J. Korea Water Resour. Assoc. Vol. 59, No. 9 (2026), pp. 1003-1016
doi: 10.3741/JKWRA.2026.59.9.1003
pISSN 2799-8746
eISSN 2799-8754

Experimental analysis of vertical seawater intrusion and freshwater recovery in a coastal aquifer behind a seawall under seawater flooding

Cho, Sung[a] · Hwang, Taegeon[b,c] · Shin, Seungjun[d] · Kim, Yeonjoong[e] · Lee, Woo-Dong[f]*

[a]Senior Manager, Geum River Project Management Department, Korea Water Resources Corporation, Jeonju, Korea
[b]Researcher, Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea
[c]Graduate Student, Department of Ocean Civil Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea
[d]Graduate Student, Department of Ocean Civil Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea
[e]Research Fellow, Land and Environment Research Group, Water Management Division, Korea Environment Institute, Sejong, Korea
[f]Professor, Department of Ocean Civil Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea

Paper number: 26-032
Received: 31 March 2026; Revised: 6 May 2026; Accepted: 16 June 2026

Abstract

Rising sea levels and extreme coastal hazards increase the likelihood of seawater flooding, thereby exacerbating the risk of seawater intrusion into coastal aquifers. This study experimentally investigated the vertical seawater intrusion and freshwater recovery processes occurring in a coastal aquifer behind an impermeable seawall under seawater flooding conditions. To this end, sand tank experiments were conducted under varying inundation heights and inundation distances. In addition, a computer vision-based image analysis method was applied to track the spatiotemporal evolution of the seawater region and to quantify its expansion and recovery characteristics. The results showed that seawater introduced from the land surface propagated downward and interacted with the pre-existing seawater region. As inundation height increased, the spatial extent of the seawater region changed, whereas the maximum seawater-region area exhibited a nonlinear response. In contrast, as the inundation distance increased, both the amount of seawater entering the aquifer and the spatial extent of the seawater region increased markedly, resulting in a substantial increase in the time required to reach the recovery criterion. Furthermore, the time required to reach the recovery criterion was more sensitive to inundation distance than to inundation height, indicating that inundation distance is a key factor governing the persistence and recovery of the seawater region in coastal aquifers.

Keywords: Seawater flooding, Vertical seawater intrusion, Computer vision, Recovery criterion, Sand tank experiment

해수범람에 따른 호안 배후 해안대수층의 수직 해수침투 및 담수 회복에 관한 실험적 분석

조성[a] · 황태건[b,c] · 신승준[d] · 김연중[e] · 이우동[f]*

[a]한국수자원공사 금강사업처 차장, [b]경상국립대학교 해양산업연구소 연구원, [c]경상국립대학교 해양토목공학과 대학원생,
[d]경상국립대학교 해양토목공학과 대학원생, [e]한국환경연구원 국토환경연구본부 물관리연구실 부연구위원, [f]경상국립대학교 해양토목공학과 교수

요 지

해수면 상승과 극한 연안재해는 해수범람의 발생 가능성을 증가시키며 이에 따라 해안대수층의 해수 침투 위험을 가중시킨다. 본 연구는 해수범람 조건에서 불투과성 호안 배후 해안대수층에서 발생하는 수직적 해수침투 및 담수 회복 과정을 실험적으로 분석하였다. 이를 위해 침수높이와 침수거리를 달리한 모래수조 실험을 수행하였다. 또한 컴퓨터 비전 기반 영상분석 기법을 적용하여 해수영역의 시공간적 변화를 추적하고, 그 확장 및 회복 특성을 정량화하였다. 실험 결과, 지표면으로부터 유입된 해수는 하향 전파되며 기존 해수영역과 상호작용하는 것으로 나타났다. 침수높이가 증가함에 따라 해수영역의 공간적 범위는 변화하였으나, 최대 해수영역 면적은 비선형적 응답을 보였다. 반면 침수거리가 증가할수록 대수층으로 유입되는 해수량과 해수영역의 공간적 확장 범위가 현저히 증가하였으며, 이에 따라 회복 판정 기준에 도달하는 데 소요되는 시간도 크게 증가하였다. 또한 회복 판정 기준 도달 시간은 침수높이보다 침수거리에 더 민감하게 반응하는 것으로 나타났으며, 이는 침수거리가 해안대수층 내 해수영역의 지속성과 회복을 지배하는 핵심 인자임을 시사한다.

핵심용어: 해수범람, 수직적 해수침투, 컴퓨터 비전, 회복 판정 기준, 모래수조 실험

***Corresponding Author.** Tel: +82-55-772-9126
E-mail: wdlee@gnu.ac.kr (Lee, Woo-Dong)

© 2026 Korea Water Resources Association

1. 서 론

기후변화에 따른 해수면 상승과 극한 연안재해의 증가는 연안 저지대의 침수 위험을 지속적으로 증대시키고 있다(Jin *et al*., 2024; Kim and Kim, 2025; Kim, 2025). 이러한 변화는 단순한 지표면 침수 피해에 그치지 않고, 담수 자원과 지하수 환경에도 중대한 영향을 미친다. 해수면 상승은 대조기 만조, 폭풍해일, 고파랑 등과 결합하여 월파 및 월류의 발생 가능성과 강도를 더욱 높이며(Kim *et al*., 2025b; Joo and Kim, 2025), 재해 노출을 증가시킬 뿐만 아니라(Kim *et al*., 2025a; Hwang *et al*., 2025) 해안대수층(coastal aquifer)의 취약성을 심화시킨다. 특히 해수에 의한 침수가 발생할 경우, 해수는 지표면을 통해 불포화대와 천부 대수층으로 유입되어 지하수 염분화를 초래할 수 있다. 따라서 침수는 지표 재해를 넘어 지하수 자원에 대한 2차 피해를 유발하는 복합적 재해로 이해될 필요가 있다(Hamlington *et al*., 2024; IPCC, 2021; Neumann *et al*., 2015).

해안대수층의 해수침투에 관한 기존 연구는 주로 수평적 해수침투를 중심으로 전개되어 왔다. 이론적 연구에서는 Glover (1959), Henry (1959), Strack (1976)이 담수-염수 경계면의 평형 위치와 거동을 설명하는 기초를 제시하였으며, 이후 Ferguson and Gleeson (2012), Werner *et al*. (2013), Klassen and Allen (2017)은 해수면 상승, 과도한 지하수 취수, 내륙 경계조건 변화 등에 따른 해안대수층의 취약성과 관리 문제를 체계적으로 논의하였다. 실험 연구에서는 Goswami and Clement (2007), Abarca and Clement (2009), Lu *et al*. (2013), Park *et al*. (2009), Suh *et al*. (2010) 등이 소규모 모래수조 실험을 통해 담수-염수 경계면의 형성, 염수쐐기의 발달, 혼합대의 특성을 분석하였다. Lee *et al*. (2018)은 불투과성 호안이 설치된 해안대수층을 대상으로 수행한 모래수조 실험을 통해 평형 상태에서의 해수-담수 경계면 형성 특성을 분석하였다. 수치 연구에서는 Ataie-Ashtiani *et al*. (1999)이 조석변동의 영향을, Chang and Clement (2012)가 경계 유동 조건의 영향을 검토하였으며, Lee *et al*. (2015, 2017, 2019a, 2019b)는 투과매질 모델(Porous Body Model, PBM)을 도입한 Navier-Stokes 방정식 기반의 수치수조(Numerical Water Tank, NWT)를 이용하여 해수침투, 파랑작용, 구조물 배후 해안대수층의 수리특성을 분석하였다. 이러한 연구들은 해안대수층 내 해수-담수 상호작용의 기초 메커니즘을 이해하는 데 중요한 기반을 제공하였으나, 대체로 해안선 전면에서 발달하는 수평적 해수침투와 경계면 거동에 초점을 두었다는 한계를 가진다.

최근에는 폭풍해일, 월파, 지진해일, 고조위 범람 등으로 인해 해수가 육상 지표를 직접 덮는 침수가 발생할 경우, 해안대수층 상부로부터 하향 유입되는 수직적 해수침투(vertical saltwater intrusion)가 유발될 수 있다는 점이 중요한 연구주제로 부각되고 있다. Cantelon *et al*. (2022)은 이러한 현상을 사건 기반 침수에 의해 유도되는 중요한 염분화 경로로 정리하였으며, 침수가 수 시간에서 수일 이내에 해안대수층의 수직적 해수침투를 유발할 수 있음을 지적하였다. Cho *et al*. (2025) 역시 기존 연구의 주류가 수평적 해수침투에 집중되어 왔음을 언급하면서, 침수 유래 수직적 해수침투의 중요성을 강조하였다.

현장 및 사례 연구도 이러한 위험성을 뒷받침한다. Anderson (2002)은 폭풍 월파 이후 방호사주 섬 대수층의 염분화를 보고하였고, Violette *et al*. (2009)는 지진해일 이후 인도 남동부에서의 지하수 염분화를 제시하였다. 또한 Vithanage *et al*. (2012)은 스리랑카 해안대수층을 대상으로 대수층 상부는 비교적 빠르게 담수 상태로 회복될 수 있으나, 전체 대수층의 완전한 회복에는 장기간이 소요될 수 있음을 보였다. Frederiks *et al*. (2024)은 침수에 의한 수직적 해수 침투가 해안대수층 전반에 보다 직접적이고 광범위한 염분화를 초래할 수 있음을 제시하였다. 이러한 연구들은 수직적 해수침투가 단기적인 침수 사건으로 종료되는 현상이 아니라, 장기적인 수질 악화와 회복 지연으로 이어질 수 있음을 보여준다.

수직적 해수침투의 정량적 특성은 Lee *et al*. (2015)이 제시한 NWT 기반 수치해석 체계를 활용한 후속 연구를 통해 보다 구체화되고 있다. Jeong *et al*. (2021)은 해수범람에 따른 수직적 해수침투와 회복에 미치는 동수경사의 영향을 수치적으로 검토하였다. 이어 Cho *et al*. (2025)은 연안침수에 따른 해안지하수 염분화를 해석하고, 침수높이, 침수거리, 동수경사가 수직적 해수침투와 회복 거동을 지배함을 제시하였다. 이들 연구에 따르면, 침수거리가 길수록 염분화 범위가 확대되고, 침수높이가 클수록 수직적 유입이 가속되며, 동수경사가 작을수록 침투한 해수의 잔류가 길어져 회복이 지연된다. 반대로 동수경사가 클수록 침투 해수의 배출이 촉진되어 회복이 빨라지는 경향이 나타난다. 따라서 침수 조건과 대수층 내 지하수 유동 조건의 상호작용은 수직적 해수침투와 회복 거동을 지배하는 핵심 요인으로 이해될 수 있다.

한편, 실험 영상의 정량화 측면에서는 Robinson *et al*. (2015, 2016, 2018), Etsias *et al*. (2020) 등이 영상기반 분석의 가능성을 제시하였다. 최근 Lee *et al*. (2026)은 해안대수층 모형실험 영상을 대상으로 컴퓨터 비전 기반 영상분석 기법을 제안하여, 실험 영상으로부터 해수 거동을 정량적으로 추적할 수 있

는 방법론적 기반을 마련하였다. 이러한 접근은 침수에 따른 수직적 해수침투 범위와 회복 판정 시간을 실험적으로 정량화하는 데 유용한 수단이 될 수 있다.

이와 같은 선행연구에도 불구하고, 침수가 선행된 뒤 발생하는 수직적 해수침투와 그 이후의 회복 과정을 실험적으로 연속 정량화한 연구는 여전히 제한적이다. 기존 연구의 상당수는 수평적 해수침투, 경계면 위치, 특정 시점의 농도 분포, 또는 수치해석 기반 경향 분석에 초점을 두고 있다. 그러나 침수에 의해 침투한 해수가 시간에 따라 대수층 내부에서 어떻게 확장되고, 이후 어떻게 축소 및 안정화되는지를 실험적으로 연속 추적한 자료는 충분하지 않다. 특히 회복 과정 역시 최종 평형 상태나 특정 시점의 염분 분포로 제시되는 경우가 많아, 침투 범위와 회복 판정 시간을 직접적인 정량 지표로 평가한 실험 연구는 부족하다. 이러한 한계는 수직적 해수침투의 실질적 위험도를 평가하고, 수치해석 결과를 검증하며, 연안대수층 관리 전략을 정교화하는 데 제약으로 작용한다.

본 연구는 해수범람이 불투과성 직립호안 배후 해안대수층에 유발하는 수직적 해수침투 및 담수 회복 과정을 실험적으로 규명하는 것을 목적으로 한다. 이를 위하여 모래수조 실험을 수행하고, 침수높이와 침수거리를 변화시키면서 해수분포의 변화를 관찰하였다. 또한 Lee *et al.* (2026)이 제안한 영상분석 기법을 적용하여 해수영역의 시공간적 변화와 회복 판정 시간을 정량화하였다. 이를 통해 연안침수 조건에 따른 해안대수층의 해수영역 확장 및 회복 특성을 분석하고자 하였다.

2. 모래수조 실험

본 연구의 모래수조 실험은 Lee *et al.* (2026)에서 제시한 해안대수층 모형실험 체계를 기반으로 하였다. 기본 실험 장치, 다공질 매질, 촬영 시스템 및 조명 조건은 선행 연구와 동일한 조건을 유지하되, 해수범람에 따른 수직적 해수침투 및 회복 과정을 분석하기 위하여 침수거리 및 침수높이를 제어하였다. 또한 실험 전 과정에서 취득한 영상 자료를 이용하여 해수영역의 시공간적 변화를 정량화하였다.

2.1 모래수조

해수범람으로 인해 해안대수층에서 발생하는 해수침투 및 회복 과정을 관찰하기 위하여 Fig. 1과 같은 모래수조를 구성하였다. 본 연구의 모래수조는 Lee *et al.* (2026)에서 제시한 실험 장치를 기반으로 하였으며, 해수범람 조건을 구현하기 위하여 불투과성 직립호안 배후 육역에 수직벽을 추가하였다. 모래수조의 제원은 길이 1.8 m, 높이 0.55 m, 폭 0.20 m이며, 바닥으로부터 0.45 m 높이까지 모래를 충전하였다. 두께 3 mm의 불투과성 직립호안은 근입 깊이 0.20 m로 설치하여 수조를 해역과 육역으로 구분하였다. 길이 1.5 m의 육역 양측에는 각각 길이 0.15 m의 격실을 배치하여 해수와 담수를 안정적으로 공급할 수 있도록 하였다. 또한 해수면이 0.40 m, 지하수면이 0.41 m를 초과할 경우 자연 월류가 발생하도록 별도의 월류 장치를 설치하였다. 이와 함께, 해수와 담수를 지속적으

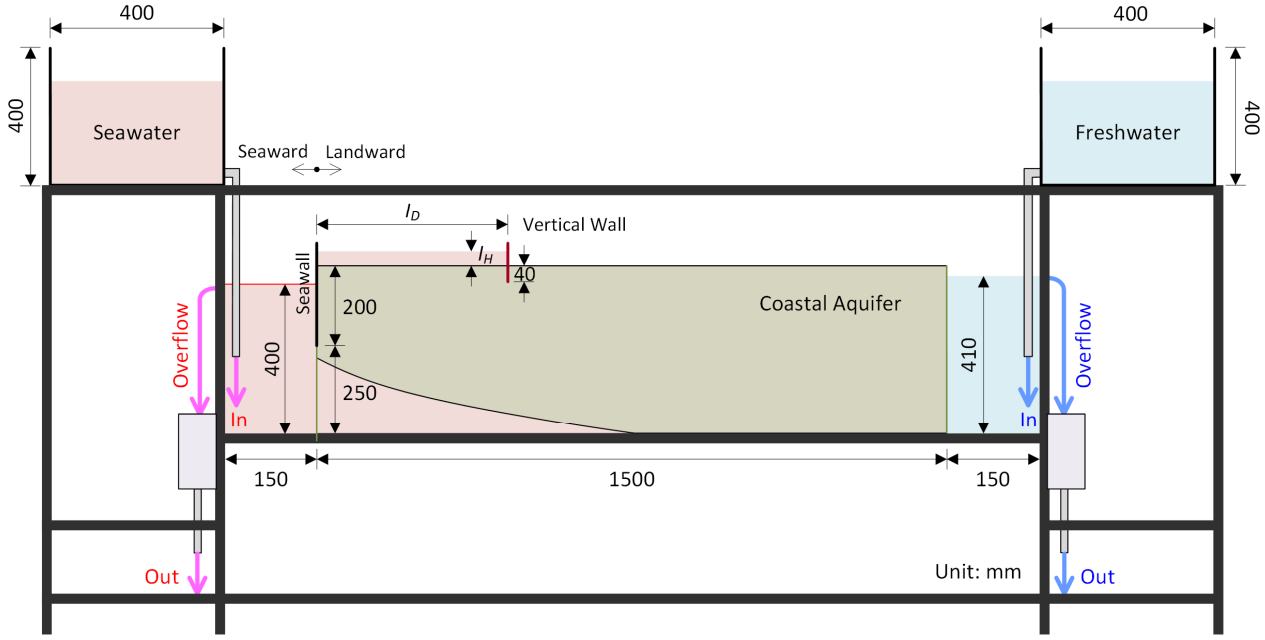


Fig. 1. Schematic of the sand tank used to investigate vertical seawater intrusion and recovery in a coastal aquifer under seawater flooding

로 공급하기 위한 외부 수조를 별도로 연결하여 실험 중 경계 조건이 안정적으로 유지되도록 하였다. 한편, 근입 깊이 0.04 m로 설치된 수직벽은 월류된 해수가 육역으로 유입되는 범위를 제어하는 장치로서 침수거리(I_D)와 침수높이(I_H) 조건을 구현하는 데 사용하였다.

2.2 실험 재료 및 측정

본 연구에서는 해안대수층을 모사하기 위하여 실험 재료 및 측정 장비를 Lee *et al*. (2026)과 동일하게 구성하였다. 해안대수층을 구성하는 다공질 매질은 순도 95% 이상의 규사(silica sand)인 KS 표준사 6호를 사용하였다. 사용된 모래는 평균 입경 0.97 mm, 공극률 0.42, 투수계수 0.065 cm/s를 가지며, 통일 토질 분류법상 입도 분포가 불량한 모래(SP)로 분류된다. 이러한 물성은 조립질 사질 해안대수층에서의 해수 침투, 배출 및 회복 과정을 단순화하여 관찰하기 위한 조건으로 설정하였다. 실험에 사용된 모래는 담수로 세척하여 잔류 염분을 제거한 후 재사용하였다.

담수는 일반 수돗물로 하였으며, 해수는 정제염을 용해하여 염분 33 psu로 제조하였다. 실험 중 측정된 담수와 해수의 수온은 각각 10.63°C와 12.26°C였으며, 밀도는 각각 0.9996 g/cm^{3}와 1.0266 g/cm^{3}로 나타났다. 따라서 본 실험에서는 두 유체 간 밀도 차와 해수위-지하수위 차가 해안대수층 내 지하수 유동을 유도하는 주요 조건으로 작용하였다.

실험 영상은 디지털 비디오 카메라를 이용하여 4K UHD 해상도(3,840 × 2,160 pixels)로 기록하였으며, 해수 거동의 시간적 변화를 추적하기 위하여 1 fps의 시간 해상도로 분석하였다. 영상 기반 색상 분석의 신뢰성을 확보하기 위하여 조명 조건은 실험 전반에 걸쳐 일정하게 유지하였고, 해수의 이동 경로와 분포 형상을 시각적으로 구분하기 위하여 Rhodamine-B 시약으로 해수를 염색하였다. 영상 촬영 및 분석 환경의 세부 사항은 Lee *et al*. (2026)에 제시되어 있다.

2.3 연안침수 조건

본 연구의 모래수조 실험에 적용한 연안침수 조건은 Table 1과 같으며, 조석, 폭풍해일, 파랑 및 지진해일 등에 의해 발생할 수 있는 해수범람 상황을 단순화하여 모사한 것이다. 이 조건은 특정 연안 재해 조건을 정량적으로 재현하기 위한 것이 아니라, 해안대수층에서 해수범람에 의해 발생하는 수직적 해수침투의 정성적 특성을 분석하기 위해 설정하였다.

실험에서는 불투과성 직립호안 배후 육역에 일정한 I_H가 유지되도록 수직벽을 설치하였다. 이 수직벽은 직립호안으로부터 육지 측으로 각각 40 cm 및 80 cm 지점에 배치하여 서로 다른 I_D 조건이 구현되도록 하였다. 또한 각 I_D 조건에 대하여

Table 1. Coastal inundation conditions used in the sand tank experiments

Case	Coastal Inundation	
	Distance	Height
	I_D (cm)	I_H (cm)
1	40	2
2		3
3		4
4	80	2
5		3
6		4

I_H는 2 cm, 3 cm 및 4 cm로 설정하였다. 한편, 침수 부여 과정에서 지표면의 교란을 최소화하기 위하여 육역 표면에는 부직포를 배치하였다.

2.4 영상분석 기법

본 연구에서는 Lee *et al*. (2026)이 제안한 컴퓨터 비전 기반 영상분석 기법을 적용하여 해수와 담수를 영상 기반으로 구분하였다. 또한 해수범람 이후의 수직적 침투에 따른 해수영역 확장, 감소 및 회복 과정을 시간적으로 분석하였으며, 이를 위해 해수영역 면적비, 최대 해수영역 도달 시점 및 회복시간을 주요 지표로 산정하였다. 본 연구에 적용한 영상분석 절차와 주요 설정값은 Table 2에 정리하였다.

영상분석은 Python 3.13.0 환경에서 OpenCV 4.12.0.88을 이용하여 수행하였으며(Bradski, 2000), 영상 전처리, RGB 추출, HSV 변환, 임계값 기반 이진분할, 관심영역(region of interest, ROI) 추출 및 해수영역 면적 산정을 수행하였다. 또한 해수영역 면적 시계열의 고주파 변동을 제거하고 장기 변화 경향을 추출하기 위한 4차 Butterworth 저역통과필터(Butterworth, 1930)는 SciPy 라이브러리를 이용하여 적용하였다(Virtanen *et al*., 2020). 이때 차단주파수는 Lee *et al*. (2026)에서 제시된 f_c = 0.001 Hz로 설정하였다.

HSV 색공간의 H 채널이 조명 강도 및 명도 변화의 영향을 RGB 성분보다 상대적으로 적게 받으며, Rhodamine-B로 염색된 해수와 담수를 안정적으로 구분하는 데 적합한 것으로 평가되었다(Lee *et al*., 2026). 이에 따라 본 연구에서도 H 채널을 주 분석 변수로 사용하였으며, 해수영역은 323°-350°, 담수영역은 42°-72°로 분류하였다. 영상분석 기법의 상세한 절차, 최적 채널 선정 과정 및 임계값 설정 방법은 Lee *et al*. (2026)에 제시되어 있다.

Table 2. Summary of the image analysis framework used for the quantitative evaluation of vertical seawater intrusion and recovery

Step	Procedure	Description	Key settings / outputs
1	Image preprocessing	Correct optical distortion and geometric mismatch in the raw frames Enhance contrast consistency and reduce image noise Improve the reliability of subsequent pixel-based quantification	Preprocessed images with improved spatial consistency and chromatic clarity
2	RGB value extraction	Extract pixel-wise Red-Green-Blue (RGB) intensity values from the preprocessed frames Use the extracted color information as the basis for subsequent chromatic discrimination	Pixel-level RGB intensity data
3	RGB-to-HSV conversion	Transform RGB values into the Hue-Saturation-Value (HSV) color space Separate chromatic information from brightness variation Improve the robustness of segmentation under nonuniform illumination	Pixel-level H values used for segmentation
4	Channel selection	Compare the separability of seawater and freshwater signals among candidate color channels Identify the channel showing the most stable and non-overlapping distributions for segmentation	H-channel
5	Threshold range identification	Determine the representative H-channel ranges for seawater and freshwater from sampled regions Confirm that the two classes can be separated without overlap under the present imaging conditions	323°-350° for seawater 42°-72° for freshwater
6	Threshold determination	Define a hue threshold from the H-channel distributions of seawater and freshwater Establish the criterion used to classify each pixel as seawater or non-seawater	Threshold determined from H-channel distributions
7	Image binarization	Apply hue-based thresholding to all pixels in each frame Classify seawater pixels according to the defined criterion Generate binary masks for quantitative analysis	Binary seawater mask
8	ROI extraction	Restrict the analysis to the region of interest (ROI) corresponding to the aquifer domain Exclude irrelevant background regions and nonphysical pixels from area quantification	ROI-constrained seawater region
9	Spatial calibration and area calculation	Convert the number of segmented seawater pixels into physical area using calibrated horizontal and vertical resolutions Quantify the seawater-occupied area within the aquifer domain	$A_{seawater} = N_{seawater} \times \Delta x \times \Delta y$
10	Frame-by-frame analysis	Apply the same analysis procedure sequentially to all frames Construct a continuous temporal record of seawater-area variation during intrusion and recovery	Time series of seawater area
11	Temporal filtering	Apply a Butterworth low-pass filter to the extracted seawater-area time series Suppress nonphysical high-frequency fluctuations caused by image processing noise Clarify the long-term trend of intrusion and recovery	Fourth-order Butterworth filter Cutoff frequency = 0.001 Hz Sampling frequency = 1 Hz
12	Quantitative interpretation	Interpret the filtered seawater-area time series in terms of seawater intrusion, temporary readjustment, subsequent recovery, and stabilization Use the smoothed history to identify the dominant temporal evolution of seawater behavior	Smoothed seawater-area history for process interpretation

2.5 해수-담수 평형 초기조건

각 실험은 불투과성 직립호안이 설치된 해안대수층에서 해수와 담수가 압력 평형 상태에 도달한 조건을 초기 상태로 설정하여 수행하였다. 초기 상태는 1시간 평균 상대 면적 변화율이 1% 미만이 되는 정상상태로 정의하였다. 각 침수 조건에 적용된 정상상태 해안대수층 내 해수-담수 경계면 분포는 Fig. 2에 제시하였으며, 정상상태에서의 해수영역 면적(S_{A0})과 최대 침투거리(S_{D0})는 Table 3에 정리하였다.

Fig. 2에 나타난 바와 같이 침수 조건에 따라 수행된 각 실험의 초기 해수-담수 경계면 분포는 전반적으로 매우 유사한 형상을 나타내었다. Table 3에 따르면, 정상상태에서의 해수영역 면적 평균은 695.59 cm^{2}로 나타났으며, 가장 큰 편차는 I_D = 40 cm, I_H = 3 cm 조건에서 평균 대비 8.93%였다. 또한 최대 침투거리의 평균은 84.73 cm였으며, 최대 편차는 평균 대비 1.64%였다.

이와 같이 각 침수 시나리오에 대해 설정된 초기 해수 분포는 전반적으로 유사하였으나, 해수영역 면적의 최대 편차는 평균 대비 8.93%로 나타났다. 이는 침수에 따른 수직적 해수

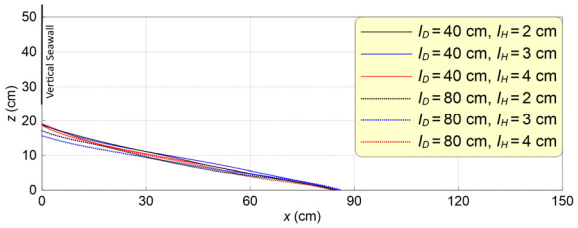


Fig. 2. Seawater-freshwater interface distributions in the coastal aquifer under steady-state initial conditions for the experimental cases

Table 3. Steady-state seawater intrusion characteristics used as initial conditions for the experimental cases under different coastal inundation scenarios

Coastal Inundation		Seawater Intrusion	
Distance	Height	Area	Maximum Distance
I_D (cm)	I_H (cm)	S_{A0} (cm^2)	S_{D0} (cm)
40	2	732.90	84.11
	3	757.68	85.76
	4	704.06	84.11
80	2	652.79	84.63
	3	642.22	86.12
	4	683.89	83.65
Mean Value		695.59	84.73

침투 및 회복 과정을 비교·분석하는 데 있어, 실험 간 초기조건의 차이가 상대적으로 크지 않음을 의미한다. 따라서 본 연구에서 설정한 해수-담수 평형 초기조건은 실험 간 비교를 수행하기에 비교 가능한 수준으로 판단하였다. 다만 초기 해수영역 면적의 편차가 일부 존재하므로, 결과 해석 시 이를 함께 고려할 필요가 있다.

3. 수직적 해수침투 특성

3.1 침수높이가 미치는 영향

침수높이에 따른 해안대수층의 수직적 해수침투 특성을 분석하기 위하여 동일한 침수거리 조건(I_D = 40 cm)에서 침수높이 I_H = 2 cm와 I_H = 4 cm에 대한 실험 결과를 각각 Figs. 3 and 4에 제시하였다. 각 실험은 침수 발생 이후 해수의 침투와 배출, 그리고 이후의 회복 과정이 충분히 확인될 때까지 수행하였으며, 대표 이미지는 12시간 간격으로 제시하였다. Figs. 3(a) and 4(a)의 초기 상태에서는 쐐기형 해수영역이 형성되었으며, 해수-담수 경계면은 안정적인 분포를 보인다.

Figs. 3 and 4에서 공통적으로 확인되는 바와 같이, 침수가 발생하면 지표면에 유입된 해수가 호안 배후의 해안대수층 상부로부터 하향 침투하여 수직적 해수침투가 형성된다. 12시간 경과 시점에서는 수직적 침투에 따른 해수영역이 지표면 부근에서 비교적 빠르게 하향 확산되었으며, 24시간 이후에는 대수층 내부의 기존 해수와 상호작용하면서 분포 형상이 변화하였다. 동시에 대수층 내부에는 해역 방향의 동수경사에 의해 해수의 배출이 유도되므로, 침투한 해수의 일부는 직립호안 하부를 통과하여 바다 측으로 유출된다. 따라서 침수 이후의 해수 거동은 단순한 하향 침투만으로 설명되는 것이 아니라, 상부로부터의 침투와 하부를 통한 배출이 동시에 작용하는 복합적인 과정으로 이해할 수 있다.

침수높이에 따른 차이는 이러한 침투-배출 상호작용의 상대적 우세성에서 뚜렷하게 나타난다. 먼저 I_H = 2 cm 조건(Fig. 3)에서는 침수에 의해 유입되는 해수량이 상대적으로 작아, 지표면으로부터 침투한 해수가 대수층 하부의 기존 해수영역과 충분히 결합하기 전에 해역 방향의 유출 흐름에 의해 점진적으로 배출되는 경향이 우세하게 나타난다. 이에 따라 침투 직후에는 지표면 인근에서 일시적으로 해수영역이 확대되었다. 하지만 36시간 및 48시간 이미지에서 확인되는 바와 같이 시간 경과에 따라 상부의 침투 해수는 점차 축소되고, 대수층 내부의 해수 분포는 초기 평형 상태에 가까운 형태로 회복된다.

반면 I_H = 4 cm 조건(Fig. 4)에서는 지표면에 형성되는 침수심이 증가함에 따라 지표로부터 공급되는 해수량과 수두차가 함께 증가하여 수직적 해수침투가 보다 뚜렷하게 나타난다. 12시간 경과 시점에서는 I_H = 2 cm 조건보다 해수영역의 하향 확산이 뚜렷하였으며, 24시간 시점에서는 침투한 해수가 대수층 상부에만 제한적으로 존재하지 않고 더 깊은 영역까지 확장되었다. 시간 경과에 따라 하부의 기존 해수영역과 직접 연결되거나 사실상 하나의 연속된 해수영역으로 합쳐지는 양상이 나타난다. 즉, 침수높이가 큰 조건에서는 해역 방향의 배출이 계속 작용함에도 불구하고, 상부로부터의 해수 침투 효과가 상대적으로 커서 기존 해수영역과의 융합이 가능할 정도의 침투가 발생한다.

이러한 결과는 침수높이가 해안대수층 내 수직적 해수침투의 강도와 공간적 확장 범위를 지배하는 주요 인자임을 보여준다. 즉, 침수높이가 증가할수록 지표 경계에서 작용하는 수두가 커지고 그에 따라 대수층 내부로 유입되는 해수량이 증가하므로, 침투한 해수가 기존 해수영역과 결합할 가능성도 함께 증가한다. 반대로 침수높이가 낮은 경우에는 침투 규모가 제한적이어서, 침투한 해수가 기존 해수영역과 완전히 결합하기 전에 해역 방향 유출에 의해 소산되는 경향이 상대적으로 크게 나타난다. 따라서 침수높이는 단순히 침수심의

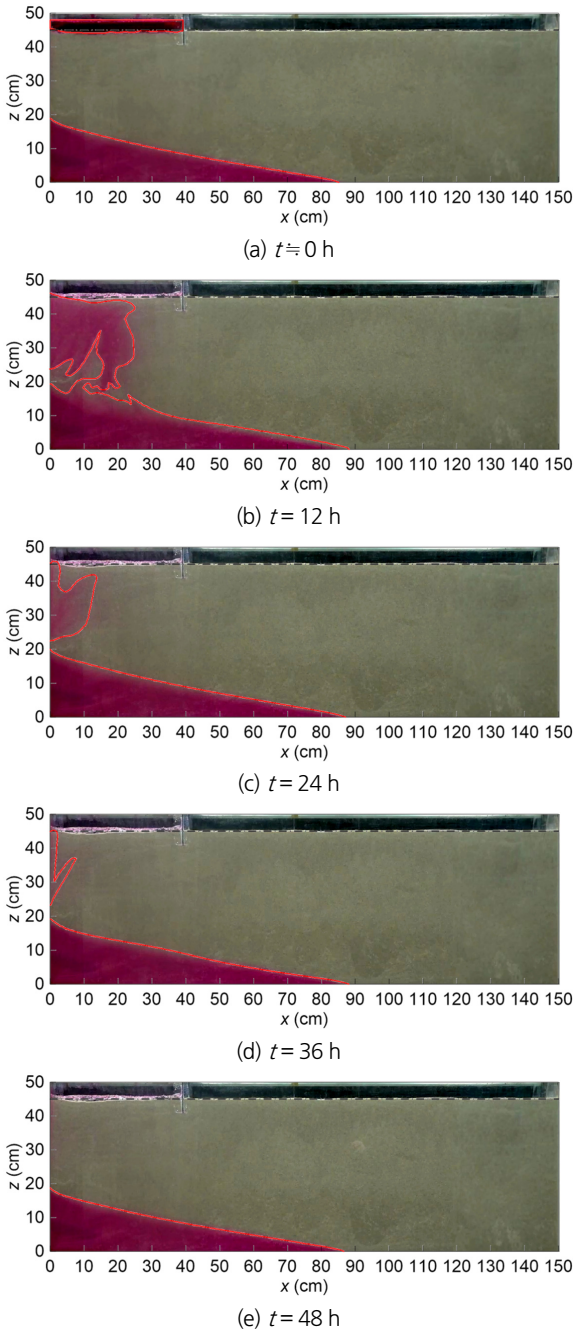


Fig. 3. Temporal evolution of vertical seawater intrusion and recovery under $I_D = 40$ cm and $I_H = 2$ cm conditions

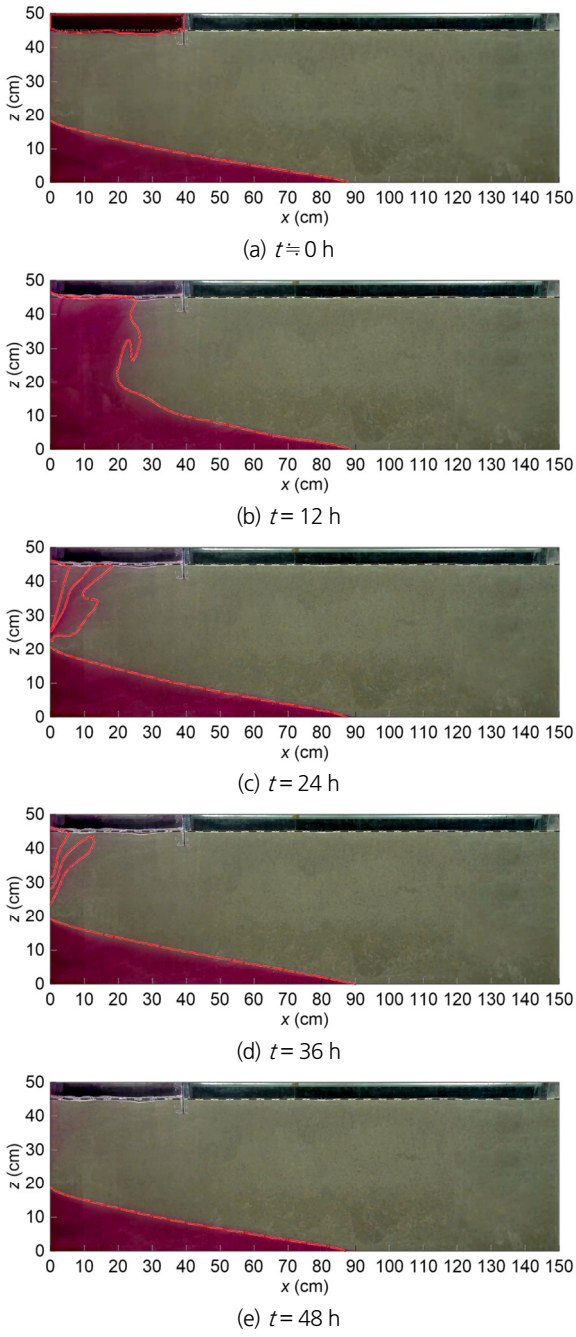


Fig. 4. Temporal evolution of vertical seawater intrusion and recovery under $I_D = 40$ cm and $I_H = 4$ cm conditions

차이를 의미하는 것이 아니라, 해수의 침투량, 침투 심도, 기존 해수와의 연결 가능성, 그리고 회복 속도에까지 영향을 미치는 핵심 수리학적 제어인자로 판단된다.

3.2 침수거리가 미치는 영향

침수거리에 따른 해안대수층의 수직적 해수침투 특성을 분석하기 위하여 동일한 침수높이 조건($I_H = 3$ cm)에서 침수거리 $I_D = 80$ cm 및 $I_D = 40$ cm에 대한 실험 결과를 각각 Figs. 5 and 6에 제시하였다. 각 조건의 대표 이미지는 12시간 간격으로 제시하였다. 다만 $I_D = 40$ cm, $I_H = 3$ cm 조건(Fig. 6)의 경우에는 회복 과정이 비교적 빠르게 진행되어 48시간 이후의 이미지는 제시하지 않았다.

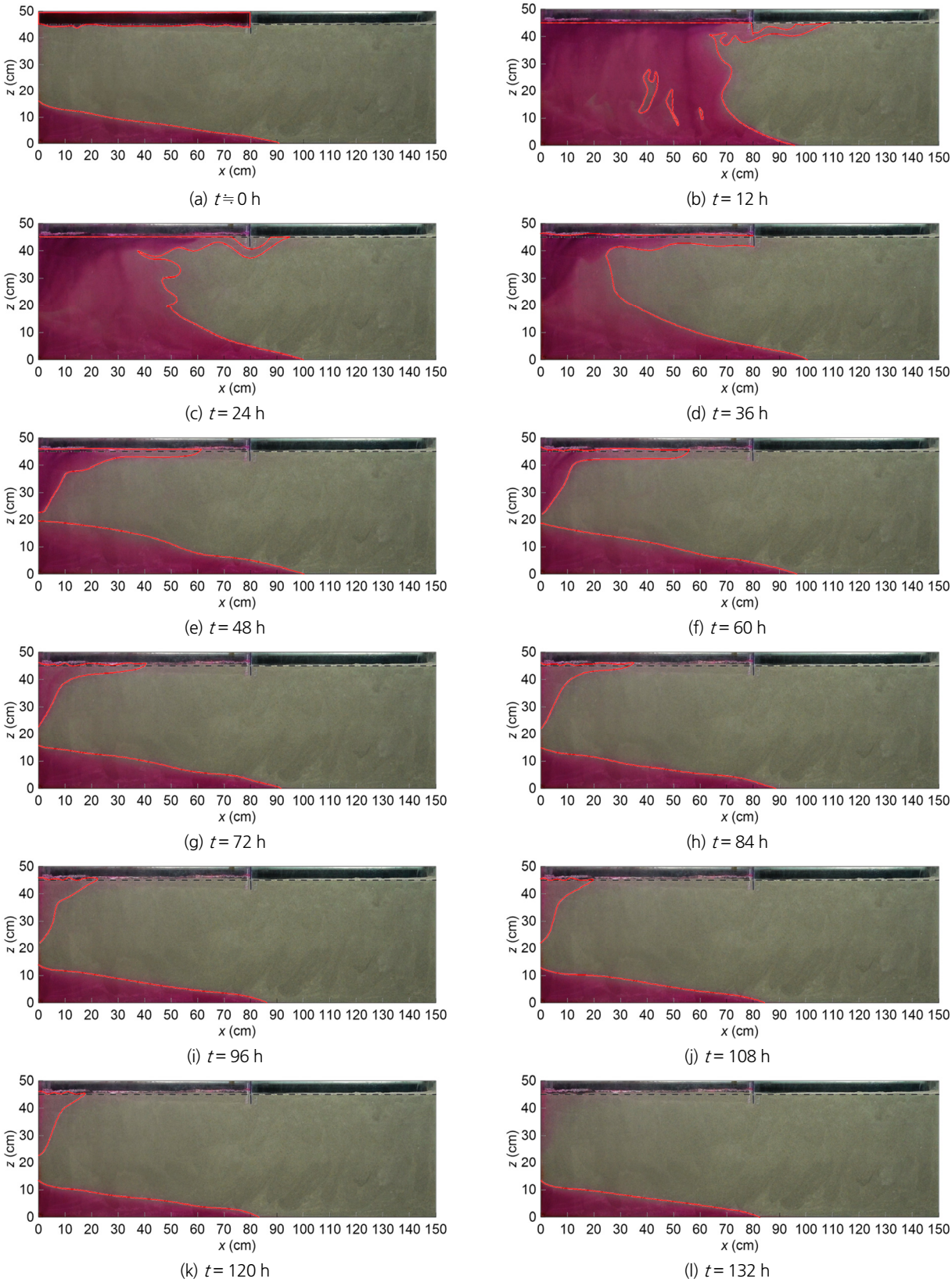
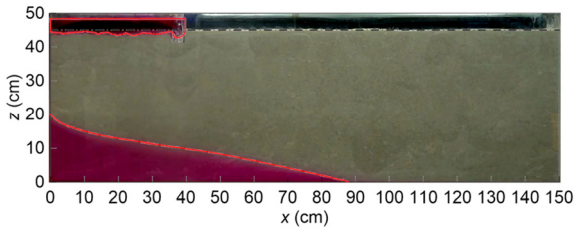
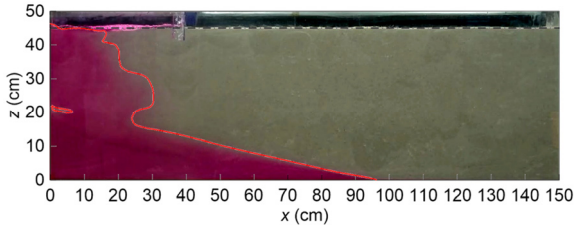


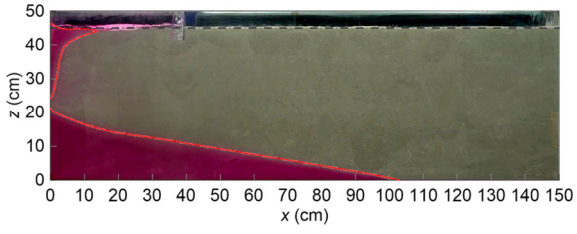
Fig. 5. Temporal evolution of vertical seawater intrusion and recovery under $l_D = 80$ cm and $l_H = 3$ cm conditions



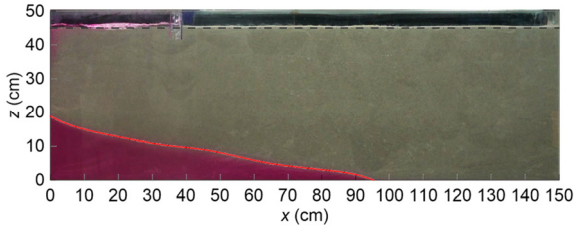
(a) $t \fallingdotseq 0$ h



(b) $t = 12$ h



(c) $t = 24$ h



(d) $t = 36$ h

Fig. 6. Temporal evolution of vertical seawater intrusion and recovery under $l_D = 40$ cm and $l_H = 3$ cm conditions

Figs. 5 and 6에서 공통적으로 확인되는 바와 같이, 침수가 발생하면 지표면에 유입된 해수가 호안 배후의 해안대수층 상부로부터 대수층 내부로 확장된다. 이후 유입된 해수는 기존 해수영역과 상호작용하는 동시에 해역 방향의 동수경사에 의해 직립호안 하부를 통과하여 바다 측으로 배출된다. 따라서 침수 이후의 해수 거동은 지표 경계로부터의 유입과 하부 경계를 통한 배출이 동시에 작용하는 비정상 과정으로 해석할 수 있다.

침수거리의 영향은 침투 범위와 지속시간에서 뚜렷하게 나타난다. 먼저 $I_D = 80$ cm 조건(Fig. 5)에서는 침수 구간이 길어짐에 따라 지표면을 통해 대수층으로 공급되는 해수의 총량이 증가하고, 이에 따라 해수의 확장 범위도 보다 넓게 나타난다. 특히 침수 초기에 형성된 상부 해수영역이 대수층 내부로 깊고 넓게 발달하며, 하부의 기존 해수영역과 연결되면서 해수-담수 경계면이 일시적으로 불명확해지는 양상이 확인된다. 이러한 변화는 12-36시간 경과 시점에서 뚜렷하게 나타나며, 48시간 이후에는 분리되는 양상이 나타났다. 또한 침투한 해수가 해역 방향으로 배출되어 초기 평형 상태에 가까운 분포로 회복되기까지 상당한 시간이 소요된다. 120시간 경과 시점까지도 침수의 영향이 지표 부근에 국한되지 않고 대수층 내부까지 미치는 것을 확인할 수 있다.

반면 $I_D = 40$ cm 조건(Fig. 6)에서는 동일한 침수높이 조건에서도 침수 구간이 짧기 때문에 상부로부터 공급되는 해수량이 상대적으로 제한되며, 해수 분포의 공간적 확장 범위 역시 Fig. 5에 비해 작게 나타난다. 그럼에도 불구하고 침투한 해수는 초기 해수-담수 경계면 상부에서 기존 해수영역과 상호작용하여 일시적으로 경계면을 흐리게 만드는 양상을 12시간 경과 시점에서 확인할 수 있다. 그러나 $I_D = 80$ cm 조건에 비해서는 침투량이 작고 해역 방향으로 빠르게 배출되므로 24시간 경과 시점에 상부 침투 해수와 하부 해수영역이 분리될 뿐 아니라, 전체 회복 시간도 상대적으로 짧게 나타난다.

이와 같은 결과는 침수거리가 해안대수층 내 해수 침투의 강도와 공간적 확장뿐 아니라, 해수영역의 지속 시간과 회복 판정 시간에도 중요한 영향을 미침을 보여준다. 즉, 침수높이가 동일하더라도 침수거리가 길어질수록 지표 경계에서 대수층으로 유입되는 해수의 총량이 증가하므로, 유입된 해수가 기존 해수영역과 결합하거나 대수층 내부에 장시간 잔류할 가능성이 커진다. 반대로 침수거리가 짧은 경우에는 침투 범위와 체류량이 상대적으로 제한되어 회복 과정이 보다 빠르게 진행된다. 따라서 침수거리는 침수높이와 함께 해안대수층의 해수영역 확장 및 회복 판정 특성을 지배하는 핵심 제어인자로 판단된다.

4. 해안대수층의 염분화 및 회복 특성

4.1 해수영역 변화 특성

해수범람에 따른 지표 경계로부터의 해수 침투는 해안대수층 내 염색된 해수영역의 확대를 유발하며, 본 연구에서는 그 영향을 해수영역 면적 변화로 평가하였다. 이를 분석하기 위하여 S_{A0}로 무차원화한 해수영역 면적비(S_A/S_{A0})의 시간 변화를 Fig. 7에 제시하였다. 여기서 해수영역 면적(S_A)은 임의 시각(t)에서의 해수영역 면적을 의미한다. Fig. 7은 침수거리 조건이 $I_D = 40$ cm와 $I_D = 80$ cm 인 경우를 각각 (a)와 (b)로 나타낸다. 최대 해수영역 형성 시각(t_p)에서의 해수 분포는 Fig. 8($I_D = 40$ cm)과 Fig. 9($I_D = 80$ cm)에 제시하였으며, 각

그림의 (a)-(c)는 각각 I_H = 2 cm, 3 cm, 4 cm 조건에 해당한다. t_p는 다음과 같이 정의하였다.

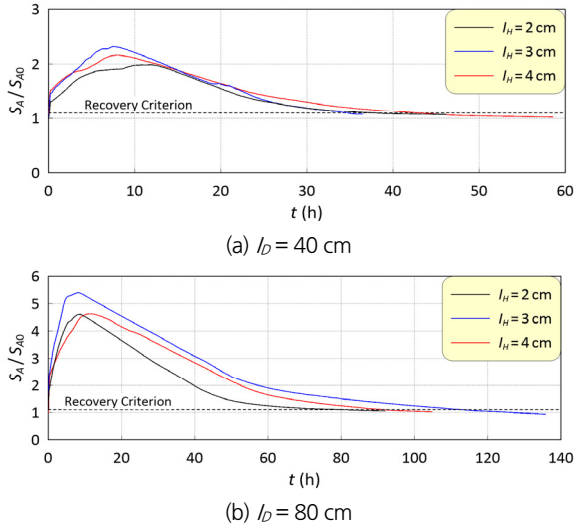
$$t_p = [t \mid S_A(t) = S_{A,\max}] \quad (1)$$

여기서 $S_{A,\max}$는 해안대수층 내 해수영역의 최대 면적을 의미한다. 이러한 정의를 통해 침수 조건에 따른 해수영역의 상대적 확장 정도와 이후 감소 과정을 정량적으로 비교할 수 있다.

4.2 침수높이가 미치는 영향

침수높이가 해안대수층 내 해수영역 변화에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 Fig. 7의 면적비 변화를 비교하였다. I_D = 40 cm 조건(Fig. 7(a))과 I_D = 80 cm 조건(Fig. 7(b)) 모두에서 I_H = 3 cm일 때 S_A/S_{A0}의 최대값이 가장 크게 나타났다. 이는 침수높이가 증가할수록 지표 경계로부터의 유입 효과가 커지는 동시에 해역 방향 배출의 영향도 함께 작용한 결과로 해석된다. 즉, I_H = 2 cm 조건에서는 상부로부터 유입되는 해수량이 상대적으로 작아 해수영역의 확장 규모가 제한되는 반면, I_H = 4 cm 조건에서는 상부 유입 효과가 더 커졌음에도 불구하고, 배출 및 내부 재분포 효과가 함께 작용하여 해수영역의 순증가가 반드시 최대가 되지는 않은 것으로 판단된다.

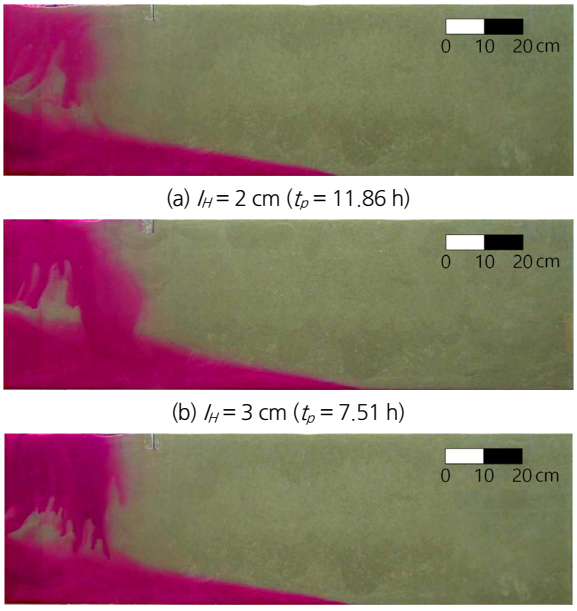
이러한 경향은 최대 해수영역이 형성된 시점의 실험 이미지(Figs. 8 and 9)에서도 확인된다. I_D = 40 cm 조건(Fig. 8)에서는 I_H = 3 cm에서 상부로부터 유입된 해수가 대수층 내부로 가장 뚜렷하게 확장되며, 기존 해수영역과의 연계도 상대적으로 분명하게 나타난다. I_H = 2 cm에서는 유입량이 제한되어 상부 해수영역의 확장 범위가 상대적으로 작고, I_H = 4 cm에서는 보다 큰 침수심에도 불구하고 배출 효과가 함께 작용하여



(a) I_D = 40 cm

(b) I_D = 80 cm

Fig. 7. Temporal variations in the normalized seawater area (S_A/S_{A0}) in the coastal aquifer under different coastal inundation heights for (a) I_D = 40 cm and (b) I_D = 80 cm

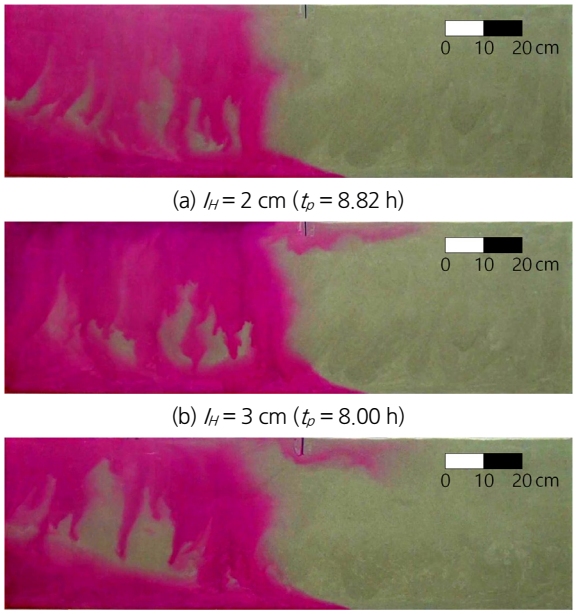


(a) I_H = 2 cm (t_p = 11.86 h)

(b) I_H = 3 cm (t_p = 7.51 h)

(c) I_H = 4 cm (t_p = 7.94 h)

Fig. 8. Experimental images at the time of maximum seawater area (t_p) in the coastal aquifer under I_D = 40 cm condition: (a) I_H = 2 cm, (b) I_H = 3 cm, and (c) I_H = 4 cm



(a) I_H = 2 cm (t_p = 8.82 h)

(b) I_H = 3 cm (t_p = 8.00 h)

(c) I_H = 4 cm (t_p = 11.86 h)

Fig. 9. Experimental images at the time of maximum seawater area (t_p) in the coastal aquifer under I_D = 80 cm condition: (a) I_H = 2 cm, (b) I_H = 3 cm, and (c) I_H = 4 cm

I_H = 3 cm보다 더 큰 면적 확장으로 이어지지 않았다.

I_D = 80 cm 조건(Fig. 9)에서도 전반적인 경향은 유사하나, 전체적으로 해수 분포의 확장 규모가 더 크게 나타난다. 특히 I_H = 3 cm 및 I_H = 4 cm 조건에서는 상부에서 유입된 해수가 대수층 내부로 넓게 발달하여 초기 해수-담수 경계면을 크게 교란하는 양상이 나타난다. 반면 I_H = 2 cm 조건에서는 침수높이가 상대적으로 작아 상부 해수영역의 확장 범위가 제한되며, 초기 해수영역과의 연결 정도도 비교적 작게 나타난다.

이와 같은 결과는 침수높이가 해수영역의 확장 정도와 최대 해수영역 면적에 직접적인 영향을 미치지만, 그 영향은 단순히 침수높이에 비례하지 않음을 보여준다. 즉, 침수높이는 상부 유입을 증가시키는 동시에 배출 거동에도 영향을 미치므로, 해수영역의 최대 확장 규모는 유입과 배출의 상대적 균형에 의해 결정되는 것으로 판단된다.

4.3 침수거리가 미치는 영향

침수거리가 해안대수층 내 해수영역 변화에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Figs. 7(a) and 7(b)를 비교하였다. 동일한 침수높이 조건에서 I_D = 80 cm인 경우가 I_D = 40 cm인 경우보다 전반적으로 더 큰 S_A/S_{A0} 값을 나타내었으며, 최대값 이후의 감소 과정도 더 완만하게 나타났다. 이는 침수거리가 길어질수록 지표면을 통해 대수층으로 공급되는 해수의 총량이 증가하고, 그 결과 대수층 내부에 더 넓은 해수영역이 형성되며 회복에도 더 오랜 시간이 소요됨을 의미한다. 반면 최대 해수영역이 형성되는 시각 t_p는 두 조건 사이에서 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 초기 확장 단계의 지배 메커니즘과 관련된 결과로 해석될 수 있으나, 그 구체적 원인은 추가적인 유동 계측 또는 수치해석을 통해 확인될 필요가 있다.

최대 해수영역 형성 시점의 실험 이미지(Figs. 8 and 9)를 비교하면, 동일한 침수높이에서도 I_D = 80 cm 조건에서 해수영역의 공간적 확장 범위가 전반적으로 더 크게 나타난다. 특히 I_H = 3 cm 및 I_H = 4 cm 조건에서는 I_D = 80 cm에서 상부로부터 유입된 해수가 대수층 내부로 보다 넓게 발달하고, 초기 해수-담수 경계면을 더 크게 교란하는 양상이 확인되었다. 이는 침수거리 증가가 단순히 지표 침수 범위의 확대에 그치지 않고, 대수층 내부의 해수영역 확장과 잔류 특성에도 영향을 미침을 보여준다.

따라서 침수거리는 해수영역의 최대 확장 규모와 회복 과정에 중요한 영향을 미치는 인자로 판단된다. 특히 침수높이가 동일하더라도 침수거리가 길어질수록 대수층으로 유입되는 해수의 총량과 공간적 분포 범위가 증가하므로, 해수영역 면적이 회복 판정 기준에 도달하기까지 더 긴 시간이 요구된다. 이러한 결과는 해안대수층의 회복 특성을 평가할 때 침수높이뿐만 아니라 침수거리의 영향을 함께 고려해야 함을 시사한다.

4.4 해안대수층의 회복시간

연안침수로 인해 발생한 수직적 해수침투 이후 해수영역의 회복 판정 시간을 분석하였다. 회복시간은 t_p로부터 S_A가 S_{A0}의 110% 수준에 도달할 때까지의 시간으로 정의하였다. 여기서 t_p는 Fig. 7에 제시된 S_A/S_{A0} 시계열에서 피크값이 발생하는 시각을 의미한다.

실험적으로 해안대수층이 초기 정상상태, 즉, S_A/S_{A0} = 1.0에 완전히 도달할 때까지 장시간 실험을 수행하는 것은 현실적으로 어렵다. 이에 따라 본 연구에서는 S_A/S_{A0} = 1.1을 회복 판정 기준으로 설정하고, 이 조건에 도달하는 데 필요한 시간을 실험적 회복시간(T_R)으로 정의하였다. 따라서 회복시간은 다음과 같이 정의된다.

$$T_R = [t \mid S_A(t) = 1.1S_{A0}] - t_p \quad (2)$$

여기서 T_R은 최대 해수영역 발생 시점 이후 해수영역 면적이 본 연구에서 설정한 회복 판정 기준(S_A/S_{A0} = 1.1)에 도달하는 데 필요한 시간을 의미한다.

각 실험 조건에 대한 t_p와 T_R 그리고 종료시간(t_p + T_R)은 Table 4에 정리하였다. 침수높이에 따른 회복시간의 변화는 비교적 불규칙하게 나타났으며, 본 실험 범위에서는 침수높이가 회복시간을 일관되게 지배한다고 보기 어려웠다. 예를 들어 I_D = 40 cm 조건에서는 I_H가 2 cm, 3 cm, 4 cm에 대해 T_R은 각각 25:50:57, 27:11:04, 34:56:49로 증가하는 경향을 보였으나, I_D = 80 cm 조건에서는 70:42:24, 104:32:52, 79:47:44로 나타나 단조 증가 경향이 유지되지 않았다. 이는 회복 판정 시간이 단순히 침수높이만의 함수가 아니라, 해수 유입량, 침투 범위, 기존 해수영역과의 연결 정도, 그리고 해역 방향 배출 효과의 상대적 크기에 의해 복합적으로 결정됨을 시사한다.

반면, 침수거리의 영향은 보다 뚜렷하게 나타났다. 동일한 침수높이 조건에서 I_D = 80 cm의 회복 판정 시간은 I_D = 40 cm보다 전반적으로 크게 나타났으며, 평균 회복시간도 각각 85:01:00 및 29:19:37로 차이를 보였다. 이를 기준으로 하면 침수거리가 2배 증가할 때 회복시간은 평균적으로 약 2.90배 증가하였다. 이는 침수거리가 길어질수록 지표면을 통해 대수층으로 유입되는 해수의 총량과 공간적 분포 범위가 증가하고, 그 결과 해수영역 면적이 회복 판정 기준에 도달하기까지 더 오랜 시간이 필요하기 때문으로 해석된다.

Table 4. Peak time, recovery time, and end time of seawater-area evolution in the coastal aquifer under different coastal inundation conditions

Coastal Inundation (cm)		Time (hh:mm:ss)		
I_D	I_H	Peak (t_p)	Recovery (T_R)	End ($t_p + T_R$)
40	2	11:51:35	25:50:57	37:42:32
	3	07:30:40	27:11:04	34:41:44
	4	07:56:40	34:56:49	42:53:29
Mean Value		09:06:18	29:19:37	38:25:55
80	2	08:49:04	70:42:24	79:31:28
	3	08:00:07	104:32:52	112:32:59
	4	11:51:42	79:47:44	91:39:26
Mean Value		09:33:38	85:01:00	94:34:38

따라서 본 실험 범위에서는 회복시간에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 침수높이보다 침수거리인 것으로 판단된다. 즉, 침수높이는 최대 해수영역 면적과 유입 강도에 영향을 미치지만, 회복 판정 시간은 침수거리 증가에 따라 더욱 민감하게 증가하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 해안대수층 내 해수영역의 회복 특성을 평가할 때, 침수높이뿐 아니라 침수거리의 영향을 함께 고려할 필요가 있음을 보여준다.

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 모래수조 실험과 컴퓨터 비전 기반 영상분석 기법을 이용하여 해수범람에 따른 해안대수층의 수직적 해수침투 및 회복 과정을 실험적으로 분석하였다. 특히 침수높이와 침수거리를 변화시키면서 해안대수층 내 해수영역의 시공간적 변화를 추적하였고, 이를 바탕으로 최대 해수영역 도달 시점과 회복 판정 시간을 평가하였다. 본 연구를 통해 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

연안침수는 해안대수층 지표로부터의 해수 침투를 유발하여 기존의 해수-담수 평형 상태를 교란하였으며, 이에 따라 해안대수층 내 해수영역이 일시적으로 확대되는 수직적 해수침투 현상이 확인되었다. 침투한 해수는 대수층 내부의 기존 해수영역과 상호작용하는 동시에 해역 방향의 흐름에 의해 점차 배출되었으며, 이에 따라 해수영역이 감소하는 회복 경향이 나타났다.

침수높이는 해수 침투의 강도와 최대 해수영역 면적에 영향을 미치는 주요 인자로 나타났다. 그러나 그 영향은 침수높이에 단순 비례하지 않았으며, 본 실험 범위에서는 특정 조건에서 해수영역의 최대 확장이 가장 크게 나타났다. 이는 침수높이가 지표 경계에서의 해수 침투를 증가시키는 동시에 해역 방향 배출과 내부 재분포 과정에도 함께 영향을 미친 결과로 해석된다.

침수거리는 해안대수층 내 해수영역의 확장 정도와 회복 판정 시간에 매우 중요한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 동일한 침수높이 조건에서도 침수거리가 증가할수록 지표면을 통한 해수 침투 총량이 증가하였으며, 그 결과 해수영역의 공간적 확장 범위가 커지고 본 연구에서 설정한 회복 판정 기준에 도달하는 데 더 오랜 시간이 소요되었다. 따라서 침수거리는 최대 해수영역 면적뿐 아니라 해수영역의 지속 시간과 회복 판정 시간에도 큰 영향을 미치는 핵심 제어인자임을 시사한다.

영상분석 기반 정량화 기법은 해안대수층 내 해수영역의 시공간적 변화를 연속적으로 추적하는 데 효과적으로 활용될 수 있었다. 본 연구에서는 해수영역 면적의 시계열 변화를 바탕으로 최대 해수영역 도달 시점과 회복 판정 시간을 정량적으로 평가하였으며, 이를 통해 침수 조건에 따른 해수영역의 확장 및 감소 특성을 비교할 수 있었다. 이러한 결과는 기존의 정성적 관찰 중심 접근을 보완하고, 해안대수층 내 해수 거동을 보다 객관적으로 분석할 수 있는 기반을 제시한다는 점에서 의의가 있다.

종합하면, 본 연구는 해수범람에 따른 침수가 해안대수층의 수직적 해수침투를 유발하며, 해수영역의 확장 규모와 회복 판정 특성이 침수높이와 침수거리 조건에 따라 달라질 수 있음을 실험적으로 확인하였다. 특히 회복 판정 시간은 침수높이보다 침수거리의 영향을 더 크게 받는 경향을 보였으며, 이는 침수의 공간적 범위가 해안대수층 내 해수영역의 지속성과 회복 특성을 평가하는 데 중요한 변수임을 시사한다.

한편 본 연구는 모래수조 실험을 기반으로 수행되었으므로 실제 해안대수층에서 나타나는 불균질한 입경 분포와 지층구조, 투수계수의 공간적 변화, 복잡한 경계조건, 지하수 흐름, 조석 및 파랑과의 상호작용, 침수 지속시간, 그리고 밀도류의 세부 거동을 모두 재현하는 데에는 한계가 있다. 따라서 이러한 실험적 한계를 보완하고 해안대수층의 수리현상을 보다 정밀하게 해석하기 위해서는 고도화된 수치해석이 병행될 필요가 있다. 특히 실험 결과를 재현하고 확장할 수 있는 정밀 수치해석이 수행된다면, 침수에 따른 해안대수층의 해수 침투, 잔류, 배출 및 회복 메커니즘을 보다 심도 있게 규명할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00356327).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

Abarca, E., and Clement, T.P. (2009). "A novel approach for characterizing the mixing zone of a saltwater wedge." *Geophysical Research Letters*, Vol. 36, No. 6, L06402.

Anderson, W.P. (2002). "Aquifer salinization from storm overwash." *Journal of Coastal Research*, Vol. 18, No. 3, pp. 413-420.

Ataie-Ashtiani, B., Volker, R.E., and Lockington, D.A. (1999). "Tidal effects on sea water intrusion in unconfined aquifers." *Journal of Hydrology*, Vol. 216, No. 1-2, pp. 17-31.

Bradski, G. (2000). "The OpenCV library." *Dr. Dobb's Journal*, Vol. 25, No. 11, pp. 120-123.

Butterworth, S. (1930). "On the theory of filter amplifiers." *Experimental Wireless and the Wireless Engineer*, Vol. 7, No. 6, pp. 536-541.

Cantelon, J.A., Guimond, J.A., Robinson, C.E., Michael, H.A., and Kurylyk, B.L. (2022). "Vertical saltwater intrusion in coastal aquifers driven by episodic flooding: A review." *Water Resources Research*, Vol. 58, No. 11, e2022WR032614.

Chang, S.W., and Clement, T.P. (2012). "Experimental and numerical investigation of saltwater intrusion dynamics in flux-controlled groundwater systems." *Water Resources Research*, Vol. 48, W09527.

Cho, S., Hwang, T., Shin, S., Kang, G., and Lee, W.D. (2025). "Analysis of coastal groundwater salinization induced by coastal inundation using numerical wave tank based on porous body model." *Journal of Coastal Disaster Prevention*, Vol. 12, No. 1, pp. 49-59.

Etsias, G., Hamill, G.A., Benner, E.M., Águila, J.F., McDonnell, M.C., Flynn, R., and Ahmed, A.A. (2020). "Optimizing laboratory investigations of saline intrusion by incorporating machine learning techniques." *Water*, Vol. 12, No. 11, 2996.

Ferguson, G., and Gleeson, T. (2012). "Vulnerability of coastal aquifers to groundwater use and climate change." *Nature Climate Change*, Vol. 2, No. 5, pp. 342-345.

Frederiks, R.S., Paldor, A., Carleton, G., and Michael, H.A. (2024). "A comparison of sea-level rise and storm-surge overwash effects on groundwater salinity of a barrier island." *Journal of Hydrology*, Vol. 644, 132050.

Glover, R.E. (1959). "The pattern of fresh-water flow in a coastal aquifer." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 64, No. 4, pp. 457-459.

Goswami, R.R., and Clement, T.P. (2007). "Laboratory-scale investigation of saltwater intrusion dynamics." *Water Resources Research*, Vol. 43, No. 4, W04418.

Hamlington, B.D., Bellas-Manley, A., Willis, J.K., Fournier, S., Vinogradova, N., Nerem, R.S., Piecuch, C.G., Thompson, P.R., and Kopp, R.E. (2024). "The rate of global sea level rise doubled during the past three decades." *Communications Earth & Environment*, Vol. 5, 601.

Henry, H.R. (1959). "Salt water intrusion into fresh water aquifers." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 64, No. 11, pp. 1911-1919.

Hwang, T., Kim, H.J., Min, B.I., Seo, M., and Lee, W.D. (2025). "Assessment of potential storm surge hazards at nuclear power plant sites on Korea's eastern coast." *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 39, No. 6, pp. 611-620.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, U.S., p. 1092.

Jeong, Y.H., Lee, S.Y., Lee, J., Lee, T.K., and Lee, W.D. (2021). "Characteristics of seawater intrusion in coastal aquifers due to seawater flooding: A numerical study." *Journal of Coastal Research*, Vol. 114, No. SI, pp. 96-100.

Jin, H., Hwang, T., Kim, H.J., Min, B.I., and Lee, W.D. (2024). "Storm surge simulations using hypothetical scenarios based on historical typhoons impacting the Korean Peninsula: Analysis of storm surge and overtopping volumes." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 57, No. 12, pp. 1037-1051.

Joo, H.J., and Kim, I.C. (2025). "Effect of sea level rise on nearshore waves and wave energy." *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 39, No. 6, pp. 621-635.

Kim, C.K., and Kim, Y. (2025). "Development of an integrated environmental information management system for estuary-coastal areas: Focusing on risk assessment." *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 39, No. 6, pp. 658-670.

Kim, H.J., Hwang, T., Min, B.I., Seo, M., and Lee, W.D. (2025a). "Assessment of potential storm surge hazards using the probabilistic synthetic typhoon ensemble: The western coast nuclear power plant site in Korea." *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 39, No. 5, pp. 512-521.

Kim, H.J., Jin, H., Min, B.I., and Lee, W.D. (2025b). "Storm surge response to typhoon tracks along the Korean Peninsula: Numerical modeling derived from historical typhoons." *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 39, No. 2, pp. 152-162.

Kim, Y. (2025). "Damage mitigation strategies for flood-prone coastal areas under climate change and sea level rise." *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 39, No. 6, pp. 646-657.

Klassen, J., and Allen, D.M. (2017). "Assessing the vulnerability of coastal aquifers to sea-level rise using a coupled flow and transport model." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 21, No. 4, pp. 2035-2049.

Lee, W.D., Cho, S., Hwang, T., Shin, S., and Kang, G. (2026). "Proposal and applicability assessment of a computer vision-based quantification method for seawater behavior in coastal aquifers." *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 40, No. 2, pp. 197-210.

Lee, W.D., Jeong, Y.H., and Hur, D.S. (2015). "Numerical simulation on seawater intrusion in coastal aquifer using N-S solver based on porous body model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 12, pp. 1023-1035.

Lee, W.D., Jeong, Y.H., and Hur, D.S. (2017). "Effects of wave action on seawater intrusion in coastal aquifer and mitigation strategies." *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 31, No. 1, pp. 47-59.

Lee, W.D., Jeong, Y.H., and Jeon, H.S. (2019a). "Groundwater flow analysis in a coastal aquifer with the coexistence of seawater and freshwater by using a non-hydrostatic pressure model." *Journal of Coastal Research*, Vol. 91, No. SI, pp. 121-125.

Lee, W.D., Yoo, Y.J., Jeong, Y.M., and Hur, D.S. (2019b). "Experimental and numerical analysis on hydraulic characteristics of coastal aquifers with seawall." *Water*, Vol. 11, No. 11, 2343.

Lee, W.D., Yoo, Y.J., Jeong, Y.M., Jeong, Y.H., and Hur, D.S. (2018). "Experimental investigation of the effects of revetments on seawater intrusion in coastal aquifers." *Journal of Coastal Research*, Vol. 85, No. SI, pp. 441-445.

Lu, C., Chen, Y., Zhang, C., and Luo, Z. (2013). "Steady-state freshwater-seawater mixing zone in stratified coastal aquifers." *Journal of Hydrology*, Vol. 505, pp. 24-34.

Neumann, B., Vafeidis, A.T., Zimmermann, J., and Nicholls, R.J. (2015). "Future coastal population growth and exposure to sea-level rise and coastal flooding: A global assessment." *Plos One*, Vol. 10, No. 3, e0118571.

Park, H.J., Kim, W.I., Ho, J.S., and Ahn, W.S. (2009). "Experimental study to parameterize salt-wedge formations in coastal aquifers." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 11, pp. 1005-1015.

Robinson, G., Ahmed, A.A., and Hamill, G.A. (2016). "Experimental saltwater intrusion in coastal aquifers using automated image analysis: Applications to homogeneous aquifers." *Journal of Hydrology*, Vol. 538, pp. 304-313.

Robinson, G., Hamill, G.A., and Ahmed, A.A. (2015). "Automated image analysis for experimental investigations of salt water intrusion in coastal aquifers." *Journal of Hydrology*, Vol. 530, pp. 350-360.

Robinson, G., Moutari, S., Ahmed, A.A., and Hamill, G.A. (2018). "An advanced calibration method for image analysis in laboratory-scale seawater intrusion problems." *Water Resources Management*, Vol. 32, pp. 3087-3102.

Strack, O.D.L. (1976). "A single-potential solution for regional interface problems in coastal aquifers." *Water Resources Research*, Vol. 12, No. 6, pp. 1165-1174.

Suh, S.K., Oh, C.M., Kim, W.I., and Ho, J.S. (2010). "Experimental study of freshwater discharge and saltwater intrusion control in coastal aquifers." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 10, No. 5, pp. 159-168.

Violette, S., Boulicot, G., and Gorelick, S.M. (2009). "Tsunami-induced groundwater salinization in southeastern India." *Comptes Rendus Geoscience*, Vol. 341, No. 4, pp. 339-346.

Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T.E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., Burovski, E., Peterson, P., Weckesser, W., and Bright, J. *et al*. (2020). "SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python." *Nature Methods*, Vol. 17, No. 3, pp. 261-272.

Vithanage, M., Engesgaard, P., Villholth, K.G., and Jensen, K.H. (2012). "The effects of the 2004 tsunami on a coastal aquifer in Sri Lanka." *Ground Water*, Vol. 50, No. 5, pp. 704-714.

Werner, A.D., Bakker, M., Post, V.E.A., Vandenbohede, A., Lu, C., Ataie-Ashtiani, B., Simmons, C.T., and Barry, D.A. (2013). "Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges." *Advances in Water Resources*, Vol. 51, pp. 3-26.