

[총설]

해안 지하수 연구 동향 및 사례 보고

장 선 우*

한국건설기술연구원 수자원연구실

[Review]

A Review of Recent Research into Coastal Groundwater Problems and Associated Case Studies

Sun Woo Chang*

Water Resources Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology,
Goyang, Korea

Received 24 November 2014; received in revised form 3 December 2014; accepted 5 December 2014

전 세계적으로 해안지방에서의 지하수자원 이용은 점차 증가하고 있다. 또한 해수침투와 같은 자연재해로 인한 피해는 점차 가중될 것으로 예상되며 기후변화와 같은 환경의 변화는 재해의 속도를 가속화시키고 세계 곳곳에서 상당히 큰 대규모 재해의 형태까지 속출하고 있다. 해안 지하수 및 관련 재해 관련 연구개발은 각국의 대표적 실증 부지 중심으로 기술을 시험하고 검증하는 추세이다. 본 논문에서는 전세계적인 해안 지하수 및 관련 재해 연구의 추세를 파악하고 질적, 양적 성장을 확인하였으며 향후 발전방향을 전망하였다. 또한 해안 지하수의 해석기술을 간략하게 소개하였다. 현재 우리나라 실증 부지 중 제주도의 수문지질학적 특징에 대해 살펴보고 국지적인 해수침투 발생 현황을 파악하였다. 마지막으로 제주도 규모와 형태가 비슷한 화산섬인 하와이 Oahu 지역의 대수층을 대상으로 해외 연구 동향 및 연구 내용에 대해 소개함으로써 앞으로 제주 지역 및 국내 해안 대수층의 지하수 유동 및 오염에 관한 연구에 접목할 수 있는 연구 방식에 대해 고찰하였다.

주요어: 해수침투, 해안 지하수, 제주도, 하와이

It is widely assumed that climate change and other anthropogenically driven processes are having a serious impact on coastal environments. One such impact is saltwater intrusion into coastal aquifers, which has resulted in the loss of groundwater resources. The pattern of saltwater intrusion is strongly dependent on regional hydrogeological characteristics. This study reviews recent qualitative and quantitative research into this problem, and considers relevant case studies. In addition, the characteristics of the aquifers from two representative volcanic islands (Jeju Island, Korea and Oahu Island, USA) are compared. The fundamental theory of density-dependent flow used to model saltwater intrusion processes and the programs that are widely used to simulate saltwater intrusion based on density-driven problems are also investigated. It is expected that the knowledge gained from this review of previous studies can be used to help improve groundwater management practices in Korea and also to inform future interdisciplinary studies.

Key words: saltwater intrusion, coastal aquifer, Jeju Island, Hawaiian Island

*Corresponding author: chang@kict.re.kr

© 2014, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

지하수를 주 용수 자원으로 활용하고 있는 해안 지역에서 직면하고 있는 문제로는 급격한 도시화, 인구증가 및 이에 따른 여러 환경의 악화를 들 수 있으며 기후 변화 역시 환경의 변화를 가속화 하는 인자로 볼 수 있다. 이와 같은 자연적 요인이나 인위적 요인에 의해 해안 지하수 이용에 문제가 발생한 경우로 지하수 장해는 과잉 양수에 의한 지하수 수위저하 또는 수원부족/고갈, 지반침하, 수질오염, 해안 및 도서지방에서의 해수침입 등이 이에 해당한다. 이 사항들은 모두 해안 지하수의 염수 침입을 악화시키는 작용을 야기하며 수자원 관리의 핵심 위해 요소로 자리잡고 있다. 최근 들어서는 토지이용 변화와 같은 인위적인 요소로 인한 지하수 함양량 감소도 해안 지하수 자원의 보전을 위협하는 요소로 작용한다. 해안 지하수의 재난 재해는 전세계적으로 빈번히 발생하지만 지역의 수문지질학적 특성에 따라 각기 다른 형태로 나타난다(Werner et al., 2013). 해안 지하수자원 관리에 있어서 심각한 문제로 인식되고 있는 대표적인 형태는 해수침투이다. 염도가 높은 해수가 미량으로라도 지하수에 섞이는 경우 오염으로 간주되어 용수를 사용할 수 없게 되며, 최악의 경우에는 취수정을 포기해야 하는 경우까지 발생하기 때문에 해수침투는 직접적인 해안 지하수 자원의 손실로 연결된다. 알려진 사례 중에서 미국 뉴저지 주의 Cape May County 지역에서는 1940년 이래로 약 120 여개의 취수정을 폐쇄한 사례가 있다(Lacombe and Carleton, 1992).

본 연구에서는 이와 같이 제시한 영향들을 분석한 선행연구를 파악하여 세계적인 연구동향 추세를 파악하고 대표적인 현장 적용 연구에 대해 집중 탐구하였다. 마지막으로, 대표적인 화산섬 실증 부지인 해외 하와이 오아후 섬과 제주도에 대한 추가적인 고찰을 통해 각각의 연구 방식과 전략을 이해하고 향후 발전 방향을 제시하고자 한다.

최근 연구 성과의 정량적 출판 동향

Fig. 1은 해안 지하수의 일반적인 분포 형태를 개략적인 그림으로 표현한 것이다. 수두 분포에 따라 내륙에서 해안으로 배출되는 지하수는 해안에 도달한 후 연안 대수층으로부터 유출된다. 해안 지하수 연구는 최근들어 빠르게 관심이 커지고 있는 영역이다. 전세계 인구의 상당수가 해안지역에서 거주하고 있으며 경제적 성장으로

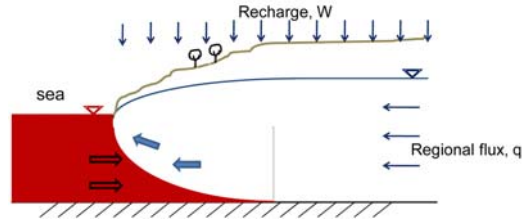


Fig. 1. Groundwater flow pattern in a coastal aquifer.

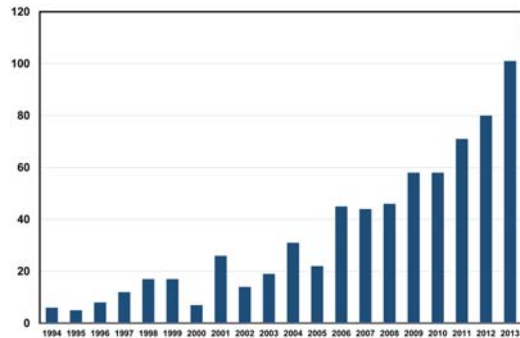


Fig. 2. Numbers of peer-reviewed journal publications addressing seawater intrusion into coastal aquifers between 1994 and 2013. A total 687 paper is included (Thomson Reuters, 2014).

물 이용량 증가, 토지 이용의 변화와 더불어 기후변화의 영향 등 여러 요인들로 인해 해안 지하수 자원 관리 대책이 새롭게 요구되고 있는 실정이다.

최근 기후변화에 의한 해수면 상승, 가뭄 또는 해안 지대의 지하수 취수량 증가 및 토지 이용 변화가 해안 지하수 관리의 이슈로 떠오르고 있다. 해안 지하수 연구는 미국과 유럽에서 수십 년에 걸쳐 대규모 연구 그룹에 의해 수행되었고 국내에서는 실질적인 필요에 의해 해안 지하수 관리의 필요성이 대두되고 있다. 해안 지하수 연구는 국지적 측면에서 다양한 양상을 보이고 있으며 대륙별로 북미, 유럽 지역에서 다양한 연구가 진행되고 있다. Fig. 2에 1994년부터 2013년까지 약 20여년에 걸친 연구논문(peer-reviewed journal paper)의 출판부수를 그래프로 나타내었다. 해안 대수층(coastal aquifer)의 해수침투(saltwater intrusion or seawater intrusion)에 관한 주제로 분류하였을 때 약 690 여 편의 논문 성과를 확인할 수 있었으며, 주로 실증 부지에 대한 해수/담수 경계면의 동역학적 변화, 해수에 의한 대수층 지하학적 변동, 기후변화의 영향 및 대수층 관리 최적화 기술을 주제로한 연구가 있으며 실내실험 및 이론적 연구가 일부 포함되어 있다. 추세를 살펴보면, 해안 지하



Fig. 3. Map showing the locations of studies into saltwater intrusion in Europe. Overseas territories are not included. The inset shows archipelagos in the Atlantic Ocean, modified from Custodio (2010).

수 연구는 이미 1960년대부터 연구해왔으나 1990년대 후반 이후에 실증연구가 늘고 있으며 인도, 이탈리아, 튀니지, 스페인, 미국, 그리스, 중국, 터키, 모로코, 이스라엘, 한국, 말레이시아, 호주가 각국의 대표적인 실증 부지를 중심으로 논의를 주도하고 있다. 주목할 점은 지중해 지역에 위치한 국가인 이탈리아 남부, 스페인 동부 지역, 그리스, 터키, 이스라엘 지역에서 꾸준히 해안 지하수 연구를 보여주고 있다는 점이다. Custodio (2010)는 유럽 해안지역은 다른 대륙보다 불규칙하고 긴 해안선으로 이루어져있기 때문에 국지적인 해수침투에 더욱 취약하다고 서술하였는데 그 결과가 지중해 주변의 연안 재난재해 형태로 나타나고 있는 것이다(Fig. 3 참조) 또한 Custodio (2010)는 지중해나 에게해 해안지역 및 대서양의 도서지역에서 관개용수 공급으로 인해 재해 양상이 계절별로 변화폭이 뚜렷하다는 점을 예로 들었다. 지중해 지역이 아닌 네덜란드와 벨기에는 해수면보다 낮은 국토로 인한 해수침투 연구를 특징으로 들 수 있으며, 독자적인 실증 부지를 이용해 지중해와 차별화된 연구 방식을 선보이고 있다. Fig. 2의 최근 5년 동안의 출판부수의 급격한 증가는 중국, 인도의 새로운 실증연구 붐에 힘입은 바가 크다. 우리나라의 경우도 연구 논문의 출발수에서 확인할 수 있듯이 제주도를 실증 부지로 하는 연구가 끊임없이 생산되고 있다. 호주의 경우에

는 실증연구의 양적 성장은 확연히 보이지 않으나, 개념 모델을 이용한 이론적 접근 및 타 국가 연구그룹과 연합한 범국가적인 해안 지하수 연구를 특징으로 하고 있다. 실증 부지에 대한 조사 및 모델링 연구 이외에도 그리스의 경우 Mantoglou가 이끄는 그룹(Kourakos and Mantoglou, 2009; Kourakos and Mantoglou, 2011; Kourakos and Mantoglou, 2013)이 수행하는 최적화 연구가 실증 부지에 가장 집중할 만한 방식으로 성장하고 있다는 점이 주목할 만 하다.

북아메리카의 경우, 미국 동남부 해안이 해수침투에 취약한 것으로 알려져 있다. 미국의 해안 지하수 연구 동향은 국제적인 학회지에 실린 연구 논문 이외에도 지질조사소(USGS)에서 나오는 보고서로도 파악할 수 있다. Dausman and Langevin (2005)은 미국 남동부의 Broward County 지역 해안 지하수에서 가뭄, 대규모 양수, 해수면 상승과 운하의 영향을 수치 모의를 수행해 복합적으로 평가한 바 있다. 모의 결과로, 향후 100년 동안 약 48 cm 정도의 해수면 상승으로 인해 대규모 양수 지역은 해수침투의 위험에 처할 것이라고 보고한 바 있다. 해수면 상승 이외의 요소로 지하수 함양이 해수침투에 영향을 주는 요소가 되며, Liu et al. (2008)는 미국 알라바마 주의 Morgan Peninsula의 해안 지하수 자원을 분석하였는데 각각 25%의 지하수 함양 감소



Fig. 4. Map showing the locations of studies into saltwater intrusion in North America, modified from Barlow and Reichard (2010).

및 개발량의 증가를 두 개의 시나리오로 작성하고 이에 기반해서 모의를 수행할 결과, 두 경우가 모두 심각한 해수침투를 야기하게 된다고 보고하였다. Masterson (2004), Masterson and Garabedian (2007)는 유명한 휴양지인 동시에 여러 연구그룹의 테스트베드로 이용되고 있는 미국 동부 해안의 Cape Cod 섬 지역의 지하수 시스템을 모의한 바 있다. 이 지역은 현재까지도 대수층의 상당량을 개발하고 있는 곳으로서 양수에 의한 담염수 경계면의 이동이 시간에 따라 더욱 내륙으로 이동하게 된다고 보고하였다. Fig. 4는 대표적인 해안 지하수 관련 재해 사례 발생 지역 및 연구 지역을 나타낸 지도이다.

아시아의 경우도, 말레이시아, 한국, 일본 등에서 흥미로운 연구 결과를 발표하고 있는데, 정밀한 모델을 구축한 사례로 말레이시아 동부에 위치해있는 Manukan Island의 지하수 함양량과 양수량에 의한 영향 연구가 있다(Praveena and Aris, 2009). Manukan Island 지역의 지하수를 지속가능한 형태로 이용하기 위해서는 양수량을 현 이용량의 75% 수준으로 적게 이용함과 동시에 지하수 인공함양을 실시해야 한다고 주장하였다. 또한 Praveena et al. (2010)은 섬의 지하수 함양을 더 정밀하게 평가하였으며, 물수지 분석을 통한 지하수자원의 보호와 관리에 대한 필요성을 주장했다. 인도의 경우, 실증 부지에 대한 연구가 2000년 이전에는 거의 전무했으며 최근 5년동안 폭발적인 증가세를 보이고 있고

아직까지는 해수 침투와 오염 현황 파악에 중점을 둔 연구가 주를 이루고 있다. 주로 인도 남부에 위치한 타밀나두(Tamil nadu) 주의 해안을 대상으로 한 실증연구가 강세를 보이고 있다. Ranjan et al. (2006)은 sharp interface 가정을 이용해 기후변화의 영향으로 인한 Sri Lanka의 해안 지하수 자원의 변화를 계산하였다.

Table 1은 각 나라의 대표적인 해안 지하수 실증 부지이다. 해수침투가 보고된 사례는 많으나, 그 특성을 체계적으로 분석하고 널리 연구된 실증 부지 모델은 전세계적으로 손에 꼽을 수 있을 정도로 적은 편이다(Werner et al., 2013). Table 1에서 보고한 사례대로 살펴보면, 미국의 하와이의 오아후 섬(Oahu Island)의 경우는 이미 1980년대부터 지속적인 연구결과를 양산하고 있으며, 앞으로도 주목할 성과를 기대할 수 있다. 오아후 실증 부지에 대한 고찰은 해안 지하수 동향 부분에서 본 연구에서 추가로 논의하도록 한다. 표의 두 번째 줄에 언급된 플로리다의 실증 부지의 위치는 앞서 설명한 Fig. 3에서 확인할 수 있다. 아시아의 신흥 연구 트렌드 역시 실증 부지를 통해 양산될 것으로 예상되지만 현재까지 체계적으로 현황이 파악되지 못하고 있다. 따라서 여러 사례 중 비교적 꾸준히 성과를 보이고 있는 말레이시아의 사례를 표에서 언급하였다. 예시한 마누칸 섬 모델(Manukan Island)은 수치 모의에 기반한 방식으로 비교적 긴 연구기간 동안 연구를 진행한 곳이

Table 1. Associated Case studies related to saltwater intrusion of coastal aquifers.

References	Field location	Softwares for analysis	Description
Gingerich and Voss, (2005)	Hawaii, U.S.A	SUTRA	A volcanic island aquifer where consists of highly permeable basalt with complex layers.
Dausman and Langevin, (2005)	Biscayne aquifer, FL, U.S.A	SEAWAT-2000	Quantitative evaluation of saltwater intrusion in the highly permeable shallow surficial aquifer system where the surface-water system is separated and bounded by artificial structure, such as canals, levees, and high-ways.
Praveena et al. (2010)	Manukan Island, Malaysia	SEAWAT-2000	Climate change and human pressure in tropical small island.
Oude Essink et al. (2010)	Dutch Delta, Netherland	MOCDENS3D	Dutch North Sea coast and northern Germany Baltic shore due to low sea-level stand.
Vandenbohede et al. (2014) Cruz-Fuentes et al. (2014) Yechieli et al. (2010)	Mediterranean coastal aquifers	SEAWAT MODFLOW FEFLOW	A long continental coastline along the Mediterranean shore including Spain, Italy, Greece, Turkey and north African areas where freshwater demand have been increased for irrigated agricultural activities and tourist resorts.

다. 유럽의 경우는 크게 네덜란드의 간척지의 해수침투와 지중해의 해수침투로 부지 특성을 나눌 수 있으며 이에 따라 연구 방식도 독자적으로 발전하고 있다. 따라서 표에서는 대표적인 두가지 유럽 해안 지하수 실증 부지의 특성에 대해 설명하고 있다.

해안 지하수 해석 기술 동향

세계적으로 해수침투에 관한 실증 부지 연구는 1950년대와 60년대부터 활발히 이루어졌으나, 그 시절에는 계산 도구의 제한성으로 모델링 작업은 단순화한 개념 모델 분석에 머물러 있었다(Bear et al., 1999). 해석기술로서의 해안 지하수 연구의 핵심은 밀도류에 대한 이해와 적용이다. 일반적으로 바닷물로 대표되는 염수는 고농도의 염분으로 인해 담지하수에 비해 약 2.5% 정도 무겁다. 관측되는 수두가 같더라도 해수는 담수에 비해 더 높은 압력수두를 가지고 있기 때문에 결국 관측되는 수두가 아닌 담수 기준으로 비교했을 때의 등가수두(equivalent head)가 높아서 수두가 낮은 내륙지역으로 이동하는 성질을 지닌다. 두 가지 다른 밀도의 유체가 양방향의 흐름을 보이면서 중간에서 경계면을 형성하는데 형태는 비교적 곡선이고 일반적으로 해수가 대수층 깊은 곳에서는 비교적 내륙 방향으로 더 안쪽에 위치해 있다. 경계에 해당하는 지역에서는 혼합대(mixing zone)가 생기는데 지하수의 염도는 해수와 담수 사이의 범위에서 존재한다. 경계면의 형태와 크기는 내륙지방의 지하수 흐름 및 지질학적 특징에 의해 강하게 영향을 받

는다. 밀도차를 적용하는 지하수의 흐름과 이동을 계산하는 문제는 계산시간(computing time)이 비교적 오래 걸리기 때문에 모델을 단순화하여 수직 2차원 문제로 접근하는 경우도 많다. 실내 실험도 이와 같은 과정에 맞추어 가로로 얇은 2차원 물리모형을 이용하는 사례가 일반적이다.

자유면 대수층에서 담염수 경계면을 예측하는 대표적인 방법은 Ghyben-Herzberg 식을 들 수 있다. 담수와 염수 사이에 뚜렷한 경계 조건이 있다고 가정했을 때, 해수면 기준 상부 담수 수두 높이의 40배에 해당하는 해수면 하부 깊이에 담염수 경계면이 존재한다는 의미로서, 이 관계식으로 대수층의 두께를 유추할 수 있다. 염수의 밀도가 1.025 g/cm³일 때, 만약 담수 수두가 1 m 감소하면 경계면은 약 40 m 가량 높아진다는 것을 의미하기도 한다(Freeze and Cherry, 1977). 이로부터 많은 연구들이 해수침투의 해석해를 고안해내었는데, 해석해의 장점은 모델의 실제 해답이며, 계산 시간이 비교적 짧기 때문에 개념 모델과 같은 복잡하지 않은 모델에서는 수자원 산정이 비교적 용이하며, 최적화와 같은 기술과 연계가 충분히 가능하다는 점이다. 또한 해수면 상승 등과 같은 기후변화 요소를 영입한 더욱 정교한 연구방식이 등장하고 있다(Werner and Simmons, 2009).

분산 모델을 이용한 수치해석은 지질학적인 다양성 및 지형적 복잡함을 고려해 해안 지하수를 더욱 현실적으로 모사할 수 있어 최근 해안 지하수 관리 및 해수침투 연구에 많이 사용되고 있는 기법이다. 수치해석 기법의 장점은 담염수의 혼합대를 모의할 수 있다는 점이다.

수치모의 코드는 표준으로 약속된 모델(benchmark problem)을 모의한 결과를 기준에 검증된 결과와 비교하는 방식으로 그 사용 가능성을 증명한 후 이용된다. 밀도차를 이용하는(variably-density-driven-problem) 대표적인 표준 문제 중에서 해수침투의 모형으로 가장 자주 사용되는 방식은 Henry Problem (Henry, 1964)으로 구현되는 2차원 개념모델의 준해석해(semi-analytical solution)이다. Henry Problem은 모델 경계 구성이 국지적 해수침투 문제와 상당히 비슷하게 전개되는 문제이다. 이와 관련한 실내실험으로 Goswami and Clement (2007) 및 Abarca and Clement (2009)는 실험실 규모의 수조 실험을 이용해 Henry Problem과 비슷한 유형의 해수침투 문제를 시각화하는데 성공하였다. 확산모델은 지배방정식의 비선형성으로 인해 계산에 많은 시간이 요구되며 격자구성이 세밀할수록 계산 시간은 기하급수적으로 증가한다. 따라서 실증 부지 연구와 같이 규모가 큰 테스트베드의 정밀 모델이 다른 연구기법과 연계해 수행하는 다학제간 연구, 예를 들면 3차원 정밀 모델링의 최적화 기법을 시도하는 것은 현재까지 현실적인 어려움이 따른다. 다만, 이 기술적 제약은 향후 극복할 수 있을 것으로 전망한다

지하수 흐름은 용질의 농도를 재배치하면서 대수층의 밀도장을 변화시키고, 이로 인해 지하수 흐름도 다시 영향을 받는다. 따라서 지하수 유동 방정식과 이동 방정식은 서로 연결된 과정으로 다뤄지며(coupled processes), 해를 얻기 위해 반복 연산을 실시한다(Werner and Gallagher, 2006). 분산모델을 이용한 대표적인 실증 부지 연구로 Gingerich와 Voss (2005)가 미국 하와이를 대상으로 3차원 SUTRA (Voss and Provost, 2002)를 적용한 경우 및 Langevin (2001)이 SEAWAT (Guo and Langevin, 2002) 프로그램을 이용하여 미국 플로리다의 Biscayne Bay의 해안 지하수를 연구한 경우, 그리고 Werner and Gallagher (2006)가 호주 Pioneer Vally를 MODHMS (HydroGeoLogic Inc, 2003)을 3차원 모델링을 수행한 경우를 들 수 있다.

모델링에 기반한 다수의 해안 지하수 연구는 미래 수 자원에 미치는 기후변화의 영향을 다루고있는데(Sherif and Singh 1999; Ranjan et al., 2006; Masterson and Garabedian 2007; Oude Essink et al., 2010; Praveena et al., 2010; Rozell and Wong 2010; Yu et al., 2010; Sulzbacher et al., 2012), 이 연구들의 주목할 점은 대부분이 현재까지도 해수면 변동 또는 함양 시나리오 및 연구방법에 있어 여전히 개념화(Conceptualization)

를 시도하고 있다는 점이다. 예를 들면 1) 함양의 시공간 구성을 균일하게 보거나, 2) 해수면 상승을 선형적인 증가로 설정하거나 3) 해석해를 이용해 계산 시간을 줄이거나, 4) 정밀 3차원 모델링 대신 개념화한 2차원으로 모델을 채택하는 방식을 사용하고 있다는 점이다. 그러나 2010년 이후에 수문, 지질학적 요소의 정밀화를 시도하는 연구들이 등장하고 있어 다학제간 연구의 성격을 가진 3차원 정밀 모델링 성과를 앞으로 기대할 수 있다. 또한 해안 지하수 자원 관리의 특징으로 가역성을 들 수 있다. 해안 대수층의 개발량을 제한함으로써 담염수 경계면의 움직임을 어느정도 제어할 수 있고, 인공 함양 등의 기법을 통해 지하수 담수 수위를 유지함으로써 해수침투를 방지하거나, 심지어 경계면을 후퇴시킬 수 있다는 관계이다(Bear et al., 1999). Chang and Clement (2012)은 경계면 후퇴를 실내실험으로 증명할 바 있고, Lu and Werner (2013)에 의해 경계면 후퇴가 침투에 비해 유동 시간이 짧아지는 것을 정량적으로 도식화하였다. 이와 같은 해안 지하수 연구의 특징은 앞으로 기존 지하수 연구와 차별되는 연구 결과를 계속 기대할 수 있을 것이다.

해안 지하수 연구의 진화

면적인 작은 섬일수록 지표수 자원을 이용하기 어려운 지질학적/지형적 특성을 지니고 있고 지하수의 함양 방식은 대부분 강우에 의지하고 있으며, 내륙연안의 해안 대수층에 비해 섬 형태의 해안 지하수 자원은 자연적/인위적 환경 변화로 인한 재해에 더욱 취약하다. 해수로 둘러싸인 대수층의 담수 지하수는 렌즈 형태로 해수 위에 떠 있거나, 불투수층 위에 존재하는 형상을 띄고 있는데, 담수렌즈 두께가 비교적 얇아 충분한 지하수 자원을 보유하고 있지 못한 경우 지하수 개발이 지속가능하지 못한 경우가 많다. Fig. 5은 해수 위에 놓여있는 담수 자원의 형태를 실내수조시험에서 재현한 사진이다. 붉은 색으로 보여지는 부분은 해수를 나타내며 그 위의 완만한 곡선을 그리고 있는 경계면 상부에 담수렌즈를 볼 수 있다. 섬의 지질 구조가 투수성이 좋고 비교적 균질한 경우 이와 같은 담수 렌즈의 형태가 나타난다. 바다에 맞닿는 면적이 클수록 해수침투에 취약한 점은 섬 지역에서 더욱 강화되는 특징이다. 이 때문에 둥근 모양의 섬(circular island) 보다는 긴 모양의 섬(barrier island)이 훨씬 수자원관리에 취약한 면을 보인다. 기후 변화의 영향은 면적이 넓지 않은 섬의 대수층의 경우

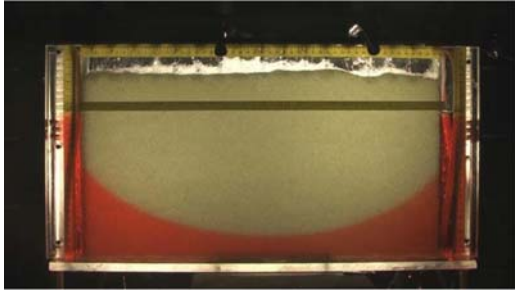


Fig. 5. Visualization of a floating groundwater lens using laboratory water-tank setups.

더욱 대수층 담수자원의 손실이 심화되고 있으며 허리케인과 해안선 손실 등이 더해져 매우 극심한 결과를 낳기도 한다. 가장 자연재해에 취약한 섬은 환초(atolls)와 같은 태평양, 인도양의 산호섬들이다. 해발 수 m 미만의 저지대에 위치하면서 동시에 면적도 비교적 작은 편에 속한다. Kundzewics and Dolle (2009)는 델타와 산호섬과 같은 얇은 해안 지역에서는 기후변화로 인한 해수면 상승이 심각한 담수 자원의 감소를 야기할 것이라 보고하고 있으며, 이외에도 대부분의 연구들이 기후변화는 해수침투에 심각한 악영향을 미칠 것으로 가정하고 있다. Bailey et al. (2009)은 태평양 서부에 걸쳐 엘니뇨의 영향으로 인한 가뭄이 환초섬들에 극심한 자연재해를 일으킬 것으로 전망하고 수치모의를 통해 약 6개월 지속되는 가뭄으로 인한 담수 렌즈의 고갈이 회복하는데 약 1.5년 정도의 더 큰 기간이 걸린다는 것을 예상하였다. White and Falkland (2010)의 연구에 따르면 태평양 지역의 산호섬 지역에서 1 m 정도의 해수면 상승 정도까지는 섬의 수자원에 심각한 영향을 미치지 않을 것으로 보았으나, 다만 이 때의 가정으로는 섬의 해안선이 침식되지 않는다는 가정을 하고 있었지만, 실제로는 환초섬의 해안선 침식이 쉽게 일어나고 있다. 따라서 위의 연구들을 종합해보면 기후학적 현상 외에 섬에 미치는 재해 정도는 지형에 따라 양상이 매우 다르게 펼쳐질 수 있다는 것을 알 수 있다.

기후변화는 지하수자원 관리의 매우 중요한 고려 사항이다. 비록 전지구적인 현상에서 기후변화로 인해 증가한 온도가 강수량을 증가시킨다 하더라도 국지적인 규모에서의 기후 상태는 그 양상이 매우 달라질 것을 보고 한 바 있다(Ranjan et al., 2006). 따라서 기후 변화는 실증 부지 위주의 연구 경향을 더욱 강화하는 방식으로 해안 지하수 연구와 연계된다. IPCC 모델은 장래 좀더 간헐적이고 심각한 가뭄이 찾아올 것으로 예측하

고 있는데(IPCC, 2007) 가뭄은 지하수 함양량을 감소시킬 뿐만 아니라 하천과 같은 지표면의 수자원 저장량을 감소시켜 결과적으로 지하수의 사용량 증가를 초래하게 되기 때문이다. 이와 같은 현상은 Mollema et al. (2010)에 의해 포르투갈의 Terceira Island를 대상으로 연구가 되었는데, 이 도서 지역은 봄에 해당하는 계절 동안 강수에 의해 충전된 지하수를 주로 사용하는 지역으로 가뭄이 심해진 기간동안 지하수를 개발하게 되면서 섬의 담수 렌즈가 줄어든 것을 보고한 바 있다. Comte et al. (2010)은 도서 지역에서의 담수 렌즈를 충전시키는 지하수 함양량이 식물의 근권역(root zone)에 크게 영향을 받는 것으로 보고한 바 있다.

해안 유출수에 대한 연구는 해안 지하수 관련 연구 가운데서도 최근 가장 빠른 성장세를 보이고 있는 분야로서 동역학적 연구, 해양학, 지화학 등 다학제간 연구가 가능한 분야로 각광받고 있다. 해안으로 유출되는 지하수 내의 화학물질 및 영양염류 등이 해양생태계에 큰 영향이 있음을 밝혀낸 이후로(Johannes, 1980; Moore, 1996; Moore and Church, 1996), 지하수 대수층 내에서의 순환 및 물수지에 관한 연구가 활발히 이루어졌으며 최근에 들어서는 조류에 의한 영향 및 대수층 비포화대와 연계한 영역으로 연구가 확장되고 있다(Robinson et al., 2007). 실증 부지에 관한 동역학적 연구로, Kohout (1960)는 플로리다의 실증 부지를 대상으로 지하수 담수 흐름량의 10%에 해당하는 해수가 혼합대 지역에서 순환한다는 사실을 밝혀낸 이래로 많은 실험, 현장 연구들이 담수/해수 유출 및 혼합대에서의 오염물질 이동에 관한 연구를 지속해오고 있다. Destouni and Prieto (2003)은 시뮬레이션을 통해 지하수 담수유동량에 비해 해수 유동량 규모가 수십 배 이상 작다는 것을 경험적인 상관관계를 수립함으로써 밝혀내었고, Smith (2004) 역시 모델링을 통하여 해수 담수층 내에서의 해수가 광범위하게 순환유동하고 있으며, 분산계수(Dispersion coefficient) 의해 그 정도가 크게 좌우된다고 보고하였다. Chang and Clement (2013)는 영양염류 및 오염물질등이 담수에서 머무는 시간에 비해 해수로 오염된 대수층에서 순환하는 시간이 긴 것을 모의를 통해 밝혀낸 후 실내실험으로 입증하는데 성공하였다.

제주 해안 지하수 특성

섬 지역 중에서 개발 중이거나, 개발된 상태의 지역으로 인구 증가가 예상되는 해안지역에서는 해수침투는

예외적이지 않은 자연현상이다. 제주도는 행정구역상으로 제주특별자치도에 속하며 대한민국에 속해있는 섬 중에 가장 큰 면적을 가진 섬 지역으로, 현재 지속적인 개발과 더불어 일정 시기에 지하수 부족을 겪고 있다. 제주도는 대한민국의 가장 큰 섬으로서 본토의 남방에 위치하여 있다. 총면적은 약 1,850 km²이며 가장 높은 고도는 한라산 정상인 1,950 m이다. 제주도는 우리나라 최대 다우지이나, 연강수량 변동이 매우 심할 뿐 아니라, 풍부한 강수량에도 불구하고 투수성이 좋은 화산암 분포로 인해 지표수의 발달이 빈약하여 대부분의 용수를 지하수에 의존하는 특수한 지역이다. Lee et al. (2007)은 최근 채소류의 경작 비율 및 동절기 농업 활동량의 증가로 인해 적정 개발량 이상의 과도한 지하수 양수를 실시하는 지하수 관정이 증가하고 있다고 보고 하였다.

제주 담수층은 제주도의 수자원의 제 1 공급처이며 97%의 수량이 지하수에서 공급된다. 물이 잘 빠지는 지질구조로 인하여 상시하천이 존재하지 않으며, 댐과 같은 지표수를 이용하는 구조물 역시 없다. 투수성이 좋은 다공질 화산암으로 이루어져 있기 때문에 우리나라 내륙지역 평균 지하수 함양율보다 3배나 높다고 알려져 있다(Park et al., 2013). 이외에도 지질학적 구성에 대한 연구는 그동안 수많은 그룹에서 다양하게 이루어져 왔다. 한라산은 강수가 지하로 침투하여 지하수를 함양하는 가장 규모가 크고 오염되지 않은 지하수 함양지역이며, 수리지질학적으로 서귀포층이라 불리는 저투수층이 지하수 흐름에 있어서 중요한 역할을 한다(Yoon et al., 2005).

해수침투 개념모델에서는 함양량을 간략하게 강우량의 함수로 표현하거나 심지어 일정한 값으로 간주하고 모의하는 경우가 잦다. 그러나 섬지역과 같이 강우에 의한 지하수 함양이 수자원의 주요 공급원인 곳에서 정확한 해안 지하수 연구를 수행하기 위해서는 시간적, 공간적 다양한 분포를 나타낼 수 있는 함양 모델이 필요하다. Kim et al. (2009a)은 제주 표선 유역에 지표수-지하수 통합수문해석 모형인 SWAT-MODFLOW 모형(Kim et al., 2008)을 시험 적용한 바 있다. 한라산 고지대와 중산간 지역에서 함양된 지하수는 지하의 투수층을 따라 해안가로 이동하여 바닷가 근처에서는 지하수위가 지표 가까이에서 형성된다(Park et al., 2013). 제주도 지하수위는 약 -26m에서 282 m 사이에 분포한다(Won et al., 2005).

제주도에서는 지하수를 과다 사용할 시에 해수침투의

위험이 도사리고 있다. 제주특별자치도에서는 1993년부터 16개의 수역별로 '지하수 지속 이용 가능량'을 산정해 관리해오고 있다.

기존 선행 연구를 살펴보면 제주도 동부 지역 지하수의 염수대 변화 양상이 지구 온난화에 따른 제주도 근해의 해수면 상승 또한 제주도 동부 지역 지하수의 염수화 현상의 한 원인이 될 수 있음을 제시한 바 있다(Kim et al., 2009b). 제주도 동부에 위치한 성산과 북부의 표선 유역은 지하수 개발이 집중적으로 이루어지는 곳으로(Won et al., 2005), 동부 한동리유역은 Youn et al. (2003) 및 Kim et al. (2005)이 담염수 경계면을 확인한 바 있다. Youn et al. (2003) 등에 3개의 관측정(한동 1, 2, 3호 관측정)에서 담염수 경계면을 확인하였는데, 전기전도도와 온도 값이 겹경사 구간으로부터 확인된 점이대의 깊이는 한동1호공에서 해수면하 약 44.1 m, 한동 2, 3, 호공에서 각각 해수면하 약 37.2 m와 74.5 m의 깊이에 형성되고 있다고 판단하였으며 이 경계면의 심도는 Ghyben-Herzberg 공식에 의해 산정된 이론치보다 비교적 얇은 심도에서 형성되어 있다고 서술하였다. Kim et al. (2005)는 조석반응 분석법을 적용하여 해안 대수층의 수리인자를 산정하였고, 제주도 동부지역에서 조석이 영향을 미치는 범위는 해안으로부터 3~5 km 사이인 것으로 판단하였다.

하와이 지역 해안 지하수 연구 동향

하와이 섬은 담수 지하수가 염수 지하수에 위에 있는 해양 섬의 전형적인 예이다. 하와이 섬의 지하수는 높은 투수성을 가지는 현무암대에 포함되고 있다. Fig. 6은 하와이 군도 지도 내의 오아후 섬의 위치를 표시하였다. 하와이주에서 세 번째로 큰 섬인 오아후가 주로 연구의 대상이 되는 실증 부지로(Bear et al., 1999; Oki, 2005) 오아후 섬에서의 지하수 대수층은 연평균 6,350 mm 강우에 의해 함양된다(Fetter, 2001). 해안지역의 평평한 지형과 내륙의 가파른 산악 형태를 띠는 점에서 제주도와 흡사한 지형을 이루고 있다. 특히 주목해야 할 점은 강수의 공간 분포가 지역적으로 균일하지 않다는 점이다(Oki, 2005).

하와이 군도의 오아후 섬은 5개의 섬 중에 두 번째로 오래된 섬이며, 면적은 약 1,546 km²으로 제주도와 그 규모와 형태가 비슷하다. 1880년도에 처음으로 지하수 개발이 시작되었으며 미국지질조사소(USGS)가 개발량과 지하수위 자료를 초기단계에서부터 보유하고 있다.

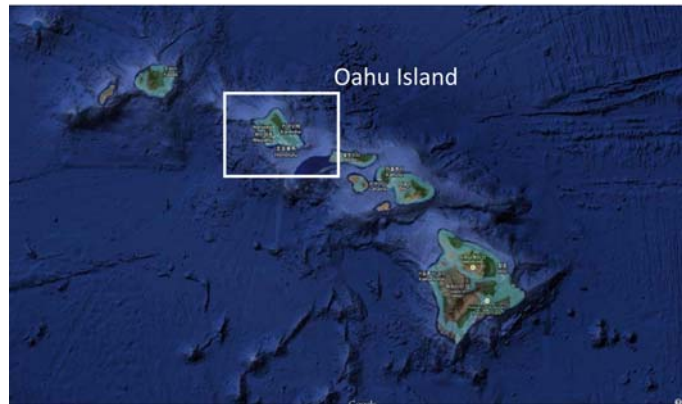


Fig. 6. Map of Oahu island, Hawaii, USA (modified from Google Earth).

연구를 수행하던 20세기 말까지 오아후 섬의 중요 이슈는 여전히 해결되지 않은 상태에 머물러 있다. 지하수 개발의 핵심인 지속가능하게 개발을 유지하고자 하면서 지하수 개발의 제한은 잠재적으로 경제적 발전에 저해 요소로 자리잡고 있었으며, 해수침투의 가능성으로 인한 개발제한 문제도 인지되기 시작되었다(Fetter, 2001).

하와이 섬의 지하수는 높은 투수성을 가지는 현무암류에 존재하며 오아후 섬에서는 연간 평균 635 cm 강우에 의해 함양된다. 섬 내부의 지하수는 지하수 댐의 역할을 수행하는 화성암맥으로 막혀있는데, 오아후 섬을 구성하고 있는 현무암의 투수계수는 100에서 1000 m/day로 공극률을 50% 이상으로 보고 있으나, 지하수가 흐를 수 있는 연결된 공극들(Connected porosity)은 10% 미만으로 평가하고 있다. Oki (2005)는 총공극률을 5~50% 사이로 추정하고, 유효 공극률은 총 공극률의 10% 미만으로 추정하고 있다. 이와 같은 대수층은 하와이의 활화산 지대에서 발견할 수 있는데, 용암이 흐른 중심 지역은 비교적 불투성인데 반해, 용암의 흐름 사이의 퇴적물에서 높은 투수성의 지역이 발견되고 있다. 거시적으로 보자면 용암의 흐름층이 쌓여있는 형태는 이방성의 대수층으로 볼 수 있으나, 국지적인 규모에서는 균질한 매질로 보는 것이 옳다. 일반적으로 화산섬이 좋은 투수성을 보여준다고 알려져 있는 반면에, 국지적 규모에서는 투수성과 흐름의 특징이 상대적으로 큰 변화를 보이고 있다. Oki et al. (1998)은 하와이의 지역별 지층에 따른 투수계수와 지하수 흐름량 및 지하수 흐름 방향에 대해 논의하였다. 특히 덮개층에 의해 큰 영향을 받는 것을 보고하였고, 직접 언급하지 않았으나 해안 유출과 순환에 관한 논의도 진행한 바 있다.

개발 전의 담수렌즈 두께는 400-500 m에 이른다고

보고하였으며, 이 때 해수-담수의 관계는 동역학적으로 평형에 이르고 있다고 추측하고 있다. 그러나 100년 후인 1990년대에 이르러서는 담수렌즈의 두께가 200-300 m 정도로 줄어들었다. Voss는 하와이 섬은 진주만(Pearl Harbor) 지역 대수층의 지하수 거동을 알아보기 위해 SUTRA를 이용해 cross sectional 2D 모델을 모의하였다. 최근에는 분산모델을 이용하여 3차원 담염수모델로까지 확장하였다(Gingerich and Voss, 2005). Gingerich and Voss (2005)는 그 전까지 지질학적인 영향에 의한 담염수 경계에서 발전하여 100년 동안 수집한 관측자료를 모델링자료와 비교하는 방식으로 양수에 의한 담염수 경계면 이동을 모의하였으며, 결과를 바탕으로 향후 지하수 관리의 방향성을 제시하였다. USGS에서 수행한 수치모의에서 채택한 분산계수는 담-염수 경계면을 결정하는데 중요한 요소로 오아후 섬의 경우는 대략 61 m로 추정된 값을 사용하고 있다. 반면 수치분산계수는 250~0.82 m의 범위를 채택하였는데, 현재도 분산계수에 관한 연구는 진행 중이므로, 앞으로의 새로운 연구에서는 분산계수 채택 전략이 필요하다고 본다.

요약 및 결론

해안 지하수는 자연적, 인위적인 요소에 의해 끊임없이 지속가능성을 위협받고 있다. 자연적으로 불가항력적으로 보이는 기후변화와 달리, 인간의 활동에 의한 연구는 분명한 인과관계를 보이고 있다. 세계 여러 케이스에서 살펴본 것처럼 지하수 자원은 관개용수 공급으로 인해 계절별로 그 양상이 뚜렷하며 과다사용에 의한 수자원의 손실은 우리나라의 지하수자원 관리에서도 핵심적으로 고려해야 할 사항으로 볼 수 있다. 해안 대수층의

해수침투에 관한 모델링 기법을 적용한 연구의 경우는 기후변화 모델링의 정밀화로 인해 해수면 상승 및 지하수 함양 시나리오의 시공간적 불균질성을 반영하고자 하는 움직임이 증가하고 있다. 기존에는 해안 지하수 모의 자체가 기술적인 제약으로 인해 실내 실험 또는 개념화한 유역 연구에 그쳤으나, 최근 각국의 대표적 연구그룹이 현장에 대한 실증 연구 데이터를 검증할 수 있는 3차원 모델링 방식이 가능한 수준에 도달하면서 세계 전역에서 현장 모델링 연구가 늘어나고 있다. 그 결과, 2010년 이후 정밀 3차원 모델링 분야에서도 유의미한 연구결과를 도출하기 시작하였으며 서로 다른 국적의 연구자 또는 연구 그룹 간에 축적된 지식을 교류하기 시작하는 점이 문헌연구를 통해서 분명하게 보이기 시작한다. 또한 아시아의 실증 부지 연구가 최근 5년동안 폭발적으로 증가하고 있는 점을 살펴 볼 때, 국내의 경우도 제주도의 해안 지하수 연구는 특히 지질학적 연구는 양적, 질적으로 충분히 축적되어 있다. 제주도의 3차원 개념 및 정밀 모델링 방식의 모의가 더욱 정교한 시나리오에 기반한 예측 역시 가능할 것으로 판단되며, 앞으로 유역수문해석과의 동적 연계한 해안 지하수 연구는 다학제간 연구로서도 유의미한 시도가 될 것이라고 전망한다. 또한 우리 나라 해안 지하수의 모델링 방식도 최종 목표는 3차원 정밀 모델링이 되어야 하나, 초기 연구단계에서 오아후 섬의 연구 방식과 같이 일부분을 개념모델로 구성하여 일부 수리지질학적 불균일성을 과감히 생략한 방식을 참조할 수 있다. 마지막으로, 세계적인 연구 추세를 맞추어 가려면 앞으로는 3차원 정밀 모델링 수행을 단순히 모의 성공 여부로 파악하는 것 이외에, 도출된 연구 결과를 분석하는 방식의 다양화에 앞장서서 실증 부지로부터 얻은 새로운 정보를 과학적 사실로 전달하는 방식에 대해 고민해야 할 것이다. 예를 들면 해수면 상승과 함양량 변화 시나리오를 조합한 경우, 또는 지하수 개발 요소 까지 고려해야 할 경우, 복합적인 효과의 상관성 및 각 요소의 영향을 구분해 내는 방식으로부터 해안 지하수에 대한 새로운 이해에 기여를 할 수 있는지 여부가 판가름 날 것이다.

사 사

본 연구는 국토교통부의 건설교통기술지역특성화사업 “제주권 건설교통기술 지역거점센터”의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Abarca, E. and Clement, T. P., 2009, A novel approach for characterizing the mixing zone of a saltwater wedge, *Geophysical Research Letters*, 36(6), L06402.
- Bailey, R. T., Jenson, J. W., and Olsen, A. E., 2009, Numerical modeling of atoll island hydrogeology, *Ground Water*, 47(2), 184-196.
- Barlow, P. M. and Reichard, E. G., 2010, Saltwater intrusion in coastal regions of North America, *Hydrogeology Journal*, 18, 247-260.
- Bear, J., Cheng A. H.-D., Sorek S., Ouazar D., and Herrera I., (eds), 1999, *Seawater intrusion in coastal aquifers & #8211; concepts, methods and practices*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 625p.
- Chang, S. W. and Clement, T. P., 2012, Experimental and numerical investigation of saltwater intrusion dynamics in flux-controlled groundwater systems, *Water Resources Research*, 48, W09527.
- Chang, S. W. and Clement, T. P., 2013, Laboratory and numerical investigation of transport processes occurring beneath a saltwater wedge, *Journal of Contaminant Hydrology*, 147, 14-24.
- Comte, J. C., Banton, O., Join, J. L., and Cabioch, G., 2010, Evaluation of effective groundwater recharge of freshwater lens in small islands by the combined modeling of geoelectrical data and water heads, *Water Resources Research*, 46, W06601.
- Curz-Fuentes, T., Heredia, J., Cabrera, M.C., and Custodio, E., 2014, Behavior of a mall sedimentary volcanic aquifer receiving irrigation return flow: La Aldea, Gran Canaria, Canary Islands (Spain), *Hydrogeology Journal*, 22(4), 865-882.
- Custodio, E., 2010, Coastal aquifers of Europe: an overview, *Hydrogeology Journal*, 18(1), 269-280.
- Dausman, A. M. and Langevin, C. D., 2005, Movement of the saltwater interface in the surficial aquifer system in response to hydrologic stresses and water-management practices, Broward County, Florida., U. S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2004-5256, USGS, 73p.
- Destouni, G. and Prieto, C., 2003, On the possibility for generic modeling of submarine groundwater discharge, *Biogeochemistry*, 66(1), 171-186.
- Fetter, C. W., 2001, *Applied Hydrogeology*, Prentice Hall, New Jersey, 551p.
- Freeze, R. A. and Cherry, J. A., 1977, *Groundwater*, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, USA.
- Goswami, R. R. and Clement, T. P., 2007, Laboratory-scale investigation of saltwater intrusion dynamics, *Water Resources Research*, 43(4), doi:10.1029/2006WR005151.
- Guo, W. and Langevin, C. D., 2002, User's guide to SEWAT: A computer program for simulation of three-dimensional variable-density ground-water flow, United States Geological Survey, 73p.
- Gingerich, S. B. and Voss, C. I., 2005, Three-dimensional variable-density flow simulation of a coastal aquifer in

- southern Oahu, Hawaii, USA, *Hydrogeology Journal*, 13, 436-450.
- Henry, H. R., 1964, Effects of dispersion on salt encroachment in coastal aquifers, U. S. Geological Survey Water-Supply Paper Rep, 1613-C, C71-C84.
- HydroGeoLogic INC., 2003, MODHMS software, version 2.0 documentation, Volume I: groundwater flow modules, Volume II: transport modules, Volume III: surface water flow modules, HydroGeoLogic Inc., Herndon, VA.
- IPCC, 2007, Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability, Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden and C. E. Hanson, Cambridge University Press, Cambridge, 976p.
- Johannes, R. E., 1980, The ecological significance of the submarine discharge of groundwater, *Marine Ecology Progress Series*, 3, 365-373.
- Kim, K., Shim, B., Park, K., Kim, T., Seong, H., Park, Y., Koh, K., and Woo, N., 2005, Analysis of hydraulic gradient at coastal aquifers in eastern part of Jeju Island, *Economic and Environmental Geology*, 38(1), 79-89 (in Korean with English abstract).
- Kim, N. W., Chung, I. M., Won, Y. S., and Arnold, J. G., 2008, Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model, *Journal of Hydrology*, 356, 1-16.
- Kim, N. W., Chung, I. M., Yoo, S., Lee, J., and Yang, S. K., 2009a, Integrated surface-groundwater analysis in Jeju Island, *Journal of the Environmental Sciences* 18(9), 1017-1026 (in Korean with English abstract).
- Kim, K., Shin, J., Koh, E., Koh, G. and Lee, K., 2009b, Sea level rise around jeju island due to global warming and movement of groundwater/seawater interface in the eastern part of Jeju Island, *Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, 14(3), 68-79 (in Korean with English abstract).
- Kohout, F. A., 1960, Cyclic flow of salt water in the Biscayne aquifer of southeastern Florida, *Journal of Geophysical Research*, 65(7), 2133-2141.
- Kourakos, G. and Mantoglou, A., 2009, Pumping optimization of coastal aquifers based on evolutionary algorithms and surrogate modular neural network models, *Advances in Water Resources*, 32(4), 507-521.
- Kourakos, G. and Mantoglou, A., 2011, Simulation and multi-objective management of coastal aquifers in semi-arid regions, *Water Resources Management*, 25(4), 1063-1074.
- Kourakos, G. and Mantoglou, A., 2013, Development of a multi-objective optimization algorithm using surrogate models for coastal aquifer management, *Journal of Hydrology*, 470, 13-23.
- Kundzewicz, Z. W. and Doll, P., 2009, Will groundwater ease freshwater stress under climate change?, *Hydrological Sciences Journal*, 54(4), 665-675.
- Lacombe, P. J. and Carleton, G. B., 1992, Saltwater intrusion into fresh ground-water supplies, southern Cape May County, New Jersey, 1890-1991.
- Langevin, 2001, Simulation of ground-water discharge to Biscayne Bay, southeastern Florida, USGS water-resources investigation report 00-4251, 137p.
- Lee, J., Yoon, J., Moon, Y., Kim, H., and Hwang, S., 2007, An integrated management plan for groundwater resources in the coastal areas of Korea (I), Korea Environment Institute, 172p (in Korean).
- Liu, J., Rich, K., and Zheng, C., 2008, Sustainability analysis of groundwater resources in a coastal aquifer, Alabama, *Environmental Geology*, 54, 43-52.
- Lu, C. and Werner, A. D., 2013, Timescales of seawater intrusion and retreat, *Advances in Water Resources*, 59, 39-51.
- Masterson, J. P., 2004, Simulated interaction between freshwater and saltwater and effects of ground-water pumping and sea-level change, Lower Cape Cod aquifer system, Massachusetts. USGS Scientific Investigations Report 2004-5014. Reston, Virginia, USGS, 78p.
- Masterson, J. P. and Garabedian, S. P., 2007, Effects of sea-level rise on ground water flow in a coastal aquifer system. *Ground Water*, 45, 209-217.
- Mollema P. N., Antonellini M., Dentinho, T., and Silva, V. R. M., 2010, The Effects of climate change on the hydrology and groundwater of Terceira Island (Azores). SWIM21-21st Salt Water Intrusion Meeting, Azores, Portugal, 281-284.
- Moore, W. S., 1996, Large groundwater inputs to coastal waters revealed by ²²⁶Ra enrichments. *Nature*, 380(6575), 612-614.
- Moore, W. S. and Church, T. M., 1996, Submarine Groundwater Discharge, Reply to Younger. *Nature*, 382(6587), 122p.
- Oki, D. S., Souza, W. R., Bolke, E. L., and Bauer, G. R., 1998, Numerical analysis of the hydrogeologic controls in a layered coastal aquifer system, Oahu, Hawaii, USA, *Hydrogeology Journal*, 6(2), p.243-263.
- Oki, D. S., 2005, Numerical simulation of the effects of low-permeability valley-fill barriers and the redistribution of ground-water withdrawals in the Pearl Harbor area, Oahu, Hawaii, USGS Scientific Investigations Report 2005-5253. p.112.
- Oude Essink, G. H. P., van Baaren, E. S., and de Louw, P. G. B., 2010, Effects of climate change on coastal groundwater systems: A modeling study in the Netherlands. *Water Resources Research*, 46, W00F04, doi:10.1029/2009WR008719.
- Park, K., Kim, Y., Kwon, C., Ha, K., Park, W., Koh, K., and Park, J., 2013, Experience of the geological splendor of Jeju Island: The Visitor's guide, KIGAM & JDI, 204p (in Korean).
- Praveena, S. M. and Aris, A. Z., 2009, Groundwater resources assessment using numerical model: A case study in low-lying coastal area. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 7(1), 135-146.
- Praveena, S. M., Abdullaha, M. H., Aris, A. Z., and Bidina, K., 2010, Recharge and aquifer response: Manukan Island's Aquifer, Sabah, Malaysia. *Environment Asia* 3(1), 72-81.
- Ranjan, P., Kazama S., and Sawamoto M., 2006, Effects

- of climate change on coastal fresh groundwater resources. *Global Environmental Change*, 16, 388-399.
- Robinson, C., Li, L., and Prommer, H., 2007. Tide-induced recirculation across the aquifer-ocean interface. *Water Resources Research*, 43(7), W07428.
- Rozell, D. J. and Wong, T. F., 2010, Effects of climate change on groundwater resources at Shelter Island, New York State, USA. *Hydrogeology Journal*, 18, 1657-1665.
- Sherif, M. M. and Singh, V. P., 1999, Effect of climate change on sea water intrusion in coastal aquifers. *Hydrological Processes*, 13, 1277-1287.
- Smith, A. J., 2004. Mixed convection and density-dependent seawater circulation in coastal aquifers. *Water Resources Research*, 40(8), W08309.
- Sulzbacher, H., Wiederhold, H., Siemon, B., Grinat, M., Igel, J., Burschil, T., Gunther, T., and Hinsby, K., 2012, Numerical modelling of climate change impacts on freshwater lenses on the North Sea Island of Borkum using hydrological and geophysical methods. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 3621-3643.
- Thomson Reuters, 2014, Web of Science, Chart created: Nov. 17, 2014. Data source: Web of Science Core Collection.
- Vandenbohede, A., Mollema, P. N., Greggio, N., and Antonellini, M. (2014) Seasonal dynamic of a shallow freshwater lens due to irrigation in the coastal plain of Ravenna, Italy. *Hydrogeology Journal*, 22(4), 898-909.
- Voss, C. I. and Provost, A. M., 2002, SUTRA- a model for saturated-unsaturated variable-density ground-water flow with solute or energy transport. U.S. Geological Survey Open-File Report 02-4231, USGS, Reston, VA, 250p.
- Werner, A. D. and Gallagher, M. R., 2006, Characterisation of seawater intrusion in the Pioneer Valley, Australia using hydrochemistry and three-dimensional numerical modeling, *Hydrogeology Journal*, 14(8), 1452-1469.
- Werner, A. D., Simmons, C.T., 2009, Impact of sea-level rise on sea water intrusion in coastal aquifers. *Ground Water*, 47, 197-204.
- Werner, A. D., Bakker, M., Post, V. E. A., Vandenbohede, A., Lu, C., Ataie-Ashtiani B., Simmons, C. T., and Barry, D., 2013, Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges, *Advances in Water Resources*, 51, 3-26.
- White, I. and Falkland, T., 2010, Management of freshwater lenses on small Pacific islands, *Hydrogeology Journal*, 18, 227-246.
- Won, J. H., Kim, J. W., Koh, G. W., and Lee, J. Y., 2005, Evaluation of hydrogeological characteristics in Jeju Island, Korea. *Geoscience Journal*, 9(1), 33-46.
- Yechieli, Y., Shalev, E. Wollman, S., Kiro, Y., and Kafri, U. (2010) Response of the Mediterranean and Dead Sea coastal aquifers to sea level variations, *Water Resources Research*, 46, W12550.
- Youn, J., Kim G., and Jung, C. Y., 2003, A hydrogeological study on high saline groundwater of Handong-ri in the eastern part of Jeju Island, Korea, *Journal of the Geological Society of Korea*, 39(1), 115-131 (in Korean with English abstract).
- Yoon, S., Hyun, W. H., and Jung, C. Y., 2005, Geology of Hallasan (Mt. Halla), Jeju Island, *Journal of the Geological Society of Korea*, 41(4), 481-497 (in Korean with English abstract).
- Yu, W., Voss, C., Michael, H., Ahmed, K. M., Feinson, L., Khan, M. R., and Tuinhof, A., 2010, Implications of climate change for fresh groundwater resources in coastal aquifers in Bangladesh, *The world bank & U.S. Geological Survey*. 121p.

장선우

한국건설기술연구원 수자원연구소

411-712 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283

Tel: 031-910-0278

Fax: 031-910-0251

E-mail: chang@kict.re.kr