

울릉도 나리분지 추산용천수 수량의 수리지질학적 지배요소

이병대¹ · 한 민² · 류충렬³ · 조병욱^{1*}

¹한국지질자원연구원 지하수환경연구센터 책임연구원

²한국지질자원연구원 제4기환경연구센터 선임연구원

³한국지질자원연구원 활성지구조연구센터 책임연구원

Hydrogeological Controls on the Discharge Rate of Choosan Spring in the Nari Basin of Ulleung Island, South Korea

Byeongdae Lee¹ · Min Han² · Chung-Ryul Ryoo³ · Byong-Wook Cho^{1*}

¹Principal Researcher, Groundwater Environment Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²Senior Researcher, Quaternary Environment Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

³Principal Researcher, Active Tectonics Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

Abstract

The purpose of this study is to identify the geology, geologic structure, hydrogeology and geomorphic characteristics of the Nari Basin and establish the controls on the discharge of water 20,000–40,000 m³/day from the Choosan Yongchulso, Ulleung Island, South Korea. Pumice and lapilli tuffs showing well-developed stratification are the predominant rock types surrounding the spring. The spring shows a structure whereby discharge occurs along a lens-like erosion cave formed by differential erosion of strata comprising tuff or pumice tuff. The Choosan Yongchulso is located at the point where the planation surface of the Nari Basin' ends and steep slopes begin. The basin is bounded on all sides by these steep slopes, except in the north, where the Choosan Yongchulso is located. Given these geomorphic characteristics, the Choosan Yongchulso is regarded as the ultimate outlet of the basin catchment area.

Keywords: Nari Basin, dominant control, Choosan Yongchulso, spring, catchment area

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Byong-Wook Cho
E-mail: cbw@kigam.re.kr

Received: 24 January, 2024

Revised: 21 February, 2024

Accepted: 29 February, 2024

© 2024 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

이 연구는 울릉도 나리분지의 추산용천소에서 20,000~40,000 m³/day의 많은 수량이 용출될 수 있는 지배요소를 파악하기 위하여 나리분지의 지형 및 수리지질학적인 특성을 밝히는 것이다. 용천수가 용출되는 추산용천소 인근에는 층리가 잘 발달되어 있는 부석질 응회암과 라필리 응회암이 분포하고 있다. 추산용천수는 응회암의 엽층리나 부석질 응회암이 차별적으로 침식된 특별한 층준에서 렌즈상의 침식동굴처럼 발달한 곳을 따라 용출하는 구조를 보이고 있다. 추산용천소가 위치하고 있는 지점은 나리분지의 평탄면이 끝나고 급경사가 시작되는 곳으로, 모든 방향의 사면이 닫혀 있고, 추산용천소가 위치한 북쪽만 열려 있는 형태이다. 이러한 지형적인 특성으로 추산용천소는 나리분지 집수구역의 최종적인 유출구로 작용하고 있다.

주요어: 나리분지, 지배요소, 추산용천소, 용천수, 집수구역

서론

추산용천수는 경상북도 울릉군 북면 나리 381-1번지에 위치하고 있는 추산용출소에서 용출되고 있는 샘물이다(Fig. 1). 추산용천수의 수량은 20,000~40,000 m³/day 내외로 매우 풍부하며 수질 또한 매우 양호한 편이다. 추산용천수는 220 L/s로 성인봉에서 함양된 지하수가 나리분지 방향으로 흐르다가 추산용출소에서 배출되는 것으로 보고되어 있다(Ulleung-gun, 2007). 용출량이 큰 용천수의 경우, 용출량의 규모에 따라 moderately large(0.0283~0.283 m³/s), large(0.283~2.83 m³/s), very large spring(2.83 m³/s<)으로 구분하는데(Brune, 1975), 추산용천수는 moderately large와 large spring의 경계에 해당된다. 이와 같이 추산용천수는 많은 수량이 용출되고 있음에도 나리분지와 알봉분지 대수층의 수리지질학적 특성이 잘 알려져 있지 않다.

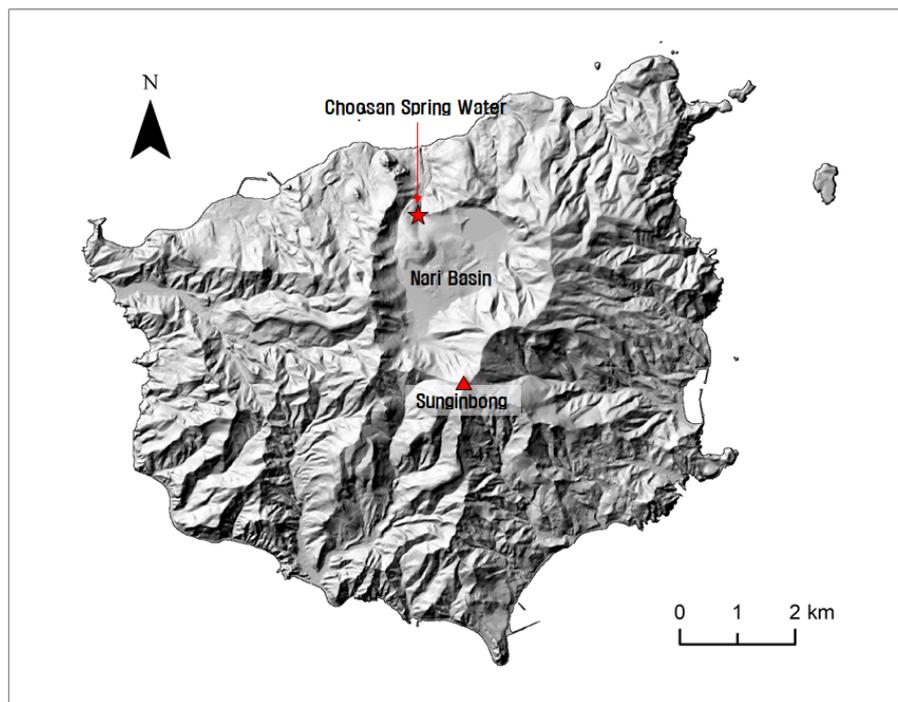


Fig. 1. Shaded topographic relief map showing the location of the study area.

울릉도에 관한 연구로는 암석, 광물학적인 특성을 밝히는 연구는 비교적 많이 보고되어 있으나(Kim and Lee, 1983, 2008; Kim, 1985; Min et al., 1988; Kim et al., 1999, 2011, 2014; Song et al., 2006; Bae et al., 2012; Im et al., 2012; Im and Choo, 2015; Kim and Kim, 2019), 지하수와 관련된 연구는 많이 보고되어 있지 않다. Lee et al.(2018)은 나리분지 일대에 광범위하게 분포하는 투수계수가 높은 부석층, 칼데라 함몰과 관련된 수많은 단층과 절리와 같은 파쇄대는 대수층 발달에 유리하다고 보고하였다. Cho and Lee(2018)의 연구에 의하면 추산용천수는 지하수 함양지역인 성인봉 하류 칼데라 내에 내린 강우가 지표수의 형태로 흐르다가, 조면암질 부석응회암층에서 지하로 침투하여 하류로 이동하다가 조면암과 나리응회암 경계부인 추산용출소에서 용출되는 형태이다. Kim et al.(2005)은 울릉읍 도동리 저동천 상류 부근의 기존 관정을 대상으로 양수시험을 수행한 결과, 암반 대수층은 투수계수가 낮으며, 상부 층적층은 높은 투수계수를 가진다고 보고하였다. 이들 연구 외에는 아직까지 추산용천수 대수층의 발달상황, 지하수유동 등과 같은 실제적인 수리지질학적 연구가 거의 이루어지지 않았다.

상기한 바와 같이 추산용천수는 20,000~40,000 m³/day 내외의 많은 수량이 용출되고 있음에도 수리지질학적인 특성이 밝혀지지 않았다. 그리하여 나리분지에 대한 수리지질학적인 연구를 통하여 추산용천수의 생성기원과 수리적인 특성, 유동경로 등 수리지질학적인 특성을 파악하려는 연구의 필요성이 제기되었다. 금번 연구의 목적은 추산용출소에서 20,000~40,000 m³/day의 많은 수량이 용출될 수 있는 지배요소를 파악하기 위하여, 나리분지의 지형 및 수리지질학적인 특성을 밝히는 것이다. 이를 위하여 2018년 6월부터 2019년 10월까지 나리분지 일대의 지질 및 지질구조 조사, 지형분석, 용출량 측정 등을 수행하였다.

연구지역

연구지역인 울릉도는 북동-남서방향의 장축은 약 12 km, 북서-남동방향의 단축은 약 8 km인 화산섬이다. 면적은 72.82 km²이며 가장 높은 곳은 성인봉으로 해발고도 983.6 m이다(Fig. 1). 울릉도는 성인봉을 정점으로 남동부 사면, 남서부 사면, 북부 사면의 3개 사면으로 구분된다. 북부 사면은 그 정상부가 함몰에 의한 칼데라를 이룬다. 칼데라는 50~634 m의 칼데라 벽에 의해 둘러싸여 있다. 남동벽과 남서벽은 500 m 내외의 단애에 의하여 둘러싸여 있고, 북벽은 50~150 m 이하의 낮은 산지로 막힌 나리분지를 이룬다(Ulleung-gun, 2007). 나리분지는 험준한 산악지형으로 평지가 거의 없는 울릉도에서 가장 큰 평지 지대로 최저 해발고도가 350 m, 장경이 약 2.2 km이다. 나리분지는 칼데라, 용암돔과 같은 원지형을 거의 그대로 보존하고 있으며, 지표쇄설층(epiclastic deposits)이 발달되어 있어 분지의 평탄화 작업이 있었던 것으로 보여진다. 추산용천수가 용출되고 있는 추산용출소는 이 나리분지의 북측 하류에 위치하고 있다(Fig. 1).

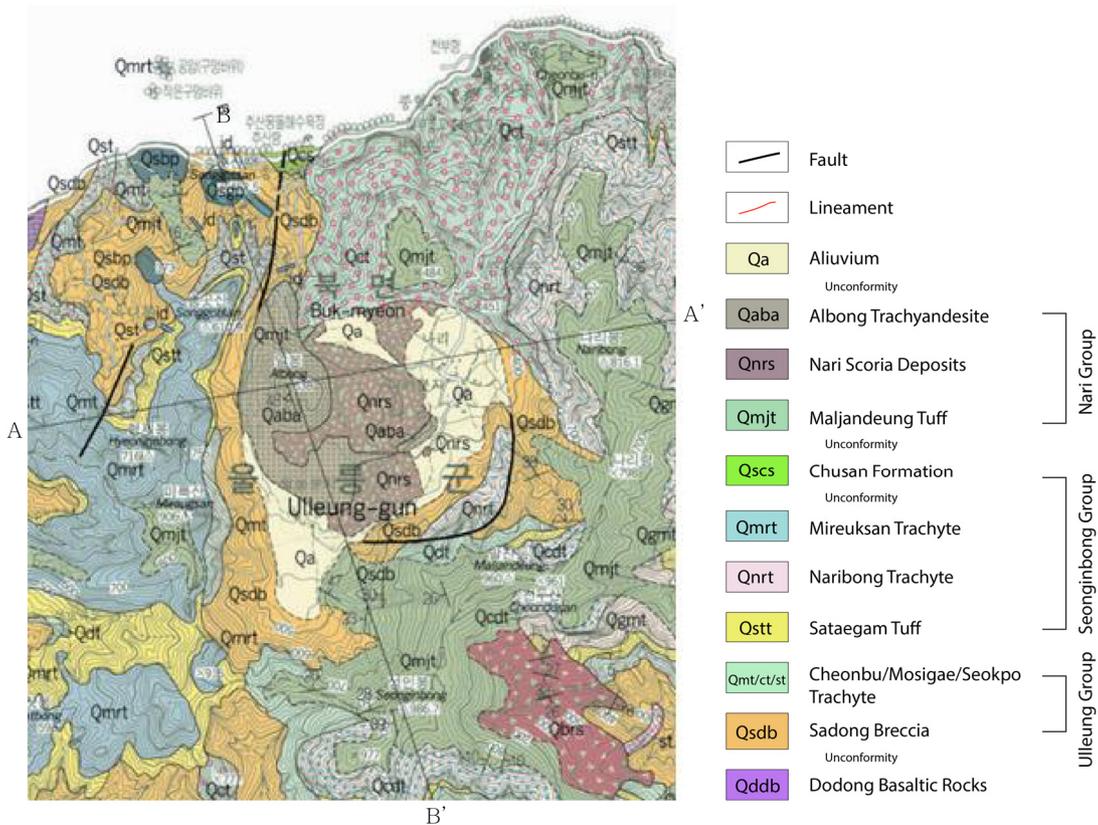


Fig. 2. Geological map of the Nari basin and the surrounding area (after Hwang et al., 2012).

추산용출소가 위치하고 있는 나리분지 일대의 지질은 수백 m의 함몰 결과 칼데라 외부와 내부가 차이를 보인다. 칼데라 외부는 하부로부터 도동현무암, 사동각력암, 천부조면암, 사태감응회암, 나리봉조면암, 그리고 말잔등응회암이 최고 지에 주로 분포한다(Fig. 2; Hwang et al., 2012). 내부는 해수준면을 기준으로 천부조면암 위에 사태감응회암, 나리봉조면암, 말잔등응회암이 분포하고 있다. 그 위를 나리분석층과 알봉조면안산암이 관입분출하여 덮고 있다. 추산용출소 일대는 주로 말잔등응회암이 발달하고 있으며, 나리분지와 알봉분지 내에는 층적층이 넓게 분포하고 있다. 화산활동 최후기에 화산체의 중심화도가 함몰되면서 나리칼데라가 형성되었다. 알봉분지 북서쪽에 칼데라호수 퇴적층이 발달하고 있으며, 수평층의 부석질 엽층이 관찰된다(Fig. 3). 이 퇴적층에는 조면암과 현무암의 각력이 함유되어 있고, 얇은 퇴적층을 교란하고 있다. 칼데라퇴적층 형성이후, 조면안산암이 분출하면서 칼데라 북서편에 알봉-용암돔이 형성되었다. 나리분지로 유입되는 하천중에서 최상류부인 남서측에 발달하는 성인계곡은 매우 두꺼운 부석층과 각력질 응회암이 발달한다(Fig. 4). 부석층은 수평층리가 잘 발달하고 있으며, 침식면이나 약한 습곡의 형태로서 일부 교란된 부분도 관찰된다.



Fig. 3. Caldera lake sediments with pumiceous lamina at the top of the valley in the northwestern Albong Basin.



Fig. 4. Thick pumice layer at an outcrop in Sungin valley in the southwestern Nari Basin.

연구방법

용천수 용출량 측정

용출량 측정은 용출지점을 여러 개의 소단면으로 나누어, 각 소단면에서의 유속을 측정하여 용출량을 구하였고, 그 다음 각 소단면의 용출량을 합하여 전체 용출량을 산정하였다(Lee et al., 2018). 유속측정 방법은 측정지점의 심도가 0.35 m 미만은 0.6 심도 지점의 유속을 이용하는 1점법을, 측정지점의 심도가 그 이상일 경우는 0.2 심도와 0.8 심도를 측정하여 평균 유속을 이용하는 2점법을 이용하였다(USGS, 1982). 유속측정에 이용된 기기는 독일 OTT사의 Small Current Meter C2 유속계를 이용하여 측정하였으며 측정 유속의 오차범위는 $\pm 2\%$ 이내이다.

지형분석

나리분지 일대의 지형분석을 위하여 국토지리정보원에서 제공하는 1:5,000 축적의 수치지형도를 기반으로 GIS 분석을 수행하였다. GIS 분석은 먼저 수치지형도를 이용하여 수치표고모형(이하 DEM)을 제작하였다. 제작된 DEM을 바탕으로 음영기복도를 작성하고 경사도를 분석하여 울릉도의 전체적인 지형 특성을 파악하였고, 나리분지의 수계 발달 상태와 유동경로 파악을 위해 하계망 분석을 하였다. 하계망 분석은 DEM을 이용하여 지형 특성을 기반으로한 이상적인 하계망을 추출하였으며, 추출된 하계망을 이용하여 실제 수치지형도상의 하천과 비교, 분석하였다.

결과 및 토의

추산용천수의 용출량 및 용출구조

용출량 측정은 금번 연구기간동안 4회, 이전에 한국지질자원연구원(KIGAM, 2011, 2012, 2014)과 (주)한맥이앤씨(HMENC, 2018)에 의하여 20회, 총 24회 측정되었다. 전체 기간 동안 측정된 용출량은 19,828~39,959 m³/day의 범위로 매우 많은 양의 물이 용출되고 있다(Table 1).

Table 1. Discharge of Choosan Spring

Date	Discharge (m ³ /day)	Date	Discharge (m ³ /day)
21-08-2010	25,771	08-04-2014	23,419
21-10-2010	23,000	29-07-2014	20,471
21-11-2010	23,000	30-09-2014	25,118
05-01-2010	25,000	09-06-2014	25,717
05-03-2011	20,718	21-09-2014	22,740
15-05-2011	34,539	26-10-2017	21,737
28-08-2011	31,708	28-03-2018	20,236
13-10-2011	29,093	25-04-2018	20,040
25-12-2011	27,000	23-10-2018	24,231
21-03-2012	19,828	20-03-2019	20,519
22-05-2012	36,278	23-05-2019	25,388
31-07-2012	31,954	01-11-2019	39,959

추산용천수는 성인봉 하류에 내린 강수가 나리분지와 알봉분지에서 지하로 침투하여, 부석층과 화산쇄설층 내를 통하여 하류로 이동하다가 지표에 노출된 것으로 지표노출형 용천수이다(Lee et al., 2018). 즉, 함양지역에 내린 강우와 겨울철의 강설은 지표수의 형태로 하류로 흐르다가 지형경사가 완만해지는 조면암질 부석응회암에 도달해서는 지하로 침투하고 이동하여 조면암과 나리응회암의 경계부인 추산용출소에서 대부분 용출된다(Cho and Lee, 2018). 추산용천수가 용출되고 있는 용출소 근처는 응회암층이 층상 구조를 보이고 있다. 이 응회암층은 대체로 북이나 북동으로 30° 정도 경사하고 있으며 완만한 배사구조를 이루고 있다(Fig. 5). 용천수가 배출되는 말잔등응회암은 다공질의 응회암층이 주를 이루고 있으며, 층간 사이사이에 저투수성 세립질 응회암이 호층을 이루고 있다. 반면, 이 응회암층 직하부의 나리봉조면암은 단열이 적고 치밀한 불투수층으로 유체 이동의 장벽 역할을 하는 것으로 판단된다. 따라서 지하수는 더 이상 하부로 침투하지 못하고 부석질 응회암층의 퇴적층리를 따라 추산용출소 방향으로 흐르다가 지하수면이 사면과 교우하는 현 용출소 지점에서 용출하는 것으로 보인다. 용출구조는 응회암의 엽층리나 부석질 응회암이 차별적으로 침식된 특별한 층준, 즉 현재의 용출지점인 렌즈상의 침식동굴처럼 발달한 곳을 따라 용출하는 구조를 보이고 있다(Fig. 6).



Fig. 5. Anticline structure in the Maljandeung Tuff at Choosan Yongchulso.

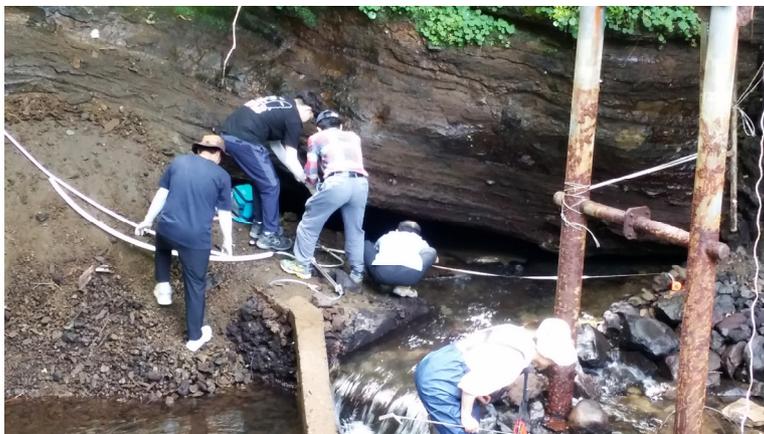


Fig. 6. Pumiceous tuff layer from which the Choosan Spring is discharged.

추산용출소에서 19,828~39,959 m³/day의 많은 양의 물이 용출될 수 있는 것은 나리분지 일대가 투수성이 좋은 부석 및 화산쇄설층이 두꺼운 형태로 교호되어 분포하고 있어(HRENC, 2012), 나리분지 전체가 지하수 저장고 역할을 하고 있으며, 많은 양의 물이 용출될 수 있는 특별한 층준의 용출구조를 가지고 있기 때문인 것으로 판단된다.

나리분지 투수성

추산용천수의 함양지역인 성인계곡 및 나리분지 일대는 대부분 부석, 화산역 및 화산회를 포함하는 화산쇄설물, 부석질 응회암층, 역질층, 사질층 등으로 구성되어 있다(Lee et al., 2018). 나리분지는 화산체 정상부가 함몰되고 나리칼데라 호수가 형성된 이후 공극률과 투수율이 높은 부석들이 호수 내로 퇴적되어 이루어진 전형적인 호수퇴적층 분지이다. 나리분지 지형(Fig. 1)으로 볼 때 이와 같은 퇴적층은 나리칼데라 전역에 걸쳐 분포했을 것으로 생각되는데, 이러한 암질은 함수성이 높아 양호한 대수층의 기능을 할 수 있을 것으로 보인다. 기존 연구에 의하면 나리분지 퇴적층은 약 50~200 m 내외의 두께를 보이고 있다(Kim and Kim, 2019). 이와 같이 다공성이며 투수성이 좋은 두꺼운 퇴적층은 추산용천수의 풍부한 수량을 저류시키기에 충분한 요소가 될 것으로 판단된다.

나리분지의 최상류부인 성인계곡은 매우 두꺼운 부석층과 부석질 응회암층이 발달되어 있다. 이 층들은 층리가 잘 발달되어 있고 분급도 비교적 좋은 편이다. 또한 완전히 석화되지 않은 반고결 상태로 다공성이며 투수성이 좋아 지하수 함양에 매우 유리한 대수층 역할을 한다. 부석질응회암층과 부석층 벽면은 습하거나 물이 스며 나오고 있는데, 이는 투수성이 좋고 함수성이 매우 높다는 것을 의미한다(Fig. 7). 성인계곡 하단부는 사태퇴적층의 특징을 보이는데, 부석질의 사태층내 각력은 최대 1 m가 넘는 경우도 있다.



Fig. 7. Pumiceous tuff layer with good permeability and water flow in the upper part of Sungin valley.

추산용천수가 용출되는 용출소 인근에는 부석질 응회암과 라필리 응회암이 분포하고 있다. 이들 암석에는 층리가 잘 발달하고 있으며, 투수성이 높아서 층리면은 항상 습기를 머금고 있거나 역이 빠져 나간 자리를 중심으로 발달하는 일부 동공에서는 작은 물구멍이 발달한다.

성인봉 및 나리분지를 둘러싼 외륜산 계곡으로부터 발원된 하천수는 북향하여 추산용출소 방향으로 흐른다. 북향하면서 흐르는 하천수는 신령수를 지나면서 외관상의 하천은 완전히 소멸되어 육안으로 찾아볼 수 없다. 이는 나리분지내 다공질의 두꺼운 칼데라퇴적층으로 인해 물이 전부 스며들어 사라지므로 실제적인 하천이 발달하지 않는 것으로 나리분지가 투수성이 매우 좋고 함수성이 높다는 것을 의미한다. 나리분지 일대 토층지반의 투수계수는 $8.21 \times 10^{-3} \sim 5.86 \times 10^{-1} \text{ cm/sec}$ 의 범위로 투수성이 약간 빠름~매우 빠른 특성을 가진다(KIGAM, 2012). 이와 같은 사실은 나리분지의 투수성이 좋다는 사실을 뒷받침하며, 강우시에 우수가 지하로 빠르게 침투, 이동하여 대수층까지 도달함으로써 지하수의 함양을 빠르고 높게 하는 요인으로 작용할 것으로 판단된다.

나리분지 지질구조

나리분지 일대의 지질구조는 화산성 환상암물에 관련된 환상단층과 알봉 서측에서 추산으로 달리는 거의 남북 방향의 단층이 주를 이루고 있다(Hwang et al., 2012). 나리분지의 칼데라는 전체적으로 역삼각형의 단층선이 나타나고, 나리분지를 중심으로 동서, 남북, 북동, 그리고 북서 방향의 단층선이 발달하고 있는 것으로 보아 칼데라 함몰의 여파로 형성된 것으로 추정할 수 있다(Kim and Lee, 2008). 특히 칼데라 내부 가장자리를 따라 발달하는 이러한 단층 외에도, 최후기 화산활동의 산물인 알봉의 관입으로 인해 기존의 칼데라와 화도 내부도 상당히 교란되었을 것으로 판단된다(Lee et al., 2018). 이러한 복잡한 화산활동의 결과 형성된 칼데라 내 단열구조는 대수층의 발달에 크게 기여했을 뿐 아니라, 주요 지표수계 및 용출소 형성, 지하수 유동방향에도 영향을 주었을 것으로 보인다.

추산용출소 인근의 지하지질은 지표면으로부터 약 15 m까지는 자갈과 모래 등이 혼재되어 분포하고 있으며, 그 하부로는 부석질 응회암과 단열대(Fracture zone)가 반복적으로 발달되어 있다(HRENC, 2012), 단열대는 파쇄가 많이 되어 있는 해발고도 기준 심도와 추산용출소의 위치가 비슷한 것으로 보아 이러한 단열을 따라서 지하수가 유동하는 것으로 판단된다. 이로 보아 나리분지에 함양된 지하수는 북동 방향과 북서 방향의 단열대를 따라 북쪽으로 흐르다가 일부는 용출소 방향으로 흘러 용출된다. 나머지 일부 북쪽의 칼데라 내벽으로 흐르는 지하수는 불투수층 역할을 하는 조면암류를 만나 더 이상 북쪽으로의 흐름이 차단되고, 나리분지 북부에 동-서 방향으로 발달하는 단층을 따라 서쪽으로 이동하여 추산용출소에서 용출하게 된 것으로 해석된다.

나리분지의 전체적인 지질구조는 크게 보아 남서측이 높고 북동쪽이 낮은 지형적 구조를 보이고 있다. 이와 같은 사실은 칼데라 내부인 나리분지 하부의 지괴는 북동 내지 북북동 쪽으로 경동되며 함몰하였을 가능성을 시사하고 있으며, 이 함몰과 관련된 단층, 파쇄대와 같은 단열구조가 발달된 것으로 고려된다. 추산용천수는 나리분지에 함양된 지하수가 동서 방향의 단열대와 남북 방향의 단열대가 이루는 한 교차점에서 용출되는 것으로 2차원적으로 해석된다. 이와 같이 추산용출소의 풍부한 용출은 분지 내 주요 단열대와 북북동 방향으로 경사진 칼데라의 부등함몰과 틸팅이 기여를 하는 것으로 판단된다.

지형 특성

나리분지는 추산용출소를 제외한 모든 사면이 급경사를 가지는 칼데라 벽에 의해 둘러싸여 있고, 분지 내에서는 평탄한 지형을 이루고 있다. 추산용출소가 위치하고 있는 지점은 나리분지의 평탄면이 끝나고 급경사가 시작되는 곳으로, 모든 방향의 사면이 닫혀 있고 추산용출소가 위치한 북쪽만 열려 있는 형태이다(Fig. 1). 이는 성인봉과 나리분지 일대에 내리는 강수는 모두 추산용출소를 통해 유출되고, 이러한 지형적인 특성은 추산용출소가 나리분지 집수구역의 최종적인 배출구라는 것을 의미한다.

나리분지의 지형 특성이 북쪽만 열려있기 때문에 겨울철에 동해를 지나면서 습윤해진 북서 계절풍이 북쪽 입구를 통해 들어와서 성인봉 일대의 높은 산지로 상승하며 지형성 강수를 일으키게 된다. 또한 여름철에는 동해를 지나는 태풍의 영향으로 많은 양의 비를 내린다. 이러한 강수는 나리분지 내 다공질의 두꺼운 칼데라퇴적층과 부석질 대수층에 함양되어, 모두 고도가 낮은 북쪽으로 흘러 추산용출소에서 용출된다. 나리분지의 이러한 지형 특성으로 추산용출소는 울릉도 내에서 가장 넓은 집수유역 분지를 가지며, 연중 고르고 풍부한 강수량을 바탕으로 연중 수량이 풍부한 물이 용출되고 있다.

나리분지 수계(하천)는 성인봉 일대를 중심으로 남측의 칼데라 계곡으로부터 발원하여 북향한다. Fig. 8은 수치지형도상의 실제 하천을 나타내는 그림으로, 이 하천은 나리분지 평탄지 즉 나리분지 최상류 지점에 도달하면서 실제 외관상의 하천은 완전히 소멸된다. Fig. 9는 DEM을 이용하여 지형 특성을 기반으로 추출된 하계망으로, 이 추출된 하계망은 실제 하천과 잘 일치하고 있다. 그런데 Fig. 9에서 나리분지 일대의 하계망은 울릉도 전체와는 전혀 다른 특징적인 모습을 보여주고 있다. 이 그림에서 빨간 파선의 타원 내에 있는 흰 선은 분석된 하계망으로 실제 발달되어 있는 수계가 아니다. 이 흰 선은 성인봉 일대에서 발원된 하천이 추산용출소가 위치하고 있는 북쪽으로 흐르다가 나리분지 내에서는 칼데라퇴적층의 높은 투수성으로 인하여 하천의 형태로 흐르던 물이 모두 지하로 함양되었다는 것을 의미하며, 이는 추산용출소의 풍부한 수량을 지배하는 요소로 작용한다. 이렇게 함양된 지하수는 고도가 낮은 북쪽 방향으로 흘러 추산용출소에서 용천수의 형태로 용출하게 된다.

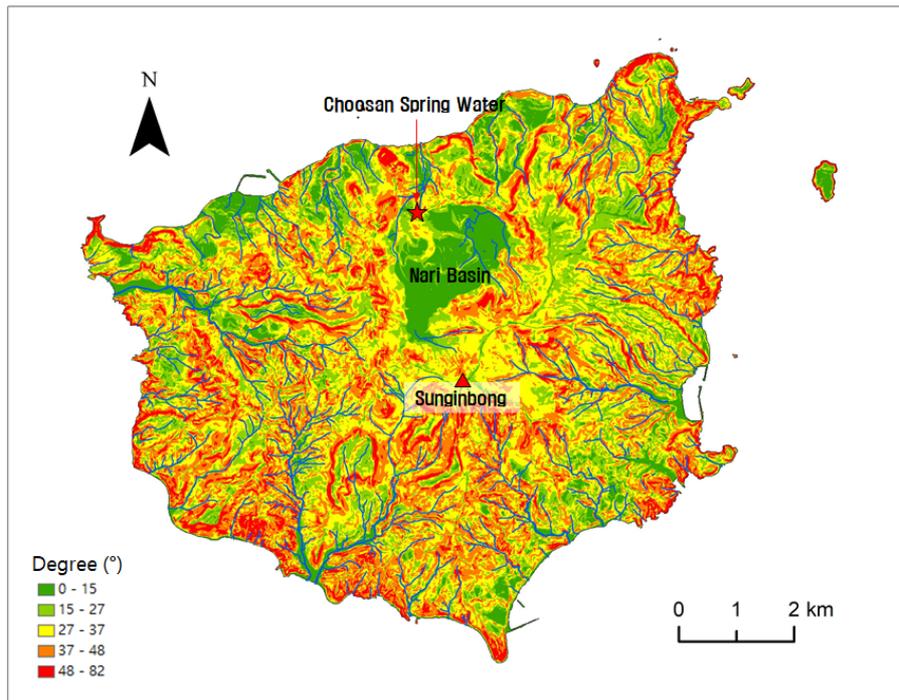


Fig. 8. Drainage network in and around Nari Basin superimposed on a digital topographic map.

실제 현장조사에 의하면 성인봉 계곡에서 북향하여 흐르는 물은 나리분지 상류의 신령수를 지나면서 외관상의 하천은 완전히 소멸된다(Fig. 9). 반면 나리분지 서편에 위치하는 남북 방향의 단층대를 따라 발달한 계곡에서부터 비교적 수량이 풍부한 하천이 발달한다(Fig. 9a). 추산용출소는 남북방향 하천의 동편에 위치하며 이 지표수계와는 완전히 격리되어 있고, 알봉 북편의 급사면 절개지 하단부에서 자분정으로 발달한다.

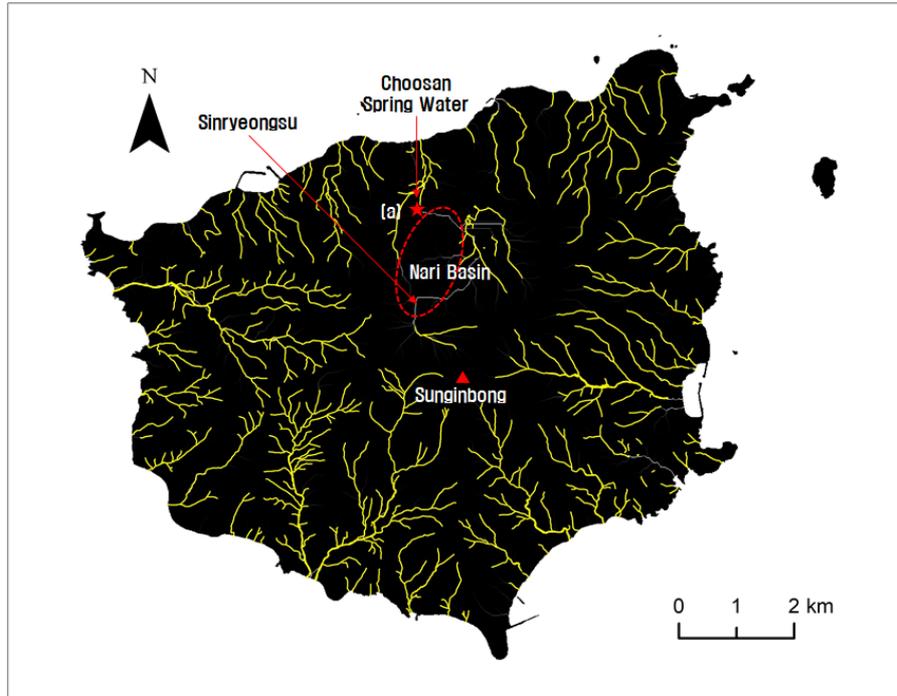


Fig. 9. Drainage network generated through GIS analysis. (a): A stream developed along a fault zone located in the western part of the Nari Basin.

결론

이 연구는 추산용출소의 풍부한 수량 지배요소를 파악하기 위하여 나리분지의 지질, 지질구조, 수리지질, 지형 특성 등을 밝혔다. 추산용천수는 분지 내에 함양된 대부분의 물이 추산용출소에서 용출되는 high-discharge spring이다.

추산용출소에서 풍부한 물이 용출될 수 있는 지배요소로 몇 가지를 들 수 있다. 첫째, 화산성 환상암물과 관련된 단층, 칼데라 내의 단열구조, 부석, 부석질 응회암, 역질층, 사질층으로 구성된 호수퇴적층의 높은 투수성, 둘째, 나리분지의 풍부한 강수량 및 높은 함양률, 셋째, 풍부한 강수를 내리게 하고, 성인봉 일대에 내린 강수가 모두 나리분지에 집수될 수 있는 지형적인 조건, 추산용출소가 나리분지 집수구역의 최종적인 유출구로 작용하는 지형적인 특성 등을 들 수 있다.

추산용천수는 응회암의 엽층리나 부석질 응회암이 차별적으로 침식된 특별한 층준을 따라 용출되고 있다. 용출구조로 인하여 용출소의 주 배출구는 점차 그 폭이 횡적으로 확장될 가능성이 있다. 이로 인해 유량 변화나 대수층의 교란이 발생할 수 있는 가능성을 배제할 수 없으므로 지층의 안전성에 대한 모니터링을 계속할 필요가 있다. 지하수는 칼데라분지 내 특정한 지형이나 계곡 발달과는 다른 흐름(flow)을 가질 수 있으며, 나리칼데라 붕괴시 형성된 수많은 파쇄대와 불연속면이 지하수의 흐름에 영향을 줄 수 있다. 현재의 조사자료만으로는 칼데라 지하 내부의 연약대의 분포 특징을 확인할 수 없는 한계점이 있다. 칼데라 지하구조나 칼데라 붕괴가 심했던 북서부 외륜산 구역은 지하수의 유로에 영향을 줄 수 있으므로 지하 지질구조 파악이 중요하다. 따라서 향후 칼데라 내부의 지하 지질 분포 특성을 파악하기 위해서는 지구물리탐사와 시추코어 조사 등 추가적인 조사가 필요하다.

또한 이번 연구를 통해 다음과 같은 시사점을 제시할 수 있다. 나리분지는 추산용천수의 유역분지이며, 나리분지 평탄지에서 지하수로의 침투 및 투수성이 매우 높은 것을 확인할 수 있었다. 이로 인하여 추산용출소에는 연중 수량이 풍부한 물이 용출되고 있으나, 현재 나리분지 평탄지 내에는 농업활동으로 인하여 수질이 오염될 가능성을 배제할 수 없다. 따라서

추산용천수의 수질을 양호한 상태로 유지하고 관리하기 위해서는 지속적인 수질 모니터링과 나리분지 평탄지 내의 토지 이용 등을 잘 관리할 필요가 있다. 특히 나리 마을 일대의 경우에는 지표수가 지하로 이동하는 주요 지점이기 때문에 더욱 세심한 관리가 필요하다.

사사

이 연구는 한국지질자원연구원 기본과제(과제번호 23-3411)의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Bae, S.G., Choo, C.O., Jang, Y.D., 2012, Mineralogical characteristics of tachylite occurring in basic dike, basaltic agglomerate formation, Ulleung Island and its implications of volcanic activity, *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 25(2), 63-76 (in Korean with English abstract).
- Brune, G., 1975, Major and historical springs of Texas, Texas Water Development Board Report 189, 95p.
- Cho, B.W., Lee, B.D., 2018, Discharge characteristics of the Chusan Spring, Ulleung Island, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 23(6), 37-45 (in Korean with English abstract).
- HMENC (Han Maek ENC), 2018, Study on the development of the Chusan Spring water, Ulleung-gun, 170p.
- HRENC (Ha Ri ENC), 2012, Geophysical survey for the area around the Choosan Spring, Ulleung-gun, 129p.
- 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.
- KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 2011, Feasibility study on the development of the Chusan Spring water, Ulleung-gun, 155p.
- KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 2012, Study on the development of the Chusan Spring water, Ulleung-gun, 207p.
- KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 2014, Study on the post management of the Chusan Spring water, Ulleung-gun, 89p.
- 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, G.B., Kim, M.I., 2019, Distribution of resistivity zones near Nari Caldera, Ulleung-do, Korea, inferred from modified dipole arrays, *The Journal of Engineering Geology*, 29(3), 223-236 (in Korean with English abstract).
- Kim, G.B., Yoon, S.H., Chouhg, S.K., Kwon, Y.K., Ryu, B.J., 2011, Seismic reflection study of acoustic basement in the South Korea Plateau, the Ulleung Interplain Gap, and the northern Ulleung Basin: Volcano-tectonic implications for Tertiary back-arc evolution in the southern East Sea, *Tectonophysics*, 504, 43-56.
- 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, *Proceedings of the Fall Conference of the Geological Society of Korea*, Jinju, 152 (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.
- Kim, Y.K., Lee, D.S., 1983, Petrology of alkali volcanic rocks in northern part of Ulrung Island, *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, 16(1), 19-36 (in Korean with English abstract).
- Lee, B.D., Cho, B.W., Choo, C.O., 2018, The hydrochemistry of Chusan Yongchulso Spring, Cheonbu-ri, Buk-myeon, Northern Ulleung Island, *The Journal of Engineering Geology*, 28(4), 565-582 (in Korean with English abstract).
- 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.
- 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(2), 72-80 (in Korean with English abstract).
- Ulleung-gun, 2007, Ulleung-gun report, Ulleung-gun, 1390p.
- USGS (United States Geological Survey), 1982, *Measurement and computation of streamflow: Volume 1. Measurement of stage and discharge*, 284p.