1930년대 제주도 수원의 수질 특성

권홍일¹ · 오윤영¹ · 박윤석² · 김강주³ · 함세영^{1*}

¹부산대학교 지구환경시스템학부, ²제주특별자치도 수자원본부, ³군산대학교 환경공학과

Water Quality Characteristics of Jeju Island in 1930s

Hong-Il Kwon¹, Yun-Yeong Oh¹, Yoon-Suk Park², Kangjoo Kim³ and Se-Yeong Hamm^{1*}

¹Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

²Jeju Water Resources headquarters, Jeju Special Self-Governing Province 695-962, Korea

³Department of Environmental Engineering, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

In this study, the chemical components (pH, HCO_3^- , Cl^- , and SO_4^{2-}) of water sources (surface water, groundwater, and spring water) in 1930s were compared to those in the period of 1985–1992 in Jeju Island. By the comparison, pH values and Cl^- and SO_4^{2-} concentrations in 1930s appeared similar to those in the second period (1985–1992) while HCO_3^- increased about the six times in the second period. Such a great increase of HCO_3^- concentration may be caused by the increase of carbon dioxide in the atmosphere due to industrialization.

Key words : Jeju Island, 1930s, water source, water quality, carbon dioxide

본 연구에서는 1930년대 제주도의 수원(지표수, 지하수, 용천수)의 수질(pH, HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-})과 약 50년 후(1985~1992년)의 수질자료를 비교하였다. 그 결과 두 시기 사이에 pH값과 Cl^- , SO_4^{2-} 의 농도는 큰 차이가 없었으나, HCO_3^- 의 농도는 두 번째 시기(1985~1992년)에서 6배 정도 증가하였다. 이러한 HCO_3^- 농도 증가는 산업화에 따른 대기 중 이산화탄소량의 증가에 의한 것으로 추측된다.

주요어 : 제주도, 1930년대, 수원, 수질, 이산화탄소

1. 서 언

제주도는 면적 1,849 km^2 , 장축(동-서)의 길이 74 km, 단축(남-북)의 길이 32 km인 타원형의 화산섬으로서 대한민국에서 가장 큰 섬이다. 지형은 장축인 동서방향으로는 완만하고, 남북방향으로는 험준한 편이다(Fig. 1).

일본제국주의 강점기인 1919년부터 일본인 학자들에 의해 처음으로 제주도의 지질조사가 이루어지기 시작하였고(Haraguchi, 1919), 1937년에 일본중앙공업시험소에 의해 제주도 지하수에 대한 기초조사가 이루어졌다(Wataru *et al.*, 1938). 해방 후 1960년대부터는 우리나라 학자들에 의해 본격적으로 지질과 지하수에 대한 조사·연구가 이루어졌다. 1963년부터 1965년까지

는 국립지질조사소(현 한국지질자원연구원)에 의해서 제주도 남부와 남동부지역에 대해 지질조사가 실시되었으며, 1965~1966년에는 (주)한국지하자원조사소에 의해서 제주도 전역에 대한 지질 및 지하수조사가 실시되었다(Kim, 1969). 한편, 건설부는 1965년에 제주도 산업지 기초조사 및 고지대 용수이용계획수립을 위한 조사용역을 실시하였다. 농업진흥공사(현 한국농어촌공사)에서는 1971년 제주시 한림읍의 지하수 관정개발을 시초로 지속적인 농업용수개발을 진행하여 왔다. 또한 제주특별자치도 수자원 본부에서는 2003~2007년까지 제주도 광역상수도사업 시설공사를 수행하였다.

본 연구에서는 일제강점기인 1937년 9월부터 10월까지 실시된 제주도의 수자원에 대한 최초의 조사(Wataru *et al.*, 1938)와 제주시, 김녕지역, 남동부지역,

*Corresponding author: hsy@pusan.ac.kr

Fig. 1. Water sampling areas of Jeju island in 1937.

서귀포지역, 모슬포지역, 북서부지역의 61개 지하수수질분석자료를 바탕으로 그 당시의 제주도 수자원의 특성을 파악하였다(Fig. 1). 그리고 1937년 이후 50년이 지난 1985~1992년의 지하수 수질(Ann *et al.*, 1989; Choung *et al.*, 1985, 1986; U *et al.*, 1988, 1990, 1991, 1992)을 비교·검토하고자 하였다.

2. 지형 및 지질

2.1. 지형

제주도는 제3기 플라이오세말에서 제4기 플라이스토세말에 걸친 화산분출과 지반 융기와 함몰에 의해서 형성되었으며(Yoon *et al.*, 2003), 제주도의 중앙에는 남한에서 가장 높은 한라산(높이 1,950 m)이 솟아 있고, 한라산 정상에는 지름 575 m, 깊이 100 m의 화구호인 백록담이 있다. 순상화산인 한라산의 주변에는 360여 개의 오름(기생화산)이 분포하고 있다(Fig. 1). 동서지역의 완만한 지형에는 파호이호이용암(pahoehoe lava)

이 분포하며, 남북지역의 험준한 지형에는 아이용암(aa lava)이 분포하고 있는데, 파호이호이용암의 분포면적이 아이용암보다 넓은 면적을 차지한다(Lee *et al.*, 2006).

제주도에는 서쪽으로부터 도너리오름(도을악, 道乙岳, 440 m), 영아리오름(영아이악, 靈阿伊岳, 681 m), 돌오름(석악, 石岳, 869 m), 한라산(1950 m), 흙붉은오름(토적산, 土赤山, 1402 m), 성널오름(성관악, 城板岳, 1219 m), 물чат오름(거문악, 拒文岳, 736 m), 대록봉(大鹿峰, 475 m) 등의 일련의 화산들이 N75°E 방향인 성산일출봉 쪽으로 뻗어있으며, 제주도의 해안선은 신생대 용암류에 의해 피복되어 모두 하나의 지질 구조선에 의해 지배되고 있다.

제주도의 수계는 대체로 남쪽과 북쪽 두 방향으로 형성되며, 북쪽으로 흐르는 하천은 별도천(別刀川), 산지천(山地川), 도근천(都近川) 등이고, 남쪽으로 흐르는 하천은 천미천(川尾川), 근천(根川), 효돈천(孝敦川), 정방천(正房川), 연외천(淵外川), 강정천(江汀川), 소가래천(小加來川), 감산천(柑山川) 등이다. 이들 중 표류수

Table 1. Annual precipitation of Jeju Island during 1934-1936 (mm)

Year	Jeju	Seongsan	Seogwipo	Hanlim
1934	1406.6	2043.6	2190.5	1358.1
1935	1347.6	1738.8	2390.6	1307.4
1936	1571.5	2057.8	2347.2	1379.5
Average	1,441.9	1,946.7	2,309.4	1,348.3

를 가지는 하천은 산지천, 도근천, 소가래천, 강정천, 연외천, 정방천 등이고, 그 외 하천들은 호우 시에만 격류를 형성하여 다량의 토사와 전석을 흘려보내지만 강우가 멈추면 수 시간도 되지 않아 거의 말라버리는 간헐천이다.

강수량의 경우 1937년 당시 지난 3년간(1934년~1936년)의 연평균 강수량은 약 1762 mm 였고, 지역별로는 제주가 약 1442 mm, 성산은 약 1947 mm, 서귀포는 약 2309 mm, 한림이 약 1348 mm 였다(Table 1). 한편 2013년 현재 지난 30년간(1983년~2012년) 연평균 강수량은 약 1,822 mm 로 1937년 당시보다 약 3.4 %(약 60 mm) 정도 증가한 것으로 나타났으며 지역별로는 고산이 약 1,180 mm, 제주가 약 3,508 mm, 서귀포가 약 1,908 mm로 조사되었다(Jeju Special Self-Governing Province and Korea Water Resources Corporation, 2002, Table 2).

2.2. 지질

1937년의 수리지질 조사에서는, 제주도 화산활동을 제3기말부터 대략 3개의 시기로 구분하여, 화산분출 초기(제1기)는 산성 마그마의 조면암분출기, 제2기는 중성 마그마의 조면암질안산암 분출기, 그리고 최후기(제3기)는 염기성 마그마의 현무암분출기로 구분하였으며, 이는 Haraguchi (1919)의 조사내용과 동일하다(Table 3). 그리고 당시 제주시의 동쪽, 베리오름(별도봉, 別刀峰) 서북해안의 화강암 노두와 시추자료를 근거로, 제주도의 지하 심부에 화강암류가 분포하고 있다고 추론하였다(Wataru *et al.*, 1938).

Table 2. Annual precipitation of Jeju Island during 1983-2012 (mm)

Year	Jeju	Gosan	Seongsan
1983	1373.6	1835.1	1958.9
1984	878.5	1145.8	1255
1985	2420.6	3244.3	3193.9
1986	1828.6	1746	1801.3
1987	1719.4	1952.9	2323.5
1988	1084.6	1591.8	1264.4
1989	1358.6	1681.9	1696.1
1990	1544.5	2398.6	1952.3
1991	1810.9	1872.6	1983.8
1992	1232.9	1827.5	1981.4
1993	1552.8	2190.2	2025.4
1994	1448.9	1626	1509.3
1995	1472.9	2280.4	2169.8
1996	881.1	1656	1757.9
1997	999.5	1575.8	1803
1998	1581.1	2091.9	2235.9
1999	2526	2970.5	2328
2000	1189.4	1368.5	1370
2001	1388.6	1782.1	1856.5
2002	1704.1	1877.2	1781.5
2003	1999.2	2280.1	2550.5
2004	1333.8	2018	1962.5
2005	872.5	1390.6	1588
2006	1527.4	1757.6	2238
2007	2139.8	2166.5	2582.5
2008	1719.4	1952.9	2323.5
2009	1308.8	1661.4	1770.7
2010	1584.9	2393.3	2086.8
2011	1478.6	2010.2	1865.7
2012	2248.3	2700.8	2458.4
Average	1526.5	1970.0	1970.2

Table 3. The composition of lava in Jeju Island (Haraguchi, 1919)

Lava	Mt. Hanlla	Yimdo	Mt. Sanbang	Hacan-ri	Beoldo-bong	Gaksuam	Toido-dam	Seo-gyeupo	Yongdang-cheon	Alakli Basalt	Hanllasan basalt	Jeju Basalt	Gim-nyeong
SiO ₂	64.62	61.36	59.51	56.34	56.19	54.98	54.87	54.28	50.02	48.33	47.6	46.86	43.41
TiO ₂	0.27	0.37	1.13	0.94	2.14	0.93	1.33	1.23	2.25	2.31	1.78	2.69	2.58
Al ₂ O ₃	17.9	18.12	18.52	17.43	16.12	21.13	17.91	17.82	15.08	16.13	14.77	16.37	15.52
Fe ₂ O ₃	1.86	2.08	2.84	3.52	2.44	3.49	4.68	2.66	6.42	4.60	2.78	6.01	3.99
FeO	1.84	2.14	2.68	6.46	5.50	2.66	3.57	6.95	7.17	7.39	8.58	6.04	8.15
MnO	0.08	0.12	0.22	0.25	0.30	0.21	-	0.18	0.20	0.12	0.67	1.23	1.38
CaO	2.31	3.21	4.19	3.80	7.63	3.72	7.38	6.49	6.40	10.67	12.76	6.81	10.77
Na ₂ O	5.19	6.08	5.02	5.13	4.39	5.94	4.58	3.91	4.33	3.74	3.76	5.28	4.28
K ₂ O	5.25	4.95	3.16	3.32	2.30	3.40	3.20	3.40	2.97	1.07	1.03	2.41	1.30
H ₂ O	0.32	1.75	1.37	1.02	0.47	1.47	0.77	0.37	0.64	0.56	0.45	0.01	0.46
P ₂ O ₅	0.02	0.23	0.14	0.24	0.55	0.97	1.02	0.29	n.d.	1.46	1.40	1.71	1.29
SO ₃	-	-	0.10	-	-	-	-	0.09	-	-	-	-	-
ZrO ₂	-	-	-	-	-	0.08	-	-	-	-	-	-	-
Total	99.82	100.5	99.96	100.3	101.1	99.76	100.46	99.24	100.5	100.51	100.16	100.7	99.94
Sp. gr.	2.617	2.647	2.659	2.707	2.85	2.637	-	2.767	-	2.851	2.889	2.843	2.882

2.2.1. 제1기(조면암 분출기)

제주도 최초의 화산활동은 신생대 제3기말(플라이오세) 지각변동에 의해서 일어났으며, 이와 함께 한라산을 지나는 동북방향의 선과 이에 평행한 구조선을 따라 조면암질 용암이 분출하였다. 이 조면암질 용암은 약 65~60%의 규산함량을 가지고, 한라산용암, 어승생오름(어승생악, 御乘生岳)용암, 성널오름(성판악, 成板岳)용암, 수도(壽道)용암 등이 이에 속한다. 이 화산활동의 말기에 약간의 해성의 용암류(서귀포해안에서 나타나는 서귀포층)가 있었던 것으로 보이고, 서귀포층 중에 포함된 폐각화석을 근거로 약 제4기 플라이스토세 초기에 속하는 것으로 파악하였다.

2.2.2. 제2기(조면암질안산암 분출기)

서귀포층의 퇴적후 잠시 화산활동의 휴지기 이 후 다시 지각변동을 동반한 화산활동에 의해서 기존의 구조선을 따라 조면질안산암류의 대분출이 일어났다. 이들 암석의 규산함량은 59~54%의 중성용암으로 상당한 범위에 걸쳐 용암대지가 형성되었다. 그리고 이 시기에 분출된 용암으로는 산방산(山房山)용암, 각수암(角秀岩)용암, 어승생오름용암, 함각섬석조면암질안산암 그리고 서귀포 부근에서 나타나는 조면질안산암류 등이다.

2.2.3. 제3기(현무암 분출기)

조면질안산암의 분출 후 제주도의 화산활동은 일시 소강상태를 가졌고, 최후기에 현무암 대분출이 일어났다. 용암의 분출과 화산 폭발이 반복적으로 일어났다. 용암의 분출구는 복잡한 화산구조선상에 위치하고 있었고, 폭발에 의해 무수히 많은 분출구도 생성되었다. 또한 화산각력암과 집괴암의 얇은 층이 각 용암의 사이에 협재된 경우가 많고, 이 화산활동에 의해 제주도는 거의 현재와 같은 모습으로 형성되어진 것으로 보인다. 이 시기에는 알칼리현무암, 제주용암, 장석현무암, 제1회석현무암, 제2회석현무암, 분출구, 비현정질현무암, 한라산현무암, 수기동(水基洞)현무암, 군산(軍山)현무암 등이 형성되었다. 이후에도 소규모의 화산활동이 일어났으나 점차 화산활동이 약해져서 현재는 휴화산이 된 것으로 파악하였다.

3. 1930년대 제주도 수원 및 수질

3.1. 지하수 수원

제주도의 지표는 다공성 암석과 절리, 균열 등으로 구성되어 있어서 강우의 대부분은 지하로 침투되고, 특

수한 곳을 제외하고는 계곡 침식작용이 크지 않으며, 하상 역시 대부분 용암류 층들로 구성되어 있다. 따라서 Wataru *et al.* (1938) 에서도 산지천(山地川), 도근천(都近川), 소가래천, 강정천, 연외천, 정방천 등에는 대부분 해발 700 m 이상의 상류지역과 해안 가까이 저지대에서만 표류수가 나타나고, 그 외 다른 하천에서는 무강우시에 하천수가 흐르지 않는 것으로 나타났다. 그 원인으로는 (a) 산악지대와 산기슭의 강수량 차이 (b) 계곡 형태 차이에 의한 상류(V자곡)에서의 이득 하천, 하류(U자곡)에서의 손실하천 현상 (c) 해수에 의한 단층 및 용암류의 침식으로 판단하였다(Wataru *et al.*, 1938). 또한 제주도에 하천의 표류수 및 복류수를 제외한 수원은 (a) 분화구호 (b) 말발굽형 분지에서 용천 (c) 용암터널의 용천 (d) 용암류 말단 또는 기타 급경사지에서의 용천 (마) 해안지역의 용천이 있는 것으로 파악하였다(Wataru *et al.*, 1938).

3.1.1. 분화구호

일본의 경우 화산 폭발에 의해 생성된 화구호가 각지에 존재하며, 이들 중 집수면적이 크고 유입량과 순환작용이 많은 호수가 지표수로 유출된 경우는 수질이 양호하나 그 외의 경우는 황산이온 때문에 산성을 나타내어 음용수로는 부적합한 것이 많았다(Wataru *et al.*, 1938), 반면 1937년 조사 당시 제주도의 경우 한라산 백록담, 사라오름(사라악, 紗羅嶽), 물장울(수장울, 水藏兀)의 분화구호를 확인하였으나 이들의 수질에 관해서는 충분한 조사가 이루어지지 않았다(Fig. 2).

3.1.2. 말발굽형분지

정물오름(정수악, 井水岳), 샘오름(천악, 泉岳) 등과 같은 말발굽형 분지의 경우 용천수의 수량이 많고(1000~2000 m³/day), 지하수의 순환고대작용이 활발하여 수질도 양호하고, 간단한 정수를 통해 음용수 또는 목축용으로 이용되고 있어서 추후 정밀 조사의 필요성을 제기하였다(Wataru *et al.*, 1937, Fig. 3). 이러한 말발굽형 분지는 (a) 화산 폭발시 화구벽의 일부 유실, (b) 용암류, (c) 기생화산의 분출 등의 원인에 의해서 생성되었다.

3.1.3. 용암터널

용암터널은 지상으로 분출된 용암의 표면이 냉각될 때, 아직 냉각되지 않은 내부 용암이 고체화된 표피를 뚫고 유출되면서 생성된다. 용암터널은 천연의 암거(暗渠, 지하수로)를 형성하면서 다량의 용출량을 보이는

Fig. 2. Caldera in Mountain Halla.

Fig. 3. Horse-shoe shaped basin.

경우가 있으며, 제주도에도 그 예가 많을 것으로 추론하였다(Wataru *et al.*, 1938).

Fig. 4. Steeply-sloped land

3.1.4. 용암류의 말단, 기타 급경사지

화산 산록지대의 용암류 말단 혹은 하천의 침식에 의해 하곡의 일부가 급경사를 이루는 지점(Fig. 4)에서 지층의 균열과 절리를 통하여 지하수가 유출하거나 투수성이 좋은 지층(집괴암, 화산재 등)으로부터 다량의

지하수가 용출하는 경우가 있었다(Wataru *et al.*, 1937). 대표적으로 용포리(翁浦里)부근의 용천수의 1937년 조사 당시 유량은 $180 \text{ m}^3/\text{min}$ 에 달하였고 수질도 양호한 것으로 나타났다(Fig. 5).

3.1.5. 해안지역

제주도의 산지에는 일반적으로 음용수가 부족한데 반해 해안에서는 도처에 용천수가 산출하였고, 유량과 수질 측면에서 이들 용천수가 중요한 음용수원이라는 것을 강조하였다.

일반적으로 해안지역의 용천수는 해수와 평형을 이루고, 용출량과 염소 농도는 매우 밀접한 관계를 가진다. 해안에서 염수와 담수사이의 평형은 Gyben-Hertzberg의 원리에 의해서 설명된다. 따라서 어떤 일정한 지층으로 이루어진 해안지역의 육지내에서는 담지하수의 높이(h)는 일정하다고 말할 수 있다. 조수 간만에 의해 해수면의 높이가 상승(하강)하면 육지내 담지하수의 수위도 이에 따라 상승(하강)할 것이다. 따라서 1937년 조사당시 제주도 해안 지역에서 나타난 현상(만조 후 비교적 다량의 용출량을 보이고, 최대 간조 시에는 최소의 용출량을 보이며, 때로는 용출량이 전혀 없는)의 원인을 설명할 수 있다. 또한 이러한 평형 상태에서 단기간에 대량의 담지하수를 양수할 경우 지하수면의 하강에 의한 압력의 감소를 보이게 되며, 지

하수면이 하강하면, 염수와 담지하수의 경계면은 같은 압력으로 상승하여 기존의 평형이 깨지면서 담수우물로의 염수 혼입이 일어날 것을 예측할 수 있다. 따라서 해안지역에서는 동일한 심도의 우물이라도 바다로부터의 거리에 따라 지하수 수질이 현저히 다르게 나타나는 현상을 설명할 수 있다(Wataru *et al.*, 1938).

한편 1930년대의 제주도는 수원의 부족과 수질의 악화로 인하여 심각한 상황에 처해 있었다. 간이상수도의 설비가 있던 곳은 서귀면에 있는 서귀포, 호근리(好近里), 토평리(吐平里), 신흥리(新孝里), 하효리(下孝里) 등이고, 그 외 마을에는 마을마다 1~2개의 우물을 가진 것은 그래도 양호한 편이며, 대부분의 해안지역 주민은 해안 용천수를 이용하였다. 그리고 중간산지지역 이상의 산지 주민의 경우에는 (a) 저지에 고인 물 (b) 하곡을 제방으로 일부 막은 것 (c) 지면에 저수지를 만들어 빗물이 저류된 것 (d) 혹은 수목에 줄을 휘감아 이것을 따라 흐르는 빗물을 항아리에 모으는 것(총항)과 같은 방법으로 음용수를 얻었으나 이들은 모두 지상의 오염물질이나 저수지에 빠진 부패물에서 생성된 유해 미생물 등으로 인해 일년내내 대장균 등에 의한 전염병이 끊이지 않은 것으로 나타났다. 특히 표선리에서 서쪽 5 km 떨어진 남토산(南兔山)에서 해안을 따라 남원면(南原面)의 제산포(濟山浦)부근에 이르는 동서 약 8 km 지역에 걸쳐 음용수내 세균 유입으로 인

Fig. 5. Topography formed by lava flow in Hanlim and Hyupjae areas.

Fig. 6. Spring water in coastal Hanlim area.

Table 4. Water analysis of Jeju island in 1930s and 1985-1992

1930s	pH				HCO ₃ ⁻ (mg/L)				SO ₄ ²⁻ (mg/L)				Cl ⁻ (mg/L)			
	Average	Min	Max	Median	Average	Min	Max	Median	Average	Min	Max	Median	Average	Min	Max	Median
Jeju	7	6	7	7	8.5	2.0	33.9	5.3	7	4	12	6	50.9	4.2	248.2	24.9
Gimnyeong	7	7	7	7	7.1	0.0	17.6	5.3	10	5	24	9	173.7	10.3	390.1	173.8
South-East	7	6	8	6	7.3	0.9	17.8	6.2	10	6	19	9	157.3	3.0	496.4	113.5
Seogwipo	7	6	7	7	5.2	2.7	7.1	5.3	9	5	24	5	6.5	5.3	7.8	6.5
Mosulpo	6	5	8	6	6.7	3.9	9.8	5.9	8	6	9	8	34.4	10.8	99.3	22.8
North-West	7	6	7	7	5.0	2.7	10.7	4.0	6	5	8	6	18.0	7.4	34.0	14.0
Average	7	6	7	7	6.6	2.0	16.2	5.3	8	5	16	7	73.5	6.8	212.6	59.2
1985-1992	pH				HCO ₃ ⁻ (mg/L)				SO ₄ ²⁻ (mg/L)				Cl ⁻ (mg/L)			
	Average	Min	Max	Median	Average	Min	Max	Median	Average	Min	Max	Median	Average	Min	Max	Median
Jeju	7.6	6.8	8.6	7.6	35.6	0.3	101.8	30.3	9.1	1.0	120.5	2.8	31.1	0.1	497.5	12.1
Gimnyeong																
South-East	7.2	6.5	8.3	7.1	40.2	5.9	84.6	34.8	4.4	0.5	30.9	2.9	20.2	6.6	106.1	16.3
Seogwipo	7.6	7.0	8.3	7.6	46.0	19.4	72.8	47.6	20.3	0.7	127.4	9.6	179.2	6.9	800.8	103.1
Mosulpo	7.6	6.7	8.5	7.5	36.6	13.1	63.8	37.2	4.6	0.4	14.7	3.8	23.6	10.0	143.2	18.1
North-West	7.7	7.1	8.5	7.6	54.3	12.9	316.2	37.4	5.2	0.3	12.4	4.8	20.3	6.6	90.2	14.6
Average	7.6	6.8	8.4	7.5	42.5	10.3	127.8	37.4	8.7	0.6	61.2	4.8	54.9	6.0	327.6	32.8

한 풍토병이 확인되었으며, 이로 인해 남녀 할 것없이 14~15세 이상의 이 지역 인구의 8%가 수족관절에 종창이 발생하고, 우천이나 흐린 날씨 등 날씨가 변할 때 관절통증을 동반한 발열증상이 있는 것으로 나타났다(Wataru *et al.*, 1938).

3.2. 지하수 수질

3.2.1. 제주도 토양과 지하수

1937년 조사당시에는 제주도의 기반암 및 토양이 산성을 나타내기 때문에 이들 사이를 흐르는 지표수 및 지하수는 보통 약산성(pH≤7) 이고, 대부분의 용천수는 해안에 인접하여 해수압(海水壓)과 평형을 유지하면서 용천수의 용출량이 조석 간만에 영향을 받고 있는 것으로 보았다(Wataru *et al.*, 1938, Table 3, Table 4). 따라서 만조시 해수면 아래로 가라앉는 용천수가 각처에 존재하며 염분 농도가 높은 것이 많았다. 제주도 전역의 6개 지역(제주시, 김녕지역, 남동부지역, 서귀포지역, 모슬포지역, 북서부지역)에 대한 1937년도의 조사에서 61개소에 대한 수질분석 결과를 이용한 염소와 경도(Hardness) 사이의 관계(Fig. 7)에 의하면, 표류수 및 용천수의 경우 염소이온 농도가 30 mg/L를 넘는 경우는 드물며, 경도(Hardness) 역시 1~3 도(mg/mL) 정도이다. 우물물의 경우 해수와 직접적인 관계가 없음에도 염소이온 농도가 높은 편으로 적게는 20~

90 mg/L, 경도(Hardness) 1~3 도(mg/mL), 많게는 120~500 mg/L, 경도(Hardness) 5~10 도(mg/mL)로 나타났다. 이러한 이유는 (a) 증발된 해수의 지표 강하 (b) 지하수의 순환교대(循環交代)의 정도 차이 (c) 지하에 스며든 해수의 일부가 확산 또는 모세관 현상 등에 의해 상승하여 혼화(混和)한 것 (d) 지층성분의 용해 또는 지표의 오염 때문으로 설명하였다(Wataru *et al.*, 1938).

Fig. 7. Cl⁻ concentration vs. total hardness (Wataru *et al.*, 1938).

3.2.2. 지하수 수질 특성

일반적으로 반도(半島)와 도서(島嶼)지방에서는 해수의 일부가 직접 바람에 의해 육지로 이동하거나, 해수가 증발 후 비·눈으로서 지표에 내린 결과 바다로부터 상당히 떨어진 높은 지대에서도 지하수의 염분 농도가 현저히 높은 경우가 많으므로 제주도에서도 이와 같은 이유로 지하수의 염분 농도가 높았을 것으로 설명하였다. 한편 얇은 우물물의 염분 농도가 지층의 절리, 균열 또는 사력층으로부터의 용출수의 염분 농도보다 훨씬 높은 이유는 해수로부터의 증발에서 유래하는 염분이 지하로 침투할 때 지하수 침투속도가 빠르면 천부대수층의 우물물에서 염분 농도가 높아지기 때문으로 보았다. 또 고지대가 아닌 지역에서는 지하 깊은 곳에 존재하는 염수의 일부가 확산이나 미세 균열 등을 따라서 모세관현상에 의해 상승하여 담지하수와 혼합되기 때문으로 판단하였다. 한편 특수한 지질구조 또는 주위의 현저한 오염 등에 의해 염분과 경도(Hardness)가 증가하기도 하지만, 1937년 당시에는 그런 현상을 인지할 수 없었다.

결국 제주도의 표류수 및 용출수는 수질이 좋아 음료수 및 공업용수로 사용할 수 있지만 지하수 m의 풍화대에 위치하는 우물에는 대부분 연화 및 여과장치를 필요로 하는 것으로 평가하였다(Wataru *et al.*, 1938).

제주시, 김녕지역, 남동부지역, 서귀포지역, 모슬포지

역, 북서부지역의 61개 지하수 수질 특성은 아래와 같다.

(1) 제주시

1937년 당시 제주읍(현재의 제주시)에서 볼 수 있는 얇은 우물은 대부분 pH 6~7, 경도(Hardness) 5도(mg/mL) 내외, 염분농도 80~250 mg/L로 상수도로서는 부적합하나 당시의 토지의 상황으로 인해 어쩔 수 없이 음용수로 이용되었다. 또 이 지역의 우물물은 기관급수(汽罐給水) 혹은 특히 양질의 물을 필요로 하는 공업용수로 직접 사용되기는 어려운 것으로 판단하였다(Table 4).

제주읍 내 산지의 용수(용천수, 용출수) 및 제주면 내 도근천의 표류수 등은 비교적 수질이 양호하고 또 수량도 풍부하여 제주읍 상수도 또는 공업용수원으로 가장 적절한 것으로 평가하였으나, 약산성(pH 6~7)의 수질은 소량의 석회 또는 소다회 처리를 하면 쉽게 정수할 수 있다고 보았다(Wataru *et al.*, 1938).

한편 1985~1992년에 조사된 제주시 주변 지하수 수질분석 자료에 의하면 pH의 범위는 6.8~8.6(평균 7.6)의 중성이고, HCO_3^- 농도는 0.3~101.8 mg/L(평균 35.6 mg/L)이며, Cl^- 농도는 0.1~479.5 mg/L(평균 31.1 mg/L), SO_4^{2-} 의 농도는 1.0~120.5 mg/L(평균 9.1 mg/L)로 나타났다(Table 4, Fig. 8).

1930년대와 50년이 지난 1985~1992년 사이의 제주시지역의 지하수 수질을 비교하면, Cl^- 와 SO_4^{2-} 농도는 크게 차이가 없었으나 pH의 경우 평균 7(1930년대)에서 7.6(1985~1992년)으로 약 0.6 정도(약4배)의 차이가 났고, HCO_3^- 농도는 평균 8.5 mg/L(1930년대)에서 35.6 mg/L(1985~1992년)로 4 배 이상 증가하였다. 이는 산업화에 의한 공기 중의 CO_2 농도의 상승과 연관이 있을 것으로 추정된다.

Fig. 8. Comparison of chemical concentration of 1930s and 1985-1990 in Jeju area.

Fig. 9. Chemical concentration in Gimnyeong area in 1930s.

(2) 김녕지역

1937년 조사 당시 김녕지역은 일반적으로 표류수가 적으며 우물물은 한동리(漢東里) 하동, 함덕리(咸德里), 조천리(朝天里) 등의 공용우물을 제외하고는 모두 염분 농도가 높은(170~400 mg/L) 것으로 나타났다. 경도(Hardness)는 5~8 도(mg/mL)로서 공업용수로는 잡용(雜用), 냉각용으로 그리고 관개용수로 쓸 수 있는 것으로 보았다.

pH는 평균 7(중성)이고 HCO_3^- 농도는 0.0~17.6 mg/L(평균 7.1 mg/L)이며, Cl^- 농도는 10.3~390.1 mg/L(평균 173.7 mg/L), SO_4^{2-} 의 농도는 5.0~24.0 mg/L(평균 10.4 mg/L)로 나타났다(Table 4, Fig. 9).

(3) 동남부지역

1937년 조사당시 제주도 동남부지역의 천미천(川尾川) 및 수산리(水山里)의 제1, 제2 저수지는 모두 빗물을 저류한 것으로 수질이 양호하나 고갈의 우려가 있으며, 우물물은 온평리(溫平里) 공용우물만 연수(軟水)이고 그 외는 모두 염분농도가 120~270 mg/L로 수질이 대체로 불량하였다. 또 온평리 공용우물은 착색이 심해서(백금코발트 색도 80도) 청정제(淸澄劑)나 모래로 여과한 후 사용할 것을 제안하였고, 신산리(新山里) 공용우물(pH 7) 및 성산포의 일부 우물(pH 8)은 특이하게 알칼리성을 나타냈는데 이는 해수의 영향인 것으로 판단하였다(Table 4, Fig. 10).

한편 1985~1992년의 동남부지역 지하수 수질분석 자료에 의하면 평균 pH의 범위는 7.0~8.3(평균 7.6)의 중성이고 HCO_3^- 농도는 19.4~72.8 mg/L(평균 46.0 mg/L)이며, Cl^- 농도는 6.9~800 mg/L(평균 179.2 mg/L), SO_4^{2-} 의 농도는 0.2~127.4 mg/L(평균 20.3 mg/L)로 나타났다(Table 4, Fig. 10)

1930년대의 수질과 50년이 지난 1985~1992년의 동남부지역 지하수의 수질을 비교하면, Cl^- 와 SO_4^{2-} 의 농도는 크게 차이가 없었으나 pH의 경우 평균 7(1930년대)에서 7.6(1985~1992년)으로 높아졌고, HCO_3^- 농도는 평균 7.3 mg/L(1930년)에서 46.0 mg/L(1985~1992년)로 6 배 이상 증가하였다. 이는 산업화에 의한 공기중의 CO_2 농도의 상승과 연관이 있을 것으로 판단된다

(4) 서귀포지역

1937년 당시 동홍리의 용천수를 제외하고 토평리, 호근리 및 서귀포는 모두 절리에서 용출하는 물을 철관으로 자연 유하시켜 간이상수도 수원으로 사용하고 있었다. 본 지역의 용천수는 수량이 풍부하고, 수질이 약산성(pH 6~7)인 것을 제외하면, 경도(Hardness) 1도(mg/mL) 이하, 염분농도 10 mg/L 이하로 화학적 성분이 양호하여 기관(汽缸)급수는 물론 제사(製絲), 제지(製紙), 통조림, 기타 각종 공업용수로 쓸 수 있을 것으로 판단하였고, 석회 또는 소다회로 처리하면 수

Fig. 10. Comparison of chemical concentration of 1930s and 1985-1992 in south-east area.

Fig. 11. Comparison of chemical concentration of 1930s and 1985-1992 in Seogwipo area.

질을 향상시킬 수 있을 것으로 전망하였다(Wataru *et al.*, 1938, Table 4, Fig. 11)

한편 1985~1992년의 서귀포지역 지하수 수질분석 자료에 의하면 pH는 7.0~8.3(평균 7.6)의 중성이고 중탄산이온(HCO_3^-)의 농도는 13.1~63.8 mg/L(평균 36.6 mg/L)이며, 염소이온(Cl^-) 농도는 6.9~800.8 mg/L(평균 179.2 mg/L), 황산이온(SO_4^{2-})의 농도는 0.7~127.4 mg/L(평균 20.3 mg/L)로 나타났다(Table 4, Fig. 11).

1930년대와 1985~1992년의 서귀포지역 지하수의 수질을 비교하면, Cl^- 와 SO_4^{2-} 의 농도는 큰 차이가 없었으나 pH의 경우 평균 6.7(1930년대)에서 7.6(1985~1992년)으로 10배 가량 차이가 났고, HCO_3^- 농도는 평균 5.2 mg/L(1930년대)에서 46.0 mg/L(1985~1992년)로 8 배 이상 증가하였다.

(5) 모슬포지역

본 지역은 서귀포의 서쪽, 제주도 남서쪽 끝에 위치하며, 1937년 조사 당시 일반적으로 표류수는 부족하며 용천수는 서귀포지방 보다는 산성을 띠는 pH 5~8을 나타내었다. 또한 해안 용출수는 많으나 대부분 만조 때 해수면 하 0.5~1.5 m에 잠기고, 용출량도 조석 간만에 따라 차이가 있는 것으로 나타났으며, 모슬포 서쪽 봉수대 터 부근의 것은 해수의 침입도 없고 수량이 풍부하며 수질 또한 양호하다고 하였다(Wataru

et al., 1938, Table 4, Fig. 12)

한편 1985~1992년의 모슬포지역 지하수의 수질분석 자료에 의하면 pH는 6.7~8.5(평균 7.6)이고 HCO_3^- 농도는 13.1~63.8 mg/L(평균 36.6 mg/L)이며, 염소이온(Cl^-) 농도는 10.0~143.2 mg/L(평균 23.6 mg/L), 황산이온(SO_4^{2-})의 농도는 0.4~14.7 mg/L(평균 4.6 mg/L)로 나타났다(Table 4, Fig. 12).

1930년대와 1985~1992년의 모슬포지역 지하수의 수질을 비교하면, Cl^- 와 HCO_3^- , SO_4^{2-} 의 농도는 큰 차이가 없었으나 pH의 경우 평균 6(1930년대)에서 7.6(1985~1992년)으로 10배 이상 증가하였다.

(6) 북서부지역

북서부지역은 한림면 및 애월면으로 하귀리(下貴里), 애월리(涯月里)의 용천수, 광지리(郭支里)의 우물물 및 한림리(翰林里)의 지표수 등은 매우 풍부한 유량을 가지는 것으로 조사되었다. 대부분 수질이 양호하며 일부 혼탁한 것도 볼 수 있으나 적당한 장치에 의해 정수할 수 있을 것으로 보았다(Wataru *et al.*, 1938, Table 4, Fig. 13).

한편 1985~1992년의 북서부지역 지하수 수질분석 자료에 의하면 pH는 7.1~8.5(평균 7.7)이고 HCO_3^- 농도는 12.9~316.2 mg/L(평균 54.3 mg/L)이며, Cl^- 농도는 6.6~90.2 mg/L(평균 179.2 mg/L), SO_4^{2-} 농도는 0.3~12.4 mg/L(평균 5.2 mg/L)로 나타났다

Fig. 12. Comparison of chemical concentration of 1930s and 1985-1992 in Moseulpo area.

Fig. 13. Comparison of chemical concentration of 1930s and 1985-1992 in north-west area.

(Table 4, Fig. 13).

1930년대와 1985~1992년의 북서부지역 지하수의 수질을 비교하면, Cl^- 와 SO_4^{2-} 의 경우 큰 차이가 없었으나 pH는 평균 7(1930s)에서 7.7(1985~1992)으로 0.7 정도 증가하였고, 중탄산이온(HCO_3^-)의 농도는 평균 5.0 mg/L(1930s)에서 54.3 mg/L(1985~1992)로 10 배 이상 증가하였다(Fig. 13).

4. 결 언

1930년대 당시 제주도에서는 중산간지대의 개발과 더불어 해안지역의 원활한 음용수 공급이 보건위생상으로 필요할 뿐만 아니라 나아가서 산업발전 측면에서도 중요하다고 보았다. 또한 당시 해안지역 마을의 음용수는 용천수 수원을 정수처리함과 더불어 인접 마을들의 공동 수원을 찾아서 간이상수도를 설치할 것을 권고 하였다. 또한 1930년대의 수질조사 결과에 의하면 제주도의 지표수, 용천수, 지하수는 모두 수질이 약 산성(평균 pH≤7)이고, 염소의 농도가 높았다(평균 73.5 mg/L). 그 원인으로는 (a) 증발된 해수의 지표 강하 (b) 지하수의 순환교대(循環交代) 정도의 차이 (c) 지하의 염수가 확산 또는 모세관 현상 등에 의해 상승하여 혼합(混和)한 것 (d) 지층의 화학성분이 용해 또는 지표의 오염 등에 의한 것으로 판단하였고, 상수도 및 기타 철관 부식에 주의를 요한다고 하였다. 특히 1930년대 당시 남원면 부근에서 보게 되는 풍토병은 수인성세균에 의한 것으로 판단하였고, 장차 조사·연구의 필요성을 제기하였다.

제주도 전역에 대한 1930년대의 용천수 수질분석 결과, pH는 5(모슬포)~8(김녕)로 평균 7 이하이었고, 중탄산이온(HCO_3^-)의 농도는 0.0(김녕)~33.9 mg/L(제주읍), 평균 7.2 mg/L로 비교적 지표수의 특성에 가깝게 나타났다. 한편 염소이온 농도는 평균 94.7 mg/L이고 3.0(동남부지역)~396.4 mg/L(동남부지역)이며, 황산이온(SO_4^{2-})의 농도는 4(제주읍)~24 mg/L(김녕), 평균 8 mg/L를 보였으며, 김녕지방과 남동부지역의 우물과 용천수가 해수의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다.

반면 1985~1992년의 수질분석 결과, pH는 6.5(동남부)~8.6(제주)으로 평균 7.5 이었고, HCO_3^- 의 농도는 0.3(제주읍)~316.2 mg/L(북서부), 평균 41.2 mg/L로서 1930년대에 비해 6 배 정도 증가하였다. 이에 반해 염소이온 농도는 0.1(제주읍)~801 mg/L(서귀포), 평균 70.8 mg/L로서 1930년대보다 감소하였다. 그러나 황산이온(SO_4^{2-})의 농도는 0.3(북서부)~127.4 mg/L(서

귀포), 평균 10.3 mg/L를 보여서 1930년대와 거의 차이가 없었다. 이와같이 1930년대와 1985~1992년의 pH와 HCO_3^- 의 농도 차이는 산업화에 의한 공기중의 이산화탄소양이 증가한 것에 그 원인이 있는 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업 지하수활용 가치 극대화 및 기반기술(11기술혁신C05-1)의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- An, J.-S., U, Z.-K., Choung, C.-C. and Song, S.-J. (1989) Environmental Isotope-Aided Studies on Water Resources in the Region of Cheju (IV), Cheju Applied Radioisotope Research Institute Cheju National University Annual Report, 4.
- Choung, C.-C., Park, Y.-M., U, Z.-K., Yoo, K.-J. and An, J.-S. (1985) Environmental Isotope-Aided Studies on Water Resources in the Region of Cheju (I), Cheju Applied Radioisotope Research Institute Cheju National University Annual Report, 1.
- Choung, C.-C., U, Z.-K., An, J.-S. and Song, S.-J. (1986) Environmental Isotope-Aided Studies on Water Resources in the Region of Cheju (II), Cheju Applied Radioisotope Research Institute Cheju National University Annual Report, 2.
- Haraguchi. (1919) The report of Geological survey in Joseon, Geological Survey of Government General of Joseon, 10(1).
- Lee, B.-J., Koo, M.-H., Park, Y.-S., Koh, G.-W. and Park, K.-H. (2006) Hydraulic diffusivity and possibility of conduit-flow of groundwater in eastern part of Jeju island. Journal of the Geological society of Korea, 42(3).
- Jeju Special Self-Governing Province, Korea Water Resources Corporation. (2002) Comprehensive hydrogeological investigations and groundwater resources in Jeju Island (II).
- Kim, O.-J. (1969) Distinctiveness of water resources and development plan in Jeju-island, Mine geology, 2(1).
- U, Z.-K., Choung, C.-C., An, J.-S. and Song, S.-J. (1988) Environmental Isotope-Aided Studies on Water Resources in the Region of Cheju (III), Cheju Applied Radioisotope Research Institute Cheju National University Annual Report, 3.
- U, Z.-K., Choung, C.-C., Song, S.-J. and An, J.-S. (1990) Environmental Isotope-Aided Studies on Water Resources in the Region of Cheju (V), Cheju Applied Radioisotope Research Institute Cheju National University Annual Report, 5.
- U, Z.-K., Choung, C.-C., Song, S.-J. and An, J.-S. (1991) Environmental Isotope-Aided Studies on Water Resources in the Region of Cheju (VI), Cheju Applied

- Radioisotope Research Institute Cheju National University Annual Report, 6.
- U, Z.-K., Choung, C.-C., Song, S.-J. and An, J.-S. (1992) Environmental Isotope-Aided Studies on Water Resources in the Region of Cheju (VII), Cheju Applied Radioisotope Research Institute Cheju National University Annual Report, 7.
- Wataru, M., Masao T. and Matsuo, H. (1938) Water survey of Jeju Island, Test center report of Government General of Joseon, 17(11), Industrial water survey (no. 4).
- Yoon, J.-S., Kim, G.-P. and Jung C.-Y. (2003) A Hydrogeological Study on High Saline Groundwater of Handong-ri in the Eastern Part of Jeju Island, Korea. Journal of the Geological society of Korea, 39(1).

2013년 9월 30일 원고접수, 2013년 11월 25일 1차수정,
2013년 12월 17일 게재승인