

제주도 지하수의 특성과 수자원관리(I)

- 제주지하수 조사·연구발달사 -



고 기 원 |

제주특별자치도 수자원본부 수자원연구실장
lavakoh@hanmail.net

1. 서 언

제주도는 독특한 수문지질학적 특수성으로 말미암아 1970년대 까지도 물허벅으로 물을 길어다 먹거나, 초가지붕에서 내리는 빗물을 항아리에 받아 사용하는 극심한 물 곤란을 겪었던 지역이다. 그러나 1961년 제주도 최초로 지하수 관정개발이 성공을 거두고, 용수개발사업이 활발하게 추진되면서 1985년에 전국 최고의 상수도 보급률(99.9%)을 자랑하게 되면서 제주도의 물 문제는 완전 해결되었다.

이와 같이 짧은 기간 내에 제주도의 물 문제가 해결될 수 있었던 것은 지하수 개발·이용에 필요한 지질과 지하수에 관한 조사·연구의 성과가 축적되어 있었기에 가능한 것이었다. 오늘날 우리가 접하고 있는 제주지하수와 관련된 전문적인 용어나 여러 가지 정보는 제주지하수의 제반특성을 밝히기 위해 많은 조사·연구자들이 수십 년 간 기울여 온 노력의 결과라 할 수 있다. 이 글에서는 1921~2004년까지 수행된 제주도의 지하수에 관한 조사·연구실적을 파악함과 아울러, 단계별로 이전에 수행된 조사·연구의 주요 내용과 연구의 흐름 및 발전과정을 살펴보고자 한다.

2. 조사·연구문헌 분석

제주도의 지질과 수자원에 대한 조사·연구는 일제강점기 때인 1921년부터 이루어지기 시작하였다. 필자가 1921~2004년까지 수행된 제주도의 지질과 수자원 분야에 대한 조사·연구 문헌을 수집하여 분석한 결과, 지난 84년 동안 학술논문을 비롯하여 기고문, 단행본, 보고서, 학술세미나 발표자료 등을 총망라하면 모두 1,109편에 이르는 것으로 나타났다. 조사·연구 문헌을 유형별로 보면, 연구논문이 762편으로 전체의 69%를 차지하였고, 조사·연구 보고서가 146편, 단행본 13편, 학술세미나 발표자료가 156편, 기고문 32편으로 분류되었다. 연구논문(762편)을 세부 분야별로 구분해 살펴보면, 수자원 분야가 311편으로 가장 많았고 일반지질을 포함하는 층서학 분야가 79편, 암석학 분야 71편, 지구물리학 분야 66편, 고생물학 및 지형학 분야가 각각 59편으로 분류되었다. 조사·연구 보고서(146편)는 수자원 분야가 97편, 층서학 분야 12편, 온천 분야 10편 등이며, 학술세미나 발표자료 역시 수자원 분야가 전체의 절반 이상을 차지하고 있다(표 1).

조사·연구 분야를 13개의 분야로 세분하였을 때(표 1), 수자원 분야가 510편으로 가장 많았고 층서학 분야 126편, 암석학 분야 82편, 지구물리학 분야 80편, 지형학 분야 78편이었다. 또한, 고생물학 분야는 64편이었고 동굴 분야도 58편이나 되었으며, 퇴적학 및 토양학 분야는 각각 42편과 26편인 것으로 분석되었다. 이처럼 수자원 분야의 조사·연구 문헌이 타 분야에 비해 월등히 많은 것은 그동안 제주도의 물 문제 해결을 위한 기초조사가 집중되었을 뿐만 아니라, 지하수의 보전·관리에 필요한 기초 자료의 축적을 위한

표 1. 분야별 및 단계별 조사·연구문헌 분석결과(1921~2004)

(단위 : 편)

분야별	합 계	태동기 (1921~1960)	개념화기 (1961~1980)	발달기 (1981~2000)	성숙기 (2001~2004)
합 계	1,109	14	94	681	320
고생물학	64	2	5	47	10
광물학	4	1	1	2	
동굴학	58		10	39	9
수자원	510	1	48	311	150
암석학	82	6	5	46	25
온천	10			5	5
지구물리학	80		1	70	9
지질공학	15		2	5	8
지형학	78		11	34	33
층서학	126	4	6	73	43
토양학	26		4	13	9
퇴적학	42		1	34	7
기타	14			2	12

※ 1921년~2004년까지 발표된 것을 수집·정리한 것이며, 누락된 것도 일부 있을 수 있음

조사·연구도 꾸준히 진행되어 온 결과로 보인다.

(염분 함량)에서 차이를 나타내는 이유에 대해 담수와 해수간의 정역학적인 관계를 통하여 설명하였다.

3. 제주도 지하수 조사·연구 발달과정

3.2 개념화기(1961~1980)

3.1 태동기(1921~1960)

현재까지 파악된 이 시기의 지하수에 대한 조사·연구문헌은 1938년 일본중앙공업시험소에서 발간한 《제주도 수자원조사 개보》가 유일한 것이다. 1937년 9월~10월까지 일본중앙공업시험소의 室井渡, 塚本正夫, 配野松雄는 제주도의 공업용수를 확보하기 위한 조사를 실시하고, 지역별 수자원 확보방안 뿐만 아니라, 63개소의 우물·용천수에 대한 수질조사 결과도 제시하였다. 이 조사에서 일본중앙공업시험소는 대정(굴착심도 30m), 성읍(굴착심도 100m), 송당(굴착심도 100m)에서 지하수를 찾기 위한 시추조사를 실시하는 것으로 계획하였다. 특히, 이 보고서에서는 해안 지역 용천수·우물이 간조와 만조에 따라 수위와 수질

일본중앙공업시험소의 조사 이후 1963년까지 27년 동안은 이렇다할만한 조사·연구가 이루어지지 않았으나 이른바 개발연대로 불리는 1960년대에 들어 오면서 제주도의 지하수에 대한 조사·연구가 본격적으로 이루어지기 시작하였다. 1차적으로 1963~1965년까지 국립지질조사소(현 한국지질자원연구원)는 제주도 남부와 남동부지역에 대한 지하수원조사와 아울러 지질조사를 실시하였으며, 1965~1966년에는 (주)한국지하자원조사소가 건설부와의 용역계약에 의하여 제주도 전역에 걸쳐 전반적인 지질 및 지하수조사를 실시하였고(김옥준 외 7인, 1965; 김옥준 외 3인, 1966), 건설부에서는 1965년에 제주도 산업지 기초조사 및 고지대 용수이용계획수립을 위한 조사용역을 실시하였다.

1963년부터 시작된 제주도의 지질과 지하수조사에 참여했던 남기영(1966)은 '제주도에 있어서 지하수 발달에 영향을 주고 있는 중요한 지질적 조건은 암석 내에 발달하는 절리나 균열과 같은 투수성구조, 상하 용암사이에 발달하는 접촉면 및 용암턴넬 등이 다'고 강조하면서, 제주도에는 상층부 지하수(High-Level Groundwater)와 기저지하수(Basal Groundwater)의 두 종류의 지하수가 발달하는 것으로 제시하였다. 남기영은 기저지하수는 양적으로는 비교적 풍부하지만 전도(全島)에 걸쳐 어느 곳이나 존재하는 것이 아니고 수리지질학적 조건에 따라 지역적으로 있는 곳도 있고 없는 곳도 있기 때문에 제주도의 지하수조사에 있어서는 Ghyben-Herzberg 렌즈를 지배하는 수리지질학적 조건에 대하여 특히 중점을 두어야 한다고 강조하였다. 김옥준(1969)은 제주도의 지하수를 상부유동 지하수(High Level Groundwater)와 기저지하수(Basal Groundwater)로 구분하고, 기저지하수를 얻을 수 있는 최소의 심도를 계산하여 제시하였다.

한국원자력연구소와 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency; IAEA)는 1965~1969년까지 제주도의 수문환경에 대한 환경동위원소 연구를 공동으로 실시하였는데, 이 조사에 참여했던 이창균과 Davis는 연구결과를 3회에 걸쳐 보고한 바 있다. Davis 외 2인(1970)은 24개소(용천수 14개소, 관정 8개소, 하천 2개소)에서 채취된 시료에 대해 삼중수소·이중수소·산소 동위원소분석을 실시하고, 제주도 지하수의 평균 체류기간을 2~9년으로 산정하였다. 특히, 이들의 연구에서는 고지대에 위치한 용천수(선녀폭포물, 성널샘)의 평균 체류기간은 2~2.5년이고 중산간 지역의 용천수(산천단물, 선돌물)는 3~7.5년, 해안 용천수(옹포, 금산물)는 8.5년인 것으로 조사되었다.

국립지질조사소의 기초조사에 뒤이어 UNDP/FAO는 1968~1971년까지 제주도의 신촌, 고산, 사계, 외도, 난산지역을 관정에 의한 관개사업 대상지역으로 선정하고, 이 지역에 대한 지하수와 지질조사

를 실시하였다. 이 조사에서는 지질조사, 전기탐사 및 물리검층, 소구경 시추조사 및 대구경 관정 개발(13개소), 양수시험, 지하수위 관측, 수질조사 등을 실시하였을 뿐만 아니라, 최초로 제주도의 물 수지를 다음과 같이 제시하였다. 즉 연간 총강우량은 27억 m^3 이고, 직접유출량은 7억 m^3 /년(26%), 증발산량 9억 m^3 /년(34%), 지하수 함양량은 11억 m^3 /년(40%)으로 산정하였다.

농업진흥공사(현 농업기반공사)는 농림부의 지원에 의해 1970~1971년까지 제주도 지하수조사를 실시하였고, 보고서에서는 제주도의 지하수 부존형태를 상위지하수와 기저지하수로 구분하고, 기저지하수는 담수와 해수와 비중차이로 렌즈상을 이루며 사실상 도 전역에 분포하며, 상위지하수는 서귀·남원·제주지역 중산간 일부에 부존하는 것으로 결론을 내렸다. 또한, 이 보고서에서 농업진흥공사는 제주도의 기저지하수 포장량을 Ghyben-Herzberg 원리를 적용하여 산출한 결과, 약 340억 9천 9백만 m^3 에 달하는 것으로 제시하였으며, 경제적 실효를 거둘 수 있는 개발 가능한 지하수는 표고 100m 이하(657 km^2 지역)에 부존하는 약 123억 1천 4백만 m^3 인 것으로 추정하였다.

3.3 발달기(1981~2000)

가. 연구기관에 의한 조사·연구

산업기지개발공사(1981, 현 한국수자원공사)는 제주도의 지하수 부존형태를 상위지하수(High Level Groundwater), 기저지하수(Basal Groundwater) 및 준기저지하수(Parabasal Groundwater)의 3가지 형태로 구분하여 '준기저지하수'라는 개념을 새롭게 도입하였다. 또한, 제주도의 연간 총강우량은 2,385백만 m^3 이며 이중 약 45%에 해당하는 1,542백만 m^3 (일간 4.22백만 m^3)이 지하수로 함양되는 것으로 추정하였을 뿐만 아니라, 지하수 최대 이용 가능량은 지하수 함양량의 70%인 일 3백만 m^3 , 경제적 이용 가

능량은 47%에 해당하는 일 2백만 m^3 으로 추정함으로써 제주도 지하수의 적정 이용량에 대해 처음으로 제시하였다.

한국수자원공사는 1989년 제주도 및 울릉도 수자원개발 타당성 지질조사를 통해 제주도의 수자원 개발방안으로서 기저지하수 부존지역에서는 Ditch Tunnel 방식으로, 용출수는 집수정 방식으로 개발하고, 관정은 각 지구별로 기저지하수를 대상으로 관정의 밀집 정도나 개발량의 적정량을 검토하여 시행하는 것이 바람직하다고 제시하였다. 한국수자원공사는 1993년 제주도의 용역의뢰에 의해 수행한 《제주도 수자원종합개발계획수립 보고서》에서 제주도의 수자원 총량은 3,385백만 m^3 /년이고, 이 중 1,268백만 m^3 /년(37%)이 증발하고 650백만 m^3 /년(19%)이 직접 유출되며, 1,467백만 m^3 /년(43%), 1일 4.0백만 m^3 /일이 지하수로 유입되는 풍부한 지하수 자원을 보유하고 있다고 결론 내렸다. 아울러, 하와이주의 평형방정식에 의한 적정 개발량 산정기법을 적용하여 1일 지하수 적정 개발량을 지하수 함양량의 41%인 167만 8천 m^3 으로 산정하였다.

농어촌진흥공사는 1989년 제주도 지하수 장기개발계획조사를 실시하고, 본도의 수자원 이용가능 총량은 1일 평균 2,525,891 m^3 으로 추정(지표수가 32,710 m^3 /일, 용출수 684,932 m^3 /일, 지하수 1,808,219 m^3 /일) 하였다. 또한, 이 보고서에서는 해수면 하 140m 이하를 비대수층, 자연수위 구배를 1.7m/km로 보고 G-H 원리를 적용하여 기저지하수 포장량을 산출한 결과, 해수면 상부에 379억 m^3 , 해수면 하부에 2,534억 m^3 으로 산정하였으며, 자연수위 이하에 분포하는 대수층의 분포비율과 공극율, 자연수위 하부에 분포하는 난대수층 또는 비대수층의 분포 비율 및 공극율 등을 고려해서 최종 추정한 기저지하수 포장량은 75억 m^3 으로 제시하였다. 특히, 이 보고서에서는 동부지역의 염수침입은 해안변 대수층 구성성분 및 투입성을 감안치 않은 과도한 채수가 주원인이겠으나 무엇보다도 해안변은 해수침입의 취약지역이기 때문이며 앞으로 장기 관측조사의 실시와

더불어 해안변에서의 개발을 지양하면 이 문제는 쉽게 해결이 가능할 것으로 전망하였다.

한국동력자원연구소는 1985년 《제주지역 수리지질 조사연구》보고서에서 제주도의 지하수 부존형태를 기저지하수(Basal ground water)와 상위지하수(High level)로 분류함과 아울러, 물수지 방법에 근거하여 제주도의 지하수 연간 함양량을 총 11억 2천만 m^3 으로 추정하였다. 한국동력자원연구소는 1987년 제주지역 영향권 조사연구에서 남제주군 성산읍 일원은 해안가에서 내륙으로 2~3km 정도, 그리고 성산읍 난산리를 경계로 하여 동북지역이 해수의 영향을 심히 받고 있으며, 상수도용 관정설치에 있어서 해수면 하 100m 이하에서 설치하지 않는 것이 좋다고 제시하였다. 한편, 제주대학교 방사능이용연구소와 한국원자력연구소는 Tritium, Deuterium, Oxygen-18의 함량을 분석하여 지하수의 수질 및 해수의 지하수로의 침수여부에 대한 조사에 중점을 두고 1985년부터 1992년까지 조사를 실시하였다. 이 조사에서는 제주시, 서귀포시, 구좌·성산·우도지역, 한림·애월지역의 용천수와 지하수 관정을 대상으로 연구를 실시되었으며, 각 지역별 수질 및 동위원소 특성에 대하여 자세하게 밝혔다. 또한, 제주도보건환경연구원에서는 1992년도부터 자체 연구사업의 결과를 《보건환경연구원보》에 게재하여 오고 있다.

나. 개인 연구자에 의한 연구

이 시기에 제주도 지하수와 관련된 가장 큰 화두는 동부지역 지하수의 해수침투에 의한 오염문제라 할 수 있다. 해안변에서 용출하는 용출수는 물론 관정으로부터 채수되는 지하수에도 많은 염분이 포함되어 있어 이의 원인 규명에 많은 관심이 집중되었다. 1980년대 후반 이후부터 동부지역 지하수의 고염분 원인에 대한 연구가 연구기관 및 개인 연구자들에 의해 이루어지기 시작하였으며, 지하수의 과잉양수에 의한 해수의 침입(seawater intrusion) 현상에 초점이 맞추어졌다. 동부지역 고염분 지하수의 부존현상

과 관련한 주장은 다음과 같이 크게 3가지로 대별할 수 있다.

- ① 지하수의 과잉양수에 기인한 해수침입 현상 (최순학, 1986; 조진동의 2인, 1987; 최순학, 1988; 최순학, 1989; 최순학, 1991; Choi et al., 1991; 농어촌진흥공사, 1989; 박남식·이용두, 1997; 고병련, 1998; 김경훈, 1998; 김지영, 2000)
- ② 토양 및 사구층내의 염분의 용해·침투에 의한 현상(윤정수, 1986)
- ③ 제주도 형성당시부터 염지하수가 부존할 수 있는 지질구조로 인한 자연적 인 현상(고기원, 1991b; 고기원의 7인, 1993; 고기원의 2인, 1994; 윤선의 2인, 1994; 고기원, 1997; 한국수자원공사, 1993)

고병련(1998)은 제주도 동부지역의 관정 32개소와 용천수 15개소에 대한 수질분석을 실시하고 수질조성 분포 특성과 해수침입에 따른 이온성분의 상관관계, 담·염수의 밀도 차이에 의한 수침모형실험을 실시하여 해안대수층에서 해수침입으로 인한 지하수체내의 해수의 이송·확산에 따른 수질오염을 예측하였다. 최순학(1990)은 제주도 지하수의 수리화학적 특성에 관한 연구에서 해수준면 상부에 부존하는 지하수의 부존량은 총 113 억 m^3 에 달하며, 연간 강수량으로부터 침투되는 지하수의 연간 함양량은 8억 3천4백만 m^3 으로 제시하였다.

고기원(1991)은 시추코아에 대한 지질검층 및 기존 자료 분석을 통하여 서귀포층의 지하분포 상태와 지하수 부존특성과의 관계에 대한 연구를 통하여 제주도 지하수의 수위는 1차적으로 지형적인 요인에 의해 지배되나 서귀포층의 지하분포 상태도 수위를 결정짓는 2차적인 요인으로 규정하고, 서귀포층은 지하수를 저장하고 있는 거대한 용기(차수벽)와 같은 역할을 담당한다고 하였다. 또한, 고기원의 5인(1992)은 동부지역의 지하지질구조와 지하수위 및 수질특성에 관한 연구를 실시하여 동부지역 지하수의 고염분 원인을 수문지질구조적인 관점에서 해석하였다. 고기원의 3

인(1992)과 고기원의 4인(1992)은 강우와 조석에 의한 지하수위 변동에 관한 연구를 통해 서귀포층은 제주도 지하수의 부존형태를 결정짓는 가장 중요한 지질요인으로서 지표로부터 침투된 강우를 저장해주는 그릇과 같은 역할을 해주고 있으며, 용암류 사이사에 협재된 점토층과 고결된 화산쇄설성 퇴적층 또한 해수의 침투를 막아주는 차수벽 역할을 해주고 있으며, 제주도 지하수의 수위는 대체적으로 동서하부의 계절변동을 나타내지만 동부지역을 제외한 대부분의 지역은 강우량의 다소에 따라 상당한 변동범위를 나타내는 것으로 제시하였다. 고기원의 5인(1993)은 지하지질구조와 지하수의 산출상태에 따라 상위지하수, 기저지하수, 준기저지하수(상부준기저, 하부준기저), 기반암지하수의 5가지 형태로 구분하고 그 각각의 특성에 대하여 설명하였다. 고기원의 7인(1993)과 고기원의 2인(1994) 및 윤선의 2인(1994)은 제주도 동·서부지역 지하수의 수질과 지질조사(시추코아 검층)를 실시하여 동·서부지역의 지하수 부존특성의 차이점을 비교 분석한 바 있으며, 고기원(1997)은 1921~1996년까지 실시된 제주도 수문지질에 관한 조사·연구목록을 집대성하여 조사·연구의 발달과정을 5단계로 분류함과 아울러, 132개소의 온천 및 지하수 시추공에 대한 지질검층, 27개소에 대한 지하수위조사(1993. 10~1996. 12), 35개소에 대한 지하수관정에 대한 수질조사(1992. 7~1993. 11), 5개소에 대한 지하수의 수질적인 수질검층 등을 실시하고, 제주도의 거시적인 지하지질구조를 포함하여 서귀포층과 지하수 부존형태와의 관계를 해석하였다.

이기화(1991)는 제주도 지하수의 Ghyben-Herzberg 관계에 대해 연구를 실시하고, 제주도에서 해안선의 곡률이 작은 북부·남부해안의 관정자료를 분석한 결과, 지하수면의 고도가 전체적으로 해안선으로부터의 거리의 제곱근에 비례함이 밝혀졌는데, 이 현상은 제주도의 지하수가 해수위에 Ghyben-Herzberg lens 비슷한 형태로 떠있으면서 하부의 해수와 동역학적인 평형을 유지하고 있음을 의미한다고 해석하였다. 또한, 이기화(1992)는 제주도의 담

수-해수간의 유체동력학적 평형에 관한 연구를 통해 큰 규모로 볼 때 담수는 그 하부의 해수와 거의 유체 동력학적 평형상태에 있으며 Ghyben-Herzberg 관계식은 제주도 전역의 규모에서 성립하지만 소규모로 볼 때 담수의 분포는 해수와의 유체 동력학적 평형상태에서 많이 벗어나 있음이 관찰되며 이는 제주도 대수층의 심함 국지적 불균일성을 반영하고 있는 것으로 해석하였다.

김중훈과 안중성(1992)은 제주도 용천수의 수질학적 특성과 Tritium에 의한 연대측정 연구를 실시한 결과, 삼양과 중문 및 일과리 용천수의 평균 이동시간은 약 1.2개월이고, 제주시 외도동의 용천수는 5.6개월, 한경면 청수리 관정(심도 125m) 지하수의 경우는 평균 이동시간이 약 4년인 것으로 제시하였다. 또한, 용천수의 연령은 삼양·중문·일과의 경우는 1.7년, 제주시 용담동의 용천수는 8.36년, 한경면 청수리의 관정 지하수는 28.9년인 것으로 제시하였다. 박원배(1993)와 박원배외 2인(1994)은 제주도 지하수의 수위변동에 관한 연구에서 수위변동의 양상을 조석의 영향을 거의 받지 않는 양상(서귀포 일대지역의 남부지역), 조석의 영향이 미미하고 강우량의 영향을 현저하게 받고 있는 유형(북부 및 서부지역), 강우에 의한 수위상승 폭은 작으나 조석의 영향을 뚜렷하게 받고 있는 유형(동부지역)으로 구분하였다.

현해남과 오상실(1994)은 제주도 토양은 다른 지역과는 달리 지역에 따라 오염물질을 흡착하는 능력이 차이가 매우 커서 약 20배의 흡착량의 차이를 보이며, 동부지역의 흑색 화산회토는 북서부 지역의 비화산회토에 비하여 유기물함량이 10배, 양이온치환용량이 3~5배 이상 크기 때문에 alchlor, chloro-thalonil와 같은 농약류, trichloroethylene, tetrachloroethylene과 같은 발암성 유기염소계 화합물, Cd, Zn, Cu와 같은 중금속류, 일부지역에서 오염현상이 나타나는 NO₃-N 등의 흡착량이 커서 지하수 오염의 위험성이 그만큼 적을 것으로 해석하였다. 현해남·오상실·고승학(1994)은 인구밀집 지역인

호텔, 상가 및 아파트 밀집지역에서 음용수로 사용하고 있는 지하수의 NO₃-N, pH, SO₄, Cl 및 hardness의 오염정도, 월별 및 연별 이들 물질의 농도변화를 조사하였을 뿐만 아니라, 양돈시설이 밀집해 있는 서북부지역의 19개 관정과 동북부지역의 9개 관정의 지하수를 채취하여 지역간 NO₃-N 농도의 차이, NO₃-N과 다른 이온과의 관계, 각 이온 간의 관계 및 이온조성의 차이에 대한 조사를 수행하였다.

윤정수와 박상운(1994)은 1983년부터 1993년까지 분석된 자료에 의하면 제주지하수의 오염정도가 초기 개발시의 수질보다 오히려 연속적으로 증가하고 있는 것으로 보고하였다. 또한, 윤정수와 박상운(1998)은 도내 55개 용천수에 대한 수질조사를 실시한 결과 용천수내의 전기전도도, pH, 질산성질소, 중탄산 이온은 강수량이 많았을 때 그 농도가 증가하는 반면 나트륨, 염소이온, 황산이온은 강수량이 많았을 때 농도가 감소하였으며, 제주도 용천수는 해발고도가 높은 고산 및 중산간지역에서는 bicarbonate type이 우세하고 저지대 및 해안지역으로 유동되면서 non-bicarbonate type 형태의 변질된다고 하였다. 윤정수와 박상운(2000)은 한라산 지역에 분포하는 대표적인 9개 용천수에 대한 고도별 수질특성과 그 진화 과정을 연구하였다.

3.4 성숙기(2001~2004)

제주발전연구원과 한국지질자원연구(2001)은 제주도의 의뢰에 의해 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사 1차년도 연구사업을 수행하였다. 조사결과, 제주도 지하수의 평균연령은 16년이며, 2년~53년의 범위를 나타내고, 지하수 연령은 전반적으로 고지대 및 중산간 지역에서 해안지역으로 내려올수록 연령이 높아 가는 경향을 보여 주며, 지역적으로는 남부지역이 가장 낮은 연령을 보이며, 동부지역, 북부지역, 서부지역 순으로 연령이 높아지는 것으로 제시하였다. 또한, 동부지역 지하수 중의 고염분은 대수층 내에 산류되었던 염분(古鹽分)으로부터 유래된 것이라기보

다는 현재의 해수가 지하수와와 단순혼합으로부터 주로 유입된 것으로 해석하였다.

한국수자원공사(2003)는 제주도 수문지질 및 지하수자원종합조사 3차년도 연구사업의 결과를 통하여 토지이용 형태를 감안한 유효지하수 함양량 개념을 처음으로 도입하였으며, 제주도의 유효지하수 함양량은 총 강우량의 46.1%에 해당하는 1,581백만 m^3 (일평균 4,329천 m^3)이고, 지하수 적정 개발량은 지하수 함양량의 40.8%인 1일 1,768천 m^3 으로 산정하였다. 또한, 2002년 시점의 제주도의 지하수 이용량은 일평균 294천 m^3 인 반면, 일최대 이용량은 1,047천 m^3 으로서 지하수 개발량(1,489천 m^3 /일) 대비 각각 19.7%와 70.3% 수준인 것으로 분석하였다.

박윤석·고기원·강봉래·박원배(2001), 박윤석·고기원·강봉래·함세영(2002), 고기원·박윤석·박원배·문덕철(2003)은 제주도 동부지역에 설치된 해수침투 감시 관측망을 대상으로 담-염수 경계면의 분포와 변동특성, 기저지하수의 내륙 쪽 분포경계, 동부지역 지하수의 수직적인 분포상태 등에 대해 자세하게 밝혔을 뿐만 아니라, 동부지역의 지하지질구조와 지하수 부존특성과의 관계에 대해서 체계적으로 연구하였다. 고경석·김용제·고동찬(2004)은 다변량 및 지구통계분석을 이용한 제주도 지하수의 수리지화학적 특성에 대한 연구를 실시하고, 대수층의 지하수 조성에 가장 영향을 미치는 주요 성분은 Cl 과 NO_3 이었는데, 이는 농경활동에 따른 질산염 오염과 해수침투가 대수층 지하수 수리지화학적 특성을 결정하는 주요한 기작임을 지시한다고 하였다. 또한, 고동찬·김용제(2004)는 다중 환경추적자를 이용한 제주도 지하수 유동 및 수질 특성분석연구를 실시한 결과, 3H 과 CFC-12의 비교로부터 조사된 지하수중 상당수가 old 지하수 요소와 young 지하수 요소의 이성분 혼합체로 구성되어 있는 것으로 파악되었다.

김창욱·고기원·박윤석·윤정수(2004)는 제주도 서부지역에 위치한 2개 관측정을 대상으로 대수층별 대수성시험을 실시하고, 지하수 산출능력을 평가한 결과, 연구대상 관측정은 대수층이 수직적으로 서로 연

결되어 있지 않을 뿐만 아니라, 대체로 해수면 하 10~20m 사이 구간에 제1대수층이 발달하고 있으며, 지하수 산출능력은 절리 또는 용암류 경계의 대수층(용수2호공)보다는 유리쇄설성 각력암층(무릉1호공)에서가 상대적으로 양호한 것으로 평가되었다. 서귀포층을 포함한 제2대수층은 수위강하가 10m 이상 발생하는 것으로 미루어 보아 제1대수층보다는 지하수 산출능력이 떨어지는 것으로 판단되지만 제1대수층은 지표로부터 얕은 깊이에 위치하고 있어 질산성질소 농도가 전반적으로 높고, 양수에 의한 영향권이 취수정 주변 300m까지 발생하고 있어 서부지역에서 제1대수층 개발은 세심한 주의가 요구된다고 밝혔다.

문덕철(2004)은 제주도의 주요 하천을 통해 용천수의 형태로 유출되고 있는 지하수의 기저유출 현상을 수문학적 관점에서 정량화하기 위해 4개 하천(의도천, 강정천, 연외천, 옹포천)을 대상으로 수위관측 및 기저유출 성분에 대한 유속측정 자료를 기초로 기저유출특성과 기저유출량을 산정하였다. 이광식·박원배·현승규·김용제·문덕철·김구영(2004)은 한라산 남·북측 사면에 분포하는 용천수들의 수리지구화학적·동위원소적 특징을 밝히기 위하여 23개 용천수를 대상으로 용존 이온의 함량과 산소와 수소 동위원소 조성의 계절 변화에 대한 연구를 실시하였다. 박관석(2004)은 제주도에서 해저를 통해 유출되는 지하수의 화학적 특성과 유출량 측정에 대한 연구를 실시하고, 제주 전 해안선에 걸쳐 측정된 해저 지하수의 유출속도는 일반 대륙연안에서 나타나는 값보다 10배 이상($>10cm/d$)의 빠른 속도를 보였으며, 간극수 중의 염분농도는 주변해수에 비해 약 20%이상 낮은 값을 나타내고 있어 해저를 통한 담지하수의 유출량은 제주도 물수지에 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다고 제시하였다.

4. 결 언

1921년~2004년까지 84년 동안 수행된 제주도의

지질과 수자원에 대한 조사·연구문헌 수는 총 1,109편에 이르며, 이중 수자원 분야가 510편(46%)으로 가장 많고 층서학 분야 126편, 암석학 분야 82편, 지구물리학 분야 80편, 지형학 분야 78편이다. 1921~2004년까지 84년의 기간을 시대적 상황과 조사·연구의 성과 등을 감안하여 태동기(1921~1960), 개념화기(1961~1980), 발달기(1981~2000), 성숙기(2001~2004)의 4단계로 구분한 결과, 태동기에 해당하는 40년 기간 동안에는 14편에 불과한 반면, 제주도의 지질과 지하수에 관한 기초적인 개념이 만들어진 1961~1980년까지 20년 동안에는 총 94편으로 증가하였다. 또한 지질 및 지하수에 관한 학술적 기반이 정립된 1981년~2000년까지 동안에는 무려 681편의 연구논문 및 보고서가 발표되는 놀라운 성과가 이룩되었으며, 2001~2004년까지 4년 동안은 이전의 단계에 비해 매우 짧은 기간이지만 320편이 발표되었다.

참고문헌

고기원, 1997, 제주도 지하수 부존특성과 서귀포층의 수문지질학적 관련성, 부산대학교 대학원 박사학위 논문, p. 1~325

고기원, 1999, 제주도 수문지질에 관한 조사·연구연혁과 지하수의 합리적 이용을 위한 과제, 제주발전연구원·제주대학교환경연구소 주최 ‘제주지하수 영원한 자원인가?’ 세미나 자료집 p. 47~97

고기원, 박원배, 2005, 제주도 지하수 조사·연구 발달과정, 제주발전연구 제9호 p. 113~145

고기원, 2005, 제주도 지하수의 부존 및 산출특성, 제주문화 제11호, p. 95~115

최순학, 1994, 제주도 지하수의 조사연구 발달사, 대한지하수환경학회, 전략광물자원 연구센터, 제주도 지하수자원의 환경학적 보전과 개발 이용, p. 1~25



※ 본 연구의 참고문헌은 총 1,109편에 이르기 때문에 전체를 수록하는 것은 불가능하므로 제주도 지질과 지하수에 대한 조사·연구 발달과정과 관련된 참고문헌만을 기재하였음