강화 인근 해역 부유 쓰레기 이동경로 및 고립 특성

2025. 08. 22(금)

인하대학교 해양과학과

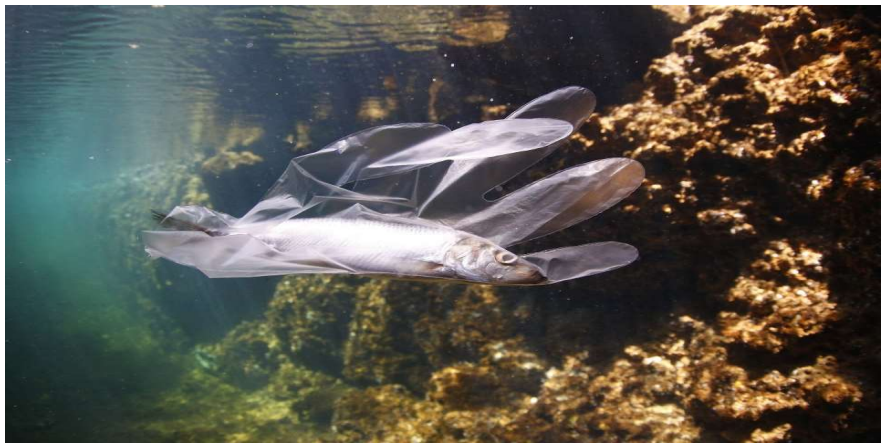
정 윤 성

인하대학교 MPL Marine Prediction Lab

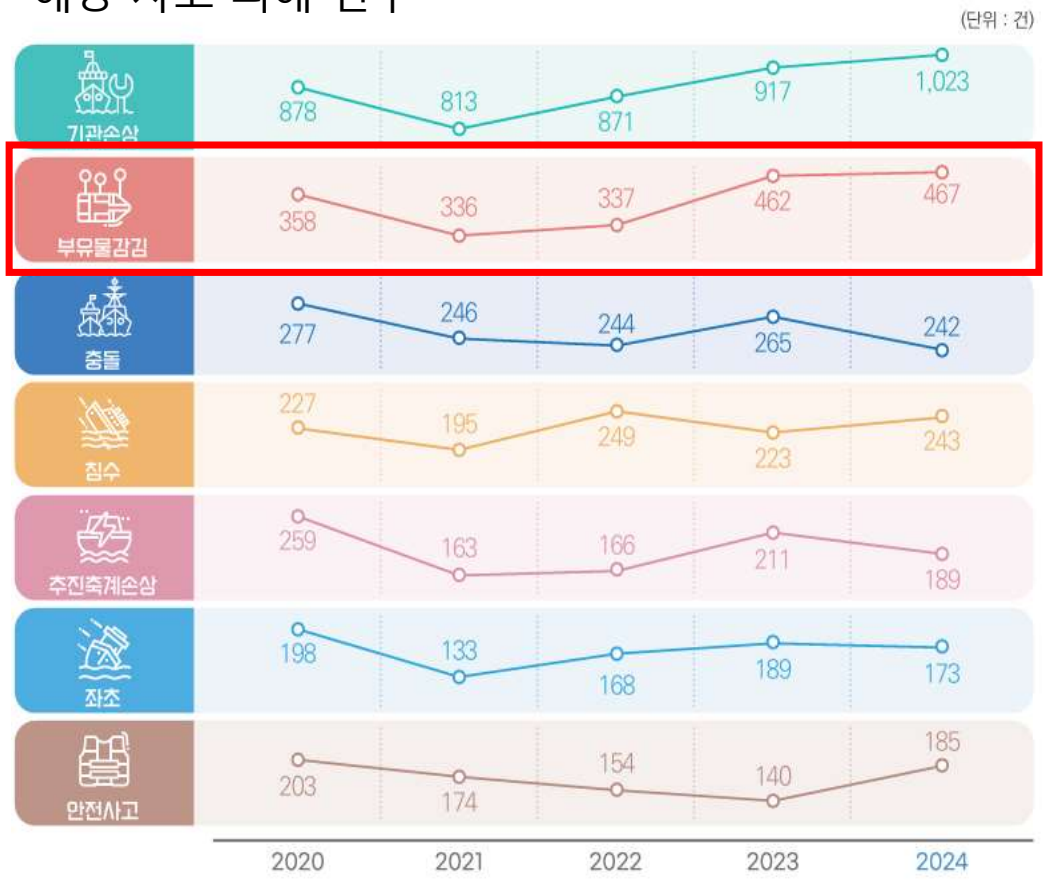


해양 쓰레기의 위험성





해양 사고 피해 건수



출처: 2024 해양사고 통계(해양수산부 중앙해양안전심판원)

서해안 해양 쓰레기 관련 선행 연구

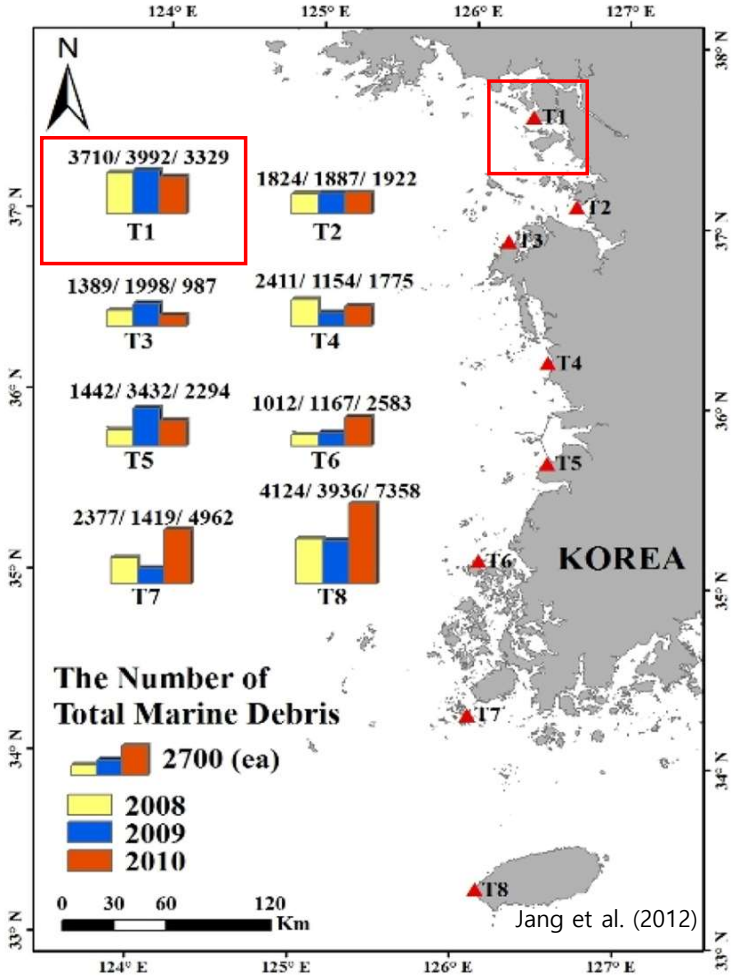


Fig. 3. Annual occurrence rate of total marine debris-to-foreign marine debris for each region(based on : quantity).

➔쓰레기로 인한 피해를 서해안 중에서도 강화도가 크게 받음

(인천광역시, 1998)	하구 연안 표층 부유 쓰레기의 90% 이상 비닐 쓰레기 ➔관측 정점의 위치가 **강화도 서측에 한정됨**
(Song et al., 2001)	한강 하구에서 유입되는 폐기물 특성을 고려하여 수치 모사 ➔**비중이 물보다 낮은 쓰레기에 대한 고려가 부족함**
(Jang et al., 2012)	해양쓰레기 중 플라스틱이 가장 많은 비중 차지 ➔ **한강 하구 지역의 연구는 수행되지 않음 : 외해역 집중**
(Kim et al., 2015)	미세플라스틱 분포의 영향 인자 : 조류, 풍향 ➔ **표층 부유 쓰레기(거시 플라스틱) 연구 필요**
(Kim et al., 2019)	풍속이 5m/s 이하일 경우, 조류와 해류의 영향 증가 ➔ **서남해역 연구 : 바람 조건에 대한 한강 하구 연구 필요**

강화도 부근 쓰레기 문제 현황



2024년 10월 인천 주문도 앞장술 해변 쓰레기 현장

2000년

동아일보 구독

[이슈추적]인천앞바다 쓰레기 몸살

입력 2000.05.30. 오후 6:53

2011년

인천 앞바다 쓰레기로 '몸살'…26만 톤 '둥둥'

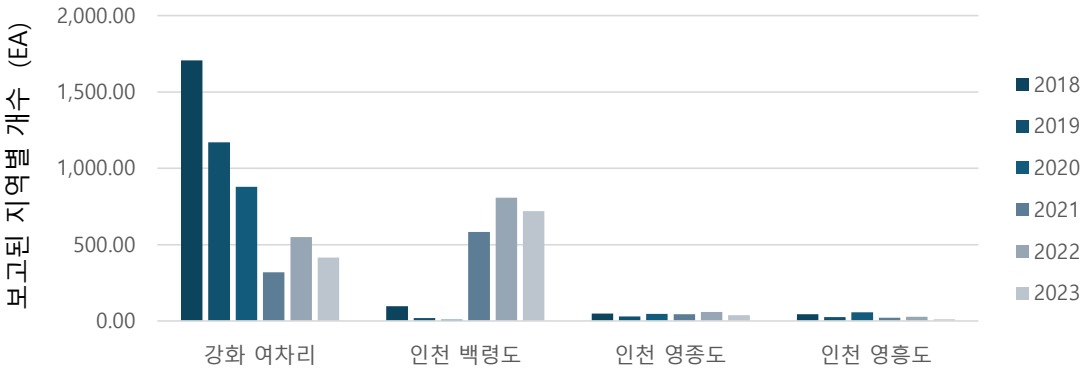
기사입력 2011-07-19 16:24 | 최종수정 2011-07-19 21:36

2024년

뉴스홈 | 최신기사

해양쓰레기에 인천 앞바다 몸살…"처리비용 합리적 분담 필요"

송고시간 | 2024-08-01 08:00



출처: 해양환경정보포털 해안쓰레기 모니터링 통계

강화도 해역 쓰레기 선행 연구

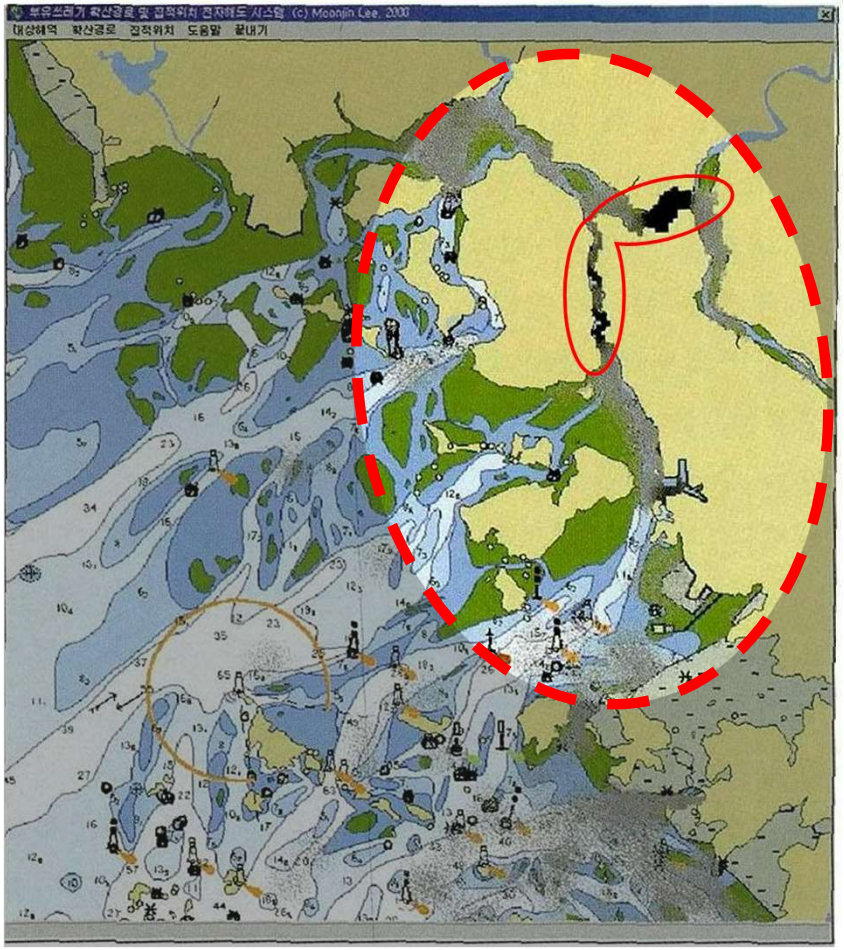


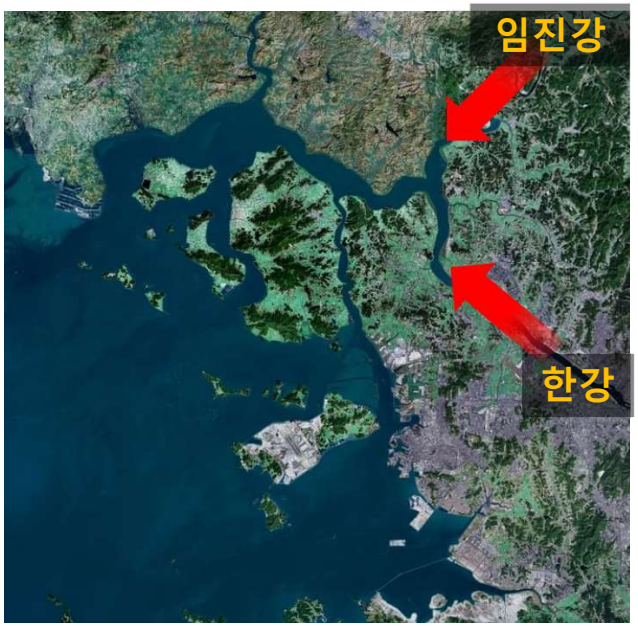
Fig. 8 부유시간 100일인 쓰레기의 침적상태 (한강유역) Song et al. (2001)

➔부유 쓰레기가 100일 이상 강화도 인근 체류 가능

(인천광역시, 1998)	하구 연안 표층 부유 쓰레기의 90% 이상 비닐 쓰레기 ➔관측 정점의 위치가 **강화도 서측에 한정됨**
(Song et al., 2001)	한강 하구에서 유입되는 폐기물 특성을 고려하여 수치 모사 ➔**비중이 물보다 낮은 쓰레기에 대한 고려가 부족함**
(Jang et al., 2012)	해양쓰레기 중 플라스틱이 가장 많은 비중 차지 ➔ **한강 하구 지역의 연구는 수행되지 않음 : 외해역 집중**
(Kim et al., 2015)	미세플라스틱 분포의 영향 인자 : 조류, 풍향 ➔ **표층 부유 쓰레기(거시 플라스틱) 연구 필요**
(Kim et al., 2019)	풍속이 5m/s 이하일 경우, 조류와 해류의 영향 증가 ➔ **서남해역 연구 : 바람 조건에 대한 한강 하구 연구 필요**

연구 목표

❖ 기존 연구 한계점



강 상류 유입 쓰레기 이동 및 고립 특성 연구 부족

- 선행 연구가 주로 강화도 서쪽(외해)에서 진행됨
- 물보다 비중이 큰 쓰레기(목재) 위주 수치 모사 진행
- 한강 및 임진강 기원 쓰레기 유입에 대한 연구 부족
- 쓰레기 이동에 담수가 미치는 영향 파악 필요

관측 자료 연계 부유 쓰레기 추적 모델링 필요

- 부유 쓰레기 이동 궤적에 관한 계절적 변화를 파악할 수 있는 현장 자료 수집
- 조석-담수-바람 조건이 고려된 수치모델링 필요
- 쓰레기 오염도에 따른 침강속도 결정 필요

❖ 연구 목표

1. 강화도 인근 부유 쓰레기 이동 기작 및 고립 특성 분석

2. 현장 자료 기반 해양 특성이 반영된 부유 쓰레기 추적 및 모델링 기술 개발

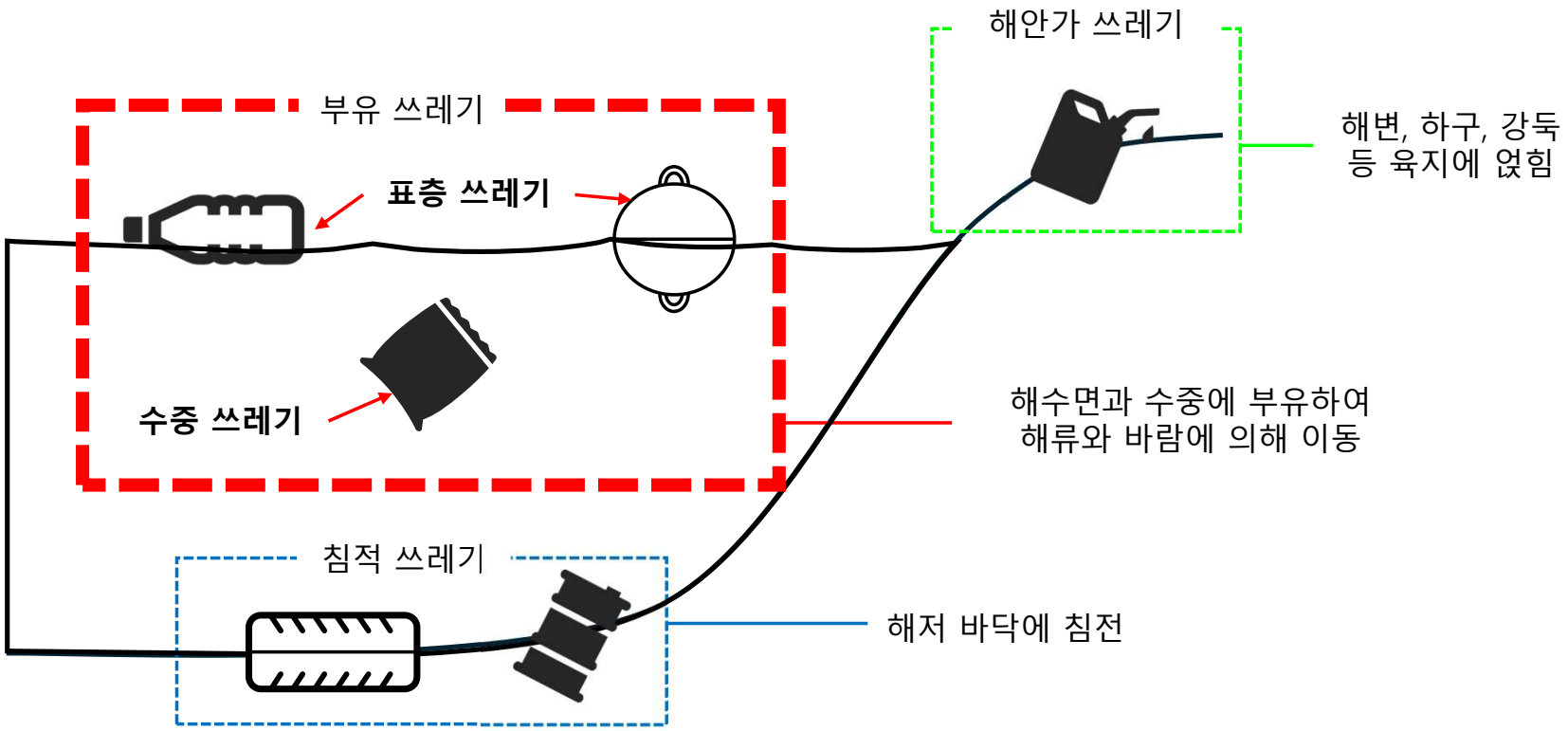
해양 쓰레기 정의 및 분류

해양 쓰레기 (해양 폐기물)

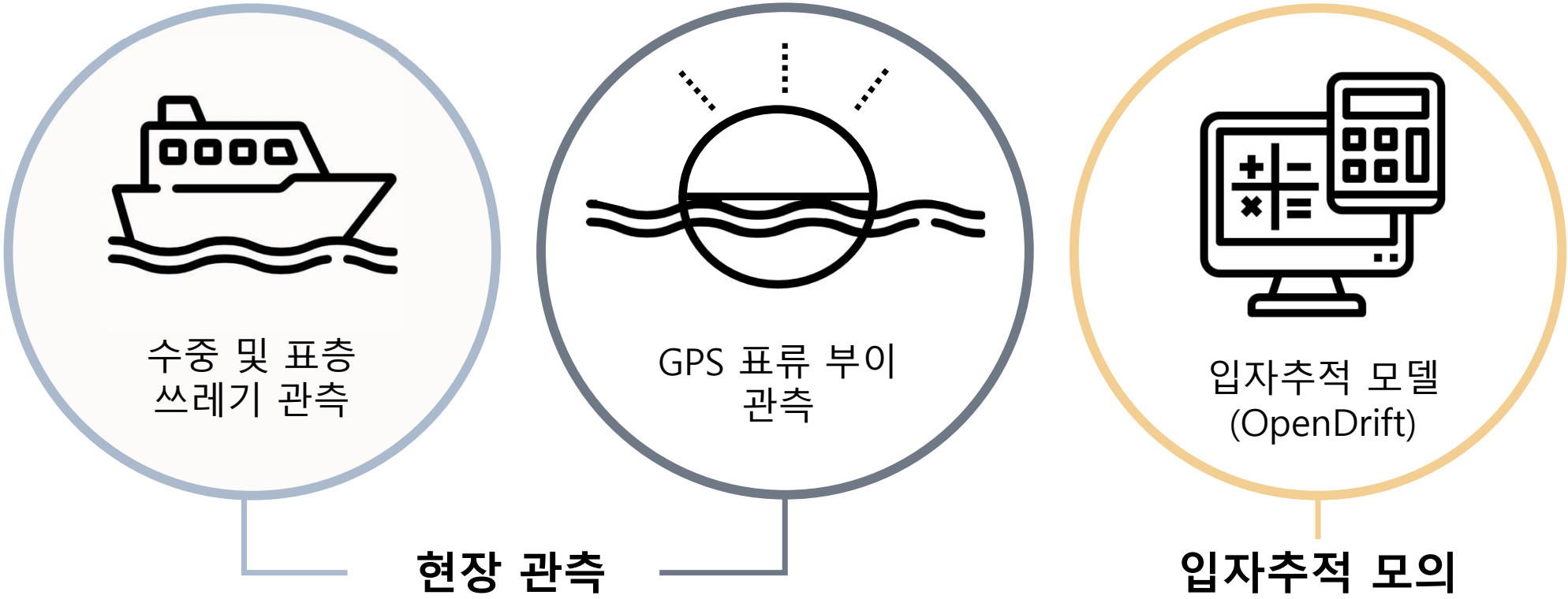
해양 및 바닷가에 유입・투기・방치된 폐기물

분포 위치에 따라 해안/부유/침적으로 분류

(출처: 해양환경정보포털, 해양폐기물 및 해양오염 퇴적 관리법 제 2조(정의))

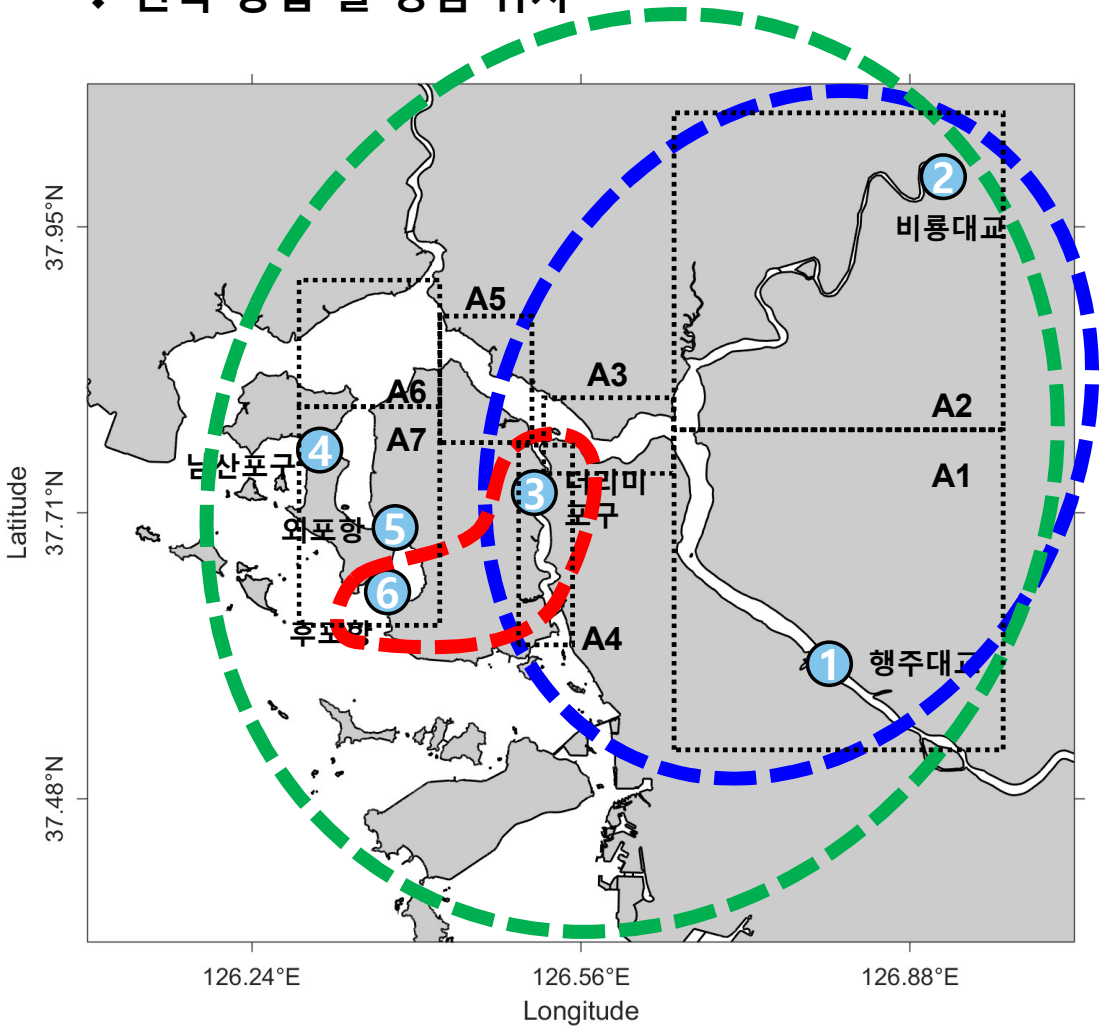


연구 방법



현장 관측 정점

❖ 관측 방법 별 정점 위치

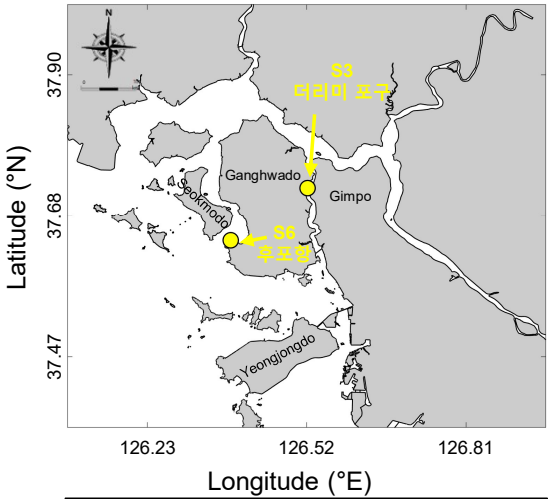


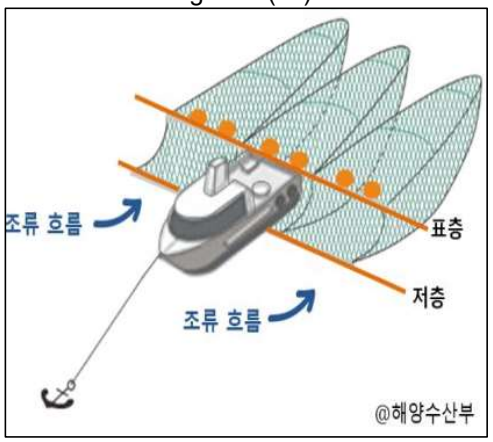
수중 쓰레기 정점	표층 쓰레기 정점	GPS drifter 정점
③더리미 포구 ⑥후포항	①행주대교 ②비룡대교 ③더리미 포구 ④남산 포구 ⑤외포항 ⑥후포항	①행주대교 ②비룡대교 ③더리미 포구
• 어업 그물 사용 • 2시간동안 수거	• 반경 10 m 이내 영역 통과 쓰레기 기록	• 3개 정점에서 동시 투하 • 약 30~40일 간 이동

- 2024년 6월 ~ 11월 관측 진행
- 매 월 1회, 대조기에 관측

수중 쓰레기 조사 방법

❖ 안강망을 활용한 쓰레기 조사





안강망 조업 모식도



수중 쓰레기 조사 방법

❖ 쓰레기 수거 및 분류



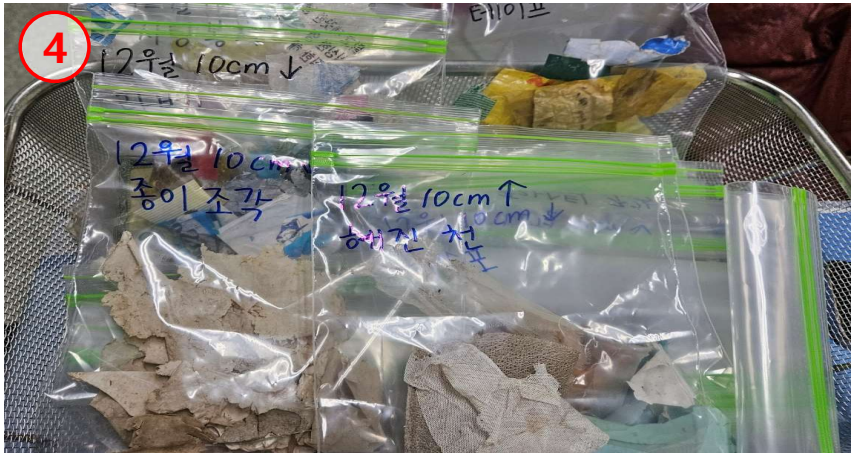
그물 수거



어획물 중 쓰레기 분류 및 채집



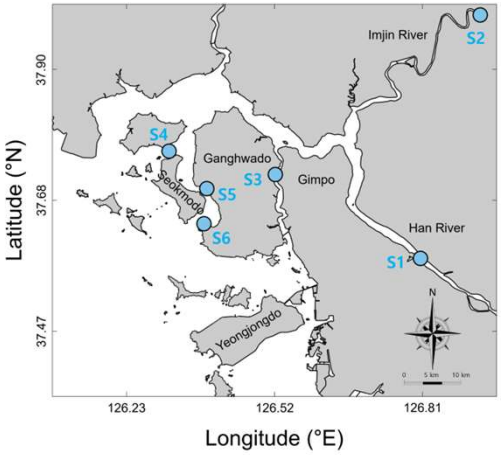
수중 쓰레기 세척 및 건조



크기, 재질별 분류

표층 쓰레기 목시 조사 방법

❖ S1-S6 (6개 정점) 목시조사 수행







조사 선박 선정
- (비)조사 목적 선박
- 조사 해역

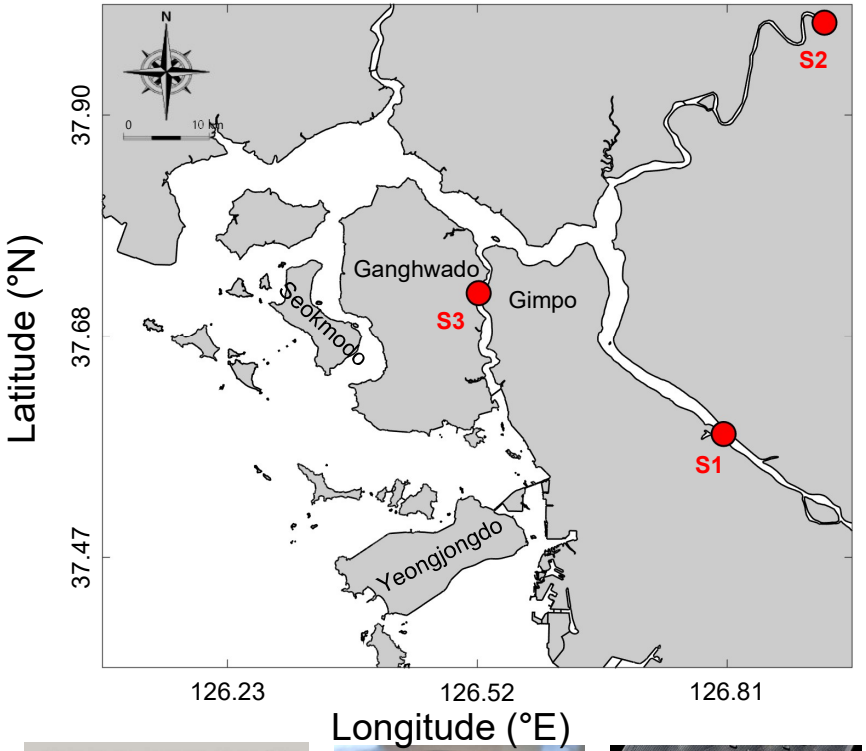
관측 기준 파악
- 선박 제원 (선속, 관측 높이)
- 해상
- 물체 크기
- 유효식별거리
- 최소 관측 면적
- 조사 인원

현장 관측
- 현장 정보 기록
  - 일자
  - 관측 위치
  - 해상
- 물체 관측 및 기록
  - 종류
  - 크기
  - 색상
  - 부착생물/얽힘

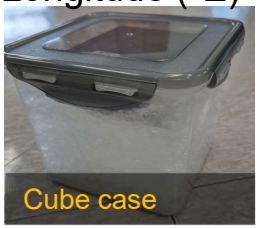
자료 처리
- 분류체계 기준
- 정량 및 정성 자료

GPS drifter 조사 방법

❖ 표층 부유 쓰레기 이동 경로 및 체류 관측(GPS drifter)









GPS drifter 투하 정점 및 시기

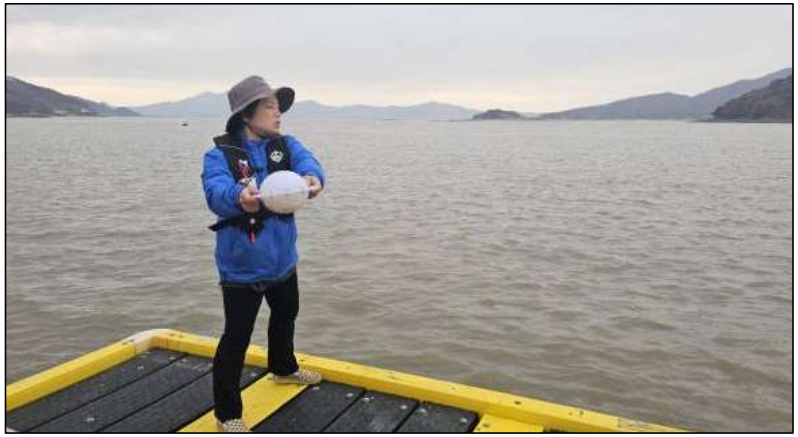
Station	Latitude/ Longitude	GPS drifter case type	Observation period	Number of GPS drifters dropped	Time interval
S1 Hanju Bridge (17 observations over 6 months)	37.5985˚ 126.8101˚	Cube	2024.06.28~07.21	2	10 min
			2024.07.16~08.09	3	
			2024.07.25~08.19	2	
			2024.08.23~09.20	3	
		Sphere	2024.09.19~11.04	3	
			2024.10.18~11.29	2	
			2024.11.15~12.28	2	
S2 Biryong Bridge (17 observations over 6 months)	37.9869˚ 126.9184˚	Cube	2024.06.28~07.21	2	
			2024.07.15~07.27	3	
			2024.07.25~08.20	2	
			2024.08.23~09.20	3	
		Sphere	2024.09.19~11.10	3	
			2024.10.18~12.01	2	
			2024.11.15~12.28	2	
S3 Derimi Port (15 observations over 6 months)	37.7258˚ 126.5164˚	Cube	2024.06.27~07.21	2	
			2024.07.16~08.06	3	
			2024.08.23~09.20	3	
		Sphere	2024.09.20~11.07	3	
			2024.10.17~11.20	2	
			2024.11.15~12.27	2	
	Total		2024.06.26~12.27	49	

- 매월 1회 이상 GPS drifter 투하
- 차량용 GPS 사용
- 정육면체, 구형 부이 케이스 사용

GPS drifter 조사 방법

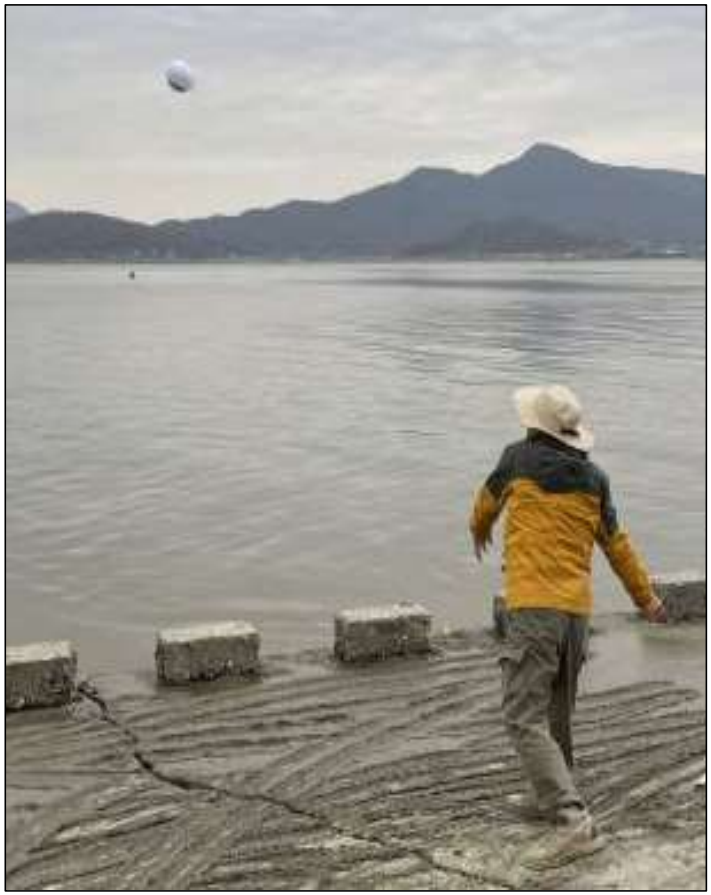
❖ **GPS drifter 투하**

- 시민사회와 협동하여 한강, 임진강, 더리미 포구 정점에 동시 투하







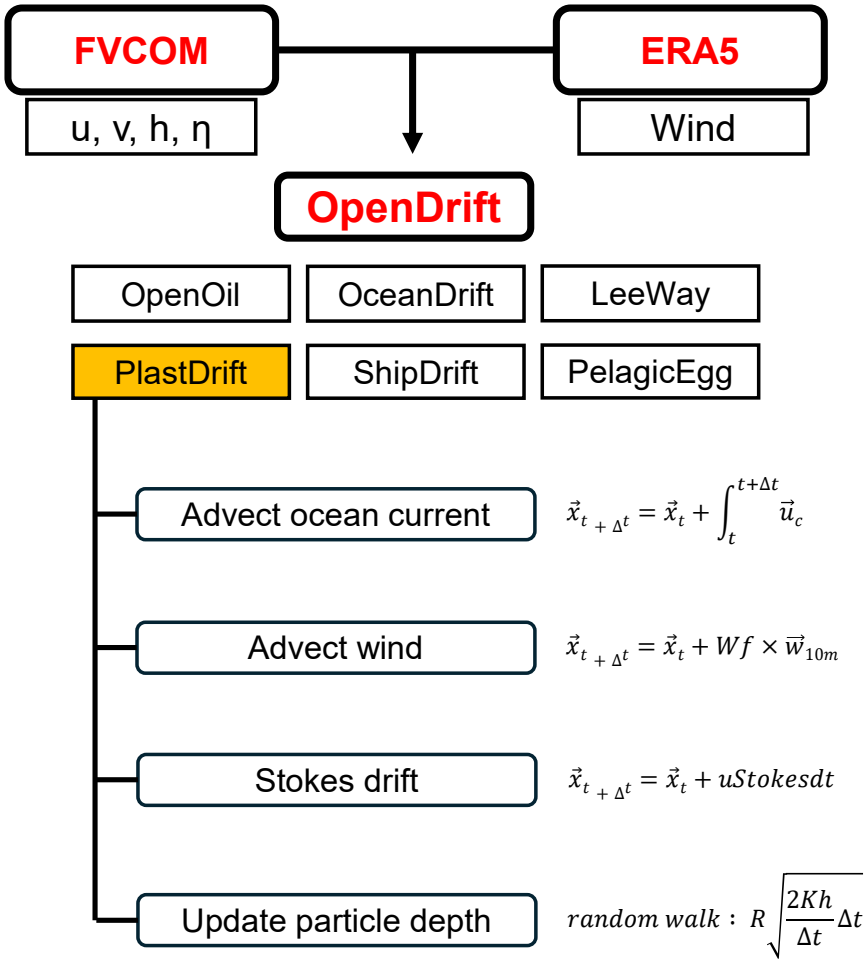


입자추적 모델 구축 및 모의(OpenDrift)

❖ OpenDrift

- 3차원 부유 입자 추적 모델
- 외부 유동 모델(FVCOM, ROMS 등) 자료를 바탕으로 모의
- 다양한 하위 모델

Finite Volume Community Ocean Model (FVCOM)	Simulation period	Dry season	2024-03-01~03-31 (31days)
		Flood season	2024-06-28~07-28 (31days)
		Time interval	10 minutes
	Tidal	M_2, S_2, K_1, O_1, N_2 (TPX08-atlas)	
	Freshwater discharge	WAter resource Management Informaion System(WAMIS)	
	Salinity	National Institude of Fisheries Science(NIFS)	
Lagrangian particle tracking model (OpenDrift)	Simulation period	Dry season	2024-03-01~03-31 (31days)
		Flood season	2024-06-28~07-28 (31days)
		Time interval	10 minutes
	Particle setting	Vertical diffusivity	0 m/s
	Flow	FVCOM	
	Wind	Wind drift	2%
		ERA5 Model	

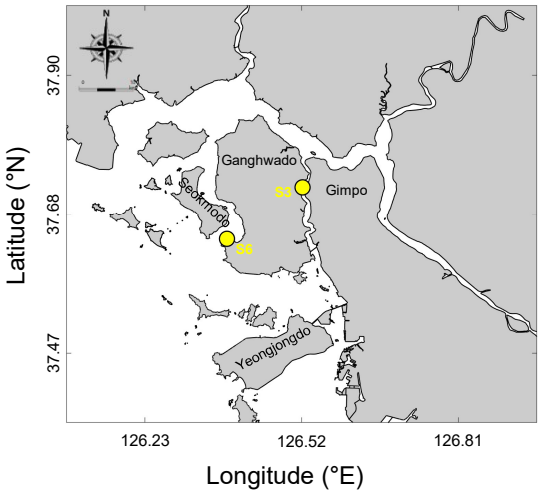


부유 쓰레기
그물 및 목시조사

수중 쓰레기 그물 조사 결과

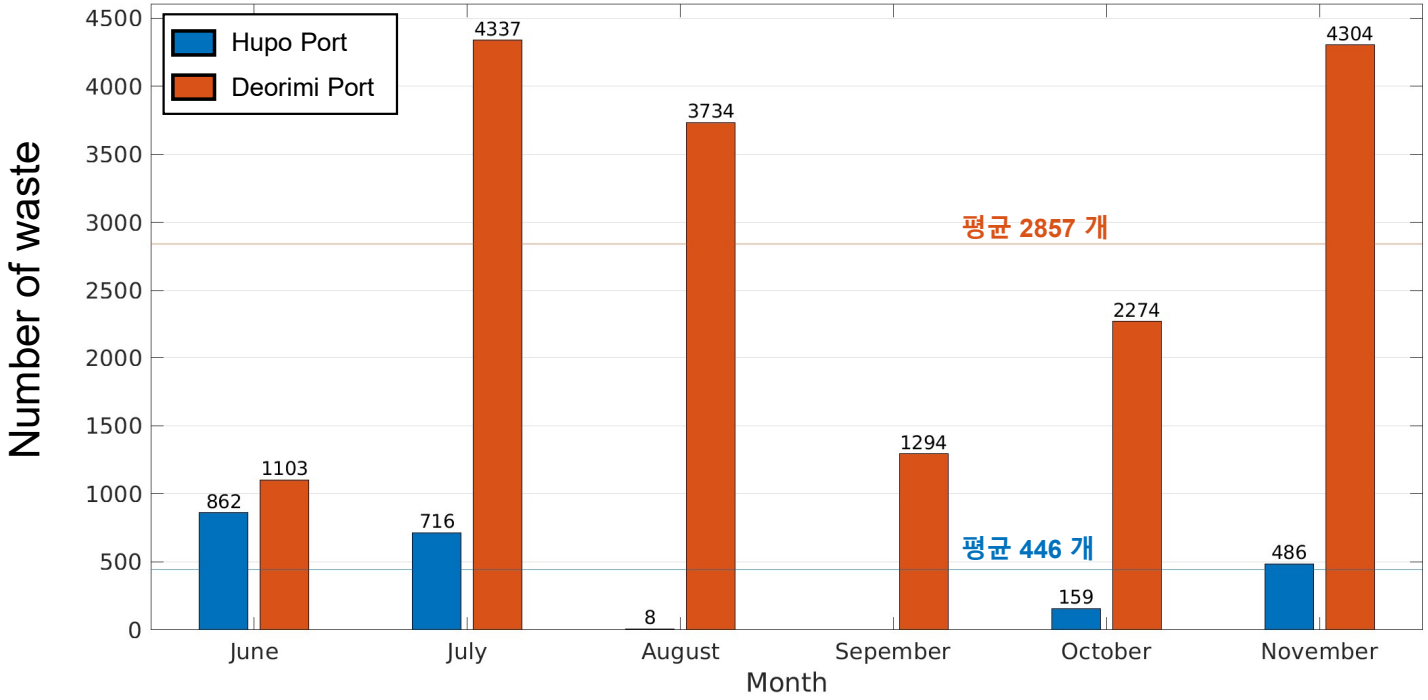
❖ 수중 쓰레기 개수

수중 쓰레기 조사 정점



후포 (S6)	더리미 (S3)
2,231개	17,046개

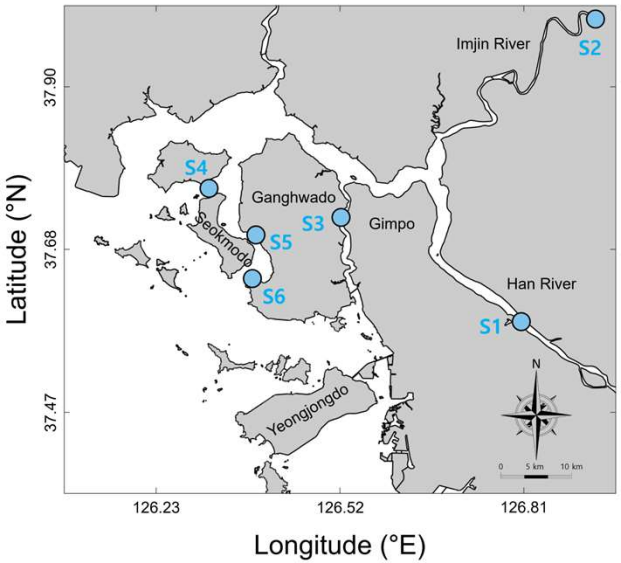
정점별 수중 쓰레기 발생량

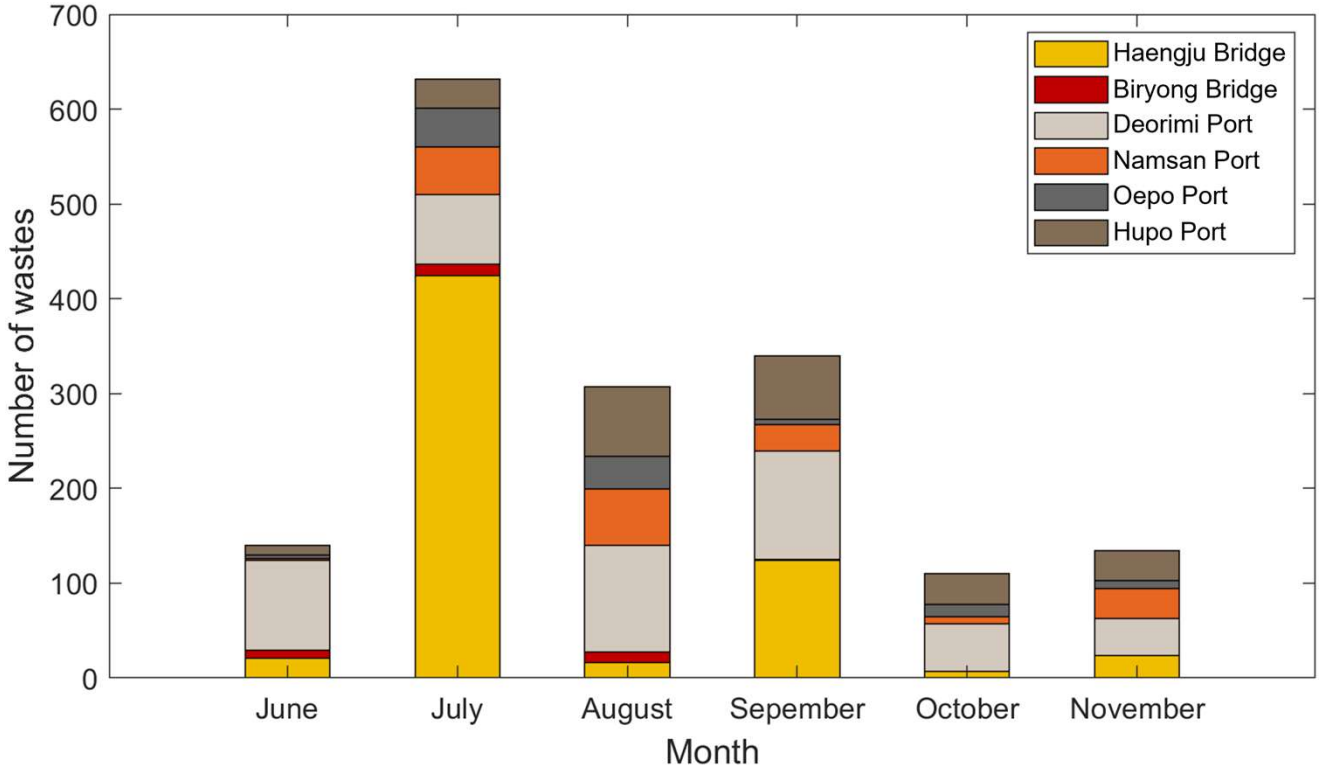


- 수중 쓰레기 발생량: 후포항 << 더리미 포구 (6.4배 증가)
- 7월 이후 8, 9월에 쓰레기 발생량이 감소하나, 10월부터 다시 증가

표층 쓰레기 목시 조사 결과

❖ 표층 쓰레기 개수



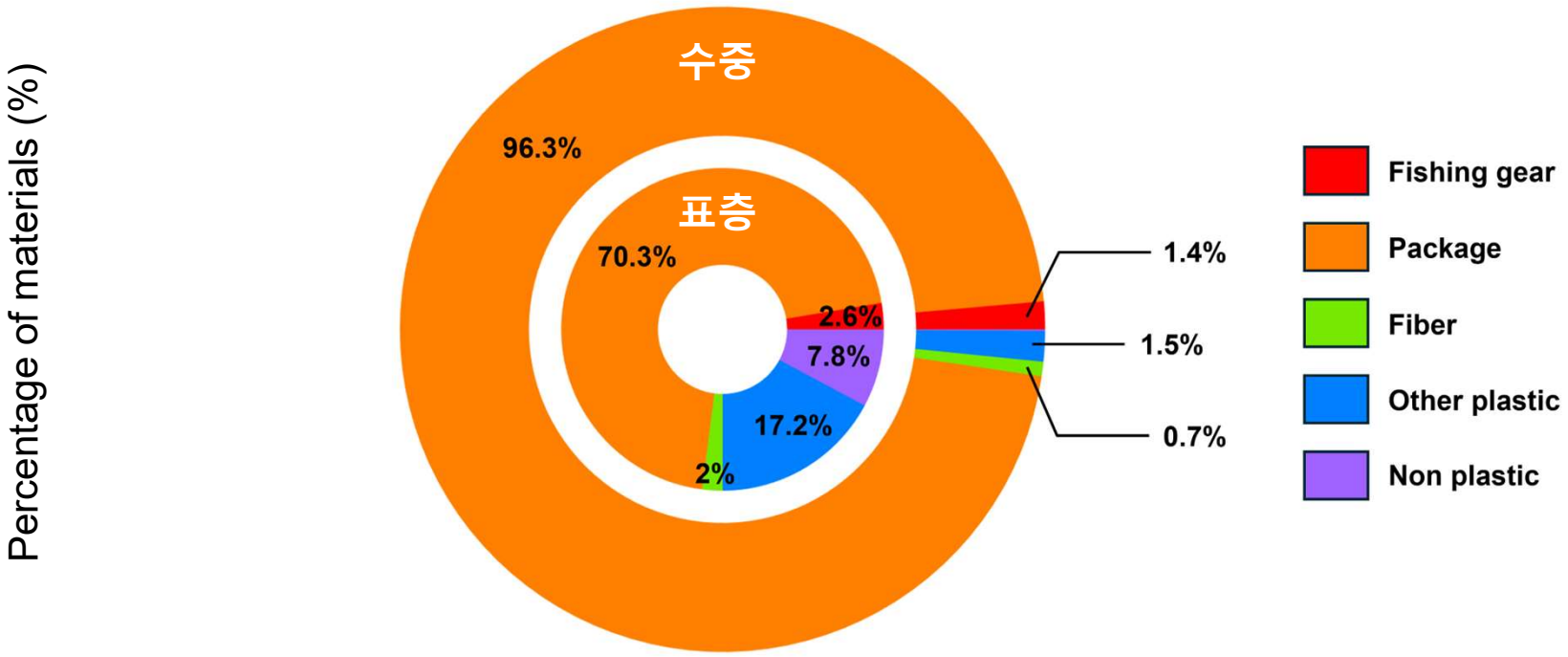


- 더리미 포구(S3), 표층 쓰레기 발생량이 차지하는 비율을 상대적으로 높게 유지됨(약 30% 이상 유지)

  → 염하수로의 표층 쓰레기는 고립될 가능성이 높을 것으로 추정됨

수중 및 표층 쓰레기 재질별 비율

❖ 6월~11월 수중 및 표층 쓰레기 재질 분포

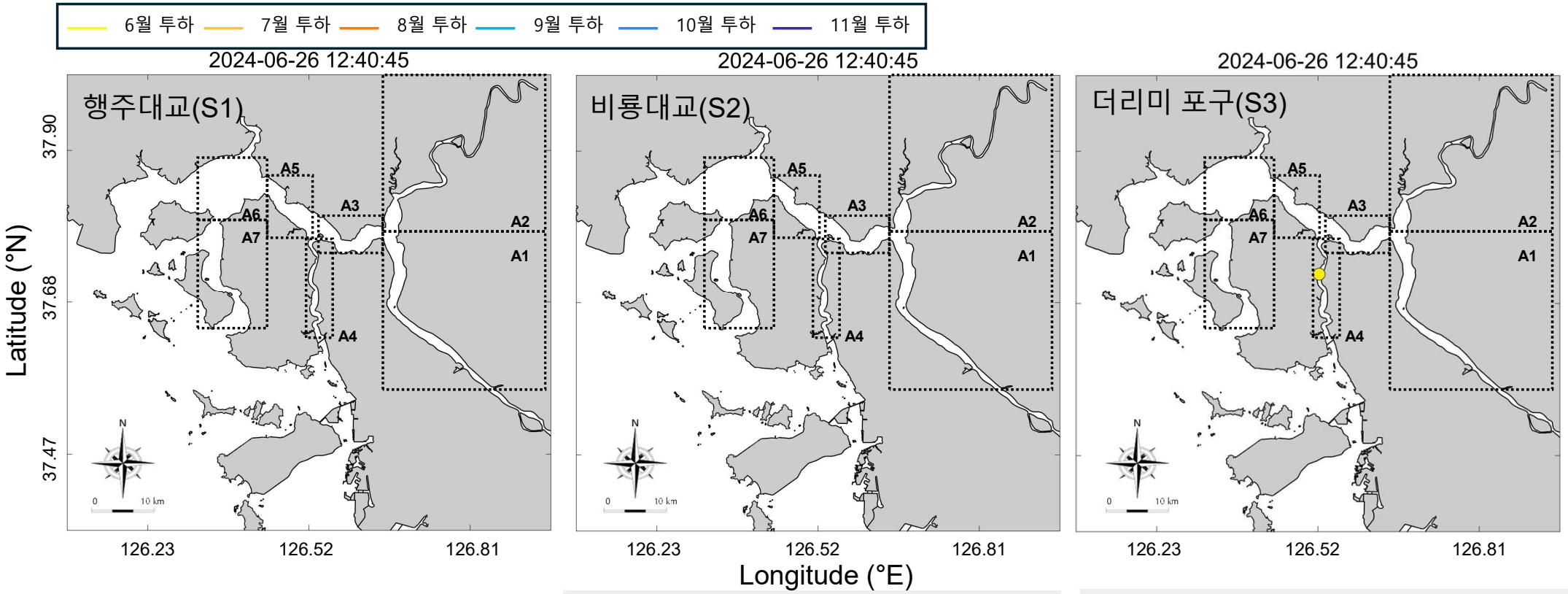


- 표층과 수중 모두 플라스틱 포장재 쓰레기가 70% 이상 차지함
- 수중에 비해 표층에서 더 다양한 종류의 쓰레기가 관측됨 → 재질별 주요 이동 수층이 다름

표층 플라스틱 부이 추적 현장 실험(GPS drifter)

GPS drifter 조사 결과

❖ 투하 위치(S1, S2, S3) 별 drifter 이동 경로 및 범위



- 6~7월 투하: A6, A7 까지
- 8~11월 투하: A1~A5 내부

- 6~7월 투하: A7 까지
- 8~11월 투하: A2 에서만

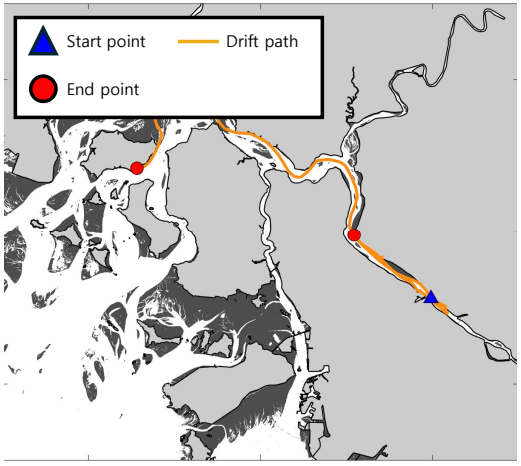
- 6~7월 투하: A4 영역 위주
- 8~11월 투하: A1~A5 내부

GPS drifter 조사 방법

❖ GPS drifter 이동 분석

데이터 수집 및 보간

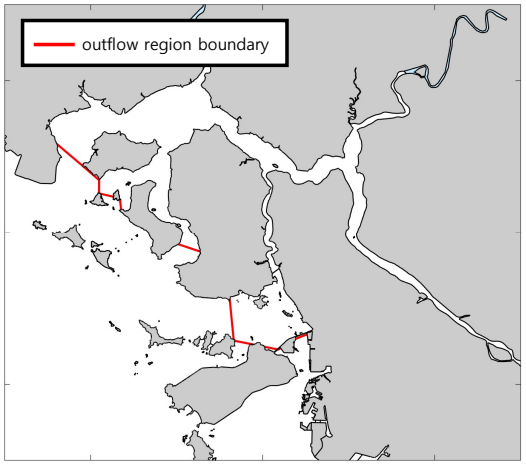
- GPS drifter 위치 정보 및 조석, 담수, 바람 관측자료 다운로드
- 누락된 데이터 보간



GPS drifter 이동 궤적

GPS drifter 유출 여부 분석

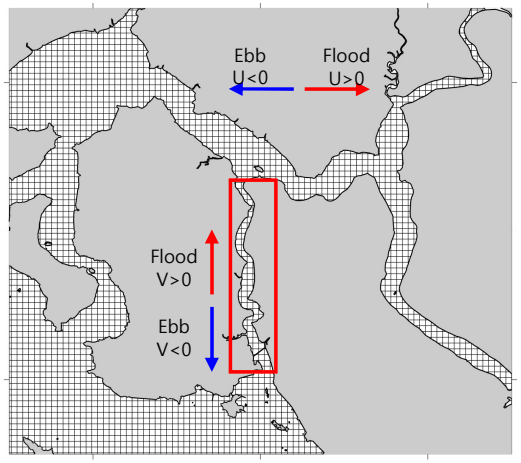
- 유출 기준 범위: 갈수기 담수 영향범위
- GPS drifter의 최종 위치를 기준으로 유출 여부 확정



GPS drifter 유출 범위 설정

시기 별 GPS drifter 평균 이동 속도 계산

- 전체 영역을 격자로 나눠 격자별 평균 이동 속도 분석
- 시기 별(전체/대조/소조) 이동 속도 계산



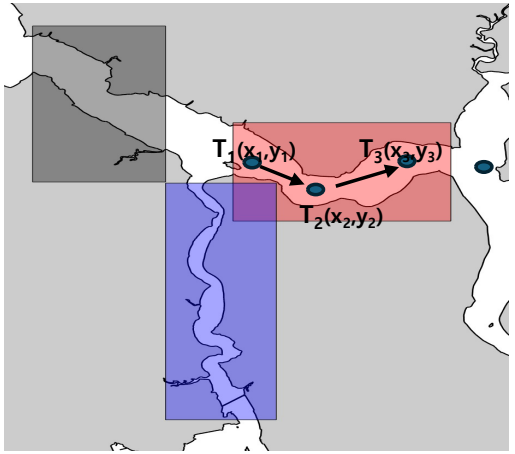
전체 영역의 drifter 평균 이동 속도 분석

영역 구분 및 영역별 GPS drifter 이동 속도 계산

- 영역별 GPS drifter 이동 속도 분석

$$u = \frac{T_{ii+1} - Ti_i}{dt} = \frac{x_{ii+1} - xi_i}{dt}$$

$$v = \frac{T_{ii+1} - Ti_i}{dt} = \frac{y_{ii+1} - yi_i}{dt}$$

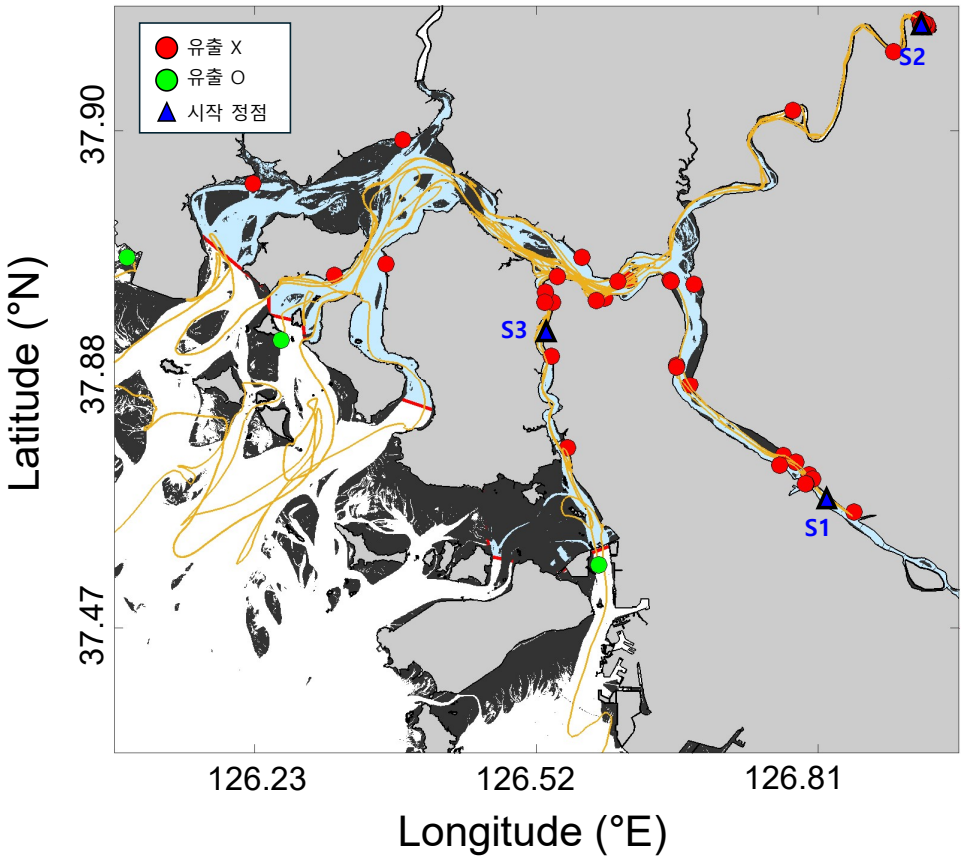


영역 내부에서 움직인 drifter 이동 속도 분석

GPS drifter 조사 결과

❖ Drifter 유출 여부 분석

GPS drifter 유출 경로 및 위치



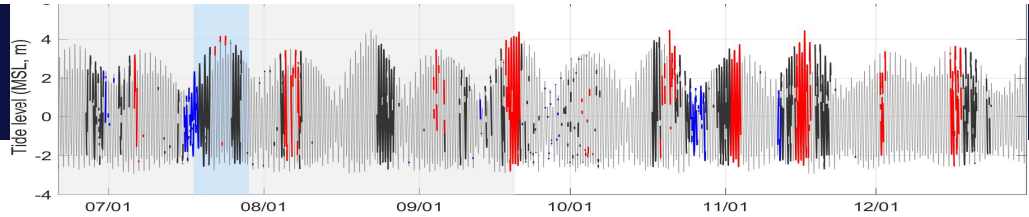
GPS drifter 유출 정보

Starting location	Number of exited drifter	Start time	Exited time	Time taken to exit
Haengju Bridge (S1)	1/17	2024-09-19 16:20	2024-10-30 19:00	986:00:00 (41 days 2 hours)
Biryong Bridge (S2)	3/17	2024-06-28 11:30	**2024-07-20 19:19**	535:40:00 (22 days 7 hours)
		2024-07-15 16:40	**2024-07-19 06:50**	86:10:00 (3 days 14 hours)
		2024-07-15 16:40	**2024-07-19 07:25**	86:40:00 (3 days 14 hours)
Deorimi port (S3)	2/15	2024-07-16 12:50	**2024-07-27 02:30**	253:40:00 (10 days 13 hours)
		2024-08-23 17:00	2024-09-19 09:20	645:10:00 (26 days 21 hours)

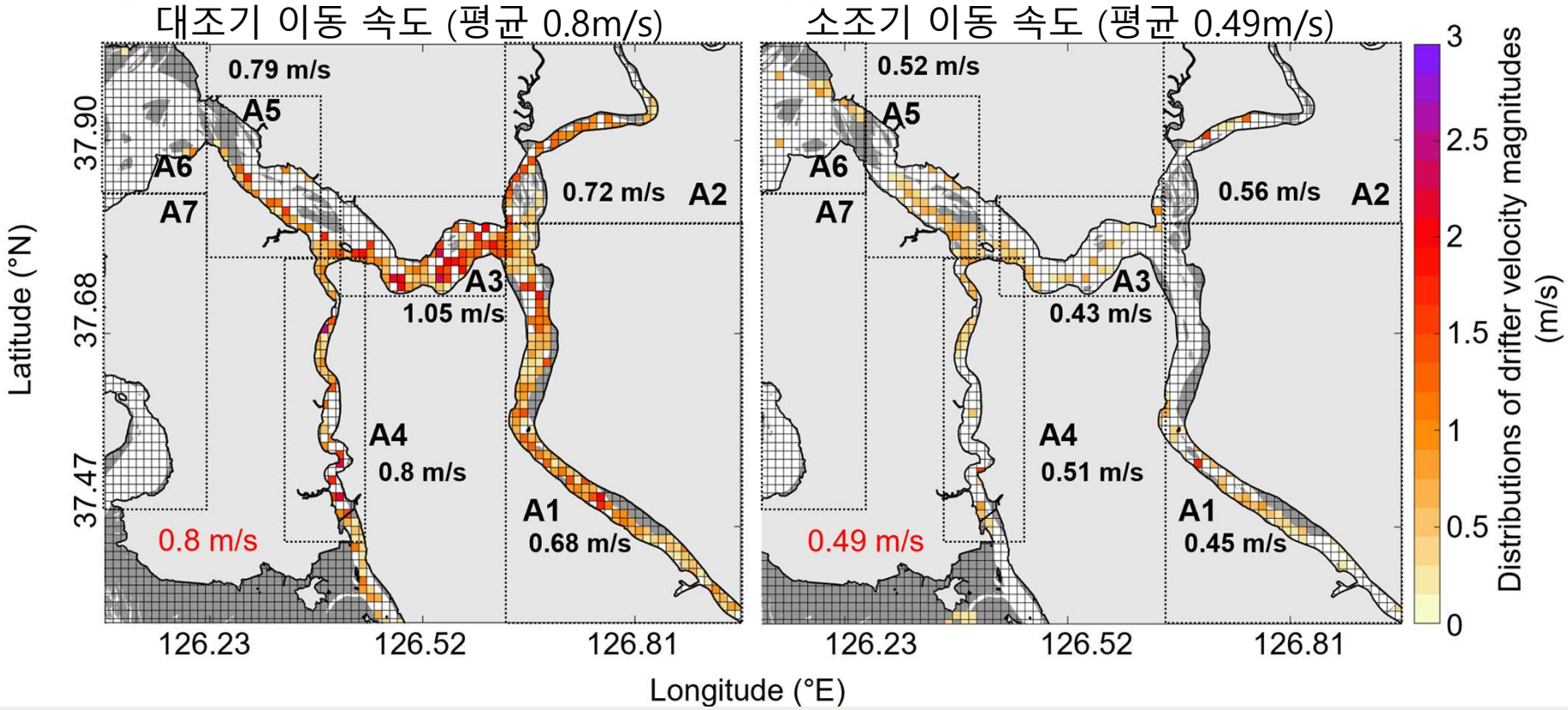
- 총 drifter 49개 중 6개(12%) 유출(하늘색 영역 밖)
- 비룡대교(S2)의 3개와 더리미포구(S3)의 1개 drifter들은 7월 19일에서 27일 사이에 모두 유출됨

  → **2,000 m^3/s 이상의 높은 담수 유량 영향**

GPS drifter 조사 결과

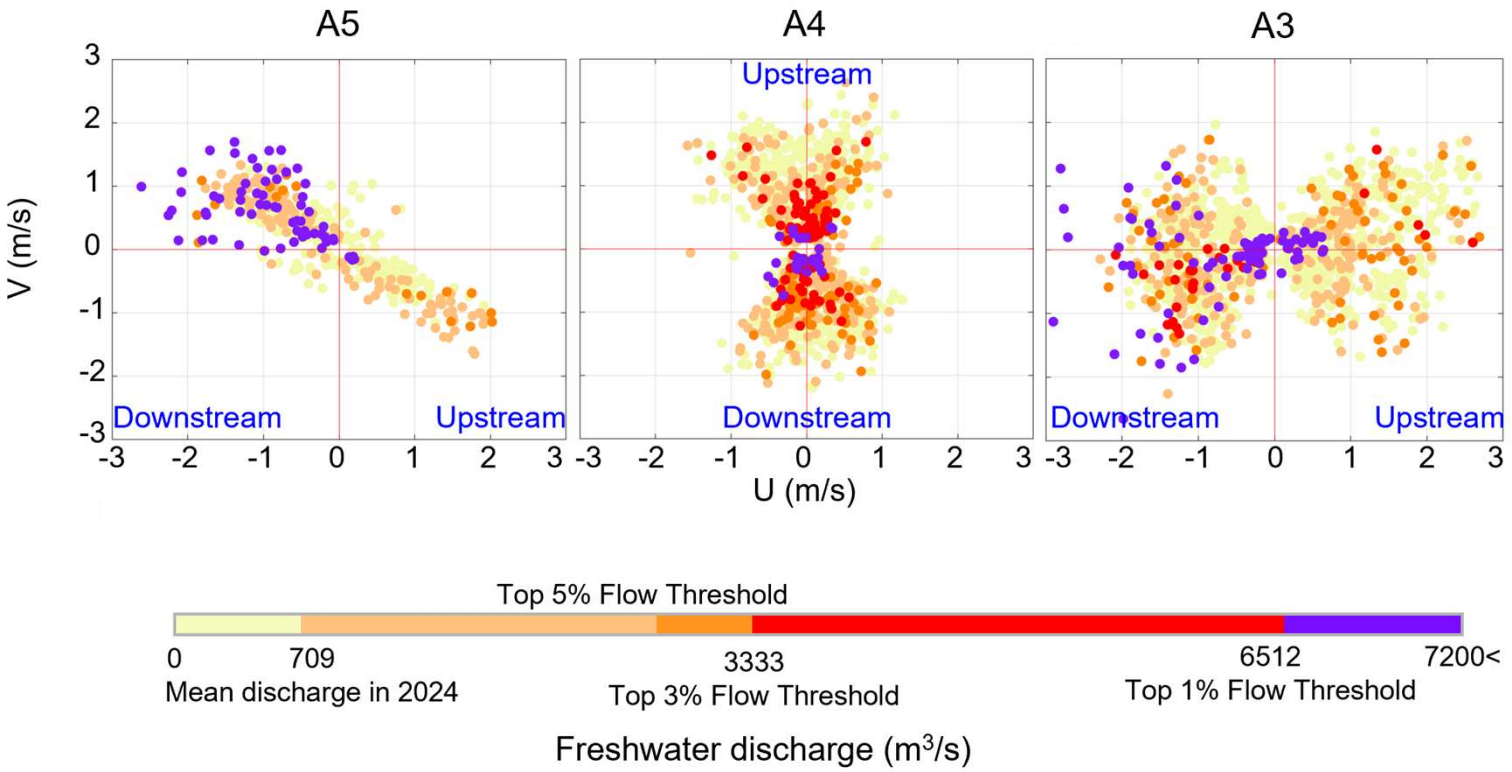


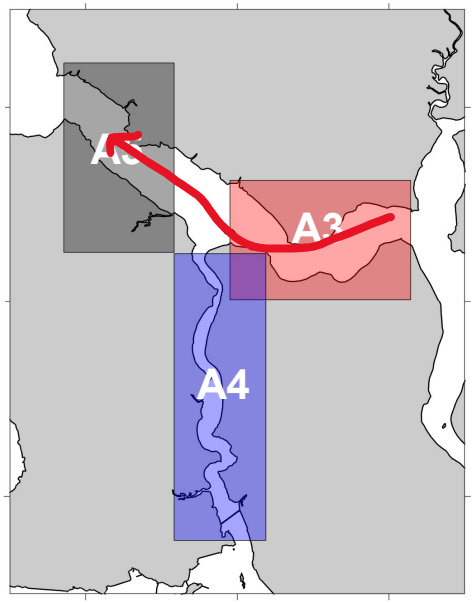
❖ **대조, 소조별 평균 이동 속도**



- Drifter가 좌초된 경우를 전부 제외하고 움직임이 확인된 경우에만 계산 진행
- 대조, 소조 별 이동 속도 및 범위 간 차이 발생

담수 유량에 따른 GPS drifter 이동





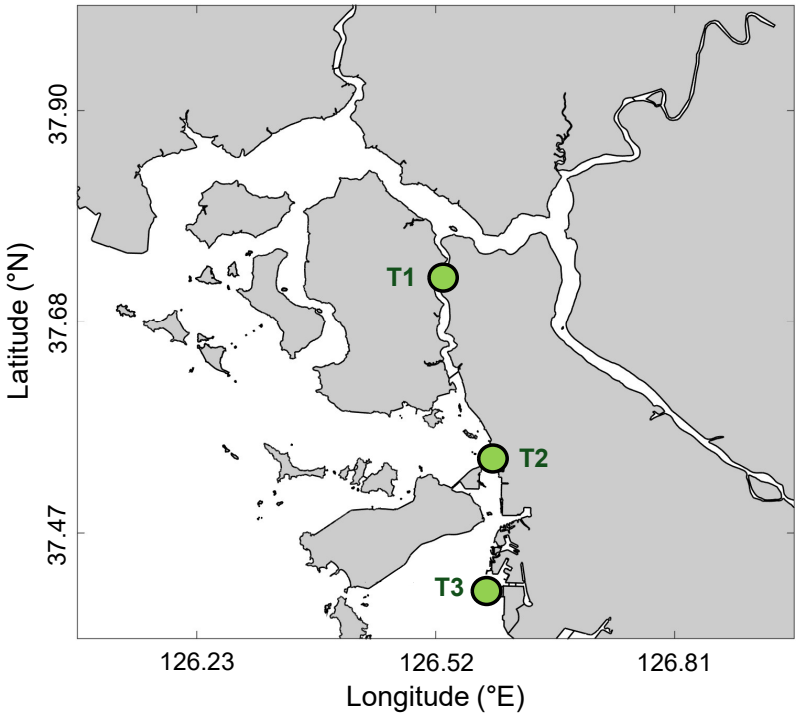
담수 유량이 높게 지속될 경우(연평균 유량의 상위 1% 이상):

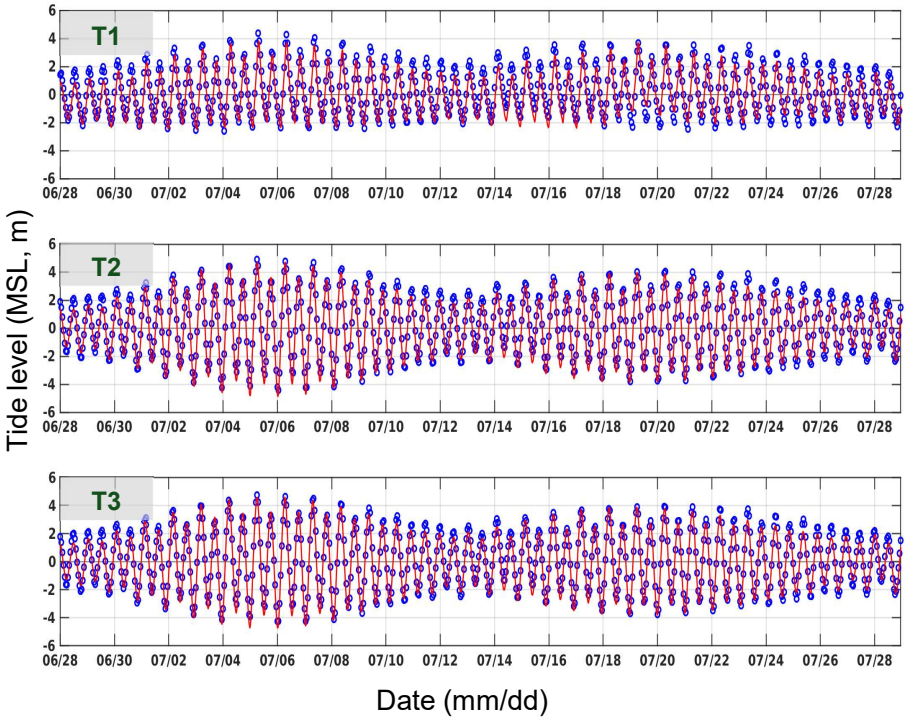
- 한강과 임진강 기원의 drifter들은 강화 북수로를 통해 바로 빠져 나감
- A4 영역의 drifter들은 높은 담수 유량의 영향을 다른 영역에 비해 약하게 받음

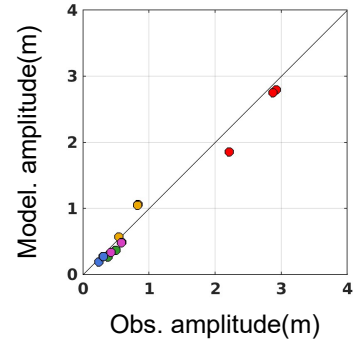
부유 쓰레기 추적 모델 구축 및 모의

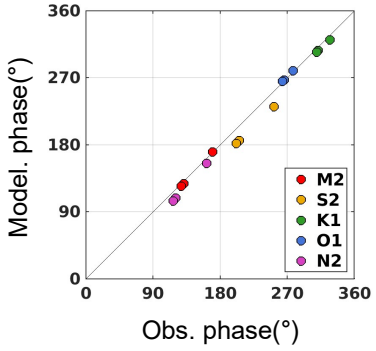
유동 수치 모델 구축(FVCOM)

❖ 조위 검증









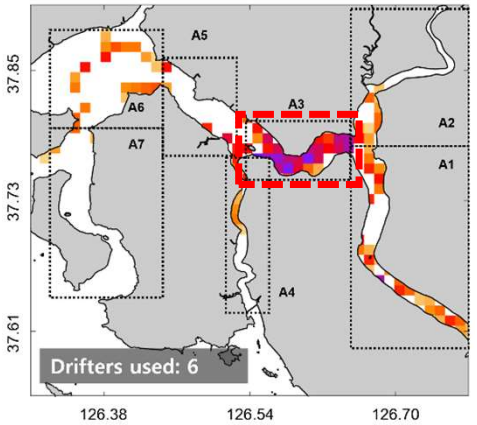
ME	MAE	Skill
-22.03	45.88	0.965
-15.26	39.62	0.987
-15.42	39.06	0.987

- T1~T3 조위검조소 관측 자료 사용
- T1~T3 정점 모두 실측값과 높은 일치도 (skill 0.96 이상)

모델 검증

❖ 실제 부이 및 OpenDrift 입자 평균 이동 속도 비교

바람 계수 (%)	R	P
1	0.185	0.27
2	0.376	0.0045
3	0.37	0.025
4	**0.39**	**0.016**
5	0.318	0.055



$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{N}(y_i - \bar{y})^2}}$$

$$t = \frac{r\sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r^2}}$$

$$p\ value = 2 \cdot P(t > |t_{calc}|), t \sim t_{N-2}$$

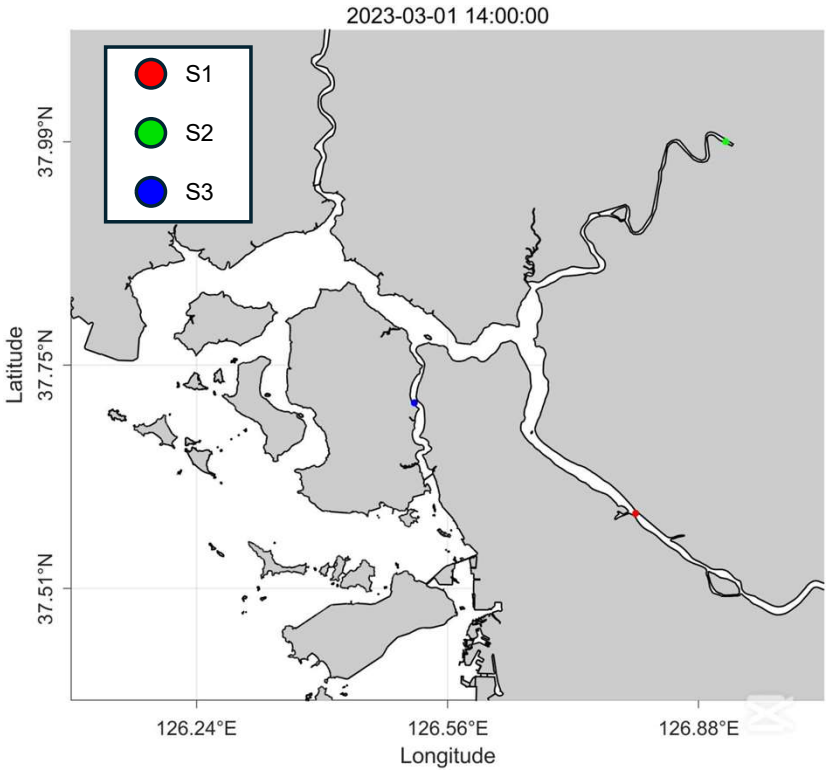
x_i: 모델값
y_i: 관측값
N: 모델값

- A3 영역에 한해 실제 부이와 OpenDrift 입자의 평균 이동 속도 비교
- 1~5% 바람계수 중 4%에서 가장 상관 계수가 높게 나타남

모델 입자의 이동 경로 및 체류 기간

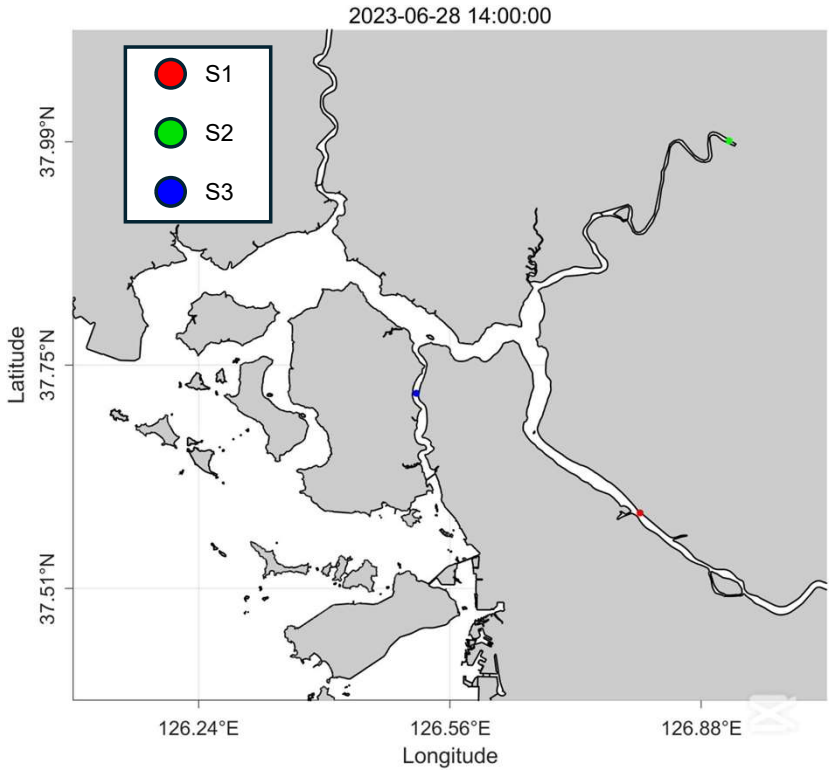
❖ 갈수기/홍수기 별 모델 입자 이동 경로

갈수기



- 입자 대부분 수로를 벗어나지 못함
- 밀집되어 움직임

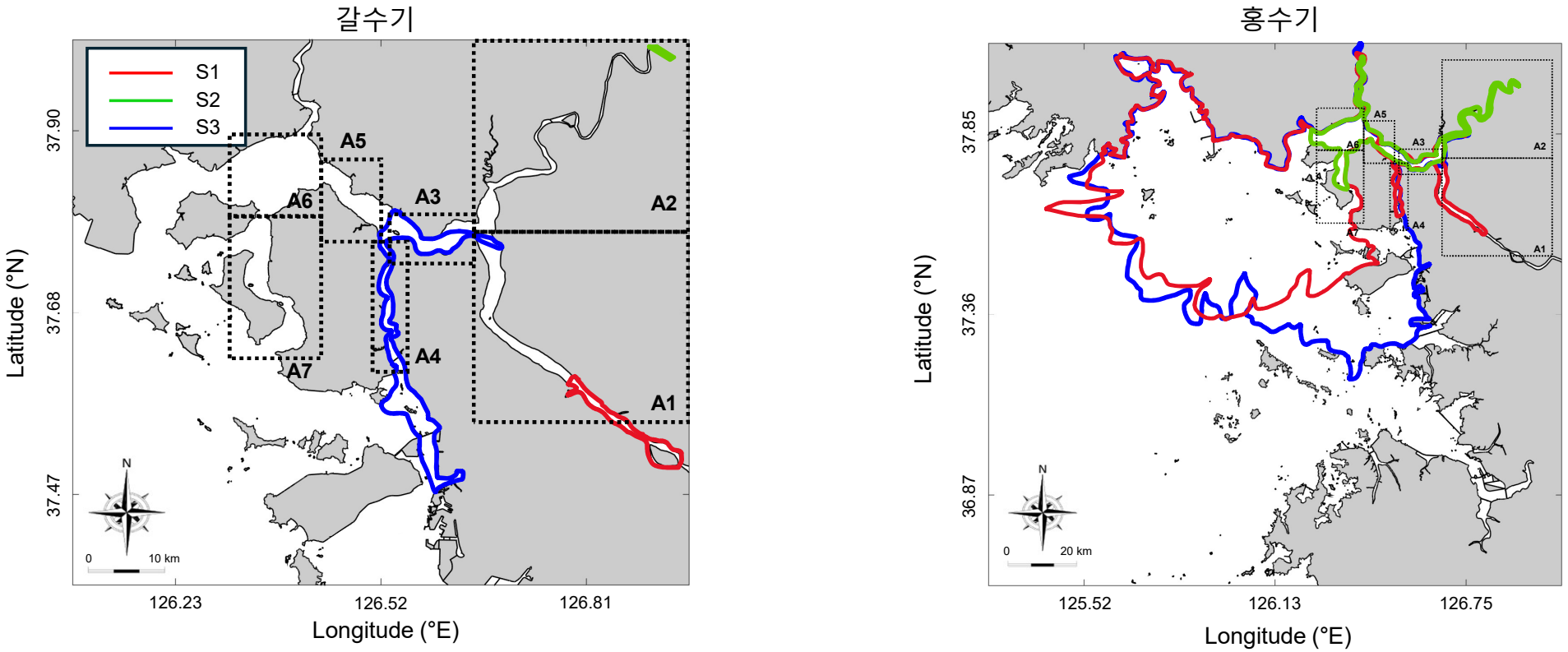
홍수기



- 대부분 외해로 유출됨
- 담수 유량이 급증 시 S2 정점 입자 이동

모델 입자의 이동 경로 및 체류 기간

❖ 담수 유량에 따른 OpenDrift 입자 이동 범위

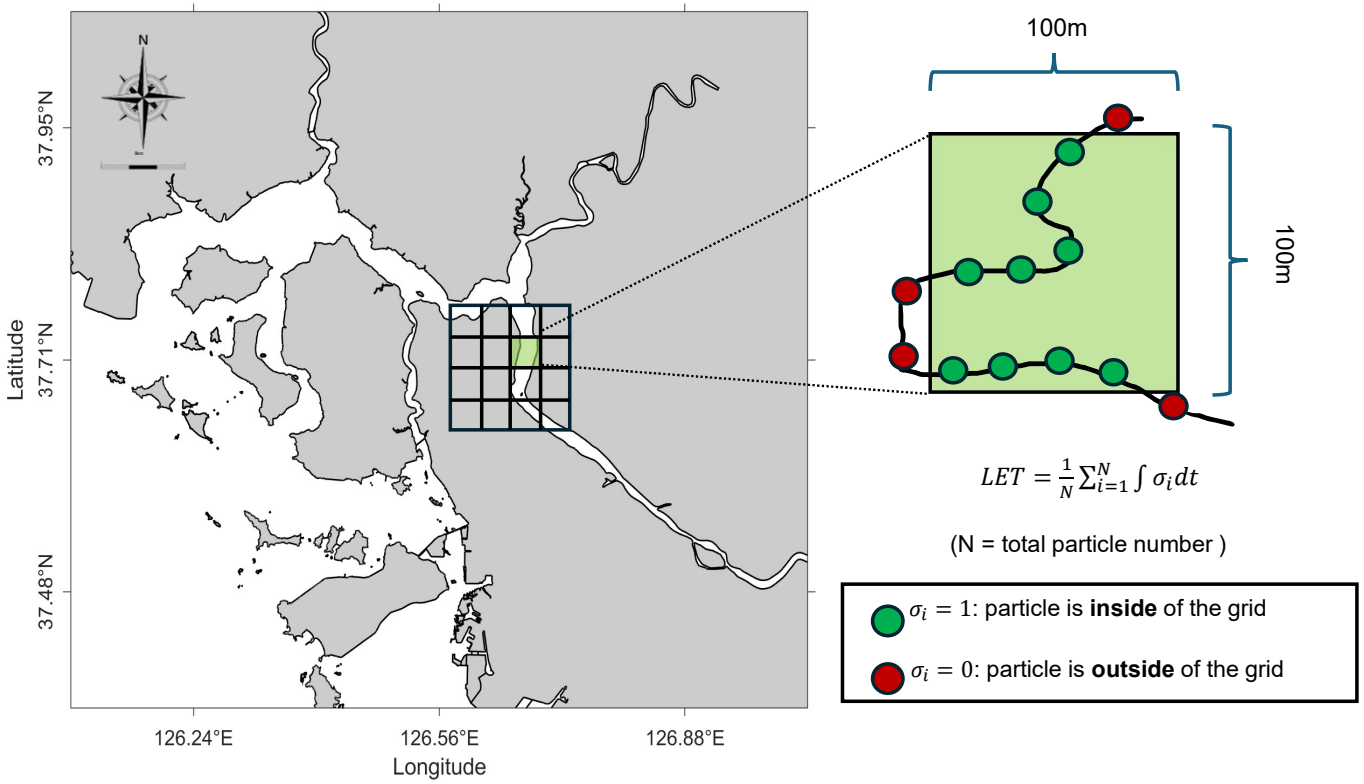


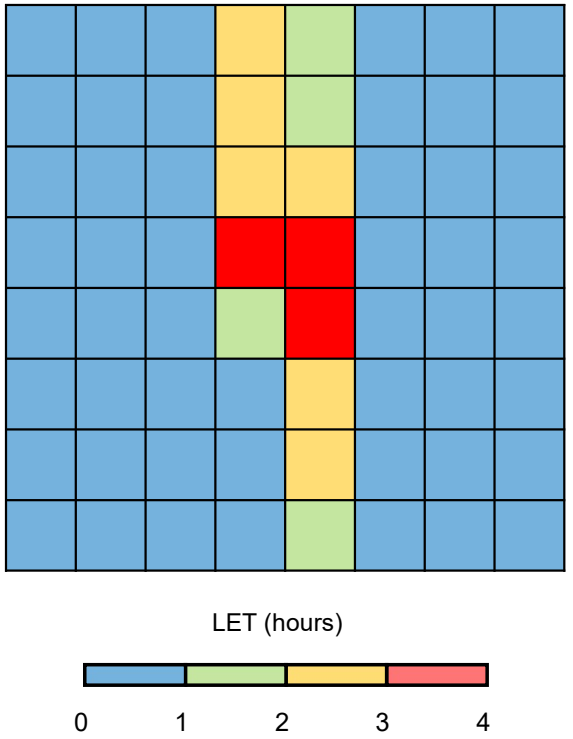
- 갈수기 이동 범위(118 km^2)에 비해 홍수기 이동 범위(5016 km^2)가 약 42배 증가

  ➔ 표층 쓰레기의 이동 범위와 발생량은 담수 유량에 영향을 받음

체류 시간 분석

❖ **GPS drifter 및 모델 입자 장기 체류 지역 분석 (Local Exposure Time, LET)**



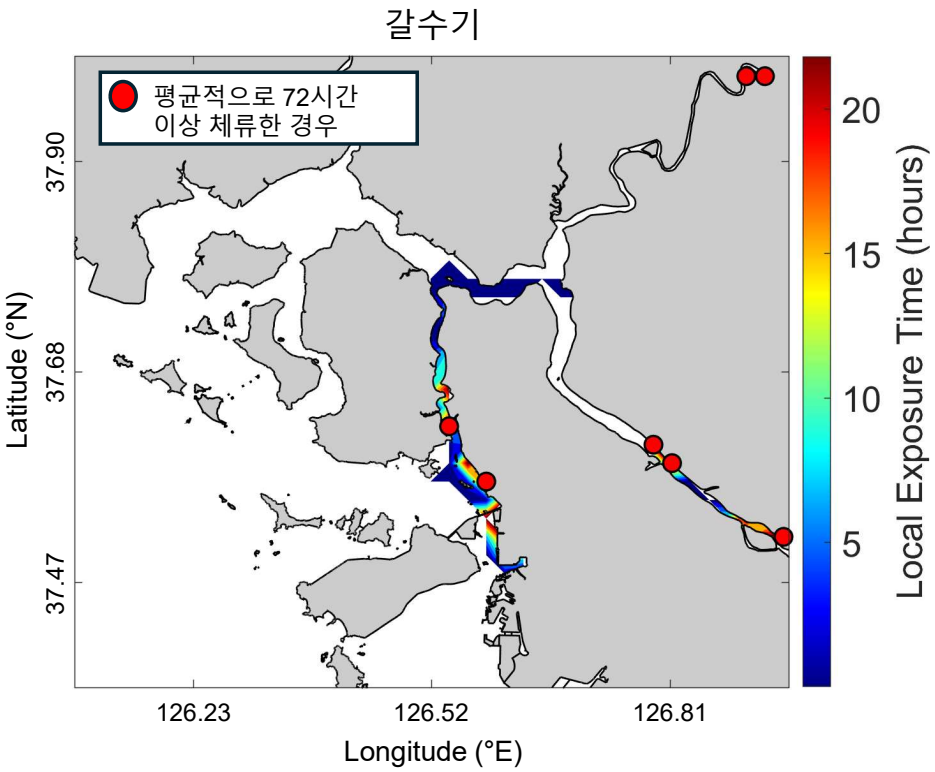


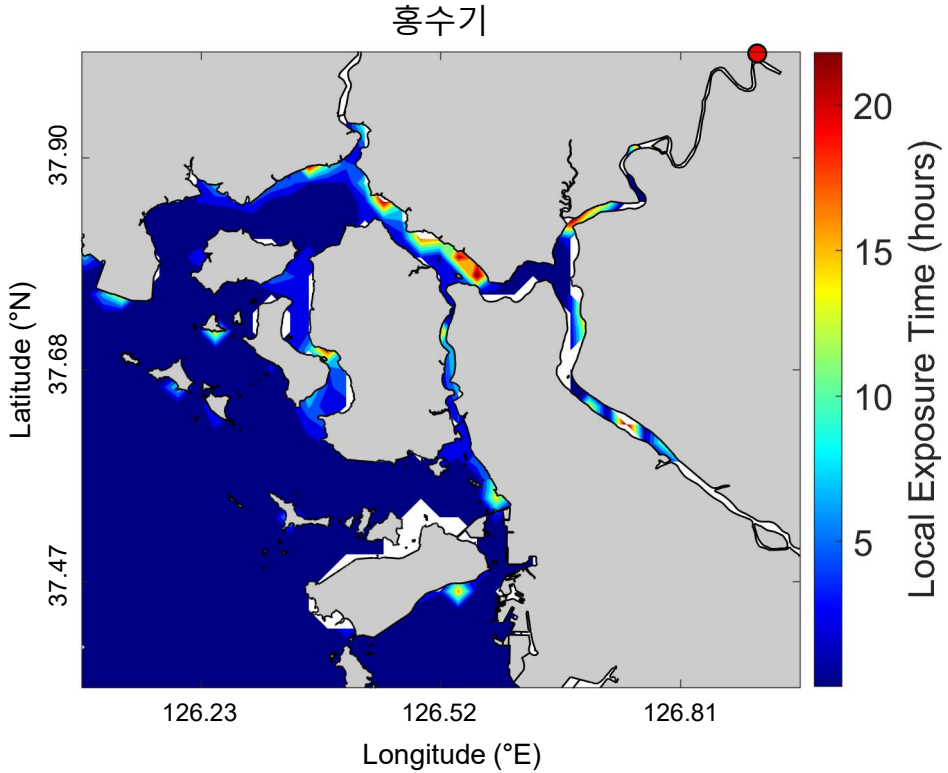
- 격자별 평균 체류 시간 분석
- 입력자료별 주요 체류지 확인

- LET 높은 영역:
  입자 다수·장기 체류

모델 입자의 주요 장기체류 지역

❖ 시기별 입자 체류 지역 변화





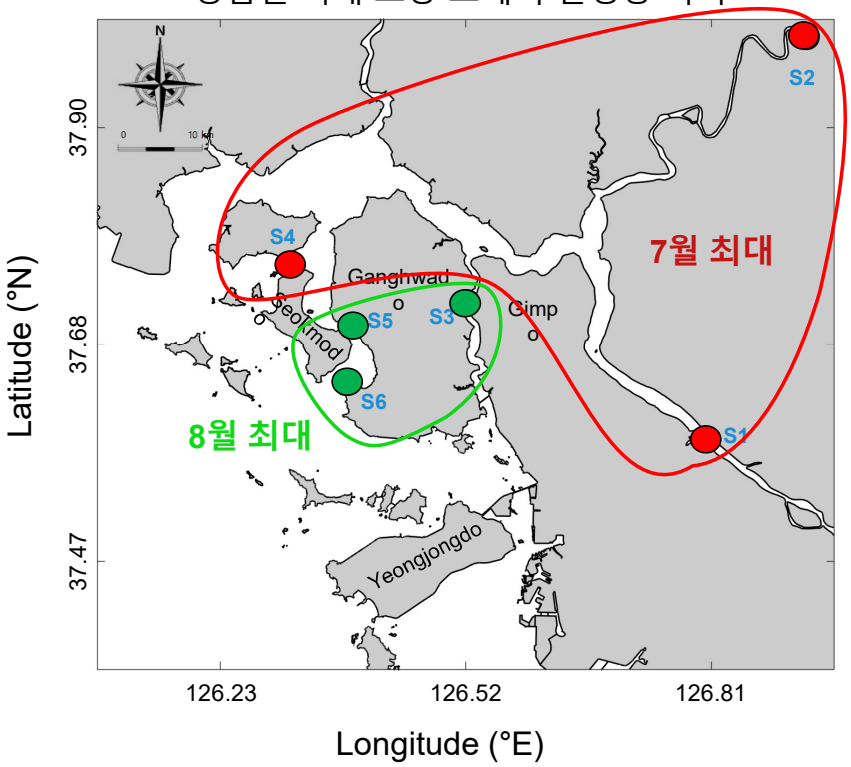
- 최대 체류 시간: 갈수기 682시간/ 홍수기 204시간 (모두 비룡대교 인근)
- 홍수기에는 입자 대부분이 3일 이내 유출되어 장기 체류 사례 적음

토론

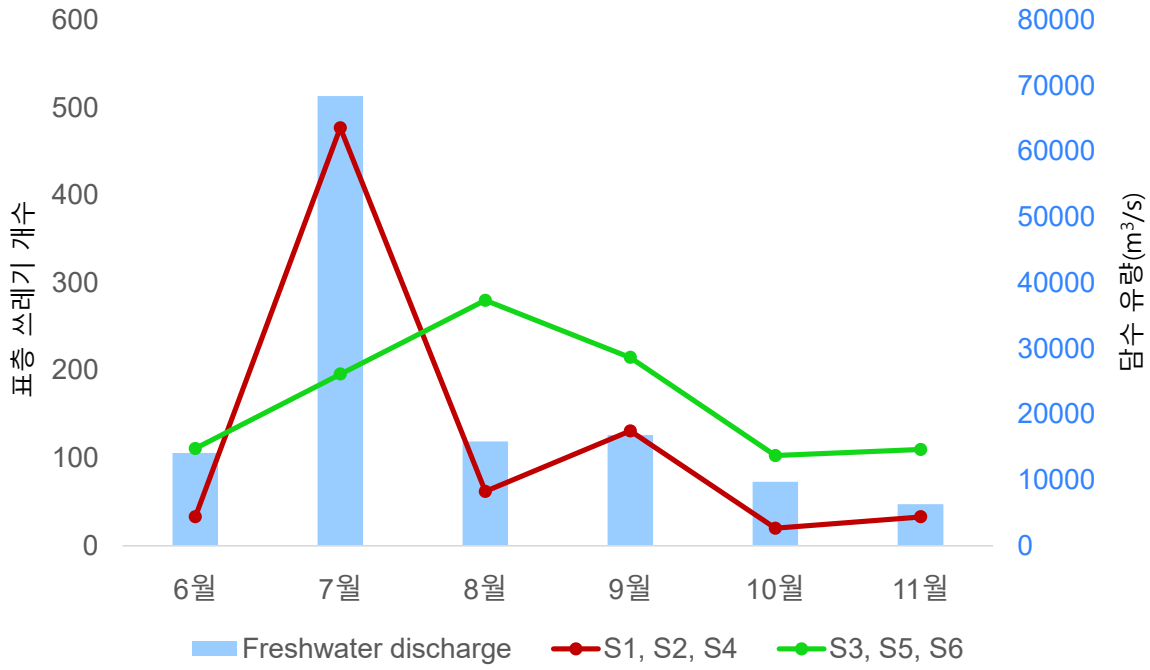
강화도 인근 쓰레기의 장기 체류

❖ 정점별 최대 표층 쓰레기 발생 시기

정점별 최대 표층 쓰레기 발생량 시기



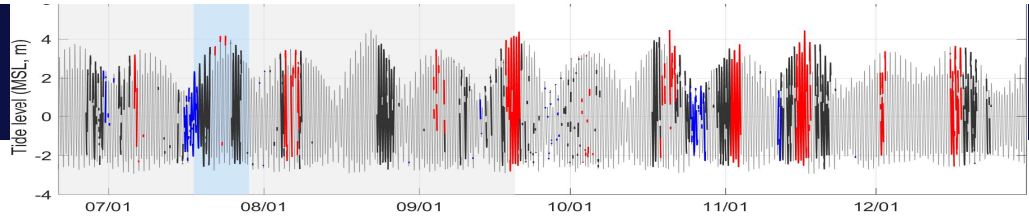
월평균 담수 유량 및 표층 쓰레기 발생량



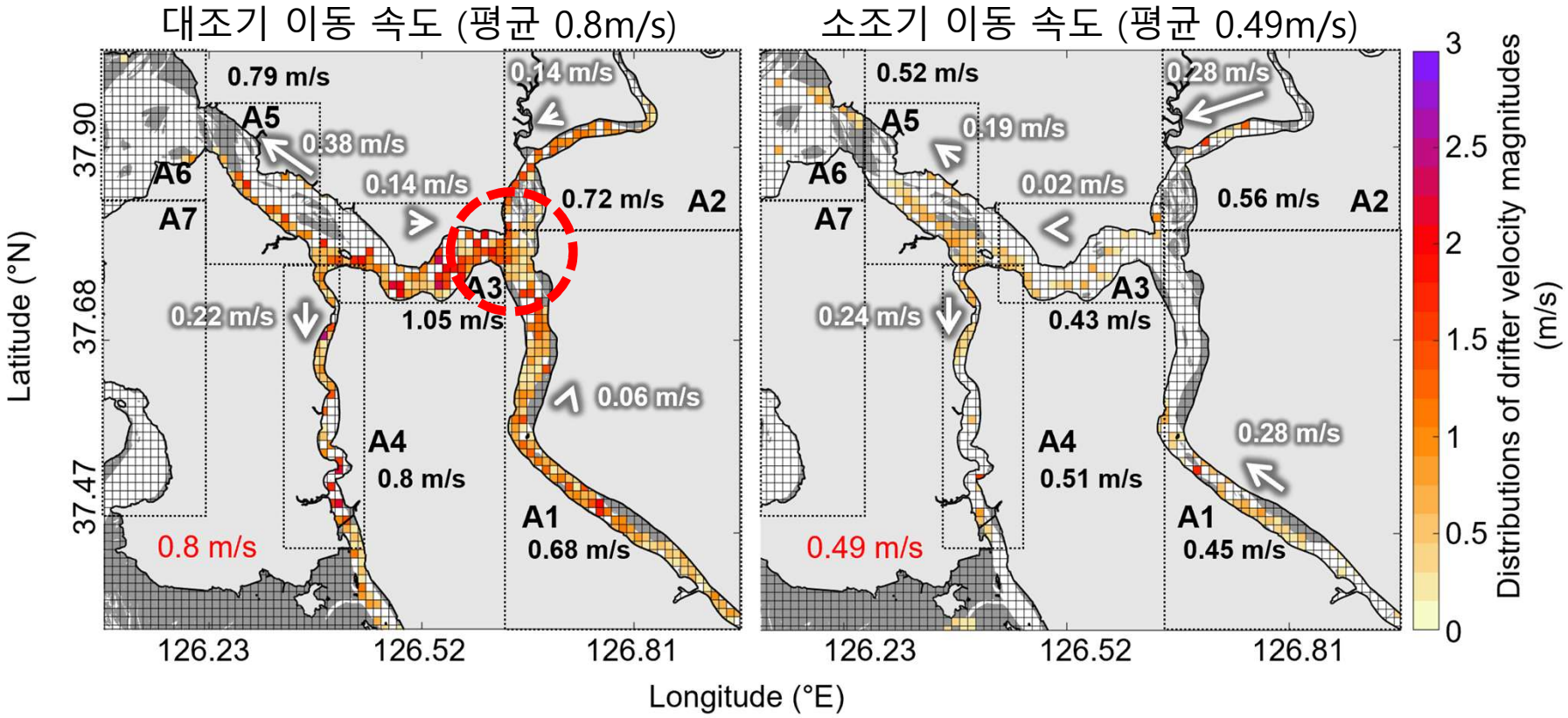
- 한강·임진강 유입량 감소에도 불구하고, 강화도 인근 표층 쓰레기 증가(8월)

  ➔ 7월 대량 유입 쓰레기 일부가 강화도 인근에 잔류한 것으로 추정

GPS drifter 조사 결과



❖ 대조, 소조별 평균 이동 속도



- 소조기 : 외해 유출 / 대조기 : 부유 쓰레기는 A3 영역에서 평균적으로 하구 안쪽으로 유입

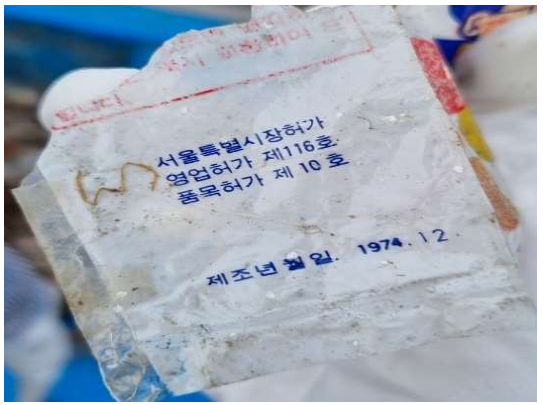
  ➔ 부유 쓰레기는 대조 시 외해로 빠져나가기 어려우며, 강 하류 부근에서 장기체류 할 가능성이 있음

2000년도 이전 제작된 쓰레기







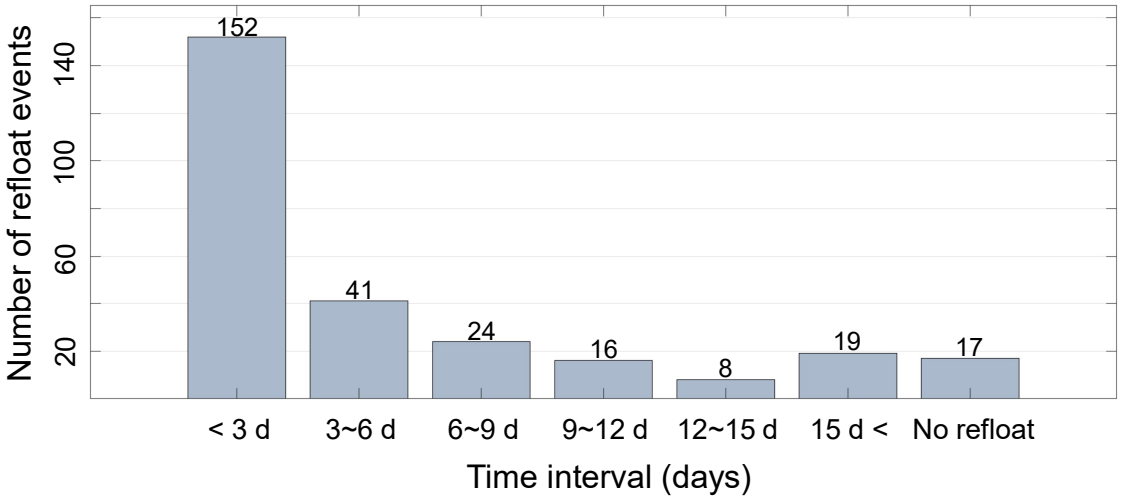



- 2000년도 이전 제작되어 오랜 시간이 지났음에도 인쇄 상태가 양호한 쓰레기가 발견됨
  ➔ 장기간 땅 아래 퇴적되어 오랜 기간 체류했을 것으로 추정됨

강화도 인근 지역의 주요 부유 쓰레기 체류 예상 지역

❖ 모든 GPS drifter 좌초 지점 및 횟수

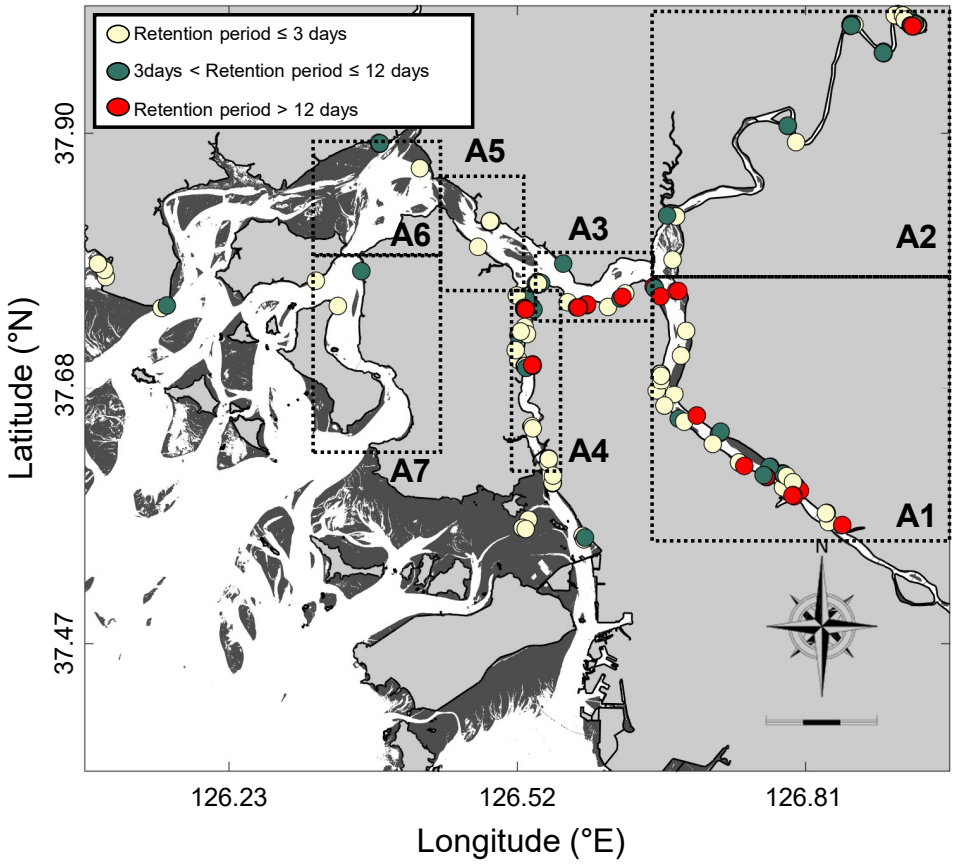
좌초 및 재부유 횟수



- 좌초 기간이 3일을 초과할 경우, 재부유 감소
- 주요 장기체류 지점: A1~A4 조간대 및 강둑 지점

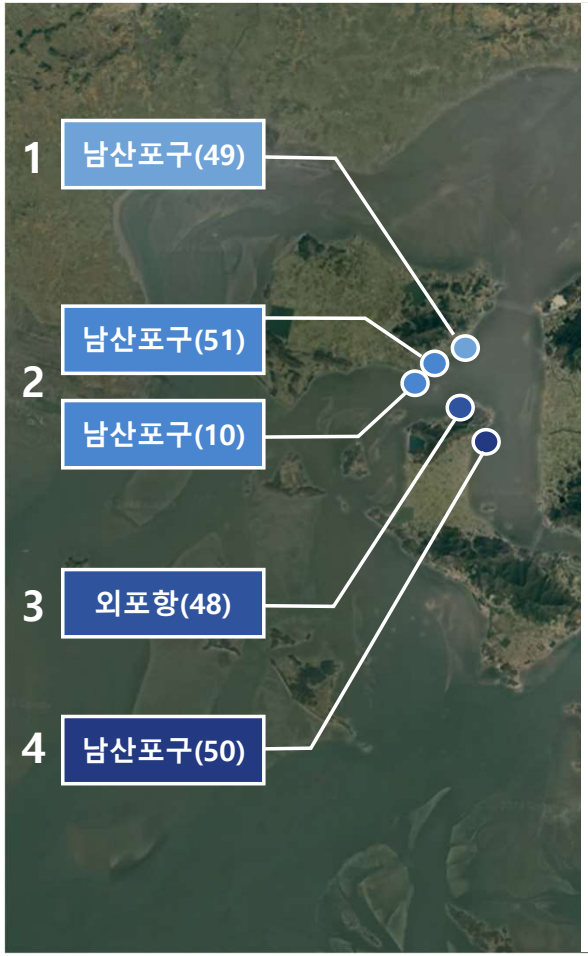
➔ **쓰레기 장기체류의 원인으로 추정됨**

장기 체류 위치



실제 Drifter 좌초 위치

❖ GPS drifter 실제 좌초 지점



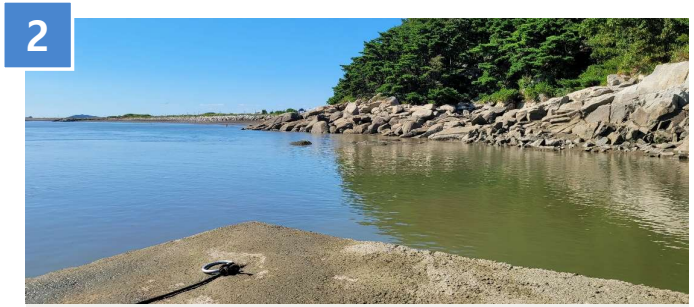
지형 및 좌초 특성: 석모수로의 서쪽

1



- 염생식물 군집
- 유입은 쉬우나 유출 어려움

2



- 돌섬
- 충격에 의한 파손 또는 돌 틈 가림
  → 신호 수신 불량 가능성

3



- 모래, 쇄석
- 민간인 출입 금지 구역

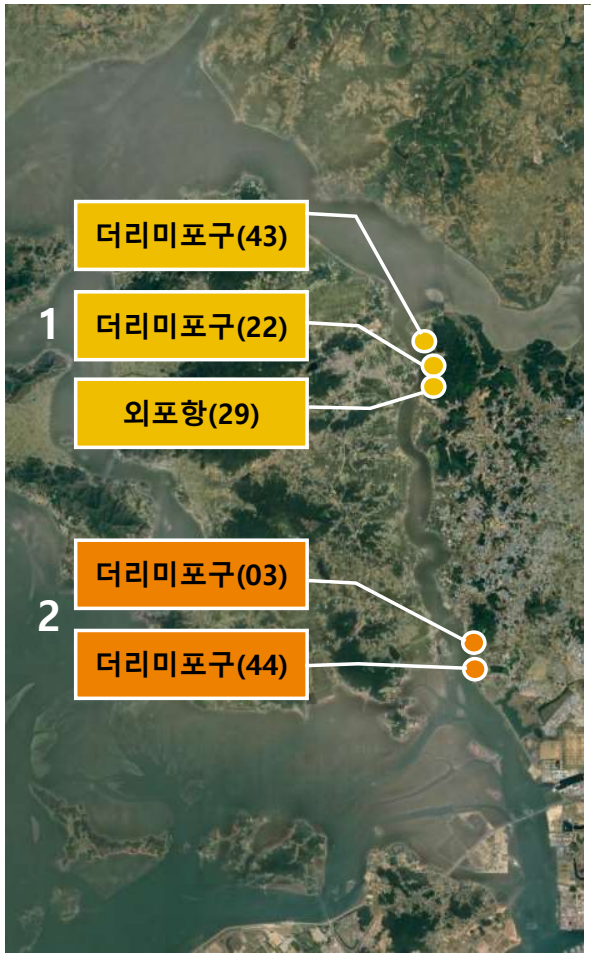
4



- 쇄석
- 쇄석 틈에 껴 해류로도 탈출 어려움

실제 Drifter 좌초 위치

❖ GPS drifter 실제 좌초 지점



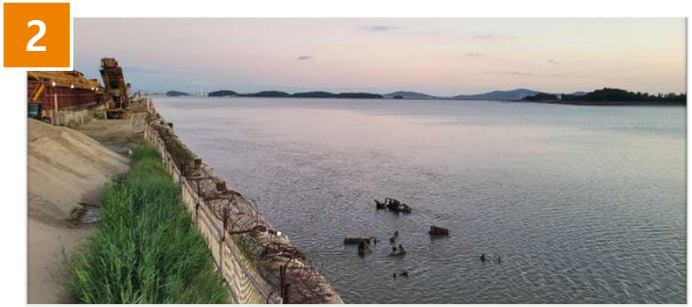
지형 및 좌초 특성: 염하수로의 동쪽

1



- 자갈과 바위
- 파도 영향으로 탈출 어려움, 장기 체류 가능성 증가

2



- 자갈과 바위
- 파도 영향으로 탈출 어려움, 장기 체류 가능성 증가

- 강화도 인근 좌초 지점은 자갈, 쇄석 등 구조적 특성으로 쓰레기 유입은 쉬우나 유출이 어려움
- 파도 영향으로 탈출 어려워 장기체류 가능성 높음
- 민간인 출입 통제 구역 → 수거 어려움 → 좌초되기 전 예방하는 것이 중요

결론

결론

- 부유쓰레기 중 **70%이상이 비닐**류이며, **평균 쓰레기의 발생량**은 (한강, 임진강, 더리미, 후포항, 남산포구, 외포항) 중 **더리미포구(염하수로)가 가장 높음**
- **대조기 시 창조류 우세성**으로 인해, 한강 및 임진강의 부유 쓰레기들은 **김포 북단에서 고립 및 유출이 지연**됨
- **높은 담수 유입 시 한강 및 임진강 기원** 부유 쓰레기들이 **강화 북수로를 걸쳐 직접적으로 외해로 유출됨**
- **높은 담수 유입량**에도 불구하고, **염하수로 기원 부유 쓰레기**들 대부분 **수로 내 이동 및 체류함**
- **홍수기 시** 부유 쓰레기 **유출 범위**가 갈수기에 비해 약 **42배 높음**

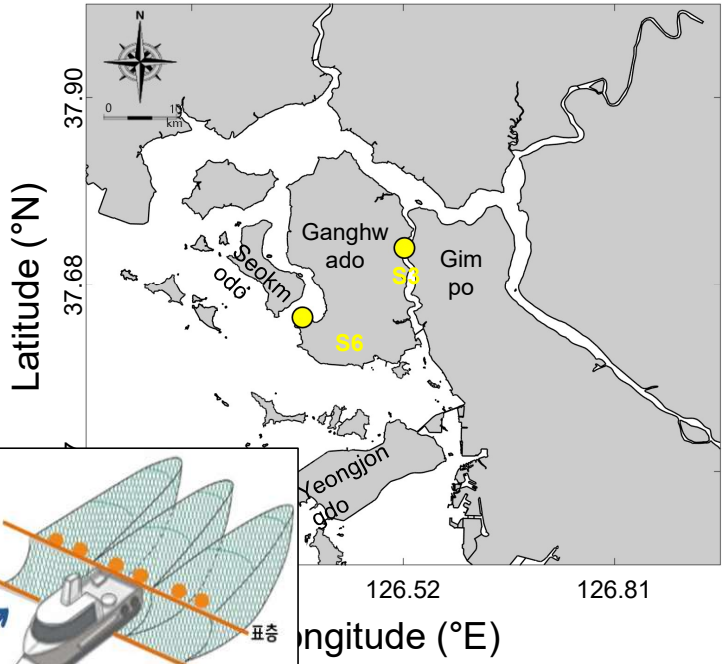
→ 보다 정확한 쓰레기 이동 추적 모의를 위해 수중 쓰레기의 연직 방향 움직임도 추가 고려 필요

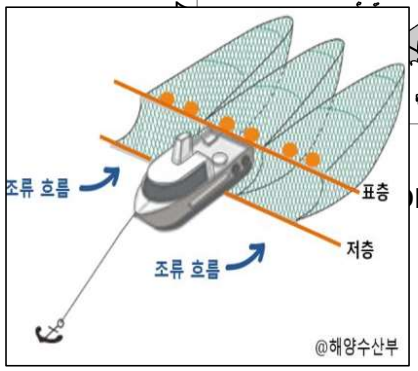
감사합니다

수중 쓰레기 조사 방법

❖ 어구를 활용한 쓰레기 조사

- 안강망 조업 선박 사용
- 낙조 시작 시간부터 2시간 동안 그물 설치





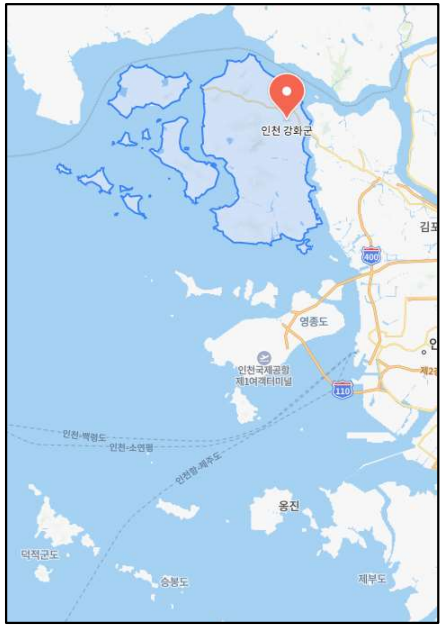
안강망 조업 모식도

Station	Latitude/ Longitude	Mesh size	Observation period	Time interval
S3 Derimi Port (15 observations over 6 months)	37.7258˚ 126.5164˚	1.4 cm	2024.06.26 10:00~12:00 2024.07.16 13:42~15:42 2024.08.23 11:00~13:00 2024.09.19 09:15~11:15 2024.10.17 08:00~10:00 2024.11.15 07:40~09:40	2 hours
S6 Hupo Port (17 observations over 6 months)	37.6411˚ 126.3917˚	2.7 cm	2024.06.25 09:50~11:50 2024.07.26 11:20~13:20 2024.08.24 11:35~13:35	
		1 mm	No observations	
		2.7 cm	2024.10.18 07:40~09:40 2024.11.16 07:10~09:10	

Drifter 유출 범위 정의

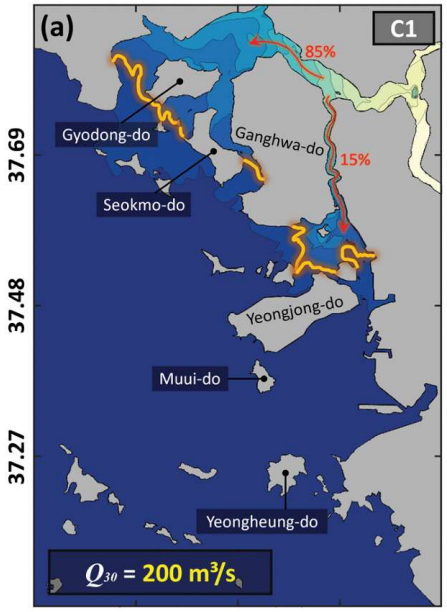
❖ **주요 연구 지역(강화도 부근) 정의:**

행정적 범위



- 강화도, 교동도, 석모도, 볼음도 부근을 포함하여 총 1읍 12면으로 구성

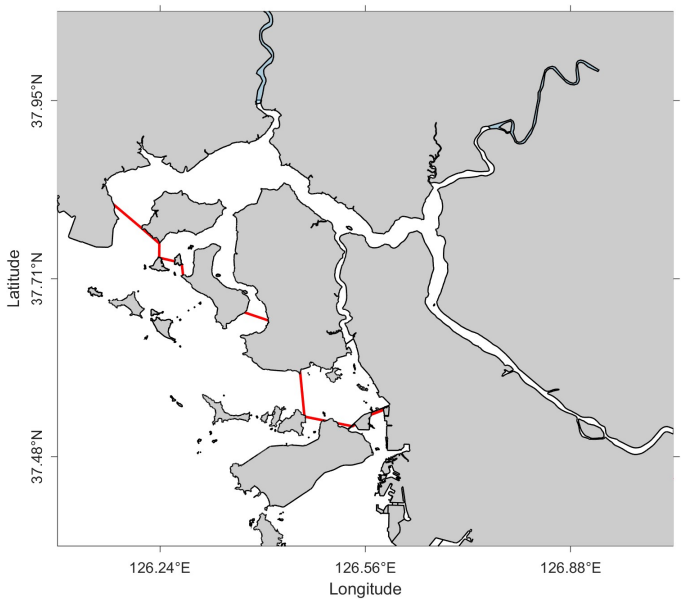
하구적 특성 범위



(Lee et al. 2021)

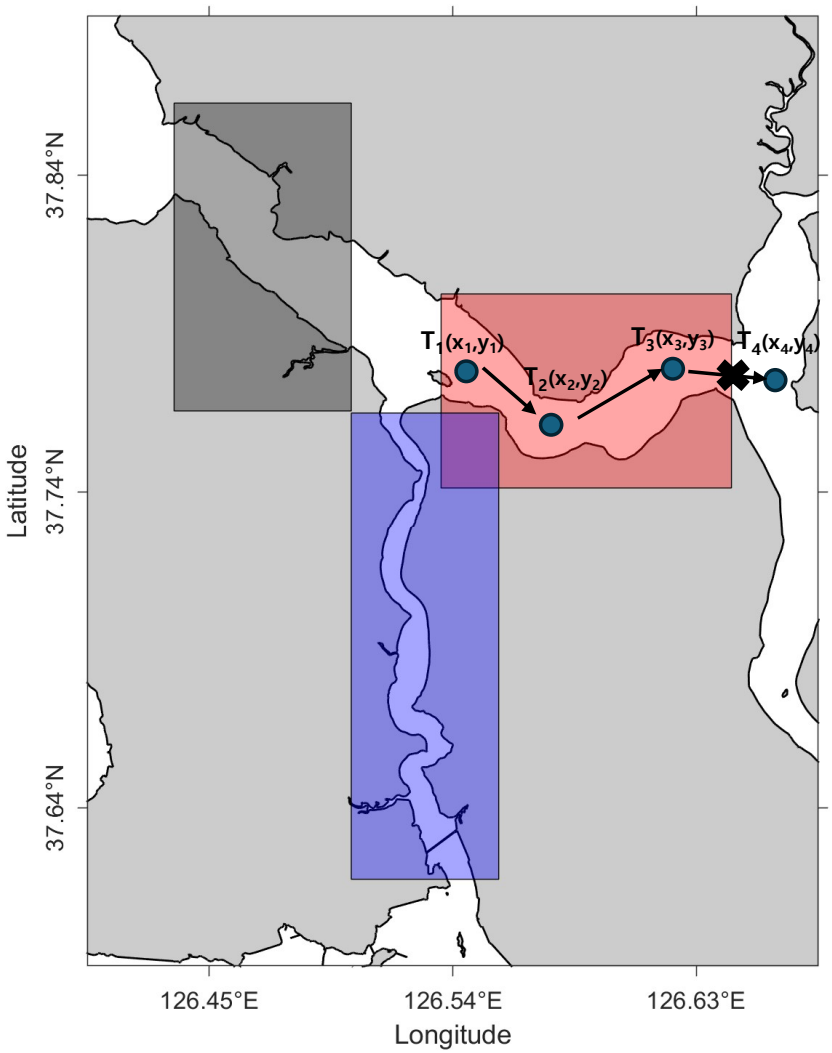
- 갈수기 담수 유량이 영향을 미치는 범위인 석모도 인근 ~ 강화도와 영종도 사이 영역 (Lee et al. 2021)

강화도 부근 정의

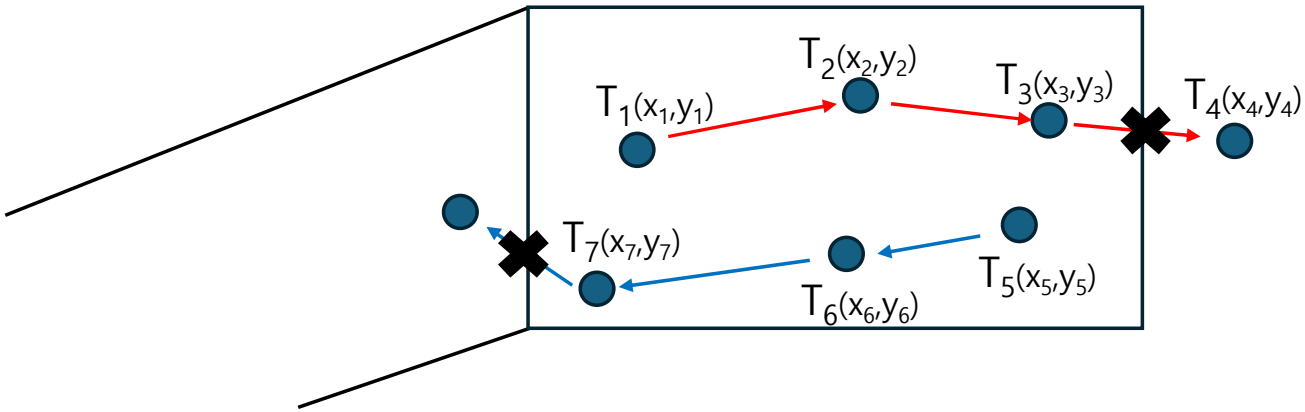


- 하구 특성 상 표류물 이동에 담수 영향이 포함됨
- **강화 북수로, 염하수로, 석모수로와 교동도~석모도 인근까지 "강화도 부근 "** 으로 정의

조석에 따른 부이 이동 패턴



부이가 영역 내부에 위치할 때만 이동속도 계산



- **부이 이동 속도 계산:**
  - 부이의 이동 경로 중 영역 안쪽에 위치한 경우만 잘라 사용
  - 부이 이동 거리(m)/이동 시간 간격(600s) → 부이 이동 속도(m/s)
  - 영역 내 움직인 모든 부이 이동 속도를 평균하여 영역 밖으로 탈출하기 위한 필요 시간 계산

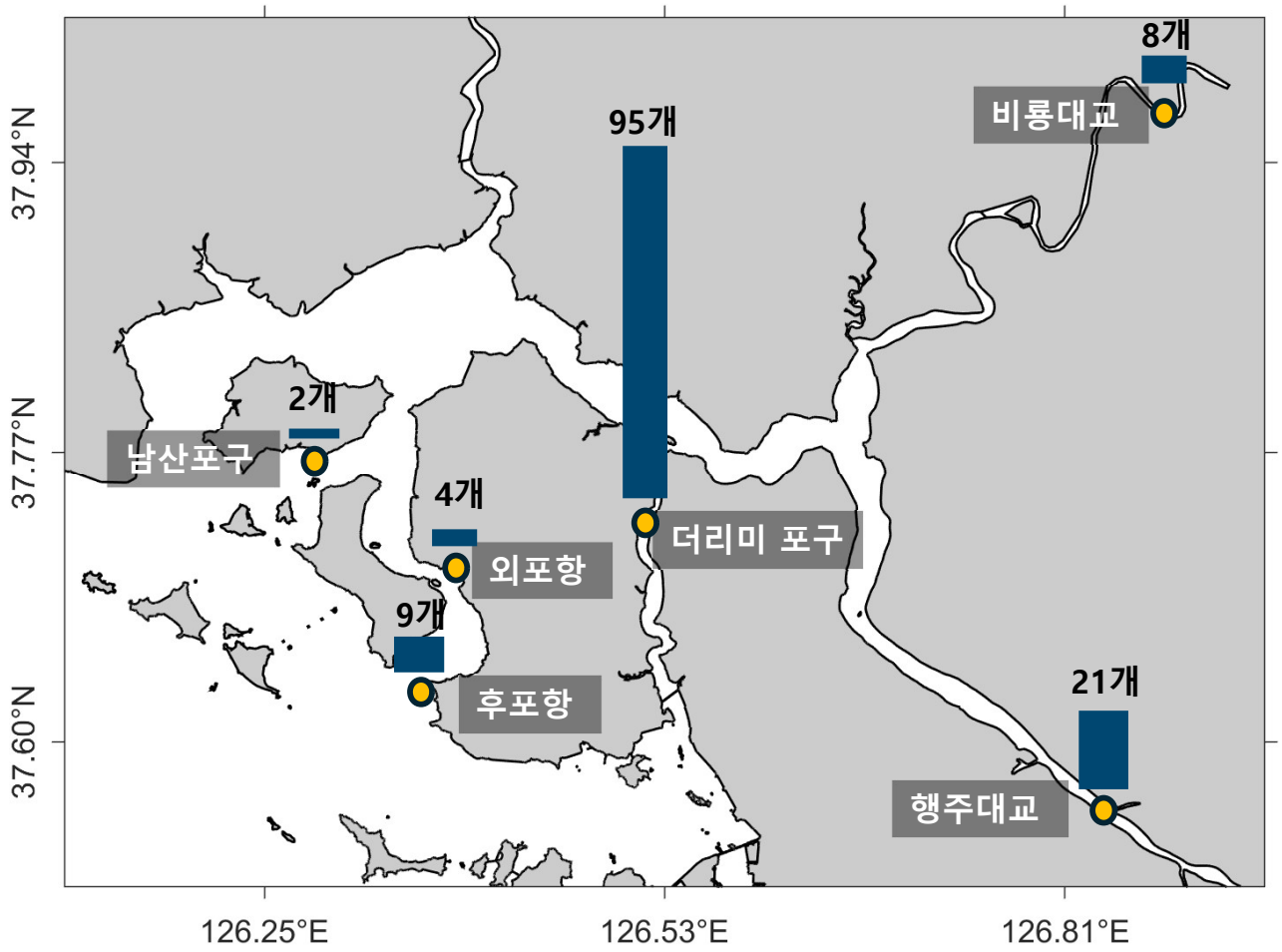
$$u = \frac{T_{ii+1} - Ti_i}{dt} = \frac{x_{ii+1} - xi_i}{dt}$$

$$v = \frac{T_{ii+1} - Ti_i}{dt} = \frac{y_{ii+1} - yi_i}{dt}$$

월별 표층 쓰레기 발생량 (정점별)

표층 쓰레기의 발생 및 계절적 변화

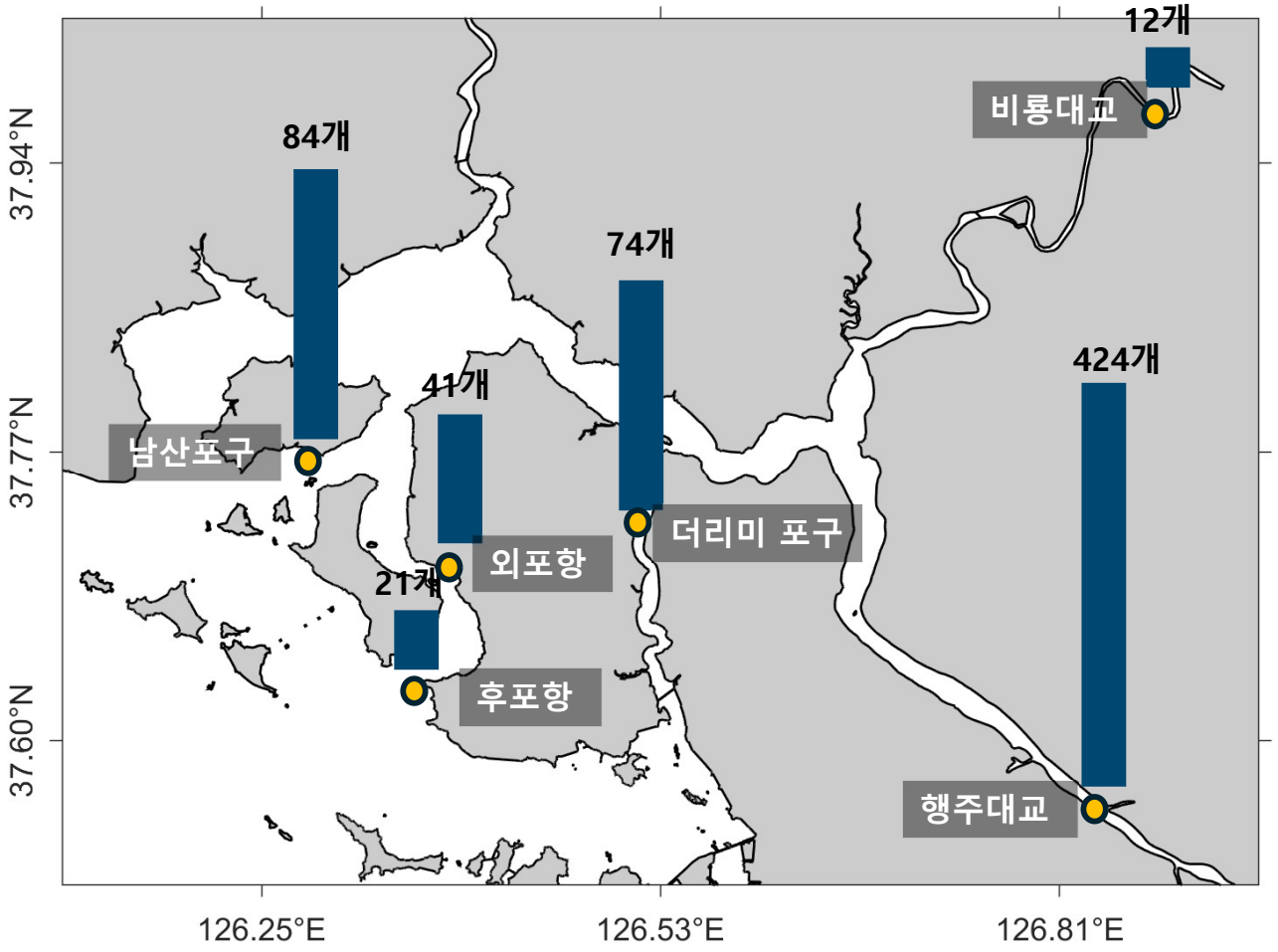
❖ 6월 정점별 표층 쓰레기 개수



- 육상(한강, 임진강) 유입량: 총 29개
- 강화도 인근 체류 쓰레기량: 총 110개
- 육상(한강, 임진강) 유입량 대비 강화도 인근(더리미 포구) 쓰레기 개수 증가

표층 쓰레기의 발생 및 계절적 변화

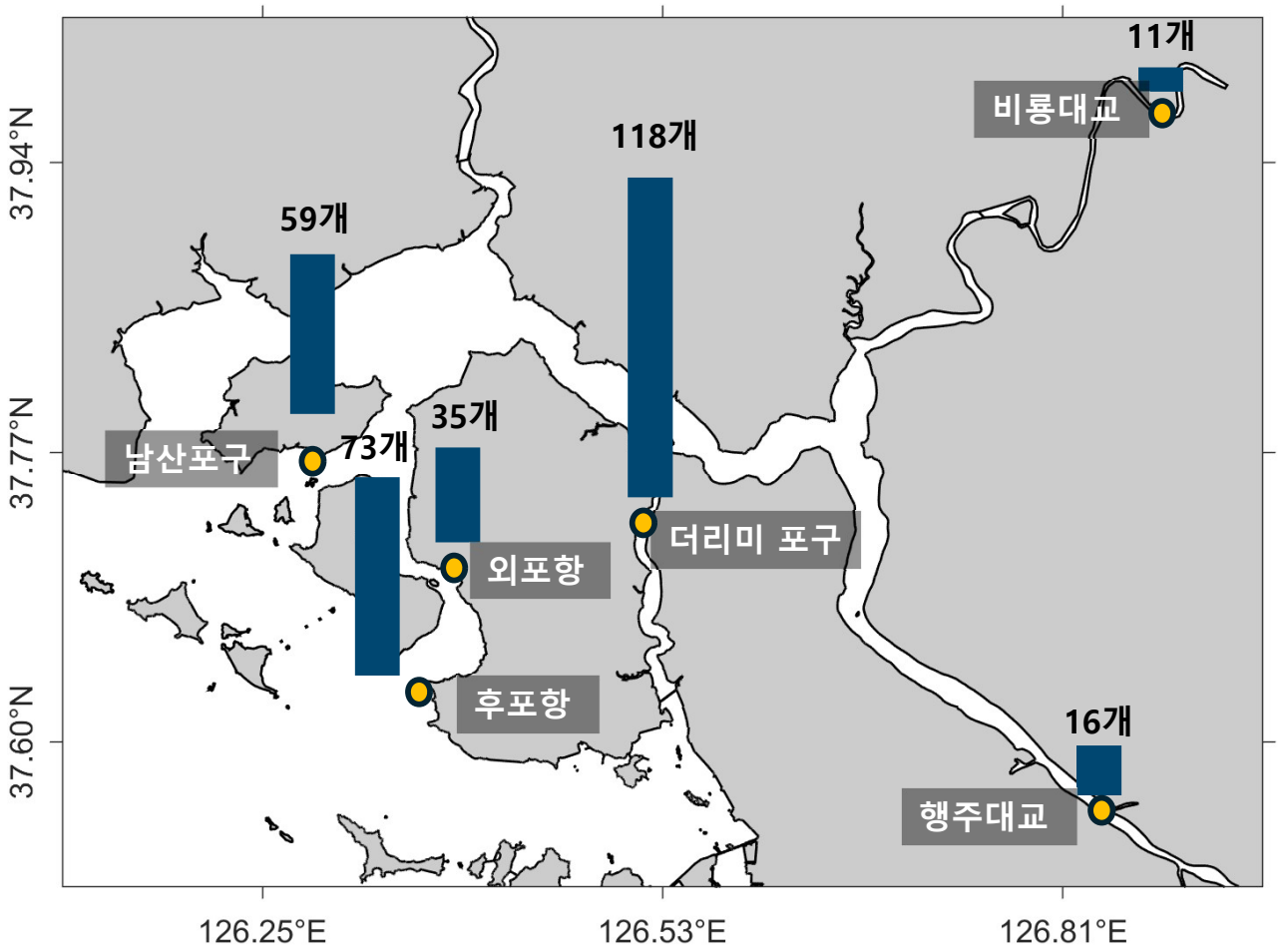
❖ 7월 정점별 표층 쓰레기 개수



- 육상(한강, 임진강) 유입량: 총 453개
- 강화도 인근 체류 쓰레기량: 총 220개
- 홍수기 육상(한강, 임진강) 유입량 급증
- 임진강 보다 한강 유입량 크게 증가

표층 쓰레기의 발생 및 계절적 변화

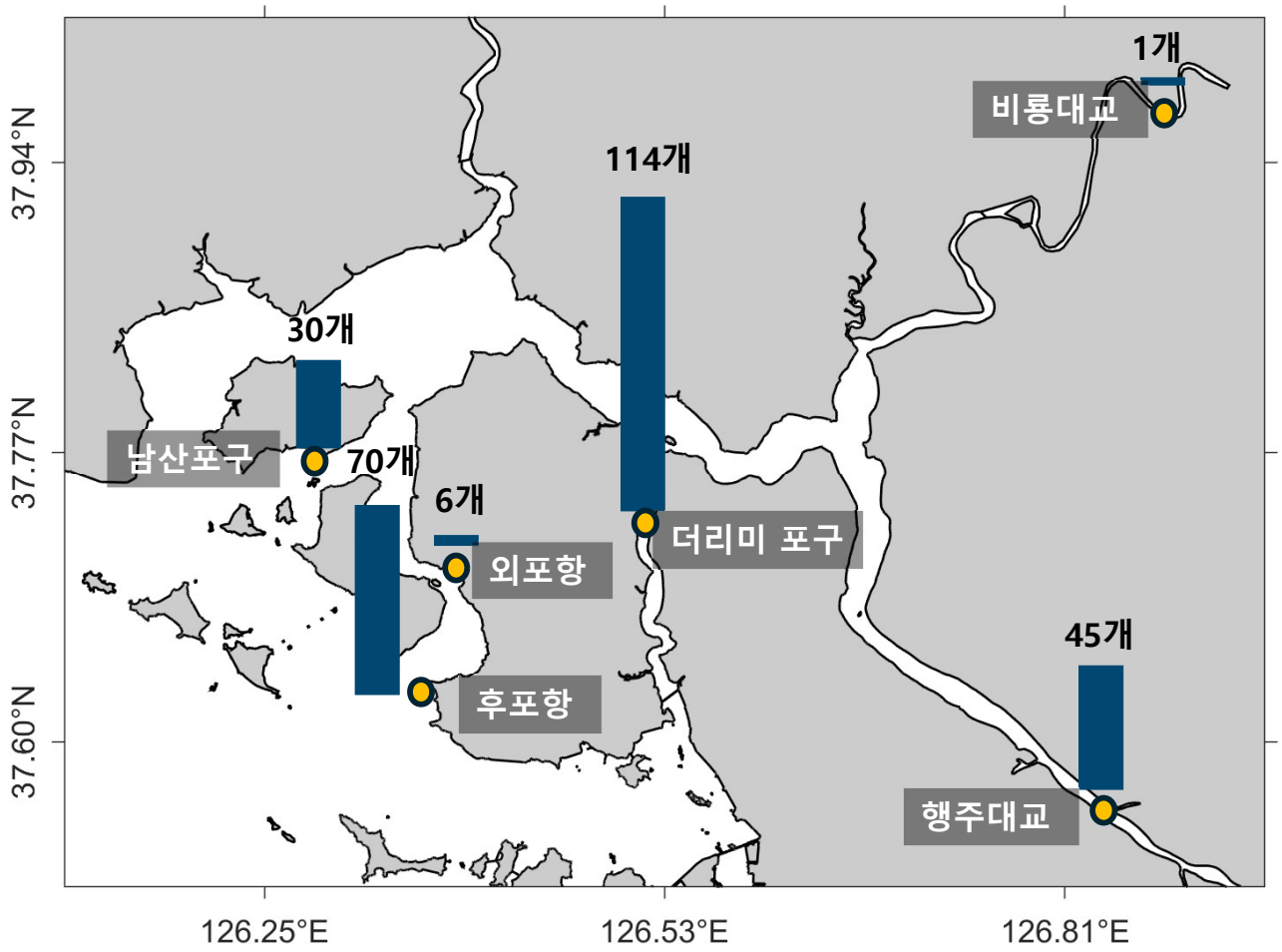
❖ 8월 정점별 표층 쓰레기 개수



- 육상(한강, 임진강) 유입량: 총 27개
- 강화도 인근 체류 쓰레기량: 총 285개
- 육상(한강, 임진강) 유입량이 감소된 반면, 강화도 인근의 쓰레기 개수 증가

표층 쓰레기의 발생 및 계절적 변화

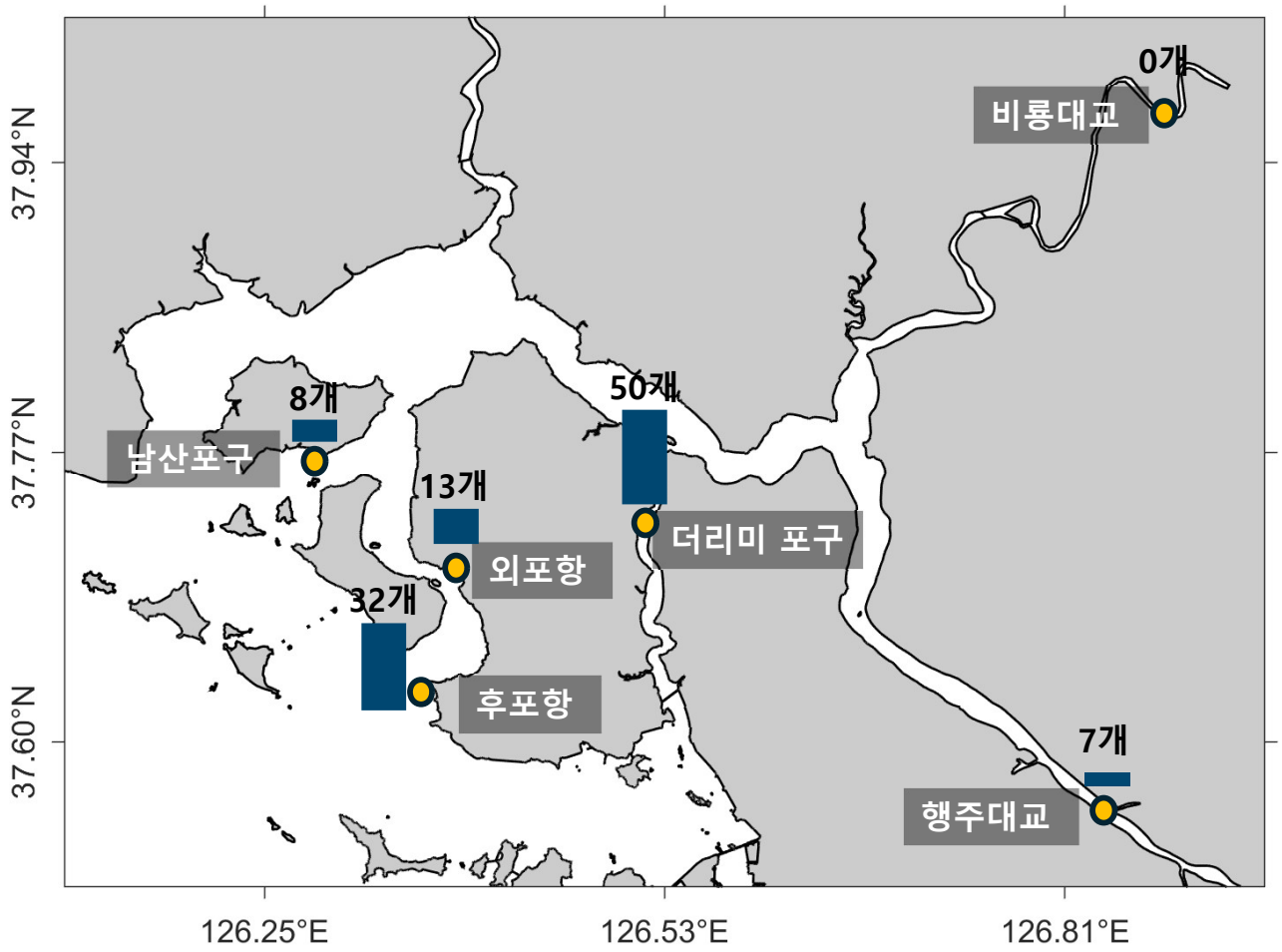
❖ 9월 정점별 표층 쓰레기 개수



- 육상(한강, 임진강) 유입량: 총 46개
- 강화도 인근 체류 쓰레기량: 총 220개
- 육상(한강, 임진강) 유입량이 적은 반면, 강화도 인근의 쓰레기 발생량 많음

표층 쓰레기의 발생 및 계절적 변화

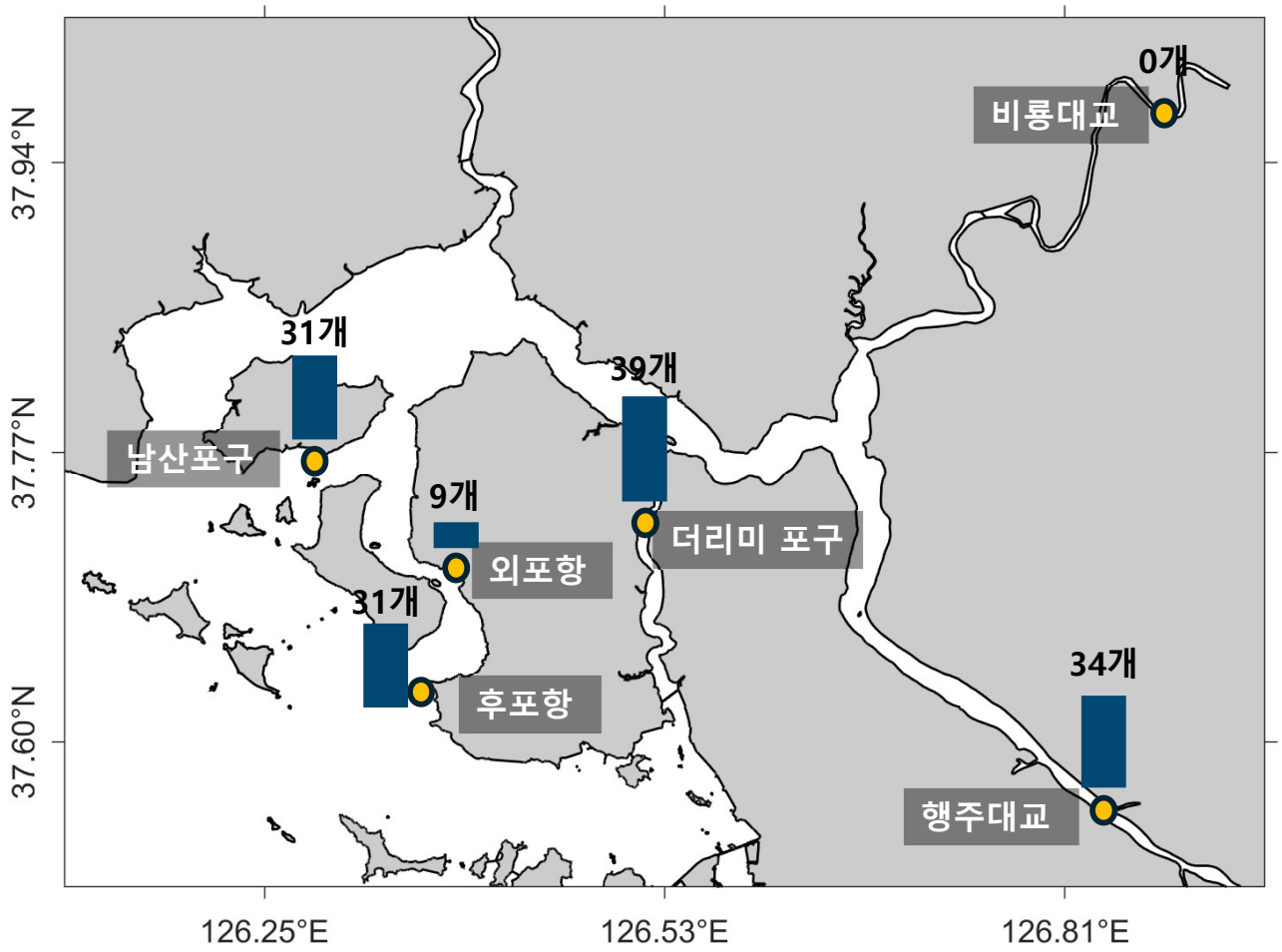
❖ 10월 정점별 표층 쓰레기 개수



- 육상(한강, 임진강) 유입량: 총 7개
- 강화도 인근 체류 쓰레기량: 총 103개
- 육상(한강, 임진강), 강화도 인근 쓰레기 모두 크게 감소

표층 쓰레기의 발생 및 계절적 변화

❖ 11월 정점별 표층 쓰레기 개수



- 육상(한강, 임진강) 유입량: 총 34개
- 강화도 인근 체류 쓰레기량: 총 110개
- 강화도 인근에서 빠져나가는 정점 (남산포구, 후포항)의 쓰레기 관측 증가

부이 형태 변경에 따른 좌초

정육각형 형태(6~8월 사용)

구 형태(9~11월 사용)

