

지질학회지 제 55권 제 1호, p. 117-129, (2019년 2월) J. Geol. Soc. Korea, v. 55, no. 1, p. 117-129, (February 2019) DOI http://dx.doi.org/10.14770/jgsk.2019.55.1.117 ISSN 0435-4036 (Print) ISSN 2288-7377 (Online)

강원도 삼척 석회암 지역 지하수와 하천수의 수리화학 특성연구

유한선^{1,2} · 이진용^{1,2,*} · 임충완³ · 김기태⁴ ¹강원대학교 지질학과 ²강원대학교 크리티컬존선도연구실 ³공주대학교 지구과학교육과 ⁴극지연구소 극지고환경연구부

요 약

본 연구에서는 강원도 삼척시 카르스트 지역의 하천수와 지하수의 수화학적 진화에 대하여 평가하였다. 연 구지역의 하천수와 지하수는 높은 농도의 칼슘과 중탄산이온 농도를 보였는데 이는 주로 탄산염암 중 석회암의 용해에 의한 결과이다. 탄소동위원소와 이온비에 의하면 이 지역의 수화학은 주로 탄산염암 용해 그리고 일부 대기 중 이산화탄소 용해에 영향을 받음을 지시하였다. 특별히 바다 근처의 하천수는 높은 농도의 나트륨과 염 소이온 농도를 보였다. 산소 및 수소 안정동위원소의 조성과 나트륨과 염소이온의 이온비를 살펴보면 이 지역 의 하천수는 전형적인 편서풍에 의한 서해안 해수증발에서 유래한 것보다는 인근 동해안 해수의 증발에 기원임 을 지시하였다.

주요어: 수리화학, 카르스트, 탄산염암, 하천수, 지하수, 삼척

Han-Sun Ryu, Jin-Yong Lee, Chung-Wan Lim and Kitae Kim, 2019, Hydrochemical characteristics of groundwater and stream water in a karst area of Samcheok, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 55, no. 1, p. 117-129

ABSTRACT: This study examines the chemical evolution of stream water and groundwater in the karst area of Samcheok city. The stream water and groundwater in this area are characterized by high levels of Ca^{2+} and HCO_3^- , which is a result of water-carbonate rock interaction, especially calcite dissolution. The $\delta^{18}C$ and ionic ratios also indicates carbonate rock dissolution is a dominant factor controlling the water chemistry in this area with a small contribution of atmospheric CO_2 dissolution. The coastal stream water was highly affected by seawater, showing high concentrations of Na^+ and CI^- . The stable isotopic compositions (δD and $\delta^{18}O$) and ionic ratios of Na^+ and cl indicate that the stream water is originated from a single source, nearby seawater evaporation from East Sea rather than typical evaporation of Yellow Sea, transported by the prevailing westerlies.

Key words: hydrochemistry, karst, carbonate rock, stream water, groundwater, Samcheok

(Han-Sun Ryu 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; Chung-Wan Lim, Department of Earth Science Education, Kongju National University, Gongju 32588, Republic of Korea; Kitae Kim, Korea Polar Research Institute, Incheon 406840, Republic of Korea)

1. 서 론

카르스트 지형은 지질학적으로 매우 특이한 지역 일 뿐더러 비교적 빠른 물과 암석반응으로 인하여 하천수 및 지하수 수질에 미치는 영향도 지대하다 (Hartmann *et al.*, 2014; Pu *et al.*, 2015). 또한 이산 화탄소(CO₂)의 순환에 미치는 영향이 커 환경적으 로도 매우 중요한 지역이다(Liu and Zhao, 2000; Yoshimura *et al.*, 2001). 제주도의 화산암 지역을 제 외하면 우리나라의 내륙 지역은 대부분 지표 및 지 하지질이 화강암, 편마암 또는 퇴적암으로 되어 있 고 그들의 투수성이 그다지 좋지 않다. 그 결과 우수 한 대규모 대수층의 발달이 미약한 편이다(Lee *et al.*, 2018). 그러나 석회암 지역의 경우 지표의 여러 함몰

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

특성(돌리네, 우발라, 폴리에 등)과 탁월한 지하통로 발달로 인하여 강수의 지하침투가 빠르고 지하수함 양이 매우 큰 편이다(Giese *et al.*, 2018). 그러므로 곳 에 따라 석회암 지역에서는 수량이 풍부한 대수층이 발달하기도 한다(Barbieri *et al.*, 2005; Park *et al.*, 2011). 한편 상기와 같은 투수성이 좋은 조건은 때로는 수질에 나쁜 영향을 미치기도 한다. 흔히 폭우가 발 생할 때에는 흙탕물이 발생하여 빠르게 카르스트 통 로를 통하여 확대되는 양상을 보이기도 한다(Mahler and Leo Lynch, 1999; De Waele, 2008).

우리나라의 경우 석회암(탄산염암)은 대체로 강원 도와 충북 일부 지역으로 국한되어 나타나며 이들 지역에서 농업용수와 생활용수의 공급을 위해 지하 수의 개발도 활발하다(Park *et al.*, 2011). 한편 석회 암지역에서 이루어지고 있는 여러 광산활동은 석회 암지역의 하천수와 지하수에 큰 영향을 줄 수 있다 (Zhang *et al.*, 2010; Xu *et al.*, 2018). 앞서 기술한 바 와 같이 이런 지역은 오염영향이 빠르게 전파되는 특성이 있어 수질관리에 더 큰 어려움이 있다. 특히 석회암지역에서 발달하는 테라로사 토양의 경우 집 중 강우 시 매우 붉은 색의 흙탕물을 발생시켜 주변 생태계는 물론 심미적으로도 매우 부정적인 영향을 줄 수 있다(Leo Lynch *et al.*, 2004).

우리나라 석회암 지역은 지하수와 더불어 하천수 에 대한 수화학적 연구가 매우 미흡한 상황이다(Lee, 2004). 이들 지역은 탄산염암의 지질학적 특성으로 인 하여 수질에 큰 영향을 받는다. 그럼에도 불구하고 수리지질학적 관심이 그 동안 미흡했던 것은 주지의 사실이다. 본 연구에서는 우리나라의 대표적인 석회 암 카르스트 지역인 삼척시에 있는 소한굴샘 주변의 하천수와 지하수의 수화학에 대하여 연구하였다. 석 회암 지역에 지질학적 영향과 특성이 수질에서 나타 나는지 평가하였으며 지역별로 차이가 있는지도 검토 하였다. 아울러 이 지역의 하천수 그리고 지하수의 동 위원소 조성 등을 평가함으로써 물의 근원이 어디인 지를 밝히려고 시도하였다. 이를 위해 현장조사와 실 내에서 다양한 수리화학적 연구를 수행하였다.

2. 연구지역 및 연구방법

2.1 연구지역

연구지역은 강원도 삼척시 노곡면과 근덕면 일대

이다. 이 지역 북서부에는 1970년 9월 17일 천연기념 물 제226호로 지정된 초당굴이 있으며 그 하부에 연결 되어 발달한 소한굴이 있다(Woo et al., 2000; SAMPYO and KNU, 2017; 그림 1). 초당동굴은 3층 다층구조 로 되어 있는 수직동굴로 최하층이 가장 길고 큰 광 장이 여러 개 나타나며 연중 많은 유출수가 발생하 고 있다. 한편 소한굴은 입구로부터 20 m 정도는 걸 어 들어갈 수 있으나 그 내부는 W형의 수중동굴로 접근이 쉽지 않다. 이 수중동굴의 높이는 3~9 m 정 도이며 폭은 3~5 m 정도이다(Woo et al., 2000). 소 한굴샘은 유량이 풍부하고 수중동굴에서 다량의 물 이 공급되고 있다. 상부의 초당굴 내 동굴수의 유동 방향은 계절에 따라 변하며 동굴 내에 역질, 사질, 이 질 퇴적물이 분포한다(Woo et al., 2000). 유속에 따 라 퇴적물의 구성비가 달라지기는 하지만 주로 뜬짐 형태인 실트와 점토 크기의 입자들이 우세하며 이들 은 주로 방해석, 백운석, 석영, 장석, 사장석, 점토광 물로 구성된다(Woo et al., 2000). 최근 들어 소한굴 샘은 폭우 시 흙탕물이 크게 발생하여 환경적 문제 로 인식되고 있다.

연구지역의 중앙부에는 석회석 광산이 위치하고 있다. 이 석회석 광산은 주로 고품위의 풍촌석회암 을 개발하고 있으며 추가적으로 확장의 계획이 있는 것으로 알려지고 있다(SAMPYO and KNU, 2017). 한편 광산의 동북방향에는 골프장이 위치하고 있다. 소한굴샘에서 유출된 물은 유하하여 하부에 있는 초 당저수지로 유입되고 결국 동해로 빠져나간다. 초당 저수지의 상부에는 내수면 민물고기 전시관이 있는데 소한굴샘의 유출수를 이용하고 있다(SAMPYO and KNU, 2017). 소한굴샘에서 민물고기 전시관 사이는 천연기념물로 지정된 민물김이 자라고 있어 삼척시 와 정부당국에서 환경적으로 엄격하게 관리하고 있 다. 그러나 인근에 있는 석회석광산에 의한 환경적 영 향에 대한 우려가 상존하고 있다.

연구지역의 지질은 선캠브리아기의 태백산통을 기 반암으로 상부에 고생대의 대석회암통이 부정합으로 피복하고 있으며 이들 암석을 부정합으로 신기하성 층이 퇴적되었다(그림 1; Won *et al.*, 1994). 태백산 통은 연구지역 동쪽 저지대에 남북방향으로 분포하 고 있다. 태백산통은 주로 광역변성작용에 의한 편 암류가 기반을 이루지만 이차적인 편마암화 작용으로 인해 만들어진 편마암류가 분포한다(Lee *et al.*, 1986). 장산규암층은 태백산통을 부정합으로 피복하고 있 으며 남북방향의 대상으로 분포한다. 층의 두께는 10~ 50 m로 넓은 범위를 보이며 지역에 따라 심한 변화 를 보인다. 주로 규암으로 구성되며 기저부에서는 10 m 내외의 기저역이 발견되기도 한다. 역은 규암, 화 강암 및 점판암으로 구성되며 원마도가 매우 높다. 장 산규암층과 정합관계를 보이는 묘봉층은 장산규암층 의 왼쪽에 남북방향의 대상으로 분포하며 층의 두께 는 100~250 m이다(Won *et al.*, 1994). 묘봉층은 쇄 설성 퇴적층으로서 하부는 암회색의 세일과 점판암 으로 구성되며 중부는 부분적으로 규암과 렌즈상의 석회암이 분포한다.

풍촌석회암층은 묘봉층과 정합관계를 보이며 연 구지역의 중앙지역에 남북방향으로 넓게 분포한다(그 림 1). 풍촌석회암은 담홍색, 백색 및 회색 석회암과 돌로마이트로 구성되며 상부로 갈수록 세일이 많이 협재한다(Noh and Oh, 2005; Kim et al., 2016). 풍 촌석회암과 정합관계를 이루는 화절층은 고생대 캠 브리아기의 최상부층으로 풍촌석회암층 서쪽에 남 북방향으로 분포한다. 화절층의 하부는 암갈색 또는 암녹색 세일과 점판암으로 구성되며 상부는 이질의 석회암이 분포한다. 동점규암층은 화절층과 정합 관 계이며 고생대 초기 오르도비스기에 해당한다. 연구 지역 서쪽에 남북방향으로 소규모로 분포한다.

연구지역의 2003~2018년 동안 연강수량은 평균 1,160 mm 정도이며 2015년에 연강우량이 903.7 mm로 가장 적은 강우량을 기록하였으며, 2011년에 1,765.7 mm로 연강우량이 가장 많았다(그림 2). 이중 연구 지역에 월간 200 mm 이상의 강수량이 발생한 시기 는 7~9월에 집중되어 있으며, 2014년 4월, 2011년 5 월, 2015년 11월에 각각 200 mm 이상의 강수량이 발 생하였다. 이 지역의 기온은 영하 10도에서 영상 30



Fig. 1. Location and simplified geological map of the study area with water sampling locations.

도 사이를 보이며 겨울에 매우 춥고 여름에 매우 더 워 계절적 편차가 크게 나타난다.

2.2 연구방법

연구지역에서 하천수와 지하수의 수리화학을 평 가하기 위하여 현장수질 측정과 시료채취를 통한 실 내분석을 수행하였다. 2017년 2월부터 현장수질을 측정하였으며(위치에 따라 매달 혹은 격월로) 또 수 화학 분석을 위해서 2017년 11월, 2017년 12월 그리 고 2018년 1월에 하천수 및 지하수에 대한 시료채취 를 총 33개 지점에서 수행하였다(그림 1 시료채취지 점 참조). 특히 소한굴샘에서 용출되어 나오는 물의 수질변화를 상세히 평가하기 위하여 동해 쪽으로 유 하하면서 거리에 따라 빈번하게 시료를 채취하였다. 현 장에서 분석용 물시료를 채취하기 전에 현장수질측정 기(Horiba D-50 Series 및 Hach 2100Q)를 이용하여 수온, 수소이온농도(pH), 용존산소(DO), 전기전도도 (EC), 산화환원전위(ORP) 그리고 탁도(turbidity)를 측정하였다. 여기서 산화환원전위(ORP)는 현장에서 흔히 사용하는 Ag/AgCl 전극을 통해 측정되었으며 연구에는 현장에서 측정한 값을 그대로 사용하였다. 이후 양이온과 음이온이온 분석을 위한 물시료와 산 소 및 수소동위원소 분석을 위한 물시료를 각각 채 취하였다. 이온분석 시료는 0.45 µm로 필터링하였고 이후 양이온 분석용 시료는 강질산을 이용하여 pH 2 이하로 조정하였으며 시료는 현장용 시료박스에 냉 장 보관하였다. 양이온과 음이온은 상지대학교 기초 과학분석지원센터에 분석 의뢰하였고 동위원소의 경 우 서울에 위치한 Beta Analytic Testing Laboratory 한국지사에 의뢰하였으며 미국본사에서 분석한 자료 를 이용하였다. 이온 분석결과는 mg/L로 보고되었 고 양·음이온의 전하균형(charge balance)은 15% 이 내로 나타났으며 동위원소의 경우 ‰로 표현하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 일반적 수리화학 특성

표 1은 하맹방리(소한굴샘과 초당저수지) 지역, 상 월리 지역, 교곡리 지역의 하천수 수질과 지하수로 구 분한 수질을 보여준다. 하천수온은 평균 8~13℃의 범 위를 보였으며 지하수의 경우는 평균 16℃ 정도로 다 소 높은 온도를 보였다. 하천수의 경우 외부 공기의 영향을 직접적으로 받기 때문에 계절적 변동폭이 크 게 나타나지만 지하수의 경우 계절적 영향이 비교적 작게 나타난다(Lee and Hahn, 2006). 하천수와 지하 수의 pH는 공통적으로 8 내외로 약일칼리성을 보였다. 이는 탄산염암의 용해에 의해 공급된 탄산이온(CO₃²) 과 이산화탄소 용해로 공급된 수소이온(H⁺)의 결합 에 따른 중탄산이온(HCO₃)의 증가에 따른 것이다 (Sasowsky and Dalton, 2005; Sappa *et al.*, 2014).

한편 이 지역 하천수의 전기전도도는 일반 하천수 (50~100 μS/cm; Yun *et al.*, 2015)보다는 상당히 높



Fig. 2. Daily precipitation and daily mean air temperature measured at the automatic weather station, about 10 km northwest of the study area.

Parameter	Hamaengbang area						Sangwol area						Gyogok area				Groundwater							
	n	Max	Min	Mean	SD*	CV**	n	Max	Min	Mean	SD	CV	n	Max	Min	Mean	SD	CV	n	Max	Min	Mean	SD	CV
Temp. (℃)	116	25.7	2.1	10.2	4.4	0.43	57	21.0	0.4	8.3	6.9	0.83	10	21.5	3.3	12.8	6.1	0.47	9	18.5	12.3	15.8	2.4	0.15
pН	111	9.8	7.4	8.3	0.4	0.05	57	9.5	7.6	8.4	0.4	0.05	10	9.2	7.9	8.6	0.4	0.05	9	9.2	7.2	8.3	0.7	0.09
EC (µS/cm)	116	2,080	130	220	251	1.14	57	240	94	140	38	0.27	10	310	4	235	90	0.38	9	349	119	192	72	0.38
DO (mg/L)	116	12.6	4.6	7.7	1.5	0.19	57	11.4	3.1	7.6	1.6	0.21	10	10.1	6.5	8.0	1.3	0.17	9	8.8	3.1	6.2	2.2	0.35
ORP (mV)	116	298	141	216	28	0.13	57	333	-70	205	59	0.29	10	258	168	208	29	0.14	9	243	-70	89	131	1.47
Turb. (NTU)	98	35.9	0.4	3.9	4.9	1.24	54	57.6	0.1	3.1	8.5	2.69	9	33.4	2.5	12.1	11.4	0.94	9	83.0	2.7	22.2	32.3	1.46
$\operatorname{Ca}^{2+}(\operatorname{mg/L})$	42	70.7	41.2	47.2	6.6	0.14	20	38.0	23.7	32.8	4.5	0.14	1	59.3	59.3	59.3	-	-	0	-	-	-	-	-
Mg^{2+} (mg/L)	42	64.1	3.4	6.1	9.6	1.58	20	4.6	3.2	4.0	0.6	0.14	1	5.5	5.5	5.5	-	-	0	-	-	-	-	-
Na ⁺ (mg/L)	42	589.2	3.6	24.3	92.0	3.79	20	6.4	3.6	4.4	1.0	0.23	1	5.4	5.4	5.4	-	-	0	-	-	-	-	-
K^{+} (mg/L)	42	30.4	0.6	2.2	4.8	2.14	20	1.2	0.6	0.8	0.1	0.17	1	1.5	1.5	1.5	-	-	0	-	-	-	-	-
Si (mg/L)	42	4.9	1.9	3.0	0.5	0.16	20	3.4	1.6	2.4	0.6	0.25	1	3.0	3.0	3.0	-	-	0	-	-	-	-	-
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	42	122.9	26.7	60.9	20.8	0.34	20	68.8	22.4	43.0	12.9	0.30	1	83.8	83.8	83.8	-	-	0	-	-	-	-	-
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	42	194.0	3.6	13.9	30.3	2.19	20	13.2	6.0	9.2	2.6	0.28	1	7.5	7.5	7.5	-	-	0	-	-	-	-	-
Cl ⁻ (mg/L)	42	997.0	6.1	41.6	156.4	3.76	20	10.6	5.9	7.8	1.5	0.20	1	10.4	10.4	10.4	-	-	0	-	-	-	-	-
$NO_3^-(mg/L)$	42	24.0	0.9	4.7	3.5	0.75	20	5.0	1.9	3.3	0.9	0.28	1	38.9	38.9	38.9	-	-	0	-	-	-	-	-
δ ¹³ C (‰)	70	-9.2	-12.3	-10.8	0.7	-0.07	35	-1.0	-11.2	-9.2	1.6	-0.18	10	-8.5	-11.3	-10.5	0.9	-0.08	8	-0.9	-16.2	-11.2	5.4	-0.49
δ ¹⁸ O (‰)	84	-7.6	-8.8	-8.4	0.3	-0.03	42	-8.1	-8.8	-8.5	0.2	-0.03	10	-7.2	-8.6	-8.1	0.5	-0.06	8	-6.7	-10.5	-8.4	1.1	-0.13
δD (‰)	84	-40.1	-57.0	-52.4	2.7	-0.05	42	-48.7	-57.4	-53.7	2.0	-0.04	10	-44.1	-54.8	-50.4	3.6	-0.07	8	-39.1	-69.9	-53.9	8.8	-0.16

 Table 1. Statistics of field parameters and ionic compositions of stream water and groundwater for (Mar. 2017 - Apr. 2018).

*SD: standard deviation, **CV: coefficient of variation

고 천부지하수(150~500 μS/cm) 못지않게 크게 나 타나는데(Yun *et al.*, 2017) 이는 빗물의 침투 및 유 동과정에서 발생한 석회암 용해작용의 결과로 이온 물질이 부화된 까닭이다. 특히 소한굴샘에서 용출되 는 하천수는 상대적으로 매우 큰 전기전도도를 보여 빗물의 지하 침투 후 동굴 내 유동네트워크를 통하 면서 발생한 석회암 용해를 추정케 한다. 한편 초당 굴 지역에서는 소한굴샘에서 초당저수지를 지나 동 해쪽으로 가면서 기수역 해수의 영향으로 전기전도 도가 크게 증가하는 것을 볼 수 있다.

한편 그림 3은 주요 이온의 파이퍼(Piper) 다이아 그램을 보여준다. 연구지역 하천수 및 지하수에서 가 장 지배적인 양이온은 칼슘이온(Ca²⁺)이며 음이온의 경우 중탄산염(HCO₃)으로 수질유형으로는 Ca-HCO₃ 형이 대부분이다. 이는 대기의 영향을 직접적으로 받 는 전형적인 하천수로 볼 수 있으며 이 지역은 특히 탄산염암 용해(풍화)에 따른 영향도 크게 기여하였 을 것이다(Hwang *et al.*, 2016). 그러나 일부 동해안 쪽의 하천수의 경우 해수의 영향을 받아 나트륨이온 (Na⁺)과 염소이온(CI)의 비중이 가장 많은 Na-CI 유 형으로 나타났다. 한편 월별 혹은 시료 지역에 따른 수질 유형의 차이는 크게 나타나지는 않았다.

3.2 소한굴샘에서 유동경로에 따른 수질변화

소한굴은 천연기념물인 초당동굴과 직접 연결되 어 있으며 샘에서 나오는 유출수는 강우의 침투 후 동굴 내부를 통과하면서 일정한 화학적 풍화작용과 수암반응(water-rock interaction)을 겪은 것으로 볼 수 있다. 그림 4는 소한굴샘(유출구; HMS2)에서 민물고기전시관(HMS9), 초당저수지(HMS10, 11) 그리고 동해안 기수역(약 4.5 km)까지의 수질 변화 를 보여준다. 수온의 경우 소한굴샘 근처에서 평균 10℃ 내외로 연중 안정적이며 내려가면서 외기의 영 향으로 변동성은 상당히 커지면서 평균적으로 온도 는 낮아지는 경향을 보여준다. 이는 측정일이 대체 로 추운 기간(2017년 10, 11월, 2018년 1, 2, 3, 4월)에 집중된 결과이다. 즉 비교적 항온성을 유지하는 소 한굴샘에서 나오면서 추운 외기를 받아 이동하면서 하천수가 차가워지는 것이다.

수소이온농도(pH)의 경우 8~8.5 사이인데 하류로



Fig. 3. Water types of stream water samples in the studied area.

diffraction (XRD)로 분석한 결과 주로 방해석(calcite) 로 나왔는데 증가한 pH에 따른 침전강화 영향으로 보인다(SAMPYO and KNU, 2017; Romero-Mujalli

가면서 처음보다 약간 증가하는 양상을 보인다. 이런 영향으로 민물전시관 상하부(HMS8~HMS9)에서 하 천바닥에 백색의 침전이 발생하였다. 이 침전물을 X-ray



Fig. 4. Field measured parameters, ions and isotopic values of stream water from the exit of the Sohan Cave to the east coast.

et al., 2018). 한편 앞서 언급한 바와 같이 이 지역 하 천수의 전기전도도는 기수역을 제외하고 140~180 μ S/cm로 상당히 높게 나타난다. 그러나 전기전도도 에 대하여 이동거리에 따른 특별한 경향성은 나타나 지 않으며 오직 기수역의 전기전도도가 매우 높게 나타나는 현상이 뚜렷할 뿐이다.

용존산소(DO)의 경우 생물의 호기성, 혐기성상 태를 판단하며 오염지역에서는 많은 유기물들이 증 식하여 산소를 흡수하므로 용존산소(DO)가 감소한 다(Hyun et al., 2006). 민물고기들이 살기에 알맞은 용존산소(DO)는 6~9 mg/L이며 소한굴샘에서부터 유동경로에 따라 측정한 값은 평균 8 mg/L 내외로 오염되지 않은 일반적인 하천수의 상태를 보이며 소 한굴샘에서 나오면서 점점 높아지는 경향이 뚜렷하 다(Doudoroff and Shumway, 1970). 소한굴샘으로 부터 기수역까지 특별한 오염원은 없으며 생활하수 는 별도의 처리시설에서 처리되고 있다. 이런 이유로 깨끗한 상태를 유지하는 것으로 보인다. 산화환원전 위(ORP)의 경우에도 유동경로 내내 평균 180~250 mV 로 산화환경으로 산소가 부화된 상태와 일치한다. 탁도의 경우 비교적 청정상태를 보이나 초당저수지 이후에 크게 상승하는 경향을 보이는데 이는 해당 지역 일대에 진행 중이던 하천공사 영향이다.

다음은 용존이온에 대한 것으로 칼슘이온(Ca²⁺) 은 양이온 중에서 가장 지배적인(40~50 mg/L) 이 온으로 하류로 가면서 점점 증가하는 양상을 보이는 데 하천수가 유하하면서 일부 위치에서 침전이 발생 하지만 많은 경우 추가적인 수암반응의 발생과 지하 수에 의한 기저유출로 인한 추가적 부하를 고려할 수 있다. 기수역에서의 급격한 이온증가는 해수에 의한 영향이다. 한편 마그네슘이온(Mg²⁺)은 3~4 mg/L 로 기수역을 제외하고는 상류와 하류에서 큰 변동경 향은 나타나지 않았다. 나트륨 이온(3.5~5.5 mg/L) 도 마그네슘과 비슷한 정도인데 다만 하류로 가면서 해수의 영향을 받아 증가하는 경향을 보인다. 칼륨 이온의 경우도 나트륨과 거의 동일한 변화 경향을 보 였다. 규소(Si)는 하류로 가면서 약간씩 감소하였으 나 기수역에서 급격히 증가하는 모습을 보였다.

음이온(SO₄²⁻, HCO₃⁻, Cl⁻, NO₃⁻)도 상기 기술한 변 화 경향성과 크게 다르지 않다. 가장 많은 중탄산염 (HCO₃)의 경우 칼슘 양이온과 거의 동일한 거동을 보이므로 이 이온이 주로 탄산염암의 풍화에서 유래 된 것임을 추정케 한다. 한편 인위적인 지표·천부 오 염(생활하수, 비료, 농약 등)의 주요 지시자로 인식 되는(Lee *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2014) 염소(CI)나 질산염(NO₃)의 농도가 높지 않은 것은 이 지역에 별 도의 오폐수 처리시설이 있으며 또한 주변에 농업시 설(논밭, 비닐하우스)이 많지 않은 까닭이다.

한편 탄소동위원소(δ¹³C)는 특징적인 변동경향을 보인다. 소한굴샘(HMS2)에서 민물고기전시관(HMS9) 전까지는 평균 -11.37‰에서 -10.16‰까지 지속적으 로 증가하는 양상을 보였다. 흔히 탄산염암의 용해 에 의해 공급된 중탄산염의 경우 보통 δ¹³C가 -13‰~ -10‰의 범위를 보이는 것으로 알려져 있다(NIER, 2013). 그러므로 강수가 소한굴 내에 침투하여 탄산 염암을 녹였고 이 지하수에서 유래된 물이 소한굴샘 으로 나와 동해 쪽으로 유하하면서 대기 중 이산화 탄소(-7.5‰)가 일부 녹아들어 약간 더 무거워지는 방 향으로 변한 것으로 추정된다. 이후 초당저수지 및 기 수역 근처에서의 동위원소값의 상승과 하강은 다른 성격의 수체와의 혼합의 영향으로 볼 수 있다.

또 산소동위원소(δ¹⁸O)와 수소동위원소(δD)는 소 한굴에서 나와 흘러가면서 조금씩 무거운 쪽으로 이 동하는 것을 볼 수 있다. 이는 굴에서 나와 이동하는 동안 발생하는 증발 현상에 의해 보다 무거운 쪽으 로 부화되는 것으로 이해할 수 있다(Lee and Lee, 1999; Ryu *et al.*, 2008). 다만 한강과 달리 유하거리 가 길지 않아 동위원소 값 차이는 크지 않는 것으로 나타났다.

3.3 탄산염암 풍화, 동위원소 특성 및 물의 기원

그림 5는 중탄산염과 칼슘이온 그리고 중탄산염 과 마그네슘/칼슘 이온비 관계를 보여준다. 중탄산 염과 칼슘이온 관계에서 1:1 라인에 거의 도시되거 나 칼슘이온 쪽으로 부화된 특성을 보임으로써 하천 수의 중탄산염 그리고 칼슘이온이 규산염광물이 아 닌 탄산염암의 풍화와 용해에서 유래된 것임을 알 수 있다(Pu et al., 2015; Yuan et al., 2017). 특히 중탄산 염과 마그네슘/칼슘 이온비 그림에서 모두 아래에 도 시됨으로서 탄산염 광물 중에서도 백운석(dolomite) 보다 방해석(calcite)에서 유래되었음을 알 수 있다 (Pu et al., 2015).

한편 그림 6은 깁스(Gibbs) 다이아그램을 보여주 는데 Na⁺/(Na⁺+Ca²⁺)비와 CI⁻/(CI⁻+HCO₃⁻)비가 넓 은 범위를 보여 다양한 정도의 풍화 및 물-암석 반응 을 지시하며 특히 총용존고형량(TDS)이 상당한 값을 보여 이 지역의 이들 이온들은 거의 대부분 물-암석 반응에 영향을 받은 것으로 보인다. 특히 한 시료를 제외하고 강수나 증발(결정화)의 영향은 크지 않는 것으로 평가된다(Nur *et al.*, 2012; Pu *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2017).

그림 7은 중탄산염과 탄소동위원소, 그리고 칼슘 이온과 탄소동위원소 관계를 보여준다. 그림에서 보 는 바와 같이 전체적으로는 각 두 파라미터는 탄소 동위원소와 음의 상관관계를 보이며 그러나 하맹방 리(소한굴샘과 초당저수지)쪽과 상월리쪽은 확연하 게 그룹이 나누어진다. 상월리쪽은 상대적으로 중탄 산염의 농도는 적은데 반해 탄소동위원소는 -8.5~-10. 5‰로 상대적으로 무거운 동위원소가 부화된 것을 알 수 있으며 초당동굴 쪽은 중탄산염이 비교적 고 농도로 나타나나 탄소동위원소는 -10~-12.5‰로 비 교적 가벼운 것을 알 수 있다(유로에 따른 변화는 3.2 참조). 탄산염암의 용해에서 중탄산염이 유래되었다 면 일반적으로 중탄산염 농도증가에 따라 탄소동위원소



Fig. 5. Scatter plots of HCO₃⁻ vs. Ca²⁺ and HCO₃⁻ vs. Mg²⁺/Ca²⁺ for the stream water samples in the studied area.



Fig. 6. Gibbs diagrams of the stream water samples in the studied area.

가 무거워지는 경향을 보인다(Li *et al.*, 2008; NIER, 2013; Knierim, 2015). 상월리 쪽에서는(그림에서 빨 간 마름모) 비교적 양의 관계성을 보이는 반면 하맹 방리쪽은 약한 음의 관계를 보여 두 지역의 탄소동 위원소 기작이 다름을 알 수 있다. 앞서 3.2에서 기술 한 바와 같이 하맹방리(소한굴샘, 초당저수지, 기수 역)에서는 탄산염암 용해 외에 대기 중 이산화탄소 용해에 의한 무거운 동위원소의 부화 또는 유기물의 산화 영향을 추정케 한다(Yun *et al.*, 2003).

그림 8은 수소와 산소 안정동위원소 값의 관계를 보여준다. 전체적으로 수소는 -40~-60‰ 그리고 산 소는 -7~-9‰의 범위를 보인다. 두 시료를 제외하고 는 나머지 대부분의 시료는 지역순환수선(LMWL)과 비슷한 곳에 대부분 잘 도시됨으로써 이들 물은 대 부분 동일한 기원에서 유래된 것으로 평가할 수 있 다(Florea *et al.*, 2017). 물론 일부 시료는 증발의 영 향으로 지역순환수선 약간 위에 도시되는 것도 발견 할 수 있다. 그런데 이들 물속의 나트륨과 염소이온 의 비를 살펴보면(그림 9) 1.16:1 (CI:Na⁺) 선에 매우 잘 도시되는 것을 알 수 있는데 이로부터 이들 하천 수는 서해안으로부터온 강수가 아니라 가까운 동해 쪽의 해수 증발에서 온 것이라고 추정할 수 있다(Lim *et al.*, 2012). 서해안 쪽에서 증발할 때는 비교적 무 거운 동위원소 조성을 보이지만 지구자전과 편서풍



Fig. 7. Relationship of HCO₃⁻ and Ca²⁺ with δ^{13} C values for the stream water in the study area.



Fig. 8. Relationship between the δ^{18} O and δ^{2} H values in stream water and groundwater.



영향으로 동쪽으로 이동하면서 강수가 발생하고 점 점 더 가벼운 동위원소 조성으로 변하게 된다.

그런데 이런 동위원소 조성측면에서는 서해안에 서 유래한 물이라면 태백산맥을 넘으면서 더욱 가벼 워져 춘천의 기상수보다 훨씬 더 가벼운 조성을 보 여야 하나 연구지역 하천수 동위원소를 보면 거의 비슷하거나 오히려 더 무거운 조성을 보이는 것을 보면 보다 가까운 동해안의 해수증발에 의한 물의 기원으로 추정할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 삼척 석회암지역에서 하천수와 지 하수의 화학적 특성을 살펴보았다. 이 지역의 하천 수와 지하수는 석회암 지역의 전형적인 Ca-HCO₃ 유형이 지배적으로 나타나며 동해 바닷가쪽에는 해 수의 영향으로 일부 Na-CI 유형으로 나타나기도 한 다. 한편 탄소동위원소로 보면 일반적으로 HCO₃가 증가함에 따라 무거워지는 경향을 보이는 것인 석회 암 수암 반응의 전형적인 결과로 볼 수 있으나 여기 서는 하맹방리에서 일부 반대의 경향을 보임으로 대 기 이산화탄소 혹은 유기물의 의한 산화의 영향이 있 음을 지시하였다. 한편 Na-CI의 이온비로 보았을 때 이곳은 하천수는 인근 바다의 영향이 매우 크게 나 타나며 이곳의 강수는 서해로부터 유래된 것이 아니 라 동해 해수의 증발에 의한 짧고 빠른 경로에서 유 래한 것으로 추정된다.

감사의 글

이 성과는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2015R1A4A1041105). 또 2017년도 강원대 학교 대학회계 학술연구조성비로 연구하였음(520170518). Funding for this work was provided by the Korea Polar Research Institute (KOPRI) project (PE18200). 현장조사에 큰 도움을 준 지질학과 지하수토양환경 연구실 전우현 박사에게 감사를 표한다.

REFERENCES

Barbieri, M., Boschetti, T., Petitta, M. and Tallini, M.,

2005, Stable isotope (²H, ¹⁸O and ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr) and hydrochemistry monitoring for groundwater hydrodynamics analysis in a karst aquifer (Gran Sasso, Central Italy). Applied Geochemistry, 20(11), 2063-2081.

- De Waele, J., 2008, Interaction between a dam site and karst springs: The case of Supramonte (Central-East Sardinia, Italy). Engineering Geology, 99(3-4), 128-137.
- Doudoroff, P. and Shumway, D.L., 1970, Dissolved oxygen requirements of freshwater fishes. FAO Fisheries technical paper, 86, 99-104.
- Florea, L., Bird, B., Lau, J.K., Wang, L., Lei, Y., Yao, T. and Thompson, L.G., 2017, Stable isotopes of river water and groundwater along altitudinal gradients in the High Himalayas and the Eastern Nyainqentanghla Mountains. Journal of Hydrology: Regional Studies, 14, 37-48.
- Giese, M., Reimann, T., Bailly-Comte, V., Marechal, J.-C., Sauter, M. and Geyer, T., 2018, Turbulent and laminar flow in karst conduits under unsteady flow conditions: interpretation of pumping tests by discrete conduit-continuum modeling. Water Resources Research, 54(3), 1918-1933.
- Hartmann, A., Goldscheider, N., Wagener, T., Lange, J. and Weiler, M., 2014, Karst water resources in a changing world: Review of hydrological modeling approaches. Reviews of Geophysics, 52(3), 218-242.
- Hwang, J.H., Song, M.H., Cho, H.L. and Woo, N.C., 2016, Influence of groundwater on the hydrochemistry and the origin of Oseepchun in Dogye area, Korea. Economic and Environmental Geology, 49(3), 167-179 (in Korean with English abstract).
- Hyun, S.G., Woo, N.C., Shin, W.S. and Hamm, S.Y., 2006, Characteristics of groundwater quality in a riverbank filtration area. Econ. Environ. Geol., 39(2), 151-162.
- Kim, H.K., Park, S.H., Kim, M.S., Kim, H.J., Lee, M.K., Lee, G.M., Kim, S.H., Yang, J.H. and Kim, T.S., 2014, Contamination characteristics of agricultural groundwater around livestock burial areas in Korea. The Journal of Engineering Geology, 24(2), 237-246 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.H., Kim, G.B., Choi, S.G. and Kim, C.S., 2016, SWIR application for the identification of high-grade limestones from the Upper Pungchon formation. Economic and Environmental Geology, 49(5), 335-347 (in Korean with English abstract).
- Knierim, K., 2015, Stable Isotopes as a Tool to Characterize Carbon Cycling and Develop Hydrologic Budgets in Mantled Karst Settings. University of Arkansas, Fayetteville, Ph.D. thesis, 268 p.
- Lee, E.J., Woo, N.C., Lee, B.S. and Kim, Y.B., 2008, Variation in nitrate contamination of shallow ground-

water in a farmland in Gyeonggi-do, Korea. Economic and Environmental Geology, 41(4), 393-403 (in Korean with English abstract).

- Lee, E.S., 2004, Review of principle and applications of karst hydrogeology. Journal of the Geological Society of Korea, 40(3), 349-359 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y. and Hahn, J.S., 2006, Characterization of groundwater temperature obtained from the Korean national groundwater monitoring stations: implications for heat pumps. Journal of Hydrology, 329(3-4), 514-526.
- Lee, J.Y., Raza, M. and Park, Y.C., 2018, Current status and management for the sustainable groundwater resources in Korea. Episodes, 41(3), 179-191.
- 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, S.M., Kim, H.S. and Oh, I.S., 1986, Metamorphic petrology of Precambrian gneisses in Samcheok-Jukbyeon area. Journal of the Geological Society of Korea, 22(3), 257-277.
- Leo Lynch, F., Mahler, B.J. and Hauwert, N.N., 2004, Provenance of suspended sediment discharged from a karst aquifer determined by clay mineralogy. Studies of Cave Sediments, Springer, New York, 83-93.
- Li, S.L., Liu, C.Q., Lang, Y.C., Tao, F., Zhao, Z. and Zhou, Z., 2008, Stable carbon isotope biogeochemistry and anthropogenic impacts on karst ground water, Zunyi, Southwest China. Aquatic Geochemistry, 14, 211-221.
- Lim, C., Lee, I., Lee, S.M., Yu, J.Y. and Kaufman, A.J., 2012, Sulfur, oxygen, and hydrogen isotope compositions of precipitation in Seoul, South Korea. Geochemical Journal, 46, 443-457.
- Liu, Z. and Zhao, J., 2000, Contribution of carbonate rock weathering to the atmospheric CO₂ sink. Environmental Geology, 39(9), 1053-1058.
- Mahler, B.J. and Leo Lynch, F., 1999, Muddy waters: temporal variation in sediment discharging from a karst spring. Journal of Hydrology, 214(1-4), 165-178.
- National Institute of Environmental Research (NIER), 2013, Handbook of Oxygen and Hydrogen Isotopes in Hydrological Environment using Isotope Ratio Mass Spectrometer (IRMS)(II). NIER-GP2013-85, NIER, Incheon, 84 p (in Korean).
- Noh, J.H. and Oh, S.J., 2005, Hydrothermal alteration of the Pungchon limestone and the formation of high-Ca limestone. Journal of the Geological Society of Korea, 41(2), 175-197 (in Korean with English abstract).
- Nur, A., Ishaku, J.M. and Yusuf, S.N., 2012, Groundwater flow patterns and hydrochemical facies distribution using

geographical information system (GIS) in Damaturu, Northeast Nigeria. International Journal of Geoscience, 3, 1096-1106.

- Park, Y., Lee, J.Y., Lim, H.G. and Park, Y.C., 2011, Characteristics of hydraulic conductivity of carbonate aquifers in Gangwon Province. The Journal of Engineering Geology, 21(1), 79-85 (in Korean with English abstract).
- Pu, J., Yuan, D., Xiao, Q. and Zhao, H., 2015, Hydrogeochemical characteristics in karst subterranean streams: a case history from Chongqing, China. Carbonates and Evaporates, 30(3), 307-319.
- Romero-Mujalli, G., Hartmann, J., Borker, J., Gaillardet, J. and Calmels, D., 2018, Ecosystem controlled soil-rock pCO₂ and carbonate weathering - Constraints by temperature and soil water content. Chemical Geology, https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.01.030.
- Ryu, J.S., Chang, H.W. and Lee, K.S., 2008, Hydrogeochemistry and isotope geochemistry of the Han River system: A summary. Journal of the Geological Society of Korea, 44(4), 467-477 (in Korean with English abstract).
- SAMPYO and KNU, 2017, Groundwater Impact Investigation Report (1st Stage) on High Quality Limestone Development of Dongyang 2nd Mine. March 2017, KNU, 765 p (in Korean).
- Sappa, G., Ergul, S. and Ferranti, F., 2014, Water quality assessment of carbonate aquifers in southern Latium region, Central Italy: a case study for irrigation and drinking purposes. Applied Water Science, 4(2), 115-128.
- Sasowsky, I.D. and Dalton, C.T., 2005, Measurement of pH for field studies in karst areas. Journal of Cave and Karst Studies, 67(2), 127-132.
- Won, J.K., Park, B.K. and Lee, S.H., 1994, Geologic Report on Samcheock-Gosari Sheet. KIGAM.
- Woo, K.S., Won, J.K., Lee, G.C., Namkoong, C. and Choi, Y.K., 2000, Comprehensive Investigation Report of Chodang Cave. Samcheok City, 202 p (in Korean).
- Xu, K., Dai, G., Duan, Z. and Xue, X., 2018, Hydrogeochemical evolution of an Ordovician limestone aquifer influenced by coal mining: a case study in the Hancheng mining area, China. Mine Water and the Environment, 37(2), 238-248.
- Yoshimura, K., Nakao, S., Noto, M., Inokura, Y., Urata, K., Chen, M. and Lin, P.-W., 2001, Geochemical and stable isotope studies on natural water in the Taroko Gorge karst area, Taiwan-chemical weathering of carbonate rocks by deep source CO₂ and sulfuric acid. Chemical Geology, 177(3-4), 415-430.
- Yuan, J., Xu, F., Deng, G., Tang, Y. and Li, P., 2017, Hydrogeochemistry of shallow groundwater in a karst aquifer system of Bijie city, Guizhou province. Water, 9, 625, https://doi.org/10.3390/w9080625.

- Yun, S.W., Jeon, W.H. and Lee, J.Y., 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, 53(5), 727-742 (in Korean with English abstract).
- 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 Haean basin. Journal of the Geological Society of Korea, 51(6), 611-621 (in Korean with English abstract).
- Yun, U., Chi, S.J. and So, C.S., 2003, The hydrochemical and stable isotope characteristics of shallow groundwater near the Gwangju stream. Economic and Environmental Geology, 36(6), 441-455 (in Korean with English abstract).
- Zhang, C., Li, Z., Gu, M., Deng, C., Liu, M. and Li, L., 2010, Spatial and vertical distribution and pollution assessment of soil fluorine in a lead-zinc mining area in the Karst region of Guangxi, China. Plant Soil Environment, 56(6), 282-287.
- Zhang, T., Pu, J., Li, J., Yuan, D. and Li, L., 2017, Stable isotope and aquatic geochemistry of a typical subtropical karst subterranean stream in southwest China. Carbonates and Evaporates, 32(3), 415-430.

Received	:	December	11,	2018
Revised	:	December	27,	2018
Accepted	:	December	27,	2018