

농업 밀집지역인 해안분지에서 지하수와 하천수의 수리화학적 특성 평가

윤상웅^{1,2} · 전우현^{1,2} · 이진용^{1,2,*}

¹강원대학교 지질학과

²강원대학교 크리티컬존선도연구실

요 약

이 연구는 농업이 밀집한 강원도 양구군 해안분지의 지하수와 하천수의 수리화학적 특성을 다각적으로 평가하기 위해 수행되었다. 이를 위해 2011년부터 2014년까지 9회의 현장조사를 통해 연구지역 지하수 관정 및 인근하천에서 시료를 채취하여 수질 분석을 수행하였다. 분석 결과, 지하수와 하천수는 서로 비슷한 화학조성을 보이며 빠른 유동과 함께 물-암석 교환작용을 받은 것으로 나타났다. 지하수는 하천수에 비해 $\text{Ca-HCO}_3\text{-Cl}$ 과 Ca-HCO_3 유형으로 넓은 분포를 나타낸 반면 하천수는 $\text{Ca-HCO}_3\text{-Cl}$ 유형이 집중적으로 나타났다. 두 수체의 산소·수소동위원소 조성을 분석한 결과, 연구지역은 수문순환이 빠르게 나타나며 지하수와 하천수간의 수리연결성이 좋은 것으로 나타났다. 나트륨 흡착비 및 나트륨 비율 분석결과, 지하수와 하천수는 관개수로서 적합하다고 평가되었다. 또한 연구지역 내 활발한 농업활동과 관련하여 지하수의 질산염 오염이 심각할 것으로 예상했지만 일부 시료만 먹는물 수질 기준치를 초과하는 것으로 나타났다. 이는 논 주변에 채취된 지하수 및 하천수가 논토양의 탈질 작용에 영향을 받은 것으로 판단된다.

주요어: 수리화학, 지하수, 안정동위원소, 수리연결성, 질산염

Sang Woong Yun, Woo-Hyun Jeon and Jin-Yong Lee, 2017, Evaluation of hydrochemical characteristics of groundwater and stream water in a heavy agricultural region of the Haean basin, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*. v. 53, no. 5, p. 727-742

ABSTRACT: This study evaluated the hydrochemistry of the groundwater and stream water of a heavy agricultural region of the Haean basin in Gangwon province, using the multi-hydrochemical analysis methods. For this study, we collected the samples of groundwater and adjacent stream water for nine times from 2011 to 2014 and conducted hydrochemical analysis. The result showed that the groundwater and stream water had similar chemical compositions and groundwater in the study area have undergone water-rock interaction with fast flow. Groundwater samples showed relatively wide distribution with $\text{Ca-HCO}_3\text{-Cl}$ and Ca-HCO_3 types whereas most of the stream water samples were plotted on the narrow range of the $\text{Ca-HCO}_3\text{-Cl}$ type. The oxygen and hydrogen isotopic compositions analysis result indicated that the hydraulic connection between groundwater and stream water is good. Sodium absorption analysis results suggested that both groundwater and stream water were suitable for irrigation. Groundwater generally showed good quality in terms of nitrate concentration despite the intensive agricultural activities in the study area. Groundwater is considered to be influenced by the denitrification process particularly from the rice paddy field.

Key words: hydrochemistry, groundwater, stable isotopes, hydraulic connection, nitrate

(Sang Woong Yun, Woo-Hyun Jeon and Jin-Yong Lee, Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea; Critical Zone Frontier Research Laboratory, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea)

* Corresponding author: +82-33-250-8551, E-mail: hydrolee@kangwon.ac.kr

1. 서 론

최근 전 세계는 극심한 가뭄 및 홍수와 같은 기상 이변과 함께 인간 활동으로 인한 수질오염으로 안정적인 수자원 확보에 어려움을 겪고 있다. 이에 많은 나라들은 지속적인 수자원 관리 및 이용하기 위해 물이용 효율성, 지하수 및 하천수의 통합적 관리를 위한 노력을 하고 있다. 이 중 지하수는 많은 나라에서 농업용수 및 생활용수를 공급하는 중요한 수자원 역할을 한다. 현재 전 세계 인구의 약 1/3은 지하수를 음용수로 의존하고 있다(UNEP, 1999). 지하수 자원의 수질 조성 연구는 수자원의 안정적 확보를 위한 기본 자료 제공 및 관리방안의 기본 틀을 마련한다는 측면에서 중요하다.

과거 연구자들은 지하수와 하천수가 각 독립된 수체로 생각하여 연구를 수행하였다(Kalbus *et al.*, 2006; Yang *et al.*, 2014). 그러나 많은 경우, 지하수와 하천수는 수리학적·수리적으로 서로 매우 밀접한 상호관계를 가진다. 이를 위해 연구자들은 두 수체의 상호작용을 평가하기 위한 다양한 방법들을 제시하였으며, 지하수와 하천수의 통합관리의 중요성을 보고하였다(Winter *et al.*, 1998; Brodie *et al.*, 2007; Jeon *et al.*, 2015).

지하수 및 하천수의 수리·화학적 특성을 비교·분석하는 연구는 지하수의 화학적 성질을 지배하는 지질학적 과정을 이해하는데 도움이 된다. 지하수 및 하천수가 생활/농업용수로서의 수질 적합성을 결정하는데 중요한 척도가 된다. 정기적인 수질평가는 그 지역의 주민과 정책자에게 수질에 대한 많은 정보를 알려주는 역할을 한다. 산소·수소동위원소 조성 분석은 지하수 함양지역 및 시간 추정, 지하수 흐름 경로 및 지역의 함양조건, 증발의 정도, 그리고 두 수체간의 상호연결성을 이해하는데 중요한 정보를 제공한다(Kanduč *et al.*, 2014).

양구군 해안분지는 농업밀집 지역으로서 다른 농촌지역에 비해 매년 대량의 화학비료 및 퇴비를 사용하고 있어 지하수 내 나트륨 및 질산성 질소의 오염 가능성이 대두된 바 있다(Kim *et al.*, 2015). 농업지역에 해당되는 낙동강 유역, 제주시, 금강권역 등 여러 지역에서 총적대수층이 질산성 질소로 오염된 연구사례가 있다(Choi *et al.*, 2002; Min *et al.*, 2003; Chae *et al.*, 2009). 이 연구결과들에 따르면 농업활동으로 인해 대부분 지하수 관정의 질산성 질소가

먹는물 수질기준(10 mg/L)을 초과한 것으로 나타났다. 이는 우리나라 농업지역 지하수의 질산성질소에 대한 영향 평가 및 수리적 특성에 대한 이해가 필요함을 시사한다.

양구군 해안분지의 고지대는 농업활동이 활발하게 이루어지는 지역으로, 특히 여름철에 기온역전 현상으로 냉기가 형성되어 대부분 고랭지밭에서 무, 배추, 인삼이 주로 생산된다. 이에 대규모 밭으로 조성되면서 폭우 시 지표유출로 인한 토양유실의 문제가 발생하고 있다. 또한 강우강도에 따라 수일 또는 수주가 탁수현상이 지속되고 있는 상황이다. 이러한 탁수 문제는 연구지역의 수자원 이용, 저수지 수질 관리, 수리 생태계에 부정적인 영향을 미친다. 또한 지하수와 하천수의 수질은 농작물의 품질과 생산량 그리고 인간 건강에 상당한 영향을 줄 수 있어 이에 대한 체계적인 분석이 중요하다(Hoek *et al.*, 2001). 현재까지 수화학 측면에서 연구지역의 전반에 걸친 장기 모니터링의 연구는 없었다. 이 연구 목적은 연구지역에서 다년간 수집된 자료를 통해 두 수체의 수리·화학적 특성을 다각적으로 평가하고 이를 통해 연구지역의 수리적 특성을 이해하고자 하는데 있다. 이 연구결과가 연구지역의 계절적 변화에 따른 지하수와 하천수의 물수지 상관관계를 평가하는데 있어 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

2. 연구지역 및 방법

2.1 연구지역

연구지역은 남한과 북한이 대치중인 군사분계선에 인접한 대한민국 강원도 양구군 해안면(38.239~38.329°N, 128.083~128.173°E)에 위치하고 소양강 유역에 해당된다(그림 1a). 2011년 기준 해안분지의 전체면적은 61.75 km²이며 가칠봉(1,242 m), 대우산(807 m), 도솔산(1,147 m) 등 해발고도 1,000 m 내외의 산으로 둘러싸인 폐쇄형 분지이다. 연구지역의 해발고도 범위는 339 m부터 1,321 m 사이를 보인다. 지형적 특성으로 해당 면적에 비해 고도차가 커 전경을 한눈에 볼 수 있고 다른 지역과 격리되어 있어 주변 능선의 경계가 곧 행정구역이다.

연구지역의 일반지질은 외륜 및 능선인 선캄브리아기 변성암 복합체와 내부는 주라기 흑운모 화강암으로 구성되며 그 외에 지천을 중심으로 제4기 충적층

으로 형성된다(Won *et al.*, 1987, 1988). 이 분지의 생성원인은 기존 선크브리아기 변성암 복합체 지역에 흑운모 화강암이 분지 내부로 관입한 후 차별침식 작용으로 현재의 편지불 모양의 분지가 형성된 것으로 추측된다(Won *et al.*, 1987, 1988; Kwon *et al.*, 1990). 분지 내부는 풍화에 약한 흑운모 화강암이 풍화토(saprolite)로 산출되고 분지 외륜은 변성암복합체며 편암, 편마암, 규암 혹은 석류석으로 분포된다.

분지 내 하천은 하천폭 약 1~2 m의 지천들로 구성된 수지상 또는 방사상의 수계이며 주요 하천은 폭 10~15 m인 만대천, 도솔천 그리고 성황천이다(그림 1a). 여러 지천들이 만대천으로 한곳에 수렴하여 연구지역의 동쪽 당물골로 배출되는 단순한 수리학적 시스템이다. 하천의 경사는 상대적으로 가파른 산지에서 상류(20°)로 시작하여 경사가 완만한 분지 내 하류(5°)까지 점차 감소한다. 이 연구지역의 평균 경사는 11°이다(Lee *et al.*, 2011).

2015년 양구군 통계자료에 따르면 해안분지에 신고 지하수 관정은 310개이지만 미신고된 관정까지 고려하면 약 600개 이상으로 추정된다. 이에 연구지역의

지하수 개발밀도는 4.56개/km²로 추정된다. 대부분 지하수 관정은 농업용수 목적으로 주로 사용되며 장기간 상당량의 관개수가 필요한 논에 밀집되어 있다.

연구지역의 기후는 여름엔 덥고 습하며 겨울에는 춥고 건조한 전형적인 동아시아 몬순기후 영향을 강하게 받는다. 1999년부터 2009년까지 연평균 기온은 약 8.5℃이며 최저기온인 1월 -26.9℃과 최고기온인 8월 33.4℃의 범위를 보이는 등 4계절이 뚜렷하게 나타난다. 연강수량은 1,577 mm이며 이 중 70%가 장마로 인해 우기인 6월에서 8월 사이에 내린다(Kettering *et al.*, 2012). 이 지역의 농업활동은 4월에서 10월 사이에 거의 90%가 이루어진다.

2010년 기준으로 해안분지의 토지 이용률은 해발고도에 따라 그 분포가 다르게 나타난다. 해발고도 650 m 이상은 가장 큰 면적을 차지하는 산림(58%)이며 650 m 이하 고랭지밭(27%), 논(9%), 기타(5%), 과수원(0.5%) 순으로 나타난다(그림 1b). 2002년부터 2014년까지 전체 토지 이용면적(6,150 ha) 변화를 보면 큰 면적을 차지하는 산림은 3,580~3,604 ha, 밭은 1,683~1,725 ha 그리고 논은 529~537 ha로 거의

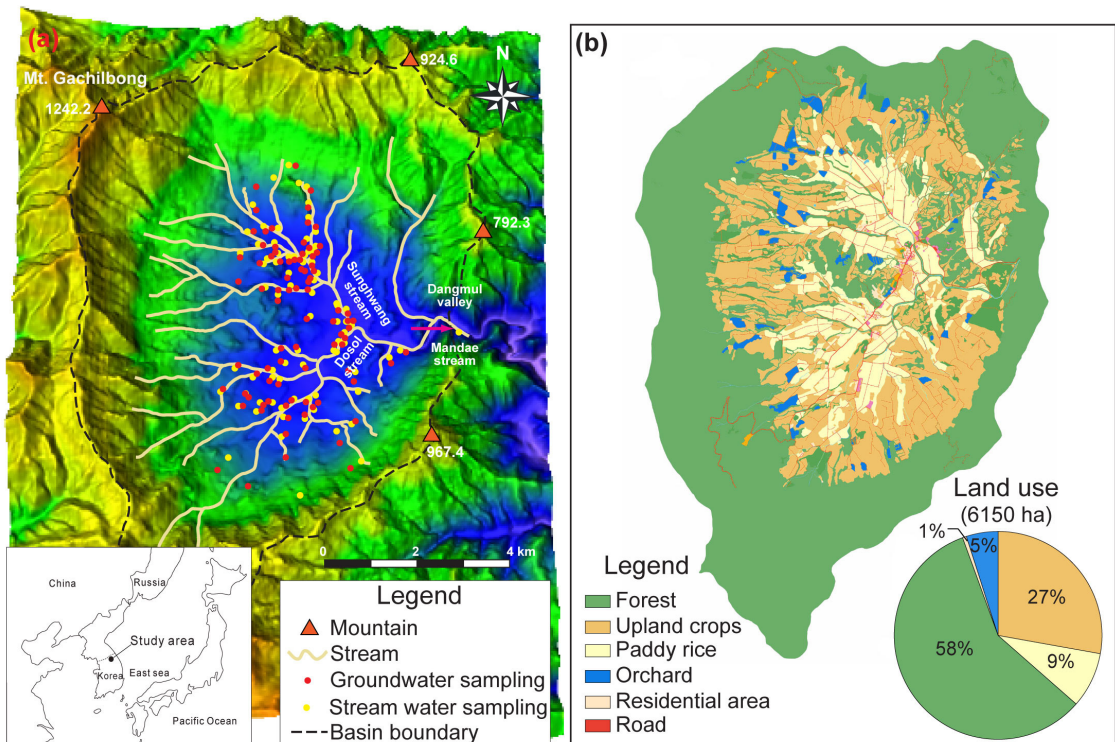


Fig. 1. (a) Location of the Haean basin and water sample points, (b) land use of the study area.

변화가 없었다.

한편 상류 지역인 양구 해안분지에서 발생한 탁수는 하류에 있는 여러 지역에 탁수 피해를 입히고 소양강댐의 수질 영향을 주고 있다(Jo *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2011). 2006년부터 2012년까지 양구군청은 탁수저감을 시키기 위해 침사지 8개를 건설했으나 폭우 시 큰 저감 효과를 보지 못하였다. 탁수의 장기화는 수리 생태계 파괴 및 하천수 수질 저하에 영향을 끼칠 수 있어 체계적인 관리가 필요하다.

2.2 현장시료 채취 및 분석

2011년부터 2014년까지 9회 현장조사를 걸쳐 지하수 관정 44개 및 하천 36지점에서 각각 총 지하수 114개, 하천수 114개의 시료를 채취하였다(그림 1a). 각 시기별로 채취된 지하수 및 하천수의 시료 개수와 위치는 일부 변화가 있었으며 대부분 논 주변의 지하수 관정과 하천에서 채취했다. 이는 상당량의 관개수를 필요한 논 중심으로 지하수 관정과 하천이 밀집되어 있기 때문이다. 하천수는 지하수와 수리연결성을 평가하기 위해 지하수 관정에서 가까운 하천에서 시료를 채취하였다. 또한 논물의 영향에 대한 두 수체의 평가하기 위해 2012년 6월과 2013년 6월에 논물 각각 5개, 8개의 시료를 채취하였다.

현장에서 채취된 시료는 현장수질측정기(D-54, D-55, HORIBA)로 이용하여 수온, 수소이온농도(pH), 전기전도도(electrical conductivity) 및 용존산소(dissolved oxygen)에 대한 각각의 항목들을 측정하였다. 이에 앞서 정확한 자료값을 수집하기 위해 실내에서 현장수질측정기의 pH 전극은 표준용액(pH 4, 7, 9)으로 3점 보정하였고 DO 전극은 대기상에서 기압 모드로 보정하였다. 현장에서 채수된 시료는 0.45 μm 여과필터로 부유물질 제거 및 질산 처리(양이온) 후 아이스박스에 4°C 이하로 냉장 보관하였다.

각 주요 양이온(Ca, Mg, Na, K, Si), 음이온(Cl, HCO₃, SO₄, NO₃)은 강원도 원주시 상지대학교 자연과학연구지원센터의 유도결합 플라즈마(Inductively Coupled Plasma, VISTA-MPX model, VARIAN)와 이온 크로마토그래프(Ion Chromatograph, DX-120 model, Dionex Corporation)를 이용하여 분석하였다. 이 분석기기의 검출한계는 각 0.001 mg/L이며 각 시료들은 정확하게 분석된 결과인지 확인을 위해 이온균형오차(charge balance error, CBE)를 계산하

였다. 모든 분석시료의 CBE는 $\pm 10\%$ 이내로 보였다. 산소·수소동위원소 조성은 한국기초과학지원연구원 오창센터의 검출한계 0.01‰인 동위원소비 질량분석기(Isotope Ratio Mass Spectrometer, Isoprime model, GV Instruments Ltd.)를 이용하여 각각 101개 시료가 분석되었다.

2.3 나트륨 흡착비(Sodium absorption ratio) 및 나트륨 비율(Na%)

Sodium absorption ratio (SAR)는 물의 알칼리/나트륨이 농산물에 위험을 나타내는 수치인 동시에 관개수로 적합한지 알려주는 척도이다(Subramani *et al.*, 2005). 관개수로 사용되는 물이 Na가 높다면 화학적 작용에 의해 토양구조 파괴로 이어져 식물은 성장하는데 큰 지장을 받는다(Subramani *et al.*, 2005; Alam, 2014). Karanth (1987)에 의해 SAR는 다음과 같이 정의가 내려진다.

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{(Ca^{2+} + Mg^{2+})/2}} \quad (\text{all unit in meq/L}) \quad (1)$$

Mg와 Ca에 관계있는 초과된 나트륨 비율은 토양 투수성을 감소시킨다. 나트륨은 점토 입자에 의해 흡수되는 경향이 있어 Mg와 Ca를 방출시키고 식물에 필요한 수분공급을 억제한다. 관개수로서 지하수와 하천수에 의존도가 높은 이 연구지역에서는 바로 농산물 생산량과 직결되기 때문에 중요한 자료가 된다. Wilcox (1955)에 의해 Na%를 구하는 식은 아래와 같이 따른다.

$$Na\% = \frac{Na^+}{Na^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+} \times 100\% \quad (\text{all unit in meq/L}) \quad (2)$$

본 연구에서는 상기 두 식을 이용하여 연구지역 지하수 및 관개수의 농업용수 활용 적합성을 평가하였다.

3. 연구결과 및 토의

3.1 일반 수리화학적 특성

표 1은 연구지역의 지하수와 하천수의 수리화학

Table 1. Descriptive statistics of field parameters and ionic compositions for groundwater, stream water and ponded water in the studied period.

Parameter	Groundwater (n=114)					Stream water (n=114)					Ponded water (n=13)				
	Max	Min	Mean	SD	CV	Max	Min	Mean	SD	CV	Max	Min	Mean	SD	CV
Temp (°C)	21.8	7.6	14.2	2.6	0.18	28.2	3.3	15.3	7.3	0.48	32.0	18.4	22.2	5.5	0.25
pH	9.7	5.8	7.1	0.7	0.10	9.4	6.0	7.6	0.5	0.07	8.5	7.5	8.0	0.3	0.04
EC (μS/cm)	10,830	39	318	1,008	3.17	576	40	159	77.1	0.49	778	98	251	182.3	0.72
DO (mg/L)	15.4	0.1	3.2	2.4	0.74	13.1	0.8	6.1	2.6	0.42	7.7	3.3	4.7	1.5	0.32
Ca (mg/L)	274.4	4.1	30.9	46.3	1.50	42.2	3.4	15.8	7.0	0.44	65.0	6.9	23.7	15.9	0.67
Mg (mg/L)	20.8	0.1	3.7	3.3	0.91	10.3	0.5	2.7	1.5	0.54	14.5	0.8	4.3	3.4	0.79
Na (mg/L)	25.5	0.7	9.4	4.1	0.43	44.4	2.5	6.9	5.4	0.79	42.4	4.7	11.4	9.6	0.84
K (mg/L)	6.9	0.2	1.5	1.2	0.80	13.3	n.d	1.8	1.7	0.95	11.9	1.9	4.2	2.8	0.67
Si (mg/L)	138.5	0.7	19.0	22.6	1.19	35.8	1.7	12.6	9.2	0.73	8.0	0.2	3.1	2.5	0.81
HCO ₃ (mg/L)	411.1	2.4	44.1	73.1	1.66	43.0	3.5	17.1	7.8	0.45	55.1	9.0	28.9	14.5	0.50
SO ₄ (mg/L)	19.7	n.d	5.5	5.0	0.90	37.3	2.0	6.8	4.6	0.68	51.7	2.0	10.6	13.0	1.23
Cl (mg/L)	51.7	0.5	8.1	6.3	0.78	106.0	1.2	9.0	11.7	1.29	119.8	6.6	23.3	30.1	1.29
NO ₃ (mg/L)	88.2	0.1	19.2	18.3	0.97	76.1	0.1	21.3	14.6	0.68	19.3	0.1	6.5	7.3	1.12
δ ¹⁸ O (‰)*	-6.5	-10.7	-9.6	0.7	-0.07	0.5	-10.6	-9.7	1.1	-0.11	4.8	-8.7	-4.1	3.8	-0.94
δD (‰)*	-51.9	-79.9	-70.5	4.7	-0.07	-24.6	-80.0	-70.2	5.7	0.41	-9.4	-67.1	-47.0	16.2	-0.35

*No. of stable isotope samples (n=101), SD: standard deviation, CV: coefficient of variation, n.d: not detected, n: the number of groundwater, stream water and ponded water samples.

적 특성에 대한 기초통계 분석결과를 보여준다. 두 수체의 산소·수소동위원소 조성 및 질산염 농도의 영향인자로 추정되는 논물 13개는 표 1에 함께 나타냈으며 그 내용은 산소·수소동위원소 및 질산염 오염의 평가 파트에서 다루겠다. 각 지하수와 하천수의 칼륨농도의 범위는 0.2~6.9 mg/L, 0~13.3 mg/L이며 평균은 1.5와 1.8 mg/L로 서로 비슷한 값을 보인다. 지하수 내 칼륨은 양이온 교환작용에 의해 지하수는 하천수보다 칼륨농도가 보통 낮게 나타나는 것으로 알려져 있다(Griffioen, 2001).

분석결과, 연구지역 지하수와 하천수의 나트륨 농도 범위는 0.7~25.5 mg/L와 2.5~44.4 mg/L이며 평균 9.4와 6.9 mg/L로 보인다. Ca와 Mg는 보통 돌로마이트와 방해석 같은 탄산염 용해로 생성되며 연구지역에서는 지하수와 하천수의 Ca의 농도범위는 각각 4.1~274 mg/L, 3.4~42.2 mg/L이며 평균은 30.9와 15.8 mg/L이다. Mg의 농도범위는 지하수와 하천수 각각 0.1~20.8 mg/L와 0.5~10.3 mg/L이며 평균은 3.7과 2.7 mg/L이다. 전반적으로 지하수와 하천수의 주요 양이온은 Ca와 Na 그리고 주요 음이온은 HCO₃와 NO₃가 우세하게 나타난다.

지하수와 하천수의 표준편차는 각각 1,008과 77.1로 EC에서 가장 크게 나타난 반면 산소·수소동위원소에서 각각 4.7과 5.7로 가장 작게 나타난다. 표본표준편차와 표본평균의 비인 지하수와 하천수의 변동계수는 각각 EC (3.17), Cl (1.29)가 가장 크다. 특히 지하수의 Ca와 HCO₃는 하천수에 비해 각각 6.6과 9.4배로 높게 나타났다. 이는 물과 암석 반응으로 용해된 광물이 지하수에 영향을 준 것으로 분석된다.

지하수와 하천수의 현장수질, 주요 양이온, 음이온에 대한 차이와 관계를 평가하기 위해 상관분석을 수행하였다(표 2). 지하수는 Ca와 HCO₃, Mg, Na 그리고 Mg와 HCO₃, Na 그리고 Na와 HCO₃ 순으로 높은 상관관계($r>0.78$)를 보인다. 특히 지하수 내 높은 상관성을 보인 Ca, Mg은 몬모릴로나이트, 일라이트 등 점토광물로 기인된 것으로 분석된다(Garrels, 1976). 하천수는 Ca와 Mg, HCO₃ 그리고 EC와 Mg, Ca 그리고 Mg, SO₄ 그리고 Na과 Cl 순으로 높은 상관관계($r>0.70$)를 보인다. 하천수에서 EC에 대한 모든 양이온, 음이온의 상관계수가 0.48 이상으로 높게 나타났다. 지하수에 비해 하천수에서 Na와 Cl의 상관계수는 0.90으로 강한 상관성을 보이는데 유속

Table 2. Pearson correlation coefficients of analyzed chemical parameters of groundwater and stream water.

Groundwater												
	pH	EC	DO	Ca	Mg	Na	K	Si	SO ₄	HCO ₃	Cl	NO ₃
pH	-	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.06	0.00	0.00	0.00	0.03
EC	-0.19	-	0.39	0.00	0.00	0.00	0.05	0.04	0.54	0.00	0.83	0.27
DO	0.30	-0.08	-	0.08	0.21	0.07	0.23	0.03	0.43	0.06	0.41	0.74
Ca	-0.30	0.50	-0.16	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.53	0.00	0.42	0.08
Mg	-0.36	0.47	-0.12	0.95	-	0.00	0.00	0.00	0.58	0.00	0.67	0.64
Na	-0.33	0.42	-0.17	0.81	0.84	-	0.00	0.00	0.14	0.00	0.09	0.20
K	-0.20	0.18	-0.11	0.37	0.36	0.30	-	0.28	0.46	0.00	0.02	0.11
Si	-0.18	0.19	-0.20	0.69	0.63	0.54	0.10	-	0.37	0.00	0.08	0.67
SO ₄	-0.35	-0.06	-0.07	-0.06	0.05	0.14	0.06	-0.08	-	0.23	0.00	0.00
HCO ₃	-0.27	0.55	-0.17	0.99	0.93	0.78	0.39	0.67	-0.11	-	0.12	0.00
Cl	-0.40	-0.02	-0.08	-0.08	0.04	0.16	0.22	-0.16	0.34	-0.15	-	0.00
NO ₃	-0.21	-0.10	-0.03	-0.16	-0.04	0.12	-0.15	-0.04	0.25	-0.28	0.36	-
Stream water												
	pH	EC	DO	Ca	Mg	Na	K	Si	SO ₄	HCO ₃	Cl	NO ₃
pH	-	0.07	0.00	0.02	0.10	0.86	0.17	0.03	0.04	0.14	0.89	0.02
EC	0.17	-	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00
DO	0.37	0.07	-	0.65	0.72	0.01	0.68	0.00	0.66	0.00	0.09	0.44
Ca	-0.22	0.75	0.04	-	0.00	0.00	0.00	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	-0.16	0.77	0.03	0.88	-	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	-0.02	0.64	0.25	0.53	0.52	-	0.00	0.64	0.00	0.00	0.00	0.65
K	-0.13	0.64	-0.04	0.41	0.53	0.36	-	0.02	0.00	0.18	0.00	0.03
Si	0.21	-0.14	0.61	-0.14	-0.17	0.05	-0.22	-	0.16	0.82	0.75	0.96
SO ₄	-0.19	0.59	-0.04	0.63	0.84	0.27	0.54	-0.13	-	0.18	0.00	0.00
HCO ₃	-0.14	0.48	0.24	0.70	0.51	0.47	0.13	-0.02	0.13	-	0.00	0.83
Cl	-0.01	0.72	0.16	0.52	0.61	0.90	0.58	-0.03	0.42	0.28	-	0.13
NO ₃	-0.22	0.43	-0.07	0.57	0.57	0.04	0.20	0.00	0.58	0.02	0.14	-

Coefficients that are higher than 0.70 were shown as bold.

이 빠른 하천수가 농업활동 의한 비료사용 등 인위적인 유입의 영향을 더욱 뚜렷하게 받은 것으로 추정된다.

그림 2는 지하수와 하천수의 수리화학적 자료를 Piper (1944) diagram 을 통해 유형별로 비교하기 쉽게 도시한 결과를 보여준다. 지하수는 114개 시료 중 Ca-HCO₃-Cl (47.0%)와 Ca-HCO₃ (36.5%) 유형에 도시되었다. 그 외에 Ca-Na-HCO₃ (12.2%), Ca-Cl (0.9%), Ca-Na-HCO₃-Cl (2.7%) 그리고 Ca-Na-Cl (0.9%) 유형이 일부 나타난다. 한편 하천수는 주로 Ca-HCO₃-Cl (83.5%) 유형에 도시된다. 그밖에 Ca-Cl

(5.2%), Na-Cl, Ca-HCO₃ (2.7%), Ca-Na-HCO₃-Cl (2.7%) 그리고 Ca-Na-Cl (0.9%) 유형 순으로 나타난다. 농업지역에서 Cl은 화학비료 사용으로 인해 질산염과 함께 나타나는 주요 음이온이다. 이에 지하수와 하천수 모두 지표 기원 오염물질인 Cl에 지속적인 영향을 받는다(Ki *et al.*, 2013, Kim *et al.*, 2015). 한편 논물의 유형은 Ca-HCO₃-Cl (61.5%), Ca-Na-HCO₃-Cl (30.8%) 그리고 Ca-Na-Cl (7.3%) 순으로 분포한다.

9회 샘플링 자료를 시기별로 비교·분석한 결과, 지하수와 하천수의 물 유형의 경우 시간에 따라 변

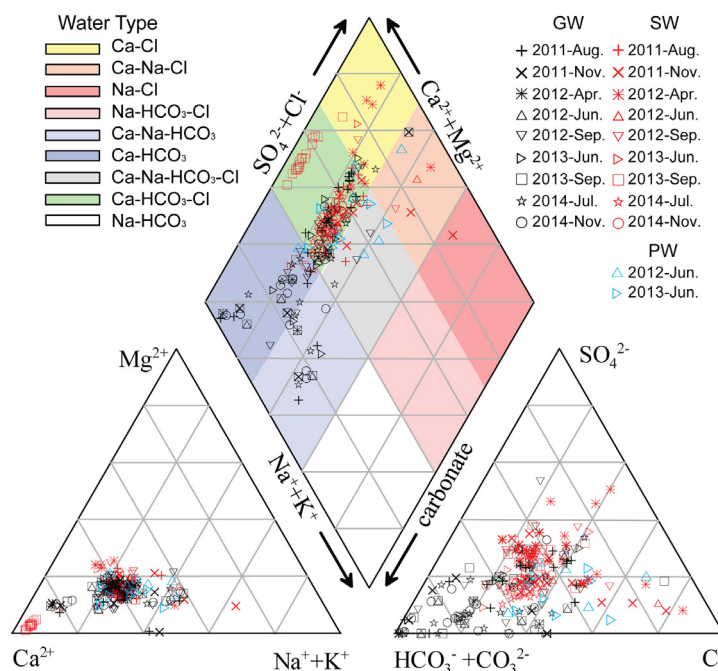


Fig. 2. Water types for groundwater and stream water samples in the studied area for 2011~2014.

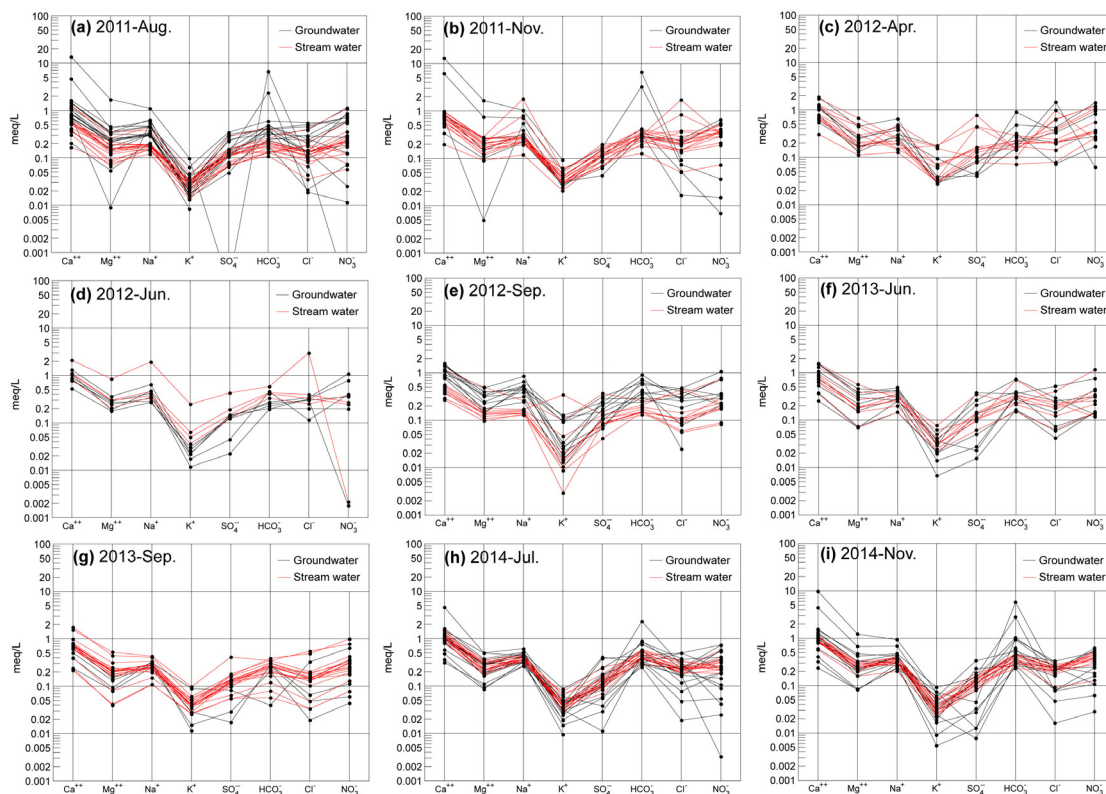


Fig. 3. Schoeller diagram for groundwater and stream water samples from 2011 to 2014.

화를 보이지 않지만 지하수와 하천수의 도시되는 분포범위는 다르게 나타났다. 지하수는 하천수에 비해 $\text{Ca-HCO}_3\text{-Cl}$, Ca-HCO_3 유형을 걸치면서 넓은 분포를 보이는 반면 하천수는 대부분 $\text{Ca-HCO}_3\text{-Cl}$ 유형에 집중 분포한다. 이것은 하천수의 유속이 빨라 활발한 수리화학적 반응을 겪을 시간이 짧은 것과 관련이 있을 것으로 추정된다. 지하수의 경우, 상대적으로 넓은 화학조성 분포를 보이는데 이는 지하수는 충분한 화학적 반응과 토지이용별 직접적인 영향을 받기 때문이다.

연구기간에 채취된 지하수와 하천수의 주요 양이온 및 음이온의 구성변화(meq/L)를 Schoeller (1977) diagram을 이용하여 시기별로 도시하였다(그림 3). 전반적으로 지하수와 하천수는 양이온의 경우 $\text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{K}$, 음이온의 경우 $\text{HCO}_3 > \text{NO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4$ 순으로 비슷한 화학조성 비율을 보였으며 이는 두 수체가 수리연결성이 좋다는 것을 시사한다. 선행연구인 Yun *et al.* (2015)에서는 강우 이벤트 시 기저유출이 단시간 내 발생하여 타 지역에 비해 빠른 수문순환을 보여주는 연구사례가 있다. 지점별 지하수와 하천수의 각 이온들의 변화 정도는 상이하게 나타난다. 지하수의 이온 변화는 상대적으로 불규칙하고 광범위하게 변화를 보이는 반면, 하천수는 좁은 범위 내 일정

하게 나타난다. 지하수의 경우 특히, NO_3 이온의 변화폭이 크게 나타났는데, 이는 작물재배 및 비료사용 등의 인위적인 영향을 받은 것으로 추정된다.

지하수와 하천수에 나타나는 강수의 영향, 물-암석 교환, 증발 등의 수리화학적 과정을 이해하기 위해 Gibbs (1970) diagram을 이용하였다. 우리는 TDS에 따른 $\text{Na}/(\text{Na}+\text{Ca})$ 과 $\text{Cl}/(\text{Cl}+\text{HCO}_3)$ 의 비율을 각각 계산한 후 (1) 증발 우세 (2) 강수 우세 (3) 암석 우세 총 3개 영역으로 도시하였다(그림 4). 지하수와 하천수는 Gibbs diagram에 중간 영역인 암석 우세에 대부분 도시되었으며, 이러한 결과는 전형적 분지형태인 연구지역의 수리지질학적 환경과 관련이 있다. 이 연구지역은 폐쇄형 지하수 함양지역이며 물-암석 교환작용에 의해 지하수 및 하천수의 수화학이 형성된 것으로 보인다. 연구지역에서 지하수는 자유면 대수층 및 피압대수층 상관없이 물-암석 교환작용에 영향을 받는다. 하천수의 일부 시료는 강수 우세를 보이는데 이것은 우기 때 강우영향을 받은 것으로 분석된다.

3.2 산소·수소동위원소의 시·공간적 분포 특성

2011년부터 2014년까지 지하수와 하천수의 산소·수소동위원소 범위는 각각 $-10.7\sim-6.5\text{‰}$, $-79.9\sim-51$.

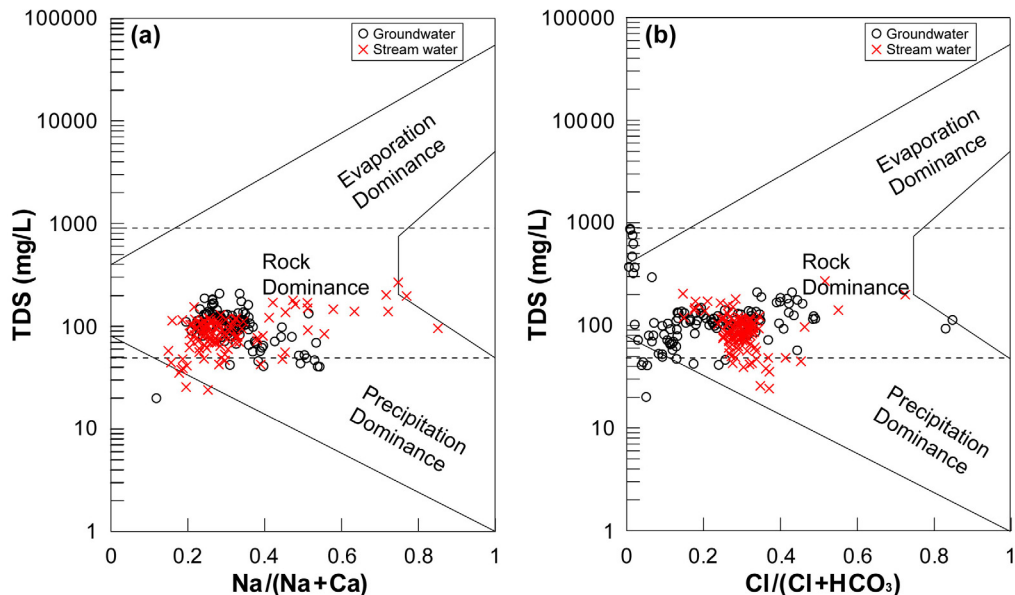


Fig. 4. Gibbs diagrams showing the mechanism of groundwater and stream water evolution. (a) TDS versus $\text{Na}/(\text{Na}+\text{Ca})$, (b) TDS versus $\text{Cl}/(\text{Cl}+\text{HCO}_3)$.

9‰와 -10.6~0.5‰, -80.0~-24.6‰이다. 하천수의 산소·수소동위원소의 변화 범위는 지하수 산소·수소동위원소보다 크다. 추가로 2012년 6월과 2013년 6월에 채취된 13개 논물의 산소·수소동위원소는 각 -8.7~4.8‰와 -67.1~-9.4‰ 범위를 보이며 각 평균 -4.1‰와 -47.0‰이다.

지역순환수선과 함께 지하수 및 하천수를 비교하는 것은 지역적 수리학 연구에서 수원을 결정하는데

유용한 지표로 될 수 있다(Clark and Fritz, 1997). 이 연구지역의 두 수체는 Park *et al.* (2006)의 지역순환수선($\delta D = 8.06 \times \delta^{18}O + 12.5$, $r^2 = 0.95$; Local Meteoric Water Line) 그리고 Craig (1961)의 지구순환수선($D = 8 \times \delta^{18}O + 10$; Global Meteoric Water Line) 부근에 도시된다(그림 5).

그림 5e, 5f, 5g에서 두 수체가 GMWL 오른쪽 하단에 도시된 것은 강한 증발 영향이 반영된 것이다.

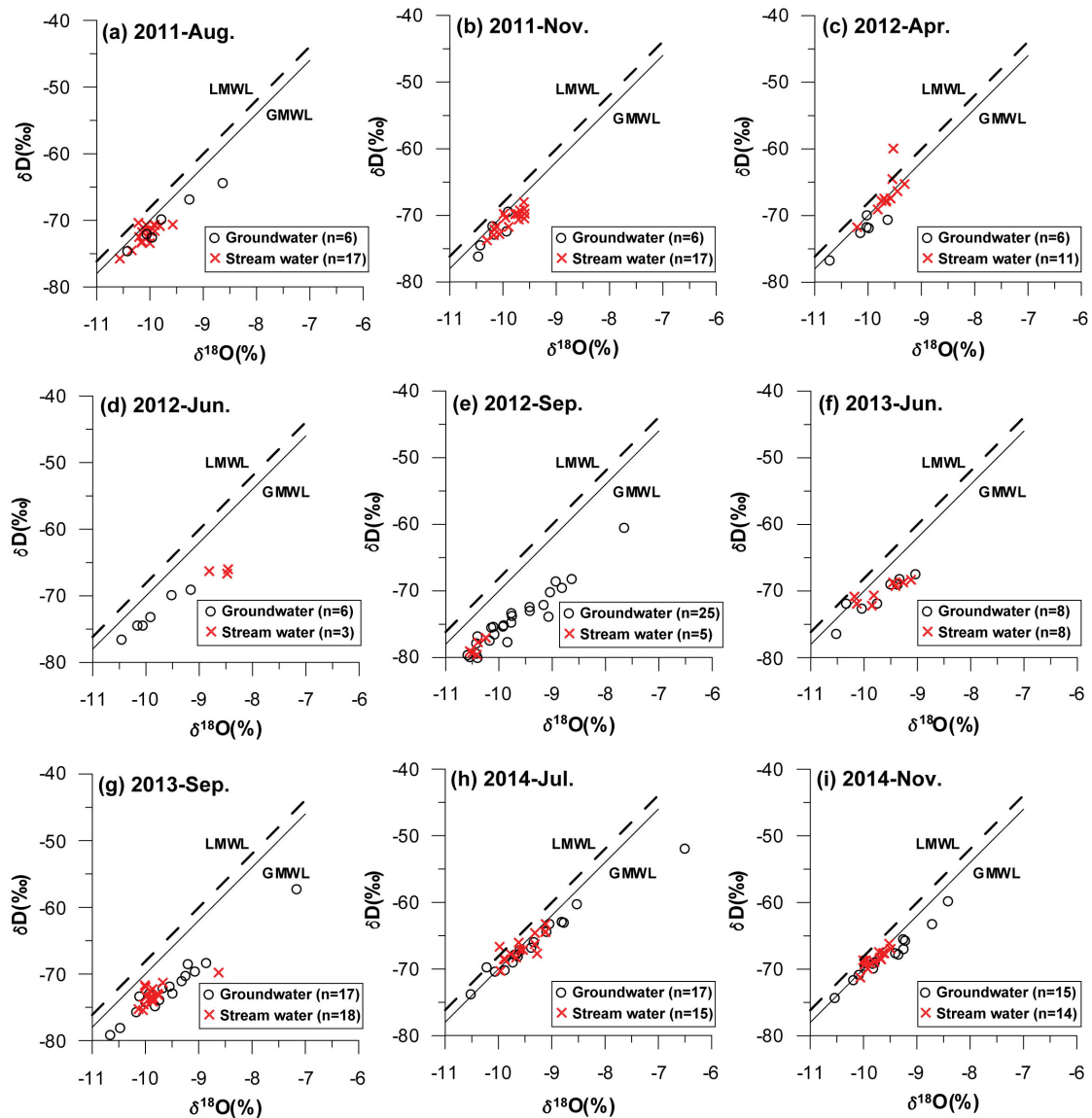


Fig. 5. $\delta^{18}O$ versus δD values of groundwater and stream water shown relative to local meteoric water line (LMWL; $\delta D = 8.06\delta^{18}O + 12.5$, from Park *et al.*, 2006) and the global meteoric water line (GMWL; $\delta D = 8.1\delta^{18}O + 9.8$, from Craig, 1961) in the Haeen Basin.

시기별 지하수에 대한 기율기 범위는 5.89~8.54로 보이며 전체 평균 기율기(6.15)는 LMWL (8.06) 기율기보다 작다. 이는 연구지역의 지하수는 주로 강수 기원이며 지하침투 전에 다양한 증발작용을 거쳤음을 의미한다(Friedman *et al.*, 1962; Paul and Wanielist, 2000; Cui and Li, 2014; Wang *et al.*, 2015). Gonfiantini (1986)에 따르면 하천이 강한 증발작용을 겪었다면 하천수의 기율기는 3.9~5.2 범위로 나타난다. 그림 5a, 5f, 5g, 5h에서 하천수의 기율기는 각각 5.04, 3.37, 3.05, 4.92로 강한 증발영향을 받았으며 이것은 일사량이 강했던 계절들과 일치한다.

두 수체의 전반적인 경향을 살펴보면 지하수의 산소·수소동위원소는 시료수 및 시기와 상관없이 하천수에 비해 넓은 분포를 보인다. 이는 증발영향으로 무거워진 논물의 산소·수소동위원소가 지하수와 하천수에 영향을 준 것으로 분석된다(Fernández-Chacón *et al.*, 2010). 일부 시료를 제외한 두 수체의 산소·수소동위원소는 매우 유사하게 나타난다. 이것은 연구지역의 수리학적 수리연결성이 좋으며 빠른 수문순환이 일어나고 있음을 의미한다(Akomako *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2013).

그림 6은 연구지역의 고도별 산소동위원소 조성

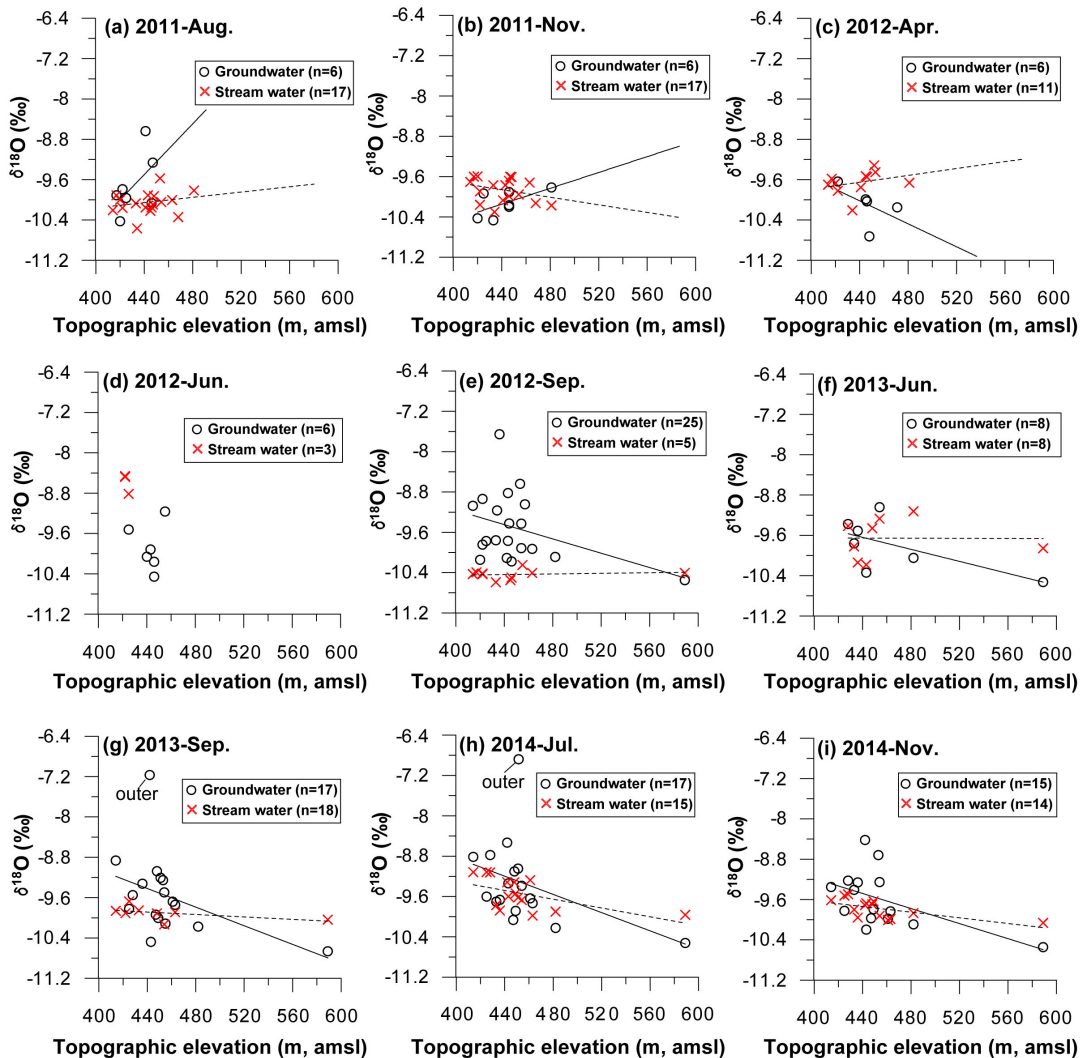


Fig. 6. Relationships of $\delta^{18}\text{O}$ with topographic elevations (EL) for groundwater and stream water in the study area. The solid and dotted line represent the regression line for the groundwater and stream water, respectively.

변화를 시기별로 보여준다. 이상값을 제외한 고도에 따른 지하수 및 하천수의 산소동위원소 조성변화는 그림 6g, h, i에서 상대적으로 잘 나타난다. 이 중 회귀선이 잘 표현된 산소동위원소는 각 $\delta^{18}\text{O}=0.009\text{EL}-5.46$ ($r^2=0.41$), $\delta^{18}\text{O}=0.004\text{EL}-7.56$ ($r^2=0.44$)로 나타나지만 고도효과는 뚜렷하게 보이지 않는다. 그러나 연구지역의 고도차(170 m)가 작음에도 불구하고 고도가 증가할수록 산소동위원소가 감소하는 경향성을 보여 그 의미가 있다(Lee *et al.*, 2013).

또한 시기별 고도 증가에 대한 지하수의 산소동위원소는 하천수의 산소동위원소보다 수직으로 넓게 분포된 경향성을 보인다. 반면 하천수는 지형학적 특성으로 한 곳에 집중 분포하고 있다. 연구지역 저지대(430~460 m)의 토지이용은 하천을 중심으로 논이 분포하고 있다(그림 1b). 마찬가지로 강한 증발작용 인해 무거워진 논물의 산소·수소동위원소는 지하로 침투하여 지하수내 동위원소에 영향을 미친 것으로 풀이된다(Cui and Li, 2014). 더 나아가 지하수의 수직적 분포는 각 논에 관개수 공급되는 시점 및 증발 시간이 달라 비롯된 것으로 분석된다. 또한 논 토양 침투속도는 논수위 변화에 따라 다르게 나타난다(Sohn *et al.*, 2004). 이는 총적대수층에 상당한 지하수 함양을 기여한다(Liu *et al.*, 2001; Chen *et al.*, 2002; Huang *et al.*, 2003).

3.3 질산염 오염 가능성 및 관개수의 적합성 평가

국내 먹는물 수질기준으로 질산염 농도는 44.3 mg/L(질산성 질소 농도는 10 mg/L)로 정해져 있다. 연구기간 동안 채취된 지하수내 질산염 농도 범위는 0.1~88.2 mg/L이며 평균 19.2 mg/L로 나타난다(표 1). 연구지역에서 질산성 질소 오염이 다수 발생할 것으로 예상했지만 먹는물 기준에 초과한 지하수 시료는 144개 중 16개(11%)만 나타났다. 하지만 인위적 오염물질의 유입가능성(질산성 질소: 3 mg/L 초과)이 있는 시료는 57개(39.6%)로 높게 나타났다. 한편 2012년 6월과 2013년 6월에 논물의 질산염 농도범위는 0.1~19.3 mg/L이며 평균 6.5 mg/L로 지하수에 비해 낮게 나타났다(표 1).

연구지역 질산염 농도의 시공간적 분포 현황을 파악하기 위해 열지도(heat map) 분석을 수행하였다(DeBoer, 2015). GIS의 열지도를 이용한 지하수내 질산염 농도의 분포 변화는 그림 7에 시기별로 도

시하였다. 분석결과, 연구지역의 질산염 오염 분포 경향의 경우, 시기별로 뚜렷한 차이를 보이지는 않았다. 공간적 분포의 경우, 만대천, 도솔천, 성황천 주변 저지대에서 질산염 농도가 상대적으로 높게 나타났다(그림 7a, 7e, 7g, 7h, 7i). 시료수($n<6$)가 적은 시기를 제외한 농한기($n=15$) 지하수내 평균 질산염 농도는 6.0 mg/L로 농번기($n>17$)의 지하수 질산염 농도보다 약 2~4배가 낮다.

연구지역에서 지하수의 질산염 농도가 낮은 이유는 논 토양 특성과 관련이 있는 것으로 추정된다. 일반적으로 논토양의 하층은 산소가 부족하여 미생물에 의한 탈질이 강하게 나타나게 된다(Kim *et al.*, 2015). 이는 논에 사용된 질소 비료의 상당량이 탈질작용으로 없어짐을 시사한다. 다만, 이 연구에서 분석한 질산염 데이터의 경우, 시기별 시료 채취된 지점이 상이하고 일부 지점만 갖고 분석된 것으로 전체 연구지역의 질산염 농도 분포를 평가하기엔 다소 한계가 있다.

연구지역에서 지하수와 하천수의 SAR 값은 각 0.1~1.0 meq/L와 0.2~2.4 meq/L의 범위로 매우 낮게 보였다. 연구지역의 SAR에 대한 지하수와 하천수의 세부적 분류는 표 3에 나타났다. 지하수와 하천수의 시료들은 114개 시료 모두 $\text{SAR}<10$ 의 값을 보여주었다. 즉 관개수로서의 지하수와 하천수는 나트륨 교환가능 위험이 없는 Excellent quality 등급으로 나타났다. EC 역시 관개수의 염분 위험을 판별할 수 있는 좋은 도구다. EC에 관한 관개수로서 지하수와 하천수의 수질 분류를 살펴보면 지하수는 Excellent에서 88개(77.2%) Good에서 22개(1.9%), Fair에서 3개(2.6%) 그리고 Poor에서 1개(0.9%)로 나타났다(표 3). 하천수는 Excellent에서 101개(88.6%) 그리고 Good에서 13개(11.4%)로 나타났다.

Wilcox diagram에서 EC에 대한 지하수와 하천수의 산출된 초과 나트륨 함량은 그림 8a에 도시하였다. 지하수와 하천수 모두가 Excellent to good 범주에 속하였다. 그 외에 지하수 3개 시료는 Good to permissible 범주에 나타났고 EC가 매우 높은 1개 시료는 Unsuitable로 판명되었다. 이 지점은 식물의 성장에 지장을 줄 수 있는 우려가 있다(Todd, 1980).

또한 연구지역에서 지하수와 하천수는 EC와 함께 US Salinity diagram을 이용하여 나타내었다(그림 8b). 대부분 지하수와 하천수의 시료들은 C1-S1

과 C2-S1 범주에 속한다. 이것은 낮음에서 중간 염분 그리고 낮은 나트륨 지하수 및 하천수를 나타낸다. 이는 연구지역의 대부분의 지하수 및 하천수는

나트륨 교환 확률이 낮으며, 따라서 대부분의 토양 유형에 관개수로 적합함을 의미한다. 그러나 4개의 지하수 시료는 높은 EC ($>750 \mu\text{S}/\text{cm}$)를 보여 교환

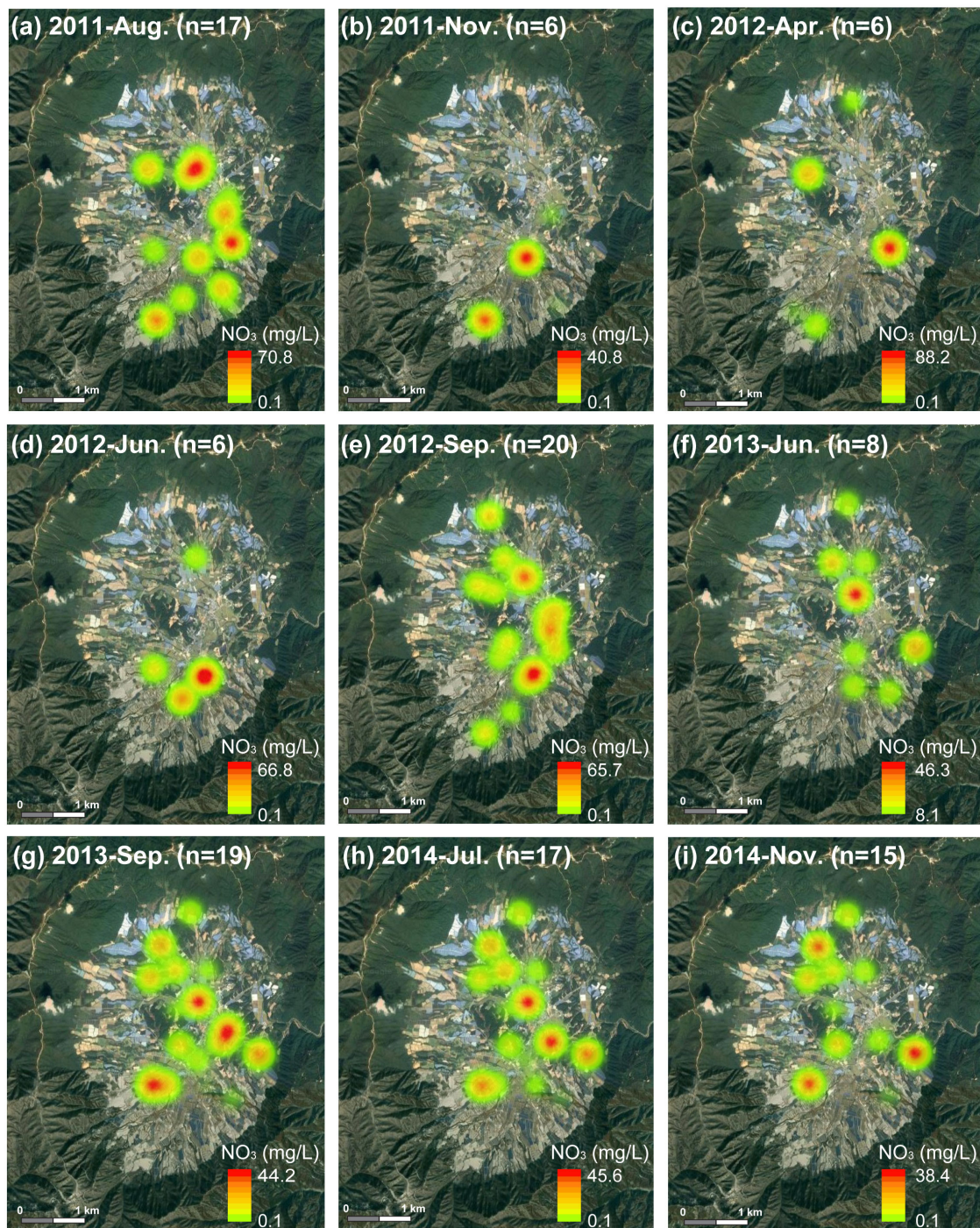


Fig. 7. Heat map of NO_3 concentration in groundwater from 2011 to 2014.

가능한 나트륨 위험의 원인이 될 수 있다. 채취된 2 지점에서 꾸준히 높은 EC가 나타나 향후 지속적인 모니터링이 필요하다.

4. 결 론

농업 밀집지역인 양구 해안분지는 지형학적 및

Table 3. Suitability of groundwater and stream water for irrigation based on EC, SAR and Na% classifications.

Parameter	Water class	No. of groundwater samples (% of samples)	No. of stream water samples (% of samples)
EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)			
Up to 250	Excellent	88(77.2%)	101(88.6%)
250~750	Good	22(19.3%)	13(11.4%)
750~2250	Fair	3(2.6%)	
2250	Poor	1(0.9%)	
Based on SAR			
<10	Excellent	114(100%)	114(100%)
10~18	Good		
18~26	Doubtful		
>26	Unsuitable		
Based on Na%			
<20	Excellent	37(32.5%)	35(30.7%)
20~40	Good	69(60.5%)	77(67.5%)
40~60	Permissible	8(7.0%)	1(0.9%)
60~80	Doubtful		1(0.9%)
>80	Unsafe		

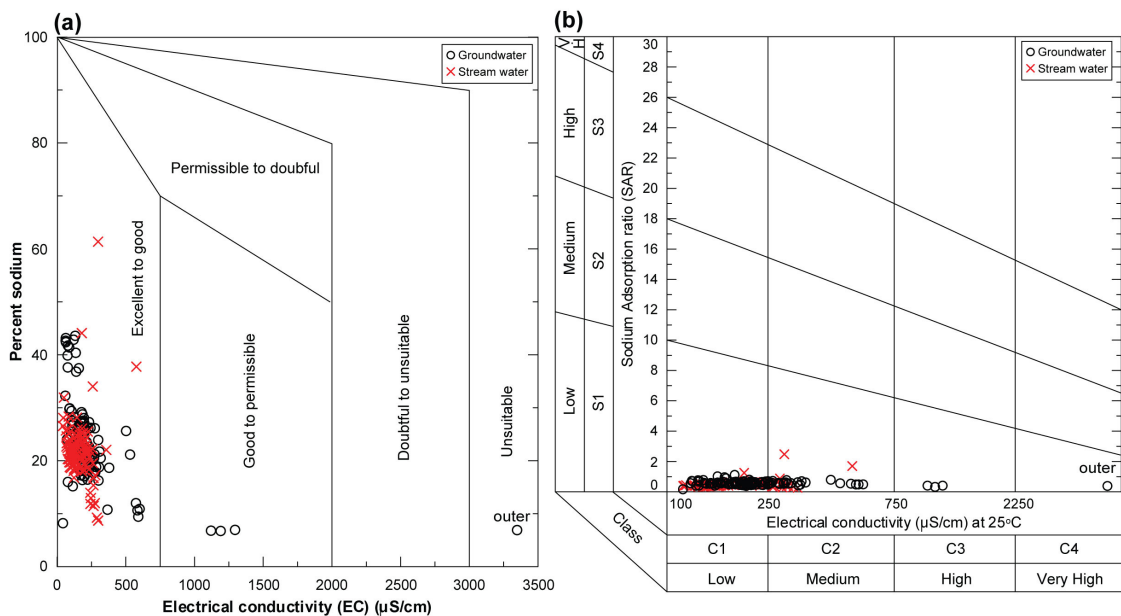


Fig. 8. (a) Plot of percent sodium vs. electrical conductivity (from Wilcox, 1955), (b) diagram for irrigation waters classification (from USSSL, 1954).

수리지질학적으로 단순하여 연구가치가 크다. 특히 연구지역은 최근 3년간 기후변화로 인해 농민에게 극심한 가뭄을 겪고 있으며 화학비료 및 퇴비사용으로 수질악화가 우려되고 있다. 이에 본 연구는 두 수체의 수리지질학적 특성을 다각적으로 평가하였다.

연구지역의 지하수와 하천수의 일반 수리지질학적 특징은 양이온 경우 Ca와 Na 그리고 음이온 경우 HCO_3 와 NO_3 가 두 수체 모두 우세하게 나타난다. 하천수의 Na와 Cl의 상관계수는 지하수에 비해 강한 상관성을 보였다. 이는 외부에 노출된 하천이 인위적 영향을 받은 것으로 판단된다. 지하수는 $\text{Ca-HCO}_3\text{-Cl}$ 및 Ca-HCO_3 유형으로 넓은 분포를 보인 반면 하천수는 $\text{Ca-HCO}_3\text{-Cl}$ 유형에 집중분포를 하였다. 두 수체는 지표 기원 오염물질인 Cl에 지속적으로 영향을 받은 것으로 분석된다. 또한 지하수와 하천수는 양이온 경우 $\text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{K}$, 음이온 경우 $\text{HCO}_3 > \text{NO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4$ 순으로 유사한 화학적 구성을 보인다. 이를 통해 두 수체간 수리연결성이 상대적으로 좋음을 확인 할 수 있다. 전체적인 연구지역의 지하수 및 하천수의 수화학은 빠른 유동과 함께 물-암석 교환작용을 받아 형성된 것으로 판단된다.

산소·수소동위원소를 통해 연구지역의 지하수는 강수 기원이며 지하 침투 전에 다양한 증발작용을 겪은 것으로 확인되었다. 특히 일부 하천수는 강한 증발의 영향을 받았던 것으로 보인다. 두 수체의 산소·수소동위원소 조성은 유사하게 나타났으며, 이는 수문순환이 빠르고 수리연결성이 좋다는 주장을 뒷받침해준다. 한편 연구지역의 전반적으로 작은 고도차이임에도 불구하고 고도가 증가할수록 산소동위원소가 감소하는 경향을 보인다. 특히 지하수의 광범위한 산소동위원소 분포는 증발작용으로 무거워진 논물의 영향을 받은 것으로 보인다.

시기별 질산염의 농도 분포는 만대천, 도솔천, 성황천 부근에 질산염 농도가 다른 지점에 비해 높게 나타나는 경향을 보였다. 이는 여러 지천의 질산염이 주요 하천으로 모여 높게 나타난 것이다. 한편 지하수의 먹는물 수질 분석 결과 일부 시료만 먹는물 수질 기준치를 초과하는 것으로 나타났으며 이는 탈질의 영향을 받은 것으로 판단된다. SAR, EC 그리고 Na% 지표에 따라 연구지역의 지하수 및 하천수는 관개수로서 매우 적합한 것으로 평가되었다.

해당 연구지역은 농작물의 생산성을 높이기 위해

가축 퇴비뿐만 아니라 다양한 무기질 화학비료와 농약이 쓰이고 있다. 연구지역의 높은 지하수-하천수 간 수리 연결성을 고려하면 이는 해당 지역이 수질 오염에 매우 취약할 수 있음을 시사한다. 따라서 향후 지속적인 모니터링과 함께 중금속 및 NH_4 , NO_2 , PO_4 이온을 추가 분석하여 종합적 연구수행이 필요하다.

사 사

이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. NRF-2015R1A4A1041105). 또한 2016년 강원대학교 대학회계 학술연구조성비로 연구하였습니다(관리번호-520160395). 아울러 심사과정에서 발전적인 비판과 조언을 해주신 익명의 심사자님들께 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Akomako, D., Osae, S., Akiti, T.T., Faye, S. and Maloszewski, P., 2011, Geochemical and isotopic studies of groundwater conditions in the Densu River Basin of Ghana. *Environment Earth Science*, 62, 1071-1084.
- Alam, F., 2014, Evaluation of hydrogeochemical parameters of groundwater for suitability of domestic and irrigation purposes: a case study from central Ganga Plain, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 7, 4121-4131.
- Brodie, R., Sundaram, B., Tottenham, R., Hostetler, S. and Ransley, T., 2007, An overview of tools for assessing groundwater-surface water connectivity. *Bureau of Rural Sciences*, Canberra, Australia, 131 p.
- Clark, I.D. and Frjtz, P., 1997, *Environmental isotopes in hydrogeology*. Lewis Publishers, New York.
- Chae, G.T., Yun, S.T., Mayer, B., Choi, B.Y., Kwon, J.S. and Yu, S.Y., 2009, Hydrochemical and stable isotopic assessment of nitrate contamination in an alluvial aquifer underneath a riverside agricultural field. *Agricultural Water Management*, 96, 1819-1827.
- Chen, S.K., Liu, C.W. and Huang, H.C., 2002, Analysis of water movement in paddy rice fields (II) simulation studies. *Journal of Hydrology*, 268, 259-271.
- Choi, W.J., Han, G.H., Ro, H.M., Yun, S.H. and Lee, S.M., 2002, Evaluation of nitrate contamination sources of unconfined groundwater in the North Han River basin of Korea using nitrogen isotope ratios. *Geosciences Journal*, 6, 47-55.

- Craig, H., 1961, Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133, 1702-1703.
- Cui, B.L. and Li, X.Y., 2014, Characteristics of stable isotope hydrochemistry of the groundwater around Qinghai Lake, NE Qinghai-Tibet Plateau, China. *Environment Earth Science*, 71, 1159-1167.
- DeBoer, M., 2015, Understanding the heat map. *Cartographic Perspectives*, 80, 39-43.
- Fernández-Chacón, F., Benavente, J., Rubio-Campos, J.C., Kohfahl, C., Jiménez, J., Meyer, H., Hubberten, H. and Pekdeger, A., 2010, Isotopic composition ($d^{18}O$ and D) of precipitation and groundwater in a semi-arid, mountainous area (Guadiana Menor basin, Southeast Spain). *Hydrology Process*, 24, 1343-1356.
- Friedman, I., Machta, L. and Soller, R., 1962, Water vapour exchange between a water droplet and its environment. *Journal of Geophysical Research*, 67, 2761-2766.
- Garrels, R.M., 1976, A survey of low temperature water mineral relations. In: *Interpretation of environmental isotope and hydrogeochemical data in groundwater hydrology*: vienna, International Atomic Energy Agency, 65-84 p.
- Gibbs, R.J., 1970, Mechanism controlling world water chemistry. *Science*, 170, 1088-1090.
- Gonfiantini, R., 1986, *Environmental isotopes in lake studies*. Elsevier, New York, 133 p.
- Griffioen, J., 2001, Potassium adsorption ratios as an indicator for the fate of agricultural potassium in groundwater. *Journal of Hydrology*, 254(1-4), 244-254.
- Hoek, W., Konradsen, F., Ensink, J.H.J., Mudasser, M. and Jensen, P.K., 2001, Irrigation water as a source of drinking water: is safe use possible? *Tropical Medicine & International Health*, 6(1), 46-54.
- Huang, H.C., Liu, C.W., Chen, S.K. and Chen, J.S., 2003, Analysis percolation and seepage through paddy bunds. *Journal of Hydrology*, 284, 13-25.
- 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.
- Jo, K.W., Lee, H.J., Park, J.H. and Owen, J.S., 2010, Effects of Monsoon rainfalls on surface water quality in a mountainous watershed under mixed land use. *Korea Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 12(3), 197-206.
- Kalbus, E., Reinstorf, F. and Schirmer, M., 2006, Measuring methods for groundwater-surface water interactions: a review. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10, 873-887.
- Karant, K.R., 1987, *Groundwater assessment, development and management*. Tata McGraw Hill Education, New Delhi, 720 p.
- Kanduč, T., Grassa, F., McIntosh, J., Stibilj, V., Ulrich-Supovec, M., Supovec, I. and Jamnikar, S., 2014, A Geochemical and stable isotope investigation of groundwater/surface-water interaction in the Velenje Basin, Slovenia. *Hydrogeology Journal*, 22, 971-984.
- Kettering, J., Park, J.H., Lindner, S., Lee, B., Tenhunen, J. and Kuzyakov, Y., 2012, N fluxes in an agricultural catchment under monsoon climate: a budget approach at different scales. *Agriculture, Ecosystem & Environment*, 161, 101-111.
- Ki, M.G., Koh, D.C., Yoon, H. and Kim, H.S., 2013, Characterization of nitrate contamination and hydrogeochemistry of groundwater in an agricultural area of Northeastern Hongseong. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 18(3), 33-51 (in Korean with English abstract).
- Kim, H., Kaown, D., Mayter, B., Lee, J.Y., Hyun, Y. and Lee, K.K., 2015, Identifying the sources of nitrate contamination of groundwater in an agricultural area (Haeon basin, Korea) using isotope and microbial community analyses. *Science of the Total Environment*, 533, 566-575.
- 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 the Korea Earth Science Society*, 11(3), 236-241 (in Korean with English abstract).
- Lee, J., Eom, J.S., Kim, B.C., Jang, W.S., Ryu, J.C., Kang, H., Kim, K.S. and Lim, K.J., 2011, Water quality prediction at Mandae watershed using SWAT and water quality improvement with vegetated filter strip. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 53(1), 37-45 (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 a heavy agricultural basin of Korea. *Journal of Geology Society India*, 82, 169-180.
- Liu, C.W., Chen, S.K., Jou, S.W. and Kuo, S.F., 2001, Estimation of infiltration rate of a paddy field in Yun-Lin, Taiwan. *Agricultural Systems*, 68, 41-54.
- Min, J.H., Yun, S.T., Kim, K., Kim, H.S. and Kim, D.J., 2003, Geologic controls on the chemical behavior of nitrate in riverside alluvial aquifers, Korea. *Hydrological Processes*, 17, 1197-1211.
- Park, Y., Lee, K.S. and Yu, J.Y., 2006, Seasonal variation of dissolved ions and oxygen and hydrogen isotopic compositions of precipitation in Chuncheon, Korea. *Journal of the Geology Society of Korea*, 42(2), 283-292 (in Korean with English abstract).
- Paul, G. and Wanielista, M., 2000, *Effects of evaporation*

- enrichment on the stable isotope hydrology of a central Florida (USA) river. *Hydrology Process*, 14, 1465-1484.
- Piper, A.M., 1944, A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis. *Transactions American Geophysical Union*, 25, 914-928.
- Schoeller, H., 1977, *Geochemistry of groundwater*, Chap. 15. UNESCO, Paris, 1-18 p.
- Sohn, S.H., Park, K.J. and Chung, S.O., 2004, Analysis of water balance for ponding depth treatment in paddy fields. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 46(4), 13-21 (in Korean with English abstract).
- Subramani, T., Elango, L. and Damodarasamy, S.R., 2005, Groundwater quality and its suitability for drinking and agricultural use in Chithar river basin, Tamil Nadu, India. *Environmental Geology*, 47, 1099-1110.
- Todd, D., 1980, *Groundwater hydrology*, 2nd edition. Wiley, New York.
- United Nations Environment Program (UNEP), 1999, *Global environment outlook 2007*. Earthscan, UK.
- United States Salinity Laboratory (USSL), 1954, *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. Agriculture handbook 60, US Department of Agriculture (USDA), Washington, 69-81 p.
- Wang, H., Jiang, X.W., Wan, L., Han, G. and Guo, H., 2015, Hydrogeochemical characterization of groundwater flow systems in the discharge area of a river basin. *Journal of Hydrology*, 527, 433-441.
- Wilcox, L.V., 1955, *Classification and use of irrigation waters*. US Department of Agriculture, New York.
- 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 p.
- Won, J.K., Lee, M.W. and Woo, J.K., 1987, Geologic and geographic characteristics of Haeen basin. *Memorial Book of 40th Anniversary of Kangwon Nation University*, Kangwon National University, 45-57 p (in Korean).
- Won, J.K., Na, K.C. and Lee, M.W., 1988, *Geology in northern area of Demilitary Zone (Geology)*. Cultural Heritage Administration of Korea, 114-120 p (in Korean).
- Yang, Z., Zhou, Y., Wenninger, J. and Uhlenbrook, S., 2014, A multi-method approach to quantify groundwater/surface water-interactions in the semi-arid Hailiutu River basin, northwest China. *Hydrogeology Journal*, 22, 527-541.
- Yun, S.W., Lee, J.Y. and Lee, H.G., 2015, Variation of stream water quality and baseflow contribution from groundwater during rainfall event in the Haeen basin. *Journal of Geology Society of Korea*, 51(6), 611-621 (in Korean with English abstract).

Received : June 15, 2017

Revised : July 10, 2017

Accepted : August 1, 2017