

하와이(오아후섬) 지하수관리 사례조사 출장결과 보고

I 출장 개요

☐ 출장목적

- 제주 물 선진화를 위한 국제협력 네트워크 구축
 - 각 기관별 지하수 보전·관리 현황 공유 및 공동 학술 세미나 교류 논의
- 지하수 관리 선진사례 조사(현장 방문을 통한 관리실태 등)

☐ 출장기간

- 2022년 12월 18일 ~ 2022년 12월 23일

☐ 출장국가

- 미국 하와이주(오아후 섬)

☐ 출장자

- 제주지하수연구센터 : 김민철 전문연구위원, 현범석 전문연구위원, 송병찬 전문연구위원
- 제주특별자치도청 : 진기옥과장, 김용우팀장, 부춘성팀장, 고윤정주무관, 김현희주무관, 이준호주무관

☐ 주요내용(일정)

날짜	방문기관	주요 내용
'22.12.19	• Kunia Well Field	• 상수도 수처리 기술 조사
	• Honouliuli Water Recycling Facility	• 하수처리 기술 조사
'22.12.20	• Hawaii Water Resources Research Center	• 하와이 수자원 주요 이슈 파악 • 최근 수행중인 연구 동향 조사
'22.12.21	• Commission on Water Resource Management	• 하와이 물관리 방안 • 제주-하와이 학술 세미나 일정 협의
	• Waihee Tunnel	• 수평터널을 활용한 수자원 확보 기술 조사

II 출장 결과

1. Kunia Well Field (쿠니아 상수도 관정)

☐ 장 소

- 명칭 : Kunia Well Field
- 위치 : 253 Kunia Rd, Waipahu, HI 96797, USA
- 관리기관 : Board of Water Supply(BWS)

☐ 면 담 자 : Julie H., William J., Arthur W.K.

☐ 주요내용

- 1977년 4월 7일 오아후 섬에서는 1.87m³의 EBD¹⁾(토양처리용 살선충제)가 지하수 관정 주변에서 누출되는 사고가 발생함
 - 발생 직후 시료를 채취하여 수질검사를 하였으나 EBD는 검출되지 않았음
- 1979년 5월 미국 환경국은 캘리포니아 지역 지하수 관정에서 DBCP²⁾(Dibromochloropropane)가 검출됨에 따라 DBCP를 사용하고 있는 하와이주에 대해 모니터링을 착수하였음
 - 1979년 6월, 오아후 섬, 마우이섬, 몰로카이섬, 라나이섬에서 과거 DBCP를 사용했던 파인애플 농장에 인접한 16개 관정에서 시료채취를 실시하였으나 검출되지 않음
 - 2차로 마우이섬의 마우이 고등학교 지하수 관정에서 200ppt의 DBCP가 검출되어 주변 4개지점에서 추가 조사를 하였음
 - 마우이 고등학교 관정에서 300ppt, 주변 용천수 2,230ppt 및 260ppt, 부유지하수에서 1,740ppt의 DBCP가 검출됨
- 1980년에 1977년 EBD 누출사고가 있었던 오아후 섬 쿠니아 지

1) EBD : 훈증제로 사용되는 토양처리용 살선충제이며 흡입 시 신진대사 변화를 일으키고 세포 조직을 파괴하는 물질

2) DBCP : 선충류에 효과적으로 사용되는 살충제로서 정자감소, 악성종양을 일으켜 현재는 사용금지 물질

역 델몬트회사의 지하수 관정에 대한 집중적인 조사 수행

- 조사 결과, EBD는 92,000~300,000ppt의 농도가 검출되었고 DBCP는 500~11,000ppt의 농도가 검출됨
- 오아후 섬의 쿠니아 지역 호놀룰루시 수도국의 상수도용 관정에 서도 DBCP와 EBD가 검출되어 가동이 중지되고, 이 일대 관정이 폐쇄되기도 함
- 당시 정부는 지하수 관정에서 나온 성분들은 일대 농업과 관련이 깊다고 판단하여 오염물질을 제거하기 위해 입상활성탄 정수처리시설을 설치하고 오염 예방 프로그램을 진행, 관리를 하고있음
- 현재 오염 예방 프로그램이 이뤄지고 있으며 지하수 오염 이후 지하수에 대한 관심이 높아짐에 따라 모니터링 등을 통해 지속적으로 수질관리에 나서고 있음
- 하지만, 최근 도심속 난개발이 극심화되면서 하와이도 제주와 마찬가지로 지하수와 관련된 문제가 야기되고 있는 상황임
- 또한, 농업활동에서 비롯되지 않는 유기화학 물질들도 오아후 섬의 지하수 관정에서 검출되었음
- Chlordane, Dieldrin, Trichloroethylene와 같은 살충제 및 Tetrachloroethylene, Carbon tetrachloride와 같은 유기화학물질도 호놀룰루와 오아후 섬 중부지역 일부 지하수 관정에서 검출되고 있음
- 농약성분이 검출되고 있는 관정은 대부분 과거 파인애플을 대규모로 재배하였거나 현재도 재배하고 있는 지역 주변 관정이며, 이들 성분을 함유한 농약은 파인애플 재배시 사용되는 농약에서만 사용되는 점을 들어 오염원이 파인애플 농경지에서 사용한 농약인 것으로 추정하고 있음

- 이에 따라, 먹는 물로 공급되는 수원에 대해서는 입상활성탄 정수처리시설 또는 공기교반 정수처리시설을 통한 정수 후 공급 중
- 상수원 내 활성탄은 1년 주기로 교체해 주고, 폐 활성탄은 폐기물 처리기관에서 위탁수거하고 있음
- 쿠니아 상수원 시설에는 총 4공의 지하수 관정, 인근지역에 3공의 관정을 개발(총 7공 개발·이용)하여 하루에 450만갤런($17,000\text{m}^3/\text{d}$)을 취수함
- 취수한 지하수는 1만 8천여명이 사용할 수 있도록 쿠니아 지역에 공급하고 있음
- 쿠니아 상수원 시설 내 관정간 이격 거리는 25-30ft(7.6-9.1m), 심도는 약 700ft(213m)임
- 취수 및 정수된 물을 저장할 수 있도록 3,000~4,000 m^3 수준의 물탱크 2기를 설치·운영하고 있음



	
c. 저장용 물탱크	d. 활성탄을 이용한 정수처리시설
	
e. 정수처리시설 내 입상활성탄	f. 상수도시설 현황 설명

<그림 1> 쿠니아 상수도 관정 현장조사 사진

2. Honouliuli Water Recycling Facility (호노올리울리 하수 재이용 시설)

☐ 장 소

- 명칭 : Honouliuli Water Recycling Facility
- 위치 : 91-1000 Ceiger Rd, Ewa Beach, HI96706, USA
- 관리기관 : Board of Water Supply(BWS), Veolia

☐ 면 담 자 : Kathleen Elliott-Pahinui, Calvin Say, Fred Layi,
Catherine Soriano, Arthur W.K.

☐ 주요내용

- 현재 하와이는 중앙 집중식 폐수처리시설(Centralized facility)과 개별 폐수시스템(Individual Wastewater Systems)을 통해 하수를 처리하고 있음
 - 하와이 주민의 61.9%는 중앙 집중식 폐수 처리 시설을 이용하고 38.1%는 개별 폐수시스템을 통해 하수를 처리하고 있음
 - 중앙 집중식 폐수처리시설은 제주에서 운용하고 있는 공공하수처리방식으로, 가정이나 시설의 하수를 하수관로로 연결해 폐수(하수)처리장으로 보내 처리하는 시스템임
 - 개별 폐수시스템은 중앙 집중식 폐수처리장에 연결되지 않은 가정이나 건물의 폐수를 받아 처리하는 분산형 시스템으로 중앙 집중식 폐수처리장으로 하수관로를 연결하기 어려운 지역에서 이용하며 제주도의 개인하수처리시설과 같은 개념
- 오아후 섬의 하수처리는 1972년 오아후 섬 수질관리 프로그램 계획이 수립되면서부터 본격적으로 이루어지기 시작함
- 오아후 섬에서는 현재 9개(호노올리울리, 카후쿠, 카일루아 공항, 라이에, 파알라 카이, 샌드 아일랜드, 히아와, 와이아나에, 와이마날로)의 폐수(하수)처리장이 운영되고 있음

- 운영실태
 - 처리용량 : 45,400m³ (1200만 갤런)
 - 처리방법 : R-1과 RO의 2가지 수질등급의 물로 재처리
 - R-1 : 고온호기성소화법으로 슬러지와 같은 고농도의 고형물을 감량화 또는 생분해를 통한 안정화를 위하여 소화를 실시하는데, 반응속도를 향상시킬 목적으로 충분한 산소공급에 의하여 호기성상태에서 고온으로 처리하는 방법
 - RO : 역삼투압방식으로 각종 불순물이 섞여 있는 물에 압력을 가해 반투막인 멤브레인을 통과할 때 미생물, 중금속, 무기물질, 방사선물질 등 불순물은 걸러주고 순수한 물과 용존 산소, 미량의 미네랄만 통과시켜주는 방식
- 호노울리울리 하수처리장은 지금까지 1차 처리된 하수를 연안으로부터 약 2.7km 떨어진 연안에 방류해 왔으나, 1990년대 호노울리울리 처리장에 1일 45,400m³을 재처리할 수 있는 재이용 시설이 준공되었음 <그림 2, a>
 - 하수처리에서 처리된 하수는 재처리시설에서 R-1과 RO의 2가지 수질등급의 물로 재처리되고 있으며, R-1은 골프장을 비롯한 농업용수로 이용하며, RO는 공업용으로 이용하고 있음
 - R-1 재처리 능력을 기존 R-1 및 RO 처리 용량을 합친 1,600만 갤런까지 개선하여 Ewa 평야 전역에서 비음용수를 사용할 수 있도록 시설 개선 중
 - 재처리를 하고난 후 남은 농축액은 다시 물에 용해시켜 하수처리장으로 보냄
- 하수 재처리수를 이용하고 있는 사용자들의 만족도는 R-1, RO 모두 매우 높은 만족도를 보인다고 함
- 그러나 당국에서는 재활용수를 피부에 접촉할 시 비누와 깨끗한

음용수로 씻어야 한다고 설명하고 있으며, 잠재적인 건강 위험에 대해 홍보 및 교육을 진행하고 있음

- 특히, 처리공정도에서의 비음용수는 보라색으로 구분하였으며, <그림 2, b>, 사용 시 주의 표지판을 함께 설치함



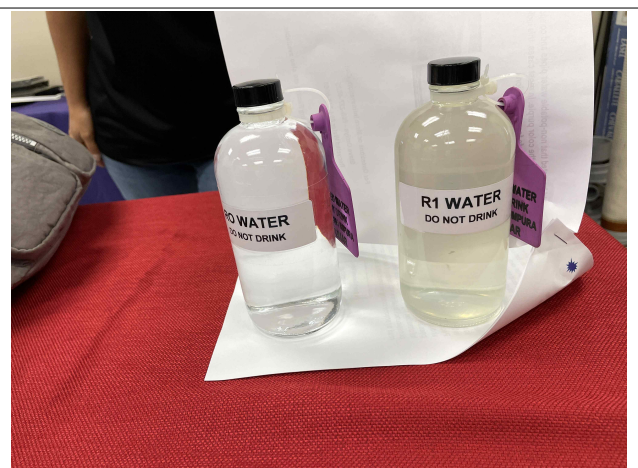
a. 하수재이용시설 설명



b. 재이용수 공급관로망



c. RO 및 R-1 처리 공정도



d. RO 및 R-1 처리수 비교



e. UV 살균(R-1)



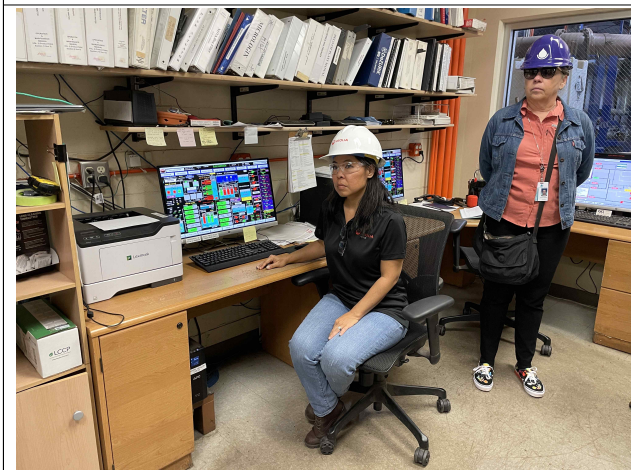
f. 처리된 재이용수(R-1)



g. micro filterRO)



h. membrane filterRO)



i. 하수재이용수 통제실



j. 통제 시스템

<그림 2> 호노울리울리 하수재이용 시설 사진

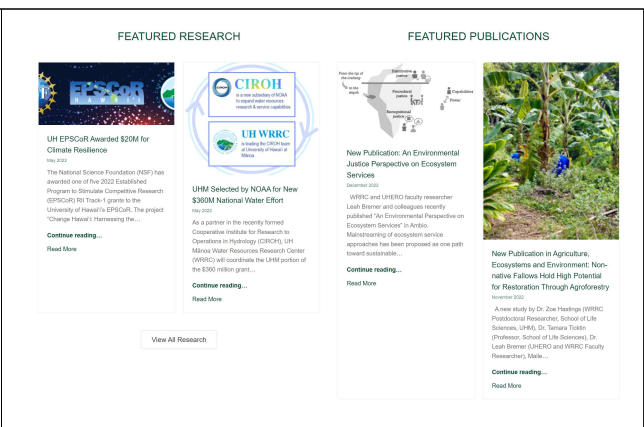
3. Hawaii Water Resources Research Center(하와이 수자원 연구 센터)

□ 장 소 : Holmes Hall, Honolulu, HI 96822, USA (Department of Civil Engineering)

□ 면 담 자 : Thomas Giambelluca, Tao Yan

□ 주요내용

- 미국에서는 각 주마다 1개의 연구 센터를 설치·운영하며 전체 54개소의 연구 센터가 설치됨
 - 하와이에는 2개소의 센터(1개소는 American Samoa에 위치)가 위치하며, 센터에서는 지하수 모니터링 및 데이터 분석, 모델개발 등을 수행
- 하와이대학 수자원연구센터에서는 총 100개의 기상 및 지하수 모니터링 시설을 설치하여 데이터를 자동 수집하고 있음
 - 모니터링 데이터는 강수량, 기온, 풍속 등 기후자료와 지하수위 자료를 수집
 - 연간 유지관리 비용은 50만 불(한화 약 6천 5백만원)이 소요됨
 - 센터에서 홈페이지를 운영하며, 주요 연구내용 및 분석 결과물을 제공하고 있음

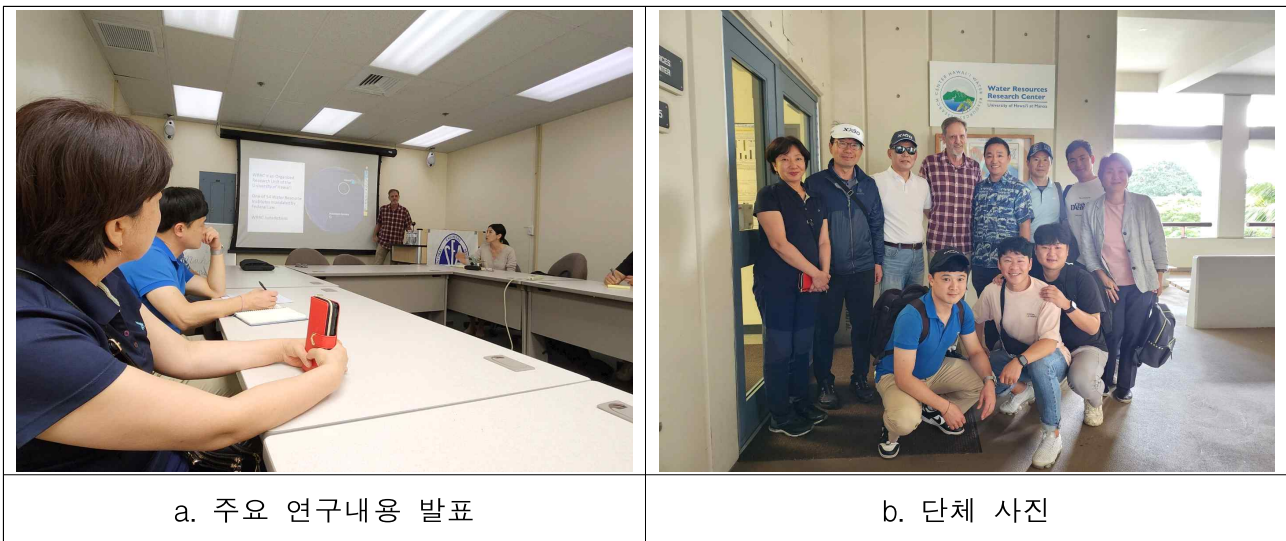
	
a. 하와이대학 수자원연구센터 홈페이지	b. 주요연구 및 간행물 소개

<그림 3> 하와이대학 수자원연구센터 홈페이지(<https://www.wrrc.hawaii.edu/wrrc-hawaii/>)

- 최근 하와이에서의 가장 큰 지하수 이슈는 수질오염으로 주원인으로는 군대(육, 해군)에서의 불법적인 폐기물 매립, 농약, 재래식 시설(오수처리시설이 갖춰지지 않은 시설)로 인한 오염물질 유입임
 - 이러한 수질오염에 대한 이슈는 약 1년 전부터 제시되어 왔으며, 현재 사회적으로 공유, 다양한 분야의 전문가와의 협업을 통해 수질문제 해결을 위해 노력하고 있음
 - 특히, 재래식 시설은 하와이 전체에 약 9만여개 정도 설치되어 있으며, 이는 개인오수처리시설 수보다 많은 수치임(정확한 현황 파악이 안 된 상황)
 - 현재, 하와이주에서는 재래식 시설을 가진 소유주에게 정화조시설을 갖추고, 수질 처리 후 방류 하도록 권고하고 있는 상황
 - 이러한 내용을 주 정부에 전달하고, 2050년까지 공공화 시설로 전환하고자 하는 계획을 수립하였으나, 실현 가능성이 모호하다는 의견이 있었음
- 기후변화에 의한 수자원 대응 방안으로 호놀룰루 지역에서 자체적으로 진행하는 연구와 하와이주 전체적으로 진행하는 연구가 있음
- 하와이주에서는 본토로부터 물 공급이 안 되고(섬 내 자체 해결), 강수량 변화에 의한 수자원 환경변화, 관광객 급증에 따른 수요량 증가 등의 문제를 해결하기 위해 하수재이용수를 최대한 활용하고자 함
 - 오아후 섬만 하더라도, 1일 방류되는 방류수는 약 6억 m^3 수준으로 방류수 수질기준에 대해 EPA(Environmental Protection Agency)와 공동으로 사람에게 미치는 영향에 관한 연구를 수행

하고 있음

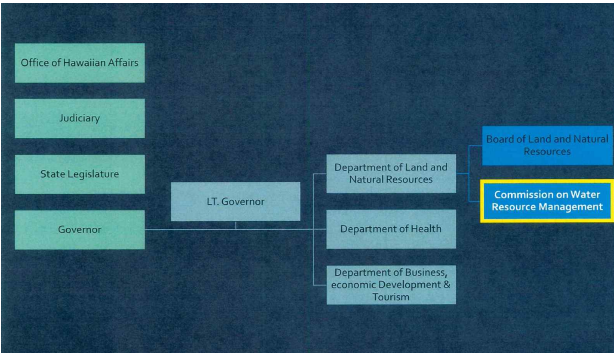
- 현재, R-1으로 처리된 재처리수는 조경용수 및 골프장에서 최대한 활용하도록 추진중임
- 지하수 수질개선을 위해 화학적 위험물질(앞서 언급한, 폐기물, 오염원, 농약 등)이 지하수로 최대한 유입되지 않도록 관리하고 있음
- 물 사용량을 절약하기 위해서는 절수기기 설치, 전자기기(세탁기, 식기세척기 등)로 인한 물 절약 등이 실시되고 있음
- 조경수는 최대한 물이 많이 필요하지 않은 작물로 식재하고 있음



<그림 4> 하와이대학 수자원연구센터 방문 사진

4. Commission on Water Resource Management (수자원 관리위원회)

- 장 소 : 1151 Punchbowl St # 227, Honolulu, HI 96813 USA
(State of Hawaii Commission on Water Resource Management)
- 면 담 자 : Jeremy LS Kimura, Ryu Dami
- 수자원관리위원회 조직 구성
 - 하와이주는 하와이 사무국, 사법부, 시의회, 주지사로 구분되며, 주지사 아래, 토지 및 자연 자원부, 보건부, 경제개발 및 관광부로 나뉨
 - 토지 및 자연 자원부에는 토지 자연 자원위원회와 수자원관리위원회가 속해 있음
 - 수자원관리위원회에서는 지하수 및 하천 보전·관리, 모니터링, 수자원 관리계획 등의 업무를 수행
 - 수자원 관리위원회에는 현재 24명의 연구진으로 운영

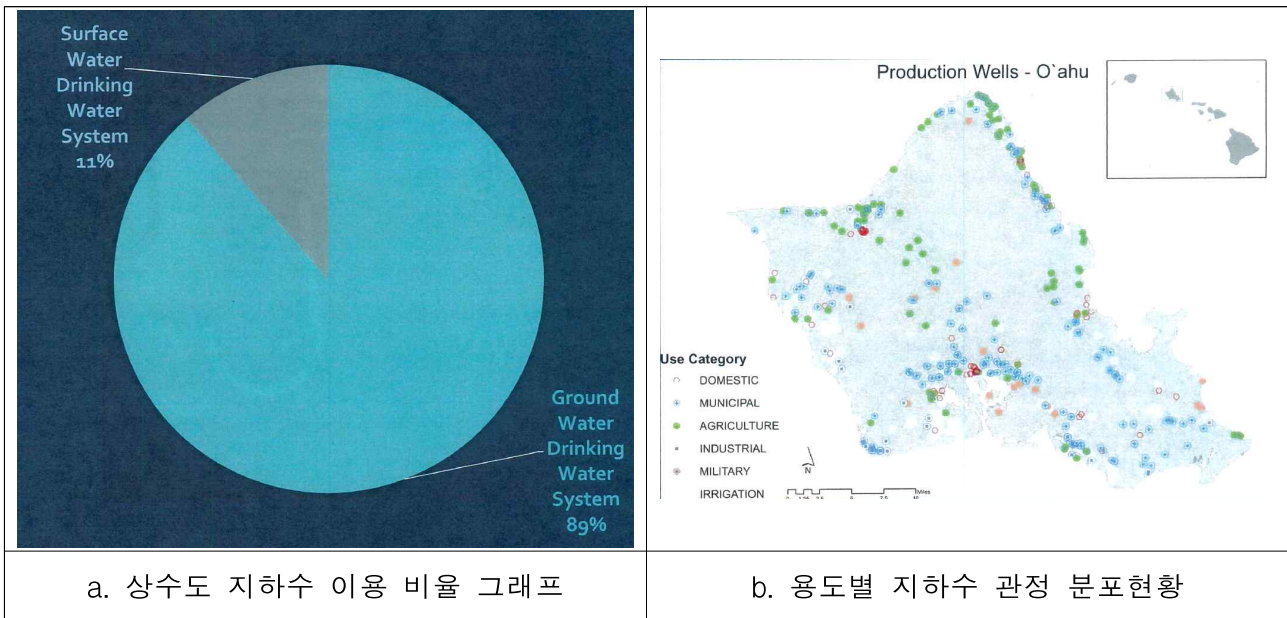
	  Director of DOH Elizabeth Char  Aurora Kagawa-Viviani  Michael Buck  Paul Meyer  Wayne Katayama  Neil Hannahs
a. 하와이주 조직 구성 현황	b. 수자원 관리위원회 주요 인사

<그림 5> 하와이주 조직 및 수자원 관리위원회 주요 인사

- 지하수 이용·관리 현황
 - 하와이의 대부분의 식수는 지하수로 이용되며, 하와이 전체 지

하수는 약 5,000공, 오아후 섬에는 약 2,200공의 지하수가 개발·이용 됨

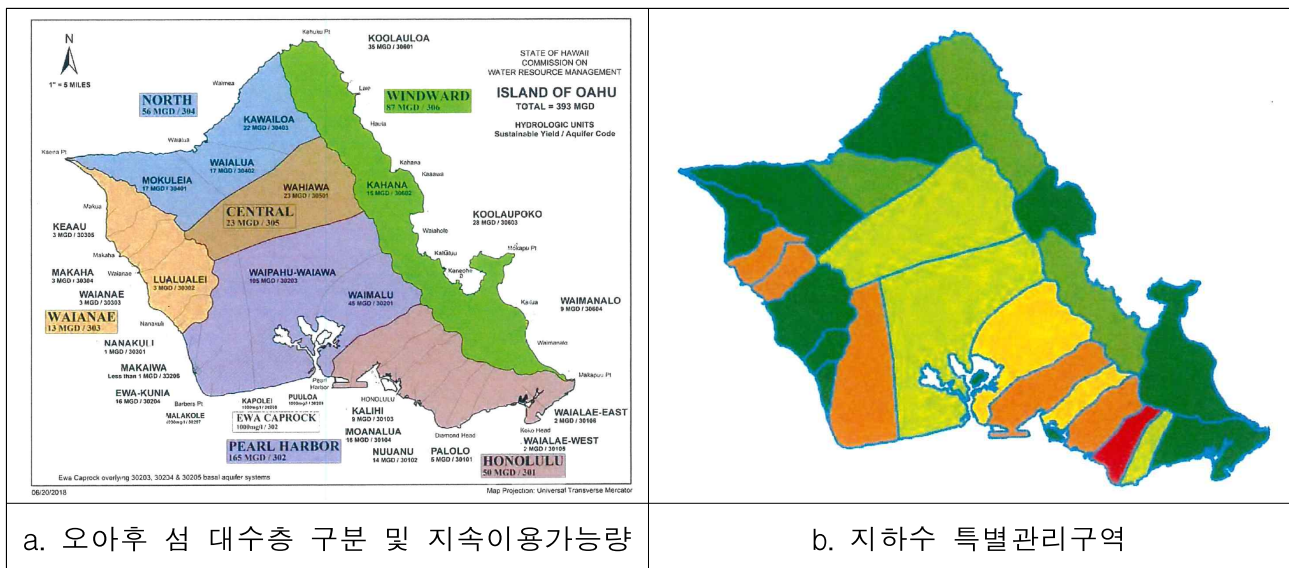
- 상수도의 89%는 지하수 이용, 11%는 지표수 이용
- 지하수는 상수도, 농업용, 공업용, 군용, 관개용 등으로 구분하여 관리됨



<그림 6> 호놀룰루 시의 지하수 관정 현황

- 오아후 섬의 지하수 지속이용가능량은 전체 393MGD(약 1,491,290 m^3 /일)이며, 대수층에 따라 6개의 구역으로 구분하여 관리하고 있음
- 진주만(Pearl harbor)은 165MGD(624,525 m^3 /일), 호놀룰루(Honolulu) 50MGD(189,250 m^3 /일), 윈드워드(Windward) 87MGD(329,295 m^3 /일), 와이에나(Waianae) 13MGD(49,205 m^3 /일), 북부(North) 56MGD(211,960 m^3 /일), 중부(Central) 23MGD(87,055 m^3 /일)임
- 오아후 섬의 지하수 이용량은 지속이용가능량의 약 50%수준

- 특히, 와이키키해변이 위치한 소유역에는 지하수 사용량이 지속 이용가능량을 초과하여 특별관리구역으로 관리되고 있음
- 수자원 보호 계획은 수자원 형성 기원, 수문학적 특성, 수자원 활용, 보전 및 보호 프로그램 등을 고려하며, 각종 데이터(물이 용량, 이해관계자, 수자원 현황)를 수집하고, 데이터 분석(수자원 주요 이슈 및 목표 설정), 솔루션 및 전략(프로젝트 발굴)을 토대로 계획하고 있음
- 특히, 수자원 계획과 보호·관리정책을 통합하여 수자원 관리계획을 수립함



<그림 7> 오아후 섬의 지속이용가능량과 특별관리구역 현황

□ 제주도-하와이 학술 세미나 관련 업무협의

- 2023년 학술 세미나는 하와이에서 여름경에 추진할 계획이며, 이번 하와이 주지사가 변경됨에 따라, 보고 이후 1월경 확정할 계획
- 하와이 또한 제주와 마찬가지로 수자원 오염에 대한 이슈가 나타나고 있어, 세미나는 오염과 관련된 주제로 설정하고, 각 기관

별 개선방안을 중점으로 진행하는 것이 좋을 것 같음

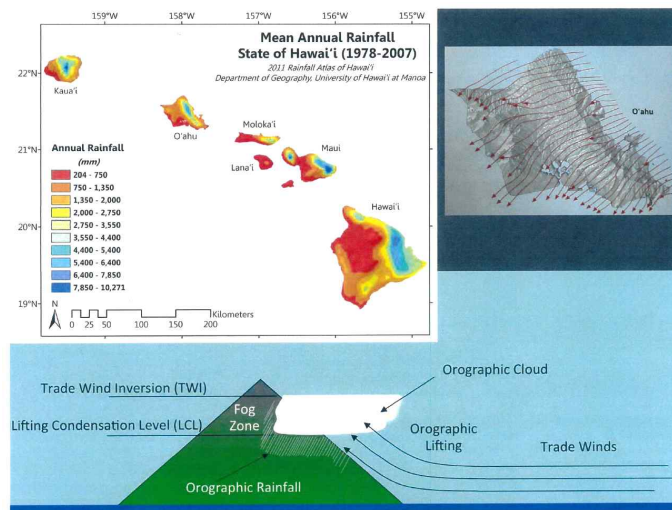
- 또한 수자원관리위원회에서 용도별 지하수 사용량 관리 방안, 거버넌스 운영을 어떻게 하는지 공유해주면 좋을 것 같음
- 제주도에서는 지하수 이용량 모니터링 시스템과 관련된 내용을 이야기해주었으면 좋겠음

□ 기타 주요의견

- 개인오수처리시설의 경우, 연방정부차원에서 하수관로 연결 지원 정책을 추진중임
 - 지원금은 연방 보호국 교부금을 지원받아 활용되며, 추가 개인 및 시설 설치 시에는 직접 부담하는 방안
 - 오아후 섬에는 주택간 거리가 너무 가깝거나, 외부지역은 주택간 거리가 너무 멀어 비용이 많이 소요될 것으로 판단되며, 9만 여개의 재래식 시설 연결이 전체적으로 가능할지 미지수임
 - 관리위원회에서 기존 재래식 시설을 조사하고 관리할 수 있는 기능은 없으며, 새로운 시설이 발견될 경우, 개인오수처리시설을 설치하도록 권고하고 있음
 - 다만, 지하수 오염지역에 20인 이상 시설인 경우, 시설 개선을 안할 경우, 벌금을 부과하고 있으나, 20인 이하의 시설에는 규제방안이 없음
- 하와이 또한 제주도와 기후변화에 취약한 지역으로 우선 지역주민에게 절수를 권장하고, 새로운 건물 개발 시 절수시설을 설치하고 있음(이는 건축 전문가와 협업하면서 제안하고 있는 상황)
- 최근 하와이 공항 근처에서 지하수 오염에 의해 상수도 공급량이 부족해지는 현상이 나타나고 있으며, 위원회에서 지속적으로 함양량을 모니터링하고, 지속이용가능량 대비 사용량을 비교 하

고 있음

- 하와이는 제주도와 유사하게, 지하수 함양률이 전체 수문총량의 40% 수준이지만, 강수량의 지역적 편차가 매우 큼
 - 지역적으로 강우 편차가 매우 심하고, 매년 200~10,000mm의 강수특성을 보이고 있음
 - 이에 강수량이 적은 지역은 지하수 허가 시 지속이용가능량과 이용량 등을 고려하여 세밀하게 검토 후 허가해줌
 - 또한 해양생태계에 문제가 발생하는 경우에도 면밀한 검토 후 허가가 진행됨



<그림 8> 하와이섬의 강수량 분포 현황

- 제주도의 경우, 사설 지하수 개발 허가는 제한하고 있으나, 하와이의 경우, 제한하기 위한 규제방안이 따로 없음(제주에서는 지하수 관리를 잘하고 있는 것으로 생각됨)
 - 하와이에서는 사업계획 및 물 이용계획이 명확히 확인될 경우, 지하수 허가가 진행됨(특별관리구역 이외 지역)
- 하와이 빅아일랜드 섬에서는 지하수공을 매우 깊게 굴착하여 식수로도 사용하지만, 온도 차를 이용하여 에너지화하여 사용하고

있음

- 다만, 물을 끌어올리는데 전력 소모가 매우 높아 풍력 및 태양열 등 다양한 전력을 활용함
- 지하수개발이 된 지역에 지하수 오염이 발생할 경우, 위원회에서 정해진 허가량 내에서 활용하고 있는지를 검토하고, 생활용의 경우, 보건국에서 주요 항목에 대한 수질조사를 실시하고 있음
- 수질이 초과된 지하수의 경우, 관정 소유주와 상의 후 원상복구 등 추후 조치가 이루어짐(비용 등은 소유주에게 지출토록 함)
- 과거 파인애플 농장으로 인해 지하수 수질오염이 발생하였으며, 활성탄 처리 후 용수를 공급하고 있음
- 하와이에서 가뭄이 발생할 경우, 오아후 섬의 경우, 큰 영향은 없지만, 하와이섬은 영향이 크게 나타남
- 극심한 가뭄이 발생할 경우, 물 사용량 제한 프로그램을 운영하여 골프장에서 물사용량 절감 홍보를 실시함
- 물 사용량이 많은 지역은 강제로 진행하지만, 대부분 권장 하고 있는 상황(이러한 내용은 위원회에서 결정함)
- 제주도에서는 지하수 이용량이 지속이용가능량을 초과하여, 일부 지역에서는 해수침투가 발생하고, 해수를 사용한 농가에서 피해 발생 사례가 있으며 하와이에서 이러한 사례는 없는지?
- 하와이에서는 이러한 문제를 거의 발생하지 않는 상황이며, 지하수 관정을 해안과 거리를 두서 설치하도록 하고 있음. 염분 모니터링을 통해 실시간으로 확인하고 있음
- 또한 상수도에 염분농도 측정기기를 설치하여 농도 증가 시 자동으로 차단되는 시스템으로 운영됨
- 제주도는 먹는물, 생활, 농업 등 용도별 지하수 수질기준이 다른

데, 하와이에서도 용도별 기준이 있는지?

- 식수의 경우, 수질기준을 적용하지만, 농업용수나 골프장 등에서는 특별한 수질기준을 다루지 않음
- 농업용수 수질기준이 없으므로 수질이 나빠지더라도 크게 제한되지 않음
- 오아후 섬의 경우, 지하수 관정당 취수허가량 개념을 도입하였지만, 다른섬은 아직 허가량 개념이 없음
 - 지하수 허가기간은 20년으로 허가기간 이내 지하수 이용량이 취수허가량을 초과할 경우, 재허가받아야 함
 - 20년 후 지하수를 이용하지 않을 경우, 소유주에게 원상복구하도록 전달함
 - 현재, 사용을 안하는 지하수 약 300공 정도가 있으나, 소유주를 찾지 못하고 있음
 - 이러한 경우, 부동산 거래 시 원상복구비용을 회수하여 원상복구를 실시함
- 오아후 섬에서도 지하수 이용량을 관리하고 있으며, 실시간모니터링보다는 소유주가 유선으로 보고하는 방법으로 진행
 - 현재 오아후 섬 지하수 관정 중 60%정도가 유선 보고 되고 있으며, 보고가 안되는 경우, 벌금부과 방안을 모색하고 있음
 - 보고되는 데이터를 활용하여 이용량 분석을 실시하고 있음
- 하와이에서 지하수를 깊게 굴착할 경우, 온도가 100℃ 이상의 지하수가 있으며, 향후 에너지 전환 등 자원 활용 방안이 필요
- 마우이 섬 등 젊은 화산체에서 SGD가 많이 발생하는 것으로 보고되고 있으나, 현재 USGS에서 온도측정을 통해 대략적 확인은 하고 있으나, 유출량조사는 이루어지지 않은 상황
 - 이와 관련하여 제주도-하와이 공동연구로 하면 좋지 않을까? 생

각이 들며, 하와이는 어업이 주를 이루고 있어 해양 생태 분야
에 아주 좋은 연구라 생각됨



a. 회의사진



b. 기념사진

<그림 9> 하와이 수자원관리위원회와 회의 및 기념사진

5. Waihee Tunnel (와이헤 터널)

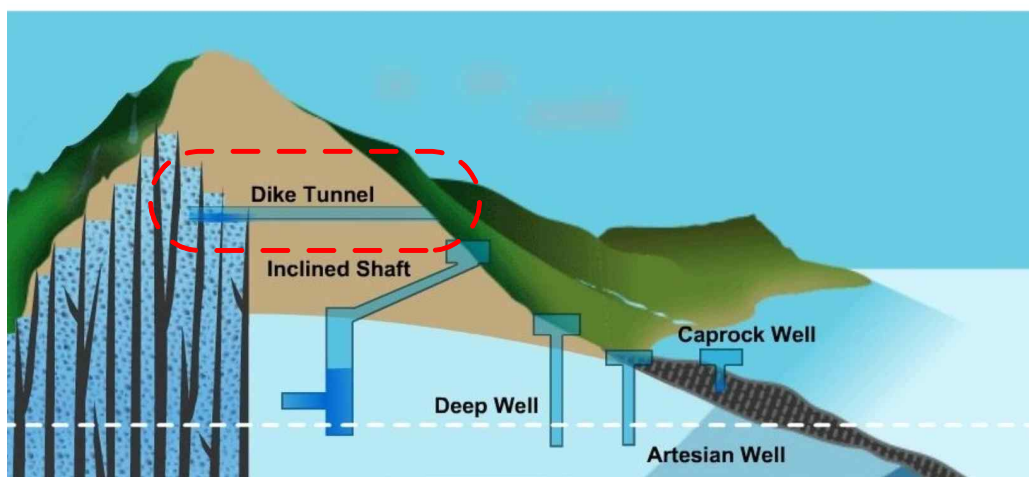
☐ 장 소

- 명칭 : Waihee Tunnel
- 위치(위경도) : 21°26'46.0"N 157°51'34.2"W, Googlemap
- 관리기관 : Board of Water Supply(BWS)

☐ 면 담 자 : Arthur W.K. (Board of Water Supply)

☐ 주요내용

- 와이헤 터널(Waihee Tunnel)은 1951년에 Suburban Water System(SWS)을 지원하던 Board of Water Supply 수문지질학자인 Chester Wentworth가 건설함
 - 터널을 건설하는데 약 1년 정도 소요되었으며, Kahaluu에서 kailua까지 오후우섬 주민 100만 명 중 약 5%(5만 명) 정도의 물을 공급하는 수원임
- 와이헤 터널은 상위 지하수를 개발하기 위한 수평형 터널로 암맥(Dike)을 수평으로 관통시킨 후 지하수를 동력없이 자연유하로 상위에서부터 하류방향으로 공급하고 있음
 - 또한, 자연유하 방식으로 물을 공급하기 때문에 전력이 부족하더라도 지속적인 물 공급에 용이함



<그림 10> 하와이 지하수 개발 모식도

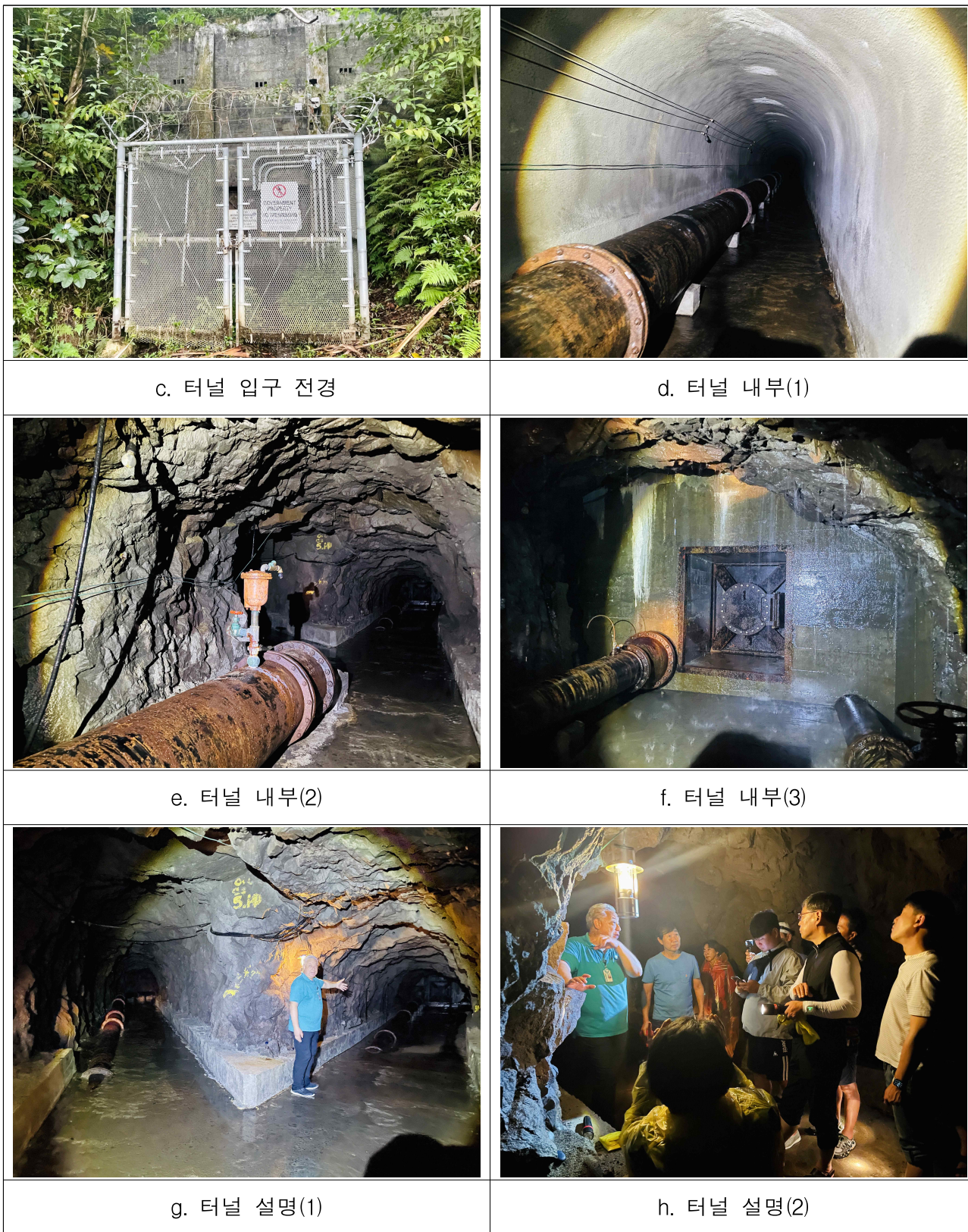
- 수평 터널 길이는 약 1,500ft(457m) 정도이며, 지하수는 파이프(Pipe) 라인을 통해 하류쪽으로 물을 자연유하 시킴
 - 터널 파이프로 연결된 하류지역에는 물이 역류하는 것을 방지하기 위한 역류방지시설을 설치하여 운영하고 있음
- 제방 터널에서 생산되는 물의 양은 하루에 약 26,400 ~ 34,000m³/day 정도이나, 수자원관리위원회에서는 지하수의 보전·관리를 위해 하루 약 18,900m³/day으로 취수량을 제한하고 있음
- 수평 터널의 끝에는 콘크리트 격벽을 설치하여 물을 저장하고 있음
- 터널 중간 암맥에서 흘러나오는 물을 막기 위해 콘크리트로 시공하여 보수관리에 용이하도록 설계되어 있음
- 과거 5년 전에는 터널 내부 흐르는 물은 식수로 섭취가 가능하였으나, 현재는 박테리아(Bacteria)가 검출되는 등 수질적인 문제로 섭취는 불가능하며, 정수처리 후 공급하고 있음



a. 터널 진입로 진입 금지 표지판



b. 터널 옆 지표수(용천수)



<그림 11> 와이헤 터널 사진

Ⅲ 시사점(현장 견학 중심)

- 하와이 지하수는 농약성분에 의한 오염으로 심각한 것으로 확인되어 활성탄 등을 이용한 정수처리 수 식수로 공급하고 있음
- 제주도 또한 하와이와 같은 화산섬지역이며(함양률이 매우높은), 전 지역 농업면적이 매우 넓고, 다양한 비료, 농약 등을 이용하고 있어 농약성분에 의한 지하수 오염도 우려되는 상황
- 하와이와 같이, 농약에 의한 지하수 오염을 방지하기 위해서는 실제 농가에서 이용되는 농약정보(농약성분 및 뿌려지는 양 등) 조사 및 데이터 구축이 필요하고, 지하수 중의 농약 검출 여부를 조사해야 할 필요성도 있음
- 또한, 농약성분이 검출될 경우, 하와이 사례를 토대로 정수처리 방안을 검토해야 할 것으로 사료됨
- 제주도에서도 하수를 RO처리하여 재이용수를 생산하고 있으나, 재이용수의 이용 비율은 매우 낮은 수준임
- 하와이에서는 재처리된 용수를 물 사용량이 많은 골프장, 농업 지역 등으로 공급하고 있으며, 향후, 추가 농업용수 공급계획까지 고려되고 있는 상황
- 제주도에서도 통합물관리기본계획을 통해 재이용수를 골프장, 공업용(시멘트 공장) 시설에 공급하여 이용할 수 있도록 계획하고 있지만, 농업용수 공급계획 부분에서는 다소 소극적인 계획으로 나타남
- 도민과 농업종사자를 대상으로 하와이와 같은 사례를 교육·홍보하여 장기적으로는 재이용수를 농업용수로 사용할 수 있도록 유도방안이 필요함

- 와이헤 수평 터널의 경우, 하와이 수자원 개발·이용 역사 및 수자원 개발 기술을 잘 보여주고 있었음
- 제주도에서도 하와이 수평 터널과는 다소 다르지만, 이와 유사하게 수평적으로 물을 집수하고, 이를 활용하기 위한 수원 개발 사업(천아수원)이 추진되었음
- 그러나, 수량 부족에 의해 용수공급은 실패(일부 용수는 경마장에서 활용)하였고, 현재는 개발 당시 그대로를 보존하고 있는 상태임
 - 천아수원의 깊이는 약 35m이며, 하부로 내려갈 수 있는 시설이 설치되어 있고, 아래에서는 물이 흐르는 소리, 상태 등을 관찰할 수 있음
- 천아수원의 경우, 제주도 물 이용·계획의 역사적 의미가 있는 시설로서 물 교육 장소로 활용할 수 있지 않을까 생각됨
- 또한, 2020년 많은 강수량으로 인해 천아수원 내에는 물로 가득 채워진 것으로 확인되었으며, 수위 모니터링(물 부존여부 확인), 양수시험(공급가능량 조사) 등을 실시하여, 용수 이용 계획을 재수립 해보는 것도 좋을 것 같음
- 특히, 천아수원이 위치한 지역은 탐방로가 형성되어 있어, 많은 탐방객이 다니고 있는 지역으로, 천아수원 물량이 적을 경우, 탐방객이 이용할 수 있는 식수로 활용방안을 마련하는 것도 좋을 것 같음

IV

기타 (출장시 수집자료)

Water For Life

WHAT IS WAIHE'E TUNNEL?

Waihe'e Tunnel is a dike water source Windward O'ahu from Kahala'u to Kaneohe complex in the Waihe'e watershed of O'ahu.

The Observation Tunnel is 1,500 feet long; the storage compartment tunnel beyond the bulkhead extends another 200 feet.

The tunnel is about 2,000 feet below the ridge of the mountain above it.

This tunnel can yield as much as 7 to 9 million gallons of water per day, amount it can supply daily without dry closer to 5 million gallons daily.

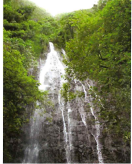
Because this is a gravity flow system, needed to draw the water out. In the Waihe'e can continue to supply water.

WHY WAS IT BUILT AT THIS LOCATION?

By the late 1920's, geologists knew the stream. A gaining stream is one that receives additional water (possibly from underground flow from dikes) as it moves downstream.

Water is stored at Waihe'e during the winter months for use during the dry summer season. It is our "bank account" for water on Windward O'ahu.

Welcome to Waihe'e Tunnel



Waihe'e: A rich resource for Windward O'ahu

Mālamawai...respect the water

TAKE FOR WATER TO FILTER THE RIDGE TO THE TUNNEL?

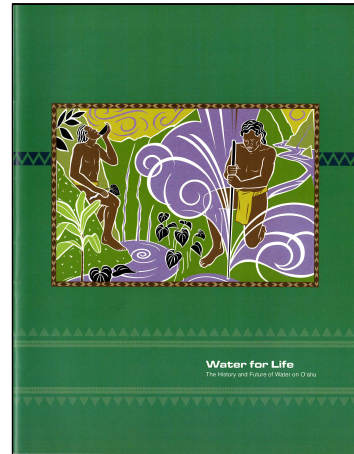
Water is filtered for a few months before it reaches the tunnel and pipe system. Because of the relatively short filtration period, Waihe'e tunnel water is treated at a chlorination station a short distance from the tunnel.

TUNNEL UNIQUE?

Unique in that it is the only tunnel we successfully bulkheaded for storage.



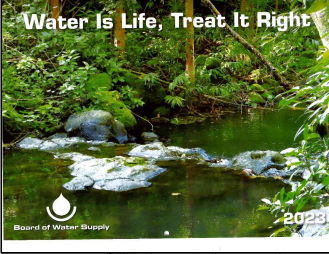
Only store a negligible amount of water.



와이헤 터널(waihee Tunnel) 설명 자료
자료 : Board of Water Supply

오하우의 물의 역사와 미래 설명 자료
자료 : Board of Water Supply

Water Is Life, Treat It Right



Board of Water Supply



2023

THURSDAY	FRIDAY	SATURDAY
5	6	7
8	9	10
11	12	13
14	15	16
17	18	19
20	21	22
23	24	25
26	27	28
29	30	31

Water Recycling Overview



Water has been one of man's greatest need in life. Yet the overall rainfall has declined. At times, it's not easy to move water to where it's needed the most. As population increases so does the demand for water. It has, therefore, become essential to use and consume it wisely.

Conservation is no longer enough and additional sources must be found. Recycled water is just part of the solution. This helps to save the groundwater for drinking and is cost-effective as well as being environmentally sound.

The Honolulu Water Recycling Facility in Ewa is the largest facility in Hawaii. It's capable of producing 12 million gallons of recycled water a day and is fully automated.

Recycled water is highly treated wastewater that is regulated by the Department of Health. It sets the guidelines for its use and

'Board of Water Supply' 홍보물
자료 : Board of Water Supply

물 재활용에 대한 개요 설명
자료 : commission on water resource management

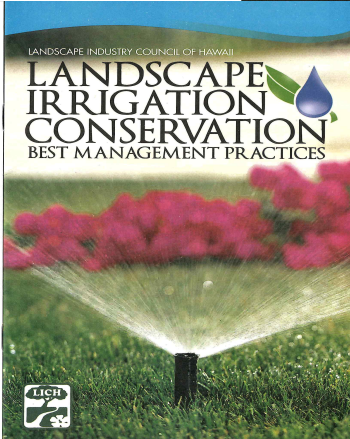
Water Resource Management in Hawai'i

Hawaii Commission on Water Resource Management



LANDSCAPE IRRIGATION CONSERVATION BEST MANAGEMENT PRACTICES

LANDSCAPE INDUSTRY COUNCIL OF HAWAII



DSCAPE

LANDSCAPE INDUSTRY COUNCIL OF HAWAII

The Landscape Industry Council of Hawaii is a state-wide organization of landscape architects, horticulturists, and landscape contractors. It is the only organization of its kind in Hawaii.



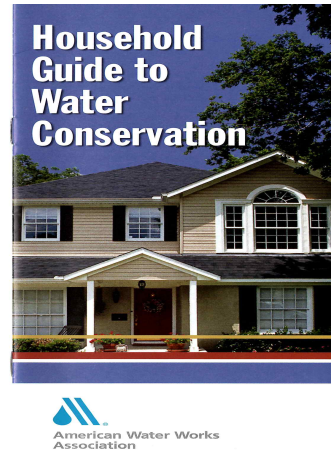
하와이의 수자원관리 설명
자료 : commission on water resource management

조경관개 보호을 위한 최적 관리 방법
자료 : Landscape Industry Council of Hawaii



하와이의 하천(stream) 관리 프로젝트

자료 : Commission on water resource Management



가정에서의 물 절약 지침서

자료 : American Water Works Association