

<Short Note>

## 강우시 해안분지 하천의 수질변동 및 지하수 유출 평가

윤상웅 · 이진용<sup>‡</sup> · 이호건

강원대학교 지질학과

### 요 약

이 연구에서는 강원도 양구군 해안분지 내 소유역에서 강우 시간에 따른 하천수의 수질변동 및 지하수의 기저유출을 분석하였다. 물시료는 2013년 10월 7일부터 9일까지 3일에 걸쳐 채취하였고 기저유출량 산출을 위해 자연추적자인 산소 동위원소와 2성분계 수문분리 모델을 이용하였다. 강우시 하천의 수소이온농도(pH)는 7.6-8.3 범위의 약알칼리성으로 나타났다. 전기전도도(EC)는 낮아졌으나 용존산소(DO)와 산화환원전위(Eh)는 증가하는 경향을 보였다. 수질유형으로 강우 전 지하수는 Ca-Cl 유형 그리고 하천수는 Ca-NO<sub>3</sub> 유형으로 분석되었다. 그러나 강우시 하천수는 다른 유형으로 전이되지 않는 것으로 나타났다. 강우가 지속적으로 하천에 유입됨에 따라 희석효과가 나타나 용존 이온 농도는 감소하는 경향을 보였다. 한편 지표기원 인위적 오염물질인 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 Cl<sup>-</sup>의 농도가 증가될 것으로 예측했지만 오히려 농도는 감소하였다. 이는 강우량이 적어 지표유출로 인한 가축분뇨 및 농업비료 등의 오염원이 하천 내로 크게 유입되지 않았음을 의미한다. 연구지역의 토양수의 영향을 배제한 수문분리 분석결과 강우기간 동안 전체 하천유출량의 약 66%는 지하수의 기저유출이며 34%는 강우성분으로 나타났다. 또한 기저유출 최고치가 강우 시작 4시간 이내에 발생하여 다른 지역과 달리 빠른 수문순환을 보였다.

**주요어:** 하천수질, 수리지화학, 안정동위원소, 기저유출, 2성분계 유출수문곡선분리, 강우

**Sang Woong Yun, Jin-Yong Lee and Ho Geon Lee, 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. v. 51, no. 6, p. 611-621**

**ABSTRACT:** The purpose of this study is to examine the variation of stream water quality and to separate out baseflow and the rainfall event from stream water in a small catchment of the Haeon basin in Gangwon province. For the study, samples of stream water and groundwater were collected during October 7-9, 2013. The pH of stream water showed slightly alkaline (7.6-8.3). EC values gradually decreased while both DO and Eh values increased with the rainfall event. Before the rainfall event, groundwater and stream water showed Ca-Cl and Ca-NO<sub>3</sub> types, respectively. A substantial direct inflow of NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and Cl<sup>-</sup> from surface runoff was not detected in the stream water. Therefore, it is inferred that influence of animal waste and agricultural fertilizer was not important in this rainfall event. Using  $\delta^{18}\text{O}$  as a natural tracer, two-component hydrograph separations were conducted excluding effect of soil water. For the whole rainfall event, the stream water was composed of approximately 66% of groundwater baseflow and 34% of rainfall. Furthermore, groundwater baseflow showed a peak within 4 hours after the rainfall event started. The study area showed, compared to other regions, rapid hydrological cycle.

**Key words:** stream water quality, hydro-geochemical, stable isotopes, baseflow, two-component hydrograph separations, rainfall

(Sang Woong Yun, Jin-Yong Lee and Ho Geon Lee, Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea)

<sup>‡</sup> Corresponding author: +82-33-250-8551, E-mail: [hydrolee@kangwon.ac.kr](mailto:hydrolee@kangwon.ac.kr)

## 1. 서론

최근 기후변화로 미국 캘리포니아주는 4년째 극심한 가뭄을 겪고 있고 중동 카타르와 사우디는 폭우와 홍수가 발생하는 등 세계 각지에서 기상이변이 일어나고 있다(Lee and Han, 2013). 우리나라도 예외 없이 2000년대 들어 평년대비 턱없이 부족한 강수량을 기록하고 있어 하천수와 지하수 부족을 일컫는 수문학적 가뭄을 겪고 있다(Sim, 2009; Rhee *et al.*, 2014). 극심한 가뭄이 점차 장기적이고 빈도가 높아지자 중앙정부와 지방자치단체는 가뭄대비 빗물 활용, 4대강 사업 활용, 물 절약 등 여러 해결방안을 모색하고 있다(Energy & Environment New, 2015). 이와 함께 하천수 및 지하수에 대한 활용방안도 적극적으로 검토되고 있다(Korea Land Daily, 2015).

강원도 농촌지역인 해안분지는 생활용수 및 농업용수의 대부분을 지하수와 하천수에 의존한다(Lee, 2009; Yun *et al.*, 2009). 따라서 연구지역의 하천수와 지하수의 안정적인 공급 및 효과적인 수질관리는 매우 중요하다. 근래 들어 연구지역은 도시인들의 귀농 및 기업의 대규모 자본 유입으로 상업적 농업 활동으로 인한 토지이용이 꾸준히 증가하는 추세이다. 또한 해안분지의 토사유출 인해 주변지역의 탁수현상이 매우 심각한 상태이다(Lee, 2009).

한편 해안분지는 매년 지하수 사용량 증가와 함께 2010년과 2012년에 지하수위가 기후변화로 심각한 가뭄을 겪어 상당히 하강하였다(Choi and Lee, 2010). 이에 기후변화에 따른 물수지의 변동 분석을 위해 농촌지역의 하천수와 지하수의 밀접한 관계에 대한 많은 연구가 계속 진행되고 있다(Criss and Davisson, 1996; Negrel *et al.*, 2003; Jeon *et al.*, 2015). 특히 수문분리 연구는 강우시 지하수 함양 특성 및 하천수의 기저유출량 등 연구지역의 종합적인 물수지 정보를 수집할 수 있다(Lee *et al.*, 2006). 이 연구의 목적은 해안분지 내 강우로 인한 하천의 수질 변화를 관찰하고 산소동위원소( $\delta^{18}\text{O}$ ) 추적자를 이용한 2성분계 수문분리 모델로 강우 및 기저유출량을 산출하는데 있다.

## 2. 연구지역 및 방법

### 2.1 연구지역

연구지역은 행정구역상 강원도 양구군 해안면 일

대로 지리적 방위는 동경 128°10′-127°51′, 북위 37°19′로 동쪽은 인제군, 서쪽은 화천군 그리고 북쪽엔 군사분계선 사이를 두고 북한과 대치하고 있다. 그림 1a에서 지형은 가로 10.5 km, 세로 6.7 km 그리고 전체 면적은 62 km<sup>2</sup>며 면적대비 고도차가 커 한눈에 볼 수 있는 전형적인 분지이다(Won *et al.*, 1987, 1988; Lee, 2009). 해안분지의 수계는 수지상 또는 방사상의 형태로 발달했다. 강우시 해발고도(약 1,200 m)가 높은 외각 산지로부터 강우가 전파되어 여러 지천들이 저지대(약 400 m) 분지 내부에 모여 유일한 배출구인 당골골로 빠져나가는 단순한 시스템으로 이루어져 있다. 이러한 지형특성 이유로 강우시 적은 양에도 불구하고 저지대의 지하수위 및 하천수위가 다른 소유역에 비해 민감하게 반응한다(Lee, 2009; Yun *et al.*, 2013).

일반지질은 크게 분지 외각 및 능선의 선캠브리아기 변성복합체와 분지 내부의 주라기 흑운모화강암으로 구성된다. 그 외에 하천을 중심으로 일부 제4기 충적층이 분포하고 있다(그림 1a; Won *et al.*, 1987, 1988; Yun *et al.*, 2009). 해안분지의 생성원인으로 흑운모화강암이 분지 내부에 관입접촉한 뒤 분지 외각의 선캠브리아기 변성복합체보다 상대적으로 풍화에 약해 차별침식 작용으로 지금의 주발모양의 오목한 분지가 형성된 것으로 추측된다(Won *et al.*, 1987, 1988; Kwon *et al.*, 1990). 분지 외각의 변성암복합체는 편마암, 편암, 규암 등이 분포하고 분지 내부는 흑운모화강암이 심하게 풍화작용 받아 주로 saprolite로 산출된다. 외각부근에서 흑운모화강암이 섬록암을 포획한 것으로 나타났다(Yun, 2009).

기상청 자료에 따르면 2001-2010년까지 해안분지의 연평균 기온 8.1-9.3°C이며 연평균 강수량은 1,388.9 mm이다. 우기(7월-9월)에 월평균 강수량은 165.3-390.8 mm, 건기(11월-3월)에 월평균 강수량 13.2-39.9 mm의 범위를 보여준다(Lee and Han, 2013; Yun *et al.*, 2013). 해안분지의 토지이용은 해발고도에 따라 매우 다르게 나타난다. 고지대인 650-700 m는 대부분 임지(50.3%)이며 650 m 이하는 밭(25.9%), 초지/임지(12.9%) 그리고 저지대는 용수량이 많이 필요한 논(10.9%) 순으로 분포한다(Kim *et al.*, 2013). 이 지역의 농민들은 고지대 산을 개간하고, 논농사 대신 흙탕물을 유발시키는 고랭지 채소와 인삼 재배면적을 점차 늘리고 있는 실정이다.

이에 흙탕물 저감을 위해 정부와 지자체가 수백억원의 예산을 들임에도 불구하고 우기에 인제군 서화면 인북천의 심각한 탁수현상을 발생시켜 이 지역 및 하류지역 주민들이 피해를 입고 있다(Lee, 2009).

2.2 연구방법

이 연구는 2013년 10월 7일부터 10월 9일까지 해안분지 내 하천 규모가 약 5 m의 완경사인 소하천 1 곳을 선정하였다(그림 1b와 1c). 강우 전(10월 7일) 하천(SW)과 인근 2개의 지하수관정(GW1, GW2)에서 1회, 강우 발생부터 종료 시(10월 8-9일)까지 강우강도에 따라 일정한 시간(강우집중 시: 1시간 간격, 그 외 2시간 간격)을 두어 하천의 시료 채취 및 현장수질측정(Horiba, D-54, D-55)을 하였다. 정확

한 분석을 위해 현장수질측정기의 pH 전극은 pH 4, 7, 9 표준용액(standard buffer)을 통해 3점 보정을 하였고 DO 전극은 대기상태에서 air pressure 모드로 보정하였다. 그리고 현장에서 채수하는 즉시 현장수질측정기로 수온, 수소이온농도(pH), 용존산소(DO), 산화환원전위(ORP 측정 후 Eh로 전환), 전기전도도(EC)를 측정하였다(그림 1d).

채취된 총 15개 시료는 수동 핸드펌프를 이용하여 0.45 μm 여과필터로 부유물질 제거 및 산처리(양이온 시료) 후 아이스박스에 4℃ 이하 냉장 보관하였다. 그 중 대표성이 있는 시료 11개를 선택하여 양이온(Ca, Mg, Na, K, Fe, Mn)과 음이온(Cl, NO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>4</sub>)은 상지대학교 자연과학연구지원센터에서 동일 시료 11개와 빗물 1개의 산소, 수소 동위원

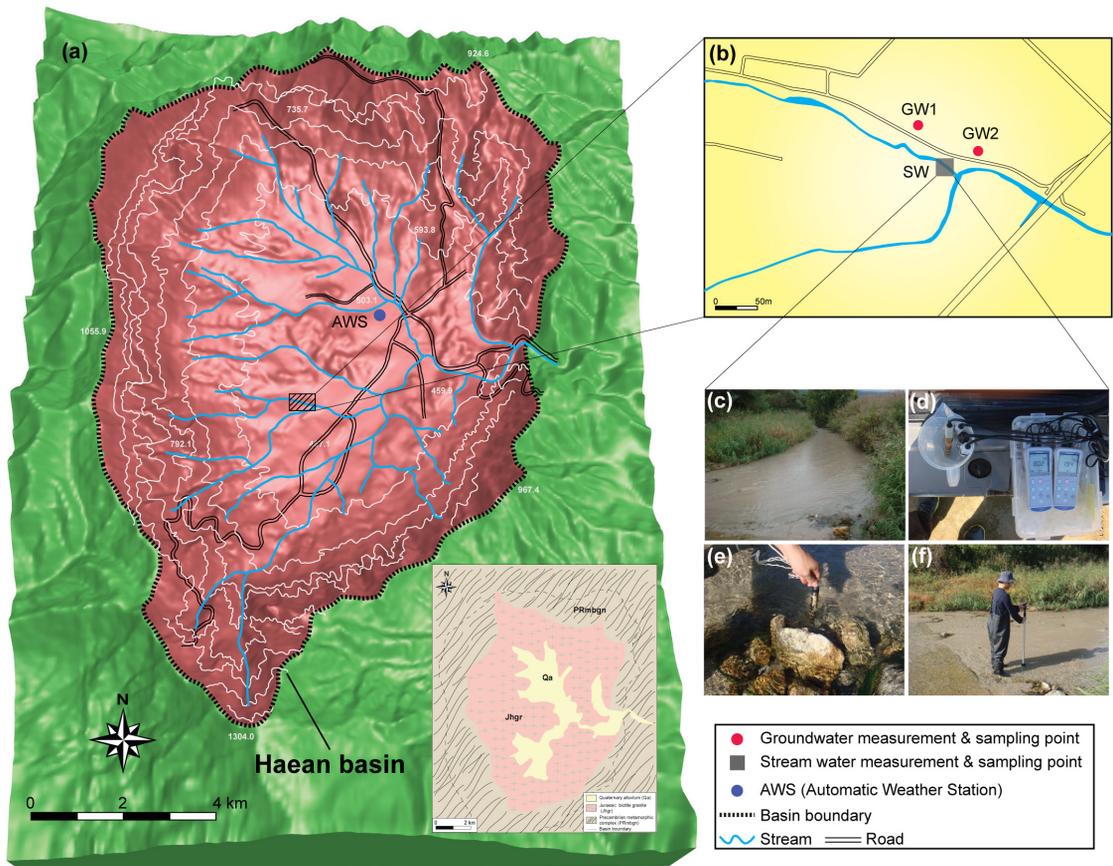


Fig. 1. Map of (a) the studied Hae-an basin, and (b) groundwater and stream water measurement and sampling location (photos showing (c) scene of stream water, measurements of (d) groundwater and stream water quality, (e) stream stage, and (f) stream flow).

소( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ )는 기초과학지원연구원에서 분석하였다.

연구지역의 강우량은 해안면사무소에 설치된 기상청의 무인자동기상관측장비(Automatic Weather Station)에서 측정한 자료를 이용하였다. 우선 수문분리를 위해 하천수의 정확한 유출량 측정이 필요하다. 하천수위 측정은 자동수위측정기(Solinst, Levelogger)를 이용해 매 시간 측정하였다(그림 1e). 하천유속은 매 시간 유속측정기(Formtec, FP-111)를 이용하여 폭 1 m 간격마다 깊이(cm)와 유속(m/sec) 측정하였다(그림 1f).

수문분리에 대한 기존 연구들은 염소이온(Cl<sup>-</sup>), 전기전도도(EC), 용존 규소(Si), 그리고 산소와 수소 동위원소( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ )가 추적자로 사용되고 있다(Lee *et al.*, 2006). 이 연구에서는 하천을 대상으로 물-암석 반응에 거의 영향을 받지 않는 보전적인 산소 동위원소를 추적자로 선택하였다. 수문분리 모델은 2성분계(강우, 하천수)와 3성분계(강우, 하천수, 토양수) 2종류가 있다. 최근 연구에 따르면 토양수는 무시할 수 없는 중요한 성분으로 밝혀져 3성분계 수문분리 방법이 주로 사용된다(Lakey and Krothe, 1996; Lee *et al.*, 2006). 그러나 이 연구에서는 농한기에 실시하여 인위적인 지하수 및 최근 2 차례 강우로 포화된 토양은 하천에 미치는 영향이 미미하다는 것을 전제로 Lee *et al.* (2006)의 해석절차를 따랐다. 2성분계 수문분리모델은 강우에 의해 하천유출량이 증가할 때 강우와 지하수의 2성분으로만 구성되며

아래와 같이 2개의 식으로 구성된다.

$$Q_t = Q_{gw} + Q_r \tag{1}$$

$$Q_t \times \delta_t = Q_{gw} \times \delta_{gw} + Q_r \times \delta_r \tag{2}$$

- $Q_t$ : 총 유출량,  $Q_{gw}$ : 강우 전 기저유출량,
- $Q_r$ : 강우가 하천에 더해진 양,
- $\delta_t$ : 하천수의 산소 동위원소 조성,
- $\delta_{gw}$ : 지하수의 산소 동위원소 조성,
- $\delta_r$ : 강우의 산소 동위원소 조성

연구지역의 현장조사 실측값 및 실내 분석값을 대입하여 식 1과 2를 계산하면 연구지역 하천수의 총 유출량 중에 강우와 기저유출이 차지하는 비율을 산출할 수 있다.

### 3. 연구결과 및 토의

#### 3.1 하천의 유출량 및 수질특성 변화

그림 2는 2013년 10월 8일부터 10월 9일까지 해안 분지 내 소하천(SW)에서 강우 전·후 시간경과에 따른 하천유출량 변화를 나타냈다. 연구기간 동안의 총 강우량은 11 mm로 측정되었고 10월 8일 14:00-16:00에는 강우가 집중되어 하천유출량이 가장 높은 것으로 나타났다. 특히 시간당 강우량이 적음에도 불구하고 강우반응에 민감한 것은 소규모 하천이며 수두구배에 의해 하천 및 지하수가 모이는 저지대인

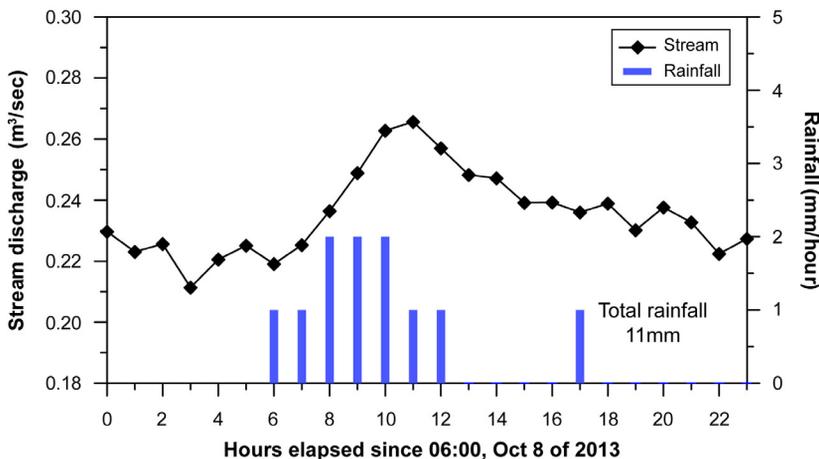


Fig. 2. Variation of stream discharge and rainfall amount in the study area.

**Table 1.** Field parameters and ionic compositions for groundwater and stream water analyzed in October, 2013 (dry season).

Date	Time	Sample	Temp. (°C)	pH	EC (μS/cm)	DO (mg/l)	Eh (mV)	Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	Na <sup>+</sup> (mg/l)	K <sup>+</sup> (mg/l)	Fe (mg/l)	Mn (mg/l)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	δ <sup>18</sup> O (‰)	δD (‰)
10.07	16:00	SW0	17.0	7.6	111.1	4.20	542	14.0	2.1	5.8	1.1	0.038	0.013	4.77	21.5	n.d	5.3	-9.9	-65.8
		GW1	13.2	7.6	190.0	2.22	526	24.5	3.5	9.8	1.0	n.d	n.d	8.88	6.3	n.d	6.0	-9.4	-64.5
		GW2	13.4	7.2	173.0	2.67	507	26.7	4.2	8.3	1.4	n.d	n.d	6.67	14.9	n.d	6.2	-8.6	-60.7
10.08	12:00	SW1	15.1	8.3	113.2	3.90	360	13.4	2.1	5.9	1.1	n.d	n.d	4.84	21.5	n.d	4.9	-9.9	-65.8
	13:00	SW2	12.2	8.1	111.4	4.58	378	13.7	2.0	5.9	1.2	n.d	0.005	5.01	21.2	n.d	4.8	-9.9	-66.4
	14:00	SW3	14.8	7.6	109.7	4.54	438	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a	n.a
	15:00	SW4	14.9	7.9	105.3	4.36	453	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a	n.a
	16:00	SW5	14.7	7.9	103.6	4.06	487	12.1	1.9	5.3	1.3	0.002	n.d	4.30	18.5	n.d	4.6	-9.6	-62.1
	17:00	SW6	14.8	7.6	100.5	4.51	497	11.9	1.9	5.3	1.3	n.d	n.d	4.12	17.4	n.d	4.5	-9.2	-61.3
	18:00	SW7	14.1	8.0	102.5	4.36	510	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a	n.a
10.09	20:00	SW8	14.0	7.8	105.5	3.97	526	12.6	2.0	5.5	1.2	0.004	0.004	4.55	19.2	n.d	4.6	-9.6	-63.9
	22:00	SW9	14.1	7.7	107.6	4.53	501	12.7	2.0	5.6	1.1	n.d	0.005	4.47	19.8	n.d	4.7	-9.7	-66.4
	00:00	SW10	13.8	7.9	108.8	4.19	528	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a	n.a
	02:00	SW11	13.3	7.7	109.4	4.04	486	12.9	1.9	5.6	1.2	n.d	0.008	4.60	20.2	n.d	4.7	-9.8	-66.6
	04:00	SW12	13.2	7.6	110.0	3.56	493	13.6	2.1	5.8	1.1	n.d	0.008	4.85	20.6	n.d	4.7	-9.8	-66.7
	06:00	Rain	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	0.1	0.1	0.1	0.003	n.d	n.d	0.19	n.d	n.d	n.d	-5.7	-35.5

\*n.d: not detected

\*\*n.a: not available

것으로 판단된다.

연구지역의 강우 전(10월 7일)과 강우시(10월 8일 12:00-9일 04:00) 하천수, 지하수 및 빗물을 채수 및 측정하였다. 표 1은 현장수질, 주요 양이온, 음이온 그리고 산소, 수소 동위원소 조성을 정리한 것이다. 강우 전·후 하천의 동일한 시간대 비교 결과 강우시 수온이 강우 전보다 약 2.3°C가 낮았다. 강우가 집중되는 시간의 하천 pH는 7.6-8.3의 약알칼리성을 보였다. 간접적으로 수질오염을 확인할 수 있는 EC는 113.2에서 100.5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 낮아졌다. DO와 Eh는 각각 3.90-4.58 mg/L와 360-526 mV로 증가하는 경향을 보였다. 집중강우가 종료되는 시점(10월 8일 18:00)부터 하천의 pH, EC, DO 그리고 Eh는 강우 전으로 점차 회복하는 것으로 나타났다.

강우시 하천 주변에 인위적 오염원의 직접유입을 고려하여 하천수 및 지하수의 수질유형 분석을 음이온  $[\text{HCO}_3^{2-} + \text{CO}_3^{2-}]$  항목 대신  $[\text{NO}_3^-]$ 를 이용하였다. 이에 연구지역의 하천수 및 지하수의 화학 조성은 수정 파이프다이어그램(Piper, 1944)로 도시하였다(그림 3). 강우 전 하천의 화학 조성은  $\text{Ca}^{2+}$ 과  $\text{NO}_3^-$ 가 우세한 Ca- $\text{NO}_3$  유형으로 나타났으나 강우에 따른 하천의 화학조성은 뚜렷하게 변화하지 않았다. 강우 전 지하수의 화학 조성은  $\text{Ca}^{2+}$ 과  $\text{Cl}^-$ 가 우세한

Ca-Cl 유형으로 나타났다.

그림 4는 강우시 시간경과에 따른 하천의 주요 양이온(Mg, Ca, Na, K)과 음이온( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ )의 농도변화를 나타냈다(불검출된 Fe, Mn,  $\text{NO}_2^-$ 는 제외). 하천에 강우량이 유입됨에 따라 Mg, Ca, Na의 이온 농도는 지속적으로 소폭감소 후 강우 종료시점부터 다시 회복양상을 보였다. 각각의 평균 이온농도는 2.0, 12.9, 5.6 mg/L로 나타났다. 마찬가지로  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ 의 이온농도도 강우에 의해 소폭 감소 후 회복하였고 각각의 평균 이온농도는 4.6, 19.8, 4.7 mg/L로 나타났다. 그러나 K (평균농도: 1.1 mg/L)의 이온농도는 오히려 증가하는 특성을 보였다.

강우의 희석효과로 하천의 모든 용존 이온 농도는 감소하였다( $\text{K}^+$ 이온은 제외). 인위적 오염의 주요 물질인  $\text{NO}_3^-$ 와  $\text{Cl}^-$ 의 농도가 증가될 것으로 예측했지만 오히려 감소하는 경향을 보였다. 이는 연구기간 동안 지표유출로 인해 가축분뇨, 비료, 생활쓰레기 등의 오염원이 하천으로 직접 유입이 되지 않는 것으로 판단된다. 한편 강우시  $\text{K}^+$  이온농도의 증가에 대한 명확한 원인 분석은 못하였다. 하지만  $\text{K}^+$  이온의 Y축 범위는 상대적으로 다른 용존 이온에 비해 작다. 즉  $\text{K}^+$  이온농도의 증가는 자연적인 현상으로 인한 결과로 해석된다.

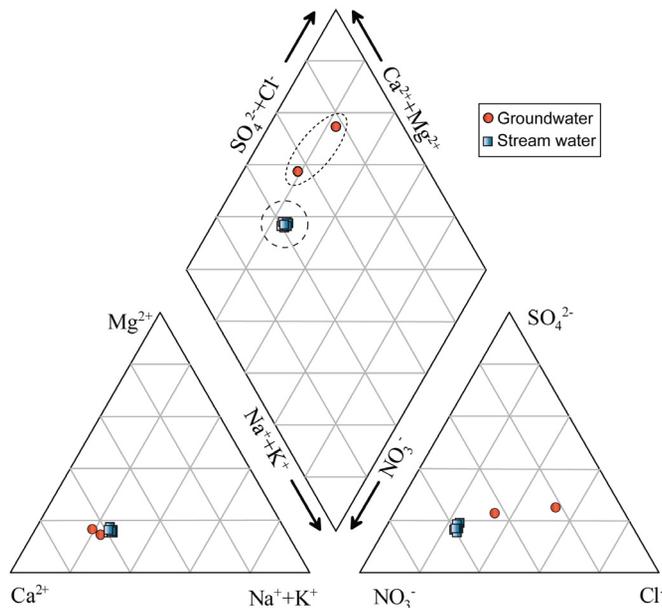


Fig. 3. Modified piper diagrams of chemical compositions of 2 groundwater samples and 9 stream water samples in October 7-9, 2013.

3.2 동위원소 조성 변화 및 유출수문곡선 분리

우리나라 강수는 우기에 산소, 수소 동위원소 조성이 가볍고 건기엔 무거워지는 계절적 특성을 갖는

다(Lee and Lee, 1999; Lee *et al.*, 2002). 강우에 민감한 하천은 흐르는 양과 동위원소에 의해 계절변화를 관찰할 수 있다. 특히 하천의 규모가 작을수록 이

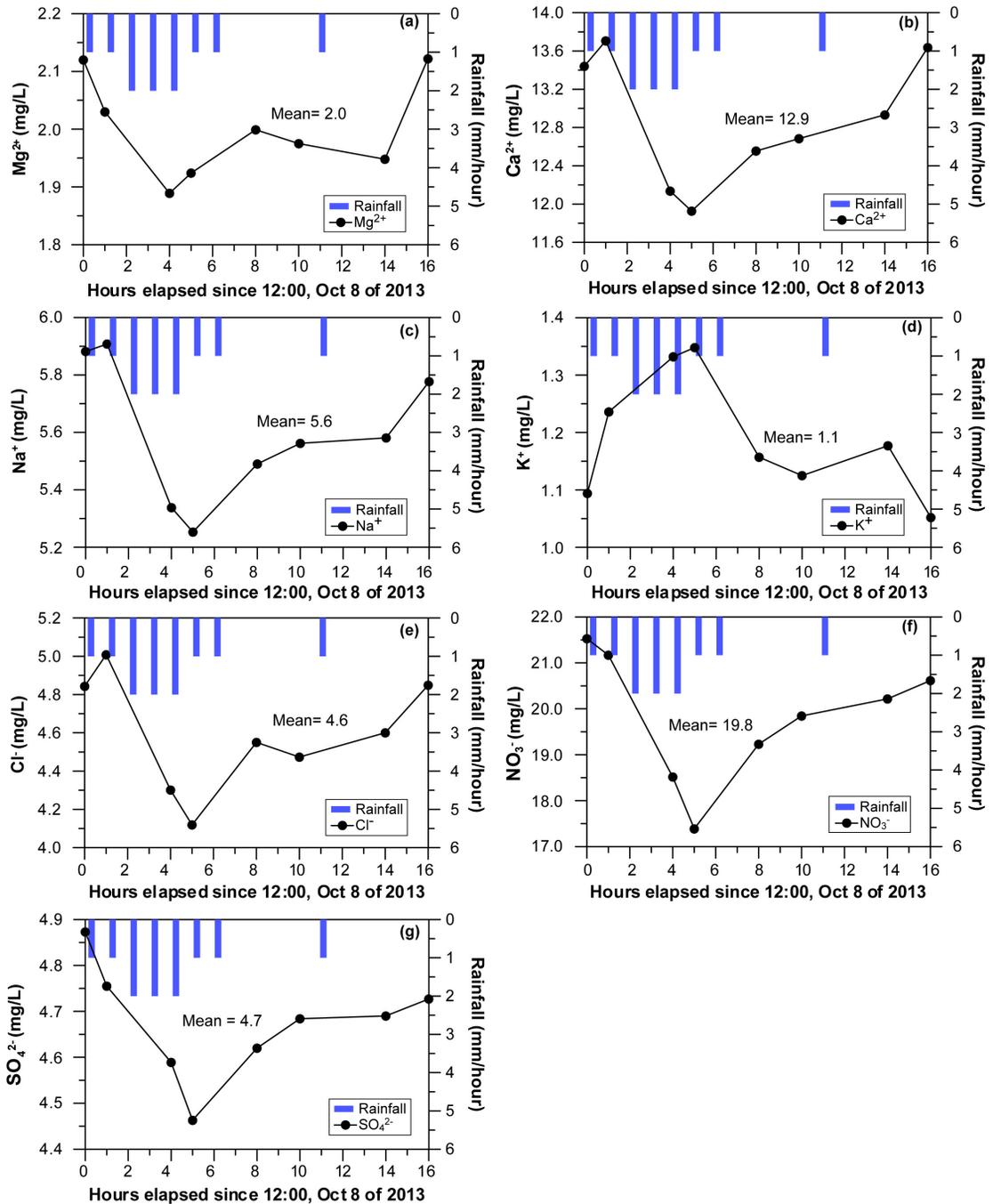


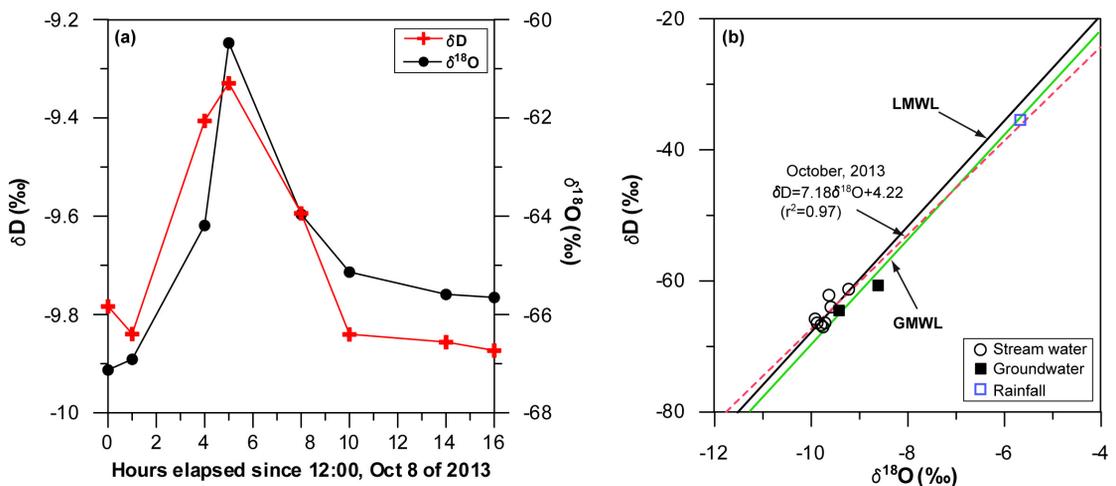
Fig. 4. Variation of major cations and anions concentrations in the stream water during the rainfall event.

리한 영향은 더 크게 나타난다(Lee and Lee, 1999). 연구지역에 강우 전·후로 하천의 산소, 수소 동위원소는 각 -9.9~-9.2‰와 -66.7~-61.3‰의 범위를 보였다. 강우시 하천의 산소, 수소 동위원소는 상대적으로 무거운 강우의 산소(-5.7‰), 수소(-35.5‰) 동위원소와 혼합되어 각 최대 -9.2‰와 -61.3‰까지 증가 후 다시 원래 값으로 빠르게 회복되는 특징을 보인다(그림 5a). 이는 희석효과로 인한 주요 양이온, 음이온의 농도 변화와 상반되는 경향을 보인다.

그림 5b는 연구지역에서 채취된 하천수, 지하수 및 강우의 지역순환수선( $\delta D=7.18 \times \delta^{18}O+4.22, r^2=0.97$ ), Park *et al.* (2006)의 춘천지역순환수선( $\delta D=8.06 \times \delta^{18}O+12.5, r^2=0.95$ ; Local Meteoric Water Line) 그리고 Craig (1961)의 지구순환수선( $D=8 \times \delta^{18}O+10$ ; Global Meteoric Water Line)을 도시한 것이다. 연구지역에서 채취된 시료개수(11개)가 적어 지역순환수선이 춘천지역순환수선과 지구순환수선의 기울기 및 Y절편과 다소 차이가 난다. 하지만 이 시료들은 춘천 지역순환수선과 지구순환수선의 부근에 도시되어 강우에서 기원된 순환수로 분석되었다. 특히 그림 5b에서 채취된 시료가 지구순환수선의 왼쪽 하단 쪽으로 치우친 것은 건기에 강우는 수소 동위원소가 산소 동위원소보다 부화되어 나타난 것으로 분석된다(Lee *et al.*, 1997, 1999; Park, 2006). 기존에

발표된 Lee *et al.* (2013)의 2009년 8월 해안분지의 산소, 수소 동위원소와 비교한 결과 이 연구에서 건기에 측정된 산소, 수소 동위원소가 전반적으로 더 무거운 것으로 나타났다.

그림 6은 2013년 10월 8일 강우로 인한 총 하천수의 유출량 변화에 따른 지하수의 기저유출(baseflow)과 강우의 유출(new water) 변화를 나타냈다. 연구수행 전 강우는 2013년 9월 24일 42 mm 그리고 9월 28-29일에 27 mm로 2차례 발생하였다. 이 강우로 인해 토양 내 수분이 포화되었기 때문에 연구기간 동안 강우가 지하로 침투되지 않고 하천수로 유입된 것으로 분석되었다. 따라서 이 연구에서는 하천수와 강우의 기여도만을 고려한 2성분계 수문분리 방법을 사용하였다. 그 결과 총 하천수의 유출량이 증가함에 따라 배출되는 지하수량도 급격히 증가한 것으로 나타났고 강우가 시작해서 약 4시간이 지난 후 지하수의 기저유출이 최고치를 나타냈다. 이는 연구수행 전에 내린 강우들로 인해 토양층의 수분함유량 증가와 빠른 수문순환 때문인 것으로 해석된다(Lee *et al.*, 2006; Lee, 2009; Choi and Lee, 2010). 또한 강우발생 동안 전체 하천수의 유출량은 약 66%가 지하수의 기저유출에 의한 것이고 나머지 34%는 강우로부터 공급된 것으로 분석되었다. 특히 지하수 유출량이 다른 지역에 비해 상대적으로 높게 나타났



**Fig. 5.** (a) Time series data for measurements of  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  and (b) plots of  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  for groundwater, stream water and rainfall in the study area. The green and black solid line represent the global meteoric water line (GMWL) (Craig, 1961) and local meteoric water line (LMWL) for the Chuncheon basin (Park *et al.*, 2006) respectively. The dotted line represents the regression line for the dry season.

다. 이는 연구지역의 이득하천 시기와 맞물려 연구 지역의 수리지질학적 특성 때문인 것으로 사료된다. 유성지역 소유역에 추적자 염소이온 농도를 이용한 Cho *et al.* (2005)의 수문분리 연구에서도 건기에 62.1%의 높은 기저유출이 나타났다.

수문분리 결과는 향후 연구지역 내 물수지를 산정할 때 지하로 유입되는 강우의 양을 정량적으로 제시하는데 기초자료로 활용될 수 있다. 강우가 지하로 침투하는 경우에 토양의 포화도가 크게 영향을 주기 때문에 매번 강우가 발생할 때마다 수문분리 결과가 다르게 나타날 수 있다. 향후 보다 신뢰할만한 연구결과를 위해 추가적으로 우기와 비교·분석할 필요가 있다.

#### 4. 결론

강원도 양구군 해안분지 내 소유역에서 2013년 10월 7일부터 9일까지 하천의 수질변동과 지하수의 기저유출을 연구하였다. 강우시 하천의 pH는 약알칼리성을 나타냈다. 또한 EC는 낮아진 반면 DO와 Eh는 증가하는 경향을 보였다. 강우 종료시점부터 하천의 pH, EC, DO 그리고 Eh는 강우 전으로 다시

빠르게 회복하는 특징을 보였다.

해안분지의 강우 전 지하수는 양이온  $Ca^{2+}$ 과 음이온  $Cl^-$ 가 우세한 Ca-Cl 유형으로 나타났다. 그리고 강우 전·후 하천수 모두 양이온  $Ca^{2+}$ 과 음이온  $NO_3^-$ 가 우세한 Ca- $NO_3$  유형으로 나타나 다른 유형으로 전이되지 않았다. 하천에 강우량의 유입으로 희석효과가 나타나  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$ 의 이온농도는 점차 감소하였으나 강우종료 후 다시 회복하는 양상을 보였다. 마찬가지로  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ 의 이온농도는 강우로 인해 작은 변동 폭으로 감소하였지만  $K^+$  이온농도는 오히려 증가하는 특징을 보였다. 따라서 연구기간 동안 지표유출로 인해 주변 오염물인 가축분뇨, 비료 등이 하천에 영향을 주지 않는 것으로 해석된다.

자연추적자인 산소 동위원소 및 2성분계 수문분리 모델을 이용하여 해안분지의 기저유출수와 강우를 산출하였다. 연구지역의 토양수의 영향을 배제한 수문분리 분석결과 하천수 전체 유출량의 약 66%는 지하수의 기저유출이며 34%는 강우로 공급된 것으로 분석되었다. 또한 강우발생 후 4시간 이내에 기저유출량이 최고치를 보여 빠른 수문순환이 되는 것으로 해석된다. 이는 지질 및 지형특성상 해안분지는

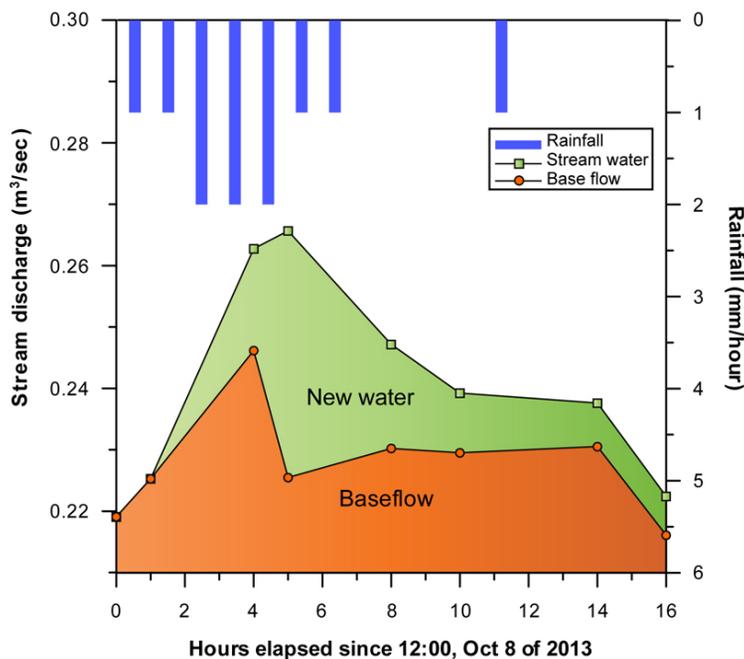


Fig. 6. Hydrograph separation of stream water using  $\delta^{18}O$  tracer during the study period.

닫힌계(closed system)로 다른 유역에 유출이 없어 수문분리 모델을 적용하기엔 최적지로 사료된다. 본 연구에서는 단일강우 및 소하천의 자료를 이용한 결과이기 때문에 우기를 추가하여 분석·비교한다면 보다 유의미한 연구결과가 도출될 것으로 기대된다.

## 사 사

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2015R1A4A1041105). 세심하고 유익한 수정의견을 주신 진성욱 교수님과 김희정 박사님께 감사드립니다.

## REFERENCES

- Cho, S.H., Moon, S.H., Kho, D.C., Cho, M. and Song, M.Y., 2005, Hydrograph separation using a chemical tracer(Cl) and estimation of baseflow rate in two small catchments, Yuseong, Daejeon. *Journal of the Geological Society of Korea*, 41(3), 427-436 (in Korean with English abstract).
- Choi, H.M. and Lee, J.Y., 2010, Groundwater level distribution and rainfall response characteristics in Haeon basin of Yanggu. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 15(6), 1-8 (in Korean with English abstract).
- Craig, H., 1961, Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133, 1702-1703.
- Criss, R.E. and Davisson, M.L., 1996, Isotopic imaging of surface water-groundwater interactions, Sacramento Valley, California. *Journal of Hydrology*, 178, 205-222.
- Energy & Environment News, 2015, Only the sky is not looking at measure of drought. November 11, 2015 (in Korean).
- Jeon, W.H., Lee, J.Y., Cheong, W.Y., Park, Y.H., Oh, S.H., Eum, D.H. and Park, J.Y., 2015, A multi-method approach revealing the groundwater-stream water interaction in the Inbuk stream, Korea. *Geosciences Journal*, 19(2), 325-340.
- Kim, H., Lee, J.Y. and Lee, K.K., 2013, Spatial and temporal variations of groundwater-stream water interaction in an agricultural area, case study: Haeon basin, Korea. *Research Journal of Earth and Planetary Sciences*, 3(1), 1-12.
- Korea Land Daily, 2015, Special symposium on groundwater utilization overcome drought. November 11, 2015 (in Korean).
- Kwon, Y.S., Lee, H.H., Han, U., Kim, W.H., Kim, D.J., Kim, D.I. and Youm, S.J., 1990, Terrain analysis of Haeon basin in terms of earth science. *Journal of Korean Earth Science Society*, 11(3), 236-241 (in Korean with English abstract).
- Lakey, B. and Krothe, N.C., 1996, Stable isotopic variation of storm discharge from a perennial karst spring. *Indiana, Water Resources Research*, 32, 721-731.
- Lee, J.Y., 2009, Importance of hydrogeological and hydrologic studies for Haeon basin in Yanggu. *Journal of the Geological Society of Korea*, 45(4), 405-414 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y. and Han, J., 2013, Groundwater use and its perspective in Haeon Basin, Yanggu County of Gangwon Province. *Journal of Wetlands Research*, 15, 179-189 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y., Lee, K.S., Park, Y., Choi, H.M. and Jo, Y.J., 2013, Chemical and isotopic compositions of groundwater and stream water in heavy agricultural basin of Korea. *Journal Geological Society of India*, 82, 169-180.
- Lee, K.S., Koh, D.C., Lee, D. and Park, W.B., 2002, The temporal and spacial distribution of stable isotope composition of precipitation in Jeju Island: application to groundwater recharge study. *Journal of the Geological Society of Korea*, 38(2), 151-161 (in Korean with English abstract).
- Lee, K.S. and Lee, C.B., 1999, Oxygen and hydrogen isotopic composition of precipitation and river waters in South Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 35(1), 73-84 (in Korean with English abstract).
- Lee, K.S., Lee, I., Choi, M.S. and Barg, E.J., 1997, An environmental isotopic study of precipitation in Cheju Island, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 33(3), 139-147 (in Korean with English abstract).
- Lee, K.S., Park, Y., Kim, Y., Jeong, J.H., Park, S.K., Shin, H.S. and Bong, Y.S., 2006, A preliminary hydrograph separation study in a small forested watershed using natural tracers. *Journal of the Geological Society of Korea*, 42(3), 427-437 (in Korean with English abstract).
- Négrel, P., Petelet-Giraud, 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.
- Park, Y., Lee, K.S. and Yu, J.Y., 2006, Seasonal variations of dissolved ions and oxygen and hydrogen isotopic compositions of precipitation in Chuncheon, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 42(2), 283-292 (in Korean with English abstract).
- Piper, A.M., 1994, A graphic procedure in the geochemical

- interpretation of water analyses. American Geophysical Union, Transaction, 5, 914-923.
- Rhee, J., Im, J. and Kim, J., 2014, Hydrological drought assessment and monitoring based on remote sensing for ungauged areas. Korean Journal of Remote Sensing, 30(4), 525-536 (in Korean with English abstract).
- Sim, G.O., 2009, A study on the extreme drought countermeasures by climate changes. National Disaster Management Institute, Seoul, South Korea (in Korea with English abstract).
- Won, J.K., Lee, M.W. and Woo, J.K., 1987, Geologic and geographic characteristics of Haeon basin. Memorial Book of 40th Anniversary of Kangwon National University, Kangwon National University, Chuncheon, Korea, 45-57 (in Korean).
- Won, J.K., Na, K.C. and Lee, M.W., 1988, Geology in northern area of Demilitary Zone. Investigation Report of Resources in North of Demilitary Zone (Geology), Cultural Heritage Administration of Korea, 114-120 (in Korean).
- Yun, S.W., 2009, Comparison of geology and groundwater recharge estimated in Haeon basin of Yanggu. B.S. thesis, Kangwon National University, 21 p (in Korean with English abstract).
- Yun, S.W., 2014, Groundwater recharge estimation and analysis of groundwater variation using numerical modeling in Haeon basin of Yanggu. M.S. thesis, Kangwon National University, 55 p (in Korean with English abstract).
- 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(4), 391-404 (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 groundwaters of urban and rural areas in Gangwon Province. Journal of Geological Society of Korea, 49(4), 503-516 (in Korean with English abstract).

---

Received : December 8, 2015

Revised : December 18, 2015

Accepted : December 18, 2015