

제주도 수자원 부존특성 및 개발방향

원종호 (한국수자원공사)

1. 序 言

濟州道는 화산활동에 의하여 형성된 섬으로서 地形地質 特性上 地層의 透水性이 커 地表水의 발달이 미약하여 1970년대 초반까지만 하더라도 用水源을 전적으로 海岸 湧出水와 奉天水에 의존하는 물이 귀한 지역으로 인식되었으나, 1960년대 수원조사과정에서 막대한 양의 地下水 賦存이 확인되어 1970년 이후 정부 주도로 管井을 이용한 지하수 개발이 많이 이루어져 현재는 1인1일 급수량은 육지에 비하여 다소 낮으나 상수도 보급률이 전국 최고 수준인 99.9%에 이르는 등 양적인 측면에서의 물 문제가 해결되었다.

그러나 앞으로 산업개발에 따른 인구 증가와 생활수준 향상 및 관광 개발 등에 따라 濟州道의 用水需要는 계속적으로 증가할 것으로 예상되는 반면, 본 도의 唯一한 水資源인 地下水는 근래에 와서 일부 해안지역의 鹽水侵入, 生活下水 및 畜産廢水에 의한 水質 汚染과 地下水位 低下 및 海岸 湧出水量의 減少 現象이 보고되고 있어 濟州道 水資源의 開發, 保全, 管理에 대한 전반적인 再檢討가 要求되게 되었다.

이에 따라 1980년대 후반부터 韓國水資源公社, 農漁村振興公社, 韓國資源研究所 등의 여러기관에서 제주도 수자원의 부존 및 산출 특성에 관한 조사를 실시하였으며 1992년에는 한국수자원공사에서 정부와 제주도의 의뢰를 받아 제주도 지하수자원의 合理的인 利用과 保全管理方案 樹立을 위한 『濟州道 水資源綜合開發計劃 事業』에 착수, 1993. 11 시행 완료하였다. 동 사업에서는 濟州道 唯一의 水資源인 地下水를 合理的으로 開發, 利用하고 體系的으로 保全 管理할 수 있는 기본틀 마련을 위하여 기존의 제주도에 대한 氣象, 水文, 社會, 環境 및 地下水 關聯資料를 集成하고 現地調査와 科學的인 分析 評價 技術의 適用을 통하여 제주도 지하수의 현황과 용수수급 체계를 체계적으로 분석, 규명하고, 이를 토대로 장래 용수수요를 수량, 수

질 측면에서 충족시킬 수 있는 綜合的인 水源의 開發 및 用水供給計劃을 樹立함과 아울러 地下水資源의 合理的인 保全 管理 方向을 提示하였다.

本 發表文은 동 사업의 성과중 濟州道 地下水의 賦存 및 產出 特性과 이를 토대로 한 水資源 開發 方向에 관한 사항을 要約, 整理한 것이다.

2. 地形 및 地質

濟州道는 약 250만년~300만년전의 新生代 第3紀末과 第4紀初에 걸쳐 일어난 火山活動에 의하여 噴出된 다량의 玄武岩質 熔岩流와 火山碎屑物로 이루어진 橢圓形 楕狀火山島로서 섬 중앙의 漢拏山(EL. 1,950m)를 중심으로 東西 斜面은 3~5°의 매우 완만한 경사를 이루며 水系의 발달이 미약한 반면, 南北 斜面은 이보다 약간 급한 5° 내외의 경사를 보이며 60여개의 대소 하천이 발달하고 있는 것이 특징이다. 全體 地形은 海拔高度와 傾斜度에 따라 해안에서 해발 고도 약 200m까지의 海岸低地帶, 해발 200~400m 사이의 中山間地帶 및 그 이상의 漢拏山體로 구분할 수 있는데, 東西 兩斜面에서는 臺地狀의 海岸低地帶와 中山間地帶가 넓게 분포하는 반면, 南北 兩斜面에는 漢拏山體가 상당한 부분을 차지하고 있다.

본도의 지질은 化學的으로 玄武岩類에서 粗面岩類까지 다양한 熔岩流가 분포하는데, 玄武岩質 熔岩流가 대부분으로 地表面積의 90%이상 분포하고 있다. 현재까지의 試錐 및 地質調查 資料를 이용, 火山岩類의 產出狀態 및 化學的인 分化過程 등을 연관시켜 보면 제주도는 크게 4段階의 火山活動에 의하여 형성된 것으로 추론된다(이동영, 1991).

제주도의 基盤岩은 시추자료와 화산쇄설물에 포함된 岩片으로 볼 때, 侏羅紀의 大寶花崗岩, 白堊紀의 堆積岩類, 凝灰岩類, 火山岩類 등으로 구성된 것으로 추정되며, 이 상부에 海成層인 泥岩層이 분포하고 있는 것으로 해석된다. 최근 溫泉 開發을 위한 심부 시추조사자료에 의하면, 현재 지표에 분포하고 있는 현무암류는 지하 약 100m까지 연속되며, 그 하부에는 100~200m 두께의 堆積層이 분포하고, 퇴적층 하부에서 시추 종료 지점인 해수면하 약

500m까지는 白堊紀 凝灰岩으로 구성된 것으로 나타났다.

상기한 基盤岩을 덮고 있는 제1단계 화산활동의 현무암류는 지표에서는 관찰되지 않으나 응회암내에 들어 있는 암편과 시추자료에서 확인되는데, K/Ar 연대 측정결과, 0.94~1.20Ma이다. 이 화산암류의 상부에는 貝類化石을 함유한 砂質 海成層이 現 海水面下 약 50m 하부에 분포하고 있으며, 이를 제2단계 화산활동기의 長石橄欖石 玄武岩類가 被覆하고 있다. 한편 제2단계 화산활동기의 堆積層은 西歸浦層이라 불리우며 제주도 형성 및 지하수 부존 특성에 대한 해석에 대단히 중요하나 아직까지 그 분포 상태가 명확히 규명되지 않은 상태이다. 제2단계에 속하는 長石橄欖石 玄武岩類는 약 60만년전부터 계속된 수습회의 분출을 통하여 현 제주도 동부와 서부에 넓은 熔岩臺地를 형성하였다. 한편 이 현무암질 용암류의 噴出 產物로서 서귀포층을 피복하고 있는 하와이아이트는 中山間地帶와 漢拏山體의 하부를 이루며, 濟州道의 楯狀火山體를 형성하였다.

이 순상화산체를 不整合으로 被覆하는 제3단계의 화산활동은 한라산 화산체를 중심으로 진행되어 현재와 같은 한라산 화산체의 대체적인 모양을 형성한 것으로 해석되는데, 이 시기의 熔岩流는 長石 및 輝石 斑晶을 많이 함유한 것이 특징이다.

제4단계는 상부 플라이오세 동안 한라산 화산체의 山斜面에서 소규모의 熔岩噴出 또는 噴石丘를 형성한 시기로서 특히 장축 방향에서 많이 일어났다. 이 기간동안 現 海岸 周邊에는 新陽里層이라 불리는 海濱 堆積層이 퇴적되었으며, 말기에는 한라산 정상부에서 조면암류의 분출과 아울러 정상부에 백록담이 형성되고, 그 후 더 젊은 용암류가 분출되었다.

3. 濟州道 水資源 賦存現況

地下水는 水文循環過程에서 나타나는 한 형태로서 이의 효율적 개발, 이용, 관리에는 賦存量 즉, 降雨가 地下로 浸透하여 地下水로 涵養되는 양에 대한 평가가 필수적이다. 水文學的 水收支 分析은 水文循環過程에서 水文 諸量을 평

가하여 지하수 함양량을 추정하는 과정으로서 수자원의 부존 한계를 결정하는 중요한 도구가 되는데, 일반적으로 一定 水域內的 降水量과 直接流出, 蒸發散量 및 地下水 涵養量간에 水文平衡이 유지되는 것으로 보아 다음 식으로 표현된다.

$$I = P - DR - ET \pm IU$$

이 식에서 I는 地下水 涵養量, P는 降水量, DR은 地表水 直接 流出量, ET는 蒸發散量이며 IU는 他水域으로(부터) 地下水 流出入量이다. 금번 조사에서 제주도 전역을 지형지질특성, 행정구역 및 지하수 부존특성 등을 감안, 동서남북의 4개지역으로 구분하고 이를 다시 16개 수역으로 세분하여 분석한 결과, <表 1>에서 보는 바와 같이 본도의 年平均 降水量은 1,872mm로서 降水 總量은 연간 33.9억^{m³}이며 이중 약 44%에 해당하는 14.9억^{m³}, 즉 일 평균 약 400만^{m³}에 이르는 막대한 양이 지하수로 함양되는 것으로 나타났다.

<表 1> 地域別 水收支 分析 結果

구 분	면 적 (km ²)	강수량 (mm)	강수 총량 (백만 ^{m³})	직접 유출 (백만 ^{m³})	증발 산량 (백만 ^{m³})	지하수함양량		해안길이당 함양량 (m ³ /m)
						년 간 (백만 ^{m³})	일 간 (천 ^{m³})	
합 계	1,810	1,872	3,388	638	1,256	1,494	4,093	22.2
북부지역	339.7	1,861	632	150	242	240	657	22.8
남부지역	357.7	2,146	768	220	249	299	820	23.0
서부지역	371.7	1,394	518	44	266	208	570	12.7
동부지역	740.9	1,985	1,470	224	499	747	2,046	27.5

4. 地下水의 産出 特性

4.1 透水性 支配要素

제주도의 지하수 산출에 영향을 줄 수 있는 地質 條件으로는 1) 岩石의 節理나 龜裂, 2) 熔岩 터널이나 熔岩 튜브, 3) 上下 熔岩流間에 挾在된 火山碎屑物이나 스코리아 등 透水性 地層, 4) 시기를 달리하는 용암류 분출간

에 侵蝕에 의하여 형성된 溪谷, 5) 오름의 分布 등을 들 수 있다.

地下水는 地層內의 水理地質學的 空間에만 부존되며, 그 透水性은 이러한 空間의 連結性和 水理傳導度에 좌우된다. 地下水의 貯溜를 지배하는 수리지질학적 요인은 空隙率이나 지하수의 産出을 지배하는 因子는 斷層, 節理 등의 地質構造에 따른 2次 有效空隙 및 水理傳導度이다.

玄武岩이 生成될 당시에는 氣孔, 冷却 節理나 熔岩터널과 같은 1次 空隙만 형성되나 그 후의 격렬한 火山활동과 斷層, 褶曲, 沈降隆起作用과 같은 地殼運動에 의하여 2次 有效空隙이 형성되게 된다. 이러한 2차 공극은 降水의 地下 浸透와 移動에 결정적인 역할을 하게 되며, 고립된 공극을 가진 火山암류도 이들 2차공극에 의해 서로 연결되면 그 투수성이 증대된다.

일반적으로 제주도에서 가장 透水性이 良好한 岩石은 長石橄欖石玄武岩으로, 이들은 통상 3m 이하 두께의 岩層과 클링커層이 互層을 이루며 그 延長性은 100m를 초과하지 않는다. 기개발된 관정 자료에 의하면 분출시기가 상이한 熔岩流間에 挾在된 火山碎屑層과 클링커層이 主帶水層을 이루는데, 飽和帶 掘進區間中 이들의 構成 比率은 약 20% 정도이다.

濟州道 第1段階 火山活動期에 형성된 砂質泥土層과 그 후에 형성된 西歸浦層, 城山層 등의 火成起源 堆積層들은 相對的으로 透水性이 낮아 難帶水層 또는 低透水層으로 분류되며, 濟州道の 地下水 賦存 形態에 決定的인 影響을 미친다. 한편, 火山灰로 이루어진 低透水性 火山碎屑物이나 주로 粘土質로 구성된 古土壤(Paleo-soil)은 지역에 따라서 confining bed나 aquitard를 이루며 上位 및 浮遊地下水(Perched water) 흐름에 큰 영향을 미친다.

신더콘(Cinder cone)은 구성 물질의 比重이 낮고 透水性이 매우 良好하나 분포가 오름주위에만 제한되어 있고 그에 대한 수리지질학적 연구가 아직까지 제대로 이루어지지 않아 이들이 周邊 地下水系에 미치는 영향에 관하여는 향후 지속적으로 연구되어야 할 것이다.

또한 前述한 바와 같이 제주도 일원에서 시행한 深部 溫泉 試錐資料에 의하면 海面下 100~250m에 低透水性 非固結 堆積層이 광범위하게 분포하며 그 하부 역시 저투수성인 結晶質 凝灰岩이 基盤을 이루고 있는 것으로 알려

지고 있는데, 이들은 본도의 地下水 賦存과 流動 mechanism에 있어 대단히 중요한 水理地質學的 要因이므로 계속 면밀히 조사되어야 할 것이다.

4.2 管井의 産出 特性

濟州道の 地域別, 海拔標高別 地下水의 産出特性 檢討를 위하여 도 전역을 4개 지역으로 구분하여 水理地質 資料가 可用한 既設管井 455개소의 특성을 분석하였는데(<表 2> 참조), 전체 분석대상 지하수 개발공중 89.5%에 해당하는 407개소가 海拔 150m이하의 海岸低地帶에 集中되어 있다. 동 표에서 보는 바와 같이 본도 관정의 平均 採水量 및 比揚水量은 標高가 높을수록 전반적으로 減少하는 추세를 보이고 있다.

지역별로 살펴보면, 基底 및 準基底地下水 賦存帶에 속하는 東部, 西部 및 北部地域의 海拔 標高別 平均 採水量과 比揚水量이 高度의 增加에 따라 減少하는 경향을 뚜렷이 나타내는 반면, 上位地下水가 분포하는 南部地域에서는 海拔 50~ 100m 구간에 설치한 管井의 平均 採水量 및 比揚水量이 가장 높게 나타나고 있는 것이 특징이다.

한편 이와 아울러 각 관정에서의 기존 양수시험 자료를 部分貫通에 따른 補正과 管井에 의한 水頭損失을 감안, 분석한 결과 동 표에서 보는 바와 같이 透水量係數는 $10^4 \text{m}^2/\text{d}$, 貯溜係數는 10^{-1} 정도의 범위로 나타났다.

5. 地下水 賦存 特性

5.1 濟州道 地下水의 賦存形態

濟州道 地下水의 賦存形態는 上位地下水(High level groundwater), 基底地下水(Basal groundwater) 및 準基底地下水(Parabasal groundwater)로 大別할 수 있다(<그림 1> 참조).

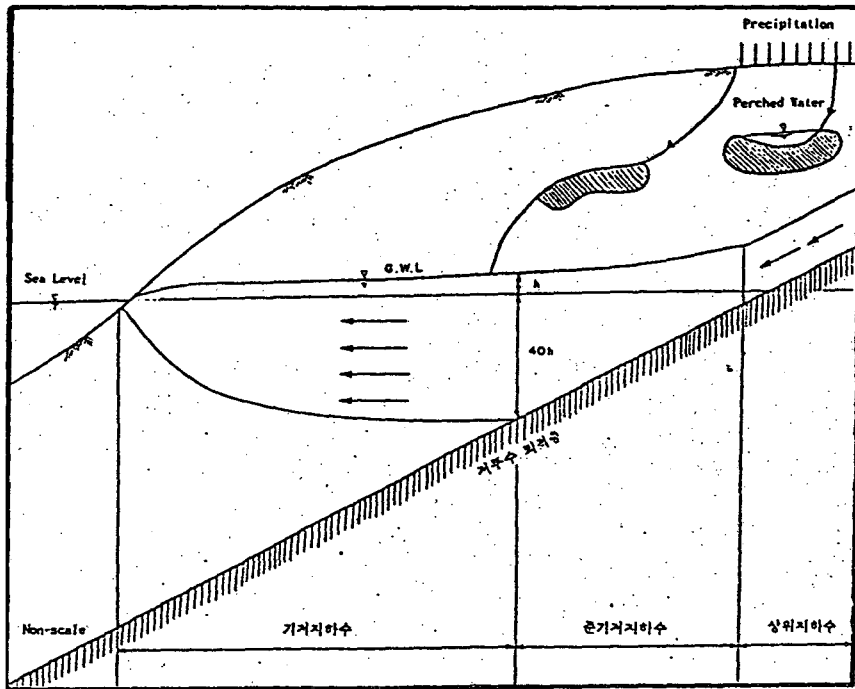
上位地下水는 降水가 重力에 의해 투수성 요소를 통하여 下方 浸透를 하다가 不透水性 地層을 만나 더이상의 수직 하강을 못하고 불투수성 지층을 따라 流動하여 潮水의 影響을 받지 않는 지하수를 말한다. 基底地下水란

<表 2> 地域別, 標高別 既設 管井의 特性

구 분	표고범위 (EL. m)	관정 갯수	채수량(m ³ /d)			수리상수(m ² /d)		
			최소	최대	평균	SPC	T	S
제주도 전역	0 ~ 50	183	350	4,400	1,714	2,242.9	2.28E+04	1.18E-01
	50 ~ 100	146	400	3,000	1,374	1,135.9	2.85E+04	1.30E-01
	100 ~ 150	78	320	2,800	1,218	1,204.1	4.66E+04	1.09E-01
	150 ~ 200	34	233	1,600	1,036	203.9	3.87E+04	1.21E-01
	200 ~ 250	10	300	1,500	995	73.3	5.13E+03	1.47E-01
	250 이상	4	800	1,100	900	30.9	2.03E+04	1.38E-01
북지 부역	0 ~ 50	25	400	2,300	1,417	3,576.6	6.07E+04	1.17E-01
	50 ~ 100	41	450	2,450	1,437	638.3	2.25E+04	1.37E-01
	100 ~ 150	30	320	2,800	1,231	928.9	2.00E+04	1.27E-01
	150 ~ 200	8	800	1,200	1,050	38.6	3.68E+03	1.19E-01
	200 ~ 250	3	1000	1,100	1,033	40.6	4.12E+03	1.65E-01
남지 부역	0 ~ 50	7	400	1,900	1,105	250.4	3.51E+03	1.35E-01
	50 ~ 100	18	400	2,445	1,226	921.7	2.36E+04	1.39E-01
	100 ~ 150	9	800	2,030	1,194	62.3	5.95E+03	1.05E-01
	150 ~ 200	15	233	1,600	1,078	339.1	6.99E+04	1.24E-01
	200 ~ 250	4	300	1,339	760	95.1	5.81E+03	1.35E-01
	250 이상	1	800	800	800	30.9	4.07E+04	1.35E-01
서지 부역	0 ~ 50	107	350	4,400	1,804	1,093.1	1.32E+04	1.11E-01
	50 ~ 100	36	800	3,000	1,432	555.2	2.83E+04	1.25E-01
	100 ~ 150	18	900	1,600	1,239	919.7	5.67E+04	8.92E-02
	150 ~ 200	4	800	1,200	988	293.1	2.77E+04	1.09E-01
	250 이상	1	800	800	800	30.9	3.79E+00	1.40E-01
동지 부역	0 ~ 50	41	370	4,121	1,771	4,901.1	3.06E+04	1.41E-01
	50 ~ 100	44	800	2,200	1,325	2,153.0	3.60E+04	1.28E-01
	100 ~ 150	16	800	1,800	1,182	3,145.9	1.18E+05	1.03E-01
	150 ~ 200	7	800	1,105	945	43.1	1.02E+04	1.21E-01

水理的으로 靜的인 상태에서 海水와 淡水와의 比重差에 의한 浮力으로 海水面上에 렌즈狀으로 뜬 형태로 부존되는 지하수를 말하는데, 이러한 관계를 Ghyben-Herzberg 原理라 하며 다음 식으로 표현된다.

$$(1) z = \left(\frac{g_f}{g_s - g_f} \right) h$$



<그림 1> 濟州道 地下水 賦存形態 模式圖

상기 식에서 h 는 地下水位(海拔標高), z 는 海水面下 淡水의 깊이, g_s 는 海水의 比重, g_f 는 淡水의 比重으로서 일반적인 해수의 비중 1.025, 담수의 비중 1.000을 적용하면, $z=40h$ 가 된다. 이 때 比例常數 40을 Ghyben-Herzberg 常數라 한다. 한편 準基底地下水는 이와 類似하나 帶水層 下部에 不透水層이 境界를 이루고 있어 海岸으로부터 潮水의 水平的 影響만을 받는 지하수를 말한다.

基底地下水體의 形態에 관한 방정식은 정수역학에 기초하여 Darcy의 법칙과 연속방정식을 조합하면 개략적인 유도가 가능한데, 그 과정은 다음과 같다. 기본적으로 帶水層은 均質 等方性이며 淡水와 하부의 海水와는 뚜렷한 境界를 갖고 담수는 水平 流線을 따라 흐른다. 가정하면 <그림 2>와 같은 좌표계에서 h : 지하수위(해발 표고), x : 해안 유출선으로부터 내륙쪽에서의 거리, q : 대수층 단위 폭당 유량(specific flux), w : 수직방향의 함양율(일정한 것으로 가정), B : G-H 상수(일반적인 경우 40)이라 하면 지하수의 흐름이 연속성을 가

지므로,

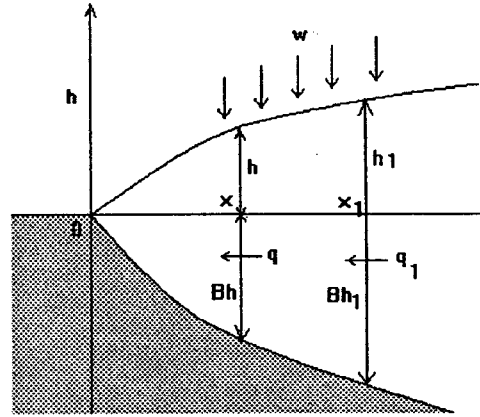
$$(2) q = q_1 + w(x_1 - x)$$

Darcy의 법칙에 따라

$$(3) q = k(B+1)h \frac{dh}{dx} = 41kh \frac{dh}{dx}$$

이 식에서 k : 수리전도도

$$(4) q_1 + w(x_1 - x) = 41kh \frac{dh}{dx}$$



<그림 2> 淡水렌즈 형태 유도를

위한 座標系

상기식을 적분하면

$$(5) q_1 \int_0^x dx + wx_1 \int_0^x dx - w \int_0^x x dx = 41k \int_0^h h dh$$

$$(6) q_1 x + wx_1 x - \frac{wx^2}{2} = \frac{41kh^2}{2}$$

$h(x)$ 에 대하여 정리하면

$$(7) h^2 = \left[\frac{2x}{41k} \right] \left(q_1 + wx_1 - \frac{wx}{2} \right)$$

수직 함양은 유량에 비하여 훨씬 작으므로 무시하면

$$(8) q_1 = \frac{41kh^2}{2x}$$

이식에서 연속성이 유지되려면 $q_1 = q$ 이므로

$$(9) q = \frac{41kh^2}{2x}$$

즉, 식 (9)에서 보는 바와 같이 기저지하수체는 수리전도도와 specific flux에 따라 曲率이 결정되는 상하면이 거의 拋物線인 렌즈 형태를 갖게 되므로, 해안으로부터 거리에 따른 기저지하수체의 수위 분포 범위의 추정이 가능하다. 따라서 각 관정에서의 지하수위와 전술한 저투수성~불투수성 지층의 분포 범위를 알면 본도 지하수 부존 형태의 분류가 가능하다.

또한, 海水와 접촉하고 있는 海岸地域 帶水層의 地下水位는 潮汐干滿의

영향에 따라 正弦曲線을 그리며 변동하므로 高潮時에 潮水의 影響範圍를 알면 지하수 부존형태 즉, 기저지하수, 준기저지하수 및 상위지하수의 경계를 개략적으로 파악할 수 있다.

이에 따라 본 조사에서는 제주도 지하수위의 변동 특성 파악과 지하수 부존형태 분류를 위하여 長短期 地下水位 觀測網調査 및 潮汐 影響 調査를 실시하였다.

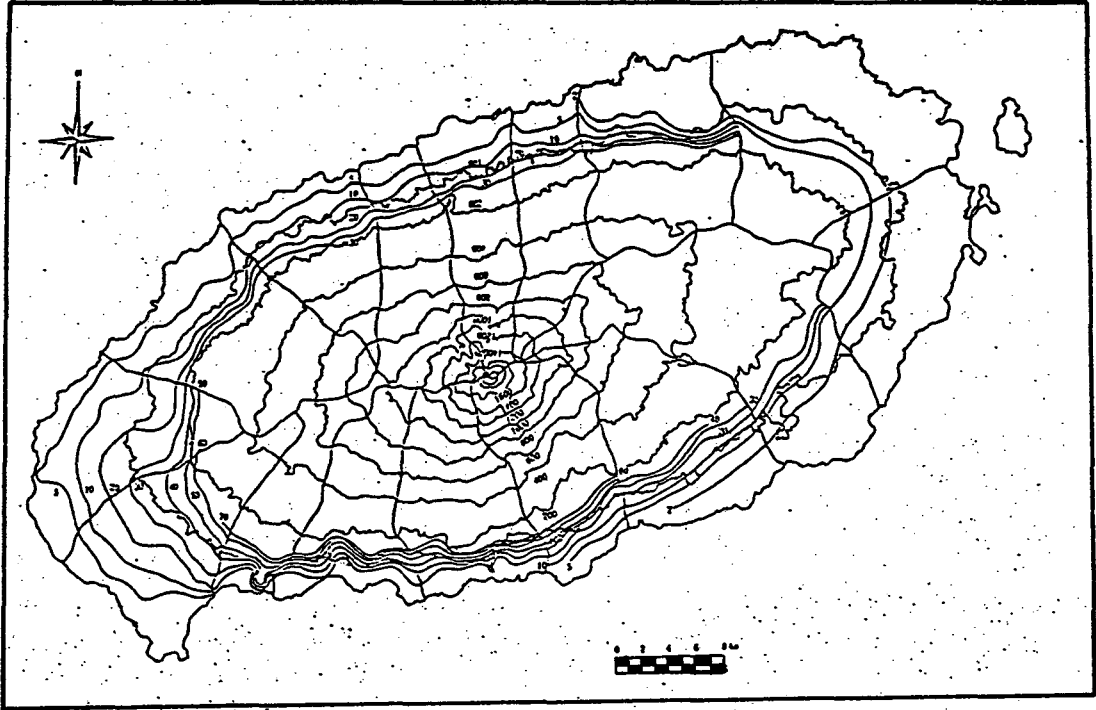
5.2 地下水位 變動

地下水位 資料는 帶水層의 性格과 能力 評價의 기본자료일뿐만 아니라 地下水 流動方向 判斷 및 帶水層 變動 豫測의 직접적인 지표가 된다. 일반적으로 地下水位는 水文氣象條件, 揚水 등에 따라 年中 끊임없이 變化하며, 특히 본도와 같이 透水性이 큰 地質媒體로 구성된 지역에서는 그 變化 幅이 크게 나타난다. 地下水位의 變動은 降雨에 의한 地下水 涵養, 井戶場에서의 採水, 潮汐干滿에 의한 影響, 大氣壓의 變動, 管井 周邊에서의 荷重 作用, 地塊의 上下運動 등과 같은 여러 要因에 의하여 발생하는데, 본도내의 지하수위 변동은 주로 첫째~넷째 요인에 의하여 발생하게 된다.

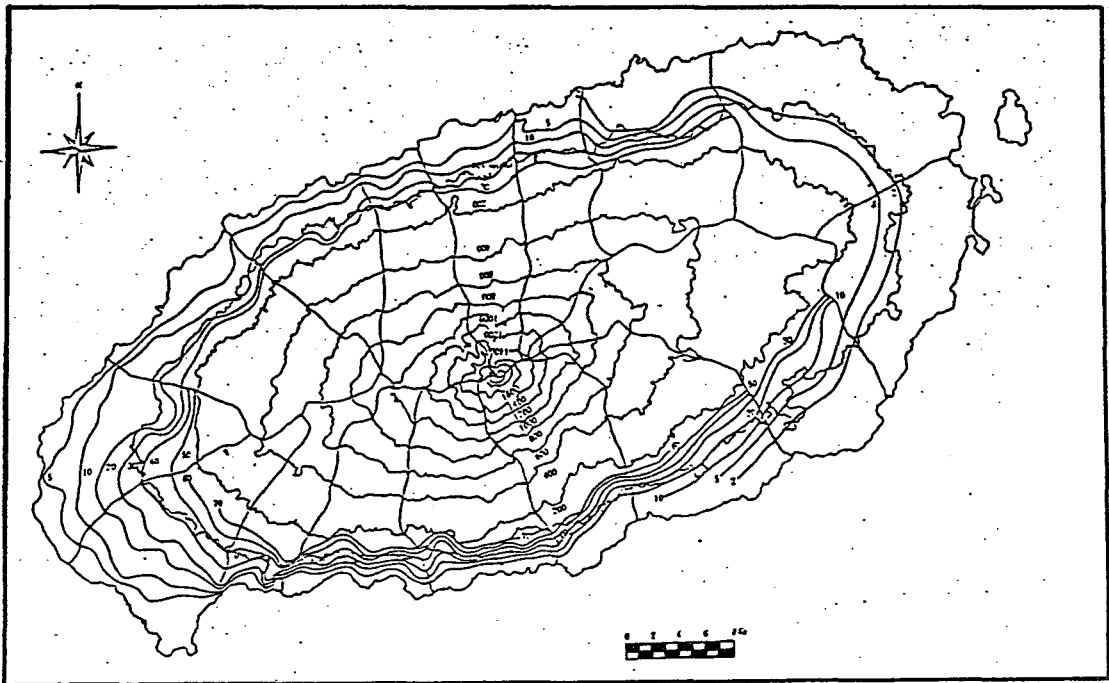
본 조사에서는 제주도 지하수 대수층의 전반적인 수위 변동 양상 파악을 위하여 道 全域을 대상으로 週期的으로 地下水位를 測定하였으며, 이와 아울러 潮汐干滿에 따른 影響圈 調査를 실시하였다.

본도에서 地下水 涵養量의 增減에 따른 地下水位 變動은 地下水位 觀測網 調査 結果에서 잘 나타나고 있다. 먼저 도 전역에 산재한 150개 관정을 대상으로 4월과 10월 2회에 걸쳐 일제 관측을 실시한 短期 地下水位 觀測網 調査結果를 살펴보면 <그림 3>, <그림 4>에서 보는 바와 같이 渴水期인 4월에 비하여 豊水期인 10월에 地下水位가 全體的으로 上昇한 것으로 나타났는데, 지역별로는 남부지역의 상승 폭이 가장 크며, 동부지역의 상승 폭이 가장 낮게 나타났다.

한편 총 32개소를 선정, '93. 4 ~ '93. 10 까지 월 2회씩 실시한 長期 水位 觀測結果, 月別 降雨量에 따른 地下水位 變化가 잘 나타나는데, 전반적으로 地下水位 變動幅은 마찬가지로 남부지역이 가장 크게 나타났으며, 북



<그림 3> 地下水位 等高線圖('93년 4월 일제 관측 결과)



<그림 4> 地下水位 等高線圖('93년 11월 일제 관측 결과)

부지역도 대부분의 조사대상 관정이 상위지하수대에 위치하고 있어 계절별 수위 변동이 상당히 크게 나타났다. 반면에 동부지역에서는 비교적 높은 지대에 위치한 일부 관정을 제외하고는 대체적으로 수위 변동 폭이 작게 나타났다. 한편 서부지역에 위치한 관정은 대부분이 하부에 서귀포층이 분포된 준기저지하수대에 위치하고 있어 년중 수위 변화도 기저지하수와 상위지하수의 중간 정도를 나타내고 있다.

한편, 전술한 바와 같이 海水와 접촉하고 있는 海岸地域 帶水層의 地下水位는 潮汐干滿에 따라 변동하게 되는데, 해안으로부터 거리 x 만큼 떨어진 지점에서 潮汐의 影響에 따른 地下水位 變動幅은 다음 식으로 표현된다.

$$(10) \quad h = h_0 \exp(-x\sqrt{\pi S/t_0 T})$$

이 식에서 h : 地下水位의 振幅, h_0 : 潮水干滿의 振幅, x : 해안으로부터의 거리, S : 貯溜係數, t_0 : 潮水の 週期, T : 透水量係數이다.

또한 潮水位와 地下水位間의 遲滯時間 t_L 은 다음 식으로 표시된다.

$$(11) \quad t_L = x\sqrt{t_0 S/4\pi T}$$

상기 식들은 엄격하게 볼 때 일정 두께를 갖는 被壓帶水層에 적용되는 것이나 干滿의 差가 帶水層의 飽和 두께보다 훨씬 작을 경우에는 自由面 帶水層에도 적용이 가능하다(Mink, 1991). 상기 식에서 보면 帶水層의 水理常數가 동일한 경우 해안에서 내륙으로 거리가 멀어질수록 潮汐의 影響이 減少하는 반면, 遲滯時間이 增加함을 알 수 있다.

금번 조사에서는 潮汐의 影響 範圍를 검토하기 위하여 '93.7.11 ~ 7.16에 8개 지역에서 각 3개 관정씩을 선정, 총 24개 관정에 대하여 지하수위를 48시간 연속으로 관측하였다. 동 관측 결과를 검토하여 보면 各 管井의 地下水位는 潮汐에 의한 影響외에도 周邊에서의 揚水, 大氣壓의 變化 등 타 요인에 의한 영향을 받은 것으로 판단된다. <표 3>은 관측결과를 요약한 것으로 潮汐 影響 有無에 따라 地下水 賦存形態를 分類, 記載하였다. 分類 基準으로는 각 관정에서의 지하수위 변화의 형태 즉, 정현곡선을 나타내는가 하는 점과 조수위 변동과의 주기의 일치 여부를 주안점으로 하여 비교하고 動水勾配 등을 고려하였다.

<表 3> 潮汐影響 및 地下水 賦存形態

구분	공번	표 고 (EL. m)	지하수위(EL. m)		수위차 (m)	해안에서 거리(m)	지하수 부존형태
			최 소	최 대			
북부 지역	D-096	33.14	12.572	12.609	0.037	1,100	준기저/상위
	79-04	84.00	9.550	9.697	0.147	3,100	상위
	D-066	105.78	13.248	13.718	0.470	3,500	상위
	W-001	23.00	6.856	6.897	0.041	1,400	준기저
	D-128	26.13	9.714	9.797	0.083	900	준기저
	F-027	110.00	8.056	8.091	0.035	3,800	준기저
서부 지역	D-080	18.00	1.252	1.285	0.033	1,000	준기저
	F-029	70.00	22.089	22.145	0.056	4,600	상위
	D-074	84.34	27.079	27.118	0.039	6,400	상위
	D-113	23.00	14.830	15.120	0.290	750	준기저
	D-107	47.30	13.700	13.715	0.015	3,720	상위
	D-197	62.10	28.007	28.069	0.062	4,800	상위
동부 지역	U-052	31.12	1.351	1.474	0.123	1,600	기저
	D-189	34.00	1.570	1.753	0.183	1,000	기저
	W-005	33.72	2.722	2.800	0.078	1,400	준기저/상위
	W-010	29.78	4.075	4.314	0.239	2,000	기저
	D-203	68.08	2.842	2.961	0.119	2,900	기저
	D-050	198.38	57.745	57.828	0.083	9,500	상위
	D-028	28.24	1.387	1.617	0.230	1,800	기저
	D-124	28.65	1.481	1.633	0.152	2,400	기저
	D-069	109.20	1.301	1.384	0.083	5,800	기저
	D-031	40.95	2.451	2.577	0.126	1,650	기저
	D-259	66.90	1.100	1.171	0.071	2,900	기저
D-020	126.50	4.582	4.638	0.056	6,900	상위	

5.3 地下水 賦存 特性

제주도의 지하수 부존형태는 전술한 바와 같이 해수면하에 광범위하게 분포하고 있는 것으로 추정되는 低透水性 堆積層의 分布 位置, 地下水位 및 水理勾配 등에 따라 그 區分이 可能한데, 이상의 지하수위 관측망조사 및 조석 영향조사 성과와 기존 관정의 조사자료중 본도에서 不透水 또는 難透水性으로 분류되는 西歸浦層의 分布 位置, 개발 당시의 지하수위 자료 등을

종합하여 분석한 결과는 <表 4>와 같다.

동 표에서 보면 서귀포층의 분포 심도는 대체로 해안변에서 깊으며, 내륙쪽으로 향하여 낮아지나 그 연속성은 그리 크지 않은 것으로 나타났다. 한편, 西部地域은 下部에 堆積層이 넓게 분포하여 準基底地下水가 廣範圍하게 분포하고 있는 것으로 판단된다.

各 賦存形態別로 特性을 살펴 보면, 上位地下水는 본도의 中山間地帶 및 高地帶와 南部 海岸地域에 걸쳐 廣範圍하게 分布하는데, 그 부존 상태에 따라 세가지 類型으로 細分할 수 있다. 첫째는 非飽和帶內에 斷續적으로 賦存되어 他 帶水層과 水理的인 連結性이 없는 浮遊地下水로서 지금까지 통상 상위지하수로 불리워 온 유형의 지하수이다. 둘째는 帶水層 下部에 基盤을 이루고 있는 低透水性 堆積層이 海水面 上部에 위치한 경우이며, 셋째는 堆積層이 海水面下에 위치하나 地下水位가 높게 형성되며 潮水의 影響을 받지 않는 地下水體이다. 두번째 유형의 지하수는 폭포등으로 직접 바다로 유입되거나 하류쪽의 준기저 또는 기저지하수로 연결되기도 한다. 上位地下水體는 海水와의 直接的인 接觸이 없어 대체적으로 水質이 良好하나 獨立的 또는 局地的으로 分布하여 그 규모가 작으므로 降水量 및 季節에 따라 流量과 水位 變化가 심하게 나타난다. 따라서 上位地下水 賦存帶에서 개발한 管井의 生産性은 同一 條件下의 基底地下水에 비하여 낮게 나타난다.

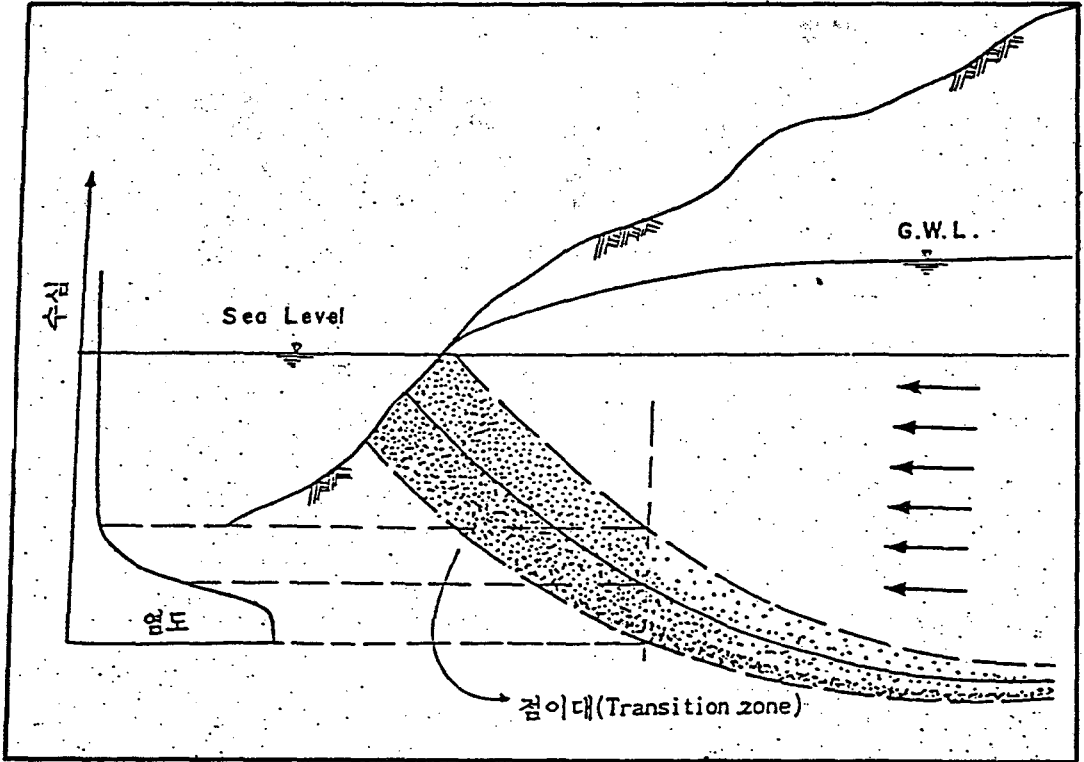
본도에서 가장 豊富한 水資源인 基底地下水는 東部地域, 즉 朝天에서 南原 區間의 海岸으로부터 內陸 깊숙히까지 분포하고 있으며, 西部地域의 翰林, 高山 및 翰京 등 일부지역에서도 海岸邊을 따라 분포하고 있는 것으로 분석된다. 基底地下水는 上位地下水와는 달리 淡水體 上下部가 항상 流動狀態에 있으며 淡水體의 變化에 따라 海水의 水平 및 垂直 運動이 일어나게 되며, 해수와 담수의 접촉면은 렌즈의 수축, 팽창과 조수의 영향으로 인하여 뚜렷한 경계면을 갖기보다는 담수와 해수가 혼합된 漸移帶(Transition zone)을 갖는데, 제주도와 같이 투수성이 큰 지층으로 구성된 지역에서 漸移帶의 두께는 淡水體의 크기가 큰 上流地域에서는 얇게 형성되며, 해안쪽으로 갈수록 두꺼워지다가 海岸 流出地點에서는 렌즈의 전 두께가 점이대로 구성된다(<그림 5> 참조). 따라서 해안 용출수에 염분이 함유되며, 해안

〈表 4〉 堆積層 分布 및 地下水位에 따른 地下水 賦存形態

구분	공 번	표 고 (EL. m)	지하수위 (EL. m)	해안에서 거리 (m)	퇴 적 층 표고(EL. m)	지 하 수 부존형태
북부 지역	D-044	32.26	10.80	650	-72.54	상위/준기저
	D-027	40.18	9.05	1,150	-78.52	"
	D-127	145.28	23.28	4,400	-17.22	상 위
남부 지역	D-125	109.26	68.26	3,500	23.26	상 위
	D-177	190.47	145.27	5,000	42.97	"
	D-187	178.77	120.87	3,750	32.77	"
	D-063	55.00	33.30	1,450	2.50	"
	D-108	73.16	56.16	1,900	-11.94	"
	W-004	70.30	57.07	1,500	29.20	"
	D-116	50.00	47.00	800	10.00	"
	D-217	220.00	150.00	3,400	148.00	"
	D-215	180.00	135.50	3,200	-9.00	"
	D-101	162.00	109.00	2,100	12.00	"
	D-241	205.00	95.00	3,600	36.00	"
	D-118	157.57	55.57	3,300	-44.43	"
	D-087	55.21	4.71	650	-40.89	"
	D-178	52.44	37.94	1,300	4.54	"
	D-038	185.00	107.60	3,000	94.50	"
	D-169	80.00	48.00	900	-55.90	"
	D-168	113.17	77.17	1,800	5.17	"
	D-111	100.00	38.00	850	4.50	"
D-205	160.00	78.00	2,500	44.00	"	
D-039	140.00	59.80	2,250	24.00	"	
D-048	14.04	1.54	600	-34.46	"	
D-165	190.00	105.00	4,500	20.00	"	
D-049	124.82	84.62	2,900	49.92	"	
D-138	80.00	42.60	1,550	35.00	"	
동부 지역	D-129	143.91	40.91	3,800	-3.19	"
	D-097	134.61	39.41	2,700	17.61	"

<表 4> (繼續)

구분	공 번	표 고 (EL. m)	지하수위 (EL. m)	해안에서 거리 (m)	퇴적층 표고(EL. m)	지 하 수 부존형태
서부 지역	D-103	44.50	9.50	2,900	-71.80	준기저
	D-121	13.00	1.00	1,050	-61.00	기준기
	D-196	26.56	5.56	1,900	-70.04	준기저
	D-083	21.00	3.00	1,350	-32.00	"
	D-134	18.00	4.50	1,700	-50.00	"
	D-086	15.00	1.50	950	-55.00	"
	D-171	29.88	3.88	2,100	-48.12	"
	D-190	16.19	3.69	700	-38.51	"
	D-155	17.50	1.80	600	16.80	"
	D-079	17.60	1.50	700	-59.90	"
	D-080	18.00	2.70	1,000	-56.50	"
	D-093	19.50	6.50	650	-50.00	"
	D-181	19.50	7.50	400	-48.50	"
	D-123	24.00	7.00	1,900	-47.50	"
	D-104	20.00	7.00	300	-46.50	"
	D-115	18.10	13.10	1,000	-37.90	상위
	D-179	18.00	8.50	1,300	-70.50	상기
	D-151	21.00	3.50	1,750	-54.00	"
	D-009	11.68	8.18	900	-63.32	"
	D-102	10.81	2.81	1,200	-61.19	"
	D-052	73.32	33.82	4,850	-43.18	상위
	D-221	44.05	10.55	2,500	16.25	"
	D-244	83.99	42.99	5,700	-43.51	"
	D-056	42.50	4.60	1,900	-45.30	준기저
	D-209	32.50	5.70	1,150	-53.70	"
	D-129	26.13	9.73	900	-49.87	"
	D-033	122.50	16.20	3,100	-1.50	상위
	D-119	44.29	3.29	1,800	-34.71	상기
	D-198	46.00	29.00	2,100	-37.50	"
	D-004	78.43	46.73	2,900	-5.57	"
	D-100	43.75	18.05	3,700	-16.25	"
	D-193	35.50	12.00	3,000	-54.50	"
	D-199	14.74	0.74	500	-54.76	기저
	D-185	42.50	19.50	4,500	-45.50	상위
D-095	47.50	27.90	4,400	-24.50	"	
D-107	47.30	32.40	3,750	-25.70	"	
D-197	62.10	30.10	4,800	-33.90	"	
D-114	17.20	2.20	1,350	-144.80	기저	
D-055	15.82	2.42	1,000	-41.68	기준기	
D-081	16.74	5.64	800	-100.76	"	
D-159	160.00	60.20	9,750	2.00	상위	
D-145	43.20	8.20	3,600	-67.80	상기	
D-122	33.00	8.30	2,600	-41.70	"	
D-017	32.50	10.10	2,900	-69.00	기저	
D-099	42.50	0.10	3,300	-60.50	상위/기	
D-146	53.50	9.50	3,900	-63.50	상위	
D-113	23.00	5.60	750	-53.00	기준기	



<그림 5> 基底地下水 淡水體 模式圖

부근에 관정을 개발할 경우 염수의 역상승(upconing)에 의한 해수침입이 발생하기 쉽다. 이러한 현상이 현재 문제가 되고 있는 東部地域, 특히 舊座, 城山地域 湧出水 및 海岸附近 管井의 鹽分 含量이 높게 나타나고 있는 이유로 설명될 수 있다.

準基底地下水는 下部가 不透水性 또는 難透水性 地層에 의하여 海水와의 직접적인 접촉이 차단되어 기저지하수와 비교할 때 採水에 따른 海水侵入 우려가 상대적으로 적으므로 用水開發에 그 重要性이 크다. 準基底地下水의 賦存 與否는 상기한 低透水性 地層의 帶水層 下部分布 位置에 따라 결정되는데, 본도 하부에 투수성이 낮은 퇴적층이 넓게 분포하고 있는 것으로 추정되므로 광범위하게 분포할 것으로 예상되나, 현재까지 賦存이 確認된 곳은 西部 海岸地域과 北部의 三陽 및 新村地域, 南部 西歸浦의 자굴이地域 등이다. 물론 準基底地下水 分布地域에서도 淡水體가 下部 堆積層까지 水

理的으로 連結되어 Ghyben-Herzberg 原理에 따라 堆積層 下部까지 淡水렌즈가 형성되나, 준기저지하수체를 이루고 있는 현무암류에 비하여 하부 퇴적층의 透水係數가 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 정도로 극히 작으므로 準基底地下水體가 實質的인 地下水 流動 通路 役割을 하게 된다. 따라서 準基底地下水는 下部 境界條件을 달리할 뿐 水理的으로는 基底地下水와 同一하다 할 수 있다.

<그림 6>은 이상의 檢討結果를 綜合하여 作成한 “濟州道 地下水 賦存圖”로서, 向後 地下水調査 資料가 蓄積되면 補完되어야 할 것이다.

6. 濟州道 水資源 開發方向

6.1 水資源 開發 및 利用 現況

濟州道는 道 全域에 散在한 地下水 管井과 低地帶沿岸을 따라 地表로湧出하는 湧泉水를 主水源으로 하여 上水道施設, 農業灌溉施設, 自家取水 供給施設 等の 用水需給體系를 이루고 있으며 이로부터 生活, 工業, 農業 等 各種目的의 用水를 供給, 利用하고 있다.

上記 管井 및 湧泉水를 水源으로 한 濟州道の 水源施設은 1991年 現在 總施設規模 810千 m^3 /日로 集計되고 있으나 實際 用水供給을 위하여 稼動될 수 있는 可用施設容量(以下 開發量이라 稱함.)은 552千 m^3 /日로서 이 중 約 67%인 368.8千 m^3 /日이 地下水開發 管井으로 地下水의 比重이 他 內陸地域보다 越等히 높으며, 湧泉水는 約 29%인 161.7千 m^3 /日, 그리고 나머지 約 4%인 21.5千 m^3 /日이 上位湧泉水를 貯溜하여 供給하는 御乘生水源이다.

用水利用現況을 살펴보면 1991年 現在 日平均 296.4千 m^3 /日, 年間 93,490千 m^3 /年으로 水資源 開發量 552千 m^3 /日의 約 54%가 利用되고 있으며 用水需給計劃의 重要한 指標가 되는 日最大 用水利用量은 517.3千 m^3 /日로 現 水資源 開發量에 거의 육박하고 있어 新規 水源開發 및 供給施設 建設이 時急한 實情이다. 地域別, 目的別 用水利用量은 濟州市가 總 年 用水 利用量의 約 41%인 38,582千 m^3 /年, 西歸浦市가 約 17%인 15,637千

m³/年, 北濟州郡, 南濟州郡이 各各 約 19%인 18,009千m³/年, 約 23%인 21,262千m³/年이며 生活用水 64,270千m³/年(約 69%), 農畜用水 19,901千m³/年(約 21%), 工業用水 9,319千m³/年(約 10%)의 順으로 利用되고 있다. 한편 日最大 用水利用量은 農畜用水의 時期別 單位用水量의 變化가 甚하여 農畜用水 278.9千m³/日(約 54%), 生活用水 212.9千m³/日(約 41%), 工業用水 25.5千m³/日(約 5%)로 推定된다.

上記 用水利用量中 上水道에 의한 生活用水 利用量을 除外한 他目的의 用水利用量은 用水供給系統內의 計量化가 未備되어 各 目的別 單位用水量에 의해 推定하는 間接的 方法에 의해 算定하였다.

以上 水資源開發 現況 및 用水利用 現況을 綜合하면 <表 5>, <表 6>과 같다.

6.2 既存 水資源 開發의 問題點

전술한 바와 같이 濟州道の 水源은 湧出水와 地下水 管井으로서, 湧出水源은 地下水 管井水源에 비해 大量 用水供給이 可能하고 水源開發 및 維持運營管理 側面에서 經濟的이므로 濟州市 및 西歸浦市 等 都市地域 上水道의 主水源으로 利用되고 있으나, 平年基準 湧出水量으로 水源이 開發되어 있어 無降雨 連續時 湧出水量 減少에 의해 用水供給量의 制限을 받는다. 이것이 生活用水 水不足 現象의 한 要因으로 作用하고 있어 이에

<表 5> 水源別 水資源 開發現況

(단위 : m³/일)

구 분	지하수			용천수	어승생	계
	관 용	사 설	소 계			
제 주 시	24,800	27,400	52,200	69,200	8,100	129,500
서귀포시	27,800	14,100	41,900	37,300	-	79,200
북제주군	113,400	8,200	121,600	31,100	10,300	163,000
남제주군	135,600	17,500	153,100	24,100	3,100	180,300
합 계	301,600	67,200	368,800	161,700	21,500	552,000

<表 6> 用水 利用 現況

(단위 : 년용수: 천㎥/년, 일평균, 일최대: ㎥/일)

구 분		생 활	공 업	농 축	계
제 주 시	년용수	37,478	471	633	38,582
	일평균	102,700	1,300	3,000	107,000
	일최대	122,900	1,300	8,100	132,300
서귀포시	년용수	12,790	1,103	1,744	15,637
	일평균	35,100	3,000	8,300	46,400
	일최대	42,900	3,000	26,700	72,600
북제주군	년용수	7,539	1,924	8,546	18,009
	일평균	20,600	5,300	40,700	66,600
	일최대	25,300	5,300	115,700	146,300
남제주군	년용수	6,463	5,821	8,978	21,262
	일평균	17,700	15,900	42,800	76,400
	일최대	21,800	15,900	128,400	166,100
합 계	년용수	64,270	9,319	19,901	93,490
	일평균	176,100	25,500	94,800	296,400
	일최대	212,900	25,500	278,900	517,300

대한 對策으로 地下水 水源을 補助水源 및 豫備水源으로 開發하여 利用하고 있으나, 施設規模 및 利用率은 상당히 낮은 實情이다. 給水人口가 많지 않은 農漁村 村落地域에서는 지하수 水源이 主水源으로 利用되고 있다. 地下水를 水源으로 하는 上水道施設은 地下水管井의 揚水可能量에 비해 施設規模가 작으며, 容量面에서 볼 때 內陸의 簡易上水道施設 범주에 지나지 않는다. 한편 一部地域의 地下水 水源은 公共給水井의 경우 적절한 水源保護對策의 未備, 私設 管井의 경우에는 標準 設計 및 施工 基準의 未確立에 따른 시공상의 결함 등으로 인하여 下廢水 및 鹽水侵入으로 인한 水質汚染으로 使用이 不可能한 實情이다.

한편 水源으로부터 需要地까지의 用水供給體系는 單一水源에 의한 單純供給體系가 아닌 多數複合水源에 의한 複雜한 用水供給體系를 이루고 있으며, 農漁村地域에는 個別 地下水水源을 利用한 村落別 給水體系로 다수의 給水單位를 이루고 있다. 이러한 복잡한 用水需給體系 및 다수의 給水單位體系는 圓滑한 用水需給에 支障이 됨은 물론 效率的 用水施設運營 및 維持管理에 相當한 努力과 經費가 所要될 뿐만 아니라 地域間 用水需

給 連繫體系의 未備로 인한 用水의 均衡的 配分이 不可能하여 地域的 用水不足 發生의 原因이 되고 있다.

濟州道 用水需給上의 또다른 特徵은 內陸에서는 上水道로부터 供給받고 있는 都市活動 用水의 많은 부분을 私設管井에 의한 自家取水 供給施設에 依存한다는 점이다. 私設管井은 個人的 使用에 局限되기 때문에 用水需給上 利用이 制限的이며, 開發個所의 亂立으로 인해 合理的인 水資源保全 및 開發에 많은 支障을 招來하고 있다.

濟州道 用水需要의 地域的 特性을 살펴보면 濟州市 및 西歸浦市는 生活 用水需要 集中, 西部地域은 農業用水需要 集中化 現象을 보이고 있으며 東部地域은 開發이 미진하여 用水需要가 相對的으로 적게 나타나고 있다. 增加하는 用水需要를 充當하기 위한 水資源開發은 現在까지 “地自體內 用水需要 = 地自體內 水資源開發”이라는 局地的인 限界를 벗어나지 못하고 있어, 地下水資源 保全側面을 고려한 濟州道 水資源의 均衡的인 開發이 이루어지지 못하고 있는 實情이다.

1991年 現在 濟州市를 包含하는 北部地域의 水資源開發量은 162.1千 m^3 /日로서 “濟州道 水資源綜合開發計劃”(韓國水資源公社, 1993)에서 算定한 適正 地下水 開發可能量 335千 m^3 /日의 48%에 이르는 반면, 가장 豊富한 水資源을 保有하고 있는 東部地域에서는 適正 開發可能量 1,689千 m^3 /日의 5.6%인 95.2千 m^3 /日의 水資源開發에 그치고 있다. 앞으로 濟州市 및 西歸浦市의 用水需要가 急增하여 用水需要의 地域的 集中化 現象이 더욱 심화되어 될 것이라는 점을 고려할 때 현재와 같은 局地的 觀點에서의 水資源開發 및 用水供給 方式은 本道 물이용의 效率性을 低下시킬 뿐만아니라 많은 制約을 줄 것이다. 따라서 가장 豊富한 地下水資源을 保有하고 있는 東部地域을 개발하여 本道의 主 用水供給源 役割을 擔當하게 하는 廣域的 用水需給 體系가 이루어져야 할 것으로 判斷된다.

6.3 水資源 開發 方向

濟州道の 將來 水資源 開發은 앞서 言及한 바와 같이 短期的이고 局地的인 開發을 止揚하고 長期的이고 廣域的인 開發로 전환, 既存 用水供給

體系的 問題點, 賦存 水資源의 效率的 管理와 保全, 將來 用水需給 展望 등을 고려하여 充分한 물이 適期에 供給될 수 있도록 다음과 같은 方向으로 추진되어야 할 것이다.

- 將來年度에 豫想되는 물不足量에 대하여는 短期的, 局地的인 開發을 止揚하고 道 全域을 對象으로 한 長期的 用水供給體系的 段階的 構築을 통하여 地域間 用水需給 連繫體系的 未備에 따른 地域的인 用水 不足을 解消하고, 效率的인 用水施設의 運營으로 維持管理 努力 및 經費 節減
- 水資源開發은 渴水時 保障量을 基準으로 하되 水質管理를 最優先으로 하여 充分한 水源確保를 摸索토록 하고 水文, 地質, 地域的 地下水 賦存特性을 考慮하여 有望 地下水開發 可能地點(湧出水, 基底地下水)을 선정하고 이를 可能的한 大規模로 開發, 地下水資源의 均衡開發을 통한 地下水資源의 保全管理를 圖謀
- 水質汚染 地域은 既存施設을 閉鎖, 代替水源을 開發하여 供給하고, 上水道 供給體系를 完備하므로써 私設管井 開發의 亂立을 抑制하여 效率的인 水資源 開發 및 保全 圖謀
- 水質에 따른 多用途 用水利用計劃으로의 轉換 등 合理的인 用水利用 推進

7. 結論

이상 檢討한 事項을 要約하면 다음과 같다.

- 濟州道 水資源總量은 年間 33.9億 m³으로서 이중 19.0億 m³/年 (56%)가 蒸發散 및 直接流出되고 나머지 14.9億 m³/年(44%)이 地下水로 涵養됨
- 本道の 水資源 賦存形態는 高地帶 및 南部地域에 넓게 分布된 上位地下水와 東部地域 및 西部一部 海岸地域에 Lens상으로 賦存하는 基底地下水 그리고 北部 및 西部地域에 賦存된 準基底地下水로 大別됨

- 向後 濟州道의 水資源 開發은 短期的, 局地的인 開發을 止揚하고 道 全域을 對象으로 한 長期的 用水供給體系의 段階的 構築을 통하여 地域的인 用水 不足을 解消하고, 水資源의 地域的 均衡開發, 水質汚染 地域의 既存施設 閉鎖 및 私設管井 開發 抑制를 통하여 效率的인 水 資源開發 및 保全을 圖謀하는 方向으로 추진되어야 할 것임.

參 考 文 獻

- 農漁村振興公社(1970~1992), 濟州道 地下水開發 報告書
- 農漁村振興公社(1989), 濟州道 地下水 長期開發計劃
- 農漁村振興公社(1992), '92 長期 觀測網 設置 및 調查實績 報告書
- 産業基地開發公社(1989), 濟州道 水資源開發 綜合調查 報告書
- 韓國水資源公社(1988), 濟州道 水資源開發 豫備妥當性調查 研究 報告書
- 韓國水資源公社(1989), 濟州道 및 鬱陵島 水資源開發 妥當性地質調查 報告書
- 韓國水資源公社(1990), 濟州道 및 鬱陵島 地下水調查 報告書
- 韓國水資源公社(1990), 濟州道 水資源調查 報告書
- 韓國水資源公社(1993), 濟州道 水資源 綜合開發計劃 樹立 報告書
- John F. Mink(1991), Groundwater Resources of Guam : Ocurrence and Development