

2022년 세계 물의 날 기념 JRI-KIGAM 학술교류 세미나

발표자료집

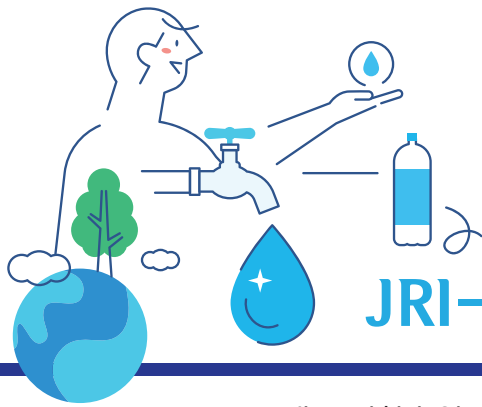
(제주 지하수의 지속이용 가능성을 위한 과학적 진단 및 관리방안 모색)

일시 2022년 3월 18일(금), 13:30 ~

장소 제주연구원 3층 대강당(윗세오름)

주최  제주연구원  한국지질자원연구원
Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

주관  제주지하수연구센터  용암해수센터
JEJU GROUNDWATER RESEARCH CENTER

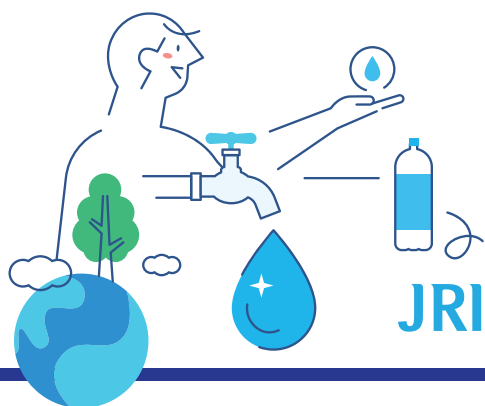


2022년 세계 물의 날 기념 JRI-KIGAM 학술교류 세미나

제주 지하수의 지속이용 가능성을 위한 과학적 진단 및 관리방안 모색

구 분	시 간	소요시간 (분)	주요 내 용
등록 및 개회	13:30 ~ 14:00	30	○ 등록
	14:00 ~ 14:30	30	○ 개회 - 개회 및 참석자 소개, 국민의례 - 개회사(제주연구원장), 환영사(한국지질자원연구원부원장) - 축사(도의회 환경도시위원장) - 기념사진 촬영
기조 강연	14:30 ~ 15:10	40	○ 기조강연(우남철 교수, 연세대학교) - 제주 지하수의 지속가능성
휴식	15:10 ~ 15:20	10	Break time
주제 발표	15:00 ~ 16:40	25	○ 김용철(한국지질자원연구원) - 해안지역 담-염수 경계면 모니터링 방법 비교연구: 제주 동부지역 사례
		25	○ 김기주(제주TP 용암해수센터) - 염지하수의 지속이용을 위한 연구 방안 모색
		25	○ 신우식(제주연구원 제주지하수연구센터) - 다심도 관측자료를 이용한 동부지역 담-염수경계 특성 변화
		25	○ 김지명(제주연구원 제주지하수연구센터) - 기후변화에 따른 제주 지하수위 변동 특성
휴식	16:40 ~ 16:50	10	Break time
지정 토론	16:50 ~ 17:50	60	○ 종합토론 - 좌장 • 김태운 상임의장(제주특별자치도 지속가능발전협의회) - 토론자 • 박남식 교수(동아대학교) • 장선우 수석연구원(한국건설기술연구원) • 서상기 본부장(한국농어촌공사 제주지역본부) • 이영웅 사무처장(제주환경운동연합)
폐회	17:50 ~	-	폐회

※ 상기 일정은 진행 상황에 따라 변경 가능

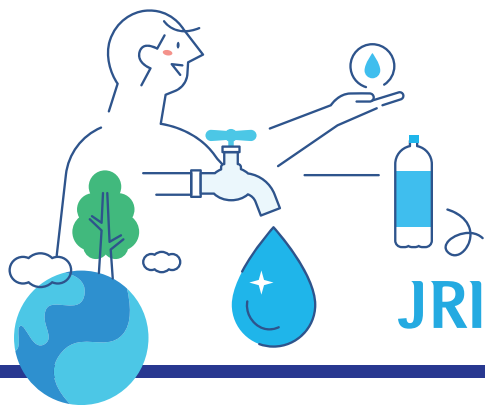


2022년 세계 물의 날 기념 JRI-KIGAM 학술교류 세미나

제주 지하수의 지속이용 가능성을 위한 과학적 진단 및 관리방안 모색

발표순서

1. 해안지역 담-염수 경계면 모니터링 방법 비교연구 : 제주 동부지역 사례 5
2. 염지하수의 지속이용을 위한 연구 방안 모색 23
3. 다심도 관측자료를 이용한 동부지역 담-염수경계 특성 변화 37
4. 기후변화에 따른 제주 지하수위 변동 특성 55

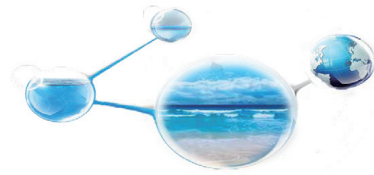


2022년 세계 물의 날 기념 JRI-KIGAM 학술교류 세미나

제주 지하수의 지속이용 가능성을 위한 과학적 진단 및 관리방안 모색

해안지역 담-염수 경계면 모니터링 방법 비교연구: 제주 동부지역 사례

김용철 한국지질자원연구원 지하수환경연구센터



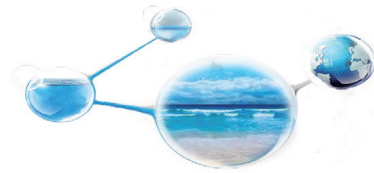
해안지역 담-염수 경계면 모니터링 방법 비교연구: 제주 동부지역 사례

김용철

윤희성, 정병주, 이수형

한국지질자원연구원
기후변화대응연구본부
지하수환경연구센터

KIGAM Korea Institute of Geoscience
and Mineral Resources



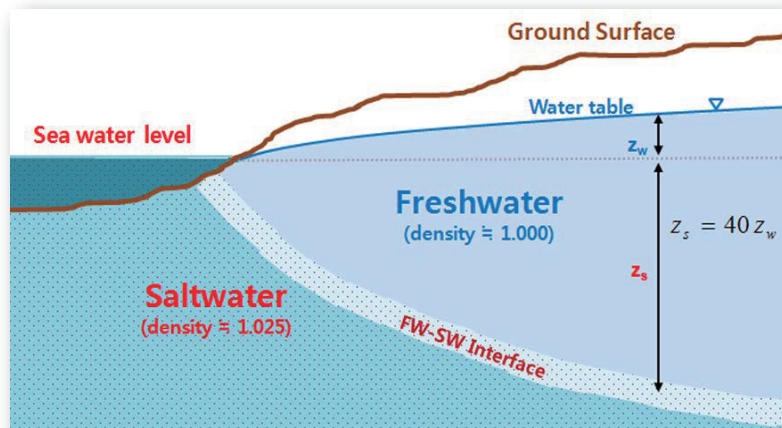
What is the Freshwater-Salt Water Interface?



KIGAM Korea Institute of Geoscience
and Mineral Resources

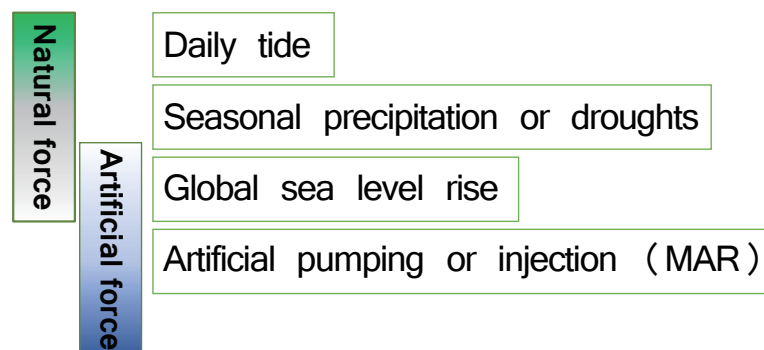
Freshwater-Saltwater Interface in Nature

- The less dense freshwater rises up over the more dense seawater
- The interface could be moderately sharp or most often diffuse



Dynamics of FW-SW Interface

Major Driving Forces

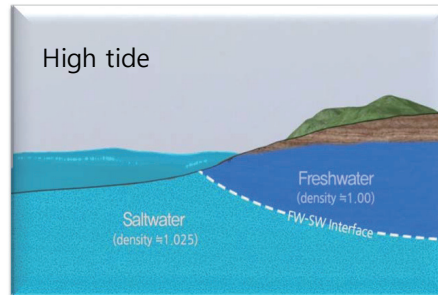


Tide

Ocean tide
by the Moon & the Sun

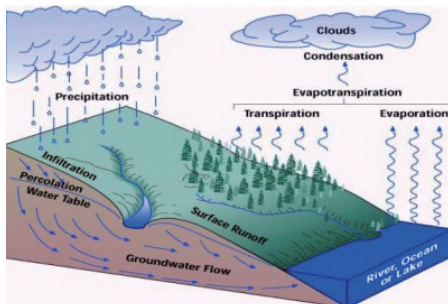


Interface moves down at low tide
& moves up at high tide

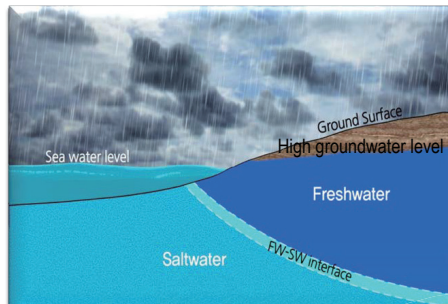


Groundwater recharge

Recharge of water
from precipitation, snow and ice



Water table rises pushing the interface
seaward with groundwater recharge

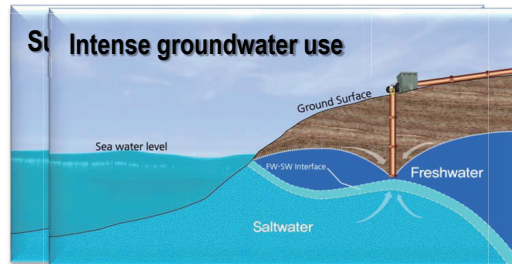


(source:
[http://www.spokaneaquifer.org/aquifer/
what-is-groundwater/](http://www.spokaneaquifer.org/aquifer/what-is-groundwater/))

Groundwater Abstraction

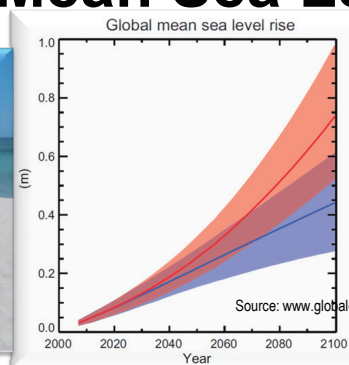


Photo by California Department of Water Resources

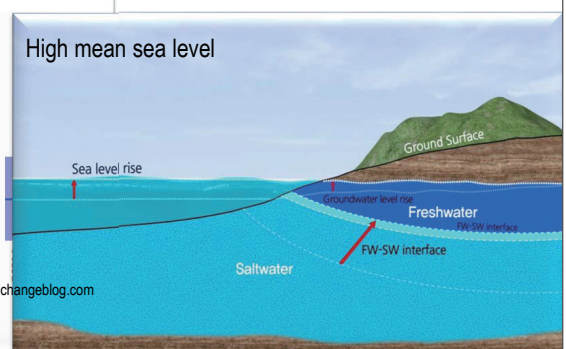


- Intense groundwater pumping causes saltwater intrusion
- Saltwater intrusion diminishes the groundwater resource

Global Mean Sea Level Rise



(source: IPCC 5th Report, 2013)



Several centimeters of mean sea level rise

Could bring the interface into play several kilometers inland

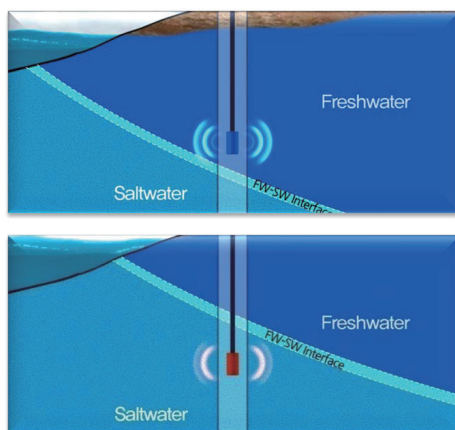
Global mean sea level is projected to rise by 0.2 ~ 1.0 m in 2100

Global mean sea level is projected to rise by 0.2 ~ 1.0 m in 2100

Monitoring methods for Freshwater-salt water interface

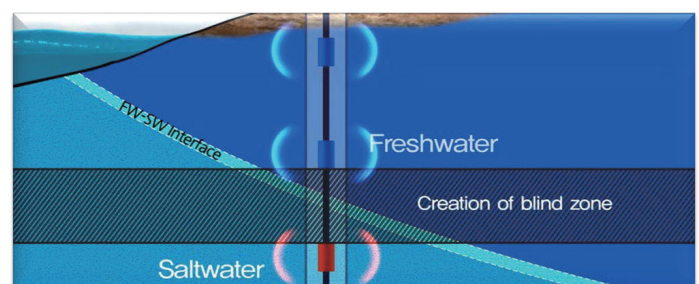


Single Sensor Method



- Only provides information as to whether the interface is somewhere above or below the sensor

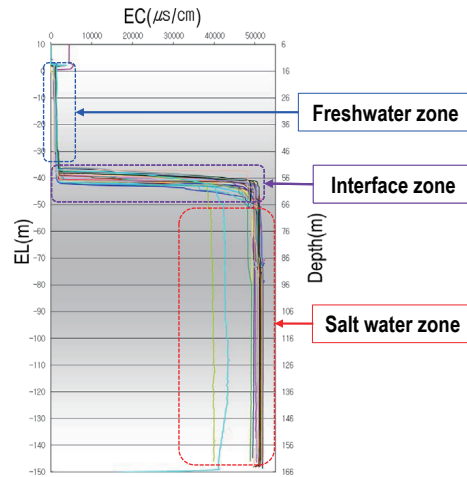
Multi-sensor method



- Data gaps or blind zones still exist between sensors
- Adding more sensors becomes problematic from a cost point of view

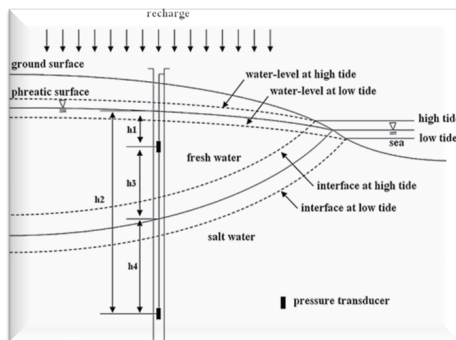
Geophysical logging

- It provides the exact location and width of the interface
- But, info like snapshot in time
- Repeated logging is not practical in time, cost and man power



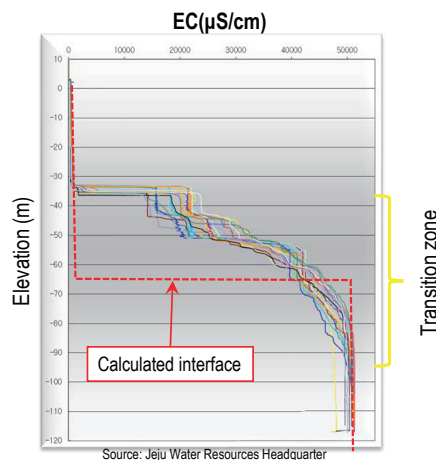
Indirect method

Two fixed sensors, one in the freshwater and the other in the salt water zone
- Assumption of sharp interface

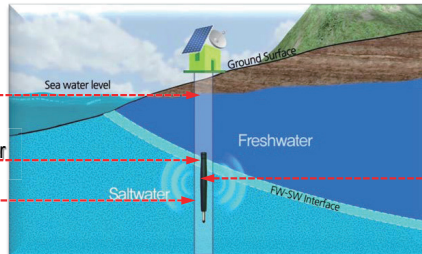
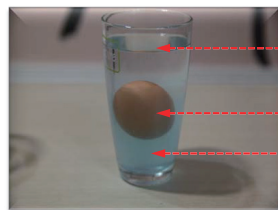


Ground Water
Volume 45, Issue 6, pages 723-728, 5 JUL 2007 DOI: 10.1111/j.1745-6584.2007.00349.x
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1745-6584.2007.00349.x/full#1>

But, diffuse interface is much more common in real field setting



Floating egg vs Interface tracker



- Density difference btw freshwater and saltwater is small, 0.025 kg/L.
- This density range seems rather small to cut into, but it is designed to provide the necessary fine density adjustments needed

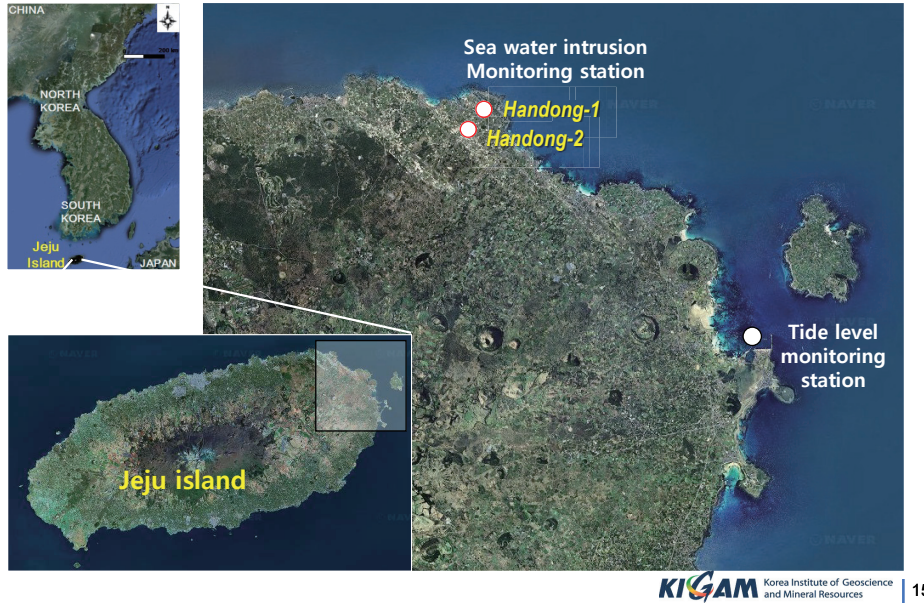


- ✓ Simple
- ✓ Buoyancy adjustable
- ✓ Actual interface location
- ✓ Real time monitoring
- ✓ Accurate and cost effective
- ✓ Ideal for early warning of SWI

Comparative case study of coastal aquifer monitoring at eastern Jeju

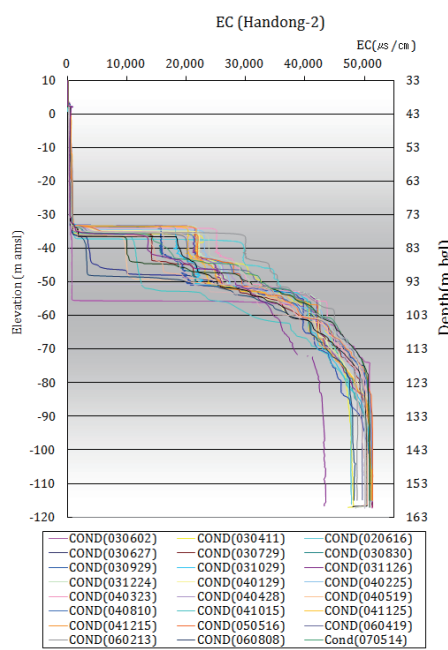
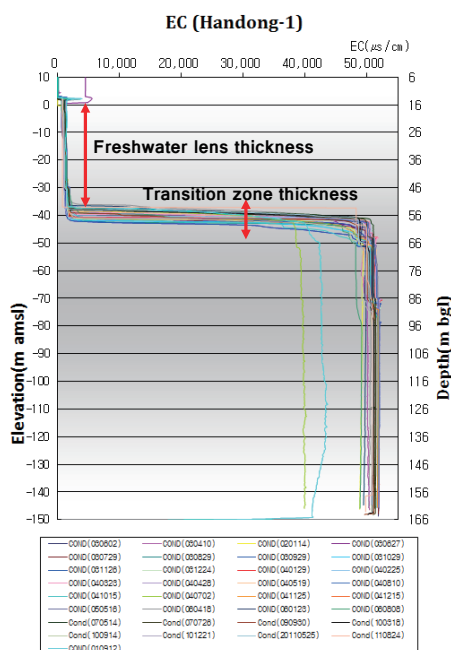


Location of demonstration site



15

Geophysical logging method

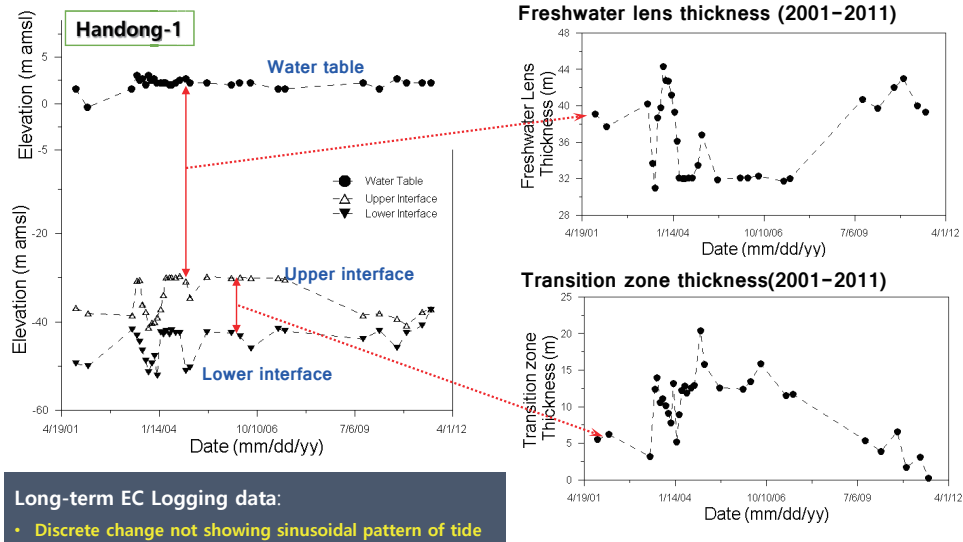


EC logging data

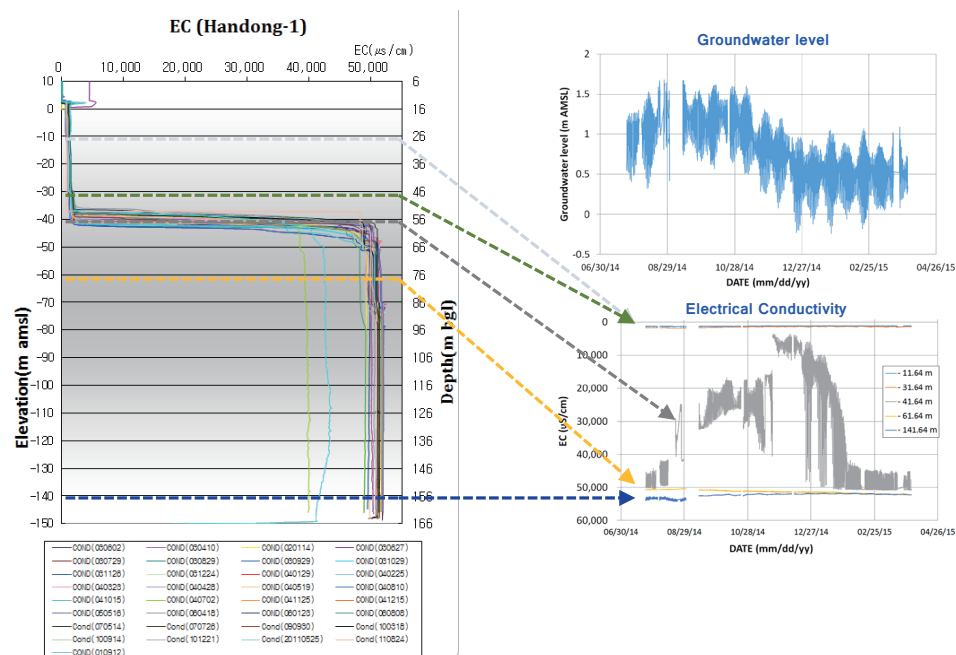
(from Jeju Water Resources Headquarter)

- Period: 2001–2011
- Logging : 30 times (HD-1), 24 times (HD-2)
- Snapshot of vertical profile at a specific time
- Exact location of water table/upper and lower interface boundaries
- Temporal change can be known only when comparing with previous data

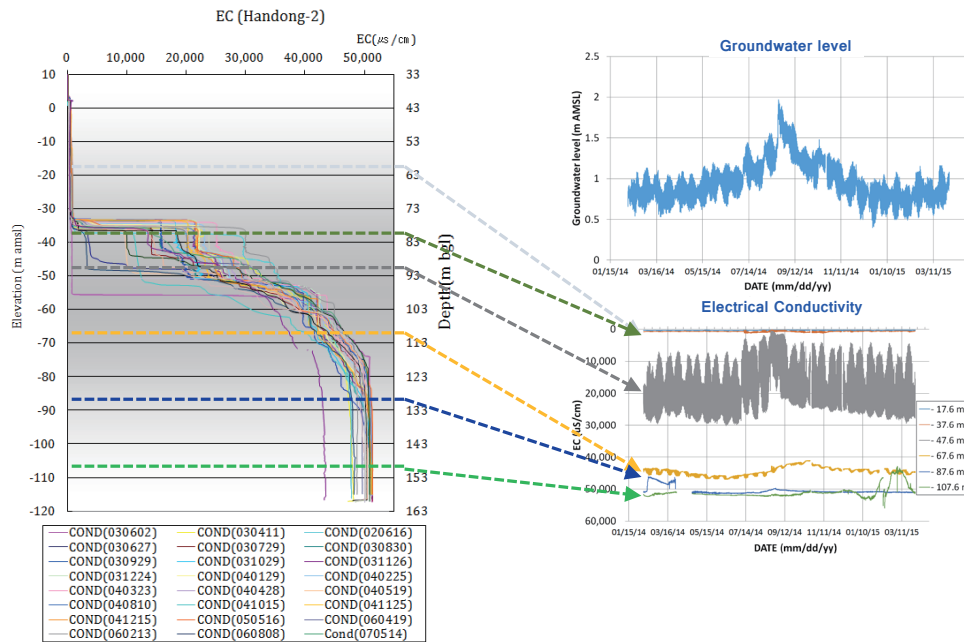
Geophysical logging method



Multi-depth measuring method (HD-1)

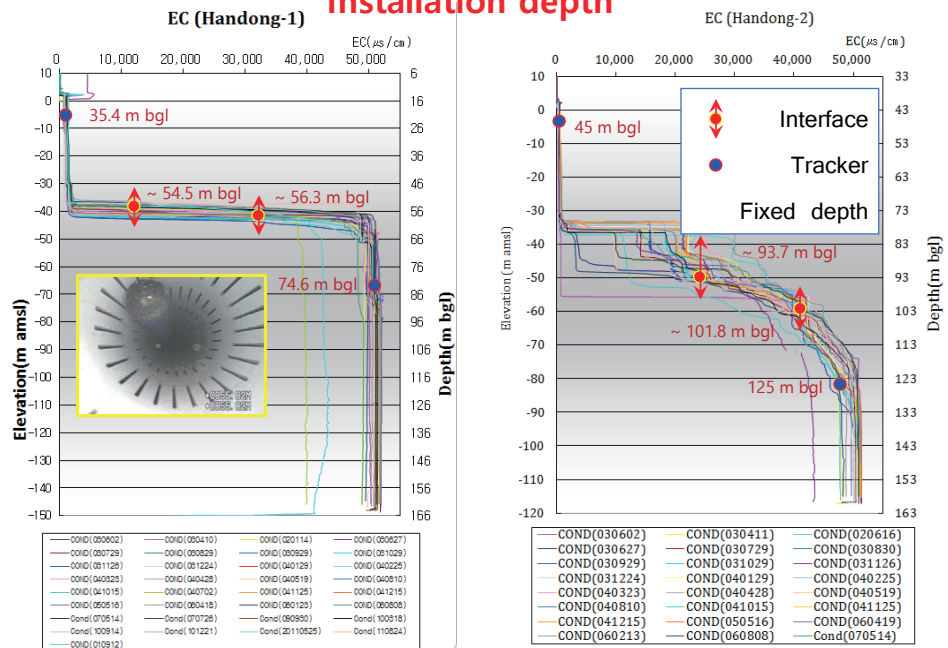


Multi-depth measuring method (HD-2)



Monitoring method using “Interface Tracker” probe:

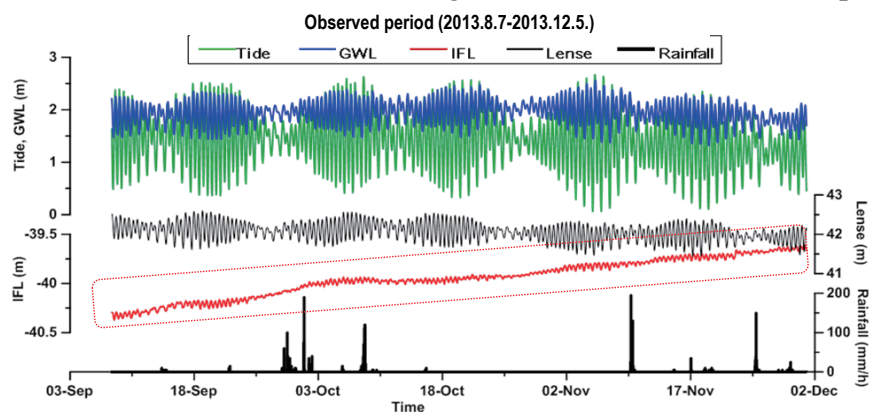
Installation depth



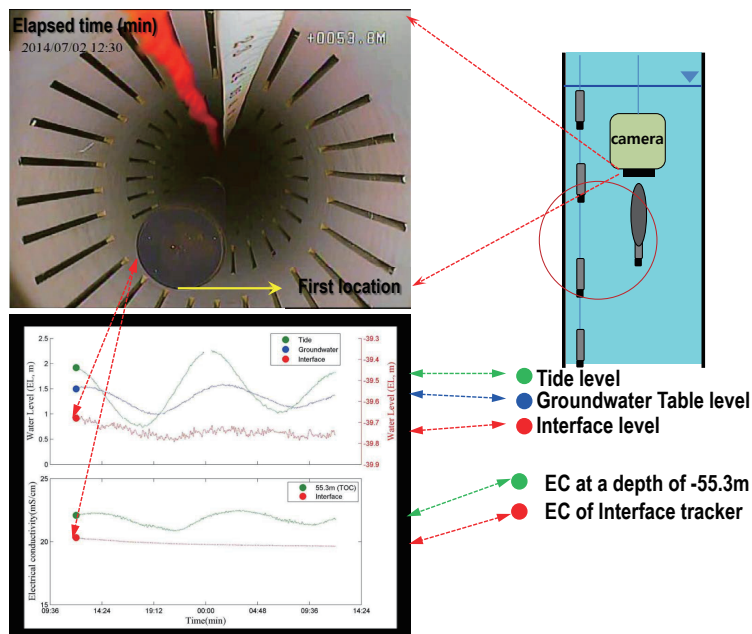
Field Demonstration of Interface Tracker

- HD1, Jeju

First time series data ever showing actual FW/SW interface depths!!!



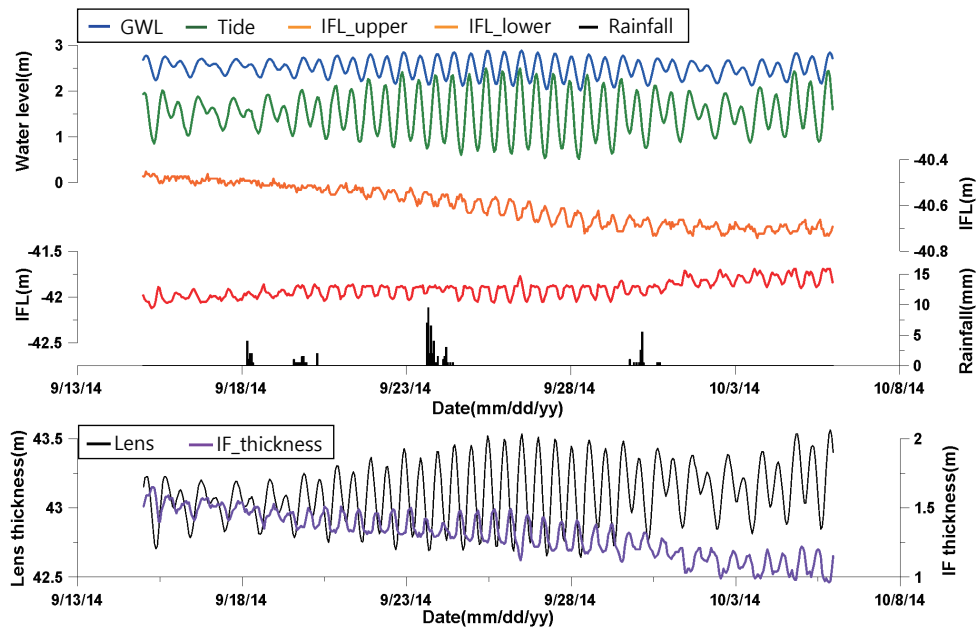
Real Time Data and Images



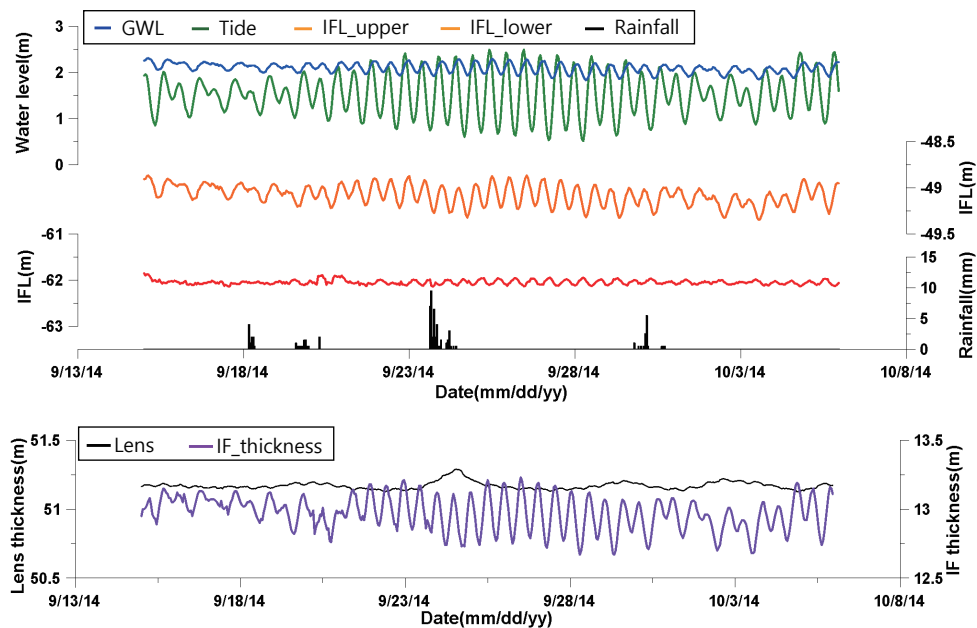
The video shows clearly that the interface tracker is following real-time fluctuations of interface

The interface tracker is proven to act as a constant-density tracker

Monitoring method using “Interface Tracker” probe (HD-1)

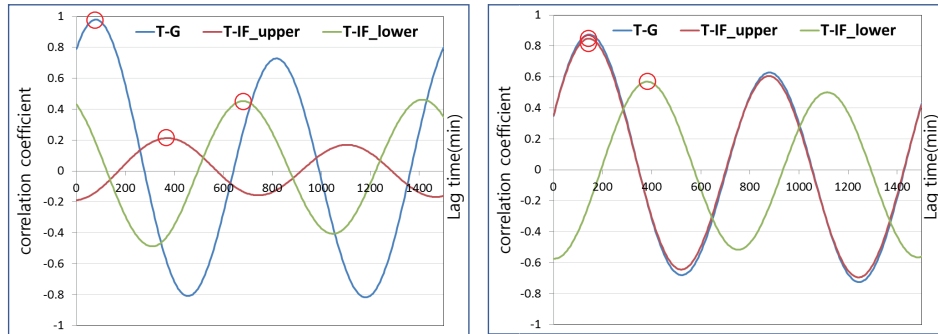


Monitoring method using “Interface Tracker” probe (HD-2)



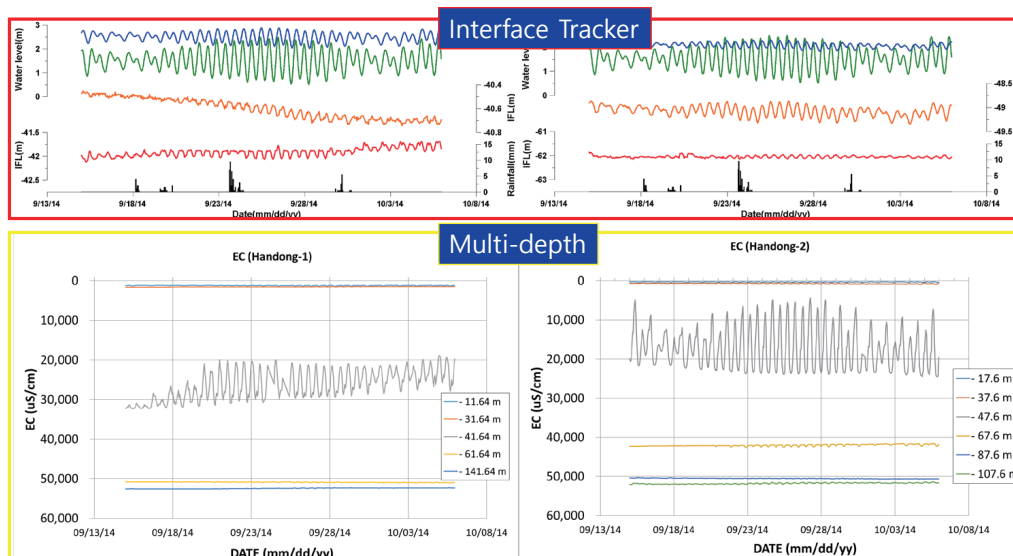
Monitoring method using “Interface Tracker” probe :

Cross Correlation Analysis

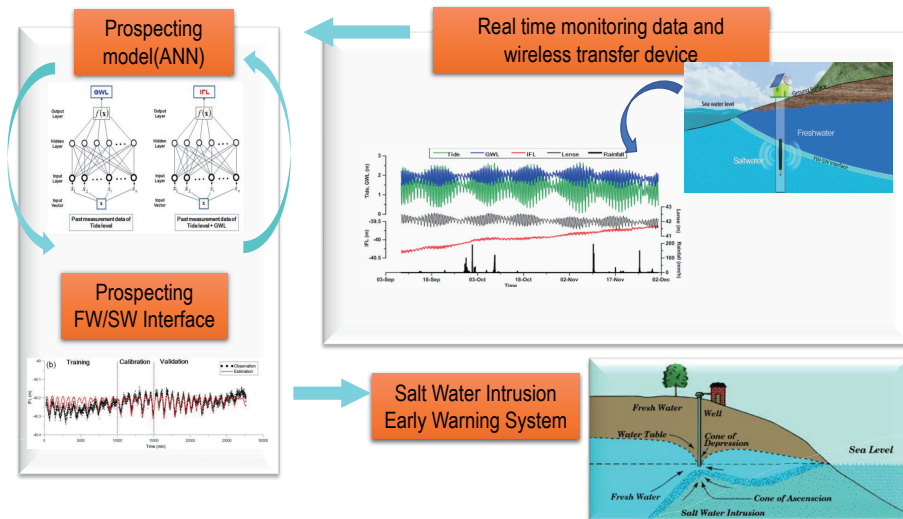


Station	HD-1	HD-2
Tide-GWL	80min (0.98)	145min (0.87)
Tide-IF_upper	370min (0.21)	145min (0.85)
Tide-IF_lower	680min (0.45)	380min (0.57)

Comparison btw multi-depth vs interface Tracker



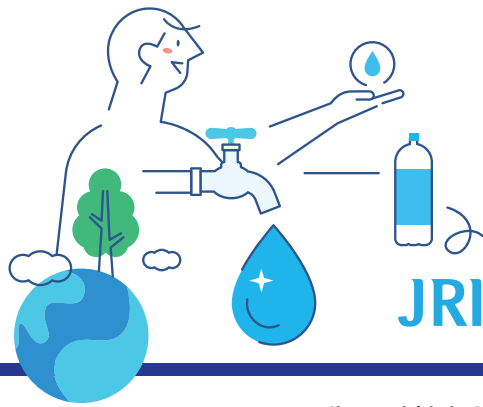
Potential Configuration of Early Warning System for Salt Water Intrusion



Conclusions

- Various methods are used to monitor fw-sw interface at two coastal observation wells in Jeju
- Comparative study shows that Interface Tracker can be a good method for temporal monitoring fw-sw interface
- Temporal change in the thickness of the freshwater lens and the transition zone can be calculated using a combination of another interface Tracker and depth-fixed sensors
- It can be utilized as an early warning system for saltwater intrusion and/or freshwater decline when the probe is integrated with a predictive numerical model and a remote communication technology

감사합니다.



2022년 세계 물의 날 기념 JRI-KIGAM 학술교류 세미나

제주 지하수의 지속이용 가능성을 위한 과학적 진단 및 관리방안 모색

염지하수의 지속적 이용을 위한 연구방안 모색

김기주 제주TP 용암해수센터

염지하수의 지속적 이용을 위한 연구방안 모색



2022. 3. 18.

김 기 주

JTP 제주테크노파크
JEJU TECHNOPARK

I. 제주의 지하수

수문지질 특성

형성연대가 젊은 화산섬

다공질 용암



- 제주도 화산활동 : 1.9 ~ 0.01 Ma
- 10만년 이내의 젊은 연대 용암류 노출

높은 강수량

다우지역



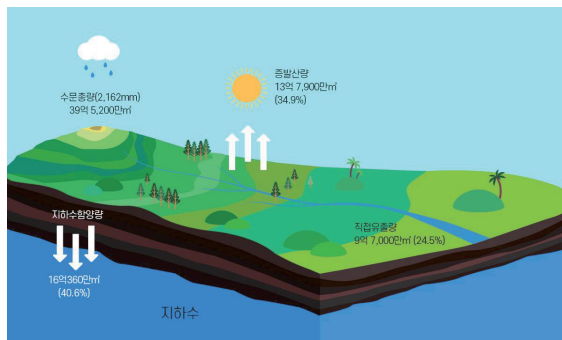
- 30년간 연평균 강수량은 1,144.4~1,963.1mm 범위

부존 특성

다공성 화산암 분포



- 지하수위별 분포특성



자료 : 제주특별자치도 수자원관리종합계획 2018

지하수 함양률

제주특별자치도 40.5%

우리나라 내륙 평균 14.4%

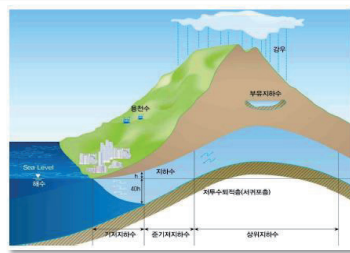
일본 오키나와(석회암) 5%

하와이주 오아후섬(화산암) 36.4%

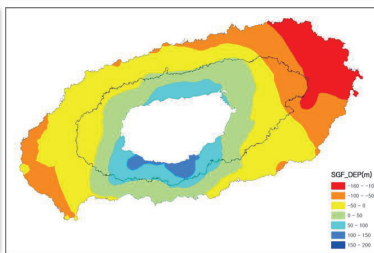
괌(석회암/화산암) 39%

테네리페섬(화산암) 32.5%

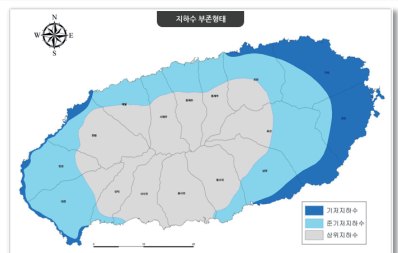
I. 제주의 지하수



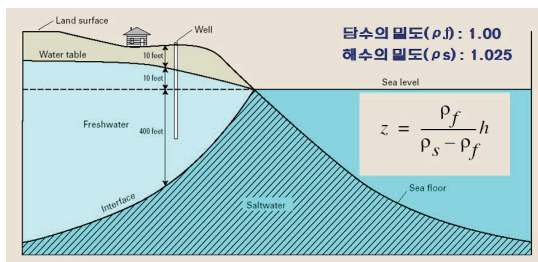
✓ Groundwater level distribution



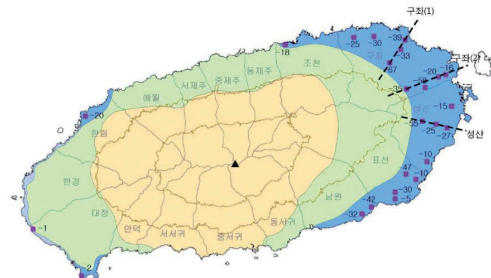
✓ Distribution Characteristics of Underground Lipids



✓ Relationship between freshwater and sea water



✓ 담수의 밀도는 1.000 g/cm³ 이고, 해수의 밀도는 1.025 g/cm³
✓ Z = 40. hf(G-H Ratio)



✓ 동부지역의 담수렌즈의 G-H비는
최소 1:13, 최대 1:31, 평균 1:19

II. 용수 공급체계 다변화

지속적인 외부환경 변화로 지하수관리체계 변화 가속화



II. 용수 공급체계 다변화

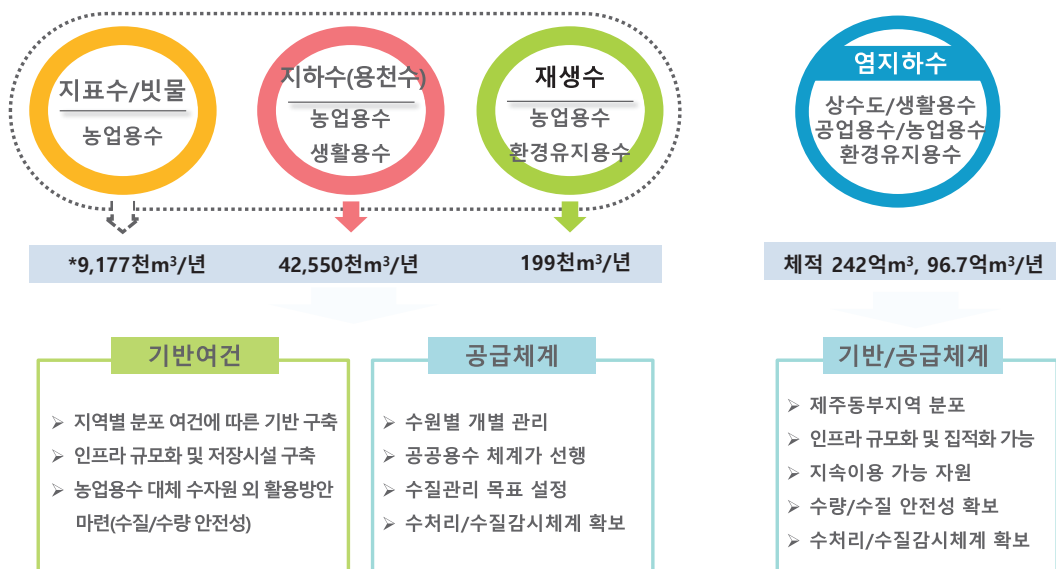
기후 및 토지이용 변화에 따른 지속 이용 가능량 감소에 적응 가능한 체계 전환



지하수 의존 용수공급체계에서 염지하수 담수화 및 활용에 대한 장기적 검토가 필요한 시점

II. 용수 공급체계 다변화

제주 지하수의 지속 이용 가능량 감소에 적응 가능한 용수 공급체계 다변화 모색



III. 염지하수 활용

수자원다원화에 따른 염지하수 활용 증가 및 수자원 가치 변화

수자원의 다원화 방안으로 염수 ⇒ 해양심층수, 염지하수
 해수담수화 기술 발전에 따른 염지하수 활용도 증가
 (시장변화) 소비자(국민)의 니즈에 기반한 가치 변화



III. 염지하수 활용

제주 지하수 공급 체계 다변화



제주 물산업 경쟁력 강화

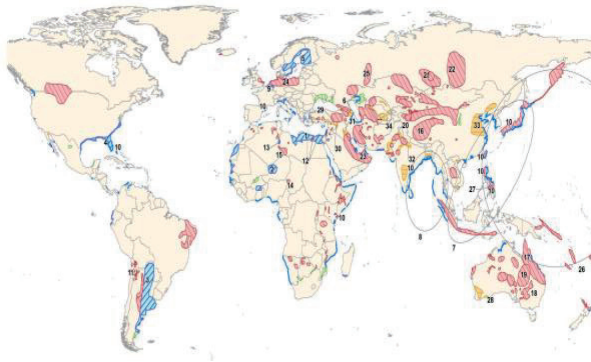
환경보존, 유일한 식수 **공공재** 소비자 니즈에 기반한 가치 **경제제 활용**



Water value
• 제주 지역에서만 취수 할 수 있는 유일한 자원 (부존형태, 특별법에 의한 독점성) • 화산암반수와 해수유용미네랄의 복합적 특성 보유
Needs
• 제주도의 친환경에 대한 높은 인지도 • 건강에 대한 소비자 관심 증대 • 프리미엄 기능성 물에 대한 니즈 증대
Value change
• 전후방 연관산업 육성 • 수요 분야 활용 다각화 • 지역산업 연계 적합성

III. 염지하수 활용

염지하수는 전 세계에 분포하고 있으나, 해양 및 육상기원 염지하수 형태로 분포



(출처 : Weet F. V., 2012, Saline and Brackish Groundwater at Shallow and Intermediate Depths: Genesis and World-Wide Occurrence, IAH 2012 Congress)

■ 해양기원 ■ 육상기원 ■ 인위적 기원 ■ 혼합기원

국내 염지하수 활용(해수담수화)

- ▶ 생활용수 확보를 위한 해수담수화 운영 사례
 - 수도권(용진군) 1개소 (200m³/일)
 - 충남(보령시) 14개소 (915m³/일)
 - 전북(군산시) 7개소 (360m³/일)
 - 전남(여수시,신안군) 6개소 (640m³/일)

산업적 활용 사례

- ▶ 해양치유분야
 - 완도 해양치유센터 건립(건설 중, ~'22)
 - 울진 해양치유센터 건립(건설 예정, ~'24)
 - 해양치유자원에 관한 법률 공포('22.01.04)
- ▶ 염지하수 미네랄 활용 제품화(울진)
 - 미네랄 활용 항염, 면역 개선 음료(아리바이오)

염지하수는 수량/수질 안정성 미확보, 대규모 수자원 확보 및 산업화 한계

III. 염지하수 활용

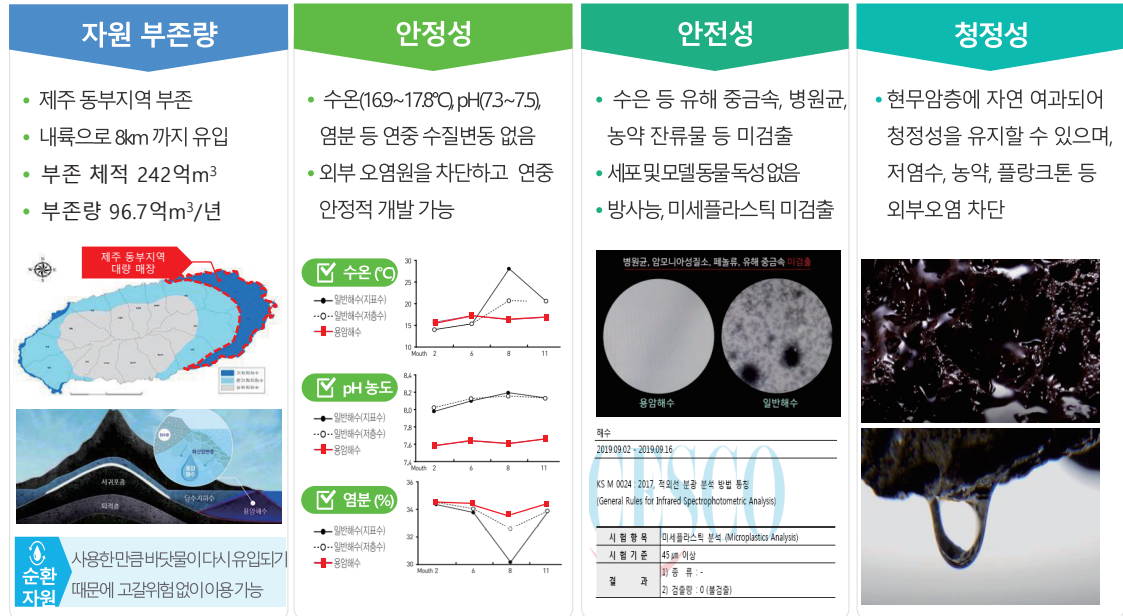
해수담수화 수처리

시설 현황	물생산 단가	해수담수화 운영 문제점
<중·대규모> 10,000m³/d 초과 3개소 - (정부) 부산 기장, 대산산업, (민간)포스코 1,000m³/d ~10,000m³/d - (민간) 현대석유, 삼성 SDI <소규모> 1,000m³/d 미만 109개소 - 2018년 11월 기준 8,333m³/d, 도서지역 - 소규모 시설 81%, 100m³/d 미만 - (지자체) 74개, 공사 35개, 위탁 5개	2016년 이전에 물 생산단가는 평균 1~1.3 US\$/m³ 수준 - 최근 0.5 US\$/m³ 수준으로 대폭 하락 - 에너지 효율 증가 - MSF9(증발식) 방식 9~25kWh/m³ - MED(다단효율)방식 kWh/m³ - RO 방식 3kWh/m³ → 2kWh/m³ - 분리막 개발 및 가격 가성비 향상 - 고성능 RO 분리막 개발	에너지 효율 - 수처리 방식 중 에너지 효율이 높지만 고에너지 한계 극복 필요 유지보수비용 - 고가 분리막/염분에 따른 장비 부식 - 운영에 따른 유지보수비용 절감 필요 농축수 배출 - 농축수에 대해 바닷물과 희석하여 배출 - 해양환경문제 야기/저감 방안 필요
표층해수	해양심층수	염지하수(용암해수)
- 취수구조물 10억이상의 설치비 - 외부 환경요인에 의한 유지보수비용 - 다층여과(모래 등), UF, MF, 물리/화학적 전처리 설비 필요 - 10억 내외의 설치비용 발생 - 역삼투압 반투막 교체 주기 2년 - SDI 3이하 적용을 위한 다단 전처리 막사용 - 계절별 수온 변동성에 의한 운전효율 감소 - 고압펌프 운전 조건 변동/운전효율 감소	- 특수목적용 플랜트 150억내외 설치비 - 외부 환경요인에 의한 유지보수비용 10억/년 - 다층여과(모래 등), UF, MF, 물리/화학적 전처리 설비 필요 - 10억 내외의 설치비용 발생 - 역삼투압 반투막 교체 주기 2년 - SDI 3이하 적용을 위한 다단 전처리 막사용 - 낮은 수온에 의한 운전효율 감소 - 고압펌프 운전 조건 변동/운전효율 감소	- 지하수관정 굴착 15억원 - 유지보수비용 절감 - 전처리 설비 불필요 - 역삼투압 반투막 교체 주기 5년 - 전처리 없이 SDI 1.5이하 - 일정 수온에 의한 효율 증가 - 고압펌프 일정 운전 조건
		취수 경쟁력 ↑ 전처리 불필요 유지비용 절감 운영효율 ↑

※ 해수담수화 시설 처리용량 1,000톤/일 규모

IV. 염지하수 특성

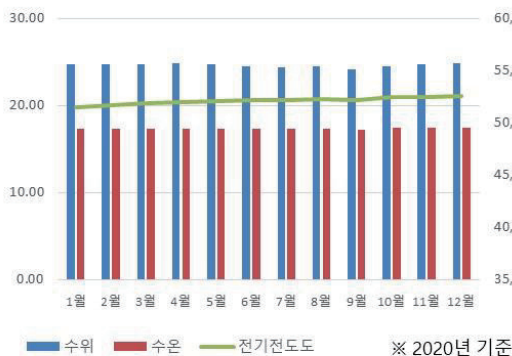
산업적 활용 가치가 높은 자원



IV. 염지하수 특성

Physical properties

	Temperature (°C)	pH	Electrical conductivity (mS/cm)	Salinity (%)
Mean	17.3	7.5	51.78	34.5
S.D.	0.4	0.2	0.71	0.5
Max	17.8	7.7	52.63	35.0
Min	16.9	7.3	50.91	33.8



- 대상: 제주용암해수일반산업단지
- 염지하수관리구역 지정(고시번호 2014-57)
- 「먹는 물 관리법」 염지하수관리구역 지정을 통한 관리
- * 시행령 제3조의3 염지하수관리구역의 지정고시 등
- 총면적: 196,341m²
- 취수관정 4개공, 관측관정 2개공



IV. 염지하수 특성

Analytical results for water quality criteria (for recent 3 years)

➤ microorganism 8 Items

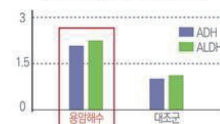
Items		Water Quality Criteria	2019 First-half	2019 second-half	2020 First-half	2020 second-half	2021 First-half
General bacteria	Psychrophilic Bacteria	<20 CFU/mL	ND	ND	ND	ND	ND
	Mesophilic bacteria	<5 CFU/mL	ND	ND	ND	ND	ND
Total coliform		BDL/250 mL	ND	ND	ND	ND	ND
Fecal streptococci		BDL/250 mL	ND	ND	ND	ND	ND
Pseudomonas aeruginosa		BDL/250 mL	ND	ND	ND	ND	ND
Salmonella		BDL/250 mL	ND	ND	ND	ND	ND
Shigella		BDL/250 mL	ND	ND	ND	ND	ND
Clostridium perfringens		BDL/50 mL	ND	ND	ND	ND	ND

ND : Not detected

IV. 염지하수 특성

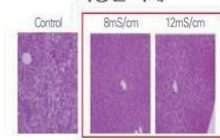
용암해수 생리활성

ADH 및 ALDH 활성증가



알코올분해효소 활성에 미치는 영향 실험

지방간 억제



고지방식이 유도된 C57BL/6J 마우스 대사증후군 모델의 용암해수 효능 실험

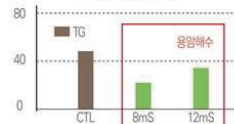
항산화 효소 활성 증진



항산화효소 활성에 미치는 영향 실험

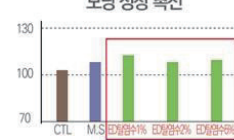
※ 한국생명공학연구원 및 제주대학교 의과대학 공동연구 결과

중성지방 감소



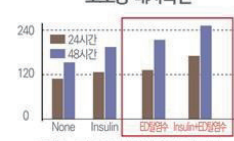
용암해수 및 고지방식 육성 마우스의 혈액 내 중성지방 비교분석

모낭 성장 촉진



모낭주기 조절세포 (dorsal papilla cell) 증식에 미치는 영향 실험

포도당 대사 촉진



포도당 흡수 및 인슐린 수용체 의존성 신호전달에 미치는 영향 실험

Desalinated underground seawater of Jeju Island (Korea) improves lipid metabolism in mice fed diets containing high fat and increases antioxidant potential in t-BHP treated HepG2 cells. *Nutr Res Pract* 4(1), 3-10 (2010). Jung-Ran Noh *et al*
간 지방생성에 대한 억제 효과, 세포손상에 대한 보호 효과

제주 용암해수의 배양액 첨가가 L6 근육세포 포도당 수송 활성에 미치는 영향. *J Med. Life Sci.* 6(1), 23-28 (2017).

골격근육으로의 포도당 흡수를 자극하여 혈중 포도당 농도를 낮추는데 기여

Beneficial effects of desalinated Magma Seawater in ameliorating Thioacetamide-induced chronic hepatotoxicity. *Biotechnology and Bioprocess Engineering* 24, 126-134 (2019). Hyunjo Lee *et al*.
간독성 유도 동물모델에서 용암해수의 간 독성 개선 효능 확인

Magma seawater inhibits hepatic lipid accumulation through suppression of lipogenic enzymes regulated by SREBPs in thioacetamide-injected rats. *Marine drugs* 17(6), 317 (2019). Minji Woo *et al*.

용암해수가 간 지질 대사에 미치는 영향 조사 → 지질생성 효소 억제

Mineral-rich Jeju lava sea water suppresses lipid accumulation in 3T3-L1 adipocytes and ameliorates high-fat diet-induced obesity in C57BL/6J mice. *Food Sci Biotechnol* 30, 299-304 (2021). Hyun, Y.J. *et al*.

지방세포의 지질축적 억제에 따른 항비만 효과

IV. 염지하수 특성

용암해수 안전성 연구

2008년 한국생명공학연구원 안전성 연구

Weight change due to repeated administration of lava water using ICR mouse

group (administ- ration)	Dose ml/time /day	M/F	death rate	Weight(g)				
				0 day	1 day	3 day	7 day	14 day
Lava seawater(>5)	700	-	0/10*	31.2±1.6	31.9±1.9	32.2±1.2	33.8±1.5	35.2±2.1
Lava seawater	700	-	0/10	29.7±1.1	30.2±1.5	31.8±0.8	33.2±1.2	34.9±1.4
Lava seawater	700	-	0/10	30.5±1.5	31.1±1.2	32.0±1.5	34.1±0.9	35.8±1.7
Control group	700	M	0/10*	34.1±1.0*	34.5±1.4	37.4±1.2	38.3±1.4	41.0±1.0
		F	0/10	26.8±1.0	27.0±1.4	29.5±1.3	31.1±1.4	33.6±1.2
Lava seawater (8 ml/cm)	700	M	0/10	36.7±1.4	37.2±1.7	37.8±1.6	38.9±2.0	40.6±1.1
		F	0/10	29.8±1.6	29.7±1.2	29.6±1.5	30.2±1.3	32.6±1.3
Lava seawater (12 ml/cm)	700	M	0/10	36.3±1.5	36.1±1.4	37.0±1.6	38.4±1.4	41.1±1.5
		F	0/10*	31.0±1.7	31.1±1.5	31.6±1.4	32.2±1.9	33.6±1.1

- ✓ 반복투여 & 급성독성 없음
- AST, ALT, blood urea nitrogen (BUN), creatinine kinase (CK) 등이 정상
- ✓ 피부자극 독성 없음
- ✓ 복귀 돌연변이 없음
- ✓ 체외염색체 이상 없음
- ✓ 소핵시험 - 골수세포의 소핵유발 없음
- ✓ 다회 경구 투여를 통한 독성 없음

2016년 고려대학교 건강기능식품연구센터 식품 안전성 평가

다회 경구 투여 시험의 각 군별 최종 몸무게 평균

Mean ± SD	Control	8 ml/kg	14 ml/kg	20 ml/kg
Female				
Initial weight (g)	27.86 ± 0.62	27.86 ± 0.61	27.84 ± 0.53	27.84 ± 0.53
Final weight (g)	31.44 ± 0.57	30.37 ± 0.62	30.35 ± 0.59	30.27 ± 0.69
Body weight gain (%)	12.93 ± 1.58	9.77 ± 0.69	9.03 ± 1.24	8.69 ± 1.19
Food Intake (g/day)	4.35 ± 0.66	4.05 ± 0.58	3.92 ± 0.51	3.94 ± 0.77
Male				
Initial weight (g)	32.96 ± 0.48	33.02 ± 0.52	33.00 ± 0.63	33.00 ± 0.53
Final weight (g)	37.18 ± 0.90	35.82 ± 1.55	36.58 ± 1.03	38.23 ± 1.05
Body weight gain (%)	12.83 ± 2.41	8.53 ± 4.66	10.81 ± 1.51	15.85 ± 2.57
Food Intake (g/day)	5.20 ± 0.59	4.85 ± 0.72	4.75 ± 0.61	5.08 ± 0.88

- ✓ 반복투여 & 급성독성 없음
- AST, ALT, blood urea nitrogen (BUN), creatinine kinase (CK) 등이 정상
- ✓ 피부자극 독성 없음
- ✓ 안점막 자극 영향 없음
- ✓ 복귀 돌연변이 없음
- ✓ 체외염색체 이상 없음
- ✓ 소핵시험 - 골수세포의 소핵유발 없음
- ✓ 다회 경구 투여를 통한 독성 없음

IV. 염지하수 특성

피부 개선 기능성

아토피 피부염에 대한 효능

아토피 피부염 중증도를 반영하는 SCORAD 수치 감소, 피부의 보습도 (수분자수)를 반영하는 Corneometer 수치 증가

여드름 치료 효과

용암해수 미네랄로 염증성 여드름 병변인 농포의 개선

피부 색소침착 억제

B16F10 세포에서 α-멜라닌세포 자극 호르몬에 의해 유도된 멜라닌 생성 억제

피부 보습 효과

피부 장벽기능 강화와 수분 보유력 향상 및 세포 간 수분이동 조절
수분 보유력이 뛰어난 HA 수용체인 CD44의 발현량 증가

Jeju Magma-Seawater Inhibits α-MSH-Induced Melanogenesis via CaMKKβ-AMPK Signaling Pathways in B16F10 Melanoma Cells. *Marine drugs* 18(9), 473 (2020). Minhyeok Song *et al.*

α-멜라닌세포 자극 호르몬에 의해 유도된 멜라닌 생성 억제 → 피부 색소침착 치료

아토피 피부염 유발 NC/Nga 생쥐에 대한 용암해수의 효과. *국제보건 의학학회지* 11(2), 5-24 (2017). 객진영 등.

제주 용암해수의 피부 보습 효과 연구. *대한화장품학회지* 42(4), 343-349 (2016). 이성훈 등. 아모레퍼시픽.

피부보습과 관련된 인자들의 발현량을 증가시켜 보습기능에 도움

Effects of balneotherapy in Jeju magma-seawater on knee osteoarthritis model. *Scientific Reports* 10, 6620 (2020). Choong-Gon Kim *et al.*

용암해수 입욕에 의한 무릎 골관절염 비약물치료 효과

용암해수 활용 연구

제주 용암해수로 숙성된 참다귀 뿌리 추출물과 지표물질 Decursin의 인 간 진피세포에서 MMP3 발현 억제 효과. *Asian Journal of Beauty and Cosmetology* 19(1), 65-76 (2021). 강정욱 등. 서원대, 건국대, 코스메 카코리아.

용암해수로 저온 숙성한 참다귀 뿌리 추출물의 피부 주름개선 효과

제주 용암해수로 숙성된 병풀 추출물의 항염 및 보습 효과. *J. Soc. Cosmet. Sci. Korea* 45(4), 363-372 (2019). 이지선 등. 에이비지노쓰아시 아, 경희대, 두래, 한국암웨이.

용암해수 숙성과정을 통한 유효성분 증가

Anti-melanogenesis activity of *Ecklonia cava* extract cultured in tanks with magma seawater of Jeju Island. *The Korean Society of Phycology* 34(2), 177-185 (2019). Ding Yuling *et al.* 순천향대, 충북대, 네이처텍, KIOST

용암해수로 배양한 감태 추출물의 유효성분 증가

용암해수를 이용한 해조류-식물 복합추출물의 숙취해소 효과. *Food Eng. Prog.* 22(2), 110-117 (2018). 손명수 등. 비케이바이오, 제주대.

용암해수로 추출한 복합추출물의 혈중 alcohol과 acetaldehyde 농도 감소

제주도 탈염 용암해수를 이용하여 수경재배한 새싹인삼 추출물의 in vitro 신경독성에 대한 신경보호 효과. *한국식품영양과학회지* 49(9), 925-939 (2020). 최윤표 등. 아리바이오, 제주바네, 제주테크노파크

탈염 용암해수로 수경재배한 새싹인삼 추출물의 미네랄 함량 증가

Probiotic properties and immune-stimulating effect of the Jeju lava seawater mineral-coated probiotics. *LWT* 126, 109299 (2020). Kyung Min Kim *et al.* SK바이오팜.

용암해수는 프로바이오틱스의 섭취 안정성과 기능을 향상

IV. 염지하수 특성

산업적 적용

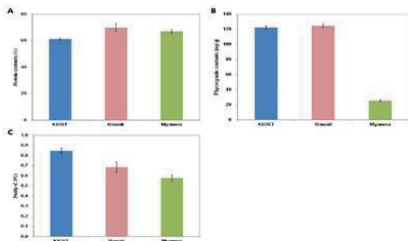
용암해수와 울금을 이용한 건강기능식품 소재 개발 (주) 휴림

용암해수-울금 추출물은 울금 추출물보다 높은 클레스테롤 흡착능을 보임
용암해수-울금 추출물은 클레스테롤 합성을 저해하여 클레스테롤 수치 개선

Extraction method	85% EtOH	85% EtOH + 7.5% E.D mineral water
Curcumin	20.21	15.83
Demethoxycurcumin	5.92	4.21
Bisdemethoxycurcumin	2.55	1.71
Total Amount	28.68	21.75

제주 스피롤리나 최적 배양기술 및 관련 상품 개발(KIOST)

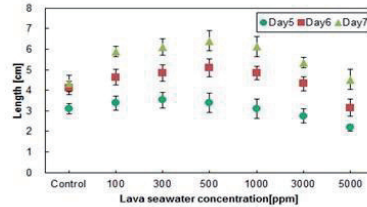
용암해수를 활용한 스피롤리나 배양기술 및 피코시아닌 추출기술 개발
용암해수 혼합 배양한 스피롤리나에서 피코시아닌 함량 증대



Increase of Amino acids, Minerals, Unsaturated fatty acids, fiocyanin, etc.

용암해수와 십자화과 싹 이용 기억력 개선 효능 제품의 개발 (주)비케이바이오

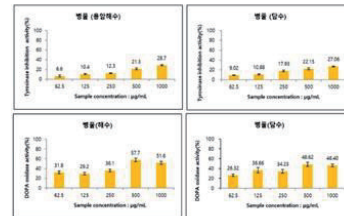
용암해수에 양액, 광원 등의 재배기술을 접목하여 성장 속도 향상
미네랄수 배양시 기억력 개선 지표물질 (Sulforaphane)의 함량 증가



Broccoli sprout growth (length) measurement.

마이크로바이옴 분석 기반 트러블케어 기능성 화장품 개발 (주)아미코스메틱

용암해수 재배한 삼백초, 작약, 병풍의 생장율, 미네랄 함량, 유효성분 증가



V. 염지하수의 산업적 활용

지역 내 용암해수 산업 고도화를 통한 농수산업 및 제조업 등 다양한 분야의 산업 육성

음료



- 혼합음료, 기능성 음료
- 지역특산품과 연계한 혼합음료
- 미네랄을 원료로 한 이온음료
- 건강기능식품(음료)

미네랄소금



- 고부가가치 액상, 미네랄 소금
- 제주 특산원료 연계 천연 조미료
- 고염도 농축수를 활용한 절임 식품
- 용암해수 소금 활용 장류 (된장, 고추장, 간장 등)

식품



- 칼슘, 마그네슘 함유 기능성 식품
- 두부, 요구르트 등 발효 식품
- 탈염수/농축수를 이용한 식품소재
- 주류 (전통주, 소주, 맥주)
- 건강기능식품, 기능성표시제품

해수농법



- 용암해수 내 다량/미량 미네랄을 활용한 해수농법 개발
- 용암해수 내 미네랄을 활용한 양액
- 화학제품 미사용 천연 제초제

화장품



- 피부재생 등 기능성 로션, 크림, 젤
- 입욕제 및 스파용 제품
- 세정제 (비누, 샴푸, 바디워시 등)

기타



- 관광산업 및 체험교육
- 용암해수 활용 수치료 및 헬스케어
- 해양치유 소재 및 산업 적용
- 고부가가치 해양생물 배양 및 양식

V. 염지하수의 산업적 활용

용암해수산업 다각화

먹는물 및 음료 사업화 치중

먹는물

- 제주오리온용암수 등 먹는물 위주의 제품화 중심 → 먹는샘물(삼다수)과 경쟁구도 부각
- 단지 내 혼합음료 사업화 편중으로 먹는물 시장과 지속적으로 쟁점화

음료산업

- 먹는샘물 시장 외 음료시장 확대 미흡
- 기능성 음료 등 제품화 미흡

액상소금, 식품소재 등
연관산업 집중 육성

스마트특성화사업
통한 음료산업고도화

연관산업 육성 및 제품 다각화

제품 다각화

- 농축수 활용 소금 및 연관산업 육성
- 식품소재 및 원료화로 제품 포트폴리오 확대
- 전문생산시설 활용 다양한 제품 양산체계 확립

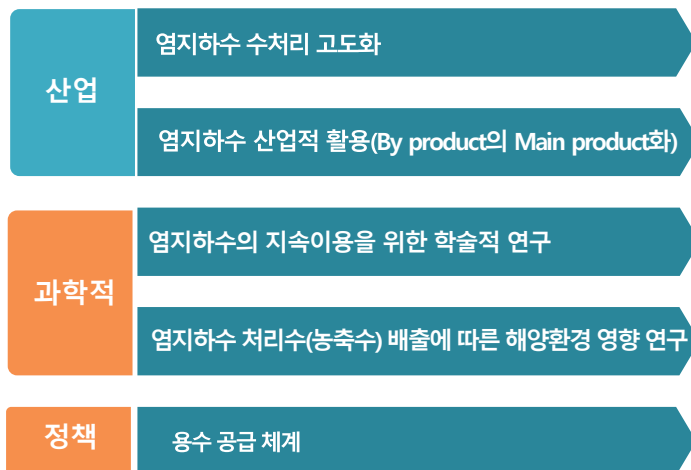
기능성음료

- 기능성표시제 활용 지역소재 기능성음료 제품화
- 고시형 원료+제주자원 활용 건강기능음료 생산
- 제주자원활용 개별형 건강기능음료 생산
- 고부가가치 소재 및 제품화로 부가가치 확대



VI. 염지하수 연구 방안

염지하수 지속 이용을 위한 산업적/학술적/정책 연구 관점 전환

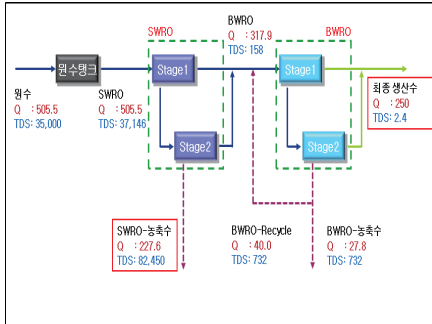


염지하수의 지속이용 관점으로 제주수자원 가치 변화 모색 필요

→ 염지하수 자원에 대한 인식 및 자원 활용을 위한 연구 추진

VI. 염지하수 연구 방안

염지하수 수처리 고도화



담수화 효율 연구

- 원수수질, 1차 SWRO압력변화, 생산수 수질
- 순수가동압(NDP), 막오염 등에 의한 담수화장비의 성능연구

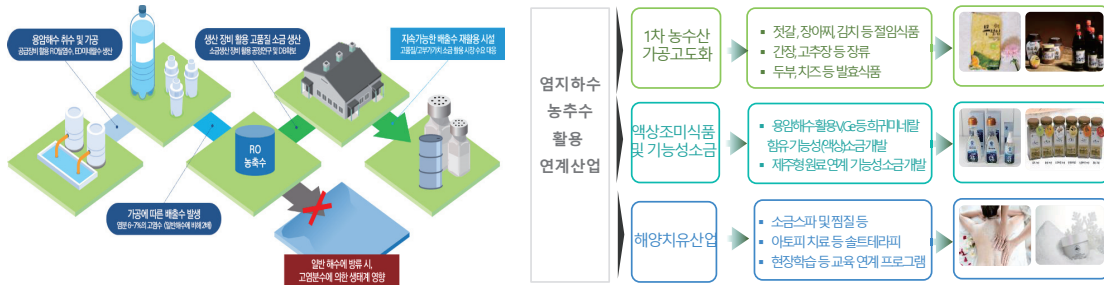
수질조정기술 연구

- 담수화 공정의 나노필터, 증발법, 전기투석법 적용 수질조정
- 희소 금속 선택적 이온교환 수지 이용 및 개발

에너지 효율

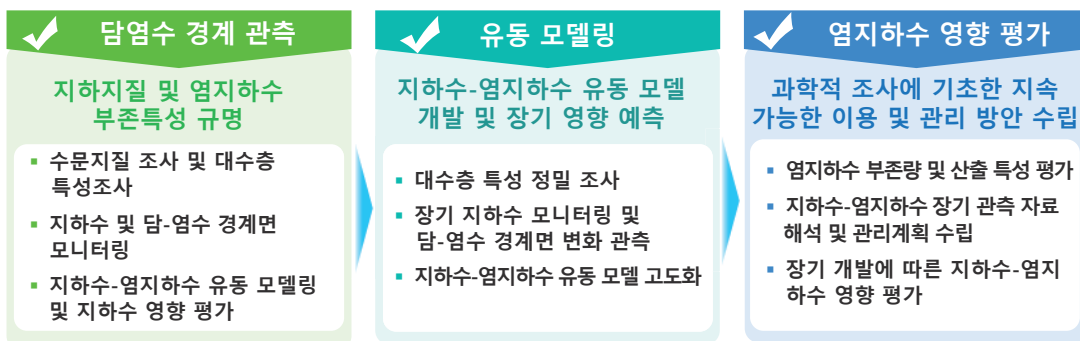
- 염지하수 활용 염분차발전, 해수전지, 수소발전적용 연구
- 플러시DR 제도 도입을 통한 에너지비용 절감

염지하수 담수화의 By product의 Main product화



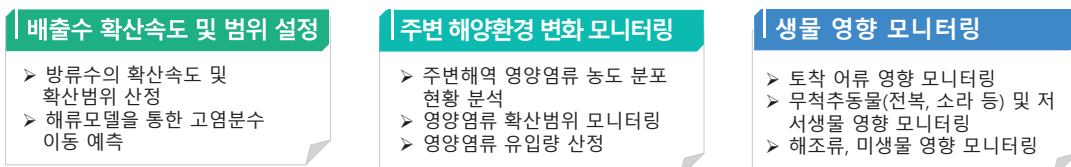
VI. 염지하수 연구 방안

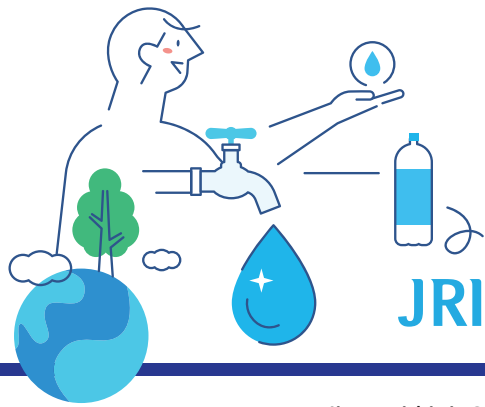
염지하수의 지속 이용을 위한 학술적 연구



염지하수 처리수(농축수) 배출에 따른 해양환경 영향 연구

중장기 해양환경 영향 계획 수립 후 해양환경모니터링 시스템 구축 및 지속적인 모니터링 및 환경개선





2022년 세계 물의 날 기념 JRI-KIGAM 학술교류 세미나

제주 지하수의 지속이용 가능성을 위한 과학적 진단 및 관리방안 모색

다심도 관측자료를 이용한 동부지역 담-염수경계 특성 변화

신우식 제주연구원 제주지하수연구센터

다심도 관측자료를 이용한 제주 동부지역 지하수의 담-염수 경계특성 변화

2022. 03. 18.

1



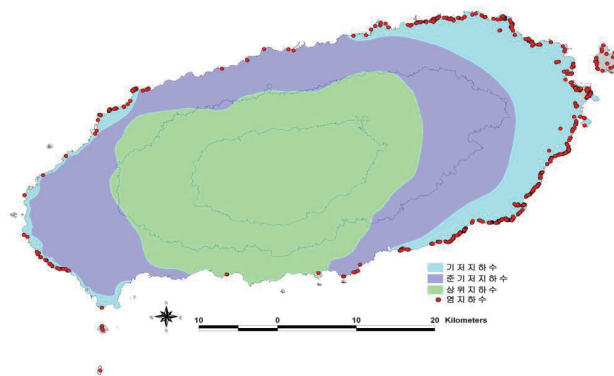
CONTENTS

- 1 Introduction
- 2 Methods
- 3 Results and Discussions
- 4 Future Works
- 5 Conclusions

2

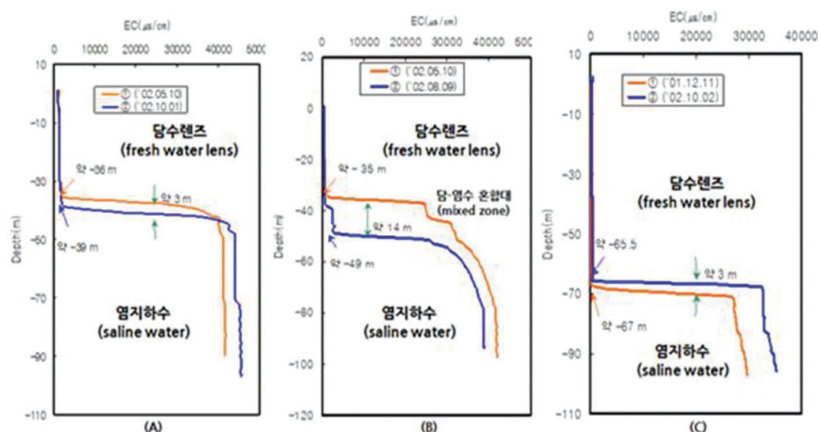
■ 연구 배경

- 제주 동부지역의 경우, 1980년대 이후 고염분 지하수의 존재가 보고되며, 약 8 km 거리의 내륙에서도 발견
- 고염분 지하수의 부존 원인에 대한 다양한 가설 존재
 - 해수의 침투에 의한 가능성 (유장걸 외, 1986)
 - 토양 및 사구층 내 염분이 강수에 의해 용해되어 지하수에 혼입 (윤정수, 1986)
 - 지하수의 과잉채수에 의한 해수 침투 (최순학, 1988; 최순학 및 김영기, 1989; Choi et al., 1991; 이진용 외, 2007)
 - 유리질 채설암 등 지질 구조에 의한 해수의 자연적인 내륙 침투 (고기원, 1997; 고기원 외, 2003)
 - 해수면 상승의 영향 (김경호 외, 2009)



3

■ 기존 연구들(담-염수 경계면의 분포)



<조사시기>

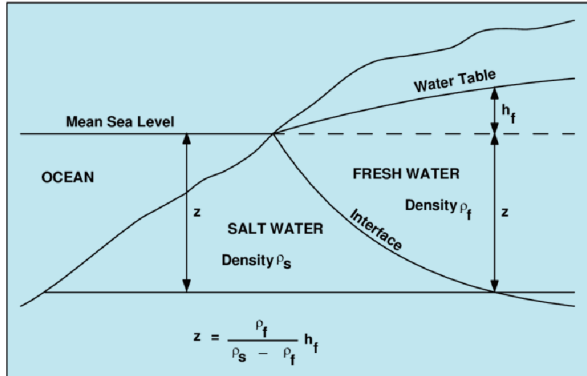
- A : '02년 05월 vs '02년 10월
- B : '02년 05월 vs '02년 08월
- C : '01년 12월 vs '02년 10월

【그림 148】 제주도 동부 한동리 지역에 설치된 3개 관측정의 전기전도도 수직분포. A: 한동1호공, 해발 15.12m, B: 한동2호공, 해발 42.37m, C: 한동3호공, 해발 112.47m

(제주특별자치도개발공사, 화산섬 제주도의 지질과 지하수, 2017)

4

기존 연구들(담-염수 경계면의 분포)



Ghyben-Herzberg Relation

$$z = 40 h_f (\rho_f : 1.0 \text{ g/cm}^3, \rho_s : 1.025 \text{ g/cm}^3)$$

$z/h_f > 40$: 담수 압력 우세 (관측 SWI가 더 하부에 위치)
 $z/h_f < 40$: 해수 압력 우세 (관측 SWI가 더 상부에 위치)

【표 18】 제주도 동부지역 관측정의 담수렌즈 두께와 G-H비

관측공명	표고(m)	자연수위(m)	담수렌즈 두께		G-H비
			이론적 두께	실측두께	
한동 1호공	14.79	1.80	72m	33.18m	1 : 18
한동 2호공	42.22	2.00	80m	35.15m	1 : 18
한동 3호공	112.25	2.43	97.2m	67.69m	1 : 28
수산 1호공	33.33	0.90	36m	27.56m	1 : 31
수산 2호공	70.47	2.30	92m	29.21m	1 : 13
수산 3호공	115.06	2.40	96m	48.33m	1 : 20
신촌연구정	17.90	0.80	32m	22.73m	1 : 28

해수의 영향이 더 우세

(화산섬 제주도의 지질과 지하수, 2017)

5

기존 연구들(담-염수 경계면의 분포)

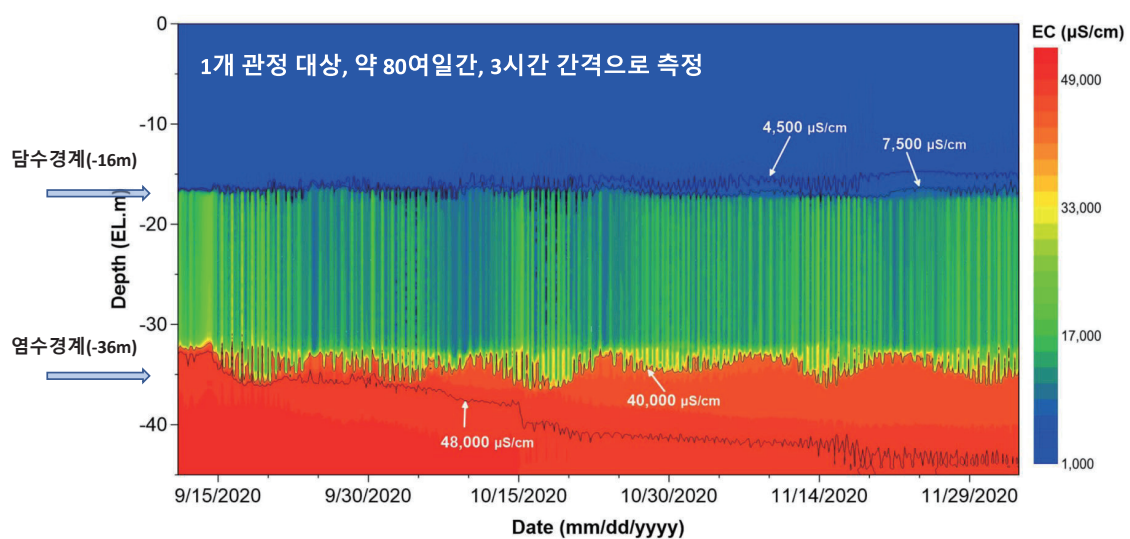


Fig. 5. EC variation with depth and time from September 11 to December 3, 2020.

(장호준 외, 지하수토양환경, 2020)

6

기존 연구들(담-염수 경계면의 분포)

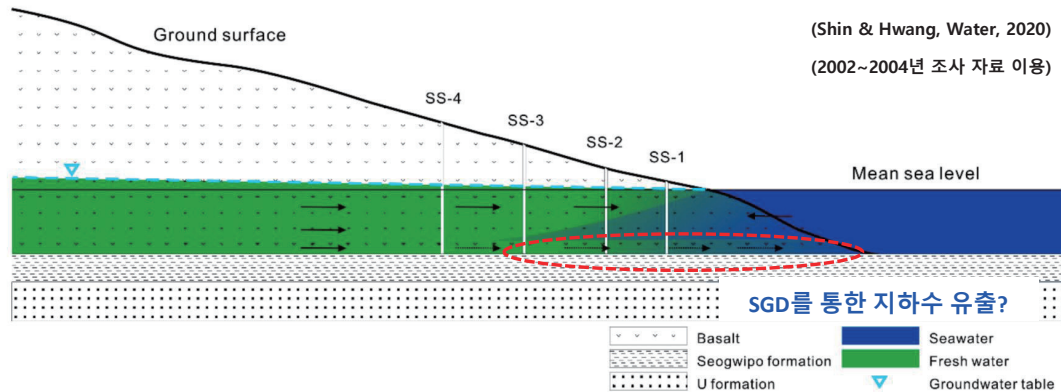
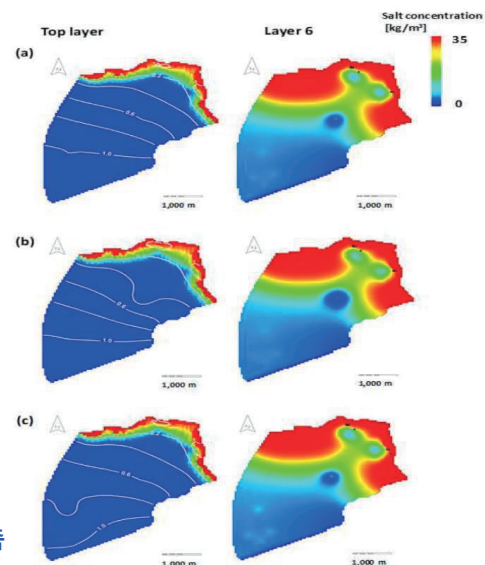
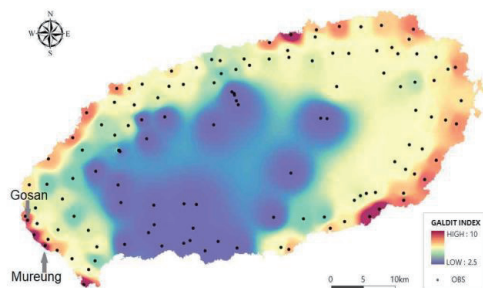


Figure 10. Conceptual model of seawater intrusion on the eastern coast of Jeju Island.

- 제주의 경우, 대수층의 특이적인 이방성으로 인해 G-H 관계로 설명되지 않는 경우가 많음
- 해안 대수층에는 수직적으로 약하게 연결된 몇 개의 독립적인 채널이 발달되어 있으며, 해수침투는 이와 같은 **multilayered aquifer**를 통해서 발생
- 일부 지역에서는 SGD(submarine groundwater discharge)처럼, 지하수의 직접적인 해양유출로 여겨지는 현상이 발견되기도 됨.

7

기존 연구들(담-염수 경계면 변화 예측)



[개발 시나리오에 따른 담-염수 분포도 :
(a) 기존 개발과 같은 기본 시나리오 (b) 개발 시나리오 1 (c) 개발 시나리오 2)]
(제주특별자치도개발공사, 2020)

8

■ 기존 연구들의 제약 사항들

- 특정시기에 담-염수 경계면의 수직적 위치에 대한 연구가 주를 이룸
- 소수의 관정에서 얻어진 자료만을 이용하였거나, 1회성 조사 또는 자료 취득기간이 수개월 정도로 짧음
→ 장기 관측 결과를 이용한 연구 사례는 부재
- 담-염수 경계면의 변화의 경우, 취약성 평가 또는 모델링 기법(SEAWAT)을 이용한 예측만 수행
→ 현장 관측 자료를 이용한 실증 연구 사례는 부재

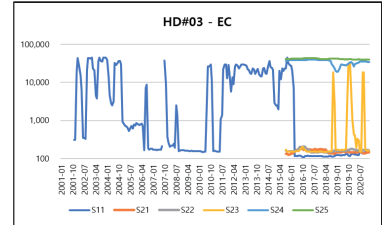
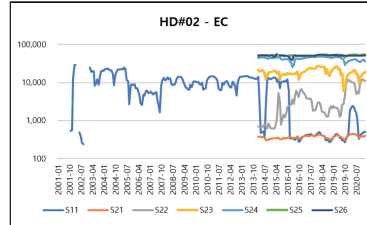
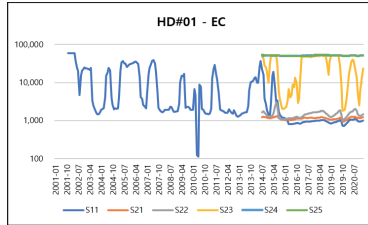
■ 연구 목적

- 장기 관측자료를 이용하여 제주 동부 지역 내 담-염수 경계면의 분포 및 장-단주기적 변동 양상 파악
- 과거 조사(2002년도) 결과와의 비교를 통해, 담수체 규모의 변화 추정
- 지역별 담-염수 경계특성의 차이와 변화를 유발시킨 여러 요인들의 가능성 평가

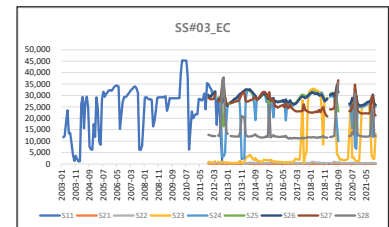
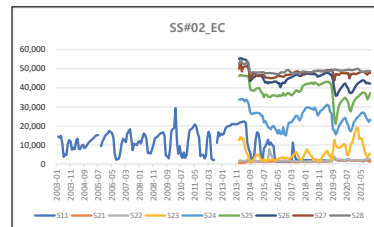
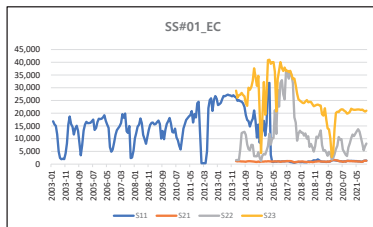
9



■ 연구 대상 기간 선정

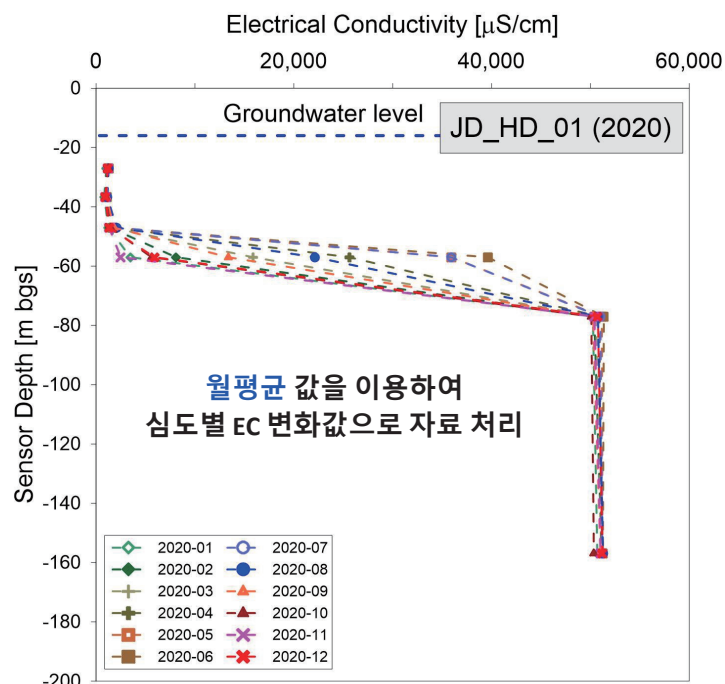


최상부에 위치한 대표센서(S11 or S21)의 측정값이 안정화된
2018년 이후(4개년) 자료를 이용하여 평가



11

■ Data Processing



12

■ 해수침투 판단 선정

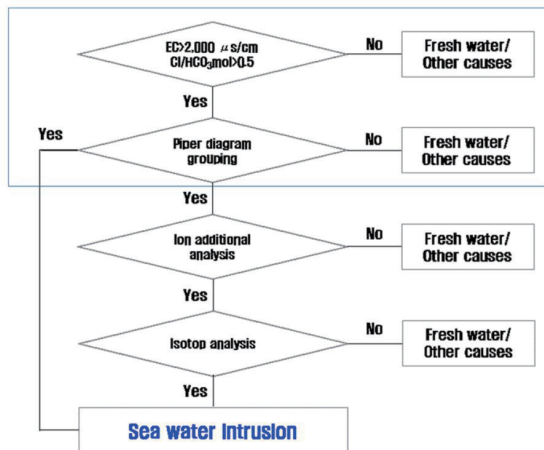


Fig. 6. Systematic analysis of seawater intrusion using EC and chemical and isotopic compositions of groundwater in coastal area.

(김창훈 외, 지질공학회, 2017)

Table 2. Classification of groundwater with Cl⁻ concentrations.

Reference	Classification	Range of Cl ⁻ concentrations (mg/L)
Stufaznd (1986)	Fresh	<150
	Fresh-brackish	150~300
	Brackish	300~1,000
	Brackish-salt	1,000~10,000
Vengosh and Rosenthal (1994)	Fresh	<400
	Brackish	400~4,000
	Saline	4,000~19,000
	Brine	>19,000

<표 2-16> Cl/HCO₃ 몰비에 의한 해수에 의한 오염정도

Cl/HCO ₃ 몰비	해수에 의한 오염정도
0.5 미만	해수영향 전혀 없음
0.5 ~ 1.3	약간 문제 있음
1.3 ~ 2.8	약간 해수영향 받음
2.8 ~ 6.6	해수에 의한 보통정도의 오염
6.6 이상	매우 심한 정도의 해수영향 받음

(환경부, 2018)

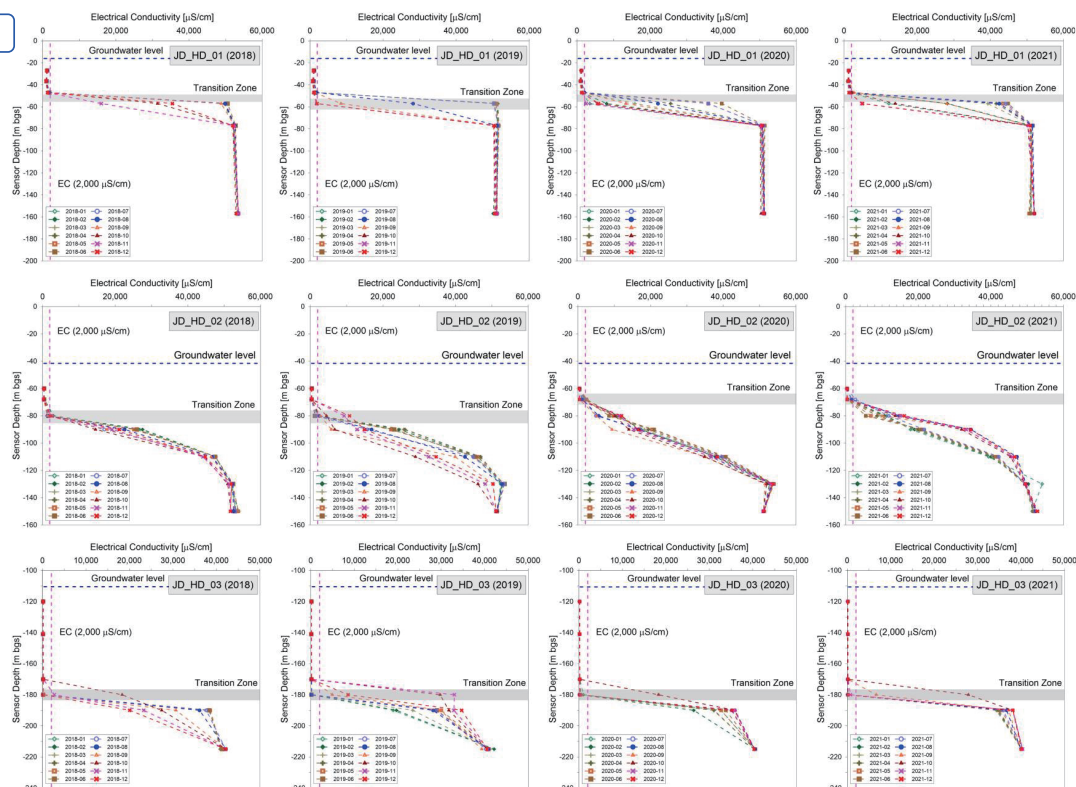
<염지하수 기준>

- 먹는물관리법 : TDS 2,000 mg/kg 이상
- 제주도 지하수관리조례 : TDS 1,000 mg/kg 이상

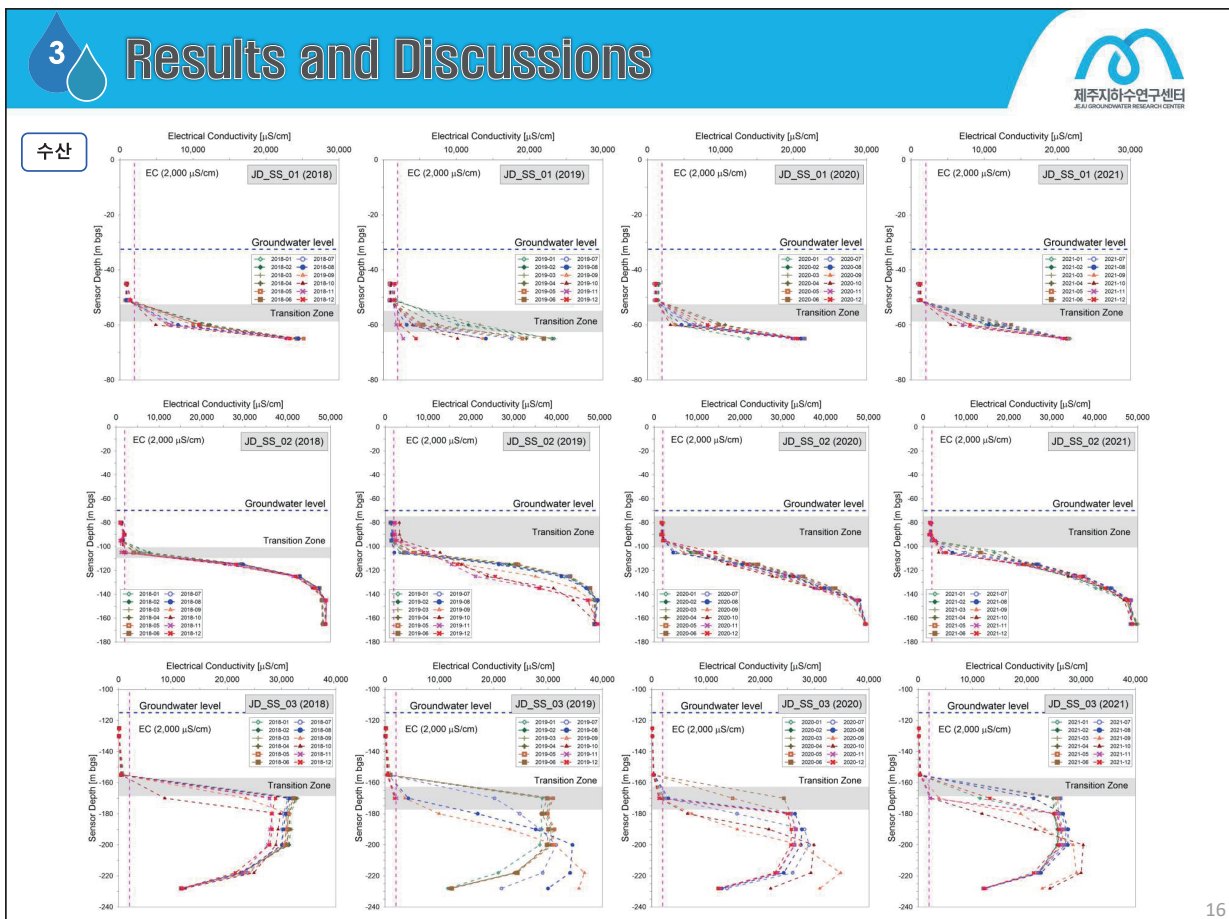
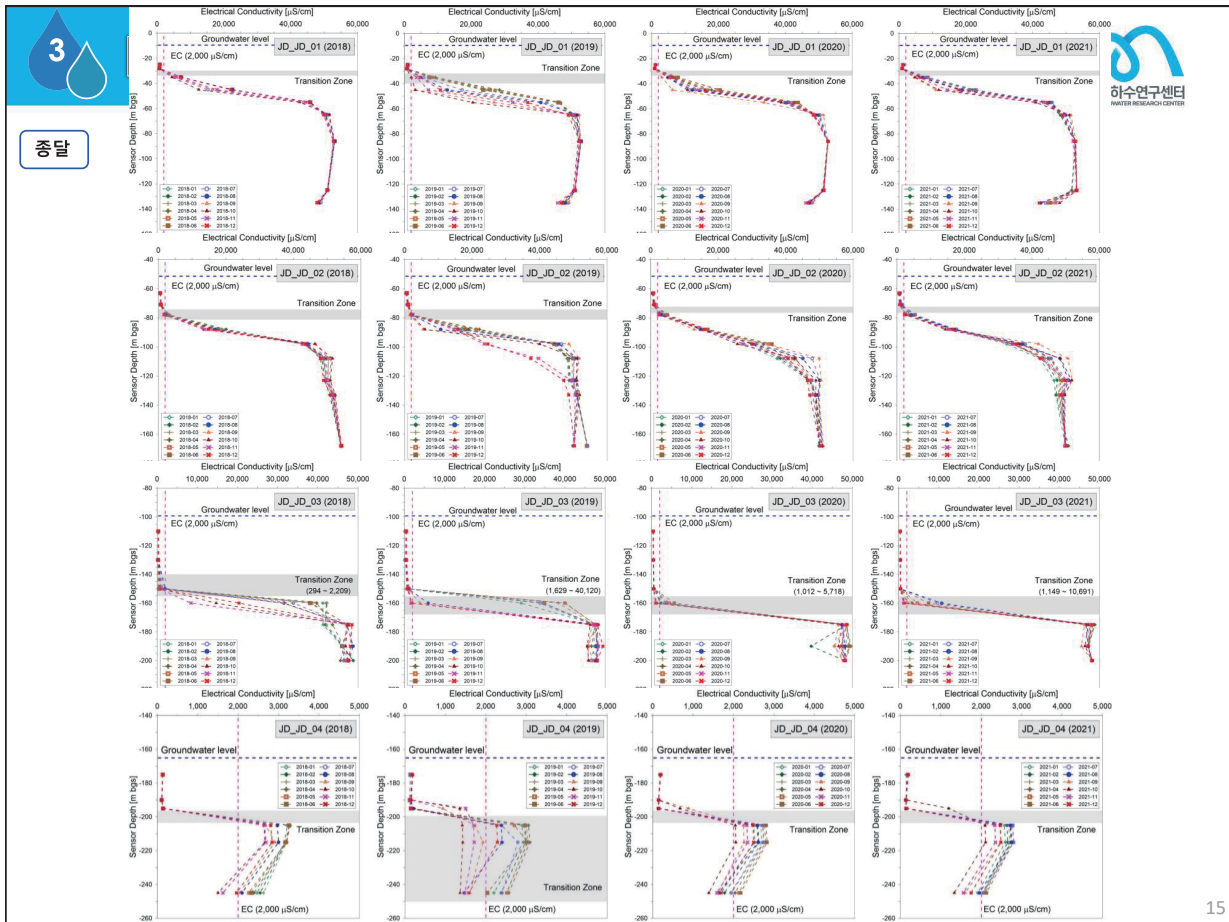
EC 2,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (≈ 1 ppt)를 담-염수 경계 기준으로 설정

13

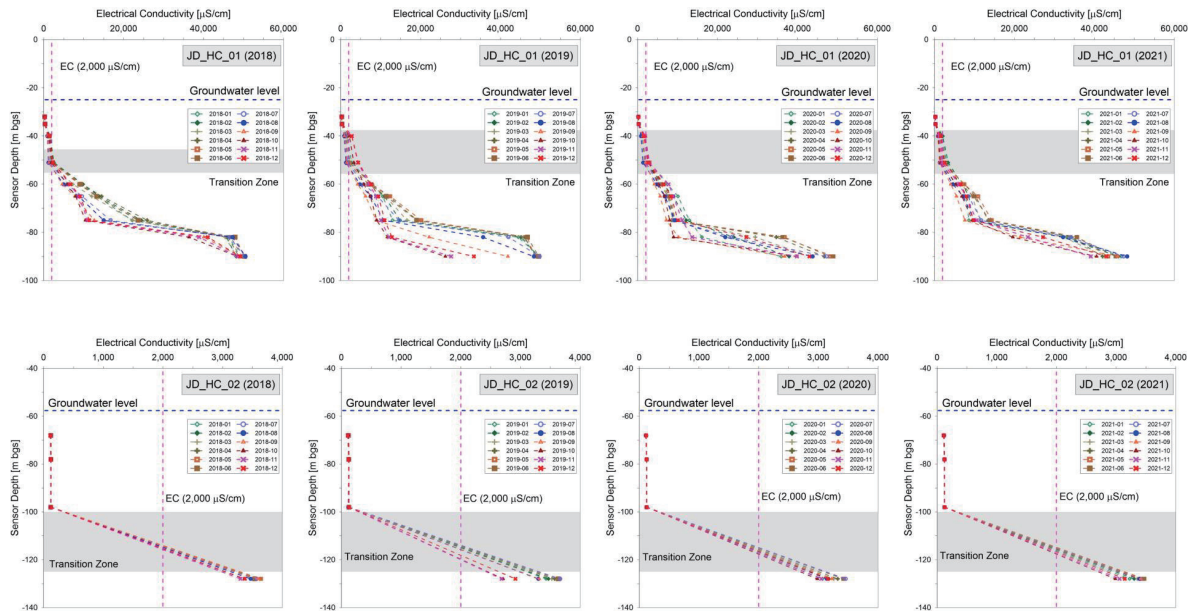
한동



14

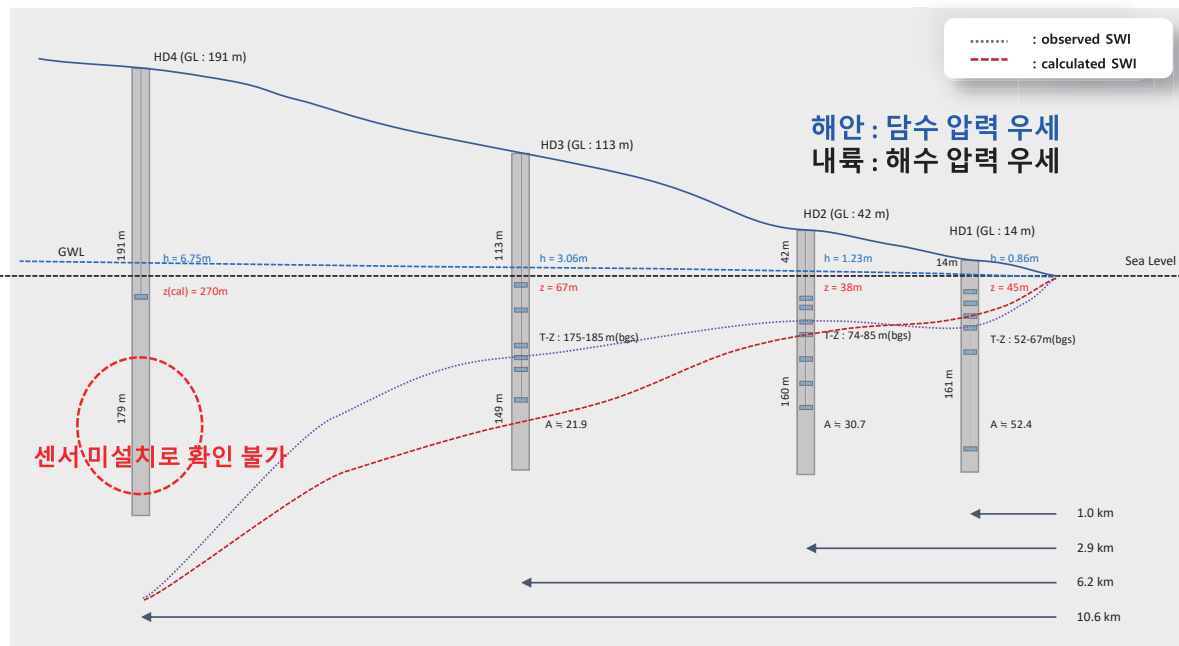


하천



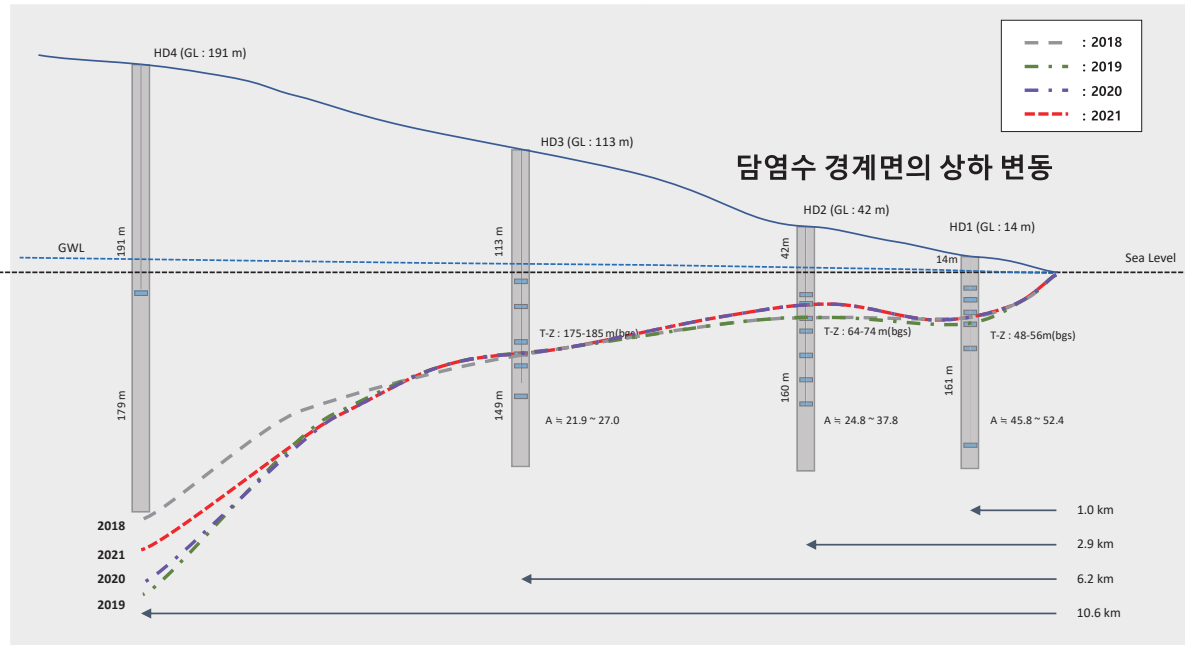
17

JD한동1 ~ 한동4 (2019)



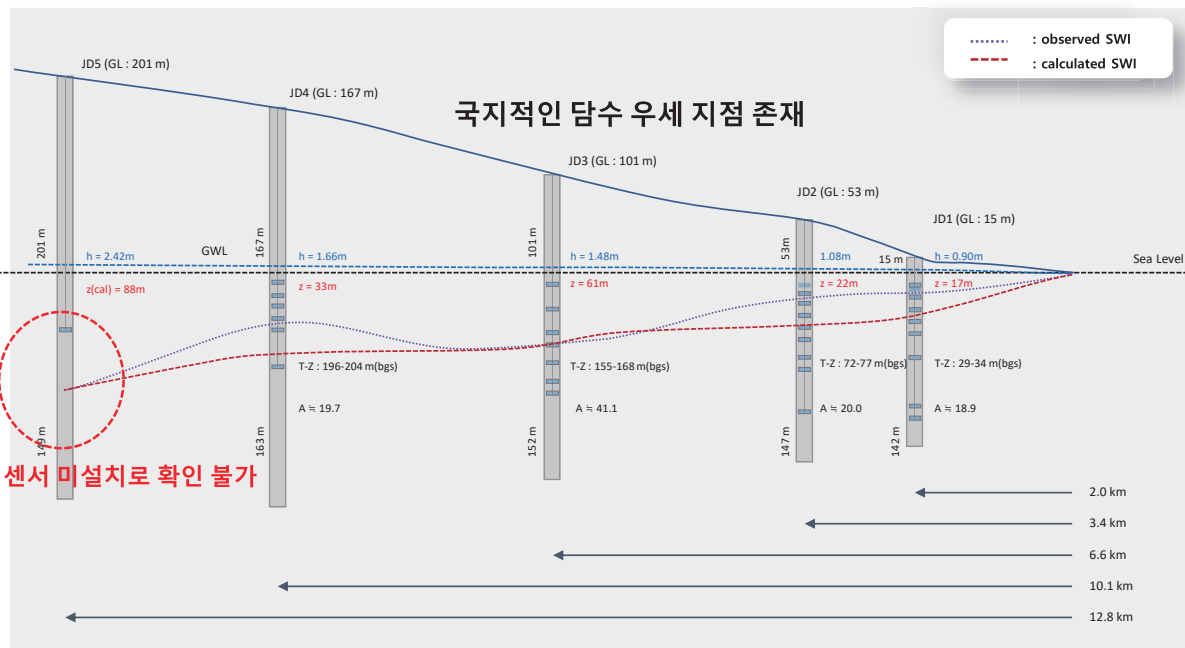
18

한동1 ~ 한동4 (2018-2021)



19

종달1 ~ 종달5 (2021)



20

■ 지점별, 시기별 G-H ratio 변화

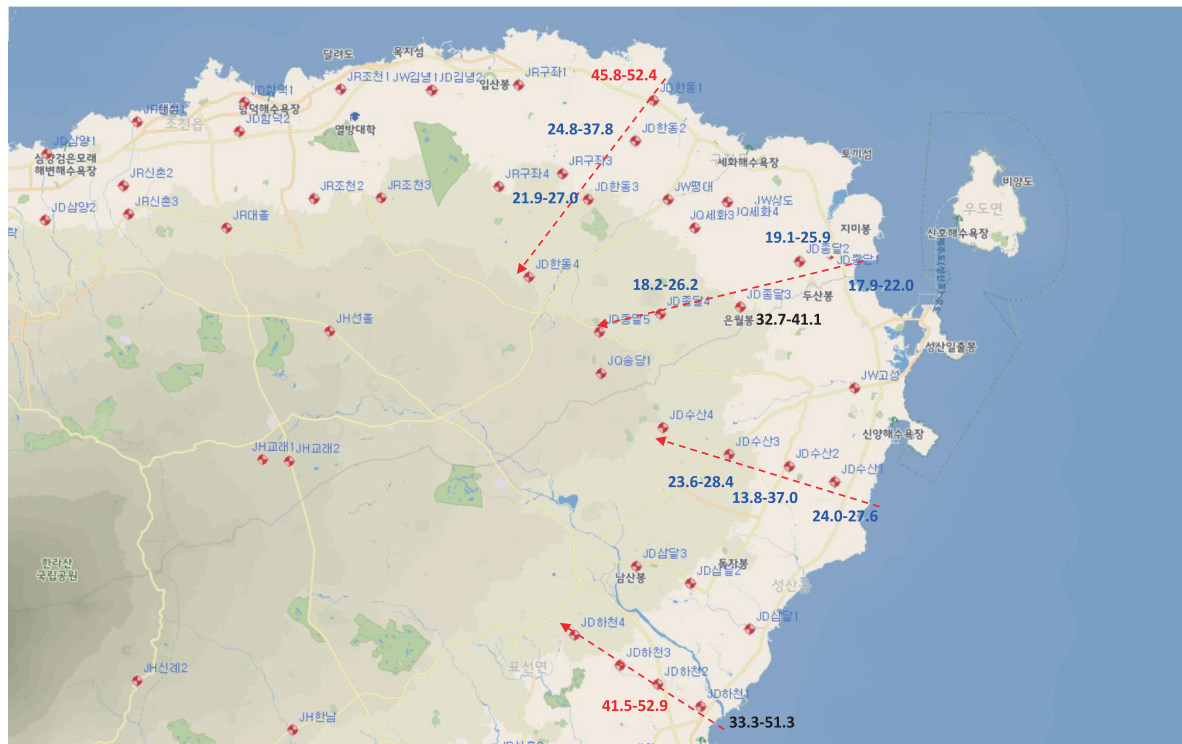
조사시기	HD1			HD2			HD3			
	h	z	z/h	h	z	z/h	h	z	z/h	
2018	0.75	37.58	50.1	1.00	37.76	37.8	2.50	67.11	26.8	<2021.03.10> HD1 0.65m HD2 0.80m HD3 2.04m
2019	0.86	45.08	52.4	1.23	37.76	30.7	3.06	67.11	21.9	
2020	0.82	37.58	45.8	1.10	27.26	24.8	2.62	67.11	25.6	
2021	0.78	37.58	48.2	1.02	27.26	26.7	2.49	67.11	27.0	

조사시기	JD1			JD2			JD3			JD4		
	h	z	z/h	h	z	z/h	h	z	z/h	h	z	z/h
2018	0.83	17.1	20.5	0.99	25.6	25.9	1.42	47.0	33.1	1.61	32.7	20.3
2019	0.97	21.3	22.0	1.22	25.6	21.0	1.86	60.8	32.7	2.20	57.7	26.2
2020	0.95	17.1	17.9	1.13	21.6	19.1	1.60	60.8	38.0	1.79	32.7	18.2
2021	0.90	17.1	18.9	1.08	21.6	20.0	1.48	60.8	41.1	1.66	32.7	19.7

조사시기	SS1			SS2			SS3			
	h	z	z/h	h	z	z/h	h	z	z/h	
2018	0.79	21.60	27.3	0.92	34.00	37.0	1.65	46.90	28.4	<2021.03.10> JD1 0.79m JD2 0.93m JD3 1.13m JD4 1.18m SS1 0.67m SS2 0.71m SS3 1.23m
2019	0.91	25.10	27.6	1.20	16.50	13.8	2.25	53.15	23.6	
2020	0.90	21.60	24.0	1.11	16.50	14.9	1.92	53.15	27.7	
2021	0.81	21.60	26.7	1.01	16.50	16.3	1.74	46.90	27.0	

조사시기	HC1			HC2			
	h	z	z/h	h	z	z/h	
2018	0.48	24.6	51.3	1.02	54.0	52.9	<2021.03.10> HC1 0.22m HC2 0.63m
2019	0.62	20.6	33.3	1.30	54.0	41.5	
2020	0.59	20.6	35.0	1.18	54.0	45.7	
2021	0.46	20.6	44.9	1.04	54.0	51.9	

21



22

■ 담수체 규모 변화 (2002년 결과 대비)

조사시기	HD1			HD2			HD3			Area (m ²)	Remark
	h	z	z/h	h	z	z/h	h	z	z/h		
2002 ¹⁾	1.80	33.18	18.4	2.00	35.15	17.6	2.43	67.69	27.9	283,165	-
2018	0.75	37.58	50.1	1.00	37.76	37.8	2.50	67.11	26.8	285,659	▲0.9%
2019	0.86	45.08	52.4	1.23	37.76	30.7	3.06	67.11	21.9	295,374	▲4.3%
2020	0.82	37.58	45.8	1.10	27.26	24.8	2.62	67.11	25.6	258,837	▼8.6%
2021	0.78	37.58	48.2	1.02	27.26	26.7	2.49	67.11	27.0	258,317	▼8.8%

1) 제주특별자치도개발공사, 화산섬 제주도의 지질과 지하수, 2017

조사시기	SS1			SS2			SS3			Area (m ²)	Remark
	h	z	z/h	h	z	z/h	h	z	z/h		
2002 ¹⁾	0.90	27.56	30.6	2.30	29.21	12.7	2.40	48.33	20.1	198,610	-
2018	0.79	21.60	27.3	0.92	34.00	37.0	1.65	46.90	28.4	192,372	▼3.1%
2019	0.91	25.10	27.6	1.20	16.50	13.8	2.25	53.15	23.6	167,013	▼15.9%
2020	0.90	21.60	24.0	1.11	16.50	14.9	1.92	53.15	27.7	159,697	▼19.6%
2021	0.81	21.60	26.7	1.01	16.50	16.3	1.74	46.90	27.0	150,573	▼24.2%

측선별 담수체의 단면적이 2002년 대비,
최대 24.2%까지 감소

23

■ 추후 연구 필요 사항들

1) 지역별 담-염수 경계특성 차이 및 변화 유발 원인 규명

- 내부적 요인

: 특이적 이방성을 지닌 지질학적 층서의 영향

- 외부적 요인

: 강수량/이용량 변화의 영향

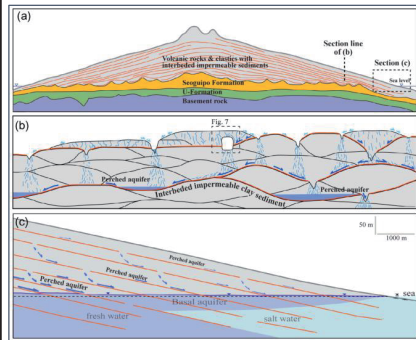
: 염지하수 개발의 영향

: 해수면 상승 영향

: 용천수 유입으로 인한 해수염도 변화

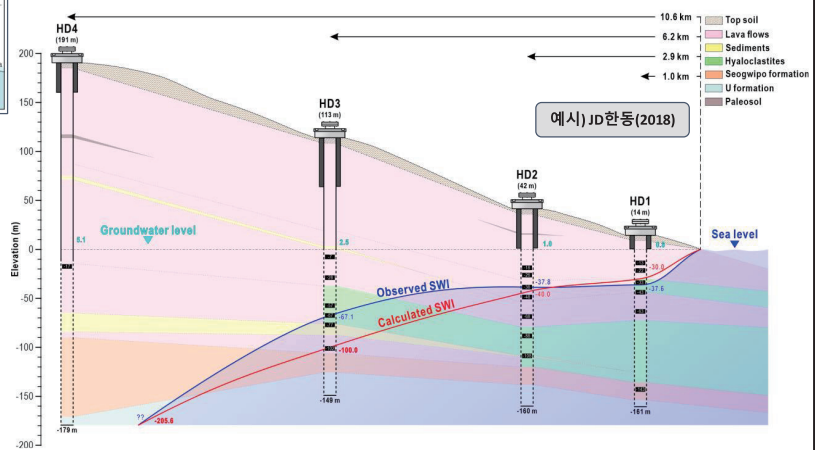
24

1) 이방성을 갖는 지질학적 층서 영향 파악



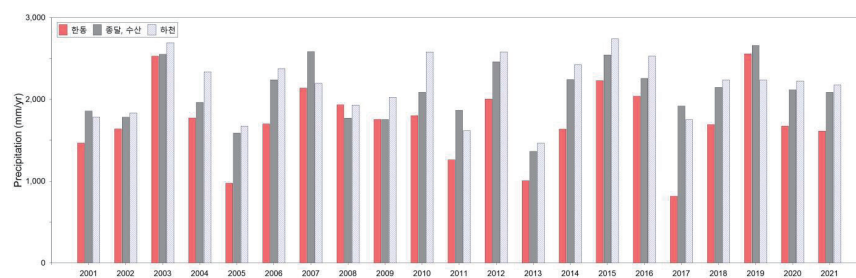
(Ahn et al., Hydrological Processes, 2021)

복잡하고, 이방성을 갖는 제주도 특성에 맞는
수리수문지질 모형 구축 연구 필요

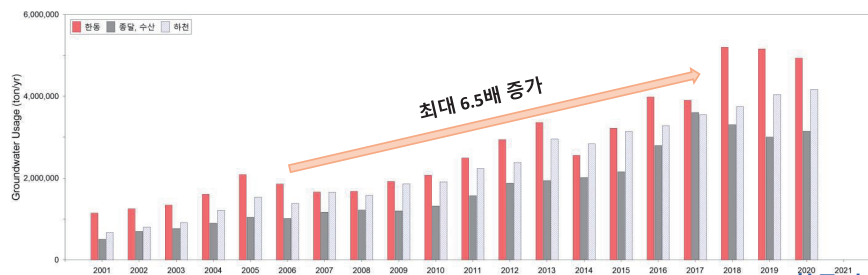


25

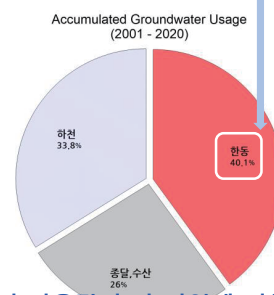
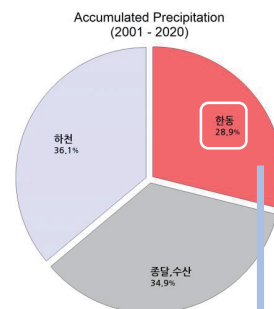
2) 강수량 및 이용량 변화?



강수량 변화 대비 지하수이용량 증가가 더 큼



※ 공공농업용 지하수 이용량 기준(염지하수 이용량은 제외)

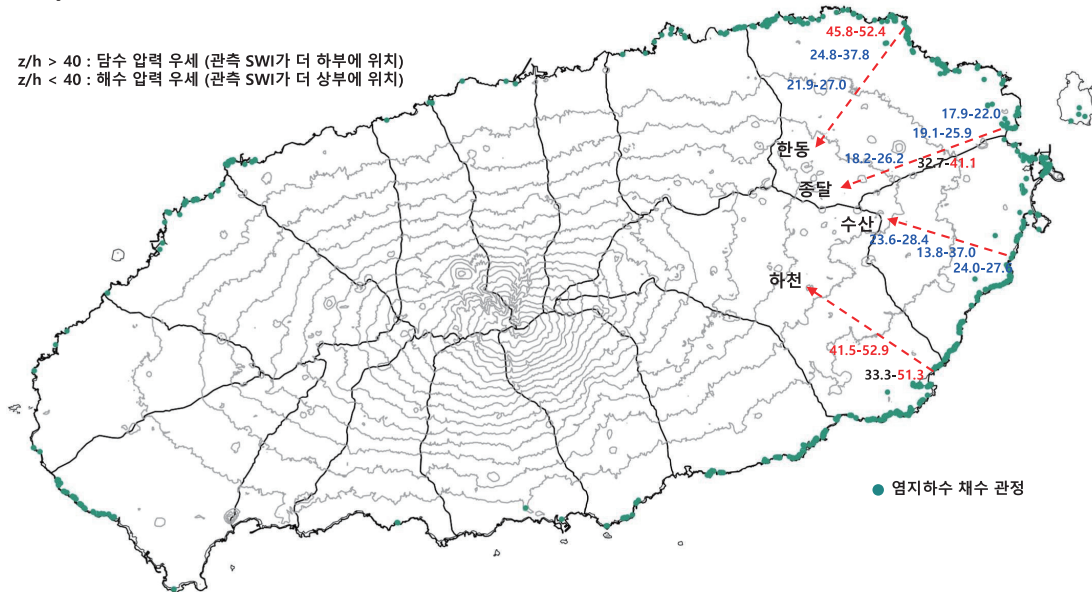


한동지역의 이용량이 타 지역에 비해
훨씬 가파르게 증가하는 추세

26

3) 염지하수 개발의 영향?

$z/h > 40$: 담수 압력 우세 (관측 SWI가 더 하부에 위치)
 $z/h < 40$: 해수 압력 우세 (관측 SWI가 더 상부에 위치)



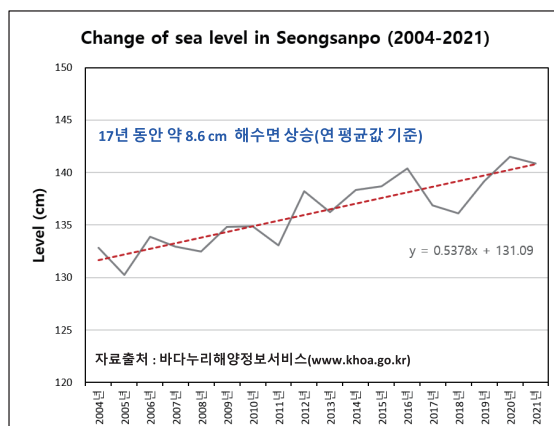
염지하수 관정이 밀집한 해안가보다
 내륙쪽의 해수침투 경향이 더 크게 나타남



아직까지는 해안가 염지하수 개발로 인한
 해수침투 영향 악화는 확인되지 않음

27

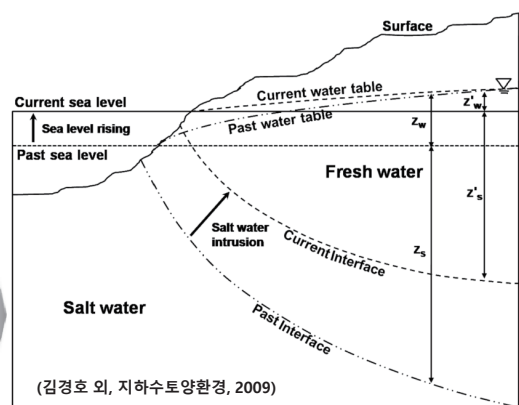
4) 해수면 상승?



Name	Year 2025	Year 2050	Year 2075	Year 2100
RCP 2.6	0.17 m	0.36 m	0.62 m	0.87 m
RCP 4.5	0.18 m	0.43 m	0.79 m	1.21 m
RCP 6.0	0.16 m	0.35 m	0.63 m	1.02 m
RCP 8.5	0.16 m	0.38 m	0.76 m	1.36 m

(김태윤 외, 해양환경안전학회지, 2013)

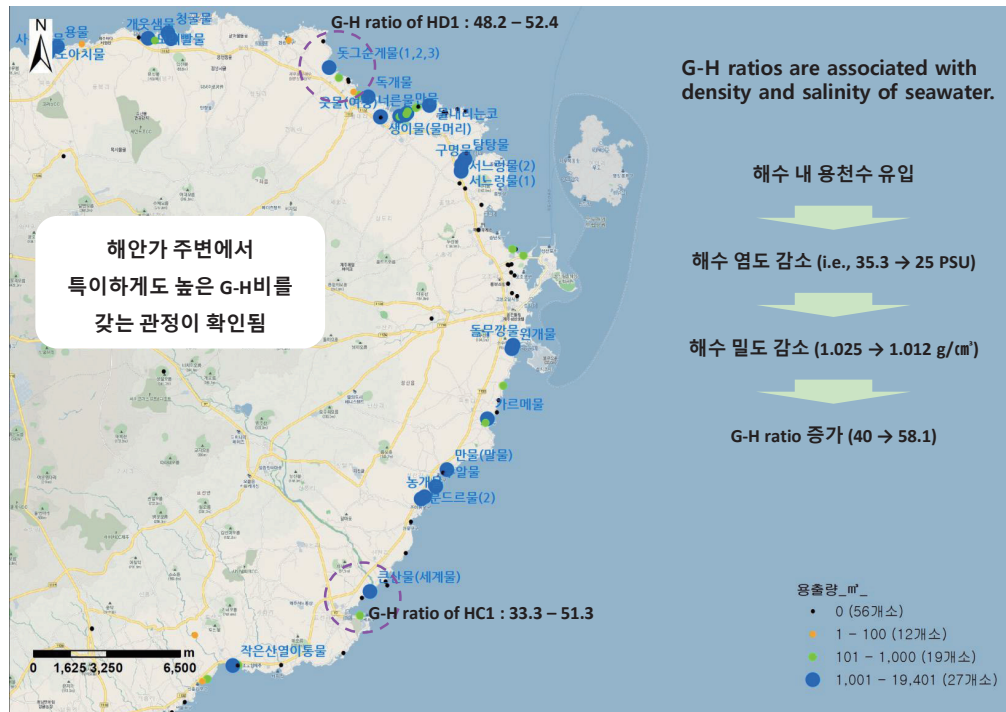
담염수
 경계
 상승



해수면 상승의 영향 여부 및 규모 파악을
 위한 지속적인 관찰 및 모니터링 필요

28

5) 용천수 유출로 인한 염도 저하?



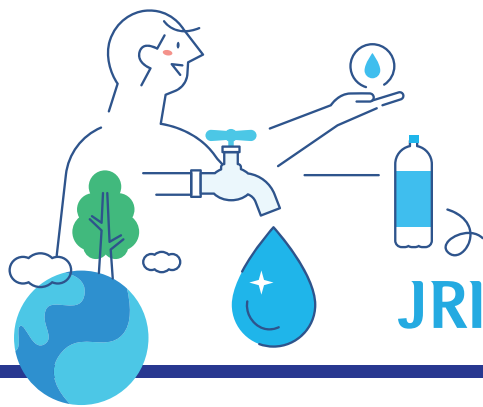
29

- 제주 동부지역 지하수 관정에 설치된 다심도 센서 관측자료를 이용하여 담-염수 경계면의 수직-수평적인 분포 및 변화를 추적
- 담-염수 경계는 고정되어 있지 않고, 수평-수직 방향으로 **변동하고 있음**이 확인됨.
- 해안가에 인접한 일부 관정(HD1, HC1, HC2)을 제외하면, **대부분의 관정에서 G-H비가 40 미만**
→ 담-염수 경계가 **이론적 위치보다 상부에 존재**하는 것이 확인됨
- 해안가에서 **내륙으로 갈수록 G-H비가 감소**하여 **담수체의 두께가 감소**하는 것이 확인됨.
→ 일부지역에서는 내륙에서 **국지적으로 담수체의 두께가 두꺼워지는 지역(JD3)**이 확인됨
→ 가장 내륙에 위치한 관정에는 다심도 센서가 설치되어 있지 않아 경계부 확인 불가
→ **다심도 센서의 추가적인 설치**가 필요
- 다심도 센서가 설치된 12개 관정 중 8개 관정에서 **2019년 이후 담-염수 경계의 상승**이 확인
→ 지하수 내 **해수의 영향이 더 증가**되는 추세
- 담수체의 단면적은 2002년 조사 결과 대비 **한동지역에서 최대 8.8% 감소**, **수산지역 최대 24.2% 감소**한 것으로 조사됨.
→ 정확한 **지하수 부존량의 변화**를 파악하기 위해서는 **장기적인 관찰 및 조사 연구**가 필요
- 담-염수 경계특성의 변화를 발생시킬 수 있는 내외부적 요인들(i.e., 국지적 지질층서의 영향, 강수량/이용량의 변화, 염지하수개발, 해수면 상승, 용천수 유입 등)의 기여도 파악을 위한 추가적인 조사 연구가 필요

30



‘물을 사랑합시다’



2022년 세계 물의 날 기념 JRI-KIGAM 학술교류 세미나

제주 지하수의 지속이용 가능성을 위한 과학적 진단 및 관리방안 모색

기후변화에 따른 제주 지하수위 변동 특성

김지명 제주연구원 제주지하수연구센터



기후변화에 따른 제주 지하수위 변동특성

수자원 정보관리팀
김지명



CONTENTS



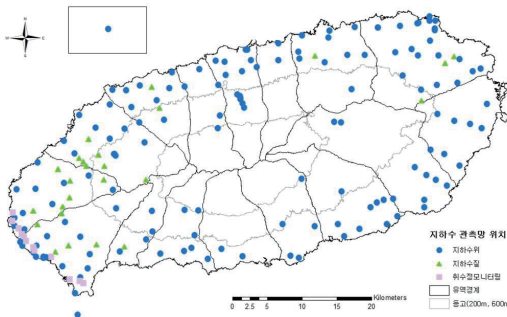
- 1 제주 지하수 관측망 현황
- 2 제주도 기후변화 현황
- 3 지하수 수위변화 추세
- 4 지하수 이용량 변화
- 5 기후위기 대응 물 관리 개선방안

1 제주 지하수 관측망 현황

[지하수, 보이지 않는 것을 보이게
Groundwater : making the invisible visible]

제주특별자치도 지하수 관측망은 지하수의 수위·수질 변동 상태를 파악분석

- 지하수위 하강, 지하수의 수질 악화, 대수층으로의 염수 침입 등 지하수 장애로부터 지하수를 보전·관리하고 대책을 수립하기 위하여 지하수의 변동 상태를 정기적이고 지속적으로 관측·감시하는 시설임



유역구분	관측소 구분			
	계	수위관측	수질관측	취수정 모니터링
계	202	149	41	12
북부유역	42	40	2	
서부유역	83	41	30	12
남부유역	30	27	3	
동부유역	45	39	6	
도시	2	2		

* 수질관측망에서는 수위관측과 더불어 지점 특성에 따라 수질항목 측정

3

2 기후변화가 지하수에 미치는 영향

- ✓ 지구 온난화에 의한 기후변화(Climate Change)는 강수의 편중이나 이상기온 현상 등이 나타나며, 이로 인한 가뭄 및 태풍과 집중호우 등이 빈번하게 발생
- ✓ 최근 기후변화의 중요한 요인은 인위적인 원인에 의한 기존의 기후변화 속도가 급격하게 증가

2021년 12월 ~ 2022년 2월
전 세계 이상기후 현상 별 발생 위치



함양량의 변화

- 강수량 패턴의 변화
- 토지이용(토지피복) 변화

이용량의 변화

- 기온 상승에 따른 용수 수요 증가에 의한 취수량 증가
- 농작물 재배에 있어 아열대성 작물로 전환과 시설재배로 많은 농업용수가 요구됨에 따라 자연 강우가 아닌 관개에 더 의존함

저류량의 변화

- 함양량의 변화
- 해수면 상승(연안지역에서 해수침투로 이어질 수 있음)

4

Climate change's impact on groundwater could leave 'environmental timebomb'

CarbonBrief

Daisy Dunne, 21 January 2019

2 제주도 기후변화 전망



“신기후체제대비 제주특별자치도 기후변화 전망 보고서(기상청, 2017)”

- ✓ 온실가스 저감 정책이 현실성 있게 어느 정도 실현되는 RCP 6.0 시나리오 적용
- * RCP 6.0: 온실가스저감정책이 어느 정도 실현되는 경우로서 21세기말 대기 중의 CO₂ 농도가 670ppm에 이를 것으로 전망, 현재 우리나라 대기 중 CO₂ 평균농도는 420ppm 수준

연 평균 기온	연강수량	강수강도	폭염일수	열대야일수
현재(2001~2010년 기준) 14.4℃ 대비 2030년대는 0.5℃, 2050년대는 0.7℃ 상승	현재(2,166mm) 대비 2030년대는 10.5% 감소, 2050년대는 1.5% 감소하다가 이후 증가 *특히 지역별 편차가 더 커질 것	현재 19.5mm/일에서 2030년대는 19.8mm/일, 2040년대는 21.4mm/일로 증가	현재 1.7일에서 2030년대가 되면 2.9일로 증가하고 2050년대는 4.1일로 증가	현재 9.6일에서 2030년대가 되면 12.7일로 증가하고 2050년대는 15.1일까지 증가

- ✓ 기온은 지속적으로 상승하는 경향을 나타내고 연평균 강수량은 변동폭이 커짐
- ✓ 물 이용량은 증가하고 지하수 함양량도 지역적 편차와 연 변화폭이 커짐에 따라 지하수의 지속이용가능성에도 문제가 발생할 가능성이 높음

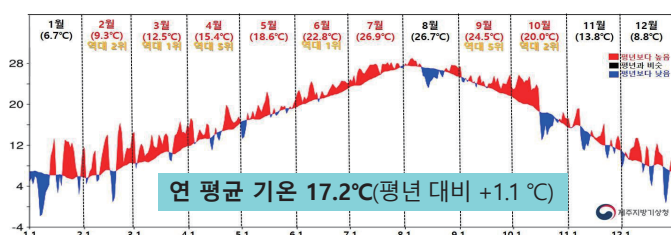
5

2 제주도 기후변화 현황

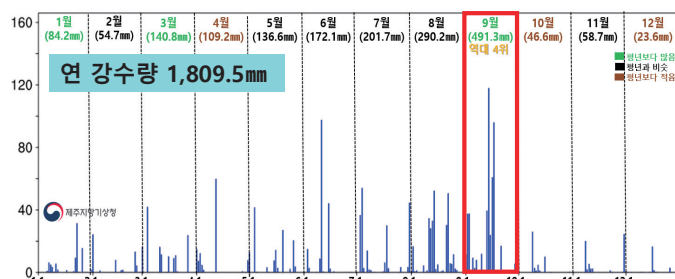


2021년 제주도는 역대 가장 높은 기온과 17일간의 짧은 장마, 큰 기온 변동

2021년 제주도 월별 평균 기온

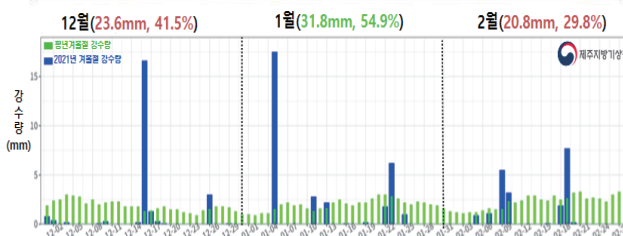


2021년 제주도 월별 강수량



평년보다 비가 다소 적게 내려 건조했던 제주도의 지난 겨울

- 2021년 겨울철 제주도2) 강수량 역대3) 최저 3위, 강수일수 최저 4위 기록
- 전국(제주도 제외) 강수량 및 강수일수4)에 비해 상대적으로 비가 많이 자주 내려



2021년 겨울철 강수량은 76.2mm(평년 대비 -108.5mm)
강수일수 22.8일(평년대비 -8.0일)

* 2021년 제주도 연 기후 특성,
평년보다 비가 다소 적게 내려 건조했던 제주도의 지난 겨울
(제주지방기상청 보도자료)

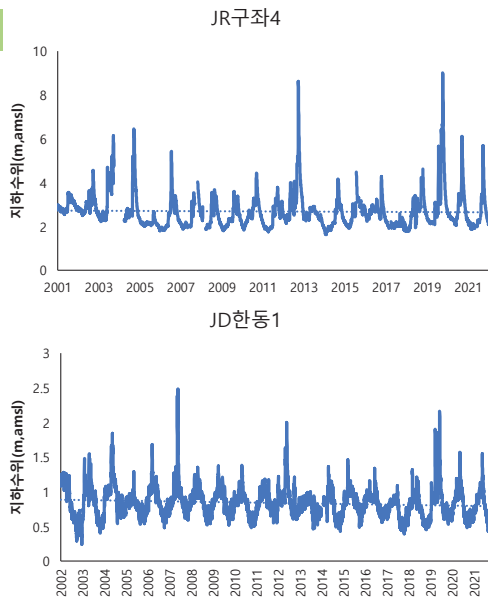
6

2 장기 수위변화 추세

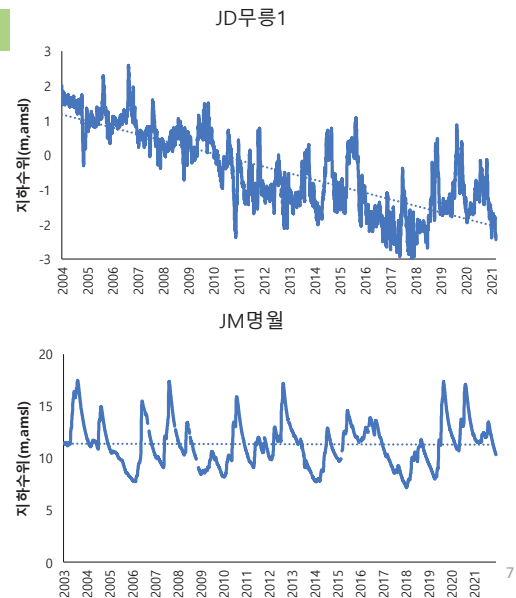


지역별 지하수위 분포

동부지역



서부지역

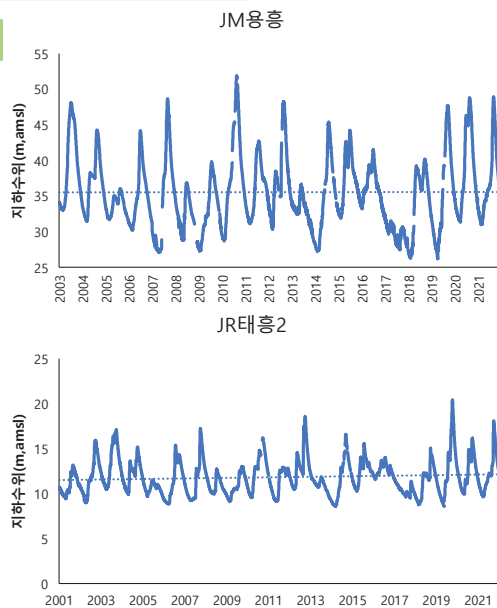


2 장기 수위변화 추세

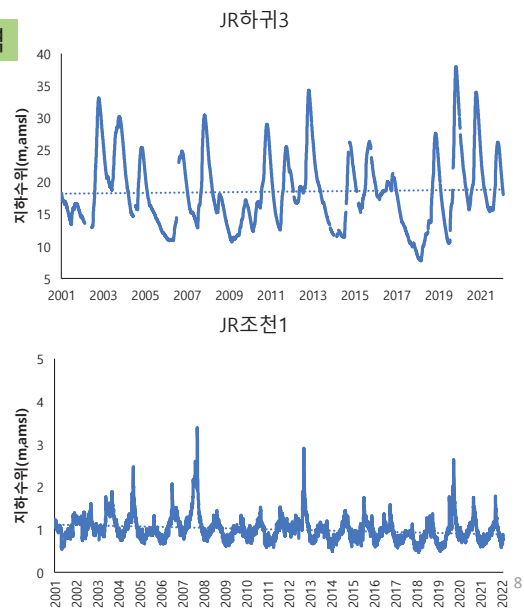


지역별 지하수위 분포

남부지역



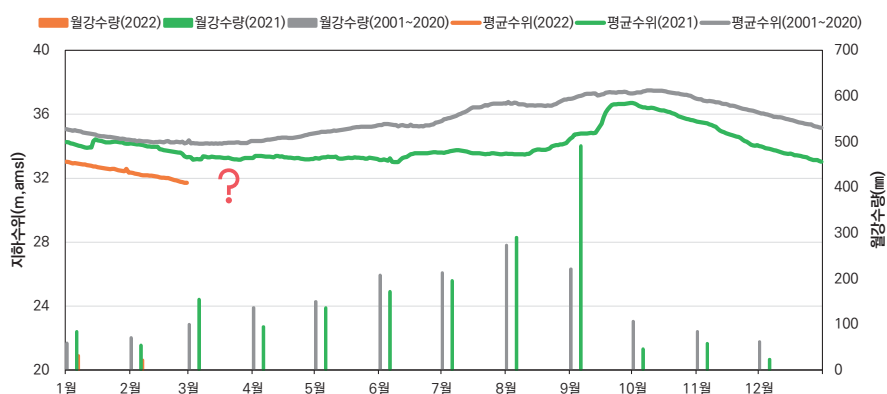
북부지역



3 장기 수위변화 추세

제주도 지하수위 관측정의 지하수위 분포

- ✓ 2001~2020년 평균수위 대비 2021년 평균수위가 낮게 나타남
- ✓ 2022년은 2월 현재까지 하강하는 추세 보임
 - 일반적으로 지하수위는 10월 이후 하강하다 4월부터 상승하는 추세를 나타내지만, 2021년의 경우 강수량 부족으로 6월까지 하강하다 9월 강수량의 영향으로 수위가 상승하는 경향을 나타냄

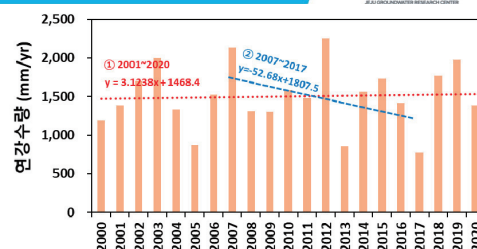


9

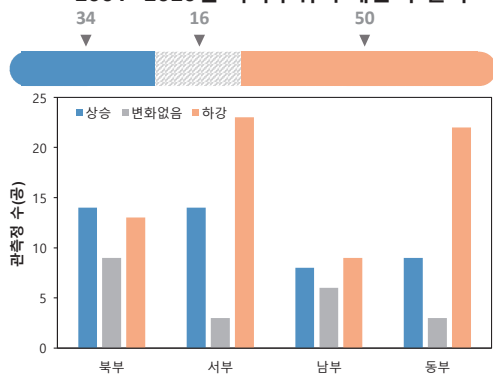
3 장기 수위변화 추세

강수량의 장기적 변화에 의한 지하수위 변화 추세 영향

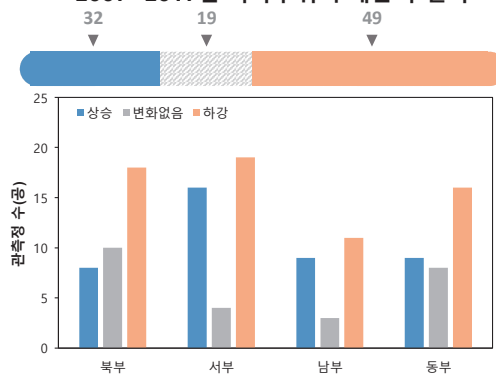
- ✓ 지하수위 관측이 시작된 2001년부터 최근 관측연도인 2020년까지와 연강수량의 뚜렷한 하강 추이가 나타나는 2007~2017년의 두 기간에 대한 추세분석



2001~2020년 지하수위 추세분석 결과



2007~2017년 지하수위 추세분석 결과



* 지하수위 하강 원인분석 및 대응방안 연구(제주연구원, 2021)

10

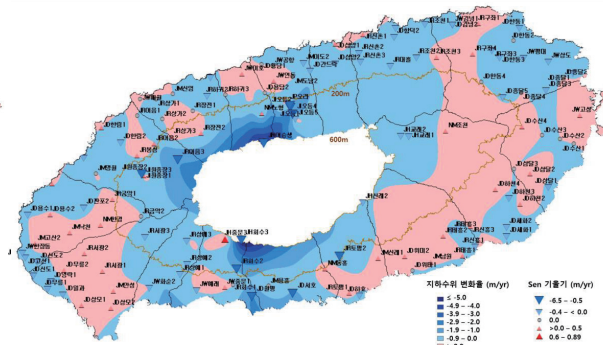
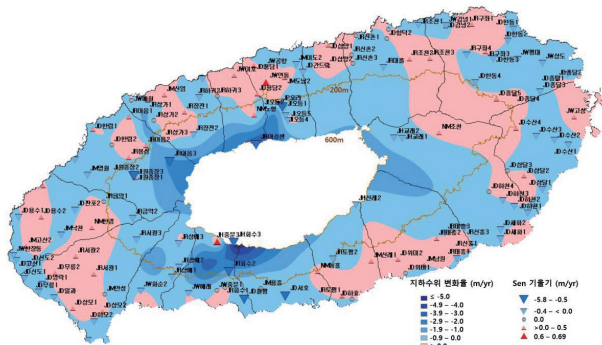
3 장기 수위변화 추세

지하수위 추세 및 Sen 기울기 분포

- ✓ 지하수위 하강 기울기가 큰 관측정은 고도 200m 이상의 고지대에 주로 위치함
- 강수량 변동에 따라 지하수위 변화가 심하게 나타나는 상위지하수 부존 지역
- ✓ 남부 안덕 ~ 중서귀 유역에서는 낮은 고도에서도 큰 지하수위 하강 기울기가 나타남
- ✓ 두 기간 모두 하강 지역이 우세하며, 변화율 -1m/yr 미만의 미약한 지하수위 하강이 전 구간에서 우세함

2001~2020년 지하수위 추세 및 Sen 기울기 분포

2007~2017년 지하수위 추세 및 Sen 기울기 분포



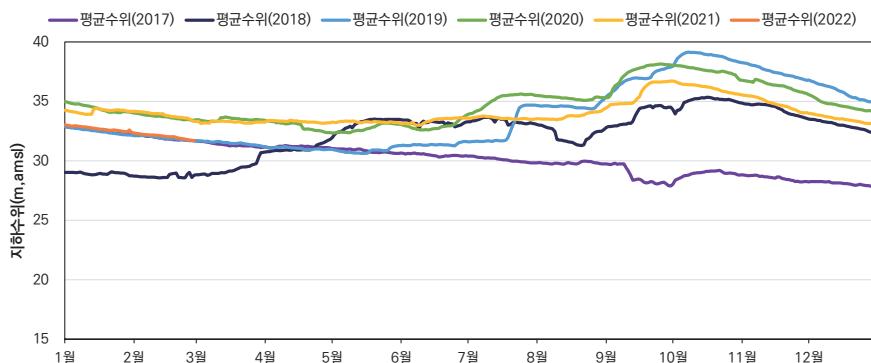
* 지하수위 하강 원인분석 및 대응방안 연구(제주연구원, 2021)

11

3 최근 지하수위 변화

최근 5년(2017~2021) 수위 변화 추세

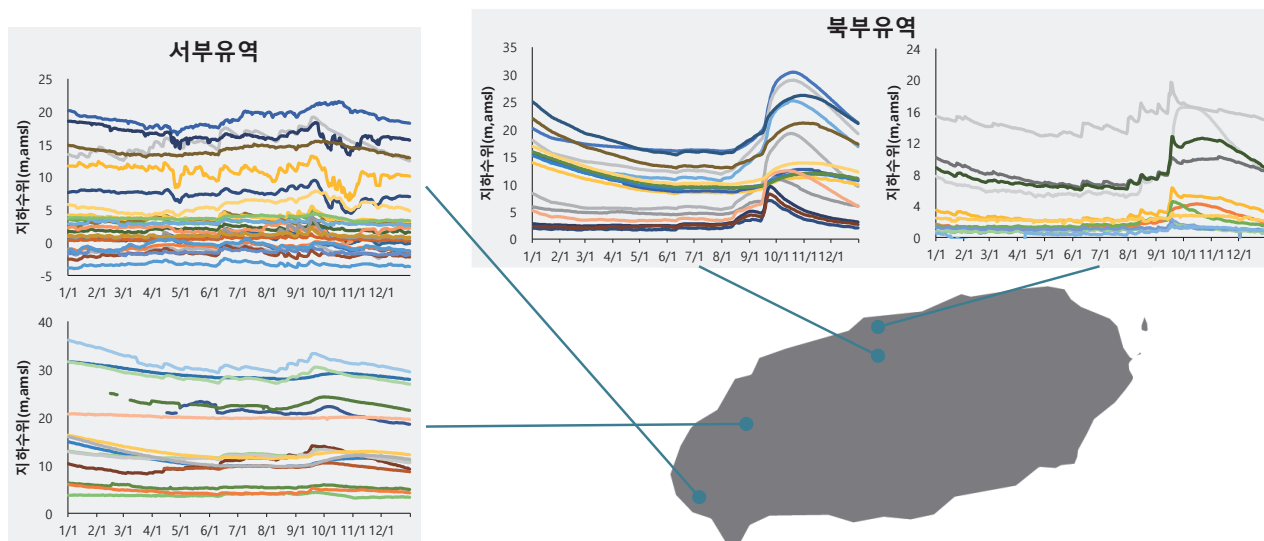
- ✓ 2017년의 가뭄으로 인해 2018년 3월까지 지하수위 하강 추세가 지속되었으나, 3월 강수량의 영향으로 상승하기 시작했으며 5월 이후에 평균수위까지 상승하였으나 전반적으로 수위가 낮게 형성되고 있음
- ✓ 2022년의 경우 2월까지의 수위가 2017년과 2019년 월평균 수위 변화와 같은 경향을 나타냄
- 만일 4월까지 강수량이 평년보다 많지 않으면 수위 하강이 6월까지 계속되어 2017년, 2019년과 같은 경향을 보일 수 있어 주의가 필요함



12

3 지역별 지하수위 패턴

- 지역별 지하수위 변동 패턴 분류와 각 패턴별 관리 및 예측 필요



13

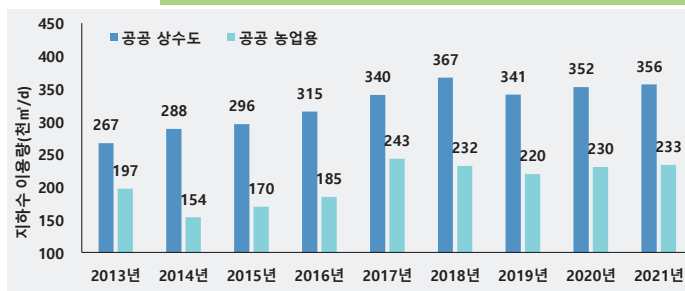
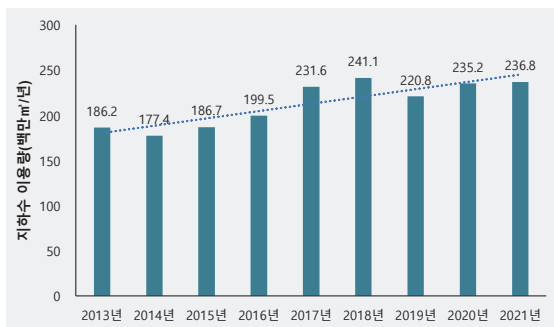
4 지하수 이용량 변화

“제주특별자치도 수자원관리종합계획(제주특별자치도, 2017)”

- 제주도 지하수 지속이용가능량

- 총 강수량 연간 39억5천2백만 m³, 증발산량 연간 13억7천8백만 m³, 직접유출량 연간 9억6천9백만 m³, 지하수 함양량 연간 16억3백만 m³
- 지하수 지속이용가능량은 연간 652백만 m³(일간 1,787천 m³) 으로 지하수 함양량의 40.6%
 - 2021년말 기준으로 허가된 양은 1,628천 m³/일로 91%가 허가됨
- 지하수 연간 이용 현황을 보면 현재 허가량의 39.8%를 이용
 - 2013년 186백만 m³/년 → 2021년 236백만 m³/년

가뭄 시마다 물 공급에 문제가 발생하고 있음



* 2013~ 2021년 지하수 원수대금 부과자료 이용

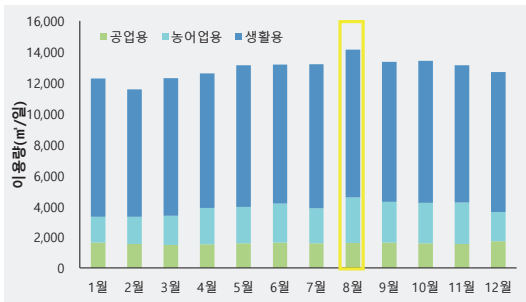
14

4 지하수 이용량 변화

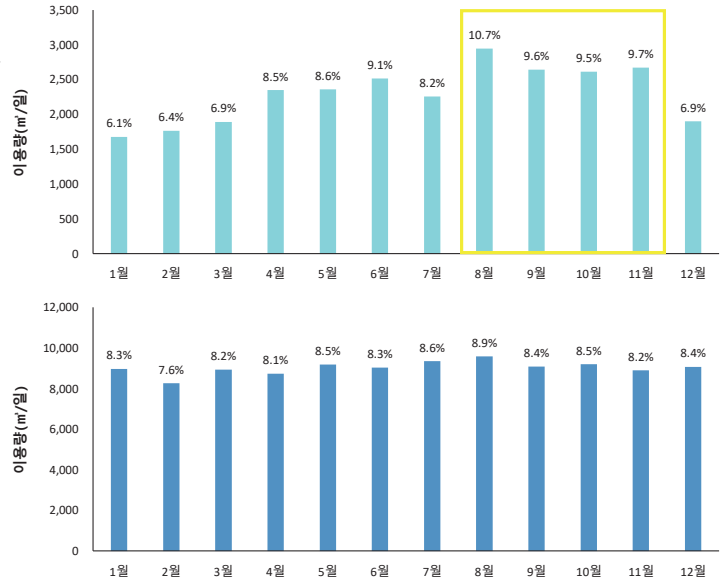
월별 평균 지하수 이용량

- ✓ 월간 11,573m³(2월) ~ 14,151 m³(8월) 이용
- ✓ 농업업종의 경우 8~11월의 이용량 많음
- ✓ 생활용의 경우 일정량 이용

2013~2021년 용도별 월평균 지하수 이용량



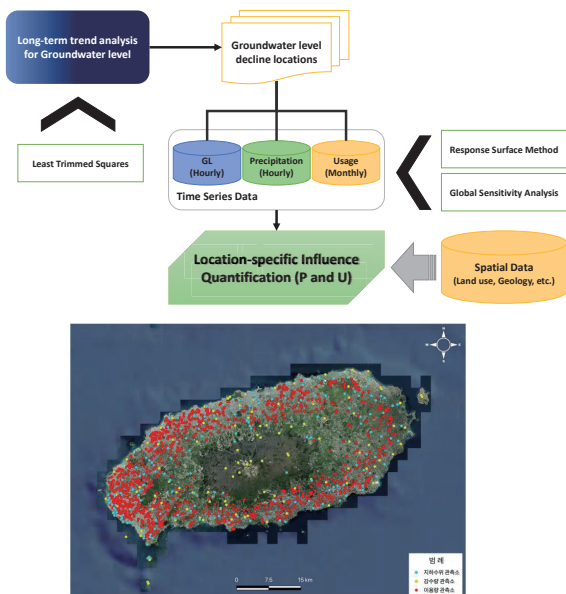
* 2013~ 2021년 지하수 원수대금 부과자료 이용



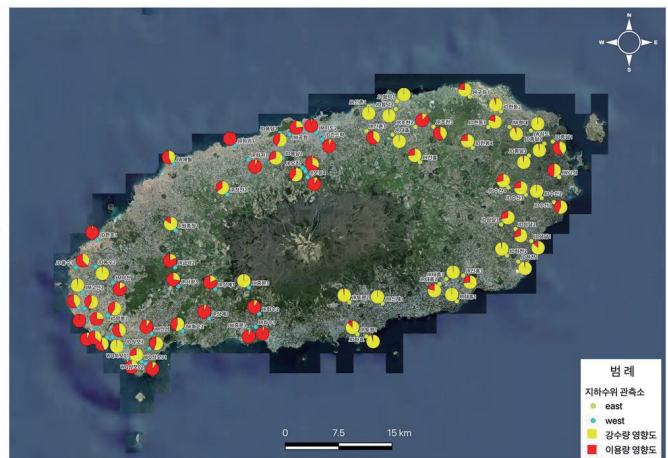
15

4 강수 및 지하수 이용과 지하수위 변동

지하수 변동 원인 인자 정량적 영향도 평가



지하수 관측정에 대한 강수 및 지하수 이용량 영향도



* 지하수위 하강 원인분석 및 대응방안 연구(제주연구원, 2021)

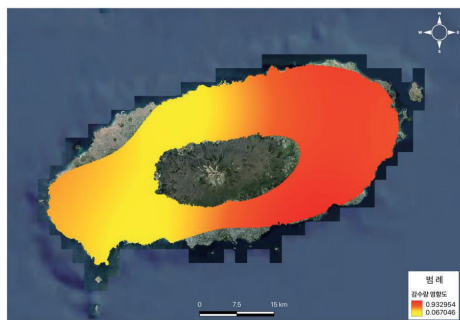
16

4 강수 및 지하수 이용과 지하수위 변동

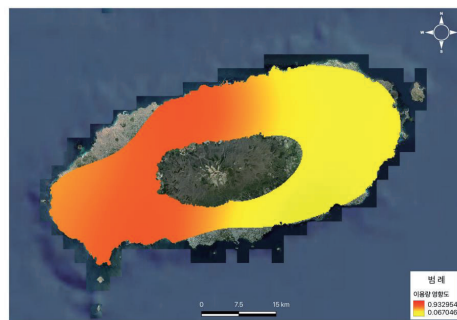
강수 및 지하수 이용량 영향도

- ✓ 강수의 영향도는 동남부에서 강하게 나타남
- ✓ 이용량의 영향은 북서부에서 강하게 나타남

강수량 영향도



이용량 영향도



동부지역과 서부지역의 지하수위 변동 패턴이 뚜렷한 구분 양상을 보임
지하수위 변동에 영향을 주는 기상학적 요인 또한 동부 및 서부지역에서 뚜렷이 구분되는 특징을 보임
→ 제주지역의 지하수 관리 대책은 동부와 서부지역으로 구분하여 **지역별 관리대책** 마련하는 것이 필요

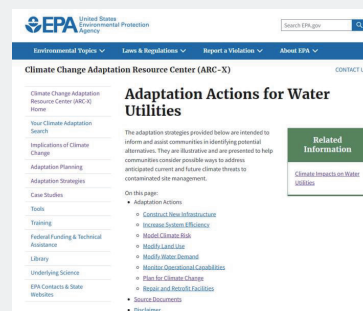
* 지하수위 하강 원인분석 및 대응방안 연구(제주연구원, 2021)

17

5 기후위기 대응 지하수 관리 방안

지하수위 하강 및 해수침투 등을 대비한 지하수 함양량 증대

- 기후변화로 인한 **가뭄 발생시** 평상시보다 물 사용량이 많아지며 빗물, 용천수 등을 이용할 수 없어 **전량 지하수를 이용**해야 함
- 가뭄이 발생하면 지하수 **함양량이 감소**하지만, 지하수 **이용량은 급속하게 증가**되어 **지하수위 하강이 더 빨라**지는 문제점 발생
- 가뭄 시 함양량 감소와 이용량 증가에 따른 지하수위 하강을 지연시키기 위해서는 **평상시 대수층 내의 지하수량을 증가**시키는 방안이 필요함
 - 미국 EPA(www.epa.gov) 기후변화 대응 실행계획 : 상수원 다양화, 물 저장 용량 증량, 해수 침투 대응 인공함양 등
- 제주도에서도 **고지대 용천수나 저류지, 저수지, 하천수** 등을 인공함양 시키기 위한 시설을 설치하거나 **하수재처리수** 등을 인공함양 시키는 방법을 적극적으로 검토할 필요가 있음



18



기후위기 대응 지하수 관리 방안

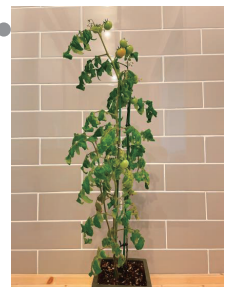


농업용수 부족 해결을 위한 공급체계 개선

- 2021년 기준 공공농업용 지하수 이용시설은 923개소(허가량 710천 m³/일), 사설 농업용 지하수 이용시설은 2,125개소(173천 m³/일)로 전체의 **67%**
- 현재의 농업용수광역화 사업은 마을 단위 관정을 일부 연계하여 활용하는 수준으로 이를 발전시켜 **지역단위 연계로 물을 균형있게 배분**할 수 있는 구조가 필요함
- 농지에 물을 주는 방식도 스프링클러를 이용하는 방식 보다는 점적 관수나 토양관수 등의 **개선 필요**
- 물을 적게 사용하는 작물로 전환하는 방안 검토 필요
 - 재배작물을 선정함에 있어 작물의 물 사용량을 감안하는 노력 필요
 - 기후변화에 따른 대응에 있어서 아보카도가 유망작물로 대두되고 있음
아보카도의 경우 물 이용량이 과일 1개당 320L



*JTBC [발품뉴스] 제주 아닌 정읍 한라봉?... 기후변화에 '주산지' 이동, (2021.10.02)



19

‘물을 사랑합시다’



