

# 제주도 지하수 조사·연구 발달과정

고 기 원\* 박 원 배\*\*

## 목 차

1. 서 언
2. 조사·연구문헌 분석
3. 제주도 지하수 조사·연구의 발달 과정
4. 결 론

## 1. 서 언

지하수는 ‘지하의 지층 틈이나 공극을 채우고 있거나 흐르는 물’이기 때문에 지하수의 부존 및 산출상태, 저류량, 유동경로, 진화과정 등의 제반 현상을 사람의 눈으로 직접 목격하기는 곤란하다. 따라서 상기와 같은 여러 가지 지하수의 특성을 과학적으로 밝혀내기 위해서는 수문지질학을 비롯한 여러 학문의 분야에서 다양한 조사방법과 분석기술을 이용한 조사·연구가 필요한 것이며, 그와 같은 조사·연구의 결과는 지하수의 합리적 이용과 체계적 관리를 뒷받침 해주는 초석으로서의 역할을 하기 때문에 지하수에 관한 조사·연구가 그만큼 중요하다는 것에 대해서는 재삼 강조할 필요성조차 없을 것이다. 제주도의 경우도 예외는 아니다. 일제강점기 때인 1921년부터 지하수조사의 기초가 되는 지질조사가 일본인 학자들에 의해 이루어지기 시작하였고, 1937년에는 일본중앙공업시

\* 제주도광역수자원관리본부 수자원연구실장

\*\* 제주발전연구원 연구위원

협소에서 제주도의 지하수에 대한 기초조사가 이루어졌으며, 1960년대부터는 우리나라 학자들에 의해 지질과 지하수에 대한 조사·연구가 본격적으로 진행되면서 제주지하수에 대한 과학적 접근이 시도되기 시작하였다.

오늘날 우리가 접하고 있는 제주지하수와 관련된 전문적인 용어나 여러 가지 정보는 제주지하수의 실체를 규명하기 위해 수많은 조사·연구자들이 수십 년간 기울인 노력과 열정으로부터 얻어진 산물인 것이다. 그렇지만, 제주도의 지질과 지하수에 대한 조사·연구가 84년이라는 긴 역사를 간직하고 있음에도 불구하고 최순학(1994), 고기원(1997), 고기원(1999)이 이전에 수행된 조사·연구 문헌에 대해 목록화 하고 그 발달과정을 요약 정리한 것을 제외하면 제주도 지하수에 대한 조사·연구 발달과정을 체계화하려는 시도는 이루어지지 않았다. 즉, 제주도 지하수와 관련하여 그동안 진행된 조사·연구의 성과를 되돌아보고, 이전에 수행된 조사·연구의 문제점과 미흡한점을 도출하는 것은 향후 조사·연구방향의 설정뿐만 아니라 잘못된 정보의 유통으로 인한 왜곡과 혼란을 차단하기 위한 측면에서도 매우 필요한 부분인 것이다.

본 연구에서는 1921~2004년까지 수행된 제주도의 지질과 지하수에 관한 조사·연구 문헌의 분류를 통하여 각 분야별 연구실적을 파악함과 아울러, 제주지하수에 대한 주요 조사·연구내용을 단계별로 정리함으로써 이전에 수행된 조사·연구의 주요 내용과 연구의 흐름 및 발전과정에 대한 기초정보를 제공하는데 목적이 있다.

## 2. 조사·연구문헌 분석

제주도의 지질과 수자원에 대한 조사·연구는 일제 강점기 때인 1921년부터 이루어지기 시작하였다. 이처럼, 제주도의 지질과 수자원에 대한 조사·연구가 84년이라는 긴 역사를 간직하고 있음에도 불구하고 최순학(1994), 고기원(1997), 고기원(1999)이 이전의 조사·연구 문헌에 대한 목록화 및 분류를 시도한 것 외에는 조사·연구 문헌을 체계화하려는 시도는 이루어지지 않았다. 따라서, 본 연구에서는 1921~2004년까지 수행된 제주도의 지질과 수자원 분야에 대한 조사·

연구 문헌을 수집하여 분야별, 시대별, 연구기관별 및 연구자별 연구실적 등에 대한 통계분석을 실시하였다.

### 가. 이전의 연구

최순학(1994), 고기원(1997), 고기원(1999)은 제주도의 지질 및 수자원 분야 조사·연구 성과와 변천, 그리고 발달과정에 대하여 정리한 바 있다. 최순학(1994)은 1963년부터 1994년까지 30년 동안 진행된 제주도 지하수와 관련된 논문과 각종 보고서를 정리하여 제주도 지하수 조사·연구 발달사를 초기 조사단계(1964~1971), 조사개발 병행단계(1972~1982), 보존관리 단계(1983~1993), 개발제한 단계(1994~)의 4단계로 구분하였다. 이 연구에서 최순학은 총 64편의 논문(25편)과 보고서(39편)를 중심으로 단계별 조사·연구의 발달흐름을 서술하였다.

<표 1> 최순학(1994)이 발표한 조사 단계별 논문 및 보고서 발간 내역

단 계 별	기 간	논 문(편)	보 고서(편)	계
초기 조사단계	1964 ~1971	2	5	7
조사개발 병행단계	1972 ~1982	2	5(11)	7(11)
보존 관리 단계	1983 ~ 1993	18	28(12)	46(12)
개발 제한 단계	1994 ~ 현재	3	1	4
계		25	39(23)	64(23)

( )는 연도별 개발 보고서임

고기원(1997)은 1921년~1996년까지 수행된 제주도의 지형·지질 및 수자원 분야에 대한 조사·연구 문헌을 수집하고 분야별 및 시대별로 분류함과 아울러, 조사·연구의 발달과정을 서술한 바 있다. 이 연구에서 고기원은 논문과 보고서 302편을 분야별로 분류함과 아울러 조사·연구의 발달과정을 5단계로 구분하였다(표 2 및 3). 즉, 고기원은 1921~1996년까지 75년간을 시대적 상황과 조사·연구의 성격 등을 고려하여 여명기(1921~1939), 침체기(1940~1960), 태동기(196

1~1972), 발달기(1973~1989), 성숙기(1990~1996)의 5단계로 구분하고, 각 단계별 기간동안에 수행된 조사·연구 문헌을 논문과 보고서류로 나누어 정리하였다.

<표 2> 고기원(1997)이 분석한 제주도 지질 및 수자원 분야 조사·연구 문헌

분야별	합 계	논문 및 보고서 발표 편수(1921~1996)				
		1921~1939	1940~1960	1961~1972	1973~1989	1990~1996
합 계	302	16	-	36	119	131
고생물학	25	2	-	4	9	10
광물학	7	1	-	1	5	-
지구물리학	29	-	-	1	9	19
수 자원	133	1	-	24	53	55
암석학	27	8	-	4	5	10
층서학	48	4	-	1	22	21
지형 및 기타	20	-	-	1	16	3
학술심포지움	13	-	-	-	-	13

<표 3> 고기원(1997)이 분석한 단계별 및 분야별 조사·연구 문헌

단계별	기 간	합계	지질학 분야(편수)			수자원 분야(편수)		
			소 계	논문	보고서	소계	논문	보고서
합 계	75	302	127	115	12	175	69	106
여명기	1921~1939	16	15	15	-	1	-	1
침체기	1940~1960	-	-	-	-	-	-	-
태동기	1961~1972	36	11	10	1	25	6	19
발달기	1973~1989	119	57	51	6	62	26	36
성숙기	1990~1996	131	44	39	5	87	37	50

한편, 고기원(1999)은 자신이 1997년 수행한 연구결과에 1996년~1998년까지 진행된 연구문헌을 추가하여 제주도의 수문지질에 관한 조사·연구 진행과정을 체계화하였다. 1999년 연구에서는 130편의 연구문헌 목록이 추가되었다. 분야별로 보면, 고생물학 분야에서 6편이 추가된 것을 비롯하여 지구물리학 7편, 수문지질학(수자원) 19편, 암석학 7편, 층서학 10편, 지형학·기타 1편, 학술 심포지움 80편이다. 이 연구에서 고기원은 총 432편의 조사·연구 문헌을 분야별 및 시대별로 분류한 결과, 수자원 분야가 152편이고 층서학 분야 58편, 고생물학 분야 31편, 광물학 분야 7편, 지구물리학 분야 36편, 암석학 분야 34편, 지형학 및 기타분야 21편, 학술심포지움 93편(19회)으로서 수자원 및 층서학분야가 전체의 49%를 차지하는 것으로 분석하였다.

<표 4> 고기원(1999)이 발표한 단계별 및 분야별 조사·연구문헌 분석

분야별	합계	조사·연구 편수				
		1921~1939 (여명기)	1940~1960 (침체기)	1961~1972 (태동기)	1973~1989 (발달기)	1990~1998 (성숙기)
합계	432	16	-	37	128	251
고생물학	31	2	-	4	9	16
광물학	7	1	-	1	5	0
지구물리학	36	0	-	1	9	26
수문지질학	152	1	-	24	62	65
암석학	34	8	-	4	5	17
층서학	58	4	-	2	22	30
지형학·기타	21	0	-	1	16	4
학술심포지움	93	0	-	-	-	93

#### 나. 조사·연구문헌 통계분석(1921~2004년)

본 연구에서는 1921년~2004년까지 국내외의 전문기관과 개인 연구자에 의해

진행된 제주도의 지질과 수자원 분야에 대한 조사·연구문헌을 수집하여 13개의 세부 분야별로 정리함과 아울러 분야별, 시대별, 연구기관 및 연구자별 조사·연구 실적 등에 대해 통계분석을 실시하였다.

분석결과, 지난 84년 동안 학술논문을 비롯하여 기고문, 단행본, 보고서, 학술세미나 발표자료 등을 총망라하면 모두 1,109편에 이르는 것으로 분석되었다. 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 5 참조).

<표 5> 유형별 조사·연구문헌 분류결과(1921~2004)

(단위 : 편)

분 류	합 계	태동기 (1921~1960)	개념화기 (1961~1980)	발달기 (1981~2000)	성숙기 (2001~2004)
합 계	1,109	14	94	681	320
기고문	32		22	7	3
단행본	13		1	5	7
보고서	146	1	28	88	29
학술논문	762	13	43	506	200
학술세미나	156			75	81

<표 6> 분야별 및 단계별 조사·연구문헌 분석결과(1921~2004)

(단위 : 편)

분야별	합 계	태 동 기 (1921 ~ 1960)	개 념 화 기 (1961 ~ 1980)	발 달 기 (1981 ~ 2000)	성 숙 기 (2001 ~ 2004)
합 계	1,109	14	94	681	320
고 생물 학	64	2	5	47	10
광 물 학	4	1	1	2	
동 굴 학	58		10	39	9
수 자 원	510	1	48	311	150
암 석 학	82	6	5	46	25
온 천	10			5	5
지구 물 리 학	80		1	70	9
지 질 공 학	15		2	5	8
지 형 학	78		11	34	33
층 서 학	126	4	6	73	43
토 양 학	26		4	13	9
퇴 적 학	42		1	34	7
기 타	14			2	12

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

조사·연구 분야를 13개의 분야로 세분하였을 때(표 6 참조), 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 문제해결을 위한 기초조사가 집중되었을 뿐만 아니라, 지하수의 보전·관리에 필요한 기초 자료의 축적을 위한 조사·연구도 꾸준히 진행되어 온 결과로 보인다.

한편, 조사·연구 문헌 수가 10편 이상 되는 개인 연구자 현황을 분석한 결과,

총 52명이 되는 것으로 집계되었다. 연구자별 연구실적을 살펴보면, 고기원이 79편으로 가장 많았으며, 윤정수·박원배·윤선을 비롯한 9명은 30~47편이었고, 윤성효·원종관·손영관·우경식·이광식 등 10명의 연구자는 20~30편으로 분석되었다. 또한, 고동찬·박기화·송시대·박윤석·최순학·김용제·고병련·강봉래·윤혜수·한정상 등 30명의 연구자는 연구 실적이 10~20편 범위인 것으로 집계되었다. 개인 연구자들의 분야별 연구실적을 살펴보면, 고생물학 분야에서는 윤선이 14편으로 가장 많았고, 수자원 분야에서는 고기원이 57편으로 가장 많았다. 암석학 분야의 경우 윤성효가 18편, 지구물리학 분야에서는 이희순이 11편, 지형학 분야는 김태호가 11편, 일반지질을 포함한 층서학의 경우는 손영관이 19편, 퇴적학 분야에서는 윤정수가 20편, 동굴분야에서는 홍시환이 11편으로 가장 많은 연구실적을 나타내었다. 이상의 분석 결과를 요약해 보면, 지난 84년 동안 제주도의 지질과 수자원 분야의 연구를 주도해 온 연구자들은 대체로 50여 명이며, 특히 수자원과 관련된 분야에 집중적인 조사·연구가 진행되었음을 알 수 있다.

행정기관 및 연구기관이 수행한 각종 조사·연구 실적을 집계한 결과(표 7), 제주도가 45편으로 가장 많았으며 농업기반공사 42편, 농림부 35편, 한국지질자원연구원 17편, 한국수자원공사 14편, 건설교통부 11편 등으로 분석되었다. 이들 기관이 수행한 분야를 보면, 제주도를 비롯한 농림부, 건설교통부, 한국수자원공사, 농업기반공사는 수자원 분야에 대한 조사·연구를 집중적으로 실시하였고, 한국지질자원연구원은 수자원, 온천, 지구물리, 층서학 분야에 대한 조사를 실시한 것으로 나타났다.

1991년부터 제주도의 지질과 지하수와 관련된 학술행사가 연구기관(단체) 및 행정기관 주최로 꾸준히 개최되었다. 1991년부터 2004년까지 모두 40회에 걸친 학술행사가 열림으로써 제주도의 지질과 지하수를 이해하는데 많은 도움을 주었다. 제주지하수와 관련된 학술행사는 1991년 한라일보사에 의해 처음으로 개최되었는데, 한라일보사에서는 한정상박사를 비롯하여 최순학박사·김영기교수 등을 초청해 ‘제주도 지하수 함양·보전을 위한 심포지움’을 개최해 당시의 지하수 문제의 심각성을 일반인들에게 알림과 동시에 지하수의 보전·관리를 강화해야 한다는 여론 형성에 큰 역할을 하였다.

<표 7> 기관별 및 분야별 조사·연구 보고서 분석결과

(단위 : 편)

기 관 별	합 계	수자원	온천	지구물리학	지형학	층서학
제 주 도	45	39			2	4
농업기반공사	42	42				
농 립 부	35	35				
한국지질자원연구원	17	4	7	3		2
한국수자원공사	14	12				2
건설교통부	11	10				1

또한, 1991년 제주대학교 사회발전연구소와 제주도수자원연구회 주최로 열린 ‘제주도 수자원의 합리적인 개발과 보전방향에 관한 심포지움’을 비롯하여 2004년까지 연구기관(단체) 및 행정기관에 의한 지하수와 관련된 학술행사가 29회나 개최되었다. 특히, 제주도(제주도광역수자원관리본부)에서는 제주도가 직접 수행하고 있는 지하수 관련 조사·연구사업의 성과를 도민들에게 알리고, 전문가들의 의견을 수렴하기 위한 2001년부터 ‘세계 물의 날’을 기념한 학술 세미나를 매년 개최해 2004년까지 4회에 걸쳐 학술행사를 개최해 오고 있다. 지질분야에 대한 학술행사로서는 1993년 한라산-백두산비교 연구회가 주최한 ‘제주도 화산지질에 대한 심포지움’ 등 10여 회가 열려 제주도의 지질학적 특성을 알리는데 많은 역할을 하였다. 2003년도에는 제주화산연구소가 만들어지고 그 기념으로 학술지포지움이 열렸으며, 2004년도에는 대한지질학회에서 제주도의 화산암과 화산활동이란 주제의 학술세미나와 답사가 열렸다.

한편, 제주도의 지질과 지하수를 연구 주제로 한 박사 및 석사학위 논문도 여러 대학에서 발표되었다. 박사학위 논문은 총 22편이 발표되었는데, 지질학분야가 15편이고 수자원 분야는 7편이다. 석사학위 논문은 총 112편이 발표되었는데, 지질학분야가 70편이고 수자원 분야는 42편이다. 본 연구에서는 제주도 지질과 지하수를 주제로 한 박사학위 논문현황을 (표 8)에 수록하였다.

<표 8> 제주도 지하수를 주제로 한 박사학위 논문 현황

구분	연구자	연도	학위논문명	대학교명
지질학 분야	원종관	1976	제주도의 형성과정과 화산활동상에 관한 연구	건국대학교
	이의형	1991	제주도의 해성 퇴적층으로부터 探出된 신생대 후기 개형층 화석에 대한 연구	서울대학교
	천광희	1992	제주도 지역에서의 지하수 탐지를 위한 쌍극자배열 전기탐사	서울대학교
	손영관	1992	Depositional Models of Basaltic Tuff Ring and Tuff Cones in Cheju Island, Korea	서울대학교
	윤정수	1992	제주도 주변해역 대륙붕 퇴적물의 광물학적 및 지화학적 연구	고려대학교
	한태홍	1993	제주도 연안 해빈과 사구에 관한 연구	경희대학교
	박준범	1994	제주도 화산암의 지화학적 진화	연세대학교
	이희순	1994	제주도 지질구조의 지구물리학적 연구(영문)	서울대학교
	장광화	1997	제주 화산도의 조면암류에 대한 암석 성인적 연구	연세대학교
	손인석	1997	제주화산도의 암석층서 및 연대측정	제주대학교
	권영인	1997	제주분지의 시퀀스 층서구분 및 열개와 관련된 퇴적물 특성	연세대학교
	최성희	1998	Geochemical study of ultramafic xenoliths in basalts from Cheju Island, Korea	서울대학교
	송시대	2000	제주도 암피상 아아용암류의 분포 및 암질에 관한 연구	부산대학교
	강소라	2003	Benthic foraminiferal biostratigraphy and paleoenvironments of the Seogwipo Formation, Jeju Island, Korea	부산대학교
김경수	2004	제주도 하모리층에서 산출된 조류와 우제류 발자국 화석 및 무척추동물의 생존 화석에 관한 연구	한국교원대학교	
수자원 분야	최순학	1990	제주도 지하수의 수리화학적 특성	경북대학교
	이순탁	1996	Groundwater Movement in the Volcanic Island of Cheju	일본 Tsukuba대학
	고기원	1997	제주도의 지하수 부존특성과 서귀포층의 수문지질학적 관련성	부산대학교
	고병련	1998	지하수 수질 및 오염 예측 모델에 관한 연구	영남대학교
	정차연	2002	제주도 서부해안지역의 지질과 지하수	부산대학교
	박관석	2004	제주도에서 해저를 통해 유출되는 지하수의 화학적 특성과 유출량 측정	부경대학교
	원종호	2004	제주도 지하수자원에 대한 수리지질학적 평가 및 물수지분석 연구	서울대학교

## 다. 조사·연구 발달 단계의 구분

본 연구에서는 1921년부터 2004년까지 84년의 기간을 시대적 상황과 조사·연구의 성과 등을 감안하여 아래와 같이 조사·연구단계를 4단계로 구분하고, 각 시대 단계별 및 분야별의 조사·연구 문헌 수를 분석하였다.

- 태 동 기 : 1921년 ~ 1960년(40년)
- 개념화기 : 1961년 ~ 1980년(20년)
- 발 달 기 : 1981년 ~ 2000년(20년)
- 성 숙 기 : 2001년 ~ 2004년(4년)

각 단계별 조사·연구 문헌 수를 살펴보면, 태동기(1921년~1960년)에 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 이룩되었는데, 이 기간 동안에 발표된 681편의 문헌은 전체 문헌 수의 61%를 차지하는 것이다. 특히, 2001~2004년까지 4년 동안은 이전의 단계에 비해 매우 짧은 기간이지만 320편이 발표되었다. 이는 연평균 80편에 해당하는 것으로서 발달기 동안의 연평균 발표 문헌 수 34편과 비교할 때 무려 46편이나 많은 것이다.

## 3. 제주도 지하수 조사·연구의 발달과정

제주도의 지질과 지하수 분야의 조사·연구문헌 수는 1,200여 편에 이를 정도로 방대하고, 그 분야도 13개의 세부 분야로 구분할 수 있을 정도로 광범위하기 때문에 본 연구에서는 지하수 분야의 조사·연구 발달 과정에 대해서만 정리하였으며, 나머지 세부 분야에 대해서는 다음 기회에 정리하고자 한다. 또한, 본 연구에서는 앞서 구분한 4 단계의 조사·연구 단계별 주요 연구내용을 정리함

으로써 그동안 지하수와 관련된 조사·연구가 어떻게 발전되어 왔는지를 파악하고자 노력하였다.

## 가. 태동기(1921~1960)

현재까지 파악된 이 시기의 지하수에 대한 조사·연구문헌은 일본중앙공업시험소에서 실시한 《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 1938년에 《공업용수 조사(제4보)-제주도 수자원조사 개보-》를 발간하였다.

이 조사는 1930년대 이후 일제에 의해 논의된 제주도 개발계획의 핵심인 공업 및 생활용수 확보를 통해 개발을 가속화해 대륙침략전쟁 군수물자를 공급하고 지배를 고착화하기 위한 수단으로 풀이된다. 이는 보고서의 서언에서 ‘개발을 필요로 하는 부분은 최근 각 분야의 전문가에 의해 기초적인 조사가 착수되어 있고, 개발에 있어서 가장 긴급을 요하는 사항 중 일반 수원에 관한 조사는 실로 그 하나라도 소홀히 할 수 없다’고 서술하고 있음은 물론 ‘제주도 각지의 지형 및 지질구조를 조사하고 기존에 실시한 지하수리(地下水理)를 고찰·연구하며, 약 60개소에서 각 종의 물을 채수하여 분석하고, 화학적 성분을 명확하게 파악함으로써 향후의 계획수립에 기초 자료를 제공하는 데 중점을 두었다’고 서술함으로써 당시 이 조사의 목적이 제주도 개발에 필요한 수자원 확보방안을 마련하기 위한 것임을 분명히 밝히고 있다.

이러한 조사목적은 반영하여 이 보고서에서는 지역별 수자원 확보방안으로서 1) 제주읍의 경우, 어승생악 남쪽 표고 920m 부근 표류수(어승생수원지 수원인 Y계곡)를 취수해 자연유하에 의해 공급함과 아울러, 기상측후소 단애 밑 산지천 부근의 용천수(금산수원지 수원)를 800m 거리 배수지까지 가압시켜 사용하고, 병문천 유역 오라리 부근 해발 70m 지점에 지하수 관정(심정)을 2개소 착정하는 안을 제시하였다. 2) 한림리는 명월리 부근 용천수를 이용하고, 3) 모슬포는 서남쪽 4km 지점 봉수대 부근 해안 용천수를 끌어올리는 방안을 제시하였다. 또한, 일본 공업시험소는 많은 양의 물을 사용하는 공장 설치 적지로 수

원·교통·부지 등을 감안하여 제주·애월·한림·모슬포·서귀포·함덕리 등을 제시하기도 하였다.

63개소의 우물·용천수에 대한 수질조사도 실시하였는데, 표류수와 용천수의 염소 함유량이  $300\text{mg}/\ell$  을 넘어서고 우물물도 직접 해수와 관계없는 곳에서도 소량은  $20\sim 90\text{mg}/\ell$ , 다량인 것은  $120\sim 500\text{mg}/\ell$  에 이르는 것으로 제시하였다. 그와 같은 원인으로서는 1) 해수에서 증발된 염분의 지표 강하, 2) 지하수의 순환고대 불량, 3) 지하 침투 해수의 일부 확산 또는 모세관현상에 의한 상승 혼합, 4) 지층속의 성분이 용해 또는 지표의 오염 등에 의한 것으로 해석하였다. 또한, 제주도에 있어서 일반적으로 수원으로 생각할 수 있는 것은 분화구호(噴火口湖), 마제형(馬蹄型) 요철지형을 이룬 지역의 용천수, 용암수로에 의한 용천수, 용암류의 말단지형으로 급구배를 형성한 곳의 용천수, 해안의 용천수로 분류하였다. 이 조사에서 일본중앙공업시험소는 대정(굴착심도 30m), 성읍(굴착심도 100m), 송당(굴착심도 100m)에서 지하수를 찾기 위한 시추조사를 실시하는 것으로 계획하였다. 특히, 이 보고서에서는 해안지역 용천수·우물이 간조와 만조에 따라 수위와 수질(염분 함량)에서 차이를 나타내는 이유에 대해 담수와 해수간의 정역학적인 관계를 통하여 설명하였다.

## 나. 개념화기(1961~1980)

일본중앙공업시험소의 조사 이후 1963년까지 27년 동안은 이렇다할만한 조사·연구가 이루어지지 않았다. 1945년 8.15 광복과 더불어 제주4.3사건, 6.25 한국전쟁 등 사회적 혼란과 불안이 끝나고, 이른바 개발연대로 불리는 1960년대에 들어오면서 제주도의 지하수에 대한 조사·연구가 본격적으로 이루어지기 시작하였다. 1970년대 초반까지의 지하수조사는 제주도의 심각한 물 문제를 해결하기 위한 방안으로서 지하수 개발 가능성을 진단하는데 초점이 맞춰졌다. 즉, 제주도에 지하수가 부존하고 있는 것인지?, 그리고 지하수를 개발해 이용할 수 있을 것인지? 하는 의문에 대한 해답을 찾기 위한 기초조사가 착수된 것이다.

1차적으로 1963~1965년까지 국립지질조사소(현 한국지질자원연구원)는 제주

도 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 용암터널 등이다'고 강조하면서, 제주도에는 상층부 지하수(High-Level Groundwater)와 기저지하수(Basal Groundwater)의 두 종류의 지하수가 발달하는 것으로 제시하였다. 즉, 상층부 지하수는 기저지하수 상부에 존재하는 지하수로서 불투수층암이나 반투수층암에 의하여 기저지하수와 분리되는 지하수이고, 기저지하수는 상층부 지하수와 구별되어 더 깊은 곳에 발달하는 일명 「Ghyben-Herzberg 렌즈」라 하였다. 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. 그러나, 김옥준은 제주도는 화산암류와 화산쇄설층 중의 대수층의 분포가 불규칙하여 추측기 어려울 뿐만 아니라, 대수층을 상호 연결하여 주고 또 지하수의 유동통로의 역할을 하는 지질구조가 복잡하여 예측기 어렵기 때문에 Ghyben-Herzberg Lens의 물을 찾기 위해서는 우선적으로 전기비저항탐사를 실시한 이후 시추조사를 실시하는 것이 바람직하며, 아울러 정호 및 시추공의 위치, 표고, 해안으로부터의 수평거리, 수질 및 수위측정과 조수의 영향 등 과학적 조사가 이루어져야 한다고 강조하였다.

한편, 당시 제주도립위생시험소에 근무했던 임두봉은 1961년 5월부터 1964년 10월말까지 전 도적으로 분포되어 있는 총 562개소의 공동 정호수 및 봉천

수(제주시 관내 81개소, 북제주군 관내 204개소, 남제주군 관내 277개소)와 상수도 및 간이수도(제주시 관내 68건, 북군관내 3건, 남군관내 33건)에 대한 수질검사를 실시한 결과를 근거로 음료수의 적합 여부에 대한 분석을 실시한 바 있다. 이 연구에서 임두봉은 음료수로서 적당한 정호수 및 봉천수는 54.8%이며, 부적당하다고 추정된 곳은 45.2%인 것으로 제시하였다. 부적당한 내역을 보면, 화학적 시험에서는 암모니아성질소가 25.0%, 아초산성질소는 29.8%, 검출되었으며, 염소이온 함량의 증대는 35.7%이며, 세균학적 검사로서 대장균군이 검출된 곳은 36.8%이었다.

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 지질조사를 실시하였다. 이 조사에서는 지질조사, 전기탐사 및 물리검층, 소구경 시추조사 및 대구경 관정 개발(13개소)<sup>1)</sup>, 양수시험, 지하수위 관측, 수질조사 등을 실시했을 뿐만 아니라, 최초로 제주도의 물 수지<sup>2)</sup>를 다음과 같이 제시하였다. 즉 연강 총강우량은 27억<sup>3</sup>m<sup>3</sup>이고, 직접 유출량은 7억<sup>3</sup>m<sup>3</sup>/년(26%), 증발산량 9억<sup>3</sup>m<sup>3</sup>/년(34%), 지하수 함양량은 11억<sup>3</sup>m<sup>3</sup>/년(40%)으로 산정하였다.

농업진흥공사(현 농업기반공사)는 농림부의 지원에 의해 1970~1971년에 제주

1) 이 당시 개발된 관정의 번호는 'U'자를 붙여 부여되었으며(예 : U-34 등), 현재까지도 농업용수로 이용되고 있음

2) 물 수지분석에서 연평균 강우량은 1500mm, 제주도의 면적은 1800km<sup>2</sup>를 기준으로 하였음

도 전역에 대한 광역지질조사와 더불어 전기탐사, 시추(120공) 및 착정조사(30공), 양수시험, 용천수조사 등을 실시했을 뿐만 아니라, 축척 1/10만의 제주도 지질도를 발간하였는데, 이 지질도는 국내 지질학자들에 의해 발간된 제주도 최초의 지질도이다. 이 조사의 결과는 1971에 《제주도 지하수 보고서》로 발간되었는데, 보고서에서는 제주도의 지하수 부존형태를 상위지하수와 기저지하수로 구분하고, 기저지하수는 담수와 해수와의 비중차이로 렌즈상을 이루며 사실상 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. 특히, 농업진흥공사는 제주도의 지하수 개발방향에 대한 제언을 통하여 ‘제주도 전역 특히 표고 약 300m이하 지역에 기저지하수가 풍부히 부존되나 서귀지역에는 난투수층이 발달 되어 있으므로 수량이 적기 때문에 서귀지역을 제외한 전 지역을 기저지하수(공당 평균 1,360 $m^3/D$ )로 개발이 가능하나 경제적으로 타당한 개발대상 지역은 표고 150m이하 지역’이라고 제시하였다. 아울러, ‘서귀지역과 남원서부지역(표고 50~400m)은 기저지하수량이 부족하므로 상위지하수를 개발함이 효과적일 것이며, 현재 본 도의 용수 부족량은 약 78,000 $m^3/D$  이나 5개년 후(1976년도)의 용수 수요량 증가를 감안한 소요량 416,000 $m^3/D$ 을 충족시키려면 약 320공(공당평균 1,300 $m^3/D$ )의 관정개발이 연차적으로 계획 시행되어야 할 것’으로 제시하였다.

한편, 이문원과 한규언(1978)은 제주도의 지질과 지하수와의 관계에 대한 연구를 통해 자연수위의 고도변화는 서귀포층의 절대고저 변화의 경향과 일치하고, 서귀포층의 바로 위의 접촉부분은 대체적으로 좋은 대수층 역할을 하며, 이제까지 서귀포층은 완전 불투수층으로 차수역할만 하는 것으로 보아 왔으나 서귀포층 내에 대수층 역할을 하는 부분도 있음을 강조하였을 뿐만 아니라, 지하수 부존형태는 대수층 분포의 불규칙성에 따라 매우 복잡하기 때문에 지하수 포장량 산출에는 이상적인 Ghyben-Herzberg 원리를 적용시킬 수 없다는 결론을 내렸다.

## 다. 발달기(1981~2000)

1981~2000년까지 20년 동안에는 여러 연구기관과 많은 연구자들에 의해 제주도의 물수지 분석, 지하수 함양량 및 적정 개발량, 지하지질구조와 지하수 부존특성, 동부지역 고염분 지하수 부존원인, 제주지하수의 환경동위원소적 특성, 용천수의 분포와 용출량 및 수질특성, 지하수의 수질과 오염, 질산성질소 오염원 연구, 지하수위 분포와 변동요인, 지하수위 장기 관측조사 등 다양한 조사·연구가 진행되어 제주지하수의 수문지질학적인 제반 현상과 특성이 정립되기 시작하였다.

### 1) 연구기관에 의한 조사·연구

이 기간동안 연구기관에 의해 수행된 대표적인 조사·연구를 보면, 한국수자원공사(산업기지개발공사 포함)는 1981년 《제주도 수자원조사 보고서》와 1993년 《제주도 수자원종합개발계획수립 보고서》 비롯하여 모두 10편의 보고서를 발간하였다. 또한, 농업기반공사(농어촌진흥공사 포함)는 1981년 《제주도 지하수 개발현황과 전망(평가분석과 장기계획안)》 및 1989년 《제주도 지하수 장기개발계획조사 보고서》를 포함하여 총 9편을 발간하였으며, 한국지질자원연구원(한국동력자원연구소 포함)는 1985년 《제주지역 수리지질조사 연구》를 비롯하여 모두 6편의 보고서를 발간하였다. 또한, 제주대학교 방사능이용연구소와 한국원자력연구소는 1985년부터 《동위원소를 이용한 제주지역 수자원에 관한 연구》를 연차연구사업으로 추진하여 1992년까지 7편의 보고서를 발간하였다<표 9 참조>.

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 도입하였으며, 상위지하수는 고지대 및 남제주 전역에 넓게 분포하고, 해수상부에 Lens상으로 부존하는 기저지하수는 동부지역에, 그리고 준기저지하수는 북부 및 서부 일부지역에 부존하는 것으로 제시하였다. 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 가능량은 47%에 해당하는 일 2백만 $m^3$ 으로 추정함으로써 제주도 지하수의 적정 이용량에 대해 처음으로 제시하였다. 특히, 이 조사 과정에서는 용천수에 대한 조사도 함께 실시되었는데, 당시 확인된 용천수는 모두 300개소이며 용출량은 746,000 $m^3$ /일인 것으로 보고하였다. 아울러, 이 보고서에서는 ‘지하수의 수질은 전반적으로 극히 양호하나 동부해안 저지대의 용천수와 일부 관정에서 염분의 함량이 허용기준을 초과하고 있으며, 지하수개발은 동부지역에서는 해안으로부터 5km, 서부지역에서는 2km이상 내륙에 위치하여 대용량 관정개발이 가능 할 것으로 판단하였다.

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. 지표수 개발 대상 지점으로는 열안지, 미악, 천아 지점 등을 들 수 있으나 전반적으로 투수성이 크고 초기 투자비가 과다하게 소요되어 용수 단가가 고가이며, 본 도에 적합한 대규모 지하수 개발 방안으로는 TUNNEL공법과 집수정 공법을 고려할 수 있으나 지하수 부존 형태에 따라 개발 방법을 달리해야 할 것으로 제시하였다. 즉, TUNNEL방식은 기저 지하수를 대상으로 개발이 가능하고(대상 지점 : 제주시 외곽 광령지구, 동제주 지역), SHAFT집수정 방식은 해안 용출수의 유로를 추적, 용출지점의 상류 내륙에서 개발가능(대상 지점 : 자굴이, 법환, 강정, 신촌,

괄지)한 것으로 제시하였다.

<표 9 > 전문기관에 의해 1981~2000년까지 수행된 주요 조사·연구보고서

기 관 명	연도	조사·연구 보고서명
농업기반공사 (농어촌진흥공사)	1981 1987 1988 1989 1989 1990 1991 1996 2000	- 제주도 지하수개발 현황과 전망(평가분석과 장기 계획안) - 제주도 서귀포시 호근지구 수맥도조사보고서 - 제주도 서귀포시 범호천지구 수맥도조사보고서 - 제주도 서귀포시 회수지구 수맥도조사보고서 - 제주도 지하수장기개발계획 조사보고서 - 남안지구 농어촌 용수 구역 조사보고서(제주도 남제주군 안덕면) - 제한지구 농어촌 용수 구역 조사보고서(제주도 북제주군 한경면) - 제주지역 지하수 인공함양에 관한 연구(제2차년도 최종보고서) - 제주도 지하수 보전관리계획 보고서
한국수자원공사 (산업기초개발공사)	1981 1988 1989 1989 1990 1991 1992 1993 1993 1995	- 제주도 수자원개발 종합보고서 - 제주도 수자원개발 예비 타당성조사 연구보고서 - '89 제주도 및 울릉도 수자원개발 조사보고서 - 제주도 및 울릉도 수자원개발 타당성 지질조사 보고서 - 제주도 수자원 조사 보고서 - 북제주지역 수리지질계 분석에 관한 연구보고서 - 제주도 중산간 용수개발 실시설계 지질조사 보고서 - 제주도 수자원종합개발계획수립 보고서 - 해수의 지하수 침투 예상모형 연구 - 제주도 광역상수도 1단계 기본 및 실시설계 지질조사 보고서
한국지질자원연구원 (한국동력자원연구소)	1985 1986 1987 1989 1990 1990	- 제주지역 수리지질조사 연구 - 제주지역 수리지질조사 연구 - 제주지역 영향권 조사연구(I) - 제주도 서부지역의 지하수 부존 및 해수유입과약을 위한 비저항(Conductive) 및 TEM(Inductive)법 복합 물리탐사 - 제주도 수자원의 특성과 수질오염 연구(II) - 제주도 수자원의 환경학적 조사연구
제주대학교방사능이 용연구소/한국원자력 연구소	1985 ~ 1992	- 동위원소를 이용한 제주지역 수자원에 관한 연구(I)~(VII)

아울러, 해안 용출수는 도내에서 대량 용수 공급원으로 비중이 크며, 개발 단가면에서도 저렴하므로 대용량 집수정 방식에 의한 개발이 필요함(개발 우선순위가 높은 북부 지역의 북제주군 신촌용출수, 남부지역의 서귀포시 자굴이 용출

수)를 추천하였다. 특히, 용수의 지역적인 과부족 해결을 위해 용수공급 체계의 광역화와 시설의 효율적인 운영 관리 및 용수의 재분배 문제 등에 대한 세부적인 검토가 요망된다고 제시하였다. 이 용역사업의 일환으로 한국수자원공사는 원종관외 3인(1993)과 원종관외 4인(1995)과 축척 1/5만의 성산도폭과 표선도폭 지질도 작성용역을 체결함으로써 제주도 최초의 1/5만 지질도 작성사업이 추진되었다.

농업진흥공사(1981)는 제주도 지하수 개발현황과 전망에 대한 조사·분석에서 본도의 지하수 포장량은 대략 650억 $m^3$ 으로 추정되나 기술적 측면에서 개발 가능 수량은 연간 712백만 $m^3$ (일 당 195만 $m^3$ ) 정도로 추정하였으며, 남제주군 표선면·성산면 일원, 그리고 북제주군 조천면·구좌면 일원은 타 지역에 비하여 담수렌즈의 두께가 박층(薄層)일 것으로 판단되므로 지하수 개발시 해수오염을 고려하여 굴착심도, 양수량 결정 등에 각별히 유의하여야 한다고 강조하였다. 또한, 북제주군 한경면 고산지구에서 실시한 동시 양수시험 결과, 우물의 비산출량이 개별 양수시험시에 비하여 약 12% 감소된 바, 갈수기 담수렌즈의 수축, 해수오염 등을 감안하여 현재와 같이 양수량의 70% 정도를 이용계획에 반영하는 것이 바람직하며, 우물의 영향권은 남제주군 대정읍 무릉지구에서 580m로 조사되었으나 이는 지역별 개발계획수립과 밀접한 관계가 있으므로 금후 계속적인 조사가 요망된다고 제안하였다.

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 분포 비율과 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 주 원인이겠으나 무엇보다도 해안변은 해수침입의 취약지역이기 때문이며 앞으로 장기 관측조사의 실시와 더불어 해

안변에서의 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. 또한, 한국동력자원연구소에서는 1990년 제주도 수자원의 환경학적 조사연구를 실시하고, 지하수의 오염여부를 판별해 주는 가장 좋은 인자는 K,  $NO_3$ 와  $SO_4$ 의 농축 양에 따라 지배되고 있으며, 특히 본 도에서는 Mg와 Ca의 비율이 해수침입 여부를 판별할 수 있는 가장 중요한 요인임을 제시함과 아울러, 위의 두 요인을 적용하여 해수침입과 폐기물에 의한 오염을 가려낸 결과, 김녕을 포함한 5개 지역에서 해수침입을 확인하였는데, 이들 지역은 본 도 타원형의 장축부의 우측인 동부 쪽에 밀집되어 있음을 보여주고 있어 이는 본 도 생성과정을 침강운동에 의해 동쪽방향이 우세한 경동(tilted)침강이 일어났다고 주장하는 일부 학설을 입증해 주는 것으로 제시하였다. 제주도 지하수는 Bicarbonate type에 속한 것이 우세하며 이는 흔히 지표수나 자유면 지하수에서 나타나는 수질조성을 보여주고 있어 본도 지하수는 충전과 배출의 순환역사가 극히 짧다는 것을 암시해 주는 것으로 결론을 내렸다.

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.

## 2) 개인 연구자에 의한 연구

이 시기에 제주도 지하수와 관련된 가장 큰 화두는 동부지역 지하수의 해수 침투에 의한 오염문제라 할 수 있다. 제주도 동부의 구좌에서 표선에 이르는 지역은 과거부터 지하수에 다량의 염분이 함유되어 있어 용수이용에 많은 불편을 겪어왔다. 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 부존현상과 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 자연적인 현상(고기원, 1991b; 고기원의 7인, 1993; 고기원의 2인, 1994; 윤선의 2인, 1994; 고기원, 1997; 한국수자원공사, 1993)

고병련(1984)은 제주도의 지하수 부존형태와 지하수위 변동에 관한 연구를 통하여 제주도의 fresh하고 saline한 지하수의 부존형태는 정량화된 Ghyben-Herzberg이론을 엄격하게 따르지 않고 있으며, 강우의 효과는 1mm의 강우량은 지하수위의 3~17mm의 수위변동을 보여준다고 제시하였다. 또한, 고병련(1987, 1988)은 제주도 지하수의 용출현상에 관한 연구를 통해 본도의 지하수는 용암의 균열부에 맥상으로 차 있으면서 이동하는 열출수로 규정함과 아울러, 지하수는 상하에 있는 난수수층 사이에 끼어 압력을 받는 피압면 지하수라 볼 수 있다고 하였다. 고병련(1998)은 제주도 동부지역의 관정 32개소와 용천수 15개소에 대한 수질분석을 실시하고 수질조성 분포 특성과 해수침입에 따른 이온성분의 상관관계, 담 · 염수의 밀도 차이에 의한 수치모형실험을 실시하여 해안대수

층에서 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 제시하였을 뿐만 아니라, 본도 지하수의 투수량계수는 10 $m^2/day$  에서 20,000 $m^2/day$ 의 범위로 다양하나 평균치는 1,587 $m^2/day$ 이고, 저류계수는  $1,939 \times 10^{-1}$ , 투수계수  $3.54 \times 10^{-2}$  m/min, 비양수량 평균치는 1,127  $m^3/d/m$  으로 이들 수리상수는 화산암에서의 특이한 수리지질학적인 조건에 따라 그 값이 월등히 높은 것이 특징적인 것으로서 이것은 다공질의 매체가 아닌 공극구조의 통로를 갖는 대수층의 특성에 기인된 것으로 해석하였다.

또한, 최순학은 제주도 지하수는 Bicarbonate type에 속한 것이 우세하며, 이는 흔히 지표수나 자유면 지하수에서 나타나는 수질조성을 보여주고 있어 본도 지하수는 충전과 배출의 순환역사가 극히 짧다는 것을 암시해준다. 이는 지하수의 지하통로가 되는 lava tube, lava tunnel 등이 마치 파이프와 같이 지하수의 투수를 급격히 촉진해 주는 매질을 통해 빠른 속도로 순환되고 있음을 입증해 준다고 제시하였다.

고기원(1991)은 시추코아에 대한 지질검층 및 기존자료 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 3인(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 사이사이에 협재된 점토층과 고결된 화산쇄설성 퇴적층 또한 해수의 침투를 막아주는 차수벽 역할을 해주고 있으며,

제주도 지하수의 수위는 대체적으로 동저하고의 계절변동을 나타내지만 동부지역을 제외한 대부분의 지역은 강우량의 다소에 따라 상당한 변동범위를 나타내는 것으로 제시하였다. 특히, 강우에 따른 수위변동은 대체적으로 1일 50mm 이상의 강우시 빗물이 24시간 이내에 침투되어 지하수위를 상승시키는 것으로 나타났다는데, 수위상승 지속시간과 상승폭은 지하지질구조에 따라 상이하며, 성산과 종달지역은 해안에서 내륙 쪽으로 거리가 증가함에 따라 조석영향은 감소하나 지연시간은 증가하는 반비례적인 관계를 뚜렷하다고 제시하였다. 제주남부 및 서부지역이 갈수기에 수위하강이 큰 것과는 대조적으로 동부지역이 소폭의 변동을 보이는 것은 지하지질구조가 상이한데서 비롯되는 것으로 해석하였다. 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 담수-해수간의 유체동력학적 평형에 관한 연구를 통해 큰 규모로 볼 때 담수는 그 하부의 해수와 거의 유체 동력학적 평형상태에 있으며 Ghyben-Herzberg 관계식은 제

주도 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. 특히, 담수를 포장하는 대수층의 체적은 유체동력학적 평형이론에서 지하수면과 담수-해수 경계의 모양을 결정하여 대략 900km<sup>3</sup>으로 추정되며, 제주도 지하수 총량은 대수층의 공극률을 대략 35~20%라고 가정 할 때 200~300km<sup>3</sup> 정도로 추정되는 것으로 제시하였다.

김종훈과 안종성(1992)은 제주도 용천수의 수질화학적 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 않는으나 강우의 다소에 따라 매우 큰 폭으로 변동하는 유형(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.

한정상의 3인(1994)은 총 455개 공의 자료를 전산처리하여 대수성 수리특성을 산정한 결과, 제주도는 주로 현무암 내에 협재된 화산쇄설층, clinker층과 현무암의 1 및 2차 유효공극이 주 대수대의 역할을 하며 이들은 기저, 준기저 및 상위대수층으로 구성되어 있는 것으로 해석하였다. 또한 제주도 대수층의 평균 투수계수는 29,300m<sup>2</sup>/일이며 평균 저류계수는 0.12로써 자유면 대수층을 이루고 있는 것으로 해석하였을 뿐만 아니라, 제주도 지하수 부존량은 약 440억m<sup>3</sup>인 것으로 산정하였다.

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 유기물함량

이 10배, 양이온치환용량이 3~5배 이상 크기 때문에 alchlor, chlorothalonil와 같은 농약류, trichloroethylene, tetrachloroethylene과 같은 발암성 유기염소계 화합물, Cd, Zn, Cu와 같은 중금속류, 일부지역에서 오염현상이 나타나는  $\text{NO}_3\text{-N}$  등의 흡착량이 커서 지하수 오염의 위험성이 그만큼 적을 것으로 해석하였다. 또한 그들은 도시 및 양돈단지 주변 지하수에서  $\text{NO}_3\text{-N}$ 에 의한 지하수의 오염현상이 심화되고 있고, 일부 대형 호텔 주변 지하수에서 극미량의 발암성 TCE와 PCE가 검출되었다고 보고하였다. 현해남·오상실·고승학(1994)은 인구밀집지역인 호텔, 상가 및 아파트 밀집지역에서 음용수로 사용하고 있는 지하수의  $\text{NO}_3\text{-N}$ , pH,  $\text{SO}_4$ , 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  $\text{NO}_3\text{-N}$  농도의 차이,  $\text{NO}_3\text{-N}$ 과 다른 이온과의 관계, 각 이온 간의 관계 및 이온조성의 차이에 대한 조사를 수행하였다.

김경찬(1996)은 1995년 5월부터 1996년 6월까지 총 6회에 걸쳐 제주도 서귀포 지역에 분포하는 용출수들 중 16개 지점의 수질 화학적 성분을 분석하여 서귀포지역 용출수의 수질 특성과 월별, 해발 고도별 수질 특성에 관하여 연구를 수행하였다. 박상운(1996)은 도내 19개의 용천수에 대한 용출량과 수질에 대해 연구하였으며, 현익현(1996)은 제주도 지하수에 함유된 질산성질소( $\text{NO}_3\text{-N}$ )의 원인을 규명하기 위해 질소동위원소에 대한 연구를 실시하고, 질산성질소 오염원을 자연토양, 화학비료, 생활하수, 축산폐수 등의 4가지 그룹으로 분류하였다.

윤정수와 박상운(1994)은 1983년부터 1993년까지 분석된 자료에 의하면 제주 지하수의 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 수질특성

과 그 진화과정을 연구하였다.

박관석(1994)은 제주도 남·동부지역을 대상으로 지하해수에 대한 화학적 특성을 규명하기 위하여 주요 이온 조성비를 표준적 해수와 지하해수를 비교 분석하였으며, 수온 및 염분의 측정으로부터 지하해수의 수질특성에 미치는 영향 인자에 대한 상호연관 관계에 대해 연구하였다. 김경훈(1998)은 제주도 동부지역 지하수의 염수화에 대하여 이화학적 특성을 규명하기 위한 연구를 통해 해수침입에 의한 담수와 해수 혼합비율은 온평 용천수에서 80 : 20으로 가장 높고, 해안과의 거리가 멀어질수록 이 비율이 낮아져서 수산3 관정인 경우 99.8 : 0.2로 제시하였다. 또한, 혼합비율에 의해 이론적인 Na농도를 구하여 실제 측정된 Na 농도와 비교하면, 실제 측정된 농도가 25~42%까지 낮게 나타나고 있는데, 이는 해수와 담수의 혼합에 의한 특성뿐만 아니라 이온교환 형태로도 나타나는 것으로 해석하였다. 김진회(1998)는 남제주군 대정읍 상모리, 하모리, 사계리 일대의 수리지질 특성을 이해하고, 3차원 지하수 흐름모델을 이용하여 강우량, 양수량 등 외부 stress에 대한 지하수 흐름계의 변화를 분석하였으며, 부성안(1999)은 제주도 지하수의 실제 포장량은 총 671억 89백만 $m^3$ 이며, 현무암층에 39억 44백만 $m^3$ 이, 서귀포층의 미고결사층에 19억 58백만 $m^3$ 이 포장되어 있고 미고결퇴적층에 612억 87백만 $m^3$ 이 포장되어 있는 것으로 분석하였다. 또한, 그는 기저지하수의 최적 개발 가능량은 연간 1,236백만 $m^3$ (1일 3,386,000 $m^3$ )으로 산정하였다. 양팔진(2000)은 제주도에 분포하는 용천수에 대한 조사를 실시하고, 지역별 분포와 용출지점의 지질구조에 따른 유형분류를 실시함과 아울러, 701개소에 대해 용출량을 측정한 결과 평균 용출량은 총 1,083,363 $m^3$ /일이며 최대 용출량은 1,608,342 $m^3$ /일을 밝혔다. 오홍식(2000)은 제주도개발특별법에 의거 시행되고 있는 지하수 원수대금 부과제도의 문제점을 분석하고, 그 결과를 근거로 합리적인 지하수 원수대금 부과제도 개선방안을 제시하였다. 함진규(2000)는 중산간 지역에 위치한 3개 관측정에서 연속 측정된 지하수위 자료와 주변지역 강수량자료의 분석을 통하여 지하수 함양지역 심부지하수체의 지하수위 변동특성과 강우에 의한 수위반응 및 함양율에 대하여 연구하였다.

## 라. 성숙기(2001~2004)

2000년 이후 제주도 지하수와 관련된 조사·연구는 제주도(광역수자원관리본부), 한국지질자원연구원, 제주도보건환경연구원 등을 중심으로 활발하게 전개되었다. 2000년 10월 제주도수자원개발사업소가 제주도광역수자원관리본부로 확대 개편되고, 2001년 수자원연구실이 설치되면서 지하수위 관측망 설치·운영, 해수침투 감시 관측망 설치 및 조사, 질산성질소 오염원 연구, 하수처리장 방류수 재이용 방안연구 등 연구사업이 자체사업으로 추진되었을 뿐만 아니라, 2000년도부터 3개년 사업으로 제주도 수문지질 및 지하수자원종합조사 용역사업이 추진되었다. 또한, 한국지질자원연구원에서는 과학기술부의 프런티어 연구개발사업에 의한 지하수 순환해석기술연구를 제주도를 대상으로 2002년부터 3년간 실시하였을 뿐만 아니라, 제주도 수문지질 및 지하수자원종합조사 1차년도 연구사업을 제주발전연구원과 공동으로 수행하였다. 또한, 한국수자원공사에서는 제주도 수문지질 및 지하수자원종합조사 3차년도 연구사업을 맡아 지하수 함양량 및 적정 개발량에 대한 재평가를 실시하였다.

제주발전연구원과 한국지질자원연구(2001)은 제주도의 의뢰에 의해 제주도 수문지질 및 지하수자원종합조사 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, 관정 지하수의 유속은 70~1,512m/y의 범위이고, 평균 유속은 475m/y(중간값 358m/y)로 조사되었다. 또한, 동부지역 지하수 중의 고염분은 대수층 내에 잔류되었던 염분(古鹽分)으로부터 유래된 것이라기보다는 현재의 해수가 지하수와 의 단순혼합으로부터 주로 유입된 것으로 해석하였다. 특히, 동부지역에 고염분 지하수가 부존하고 있는 것은 이 지역의 수리지질학적 및 수리지구화학적 특이성에 기인하는 것으로 해석하였다.

한국수자원공사(2003)는 제주도 수문지질 및 지하수자원종합조사 3차년도 연구사업의 결과를 통하여 토지이용 형태를 감안한 유효지하수 함양량 개념을 처

음으로 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. 강봉래(2001), 강봉래·박윤석·고기원·허목(2002)은 질소동위원소에 대한 연구를 통하여 대정지역 지하수 중의 질산성질소 기원을 토양유기물, 화학비료, 축산폐수, 생활하수 등으로 구분하였다.

김규범·박관석·황동운·양한섭(2003)은 제주도 연안에서 해저 지하수의 유출양상과 지구화학적 특성에 대한 연구로부터 제주도 해저지하수 유출속도는 일반 대륙에서보다 10배 이상(>10cm/d)의 빠른 속도를 보이며, 유출되는 담수의 기원을  $^{18}O$ 를 이용하여 추적한 결과, 해안선을 따라 존재하는 용천수와 같은 기원인 것으로 나타났다. 또한, 용천수와 지하해수의 총질산염과 인산염은 주변해수보다 약간 높고, 규산염은 5배 이상이 높은데, 이는 제주도 동부에서 조석 또는 인위적 양수에 의한 지하해수의 해양유출이 주변 해양에 상당한 생지화학적 영향을 미친다는 것을 의미는 것으로 해석하였다.

고경석·김용제·고동찬(2004)은 다변량 및 지구통계분석을 이용한 제주도 지하수의 수리지화학적 특성에 대한 연구를 실시하고, 대수층의 지하수 조성에 가장 영향을 미치는 주요 성분은 Cl과  $NO_3$ 이었는데, 이는 농경활동에 따른 질산염 오염과 해수침투가 대수층 지하수 수리지화학적 특성을 결정하는 주요한 기작임을 지시한다고 하였다. 또한, 고동찬·고경석·김용제·이승구(2004)는 다변량 통계 분석 및 질량 균형법을 이용한 제주도 지하수의 수질요소 분리에 대한 연구를 통하여 다변량 통계분석 결과 해수와 질산성 질소 오염원이 제주도 지역 지하수의 수리지구화학적 특성에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며,

해염을 포함한 해수의 영향, 질산성질소 오염, 자연적인 수질진화, 그리고 강수의 영향 등의 네 가지 지구화학적 요소들은 순차적인 질량 균형법에 의한 수질 요소 기여 분석을 통해 평가하였다. 고동찬·김용제(2004)는 다중 환경추적자를 이용한 제주도 지하수 유동 및 수질 특성분석연구를 실시한 결과,  $^3\text{H}$ 과 CFC-12의 비교로부터 조사된 지하수중 상당수가 old 지하수 요소와 young 지하수 요소의 이성분 혼합체로 구성되어 있는 것으로 파악되었다. 특히, 서부 해안지역에서 서귀포층내의 피압대수층에 설치된 지하수관정에서 채취된 지하수는  $^3\text{H}$ 과 CFC-12가 거의 없어 50년 이상의 지하수 연령을 가지는 것으로 나타났다으며, 질산성질소 오염과 지하수 함양시기에 따른  $\text{NO}_3$  농도 변화는 제주도 지역 화학비료 공급량과 시간적인 유사성을 보여주고 있어 상당량의  $\text{NO}_3$ 가 다량의 화학비료로부터 유래하며, 지하수 수질 보호를 위해 화학비료의 적절한 사용 조절이 필요하다고 강조하였다.

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

수를 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 측정한 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. 결론

- 1921년~2004년까지 국내외의 전문기관과 개인 연구자에 의해 진행된 제주도의 지질과 수자원 분야에 대한 조사·연구문헌을 수집하여 13개의 세부 분야별로 정리함과 아울러 분야별, 시대별, 연구기관 및 연구자별 조사·연구 실적 등에 대해 통계분석을 실시한 결과, 지난 84년 동안 학술논문을 비롯하여 기고문, 단행본, 보고서, 학술세미나 발표자료 등을 총망라하면 모두 1,109편에 이르는 것으로 분석되었으며, 조사·연구 문헌을 유형별로 보면, 연구논문이 762편으로 전체의 69%를 차지하였고, 조사·연구 보고서가 146편, 단행본 13편, 학술세미나 발표자료가 156편, 기고문 32편으로 분류되었다.
- 조사·연구 분야를 13개의 분야로 세분하였을 때, 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 문제해결을 위한 기초조사가 집중되었을 뿐만 아니라, 지하수의 보전·관리에 필요한 기초 자료의 축적을 위한 조사·연구도 꾸준히 진행되어 온 결과로 해석된다.
- 조사·연구 문헌 수가 10편 이상 되는 개인 연구자 현황을 분석한 결과, 총 52명이 되는 것으로 집계되어 지난 84년 동안 제주도의 지질과 수자원 분야의 연구를 주도해 온 연구자들은 대체로 50여 명인 것으로 파악되었다.

- 행정기관 및 연구기관이 수행한 각종 조사·연구 실적을 집계한 결과, 제주도가 45편으로 가장 많았으며 농업기반공사 42편, 농림부 35편, 한국지질자원연구원 17편, 한국수자원공사 14편, 건설교통부 11편 등으로 분석되었다.
- 1991~2004년까지 제주도의 지질과 지하수와 관련된 학술행사가 연구기관(단체) 및 행정기관 주최로 40회에 걸쳐 열림으로써 제주도의 지질과 지하수를 이해하는데 많은 도움을 주었다.
- 제주도의 지질과 지하수를 연구 주제로 한 박사학위 논문은 총 23편이 발표되었는데, 지질학분야가 16편이고 수자원 분야는 7편이다. 또한, 석사학위 논문은 총 112편이 발표되었는데, 지질학분야가 70편이고 수자원 분야는 42편이다.
- 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 구분하였다.
- 단계별 조사·연구 문헌수를 보면, 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 이룩되었는데, 이 기간 동안에 발표된 681편의 문헌은 전체 문헌 수의 61%를 차지하는 것이다. 특히, 2001~2004년까지 4년 동안은 이전의 단계에 비해 매우 짧은 기간이지만 320편이 발표되었는데, 이는 연평균 80편에 해당하는 것으로서 발달기 동안의 연평균 발표 문헌 수 34편과 비교할 때 무려 46편이나 많은 것이다.

□참 고 문 헌<sup>3)</sup>□

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

---

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