理 學 碩 士 學 位 論 文

濟州道 地下水 賦存特性 및 利用可能量 算出에 對한 硏究

1 9 9 9年　12月

安 東 大 學 校 大 學 院

地球環境科學科 應用地質學 專攻

夫　聖　安

濟州道 地下水 賦存特性 및 利用可能量 算出에 對한 硏究

指 導 敎 授 : 鄭 敎 澈

이 論文을 理學碩士學位 論文으로 提出함.

安東大學校大學院 地球環境科學科 應用地質學 專攻

夫 聖 安

夫 聖 安의 理學碩士學位 論文을 認准함.

1999年 12月

學 位 論 文 審 査 委 員

委員長 : 金 智 洙 (印)

委 員 : 孫 鎬 雄 (印)

委 員 : 鄭 敎 澈 (印)

安 東 大 學 校 大 學 院 委 員 會

목 차

List of Table

List of Figure

제 1 장 서론

제 1 절 연구의 목적

제주도는 동경 126°08′45″ 126°58′25″, 북위 33°06′26″ 34°00′00″에 걸쳐 있으며, 목포에서 남쪽으로 약 140㎞ 지점에 위치하는 국내 최대의 섬으로서 화산도 특유의 지질여건과 해발 1,950m의 한라산을 정점으로 한 원추형의 지형조건 등으로 연간강수량이 국내 최대인 1,872㎜나 되는 다우 지역이면서도 하천수는 50㎜ 이상의 집중 강우를 제외하고는 대부분 곧바로 지하로 침투 건천화되어 흐르지 않는 관계로 예로부터 물이 귀한 지역으로 인식되어 왔다. 1960년대까지만 하여도 어승생 지표수와 해안변의 용출수를 이용할 수 있는 일부 주민을 제외하고는 생활용수를 비롯한 각종 용수가 부족하여 지역발전의 최대 걸림돌이 되었으며 식수마저도 봉천수(우기 중에만 흐르는 지표수를 낮은 곳에 모아두었다가 갈수기나 평상시에 음료수로 사용하는 물을 말함)에 의존해야만 되는 도서지방으로서의 물 기근을 겪고 있었다.

제주도에 대한 지질조사는 '21년 Yokoyama가 서귀포층의 패류화석을 최초로 연구하고 Haraguchi가 '30년에 1:100만 지질도를 발간하였으며, 국내인으로는 서해길 외(1964)가 남제주군 일부분의 지질도를 처음으로 작성하였다. 그리고 지하수에 대한 체계적인 조사연구는 '63년부터 '66년까지 상공부 국립지질조사소(현 한국자원연구소)의 연구진에 의하여 남제주군에 수리지질조사를 하였는데 퍼커솝시추기로 착정조사를 병행하였으며 또한 해안변에서 용출되는 용천수의 활용방안을 조사한 것으로부터 시작되었다. '66년에는 한국지하자원조사소와 원자력연구소가 제주도 일부지역에 대한 지하수원탐사를 실시하였으며 같은 해에 농림부 주관으로 토지개량조합연합회(농업진흥공사 전신)에서 국지적인 지하수 조사를 시행하였다. 그 후 '70 '71년까지 2개년에 걸쳐 농림부의 예산지원 아래 농업진흥공사(농어촌진흥

공사 전신)가 각 분야의 전문교수를 자문위원으로 하여 제주도 전역의 지하수 부존상태와 개발 가능성 여부를 규명하고자 정밀 지질조사와 함께 물리탐사, 150개공의 시추 및 착정조사를 시행한 결과 본 도의 지하에는 약 340억㎥에 달하는 막대한 양의 지하수가 부존되어 있고 그 중 이용가능한 양이 약 120억㎥임을 확인하였으며, 특히 2개년의 조사 결과를 종합하여 1:100,000 제주도 지질도와 제주도지하수보고서를 작성하여 이후 제주도를 연구하는 기초 자료가 되었다. 이 당시의 지하수조사 결과를 토대로 250개소의 암반지하수개발 장기계획을 수립하였으며 '89년까지 250공의 지하수를 개발함으로써 우선 급한 용수문제를 해결하였다. 또한 '89.6.5 12.31까지 농업진흥공사가 제주도 지하수의 함양가능량과 채수량의 균형유지 및 수자원의 부존 여부, 경제성, 수질 등을 종합적으로 조사하여 '제주도 지하수장기개발계획' (농림수산부 외, 1989)을 수립하였으며, '93년에는 한국수자원공사가 '제주도 수자원종합개발계획' (건설부 외, 1993)을 수립하여 광역상수도를 개발하고 있다.

'70년 지하수를 처음 개발한 이래 '98년까지 개발한 공공관정은 726공으로 1일 약 832,000㎥이 개발되었다.

이처럼 제주도에서의 지하수 및 지질조사는 1921년부터 꾸준히 조사·연구되어 각 분야에서 많은 논문과 보고서가 발표되었으며, 지하수의 부존특성과 이용가능량 등에 대하여 여러 의견이 제시되었다. 일 예로 제주도 지하수 포장량은 연구자에 따라 최소 88억㎥에서 최대 3,000억㎥으로 그 차가 매우 큰 편이며, 지하수 이용가능량 역시 0.82억㎥에서 9.08억㎥으로 연구 보고되어 있다.

지하수가 자연의 천연자원임은 명약관하한 사실이다. 그러나 지하의 다른 천연자원은 사용하면 없어지지만 지하수는 적정하게 사용하고 관리한다면 영구적으로 쓸 수 있는 자원이다. 제주도는 거의 대부분의 용수를 지하수에 의존하고 있으나 어느만큼, 어떻게 개발 사용하여야 환경파괴가 일어나지 않는지는 완벽하게 파악되지 못한 것이 지금의 현실이다. 현재 제주도가 농어촌진흥공사와 함께 최적의 지하수관리기법을 연구하고 있으므로 이 연구가 완료되고 정착되어 잘 운영된다면 최적의 지하수관리시스템이 구축될 것이며 이와 함께 도민이 다같이 노력한다면

지하수의 수량감소, 수질악화, 대수층의 파괴 등 지하수환경에 대한 우려가 해소될 것이다.

본 연구는 제주도의 지하지질과 대수층의 분포상태, 지하수의 부존특성 등을 파악함으로써 지하수 포장량과 지하수 최적 개발가능량을 산정하고, 동부지역 담지하수 대수층에 대한 염수침입의 원인을 분석하여 해수의 침입을 받지 않고 안정적으로 지하수를 취수할 수 있는 기초가 될 수 있도록 하는 것이 본 연구의 목적이다.

제 2 절 연구 지역 및 연구 방법

본 연구 지역은 제주도 화산체의 본섬 만을 대상으로 하였다.

일반적으로 「지하수 포장량은 대수층 체적에 공극율을 곱한 것」이며 이것이 지하수의 "이론적 포장량"이 된다.

현재까지 이루어진 제주도 화산체의 지하수 포장량 산정방식 역시 위의 방식에 의한 것이 대부분이었으나 연구자마다 대수층의 체적이나 공극율이 달라 지하수 포장량이 크게 차이가 나고 있다. 연구초기에는 대체로 제주도와 비슷한 미국 하와이주 Oahu섬에서의 지하수 부존 및 산출상태를 제주도 화산체에 적용하고, 담수와 해수가 Ghyben-Herzberg(이하 G-H)의 원리에 의해 부존하는 유체동역학을 이용하여 지하수 포장체의 총 체적을 구하고 여기에 대수층의 공극율을 곱하여 지하수 포장량을 구하였으나, 최근에는 담수와 해수와의 동역학을 고려한 전산모형을 이용한 모델링을 수행하여 지하수 포장량을 구하기도 하였다. 이때 G-H 비율의 적용방법, 기반암 혹은 비대수층의 심도, 담수체의 상·하한을 추정하는 방법 등에 따라 담수체의 체적에 큰 차이가 발생하며, 또한 유효공극율을 얼마로 적용시키느냐에 따라서 지하수 포장량이 크게 달라지게 된다. 또한 제주도 화산체에 대한 물수지 분석 결과에 의해 지하수 함양량과 지하수 이용가능량을 산출하였는

데 이 역시 여러 요인에 의하여 큰 차이를 보인다. 이처럼 제주도 화산체에 대한 정확한 지하수 포장량과 이용가능량 내지 최적 개발가능량을 산출하는 것이 쉽지 않으나 기존의 시추·개발 결과를 분석하여 이를 구하였으며 다음과 같은 방법으로 수행하였다.

본 연구를 위하여 첫 번째로 '70년부터 '97년까지 농어촌진흥공사가 개발한 공공관정 중 지질주상도가 확인된 653공과 고심도로 조사·개발한 27공의 지질주상도를 검층하여 지하지질, 대수층, 저투수성 퇴적층 등의 분포상태를 분석하였는데, 제주도 전체를 고심도공을 위주로 17개의 단면으로 나누어 도 중심부에서 해안까지의 지층 분포상태를 파악하였다.

다음으로 농어촌진흥공사가 개발한 공공관정의 개발현황 자료를 분석함으로써 제주도에서의 전반적인 지하수 개발상태를 파악하고, 지하수위 장기관측 자료를 이용하여 수위변화의 패턴을 분석하며, 지하수 산출상태를 파악하여 지질과 관련된 지하수 부존특성을 규명하여 보았다. 그리고 기존에 연구 발표된 제주도 지하수에 대한 부존특성, 물수지, 포장량 및 이용가능량 산출 방법을 비교 검토하였다.

지층의 분포상태와 지하수 부존특성이 파악되고 대수층의 상·하한이 결정되었으므로 담수체의 체적을 구하고, 이에 대수층의 공극율 및 비산출율과 지질특성 등을 적용하여 지하수 포장량과 이용가능량 및 최적 개발가능량을 산출하였다.

제 2 장 제주도의 지형 및 지질

제 1 절 지형

제주도는 신생대 화산활동에 의해 형성된 현무암질 용암류와 화성쇄설물로 이루어진 화산도로서, 화산지형의 특징을 잘 보여준다. 특히 분석구로 알려진 화성쇄설물의 분출구인 화구가 잘 발달되어 있는 것이 특징이다.

제주도 면적은 1828.3㎢(기타 도서를 제외한 면적)로서 한라산을 정점으로 하는 북동동-남서서 방향의 장축의 길이가 약 75㎞, 단축인 남북방향이 약 33㎞의 타원형 모양을 하고 있으며 장축은 동쪽으로 약 75° 기울어져 있다(Fig. 3.1).

전체지형은 해발고도에 따라 크게 EL200m 이하 지역을 해안지역, EL200 600m 지역을 중산간지역, EL600m 초과 지역을 산악지역으로 구분하는데, 이들의 면적은 각각 993.3㎢, 589.0㎢ 및 246.0㎢로서 각각 도 전역의 54.3%, 32.2% 및 13.5%를 차지하고 있다(제주도, 1997).

제주도 전역의 평균 경사도는 8% 정도이며 경사 5% 미만의 평탄지역은 도 면적의 43.6%인 796.0㎢이고 경사 20% 미만지역이 89.0%인 1627.2㎢로 제주도 대부분의 지역이 평탄한 지형으로 형성되어 있으며, 지형은 침식윤회상 유년기에 해당된다.

산계는 한라산(EL1,950m)을 정상으로 원추형의 순상화산(shield volcano)의 양상을 나타내며 동부와 서부는 거의 평탄한 대지를 형성하고 남부와 북부는 비교적 경사가 급한 편이다.

수계와 관련하여 제주도는 전체적으로 한라산과 동서방향의 장축을 경계로 58개의 하천이 남향 또는 북향하는 경향을 보이며, 동서방향의 하천 발달은 상대적으로 미약한 편이다. 수계는 지표 용암류의 종류, 용암류의 경계 및 지형경사도의 영향으로 한라산의 정상으로부터 해안 쪽을 향해 수 수십 ㎞ 길이의 V자 형의 침식계곡을 따라 발달한 형태를 보인다. 하천의 총 연장은 1,907.1㎞이며 하천밀도

는 1.05㎞/㎢로 하천 발달은 양호한 편이나, 하천은 강우 시에만 흐름이 있고 바로 지하로 침투해서 복류하는 건천이 62.6%나 되며, 용천수에서 발원하는 몇몇 하천만이 건기에도 지속적으로 흐르고 있을 뿐이다.

제 2 절 지질 및 화산활동

제주도는 제3기말의 플라이오세 중기에서부터 제4기 플라이스토세 말까지의 화산활동으로 형성된 화산도로서, 화산활동은 크게 5단계로 구분할 수 있다.

제주도의 지질은 대체로 기반암과 화산분출암인 현무암류, 조면암류, 조면암질안산암류 그리고 화성쇄설물과 화성쇄설암, 사구 등으로 구성되어 있고 미고결퇴적층이 지하에 분포한다.

제주도에 분포하는 용암은 대양형에 속하며 그 성분은, 암석에 대한 화학분석을 기초로, 알칼리 성분이 많고 MgO 및 CaO 함량이 부족한 마그마로부터 기원된 것으로 알려져 있다(남기영, 1966). 또한 현재까지 연구된 바로는 79회 이상의 화산활동이 있었다고 알려져 있으며(원종관, 1976), 연구자에 따라 크게 3 10단계의 형성과정으로 나눈다.

Ⅰ. 기반암

1.화성쇄설암류

제주도의 하부 기반암은 최근에 온천탐사를 위한 심부시추와 중력, 자력탐사를 통한 기반암 분포조사에 의해 화성쇄설암류와 이를 관입한 화강암으로 확인되었다. 이들은 노두로는 나타나지 않으나 우도 동해안 절벽의 응회암 속에 백악기 응회암이, 제주시 사라봉과 인접한 별도봉 북측 해안가에 분포하는 응회암 속에 화강암력이 각각 포획암으로 산출된다. 그러나 이문원(1994)은 제주도 서부 송악산 절벽과 수월봉 해안 절벽에 편마암류력이 포획암으로 산출되므로 기반암에 변성암

류도 있다 하였다.

기반암인 화성쇄설암류는 응회암, 용결응회암 그리고 화산력응회암 등으로 이루어져 있으며 방사성동위원소 연대측정이 되지 않아 시대를 알 수는 없지만 암질만으로는 백악기 유천층군 또는 제3기 에오세의 왕산층 화산암류에 대비되는 것으로 추정된다(윤선 외, 1994).

기반암의 분포심도는 단면도 분석결과 동부지역은 EL(-)250 (-)300m, 서부지역은 EL(-)350 (-)400m, 남부지역은 EL(-)250 (-)300m, 북부지역은 EL(-)200 (-)250m, 그리고 도 중심부는 EL(-)210m 정도에 분포할 것이다.

2. 화강암

화강암은 제주시 연동에서 EL(-)486m에서부터, 조천읍 함덕에서는 EL(-)990m에서부터, 구좌읍 만장굴 부근의 덕천에서는 EL(-)950m에서부터 그리고 서귀포시 천지연에서는 EL(-)726m에서부터 각각 채취되었으며 도 전역의 오름에서 화강암력이 포획암으로 산출되는 것으로 보아 도 화산체 하부에 광범위하게 관입 분포하는 것으로 추정된다.

덕천 시추공의 EL(-)970m에서 채취된 화강암 코아의 K/Ar 연대측정 결과 66.4±1.7Ma(이동영, 1996)이고, EL(-)1,200m에서 채취된 화강암의 시추코아에서 분리된 알칼리장석의 K/Ar 연대는 58.14±1.4Ma이나 광물의 연대보다 전암의 연대는 10Ma 정도 차가 있을 수 있다(안건상 외, 1995).

그러므로 화강암의 관입연대는 최대 69.54Ma에서 최소 56.74Ma가 되므로 백악기 말에서 신생대 제3기 초(Lower Paleocene)에 해당된다.

Ⅱ. 1차 화산활동

1. 감람석휘석현무암(Olivine augite basalt, OAB)의 분출

기반암에 화강암체의 대규모 관입이 있은 이후 해침이 일어나 서측은 한림, 한경, 대정, 안덕지역이 100 150m 정도 침식되고, 북측의 조천, 구좌 서쪽과 남측의 남원 동쪽과 표선지역이 100m 정도 침식되었다.

이들 기반암은 OAB에 의해 피복되는데, OAB는 노두로는 나타나지 않는 것으로

알려졌고 '71년 농업진흥공사의 시추조사에 의해 처음 확인되었다. 그러나 서귀포층의 모식지 하부에서 간조 때 OAB가 노출되는 것으로 보아 지표상에서도 분포하는 것으로 여겨진다. OAB는 농업진흥공사가 '70 '71년에 시추조사한 제주도 서쪽의 한림읍 금악 B-94, 애월읍 어음 B-95, 안덕면 감산 B-65, 동쪽의 구좌읍 덕천 B-96, 구좌읍 송당리 중동 B-98호 시추공의 EL(-)3.5 (-)73.0m 범위에서 산출되었으며 서귀포층에 의해 부정합으로 피복되어 있는데, 암석은 암회색, 청회색 내지 담회색으로 매우 치밀하며 감람석과 휘석의 반정들이 취반상조직을 이루고 있다. 광물조성은 세립 내지 중립질의 감람석 20%, 중립 내지 조립질의 휘석이 5%, 사장석이 70% 내외 함유되어 있다. 감람석과 휘석은 집괴되어 거정을 이루는 부분이 있으며, 절리는 국부적으로 발달되어 있다. 포획된 OAB암편의 K/Ar 연대측정 결과 산방산 이남의 용머리 응회구내 암편은 1.20±0.05Ma(윤상규 외, 1986)이고, 수월봉내 암편은 1.20±0.04Ma이며 사계층내 암편은 0.94±0.05Ma 등으로 나타나 있으나 OAB층의 분포위치와 미고결퇴적층의 퇴적시기와 비교해 볼 때 약 1Ma 정도의 차이가 있으므로 OAB암편의 연령은 재검토할 필요가 있다.

'71년의 시추조사 결과와 응회구내 포획암의 분포위치로 보아 OAB는 도 전역에 분출되었으며 그 분출시기는 플라이오세 중기일 것으로 추정된다.

2. 판포현무암

'89년 한경면에 개발된 판포 D-221호 공의 EL(-)144.2 (-)153m에서 산출되어 농업진흥공사에 의해 기저현무암일 것으로 보고되었던 판포현무암(농림수산부 외, 1989)은 암회색 내지 흑회색으로 암질이 매우 치밀 견고하고 감람석의 반정을 함유하고 있는 것으로 보고되었다. 판포현무암의 연령은 澤田의 방사상동위원소 측정 결과 2.22±0.16Ma로서(윤선 외, 1994) OAB와 산출시기가 비슷한 것으로 여겨진다.

Ⅲ. 2차 화산활동

1. 미고결퇴적층(Uncemented sediment formation, USF)의 퇴적

OAB분출이후 해저폭발이 일어나 USF층이 기반암을 따라 도전역에 광범위하게 퇴적되었다.

본 층은 서귀포층 하부에 분포하는 것으로서, 지상에는 나타나지 않고 있으나 지하 심부 시추조사 결과에 의해 그 존재가 확인되었다. USF층은 남부지역은 해수면 아래 약 (-)10 (-)100m 위치에 두께 약 200 300m로 분포하고, 그 외 지역은 해수면 아래 (-)100 (-)150m 위치에 두께 약 70 300m로 분포하는 미고결된 실트질세립모래 혹은 사질실트층이다. 본 층은 도 중앙부에서 EL0m 정도에 분포하므로 중앙부는 높고 해안변으로 갈수록 낮은 형태를 이룬다. 이는 퇴적이 완료된 후에 일어난 해안 및 중산간지역의 침식작용과 제4차 및 제5차 화산활동 시기에 일어난 마그마 분출에 의해 도 중심부가 밀려 올라온 것으로 해석된다.

원종관 외(1993), 이동영(1994), 이문원(1994), 한정상 외(1994) 등은 미고결퇴적층을 세화리층이라 명명하였고, 이 층의 생성원인은 화산분출에 의한 화성쇄설성 화산회가 바다로 떨어져 급속히 퇴적함에 따라 미고결 상태로 존재하는 것으로 해석하였으나, 본 층이 지표에 나타나지 않으므로 지리적 명칭을 사용하지 않고 윤선 외(1994)는 미고결층으로, 고기원(1997)은 U층으로 기재하였다. 윤선은 본 층의 점토광물을 분석하여 미고결의 원인을 해석하였는데, 점토광물에는 비화산성 기원의 육상 풍화물질이 퇴적분지내로 공급되어 퇴적된 산성암의 풍화물질인 석영과 장석이 주를 이루고 있을 뿐 현무암질유리가 함유되어 있지 않아 이로부터 생성되는 교결물질인 스멕타이트(smectite)가 없으며, 또한 패각이나 유공충의 각이 발견되지 않으므로 이로부터 추출되는 교결물질인 탄산칼슘이 생성되지 못하여 미고결 상태로 존재하고 있다 하였다.

USF층의 퇴적시기는 OAB분출 이후부터 서귀포층 퇴적직전까지의 플라이오세 후기인 것으로 추정된다.

USF층의 퇴적 이후 해안변을 따라 침식이 일어났는데 남원읍 신흥, 제주시 연동지역이 좀 더 심하게 일어났다.

2. 서귀포층(Seoguipo formation, SGF)의 퇴적과 LFOB 분출

침식이 끝나자 제주도 중앙부에서 남북방향으로 급격한 화산폭발이 일어나면서 SGF층이 퇴적되었다. 이번의 폭발과 퇴적은 서귀포지역을 중심으로 하여 일어나 남에서 북으로, 또 서와 동으로 퇴적이 진행됨으로써 SGF층의 상부는 서귀포지역

이 다른 지역보다 높게 되었다. 그러나 본 층의 퇴적은 동측의 구좌, 성산지역까지 미치지 못하여 동측의 일부지역에 SGF층이 분포하지 않게 되었다.

SGF층의 퇴적위치는 동부 중산간지역은 약 EL(-)120m, 서부지역은 EL50 (-)100m, 남부지역은 EL200 (-)50m 그리고 북부지역은 EL120 (-)120m부터 분포하며, 도 중앙부는 약 EL200m에 위치할 것이고 남쪽이 약간 더 높은 형태를 이룬다. 층의 두께는 약 100m 이나 서귀포지역에서는 약 200m로 두꺼운 편이다.

SGF층의 퇴적 중에 LFOB의 분출이 있었으며(이것은 FOB편에 설명한다) 이후 침강과 해침이 일어나면서 해안쪽의 SGF층이 차별침식을 받아 중심부보다 해안변이 낮은 형태가 되었다.

이로써 제주도 화산체에 가장 광범위하게 퇴적된 USF층과 SGF층의 퇴적작용이 완료되었다.

SGF층은 제주도 서귀포시 천지연폭포 서쪽 해안 절벽에 높이 약 30m, 연장 약 1㎞ 정도로 분포하고 있는데 하부는 해수면 아래에 있다. 이 층은 천해성 퇴적층으로서 암석은 역질사암, 사암, 이암, 세일 등으로 구성되며 고결, 미고결 내지 준고결 상태이다. SGF층은 Yokoyama(1923)에 의해 처음 보고된 후 많은 연구가 있었으며 1968년에 천연기념물 제195호로 지정되어 보호되고 있다. SGF층에는 연체동물화석, 석회질 초미화석, 유공충, 완족류, 성게, 개형충 등의 화석이 다량 포함되어 있으므로 이들 화석 및 퇴적환경을 연구하여 그 생성연대를 추정하였는데 김봉균(1972), 원종관(1976), 최순학(1988) 등은 플라이오세, Yokoyama(1923), 농업진흥공사(1971), Yoon, S.(1988) 및 Lee, M.W.(1982)등은 플라이오세 후기, Haraguchi(1931)는 플라이스토세, 민경덕 외(1986), 윤선(1998) 등은 플라이오세 후기에서 플라이스토세 초기, 이성숙 외(1995)는 플라이오세 최후기에서 플라이스토세 중기 초, 윤상규 외(1986), 이동영과 김주용(1991), 원종관 외(1993), 이문원 외(1994) 등은 플라이스토세 중기일 것이라 하였다. 그중 윤상규 외는 고지자기 측정 결과 0.73 0.41Ma 사이에 해수면이 상승되는 과정에 SGF층이 퇴적되었다 하였다.

이들 여러 연구자들의 연구 결과와 층서를 종합하여 보면 SGF층의 퇴적시기는 플라이오세 후기에서 플라이스토세 중기까지일 것이다.

Ⅳ. 3차 화산활동

1. 침상장석감람석현무암(Feldspar olivine basalt, FOB)의 분출

SGF층의 퇴적 중과 이후에 서귀포지역을 제외한 제주도 전 지역에 FOB가 광범위하게 분출되어 용암대지를 형성하였는데, 서귀포지역은 지대가 높아 FOB로 피복되지 못하고 이후 조면암(Trachyte, T)에 의해 피복되었다.

FOB는 서해길 외(1964)에 의해 표선리현무암으로 명명된, 회색 내지 암회색의 치밀질 암석으로 침상의 장석과 감람석을 반정으로 함유하고 있다. FOB는 구갑상의 주상절리가 잘 발달되어 있으며 다공질이고 기공의 크기가 큰 것이 특징이다. 또한 점성이 낮아 이들의 유로를 따라 큰 규모의 용암동굴을 형성하게 하였으며 (대표적인 것에는 빌레못굴, 만장굴, 수산굴, 소천굴, 협재굴, 사굴 등이 있다) 이들은 주로 해안저지대에 분포하고 대부분 수평굴을 형성하고 있고, 절리 등의 발달로 붕괴 및 침몰이 심하며, 동굴대 주변부는 공동의 발달이 심하여 지하수의 통로가 되기도 한다(김영기, 1991).

FOB는 최근의 K/Ar 연대측정 결과 성산읍 온평이 0.67±0.03Ma(원종관 외, 1993)이고 성산읍 수산이 0.150±0.015Ma 정도이므로, FOB의 생성연대는 플라이스토세 중기에 해당될 것이다. 특히 온평지역의 연대는 SGF층이 퇴적 중인 시기에 해당하며 수산지역은 퇴적이 완료된 시기에 해당되는데, 그 외에도 FOB에 대한 많은 연대측정 결과가 이를 반영한다. 또한 농어촌진흥공사의 지하수 개발보고서에 수록된 지질주상도에서도 본 암이 SGF층 내에 분포하는 곳이 많이 있다. 이러한 이유로 FOB는 SGF층 퇴적 중과 퇴적 후에 각각 분출된 것으로 추정되지만 FOB는 주로 SGF층 퇴적 후에 분출된 것으로 보인다.

이에 따라 FOB는 SGF층 퇴적 중에 분출된 LFOB(Lower FOB)와 SGF층 퇴적 후에 서귀포지역의 조면암류와 비슷한 시기에 분출된 UFOB(Upper FOB)로 구분된다.

2. 성산층(Seongsan formation, SSF)의 퇴적

FOB의 분출로 용암대지가 형성된 이후에 제주도 전 지역에서 국부적인 화산활동이 일어나 SSF층을 퇴적시켰는데 화산활동은 SSF층 퇴적과 동시 또는 퇴적 후에 연이어 있었을 것이다.

SSF층은 성산 일출봉(Δ192m)이 표식지로 분화구의 원형이 잘 보존되어 있다. 그 외에도 당산봉, 수월봉, 송악산, 군산, 매오름 등에서 SGF층을 볼 수 있다. 본 층은 수중분출에 의해 형성된 화성쇄설성 퇴적층이며, 회색, 황갈색, 담회색 내지 암회색의 세립 내지 조립질 응회암으로서 대체로 고결도가 낮고 층리가 잘 발달되어 있으며 주향은 N48 50W, 경사는 15 40NE이다. 또한 상부로 갈수록 입자가 굵어져 각력질화산암편들로 구성되어 있다.

SSF층은 퇴적된 위치로 보아 플라이스토세 중기 말에 형성된 것으로 추정된다.

Ⅴ. 4차 화산활동

1. 조면암 및 장석현무암의 분출

SSF층 퇴적 이후 조면암(Trachyte, T) 및 장석현무암(Feldspar basalt, FB)의 분출로 제주도 기저부의 현재 지형이 형성되었다.

2. 신양리층(Sinyangri formation, SYF)의 퇴적

이후 북반 해안이 해침된 후 퇴적된 SYF층은 성산읍 신양리에서 성산리에 이르는 해변에 주로 분포하며 대정읍 신도리 해안에 소규모로 분포하는데, 성산리 부근에서는 SSF층을 피복하며 노출되어 있다.

SYF층은 암색이 암갈색이며 화산회와 화산사, 원마도가 양호한 화산력 그리고 패사로 구성된 응회암과 집괴암으로서 층리가 잘 발달된 해성기원의 준고결층이다. 본 층은 Kim, B.K.(1969)에 의해 명명되었으며 유공충, 패각류, 방산충 등의 화석이 발견되어 플라이스토세로 추정하였으나, 농업진흥공사(1971)는 애월읍 동귀리에서 개발한 동귀 W-014호 공의 심도 43.5 55.4m(층 두께 11.9m)에서 산출된 조개화석층의 화석감정 결과에 의거 제4기초라 하였고, 원종관(1976)은 플라이스토세 중기, Lee, M.W.(1982)은 플라이스토세 후기 말이라 하였다. Yi *et al.*(1995)은 신양리층에 함유된 석회질 초미화석 연구결과 0.085 0.073Ma 보다 젊은 시기에 SYF층이 형성된 것이라 하였다.

SYF층에 대한 여러 연구 결과와 퇴적상황을 종합하여 볼 때 SYF층의 퇴적시기는 플라이스토세 후기에 해당되는 것으로 추정된다.

Ⅵ. 5차 화산활동

1. 현무암류 및 조면암류의 분출

신양리층 퇴적 후 현무암류(Basalts) 및 조면암류(Trachytes)의 분출로 도 중앙부를 제외한 골격이 형성되었고, FB의 분출로 제주도의 골격 형성이 완료되었다.

제4차와 제5차 화산활동에 의하여 도 중심부는 해안변보다 융기된 형태를 보여주고 있으며 SGF층 퇴적 이전에 이루어진 해안변의 침식작용과 복합되어 Fig. 4.9 4.12에서처럼 각 지층은 도 중심부가 해안변보다 높이 분포한다.

2. 분석구(cinder cone)와 응회구(tuff cone)

제주도 전역에 분포하는 분석구와 응회구는 368개(제주도, 1997)의 오름이라고 부르는 기생화산으로서, 각 용암들이 분출될 때와 중앙화구에 의한 화산활동에 뒤이은 후화산활동에 의해 도 전역에서 몇 회에 걸쳐 시기를 달리하여 형성되었을 것이며, 주로 화성쇄설물로 구성되어 있다.

이들은 SGF층의 퇴적 후기에서부터 생성되었으나 후화산활동에 의해 가장 많이 형성되었다.

이들 오름은 장축방향의 배열이 우세하고 고산리에서 사계리를 거쳐 서귀포에 이르는 해안을 따라서는 불연속적으로 분포하며 신양리, 성산일출봉, 두산봉, 우도 등에도 분포하는데, 화구는 칼데라를 이루거나 한쪽이 무너진 마제형을 이룬다.

Ⅶ. 화산활동 이후

화산활동이 완료된 후인 홀로세에 동북 해안선과 협재리, 사계리 및 표선리 해안 일대에 계절풍의 방향을 따라 내륙을 향하여 사구(sand dune)가 발달되었다. 이들 사구는 주로 패사로 구성되며 상부는 세립질이고 하부로 갈수록 잔자갈이 혼입되어 있다. 그러나 이 시기에도 제주도에는 화산활동이 완전히 멈추지 않고 몇 차례 일어났는데,「동국여지승람」 제38권에 의하면 1002년에는 비양도에서, 1007년에는 군산에서 화산폭발이 있었고, 「이조열성실록」에는 1455년 1월 24일과 1570년 11월 15일에 화산폭발과 지진이 일어나 많은 피해가 있었던 것으로 기록되어 있다.

현재는 제주도가 사화산(남기영, 1966) 내지 휴화산(원종관, 1976; 최순학과 김영

기, 1989)으로 알려져 있으나 최근에 한국자원연구소는 Szakacs의 새로운 정의에 따라 제주도가 사화산(제주도, 1998)에 해당된다고 하였다.

이상의 결과로 볼 때 제주도는 백악기 내지 제3기 초에 형성 및 관입된 화성쇄설암과 화강암을 기반암으로 하여 초기 모양을 갖춘 후, 제3기말의 플라이오세 중기에서부터 제4기 플라이스토세 말까지 크게 5단계의 화산활동으로 형성이 완료된 화산도로서, 현무암류의 연령을 보면 OAB와 비슷한 시기에 분출된 것으로 보이는 판포현무암이 2.20±0.16Ma이고 백록담조면안산암은 0.025±0.008Ma(Won *et al.*, 1986)이므로 제주도는 약 230만년 정도에 걸친 화산활동으로 형성되었다고 할 수 있다.

이상에서 제시한 제주도의 화산활동 순서 및 퇴적층서는 Table 2.1과 같다.

Table 2.1 Valcanic sequence and sedimentary stratigraphy in Cheju Island

Stratigraphic				Age(Ma)		Stage	Volcanic stratigraphy	Sedimentation
Era	Period	Epoch						
Ceno-zoic	Quater-nary	Holocene		0.01			1002, 1007 activities	Sand dunes
		Pleisto-cene	U		0.025±0.008	5th	tuff cones/cinder cones **Feldspar basalt** **Trachyandesites** **Basalts/Trachytes**	
					0.073 0.085	4th	cinder cones	**SYF**
				0.125			**Trachyte/FB**	
			M			3rd	tuff cones	**SSF**
					0.15 0.31 0.41		**UFOB/Trachytes**	
			L	0.73	0.67±0.03	2nd	tuff cones **LFOB**	**SGF**
	Terti-ary	Plio-cene	U	1.70				**USF**
			M		2.22±0.16	1st	**OAB/Panpobasalt**	
			L					
		Miocene		5 24				
		Oligocene		36				
		Eocene		55				
		Paleocene		66	58.14±1.4 (+10.00)		**Granite intrusive**	
Meso-zoic	Cretaceous				66.4±1.7		**Tuff,** **Welded tuff,** **Lapilli tuff**	
				140				

제 3 장 제주도 지하수의 부존특성

제 1 절 지질주상도 검층

지하지질의 특성을 규명하기 위하여 총 680공의 지질주상도를 검층하였다. 검층 대상 공은 '70년 이후부터 '97년까지 농어촌진흥공사가 제주도 본섬 안에 농업용수와 먹는물로 개발한 지하수 공공관정 653공과 27공의 고심도 조사·개발공이다 (Table 3.1). 고심도 공은 표고나 개발심도가 400m 이상인 사설관정, 온천시추 및 개발공 중에서 검층 가능한 지질주상도가 확보된 공을 택하였다.

Table 3.1 Number of wells having open hole log data

Classification	Total	Public well	deep drilled wells
Total	680	653	27
Cheju city	79	75	4
Seoguipo city	72	67	5
Buk-cheju gun	292	279	13
Nam-cheju gun	237	232	5

공공관정은 국가에 의해 개발되어 농민이 사용할 수 있도록 한 관정을 말하며, 사설관정은 지방자치단체, 기관, 단체 및 개인이 개발하여 주로 개발자가 사용하는 관정으로서 공공관정을 제외한 모든 관정을 말한다.

제주도에서 개발된 공공관정에는 여타 도와는 다른 특별한 방법으로 공 번호를 지정하는데 일 예로 '동명 W-001호 공'이라 하면 동명은 W-001호 공이 위치한 지명이나 사업지구명이고, W(well)는 '70 '71년 지하수조사시 개발된 공을 말하며 마지막의 번호는 일련번호이다. 그 외에도 U, D, F, R 등이 있는데 U는 UNDP지원으로 개발된 공이며, D(domestic)는 제주도지하수개발사업에 의해 먹는

물로 개발된 공이고, F(field)는 밭기반정비개발사업에 의해 개발된 밭용수용이며, R(rural)은 농어촌생활용수개발사업에 의해 개발된 먹는물 위주의 다목적 용수로서, 각 단어의 첫 글자로 개발 목적을 나타내었다.

제 2 절 공공 지하수 개발현황

Ⅰ. 지하수 개발현황

제주도에 개발된 지하수현황을 살펴보는 것이 제주도 화산체에 있어서의 지하수 부존특성 파악에 도움이 될 것이므로 이에 대해 검토해 보았다. 제주도에서 '70년 이후 '97년까지 농어촌진흥공사가 개발한 공공관정 중 지질주상도 검층이 가능한 653공의 개발 현황은 Table 3.2와 같다.

Table 3.2 Public wells in Cheju Island by area

Classification / Area		Number of wells	Average elevation (m)	Average well depth (m)	Average bottom elevation (m)	Average water level (m)	Average yield (m^3/D)	Average draw-down (m)
Total		653	98.60	131.64	-33.04	23.67	1,163	17.19
Cheju city		75	136.50	164.15	-27.66	29.76	1,085	15.71
Seoguipo city		67	141.65	157.91	-16.17	77.29	937	35.40
Buk chejugun	Gujwa	39	82.88	103.89	-20.01	6.41	1,159	6.94
	Jocheon	41	122.54	148.28	-25.74	17.04	1,302	14.54
	Aewol	85	117.80	148.78	-30.98	12.77	1,013	13.25
	Hallim	44	97.63	126.88	-29.26	12.55	1,066	8.59
	Hankeong	70	50.41	114.83	-64.42	15.35	1,497	26.02
	Subtotal	279	95.53	130.46	-36.94	13.12	1,205	15.03
Nam chejugun	Daejeong	89	41.61	93.17	-51.56	12.67	1,442	17.04
	Andeog	33	126.81	157.44	-30.64	50.07	1,150	23.80
	Namwon	55	109.76	134.35	-24.60	25.39	1,033	15.58
	Pyoseon	26	90.27	112.32	-22.05	6.50	992	6.25
	Seongsan	29	79.00	99.05	-20.05	1.42	1,031	5.50
	Subtotal	232	80.01	114.95	-34.95	18.91	1,202	15.00

개발공을 읍면별로 보면 대정읍 지역이 89공으로 가장 많이 개발되었으며, 표선면과 성산읍 지역은 각각 26공, 29공으로 대정읍의 약 30%정도 밖에 개발되지 않았다.

Fig. 3.1에서 보면 구좌읍에서 표선면까지 지역의 공공관정은 내륙쪽으로 깊이 들어가서 분포되어 있고, 한경면과 대정읍이 위치한 서쪽지역은 해안 가까이 까지 우물이 개발되어 있다. 해안과 가장 가까운 쪽에 개발된 우물에 대한 해안까지의 평균거리는 동쪽의 구좌읍이 약 1.94㎞, 성산읍이 약 2.18㎞, 표선면이 약 1.85㎞이며, 서쪽의 한경면이 약 0.92㎞, 대정읍이 약 0.74㎞로 성산읍이 대정읍보다 약 3배 더 내륙쪽으로 들어와서 우물이 개발된 것을 알 수 있다. 이처럼 성산, 표선지역이 개발공수도 적고 내륙쪽으로 들어와서 개발된 이유는 동부지역 깊숙이 침투한 염수침입에 의한 수질악화를 방지하기 위하여 해안변에서의 지하수개발을 기피하였기 때문이다

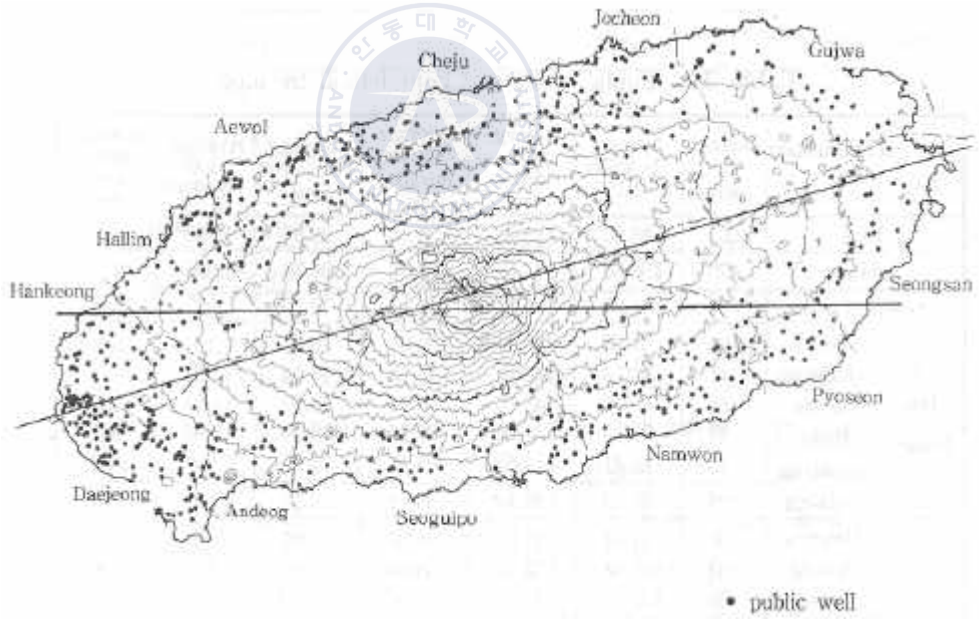


Fig. 3.1 Location of public wells in Cheju Island developed during 1970 to 1997.

연대별로 개발된 내역을 보면(Table 3.3) '70년대에 160공(25%), '80년대에 131공(20%)을 개발하였으나 '90년대에 들어와 '97년까지 8년 동안 362공(55%)을 개발하였는데 특히 '95년부터 제주도에 많은 국가예산이 투입됨으로써 이 기간에 지하수 개발이 집중되게 되었다.

Table 3.3 Description of public wells classified by developed year

Classification		Total	1970 1979	1980 1989	1990 1997
Number of wells		653	160	131	362
Elevation (m)	Average	98.60	62.71	73.54	123.53
	Maximum	442.00	214.30	314.00	442.00
	Minimum.	9.00	9.35	9.08	9.00
Well depth (m)	Average	131.64	97.46	111.10	153.95
	Maximum	460.00	222.00	230.00	460.00
	Minimum.	26.00	26.00	55.00	50.00
Water level (m)	Average	23.67	16.18	23.68	27.04
	Maximum	278.00	157.30	278.00	222.00
	Minimum.	0.00	0.03	0.30	0.00
Drawdown (m)	Average	17.19	9.57	19.11	19.79
	Maximum	184.00	85.00	67.00	184.00
	Minimum.	0.00	0.04	0.40	0.00
Yield (㎥/D))	Average	1,163	1,609	1,643	791
	Maximum	4,400	4,121	4,400	1,500
	Minimum.	500	600	700	500

개발공의 평균표고는 '70년대 EL62.71m, '80년대 73.54m이었으나 '90년대에 들어와 123.53m가 되었고, 최대표고도 각각 EL214.30m, 314.00m, 442.00m로 점점 고지대로 개발이 진행되어짐을 알 수 있다. 연대별 개발심도 역시 평균 97.40m, 111.10m, 153.90m, 최대 222.00m, 230.00m, 460.00m로 최근으로 올수록 더욱 깊게 개발하고 있다. 그러나 개발공의 1일 평균 양수량은 '70년대 1,609㎥에서 '80년대에 1,643㎥으로 다소 늘어나다가 '90년대에 들어와 791㎥으로 급격히 감소하였다. 최대 양수량 역시 1일 4,121㎥에서 4,400㎥으로 늘어나다가 1,500㎥으로 감소하였으며, 최소 양수량의 증감도 1일 600㎥, 700㎥, 500㎥으로 동일한 경향을 보인다.

Table 3.4 Description of public wells classified by well head elevation

Classification \ Elevation		Total	0 50.00 m	50.01 100.00 m	100.01 200.00 m	200.01 300.00 m	300.01 400.00 m	400.01m over
Number of wells		653	206	195	180	63	7	2
Well depth (m)	Ave.	131.64	80.16	101.98	169.19	257.65	297.85	395.00
	Max.	460.00	153.00	222.00	244.00	339.00	360.00	460.00
	Min.	26.00	26.00	35.50	110.00	92.00	100.00	330.00
Bottom elevation (m)	Ave.	-33.04	-49.51	-30.82	-25.35	-16.75	24.00	41.00
	Max.	-122.00	-120.88	-122.00	-99.00	-59.00	-19.00	-30.00
	Min.	214.00	-6.66	22.88	63.00	122.30	214.00	112.00
Water level (m)	Ave.	23.67	6.26	12.66	35.93	64.18	126.57	152.50
	Max.	278.00	47.00	58.26	145.27	177.00	278.00	160.00
	Min.	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	56.00	145.00
Yields (m^3/D)	Ave.	1,163	1,555	2,779	959	746	714	600
	Max.	4,400	4,400	3,881	2,800	1,339	900	700
	Min.	500	500	500	500	500	500	500
Draw down (m)	Ave.	17.19	14.60	13.07	19.96	26.53	53.71	14.00
	Max.	184.00	66.00	105.00	150.00	135.00	184.00	23.00
	Min.	0.00	0.04	0.00	0.07	1.00	7.00	5.00

이처럼 '90년대에 들어와 공당 개발수량이 크게 감소한 원인을 보면, 첫째는 '70년대에는 대체로 해안변 지역에서 지하수를 개발하였는데 최근에 와서는 해발 200m 이상의 중산간 지역에까지 지하수개발이 이루어지게 됨에 따라 개발심도가 증가함에도 불구하고 양수량이 감소하게 된 것이다. 즉, 초기에는 대수층의 수리성이 양호한 지역에서 개발하였으나 지금은 지하수의 원할한 공급을 위하여 수리성이 불량한 지역까지 개발이 많이 이루어지는 것을 뜻한다. 둘째는 초기에 개발시 표고는 62.71m 내외로 개발심도는 97.46m이었으나 '90년대 들어와 개발공의 표고가 123.53m로 높아지고 개발심도는 153.95m로 깊어졌으나, 수위강하량이 9.57m에서 19.79m로 약 10m가 하강하여(Table 3.4) 평균 양정이 57m에서 116m로 길어짐에 의한 양수능력의 부족에 의한 것이다. 세번째는 지하수 개발이 중산

간지역까지 올라감에 따른 개발심도의 증가로 비용이 급격히 증가하자 해수면 아래까지 충분히 착정하여 대수층을 확보하지 못하는 것 등이 양수량 감소의 원인일 것이다.

Fig. 3.2는 653공을 표고별로 개발심도, 개발하한심도, 수위분포, 양수량 및 수위강하량을 비교한 것으로서, 표고가 높아질수록 평균적으로 개발심도와 수위는 비례하여 증가하고 개발하한심도는 높아지는 반면 양수량은 감소하였으며, 수위강하량은 대체로 증가하다가 EL400m를 초과하여 개발된 공은 수위강하량이 급격히 적어지는데 수위강하량의 최대치에서 그 차이가 더욱 크다

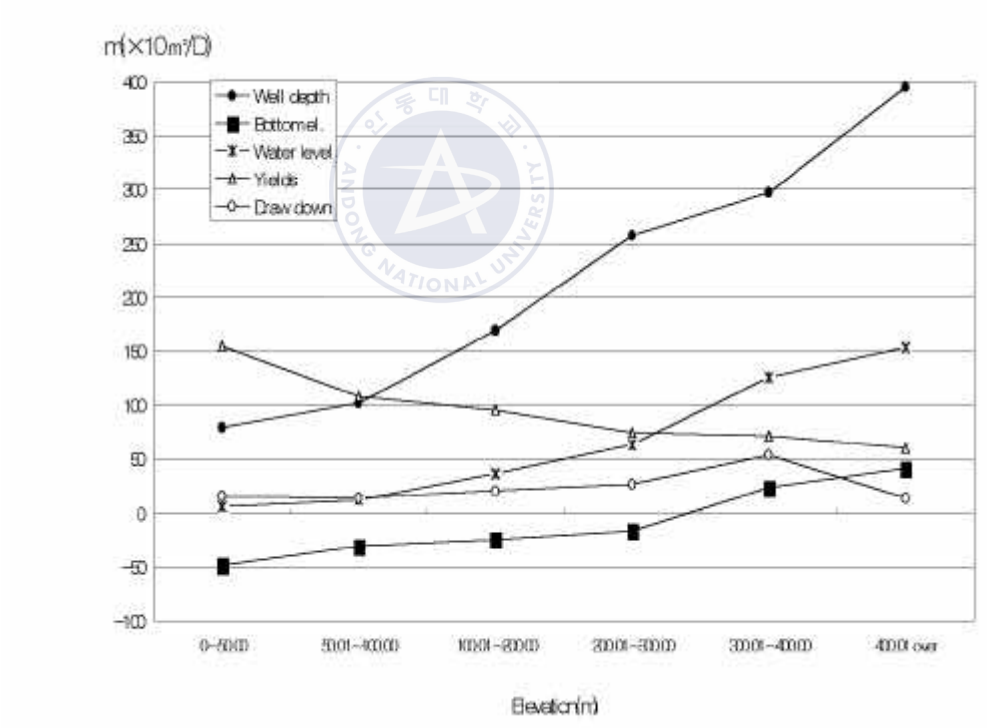


Fig. 3.2 Averaged well depth, bottom elevation, water level, yield and drawdown by the elevation of well head.

Ⅱ. 지하수 개발공의 특성

제주도 본섬 안에 개발된 공공관정 653공의 표고, 수위분포, 개발심도, 개발하한심도, 양수량 등을 평균해수면(이하 해수면)을 기준으로 각각 살펴보면, 약 32%인 206공이 표고 50m 이하에서 개발되었으며 전체의 89%인 581공이 표고 200m 이내에서 개발되었다(Table 3.5). 개발공의 표고가 가장 높은 공은 북제주군 조천읍의 교래 F-264호 공으로서 EL442.0m이고, 가장 낮은 곳에서 개발된 공은 EL9.00m에서 개발된 북제주군 한경면의 용수 F-120호 공이다.

Table 3.5 Elevation distribution of the public wells by areas in Cheju Island

(Unit : Number of wells)

Area \ Elevation		No.of wells	0 50 m	50.01 100 m	100.01 200 m	200.01 300 m	300.01 400 m	400.01 m over	Ave. (m)	Max. (m)	Min. (m)
Total		653	206	195	180	63	7	2	98.60	442.00	9.00
Cheju city		75	10	18	28	19	-	-	136.50	300.00	15.00
Seoguipo city		67	7	17	28	13	2	-	141.65	323.00	14.04
Buk chejugun	Gujwa	39	9	22	6	1	1	-	82.88	305.00	12.02
	Jocheon	41	13	10	9	5	3	1	122.54	442.00	10.32
	Aewol	85	21	25	26	13	-	-	117.80	288.00	9.35
	Hallim	44	16	10	13	4	1	-	97.63	312.00	13.84
	Hankeong	70	43	16	11	-	-	-	50.41	147.00	9.00
	Subtotal	279	102	83	65	23	5	1	95.53	442.00	9.00
Nam chejugun	Daejeong	89	62	25	2	-	-	-	41.61	125.00	9.08
	Andeog	33	8	3	18	3	-	1	126.81	430.00	15.33
	Namwon	55	6	21	24	4	-	-	109.76	273.00	18.42
	Pyoseon	26	5	12	8	1	-	-	90.27	205.00	25.45
	Seongsan	29	6	16	7	-	-	-	79.00	149.00	24.47
	Subtotal	232	87	77	59	8	-	1	80.01	430.00	9.08

개발공의 개발당시 수위는 EL50.01m 이하가 563공으로 86%나 되며 EL1.0m 이하가 59공으로 9%이다. 평균수위는 동 측의 성산읍지역이 EL1.42m로 가장 낮고, 남측의 서귀포시 지역이 EL77.29m로 가장 높이 형성되어 있다. 수위가 가장 높은 곳은 서귀포시의 상효 F-036호 공으로 EL278.0m이고, 가장 낮은 곳은 남제주군 성산읍의 난산 D-316호 공 등 16공으로서 해수면과 같다(Table 3.6).

Table 3.6 The groundwater level distribution of the public wells by areas in Cheju Island

(Unit : Number of wells)

Area \ Water level		0 1.00 m	1.01 5.00 m	5.01 10.00 m	10.01 20.00 m	20.01 50.00 m	50.01 100.00 m	100.01 200.00 m	200.01 300.00 m	Ave. (m)	Max. (m)	Min. (m)
Total		59	176	90	111	127	61	27	2	23.67	278.00	0.00
Cheju city		1	4	10	23	20	15	1	-	29.76	114.60	0.50
Seoguipo city		-	5	2	4	16	18	20	2	77.29	278.00	1.14
Buk chejugun	Gujwa	10	21	5	-	1	2	-	-	6.41	74.00	0.00
	Jocheon	5	20	6	2	3	3	2	-	17.04	160.00	0.00
	Aewol	3	22	21	24	14	1	-	-	12.77	73.15	0.00
	Hallim	5	11	12	10	5	1	-	-	12.55	76.00	0.18
	Hankeong	3	23	11	12	17	4	-	-	15.35	66.89	0.00
	Subtotal	26	97	55	48	40	11	2	-	13.12	160.00	0.00
Nam chejugun	Daejeong	12	19	16	22	20	-	-	-	12.67	47.50	0.10
	Andeog	-	6	2	-	11	12	2	-	50.07	145.00	0.00
	Namwon	2	15	4	8	19	5	2	-	25.39	125.00	0.00
	Pyoseon	4	14	1	6	1	-	-	-	6.50	32.50	0.00
	Seongsan	14	15	-	-	-	-	-	-	1.42	5.00	0.00
	Subtotal	32	69	23	36	51	17	4	-	18.91	145.00	0.00

제주도에서의 지하수위는 강수량의 다소, 조석, 양수량, 개발하한심도, 대수층의 지질이나 지하수 부존상태에 따라서 일별 혹은 월별로 높이가 달라지므로 개발당시에 측정된 수위값으로 수위분포 상태를 분석하기에는 무리가 있으나, 개발공 전체의 지하수위를 일시에 다시 측정하기가 어려우므로 개발당시 측정한 값을 그대로 분석하여 보았다. Fig. 3.3에서처럼 대부분의 지역에서 표고의 높고 낮음과 수위의 높고 낮음이 비슷한 양상을 보이고 있다.

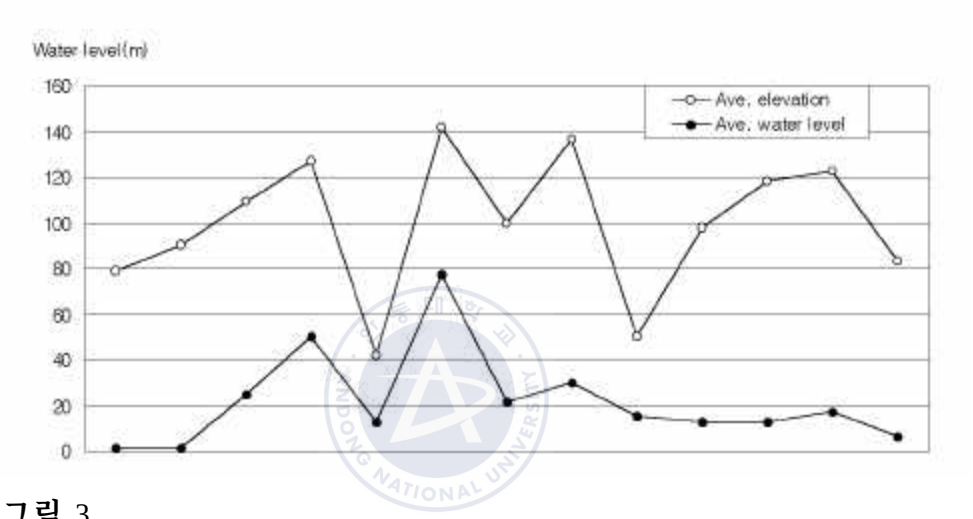


그림 3

Fig. 3.3 The relationship between elevation and groundwater level of the public wells by areas in Cheju Island at the time of development.

기존의 지하수 개발공에 대한 수위자료를 보면 수위가 평균 해수면 아래 수 m에 위치하는 공이 다수 나타난다. 이는 과거 지하수 개발 당시에는 지금처럼 정밀한 지형도가 없었고, 찾기 쉬운 건물이나 도로 등의 개발이 덜되어 우물 위치를 정확하게 지형도에 기입하지 못하였거나, 부주의로 인하여 표고 혹은 수위를 지질주상도나 보고서에 기재할 때 잘못 기재한 결과일 것이며, 이로 인하여 제주도에서의 지하수 부존특성이 부적절하게 해석되는 오류가 있었다. 그러나 수위가 EL1m 이하인 공이 59공이나 되므로 강수에 의한 연간 수위변화량과 조석에 의한

일변화량을 감안할 때 갈수기의 건조시에 수위가 해수면 아래에 위치할 가능성이 있다. 그러므로 이런 공에 대해서는 정밀한 수위조사와 수질검사를 지속적으로 시행하여 해수의 침입을 사전에 방지하여야 할 것이다.

지하수 개발은 심도 50.1 100.0m까지가 264공, 100.1 200.0m까지가 266공 등 50.1 200.0m까지가 530공으로 81%가 200.0m 이내로 개발되었다. 개발된 공의 평균심도는 131.5m이고, 가장 깊이 개발된 공은 '97년에 남제주군 안덕면에다 개발한 동광·광평 F-296호 공으로 심도가 460.0m이었으며, 가장 얕게 개발한 공은 '70년과 '71년에 개발한 북제주군 애월읍의 애월 W-006, 조천읍의 함덕 W-029호 공 등 2공으로 26.0m만 개발하였다(Table 3.7).

Table 3.7 Well depth of the public wells by areas in Cheju Island

(Unit : Number of wells)

Area \ Well depth		0 50.0 m	50.1 100.0 m	100.1 200.0 m	200.0 300.0 m	300.1 400.0 m	400.1 m over	Total (m)	Ave. (m)	Max. (m)	Min. (m)
Total		25	264	266	85	12	1	85,963	131.6	460.0	26.0
Cheju city		2	13	37	22	1	-	12,312	164.1	320.0	42.5
Seoguipo city		2	19	30	15	1	-	10,581	157.9	222.0	35.5
Buk chejugun	Gujwa	4	23	10	1	1	-	4,052	103.8	320.0	35.0
	Jocheon	3	14	12	7	5	-	6,080	148.2	360.0	26.0
	Aewol	3	28	33	20	1	-	12,647	148.7	339.0	26.0
	Hallim	2	21	13	5	3	-	5,583	126.8	320.0	34.0
	Hangeong	1	35	32	2	-	-	8,039	114.8	220.0	50.0
	Subtotal	13	121	100	35	10	-	36,400	130.4	360.0	26.0
Nam chejugun	Daejeong	1	61	27	-	-	-	8,293	93.1	140.0	47.6
	Andeog	1	6	20	5	-	1	5,196	157.4	460.0	47.5
	Namwon	1	21	26	7	-	-	7,390	134.3	280.0	27.5
	Pyoseon	2	10	13	1	-	-	2,921	112.3	230.0	43.0
	Seongsan	3	13	13	-	-	-	2,873	99.0	170.0	41.0
	Subtotal	8	111	99	13	-	1	26,671	114.9	460.0	27.5

또한 개발하한심도는 해수면을 기준으로 EL(-)20.1 (-)50.0m까지 개발된 공이 322공으로 거의 절반인 49%이고, 해수면 상부에서 개발이 종료된 공은 서귀포시 11공 등 총 19공으로 3%밖에 되지 않는다(Table 3.8).

이 중 서귀포시 중문 D-111호 공은 표고가 EL100.0m 인데 EL(-)122.0m까지 개발되었으나, 서귀포시의 상효 F-036호 공은 표고가 EL314.0m이나 개발심도는 100.0m로서 EL214.0m 깊이까지만 개발되었다.

Table 3.8 Bottom elevation of the public wells by areas in Cheju Island

(Unit : Number of wells)

Area \ Bottom elevation		0.0m until	-0.1 -10.0 m	-10.1 -20.0 m	-20.1 -50.0 m	-50.1 -100.0 m	-100.1 m below	Ave. (m)	Max. (m)	Min. (m)
Total		30	67	127	282	140	7	-33.0	+214.0	-122.0
Cheju city		4	5	14	47	5	-	-27.6	+5.3	-99.0
Seoguipo city		11	10	12	26	6	2	-16.2	+214.0	-122.0
Buk chejugun	Gujwa	9	5	25	-	-	-	-20.0	-1.6	-40.0
	Jocheon	1	7	6	22	4	1	-25.7	+112.0	-120.8
	Aewol	-	6	19	49	11	-	-30.9	-2.0	-97.7
	Hallim	-	4	5	33	2	-	-29.2	-8.0	-56.1
	Hankeong	-	-	1	12	55	2	-64.4	-12.6	-110.8
	Subtotal	10	22	56	116	72	3	-36.9	112.0	-120.8
Nam chejugun	Daejeong	-	2	4	32	50	1	-51.5	-8.7	-113.2
	Andeog	-	5	8	13	6	1	-30.6	-2.0	-109.6
	Namwon	3	6	12	33	1	-	-24.6	+8.7	-77.0
	Pyoseon	-	3	8	15	-	-	-22.0	-5.0	-39.0
	Seongsan	2	14	13	-	-	-	-20.0	-8.1	-37.0
	Subtotal	5	30	45	93	57	2	-34.9	8.7	-113.2

Fig. 3.4는 읍면별 공공관정의 평균 개발심도와 개발하한심도를 비교한 것이다. 개발심도가 100m 내외인 동부지역의 구좌읍, 성산읍, 표선면 지역은 개발하한심도가 (-)20m 내외인데 비하여, 남부의 대정읍과 북부의 한경면 지역은 개발하한심도가 (-)50 (-)60m 이하로 30 40m의 차이가 있다.

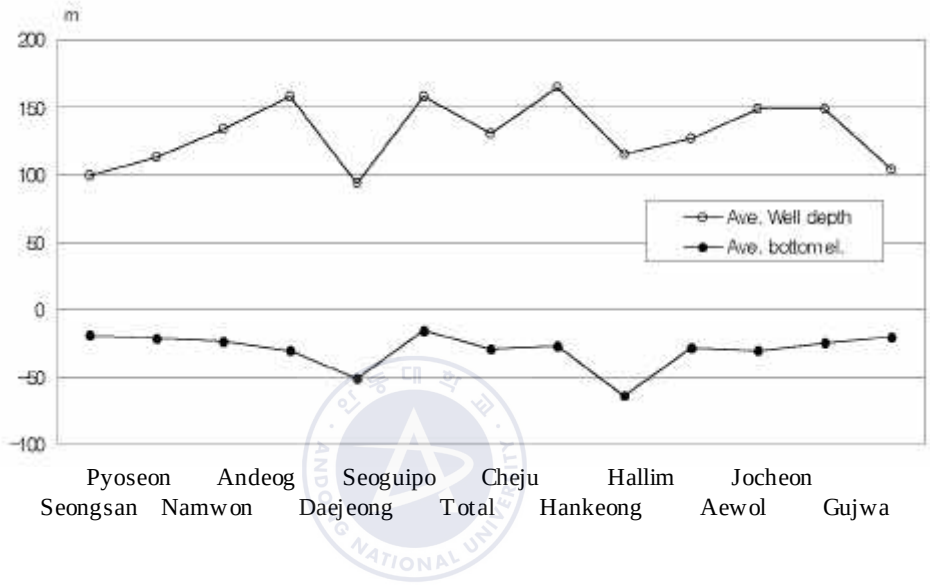


Fig. 3.4 The relationship between average well depth and bottom elevation of the public wells by areas in Cheju Island.

개발된 양수량은 1일 501 1,000㎥까지가 379공으로 58%를 차지하며(Table 3.9), 북제주군 한경면의 고산10 D-155호 공이 1일 4,400㎥으로 가장 많고, 서귀포시 신효 D-289호 공 등 11공이 500㎥으로 가장 적다.

Fig. 3.5는 읍면별 공당 개발 수량을 비교한 것으로 대정읍, 한경면 및 조천읍에 개발된 관정의 양수량이 다른 읍면에 비하여 평균 300 500㎥ 정도가 많은 것을 알 수 있다. 이것은 동부 해안지역은 대수층의 투수성은 좋으나 수위가 낮고 해수면 이하의 대수층이 해수와 직접 접하므로 개발심도를 충분히 깊게 하지 못하기 때문이며 그로 인하여 채수량을 증가시키지 못하게 되는 것이다.

Table 3.9 The distribution of yield of the public wells by areas in Cheju Island

(Unit : Number of wells)

Area \ Yield		No. of wells	500 ㎥/D below	50 1,000 ㎥/D	1,001~ 1,500 ㎥/D	1,501~ 2,000 ㎥/D	2,001~ 3,000 ㎥/D	3,001~ 4,000 ㎥/D	4,001 ㎥/D over	Total (㎥/D)	Ave. (㎥/D)	Max. (㎥/D)	Min. (㎥/D)
Total		653	11	379	125	78	54	4	2	759,293	1,163	4,400	500
Cheju city		75	2	44	17	11	1	-	-	81,396	1,085	2,800	500
Seoguipo city		67	7	37	16	4	3	-	-	62,806	937	2,100	500
Buk cheju -gun	Gujwa	39	-	23	8	5	2	1	-	45,211	1,159	3,308	600
	Jocheon	41	1	24	6	3	6	-	1	53,399	1,302	4,121	500
	Aewol	85	1	54	20	7	3	-	-	86,063	1,013	2,300	500
	Hallim	44	-	30	6	6	2	-	-	46,895	1,066	2,030	600
	Hankeong	70	-	33	12	6	15	3	1	104,757	1,497	4,400	600
	Subtotal	279	2	164	52	27	28	4	2	336,325	1,205	4,400	500
Nam cheju -gun	Daejeong	89	-	34	18	22	15	-	-	128,301	1,442	3,000	600
	Andeog	33	-	24	3	2	4	-	-	37,963	1,150	2,910	600
	Namwon	55	-	37	11	5	2	-	-	56,825	1,033	2,200	600
	Pyoseon	26	-	19	4	2	1	-	-	25,788	992	2,060	600
	Seongsan	29	-	19	4	5	-	-	-	29,889	1,031	2,000	600
	Subtotal	232	-	134	40	36	22	-	-	278,766	1,202	3,000	600

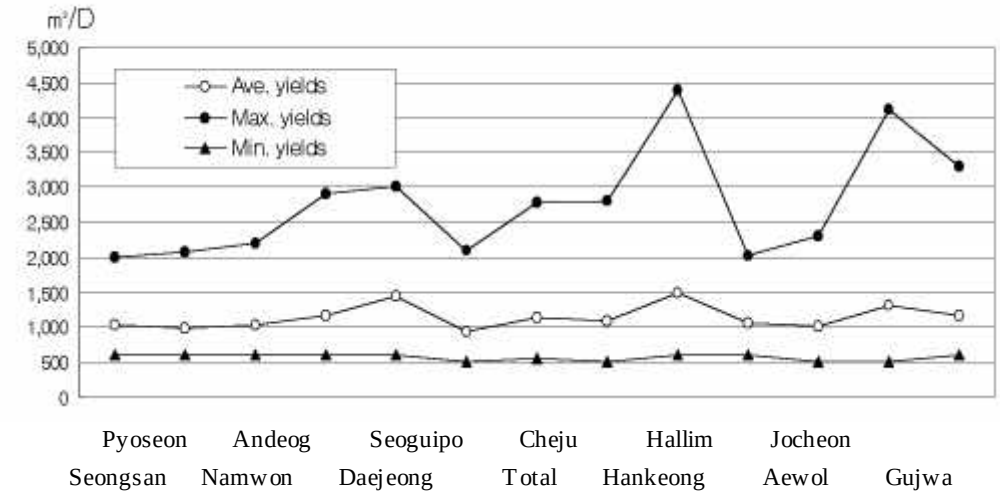


Fig. 3.5 The maximum, minimum and average yield of the public wells by areas in Cheju Island.

제 3 절 지하수위와 지질

Ⅰ. 지하수위 분포양상과 동수구배

1. 지하수의 수위분포양상

지하수(groundwater)는 "지하의 지층이나 암석 사이의 빈틈을 채우고 있는 물(지하수법, 1994)", "포화지층이나 포화대 안에 저류된 물(Todd, D.K.)", "포화지층이나 토양의 지하수면 하부에 부존된 표면하의 물(John Cherry)", "지표면 하부의 물 중 표면하수에서의 압력이 대기압보다 큰 부분, 즉 공극이 완전히 물로 충진된 포화대 내를 채우고 있는 물(농어촌진흥공사, 1996)" 등으로 정의하고 있다.

대수층(aquifer)이란 우물이나 샘을 통해 상당한 양의 물을 산출할 수 있는 투수성이 양호한 포화된 층으로서, 지하수를 저장하거나 이동시킬 수 있는 능력을 포함한다. 또한 대수층의 투수능력은 10^{-2} ㎝/sec 이상으로서, 미고결된 모래나 자갈층, 사암, 석회암, 용암류, 파쇄된 화성암류나 변성암류 등에 발달되어 있다. 대수층은 형태에 따라 피압대수층(confined aquifer), 자유대수층(unconfined aquifer) 및 주수대수층(perched aquifer)으로 구분되며, 투수도에 따라 투수층(permeable layer)과 불투수층(impermeable layer)으로 나누고 불투수층은 반대수층(aquitard), 난대수층(aquiclude) 및 비대수층(aquifuge)으로 구분된다. 반대수층은 지하수를 저장할 수 있는 저투수성 층으로서 지하수가 다른 대수층으로 서서히 누수되거나 이동하는 층이며, 충분한 두께를 가지고 있으면 지하수의 저류지 역할을 하게되는 층으로, 이에는 사질점토가 있다. 난대수층은 포화상태로 되어 있으나 투수성이 불량하여 충분한 양의 지하수를 산출할 수 없는 층으로서, 점토층이 이에 해당한다. 비대수층은 지하수를 포함하기도 어렵고 이동도 불가능한 불투수성 지층으로 신선한 화강암 등이 이에 해당된다.

수위(water level) 혹은 지하수위(groundwater level)는 수면의 위치를 말하며, 이는 보통 수면의 해발고도(평균 해수준고)로 나타내며 수두(hydraulic head)라고

도 한다. 자연수위(natural water level)는 자연상태의 수위를 말하며, 수면의 위치를 지면에서의 깊이로 나타낸 것으로서 지면에서 수면까지의 깊이(depth to water table)이다.

지하수면(groundwater table)은 우물 속에 나타나는 수면으로서 지하수의 노두와 같으며 지하수 노두에는 자연적인 천(spring)과 인공적인 우물(well)이 있다. 자유대수층에 부존하는 지하수가 자유지하수(Free groundwater)로서 지하수면이 흙의 간극을 통하여 대기와 직접 접하고 있다. 정지된 지하수면은 지하수의 수압과 대기압이 평형을 유지하고 있는 것을 의미하며 자유지하수면은 수압이 대기압과 동등한 특수 정수압면이다. 단, 피압지하수의 경우, 우물의 수면은 지하수체의 상면(上面)을 나타내는 것이 아니고 피압수두(piezometric head)를 나타내는 것이므로 수위라 하지 않고 압력수두(pressure head)라 한다.

지하수위등고선도 혹은 수위등고선도(water table map)는 자유지하수에서 지하수위가 동일한 지점을 연결하여 작성한 등고선도를 말하며, 지하수위의 운동방향은 항상 수위등고선에 직각방향으로 흐른다. 피압지하수의 지하수면은 압력에 의하여 수위가 상승한 정수압면(potentiometric surface)으로 나타나므로 자유지하수와 같은 방법으로 지하수위등고선도를 작도할 수 없으나, 정수압면을 연결하면 등수두선도(equipotential line map)로 나타내어진다. 깊이에 따라 수두의 변화가 큰 대수층에서는 특정한 단면이나 지층을 한정하여 정수압면을 작도하여야 하며 이를 내압수면(piezometric surface)이라 한다.

자유대수층이나 피압대수층에 우물을 개발할 경우 자유지하수의 수위는 대기압에 의해 일반적으로 지표면 아래에 있으나, 피압지하수는 정수압면이 높게 형성되는 피압우물(artesian well)을 형성하거나 우물의 정수압면이 지표면 위에 있어 우물에서 지하수가 자연히 용출하는 자분정(flowing well)을 형성하게 된다.

Fig. 3.6은 자유대수층에 형성된 일반적인 지하수면, 가압층에 의해 형성된 피압대수층의 피압수두와 내압수면, 불투수층 위에 부존하는 주수대수층의 주수면(perched water table)과 이들 각 대수층에 개발된 우물의 지하수 산출상을 보여주는 것이다. 이 그림에서 자유대수층(B) 보다 아래에 있는 피압대수층(A)의 수위가 자유대수층의 지하수면 보다 높은 곳에 위치하고 있는 것을 알 수 있으며 이 피압

대수층의 정수압면은 상부가압층(C)의 바닥면이 된다.

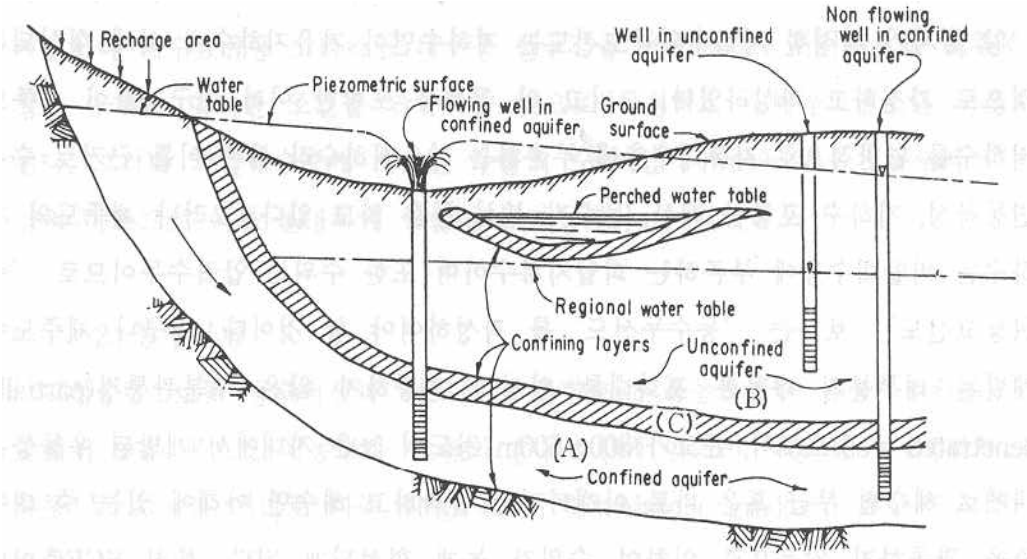


Fig. 3.6 Types of wells and aquifers(Ground Water Manual, 1981)

지하수위를 측정한 후 수위등고선도를 작성, 분석하여 제주도 지하수의 특성을 파악하려는 시도가 몇 차례 있었다. '89년에 농업진흥공사가 200공의 지하수 개발공을 대상으로 수위를 측정한 후 1회 수위등고선도를 작성하였으며(농림수산부 외, 1989), '93년에는 한국수자원공사가 150공을 대상으로 개발당시의 수위와 4월과 10월에 수위측정한 결과를 이용하여 3회(건설부 외, 1993), 그리고 '95.2월과 7월에 158공을 대상으로 수위측정한 결과를 분석하여 2회(한국수자원공사, 1995) 등 총 6회의 수위등고선도를 작성하였다.

농업진흥공사는 수위 측정 결과를 개발 당시와 비교하여 30공은 수위가 평균 5.9m 상승하였으나 61공은 평균 5.9m 하강한 것으로 분석하였으며, 전체적으로 지하수 유동방향은 해안을 향해 있고, 지형에 많은 지배를 받고 있는 것으로 파악하였다. 한국수자원공사는 수위 측정 결과를 개발 당시 수위와 비교하여 '93.4월 수위는 평균 4.85m 하강하였으며, 10월에는 남부지역만 평균 4.39m 하강하고 그 외 지역은 수위가 상승한 것으로 보고하였다. '95년의 조사결과 도 안의 모든 측정공

에서 갈수기인 '93.4월과 '95.2월의 평균수위는 개발 당시의 평균수위보다 낮았으나 풍수기인 8월에서 10월에는 수위가 높아지는 것으로 파악하였다.

양 공사가 작성한 지하수위등고선도는 지하수면이 자유지하수에 의해 형성되는 것으로 가정하고 작성하였다. 그리고 양 공사를 포함한 여러 연구자들이 제주도 지하수를 일반적으로 자유대수층에 부존하는 자유지하수라 하며 이를 근거로 수위 변동특성, 지하수 포장량 계산, 물수지 분석 등을 하고 있다. 그러나 제주도의 지하수는 피압대수층에 부존하는 피압지하수이며 또한 수위는 압력수두이므로 '수위등고선도' 보다는 '등수두선도'를 작성하여야 할 것이다. 더구나 제주도에 개발된 대부분의 우물은 포화대를 완전히 관통하지 않은 부분관통정(partially penetrated well)으로서, 표고가 300 500m 정도의 높은 지대에서 개발된 우물들은 대체로 해수면 부근 혹은 바로 아래까지만 굴착하고 해수면 아래에 있는 주 대수층을 관통하지 않음으로 인하여 수위가 높게 형성되게 된다. 특히 SGF층이나 SSF층 등의 저투수성 퇴적층이 해수면 부근이나 상부에 형성된 지역은 수위가 해수면 보다 매우 높게 형성되는데, 이 층 상부에 양호한 대수층이 없으면 이 층 사이에 퇴적된 미고결층에 부존된 지하수를 채수 하거나 하부의 USF층까지 굴착하여야 충분한 수량을 확보할 수 있으므로 이런 지역에서는 상부 가압층에 의해 수위가 매우 상승하는 압력수두를 형성하게 된다. 일반적으로 지하수 개발시 대수층이 한 개의 층으로 이루어진 곳은 거의 없다. 대부분의 대수층이 4 5개의 분리된 층으로 구성되어 있으며 대수층들은 2차 구조에 의해 형성된 절리 등으로 인하여 일부는 서로 연결되기도 하지만 대체로 화산암이나 저투수성 퇴적층, 고토양층, 점토층 등에 의해 사이가 단절되어 있으므로 지하수 개발시 주 대수층의 위치, 스크린 설치방법 혹은 굴착심도에 따라 수위가 달라질 수 있다. 이러한 것은 제주도내 여러 지역에서 굴착이 진행되는 동안 수위가 수 십 m씩 하강하기도 하며, 저투수성 퇴적층내의 대수층이나 현무암 사이의 지하수를 포함한 스코리아층, 크링커층 또는 조립의 화성쇄설층 등까지 굴착할 경우 반대로 수위가 몇 m에서 수 십m씩 상승하기도 하는 것으로 보아 알 수 있다.

이처럼 제주도 지하수는 자유지하수가 아니고 피압지하수이므로 수위변동, 지하

수포장체의 규모와 저류량 등을 분석할 때 과거와는 다르게 해석해야 할 것이다.

이와 같은 이유로 수위등고선도는 측정된 수위가 자유지하수에 의한 것이고 우물의 공저가 포화대를 완전히 관통하였을 경우에만 유효하나 현실적으로 경제적인 여건이나 채수 효율을 고려하면 대수층 전구간을 굴착하기가 어려우므로 대부분 측정한 수위가 이러한 조건을 만족하는 것으로 가정하고 수위등고선도를 작성하게 된다. 그러나 피압대수층에 개발된 우물의 수두(압력수두)는 자유지하수의 수위와 전혀 다르므로 이를 분명하게 구분하여 작성해야 할 것이다.

2. 동수구배

지하수는 보통 등수위선과 직교하는 방향으로 유동하거나 유동하려하며, 높은 곳에서 낮은 곳으로 이동한다. 흐름의 운동방향에 있어서 지층 중 두 지점의 수압차를 두 지점의 거리로 나눈 값을 동수구배(hydraulic gradient) 혹은 수두경사라 하며 i로 표시한다.

지하수 수문의 기초가 되는 Darcy의 법칙에 의하면 (1)이 동수구배가 된다.

$$Q = A\,V, \quad V = K\,i$$

$$Q = K\,iA = KA\,\frac{h_1 - h_2}{L}$$

$$\therefore \quad i = \frac{h_1 - h_2}{L} \qquad (1)$$

Q : 양수량, K : 투수계수, A : 단면적,
h_1, h_2 : 수위, Δh : 수위차,
L : 수위 h_1 에서 h_2 까지의 거리, i : 동수구배

이것은 자유지하수에 있어서의 동수구배를 말하며, 피압지하수에서는 자유지하수에서와 같은 지하수면이 없고 등수압면이 존재한다. 피압지하수에 있어서도 유속은 압력면의 경사에 지배되며 이와 같은 압력면의 경사는 피압지하수의 보급지대와 유출지대와의 고저차에 의해 결정되고 있다. 따라서 이 고저차를 거리로 나

누면 압력면의 경사가 된다.

농업진흥공사(1989)는 제주도의 동수구배를 산정함에 있어서 수위등고선도와 지층 등을 고려하여 동부 0.0007 0.0011, 서부 0.008, 남부 0.042, 북부 0.049로 북부가 가장 크고 동부가 가장 완만한 것으로 분석하였으며 평균 0.0017이 된다 하였다.

Choi, S.H.(1990)은 본도의 동수구배는 지형의 경사와 유사한 경사를 갖는데 동북부에서는 동수구배가 0.036이며 남부는 이보다 훨씬 크다고 하였다.

한정상 외(1994)는 동부지역의 조천, 구좌, 성산, 표선, 남원수역 관정 71공의 동수구배를 구한 결과 평균 약 0.00144로 산출하였다.

개발 당시의 지하수위를 이용하여 공공관정이 개발된 표고인 450m까지의 동수구배를 구해 보면 제주도 동수구배의 평균은 0.00771이었으며, 지역별로는 서귀포시지역이 0.02889로 가장 크고, 성산지역이 0.00043으로 가장 작았다.

Table 3.10 The hydraulic gradient distribution by areas in Cheju Island

Classification / Area		Number of wells	Elevation (m)	Distance from coast (m)	Water level at confined aquifer (m)	Hydraulic gradient at confined aquifer
Total average		653	98.60	3,175	23.67	0.00771
Cheju city		75	136.50	3,624	29.76	0.00801
Seoguipo city		67	141.65	2,582	77.29	0.02889
Buk chejugun	Gujwa	39	82.88	3,512	6.55	0.00129
	Jocheon	41	122.54	3,754	17.04	0.00294
	Aewol	85	117.80	2,937	12.77	0.00571
	Hallim	44	97.63	3,125	12.55	0.00374
	Hankeong	70	50.41	3,062	15.35	0.00504
	Subtotal	279	95.53	3,197	13.16	0.00420
Nam chejugun	Daejeong	89	41.61	2,732	12.67	0.00446
	Andeog	33	126.81	3,769	50.07	0.01293
	Namwon	55	109.76	3,058	25.01	0.00805
	Pyoseon	26	90.27	3,854	1.41	0.00143
	Seongsan	29	79.00	3,788	1.33	0.00043
	Subtotal	232	80.01	3,157	18.83	0.00570

동수구배는 653공의 공공관정 자료를 Arc/View프로그램을 이용하여 구하였는데 (Table 3.10), 해안선에서부터 각 관정의 수위를 최단거리로 연결하여 해안거리를 산출해내고 이를 바탕으로 동수구배를 계산하였으며, 조석의 영향에 의한 수위 차나 간만에 의한 해수면의 조차는 무시하였다.

그러나 이와 같은 방법으로 동수구배를 구한 것은 피압된 지하수위를 이용한 것으므로 상위가압층의 바닥면의 수위를 적용하면 산출된 동수구배의 약 40 70%인 평균 0.00425 정도로 경사가 작아진다. 그리고 표고 200 300m 이상 지역에서 도중심부로 가면 동수구배가 급격히 상승하게 된다.

Ⅱ. 지하수위 변화

1. 지하수위 변화요인

지하수위의 변동자료는 지하수 포장체의 규모, 대수층의 성격과 능력, 지하수 유동방향 판단 및 대수층 변동 예측뿐만 아니라 총체적인 지하수 거동 파악을 통한 지역별 지하수 개발 가능량을 설정하는데 필수적인 기본자료가 된다.

지하수위 변동은 증발산, 대기압·강우·바람·서리 등의 기상현상, 조석현상, 도시화, 지진 및 외적하중 등의 요인에 의하여 발생하며, 수위의 시간적인 변화에는 장기간에 걸쳐 서서히 일어나는 변화(secular variations)와 계절적 변화 (seasonal variations) 및 단기간에 일어나는 변화(short-term variations)가 있다 (Todd, D.K., 1980).

Soki Yamamoto(1983)는 지하수위 변화의 원인을 자연현상과 인위현상의 2가지로 크게 분류하였는데 이중 자연현상에는 ①강수량, ②증발산, ③기압, ④지진, ⑤조석, ⑥호우 혹은 이상건조에 따른 하천수의 증감의 영향에 의한 변동 등이 있고, 인위적인 것에는 ①우물에서의 양수, ②상하수도 등에서의 누수, ③관개용수, ④댐에서의 방류 등에 의한 하천수의 증감, ⑤말뚝박기 등의 지하구조물 설치영향 등이 있다.

제주도에서 지하수위 변화에 가장 큰 영향을 미치는 것은 대체로 대수층의 유형과 지질구조, 강수량의 다소, 조석간만 현상, 양수량 등으로서 지역별로 매우 상이하게 나타나는데, 투수성이 큰 지하지질구조가 다른 요인과 복합하여 수위가 큰

폭으로 변화하고 있는 것으로 판단된다. 특히 강수량의 다소에 따라 지하수위의 단기적 및 계절적인 변동이 일어나며, 조석간만에 의한 1일 수위변동폭과 영향권은 지하지질구조에 따라 지역적으로 매우 다르게 나타나고 있다. 또한 지하수 함양량이나 대수층의 산출능력을 초과하는 과잉양수가 있으면 대수층 구조의 변형과 함께 수위도 큰 폭으로 하강하게 된다.

2. 지하수위와 지질

제주도에 있어서 지하수의 부존형태 및 산출상태는 지질분포와 밀접한 관계가 있는 것으로 '70년대부터 연구되었는데, 특히 SGF층의 분포고도가 지하수위의 고저에 크게 영향을 미칠뿐만 아니라 이 층이 광역적인 차수층 역할을 하고 있으며 또한 강수의 지하침투를 방해하여 지하수를 받쳐 주고 있는 것으로 판단하였다.

농업진흥공사가 '70 '71년 제주도 전역에서 시추조사를 한 결과 SGF층이 확인된 시추공에서의 수위가 SGF층이 없는 시추공의 수위보다 높이 형성되어 있는 것을 보고 SGF층이 수위 상승의 원인일 것으로 판단한(농림부와 농업진흥공사, 1971) 이후 여러 연구자가 수위분포 및 수위변화에 대하여 연구하였는데 수위의 높고 낮음과 남부나 북부지역에서의 큰 폭의 수위변화가 SGF층의 분포와 매우 밀접한 관계가 있는 것으로 주장하였다(이문원과 한규언, 1977; 고기원, 1991; 박원배, 1993; 윤선 외, 1994).

SGF층은 저투수성 퇴적층으로 광역적인 차수층 역할을 하며 또한 일부 미고결된 지층은 지하수를 저장하는 대수층이 되기도 한다.

이문원과 한규언(1977)은 자연수위와 대수층과의 연구를 통해서 SGF층의 분포심도와 지하수의 수위분포 심도는 매우 밀접한 관계가 있으며, 대수층 요인에 의해 제주도 지하수가 큰 제약을 받고 있고 G-H렌즈 자체도 대수층과 차수층의 분포상태에 따라 매우 복잡한 형태를 이룸으로 인하여 이상적인 G-H원리가 적용되지 않는다 하였다.

고기원(1997)은 제주도 지하수의 자연수위 분포, 지하수위 변동양상, 수직적인 수질조성 등에 대하여 조사한 결과를 SGF층의 지하분포상태와 연결시켜 해석한 결과 SGF층이 제주도 지하수의 부존형태를 결정짓는 가장 중요한 지질요인인 것

으로 판단하였다. 그리고 이 층의 분포여부나 분포심도가 수위형성에 지대한 영향을 미치고 있으며 지하수 부존형태와 조석이나 강우에 의한 수위변동까지 지배하고 있다 하였다.

그러나 제주도의 대수층을 지배하고 있는 지질분포는 SGF층만이 차수층을 형성하는 것은 아니고 SGF층 아래에 분포하고 있는 USF층도 지하수의 유동이 매우 어려운 층으로 차수층의 역할을 충분히 하고 있다. 그리고 화산암류의 암체는 층내에 분포하는 대수층의 수위가 상승하지 못하도록 압력을 가하고 있으며 이러한 작용을 하는 층은 점토층, 저투수성 내지 불투수성의 퇴적층도 포함된다. 이와 같은 작용이 강수, 조석 및 양수작용과 각각 상호 작용함으로써 수위는 큰 변화가 일어나며 이들이 복합적으로 작용하게 되면 더 큰 폭으로 변화하게 된다.

3. 강수에 의한 수위변화

제주도에 있어서 지하수위 변화에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 강수량이라 할 수 있다.

Table 3.11 Meteorological station of Cheju Island

Meteorological station	Elevation (m)	Observed period	Item
Seongsanpo weather office	17.5	'71.5.1	temperature, precipitation etc.
(Daejeong weather office)	19.7	'71.5.1 '88.4	〃
Cheju upper air & radar meteorological station	71.2	'88.5.1	〃
Seoguipo weather office	50.5	'61.1.1	〃
Cheju regional meteorological office	20.0	'23.5.1	〃

현재 제주도내에는 해안변에 위치한 기상청관할 관측소 4개소, 제주공항기상관측소, 우도 등 11개 무인기상자동관측소(AWS) 그리고 '92년부터 제주도 재해대책본부에서 운영 중인 24개소의 T/M우량계와 온라인망에 의한 광역 자동수취시스템의 강우관측망 등 40개소 외에 한국수자원공사에서 최근에 영실 등에 강우량계를 설치 관측조사 중이나, 그 중 10년 이상 장기 우량관측자료를 보유한 관측소는 동쪽의 성산포에 위치한 성산포기상관측소, 서쪽의 고산지역의 제주고층레이더기상대(대정읍의 대정기상관측소가 '88.5월에 이곳으로 이전되었음), 남쪽의 서귀포의 서귀포기상관측소, 북쪽의 제주시에 위치한 제주지방기상청 등 4개소에 불과하며 기타 지점은 단지 3년에서 6년 정도의 단기자료만 보유하고 있을 뿐이다. Table 3.11은 본 연구에 자료를 이용한 기상청관할 관측소의 표고, 관측기간 등이며 그 위치는 Fig. 3.10에 나타내었다.

유역면적 우량 산정방법으로는 산술평균법, Thiessen가중법, 등우선법이 있으나 제주도와 같이 우량계의 분포가 고르지 못하고 지형성 강우의 영향을 많이 받는 곳에서는 등우선법이 가장 적합한 방법(Boutwell *et al*., 1986)으로 알려져 있다. 등우선도를 이용하여 평균 강수량을 구한 바 제주도의 연평균 강수량은 1,872㎜이었다(건설부 외, 1993). 표고별 연평균 강수량은 EL200m 이하 지역이 1,625㎜, EL800m 지역이 2,779㎜이었다. 지역별로는 한라산을 기준으로 남동부 산악지역에 가장 많은 강우가 내리며 서부지방에서는 비교적 적은 양의 강우를 보이고 있다.

그러나 최근 고산 지대에 설치 관측 중인 기상청 무인 기상자동관측장비에 기록된 강수량이 년간 4,000㎜를 넘는 곳이 다수 나타나고 있다. 고산 지대의 강수는 거의 대부분이 지하로 함양되므로 이와 같은 강수량의 증가는 지하수함양율을 크게 증가시켜 지하수 개발가능량을 높일 것이므로 연평균 강수량을 재 산정 해야될 것이다. 또한 제주도는 등우선법에 의해 평균 강수량을 구할 것이 아니라 현재 설치된 우량계의 자료를 이용하여 산정해야 할 것이며, 계속적으로 우량계를 고지대까지 충분히 고르게 설치하고 이를 이용하여야 할 것이다.

Table 3.12 The average rainfall along the shoreline in Cheju Island

(Unit : ㎜)

Classification		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
Eastern	'73 '92	75	90	117	144	166	243	284	261	208	91	81	55	1,817
	'93	47	117	127	72	191	187	153	783	92	64	139	30	1,999
	'94	70	68	73	231	138	252	35	363	118	109	32	24	1,509
	'95	45	57	174	130	256	205	779	243	132	61	58	24	2,162
	'96	50	39	264	84	139	326	108	285	30	195	120	120	1,758
	'97	20	23	148	277	105	219	202	270	46	14	306	176	1,803
	'93 '97	46	61	157	158	166	238	255	389	83	88	131	75	1,846
	Average	70	84	125	146	166	242	279	286	183	91	91	59	1,825
Western	'73 '92	40	57	78	104	125	188	197	164	118	50	52	36	1,209
	'93	33	67	91	24	132	161	87	355	41	27	94	41	1,151
	'94	38	20	53	153	85	123	20	208	50	49	12	24	834
	'95	36	61	41	83	136	80	341	86	49	60	21	9	1,003
	'96	26	16	92	48	63	217	57	176	15	36	45	48	837
	'97	14	15	55	139	60	42	120	162	13	5	197	55	875
	'93 '97	29	36	66	89	95	124	125	197	34	35	74	35	940
	Average	38	53	76	101	119	175	182	170	101	47	57	36	1,134
Southern	'61 '92	58	78	111	183	215	280	285	216	164	67	76	44	1,776
	'93	50	156	182	76	240	287	221	632	81	83	112	70	2,191
	'94	55	38	61	236	213	188	62	445	133	121	33	41	1,625
	'95	45	56	179	142	371	203	790	297	71	103	22	2	2,280
	'96	59	31	187	166	120	402	120	333	22	61	85	108	1,695
	'97	19	18	96	252	125	136	235	250	33	4	282	126	1,576
	'93 '97	46	60	141	174	214	243	286	391	68	74	107	69	1,873
	Average	57	75	115	182	215	275	285	240	151	68	80	47	1,795
Northern	'60 '92	64	65	76	98	92	179	226	244	187	70	77	50	1,431
	'93	57	43	95	29	142	205	138	578	34	60	116	56	1,553
	'94	38	46	44	106	25	342	72	365	94	271	16	29	1,447
	'95	52	55	63	73	136	109	413	337	121	67	34	23	1,483
	'96	30	21	114	36	57	224	49	112	8	101	79	52	881
	'97	24	27	72	171	75	79	108	161	45	5	158	76	1,000
	'93 '97	40	38	77	83	87	192	156	311	60	101	80	47	1,273
	Average	61	62	77	96	92	181	217	253	170	74	78	50	1,402
Total	Average	56	69	98	131	148	218	241	237	151	70	76	48	1,539

농어촌진흥공사가 '97년까지 제주도 안에 설치한 37개의 수위관측공 중 가장 높은 위치는 EL153.13m로서 연동3 D-167호 관측공이며, EL100m 미만이 33개소로서 89%나 되어 대부분이 EL100m 이하에 위치하고 있어 제주도 해안지역에 설치된 기상청관할 관측소에서 측정한 강수량만으로도 각 관측공에 충분히 영향을 미칠 수 있을 것이므로 이곳에서 측정된 '60년부터 '97년 사이의 강수량 관측자료와 관측공의 수위변화를 비교하여 분석하였다. 이들 4개소에서 관측된 제주도의 38년간 연평균강수량은 1,539㎜이었고, 권역별로는 동부지역이 1,825㎜로 가장 많고 서부권역이 1,134㎜로 가장 적었으며 남부권역이 1,795㎜, 북부권역이 1,402㎜이었다 (Table 3.13). 그러나 이러한 수치는 관측소의 위치가 주로 해안변에 위치한 관측소의 기록을 산술 평균한 값으로 지형의 영향에 의한 국지적인 호우가 많은 제주지역의 연평균강수량이라 하기에는 불합리한 면이 있으며 이것은 제주지역 전체 연평균강수량보다 약 47 738㎜가 작은 97 60%에 해당한다.

'93년에서 '97년까지 최근 5년간의 강수량은 동부권역인 성산포지역이 가장 많은 1,846㎜의 강수량을 기록하였으나 서부권역인 고산지역은 4개 권역 중 가장 적은 900㎜가 내려 '94년에 이어 '96년과 '97년에 년간 800㎜대의 극심한 강수량 부족현상을 보였으며 성산포지역에 비하면 900㎜ 이상의 차이가 있다. 남부권역인 서귀포지역과 북부권역인 제주지역은 각각 1,873㎜, 1,273㎜를 기록하였다. 특히 '94년에 이어 '96년과 '97년에 연속하여 강수량이 지역별 평균 강수량의 4 37%에 해당하는 약 220 520㎜나 적은 가뭄현상이 지역별로 발생함으로써 지표를 통하여 지하로 함양되는 수량 또한 줄어들게 되어 결국 지하수위의 변화를 초래하였다. 그러나 이후에 내린 강수에 의해 수위가 즉시 원상태로 회복되는 것으로 보아 이 정도의 가뭄으로는 대수층에 장기적인 영향을 미치지 않는 것으로 여겨진다.

연도별로 차이는 있으나 강수량은 6월, 7월, 8월에 평균 232㎜가 관측되었는데 이 양은 월평균 128㎜의 1.8배 이상이나 되어 여름철에 집중적인 강수현상이 일어나는 것을 알 수 있다. 그러나 서부권역의 고산지역은 풍수기에도 강수량이 월 평균 176㎜ 이하이고 상대적으로 경지면적이 넓어 하절기 물 부족현상이 빈번히 발생하였으며, '98년 여름에는 극심한 가뭄에 수 개소의 관측공이 급수를 위하여 수위관측이 중단되는 결과를 낳아 장기적인 관측조사가 차질을 빚기도 하였다.

이처럼 강수량은 기간별 혹은 지역별로 큰 차이가 있으며 강수량의 다소에 의해 지하수위의 변화 폭과 반응기간이 지역별, 관측위치별로 차이를 보임이 많은 조사자와 농어촌진흥공사의 관측조사에 의해 확인되었다. Fig. 3.7은 제주도에서 강수량의 증감에 따라 매우 밀접하게 수위변화가 일어나는 남부권역의 신효 F-001호 관측공의 '93년에서 '97년 사이의 강수량과 수위변화와의 관계를 나타낸 것이다.

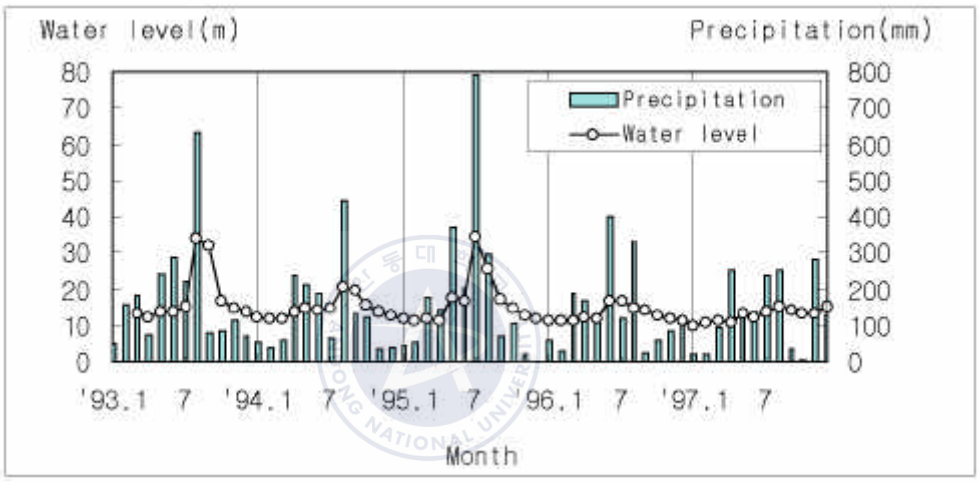


Fig. 3.7 Relationship between rainfall and water level at the monitoring well, Shinhyo F-001.

4. 조석에 의한 수위변화

조석은 달과 태양의 인력으로 해수면이 매일 두 차례씩 오르내리는 현상으로써 북쪽의 제주시와 남쪽의 서귀포시가 약 1시간의 시차를 갖는다. 또한 실측된 월별 조석 해수위 변화는 여름철이 겨울철보다 해수위가 훨씬 높다. 해안지역 대수층 안의 지하수위는 조석간만의 영향에 따라 정현곡선(Sin curve)을 그리며 변화하게 된다. 따라서 해안지역에서의 조석영향을 파악하는 것은 대수층의 특성을 규명하는 중요한 단서가 된다.

지하수위에 영향을 미치는 조석의 정도는 조석효율(Tidal efficiency ; T_E)에 의해 평가된다. 해안저까지 뻗어 있는 피압대수층의 수위는 조석수위가 상승하면 올라가고, 조석수위가 하강하면 내려간다. 피압우물의 수위변화와 조석수위변화의 비를 조석효율이라 하며 그 값은 상위가압층의 압력변화에 대한 저항력이 된다.

$$T_E = \frac{G_W}{T_w} \times 100 \quad (\%) \qquad (2)$$

G_W : 지하수위의 변화폭, T_W : 해수면의 변화폭

(2)식에서 T_W가 3m로 일정할 경우 T_E가 10%이면 지하수위는 0.3m가 변화하며, 20%이면 0.6m, 50%이면 1.5m가 변화한다. 즉, 해수면의 변화가 클 경우 조석효율이 크다는 것은 지하수위 변화 폭도 비례하여 큰 것을 말하며, 지하수위의 변화량이 많으면 조석효율도 상대적으로 높아진다.

해안에서 χ 거리에 있는 지점에서 조수의 영향을 받는 지하수위 변화 폭 h_x는 (3)식과 같이 나타내어진다.

$$h_x = h_o e^{-x\sqrt{\pi S / t_o T}} \qquad (3)$$

h_0 = 조수위 변화폭, x = 해안으로부터 내륙쪽으로의 거리,
S = 대수층의 저류계수, t_o = 조수의 주기, T = 투수량 계수

그러므로 대수층의 저류계수와 투수량계수를 알고 조수위의 변화폭을 측정하면 조수의 영향거리를 산출할 수 있다. 다만 (3)식에서 구해지는 영향거리는 지층이 균질한 자유대수층에서나 가능할 것이다. 지하수면이 흙의 간극을 통하여 대기와 직접 접하고 있는 자유지하수는 조수위의 등락에 의해 지하수위도 일정거리까지 영향이 미칠 수 있다. 그러나 제주도와 같이 해수면 위의 지층이 암반으로 분포하며 이들은 투수성이 좋다 하여도 상하로 균일하게 연결되어 있지 못하다. 또한 수

평적으로 투수성 지층과 불투수성 지층이 호층으로 분포하며, 해안에서 내륙쪽으로 직선 상에 위치하는 대수층의 저류계수와 투수량계수가 동일한 값을 갖지 않으므로 지하수위에 대한 조수의 영향거리를 구하는 것은 매우 어려울 것이다.

조석이 지하수위 변동에 어느 정도의 영향이 있는지를 알아보기 위하여 지하수위를 측정한 것은 농업진흥공사(1989)와 박원배(1992)에 의하여 이루어졌으며 또한 '91년부터 농어촌진흥공사가 제주도와 함께 현재까지 자동관측장비로 관측조사 중에 있다.

이들의 조사내용을 보면 농업진흥공사는 고산지역 3개 공의 우물(D-079, D-093, D-104)에서 자연수위변화를 측정한 후 이 지역의 수위 변화량이 0.06 0.49m이고, 평균 영향시간은 만조시 2시간34분, 간조시 2시간55분인 것으로 보고하였다. 또한 조수가 수위에 영향을 미치는 거리는 고산지역에서 약 860m가 된다 하였다.

박원배는 '92.2월 '93.2월까지 11개 공의 우물에서 매월 1회 25시간 연속 관측한 결과 동부지역의 7개 우물에서 조석에 의한 수위변화를 확인하였으며 그 중 김녕 D-140호 공의 조석효율이 34.82%로 최고였고, 수산2 D-124호 공이 10.32%로 최저였다고 하였다.

농어촌진흥공사가 '91년부터 '97년까지 관측한 총 51개의 관측공 중에서 조석의 영향을 받는 공은 23공으로서 동부 13공, 서부 6공 및 남부와 북부권역이 각 2공씩 나타나는 것으로 보고되었으며, 그 중 해안에서 1.17㎞ 떨어진 동부권역의 온평 D-030호 관측공의 1일 수위변화량이 179.3㎝로 가장 컸고(Fig. 3.8), 북부권역과 인접한 조천1광역관측공이 해안에서 2.35㎞ 떨어져 있으며 1일 수위변화량이 2.1㎝로 가장 적었다. 이와 같이 조석에 의해 수위가 변화하는 것이 확인되었으나 수위변화량이 대부분 0.5m 이하인 것으로 보아 강수나 양수에 비하여 수위변화에 미치는 영향은 적은 것으로 여겨진다.

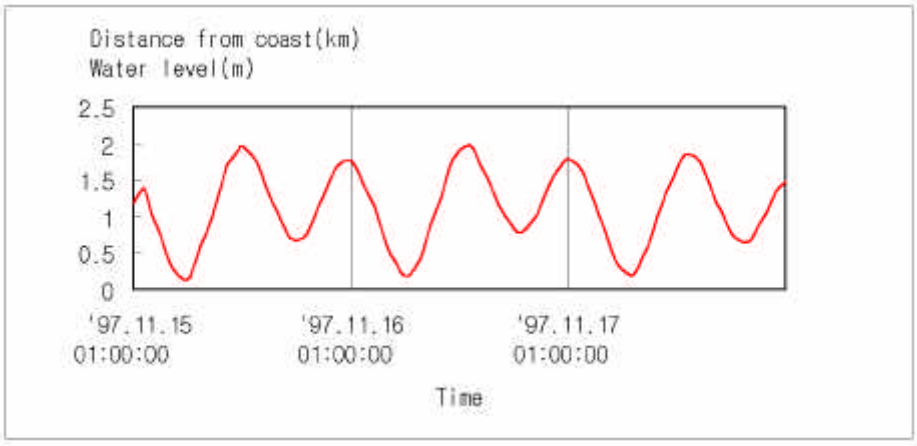


Fig. 3.8 The variation of groundwater level by tidal change at the monitoring well, Onpyong D-030.

5. 양수에 의한 수위변화

우물 속에 수중모타펌프를 설치하고 강제로 양수를 한다면 대수층의 성격, 펌프의 양수능력, 강수량의 다소 등에 의해 수위가 크게 변할 수 있다.

지하수유역에서 주어진 조건 아래 나쁜 영향이 발생하지 않는 범위 내에서 항구적으로 취수할 수 있는 양수량을 안전양수량 혹은 안정채수량(safe yield)이라 한다. 안전양수량은 대수층이 위험한 고갈을 일으키지 않고 정상적, 영속적(perennial)으로 양수되는 한계수량으로서, 지역단위 지하수유역 내에서의 총량적인 양수량 개념이므로 우물의 적정양수량과는 다르다. 안전양수량은 ①연간평균함양량 이내일 것, ②양수비용이 일정 기준 이하일 것, ③수위저하로 수질이 악화되지 않을 것, ④수리권에 저촉되지 않을 것 등의 요건을 갖추어야 한다(김영기, 1995).

적정양수량은 우물 양수 시 대수층 성질 또는 양수기 성능에 무리를 주지 않는 양수량 범위를 말한다. 자유대수층에서는 수위강하량(대수층손실량)이 포화된 대수층 두께의 ⅔에 해당되는 양수량을 적정양수량으로 정한다. 일반적으로 단계양수시험에 의하여 적정양수량을 정할 수 있으며, 계속 양수량을 증가시키면 한계양수량에 도달하게 되고 이를 초과하면 과잉양수(overdraft)가 되어 대수층의 파괴가 일어나 세립물질이 유출되거나 지하수 유로가 변경되며, 양수시 수위강하로 인한

담수체의 수축으로 인하여 해수가 상승(upconing)하게 되고 이로 인한 수질악화의 가능성이 항상 존재하기 때문에, 이로 인해 우물을 더 이상 사용할 수 없게 될 수도 있으므로 향후 과잉양수에 의한 대수층의 파괴와 과도한 수위 하강을 늘 경계하여야 한다.

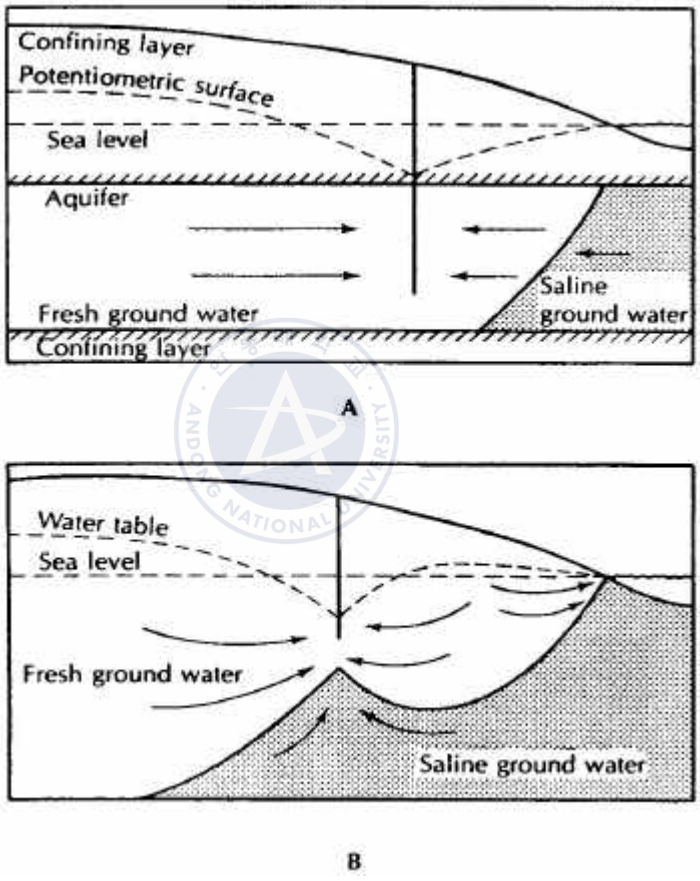


Fig. 3.9 **(A)** Active saline water encroachment in a confined aquifer with the potentiometric surface below sea level. **(B)** Active saline water encroachment in an unconfined aquifer with the water table drawn below sea level(Fetter, C.W., 1994).

제주도와 같은 도서지역에서는 과잉양수에 의한 해수침투가 현안문제로 대두되고 있다. 특히 제주도 동부지역의 해안변 일대, 북부지역의 한림읍 수원리 등에서 해수침입의 사례가 보고되어 있는데 이것이 과잉양수에 의한 것인지 지질구조에 의한 것인지 혹은 그 외의 다른 사유에 의한 것인지에 대해서는 여러가지 이견이 있다.

해안변에서는 일반적으로 염수 상부에 비중이 작은 담수가 부존하고 있으며 정적인 상태에서는 항상 평형상태를 이루고 있다. 우물에서 양수가 이루어질 경우 안정수위가 해수면 아래로 떨어지면 평형상태가 깨어지게 되는데 Fig. 3.9는 과잉양수시 피압대수층과 자유대수층에서의 일반적인 해수침입 형태를 각각 보여주고 있다. 피압대수층에서는(A) 염수가 대수층을 따라 내륙쪽으로 밀려오게 될 것이며, 자유대수층에서는(B) 염수가 해수면쪽으로 상승하게 된다. 이처럼 대수층의 한계를 넘어서는 과잉양수가 이루어질 경우 우물의 공저 위로 염수가 상승하게 되어 대수층이 염수로 오염되게 되는데, 오염된 대수층은 복구하는데 장구한 세월과 비용이 들게 될 것이다. 그러므로 해안지역이나 염수의 침입 가능성이 있는 지역에서는 양수시 수위를 해수면 이상으로 유지시키는 것이 필수적임을 명심해야 한다.

우물별로 대수층 특성에 맞는 적정한 수량을 채수 하였을 때의 수위변화 양상은 Table 3.13에서처럼 지역별로 크게 차이가 있다.

양수 시 수위강하량은 653공 중 93%인 607공이 50.00m 이하였다. 제주도 전체의 평균 수위강하량은 17.19m이었는데, 남제주군 성산읍의 난산 D-316호 공은 수위가 해수면과 동일한 EL0.00m로서 1일 700㎥으로 양수 시에도 수위가 전혀 변하지 않았으나, 서귀포시의 서홍 F-115호 공은 1일 500㎥을 양수하였으나 수위가 184.00m나 하강하였다. 시·군별로 보면 서귀포시 지역의 수위강하량이 제일 커 평균 35.40m로 도 평균의 2배 이상이나 되었고, 남제주군 성산읍 지역이 평균 5.34m로 가장 적었으며, 표선, 구좌 및 한림 지역도 각각 평균 6.25m, 6.94m, 8.59m로 10m 이하의 변화를 보였다.

이처럼 양수시 지역별로 수위강하량이 크게 차이가 나는 주된 요인은 주 대수층이 어떠한 형태로 형성되어 있는가 하는 것이다. 구좌, 성산, 표선지역의 해안지대는 대수층의 투수성이 좋으므로 수위가 낮은 반면에 양수시 수위강하량은 크지 않

으나 그 외의 지역은 해안변을 제외하고는 대부분이 피압대수층에 의한 압력수두를 형성하므로 평소에는 수위가 크게 상승하여 있으나 양수를 하면 주 대수층의 상부 가압층까지 수위가 떨어진다. 즉, 양수량의 다소 외에도 수위의 피압여부와 피압정도가 수위강하량을 결정하게 된다.

Table 3.13 The drawdown by areas in Cheju Island

(Unit : Number of wells)

Area \ Drawdown		0.00 1.00 m	1.01 5.00 m	5.01 10.00 m	10.01 20.00 m	20.01 50.00 m	50.01 100.00 m	100.01 200.00 m	Ave. (m)	Max. (m)	Min. (m)
Total		84	128	129	130	136	40	6	17.19	184.00	0.00
Cheju city		5	13	20	17	17	3	-	15.71	57.60	0.10
Seoguipo city		4	8	10	9	22	9	5	35.40	184.00	0.30
Buk chejugun	Gujwa	12	10	8	8	1	-	-	6.94	44.00	0.05
	Jocheon	9	7	11	1	11	2	-	14.54	63.00	0.07
	Aewol	11	16	19	22	15	2	-	13.25	66.00	0.04
	Hallim	7	14	9	10	4	-	-	8.59	35.60	0.10
	Hankeong	5	11	11	10	20	12	1	26.02	105.00	0.30
	Subtotal	44	58	58	51	51	16	1	15.03	105.00	0.04
Nam chejugun	Daejeong	9	14	16	17	29	4	-	17.04	55.00	0.19
	Andeog	2	8	2	8	8	5	-	23.80	90.00	0.07
	Namwon	6	8	13	17	8	3	-	15.58	83.00	0.11
	Pyoseon	6	9	5	5	1	-	-	6.25	24.00	0.17
	Seongsan	8	10	5	6	-	-	-	5.50	16.00	0.00
	Subtotal	31	49	41	53	46	12	-	15.00	90.00	0.00

양수시 일어나는 수위강하량을 해수면을 기준으로 분석한 결과 양수수위가 해수면 이하로 내려간 우물은 총 개발공인 653공 중 294공으로 45%이었고, 표고 50.0m 이하에 개발된 206공 중에서는 136공으로 각각 66%, 수위가 10m 이하인 326공 중에서는 232공으로 71%를 차지하고 있다. 이처럼 안정수위가 해수면 이하로 떨어지는 우물에 대해서는 대수층의 지질을 검토하고, 수위강하를 일으키는 여러 요인을 종합 분석한 후, 개발 당시와 우물의 상태가 달라져 해수침입의 가능성이 예견되는 우물에 대해서는 정밀한 양수시험을 실시함으로써 미리 예방하여야 할 것이다.

6. 권역별 지하수위 변화양상

가. 제주도의 권역구분

제주도를 연구함에 있어서 농업진흥공사가 '70 '71년 지하수 조사시 지질분포와 지질구조에 근거하여 제주·서부·서귀·남원·동부 및 고산지역 등 6개 지역으로 구분하여 지하수 조사를 시작한 이 후 대부분의 연구자들은 편의상 동·서·남·북의 4개 지역으로 구분하여 연구하고 있다. 그러나 각 지역의 경계는 연구자에 따라 조금씩 다르게 구분되어 있으므로 지금까지 가장 많이 사용되었던 구분방법을 간략히 기술하고 지형도에 나타내어 보았다.

농업진흥공사(1985)가 발간한 '지하수개발사'에는 제주도를 수자원 부존 및 개발 형태가 지형 및 지질여건에 따라 지역적으로 상이한 양상을 보이는 특성에 따라 4대분 하였다. 한국수자원공사(1993)는 지하수 부존특성 및 부존양상에 영향을 주는 지형, 지질, 지하수위, 등고선 등의 지하수 수리 수문 조건을 고려하여 이들이 유사한 지역을 16개 수역으로 나누고 크게는 역시 4개 지역으로 구분하였으며, 고기원(1997)은 서귀포층의 지하분포 상태를 고려하여 구분하였다.

농어촌진흥공사는 지하수 장기관측조사 결과와 분포 지질과의 관계를 분석하여 각 관측공의 수위 변화 양상이 유사한 동·서·남·북의 4개 권역으로 구분하였다(농림부 외, 1997). 이 결과 다른 조사자보다 동부지역과 서부지역의 경계선이 서편으로 이동되어 있다.

최근에 손주형(1999)은 다른 연구자들과는 다르게 제주도를 4대분 하였는데 지하수위와 표고를 코크리깅(cokriging) 하여 한림, 조천, 안덕 및 표선대수역으로 구분하였다.

본 연구에서는 농어촌진흥공사가 시행한 지하수 장기관측조사 결과를 따라서 지하수 유역을 구분하였다(Fig. 3.10). 권역별로는 동부권역에 조천읍, 구좌읍, 성산읍, 표선면 전역과 남원읍 동부 일부 및 제주시 동부 일부가 포함되고, 서부권역에는 한림읍, 한경면, 대정읍 전역과 안덕면 서부가, 남부권역에는 안덕면 동부와 서귀포시 전역 및 남원읍 대부분이, 북부권역에는 애월읍 전역과 제주시 대부분이 각각 포함된다.

고기원 외(1994)는 Haraguchi(1931)가 지질구조선으로 제시한 김녕-토산리선(Fig. 3.10 A-A')이 서귀포층의 결층선과 유사하게 나타나므로 이를 보완하여 북촌

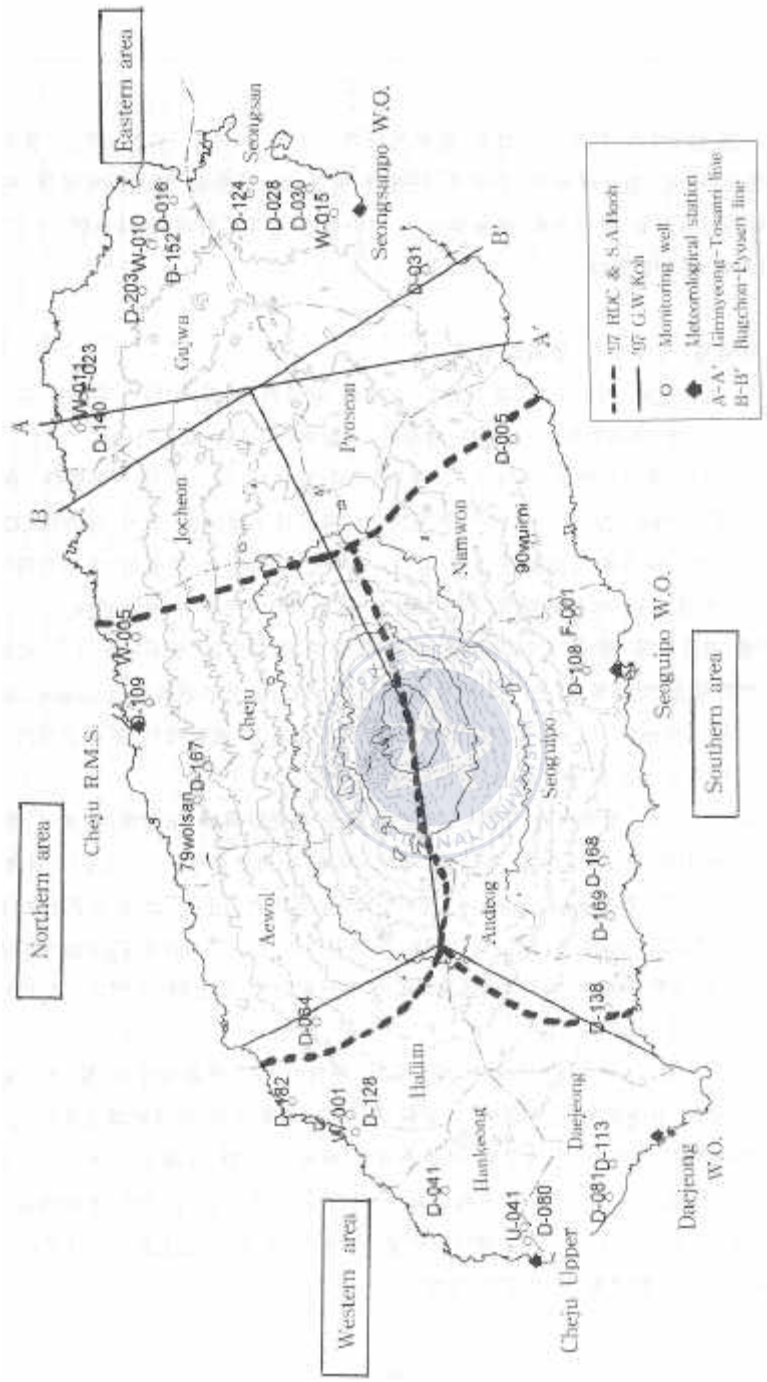


Fig 3.10 The groundwater divides of Cheju Island.

-표선선(B-B')이라 하고 이 선을 동부지역과 그 외 지역을 구분지우는 경계선으로 하였으나, 본 연구에서는 동부에 인접한 북부 및 남부의 일부지역에서 서귀포층이 나타나더라도 지하수위 변동양상이 일반적인 동부지역과 유사하면 그 지역을 동부권역에 포함하였다.

나. 권역별 지하수위 변화양상

제주도 동부권역 지하수의 염수침입 원인을 규명하기 위해서는 제주도 각 지역별로 서로 다른 지하수의 수위변화 양상을 파악하는 것이 도움이 될 것이다. 이를 위하여 지하수 장기관측조사 자료 중 '97년까지의 조사 자료를 분석하였다. 관측조사 공은 총 51개로 그 중 '93년부터 '97년 12월까지 5개년간 장기 관측된 37공에 대한 관측자료 내역은 Table 3.15와 같다. 권역별 관측공의 분포는 동부권역에 17공, 서부권역에 8공, 남부권역에 7공 그리고 북부권역에 5공이 분포한다.

권역별 관측공의 평균 해안거리와 조석에 의한 영향으로 발생하는 1일 평균 최대수위변화량을 비교하면, 동부권역은 1.91㎞에 0.43m, 서부권역은 1.14㎞에 0.11m, 남부권역은 1.76㎞에 0.15m가 변화하였으나 북부권역은 해안에서 관측공까지 가장 먼 2.74㎞이었고 1일 수위변화는 나타나지 않았다.

강수의 영향으로 발생하는 연간 수위변화량을 평균수위에 대비하여 보면 동부권역은 평균수위가 EL1.24인데 비하여 평균 최대 수위변화량은 1.72m로 관측공의 수위에 대한 수위변화율이 139%나 되지만 서부권역은 EL6.72m에 5.75m로 86%, 남부권역은 EL35.26m에 11.81m로 33%, 북부권역은 EL17.00m에 13.43m로 79%인 것으로 보아 동부권역이 다른 지역보다 연평균수위는 낮으나 수위의 연간변화율이 가장 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 3.11은 37개 관측공 중에서 제주도의 권역별 수위변화양상을 잘 비교할 수 있는 대표적인 관측공을 선정하여 비교한 것으로, 관측공의 수위변화양상은 동부와 서부권역이 서로 유사하고, 남부와 북부권역이 서로 비슷한 형태를 보여 주고 있다.

Fig. 3.12는 조석에 의한 1일 수위변화가 나타나는 관측공 중에서 권역별로 동일한 시간에 측정된 동부의 표선2광역관측공, 서부의 영락 D-081호 공, 남부의 의귀 D-005호 공의 수위를 비교한 것이다.

Table 3.14 List of the monitoring well in Cheju Island

Area	Well name	Well number	Elevation (m)	Well depth (m)	Bottom elevation (m)	Start year	Ave. water level (m)	Max. variation of water level (m)	Max. water level variance per day (m)	Water level variance ratio(%)		Distance from coast (km)	Precipitation (mm)	X-Coord.	Y-Coord.
										Rain fall	Tidal				
Ave.	**4 areas**	**37 wells**	**51.41**	**87.06**	**-35.64**		**10.64**	**6.10**	**0.32**	**57**	**3**	**1.83**	**1483**		
Eastern	Dongbok	W-011	28.95	50.00	-21.05	93.02.	0.80	1.62		203		0.76	1846	175510	55730
	Gimnyeong 2	D-140	35.85	60.00	-24.15	91.06.	1.16	1.46		126		1.15	1846	175150	55430
	Onpyeong	D-030	33.26	50.00	-16.74	94.01.	0.88	1.68	1.79	191	203	1.17	1846	190250	40860
	Jongdal	D-016	12.02	35.00	-22.98	91.06.	1.01	1.07		106		1.21	1846	189600	49390
	E.gimnyeong 2	F-023	46.33	72.00	-25.67	91.06.	0.85	1.80		212		1.52	1846	177100	55230
	Hacheon	D-031	40.95	80.00	-39.05	92.10.	1.40	4.40	0.67	314	48	1.62	1846	184970	33730
	Pyoseon 2	Pyoseon 2-O	51.55	100.00	-48.45	96.04.	1.55	0.96	0.33	62	21	1.70	1846	177795	30185
	Goseong	D-028	28.24	41.00	-12.76	93.02.	0.90	1.15	0.39	128	43	1.82	1846	190820	44390
	Nansan	W-015	40.01	55.00	-14.99	93.02.	1.05	3.20		305		1.84	1846	188651	39379
	Jongdal	D-200	52.02	75.00	-22.98	91.06.	1.07	1.75	0.19	164	18	1.91	1846	188750	49055
	Sinchon 1	Sinchon 1-O	45.69	80.00	-34.31	96.05.	1.27	0.64	0.21	50	17	2.05	1846	164135	51285
	Sangdo	W-010	29.78	50.00	-20.22	93.02.	0.87	0.91	0.44	105	51	2.31	1846	186862	50870
	Jocheon 1	Jocheon 1-O	47.99	100.00	-52.01	96.05.	2.50	0.89	0.02	36	1	2.35	1846	169995	53195
	Sangdo	D-152	40.55	60.00	-19.45	92.08.	1.69	3.37	0.55	199	33	2.49	1846	186780	50700
	Susan 2	D-124	28.65	62.00	-33.35	93.03.	1.03	1.64	0.12	159	12	2.63	1846	189960	44610
	Haengwon 1	Haengwon 1-O	88.72	120.00	-31.28	96.04.	1.39	0.68	0.26	49	19	3.00	1846	179835	53060
	Peongdae	D-203	68.08	91.00	-22.92	92.08.	1.76	2.77	0.25	157	14	3.04	1846	183870	51400
	Subtotal	**17 wells**	**42.27**	**69.40**	**-27.19**		**1.24**	**1.72**	**0.43**	**139**	**35**	**1.91**	**1846**		

Table 3.14 (Continued)

Area	Well name	Well number	Elevation (m)	Well depth (m)	Bottom elevation (m)	Start year	Ave. water level (m)	Max. variation of water level (m)	Max. water level variance per day (m)	Water level variance ratio(%)		Distance from coast (km)	Precipitation (mm)	X-Coord.	Y-Coord.
										Rain fall	tidal				
Western	Suwon	D-182	13.84	70.00	-56.16	91.06.	0.86	0.83		97		0.56	940	132270	42840
	Yeongrak 2	D-081	16.74	130.00	-113.26	92.09.	5.33	3.53	0.20	66	4	0.71	940	125920	23250
	Hyeopjae	D-128	26.13	82.00	-55.87	92.09.	9.53	3.75	0.07	39	1	0.72	940	130270	38910
	Gosan 2	D-080	18.86	82.00	-63.14	91.06.	2.39	3.68		154		0.81	940	123200	28350
	Illgwa	D-113	22.14	80.00	-57.86	92.09.	6.99	6.41	0.14	92	2	1.00	940	128020	22970
	Dongmyeong	W-001	25.05	60.00	-34.95	92.09.	8.48	6.50	0.06	77	1	1.25	940	131416	39252
	Gosan	U-041	35.32	61.00	-25.68	91.06.	1.98	3.15		159		1.70	940	124092	28499
	Panpo	D-041	35.32	61.00	-25.68	94.01.	18.23	18.18	0.09	100	0.5	2.44	940	126470	33480
	Subtotal	**8 wells**	**24.17**	**78.20**	**-54.07**		**6.72**	**5.75**	**0.11**	**86**	**2**	**1.14**	**940**		
Southern	Yeorye 2	D-169	59.41	170.00	-110.59	92.10.	22.41	1.64		7		0.90	1873	143810	22890
	Hwasun	D-138	67.21	90.00	-22.79	94.01.	37.35	11.16	0.08	30	0.2	1.38	1873	137950	23160
	Jungmun	D-168	113.17	130.00	-16.83	95.03.	73.12	11.62		16		1.70	1873	147260	23270
	Wuimi	'90Wuimi	102.00	130.00	-28.00	95.03.	28.02	9.43		34		1.89	1873	151340	47320
	Seohong 3	D-108	73.16	100.00	-26.84	92.10.	54.76	19.94		36		1.91	1873	159370	24130
	Sinhyo	F-001	53.51	130.00	-76.49	91.06.	14.95	24.57		164		2.14	1873	163090	24550
	Eugui	D-005	66.61	90.00	-23.39	94.01.	3.38	4.34	0.22	128	7	2.43	1873	174060	28440
	Subtotal	**7 wells**	**76.43**	**120.00**	**-43.56**		**35.26**	**11.81**	**0.15**	**33**	**0.4**	**1.76**	**1873**		
Northern	Samyang	W-005	33.84	42.50	-8.66	91.06.	3.89	4.27		110		1.22	1273	161830	52130
	Sinsan	D-109	68.28	122.00	-53.72	95.02.	17.29	6.74		39		1.45	1273	157710	51350
	Wolsan	'79wolsan	88.40	116.00	-27.6	92.09.	14.05	21.14		150		2.67	1273	167770	27230
	Eoum	D-064	111.75	124.00	-12.25	95.02.	8.52	4.71		55		4.13	1273	137360	41260
	Yeondong 3	D-167	153.13	170.00	-16.87	92.09.	41.26	30.30		73		4.25	1273	153620	47780
	Subtotal	**5 wells**	**91.08**	**114.90**	**-23.82**		**17.00**	**13.43**		**79**		**2.74**	**1273**		

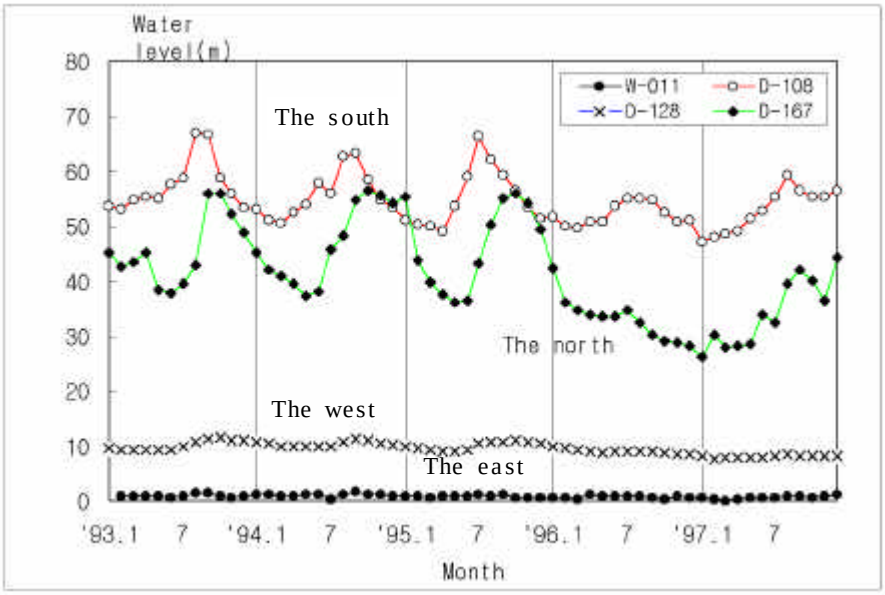


Fig. 3.11 Water level variance on the monitoring well by areas in Cheju Island.

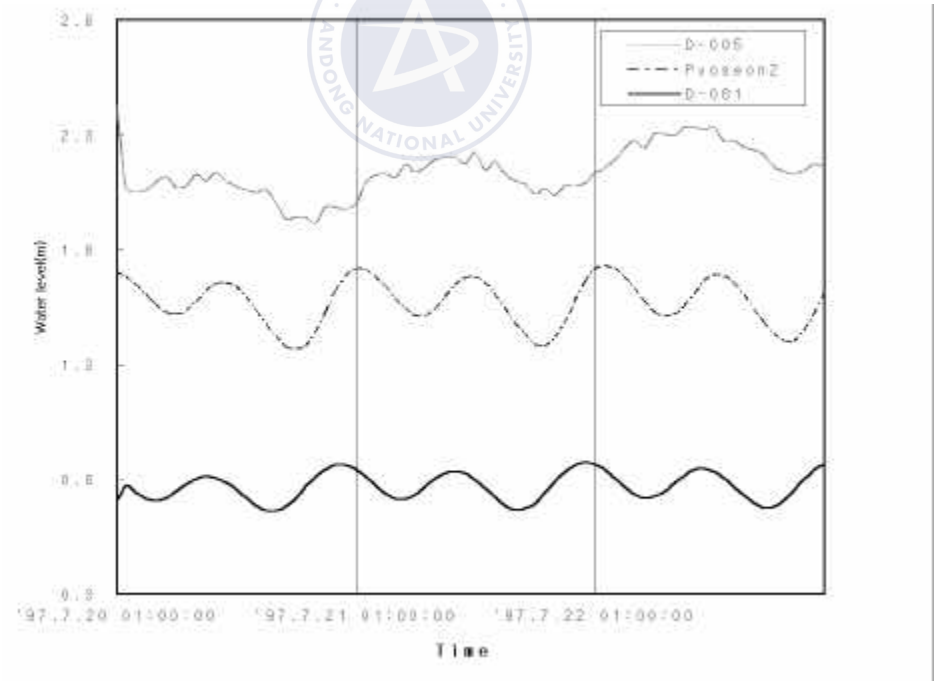


Fig. 3.12 Maximum water level variance per day tidal level change.

다. 동부권역

동부권역에 속하는 17개 관측공은 표고가 EL12.02 88.72m에 분포하며, 착정심도는 35.0 120.0m로 해수면 아래 최대 (-)52.01m까지 착정하였다. 관측공은 해안에서 평균 1.91㎞정도의 거리에 위치하며, 개발심도 내에 퇴적층이 분포하는 관측공은 2개소로서 수산2 D-124호 관측공은 해수면 아래(-)29.55m부터, 조천1광역관측공은 해수면 위 11.99m부터 그 아래로 각각 분포한다.

5년간('93 '97년)의 강수량은 월평균 최고가 783㎜이었으며 월평균은 153㎜이고, 연평균은 1,846㎜정도이다. 5년간 평균수위는 EL1.24m로 월평균 수위 중 최고수위가 EL5.01m, 최저수위가 EL0.03m이다. 각 관측공별 최대 수위변화폭은 4.40 0.68m로서 평균 1.72m이며 76%의 관측공이 연간 2m 이하의 변화를 보인다.

관측기간 중 수위변화가 4.40m로 가장 컸던 회천 D-031호 공은 '93.1월 수위가 EL5.01m로 최고였으나 수위에 영향을 주는 '92.11월과 12월 및 '93.1월의 강수량이 각각 47, 50, 47㎜로 월평균 강수량의 32% 내외였다. 또한 '93.8월과 '95.7월에 각각 783, 779㎜의 강수가 있었으나 수위는 각각 EL4.55m와 EL2.02m 이었던 것으로 보아 강수량이 크게 증가하여도 이에 비례하여 수위가 크게 증가하지 않으므로 강수량의 증감에 의한 수위변화가 크지 않음을 알 수 있다. 이것은 투수성이 큰 지질구조의 분포로 인하여 강수가 지하를 통하여 해안으로 즉시 유출됨에 따라 강수량이 크게 증가하여도 높아진 수위의 지연시간이 2 3일로 매우 짧아 지속적인 수위 상승이 이루어지지 못하기 때문에 일어나는 현상으로서 이로 인하여 수위는 낮은 위치에서 유지되고 있다. 또한 도내에서 가장 강수량이 많은 지역임에도 불구하고 양질의 지하수로 개발할 수 있는 양이 다른 지역보다 적다.

동부권역 17개 관측공 중 12개 관측공에서 조석에 의한 1일 수위변화가 관측되는데 이 기간 중에는 1일 0.02 1.79m의 수위변화가 일어났으며 평균은 0.43m이었다. '97년 중 1일 최대 수위변화량이 가장 컸던 온평 D-030호 관측공의 수위는 '97.11.15일 01:00에서 11.19일 01:00 사이에 1.79m나 변화하였다. 이 기간 중의 수위 변화에 영향을 줄 수 있는 '97.9월, 10월, 11월의 강수량은 각각 46, 14, 306㎜로 월평균 강수량의 9 200%이었고, 평균수위는 EL0.76, 0.72, 1.42m로 10월과 11월의 월평균 수위차는 0.7m인데 비하여 1일 수위변화량은 1.79m로 조석에 의한 수위변

화가 강수에 의한 수위변화보다 2.5배 이상이었다. 그러나 동부권역 12개 관측공의 5년간 월평균 최대 수위변화폭은 1.72m이나 1일 최대 수위변화폭은 평균 0.43m로서 월간 변화량의 25% 밖에 되지 않고 있다. 또한 1일 최대 수위변화폭이 월평균 최대 수위변화폭보다 큰 곳은 D-030호 관측공 1개소뿐인 것으로 보아 동부권역 역시 강수의 영향을 받고 있다. 그러므로 동부권역은 다른 지역보다는 조석의 영향을 많이 받고 있으나 일반적으로 알려져 있듯이 강수보다 조석에 의한 수위변화가 더 많이 작용하는 것은 아닌 것을 알 수 있다.

다만 동부권역은 강수량이 크게 증가하여도, 투수성이 큰 지질구조의 분포로 인하여 강수가 지하를 통하여 해안으로 즉시 유출됨으로써, 높아진 수위의 지연시간이 2 3일로 매우 짧아 지속적인 수위 상승이 이루어지지 못하며, 이로 인하여 해수침입의 우려가 크므로 도내에서 가장 강수량이 많은 지역임에도 불구하고 양질의 지하수로 개발할 수 있는 양이 다른 지역 보다 적다.

라. 서부권역

서부권역 8개 관측공은 EL13.84 35.32m에 분포하며, 착정심도는 60.0 130.0m로 해수면 아래 (-)113.26m까지 착정 하였다. 관측공은 해안에서 평균 1.14㎞ 정도의 거리에 위치하며, 개발심도내에 퇴적층이 분포하는 관측공은 5개소로서 고산2 D-080호 관측공이 EL0.0m에서 분포하고 그 외는 모두 해수면 아래에서 산출되는데 동명 W-001호 관측공은 EL(-)33.35m부터 산출되고, 영락2 D-081호 관측공은 EL(-)100.76m부터 분포한다.

5년간의 강수량은 월평균 최고가 355㎜이었으며 월평균은 78㎜이고, 연평균은 940㎜로 4개 권역 중 최저이다. 5개년간 평균수위는 EL6.72m로 월평균 최고수위가 EL18.23m, 최저수위가 EL0.86m이다. 각 관측공별 최대 수위변화폭은 18.18 0.83m로서 평균 5.75m이었으며, 판포 D-041호 관측공을 제외하고는 모두 7m 이하의 변화를 보였다.

관측기간 중 수위변화가 18.18m로 가장 큰 판포 D-041호 관측공은 '95.7월에 EL27.64m로 수위가 최대였는데 '95. 5월, 6월, 7월의 강수량은 각각 136, 79, 341㎜로 월평균 강수량의 101 437%나 되었다. '96.9월부터 '97.3월까지 강수량은 월 1

3 47㎜이었는데, 이 당시 수위는 EL21.43m에서 EL9.46m까지 떨어져 5년 중 최저를 나타낸 것으로 보아 강수량의 다소가 수위변화에 크게 영향을 미치는 것으로 판단된다.

서부권역 8개 관측정 중 5개 관측정에서 0.06 0.20m의 1일 수위변화가 일어나고 있으며 평균은 약 0.11m로 매우 미약한 편이다. '97년 중 1일 최대수위변화량이 가장 큰 곳은 영락2 D-081호 관측공으로서 '97.7.20일 01:00 7.22일 01:00까지 0.20m의 수위변화가 있었다. '97.5월 7월까지 강수량은 각각 60, 42, 120㎜로 월평균 강수량의 53 153%이었고, 평균수위는 EL4.83, 4.50, 4.98m이었는데 6월과 7월의 월평균 수위차는 0.48m인데 비하여 1일 최대 수위변화량은 0.20m로 강수에 의한 수위변화가 조석에 의한 수위변화보다 2.4배 이상이었으며, 5년간의 월평균 최대 수위차가 3.53m로 조석에 의한 수위변화보다 1.76배나 큰 것으로 보아 서부권역의 수위변화는 조석보다는 강수가 더 크게 작용하는 것을 알 수 있다.

이러한 이유는 서부권역의 지하 지질구조가 저투수성의 SGF층이 5개 공에서 해수면에서부터 (-)100.71m 정도에 위치하고, 그 이하는 USF층과 기반암이 분포하므로 조석의 영향을 받기가 어렵고 또한 피압대수층에 유입된 강수가 저투수성 내지 불투수성 지층에 막혀 하부로의 이동보다 정수압면으로의 상승이 더 빨리 이루어짐에 의한 결과이다.

마. 남부권역

남부권역 7개 관측공은 EL53.51 113.17m에 분포하며, 착정심도는 90.00 130.00m로 해수면 아래 EL(-)110.59m까지 착정 하였다. 관측공은 해안에서 평균 1.76㎞ 정도의 거리에 위치하며, 개발심도 내에 퇴적층이 분포하는 관측공은 5개소로서 약 EL10 40m 사이에 분포한다.

5년간의 강수량은 월평균 최고가 790㎜이었으며 월평균은 156㎜이고, 연평균은 1,873㎜ 정도이다. 5개년간 평균수위는 EL35.26m로 월평균 최고수위가 73.12m, 최저수위가 3.38m이다. 각 관측공별 최대 수위변화폭은 24.57 1.64m로서 평균 11.81m이며 57%의 관측공이 연평균 10m 이상의 큰 변화를 보인다.

관측기간 중 수위변화가 24.57m로 가장 큰 신효 F-001호 관측공에 있어서 '95.7

월에 34.67m로 수위가 최대였으며, '95.5월, 6월, 7월의 강수량은 각각 370, 203, 790㎜로 월평균 강수량의 130 506%나 되었다. '96.11월, 12월 및 '97.1월에는 강수량이 각각 85, 108, 19㎜로 매우 적어지자 수위가 EL10.10m로 떨어진 것으로 보아 강수량의 증감이 수위변화에 매우 크게 영향을 미치는 것으로 판단된다.

남부권역 7개 관측정 중 2개 관측정에서 0.08 0.22m의 1일 최대 수위변화가 일어나고 있었으며 평균은 0.15m이었다. '97년 중 1일 최대 수위변화량이 가장 큰 곳은 의귀 D-005호 관측공으로서 '97.7.20일 01:00 7.22일 01:00까지 0.22m의 수위변화가 있었다. '97.5월 7월까지의 평균수위는 2.51, 3.23, 3.72m로 6월과 7월의 월평균 수위차는 0.49m인데 비하여 1일 수위변화량은 0.22m로 강수에 의한 수위변화가 조석에 의한 수위변화보다 2.2배 이상이었으며, 또한 5년간 월평균 최대 수위변화가 4.34m로 조석에 의한 최대 수위변화량보다 약 20배나 큰 것으로 보아 남부권역의 수위변화는 조석의 영향은 미미하고 강수의 영향을 크게 받는 것을 알 수 있다.

이러한 이유는 남부권역의 지하 지질구조가 저투수성 퇴적층인 SGF층이 해수면 위에 분포하고 있어 해안변 가까운 곳을 제외하고는 조석의 영향이 거의 없으며 서부권역과 같이 피압대수층에 유입된 강수가 저투수성 내지 불투수성 지층에 막혀 하부로의 이동보다 정수압면으로의 상승이 더 빨리 이루어짐에 의한 것이며, 수위의 변화폭이 큰 것은 정수압면이 매우 높아 외부의 변화에 매우 민감하게 변화하기 때문이다.

바. 북부권역

북부권역 5개 관측공은 EL33.84 153.13m에 위치하여 4개 권역 중 가장 높은 곳에 관측공이 설치되어 있다. 착정심도는 42.50 170.00m로 해수면 아래 EL(-)53.72m까지 착정하였다. 관측공은 해안에서 평균 2.74㎞ 정도로 가장 멀고, 개발심도내에 퇴적층이 분포하는 관측공은 연동3 D-167호 관측공 1개소로서 EL12.63m에서부터 분포한다.

5년간의 강수량은 월평균 최고가 578㎜이었으며 월평균은 106㎜이고, 연평균은 1,273㎜ 정도로 적은 편이다. 5개년간 평균수위는 EL17.00m로 월평균 최고수위가

41.26m, 최저수위가 3.89m이다. 각 관측공별 최대 수위변화폭은 30.30 4.27m로서 평균 13.43m이며 3개 공은 10m 이하이고 나머지 2개 공은 20m 이상으로 차이가 매우 크다.

관측기간 중 수위변화가 30.30m로 가장 컸던 연동3 D-167호 관측공은 '94.11월에 56.60m로 수위가 최대로서 '94.8월, 9월, 10월 및 11월의 강수량이 각각 365, 94, 271, 15㎜로 월평균 강수량의 14 344% 내외였다. 또한 '97.1월에는 수위가 최저인 26.30m를 기록하였는데 '96.11월, 12월 및 '97.1월에 각각 78, 51, 23㎜의 강수밖에 기록하지 못한 것으로 보아 강수량의 증감이 수위변화에 크게 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다.

북부권역 관측공 중 개발심도내에 퇴적층이 분포하는 공은 연동3 D-167호 관측공 1개소이며, 조석에 의한 1일 수위변화는 나타나지 않고 있다. D-167호 관측공은 37개 관측공 중 표고가 가장 높은 곳에 설치되어 있고 개발심도는 가장 깊으나 공저의 깊이가 EL(-)16.87m로 전체 평균하한인 EL(-)35.64m 보다 약 20m나 적게 개발되어 있고 저투수성 퇴적층이 해수면 위에 분포하고 있음으로 인하여 수위도 높게 형성되고 수위변화도 가장 크게 나타나고 있는 것으로 보인다.

Ⅲ. 동부권역 담지하수 대수층에 대한 염수침입

제주도 동부권역에 개발된 많은 공이 염수의 침입으로 인하여 먹는물이나 농업용수로 사용되지 못하고 폐공되었거나 일부는 관측공으로 활용되기도 하며 가뭄이 들었을 때 농업용수로 취수되는 공을 볼 수 있는데, 염소이온(Cl^-)이 250㎎/ℓ이상인 지역은 북제주군 한림읍 수원리, 남제주군 대정읍 상모리, 서귀포시 보목동 등 극히 일부지역이나, 동부권역은 해안에서 가까운 곳에 개발된 대부분의 우물에서 염수가 산출되고 있다

이와 같은 제주도 동부권역의 지하수 고염수화 현상에 대하여 농업진흥공사(1989)는 동수구배가 완만한 대수층이 지하수위가 낮으므로 해수의 내륙침투가 용이한 지질조건과 해안 인접지역에서 발생하는 지하수의 과잉양수에 의한 해수침투가 원인이라 하였고, Choi *et al.*(1991)은 해안 인접지역에서의 과잉양수가 해수침입의 주 요인이라 하였다. 윤정수(1986)는 여러 가지 원인 중 동부지역 패사사구층

내에 다량 함유되어 있는 염분이 강우시 빗물에 용해되어 지하로 침투한 것이 주된 원인이라 하였으나, 고기원(1991)은 SGF층의 결층 현상과 깊은 관계가 있는 것으로 추정하였으며, 그 후 고기원 외(1992)는 SGF층의 결층 외에도 균열 또는 절리가 발달된 현무암류가 호층으로 존재하며 스코리아층도 호층으로 발달되어 있어 제주도가 생성될 당시부터 해수가 내륙 깊숙이 까지 침투할 수 있는 지질구조 때문이라 하였다.

제주도 동부권역 해안변에서 발생하고 있는 지하수의 고염도화 현상은 거의 대부분의 용수를 지하수에 의존하고 있는 제주도로서는 매우 심각한 일이다. 특히 북서부와 남서부 해안지역에서도 지하수의 고염도화 현상이 일어나고 있으므로 이에 대한 대책수립이 시급하다.

1. 염수화의 요인

지하수의 염수화 원인은 대체로 ①담수 대수층 아래 부존하는 염지하수가 자연현상에 의하여 위로 이동함으로써 발생하는 것, ②과잉양수에 의한 대수층의 파괴로 인한 해수침입, ③공동이나 터널 등 투수성이 높은 지질 구조가 해안에서 내륙으로 경사되어 깊숙이 분포하는 경우, ④암염이 강우에 의해 대수층으로 용해되거나 외부적 요인에 의하여 암염층이 대수층과 접하게 되는 경우, ⑤농작물에 사용한 Cl^- 비료 성분의 대수층 내 유입, ⑥동절기 제설을 위하여 도로에 뿌려진 염화칼슘이나 염화나트륨에 의한 염수화, ⑦기타 가스나 유정에 의한 경우, 토양의 염화확산, 해일에 의한 물보라, 쓰레기 매립장의 침출수 등을 들 수 있다.

농업진흥공사가 '70 '71년 제주도 전역에 걸쳐서 지질 및 지하수조사를 한 후 발간한 '71년 제주도지하수보고서에 의하면 북제주군 구좌면의 동복 W-011호 공에서 양수에 따라 염도가 차이가 있다 하였다. 이 공은 표고가 EL28.95m이며 개발심도는 50m로서 해수면 아래 (-)21.05m 깊이까지 개발되었으며 수위는 EL13.04m 이었다. 이 공에 대한 양수시험 결과 양수량이 1일 1,230㎥으로 보고되어 있는데 1일 1,140㎥으로 양수시에는 염도가 950ppm이었으나 1,230㎥일 때는 1,350ppm으로 상승하는 것을 보고 양수량을 증가시킬 경우 해수와의 혼합대가 상승하여 공 안으로 유입되는 것으로 추정하였다. 또한 북제주군 애월읍 귀일 W-013호 공은 염도가

150ppm 이었고, 구좌읍 세화 W-019호 공은 267ppm, 한림읍 월령 W-022호 공이 150ppm이었으며, 남제주군 성산면 난산 W-015호 공은 187ppm, 남원읍 태흥 W-026호 공 100ppm, 표선면 가시 W-028호 공 250ppm, 안덕면 화순 W-030호 공 150ppm 등으로 보고되어 있다(농림부와 농업진흥공사, 1971).

이처럼 이 보고서에는 염도의 단위가 ppm으로 기재되어 있는데 이것은 용존고형물총량(TDS)과 염도를 혼동한 것으로 보인다.

염수(saline water)는 염분이 농축된 천연수를 말하며, 염도(salinity)는 해수 1㎏ 중에 함유되어 있는 염류(이온 및 분자화합물)의 전량을 g으로 나타낸 것으로서, 염분량이라고도 한다. 단위는 천분율(permilli, ‰)을 사용하는데 염도의 직접 측정은 기술적으로 곤란하므로 염소량을 측정하여 M.H.C.Knudsen 공식(염도 =0.030+1.8050×염소량)에 의해 염도로 환산할 수 있다. 또한 염도는 일반적으로 TDS와 같은 의미로 사용된다. 그러므로 직접 측정이 어려운 염도를 일부러 환산하여 보고서를 작성한 것과 그 단위가 ppm인 것으로 보아 이 보고서에 기재된 값은 TDS를 나타낸 것으로 추정할 수 있다. 그러나 이후의 연구자들이 이 값을 염소이온농도로 잘못 이해하여 인용한 사례가 있었다.

이와 같이 잘못 이해된 부분도 있었지만 동부권역 해안변에 부존하는 담지하수체에 염수침입 현상이 일어나고 있는 것은 주지의 사실이며 이러한 현상은 지하수를 개발하기 이전부터 용출수에서도 나타나고 있었고 현재는 그 양상이 심화되고 있다.

Table 3.15는 '71년 조사시 TDS(염도)가 100ppm 이상이었던 공의 내역이며 농림부의 예산지원으로 농어촌진흥공사가 제주도와 '91년부터 2000년까지 계획한 "제주도 지하수 장기관측망 설치 및 조사"에서 측정한 TDS값과 비교하여 본 것이다. Table의 ( ) 안에 기재한 숫자는 Cl^- 측정된 연평균치 이며 단위는 TDS와 같은 ppm 혹은 ㎎/ℓ이다. 그러므로 염도(TDS)와 Cl^- 값은 크게 차이가 있음을 알 수 있다. 염도가 100ppm 이상 산출되는 8개 공 중 수위에 비하여 우물이 깊게 개발됨으로써 자연적인 수위변화에 의해 염수가 침입할 수 있는 공은 북제주군 구좌읍의 동복 W-011, 세화 W-019, 남제주군 성산읍 난산 W-015, 남원읍 태

흥 W-026호 공 등 4공이다. 그 중 W-011호 공과 W-015호 공은 현재 염수화 되어 관측공으로 활용 중인데 W-011호 공은 염소이온농도가 '93년 39ppm에서 '94년에 178ppm으로 크게 증가하였고, W-015호 공은 '93년 측정시 190ppm이었으며 이후 58ppm까지 감소하였다가 '97년에 다시 97ppm으로 증가하였다. 북제주군 애월읍 귀일 W-013호 공은 이 후 수량이 부족하여 수중모타펌프 설치 심도를 6m 더 낮추어 취수하였으나 현재는 질산성질소가 먹는물 기준을 초과하므로 관측공으로 활용하고 있다. 그리고 남제주군 안덕면 화순 W-030호 공은 표고가 EL75.13m인데 공 심도는 50.0m로서 해수면 위인 EL23.13m까지만 개발된 결과 개발심도의 부족에 의한 채수량 감소로 인하여 폐공되었다.

Table 3.15 Monitoring wells showing saline water production from 1970 to 1971

Area	Well nomber	Eevation (m)	Well depth (m)	Bottom elevation (m)	Water level (m)	Yield (㎥/D)	Dis-tance From coast (m)	TDS(Cl^-) (ppm)						Remarks
								'71	'93	'94	'95	'96	'97	
Eastern	W-011	28.95	50.0	-21.05	0.82	1,230	769	1350	(39) 643	(178) 732	388		128	monitoring well
	W-015	40.01	55.0	-14.99	1.16	1,230	1,841	187	(190) 290	(109) 419	388	(58) 404	(97) 349	monitoring well
	W-019	38.50	45.5	-7.00	1.50	1,166	2,058	267						
	W-028	98.13	104.5	-6.37	12.88	838	5,201	250						
Western	W-022	19.14	34.0	-14.86	4.94	918	796	150						
Southern	W-026	18.42	27.5	-9.08	2.42	1,780	586	100						
	W-030	73.13	50.0	+23.13	38.13	450		150						discarded well
Northern	W-013	65.13	72.0	-6.87	13.04	812	1,527	150					(28) 267	monitoring well

2. 염수침입 원인

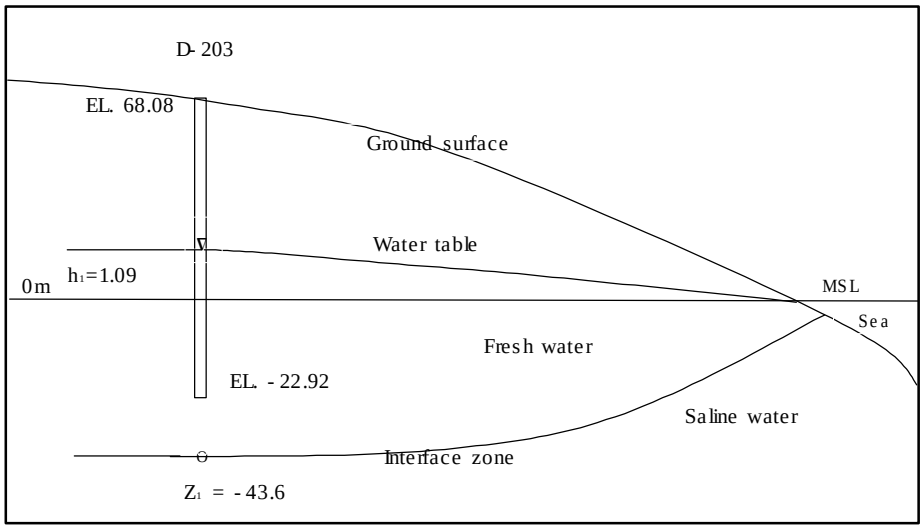
제주도 동부권역 담지하수 대수층에 대한 염수침입의 주된 원인은 첫째, 동부권역 해안변에 분포하는 지하수의 수위가 EL3m 이하로 매우 낮으므로 인한 갈수기 때의 자연적인 수위하강과 조석에 의해 발생하는 해수면의 상승으로 인한 점이대의 상승이 일어나고 또한 용수사용량의 급증으로 인하여 과잉양수가 행해지므로 담수렌즈가 얇아져 점이대가 공저로 상승하게 되는 것이며 둘째, 점성이 낮은 FOB의 분출로 인하여 생성된 2차 구조를 따라 지하수가 매우 잘 유동할 수 있는 지질적인 조건 때문이고 셋째, 저투수성의 미고결퇴적층이 약 135m 정도나 두껍게 분포하지만 그 분포 심도가 해수면 아래 평균 (-)100m 이하에 분포하고 있으므로 해수유입을 효과적으로 차단하지 못하기 때문이며, 이러한 여러 요인이 복합적으로 작용하여 해수가 내륙으로 깊숙이 침투하게 되었고 또한 해안변의 지하수가 염수로 치환된 것이다.

가. 지하수위의 낮은 분포와 과잉양수

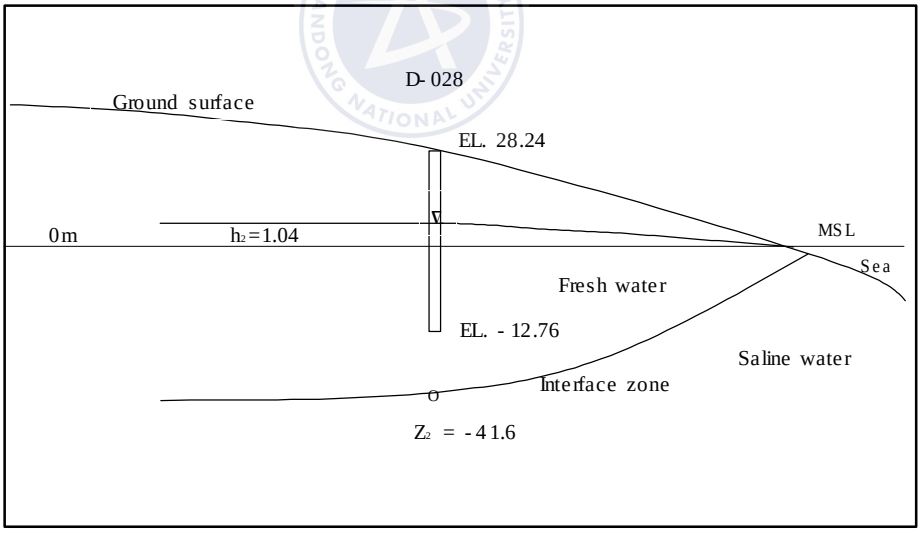
동부권역 지하수 대수층에 대한 염수침입 원인의 첫 번째는 이 일대의 지하수위가 대단히 낮고 또한 강수의 영향과 조석의 영향으로 수위가 상승과 하강을 반복함으로써 해수의 상승이 계속적으로 이루어짐과 동시에 과잉양수에 의해 해수침입이 더욱 급속히 이루어지기 때문이다.

동부권역은 앞에서도 언급하였듯이 평균수위에 비하여 수위의 연간변화율이 매우 크다. 동부권역 17개 관측공의 5년간 평균수위가 EL1.24m이나 수위변화량은 평균 1.72m로서 평균수위는 1.24m±1.72m/2가 되어 최고 EL2.1m에서 최저 EL0.38m로 변화하고 있다. 이에 따라 담·염수 경계면은 상승과 하강을 반복함으로써 담수체의 일부가 염수로 치환되는 것이다.

예를 들면 염수가 산출되는 관측공 중 월평균 수위가 가장 높은 공은 평대 D-203호 공으로 5년간 평균수위는 EL1.76m이다. 이 공의 최고수위는 EL3.86m, 최저수위는 EL1.09m로 수위차는 2.77m이고, 1일 최대 수위변화 폭은 0.25m이며, 해안에서 3.04㎞ 떨어진 곳에서 해수면 아래 (-)22.92m까지 개발되었다.



(A)



(B)

Fig. 3.13 Depth to interface zone between the fresh and the saline water.

평균수위가 EL0.90m로 매우 낮은 편에 속하고 1일 수위변화가 0.39m인 고성 D-028호 공은 최고수위가 EL1.61m, 최저수위 EL0.46m로 수위차는 1.15m이고, 1일 최대 수위변화폭은 0.39m이며, 해수면 아래 (-)12.76m까지 개발되어 있고 해안에서 1.82㎞ 떨어져 있다.

Fig. 3.13은 D-203호 공과 D-028호 공에 대한 G-H 이론상의 담·염수 경계면의 깊이를 나타내는 모식도이다. 개발당시 수위는 각각 EL1.09m와 1.04m로서 점이대는 각각 해수면 아래 (-)43.2m와 (-)41.6m에 형성되는 것으로 계산되므로 개발하한 심도인 (-)22.92m와 (-)12.76m는 약 20 28m 정도 염수침입에 대하여 여유가 있었다.

수위의 상승과 하강은, 강수의 영향에 더하여 조석의 영향이 미치면 그 폭은 더욱 커지게 된다. Fig. 3.14는 D-203호 공과 D-028호 공의 5년간 월평균 최고, 최저 수위에 1일 최대 수위변화량을 포함시켜 계산한 점이대를 나타낸 모식도이다. (A)는 D-203호 공을 나타낸 것으로 개발당시 수위는 EL1.09m이었으며 이때의 점이대의 깊이는 Z=40h에 의해 1.09m×40으로 (-)43.6m가 된다. 그러나 최저, 최고수위에 조석의 영향을 반영하여 점이대의 깊이를 계산하면

최저수위 h_1 = 1.09m - 0.25m/2 0.96m, ∴ Z_1 = (-)38.4m

최고수위 h_2 = 3.86m + 0.25m/2 3.98m, ∴ Z_2 = (-)159.2m로서

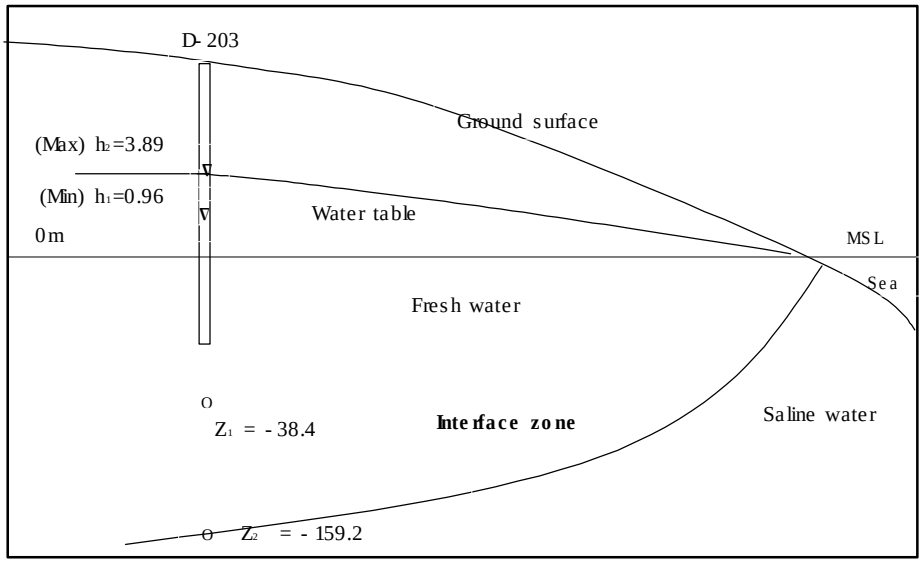
간조 때 수위는 최저 EL0.96m까지 내려가고 만조 때 수위는 최고 EL3.98m까지 올라가므로 점이대의 깊이는 수위가 최저일 때 EL(-)38.4m, 최고일 때 EL(-)159.2m로서 그 폭은 120.8m나 된다.

(B)는 D-028호 공으로서 개발당시 수위는 EL1.04m 이었으며 이때의 점이대의 깊이는 1.04m×40으로 (-)41.60m이다. 본 공 역시 최저, 최고수위에 조석의 영향을 반영하여 점이대의 깊이를 계산하면

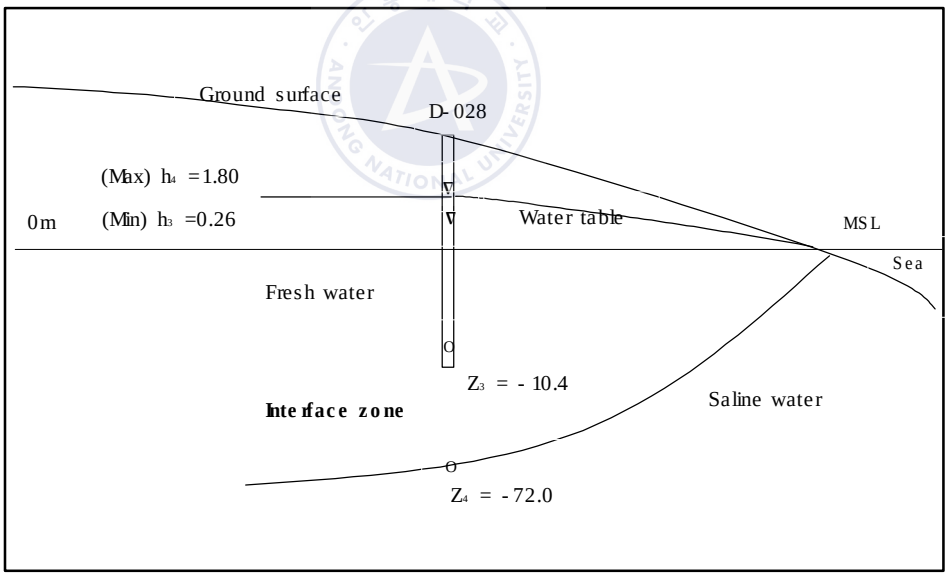
최저수위 h_3 = 0.46m - 0.39m/2 0.26m, ∴ Z_3 = (-)10.4m

최고수위 h_4 = 1.61m + 0.39m/2 1.80m, ∴ Z_4 = (-)72.0m로서

간조 때 수위는 최저 EL0.26m까지 내려가고 만조 때 수위는 최고 EL1.80m까지 올라가므로 점이대의 깊이는 EL(-)10.4m (-)72.0m로서 그 폭은 61.6m이다.



(A)



(B)

Fig. 3.14 Elevation of the interface zone varying with rainfall and tidal change.

그 결과 D-203호 공은 갈수기의 간조 때에도 해수의 침입을 받지 않으나 D-028호 공은 공저 심도가 EL(-)12.76m이므로 이 때에는 우물 아래 부분에 염수가 침입하게 된다.

그러나 D-203호 공과 같이 수위의 변화에도 염수침입에 안전하였던 공도 가뭄이 들면, 농업용수는 물론 생활용수 등의 용수 사용량이 급격히 증가하므로, 우물의 채수량이 이에 비례하여 늘어나고 양수기간도 더욱 장기간이 될 것이며, 해안변에 개발된 염지하수 관정은 양식장에 급수하기 위하여 거의 매일 취수할 것이므로 우물의 간섭현상에 의해 Fig. 3.15에서처럼 수위는 내려가고 점이대가 상승하는 현상(upconing)이 가속화 될 것이며 이로 인하여 공저에 염수가 접촉하게 되고 또한 상승하게 된다.

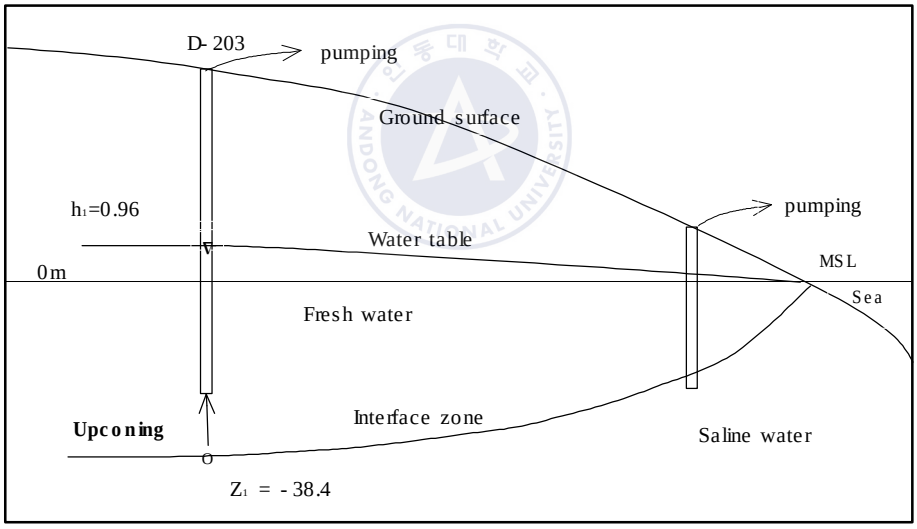


Fig. 3.15 Upconing of the saline water level due to simultaneous pumping of two wells.

이와 같이 동부권역 해안 부근에 개발된 우물은 수위가 매우 낮으므로 풍수기와 갈수기에 강수의 영향으로 일어나는 자연적인 수위의 상승과 하강, 조석에 의한 수위의 정현

운동 및 과잉양수에 의한 수위하강 등에 의하여 담·염수 경계면은 해수면 아래 근접한 곳에서 상승과 하강을 반복하게 되며 이런 현상이 장기간 지속되면 염수가 상승한 위치까지 담수가 염수로 치환됨으로써 이곳의 지하수는 사용할 수 없게 되는 것이다.

나. 지하지질 구조

두 번째로는 동부권역의 지하지질을 구성하고 있는 현무암류의 지질구조가 원인이 된다. 동부권역에는 FOB가 광범위하게 분포하고 있다. FOB는 점성이 낮아 분출시 이들의 유로를 따라 대·소규모의 용암동굴을 해안저지대에 다수 형성시켰으며 용암동굴은 대부분 수평 굴을 이루고 있다. 또한 FOB에는 구갑상의 주상절리 혹은 수직절리가 매우 발달하여 있다. 그리고 FOB는 용암류의 분출 단위가 3 5m 정도로서 용암류 사이에는 화성쇄설층이 퇴적되거나 크링커 및 파쇄대가 발달되어 있고 스코리아층도 다수 형성되어 있으므로 이러한 것이 모두 지하수의 좋은 통로가 된다. 그러므로 강수량이 가장 많은 지역임에도 불구하고 이와 같은 1, 2차적인 지질구조를 따라 강수가 급속히 지하로 침투되고 해안으로 유출되므로 수위를 높게 상승시키지 못하며, 갈수기에는 해수가 침입하는 좋은 통로가 되므로 내륙 깊숙이까지 해수가 수평으로 침투하게 된다.

다. 저투수성 퇴적층의 분포 심도

세 번째는 동부권역 저지대의 수위가 약 EL3m 이하로 낮은 반면에, FOB하부에는 저투수성의 퇴적층인 USF층이 해수면 아래 평균 (-)100.2m 이하에서부터 분포하고 있기 때문이다. USF층은 주로 sandy silt, silty sand 내지 muddy sand층으로서 지하수를 다량 함유하고 있으나 산출이 어려운 난대수층 내지 반대수층을 이루고 있다. 그리고 동부지역은 다른 지역과는 달리 직상부에 저투수성 퇴적층인 서귀포층이 분포하지 않는다. 해수가 침입한 지역을 보면 대부분 평균 수위가 EL3m 이하로서 매우 낮은 편인데 해수를 막아줄 수 있는 퇴적층이 해수면 아래 깊이 분포하므로 G-H원리에 의하면 100.2m÷40 2.50m 즉, 수위가 EL2.50m인 지역까지 점이대가 분포하게 된다. 이때 동부권역 관측정 중 해안에서 가장 멀리 떨어진 평대 D-203호 공의 수위변화폭이 2.77m이다.

$Z_2 = Z_1 = 100.2m$ 일 경우 $Z_2 = 40 \times h_2$ 이므로 $(h_2 - 2.77m/2) \times 40 = 100.2(m)$

$\therefore h_2 \quad 3.89m$

즉, 평균수위가 EL3.89m인 지역도 연간 수위변화를 볼 때 수위가 EL2.50m 혹은 그 이하로 하강하므로 이 지역까지 점이대가 침입 형성되어 진다. 그러므로 개발 당시의 수위를 근거로 추정하여볼 때 Fig. 3.16에서처럼 최대 7㎞까지 염수가 침입하게 될 것이다. 여기에 수평의 투수성 지질구조가 있는 지역이라면 이보다 더 깊숙이 침투가 가능할 것이다.

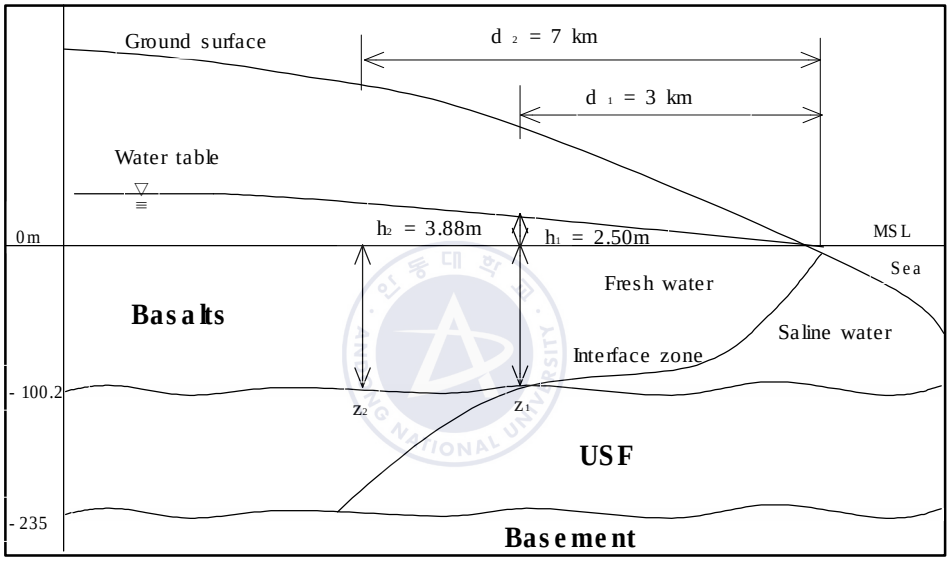


Fig. 3.16 Schematic diagram on distribution of the interface zone in eastern Cheju Island.

이처럼 동부권역이 다른 지역에 비하여 해수가 내륙으로 깊숙이 침투하게 된 원인이 SGF층의 결층으로 인하여 해수에 대한 차수층이 빈약하기 때문이 아니라, ①수위가 EL3m 이하로 매우 낮으므로 인하여 갈수기 때의 자연적인 수위하강이나 과잉양수시 담수렌즈가 얇아져 점이대가 공저로 상승하게 되는 것, ②점성이 낮은 FOB의 분출로 인하여 생성된 2차 구조를 따라 지하수가 매우 잘 유동할 수 있는 지질적인 조건, ③저투수성의 USF층이 약 135m 정도나 두껍게 분포하지만

그 분포 심도가 해수면 아래 평균 (-)100m 이하에 분포하고 있는 것 등이 복합적으로 작용하여 해수가 내륙으로 깊숙이 침투하게 되었고 또한 지하수가 염수화되는 원인이 된다.

만약에 동부권역 현무암류 아래에 분포하는 USF층이 현재의 위치보다 좀 더 높은 곳에 퇴적되었다고 가정했을 때에도 현재와 같은 동부권역 지하수의 고염도 현상이 일어났을 것인가를 G-H법칙을 따라 분석해 보았다.

Fig. 3.17은 USF층이 해수면 아래 (-)50m 정도에 분포하고 전혀 피압이 일어나지 않은 상태를 가정한 것으로, 이때에는 수위가 EL1.25m인 지역에 점이대가 형성되며 내륙으로의 분포는 2.6㎞ 정도까지일 것이며 강수에 의한 수위변화량을 감안하여도 점이대는 내륙으로 EL2.63m 지역인 3.5㎞까지 진행되게 될 것이다.

그러므로 SGF층이 없더라도 USF층이 해수면 부근이나 위에 분포한다면 동부지역도 다른 지역과 마찬가지로 자연현상에 의한 해수침입은 거의 없었을 것이다.

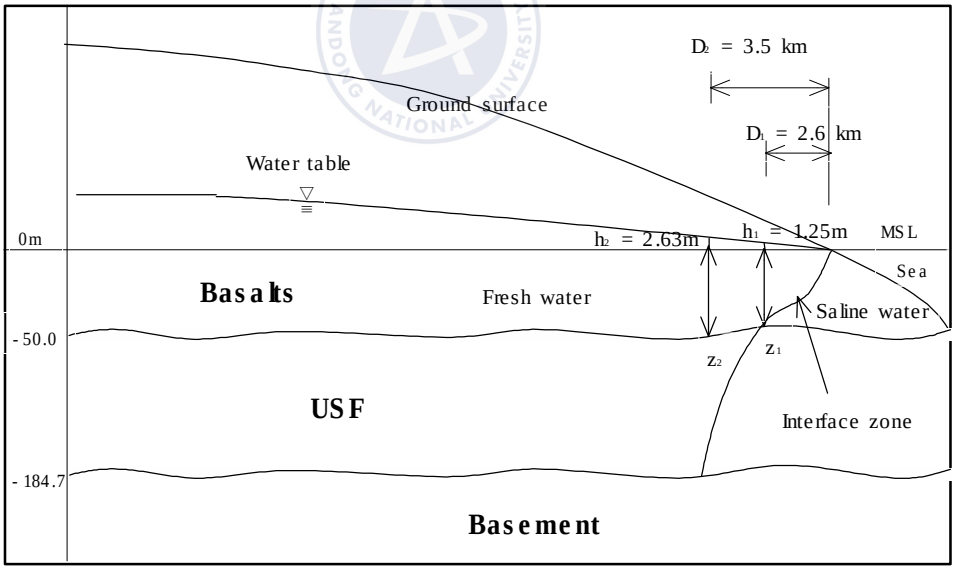


Fig. 3.17 Schematic diagram on distribution of the interface zone related to the depth of uncemented sediment formation(USF) in eastern Cheju Island.

제 4 절 제주도 지하수 부존특성

Ⅰ. Oahu섬의 지질 및 지하수

제주도와 Oahu섬은 신생대 제3기말에서 제4기초 사이의 화산활동에 의해 형성된 화산도라는 점에서 지질적으로는 유사하지만 수리지질학적으로는 매우 상이하다. 섬의 크기는 제주도가 Oahu섬(1,564㎢)보다 1.17배 더 크지만 동수구배는 Oahu섬이 제주도보다 지극히 완만한 편이다. 제주도 지하수 개발 및 부존형태 정립의 모델이 된 Oahu섬에 대한 지하수 개략적인 지질과 지하수 부존특징을 살펴봄으로써 제주도 지하수 부존형태 결정에 참고가 될 것으로 판단된다.

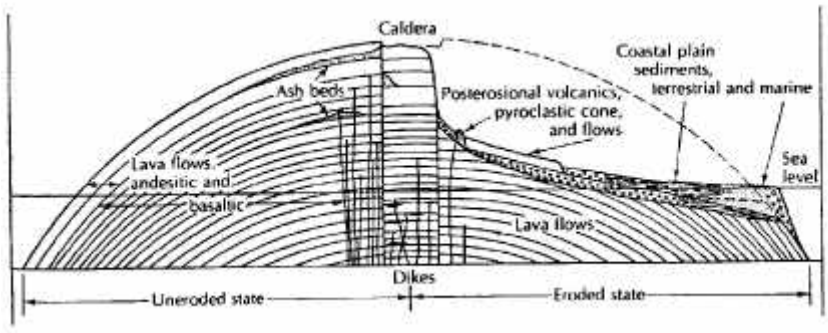
1. Oahu섬의 지질

Oahu섬에는 2개의 산맥이 동서 양쪽에 동남-서북방향으로 발달하고 있고, 양산맥을 연결하는 중앙부에는 Schofield대지가 발달하고 있다.

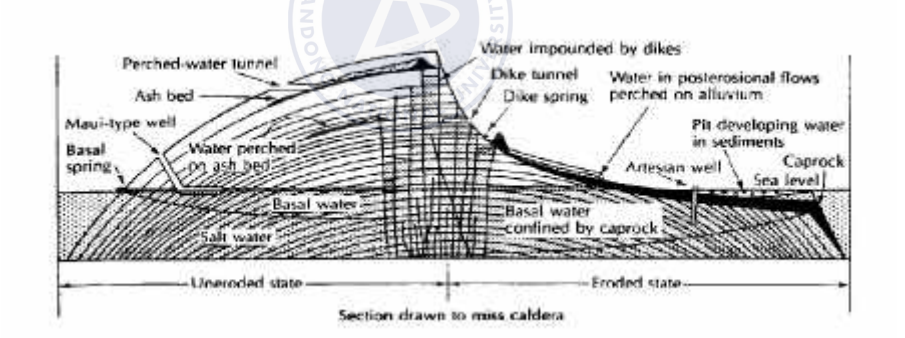
서쪽에 위치한 Waianae산맥은 동쪽에 위치한 Koolau산맥보다 화산활동시기가 빠르며 정지시기 또한 빠른데 그 결과 Koolau에서 분출하여 서쪽으로 흘러간 라바류는 스코필드대지 중앙을 지나 Waianae산맥 동 측 사면 해발 300m 이상 되는 곳까지 덮고 있다. 화산활동이 시작된 위치는 대개 현재의 산맥방향과 일치되는 균열대로서 앞에서 말한 열극대 선상을 따라 시작되었으며 화산활동과 함께 융기와 침강작용이 수반되었다. 침강의 규모는 400m에 이르는 곳이 있고 600m 이상을 융기한 흔적을 찾아 볼 수 있는데 조사 결과 밝혀진 바로는 이러한 융기작용이 한 번에 일어나지 않고 소규모적인 침강이 반복되었으며 융기지층의 퇴적환경은 천해이었음을 알려주고 있다(농수산부 외, 1974).

Oahu섬에 발달된 용암류에는 암맥의 관입현상을 도처에서 볼 수 있다. 암맥의 주향은 대체로 라바가 분출한 균열대선 즉 산맥의 주향방향과 일치한다. 암맥의 관입규모는 단순한 관입양상을 띄우는 곳으로부터 복합적인 관입양상을 띄우는 곳까지 다양한데 특히 관입현상이 뚜렷하여 1마일에 100개 이상의 평행암맥이 관입되어 있는 지대를 복합암맥군대(Dike complex zone)라 칭하고 있는데 바로 이 복

합암맥군대에 막대한 양의 상위지하수가 부존하고 있다. Fig. 3.18은 Oahu섬 화산돔의 지질구조와 지하수의 산출상 및 개발형태를 잘 나타내주고 있다.



(A)



(B)

Fig. 3.18 **(A)** Geologic structure of an idealized Hawaiian volcanic dome. **(B)** Occurrence and development of ground water in an idealized Hawaiian volcanic dome(Fetter, C.W., 1942).

2. Oahu섬의 지하수 부존특징

Oahu섬의 지하수 산출형태는 기저지하수, 상위지하수 및 주수형 지하수의 산출상을 갖는다. 본 섬에 발달되어 있는 용암류(lava flow)는 이 지역 용어로 파회회(pahoehoe)형과 아아(aa)형으로 구분되는데 이들 용암류는 투수성이 양호하여 본 섬의 주 대수층을 이루고 있다. 또한 각 용암류 사이에 있는 slag 혹은 크링커(clinker)체도 용암류의 상·하부와 같이 투수성이 매우 양호하다.

가. 기저지하수(Basal groundwater)

Oahu섬에는 G-H원리에 의해 부존되는 렌즈상의 대규모 기저지하수가 거의 섬 전역에 부존하고 있으며, 특히 해안 주변부에는 제4기 퇴적층이 평균 약 200m의 두께로 바다 밑까지 넓게 분포하며 투수성이 높은 현무암을 피복하고 있어 지하수가 바다로 유출되는 것을 억제시키고 있다(Fig. 3.18). 이러한 불투수성 지층을 본 지역 용어로 cap rock이라 하며 이로 인하여 기저지하수는 피압현상을 나타내고 있다. 그러나 개발 초기의 우물에서 볼 수 있었던 피압현상은 집중적인 개발과 양수량의 증가로 인한 수위 하강으로 개발이전과 같은 피압현상은 볼 수 없게 되었으며 진주만 지역에서는 용천이 아닌 삼출(滲出)상태로 기저지하수가 스며 나오고 있다.

Oahu섬 기저지하수면의 동수구배는 대체로 0.00018로서 이는 이 지역의 암석이 매우 양호한 투수성 암석임을 말해 준다. 기저지하수면은 섬 전역에 걸쳐 평탄한 경사를 보이는 것은 아니고 암맥관입지대로 가면서 경사가 급해짐을 생각할 수 있으나 기반암의 투수성이 높은 것을 감안하면 그 차이는 무시해도 될 것으로 생각된다.

나. 상위지하수(High-level groundwater)

Oahu섬에서는 제주도와 달리 암맥의 관입 현상을 흔히 볼 수 있는데 지역에 따라서 그 관입 양상을 달리한다. 해안부근은 단조로운 관입 현상을 보이나 내륙 산악지역으로 갈수록 집중적이고 복합적인 관입암맥군을 이룬다. 양호한 투수성을 갖는 화산암을 관입한 맥암은 지하수의 유동을 억제하는 벽의 역할을 하게 되며 복합관입암맥군대에서는 맥암과 맥암 사이에 투수성이 양호한 현무암에 지하수를

충진, 포장하게 된다. 이러한 지하수 부존상태를 compartment형이라고 하는데 이 상위지하수는 외부와 완전 차단된 상태가 아니고 compartment 밖으로 넘치거나 수직 유출, 또는 수평 유동하여 대부분 기저지하수로 유입되는데 이는 맥암의 발달상태에 따른 투수성과 관계가 깊다. 상위지하수의 수위는 지역에 따라 차이가 있으나 기저지하수위보다는 대개 100 200m 정도 높게 부존하며 막대한 양의 지하수를 저장하고 있어 오래전부터 수평터널을 굴착하여 지하수를 이용하고 있다.

다. 주수(Perched water)

투수성 용암류의 하부에 연속성이 없는 화산회층(ash bed), 응회암(tuff), 기타 퇴적층 등이 발달된 곳 상부에 주수가 부존한다. 주수의 산출상은 연속성이 없는 산점상(散点狀)으로 소규모로 분포하며 일부는 이러한 불투수층을 따라 흘러 지표에서 용천으로 나타나기도 한다. 주수의 포장량은 많지 않으나 개발하여 이용하는 곳도 있다.

이상에서 기술한 바와 같이 Oahu섬의 지하수는 G-H원리에 의한 기저지하수, 맥암의 관입에 의한 상위지하수 및 용암류 사이의 불연속적인 불투수층 상부에 존재하는 주수로 각각 분류할 수 있다.

Oahu섬에서 지하수 포장의 역할을 하는 것을 포장능력 순으로 열거하면 ①크링커체 내의 간극, ②용암류 사이의 공동, ③수축절리, ④기공, ⑤용암 튜브, ⑥균열(cracks) 등을 들 수 있는데 고기 용암류는 상부에 퇴적된 다른 용암류에 의하여 압축되어서 후기 용암류에서 볼 수 있는 양호한 간극을 볼 수 없다. Koolau암맥지대에서 조사된 바에 의하면 상악부에 발달된 후기 층에는 크링커체 등이 협재되고 간극의 발달이 양호하여 지하수의 포장능력이 크나 1,000m 하부에서는 이러한 간극이 압축되어 있어 이를 크게 저하시키고 있다.

Ⅱ. 제주도에서의 Ghyben-Herzberg 법칙

W.Badon Ghyben은 네델란드 해안지방에서 신선한 지하수가 대수층 중 해수 위에서 평형 상태를 유지하고 있으며 또한 해수를 치환하고 있음을 발견하였고, Alexander Herzberg도 북해의 섬에서 같은 현상을 관찰하였다. 이들은 해안지방의

사층 지대에서 이 같은 물의 렌즈(lens)를 발견하였지만 이후 화산도에서도 이러한 현상이 나타나고 있음이 연구되었고 하와이주 Oahu섬에서 이러한 담수 렌즈가 파악되었다.

Fig. 3.19는 일반적인 상태 하에서 섬에서의 담수렌즈를 보여주는 모식도이다. 지표에서 함양되는 강수는 지하로 침투하여 염수의 상부에 부존하며 지하수는 계속적으로 해안으로 유출된다. 그리고 담·염수간의 밀도차에 의해 어느 정도의 깊이에서 점이대가 형성되며 이를 경계로 담수와 염수가 나뉘어 부존하게 된다.

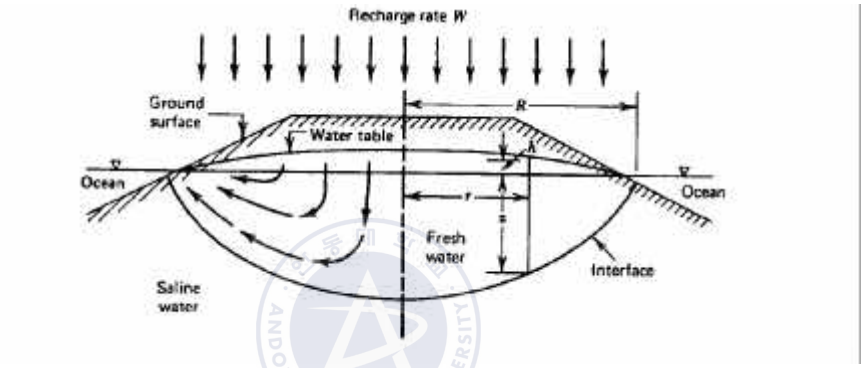


Fig. 3.19 Freshwater lens in an oceanic island under natural conditions (Todd, D.K., 1923).

해안대수층에서 해면 위에 있는 담수면(자유지하수면)의 높이가 염수경계면의 깊이에 관련된 식을 Ghyben-Herzberg관계라 부른다. 지하수가 바다와 수리적 연결이 되어 있는 대수층에서 양수하였을 때, 바다로부터 우물(well)쪽으로 염수의 유동이 일어나게 되어 그 기울기는 급하게 된다. 담수대수층 속으로 염수가 이동하는 것을 염수침입이라 한다. Ghyben(1888)과 Herzberg(1901)는 해안에서의 자유지하수와 해수와의 관계를 다음과 같이 나타내었다(Fig. 3.20).

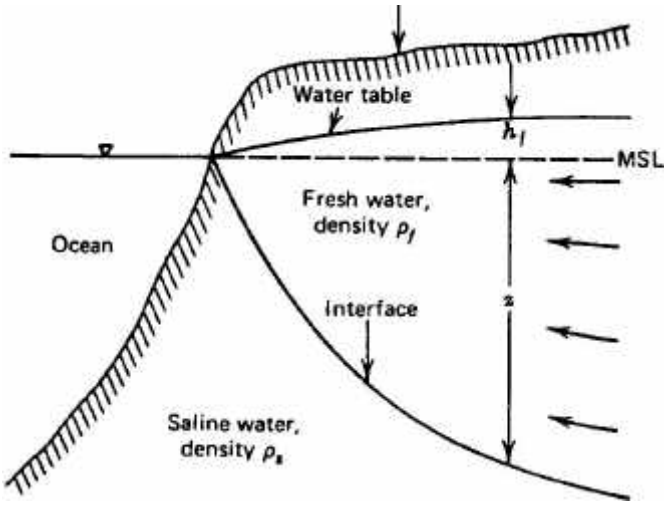


Fig. 3.20 Idealized sketch of fresh-water and salt-water distribution in an unconfined coastal aquifer to illustrate the Ghyben-Herzberg relation.

$$\rho_s z h_s = \rho_f z (h_s + h_f)$$

$$z = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f \qquad (4)$$

h_s : 해수면에서 담수와 해수와의 경계면에서의 높이

ρ_f : 담수의 밀도

ρ_s : 해수의 밀도

h_f : 해수면에서 지하수면까지의 높이

ρ_s = 1.025g/㎤, ρ_f = 1.000g/㎤ 라 하면,

$$\therefore \quad z = 40 \ h_f \qquad (5)$$

식 (5)를 일반적으로 Ghyben - Herzberg관계식이라 한다. 피압지하수도 자유지하수와 같이 관계를 구할 수 있으나 자유면이나 피압면 모두 다음과 같은 조건이 필요하다.

『 담수-해수체의 평형조건은 지하수면이 해수면보다 위에 있어야 하고, 수리경사는 반드시 바다 쪽을 향하여야 한다.』

만약 제주도의 지하수가 위의 조건을 만족한다면 제주도 화산체에 부존하는 지하수는 G-H법칙이 성립될 것이다.

일반적으로 담수와 염수와의 관계는 염수의 밀도가 기후나 지역에 따라 달라질 수 있으므로 꼭 $z = 40hf$ 인 것만은 아니다. 또한 이론적인 경계면의 위치보다 실제 경계면의 위치가 더 깊은 것으로 알려져 있다(김천수 외, 1997; 황용수 외, 1999).

담수와 해수가 정지된 평균상태를 유지하고 있는 것은 양자간의 밀도차이 때문이며 이는 담수렌즈의 두께와 형태에 영향을 미치는 근본 요소이다. 해안선 근처에서는 지하수의 배출이 끊임없이 일어난다. 또한 담수아래에서 밀도차에 의해 부존하고 있는 염수와는 일정한 심도에서 섞이게 되며 이처럼 담수와 염수가 혼합되는 곳을 점이대(interface zone), 전이대(transition zone) 혹은 확산대(diffusion zone)라 한다. 이와 같은 담·염수의 점이대는 그 두께가 일정하지 않으며 그 위치도 고정되어 있지 않고 여러 외부 요인에 의해 계속 변화하므로 점이대가 우물 하부 몇 m에서 몇 m의 두께로 분포한다고 단정할 수는 없을 것이다. 담수렌즈에 지하수를 함양시키는 요소는 담수의 함양률, 지하수의 유동을 좌우하는 암석의 투수율, 해수와 담수가 혼합되어 일으키는 영향 등이 있다.

강우기에는 담수가 렌즈 안으로 함양되고 바다쪽으로 유동하여 해안부근 용천이나 삼출현상으로 계속 유출된다. 담수렌즈의 두께는 투수계수가 동일한 대수층일 경우는 유동하고 있는 지하수량에 따라 변한다. 다시 말하면 함양량이 증가하면 렌즈의 두께도 증가하고, 함양량이 일정할 때 렌즈의 두께는 투수계수가 낮은 곳보다 투수계수가 높은 대수층에서 더 얇다.

해면 위 또는 해면 아래 대수층을 피복하여 해수침입을 억제시키고 있는 불투수층이 발달될 때는 담수 렌즈의 두께에 영향을 미치게 된다. 이와 같은 불투수층은 cap rock 역할을 하여 렌즈에서 지하수가 유출되는 것을 억제시키기 때문에 Fig. 3.18에서처럼 불투수층이 없을 때보다 더 두터운 담수층을 형성하게 된다.

제주도 해안지역에 G-H법칙에 따라 지하수가 부존하기 위해서는 균질한 자유

대수층이라는 조건이 필요하나 제주도 화산체는 피압지하수로 포장되어 있으므로 전혀 이 조건을 만족시키지 못한다. 이러한 현상은 일본이나 미국 혹은 유럽에서 처럼 충적층이 100 200m 씩 두텁게 발달하여 있는 지역에서나 가능할 것이다. 충적층 발달이 불량하고 풍화대가 거의 발달되어 있지 못한 제주도 화산체는 분명히 피압대수층에 의한 피압지하수가 부존되어 있으나 지하수면이 해수면 위에 있고 지하수면의 수리경사가 바다쪽을 향하고 있는 해안지역에서는 G-H 법칙에 따라 담수지하수가 부존되어 있을 것이며 이러한 지역은 저투수성 퇴적층인 USF층이 해수면 아래 깊이 분포하는 동부 해안지역과 SGF층이 해수면 아래 깊이 분포하고 있는 서부와 북부 해안지역 일부가 될 것이다.

다시 말하면 제주도 화산체는 피압대수층에 의한 피압지하수이나 지하수위가 해수면 위에 있고, 수두경사가 해안쪽을 향하고 있는 지역 중 저투수성 퇴적층인 SGF층과 USF층이 비교적 해수면 아래 깊은 곳에 퇴적된 해안변 지역에서 G-H 법칙에 따라 지하수가 부존되어 있으며, 특히 동부권역에서 G-H법칙이 잘 적용되는데 이는 단순히 SGF층의 결층에 의한 것이 아니라 퇴적층의 분포심도, 대수층의 상태, 대수층을 이루는 화산암류의 1,2차적인 구조 등의 복합적인 요인에 의한 것이다.

Ⅲ. 제주도 지하수 부존특성

1. 제주도 지하수 부존형태 및 특징 비교

제주도 지하수의 부존형태나 특징을 파악하기 위하여 제주도와 생성연대나 크기가 비슷한 화산체인 미국 하와이주 Oahu섬에서의 지하수 부존형태 및 특징을 알아보았다.

Oahu섬에서는 지하수를 크게 상위지하수, 기저지하수, 주수로 분류하였으나, 제주도에서는 남기영(1966)이 분류한 것이 최초로서 상부층지하수와 기저지하수로 처음 분류한 이후(Table 3.16) 김옥준(1969)이 상부유동지하수와 기저지하수로, 농업진흥공사가 상위지하수와 기저지하수로 분류(농림수산부 외, 1989)하였고, 한국수자원공사가 상위지하수와 기저지하수, 준기저지하수로 구분하였으며(건설부 외, 1993), 최근에

고기원(1997)이 상위지하수, 기저지하수, 상부준기저지하수, 하부준기저지하수 및 기반암지하수의 5가지 형태로 구분하였다. 이러한 구분방법은 Oahu섬에서 구분한 지하수 부존형태를 제주도 지하수에 적용한 것이나, 양 섬의 지질 분포양상이 다르고 지하수 부존형태가 서로 같지 않음을 고려하지 않고 적용한 것으로 보인다.

Table 3.16 Classification of groundwater type in Cheju Island

Name	Year	Classification of groundwater type
Nahm, K.Y.	1966. 6	맥상지하수
	1966. 12	상부층지하수(high-level groundwater) 기저지하수(basal groundwater)
Kim, O.J.	1969	상부유동지하수(high level groundwater) 기저지하수(basal groundwater)
ADC	1971	상위지하수(high level groundwater) 기저지하수(basal groundwater)
KWRC	1990	
Kim, Y.K.	1991	상위지하수체(상부유동지하수) 하위지하수체(기저지하수)
Choi, S.H.	1988	주수(perched water or high level groundwater) 기저지하수(basal groundwater)
ISWACO	1981	상위지하수(high level groundwater) 준기저지하수(parabasal groudndwater) 기저지하수(basal groundwater)
KWRC	1993	
Koh, G.W.	1997	상위지하수(high level groundwater) 상부준기저지하수(upper parabasal groudndwater) 하부준기저지하수(lower parabasal groundwater) 기저지하수(basal groundwater) 기반암지하수(basement groundwater)
Son, J.H.	1999	상위지하수(high level groundwater) 기저지하수(basal groundwater)

제주도의 지하수 부존특성 및 부존형태를 조사자별로 살펴보면,

① 남기영(1966)은 지하수 굴착조사 결과에 의거 지하수는 전도에 걸쳐 연속성이 없이 부존하고 있는 것으로 결론 짓고 맥상지하수를 형성하고 있을 것이라고 하였다. 그 후 '66.12월에 이를 보완하여 상부층지하수와 기저지하수로 구분하였는

데, 상부층지하수(high-level groundwater)는 불투수층 암이나 반투수층 암에 의해 기저지하수와 분리되어 기저지하수 상부에 부존하는 지하수로서 고지대 용천수의 근원이 되며 해수의 영향이 없어 수질이 좋다 하였다. 기저지하수(basal groundwater)는 상부층지하수보다 깊은 곳에 발달된 대량의 수괴로서 G-H렌즈에 의해 부존 하는 지하수를 말하며 비교적 양은 풍부하나 전 도에 부존하지 않고 수리지질학적 조건에 따라 지역적으로 있는 곳도 있고 없는 곳도 있다 하였다.

② 김옥준(1969)은 상부유동지하수(high level groundwater)는 암석의 구조선이나 용암류간의 부정합면 혹은 지표부근의 함수층을 따라 유동하여 깊게 침투되지 않는 지하수로서 제주도 각지의 중산간지역에서 유출하는 것이 이에 속한다 하였다. 기저지하수(basal groundwater)는 강수가 지하 깊이 스며들어가서 G-H렌즈의 지하수를 이루며 비중이 큰 해수상에 뜬 상태로 신선한 물의 층을 형성하는 것으로서 해안부근에서 용천하는 것들이 이에 속하는 것이라 하였다. Fig. 3.21은 G-H 원리에 의해 부존하는 담대수층의 모식도이다.

Fig. 3.21 A cross section of the basal groundwater(G-H lens) in Cheju Island (Kim, OJ., 1969)

③ 농업진흥공사(1971, 1989)는 상위지하수(high level groundwater)는 강수가 구조선이나 부정합면 등 투수성층을 따라 하부로 유동하다가 불투수성 암층을 만나 지하 심부까지 도달하지 못하고 기저지하수체 상부에서 유동하는 지하수로서, 주위가 불투수성 지층으로 차단되어 거의 유동하지 않는 주수(perched water)와 외부로의 용출수 등이 있으며 일부는 계속 지하로 유동하는 것으로서, 서귀, 제주 및 남원 지역 중산간 일부에 분포한다 하였다. 기저지하수(basal groundwater)는 담

수가 염수와의 비중차에 의해 염수체 위에 떠 있는 지하수로서 담수렌즈는 G-H 원리에 의해 형성되어 있으나 이상적인 형태로 형성되어 있지는 않을 것으로 추정하였으며, 기저지하수는 도 전역에 걸쳐 광범위하게 분포한다 하였다(Fig. 3.22).

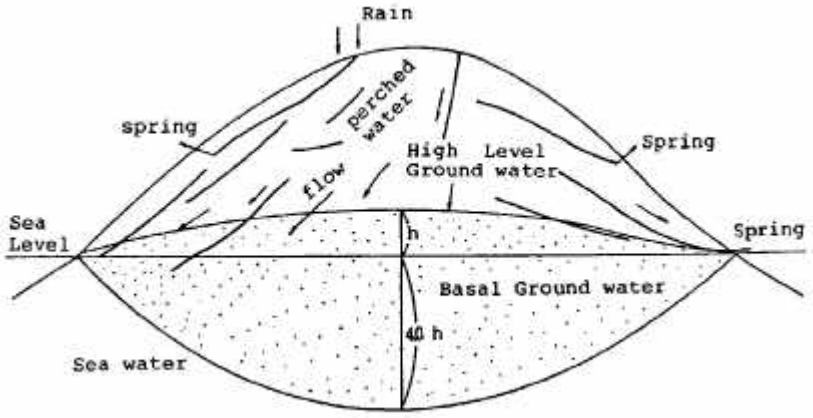


Fig. 3.22 Types of the fresh water existing beneath the Cheju Island(ADC, 1989).

④ 김영기(1991)는 제주도의 지하수체를 상위지하수체와 하위지하수체로 구분하였는데 상위지하수체는 암체의 구조선이나 용암류간 또는 지표부근의 대수층을 따라 유동하여 깊게 침투하지 않는 지하수체로서 중산간지대나 해안 가까이에서 용출 또는 유출하는 지하수체라 하였다. 하위지하수체는 심부까지 침투되는 G-H 렌즈 상으로 부존하는 지하수로서 수리지질학적 경사를 따라 해안으로 유동하여 해수면과 접하게 되어 용출되는 지하수체라 하였다.

⑤ 최순학(1988)은 강수가 연속된 2차 구열을 따라 유하하다가 하부에 발달한 불투수층에 이르러 더 이상의 수직강하를 할 수 없어 부존되는 주수(perched water or high level groundwater)와 강수가 불투수층에 차단되지 않고 그대로 기저로 유입되어 바다와 접하여 해안변에서는 해안용출수로 섬 하부에서는 렌즈상태로 부존하는 기저지하수(basal groundwater)로 구별하였다.

⑥ 한국수자원공사(1993, Fig. 3.23)는 상위지하수(high level groundwater)는 강수가 중력에 의해 투수성 구열을 통해 하방 침투하다가 불투수성 암층 또는 점토층을 만나

더 이상의 수직강하를 하지 못하고 불투수층을 따라 흐르는 지하수로서, 비포화대 내에 단속적으로 부존하여 타 대수층과 수리적으로 연결되지 않는 부유지하수(perched aquifer), 하부퇴적층이 해수면 상부에 위치한 경우와 하부퇴적층이 해수면 하부에 위치하나 지하수위가 높게 형성되어 조위의 영향을 받지 않는 지하수체로서 불연속 또는 국지적으로 분포한다 하였다. 기저지하수(basal groundwater)는 대수층의 지하수가 해수와의 비중차에 따라 담수체를 형성하여 해수 상부에 렌즈상으로 부존하는 형태의 지하수로서, 담수렌즈 상·하부가 항상 유동상태에 있고 담수렌즈의 수축에 따라 해수의 수평 및 수직운동이 일어난다 하였다. 기저지하수는 동부지역(조천수역 신촌에서 남원수역간)의 해안으로부터 내륙 깊숙이까지 분포하며, 서부지역 한림, 고산, 한경수역에서 해안선을 따라 일부지역에 분포한다. 준기저지하수(parabasal groundwater)는 대수층 하부에 불투수층을 경계로 담수가 상부에 위치하며 해안으로부터 조석의 수평적 영향을 받는 지하수로서, 해수와의 직접적인 접촉이 차단되며 하부 경계조건에 따라 기저지하수와 연속성을 갖을 수 있다 하였다. 준기저지하수는 서부지역 해안지역과 북부지역 삼양, 신촌지점 및 남부지역 서귀포 자굴이지점 등에서 부존이 확인되나 본 도 하부에 광범위하게 분포할 것으로 추정하였다.

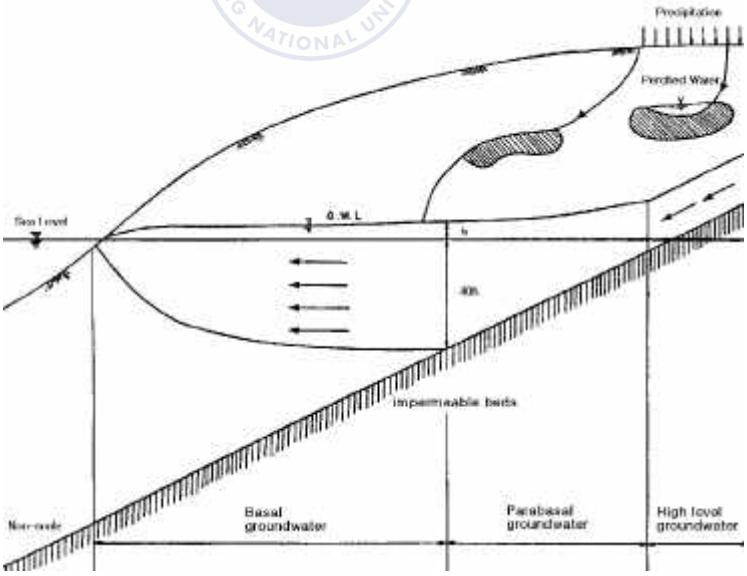


Fig. 3.23 Types of groundwater bearing at the Cheju Island(KWRC, 1993).

⑦ 고기원(1997)은 지하수의 수위분포, 변동양상, 수직적인 수질조성 등의 조사결과를 SGF층의 분포상태와 결부시켜 제주도 지하수의 부존특성을 해석하였다. SGF층의 지하분포는 국지적으로는 분포심도가 다소 차이가 있지만 광역적으로는 북촌-표선선 동쪽을 제외한 지역에서 표고 약 400m 이하의 지하에 수평적인 연속성을 가지고 분포하고 있으며, 북촌-표선 선은 SGF층의 구성물질의 하나인 유리질쇄설물을 공급하여 준 해저 화산활동과 관련된 상 경계선으로 해석하였다. SGF층이 비투수성으로 차수층의 역할을 하므로 본 층이 분포하는 지역에서는 본 층의 분포심도 변화가 지하수위 형성에 지대한 영향을 미치며, 강수량에 따른 수위변동도 큰 폭으로 발생한다 하였다. 그리고 이를 근거로 지하수 부존형태를 5가지로 나누었는데, 상위지하수(high level groundwater)는 비포화대 내의 치밀질화산암류나 퇴적층 등의 저투수성 지층 상부를 따라 비교적 빠른 선형유속으로 유동하거나 고여 있는 일종의 부유지하수(perched water)라 하였다. 또한 염수와 담수의 비중차에 의해 담수가 염수 상부에 렌즈형태로 부존하는 즉, G-H원리에 의해 부존하는 지하수를 기저지하수(basal groundwater)라 하였다. 저투수성 퇴적암층인 SGF층에 의하여 담수지하수체가 해수와 직접 접하지 않고 있으며 통상적인 G-H비가 적용되지 않는 지하수체를 준기저지하수라 하였으며, SGF층이 해수면 상부에 분포한 상부준기저지하수(upper parabasal groundwater)와 해수면 하부에 분포한 하부준기저지하수(lower parabasal groundwater)로 구분하였다. 기반암지하수(basement groundwater)는 EL(-)200m 이하의 기반암내에 발달된 파쇄대나 절리 같은 1, 2차 유효공극 내에 부존하고 있는 강우기원의 심부 지하수를 말하며 수질과 채수 가능량은 기반암 상부의 지질구조와 지하수 부존형태에 따라 영향을 받는다 하였다(Fig. 3.24). 상위지하수는 도 전역에 고루 분포하나 대부분 중산간 및 고지대에 편중되어 있으며, 기저지하수는 북촌-남원선 동쪽 해안변과 약 7㎞ 내륙지역까지 분포하며, 상부준기저지하수는 SGF층이 해수면 상부에 분포하는 지역, 하부준기저지하수는 SGF층이 해수면 하부에 분포하는 지역에 부존되어 있다 하였다.

⑧ 손주형(1999)은 지하수체의 수위변화 등 수문학적 측면에서 기저지하수(basal groundwater)와 상위지하수(high level groundwater)로 나누었는데, 일반적으로 해수면 아래에서 충분한 대수층을 형성하는 지하수체를 기저지하수라 하였다.

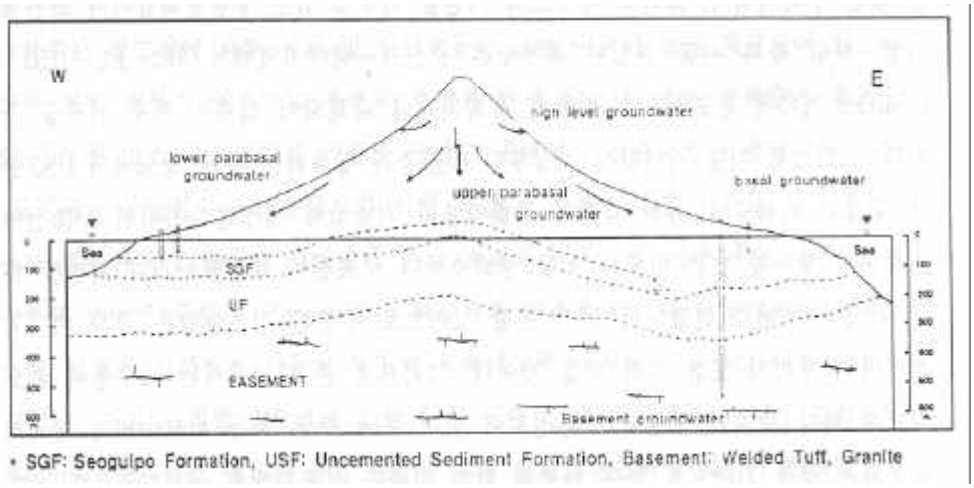


Fig. 3.24 Schematic model showing hydrogeologic structures and occurrences of groundwater in the Cheju Island(Koh, G.W., 1997).

2. 제주도 지하수 부존특성

제주도는 과거에는 담수렌즈가 Oahu섬과 같이 두텁게 발달되었을 것으로 추정하였으나 이러한 렌즈의 발달은 서귀포층 등의 저투수성 퇴적층으로 인하여 동부지역과 해안지역 일부에서만 형성되는 것으로 알려져 있다.

일반적으로 분류하는 제주도의 지하수 부존형태는 상위, 기저, 준기저지하수로서, 상위지하수는 불투수성 암층에 의하여 기저지하수와 차단된 지하수로서 주수나 용출수를 말하며, 지하수가 G-H원리에 의하여 담수렌즈가 형성되어 있고 담수와 해수의 접촉면이 점이대를 이루고 있는 지하수를 기저지하수라 하고, 대수층의 하부가 불투수성 혹은 저투수성 퇴적층으로 이루어져 해수와 접촉이 차단된 지하수로서 통상적인 G-H원리가 적용되지 않는 지하수를 준기저지하수라 분류하고 있다.

이러한 분류에 의하면 제주도의 상위지하수는 Oahu섬에서의 상위지하수와 부존개념이 전혀 다름을 알 수 있다. 특히 기저지하수와 준기저지하수는 대수층의 하부가 해수와 접하느냐 저투수성 퇴적층에 의하여 차단되어 있느냐로 구분하였으나

수평적으로는 기저지하수와 준기저지하수가 연속되어 있을 것이므로 이를 구분하는 것은 무의미하다. 그리고 제주도의 기반을 이루고 있는 용결응회암이나 화산성 사암·이암 등과 이를 관입한 화강암은 중산간 해안지역에서 최소 EL(-)150 (-)400m 이하에 분포하므로 이들이 풍화되거나 파쇄되어 있기는 매우 어려울 것이다. 그러므로 이들 기반암이 직상부의 USF층과 접촉하는 부위 정도에서 USF층에 포장된 지하수에 의한 약간의 풍화작용과 기반암에 생성된 2차적인 구조선에 지하수가 부존할 수는 있으나 이들 풍화층이나 구조선이 대규모이거나 기반암 하부 깊이까지 계속 연결되어 있지 못할 것이므로 부존된 지하수량은 극히 미미할 것이며 이용가치 또한 극히 적을 것이다. 그러므로 본 연구에서는 대수층이 분포심도에 따라 뚜렷이 구별되게 형성되어 있어 이에 부존 하는 지하수체가 명확히 구분되는 것을 기준으로 하여 다음과 같이 지하수 산출형태를 구분하였으며 용어는 같더라도 해석은 기존과는 다르게 정의하였다.

제주도의 지하수 산출형태는 주수, 상위지하수 및 기저지하수의 산출상을 갖는다(Fig. 3.25).

가. 주수(perched water)

주수(perched water)는 투수성 용암류의 하부가 화산회나 응회암 등의 저투수성 혹은 불투수성 퇴적층으로 형성된 지역 상부에 부존하는 거의 유동하지 않는 지하수로서, 연속성이 없으며 소규모로 분포하는데 일부는 하부로 누출(seepage)되어 기저지하수체로 유동되기도 하며 일부는 하부의 불투수층을 따라 흘러 지표에 용출되기도 한다.

주수는 저장된 수량이 적으므로 개발하여 이용하기에는 적합하지 않으며 개발시 하부 불투수층을 파쇄시킬 경우 지하수가 급속히 하부로 이동하여 소멸될 우려가 크므로 주의하여야 한다.

나. 상위지하수(high level groundwater)

상위지하수(상부지하수, high level groundwater)는 지표면 가까이에서 불투수성

용암류 혹은 저투수성 내지 불투수성 퇴적층 사이에 형성된 스코리아층 등의 투수성이 높은 화성쇄설층과 용암류 접촉부에 형성된 크링커층이나 파쇄대 같은 곳에 부존하는 지하수로서 연속성이 없으며 소규모이나 도 전역에 고르게 분포한다. 상위지하수는 강수량에 따른 유량 및 수위변동이 크며 수위가 높게 형성되어 있으나 해수와 직접 접하지 않으므로 조석의 영향은 받지 않는다. 또한 지하수가 불투수성층 상부를 따라 유동하다가 지표와 만나는 곳에서는 용출수로 유출되기도 하는데 고지대나 중산간지대의 용출수가 이에 속한다. 지하수 개발시 지표 가까이에서 수위가 형성되다가 굴착이 깊어짐에 따라 파쇄대나 투수성 지층 혹은 하부의 큰 대수층을 만나면 수위가 수m 수십m 하강하여 아래쪽에서 다시 형성되는 경우가 있는데, 이것은 지하수를 가두어 두었던 상위대수층 아래의 저투수성 내지 불투수성 지층이 지하수 개발 작업으로 인하여 큰 구멍이 생겨 하부로 유로가 형성되면서 더 아래쪽에 있는 주 대수층과 만남에 따라 상위대수층의 지하수가 아래쪽으로 급속히 이동하여 일어나는 현상이며, 용출수를 대량으로 취수하기 위하여 지하지질 상태를 고려하지 않고 터널 등을 뚫을 경우에도 발생하여 용출수의 급격한 감소나 고갈이 일어나기도 하며 주수대수층에서도 이와 같은 현상이 일어나 주수의 완전누수가 일어나기도 한다.

그러므로 용출수 주변에서의 지하수 개발을 억제하여 이로 인한 주수나 상위지하수의 고갈을 근본적으로 방지함으로써 용출수의 고갈현상은 물론 지하수위의 하강으로 인한 생태계의 변화를 미연에 예방하여야 할 것이다.

상위지하수는 원칙적으로 기저지하수체와 분리되어 형성되어 있으며 부존 위치 역시 지표에 가까우므로 상부지하수라 하는 것이 더 타당할 것이나 상위지하수라는 용어가 제주도에서 보편적으로 쓰이고 있으므로 이를 그대로 사용하기로 하였다.

다. 기저지하수(basal groundwater)

기저지하수(basal groundwater)는 제주도 화산체 기반암 상부에 형성되어 제주도 지하수의 거의 대부분을 차지하는 지하수로서 해안지대에서는 담수가 염수와의 비중차에 의해 염수체 위에 점이대를 경계로 대체적으로 G-H원리에 의해 형성되

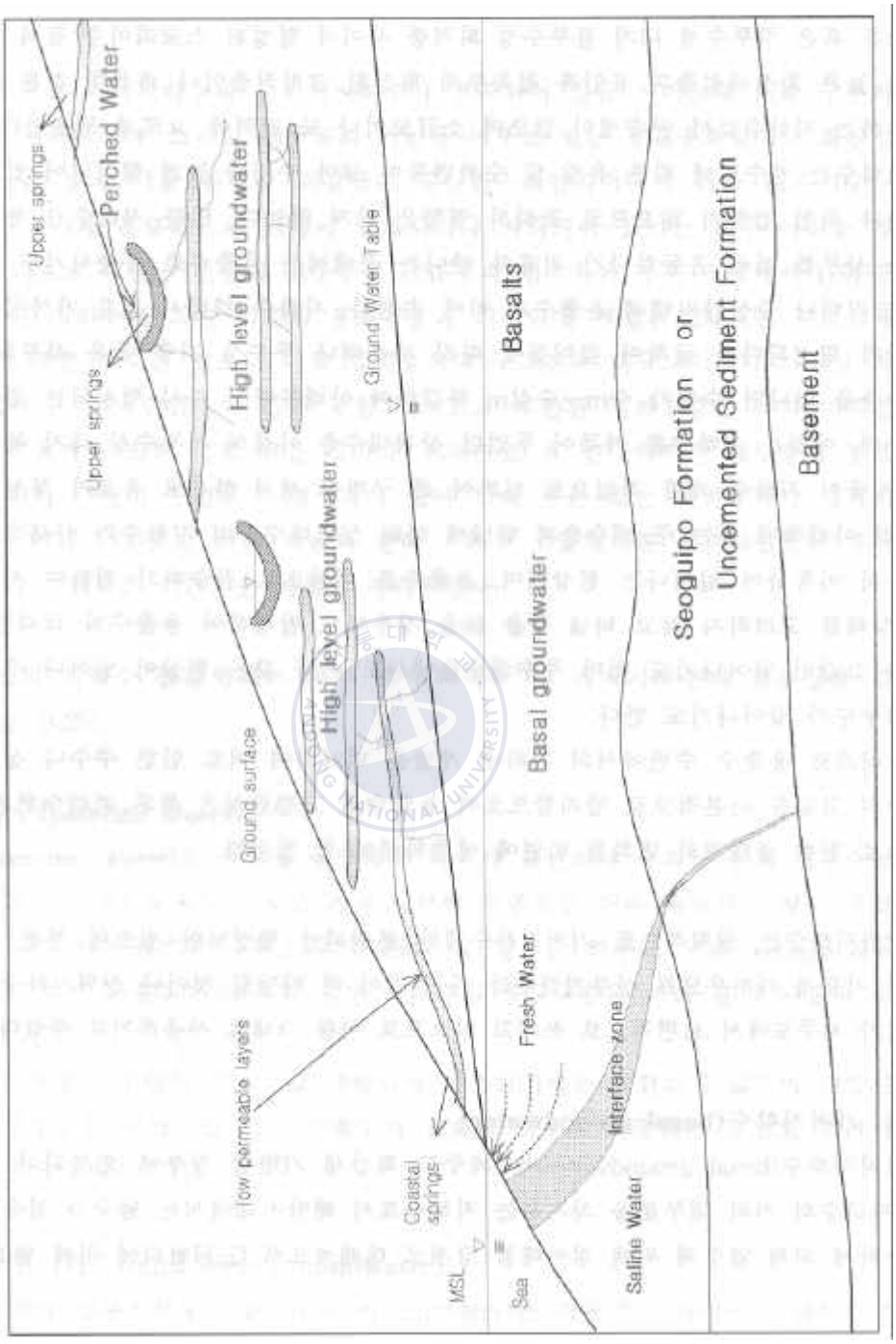


Fig. 3.25 Schematic model of groundwater occurrence in Cheju Island.

어 있고, 수위는 지역에 따라 차이가 있지만 조석의 영향을 받는다. 해안에서 한라산 중심부 쪽으로 들어가면 저투수성 혹은 불투수성 퇴적층인 SGF층과 USF층에 의해 담수가 해수와 직접적인 접촉이 차단되어 지하수는 일반적인 G-H원리가 적용되지 않고 부존한다. 수위는 해안으로 갈수록 강수의 영향을 많이 받는데 동부쪽은 그 영향이 적은 편이다.

특히 남부와 북부권역에서 양수에 의해 수위가 큰 폭으로 하강하는데 이러한 곳은 대부분 피압대수층에 부존하는 지하수가 피압되어 수위가 높게 형성됨에 의한 것으로써 높은 수위로 인하여 상위지하수와 혼동하기도 하며, 또한 피압된 수위(정수압면)를 그 지역의 진짜 수위로 인식하여 담지하수체가 해수면 아래 수백 내지 수천m까지 분포하는 것으로 잘못 알려지기도 하였다.

제 4 장 제주도 지하수 이용가능량

제 1 절 수자원

Ⅰ. 물수지 분석

수문학적인 단위로서의 유역은 분수계에 의해 둘러싸여 있는 것이 바림직하다. 그 이유는 분수계는 인접하여 내린 비와 그 결과에 의해 일어나는 표면유출을 구분하는 경계선이기 때문이다. 지표면에서 일어나는 지형적인 분수계와 지하지질에 의해 지배되는 수문학적 분수계는 일치하지 않으나 수문학적 분수계는 그 경계를 정확히 구분하기가 어려우므로, 유역의 경계로서 지형적인 분수계를 사용하는 것이 보통이다. 그러나 지하지질을 파악하고 대수층의 특성, 지하수위 변동상황 등을 파악하면 수문학적 분수계를 찾을 수 있을 것이다.

지하수 부존 및 유동의 지역적 단위를 지하수역(groundwater basin)이라 한다. 특히 제주도처럼 투수성이 매우 큰 지질구조에 따라 강수량이 우리나라 연평균 강수량 1,274㎜의 1.5배에 달함에도 불구하고 50㎜를 넘는 집중호우를 제외하고는 하천유출이 이루어지지 못하고 쉽게 지하로 침투하므로, 지형적인 분수계로 나누는 지표수역보다 수문학적 분수계로 구분하는 지하수역이 유역단위의 물수지 분석에는 더 적합할 것이다.

지하수는 그 근원이 강수에 의한 것이 거의 대부분이며, 강수의 다소에 의해 수량이 변화하게 된다. 강수가 내려서 지표로 유출되거나 지하에 침투하였다가 대기로 증발하여 다시 강수가 되는 과정이 수문학적인 물순환이며, 이에 따라 일정 유역내의 강수량과 직접유출량, 증발산량, 지하수 함양량간에 수문평형이 유지되는 것으로 보고 수문학적인 물수지를 분석하게 된다. 물수지를 분석하는 목적은 수자원을 효율적으로 개발하고 이용하기 위하여, 수자원의 부존형태와 부존량을 파악하고 이에 따라 적정개발량을 산출하고자 하기 위함이며 이의 방법으로 직접 측정

이 가능한 강수량, 직접유출량, 증발산량을 구한 후 지하수 함양량을 산출하고 지하수 이용가능량을 추정하게 된다. 그러나 제주도 전역에 대한 장기적인 강수량의 측정이 되어있지 못하고, 앞에서 언급한 것처럼 하천유출량과 해저유출량의 산정이 쉽지 않은 상황에서 물수지를 단기간에 분석하기에는 어려움이 매우 크므로 UNDP/FAO, 산업기지개발공사, 농업진흥공사 및 한국수자원공사가 산출한 물수지 분석 내용을 간단히 요약하여 비교해 보고자 한다.

물수지식 중에서 지하수식(groundwater equation)에 의하면

$$P = DR + E + I \qquad (6)$$

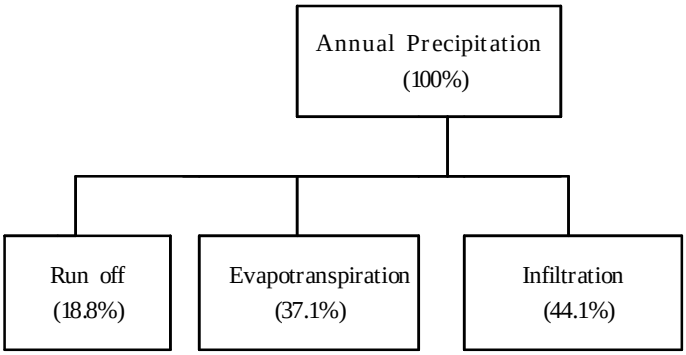
가 된다. (6)식에서 P 는 강수량, DR 은 직접유출량, E 는 증발산량이며. I 는 지하수증가량 즉, 지하수 함양량이다. 이들의 수치 중에서 P, E 는 기상관측으로, DR 는 하천유량 측정으로 알 수 있으므로 다음과 같이 I 를 산출할 수 있다.

$$I = P - DR - E \qquad (7)$$

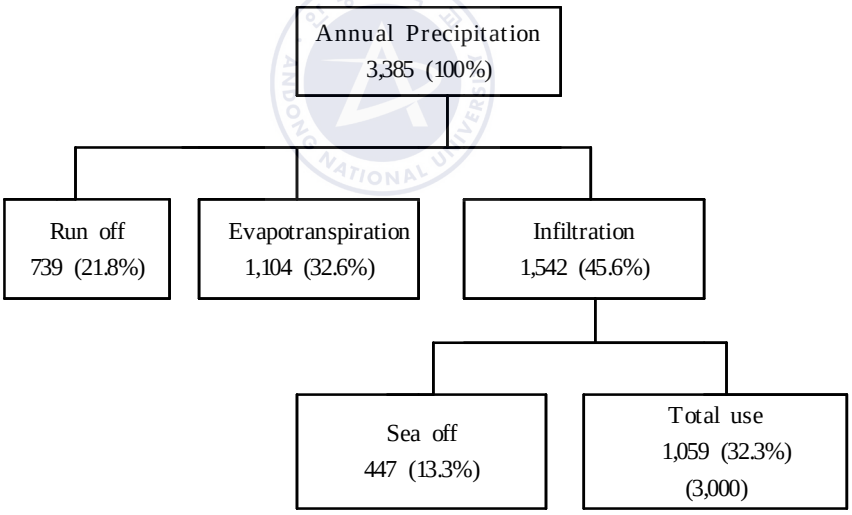
(7)식이 '81년 산업기지개발공사, '89년 농업진흥공사 및 '93년 한국수자원공사에서 지하수 함양량을 구하기 위하여 사용한 식인데, 산업기지개발공사와 농업진흥공사는 4개 지역으로 구분하여 분석하였고, 한국수자원공사는 16개 수역으로 구분하여 분석한 결과 지하수 함양량은 총 강수량의 약 44% 46%인 1,494 1,630백만㎥으로 추정하였다(Fig. 4.1).

UNDP/FAO(1972)에서는 제주도의 물수지를 분석하여 총 강수량을 100%로 할 때 직접유출량은 26%, 증발산량은 34%가 되며 지하수 함양량은 40%가 된다 하였다. Choi, S.H.(1990)은 이를 이용하여 분석한 결과 년간 총 강수량이 2,950백만㎥이므로 지하수 함양량은 1,180백만㎥이며 그 중 용출수량(272.3백만㎥)과 현재 사용중인 지하수 개발량(73.7백만㎥)을 제외한 834백만㎥이 재충진되어 이용가능한

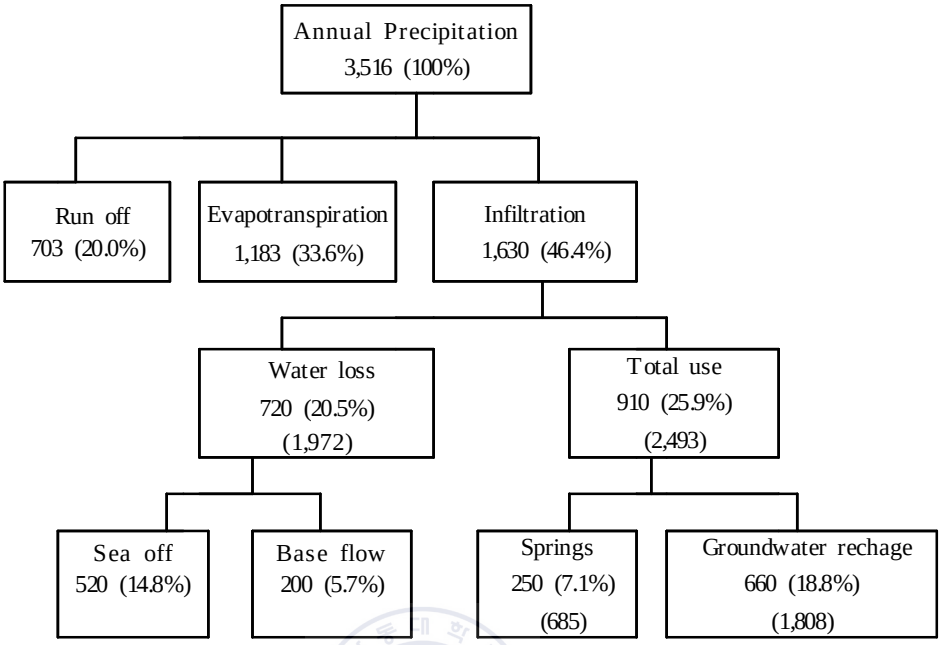
량으로 제시하였다.



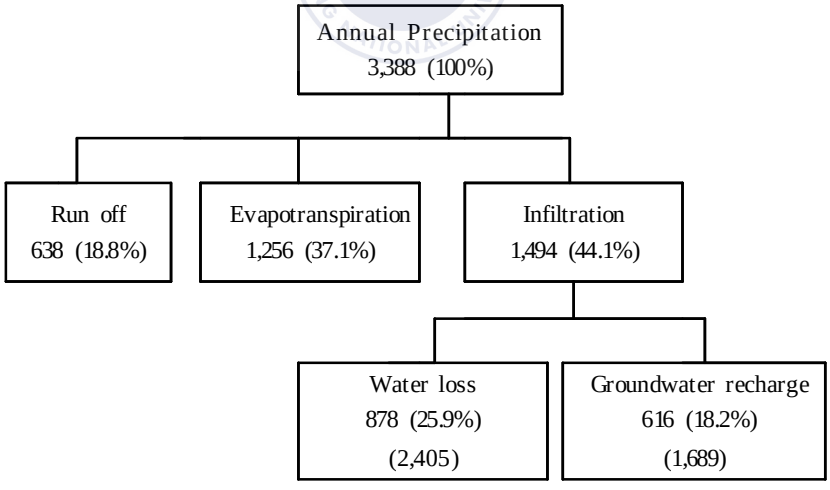
(A)UNDP/FAO(1972)



(B)ISWACO(1981)



(C) ADC(1989)



(D) KWRC(1993)

Fig. 4.1 Water balance analysis of Cheju Island[Unit : 10^6㎥/Y (10^3㎥/D)].

'81년 이후 '93년의 분석결과는 약 12년이 경과하였으나 분석결과는 거의 유사하게 나타난다. 총 강수량은 거의 같으나 직접유출량이 3% 줄고, 증발산량이 4.5% 늘어남에 따라 지하수 함양량은 1.5%정도 줄어든 것으로 분석되어 있다. 그러나 '81년과 '93에 계산한 강수량은 해안지역 측정치를 전 도에 걸쳐 등우선법을 이용하여 계산한 결과 산악지역의 강수량이 매우 적게 계산되어 있으며, 직접유출량 또한 50㎜ 이상의 집중호우를 제외하고는 하천유출이 거의 없음에도 불구하고 총 강수량의 약 20%나 계상함으로써 결과적으로 지하수 함양량을 너무 적게 추정한 것으로 판단된다.

Table 4.1에서와 같이 강수량(TP)이 10% 늘어나면 지하수 함양량(I)은 단순히 연간 150억㎥, 1일 411천㎥이 늘어나며, 직접유출량(RO)을 총 강수량 대비 10% 줄이면 연간 340억㎥, 1일 931천㎥이 늘어나므로 지하수 이용가능량(지하수 함양량의 약 41%)은 1,689천 ㎥/일에서 1,858천 ㎥/일 내지 2,620천㎥으로 크게 늘어나게 된다. 또한 이 두 가지를 모두 적용하면 지하수 함양량은 연간 522억㎥, 1일 1,430천㎥이 늘어나 지하수 이용가능량은 2,275천㎥으로 35%가 증가된다.

Table 4.1 Variation of groundwater recharge rate related with annul precipitation and run off

Classification	'93analysis (A)		AP×1.1 (B)		B-A	RO=AP×8.8 %(C)		C-A	B & C (D)		D-A
	10^6 ㎥/Y	%	10^6 ㎥/Y	%	10^6 ㎥/Y	10^6 ㎥/Y	%	10^6 ㎥/Y	10^6 ㎥/Y	%	10^6 ㎥/Y
Annual Precipitation	3,388	100	3,726	100	338	3,388	100	-	3,726	100	338
Run off	638	18.8	700	18.8	62	298	8.8	(-)340	328	8.8	(-)310
Evapotranspi-ration	1,256	37.1	1,382	37.1	126	1,256	37.1	-	1,382	37.1	126
Infiltration	1,494	44.1	1,644	44.1	150	1,834	54.1	340	2,016	54.1	522

여기에는 도시 개발로 인하여 지하수가 함양될 수 있는 지표면적의 감소현상으로 인한 지하수 함양량의 감소율과 상하수도의 누수에 의한 증가율은 포함되지 않았으나 제주도는 대부분의 강수가 지표를 통하여 해안까지 도달하지 못함에 따라 도시개발에 의한 지표면적의 감소는 고려하지 않아도 될 것이므로 지하수 함양율이 증가할 가능성이 더 크다.

이상의 이유로 적정한 지하수 함양량을 산정하여 최적의 지하수 이용가능량을 산출하기 위해서는 최근 산악지역까지 설치하여 측정 중인 강수량 자료를 사용하고 하천유출량(율) 및 증발산량을 3 5년간 정확히 측정하여 물수지를 재분석함이 절대적으로 필요하다.

Ⅱ. 지하수 포장량 비교

제주도 지하수 포장량에 대해서는 많은 연구와 발표가 있었으나 대부분이 "제주도지하수보고서"(농림부와 농업진흥공사, 1971) 및 "제주도지하수 장기개발계획 조사보고서"(농림수산부 외, 1989)를 기초로 하여 산출하였다. 그리고 최근에는 "중-동제주수역의 지하수 개발로 인한 해수침투" 연구에서 모델링을 이용하여 담수부존량을 연구한 사례(박남식과 이용두, 1997)가 있었다.

지하수 포장량은 조사자별로 88억㎥ 3,000억㎥으로 많은 차이가 있으며, 같은 조사자라도 연구방법에 따라 그 값이 상당한 차이가 있다. 이와 같은 이유는 제주도 지하수 포장체의 모양, 지하수 부존형태, 임해지역 지하수 부존특징인 G-H원리의 적용범위, 대수층의 분포 범위와 공극율, 모델링 수행시의 수위변화량 적용 등에 있어서 그 적용 방법이나 값이 서로 다름에 기인된 것이다.

① 농업진흥공사(1971)는 111공의 수위측정 자료를 근거로 제주도 중심부의 수위를 EL127.9m로 산정 하였고, 시추조사 및 우물 착정개발 결과에 의하면 제주도 화산체는 G-H원리가 잘 적용되는 화산체로 판단하고 이를 적용하여 구한 총 지하수 포장량은 약 340억㎥이 되며, 이 중 지하수 개발시 경제적 효과를 거둘 수 있는 EL100m 이하 지역의 가용 지하수 포장량은 약 123억㎥이 된다고 하였다.

Fig. 4.2는 보고서를 토대로 이를 산출한 담지하수체의 형태를 재구성한 모식도이다.

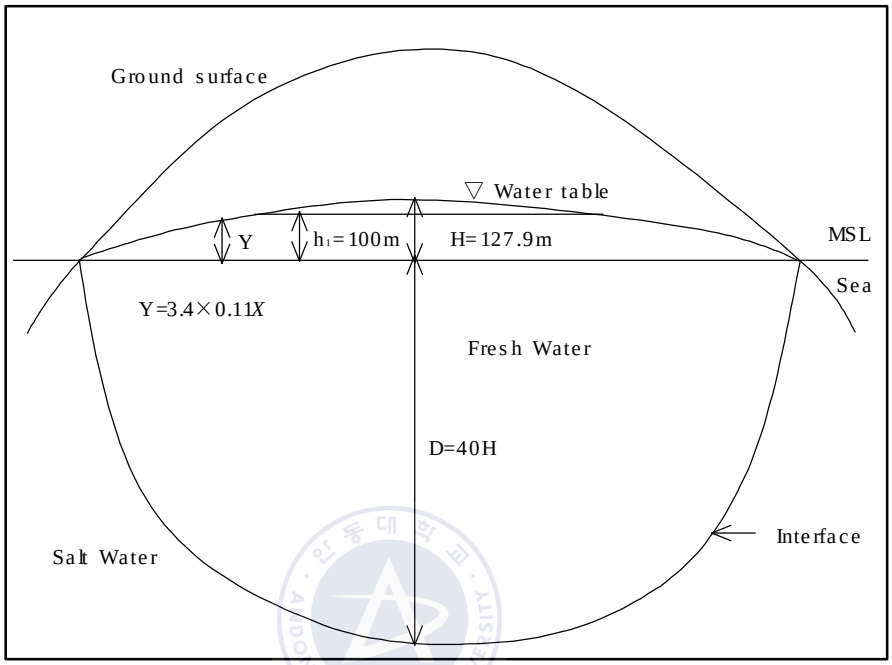


Fig. 4.2 Fresh groundwater bearing pattern of Cheju Island.

그 후 '89년에는 지하수조사 및 개발 자료를 토대로 해수면 아래 (-)140m 이하를 비대수층으로 가정하여 렌즈체에서 제외하고(Fig. 4.3) 담수체의 총 체적을 구하였고, 코아를 검층하여 주 대수층의 분포비율과 대수층 및 비대수층의 공극율을 계산하였으며, 이에 따라 렌즈체에 포화된 전체 지하수량을 약 320억m^3으로 산정하였다. 그러나 렌즈체의 중심부 쪽에 있어서의 절리 혹은 구열 발달은 바깥쪽보다 적을 것이므로 이의 생성비율을 감안하여 ⅓을 곱해주고 여기에 비산출율을 70%로 적용하면, 기저지하수 포장량은 75억m^3이 된다 하였다.

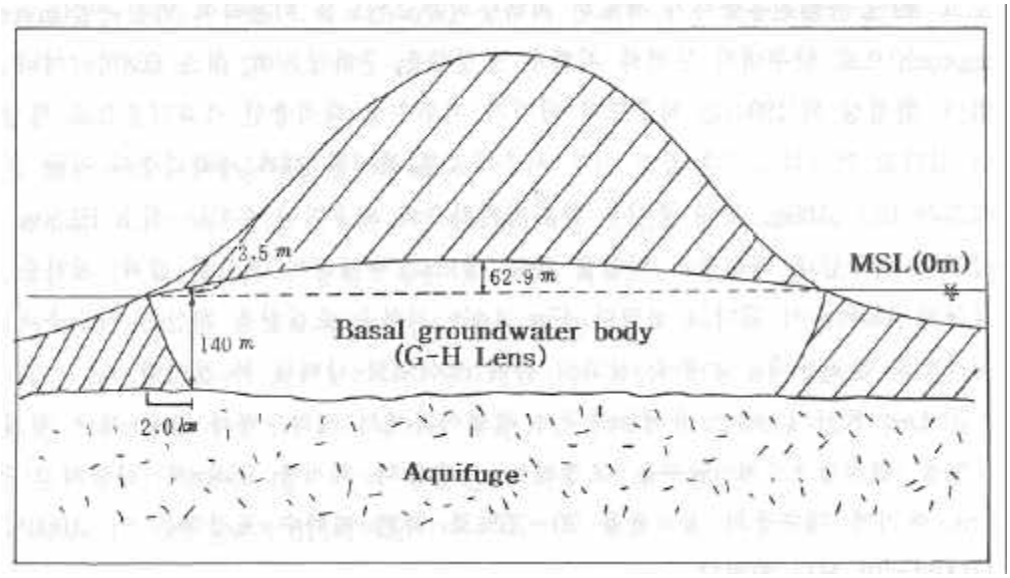


Fig. 4.3 The basal groundwater of Cheju Island(ADC, 1989).

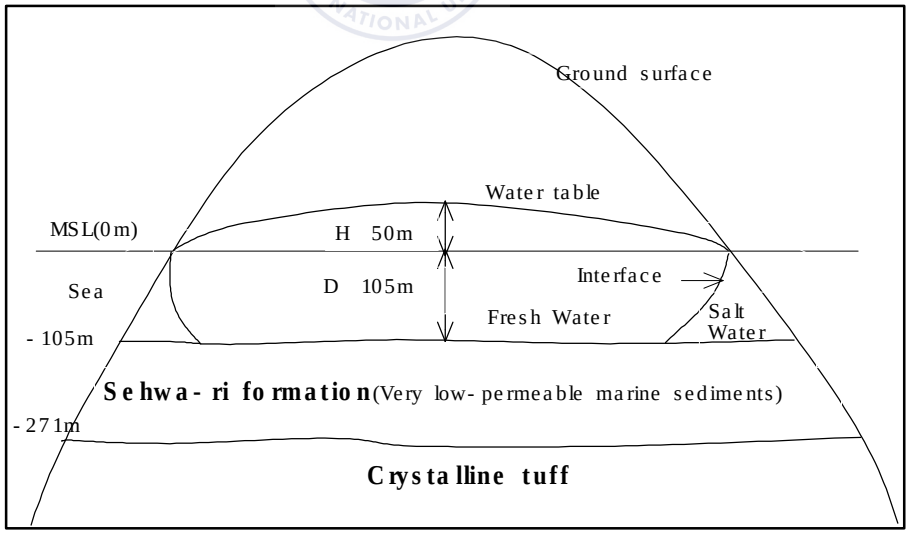


Fig. 4.4 Schematic model showing the shape of Sehwari-formation and fresh water body.

② 한정상(1991)은 제주도에는 G-H원리에 의거 지하수가 부존되어 있는 것으로 보고 '89년 농업진흥공사가 작도한 지하수위등고선도를 이용하여 역접근법(inverse approch)으로 담수대의 두께와 지하수 포장량을 구하였는데, 최소 658억㎥이라 하였다. 한정상 외(1994)는 제주도의 기저가 저투수성 퇴적층인 세화리층으로 형성되어 있다고 가정하고 7개 공의 심부 시추자료를 분석한 결과 세화리층의 평균 분포심도가 EL(-)105m, 도내 중심부 준기저지하수의 해수면상 수위는 최소 EL50m 이상이며 현무암내 대수층의 비율을 20% 정도로 추정하여 계산한 결과, 지하수 포장량이 440억㎥이 된다고 하였다. Fig. 4.4는 지하수 포장량을 계산한 담수층과 세화리층의 분포형태를 논문을 참고로 하여 모식도로 나타내 본 것이다.

③ Lee, K.H.(1992)는 유체동력학적 평형이론에서 지하수면과 담수-해수 경계의 모양을 결정함으로써 담수를 포장하는 대수층의 체적을 934㎦로 산출하고(Fig. 4.5), 여기에 대수층의 공극율을 20 35%로 하면 지하수 포장량은 약 2,000억 3,000억㎥이 된다 하였다.

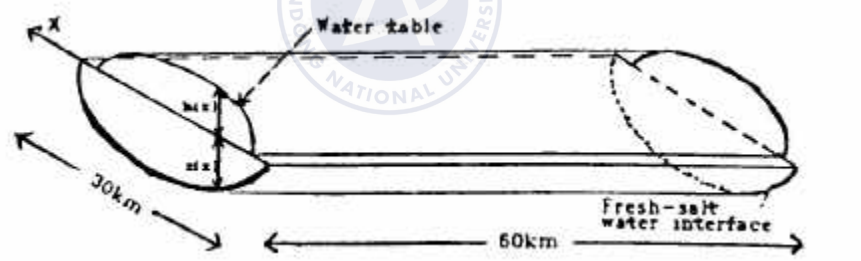


Fig. 4.5 Approximation of the shape of fresh water bearing aquifers of the Cheju Island(Lee, K.H., 1992).

④ 박남식과 이용두(1997)는 담수와 해수의 동역학을 고려한 전산모형 SIMLAS를 이용하여 중-동제주수역의 지하수 개발로 인한 지하수위 변화와 해수침투에 대한 예측 모델링을 수행하였으며, 이들 지역의 담수포장량이 4.5 45억㎥이 되므로 이를 제주도 전체에 확장시켜 계산한 결과 제주도 지하수의 총 포장량을 88억 430억㎥으로 산출하였으며 그 중 적은 값을 택하였다.

⑤ Choi, S.H.(1990)은 제주도를 4개 지역으로 나누고 각 지역 대수층의 체적과 저류계수를 곱하여 제주도의 해수준면 상부에 부존하는 지하수포장량을 구하였는데, 약 113억㎥에 달한다고 하였다.

Ⅲ. 지하수 이용가능량 비교

제주도 지하수에 대한 이용가능량에 대하여는 산업기지개발공사가 "제주도수자원개발종합조사(1981)"시, 농업진흥공사 제주도지사가 수행한 "제주도 지하수자원의 효율적 보존 및 안정적 활용방안(제주도와 농업진흥공사 제주도지사, 1986)" 연구와 농업진흥공사의 "제주도지하수장기개발계획(농림수산부 외, 1989)" 수립 조사시, 한국수자원공사가 "제주도 수자원 종합개발계획(건설부 외, 1993)" 수립 시 각각 조사하였다(Table 4.2). 이때 산출된 지하수 이용가능량은 각각 년간 1,095 730백만㎥, 910백만㎥과 616백만㎥이다.

산업기지개발공사(1981)는 지하수 이용가능량을 하와이의 Oahu섬과 비교하여 지하수 함양량의 약 70%에 해당하는 1,095백만㎥ (1일 3,000천㎥)으로 추정하였다.

농업진흥공사(1986)는 총 강우량 3,380백만㎥ 중 약 45%인 1,540백만㎥이 지하에 침투하며, 지하침투수 중 810백만㎥은 지표로 재 유출되거나 지하로 유출되고 나머지 730백만㎥이 지하에 포장되어 지하수개발 대상이 되는데 지질, 지형조건이 비슷한 하와이와 비교하여 경제적 개발한계를 70%로 가정하여 년간 510백만㎥, 1일 1,400천㎥으로 추산하였다.

그후 '89년에는 지하수 함양량과 강수에 의한 기저지하수량의 균형이 유지된다고 추정하여 다음과 같이 지하수 이용가능량을 산출하였으며 이를 요약하면 다음과 같다.

$$T = S + R + \Delta S + G \qquad (8)$$

지하수 침투량 T =1,630백만㎥/년(계산에 의함)

지표용출수량 S = 250백만㎥/년(용출수조사시 측정 값)

바다유출량 R = 520백만㎥/년(투수계수 등을 이용 계산)
지하손실량 ΔS = 200백만㎥/년(추정하여 산정)
지하포장량 (지하수 이용가능량) G

⑻식에서 지하수 침투량 T는 물수지 계산에서 구한 지하수 함양량 I와 같으며 R은 추정, ΔS는 계산, S는 직접 측정하여 그 값을 구하였다. 여기서 바다유출량과 지하손실량 ΔS를 합한 것이 자연손실량이며, 지표용출수량 S와 지하포장량 G가 수자원으로서 이용가능한 수량일 것이다.

지하포장량 G는 지하수로서의 이용가능량으로서 이는 지하수 개발가능량과 동일한 의미이며 G는 ⑻식을 이용하여 다음과 같이 구해진다.

$$G = I - (R + \Delta S) - S \qquad (9)$$

⑼식에서 구한 지하포장량, 즉 지하수 이용가능량은 연간 660백만㎥(1일 약 1,808천㎥)으로 지하수 함양량의 약 41%, 총 강수량의 약 19% 정도가 된다. 여기에서 수자원으로서의 이용가능량이란 기저지하수 포장량을 감소시키지 않는 물수지 평형상태에서의 완전한 이용한계로서 기저, 상위지하수 및 용출수를 포괄하여 이용할 수 있는 범위를 말한다.

'93년 한국수자원공사는 다음과 같이 지하수 이용가능량을 구하였으며 이를 요약하면 지하수의 적정 이용가능량은 개발대상이 되는 대수층의 효용성을 과도하게 손상시키지 않는 범위내에서 대수층으로부터 영구적으로 취수가능한 량으로 정의할 수 있다. 평형상태 수두를 주어진 대수층의 크기를 나타내는 저류수두(storage head)로 표시하면 일시적인 지하수위변동에 의한 영향을 줄이고 다음과 같이 평형방정식이 유도된다.

$$\frac{dq}{dx} = S\frac{dh}{dt} + W[I, D, L(H)] \qquad (10)$$

q : 단위지하수유출량, h : 지하수위, I : 지하수 함양량
L : 해안용출량, x : 해안으로터 거리
S : 비산출율(Specific yield), D : 양수량

식에서 $I>D$ 일 때 대수층내 평형방정식은 다음과 같이 된다.

$$L = I - D$$

또한 $h = h_o \times (\frac{I - D}{I})^{\frac{1}{2}}$ 이므로

$$D = I - I \times (\frac{h}{h_o})^2 \qquad (11)$$

(11)식에서 $\frac{h}{h_o}$ 를 지하수의 부존형태와 염수침입에 의한 오염가능성을 고려하여 동부 80%, 서부 65%, 남부 81%, 북부 70%로 유지시킬 때 지하수 이용가능량은 연간 616백만㎥(1일 1,689천㎥)이 되며 이는 지하수 함양량의 약 41%이며 총 강수량의 약 18%가 된다. 위 식에서 평형상태의 지하수위는 지하수 함양량과 양수량의 함수로 표시되며 대수층의 크기나 수리특성과는 무관한 것이며 또한 지하수 함양량이 일정하면 평형상태에서의 지하수 이용량은 평형수두를 얼마로 정하느냐에 따라 결정되며 지하수 이용량이 지하수함양량과 동일해질 때 평형수두 및 대수층의 저류량은 "0"이 된다고 하였다.

그 외에 Choi, S.H.(1990)은 연간 908백만㎥이, 한정상(1991)은 가장 적은 82백만㎥이 지하수로 이용가능한 양이라 하였다.

Table 4.2 Groundwater recharge and total storage for water balance

Unit : 10 ㎥/Y (10^3㎥/D)

Name	Year	Precipitation (㎜)	Annual precipitation (A)	Run off (B)	Evapo-transpiration (C)	Infiltration (D)	Groundwater recharge			Total storage
							(E)	E÷A	E÷D	
ADC	1971	1,578	2,860 (100%)	1,491 (52.1%)	229 (8.0%)	1,140(3,123) (39.9%)	-	-	-	34,000
ADC	1986	1,870	3,380 (100%)	1,840 (54.4%)		1,540(4,219) (45.6%)	730 (2,000)	21.6%	47.4%	
ADC	1989	1,918	3,516 (100%)	703 (20.0%)	1,183 (33.6%)	1,630(4,465) (46.4%)	660 (1,808)	18.8%	40.5%	32,000
ISWACO	1981	1,870	3,385 (100%)	739 (21.8%)	1,104 (32.6%)	1,542(4,225) (45.6%)	1,095 (3,000)	32.3%	71.0%	43,800
KWRC	1990	1,870	3,385 (100%)	650 (19.2%)	1,268 (37.5%)	1,467(4,019) (43.3%)	-	-	-	
Lee, K.H.	1992									200,000~ 300,000
KWRC	1993	1,872	3,388 (100%)	638 (18.8%)	1,256(3,441) (37.1%)	1,494(4,093) (44.1%)	616 (1,689)	18.2%	41.2%	
Choi, S.H.	1990	1,630	2,950 (100%)	767 (26%)	1,003(2,748) (34%)	1,180 (40%)	908 (2,488)	30.8%	77.0%	11,300
Hahn, J,S.	1991.4					163	82			72,400
Hahn, J.S.	1991.5	1,918	3,516 (100%)	703 (20.0%)	1,183 (33.6%)	1,630 (46.4%)	-	-	-	65,800
Hahn *et al.*	1994	1,872	3,388 (100%)	638 (18.8%)	1,256 (37.1%)	1,494(4,093) (44.1%)	616 (≒1,689)	18.2%	41.2%	44,000
Park & Lee										8,800

제 2 절 지하지질 분포와 담수체의 특성

Ⅰ. 지하지질 분포

담수체의 상·하한, 체적, 대수층의 종류와 비율 등을 파악하기 위하여 먼저 지하지질과 수위의 분포상태를 알아야할 것이다. 이를 위하여 27공의 고심도 조사·개발공과 66공의 공공관정의 지질주상도를 분석하여(Table 4.3 4.4, Fig. 4.6 4.12) 17개의 단면도를 작성하여 해안쪽에서 도 중심부로 수위, SGF층, USF층, 기반암인 Tuff층과 화강암층을 각각 연결함으로써 지하지질의 분포상태를 추정하고 도 중심부에서의 각층별 심도를 구하였다. Fig. 4.6은 단면선의 위치를 나타낸 것이며, Fig. 4.7 (A)와 (B)는 SGF층과 USF층의 산출심도를 나타낸 것이고, Fig. 4.8 (A)는 기반암인 Tuffs층의 산출심도를 도시한 것이다. (B)는 고심도공의 개발하한심도이며 이와 함께 ( )에 표시한 숫자는 화강암층의 산출 심도이다.

각 단면도를 분석한 결과 A와 Q단면선, B, C 및 D단면선, E와 F단면선, G, H, I, J 및 K단면선, L과 M단면선 그리고 N, O 및 P단면선이 서로 지질상태가 유사하게 나타났다. 각 단면선을 따라 공의 위치와 지층이 표시된 단면도를 지층의 변화형태가 유사한 4개 지역별로 구분하여 중첩시켜보면 Fig. 4.9 4.12와 같이 나타내어진다. 각 그림에 표시된 점선은 SGF층, 실선은 USF층, 일점쇄선은 Tuffs층의 산출심도를 각각 나타내고 3점쇄선은 화강암층의 산출심도이다. 이처럼 모든 단면선을 조합한 결과 도 중심부 지층의 분포심도 추정이 가능하였다.

1. 도 중심부의 수위와 지층분포

도 중심부의 수위는 분석결과 EL400 450m 정도로 높게 형성될 것이나 이는 피압에 의한 것이므로 대수층 본래의 상태가 유지된다면 수위는 EL250 300m 정도에 형성되어 있을 것이다.

SGF층은 약 EL200m에서부터 산출될 것이며, 도 중심부보다 남쪽의 EL800m 지역에서 대략 EL230m로 가장 높게 분포된 것으로 추정된다.

USF층은 해수면 위치인 EL0m에 형성되어 있을 것이다.

Table 4.3 Details on the deep drilled wells

Well name	No.	Elevation (m)	Well depth (m)	Water level (m)	Bottom elevation (m)	SGF elevation (m)	SGF thickness (m)	USF elevation (m)	USF thickness (m)	Bed rock elevation (m)	Bed rock thickness (m)	Granite elevation (m)	X-coord.	Y-coord.
Yeondong-1	1	114.00	900.00		-786.00	-46.00	90.00	-136.00	70.00	-206.00	280.00	-486.00	152115	47871
Dongseo CC1	2	405.00	375.00	200.00	30.00								164200	45360
Bonggae	3	440.35	437.00	168.14	3.35								166158	45004
Cheju T.C.	4	454.90	403.00	178.90	51.90	109.90	58.00						160046	43736
Namseongri-1	5	44.00	450.00		-406.00	-7.00	89.00	-96.00	310.00				158158	21852
Cheonjiyeon	6	45.00	1000.00		-955.00	34.00	61.00	-27.00	278.00	-305.00	421.00	-726.00	158380	22340
Jungmun-1	7	78.00	935.00		-857.00	-10.50	89.50	-100.00	136.00	-236.00	621.00		144909	22880
Hallanongjang	8	185.00	428.00		-243.00	84.00	99.00	-15.00	228.00				162280	27510
Sanghyo-1	9	296.00	550.00		-254.00	114.00	130.00	-16.00	195.00	-211.00	43.00		161446	28746
Jongdal-W1	10	20.00	701.00		-681.00			-103.00	125.00	-228.00	453.00		188788	51133
Jongdal-DW1	11	41.10	603.00		-561.90			-101.90	120.00	-221.90	340.00		186961	49762
Sehwa-1	12	176.00	680.00		-504.00			-84.00	180.00	-264.00	240.00		183026	46983
Cheju-4	13	203.40	960.00	9.40	-756.60			-116.60	121.00	-237.60	519.00		181912	46193
K.R.A	14	430.00	450.00	111.45	-20.00								144200	40400
Green	15	452.00	400.00	157.43	52.00								140658	35407
Tamrra CC1	16	478.49	433.00	71.49	45.49								141689	37010
Tamrra CC5	17	479.50	480.00	69.03	-0.50	54.50	55.00						141239	36113
Hamdeok-1	18	20.00	1500.00		-1480.00	-115.00	45.00	-160.00	255.00	-415.00	575.00	-990.00	169959	54562
Samdasu-1	19	430.00	420.00	135.80	10.00								169315	41586
Sangumburi	20	432.51	330.00	219.19	102.51								170790	43186
Isidol	21	365.00	668.00		-303.00	-69.00	17.00	-86.00	217.00				136720	34550
Shinhung-1	22	115.00	685.00		-570.00	-35.00	170.00	-205.00	90.00	-295.00	275.00		176253	32826
Ojo-1	23	2.50	851.00		-848.50			-117.50	147.00	-264.50	584.00		191888	45392
Pinks CC4	24	457.00	426.00	193.18	31.00								143230	29995
West Cheju CC	25	579.18	535.00	226.06	44.18								143775	32964
Seongup	26	155.00	740.00	9.00	-585.00	-116.00	29.00	-145.00	167.00	-312.00	273.00		182499	41161
Deogcheon	27	120.00	1500.00		-1380.00			-78.00	99.00	-177.00	773.00	-950.00	179472	51970
Average		**259.96**	**660.74**	**134.54**	**-400.79**	**-0.17**	**71.73**	**-99.19**	**171.12**	**-259.47**	**415.15**	**-788.00**		

Table 4.4 Details on the public wells

Line	Well number	Elevation (m)	Well depth (m)	Bottom elevation (m)	Yield (m)	Water level (m)	Pumping water level(m)	Drawdown (m)	SGF elevation (m)	Upper elevation of the confining layer(m)
A	F-125	15.00	90.00	-75.00	700	4.00	-60.00	64.00	-37.00	4.00
	D-221	44.05	153.00	-108.95	1000	10.55	-45.95	56.50	-53.45	10.55
	F-123	68.00	160.00	-92.00	1000	26.50	-49.00	75.50	-74.00	15.00
	F-135	85.00	105.00	-20.00	600	10.00	-5.00	15.00	10.50	10.00
	F-243	142.00	170.00	-28.00	800	13.00	11.00	2.00	-20.00	13.00
	D-280	312.00	320.00	-8.00	600	76.00	42.00	34.00	26.00	50.00
B	F-080	27.00	60.00	-33.00	700	4.00	3.85	0.15		4.00
	F-207	46.00	70.00	-24.00	700	3.00	-14.00	17.00		3.00
	D-026	59.20	101.00	-41.80	1337	16.40	15.00	1.40		16.40
	F-254	151.00	170.00	-19.00	800	11.00	8.00	3.00		11.00
C	F-010	52.87	100.00	-47.13	1600	7.07	-7.13	14.20		7.07
	D-047	73.00	90.50	-17.50	1200	8.30	7.80	0.50		8.30
	D-294	162.00	190.00	-28.00	800	6.00	-10.00	16.00		6.00
	F-259	220.00	240.00	-20.00	1000	12.00	5.00	7.00		12.00
	D-322	250.00	260.00	-10.00	700	15.00	-3.00	18.00		15.00
	D-302	260.00	280.00	-20.00	900	30.00	20.00	10.00		30.00
D	D-068	54.24	77.50	-23.26	1100	5.24	-9.86	15.10		5.24
	D-238	192.00	220.00	-28.00	1000	73.00	52.00	21.00		38.00
E	U-035	39.95	47.20	-7.25	2823	2.55	1.76	0.79		2.55
	F-112	101.00	200.00	-99.00	600	10.70	-39.00	49.70	-45.00	10.70
	D-227	172.00	190.00	-18.00	1000	61.00	4.00	57.00		23.50
	F-066	237.00	265.00	-28.00	800	27.00	17.00	10.00		27.00
	F-109	265.00	282.00	-17.00	500	17.00	-3.00	20.00		17.00

Table 4.4 (Continued)

Line	Well number	Elevation (m)	Well depth (m)	Bottom elevation (m)	Yield (m)	Water level (m)	Pumping water level(m)	Drawdown (m)	SGF elevation (m)	Upper elevation of the confining layer(m)
F	F-058	75.00	110.00	-35.00	1000	1.00	-9.00	10.00		1.00
	F-266	136.00	170.00	-34.00	700	6.00	-26.00	32.00		6.00
	F-086	230.00	230.00	0.00	800	93.00	65.00	28.00	17.00	69.00
G	F-023	46.33	72.00	-25.67	1200	3.33	-15.67	19.00		3.33
	D-211	59.92	86.00	-26.08	1200	1.52	-16.08	17.60		1.52
	D-003	87.42	104.00	-16.58	1710	4.12	4.05	0.07		4.12
	D-232	195.00	220.00	-25.00	800	35.00	-10.00	45.00		7.50
	F-267	333.00	340.00	-7.00	900	103.00	52.00	51.00	83.00	83.00
H	D-012	48.63	70.00	-21.37	1200	1.25	0.33	0.92		1.25
	F-160	83.00	105.00	-22.00	800	1.00	0.00	1.00		1.00
	D-042	133.08	171.00	-37.92	800	1.33	-10.92	12.25		1.33
	D-265	230.00	270.00	-40.00	600	26.00	23.00	3.00		14.00
	F-264	442.00	330.00	112.00	500	160.00	137.00	23.00		141.00
	F-268	355.00	360.00	-5.00	600	77.00	70.00	7.00		51.00
I	D-253	98.00	130.00	-32.00	1000	2.00	-12.00	14.00		2.00
	D-324	305.00	320.00	-15.00	800	74.00	30.00	44.00		21.00
J	D-028	28.24	41.00	-12.76	1901	1.04	0.94	0.10		1.04
	F-171	69.00	80.00	-11.00	800	3.00	2.50	0.50		3.00
	W-020	73.81	82.00	-8.19	1052	1.41	0.81	0.60		1.41
	F-270	205.00	230.00	-25.00	700	17.50	14.00	3.50		15.00

Table 4.4 (Continued)

Line	Well number	Elevation (m)	Well depth (m)	Bottom elevation (m)	Yield (m)	Water level (m)	Pumping water level(m)	Drawdown (m)	SGF elevation (m)	Upper elevation of the confining layer(m)
K	W-015	40.01	55.00	-14.99	1230	1.16	-0.84	2.00		1.16
	F-275	96.00	130.00	-34.00	900	1.00	-14.00	15.00		1.00
	F-273	103.00	140.00	-37.00	900	0.00	-15.00	15.00		0.00
	D-020	126.50	143.00	-16.50	1707	9.70	9.53	0.17		9.70
	D-309	195.00	200.00	-5.00	900	18.00	15.00	3.00		12.00
L	W-012	33.95	43.00	-9.05	812	1.29	0.51	0.78		1.29
	F-176	58.00	76.00	-18.00	700	1.00	-7.00	8.00		1.00
	D-148	107.82	140.00	-32.18	1313	3.82	-12.18	16.00		3.82
M	F-281	60.00	90.00	-30.00	700	1.00	-2.00	3.00		1.00
	D-022	62.42	90.00	-27.58	1237	16.92	14.42	2.50	-9.08	8.42
	D-097	134.61	170.00	-35.39	1050	39.41	24.61	14.80	17.61	36.61
	F-276	273.00	280.00	-7.00	600	125.00	101.00	24.00		91.00
N	D-036	70.26	92.00	-21.74	1183	14.76	13.76	1.00		14.76
	D-274	118.00	146.00	-28.00	800	30.00	-2.00	32.00	30.00	30.00
O	F-115	323.00	315.00	8.00	500	222.00	38.00	184.00	185.00	77.00
P	D-111	100.00	222.00	-122.00	1000	38.00	-65.00	103.00	4.50	13.50
	F-040	193.00	150.00	43.00	800	121.00	99.00	22.00	117.90	67.00
Q	D-081	16.74	130.00	-113.26	710	5.64	-7.96	13.60	-100.76	5.64
	F-291	50.40	92.00	-41.60	800	20.40	-4.60	25.00		2.40
	D-234	102.00	130.00	-28.00	1000	47.00	42.00	5.00	2.00	35.00
	D-002	132.35	152.00	-19.65	1530	47.05	44.89	2.16	-11.65	47.05
	F-297	184.00	214.00	-30.00	700	39.00	14.00	25.00		14.00
	F-099	205.00	220.00	-15.00	800	84.00	65.00	19.00		69.00

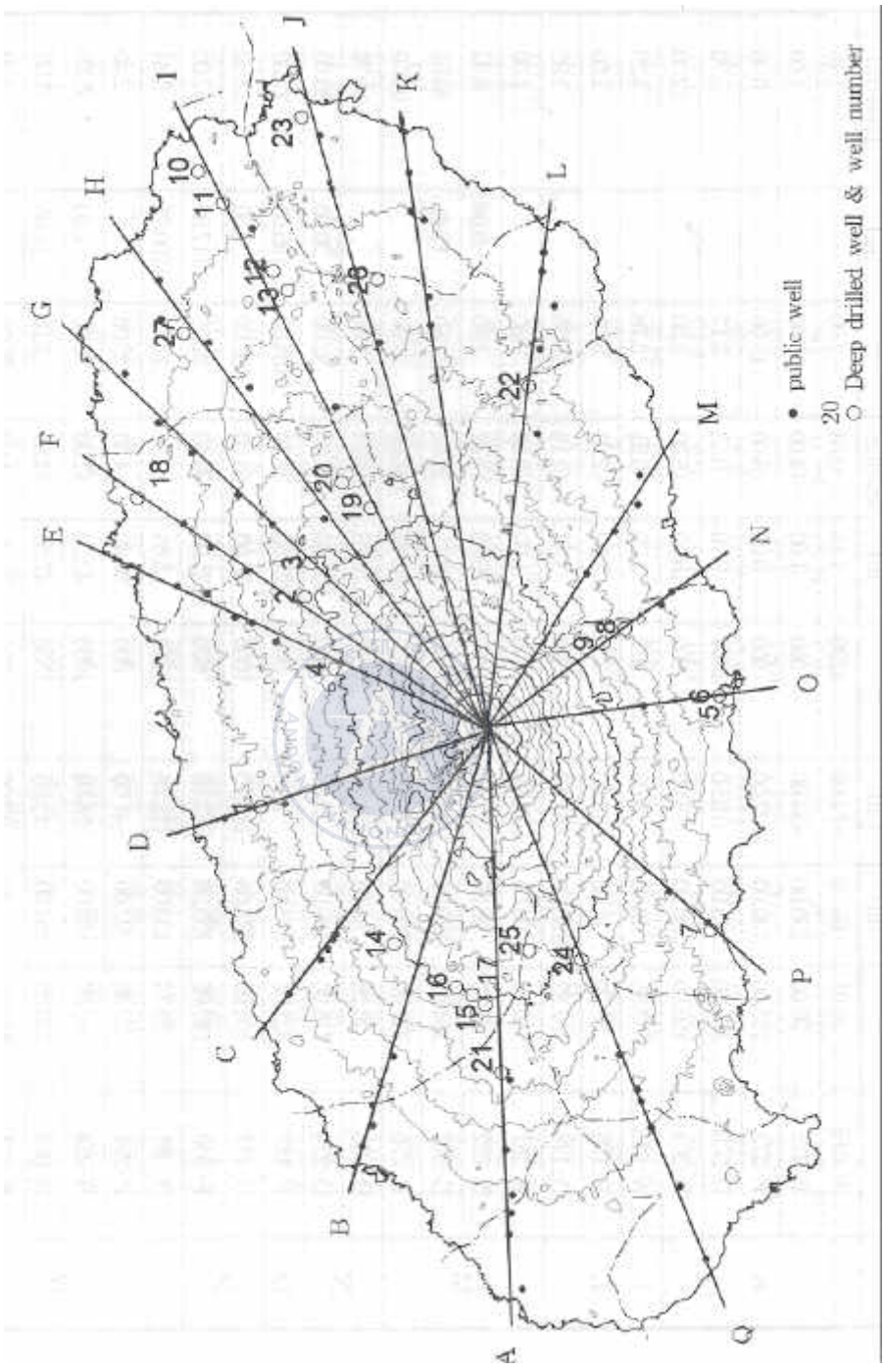


Fig. 4.6 Cross-section to identify the geologic structure.

기반암인 Tuff층은 EL(-)210m 이하에 분포되어 있고, 화강암은 EL (-)700m에서부터 산출될 것이다.

2. G, H, I, J 및 K단면선

G K까지 5개 단면선이 분포하는 지역은 표고 약 100 150m까지 수위가 EL10m 이하이며 표고 약 300m에서 수위가 EL100m 정도로 높아진다. 그러나 표고 300m 이상의 지역에서 해수면 이하로 (-)50 (-)80m 정도까지 개발한다면 수위는 현재보다 약 30 50m 정도 더 낮아질 것이다.

SGF층은 고기원이 제시한 북촌-표선선 동측에서는 성읍 고심도공에서만 EL (-)116m에서 산출되고 그 이외지역에는 나타나지 않는다. 그러나 단면도 작성결과 표고가 대략 400m인 지역에는 해수면 높이에서부터 산출될 것이다.

USF층은 중산간 이하지역의 약 EL(-)100 (-)150m 이하에 분포한다.

기반암인 Tuff층은 EL(-)250 (-)300m 이하에서부터 산출되며, 도 중앙부와 거의 수평을 이룬다.

화강암은 덕천에서는 EL(-)950m에서부터 산출되었고, 오조에서는 개발하한심도인 EL(-)848.5m까지 Tuff층이 나타났으므로 대략 EL(-)900m 이하에 관입 분포할 것이다.

이처럼 수위나 각 지층의 분포심도는 모든 단면에서 해안지역에서 중심부로 갈수록 높아지는 것으로 추정된다.

3. A와 Q 단면선

A와 Q 단면선은 표고 100 200m인 지역은 수위가 EL50m 이하이고 표고 200m 이상인 중산간지역은 EL250 300m로 상승한다. 그러나 이 지역 역시 개발하한심도를 해수면 아래로 낮추어 SGF층을 관통시키면 수위는 약 50m가 현재보다 더 내려갈 것이고 채수량도 30% 정도 증가시킬 수 있을 것이다.

SGF층은 표고가 400m 이하인 지역은 해수면 부근에 분포하며, 표고 500m 이상 지역은 해수면 위에 분포하므로 도 중심부쪽으로 갈수록 높아진다.

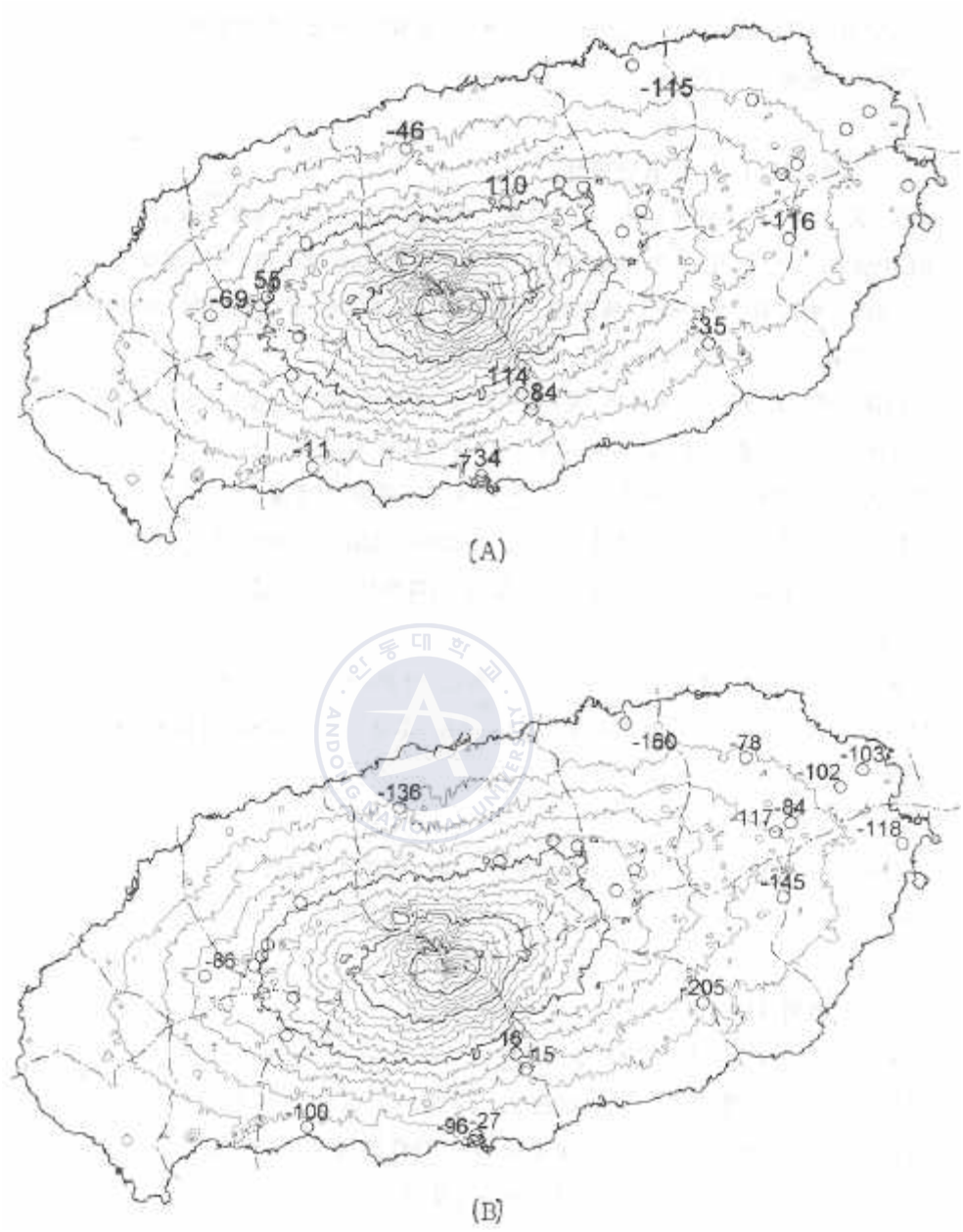


Fig. 4.7 Depth to the SGF and USF in Cheju Island(in meter). (A)SGF. (B)USF.

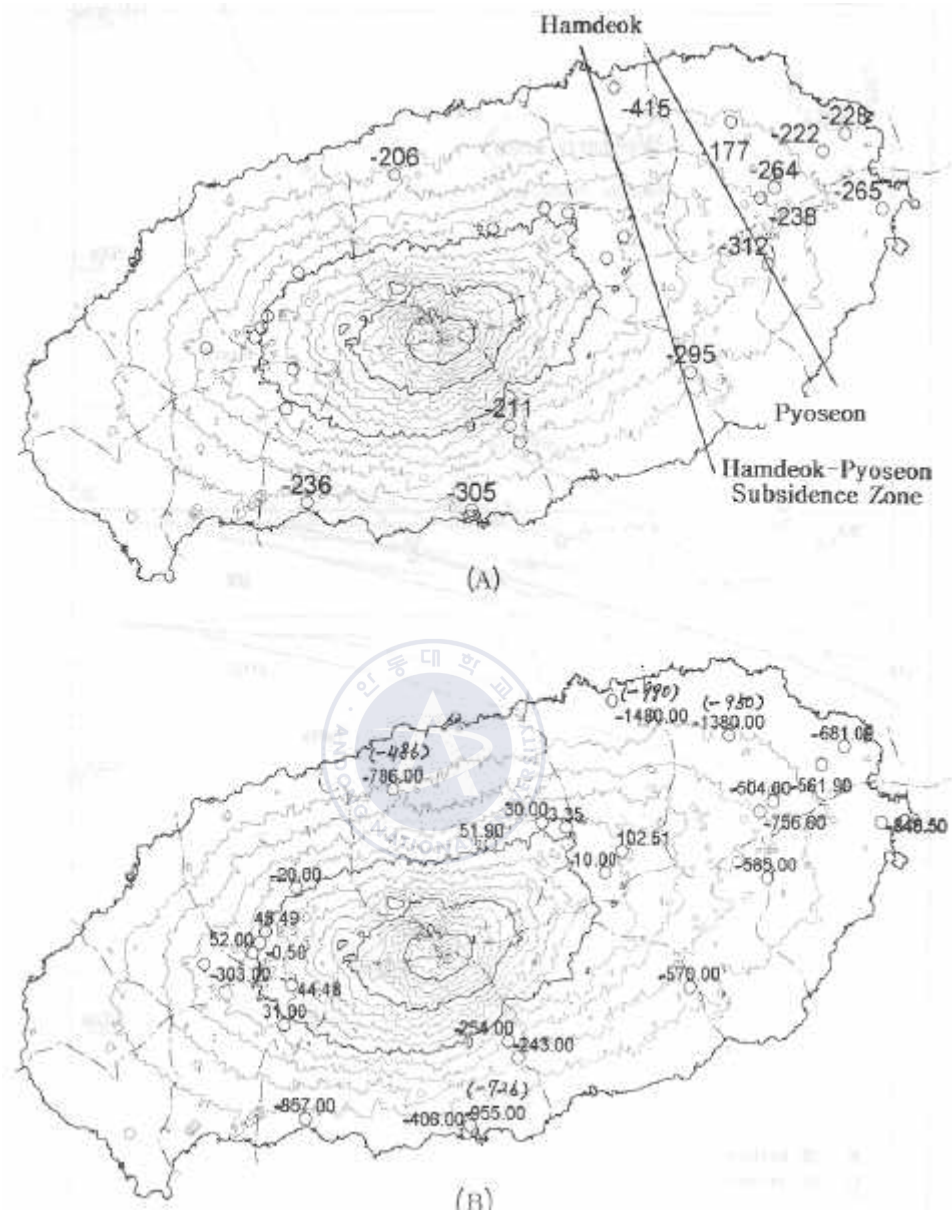


Fig. 4.8 Depth to the basement and bottom elevation of deep drilled well in Cheju Island(in meter). (A)Tuffs. (B)Bottom elevation of well and Granite.

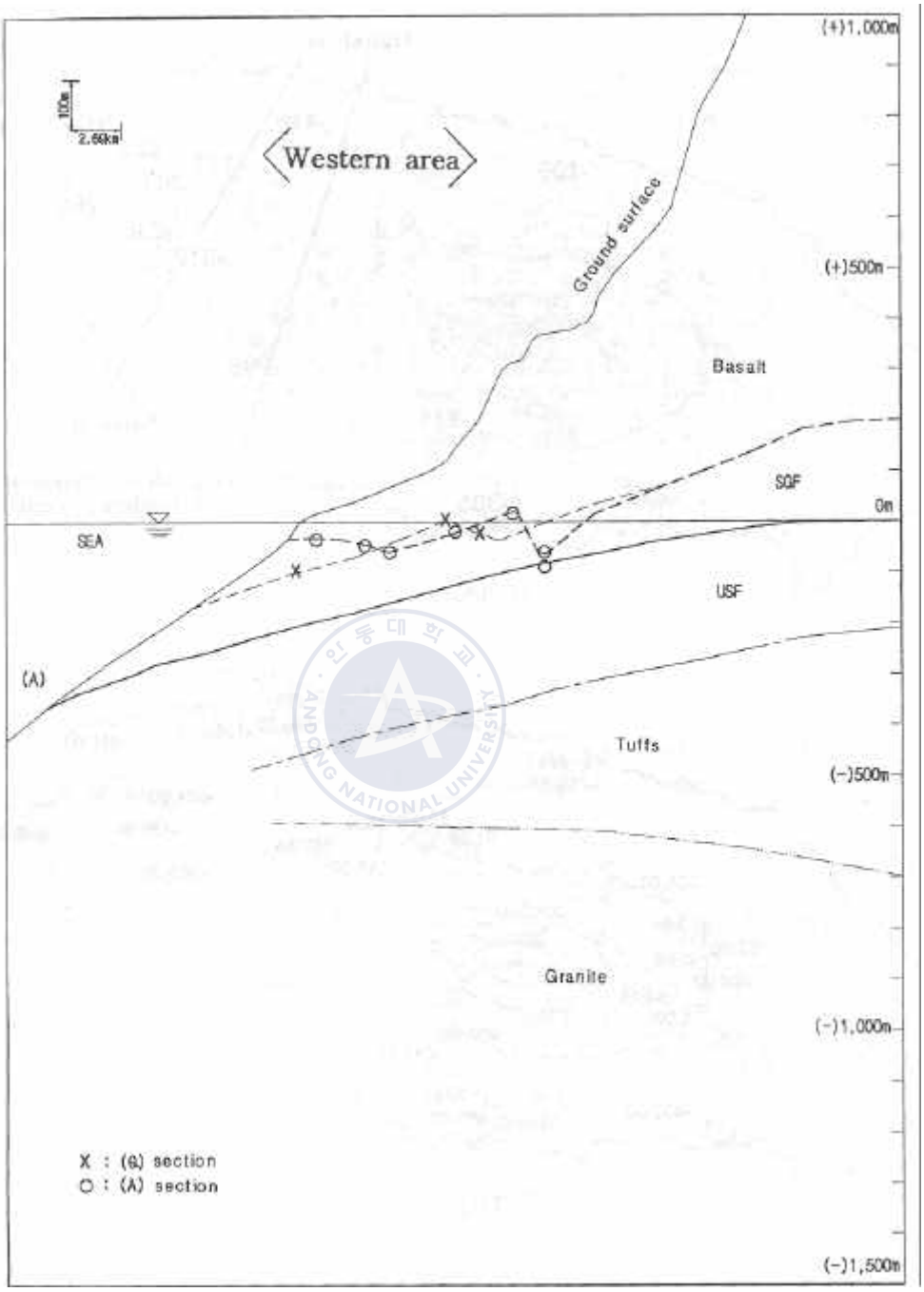


Fig. 4.9 Geologic structure of western area in Cheju Island.

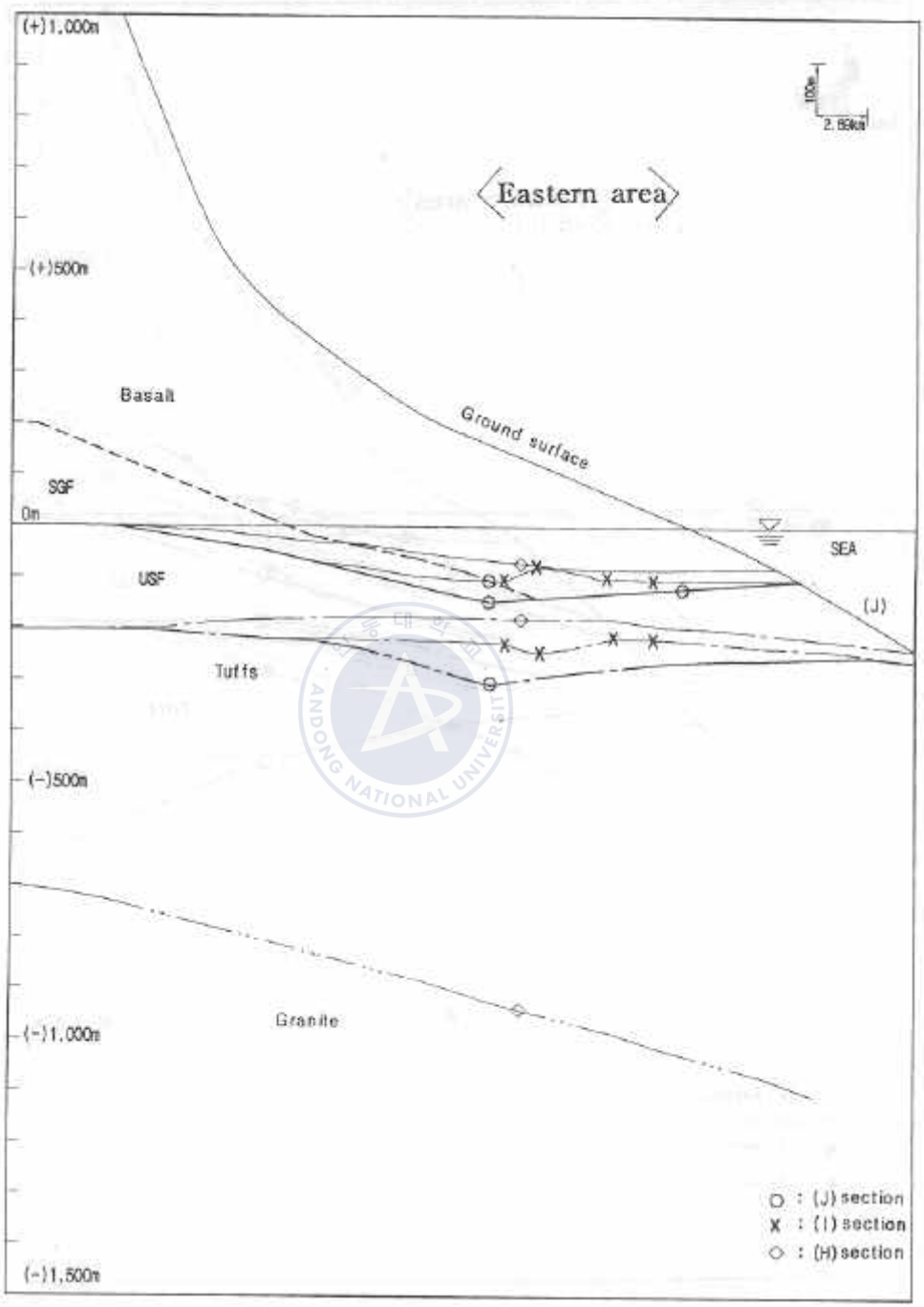


Fig. 4.10 Geologic structure of eastern area in Cheju Island.

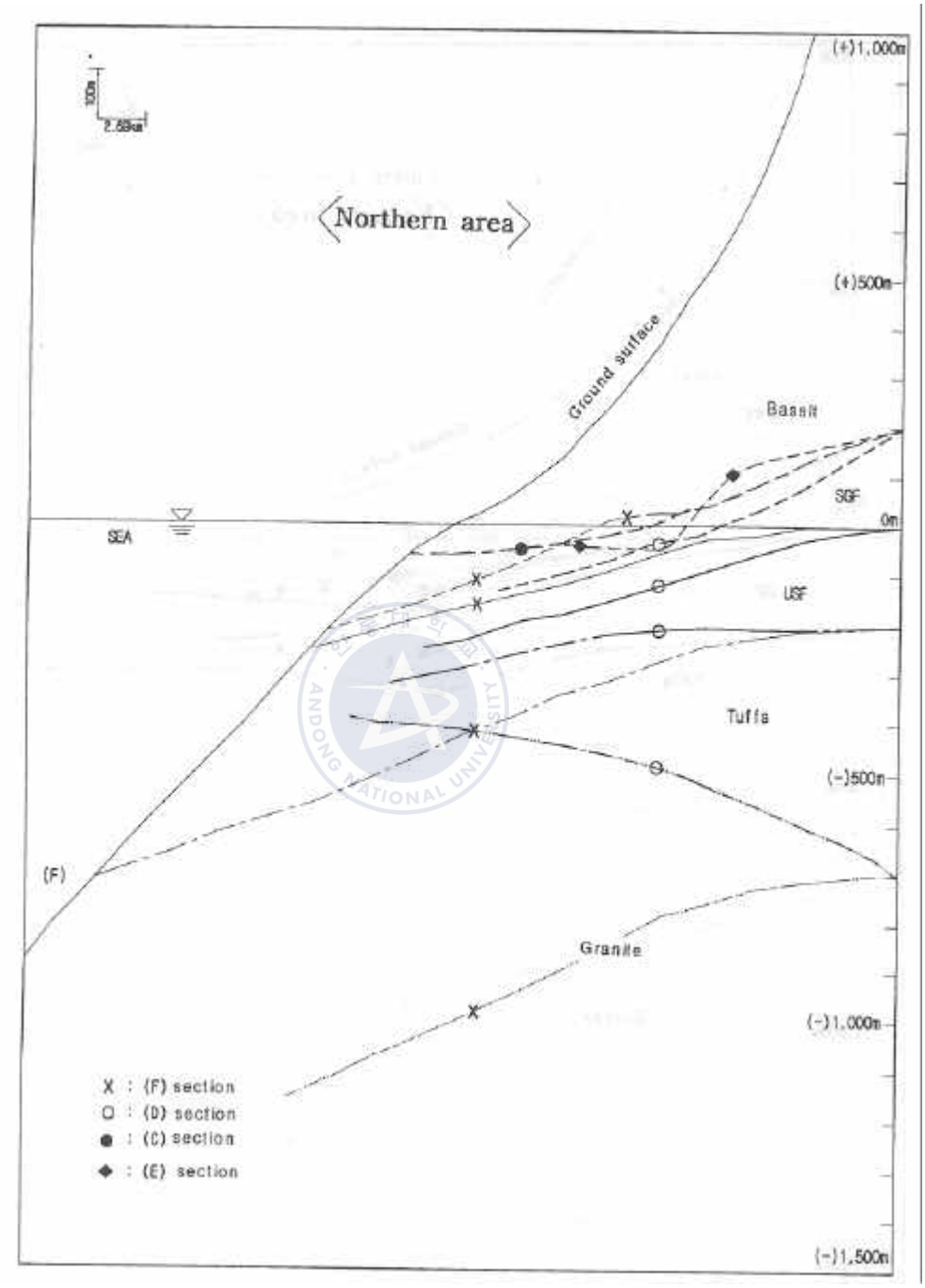


Fig. 4.11 Geologic structure of northern area in Cheju Island.

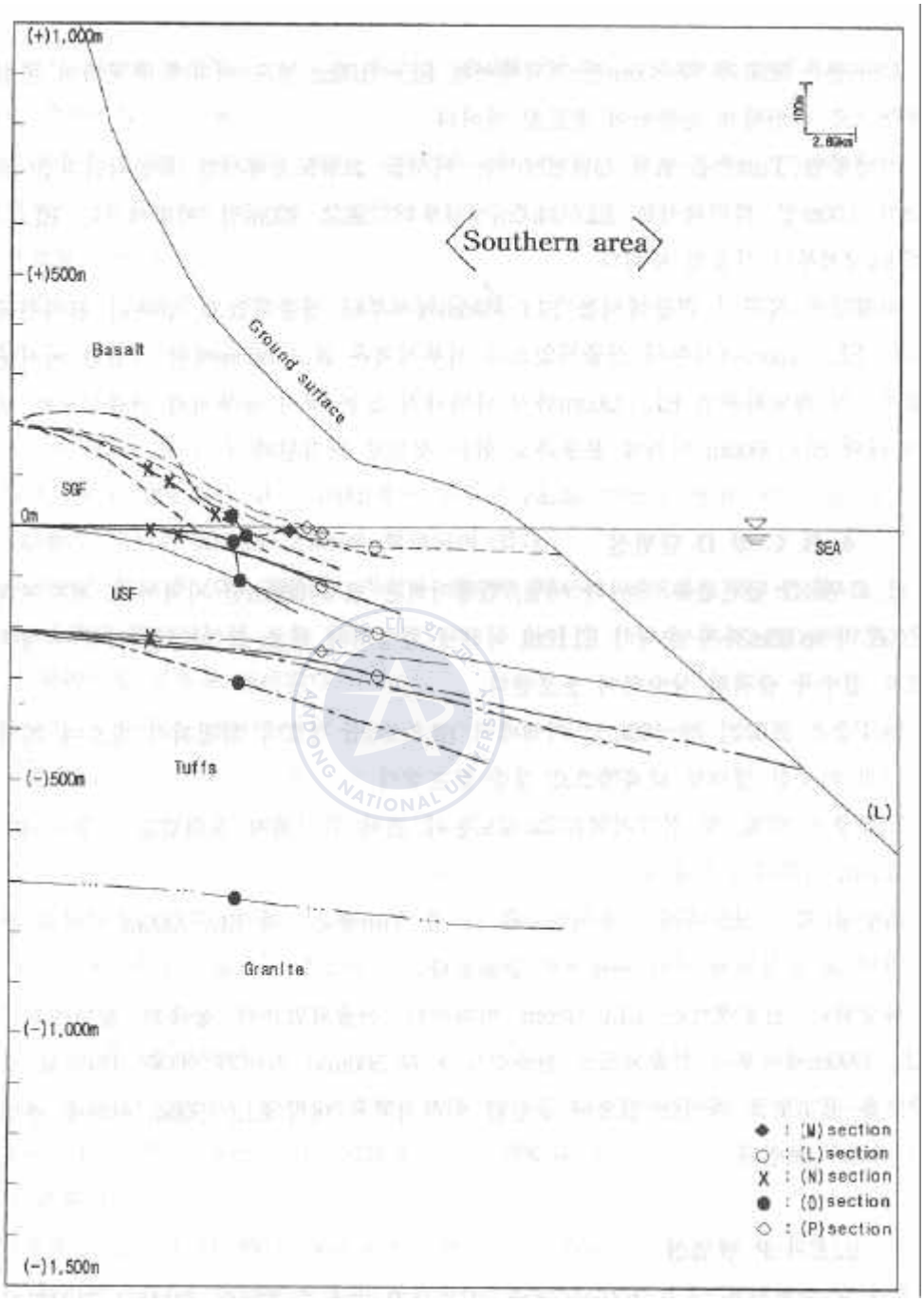


Fig. 4.12 Geologic structure of southern area in Cheju Island.

USF층은 표고가 약 300m인 지역에서는 EL(-)100m 정도 이하에 분포하며 중심부쪽으로 완만하게 상승하여 분포할 것이다.

기반암인 Tuff층은 A와 Q단면에서는 이시돌 고심도공에서만 확인되었지만 표고가 100m인 지역에서는 EL(-)400m에서부터, 표고 300m인 지역에서는 EL(-)350m에서부터 산출될 것이다.

화강암은 북쪽의 연동에서는 EL(-)486m에서부터 산출되었고, 남쪽의 천지연에서는 EL(-)726m에서부터 산출되었으나 서부지역은 표고 365m에서 개발한 이시돌 심부공의 개발하한인 EL(-)303m까지 나타나지 않는 것과 동부지역 산출심도로 보아 대략 EL(-)600m 이하에 분포하고 있는 것으로 여겨진다.

4. B, C 및 D 단면선

B, C 및 D 단면선은 수위가 애월, 한경지역은 표고 200m인 지역까지, 제주지역은 표고 약 60m까지 수위가 EL10m 이하에 형성되어 있고 그 이상인 지역은 내륙으로 갈수록 급격히 상승하여 분포한다.

SGF층은 표고가 약 100m인 지역에서 EL(-)50m 정도에 형성되어 있으며 지하수면과 비슷한 형태로 내륙쪽으로 상승 분포한다.

USF층은 애월 및 한경지역은 고심도공이 없어 확인하지 못하였고 연동의 EL(-)136m 이하에서 산출되었다.

기반암 역시 연동에서 산출되었는데 그 중 Tuff층은 약 EL(-)200m 이하에 분포하며 도 중심부와 거의 수평으로 분포한다.

화강암은 연동에서는 EL(-)486m 이하부터 산출되었는데 동측의 함덕에서는 EL(-)990m에서부터 산출되므로 산출심도가 약 500m나 차이가 난다. 그러므로 화강암은 표고별로 차이는 있으나 중산간 이하지역은 대략 EL(-)500m 이하에 관입된 것으로 보인다.

5. E와 F 단면선

E와 F 단면선은 표고 150 250m인 지역까지 수위가 EL50m 이하에 형성되어 있고 그 이상의 지역은 내륙으로 갈수록 급격히 상승하며 분포한다. 그러나 이 지

역 역시 개발하한심도를 SGF층 이하로 깊게하면 수위의 하강과 함께 양수량도 다소 증가시킬 수 있을 것이다.

SGF층은 표고가 약 200 300m인 지역은 해수면 부근에 분포하고, USF층은 해안변에서 EL(-)150m 정도에 분포하나 SGF층과 같이 중심부쪽으로 향할수록 상승하게될 것이다.

기반암인 Tuff층은 함덕에서 EL(-)415m에서 산출되었으며, 화강암은 EL(-)990m이하부터 산출되었다.

6. N, O 및 P 단면선

N, O 및 P 단면선은 표고 100m에서 수위가 EL30 90m에 형성되어 있고 표고가 300m인 지역은 EL150 250m에 형성되어 있다.

SGF층은 표고가 100 200m인 지역은 해수면 부근에 분포하고 도 중심부로 갈수록 급격히 높아지는데 표고 800m 정도가 도 안에서 가장 높은 EL230m에 분포하고 북쪽으로 갈수록 낮아진다.

USF층은 중문과 남성리의 해안 인접지역에서는 EL(-)100m에 분포하고 천지연에서부터 도 중심부까지는 거의 해수면 직하부에 분포한다.

기반암인 Tuff층은 표고가 100m인 지역에서는 EL(-)250 (-)300m 정도에 분포하고 도 중앙부로 갈수록 완만하게 상승하며 분포한다.

화강암은 천지연에서 EL(-)726m에서부터 산출되었으므로 대략 EL(-)700m 정도에 중심부와 거의 수평으로 분포하고 있는 것으로 여겨진다.

7. L과 M 단면선

L과 M 단면선은 SGF층이 해수면 아래 약 (-)50m에 분포하는데도 불구하고 SGF층 가까이까지 개발되거나 SGF층 내에 개발된 공의 수위가 EL20m 이하로 낮게 분포한다.

SGF층은 표고가 약 200 300m 이하지역은 EL(-)50m에, 표고 약 200 300m 지역은 해수면 부근에 분포하며, USF층은 해안지역에서는 EL(-)200m 정도에 분포한다.

기반암인 Tuff층은 신흥의 EL(-)295m에서부터 산출되었으나, 화강암은 EL(-)570m까지도 확인하지 못하였다. 그러므로 남원지역은 EL(-)750m 이하에, 신흥지역은 EL(-)950m 이하부터 산출될 것으로 추정된다.

8. 「함덕-표선 침하대」의 형성

Fig. 4.7(B)와 Fig. 4.8(A)에 의하면 함덕과 신흥 고심도공의 USF층과 Tuff층의 산출심도가 동, 서에 위치한 다른 공보다 50 240m 정도 더 깊이 분포하고 있다. 그리고 화강암도 서측보다 약 500m 더 깊이 분포한다. 이것은 함덕지역에서부터 신흥리를 포함한 표선지역까지 SGF층 퇴적이전에 발생했던 차별 침하형태로 나타나고 있다. 이러한 형태를 본 논문에서는 「함덕-표선 침하대」(Fig. 4.8 A)로 명명하였다. 또한 이 지역의 침하로 인하여 SGF층의 퇴적이 동부지역 해안까지 진행되지 못하고 EL150 200m 정도까지만 퇴적된 것으로 추정된다.

Ⅱ. 담수체의 상·하한

대수층은 일반적으로 투수성이 좋은 지층과 나쁜 지층과의 호층으로 구성되어 있다. 또한 지하수면 아래에 존재하는 대부분의 대수층은 1개의 층으로 되어 있지 않고 4 5개 층 혹은 그 이상으로 형성되어 있다. 주 대수층은 대수층의 면적이나 투수율에 따라 제1층이 될 수도 있고 제2층 혹은 제3층 등 어느 층도 주 대수층이 될 수 있으므로 지하수 개발 시 주 대수층의 관통 여부가 지하수량을 결정짓는 큰 요인이 될 수 있다. 또한 수위의 형성도 개발심도에 따라 달라지는 경우가 많다. 피압대수층의 경우 수위(수두)는 상위의 가압층 바닥 면에서 거의 지하수 함양지역의 수면 높이까지 상승한다.

한국자원연구소는 대수층이란 경제적으로 개발할 수 있을 정도의 지하수를 포함하고 있는 암석이나 지층을 말하므로, 제주도에서의 대수층은 지하수위면에서 U층(USF층을 말함), SGF층의 퇴적층이나 기반암까지의 구간을 대수층으로 보았다(제주도, 1988). 물론 주 대수층은 수십㎝에서 수m 두께의 크링커나 스코리아층이고 이들 사이에 있는 치밀한 용암류는 대수층으로 볼 수가 없으나 이들 크링커나 스

코리아층은 용암류에 발달한 수직절리, 용암류의 경계면 등에 의해 연결되어 있기 때문에 하나의 대수층으로 볼 수 있다 하였다. 그리고 제주시 및 애월 지역의 지하수공 자료에 의거하여 이 지역에서 지형고도가 높아짐에 따라서 지하수위면이 높아지는 이유가 대수층의 하한이라고 볼 수 있는 퇴적층이나 응회암의 분포위치가 따라서 높아지기 때문이라 하였다. 또한 제주도 지하수 이용에 있어서 경제적인 측면을 고려하여 지하수공의 개발을 지형고도 약 400m 이하로 고려한다면 대수층 구간은 해발고도 160m에서 (-)80m 정도의 구간으로 볼 수 있다 하였다.

그러나 이것은 제주도의 지하수가 자유지하수라는 전제아래서만 성립될 수 있다. 지하수면은 저투수성 퇴적층에 의해 압력수두를 형성하여 있으며, 치밀한 용암류는 결코 전부가 다 상하가 연결되어 있지 않으므로 이곳의 지하수위도 압력수두를 형성하게 된다. 즉, 이런 곳은 지하수를 개발하지 않았다면 수위가 상위가압층의 바닥면에 있게 되는 피압대수층의 특성을 무시한 결과이다. 제3장 32쪽에서 설명한 것처럼 제주도 화산체에는 피압대수층에 의한 피압지하수가 부존되어 있으므로 개발수위는 실제수위보다 더 높은 곳에 위치하고 있음을 확인하였다.

제주도에 있어서 지역별로 지하수위면의 높이가 큰 차이를 보이는데, 과거에는 자연수위부터 그 아래의 불투수성 지층 상부면까지를 대수층으로 가정하고 지하수 포장량을 구한 경우가 많았다. 이 경우 서귀포지역처럼 저투수성 퇴적층이 발달하거나 화산암류 내에서 불연속의 용암류에 의한 피압대수층이 부존하는 곳에서는 수위가 크게 상승하는 압력수두를 형성하므로 비산출량에 비하여 대수층의 체적이 크게 나타나게 되며, 이로 인하여 지하수 포장량이 실제보다 과다하게 계산되었다. 그러므로 우물의 지질주상도를 면밀히 검토하여 피압지하수가 부존하는 지역의 실제 수위를 찾아내어 이를 대수층의 상한으로 적용하여야 할 것이다.

수위측정시 주의해야할 또 한가지는 우물 속에 설치된 스크린의 위치이다. 스크린을 주 대수층에만 설치한다거나 일부 대수층에만 설치하게 되면 수위는 그 지역에서의 진정한 수위가 될 수 없을 것이며, 모든 대수층에 스크린이 설치되어 지하수의 유동이 자유로와 진다면 최종적인 수위는 정수압이 분포하는 곳에 형성될 것이다.

본 연구에서 결정한 대수층의 상한은 지하수 개발당시 처음 나타난 수위가 최종 개발 완료 후에도 거의 변동이 없이 형성되어 있는 우물의 수면을 대수층의 상한으로 결정하였다. 그러나 저투수성 퇴적층이나 파쇄성이 없는 점토층 등이 우물 내에 존재하는 피압대수층의 경우는 대수층의 상위 가압층으로 추정되는 상위 가압층의 바닥 면이 지하수체의 상부 면으로서 수위 면이 되므로 이를 상한으로 하였다.

대수층의 하한은 제주도의 기반을 이루고 있는 응회암류의 상부인 USF층까지로 하였다. 기반암을 대수층에서 제외한 것은 이 층이 지하수를 저장하거나 유동시킬 수 있는 유효공간이 극히 적을 것이기 때문이다. 그러나 기반암 상부의 퇴적암류인 SGF층 내에는 지하수를 저류할 수 있는 미고결 사층이 있으며, USF층 역시 세립질의 모래와 점토 등으로 구성되어 지하수의 저류가 가능할 것이므로 대수층에 포함시켰다.

제주도 대수층의 평균 상·하한을 지역별로 보면 동부지역은 EL100 (-)300m이고, 서부지역은 표고별로 차이가 크지만 대략 상한은 EL50 250m, 하한은 EL(-)350 (-)400m이다. 남부지역은 상한은 EL50 200m, 하한은 EL(-)250 (-)300m이다. 북부지역 역시 표고별로 차이가 크지만 대략 상한은 EL50 200m이고, 하한은 약 EL(-)200m이다. 그리고 도 중심부는 EL300 (-)210m 정도가 된다.

Ⅲ. 담수체의 공극율과 비산출율

제주도에 있어서는 용암류의 경계면에 발달한 크링커나 스코리아층, 현무암류에 발달된 파쇄대구간, 화산쇄설물층, 퇴적층에서의 미고결층 등이 주 대수층이 된다. 현무암류는 비대수층(aquifuge)으로서 지하수를 포함하거나 이동시키기 어려우나, 용암류가 냉각되는 과정에서 수축으로 인하여 수직 혹은 수평의 절리대나 균열대를 형성시키므로 이를 통하여 상·하부에 위치한 대수층과 연결되는 경우가 많으며 특히 FOB층은 층 사이에 화성쇄설층과 크링커 등의 투수성 지층을 많이 협재하고 있어 투수성이 가장 양호한 암석층으로 알려져 있다.

각각의 대수층별로 각각의 공극율과 비산출율을 측정하여 대수층에 부존하는 지

하수량과 산출가능량을 계산하여야 하나 본 연구에서는 공극율과 비산출율을 실제로 측정하지 못하고 일반적으로 알려져 있는 것을 이용하였다. Table 4.5는 제주도 화산체에 해당되는 여러 종류의 지층별 공극율과 비산출율인데 이를 알 수 없는 것은 지질적으로 유사한 층에 해당되는 값을 적용하였다.

본 연구에서 적용한 제주도 화산체 대수층을 이루는 각 지층의 공극율과 비산출율은 스코리아층, 크링커층 및 화산쇄설물층은 30%와 0.22, 화산암류의 파쇄대는 20%와 0.15, SGF층 내의 미고결사층은 35%와 0.10, USF층은 43%과 0.01을 적용하였으며, 비대수층의 화산암류, 기반암을 이루는 고결된 응회암류와 화강암 및 균열된 암은 공극이나 절리는 있으나 이들이 서로 연결되어 있지 못하므로 지하수 부존이 지극히 어렵고 또한 산출도 거의 되지 못할 것이므로 공극율과 비산출율을 "0"으로 하였다.

Table 4.5 Porosity and specific yield by formations

Classification	Formation	Porosity(%)	Specific yield	Remarks
Aquifer	- Scoria deposit	24 36	0.22	coarse gravel
	- Clinker formation	24 36	0.22	coarse gravel
	- Pyroclastic materials	20 35	0.22	sand & pebble
	- Fractured zone of volcanic rocks	20	0.15	
	- Unconsolidated sand formation of SGF	26 53	0.10	fine sand
	- Unconsolidated Sediment Formation	26 61	0.01	sandy clay
Aquifuge	- Volcanic rocks	3 35	0	
	- Sedimented tuffs	14 40	0(0.002 0.35)	
	- Fractured rocks	0 10	0(0.00050 0.05)	

Ⅳ. 담수체의 체적

지하수를 함유하고 있는 담수체의 상한과 하한선이 결정되었으므로 17개의 단면도를 작성하여 담수체의 체적을 구하였는데, 담수체의 체적은 총 432,830백만㎥이었으며 그 중 현무암층은 93,580백만㎥이고, SGF층은 149,210백만㎥, USF층은 190,040백만㎥이었다(Table 4.6). 현무암층의 담지하수체 체적이 적은 것은 실제 지하수위 아래부터 계산하였기 때문이다.

현무암층에 분포하는 대수층은 크링커층, 스코리아층, 화산쇄설층 및 발달된 구조대나 절리대 등이며, SGF층에는 층사이에 일부 분포하는 미고결사층이 이에 속하고 USF층은 층 전체가 대수층으로서 지하수를 저장할 수 있는 지층이 된다. 각각의 대수층 분포비율은 지질주상도를 분석하여 계산하였으며 이에 담지하수체의 체적을 곱하여 대수층의 체적을 구하였다. 각 층별 대수층의 분포비율은 현무암층은 20.6%, SGF층은 5%이고 USF층은 100%로서 대수층의 체적은 총 216,777백만㎥이다.

Table 4.6 Volume of the fresh groundwater body in Cheju Island

Classification	Formation	Volume (10^6㎥)	Ratio (%)	Volume of aquifer (10^6㎥)
Total		432,830		216,777
Basalt	Subtotal	93,580	100	19,277
	Scoria deposit, Clinker formation, Pyroclastic materials	14,037	15	14,037
	Fractured zone of volcanic rocks	5,240	5.6	5,240
	Volcanic rocks	74,303	79.4	-
SGF	Subtotal	149,210	100	7,460
	Unconsolidated sand formation	7,460	5	7,460
	Consolidated formation	141,750	95	-
USF	Uncemented sediment formation	190,040	100	190,040

제 3 절 지하수 이용가능량

Ⅰ. 지하수 포장량

지하수 포장량은 담지하수체의 체적에 각 대수층별 공극율을 곱하여 산출하였다.

제주도 화산체 담지하수체의 총 지하수 포장량은 895억87백만㎥으로 USF층이 가장 많고 현무암층이 가장 적었다(Table 4.7).

그러나 화산체 중심부로 갈수록 마그마 작용에 의해 SGF층과 USF층이 열변질을 받았을 것이며, 오름주변에서 지하수 개발에 실패한 경우가 많으므로 화산체의 중심부에 형성된 화도 주변 역시 지하수의 부존량이 극히 적을 것이다. 그리고 표고 500 600m 이상에 분포하는 장석현무암류, 안산암류, 조면암류 등은 치밀 견고하며 괴상으로 분포하므로 파쇄대나 절리대, 크링커층 등의 2차 지질구조를 적게 형성시켰을 것이며 화성쇄설층이나 스코리아층의 분포비가 적을 것이다. 그러므로 화산체 중심부의 지질상태를 감안하면 실제 지하수 포장량은 895억87백만㎥의 약 3/4정도인 671억89백만㎥이 될 것이다.

Table 4.7 The computed and assessible storage of the fresh groundwater

Classification	Formation	Volume of aquifer (10^6㎥)	Porosity (%)	Computed storage (10^6㎥)	Assessible storage (10^6㎥)
Total		216,777		89,587	67,189
Basalt	Subtotal	19,277		5,259	3,944
	Scoria deposit, Clinker formation, Pyroclastic materials	14,037	30	4,211	3,158
	Fractured zone of volcanic rocks	5,240	20	1,048	786
SGF	Unconsolidated sand formation	7,460	35	2,611	1,958
USF	Uncemented sediment formation	190,040	43	81,717	61,287

Ⅱ. 지하수 이용가능량과 최적 개발가능량

지하수 이용가능량은 각 대수층의 체적에 비산출량을 곱하여 구하였으며 그 결과 연간 65.2억㎥으로 산출되었다.

그러나 이 양 전부를 실제로는 이용할 수 없다. 그 이유는 표고가 높아질수록 지하수를 채취할 수 있는 심도가 크게 증가하여 개발비용이 기하급수적으로 늘어날 것이고, 2차적 지질구조의 감소로 지하수 부존량도 급격히 줄어들 것이므로 표고 500 600m 이하가 지하수로서 가장 많이 이용 가능한 지역이 될 것이다. 그리고 양수수위를 해수면 아래로 내려가지 않도록 하는 것은 물론이고 최소한 양수수위가 1 2m 이상이 되도록 유지시킨다면 이용가능한 양 중 최적 개발가능량은 더욱 줄어들게 된다.

또한 SGF층에 분포하는 미고결사층은 양수시 입자가 유출되지 않는 채수량 범위 안에서만 대수층으로 유효하며, USF층은 지하수를 채수하는 기능보다 상부에 부존하는 지하수를 받쳐주는 특성이 훨씬 강하다. 즉, 미고결의 SGF층에서는 300 400㎥/D 정도의 지하수를 채수할 수 있으나 USF층 내의 지하수는 거의 활용이 불가능하다. 개발공의 심도가 SGF층이나 USF층까지 내려갈 경우 채수시에 수위강하량이 큰 폭으로 증가하며, 이물질이 유출되지 않도록 수량을 조절하면 채수량이 급격히 감소하게 되는 현상이 이를 뒷받침한다.

그러므로 제주도 기저지하수의 최적 개발가능량은 잠재된 이용가능량 중에서 현무암층에서는 약 30%, SGF층에서는 약 10% 정도가 될 것이며, USF층의 지하수는 이용이 불가능할 것이므로 이를 제외하면 연간 1,236백만㎥, 1일 3,386,000㎥으로 산출된다(Fig. 4.8).

이상의 방법으로 구한 지하수 이용가능량과 최적 개발가능량은 지하수 함양량을 고려하지 않고 단순히 지하수 포장체의 포장능력과 산출능력 및 현장에서 양수시험한 경험을 바탕으로 산출한 것이다.

Table 4.8 Sustainable yield of the fresh groundwater in Cheju Island

Classification	Formation	Volume of aquifer ($10^6 m^3$)	Specific yield	Potential yield ($10^6 m^3$)	Sustainable yield ($10^6 m^3$)
Total		216,777		6,520	1,236
Basalt	Subtotal	19,277		3,874	1,162
	Scoria deposit, Clinker formation, Pyroclastic materials	14,037	0.22	3,088	
	Fractured zone of volcanic rocks	5,240	0.15	786	
SGF	Unconsolidated sand formation	7,460	0.10	746	74
USF	Uncemented sediment formation	190,040	0.01	1,900	

제 5 장 결 론

1. 제주도는 제3기말의 플라이오세 중기에서부터 제4기 플라이스토세 말까지 약 230만년 동안에 걸쳐 5회의 대단위 화산활동에 의해 형성된 화산도이다.

도 중심부에서는 정수압면이 약 EL250 300m에 형성되어 해안변으로 유하하고 있으며, 서귀포층, 미고결퇴적층 및 기반암인 Tuff층과 화강암층은 각각 EL200m, EL0m, EL(-)210m 및 EL(-)700m에서부터 분포하고 있다.

2. 함덕과 신흥 고심도공의 USF층과 Tuff층의 산출심도가 동, 서의 다른 공보다 50 240m 정도 더 깊이 분포하고 있으며, 화강암도 서측보다 약 500m 더 깊이 분포하는 것은 함덕지역에서부터 신흥리를 포함한 표선지역까지 SGF층 퇴적이전에 발생했던 차별 침하작용에 의해 「함덕-표선 침하대」가 형성되었었기 때문으로 해석된다.

3. 제주도 지하수는 동부지역 해안변을 제외하고는 피압대수층에 부존하는 피압지하수이다.

4. 개발된 수위자료를 근거로 구해본 동수구배는 평균 0.00771로서 서귀포시지역이 0.02889로 가장 크고 성산지역이 0.00043으로 가장 작다.

5. 제주도에서 지하수위의 가장 큰 변화요인은 강수량, 조석 그리고 우물에서의 양수이다.

6. 동부권역 담지하수 대수층에 대한 염수침입의 주된 원인은

첫째, 지하수위가 EL3m 이하로 낮게 분포함에 따른 자연적인 수위하강과 과잉양수에 의한 점이대의 상승

둘째, 투수성의 지질구조가 내륙 깊숙이 까지 거의 수평으로 분포하는 지질구조

셋째, 저투수성의 미고결퇴적층이 해수면 아래 평균 (-)100m 이하에 분포함에 의해 해수의 상승을 방지하지 못하는 것 등이며, 또한 이들 세가지가 복합적으로 작용하여 염수침입을 가속화시키기 때문이다.

7. 제주도 지하수의 부존형태는 주수(perched water), 상위지하수(상부지하수,

high level groundwater) 그리고 기저지하수(basal groundwater)로 구분된다.

주수는 투수성 용암류의 하부가 화산회나 응회암 등의 저투수성 혹은 불투수성 퇴적층으로 형성된 지역 상부에 부존하는 거의 유동하지 않는 지하수로서, 연속성이 없으며 소규모로 분포하는데 일부는 하부로 누출(seepage)되어 기저지하수체로 유동되기도 하며 일부는 하부의 불투수층을 따라 흘러 지표에 용출되기도 한다.

상위지하수는 지표면 가까이에서 불투수성 용암류 혹은 저투수성 내지 불투수성 퇴적층 사이에 형성된 스코리아층 등의 투수성이 높은 화성쇄설층과 용암류 접촉부에 형성된 크링커층이나 파쇄대 같은 곳에 부존 하는 지하수로서 연속성이 없으며 소규모이나 도 전역에 고르게 분포한다. 상위지하수는 원칙적으로 기저지하수체와 분리되어 형성되어 있으며 부존 위치 역시 지표에 가까우므로 상부지하수라 하는 것이 더 타당할 것이나 상위지하수라는 용어가 보편적으로 쓰이고 있으므로 이를 그대로 사용하기로 하였다.

기저지하수는 제주도 화산체 기반암 상부에 형성되어 제주도 지하수의 거의 대부분을 차지하는 지하수로서, 해안지대에서는 담수가 염수와의 비중차에 의해 염수체 위에 점이대를 경계로 대체적으로 G-H원리에 의해 형성되어 있고 수위는 지역에 따라 차이가 있지만 조석의 영향을 받으나, 내륙으로 가면 G-H원리에 지배되지 않으며 조석의 영향도 받지 않는다.

8. 제주도 지하수의 실제 포장량은 총 671억89백만㎥이며, 현무암층에 39억44백만㎥이, 서귀포층의 미고결사층에 19억58백만㎥이 포장되어 있고 미고결퇴적층에 612억87백만㎥이 포장되어 있다.

9. 제주도 기저지하수의 최적 개발가능량은 연간 1,236백만㎥으로 1일 3,386,000㎥이다.

참고문헌

건설부, 한국수자원공사, 제주도, 1993, 제주도수자원종합개발계획수립보고서

고기원, 1991, 제주도 서귀포층의 지하분포와 지하수와의 관계(요약), 대한지질학회 제46차 학술발표회, p.552

고기원, 고용구, 김성홍, 오상실, 박원배, 윤선, 1992, 제주도 동부지역의 지하지질 구조와 지하수위 변동 및 수질특성에 관한 연구, 제주도 보건환경연구원보 3권, p.15 43

고기원, 1997, 제주도의 지하수 부존특성과 서귀포층의 수문지질학적 관련성, 부산대학교 박사학위논문

김봉균, 1972, 서귀포층의 층서 및 고생물학적 연구, 손치무교수 회갑기념논문집, p.1 18

김영기, 1991, 제주도의 지역환경에 대한 영향평가, 제주도지하수함양·보전을 위한 심포지엄(발표요지), p.41 70

김영기, 최옥곤, 1991, 제주도 북서부 지역 화산암체의 지질공학 특성, 지질공학 1권 1호, p.19 37

김영기, 1995, 수리지질학사전

김옥준, 1969, 제주도 수자원의 특수성과 개발방안, 광산지질 2권 1호, p.71 80

남기영, 1966, 화산암지역 지하수의 특징(제주도를 중심으로), 지질광상 제3호, p.16 23

남기영, 1966, 제주도의 지질과 지하수, 국립지질조사소 지하수원조사보고 제3호 p.109 128

농림부, 농업진흥공사, 1970, 70년도 농업용수원개발 지하수조사 중간보고서, p.36 43

농림부, 농업진흥공사, 1971, 제주도지하수보고서

농림부, 제주도, 농어촌진흥공사, 1972 1997, 제주도지하수개발보고서

농림부·농어촌진흥공사·제주도, 1992 1997, 제주도 장기관측망 설치 및 조사 실적보고서

농림수산부, 제주도, 농업진흥공사, 1989, 제주도 지하수장기개발계획 조사보고서,

p.1 124
농림수산부, 제주도, 농업진흥공사, 1989, 제주도지하수개발보고서
농수산부, 농업진흥공사, 1974, 제주도와 OAHU도의 지하수(도서지방 수자원개발현황), p.1 167
농수산부, 농업진흥공사, 1985, 지하수개발사, p.426 451
농어촌진흥공사, 1996, 한국지하수총람, p.68 69
민경덕, 원중선, 황석연, 1986, 제주도에 분포하는 화산암류 및 퇴적암류에 대한 고자기 연구, 광산지질 19권 2호, p.153 163
박남식, 이용두, 1997, 중-동제주 수역의 지하수개발로 인한 해수침투, 대한지하수환경학회지 4권 1호, p.5 13
박원배, 1993, 제주도 지하수의 수위변동에 관한 연구, 제주대학교 석사학위논문
서해길, 조한익, 남기영, 1964, 제주도 남부지하수원, 국립지질조사소 지하수원조사보고 제1호, p.77 91
손주형, 1999, 제주도 기저지하수의 수위분포에 관한 연구, 부경대학교 석사학위논문
안건상, 이현구, 임현철, 1995, 제주도에서 산출되는 화강암에 관한 연구, 자원환경지질학회지 28권 5호, p.513 518
원종관, 1975, 제주도의 형성과정과 화산활동에 관한 연구, 건국대학교 박사학위논문
원종관, 1976, 제주도의 화산암류에 대한 암석 화학적인 연구, 지질학회지 12권 4호, p.207 226
원종관, 1976, 제주도에 분포하는 화산구의 구조해석에 관한 연구, 건국대 이학논집 2권, p.33 43
원종관, 이문원, 김문섭, 이동영, 박계헌, 1993, 제주도 남사면 일대에 분포하는 화산암류의 화산층서 및 암석학적 연구(요약), 지질학회 48차 학술발표집, p.63 64
윤상규, 한 대석, 이동영, 1986, 제주도 남부지역의 제 4기 지질조사연구, 동력자원연구소, KR-86-2(B)-2.7.
윤선, 고기원, 김인탁, 1994, 제주도 형성사 98호, p.148 164
윤선, 1998, 제주도 종합층서와 지하지질구조, 한국과학재단 연구보고서, p.27 28,
윤정수, 1986, 제주도 동부지역 지하수의 고염도 요인에 관한 연구, 제주도연구 3집, p.43 53
이동영, 김주용, 1991, 제주도의 화산활동사와 층서 고찰(요약), 지질학회지 27권

5호, p.538
이동영, 김주용, 1993, 제주도 화산활동사, 제주도 화산지질에 대한 심포지움, 한라산-백두산 화산비교 연구회
이문원, 한규언, 1977, 제주도의 지질과 지하수와의 관계 연구(1), 제주대학 논문집 9집, p.193 204
이문원, 1982a, 한국 제주화산도의 지질, 암석광물광상학회지(일본) 77권, p.55 64
이문원, 1982b, 한국 제주화산도의 암석학, 암석광물광상학회지(일본) 77권, p.203 214
이문원, 1994, 제주도의 형성사와 지질구조, 대한지하수환경학회 전략광물자원연구센터 공동 학술심포지엄 논문집, 제주도 지하수자원의 환경학적 보전과 개발이용, p.54 74
이문원, 원종관, 이동영, 박계현, 김문섭, 1994, 제주도 남사면 화산암류의 화산층서 및 암석학적 연구, 지질학회지 30권 6호, p.521 541
이성숙, 윤선, 윤혜수, 고기원, 1995, 제주도 신생대 지층에서 산출된 석회질 초미화석, 고생물학회 제1차 학술발표회 요약문, p.14 16
제주도, 농업진흥공사제주도지사, 1986, 제주도 지하수자원의 효율적 보존 및 안정적 활용 방안, p.5 20
제주도, 1997, 제주의 오름
제주도, 1997, 제주도 중산간지역종합조사
제주도, 1998, 제주·애월도폭 지질보고서, p.7 10, p.200 228
최순학, 1988, 제주도의 형성과 지하수 특성, 제주도 연구 5집, p.59 77
최순학, 김영기, 1989, 제주도 지하수의 수질특성, 지질학회지 25권 3호, p.230 238
한국수자원공사, 1995, 제주도 광역상수도 Ⅰ단계 기본 및 실시설계용역 기본설계 보고서
한정상, 1991, 제주도 지하수자원의 오염현황과 관리보존대책, 제주도 지하수함양·보전을 위한 심포지엄(발표요지), p.41 70
한정상, 한규상, 김창길, 김남종, 한찬, 1994, 제주도 지하수자원의 최적 개발가능량, 대한지하수환경학회지 1권 1호, p.33 50
황용수, 배현숙, 서동일, 김경수, 김천수, 1999, 임해지역의 모의 지하 비축 시설 주변에서 해수 침투에 의한 지하수 유동 특성, 지질공학 9권 1호, p/17 29

Kim, B.K., 1972, A Stratigraphic and paleontologic syudy of the Sinyangri Formation in the vicinity of Synyangri and Gosanri, the Jeju Island, J. Geol. Soc, Korea, Vol.5, No.2, p.103 121

Choi, S.H., 1990, Hydrogeological and Hydrochemical Characteristics of Groundwater in Cheju Island. D. Sc. Thesis of Kyungpook National Univ.

Choi, S.H., Kim, Y.K., Lee, D.Y., 1991, Sea Water Intrusion in the Coastal Area of Cheju Volcanic Island, Korea. J. Korea Inst. Mining Geol. Vol.24, No.3. p.319 327

Ground water manual, 1971, 1st ed. A Water Resources Technical Publication, p.1 41

Fetter, C. W., 1994, Applied Hydrogeology 3rd ed. p.358 377

Halaguchi, 1931, **濟州道의 地質, 朝鮮地質調査要報** 10**卷** 1**號**, p.1 34

Lee, M.W., 1982, Petrology and Geochemistry of cheju Volcanic Island Korea, The Science Reports of the Tohoku Univ. Series **Ⅲ**. Vol.**XV**, No.2.

Lee, K.H., 1992, On the Hydrodynamic Balance of Fresh and Salt Waters in the Cheju Island, J. Geol. Soc. Korea, Vol.28, No.6. p. 649 664

Todd, D. K.,1980, Groundwater hydrology, 2nd ed.

Won, J.K., Matsuda, J., Nagao, K., Kim, K.H., Lee, M.W., 1986, Paleomagnetism and radiometric age of trachytes in Jeju Island, Korea, J. Korean Inst. Mining Geol. Vol.19, No.1, p.25 33

Yi, S.S., Yun, H.S., Yoon, S., 1995, Late quaternary Calcareous Nonnofossils from the Sinyangri Formation of Cheju(Jeju) Island, Korea, J. Paleont. Soc. Korea, Vol.11, No.2, p.146 158

Yoon, S., 1988, The Seoguipo Molluscan Fauna of Cheju Island, Korea, Saito Ho-on Kai Special Publication, p.539 545

Yokoyama Matajiro, 1923, On some fossil shells from the island of Saishu in the strait of Tsushima. Imp. Univ. Tokyo Coll. Sci. Jour.,Vol.44, Art.7.

The study on the Groundwater Characteristics and Use in Cheju Island

Seong-An Booh

Department of Earth and Environmental Sciences
Graduate School
Andong National University

Abstract

Cheju Island had formed by five major volcanic activities occurred during 2.3million years from middle Pliocene up to the late Pleistocene. In the middle part of the island, Seoguipo Formation(SGF), Uncemented Sediment Formation (USF), the tuffs basement formation and the granite basement are distributed at 200m, 0m, (-)210m and (-)700m in elevation respectively. In the banded area from Hamdeok to Pyoseon including Shinhengri, 「the Hamdeok - Pyoseon subsidence zone」 is formed by the differential subsidence developed before the sedimention of the SGF.

The groundwater in the Island occurs mainly in the form of confined aquifer. The static water level in the middle part of the Island is located at 250 300m and flow down to the direction of seashore. In the Island, the hydraulic

gradient at the wells located below 500m in elevation shows relatively steep so as much as 0.00771. The major factors giving influences to the groundwater level are precipitation, tidal change and pumping from the wells.

The types of groundwater occurrence can be classified into the perched water, the high level groundwater and the basal groundwater. The potential yield of the basal groundwater is estimated as much as 67.189 billion m^3 and the sustainable yield as 12.36 million m^3 of water which is equivalent to 3.386 million m^3 per day.

The important causes of the salt water intrusion into the fresh water body in the eastern island can be summarized as follows : first, relatively low groundwater level and excessive pumping from wells ; second, nearly horizontal and permeable geologic structure which is extended very deeply toward the center of the island ; third, distribution of low-permeable sedimentary formation as deeply as at least 100m in average under the sea level along the shoreline.

요 약

제주도는 제3기말의 플라이오세 중기에서부터 제4기 플라이스토세 말까지 약 230만년 동안 5회의 대단위 화산활동에 의해 형성된 화산도로서 도 중심부에서는 서귀포층, 미고결퇴적층 및 기반암인 Tuff층과 화강암층은 각각 EL200m, EL0m, EL(-)210m 및 EL(-)700m에서부터 분포하고 있다. 그리고 함덕지역에서부터 신흥리를 포함한 표선지역까지 SGF층 퇴적이전에 발생한 차별 침강작용에 의해 「함덕-표선 침강대」가 형성되었다.

제주도 지하수는 피압대수층에 부존하는 피압지하수 형태이다. 도 중심부에서는 정수압면이 약 EL250 300m에 형성되어 해안변으로 유하하고 있으며, 동수구배는 0.00771로 경사가 큰 편이다. 그리고 제주도에서 지하수위의 가장 큰 변화요인은 강수량, 조석 그리고 우물에서의 양수이다.

제주도 지하수의 부존형태는 주수(perched water), 상위지하수(상부지하수, high level groundwater) 그리고 기저지하수(basal groundwater)로 구분되는데 기저지하수의 실제 포장량은 671억89백만㎥이며, 최적 이용가능량은 연간 1,236백만㎥으로 1일 3,386,000㎥이다.

동부권역 담지하수 대수층에 대한 염수침입의 주된 원인은 첫째 지하수위의 낮은 분포와 과잉양수, 둘째 투수성의 지질구조가 거의 수평으로 형성되어 내륙 깊숙이 까지 분포하는 지질구조, 셋째 저투수성 퇴적층의 분포가 해안변 아래 평균 (-)100m 이하에 분포하는 것이다.