

제주도 용천수의 수질 화학적 특성과 연대 측정에 관한 연구

金鍾勳* · 安鍾成†

전주대학교 이공대학 화학과

† 한국원자력연구소 수문기술실

(1992. 5. 1 접수)

Water Chemistry and Age Dating of Springwater in Cheju Island

Jong-Hun Kim* and Jong-Sung Ahn†

Department of Chemistry, Jeonju University Jeonju 560-759, Korea

† Hydrology Department, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353, Korea

(Received May 1, 1992)

요 약. 제주도 해안가 용천수의 수질화학적 특성과 연대에 관한 연구하였다. 수질화학적 특성은 TDS와 전기전도도, Cl과 H-3의 상관관계, Cl/HCO₃비, 경도와 유사경도의 관계 등에 의하여 C₁, C₄, C₇, C₉ 용천수만 해수의 영향을 받지 않았으며 이때 C₇ 용천수는 Mineral Balance Index에 의해 맛있고 건강한 물이라 평가되었다. 강수의 Tritium 함유량과 용천수중의 Tritium 잔존량을 기초로 한 연대측정에서 제주도 수리지질 및 수문화학적 조건에 적합한 Completely mixed model에 의한 값으로 해수의 영향을 거의 받지 않는 C₉ 그룹(C₁₀, C₁₂, C₁₄) 용천수의 평균 이동시간은 약 1.2개월, 맛있고 건강한 물로 평가된 C₇ 용천수의 평균 이동시간은 5.6개월, 심부 지하수인 C₁₇은 약 4년 정도로 계산되었다.

ABSTRACT. The water chemical characteristics and age dating of springwater in Cheju island had been investigated. C₁, C₄, C₇, C₉ springwaters were not affected by seawater intrusion by TDS and electrical conductivity, relationship of Cl and tritium, Cl and HCO₃ ratio, and total hardness and pseudo hardness. In this case only C₇ springwater was evaluated tasty and healthy mineral springwater by Hahimoto's Mineral Balance Index. On the basis of the mean tritium content of rainfalls and springwater, the average residence time of it, were calculated. Considering the hydrogeologic and hydrochemical condition, completely mixed model seems to be very fit. It was obtained the result that C₉ group springwater (C₁₀, C₁₂, C₁₄) was 1.2 months, C₇ springwater was 5.6 months, and deep groundwater C₁₇ was 4 years.

서 론

이 사실이다.

제주도는 한국 최대의 강우량을 가지면서도 화산 용암으로 구성된 특수상층 구조로 되어 있어서 용수의 부족을 면치 못하고 있는 실정이다. 따라서 제주도에 대한 지하수 개발사업은 그동안 급격한 증가추세에 있는 용수 수요에 대비한 해결책의 일환으로 추진되어 왔다.

그동안 조사연구로서 본 도에 대한 지하수의 부존형태¹나 수리지질학적 특성²은 상당한 부분이 밝혀진 바 있으나 해안가에 인접한 용천수와 지하수의 수질화학적 특성과 연대측정에 대한 연구는 없었음

본 연구는 1984년부터 실시해온 동위원소를 이용한 제주지역 수자원에 관한 연구사업중 제주도 용천수와 지하수의 수질화학적 특성과 나이에 대하여 고찰한 것이다.

수질화학적 특성을 분류하는 방법은 Piper의 diagram에 의한 방법³, 각각의 주요 양, 음이온의 성분특성에 의한 방법⁴ 등이 있으나 본 연구는 주로 해안가 주변에 위치한 용천수가 해수에 의하여 어느 정도 영향을 받고 있으며, 이들이 식수로서의 사용 가능성에 대하여 TDS와 전기전도도, Cl과 H-3, Cl과

HCO_3^- 비, 경도와 유사경도, Mineral Balance Index 등으로 서로 관련지어 해석하였고, 연대측정에서는 Nir⁵의 Piston flow model과 Completely mixed model을 사용하여 상호값을 비교한 후 제주도의 지질과 수문화학적 조건에 맞는 모델값을 설정하였다.

실험

시료채취. 제주도 전지역에 걸쳐서 해수(C_{15} , C_{16}), 용천수($C_1 \sim C_{14}$)와 지하수(C_{17})로 구분하여 84년부터 계절별로 채수하였다(*Fig. 1* 참조).

이화학적 분석. 수온은 수온온도계를 사용하여 현장에서 측정하였으며, pH는 시료를 실험실로 운반 후 즉시 pH meter(Corning Model 5)로 측정하였고, 전기전도도는 Conductivity bridge(Y.S.I. Model 31)를 사용하였고, 양이온(Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})은 원자흡광분광기(Perkin Elmer. Model 2380)로 측정하였으며, 이때 Ca^{2+} , Mg^{2+} 의 경우 화학간섭을 줄이기 위해 0.25% La_2O_3 용액을 처리하였다.

또한 음이온(Cl^- , $\text{CO}_3^{2-} + \text{HSO}_3^-$, SO_4^{2-})인 경우 Cl^- 은 AgNO_3 적정법, $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}^-$ 는 0.05 N H_2SO_4 적정법, SO_4^{2-} 는 탁도정량법으로 측정하였다.

환경동위원소 측정. 모든 물 시료는 증류하여

염을 제거한 후 600 g을 취하고 전기분해로 20 g이 될 때까지 농축한다. 이때 소요되는 농축시간은 약 210 시간이며, Tritium 함량을 이미 알고 있는 2개의 Tritiated water를 다른 시료와 동일하게 처리하여 농축계수를 계산한다.

농축 및 증류가 완료된 시료를 계측용기에 10 ml 취하고 여기에 Instagel 10 ml 가하여, 1개월 이상 안정성이 유지되도록 한다. 이 Tritium 시료는 액체섬광계수기(Packard Model 3255)로 20분씩 25회 반복계측하고 TU(Tritium unit; 1 TU = 3.24×10^{-3} pCi g⁻¹)로 환산하였다.

결과 및 고찰

수질화학적 특성. 지하수의 수질화학적 특성은 일반적으로 충진수(대기중의 강수, 지표수, 해수)의 수분화학적 특성과, 지하매질의 지구화학적 특성에 영향을 받는다. 그러므로 지하수는 이동 과정 동안에 여러 물질을 용해시키며 반응하여 그것의 성분이 변화한다. 이러한 변화의 척도는 주변암석의 물리화학적 특성, 침전물의 속성작용(Diagenesis) 정도, 물의 온도와 다른 화학적 조성, 이동기간 동안의 물의 양과 속도, 그리고 인위적 영향 등에 좌우된다.

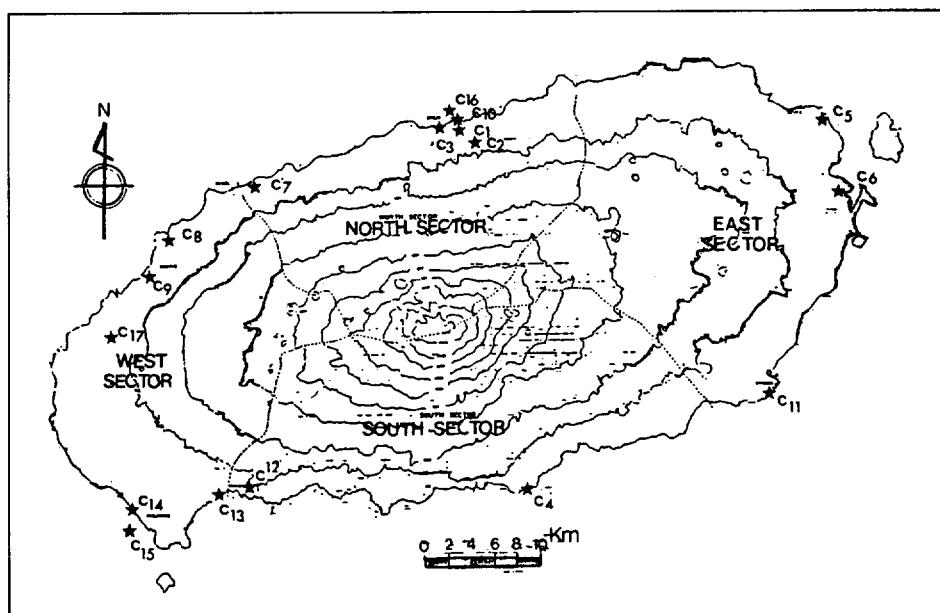


Fig. 1. Springwater-sampling points.

Table 1. Springwater sampling sites

Sample No.	Location	Description	Distance from sea (Km)
C ₁	Cheju-si Könip-dong	Springwater	0.30
C ₂	Cheju-si Ido-dong	Springwater	1.90
C ₃	Cheju-si Yong dam-dong	Springwater	0
C ₄	Cheju-si Songsan-dong	Springwater	0
C ₅	Kujwa-up Hado-ri	Springwater	0
C ₆	Song san-up Sinyang-ri	Springwater	0
C ₇	Cheju-si Oedo-dong	Springwater	0.35
C ₈	Aewol-up Aewol-ri	Springwater	0.05
C ₉	Halrim-up Ongpo-ri	Springwater	0.75
C ₁₀	Cheju-si Samyang-dong	Springwater	0
C ₁₁	Pyoson-myun Tosan-ri	Springwater	0
C ₁₂	Soguip-si Chungmun-dong	Springwater	0.9
C ₁₃	Namcheju-gun Andok-myon Hwasoon-ri	Springwater	0
C ₁₄	Namcheju-gun Daijong-up Ilkwa-ri	Springwater	0
C ₁₅	Namcheju-gun Daijong-up Ilkwa-ri	Seawater	
C ₁₆	Cheju-si Samdo 2-dong	Seawater	
C ₁₇	Buckcheju-gun Hankyung-myun Chosoo-ri	Groundwater	5.70 125 m(depth)

기상수는 소량의 용해물질과 현탁물질을 포함하여 그것의 양과 조성 그리고 pH값은 시간과 장소에 따라 다르다. 강수에서 가장 중요한 양이온으로는 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 이며 음이온 성분으로는 Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- 등이다. 이를 항목에 대한 제주도 용천수의 분석결과를 Table 2, 해수는 Table 3, 지하수는 Table 4에 나타냈다.

TDS와 전기전도도. 일반적으로 가장 간단하게 수질특성을 검사하는 방법은 시료의 비저항값과 총고용분(Total Dissolved Solid)을 측정하는 것이다.

Table 2~4에서 TDS값이 크면 전기전도도 값도 크게 증가함을 알 수 있다. Table 3의 해수의 전기전도도 값은 25,000~53,000 $\mu\text{mho}/\text{cm}$ 이며 Table 4의 심부지하수의 전기전도도 값은 180 $\mu\text{mho}/\text{cm}$ 이다.

Table 2에서 시료 C₁, C₄, C₇, C₉, C₁₀, C₁₂, C₁₃, C₁₄의 전기전도도 값은 180 $\mu\text{mho}/\text{cm}$ 이하로서 심부지하수 그 값보다 작게 나타났으며, 시료 C₂, C₆, C₁₁은 200~300 $\mu\text{mho}/\text{cm}$ 로 심부지하수의 전기전도도 값보다 크며, 시료 C₅, C₆는 3600~4500 $\mu\text{mho}/\text{cm}$ 로 해수 전기전도도값에 비교할 수 있을 만큼 큰 값을 나타냈다.

따라서 TDS와 전기전도도 값에 의한 평가로 시료

C₅, C₆는 해수에 의해 심하게 영향을 받으며, C₂, C₈, C₁₁은 약간의 영향을 받고 있으며, 그 나머지 시료는 거의 영향을 받지 않는다고 생각할 수 있다.

Chloride와 Tritium. 해안가 용천수는 해수에 의한 영향을 받을 가능성이 크므로 시료의 Cl 이온의 함량과 환경동위원소인 Tritium의 함량을 비교하면 보다 더 명확한 관계를 알 수 있다. 일반적으로 Cl의 농도가 증가하면 해수의 침투에 의해 함량도 증가하는 것으로 알려졌다. Table 5, 6은 해수, 지하수, 용천수의 Tritium의 분석결과이다.

또한 제주지역 강수의 Tritium 함량은 Table 7에 나타났다. Table 5에 해수의 평균 Tritium 함량은 4.4~5.1 TU 심부지하수는 2.46 TU, Table 7에서 강수의 평균 Tritium 함량은 17 TU에서 2.38 TU까지 넓게 분포되어 있음을 알 수 있다.

이들의 관계를 도표로 나타낸 것이 Fig. 2이다. Fig. 2를 보면 크게 세그룹으로 나눌 수 있다. Cl과 Tritium의 농도가 다같이 매우 높은 A그룹, Cl의 농도는 작으나 Tritium의 농도가 많은 B그룹, Cl의 농도와 Tritium의 농도가 서서히 증가하는 C그룹으로 나눌 수 있다. 따라서 A그룹에 속하는 C₅, C₆, C₈, 11은 해수침투가 매우 심한 용천수이며, C그룹에 속하는 C₂, C₃, C₁₃은 해수침투의 위험성(가능성)이

Table 2. Chemical analysis data of springwater samples (Units: ppm)

Sampling site and month	Temp (°C)	pH	Na	K	Mg	Ca	Cl	NO ₃	SO ₄	HCO ₃	Cond. umho/cm	TDS	
1984													
*C ₁	April	14.0	7.5	9.5	2.9	5.6	2.8	2.8	3.5	25.8	132	78	
	May	14.0	7.4	10.0	2.9	5.6	3.8	29.3	4.3	78.1		134	
	June	13.5	7.4	9.4	2.6	5.6	4.8	23.2	4.3	42.9		92	
	Average		7.4	9.6	2.8	5.6	3.8	26.8	4.0	48.9		101	
*C ₂	April	15.0	7.2	27.0	2.8	30.5	14.5	23.8	13.1	91.3	500	203	
	May	15.5	6.8	29.0	3.1	32.5	15.5	70.2	3.0	97.6		250	
	June	16.0	6.9	29.0	2.6	16.0	23.5	61.5	15.4	98.8		246	
	Average		6.9	28.3	2.8	26.3	17.8	51.8	10.5	95.9		233	
1985													
C ₄	February	15.0	6.9	6.6	1.9	2.1	2.8	9.4	1.4	27.7		51	
	July	16.0	7.1	11.2	0.2	2.6	8.4	13.6	2.8	24.7	155	63	
	September	15.5	7.0	6.2	0.2	3.4	6.4	10.1	1.5	23.0	172	50	
	Average		7.0	8.0	0.7	2.7	5.8	11.0	1.9	25.1	163	55	
1986													
C ₅	March	14.0	7.1	445	49.4	69	31.3	936	1.0	123	36.6	3,343	1691
	May	15.0	7.6	1,150	140.0	205	70.3	6,467	0.7	313	48.7	3,840	8394
	August	15.0	7.4	663	49.4	110	32.2	1,427	0.7	140	38.5	5,015	2459
	October	—	7.0	548	32.4	88	30.7	975	0.5	153	39.4	3,840	1867
	Average		7.3	701	67.8	118	41.1	2,451	0.7	182	40.8	4,009	3602
C ₆	March	15.0	7.4	1,192	46.0	109	66.0	2,154	2.8	343	46.4	7,276	3959
	May	15.0	7.5	1,050	98.3	134	54.1	2,195	2.7	257	44.2	7,398	3835
	August	16.0	7.5	847	51.6	96	35.5	1,545	3.0	221	14.1	5,595	2813
	October	—	7.5	2,248	129.2	322	86.5	3,970	2.3	510	53.3	12,874	7321
	Average		7.5	1,334	81.2	165	60.5	2,467	2.7	332	39.5	8,285	4481
1987													
*C ₇	March	15.0	7.6	6.6	2.3	2.9	3.8	15.2	2.0	1.4	24.8	111	59
	May	17.0	8.1	9.2	2.5	2.8	5.1	15.7	1.6	1.4	28.1	101	66
	August	22.0	7.6	3.7	0.9	1.5	1.0	14.0	1.7	1.0	12.7	53	36
	October	17.0	7.4	5.2	1.6	2.3	1.2	13.4	1.0	1.4	26.8	76	52
	Average		7.6	6.1	1.8	2.3	11.1	14.5	1.5	1.3	23.1	85	53
*C ₈	March	14.0	7.6	17.3	32.9	19.1	10.5	107.9	2.6	10.3	34.5	427	235
	May	15.0	7.9	17.3	33.6	22.5	12.7	139	3.0	13.5	34.8	512	276
	August	15.0	7.4	15.8	4.2	8.2	4.7	69.2	6.8	10.1	36.5	209	155
	October	15.0	7.9	9.2	2.4	6.5	3.1	58.9	0.8	7.1	49.4	137	137
	Average		7.7	14.9	18.2	14.0	7.7	93.7	3.3	10.2	38.8	321	200
*C ₉	March	14.0	7.8	11.3	3.8	5.3	12.1	16.0	3.1	2.7	37.3	164	91
	May	15.0	8.1	12.5	3.6	5.3	3.3	16.7	2.9	4.0	39.7	158	88
	August	15.0	7.9	8.7	3.3	5.7	1.7	18.0	3.5	4.4	4652	152	90
	October	15.0	7.9	9.4	3.2	2.9	1.9	21.4	3.2	8.0	47.0	147	97
	Average		7.9	1.0	3.4	4.8	4.7	18.0	3.1	4.7	42.3	155	91
C ₁₀	March	13.0	7.6	5.7	2.5	7.8	3.5	12.1	1.0	2.1	22.2	100	56
	May	14.0	7.8	6.3	2.8	2.6	3.7	14.6	1.6	2.7	23.8	101	58
	August	14.0	7.8	7.1	2.6	1.8	1.7	16.0	1.5	3.0	35.4	112	69
	October	14.0	7.8	5.6	2.1	1.4	1.3	11.0	1.2	2.0	36.6	83	61
	Average		7.8	6.1	2.5	3.4	2.5	13.4	1.3	2.4	29.5	39	61

be continued.

Sampling site and month	Temp (°C)	pH	Na	K	Mg	Ca	Cl	NO ₃	SO ₄	HCO ₃	Cond. umho/cm	TDS
1988												
C ₁₁ March	15.0	7.5	99.0	6.5	7.3	14.1	197	1.5	26.4	34.5	691	386
May	16.0	7.8	77.1	5.5	7.1	12.1	154	1.6	65.6	35.4	547	358
August	16.0	7.9	81.9	8.4	5.3	6.0	187	1.9	20.8	36.0	506	347
October	16.0	7.8	61.6	4.3	4.1	4.6	170	1.8	13.7	37.2	421	297
Average	7.7	79.9	6.1	5.9	9.2	177	1.7	31.6	35.7	541	347	
1989												
*C ₁₂ March	14.0	7.3	8.4	1.09	3.23	1.22	7.1	2.20	4.38	33.9	118	60
May	21.0	7.4	7.6	0.90	1.84	2.18	6.5	1.85	4.18	34.8	125	60
August	19.0	6.9	7.9	2.66	4.63	2.94	8.8	0.81	3.76	31.9	132	63
October	19.0	7.4	6.6	1.43	3.08	2.07	11.9	0.66	0.50	50.0	100	76
Average	7.3	7.6	1.52	2.9	2.10	8.5	1.38	3.2	37.6	118	64	
C ₁₃ March	15.0	7.6	15.9	2.76	3.43	1.36	17.7	4.93	6.37	36.3	198	88
May	15.0	7.7	15.5	2.90	2.72	2.52	17.2	3.39	5.57	39.7	203	89
August	15.0	7.5	16.3	5.53	7.65	4.28	87.6	2.18	8.08	31.2	259	162
October	16.0	7.3	19.3	6.32	11.0	6.52	29.7	6.95	1.46	32.0	315	113
Average	7.5	16.7	4.37	6.2	3.67	38.0	4.36	5.37	34.8	243	113	
C ₁₄ March	14.0	7.4	8.3	2.35	1.29	0.57	8.8	1.97	4.58	27.8	116	55
May	14.0	7.6	7.4	1.87	0.62	1.23	6.3	1.37	3.88	30.2	113	53
August	15.0	7.2	11.4	3.64	4.75	2.30	12.4	0.65	3.76	31.4	418	70
October	14.5	7.3	7.9	2.96	3.23	1.64	13.6	0.92	0.51	25.6	113	57
Average	7.4	8.7	2.70	2.47	1.43	10.3	1.22	3.18	28.7	122	58	

*Springwaters far from sea side.

Table 3. Chemical analysis data of seawater (Units: ppm)

Sampling site and month	Temp (°C)	pH	Na	K	Mg	Ca	Cl	NO ₃	SO ₄	HCO ₃	Cond. umho/cm	TDS
C ₁₅ March	18.0	8.2	9,050	353	1,100	480	16,484	0.15	2,310	112.0	47.994	29889
May	19.0	8.7	3,890	155	982	294	8,047	0.97	1,234	70.2	24.540	14673
August	27.0	8.0	8,560	776	1,284	340	14,000	0.31	2,161	103.9	45.400	27225
October	20.0	8.3	9,360	600	1,188	378	17,488	0.61	1,950	151.3	53.000	31115
Average	8.3	7,715	471	1,138	373	14,004	0.51	1,913	109.0	42.733	25723	
C ₁₆ April	14.0	8.5	10,400	410	1,200	200	18,710		3,060	46.6	25.000	34026
May	18.8	8.5	10,300	500	1,200	470	18,264		3,143	158.2		34035
June	22.0	8.3	7,100	300	860	230	12,840		2,571	27.7		23928
Average	8.4	9,266	403	1,086	300	16,605		2,924	77.5	25.000		30664

Table 4. Chemical analysis data of groundwater (Units: ppm)

Sampling site and month	Temp (°C)	pH	Na	K	Mg	Ca	Cl	NO ₃	SO ₄	HCO ₃	Cond. umho/cm	TDS
C ₁₇ March	16.0	7.5	14.3	3.90	2.55	1.55	14.2	2.72	5.57	55.9	182	100
May	16.0	8.4	12.3	3.03	2.20	2.49	12.6	1.60	5.47	54.9	172	94
August	18.0	7.2	14.0	4.43	5.55	3.67	24.8	0.90	4.91	27.7	197	85
October	16.5	7.5	12.1	4.48	5.02	3.80	19.8	1.45	1.36	43.8	173	92
Average	7.6	13.1	4.05	3.83	2.87	17.8	1.66	4.32	45.5	181		93

Table 5. Environmental tritium levels of seawater and groundwater (Units: TU)

Sample No.	March	May	August	October	Average	
C ₁₅	3.00	7.44	3.27	3.90	4.40	seawater
C ₁₆	4.50	5.70			5.10	〃
C ₁₇	1.07	0.02	5.71	3.05	2.46	groundwater

*1 TU : $3.24 \times 10^{-3} \text{ pCg}^{-1}$.

Table 6. Environmental tritium levels of springwater (Units: TU)

Sample No.	March	May	August	October	Average	
C ₁	18.80	17.90	—	—	18.30	1984
C ₂	16.20	13.00	—	—	14.60	
C ₃	20.00	17.50	—	—	18.70	
C ₄	15.64	17.29	11.93	—	14.94	1985
C ₅	10.74	14.44	—	—	12.59	1986
C ₆	11.23	10.72	—	—	10.97	
C ₇	10.37	7.92	6.79	—	8.36	1987
C ₈	12.51	10.92	11.80	—	11.74	
C ₉	12.33	11.77	10.02	—	11.37	
C ₁₀	12.31	11.37	11.22	—	11.63	
C ₁₁	13.20	13.90	12.90	12.70	13.17	1988
C ₁₂	12.70	11.60	9.19	10.18	10.91	1989
C ₁₃	7.49	8.45	6.34	6.78	7.26	
C ₁₄	12.10	9.33	9.63	11.80	10.71	

Table 7. Tritium levels of precipitation at Cheju in 1983 and 1989 (Units: TU)

Year	Precipitation	Kind	Tritium
83/2	63.4	rain	12.43
3	69.6	rain	5.91
3	85.7	rain	13.93
3	88.9	rain	12.18
3	63.6	rain	17.44
88/3			17.43
89/5			6.99
6			7.87
8			11.49
9			2.38
10			8.27
11			3.58

있는 용천수이며, B그룹에 속하는 C₄, C₇, C₉, C₁₀, C₁₂, C₁₄는 해수의 영향을 거의 받지 않는 것으로 판단된다.

Chloride와 Bicarbonate. 지하수 중의 해수오염 정도를 평가하기 위해서 Reveller⁸은 Chloride-Bica-

rbonate ratio를 이용했다. Chloride는 해수 중에 많이 함유되어 있는 반면 지하수 중에서 적은 양이 존재하고, Bicarbonate는 Chloride와는 반대로 해수중에는 소량이고 지하수중에는 가장 많이 함유된 음이온인데 이것은 대기중의 CO₂의 부분압 및 표토층의 탄소동화작용에 의해 결정되나 그 값은 거의 일정한 값을 갖는다.

또 해수와 지하수가 혼합되는 경우에 발생될 수 있는 염기 치환현상⁹, 황산이온의 환원이나 탄산과 기타 약산기의 상호치환, 그리고 침전현상 등과는 무관하게 Chloride와 Bicarbonate는 영향을 받지 않는다는 사실을 이용하여 Cl/CO₃+HCO₃⁻값을 계산하고 용천수의 해수오염 지표로 사용한다.

즉 Chloride-Bicarbonate 비가 0.5 이하인 경우 해수오염 문제가 전혀 없고, 0.5~1.3인 경우 약간 문제가 되며, 1.3~2.8인 경우 보통 정도로 오염되어 있고 2.8~6.6인 경우 심한 오염 정도를 나타낸다.

위의 일반적인 지표를 Table 8에 적용시켜 보면 C₁₂ 용천수는 그 값이 0.37로 해수 오염의 문제가

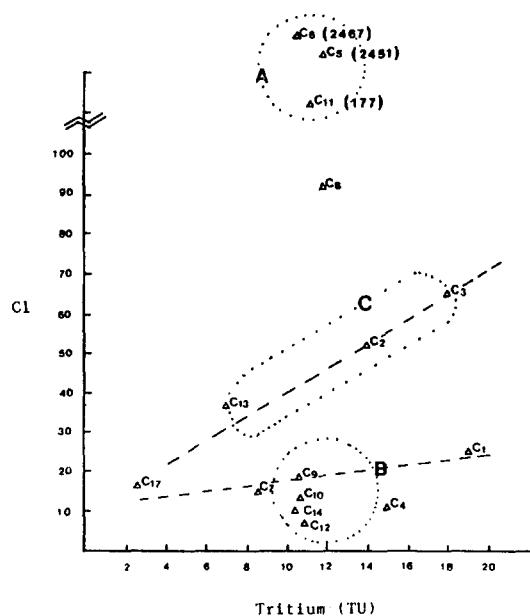


Fig. 2. Correlation between tritium and chloride of spring water.

Table 8. Chloride-bicarbonate ratios as a criterion of seawater intrusion sprigwaters

Sample site	Cl/HCO ₃
C ₁	0.93
C ₂	0.92
C ₃	3.43
C ₄	0.75
C ₅	104
C ₆	108
C ₇	1.08
C ₈	4.17
C ₉	0.72
C ₁₀	0.77
C ₁₁	8.58
C ₁₂	0.37
C ₁₃	1.87
C ₁₄	0.61
C ₁₇	0.67

전혀 없으며, 심부 지하수 C₁₇과 용천수 C₄, C₉, C₁₀, C₁₄는 그 값이 0.61~0.75로 이들은 약간의 문제가 있다. 즉 관찰의 대상이라 생각된다. 또한 C₁, C₂, C₇, C₁₃은 그 값이 3.43~108까지 나타내고 있으므로 해수침투의 영향을 심하게 받고 있는 용천수라 판

Table 9. Comparison of total hardness and Pseudo-hardness (Units: ppm)

Sample site	Total hardness	Pseudo-hardness
C ₁	32	53
C ₂	125	187
C ₃	148	292
C ₄	25	42
C ₅	586	2,109
C ₆	827	3,727
C ₇	37	50
C ₈	76	108
C ₉	31	53
C ₁₀	20	33
C ₁₁	47	220
C ₁₂	17	33
C ₁₃	34	70
C ₁₄	13	32
C ₁₆	5,200	25,343
C ₁₇	22	51

단된다.

총경도와 유사경도. 자연수에서 나타나는 경도의 대부분은 칼슘과 마그네슘에 의하여 유발되는 총경도와 상당량의 Na⁺를 포함하고 있는 바닷물, 염분의 소량 포함되어 있는 물은 공통이온효과로 인하여 높은 경도를 나타내는데 이것을 유사경도¹⁰(pseudo hardness)라 한다.

Table 9는 총경도와 유사경도 값을 계산하여 나타냈고 이 관계는 Fig. 3에 나타냈다. 일반적으로 경도가 0~75는 단물, 75~150은 약간 센물, 150~300은 센물, 300 이상은 대단히 센물로 분류한다.

따라서 총경도에 의하면 C₁, C₄, C₇, C₉, C₁₀, C₁₁, C₁₂, C₁₃, C₁₄, C₁₇은 그 값이 586, 827이므로 대단히 센물에 해당한다. 이것을 다시 Table 9의 유사경도 값과 비교하여 Fig. 3에서 관찰해 보면 C₅, C₆의 용천수는 그 유사경도값이 300 이상으로서 대단히 센물로 분류할 수 있으며, C₂, C₃, C₈은 그 값이 187, 292, 108로 센물 또는 약간 센물로 분류할 수 있다. 또한 C₁, C₄, C₇, C₉, C₁₀, C₁₂, C₁₃, C₁₄, C₁₇은 그 값이 75 이하로 단물로 평가할 수 있다.

이것을 해수오염의 정도와 관련지어 생각하면 C₅, C₆ 용천수는 심각한 해수침투지역이며, C₂, C₃, C₈, C₁₁은 상당한 해수침투지역, C₁₃은 약간의 해수침투

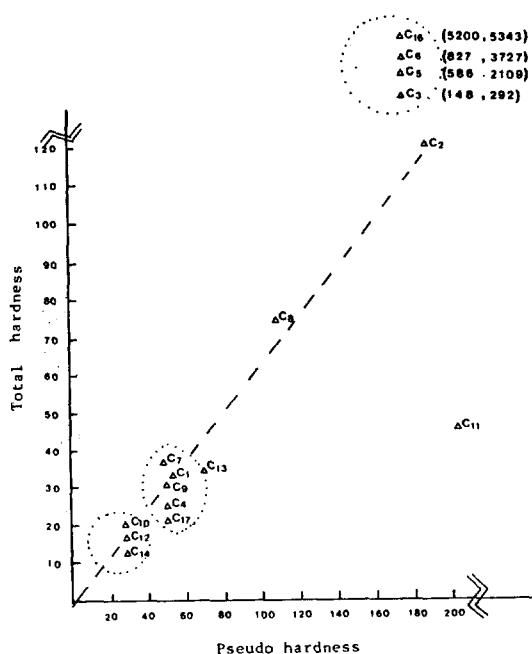


Fig. 3. Correlation between total hardness and pseudo hardness.

지역, C₁, C₄, C₇, C₉, C₁₇은 해수의 침투가 없으며, 상당한 지하이동을 한 용천수이며, C₁₀, C₁₂, C₁₄는 지하이동을 거의 하지 않은 단순한 빗물이라 판단된다.

Mineral Balance Index. 일본 大板大 공학부 橋本獎 교수는 2가지 Mineral Balance Index를 발표하였는데 그것은 K Index와 O Index로서 K Index는 건강한 물의 지표로서 일본 전국의 도별 뇌졸증 정정사망률과 하천의 화학적 성분사이에서 통계학적 상관관계가 인정되는 것과, 一方石原의 장수로 불리는 지역과 단명으로 불리는 지역에 대하여 음료수의 Mg/Ca 및 Na/K를 Ca-Na에 대한 그래프로 조사한 결과 장수촌에서는 Ca-Na값이 크게, Na 및 Mg는 작게 나타난 것을 기초로 하여 산출한 것이다. 여기서 $\text{Ca-Na} \geq 0.26(\text{meq/l})$ 이며 mg/l로 나내면 $K \text{ Index} = \text{Ca-0.87Na} \geq 5.2(\text{mg/l})$ 이다.

또 한가지 O Index는 일본의 대표적인 음료수, 광천수의 관능시험에 대해 Ca, K, SiO₂가 맛을 좋게 하고, Mg, SO₄²⁻가 맛을 나쁘게 하는 것이 명백하다고 하여 O Index(맛있는 물의 지표) = (Ca + K + SiO₂) / (Mg + SO₄²⁻) ≥ 2.0 으로 제안하였다. 물론 이

Table 10. Mineral balance index of springwater

Sample site	K Index	O Index
C ₁	-4.5	0.47
C ₂	-6.8	0.40
C ₃	-43.5	0.25
C ₄	-1.1	1.18
C ₅	-568	0.27
C ₆	-1,100	0.25
C ₇	5.8	2.79
C ₈	-5.2	0.61
C ₉	-4.3	0.66
C ₁₀	-2.8	0.57
C ₁₁	-60.3	0.54
C ₁₂	-4.5	0.49
C ₁₃	-10.8	0.46
C ₁₄	-6.2	0.51
C ₁₇	-8.5	0.62

두가지 지표값에는 폭이 있고, 단정적인 것은 아니나, 맛있고 건강한 물의 표준의 하나로서 채택하는데 간편하고 편리한 방법이라 하겠다.

그러므로 용천수를 이 지표에 의해 계산하여 Table 10에 나타내었다. Table 10을 보면 K Index는 대부분 마이너스값을 가지나 C₇만 5.8의 값을 나타내었으며, O Index는 대부분 0~1 사이이나 C₇ 용천수만 O Index값이 2.97로 맛있는 물의 지표 2.0을 상회하고 있다. 따라서 제주도 해안가의 여러 용천수 중 제주시 외도동에 있는 C₇ 용천수만 맛있고 건강한 물이라 생각할 수 있다.

제주 용천수의 해수침투 정도와 그들의 수질특성을 충괄하여 나타낸 것이 Table 11이다. Table 11을 보면 TDS와 전기전도도 방법에 의한 용천수 오염 정도의 평가에서 C₅, C₆만 해수의 영향을 심하게 받은 것으로 나타났다.

Chloride와 Tritium의 상관관계에 의한 평가에서는 C₅, C₆ 뿐만 아니라 C₈, C₁₁도 심하게 해수의 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한 Cl/HCO₃에 의한 평가에서는 상기에서 평가된 용천수와 C₃가 다시 추가됨을 알 수 있었다. 이것은 후자로 갈수록 보다 더 신뢰성 있는 처리방법에 의한 평가이기 때문이라 판단된다. 총경도와 유사경도법에서는 C₂가 심하게 해수의 영향을 받은 것으로 판단되었으며 이 방법은 해수의 침투정도를 결정하는데 있어서 매우 유용한

Table 11. Total relationship of springwater

Sample site	TDS와 전기전도도	Cl과 H-3	Cl/ HCO_3	T.H와 pH	MBI
C ₁	☆		△	♥	
C ₂	△	△	△	○	
C ₃	☆	△	○	○	
C ₄	☆	☆	☆	♥	
C ₅	○	○	○	○	
C ₆	○	○	○	○	
C ₇	☆		△	♥	□
C ₈	△	○	○	○	
C ₉	☆	☆	☆	♥	
C ₁₀	☆	☆	☆	♣	
C ₁₁	△	○	○	○	
C ₁₂	☆	☆	☆	♣	
C ₁₃	☆	△	△	△	
C ₁₄	☆	☆	☆	♣	
C ₁₇	☆	☆	☆	♥	

○: 해수의 영향을 심하게 받고 있다. △: 해수의 영향을 보통 받고 있다. ☆: 해수의 영향을 거의 받지 않는다. ♥: 해수의 영향을 받지 않고 상당히 지하이동한 용천수. ♣: 해수의 영향을 받지 않은 단순한 빗물. □: 맛있고 건강한 물.

방법이라 생각된다. 해수에 의하여 영향을 받지 않지만 오랜 기간동안 지하이동을 한 용천수인지 아니면 단순한 빗물인가를 구분할 수 있었다. 전자로는 C₁, C₄, C₇, C₉, C₁₇이며 후자로는 C₁₀, C₁₂, C₁₄로 생각된다. 끝으로 Mineral Balance Index에서 맛있고 건강한 물은 상당히 오랜 기간동안 지하이동을 한 용천수이어야 한다. 따라서 C₇ 용천수만이 K Index값과 O Index값을 충족시켰으며 이 결과는 매우 신빙성 있는 결과라 사료된다.

연대측정. 삼중수소를 이용한 지하수와 온천수의 연대측정은 Kaufman과 Libby¹²에 의하여 최초로 시도되었다. 이 수소동위원소는 반감기가 아주 짧으므로 수개월 또는 수십년까지의 시간차까지는 계산할 수 있어 지하수나 온천수의 연대측정 및 추적자로 널리 사용할 수 있다.

용천수의 연대측정시 용천수에서는 여러가지 물리화학적 현상이 발생하므로 이를 항목에 대한 적절한 고려와 이에 따른 용천수 유동형태를 파악한 다음 알맞는 모델방정식을 도입해야 한다. 그러나 이러한 모든 항목을 고려한다는 것은 매우 어렵다.

따라서 본문에서는 용천수의 Tritium은 자연붕괴에 의해서만 소멸된다는 것을 가정하여 연대측정하기로 하였다.

Piston Flow Model⁵. 이 모델은 각각의 유동로를 따라 지하수계에 들어가는 물이 서로 혼합되지 않는다는 가정에 기준을 두고 있기 때문에 자연상태의 지하수계에서의 체재 시간은 과소평가된다. 그러나 하나의 지하수계에서 최소 체재시간을 측정하는데는 매우 유용한 식이다.

충진지역으로부터 X₀ 지역에 위치한 시료채취 지점의 원소농도를 C로 하면 다음식이 성립한다.

$$C = C_0 \exp(-X_0/VT) = C_0 \exp(-t/T) \quad (1)$$

여기서 C₀는 충진수의 방사성 동위원소(Tritium)의 농도, V는 지하수 유동속도, T는 동위원소의 평균수명($T = T_{1/2}(\text{반감기})/\ln 2$)이다. 이 식은 방사성물질의 반감법칙과 대응되는 식이다.

Table 12는 최근 3년간의 대덕 연구단지 주변의 강수에 대한 Tritium의 농도를 나타낸 것이다. 제주도 강수에 대하여 정확한 자료가 없으므로 이 값을, C₀(충진수의 Tritium 농도)로 적용하면 87, 88, 89년 각각 11.50, 21.05, 12.34 TU가 해당된다. 이중 89년 12.34 TU값을 웁 식에 대입하면 Fig. 1에서 C₉ 그룹(C₁₀, C₁₂, C₁₄)의 용천수 연령은 1.7년, C₃ 용천수는 8.36년, 지하수인 C₁₇은 28.9년 정도로 계산되었다.

Complestey Mixed Model⁵. 이 모델은 충진수는 지하수계에서 매우 빠르게 혼합된다고 가정하며, 평형에 도달된 안정한 지하수계는 방사성 원소의 평균수명과 붕괴된 비에 의해 결정된다. 또한 대수 층이 X₀ 지점까지 확장되고, 단위 길이당 단위부피의 물(전체가 똑같은 물)을 함유하고 있다고 가정한다. 붕괴된 방사성 원소를 함유한 유출수와 유입수의 양이 같다고 하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$C_0V = CV + CX_0/T \quad (2a)$$

$$C/C_0 = 1/(1 + (X_0/VT)) = 1/(1 + t/T) = 1/(1 + K) \quad (2b)$$

여기서 t=X₀/V는 저수조(reservoir)내에서의 물의 평균 체재시간이며 K는 똑같은 양을 평균수명 단위로 표시한 것이다. 이 식은 그렇게 깊지 않은 지표수체와 제한적인 경우의 지하대수층에 유용하게

Table 12. Rainfalls and tritium concentration at Daeduk area during recent 3 years

Month	1987		1988		1989	
	Precip. (mm)	Trtm. (TU)	Precip. (mm)	Trtm. (TU)	Precip. (mm)	Trtm. (TU)
1	73.1	14.21	10.2	24.14	90.4	8.61
2	60.5	27.73	5.1	—	82.1	12.62
3	39.5	15.32	56.7	27.59	56.9	12.33
4	55.1	18.63	60.4	34.15	21.9	19.11
5	84.2	8.25	58.5	30.21	51.6	22.27
6	136.0	15.96	62.4	8.76	170.3	12.03
7	618.7	8.64	443.9	22.78	511.6	5.45
8	580.2	10.72	154.2	13.97	105.5	6.33
9	19.1	7.96	18.9	25.25	323.6	11.44
10	80.2	12.76	1.5	—	35.3	8.51
11	25.8	25.88	13.8	9.97	51.0	10.66
12	3.4	12.76	9.2	13.44	17.8	10.21
Total	1,838.8	894.8			1,538.0	
Weighted mean		11.50		21.50		12.34

Precip: Precipitation, Trtm: Tritium.

적용된다.

Table 12에서 C_0 값은 12.34 TU이며, C_9 그룹(C_{10} , C_{12} , C_{14})의 C_0 값은 평균 11.25 TU이다. 이 값을 식(2b)에 대입하여 t 를 구하면 1.95년이나 평균수명 K 는 0.107년 이므로 약 1.2개월로 계산된다. 또한 C_7 용천수의 평균수명은 0.477년 약 5.6개월, 지하수 C_{17} 은 평균 4.02년 정도로 계산되었다.

제주도 수리지질학적 조건은 화산 용암으로 구성된 특수 상층구조와 용암공극으로 되어 있어 대부분이 바다로 유실되고 일부만이 지하로 침투된다. 이러한 조건을 만족하는 모델은 Completely Mixed Model이라 판단되며 이때 지하수의 평균 체재시간을 Tritium의 평균 수명단위로 나타내며 해수의 영향을 거의 받지 않는 C_9 그룹(C_{10} , C_{12} , C_{14}) 용천수의 평균이동시간은 약 1.2개월, C_7 용천수의 평균 이동시간은 약 5.6개월, 심부 지하수인 C_{17} 은 약 4년 정도로 매우 보수적인 값이라 사료된다.

결 론

제주도 해안가 용천수는 대부분 해수의 영향을

심하게 받는 것으로 판단된다. TDS와 전기전도도 방법, Cl과 H-3 상관관계, Cl/HCO_3 비, Total hardness와 Pseudo hardness 등에 의한 평가에서 후자로 갈수록 보다 보수적인 방법이었으며 해수에 의해 오염되지 않은 용천수는 C_1 , C_4 , C_7 , C_9 4곳으로 이중 제주시 외도동에 있는 C_7 용천수는 K Index 값과 O Index값을 충족시켜 맛있고 건강한 물이라 평가되었다.

삼중수소에 의한 연대측정에서 제주도의 지질조건과 수문화학적 조건을 고려할 때 Completely Mixed Model이 적합했으며 이 모델에 의하여 구한 용천수의 평균 이동시간은 해수의 영향을 거의 받지 않는 C_9 그룹(C_{10} , C_{12} , C_{14})이 약 1.2개월로 매우 짧았으며, 맛있고 건강한 용천수인 C_7 의 평균 이동시간은 약 5.6개월, 심부 지하수인 C_{17} 의 평균 이동시간은 약 4년 정도로 평가되었다.

인 용 문 헌

1. (a) 농수산부, 제주도, 동업진흥공사, “1986년도 제주도 지하수 개발보고서”, (1986); (b) 안종성, 김종훈, “동위원소를 이용한 제주지역 수자원에 관한 연구(IV), KAERI 보고서”, (1987); (c) 안종성, 김종훈, “동위원소를 이용한 제주지역 수자원에 관한 연구(V), KAERI 보고서”, (1988); (d) 안종성, 김종훈, “동위원소를 이용한 제주지역 수자원에 관한 연구(VI), KAERI 보고서”, (1989).
2. S. H. Choi and Y. K. Kim, *J. Geol. Soc. Korea*, **25**(3), 230~238 (1989); (b) 최순학, “제주지역 수리지질 조사연구”, 동력자원 연구보고서 (1987).
3. A. M. Piper, A Graphic Procedure in the Geochemical Interpretation of Water Analysis, *Am. Geophys. Union Trans.*, **25**, 914~923 (1944).
4. D. K. Todd, *Groundwater Hydrology*, John Wiley & Sons. p. 293~294, 1959.
5. A. Nir, “On the interpretation of tritium age measurements of groundwater”, *J. of Geophys. Res.*, **69**, 2589~2595 (1964).
6. A. E. Greenberg, J. J. Connors, and D. Jenkins, Standard Methods for the Examination of water and wastewater. Amm. Public Health Asso., Washington, p. 152~155, 270~271, 439~440 (1981).
7. (a) J. S. Ahn, J. S. Kim, and J. S. Kim, Studies on Tritium Analysis and its Monitoring with Spe-

- cial Reference to Power Reactor Operation. KAERI/RR-204/80 (1980); (b) L. W. Alvarez and R. Coming, Radioactive Hydrogen. A Correction, *Phys. Rev.*, **58**(2), 197 (1980); (c) G. E. Calf *et al.*, the Measurement of Natural Levels of Tritium in Water, AAEC/E373, July (1976).
8. R. Revelle, Criteria for Recognition of Sea Water in Groundwaters, *Trans. Amer. Geophysical Union.*, **22**, 593~597 (1941).
9. S. K. Love, Cation-Exchange in Groundwater Contaminated with Sea Water near Miami, Florida, *Trans. Amer. Geophysical Union.*, **25**, 951~955 (1944).
10. 김덕찬, 유명진, "환경화학", 동화기술, 399 (1989).
11. 이창근, 인천지역 광천수의 수질특성에 관한 연구 (석사학위논문), 숭실대학교 (1989).
12. S. Kaufman and W. Libby, The Natural Distribution of Tritium, *Phys. Rev.*, **93**, 1137~1144 (1964).