

# 낙동강 하구 및 유역의 수질 환경 변화 궤적 고찰(1964-2025): 대규모 구조적 개입과 기후 위기에 따른 수문·생태적 복원력 분석

이문옥<sup>1</sup> · 김종규<sup>2,†</sup> · 김병국<sup>3</sup><sup>1</sup>전남대학교 조선해양공학과 명예교수<sup>2</sup>전남대학교 조선해양공학과 교수<sup>3</sup>한국가스공사 통영기지본부 안전환경부 과장

## A Comprehensive Review of Environmental Trajectories in the Nakdong River Basin and Estuary (1964-2025): Analyzing Hydro-Ecological Resilience Amidst Structural Interventions and Climate Change

Moon Ock Lee<sup>1</sup>, Jong Kyu Kim<sup>2,†</sup>, and Byeongkuk Kim<sup>3</sup><sup>1</sup>*Emeritus Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chonnam National University, Yeosu 56926, Korea*<sup>2</sup>*Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chonnam National University, Yeosu 56926, Korea*<sup>3</sup>*Manager, Tongyeong Terminal Division, Korea Gas Corporation, Tongyeong 53007, Korea*

### 요 약

본 연구는 1964년부터 2025년까지 반세기 이상 축적된 624편의 학술 문헌을 바탕으로 낙동강 하구 및 유역의 환경 변화 궤적을 메타 분석(meta-analysis) 관점에서 심층 고찰하였다. 연구 결과, 낙동강의 물리·수문 환경은 하굿둑 및 8개 다기능 보 건설이라는 대규모 구조적 개입을 기점으로 유속 저하, 퇴적 패턴 왜곡, 수질 악화라는 비가역적 변동을 겪었음이 확인되었다. 특히 2010년대 이후의 연구들은 정체 수역의 형성이 기후 위기와 결합하여 하구 생태계의 취약성을 가중시키고 있음을 입증하였다. 현재 진행 중인 제한적 수문 개방은 생태 복원의 긍정적 신호를 보이고 있으나, 완전한 기능 회복을 위해서는 고유 담수어종의 회복 수준을 고려한 구체적 복원 목표 설정과 더불어 보 구간의 세굴 방지를 위한 근 고공(根固工) 및 녹조 저감을 위한 폭기(aeration) 시스템 등의 공학적 대안이 병행되어야 한다. 결론적으로 본 연구는 과거의 구조적 개입이 초래한 환경 비용을 최소화하고, 과학적 데이터에 기반한 통합 수자원 관리 체계(IWRM)로의 전환 필요성을 역설하였다.

**Abstract** – This study presents a comprehensive meta-analysis of 624 academic publications spanning five decades (1964–2025) to trace the environmental trajectory of the Nakdong River basin and its estuary. The findings reveal that the physico-hydrological environment underwent irreversible shifts following major structural interventions, namely the construction of the estuary barrage and eight multi-purpose weirs. These structures significantly altered flow velocities and sedimentation patterns, exacerbating water quality degradation. Recent research (post-2010s) highlights that the formation of stagnant water bodies, coupled with climate change, has increased the vulnerability of the estuarine ecosystem. While current partial gate openings show positive signs of ecological recovery, such as the migration of catadromous species, achieving full restoration requires setting quantifiable targets for indigenous freshwater fish recovery. Furthermore, engineering countermeasures-including footing protection (根固工) to prevent scouring and aeration systems to mitigate algal blooms-must be integrated. This study concludes that a paradigm shift toward Integrated Water Resources Management (IWRM) is essential to restore hydrological resilience and ensure sustainable ecosystem services in the Nakdong River.

**Keywords:** Nakdong River Estuary(낙동강 하구), Estuary Barrage(하굿둑), Multi-functional Weirs(다기능보), Hydrological Environment(수문 환경), Research Trends(연구 동향), Climate Change(기후변화)

---

†Corresponding author: kimjk@jnu.ac.kr

## 1. 서론

낙동강은 총 유로 연장 약 521.5 km, 유역 면적 23,656 km<sup>2</sup>에 달하는 국내 제2의 하천으로, 강원도 태백시 함백산에서 발원하여 영남권 전역을 관통한 뒤 남해로 유입된다(Park *et al.*[2001]; MOCT[2006]). 낙동강 수계는 Andong 부근에서 여러 지류가 합류하여 곡류하다가 Sangju, Daegu, Saanrangjin을 거치며 Wuicheon, Geumhogang, Namgang, Milyanggang 등 주요 지류와 통합되어 거대한 하천망을 형성한다(Fig. 1). 최종적으로 이 유량은 낙동강 하굿둑을 거쳐 외해로 유출되며, 이 과정에서 형성된 하구역은 담수와 해수가 교차하는 역동적인 이행 지대를 형성해 왔다(Nakdong River Basin Environmental Office[2025]). 낙동강 하구의 지형적 변천은 인위적 간섭에 의해 가속화되었으며, 1900년대 초 Seo-Nakdonggang에 위치했던 주수로는 1935년 Noksan gate 및 Daejeo gate의 건설로 인해 현재의 을숙도 방향으로 이동하였다(Fig. 2).

이후 1960년대 산업단지 조성과 1980년대 하굿둑 건설(1983-1987년)을 기점으로 낙동강의 물리적 환경은 근본적인 변화를 맞이하였다. 특히 총연장 2,330 m에 달하는 하굿둑의 건설은 상류로

의 염수 침입을 완전히 차단하여 용수의 안정적 공급을 가능케 하였으나, 동시에 하구의 자연적인 수리 체계를 폐쇄형 구조로 전환하는 결과를 초래하였다(McLaren[1981]; Kim and Kim[2014]).

하굿둑 완공 이후에도 1990년대 간척사업, 1995년 부산항 신항만 개발, 2000년대 을숙도대교 건설 등 대규모 토목 사업이 지속되었다(MOE[2015]). 이러한 과정에서 발생한 대규모 매립과 준설은 수로 구조를 재편하였고, 1980년대 후부터 2000년대에 걸쳐 도요동(Doyodeung), 맹금머리동(Maenggeummeorideong)과 같은 새로운 사주(Sandbar)를 형성하는 등 하구 퇴적 환경의 변화를 야기하였다(Kim[1992]; Jang and Kim[2006]; Jeon[2010]). 한편, 하굿둑 건설에 따른 순기능 이면에는 수질 악화, 기수역 생태계 고갈, 철새 도래지 훼손 및 유해 조류의 대량 발생과 같은 심각한 환경적 부작용이 수반되었다(An[2015]; Song *et al.*[2014]). 더욱이 2013년 홍수 조절력 강화를 위한 추가 수문 설치와 2009-2012년 사이 낙동강 본류에 건설된 8개의 다기능 보(weirs)는 하천의 수문학적 특성을 다시 한번 급격히 변화시켰다(Fig. 3). Kim *et al.*[2015]의 결과에 따르면, 총 저류량 약 5억 6,940만 m<sup>3</sup>에 달하는 보 건설과 수반된 대규모 준설은 하천의 수심을 확장하고 유속을 정체시켜,

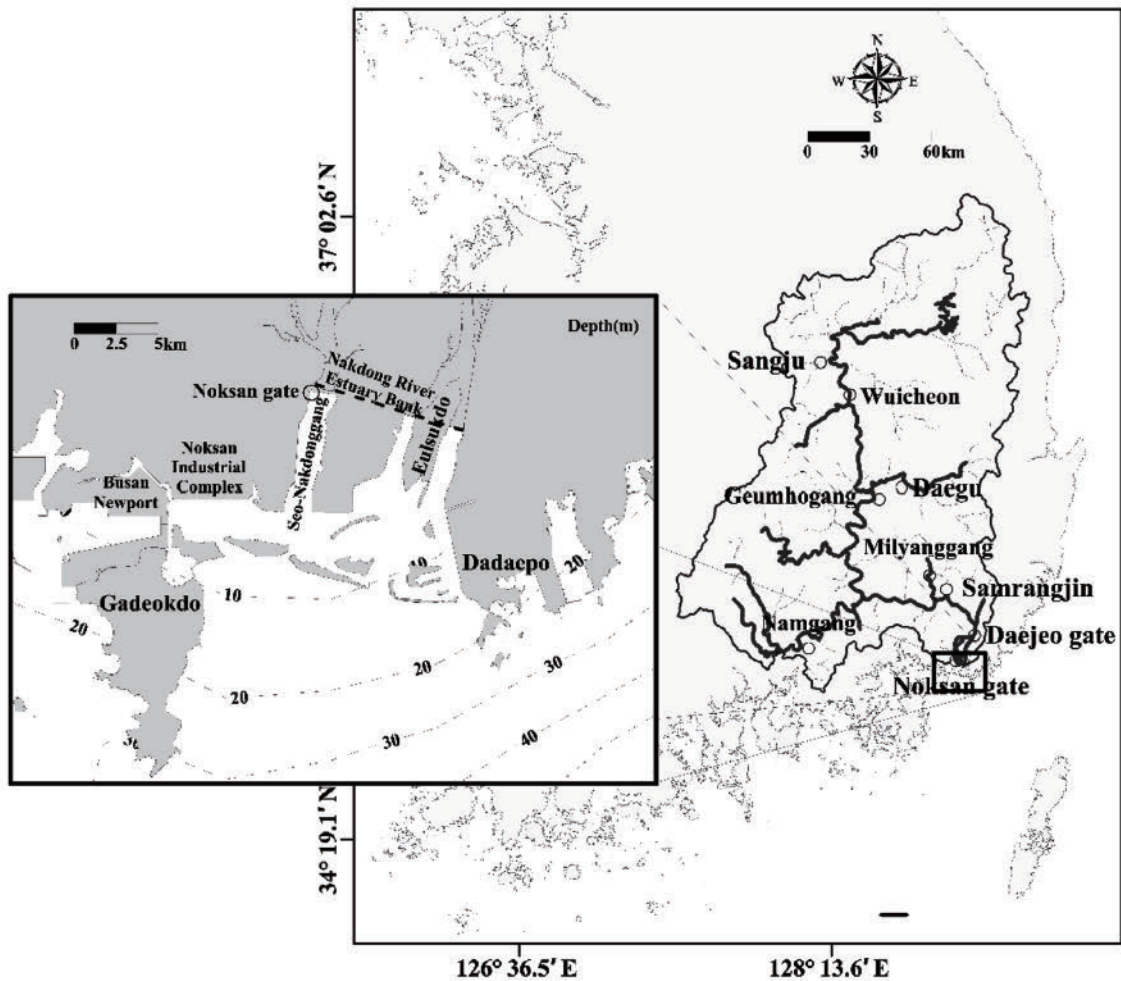


Fig. 1. Nakdong River basin and estuary.



Fig. 2. Topography before (1985, Jeon[2010]) and after (2024, KHOA[2024]) the construction of Nakdong River estuary barrage.

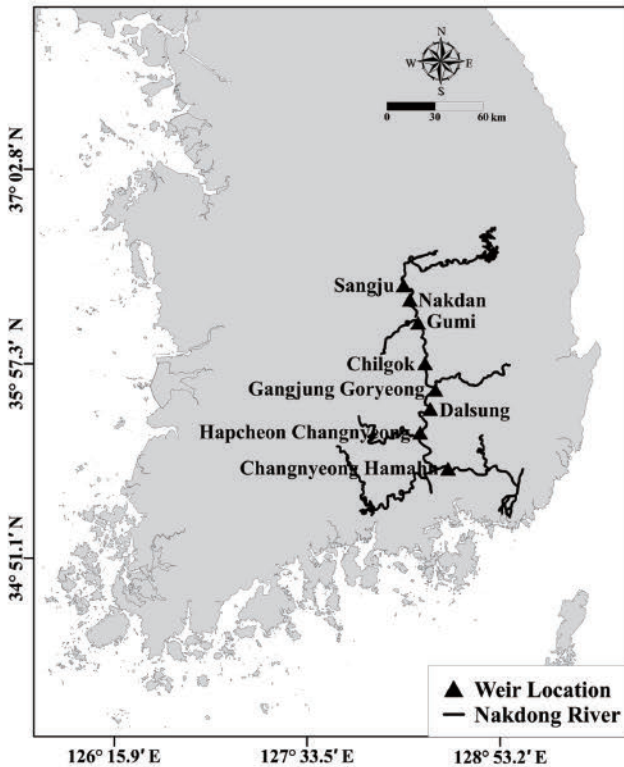


Fig. 3. Multi-functional weirs constructed in the Nakdong River basin during the Four Major River Restoration Project.

모래톱 소실과 녹조 현상(green algae blooming) 심화 등 하천 건강성에 중대한 영향을 미치고 있는 것으로 나타났다. 이처럼 낙동강 유역은 지난 한 세기 동안 산업화와 국토 개발이라는 명목하에 지속적인 지형적·수문적 변형을 겪어왔으며, 최근에는 전 지구적 기후변화에 따른 수문 변동성까지 더해져 과거와는 판이한 물리·화학 및 생물학적 환경으로 이행하고 있다. 따라서 낙동강 하구 및 유역의 환경 실태를 과학적으로 진단하는 것은 효율적인 치수(治水)와 이수(利水)를 넘어 하구 복원 및 지속 가능한 환경 관리 정책을 수립하는 데 필수적이다. 이에 본 연구는 지난 50여 년간의 연구 성과를 체계적으로 분석하여 물리 환경의 장기적 변화 특성

을 규명하고, 이를 바탕으로 낙동강 하구의 생태적 복원을 위한 실효성 있는 방안을 제시하고자 한다.

## 2. 자료 및 방법

본 연구는 1964년부터 2025년까지 낙동강 하구(Nakdong River Estuary) 및 유역(Nakdong River Basin)을 대상으로 수행된 국내외 학술 연구를 종합적으로 검토하였다. 연구 자료는 한국학술지인 용색인(KCI) 및 과학기술논문 인용색인(SCI/SCIE)급 학술지에 게재된 논문을 대상으로 하였으며, 학술정보포털인 KISS(Korean Studies Information Service System)와 ScienceDirect를 활용하여 문헌 조사를 실시하였다.

검색어로는 국문의 경우 ‘낙동강 하구’, 영문은 “Nakdong River estuary”를 핵심 용어(keywords)로 설정하였다. 1차 검색을 통해 총 624편의 관련 문헌을 추출하였으며, 이 중 자료의 연속성과 학술적 기여도를 고려하여 분석 대상을 선정하였다. 특히, 본 연구의 목적인 물리 환경 변화 규명을 위해 하굿둑 및 다기능 보(weir) 설치에 따른 해수 유동과 수문 환경의 변화를 중점적으로 다룬 주요 논문 30여 편을 선별하여 심층 분석을 수행하였다.

또한, 하구역과 유역의 유동 및 수질에 관한 정량적 분석을 위해 공공기관에서 제공하는 공신력 있는 기초 자료를 활용하였다. 구체적으로는 낙동강유역환경청(Nakdong River Basin Environmental Office)의 수문 자료, 해양환경정보포털(MEIS)의 장기 해양 환경 모니터링 자료, 그리고 국립해양조사원(KHOA)의 조석 및 해수 유동 관측 자료를 수집·분석하였다. 이러한 다각적인 자료 분석을 통해 하굿둑 건설 및 4대강 사업 전후의 물리적 환경 변천사를 정밀하게 검토하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 낙동강 하구 및 유역 환경 관련 연구 동향

Table 1은 1964년부터 2025년까지 낙동강 하구(역) 및 유역 환경을 주제로 수행된 논문 624편을 분야별로 분류한 결과이다. 본



Table 1. (continued)

Year	Physical Environment	Water Quality Environment	Sedimentary Environment/ Geomorphology	Biological Environment					Hydrology/ Climate Change	Micro-plastic	Migrant Birds	Estuary resources	Total
				Phyto-Zoo plankton	Fish/ Benthos/ Algae	Vegetation	Marine Bacteria/ Microbes	Mammal					
1992													
1993					1							1	
1994		1	1									2	
1995		1										1	
1996		1										1	
1997		1					1					2	
1998	1				1				1			3	
1999	2	1	1		1							5	
2000		2										2	
2001		2										2	
2002	1	4		2			1					8	
2003	1	4	2	1			1				5	14	
2004		1		4	1				2		1	9	
2005		2	5	1					1		2	8	
2006	1	3			1	2			1			11	
2007	2	6	4	1		2			3	2	2	22	
2008		5	3	3	1	2						14	
2009		4	2	1	3		1		5		1	17	
2010	1	6	3	3	1				4	2	5	25	
2011	4	7	5	1	1	1			7		2	28	
2012		7	2	1	1				4		3	20	
2013	1	8	4	4	3	1	4		6	2	2	37	
2014		6	4	5	1	1			5	2	1	31	
2015	3	8	7	2	3				4	2	3	31	
2016	1	5	9	4	4		3		3		2	27	
2017	2	7	4	5		1			7			26	
2018	1	8	1	4	4			1	2		1	22	
2019	1	11	8	3	4				1	1		29	
2020	2	10	5	5	1	1	1	1	4	1	1	32	
2021	1	10	9	8	2		2	1	4	1		43	
2022	1	4	3	2	1		1		4	2	1	21	
2023		9	3	11	1	3			3	5	2	38	
2024	1	7	8	6	3		2		4	6	1	38	
2025	2	9	3	5	1			1	4	2		33	
Total	32	163	96	83	42	16	18	4	80	26	20	44	624
Ratio (%)	5.1	26.0	15.3	13.7	6.7	2.6	2.9	0.6	12.8	4.1	3.2	7.0	100

㉔ 특정 시기 집중 연구: 8개 다기능보가 설치된 2009년에서 2012년 사이에는 수질, 퇴적, 수문 환경 변화에 관한 연구가 집중적으로 수행되었다.

3) 학술적 시사점 및 논리적 요약

Table 1에 나타난 자료를 종합해 볼 때, 낙동강 하구 연구의 흐름은 다음의 Table 2와 같은 논리적 귀결을 가지고 있다.

결론적으로, 이들 자료는 낙동강 하구가 단순히 지리적 경계를 넘어 “수질-생태-지형”이 복합적으로 얽힌 학술적 현장임을 보여주며, 향후 기후변화와 오염 물질에 대응하는 방향으로 연구의 축이 이동하고 있음을 시사하고 있다.

3.2 하굿둑 건설 이전 낙동강 하구역의 물리 환경

3.2.1 수온 및 염분 특성(1962년 11월-1963년 10월)

Won[1964]이 낙동강 하구 2개 정점에서 김양식장 적지 조사를 위해 매월 대조기에 분석한 결과에 따르면, 하굿둑 건설 이전 낙동강 하구역의 수온 및 염분은 뚜렷한 계절적 특성을 보였다. 즉, 수온은, 2월이 4.9-9.2°C(평균: 6.9°C), 5월이 13.6-17.5°C(평균: 15.6 °C), 8월이 24.9-30.8°C(평균: 28.3°C), 11월이 9.2-12.8°C(평균: 11.0°C)로, 하계(여름)에 가장 높게 나타났다. 반면, 염분은 2월이 17.60-21.90 psu(평균: 20.72 psu), 5월이 2.38-19.51 psu(평균: 11.69 psu), 8월이 0.91-13.82 psu(평균: 5.37 psu), 11월이 12.42-20.37 psu(평균:

**Table 2.** Summary of research perspectives on the Nakdong River basin

Analysis perspective	Key characteristics
Reflection of Social issues	·Academically proves that water quality conservation and biodiversity maintenance are the most critical social demands in the Nakdong River basin.
Specialization of research	·Research themes have deepened from early studies focused on general biota to sophisticated environmental analyses, including climate change impact and microplastics.
Focus on resource value	·Academic approaches have expanded beyond simple conservation to include ecosystem service values and resource utilization, as evidenced by research on estuary resources (7.1%).

**Table 3.** Traveling time and velocity of tidal wave in the Nakdong River estuary (Ryu and Chang[1979])

Section	Distance (km)	Crest		Trough	
		Traveling time (hour)	Velocity (m·s <sup>-1</sup> )	Traveling time (hour)	Velocity (m·s <sup>-1</sup> )
Myeongji-Gupo	13.6	1	3.78	1.35	2.8
Gupo-Myeongji	12.9	1	3.58	1.5	2.3
Mulgeum-Samrangjin	18.8	1	5.22	3.0	1.74

18.11 psu)로 관측되었다. 특히, 하계에는 수온이 증가한 반면, 염분이 현저하게 감소하여 담수(하천수)의 영향이 강하게 반영됨을 확인하였다.

3.2.2 조석파 및 유속 변동 특성(1978년 4월-9월)

Ryu and Chang[1979]은 1978년 낙동강 하구역 18개 정점에서의 유량·유속 자료와 3개 정점의 수위 기록을 활용하여 조석파의 전파 특성과 유속 변동 상태를 분석하였다. 조석파 진폭 감소율은 소조기에는  $0.38 \eta_0 \cdot \text{km}^{-1}$ , 대조기에는  $0.058 \eta_0 \cdot \text{km}^{-1}$ 로 나타났다(여기서,  $\eta_0$ 는 하구에서의 조석파 진폭). 또한, 위상 변동율은  $k=0.035 \text{ rad} \cdot \text{km}^{-1}$  (이때  $Q$ (진동에서의 유량) <  $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )로 산출되었다. 한편, 조석파의 파속(위상 속도)은 하구에서 상류인 삼랑진으로 진행할 때 감소하였고, 파형은 마루(crest)의 진행 속도가 골(trough)의 진행 속도보다 빨라지는 현상을 보였다(Table 3 참조).

이는 하천에 침입한 조랑(潮浪, tidal wave)이 수심 감소, 마찰 증가, 하천류의 영향으로 변형되어 나타나는 현상이다. 그 결과, 하구에서는 대칭형이었던 조석파가 상류로 갈수록 비대칭형이 된다. 즉, 저조(low water)에서 고조(high water)로의 수면 상승은 급격하고, 고조에서 저조로의 수면 하강은 완만해져 창조류(밀물)의 시간이 짧아지고 낙조류(썰물)의 시간이 길어지는 특성을 보였다(Lee[2017]). 또한, 이들은 조석파의 진폭 감소와 하상 기울기를 기준으로 조석파의 영향 범위를 하구로부터 약 65 km까지로 추론하였다.

3.2.3 염분 분포 및 염수쐐기 형성(1978년 4월-1981년 5월)

Chang et al.[1981]은 낙동강 하구역 16개 정점에서 총 8회에 걸쳐 13시간 연속하여 수온, 염분, 유량, 유속을 관측한 결과를 다음과 같이 제시하였다.

1) 조석 주기에 따른 혼합: 대조기에는 조류 혼합 작용이 활발하여 표층과 저층 간의 염분차가 1-3 psu 미만으로 비교적 균질한 수직 구조를 나타내었다. 반면, 소조기에는 혼합 작용이 약해져 염분차가 7-15 psu로 증가하며 염수쐐기(salt wedge)가 형성되었다.

2) 염수쐐기 길이 및 염분 영향 범위: 염수쐐기의 길이는 소조기에 약 22 km, 대조기에 약 16 km로 추정되었다. 이에 따른 염분의 영향 범위는 소조기에 약 35 km, 대조기에 약 45 km로 밝혀졌다.

3) 하천 유량과의 상관관계: 낙동강 중류 지역(진동)의 유량과 하류 지역(구포)의 염분 사이에 높은 상관관계가 확인되어, 하천 유입량이 하구역의 염분 분포에 중요한 영향을 미침을 시사하였다.

3.3 하굿둑 및 다기능 보 건설 이후 낙동강 하구역 물리 환경

3.3.1 하굿둑 건설 직후의 지형 및 흐름(1986년-1987년)

Yoon[1988]은 하굿둑 건설이 김 양식 및 정치망 어업에 미치는 영향을 파악하기 위해 1986년부터 1987년까지 6회에 걸쳐 낙동강 하구에서 음향측심, 측류판, 해류병, 휴대용 염분계를 사용하여 해저 지형과 흐름 변동을 조사하였다. 그 결과, 하굿둑 건설 이후 매립 및 준설 공사로 인해 하구 내에 다수의 모래톱과 새로운 해양 수로가 형성되는 등 지형 변화가 발생하였고, 하천의 주 흐름은 동서 지류로 분리된 것으로 나타났다. 또한, 1986년에는 서쪽 지류의 조류 유속이 더 빨랐으나, 1987년에는 동쪽 지류가 더 빨라지는 등 흐름의 역전 현상이 관찰되었고, 이는 지형 변화에 따른 수로 구조 재편의 결과로 추정되었다.

3.3.2 유출류의 거동

한편, Lee et al.[1998]은 1970년대 미국 기상청이 1차원 점변류 해석을 위해 개발한 홍수 추적 모형 DWOPER를 이용하여 낙동강 하류 감조 구간에서 유량별 최적 조도계수(roughness coefficient)를 산정하고 수위-유량 곡선을 성공적으로 재현하였다. 이들은 진동(Jindong) 지점에서부터 하굿둑까지 낙동강 본류를 3개 구간으로 나누어 구간별, 유량 규모별 조도계수(roughness coefficient)를 산정하였다. 그 결과, 최적 조도계수의 범위는 진동-삼랑진(Samrangjin) 구간은 0.0181-0.0311, 삼랑진-구포(Gupo) 구간은 0.0157-0.0357, 구포-하굿둑 구간은 0.0095-0.0573의 범위를 각각 나타내었다. 또한, 수치 실험 결과, Samrangjin 및 Gupo 지점의 수위는 조위(潮位)에

의해 상당한 영향을 받고 있음이 밝혀졌다. 한편, Kim *et al.*[1999]은 수치모형(EFDC)실험과 현장관측을 통해 하굿둑 개폐에 따른 평수시, 갈수시, 홍수시의 유속과 염분침투와 확산 범위에 대하여 조사하였다. 그들의 결과에 따르면, 홍수시 수문을 개방하면 하굿둑 직하류에서는 초당  $1.5\text{--}2.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  이상의 강한 분류(jet)가 형성되어, 방류수는 하구의 사주(Daemadung, Shinjado 등) 사이의 수로를 통과하지만 유속은 여전히  $1.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  이상으로 외해로 뺏어 나갔다. 이들은 이와 같이 강한 유속은 바닥의 저질(모래 및 펄)을 재부유시켜 지형 변화를 일으키는 직접적인 원인이 된다고 주장하였다. 한편, 염분은 하굿둑이 닫혀 있을 때는 조석의 영향으로 바닷물이 둑 바로 앞까지 밀려 올라와, 하류측의 염분은 외해와 유사하게 30-32 psu 수준을 유지하며 안정적인 염수층을 형성하였다. 반면, 수문을 열면 거대한 담수 덩어리가 밀려 내려오면서 염수를 외해 쪽으로 밀어내어, 대량 방류 시(예: 초당 5,000톤 이상)에는 저염분수(약 15psu 이하)의 영향권이 하구 사주들을 지나 남쪽으로 약 5-10 km 이상 외해까지 확장하였다. 결과적으로, 방류량에 따라 해수 정체 및 침강이 발생하고, 저질 토사 운반 및 지형 세굴이 발생하는 것으로 판단된다. 반면, Hwang *et al.*[2002]은 Landsat TM의 위성영상(SeaWiFS, Landsat)과 2차원 유한차분법에 의한 유동 및 Lagrange 입자추적 모형을 이용하여 낙동강 유출 부유물질(SS)의 확산 범위를 추정하였다. 그 결과, 낙동강 하구에서 유출한 부유토사는 Gadeokdo 동쪽에서 부산 방향으로 이동·확산하였다. 또한 유출한 부유토사는 해수색 위성 영상에 따르면, 동한난류에 의해 동해 중부 연·근해역까지 이동될 수 있음을 보여주었다.

### 3.3.3 유동 구조

한편, Jang and Kim[2006]은 10여년에 걸친 유속과 해수 물성의 현장조사자료 및 위성원격탐사자료를 이용하여 낙동강 하굿둑 건설 전후의 지형 변화와 해수 물성의 분포 특성을 조사하였다. 하구

지형변화는 국립지리원의 항공사진과 Landsat 이미지(1982-1998)를, 그리고 조류와 염분은 직독식유속계와 CTD를 각각 사용하여 조사가 이루어졌다. 이들의 결과에 의하면, 하굿둑 건설 전과 후의 정점 Saedeung에서 관측된 하구지역의 순환은 유입원에서의 거리와 조류의 영향보다 담수의 유입량에 의해 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한, 중조기(mean tide)인 1981년 9월 Saedeung에서 관측된 최강유속은  $83\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 이었고, 표층과 저층간의 유속차는  $50\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 로, 유출류의 영향이 표층에 미치고 있음을 알 수 있다. 반면, 중조기인 1993년 7월(장마시)에 관측된 최강유속은  $126\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 로, 표층과 저층간의 유속차는  $104\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 로, 매우 컸다. 특히, 건설 전과 동일한 중조기임에도 불구하고 유출수의 영향으로 표층과 저층의 이층구조(stratified structure)가 확인되었다. 한편, 건설 전 CTD관측결과에서는 Eusukdo남단까지 담수의 영향이 지배적이고 Daemadung 아래부터 혼합이 활발하게 진행되다가 Jangjadeung과 Namussideung 사이에서 완전 혼합되는 양상을 나타내었다. 반면, 중조기인 1992년 10월 CTD관측결과에서는 조시에 따라 수문이 개폐되는 평상시의 경우, 낙조시 대부분의 담수는 주수로를 따라 흐르고 일부는 Janglim에서 Dadaedong의 기존 수로를 따라 유출하는 패턴을 보여주었다. 결론적으로, 이들은 담수방류량과 장기 관측 및 위성 원격탐사 자료 분석을 통해 하굿둑 건설 이후 유속이 감소하였으며, 기존에 조류에 의해 지배되던 혼합 체계가 담수 방류에 의해 주도되는 체계로 전환되었다고 주장하였다.

또한, Jeon[2010]이 낙동강 하구 Gadeokdo에서 관측된 1977-2008년간의 조석의 평균해면변화를 분석한 결과에 의하면, 하굿둑 건설 전인 1977년에  $92.8\text{ cm}$ 가 2008년에는  $103.2\text{ cm}$ 로 나타나, 지속적인 해면 상승을 보여주었다. 물론 이것은 지구 온난화에 의한 영향이 훨씬 큰 것으로 생각되지만, 부분적으로 해역 개발에 의한 영향도 작용하였을 것으로 판단된다. 한편, 수치 모형 EFDC를 사용하여 하굿둑 건설 전후의 지형변화를 분석한 결과에서는 1969

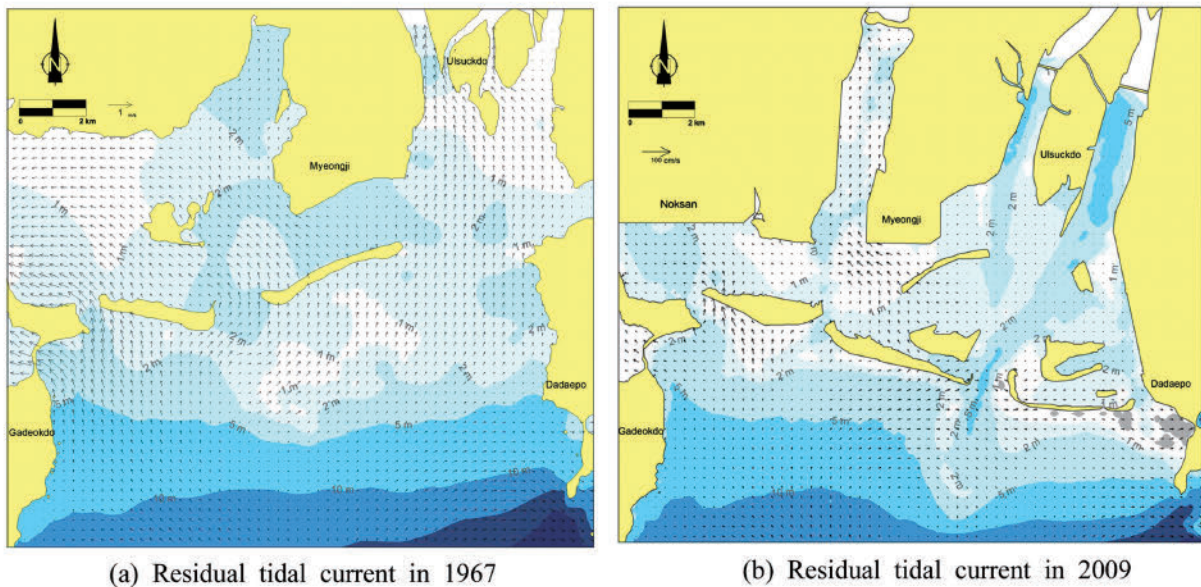


Fig. 4. Variations of tidal residual currents before and after the construction of Nakdong River estuary barrage (Jeon[2010]).

년에는 하구 전면에 사주(sandbar)가 발달하기 전의 경우, 외류가 발생하는 곳이 수심의 영향을 많이 받았으나, 1985년과 2009년에는 주수로 방향의 영향이 더 큰 것으로 나타났다(Fig. 4). 또한, 하구에서의 전체 지형 변화를 100%로 하였을 경우, 1985년에는 잔존율이 73.1%였으나, 2009년에는 73.1%로 나타나, 낙동강 하구 사주의 발달로 인해 잔존율이 높아진 것으로 판단되었다.

### 3.3.4 염수 침입 거리 및 염분 분포

Cho *et al.*[2018]은 다기능 보 건설 후 수치 모형 EFDC를 사용하여 낙동강 하구둑 수문 개방시 상류 유입 유량에 따른 염수침입 거리를 산정한 결과, 담수 보호를 위해서는 함안댐에서 최소 200  $m^3 \cdot s^{-1}$ 의 방류가 필요하며, 이때 염수는 하구둑에서 26 km 상류까지 영향을 미친다고 주장하였다. 이것은 하구둑 건설 전 Chang *et al.*[1981]이 제시한 염분 영향 범위 45 km보다 크게 축소된 결과이다. 또한, Han *et al.*[2011]은 수치 모형 ECOMSED를 이용해 염수 침입을 분석한 결과, 유입 유량이 75  $m^3 \cdot s^{-1}$ 일 때의 염분 농도 예측값이 실측치(염분 1 psu 이상인 염수 침입거리 25 km)에 더 가까운 것으로 나타났다. 한편, Song *et al.*[2014]은 낙동강 하구둑 수문 개방시 예상되는 하구역의 해수 순환을 파악할 목적으로 홍수기(<956  $m^3 \cdot s^{-1}$ ) 방류 시기에 낙동강 하구역에서 ADCP와 CTD를 사용하여 유속과 염분을 관측하였다. 그 결과, 잔차류 유속과 염분 분포가 지형적 요인에 의해 수로별로 다르게 나타났으며, 일부 수로에서는 고염분(>25 psu)이 정체되는 구간이 존재하여 염분 상승 가능성을 시사하였다. 또한, Kim and Youn[2019]는 2017년 4월부터 2018년 3월까지 1년간 낙동강 하구(가덕도 북동해안의 1개 정점)에서 계류형 수온센서와 수질측정기를 사용하여 방류(담수 방류량이 500  $m^3 \cdot s^{-1} \cdot d^{-1}$  이상인 풍수기와 200  $m^3 \cdot s^{-1} \cdot d^{-1}$  이하인 평수기)시 수온과

염분을 연속적으로 측정하였다. 그 결과, 평수기 수온은 10°C, 염분은 32-33 psu 범위에서 소조기 동안에는 비교적 안정적인 변화를 나타낸 반면, 대조기에는 방류 주기에 따라 규칙적인 변동을 보였다. 한편, 풍수기 수온은 28°C, 염분은 8-17 psu 범위에서 변화하였으며, 이 기간 중 3개월이상 저염 환경이 지속되었다. 이러한 결과는 저염 환경의 지속시간과 염분의 회복은 대량 방류의 양과 빈도에 영향을 받는 것으로 나타났다.

### 3.3.5 장기 수온 및 염분 변화(2004년-2024년)

하구둑 건설 이후 낙동강 하구역의 수온과 염분은 해양환경정보포털 자료(2004년-2024년)를 분석한 결과, Fig. 5와 같은 장기 변동을 보였다.

#### 1) 수온 변화

수온은 2월은 표층과 저층에서 각각 8.68-13.2°C (평균 11.3°C)와 9.18-13.65°C (평균 11.2°C)이었고, 8월은 표층과 저층에서 각각 18.2-29.67°C (평균 24.7°C)와 13.79-27.78°C (평균 18.6°C)이었다. 따라서, 2월은 표층과 저층 수온이 거의 유사한 변화를 보인 반면, 8월은 표층과 저층간의 평균 수온이 6°C이상 차이를 나타내어 성층이 형성되어 있음을 알 수 있다. 또한, 수온이 2월에 비해 8월에 상대적으로 그 변동 폭이 큰 것은 (인위적 또는 자연적)인 하천수의 유량 변동에 따른 영향으로 생각된다.

한편, 낙동강 하구에서의 수온은 표층과 저층 모두 해와 더불어 점차 증가하고 있는 것으로 나타났다. 이러한 낙동강 하구에서의 각 계절의 평균 수온과 수온의 증가율은 Lee *et al.*[2024]이 제시한 부산 연안에서의 지난 50년간(1968-2016)의 평균 수온 (2월: 11.0°C, 5월: 15.0°C, 8월: 23.1°C, 11월: 16.3°C) 및 SST의 증가율 (0.0129°C·y<sup>-1</sup>)보다 더 컸다. 물론 이러한 차이는 조사 기간의 차이

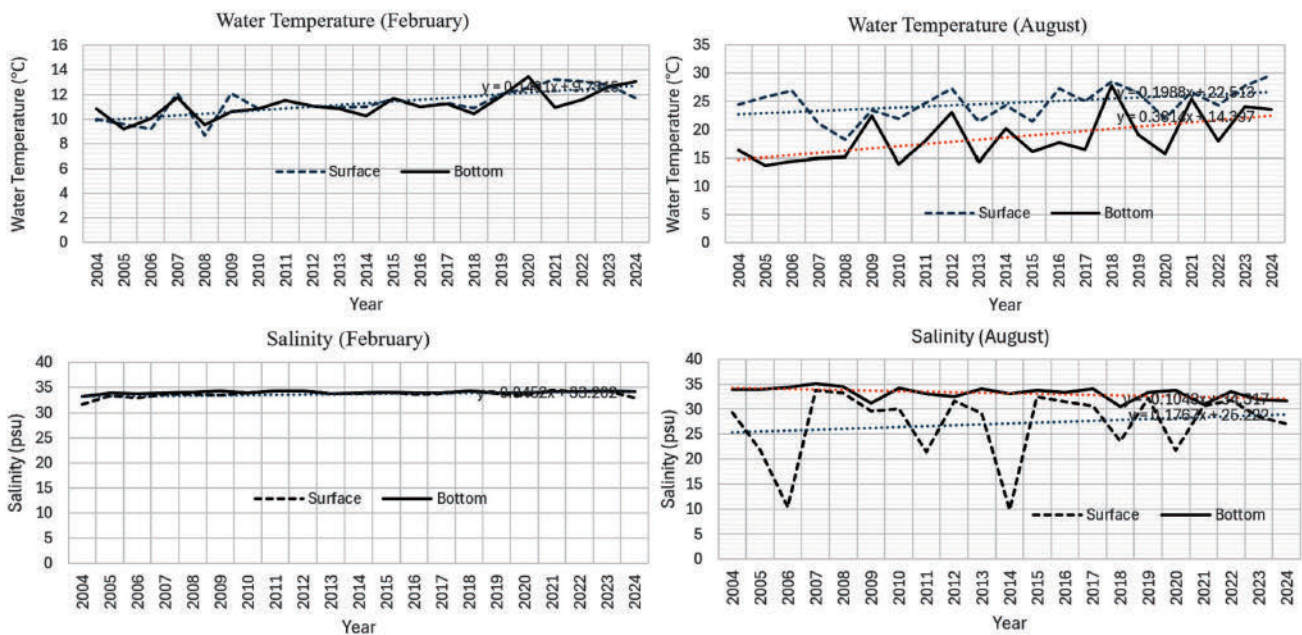


Fig. 5. Annual variations of water temperature and salinity in February and August in the Nakdong River estuary.

에서도 기인하는 것으로 판단된다.

## 2) 염분 변화

염분은 2월은 표층과 저층에서 각각 31.70-34.53 psu (평균 33.70 psu)와 33.15-34.38 psu (평균 34.0 psu)이었고, 8월은 표층과 저층에서 각각 30.56-35.13 psu (평균 27.17 psu)와 9.86-33.74 psu (평균 33.17 psu)이었다. 따라서, 2월은 표층과 저층 염분이 거의 유사한 변화를 나타낸 반면, 8월은 표층과 저층간의 평균 염분이 6 psu 차이를 나타내어 전술한 수온과 마찬가지로 성층이 형성되어 있음을 알 수 있다. 염분 또한 전술한 수온과 마찬가지로 8월이 2월에 비해 상대적으로 그 변동 폭이 큰 것은 하천수의 유량 변동에 따른 영향으로 생각된다.

특히, 여기서 주목되는 것은 하굿둑 건설 이후 낙동강 하구에서의 표층 염분은 점진적으로 상승하고 있으나 저층 염분은 오히려 감소하는 추세를 보이고 있다는 점이다. 이러한 변화는 수문 구조물 설치로 인한 조석 차단과 담수-해수 교환 감소, 인위적 방류 패턴 변화, 그리고 기후변화로 인한 외해 환경 변화가 복합적으로 작용한 결과로 해석된다. 우선, 하굿둑 건설로 인해 저층을 통한 고염 외해수의 역류가 크게 약화되면서 저층 염수 공급이 구조적으로 차단되었고, 이는 저층 염분의 지속적인 하강을 초래하였다. 반면, 장기적으로 방류량의 감소와 계절적 편차 증가는 표층에서 담수에 의한 희석 효과를 약화시켜 표층 염분의 상승을 유도하였다. 또한 조석 에너지 감소로 인한 수층 혼합의 약화는 성층 구조를 강화하여 표층과 저층의 염분 차이를 더욱 확대시켰다. 더불어 부산-남해 연안에서 관측되는 해수의 장기적 고염화 경향 역시 표층에서 외해수의 염분 증가를 통해 하구 표층 염분의 상승에 기여한 것으로 판단된다. 따라서 낙동강 하구에서 나타나는 표·저층 염분의 상반된 변화는 수문 구조물 운영, 수리·지형 변화, 외해 환경 변화가 복합적으로 작용하여 형성된 구조적 특징으로 생각된다.

## 3.4 보 건설 및 준설에 따른 낙동강 유역내의 수리·수문 및 환경적 특성 변화

### 3.4.1 수리·수문 모형을 이용한 유동 및 홍수 조절 능력 검증

낙동강 하굿둑 및 보 건설 이후의 유역 내 본류 유동 특성을 분석하기 위해 다양한 수치모형이 적용되었다. Kang *et al.*[2011]은 SWAT-EFDC 연계 모형을 통해 산정된 유출량이 환경부 관측 자료와 높은 상관성을 보여 모형의 적합성을 입증하였다. 특히 EFDC 모형은 저유량 및 고유량 조건 모두에서 실제 관측값과 일치하였으며, 곡류 구간의 기속·감속 특성을 성공적으로 재현하였다. 한편, 염료 주입 시뮬레이션 결과 상류에서 하굿둑까지의 유동 도달 시간은 약 65일로 산정되었다. 또한, Jun and Kim[2011]은 4대강 사업 완료 전후의 홍수위 변화를 분석한 결과, 대규모 준설에 의한 수위 저하 효과가 보 설치에 따른 수위 상승 요인을 상쇄하여 전 구간에서 홍수위가 낮아질 것으로 예측하였다. 다만 평상시 유량 조건에서는 한강과 달리 낙동강의 경우 보의 높은 관리 수위로 인해 준설에 의한 수위 저하 효과가 제한적이었으며, 유속 지연(도달 시간 증가) 효과는 한강보다 더 큰 것으로 나타났다.

### 3.4.2 구조물 설치에 따른 하도 특성 및 에너지 수지 변화

Ahn *et al.*[2014]은 COSFIM과 FLDWAV를 연계한 시스템을 통해 낙동강 8개 다기능 보 구간의 수리 특성을 분석하였다. 분석 결과, 준설로 인해 하도 내 체적이 증가하여 전체적인 통수능은 향상되었으나, 가동보 주변에서는 국부적인 유속 증가로 인해 세굴 현상이 심화될 가능성이 제기되었다. 또한, Kim *et al.*[2015]은 Landsat 위성 자료와 현장 관측을 통해 보 건설 이후 모래톱 등 하천 퇴적토가 대부분 소실되고 하도폭이 확장된 것을 확인하였다. 특히 보 건설 후 수온의 계절적 변동 폭이 감소하였는데, 이는 준설과 보 설치에 따른 수량 증가가 하천의 열용량(heat capacity)을 변화시켰기 때문으로 분석되었다. 한편, 수온 예측 모델인 HSPF를 적용한 Shin *et al.*[2014]의 연구에서는 태양복사 및 장파복사 등 다양한 열 플럭스(heat flux) 성분을 정량화하여 하천의 에너지 수지를 상세히 규명하였다.

### 3.4.3 지하수위 연계성 및 물질 확산 특성

보 건설은 하천과 지하수의 상호작용 체계에 구조적인 변화를 야기한다. 우선 하천 수위와 지하수위 간의 수문 연계성 측면에서, Kim *et al.*[2013]은 보 설치 이후 두 수계 간의 연계성이 강화된 지점이 증가했음을 확인하였다. 그러나 주성분 분석(PCA) 결과, 지하수위 변동에 대한 하천 수위의 기여율은 82%에서 45%로 대폭 감소한 것으로 나타났다. 이는 보 건설 이후 수위 조절뿐만 아니라 양수 및 주변 지표 개발 등 인위적 요인이 지하수위 변동을 결정짓는 주요 변수로 부상했음을 시사한다.

오염물질의 확산 특성 또한 하천 구조 변화에 따라 민감하게 반응한다. Shin *et al.*[2020]은 추적자 실험 기반의 2차원 이류-확산 모델을 통해, 농도 기반의 중방향 확산계수가 유속 기반 계수보다 약 4-6배 크게 산정됨을 밝혔다. 이는 단순 유속 외에도 보 설치에 따른 수로 내 구조적 혼합 효과(Structural mixing effect)가 오염원 확산에 지대한 영향을 미치고 있음을 의미한다. 이와 관련하여 Kim *et al.*[2020]은 EFDC 모형을 활용해 방류량 증가에 따른 유속 증가와 도달 시간의 급격한 감소 사이의 정량적 상관관계를 입증함으로써, 보 운영 조건에 따른 확산 제어 가능성을 제시하였다.

한편, 하천 유출뿐만 아니라 영양염류 및 미량금속의 주요 해양 유입 경로인 해저지하수유출(Submarine Groundwater Discharge; SGD)의 역할에도 주목할 필요가 있다(Burnett *et al.*[2006]; Zhou *et al.*[2019]). Kim and Jung[2021]은 낙동강 유역을 대상으로 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission) DEM(Digital Elevation Model) 자료 기반의 210개 소유역을 추출하고 FLDAS(Famine Early Warning Systems Network Land Data Assimilation System) 모델을 적용하여 SGD를 분석하였다. 분석 결과, 낙동강 연안의 연평균 SGD는 466.7 m<sup>3</sup>·y<sup>-1</sup>로 산정되었다. 시계열적 관점에서 SGD 유출은 과거 여름철에 집중되던 양상에서 가을철까지 유출 시기가 확대되는 경향을 보였으며, 1980년대 이후 대수계 인접 연안을 중심으로 유출량이 점진적으로 증가하는 추세를 확인하였다. 이러한

변화는 강수 패턴의 시기적 확장과 기저유량이 풍부한 유역의 집수 효율 증가에 기인한 것으로 판단된다.

### 3.4.4 인위적 교란에 따른 온실가스(GHG) 배출 특성 및 수문학적 미래

하구 내 보 설치와 같은 인위적 교란이 온실가스(GHG) 배출 기작과 관련한 Lee *et al.* [2025]의 연구에 따르면, 하굿둑에 의해 조석역이 차단된 영산강 및 낙동강 하구는 한강 하구와 달리 메탄(CH<sub>4</sub>) 배출 비중이 전체 GHG의 77-79%에 달하는 것으로 확인되었다. 특히 낙동강 하구에서는 하계 남조류 대번식에 따른 일시적인 CO<sub>2</sub> 흡수 현상이 관측됨에도 불구하고, 상류 보 구간에서 유입된 유기물 부하로 인해 CH<sub>4</sub> 배출이 급격히 촉진되는 상쇄 효과가 나타났다. 이는 CH<sub>4</sub>의 높은 지구온난화지수(GWP)를 고려할 때, 구조적 교란이 하구 생태계의 탄소 흡수원 기능을 약화시키고 오히려 온실가스 배출원으로 작용하게 함을 시사한다. 나아가, 수문학적 위험 측면에서 Kim *et al.*[2025]이 다중가뭄지수(MDI)와 동적 나이브 베이스 분류기(DNBC)를 활용해 분석한 결과, 낙동강 및 중부 유역의 단기적 수문 위험이 고조되고 있음이 밝혀졌다. 특히 RCP 8.5 시나리오 하에서는 낙동강 남부 유역의 장기적 가뭄 위험이 지속될 것으로 예측되어, 하구 관리의 시급성을 뒷받침한다. 이러한 수문학적 변화는 물질 순환에도 영향을 미치는데, Hwang *et al.*[2002]의 위성영상 및 입자추적 모형 분석 결과처럼 낙동강 유출 부유물질이 가덕도 동쪽을 거쳐 부산 방향으로 확산되는 물리적 거동과 결합되어 하구 연안의 생태환경적 복합 위기를 가중시킬 수 있다. 결론적으로, 하구의 구조적 특성(보 및 하굿둑)과 오염 부하의 결합은 CH<sub>4</sub> 중심의 GHG 배출을 가속화하는 핵심 요인이며, 향후 기후 변화 시나리오에 따른 가뭄 위험 심화와 맞물려 하구 관리 체계의 근본적인 재설계가 필요함을 강조한다.

## 4. 결 론

본 연구는 1964년부터 2025년까지 반세기 이상 축적된 624편의 학술 문헌을 종합 분석하여, 낙동강 하구 및 유역의 환경 변화 궤적을 심층적으로 고찰하였다. 분석 결과, 낙동강의 물리적·수문학적 환경은 하굿둑(1983-1987) 및 8개 다기능 보(2009-2012) 건설이라는 두 차례의 대규모 구조적 개입을 기점으로 비가역적인 변동을 겪었음이 확인되었다.

첫째, 하굿둑 건설 초기에는 환경 영향에 대한 정량적 규명이 다소 미비하였으나, 다기능 보 설치 이후 수질(26.1%) 및 퇴적 환경(15.4%) 분야의 연구가 집중되면서 대형 구조물 설치가 유속 저하, 퇴적 패턴의 왜곡, 수질 악화에 미치는 인과관계가 학술적으로 명확히 입증되었다. 둘째, 2010년대 이후 급증한 수문 및 기후변화 연구(12.8%)는 보 건설에 따른 정체 수역의 형성이 기후 위기와 결합하여 하구 생태계의 취약성을 더욱 가중시키고 있음을 시사하였다.

이러한 연구 결과는 향후 낙동강 관리 정책이 단순한 유량 조절의 차원을 넘어, 구조물 건설 이전의 '수문·물리적 복원력(hydrological

and physical resilience)'을 정량적으로 회복하는 방향으로 패러다임이 전환되어야 함을 뒷받침한다. 따라서 유관 기관은 본 연구에서 도출된 수질-생물-수문의 유기적 연결성을 기반으로, 하굿둑 개방 및 보 운영 최적화가 하구 자원(7.1%)의 가치 증대로 이어질 수 있는 '통합 수자원 관리 체계(IWRM)'를 구축해야 한다.

현재(2025년 기준) 낙동강 하굿둑에서는 대조기 수문 개방을 통해 제한적인 해수 유입과 담수 방류가 시행되고 있으며, 이에 따른 실뱀장어의 소상 및 기수종 분포 확대 등 긍정적인 생태적 변화가 보고되고 있다. 그러나 이러한 부분적 개방만으로는 하굿둑 건설 이전의 자연적 생태계 기능을 온전히 회복하기에는 한계가 있음이 확인되었다. 따라서 단순한 외형적 복원을 넘어, 낙동강 수계 고유 담수어종의 회복 수준을 계량화하고 구체적인 생태 복원 목표치(Target)를 설정하는 전략적 관리가 시급하다.

아울러, 다기능 보 설치 및 준설 이후 발생한 하상 세굴, 지하수위 상승, 열환경 변화 및 하절기 조류 대발생(Algal bloom) 등의 복합적 문제에 대응하기 위한 공학적 대안이 병행되어야 한다. 구조적 안정성 확보를 위한 근고공(根固工)의 정밀 시공과 더불어, 정체 수역의 산소 공급 및 순환을 위한 폭기(aeration) 시스템의 실질적 운용은 하천의 자정 작용을 보조하고 수계 안정을 확보하기 위한 필수적인 단기 대책으로 판단된다. 결론적으로, 본 연구는 과거의 구조적 개입이 초래한 환경 비용을 최소화하고, 지속 가능한 하구 생태계 서비스를 확보하기 위한 과학적 기반의 정책 의사결정 경로를 제시하고자 한다.

## References

- [1] Ahn, J.M., Im, T.H., Lee, I.J., Cheon, S.U., Lyu, S., 2014, Development and application of coupled system for river flow analysis with multi-dimensional models in Nakdong River, *J. Wetlands Res.*, 16(4), 389-402 (in Korean).
- [2] An, S.M., 2015, Brackish area survey in the Nakdong estuary, Ministry of Environment, 154-163 (in Korean).
- [3] Burnett, W.C., P.K. Aggarwal, A. Aureli, H. Bokuniewicz, J.E. Cable, M.A. Charette, E. Kontar, S. Krupa, K.M. Kulkarni, A. Loveless, W.S. Moore, J.A. Oberdorfer, J. Oliveira, N. Ozyurt, P. Povinec, A.M.G. Privitera, R. Rajar, R.T. Ramessur, J. Scholten, T. Stieglitz, M. Taniguchi, and J.V. Tumer, 2006, Quantifying submarine groundwater discharge in the coastal zone via multiple methods, *Sci. Total Environ.*, 367(2-3), 498543.
- [4] Chang, S., Ryu, C., Lee, M., Lee, J.C., 1981, Saline wedge movement in the estuary of the Nakdong River, *J. Oceanol. Soc. Korea*, 31-37 (in Korean).
- [5] Chen, T., Geustrin, C., 2016, XGBoost: A scalable tree boosting system, *Proc. 22<sup>nd</sup> ACM SIGKDD Intl. Conf. Knowledge Discovery and Data Mining*, San Francisco, USA, 785-794.
- [6] Cho, Y., Ryu, D., Lee, K., Park, J., 2018, Strategies to defence of intake raw water according to open Nakdong River estuary gate, *J. Korean Soc. Water Sci. & Tech.*, 26(1), 47-54 (in Korean).

- [7] Han, C.S., Park, S.K., Jung, S.W., Rho, T.Y., 2011, The study of salinity distribution at Nakdong River estuary, *J. Korean Soc. Coastal and Ocean Engineers*, 23(1), 101-108 (in Korean).
- [8] Hwang, J., Kang, Y.Q., Suh, Y., Cho, K.D., Park, S.E., Jang, L., Lee, N.K., 2002, Estimation of the range of the suspended solid from the Nakdong River using satellite imageries and numerical model, *J. Korean Assoc. Geographic Info. Studies*, 5(2), 25-33 (in Korean).
- [9] Jang, S., Kim, K., 2006, Change of oceanographic environment in the Nakdong Estuary, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 11(1), 11-20 (in Korean).
- [10] Jeon, Y.H., 2010, A study on geomorphological processes and estuarine water movement in Nakdong River estuary, Korea, PhD dissertation, Pukyong National University, 1-144 (in Korean).
- [11] Jun, K.S., Kim, J.S., 2011, The four major rivers restoration project: Impacts on river flows, *KSCE J. Civil Engineering (Water Engineering)*, 15(2), 217-224.
- [12] Kang, H., Jang, J.H., Ahn, J.H., Kim, I., 2011, Numerical estimations of Nakdong River flows through linking watershed and river flow models, *J. Korean Water Resources Assoc.*, 44(7), 577-590 (in Korean).
- [13] Kim, B., Kim, B., Han, K., 2020, 2-D hydrodynamic analysis using EFDC in the Nakdong River-focused on velocity and arrival time between weirs, *J. Korean Assoc. Geographic Info. Studies*, 23(2), 36-52 (in Korean).
- [14] Kim, D., Jung, H.C., 2021, The characteristics of submarine groundwater discharge in the coastal area of Nakdong River basin, *Korean J. Remote Sensing*, 37(6-1), 1589-1597 (in Korean).
- [15] Kim, H., Jung, H., Yoo, J., Lim, T., Lim, Y., Oh, J., 2015, Occurrence of pesticides in the Nakdong River basin and risk assessment, *J. Korean Soc. Environ. Analysis*, 19(1), 1-11 (in Korean).
- [16] Kim, H., Kim, T., Chen, S., Kim, D., Kim, T., 2025, Hydrologic risk assessment of drought in South Korea according to climate change scenarios using a multiple drought integrated index with a dynamic naive Bayesian classifier, *KSCE J. Civil Engineering*, 29, 100118.
- [17] Kim, J.L., Hwang, S., Lee, J.K., 2013, Environmental cost and benefit analysis pollutant reduction facilities of the using the emergy, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 29(5), 591-597 (in Korean).
- [18] Kim, K.C., Kim, S.B., 2014, Characteristics of the plume formed by the buoyant discharges from the river, *J. Korean Soc. Mar. Engineering*, 38(8), 988-1001 (in Korean).
- [19] Kim, K., Yang, H., Kim, C., Moon, C., Jang, S., 1999, Variations of physical oceanographic environment caused by opening and closing the floodgate in Nakdong Estuary, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Engineering*, 2(2), 49-59 (in Korean).
- [20] Kim, S., Youn, S., 2019, Effect of freshwater discharge on the Nakdong River estuary: Mooring observations of water temperature and salinity, *J. Korean Soc. Mar. Environ. & Safety*, 25(1), 89-95 (in Korean).
- [21] Kim, Y.E., 1992, Hydrological research of Nakdong River estuary, Institute for Environmental Studies, Inje University, 1, 77-86 (in Korean).
- [22] Korea Hydrographic and Oceanography Agency (KHOA), <https://www.khoa.go.kr> (accessed 2025. 5. 30).
- [23] Lee, H., Zhumabieke, M., Jeon, G., Shin, K., Khim, B., Park, J., 2025, Differential river-to-sea transfers and CH<sub>4</sub> dominance of greenhouse gas emissions in urbanized and impounded estuaries, *Sci. Total Environ.*, 978, 179444.
- [24] Lee, J.H., Lee, E.T., Lee, D.H., Kim, N.W., 1998, Flood analysis in the tidal reaches of the Nakdong River”, *J. Korea Water Resources Assoc.*, 31(3), 235-242 (in Korean).
- [25] Lee, M.O., 2017, New oceanography, Chonnam National University Publisher, 1-545 (in Korean).
- [26] Lee, M.O., Kim, J.K., Kim, B.K., 2024, Characteristics of sea surface temperature (SST) and sea level rise (SLR) in the Korean coastal waters, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 27(3), 167-177 (in Korean).
- [27] Marine Environment Information Portal (MEIS), <https://www.meis.go.kr/portal> (accessed 2025. 8. 16)
- [28] McLaren, P., 1981, An Interpretation of trends in grain size measures, *J. Sedimentary Petrology*, 51(2), 611-624.
- [29] Ministry of Construction and Transportation (MOCT), 2006, River discharge measurement in the main stream of Nakdong River” (in Korean).
- [30] Ministry of environment (MOE), 2015, A study for the restoration ecosystem of Nakdong River estuary, Pusan National University (in Korean).
- [31] Nakdong River Basin Environmental Office, <https://me.go.kr/ndg> (accessed 2025. 6. 20).
- [32] Park, H., Park, C., Song, M., Baek, K., Shin, S., 2001, Evaluation of water quality characteristic using factor analysis in the Nakdong River, *J. Korean Soc. Water Quality*, 17(6), 693-701 (in Korean).
- [33] Ryu, C., Chang, S., 1979, Tide and tidal current in the estuary of the Nakdong River”, *J. Oceanological Soc. Korea*, 14(2), 71-77 (in Korean).
- [34] Shin, C.M., Na, E.H., Kim, D.G., Kim, K., 2014, Operational water temperature forecast for the Nakdong River basin using HSPF watershed model, *J. Korean Soc. Water Environ.* 30(6), 673-682 (in Korean).
- [35] Shin, J., Seo, I.W., Baek, D., 2020, Longitudinal and transverse dispersion coefficients of 2D contaminant transport model for mixing analysis in open channels, *J. Hydrology*, 583, 124302.
- [36] Song, J.I., Yoon, B.I., Kim, J., Lim, C.W., Woo, S., 2014, Spatial and temporal variability of residual current and salinity distribution according to freshwater discharge during monsoon in Nakdong River estuary, *J. Korean Soc. Coastal and Ocean Engineers*, 26(3), 184-195 (in Korean).
- [37] Won, C.H., 1964, Seasonal variations of chemical composition of the estuary water at the tidal flat in Nack Dong River from Nov. 1962 to Oct. 1963, *J. Korean Chemical Soc.*, 8(4), 192-199

(in Korean).

- [38] Yang, H.J., 1973, Studies on the fishes from the Nakdong River- The list of fishes and their distribution -, J. Korean Soc. Limnol., 6(1-2), 19-36 (in Korean).
- [39] Yoon, G.D., 1988, A study on the physical oceanographic in the mouth of the Nakdong River, Bull. Korean Fish. Tech. Soc., 24(2,3), 65-70 (in Korean).
- [40] Zhou, Y., A.H. Sawyer, C.H. David, and J.S. Famiglietti, 2019,

Fresh Submarine Groundwater Discharge to the Near-Global Coast, Geophysical Research Letters, 46(11), 5855-5863.

---

Received 8 January 2026

1st Revised 27 January 2026, 2nd Revised 6 February 2026

3rd Revised 13 February 2026, 4th Revised 5 March 2026

Accepted 9 March 2026