



복합 지하수위 변동법과 지하수 모델링에 의한 지하수 함양률 비교 분석: 여주시 강천유역을 중심으로

노달님^{1,3} · 박현진¹ · 정재열² · 함세영^{3,*}

¹한국수자원공사

²한국원자력환경공단 방사성폐기물연구소

³부산대학교 지질환경과학과

요 약

지하수 함양률은 지역 지하수계에서 지속가능한 산출량을 산정하기 위한 중요한 인자 중 하나이다. 본 연구에서는 경기도 여주시 강천유역을 대상으로 지하수 모델링과 복합 지하수위 변동법을 적용하여 지하수 함양률을 산정하고, 두 방법을 서로 비교·검토하였다. 지하수 모델링에 의한 강천유역(104.77 km²)의 지하수 함양률은 연평균 강수량의 18.13%로 산정되었다. 30년 평균 유효 강수량과 지하수위 자료 그리고 토양층의 입도분석 자료를 이용한 복합 지하수위 변동법에 의하면, 평균 지하수 함양률은 17.81%로 나타났다. 지하수 모델링에 의한 지하수 함양률은 연구지역 전체를 대표하지만 국지적인 지하수 함양률을 대변하지 못한다. 한편, 복합 지하수위 변동법으로 연구지역내 5개 지하수 관측공에서 산정한 지하수 함양률은 국지적인 지점을 대표할 수는 있으나, 연구지역 전체를 대표할 수 없다. 아울러서, 복합 지하수위 변동법은 강수에 따라 지하수 함양이 민감하게 일어나는 충적층 지역에 더 잘 적용되며, 지하수 함양률이 낮은 기반암이나 저 투수 지층에는 적용하는 것이 적절치 않다고 보인다.

주요어: 지하수 함양률, 지역 지하수계, 지하수 모델링, 복합 지하수위 변동법, 강천유역

Dal Nim Noh, Hyun Jin Park, Jae-Yeol Cheong and Se-Yeong Hamm, 2018, Groundwater recharge analysis and comparison using hybrid water-table fluctuation method and groundwater modeling: a case of Gangcheon basin in Yeosu City. Journal of the Geological Society of Korea. v. 54, no. 2, p. 169-181

ABSTRACT: Groundwater recharge rate is key parameter to estimate sustainable yield of a local groundwater system. This study estimated groundwater recharge rate of the Gangcheon watershed in Yeosu City by using groundwater flow modeling and hybrid water-table fluctuation (hybrid-WTF) method and compared groundwater recharge rates from the two methods. The recharge rate of the Gangcheon watershed (104.77 km²) was 18.13% of the annual precipitation was estimated by groundwater flow modeling. Using average effective precipitation for 30 years, groundwater level data, and particle size analysis data of the soil layers, average groundwater recharge rate by the hybrid-WTF method was 17.81%. The groundwater recharge rate estimated by groundwater flow modeling can represent the whole study area but cannot precisely represent local groundwater recharge rate. On the other side, the hybrid-WTF method can properly estimate local groundwater recharge, while the method cannot represents the whole study area. Besides, the hybrid-WTF method may be preferably applicable to alluvial regions that groundwater recharge is sensitively related to rainfall, but isn't properly applied to low permeability layer or bedrock areas in which groundwater recharge rate is low.

Key words: groundwater recharge rate, local groundwater system, groundwater modeling, hybrid water-table fluctuation method, Gangcheon basin

(Dal Nim Noh and Hyun Jin Park, Hangang River Regional Head Office, Korea Water Resources Corporation, Gyeonggi-do 13841, Republic of Korea; Jae-Yeol Cheong, R&D Institute of Radioactive Wastes, Korea Radioactive Waste Agency, Daejeon 34129, Republic of Korea; Dal Nim Noh and Se-Yeong Hamm, Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea)

* Corresponding author: +82-51-510-2252, E-mail: hsy@pusan.ac.kr

1. 서 언

주로 강우에서 유래하여 대수층에 함양되는 지하수의 양을 지하수 함양량이라고 하며, 지속적인 지하수자원의 개발·이용과 보전·관리를 위해 유역별과 지자체 별로 정확한 지하수 함양량을 산정하는 것은 매우 중요하다. 지하수 함양량을 구하기 위해서는 강수량, 증발산량, 지표유출량, 기저유출량, 양수량 등을 알아야 한다. 강수량은 기상관측소에서 측정한 강수량 자료로부터 획득할 수 있으나, 증발산량, 지표유출량, 기저유출량 자료의 획득은 쉽지 않다. 지하수위 변동법(Water Table Fluctuation method, WTF)은 강우에 의해서 자유면 대수층의 지하수면 상승과 지하수 함양에 대한 물리적 산정법이다(Healy and Cook, 2002). 그러나, 지하수위 변동법은 비포화대의 수분 증감에 기초한 방법으로 수분의 대수층 유출 및 대수층 물성과의 관계 등을 체계적으로 설명하지 못한다(Rasmussen and Andreasen, 1959; Bierkens, 1998; Knotters and Bierkens, 2000). 복합 지하수위 변동법(Hybrid water table fluctuation method, hybrid-WTF, H-WTF)은 지하수위 변동법(WTF) 모델과 비포화 함수모델을 결합한 모델로서, 지하로 침투된 강우가 지하수면까지 도달하는데 걸리는 지연 시간과, 포화대 직상부의 비포화대 및 대수층의 수리성이 양호한 경우에 지하수 함양과 대수층을 통한 기저유출/지하수위 하강이 동시에 일어나는 현상을 반영한 방법이다(Park, 2007; Cho and Park, 2008; Park and Parker, 2008). Yun *et al.* (2015)은 강우시간에 따른 양구군 해안분지내 소유역에서의 지하수 함양과 기저유출 특성을 밝혔으며, Yun *et al.* (2013)은 지하수위 변동법으로 강원도 도시지역(원주시)과 농촌지역(양구군)의 지하수 함양 특성을 비교·분석한 바 있다.

지표유출량 자료가 없는 경우에는 Soil Conservation Service (SCS) 또는 SCS-CN법(Morel-Seytoux and Verdin, 1981)을 이용하는데, 유역의 토질특성과 식생피복상태 등에 대한 상세한 자료만으로 지표유출량(초과강수량 또는 직접유출량)을 산정할 수 있으며, 미국의 계획 유역의 초과강수량(혹은 유효수량)의 산정에 널리 사용되고 있다. SCS-CN법에서는 유효수량의 크기에 직접적으로 영향을 미치는 인자로서 유역 내 토양의 종류와 토지 이용 혹은 식생피복

의 종류, 피복상태 및 토양의 수문학적 조건을 고려한다. An *et al.* (2008)은 울산지역의 증배천-보은천 유역에 대해서 물수지 분석과 SCS-CN 방법으로 지하수 함양량을 산정한 바 있다.

증발산량은 대기로 환원되는 기체상태의 총 수분량으로서 수면으로부터의 증발량과 식물로부터의 증발산을 합한 값이다. 증발산량은 에너지 균형방법에 의해 계산되어질 수 있는데, 순 태양복사량, 지면으로 전도되는 에너지량, 대기로 방출되는 에너지량, 단위면적당 지표에 저장되는 열에너지 변화량, 주어진 온도에 대한 기하증발열 등의 매개변수들을 알아야 하지만(Hornberger *et al.*, 1998), 매개변수는 쉽게 관측 또는 평가하기 어렵다. 또한 증발산계(lysimeter)를 사용하여 증발산량을 직접 측정할 수 있지만, 이 방법 역시 쉽지 않기 때문에 흔히 간접적인 방법으로 증발산을 구하게 된다(Thornthwaite, 1944; Penman, 1948; Blaney and Criddle, 1950; Turc, 1963; Monteith, 1965).

시계열 분석도 함양량 산정에 많이 이용되며, Lee and Lee (2002)는 강원도 원주지역과 경기도 의왕지역의 지하수위자료와 강우의 시계열 분석을 통하여 지하수 함양기작을 연구하였다. Won *et al.* (2002)는 경상북도 고령군 다산면, 천안시 풍세면 삼태리 및 부여 정동, 자왕 지역의 장기수위 관측자료 및 강수, 대기압의 시계열 분석을 통하여 지하수 함양특성을 평가하였다. Cheong *et al.* (2003)는 창원시 대산면 강변충적층의 6개의 지하수 관측공의 지하수위 자기상관분석을 통하여 1, 2, 3그룹으로 분류하였으며, 1그룹은 낙동강 수위변화의 영향을 상대적으로 많이 받는 그룹, 2그룹은 낙동강수위와 취수량의 영향을 동시에 받는 그룹, 그리고 3그룹은 취수량의 영향을 가장 많이 받는 그룹으로 해석하였다. Kim *et al.* (2008)는 금정산 지역의 지하수위와 강수량의 시계열 분석을 통하여 금정산의 암반대수층은 강우의 직접적인 침투보다는 단열대를 따라서 일어나는 지하수 함양의 영향을 받고 있음을 제시하였다. 하천과 인접한 관정에서는 하천으로부터의 함양에 의해서 지하수위가 강수량보다는 하천수위 변동에 더 민감하게 반응하며 하천수위의 주기적인 변동 특성이 잘 나타난다(Ha *et al.*, 2006).

지하수 모델링은 복잡한 현실의 지하수계를 단순화 시켜 표현하며, 지하수위, 지하수 흐름, 지하수의

양적 변화를 평가·예측하고 지하수 함양률을 산정할 수 있다. Chung *et al.* (2011)는 WAT-MODFLOW 통합모형으로 진천지역의 소유역별 일단위 지하수 함양률을 산정하였다. Cho (2001)은 지하수 모델링에 의해서 부산지역의 물수지와 지하수 함양률을 산정한 바 있다. Won *et al.* (2006)는 2차원 지하수 유동 모델링으로 경상북도 고령군 낙동강변 충적대수층의 취수정과 대수층내 지하수위 변동과 대수층내로의 하천수 함양량의 계절적 변화를 분석하였다. Lee (2001), Cheong *et al.* (2015)은 터널 굴착과 관련하여 터널내 지하수 유출량과 지하수 함양률을 산정하였다. 이밖에도 기저유출 분리법(Meyboom, 1961; Park, 1996), 지하수위 감수곡선법(Lee and Yoon, 1996; Choi and Ahn, 1998), 동위원소 및 염소이온 농도 이용방법(Andres and Egger, 1985; Solomon *et al.*, 1993; Koh *et al.*, 2001)으로 지하수 함양률을 산정하는 방법들이 있다.

현재 우리나라에서는 지하수모델링 방법과 복합 지하수위 변동법에 의해서 지하수 함양률을 산정하

는 경우가 많으나, 이 두 방법에 의한 지하수 함양률 값의 차이를 깊이있게 비교 검토한 연구는 없다. 연구지역인 여주시 강천유역(그림 1)에는 일부 산악지역이 존재하고 있으며 강천을 따라 충적층이 비교적 넓게 분포하므로, 유역 전체를 대변할 수 있는 지하수 모델링 방법과 관측공 주변 충적층의 지하수 함양률을 정확히 산정할 수 있는 복합 지하수위 변동법을 이용하여 지하수 함양률을 산정하고 서로 비교·분석하였다.

2. 지형, 지질 및 수리지질 특성

연구지역은 경기도 여주시 점동면과 강천면 일대의 강천유역(유역면적 104.77 km²)으로서, 동경 127° 63' 732" ~ 127° 755' 379", 북위 37° 164' 192" ~ 37° 247' 509" 범위이다. 연구지역의 지형은 동고서저형으로 남한강 및 지류 주변에는 저지대의 넓은 충적층이 발달하고 있으며, 남동부의 행정경계를 기준으로 산악지형이 발달하고, 남북방향의 능선을 형성하

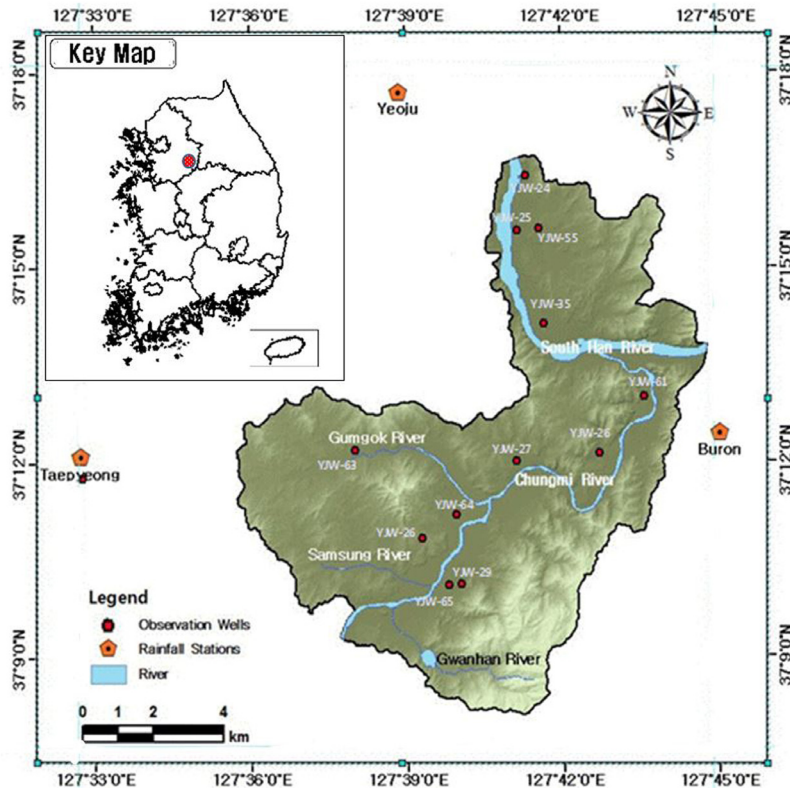


Fig. 1. Study area.

고 있다. 이러한 지형은 북향 또는 북북동 방향으로 우세하게 발달하는 주향이동 단층과 경사 단층의 영향이다. 연구지역의 북부에는 국가하천인 남한강이 여주시 중앙부를 북서쪽으로 관류하고 있다. 금곡천, 삼승천은 동류하여 청미천으로 유입되고, 청미천은 북류하여 남한강에 유입된다. 수지상의 소하천들이 합류하여 지방하천을 이루고, 이 지방하천은 각각 남류와 북류하여 남한강에 유입된다(그림 1).

본 연구지역은 경기 육곡 중 여주 도폭(Yeo and Lee, 1975) 및 장호원 도폭(Kim *et al.*, 1989)에 속하며, 선캄브리아기 변성암류(편암, 흑운모 편마암)와 중생대 쥐라기, 백악기 화성암류 및 미고결 쇄설성 퇴적층(충적층)으로 구성되어 있다(그림 2). 중생대 쥐라기 화성암류(흑운모 화강암, 백운모 화강암, 복운모 화강암, 반상 화강암, 섬강암질 화강암, 섬록암질 화강암, 화강반암)는 연구지역 대부분에 걸쳐 넓게 분포한다. 충적층은 남한강과 그 지류인 청미천, 금곡천, 삼승천의 주변 범람원이나 퇴적지에 비교적 넓게 분포하며 제4기 보다 고기의 모든 암층을 부정합으

로 피복하고 있다. 충적층은 대부분 모래로 구성되어 있으며, 상류지역에서는 자갈층이 우세하다. 일부 실트 및 점토로 구성되어 있는 지역은 경작에 적합하다. 연구지역의 동쪽에는 북북동방향의 A-1, A-2, A-3 대규모 단층이 존재하고 있으며, 서부에는 북북서 방향의 단층(B)과 북북동 방향의 단층(C)이 존재하고 있다.

연구지역의 시추조사 자료와 자동관측망 자료, 전기비저항탐사 자료, 수리지질조사 자료, 지하수영향조사 자료 등 총 170개 자료를 이용하여 산정한 충적층의 평균두께는 5.5 m이다(MOLIT, 2015). 현장 양수시험 자료 등을 이용하여 산정한 충적층, 화성암, 변성암의 수리전도도는 각각 1.279~186.6 m/d, 0.001~6.575 m/d, 0.037 m/d이다(표 1).

3. 연구방법

3.1 복합 지하수위 변동법

물수지와 질량평형에 기반으로 하는 지하수위 변

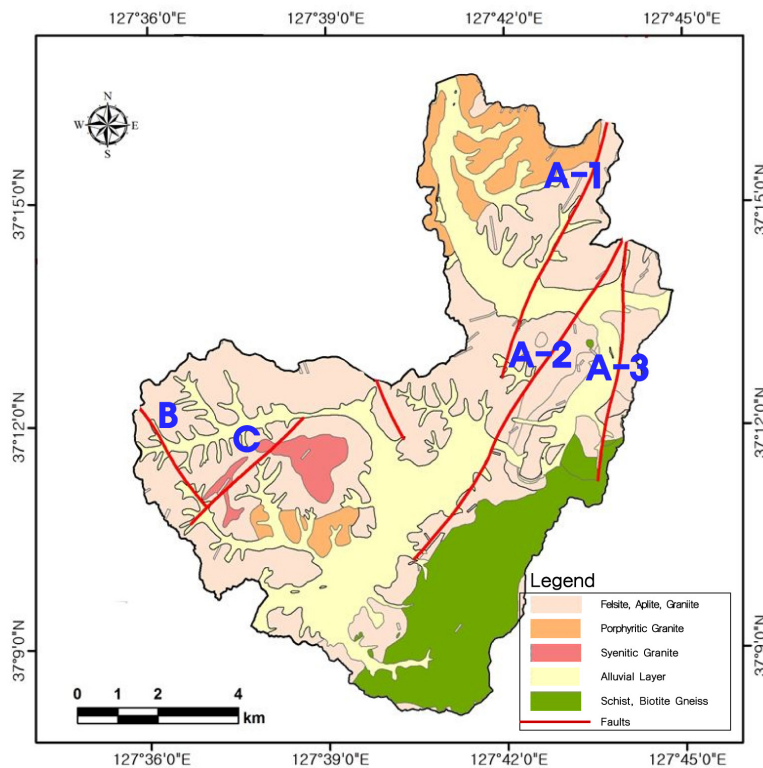


Fig. 2. Geological map of Gangcheon basin (modified from Yeo and Lee, 1975; Kim *et al.*, 1989).

동법은 강우에 의한 지하수 함양이 자유면대수층의 지하수면 상승을 초래하는 것을 전제로 하며(Healy and Cook, 2002), 지하수 함양률(R)은 지하저류량(ΔS_{gw}), 기저유출량(Q_{bf}), 증발산량(ET_{gw}), 인위적인 양수/주입을 포함하는 총 지하수 배출량(ΔQ_{gw})의 합으로 표현된다(Schicht and Walton, 1961):

$$R = \Delta S_{gw} + Q_{bf} + ET_{gw} + \Delta Q_{gw} \quad (1)$$

복합 지하수위 변동법(Hybrid-WTF)은 기존 지하수위 변동법(WTF) 모델과 비포화 함수모델을 결합한 방법으로서, 지하로 침투된 강우가 지하수면까지 도달하는데 걸리는 시간을 고려한다. 또한 포화대 직상부에 위치하는 비포화대와 포화대(자유면대수층)의 수리성이 양호할 경우 지하수 함양과 자유면 대수층을 통한 기저유출 또는 지하수위 하강을 동시에 반영하며(Park, 2007; Cho and Park, 2008; Park and Parker, 2008), 비포화대의 수리적 특성에 따른 유효 함수비의 변화를 고려한다. 유효 함수비는 총 함수비에서 대수층 골격의 함수비를 뺀 값 또는 총 함수비에서 잔류 함수비를 뺀 값이다(Shao *et al.*, 2017). 복합지하수위 변동법에서 대수층의 어떤 구간의 저류량의 변화는 지표로부터의 함양률, 대수층의 인근 구간으로부터의 지하수 유입량 그리고 대상 구간으로부터 유출되는 유량의 합과 같다(그림 3).

복합 지하수위 변동법에 의하면 지하수 함양률(R_i , LT^{-1})은

$$R_i = -kn \frac{h^{(i)} \exp(-k\Delta t) - h^{(i+1)}}{\exp(-k\Delta t) - 1} \quad (2)$$

과 같다. 여기서, $h^{(i)}$ 는 i 번째 시간의 수위[L], Δt 는 시간차분 간격[T], n 은 충전공극률[무차원], k 는 어느 대수층 구간에서 시간에 따른 잠재배출량의 비례상수[T⁻¹]이다. (2)식에서 함양률은 n (또는 비산출률)과 비례하므로 함양률 산정 시 정확한 n 값 산정이 매우 중요하다(Park, 2007).

3.2 지하수 유동 모델링

지하수 유동 모델링은 지하수계의 지하수위, 지하수 흐름 그리고 지하수의 양적변화를 평가·예측하기 위한 수치해석 모형으로 지하수 함양률 산정에 널리 이용된다(Chung *et al.*, 2011; Won *et al.*, 2006). 지하수 모델링에서는 경계조건과 개념모델을 어떻게 설정하느냐가 모델링 결과의 신뢰도를 결정하는 가장 중요한 요소 중 하나이다(Reilly, 2001; Choi *et al.*, 2004). 본 연구에서는 Visual MODFLOW ver. 4.3 (Waterloo hydrogeologic사 상용 소프트웨어)의 다공질 포화매체를 대상으로 하는 유한차분법의 3차원 지하수 유동 모델인 MODFLOW (McDonald and

Table 1. Hydraulic conductivity values (m/d) of the hydrogeologic units.

Hydrogeologic unit	Minimum	Maximum	Geometric mean
Alluvium	1.279	186.6	21.332
Igneous rock	0.001	6.575	0.059
Metamorphic rock	0.037	0.037	0.037

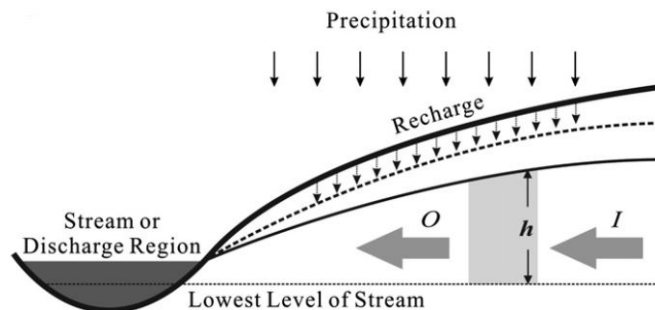


Fig. 3. Schematic diagram of precipitation and recharge (Park and Parker, 2008).

Harbaugh, 1988)를 이용하였다. Visual MODFLOW는 MODFLOW와 MT3DMS (Zheng and Wang, 1999)의 전처리, 후처리 모듈을 가지고 있어서 3차원 지하수 유동과 오염 물질 거동을 모사할 수 있다. Visual MODFLOW의 장점은 모델 영역을 쉽게 설정할 수 있으며 모델 영역 내에서 수리적 특성과 모델 경계를 쉽게 지정할 수가 있다. 모델 보정은 수동과 자동의 두 가지 방법으로 가능하며, 양수량의 최적화 작업과 정화 작업 시 복원 양수정의 위치와 양수량을 결정할 수 있다. 또한 모델링 결과를 화면이나 프린터를 통해서 2차원의 단면도, 평면도와 3차원 도면으로 쉽게 출력할 수 있다.

지하수 함양이나 배출을 고려하면, 다공질포화매체 내에서 밀도가 일정한 지하수의 3차원 흐름 지배식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}) \pm W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3)$$

K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} 은 각각 x, y, z 방향의 수리전도도(LT^{-1})이고, h 는 수두(L), W 는 지하수 함양이나 배출(T^{-1}), S_s 는 비저류계수(L^{-1}), t 는 시간(T)이다. S_s , K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} 은 공간도함수이고, W 는 시공간도함수이다. (3)식은 직교좌표계의 주축과 수리전도도의 주 텐서방향이 동일할 때 불균질, 이방성 다공질 매체 내에서 부정류상태의 지하수흐름식으로서, 포화대수층의 경계에서 수두분포, 흐름 특성, 초기수두조건에 의해서

지하수유동계를 수학적으로 표현한 것이다.

4. 연구결과

4.1 지하수위 변동분석

지하수위의 변동은 그 지역 대수층의 특성에 따른 함양률의 변화를 나타낸다. 지하수위 변동에는 강우나 일변화에 따른 단기적 변화와 계절적인 함양률에 의한 장기적 변화가 있고, 기압과 조석에 의한 변동, 양수와 상수도 누수 등에 의한 인위적인 변동 그리고 이들에 의한 복합적인 요인에 의해 변동한다. 특히, 기압에 의한 변동은 자유면대수층보다는 피압대수층에서 더 크게 나타난다. 연구지역내의 11개 시추공(표 2)에 대해서 2014년 9월부터 2015년 10월까지의 지하수위 변동 특성을 분석하였다(그림 4). 지하수위는 대체로 7월경에 가장 높고, 5월경에 낮다. 따라서 풍수기(6, 7, 8, 9월)에는 지하수위 상승이 강수량의 영향을 받는 것을 알 수 있으며, 강우가 지하로 침투하여 대수층에 도달하기까지는 약 2~3개월의 시간이 걸리는 것으로 나타난다. 각 공별 지표면 하 평균 지하수위는 0.21~7.27 m이며, 지표면 하 전체 평균 지하수위는 3.49 m이다. 또한 각 공별 최대 수위 변화폭은 0.56~10.6 m이며, 최대 수위 변화폭의 평균값은 2.11 m이다. 각 공별 지하수위 변동은 아래와 같다(표 2).

지하수위가 강우에 민감하게 반응하는 관정과 반응하지 않는 관정으로 구분 했을 때, 2014년 8월~

Table 2. List of the observation wells.

Well Number	Location		Aquifer type of the well	Mean groundwater level (m)	
	X	Y		El	DTW
YJW-24	261058.00	519600.00	Alluvial layer	38.97	9.03
YJW-25	260846.00	518026.00	Alluvial layer	39.31	9.70
YJW-26	263196.00	511679.00	Rock layer	48.79	2.21
YJW-27	260833.00	511453.00	Rock layer	51.39	2.61
YJW-28	258138.00	509225.00	Rock layer	69.20	3.80
YJW-29	259269.00	507934.00	Alluvial layer	97.54	3.46
YJW-35	261593.00	515382.00	Alluvial layer	37.88	9.12
YJW-55	261450.00	518085.00	Alluvial layer	61.89	4.11
YJW-61	264472.00	513290.00	Alluvial layer	52.40	2.60
YJW-63	256231.00	511747.00	Alluvial layer	64.32	3.68
YJW-64	259138.00	509925.00	Alluvial layer	50.83	2.17

2015년 9월 관측자료에 의하면, YJW-26, 28, 61, 63, 64 관측공은 강우에 민감하게 반응하는 관정이다(그림 4). YJW-26공은 최저 수위 48.62 m, 최고 수위 49.71 m, 변동폭은 1.09 m이다. YJW-26공은 강우 뿐만 아니라 주변의 양수정의 양수 영향도 받는 것으로 보인다. 관측공 주변 포장률은 높지 않으며, 주변에는

논과 밭이 분포한다. YJW-28공은 최저 수위가 66.90 m, 최고 수위가 78.55 m, 변동 폭 11.65 m로서 주변 양수정(마을상수도)의 영향도 많이 받는 것으로 보인다. 주변 포장구간은 없으며 마을상수도가 있다. YJW-61공은 최저 수위가 49.88 m, 최고 수위가 53.56 m, 변동폭은 3.68 m이다. 주변은 논과 밭으로 구성

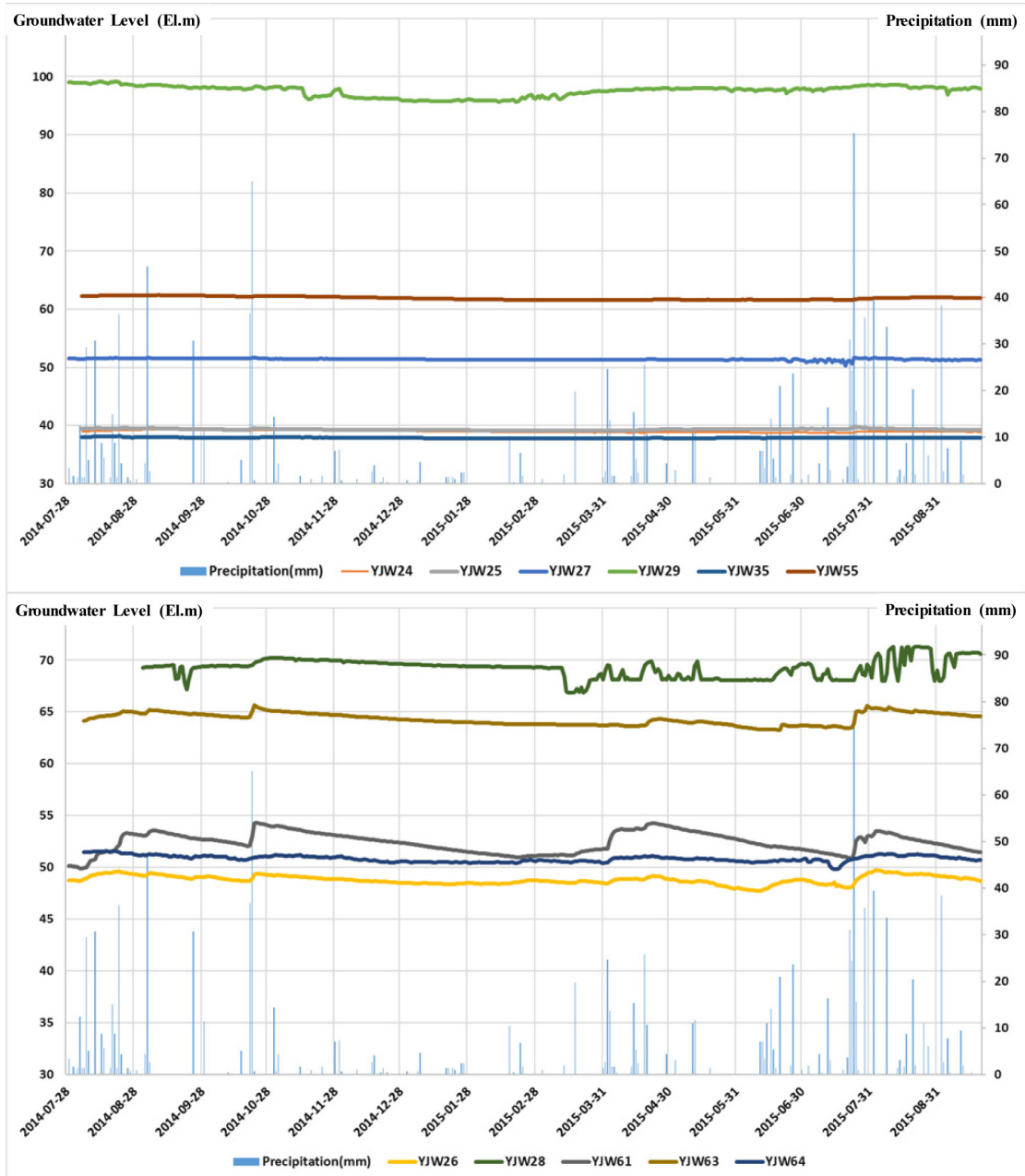


Fig. 4. Groundwater level fluctuation on the observation wells.

되어 있으며 포장구간은 없다. YJW-63공은 최저 수위가 64.15 m, 최고 수위가 65.24 m이다. 도로 주변부에 위치하며 주변 논과 밭으로 구성되어 있다. YJW-64공은 최저 수위가 50.79 m, 최고 수위가 51.60 m, 변동폭은 0.81 m이다. 주변부에는 논과 밭이 분포하고 있다.

2014년 8월~2015년 9월 관측자료에 의하면, 지하수위가 강우에 민감하게 반응하지 않는 관측공은 YJW-24, 25, 27, 29, 35, 55공이다. YJW-24공은 최저 수위가 38.96 m, 최고 수위가 39.2 m이다. 도로 주변부에 위치하며 인근에 비닐하우스가 위치하고 있다. YJW-25은 최저 수위가 39.36 m, 최고 수위가 39.61 m이다. 강우에 따라 약하게 반응한다. 도로 주변부에 위치하며 주변에는 논, 밭이 분포한다. 생활용 미사용 관정인 YJW-27공은 최저 수위가 51.39 m, 최고 수위가 51.63 m, 변동폭은 0.24 m이다. 주변 포장률은 중간 정도이며, 인근 양수정의 영향을 받는 것으로 보인다. YJW-29공은 최저 수위가 97.95 m이고, 최고수위는 99.28 m이다. 주변부에 논과 밭이 분포하며 비닐하우스가 존재한다. YJW-35공은 지표면

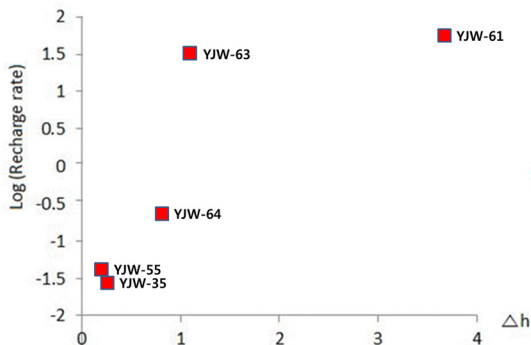


Fig. 5. Recharge rate (%) vs difference between maximum and minimum levels (Δh , m).

하 기준 최저 수위가 37.93 m, 최고 수위가 38.19 m이며, 지하수위 변동이 아주 미미하다. 하천과 가까우며, 도로 주변에 위치하며 주변에는 잔디밭이 분포한다. YJW-55공은 최저 수위가 62.23 m, 최고 수위가 62.43 m이다. 역시 지하수위 변동은 미미하다. 주변에는 논과 밭이 분포하고 있다.

4.2 복합 지하수위 변동법에 의한 함양률 산정

12개 지하수위 자동관측공 중 토층 시료를 채취하지 못한 6개 기존공과 망실공 1공(YJW-65)을 제외하고, 5개 지하수공(YJW-35, 55, 61, 63, 64)에 대해 복합 지하수위 변동법을 적용하여 지하수 함양률을 구하였다. 강우관측소별로 강우량과 토성에 따라 유효강우량을 결정하고, 유효강우량 이상에 대해 부정류 잔류함수비(Residual water content),유 지하수 유출상수(Runoff constant)와 충전 공극률을 산정하였다(Carsel and Parrish, 1988; Cho and Park, 2008). 지하수위 자동관측공 굴착시에 수위변동 구간에서 채취한 토양 시료를 입도분석하여 토성을 분류하였다. 그리고 식 (2)를 이용하여 모사된 지하수위 값과 관측된 지하수위 값의 상호 비교에 의해서를 통하여 지하수 함양률을 산정하였다(표 3).

관측공별로 복합 지하수위 변동법으로 구한 지하수 함양률은 0.03~55.42%로서 큰 차이를 보이는데, 이는 강수량, 충전 공극률, 토양의 종류 뿐만 아니라 도로의 포장률 등 인위적인 요인과의 관련된다. 복합 지하수위 변동법으로 산정한 각 관측공별 지하수 함양률은 관측공 주변의 국지적인 함양률을 대표하는 것으로 볼 수 있다. 각 관측공의 지하수 함양률과 지하수위 변동폭을 그래프에 도시한 결과, 둘 간의 상관성은 비교적 높게 나타난다(그림 5). 관측공별 함양률을 이용하여 티센망으로 강천유역의 평균 지하수

Table 3. Recharge rate of the observation wells using the effective rainfalls of three rainfall stations.

Well number	Soil classification	Residual water content	Runoff constant (T^{-1})	Fillable porosity (%)	Effective rainfall (mm)	Rainfall station	Recharge rate (%)
YJW-35	Sand	0.045	-0.013	0.4321	7	Buron	0.03
YJW-55	Loamy sand	0.057	-0.008	3.6904	33	Yeoju	0.04
YJW-61	Sandy loam	0.065	-0.19	2.7665	8	Buron	55.42
YJW-63	Sandy loam	0.065	-0.02	3.0506	11	Taepyeong	33.33
YJW-64	Silty loam	0.067	-0.03	0.1296	8	Buron	0.25

함양율을 산정하면 17.81%이다. 연평균 강수량(1,270 mm)과 강천유역 면적(104.77 km^2)의 수자원 총량($133,055.25 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{yr}$)에 지하수 함양율(17.81%)을 곱하면 총 지하수 함양량은 $2.37 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{yr}$ 이다. 한편, 3개 강우관측소의 30년 평균 강수량(13.65 mm)을 이용하여 지하수 함양률을 산정하면, 관측공별 지하수 함양률은 1.92~51.35%를 보인다(표 4).

4.3 지하수 유동 모델링에 의한 지하수 함양률 산정

4.3.1 개념모델 설정

연구지역인 강천유역(여주시 점동면과 강천면 일

대)의 모델영역의 총면적은 230 km^2 으로서, 가로 14.00 km, 세로 16.45 km이다. 모델영역의 격자수는 32,000 개(= 400행 $\times$ 470열 $\times$ 2층)이다. 지층은 수문지질단위를 기준으로 2 층(쇄설성 퇴적물로 이루어진 충적층, 화성암과 변성암으로 이루어진 기반암)으로 구성으로 설정하였다(그림 6). 모델영역의 바깥경계는 불투수경계로 설정하였다. 연구지역내 남한강, 금곡천, 청미천, 삼승천, 관한천은 하천경계로 설정하였고, 북부에 위치한 강천보는 일정수두경계로 설정하였다. 그리고 하천으로 유입되는 작은 지류들은 배수경계로 설정하였다(그림 6).

Table 4. Recharge rate of the observation wells using 30-year annual mean rainfall rates of three rainfall stations.

Well number	Soil classification	Residual water content	Runoff constant (T^{-1})	Fillable porosity (%)	Effective rainfall (mm)	Rainfall station	Recharge Rate (%)
YJW-35	Sand	0.045	-0.013	0.68428	13.65	Buron	1.92
YJW-55	Loamy sand	0.057	-0.008	1.0034	13.65	Yeoju	2.10
YJW-61	Sandy loam	0.065	-0.19	5.2777	13.65	Buron	51.35
YJW-63	Sandy loam	0.065	-0.02	4.3063	13.65	Taepyeong	32.18
YJW-64	Silty loam	0.067	-0.03	0.262	13.65	Buron	25.09

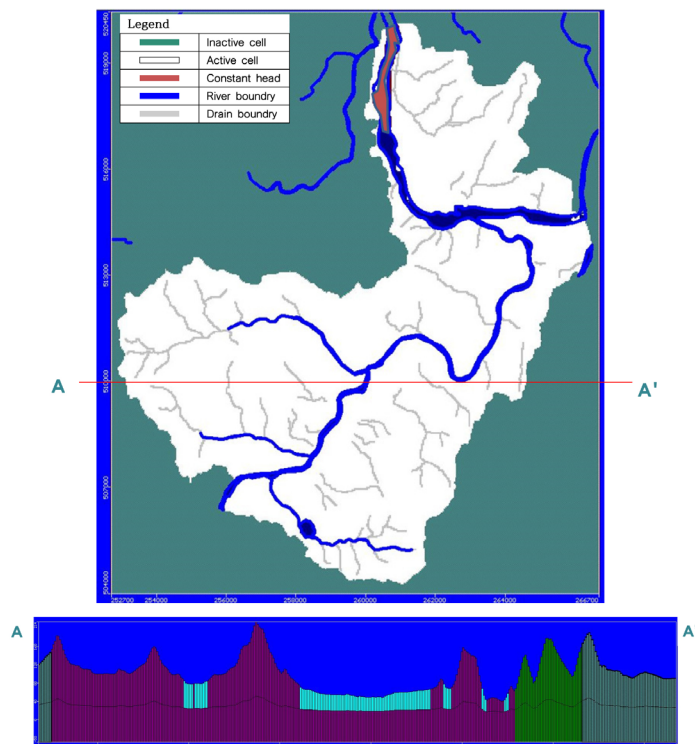


Fig. 6. Model domain and layers.

지하수위 보정을 위한 관측정은 지하수위 자동관측 결과를 이용하여 분석한 평수위시 충적대수층 자동관측 및 일제조사 결과를 이용하였다(MOLIT, 2015). 양수정 및 양수량은 사용 중인 우물 및 세부용도별 공당이용량을 산정하여 적용하였다. 모델에 입력된 관측정과 양수정 개수는 각각 12공, 2,665공이며, 지하수 양수량은 총 23,936.28 m³/day이다.

4.3.2 지하수위 보정 및 민감도 분석

민감도 분석이란 주로 수리적 매개변수 값이 지

하수위 계산값을 얼마나 많이 변화시키는지를 살펴보는 것이다. 본 연구에서 지하수 함양률에 대한 지하수위 계산값의 민감도 분석 결과, 지하수 함양률이 231.64 mm/yr일 때, 지하수위 계산값과 관측값의 평균제곱근 오차(Root mean square, RMS)가 14.25%로 최소값을 나타내었다(그림 7). 모델영역 내에 위치하는 11개의 지하수공에 대한 지하수위 관측값과 모델 계산값을 비교하여 지하수위 보정을 실시한 결과, 지하수위 관측값과 계산값의 평균 제곱근 오차는 4.85 m로서 서로 비교적 잘 일치한다(그림 8). 이 때

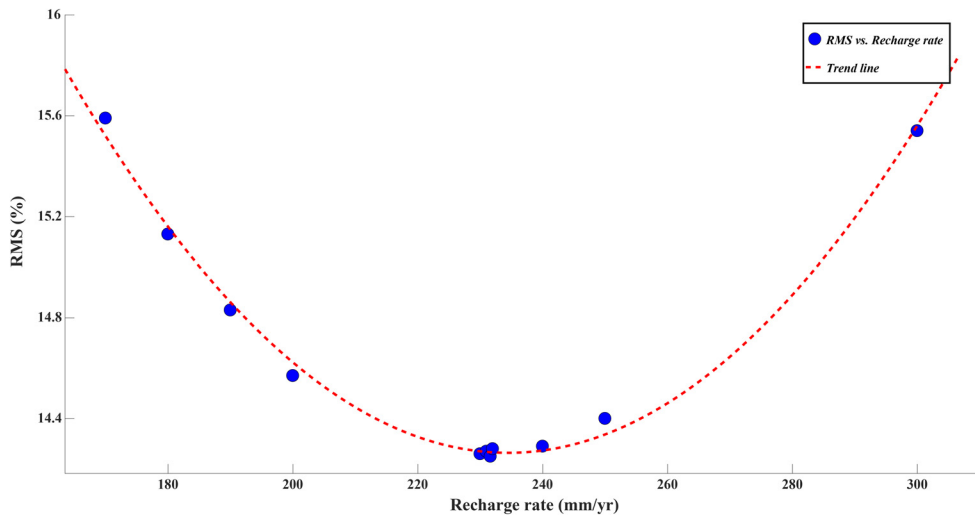


Fig. 7. RMS vs groundwater recharge rate.

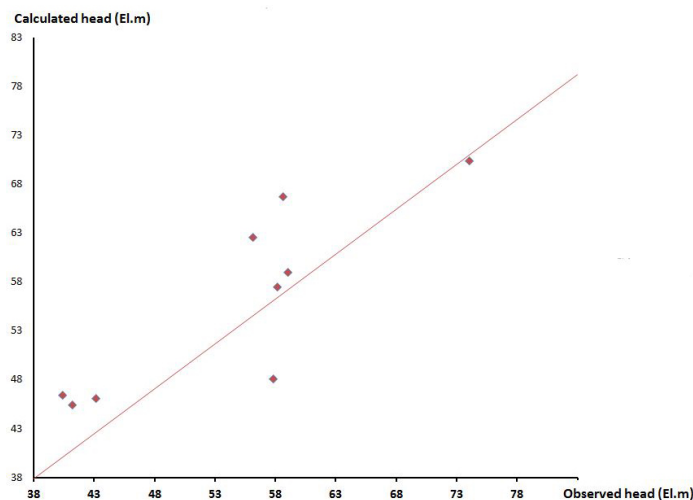


Fig. 8. Relationship between observed and calculated head.

산정된 지하수 함양율은 18.13%이고, 연평균 강수량 (1,270 mm)과 강천유역 면적(104.77 km²)의 수자원 총량 $133,055.25 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{yr}$ 에 대한 총 지하수 함양량은 $2.41 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{yr}$ 로 계산되었다.

5. 토의 및 결론

현재 우리나라에서는 지하수모델링 방법과 복합 지하수위 변동법에 의해서 지하수 함양률을 산정하는 경우가 많다. 그러나, 이 두 방법에 의한 지하수 함양률의 차이를 깊이있게 비교 검토한 연구 결과는 없다. 본 연구에서는 여주시 강천 유역을 대상으로 지하수 함양률 산정을 산정하기 위해서 지하수 모델링방법과 복합 지하수 변동법을 적용하였으며, 두 방법의 차이점을 제시하였다. 지하수 모델링방법과 복합 지하수 변동법으로 산정된 평균 함양율은 각각 18.13%, 17.81%로 나타났다. 강천 유역에 대하여 두 가지 방법으로 산정된 함양율에서 서로 차이를 보이는 것은 각각의 방법에 필요한 입력인자와 매개변수가 다르며, 분석방법의 오차와 측정값의 오차 등에 기인된다고 사료된다. 지하수 모델링 방법에 의해서 산정한 지하수 함양률은 유역 전체를 대표하는 값으로 볼 수 있으나, 수리상수, 수리적 경계, 대수층의 수직적 및 수평적 경계 등의 입력 변수의 자료 개수가 제한적이어서 유역 전체에 적용시킬 때 불확실성이 크다.

복합 지하수위 변동법은 각각의 관측공의 수위자료와 관측공 주변의 3개 강우관측소의 30년 평균 유효강수량, 충전 공극률, 토성분류, 입도분석 결과를 반영하므로, 국지적으로 정확한 함양률을 구할 수 있으나 유역 전체와 같은 넓은 범위를 대표하기에는 어려운 측면이 있다. 복합 지하수위 변동법은 강우가 지하로 침투하여 포화대에 도달한 지하수 함양률이 직접적으로 지하수위 상승을 초래하는 것을 전제로 하므로, 강우에 민감하게 반응하여 함양이 빠르게 일어나는 충적층에서 적용성이 높다. 그러나, 저투수성 매질로 구성되어 있는 지역에는 적용이 어렵다고 판단된다.

이 연구는 지하수 모델링과 복합 지하수위 변동법의 장점과 단점을 비교 검토함으로써 국가 지하수 관리를 위한 효율적인 지하수 함양률 산정법 이용방안에 도움을 줄 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 과학기술정보통신부의 한국연구재단 중견연구사업 (NRF-2017R1A2B2009033)으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- An, J.-H., Hamm, S.-Y., Lee, J.-H., Kim, N.-H., Yang, D.B. and Hwang, J.G., 2008, Estimation of groundwater recharge in Junggwae-Boeun area in Ulsan City using the water balance and hydrogeological analyses. *Economic and Environmental Geology*, 41(4), 427-442 (in Korean with English abstract).
- Andres, G. and Egger, R., 1985, A new tritium interface method for determining the recharge rate of deep groundwater in the Bavarian Molasse basin. *Journal of Hydrology*, 82, 27-38.
- Bierkens, M.F.P., 1998, Modeling water table fluctuations by means of a stochastic differential equation. *Water Resources Research*, 34(10), 2485-2499.
- Blaney, H.F. and Criddle, W.D., 1950, Determining Water Requirements in Irrigated Areas from Climatological and Irrigation Data. USDA (SCS) TP-96, 48.
- Carsel, R.F. and Parrish, R.S., 1988, Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resources Research*, 24(5), 755-769.
- 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(4), 457-474 (in Korean with English abstract).
- Cheong, J.-Y., Hamm, S.-Y., Yu, I.-R., Whang, H.-S., Kim, S.-H. and Kim, M.-S. and Kim, M.-S., 2015, Analysis of groundwater discharge into the Geumjeong tunnel and baseflow using groundwater modeling and long-term monitoring. *Journal of Environmental Science International*, 24(12), 1691-1703 (in Korean with English abstract).
- Cho, B.W., 2001, Hydrogeological Characteristics of the Groundwater Resources in the Busan Area, Korea. Doctoral thesis, Kyungpook National University, 208 p.
- Cho, J.-W. and Park, E., 2008, A study on delineation of groundwater recharge rate using water-table Fluctuation and unsaturated zone soil water content model. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 13(1), 67-76 (in Korean with English abstract).
- Choi, B.-S. and Ahn, J.-G., 1998, A study on the estimation of regional groundwater recharge ratio. *Journal of the*

- Korean Society of Groundwater Environment, 5(2), 57-65 (in Korean with English abstract).
- Choi, M.-J., Lee, J.-Y., Koo, M.-H. and Lee, K.-K., 2004, A comparative study on groundwater flow depending on conceptual models in tunnel modeling. *The Journal of Engineering Geology*, 14(2), 223-233 (in Korean with English abstract).
- Chung, I.-M., Na, H., Lee, D., Kim, N.-W., Lee, J. and Lee, J.-M., 2011, Spatio-temporal variations in groundwater recharge in the Jincheon region. *The Journal of Engineering Geology*, 21(4), 305-312 (in Korean with English abstract).
- 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(3), 269-284 (in Korean with English abstract).
- Healy, R.W. and Cook, P.G., 2002, Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 10, 91-109.
- Hornberger, G.M., Raffensperger, J.P., Wilberg, P.L. and Eshleman, K.N., 1998, *Elements of Physical Hydrology*. John Hopkins Univ. Press, Baltimore, Maryland, 302 p.
- Kim, S.-J., Noh, J.-H. and Jang, S.-W., 1989, Geological Map of Korea, Janghowon Sheet (1:50,000). Korea Institute of Energy and Resources, 17 p (in Korean with English abstract).
- Kim, T.-W., Hamm, S.-Y., Cheong, J.-Y., Ryu, S.M., Lee, J.-H., Son, K.T. and Kim, N.-H., 2008, Time series and groundwater recharge Analyses using Water fluctuation data in Mountain Geumjeong area. *Journal of Environmental Science International*, 17(2), 257-267 (in Korean with English abstract).
- Knotters, M. and Bierkens, M.F.P., 2000, Physical basis of time series models for water table depths. *Water Resources Research*, 36(1), 181-188.
- Koh, Y.-K., Bae, D.S., Kim, K.S., Chung, H.J. and Kim, S.Y., 2001, Consideration of the groundwater recharge based on environmental isotopic characteristics of the small basin in the Yeosu area. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 6(3), 93-106 (in Korean with English abstract).
- Lee, B.D., 2001, Study on Hydrogeological Characteristics Related to the Excavation of Youngchun Waterway Tunnel. Doctoral thesis, Pusan National University, 302 p (in Korean with English abstract).
- Lee, D.R. and Yoon, Y.N., 1996, Estimation and analysis of groundwater recharge in Korea. *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, 16, 321-334 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.-Y. and Lee, K.-G., 2002, A Comparative study on characteristics of waterlevel responses to rainfall in the two aquifer systems. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 7(1), 3-14 (in Korean with English abstract).
- McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W., 1988, A Modular Three-dimensional Finite-difference Ground-water Flow Model. *Techniques of Water-Resources Investigations of the USGS*, Book 6, Chapter A1.
- Meyboom, P., 1961, Estimating ground-water recharge from stream hydrographs. *Journal of Geophysical Research*, 66, 1203-1214.
- MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport), 2015, Basic Survey Report of Groundwater in Yeosu Area (in Korean).
- Monteith, J.L., 1965, *Evaporation and environment*. Symposium of the Society for Experimental Biology. The State and Movement of Water in Living Organisms, 19, Academic Press, Inc., NY., 205-234.
- Morel-Seytoux, H.J. and Verdin, J.P., 1981, Extension of the Soil Conservation Service rainfall-runoff methodology for ungaged watersheds. Report FHWA/RD-81-060, Offices of Research & Development, Environmental Division, US Federal Highway Administration, 75 p.
- Park, C.-K., 1996, Estimation of the available amount of groundwater in south Korea: 2. Application of five major river basins. *Journal of Korean Society of Groundwater Environment*, 3(1), 21-26 (in Korean with English abstract).
- Park, E., 2007, Development and application of the prediction model of underground water level by rainfall. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 12(4), 54-59 (in Korean with English abstract).
- Park, E. and Parker, J.C., 2008, A simple model for water table fluctuations in response to precipitation. *Journal of Hydrology*, 356, 344-349.
- Penman, H.L., 1948, Natural evapotranspiration from open water, bare soil, and grass. *Proceedings of the Royal Society of London, Ser. A.*, 193, 120-145.
- Rasmussen, W.C. and Andreasen, G.E., 1959, *Hydrologic Budget of the Beaverdam Creek Basin*, Maryland. US Geological Survey Water-Supply paper, 1472, 106 p.
- Reilly, T.E., 2001, System and Boundary Conceptualization in Ground-water Flow Simulation. *Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey*. Book 3. Applications of Hydraulics Chapter B8.
- Schicht, R.J. and Walton, W.C., 1961, *Hydrologic Budget for Three Small Watersheds in Illinois*. Illinois State Water Survey Report of Investigation, 40.
- Shao, L., Guo, X., Liu, S. and Zheng, G., 2017, *Effective Stress and Equilibrium Equation for Soil Mechanics*. CRC Press, London, 160 p.
- Solomon, D.K., Schief, S.L., Poreda, R.J. and Clarke,

- W.B., 1993, A validation of $^3\text{H}/^3\text{He}$ method for determining groundwater recharge. *Water Resources Research*, 29(9), 2951-2962.
- Thornthwaite, C.W., 1944, Report of the Committee on Transpiration and Evaporation, 1943-1944. *Transactions. American Geophysical Union*, 25, 687 p.
- Turc, L., 1963, Evaluation des besoins en eau d'irrigation. evapotranspiration potentielle, formulation simplifie et mise a jour. *Ann. Agron*, 12, 13-49.
- Won, L.-J., Kim, H.-S., Koo, M.-H. and Seo, H.K., 2002, Evaluation of aquifer characteristics by long-term observation data. *Proceeding of Fall Meeting of Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, 265-268 (in Korean).
- Won, L.-J., Koo, M.-H. and Kim, H.-S., 2006, Simulation of groundwater flow and sensitivity analysis for a riverbank filtration in Koryeong, Korea. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 11(2), 45-55 (in Korean with English abstract).
- Yeo, S.-C. and Lee, I.-K., 1975, Geological Map of Korea, Yeosu Sheet (1:50,000). *Korea Institute of Geology and Mineralogy* (in Korean with English abstract).
- Yun, S.-W., Kim, Y.-S., Kim, D.-H., Kim, H.-C., Shin, M.-C., Park, J.-Y., Kim, H. and Lee, J.-Y., 2013, Comparative study on waterlevel fluctuation and recharge characteristic in groundwater of urban and rural areas in Gangwon Province. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49(4), 503-516 (in Korean with English abstract).
- Yun, S.-W., Lee, J.-Y. and Lee, H.-K., 2015, Variation of stream water quality and baseflow contribution from groundwater during rainfall event in the Haeon basin. *Journal of the Geological Society of Korea*, 51(6), 611-621 (in Korean with English abstract).
- Zheng, C. and Wang, P.P., 1999, MT3MS, A Modular Three-dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems (Release DoD_3.50.A). *US Army Corps of Engineers*, 239 p.

Received : March 28, 2018

Revised : April 24, 2018

Accepted : April 24, 2018