \sim 1.00 \times 10^{-4} \text{ m/sec}$)에 해당한다(Fetter, 2001; Todd and Mays, 2005). 2층의 중립질 모래층은 $9.97 \times 10^{-8} \sim 2.79 \times 10^{-5} \text{ m/sec}$ 이고 기하평균값은 $4.11 \times 10^{-6} \text{ m/sec}$ 이다. 3층의 모래자갈층은 $3.56 \times 10^{-6} \sim 1.23 \times 10^{-4} \text{ m/sec}$ 이고 기하평균값은 $1.90 \times 10^{-5} \text{ m/sec}$ 이다. 그리고 4층인 기반암층은 $1.21 \times 10^{-6} \sim 1.77 \times 10^{-4} \text{ m/sec}$ 이고 기하평균값은 $3.27 \times 10^{-6} \text{ m/sec}$ 이다. 한편, 양수시험으로 결정된 저류계수(S)는 7.40×10^{-3} 이다.

하성충적층의 경우, 1층인 점토층의 수리전도도는 $5.29 \times 10^{-8} \sim 4.28 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$, 기하평균값은 $9.45 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$ 이었다. 2층인 중립질 모래층의 수리전도도는 $1.65 \times 10^{-5} \sim 8.87 \times 10^{-5} \text{ m/sec}$, 기하평균값은 $4.18 \times 10^{-5} \text{ m/sec}$ 이었다. 3층인 모래자갈층의 수리전도도는 $1.75 \times 10^{-4} \sim 4.80 \times 10^{-4} \text{ m/sec}$, 기하평균값은 $3.23 \times 10^{-4} \text{ m/sec}$ 이었다. 4층(기반암층)의 수리전도도는 $4.68 \times 10^{-7} \sim 5.04 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ 이었고 기하평균값은 $4.86 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ 이었다 (Table 2).

Table 2. Hydraulic conductivities in the study area.

(unit: m/sec)

Riverbed	Silt layer	Medium sand layer	Sand/Gravel layer	Bedrock layer
Max.	4.23×10^{-5}	2.79×10^{-5}	1.23×10^{-4}	1.77×10^{-4}
Min.	2.43×10^{-8}	9.97×10^{-8}	3.56×10^{-6}	1.21×10^{-6}
Geo. mean	3.72×10^{-6}	4.11×10^{-6}	1.90×10^{-5}	3.27×10^{-6}
Alluvial deposit	Clay layer	Medium sand layer	Sand/Gravel layer	Bedrock layer
Max.	4.28×10^{-7}	8.87×10^{-5}	4.80×10^{-4}	5.04×10^{-7}
Min.	5.29×10^{-8}	1.65×10^{-5}	1.75×10^{-4}	4.68×10^{-7}
Geo. mean	9.45×10^{-8}	4.18×10^{-5}	3.23×10^{-4}	4.86×10^{-7}

배수 특성 분석

농경 배수로의 재질, 배수로의 습윤 상태, 유공관 설치 유무, 설치된 유공관의 개수 및 간격, 유공관의 유출량 등을 조사하여 연구지역의 배수 체계를 분석하였다. 주 배수로에 설치된 유공관에서 실측된 배출량은 $583 \sim 928 \text{ m}^3/\text{day}$ 로서, 평균값은 약 $740 \text{ m}^3/\text{day}$ 이었다. 한편, 연구지역 남쪽에 위치하는 덕곡 배수장에서는 집수된 물을 덕곡천으로 배출시키고 있는데(Fig. 1), 이 배출지점의 총 배수량을 Manning 식을 이용하여 계산하였다(Fetter, 2001). 덕곡 배수장에서 유출되는 배수량은 약 $892 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 산정되었으며 이는 유공관의 현장 실측치 범위에 포함되므로, 연구지역의 갈수기에 배수되는 유출량은 약 $900 \text{ m}^3/\text{day}$ 내외로 판단된다. 하성충적층의 지하수위가 지표 아래 3 m 이상에 위치하고 있음에도 불구하고 배수로의 유공관에서 물이 배출되고 있다는 것은 지하수 관정에서 양수된 지하수가 하성충적층에 공급되고 다시 유공관을 통해서 유출되는 것으로 판단된다. 평가된 배수로의 유출량은 지하수 수치 모델링에서 배수경계의 유출량의 보정자료로 활용하였다.

지하수 이용량 분석

하성충적층의 지하수위 변동 특성은 연구지역내에 분포하는 지하수 이용량에도 영향을 받는다(Freeze and Cherry, 1979; Cheong et al., 2003). 연구지역내에는 신고 관정 65개소(<http://www.gims.go.kr>)와 야외조사로부터 확인된 46개소를 포함하여 총 111개소의 지하수 관정이 분포하고 있다. 지하수 관정 중 농업용 관정 84개소의 지하수 이용량은 $15 \sim 130 \text{ m}^3/\text{day}$ (평균 $71.9 \text{ m}^3/\text{day}$)이고, 생활용 관정 27개소의 지하수 이용량은 $2 \sim 27 \text{ m}^3/\text{day}$ (평균 $6.16 \text{ m}^3/\text{day}$)이다. 지하수 관정의 이용량은 지하수 수치 모델링에서 배출원으로 적용하였다.

지하수 함양량 산정

연구지역에서 가장 가까이 위치하는 적포교의 지하수 함양율은 12.25%이다(Ministry of Construction & Transportation, 2007). 적포교의 2004~2009년 강우 관측소자료에 의하면 연평균 강우량은 1,112 mm이다(Ministry of Construction & Transportation, 2004, 2005, 2006; Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2007, 2008, 2009). 따라서 연간 지하수 함양량은 $136.3 \text{ mm}(=1,112 \text{ mm} \times 12.25\%)$ 이다. 그리고, 분기별 지하수 함양량은 1분기(1월~3월) 49.5 mm/yr, 2분기(4월~6월) 159.7 mm/yr, 3분기(7월~9월) 302.6 mm/yr, 4분기(10월~12월) 33.2 mm/yr이다. 위에서 계산된 분기별 지하수 함양량을 지하수 모델링에 적용하였다.

지하수 수치 모델링

모델 구성

지하수 모델 영역은 약 50.5 km^2 (가로 $5.8 \text{ km} \times$ 세로 8.7 km)로서, 수평 격자수는 총 249,001개(499×499 개)이고 수직 격자는 총 7개로 구성하였다(Fig. 4). 수평 격자는 3개의 지역(하상퇴적층(riverbed), 하성충적층(alluvial deposit), 산지지역(mountain area))으로 세분하였으며, 수평 격자의 크기는 하상퇴적층과 하성충적층 지역은 $5 \times 5 \text{ m}$, 산지지역은 좀 더 넓은 $30 \times 30 \text{ m}$ 로 구성하였다. 수직 격자는 시추 자료를 바탕으로 구분하였으며, 하상퇴적층은 지표로부터 실트층(1격자), 중립질 모래층(2격자), 모래자갈층(3격자), 기반암층(4~7격자)으로, 하성충적층은 점토층(1격자), 중립질 모래층(2격자), 모래자갈층(3격자), 기반암층(4~7격자)으로 구분하였으며, 산지지역은 토양층(1격자)과 기반암층(2~7격자)으로 구분하였다. 기반암층은 다른 층들보다 두껍기 때문에, 수

Fig. 4. Model area and model grids.

치 모델링에서 발산을 방지하기 위해 3개의 격자로 이산화하였다. 그리고 수직 격자의 1층의 높이는 10 m, 2층의 높이는 7 m, 3층의 높이는 5 m, 4-6층은 7 m, 7층은 19 m로 하였다. 수리지질경계는 산지 분수령은 모두 무흐름경계로 설정하였고, 낙동강 본류, 회천, 덕곡천은 하천경계, 학동저수지, 장천아랫늪, 준전못 등의 저수지들은 일정수두경계로 설정하였다.

정상류 모델링

정상류 모델링은 부정류 모델링을 수행하기 이전에 실시되었으며, 연구지역의 자연적인 평형 상태의 지하수위 분포를 모사하기 위한 것이다. 정상류 모델링에서는 관측된 자연수위와 계산된 지하수위 값을 일치시키는 모델 보정(model calibration)을 실시하였다. 모델 보정을 위해서는 경계조건, 수리전도도, 지하수 함양량 등을 바꾸어 가면서 시행착오법을 이용하여 보정하였다. 모델 보정에는 지하수 관측공 16개소(OB-1~OB-4, W-1~W-4, A, B, C, BH-1~BH-5)와 낙동강 본류 및 지류인 회천, 덕곡천의 하천수위를 2011년 3월 22일에 동시 측정한 값을 이용하였다. 모델 보정으로 결정된 수리전도도(K)와 비저류계수(S_s)는 Table 3과 같다. 지하수 모델링과 수압시험에서 결정된 수리전도도를 비교해 보면, 지하수 모델 보정에 의한 K 가 수압시험에 의한 K 값보다 하상퇴적층의 중립질 모래층과 모래자갈층에서 약 200배 더 크다. 이는 하상 시추와 현장시험의 제약성 그리고 규모의 효과 때문으로 판단된다 (Schulze-Makuch et al., 1999). 모델 보정에 의하면, 제곱근 평균제곱오차는 0.467 m이고, 결정계수(r^2)는 0.95로서 관측공 16개소에서 관측수위와 계산된 수위가 비교적 잘 일치하고 있다(Fig. 5). 한편, 정상류 모델링에 의한 등수위선도에 따르면, 지하수는 서쪽의 고지대부터 토양층과 기반암층을 거쳐 덕곡천, 회천과 낙동강 본류로 배출되고 있다(Fig. 6). 지하수 유속은 대체로 낙동강에 가까울수록 빨라지는 경향성을 보이거나 위치에 따라 유속이 다르게 나타난다. 이는 하상퇴적층과 하성층적층의 투수성이 공간적으로 불균질하기 때문이다.

Table 3. Hydraulic properties of the model layers.

Layer	Grid	Riverbed		Alluvial deposit		Mountain area	
		K (m/sec)	S_s (m^{-1})	K (m/sec)	S_s (m^{-1})	K (m/sec)	S_s (m^{-1})
1	1	9.89×10^{-5}	7.41×10^{-6}	9.63×10^{-6}	5.36×10^{-6}	5.61×10^{-6}	5.36×10^{-6}
2	2	9.89×10^{-4}	3.60×10^{-6}	9.84×10^{-5}	3.91×10^{-6}	9.84×10^{-8}	3.91×10^{-6}
3	3	7.60×10^{-3}	3.91×10^{-6}	9.84×10^{-4}	3.10×10^{-6}	6.84×10^{-8}	3.10×10^{-6}
4	4	5.84×10^{-8}	5.33×10^{-6}	5.84×10^{-8}	5.33×10^{-6}	5.84×10^{-8}	5.33×10^{-6}
	5	4.74×10^{-8}	5.33×10^{-6}	4.74×10^{-8}	5.33×10^{-6}	4.74×10^{-8}	5.33×10^{-6}
	6	3.64×10^{-8}	5.33×10^{-6}	3.64×10^{-8}	5.33×10^{-6}	3.64×10^{-8}	5.33×10^{-6}
	7	2.54×10^{-8}	5.33×10^{-6}	2.54×10^{-8}	5.33×10^{-6}	2.54×10^{-8}	5.33×10^{-6}

Fig. 5. Observed vs. calculated head.

Fig. 6. Groundwater contours obtained from a steady-state simulation.

부정류 모델링

연구지역의 낙동강 본류에 건설된 인공구조물에 의해서 변화된 하천수위가 주변 지역의 지하수에 미치는 영

Fig. 7. Rise in groundwater level after the transient simulation.

향을 평가하기 위해 부정류 모델링을 수행하였다. 인공 구조물 건설은 하천경계의 하천수위를 강제로 상승시킴으로서 적용하였다. 부정류 모델링의 기간은 총 120개월이며, 부정류 모델링의 초기수위는 정상류 모델링에서 결정된 지하수위와 동일하다.

부정류 모델링 결과, 인공구조물 건설 후 관리수위를 10.5 m로 했을 때는 낙동강 본류와 덕곡천, 회천을 중심으로 지하수위가 상승하고 있다(Fig. 7). 16개 지하수 관측정의 지하수위는 하천으로부터의 거리에 따라 공간적으로 다양한 변동을 보였다. 낙동강 본류로부터의 거리가 멀고(1 km 이상) 하성충적층과 산지지역의 경계부에 위치하는 관측공인 W-1호공, OB-2호공은 지하수위 변동폭이 2 m 이내 이었으며, 하성충적층 내에 분포하는 대부분의 관측공의 지하수위는 2 m 이상이었다. 특히 낙동강 본류와 가까운 B호공, C호공, BH-1, OB-4, W-4호공의 지하수위 변동폭은 5 m 이상이었다. 이는 하천에 인접한 관측정에서는 지하수위가 하천수위 직접적인 영향권에 포함되기 때문에 상대적으로 더욱 큰 변동 특성을 보여주는 것으로 판단된다. 이러한 공간적인 지

하수위 변동 특성은 아의 조사 결과와도 잘 일치하고 있다. 그리고 하천수위 상승으로 인한 하천 인접 지역에서 상승된 지하수 흐름은 하성충적층 내부 저지대인 독산의 남쪽과 동쪽 지역, 덩밀산 동쪽 저지대 지역으로 수렴되고 있다. 따라서 인공구조물 건설에 의해 상승된 하천수는 주변 대수층으로 유입된 후, 연구지역의 저지대로 수렴되고 결국 낙동강 쪽으로 기저유출 형태로 유출되는 것으로 판단된다. 한편, 연구지역의 하천변 지하수위는 강우사건보다 하천수위 변동에 직접적인 영향을 받으며 하상의 인공구조물에 의한 하천수위 상승은 하천 주변지역의 지하수 시스템을 변화시키게 된다. 특히, 연구지역내 일부 지점에서는 홍수시에 지하수 관정에서 지하수가 용출되기도 한다. 이는 연구지역에서 지하수위 상승으로 인한 지하수 홍수(groundwater flooding)의 취약성을 내포하고 있는 것을 지시한다(Marsh and Dale, 2002; Kim et al., 2012).

결 론

본 연구는 경상남도 합천군 덕곡면 일원에 대해 낙동강 본류 하상에 설치한 인공 구조물에 의해서 주변 지역의 지하수 환경에 미치는 영향을 현장조사와 지하수 모델링으로 평가하였다. 연구지역의 하성충적층의 지하수위는 강우량 자체보다는 낙동강 본류 수위의 계절적인 변동에 민감하게 반응하면서 제방저류효과를 보이고 있다. 또한 하성충적층의 지하수위는 주 대수층(모래자갈층)을 통하여 하천과 직접적으로 연결되는 것으로 판단된다.

지하수 모델 영역은 하상퇴적층, 하성충적층, 산지지역으로 구분되며, 수리지질층서는 4개의 층(점토 내지 실트층, 중립질 모래층, 모래자갈층, 기반암층)으로 구성된다. 모델 보정으로 결정된 수리전도도는 하상퇴적층의 실트층에서 9.89×10^{-5} m/sec이고, 중립질 모래층은 9.89×10^{-4} m/sec이고, 모래자갈층은 7.60×10^{-3} m/sec이고, 기반암층은 5.84×10^{-8} m/sec이다. 또한 하성충적층의 수리전도도는 점토층에서 9.63×10^{-6} m/sec이고, 중립질 모래층은 9.84×10^{-5} m/sec이고, 모래자갈층은 9.84×10^{-4} m/sec이고, 기반암층은 5.84×10^{-8} m/sec이다. 그리고 산지지역의 수리전도도는 토양층에서 5.61×10^{-6} m/sec이고, 2층은 9.84×10^{-8} m/sec, 3층은 6.84×10^{-8} m/sec, 4층은 5.84×10^{-8} m/sec이다.

수치 모델링 결과, 지하수 유속은 대체로 낙동강에 가까울수록 빨라지는 경향성을 보이며, 하상퇴적층과 하성

충적층의 투수성의 공간적인 불균질성 때문에 공간적으로는 유속이 다르게 나타난다. 또한, 인공구조물 건설에 의해서 지하수 흐름은 하성충적층의 저지대의 독산의 남쪽과 동쪽 지역, 덩밀산 동쪽 지역 쪽으로 수렴되고 있다. 지하수 흐름이 수렴되고 있는 이들 지역에서는 갑작스런 수문변화에 의한 지하수 홍수가 발생할 수 있는 취약성을 가지고 있는 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 얻어진 결과는 하성충적층에서 상승된 지하수위를 예측하고 지하수 홍수를 제어할 수 있는 배수시스템 설계 구축에 기초적인 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

한편, 본 연구의 지하수 수치 모델링 결과를 검증하기 위해서는 장기적인 지하수위 관측 자료가 필수적이지만, 현재로는 충분한 지하수위 관측 자료가 확보되지 않은 상태이므로 지하수 환경 변화의 장기적인 검증은 불가능하다. 따라서 지속적인 지하수위 변동 감시 시스템 확립으로 정기적인 지하수위 자료 획득이 필요하다.

사 사

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업(11기술혁신 C05-1)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Alley, W.M., Healy, R.W., LaBaugh, J.W. and Reilly, T.E., 2002, Flow and storage in groundwater systems, Science, 296, 1985-1990.
- Anderson, E.I., 2003, An analytical solution representing groundwater-surface water interaction, Water Resources Research, 39(3), 1071-1077.
- Anderson, E.I., 2005, Modeling groundwater-surface water interactions using the Dupuit approximation, Advances in Water Resources, 28, 315-327.
- Bower M.J., Smith, J.T., Jarvie, H.P., Neal, C. and Barden, R., 2009, Changes in point and diffuse source phosphorus inputs to the river Frome (Dorset, UK) from 1966 to 2006, Science of Total Environment, 407, 1954-1966.
- Burt, T.P., Howden, N.J.K., Worrall, F. and Whelan, M.J., 2011, Nitrate in United Kingdom rivers: policy and its outcomes since 1970, Environmental Science and Technology, 45, 174-181.
- Chen, X., Chen D.Y. and Chen, X.-H., 2006, Simulation of baseflow accounting for the effect of bank storage and its implication in baseflow separation, Journal of Hydrology, 327, 539-549.
- Cheong, J.-Y., Hamm, S.-Y., Kim, H.-S., Ko, E.-J., Yang, K., Lee, J.-H., 2008, Estimating hydraulic conductivity using grain-size analyses, aquifer tests, and

- numerical modeling in a riverside alluvial system in South Korea, *Hydrogeology Journal*, 16(6), 1129-1143.
- Cheong, J.-Y., Hamm, S.-Y., Kim, H.-S., Son, K.-T., Cha, Y.-H., Jang, S. and Baek, K.-H., 2003, Characteristics of waterlevel fluctuation in riverside alluvium of Daesan-Myeon, Changwon City, *The Journal of Engineering Geology*, 13, 457-474 (in Korean).
- Choe, E., Lee, J.-W. and Lee, J.-K., 2011, Estimation of chlorophyll-a concentrations in the Nakdong River using high-resolution satellite image, *Korean Journal of Remote Sensing*, 27, 613-623 (in Korean).
- Choi, B.-K., Koh, D.-C., Ha, K. and Cheon, S.-H., 2007, Effect of redox processes and solubility equilibria on the behavior of dissolved iron and manganese in groundwater from a riverine alluvial aquifer, *Economic and Environmental Geology*, 40, 29-45 (in Korean).
- Chung, I.-M., Lee, J. and Kim, N.-W., 2011, Estimating exploitable groundwater amount in Musimcheon watershed by using an integrated surface water - groundwater model, *Economic and Environmental Geology*, 44, 433-442 (in Korean).
- Fetter, C.W., 2001, *Applied hydrogeology*, Prentice-Hall, New Jersey, 598p.
- Freeze, A.R. and Cherry, J.A., 1979, *Groundwater*, Prentice Hall, New Jersey, 604p.
- Graf, W.L., 2006, Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers, *Geomorphology*, 79, 336-360.
- Ha, K., Ko, K.-S., Koh, D.-C., Yum, B.-W. and Lee, K.-K., 2006, Time series analysis of the responses of the groundwater levels at multi-depth wells according to the river stage fluctuations, *Economic and Environmental Geology*, 39, 269-284 (in Korean).
- Hahn, J.-S., 1998, *Environment and contamination of groundwater*, Pakyoung Inc., 1071p (in Korean).
- Hamm, S.-Y., Cheong, J.-Y., Kim, H.-S., Hahn, J.-S. and Cha, Y.-H., 2005, Groundwater flow modeling in a riverbank filtration area, Daesan-Myeon, Changwon City, *Economic and Environmental Geology*, 38, 67-78 (in Korean).
- Hamm, S.-Y., Cheong, J.-Y., Kim, H.-S., Hahn, J.-S. and Ryu, S.-H., 2004, A study on groundwater flow modeling in the fluvial aquifer adjacent to the Nakdong River, Book-Myeong area, Changwon City, *Economic and Environmental Geology*, 499-508 (in Korean).
- Hamm, S.-Y., Cheong, J.-Y., Ryu, S.M., Kim, M.J. and Kim, H.-S., 2002, Hydrogeological characteristics of bank storage area in Daesan-Myeon, Changwon City, Korea, *Journal of the Geological Society of Korea*, 38, 595-610 (in Korean).
- Hamm, S.-Y., Lee, S.-I., Cheong, J.-Y., Kim, H.-S., Lee, J.-H., Kim, G.-B. and Choi, D.-H., 2011, Technique for interpreting groundwater-stream water interaction associated with riverbank filtration, *Sustainable Water Resources Research Center, Technical Report*, 78p (in Korean).
- Hwang, B.H., Kim, D.I., and Yoon, Y.S. and Han, K.Y., 2010, Non-point source quantification analysis using SWAT in Nakdong River watershed, *Journal of Korea Water Resources Association*, 43, 367-381 (in Korean).
- Hyun, S.G., Woo, N.C., Shin, W. and Hamm, S.-Y., 2006, Characteristics of groundwater quality in a riverbank filtration area, *Economic and Environmental Geology*, 39, 151-162 (in Korean).
- Jeon, H.-T. and Kim, G.-B., 2011, Evaluation of interactions between surface water and groundwater based on temperatures, flow properties, and geochemical data, *The Journal of Engineering Geology*, 21, 45-55 (in Korean).
- Jeong, C.H. and Moon, B.J., 2009, Hydrochemical and isotopic characteristics of major streams in the Daejeon area, *Economic and Environmental Geology*, 42, 315-333 (in Korean).
- Jeong, J.-H. and Kim, H.-S., 2008, Field measurement of surface hydraulic conductivity distribution using Guelph parameter : a case study in the riverbank filtration site of Kimhae (Ddanseom), *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 13, 36-43 (in Korean).
- Kang, H., Jang, J.H., Ahn, J.H. and Kim, I.-J., 2011, Numerical estimations of Nakdong River flows through linking of watershed and river flow models, *Journal of Korea Water Resources Association*, 44, 577-590 (in Korean).
- Kang, M., 2009, Establishment of management system for Nakdong River basin, *Journal of Korea Society of Environmental Engineers*, 31, 395-400 (in Korean).
- Kang, M., Jo, S.-H., Jeong, G.-C., Lee, S. and Kim, S., 2006, Preparatory monitoring of trace chemicals load into Nakdong River, *The Journal of Engineering Geology*, 16, 351-357 (in Korean).
- Kim, B.K., Kim, Y., Nam, E.-K., Jung, D.-H. and Lee, J.E., 2006b, Mineralogical composition and heavy metal concentrations in the sediments of the Kumho River, *Journal of Petrological Society of Korea*, 19, 291-300 (in Korean).
- Kim, D.-H., Lee, J.-H., Park, K.T., Kim, S.C., Choi, Y.-M., Seo, Y.-R., Noh, G.M. and Hamm, S.-Y., 2008, Characteristics of joint systems and their relationship with groundwater system in the Nakdong River mid-basin, *The Journal of Engineering Geology*, 18, 483-492 (in Korean).
- Kim, G.-B., Son, Y.-C., Lee, S.-H., Jeong, A.-C., Cha, E.-J. and Ko, M.-J., 2012, Understanding of surface water-groundwater connectivity in an alluvial plain using statistical methods, *The Journal of Engineering Geology*, 22, 207-221 (in Korean).
- Kim, G.-Y., Koh, Y.K., Kim, C.S., Kim, H.-S. and Kim, S.-Y., 2003, Geochemical study on the alluvial aquifer system of the Nakdong River for the estimation of river bank filtration, *The Journal of Engineering Geology*, 13, 83-105 (in Korean).
- Kim, H.-S., 2008, Characterization of groundwater flow to horizontal or slanted well using numerical modeling, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 13, 54-61 (in Korean).

- Kim, H.-S. and Jeong, J.-H., 2009, Numerical analysis of horizontal collector well in riverbank filtration, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 14, 1-10 (in Korean).
- Kim, K.-H., Yun, S.-T., Chae, G.-T., Choi, B.-Y., Kim, S.-O., Kim, K., Kim, H.-S. and Lee, C.-W., 2002, Nitrate contamination of alluvial groundwaters in the Keum River watershed area : source and behaviors of nitrate, and suggestion to secure water supply, *The Journal of Engineering Geology*, 12, 471-484 (in Korean).
- Kim, K.-Y., Chon, C.-M., Kim, T., Oh, J.-H., Jeoung, J.-H. and Park, S.-K., 2006a, Use of a temperature as a tracer to study steam-groundwater exchange in the hyporheic zone, *Economic and Environmental Geology*, 29, 525-535 (in Korean).
- Kim, K.W. and Lee, Y.J., 1969, Explanatory text of the geological map of Changnyeong sheet (1:50,000), *Geological Survey of Korea*, 18p (in Korean).
- Kim, Y. and Nam, E.K., 2009, Geochemical and isotopic study of the Kumho River, *Economic and Environmental Geology*, 42, 527-539 (in Korean).
- Korea Water Resources Corporation, 2010, Report on the four major rivers restoration project of 20 section area (Changnyeong·Uiryeong·Hapcheon), *Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs*, 250p (in Korean).
- Lee, E., Hyun, Y., Lee, K.-K., Kim, H.-S. and Chong, J.-H., 2010, Evaluation of well production by a riverbank filtration facility with radial collector well system in Jeungsan-ri, Changnyeong-gun, Korea, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 15, 1-12 (in Korean).
- Lee, J.-H., 2012, Groundwater-river interaction in the middle Nakdong River basin using physicochemical analyses and numerical modeling, Ph.D. diss., Pusan National University, 222p.
- Lee, J.-H., Hamm, S.-Y., Cheong, J.-Y., Lee, S.-H., Jeon, H.-T., Kim, D.-H., Kim, H.-J. and Kim, H.-S., 2009b, Characteristics of groundwater flow of Nakdong riverside area using temperature tracer, *Proceeding of the 2009 fall annual meeting, Korea Society of Soil and Groundwater Environment*, 99-100 (in Korean).
- Lee, J.-H., Hamm, S.-Y., Cheong, J.-Y., Kim, H.-S., Ko, E.-J., Lee, K.-S. and Lee, S.-I., 2009a, Characterizing riverbank-filtered water and river water qualities at a site in the lower Nakdong River basin, *Journal of Hydrology*, 376, 209-220.
- Linderfelt, W.R. and Turner, J.V., 2001 Interaction between shallow ground-water, saline surface water and nutrient discharge in a seasonal estuary: the Swan-Canning system, *Hydrogeological Process*, 15, 2631-2653.
- Marsh, T.J. and Dale, M., 2002, The UK floods of 2000-2001: A hydrometeorological appraisal, *The CIWEM Journal*, 16, 180-188.
- Mayer, J.R., Brinson, J. and George, B., 2002, Groundwater quality implications of bank-storage in a crystalline-rock setting, *Environmental Geosciences*, 9(2), 74-80.
- McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W., 1998, A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model, *U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations*, Book 6, 586p.
- Ministry of Construction & Transportation, 2003, Report on river improvement near the Jeonggok bank of the Nakdong River watershed, 100p (in Korean).
- Ministry of Construction & Transportation, 2007, Report on the general plan of groundwater management : 2007 ~ 2011, 404p (in Korean).
- Ministry of Construction & Transportation, 2004, Hydrological annual report in Korea (rainfall), 11-1500000-000579-10, 974p (in Korean).
- Ministry of Construction & Transportation, 2005, Hydrological annual report in Korea (rainfall), 11-1500000-000579-10, 941p (in Korean).
- Ministry of Construction & Transportation, 2006, Hydrological annual report in Korea (rainfall), 11-1500000-000579-10, 941p (in Korean).
- Ministry of Land, transport and Maritime Affairs, 2007, Hydrological annual report in Korea (rainfall), 11-1500000-000579-10, 941p (in Korean).
- Ministry of Land, transport and Maritime Affairs, 2008, Hydrological annual report in Korea (rainfall), 11-1500000-000579-10, 941p (in Korean).
- Ministry of Land, transport and Maritime Affairs, 2009, Hydrological annual report in Korea (rainfall), 11-1500000-000579-10, 941p (in Korean).
- Negrel, P., Petelet-Grikaud, E., Barbier, J. and Gautier, E., 2003, Surface water-groundwater interactions in an alluvial plain: Chemical and isotopic systematics, *Journal of Hydrology*, 277, 248-267.
- Oh, C.W., Lee, J.S., Kim, K. and Hwang, G.S., 2002, The state and sources of contamination with BOD, COD, T-N and T-P in stream within Chonju City, *Economic and Environmental Geology*, 35, 43-54 (in Korean).
- Oh, J.-H., Kim, T., Sung, H.C., Kim, Y.-J. and Song, M.-Y., 2007, Interaction between groundwater and stream water induced by the artificial weir on the streambed, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 12, 9-19 (in Korean).
- Oh, K.-C., Kim, J.-Y., Yang, D.-Y., Hong, S.-S., Lee J.-Y. and Lim, J., 2010, Origin, age and sedimentation rate of mid-Geum River sediments, *Economic and Environmental Geology*, 43, 333-341 (in Korean).
- Oxtobee, J.P.A. and Novakowski, K., 2002, A field investigation of groundwater/surface water interaction in a fractured bedrock environment, *Journal of Hydrology*, 269, 169-193.
- Park, J.Y., Park, M.J., Ahn, S.R. and Kim, S.J., 2009, Watershed modeling for assessing climate change impact on stream water quality of Chungju Dam Watershed, *Journal of Korea Water Resources Association*, 42, 877-889 (in Korean).
- Rossi, P., De Carvalho-dill, A., Muller, I. and Aragno, M., 1994, Comparative tracing experiments in a porous aquifer using bacteriophages and fluorescent dye on a test field located at Wilerwald (Switzerland) and simultaneously surveyed in detail on a local scale by

- radio-magneto-tellury (12-240kHz), Environmental Geology, 23, 192-200.
- Schulze-Makuch, D., Carlson, D.A., Cherkauer, D.S. and Malik, P., 1999, Scale dependency of hydraulic conductivity in heterogeneous media, Ground Water, 37, 904-919.
- Shin, H.S., Kang, D.K. and Kim, S.D., 2007, Analysis of the effect of water budget elements on flow duration characteristics using SWAT-Nak Dong, Journal of Korea Water Resources Association, 40, 251-263 (in Korean).
- Todd, D.K. and Mayer, L.W., 2005, Groundwater Hydrology, 3rd ed., John Wiley and Sons, Inc., 636p.
- Wang, H.F. and Anderson, M.P., 1995, Introduction to groundwater modeling: finite difference and finite element methods, Academic Press., 237p.
- Winter, T.C., 1999, Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems, Hydrogeology Journal, 7, 28-45.
- Winter, T.C., Harvey, J.W., Franke, O.L. and Alley, W.M., 1998, Ground Water and surface water, a single resource, U.S. Geological Survey Circular 1139, 79p.
- Woessner, W.W., 2000, Stream and fluvial plain ground water interactions: Rescaling hydrogeologic thought, Ground Water, 38(3), 423-429.
- Woessner, W.W., Troy, T., Ball, P. and DeBorde, D.C., 1998, Virus transport in the capture zone of a well penetrating a high hydraulic conductivity aquifer containing a preferential flow zone: Challenges to natural disinfection, In Preceeding of Source Water Protection International 98, Dallas, Texas, 167-174.
- Won, L.-J., Koo, M.-H. and Kim, H.-S., 2006, Simulation of groundwater flow and sensitivity analysis for a riverbank filtration site in Koryeong, Korea, Journal of Soil and Groundwater Environment, 11, 45-55 (in Korean).
- Yun, S.W., Jo, Y.-J. and Lee, J.-Y., 2009, Comparison of groundwater recharges estimated by waterlevel fluctuation and hydrograph separation in Haeon basin of Yanggu, Journal of the Geological Society of Korea, 45, 391-404 (in Korean).

이정환

한국방사성폐기물관리공단 기술개발센터
대전광역시 유성구 대덕대로 1045번지
Tel: 042-601-5323
E-mail: oathway@krmc.or.kr

함세영

부산대학교 지구환경시스템학부
609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지
Tel: 051-510-2252
E-mail: hsy@pusan.ac.kr

이충모

부산대학교 지구환경시스템학부
609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지
Tel: 051-510-3451
E-mail: lcmol006@pusan.ac.kr

이종진

한국수자원공사 수자원조사팀
306-711 대전광역시 대덕구 신탄진로 200
Tel: 042-629-2731
E-mail: LJJ@kwater.re.kr

김형수

중원대학교 에너지자원공학부
367-805 충청북도 괴산군 문무로 85
Tel: 043-830-8622
E-mail: hskim@jwu.ac.kr

김규범

한국수자원공사 K-water연구원
305-730 대전광역시 유성구 전민동 462-1번지
Tel: 042-870-7640
E-mail: gbkim@kwater.or.kr

원고접수일 : 2012년 7월 11일
수정본채택 : 2012년 9월 4일
게재확정일 : 2012년 9월 6일