

삼척시 카르스트 지역의 수화학 특성과 형광광물 추적자 시험을 통한 수리연결성 평가

장지욱 · 이진용[‡] · 오세림 · 김영인
강원대학교 지질학과

Evaluation of hydrochemical characteristics and hydraulic connectivity using fluorescent mineral tracer test in karst region of Samcheok, Korea

Jiwook Jang · Jin-Yong Lee[‡] · Serim Oh · Young-In Kim

Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea

요 약

카르스트 수리지질학은 복잡한 유동 과정을 겪으며 수화학 및 수리연결성을 파악하기 어려운 도전적인 분야 중 하나이다. 이 연구는 동굴 유출수와 하천수의 수화학 특성을 규명하고 싱크홀이 다수 발달된 카르스트 지역에서 새롭게 제안된 추적자 시험을 통해 동굴과 싱크홀을 통한 수리적 연결성을 밝혀내는 것이다. 강원도 삼척시의 하천수와 동굴 유출수의 수화학은 대부분 Ca^{2+} 와 HCO_3^- 가 높은 농도로 나타나는데 탄산염암의 용해로 인한 것으로 판단된다. 그러나 지하수의 Ca^{2+} 와 HCO_3^- 의 농도는 하천수와 동굴 유출수에 비해서 낮은 조성으로 나타난다. 이는 하천수와 동굴 유출수에 영향을 주는 천부지하수의 경우 지표 지질의 영향을 받고, 심부지하수의 경우 부정합으로 존재하는 변성암의 영향을 받는 것으로 추정된다. 연구지역의 서쪽에 위치한 유역은 지하수 관정 및 하천수가 없는 유역으로 기존의 추적자 시험의 적용은 불가능하다. 따라서 연구지역 내에 발달된 거대한 싱크홀을 통한 형광광물 추적자 시험을 하였다. 주입된 형광광물 추적자는 설치장소로부터 903 m 이격되어 있는 동굴 유출수로 발원하는 하천에서 발견되었다. 추적자는 짧은 시간 안에 유역을 넘어 유출되었으며 0.8-9 cm/s 속도로 이동되었을 것으로 추정된다. 이 연구를 통해 카르스트 지역의 수화학 특성을 이해하고, 또 카르스트 지역의 특이한 수리적 연결성 및 지하수 유동 속도를 추정할 수 있다.

주요어: 수화학, 형광광물 추적자 시험, 싱크홀, 토양유실, 카르스트 지역

ABSTRACT: Karst hydrogeology is one of the challenging fields in which hydrochemistry and hydraulic connectivity are difficult to understand due to complex flow processes. This study attempts to unveil not only the hydrochemical characteristics of cave, stream water and groundwater but also hydraulic connection through sinkholes and caves in a karst region of Korea. In most cases, the ratio of Ca^{2+} and HCO_3^- is high because the dissolution of carbonate rocks. However, the concentration of Ca^{2+} and HCO_3^- are lower than stream water and cave water. It is presumed to be affected by surface geology in the case of shallow groundwater, which affects stream and cave waters, and metamorphic rocks existing in unconformity in the case of deep groundwater. Furthermore, a newly proposed tracer test confirmed the hydraulic connectivity in an area where sinkholes, where well and surface water do not exist, are distributed. The injected fluorescent tracer was found around 903 m below a cave by a distance from the injection point. The tracer crossed the watershed and reached in a short time. It was possible to estimate the flow rate of 0.8-9 cm/s during transport. This study effectively understands hydrochemical and estimates the groundwater flow velocity in a karst environment using a fluorescent tracer test.

Key words: hydrochemistry, fluorescent tracer test, sinkhole, soil loss, karst area

[‡]Corresponding author: +82-33-250-8551, E-mail: hydrolec@kangwon.ac.kr

1. 서론

탄산염암 노두는 영구동토 지역을 제외하고 전 세계 육상 환경의 약 10% 이상을 차지한다(Ford and Williams, 1989). 특히 세계 인구 중 25% 이상이 카르스트 대수층을 사용하는 것으로 확인된다(Richts *et al.*, 2011). 카르스트 대수층은 수자원 공급에 중요한 역할을 한다. 하지만 카르스트 지역처럼 탄산염암의 용해로 인해 큰 단열이나 공극이 존재하여 지하 매질이 불균질한 지역은 매우 복잡한 지하수 네트워크를 갖는다. 특히 불균질한 매질 내에서 지하수는 일반적인 지하수 유동과 난류가 혼재되어 나타나 지하수의 유동 방향 및 속도를 예측하기 어렵다(Ghasemizadeh *et al.*, 2012). 이러한 카르스트 지역은 일반적인 지하수 유동 및 화학적 반응을 적용하기 어려워(White, 2002) 수자원량과 오염원의 거동을 파악하기 어렵다(Worthingtons, 2009). 또한 다른 지역에 비해 지하수의 유동 속도와 방향은 지질학적 배경에 큰 영향을 받는다(Berthelin and Hartmann, 2020). O'Driscoll and Dewalle (2006)에 따르면 카르스트 지역에서 단열(절리, 단층)이 존재할 경우 단열을 따라 수리적 유동과 지화학 반응은 복잡하고 역동적이어서 예측이 어렵다고 기술하였다. 싱크홀이 다수 발달한 카르스트 지형은 싱크홀을 통해 유입된 지하수가 공로(conduit) 유동을 통해 단 시간에 장거리를 유동할 수 있는 복잡한 유동 네트워크를 갖는다. 또한 평시의 지하수는 지하 유동을 하지만 우기에 지표로 유출되는 현상을 통해 건기와 우기에 일시적인 수리연결성이 있을 것으로 추정된다. 이러한 카르스트 지역의 싱크홀을 통한 유역을 넘는 수리적 연결은 종종 보고되어 왔지만 진행된 연구는 극히 드물다.

일반적으로 수리적 연결성을 파악하는 여러 가지 기법이 존재한다. 물리학적, 화학적, 생물학적 기법 등 다양하게 있으며 그중 추적자 시험은 지하수 유동 조사에서 자주 사용된다. 이는 접근이 불가능한 지하 구조를 조사하는데 직접적으로 조사하는 기법이다(Gutiérrez *et al.*, 1997; Flury and Wai, 2003). 특히나 형광 염료를 이용한 추적자는 두 지점 사이의 수리적 연결성을 파악하는데 매우 탁월한 기법 중 하나이다(Manció and Mas-Pla, 2008). 하지만 형광 염료 추적자는 온도와 탁도에 의한 영향을 크

게 받아(Blaen *et al.*, 2017) 측정되는 추적자 농도 신뢰도가 떨어지기 마련이다(Kim *et al.*, 2004).

카르스트 지역에서 토양의 이동은 토양 침식과 카르스트화 작용에 매우 중요한 역할을 한다(Goeppert and Goldsheider, 2019). 카르스트 지역은 우기에 많은 강수가 내리면 지표면에서 방대한 양의 토양이 침식되어 이동한다. 이렇게 침식된 토양은 우수(runoff)로 인해 이동하여 지표수 및 지하수에 유입되며 지표-지하 물질 교환이 활발히 진행된다(Febles-González *et al.*, 2012; Yue *et al.*, 2018). 또한 토양유실은 카르스트 지역의 특징적인 지형 구조를 형성하고 수리적 유동에 영향을 줄 수 있다. 그렇기에 수문학적 변화를 확인하기 위해서는 지형학적 이해가 필요하다. 탄산염암 지역은 규산염암 지역에 비해 암석 용해 작용이 매우 빠르게 진행된다(Tipper *et al.*, 2006). 이는 강우와 이산화탄소가 반응하여 생성되는 H_2CO_3 를 생성하고, 이후 지표로 떨어진 강우는 탄산염암과 반응하여 용해된다. 이 경우 토양을 생성하게 되고, 생성된 토양은 바람, 우수에 의해 이동하게 된다. 토양이 이동되며 대부분의 카르스트 지역은 탁수(turbid water)에 의해 수자원 오염에 대한 문제에 직면하게 된다. 이러한 탁수는 지표 물질(토양, 유기물, 오염물 등)이 유입되어(Li *et al.*, 2013) 인근 주민들에게 심미적인 불안감을 조성하기도 한다(Langtagne *et al.*, 2008). 특히나 토양은 주변 지역의 지질 환경에 의해 생성되는데, 토양은 정류 상태로 끊임없이 이동하게 된다(Kennish, 2016). 이는 지형학적 구조 형성 이해하기 위해 중요하다.

이번 연구의 목적은 화학적, 통계학적 분석을 이용하여 카르스트 지역의 수질 특성을 이해하고 새롭게 고안한 형광광물 추적자 시험 기법을 이용하여 우기에 나타나는 일시적인 지하수 유동 특징을 밝혀내는 것이다. 이를 통해 카르스트 지역 중 지표수나 관정이 존재하지 않는 유역에서의 싱크홀을 통한 토양 이동과 수화학의 특징 이해에 도움을 줄 것으로 판단된다.

2. 연구지역 및 연구방법

2.1 연구지역

연구지역은 강원도 삼척시 남양동과 근덕면 일대이며 동해와 인접해 있어 서쪽으로 이동할수록 고도

가 높아진다(그림 1a). 연구지역의 남쪽으로는 많은 양의 동굴수를 유출하는 초당굴(천연기념물 제 226 호)이 존재하며 하부에는 수직으로 연결된 소한굴이 있다. 또한 남양동(연구지역의 북부)에는 48.8 km의 길이의 오십천이 존재하는데 이는 연구지역의 남서쪽인 삼척시와 태백시 경계인 백병산(1,295 m)으로부터 발원하여 북서 방향으로 유하하여 동해로 유

출된다. 오십천은 단층선을 따라 흘러 심한 곡류로 흐른다. 특히 오십천의 유역 면적은 약 294 km²로 상당히 넓은 면적을 갖는다. 또한 이 지역은 몬순 기후의 영향을 받아 수화학 반응 과정이 규산염암 지역에 비해 빠르게 진행된다. 또한 우기에 탄산염암 지역의 동굴 유출수는 탁도가 높게 나타난다(Drysdale *et al.*, 2001; Vuileumier *et al.*, 2021). 연구 지역은



Fig. 1. Geological setting and topography in study site. (a) distribution of carbonate rock with metamorphic rock and (b) distribution of elevation. F.I. is a point that tracer injected and F.D. is a point that tracer detected.

2010-2019년 동안 연평균기온 12.5°C, 연평균강수량 1,302.9 mm의 강우가 내렸다고(Jang *et al.*, 2021). 특히나 7월부터 9월에 연중 강수량의 50% 이상을 차지하며 많은 강수로 인해 탁수가 빈번하게 발생한다. 이러한 탁도는 대개 규산염 광물(석영, 장석류, 운모류 등)의 퇴적물로 구성되어있다(Woo *et al.*, 2000).

연구지역은 오르도비스기 탄산염암이 선캄브리아기 변성암 위에 부정합으로 존재한다(Won *et al.*, 1994). 탄산염암은 주로 연구지역의 서쪽에 분포하고 변성암은 남동쪽에 위치한다(그림 1a). 단층은 서남에서 북동쪽으로 가로지르고 그 주변부로 수 mm부터 수 km 크기의 단층이 가지형으로 발달하였다.

SC1은 고도 165 m에 위치하고 입구는 폭 1.5 m, 높이 1.6 m 크기의 삼각형으로 발달하였다. 동굴의 규모는 5 m이고 입구부터 수중 동굴로 되어있어 탐사가 불가능하다. SC1의 유출량은 약 29 L/s로 유출되어 유하하는 도중에 SC2와 합류한다. SC2의 동굴의 경우 고도 130 m에 위치하고 입구는 폭 2 m, 높이 0.4 m 크기로 발달하였다. 동굴의 규모는 측정이 불가능하며 항시 동굴수가 유출된다. SC2의 유출량은 약 0.3 L/s로 유출된다. SC3과 SC4는 Basin 3에 위치하는 동굴수를 유출하는 지점으로 항시 동굴수가 유출된다. SC3은 고도 130 m에 위치하고 입구는 폭 1 m, 높이 0.6 m의 타원형으로 발달하였다. 동굴은 약 6 m 규모로 수중 동굴의 형태로 발달하여 탐사가 불가능하다. SC3의 유출량은 항시 1.6 L/s로 계절이 변화함에 따라 변동성이 적다. SC4는 고도 약 90 m에 위치하고 입구는 폭 6 m, 높이 7의 아치 형태로 발달하였다. 동굴의 규모는 약 740 m로 연구지역 중 가장 많은 양의 동굴수를 항시 유출한다. SC4의 유출량은 계절에 따라 300-840 L/s로 유출된다.

이 지역의 하천은 대부분 동굴(SC1, SC2, SC3, SC4)에서 기원하여 동해로 유하한다. 연구지역 내 소하천의 주요 수원은 SC1의 동굴 유출수로 사용하는 샘물이다. 이 소하천은 SC1에서 발원하여 북동 방향으로 흐르다가 북쪽에 위치하는 오십천으로 유입된다. SC1부터 SC6까지 유동하여 하천수의 유량이 급격하게 감소하여 건천화된다. 이후 주요 하천에서 700 m 떨어진 지점에서 용출되어 합류하고 동해로 유출된다. 건천화된 구간은 약 2.31 km로 하천 총 연장의 33%를 차지한다. 서쪽으로 이동함에 따

라 고도는 증가하고 지표수와 지하수 관정은 극히 드물게 존재한다. SC7은 도심지 내에 위치하여 지표로 유출되어 연구지역 북쪽에 있는 오십천과 합류하여 동해로 유출된다.

그림 1b는 연구지역에 존재하는 4개의 유역과 시료 채취 지점을 나타내고 있다. Basin 1은 지표수와 지하수 관정이 존재하지 않는 유역으로 가장 좁은 폐쇄형의 유역이다. 특히 이 지점에서 매년 싱크홀을 통한 토양유실이 발생하여 토양을 보충한다. Basin 2는 연구지역 중 가장 넓은 유역으로 동굴 유출수가 발원하는 7개의 동굴 중 4개의 동굴이 존재한다. Basin 3은 동굴 유출수와 용출수가 존재하지 않지만, 극히 적은 양의 지표수가 고도가 낮아짐에 따라 기저유출하여 하천을 형성한다. Basin 4는 연구지역에서 가장 풍부한 수량을 나타내는 유역이다. 두 개의 동굴(SC3, SC4)에서 나오는 동굴 유출수는 약 2 km 이상 유하하여 동해로 유출된다.

2.2 시료 채취 및 분석

이번 연구는 2020년 2월부터 2021년 2월까지 2달에 1회씩 시료 채취 및 현장수질조사를 수행하였고, 2021년 7월에 추가적인 조사를 진행하였다. 물 시료는 동굴 유출수 7지점과 그 주변에 존재하는 하천수 및 지하수를 채취하였다. 하천수 및 지하수가 존재하지 않는 Basin 1을 제외하고 Basin 2, Basin 3, Basin 4의 23개 지점에서 총 8회에 걸쳐 시료를 채취하였다. 물 시료는 동굴 유출수 7지점과 그 주변에 존재하는 하천수 및 지하수를 채취하였다. 하천수의 시료 채취는 하천수량이 크게 변화하는 지점에서 총 9개 채취하였고, 지하수 시료의 경우 국가 지하수정보센터에 등록되어 있는 7개 관정에서 채취하였다.

현장수질조사의 경우 시료를 채취하기 이전에 다항목수질측정기(YSI ProDSS, USA)를 이용하여 수소이온농도(pH), 수온, 전기전도도(EC), 용존산소(DO), 산화환원전위(Eh), 탁도를 측정하였다. Ag/AgCl 전극을 통해 ORP 값으로 측정하여 Eh 값으로 변환하였다. 물 시료는 화학 및 동위원소 분석을 진행하기 위해 현장에서 0.45 µm 멤브레인 필터를 사용했고, 양이온 시료의 경우 염산을 이용하여 pH 2 이하로 조정하였다. 시료는 4°C 이하로 냉장 보관하여 한국 기초분석지원센터(KBSI)에 분석 의뢰하였다. 양이

온은 Inductively coupled plasma-atomic emission spectroscopy (ICP-AES; Optima 8300, PerkinElmer) 을 이용하여 양이온을, 음이온은 Ion chromatography (Aquion, Thermo Scientific)를 이용하였다.

현장수질항목과 주요 양·음이온 분석 결과를 이용하여 주성분 분석을 진행하였다. 통계 분석 시 불검출(not detected)과 이상값은 통계 분석 시 제외하였다. 이상값은 사분범위(Inter Quartile Range) 1.5로 선정하여 제거하였다. 분석 시 데이터의 정규성을 확인하기 위해 수화학 분석 결과를 로그화하여 Shapiro-Wilk 검증을 진행하여 정규성(신뢰도>95%)을 검증하였다(Cha and Lee, 2020). 또한 피어슨 상관 분석과 주성분 분석을 수행하였다. 주성분 분석은 다변량 통계분석의 일종으로 다양한 환경변수의 차원을 단축시켜 자료의 구조를 쉽게 파악하는데 용이하다(Menció and Mas-Pla, 2008). 특히 주성분 분석은 각기 다른 변수들을 동시에 평가하기 때문에 각각의 자료의 크기를 동일하게 맞추기 위한 표준화 방법으로 Z-점수화(Z-score)하며 PAST 4.09를 이용하여 통계분석을 수행하였다.

2.3 형광광물 추적자 시험

연구지역의 서쪽으로 이동할수록 지하수 관정이 존재하지 않아 지하수 조사를 하기 어려운 애로점이 있다(그림 2a). 이처럼 지하수 관정이 없는 지역에서 지하수 유동 및 수리적 연결성을 평가하기 위해 이번 연구에서는 토양 입자의 거동을 이용한 추적자 시험을 고안하였다. 추적자로 사용되는 형광광물은 규산염 광물의 일종인 주석(scapolite)을 이용하였다.

주석은 회백색의 암석으로, 석영과 비슷한 비중인 2.5-2.7, 섬유형 벽개를 갖고 노란색의 형광을 발한다. 선택된 추적자는 0.02-2 mm (medium silt-very coarse sand)의 크기의 입자로 분쇄하여 20 cm 직경의 원통형 용기에 보관하였다. 용기의 상부는 마개가 없는 개방형으로 바닥에는 입자가 충분히 빠져 나갈수 있는 2 mm 직경의 체로 제작하였다. 분쇄한 추적자 1,000 mL를 용기에 넣어 토양 유실이 발생한 싱크홀 지점에 직경 30 cm, 깊이 2 m(굴착한계 지점)의 피트(pit) 기저면에 설치하여(그림 2b) 다시 복토하였다. 이 지점에 많은 강우가 발생하여 토양 유실이 발생하게 된다면 형광광물 추적자 입자는 피트 아래의 지하 유동 네트워크와 직결되는 공로 또는

공동으로 유입할 것으로 예상된다. 이후 추적자는 지하 유동 네트워크를 따라 지하수와 함께 이송하여 예상 지점에서 출현할 것으로 예측된다(그림 2c).

추적자 시험은 토양유실이 확인되는 Basin 1 유역에 강우가 내리기 전 8월 20일 설치하였다. 설치한 이후 강우는 13일 뒤인 9월 1일에 87 mm의 폭우가 내렸다. 추적자 예상 검출 지점은 동굴수가 유출되어 생성된 하천의 퇴적물에 있을 것으로 예상되어 설치 이후 2개월 뒤인 10월 15일에 퇴적물 조사를 수행하였다. 하천을 따라 2.2 km 이동하며 강우가 발생한 이후의 새로 퇴적된 6지점을 선정하였고, 암막 커튼을 사용하여 자외선으로 형광광물 입자를 조사하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 수화학 특성

조사 지역의 하천수, 지하수 및 동굴 유출수의 수

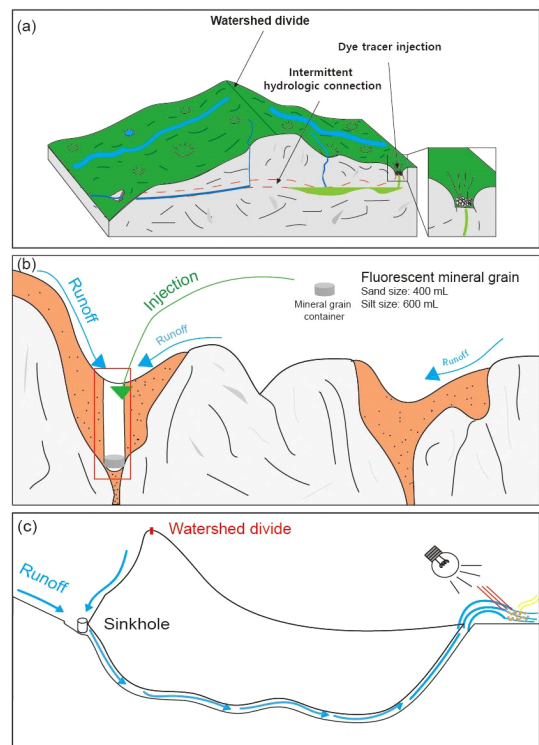


Fig. 2. Concept model of intermittent hydrologic connection and fluorescent mineral tracer test. (a) case of complex karst structure, (b) method of fluorescent mineral tracer injection and (c) expected tracer flow result.

Table 1. Statistical results of physicochemical characteristics in Samcheok region.

	Stream water n=19				Cave water n=32				Groundwater n=11			
	min	max	med*	SD**	min	max	med*	SD**	min	max	med*	SD**
T (°C)	3.6	27.1	12.5	5.5	5	19.6	12.9	3.3	10	20.3	15.8	3
pH	6.9	8.7	8.2	0.4	6.6	8.5	7.8	0.5	5.9	7.7	6.9	0.6
EC (µS/cm)	204	40321	291	8202.5	199	541	279	98.9	135	417	300	81.7
Eh (mV)	275.7	444	364	42.2	88	269	173	48.7	-49	122	87	69.9
DO (mg/L)	4.3	13.8	7.7	2.6	5	13.8	7.8	2.4	1.6	9.3	6.1	2.5
Turbidity (NTU)	0.1	683	4.8	156.5	0.1	904	1	183.1	0.2	65	11	20.5
Ca ²⁺ (mg/L)	22.7	291.6	49.9	52.3	24.5	113.2	50.5	16	5.8	65.4	21.6	18.3
Mg ²⁺ (mg/L)	2.3	806.3	4.8	165.9	1	10.7	3.6	2.3	2.9	13.8	7.7	3.2
Na ⁺ (mg/L)	3.5	7447.4	5.7	1527.7	1.9	12.9	4.9	2.5	3.6	40.8	12.8	10.2
K ⁺ (mg/L)	0.4	283.4	2.1	60.8	0.3	8	1.3	1.9	0.6	5	2.4	1.4
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	26.8	211.1	130.9	49.6	30.5	353.6	137.5	59.7	26.8	205.4	58.5	62.1
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	5.3	12315	9.6	2675.3	2.8	59.3	6.2	16.8	6.2	64.3	19.1	18.7
NO ₃ ⁻ (mg/L)	3.3	1746.4	6.2	405.3	3.4	26.4	5.9	6.3	0	86.1	1.5	28.4
Cl ⁻ (mg/L)	0.3	31.4	5.8	6.5	4	27	10.6	5.4	8.2	24.1	15.1	4.9

온, pH, EC, Eh, 탁도와 주요 양·음이온 및 안정동위 원소의 기술적 통계 값을 표 1에 정리하였다. pH의 경우 지하수(중앙값: 6.9)가 하천수(중앙값: 8.2)와 동굴 유출수(중앙값: 7.9)에 비해 낮은 것으로 나타났다. 이는 하천수와 동굴 유출수는 대기와 접촉하여 생성되는 HCO₃⁻의 증가에 따른 것이다(Ryu *et al.*, 2019). EC의 경우 이 지역의 대부분의 시료는 비슷한 수준으로 나타났다. SS1 지점은 평균 14,143 µS/cm으로 하천수 EC 중앙값인 291 µS/cm인 다른 지점에 비해 상당히 높게 측정된 것으로 나타났다. 이는 SS1 지점에서 해수의 직접적인 영향을 받아 일부 기수역을 형성하는 것으로 나타났다. 하지만 2021년 9월의 EC는 336 µS/cm으로 14호 태풍 찬투가 발생하여 많은 강우가 내리고 내륙으로부터 많은 우수가 하천으로 유입되었다. 이 시기에는 하천

수량이 증가하여 해수의 영향을 적게 받은 것으로 나타났다. Eh는 대부분 200 mV 이상으로 나타나나 SG1지점의 경우 연중 음의 값(평균: 164.8 mV)으로 나타난다. DO의 경우 하천수와 동굴 유출수가 비슷한 수준으로 나타났다(하천수: 7.7 mg/L, 지하수: 6.9 mg/L, 동굴 유출수: 7.8 mg/L). 특히 탁도의 범위는 0.1-904.0 NTU로 큰 변동성을 보였다. 이 지역은 우기를 제외하고 평균 5.8 NTU이나 강우 직후 365.8 NTU로 나타났다. 특히 동굴에서 직접적으로 탁수가 발생하여 동굴 유출수가 유동하는 주변부의 환경오염에 대한 문제가 제기되기도 한다.

주요 양이온 농도는 하천수, 지하수, 동굴 유출수의 경우 Ca²⁺ 중앙값(하천수 범위: 22.7-291.6 mg/L, 지하수 범위: 5.8-65.4 mg/L, 동굴 유출수 범위: 24.5-113.2 mg/L)이 가장 우세하게 나타났다. 이후 하천수,

지하수, 동굴 유출수의 중앙값 모두 $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ 순으로 화학 조성이 높은 것으로 나타났다. 음이온의 경우 HCO_3^- (하천수 범위: 26.8-211.1 mg/L, 지하수 범위: 26.8-205.4 mg/L, 동굴 유출수 범위: 30.5-353.6 mg/L)가 가장 우세하게 나타났다. 이후 하천수와 지하수의 경우 Cl^- (하천수 범위: 0.3-31.4 mg/L, 지하수 범위: 8.2-24.1 mg/L)에 비해 SO_4^{2-} (하천수 범위: 5.3-12,315 mg/L, 지하수 범위: 6.2-64.3 mg/L)의 농도가 상당히 높은 것으로 나타났다. 하지만 동굴 유출수 음이온의 중앙값은 $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$ 순으로 높은 것으로 나타났다. 해당 지역의 수질은 지표 지질의 영향을 크게 받아 Ca^{2+} 와 HCO_3^- 가 상당히 부

화되어 있는 것으로 나타난다. 특히 동굴 유출수 내 HCO_3^- 은 다른 이온에 비해 높은 농도를 갖는 것을 확인할 수 있다. 이는 탄산염암이 용해되어 생성되는 CO_3^{2-} 와 대기의 CO_2 가 결합하여 HCO_3^- 가 지속적으로 공급된 것으로 판단된다.

Durov 모식도(Durov, 1948)는 주요 양·음이온과 pH, 총용존고형량(total dissolved solids: TDS)을 이용하여 수질의 유형을 결정하고 또 지점 간의 유사성을 확인할 수 있다. 하천수와 동굴 유출수 중앙이온 조성의 중앙값은 Ca^{2+} 는 79.6, 80.8%로 가장 많고 다음으로 Mg^{2+} (11.2, 11.0%) $>$ $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ (8.3, 8.4%)의 조성을 갖는다(그림 3a). 음이온의 경우 HCO_3^- 중앙

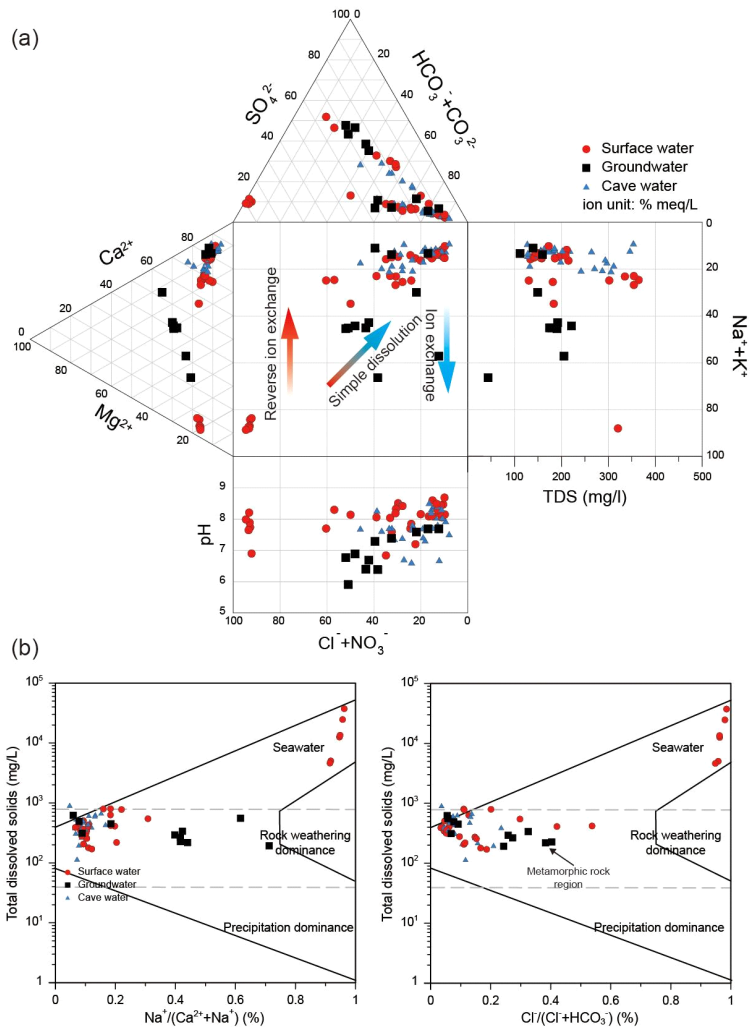


Fig. 3. Hydrochemical composition and the main process of controlling hydrochemistry of Samcheok. (a) durov diagram and (b) gibbs diagram.

Table 2. Pearson's correlation analysis results of physicochemical parameter. Values over 0.5 are in bold.

	Temp.	pH	EC	DO	Eh	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Alk.	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
Temp.		-0.11	-0.01	-0.56	0.04	-0.06	0.25	0.08	0.08	0.30	-0.04	0.04	-0.03
pH	-0.11		0.08	0.44	0.13	0.46	-0.12	-0.13	-0.18	0.19	-0.21	-0.21	0.18
EC	-0.01	0.08		0.05	0.07	0.59	0.66	0.61	0.57	0.11	0.70	0.75	0.27
DO	-0.56	0.44	0.05		-0.34	0.32	-0.18	-0.15	-0.19	-0.13	-0.13	-0.16	0.02
Eh	0.04	0.13	0.07	-0.34		0.19	-0.19	-0.10	-0.06	0.00	-0.13	-0.06	0.29
Ca ²⁺	-0.06	0.46	0.59	0.32	0.19		0.22	0.03	0.08	0.17	0.12	0.18	0.52
Mg ²⁺	0.25	-0.12	0.66	-0.18	-0.19	0.22		0.78	0.65	0.09	0.78	0.82	-0.03
Na ⁺	0.08	-0.13	0.61	-0.15	-0.10	0.03	0.78		0.80	0.13	0.88	0.89	0.09
K ⁺	0.08	-0.18	0.57	-0.19	-0.06	0.08	0.65	0.80		0.14	0.81	0.85	0.10
Alk.	0.30	0.19	0.11	-0.13	0.00	0.17	0.09	0.13	0.14		0.03	0.04	0.13
Cl ⁻	-0.04	-0.21	0.70	-0.13	-0.13	0.12	0.78	0.88	0.81	0.03		0.89	0.14
SO ₄ ²⁻	0.04	-0.21	0.75	-0.16	-0.06	0.18	0.82	0.89	0.85	0.04	0.89		0.11
NO ₃ ⁻	-0.03	0.18	0.27	0.02	0.29	0.52	-0.03	0.09	0.10	0.13	0.14	-0.03	0.18

값이 78.3%로 가장 많고 다음으로는 Cl⁻+NO₃⁻(16.4%) > SO₄²⁻(5.3%)의 조성을 갖는다. Cl⁻+NO₃⁻ 조성비가 높은 것을 통해 인위적인 오염의 영향인 것으로 판단된다(Devic *et al.*, 2014; Moquet *et al.*, 2014). 지하수의 양이온 조성비의 경우 Ca²⁺ 중앙값이 41.2%로 다음으로 Na⁺+K⁺(29.4%)>Mg²⁺(27.7%)로 Na⁺+K⁺의 조성비가 하천수와 동굴 유출수에 비해 확연하게 높은 것을 확인할 수 있다. 음이온의 조성비 중앙값의 경우 HCO₃⁻(56.2%)가 가장 많은 비율을 차지하고 Cl⁻+NO₃⁻(24.64%)>SO₄²⁻(11.7%)로 다른 이온들에 비해 상당히 많은 조성을 차지한다. 지하수에서는 Na⁺+K⁺의 조성비가 증가한 것은 천부 지층의 경우 탄산염암으로 구성되어 있으나 심부 지층은 선캄브리아기의 변성암으로 구성된 것으로 추정된다(Won *et al.*, 1994). 모식도에서 대부분의 하천수와 동굴 유출수의 경우 Ca-HCO₃ 유형의 유사한 영역에 도시되는 것을 확인할 수 있다. 이는 지표 지질인 탄산염암의 용해로 인해 유사한 수질로 나타난다. 하지만 일부 하천수의 경우 Cl⁻+NO₃⁻와 SO₄²⁻의 비율이 증가하는 것을 통해 인위적인 영향을 직접적으로 받은 것을 확인할 수 있다. 또한 SG1의 지하수 시료는 조사기간 동안 일정한 화학 조성비를 갖는 것으로 나타나는데 이는 하천수와 동굴 유출수의 천부 지하수와 달리 강우 등 기상 영향이 거의 받지 않은 것으로 나타났다.

Gibbs 모식도(그림 3b)는 하천수 또는 지하수의

용존되어 있는 주요 양·음이온과 TDS를 이용하여 해당 수질에 영향을 미치는 환경적인 요소를 선정하는 방법 중 하나이다(Gibbs, 1970; Marandi and Shand, 2018). 하천수와 지하수, 동굴 유출수의 경우 대부분 암석 풍화가 우세한 것으로 나타나며 변성암 지역의 지하수 관정인 SG7의 경우 양이온 조성비가 연중 일정한 조성을 갖는 것으로 나타난다. SC6은 동굴 유출수가 하천으로 유입되긴 하지만 그 양은 극히 적다. SC6의 TDS의 경우 534.5 mg/L로 일부 증발의 영향을 받아 용존이온들이 부화되어 있는 것으로 판단된다. 특히 SS1 지점의 경우 해수의 TDS로 2021년 9월을 제외하고 2,846-14,729.1 mg/L로 해수의 영향을 받는 것으로 나타난다.

3.2 상관관계 및 주성분 분석

피어슨 상관분석은 각각의 수질 항목들의 관계를 보여준다. 하지만 각 항목들 간의 독립적인 관계일 뿐, 종속 변수의 관계를 설명하지 않는다. 표 2는 현장수질 측정항목과 이온 농도에 대한 피어슨 상관분석 결과를 도시한 것이다. 수온은 DO와 r=-0.56으로 음의 상관관계를 갖고 있으며, Mg²⁺(r=0.25)과 HCO₃⁻(r=0.30)은 약한 양의 상관관계를 갖는다. 반면 나머지 항목들에 대해 r±0.1로 나타난다. pH의 경우 DO (r=0.44)와 Ca²⁺(r=0.46)으로 양의 상관관계를 갖는 것으로 나타나고 다른 항목들 간의 상관계수가 r<0.21로 상관성이 거의 나타나지 않는다.

EC의 경우 HCO_3^- ($r=0.11$)와 NO_3^- ($r=0.27$)를 제외한 모든 이온과 강한 양의 상관관계($r>0.57$)를 나타낸다. 이는 HCO_3^- 의 농도가 다른 이온들에 비해 월등히 높아 상관성이 없는 것으로 나타난 것으로 추정된다. Ca^{2+} , HCO_3^- , NO_3^- , pH를 제외한 나머지 이온들은 각각의 상관계수가 상당히 높은 양의 상관관계를($r=0.59-0.75$) 갖는 것으로 나타난다.

주성분 분석의 결과를 표 3에 도시하였다. 주성분 분석 결과 고유향이 1 이상인 성분을 선택하였으며(그림 4), 이 지역의 수질을 조절하는 주성분은 2가지로 선정할 수 있다. PC1(총 변량 중 47.2%)은 Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} 의 부하(loading)가 유의미

Table 3. Loadings of two principal components. Values over 0.3 are in bold.

Parameters	PC1	PC2
pH	-0.10	0.60
Ca^{2+}	0.08	0.62
Mg^{2+}	0.42	0.03
Na^+	0.45	-0.02
K^+	0.41	-0.01
Alkalinity	0.05	0.38
Cl^-	0.45	-0.03
SO_4^{2-}	0.47	-0.01
NO_3^-	0.05	0.34

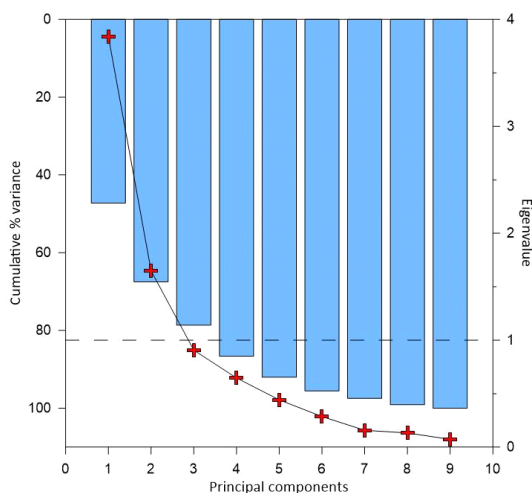


Fig. 4. Cumulative % variance and eigenvalues of each principal components. The bar indicates the cumulative % variance of principal components and cross symbol indicates the eigenvalue.

한 수준으로 나타난다. 그 값들은 0.42, 0.45, 0.41, 0.45, 0.47로 0.3 이상일 경우 유의미하다고 판단한다. 이 지역은 카르스트 지역임에도 불구하고 탄산염 광물을 조성하는 이온들의 영향이 적은 것을 통해 규산염 광물의 용해에 의한 요인으로 추정할 수 있다(Choi *et al.*, 2005; Marghade *et al.*, 2012). 이는 Ca^{2+} 와 HCO_3^- 가 다른 이온들에 비해 높은 농도로 존재하는 것을 통해 주성분 분석에서 반영을 못한 결과이다. 이번 PC1은 카르스트 지역에서 규산염 광물의 조성 이온들이 수질에 영향을 줄 수 있는 것을 의미한다.

또한 PC2(총 변량 중 20.27%)의 경우 pH, Ca^{2+} 와 HCO_3^- , NO_3^- 로 추출되었다. 특히 PC2의 경우 pH와 Ca^{2+} 가 상당한 양의 부하(0.59-0.62)로 큰 영향을 주는 것을 확인할 수 있다. 비슷한 수준의 부하가 나타나는 것은 지역의 수질을 구성하는 Ca^{2+} 는 대부분 탄산염암의 용해에서 오는 것으로 판단된다. 반면에 HCO_3^- 와 NO_3^- 는 0.33, 0.37로 낮은 수준으로 나타났다. 탄산염암의 용해로 HCO_3^- 가 일부 포함을 시킬 수 있으나 Ca^{2+} 의 이온에 비해 매우 높은 양으로 존재한다. 이는 HCO_3^- 가 탄산염암의 용해 이외에도 추가적인 유입이 있을 것으로 추정되는데, NO_3^- 와 유사한 부하를 갖는 것을 통해 외부 강수의 유입으로 추정된다. NO_3^- 는 대표적인 인위적 지표 오염 중 하나(Lee *et al.*, 2019)로 연구지역 주변에 농업활동이 활발하게 진행되고 있음을 지시한다. 시료 채취지점은 동굴 유출수가 유하며 소규모의 하천을 형성하며 동해로 유출되는데, 이 하천 주위로 농업 활동이 활발히 진행된다. 이러한 농업 활동에서 사용되는 비료 및 유기물의 유입은 해당 하천에 NO_3^- 를 공급한 것으로 판단된다(Ryu *et al.*, 2019).

3.3 수리적 연결성 및 유동 특성

형광광물 추적자를 주입한 이후(8월 20일) 강수량은 일평균 17.8 mm, 일최대강수량은 87 mm (2021년 9월 1일)이다. 그림 5는 토양유실이 발생한 싱크홀의 부피 변화를 나타낸다. 해당 사진과 모식도는 6월부터 10월까지 4개월 동안의 토양유실량을 확인한 이후 추적자 시험을 수행하였다. 6월의 싱크홀 초기 부피는 0.13 m^3 로 8월에 0.33 m^3 , 10월에는 0.60 m^3 로 부피가 증가한 것을 확인할 수 있다. 4개월간의 총 부피의 변화는 초기 부피에서 약 4.5배 증

가하였고 총 토양유실량은 8월에 0.2 m³, 10월의 경우 0.27 m³ 토양유실이 발생하였다. 수량이 적은 4월에서 6월보다 강수량이 증가했을 때 토양유실량이 증가한 것을 확인할 수 있다. 추적자의 부피는 0.001 m³으로 토양유실량은 추적자 부피의 약 270 배 유실되었다. 이번 연구는 지하수 관정 및 지표수가 존재하지 않는 유역의 싱크홀을 통한 토양유실을 이용하여 유역 외부로의 수리연결성과 지하수 유동 속도를 파악할 수 있을 것으로 기대된다.

이번 연구에서 싱크홀 지점(Fluorecent mineral Injection; F.I.)과 형광광물 추적자 검출 지점(Fluorecent mineral Detection; F.D.)은 직선거리로 903 m 이격되어있다. F.I.지점은 고도 295 m에 위치하고 있고, F.D. 지점은 165 m에 위치한다. 그 사이에 340 m 높이의 분수령이 존재하여 일반적인 지하수 유동의

로는 분수령을 넘어 다른 유역으로 이동하는 것은 어려운 일이다. 이 지역의 동굴 유출수는 일반적으로 부유물을 부유하여 유동하지 않는다. 하지만 많은 양의 강우가 발생할 경우 점토-모래 크기의 입자들이 짧은 시간 내에 유출된다(Woo *et al.*, 2000). 추적자는 동굴수 유출 지점으로부터 하천 유로를 따라 약 150 m 이격된 지점에서 발견되었다. 발견된 추적자는 선지산생굴에서 발원되는 하천수가 유동하며 만나는 문턱의 동굴 생성물 파편들로 이루어진 퇴적물에서 넓게 퍼져있는 상태로 발견되었다. 현장의 퇴적물에서 모래 크기의 추적자가 발견되었으며, 발견된 지점에서 퇴적물 300 g을 채취하여 추적자를 확인하였다. 발견된 추적자는 총 23개가 검출되었으며 이를 이용하여 탁수가 발생한 시기의 동굴수 유동 속도를 추정할 수 있었다.

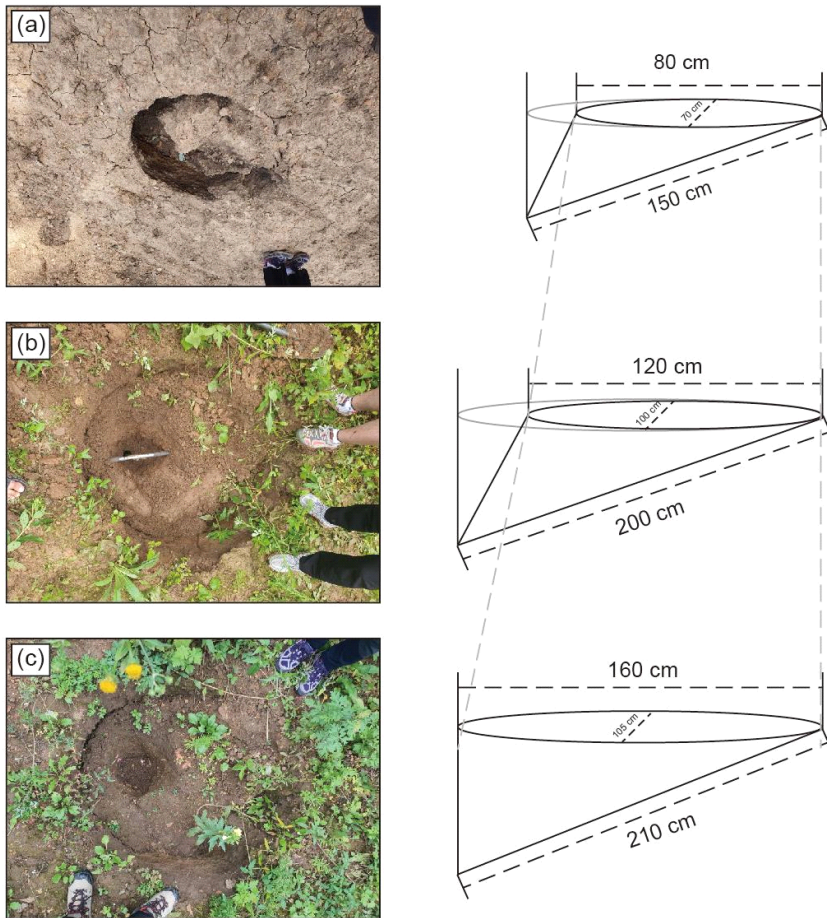


Fig. 5. Soil loss volume change through sinkhole point.

그림 6은 Hjulström (1935)이 제안한 강에서 나타나는 퇴적물의 거동을 퇴적물 입자와 유속에 관계를 설명한 모식도이다. Hjulström 모식도는 하천 흐름을 대상으로 진행되었지만 Hu *et al.* (2021)의 경우 카르스트 지역의 지하수는 특정 환경(conduit, cave)에서 하천과 같은 유동을 한다고 주장하였다. 배경 퇴적물의 입자의 크기(grain size; Gs)는 1% 미만의 함량을 갖는 입자를 제외하여 $-2 \leq Gs < 1$ Φ 의 입자가 총 함량 중 94.6%로 나타났다. 입도의 크기로 이 지점은 1.5-18 cm/s로 유동하였음을 추정할 수 있다. 하지만 추적자가 검출된 퇴적물의 입자는 $-2 \leq Gs < 0$ Φ 로 나타났으며 $0 \leq Gs < 1$ Φ 크기의 추적자는 검출되지 않았다. 함량이 5% 이상인 입자 크기는 $-2 \leq$

$Gs < 0$ Φ 으로 약 64.5%로 강수 이후 퇴적된 것으로 추정된다. 그러나 $-2 \leq Gs < -1$ Φ 는 배경 퇴적물과 달리 5.3%로 거의 존재하지 않았다. 추적자 입자의 개수의 경우 $-1 \leq Gs < 0$ Φ 는 5, $0 \leq Gs < 1$ Φ 는 4, $1 \leq Gs < 2$ Φ 는 11개로 검출되었다. 이를 통해 F.I. 지점과 F.D. (선구산샘굴)은 유역 외의 지역으로 일반적인 수리 유동이 불가능하지만, 강수의 영향으로 일시적인 수리 연결이 있다는 것을 확인할 수 있다. 또한 검출된 입자들의 크기를 통해 지하수 유속을 추정할 수 있으며 추적자가 이송되는 속도는 0.8-9 cm/s로 나타났다. 이 결과로 측정이 불가능한(조사가 되지 않은) 지하 환경의 지하수 유속을 측정하는 기법으로 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

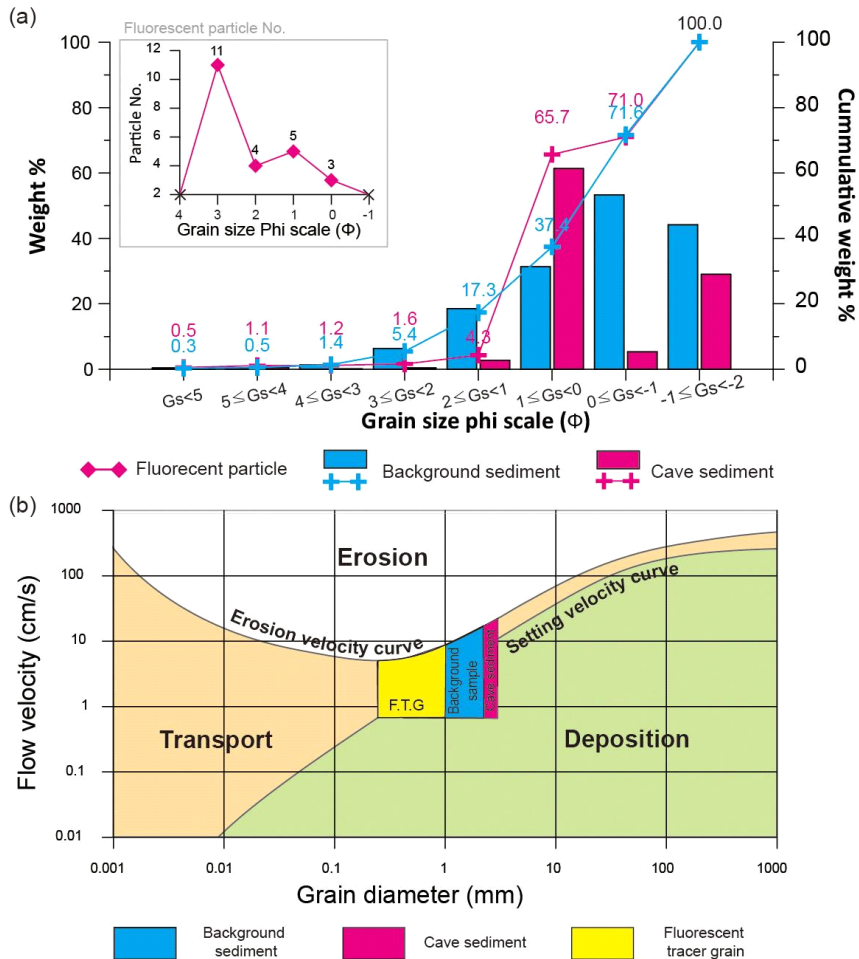


Fig. 6. Detected tracer grain size and be estimated water flow in underground. (a) distribution of grain size and (b) Hjulström diagram.

4. 결론

카르스트 지역에서 사는 주민들은 거주지 주변의 탁류 문제에 직면한다. 탁류는 해결하기에 도전적이지만, 약간의 주의를 기울이면 탁류를 저감할 수 있다. 이 연구의 목적은 탁류를 방지하기 위한 방법의 기초를 제시할 수 있을 것으로 예상된다. 제안된 형광광물 추적자 시험은 토양유실이 발생한 싱크홀에 대해 수행하였다. 연구지역은 매년 강우가 내린 직후 탁수가 발생하여 이를 방지하기 위해 고안되었다.

1) 해당 지역의 수질은 대부분 Ca-HCO_3 유형의로 측정된 EC의 중앙값은 $289 \mu\text{S/cm}$ 로 탄산염암의 용해로 인해 규산염암 지역보다 높은 용존이온 농도를 보인다. 이는 연구지역의 탄산염암이 수질에 큰 영향을 주는 것으로 판단된다. 특히 각각의 동굴 유출수의 수질이 상당히 유사하게 나타난다. 유사한 수질은 각 동굴수가 유출될 때까지 유사한 과정을 거쳤을 것을 지시한다. 특히나 동굴 유출수는 강우가 내린 직후의 시료를 제외하고 수질의 변화는 큰 차이가 없는 것으로 나타난다. 강우가 내린 직후 동굴 유출수의 pH의 감소와 탁도의 증가가 나타나는 것은 지표로 내린 강우가 빠르게 함양되는 것을 지시한다. 또한 지하수의 경우 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 의 농도가 높아 규산염암 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한 SC1과 SC3은 유역 면적에 비해 유출량이 상당히 많아 유역 외부로부터 유입되는 지하수가 있을 가능성이 높다. 하지만 동굴 유출수의 수화학 특성은 SC7을 제외하고 모두 유사하게 나타나 이를 이용한 수리적 연결성을 평가하기 어려움이 있다.

2) 통계 분석을 통해 해당 지역의 수질을 정량적으로 평가하였다. 조사된 수질에서 Ca^{2+} 와 HCO_3^- 가 수질에 우세하게 영향을 주는 것으로 나타났다. 주 성분 분석을 통해 수질을 결정하는 2가지 성분으로 추출할 수 있었다. PC1의 경우 Ca^{2+} 와 HCO_3^- 를 제외한 이온과의 관계를 통해 각 지점에서 규산염암의 영향을 평가할 수 있을 뿐만 아니라, PC2의 경우 탄산염 용해에 의한 수암반응의 영향을 확인할 수 있다.

3) F.I. 지점의 토양유실은 매년 발생하고 있으나 토양의 이동 경로에 대해 밝혀지지 않았었다. 또한 동굴 유출수간의 수화학적 특성이 유사하게 나타나 이를 이용한 수리적 연결성 평가는 한계가 있다. 그러나 새롭게 제안된 형광광물 추적자 시험을 통해

유실되는 토양의 이동 지점을 확인할 수 있었다. 주입한 추적자는 F.I. 지점에서 903 m 떨어져 있는 선지산샘굴(F.D.) 지점에서 유출되어 형성된 하천 퇴적물에서 검출되었다. 두 지점 사이에 분수령이 존재하여 일반적인 수리학 개념으로는 수리연결성이 없을 것으로 평가되었다. 또한 F.I. 지점의 유역은 하천이나 지하수 관정이 없어 K-water는 지표 고도와 유사하게 지하수가 있을 것으로 추측하고 있었다. 하지만 이번 조사를 통해 유역을 넘어 지하수가 유동하는 것을 확인할 수 있었다. F.D. 하천은 항상 선지산샘굴(SC1)로부터 유출수를 공급받고 강우 후에 탁류가 발생하는 지점 중 하나이다. F.D. 하천 중 퇴적물에 의해 지형적으로 문턱(threshold)이 발달하여 부유물들이 퇴적되기 쉬운 6지점을 조사하여 S1으로부터 150 m 떨어진 곳에서 발견이 되었다. 탁류 유속은 입자 크기를 통해 약 0.8-9 cm/s로 특정 지을 수 있다(그림 6).

본 연구는 강원도 삼척의 카르스트 지역의 수화학 특성과 강우에 의한 일시적인 수리적 연결성을 제시한다. 또한 싱크홀을 통한 함양된 지하수가 특정 도관을 통해 지하 환경에서 하천처럼 빠르게 유동할 수 있음을 증명할 수 있다. 새롭게 제안된 추적자 시험을 통해 관측할 수 없는 지하 환경 속 유동속도를 추정할 수 있을 것으로 판단된다. 싱크홀 주변 지표 오염물질의 장거리 확산 가능성을 제시할 수 있으며 이를 적용하면 카르스트 지역에서의 지표 오염물질의 거동을 평가할 수 있을 것으로 추정된다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 미세플라스틱 측정 및 위해성평가 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2020003110010). 또한 이 논문은 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다(No.2019R1A6A1A03033167). 이 논문은 제1저자의 석사 학위논문을 수정 및 발전시켜 게재함을 밝힙니다.

REFERENCES

Berthelin, R. and Hartmann, A., 2020, The shallow sub-sur-

- face of karst systems: review and directions. *Eurokarst* 2018, Besançon, 61-68.
- Blaen, P.J., Brekenfeld, N., Comer-Warner, S. and Krause, S., 2017, Multitracer field fluorometry: accounting for temperature and turbidity variability during stream tracer tests. *Water Resources Research*, 53, 9118-9126.
- Cha, J. and Lee, J.Y., 2020, Qualities of groundwater source used for production of commercial bottled waters in Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 56, 789-802.
- Choi, B.-Y., Yun, S.-T., Yu, S.-Y., Lee, P.-K., Park, S.-S., Chae, G.-T. and Mayer, B., 2005, Hydrochemistry of urban groundwater in Seoul, South Korea: effects of land-use and pollutant recharge. *Environmental Geology*, 48, 979-990.
- Devic, G., Djordjevic, D. and Sakan, S., 2014, Natural and anthropogenic factors affecting the groundwater quality in Serbia. *Science of the Total Environment*, 468-469, 933-942.
- Drysdale, R., Pierotti, L., Piccini, L. and Baldacci, F., 2001, Suspended sediments in karst spring waters near Mass (Tuscany), Italy. *Environmental Geology*, 40, 1037-1050.
- Durov, S.A., 1948, Klassificacija prirodnih vod i graficeskoje izobrazenie ich sostava (Classification of natural waters and graphic representation of their composition). *Dokl Akad Nauk USSR*, 59, 87-90.
- Febles-González, J.M., Vega-Carreño, M.B., Tolón-Becerra, A. and Lastra-Bravo, X., 2012, Assessment of soil erosion in karst regions of Havana, Cuba. *Land Degradation & Development*, 23, 465-474.
- Flury, M. and Wai, N.N., 2003, Dye as tracers for vadose zone hydrology. *Reviews of Geophysics*, 41, 1-37.
- Ford, D.C. and Williams, P.W., 1989, Karst geomorphology and hydrology. Unwin Hyman, London, 9-38.
- Ghasemizadeh, R., Hellweger, F., Butscher, C., Padilla, I., Vesper, D., Field, M. and Alshwabkeh, A., 2012, Groundwater flow and transport modeling of karst aquifers, with particular reference to the North Coast Limestone aquifer system of Puerto Rico. *Hydrogeology Journal*, 20, 1441-1461.
- Goepfert, N. and Goldscheider, N., 2019, Improved understanding of particle transport in karst groundwater using natural sediments as tracers. *Water Research*, 166, 115045.
- Gibbs, J.R., 1970, Mechanisms controlling world water chemistry. *Science*, 170, 1088-1090.
- Gutiérrez, M.G., Guimerà, J., de Llano, A.Y., Benitez, A.H., Humm, J. and Saltink, M., 1997, Tracer test at El Berrocal site. *Journal of Contaminant Hydrology*, 26, 179-188.
- Hjulström, F., 1935, Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris, *Bulletin. Geological Institute Upsala*, 25, 221-527.
- Hu, D., Li, S., Jin, Z., Lu, S. and Zhong, D., 2021, Sediment transport and riverbed evolution of sinking streams in a dammed karst river. *Journal of Hydrology*, 596, 125714.
- Jang, J., Kim, H. and Lee, J.Y., 2021, Characteristics of hydrochemistry and stable isotopes in a karst region in Samcheok, Republic of Korea. *Water*, 13, 213.
- Kennish, M.J. (Ed.), 2016, *Encyclopedia of estuaries*. Springer, Netherlands, 562-567.
- Kim, J.-W., Lee, J.Y., Cheon, J.-Y., Yi, M.-J., Kim, H.-S. and Lee, K.-K., 2004, A study of factors affecting concentration of Rhodamine WT measured using Fluorometer. *Journal of the Geological Society of Korea*, 40, 331-340 (in Korean with English abstract).
- Lantagne, D.S., Blount, B.C., Cardinali, F. and Quick, R., 2008, Disinfection by-product formation and mitigation strategies in point-of-use chlorination of turbid and non-turbid waters in western Kenya. *Journal of Water and Health*, 6, 67-82.
- Lee, J.Y., Raza, M. and Kwon, K.D., 2019, Land use and land cover changes in the Haejan Basin of Korea: impacts on soil erosion. *Episodes*, 42, 17-32.
- Li, S., Li, H., Xu, C.Y., Huang, X.R., Xie, D.T. and Ni, J.P., 2013, Particle interaction forces induce soil particle transport during rainfall. *Soil Science Society of America Journal*, 77, 1563-1571.
- Marandi, A. and Shand, P., 2018, Groundwater chemistry and the Gibbs Diagram. *Applied Geochemistry*, 97, 209-212.
- Marghade, D., Malpe, D.B. and Zade, A.B., 2012, Major ion chemistry of shallow groundwater of a fast growing city of central India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184, 2405-2418.
- Menció, A. and Mas-Pla, J., 2008, Assessment by multivariate analysis of groundwater-surface water interactions in urbanized mediterranea streams. *Journal of Hydrology*, 352, 355-366.
- Moquet, J.-S., Maurice, L., Crave, A., Viers, J., Arevalo, N., Lagane, C., Lavado-Casimiro, W. and Guyot, J.-L., 2014, Cl and Na fluxes in an Andean Foreland Basin of the Peruvian Amazon: an anthropogenic impact evidence. *Aquatic Geochemistry*, 20, 613-637.
- O'Driscoll, M.A. and DeWalle, D.R., 2006, Stream-air temperature relations to classify stream-ground water interactions in a karst setting, central Pennsylvania, USA. *Journal of Hydrology*, 329, 140-153.
- Richts, A., Struckmeier, W.F. and Zaepke, M., 2011, WHYMAP and the groundwater resources map of the world 1:25,000,000. *Sustaining Groundwater Resources*, Springer, Netherlands, 159-173.
- Ryu, H.-S., Lee, J.Y., Lim, C.-W. and Kim, K., 2019, Hydrochemical characteristics of groundwater and stream

- water in a karst area of Samcheok, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 55, 117-129 (in Korean with English abstract).
- Tipper, E.T., Bickle, M.J., Galy, A., West, A.J., Pomiès, C. and Chapman, H.J., 2006, The short term climatic sensitivity of carbonate and silicate weathering fluxes: insight from seasonal variations in river chemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70, 2737-2754.
- Vuilleumier, C., Jeannin, P., Hessenauer, M. and Perrochet, P., 2021, Hydraulics and turbidity generation in the Milandre Cave (Switzerland). *Water Resources Research*, 57, e2020WR029550.
- White, W.B., 2002, Karst hydrology: Recent developments and open question. *Engineering Geology*, 65, 85-105.
- Won, J.K., Park, B.K. and Lee, S.H., 1994, Geological report on Samcheock-Gosari sheet (1:50,000). Korea Institute of Geology, Mining and Materials, 1-36 (in Korean with English abstract).
- Woo, K.S., Won, J.K., Lee, G.C., Namkoong, C. and Choi, Y.K., 2000, Comprehensive Investigation Report of Chodang Cave. Samcheok City, 80-85 (in Korean).
- Worthington, S.R., 2009, Diagnostic hydrogeologic characteristics of a karst aquifer (Kentucky, USA). *Hydrogeology Journal*, 17, 1665-1678.
- Yi, L.X., Xia, R.U., Tang, J.S., Lu, D.H., Wang, Z., Lu, H.P. and Zhao, L.J., 2014, Karst conduit hydro-gradient non-linear variation feature study: case study of Zhaidi karst underground river. *Environmental Earth Science*, 74, 1071-1078.
- Yue, F.J., Li, S.L., Zhong, J. and Liu, J., 2018, Evaluation of factors driving seasonal nitrate variations in surface and underground systems of a karst catchment. *Vadose Zone Journal*, 17, 1-10.

Received : May 20, 2022
 Revised : June 8, 2022
 Accepted : June 15, 2022