

## 제주 자연수중의 환경동위원소 함량과 이화학적 수질특성과의 관계

송성준<sup>1</sup>, 안종성<sup>2</sup>, 유장걸<sup>1</sup>

### 1. 서 론

제주도는 국내에서는 드물게 화산활동에 의해 형성된 섬중의 하나로 지하수와 용천수의 부존 특성을 연구하는 모델로써 국내외 연구자들의 주목을 받아왔다. 화산활동으로 생긴 투수성이 양호한 지층구조로 강수는 지하로 침투되어 하천의 대부분은 마른 천을 이루고 있기 때문에 도내 식수원으로 일부의 지표수가 있기는 하나 주로 지하수와 용천수 이외에는 기대하기 어려운 편이다<sup>1)</sup>. 따라서 본도에서 수자원의 개발과 보호에 관한 연구는 매우 중요한 사안이 되고 있다.

그동안 본도의 수자원에 대한 여러 측면에서의 연구가 수행되어 대략적인 지하수의 부존량 및 형태 그리고 수리지질학적인 특성이 밝혀지고, 지하수자원 보호를 위하여 지역별 수질 특성 및 변화에 대한 지속적인 조사가 이루어지고는 있으나 지하수의 이동과 상호관계, 오염원 및 경로추적등에 대한 연구는 매우 미흡한 게 사실이다.

강수, 지표수, 용천수와, 지하수등 자연수중에 함유하는 환경동위원소의 함량을 측정하는 것은 환경방사능의 준위를 모니터링하는 측면에서 뿐만 아니라 동위원소 추적자로서 수문학 연구를 위해서도 매우 중요한 일이다. 수문학 연구에는 많은 안정 및 방사능 동위원소를 사용하고 있는 데 그 중 대표적인 것은 물(H<sub>2</sub>O)을 구성하는 원소인 수소(H)와 산소(O)의 동위원소들이다. 안정동위원소인 <sup>2</sup>H(deuterium)과 <sup>18</sup>O은 지하수의 이동(movement), 기원(orgin), 수지(water balance), 강우(precipitation)와의 관계, 염수화 현상(salinization)등을 연구하는 데 많이 사용되고 있으며<sup>2,3,4,5,6)</sup>, <sup>3</sup>H은 연대측정(age dating)과 재충진속도(recharge rate)등을 조사하는 데 이용되고 있다<sup>7,8,9,10)</sup>. 또한, <sup>15</sup>N은 환경 오염원으로 문제가 되고 있는 질산태 질소의 오염원을 추적하는 데 매우 중요한 단서를 제공한다.

본 연구진은 1983년부터 연차적으로 제주도 수자원 보호를 위하여 본도를 4개 지역으로 나누어 자연수(지하수, 용천수, 지표수, 해수)중의 환경동위원소 함량과 이화학적 수질특성을 조사하였고 이를 토대로 제주 동부지역 지하수의 염수화 현상에 대한 원인을 구명하였고 질산태 질소의 오염실상을 처음으로 밝혔다.

따라서, 본 심포지움에서는 환경동위원소 분석기술에 대한 개요와 함께 제주 자연수중의 환경동위원소 함량과 이화학적 수질특성과의 관계에 대한 본 연구진의 연구결과를 중심으로 발표하고자 한다.

### 2. 환경동위원소 분석기술

#### 1-1. <sup>3</sup>H(tritium) 측정

<sup>3</sup>H는 수소의 유일한 방사능 동위원소이다(표 1).

Table 1. Environmental isotopes used in hydrology

Isotope	Average natural abundance atoms%	Half-life
<sup>1</sup> H	99.985	Stable
<sup>2</sup> H(deuterium)	0.015	Stable
<sup>3</sup> H(tritium)	<10 <sup>-14</sup>	12.43 years
<sup>3</sup> He	0.00013	Stable
<sup>4</sup> He	99.99987	Stable
<sup>12</sup> C	98.89	Stable
<sup>13</sup> C	1.11	Stable
<sup>14</sup> C	<10 <sup>-10</sup>	5,730 years
<sup>14</sup> N	99.63	Stable
<sup>15</sup> N	0.37	Stable
<sup>16</sup> O	99.76	Stable
<sup>18</sup> O	0.20	Stable
<sup>32</sup> S	95.0	Stable
<sup>34</sup> S	4.22	Stable
<sup>35</sup> Cl	75.53	Stable
<sup>36</sup> Cl	<10 <sup>-12</sup>	300,000 years
<sup>37</sup> Cl	24.47	Stable

자연 존재비는 10<sup>-14</sup> - 10<sup>-16</sup>% 정도로 매우 희박한 양이 자연수중에 존재한다. 자연수중 존재하는 <sup>3</sup>H 함량을 표시할 때에는 tritium unit(TU)을 사용하는 데 수소원자 10<sup>18</sup>개중에 1개의 <sup>3</sup>H이 있을 때(<sup>3</sup>H/H=10<sup>-18</sup>)

<sup>1</sup> 제주대학교 방사능이용연구소

<sup>2</sup> 한국원자력연구소

이를 1 TU라고 한다. 따라서, 1 TU 농도를 가진 물 1 liter에는 3.24 pCi의 <sup>3</sup>H를 함유한다. <sup>3</sup>H는 대기 상층부에서 <sup>14</sup>N핵과 우주선과의 상호작용(<sup>14</sup>N + n → <sup>3</sup>H + <sup>12</sup>C)에 의해서 자연적으로 생성되거나 핵실험이나 원자로 등에 의해서도 만들어지고 있다<sup>8,17)</sup>.

자연수중의 <sup>3</sup>H함량은 매우 낮기 때문에 특별히 고안된 전기분해장치에 의해서 시료를 20-30배 정도 농축(400 - 600 g)을 한 뒤 background 계수치가 매우 낮은 액체섬광계수기(liquid scintillation counter)로 측정된다<sup>8,17)</sup>.

1-2. <sup>2</sup>H(deuterium)과 <sup>18</sup>O 측정

수소(H)는 두 개의 안정동위원소(<sup>1</sup>H, <sup>2</sup>H)을 가지고 있는데 그중 <sup>1</sup>H의 자연존재비는 99.985%로 대부분을 차지하며 <sup>2</sup>H(D)는 0.015%를 점하고 있다. 산소는 세 개의 안정동위원소 <sup>16</sup>O, <sup>17</sup>O, <sup>18</sup>O가 자연계에 각각 99.756%, 0.039%, 0.205% 씩 분포하고 있다(표1). 이들중 동위원소 추적자로 많이 사용하는 것은 <sup>2</sup>H와 <sup>18</sup>O이며, 동위원소 존재비는 질량분석기(강한 전장과 자기장하에서 이온화된 분자가 질량과 전하비(m/e)에 따라 비행궤적의 각도가 달라지게 되어 분리되는 원리)를 이용하여 측정하는데 그 값은 표준물질 값과 비교하여 상대적인 차이를 δ(delta)로 표시하게 된다<sup>18)</sup>. 또한, δ 값은 흔히 ‰(per mill) 단위로 사용된다. 수소(<sup>2</sup>H)와 산소(<sup>18</sup>O)에 대하여 나타내면 다음과 같다.

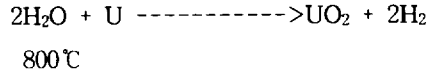
$$\delta D(^2H) = \frac{(D/H)_{sample} - (D/H)_{SMOW}}{(D/H)_{SMOW}} \times 10^3$$

$$\delta^{18}O = \frac{(18O/16O)_{sample} - (18O/16O)_{SMOW}}{(18O/16O)_{SMOW}} \times 10^3$$

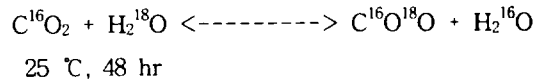
처음에는 <sup>2</sup>H와 <sup>18</sup>O를 위한 표준 물시료로 Standard Mean Ocean Water(SMOW)을 사용하였으나 모두 소모되었기 때문에 미국 캘리포니아대학교 Craig박사에 의해서 제조된 Vienna SMOW(V-SMOW)를 사용하고 있으며 국제원자력기공에서 공급된다. <sup>18</sup>O측정에 이용되는 V-SMOW는 SMOW와 같으나 <sup>2</sup>H(D) 경우 SMOW보다 0.2 ‰(per mill) 낮다.

D/H 존재비를 측정하기 위해서는 물시료는 수소가스로 전환시켜야 하는 데 uranium granules이 충전된

환원관( 800℃)에서 수소가스로 전환된다.



한편, <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O 존재비 분석은 이산화탄소의 형태로 수행하는 데, 물 시료를 담은 시료병에 공기를 제거하고 산소 동위원소 조성을 알고 있는 CO<sub>2</sub>가스를 주입하여 동위원소 치환반응을 유도시킨 뒤 측정시료로 사용한다.



3. 자연수중의 환경동위원소 함량

제주 자연수중의 환경동위원소 함량을 조사하기 위하여 본도를 4개 지역 즉, 북부(제주시, 애월지역), 남부(서귀포시, 남원지역), 동부(구좌, 성산지역), 서부(한림, 한경, 안덕, 대정) 지역으로 나누어 연차별로 시료를 채수하여(그림 1, 표 2) 해수, 우수, 지하수, 용천수, 및 지표수중의 <sup>3</sup>H, <sup>2</sup>H, <sup>18</sup>O함량을 측정하였다<sup>11,12,13,14,15)</sup>.

3-1. <sup>3</sup>H(tritium)함량

생태계에는 총 3 × 10<sup>7</sup> Ci정도의 <sup>3</sup>H이 분포되어 있으며, 매년 4만 Curies 정도가 생성되고 있으나 12.43년의 반감기를 갖고 있어서 결국 생성과 소멸은 일정한 평형을 이루게 되는 것이다<sup>17)</sup>. 따라서, 1952년 이전에는 빗물중에 <sup>3</sup>H함량은 1 - 10 TU 정도였다. 그런데, 그 이후 빈번한 핵실험의 결과로 빗물과 표면수중의 <sup>3</sup>H함량은 증가되었고 1953년 3월 Ottawa에는 빗물중에 2,937TU의 함량을 나타낸 일도 있다. 일반적으로 북반구에서 빗물중의 농도가 높은 편이며 늦은 봄부터 초여름에 최대 값을 보이며 겨울에는 최소 값을 보인다.

우리나라의 포항지역에서 조사된 빗물중의 <sup>3</sup>H 함량의 변화를 보면 1963년도 1,400 TU 정도였으나 그 이후에는 계속 감소되어서 76년에는 20TU이내 까지 감소되었다<sup>19)</sup>. 본 연구진이 제주대학교 방사능이용연구소의 옥상에서 채수한 빗물에 대한 <sup>3</sup>H함량을 보면 1983년 3월에는 13.9 TU 였는데 점차 감소되었고 91년 4월에는 8.24 TU였다(표 3).

Table 2. Specificaton of sampling sites in Chjeu.

## &lt;Eastern area&gt;

Sample No (Sampling date)	Loaction	Description	Distance from sea (km)	Depth (m)
E1(Mar.1990)	Bukcheju-gun Kujwa-up Kimyong-ri	Ground water	2.05	80
E2(Mar.1990)	Bukcheju-gun Kujwa-up Handong-ri	Ground water	2.25	70
E3(Mar.1990)	Bukcheju-gun Kujwa-up Pyongdai-ri	Ground water	3.50	90
E4(Mar.1990)	Bukcheju-gun Kujwa-up Pyongdai-ri	Ground water	2.25	80
E5(Mar.1990)	Bukcheju-gun Kujwa-up Sewha-ri	Ground water	2.00	46
E6(Mar.1990)	Bukcheju-gun Kujwa-up Sewha-ri	Ground water	3.00	60
E7(Mar.1990)	Bukcheju-gun Kujwa-up Hado-ri	Spring water	0.00	0
E8(Mar.1990)	Bukcheju-gun Kujwa-up Jongdal-ri	Ground water	2.75	75
E9(Mar.1990)	Bukcheju-gun Kujwa-up Jongdal-ri	Ground water	1.45	35
E10(Mar.1990)	Bukcheju-gun Kujwa-up Jongdal-ri	Ground water	0.60	25
E11(Mar.1990)	Namcheiu-gun Songsan-up Susan-ri	Ground water	4.90	51
E12(Mar.1990)	Namcheiu-gun Songsan-up Kosong-ri	Ground water	0.20	20
E13(Mar.1990)	Namcheiu-gun Songsan-up Songsan-ri	Ground water	0.50	50
E14(Mar.1990)	Namcheiu-gun Songsan-up Sinyusan-ri	Ground water	0.25	30
E15(Mar.1990)	Namcheiu-gun Songsan-up Sinpyung-ri	Ground water	0.75	40
E16(Mar.1990)	Namcheiu-gun Pyoson-myun Pyoson-ri	Ground water	1.25	43
E17(Mar.1990)	Namcheiu-gun Pyoson-myun Pyoson-ri	Ground water	0.85	36
E18(Mar.1990)	Namcheiu-gun Pyoson-myun Tosan-ri	Ground water	0.30	35
E19(Mar.1990)	Namcheiu-gun Pyoson-myun Tosan-ri	Spring water	0.00	0
E20(Mar.1990)	Namcheiu-gun Pyoson-myun Tosan-ri	Ground water	1.10	101
E21(Mar.1990)	Namcheiu-gun Pyoson-myun Tosan-ri	Ground water	0.30	50
E22(Mar.1990)	Bukcheju-gun Kujwa-up Sangdo-ri	Ground water	5.60	120
E23(Mar.1990)	Bukcheju-gun Kujwa-up Songdang-ri	Ground water	9.50	200

## &lt;Western area&gt;

Sample No. (Sampling date)	Location	Description	Distance from sea (Km)	Depth (m)
W1(Mar.1987)	Bukcheju-gun Halrim-up Ongpo-ri	Spring water	0.75	0
W2(Mar.1987)	Bukcheju-gun Halrim-up Dongmyong-ri	Ground water	1.50	60
W3(Mar.1987)	Bukcheju-gun Halrim-up Dongmyong-ri	Ground water	3.50	154
W4(Mar.1991)	Bukcheju-gun Hankyung-myun Yongdang-ri	Ground water	1.25	79
W5(Mar.1991)	Bukcheju-gun Hankyung-myun Hanwon-ri	Ground water	3.20	63
W6(Mar.1991)	Bukcheju-gun Hankyung-myun Chosoo-ri	Ground water	5.85	125
W7(Mar.1991)	Bukcheju-gun Hankyung-myun Chungsoo-ri	Ground water	7.70	125
W8(Mar.1991)	Bukcheju-gun Hankyung-myun Hanwon-ri	Ground water	10.1	63
W9(Mar.1989)	Namcheju-gun Daijong-up Murung-ri	Ground water	1.00	85
W10(Mar.1989)	Namcheju-gun Daijong-up Murung-ri	Ground water	2.10	110
W11(Mar.1989)	Namcheju-gun Daijong-up Murung-ri	Ground water	4.00	80
W12(Mar.1989)	Namcheju-gun Daijong-up Ilkwa-ri	Spring water	0	0
W13(Mar.1989)	Namcheju-gun Andok-myun Hwasoon-ri	Spring water	0	0
W14(Mar.1989)	Namcheju-gun Andok-myun Hwasoon-ri	Ground water	1.70	90

<Southern area>

Sample No. (Sampling date)	Loction	Description	Distance from sea (km)	Depth (m)
S1(Mar.1988)	Namcheju-gun Namwon-up Sinhung-ri	Ground water	0.13	50
S2(Mar.1988)	Namcheju-gun Namwon-up Sinhung-ri	Ground water	3.50	101
S3(Mar.1988)	Namcheju-gun Namwon-up Taehung-ri	Ground water	0.50	28
S4(Mar.1985)	Namcheju-gun Namwon-up Namwon-ri	Ground water	1.20	68
S5(Mar.1985)	Soguipo-shi Songsan-dong	Spring water	0.00	0
S6(Mar.1985)	Soguipo-shi Songsan-dong	Ground water	0.23	60
S7(Mar.1985)	Soguipo-shi Songsan-dong	Ground water	0.25	34
S8(Mar.1985)	Soguipo-shi Choungbang-dong	Ground water	0.65	45
S9(Mar.1985)	Soguipo-shi Sogui-dong	Ground water	1.00	41
S10(Mar.1985)	Soguipo-shi Sogui-dong	Ground water	0.93	60
S11(Mar.1985)	Soguipo-shi Sogui-dong	Ground water	0.15	62
S12(Mar.1985)	Soguipo-shi Sogui-dong	Ground water	0.15	250
S13(Mar.1985)	Soguipo-shi Sogui-dong	Ground water	1.05	70
S14(Mar.1985)	Soguipo-shi Sogui-dong	Ground water	0.40	60
S15(Mar.1985)	Soguipo-shi Sogui-dong	Ground water	1.40	35
S16(Mar.1985)	Soguipo-shi Sohong-dong	Ground water	2.65	80
S17(Mar.1987)	Soguipo-shi Chungmoon-dong	Spring water	0.90	0
S18(Mar.1987)	Soguipo-shi Chungmoon-dong	Ground water	0.20	60
S19(Mar.1987)	Soguipo-shi Chungmoon-dong	Ground water	0.70	122

<Northern area>

Sample No. (Sampling date)	Location	Description	Distance from sea (Km)	Depth (m)
N1(Mar.1987)	Cheju-si Samyang-dong	Spring water	0	0
N2(Mar.1987)	Cheju-si Samyang-dong	Ground water	0.80	43
N3(Mar.1987)	Cheju-si Doryon-dong	Ground water	2.40	126
N4(Mar.1991)	Cheju-si Doryon-dong	Ground water	2.70	142
N5(Mar.1991)	Cheju-si Konip-dong	Spring water	0.03	0
N6(Mar.1991)	Cheju-si Samdo 2-dong	Ground water	0.10	40
N7(Mar.1991)	Cheju-si Ildo 1-dong	Ground water	1.30	78
N8(Mar.1991)	Cheju-si Ara-dong	Ground water	3.60	141
N9(Mar.1991)	Cheju-si Ara-dong	Ground water	7.20	240
N10(Mar.1991)	Cheju-si Nohyung-dong	Stagant water	9.60	0
N11(Mar.1991)	Cheju-si Nohyung-dong	Stagant water	17.1	0
N12(Mar.1987)	Cheju-si Oedo-dong	Spring water	0.35	0
N13(Mar.1987)	Cheju-si Oedo-dong	Ground water	1.00	70
N14(Mar.1987)	Buckcheju-gun Aewol-up Aewol-ri	Spring water	0.05	0
N15(Mar.1987)	Buckcheju-gun Aewol-up Aewol-ri	Ground water	0.30	26
N16(Mar.1987)	Buckcheju-gun Aewol-up Sangga-ri	Ground water	1.85	117
N17(Mar.1987)	Buckcheju-gun Aewol-up Aewol-ri	Ground water	0.45	60
N18(Mar.1987)	Buckcheju-gun Aewol-up Napup-ri	Ground water	2.75	112

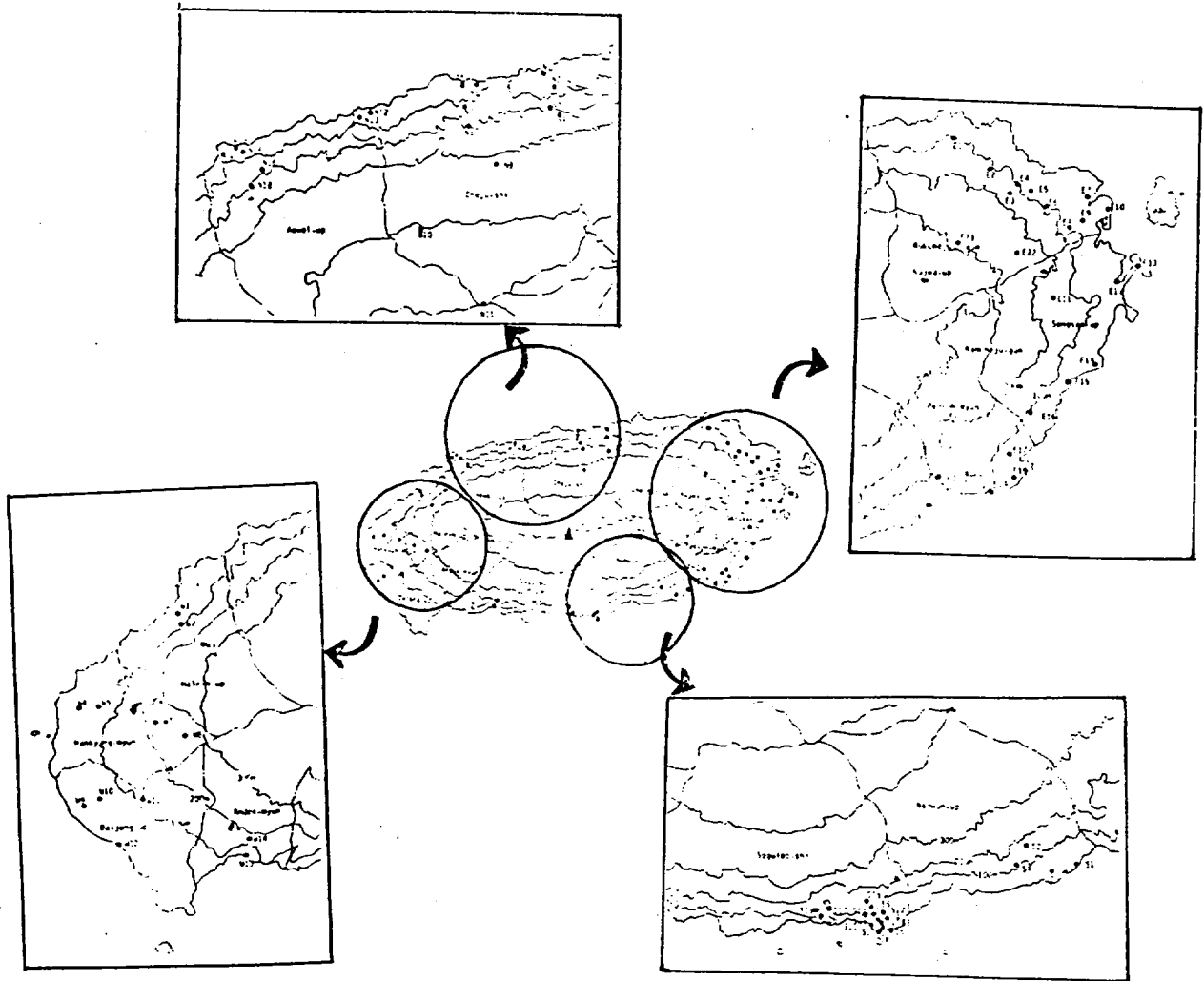


Figure 1. Location of Sampling sites.

Table 3. Environmental tritium( $^3\text{H}$ ), deuterium( $^2\text{H}$ ) and  $^{18}\text{O}$  levels of Cheju rainfall.

Sampling year	Tritium( $^3\text{H}$ ) (TU)	Deuterium( $^2\text{H}$ ) (per mill)	$^{18}\text{O}$ (per mill)
1983	15.9	-	-
1987	11.0	-	-
1991	8.24	-79.0	-12.3

-: not determined

북부지역의 지표수, 지하수, 용천수 및 해수의  $^3\text{H}$  함량은 표 4와 같다. 1987년 제주시 삼양, 외도와 애월읍지역의 지하수와 용천수  $^3\text{H}$  함량은 11 - 14.7 TU

범위였고 1991년 제주시지역의 지하수와 용천수의  $^3\text{H}$  함량은 7.3 - 8.8 TU였다. 빗물과 마찬가지로 지하수와 용천수의  $^3\text{H}$  함량은 점차 낮아지는 경향을 보이고 있는데 특히, 제주시지역 N5(용천수)와 N9(지하수)는 1983년에는 18.8과 16.2 TU였는데 91년도에는 8.8 과 8.9TU였다. 한편, 해수중의  $^3\text{H}$  함량은 4.0 TU로 지하수나 용천수보다 낮은 경향이다.

남부지역중 서귀포시 지역의  $^3\text{H}$  함량을 보면 서로 인접한 S6와 S7 지하수와 천지연 폭포부근의 S11, S14 지하수는 그 함량이 거의 같은 것으로 보아 같은 수맥상에 있는 즉 수원이 같은 지하수라고 사료된다.

동부 구좌지역의 지하수와 용천수중의  $^3\text{H}$  함량은 성산이나 표선면 지역보다 그 함량이 낮고 특히, 빗물의 값과 비슷한 경향을 보이고 있다.

Table 4. Environmental tritium(<sup>3</sup>H), deuterium(<sup>2</sup>H) and <sup>18</sup>O levels of water samples from Cheju.

<Eastern area>

Sample No.	Tritium( <sup>3</sup> H) (TU)	Deuterium( <sup>2</sup> H) (per mill)	<sup>18</sup> O (per mill)
E1	7.4	-37.3	-5.80
E2	7.5	-	-
E3	5.4	-30.9	-5.85
E4	5.3	-33.3	-5.52
E5	6.4	-39.4	-5.53
E6	5.7	-38.4	-5.49
E7	5.9	-33.3	-5.24
E8	8.2	-33.6	-5.20
E9	7.9	-	-
E10	9.8	-28.4	-5.09
E11	12.2	-49.9	-6.37
E12	10.6	-36.1	-5.55
E13	7.3	-45.7	-6.21
E14	10.8	-37.4	-5.75
E15	10.7	-33.3	-5.13
E16	11.7	-49.4	-6.71
E17	9.1	-34.0	-5.41
E18	9.9	-36.7	-5.60
E19	11.5	-39.7	-5.24
E20	10.5	-49.7	-6.47
E21	9.9	-48.8	-6.52
E22	9.2	-	-
E23	11.7	-46.4	-7.20
Sea water	1.8	-5.7	-0.11

<Western area>

Sample No.	Tritium( <sup>3</sup> H) (TU)	Deuterium( <sup>2</sup> H) (per mill)	<sup>18</sup> O (per mill)
W1	12.3	-45.2	-7.53
W2	12.8	-49.0	-8.01
W3	12.5	-43.2	-7.44
W4	0.5	-40.5	-6.81
W5	4.8	-40.3	-6.20
W6	4.6	-40.3	-6.58
W7	4.6	-43.2	-6.58
W8	2.1	-40.2	-6.42
W9	1.5	-39.6	-6.48
W10	13.6	-37.5	-5.92
W11	11.8	-41.6	-6.15
W12	12.1	-44.3	-7.26
W13	7.5	-36.4	-6.40
W14	8.0	-41.2	-7.29
Sea water	2.3	-1.4	-0.49

-: Not determined

<Southern area>

Sample No.	Tritium( <sup>3</sup> H) (TU)	Deuterium( <sup>2</sup> H) (per mill)	<sup>18</sup> O (per mill)
S1	15.1	-35.6	-5.94
S2	10.7	-38.5	-7.09
S3	15.7	-41.7	-7.82
S4	13.1	-41.4	-7.68
S5	15.6	-38.7	-
S6	7.8	-35.6	-
S7	8.8	-35.6	-
S8	13.8	-38.9	-
S9	12.5	-38.0	-
S10	11.9	-38.0	-
S11	3.6	-36.8	-
S12	13.9	-38.8	-
S13	13.2	-39.1	-
S14	4.0	-38.4	-
S15	15.0	-40.3	-
S16	13.2	-39.3	-
S17	8.5	-37.1	-5.97
S18	13.5	-43.0	-7.09
S19	13.1	-37.8	-6.68
Sea water	4.5	-2.33	-0.87

<Northern area>

Sample No.	Tritium( <sup>3</sup> H) (TU)	Deuterium( <sup>2</sup> H) (per mill)	<sup>18</sup> O (per mill)
N1	12.3	-47.4	-8.10
N2	11.9	-44.3	-7.92
N3	11.6	-47.1	-7.78
N4	12.9	-46.7	-7.82
N5	8.8(18.8)*	-	-
N6	9.1	-	-
N7	8.9	-	-
N8	7.3	-	-
N9	8.9(16.2)*	-	-
N10	8.7	-	-
N11	5.3	-	-
N12	10.4	-47.1	-7.34
N13	12.5	-46.9	-7.67
N14	8.5	-36.6	-5.70
N15	14.7	-46.0	-7.37
N16	13.1	-46.7	-7.40
N17	9.1	-48.2	-7.34
N18	12.6	-46.5	-7.59
Sea water	4.0	-2.35	-0.61

-: Not determined \*: Tritium level on March 1983

서부지역의  $^3\text{H}$  함량을 보면 채취년도가 지역별로 다르기는 하지만 한경면 지역의 지하수(w4, w5, w6, w7, w8, w9)가 매우 낮은 값을 보였다. 이는 도내 다른 지역의 지하수보다 강수의 직접적인 영향을 적게 받는 연령이 오래된 즉 지하수의 체재시간이 긴 지하수임을 추정할 수 있는 데, 안동의 한강분지중의 지하수 조사에서도 일부 지하수중의  $^3\text{H}$  함량이 0 - 2 TU로 나타나 수십년전에 함양된 지하수임을 판정한 바 있다<sup>19)</sup>.

### 3-2. 지하수의 연대측정

앞서 도내 다른 지역보다 낮은  $^3\text{H}$  측정치를 가진 서부지역의 일부 지하수(w4, w6, w8, w9)를 가지고 지하수의 연대(age dating)를 추정하여 보았다<sup>7)</sup>. 물론 지하수와 용천수의 연대를 측정할 때에는 빗물이 지하로 침투하여 지하수로 충전되는 과정 동안의 겪는 여러 가지 물리화화적인 현상(침투계수, 분산, 확산등)과 지하수의 유동형태등을 고려하여 이에 알맞은 모델식을 적용하는 것이 원칙<sup>7)</sup>이나 여기에서는 지하수 중의  $^3\text{H}$ 는 방사능 붕괴에 의해서만 소멸된다는 매우 단순한 가정하에 연대를 추정하여 보았다.

Piston flow model은 일정한 유동로를 따라 대수층으로 충전되는 물이 서로 섞이지 않고 일정한 속도의 흐름을 갖는다는 가정하에 계산하는 방법이다. 충전지역에서 일정한 유속(v)으로 거리 $x_0$ 에 위치한 곳의 지하수에 도달한 시간( $t=x_0/v$ )가 된다.  $x_0$  거리에 위치한 곳의 지하수에서 채취한 시료중의  $^3\text{H}$  농도를 C라고 하면 다음식이 성립한다.

$$C = C_0 \cdot \exp(-x_0/vT) = C_0 \cdot \exp(-t/T)$$

$$C/C_0 = \exp(-t/T)$$

$C_0$  = 충전수의  $^3\text{H}$  농도

v = 물의 유동속도

$$T = ^3\text{H} \text{ 평균 수명}(T = t_{1/2}/\ln 2) = 18$$

충진수의  $^3\text{H}$  농도( $C_0$ )로 1991년 제주지역 강우중의 농도인 8.24 TU를 적용하여 W4(0.5 TU), W6(4.6 TU), W8(2.1 TU), W9(1.5 TU) 관정 지하수의 연대를 계산하여 보았는데 10 - 50년 사이에 있는 것으로 추정되었다.

<계산예>

$$\text{Sample No. } ^3\text{H} T \cdot \exp(C/C_0) t(\text{year})$$

$$W4 \ 0.5 \ -18 \cdot \ln(0.5/8.24) \ 50$$

$$W6 \ 4.6 \ -18 \cdot \ln(4.6/8.24) \ 10.5$$

$$W8 \ 2.1 \ -18 \cdot \ln(2.1/8.24) \ 24.6$$

$$W9 \ 1.5 \ -18 \cdot \ln(1.5/8.24) \ 30.6$$

최근 지하수의 연대를 측정하는 새로운 방법<sup>9,10)</sup>이 알려져 있는 데  $^3\text{H}$ 과 이것의 붕괴산물인  $^3\text{He}$ ( $^3\text{H}$  (12.43 years)  $\rightarrow$   $^3\text{He}$ )을 동시에 측정하여 평가하는 방법( $^3\text{H}/^3\text{He}$  method) [ $t_{3\text{H}/^3\text{He}} = \lambda^{-1} \cdot \ln([^3\text{He}]/[^3\text{H}] + 1)$ ]이다. 특히 앞서의 모델은 지하수 함양지역에서 충전되는 충전수중의  $^3\text{H}$  함량을 정확히 아는 것이 중요한데, 이를 배제할 수 있다.

### 3-3. $^2\text{H}$ (Deuterium)와 $^{18}\text{O}$ 함량

물은 응축과 증발을 통하여 상이 변하는 데, 이러한 과정에서 물을 구성하고 있는 수소( $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$ )와 산소의 동위원소( $^{16}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$ )들은 공기 중에서 증기압과 확산속도의 차이 때문에 isotopic fractionation이 일어나게 된다. 따라서, 물과 평형을 이루는 수증기 속에서는 액상인 물에서  $^1\text{H}$ 와  $^{16}\text{O}$ 보다 상대적으로 무거운  $^2\text{H}$ 와  $^{18}\text{O}$ 의 함량이 낮아지게(depleted)된다.

일반적으로 바닷물 중에  $^2\text{H}$ 와  $^{18}\text{O}$ 의 함량이 높은 것도 isotopic fractionation 현상에 기인한 것이며 이러한 현상은 온도와 반비례한다. 따라서, 빗물중의 안정동위원소 함량은 계절적인 변화가 일어나는 데 추운 겨울이 여름보다 낫다. 해발이 높은 곳 또는 내륙쪽에 떨어지는 빗물중의 안정동위원소 함량은 해발이 낮은 곳 또는 해안 가까이 보다 낫다. 이와 같은 빗물중의  $^2\text{H}$ 와  $^{18}\text{O}$ 의 분포특성은 지표수, 용천수, 지하수 등의 자연수중의 환경동위원소 조성에 영향을 주기 때문에 강물과 지하수와의 상호관계<sup>19)</sup>, 지하수의 염수화 원인<sup>6)</sup>등의 해석에 활용될 수 있다.

일반적으로  $^{18}\text{O}$ 의 함량은  $^2\text{H}$ 보다 10배정도 차이가 나는 양이 자연수에 분포되어 있는 데  $^{18}\text{O}$ 는 -50 - 20 ‰,  $^2\text{H}$ 는 -450 - 100 ‰ 범위의 함량이 자연수에 함유되어 있고<sup>21)</sup> 같은 지역이라도 우수, 지표수, 온천수, 해수, 지하수, 용천수등과 같은 자연수 종류에 따라 그 함량이 달라진다.

제주지역 자연수중의  $^2\text{H}$ 와  $^{18}\text{O}$  함량을 살펴보면 표 3, 4와 같다. 강우중의  $^2\text{H}$ 과  $^{18}\text{O}$  함량은 각각 -79.0 ‰ 과 -12.3 ‰ 범위였고 해수 중에는 각각 -5.7 ~ -

1.4 ‰과 -0.87 ~ 0.11‰, 용천수와 지하수중에는 -50 ~ -30 ‰과 - 8.0 ~ -5.0 ‰범위였다. 지역별로 보면 북부지역의 지하수와 용천수의 <sup>2</sup>H와 <sup>18</sup>O함량은 서로 비슷한 값을 보이고 있으나 애월의 N14 용천수는 그 함량이 높았다.

남부지역에서는 해안 가까이에 위치하고 있는 남원 S1 용천수의 <sup>2</sup>H와 <sup>18</sup>O함량과 서귀포시의 S6, S7 두 인접 지하수의 <sup>2</sup>H함량이 비교적 높은 값을 보이고 있다.

또한, 동부지역의 경우 E11(수산), E16(표선), E20(토산), E23(송당) 지하수를 제외한 대부분 지하수의 <sup>2</sup>H와 <sup>18</sup>O함량은 제주지역에서 가장 높은 경향을 보였다.

서부지역의 경우도 안덕의 해안변에 위치한 용천수를 제외하고는 <sup>2</sup>H와 <sup>18</sup>O함량이 비교적 낮은 경향이다.

이상에서 보는 바와 같이 제주지역 지하수중의 <sup>2</sup>H와 <sup>18</sup>O 분포 특징은 동부지역이 타지역보다 뚜렷하게 그 함량이 높다는 것이다.

### 3-4. 자연수중의 <sup>2</sup>H(D)와 <sup>18</sup>O함량과의 상관관계

일반적으로 자연수중의 <sup>2</sup>H와 <sup>18</sup>O간에는 일정한 상관관계를 갖고 있는데 Craig(1961)<sup>22)</sup>는 세계각지의 강수, 지하수, 지표수등의 분석결과를 토대로 이들에 대한 회귀식 즉 순환수선(average global meteoric water line)을 얻었다.

$$\delta D = 8 \delta^{18}O + 10$$

이 회귀식은 자연수의 특성을 판단할 때 중요한 지표로 활용한다. 제주지역의 강수, 용천수, 지하수, 해수중에 있는 <sup>2</sup>H와 <sup>18</sup>O의 함량간에도 좋은 상관( $\delta D = 5.87 \delta^{18}O - 2.36, R^2 = 0.88$ )을 보이고 있다(그림 2).

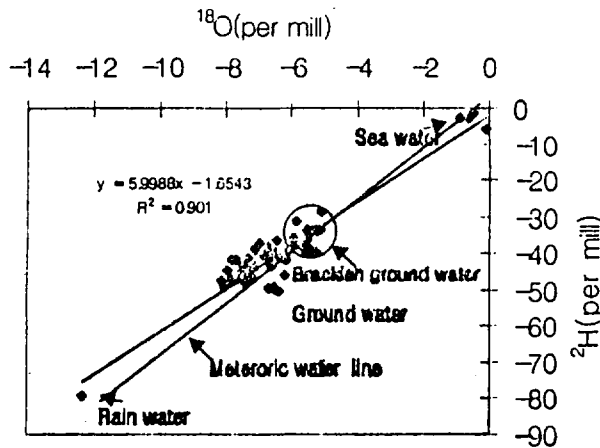


Figure 2. Relationship between <sup>18</sup>O and <sup>2</sup>H of water samples from Cheju.

또한, 기울기가 5.87로 제주지역에서는 유럽의 대륙과는 다른 isotopic fractionation현상이 일어나는 것으로 생각된다.

특히, 빗물, 용천수와 지하수, 해수중의 <sup>2</sup>H와 <sup>18</sup>O의 함량이 차이를 보여 이들간에는 독립된 그룹을 형성하고 있으며, 제주동부의 용천수와 지하수는 다른 지역보다 높은 <sup>2</sup>H와 <sup>18</sup>O함량을 가지고 있으므로 회귀직선상에서 해수쪽의 방향으로 분명하게 구별된 그룹을 형성하고 있다.

## 4. 자연수의 이화학적 수질 특성

### 4-1. 자연수의 수질특징

제주지역의 용천수 및 지하수의 이화학적 분석 결과를 보면 표 5와 같다. 지역별로 볼 때 동부지역의 용천수와 지하수의 염분함량과 전기 전도도는 북부, 남부 또는 서부지역보다 1.5 - 10배 내외의 높은 값을 나타냈으며 조사된 대부분의 지하수의 Cl함량이 식수 기준치인 150 ppm을 초과하고 있다. 해수의 Mg함량이 Ca보다 약 2배 정도 높는데 염도가 높은 지하수 또는 용천수도 Ca보다 Mg 함량이 높은 경향으로 해

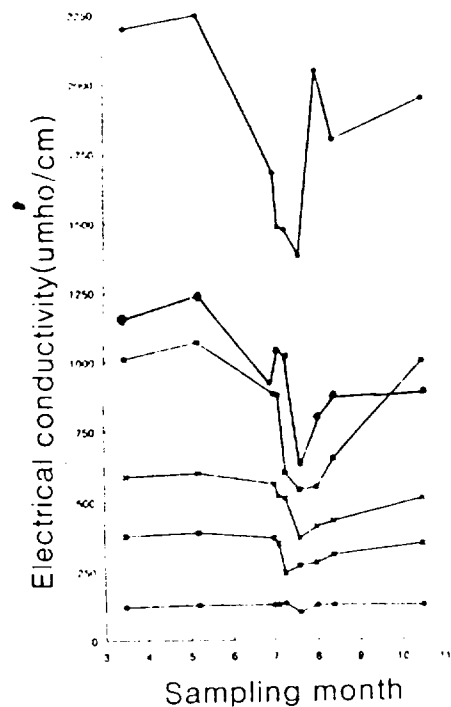


Figure 3. The seasonal changes of electrical conductivity of water samples from the eastern area.



Table 5. Analysis of water samples from Cheju.

## &lt;Eastern area&gt;

Sample No	Temp. (°C)	pH	Na ppm	K ppm	Ca ppm	Mg ppm	Cl ppm	NO <sub>3</sub> ppm	SO <sub>4</sub> ppm	HCO <sub>3</sub> ppm	Conductivity (μmho cm <sup>-1</sup> )
E1	16	7.5	104	6.2	10.3	11.9	139	3.1	18.0	37.3	608
E2	16	7.4	50	4.5	5.3	6.9	74.8	6.6	12.6	28.6	359
E3	17	7.3	47	4.8	11.2	8.8	85.3	7.5	14.1	27.6	410
E4	17	7.5	158	10.1	17.5	22.0	248	7.5	23.4	27.5	1002
E5	17	7.5	86	7.0	10.0	14.2	147	5.5	16.4	29.9	640
E6	17	7.6	115	9.8	10.6	15.0	207	2.2	23.5	34.9	913
E7	16	7.8	980	65.7	38.2	114	2146	5.3	105	40.6	6884
E8	16	7.5	59	5.9	6.7	9.1	113	4.4	23.0	30.7	505
E9	16	7.5	112	9.2	8.5	14.5	208	4.4	16.9	31.2	862
E10	17	7.9	1730	109	73.6	225	3589	14.6	191	70.1	11770
E11	16	7.3	27	3.0	4.3	6.2	40.8	11.5	8.6	28.0	237
E12	17	7.9	146	21.7	21.2	17.3	193	26.6	11.4	255	1160
E13	17	8.0	41	6.9	15.6	10.1	52.5	7.5	6.6	101	402
E14	17	7.6	129	8.9	7.7	15.6	232	5.8	14.5	34.2	883
E15	17	7.6	710	30.3	23.6	70.6	1481	8.0	66.5	35.7	3360
E16	17	7.3	11.0	2.3	4.6	5.1	22.8	5.3	6.2	26.2	141
E17	17	7.6	540	30.3	23.3	62.6	1890	15.9	64.4	25.6	3270
E18	17	7.5	284	17.4	15.8	36.5	491	13.2	39.0	32.3	1850
E19	17	7.6	310	20.1	16.5	41.3	464	7.5	47.6	32.4	2210
E20	16	7.3	7.3	1.7	4.7	3.8	14.2	4.9	5.1	27.2	103
E21	17	7.4	37.0	4.0	4.7	6.5	68.7	5.3	7.2	28.9	313
E22	16	7.8	29.4	4.8	7.5	10.0	65.3	0.7	5.5	36.3	389
E23	15	7.4	8.2	2.0	3.5	4.4	12.4	4.7	3.3	31.8	113
Sea water	17	8.2	9110	1132	600	1250	19466	3.2	1832	110	49500

## &lt;Western area&gt;

Sample No	Temp. (°C)	pH	Na ppm	K ppm	Ca ppm	Mg ppm	Cl ppm	NO <sub>3</sub> ppm	SO <sub>4</sub> ppm	HCO <sub>3</sub> ppm	Conductivity (μmho cm <sup>-1</sup> )
W1	14	7.8	11.3	3.8	12.1	5.3	16.0	13.7	2.7	37.3	164
W2	17	7.7	11.2	3.8	5.3	5.1	17.5	12.8	2.7	36.3	162
W3	16	7.5	9.3	3.1	5.2	5.1	16.4	11.1	2.7	38.1	152
W4	17	7.4	17.6	4.8	13.1	3.2	16.5	3.5	2.9	59.7	204
W5	17	6.7	16.1	4.6	9.4	8.1	25.3	39.9	4.9	30.8	247
W6	16	7.5	16.6	4.4	9.0	7.4	18.8	36.3	4.2	30.8	223
W7	16	7.2	16.0	4.6	11.9	8.7	21.8	17.3	4.5	36.5	273
W8	15	7.4	10.0	3.4	3.7	3.3	12.1	0.9	1.6	32.0	116
W9	18	8.2	14.0	3.3	2.0	4.1	14.2	5.3	6.7	70.4	217
W10	18	7.5	10.9	2.9	3.1	7.0	13.0	24.3	11.2	27.7	114
W11	14	7.6	16.0	2.4	0.6	1.1	19.0	7.5	4.8	61.0	210
W12	14	7.5	8.4	2.4	0.6	1.3	8.9	8.9	4.6	27.8	116
W13	15	7.6	15.9	2.8	1.4	3.4	17.7	21.7	6.4	36.3	198
W14	18	8.4	15.6	4.2	1.3	1.4	8.9	4.4	4.5	58.6	164
Sea water	18	8.2	10000	373	472	1160	17193	1.4	2549	120	57067

<Southern area>

Sample	Temp. (°C)	pH	Na ppm	K ppm	Ca ppm	Mg ppm	Cl ppm	NO <sub>3</sub> ppm	SO <sub>4</sub> ppm	HCO <sub>3</sub> ppm	Conductivity (μmho cm <sup>-1</sup> )
S1	15	7.4	39.5	4.9	11.2	15.0	119	3.19	16.5	36.3	444
S2	16	7.8	8.6	2.7	4.3	3.5	12.0	0.44	2.3	39.0	92.8
S3	15	7.6	17.2	2.8	8.2	6.1	36.7	19.0	7.6	56.0	199
S4	15	7.8	5.2	1.8	2.1	3.1	9.8	1.2	2.0	21.4	62.2
S5	15	6.9	6.6	1.9	2.8	2.1	9.4	-	1.4	27.7	114
S6	14	7.0	59.0	6.2	7.4	11.0	42.6	21.8	8.3	28.7	370
S7	16	6.9	62.9	12.7	22.2	22.8	103	-	30.0	60.8	323
S8	15	7.1	11.6	2.4	4.8	3.0	15.8	-	3.2	47.3	122
S9	17	6.5	9.8	2.4	4.7	2.9	15.9	-	1.5	22.2	125
S10	13	6.6	19.2	3.4	10.0	5.4	28.5	-	2.7	55.7	222
S11	18	8.2	15.1	4.1	11.5	5.0	15.9	22.3	2.0	62.5	204
S12	14	6.7	6.0	1.9	3.3	2.3	12.3	-	1.0	30.4	100
S13	15	6.7	10.8	2.8	2.8	3.1	15.3	-	1.4	30.7	125
S14	16	6.9	11.8	2.1	5.9	3.3	17.6	-	1.5	44.9	143
S15	14	6.8	6.4	2.1	2.4	3.1	9.5	-	1.5	25.3	100
S16	14	6.8	4.9	1.7	1.8	1.4	7.0	-	1.1	19.9	45
S17	14	7.4	8.4	1.1	1.2	2.2	7.1	9.7	4.4	33.9	118
S18	18	8.0	13.1	0.0	1.4	2.2	8.9	3.5	4.5	54.6	148
S19	19	7.4	13.5	1.5	3.8	8.4	21.2	21.8	5.3	40.9	255
Sea water	16	8.3	9470	400	390	1080	16083	1.8	2752	159	40000

<Northern area>

Sample	Temp. (°C)	pH	Na ppm	K ppm	Ca ppm	Mg ppm	Cl ppm	NO <sub>3</sub> ppm	SO <sub>4</sub> ppm	HCO <sub>3</sub> ppm	Conductivity (μmho cm <sup>-1</sup> )
N1	13	7.6	5.7	2.5	3.5	7.8	12.1	4.4	2.1	22.2	100
N2	14	7.7	6.4	2.6	3.2	2.3	10.7	4.9	2.1	25.7	100
N3	15	7.5	6.9	2.7	3.8	3.2	12.8	5.3	1.4	29.4	109
N4	15	7.6	5.8	2.6	3.3	2.5	9.9	1.3	1.4	30.1	96
N5	14	7.3	9.6	3.1	4.1	5.8	4.6	17.7	2.5	27.5	131
N6	15	6.9	9.6	3.4	4.0	5.6	7.3	15.1	2.5	27.2	137
N7	15	7.5	7.3	2.6	3.0	3.9	10.1	18.1	1.7	18.4	98
N8	17	7.3	15.4	3.1	9.0	14.6	16.3	62.0	3.0	27.7	270
N9	14	7.2	5.6	2.4	1.6	2.0	0.2	0.4	1.3	15.3	62
N10	14	7.1	3.9	1.4	1.0	1.8	0.1	0.4	1.4	9.9	45
N11	9	5.9	1.6	0.8	0.0	0.3	0.1	0.9	1.1	2.7	10
N12	15	7.6	6.6	2.3	3.8	2.9	15.2	8.9	1.4	24.8	111
N13	15	7.6	4.9	2.3	8.0	2.0	12.4	2.7	0.4	23.7	85
N14	14	7.6	37.3	32.9	10.5	19.1	108	11.5	10.3	34.5	427
N15	15	7.5	7.6	3.1	4.6	4.7	16.5	9.7	2.6	34.8	148
N16	15	7.6	11.0	3.2	3.8	3.7	12.8	7.1	2.1	33.8	125
N17	14	7.9	7.3	2.9	5.1	3.0	12.3	3.1	2.1	38.9	113
N18	14	7.9	6.5	3.1	3.3	2.6	9.7	1.0	1.4	32.3	98
Sea water	17	8.2	9780	562	563	1092	22220	1.8	2045	120	47630

-: not determined

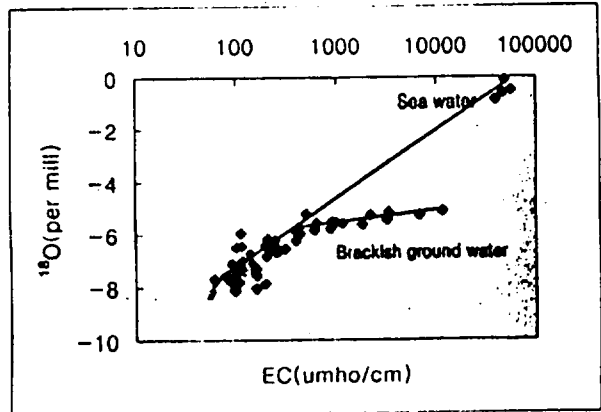
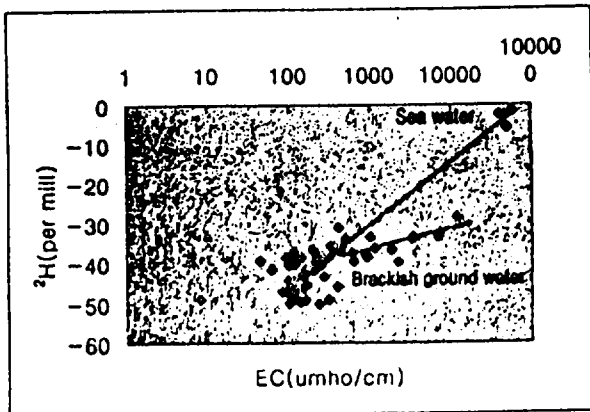
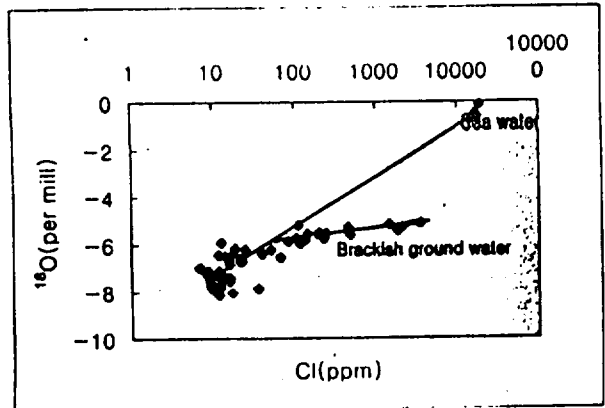
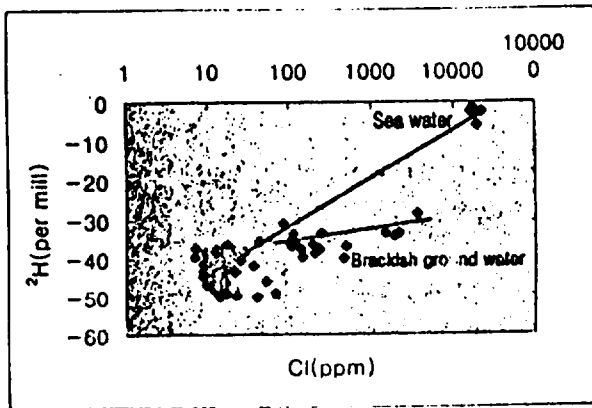
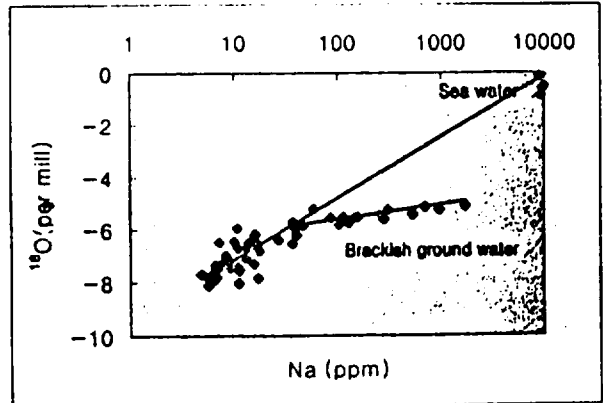
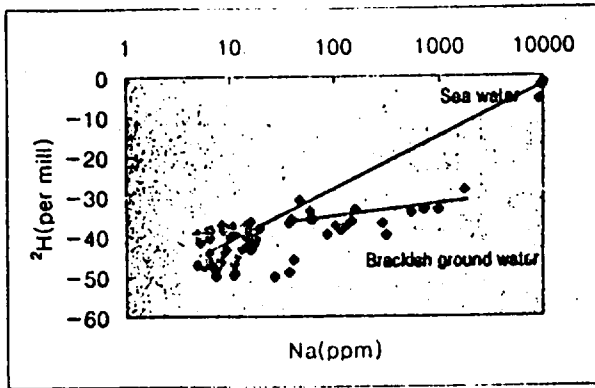


Figure 4. Relation of  $^2\text{H}$  with Na, Cl and EC.

Figure 5. Relation of  $^{18}\text{O}$  with Na, Cl and EC.

#### 4. 결 론

지금까지 환경동위원소 분석기술 그리고 제주 자연수 중의 환경동위원소함량과 이화학적 수질 특성과의 관계에 대하여 고찰하였던 바, 자연수중의  $^3\text{H}$ 함량은 강수와 지하수 또는 용천수와의 관계를 조사하는데 유용했을 뿐만 아니라 일부 지하수의 연대 측정을 가능케 하여 지하수의 충전속도를 추정할 수 있었으나, 좀더 정확한 추정을 하기 위해서는 충전수가 지하수로의 혼입과정에서 관여되는 여러 이화학적 요인(확산, 분산 등)이 충분히

고려되어야 할 것으로 사료된다. 자연수중의  $^2\text{H}$ 와  $^{18}\text{O}$ 함량간에 높은 상관을 보였고 동부지역의 지하수와 용천수의  $^2\text{H}$ 와  $^{18}\text{O}$ 함량은 다른 지역보다 높은 값을 보였는데 이것은 이화학적 수질특성과의 관계를 볼 때 해수의 침입에 의한 영향 때문인 것으로 사료된다.

환경동위원소( $^3\text{H}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$ )분석법은 이상에서 언급한 자연수의 연대측정, 해수 또는 강수와와의 상호작용을 조사하는 것 이외에도 지하수의 흐름, 인근지하수와의 관계를 조사하는데 유용한 수단으로 활용될 수 있으므로 제주도의 지하수계에 대해서 좀더 구체적으로 알기 위

해서는 지속적으로 제주지역의 자연수에 대한 환경동위원소분석이 필요하며 이는 제주지역의 수자원을 보호하기 위해서도 절실히 요청되는 일이라고 사료된다.

### 5. 참고문헌

1. J. S. Han, Ground Water of Bed rocks in South Korean Peninsular, J. Korean Asso. hydro. Scin. 14(4): 73-81, 1981.
2. B. R. Payne, L. Qujano and D. Carlos Latarre, Environmental Isotope in a Study of the Origin of Salinity of Ground Water in the Maxicali Valley, J. Hydrol. 41:201-215, 1979.
3. A. Joseph, J. P. Frangi, and J. F. Aranyossy, Isotope Characteristics of meteoric/Groundwater in Sahelo-Sudanes Zones, J. Geophys. Rea., 97, 7543-7552, 1992.
4. A. Vengosh, and E. Rosenthal, Saline Groundwater in Israel: Its bearing on the water crisis in the country, J. Hydrol., 156, 389-430, 1994.
5. W. W. Simpkins, and K. R. Bradbury, Groundwater flow, velocity and age in a thick, fine-grained till unit in Southeastern Wisconsin, J. Hydrol. 132:283-319, 1992.
6. M. Musgrove, and J. L. Banner, Regional groundwater mixing and the origin of saline fluid:midcontinent, United States, Science 259: 1877-1882, 1993.
7. A. Nir, On the Interpretation of Tritium Age Measurements of Groundwater, J of Geophys. Res., 69, 2589-2595. 1964.
8. S. Kaufmann, and W. F. Libby, The Natural Disribution of Tritium, Phys. Rev., 93,1937, 1954
9. D. K. Solomon, R. J. Poreda, S. L. Schiff, and J. A. Cherry, Tritium and Helium -3 as Groundwater age Tracers in the Borden aquifer, Water Reasour. res., 28, 714-756, 1992
10. D. K. Solomon, S. L. Schiff, R. J. Poreda, and W.B. Clarke, A validation of the  $^3\text{H}/^3\text{He}$  method for determining Groundwater Recharge, Water Resour. Res., 27, 2309-2302, 1991.
11. 안종성, 유장걸, 한정상, 이정호, 정창조, 동위원소를 이용한 제주지역 수자원에 관한 연구. 한국수문학회지. 17(2): 72-79, 1984
12. 유장걸, 안종성, 정창조, 송성준, 동위원소를 이용한 제주지역 수자원에 관한 연구(II)KAERI/RR-482/85. 1985.
13. 유장걸, 안종성, 정창조, 송성준, 동위원소를 이용한 제주지역 수자원에 관한 연구(III)KAERI/RR-527/86. 1986.
14. 유장걸, 안종성, 정창조, 송성준, 동위원소를 이용한 제주지역 수자원에 관한 연구(IV) KAERI/RR-613/87. 1987.
15. 유장걸, 안종성, 정창조, 송성준, 동위원소를 이용한 제주지역 수자원에 관한 연구(V) KAERI/RR-718/88. 1988.
16. 유장걸, 안종성, 정창조, 송성준, 동위원소를 이용한 제주지역 수자원에 관한 연구(VII) KAERI/RR-1036/86. 1991.
17. G. E. Calf, B. W. Seatonberry, and L. W. Smith, The Measurement of Natural Levels of Tritium in Water. AAEC/E373, 1976.
18. P. E. Hartley, A Rapid Mass Spectrometer Method for Determination in Water at Natural Level. Anal. Chem. 52:2232, 1980.
19. J. S. Ahn, J. S. Kim, J.S. Hahn, P. Airey and B. Payne, Environmental Isotope-Aided studies on River Water and Ground Water Interaction in the Han River Basen. J. Korean Asso. Hydro. Scin. 16(4):245-252, 1983
20. G. H. Davis, C. K. Lee, E. Bradly, and B. R. Payne, Geohydrologic interpretation of volcanic island from environmental isotopes, Water. Resour. Res. 6(1):99-109, 1970.
21. B. Kumar, R. N. Athavale. and K. S. N. Sahay, Use of stable isotope method in hydrological investigations with specical reference to studies in lower maner basin, Andhra Pradesh, Proc. of the workshop on nuclear techniques in hydrology, Isotopes in industry committe department of atomic energy, India, pp 16-40, 1980.
22. H. Craig, Standard for Reporting Concentrations of Deuterium and Oxygen-18 in Natural Waters, Science, 133, 1833, 1961.
23. R. Revelle, Criteria for Recognition of Sea Water in Ground Waters, Trans. Amer. Geophgycal Union, Vol. 22, PP593-597. 1941.