

석사학위논문

제주도 지하수의 수위변동에 관한 연구

제주대학교 대학원
해양학과



1993年 12月

제주도 지하수의 수위변동에 관한 연구

지도교수 양 성 기

박 원 배

이 논문을 이학 석사학위 논문으로 제출함

1993년 12월

박원배의 이학 석사학위 논문을 인준함.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

심사위원장

위 원

위 원

제주대학교 대학원

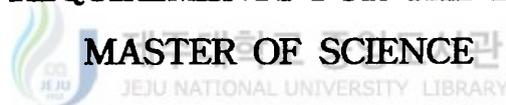
1993년 12월

Study on the A Fluctuations of Groundwater Levels in Cheju Island, Korea

Won-Bae Park

(Supervised by professor Sung-Kee Yang)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF



DEPARTMENT OF OCEANOGRAPHY
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

1993, 12

목 차

Summary	
I. 서 론	2
II. 조사 및 분석방법	4
III. 결 과	8
1. 지역별 지하수위의 변동양상	8
1) 제주도 동부지역	8
2) 제주도 남부 및 북부지역	14
3) 제주도 서부지역	19
2. 수리지질 특성	22
3. 심도별 지하수의 수질특성	29
1) 심도별 염분도와 수온의 분포	30
2) 심도별 수질조성	33
IV. 고 찰	36
V. 결 론	43
참고문헌	45
감사의 말씀	
부록	

List of Figures and Tables

Fig. 1.	Measurement wells location of groundwater level.	----- 5
Fig. 2.	Fluctuations of tidal and groundwater level in Kimnyoung well at northeastern Cheju.	----- 10
Fig. 3.	Fluctuations of groundwater level in Shinhyo well at southern Cheju.	----- 16
Fig. 4.	Relations between precipitations(upper) and groundwater level in(lower) Shinhyo well at southern Cheju, 13-14 July, 1992.	----- 17
Fig. 5.	Fluctuations of groundwater level in Samyang well at northern Cheju.	----- 18
Fig. 6.	Fluctuations of groundwater level in Kosan-I well at western Cheju.	----- 21
Fig. 7.	Fluctuations of groundwater level in Kosan-II well at western Cheju.	----- 21
Fig. 8.	Geological cross-section lines of the study area.	----- 24
Fig. 9.	Geological cross-sections of the Cheju(after Koh et al., 1992).	----- 25
	(A): Kuum - Hamduk (B): Hallim - Dansan	
	(C): Chungmun - Namwon (D): Nansan - Kimnyoung	
Fig. 10.	Fig. 9. continued(Hallim~ansan sections line).	----- 26
Fig. 11.	Fig. 9. continued(Chungmun~Namwon sections line).	----- 27
Fig. 12.	Fig. 9. continued(Nansan~Kimnyoung sections line).	----- 28

-
- Fig. 13. Depth-salinity/temperature profiles of Susan- I well at
southeastern Cheju(mean from september to december). -- 32
- Fig. 14. Vertical variations of each elements in Susan- I well at
southeastern Cheju(mean from september to december). -- 35
(A),(C):High-higher water level
(B),(D):Low-lower water level
- Fig. 15. Geological cross-section and occurrence of groundwater
Sŏngsan area, Cheju Island(after Koh et al.,1992). ---- 42



Table 1. Statistics of measurement wells in Cheju Island. -----	4
Table 2. Results of the groundwater level measurement at eastern Cheju. -----	9
Table 3. Tidal efficiency(%) of Kimnyoung well. -----	11
Table 4. Variations of the Tidal efficiency and Time Lag with the distance from coast at eastern Cheju. -----	12
Table 5. Comparison of tidal efficiency of groundwater between Cheju, Saipan and Hawaii area. -----	13
Table 6. Results of the groundwater level measurement in Shinhyo and Samyang well. -----	15
Table 7. Rising of groundwater level due to the precipitation in Shinhyo well at southern Cheju. -----	16
Table 8. Results of the groundwater level measurement in Kosan-I and Kosan-II well. -----	20
Table 9. Vertical variations of the salinity and temperature in Susan-I at eastern Cheju. -----	31
Table 10. Vertical variations of major elements in Susan-I well at eastern Cheju. -----	34

Summary

The groundwater levels at 11 sites and the vertical variations of the water quality at 1 site were measured to study the characteristic of the groundwater level fluctuation of Cheju Island.

The results of the measurements for the groundwater levels were as follows:

In the eastern part, including Kimnyong, Jongdal and Sungsan, a sinusoidal fluctuation of groundwater levels occurred in response to oceanic tides. The tidal effect on the groundwater level was reduced depending upon the distance from seashore. But time lag showed that the trend is reversed. However, in the Samyang, Kosan and Shinhyo areas show that the groundwater level was directly influenced by the amount of precipitation. Especially, Shinhyo area which southern part in Cheju was affected the most and show upper parabasal groundwater level.

In Susan- I which eastern part in Cheju, well revealed that water quality changed with the period of a tide. Salinity at the 11m, below the natural groundwater level, was approached to the brackish groundwater(1000ppm).

I. 서론

지하수의 수위는 강수량, 해양 및 지구조석, 대기압, 바람, 지진, 증발산량, 양수량 등의 요인(Jacob, 1939; Robinson, 1939; Bredehoeft, 1967; Todd, 1980 등)에 의해 변화하고 있으며, 그 변화는 수년 또는 그 이상의 기간을 주기로 하는 영년변화(secular variations)와 계절적 또는 단기간에 변하는 단주기 변화가 있다. 이러한 지하수의 수위변화는 지하수를 함유하고 있는 지질구조와 지질의 분포특성에 따라 상이하게 나타난다. 그 예로서 하와이 오후섬(Oahu Island)의 경우는 지질의 분포상태에 따라 지하수의 부존형태가 구분되고 있으며, 수위변동 또한 부존형태에 따라 상이한 양상을 나타내고 있다(Lau, 1980).

도서지방의 지하수위 변동 요인중에서 해양조석의 영향은 보편적으로 관측되고 있으나, 그 정도는 해안변 지역의 수리지질학적인 특성과 조차 등의 조건에 따라 가변적으로 나타나고 있다. 그리고, 강수량의 변화는 지하수 수위의 단기적 및 계절적 변동을 유발시키는 가장 근본적인 요인이 되고 있다. 또한, 수위변동의 폭은 대수층의 유형에 따라 좌우되는데, 피압대수층(confined aquifers)이 자유면대수층(unconfined aquifers)보다 훨씬 큰 변동을 나타내는 것으로 알려져 있다(Todd, 1980). 따라서, 조석과 강우에 의한 지역적인 수위변동 특성은 그 지역의 수리지질학적 특성뿐만 아니라 지하수의 부존특성과 산출상태를 직·간접적으로 반영하므로 이 두 요인에 의한 지하수위의 변화 조사가 우선적으로 수행 되어야 한다.

제주도의 지하수는 1970년대 초반부터 개발되기 시작하여 현재 약 3천여 공에 달하고 있다(한국수자원공사, 1993. 이하 '수공'이라함). 본도 지하수의 수위관측은 최근 농어촌진흥공사(이하 '농진공'이라함)가 1991~2000년까지 '장기수위관측망 조사계획'을 10개년 계획으로 추진중에 있는 것을 제

외하면 지금까지 단기적이고 부분적으로 이루어져 왔다. 수위변동에 관한 조사에는 농진공(1971. 3. 26~7. 30), 농진공과 UNDP(United Nations Development Program, 1971. 6. 1~12. 30)가 있으나, 그 기간이 단기간이거나 부분적인 조사에 국한되었기 때문에 제주도 수위변동의 요인을 비롯한 지하수위의 계절적 변화 및 지역별 변동 특성을 규명하는데는 매우 미흡한 실정이다. 또한, 제주도의 지하수에 대한 산출상태와 거동특성 및 수질 연구 조사로는 농진공(1971, 1973, 1982, 1989), 수공(1989, 1990, 1991, 1992), 산업기지개발공사(1981) 등의 전문기관과 남(1966), 김(1969), 조 등(1989), 최(1990)등이 있다.

본 연구에서는 1992년 2월부터 1993년 2월까지 매월 1회 25시간 연속 관측된 11개소의 수위자료를 근거로하여 제주도 지하수위의 계절적인 변동 특성과 수위변동에 대한 조석 및 강우의 영향을 파악하였다. 특히, 제주도 동부지역에 위치한 성산지역 지하수의 수직적 분포상태 및 심도별 수질조성을 조사하여 지하수의 부존 형태를 파악하고, 수리지질 구조에 따른 수위변동 특성을 규명코져 한다.



II. 조사 및 분석방법

1. 지하수위의 관측

지하수위의 관측은 제주도 동부지역에서 7개소(구좌읍: 김녕, 종달-I, 종달-II, 성산읍: 수산-I, 수산-II, 온평, 난산지역), 남부 및 북부지역 각각 1개소(서귀포시: 신희, 제주시: 삼양), 서부지역 2개소(한경면: 고산-I, 고산-II)에서 1992년 2월부터 1993년 2월까지 실시 하였다(Table 1, Fig. 1). 관측방법은 관측공마다 설치된 조사용 P.V.C. 홀(hole)속으로 전

Table 1. Statistics of measurement wells in Cheju Island

Well No.	Location	Elevation (m)	Depth (m)	Distance from coast (km)	Remarks
Sy-1	Samyang	36.0	42.5	1.50	northern part
Kn-1	Kimnyoung	35.9	60.0	1.25	
Jd-1	Jongdal-I	12.0	35.0	1.37	
Jd-2	Jongdal-II	52.0	75.0	2.20	eastern part
Ss-1	Susan-I	28.2	41.0	2.00	
Ss-2	Susan-II	28.7	51.0	2.75	
Op-1	Onpyong	33.3	50.0	1.50	southeastern part
Ns-1	Nansan	40.0	55.0	2.50	
Sh-1	Shinhyo	53.5	130.0	3.05	southern part
Ks-1	Kosan-I	18.2	118.0	0.80	western part
Ks-2	Kosan-II	18.0	82.0	0.93	

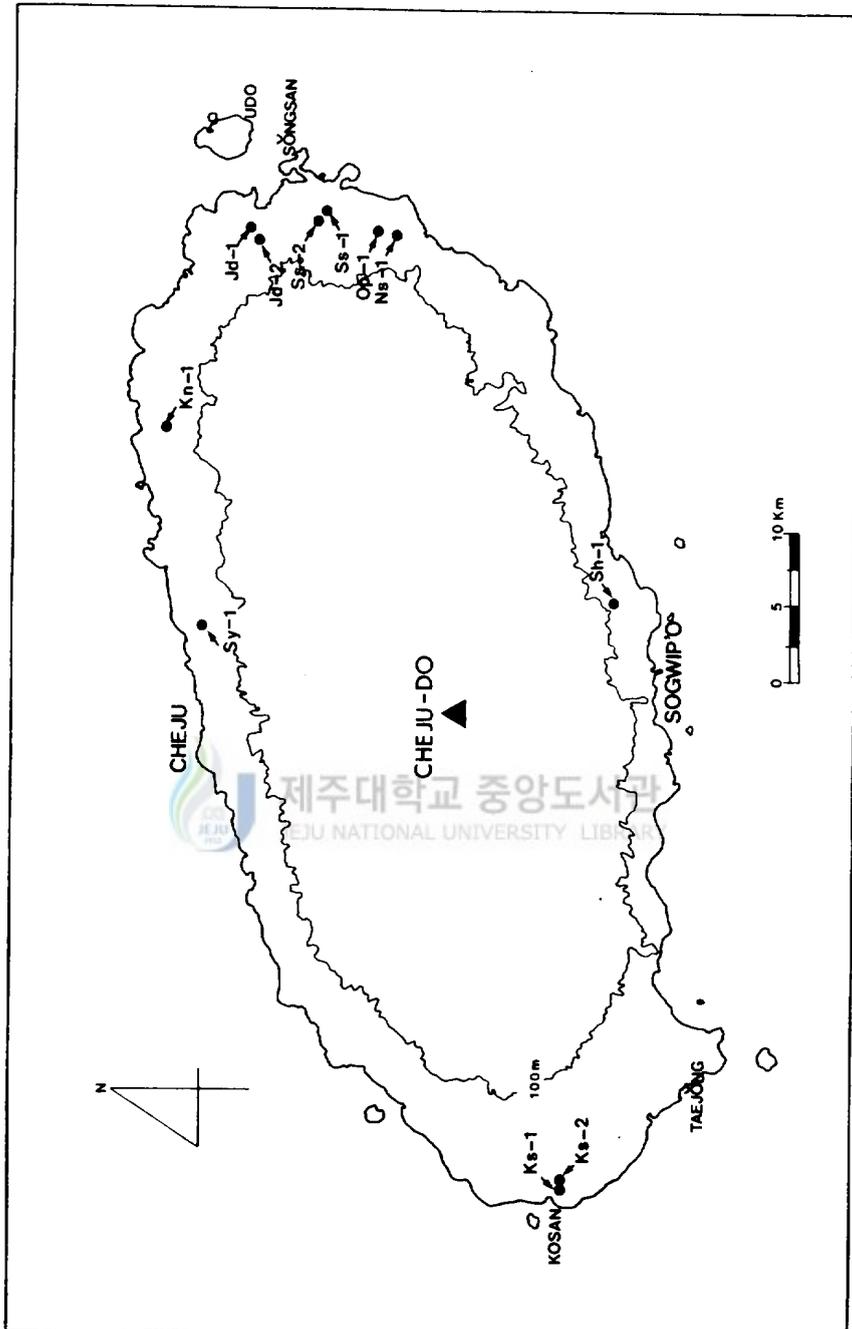


Fig. 1. Measurement wells location of groundwater level.

선줄을 삽입하여 고감도 테스터기에 의해 mm눈금 단위까지 매월 1회 이상 25시간 연속 측정하였다.

본 연구기간 동안 교통부 수로국이 제주항 및 서귀포항 검조소에서 관측한 조석자료를 사용하여 비조화상수에 의해 조석주기 및 변동폭을 계산하여 지하수위와 비교 검토하였다. 강우에 의한 지하수위의 변동특성을 파악하기 위해 제주도 기상대 및 제주도청에서 측정된 강우 자료중 수위 관측일의 시간별 강우량의 자료를 수집 분석하였다. 또한, 각 관측공의 표고는 1/5,000 지형도에 공의 위치를 정확히 표시하여 그 지점에 대한 표고를 나타내었다.

2. 수리지질 특성

수리지질 특성을 파악하기 위해 온천개발 지질주상도(고 등, 1992)와 농진공 지질주상도(농진공 1972~1991)를 이용하여 연구지역 지질단면도를 작성하였고, 지하수의 지역별 부존형태를 비교 검토하였다.

3. 심도별 지하수의 수질조성 측정 및 분석

지하수의 수직적인 수질조성을 파악하기 위해 성산읍 고성리 수산-I 관측정에서 '92년 9월에서 12월까지 4개월간 매월 사리때 1일 1시간 간격으로 미국 SBE-19 CTD(Conductivity, Temperature and Depth)를 이용하여 심도별 수온 및 염분도를 25시간 연속 관측 하였다. 또한, 수질분석용 시료는 1일 중 지하수위가 가장 높았을 때와 가장 낮았을때 각각 2회씩 자연수위하 4m 부터 2m 간격으로 심도별로 채수하여 음이온 및 양이온에 대한 성분분석을 하였다. 분석용 지하수의 시료는 폴리에틸렌 용기에 채수하고 냉장 보관하여 실험실로 운반한 후 즉시 양이온(Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})은 원자흡광광도계(GBC 904)로 각각 422.7nm, 769.9nm, 202.6nm, 330.2nm에서 흡광도를 측정

하였으며, 음이온 Cl^- 은 시료를 일정량 취하여 NaOH 또는 H_2SO_4 로 중화한 다음 질산은 적정법으로 정량하였다.



Ⅲ. 결 과

1. 지역별 지하수위의 변동양상

1) 제주도 동부지역

동부지역을 대상으로 한 지하수위의 관측은 Table 1에 나타낸 바와같이 해안으로부터 1.25Km(김녕)~2.75Km(수산-II)에 위치해 있는 김녕외 총 6개소에서 실시 되었으며, 그 결과는 Table 2에 나타내었다.

동부지역의 모든 관측공들의 지하수위는 조석의 영향을 뚜렷하게 받고 있는 것으로 나타났다. Fig. 2는 김녕관측정(Kn-1)에서 조사 기간동안 관측된 지하수위를 조석자료와 함께 나타낸 것으로서, 지하수위는 연중 조석의 영향을 뚜렷하게 받고 있음을 알 수 있으며, 일평균 자연수위는 동저하고(冬低夏高)의 현상을 나타내고 있다. 또한, 1일 수위변동 폭이 최대 1.09m('92.2월), 최소 0.42m(7월), 연평균 0.69m 를 보여 조석에 의한 수위변동이 동부지역 관측정 중 최대를 나타냈다. 종달-I(Jd-1)인 경우도 이와 비슷한 경향을 보여주고 있으며, 해수면을 기준으로한 1일 지하수위의 평균이 최소 0.92m('92.12월), 최대 1.31m(4월), 연평균 1.11m로서 평균수위의 연간 변동폭은 0.39m에 불과하다(Table 2). 강우량과의 관계를 보면 1992년 5월 5일(291.8mm)과 8월 13일(207.0mm)의 집중호우시 김녕, 종달관측정에서 측정된 수위의 상승치는 조석에 의한 지하수위의 변동 범위내에서 변화를 나타냄으로서, 동부지역의 지하수는 강우보다는 조석 영향에 의한 수위변동이 일어나고 있음을 알 수 있다.

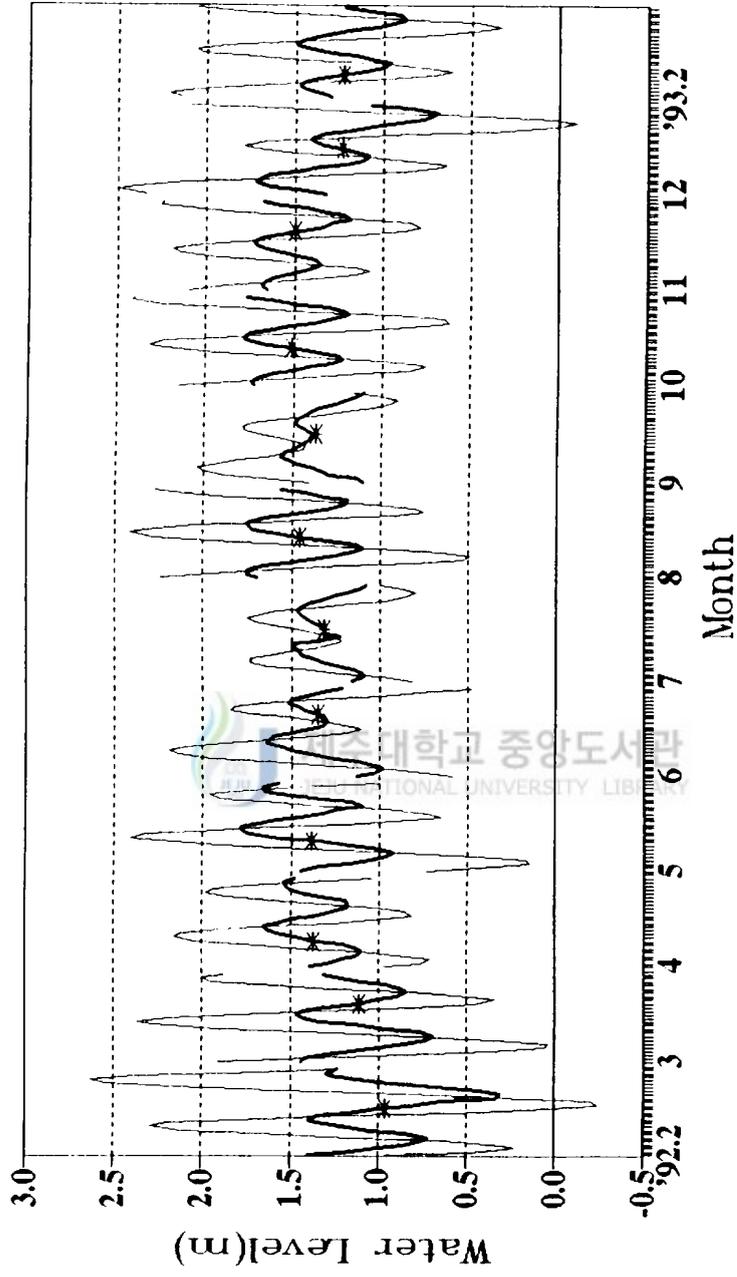
일반적으로 지하수위의 변동에 영향을 미치는 조석의 정도는 다음과 같이 조석효율(Tidal Efficiency; T_E)에 의해 평가 되어지고 있다.

$$T_E(\%) = \frac{GW}{TW} \times 100$$

Table 2. Results of the groundwater level measurement at eastern Cheju (Unit : m)

Well No.	Month														
	'92.2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	'93.2			
Kn 1	Ave.	34.93	34.79	34.53	34.52	34.55	34.59	34.44	34.53	34.39	34.40	34.67	34.68		
	Max.	34.50	34.43	34.25	34.12	34.26	34.40	34.15	34.33	34.71	34.72	34.22	35.03		
	Min.	35.59	35.21	34.80	34.98	34.92	34.82	34.80	34.80	34.12	34.18	34.18	34.41		
	Amp.	1.09	0.78	0.55	0.86	0.66	0.42	0.65	0.47	0.59	0.54	1.04	0.62		
Jd-1	Ave.	11.03	10.89	10.69	10.73	10.99	10.89	10.89	10.89	10.78	10.80	11.08	11.03		
	Max.	11.41	11.15	10.97	11.06	11.11	11.13	11.09	11.09	10.99	11.06	11.45	11.23		
	Min.	10.75	10.63	10.46	10.49	10.80	10.77	10.77	10.77	10.57	10.65	10.87	10.85		
	Amp.	0.66	0.52	0.52	0.57	0.31	0.36	0.33	0.33	0.47	0.41	0.59	0.38		
Jd-2	Ave.	51.12	50.94	50.91	51.08	51.00	50.83	51.15	50.96	50.98	51.39	51.24	51.24		
	Max.	51.28	51.10	51.11	51.28	51.11	50.99	51.27	51.09	51.10	51.65	51.36	51.36		
	Min.	50.97	50.81	50.77	50.91	50.92	50.66	51.07	50.81	50.87	51.20	51.12	51.12		
	Amp.	0.31	0.29	0.34	0.37	0.19	0.33	0.20	0.28	0.23	0.46	0.24	0.24		
Well No. \ Month	9	10	11	12	Well No. \ Month				9	10	11	12	'93.2		
Ss 1	Ave.	27.01	27.04	27.05	27.22	Op-1				Ave.	32.28	32.26	32.49	32.55	32.51
	Max.	27.15	27.17	27.16	27.36	Op-1				Max.	32.51	32.49	32.83	32.89	32.76
	Min.	26.91	26.95	26.96	27.05	Op-1				Min.	32.15	32.12	32.20	32.25	32.26
	Amp.	0.24	0.21	0.20	0.31	Op-1				Amp.	0.36	0.37	0.63	0.64	0.50
Ss 2	Ave.	27.18	27.20	27.26	27.47	Ns-1				Ave.	38.92	38.84	38.94	39.20	39.20
	Max.	27.52	27.28	27.32	27.66	Ns-1				Max.	39.04	38.96	39.20	39.34	39.34
	Min.	27.36	27.15	27.19	27.34	Ns-1				Min.	38.85	38.77	38.79	39.07	39.07
	Amp.	0.16	0.13	0.13	0.32	Ns-1				Amp.	0.19	0.19	0.41	0.26	0.26

* Ave. : Average, Max. : Maximum, Min. : Minimum, Amp. : Amplitude



— Sea Water Level — Groundwater level

Fig. 2. Fluctuations of tidal and groundwater level in Kimnyoung well at northeastern Cheju.

Table 3. Tidal efficiency (%) of Kimnyoung well

Month	G. W. L. (m)		Tidal Efficiency(%)			S. W. L. (m)	
	Range	Amp.	Flood flow	Ebb flow	Average	Range	Amp.
'92. 2	1.40-0.31	1.09		43.08	38.78	2.29--0.24	2.53
	1.30-0.31	0.99	34.49			2.63--0.24	2.87
3	1.47-0.69	0.78	33.33		32.18	2.37-0.03	2.34
	1.47-0.84	0.63		31.03		2.37-0.34	2.03
4	1.65-1.10	0.55	27.93		36.37	2.16-0.71	1.45
	1.65-1.18	0.47		34.81		2.16-0.81	1.35
5	1.78-0.92	0.86	37.89		38.54	2.41-1.14	2.27
	1.78-1.09	0.69		39.20		2.41-0.65	1.76
6	1.64-0.98	0.66	40.99		36.55	2.19-0.58	1.61
	1.64-1.29	0.35		32.11		2.19-1.10	1.09
8	1.75-1.10	0.65		37.14	35.41	2.24-0.49	1.75
	1.75-1.10	0.65	33.68			2.42-0.49	1.93
9	1.57-1.39	0.18		31.03	29.80	2.01-1.43	0.58
	1.48-1.39	0.09	28.57			1.78-1.43	0.35
10	1.78-1.22	0.56	35.67		35.01	2.32-0.75	1.57
	1.78-1.19	0.59		34.71		2.32-0.62	1.70
11	1.72-1.34	0.38	33.93		36.12	2.19-1.07	1.12
	1.72-1.18	0.54		38.30		2.19-0.78	1.41
12	1.41-1.07	0.34	30.09		34.36	1.79-0.66	1.13
	1.41-0.68	0.73		38.62		1.79--0.10	1.89
'93. 2	1.49-0.95	0.54	37.24		34.68	2.06-0.61	1.45
	1.49-0.87	0.62		32.12		2.06-0.13	1.93
Average		0.59	33.98	35.65	34.82		1.64

* G. W. L. : Ground Water Level, S. W. L. : Sea Water Level, Amp. : Amplitude

여기에서, GW : 지하수위의 변화폭, TW : 해수면 변화폭이다.

Table 3은 조석의 영향을 가장 크게 받고 있는 김녕관측정의 $T_E(\%)$ 를 창조류(flood flow)시와 낙조류(ebb flow)시로 구분하여 나타낸 것이다. 조사 기간 동안 관측된 지하수위의 자료를 근거로 산출된 김녕관측정의 $T_E(\%)$ 는 전 조사기간 동안 34.82%이나 창조류(평균 33.98%)보다 낙조류(평균 35.65%)시가 더 큰 폭으로 수위변화가 일어나고 있음을 알 수 있다. 또한, $T_E(\%)$ 는 관측 당일의 조차에 따라 좌우되고 있는 것으로 나타났는데 '92.2월 사리때가 평균 38.78%로 가장 높은 반면 9월 조금시에는 평균 29.80%로 최소치를 나타내었다.

조석의 영향은 일반적으로 해안에서 내륙쪽으로 멀어짐에 따라 점진적으로 감소하는 현상을 나타내는데 본 연구의 결과에서도 이같은 경향을 뚜렷하게 나타내고 있다(Table 4). 즉, 해안에 가장 인접한 김녕지역은 $T_E(\%)$ 가

Table 4. Variations of the Tidal efficiency and Time Lag with the distance from coast at eastern Cheju

Location	Distance From Coast (km)	Tidal efficiency(%)			Time lag (hours)
		Flood flow	Ebb flow	Average	
Kimnyoung	1.25	33.47	35.39	34.43	2
Jongdal - I	1.37	23.79	25.48	24.63	2
Onpyong	1.50	31.00	28.72	29.86	2
Susan - I	2.00	13.27	13.87	13.57	2
Jongdal - II	2.20	15.18	16.45	15.81	3
Nansan	2.50	12.73	13.25	12.99	3
Susan - II	2.75	9.36	11.27	10.32	3.5

연평균 34.43%로 가장 높고, 해안에서 2Km 떨어진 수산-I (Ss-1) 지점이 평균 13.57%, 가장 내륙쪽에 위치해 있는 수산-II (Ss-2, 2.75Km)의 경우 평균 10.32%의 값을 보여 내륙쪽으로 갈수록 T_E 가 뚜렷하게 감소하고 있다. 특히, 해안에서 내륙으로 일직선상에 위치하고 있는 종달-I, 종달-II (Jd-2)의 $T_E(\%)$ 는 종달-I (1.37Km)이 24.63%인데 비하여 이보다 내륙에 위치한 종달-II (2.20Km)에서는 15.81%로 $T_E(\%)$ 가 8.82% 감소 하였다. 동남부지역에 위치해 있는 온평(Op-1)과 난산(Na-1)관측정에서 관측된 결과도 김녕과 종달지역의 경우와 거의 같은 현상을 나타내었다.

Table 5는 동부지역 7개관측정의 $T_E(\%)$ 와 Saipan(Hoffmann & Meyer, 1989) 및 Hawaii Oahu섬(Dale, 1974)의 $T_E(\%)$ 를 서로 비교하기 위하여 나타

Table 5. Comparison of tidal efficiency of groundwater between Cheju, Saipan and Hawaii area

Area	WELL No.	Distance from coast (Km)	Tidal efficiency(%)	References
Cheju	Kn-1	1.25	34.43	present study
	Jd-1	1.37	24.63	
	Op-1	1.50	29.86	
	Ss-1	2.00	13.57	
	Jd-1	2.20	15.81	
	Ns-1	2.50	12.99	
	Ss-2	2.75	10.32	
Saipan	13-T3	0.9	4.0	Hoffmann & Meyer (1989)
	13-T4	0.9	10.0	
	13-T5	1.1	9.0	
	13-T6	0.7	9.0	
Hawaii Oahu	1959-05	0.30	55.0	Dale (1974)
	1900-13	1.92	7.0	
	1902-01	1.10	7.0	
	2256-10	8.78	3.0	
	2158-01	4.79	11.0	
	1959-05	0.21	17.0	
	2042-06	4.88	51.0	

낸 것이다. 이 표에서 Saipan의 4개 관측지점은 해안에서 1.1Km이내에 위치하고 있으면서도 $T_E(\%)$ 는 10% 이하의 값을 나타내고 있다. 그러나, 하와이 오아후섬의 경우는 관측정이 해안으로부터의 거리에 따라 최대 55%부터 최소 3%까지 매우 큰 변화를 나타내나 대부분이 제주도 보다는 작은 값을 보이고 있다. 이와같이 제주도 동부지역이 Saipan지역 보다 조석의 영향은 매우 크게 받고 있을 뿐만 아니라, 하와이 오아후섬 보다도 대체적으로 조석의 영향을 크게 받고 있음을 알 수 있다.

2) 제주도 남부 및 북부지역

제주도의 남부 및 북부지역은 동서부지역과는 지형 및 지질적인 조건이 상이하기 때문에 지하수의 부존특성이 상이할 것으로 판단된다. 즉, 남·북부 지역은 지형의 구배가 급할 뿐만 아니라 남류 및 북류하는 크고 작은 하천들이 편중되어 있으며 현무암류에 비해 투수성이 낮은 조면암류 계통의 암석들이 주로 분포하고 있다(제주도 지질도, 1971). 이와 같은 자연적인 조건을 가진 이 지역의 수위변동을 파악하기 위하여 서귀포에 인접한 신희지역과 제주시 삼양관정을 선정하여 지하수위관측한 결과는 Table 6과 같다.

(1) 신희 관측정

제주도 남부 중앙부에 위치한 신희 관측정은 해안변에서 내륙쪽으로 3.05km(해발 54.0m) 지점에 위치하고 있어 비교적 해안에서 멀리 떨어져 있다. 이 관측정의 수위변화는 계절에 따라 큰 폭으로 변화하고 있는데 (Fig. 3), 이것은 강우의 영향에서부터 비롯된 결과로 해석된다. 즉, 조석의 영향을 뚜렷하게 받고 있는 동부지역과는 전혀 다른 수위변화의 양상을 나타내고 있을 뿐만 아니라, 해수면을 기준으로 한 자연수위의 값도 매우 높게 나타나고 있다.

1992년 5월과 7월 강우시 관측된 지하수위자료에 의하면(Table 7), 1992년 5월 6일에 259.8mm 강우의 영향으로 5월 9일까지 총 22.09m(4월 측정치: 11.75m)의 수위가 상승했고, 강우 시작 후 4일째 되는날(5월 10일)부터는

Table 6. Results of the groundwater level measurement in Shinhyo and Samyang well (Unit : m)

Well No.	Month											
	'92.2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	'93.2
Sh-1	Ave.	41.86	41.76	36.88	39.56	22.13	35.05	37.45	37.90	39.19		
	Max.	41.87	41.82	37.03	39.91	22.27	35.17	38.15	38.32	39.22		
	Min.	41.84	41.71	36.71	39.05	22.02	34.95	36.72	37.41	39.18		
	Amp.	0.03	0.11	0.32	0.85	0.25	0.22	1.43	0.91	0.04		
Sy-1	Ave.	30.63		29.29	29.79	29.76	30.34	29.82	29.10	29.25	29.98	31.25
	Max.	30.71		29.34	29.84	29.84	30.39	29.86	29.16	29.30	30.07	31.30
	Min.	30.58		29.26	29.75	29.73	30.28	29.80	29.02	29.20	29.93	31.20
	Amp.	0.13		0.08	0.09	0.12	0.11	0.06	0.15	0.10	0.14	0.10

* Ave. : Average, Max. : Maximum, Min. : Minimum, Amp. : Amplitude

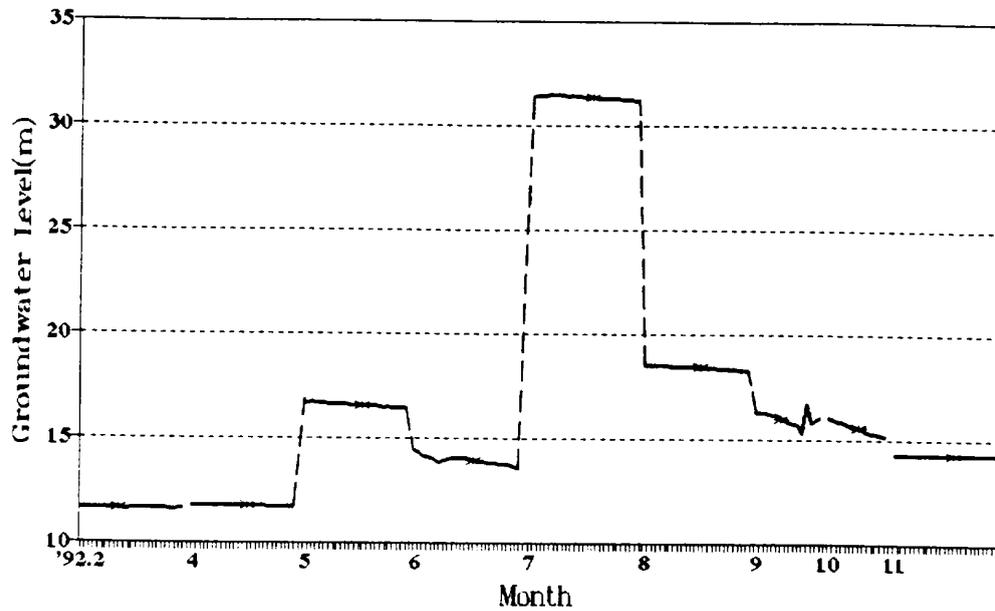


Fig. 3. Fluctuations of groundwater level in Shinhyo well at Southern Cheju.

Table 7. Rising of groundwater level due to the precipitation in Shinhyo well at southern Cheju

Month	5			7			Remarks (Precipitation)
	Date	G. W. L.(m)	cm/h	Date	G. W. L.(m)	cm/h	
Shinhyo	'92.4.27	11.75					'92.5.6 (259.8mm) '92.7.13-14 (268.7mm)
	'92.5.7	18.44		'92.7.12	13.13		
	8	20.67	+ 9.2	13	13.10	- 0.13	
	9	22.09	+ 5.4	14	29.16	+43.40	
	10	21.08	- 3.4	15	31.96	+12.17	
	11	20.47	- 5.3	16	32.08	+ 0.48	
	12	19.31	- 2.5	17	31.76	- 2.91	
	13	18.42	- 3.8	18	31.43	- 1.30	
	14	17.74	- 2.8	19	31.12	- 1.30	
	15	17.13	- 2.1	20	30.91	- 1.91	
	16	16.74	- 1.6	21	30.55	- 1.55	
	Average	Rising	: + 7.32	Rising	: +18.68		
		Declining	: - 3.07	Declining	: - 1.79		

* G. W. L. : Ground Water Level

수위가 하강하여 5월 15일까지 4.41m(17.13m)의 수위가 하강하였다. 그러나 강우 후 10일부터는 수위의 강하속도가 점차 감소하는 결과를 보였다. 또한, 7월 13~14일 2일 동안 총 268.7mm 강우로 인해 13일(7시 30분)의 수위가 13.10m 였던 것이 14일(21시)에는 29.16m로 상승하였고, 16일(21시)에는 총 32.08m를 나타내어 강우전에 비해 18.98m의 수위상승이 관측되었다(Fig. 4, Table 7). 이와같은 결과는 50mm 강우 후 24시간 이내에 빗물이 지하수

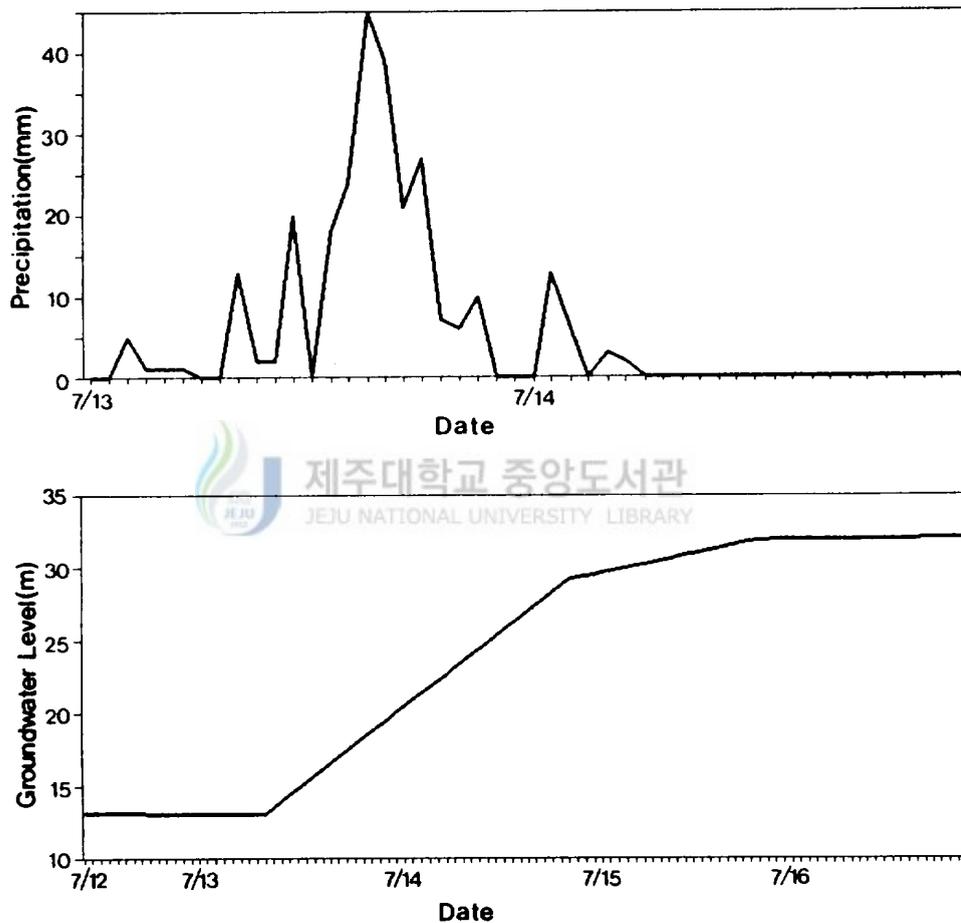


Fig. 4. Relations between precipitations(upper) and groundwater level in(lower) Shinhyo well at southern Cheju, 13-14 July, 1992.

체로 침투되어 곧바로 수위상승을 일으키고 있는 것으로 나타났다. 따라서 신희지역을 포함하는 서귀포 일대지역의 대수층은 대부분 피압대수층인 것으로 판단된다. 특히, 이 지역에 개발된 지하수 관정의 채수에 의한 수위강하량이 타 지역보다 월등히 높을 뿐만 아니라 공당 평균 채수량도 저조(환경처, 1991)한 것으로 보고된바 있다.

(2) 삼양지역

제주도 북부 중앙에 위치한 삼양 관측정은 해안에서 내륙쪽으로 1.50Km 떨어진 해발 36m 지점에 위치하고 있다. Fig. 5는 조사기간 동안 관측된 수위변화를 월별로 나타낸 것이다. 본 관측정의 1일 평균 자연수위는 계절적인 변화를 잘 나타내고 있어, 강우기와 갈수기에 따른 변동이 지배적인 것으로 판단된다. 1일 지하수위의 변동폭은 15cm이하 이고 연평균 1일 변화폭은 10.5cm이다(Table 6).

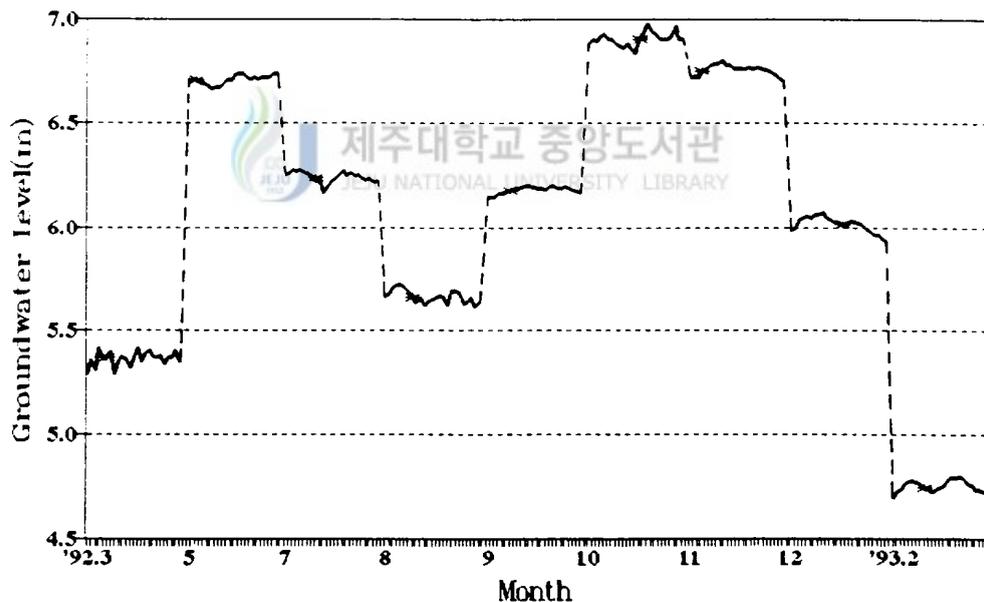


Fig. 5. Fluctuations of groundwater level in Samyang well at northern Cheju.

이 관측정에서 나타나는 특이한 현상은 수위변화의 패턴이 전반적으로 강우량의 변화에 좌우되고 있으나, 1일 25시간 동안의 변화상은 변형된 파형 곡선 또는 불규칙한 곡선상의 수위변화가 일어나고 있는 점을 들 수 있는데 이러한 원인은 조석의 영향인 것으로 사료된다. 또한, 8월의 수위가 연중 지하수위에 비해 낮은 이유는 수위측정 이전에 약 1개월간 내린 강우량이 전 조사기간 동안에 비해 적었고, 강우 후 수위상승을 강우량자료(기상연보, 1992)와 비교해 보면, 1개월전에 내린 강우는 다음달까지 계속적으로 수위변화에 영향을 주고 있다.

3) 제주도 서부지역

한경-대정을 포함하는 서부지역(Fig. 1)은 동부지역과 지형적인 조건은 매우 유사하나 지질분포에서는 차이를 나타내고 있다. 성산층이라고 불리우고 있는 퇴적암층이 한경면 용수에서 대정읍 신도해안과 하모에서 화순에 이르는 해안지역에 비교적 넓게 분포하고 있다(제주도 지질도, 1971). 또한, 지하수의 자연수위도 동부지역 보다는 비교적 높게 형성되고 있으며, 지하수의 채수에 의한 수위강하량이 동부지역 보다 크게 나타나는 등 본도의 동·서부지역간에 대조를 이루고 있다(환경처, 1991). 본 연구에서는 동부지역과 수위변화의 양상을 비교 분석하기 위해서 고산의 2개 관측정을 대상으로 수위관측을 실시하였는데, 그 결과는 Table 8에 나타내었다.

고산-I(Ks-1) 관측정에서 측정된 결과(Fig. 6)는 전술한 삼양의 경우와 유사한 수위변화 양상을 보이고 있다. 즉, 강우기와 갈수기에 따라 수위가 최대 3.04m까지 변화하고 있으며, 1일 동안의 최대 수위변화 폭은 8월에 0.12m였다. 이 관측정은 본 연구대상 관측정중에서 해안에 가장 가까운 0.80Km 거리에 위치하고 있으나 수위변화가 거의 수평적인 형태를 취하며, 1일 동안의 변동폭도 평균 6.4cm로서 소폭의 변화를 나타내고 있어 동부지역과는 지하수의 부존특성이 근본적으로 상이함을 시사해 주고 있다. 고산-II(Ks-2) 관측정의 경우(Fig. 7)도 동일한 현상을 보여 주고 있어 이 지역

Table 8. Results of the groundwater level measurement in Kosan-I and Kosan-II well (Unit : m)

Well No.	Month											
	'92.2	3	4	5	6	7	8	10	11	12	'93.2	
Ks-1	Ave.	16.67	16.45	16.13	15.68	16.51	16.16	16.59	15.16	15.89	16.09	16.71
	Max.	16.71	16.47	16.14	15.69	17.23	16.22	16.65	15.13	15.92	16.12	16.73
	Min.	16.63	16.43	16.10	15.65	15.97	16.11	16.53	15.18	15.88	16.08	16.67
	Amp.	0.08	0.04	0.04	0.04	1.26	0.11	0.12	0.04	0.05	0.05	0.06
Ks-2	Ave.	16.41	16.56	15.71	15.29	15.59	15.76	16.20	14.75	15.33	15.69	16.35
	Max.	16.55	16.62	15.73	15.34	15.77	15.85	16.31	14.77	15.42	15.69	16.40
	Min.	16.34	16.51	15.69	15.24	15.47	15.68	16.12	14.72	15.29	15.68	16.30
	Amp.	0.21	0.21	0.04	0.10	0.30	0.17	0.20	0.05	0.13	0.01	0.11

* Ave.: Average, Max.: Maximum, Min.: Minimum, Amp.: Amplitude

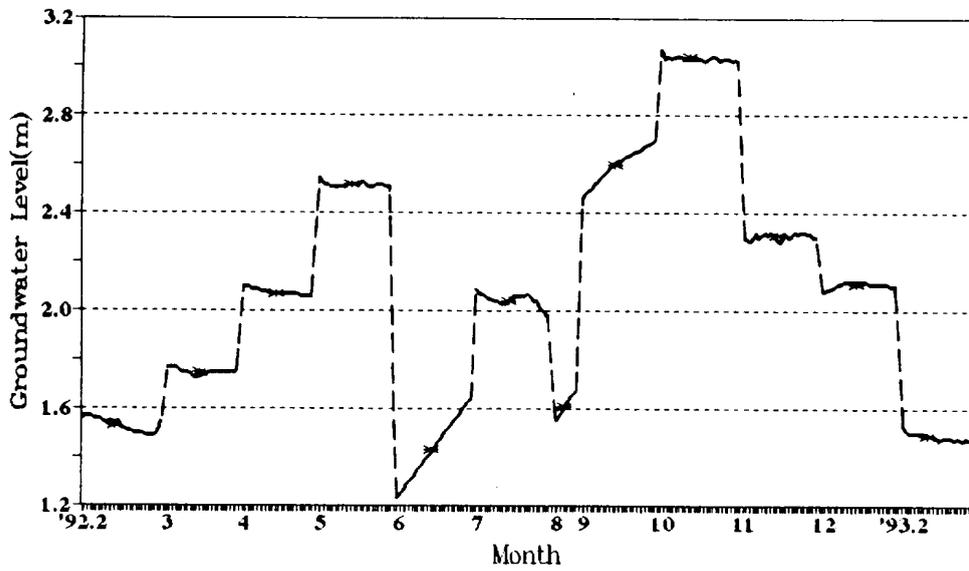


Fig. 6. Fluctuations of groundwater level in Kosan-I well at western Cheju.

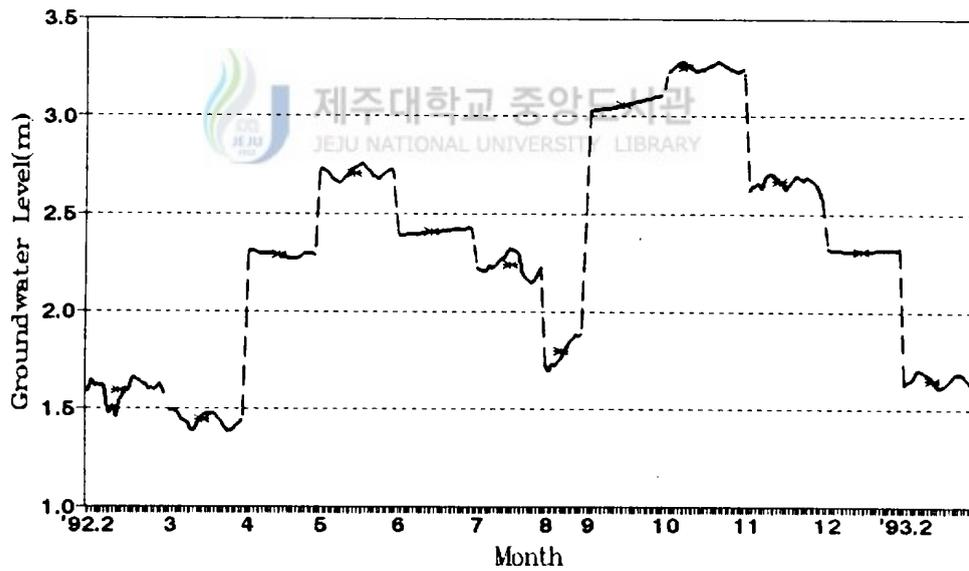


Fig. 7. Fluctuations of groundwater level in Kosan-II well at western Cheju.

의 지하수는 강우에 의한 수위변화가 지배적인 것으로 해석된다. 6~8월에 수위관측자료가 적은 것은 담작에 필요한 관개용수를 공급하기 위한 연속양수로 인하여 펌프가동이 중지된 야간에 관측이 이루어졌기 때문이다.

농진공과 UNDP(1971. 8. 28~11. 30)가 고산 U-43(해발: 14.3m, 해안에서 거리: 1.28Km) 관측정에서 자동수위 측정기로 측정한 자료에서는 1971년 9월 23일 하루동안에 153mm의 강우가 내려 자연수위는 강우가 있기전 0.78m(해수면 기준)였던 것이 24시간만에 1.62m가 되어 0.84m로 급상승하였고, 강우 이전의 자연수위로 되돌아오기까지는 약 60일이 경과한 것으로 보고된 바 있다(농진공, 1973). 이러한 결과는 이 지역의 지하수위변동의 주요 요인이 강우임을 시사하고 있다.

한편, 최(1990)는 고산-I 관측정에 인접해 있는 D-93(해안에서 0.63Km)의 관정을 대상으로 1985년 3월 27일 9시간 동안의 수위관측 결과에 의해 $T_E(\%)$ 는 19%이고, 지연시간은 1시간 20분인 것으로 보고한 바 있다. 그러나 본 연구결과에서는 고산-I 관측정에서 수위변화가 거의 없이 수평에 가까운 변화상을 나타내고 있는 반면, 고산-II에서는 아주 완만한 파형곡선의 형태로 변화하고 있어 근접한 두 관측정 사이에도 수위변동의 양상이 서로 많은 차이를 나타내고 있다. 따라서 이 지역의 지하수위의 변화특성을 조사하기 위해서는 많은 관정을 선정하여 조석영향의 정도를 장기간 관측하여야 할 것으로 생각된다.

2. 수리지질 특성

지하수는 지하를 구성하고 있는 지층의 1, 2차 유효공극 또는 대수층을 따라 유동하고 있는 유체이기 때문에 지하의 수리지질상태 및 그 분포특성은 지하수의 부존형태를 결정짓는 가장 중요한 요인이라 할 수 있다. 또한, 고 등(1991)은 서귀포층이 제주도 지하수의 부존형태를 결정짓는 가장 중요한 지질요인이라 하였다. 따라서 지하수의 수위변동 양상은 지하의 지질상

태와 지하수의 부존형태와 밀접한 관계가 있다.

Fig. 8과 Fig. 9~Fig. 12는 고 등(1992)과 농진공(1972~1991)의 지질주상도를 이용하여 북부의 구엄-함덕(A), 서부의 한림-단산(B), 남부의 중문-남원(C) 및 동부의 난산-김녕(D)을 연결한 지질단면도이다. 제주시를 포함하는 북부지역인 경우 해수면하 EL. -60m까지는 현무암류의 암석이 분포하고 있지만 그 하부에는 투수성이 낮은 서귀포층이 분포하고 있으며, 서귀포층 하부에는 기반암인 응회암(Tuff)이 분포하고 있다(고 등, 1992). 서부지역은 해수면하 EL. -40m까지 현무암류가 분포하고 그 하부에는 저투수성인 서귀포층이 서부 전역에 걸쳐 분포하고 있으며, 중문-서귀포-남원을 포함한 남부지역은 저투수성인 서귀포층이 해수면위 평균 약 16m에 분포하고 있다. 표선-성산-구좌를 포함하는 동부지역에는 해수면하 약 EL. -30m까지도 투수성이 양호한 현무암류가 분포하고 있다. 특히, 성산의 온천조사공 지질주상도를 보면 EL. -117m까지 투수성이 양호한 현무암층이 분포하고 그 하부에는 150m두께의 미고결사니층(unconsolidated muddy sand deposits)이 분포하고 있다. 또한, 북제주군 송당리 부근의 제주온천 시추공에서도 해수면하 80~125m 구간에서 평균 두께 151m에 달하는 미고결사니층이 측정됐을뿐 남부와 서부지역에 분포하고 있는 서귀포층은 존재하지 않고 있다(고 1991).

제주도와 같이 화산암으로 이루어져 있는 지역에서 지하수 함양에 기여하는 수리지질학적 요인으로서의 다음과 같은 것들을 들 수 있다(Kenneth et al.,).

수축균열(Shrinkage Cracks)

수축균열은 용암이 냉각되는 동안 만들어지는데 수축균열은 대개 수직적이고 크기가 다양한데 매우 효과적인 지하수의 통로역할을 한다.

기공(Gas Pores)

기공은 용암내에 있던 가스가 빠져나옴으로서 만들어지는데 제주도의 용암류에는 크고 작은 기공들이 상당히 발달해 있다. 또한, 다공질암석의 기공이 균열이나 절리에 의하여 서로 연결되면 지표수를 지하로 침투시키는

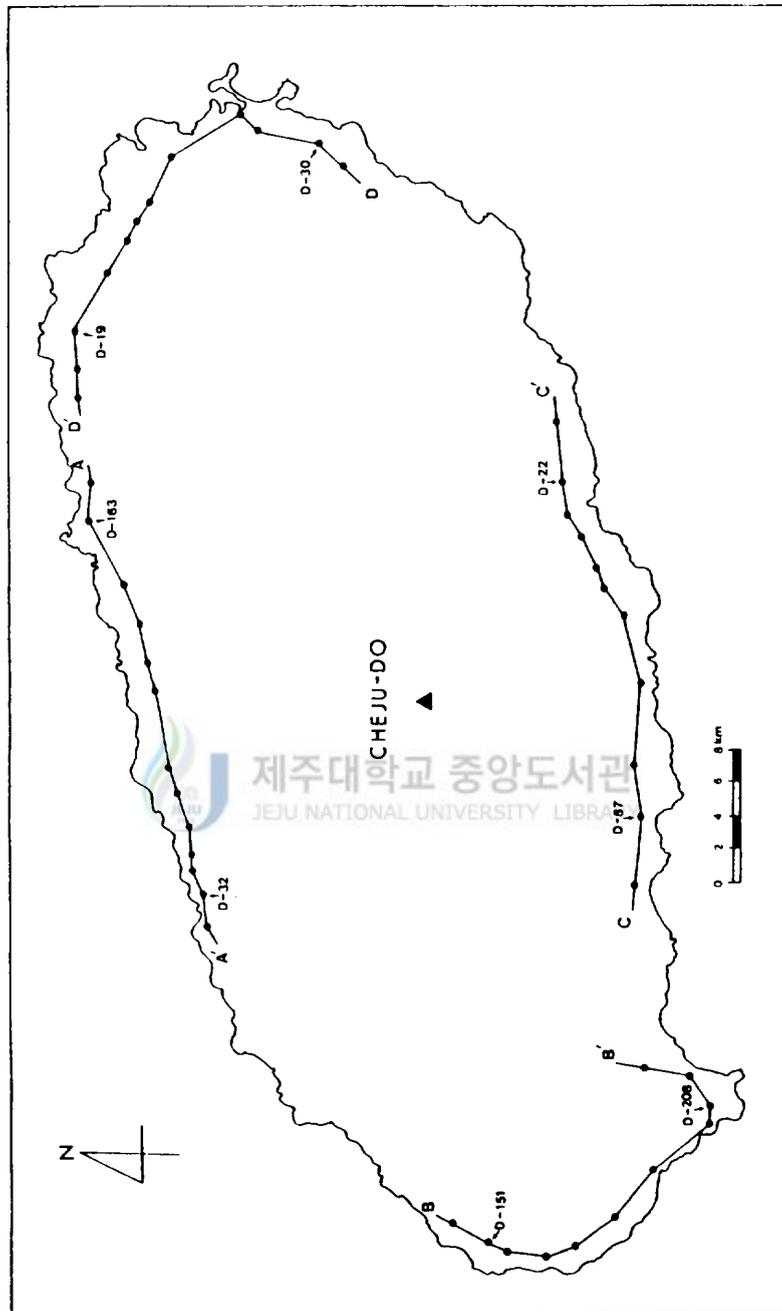


Fig. 8. Geological cross-section lines of the study area.

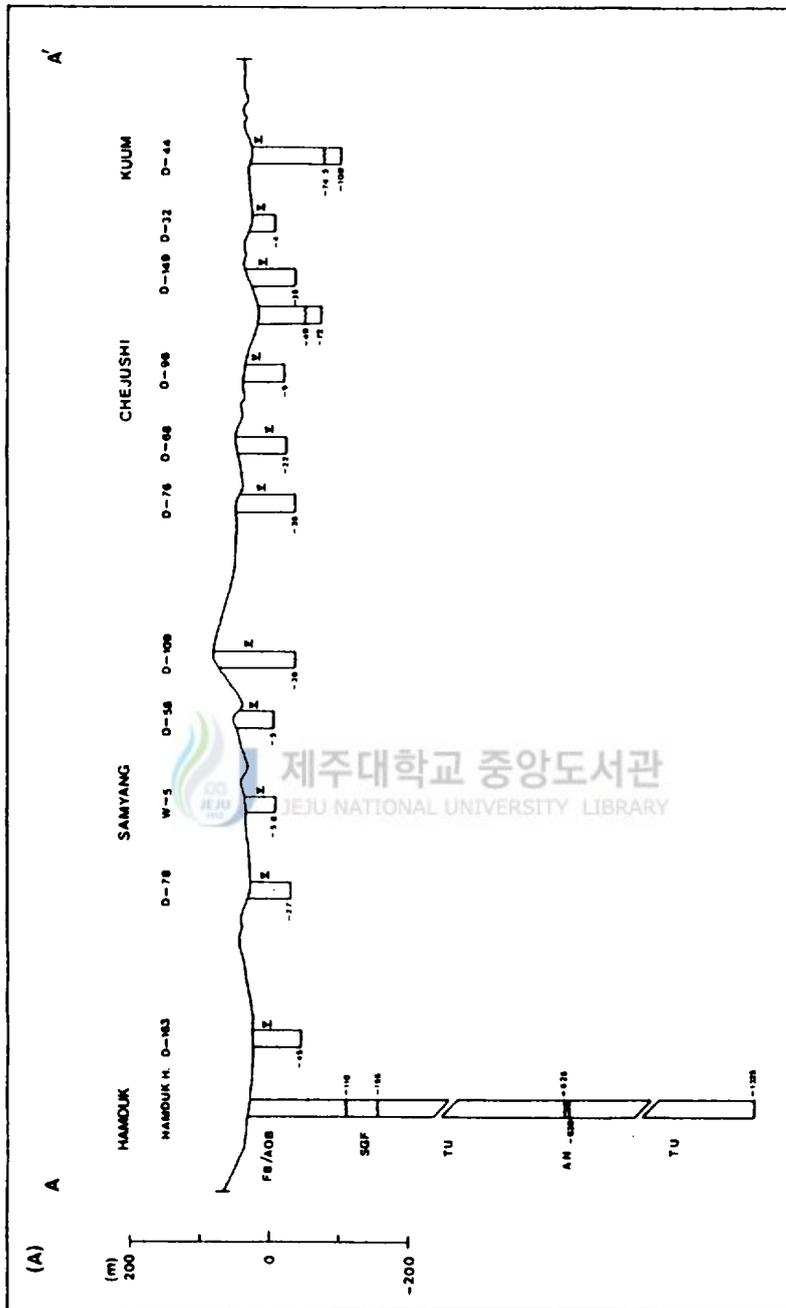


Fig. 9. Geological cross-sections of the Cheju (after Koh et al., 1992).
 (A) : Kuum-Hamduk (B) : Hallim-Dansan
 (C) : Chungmun-Namwon (D) : Nansan-Kimnyoung

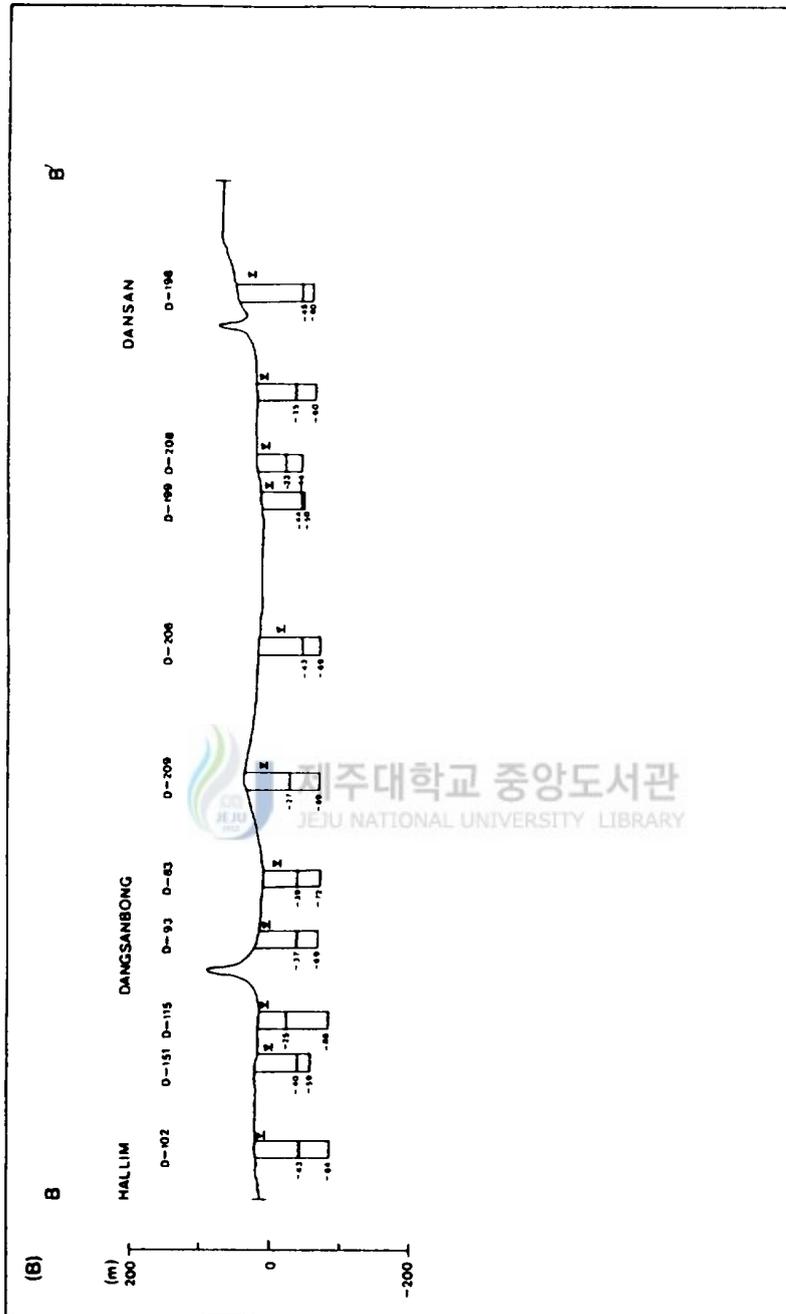


Fig. 10. Fig. 9. continued (Hallim~Dansan sections line).

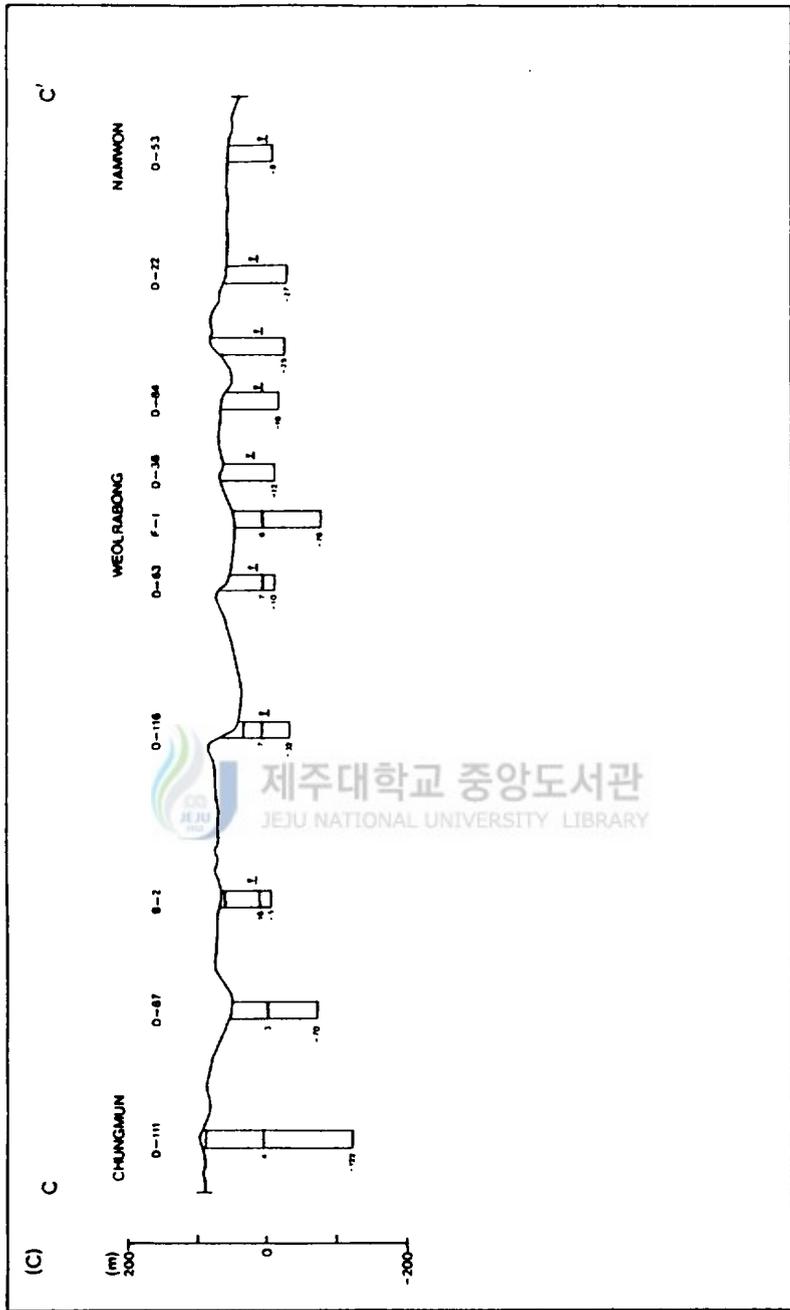


Fig. 11. Fig. 9. continued (Chungmun ~ Namwon sections line).

역할을 하게 된다.

클링커(Clinker)

클링커는 aa 현무암의 표면부분에 거칠고 불규칙하게 파쇄된 면을 클링커라 하는데 이부분은 매우 투수성이 높은 하나의 지질단위를 이룬다. 파쇄회 용암에도 불규칙하고 거치른 클링커면이 나타나기는 하지만, aa 용암에 비해 투수성은 낮다.

2차균열(Subsequent Cracks)

용암의 고화된 후 지진이나 단층운동과 같은 구조적인 운동에 의해 통상적으로 형성된다. 또한, 모든 종류의 암석을 절단함으로써 지하수 유로 형성에 아주 중요한 역할을 한다. 본도 지하수의 주 유로 형성은 2차균열이며 수직으로 발달되어 있을때 급속한 유동 현상이 일어난다.

용암튜브(Lava Tubes)

파쇄회 용암류에 통상적으로 라바튜브들이 만들어지는데 용암튜브의 직경이 수cm에서 수백 cm의 범위까지 다양하고 2차균열과 함께 양호한 지하수유동 통로가 된다.

이와같은 요인들 때문에 현무암질 용암류가 분포하는 지역의 대부분은 높은 투수성을 나타내는데 제주도에서 예로부터 소위 '숨골' 이라는 불리어져 오고 있는 것은 상기와 같은 수리지질학적 투수성 요인들을 총괄하는 말인 것으로 생각된다.

3. 심도별 지하수의 수질특성

제주도와 같은 도서지방의 지하수를 지속적으로 이용하고 효율적인 관리를 위해서는 해안변 지역의 담·염수 경계면의 상태를 비롯하여 접이대(interface)의 확장과 수축에 따른 수직적 수질변화 등을 포함하는 조사연구가 심층적으로 이루어져야 한다. 특히, 조석에 의한 수위변화가 지배적으로 일어나고 있는 지역에서는 과잉 양수로 인한 염수의 역상승(up-coning)

현상이 상존하고 있으며, 이와 같은 원인으로 인해 유발되는 지하수의 염수 오염방지와 수질을 보호하기 위해서는 수직적인 수질특성이 파악되어야만 한다. 제주도 동부지역에서 조석의 영향을 현저하게 받고 있는 성산읍 수산-I 관정을 대상으로 심도별 염분도 측정과 수온의 분포 및 수질의 주성분 (Cl^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})을 조사하였다.

1) 심도별 염분도와 수온의 분포

Table 9는 성산읍 수산-I 관정을 대상으로 1992년 9월부터 12월까지 4개월동안 수위관측시에 매시간 별로 CTD를 이용하여 심도별로 염분도와 수온을 측정한 결과를 평균한 것이며, Fig. 13은 이 결과로부터 염분도와 수온의 수직분포를 고수위(High-higher water level)시와 저수위(Low-lower water level)시로 구분하여 나타낸 것이다.

이 그림에서 고수위시 염분도는 자연수위 하 4.5m까지는 510~610ppm 범위로 증가하다가 4.5m를 기점으로 하여 급격히 증가하며, 7.5m 부근에서 900ppm, 공저인12m에서 1050ppm의 고염분도의 지하수가 분포하고 있음을 알 수 있다. 반면, 저수위시 염분도는 8.5m까지 570~670ppm의 범위로 큰 변화 없이 분포하고 있으나 8.5m 이후부터는 현저한 증가를 나타내어 고수위시와 거의 같은 분포를 하고 있다. 또한, 자연수위하부터 3.5m까지는 저수위시가 고수위보다 약간 높게 나타나고 있다.

따라서 지하수는 조석의 영향으로 인해 고염분수가 고수위와 저수위간에 약 4m두께의 수층을 가지면서 수질이 큰 폭으로 변화하고 있으며 자연수위 하 11m 부근에서부터는 기수(brackish water)에 가까운 고염분 지하수가 존재하고 있음을 알 수 있다(Carroll, 1962). 지하수의 수온은 전 수층을 통해서 약 0.45℃의 소폭으로 변화하고 있으나 0.1℃의 약한 약층이 고수위시에는 4~5.5m와 8.5~9.5m 사이에 존재하고 하고 있으며, 저수위시는 8.5~9.5m 사이에만 나타나고 있다. 또한, 심도가 깊어 질수록 고수위시가 저수위시 보다 수온이 약 0.1℃ 정도로 낮게 분포하고 있다.

Table 9. Vertical variations of the salinity and temperature in Susan- I at eastern Cheju

		Depth(m)													
		0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.0	
High-higher water level	temperature	Ave.	16.25	16.22	16.17	16.12	16.10	16.02	15.99	15.97	15.95	15.90	15.83	15.81	15.81
		Max.	16.30	16.27	16.21	16.16	16.16	16.13	16.11	16.08	16.04	15.96	15.86	15.82	15.82
		Min.	16.16	16.15	16.12	16.08	16.00	15.88	15.87	15.87	15.86	15.82	15.81	15.81	15.81
		Amp.	0.14	0.12	0.09	0.08	0.16	0.25	0.24	0.21	0.18	0.14	0.05	0.01	0.01
salinity		Ave.	527.8	548.8	570.1	597.1	633.9	766.4	844.3	887.1	923.0	967.5	1027.2	1044.4	1047.9
		Max.	578.0	582.0	594.5	648.3	777.7	917.0	1046.7	1058.6	1067.9	1084.7	1095.8	1104.8	1103.8
		Min.	483.0	536.2	550.0	567.0	582.0	621.0	693.0	747.0	802.0	855.0	988.0	1015.0	1018.0
		Amp.	95.0	45.8	44.5	81.3	195.7	296.0	353.7	311.6	265.9	229.7	107.8	89.8	85.8
Low-lower water level			0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.0
temperature		Ave.	16.22	16.18	16.15	16.13	16.11	16.10	16.09	16.09	16.07	15.97	15.91	15.89	15.87
		Max.	16.29	16.24	16.21	16.19	16.16	16.16	16.15	16.15	16.15	16.13	16.07	15.97	15.91
		Min.	16.08	16.09	16.09	16.08	16.07	16.06	16.06	16.06	16.02	15.95	15.86	15.84	15.83
		Amp.	0.21	0.15	0.12	0.11	0.09	0.10	0.09	0.09	0.13	0.18	0.21	0.13	0.11
salinity		Ave.	565.1	585.7	595.5	600.5	606.8	617.4	624.3	642.1	668.3	809.6	908.1	951.5	980.7
		Max.	596.0	636.3	647.7	653.4	663.2	668.1	684.0	768.0	888.0	1024.9	1048.3	1058.4	1053.7
		Min.	510.0	530.0	551.0	556.0	568.0	573.0	573.0	574.0	574.0	579.0	737.0	855.0	911.0
		Amp.	86.0	106.3	96.7	97.4	95.2	95.1	111.0	194.0	314.0	445.9	311.3	203.4	142.7

* Ave.: Average, Max.: Maximum, Min.: Minimum, Amp.: Amplitude

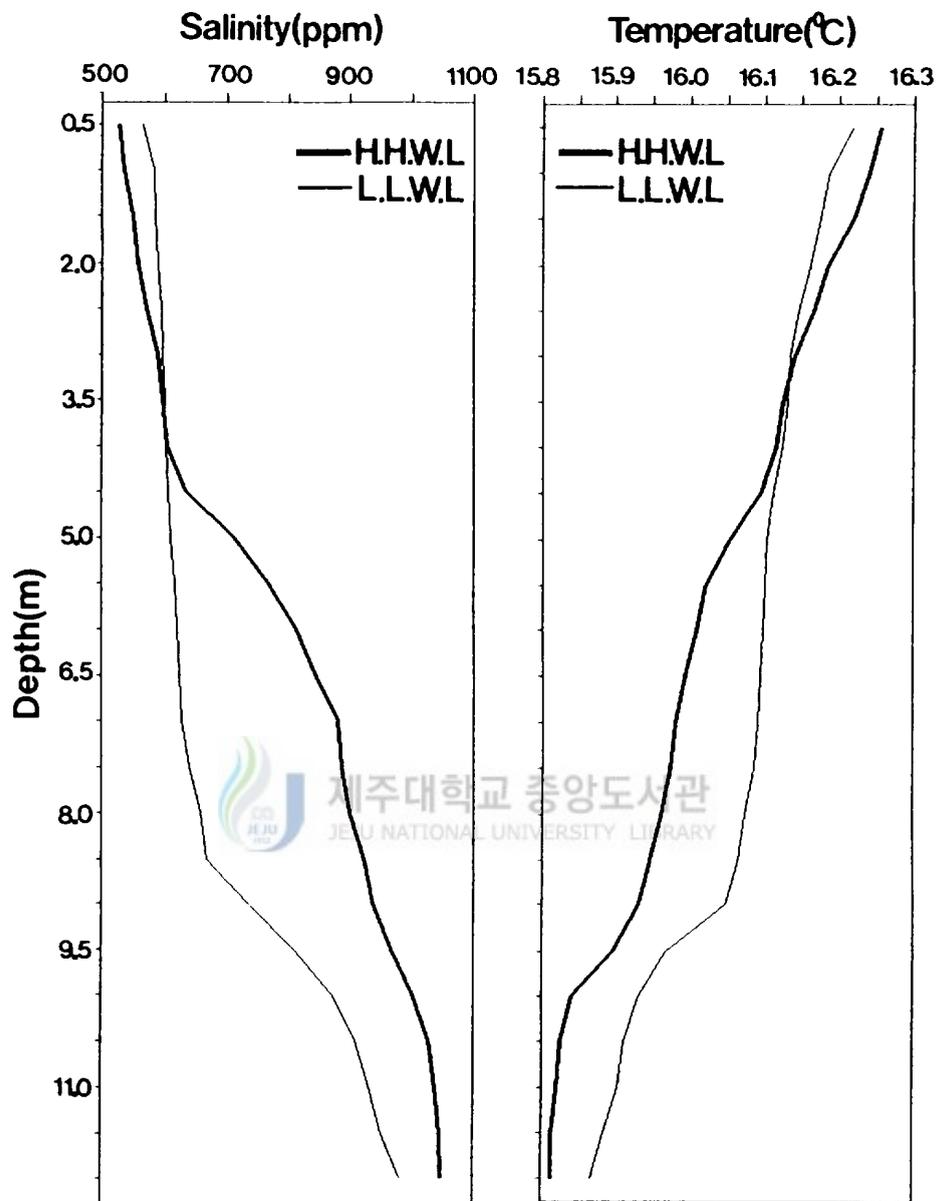


Fig. 13. Depth-salinity/temperature profiles of Susan-I well at southeastern Cheju (mean from september to december).

2) 심도별 수질조성

Table 10은 고수위와 저수위시 자연수위 하 4m부터 2m 간격으로 4개월간 채수하여 분석된 5개의 성분(Cl^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) 값을 평균하여 나타낸 것이고, Fig. 14는 이들 성분들의 수직분포를 나타낸 것이다.

이들 그림에서 수직의 조성들은 고수위와 저수위 간에 뚜렷하게 구분되고 있다. Cl은 고수위시 자연수위하 4m에서 310ppm, 12m에서 540ppm의 범위에서 농도가 증가하고 있고, 저수위시에는 300ppm~380ppm 범위의 변화를 보이고 있어 고수위시 농도가 높을 뿐만 아니라 농도 폭도 큰 폭으로 수직적인 변화를 보이고 있다. Na는 고수위시 170~270ppm, 저수위시 170~230ppm의 범위에서 변화를 보이며, 또한, Mg와 K성분도 수위가 높고 낮음에 따라 다른 조성들과 거의 같은 양상의 수직적인 변화를 나타내고 있다. 그러나, Ca성분만은 거의 일정한 값을 유지하고 있고, 저수위가 고수위시보다 높게 나타나고 있다.



Table 10. Vertical variations of major elements in Susan-I well at eastern Cheju (Unit : ppm)

Elements	Depth(m)	High higher water level					Low lower water level				
		4	6	8	10	12	4	6	8	10	12
Cl	Ave.	306.60	339.88	363.95	409.83	537.65	301.57	304.95	320.73	353.73	386.00
	Max.	320.50	358.30	404.30	500.10	565.80	307.50	318.70	376.30	415.60	480.60
	Min.	292.30	332.70	319.10	309.20	522.90	290.90	287.00	289.50	304.90	309.10
	Amp.	28.20	25.60	85.20	190.90	42.90	16.60	31.70	86.80	110.70	171.50
Na	Ave.	174.90	193.90	201.45	220.70	282.40	170.87	179.78	186.05	199.23	222.30
	Max.	184.70	209.90	220.50	247.50	302.00	175.00	195.20	207.00	230.90	285.80
	Min.	169.00	181.30	163.60	187.20	249.10	163.90	170.30	169.60	169.50	173.40
	Amp.	15.70	28.60	56.90	60.30	52.90	11.10	24.90	37.40	61.40	112.40
Mg	Ave.	25.62	26.99	27.29	31.07	36.84	25.96	26.46	26.29	28.09	29.46
	Max.	26.60	27.37	28.99	37.99	38.85	27.40	27.70	28.63	30.44	32.29
	Min.	24.22	26.41	24.10	24.72	34.71	23.97	23.70	23.09	23.99	26.63
	Amp.	2.38	0.96	4.89	13.27	4.14	3.43	4.00	5.54	6.45	5.66
Ca	Ave.	5.51	5.51	5.62	5.63	5.70	5.92	5.58	5.49	5.51	5.55
	Max.	7.35	6.95	7.17	7.02	7.13	7.19	7.16	6.94	7.13	7.23
	Min.	3.76	3.78	4.03	4.14	4.23	3.92	4.13	4.12	4.14	3.90
	Amp.	3.59	3.17	3.14	2.88	2.90	3.27	3.03	2.82	2.99	3.33
K	Ave.	16.67	17.44	17.86	19.53	23.22	16.83	17.06	17.76	18.32	19.10
	Max.	17.39	18.70	18.95	20.80	24.78	17.64	17.63	18.64	21.06	21.91
	Min.	15.91	16.60	15.50	17.89	20.96	16.40	16.55	16.60	16.10	16.30
	Amp.	1.48	2.10	3.45	2.91	3.82	1.24	1.08	2.04	4.96	5.61

Ave.: Average, Max.: Maximum, Min.: Minimum, Amp.: Amplitude

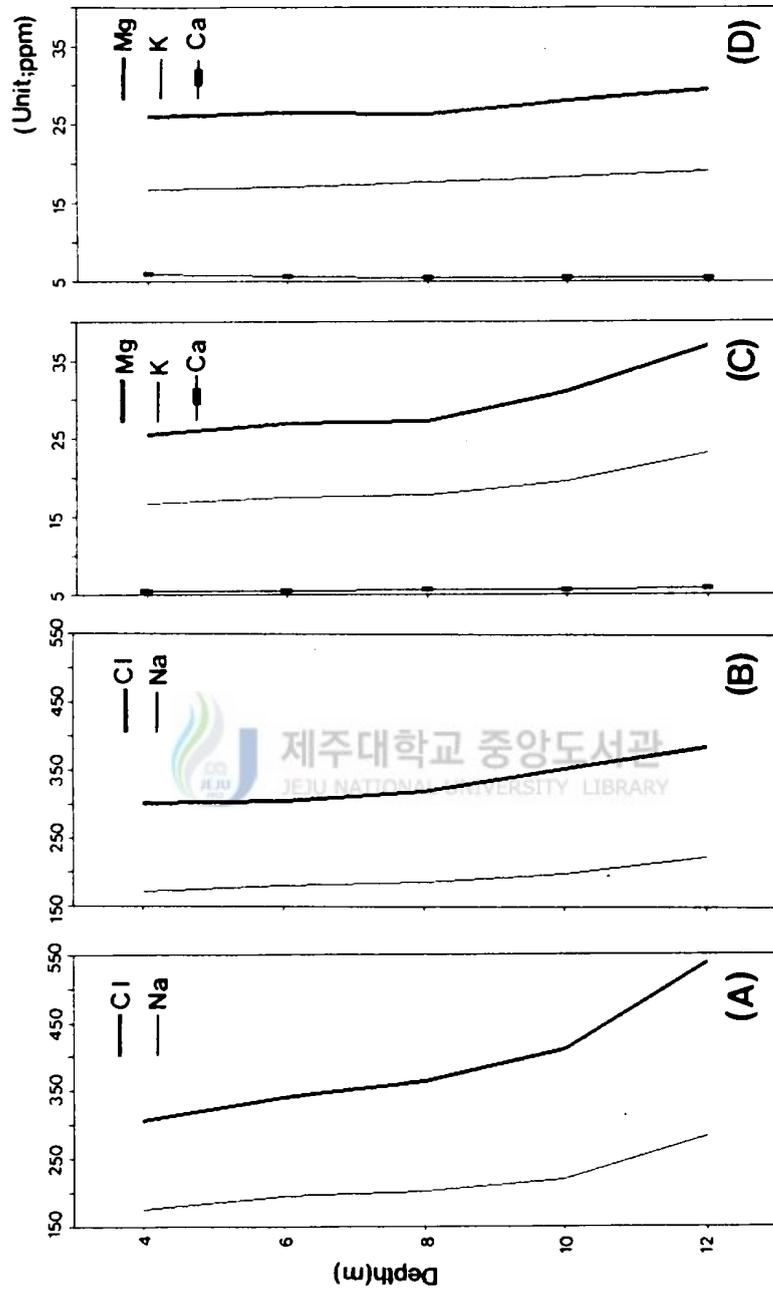


Fig. 14. Vertical variations of each elements in Susan-I well at southeastern Cheju (mean from september to december).
 (A), (C) : High-higher water level (B), (D) : Low-lower water level

IV. 고찰

1. 제주도 지하수의 부존형태

제주도 지하수의 부존형태에 대해서는 지금까지 크게 2가지 견해가 있다. 즉, Ghyben-Herzberg(이하 'G-H'이라함)원리에 의한 기저지하수체(basal groundwater)와 상위지하수(high level groundwater)로 분류한 농진공(1989)의 분류와 상위지하수, 준기저지하수(parabasal groundwater), 기저지하수(basal groundwater)로 구분한 수공(1993)의 분류이다.

농진공과 수공이 제시하고 있는 부존형태 중 큰 차이점을 보이는 것은 농진공이 제주도 지하수의 대부분이 기저지하수 형태 즉, 담수와 해수가 접촉하는 형태로 부존하고 있다고 제시하고 있다. 그 반면, 수공은 기저지하수와 상위지하수의 중간적인 형태 즉, 저투수성 퇴적층의 존재로 인하여 통상적인 G-H 비가 적용되지 아니할 뿐만 아니라 해수와 직접 접촉이 이루어지지 아니하는 형태의 지하수를 준기저지하수라는 새로운 개념을 도입하여 기저지하수의 부존지역을 축소 조정 하였다는 점이다.

제주도 지하수의 부존형태를 G-H 원리에 입각하여 설명되기 시작한 것은 1962~1965년에 실시된 지질 및 지하수조사에서 부터 인데 남(1966)과 김(1969)은 G-H Lense체의 기저지하수가 전도에 걸쳐 어느 곳이나 존재하는 것이 아니고 수리지질학적인 조건에 따라 부존지역이 결정될 것으로 추정하면서 향후의 지하수 조사는 G-H Lense를 지배하는 수리지질학적 조건에 대하여 중점을 두어야 한다고 하였다. 또한, 김(1969)은 G-H 원리에 의거 제주도에서 기저지하수를 얻을 수 있는 최소의 심도를 계산하여 제시한바 있다. G-H 원리는 도서지방의 지하수 부존형태를 설명하는데 광범위하게 적용되는 원리로서 담수(비중: 1.00)와 해수(비중: 1.025)의 비중차에 의해 평

균해수면 상부 지하수면 높이의 40배 심도까지 담수가 해수층 상부에 부존하게 된다는 이론으로서 이 비율에 의해 부존되어 있는 지하수체를 G-H Lense라 부른다. G-H 렌즈체의 지하수가 존재하기 위해서는 ① 지하수면은 평균해수면 상부에 위치하고 ② 해안은 투수성물질로 구성되며 ③ 지하수는 해안쪽으로 유동 해야하고 ④ 해수는 안정상태에 있어야 한다는 전제 조건들이 모두 충족되어야 한다. 그러나 제주도의 경우, 지하수위가 해수면에 위치하거나 또는 해수면 하부에 형성되고 있는 지역도 존재하고 있을 뿐만 아니라 불투수성내지 저투수성 퇴적암층이 해안변을 따라 분포하고 있다. 또한, 해수면 이하까지 시추하여도 지하수가 부존하지 않는 지역도 있는 반면 G-H 比 이상 심도까지 시추하여도 접이대(interface)가 존재하지 않는 지역들도 있기 때문에 이원리에 의한 지하수 부존형태를 도 전역에 일괄 적용시키기는 어렵다고 생각된다.

특히, 본 연구의 결과에서도 수위변동 양상은 지역별로 현저한 차이를 나타내어 G-H원리가 도전역에 적용시킬 수 없음을 입증시켜 주고 있다. 즉, 연구결과에 나타난 수위변동 양상을 대별하면,

첫째, 조석의 영향을 거의 받지 않는 강우의 다소에 따라 매우 큰폭으로 변동하는 유형(서귀포 일대지역)

둘째, 조석의 영향이 미미하고 강우량의 영향을 현저하게 받고 있는 유형(제주시 및 서부지역)

셋째, 강우의 영향이 적고 조석의 영향을 지배적으로 받고 있는 유형(동부지역)으로 크게 나눌 수 있다.

특히, 성산읍 수산-1 관측정에서 실시된 심도별 수질변화에 의하면(Fig. 9), 자연수위하 11m 부터 염분도가 1000ppm에 가까운 기수지하수(brackish groundwater)체가 존재하고 있는 것으로 나타났는데 이는 담수와 해수의 접촉이 이루어지는 접이대가 해수면에 근접하여 형성되고 있음을 시사해 주고 있다. 이와같은 수위관측 및 수질조성 결과를 근거로 전술한 농진공과 수공이 제시한 지하수 부존형태와 비교 분석하여 보면 제주도 동부지역에 부존

하고 있는 지하수는 G-H 원리에 의한 G-H Lense체 지하수로서 해양조석의 영향을 강하게 받고 있으며, 서부 및 북부지역의 지하수는 준기저 지하수체라고 할 수 있다.

농진공과 수공 모두 서귀포 일대지역의 지하수를 상위지하수로 설명하고 있으나, 저투수성 퇴적층인 서귀포층이 분포를 고려한다면 이 지역도 준기저 지하수로 해석되어야 할 것이다. 고 등(1993)은 제주도 지하수의 산출 특성에 대한 연구에서 서귀포층의 분포심도와 수위변동을 근거로 준기저 지하수를 상부준기저(upper parabasal)와 하부준기저(lower parabasal)로 구분 하였다. 즉, 저투수성의 서귀포층이 해수면 상부에 분포하고 있기 때문에 수위가 조석의 영향을 받지 않고 있을 뿐만 아니라 강우의 영향에 의한 수위 변동이 지배적으로 일어나고 있는 서귀포지역 일대의 지하수체를 상부준기저로 정의한 것과 본 연구의 결과는 일치하고 있다. 하부준기저 지하수는 서귀포층이 해수면 하부에 분포하고 있는 북부 및서부지역 지하수체로서 강우의 영향에 의한 수위변동이 지배적이지만 서귀포층이 해수면하 60m이상 깊게 분포하고 있는 북부와 서부지역에서는 조석에 의해 1일20cm 정도의 수위 변동이 일어나고 있는 것으로 나타났다(Fig 5와 Fig. 7). 따라서 본 연구대상인 신호관측정을 포함하여 서귀포 일대의 지하수는 상부준기저 지하수라 할 수 있으며, 삼양과 고산지역은 하부준기저 지하수체로 해석된다.

2. 제주도 지하수의 강우와 조석에 의한 수위변동 특성

지하수의 수위측정자료는 대수층의 성격과 그능력을 평가하는데 있어 기본자료로 이용될 뿐만 아니라 대수층의 변동에 대한 단기적 예측에 직접적인 지표로 활용될 수 있다. 본 연구 결과에서 제시 되었듯이 제주시, 서귀포 및 서부 고산지역 관측정들에서 강우에 의한 수위의 변동이 현저하게 일어나고 있는 현상은 투수성이 높은 화산암류로 이루어져 강우의 지하침투가 잘 이루어지고 있기 때문인 것으로 생각된다. 제주도의 숲골은 강우를 지하

수체로 유입시키는 통로와 같은 역할을 하고 있기 때문에 표면유출이 발생하는 50mm 이상의 강우시에 지하수위가 24시간 이내에 상승하는 현상이 일어나는 것으로 추정된다. 특히, 서귀포층이 분포하고 있는 지역의 대수층은 대부분 피압대수층이기 때문에 강우에 의한 수위상승이 빠르고 크며, 강우가 끝난 뒤 4~5일 후부터 진행되는 수위하강도 비교적 빠르고 큰 폭으로 일어나고 있는 것이다. 강우에 의한 수위상승이 최고점에 이룬 뒤 시작되는 수위하강이 폭은 포화대의 두께 즉, 지하수위의 높이가 높을 수록 빠르게 진행되는 데 신호관측정의 관측결과에서도 잘 나타나고 있다(Table 7).

해양과 접하고 있는 해안지역의 대수층에서 지하수의 수위는 조석에 대응하여 주기적인 변동을 일으키는 것으로 알려져 있다(Todd, 1980). 조석의 영향은 해안에서 내륙으로 거리가 멀어짐에 따라 점진적으로 감소하여 수위변동의 폭은 감소하지만 지연시간(Time Lag)은 이와는 반대의 경향을 나타내어 거리가 멀수록 길어지고 있다. 이러한 현상들은 본 연구지역 중 동부지역에 위치한 관측정들에서 잘 나타나고 있지만(Table 4와 Table 5) 조석의 영향정도는 해안지역의 수리지질학적 조건에 따라 다소의 차이를 나타내고 있다. 즉, 해안지역의 지형과 지질조건에 따라 내륙으로 전달되는 조석력의 정도가 다르게 나타나고 있는데 김녕과 성산지역의 경우를 비교해 보면, 지형적인 요인으로 인해 성산포와 종달리 해안에는 우도를 비롯 일출봉 및 성산반도, 지미봉, 식산봉, 오조리 초호, 성산항 방파제 및 갑문 등의 자연적·인위적인 제방이 형성되어 있으나, 김녕지역의 해안에는 특이할 만한 지형이 없는 개방해(Open Sea)의 성격을 지니고 있다. 또한, 지질적인 요인으로는 성산포 일대지역에는 퇴적암층인 성산층과 신양리층이 육상에 노출되어 있으나 김녕지역에는 사구퇴적층 만이 발달하고 있다. 이러한 지형·지질적인 요인은 해양에서 내륙쪽으로 전달되는 해수압을 약화시키고 있으며, 또한 해수압을 차단시키는 차수벽과 같은 역할을 하고 있기 때문에 성산지역이 김녕지역에 비해 조석의 영향이 작게 나타나는 것으로 사료된다.

제주도 동부지역은 지하수개발이 이루어지기 이전부터도 해안변 용천수가

염분을 다량 함유하고 있어 도내에서도 가장 극심한 물문제를 겪어왔던 곳이다. 동부지역 지하수의 고염도의 원인에 대해 최(1990, 1991, 1992)와 농진공(1989)은 해안에 인접한 지역에서 과잉양수에 의한 담수층의 파괴로부터 발생된 해수침투 현상으로 해석하였고, 윤(1986)은 사구층내에 다량 함유되어 있는 염분이 강우시 빗물이 지하로 하류되는 과정에서 지하수에 용해되어 기저지하수의 염분도를 증가시키는 것으로 해석하였다. 또한, 조 등(1987)은 동부지역에 대한 전기비저항과 과도전자파(TEM)탐사를 통하여 해수에 의한 오염은 지표에 가까운 천부 일수록 내륙 깊숙히 파급되어 성산읍 난산리를 경계로한 북동부지역이 해수의 영향을 심하게 받고 있다고 지적하였다. 고(1991)는 서귀포층의 지하분포 상태와 지하수와의 관계에 대한 연구에서 동부지역의 고염분 지하수의 존재는 서귀포층의 결층현상과 깊은 관계가 있을 것으로 추정 하였을 뿐만 아니라, 고 등(1992)은 지하지질구조와 지하수위 변동관계에 대한 연구에서 동부지역의 고염분 지하수 존재는 제주도 생성될 당시부터 비롯된 지질구조적인 특이성에서 생겨난 현상으로 해석하였다.

본 연구에서 성산읍 수산-1 관측정에서 수위관측과 심도별 지하수의 수질변화를 조사한 결과에 의하면 심도별 수질이 고수위와 저수위시 현저한 차이를 보이고 있는데 고 등(1992)은 이러한 현상을 이지역의 지하지질분포와 연결하여 지하수의 부존형태에 대한 해석을 시도 하였다. 즉, 해수면을 기준으로 -10m 부근까지는 염분도가 500~1000ppm 범위에서 변화하는 상부 점이대(upper interface)가 존재하고 있고, -10~-40m 사이에 중간점이대(middle interface) 및 하부점이대(lower interface)가 형성되고 -40m 하부에서는 염분도가 해수와 동일한 34% 이상 되는 고염분 지하수가 존재하고 있는 것으로 제시하였다. 특히, 본 관측정의 지질주상도에 의하면 해수면하 4m 와 8.9m에 다공질 스코리아층이 분포하고 있는데 본 층을 통하여 고염분 지하수가 유동하고 있기 때문에 주기적인 수질변화가 일어나고 있는 것으로 사료된다(Fig. 15). 또한, 고수위시에 자연수위하 약 4m 이심에서는

고염수의 영향으로 수질은 지하수에 비해 고염분이고, Cl, Na의 성분도 고농도로 분포하고 있는 특징을 보이고 있다. 자연수위하 4m 까지의 수층에서 저수위가 고수위시보다 염분도가 높게 나타나고 있는데 이러한 결과가 제주도 동부지역에서 동일하게 나타나고 있는지는 보다 정밀하고 연속적인 조사가 요망된다.

지하수위의 변화는 지하수, 함양량, 조위변화, 양수량에 따라 계속적으로 변화되고 있으므로 자료의 동질성을 얻기 위해서는 전 관정에 대한 동시 수위관측이 이루어져야 한다. 또한, 관측정에 대한 해발표고 측정, 대기압 등 기상변화에 대한 조사와 투수성 요인에 대한 조사가 되어야 한다. 이러한 종합적인 자료를 근거로 지하수 수위변화 상태에 따라 채수량조절 또는 채수시간대 조절 등과 같은 지하수관리가 체계적으로 수행되어야 하며, 연속적으로 장기간 수위 및 수질의 관측이 요구된다.



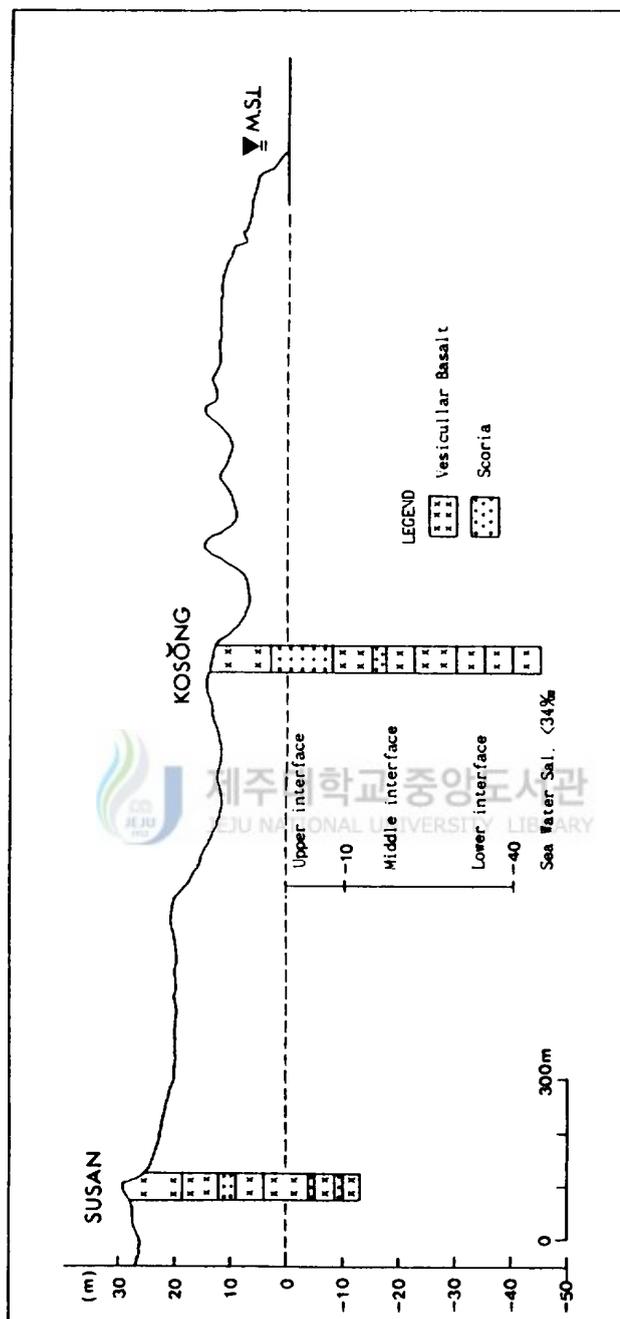


Fig. 15. Geological cross-section and occurrence of groundwater Söngsan area, Cheju Island (after Koh et al., 1992).

V. 결 론

제주도 동부지역을 비롯한 남·북부지역 및 서부지역을 대상으로 약 1년간 총 11개소의 관측정에 대한 지하수위의 관측과 성산읍 수산I 관측정에 대한 심도별 지하수의 수질조성을 조사하여 제주도 지하수의 수위변동의 특성과 그 요인을 연구한 결과는 다음과 같다.

1. 지하수위 관측 결과에서 나타난 수위변동의 양상을 유형별로 구분하면 다음과 같다. 첫째, 조석의 영향을 거의 받지 않는으나 강우의 다소에 따라 매우 큰 폭으로 변동하는 유형(서귀포 일대지역의 남부지역). 둘째, 조석의 영향이 미미하고 강우량의 영향을 현저하게 받고 있는 유형(북부 및 서부지역). 셋째, 강우에 의한 수위상승 폭은 작으나 조석의 영향을 뚜렷하게 받고 있는 유형(동부지역)으로 크게 나눌 수 있다.

2. 제주도 동부지역은 자유면 대수층을 이루고 있는 반면, 북부지역과 남부 및 서부지역은 피압대수층이 발달해 있는 것으로 판단된다.

3. 조석의 영향을 많이 받고 있는 동부지역에서는 해안에서 내륙으로 갈수록 조석의 영향은 작아지며, 수위변동의 폭이 작아지고 지연시간은 길어지고 있다.

4. 제주도 남·북부 및 서부지역은 대체적으로 50mm 강우후 24시간 이내에 빗물이 지하수체로 침투되어 수위상승을 일으키고 있는 것으로 나타났다.

5. 지하수위 변동양상을 지하수 부존형태와 연결시켜 해석하여 보면 동부지역에 부존하고 있는 지하수는 Ghyben-Herzberg 원리에 의한 기저지하수체이고, 신호관측정을 포함하는 서귀포 일대의 지하수는 상부준기저 지하수라 할 수 있으며, 삼양과 고산 지역은 하부준기저 지하수체로 해석된다.

6. 제주도 동부지역(성산읍 수산)에서 심도별 지하수의 수질조성을 조사한 결과 조석의 영향으로 인해 수질이 주기적으로 변화하고 있다. 수위의

변동(고·저수위)에 따라 약 4m 두께의 수층에 대한 수질이 주기적으로 현저한 수직변화를 나타내었다. 또한, 자연수위 하 11m지점의 지하수 염분도가 1000ppm에 가까운 기수지하수의 성격을 보이고 있어 이 지점은 상부점이대에 속하고 있다. 따라서, 동부지역에 고염분 지하수가 존재하는 것은 수리지질학적으로 서귀포층이 결층으로 지하수를 받쳐줄만한 차수층이 없으므로 인해 해양조석의 영향을 가장 많이 받고 있다.



참 고 문 헌

- 고기원, 1991. 제주도 서귀포층의 지하분포 상태. 제주대학교 해양연구소 연구보고 제15권, P. 81-92.
- 고기원, 1991. 제주도 서귀포층의 지하분포 상태와 지하수와의 관계(요약). 대한지질학회지 제27권 5호, p. 528.
- 고기원, 박원배, 고용구, 김성홍, 오상실, 윤 선. 1992. 제주도 동부지역의 지하지질 구조와 지하수위 변동 및 수질특성에 관한 연구. 제주도 보건환경연구원보 제 3권 P. 15~43.
- 고기원, 윤 선, 윤정수, 박원배, 한정상, 김남종, 정구원. 1993. 제주도의 지하수 산출특성(요약). 대한지질학회지 제48차 학술발표회 p. 48
- 기상청, 1992. 기상연보
- 김영웅, 1991. 제주도의 지하수 부존과 해수침입 방지대책 방안. 제주도 지하수함양 보전을 위한 심포지엄(한라일보), P. 7~40.
- 김옥준, 1969. 제주도 수자원의 특수성과 개발방안. 광산지질학회지 제2권 iv, P. 71~80.
- 김천수, 1992. 제주도 지하수의 오염취약성. 지하수자원의 보존과 활용('92 광산 지질학회 및 지질학회학술강연회), P. 13~28.
- 남기영, 1966. 제주도의 지질과 지하수, 국립지질조사소 지하수원 보고서 제3호, P. 109~135.
- 농어촌진흥공사, 1971. 제주도 지하수 보고서. P. 97-101.
- , 1973. 제주도와 OAHU도의 지하수 - 도서지방 지하수자원 개발 현황 - , P. 93~113.
- , 1982. 제주도 지하수개발현황과전망 P. 41~47.

- 농어촌진흥공사, 1989. 제주도 지하수 장기개발계획 조사 보고서. P.113~114.
- 윤정수, 1986. 제주동부지역 지하수의 고염도 요인에 관한 연구. 제주도 연구 제3집, P.43~53.
- 제주도 지질도, 1971.
- 조진동, 구성분, 이상규, 1987. 제주지역 영향권 조사 연구(I). 한국동력자원 연구소 KR-87-29. P.191~231.
- 최 순학, 1986. 제주지역 수리지질조사연구 KR-86-2-8, P.85~159.
- , 1989. 제주도 수자원의 환경학적 조사연구 KR-89-(B)-4. P.14~21.
- , 1992. 제주도 지하수 자원의 보존과 개발 방향. 제주의 인간과 환경 심포지엄(제대환경연구소). p.27-44.
- 산업기지개발공사, 1981. 제주도 수자원 조사 보고서.
- 한국수자원공사, 1990. 제주도 수자원 조사 보고서 P.115~129.
- , 1991. 북제주지역 수리지질계 분석에 관한 연구보고서 p.1-13.
- , 1992. 제주도 수자원 조사 보고서.
- , 1993. '92 제주도 수자원 종합개발계획 수립 중간보고서. P.1~12.
- 환경처, 1991. 제주도 환경보전 종합대책.
- Bredehoeft, J.D, 1967, Response of well-aquifer systems to earth tides: J.Geophys. Res., r.72, P.3075~3087.
- Carroll, D.,1962. Rainwater as a chemical agent of geologic processes - A review, U.S.Geological Survey Water-Supply Paper 1535-G, P.18.

- Hem, J.D., 1970. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water, 2nd ed., U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1473, P.363.
- Hofmann, J.P. and Meyer, W., 1989. occurrence of ground water in the Mariana Limestone, Kagman Peninsula, Saipan, commonwealth of the northern Mariana Islands. Honolulu, Hawaii, P.54.
- Jacob, C.E., 1939, Fluctuations in artesian pressure produced by passing railroad trains as shown in a well on Long Island, New York: Trans. Amer. Geophys. Union, v.20, P.666~674.
- Kenneth Ishizaki, Nathan C. Burbank, Jr, L. Stephen Lau. Technical Rep No.16, Water Resources Research Center, The University of Hawaii, Honolulu, Hawaii. P.1~10.
- L. Stephen Lau 1980. Hydrologic behavior of Hawaiian Ghyben-Henberg systems Technical Memorandum Re. P15~41.
- Revelle, R., 1941. Criteria for recognition of sea water in the ground-waters, Trans. Amer. Geophysical Union, V.22, P.593~597.
- Robison, T.W., 1939, Earth tides shown by fluctuations of water levels in wells in New Mexico and Iowa: Trans. Amer. Geophys. Union, v.20, P.656~666.
- Soon Hak Choi, 1990. Hydrogeological and Hydrochemical characteristics of groundwater in Cheju Island. Kyungpook National University, Korea, P.169.
- , 1991. Sea Water Intrusion in the Coastal Area of Cheju Volcanic Island Korea. Jour. Korean Inst. Mining Geol. Vol.24, No.3, P.319~327.

Todd, D.K., 1980. Groundwater hydrology, second edition. John wiley & Sons, P.218~153.



감사의 말씀

본 논문이 완성되기까지 정성으로 지도하시고 격려하여 주신 양 성기 교수님께 진심으로 깊은 감사를 드립니다.

아울러 논문을 심사하여 주시고 많은 조언을 주신 방 익찬 교수님, 최 영찬 교수님과 항상 관심을 갖고 지켜봐 주신 고 유봉 교수님, 윤 정수 교수님, 이 준백 교수님께도 감사드립니다.

또한, 수질분석을 할 수 있도록 배려해 주신 해양환경공학과 감 상규 교수님과 해양토목공학과에 김 남형 교수님, 민 창식 교수님과 부족한 능력을 채질하여 주셔서 이 글을 쓰기까지 인도하여 주신 고 기원 선배님에게 이 자리를 빌어 감사를 표하고자 합니다.

특히, 어려운 야외조사를 함께 하면서 동고동락한 해양토목공학과 학생과 자료정리에 도움을 준 하 정훈, 김 호범, 박 이석, 배 상운 학생들에게 고마움을 표합니다. 항상 옆에서 지켜봐 준 김 태희, 문 영석 선배님을 비롯한 대학원 학우들과 용기를 준 여러 선배님, 박 철용 형님과 여러 친구들에게도 고마운 마음을 전합니다.

끝으로 오늘이 있기까지 항상 사랑과 희생을 아끼지 않으신 부모님과 사랑하는 아내, 귀여운 딸 은정, 형님들, 누님들에게 이 작은 결실을 드립니다.