

Evaluation of Percolation Rate of Bedrock Aquifer in Coastal Area

해안지역 암반대수층의 침누수량 평가

Jeong-Hwan Lee^{1*}, Haeryong Jung¹, Joo-Wan Park¹, Jeong Hyoun Yoon¹, Jae-Yeol Cheong¹, Sun Ju Park², and Seong-Chun Jun³

¹ Korea Radioactive Waste Agency, 168 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Dajeon, Republic of Korea

² NEXGEO Co. Ltd, 66 Yanggae-daero, Songpa-gu, Seoul, Republic of Korea

³ GeoGreen21 Co. Ltd, 33 Digital-ro, Guro-gu, Seoul, Republic of Korea

이정환^{1*}, 정혜룡¹, 박주완¹, 윤정현¹, 정재열¹, 박선주², 전성천³

¹한국원자력환경공단, 대전광역시 유성구 가정로 168 KT빌딩

²(주)넥스지오, 서울특별시 송파구 양재대로66

³(주)지오그린21, 서울특별시 구로구 디지털로 33

(Received November 4, 2015 / Revised December 16, 2015 / Approved December 28, 2015)

Estimation of groundwater hydrologic cycle pattern is one of the most critical issues in sustainable management of groundwater resources in coastal area. This study estimated groundwater percolation by using the water balance methodology and hydrogeological characteristics of land use and soil. Evapotranspiration was computed by using the Thornthwaite method, and surface runoff was determined by using the SCS-CN technique. Groundwater storage change was obtained as 229 mm/a (17.8% of the average annual rainfall, 1286 mm/a), with 693 mm/a (60.1%) of evapotranspiration and 124 mm/a (9.6%) of surface runoff. Rainfall and groundwater storage change was highly correlated, comparing with the relationships between rainfall and evapotranspiration, and between rainfall and surface runoff. This result indicates that groundwater storage change responds more sensitively to precipitation than evapotranspiration and surface runoff.

Keywords: Groundwater storage change, Evapotranspiration, Surface runoff, Rainfall, Coastal area

* Corresponding Author.

Jeong-Hwan Lee, Korea Radioactive Waste Agency, E-mail: oathway@korad.or.kr, Tel: +82-42-601-5353

ORCID

Jeong-Hwan Lee <http://orcid.org/0000-0003-4671-5282>

Joo-Wan Park <http://orcid.org/0000-0003-4869-5916>

Jae-Yeol Cheong <http://orcid.org/0000-0003-3741-8446>

Seong-Chun Jun <http://orcid.org/0000-0002-6147-4790>

Haeryong Jung <http://orcid.org/0000-0003-1776-9206>

Jeong Hyoun Yoon <http://orcid.org/0000-0002-8485-8869>

Sun Ju Park <http://orcid.org/0000-0002-9347-6974>

해안지역에서 지하수 순환 특성 규명은 지하수 자원의 효율적 관리 측면에서 매우 중요하다. 본 연구에서는 물수지 분석법을 이용하여 지하수 침투수량을 산정하였다. 증발산량은 Thornthwaite 방법으로 계산하였으며, 지표 직접유출량은 SCS-CN 방법으로 산정하였다. 지하수 저류량 변화는 229 mm/년로 30년 평균 강수량 1286 mm/년의 17.8%에 해당하며, 증발산량은 693 mm/년 (53.9%), 지표 직접유출량은 124 mm/년 (9.6%)로 산정되었다. 강우량과 지하수 저류량 변화 사이에는 강우량과 증발산량, 강우량과 지표 직접유출량에 비해 상관성이 높게 나타난다. 이는 증발산량 및 지표 직접유출량 보다 지하수 저류량 변화가 강우량에 대해서 더 민감하게 반응한다는 것을 반영한다.

중심단어: 지하수 저류량 변화, 증발산, 지표 직접유출, 강우, 해안지역

1. 서론

지하수는 폐기물 내부에서 오염된 방사성 핵종의 용해, 이동, 및 운반 매개체로서 매우 중요하기 때문에 방사성폐기물 처분시설 부지에 대해서는 지하수 유동 특성을 명확히 규명하는 것이 필수적이다[1]. 지하수 유동 특성을 조절하는 인자로는 퇴적층의 조직, 간극 부피, 지질 구조, 지질 특성이 포함된다[2, 3]. 그러나, 특정한 면적 영역의 경우, 지하수 유동은 수리수문학적 순환의 한 부분으로 고려되어 해석될 수 있으며, 강우량, 토양 함수 특성, 하천 유출량, 온도, 토지 이용도 등의 지형적, 지질학적, 기후적인 조건을 반영한 지하수 순환 특성으로 결정될 수 있다[4]. 이러한 지하수 순환 특성 분석은 물수지 분석을 통해, 특정 영역의 증발량 및 증산량, 지표 직접유출량, 하천 유출량, 지표 침투수량 등의 산정과 인자들 간의 상호 관련성 평가가 가능하다[5].

국외의 경우, 물수지 분석을 통한 다양한 모델 영역을 고려한 지하수 함양량 과정의 개념 모델 개발 연구[6, 7, 8], 지하수 함양량 모델 개발 연구[9, 10, 11], 지리정보시스템(Geographic Information System, GIS)를 이용한 지구통계학적 연구[12, 13], 해안지역의 지하수 순환 연구[14, 15] 등 다양한 연구들이 진행되고 있다. 국내의 연구 현황으로는, 물수지 분석을 통한 소유역 지하수 함양량 산정 연구[16, 17], 지하수 함양량 모델 개발 연구[18, 19], GIS를 이용한 지구통계학적 연구[20, 21] 등 다양한 연구들이 진행되고 있으나, 해안지역에서 지하수 순환 특성 연구는 상대적으로 미진한 실정이다[22]. 따라서, 본 연구는 해안지역에 위치한 소유역에 대해서 식생, 수리지질, 토양 특성, 기후 특성 등을 분석하고, 물수지 분석법을 활용하여 다양한 인자들을 고려한 지하수

침투 특성을 규명하고자 한다.

2. 연구지역

연구지역은 경상북도 경주시 양북면 일원으로서, 해발고도는 300 m 이하, 경사도는 약 30% 미만의 완만한 지형을 형성하며, 지질은 하부로부터 상부로 백악기 퇴적암, 제3기 관입암류에 포함되는 섬록암, 화강섬록암, 흑운모화강암, 유문암, 반상질 조면암질 안산암과 이들 모두를 피복하는 제4기 충적층이 분포한다[23].

연구지역에 분포하는 토양통은 농촌진흥청 국립농업과학원의 토양환경지도(<http://soil.rda.go.kr>) 자료에 따르면 안릉(세립질 양토), 백산(세립질 양토), 봉산(세립질 양토), 칠곡(세립질 양토), 대본(사질토), 은곡(양토), 고산(양토질), 지산(세립질 양토), 조천(세립질 양토), 가포(양토), 매곡(양토), 상주(조립질 양토), 석천(조립질 양토), 사촌(조립질 양토), 삼각(조립질 양토), 송정(세립질 양토), 수암(양토), 석토(양토), 태화(세립질 양토), 영일(조립질 양토) 등 20개 토양 종류가 분포하며[24], 세립질 양토질 토양 조직이 우세하게 발달하고 있다. 한편, 연구지역의 토지이용 특성은 환경부 환경공간정보서비스(<http://egis.me.go.kr>)의 울산(009, 010)의 세분류 토지피복지도(1:5,000)을 활용하여 분석한 결과, 산림 지역(64.9%), 초지 지역(19.8%), 공공시설 지역(7.8%), 농업주거 지역(3.3%), 목초지 지역(2.5%), 교통 지역(1.4%), 인공나지 지역(0.4%) 등이 분포하며, 대부분 산림 형태의 토지피복 특성이 우세하게 나타난다(Fig. 1).

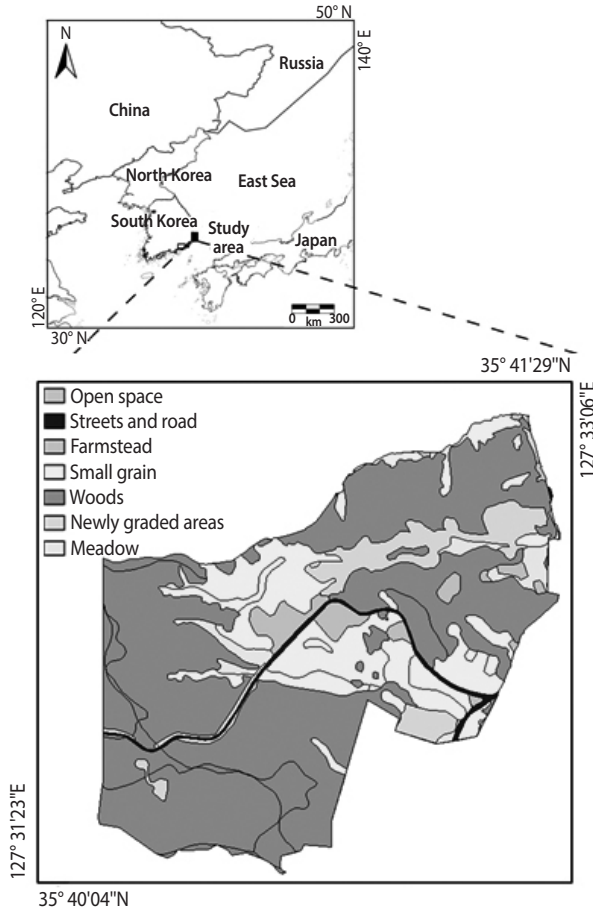


Fig. 1. Location and land use of the study area [23].

3. 연구방법

3.1 물수지(Water-budget) 분석법

물수지 방법은 특정한 지질 규제 부피에 대해서 시공간적인 물의 유입과 유출 및 저류량 변화(storage change)를 질량보존법칙을 활용하여 평가하는 방법으로서, 지하수 함양량을 산정하는 가장 보편적이고 적용가능한 방법이다[25].

물수지 방법은 존재하는 적용가능한 자료를 활용함으로써 모든 규모에 대해 수리적 시스템의 개념화가 가능하나, 관심 대상지역의 시공간적인 규모에 따라 적당한 물수지 방법을 선정하는 것이 매우 중요하며, 일반적으로 시공간에 따라 국소(local), 중간(meso), 거대(macro) 규모로 세분되며, 국소규모는 개별적인 성분들에 대한 지점 측정의 목적으로서

약 1 m~1 km의 길이 규모를 가지고, 중간규모는 단일 소유역(단일 지하수 분수령) 면적 이상으로 여러 성분들의 측정 자료가 필요하며 1~1,000 km의 길이 규모를 가지고, 거대 규모는 1,000 km 길이 규모를 초과하며 대륙적인 혹은 전 지구적인 영역을 포함하고 광역 관측시스템 자료를 활용한 다[4]. 본 연구지역의 길이 단위가 1 km 이상이기 때문에 중간 규모 물수지 방법 중 대수층의 매개변수를 포함하는 방법을 적용하였다.

$$R = ET + R_{off} + Q^{bf} + \Delta S^{sw} \quad (1)$$

여기서, R는 강우량, ET는 포화대 및 불포화대로부터의 증발산량, R_{off} 는 지표 직접유출량, Q^{bf} 는 포화대에서 샘, 하천 및 바다로의 기저유출량(지하수 유출량과 동일함), ΔS^{sw} 는 규제 부피에서 지하수 저류량 변화(유효 지하수 함양량)이다 [17]. 기저유출량과 지하수 저류량 변화량을 본 연구에서는 총 침누수량(총 지하수 함양량)으로 가정하여 해석하였다.

3.2 증발산량 분석 방법

증발산(evapotranspiration)은 수면으로부터의 증발(evaporation)과 식물로부터의 증산(transpiration)을 합한 값이며, 수분이 기체 상태로 대기에 환원되는 모든 것을 포함한 것이다. 이는 기상학적 인자 이외에도, 식물의 종류, 색깔의 농도, 식물의 밀도, 성장 속도, 잎 표면의 크기 등의 식물 요소뿐만 아니라 토양의 공극률, 수리전도도, 입자의 크기, 토양의 함수율 등에 직접적으로 영향을 받는 인자이다 [26]. 증발산량은 직접적인 측정이나 간접적인 계산에 의해서 결정할 수 있다. 직접적인 측정은 일반적으로 라이스미터를 이용하는 방법이다.

증발산의 간접적인 측정방법은 Thornthwaite 방법[26], Turc의 방법[27], Penman의 방법[28], Blaney와 Criddle 방법 [29], Penman- Monteith의 방법[30]들이 있으며 직접적인 측정 방법보다 더 효과적으로 알려져 있다[31, 32]. 본 연구에서는 국내에서 증발산량 산정 연구에 널리 사용된 Thornthwaite 방법을 적용하였다[16, 17, 33, 34, 35]. Thornthwaite 법은 기후 인자를 고려하여 증발산량을 계산한다. 월 열지표(monthly heat index)를 j 라 하면 다음의 경험식이 성립한다.

$$j = (t_m/5)^{1.514} \quad (2)$$

이다. 여기서, t_m 은 월평균 기온(°C)이고, $m=1, 2, 3 \dots 12$ 월이다. 월 열지표의 연간 합산으로 산출되는 년 열지표 J 는

$$J = \sum_{n=1}^{12} j_n \quad (3)$$

이다. 식물소비량 혹은 보정되지 않은 월 잠재증발산량(uncorrected monthly potential evapotranspiration), UPE(m)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$UPE(m) = 16.2(10t_m/J)^\alpha \quad (4)$$

여기서, 연간 열지수는 $\alpha = (675 \times 10^{-9})J^3 - (771 \times 10^{-7})J^2 + (179 \times 10^{-4})J + 0.49239$ 이다. 따라서 기온이 0°C 이하로 떨어지면 UPE(m)은 0이 된다.

월평균기온이 t_m °C 인 특정 월에 대한 보정된 잠재증발산량(corrected monthly potential evapotranspiration) PE(m)는 다음 식과 같다.

$$PE(m) = UPE(m) \cdot \frac{D}{30} \cdot \frac{T}{12} \quad (5)$$

여기서 D는 해당 월의 일수, T는 해당 월의 최대일조시간이다.

실제증발산량(AE(m))은 두 경우로 나누어 계산된다.

$$P(m) - PE(m) > 0 \quad (6)$$

$$P(m) - PE(m) < 0 \quad (7)$$

여기서, $P(m)$ 는 월 강수량(mm), $PE(m)$ 는 보정된 월 잠재증발산량(mm)이다. (6)의 경우에는 잠재증발산량과 실제증발산량이 같다. 즉, $AE(m) = PE(m)$ 이다. 그러나 (7)의 경우에는 초기상태의 토양의 수분함량(soil moisture storage in its original state, SM)이 증발산 과정에 영향을 끼친다. 이것을 고려하기 위하여 월별 토양 수분함량(monthly soil moisture storage) SM(m)은

$$SM(m) = SM^*e^{(1/SM)^{APWL(m)}} \quad (8)$$

와 같다. APWL(m)은 잠재적 물손실의 연속 합(accumulation of potential water loss) 즉, $P(m)-PE(m)$ 의 음의 값의 연속합이다. 토양의 함수능력(SM)은 Thornthwaite와 Mather의 방식에 의하여 계산된다[36]. 토양 함수능력 변화인 $\Delta SM(m)$ 은 해당 월 이전의 토양함수능력($SM(m-1)$)과 해당 월의 토양함수능력($SM(m)$)의 차를 말한다.

$$\Delta SM(m) = SM(m-1) - SM(m) \quad (9)$$

$$P(m) - PE(m) > 0 \text{ 이면 } AE(m) = PE(m) \quad (10)$$

$$P(m) - PE(m) < 0 \text{ 이며 } AE(m) = P(m) + \Delta SM(m) \quad (11)$$

3.3 지표 직접유출량 분석 방법

강수량으로부터 증발산과 침투에 의한 손실을 뺀 값을 초과강수량 또는 지표유출(Runoff)이라 하며, 지표유출량 계산방법에는 Φ 지표법(Φ index method)[37], W 지표법(W index method)[38], SCS방법(soil conservation service method)[39] 등이 있다. 어떤 수역에서 호우로 인한 유출량 자료가 없을 경우에는 직접유출량의 결정이 불가능하여 Φ 지표와 W지표를 구할 수 없으므로 초과강수량을 결정할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 전세계적으로 널리 사용되는 SCS방법을 이용하여 지표유출량을 계산하였다[40, 41].

유출량 자료가 없는 경우에 유역의 토질특성과 식생피복상태 등에 대한 상세한 자료만으로 초과강수량, 즉 지표유출량을 산정할 수 있는 방법은 SCS방법이며, 미국의 계획유역의 초과강수량(혹은 유효수량)의 산정에 널리 사용되고 있다. SCS 방법은 유효수량의 크기에 직접적으로 영향을 미치는 인자로서 유역을 이루고 있는 토양의 종류와 토지 이용 혹은 식생피복의 종류, 피복상태 및 토양의 수문학적 조건을 고려한다[39].

SCS방법에 의해서 초과강수량 또는 직접유출량(direct runoff)을 구하는 식은 다음과 같다.

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P} \quad (12)$$

여기서 F : 시간(t)에서 토양의 저류량(mm)

S : 토양이 완전 포화되었을 경우 저류량(mm)

Table 1. Soil classification by the SCS method [43]

Soil type	Description and runoff potential	Minimum infiltration rate (inch/hr)
A	Mostly sand and gravel; low runoff potential	0.30-0.45
B	Sand with small amount of clay and silt; moderately low runoff potential	0.15-0.30
C	Mostly clay and silt; moderately high runoff potential	0.05-0.15
D	Clay and silt; high runoff potential	0-0.05

Q : 직접유출량에 해당하는 유효수량(mm)
 P : 누적강수량(mm)이다.

$$CN = \frac{25,400}{S + 254} \text{ 혹은 } S = \frac{25,400}{CN} - 254 \quad (15)$$

강수로부터 발생하는 직접유출량은 토양이 최대로 저류할 수 있는 양(S)과 실제로 토양으로 흡수되는 물의 양(F)의 합수로 표시되며, 이는 직접유출량과 강수량과의 차이이다.

즉, $F = P - Q$ 이며, 이 관계를 식(12)에 대입하면 다음과 같다.

$$Q = \frac{P^2}{P + S} \quad (13)$$

방정식(13)은 강우가 발생하면 즉시 유출이 발생하는 경우이나 실제로 강우 발생 초기에는 강우의 대부분이 침투되며 유출이 발생하는 것은 강우 강도에 따라 다르고, 일정한 시간이 경과된 후에 발생하는 것이 보통이다. 따라서 초기의 침투를 고려한다면 P 값에서 초기 손실(I_a)을 제하여야 한다. 이 손실은 지역마다 다양한 값일 수 있으나, SCS는 미국 내 많은 농지 및 산림유역에서 실험한 결과를 바탕으로 $I_a=0.2S$ 로 보고되었으며[42], 이 관계를 식(13)에 대입하면 식(14)과 같이 되어, 이것이 곧 총 강우와 유효수량(직접유출량)과의 관계이다. 여기서 Q는 0보다 크고, P는 0.2S보다 커야 한다.

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (14)$$

식(14)의 S는 선행토양함수조건(antecedent soil moisture condition, AMC)에 따라 서로 다른 값을 가지게 된다. 유역의 토양이나 토지이용 및 처리상태 등의 수문학적 토양 피복형(hydrologic soil-cover complexes)의 성질을 나타내며, 유역의 유출능력을 표시하는 유출곡선지수 CN (runoff curve number)이라는 변수를 S의 함수로 정의함으로써, 유출에 미치는 S의 효과를 고려할 수 있다.

여기서 CN은 SCS에서 토양의 종류 및 지표의 상태에 따라 정한 지표로서 유출곡선지수(runoff curve index)라 한다.

SCS에서는 식(15)을 사용하여 직접유출량을 계산하는데 다음 3가지 사항으로는 (1)토양의 종류, (2)유역의 선행토양함수조건, (3)토지의 사용용도이다. 3가지 요소는 식(15)의 CN 값을 이용한 직접유출량 계산에 반영되며, CN의 값도 이에 따라 구분된다. SCS에서는 흙의 종류를 유출 발생 가능 정도에 따라 A, B, C, D의 4가지로 분류한다(Table 1).

3.4 t-검정

t검정은 모집단의 평균(μ)이나 표준편차(σ^2)를 알지 못할 때 모집단을 대표하는 표본으로부터 추정된 평균이나 표본편차를 활용하여 검정하는 통계 방법으로서, 두 모집단의 평균간의 차이가 없는 귀무가설(null hypothesis)과 두 모집단의 평균 간의 차이가 있음을 의미하는 대립가설(alternative hypothesis) 중에서 하나를 선정할 수 있도록 하는 통계적 방법이다[44]. t-검정의 판단기준은 t-분포를 평가하는 것으로서, 정규분포를 따르는 두 개의 모집단 $N_1(\mu_1, \sigma_1^2)$ 과 $N_2(\mu_2, \sigma_2^2)$ 에서 추출된 표준자료로부터 모평균 μ_1, μ_2 가 같은가 아닌가를 검증하거나, 하나의 정규 모집단에서 추출된 표본자료로부터 계산되는 표본평균이 모평균과 같은가 아닌가를 검정한다. 일반적으로 t 분포는 정규분포의 어림치에 해당되며, 정규분포와의 근접성은 자유도에 의해서 결정된다. 즉, 표본의 크기가 크면 자유도가 증가하게 되고 t 분포는 더 정규분포에 이르게 된다.

4. 결과 및 고찰

4.1 기상자료 분석

연구지역과 가장 가까운 곳에 위치하는 울산기상관측소의 기상자료를 이용하였다[45]. 지하수 침투수량 산정을 위하여 지난 30 년간(1985년 1월부터 2014년 12월까지)의 강우량과 기온 자료를 분석하였다(Fig. 2). 지난 30 년간의 연강우량의 범위는 693~2059 mm(연평균 강우량 1286 mm)이다. 1994년(921 mm), 1995년(693 mm), 2001년(869 mm)로 연강우량이 1000 mm 이하로 극심한 가뭄현상을 보였으며, 특히 1995년과 2001년에는 연강우량이 900 mm 미만으로 전국적인 가뭄이 발생하였다[16]. 한편, 30 년간의 연평균 기온의 범위는 12.7~15.2℃이며, 이 기간 동안의 연평균 기온의 평균값은 14.0℃이다. 또한 월평균 기온도 0℃ 이상으로 나타났다.

4.2 증발산량 분석

본 연구에서는 비교적 간단한 방법이지만, 기후 인자를 고려하기 때문에 월 증발산량의 변화를 산정할수 있을 뿐만 아니라, 유용한 증발산량 산정 방법[46]인 Thornthwaite 방법을 이용하여 1985년부터 2014년까지의 증발산량을 계산하였다. 울산기상청의 매월 최대일조시간을 이용하여 잠재

증발산량을 산정하였으며, 이로부터 강우량과 토양 함수능을 고려한 실제 증발산량을 산정하였다. 본 연구지역의 토양은 ‘세사질 양토’이며, 식생상태는 ‘산림이 우거진 지역’으로 분류되므로, 토양의 종류와 식생상태에 따라 결정되는 토양 함수능은 300으로 적용하였다[36]. 각 연도별 증발산량의

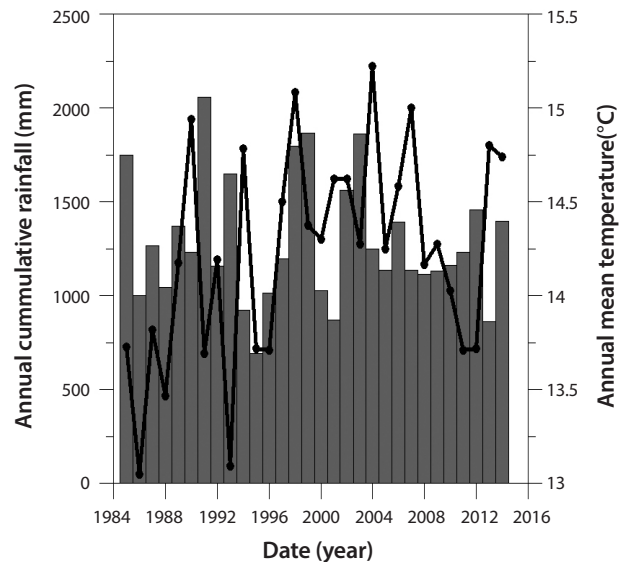


Fig. 2. Annual rainfall and average air temperature from 1985 until 2014 (bar chart: annual cumulative rainfall, line: annual mean temperature).

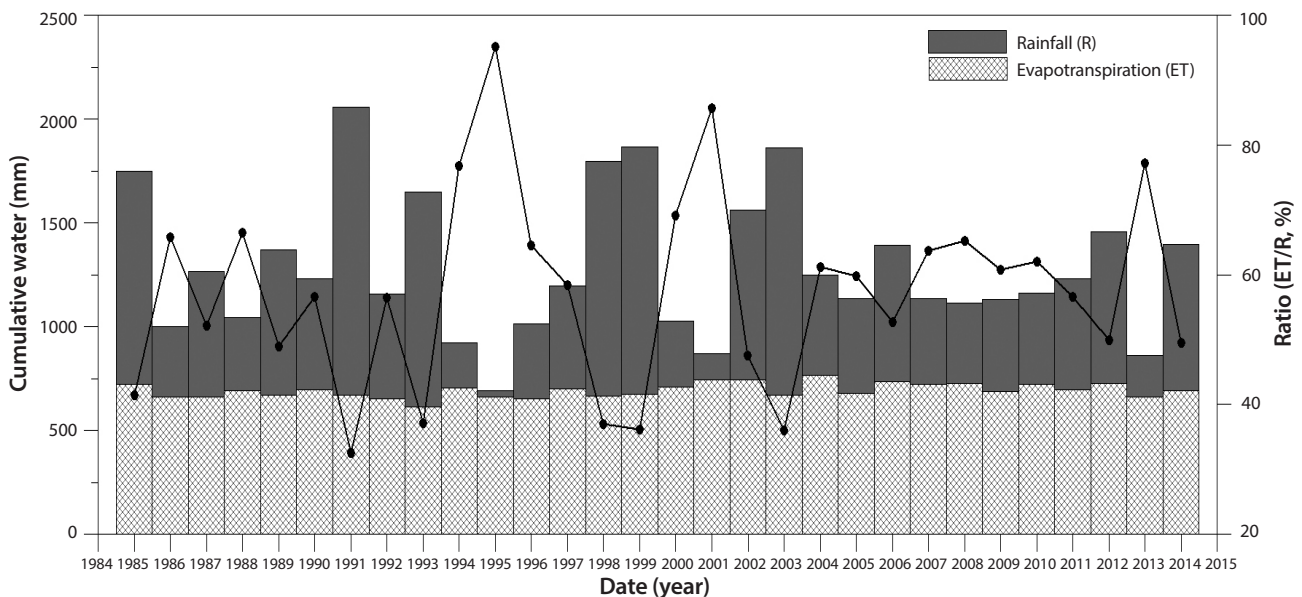


Fig. 3. Annual evapotranspiration (ET) and ratio of ET to annual rainfall (R) from 1985 until 2014.

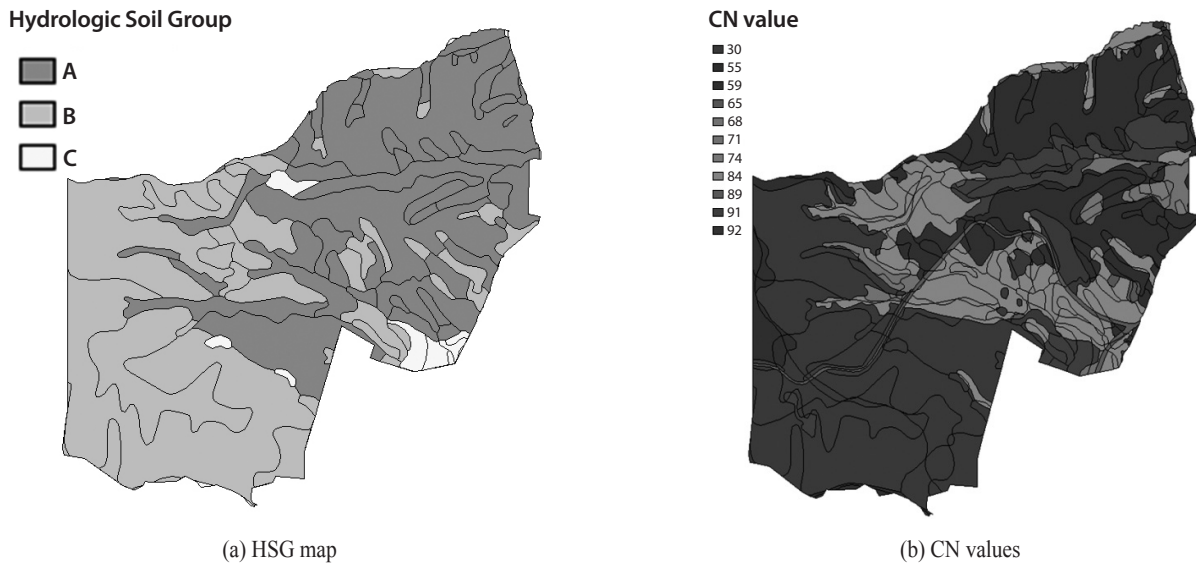


Fig. 4. Distribution (a) HSG and (b) CN values of in the study area.

범위는 612~765 mm이다(Fig. 3). 한편 30 년간의 증발산량 평균값은 693 mm로 30 년간의 연평균 강우량(1286 mm)의 53.9%를 차지한다. 증발산량의 변화는 강우량보다는 기온에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타난다. 즉, 최고 연평균 기온(15.2℃)을 기록한 2004년에는 증발산량이 765 mm이고, 두 번째로 높은 연평균 기온(15.1℃)을 기록한 1998년에는 664 mm로 역시 높은 증발산량을 나타내었다. 반면에 최저 연평균 기온(13.1℃)을 보였던 1993년에는 증발산량이 612 mm로 평균값(693 mm) 보다 낮게 나타났다.

4.3 지표 직접유출량 분석

본 연구에서는 토양종류, 토지 이용도, 식생상태를 활용하여 11개의 수문학적 토양군(Hydrologic Soil Group, HSG) A, B, C, D 등급으로 세분화하였다(Fig. 4). 또한 11개 소지역에 따른 각각 CN값을 산정하고 소지역별 지표 직접유출량에 면적 가중치를 적용하여 연구지역 전체 지표 직접유출량을 산정하였다(Table 2). SCS-CN 방법으로 구한 1985~2014년의 각 연도별 지표 직접유출량은 14.1~434 mm로 각 연도별 연강우량의 2.0~21.1%에 해당한다(Fig. 5). 한편 30 년간의 연평균 지표 직접유출량은 124 mm로 30 년 평균 강우량(1286 mm)의 9.6%이다. 해당 연도별 강우량과 지표 직접유출량은 양의 비례관계를 나타낸다. 즉, 1991년의 경우,

높은 연강우량(2059 mm)에 대해서 지표 직접유출량도 435 mm(21.1%)로 가장 높은 반면 강우량이 가장 낮은 1995년도(693 mm)에는 지표 직접유출량도 14.1 mm(2.0%)로 가장 낮게 나타난다.

4.4 침누수량 산정

특정한 소유역내로의 강우에 의한 침투나, 지하수 유입은 물수지 방법(방정식 (1))을 활용하여 산정할 수 있다. 연평균 강우량에 대해서 증발산량과 지표 직접유출량을 제외한 모든 부분이 지하수가 유입되는 수량으로 가정하여 본 연구지역의 지하수 총 침누수량을 산정한 결과, 19.4~954 mm로 각 연도별 연강우량의 2.8~53.5%에 해당한다. 한편 30 년간의 연평균 총 침누수량은 470 mm로 30 년 평균 강우량(1286 mm)의 36.5%이다. 한편, 연구지역은 해안주변에 인접한 소유역으로서 기저유출량(지하수 유출량)은 해안 및 해저유출 형태로 직접적으로 지하수가 해양으로 유출된다[47]. 그리고 연구지역의 해안 및 해저유출량에 대한 현재까지 정확하게 조사된 자료가 없기 때문에 가장 인접한 기장군 일광면 일대에서 산정된 평균 해안 및 해저유출량인 강우량의 17.8%를 적용하였다[22].

총 침누수량 중에서 해안 및 해저유출량을 제외한, 본 연구지역의 지하수 저류량 변화(유효 지하수 함양량)를 산정한

Table 2. CN values for different land uses and hydrologic soil groups

Land use	Cover type	Hydraulic condition	HSG	CN value	Area (km ²)
Cultivated agricultural lands	Small grain	Poor	A	65	0.238
			B	76	0.154
			C	84	0.019
			D	88	-
	Meadow	-	A	30	0.031
			B	58	0.018
			C	71	0.002
			D	78	-
	Woods	Good	A	30	0.562
			B	55	0.775
			C	70	0.008
			D	77	-
	Farmsteads	-	A	59	0.039
			B	74	0.029
			C	82	-
			D	86	-
Urban area	Streets and road (Paved; open ditches (including right of way))	-	A	83	0.014
			B	89	0.011
			C	92	0.003
			D	93	-
	Open space (Poor condition, grass<50%)	-	A	68	0.008
			B	79	-
			C	86	-
			D	89	-
	Newly graded areas (Pervious areas only, no vegetation)	-	A	77	0.115
			B	86	0.031
			C	91	0.015
			D	94	-

결과, -104~ 588 mm로서 연 강우량의 -15.0~55.4% 해당 된다(Table 3). 1993년에는 지하수 저류량 변화가 588 mm로

가장 높게 나타났으며, 강우량에 대한 비율 역시 55.4%로 가장 높게 나타났다. 반면, 최저 강우량(693 mm)을 기록한

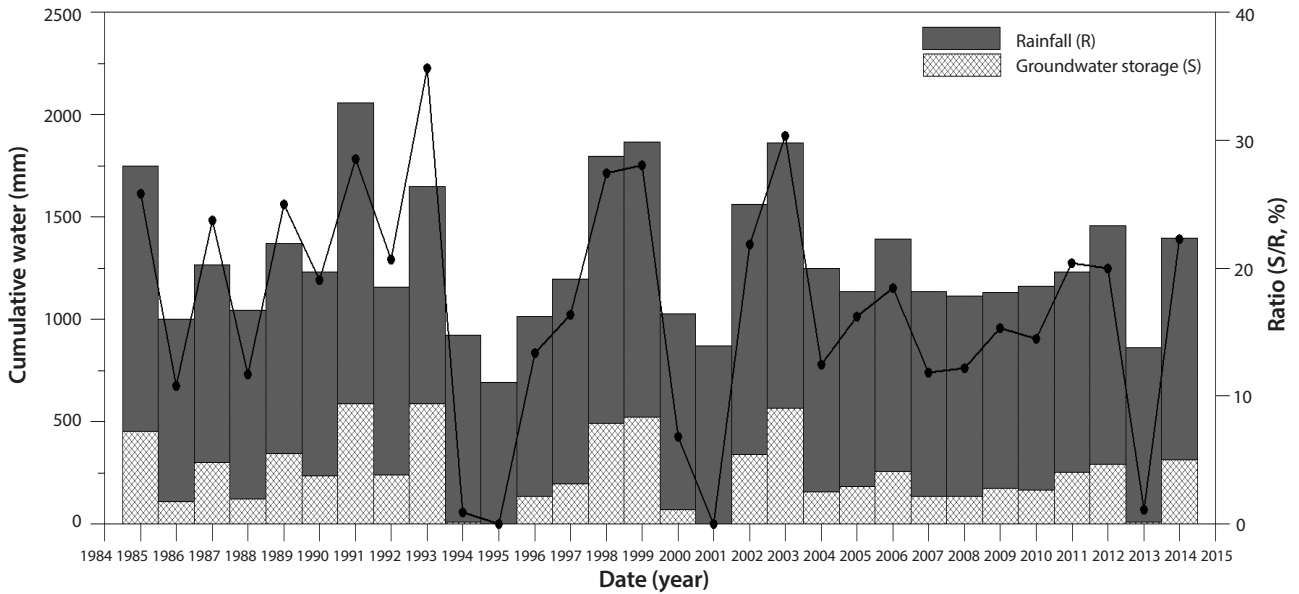


Fig. 5. Annual surface runoff (SR) and ratio of SR to annual rainfall (R) from 1985 until 2014.

1995년에는 -104 mm, 두 번째로 적은 강우량(869 mm)을 기록한 2001년에는 -57.7 mm로서 지하수 저류량 변화가 음의 값을 나타내었다. 실제로 1995년과 2001년은 가뭄이 극심했던 해로 증발산량과 지하수 사용량이 많았던 해이다[16]. 본 연구지역에서 결정된 지하수 저류량 변화는 연평균 강우량 약 18.7% (240.7 mm)로서, 연구지역의 지하수에 변동에 직접적인 영향을 미치는 유효 지하수 함양량을 의미한다. 이는 우리나라 평균 지하수 함양율(강우량의 18%)와 매우 유사하다[48]. 이는 연구지역의 수문특성이 동적인 평형상태를 유지하고 있음을 지시하는 것으로서, 강우 사건으로부터 암반대수층으로 총 침투된 지하수는 해안 및 해저유출량, 지하수 저류량의 계절적인 감소 작용을 통하여 모두 해양으로 유출됨을 반영한다.

4.5 강우량, 증발산량, 지표 직접유출량 및 지하수 저류량 변화 간의 상관성 분석

연구지역의 지하수 수문 특성을 비교하기 위해서 강우량 (R), 증발산량(ET), 지표 직접유출량(SR), 지하수 저류량 변화(ΔS^{gw})의 관련성을 통계적으로 유의성을 규명하기 위하여 t-검정 통계를 수행하였다.

두 집단 사이의 평균값이 통계적으로 유의한 차이를 검증

하기 위해서, 우선 두 집단 사이의 등분산 검정(F-검정)을 먼저 실시해야 한다. F-검정은 두 집단내에서 분산의 분포가 유사함을 비교하여 집단 비교의 유의함을 확보하기 위한 것이다.

강우량(R)과 증발산량(ET), 직접 지표유출량(SR), 지하수 저류량 변화(ΔS^{gw})에 대해 F-검정과 t-검정 통계 분석을 수행한 결과, 유의수준 95%에서 p값이 0.05 이하로 각각 계산되어 이분산 분포와 통계적으로 서로 관련성이 유의함을 나타낸다. 이러한 통계 결과를 바탕으로 상관성 분석을 수행한 결과, 강우량과 지표 직접유출량, 강우량과 지하수 저류량 변화 사이에는 상관계수(r^2)이 각각 0.55, 0.73으로 결정되어 높은 상관성을 나타내며 상관식은 다음과 같다.

$$SR = 0.30R - 262 \tag{16}$$

$$\Delta S^{gw} = 0.53R - 445 \tag{17}$$

한편, 강우량과 증발산량의 상관성 분석 결과, 상관계수가 0.01 이하로 결정되어 상관성이 매우 낮다. 이는 증발산량이 강우량보다는 월평균 기온과 최대 일조시간과 더 큰 연관성을 가짐을 반영한다[16].

Table 3. Annual rainfall, evapotranspiration, surface runoff, submarine groundwater discharge, and groundwater storage change from 1985 until 2014 (unit : mm)

Year	Rainfall	Evapo- transpiration	Surface runoff	Percolation	Submarine Groundwa- ter discharge	Groundwater storage change
1985	1746.90	722.90	261.45	762.55	310.95	451.60
1986	1001.70	659.71	55.69	286.30	178.30	108.00
1987	1265.50	660.78	78.76	525.96	225.26	300.70
1988	1042.30	693.46	41.49	307.36	185.53	121.83
1989	1371.30	670.62	113.68	587.00	244.09	342.90
1990	1232.80	697.80	80.21	454.79	219.44	235.36
1991	2058.90	669.90	434.85	954.14	366.48	587.66
1992	1155.40	652.66	57.97	444.77	205.66	239.11
1993	1649.40	612.70	154.83	881.87	293.59	588.28
1994	921.40	707.15	41.97	172.28	164.01	8.27
1995	693.00	659.54	14.06	19.41	123.35	-103.95
1996	1015.00	655.10	43.75	316.14	180.67	135.47
1997	1198.60	700.58	88.81	409.21	213.35	195.86
1998	1796.00	664.27	319.49	812.24	319.69	492.55
1999	1864.90	675.51	333.62	855.77	331.95	523.82
2000	1027.10	710.55	63.61	252.95	182.82	70.12
2001	869.10	745.17	26.97	96.97	154.70	-57.73
2002	1559.80	742.32	198.57	618.92	277.64	341.27
2003	1864.20	670.46	296.21	897.52	331.83	565.69
2004	1250.10	765.11	106.25	378.74	222.52	156.23
2005	1135.70	679.02	69.97	386.71	202.15	184.55
2006	1393.90	734.74	153.55	505.61	248.11	257.50
2007	1135.80	724.41	74.44	336.94	202.17	134.77
2008	1112.30	725.26	53.57	333.47	197.99	135.48
2009	1133.20	688.95	69.24	375.01	201.71	173.30
2010	1161.60	721.45	65.32	374.82	206.76	168.06
2011	1233.20	697.56	64.22	471.42	219.51	251.91
2012	1458.10	728.92	178.42	550.76	259.54	291.22
2013	859.40	663.15	33.58	162.67	152.97	9.70
2014	1398.70	693.43	144.71	560.56	248.97	311.59
Mean	1286.84	693.11	123.98	469.76	229.06	240.70

5. 결론

본 연구는 해안지역에 위치한 소유역에 대해서 식생, 수리지질, 토양 특성, 기후 특성 등을 분석하고, 물수지 분석법을 이용한 지하수 침투 특성을 분석하여 이와 관련된 다양한 인자들을 고려한 지하수 순환 특성을 규명하고자 하였다.

증발산량은 Thornthwaite 방법, 지표 직접유출량은 SCS-CN 방법을 이용하여 산정하였다. 해안 및 해저유출량은 인접한 지역의 연평균 강우량에 대한 평균값인 17.8%를 적용하였다. 지하수 저류량 변화(유효 지하수 함양량)를 산정 결과, 연구지역의 1985년부터 2014년까지 30 년간의 연평균 강수량 1286 mm에 대하여 증발산량은 693 mm(53.9%), 지표 직접유출량은 124 mm(9.6%)로 산정되었으며, 지하수 저류량 변화는 229 mm(17.8%)로 분석되어 우리나라 평균 지하수 함양율(강우량의 18%)과 매우 유사한 결과로서, 이는 연구지역의 지하수 저류량 변화가 우기의 강우에 의해서 침투가 발생하고 건기에 해안으로 유출이 발생하는 계절적인 동적인 평형 상태를 유지하고 있음을 지시한다.

한편, 강우량과 지하수 저류량 변화, 증발산량, 지표 직접유출량간의 유의성 분석 결과, 강우량-지하수 저류량 변화, 강우량-지표 직접유출량 간에는 상관성이 있는 것으로 나타났으나, 강우량과 증발산량 간에는 상관성이 없는 것으로 나타났다. 이는 지하수 저류량 변화와 지표 직접유출량은 강우량에 대해서 민감하게 반응하나, 증발산량은 강우량보다는 기온과 최대 일조시간에 더 많은 영향을 받는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20141720100610). 또한 논문 교정 작업을 맡아준 박보배님과 이원준님께도 감사를 전합니다.

REFERENCES

[1] S.H. Ji and Y.K. Koh, "The state-of-the art of ground-

water flow modeling for safety assessment of a rad-waste repository", J. of the Geological Society of Korea, 46(2), 181-195 (2010).

[2] K.W. Park, S.H. Ji, Y.K. Koh, G.Y. Kim, and J.K. Kim, "Numerical simulation of groundwater flow in LILW Repository site: II. Input parameters for safety assessment", J. of the Korean Radioactive Waste Society, 6(4), 283-296 (2008).

[3] C.S. Oh and J.M. Kim, "Three-dimensional numerical simulation of groundwater flow and salt and radionuclide transport at a low and intermediate level radioactive waste disposal site in Gyeongju, Korea", J. of Geological Society of Korea, 44(4), 489-505 (2008).

[4] R.H. Healy, Estimating groundwater recharge, Cambridge University Press, New York (2010).

[5] International Atomic Energy Agency, Characterization of groundwater flow for near surface disposal facilities, IAEA-TECDOC-1199, IAEA, Vienna (2001).

[6] E. Langsholt, "A water balance study in lateritic terrain", Hydrological process, 6, 11-27 (1992).

[7] J.A. Engott and T.T. Vana, Effects of agricultural land-use changes and rainfall on groundwater recharge in central and west Maui, Hawaii, 1926-2004, US Geological Survey Scientific Investigations Report 2007-5103 (2007).

[8] J. Sheffield, C.R. Ferguson, T.J. Troy, E.T. Wood, M.F. McCabe, April 3, 2009. "Closing the terrestrial water budget from satellite remote sensing", Geophysical Research Letters, 36(7), DOI:10.1029/2009GL037338 (2009).

[9] G.H. Leavesley, R.W. Lichty, B.M. Troutman, and L.G. Saindon, Precipitation-runoff modeling system: user's manual, US Geological Survey Water-Resources Investigations Report 83-4238, 1-2 (1983).

[10] L. Zhang, W.R. Dawes, T.J. Hatton, P.H. Reece, G.T.H. Beale, and I. Pacher, "Estimation of soil moisture and groundwater recharge using the TOPOG IRM model", Water Resources Research, 35, 136-138 (1999).

[11] C.R. Tiedeman, J.M. Kernodle, and D.P. McAda, Application of nonlinear-regression methods to a ground-

- water flow model of the Albuquerque Basin, New Mexico, US Geological Survey Water-Resources Investigations Report 98-417, 1-2 (1998).
- [12] C.H. Lee, W.P. Chen, and R.H. Lee, "Estimation of groundwater recharge using water balance coupled with base-flow-record and stable-base-flow analysis", *Environmental Geology*, 51, 73-82 (2006).
- [13] W.R. Dripps and K.R. Bradbury, "A simple daily soil-water balance model for estimating the spatial and temporal distribution of groundwater recharge in temperate humid areas", *Hydrogeology Journal*, 15(3), 433-444 (2007).
- [14] I.S. Zektser, V.A. Ivanov, and A.V. Meskheteli, "The problem of direct groundwater discharge to the seas", *J. of Hydrology*, 20, 1-36 (1973).
- [15] B. Sekulic and A. Vertacnik, "Balance of average annual fresh water inflow into the Adriatic Sea", *Water Resources Development*, 12, 89-97 (1996).
- [16] J.H. An, S.Y. Hamm, J.H. Lee, N.H. Kim, D.B. Yang, and J.G. Hwang, "Estimation of groundwater recharge in Junggwae-Boeun Area in Ulsan City using the water balance and hydrogeological analyses", *Economic and Environment Geology*, 41(4), 427-442 (2008).
- [17] N.H. Kim, S.Y. Hamm, T.Y. Kim, J.Y. Cheong, J.H. An, H.T. Jeon, and H.S. Kim, "Estimation of groundwater storage change and its relationship with geology in Eonyang Area, Ulsan Megacity", *The J. of Engineering Geology*, 18(3), 263-276 (2008).
- [18] H. Yoon, E. Park, G.B. Kim, K. Ha, P. Yoon, and S.H. Lee, "A method to filter out the effect of river stage fluctuations using time series model for forecasting groundwater level and its application to groundwater recharge estimation", *J. of Soil and Groundwater Environment*, 20(3), 74-82 (2015).
- [19] J.W. Cho, and E. Park, "A study on delineation of groundwater recharge rate using water-table fluctuation and unsaturated soil water content model", *J. of Soil and Groundwater Environment*, 13(1), 67-76 (2008).
- [20] I.M. Chung, H. Na, D. Lee, N.W. Kim, J. Lee, and J.M. Lee, "Spatio-temporal variations in groundwater recharge in the Jincheon Region", *The J. of Engineering Geology*, 21(4), 305-312 (2011).
- [21] S.H. Cho, M. Cho, S.H. Moon, Y. Kim, and K.S. Lee, "Estimation of groundwater recharge in a district-scale area using ^{18}O tracer", *J. of Geological Society of Korea*, 44(3), 331-340 (2008).
- [22] Y.S. Gwak, S.H. Kim, Y.W. Lee, B.K. Khim, S.Y. Hamm, and S.W. Kim, "Estimation of submarine groundwater discharge in the Il-Gwang watershed using water budget analysis and ^{222}Rn mass balance", *Hydrological Processes*, 28, 3761-3775 (2014).
- [23] J.H. Hwang, Y.H. Kihm, Y.B. Kim, and K.Y. Song, "Tertiary hydroexplosion at Bonggil-ri, Yangbuk-myeon, Gyeongju", *J. of Geological Society of Korea*, 43(4), 453-462 (2007).
- [24] J.H. Jeong, S.P. Jang, H.I. Kim, Y.T. Jeong, K.S. Heo, and H. Park, "Classification of hydrologic soil groups for determining the infiltration rate", *J. of the Korea Society of Agricultural Engineers*, 37(6), 12-32 (1995).
- [25] R.W. Healy, C.A. Rice, T.T. Bartos, and M.P. McKinley, "Infiltration from an impoundment for coal-bed natural gas, Powder river Basin, Wyoming: Evolution of water and sediment chemistry", *Water Resources Research*, 44(6) (2008).
- [26] C.W. Thornthwaite, "Report of the committee on transpiration and evaporation", *Transactions, American Geophysical Union*, 25(5), 683-693 (1944).
- [27] L. Turc, "Evaluation des besoins en eau d'irrigation, vapotranspiration potentielle, formulation simplifiée", *jour. Ann. Agron.*, 12, 13-49 (1963).
- [28] H.L. Penman, "Natural evapotranspiration from open water, bare soil, and grass", *Mathematical and Physical Sciences*, 193, 120-145 (1948).
- [29] H.F. Blaney and W.D. Criddle, Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data, USDA(SCS) TP-96 (1950).
- [30] J.L. Monteith, J.L. Evaporation and environment, In Fogg, G.E., ed., *symposium of the Society for Experimental Bi-*

- ology, *The State and Movement of Water in Living Organisms*, 19, Academic Press, Inc., New York (1965).
- [31] S.Y. Hamm, J.Y. Cheong, H.S. Kim, G.S. Hahn, and S.H. Ryu, "A study on groundwater flow modeling in the fluvial aquifer adjacent to the Nakdong River, Book-Myeon area, Changwon City", *Economic and Environment Geology*, 37(5), 499-508 (2004).
- [32] S.Y. Hamm, J.Y. Cheong, H.S. Kim, G.S. Hahn, and Y.H. Cha, "Groundwater flow modeling in a riverbank filtration area, Daesan-Myeon, Changwon City", *Economic and Environment Geology*, 38(1), 67-78 (2005).
- [33] J.H. Lee, S.Y. Hamm, J.Y. Cheong, J.H. Jeong, N.H. Kim, K.S. Kim, and H.T. Jeong, "Estimation of groundwater flow rate into Jikri tunnel using groundwater fluctuation data and modeling", *J. of Soil and Groundwater Environment*, 14(5), 29-40 (2009).
- [34] J.H. Lee, S.Y. Hamm, J.Y. Cheong, J.H. Jeong, K.S. Kim, N.H. Kim, and G.B. Kim, "Numerical simulation of the change in groundwater level due to construction of the Giheung tunnel", *The J. of Engineering Geology*, 20(4), 449-459 (2008).
- [35] J.H. Lee, S.Y. Hamm, C.M. Lee, J.J. Lee, H.S. Kim, and G.B. Kim, "Numerical simulation of groundwater system change in a riverside area due to the construction of an artificial structure", *The J. of Engineering Geology*, 22(3), 263-274 (2012).
- [36] C.W. Thornthwaite, J.R. Mather, and D.B. Carter, "Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance", *Drexel Institute of Technology, Philadelphia. Publications in climatology*, 10(3), 185-311 (1957).
- [37] N.K. Goel, R.S. Kurothe, B.S. Mathur, and R.M. Vogel, "A derived flood frequency distribution for correlated rainfall intensity and duration", *J. of Hydrology*, 228, 56-67 (2000).
- [38] R.L. Linsley, M.A. Kohler, J.L.H. Paulhus, *Applied hydrology*, McGraw-Hill, Inc., New York (1949).
- [39] H.J. Morel-Seytoux and J.P. Verdin, (1981) Extension of the soil conservation service rainfall-runoff methodology for ungaged watersheds, Report FHWA/RD-81/060 Offices of Research & Development Environmental Division, U.S. Federal Highway Administration (1981).
- [40] S.K. Mishra and V.P. Singh, "Catchment area-based evaluation of the AMC - dependent SCS-CN-based rainfall-runoff models", *Hydrological Processes*, 19, 2701-2718 (2005).
- [41] Y.M. Mustafa, M.S.M. Amin, T.S. Lee, and A.R.M. Shariff, "Evaluation of land development impact on a tropical watershed hydrology using remote sensing and GIS", *J. of Spatial Hydrology*, 5(2), 16-30 (2005).
- [42] I.h. Choi and N.C. Woo, "Limits of the NRCS-CN method to assess groundwater recharge", *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 12(5), 1-6 (2007).
- [43] R.H. McCuen, *A guide to hydrologic analysis using SCS methods*, Prentice Hall, Englewood Cliffs (1982).
- [44] J.C. Davis, *Statistics and data analysis in geology*, John Wiley & Sons, New York (2002).
- [45] Korea Meteorological Administration. July 1 2015. "National Climate Data Service System: Climate data Option." NCDSS. Accessed Apr. 1 2015. Available from: <http://sts.kma.go.kr/jsp/home/contents/climate-Data/obs/bsValSearch.doMNU=MNU>.
- [46] C.W. Fetter, *Applied hydrogeology*, Prentice Hall Inc., New Jersey (2011).
- [47] S.I. Ok, S.Y. Hamm, Y.W. Lee, E.J. Cha, S.H. Kim, I.S. Kim, and B.K. Khim, "Characterizing groundwater discharge and radon concentration in coastal waters, Busan City", *J. of Soil and Groundwater Environment*, 16(5), 53-66 (2011).
- [48] B.S. Choi and J.G. Ahn, (1998) A study on the estimation of regional groundwater recharge ratio, *J. of Soil and Groundwater Environment*, 5, 57-65 (1998).