

울릉도 추산용출소의 용출 특성

조병욱* · 이병대

한국지질자원연구원 지하수생태연구센터

Discharge Characteristics of the Chusan Spring, Ulleung Island

Byong-Wook Cho* · Byeong-Dae Lee

Groundwater and Ecohydrology Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

ABSTRACT

The source of Chusan Spring water in the Ulleungdo is the precipitation in the Nari caldera basin, which permeates in the Trachitic pumice and tuff area and moves downward, outflowing at the lithologic boundary between the trachyte and Nari tuff. It is known that the discharge rate of the Chusan Spring is large enough to be used for the small hydroelectric power generation, but the exact discharge rate and hydrogeologic characteristics have not been known. The discharge rates of the Spring were measured 11 times, which ranged from 15,220 m³/d to 36,278 m³/d. The discharge rates, measured by the automatic level recorder, for two-year period, were 20,000~38,000 m³/d. The variation of discharge rates did not coincide with rainfall event, but showed daily increases of 3,000~5,000 m³/d. The annual discharge rate excluding the evapotranspiration and the surrounding stream discharge corresponded to 70.6% of the annual precipitation of the recharge area. Therefore, meteorological observations at the Nari basin, rather than the Ulleung-do meteorological station, are more appropriate to properly interpret the discharge characteristics of the Chusan Spring and the recharge rate of the basin.

Key words : Ulleung Island, Chusan Spring, Discharge rate, Recharge area, Precipitation

1. 서 론

용천(Spring)은 지하수가 지표에 노출된 지점으로 샘이라고도 한다. 일반적으로 용천은 일정기간 지하를 거쳐서 지표에 노출되기 때문에 식수로 사용되는 경우가 많다. 용천의 분류 방법에는 여러 가지가 있으나 Clarke(1924)는 용천의 지질, 물리적인 용출 특성, 용천수의 지화학을 용천 분류의 가장 중요한 기준으로 보았다. Springer et al. (2008)은 기존의 여러 용천 분류에 이용된 항목들에 용천의 지형학적 특징, 지표로 용출되는 세기, 용출 특성, 수질 등을 추가하여 용천을 12개로 분류하였다. 이에 따르면 강원도 오색약수, 충북의 초정약수, 부강약수 등은 압력저하형 용천으로서 용출량은 적다. 한편 강원도 석회암 지대와 제주도 해안가의 용천은 cave type, 추산용출소는 hillside 또는 gushet type의 지표노출형 용천으로 용출량이 많다. Brune(1975)는 용출량이 큰 용천을 3개 그룹

(moderately large(0.0283~0.283 m³/s), large(0.283~2.83 m³/s), very large spring(2.83 m³/s<))으로 구분하였는데 이에 따르면 추산용출소는 moderately large와 large spring의 경계에 해당한다.

나리용출소라고도 불리는 추산용출소는 울릉군 북면 나리 산 26-1번지에 위치하고 있다. 추산용출소에서 용출되는 지하수는 일정거리와 기간 동안 지하를 거쳐서 지표로 용출되기 때문에 수질이 좋다고 알려져 있어 일찍부터 추산용출소 하류 주민의 음용수로 이용되어 왔다. 또한 추산용출소는 용출량이 풍부하고 하류의 지형경사가 급하기 때문에 소수력 발전용으로도 이용되고 있다. 추산용출소의 용출과 밀접한 관계가 있는 울릉도의 형성 과정과 지질(Song et al., 2006; Kim and Lee, 2008; Hwang and Cho, 2014), 추산용출소의 함양지역인 칼데라분지(나리분지)의 암석에(Im et al., 2011) 대해서는 어느 정도의 연구가 이루어지고 있으나 추산용출소의 용출량과 용출 특

*Corresponding author : cbw@kigam.re.kr

Received : 2018. 8. 29 Reviewed : 2018. 10. 19 Accepted : 2018. 11. 13

Discussion until : 2019. 2. 28

성에 대한 연구는 아직 보고된 바 없다. 단지 추산용출소의 용출량은 초당 220 L로 알려져 있으며(Doopedia), 추산용출소는 '나리분지에서 스며든 지하수가 피압수가 되어 지표로 용출하는 곳'으로 기재되어 있다(Ulleung-gun, 2007). 그러나 추산용출소의 지하수 용출지점을 관찰하면 지형경사가 급해지는 지질경계선 지점에서 지하수가 용출되고 있어서 피압수가 지표로 용출되는 상태는 아니다.

본 연구에서는 추산용출소 함양지역 일대의 지질, 2년간에 걸친 11회의 추산용출소의 용출량 측정, 강수량과 용출량과의 관계 등의 해석을 통하여 추산용출소의 용출 기구, 정확한 용출량 규모, 용출 특성을 파악하고자 하였다.

2. 연구지역과 방법

2.1. 수문지질

울릉도는 북동-남서방향이 약 12 km, 북서-남동방향 약 8 km인 섬이다. 면적은 72.8 km²이고 가장 높은 곳은 성인봉으로 해발고도는 983.6 m이다. 울릉도의 지형은 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 둘러싸이며, 남동벽과 남서벽은 500 m 내외의 단애에 의하여 둘러싸이고 북벽은 50~150 m 이하의 낮은 산지로 막힌 나리분지를 이룬다(Ulleung-gun, 2007) (Fig. 1(a)). 추산용출소는 이 나리분지의 북측 하류에 위치하고 있다(Fig. 1(b)).

칼데라분지내에는 조면암으로 이루어진 중양화구인 알봉이 있다. 조면암 위에는 조면암질 암설 및 화산회 등이 퇴적된 나리응회암층이 있다. 나리응회암층 위에는 조면암질 및 현무암질 쇄설물들이 두껍게 퇴적되어 있는데 (Fig. 2) 칼데라 남동측에는 그 두께가 약 70 m나 되는 것으로 알려져 있다(Im et al., 2011). 이 퇴적물은 주로 조면암질 부석응회암으로 이루어져 있어서 분지내로 유입된 지표수를 흡수하는 저장고의 역할을 한다. 즉, 칼데라 분지 상류지역에 내린 강수는 지표수를 이루어 하류로 이동하다가 지형경사가 완만한 조면암질 부석응회암지역에서 지하로 스며든다. 이 지하수는 하류인 북측으로 이동하다가 조면암과 나리응회암의 경계부이면서 지형경사가 급한 지점인 추산용출소에서 대부분이 용출되며 일부는 추산용출소의 좌, 우측 하천으로도 유출된다(KIGAM, 2011).

울릉도는 해양성 기후에 속하며 연평균 강수량이 내륙 지방보다 많아서 지표수와 지하수가 상대적으로 풍부한 편이다. 도동에 위치한 울릉도기상대에서 측정된 최근 10년간 연평균 강수량은 1,722.8 mm로서(KMA, 2013) 우리나라 연평균 강수량 1,250.2 mm(KWRC, 2007)에 비해 472.6 mm가 많다. 최저 연강수량은 2008년도의 1,448.3 mm이고 최고 연강수량은 2003년의 2,231.9 mm이다. 울릉도기상대에서 관측된 1960년부터 2011년까지 52년 동안의 연간 강수량 추이를 살펴보면, 해마다 약 7.8 mm씩 증가하는 양상이 나타나고 있음이 보고되고 있다(Ulleung-gun, 2013). 최근 10년간의 월평균 강수량을 보면 최저는 2월의 83.2 mm이고 최고는 7월의 227.5 mm이다. 강수가

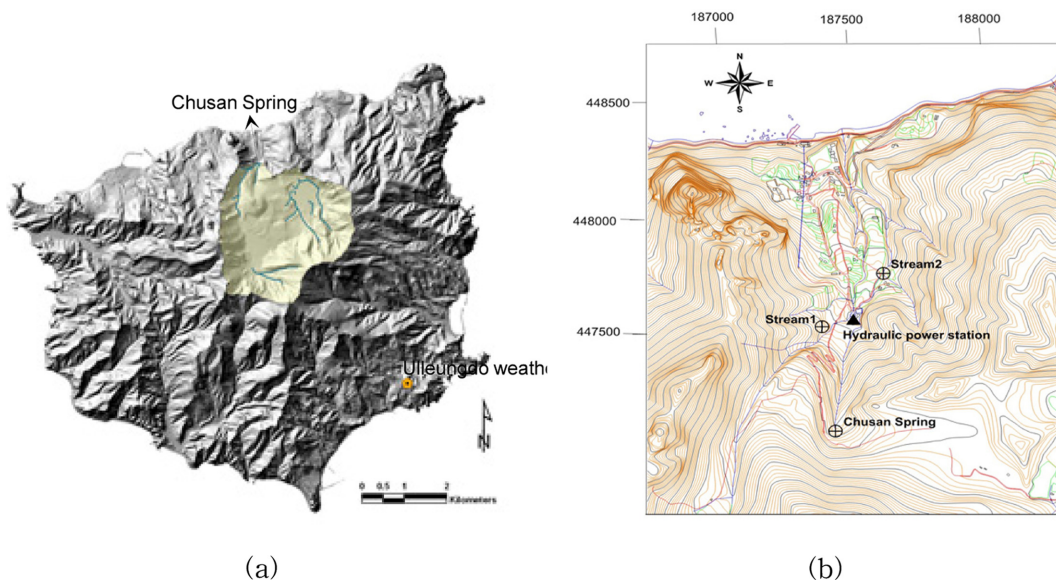


Fig. 1. Shaded relief image of the Ulleung Island (a) and location of the Chusan Spring with the hydraulic power station and two streams (stream 1 and 2).

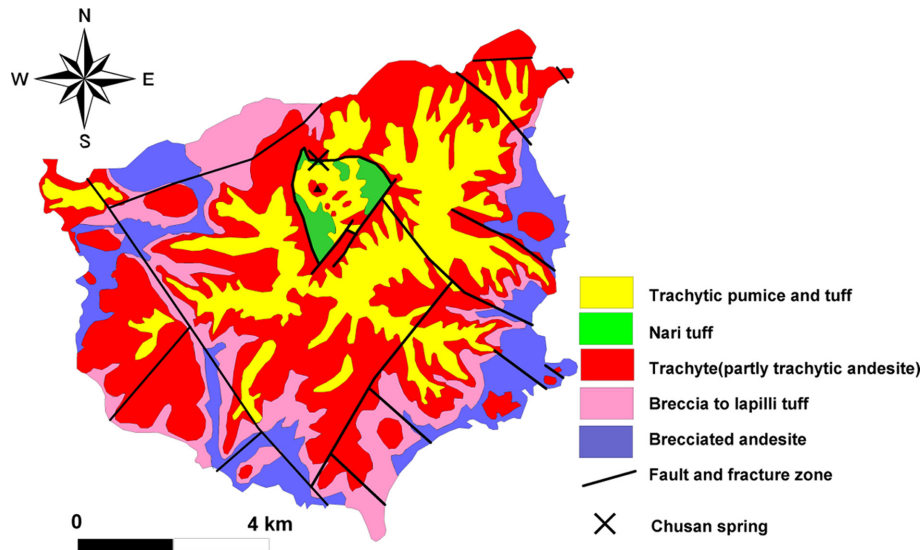


Fig. 2. Geological map of the Ulleung Island.

Table 1. Monthly precipitations of the Ulleung Island for ten years

Year	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Total
2003	115.7	66.9	66.9	396.1	323.5	248.6	285.8	252.9	202.8	35.0	53.2	184.5	2,231.9
2004	136.2	35.2	69.1	112.8	127.4	186.7	180.0	398.4	330.4	44.0	152.1	183.0	1,955.3
2005	101.1	59.7	115.4	34.7	30.7	93.8	177.3	77.5	427.5	186.7	80.0	128.4	1,512.8
2006	50.5	102.7	65.9	120.3	236.2	72.5	525.5	176.4	119.1	53.4	230.5	161.5	1,914.5
2007	85.1	65.5	117.1	18.8	191.1	142.5	126.7	95.5	308.8	181.2	106.4	119.3	1,558.0
2008	183.5	163.6	51.0	43.2	89.2	178.5	224.0	197.3	67.5	77.1	61.2	81.9	1,418.0
2009	164.4	23.0	119.4	123.4	172.5	71.3	300.9	91.0	136.8	36.1	229.9	147.4	1,616.1
2010	182.9	131.6	110.0	58.0	132.2	75.2	167.8	74.7	157.5	146.5	27.0	184.9	1,448.3
2011	321.1	90.3	93.8	214.5	72.6	308.1	98.9	55.3	193.0	94.0	84.4	169.8	1,795.8
2012	189.8	93.5	106.3	145	91	81.7	188.1	206	235.1	87.2	140	213.4	1,777.1
Ave.	153.0	83.2	91.5	126.7	146.6	145.9	227.5	162.5	217.9	94.1	116.5	157.4	1,722.8

집중되는 시기는 7, 8, 9월이나 이들 3개월의 강수량은 연 강수량의 35.3%에 불과해(Table 1) 70% 내외인 내륙 지방에 비해서는 적은 편이다. 울릉도의 5년간(2006년~2010년) 연평균 강수일은 150일 정도이며, 이 중 평균 강설일은 50일 정도이다. 한편 2002년부터 2011년까지 울릉도의 연평균 적설량은 255.7 cm로 알려져 있다(KIGAM, 2012).

2.2. 추산용출소의 용출량 측정

용천의 용출량이나 하천의 유출량 산정을 위해서는 보통 유속을 측정한다. 즉, 용출량은 용출지점을 여러 개의 소단면으로 나누고 각 소단면에서의 유속을 측정하여 각 소단면의 용출량을 구한 다음 이들을 합하여 전체 용출량을 계산하는 방법이다. 추산용출소에서의 유속 측정은 측

정지점의 심도가 0.35 m 미만은 0.6 m depth 지점의 유속(Sixth-tenths-depth)을, 측정지점의 심도가 0.35 m 이상일 경우는 2점법(Two-point method)을 이용하였다(Rantz, 1982). 유속 측정에 이용된 기기는 독일 OTT사의 Small Current Meter C2 유속계였다. 유속의 계산은 측정된 유속의 범위에 따라 OTT사의 경험식을 이용하였다. 경험식은 초당 회전수(N)가 3.06 미만일 때는 $V = 0.0607 N + 0.020$, 3.06과 9.60 사이일 때는 $V = 0.0558 N + 0.035$, 9.60 이상일 때는 $V = 0.0533 N + 0.059$ 이었다.

추산용출소의 지하수 용출은 조면암과 나리용화암의 경계부에서 일어나고 있으나 추산발전소로의 안정적인 물 공급을 위하여 추산용출소 용출 입구를 중심으로 저수지를 만들었다(Fig. 3(a)). 저수지에 저장된 추산용출소의 물 중 일부는 직경 50 cm의 파이프를 통하여 추산발전소로



Fig. 3. The scenery of Chusan Spring submerged in a reservoir (a) and flow velocity measurement at the point of the Chusan Spring after drain (b).

공급되고 나머지 물은 저수지를 넘쳐 하류로 방류된다. 즉 추산용출소의 용출량을 측정하기 위해서는 저수지의 물을 배수시킨 후 용출지점에서 직접 측정하거나 또는 추산발 전소에서 사용되는 수량과 방류되는 수량을 측정하여 합하면 된다. 추산용출소의 용출량 측정은 가능하면 저수지의 물을 배수시키고 난 다음 용출지점에서 직접 측정하려고 하였으나 여의치 않을 때는 후자의 방법을 이용하였다. Fig 3(b)는 저수지의 물을 배수시키고 난 뒤 용출지점에서 직접 유속 측정을 하고 있는 모습이다.

2.3. 장기 용출량 관측

추산용출소에서 용출되는 지하수는 용출지점 입구의 저수지에 모였다가 하류로 방류된다(Fig. 3(a)). 추산용출소의 용출량 변화를 관측하기 위하여 저수지에 자동수위기록기인 Vanessen사의 CTD Diver-100을 설치하여 30분 단위로 저수지의 장기 수심변화를 측정하였는데 측정 가능 수심은 13.5 m이다. 만일 추산용출소의 지하수 용출량이 많아지면 저수지의 수위가 상승하여 CTD Diver에 기록된 수심이 깊어지며, 용출량이 감소하면 저수지의 수위가 하강하여 기록된 수심이 얕아질 것이다. 저수지의 수심을 나타내는 CTD Diver의 압력센서는 기압에 민감하게 반응하므로 울릉도기상대의 3시간 단위의 기압자료를 이용하여 CTD Diver에 기록된 수심 중 기압변화에 의한 영향을 제거하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 추산용출소의 용출구조와 용출량 측정

추산용출소는 나리분지의 최하류에 위치해 있기 때문에 함양지역은 나리분지중에서도 해발고도가 약 300 m 이상

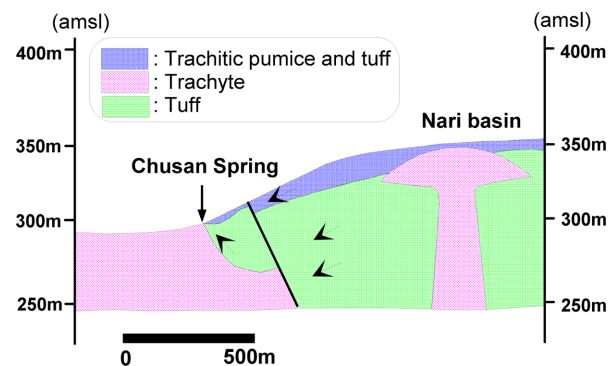


Fig. 4. A simplified geological section showing the underground flow mechanism of the Chusan Spring.

인 지역이다. 즉, 함양지역에 내린 강우와 겨울철의 강설은 지표수의 형태로 하류인 북쪽으로 흐르다가 지형경사가 완만해지는 조면암질 부석용회암에 도달해서는 지하로 침투하여 이동하여 조면암과 나리용회암 경계부에서 대부분이 용출된다(Fig. 4). 즉, 울릉도 화산체의 분화구가 화산활동을 마치면서 일어난 침강현상으로 추산리쪽 조면암과 접하면서 생성된 단층을 따라 나리분지의 조면암질 부석용회암에 저유되어 있던 지하수가 유입되어 용출되는 것으로 해석된다(KIGAM, 2012). 만일 나리분지에 단시간에 강수량이 집중되면 조면암질 부석용회암의 저유 능력을 넘어서는 지표수는 일시적으로 하천을 이루어 하류로 이동할 것이다. 이의 흔적은 알봉 좌측의 건천에 남아 있다.

추산용출소의 용출량 산정을 위한 유속 측정은 2010년 8월 21일부터 2012년 8월 22일까지 총 11회에 걸쳐 이루어졌다. Table 2는 2011년 8월 18일 저수지의 물을 배출시키고 난 뒤 추산용출소 입구에서 직접 유속을 측정한 결과를 나타낸 것이다. 11회의 유속 측정 중 7회는 저수지의 물을 빼고 난 뒤 추산용출소의 용출 입구에서 유속을 측정하였다. 나머지 4회의 용출량 산정은 저수지에서

Table 2. Results of flow velocity and calculated discharge of the Chusan Spring measurement

Date	point	depth (m)	rev1 (30 sec)	v1 (m/s)	rev2 (30 sec)	v2 (m/s)	Ave. v (m/s)	distance (m)	Q (m ³ /s)
8/28/11	0	0.04	24	0.069			0.069		
	1	0.13	85	0.192			0.192	0.2	0.0022
	2	0.32	63	0.147			0.147	0.5	0.0191
	3	0.52	82	0.186	85	0.192	0.189	0.5	0.0353
	4	0.68	69	0.16	113	0.245	0.202	0.5	0.0587
	5	0.75	151	0.316	20	0.06	0.188	0.5	0.0698
	6	0.78	138	0.292	34	0.089	0.19	0.5	0.0724
	7	0.63	83	0.188	57	0.135	0.162	0.5	0.0627
	8	0.49	97	0.216	59	0.139	0.178	0.5	0.0475
	Total								0.367

rev1: revolution at 0.2 depth, v1: flow velocity at 0.2 depth, rev2: revolution at 0.8 depth, v2: velocity at 0.8 depth
point 0, 1, 2: revolution and velocity at 0.6 depth

Table 3. Results of the 11 discharge measurements at point A, B, C, D and E (m³/d) of the Chusan Spring

Meas. point	8/21/10	12/18	3/05/11	5/15	8/28	10/13	11/25	3/21/12	5/22	7/31	8/22
A	9,722	4,969						7,392	19,783		
B	16,049	10,251	13,332					12,436	16,495	12,436	
C	16,849	8,248		17,732		15,407	17,731	11,302	39,617	20,300	
D							1,892	1,492		2,280	
E			20,718	34,539	31,708	29,093	27,515			31,954	25,892
A+B	25,771	15,220						19,828	36,278		

A: Overflow, B: Hydraulic power station, C: A+stream 2, D: Stream 1, E: Direct measurement at the Chusan Spring (Total discharge)

방류되는 지하수(A)와 추산발전소에서 이용량(B)을 측정하여 두 유출량을 합산하여 이루어졌다(Table 3). 측정된 11회의 용출량 중 최저는 2010년 12월 18일의 15,220 m³/d이고 최고는 2012년 5월 22일의 36,278 m³/d이다. 2년간의 평균 용출량은 26,596 m³/d이고 계절적으로 보면 추산용출소 함양지역의 눈이 녹는 시기인 4~5월 사이에 용출량이 많다.

나리분지의 물은 모두가 추산용출소로만 용출되는 것은 아니다. 일부는 추산용출소의 좌측 하천(Stream 1)과 우측 하천(Stream 2)으로도 유출된다(Fig. 1(b)). 추산용출소의 좌측 하천수는 알봉 좌측에서부터 나타나기 시작하는데 이는 하류로 올수록 조면암질 부석응회암의 두께가 얇아져서 조면암질 부석응회암 지하수가 다시 지표수로 노출되기 때문으로 해석된다. 추산용출소 부근에서 측정된 좌측 하천수의 유출량은 1,492 m³/d에서 2,280 m³/d로 추산용출소의 용출량 변화와 비슷하다. 그러나 우측 하천수의 유출량은 추산용출소보다도 강우에 민감한 반응을 보인다. 추산발전소 우측에서 측정된 Stream 2의 유출량(C)은 나리분지에서 추산용출소 우측 계곡으로 유출되는 지하수와

추산용출소 저수지에서 방류되는 지하수(A)가 더해진 것이다. 따라서 Stream 2의 유출량에서 A의 유출량을 빼면 나리분지에서 우측계곡으로 유출되는 하천수의 양이 된다. 나리분지에서 추산용출소 우측 계곡을 통해 유출되는 지하수량은 2012년 3월의 3,910 m³/d에서 2012년 5월의 19,834 m³/d까지로 유출량의 변화가 크다(Table 3). 이의 원인으로는 함양지역에 단기간에 많은 비가 내릴 경우 지하로 침투한 지하수 중 추산용출소 대수층의 저유 능력을 넘는 지하수는 추산용출소 우측 계곡으로 유출되기 때문으로 해석된다.

3.2. 장기 용출량 변화

추산용출소의 장기 용출량 변화를 파악하기 위하여 추산용출소 저수지에 CTD Diver를 설치하고 30분 간격으로 저수지의 수심을 관측하였다. 총 11회에 걸쳐 측정된 추산용출소의 용출량과 용출량 측정시 관측된 저수지의 수심자료를 이용하여 추산용출소 용출량-저수지 수심과의 상관관계를 구하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 산출된 추산용출소의 용출량과 저수지 수심과의 상관계수는 0.837

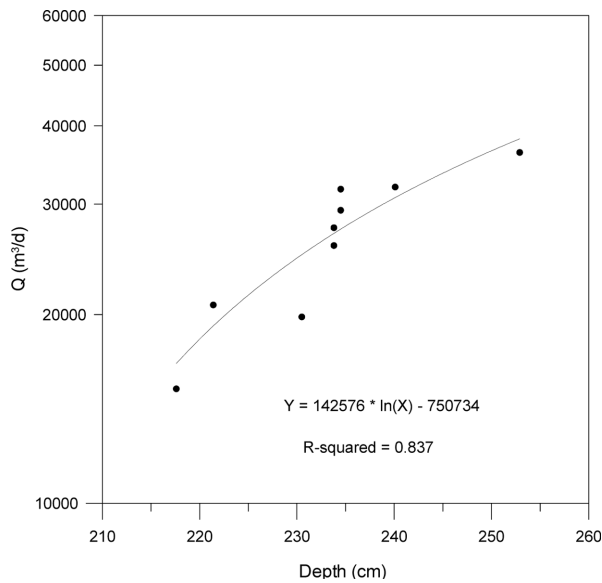


Fig. 5. Relationship between water depths of the reservoir and discharge rates of the Chusan Spring.

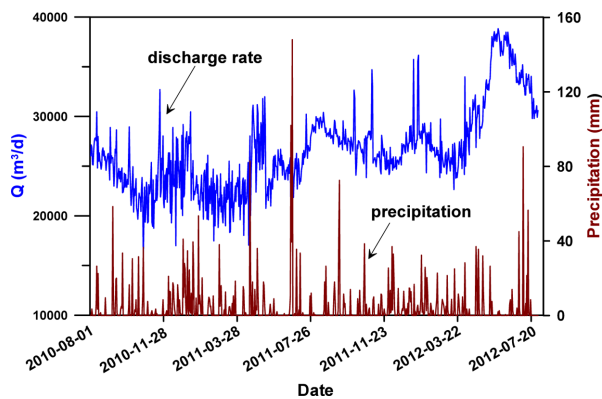


Fig. 6. Discharge hydrograph of the Chusan Spring and precipitation at Ulleungdo weather station during the period of August 2010-July 2012.

로 상관성이 높은 것으로 나타났다.

추산용출소 지하수의 기원은 강수이기 때문에 장기적으로 볼 때 강수량이 많으면 추산용출소의 용출량도 증가할 것이다. 강수량과 추산용출소 용출량과의 상관관계를 파악하기 위하여 2010년 8월 1일부터 2012년 7월 31일까지의 울릉도기상대의 강수량과 Fig. 5의 상관식을 이용하여 산정된 용출량과의 관계를 도식하였다(Fig. 6). 추산용출수의 용출량은 약 20,000~38,000 m³/d의 범위로 계절별 용출량 변화가 적은 편이다. 추산용출소의 용출량은 강수 이벤트와 일치하지는 않으나 3,000~5,000 m³/d의 단기 용출량 변동을 보인다. 전반적으로 보아서 추산용출소는 이 테리 Serino spring의 용출량 변화(Fiorillo et al., 2007)

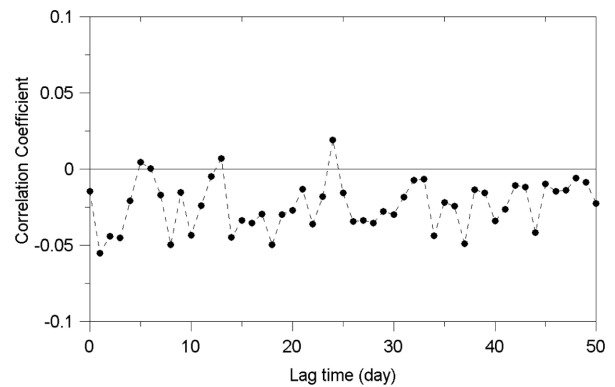


Fig. 7. Result of cross correlation analysis between precipitation and discharge rate of the Chusan Spring.

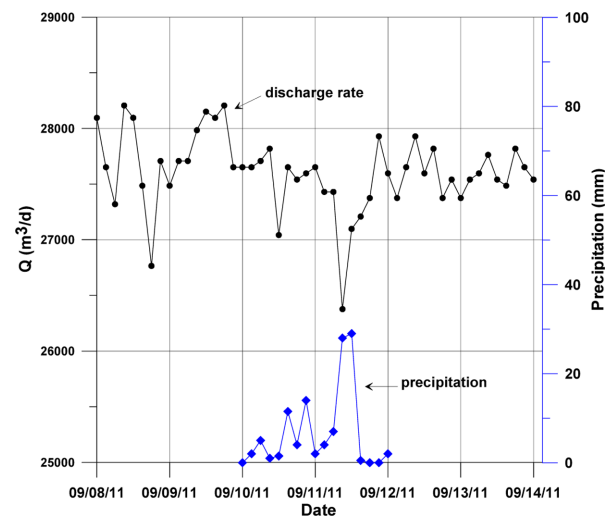


Fig. 8. Discharge hydrograph of the Chusan Spring and precipitation at Ulleungdo weather station during the period from Sep. 9 to Sep. 13 in 2011 at interval of 3 hours.

와 유사하게 우기에서 건기로 넘어가는 9, 10, 11월은 용출량이 줄어들고, 함양지역에 쌓인 눈이 녹는 시기인 4, 5월에는 용출량이 증가하는 경향을 보인다.

일반적으로 용천수의 용출 양상은 유역의 크기와 형상 뿐만 아니라 강우 강도에도 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Kresic and Stevanovic, 2010). 그러나 연구지역에서 강수량이 추산용출소의 용출량에 미치는 영향은 단기간의 일시적인 영향만 나타나고 있다. 2010년 8월 1일부터 2012년 7월 31일까지 2년 동안의 강수량과 추산용출소의 용출량 시계열 자료 간의 교차상관분석을 수행한 결과 지연시간 50일 이내에서 -0.055~0.019의 상관계수를 보여준다(Fig. 7). 최대 상관계수는 지연시간 24일에서 0.019로 나타나 강우가 용출량에 직접적인 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이의 원인으로는 몇 가지를 생각할 수

있다. 우선 함양지역과 추산용출소와의 거리는 불과 2~3 km에 불과하지만 일부 추산용출소 함양지역의 조면암질 부석응회암은 두께가 최고 70 m나 되어(Im et al., 2011) 지하수 저장능력이 크고 따라서 추산용출소까지의 흐름은 기저유출의 형태이기 때문에 단기간의 집중 강우와 가뭄에 의한 영향을 크게 받지 않기 때문으로 판단된다. 다음으로는 울릉도의 연간 강수일은 평균 150일 정도로 내륙지방에 비해서 많으며 강우강도도 내륙지방에 비해서 약하다. 울릉도의 7, 8, 9월 3개월의 강수량은 1년 전체 강수량의 35.3%에 불과해(Table 1) 70% 내외인 내륙지방에 비해서 적다. 마지막으로 추산용출소 함양지역은 해발고도가 높아서 겨울철에는 강수가 눈의 형태이고 상대적으로 천천히 지하로 침투하는 특징도(Fiorillo and Guadagno, 2010) 강수량과 추산용출소의 용출량과의 상관관계를 약화시켰을 것으로 판단된다.

추산용출소와 같이 함양지역과 용출지점의 거리가 짧으면 용출량은 강수량에 바로 반응함이 일반적이다. 그러나 울릉도기상대의 강수량과 추산용출소의 용출량은 상관성을 보이지 않는다. 예를 들면 2010년 8월 1일부터 2011년 7월 31까지의 울릉도기상대에서 관측된 강수량은 1,790 mm이고(Table 1) 추산용출소의 평균 용출량은 24,025 m³/d이다. 그러나 2011년 8월 1일부터 2012년 7월 31까지의 울릉도기상대에서 관측된 연강수량은 1,514 mm에 불과하지만 추산용출소의 평균 용출량은 29,166 m³/d로 오히려 더 많다. 이는 해발고도가 300 m 이상인 추산용출소 함양지역의 강수량과 강우강도 등은 해발고도 223 m에 위치한 울릉도기상대와 다를 수 있음을 지시한다. 따라서 추산용출소의 장기 용출량 특성 해석을 위해서는 추산용출소 함양지역의 나리응회암층과 조면암질 부석응회암의 층후 분포와 함께 강수 특성에 대한 자료가 필요하다.

3.3. 함양지역의 강수량과 지하수 함량률

지하수위 변동곡선법을 이용한 내륙지방의 유역별 지하수의 함량률은 6.1~10.0% 정도로 알려져 있다(Moon et al., 2002). 그러나 추산용출소의 함양지역은 강우의 지하 침투가 용이한 조면암질 부석응회암으로 이루어져 있으며(Im et al., 2011), 해발고도가 300 m 이상이기 때문에 낮은 증발산량과 많은 적설량으로 인해서 저지대보다 지하수 함양에 유리하다. 실제로 Fig. 1(a)에서 보는 바와 같이 성인봉 부근에서 발원한 지표수는 하류인 추산용출소쪽으로 흐르다가 지형경사가 완만해지고 강수의 지하침투가 용이한 조면암질 부석응회암으로 구성된 성인계곡

입구에서는 지하로 스며들어 건천을 이룬다. 그러나 단기간에 많은 강우가 집중될 시에는 지하로 스며들지 못한 강수의 일부가 일시적으로 하천을 이루기도 한다.

나리분지를 포함한 유역분수령(Fig. 1(a))은 약 7 km²이다. 울릉도기상대에 기록된 2010년 8월 1일부터 2011년 7월 31까지의 강수량은 1,790 mm인데(Table 1) 이를 유역분수령에 내리는 연 강수량으로 환산하면 약 12,530,000 m³이 된다. 한편 동일 기간 내에 추산용출소를 통해서 지표로 용출되는 지하수량은 약 8,851,250 m³으로 산정된다(Fig. 6). 따라서 본 유역 분수령에 내린 강수량이 증발산이 없이 모두 지하로 침투한다고 가정하면 추산용출소에서 배출되는 지하수는 연 강수량 1,790 mm의 70.6%인 1,264 mm에 해당된다. 그러나 본 분수령 내 지하로 침투한 지하수의 일부분은 추산용출소의 좌, 우 하천으로도 유출되며(Fig. 1(b)) 증발산작용도 일어날 것이다. 예를 들면 2010년 8월 21일의 추산용출소의 용출량은 2010년 8월 1일~2011년 7월 31일까지의 평균 용출량과 비슷한 25,771 m³/d이고 이때 추산용출소 좌측 하천 유출량은 1,892 m³/d, 우측 하천수의 유출량은 7,127 m³/d이었다(KIGAM, 2012). 만일 추산용출소의 용출량과 좌, 우 하천수의 유출량을 합하고 이를 함양지역(약 7 km²)의 강수량으로 환산하면 연강수량 1,790 mm의 101.3%인 1,814.1 mm가 추산용출소 부근에서 유출되는 셈이다. 따라서 함양지역의 실제 연강수량은 도동에 위치한 울릉도기상대에서 관측한 1,790 mm보다 훨씬 많을 것으로 해석된다.

추산용출소 함양지역의 강수량이 울릉도기상대에서 관측한 강수량보다도 훨씬 많을 것으로 예상되는 또 다른 근거로는 울릉도기상대의 해발고도는 223 m임에 비하여 추산용출소 함양지역의 해발고도는 300~984 m이나 된다는 사실이다. 제주도의 표고별 연평균 강수량은 해발고도 200 m 이하 지역은 1,625 mm이나, 400~600 m는 2,131.0 mm, 600~800 m는 2,291.7 mm로 해발고도가 올라갈수록 강수량은 증가한다(Han et al., 1994). 또 제주도 남측사면에서는 해발고도가 100 m씩 증가할수록 강수량은 241 mm가 증가하는 것으로 보고되고 있다(KWRC, 2003). 추산용출소 함양지역의 지하수 함양률은 많은 강수량, 겨울철의 적설량, 다공성인 지질특성으로 인해서 제주도의 함양률인 40%보다도(Han et al., 1994) 더 높을 것으로 예상되나 정확한 함양률 해석을 위해서는 울릉도기상대의 자료가 아닌 해발고도가 더 높은 나리분지에서의 강수량 자료가 필요하다.

3.4. 일 용출량 변화

추산용출소의 용출량은 단기간의 강우에 의해 일별, 시간별로도 변할 가능성이 있다. 이를 파악하기 위하여 3시간 단위의 강수량과 CTD Diver의 수심자료를 이용한 추산용출소 용출량과의 관계를 살펴보았다(Fig. 8). 울릉도 기상대의 자료에 의하면 2011년 9월 10일에 41 mm, 9월 11일에 72.5 mm의 강수가 기록되어 있지만 41 mm, 72.5 mm 강우 후 추산용출소의 용출량 증가 현상은 나타나고 있지 않으며 오히려 감소함을 보인다. 또한 강우가 있기 전인 2011년 9월 9일부터 강우 후인 9월 13일 사이 추산용출소의 용출량 변화는 1,600 m³/d 정도로서 전체 용출량의 10% 미만에도 불과하다. 일반적으로 카르스트지역이나 투수성이 높은 균열암반 대수층에서는 위와 같은 정도의 강우시 수 시간만에 수 배에 달하는 용출량 증가가 바로 일어나는 것(Kresic and Stevanovic, 2010)에 비하면 추산용출소는 단기간의 강우에 의한 일 용출량 변화는 거의 나타나지 않는다(Fig. 8).

울릉도기상대와 추산용출소 함양지역과의 직선거리는 불과 6 km 내외에 불과하지만 해발고도 차이는 100~700 m나 되기 때문에 추산용출소 함양지역의 강수량은 울릉도기상대에서 관측된 41 mm, 72.5 mm의 강수량보다 더 많았을 가능성이 크다. 그럼에도 불구하고 Fig 8에서와 같이 강수에 따른 추산용출소의 용출량 변화가 거의 없는 것은 나리분지 상류지역의 조면암질 부석응회암의 두께가 두꺼움을 지시한다. 추산용출소의 장기 용출량과 함께 일 용출량 변화 특성을 파악하기 위해서는 나리응회암층과 조면암질 부석응회암의 층후 분포와 함께 추산용출소 함양지역의 강수량, 강우강도 등의 자료가 필요하다.

4. 결 론

추산용출소의 용출량 범위와 용출특성을 파악하기 위하여 함양지역의 지질, 11회의 용출량 측정, 장기 용출량 관측, 강수량과 용출량과의 관계를 해석하였다. 추산용출소의 용출 구조는 지하수 함양지역인 성인봉 하류 칼데라 내에 내린 강우가 지표수의 형태로 하류로 흐르다 조면암질 부석응회암에서는 지하로 침투하여 하류로 이동하다가 조면암과 나리응회암 경계부에서 용출되는 형태이다. 함양지역의 일부 지하수는 추산용출소의 좌, 우측 하천으로도 유출된다. 2년간 관측된 추산용출소의 용출량은 약 20,000~38,000 m³/d(평균 26,596 m³/d)의 범위로 계절별 용출량 변화가 적은 편이다. 용출량은 우기에서 건기로 넘어가는 9, 10, 11월은 줄어들고, 건기에서 우기로 넘어가

는 시기인 동시에 추산용출소 상류에 쌓인 눈이 녹는 시기인 4, 5월에는 증가함을 보인다. 전반적으로 보아서 추산용출소의 용출량은 일정 강수량 이하의 단기간의 강수량에는 직접적인 반응을 보이지 않는데 이는 추산용출소 함양지역의 조면암질 부석응회암층의 두께가 두꺼운 점, 울릉도의 연 강수량과 강수일이 많으며 강우강도가 내륙 지방에 비해서 약한 점, 4~5월 사이 함양지역의 눈이 추산용출소의 용출량을 증가시키기 때문으로 해석된다. 추산용출소 용출량과 좌, 우 하천 유출량을 합한 배출량은 울릉도기상대에서 관측된 강수량을 지표수로 환산한 양보다 많은 것으로 계산되어 함양지역의 함양율, 추산용출소의 용출 특성 해석을 위해서는 나리응회암층과 조면암질 부석응회암의 층후 분포와 함께 함양지역의 강수 자료가 필수적이다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 2016년 ‘복합 인공함양기법을 이용한 지하수 확보·활용기술 개발: GP2015-014-2016(2)’의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Brune, G., 1975, Major and historical springs of Texas, Texas Water Development Board, Report No. 189, 95 p.
- Clarke, F.W., 1924, Mineral wells and springs. In: The data of geochemistry, USGS (United States, Geological Survey), Reston, VA, 181-217 p.
- Doopedia, <http://www.doopedia.co.kr>, 2011.5.12
- Fiorillo, F., Esposito, L., and Guadagno, F.M., 2007, Analysis and forecast of water resources in an ultra-centenarian spring discharge series from Serino (Southern Italy), *J. Hydrol.*, **336**, 125-138.
- Fiorillo, F. and Guadagno, F.M., 2010, Karst spring discharges analysis in relation to drought periods, using SPI, *Water Resour. Manage.*, **24**, 1867-1884.
- Han, J.S., Han, K.S., Kim, C.K., Kim, N.J., and Han, C., 1994, Sustainable yield of groundwater resources of the Cheju Island, *J. Korea Soc. Groundwater Environ.*, **1**(1), 33-50.
- Hwang, S.K. and Cho, I.H., 2014, Petrologic evolution processes of the latest volcanic rocks in Ulleung Island, East Sea, *J. Geol. Soc. Korea*, **50**(3), 343-363.
- Im, J.H., Choo, C.O., and Jang, Y.D., 2011, Petrological and mineralogical characteristics of matrix of pumice in Ulleung

- island, *J. Miner. Soc. Korea*, **24**(3), 151-164.
- KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 2011, Feasibility study on the development of the Chusan Spring water, Ulleung-gun, 155 p.
- KIGAM, 2012, Study on the development of the Chusan Spring water, Ulleung-gun, 207 p.
- Kim, K.B. and Lee, G.D., 2008, A study on volcanic stratigraphy and fault of Ulleung-do, Korea, *J. Eng. Geol.*, **18**(3), 321-330.
- KMA (Korea Meteorological Administration), <http://www.kma.go.kr/> [accessed 13.06.25]
- Kresic, N. and Stevanovic, Z., 2010, Groundwater hydrology of springs engineering, theory, management, and sustainability, Elsevier, 592 p.
- KWRC (Korea Water Resources Corporation), 2007, Basic plan for groundwater management, MOCT (Ministry of Construction and transportation), 149 p.
- KWRC, 2003, Investigation of hydrogeology and groundwater resources of Jeju Island, Jeju, 425 p.
- Moon, S.K., Woo, N.C., and Lee, K.S., 2002, A study on the relation between types and recharges of groundwater : analysis on national groundwater monitoring network data, *J. Korea Soc. Groundwater Environ.*, **12**(4), 98-104.
- Rantz S.E., 1982, Measurement and computation of streamflow: volume 1. measurement of stage and discharge, USGS, Geological survey water supply paper 2175, 284 p.
- Song, Y.S., Park, M.E., and Park, K.H., 2006, Ages and evolutions of the volcanic rocks from Ulleung-do and Dok-do, *J. Petrol. Soc. Korea*, **15**(2), 72-80.
- Springer, A.E., Stevenson, L.E., Anderson, D.E., Parnell, R.A., Kreamer, D.K., Levin, L., and Flora, S.P., 2008, A comprehensive springs classification system: integrating geomorphic, hydrogeochemical, and ecological criteria. In: Stevens LE, Meretsky VJ (eds) Arid land springs in North America: ecology and conservation, University of Arizona Press, Tuson, AZ.
- Ulleung-gun, 2007, Ulleung-gun report, Ulleung-gun, 1,390 p.
- Ulleung-gun, 2011, Feasibility study on the development of the Chusan Spring water, 155 p.
- Ulleung-gun, 2013, Study on the development of the Chusan Spring water, 207 p.
- USGS, 1982, Measurement and computation of streamflow: volume 1, measurement of stage and discharge, 284 p.