인천 연안 조위관측소별 해수면 상승률의 지역별 차이 분석

김예림 [1], 임채욱 [2], 우승범[1,*]
[1] 인하대학교 해양과학과, Inha University [2] 인하대학교 인공지능 융합연구센터 // E-mail: yrkim@mpl.inha.ac.kr, sbwoo@inha.ac.kr*

1 Introduction

기후변화에 따른 해수면 상승은 같은 연안에서도 관측 정점에 따라 다르게 나타날 수 있다. 대규모 매립과 항만개발이 이루어진 인천 연안에서는 상승률의 공간적 차이와 연안개발 특성의 연관성을 검토할 필요가 있다. 본 연구는 4개 조위관측소의 장기 조위자료를 동일한 분석기간으로 비교하여 정점별 상승률 차이를 파악하고, 주변 연안개발 이력과의 연관성을 검토한다.

2 Study area

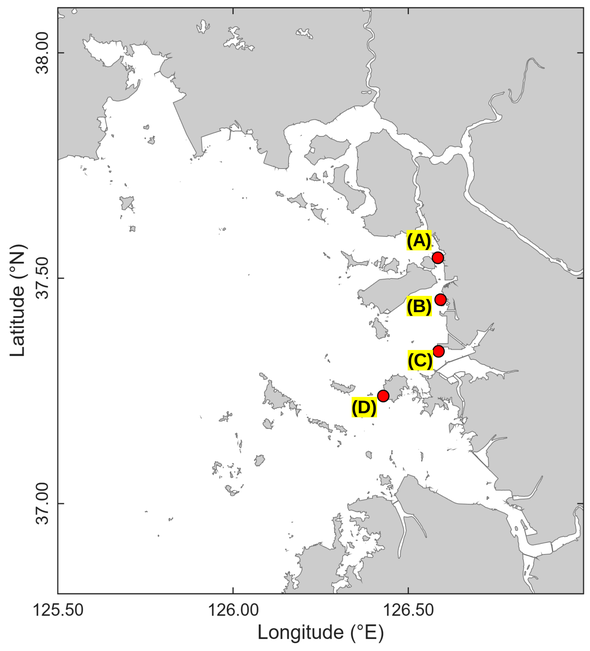


Figure 1. Tide gauge stations in Gyeonggi Bay and adjacent coastal areas: (A) Yeongjong Bridge, (B) Incheon, (C) Incheon Songdo, and (D) Yeongheungdo. Red dots mark the stations. Gray and white indicate land and water, respectively. Tide gauge data: Korea Hydrographic and Oceanographic Agency (KHOA).

Table 1. Study area and data sources.

Item	Description
Latitude range	36.50–38.10°N
Longitude range	125.40–127.00°E
Reclamation data	Incheon Metropolitan City i-MAP, "Coastal Reclamation Status"
Tide-gauge data	KHOA, Bada Nuri Ocean Information Service
Analysis period	September 2010–July 2026

Table 2. Study area

Station ID	Station name	Latitude (°N)	Longitude (°E)
(A)	Yeongjong Bridge	37.5456	126.5844
(B)	Incheon	37.4519	126.5922
(C)	Incheon Songdo	37.3381	126.5861
(D)	Yeongheungdo	37.2394	126.4286

3 Methodology

- 매립사업 구역을 경도(λ_{ij})와 위도(φ_{ij})로 구성한 다각형(P_i)으로 표현하였다. N_i는 경계점 수이다. 또한 각 구역을 원자료의 연대 분류(c_i)에 따라 구역을 1990년 이전, 1990년대, 2000년대 및 2010년대로 구분하고, 시기별 집합 $\mathcal{R}_k$로 나타냈다. 여기서 t는 시간(년), a는 절편, b는 해수면 변화율(m yr^{-1}), $\varepsilon(t)$는 회귀 잔차이다.

$$\eta_adj\,(t)=a+bt+\varepsilon(t), \qquad SLR=1000b$$

- 네 관측소의 공통 유효월을 기준으로 관측소별 평균 높이를 인천 관측소에 맞춘 뒤, 각 월의 유효 관측소 자료를 평균하였다. 이를 통해 2000년 1월–2026년 7월의 합성 해수면 시계열을 구성하였다. $\bar{\eta}_i$는 관측소 i의 공통 유효월 평균, $A(t)$는 해당 월의 유효 관측소 집합이며, $N(t)$는 관측소 수(1–4개)이다.

$$\eta_{comp}(t) = \frac{1}{N(t)} \sum_{i \in A(t)} \left[\eta_{adj,i}(t) - \overline{\eta}_i + \overline{\eta}_{Incheon} \right]$$

4 Results

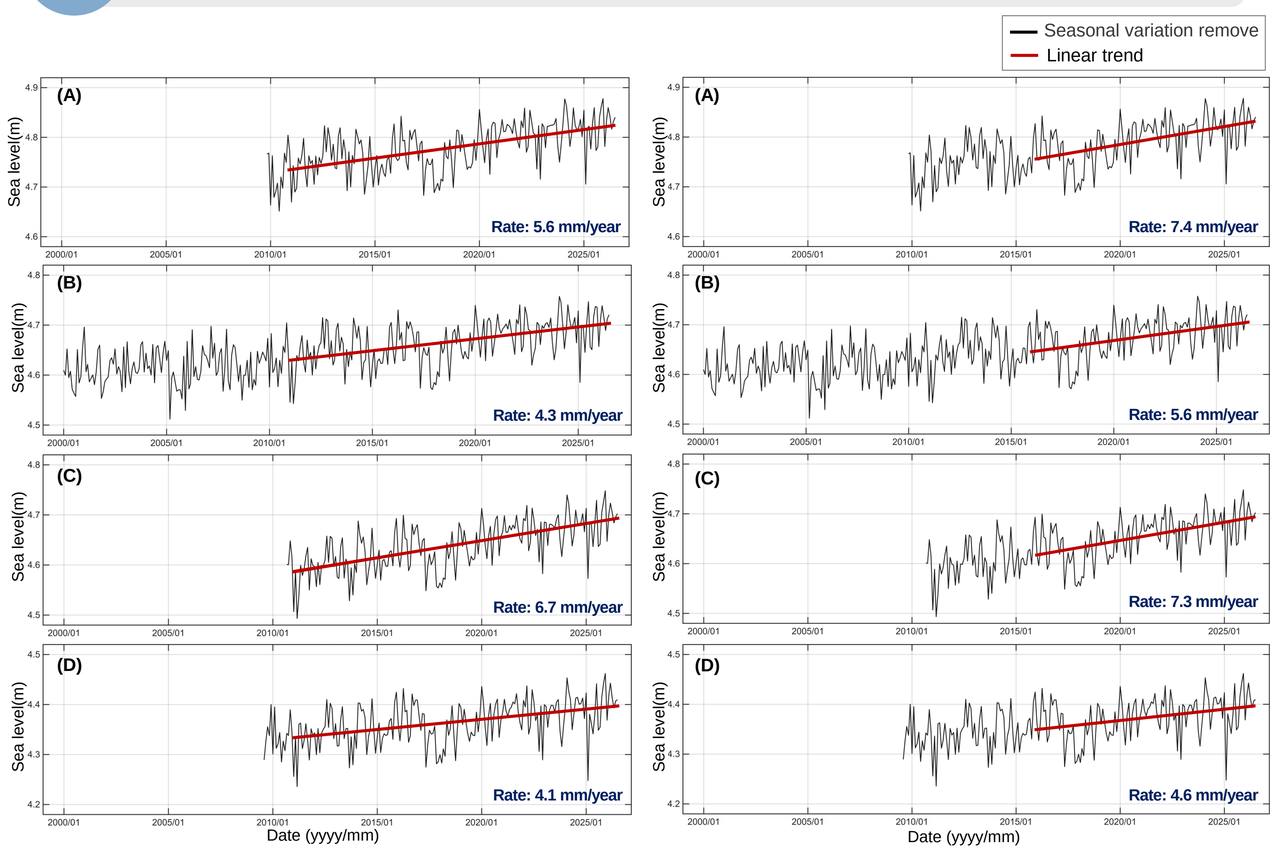


Figure 2. Monthly mean sea level and linear trends for September 2010–July 2026. Black lines show sea level after removing tidal and seasonal components. Red lines show linear trends. Panel rates are in mm yr^{-1}. Station labels (a–d) follow Figure 1.

Figure 3. Monthly mean sea level and linear trends for September 2015–July 2026. Line colors, units, and station labels follow Figure 4.

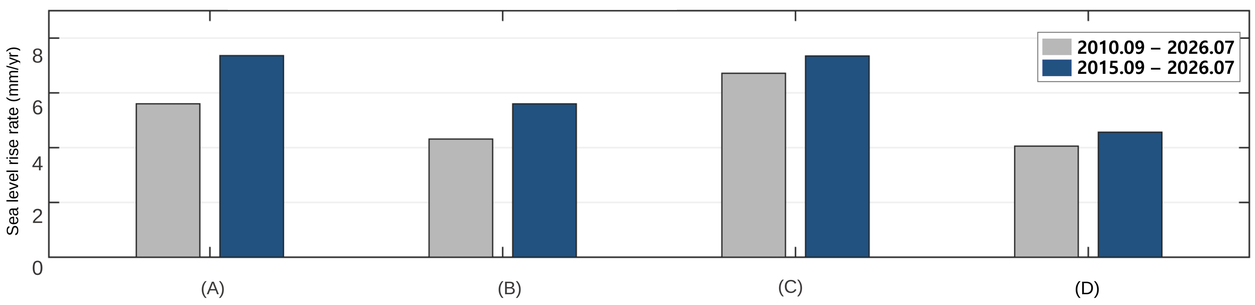


Figure 4. Sea-level rise rates for September 2010–July 2026 (gray) and September 2015–July 2026 (blue). Values above the bars show the estimated rates in mm yr^{-1}.

Table 3. Sea-level rise rates at the four stations (mm yr^{-1}).

Tide gauge station	Sep 2010–Jul 2026	Sep 2015–Jul 2026
(A)	5.6	7.4
(B)	4.3	5.6
(C)	6.7	7.3
(D)	4.1	4.6

- 인천 연안의 네 조위관측소 모두에서 해수면 상승이 나타났다. 2010년 9월–2026년 7월의 상승률은 4.1 - 6.7 mm/yr였으며, 2015년 9월–2026년 7월에는 4.6 - 7.4 mm/yr로 더 높게 추정되었다. 상승률은 관측소와 분석기간에 따라 달랐다.

- 이 연구는 2026년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2026-25538840, 인천·경기·충청씨그랜트)
- 이 연구는 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국환경산업기술원의 탈플라스틱 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행된 연구임

5 Discussion

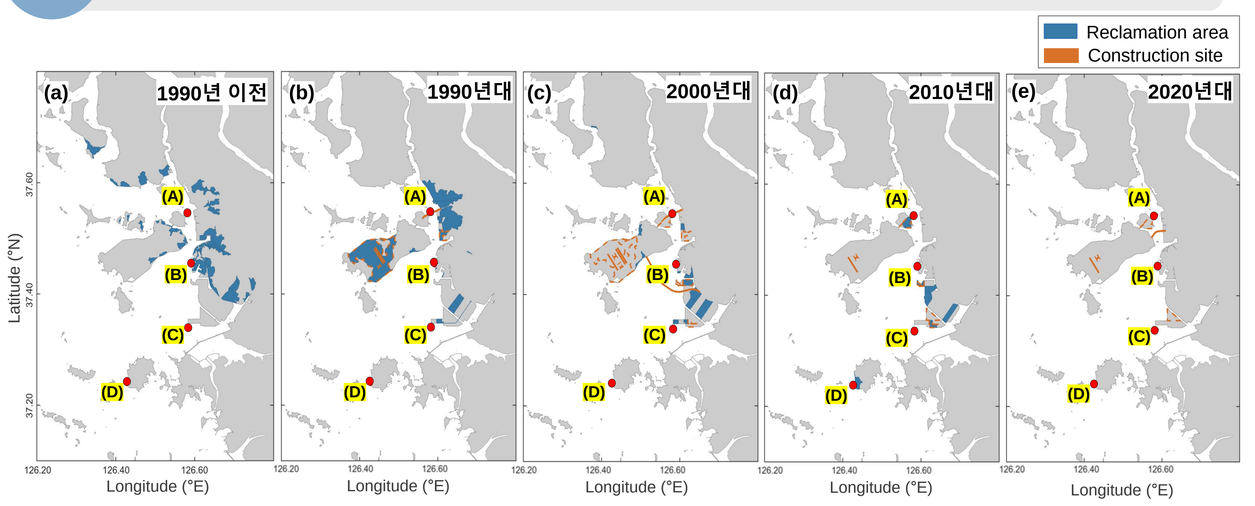


Figure 5. Reclamation areas and coastal construction projects along the Incheon coast by period: (a) before 1990, (b) 1990s, (c) 2000s, (d) 2010s, and (e) 2020s. Blue polygons indicate reclamation areas classified according to the Incheon i-MAP period divisions. Orange dashed outlines denote reference construction boundaries, and solid orange features denote bridges and airport facilities.

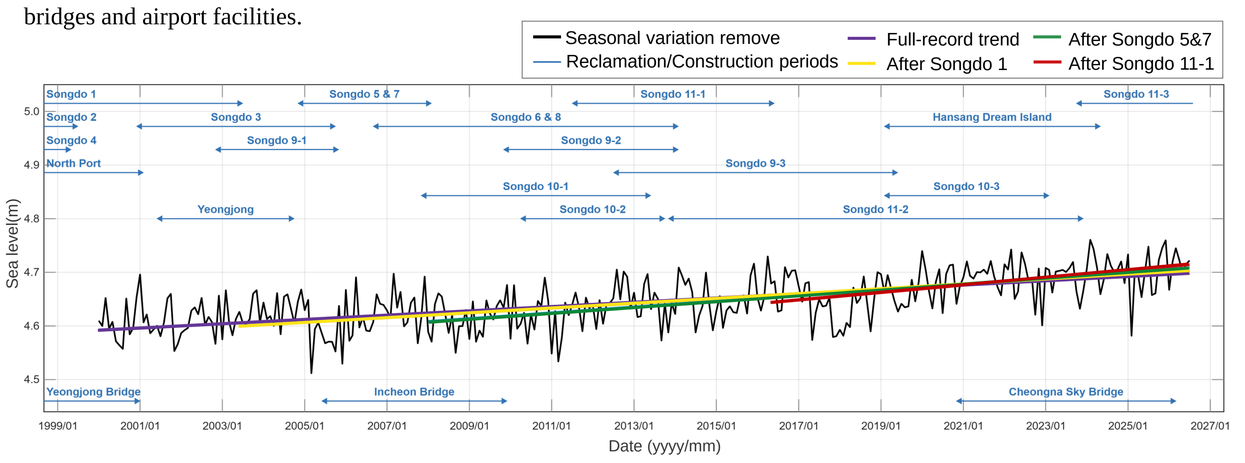


Figure 6. Sea-level trends and coastal development periods along the Incheon coast. The black line shows composite monthly sea level after removing tidal and seasonal variations (January 2000–July 2026). Blue horizontal lines indicate reclamation and bridge construction periods. Colored lines show linear trends for the full record (purple) and after completion of Songdo 1 (yellow, June 2003), Songdo 5 & 7 (green, January 2008), and Songdo 11-1 (red, May 2016).

Table 4. Coastal development periods in Incheon.

project	Period	project	Period	project	Period
Songdo 1	1996.11 - 2003.05	Songdo 11-2	2013.12 - 2023.10	Songdo 10-3	2019.03 - 2022.12
Songdo 2	1996.11 - 1999.05	Songdo 11-3	2023.11 -	North Port	1997.12 - 2000.12
Songdo 3	2001.01 - 2005.08	Songdo 9-1	2002.12 - 2005.09	Yeongjong	2001.07 - 2004.08
Songdo 4	1994.07 - 1999.03	Songdo 9-2	2009.12 - 2013.12	Hansang Dream Island	2019.03 - 2024.03
Songdo 5 & 7	2004.12 - 2007.12	Songdo 9-3	2012.08 - 2019.04	Yeongjong Bridge	1993.12 - 2000.11
Songdo 6 & 8	2006.10 - 2013.12	Songdo 10-1	2007.12 - 2013.04	Incheon Bridge	2005.07 - 2009.10
Songdo 11-1	2011.08 - 2016.04	Songdo 10-2	2010.05 - 2013.08	Cheongna Sky Bridge	2020.12 - 2026.01

- 송도 1공구, 5·7공구, 11-1공구 준공 이후부터 2026년 7월까지의 분석기간을 비교한 결과, 해수면의 평균 상승 속도가 각각 4.42, 5.40, 6.96 mm/year로 순차적으로 높아졌다.
- 개발 전후 평균해수면 변화를 보고한 선행연구(Jung, 2014)를 고려하면, 매립에 따른 해안선·수로 변화가 관측된 수위 변화에 기여했을 가능성이 있다.
- 다만 공사 기간 중에도 해수면 변동이 나타났으므로 인천과 같이 연안 개발이 활발한 지역에서는 해수면 변화를 해석할 때 기후변화뿐 아니라 매립·공사에 따른 인위적 영향도 함께 고려해야 한다.

6 Conclusions

- 4개 조위관측소 모두 해수면 상승 추세를 보였으며, 동일한 분석기간에도 관측소별 상승률에 차이가 나타났다.
- 인천 연안의 매립·연안공사에 따른 해안선 및 수로 변화가 관측된 해수면 상승에 기여했을 가능성이 있다.
- 인천 연안의 해수면 상승을 분석할 때는 관측소별·기간별 상승률 차이와 매립·연안공사 이력을 함께 고려해야 한다.