

울릉도 북면 천부리 추산 용출소의 수질화학적 특성

이병대¹ · 조병욱¹ · 추창오^{2*}

¹한국지질자원연구원 지질환경연구본부, 책임연구원

²안동대학교 지구환경과학과, 연구교수

The Hydrochemistry of ChusanYongchulso Spring, Cheonbu-ri, Buk-myeon, Northern Ulleung Island

Byeong Dae Lee¹ · Byong Wook Cho¹ · Chang Oh Choo^{2*}

¹Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Korea, Principal Researcher

²Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Korea, Research Professor

Abstract

We investigated the hydrochemical properties of ChusanYongchulso Spring located in Buk-myeon, Ulleung Island, focusing on the formation and characteristics of aquifers in and around the Nari caldera. Abundant pumice with high permeability and numerous fractures (including faults and joints) that formed as a result of caldera subsidence are widely distributed in the subsurface, favoring the formation of aquifers. Because of the presence of porous pyroclastic rocks with a high internal surface area, the water type of the springs is characterized by NaHCO₃, with upper stream waters and the upper spring being characterized by NaHCO₃ and NaCl, respectively. Components with a high coefficient of determination with EC are HCO₃, Na, F, Ca, Mg, Cl, SiO₂, and SO₄. The high concentrations of Na and Cl might be attributable to the main lithologies in the area, given that alkaline volcanic rocks are distributed extensively across Ulleung Island. Eh and pH, which are considered to be important indicators of water – rock interaction, are unrelated to most components. According to the results obtained from factor analysis, the variance explained by factor 1 is 54% and by factor 2 is 25.8%. Components with a high loading on factor 1 are F, Na, EC, Cl, HCO₃, SO₄, SiO₂, Ca, NO₃, and Mg, whereas components with a high loading on factor 2 are Mg and Ca, along with K, NO₃, and DO with negative loadings. It is suggested that the high concentrations of Na, Cl, F, and SO₄ are closely related to the presence of fine-grained alkaline pyroclastic rocks with high permeability and porosity, which favor intense water – rock interaction. However, a wide-ranging investigation that encompasses methods such as geophysical prospecting and geochemical analysis (including isotope, trace-element, and tracer techniques) will be necessary to gain a better understanding of the groundwater chemistry, aquifer distribution, and water cycling of Ulleung Island.

Keywords: Ulleung Island, Yongchulso, groundwater, water type, factor analysis, water – rock interaction

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Chang Oh Choo
E-mail: mineralogy@hanmail.net

Received: 10 September, 2018

Revised: 15 November, 2018

Accepted: 20 November, 2018

© 2018 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

초 록

울릉도 북면 천부리에 소재하는 자분샘인 추산용출소 지하수의 수질특성을 규명하고, 이를 통하여 대수층의 발달특징을 고찰하였다. 상류구배인 나리분지 일대에 광범위하게 분포하는 부석층과 화산쇄설층, 칼데라 함몰과 관련된 단층과 절리와 같은 파쇄대는 투수계수가 높아 용출소의 지하수함양에 유리한 조

건을 제공한다. 특히 다공성이며 표면적이 넓은 알칼리성 화산쇄설물로 구성된 화산암류로 인해 상류하천수와 용출소는 독특한 수질특성을 보인다. 용출소의 수질유형은 Na-HCO₃형이며, 상류의 샘과 하천수는 Na-HCO₃형과 Na-Cl형의 경계에 놓인다. EC와 상관성이 높은 성분으로는 HCO₃와 Na를 비롯하여 F, Ca, Mg, Cl, SiO₂, SO₄ 등이 있다. 높은 Na, Cl 함량은 울릉도 지질 전반에 알칼리계열의 화산암이 분포하며, 고기 화산활동에 영향을 받은 것으로 판단된다. 물-암석반응을 잘 반영하는 요소인 Eh와 pH는 어떤 수질성분과도 상관성이 거의 없는 것으로 나타났다. 요인분석결과에 의하면, 요인 1의 영향력은 54%로 나타났으며, 요인 2의 경우 25.8%이다. 요인 1에 높은 적재량을 가지는 성분은 F, Na, EC, Cl, HCO₃, SO₄, SiO₂, Ca, NO₃, Mg 등이다. 요인 2에 대해 적재량이 높은 성분은 Mg, Ca이며, 음의 적재값이 높은 성분은 K, NO₃, DO 등이다. 이 지역의 독특한 수질특성 즉 높은 Na, Cl, F, SO₄ 등은 알칼리계열의 화산쇄설암류의 세립질 입자, 높은 공극률 등이 물-암석반응을 가속화시킨 결과로 해석된다. 그러나 울릉도의 수질특성과 대수층의 발달, 수리순환을 규명하기 위하여서는 광범위한 지구물리탐사와 더불어, 동위원소, 미량원소, 추적자 등을 통한 추가연구가 필요하다.

주요어: 울릉도, 용출소, 지하수, 수질유형, 요인분석, 물-암석반응

서론

울릉도는 지질학적으로 신생대3기 말에서 제4기 말까지 활발한 화산활동으로 형성된 화산섬으로서 주요 암질은 현무암, 조면암, 포놀라이트, 화산각력암, 응회암, 부석 등으로 구성된다. 특히 성인봉을 비롯한 여러 외륜산으로 둘러싸인 나리칼데라를 중심으로 부석층, 화산쇄설암, 각력암, 함몰파쇄대, 냉각절리 등과 같은 다공질 및 불연속면이 잘 발달한 화산암의 지질특성은 울릉도의 풍부한 강수량과 더불어 지하수 함양에 매우 유리한 조건이 된다. 특히 나리칼데라를 중심으로 발달하는 분지형 집수역은 지하수함양과 대수층 발달에 영향을 주는 각종 화학적 지질특성과 밀접한 관련성을 가질 뿐 아니라, 울릉도만의 고유한 수계와 대수층을 발달시킨다. 나리분지 북편에 위치하는 자분샘의 일종인 나리용출소는 활용도와 역사성으로도 유명한데, 유량은 하루 2만 톤에 달한다. 이 중 9,000 톤은 수력발전으로 이용되는데, 이는 울릉도 전체 전력의 24%를 차지하며, 1,000 톤은 울릉도 북부지역의 상수원으로 이용되고 있다. 울릉도는 해양성 기후로 인하여 연평균 기온은 12.3°C로 온화하며, 연평균 강수량은 1,485 mm로서 우리나라에서 최다강우 지역중 하나이다. 또한 겨울에는 폭설이 많이 내려 거의 여름과 같은 풍부한 강수량을 나타내며, 육지와는 달리 건기가 없다. 특히 울릉도의 투수성이 높은 화산암지대에서는 상당량이 지하수로 함양되기 때문에 나리분지밖에 위치하는 용출소도 일년 내내 풍부한 수량을 유지할 수 있다. 대수층의 수리지질학적 특성이 잘 알려져 있지 않다.

울릉읍 도동리 저동천 상류부근의 기존공을 대상으로 양수시험을 수행한 결과에 따르면 암반층 대수층은 투수계수가 낮으며, 상부 층적층은 높은 투수계수를 가진다(Kim et al., 2005a, 2005b). 이들 연구 외에 아직까지는 울릉도의 지하수의 고유한 수질특성이나, 대수층의 발달상황, 지하수유동 등과 같은 실제적인 수리지질학적 연구는 거의 전무한 상태이다. 이의 원인으로는 접근성, 지리적 한계로 인해 다양한 지질학적 연구가 부족하였으며, 이로 인해 수리지질학적 조사도 상당히 부진하였기 때문이다. 또한 약 1만명의 현지 주민들은 비교적 풍부한 물공급을 받는 환경에서 생활하기 때문에 절실하게 지하수를 개발할 필요성이 없었다. 그러나 최근 들어 울릉도 입도객은 연간 30만 명 이상으로 급증하였으며, 이에 따라서 향후 물수요가 급증할 것으로 예상된다.

이 연구의 목적은 울릉도 북면에 소재하는 자분샘인 추산 용출소를 대상으로 지하수의 수질특성을 규명하고, 이를 통하여 울릉도 나리분지 일대의 대수층의 발달특징을 고찰하는데 있다. 현재 울릉도는 용출소의 풍부한 수량과 수질특성을 활용하여 다양한 용도개발을 모색하고 있는 중이다.

지질 및 수리지질학적 배경

울릉도는 동해의 울릉분지 북측에 위치하며, 수심 약 2,000 m의 해저에서 형성된 화산섬으로서 여러 번의 화산활동이 중첩된 복성화산체(composite volcano)를 이루고 있다. 울릉도 중앙 북부의 해발 350~400 m 지점에는 직경 약 2 km인 나리분지가 발달하는데, 칼데라의 외륜산인 성인봉(984 m)을 비롯한 준봉들이 급경사를 이루면서 이를 둘러싸고 있는 형태이다. 현재까지 수행된 암석학적 연구결과에 따르면, 울릉도는 신생대 플라이스토세($2.7 \pm 0.9 \sim 1.37 \pm 0.97$ Ma)에서 홀로세($1.4 \sim 0.01$ Ma) 동안 주로 형성되었으며(Kim, 1985; Min et al., 1988; Kim et al., 1999), 최후기의 화산활동은 9,300~6,300년 BP로 나타났다(Arai et al., 1981; Machida et al., 1984). 울릉도 화산암들은 중성 내지 산성 조성을 갖는 알칼리 계열로 구성되는데, 분출시기별로 다양한 화학 조성을 보이지만, 일련의 마그마 결정분화 작용을 겪으면서 형성되었다(Kim and Lee, 1983; Song et al., 1999; Kim and Lee, 2008). 해수면위 노출되어 있는 울릉도를 기준으로 보면, 하부 화산암류에 해당하는 현무암질암류의 연대는 $2.7 \pm 0.9 \sim 1.37 \pm 0.05$ Ma이며(Kim and Lee, 1983; Min et al., 1988; Kim et al., 1999; Song et al., 2006), 울릉도 화산활동 최후기 단계인 부석질 테프라층 속에 포함되어 있는 탄화목과 퇴적물의 연대는 19-5.6 ka BP 범위로 나타났다(Okuno et al., 2010; Im et al., 2012; Kim et al., 2014; Im and Choo, 2015). 특히 탄화목의 수종은 가문비 나무로 확인된 바 있는데, 이는 그 당시의 울릉도의 기후는 현재보다 한랭한 조건이었음을 의미한다(Im and Choo, 2015).

최근 작성된 한국지질도 울릉도 도폭설명서에 의하면(Hwang et al., 2012), 울릉도의 광역적인 화산층서는 화산유희 혹은 부정합을 기준으로 4개의 층군, 즉 현무암질암류, 울릉층군, 성인봉층군, 나리층군 순으로 발달한다. 지질개요를 보면, 하부로부터 현무암질 집괴암, 응회암 및 용암류가 해안저지대에 분포하고, 그 위를 조면암질 집괴암, 용암류 및 응회암 층이 피복하고 있다. 조면암 및 포놀라이트 암체가 급경사의 산체를 이루며 이들을 부정합으로 덮고 있는데, 해안일대에 분포하는 조면암질암은 급사면을 이루어 낙석의 위험성이 높다(Seo et al., 2013). 후기에는 플리니언 분출(Plinian eruption)의 산물인 부석(pumice)과 응회암, 라필리(lapilli)와 같은 화산쇄설물이 대부분의 울릉도 최상부의 지형을 피복하고 있으며, 나리칼데라 내부에서 최후기 화산활동으로 인해 이중 화산체의 일종인 조면안산암질 용암돔인 알봉이 형성되었다. 그 외에 칼데라내 퇴적층, 그리고 이들을 부정합으로 덮는 충적층인 해안퇴적층 및 급사면의 테일러스로 구성된다.

후기에는 화산체의 중심화도가 함몰되면서 나리칼데라가 형성되었으며, 이 칼데라에는 부석, 화산회, 조면암편, 포놀라이트 암편 등이 퇴적되어 칼데라 퇴적층이 형성되었다. 알봉분지 북서쪽 계곡상단에서 칼데라호수 퇴적층이 잘 관찰되는데, 수평층의 부석질 엽층(pumiceous lamina)이 특징적이다. 이 퇴적층에는 간간히 조면암질, 현무암질 각력이 함유되어 있으며, 얇은 퇴적층을 교란하고 있다. 칼데라퇴적층 형성 이후, 울릉도 화산활동의 최후기 동안 조면안산암이 분출하면서 칼데라 북서편에 알봉 용암돔이 형성되었다. 알봉 조면안산암은 암회색 내지 회색을 띠며, 기질이 우세하나 간혹 반상조직이 관찰되며, 육안상 반정으로는 조립질 휘석과 알칼리장석을 포함한다. 주 구성광물은 미립의 사장석 래스 및 불투명 광물이며, 다양한 크기의 장석, 휘석, 흑운모 반정도 관찰되며, 사장석의 누대조직 및 래스는 유동구조를 흔히 보여준다. 이 조면안산암질 내에는 부석편도 산재되어 있어(Kim and Lee, 2008), 알봉은 이러한 부석형성 후기임을 예상할 수 있다.

염영기복도(Fig. 1) 및 수치지형도(Fig. 2)에서 보듯이, 이 일대의 수계는 나리분지 외륜의 성인봉 일대를 중심으로 남측의 칼데라 계곡으로부터 발원하여 북향한다. 현장조사에 의하면 신령수를 지나면서 외관상의 하천은 완전히 소멸되며, 나리분지 서편에 위치하는 남북방향의 단층대를 따라 발달한 계곡에서부터 비교적 수량이 풍부한 하천이 갑자기 출현한다. 추산 용출소는 계곡의 동편에 위치하나, 이러한 지표수계와는 완전히 격리되어 있다. 주요 수계는 알봉의 서편의 단층대를 따라 통과하며, 용출소는 알봉의 북편의 급사면 절까지 하단부에서 자분정으로 발달한다(Fig. 3). 알봉돔 일대의 관입암물대, 칼데라 주변부를 따라 발달하는 수많은 단열구조는 주요 지표수계 및 용출소를 형성하는 데 훌륭한 지하수 유

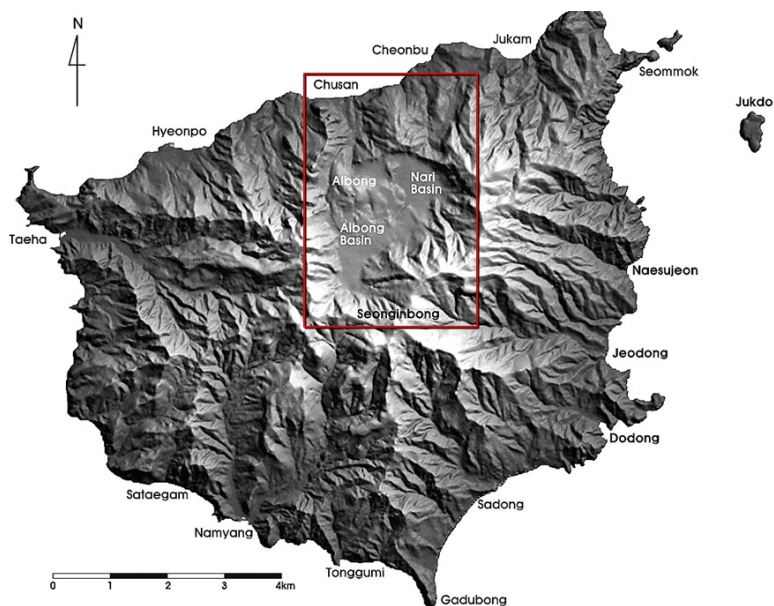


Fig. 1. Shaded relief topographic map showing the study area location (rectangular box) in the northwestern part of the Nari caldera (modified after Kim and Lee, 2008).

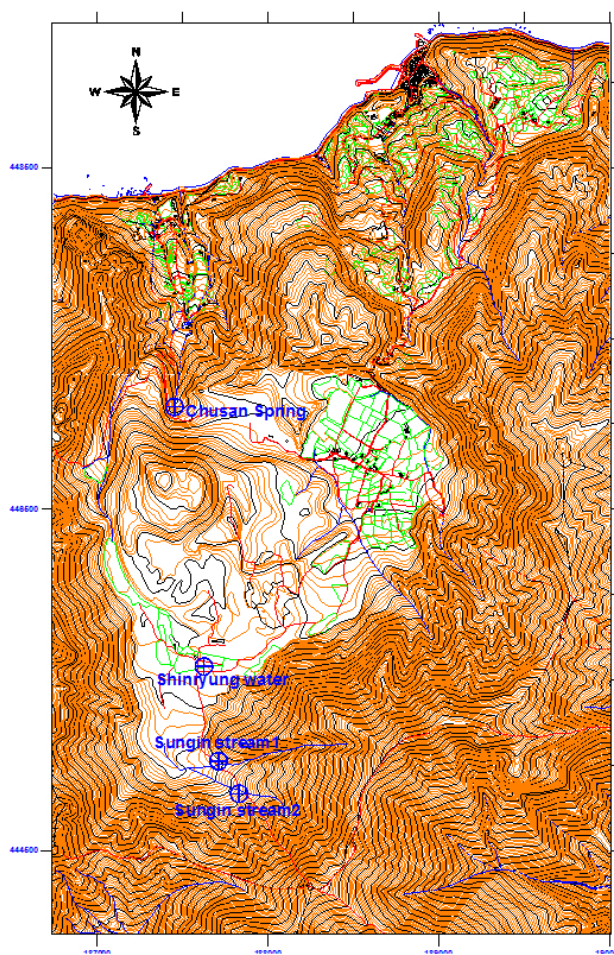


Fig. 2. Topographic map of the Nari caldera area, northern Ulleung Island, showing the sampling sites.

동통로의 역할을 하는 것으로 볼 수 있다.

본 조사지역 상류구배 지역에 위치하는 나리분지는 1.5~2 km²의 평지로서 용출소의 지하수 함양에 가장 중요한 곳이다. 나리분지는 평균 900 m 내외의 여러 외륜산의 산록으로부터 유입된 강우가 집수되는 곳으로서 투수성이 높은 부석, 응회암 등의 화산쇄설물을 지표수가 통과하여 빠르게 대수층으로 함양될 수 있다. 나리분지의 남측, 남동측 외륜부에는 계곡이 다수 발달하여 하천수가 관찰되지만, 나리분지 중심부서는 수계가 전혀 발달하지 않으며, 지표수도 관찰되지 않는다.

추산 용출소는 절단된 급사면의 바닥에서부터 지하수가 자분하는 일종의 샘(spring)의 형태인데, 외부에서부터 직접 유입되는 수계는 없으므로 지하수로 간주할 수 있다. 즉 용출소는 지하수가 피압 상태에 위치하여 수두(hydraulic potential)가 충분히 높을 때, 지하수면이 급사면, 또는 단층에 의하여 갑자기 지표에 노출되어 지하수가 자분정의 형태로 지표로 솟아나게 된 경우에 해당한다. 용출소 일대의 지질은 울릉도의 최상부층인 부석질의 라펠리 응회암층으로 이루어져 있다.



Fig. 3. The dam constructed at Yongchulso Spring.

연구방법

시료채취 및 분석

시료채취는 추산 용출소, 나리분지, 외륜산 사면의 계곡 일대를 대상으로 2010년 5월 16일부터 2011년 3월 5일까지 수행 이루어 졌으며, 지표수와 지하수의 물리화학적 특성과 화학분석을 수행하였다. 용출소 바닥으로부터 자분하는 물시료와 용출소에서 배출되는 물을 채취하여 용출소의 평균적인 수질특성을 분석하였다. 또한 추산 용출소 및 주변 하천수와 수질 비교를 위하여 성인계곡 및 신령수의 현장수질을 측정하였다(Table 1). 이를 위하여 나리분지 남서측에 위치하는 상류구배 지역, 즉 나리칼데라로 유입되는 성인계곡 지표수와 약수터인 신령수의 물도 채취하여 수질비교를 하였다. 주요 양이온 및 음이온 분석을 위하여 0.45 μm 멤브레인 필터(membrane filter)를 이용하여 여과 후 각 1 리터씩 채취하였으며, 양이온 시료의 경우는 농질산(conc. HNO₃)을 첨가하여 pH를 2 이하로 산 처리를 한 후에, 분석 전까지 4°C에서 냉장 보관하였다.

수질분석은 13개의 주요 성분 K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, SiO₂, CO₃²⁻, HCO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, F⁻, NO₃⁻, As, Fe^{TOTAL}을 대상으로 수행되었다. 양이온 중에 Na, K, Fe은 원자흡수분광광도계(AAS)를 이용하여 분석하였으며, Ca, Mg, SiO₂는 유도결합플라즈마 원자방출분광광도계(ICP-AES, Jobin-Yvon Geoplasma Model BJY-70 plus)를 사용하였다. 음이온분석은 이온 크로마토그래피(Ion Chromatography, Dionex DX-300)를 사용하였으며, 분석한계치는 0.05 ppm이다.

Table 1. Spring water and stream water of northern Ulleung Island. CS: Chusan Spring, SY: Silyungsu, SV: Sungin Valley stream(*). The unit of chemical component concentrations is mg/L unless otherwise noted.

	CS1	CS1	CS2	CS2	CS2	CS2	CS3	CS3	SYS	SV1*	SV2*
Date	10/22/2010	03/05/2011	05/16/2010	07/15/2010	08/21/2010	12/18/2010	10/22/2010	03/05/2011	08/24/2010	10/22/2010	10/22/2010
T (°C)	10.2	10.2	10.0	10.1	10.4	10.0	12.1	10.7	8.9	10.4	10.4
pH	8.13	6.86	8.17	8.17	8.30	8.38	8.30	8.27	8.21	8.28	8.31
EC (μS/cm)	172	171	172	178	171	171	427	333	95	100	105
Eh (mV)	201	212	119	170	197	194	191	242	214	176	195
DO	7.20	8.90	9.42	8.03	6.80	9.16	4.62	10.51	1.80	5.41	1.98
K	11.60	10.9	13.00	13.00	11.40	10.80	9.11	7.87	2.92	2.70	5.76
Na	27.20	28.4	27.40	26.70	26.2	27.20	75.1	63.0	11.9	12.40	12.30
Ca	0.84	0.84	0.85	0.75	0.75	0.88	9.22	6.84	1.68	1.50	2.19
Mg	0.56	0.64	0.52	0.51	0.52	0.68	1.72	1.38	0.76	0.75	0.93
SiO ₂	29.10	32.10	32.90	32.70	28.70	32.70	33.20	35.30	21.0	22.2	32.50
F	0.64	0.69	0.68	0.72	0.64	0.65	1.40	1.40	0.08	0.09	0.10
Cl	13.30	14.50	14.00	13.30	13.4	14.60	15.70	16.70	11.50	11.50	9.80
NO ₃	0.87	0.67	0.82	0.88	0.75	0.75	0.77	0.63	0.32	0.12	0.51
SO ₄	6.02	6.38	5.95	5.89	5.92	6.40	6.12	6.08	4.04	4.11	4.26
HCO ₃	61.0	62.5	57.4	56.4	56.4	61.8	205.9	158.6	21.4	20.7	30.5

현장수질 측정 및 성분 분석

지하수와 지표수의 온도, 수소이온농도(pH), 산화환원전위(oxidation reduction potential, Eh), 전기전도도(electric conductivity, EC), 용존산소량(dissolved oxygen, DO) 등은 수질이 충분히 안정된 후에, 현장 수질측정기인 SK1250MC, HM-12P TOA, RM-20P TOA, CM-14P TOA, KDO-5151 KRK를 각각 이용하여 측정하였다. 알칼리도(alkalinity)의 중탄산(HCO₃⁻) 및 탄산염(CO₃²⁻)은 현장에서 적정하여 측정하였다.

요인분석

본 연구에서는 수질분석치를 대상으로 상관행렬(correlation matrix)에 의한 상관계수 및 요인분석(factor analysis)을 수행하였다. 요인분석(factor analysis)은 변수들 간의 상관관계(interdependence)를 이용하여 서로 유사한 변수들끼리 묶어 주는 방법이다. 요인분석의 장점으로는 여러 개의 변수를 몇 개의 공통된 집단(요인)으로 묶어줌으로써 자료의 복잡성을 줄이고 몇 개의 요인은 정보를 요약하는데 이용될 수 있다. 요인분석은 서로 상관되는 변수들 사이의 복잡한 구조를 행렬로 나타내어 행렬의 조작을 통하여 주요 변수들 간의 변동성과 주요 인자들을 추출한다. 요인추출시 1이상의 고유값(eigenvalue)을 선택하고, Varimax 직각회전방식을 이용한다. Varimax 직각회전방식은 각 요인(factor)에 대하여 요인적재(factor loading)의 분산을 최대화하도록 요인들을 직교변환하는 방식이다. 이는 하나의 요인에 높이 적재되는 변수의 수를 줄여서 요인의 해석에 중점을 준 방식이다. 본 조사에서는 주요 성분들 간의 상관계수를 구하였으며, 공통성을 추출한 다음에 요인적재값을 구하였으며, 요인을 추출하고, 회전공간에 나타내었다.

결과

수질특성

전체적으로 보면 울릉도 용출소와 계곡수 간에는 수질특성이 상이함을 알 수 있다. 계곡수 또는 천부지하수에 속하는 성인봉 계곡수의 경우 수질특성은 측정지점에 따라서 Si, 중탄산, K와 같은 일부 수질항목에서 약간의 차이를 보이지만, 수질의 특성은 거의 동일한 수준으로 보아도 무방하다(Table 1). 이들은 성인봉을 중심으로 나리분지 방향으로 유하하는 경로에 놓여 있는데 비교적 경사가 급하고 공극률이 높은 화산암으로 구성되어 있는 지질특성상 빠르게 유동하면서 충분한 물-암석반응을 겪지 않았기 때문으로 보인다.

신령수의 경우 천부지하수의 지하수면이 노출되거나 거의 지표면하 계곡에 해당되는데 성인봉 계곡수와 크게 다르지 않은 수질특성을 보여준다. 따라서 성인봉 계곡수와 신령수는 비슷한 천부지하수의 특성을 가진다고 볼 수 있다. 이에 반하여 용출소는 상기한 천부지하수와는 상당히 다른 수질특성을 보여준다. 용출소1, 용출소2는 거의 동일한 지점에 놓이는데 이들의 수질특성도 상당히 유사하여 이들은 동일한 대수층으로부터 기원한 것임을 알 수 있다.

그런데 지표하 천부의 화산쇄설층을 따라 흐르는 용출소3의 경우 인접한 용출소1, 2와는 상이한 수질특성을 보여준다. 용출소3은 EC가 333~427로써 타 시료에 비하여 3~4배 높을 뿐만 아니라, Na, Ca, Mg, F, Cl, HCO₃도 상대적으로 높은 함량을 보인다. 특히 Na, Ca, Mg, HCO₃의 함량은 타 시료에 비하여 최대 수배까지 높다. 용출소3은 용출소 인근 상류의 표토층 및 화산쇄설층에서 유래하는데 이는 용출소 1, 2의 지질이 부석질 응회암층인 것과 차이가 있다. 따라서 표토층인 미고결된 화산쇄설물의 재퇴적층이나 천부의 화산쇄설층을 통과하면서 형성된 용출소3의 수질은 여타 지역 시료와는 차별적인 특성을 가지는 것으로 해석된다.

용출소의 수온은 10.0~10.4°C 범위를 보이며 평균 10.2°C를 나타낸다. 수온은 5월 및 12월이 가장 낮은 10.0°C를 보이며 8월에 10.4°C로 가장 높은 온도를 보이거나 대체로 연중 일정한 편이다. 반면 유출수(용출소3)는 2010년 10월에 12.1, 2011년 3월에 10.7°C로 기후에 변화에 따라 수온변화가 심하다.

성인계곡1, 2, 3은 2010년 10월에 측정하였는데 9.5~10.4°C를 보이며 성인계곡3이 최상류 계곡인 것을 감안하면 상류가 낮은 온도를 보인다. 신령수는 2010년 8월과 10월에 각각 측정하였는데 15.0°C, 8.9°C로 기후에 변화에 따라 수온변화가 심하여 수온이 기후에 직접적으로 영향을 받는 것으로 나타난다.

수소이온농도(pH)는 용출소에서 6.86~8.38의 범위를 보이며 평균 8.0을 나타내어 약알칼리를 나타낸다. pH는 3월이 가장 낮은 6.86이며 12월이 가장 높은 8.38을 보인다. 유출수(용출소3) 및 성인계곡, 신령수는 8.21~8.31로 약알칼리를 나타낸다.

전기전도도(EC)는 용출소에서 7월이 가장 높은 178 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 를 보인다. 유출수(용출소3)은 2010년 10월에 427 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 2011년 3월에 333 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 를 보여 용출소1보다 용존염류의 양이 2배 이상이다. 성인계곡 및 신령수는 95~105 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 를 보여 가장 낮은 염류 농도를 보인다.

산화환원전위(Eh)는 용출소에서 119~212 mV의 범위를 보이며, 평균 182 mV를 나타낸다. 5월이 가장 낮은 119 mV를 보이며 3월이 212 mV로 가장 높은 값을 보인다. 용출소3 및 성인계곡, 신령수 모두 176~242 mV이다. 금변에 조사된 시료들은 모두 전형적인 지하수 범위 내지 전이환경에 속함을 보여준다.

용존산소(DO)는 용출소에서 7.20~9.42 mg/L의 범위를 보이며 평균 8.30 mg/L를 나타내어, 대부분 용존산소가 포화된 것으로 나타난다. 용출소3은 2010년 10월에 4.60 mg/L, 2011년 3월에 10.51 mg/L를 보여 용존산소 농도의 변화가 심하며, 2010년 10월에 측정된 성인계곡1은 5.41 mg/L, 성인계곡2는 1.98 mg/L를 보여 상당히 낮은 값을 보인다. 신령수는

2010년 8월에 7.0 mg/L를 보였으나 2010년 10월에 1.80 mg/L로 매우 낮은 값을 나타내었다. 이는 상류에서 배출되는 천부지하수나, 계곡수는 산소의 용해가 조금 밖에 이루어 지지 않은 상태를 나타내는 것으로서, 대수층으로부터 급히 배출되는 것으로 보인다. 용출소의 경우 다공질인 천부 대수층을 통과하면서 산소와 충분히 반응한 것으로 보인다. 그러나 채취시기별 편차가 심하게 나타난다.

K의 농도범위는 용출소에서 10.80~13.00 mg/L를 보이며 평균 11.78 mg/L를 나타낸다. 2010년 12월에 10.80 mg/L로 가장 낮은 농도를 보이며 2010년 5월 및 7월에 가장 높은 농도인 13.00 mg/L을 나타낸다. 유입 지표수(용출소3)에서는 7.87~9.11 mg/L로 보다 낮은 값을 보여 차별화된다. 성인계곡1, 2에서는 2.70, 5.76 mg/L으로, 신령수에서는 2.92 mg/L로 나타나 계곡수의 위치에 따라 K의 농도 변화가 심하게 나타난다.

Na의 농도범위는 용출소에서 26.20~28.40 mg/L를 보이며 평균 27.18 mg/L로 년중 거의 일정하다. 2010년 8월에 26.20 mg/L로 가장 낮은 농도를 보이며, 2011년 3월에 가장 높은 농도인 28.40 mg/L을 나타낸다. 유입 지표수(용출소3)에서는 63.10~75.10 mg/L로 훨씬 높은 농도를 보여 용출소1과 완전히 구분된다. 성인계곡1, 2에서는 12.30~12.40 mg/L로 유사하나, 신령수는 11.90 mg/L로 나타나 계곡수의 위치에 따라 Na의 농도 변화가 있음을 보여준다. Na의 평균농도는 신령수 11.90 mg/L, 성인계곡 12.35 mg/L, 용출소가 27.18 mg/L, 용출소3이 69.05 mg/L로 가장 높은 농도를 보인다.

Ca의 농도범위는 용출소에서 0.75~0.88 mg/L를 보이며 평균 0.82 mg/L로 년중 일정한 농도를 보인다. 2010년 7, 8월에 0.75 mg/L로 가장 낮은 농도를 보이며, 2010년 12월에 가장 높은 농도인 0.88 mg/L을 나타낸다. 유입지표수(용출소3)에서는 6.84~9.22 mg/L로 훨씬 높은 농도를 보여 용출소1과 완전히 차별화된다. 성인계곡1, 2에서는 1.50~2.19 mg/L의 범위를 보이며 신령수는 1.68 mg/L로 나타나, 계곡수의 위치에 따라 Ca의 농도 변화가 있다. Ca의 평균농도는 용출수 0.82 mg/L, 신령수 1.68 mg/L, 성인계곡 2.03 mg/L, 용출소3이 8.03 mg/L 순으로 높은 농도를 보인다.

Mg의 농도 범위는 용출소에서 0.51~0.68 mg/L의 낮은 농도 범위를 보이며 평균 0.57 mg/L로 년중 거의 일정한 농도를 보인다. 2010년 7월에 0.51 mg/L로 가장 낮은 농도를 보이며 2010년 12월에 가장 높은 농도인 0.68 mg/L을 나타낸다. 유입지표수(용출소3)에서는 1.38~1.72 mg/L로 높은 농도를 보여 용출소1과 차별화된다. 성인계곡1, 2에서는 0.75~0.93 mg/L의 범위를 보이며 신령수는 0.76 mg/L로 계곡수의 위치에 따라 Mg의 농도 변화를 보인다. Mg의 평균농도는 용출수 0.57 mg/L, 신령수 0.76 mg/L, 성인계곡 0.84 mg/L, 용출소3이 1.55 mg/L 순으로 높은 농도를 보인다.

용출소에서 Cl의 농도 범위는 13.30~14.60 mg/L의 농도 범위를 보이며 평균 13.85 mg/L로 년중 거의 일정한 농도를 보인다. 2010년 7월, 10월에 13.30 mg/L로 가장 낮은 농도를 보이며 2010년 12월에 가장 높은 농도인 14.60 mg/L을 나타낸다. 유입지표수(용출소3)에서는 15.70~16.70 mg/L로 높은 농도를 보여 용출소1과 유사하다. 성인계곡1, 2에서는 9.78~11.50 mg/L의 범위를 보이며 신령수는 11.50 mg/L로 유사한 Cl의 농도변화를 보인다. Cl의 평균농도는 성인계곡 10.64 mg/L, 신령수 11.50 mg/L, 용출소1이 13.85 mg/L, 유출수(용출소3) 16.20 mg/L 순으로 높은 농도를 보인다.

용출소에서 SO₄의 농도범위는 5.89~6.40 mg/L를 보이며 평균 6.09 mg/L로 년중 거의 일정한 농도를 보인다. 2010년 7월에 5.89 mg/L로 가장 낮은 농도를 보이며 2010년 12월에 가장 높은 농도인 6.40 mg/L을 나타낸다. 유입지표수(용출소3)에서는 6.08~6.12 mg/L로 높은 농도를 보여 용출소1과 유사하다. 성인계곡1, 2에서는 4.11~4.26 mg/L의 범위를 보이며 신령수는 4.04 mg/L로 가장 낮은 농도의 SO₄농도를 보인다. SO₄의 평균농도는 신령수 4.04 mg/L, 성인계곡 4.18 mg/L, 용출소1이 6.09 mg/L, 유출수(용출소3) 6.40 mg/L 순으로 높은 농도를 보인다. 즉 지표수나, 천부지하수에 비하여 용출소에서 약간 더 높게 나타난다.

용출소에서 F의 농도 위는 0.64~0.72 mg/L를 보이며 평균 0.67 mg/L로 년중 거의 일정한 농도를 보인다. 2010년 8, 10월에 0.64 mg/L로 가장 낮은 농도를 보이며 2010년 7월에 가장 높은 농도인 0.72 mg/L을 나타낸다. 유출수(용출소3)에서

는 1.40 mg/L로 높은 농도를 보여 용출소 1과 차별화된다. 성인계곡1, 2에서는 0.09~0.10 mg/L의 범위를 보이며 신령수는 0.08 mg/L으로 가장 낮은 농도의 불소농도를 보인다. F의 평균농도는 신령수 0.08 mg/L, 성인계곡 0.09 mg/L, 용출소 1이 0.67 mg/L, 유출수(용출소3) 1.40 mg/L순으로 높은 농도를 보인다. 용출소에서 불소의 함량이 약간 더 높게 나타나는데, 이는 황산이온의 경우와도 경향성이 유사하다.

질산성 질소는 0.12~0.88 mg/L의 범위를 보이는데, 용출소가 약간 더 높게 나타난다. 그러나 전체적으로 음용수 수질 기준에는 적합한 수질을 보인다. 중탄산은 용출소에서 훨씬 높게 나타나는데, 이는 56.4~205.9 mg/L의 범위를 보여 계절별 편차가 심하다.

수질유형과 이온균형

울릉도의 수질유형을 파이프(Piper)다이아그램에 의해 구분하면 용출소2 및 유출수(용출소3)은 Na-HCO₃ 형이며, 성인1 및 신령수, 성인2는 Na-HCO₃ 형과 Na-Cl형의 경계에 놓인다(Fig. 4). 본 조사 지하수의 가장 특징적인 현상은 심부화성암류에서나 흔히 관찰되는 것과 유사한 Na-HCO₃라는 사실이다. 그러나 용출소3을 제외하면 EC는 일반적인 국내 천부 지하수 내지 중간 심도의 암반지하수의 범위인 200 이하이며, 불소함량도 낮은 편이다.

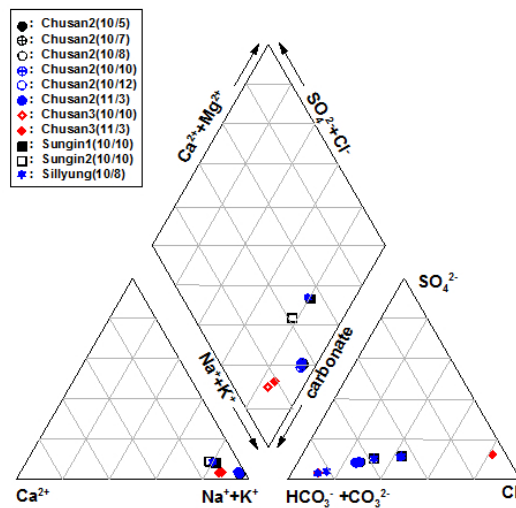


Fig. 4. Water types plotted on a Piper diagram.

스텝(Stiff)다이아그램은 이온전하 균형을 지하수의 주요 양이온과 음이온 성분을 당량으로 표시하여 지하수의 특징을 비교, 판단할 수 있게 도시하는 방법이다. Fig. 5는 스텝 다이아그램으로서, 성인계곡1, 2, 신령수에서 양이온은 Na+K가 가장 우세하며, Ca, Mg는 미량으로 산출되며 Fe는 전혀 검출되지 않는다. 음이온의 경우 성인계곡1과 신령수에서는 Cl과 HCO₃ 양이 비슷하여 일자형을 보이나, 성인계곡2의 경우 음이온인 HCO₃ 양이 상대적으로 많아 오른 쪽으로 배가 불룩한 형태를 보인다.

Fig. 6은 추산용출수의 2010년 5월부터 2011년 3월까지 6회의 분석결과를 스텝 다이아그램에 도시한 것이다. 양이온은 Na+K가 우세하며 음이온 HCO₃가 우세한 형을 보인다. 반면 양이온에서는 Ca, Mg순이며 Fe는 검출되지 않는다. 음이온에서는 Cl 및 NO₃ 순으로 검출된다. 이러한 유형은 2011년 3월까지 연속적으로 유사하게 나타나 년중 자연현상, 인위적 오염, 지질현상에 의해 수질 유형이 크게 변하지 않는다는 것을 보여준다. 지하수의 유형은 유문암 및 현무암에 Cl가 존

재하는 양으로 보아 해무의 영향이 전혀 없지는 않는 것으로 보인다. 유출수의 경우 2010년 10월 양이온은 Na+K가 우세하며 음이온에서는 HCO₃가 다른 이온보다 훨씬 우세한 형을 보인다(Fig. 7). 반면 양이온에서는 Ca, Mg가 미량으로 검출

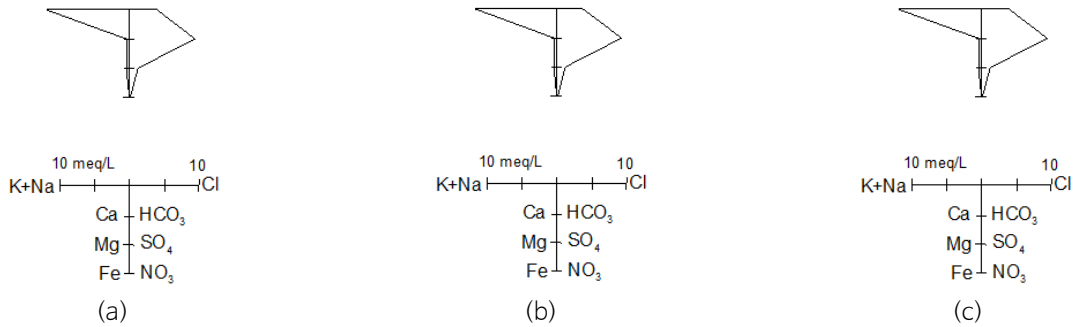


Fig. 5. Stiff diagrams of Sungin Valley and Sillyung Spring. (a) Sungin Valley 1 (October 2010). (b) Sungin Valley 2 (October 2010). (c) Sillyung Spring (August 2010).

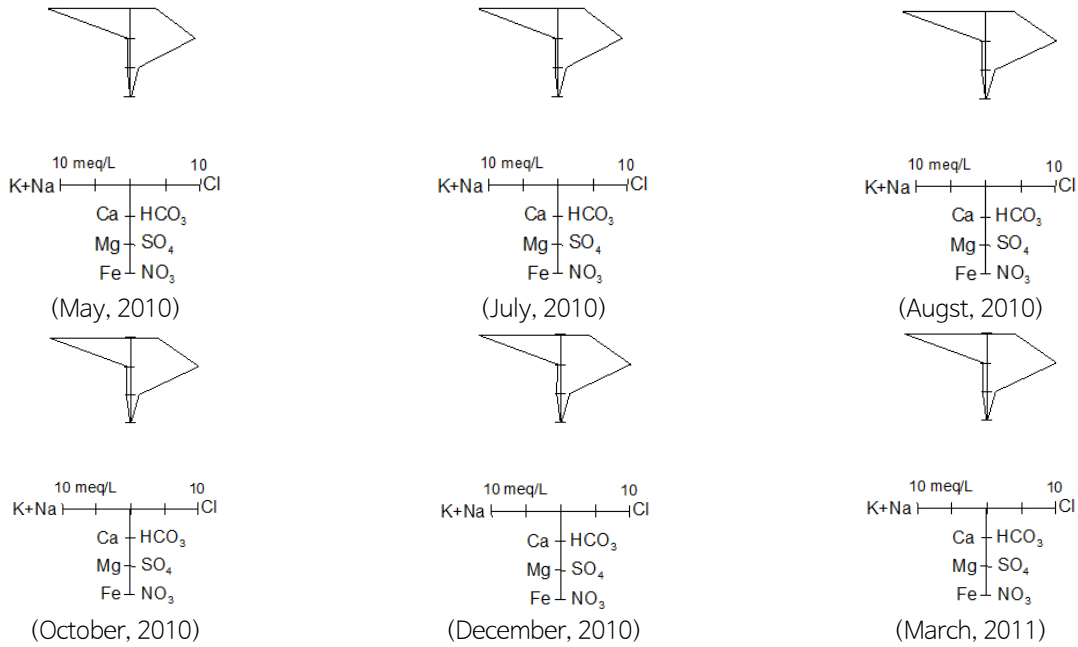


Fig. 6. Stiff diagrams for Yongchulso Spring 2 by season.

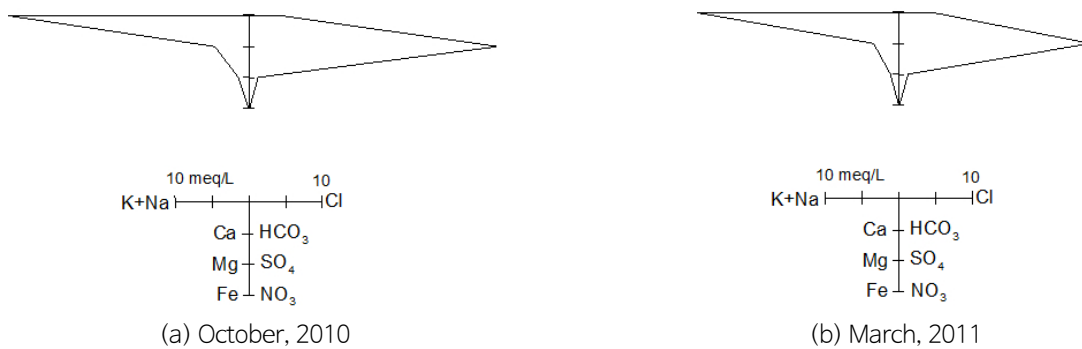


Fig. 7. Stiff diagrams for Yongchulso Spring 3 (discharge water) by season.

되며 Fe는 검출되지 않는다. 음이온에서는 Cl 및 NO₃ 순으로 검출된다. 이러한 유형은 2011년 3월에서도 유사하게 나타나 주변 지하수와 차별화된다.

수질항목간 상관성

본 조사에서 물-암석반응을 해석하기 위하여 주요 수질항목간의 상관성을 살펴보면 다음과 같다. Fig. 8에서 보듯이 EC는 가장 풍부한 성분인 HCO₃⁻, Na와 밀접한 관련성을 나타낸다. 서로 상관성이 있음을 지시하는 결정계수(coefficient of determination, R²)는 0.99이상으로서 거의 정비례하고 있음을 알 수 있다. 즉 중탄산의 결정계수는 0.994로서 전체 성분들 가운데서 가장 높은 상관성을 보여주며, Na도 0.993으로서 두 번째로 높은 상관성을 가진다. 이로 볼 때 이들 두 성분이 대부분의 용존이온의 총량에 상당한 영향력을 가진다고 할 수 있다.

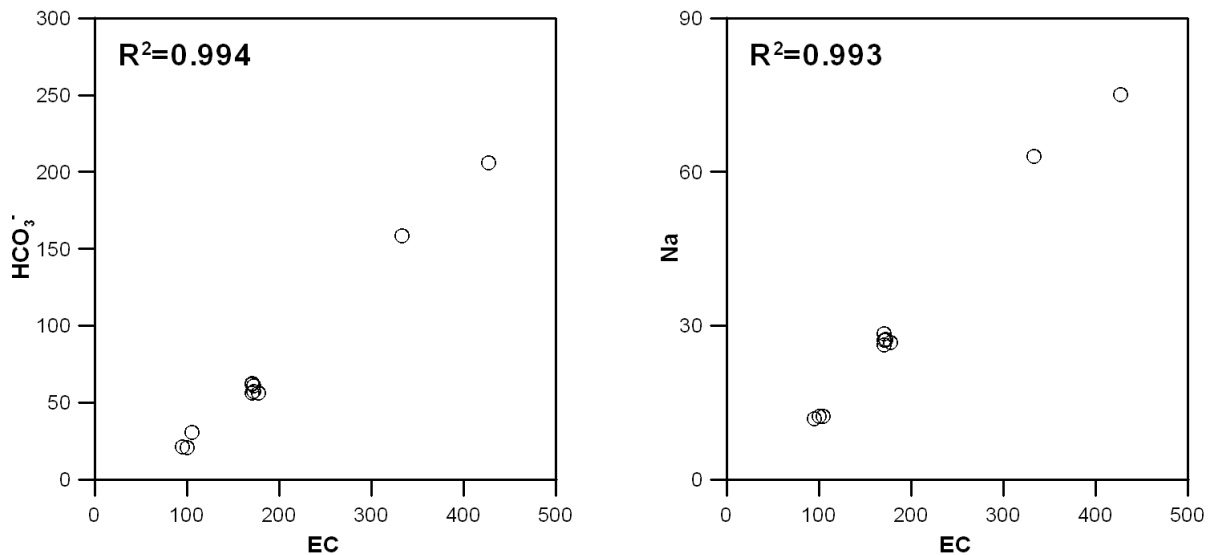


Fig. 8. Chemical relationships of HCO₃ and Na with EC.

Fig. 9는 HCO₃과 주요 알칼리성 양이온인 Na, Ca간의 상관성을 나타낸 것이다. Na와 HCO₃의 결정계수는 0.992로서 매우 높으며, Ca의 결정계수도 0.828로서 높은 수치를 보여준다. HCO₃이 높은 경우 일반적으로 Ca의 상관성이 Na보다 더 높지만 본 지하수의 경우 Na와 HCO₃는 Ca와 HCO₃보다 더 밀접한 관련성이 있음을 보여준다. 이는 파이퍼 다이어그램 수질유형에서도 밝혀진 바와 같이 본 조사지역 수질유형은 Na-HCO₃형인 사실에 잘 부합한다. 그럼에도 Ca도 어느 정도 HCO₃와 관련되어 있으므로 Na 다음으로 중요한 알칼리 성분으로 작용하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 가장 풍부한 알칼리 성분인 Na에 대하여 Ca와 K를 비교한 것이다. Na는 Ca와는 높은 상관성이 있음을 보이나, K와는 상관성이 많이 떨어짐을 보여준다. Na가 Ca와 비례하는 것은 장석질의 용해작용과 관련되는 것으로 볼 수 있다. 그렇지만 용출수3을 제외한다면 이들 두 성분간의 상관성은 매우 낮거나, 약간 역비례 함을 보인다. K의 경우 용출수3을 제외한다면 비교적 Na와 상관성이 있음을 보인다. 이는 본 지역에 풍부하게 분포하는 화산쇄설암과 화산암류에 특징적으로 함유되어 있는 알칼리 장석류의 용해작용과 밀접히 관련되어 있음을 지시한다.

본 역에서 불소는 용출수3에서 높게 나타난다. 불소는 Fig. 11에서처럼 Cl과는 높은 상관성이 있음을 보인다. 그리고 Ca, SO₄와도 비교적 의미있는 관련성이 있다.

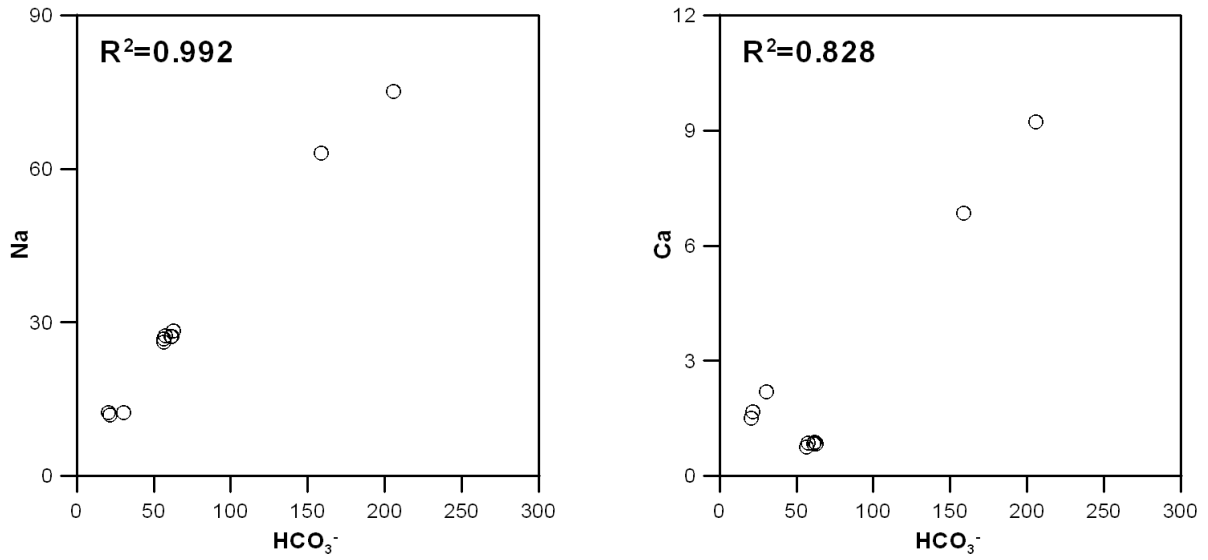


Fig. 9. Chemical relationships of Na and Ca with HCO_3^- .

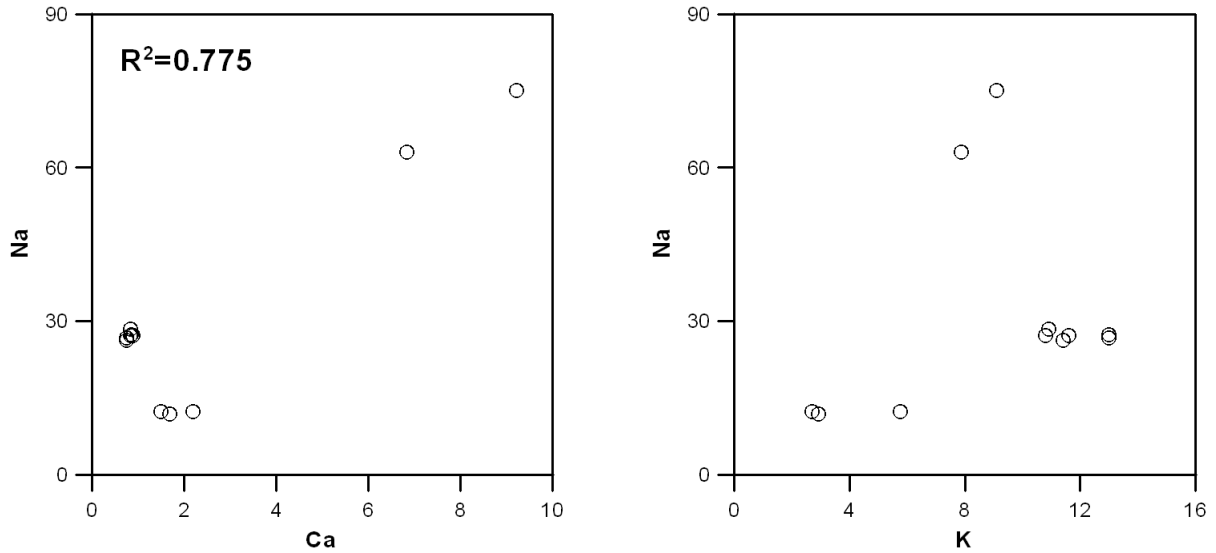


Fig. 10. Chemical relationships of Ca and K with Na.

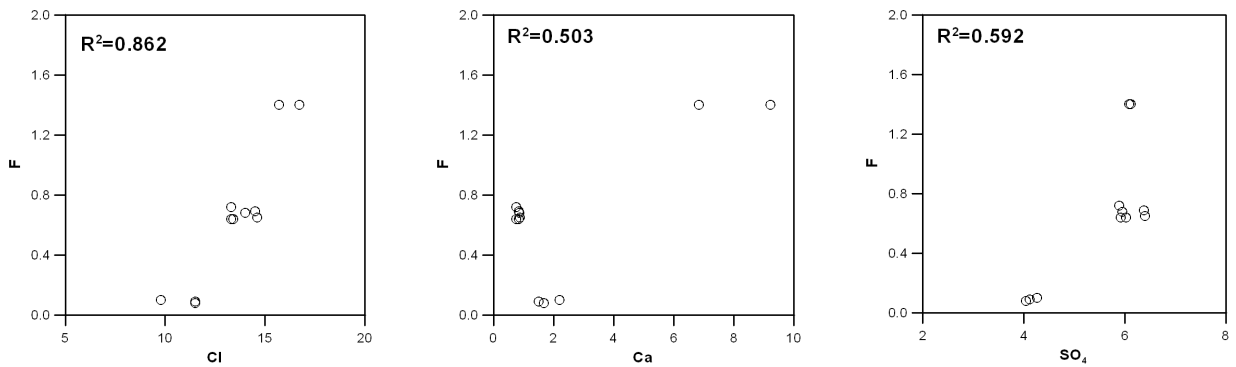


Fig. 11. Chemical relationships of Cl, Ca, and SO_4 with F.

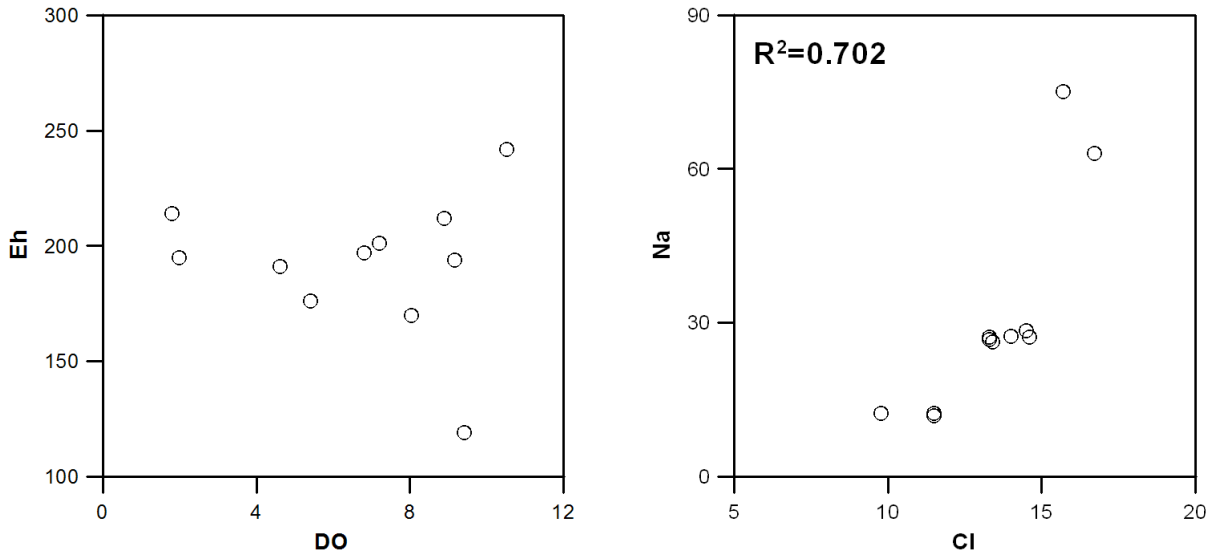


Fig. 12. Chemical relationships of Eh with DO and of Na with Cl.

한편 DO와 Eh간에는 상관성은 거의 없는 것으로 나타나며, Na와 Cl은 상관성이 높음을 알 수 있다(Fig. 12). 특히 울릉도 조사대상 시료 전반에 걸쳐 Na 함량은 국내 타 지하수에 비하여 높은 편인데, 용출소 3에서 가장 높다.

상관성 분석

지하수와 계곡수를 포함한 전체시료를 대상으로 주요 성분들 간의 상관계수를 SPSS를 이용하여 계산하였다(Table 2). EC과 상관성이 높은 성분은 HCO₃와 Na를 비롯하여 F, Ca, Mg, Cl, SiO₂, SO₄ 등이 있다.

Table 2. Correlation matrix of physicochemical components

	EC	Eh	DO	K	Na	Ca	Mg	SiO ₂	F	Cl	NO ₃	SO ₄	HCO ₃	pH
EC	1.000													
Eh	0.220	1.000												
DO	0.291	-0.090	1.000											
K	0.264	-0.348	0.680	1.000										
Na	0.996	0.257	0.339	0.261	1.000									
Ca	0.887	0.344	-0.072	-0.187	0.880	1.000								
Mg	0.808	0.397	-0.173	-0.308	0.802	0.982	1.000							
SiO ₂	0.578	-0.029	0.569	0.667	0.587	0.341	0.295	1.000						
F	0.941	0.202	0.570	0.496	0.955	0.709	0.602	0.704	1.000					
Cl	0.806	0.199	0.741	0.508	0.838	0.526	0.421	0.592	0.929	1.000				
NO ₃	0.422	-0.198	0.539	0.945	0.413	0.020	-0.095	0.731	0.601	0.537	1.000			
SO ₄	0.567	-0.001	0.797	0.864	0.582	0.141	0.036	0.726	0.770	0.834	0.846	1.000		
HCO ₃	0.997	0.269	0.263	0.213	0.996	0.910	0.843	0.573	0.928	0.792	0.381	0.535	1.000	
pH	0.090	-0.160	-0.259	-0.213	0.064	0.224	0.212	-0.108	-0.023	-0.155	-0.079	-0.289	0.086	1.000

물-암석반응을 민감하게 잘 반영하는 요소인 Eh와 pH는 어떤 성분과도 상관성이 별로 없는 것으로 나타났다. 이에 반해 DO는 SO₄와 Cl에 대하여 상관성이 높으며, F, SiO₂, NO₃ 등과도 비교적 상관성이 높다. 특히 DO가 질산성 질소와 비교적 상관성을 가지는 것은 낙엽, 표토의 유기물이 지표수에 함유되어 있어서 나타나는 것으로 볼 수 있지만, 실제 질산성 질소의 함량은 매우 낮다. K는 미량으로 함유되는 NO₃와 상관성이 매우 높으며, SO₄ 및 SiO₂와도 상관성이 높음을 보여준다.

Na는 EC와 마찬가지로 여러 성분들과 높은 상관계수를 보이는데, HCO₃, F와 상관성이 매우 높으며, Ca, Cl, Mg 등과도 상관성이 높으며, SO₄ 및 SiO₂와도 상관성이 비교적 높다.

Mg는 Ca, EC, Na, HCO₃와 상관성이 매우 높으며, F와도 상관성이 높다. F는 EC, Na와 상관성이 매우 높으며, HCO₃, SO₄와도 상관성이 높으며, 미량성분인 NO₃와도 상관성이 있음을 보여준다.

요인분석(Factor analysis)

공통성을 추출하고, 이를 토대로 적재값을 구하였다. 그런 다음에 가장 영향력이 높은 요인을 2개 추출하였다. Table 3에서 보듯이 요인 1의 영향력은 54%로 나타났으며, 요인 2의 경우 25.8%이다. 이들 요인, 1, 2에 의한 설명력은 약 80%수준으로 나타나 기타 다른 요인도 일부 존재할 가능성이 있다. 그럼에도 가장 영향력이 높은 요인 1, 2로써 수질간의 상관성을 대부분 해석하는 것이 바람직하다.

Table 3. Factor matrix extracted using principal component analysis

Variables	Factors		Communality
	1	2	
EC	0.937	0.314	0.976
Eh	0.181	0.457	0.242
DO	0.563	-0.619	0.700
K	0.528	-0.811	0.937
Na	0.947	0.304	0.989
Ca	0.698	0.701	0.980
Mg	0.604	0.774	0.964
SiO ₂	0.763	-0.315	0.681
F	0.992	0.030	0.985
Cl	0.916	-0.117	0.853
NO ₃	0.638	-0.626	0.799
SO ₄	0.798	-0.559	0.949
HCO ₃	0.926	0.361	0.988
pH	-0.047	0.354	0.127
Eigenvalue	7.563	3.606	
Percent of variance (%)	54.021	25.756	
Cumulative percent of variance (%)	54.021	79.777	

요인 1에 높은 적재량을 가지는 성분은 F, Na, EC, Cl, HCO₃, SO₄, SiO₂, Ca, NO₃, Mg 등이다. 이에 반해 pH, Eh는 적재값이 너무 낮아 영향력이 거의 없는 성분으로 판단된다. 요인 2에 대해 적재량이 높은 성분은 Mg, Ca이며, 음의 적재값

이 높은 성분은 K, NO₃, DO 등이다. 1이상의 고유치(eigenvalue)를 취하여 Varimax 직각회전방식으로 자료의 분산을 가장 잘 설명할 수 있는 방향으로 회전하여 요인 2개에 대하여 좌표로 도시하였다(Fig. 13). 서로 관련성이 높은 성분들은 비슷한 영역에 도시된다. 본 요인분석 결과 밀접한 거동을 하는 성분들은 EC, Na, HCO₃인데, 이들은 요인 1에 높은 적재값을 가지고 있다. 이들은 EC에 크게 기여하는 성분들로서 이 지역의 수질이 주로 Na-HCO₃인 유형인 것과 무관하지 않다. DO, NO₃도 조금 밀접한 관련성이 있으며, Ca와 Mg도 비슷한 거동을 하는 것으로 볼 수 있는데, 주로 요인 1에 크게 의존한다. 그 외 성분들은 서로 무관한 특성을 보여준다.

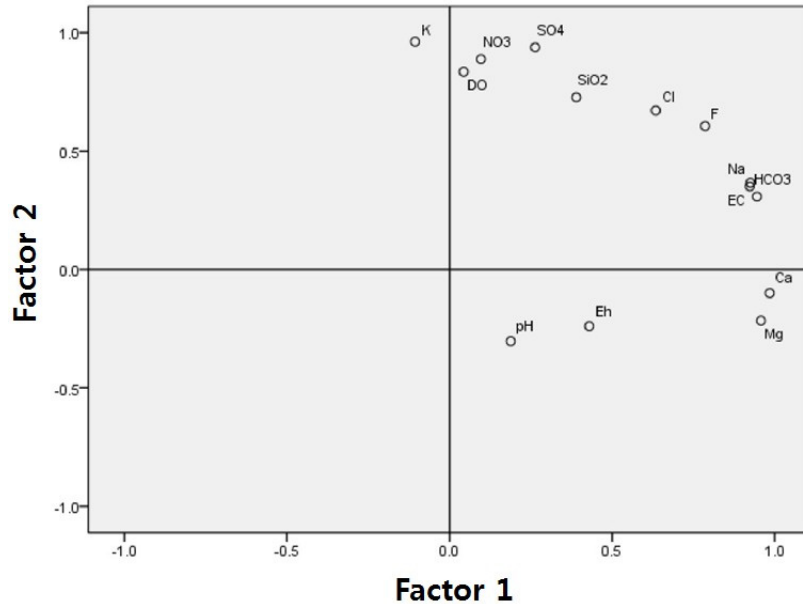


Fig. 13. Factor plot of the hydrochemical characteristics of Ulleung water.

토의

수질특성

대수층에서의 수질특성은 암질과 대수층에서의 지하수 체류시간, 물-암석반응의 정도와 관련된다. 지하수는 물-암석 반응을 겪으면서 지하수의 수질특성이 변해가게 되는데 함양지역에서는 Ca-HCO₃, 배출지역에서는 Na-HCO₃, 또는 Na-SO₄(Cl) 등이 점차 우세해 지게 된다(Chebotaev, 1955; Drever, 1988). 이 때문에 동일한 암질의 대수층인 경우 Ca-HCO₃형은 함양지역에 위치하거나, 물-암석반응이 약하고, Na-Cl(SO₄)형은 물-암석반응을 심하게 겪었거나, 배출지역에 위치하는 것이 일반적이다. 또한 지하수심도와 체류시간에 따라 음이온은 HCO₃으로부터 황산이온을 거쳐 염소가 풍부한 수질조성으로 변해간다. 이 지역에서는 대부분 Na-HCO₃형을 보이므로 이는 물-암석반응의 결과로 볼 수 있으나, 울릉도의 지하수의 함양과 배출은 비교적 빠르므로 고려할 점이 다양하다.

Na의 함량은 염수기원에 비하여 상당히 높으므로 염수로부터 기원했다고 단정할 수 없다. 울릉도의 기저부와 하부층들은 울릉도 생성초기에는 해수 중에서 활발한 화산활동으로 인해 형성되었으며 공극률이 높은 부석류, 화산쇄설암이 널리 분포하는 지질특성을 가지고 있다. 따라서 울릉도 생성초기의 경우 해수의 영향권에 놓여 있었을 것이며, 현생 울릉도의 경우도 직경 10 km의 작은 섬으로서 사방으로부터 염수침입에 상당히 취약한 수리지질학적 조건에 있다. 그럼에도 불

구하고 본 조사지역의 경우 해안과 떨어져 있고, 해발고도가 높아서 현생 해수의 영향을 받지 않는 곳이다. 그러므로 이처럼 높은 Na, Cl의 기원은 해수라기보다는 울릉도 고유의 암질특성에 기인할 가능성이 높다. 즉 울릉도 지질전반에 걸쳐 알칼리계열의 화산암이 분포하는데(Kim and Lee, 1983; Song et al., 1999; Kim and Lee, 2008), 격렬했던 최후기(수천년~약 1만년 내외) 동안, 화산활동에 수반된 Na, Cl 성분이 영향을 주었을 가능성이 있다. 특히 Na, F의 수질특성으로 볼 때 울릉도 지하수의 주요 성분은 물-암석반응의 결과임을 보여준다. 본 조사에서 드러난 주요 수질특성 즉 높은 Na, K, Cl, F, SO₄ 등은 알칼리 계열의 부석과 화쇄류의 높은 공극률 등이 물-암석반응을 가속화시킨 것으로 해석된다. Ca의 함량은 일반적인 지하수에 비하여 매우 낮는데, 이는 나리분지 지하수, 지표수의 독특한 수질특성으로 볼 수 있다. 그러나 이의 원인에 대한 추후 연구가 필요하다.

지하수의 불소농도는 일차적으로 대수층 암석의 불소 함량 및 지하수 순환 중의 물-암석 반응의 정도에 의하여 결정된다(Nordstrom et al., 1989; Banks et al., 1995; Carrillo-Rivera et al., 2002, Choo et al. 2008). 울릉도 부석과 응회암에서는 흑운모가 흔히 타형 내지 자형의 반정광물로 함유되는데, 이것이 지하수중 불소의 근원물로 작용할 가능성이 높다. 특히 불소와 Cl, SO₄의 높은 상관성은 화산암내 존재하는 흑운모나 황화광물의 용해작용과 관련된 것으로 볼 수 있다.

울릉도의 수질유형 특성상 Na가 우세하며, K도 비교적 높은 함량을 보이는 것은 울릉도 전반에 널리 분포하는 알칼리계열의 화산암과 관련성이 높은 것으로 해석된다. 즉 본 역의 경우 성인봉을 비롯하여 나리칼데라를 둘러싸는 주봉들의 급사면의 능선을 따라 지하수가 나리분지 쪽으로 유동하면서 물-암석반응이 일어나는 특징을 보인다. 나리칼데라 전역 또는 용출소 상류구배지역에 널리 분포하는 알칼리 장석류가 풍부한 화산쇄설층, 부석층 외에도 외륜부와 알봉 부근에 분포하는 조면암류, 포놀라이트 등과 같은 알칼리성 화산암류의 특성이 추산 용출소의 수질에 중요한 영향을 미친 것으로 보인다. 특히 이 일대에서 흔히 분포하는 부석과 세립질 화산쇄설물은 알칼리계열의 암질특성을 보이는데, 이들은 추산 용출소의 독특한 수질특성과 밀접한 관련성이 있는 것으로 판단된다. 그러나 이를 정량적으로 규명하기 위하여서는 동위원소, 연대측정, 미량원소, 추적자 등을 통한 물의 순환에 대한 광범위한 추가 연구가 필요하다.

용출소 일대 지질과 대수층 발달 관련성

추산 용출소는 해발 270 m의 알봉 북편사면에 위치하며, 나리분지 북부에 위치하는 알봉은 고도가 538 m로서, 이 방향으로 나리분지의 지하수가 유동한다. 인근에는 급격한 경사를 시작으로 서쪽으로는 452 m의 추산과 동쪽의 알봉사이에 협곡이 형성되어 있다. 이러한 지형적인 특징으로 인해 칼데라 안쪽으로 흐르는 수계와 나리분지 내 부석질 대수층으로 함양된 지하수는 각각 알봉 서편계곡을 따라 흐르며, 일부는 알봉을 통과하여 용출소 인근에서 자분정으로서 배출된다. 칼데라 서측내벽을 따라 남북으로 발달하는 하천은 북향하면서 나리분지 서편을 통과하는데, 투수계수가 높은 이 지역의 특성상 쉽게 지하수로 함양되므로 나리분지 접경 선상지 일대에서는 손실하천처럼 금방 건천의 형태를 띠며, 나리분지 내에서는 다공질의 두꺼운 칼데라퇴적층으로 인해 물이 전부 스며들어 사라지므로 실제적인 하천은 발달하지 않는다. 또한 칼데라 내벽과 관련되어 형성된 남북방향의 단층대를 따라 발달하는 주 하천은 북향하면서 나리분지 서편을 통과하는데, 투수계수가 높은 이 지역의 특성상 거의 지하수로 함양된다. 나리분지의 칼데라는 역삼각형의 단층선이 나타나고, 나리분지를 중심으로 북동-남서방향의 단층선과 북서-남동방향의 단층선이 발달하고 있는 것으로 보아 칼데라 함몰의 여파로 형성된 것으로 추정할 수 있다(Kim and Lee, 2008). 특히 칼데라 내부가장자리를 따라 발달하는 이러한 단층 외에도, 최후기 화산활동의 산물인 알봉의 관입으로 인해 기존의 칼데라와 화도내부도 상당히 교란되었을 것이다. 이러한 복잡한 화산활동의 결과 형성된 다양한 칼데라 내 단열구조는 대수층의 발달에 크게 기여했을 뿐 아니라, 지하수 유동방향에도 영향을 주었을 것으로 보인다.

나리분지 일대와 상류구배 유역에 광범위하게 분포하는 투수계수가 높은 부석층, 칼데라 함몰과 관련된 수많은 단층과 절리와 같은 파쇄대는 대수층 발달에 유리하다. 이 때문에 연중 강수량이 매우 높은 울릉도에서는 상당량의 물이 지하수로 함양될 수 있으므로 용출소가 연중 풍부한 수량을 유지할 수 있는 것으로 판단된다. 향후 용출소와 나리분지 일대의 정밀 단열조사 및 지구물리탐사가 이루어지게 되면 정확한 지하구조 발달 및 지하수의 유동특성이 명확하게 규명될 수 있을 것으로 보인다.

결론

나리분지 일대에 광범위하게 분포하는 투수계수가 높은 부석층, 칼데라 함몰과 관련된 수많은 단층과 절리와 같은 파쇄대는 대수층 발달에 유리하다. 이처럼 높은 투수계수를 갖는 암질이 상류구배 유역에 다량 분포하는 것이 추산 용출소의 가장 큰 특징이다. 다공성으로 표면적이 넓은 알칼리성 화산쇄설물로 구성된 화산암류 지역의 수질유형은 Na-HCO₃ 형이다. Ca의 함량은 일반적인 지하수나 지표수에 비하여 매우 낮다. EC와 상관성이 높은 성분으로는 HCO₃와 Na를 비롯하여 F, Ca, Mg, Cl, SiO₂, SO₄ 등이 있다. 요인분석결과, 요인 1의 영향력은 54%로 나타났으며, 요인 2의 경우 25.8%이다. 요인 1에 높은 적재량을 가지는 성분은 F, Na, EC, Cl, HCO₃, SO₄, SiO₂, Ca, NO₃, Mg 등이다. 요인 2에 대해 적재량이 높은 성분은 Mg, Ca이며, 음의 적재값이 높은 성분은 K, NO₃, DO 등이다. 이 지역의 높은 Na, Cl의 기원은 고기 화산활동과 관련된 Cl에 의한 가능성이 있으며, 주요 수질특성 즉 높은 Na, Cl, F, SO₄ 등은 알칼리계열 화산쇄설암류의 세립질 화쇄류 입자, 높은 공극률 등이 물-암석반응을 가속화시킨 것으로 해석된다.

사사

이 연구는 한국지질자원연구원 주요사업(과제번호: 18-3411)의 지원에 의하여 수행되었습니다.

References

- Arai, F., Oba, T., Kitazato, H., Horibe, Y., Machida, H., 1981, Late Quaternary tephrochronology and paleo-oceanography of the sediments of the Japan Sea, *The Quaternary Research*, 20(1), 209-230.
- Bank, D., Reimann, C., Royset, O., Skarphagen, H., Saether, O.M., 1995, Natural concentrations of major and trace elements in some Norwegian bedrock groundwaters, *Applied Geochemistry*, 10(1), 1-16.
- Carrillo-Rivera, J.J., Cardona, A., Edmundo, W.M., 2002, Use of abstraction regime and knowledge of hidrogeological conditions to control high-fluoride concentration in abstracted groundwater: San Luis Potosi basin, Mexico, *Journal of Hydrology*, 261(1), 24-47.
- Chebotarev, I. I., 1955, Metamorphism of natural waters in the crust of weathering - 1, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, olume 8(1), 22-33.
- Choo, C.O., Kim, J.T., Chung I.M., Kim, N.W., Jeong, G.C., 2008, Geochemical aspects of groundwater in granite area and the origin of fluoride with emphasis on the water-rock interaction, *The Journal of Engineering Geology*, 18(1), 103-115 (in Korean with English abstract).
- Drever, J. I., 1988, *The Geochemistry of Natural Waters*, Prentice Hall, 437.
- Hwang, S.K., Hwang, J.H., Kwon, C.W., 2012, Geological report of the Ulleung Sheet, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 84p.

- Im, J.H., Choo, C.O., 2015, A study on tree-ring dating and speciation of charcoal found in pumiceous deposit of the Quaternary Nari caldera, Ulleung Island, Korea, *Economic and Environmental Geology*, 48(6), 501-508 (in Korean with English abstract).
- Im, J.H., Shim, S.H., Choo, C.O., Jang, Y.D., Lee, J.S., 2012, Volcanological and paleoenvironmental implications of charcoals of the Nari Formation in Nari Caldera, Ulleung Island, Korea, *Geosciences Journal*, 16(1), 105-114.
- Kim, G.B., Cronin, S.J., Yoon, W.S., Sohn, Y.K., 2014, Post 19 ka B.P. eruptive history of Ulleung Island, Korea, inferred from an intra-caldera pyroclastic sequence, *Bulletin of Volcanology*, 76(4), 802-828.
- Kim, K.B., Lee, G.D., 2008, A study on volcanic stratigraphy and fault of Ulleung-do, Korea, *The Journal of Engineering Geology*, 18(3), 321-330 (in Korean with English abstract).
- Kim, K.H., Tanaka, T., Nagao, K., Jang, S.K., 1999, Nd and Sr isotopes and K-Ar ages of the Ulreungdo alkali volcanic rocks in the East Sea, south Korea, *Geochemical Journal*, 33(5), 317-341.
- Kim, M.I., Suk, H.J., Kim, H.S., 2005, An experimental study on understanding hydraulic storage properties of Ulleung Island, *Proceeding of Fall Conference, The Geological Society of Korea*, October, 152 (in Korean).
- Kim, M.I., Suk, H.J., Kim, H.S., Barry, J., 2005, An evaluation of site applications for aquifer storage and recovery in Ulleung Island, *Proceeding of 2005 Spring Conference, Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, April, 415-419 (in Korean).
- Kim, Y. K., Lee, D. S., 1983, Petrology of alkali volcanic rocks in northern part of Ulreung Island, *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, 16(1), 19-36 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.K., 1985, Petrology of Ulreung volcanic island, Korea; Part 1, *Geology. Japanese Association of Mineralogists Petrologists and Economic Geologists*, 80(1), 128-135.
- Machida, H., Arai, F., Lee, B.S., Moriwaki, H., Furuta, T., 1984, Late Quaternary tephra in Ulreungdo Island, Korea, *Journal of Geography of Japan*, 93(1), 1-14.
- Min, K.D., Kim, O.J., Yun, S, Lee, D.S., Kim, K.H., 1988, Applicability of plate tectonics to the post-Late Cretaceous igneous activity and mineralization in the southern part of south Korea (II), *Journal of the Geological Society of Korea*, 24(1), 11-40.
- Nordstrom, D. K., Ball, J. W., Donahoe., R. J. and Whittemore, D., 1989, Groundwater chemistry and waterrock interactions at Stripa, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(8), 1727-1740.
- Okuno, M., Shiihara, M., Torii, M., Nakamura, T., Kim, K., Domitsu, H., Moriwaki, H., Oda, M., 2010, AMS radiocarbon dating of Holocene tephra layers on Ulleung Island, South Korea, *Radiocarbon*, 52(3), 1465-1470.
- Seo, Y.S., Jang, H.S., Kim, K.Y., 2013, Assessement of rockfall hazard in the northeast region of Ulleung-Do, *The Journal of Engineering Geology*, 22(3), 353-363 (in Korean with English abstract).
- Song, Y.S., Park, K.H., Park, M.E., 1999, Major, rare earth and trace geochemsitry of Ulleungdo volcanic rocks, *Journal of the Petrological Society of Korea*, 8(1) (in Korean with English abstract).
- Song, Y.S., Park, M.E., Park, K.H., 2006, Ages and evolutions of the volcanic rocks from Ulleung-do and Dok-do. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 5(1), 72-80 (in Korean with English abstract).