

제주도와 OAHU도의 지질구조 및 수자원의 특성

Geological structure and groundwater resources of Cheju and Oahu Island

최 순 학 (Choi, Soon Hak)

한국자원연구소

요약/Abstract

제주도와 오아후섬의 지질은 제3기말에서 제4기초 사이에 걸친 화산활동에 의해 형성된 동일형의 화산도라는 점에서 유사한 특성을 갖는다. 이 두 섬의 지하수 산상(産狀)은 두가지의 기본적인 요소인 화산암의 투수성과 강수량의 지배를 받는다. 그러나 오아후도에서의 지하수 산상은 광역 화산암의 복합 암맥군에 의해 더 많은 영향을 받는다.

제주도와 오아후도의 지하수 부존형태는 두가지로 분류되는데 고지대의 주수(宙水)와 해안변에 발달된 기저 지하수가 그것이다.

일반적으로 제주도 지하수의 수질은 생활용수로 적합하나 동부 해안지역의 몇개의 지하수 관정은 과잉양수로 인하여 해수가 침입되었으며 1970년 부터 내륙쪽으로 점점 해수의 영향을 받고 있다. 이러한 해수의 오염현상은 오아후섬의 진주만에서도 비슷하다. 제주도의 신선한 지하수체에 현재 발생되고 있는 이러한 해수오염을 방지하기 위해서는 우선 해안지역을 따라 분포하는 지하수 부존 가능성과 그들을 최대한으로 개발하기 위해 지하수의 유동에 대한 연구가 필요하다.

Cheju and Oahu island are similar in geology, characterized by same types of volcanic activities during the late Tertiary to the early Quaternary. The occurrence of groundwater in both islands depend on two basic elements, permeability of volcanic rocks and precipitation. However, groundwater occurrence in Oahu is much more controlled by dike complex in the regional volcanic rocks.

There are two different types of groundwater in both islands. One is perched groundwater standing at any high altitude, and the other is basal groundwater developed near the coastal area.

The groundwater quality of Cheju island is good in general for drinking. But many wells near the eastern coastal area are salt intruded due to over pumping activities and the area of salt water intrusion has increased landward from the year of 1970. This feature of salt water contamination is similar at Pearl Harbour in Oahu island.

In order to prevent this salt water contamination into fresh groundwater reservoir on Cheju island, it is urgently asked to make groundwater flow study along the coastal area on terms of groundwater potentials and their maximum ultimate exploration.

서언

제주도와 오아후섬의 지질구조는 비록 분출시기가 유사하나 그 수리지질학

적인 조건은 상이하다. 따라서 오아후섬에서의 상위(上位) 지하수 부존개념은 제주도와는 상당히 달라 우선 그 양적인 면에서 풍부하다 하겠다.

기저지하수도 오아후섬은 이상적인 기저렌즈가 발달되고 있으며, 해안변에는 Artesian Basin을 형성, 피압현상을 유발한다. 또한 동수구배 (Hydraulic Gradient)도 제주도보다 지극히 완만한 값을 보인다. 이러한 두 섬에 대한 지질구조와 지하수 부존형태를 비교 분석하였으며, 또한 제주도 동부지역의 지하수는 해안변으로 부터 약 6Km 지점의 내륙부까지 해수의 오염을 받고 있으며, 몇개의 관정에서 점점 오염의 정도가 높아가고 있음을 알 수 있다.

그동안 수질에 대한 분석이 체계적으로 이루어지지 않아 1989년 까지의 자료와 1990년도 자료를 대비 분석하여 본 도 지하수의 순환과정을 고찰하여 자연적인 진화과정을 알았다. 또한 본 도의 신선한 지하수 자원을 보존하기 위한 방법으로서 지하수 보존구역 설정과 상위지하수 개발방향에 대하여도 언급한다.

제주도

지질구조

본 도(本島)는 N70E의 장축을 갖는 동서 약 74km, 남북 32km의 타원형 화산도로서 중앙의 한라산(1,950m)을 중심으로 원추형을 이루며 지형침식 윤회상으로 보아 유년기에 해당한다. 산사면은 단축인 남북방향은 급경사를 이루고 장축인 동서방향은 완만한 용암대지가 해안에 연하며 그위로 360여개의 기생화산 (Parasitic cone)이 총립하여 장관을 이루고 있다. 본 도는 제3기말 플라이오세로 부터 제4기에 걸쳐 수습회의 거대한 화산활동에 의하여 일차적으로 육지부를 형성한 후 오랫동안 풍화침식작용을 받아 국부적으로는 완만한 구릉지를 이루는 한편 전반적으로는 평탄한 용암대지를 형성하였다가 침강운동에 의해 본 도 동쪽방향이 우세한 경동(傾

動)침강이 일어났다. 이를 3단계로 요약할 수 있다. 즉,

- | | |
|------|-----------------------------------|
| 제1단계 | 용암대지 형성단계
(해저 용암 분출) |
| 제2단계 | 한라숄드형 화산 형성단계
(조면암류) |
| 제3단계 | 열곡대 (Rift zone)
형성단계 (기생화산 분출) |

그러나 최근 본 도 동부지역에서 지열탐사를 위해 작성된 지하심부에 발달된 지질구조를 보면 종래 기저라고 생각했던 현무암 하부에는 100m 이상의 두께를 갖는 해성퇴적물이 분포하며 그 하부에는 응회암이 분포하고 있는데(해수 준하부 약 679m까지) 이는 육지부 남서해안에서 나타나는 백악기 응회암과 유사한 바 있어 본 도의 생성 시초를 이제까지 제3기 말로 생각한 종래의 관념을 재고해야 할 것이다. (Fig.1)

본 도의 주 분포암석은 조면암, 조면질안산암, 감람석현무암, 응회암, 화성쇄설층 및 사구로 형성되어 있으며 암맥류 (Dike)는 발견되지 않는다. 이는 동일 시대에 분출한 하와의 화산도에서 볼 수 있는 암맥의 분포와는 상이한 지질구조를 갖고 있어 본도 특유의 수리지질학적 여건을 형성해 준다(Fig. 2).

수자원

지표수

본 도는 한라산과 동서장축을 분수령으로 50여개의 하천이 복류 또는 남류한다. 본 도는 동서부 지역에서는 하천이 거의 형성되지 않는것이 특징적이다 (Fig.3). 이들 하천의 대부분은 강우시 일

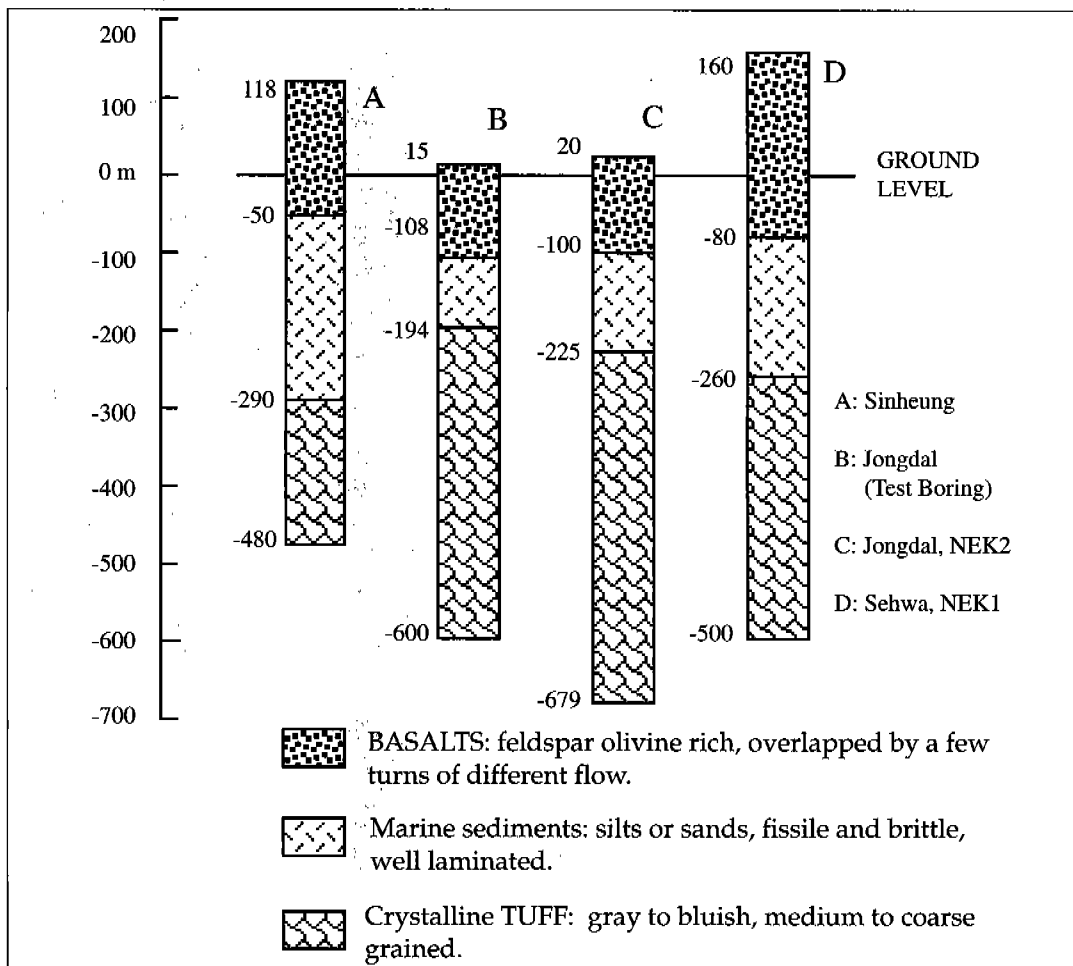


Fig.1 The main rock types in deep drilling wells at the eastern part of the island. The three different rock types are found. The upper part consists of basalt, but the middle part consists of marine sediments with shell debris, while the basement consists of tuff.

시에 유하하는 이른바 건천이며 연중 물이 흐르는 하천은 7-8개소를 헤아릴 수 있으나 이들의 수원은 하구 가까이에 있는 용출수이다.

본 도의 연평균 강우량은 1,630 mm ('75-'89 평균치)로 본토 평균 1,246 mm 보다 384mm가 더 많으며 연간 강우량의 60%가 6월에서 9월 사이에 내린다. 지금까지 알려진 바로는 연간 강우량중 약 26%가 지표로 유출되고 있으며 34%가 염수면증발량으로 증발되고 나머지 40%가 지하로 침투되고

있음이 알려져 있다.

즉 중문천(천제연폭포), 솔밭내(천지연폭포), 애리내(정방폭포) 등이 대표적인 예로 이들 폭포수의 유량은 강수의 직접적인 영향을 받고 있으며 특히 천제연폭포의 수원인 중문천은 현재 건천이나 상위용출수로서 폭포경관을 유지하고 있다. 그러므로 본 도에는 엄격한 의미의 지표수는 존재하지 않으며 기설 저수지의 수원, 형태 또한 다양하다.

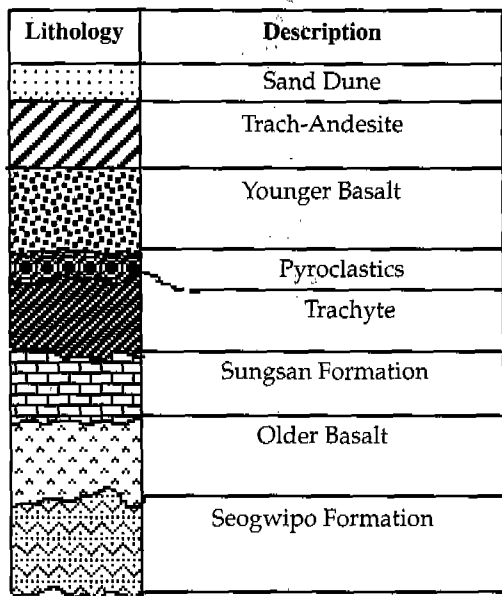


Fig.2 General Lithology section of Cheju volcanic island.

용출수

본 도의 용출수는 일종의 지하수로서 두가지 형태로 분류될 수 있다. 하나는 강수가 수리지질학적 구조선을 따라 하부로 유하하다가 불투수층을 만나 이의 수직강하가 이루어지지 못한 채 지표로 스며나와 형성된 소위 고지대에서의 상위 용출수 (Perched Spring)이며 또 하나는 2차 균열을 통하여 오랫동안 지하로 침투한 지하수가 수리지질학적 구배를 따라 해안면으로 유동하여 해수면과 접하게 되어 용출되는 기저용출수 (Basal Spring)가 그것이다. 용출수는 도 전역에 산재하고 있으나 주로 해안선을 따라 용출되고 있으며 특히 일부가 고지대 (해발 700m 이상) 와 산악지대 (어승생, 영실 등) 에서 용출되고 있다.

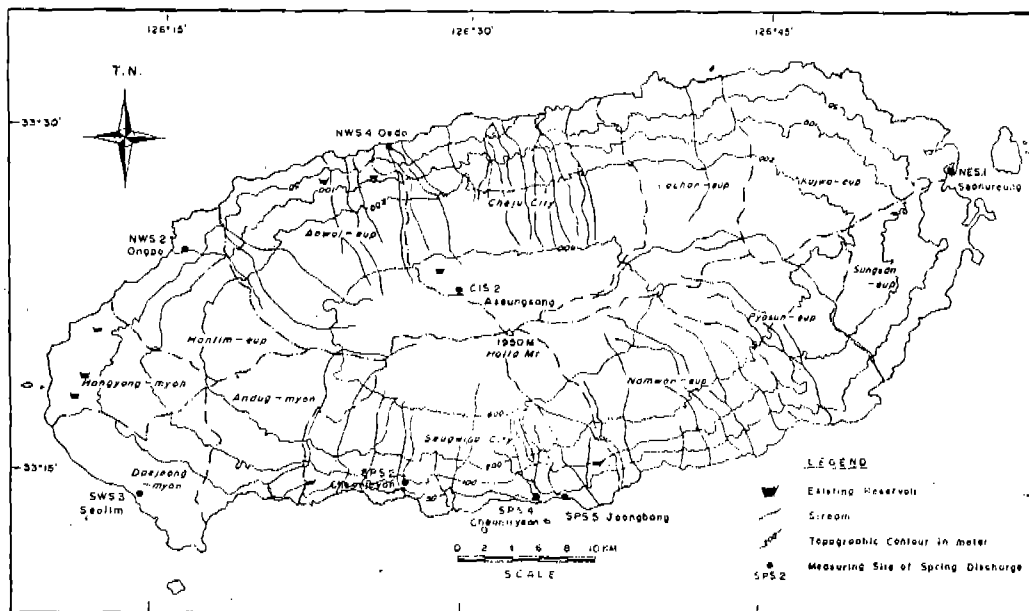


Fig. 3 Location of main spring in Cheju island. Most springs are scattered along the coast indicating basal springs, while the spring CIS2 indicates perched spring.

또한 정량적인 추산은 불가하나 신촌, 삼양 등지의 해저용출은 막대한 양으로 보고 있다. 현재까지 알려진 전도의 용출량은 약300여개소에 746,000 m³/d (ISWACO, 1981)이라고 되어 있으나 수량 조사의 방법과 또는 계절의 영향에 따라 수량의 증감이 일어날 것으로 보인다. 또한 10,000 m³/day 이상의 규모가 큰 용출수에 대한 지역별 현황은 Table 1과 같다.

지하수

부존요건

본 도의 지하수는 화산도가 지닌 특수한 지질 및 지형조건으로 인하여 특이한 부존 양상을 갖고 있다. 본 도는 전술한 바와 같이 수십차에 걸친 화산활동에 의하여 20여종에 달하는 용암류를 유출시켰으며 이들 용암류 사이에는 화산사나 화산회 등의 화성쇄설물이 협재되어 있다. 강수는 본 도의 지하수원인 바, 대부분 지표면이나 계곡을 따라 유거(流去) 바다로 유입되고 극히 일부분은 지표의 절리 및 열극을 따

라 지하로 스며들게 된다. 또한 본 도는 화산도 특유의 지질조건에 따라 층적층의 발달이 아주 빈약하여 육지부에서의 층적층을 대상으로한 천부(淺部)지하부존은 기대하기 어려운 실정이다.

본 도 지하수 부존을 결정해주는 주 구조요건은 크게 두 가지로 대별되는데 투수성요소와 불투수성요소가 그것이다. 전자는 절리와 균열을 들 수 있으며 후자는 치밀질 암석과 고기(古期)토양 즉, Paleosols라 할 수 있다. 고기 화성쇄설물은 보통 점토분을 함유하고 있어 불투수성으로 간주되나 엄밀히 관찰해보면 반투수성 요인에 속한다. 이상의 요인들이 바로 본 도의 지하수부존을 결정해 주는 중요한 요건들이다.

지하수부존

본 도 지하수의 주 근원은 전술한 바와 같이 강수로서 지표로 유출 또는 증발되는 일부를 제외(약60%) 하고는 중력에 의해 투수성의 2차 균열을 통해 지하로 침투된다(약40%) (Table 2). 이들은 연속성

Table 1 Discharge of main springs more than 10,000m³/day(ADC, 1989)

Area	Spring Name	Discharge(m ³ /day)
Cheju City	Sam Yang	32,000
	Oedo	21,900
	Aseungsang	13,820
North	Ongpo Chun	39,650
	Sinchon & Keunmul	13,590
	Sinmul	16,240
Seogwipo City	Chunjiyeun	22,970
	Jungbang	10,380
	Chunjeyeun	19,000
	Kang Jung	64,570
	Choeedongmul	18,140
South	Daejeung(Seulim)	35,000
	Sinsan	36,580
	Sinchun	12,000

의 2차 균열을 따라 유하하다가 하부에 발달한 불투수층인 치밀질 암석이나 점토층에 이르러 더 이상의 수직강하를 방해받게 되어 부존되는 소위 상위지하수(Perched Water)를 형성한다. 이들 주수는 불투수층이 끝나거나 2차 균열이 열려진 곳을 따라 또 다른 불투수층을 만날때까지 유하하여 여러개의 Perched aquifer를 형성하며 또한 불투수층의 구배를 따라 서서히 흘러 지표로 용출하게 되어 상위 용출수를 형성한다.

Table 2 Water balance in the Cheju island (UNDP/FAO, 1972).

Rainfall	100 percent
Evapotranspiration	34 "
Run off	26 "
Infiltration	40 "

본 도에는 이러한 주수형태의 용출수가 고지대에 산재되어 있는데 영실, 어승생, 구구악, 돈내코 등이 좋은 예이다. 반면에 강수가 지하로 침투하는 과정에서 불투수층에 의해 차단되지 않고 그대로 기저로 유입되어 바다와 접하여 해안면에서는 해안용출수로 섬 하부에서는 렌즈의 상태로 부존되는 소위 기저지하수가 있다. 기저지하수는 지하로 유입된 천수와 바닷물과의 비중차(1:1.025)로 담수체가 바닷물 상부에 렌즈상으로 떠있는 상태로 이는 Ghyben-Herzberg원리로서 설명될 수 있다.

이상에서 논술한 바와 같이 본 도에는 두가지 형태의 지하수가 부존되고 있는데 기저지하수는 도 전역에 광범위하게 분포하며 지하수위 변동도 아주 미약하여 포장량도 풍부한 반면에 상위지하수는 일부 지역에 국한되어 지하수위는 계절에 따라 매우 가변적이며 수량도 풍부

하지 않음이 특징이다.

상위지하수의 부존지역으로는 플라이오세에 경동침강시 퇴적된 서귀포층과 용기작용 이후의 육성퇴적층인 성산층 및 플라이스토세에 퇴적된 신양리층이 분포하는 서귀지역, 남원지역 및 제주지역의 중산간 일부 지역에 국한되어 부존된다.

지하수 함양

본 도 지하수의 함양과 배출의 균형은 전술한 바와 같은 과정하에서 본 도 물의 순환관계를 유지하고 있다. 그러므로 본 도의 지하수 함양은 바다로 유입되는 지표수와 지하로 침투된 지하수로 부터 얻어진다. 일부의 지표수는 유출도중 인공적인 Dam에 의해 차단되어 사용되어지기도 한다. 또한 지하수는 현재 1,600여 개소 이상의 관정을 개발하여 1일 202,000m³을 사용하고 있다. 수리 기상학적 방법(Hydrometeorological method)에 의한 본 도의 지하수 함양량은 다음과 같이 추정된다.

$$\text{즉 } Rg = P - (Rs + Et + \Delta s)$$

단

$$P: \text{강수량: } 29.5 \times 10^8 \text{m}^3$$

$$(1,810 \text{ km}^2 \times 1.63 \text{ m})$$

$$Rs: \text{유출량: } 7.67 \times 10^8 \text{m}^3$$

$$(29.5 \times 26 / 100 \times 10^8 \text{m}^3)$$

$$Et: \text{엽수면증발량: } 10.03 \times 10^8 \text{m}^3$$

$$(29.5 \times 34 / 100 \times 10^8 \text{m}^3)$$

$$\Delta s: \text{지하수 포장체내의 변화율}$$

$$3.46 \times 10^8 \text{m}^3$$

$$\text{Spring}(746,000\text{m}^3/\text{day})$$

$$+ \text{Groundwater use}(202,000\text{m}^3/\text{day})$$

$$= 948,000\text{m}^3/\text{day}$$

$$948,000\text{m}^3/\text{day} \times 365\text{day}$$

$$= 3.46 \times 10^8 \text{m}^3$$

수 질

Rg: 지하수 함양량

물리적 특성

$$\therefore Rg: [29.5 - (7.67 + 10.03 + 3.46)] \times 10^8 \text{ m}^3 = 8.43 \times 10^8 \text{ m}^3$$

전기비전도도

즉 본 도에 충전되는 지하수의 연간 함유량은 8억 4천 3백만톤으로 추정된다.

전기비전도도 (電氣比傳導度: Specific Electrical Conductivity)란 하나의 물질이 전류를 통과시킬 수 있는 능력을 말하며 전기 저항의 역수이다. 지하수내에서의 EC값은 용해되어 있는 고용물의 성분 및 량에 따

Table 3 The range of electrical conductivity and distance from the coast to equipotential line of 200 $\mu\text{S/cm}$ based on EC values of each area.

Area	Range of Ec value ($\mu\text{S/cm}$)	Distance in average from seashore to 200 $\mu\text{S/cm}$ in Ec
North	30 - 300	2 km
South	35 - 245	2 km
West	100 - 250	2.5 km
East	100 - 4,000	6 km

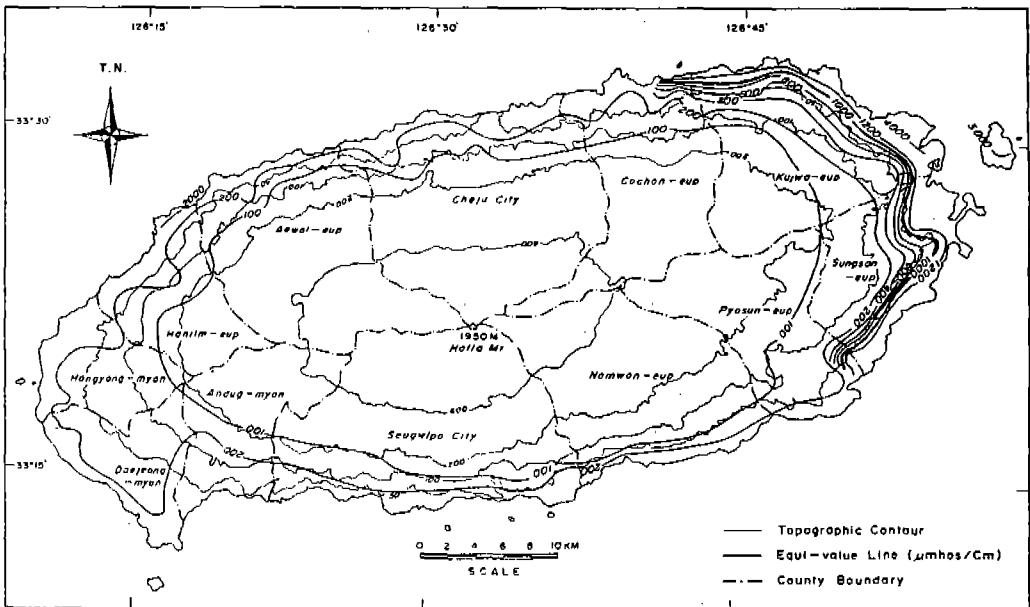


Fig.4 Distribution of electrical conductivity ($\mu\text{S/cm}$) in groundwater of the Cheju island. The EC value is lower than 100 $\mu\text{S/cm}$ in springs or perched aquifer, but increase following the low gradient of the topography. The eastern part is exceptionally high due to salt water intrusion..

라 그 값이 달라진다. 그러므로 화학적으로 순수한 물은 그 전기비전도도가 매우 낮은 물이며, 많은 고용물의 혼합으로 이온이 많이 존재하면 전기비전도도는 높아진다. 따라서 빗물의 EC값은 대단히 낮으며 오염된 지하수나 해수가 침입된 지하수의 EC값은 대단히 높다.

본 도에 산재된 지하수 관정으로 부터 EC 등위분포선도(Fig.4)를 보면 모두가 섬의 중앙부로 갈수록 그 양이 감소하고 있는데 북, 남 및 서부지역은 그 구배가 완만하나, 동부지역은 급하다. 그리고 남부 및 서부지역은 해안변으로 부터 평균 250 micro S/cm의 값을 가진 지역까지의 거리는 대략 2km 미만인데 반하여 동부지역은 거의 3배에 달하는 6km 지점에서 200 micro S/cm의 값을 보여주고 있다(Table 3). 다시말하면 동부지역은 Fig.4에서와 같이 해안변으로 부터 6km 지점의 내륙부까지 200에서 4,000 micro S/cm까지의 높은 전기전도도 값을 보여준다. 즉 동부지역은 해침으로 인해 EC를 증가시키고 있음에 기인한다.

pH

물속의 수소이온 농도를 pH로 표시하며 이는 수소이온 농도의 역수의 log와 같다. 즉 $pH = \log 1/H^+$ 이다. 실제로 이온의 수가 대단히 적기 때문에 이와같은 특수식이 사용된다. pH 값은 0에서 14까지 인데 25°C에서의 pH 7은 중성으로서 H^+ 와 OH^- 가 같은 농도임을 표시한다. pH가 7보다 적으면 산성이고 7보다 높으면 알칼리성이다. 대부분 지하수의 pH는 4에서 9사이에 있다. 반면 본 도의 지하수는 6.6에서 7.7에 속하는 것이 대부분으로 약산성에서 약알칼리에 속한다. 습지지역에서의 하천수는

5~6.5이고 건조지역에서는 7~8이다. 산성토양수는 4보다 적고 바닷물의 pH는 8.1에서 8.3에 속한다.

제주도 동부지역에서의 바닷물은 pH가 8.0을 보여준다. 이는 해안변에서 측정된 것으로 약간의 천수영향을 받는 것으로 보여진다(Table 4). 한편 육지부(대전지역)의 pH값은 5.86에서 7.15의 범위를 보인다. 한편 본 도 용출수에서의 pH값은 6.7에서 6.9의 범위에 있어 약산성 내지 중성에 가까운 값을 보여주고 있어 대전지역의 5.98~6.97의 다양한 면보다 그 범위 폭이 좁다(Table 5).

Table 4 Comparison of the pH value in Cheju water and the mean.

Water	Mean	Cheju
Groundwater	4 - 9	6.6 - 7.7
Precipitation	5.7	5.1 - 6.3
Sea Water	8.1 - 8.3	8.0

* pH values in the groundwater at Taejeon of the mainland show 5.96 - 7.15
(Data from KIER, 1989).

Table 5 pH values of five selected springs.

Ref. No.	Area	pH
NES1	Sunlungmul	6.9
SWS1	Andug Valley	6.8
SPS1	Hanil Spring	6.7
SPS2	Chunjeyeon Fall	6.8
CIS1	Samyang Spring	6.8

* pH values in the springs at Taejeon of the main land show 5.98 to 6.97
(Data from KIER, 1989).

Table 6 The composition of main cations and anions in the spring and groundwater of Cheju island
unit : ppm, () : estimated

Ref. No.	Name	K ⁺	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	SiO ₂	TDS	EC	pH
CIA 3	Whangsaeat	2.6	13.5	9.3	5.5	18.0	0	48	0.5	21	182	190	7.7
CIA 4	Ara	2.7	19.5	15.5	10.0	32	0	46	1.4	17	144	232	7.4
CIA 9	Dodu	3.5	13	7.1	6.3	17.5	0	57	0.5	16.5	139	195	7.1
CIA 5	Wolreung	4.3	20	8.3	8.2	31	1.3	44	0.6	19	203	221	7.2
NWA13	Jeuji	5.1	18	6.5	4.9	17.5	1.8	58	0.5	16	143	208	7.6
NWA18	Dongmyung	3.0	11	5.5	5.4	16.5	Tr	41	<0.5	14.5	120	156	6.6
NWA34	Kosan	4.5	26	12	13.0	43	1.7	53	0.9	17	260	276	7.1
NWA36	Myungeedong	2.8	12	3.6	<0.5	14	1.4	(23)	<0.5	17	94	119	7.4
NWA49	Yongsoo	5.2	22	14.5	4.5	26	1.1	78	0.5	14	157	268	7.7
NWA52	Haga	3.1	8.5	4.7	4.0	12	0	44	0.5	19	100	155	7.8
SPA 1	Wolpyung	2.6	11	19	1.2	18	N.D	(66)	<0.5	29	130	138	7.4
SPA 2	Sinhyo	6.3	18.5	17.5	11	33	0	29	1.8	16	133	215	7.0
SPA 5	Hoesu	3.4	8.9	4.9	5.3	8	N.D	52	<0.5	32	73	135	7.2
SPA 6	Sakdal	1.6	11	8.1	4.7	1.5	N.D	(53)	<0.5	13	112	172	7.3
SPA 13	Yongheung	2.0	5.3	2.8	2.1	7.2	Tr	(23)	<0.5	18	48	98	7.8
SPP 10	Midojang	2.7	9	6.9	3.7	14	1.4	41	0	10	126	144	7.2
SPP 11	Yongmunjang	6.0	34	16	11	40	7.6	126	0	10	263	405	7.6
SEA 3	Pyosun	3.3	14.5	5.7	11.5	28	5.4	62	0.5	14.5	138	234	7.6
SEA 5	Whajeon	3.8	30	4.9	8.9	50	2.1	42	0	17	201	511	7.2
SEA 6	Tacheung	4.2	30	12.5	11.5	59	1.3	28	0.7	15.5	167	269	6.7
SEA 7	Gasi	2.4	8	4.9	4.4	11	0	42	0.5	7.3	86	131	7.7
SEA 9	Tosan	2.4	7.4	4.7	7.8	9	1.4	39	0.5	13.5	82	132	7.7
SEA 10	Sungup	3.3	9.4	5.8	3.8	9.2	0	53	0.5	14.5	97	161	7.5
SEA 17	Siheung	9.8	154	20	33	297	49	52	<0.5	30	688	1040	7.1
SEA 22	Sumang	3.2	9.8	6.1	4.9	16	0	37	0.5	18	124	160	7.4
SEA 26	Susan	13.5	255	17	38	431	11.5	42	0	16.5	1103	1329	7.2
NEA 2	Keumyong	9.5	137	14	24	253	43	51	0.5	9.5	577	873	7.6
NEA 4	Sewha	7	82	13	18	159	24	53	0.5	16	417	577	7.7
NEA 5	Hamdeug	5.7	16.5	15	8.6	299	5.9	83	0.5	12.5	179	284	7.3
NEA13	Dugchun	2.7	8.4	2.6	3.1	9.6	Tr	41	<0.5	14.5	95	133	7.6
NEA14	Songdang	3.2	10	4.3	3.7	166	0.6	29	0.5	15	100	132	7.6
NEU 1	Winchon	2.9	11	5.2	5.3	14	0.7	(51)	<0.5	20	96	178	7.3
SWA 8	Gamsan	3.9	16	9.2	5.1	20	Tr	(67)	<0.5	32	133	248	7.5
SWU 2	Sage	2.2	16	9.6	2.9	17	Tr	(64)	<0.5	14.5	99	209	7.7
CIS 1	Samyang	3.0	7.5	2.4	4.1	12	Tr	33	<0.5	15.5	98	126	6.8
CIS 2	Eorimok	0.9	3.7	1.5	1.5	6.1	1.1	16	<0.5	10.5	49	58	7.5
NWS 1	Jangsumul	2.6	13	9.3	6.1	28.1	2.2	(47)	0	(10)	179	191	7.3
NWS 2	Hanlimchun	4.4	13.5	4.9	6.3	17	Tr	53	<0.5	19	132	192	7.3
NWS 3	Dongmyung	3.6	19	2.5	17	43	0.7	41	1.5	15	166	268	6.5
SWS 3	Sulim	3.4	11.5	4.6	4.3	18	Tr	34	1.2	16	129	150	7.3
SWS 4	Andug	19.5	27	24	11.5	55	1.0	31	2.1	14.5	186	299	6.8
SPS 1	Sugwi Hanil Hotel	2.2	6.4	3.9	2.7	12	Tr	26	<0.5	15	102	111	6.7
SPS 2	Chunjeyeon	2.2	10.5	7.4	4.9	16	Tr	37	<0.5	13	139	148	6.8
SPS 3	Yongsil	0.9	3.5	1.5	1.1	6.6	Tr	17	<0.5	6	40	60	7.5
NES 1	Sunulungmul	41	796	43	109	1400	249	(49)	<0.5	9.5	2881	4350	6.9
NEK 1	Sehwa	1.78	612	52	16.5	560	176	651		40	1790	2940	7.39
NEK 2	Jongdal	10.1	4480	1621	175.4	9270	1574	35.5		18.4	18980	30400	7.75
	Sinyang Seawater	483	10,430	367.6	1,350	18,575	2,331	119.45	ND	1.69			8.0

Table 7 Characteristics of Cheju water quality (groundwater and spring, 1990)

No.	Ref. No.	Area	K ⁺	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	CO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	Free CO ₂	Fe	Li	Sr	NO ₃ ⁻	SiO ₂	TDS	EC(μs/cm)
1	CIS-2	Eorimok	1.09	3.06	2.44	1.23	6.20	1.07	ND	25.9	3.3	0.01	ND	0.02	0.50	16.7	40.0	32
2	SPA-5	Heesoo	2.63	6.63	5.72	5.31	8.20	1.81	ND	70.2	8.8	Tr	ND	0.01	0.31	28.5	30.0	95
3	CIS-1	Samyang	2.22	6.28	4.21	3.57	10.6	2.30	ND	42.7	7.7	0.02	ND	0.01	7.83	27.4	73.0	46
4	D-211	Dongbok	2.14	9.18	3.87	3.62	15.0	3.21	ND	45.8	11.0	0.01	ND	0.02	7.20	26.5	86.0	91
5	NEA-15	Pyeongdae	7.70	126.4	14.4	19.6	212.2	30.7	ND	67.1	13.2	0.02	ND	0.04	7.57	27.8	508.0	895
6	NES-1	Sunulungmul	22.0	461.0	20.0	50.6	764.0	108.0	ND	64.1	9.9	0.02	0.01	0.12	5.88	25.4	1,516.0	1,165
7	Sinyang (Sea water)		457.0	10,590	353.6	1,360	19,590	2,640	10.5	166.3	11.0	0.16	0.19	6.54	0.88	3.21	38,330	
8	SEA-3	Pyosun	2.24	9.83	4.97	5.72	15.8	2.63	ND	58.0	6.6	Tr	ND	0.02	6.22	29.7	106.0	135
9	Haga (New well)		2.47	7.78	5.47	5.05	12.6	2.80	ND	61.0	6.6	0.01	ND	0.02	8.61	29.1	100.0	156
10	NWA-13	Jeuji	3.66	15.9	6.99	5.00	18.2	5.02	ND	73.2	6.6	0.01	ND	0.01	9.05	28.0	120.0	167
11	NWA-11	Hanwon	4.23	16.0	8.67	9.90	28.0	7.24	ND	45.8	7.7	0.02	ND	0.02	34.4	32.1	188.0	156
12	NWS-2	Hanlimchun	4.12	13.8	7.24	6.94	18.0	4.36	ND	70.2	7.7	Tr	ND	0.02	11.5	27.4	123.0	173

화학적 특성

현재까지 본 도에 개발된 지하수 관정은 사설관정을 포함해 약 1,700 개소 이상일 것으로 알려져 있다. 그중 정부에서 시행한 지하수 개발공은 400개소에 달

해 비교적 시설이나 자료보존이 양호한 편이나 수질에 대한 분석이 체계적으로 시작된 것은 80년대 중반부터이다. 1989년 까지의 자료(Table 6)와 이를 대비하기 위하여 1990년도에는 용출수 4개소, 지하수 관정 7개소, 해수 1개소 등 총 12개소에 대한 물 시료를 채취하여(Fig. 5) 현장 및 실내

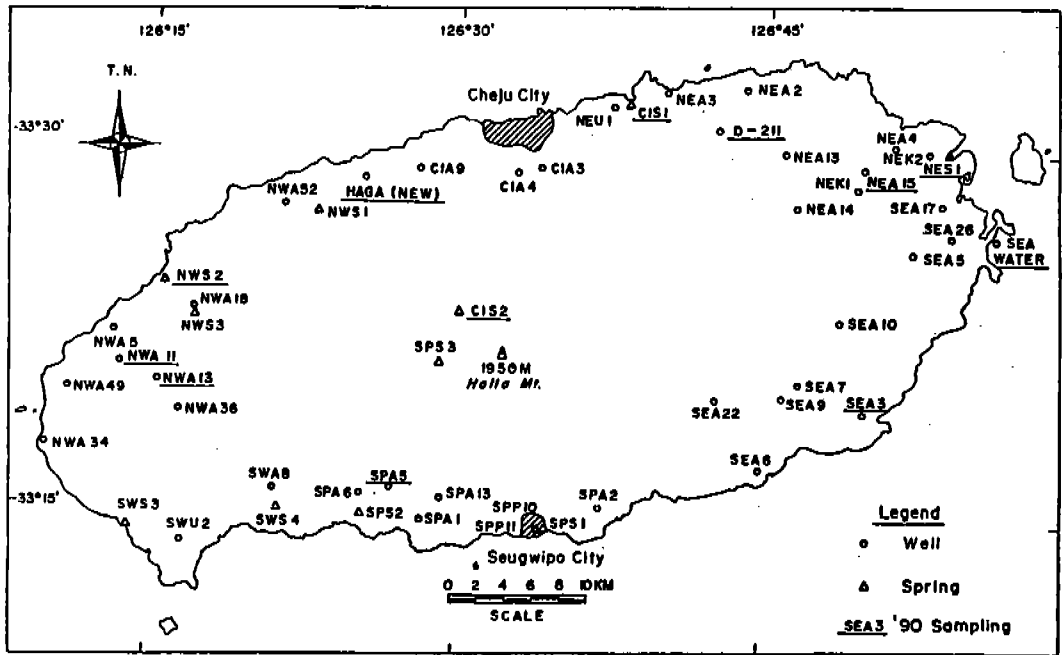


Fig.5 Location of water samples for analysis of water quality in Cheju Volcanic island.

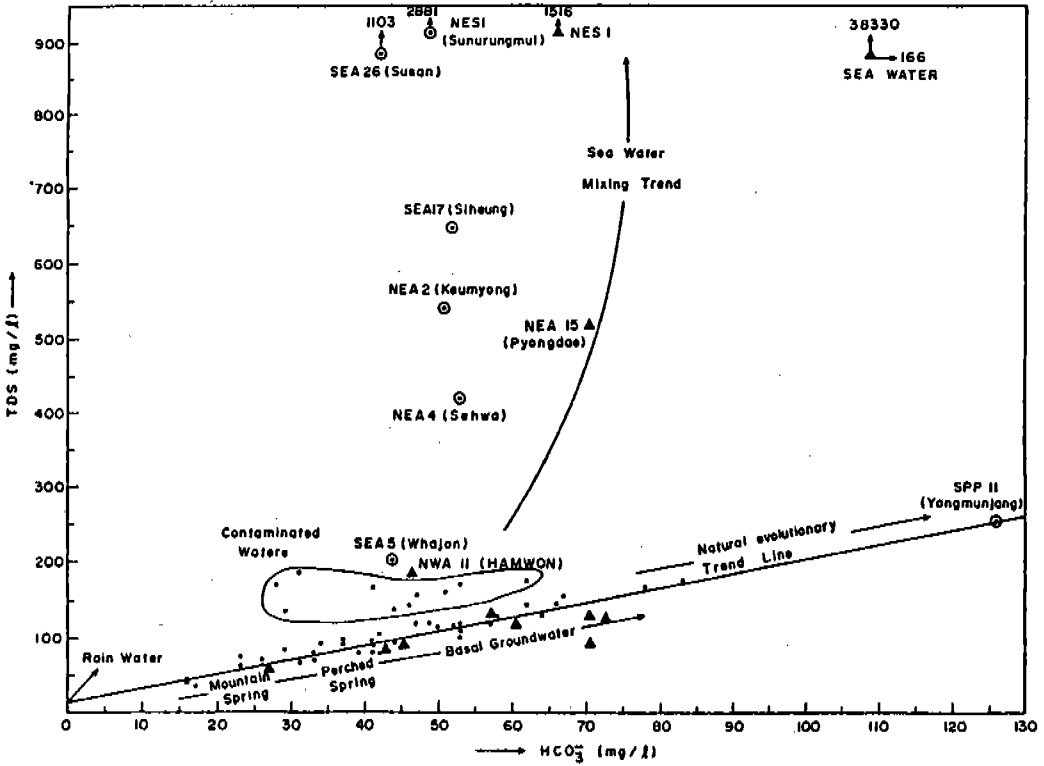


Fig.6 Graph of total dissolved solids (TDS) against bicarbonate concentration showing evolutionary and mixing trends, mg/l.
 (⊙: Before'90, ▲: '90 Samples)

Table 8 Comparison of the SO₄⁻ and NO₃⁻ composition

Unit : ppm

Ref.No.	Area	SO ₄ ⁻		NO ₃ ⁻		Remarks
		Before '90	'90	Before '90	'90	
CIS 2	Eorimok	1.1	1.07	<0.5	0.5	Perched Spring
SPA 5	Hoesoo	N.D	1.81	<0.5	0.31	High Level Groundwater
CIS 1	Samyang	Tr	2.30	<0.5	7.83	Basal Spring
NES 1	Sunulungmul	249	108	<0.5	5.88	Basal Spring
SEA 3	Pyosun	5.4	2.63	0.5	6.22	Basal Groundwater
NEW 13	Jeuji	1.8	5.02	0.5	9.05	Basal Groundwater
NWS 2	Hanlimchun	Tr	4.36	<0.5	11.5	Basal Spring

분석을 수행하였다(Table 7).

자연의 지하수는 Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} 의 양이온과 Cl^- , SO_4^{--} , HCO_3^- 및 CO_3^{--} 의 음이온이 절대적 비중을 차지한다. 따라서 보통의 지하수는 이들 주성분 외의 성분들을 극히 미량으로 포함하고 있으며 이들 주요 성분의 함량비에 의해 수질특성이 결정되어 진다. 본 도 지하수 순환과정의 자연적인 진화과정을 고찰케 해주는 Fig.6은 TDS와 HCO_3^- 와의 상관관계를 잘 나타내주는 그래프로써 채취된 시료를 분석한 결과 강수로 부터 자연의 지하수로의 진화순서가 일직선상에 놓여 있음을 잘 보여주고 있다. 그림에서 \odot 표시는 90년대 이전의 시료이며 \blacktriangle 표시는 90년의 분석시료이다.

즉, 자연의 지하수가 주수와 기저지하수를 형성하는 과정이 시간이 경과됨에 따라 HCO_3^- 와 TDS가 증가되면서 어

Table 9 The Cl-value of Cheju rain water

Date of Sampling	Cl(ppm)	Location of sampling
1987.2.23	8.3	Cheju-City
1990.6.24	8.8	Jongdalri Gujua-eup, Buk Cheju
1990.6.25	3.4	Cheju-City

떤 직선상의 진화경향을 나타내주고 있는 반면에 그림에서와 같이 직선 밖의 또다른 하나의 Group과 HCO_3^- 함유량이 40 ppm에서 50ppm 범위에서 TDS 값이 200 ppm 이상을 갖는 수직상의 선상에 놓인 또 다른 Group으로의 분류가 가능하다.

따라서 직선밖의 Group에 속하는 지하수는 1단계 오염을 나타내고 있는 지하수이며 수직선상에 놓인 것은 분명히 해수가 침입되었음을 보여주는 지하수군 이

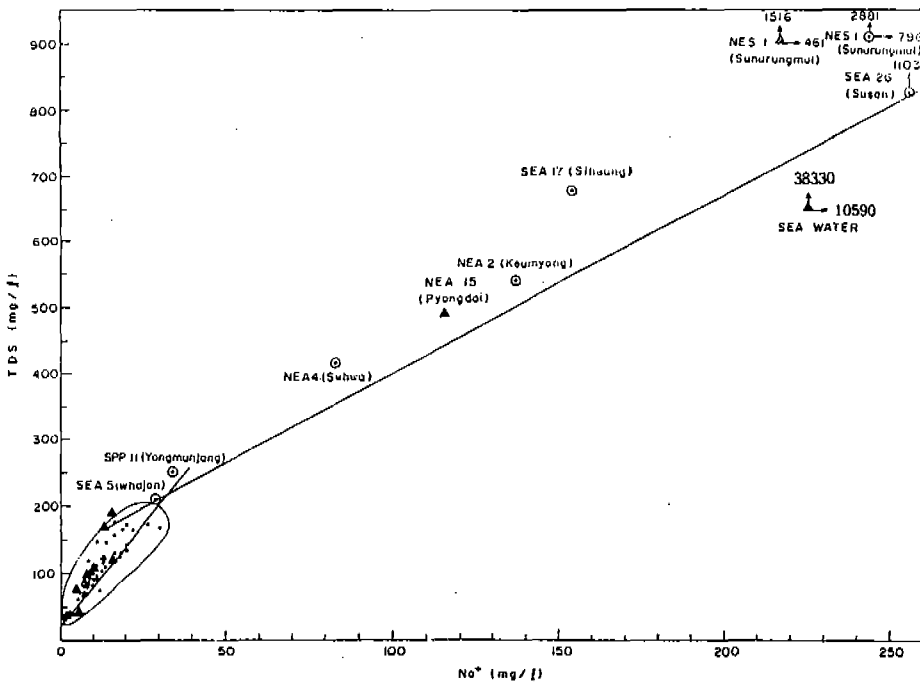


Fig. 7 Graph of total dissolved solids(TDS) against sodium concentration, mg/l. (\odot : Before '90, \blacktriangle : '90 Samples)

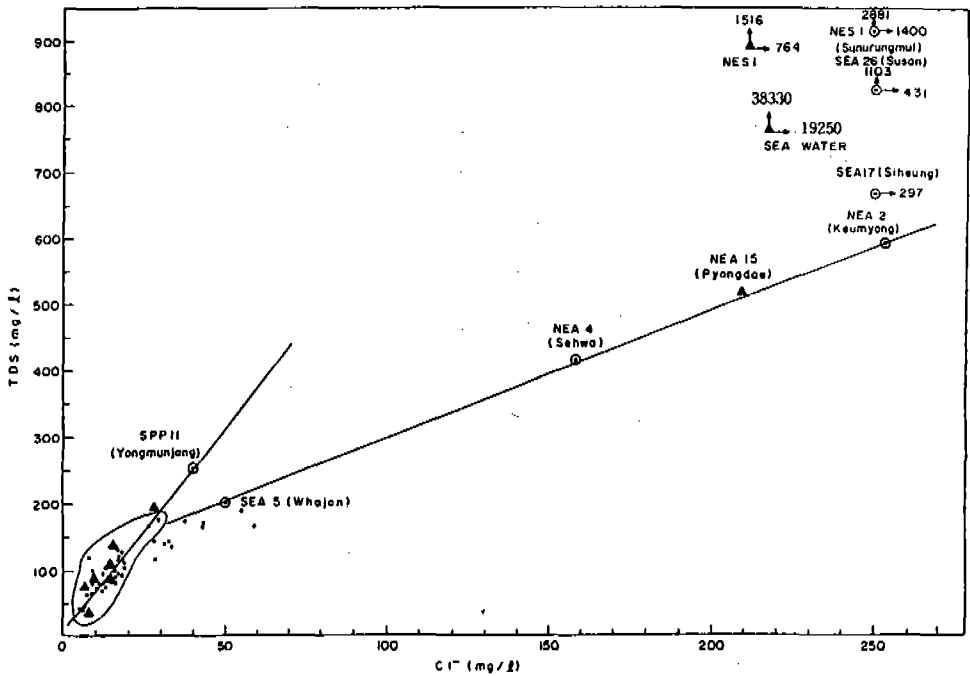


Fig.8 Graph of total dissolved solids(TDS) against chlorine concentration, mg/l.
 (○: Before '90, ▲: '90 Samples)

라 할 수 있어 Natural evolution trend line과
 는 분명히 구별되고 있음을 보여준다.

즉 '90년의 분석치중 NEA 15 평대와
 NWA11 한원지구가 바로 이 Group에 추가
 로 속한다. 평대지구는 동부지역에 위치하
 여 해안변으로 부터 2km정도 떨어져 있으
 나 해수에 의한 오염가능성을 보여주고 있
 으며 특히 본 도 서부에 위치한 한원지구
 (해안변으로 부터 3km 위치)는 그림에서와
 같이 이제 초기오염 단계에 들어가고 있음
 을 나타낸다.

수질오염

일반적으로 EC,TDS, t.d.s, Na, Cl과 SO₄
 등의 값이 높으면 해수침입의 가능성을 나
 타내주고 있으나 Mg과 Ca의 이온 당량비
 에서 이를 쉽게 인지 할 수 있다. 보통은

Ca가 Mg의 두배의 비율임에 반해 이들 관
 계가 반전되고 있으며 쉽게 해수침입 관계
 임을 알 수 있다. 일반적으로 지하수가 오
 염되어가는 과정은 Natural contaminate(제1
 단계), Pollute(제2단계) 등의 2단계로 설명되
 고 있는데 보통성분중 NO₃는 Contamination
 정도를 나타내 주고 K와 SO₄는 Pollution의
 정도를 제시해 준다.

전체 시료의 90년 이전의 분석결과를
 보면 본도 지하수의 NO₃ 값이 <2ppm의 범
 위에 있어 일반적으로는 Low level back-
 ground contamination 단계에 들어 있음을 알
 수 있으나 90년도 분석결과치와 대비하여
 보면 특히 SO₄와 NO₃ 분이 급격히 증가되
 고 있는 지역이 나타나고 있다(Table 8). 여
 러가지 성분 분석치중 Sodium과 Chloride
 에 대한 것만 요약하면 다음과 같다.

Sodium(Na⁺)

대부분 20ppm 미만이며 평대와 서누령물이 각각 126ppm과 461ppm의 높은 값을 보인다. 보통 Na과 Cl의 성분비율은 Na 값이 Cl보다 적어야 정상적인 상태의 지하수이다. 두 지역의 기타 지역에서의 특징은 발견되지 않는다. (Fig.7)

Chloride(Cl⁻)

일반적으로 자연의 지하수에는 보통 10ppm 내외의 Cl있는 것이 통상적이고 해수에서는 평균19,000 ppm(Garrels et al., 1975)의 높은 값을 갖는다. 본 도 동부 신양 앞바다에서의 Cl값은 19,250 ppm으

로 거의 동일한 값을 갖고 있다(Fig. 8). 또한 본 도 Rain Water에서의 Cl값은 Table 9에서와 같이 3.4ppm 에서 8.8ppm의 범위에 드나 보통의 강수는 8ppm 내외인 것으로 알려진다.

Fig.8의 TDS 와 Cl과의 Graph에서와 같이 본 도 지하수 Cl의 함유량 분포를 보면 거의 50ppm 이내의 함유량을 갖고있으며 금년도 시료중 평대와 서누령물이 각각 212ppm과 764ppm의 높은 값을 보이고 있어 해수침입으로 인한 Cl값의 증가로 생각된다. 서누령물은 기저용출수로서 바다와 직접 접하고 있어 거의 Brackish water에 속한다.

Table 8에서와 같이 CIS 2와 SPA 5는

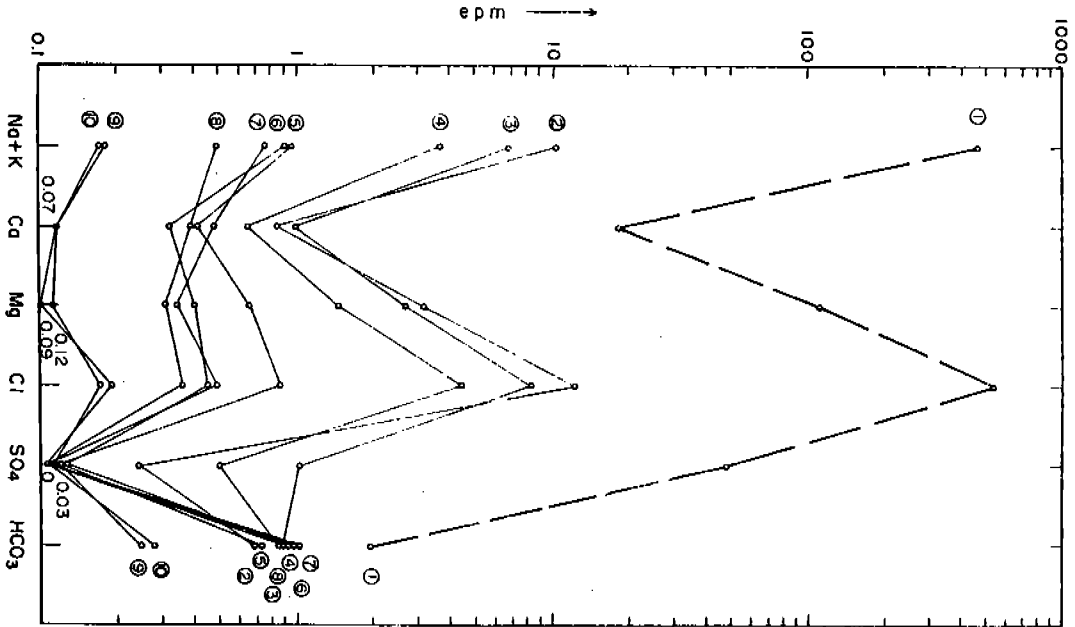


Fig. 9 The chemical composition of main components in the water resources of the Cheju island (after Shoeller Diagram). There are clear differences of these compositions according to the type of water resources. Mountain springs(9, 10) show the lowest contents of main ions and groundwater (5,6,7,8) shows slightly higher contents in most ions than the spring. While groundwater influenced by seawater in the eastern part(2,3,4) is characterized by high contents of Na⁺ and Cl⁻. The number ① shows chemical composition of seawater (①: seawater, ②: SEA26, ③: SEA17, ④: NEA4, ⑤: NWA5, ⑥: NWA13, ⑦: SWU2, SEA10, ⑧: CIS2, ⑩: SPS3).

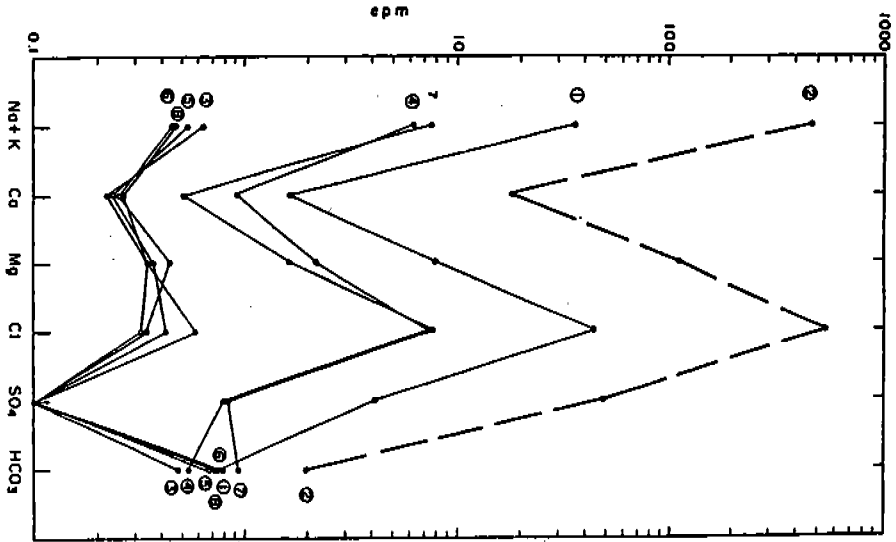


Fig.10 The chemical composition of main components in the water resources of the Cheju island (after Shoeller Diagram). There are clear differences of these compositions according to the type of water resources. Normal groundwater(3,5,8,6) shows slightly lower contents of Na^+ and Cl^- and SO_4^{2-} . While saline groundwater influenced by seawater in the eastern part(7,4) is characterized by high contents of Na^+ and Cl^- . The number ② shows chemical composition of seawater(②: seawater, ①: NES1, ⑦: D-62, ④: W-11, ③: D-211, ⑤: D-69, ⑧: H-1, ⑥: D-194).

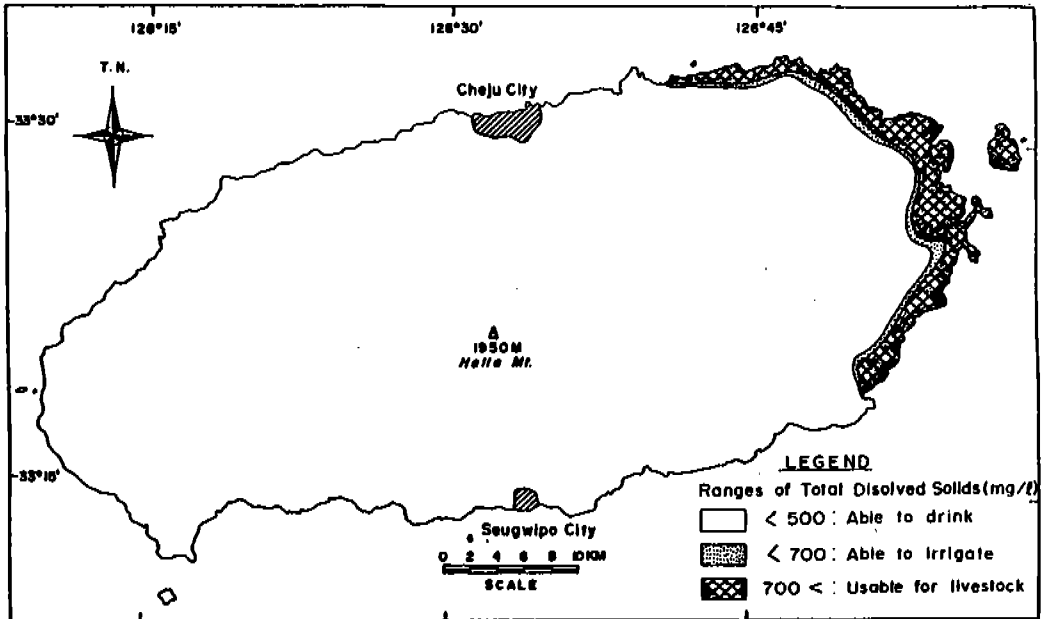


Fig.11 Area limitation of groundwater development. The eastern coastal area of TDS values higher than 700 mg/l may develop groundwater for animals but for drinking water supply the groundwater shouldn't contain TDS higher than 500 mg/l.

상위용출수와 상위지하수로서 SO_4 와 NO_3 성분이 '90 이전이나 현재까지 뚜렷한 변화는 없으며 그의 지역에서는 전반적으로 급격한 증가를 보이고 있어 Contamination 단계를 벗어나 Pollution 정도의 단계로 접어들고 있음을 의미한다. 이들 오염원은 농약 등 화학비료 사용에 주 원인이 있을 것으로 생각되어 이들 화학성분 변화는 장기적인 Monitoring과 분석을 지속하여 그 변화 Pattern을 알아야 할 것이다.

또한 Table 7에서 보는 바와 같이 NEA 15 평대와 NWA 11 한원지구에서의 Ca^{++} , Mg^{++} 의 비율은 Mg^{++} 의 이온 당량비가 Ca^{++} 보다 높은 값으로 나타나 그 비율이 반전되어 아마도 해수가 침입되고 있음을 보여준다.

이상과 같이 본도 지하수 및 용출수에 대한 수질분석 결과를 종합해 Schoeller의 Diagram에 표시해 보면 몇가지 유형으로 수질의 Pattern을 구별할 수 있다. 즉 Fig.9에서와 같이 본도 전역에서 대표적인 시료 10개를 분석해 보면 4개의 수질군으로 그 분류가 가능한데 (1)은 해수, (2) (3) (4)는 Na, Cl 성분이 높은 해수침입군, (5) (6) (7) (8)은 보통의 지하수군, (9) (10)은 이온함량이 아주 적은 상위용출수군 등으로 분류할 수 있다.

또한 Fig.10은 '89년도의 동부지역 시료분석 결과표이다. 본 그림에서도 Fig.9와 마찬가지로 4개의 수질군으로 그 분류가 가능한데 (2)는 해수, (1)은 바다와 접하고 있는 기저용출수군, (7) (4)는 해수침입군, (3) (5) (8) (6)은 보통의 지하수군 등이다.

두 그림을 비교해보면 본도 수자원의 수질 Pattern을 뚜렷하게 구분 지을 수가 있다. 즉 해수침입으로 오염된 지하수군과 보통 정상적인 지하수군, 그리고 지하수의 순환역사가 짧은 상위지하수 및 용출수군으로 분류가 가능하다. 주목해야 할 것은 해안면에 인접하고 있는 지하수

체로 부터의 화학성분중 SO_4 함유량이 증가되고 있는 경향이다. 이는 해수의 침입 가능성을 암시해주는 것으로 계속적인 Well inventory가 필요하며 관측정 (Observation Well)을 설치하여 조수간만에 따른 지하수위 변동상태 등을 계속적으로 기록해야 할 것이다.

Fig.11은 본도 동부지역의 해수침입으로 인한 TDS를 분류하여 식용수와 관개용수 및 가축용수로서 사용 가능지역을 구분하였다. 일반적으로 식용수로 가능한 TDS의 허용치는 500ppm으로 동부지역중 일부지역은 해안면으로 부터 6km 정도의 중심부까지 식용수로는 부적합한 지역으로 나타난다. 그러므로 이 지역에 대하여는 기존 지하수관정으로 부터 과잉양수등을 방지하여 대수층 파괴를 예방해야 할 것이며 이들 관정에 대한 지속적인 Well Monitoring System을 설치해야 할 것이다.

OAHU도의 지하수

지질구조

Oahu섬은 서경 $154^{\circ} 40'$, 북위 $18^{\circ} 54'$, $-28^{\circ} 15'$ 사이에 위치하는 하와이 군도 중 세번째 큰 섬이다 (Fig.12). 면적

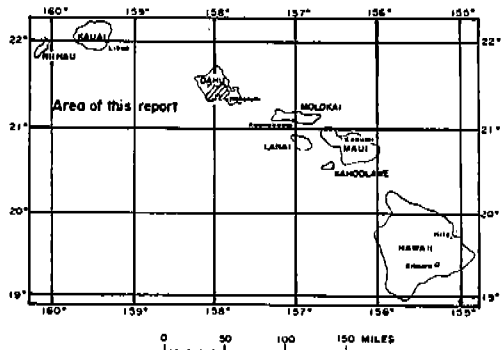


Fig.12 Location of OAHU island

은 약 1,564km²로 1,810km²의 제주도 보다는 약간 작은 편이나 인구는 약 750,000명으로 제주도 인구 510,000명보다 인구밀도가 높다.

Oahu도는 제주도와 마찬가지로 화산활동에 의하여 형성된 화산도로서 그 시기는 제주도와 동일한 제3기말로부터 플라이스토세 (Pleistocene epoch) 말기까지 계속된 화산섬으로 생각된다.

제주도는 섬 중앙에 유일한 주 화산인 한라산(1950m)을 중심으로 섬의 장축방향으로 360여개의 기생화산 (Parasitic cone)이 배열되어 있으나 Oahu도는 지형 특징상 2개의 산맥과 고원지대 즉 서쪽의 Waianae산맥, 동쪽의 Koolau산맥 그리고 중앙부에 Schofield대지로 분류된다(Fig.13).

Waianae 화산계는 Oahu도에서 최고기 암석으로 신생대 Pleiocene세에 속하는 고기층적층, 용기해안 석회암층과 고결된 석회질 사구로 구성된다.

Koolau 화산계는 Waianae 화산계보다 화산활동을 늦게 시작한 바 주로 Lava와

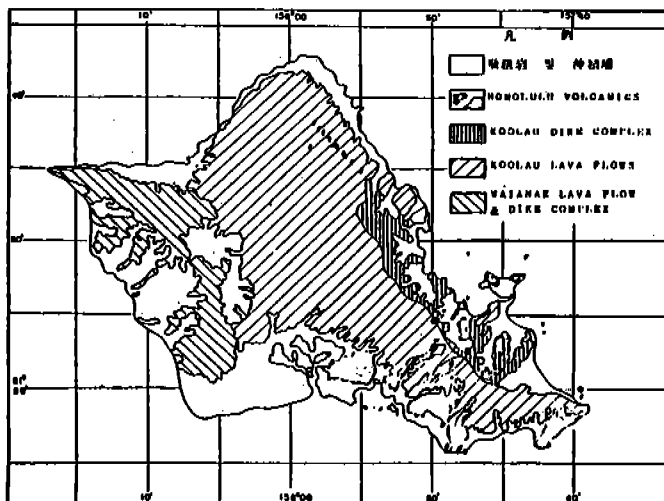


Fig. 13 Geological map of OAHU island.

층의 응회암으로 형성된다. 화산활동은 현재의 산맥방향과 일치되는 균열대를 따라 시작되어 용기와 침강이 반복되면서 현재의 지층을 형성하였다. Oahu도의 용암류에서는 많은 암맥(Dike)의 관입현상을 볼 수 있는데 이들 지대를 복합 암맥군대(Dike complex zone)라 하며 상위지하수의 좋은 부존대가 되고 있다(Fig.14). Oahu도 전면적의 반이상을 차지하는 Koolau산맥은 심한 침식작용을 받아 높은 절벽을 형성한다. 이는 비교적 풍화침식

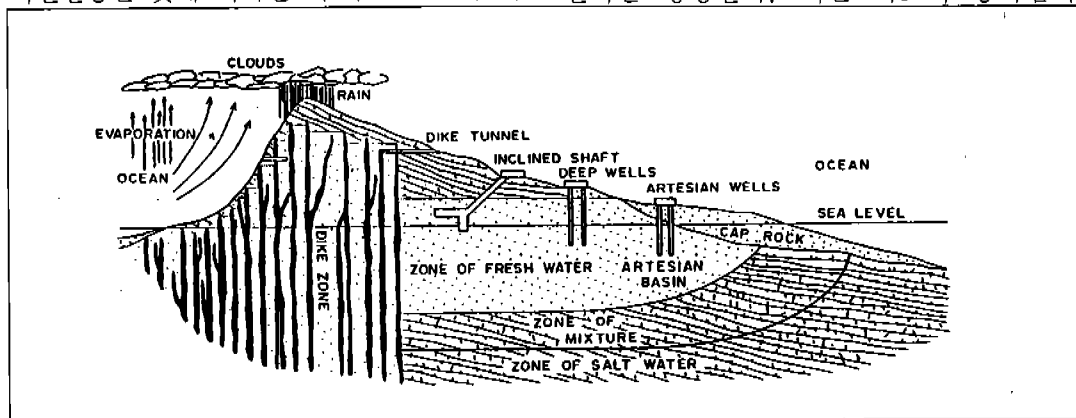


Fig.14 Schematic chart showing OAHU's water sources (Courtesy Honolulu Board of Water Supply).

에 강한 암맥의 분포와 년평균 5,000mm 이상의 강수량(제주도 약 1,630mm)이 Koolau 산맥 중산간부에 거의 내리고 있으나 해안변으로 갈수록 급격히 감소한다. 한편 고산지대는 7,600mm 이상의 강수량이 내리고 있는데 이는 제주도 정상부의 3,200mm에 비하면 거의 2.4배나 많아 급격한 풍화 침식을 촉진시키는 요인으로 작용한다.

본 Koolau 화산계의 퇴적층 중 특히 해안변이나 해저까지 발달된 불투수성 퇴적층(주로 Tuff Cone)을 Cap rock이라 하는데 이 Cap Rock은 본도에서 피압 대수층(Confined Aquifer)을 형성케 해주는 중요한 요인이다(Fig.14).

지하수 부존

Oahu도의 지하수 부존은 전술한 바와 같은 지질학적 조건에 따라 특이한 부존양상을 갖는다. 우선 크게 분류하여 기저지하수(Basal groundwater)와 상위지하수(High level groundwater) 그리고 주수(Perched water)로 구분된다.

기저지하수(Basal Groundwater)

도 전역에 Ghyben-Herzberg 원리에 의한 임해지역에서의 특징인 지하수 부존 형태를 보여준다. 즉 기저지하수는 광대한 기저 lens를 형성하여 이상적으로 분포한다(제주도는 지질조건에 따라 이상적인 기저 lens의 발달이 빈약하다). 특히 해안 주변부에는 제4기 불투수 퇴적층이 평균 약 200m의 두께를 갖고 해저까지 광대하게 발달되어 투수성이 높은 현무암을 피복, Artesian basin을 형성하면서 지하수가 바다로 유출되는 것을 억제시키고 있다.

이러한 불투수층은 Cap rock역할을 하면서 피압현상을 유발한다. 그러나 이러한 피압현상도 계속되는 지하수 개발 이용으로 인해 지하수위가 당초보다 하강되고 있는 추세로 진주만(Pearl Harbor) 지역에서 더욱 뚜렷한 현상이 나타나고 있다. 대체로 본도 기저지하수의 동수구배(Hydraulic gradient)는 0.00018로 제주도의 동서부지역 0.0036, 북부 0.0068, 남부 0.036(1990, Choi)에 비하면 극히 완만한 구배를 보여 주고 있으며 약간 높은 지역이 0.00056이나 제주도에 비교할 수 없을 만큼 완만한 값을 보여주고 있다.

상위지하수(High Level Groundwater)

전술한 바와 같이 본 도에는 제주도와는 달리 여러곳에서 암맥의 관입현상을 볼 수 있는데 지역에 따라 관입양상을 달리함이 특징적이다. 해안 부근에서는 단조로운 면을 보이거나 내륙 산악지역으로 갈수록 집중적이고 복합적인 관입암맥군(Intrusive dike complex)을 이룬다. 기존의 화산암을 관입한 맥암은 지하수의 유동을 차단하는 벽(Compartment)의 역할을 하게 되며 더우기 복합관입암맥군대에서는 맥암과 맥암사이에 투수성이 양호한 기존 현무암내에 지하수를 충전, 포장하게 되어 결국 해수면 상부의 Lens 형태로 떠 있으면서 부존하는 기저수위면보다 상부에 위치한다. 이러한 지하수를 Compart형 지하수 또는 상위지하수라 한다. 상위지하수는 지역에 따라 다르나 기저지하수위 보다는 대개 100-200m 정도 높게 부존되어 수평식 터널 공법에 의해 막대한 양의 지하수를 오래전부터 이용해 오고 있다(Fig.14).

주수(Perched Water)

시대를 달리하는 용암류 하부에는 연

속성이 없는 화산회층(Volcanic ash), 화산점토(Volcanic clay), 응회암(Tuff) 기타 퇴적층 등 불투수층이 분포한다. 이들 불투수층 상부에 주수가 부존하는데 이들 부존대는 연속성이 없고 소규모로 분포하고 일부는 2차적인 균열에 따라 하부로 강하하기도 하고 경사진 불투수층을 따라 유하하다 지표에서 용출되기도 한다. 주수의 포장량은 많지는 않으나 개발하여 이용하는 곳도 있는데 그 부존량은 강수의 영향에 따라 민감하다.

이상에서 기술한바와 같이 Oahu도의 지하수 부존상태는 Ghyben- Herzberg 원리에 의한 기저지하수와 맥암의 관입에 의한 상위지하수 및 용암류 사이의 불연속적인 불투수층에 존재하는 주수로 분류할 수 있다.

Halawa 수향

Halawa inclined shaft의 진입구(Portal entrance) (Fig.14)는 진주만 지역 해안면 50MSL.에 위치한다. 본 수향은 기저지하수를 개발하기 위하여 30° 사각으로 86m를 굴착하여 7 MSL. 에 Pump room을 설치하여 일일 15 million gallons(56.775m³)을 기저지하수체로 부터 양수하여 시로 공급하고 있는데 일일 15 million gallons의 양은 1인당 일일 사용량을 500l로 기준해 보면 113,550명이 충분히 사용할 수 있는 물의 양이다. 본향과 유사한 Main shaft가 3곳이나 더 시설되어 있는데 Hawaii 주민 75만여명에 유동인구를 포함한 80여만명을 위해 공급되고 있어 지하수의 기여도를 가히 짐작할 수 있다.

본 터널은 1941년 12월에 착수되어 1944년에 완공되었는데 2차대전의 소용돌이 속에서 노동력과 물자의 부족으로 어려운 공사였음을 당시 수도국의 주임기사인 Fred Ohrt는 진술한 바 있다. 당시 공사비는 \$760,000이었는데 만일 본 공사 규모가 1980년

대에 시행된다면 \$6-7million 정도가 투자되어야 했을 것이라고 기술자들은 평가하고 있다(Data from: Honolulu Board of Water Supply).

지하수의 부존개념은 전향에서 언급한 바와 같으나 지하수의 유동개념이 제주도와는 차이가 있어 Oahu도의 기저지하수의 연령은 25년인데 반하여 제주도 지하수의 연령은 2 - 8.5년으로 알려진바(1972, UNDP/FAO) Oahu도 지하수 연령이 오래된 것은 아마도 곳곳에 발달된 맥암군(Dike complex)과 아주 완만한 수리구배에 기인한 것으로 생각된다.

지하수 보존 및 개발방향

지하수 보존구역 설정

제주도에 대한 지하수 개발은 Oahu섬에서 지하수 개발이 착수된것 보다 80여년이 지난 1970년대에 와서야 본격적으로 착수되어 1989년도 현재 정부 주도하에 지하수개발공수는 355공, 민간개발이 1,408공으로 총 1,763공의 암반 관정이 개발되어 일일 634천톤의 용수를 확보하고 있는데 이중 46%인 288천톤/일의 용수를 실제 사용하고 있다.

서기 2001년도 기준 제주도 용수수요는 약 700천톤/일로 추정되어 있어 1989년까지 기개발 이용량 506천톤/일을 제외하면 금후 194천톤/일을 추가 개발하여야 할 것으로 전망된다. 이를 개발하려면 정부에서 250공, 민간에서 1,000여공 등 1,250공을 지하수로 추가 개발되어야 할 것으로 본다고 1989년 제주도지하수 장기개발계획 조사보고서에 보고된바 있다.

본도는 또한 계속적인 지하수 개발의 증가로 인해 지하수 오염문제가 심각해질 것으로 보고 있으나 바다와 직접 접해 있기 때문에 해수침입이 쉽게 예견되어

동부지역에서는 이미 몇몇 관정이 염수침입으로 인해 폐공이 발생되고 그 영향을 받는 지역이 점점 증가하고 있다. 이러한 현상은 1940년대 Oahu도 진주만 지역의 지하수 관정에서도 염도 증가로 인해 폐공이 발생되어 폐기해 버린 것과 똑같은 현상이다. 이러한 오염의 형태는 해안변에서 수리구배가 대단히 완만한 저지대에서 잘 나타난다. 이러한 경우 경사를 따라 지하수 유동이 대단히 느리기 때문에 장기 양수 작업은 대수층내로 해수의 침입을 유발할 것이다. 그러므로 해수침입이 예견되는 지역에서의 지하수 개발 및 양수량은 통제를 받아야한다. 이러한 통제를 가하기 위해서는 법적인 규제가 절대적으로 필요하다.

우리 인간은 양질의 용수를 사용할 권리를 갖고 있으며 후대에게도 무공해의 지하수 자원을 그대로 물려주어야 할 의무를 진다. 이렇듯 유한의 자원이기도 한 지하수는 무절제한 개발과 과잉양수로 인한 지하수원의 고갈, 산업 폐기물과 해수에 의한 수질오염 등을 예방하기 위한 어떤 질서가 필요한 것이다. 1세기 전부터 지하수를 개발 이용해 오고 있는 호주(1969), 미국(1948), 오스트리아(1959), 영국(1945), 독일(1957), 일본(1956) 등은 이미 지하수법이 제정되어 지하수 자원의 개발이용 그리고 합리적인 보존을 위해 법으로 제한을 함으로써 균형있는 관리를 해 오고 있다. 참고로 본 도의 총 지하수 부존량은 340억톤이고 이중 가용수자원이 123억톤으로 이미 추정(1971, ADC)되고 있듯이 당시만 해도 실로 막대한 양의 신선한 지하수가 부존되어 있음이 조사된 바 있다. 또한 지하수의 연간 함량(Recharge amounts)은 8억 4천 3백만톤 (1990, Choi)으로 이를 잘 보존하고 관리만 하면 본도의 수자원 이용에는 별 문제점이 없을 것이다. 이를 위해서는 지하수자원에 대한 소유개념을 재정립할 수 있도록 하루마써 지하수 보존 구역을 설정해야 할 것이다.

용수개발 방향

본 도의 저지대라 할 수 있는 200ML 이하 지역은 전항에서도 언급한 바와 같이 막대한 량의 기저지하수가 부존되어 이미 많은 양이 개발 이용되고 있다. 따라서 앞으로의 용수개발은 600-700ML 하부의 중산간지대를 대상으로 한 상위지하수 개발에 착안해야 할 것이다. 이제까지 알려진 바로는 상위지하수는 그 부존의 특수성으로 보아 규모면에서 적고 또한 계절에 따른 강수량의 영향에 아주 민감하기 때문에 세부적인 지질조사가 뒤따라야 한다.

상위 지하수가 부존되려면 지하수의 수직강하를 차단해 주는 불투수층의 분포가 필수적인데 지하수의 유동방향이 감지된 곳에서는 지하댐과 유사한 인공적인 차수벽을 형성해 주던가 전장에서 언급한 Halawa 수항과 유사한 수평 또는 경사진 터널식 공법에 의한 지하집수정도 가능할 것이다. 다만 이러한 조건을 만족시키기 위해서는 무엇보다도 과학적인 세부지질조사가 선행된후 위치가 선정되어야 할 것이다.

결언

제주도의 주 분포 지질은 화산암류와 퇴적암류로 크게 분류된다. 화산암류는 현무암, 조면암류가 주를 이루며 퇴적암류로는 화성쇄설 퇴적물과 해성층으로 구성되어 있는데 동일시대에 분출한 Oahu 섬은 복합암맥군대(Dike complex zone)의 분포로서 제주도와는 상이한 지질구조를 갖는다. 또한 Oahu도는 불투수층인 응회암층이 해저까지 발달되어 Cap rock 역할을 하면서 피압대수층을 형성하며 이상적인 기저 Lens를 형성하기도 한다. 암맥의 발달로 상부에 막대한 양의 상위 지하수와 주

수(Perched water)가 부존되어 수평식 터널에 의해 이를 개발, 이용하고 있다. 반면 제주도의 주수는 암맥이 아닌 불투수층 상부에 국부적으로 부존하고 있는데 강수량의 변화에 아주 민감하다. 제주도는 비교적 lens가 얇은 동부지역에 이미 해수에 의한 오염이 발생되고 있으며 Oahu도의 진주만 지역도 벌써 오래전에 똑같은 현상이 일어난 바 있다.

제주도 지하수의 지화화학적 성분은 두개의 군으로 분류된다. 하나는 총고용물(TDS)이 140 ppm보다 적은 군으로서 양이온과 음이온의 양이 결정질암과 비교해서 대단히 적은 편이며, 용출수와 주수 및 기저지하수가 이에 속한다. 두번째 군은 동부지역에 부존하는 지하수로서 대수층내에 해수가 침투되어 있는 지하수이다.

Cl⁻ 과 HCO₃⁻가 해안변에서 내륙으로 향할수록 감소하긴 하지만 예외적으로 높은 값을 갖는 군이다. 한편 전기비전도도(EC) 값은 4,000 micro S/cm의 높은 값을 갖는 것으로부터 다양한 범위를 갖는다. 용출수는 100 micro S/cm이하를 보이고 보통의 지하수는 200 micro S/cm 이하이다. 반면에 섬의 동부지역에서는 염수침입으로 인하여 500 micro S/cm 이상의 높은 EC값을 보인다. 또한 분석된 시료를 Ion balance에 따라 도식화해 본 결과 제주도 지하수는 Bicarbonate type에 속한 것이 우세하며 이는 흔히 지표수나 자유면 지하수에서 나타나는 수질조성을 보여주고 있어 본도 지하수는 충전(Recharge)과 배출(Discharge)의 순환역사(History of Groundwater Cycle)가 극히 짧다는 것을 암시해준다. 이는 지하수의 지하통로가 되는 Lava tube, Lava tunnel 등이 마치 파이프와 같이 지하수의 투수를 급격히 촉진해주는 매질을 통해 빠른 속도로 순환되고 있어 Dike 분포가 많은 Oahu도의 지하수 연령 25년에 비해(제주도 2.5-8년) 훨씬 낮음에도 입증이 된다. 일반적으로 지하수의 오염 여부를 판별해주는 인자인 K,

NO₃와 SO₄의 농축량이 기존 지하수 개발지역중 해안변에 인접된 지역에서 증가되고 있는 경향이다. 특히 이러한 현상은 과거에는 동부지역에서 뚜렷한 것으로 알려져 왔으나 90년의 조사결과 제주도 해안변 여러지역에서도 동일한 현상이 나타나고 있어 이에 대한 Monitoring이 계속되어야 할 것이다. 또한 지하수의 자연진화 과정을 고찰해 볼때 제주도의 지하수는 단순한 화산도에서 볼 수 있는 단순풍화 과정에서 기인된 물의 특징을 보여주고 있으며 일부 지역의 해수침입을 제외하고는 어떤 심각한 수리지화화학적 과정 하에서의 지하수 특성을 보여주지 않는 것이 또한 특성이다. 즉, 광물질의 충전이나 이온교환(Ion exchange), 용해침전(Solution-Precipitation) 또는 산화-환원(Redox process) 등과 같은 현상이 없음을 제주도 수자원의 순환역사가 짧음을 시사해준다.

제주도와 같이 신선하고도 막대한 양의 지하수가 부존되어 있는 지역은 하루 속히 지하수 보존구역으로 설정하여 개발과 이용을 법으로서 규제하여야 한다. 현재 일부 지역에서 해수 및 산업폐기물에 의한 수질오염 현상이 나타나고 있으나 이는 초기단계로서 지금부터라도 규제를 가하면 심각하지는 않을것으로 생각되며 앞으로는 해안변의 기저지하수보다 중산간지대에서의 용수개발에 더욱 치중해야 할 것이다. 그렇게 하기 위해서는 이들지역(200-700 MLS)에 대한 과학적인 세부지질조사를 시행하여 소위 주수(Perched Water) 부존 가능지역을 탐색하여 경제적인 용수개발을 추진해야 할 것이다.

사사

본 논문을 발표하도록 허락하여 주신 한국 자원연구소 김 동학 소장님께 감사를 드린다. 또한 본 논문의 일부는 1990년도 과학기술처 기본연구 과제인 '제주도 수자원의 특성과 오염연구(2)'의 연구결과를 인용하였으며, Oahu도의 지하수에 관한 부분은 1973, ADC발간 '제주도와 Oahu도의 지하수'로부터 자료를 참조하였다.

특히 1991.7.22 - 7.26, 미국 하와이 호놀룰루에서 열린 ASCE (American Society of Civil Engineer) 주최 "Groundwater in the Pacific Rim Countries"에서 발표된 필자의 논문 'Seawater Intrusion on Cheju Volcanic Island, Korea'를 자료로 하여 본 논문의 대부분이 작성되었으며 Honolulu 수향에 관한 부분은 Honolulu시 Water Resources Research Center의 Director 인 Dr. L.S. Lau와 Mink and Yuen Inc.의 Vice President로 있는 Dr. John.F. Mink로부터 많은 기술적 정보를 얻었음을 덧붙이면서 깊은 감사의 말씀을 전한다.

참고문헌

- 최 순학, 1988, 제주도 연구 제5집. 제주도의 형성과 지하수 특성, pp. 68-75.
- 최 순학, 김 영기, 1989, Jour. Geol. Soc. Korea. Vol.25, No. 3, 제주도 지하수의 수질 특성, pp. 231-238.
- KR-89-(B)-4, 1990, 제주도 수자원의 환경학적 조사 연구, pp. 14-34.
- KR-90-(B)-10, 1991, 제주도 수자원의 특성과 수질오염 연구(II), pp. 13-52.
- ADC, 지하수 73-2, 1973, 제주도와 Oahu도의 지하수, pp. 58-62.
- Choi, S.H. 1985 to 1986, Research on Applied Geology of Korea, Hydrogeological Study of Cheju Island, KIER.
- Choi, S.H., Kim, Y.K., Lee, D.Y., 1991, Proceedings of groundwater in the Pacific Rim Countries, ASCE, Seawater Intrusion on Cheju Volcanic Island, Korea., pp.50-56.