

2021 세계 물의 날 기념

제주지하수
미래 100년
과거 60년

KIGAM-JRI 학술심포지엄

2021. 03. 18.(목) 14:00~18:00

제주연구원 3층 윗세오름 대강당 / ZOOM /  YouTube 생중계



2021 세계 물의 날 기념 KIGAM-JRI 학술심포지엄 프로그램

시 간	행 사	연 사
개회 행사 / 진행: 강창민 연구실장 (제주연구원)		
14:00 (20')	개회사	김상협 원장 (제주연구원)
	환영사	김복철 원장 (한국지질자원연구원)
	격려사	강성의 환경도시위원장 (제주특별자치도의회)
14:20 (10')	휴 식	
1부 세미나 [제주지하수 연구 역사와 미래 발전 방향] / 좌장: 김용제 책임연구원 (한국지질자원연구원)		
14:30 (40')	(기조연설) 제주지하수 연구, 어디까지 왔나?	고기원 수석연구원 (제주특별자치도개발공사)
15:10 (40')	KIGAM의 연구성과와 제주지하수 자연성 회복을 위한 미래 구상	김용철 센터장 (한국지질자원연구원)
15:50 (40')	제주지하수 환경 변화 속 제주지하수연구센터의 역할	박원배 센터장 (제주연구원)
16:30 (20')	휴 식	
2부 패널 토론 / 좌장: 우남철 교수 (연세대학교)		
16:50 (40')	토론 주제: 제주지하수 발전방향	박준범 부장 (미육군극동공병단) 진기옥 과장 (제주특별자치도청) 서상기 본부장 (한국농어촌공사) 하규철 본부장 (한국지질자원연구원) 현윤정 연구위원 (한국환경정책·평가연구원)
17:30	폐 회	

목 차

개회행사 9

개회사	.....	11
환영사	.....	13

주제 발표 15

(기조연설) 제주지하수 연구, 어디까지 왔나?	.....	17
KIGAM의 연구성과와 제주지하수 자연성 회복을 위한 미래 구상	.....	39
제주지하수 환경 변화 속 제주지하수연구센터의 역할	.....	61

토론문 83

개회행사

개회사

환영사



김 상 협
제주연구원 원장

유엔(UN)이 정한 세계 물의 날을 기념하여 한국지질자원연구원(KIGAM)과 제주연구원(JRI)이 “제주지하수 과거 60년, 미래 100년”을 주제로 공동 학술 심포지엄을 열게 된 것을 매우 기쁘게 생각합니다.

이번 심포지엄을 위해 바쁘신 의정활동 속에서도 귀중한 시간을 내서 자리를 함께 해 주신 강성의 제주특별자치도의회 환경도시위원장님께 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 또한, 오늘 심포지엄 공동개최를 흔쾌히 수락해 주시고, 제주를 찾아주신 김복철 한국지질자원연구원장님께도 고마운 말씀을 드립니다.

‘물’은 우리 생활과 산업경제 활동, 나아가 자연생태계를 유지하는데 없어서는 안 되는 가장 중요한 자원입니다. 그러나, 전 세계적으로 무분별한 이용과 오염으로 지속 이용 가능한 수자원량은 점점 줄어들고 있습니다.

2019년 발간된 유엔 세계물개발보고서(UN World Water Development Report, 2019)에 따르면, 세계 20억 명의 사람들은 매우 심각한 물 부족에 시달리고 있고, 40억 명은 적어도 1년에 한 달 이상 물 공급을 받지 못한 채 살아가고 있습니다.

제주도의 물 사정도 안심할 수 없는 상황입니다. 수질이 깨끗한 청정 지하수가 화학비료, 축산폐수, 생활하수 등으로 오염되고 있습니다. 또한, 지하수의 과도한 이용과 잦은 가뭄 등으로 인해 지하수위도 낮아지고 있습니다. 특히, 인구 및 관광객의 증가, 토지이용의 변화, 기후 변화와 같은 여러 요소들이 제주지하수의 지속 이용성을 위협하고 있습니다.

제주특별자치도에서는 현재 제주지하수가 겪고 있는 수량과 수질상의 문제점과 그 원인을 찾아내고, 이를 개선하기 위한 정책과 제도를 발굴하는 지하수 조사·연구 전문기관인 제주지하수연구센터를 지난해 10월 전국 지방자치단체에서는 최초로 설립하였습니다. 제주지하수연구센터는 과학적이고 체계적인 조사·연구를 통해 제주도정의 지하수 보전·관리정책을 뒷받침하는 전문연구기관으로 성장해 나갈 것입니다.

우리 연구원과 한국지질자원연구원은 1999년 업무협약을 맺은 이래 ‘제주도 지하수 순환시스템 연구’를 비롯하여 ‘제주도 지질여행’책자 발간 등 여러 분야에서 긴밀한 협력관계를 지속해 오고 있습니다. 지금까지 이어 온 양 기관의 학술적 협력관계를 바탕으로 제주도의 지질과 지하수 분야 연구에 다각적·심층적 협력을 추진해 나가 고자 합니다. 특히, 제주지하수연구센터에서 제주지하수의 현안을 해결하기 위한 조사·연구 활동에 한국지질자원연구원의 더 많은 관심과 협력을 기대하겠습니다.

개회사

오늘 심포지엄의 주제발표와 토론을 해주시는 모든 분들께 감사의 말씀을 드립니다. 아울러 이번 행사를 위해 많은 노력을 기울인 관계자 여러분들에게도 심심한 노고를 표합니다. 또한, 이 자리에 참석해 주신 내빈 여러분과 화상채널을 통해 참여하여 주시는 모든 분들께도 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

끝으로, 이번 심포지엄을 통해 제주지하수의 과거와 현재를 되돌아보고, 미래를 생각해 보는 뜻깊은 시간이 되시길 바랍니다. 또한, 주제발표와 토론을 통해 제주지하수 발전을 위한 좋은 방안들이 심층적으로 논의되고, 향후 이정표를 정하는 알찬 시간이 되시길 기대합니다. 감사합니다.

환영사



김복철
한국지질자원연구원 원장

KIGAM-JRI 학술심포지엄 환영사

안녕하십니까?

한국지질자원연구원 원장 김복철입니다.

먼저 오늘 이 자리를 빛내 주기 위해서 직접 참석해주신 강성의 제주도의회 환경도시위원장님, 김상협 제주연구회장님을 비롯한 내외 귀빈 여러분, 그리고 실시간 온라인으로 참석하고 계신 모든 관계자, 물 전문가 여러분들께 환영과 감사의 인사를 드립니다.

오늘 심포지엄은 지난 1992년 UN에서 지정한 '세계 물의 날'을 기념하여 한국지질자원연구원과 제주연구원이 공동으로 개최하게 되었습니다.

물은 인간이 생명을 유지하고 풍요로운 삶을 영위하는데 있어 없어서는 안 되는 필수요소입니다. 그러나 최근 가속화되고 있는 전 지구적인 기후변화와 함께, 산업화로 인한 심각한 환경파괴로 인하여 지하수를 포함한 각종 수자원이 오염되거나 고갈되어가고 있는 현상은 이제 어제 오늘의 문제가 아닌 온 인류가 당면하고 있는 가장 강력한 위협요인입니다.

현재 전 세계 인구 중 약 20억 명이 지하수에 의존하고 있습니다. 그러나 최근 기후변화에 의한 강우량의 변화로 다음 세기에는 전 세계 대수층의 44% 정도가 물로 채워지지 못하고, 향후 100년 이내에 전 세계 지하수 공급량이 절반으로 줄어든 것이라고 예측하고 있습니다.

이렇게 기후변화가 가속화되고 있는 환경에서 안정적인 수자원 공급을 위한 지하수자원 보전·관리의 중요성은 아무리 강조해도 지나치지 않습니다.

현재 여러분이 날마다 드시고 있는 맑고 깨끗하고 맛있는 제주지하수는 제주도민의 생활과 산업 활동을 지탱하는 생명수이자, 고부가가치 자원으로서의 가치를 가지고 있으며, 제주를 전 세계에 알릴 수 있는 소중한 보물입니다.

이렇듯 소중한 제주지하수를 후대에 지속가능한 자원으로 물려주기 위해서는 전 지구적 기후변화에 따른 메가 가뭄의 위협에 대비하여 양적인 관리가 필요하고, 또한 농축산활동, 중산간 개발 활동 등 오염원의 질적 관리는 더 이상 미룰 수 없는 우리 세대의 숙제입니다.

이번 학술심포지엄은 「제주지하수 과거 60년 미래 100년」이라는 주제를 가지고 ‘제주지하수 연구, 어디까지 왔나?’, ‘KIGAM의 연구성과와 제주지하수 자연성 회복을 위한 미래 구상’, ‘제주지하수 환경 변화 속 제주지하수연구센터의 역할’이라는 제목으로 발표 및 패널 토론을 진행할 예정입니다.

지하수의 지속가능한 확보 및 개발을 위해서는 지하수에 대한 선진화된 연구 및 기술 개발, 그리고 그 결과를 바탕으로 합리적이고 체계적인 개발을 통해 지하수자원을 효율적으로 관리하고 이용 할 수 있어야 하며, 이는 우리 모두가 많은 관심을 가지고 다루어 나가야 할 핵심과제라고 생각합니다.

한국지질자원연구원은 지하수연구센터를 중심으로 「자연과 국민을 향한 지하수 연구」라는 비전을 가지고 ‘물/에너지 문제 해결을 위한 대수층 관리 및 지하수 활용 기술’, ‘지하수 의존 생태 시스템 복원 및 오염저감 처리 기술’, ‘국민 안전 및 삶의 질 향상을 위한 미래 지하수 신기술’ 등 지하수의 보전과 활용에 핵심이 되는 다양한 기술 개발에 전력을 기울이고 있습니다.

향후 우리 연구원은 최근 제주연구원에 설립된 제주지하수연구센터와 함께 지속가능한 지하수자원 확보와 수질오염 해결 등 미래자원인 제주지하수를 친환경적으로 보전·관리 할 수 있는 통합 물 관리 체계를 구축하는데 적극 협조할 것을 약속드립니다.

오늘 행사에 참석하신 내외 귀빈 여러분들을 다시 한 번 환영하며, 이번 학술심포지엄을 통하여 지난 60여 년 동안의 제주지하수 연구에 대한 발자취를 심도 있게 되돌아보고, 향후 100년의 미래 지하수자원을 잘 보존하고, 유용하고 지속가능하게 활용할 수 있는 의미 있는 논의들이 이루어지기를 기대합니다.

코로나-19 사태로 전체 지구촌이 예외 없이 고통을 겪고 이 엄중한 시기에 모든 분들의 건강과 안녕을 기원 드립니다. 감사합니다.

주제 발표

(기조연설) 제주지하수 연구, 어디까지 왔나?

KIGAM의 연구성과와 제주지하수 자연성 회복을 위한 미래 구상

제주지하수 환경 변화 속 제주지하수연구센터의 역할

제주지하수 연구, 어디까지 왔나?

고기원 수석연구원 (제주개발공사)

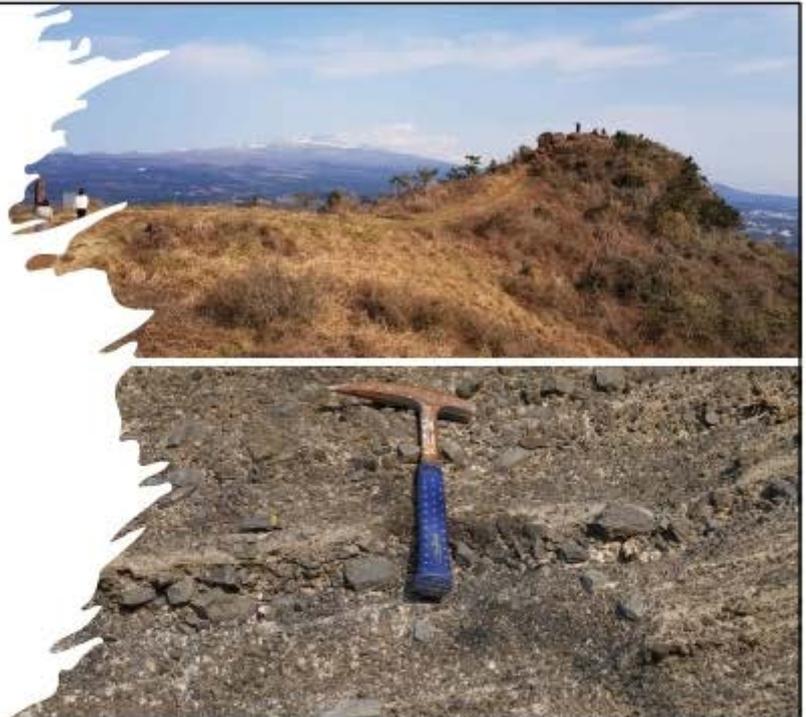


제주지하수 연구, 어디까지 왔나?

고 기 원(제주특별자치도개발공사)

목 차

1. 조사·연구 문헌 분석
2. 지질 분야 연구
3. 지하수 분야 연구
4. 맺음말





01 조사·연구 문헌 분석

- 총괄현황(1921~2020)
- 시대별 현황
- 분야별 현황
- 연구기관별 현황

01 연구문헌(1921-2020) : 총괄현황

구분	단행본	박사학위논문	보고서	석사학위논문	학술논문(국내)	학술논문(국내기관)	학술논문(국외)	합계
수자원	12	28	81	95	238	165	71	690
지질	18	23	66	53	258	39	107	564
합계	30	51	147	148	496	204	178	1,254

* 학회 구두 및 포스터 발표, 심포지움/세미나/포럼 발표, 기고문 등은 제외

地質學學部 試修八等學部百卷第九號
論說及雜文
濟州島の具化石
Yokoyama (1921)

濟州島ノ地質
Haraguchi (1931)

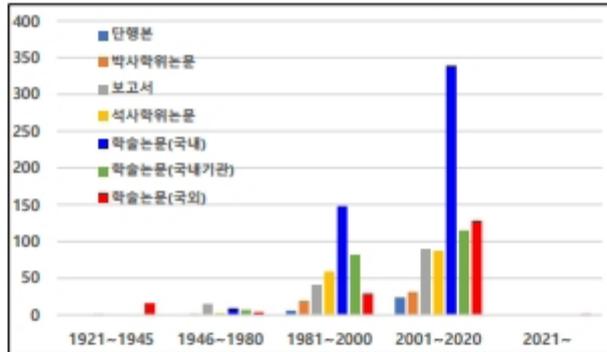
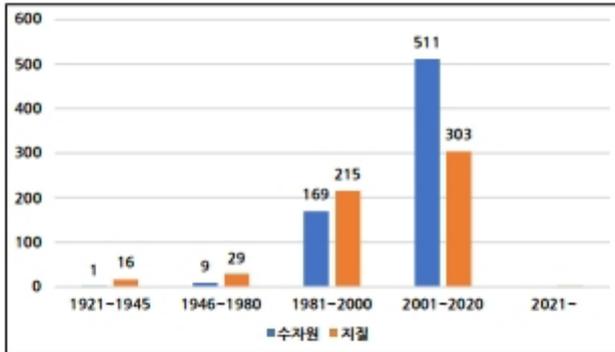
濟州島 水資源의 特殊性과 開發力案
김옥준(1969)

Much research and study has been devoted to the nature and occurrence of ground water in Hawaii. Over the past century, various private, federal, State, county, and university ground water investigations have helped scientists understand the unique and complex nature of Hawaii's ground water resources. [An internet search for ground water hydrology of the Hawaiian Islands will return over 314,000 articles related to this subject.](#)

<Water Resources Protection Plan 2019 Update, Hawaii State>

02 연구문헌 : 시대별 현황

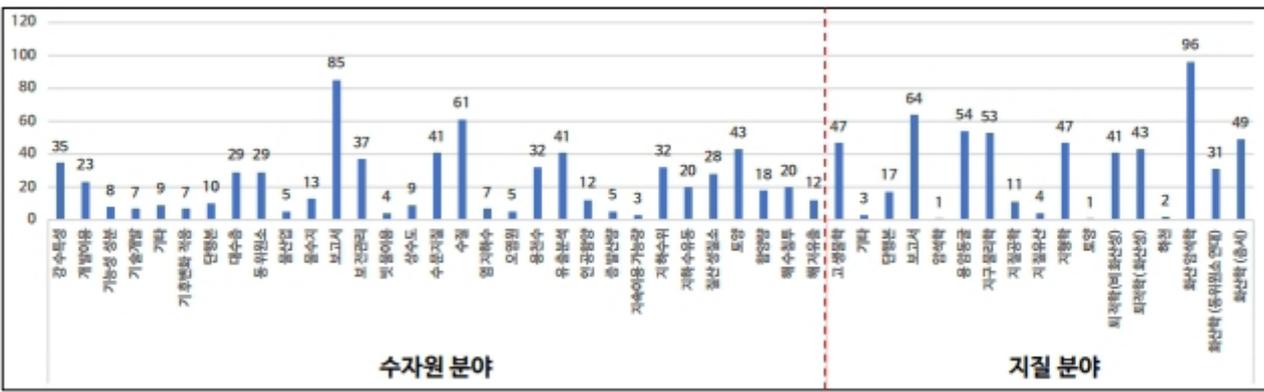
시대별	학술논문(국내)	학술논문(국외)	박사학위논문	석사학위논문	학술논문(국내기관)	보고서	단행본	합계
합계	496	178	51	148	204	147	30	1,254
1921~1945		16				1		17
1946~1980	9	4	1	2	7	15		38
1981~2000	148	29	19	59	82	41	6	384
2001~2020	339	129	31	87	115	90	24	815



03 연구문헌 : 세부 분야별 현황

- 수자원 분야
 - 단일 분야로는 수질에 관한 연구문헌이 61편으로 최다
 - 수문분야(유출, 기상, 함양, 물수지)가 107편(16%)
 - 수질분야(질산성질소 포함)도 전체의 13%
 - 동위원소에 의한 지하수 순환/해저유출 40 여 편

- 지질분야
 - 화산암류의 암석학적 연구가 96편으로 최다(17%)
 - 화산성 및 비화산성 퇴적학 분야도 84편, 용암동굴(54), 지구물리(53) 분야 순임
 - 화산활동시기에 관한 연구는 상대적으로 부족



04 연구문헌 : 연구기관별 현황(1)

구분	1946-1980	1981-2000	2001-2020	합계
국토부(문화재청)	5		5(2)	12
한국건설기술연구원			1	1
한국농어촌공사	1	4	7	12
한국수자원공사		6	8	14
한국지질자원연구원	7	18	29	54
합계	13	28	52	93

한국농어촌공사

1971	제주도 지하수보고서
1981	제주도 지하수개발 현황과 전망(평가분석과 장기 계획안)
1989	제주도 지하수장기개발계획 조사 보고서
1996	제주지역 지하수 인공함양에 관한 연구
2000	제주도 지하수보전·관리계획 보고서
2002	제주도 발관개 용수량 산정법 정립에 관한연구(I)
2003	제주도 발관개 용수량 산정법 정립에 관한 연구(II)
2004	제주도 농업용수 종합계획 수립
2004	제주도 발관개 용수량 산정법 정립에 관한 연구(III)
2005	제주도 발관개 용수량 산정법 정립에 관한 연구(최종)
2014	서부지역 해수침투 방지연구
2017	제주 농업용수 통합 관역화사업

한국수자원공사

1981	제주도 수자원개발 종합보고서
1989	제주도 및 울릉도 수자원개발 타당성 지질조사 보고서
1990	제주도 수자원조사 보고서
1993	제주도 성산도록 지질도 설명서
1993	제주도 수자원종합개발계획수립 보고서
1995	제주도 표선도록 지질 설명서
2003	제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(3)
2004	제주도 지하수 관리계획
2007	대수층 활용 상수도 공급 시스템 개발
2012	제주특별자치도 수자원관리종합계획(2013-2022)
2016	지하수 잠재오염원 조사 및 수질등급별 관리방안 마련 용역보고서
2018	제주지역 지하수 기초조사(보원) 보고서
2018	제주특별자치도 수자원관리종합계획-보원(2018)



05 연구문헌 : 연구기관별 현황(2) - 한국지질자원연구원

1964	제주도 남부 지하수원
1965	제주도 동남부 지하수원
1966	제주도의 지질과 지하수
1966	화산암지역 지하수의 특장-제주도를 중심으로
1968	제주도 지하수 광역 전기탐사 보고서
1970	제주도 화산암의 화학조성 연구
1974	울릉도 및 제주도 지역의 중력탐사 개요
1985	제주지역 수리지질조사 연구
1986	제주도 화산활동 연구
1987	제주도 남부지역의 제4기 지질조사 연구
1987	제주도 제4기 지질조사연구
1987	제주지역 열함권 조사연구(I)
1988	제주도 화산활동 연구(II)-제주도 서부지역의 화산출처와 분출사
1988	제주지역 해수염화권 조사연구(II)
1989	제주도 서부지역의 지하수 부존 및 해수유입 파악을 위한 비저항(conductive) 및 TEM(inductive)법 복합탐사
1990	제주도 수자원의 환경학적 조사연구
1990	제주도 지역의 TDEM 반응 특성 고찰
1992	제주도에서의 MT탐사
1994	제주도 지열자원탐사 및 최적활용 방안 연구(I)
1995	제주도 지열자원탐사 및 최적활용 방안 연구(II)
1996	제주도 지열자원탐사 및 최적활용 방안 연구(III)
1998	제주 - 여월도록 지질 보고서

2000	모슬포 · 한림 도록 지질보고서
2000	서귀포 · 하요리 도록 지질보고서
2000	제주(백야도, 진남포) 지질도록 설명서
2003	제주도 지질여행
2004	미래 제주도 청정지하수 안정적 공급시스템구축 사업
2004	지하수 순환/유동 시스템 모델링 기반기술 개발
2005	남제주 해안 사할 발자국 화석 지질연대 측정
2005-2008	제주도 지하수 부존특성에 대한 지구과학적 해석
2006	제주도 지질여행
2010	지구환경변화 대응 지하수 확보 통합솔루션 개발
2011	GIS MAPPING을 이용한 연공함양 가능지역 평가기술
2011	수자원의 지속적 확보기술개발 (지하수·지표수 연계 순환유동 시스템 해석기술 실용화)
2011	지하수·지표수 연계 순환 · 유동 시스템 해석기술 실용화
2012	제주유역 물개발 평가 연구
2013	제주도 지질여행
2013	제주지질공원
2014	제주도 화산활동에서 제4기 퇴적층의 지질학적 해석 예비연구
2016	제주도 제4기 미고결 퇴적층 연구 중장기 계획 수립
2016-2019	한라산 천연보호구역 지형 · 식생 · 기후 기초과학조사
2017	한라산 먹논물(영물) 수질역학조사 보고서
2020	제주도 지질여행
2020	제주도 천연동굴 보존관리방안 연구 및 조사(지하수)





01 지질분야 주요 연구성과

01 제주도의 화산활동과 화산체 성격 규명

- 구성 암석 및 화산암석학적 특성
- 거시적 지하지질구조 파악 및 해안지역 확장모델
- 서귀포층의 지질시대 및 퇴적상/고환경 해석
- 지표/지하 용암류 Ar-Ar Dating 및 화산층서 설정
- 지표/전부 퇴적층 ^{14}C 및 OSL Age Dating
- 단성화산체(옹회환, 옹회구)의 형성과 퇴적작용 해석

03 제주 향토문화와 지질학의 융합

- 제주도 '오름'에 대한 지질학적 해석
- '꽃자왈' 지대의 구성지질과 용암류의 형태
- 용전의 지질구조와 유형분류 및 용출량/수질특성
- 하는 분화구에 대한 제4기 지질연구
- 용두암, 산방산, 일출봉 등 주요 전설지 지질학적 해석

02 제주도 수문지질 특성화 토대 마련

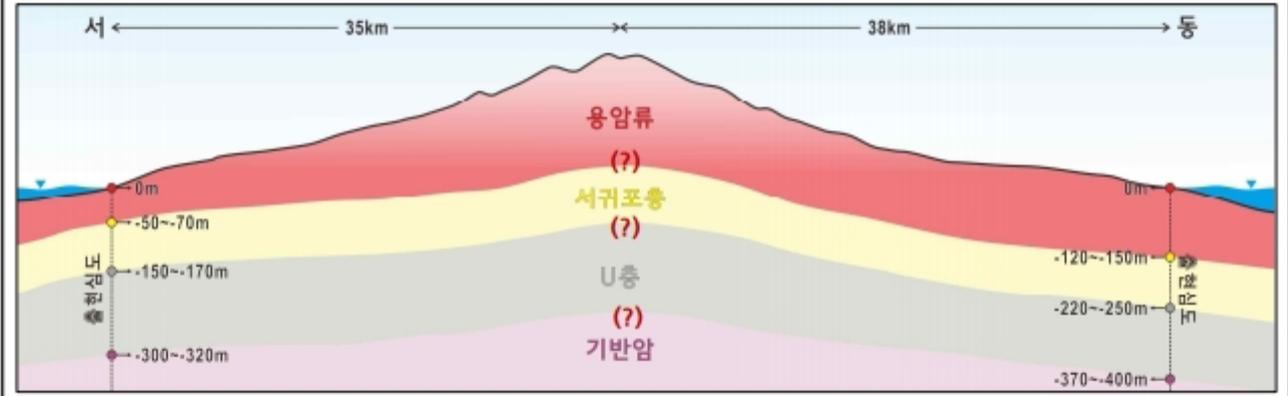
- 서귀포층 지하분포도 작성
- 축척 1/5만 지질도 작성(KIGAM 4개 도폭)
- 용암류의 형태분류, 투수성지질구조 파악
- 시추공 지구물리검층, 심부 물리탐사
- 동부지역 고염분 지하수 부존원인 해석
- 공공용 지하수 관정 지질주상도(약 1,200공)

04 제주도 지질자원의 가치발굴과 국위선양

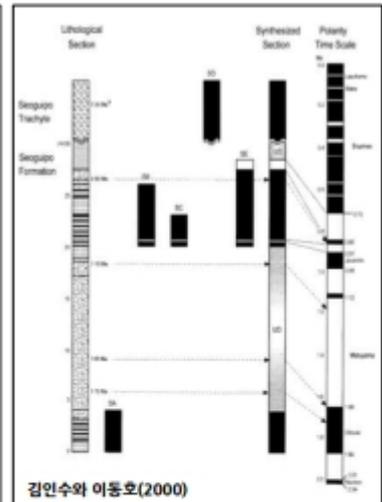
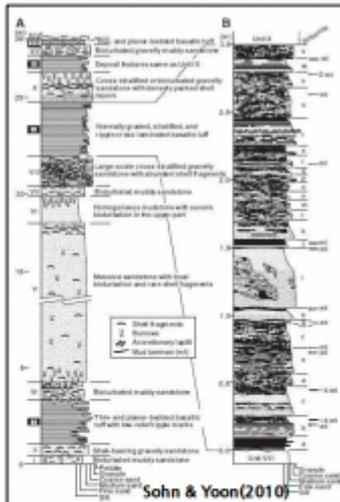
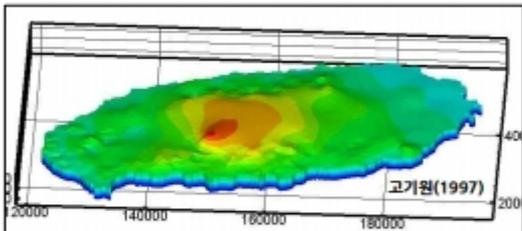
- 용암동굴 및 옹회환/옹회구 화산활동 연구
- '제주화산섬과 용암동굴' 세계자연유산 등재(2007)
- 세계지질공원(Global Geopark) 인증(2010)
- 람사르습지 등재(물장오리오름 등 5개소)
- 제주도내 용암동굴 조사 및 관리(176개소)
- <제주도 지질여행> 발간(3차 개정증보, 2020)

02 지질분야: 거시적 지하지질구조 파악

- ❖ 1980년 대 말부터 진행된 온천개발 심부시추로부터 심부지질 확인
- ❖ 제주화산체의 두께 : 2,100m ----- 하와이섬의 1/5 수준
- ❖ 기반암은 화강암과 용결용회암(해수면 하 155~312m에 위치)
 - ☞ 화강암 CHIME Zircon 절대연령 $173 \pm 31\text{Ma}$ (흑운모)



03 지질분야: 서귀포층의 구성물질, 퇴적환경 및 지질시대



- 지하에 광범위하게 분포, 지역별 고도가 다름
- 지하수 하방이동을 지연시키는 저투수성 지층
- 지하수 부존형태, 수위변동, 산출특성에 영향

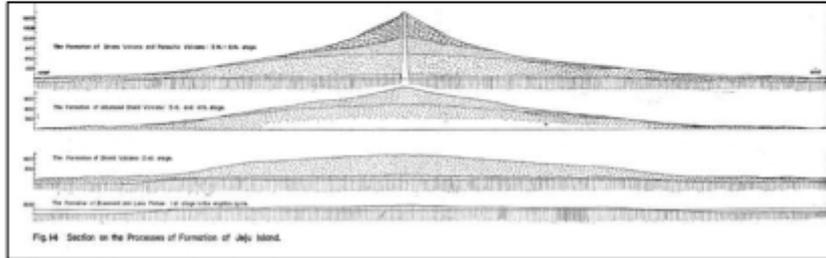
- 화석포함 층단위(10개)와 화석 비포함 층단위(4개)
- 중기마그마분화 기원의 화산쇄설물과 래양 및 비래양 퇴적물로 구성

- 자기층서와 생물층서에 의한 지질시대
- 최상부(화산회층) : 0.73~0.85 Ma
- 중상부 : 0.85~0.91 Ma
- 하부 : 1.66~1.88 Ma

04 지질분야: 화산활동과 화산체의 형태

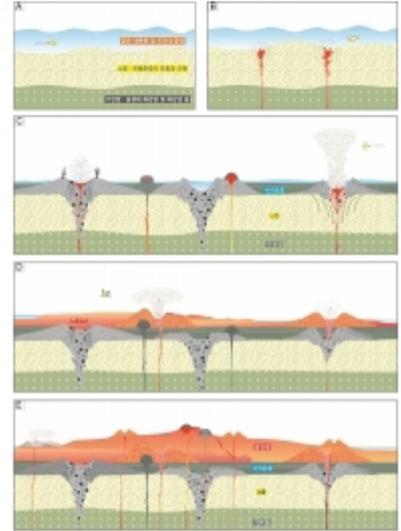
순상화산 형성론

현무암질 복합화산체론



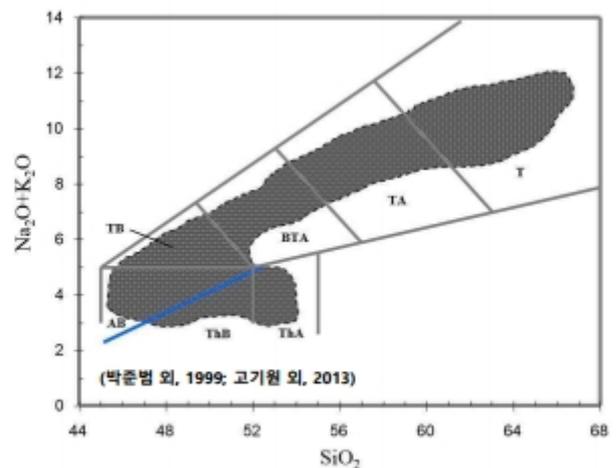
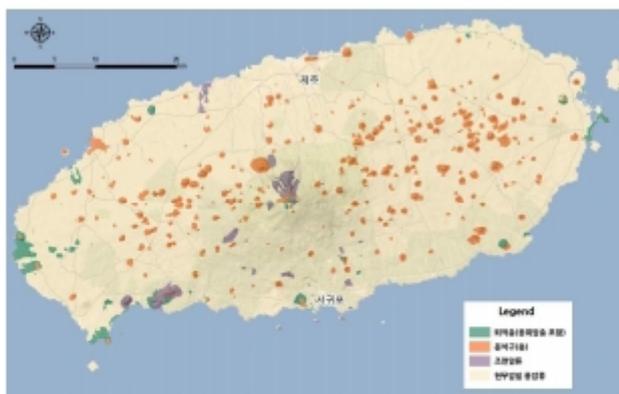
- 제주도는 대륙지각 판내부 화산활동(continental intraplate volcanism)에 의해 대륙붕 위에 만들어진 화산섬으로, 지구조 환경 및 구성 암석의 암석학적인 특징은 울릉도, 독도, 하와이섬 등과는 근본적으로 다름에도 불구하고,
- (1) 기저현무암 분출기, (2) 용암대지 형성기, (3) 한라산체 형성기, (4) 기생화산 형성기의 4단계 형성모델로 설명해 왔음 --- **Mauna Loa와 같은 순상화산체로 설명**

지표/지하 용암류의 암석학적 및 Ar-Ar 연대측정 연구를 통해 제주도는 한라산 중심부의 복성 복합화산체(polygenetic composite volcano)와 수많은 단성화산체로부터 분출된 용암류 및 화산쇄설물이 쌓여 형성된 섬으로 설명



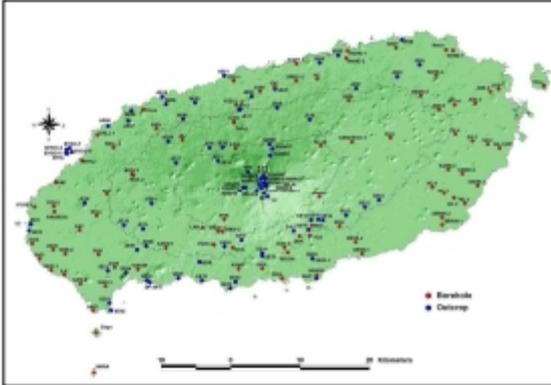
05 지질분야: 용암류의 성인과 암석학적 특성 정립

제주도 알칼리 및 비알칼리 계열의 암류는 상부 맨틀의 석류석 페리도타이트[peridotite] 근원암으로부터 각각 다른 정도의 부분용융에 의하거나 혹은 다른 깊이에서 만들어진 별개의 초생 마그마 배치(primary magma batch)로부터 분화된 것으로 해석. 제주도 하부 모호면의 깊이는 약 24.8km로서 한반도 평균 25.9~32.5km에 비해 얇음



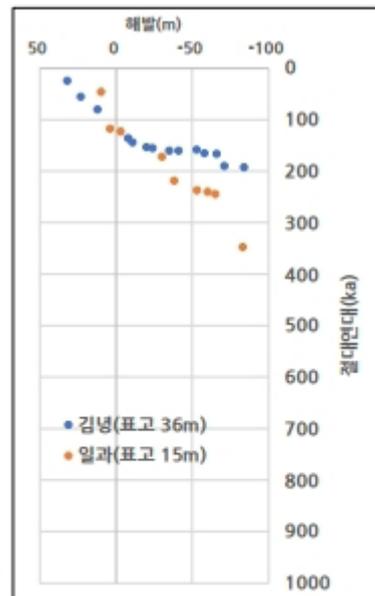
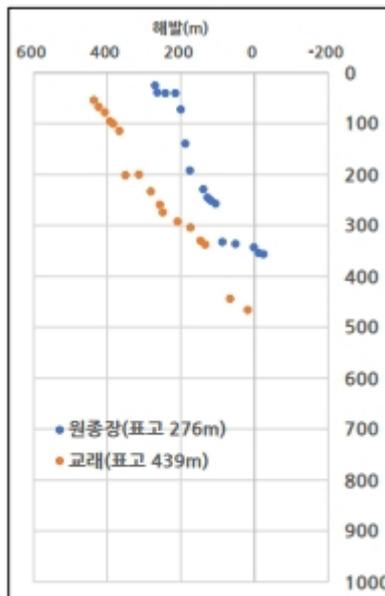
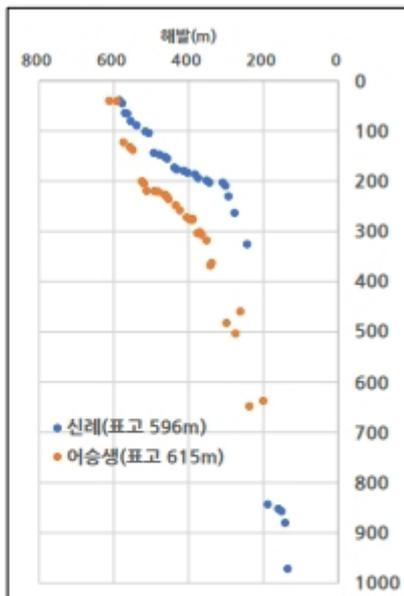
06 제주도 형성초기 용암류의 ^{40}Ar - ^{39}Ar 연대

- 총 180개소(시추공 91, 노두 89; 2001~2018)
- 분석시료 수
 - Ar/Ar 연대측정 : 845개
 - 암석성분(XRF) : 1,035개



구분	시추공				노두			
	시추공명	절대연대 (ka)	심도 (EI,m)	암석 유형	지명	절대연대 (ka)	암석유형	비고
남부	05동굴	992±21	48	TB	원안사	765±5	TR	
						799±6	TR	
	03동굴	763±8	131	TA	각수 비위	0.893±0.027 Ma 0.917±0.028 Ma	TR ¹⁾	K-Ar
	레이크힐스	968±55	31	AB	문 섬	0.728±0.034 Ma	TR ²⁾	K-Ar
	신례	971±75	136	AB	술 섬	0.725±0.038 Ma	TR ²⁾	K-Ar
	회수1	1052±51	245	TB				
	도순	774±24	141	TR				
남서부	돈내고	795±19	97	AB				
	범오촌	711±6	72	BTA				
	상예	758±9	6	BTA	산방산	802±5 0.747±0.023 Ma	TR ²⁾	K-Ar
						0.87±0.13 Ma	TR ³⁾	K-Ar
	무릉1	698±13	-70	TB	일라봉 (대영리)	863±7, 869±2	TA	
	하모	766±18	-86	BTA				
	거락도	824±32	-82	BTA				

07 지질분야 : 수치연대에 의한 화산체의 수직적 성장 해석



08

지질분야: 화산층서의 지속적 보완 - 1990년 이전

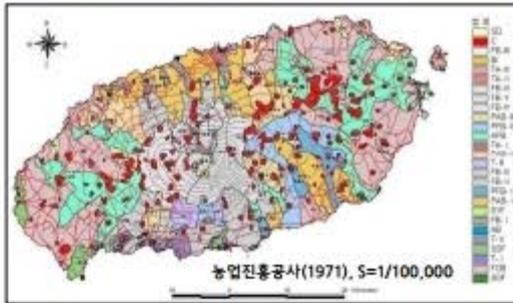
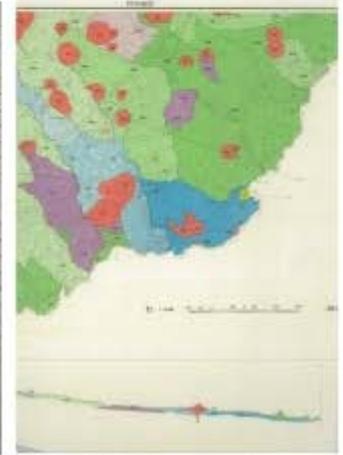
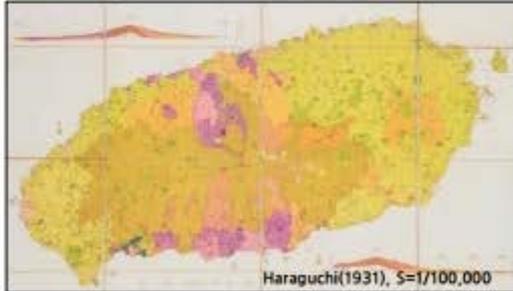
지질시대	Haraguchi(1931)	농업진흥공사(1971)	원종관(1975)	윤상규 등(1987)
홀로세	1002, 1007년 화산활동, 현무암질 소형화산	사 구 신덕근	1002, 1007년 화산활동 분석구 1, 2	<5,000 Yr BP 사구층 용회구(스코리아구)
플라이스토세	후기	한라산현무암 제주현무암 알카리현무암 장석/휘석현무암	백록담현무암 한라산조면안산암 한라산현무암 성판악현무암 시흥리현무암 법정리조면암 하효리현무암 제주현무암	35,000~70,000 Yr 현무암류, 한라산 정상 서면에서 유출 / 동남 고도암종 125,000 Yr 신양리층 160,000 Yr 한라산조면암 용회관(용막산, 수월봉, 밀줄봉)
	중기	산방산용암	신양리층	지구 온도증 410,000 Yr 비현정질현무암 서귀포조면안산암 서귀포층 용회관(당산봉, 두산봉)
	전기	서귀포층	중문조면암 성산층 서귀포조면암 표선리현무암	>600,000 Yr 현무암류(장석감람석현무암) 제주화산체가 현재 해수면 위로 성장 >730,000 Yr 용회관(화순, 단산) 870,000 Yr 산방산조면암 백룡화석 포함 해양성 퇴적층
플라이오세	한라산 알칼리조면암	서귀포층 감람석휘석현무암	서귀포층 기저현무암	1.2my~0.94my 감람석휘석현무암, 해수면 하부에 존재
플라이오세 이전	화강암		화강암	Cretaceous(?) 화강암(북부지역)/동부/남부지역 용회암)

09

지질분야: 화산층서의 지속적 보완 - 2000년 이후

지질시대	절대연대	화산층서	KIGAM Deep Drilling Project
홀로세		<ul style="list-style-type: none"> • 서기 1002년, 1007년 분화(고려목종 5년, 10년) • 0.10 Ma - 홀로세 : 알칼리 및 비알칼리계열용암류III • 0.30~0.10 Ma : 알칼리 및 비알칼리계열용암류II 	KIGAM Deep Drilling Project <ul style="list-style-type: none"> • 2007~2008년 • 해발 546m, 굴착심도 580m 
신생대 플라이스토세	0.01 Ma	비화산성퇴적층 (교래교퇴적층 등) 화산성퇴적층 (용회구, 용회관)	
	0.3 Ma	• 0.30~0.50 Ma : 알칼리 및 비알칼리계열용암류 I	 <p>알칼리현무암 Ar-Ar Age 968±55 ka</p>
	0.5 Ma	• 0.65~0.50 Ma : 알칼리계열용암류III • 0.92~0.65 Ma : 알칼리계열용암류II 일라봉(대령리), 산방산, 각수바위, 문섬, 범섬, 설섬, 가파도 등 • 1.0 Ma - 알칼리계열용암류 I (지하에 분포)	
신생대 플라이스토세 ~ 팔레오세	1.8 Ma	서귀포층 (1.88~0.3 Ma)	
	56 Ma	U층(U Formation)	
신생대 팔레오세 ~ 중생대 상부 백악기	56.0 Ma 100.5 Ma	용회암류 (66.4±1.7 - 84±5.9 Ma)	
중생대 쥐라기	145.0 Ma 174.1 Ma	화강암류 (172.4±5.2 - 173±31 Ma)	

10 지질분야 : 지질도 작성(S=1/5만)



작성기관/작성자가 달라 지층명, 도폭경계, 층서 불일치 문제 내재

11 지질분야 : 응회환 및 응회구 형성과정 규명



Ichulbong tuff cone, Jeju Island, Korea, revisited:
A compound monogenetic volcano involving multiple magma pulses, shifting vents, and discrete eruptive phases

Y.K. Sohn¹, S.J. Crissin², M. Breen³, L.E.M. Smith⁴, K. Nunn⁵, J.D.L. White⁶, R.M. Murray⁶, Y.M. Joo⁷, and C.W. Kwon⁸
¹Department of Earth and Environmental Sciences and Research Institute of Natural Sciences, Geospatial National University, Jeju 630-701, Republic of Korea
²Victoria Risk Solutions, Massey University, Private Bag 11 222, Palmerston North Private Bag 11 222, New Zealand
³School of Environment, The University of Auckland, Private Bag 92 019, Auckland 10019, New Zealand
⁴Department of Geology, University of Otago, P.O. Box 56, Dunedin, New Zealand
⁵Headquarters of World Natural Heritage Management Bureau, Jeju Special Self-Governing Provincial Government, Jeju 630-700, Republic of Korea

ABSTRACT
Ichulbong (Oenite Peak) tuff cone is a tuff cone. Ichulbong, Seomri, and Cultural Organization (UNESCO World Heritage site) that uses its scientific importance to the surrounding coastal expansion that continued to. It is a type locality for the sedimentary evidence of pyroclastic transport and depositional processes that occur during phreatomagmatic breccia eruptions. Its chronologically dated cone morphology was first described by Haraguchi (1931). However, it is still controversial whether these separate shield basaltic magma pulses were erupted, corresponding directly to the three eruption phases. Magmas 1 and 2 may be genetically related, with the former showing evidence for longer periods of shallow-level fractionation, whereas magma 2 originated from a slightly different magmatic domain, although at a similar depth. These results demonstrate that breccia in magmatite eruption sequences may represent deep magma column processes, and they raise fundamental questions concerning the

SCIENTIFIC REPORTS

OPEN Volcaniclastic tide-modulated tempestite in a coastal tuff ring, Jeju Island, Korea

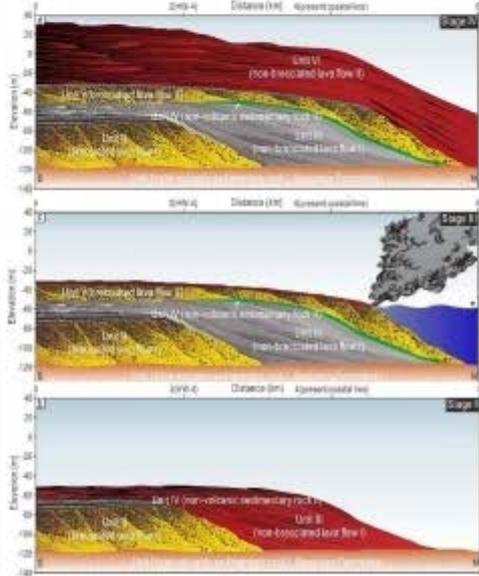
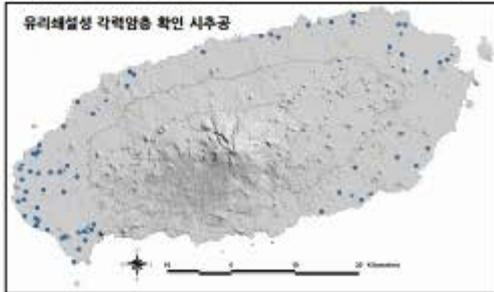
Received: 4 Jan 2018
Accepted: 11 January 2018
Published online: 02 March 2018

Chanwoo Sohn & Young Kwan Sohn

The need for more accurate and extensive records of storm activity is increasing because of growing population and infrastructure in coastal areas. Records of past storms activity have consequently been sought from diverse sedimentary proxies in marginal marine environments, as well as historical documents. In this paper, we introduce a unique record of a 2.7 ka BP storm event preserved in a coastal tuff ring on Jeju Island, Korea. The tuff ring formed mostly above high tide level by primary volcanic processes, but contains three interbeds of horizontally laminated to hemispherically cross-bedded deposits with interweaving mud drapes up to an altitude of ~4.5 m above high tide level. These interbeds were formed by wave activity in a breach to vent pores when the sea level rose several meters above normal high tide level during a storm event, and the triple interbedding of the wave-worked deposits reflects three tidal cycles during a storm event that lasted 1.5 day. Jeju Island contains the most complete record of an ancient storm event ever reported in the tuff ring, and highlights the significance of coastal volcanoes in the study of extreme depositional events in coastal areas, such as storms and tsunamis.

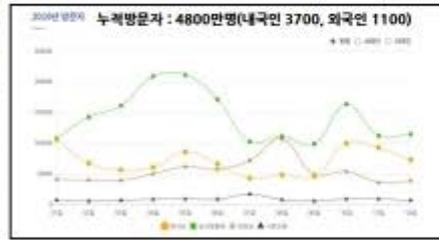
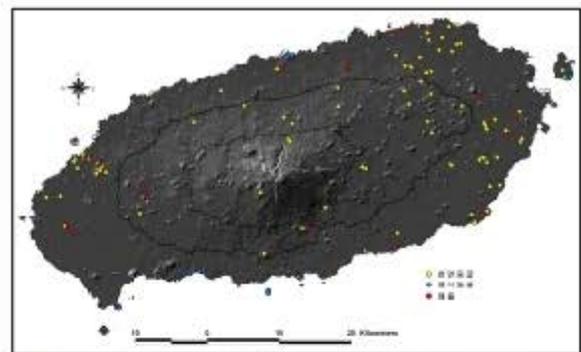
12

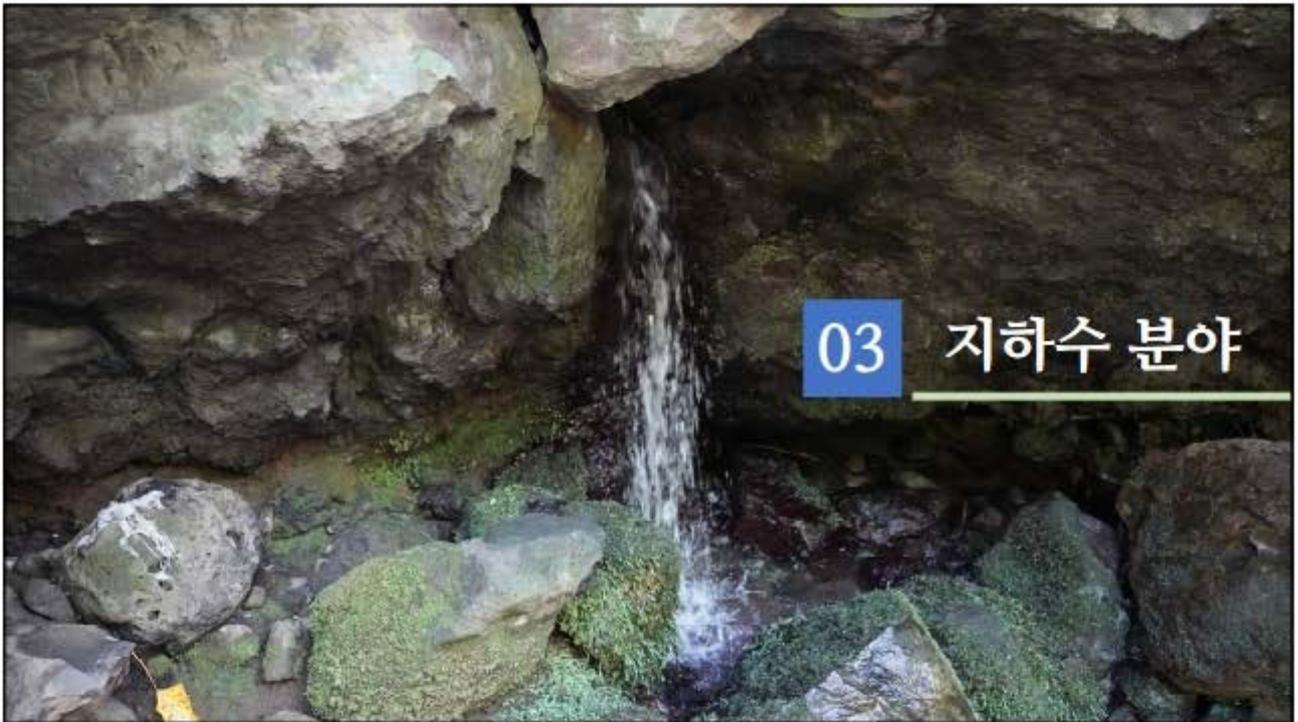
지질분야 : 용암삼각주에 의한 해안지역 확장모델



13

지질분야 : 제주지질자원의 글로벌 브랜드화





01 지하수 분야 주요 연구성과

01 물 부족 문제 해결 및 지하수 관리모델 구축

- 지하수 개발을 통한 용수공급 체계 구축
- 전국 최초 지하수 개발이용 법제도적 관리
- 화산섬 수문지질 특성을 반영한 관리제도 시행

03 제주지하수 자연성 및 인위적 영향 파악

- 제주지하수 배경수질 및 수질진화
- 지역별 및 계절적 지하수위 변동, 가뭄-취수 영향
- 환경동위원소에 의한 질산성질소 오염현상 규명
- 토지이용과 지하수 수질과의 관련성
- 해안 대수층의 수리적 특성, 대수층 수리상수
- 용천수 용출량 변화 및 해저 지하수 유출량 등

02 제주지하수의 수문지질 특성 정보 축적

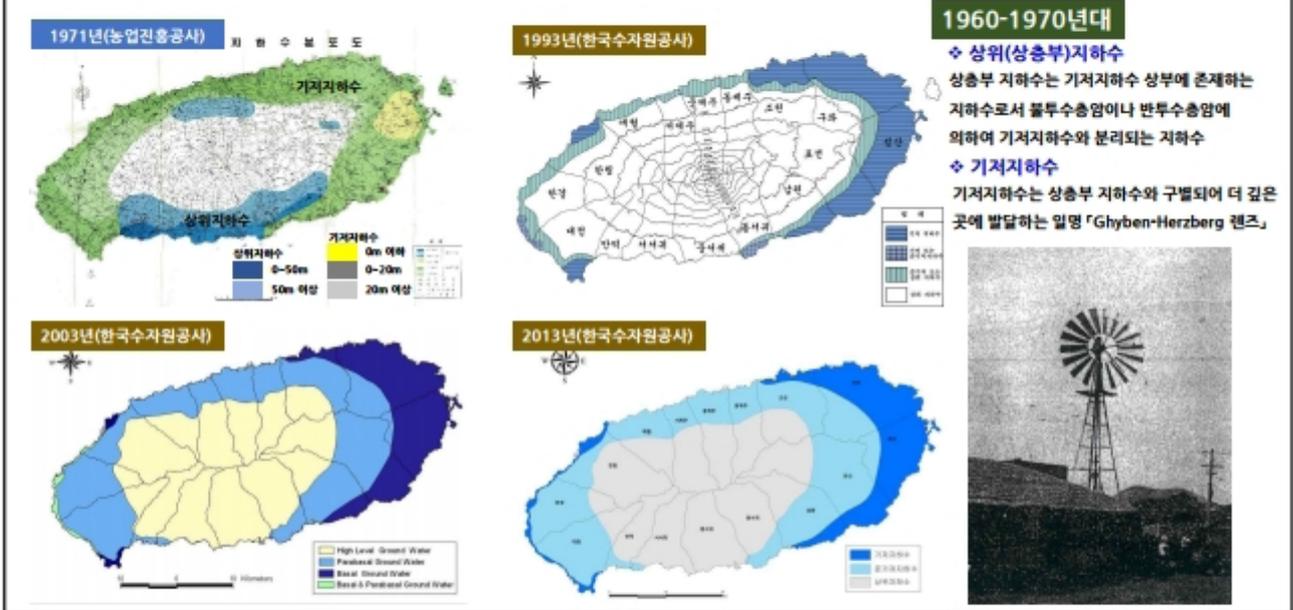
- 지하수 부존형태 정립(상위, 준기저, 기저)
- 물 수지 평가(1993년부터 5회; 수공 4회, KIGAM 1회)
- 지하수 지속 이용 가능량 평가
- 지하수 순환시스템 해석(고도별, 지역별)
- 제주지하수 특성 정립(강우 민감성, 오염위약성, 산출특성 상이성)
- 담-염수 경계면 형성 및 변동특성 파악

04 제주지하수의 가치발굴 및 브랜드화

- 제주지하수 기능성 성분 및 생리활성
- 천연탄산수 부존지역, 수질특성, 기원
- 염지하수 산업적 활용 분야
- 제주삼다수의 수질특성 및 생리활성
- 용천수 스토리텔링 및 탐방로
- 제주도 물 이용 문화 기술채록 및 스토리텔링

02

지하수 분야 : 지하수 부존형태 정립



03

지하수 분야 : 물수지 및 지하수 지속이용 가능량 주기적 평가

- ❖ 수문총량(강수량)과 직접유출량은 지속적 증가(19 → 24%), 증발산량은 전체 수문총량의 33-37% 범위
- ❖ 연간 지하수 함양량은 14-16억 톤(수문총량의 39~46%) 범위
- ❖ 지하수 지속 이용 가능량 : 6억톤 수준, 지하수 함양량의 38-40%

(단위 : mm, 백만㎥/년)

구분	UNDP/FAO (1971)	한국수자원공사					한국농어촌공사		지질자원연구원
		1981년	1993년	2003년	2013년	2018년	1989년	2000년	2011년
수문총량 (연평균 강수량)	2,700 (1,500)	3,385 (1,870)	3,388 (1,872)	3,427 (1,975)	3,769 (2,061)	3,952 (2,161)	3,560 (1,918)	3,303 (1,807)	3,716 (2,033)
직접유출량	700 (26%)	703 (21%)	638 (19%)	708 (20.7%)	833 (22.1%)	970 (24.5%)	703 (20%)	646 (19.6%)	894 (24.1%)
증발산량	900 (33%)	1,104 (33%)	1,256 (37%)	1,138 (33.2%)	1,260 (33.4%)	1,379 (34.9%)	1,183 (34%)	1,241 (37.6%)	1,382 (37.2%)
지하수 함양량	1,100 (41%)	1,542 (46%)	1,494 (44%)	1,581 (46.1%)	1,676 (44.5%)	1,604 (40.6%)	1,603 (46%)	1,416 (42.8%)	1,439 (38.7%)
지속 이용 가능량		1,095 (3,000 천㎥/d)	620 (1,689 천㎥/d)	645 (1,768 천㎥/d)	730 (2,000 천㎥/d)	652 (1,787 천㎥/d)	910 (2,493 천㎥/d)	-	603 (1,652 천㎥/d)

04 지하수 분야 : 지하수 함양량 추정기법의 발전

- 평년 : 902mm(42%)
 - 가뭄 : 591mm
 - 기후 및 토지이용 변화 : 788mm

- 지하수 함양량 : 1,935.6m³/yr
 - 직접유출량 : 1,142.7m³/yr
 - 증발산량 : 1,555.7m³/yr

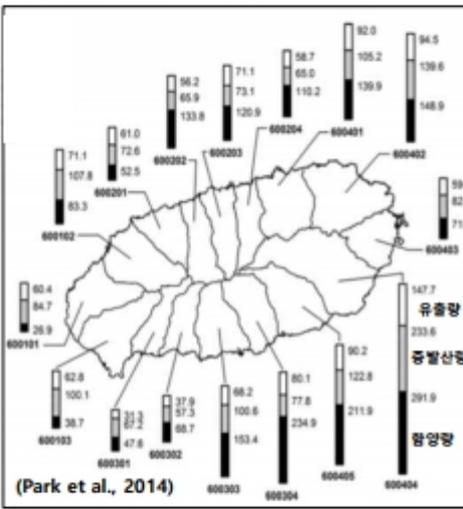
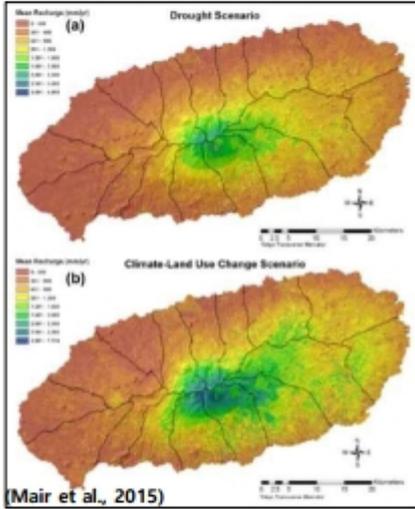
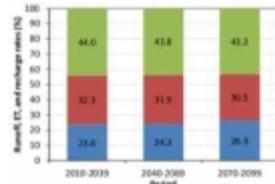
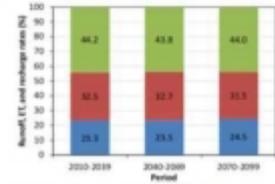


Table 4. Water budget for the Pyeongs watershed.

Classification	Rainfall (10 ⁶ m ³ /year)	Evapo-transpiration (10 ⁶ m ³ /year)	Runoff (10 ⁶ m ³ /year)	Recharge (10 ⁶ m ³ /year)
Report (2005)	497	127(25%)	109(21%)	26(5%)
This study 2006	590	182(30%)	96(17%)	31(5%)
This study 2007	637	190(29%)	118(19%)	33(5%)

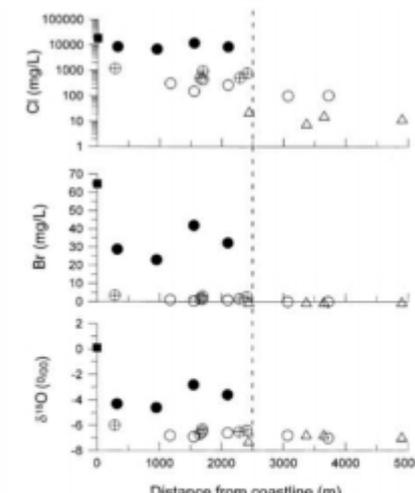
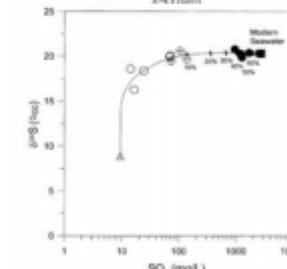
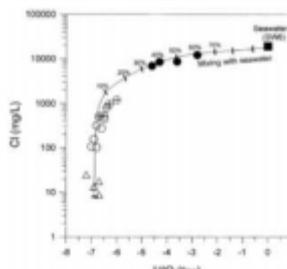
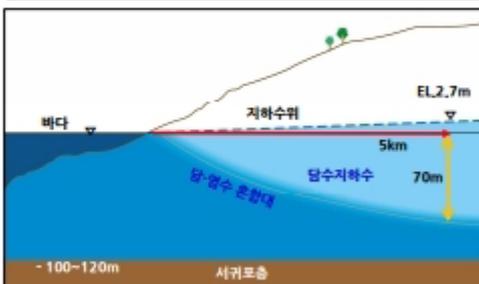
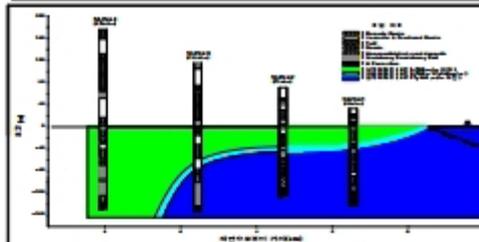
(Chung et al., 2011)



(Kim et al., 2018)

05 지하수 분야 : 제주도 동부지역 고염분 지하수 부존원인 규명

- 1980년대 말부터 제주도 동부지역의 고염분 지하수 부존원인을 지하수 과잉양수에 의한 해수침투 현상으로 해석(최순학, 1990 등)
- 해수면 하 (-)100~150m까지 심부시추, EC 수직검증, 수위관측, 동위원소 연구 등을 통해 담수-해수 단층 혼합현상으로 규명

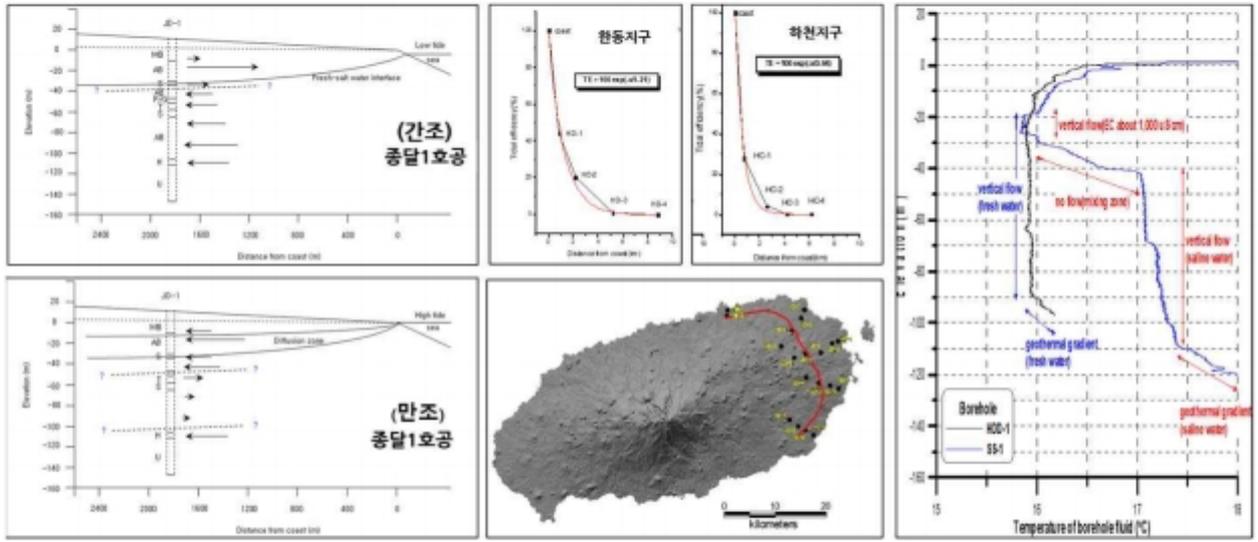


<고기원 등, 2003; 김용제 등 2003>

06

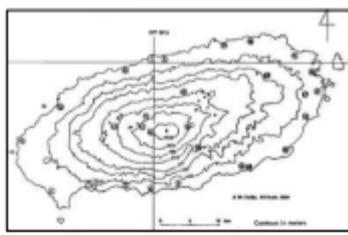
지하수 분야 : 해안대수층의 수문지질 및 수리적 특성

동부 해안대수층의 깊이별 유향/유속 및 지하수 유동, 관측정별 조석효율에 대한 조사/관측자료 해석(황세호 등, 2006; KIGAM, 2005)



07

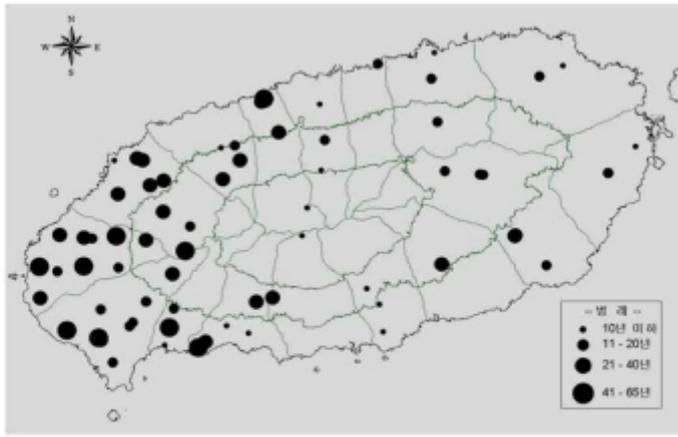
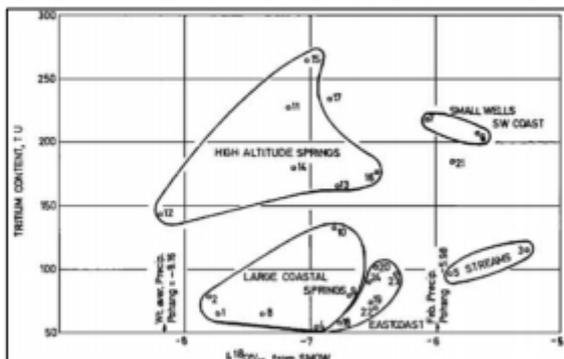
지하수 분야 : 제주도 지하수의 순환시스템 해석



고지대 용천 : 2-2.5년
 중산간 용천 : 7.5년
 해안변 용천 : 8.5년

<Davis et al., 1970>

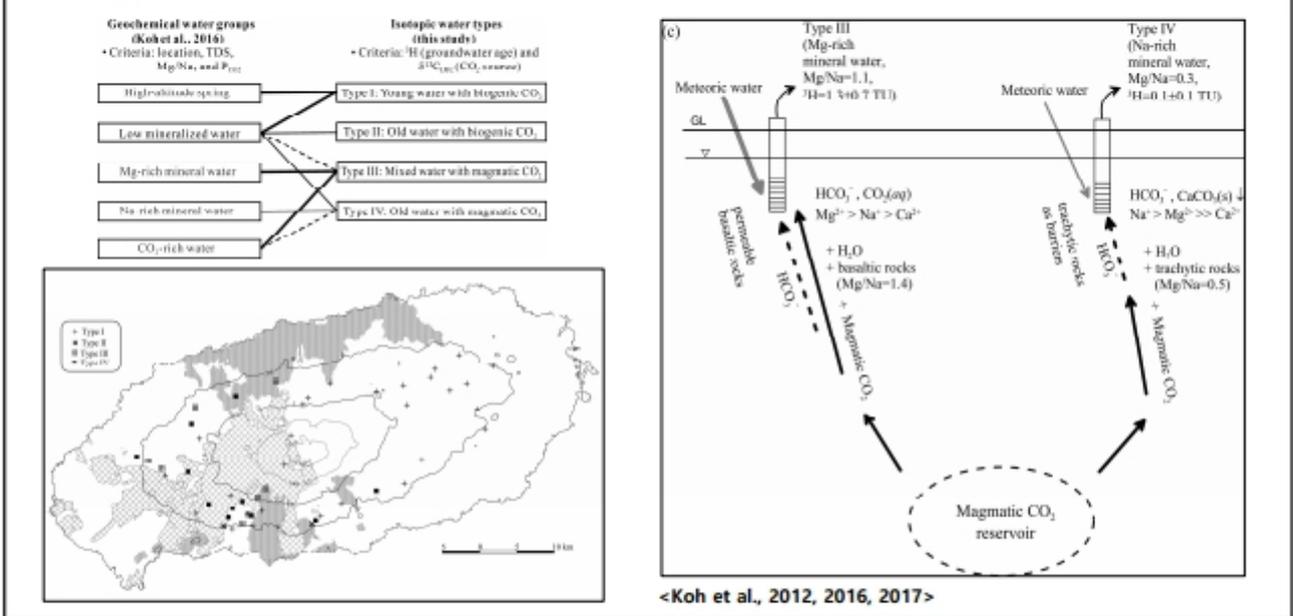
◆ 제주지하수 평균 체류시간(75개소, CFCs 및 ³H 측정) - 22년
 서부 : 30년, 북부 : 21년, 동부 : 19년, 남부 : 13년
 ☞ 프레온가스(CFC), 삼중수소(³H), 헬륨(³He) - Utah대학 분석



<제주도, 2001; 고통찬 등, 2006>

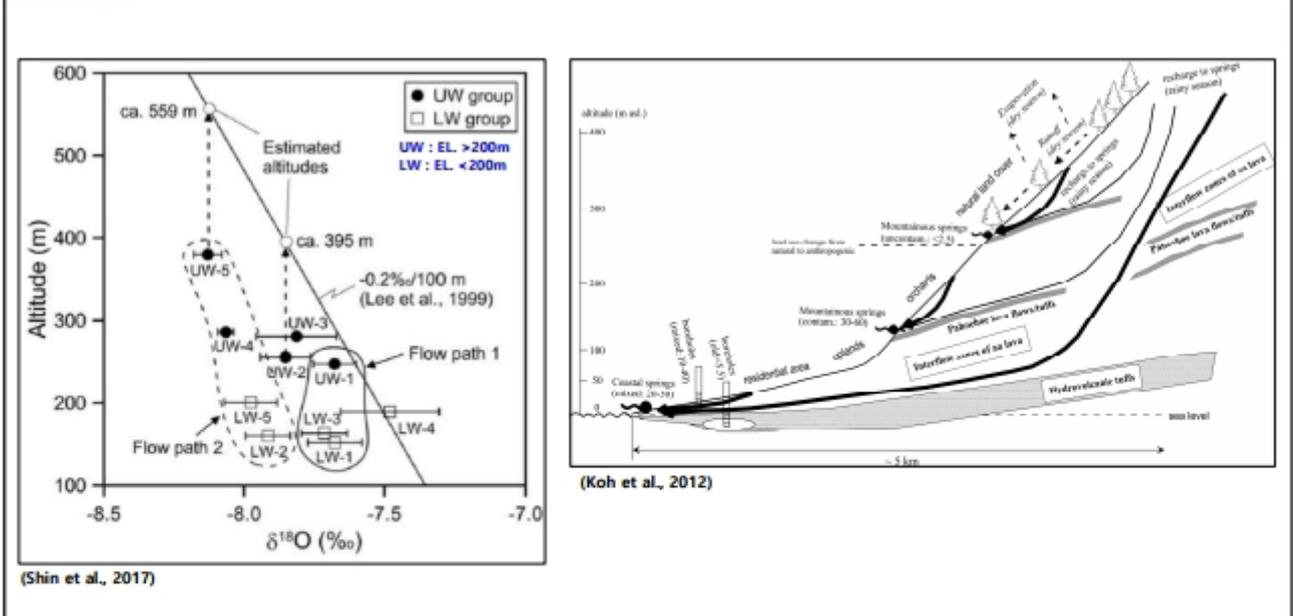
08

지하수 분야 : 제주지하수의 수리지수화학적 특성 체계적 정립



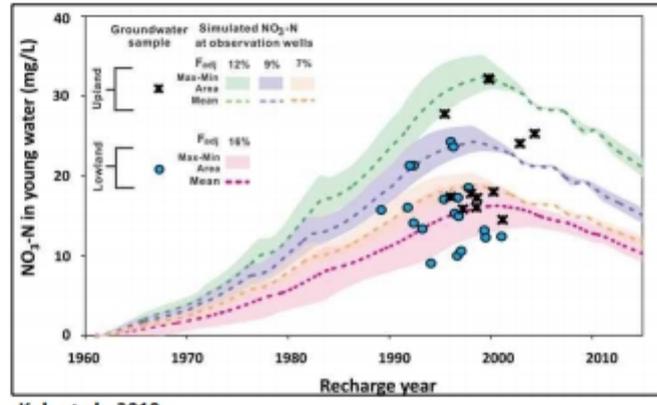
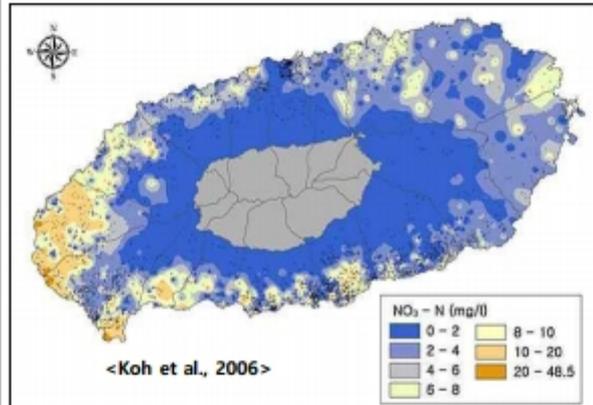
09

지하수 분야 : 제주지하수의 수질진화와 유동 시스템 해석



10 지하수 분야 : 환경동위원소에 의한 질산성질소 오염현상 규명

- 제주도 해안지역을 따라 자연수준(3mg/L) 이상의 질산성질소 검출 및 지속 증가추세, 특히 안덕~한림에 이르는 서부 해안지역이 높음
- 질소동위원소에 의한 오염원 추적연구 다수 수행 → 화학비료, 축산폐수, 생활하수, 토양 유기물이 주 오염원
- 질산성질소 농도변화 추세분석, 오염물질 유입시기 추정, 수치모델링을 통한 최근 함양수 혼합모델, 토지이용 변화 영향 등 연구
- 고산지역의 경우, younger(4~33년) 지하수와 older(60년 이상) 지하수가 혼합, 9.7~22.3년 전에 뿌린 화학비료 유래 NO₃-N 검출



11 지하수 분야 : 직접유출량 관측 및 유출율 추정기법의 발전

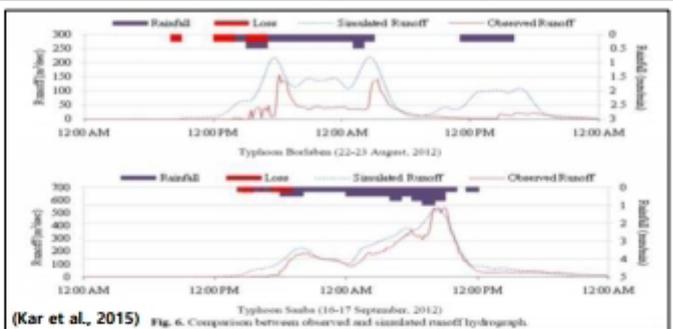
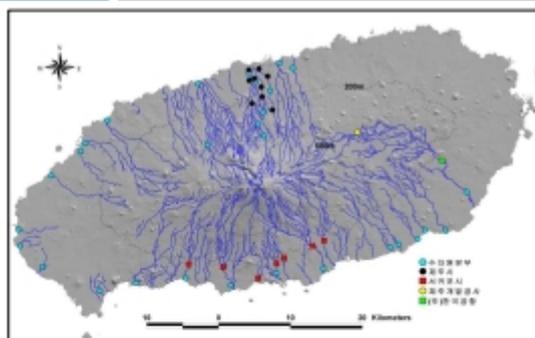
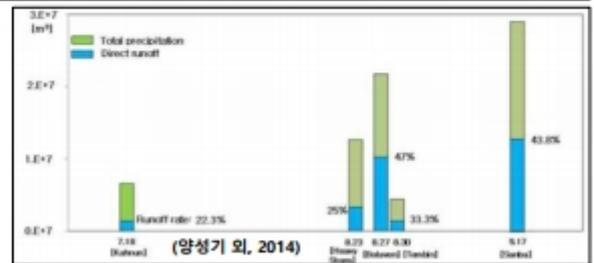


Table 6. Relations expression through stage-discharge rating curve of stream

Gauging stream	Period	Range of stream water level	Relations expression	R ²
Origo stream	2002. 9. 15 ~2003. 12. 26	0.071m < h < 0.188m	A: $Q = 45824h^{1.998}$	0.9000
			B: $Q = 512877h - 3237.7$	0.8815
			C: $Q = 3779136h^2 - 43605h + 51652$	0.9184
Yeonsoe stream	2002. 7. 14 ~2003. 10.25	0.690m < h < 0.790m	D: $Q = 136812h^{1.325}$	0.9245
			E: $Q = 1061184h - 86797.3$	0.9226
			F: $Q = 322733h^2 - 331408h + 906728$	0.9292

(문덕철 외, 2005)



12 제주용천수의 가치발굴과 보전활용

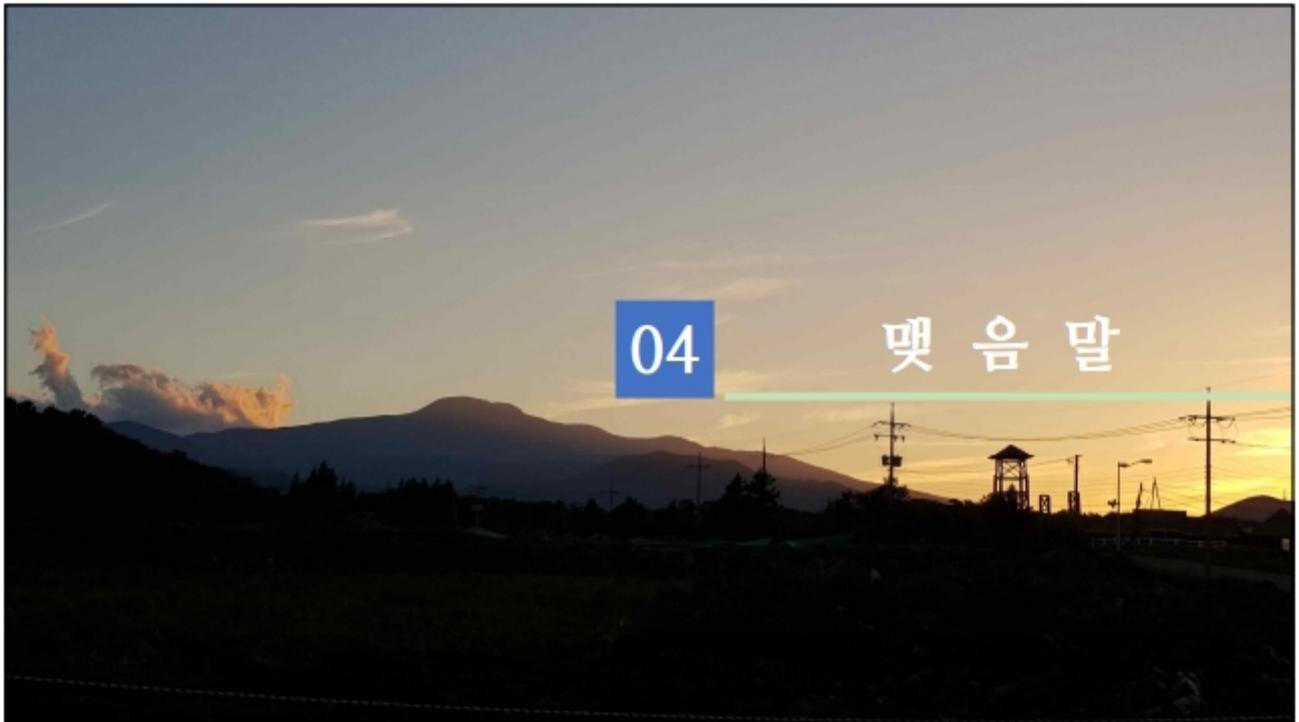
- 용천수는 제주의 물 이용역사를 간직한 지질/문화유산이나 멸실/매립, 방치, 토지이용 변화/지하수 개발로 수량감소/고갈 현상 발생
- 1998-1999 도 전역 일제조사를 시작으로 용천수의 수문지질학적 연구, 문화유산적 가치 발굴연구, 보전 및 활용방안 활발히 추진



13 제주삼다수 생리활성 효능 연구

- 제주삼다수는 1998년 3월 국내시장 출시 이후, 국내 먹는생물 시장에서 40%의 MS를 꾸준히 유지하는 대한민국 대표 브랜드로 성장
- 2004년부터 2020년까지 삼다수 판매 수익금의 37%인 2,350억원 제주특별자치도에 이익배당

생리활성 분야	논문 제목	저자	학술지명	연도
1. 항산화 효과	Increased Glutathione Synthesis Following Nrf2 Activation by Vanadyl Sulfate in Human Chang Liver Cells	Areum Daseul Kim et al.	Int. J. Mol. Sci.	2011
	Jeju Groundwater Containing Vanadium Enhances Antioxidant Systems in Human Liver Cells	Areum Daseul Kim et al.	Biol. Trace Elem. Res.	2011
2. 면역 강화 효과	Jeju ground water containing vanadium induced immune activation on splenocytes of low dose γ-rays-irradiated mice	Danbee Ha et al.	Food Chem. Toxicol.	2012
	Natural Vanadium-Containing Jeju Groundwater Inhibits Immunoglobulin E-Mediated Anaphylactic Reaction and Suppresses Eicosanoid Generation and Degranulation in Bone Marrow Derived-Mast Cells	Xian Li et al.	Biol. Pharm. Bull.	2012
3. 아토피 개선 효과	Daily intake of Jeju groundwater improves the skin condition of the model mouse for human atopic dermatitis	Akane Tanaka et al.	J. Dermatol.	2013
4. 비만 개선 효과	The Anti-obesity Effect of Natural Vanadium-Containing Jeju Ground Water	Seon-joon Park et al.	Biol. Trace Elem. Res.	2012
5. 항당뇨 효과	Effect of Jeju Water on Blood Glucose Levels in Diabetic Patients: A Randomized Controlled Trial	Gwangjo Koh et al.	J. Evid. Based. Complement. Altern. Med.	2013
	Natural vanadium-containing Jeju groundwater stimulates glucose uptake through the activation of AMP-activated protein kinase in L6 myotubes	Seung-Lark Hwang et al.	Mol. Cell. Biochem.	2012



04

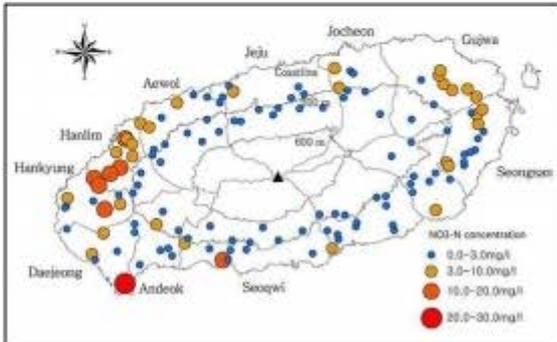
맺음말

01 제주지하수의 특성과 현(現) 상황

<p>제주지하수의 수문지질학적 특성</p>	<p>① 강수 의존형 지하수 : 강수량 매우 민감하게 반응, 강수량 변동성 증가에 적응 ② 지역별 부존 및 산출특성이 다른 지하수 : 대수층(수역)별 특성을 고려한 관리체계 필요 ③ 오염취약성이 높은 지하수 : 사전 오염예방 제도화 및 오염 지하수 수질회복기술 개발</p>
<p>현재의 제주지하수 상황</p>	<p>① 과다개발 : 5,793공(답수 4,586, 염수 1,207) - 1,636천㎥/일 취수허가(지속이용 가능량의 90.3%) ② 수질오염 : 질산성질소와 미생물 오염지역 확대, 항생제 등 기타 항목도 검출 ③ 지하수에 집중된 용수이용 : 일평균 667천㎥, 연간 2억 4000만㎥ - 전체 물 이용량의 97%</p>
<p>제주지하수 위협요인</p>	<p>① 이상기후 및 기후위기 → 수자원 확보의 불확실성 가중 및 가용량 변동성 증대 ② 함양지역 면적 감소 및 지형 교란 → 지하수 함양량 및 지속 이용 가능량 감소 ③ 지하수 이용량 증가 → 국지적 지하수 장해 발생 가능성 고조</p>
<p>New Crisis</p>	<p>▪ 1985년(상수도 보급율 99.9%) 이전 : 국가의 경제적 빈곤과 기술력 부족에 의한 물 부족 시대 ▪ 21세기 중반 : 지금 적극 대처 못할 경우, 기후위기와 무분별한 이용 및 오염의 대가에 의한 물 부족 위기에 직면 ※ 제주지하수의 건강성 회복과 기후위기 적응형 관리기반 구축을 위한 연구 시급함</p>

02

어떤 명의(名醫)가 필요한가?



명의(名醫) 삼형제 - 중국 위(魏)나라 문후왕이 명의 편작(扁鵲)에게 질문

- 첫째 형 : 표정, 음색, 몸을 만져보고 닥쳐올 병을 알아내 미리 치료하는 것에 능숙
- 둘째 형 : 병이 깊지 않은 초기 치료에 능숙
- 편 작 : 병세가 아주 위중해진 후에 병 치료에 능숙

제주지하수의 건강성을 회복시키는 것은
곧 제주의 생명력을 지키고,
대한민국의 국격을 높이는 일입니다.

제주지하수 자연성 회복을 위한 미래 구상

김용철 센터장 (한국지질자원연구원)

2021 세계 물의 날 기념
KIGAM-JRI 공동 학술심포지엄
2021.3.18.



KIGAM의 연구성과와 제주 지하수 자연성 회복을 위한 미래 구상



김용철

김용제, 고경석, 고동찬, 하규철, 정병주, 이은희, 박동규, 황세호

한국지질자원연구원 지질환경연구본부 지하수연구센터

1

PART I. KIGAM의 제주 지하수 조사·연구



KIGAM의 제주 지하수 연구 성과

- 국립지질조사소
 - 1964-1967: 지하수원조사보고 제1호~제4호
 - 1968: 물리탐사보고. 제2권 제1호(Ch4. 제주도 지하수 광역 전기탐사 보고서)
 - 1970: 지구물리화학탐사연구보고 제4권 제1호(Ch6. 제주도 화산암의 화학조성 연구)
- 국립지질광물연구소
 - 1973: 한국지질도 1:250,000(Ch12. 제주도 지질도)
 - 1974: 지질광상. 제27호(Ch5. 울릉도 및 제주도지역의 중력탐사 개요)
- 자원개발연구소
 - 1980: 조사연구보고. 제9호(Ch10. 연근해저 해양지질조사 및 물리탐사연구: 제주-청산도 해역)
- 한국동력자원연구소
 - 1981: 조사연구보고. 제11호(Ch5. 연근해저 해양지질 조사연구:제주도-진도 해역)
 - 1984-1990: 국토이용지질조사연구(지질, 지열, 지하수, 제4기지질, 동부 해수침투, 물리탐사(VES, TEM, TDEM))
 - 1990: 제주도 수자원의 환경학적 조사연구
- 한국자원연구소
 - 1990-1997, 2001-2002: 온천공 조사보고서(구좌지구, 상호지구, 색달지구, 오조지구)
 - 1998: 제주애월도폭 지질보고서
 - 2000: 제주지질조사보고서(백아도·진남포 도폭; 서귀포·하효리 도폭, 모슬포·한림 도폭)

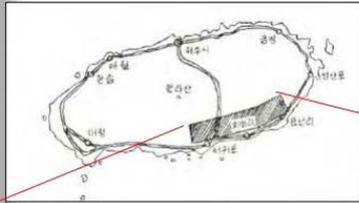
3

KIGAM의 제주 지하수 연구 성과 (계속)

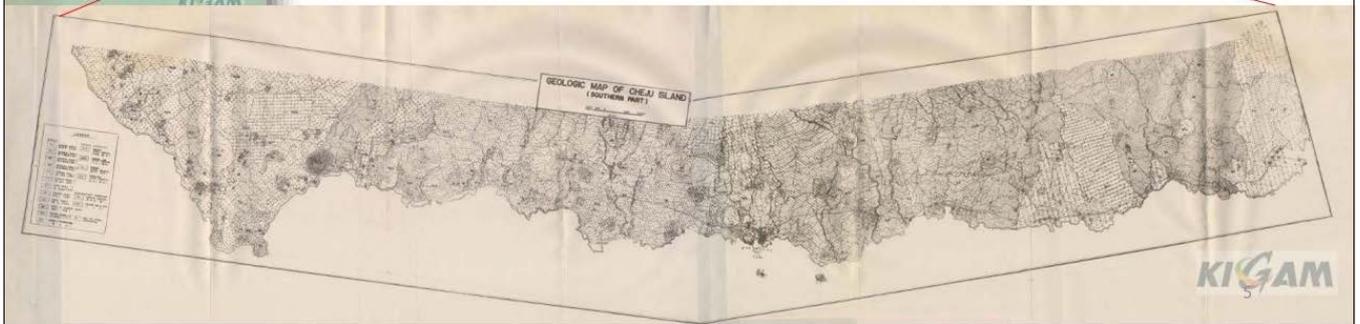
- 한국지질자원연구원
 - 2002-2003, 2006, 2013, 2020: 제주도 지질 안내 및 관광화를 위한 연구; 제주도 지질여행
 - 2003: 지하수 유입/배출 시스템 해석 기술 개발: SAR의 적용성에 관한 연구
 - 2004:미래 제주도 청정 지하수 안정적 공급 시스템 구축 사업
 - 2004: 지하수 순환/유동 시스템 모델링 기반기술 개발
 - 2005-2008: 제주도 지하수 부존 특성에 대한 지구과학적 해석
 - 2005: 남제주 해안 사람 발자국 화석 지질연대 측정
 - 2009-2010: 제주위터 지속이용 가능량 평가 및 기능성 지하수 발굴, 지식경제부(제주광역경제권순도산업지원단)
 - 2009: 염지하수 개발에 따른 환경영향 조사방안 마련(제주하이테크산업진흥원)
 - 2009-2011: 지구환경변화 대응 지하수 확보 통합솔루션 개발
 - 2010: 버차야제주리조트 예래 휴양형 주거단지 조성에 따른 용천수 영향 조사 보고서
 - 2011: 제주위터 지속이용 가능량 평가 및 기능성 지하수 발굴
 - 2011-2012: 제주유역 물개발 평가연구(UN 4th WWDR)
 - 2014: 제주도 화산활동에서 제4기퇴적층의 지질학적 해석 예비연구
 - 2017: 한라산 먹는물(샘물) 수질역학조사 보고서
 - 2019: 지속가능한 염지하수 개발을 위한 관리기반 구축 용역
 - 2019-2020: 제주도 천연동굴 보존관리방안 연구 및 조사, 제주특별자치도 세계유산본부

4

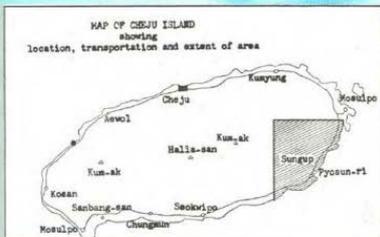
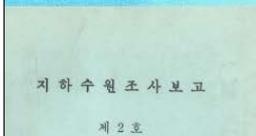
지하수원 조사 보고 제1호 ('63.2-'64.10)



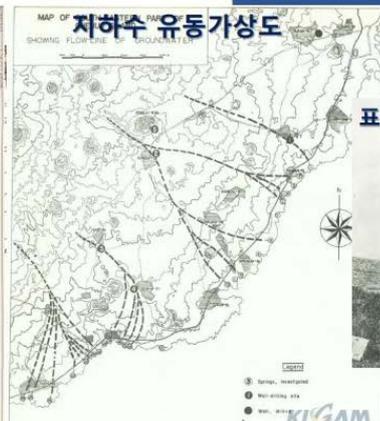
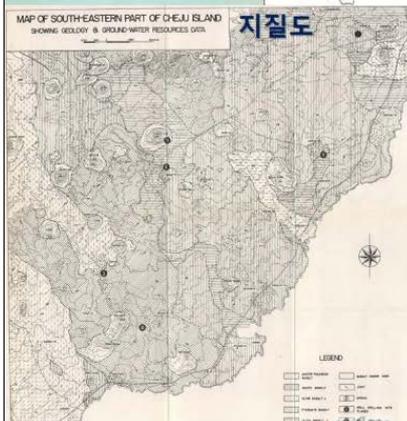
- 제주남부 (서해길, 오한익, 남기영)
- 음용수원: 취약(상류용천수보, 봉천수 활용)
- 지질: 서귀포층, 조면안산암, 현무암
- 지하수 흐름: 절리, 단열, 용암터널, 용암경계대 등 투수성 구조
- 조면안산암: 비대수층(aquifuge)으로 용천수 형성과 관련



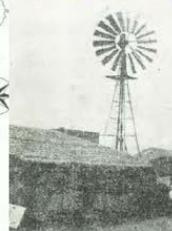
지하수원 조사 보고 제2호 ('65.3-'65.10)



- 제주동부 (남기영, 김동숙)
- Aquifer: 접촉면 Scoria, 방향성 대규모 절리(감람석 현무암) - 맥상 지하수 형성
- Aquifuge : 조면질안산암, 비현정질 현무암
- 26개 용천수 조사: 유출량, 유출방향으로 유로 추적 - 심부시추 필요성 강조



표선 간이수도용 풍차



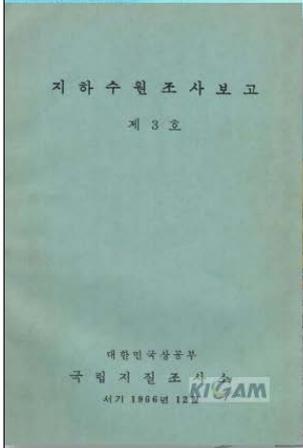
수산리 심정 굴착



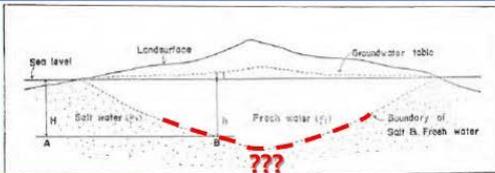
수중 용천수



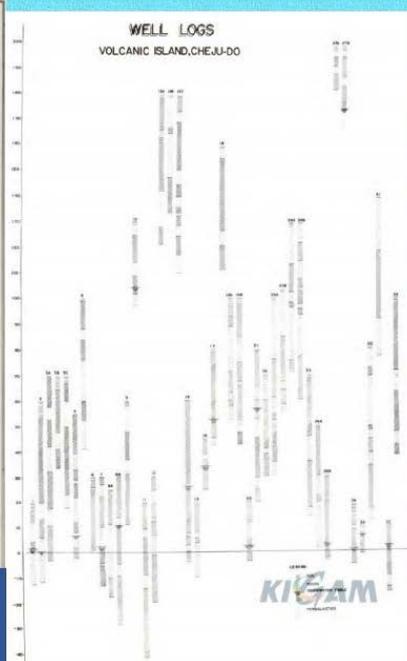
지하수원 조사 보고 제3호 ('63.2-'66.10)



- 제주동부 (남기영)
- 부족한 음용수/공업용수 확보 목적 조사(인구 38만명)
- 지질: Pliocene~early Pleistocene(약 1백만년 전), 조면암, 조면질안산암, 현무암, 퇴적암
 - 표선리현무암(대부분 해안에 분포: 분출 순서 결정의 key bed 역할)
 - 암석화학적 분류: Intra-Pacific Province에 속함 (Olivine basalt-trachyte Zone)
- 지하수산출과 연관된 지질구조
 - 암석내 절리(예: 표선리현무암, 한라산현무암), 용암터널/공동, 암석경계면
- 지하수 부존
 - 상위지하수
 - 기저지하수(Ghyben-Herzberg lens)
 - : 용천수의 발달과 산출량과 관계

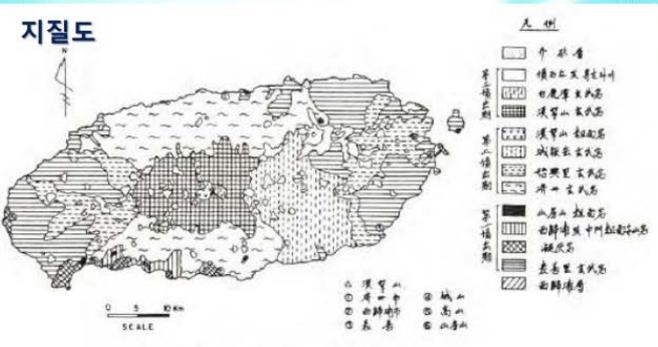


지하수원 조사 보고 제3호 ('63.2-'66.10) (계속)



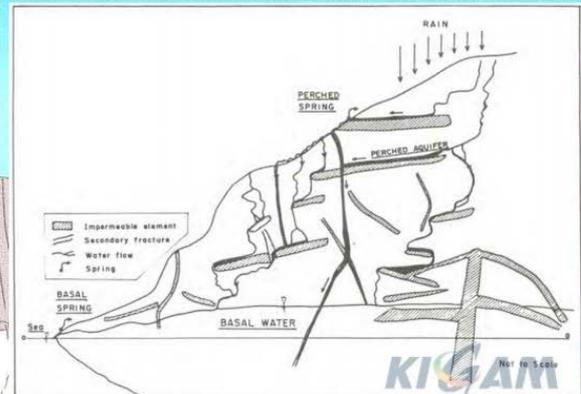
- 17개(33개지역 43개 중) 관정 개발 성공(평균심도 38m)
- 심정개발(성읍리): 심도 220m(해발150m ~ 해발 -70m), 지질구조 규명과 기저지하수 확인 목적

국토이용지질조사연구(1984-1990)



(한국동력자원연구소, 1984)

- 지하수 함양량: 1,102 M m³/yr (1,603 M m³/yr (제주특별자치도, 2018))
- 300 springs: 총 유출량: 746,000 m³/day (122개소, 603,000 m³/day (제주도, 한국수자원공사, 2003))



(한국동력자원연구소, 1985) part in Che Ju volcanic island.

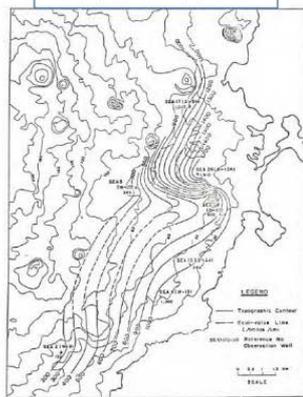
- 지하수 유동 개념도
- 부유지하수, 기저지하수, 상위용천수, 해안용천수
- 투수성구조, 저투수층

국토이용지질조사연구(1984-1990)



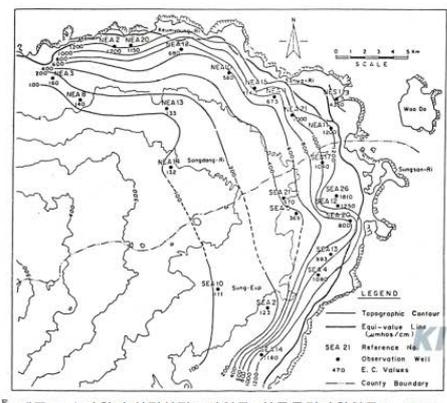
(한국동력자원연구소, 1986)

제주 동남부 전기전도도 분포도



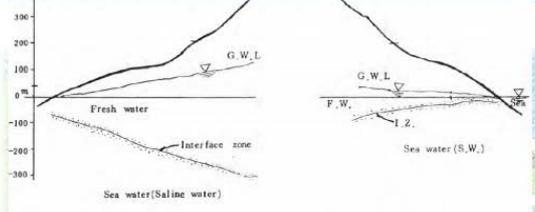
(한국동력자원연구소, 1987) part of Cheju

제주동부 전기전도도 분포도



제주도 수자원의 환경학적조사연구 (한국동력자원연구소, 1990)

제주 동부, 서부지역의 담-염 지하수 분포형태

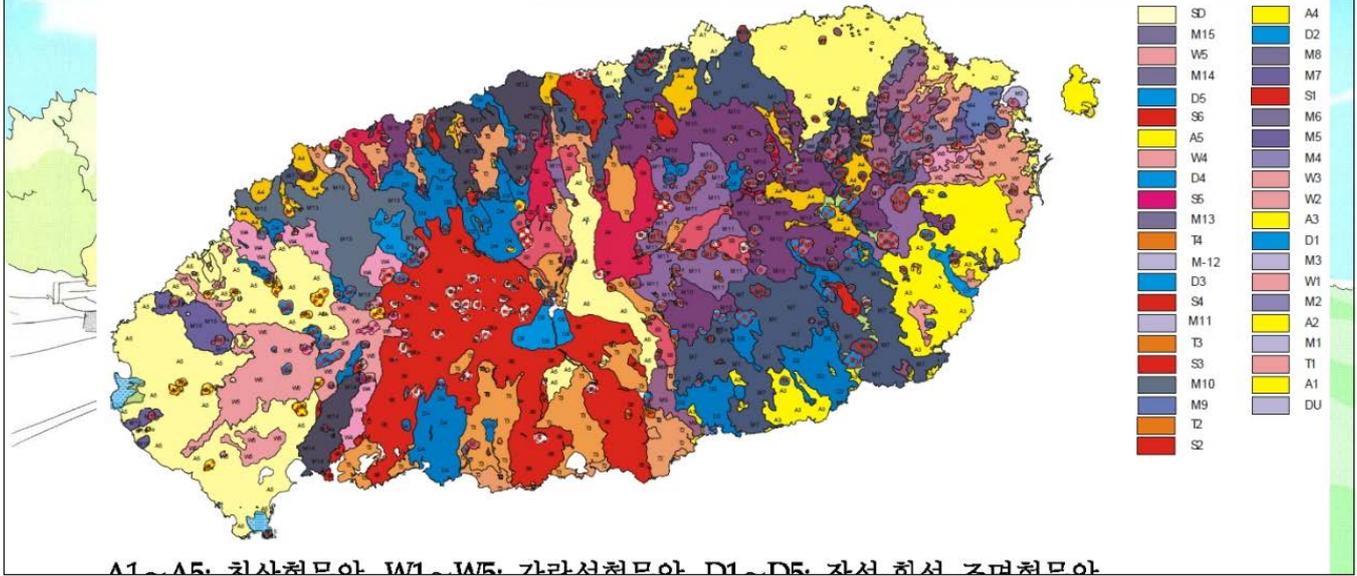


(한국동력자원연구소, 1987) and saline water in the eastern ADC, 1985)



제주지역 지질도폭 발간 및 지질조사(1998, 2000)

- 1998: 제주애월도폭 및 지질조사보고서
- 2000: 제주지질조사보고서(백아도·진남포 도폭; 서귀포·하효리 도폭, 모슬포·한림 도폭)

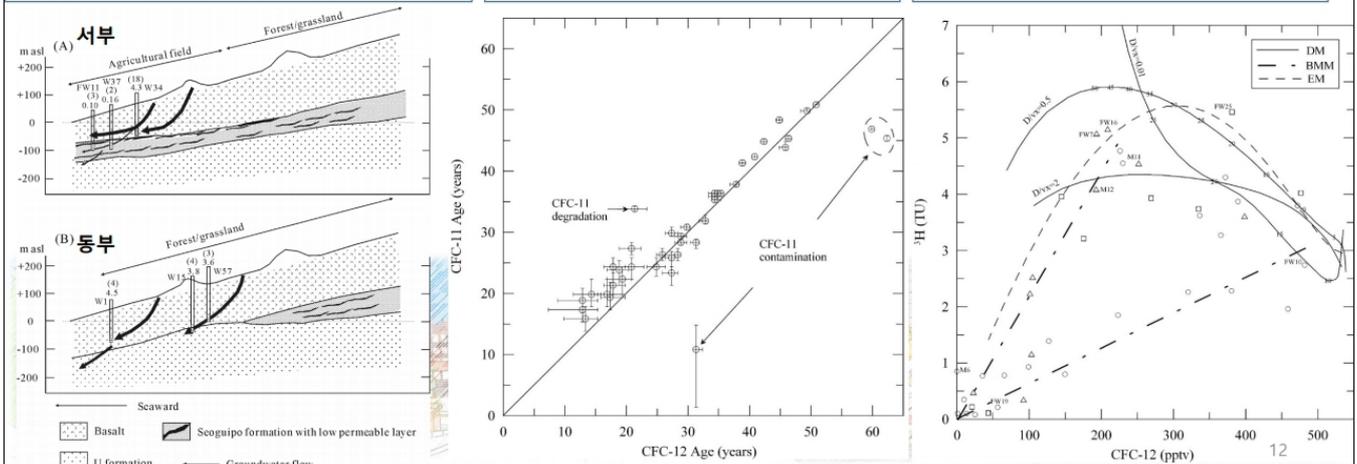


지하수 순환/유동 시스템 모델링 기반기술 개발 (2001-2004, 21C frontier R&D 사업)

- 3H 분포특성 기반 제주도 서부 및 동부 해안지역 대수층 개념 모형 구축 (Koh et al., 2005)
- 동부지역: 투수성이 좋은 화산암층이 두껍게 분포
- 서부지역: 얇은 화산암층 발달, 하부에 저투수 수성응회암층 협재

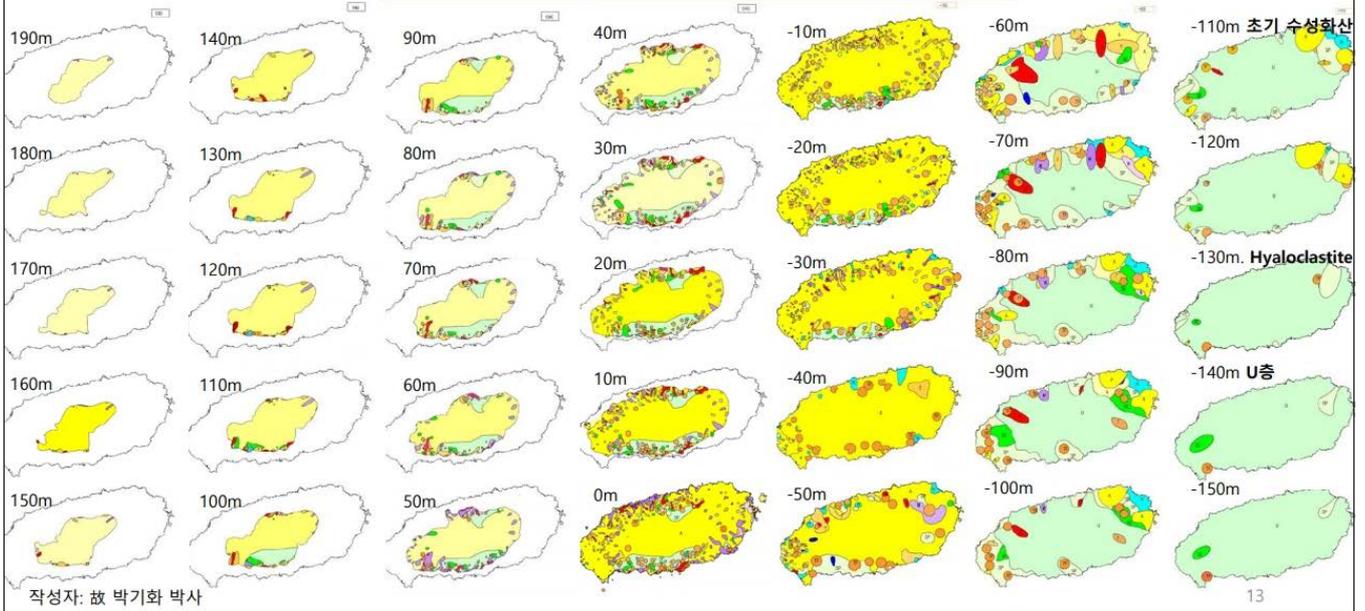
- 국내 최초 CFCs 이용 지하수 연령측정
- 제주도 지하수의 걸보기 연령범위: 15년~50년 (Koh et al., 2006)

- 3H, CFC-12 다중 추적자를 이용 제주도 지하수 유동시스템 3개 유형 구분 (Koh et al., 2006)
- 젊은 연령 (10년-30년)의 유동계가 대표적
- 그러나 50년 이상 고연령 지하수가 다양한 비율로 혼합된 특성을 보임

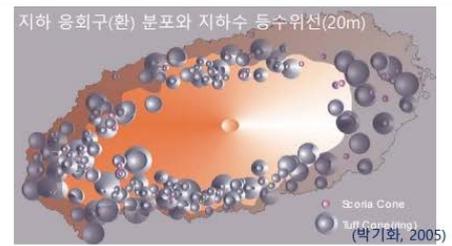
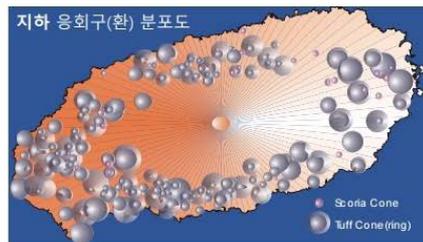


제주도 지하수 부존특성에 대한 지구과학적 해석(2004~2008)

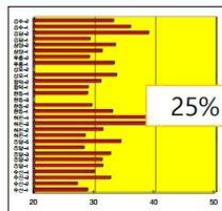
고도별 지하지질도(10m 단위) (한국지질자원연구원, 2008)



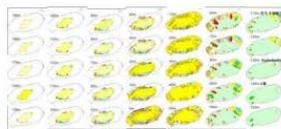
제주도 지하수 부존특성에 대한 지구과학적 해석(2004~2008)



평균 총공극률(중성자 검증)

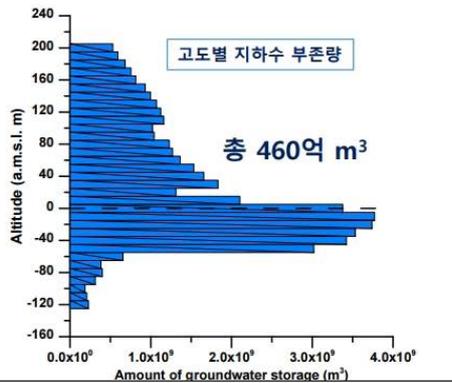


암상별 클링커 형성률



고도별 암상 부피

암종	암상명	암종	부피(10 ⁸ m ³)	중성자 검증률 (%)	지하수(10 ⁸ m ³)
300 등산용암	A	31,200,000	13	0.25	58,000,000
조각기암	T	81,000	13	0.25	43,000
정지-북서-조각기암	M	1,200,000	13	0.25	58,000
300 등산용암	A	34,200,000	13	0.25	88,000,000
정지-북서-조각기암	M	200,000	13	0.25	37,000
300 등산용암	T	200,000	13	0.25	68,000,000
정지-북서-조각기암	M	200,000	13	0.25	17,000
정지-북서-조각기암	M	200,000	13	0.25	17,000
정지-북서-조각기암	M	1,300,000	13	0.25	1,300,000
조각기암	T	800,000	13	0.25	68,000
300 등산용암	A	800,000	13	0.25	38,000,000
정지-북서-조각기암	M	800,000	13	0.25	17,000
정지-북서-조각기암	M	1,014,000	13	0.25	26,000
정지-북서-조각기암	M	1,000,000	13	0.25	16,000



제주친화형 대수층 인공함양 기술 (2007-2011, 21C frontier R&D 사업)



지구환경변화 대응 지하수 확보 통합솔루션 개발 (2009.01-2011.12, KIGAM 기본사업)

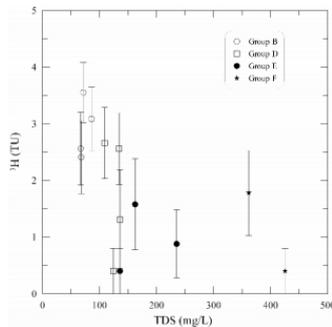
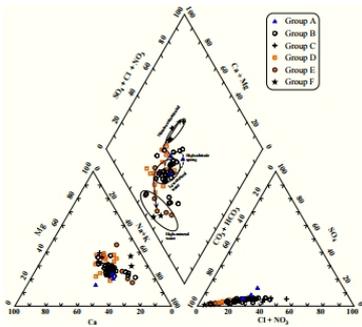
최종 연구목표

- 지구환경 변화 대응 지하수 확보 통합솔루션 제공을 위한 핵심요소기술 개발
 - 기후변화 대응 지하수자원 취약성도(금강수계) 작성/ 함양 특성 변동예측 모델 개발
 - 인공함양 최적지 선정기법 개발 및 파일럿 규모(30만톤/년) ASR(수막재배단지) 구축
 - 고부가 제주 지하수 생성-순환 기작 규명 및 개발가능지 확보 (30만톤/년, 3개소 이상)



지구환경변화 대응 지하수 확보 통합솔루션 개발 (2009-2011, 지하수연구실 기본사업)

중산간 지하수 수질 군집 분석



- TDS와 이온조성 고려
- 지하수를 총 6개의 군집으로 분류 (Koh et al., 2009)

- 지하수 체류시간(3H)과 용존이온(TDS) 농도 비례 관계 밝힘 (Koh et al., 2009)
- 3H의 감소함에 따라, 즉 대수층내 체류시간이 증가함에 따라 물-암석 반응이 진행되어 TDS가 선형적으로 증가하는 경향을 잘 보여주고 있음

- TDS와 이온 특성에 따른 지하수 군집은 공간적으로 특징적인 분포를 보여 제주도 화산암 대수층내 광물화과정이 다양함을 지시하는데, 동부지역을 포함한 대부분의 지역은 상대적으로 낮은 TDS를 가지며, 서부지역에서는 인위적 오염의 영향이 확인됨
- 대수층내 반응시간 증가에 따라 높은 TDS를 가지는 지하수 (Groups E & F)의 공간적 분포는 남서부지역에 집중되어 나타나는데 이는 이 지역의 복잡한 화산층서가 관련성이 높은 것으로 추정됨

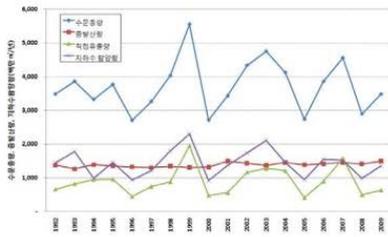
제주워터 지속이용 가능량 평가 및 기능성 지하수 발굴

- 과제개요 : 제주광역경제권 선도사업 (2009.10 ~ 2011.2)

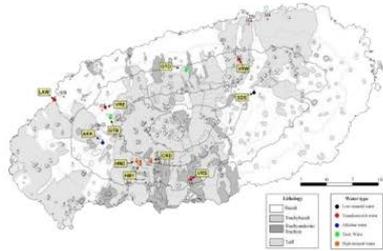


제주워터 지속이용 가능량 평가 및 기능성 지하수 발굴

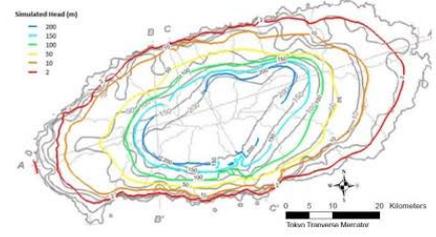
- 주요 연구 성과 : 물수지 및 지속이용량 평가, 제주도 수문지질 데이터베이스 등



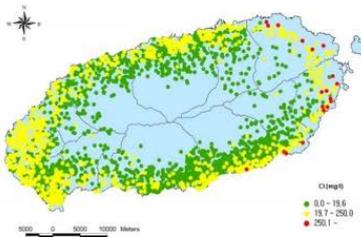
[물수지 분석]



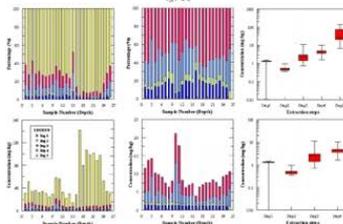
[기능성 성분 수질 안정성 평가]



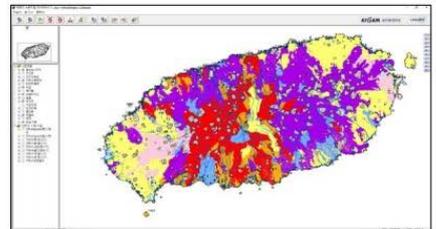
[지하수 유동 모델링]



[지하수 수질 오염 평가]



[기능성 지하수 개발(바나눔)]



[제주도 수문지질 데이터베이스] 19

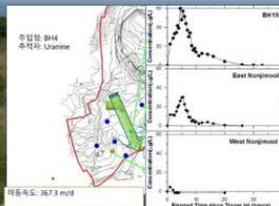
버자야 제주리조트 구성에 따른 용천수 영향조사(2008)

- 조사 내용**
- 지하지질과 대수층 분포 파악
 - 지하수와 용천수의 수리적 연결성 분석
 - 구조물 시공에 따른 지하수 흐름 및 유출 모델링
 - 휴양시설 건설로 인한 용천수 영향 최소화 방법 및 보존(전) 방안 제시

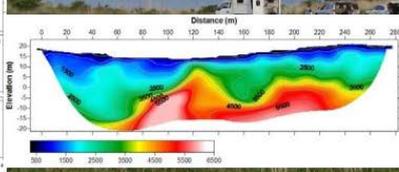
수리적 연결성



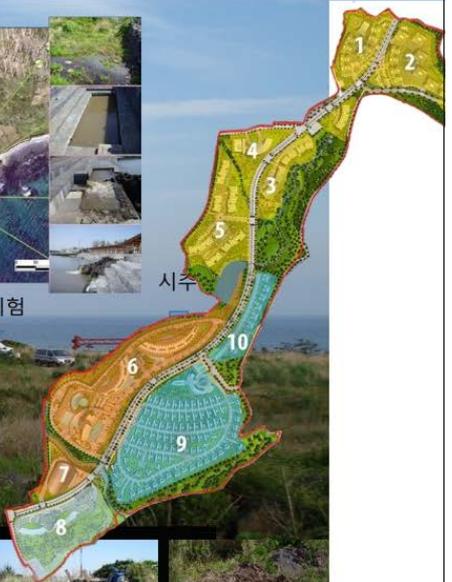
추적자 시험



물리탐사



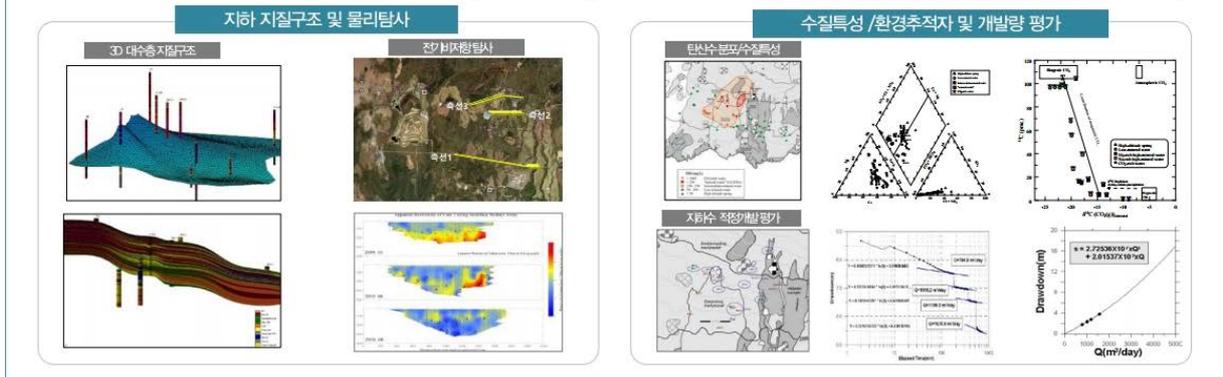
양수시험



지구환경변화 대응 지하수 확보 통합솔루션 개발 (2009.01-2011.12, KIGAM 기본사업)

[제주 지하수 주요 연구결과] 지하지질구조 특성화 및 탄산수/미네랄수 생성기작/적정개발 평가

- 고부가 지하수 분포지 (서귀포 중산간 지역)
 - 동쪽은 배경수, 중앙에 탄산수, 서쪽에 고미네랄수가 분포하고 남북 방향으로 고미네랄수와 탄산수가 대상으로 분포
- 탄산수/고미네랄수 수질기원
 - ^{13}C , ^{14}C , ^3H (탄산수 CO_2 는 심부 마그마 기원), 미네랄수/탄산수는 고립된 수질 특성(지하수 연령 60년 이상)
 - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$: 심부의 현무암/조면암류의 물-암석 반응 기여 지시
- 적정개발량 평가 (단계양수시험)
 - 대체로 안정된 수질 특성 (30만톤/년 개발량 확보 가능), 탄산수 일부 관정(양수량에 민감, 탄산수/배경수 경계부 위치)



21

유무인 열화상 항공탐사를 이용한 해저지하수 유출지역 탐지 및 평가 기술 개발 (2013-2015)

● 해저유출지하수 (SGD)



육지와 바다의 경계를 통해 해안으로 유출되는 지하수

● 해저유출지하수의 중요성

전지구적 물순환 과정의 중요한 요소

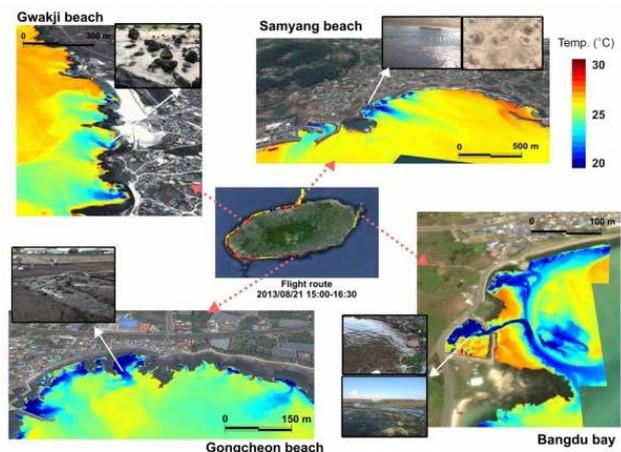
다양한 물질순환(N, C, Si,..)의 주요 이동 경로

내륙기원 오염물질의 해양이동경로 (녹조, 적조)

해양생태계의 주요 영향인자

● 열화상탐사를 통한 해저유출지하수 조사연구

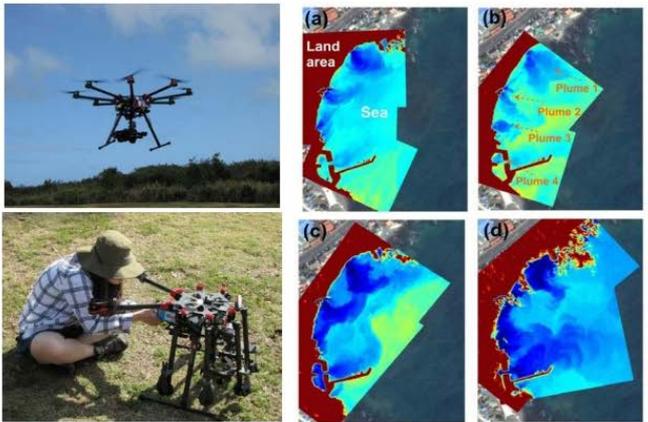
- 유인항공기를 이용한 해저유출지하수 탐사결과 (제주도, 2013.08)



22

유무인 열화상 항공탐사를 이용한 해저지하수 유출지역 탐지 및 평가 기술 개발 (2013-2015)

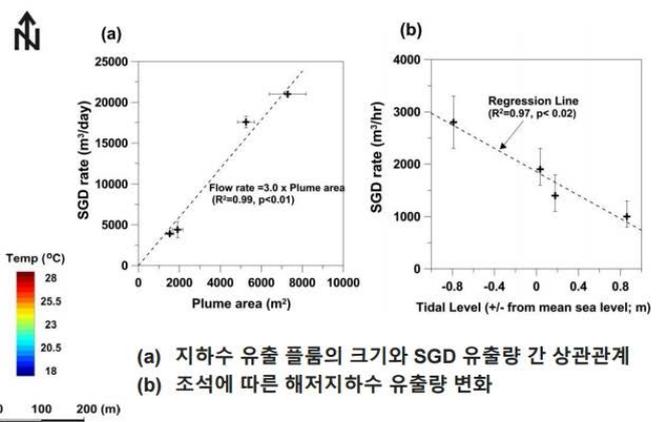
● 무인항공정기 기반 열화상 탐사 시스템 개발



제주도 공천포 해수표면온도의 시간대별 변화

- (a) rising tide, 2015.08.05 10:00-10:30;
- (b) high tide (만조), 2015.08.05 13:10-13:40
- (c) outgoing tide, 2015.08.05 15:30-16:00
- (d) low tide (간조), 2015.08.06 08:30-09:00

● 해저지하수 총유출량 추정



- (a) 지하수 유출 플룸의 크기와 SGD 유출량 간 상관관계
- (b) 조석에 따른 해저지하수 유출량 변화

Total SGD rate:
33,000 ~ 54,000 m³/day.

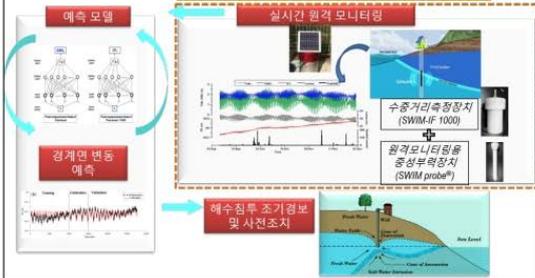
해수침투 조기 경보용 담염수 모니터링 및 예측 기술 개발 (2013,2015)

담염수 경계면 추적장치 (InterfacEGG®)

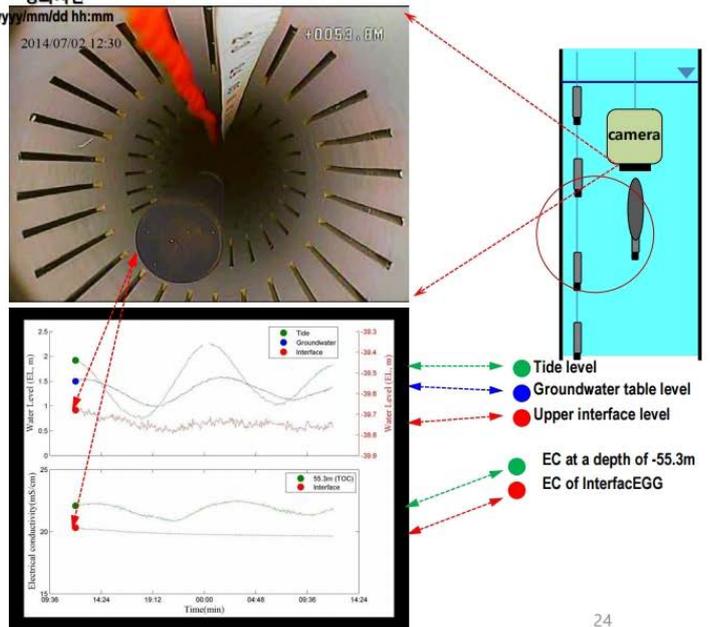
1세대장치 (목표시장: 산학연)



2세대장치 (목표시장: 국가/지자체 관리기관)



경과시간
yy/mm/dd hh:mm



지속가능한 염지하수 개발을 위한 관리기반 구축 용역 (2019.6.25-2019.12.21)

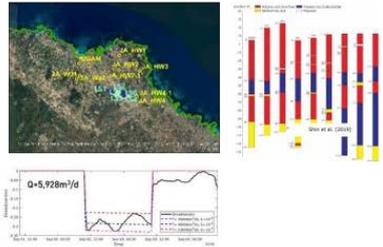
용암해수 산업단지



(재)제주테크노파크

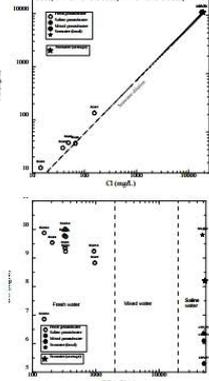
수리지질 특성 분석

파쇄대 연결 특성-높은 투수성



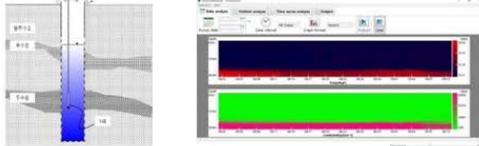
수리지구화학적 특성 분석

담수-해수 혼합 특성



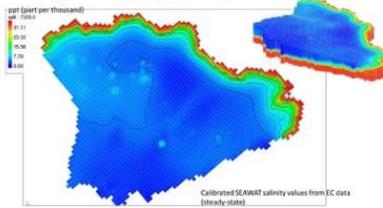
담염수면 경계 변동 특성

강수-경계면 변동 분석



지하수-염지하수 유동 모델링

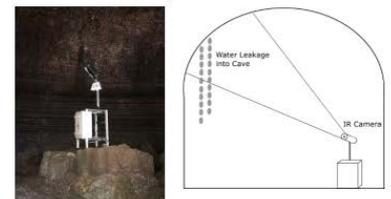
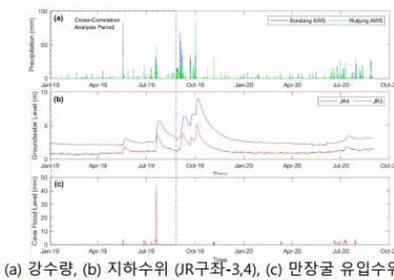
장기 개발 영향 예측



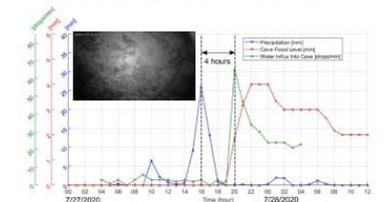
제주도 천연동굴 보존관리방안 연구 및 조사 용역 (2019-2020, 제주도 세계유산본부)



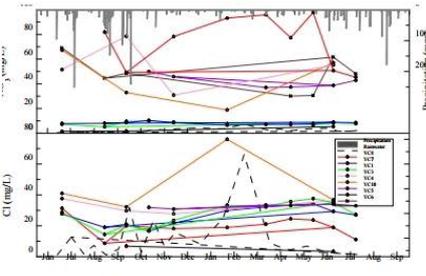
- ▶ 과제명: 2020년 용암동굴 주변 지하수 거동 연구
- ▶ 연구목표: 제주도 거문오름 용암동굴계의 동굴 주요구간 유입수의 유동과 수질 특성 평가



실시간 적외선 동굴 유입수 모니터링 장치



경작활동에 기인한 것으로 추정되며, 토양내 축적된 영양염류의 영향으로 인해 현재뿐 아니라 과거 경작 활동과 밀접한 관련



- 용천굴: 인위적 영향 지속적

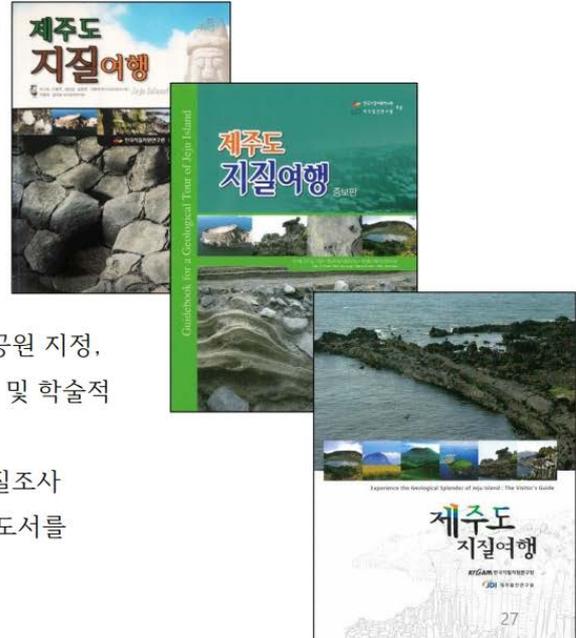
제주도 지질여행 발간

□ 과제 개요

- ▷ 목표: 제주도 화산지질 가치의 대중화를 위한 「제주도 지질여행」 국문/영문 발간
- ▷ 기간: 2019-2020
- ▷ 예산: 80 백만원

□ 배경 및 필요성

- ▷ 제주도 지질은 유네스코 세계자연유산 등재 및 세계지질공원 지정, 세계 7대 자연경관 인증, 국가지질공원 지정 등 국제 인증 및 학술적 가치가 크게 부각됨
- ▷ 우리 연구원은 제주연구원과 공동으로 수행한 제주도 지질조사 연구결과를 바탕으로 일반인들을 위한 제주도 지질 전문 도서를 발간함 (2003, 2006, 2013)



제주도 지질여행 발간 (계속)

□ 제주도 지질여행 국문(개정증보판) 및 영문(초판) 발간

- ▷ 2013년 3차 개정판은 2012년까지 조사/연구의 결과를 반영하여 관광객들이 주로 찾는 주요 지점의 지질현상을 중심으로 발간함
- ▷ 2020 개정증보판은 제주도의 화산활동과 화산층서를 제시하고, 지질학적/학술적 가치가 있고, 감상적 가치가 높은 지질관광자원에 대해 지질현상, 형성(생성)과정, 지질학적 가치 등을 설명하는 방향으로 재구성함
- ▷ 관광객들이 많이 찾는 부속도서(우도, 마라도, 가파도, 비양도, 차귀도)를 별도의 장으로 구성함
- ▷ 일반인들의 이해를 돕기 위해 일러스트 및 생동감 있는 현장 사진, 드론 촬영 사진 등을 많이 포함함



28

PART II. 제주 지하수 자연성 회복을 위한 구상



제주도 물수지와 지속이용가능량



구분	수자원개발종합계획 (1993)	제주도수문지질 및 지하 수자원 종합조사(2003)	수자원관리종합계획 (2013)	수자원관리종합계획 (보완)(2018)
수문총량(평균 면적강수량)	3,388 (1,872mm)	3,427(1,975mm)	3,769(2,061mm)	3,952(2,162mm)
작량유출량	638(19%)	708(20.7%)	833(22.1%)	970(24.5%)
증발산량	1,256(37%)	1,138(33.2%)	1,260(33.4%)	1,379(34.9%)
지하수 함양량	1,494(44%)	1,581(46.1%)	1,676(44.5%)	1,603.6(40.6%)
지속이용가능량	620	645	730	652

【 수자원총량 산정결과 】

연도	수문총량 (백만 m ³ /년)	연도	수문총량 (백만 m ³ /년)
1996	4,028	2008	2,866
1999	5,478	2009	3,321
2000	2,841	2010	4,383
2001	3,476	2011	3,724
2002	4,488	2012	5,175
2003	4,910	2013	2,600
2004	4,075	2014	4,488
2005	2,589	2015	4,418
2006	3,808	2016	4,869
2007	4,753	2017	2,552

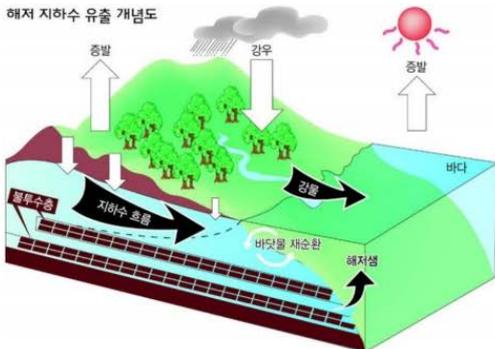
(제주특별자치도 수자원관리종합계획, 2018)

과우년(2017년) 자료

- 함양량: 884 백만m³/년
- 지속이용가능량: 359 백만m³/년

- 4-5년마다 반복되는 과우년의 함양량은 평년의 약 50%!
- 지속이용가능한 수자원관리를 위해 평균을 적용하는 것이 적절한가?

제주도 물수지와 해저유출 지하수



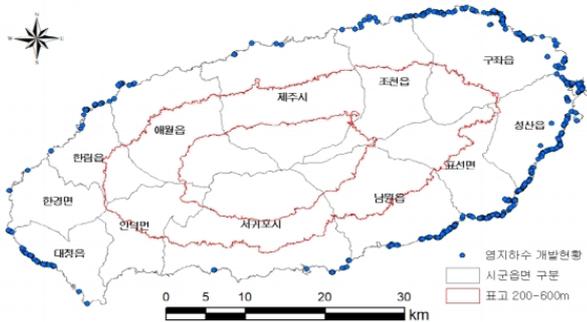
출처: <http://www.hani.co.kr/arti/society/environment/119867.html>



- 제주도 물수지의 미지수, 해저유출 지하수! 총량? 최적 관측지점은?
- 지난 2백만년의 화산활동 동안 해수면은 상승하강을 반복했는데, 현재 해수면 아래 제주도의 연장은?

육상양식용 염지하수 관리

- 염지하수: TDS 2,000 mg/L 이상인 지하수
- 부존량 96.7 억m³ (공극률 40% (?) 가정)
(제주특별자치도 수자원관리종합계획, 2018)



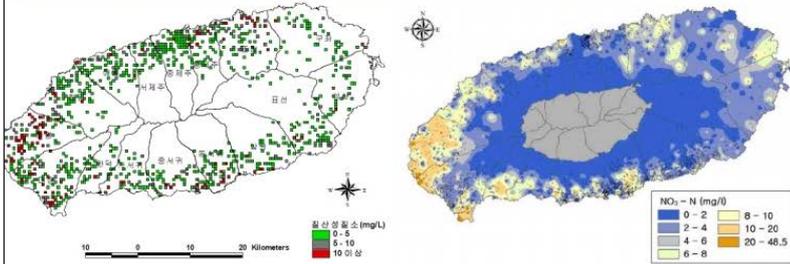
【 지역별 염지하수 개발 현황 】

❖ 지하수이용현황 (2017년 기준)

- 지하수 함양량: 1,604 백만m³/년
- 지하수 지속이용 가능량: 652 백만m³/년
- 전체지하수이용현황(4,818개소): 243 백만m³/년
- 생활용지하수이용량(1,432개소): 142 백만m³/년
- 농업용지하수이용량(3,157개소): 98 백만m³/년
- **염지하수허가량(1,295개소): 3,118 백만 m³/년**

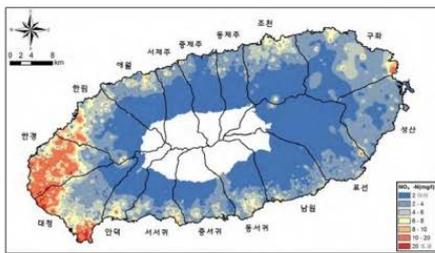
- 염지하수 이용 시설의 담지하수 혼합율은?
- 담지하수 혼합율이 10%라 가정하면, 지하수 이용량은 555(=243+312) 백만 m³/년
- 지하수 이용량 228% 증가!

농축산업과 질산성질소 관리



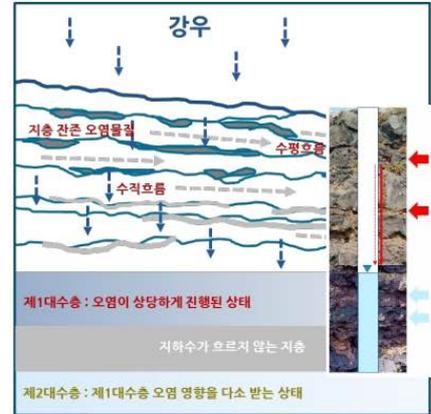
1993-2002 년 평균

2006-2011 년 평균



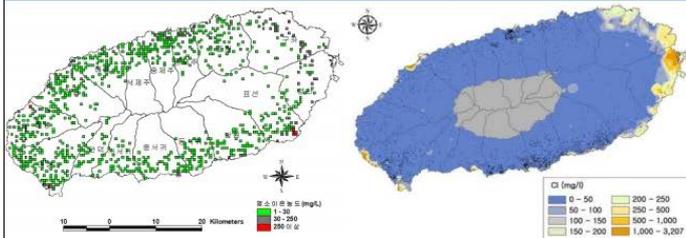
【 질산성질소 분포도 】

1993~2017 평균



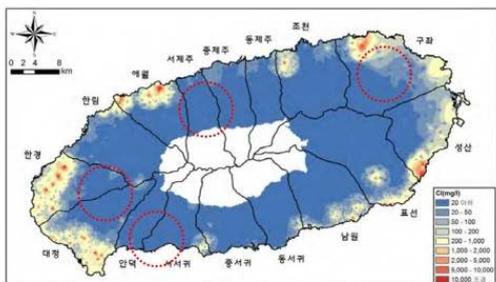
- 두꺼운 불포화대 잔류 오염물질...제거가 어려움!
 - 불안전 개발 관정 벽은 오염물질 수직 확산 통로!
 - 오염물질 제거가 어렵다면, 최소한 수직확산은 방지해야!
- 공벽 오염물질 유입경로 진단 기술 개발 및 오염차단 그라우팅 사업 필요

농업용수와 해수침투 관리



1993-2002 년 평균

2006-2011 년 평균



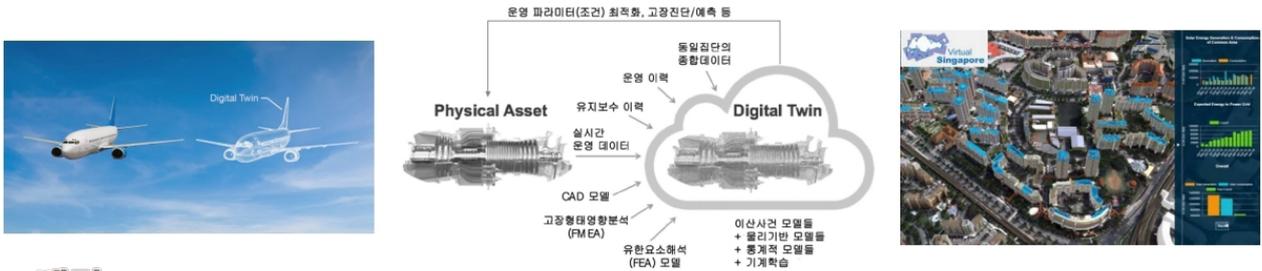
【 염소이온의 수질분포도 】

1993~2017 평균



- 애월, 한경, 대정, 구좌, 삼양지역 해수침투 심화!
- 농업용수 수요 증가기=가을 갈수기
- 농업용 대체수자원으로 하수처리수(먹는물기준) 인공함양은? (ex. 캘리포니아)

디지털 트윈 (DIGITAL TWIN)



● 배경

- 현실의 물리적 시스템을 가상 세계의 디지털 형태로 복제
- 두 시스템 간 실시간 데이터 공유 및 피드백
- 2002년 개념 첫 등장 이후, 최근 센서/사물인터넷/빅데이터/컴퓨터 하드웨어/인공지능 기술 발전 통해 각광
- 적용 예: 엔진, 발전기, 자동차, 선박, 플랜트, 도시 개발 및 운영(버추얼 싱가포르) 등

● 주요 기능 및 특징

- 실시간 자료 수집 및 해석 통한 현재 상태 모니터링, 이상 탐지, 문제 진단, 사고 방지
- 시뮬레이션 통한 미래 발생가능한 시나리오 영향 검토
- 최적 운영 관리 및 문제해결 방안 마련, 의사 결정 지원
- 3차원 정밀 시각화

35

회복탄력적 제주도 수자원 관리를 위한 미래 100년 구상

제주 대수층 디지털 트윈 개념도



©제주 환경(Photo by SYEOLS)

제주도 지질 지하수 연구에 열정을 바치시고,

훌륭한 유산을 남겨주신 故 박기환 박사님을 기리며...



감사합니다.

제주지하수 환경 변화 속 제주지하수연구센터의 역할

박원배 센터장 (제주지하수연구센터)

2021년 세계 물의 날 기념 KIGAM-JRI 공동 학술심포지엄

제주 지하수 환경 변화 속 제주지하수연구센터의 역할

박원배
(제주지하수연구센터)

Contents

1. 제주 지하수 환경의 변화
2. 제주 지하수의 현 상황
3. 제주지하수연구센터의 역할

PART 1

제주 지하수 환경의 변화



1 지하수 환경의 변화 요소

인위적 요인

- 인구증가
- 토지이용
- 농업활용
- 축산활용
- 개인하수
- 지하수이용량 증가



자연적 요인

- 기상이변
- 지구온난화



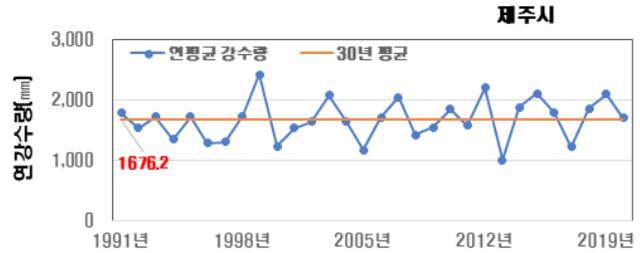
출처 (<http://www.suburbanwatersystems.com>)



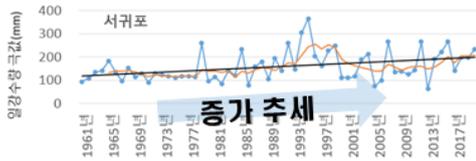
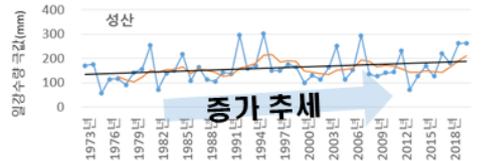
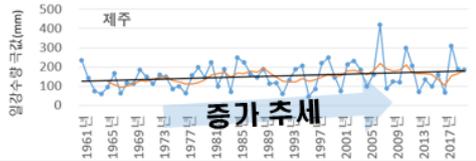
2 강수량 변화 추이

■ 제주도 30년 간 강수특성 (1991~2020)

- 평균 : 1676.2mm
- 최고 : 2206.4mm (2012년)
- 최저 : 1001.7mm (2013년)



■ 지역별 일강수량 극값 (관측시작연도~2020)



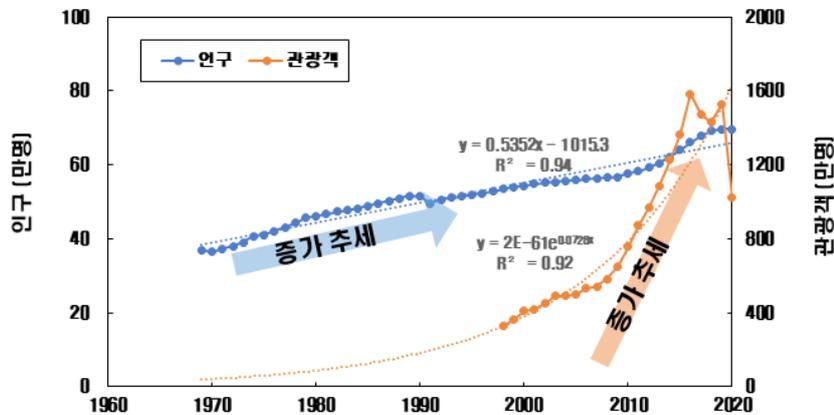
출처 : 제주도 물관기상관측소 (제주, 고산, 성산, 서귀포) 기상청 기상자료개방포털



3 인구 및 관광객 증가

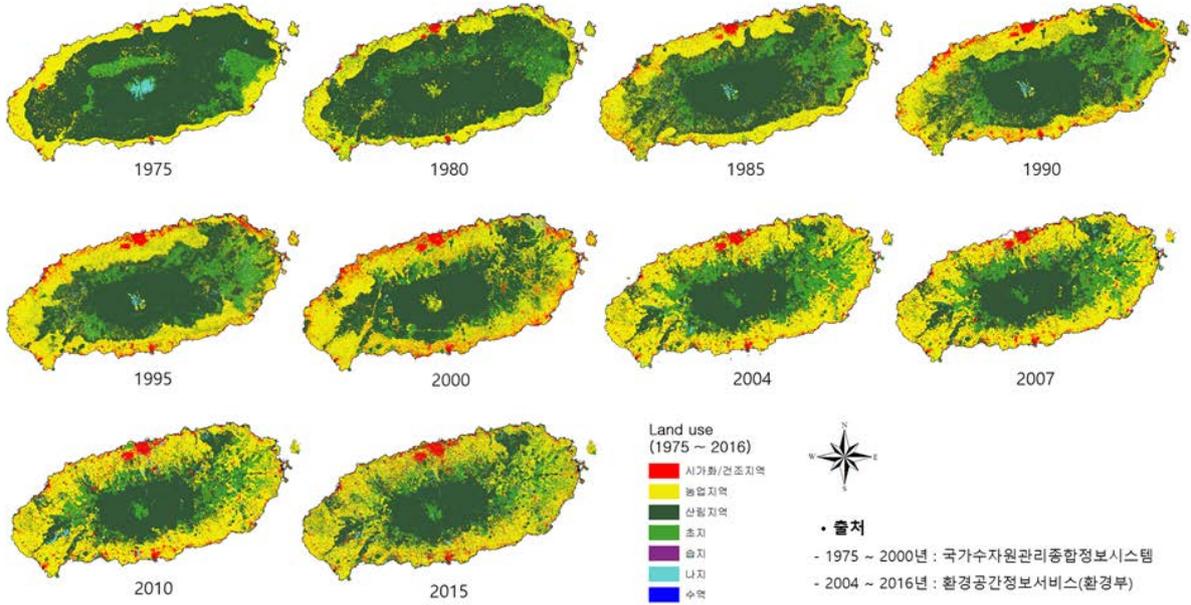
❖ 꾸준한 인구증가와 폭발적인 관광객 증가

- 상주인구는 50년간 대략 188% 증가함
 - 1969년(37만명) → 2019년(70만명)
- 관광객 수는 올레길이 개발된 2007년 이후 폭발적으로 증가함
 - 1998년(329만명) → 2019년(1,529만명)



4 토지이용의 변화

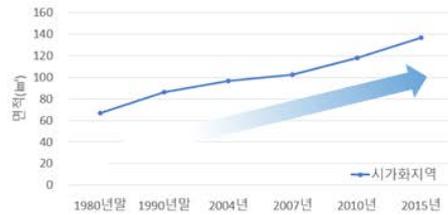
❖ 1975 - 2015년 토지이용 변화



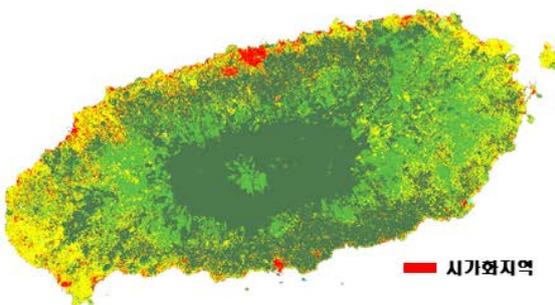
5 토지이용의 변화

❖ 시가화 지역 증가

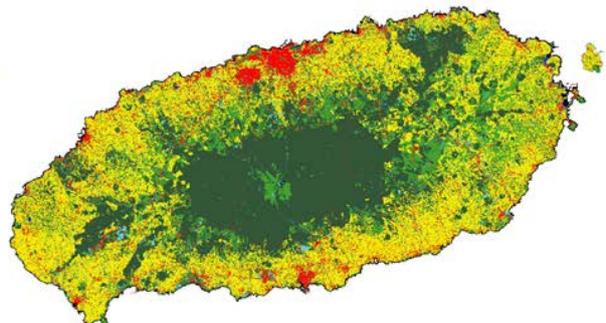
- 1980년 말 대비 2배 이상 면적 증가
- 1980년 말 : 66.9km²
- 2015년 : 136.6km²



1980년대 말



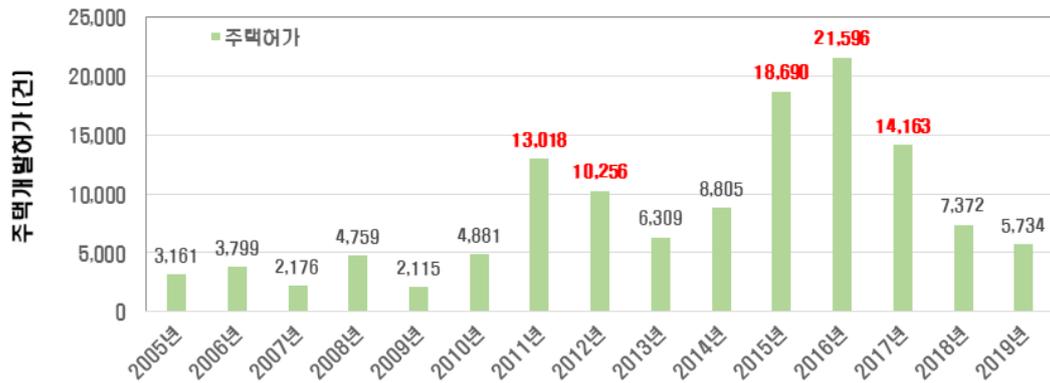
2015년



6 토지이용의 변화

❖ 주택개발허가 증가

- 2010년 이후 주택 개발허가 건수 급증
- 유입인구 및 관광객 2010년 이후 급격히 증가
- 최저: 2009년(2,115건)
- 2016년(21,596건)



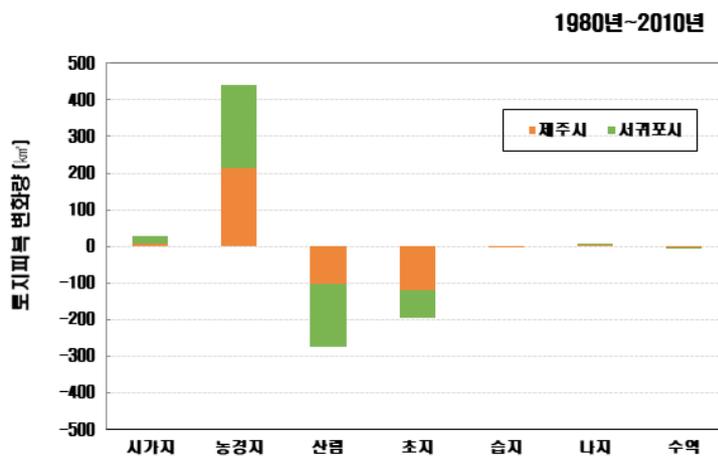
* 자료 : 제주특별자치도, 디자인건축지적과 (2019. 12 기준)



7 토지이용의 변화

❖ 농경지 증가, 산림/초지 감소

- 지난 30년간 **산림과 초지의 감소**
- 산림(276.0km² 감소), 초지(195.1km² 감소), **농경지의 증가(440.5 km²)**

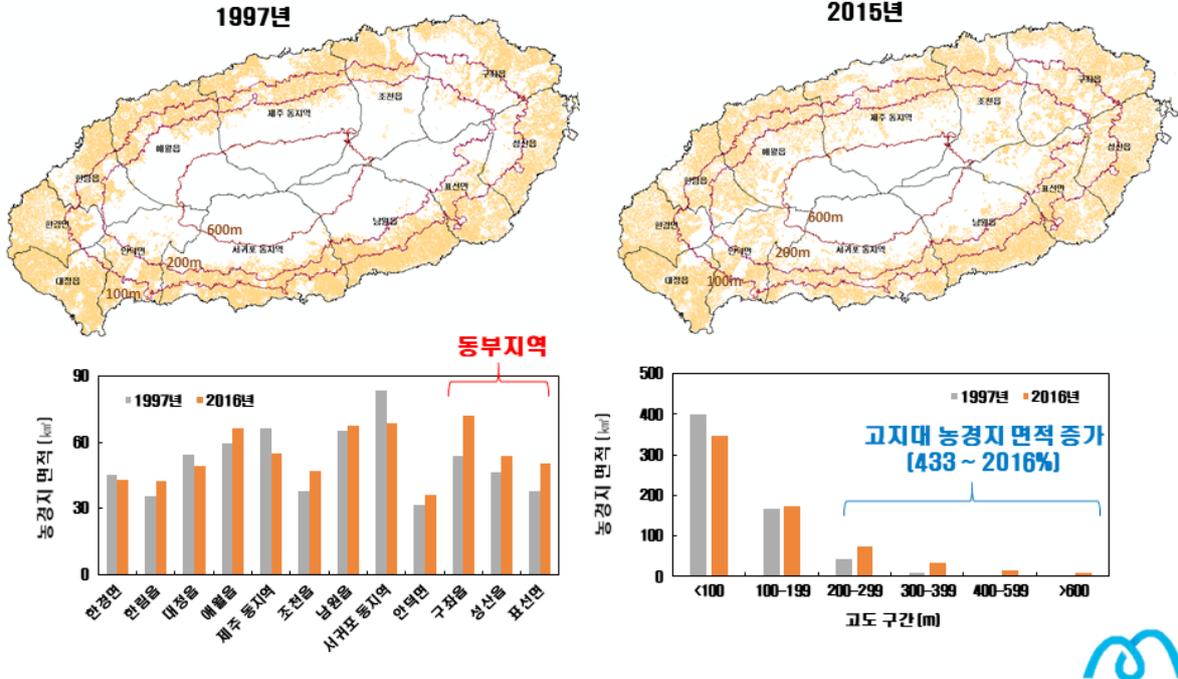


자료 출처: 환경공간서비스



8 농경지 면적 확대

❖ 고지대, 동부지역으로 농경지 신규 분포



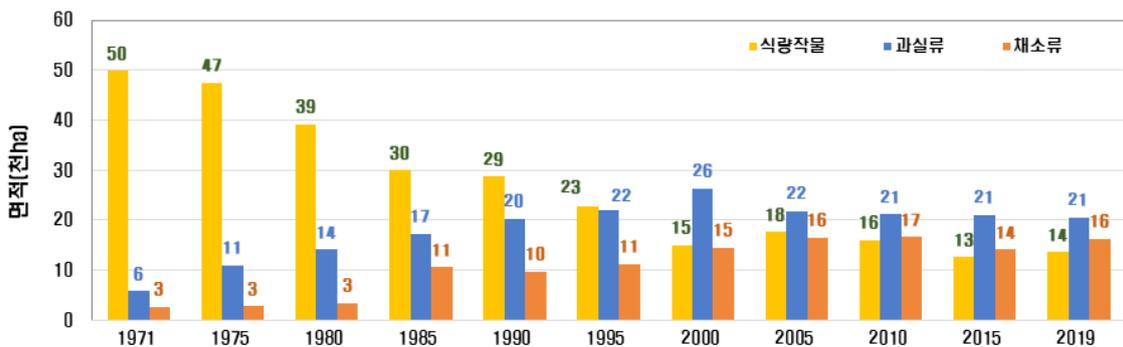
9 농업환경 변화

❖ 재배 작물의 변화

- 1970년대 대비 2019년 현재
- 식량작물: **72.7% 감소**
- 과실류(감귤, 키위 등): **352.6% 증가**
- 채소류(양배추, 무, 당근 등): **620.4% 증가**

연도별 재배작물 면적비율(%)

구분	식량작물	과실류	채소류
1971년	85.5	10.0	4.5
1985년	51.9	29.8	18.3
2000년	27.0	47.1	26.0
2019년	27.0	40.8	32.1

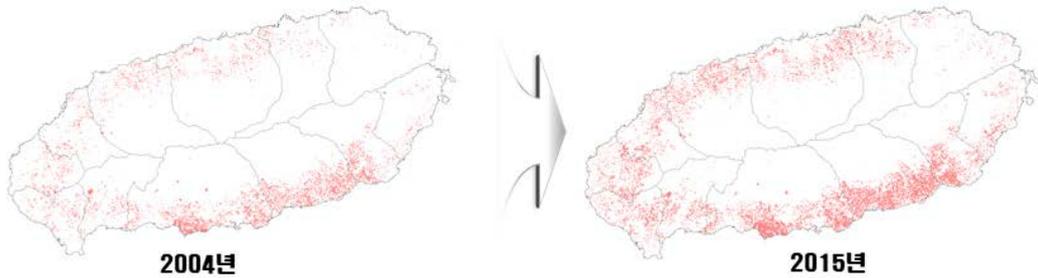
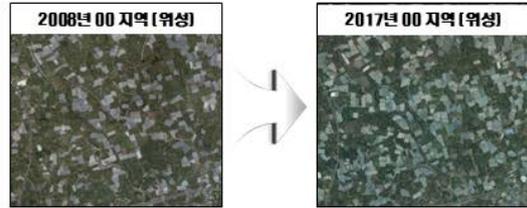
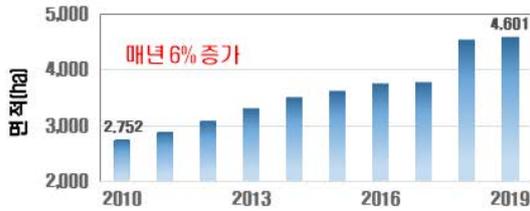


출처: 제주연구원, 2009. 제주지역 용수수요 전망과 수자원 보전관리계획에 관한 연구.
제주특별자치도 통계연보 (1994~2019)

10 농업환경 변화

❖ 농업 경쟁력 강화를 위해 시설하우스 지원사업 확대

▣ 2010년 대비 시설하우스 면적 **67.2% 증가**



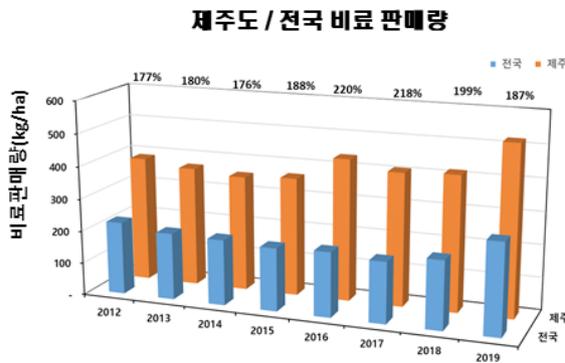
출처: 제주도 지리정보원 재해연원 자료, Kobaamap 위성지선, 원경부 드림피오도



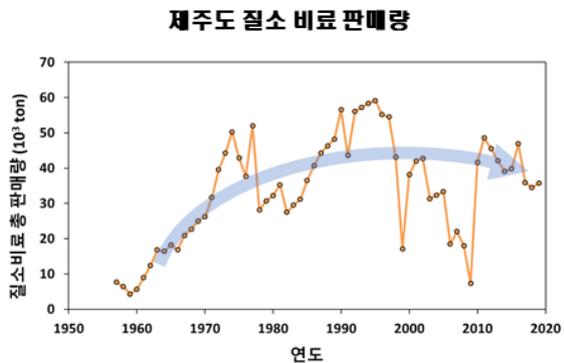
11 비료 사용량 변화

❖ 제주지역, 전국 대비 높은 비료 판매량

- ▣ 제주도 비료 판매량: 전국 대비 **평균 193% 육박**
- ▣ 제주도 질소 비료 판매량: 1990년초 최고치(57천톤)에 도달 후 감소 추이



(출처: 농림축산식품통계연보)



(출처: 제주통계연보&농림축산식품통계연보)

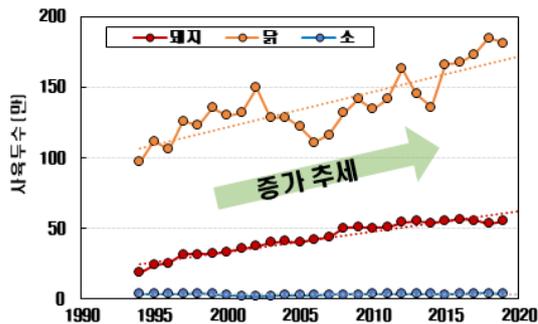


12 가축 사육 두수 증가

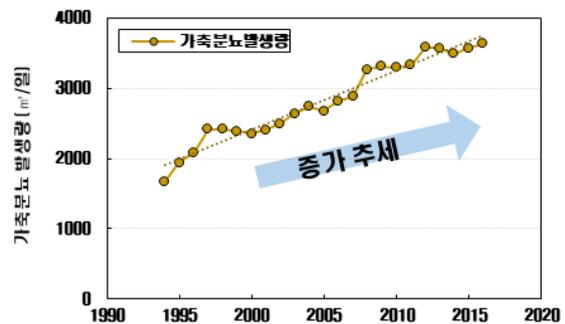
❖ 가축 사육 두수 증가에 따른 가축분뇨 발생 증가

- 돼지 사육 두수 : 25년간 18만 두 → 55만 두(293% 증가)
- 닭 사육 두수 : 97만 마리 → 181만 마리(186% 증가)
- 가축 사육 증가 : 분뇨 발생량 또한 장기적인 증가 추세(216% 증가)

가축 사육두수의 변화



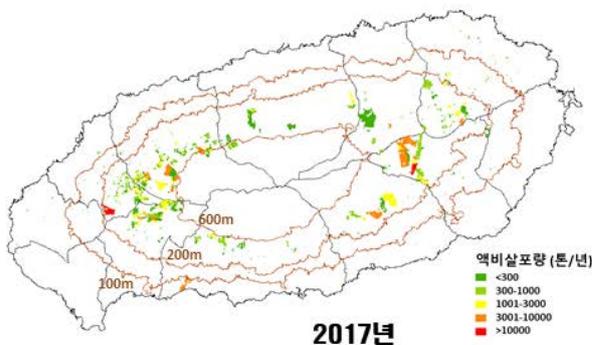
가축분뇨발생량 변화



13 가축분뇨 액비 살포

❖ 중산간 지역에 액비 살포 집중

- 가축분뇨 액비는 **지하수 주요 함양지역인 중산간 일대에 집중 살포**
- 지하수 오염 확산 우려



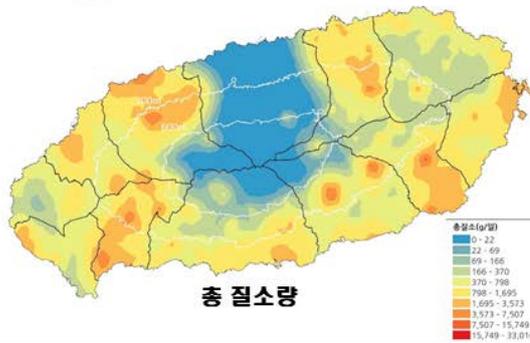
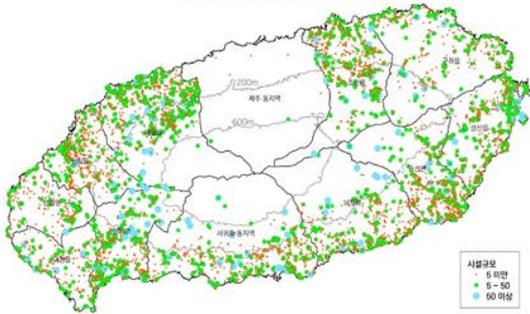
액비 살포 전경



14 개인하수시설의 증가

❖ 개인하수처리시설 약 만 여개에 육박

개인하수시설 분포도



[연도별 개인하수처리시설 현황]



15 쓰레기 배출량 증가

❖ 인구, 관광객 증가에 따른 생활폐기물 배출량 증가

- 2010년까지 평균 생활폐기물 배출량은 평균 585m³/일, 이후 배출량 **216% 증가**
- 2019년 생활폐기물 배출량: 1,220m³/일
- 생활폐기물 매립장 침출수로 인한 지하수 오염 우려

도내 생활폐기물 배출량



봉기 매립장



출처: 오마이뉴스



16 제주 지하수 환경 변화

❖ 인위적 활동에 의한 지하수 환경 변화



PART 2 제주 지하수의 현 상황



1 제주 지하수 현재 상황

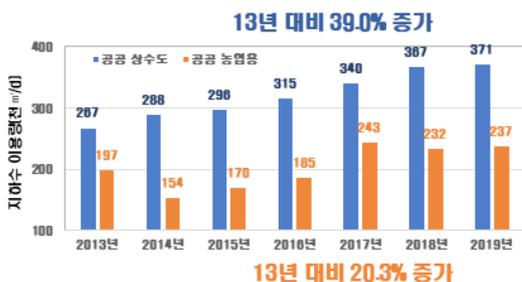
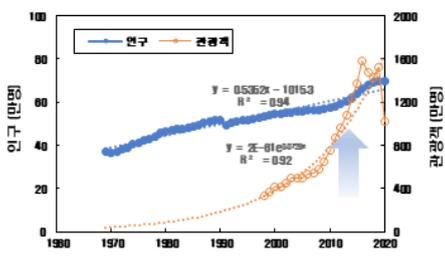
❖ 지역별 다양한 지하수 이슈



2 용수수요량 증가

❖ 인구 및 주택개발, 농업환경변화에 의한 수요량 증가

- 상주인구 및 관광객 급증, 주택개발 지속증가로 생활용수 수요량 증가
- 농업환경 변화로 인한 농업용수 수요량 증가

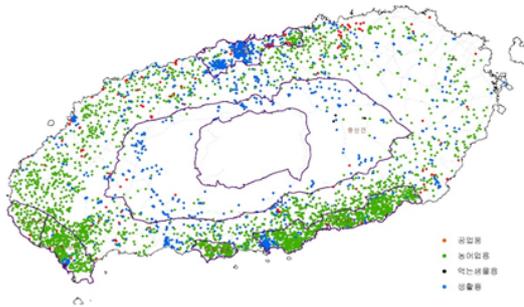


3 지하수 관다개발

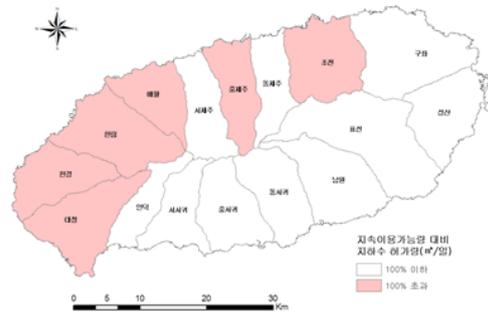
❖ 지하수 지속이용가능량 대비 91.5% 허가

- 지하수 지속이용가능량 1,787천 m³/일
- 지하수 허가량 1,636천 m³/일(지속이용가능량 대비 91.5%)

지하수 특별관리구역



지하수 허가량 초과 지역



4 지하수 수질 오염

❖ 제주 지하수는 각종 오염문제로 몸살 중

서부지역 지하수 오염 심각... 질산성질소 농도 다른 지역의 2-3 배

출처: 제주신문, 2019.07.18 10:11

미디어제주

제주자치경찰, 축산폐수 300톤 '숨골' 무단배출 업자 입건

출처: 제주신문, 2021.04.13 10:04

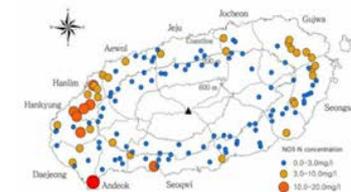
국제뉴스

대정·한경 등 서부지역 지하수 '해수침투' 심각

출처: 대정신문, 2021.03.26 09:28

제민일보

제주도 보건환경연구원, 상반기 지하수 수질 모니터링 정밀조사 결과 발표
질산성질소 농도 기준치 초과 서부 7곳 남부 1곳 확인... 최고 25.9mg/l



제주 동부지역 지하수 오염, 급속히 증가

출처: 강원신문, 2019.08.29 11:17

뉴스제주

제주연구원, 동부지역 지하수 오염원 실태분석 결과 발표
질산성질소 농도, 아직까지 먹노를 수질기준에 부합하나 올해 다른 지역보다 급격히 높아

올해 제주 동부지역 지하수 수질이 다른 지역에 비해 급속도로 안 좋아지고 있다는 연구결과가 나왔다.

제주연구원(원장 김동진) 박원배 선임연구위원은 29일 제주 동부지역 지하수 수질 오염 증가원인을 밝히고 대응방안을 제시했다.

박원배 연구위원의 분석결과에 따르면, 현재 동부지역 지하수의 질산성질소 평균 농도는 2.5mg/L로 전에서 2.8mg/L(상한) 수준을 보이고 있다. 이는 먹노를 수질기준인 10mg/L와 비교하면 매우 양호한 수준이다.

하나 최근의 질산성질소 변화 추세를 보면 안심할 수 없는 상황이다.

제주 공공수역 섬여 20여년간 제류...지하수오염 심각



뉴스 고분수 기지 3대요가 입건돼 감

"제주 수돗물 유중 상태는 취수원 오염, 운영비 절감 탓"

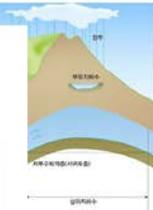
13일 연합뉴스서반 최종 결과 발표

출처: 연합뉴스, 2021.03.13 13:45

국민일보



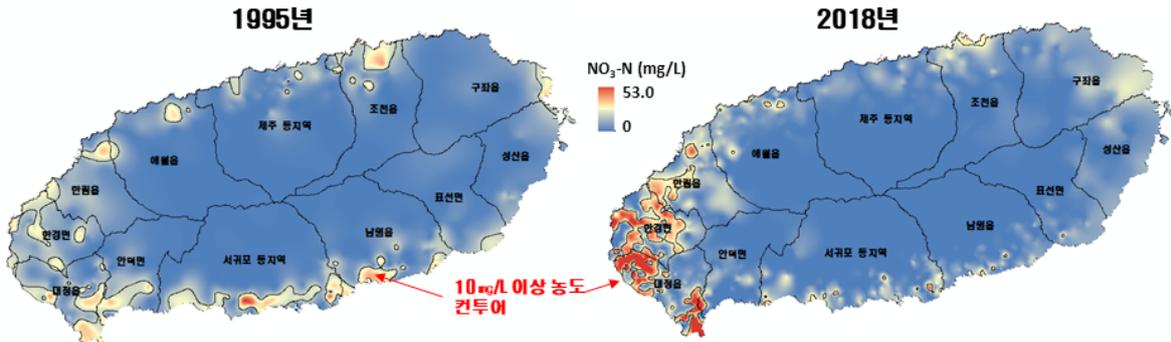
13일 제주도청 청사에서 제주 서부도시 환경용 수돗물 유중사고와 관련해 기자회견이 최종 조사 결과를 발표하고 있다. 제주도 제공



5 질산성질소 오염

❖ 서부 지역에 고농도 질산성질소 농도 집중 분포

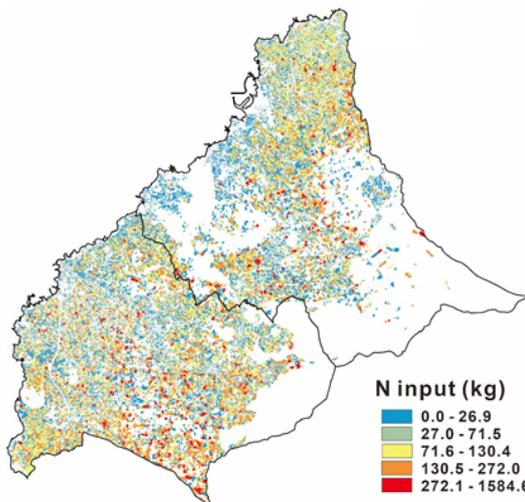
- 최근 들어, **고농도의 질산성질소 농도는 서부에 집중되며**,
- 남/북부 질산성질소 농도는 과거에 비해 감소



6 질산성질소 오염: 농업활동

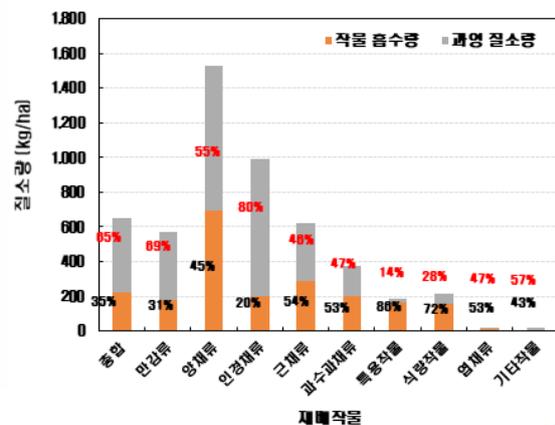
❖ 농경지 과다한 화학 비료 사용

- 질소질 비료 살포량의 65%는 작물에 흡수되지 못하고, 지하로 용탈
→ 지하수 질산성질소 오염 유발



서부지역 질소 비료 유입량

작물별 질소 흡수 및 과잉량

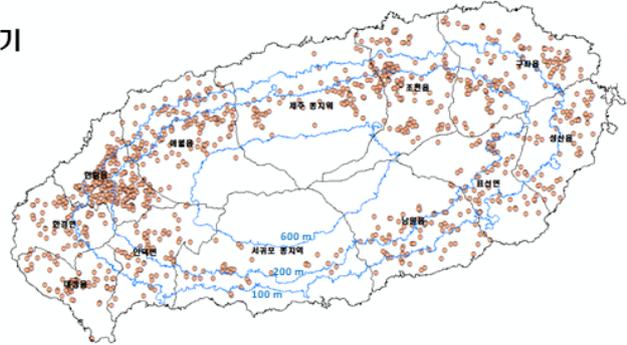


7 질산성질소 오염: 가축분뇨

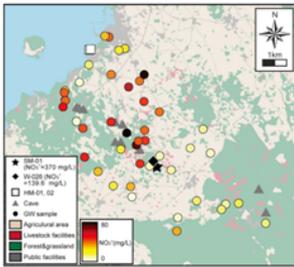
❖ 가축분뇨 오염, 장기간에 걸쳐 진행

- 한림읍 : 축산단지 밀집 & 가축분뇨 무단 투기
- 축산 단지 하류 지역 지하수
 - 고농도 NO₃⁻ 농도 분포
 - 1980년 이후 함양된 지하수에서 가축분뇨 영향 나타남

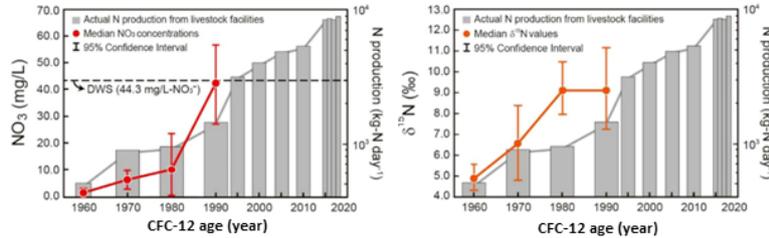
2019 가축분뇨 배출시설 위치



한림읍 NO₃⁻ 농도 분포



지하수 함양 시기에 따른 NO₃⁻ & δ¹⁵N



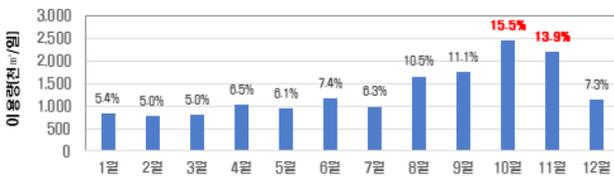
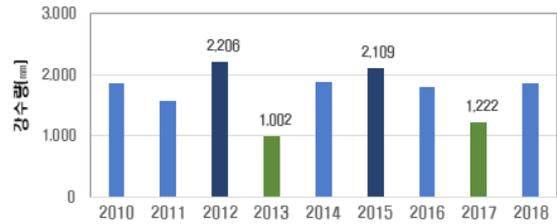
출처: Kim et al. 2021



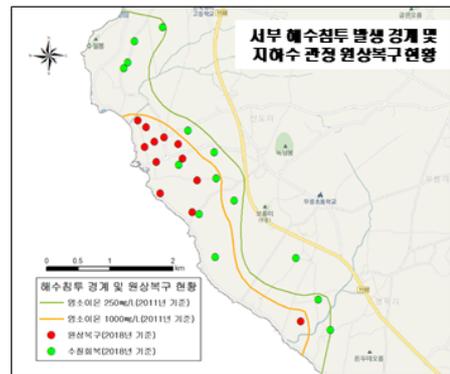
8 서부지역 해수 침투

❖ 가뭄시기에 농업용 지하수 이용 집중

- 과우년
 - ⇒ 지하수 함양량 감소
 - ⇒ 일시적 농업용 지하수 집중취수
 - ⇒ 해안 일부지역 해수침투 발생



대정-현경지역 월별 농업용수 이용특성 (2013-2018년 평균)



9 기후 변화

❖ 기후 변화로 인한 수자원 가용성 저하

- 기후변화로 제주지역은 기온상승, 강수량 증가, 해수면 상승, 계절변화 전망
- 향후 기후변화 현상은 유출량 증가, 지하수 함양량 감소, 물 소비량 증가 초래 전망



자료: KMA 2013. Climate Change Forecast on the Korean Peninsula



PART 3 제주지하수연구센터의 역할



1

제주지하수연구센터의 역할

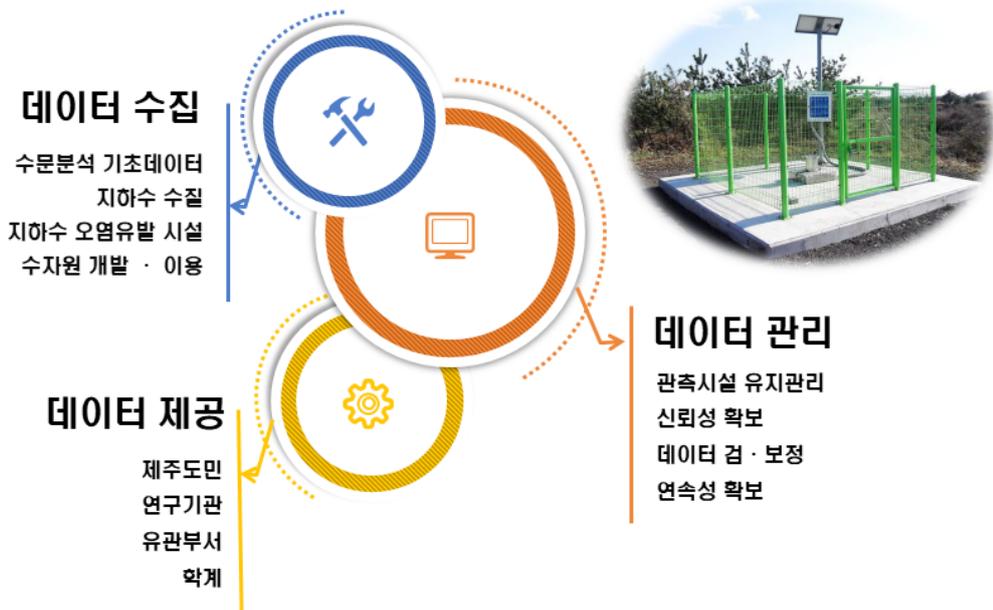
❖ 제주지하수의 과학적, 체계적인 지하수 관리



2

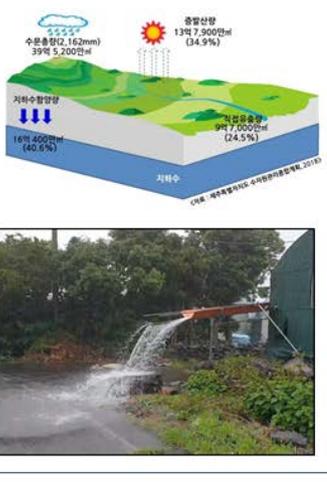
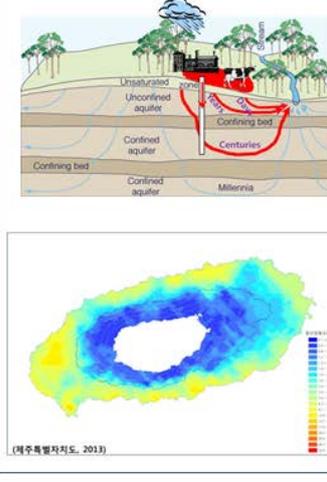
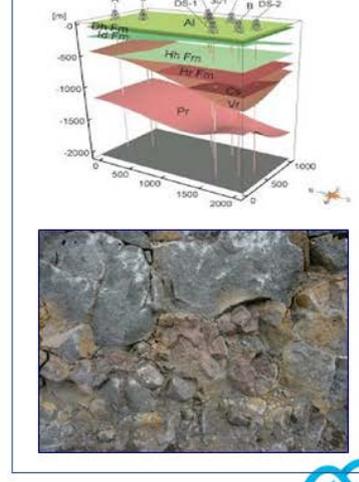
체계적인 데이터 관리

❖ 신뢰성 높은 데이터 품질 관리 및 데이터 공유



3 지하수 기초 및 응용연구

❖ 장·단기 연구과제 발굴 및 체계적 연구수행

수량	수질	수문지질
<p>물수지, 지속이용 가능량, 대체수자원, 물수요관리</p>	<p>오염경로, 수질개선기술, 오염예방</p>	<p>지하지질, 대수층 수리특성, 순환시스템</p>
		

4 지하수 정책 연구

❖ 제주지하수 관리정책 마련을 위한 학술적 연구 수행

지하수 각종 문제 현안



1. 지하수 현안 파악
2. 현안의 원인 조사
3. 장·단기 연구 수행
4. 연구결과의 정책 수립 활용
5. 문제 해결을 위한 제도 개선 방안 마련

5 도민대상 지하수 교육 실시

❖ 제주 지하수의 중요성을 알리고 도민이 실천할 수 있는 교육 추진

▣ 도민들의 의견을 청취하여 불합리한 제도 등에 대하여 개선방안 마련



6 지하수 홍보

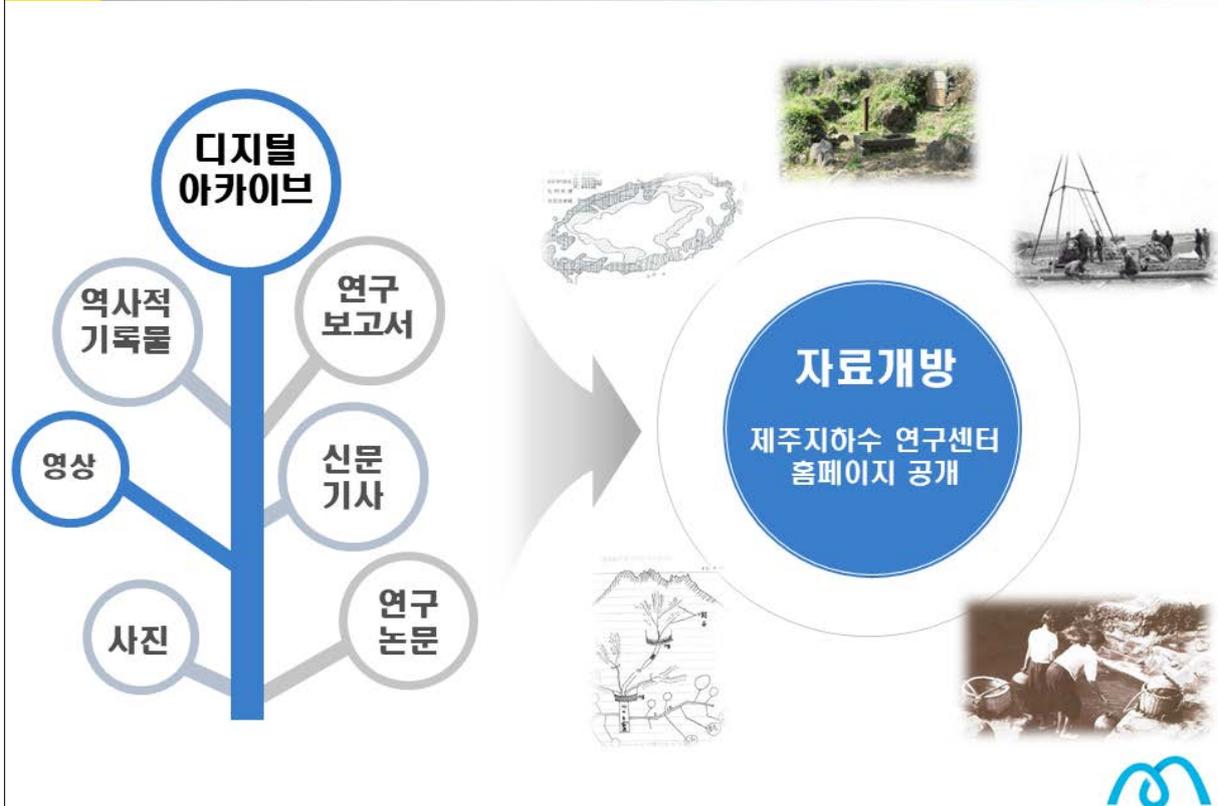
❖ 온·오프라인 등 다양한 방법을 통해 제주지하수 홍보



- 제주도민들에게 지하수에 대한 정확하고, 풍부한 정보 전달
- 제주 미래의 지속이용가능한 수자원 확보방안 공유
- 제주지하수에 대한 가치와 보전관리의 필요성 전달
- 제주지하수 위기에 대항하는 자발적 참여 유도

7

수자원 아카이브 구축



8

수자원 관련기관 협업의 중심

❖ 지하수 관련 정책 개발 견인





제주도 지하수 전문 연구기관으로 성장



토론문

- 박준범 부장 (미윤군극동공병단)
- 서상기 본부장 (한국농어촌공사)
- 우남철 교수 (연세대학교)
- 진기옥 과장 (제주특별자치도청)
- 하규철 본부장 (한국지질자원연구원)
- 현윤정 연구위원 (한국환경정책 평가연구원)

제주도 지하수 관리 방향 : 제주도 수문지질종합조사 시행을 기대한다.

소속: 주한미육군극동공병단

성명: 박 준 범

지하수의 「생성-유동-취수」에 이르는 과정은 모두 지표 및 지하를 구성하는 지질(암석, 퇴적층) 영역에서 이루어지고 있기 때문에 정확한 지표 및 지하 지질정보는 지하수체의 실체를 규명하고, 이의 합리적 개발·이용과 체계적 보전·관리의 토대임은 아무리 강조해도 결코 지나치지 않는다.

약 30년 전 제주특별자치도에서는 축적 1/5만 지질도 구축 사업을 추진하였다. 도의 사업비 지원으로 대한지질학회에 의해 성산과 표선도폭(원종관 외, 1993, 1995)이, 한국자원연구소에 의해 제주·애월도폭과 서귀포·하효리도폭(박기화 외, 1998, 2000)이 수행되었다. 한편, 한국자원연구소의 기본과제로 모슬포·한림도폭과 축적 1/25만 지질도(박기화 외, 2000)가 완성되었다. 기간으로 따지면 제주도 전역의 지질도가 완성되기 까지 약 10년 정도의 기간이 소요되었으며, 제주도 지질 관련 최고의 전문가가 양성되는 계기가 되었다. 또한, 이를 바탕으로 지금까지도 제주도 수자원종합계획서의 지질 부분이 기술되고 있다. 그럼에도 불구하고, 지질도폭은 조사 기관 간 또한 도폭 연구자 간 지층명 및 지질계통의 통일성 결여, 도폭 경계 지역에서 지질 경계선의 불합치한 문제점이 지속적으로 지적되어 왔다. 또한, 지질도폭 내의 층서 및 제주도 형성사에 관한 기재는 지질도 완성 이후 활발해진 제주도 전역에 걸친 암석 절대연대 측정 및 시추 자료에 기반 한 연구 자료와 비교할 때 아주 다른 내용을 담고 있다. 따라서 지질도폭의 개정이 절실한 시점에 와 있다고 할 수 있다.

한편, 지하수에 대한 조사는 비교적 다양하게 진행되어 왔으나, 특정 지역 중심 혹은 단일 사업별, 특정 목적별로 분산되어 진행되어 왔을 뿐 아니라, 개괄적 조사의 성격에서 벗어나지 못하고 있다. 즉, 광역적인 개괄적 조사에서 수역 단위의 세부조사 단계로 넘어가지 못하고 있고, 일정기간을 두고 도 전역의 세부적인 종합적 조사는 이루어지지 못하고 있다. 따라서 조사결과의 통일성이나 연계성, 그리고 종합성이 미흡하다. 제주지하수가 현재 겪고 있는 여러 문제를 풀어줄 단기적 해결책 뿐 만 아니라 미래의 제주지하수를 효율적이며 체계적으로 관리하고 보전하기 위한 기틀을 마련하기 위해서는 지하수 관련 조사·연구의 수행방법을 개선할 필요가 있다.

특히, 2020년 10월 제주지하수연구센터(이하 ‘연구센터’)를 설치하고 지하수 조사·연구를 본격적으로 추진할 체비를 갖춘 점을 고려할 때, 연구센터를 중심으로 종합적·계획적·세부적 조사·연구가 진행되어야 한다. 즉, 제주특별자치도가 그동안 제주연구원에 위탁하여 수행해 온 연구용역이 아닌, 제주특별자치도의 도비 혹은 국비의 지원으로 연구센터가 주도적으로 한국지질자원연구원과 같은 국내외 권위 있는 연구기관과의 협업을 통한 학술 연구이다.

이러한 측면에서 「제주도 수문지질종합조사」의 기획 및 시행을 다음과 같이 제안한다.

첫째, 종합조사에 포함될 내용은 이미 수행된 지질 및 지하수 분야의 조사·연구문헌에 대한 분야별 전문가의 철저한 검토를 통해 선정되어야 한다. 이는 예산의 중복투자 방지는 물론 이전 연구 성과의 활용 측면에서 반드시 이러한 측면에서 「제주도 수문지질종합조사」의 기획 및 시행을 다음과 같이 제안한다.

첫째, 종합조사에 포함될 내용은 이미 수행된 지질 및 지하수 분야의 조사·연구문헌에 대한 분야별 전문가의 철저한 검토를 통해 선정되어야 한다. 이는 예산의 중복투자 방지는 물론 이전 연구 성과의 활용 측면에서 반드시 이행되어야 한다. 즉, 이전에 수행된 조사·연구의 성과 중에서 가용할 수 있는 분야 혹은 항목이나 지역은 그 성과를 활용함으로써 비용과 시간의 낭비를 줄일 수 있다. 가령, 지표지질부분의 경우, 최근 발표된 연구 결과를 검토, 종합하고, 연차별 암석시료의 채취, 기재, 연대측정(구역별)을 선제적으로 진행한 이후, 그 결과를 바탕으로 이행되어야 한다. 즉, 이전에 수행된 조사·연구의 성과 중에서 가용할 수 있는 분야 혹은 항목이나 지역은 그 성과를 활용함으로써 비용과 시간의 낭비를 줄일 수 있다. 가령, 지표지질부분의 경우, 최근 발표된 연구 결과를 검토, 종합하고, 연차별 암석시료의 채취, 기재, 연대측정(구역별)을 선제적으로 진행한 이후, 그 결과를 바탕으로 주요 암층에 대한 재조사, 기존 도폭의 층서명, 층서관계, 경계 등을 재설정하는 것이다.

둘째, 이 종합조사에는 해발 500m 이상 한라산국립공원 지역에 대한 심부시추를 통한 지질 및 지하수조사가 반드시 포함되어야 한다. 이 지역은 제주지하수의 원천이자, 제주도 화산활동의 비밀을 저장하고 있는 학술적으로 매우 중요한 지역이지만, 지금까지 수문지질학적 조사·연구가 전혀 이루어지지 못하였다.

셋째, 기획단계에서부터 수문지질 전문 인력 양성 및 교육훈련 계획이 포함되어야 한다. 지하수의 관리는 물론 조사·연구는 이 분야에 대한 지식과 경험을 쌓은 전문 인력이 하는 것이다. 현 제주도내의 인력양성 체계를 감안할 때, 대학에서 전문 인력을 양성하는 정규시스템 개설은 기대하기 어려운 것 같다. 따라서 종합조사와 같은 대형 프로젝트 수행과정에서 새로운 인력양성과 기존 인력 교육훈련 프로그램이 포함되어야 현재 겪고 있는 전문 인력 부족사태를 해결하는데 도움이 될 것이다.

넷째, 종합조사의 수행과정의 관리와 성과평가는 국가연구개발사업 규정을 준용하여 실시할 것을 제안한다. 기획단계에서부터 정량적/정성적 목표는 물론 성과지표를 설정하고, 추진체계를 확고히 해야 한다. 이를 통해 종합조사를 통해 창출하고자 하는 학술적 성과와 더불어 실용화 성과목표(현장 기술적용, 정책 및 제도화, 인력양성 등)를 분명히 제시되고, 이의 달성여부를 객관적으로 평가되어야 한다.

종합조사는 중장기적 과제이므로 제주특별자치도와 도의회로부터의 지속적인 연구비 확보와 지원, 그리고 지하수연구센터를 중심으로 연구수행기관 간의 유기적인 협력이 절실하다.

현재 연구센터는 전문 인력 확보에 큰 어려움을 겪고 있다는 기사를 읽었다. 연구센터가 빠른 시일 내에 안정적인 체계를 갖추기 위해서는 제주특별자치도의 전폭적인 지원과 우수한 인력이 확보될 수 있도록 신분을 보장해주는 등의 제도개선을 해줘야 한다. 이제 막 첫발을 디딘 연구센터가 성공적으로 안착하느냐, 아니면 중도에 좌초되느냐의 문제는 제주특별자치도의 의지에 달려있다.

제주도 지하수 발전 방향

소속: 한국농어촌공사

성명: 서 상 기

1. 제주도 농업용수 체계적 관리

제주도의 지하수 지속이용 가능량은 지하수 함양량의 약 40.6%로 산정한다. 한국농어촌공사에서는 제주도를 40개 세부권역(농업용수 통합광역화사업)으로 구분한 후, 기후변화 시나리오(RCP 4.5와 8.5)의 일단위 기상자료를 이용한 물수지 분석 방법으로 2025~2030년 기간 동안의 지속이용 가능량 대비 농업용수 수요량을 평가하였다(송성호 등, 2018). RCP 4.5 시나리오의 경우 2025년 서부지역인 대정읍, 한경면, 한림읍, 안덕면과 동부지역인 구좌읍, 성산면, 조천 및 표선읍의 일부권역에서 부족한 것으로 나타났다. 이에 비해 2030년은 전반적으로 농업용수 수요량 대비 지속이용 가능량은 상대적으로 여유가 있는 것으로 분석되었다. RCP 8.5 시나리오의 경우에는 2025~2030년 서부지역인 대정읍, 한경면, 한림읍, 안덕면, 애월읍 일부권역과 동부지역인 구좌읍, 성산면, 조천 및 표선읍의 일부권역, 북쪽과 남쪽지역인 제주시와 서귀포시의 일부권역에서 부족한 것으로 나타났다. 따라서 RCP 8.5 시나리오의 경우 제주도 전체적으로 농업용수 수요량 대비 지하수 공급 가능량은 부족한 것으로 분석되었으며 특히 서부지역은 현재의 농업용수 체계를 그대로 이용하는 경우, 가뭄 취약성이 급격하게 증가할 것으로 예측되어 기존의 농업용수 공급 체계를 대신하는 적절한 활용 계획 수립과 플랫폼 구축이 필요한 시점이다.

이러한 문제를 극복하기 위하여 한국농어촌공사는 제주특별자치도와 함께 기후변화 대응, 농업위기 극복 및 제주도 수자원관리 종합대책 정책목표 달성이라는 3가지 목표로, 2017~2024년(8년) 기간 중 약 1,300억원의 예산으로 제주도 농업용수 통합광역화사업을 진행 중이다. 이 사업이 종료되면 가뭄극복, 농업경쟁력 강화 및 수자원관리 공공성 강화 등 직접적인 효과 뿐만 아니라 공공관리 강화로 인한 지하수자원 보호, 안정적인 농업용수 공급을 통한 6차산업 활성화 및 수자원의 효율적 이용에 따른 제주형 물산업 육성 등의 간접적인 효과도 거둘 수 있다.

수질관리 측면에서는 축산분뇨와 함께 문제가 되는 비료 및 농약 과잉살포와 이에 따른 지하수 수질 악화에 대한 대책 수립이 필요하다. 제주도는 대부분 화산회토로 음전하량이 다른 토양에 비해 높다. 따라서 음이온성 오염물질인 질산성질소 등이 양이온성인 중금속에 비해 빗물에 녹아 지하수로 함양되기 유리하다. 따라서 비료(퇴비 포함) 및 축산분뇨에 의한 지하수 오염에 취약함에 따라, 비료와 농약 투입량의 조절 및 가축분뇨에너지화사업 등을 통한 지하수 수질 보전 대책 수립이 필요하다. 다만 농업인 입장에서는 작물 생산량 증대를 목적으로 비료를 사용하기 때문에, 비료 사용량 감축에 따른 인센티브 제공을 위한 환경직불제 등의 정책적 수단 강구가 필요하다.

2. 대체수자원 활용 방안

제주도 수자원 시설용량을 기준으로 수원별 분포에 따르면 지하수(용천수 포함)가 약 95%를 차지하는 반면 대체수자원(빗물이용시설, 하수재이용시설, 해수담수화 및 중수도)과 저류지는 각각 2.6%와 0.9% 수준에 그치고 있다(제주도 수자원장기종합계획, 2013-2022).

대체수자원 중 규모가 큰 빗물이용시설의 경우는 제주도에 2005년부터 지하수 사용량을 줄이기 위해 2020년까지 1,540여개소를 설치할 지원하여 약 18만 m³의 저류용량을 확보하였다. 따라서 시설재배 농가에 농업용수로의 직접적 활용뿐만 아니라 중규모 저류지 추가 건설을 통해 가뭄을 대비한 목적으로 활용방안 수립이 필요하다. 다만 터파기공사를 제외한 공사비의 50%를 지원하는 현행 제도를 터파기 공사비를 포함하면 좀 더 빗물이용시설 설치가 확대될 것으로 기대된다. 또한 골프장의 경우 의무설치 대상이 56개소로, 이에 대한 체계적인 관리 감독이 필요하다. 저류지의 경우에는 제주도 내 약 220여개소에 홍수 등 재해대책을 목적으로 설치하였지만, 일부 시설의 경우 재해대비 목적과 함께 저류시설로의 활용이 기대된다. 다만 설치 목적이 도로건설, 재해위험지구정비사업, 배수개선사업 등으로 구분됨에 따라, 행정당국의 담당부서가 분산되어 효율적인 관리의 문제점이 있다. 따라서 현재 제주특별자치도에서 추진하고 있는 저류지정밀조사 및 기능개선 연구용역(2020.9~2022.9)을 통해 저류지별로 실제 집중호우 발생에 따른 효율분석을 거쳐 농업용수 등에 활용방안 제고가 필요하다.

3. 유지관리조직(수리계) 운영 개선 방안

제주도 농업용수 통합광역화사업은 제주도에 농업기반시설물 및 농업용수 관리 일원화와 지자체 소유의 농업기반시설(관정, 관로)에 대한 개보수 재원(국비) 확보를 위한 사업이다. 그러나 쟁점사항으로 저수지 수혜구역 내에 위치한 지자체 시설물 수혜구역의 공사관리지역 편입 여부, 농어촌정비법에 따른 수리계 해산 동의 절차 및 국비 예산(유지관리비, 수리시설개보수비) 확보 등이 있다. 이 중 약 410개에 달하는 수리계 해산 동의 여부는 개별 수리계의 상황에 따라 광역화사업 추진에 쟁점으로 대두될 가능성이 매우 크다. 이러한 문제 해결을 위한 대책으로 기존 수리계를 시설 운영만을 담당하는 물 사용 조직(WAU, water user association)으로 전환시키는 방법을 제안한다. 이 조직을 이용하는 경우 제주도 내 개별 관정 수혜구역 내의 관로망 및 유역 단위 지하수 시설의 합리적인 운영 방안 마련과 함께 물 분쟁을 사전에 방지할 수 있는 장치로 활용이 가능하다. 최근 경제협력개발기구(OECD)에서는 전세계적으로 발생하는 물 부족과 이로 인한 식량문제 해결의 근본적인 접근 방식으로, 각 국별로 효율적인 물관리 방안 수립을 요구하고 있다. 우리나라도 최근 물관리기본법 제정과 함께 물관리 일원화를 위한 다양한 방식의 정책을 수립하고 있다.

한국농어촌공사에서는 현재 제주특별자치도와 함께 농업용수 통합광역화사업에 필요한 하드웨어는 당초 계획을 보완하여, 신규관정 개발을 최소화하는 대신 광역저수조 신설 및 대체수원 활용 등으로 전환하여 시행 중이다. 다만 더불어 이러한 대책이 효과적이기 위해서는 시설물 운영은 물 사용 조직(WUA), 예산 지원은 정부, 그리고 시설의 유지·보수 등 지속적인 관리는 물관리 전문기관들이 참여하는 “물관리 거버넌스(governance)” 설치가 필수적이다. 이제는 이를 위한 정책적 접근이 필요한 시기로 더는 미룰 수 없는 시급한 문제로 판단된다.

제주도 지하수 발전 방향

소속: 연세대학교 지구시스템학과

성명: 우 남 칠

▪ “물”은 인류와 생태계 모두에게 생존에 필요한 필수적인 요소이며, 모든 생명체가 생존에 필요한 물을 공급받을 수 있어야 한다는 것은 당연한 명제로 들린다. 그러나 물이 지구 상에서 분포하는 영역은 시간적·공간적으로 고르게 분포하지 않으며(unequitable resource), 결과적으로 물이 있는 지역을 중심으로 인류와 생태계는 그 생명을 이어왔다. 인류는 생존 경쟁 과정에서 “물 소유권”으로 분쟁하기 시작했으며, 2021년 현재에도 세계 곳곳에서는 이러한 물 분쟁이 지역사회와 국가 간에 발생하고 있다. 이러한 분쟁은 물 사용을 담보로 하는 경제 발전 형태에 따라 더욱 가속화 되고 있다.

▪ 과학적으로 지구는 닫힌계(closed system)라고 전제한다. 즉, 외계와 고립되어 존재하며, 지구의 물질들은 총량의 관점에서 일정하게 유지된다. 물의 경우, 공간적 위치에 따라서 대기 중의 수증기 - 하천수 - 해수 - 지하수 등의 다양한 이름을 가지고 있지만, 궁극적으로 지구에 포함된 물의 총량은 일정하다는 것이다. 이러한 개념을 “물 순환”이라고 부르는데, 이 개념에서는 각 공간적 영역에서 존재하는 물들이 순환되는 개념은 있으나, 이러한 순환에 걸리는 시간에 대해서는 감추어져 있다. 그 이유는, 물의 시간적 흐름은 각각의 공간 영역에서 아주 큰 차이를 보이기 때문이다.

▪ 이러한 물의 기본 개념을 제주도에 적용하면 다음 몇 가지 사실들을 알 수 있다:

(1) 제주도는 바다에 둘러싸인 화산섬으로, 제주도 발표자료에 의하면 자체적으로 평가한 지속이용가능량의 88.4%를 이미 취수할 수 있도록 허가하였다. 이 취수허가량에는 염지하수는 포함되지 않았으며, 만약 염지하수 취수과정에 함께 산출되는 담지하수를 포함한다면, 이미 지속이용가능량의 약 3배 정도를 취수허가한 것이다. 제주도의 수자원 이용은 총량 관점에서 지속가능하지 않다.

(2) 제주도를 소유역을 기준으로 동서남북 지역으로 구분하면, 수자원의 총량과 지하수의 지속이용 가능량에서 가장 많은 남부 지역은 가장 적은 서부 지역보다 약 2.3 ~ 2.5배가 많다. 하지만 지하수이용량은 오히려 서부지역(63 백만m³/yr)이 남부지역(56 백만m³/yr)의 112%를 사용하고 있다. 즉, 물이 가용한 지역과 사용하는 지역 간에 차이가 있음을 보여준다.

(3) 최근 들어 제주도 지하수의 수질오염에 대한 민-관-학계의 관심이 높아지고 있다. 지하수에 생존을 걸고 있는 제주도에서는 늦었지만 다행한 일이다. 지하수가 오염되면, 이를 원상태로 회복하는 것은 오랜 기간과 막대한 경비가 소요된다. 이는 오염된 지하수가 흐르는 과정에 지하수의 유동경로인 지하 암반층에 오염물질이 잔류하게 되며, 이렇게 잔존하는 오염물질은 실질적으로 완전히 제거하는 것이 거의 불가능하기 때문이다. 따라서 지하수

의 오염에 대한 대책은 처리보다는 예방을 최우선으로 고려해야 한다. 이를 위한 체계적이며 지속적인 관측시스템의 구축과 운용, 해석과 정보화 등은 반드시 수행되어야 하는 과업이다.

- 제주도에서 지하수는 단순히 물 그 이상으로 모든 사회적/경제적/산업적 활동들과 직접적으로 연결되어 있다. 따라서 위에 제시한 몇 가지의 사례, 즉 지하수의 총량과 공간적 분포 및 수질 문제 등에 대한 과학적이며 체계적인 연구와 대책 수립을 위한 연구기관으로 2020년 10월 “제주지하수연구센터”가 발족된 것은 그나마 다행이며, 이 연구센터에 대한 기대가 크다. 제주도 지하수, 생명의 물에 대한 유일한 연구기관으로, 첫 술에 배부를 수는 없겠지만, 이 기관이 속히 자리매김을 할 수 있도록 제주도와 도민들의 전폭적인 지원을 기대한다.

- 제주도의 미래가, 제주도의 지속가능성이 물에 달려 있다면, 그 물(지하수)에 대해서 체계적으로 연구하고 관리대책을 세워갈 수 있도록 충분한 지원이 되어야 할 것이다. 땅에 뿌린 씨앗이 발아해서 겨우 싹이 나오기 시작했으니, 이 싹이 무럭무럭 자라서 큰 나무가 되고, 사람들이 쉬어갈 수 있는 그늘도 제공할 수 있도록, 우리 모두 열심히 거름도 주며 잘 보살펴야 할 것이다.

기후변화 대비한 지하수 보전·관리 방향

소속: 제주특별자치도 환경보전국 물정책과

성명: 진 기 옥

2000년대로 접어들어 전 세계는 기후변화로 몸살을 앓고 있습니다. 예전에 경험해 보지 못했던 최악의 가뭄, 폭우와 홍수 40°C를 훌쩍 넘는 폭염, 산불, 해수면 상승, 슈퍼 태풍 등으로 재산과 인명 피해는 물론 산업경제에도 큰 피해를 남기고 있다. 이 같은 기후변화 현상은 제주도에도 여지없이 나타나고 있다. 제주지방기상청(2019)이 1961~2018년까지 58년간 제주도의 기후특성을 분석한 바에 의하면, 연평균 기온은 0.29°C/10년 상승하였고, 연 강수량은 49.46mm/10년 증가한 반면, 연 강수일수는 1.37일/10년 감소한 것으로 나타났다. 2007년 9월 16일 제주도 지역에 12시간 동안 420mm에 달하는 폭우가 쏟아져 사상유래 없는 대홍수로 12명이 숨지고, 1,000여 억 원에 달하는 막대한 피해를 남겼다. 그런가 하면, 2013년 7월 초부터 8월 하순까지 59일간 제주지역은 극심한 가뭄에 시달렸는데, 이 가뭄은 90년만의 최악의 가뭄으로 기록되었다.

전 세계를 엄습하고 있는 기후변화는 이용 가능한 수자원 부족과 결합되어 물 관리를 더욱 어렵게 만들고 있다. 제주의 경우, 주 수원인 지하수 함양량과 지속 이용 가능량도 한정되어 있으며, 강수량 변동에 따라 그 양도 가변적이다. 그러나 최근 개발사업과 유입인구 증가, 물을 많이 이용하는 특용작물과 시설하우스 전환 등으로 지하수 함양면적이 점차 줄어드는 반면 지하수 사용량은 지속적으로 증가하고 있다. 또한, 침수피해를 방지하기 위한 배수개선사업은 많은 양의 우수를 일시에 배제시키고, 집중호우로 인한 직접 유출물 증가, 도로개설로 인한 지표수 유로 변경 등 지하수 함양에 부정적 영향을 미치고 있다.

그리고 지하수의 수질을 위협하는 잠재오염원도 계속해서 늘어나고 있을 뿐만 아니라, 해안지역 지하수의 질 산성질소 농도도 자연 수준을 초과한 지역이 확대되고 있습니다. 이러한 제주지하수를 둘러싼 환경이 지속적으로 악화되고 있음에도 불구하고, 인구 및 관광객 증가, 농업 형태의 변화와 상수도·농업용수의 공급 위주의 물 공급정책과 높은 누수율 등에 따른 물 수요량이 늘어나고 있어 이 같은 여러 가지 상황들은 제주도의 물 관리방식의 혁신을 더 이상 미룰 수 없는 여건이다.

우리 도는 이러한 제주도의 발생하고 있는 복잡하고 다양한 물 문제들을 해결해 나가기 위해서 지하수 보전·관리 정책 등을 추진해 나가고 있다.

우선 지난해 10월에 제주지하수연구센터를 설립하여 지하수의 기초적인 연구와 종합적이고 체계적인 지하수 연구·관리 수행과 개별 행정정책들에 대해 세밀하고 정확한 조정으로 현장에서 실천할 수 있는 지하수 보전관리를 위한 조사·연구와 정책개발을 집중하여 추진하고 있다.

또한, 제주연구센터와 함께 물관리 패러다임을 「수량 공급 위주의 전통적 관리」에서 「기후변화 적응형 통합 물 관리」로 전환하여 물 환경을 건전하고 지속 이용 가능한 환경으로의 재건을 통해 도민이 만족하는 물 복

지 실현을 위한 『제주형 통합 물 관리 기본계획』 수립을 추진하고 있다.

기본계획이 수립되는 2022년 10월까지 안정적인 물 확보를 위해 용수 공급·관리체계 개선, 대체 수자원 활용 확대와 수자원 배분·이용원칙 정립, 지속 가능한 수자원 관리를 위한 수질개선 및 오염저감 방안을 마련할 계획이다.

제주도의 지하수 원수대금은 용도별 1톤당 단가는 평균 345원(가정용 128원, 영업용 318원, 골프장용 563원)으로 상수도 대비 지하수의 부과단가는 11~25%에 불과하여 상수도에 비하여 저렴한 지하수 사용요금으로 지하수 사용을 선호하고 있으며, 농업용수 정액요금제로 무분별한 사용이 이루어지고 있어 지하수 낭비 요인이 되고 있는 실정으로 지하수 원수대금의 적정성 마련을 위한 지하수 원수대금 부과체계 개선을 추진하고 있다.

도내 지하수 관정 6,035공에 대해 매년 전수조사를 수행하여 오염방지 시설 개선, 장기 간 미사용 관정 원상복구, 유량계 교체가 필요한 시설은 지하수 이용량 원격검침 사업을 통해 실시간 지하수 이용량 관측을 통해 지하수 관련 정보를 정확하고 신속하게 도민에게 제공하고, 다양한 지하수 문제를 해결하기 위한 기초자료를 확보하여 지하수 자원을 체계적으로 관리해 나가고 있다.

청정한 제주지하수를 관리를 위해 지하수 수질관리 체계의 문제점을 파악하고 수자원 여건을 감안한 단계적 수질관리제도 정비를 위해 수질목표관리, 수질오염지역 중점관리, 수질전용 축적망 운영, 오염차단 그라우팅 사업, 체계적 오염원 관리 등 선제적 수질관리 제도를 마련하고 정책과제를 발굴해 나가고 있으며, 이에 따른 목표 설정과 목표 달성을 위한 정책적 지원체계를 수립해 선순환적인 지하수관리 제도를 만들어나가고 있다.

제주의 수자원에 대한 정책적인 관리 강화와 제주 물산업 육성을 위해 수자원의 지속 가능한 범위 안에서 최대한 효율적으로 활용하여 고부가가치화를 실현하고자 노력하고 있습니다. 천혜의 지하수를 이용한 삼다수 개발 및 용암해수산업단지를 조성하는 등 실질적인 물 산업 육성 정책을 추진하고 있다.

끝으로 지하수위, 이용량, 수질 변화에 근거하여 과학적인 유역별 총량관리를 실시하고 지속 가능한 수자원 이용 및 관리 기반을 공고히 하기 위한 법제도 개선과 조직 강화, 정보관리시스템 구축과 더불어 지속적인 지하수 보전관리 교육과 홍보를 실시하여 도내 물 사용 인식 및 문화 개선을 통해 미래 세대에게 전해줄 건강한 물 환경을 위해 지속이용 가능한 수자원 공급·관리 기반을 마련하여 도민이 만족하는 지속 가능한 물 복지 실현을 위해 최선을 노력을 다해야 한다.

제주지하수 발전방안에 대한 제언

소속: 한국지질자원연구원

성명: 하 규 철

제주도에서 지하수는 도민들의 관심과 애정이 집중된 중요한 한 부분이다. 일찍부터 지하수에 대하여는 꾸준한 조사와 연구가 진행되어 온 지역으로 그렇다 보니 어쩌면 제주의 지하수관리 인프라는 우리나라에서 가장 선진적, 또는 모범적인 곳으로 생각된다. 그러나, 최근 축산폐수의 무단방출, 가뭄시 가용한 지하수량 부족 등이 발생됨에 따라 여전히 해결해야할 숙제도 안고 있다. 또한, 기후변화와 인구증가, 지역 개발 등 환경변화에 대응하고 지속가능한 제주의 발전을 위해서 필요한 부분이 무엇인지 다시한번 점검하고, 미흡한 부분을 보완해 나가야 할 것이다.

첫째, 제주도가 구축해 놓은 좋은 지하수 관리 인프라와 제도를 잘 정착시키고, 물관리를 위해 수립된 다양한 계획들이 차질 없이 추진되기를 바란다. 또한, 지하수 관측망과 해수침투 관측망 확충과 여기로부터 수집된 자료들이 과학적인 분석을 거쳐서 수자원 개발과 정책에 활용될 수 있어야 한다.

둘째, 제주도의 컨트롤타워로서의 물관리 기능이 강화될 필요가 있다. 물관리를 어렵게 만드는 요인은 물과 관련된 수자원, 농축산업, 공업, 환경 등 다양한 이해 당사자들이 서로 엮여 있어 서로 다른 목소리를 내고 있기 때문이다. 이러한 다양한 의견들을 조율하고, 조정하는 리더십이 필요하다. 제주도에 물관리 주무부서외에 다양한 부서가 있는데, 이들 부서들이 서로 협력하여 합리적이고 시의적절한 정책수립과 집행이 되도록 해야 한다. 작년에 제주지하수연구센터가 발족이 되어 제주지하수에 대한 조사와 연구를 주관하고, 명실공히 제주도의 씽크탱크 역할을 할 것으로 기대되지만, 제주도가 지속적인 지원과 관심을 기울여 줘야 그 역할과 소임을 다할 수 있을 것이다.

셋째, 그동안 제주도에서 지하수인공함양, 해수침투, 수질오염 등 다양한 연구가 진행되었지만, 추가적으로 여전히 연구가 진행되어야 하는 부분도 있다. 지질구조와 지하수 부존특성 규명을 위해 3차원 수리지질 평가, 기후변화와 지하수계 영향 예측, 특히 해수면 상승에 따른 지하수에의 영향을 평가 및 대책수립이 필요하다. 수자원 관련 통계량의 신뢰성 향상과 시기별 지하수 이용량을 반영한 지하수 물수지 정교화도 지속적으로 이루어져야 할 것이다. 또한, 제주도 물순환 시스템에서의 잃어버린 고리로서 강설에 의한 함양량, 지하수 해저 유출지하수 평가 등 지속적인 조사와 연구에 투자할 필요가 있다.

마지막으로, 제주도에서 지하수의 중요성은 모두들 인식하고 있지만, 정작 전문인력은 부족한 형편이다. 제주대에서는 지하수 전문가를 교육하기 위한 전공교수나 커리큘럼도 없다. 즉, 전문인력을 양성하기 위한 시스템이 시급하게 마련될 필요가 있다. 그리고, 앞서 언급된 여러 가지를 추진하기 위해서는 무엇보다도 제주도민과 도정의 꾸준한 관심, 예산지원이 필요함을 강조한다.

제주도 지하수 발전 방향

소속: 한국환경정책·평가연구원

성명: 현 윤 정

지하수는 제주도의 주요 수원인 동시에 중요한 환경자원임. 따라서, 제주도 지하수의 자원·환경생태적 가치에 대한 정확한 이해를 바탕으로 지하수의 개발·이용과 수질, 생태계의 통합적 관리는 제주도의 지속가능발전에 필수적이라고 할 수 있음. 특히 기후변화가 극대화된 기후위기 시대에 인간과 자연이 함께 누리는 ‘공편익’의 관점에서 제주도 지하수 정책의 중장기적 발전방향을 다음과 같이 제안함.

첫째, 수량-수질-생태계 공편익에 따른 지하수 정책 추진이 필요함. 그동안 제주도 지하수 정책은 지하수의 이용 관리를 중심으로 추진되어 왔으며, 최근에 수질 오염문제가 대두되면서 지하수 수질관리를 효과적으로 하기 위한 조례를 제정하는 등 노력을 기울이고 있음. 반면, 지하수 수량, 수질의 영향을 받는 다양한 생태계(자연환경 자원 및 지역환경자원 등)의 보전을 위한 지하수 관리 정책은 미흡한 실정임. 제주도는 천지연 폭포, 정방폭포, 용천수 등 지하수와 관련된 다양한 환경자원을 보유하고 있는데 이들은 생태, 문화, 관광적으로 매우 가치있는 자산임 현윤정, 문현주 (2014), 한국환경정책·평가연구원, 지하수의 자원환경적 가치확립을 위한 기초연구 . 따라서, 지하수의 수량-수질-생태계 통합관리는 제주도의 환경자원 보전을 위해 추진해야할 정책방향임

둘째, 기후위기 대응력 강화를 위한 근본적 대책 마련을 위한 다목적 지하수 관리 추진이 필요함. 제주지역의 하천 통수량은 100년 빈도 홍수량을 수용 못하는 것으로 산정되어 극심한 집중호우 발생 시 홍수 피해가 우려됨에 따라 하천정비사업 등의 홍수 대책을 추진 중에 있음. 최근 외국에서는 강우를 지하에 충전하는 대수층함양 관리(Managed Aquifer Recharge; MAR)을 이용한 홍수 대응기술 개발을 적극 추진 중임. 이는 하천정비사업으로 인한 하천의 자연성 훼손의 우려가 없을 뿐 아니라, 홍수 뿐 아니라 가뭄 대책으로도 활용할 수 있는 친환경 재해관리기술이라고 할 수 있음 Geis, E. (2019), With floods and droughts increasing, communities take a new look at storing water underground, <https://ensia.com/features/groundwater-recharge-aquifer-water-storage/>. 검색일: 2021.3.7.

. 적극적인 MAR 기술 개발 및 제도적 지원을 통해 하천 중심의 내륙과는 수자원 여건이 다른 제주도에서 제주 맞춤형 다목적 치수대책을 추진할 수 있도록 함

셋째, 포스트 코로나 시대 그린뉴딜 정책은 제주도 지하수 정책 추진에 있어서도 반드시 고려해야 할 중요한 정책기조임. 특히 2050 탄소중립 달성을 위해서는 기존 물관리 정책의 혁신적 전환이 필요한데, 이를 구현하기 위한 것이 물(농업용수)-에너지-식량 넥서스 정책임. 관리되지 않는 농축산활동은 대기 중 탄소배출과 함께 수질 오염을 초래하고, 이는 곧 정수 및 하수처리비용과 에너지 사용을 증가시킴으로 추가적인 탄소배출이 발생함. 따라서 탄소중립을 효과적으로 달성하기 위해서는 물(농업용수)-에너지-식량의 넥서스를 통한 지하수, 농축산업 관리정책이 통합적으로 추진되어야 함. 제주도는 양분관리제, 총량관리제 등이 이미 조례로 제정되어 있어 지하

수 수질오염 관리를 위한 오염원 관리의 제도적 기반이 잘 마련되어 있음. 이제는 시범사업을 통해 직접 적용하고 점차 확대함으로써 깨끗하고 안전한 지하수 수질도 확보하고 탄소중립도 달성하는 데에 성공적인 그린뉴딜 사업모델을 구축할 것을 제안함

마지막으로, 지하수 정책을 효과적이고 발전적으로 추진하기 위해서는 실질적인 정책이행자인 도민들의 참여 협력에 기반한 거버넌스 구축이 필요함. 지하수의 공공성을 확보하기 위한 지하수 정책은 다양한 이해관계가 얽힐 수 있고 그로 인한 갈등이 발생할 수 있음. 지하수의 경우 공공기관에서 이용하기도 하지만, 개인사설시설로 이용하는 경우가 많기 때문에 도민들의 관심이 상당함. 도민들의 정책 참여 기회의 확대는 ‘공편익’의 관점에서 정책에 대한 이해도와 이행력을 제고할 수 있을 것임. 따라서, 민간 참여 협의체 확대 등을 통해 도민의 지하수 정책 참여를 지원하고 강화해야 할 것임

앞서 제안한 제주도 지하수의 발전 방향은 제주도의 지속가능발전을 위해 중장기적으로 추진해야 할 방향임. 각각 필요한 연구와 사업을 발굴하고 추진로드맵을 마련하여 체계적으로 추진하면 ‘청정 제주지하수’가 세계적으로 인정받는 지하수 관리의 대표 브랜드가 될 수 있을 것임

2021 세계 물의 날 기념
KIGAM-JRI 학술심포지엄
2021. 03. 18.