

위성고도계 기반 해류 검증 방안 연구

Verification of Altimetry based Current

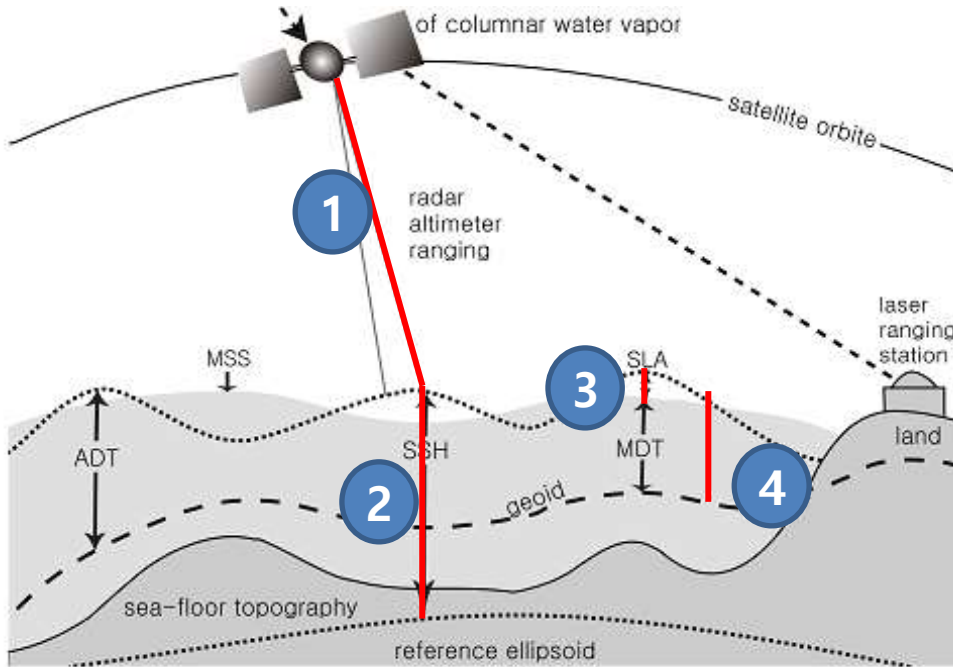


김성중, 손영태, 이성기, 이창호, 김하늘

(주)지오시스템리서치 컨소시엄,
국립해양조사원 국가해양위성센터

인공위성고도계기반 해류

I 고도계 기반 지형류 개념

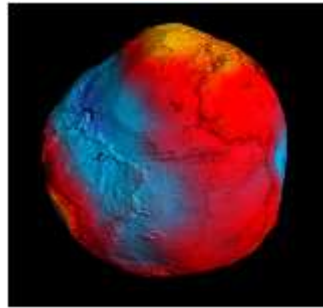
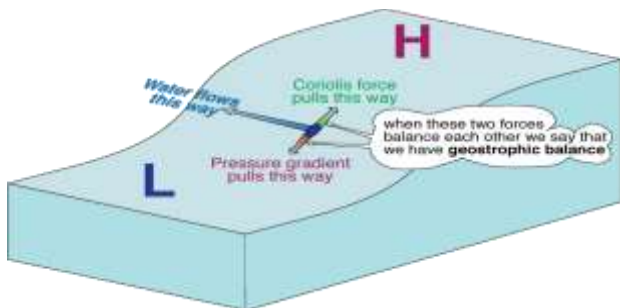
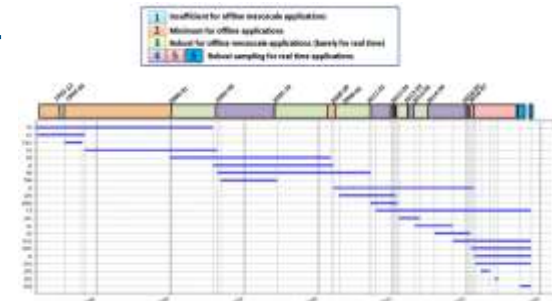


I 고도계 기반 지형류 생성

- ① 측정거리 (range)
 - ↓
 - 해수면 높이(SSH) = 인공위성고도(Altitude) - 측정거리(range) - 보정
- ② 해수면높이 (SSH)
 - ↓
 - 평균해수면(MSS) = 해수면높이(SSH)의 평균
- ③ 해수면편차 (SLA)
 - ↓
 - 해수면편차(SLA) = 해수면높이(SSH) - 평균해수면(MSS)
- ④ 절대역학지형 (ADT)
 - ↓
 - 평균역학지형(MDT) = 평균해수면(MSS) - 지오이드(Geoid)
 - ↓
 - 절대역학지형(ADT) = 해수면편차(SLA) + 평균역학지형(MDT)

I 고도계 기반 지형류 품질 개선중

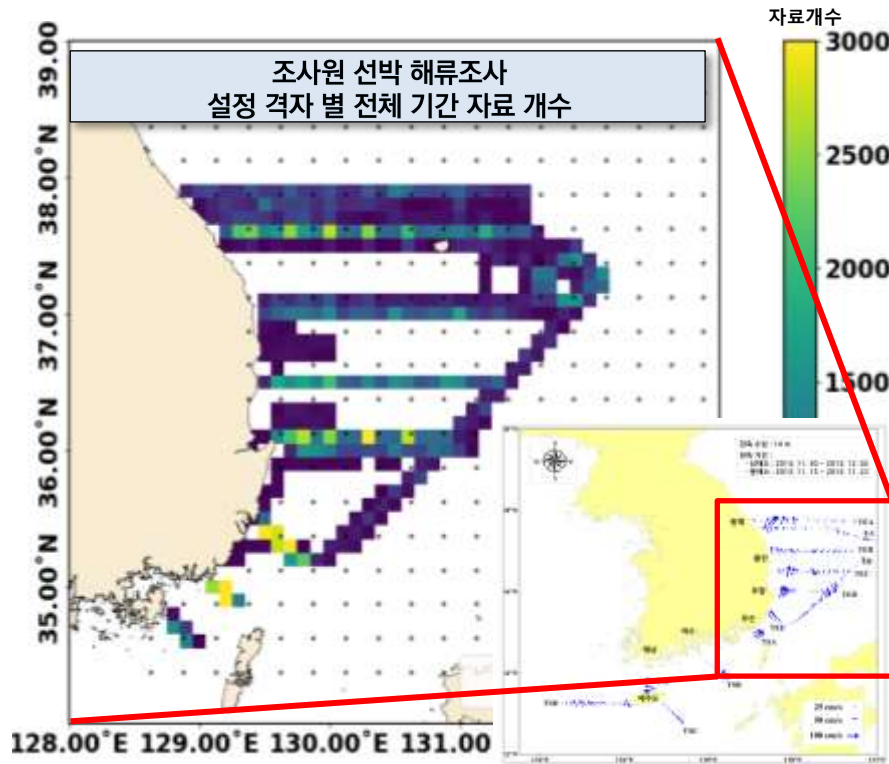
- 신호 보정 알고리즘 향상
- MDT개선: MSS, Geoid 개선
- 계산 방식 개선
- 고도계 수 증가



현재 자료의 정확도를 검증하고 개선할 수 있는 가능성을 탐색

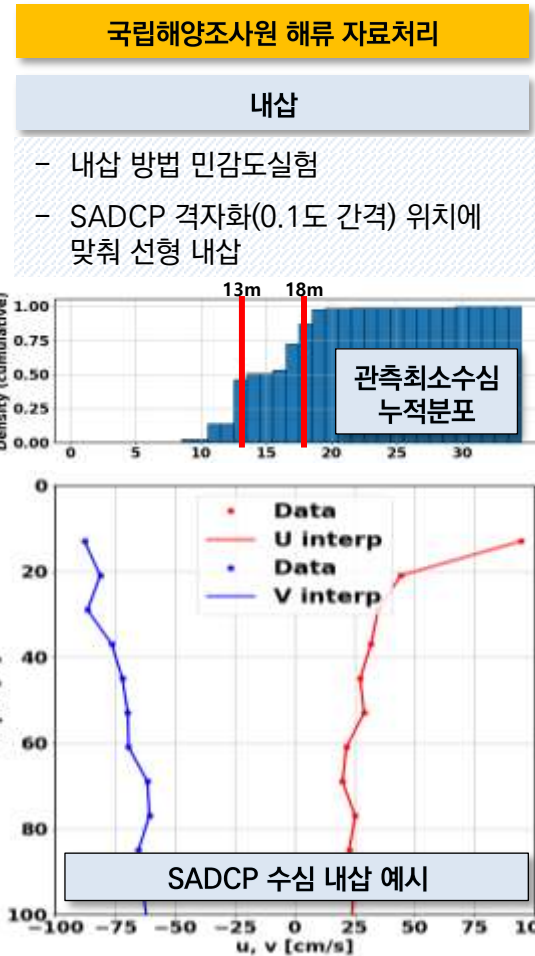
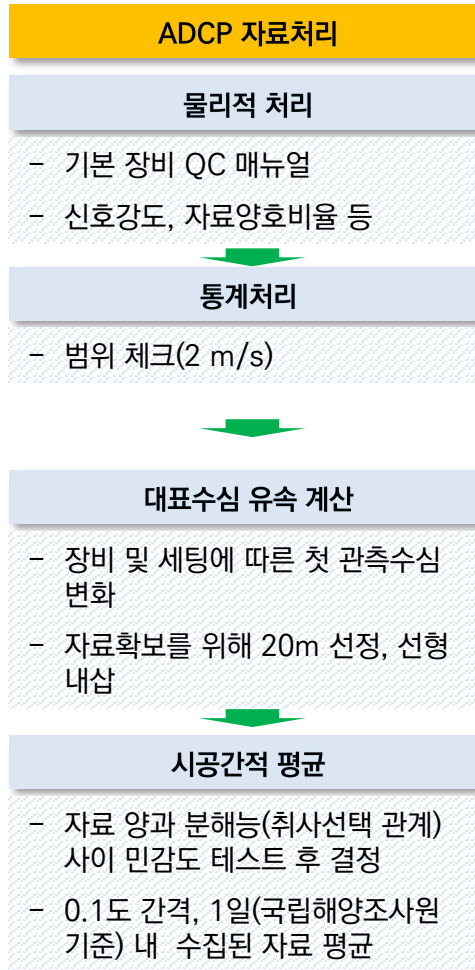
장기해류관측: 선박해류관측(SADCP)

I 자료 개요



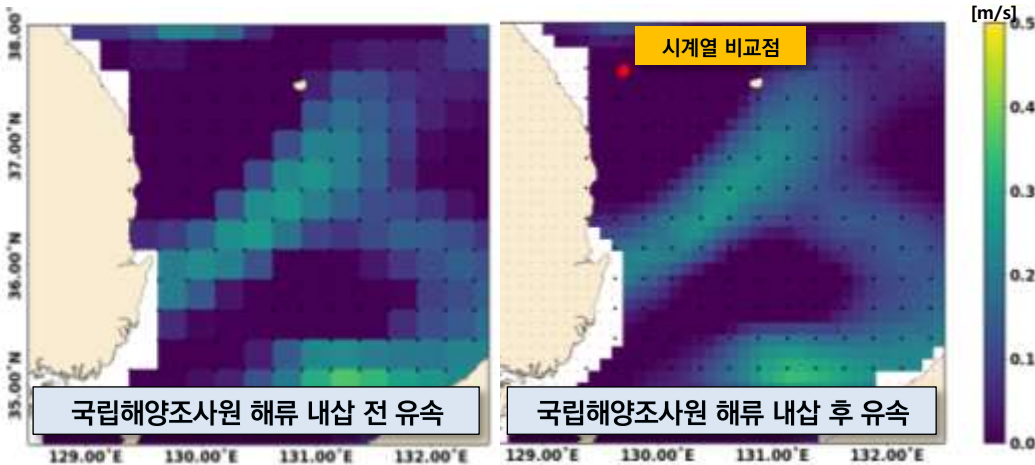
- ✓ 2010~2020년, 분기별 관측자료
- ✓ 동해안 및 남해안 일부 관측자료(국립해양조사원 표층해류 격자 내)
- ✓ 0.1도 간격 격자화: 분해능과 격자별 자료 수 확보

II 자료처리 및 동치화



장기해류관측: 선박해류관측(SADCP)

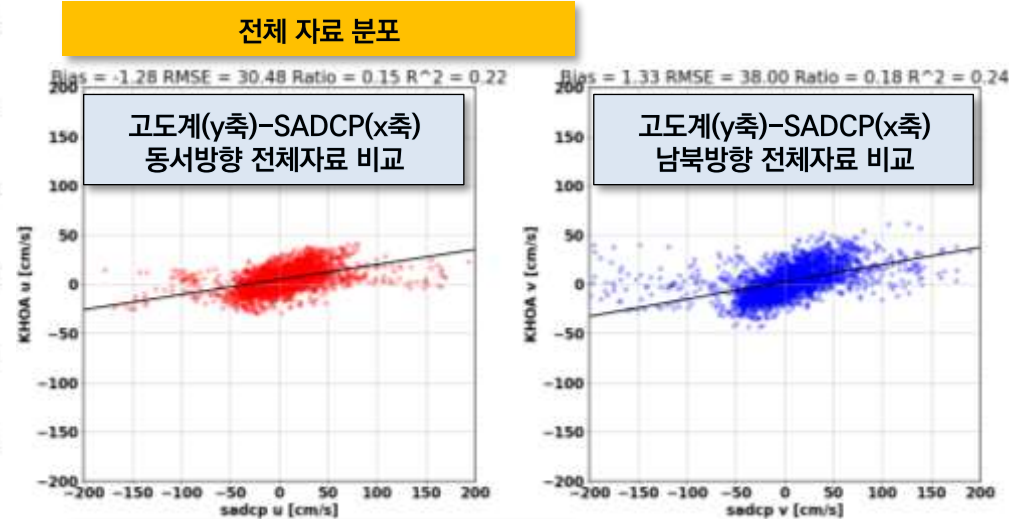
위성고도계 해류 자료처리 결과



통계값	동서방향	남북방향
편차[cm/s]	-1.28	1.33
RMSE[cm/s]	30.48	38.00
기울기	0.15	0.18
결정계수(r^2)	0.22	0.24

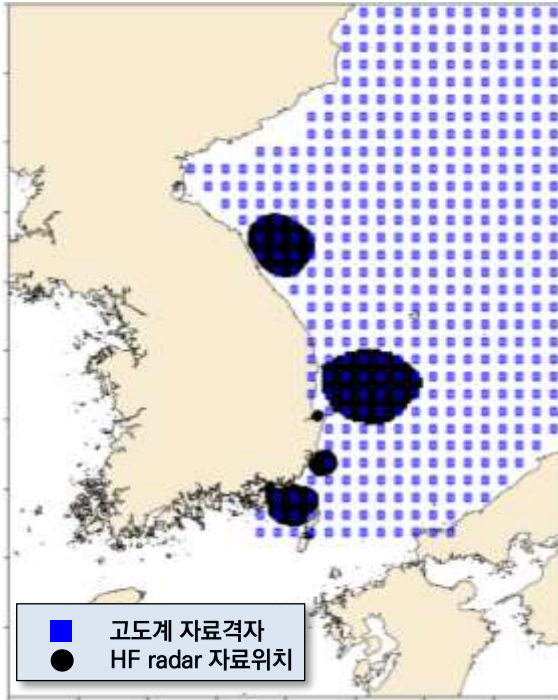
- ✓ 편차는 수 cm/s 수준으로 작지만, 유속은 선박 ADCP가 더 빠르게 나타나는 경우가 많음
- ✓ 전반적인 흐름은 잘 재현되었으나, 비지형류적인 성분에 의한 강한 유속의 영향으로 기울기나 결정계수가 낮게 계산됨
- ✓ 격자 위치별, 기간별 통계 값 산출: 어떤 환경에서 실측 값과 차이가 커지는 지 확인

선박해류관측 비교결과



HF 레이더

자료 개요

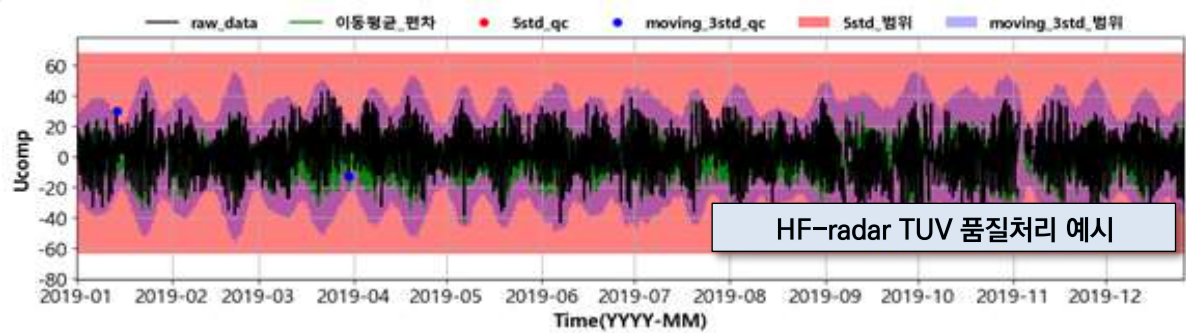
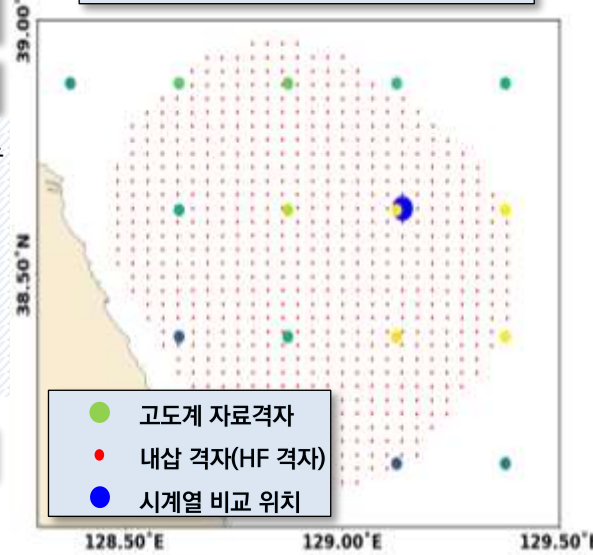


- ✓ 2010~2020년, 고도계기반 표층해류 표출 위치에 있는 국립해양조사원 HF-radar 자료
- ✓ 동해북부, 동해남부, 부산항신항 및 대한해협, 울산항 자료 사용
- ✓ HF-radar, 시기별 통계값 계산(예정)

자료처리 내용

HF-radar 자료처리	고도계 해류 자료처리
TUV 통계 품질처리	내삽
<ul style="list-style-type: none"> - 원시자료 수집률 50% 이상 추출 - 범위체크(5σ 제거) - 48시간 이동편차 생성 (High-pass 효과) - 편차자료 5일 평균 3σ 제거 	<ul style="list-style-type: none"> - 각 HF-radar 자료 표출 위치로 고도계 기반 표층해류 내삽 하여 사용 - 다양한 내삽방법 민감도 고려 (RBF, spline, 선형 중 선형 채택)
↓	↓
저주파 필터	저주파 필터
<ul style="list-style-type: none"> - 30일 저주파 필터 (Feng et al 2018) - 고도계 해류 표출 시간 추출 	<ul style="list-style-type: none"> - 30일 저주파 필터 (Feng et al 2018)

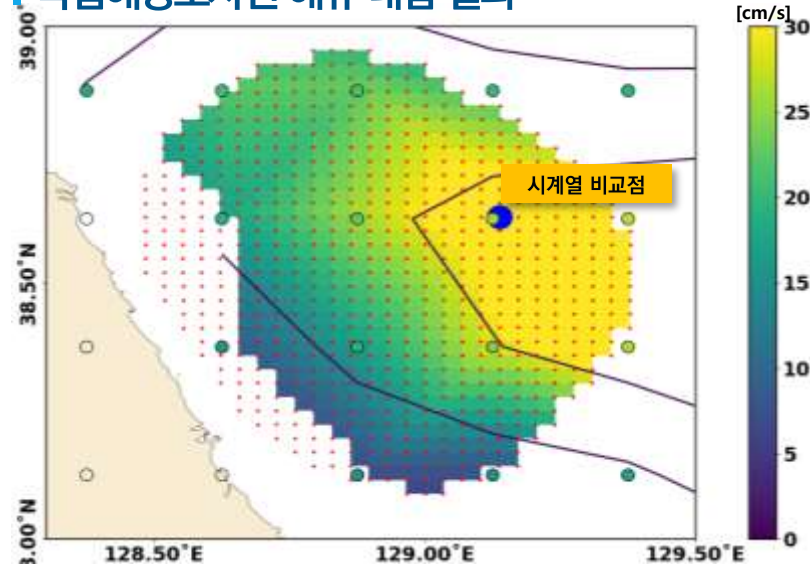
고도계 해류, HF 격자 비교(동해북부)



HF-radar TUV 품질처리 예시

HF 레이더

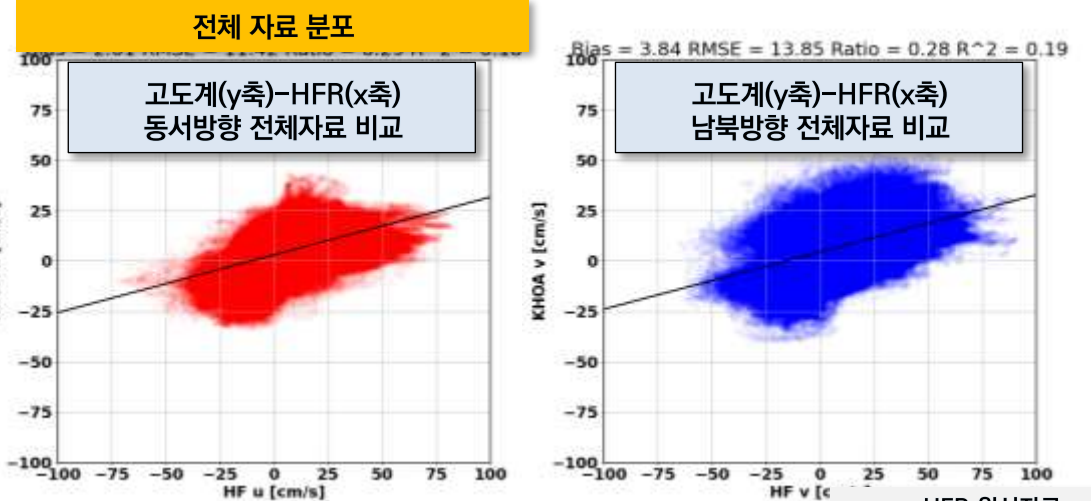
국립해양조사원 해류 내삽 결과



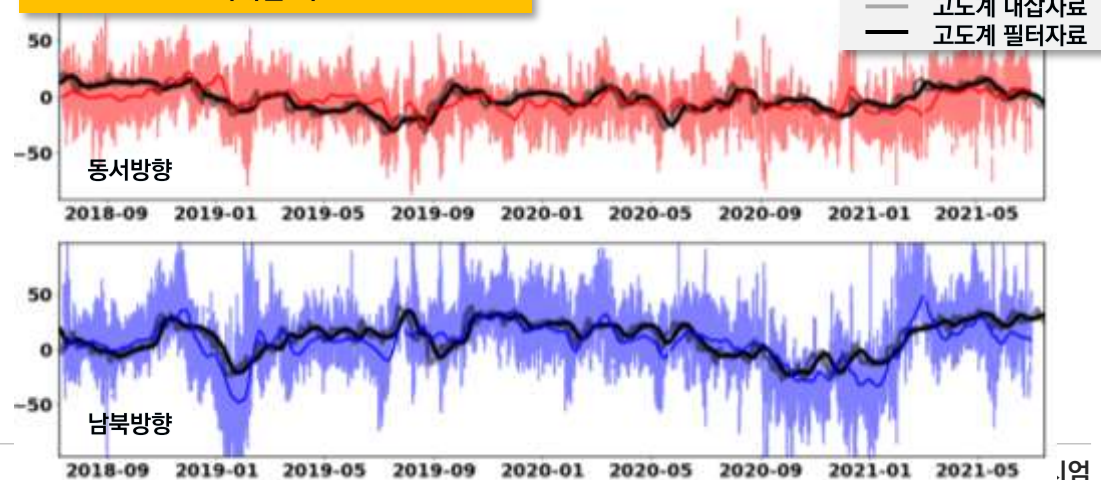
통계 값(30일 low-pass)	동서방향	남북방향
편차[cm/s]	2.01	3.84
RMSE[cm/s]	11.42	13.85
기울기	0.29	0.28
결정계수(r^2)	0.18	0.19

- ✓ 필터링 후 동서방향, 남북방향 모두 시계열 비교 결과 전반적인 흐름은 비슷하게 재현되고 있음
- ✓ HF-radar에서 상대적으로 강한 유속이 측정됨

HF 레이더 비교 결과

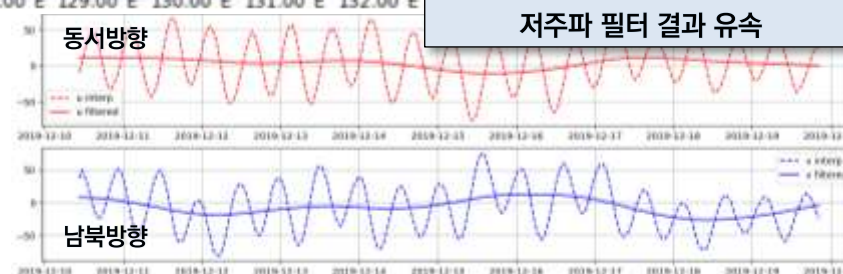
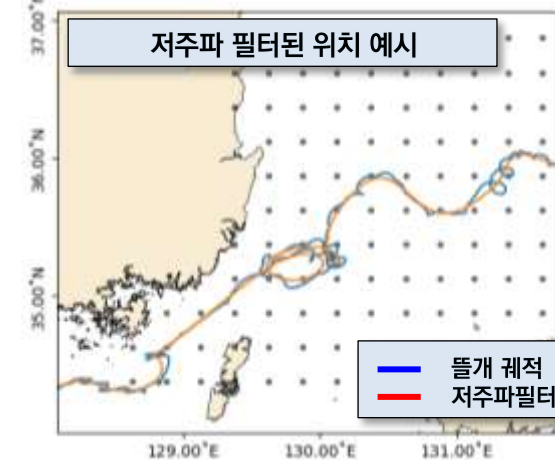
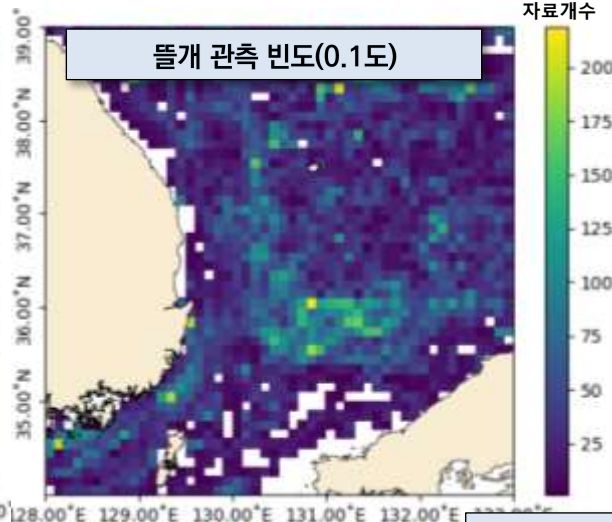
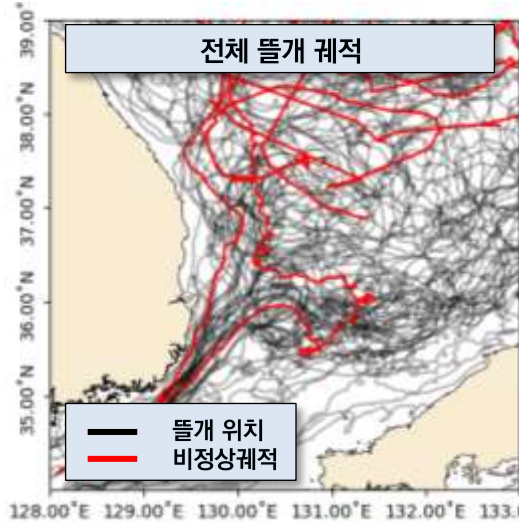


시계열 비교



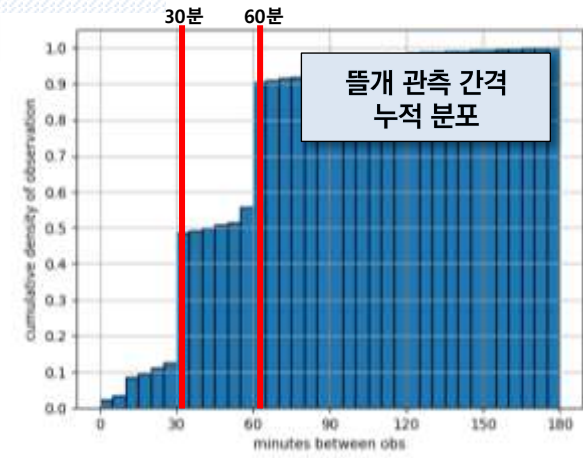
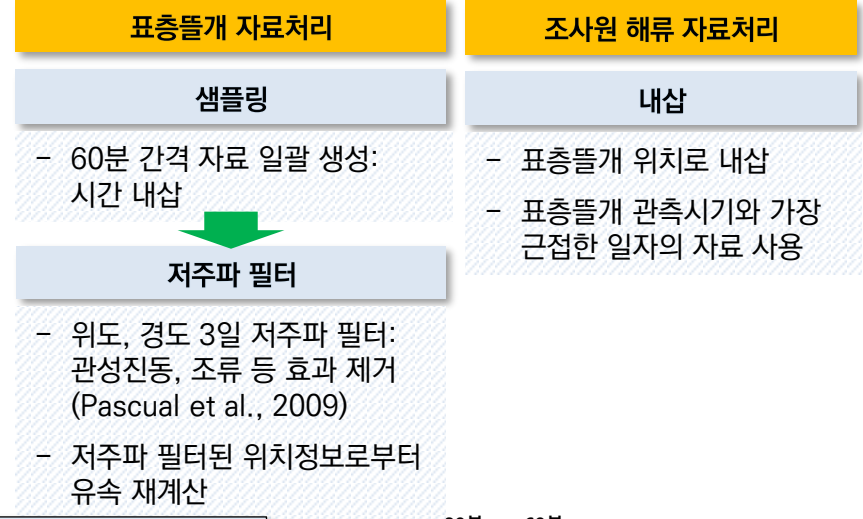
위성뜰개 자료

자료 개요



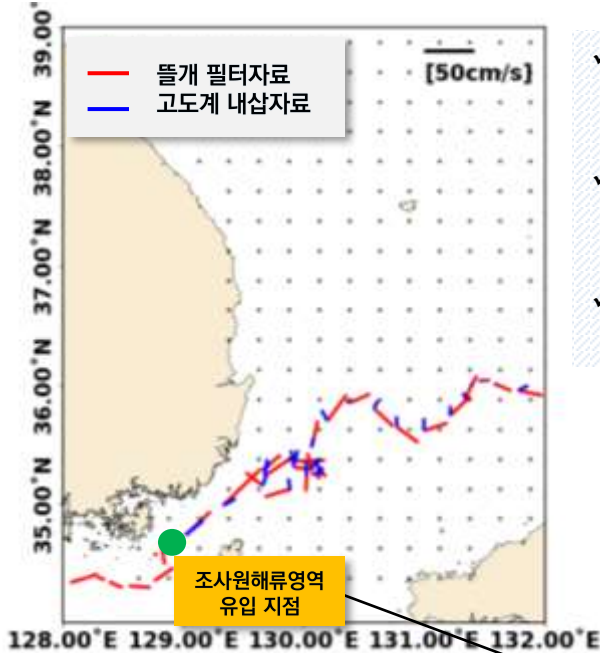
- ✓ 2010~2019년 표층뜰개자료 동해안 및 남해안 일부 관측 자료
- ✓ 일직선 궤적/결측 많은 궤적 등 비정상 자료 제외 후 분석
- ✓ 30분(~1/3), 60분(~1/3), 기타(~1/3) 관측 간격 자료

자료처리 내용



위성뜰개 자료

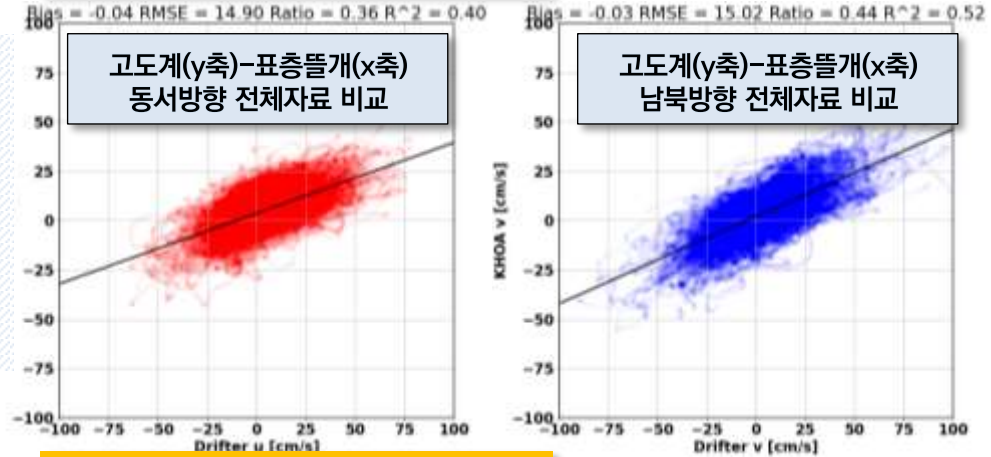
자료처리 결과



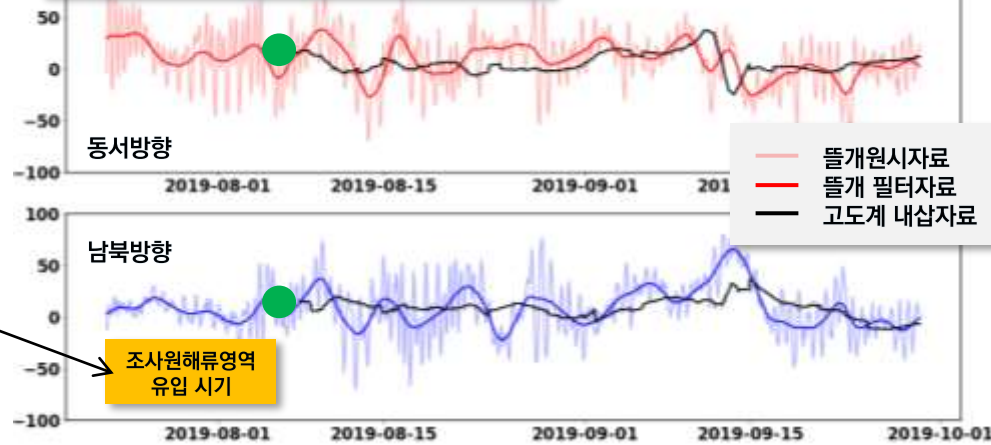
- ✓ 시계열, 전체분포 모두 표층 뜰개와 지형류 자료가 상대적으로 잘 일치함
- ✓ 뜰개에서 상대적으로 강한 유속이 관측되나, SADCPL나 HF-radar 만큼 크지 않음
- ✓ 통계값들의 공간분포 산출 예정

통계 값 (3일 저주파통과)	동서방향	남북방향
편차[cm/s]	-0.04	-0.03
RMSE[cm/s]	14.90	15.02
기울기	0.36	0.44
결정계수(r^2)	0.40	0.52

전체 자료 분포



시계열 비교



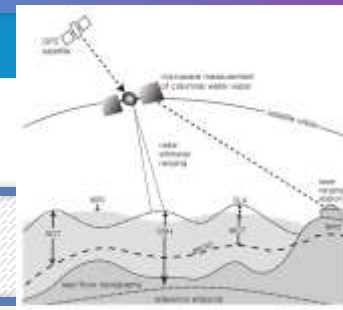
과거자료 검증 요약

고도계자료 유속 검증 결과

비교적 잘 일치
비교적 차이 큼

통계치	SADCP (20 m)		고주파레이더 (0.5 m)		위성뜰개 (5 m)	
	동서방향	남북방향	동서방향	남북방향	동서방향	남북방향
편차 [cm/s]	-1.28	1.33	2.01	3.84	-0.04	-0.03
RMSE [cm/s]	30.48	38.00	11.42	13.85	14.90	15.02
기울기(비율) [무차원]	0.15	0.18	0.29	0.28	0.36	0.44
결정계수(r^2)	0.22	0.24	0.18	0.19	0.40	0.52

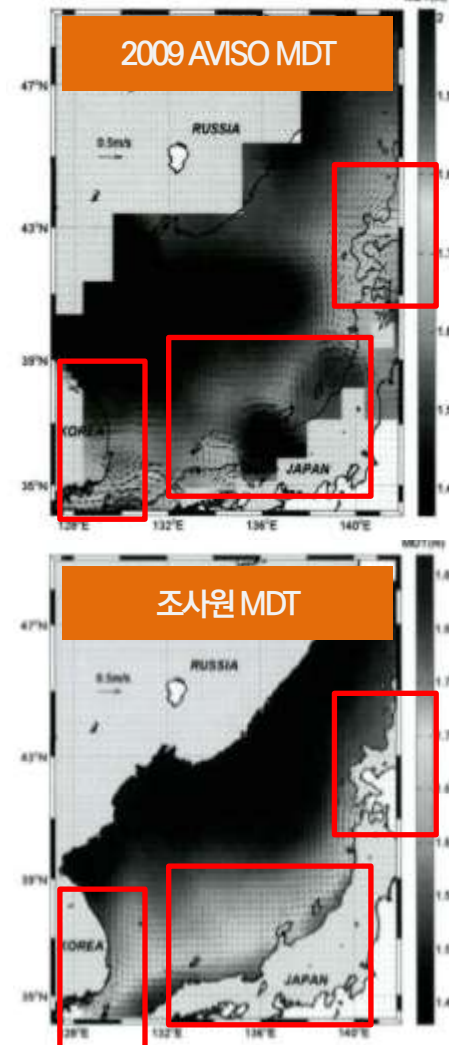
- ✓ 고도계 해류는 상대적으로 위성뜰개 (5m 낙하산) 자료와 잘 일치함
- ✓ 장기간의 자료 사용으로 편차는 모든 자료에서 낮게 나타남
- ✓ SADCP와의 비교에서 RMSE가 가장 높게 나타났고, 이는 SADP에서 관측되는 순간적 강한 유속에 의한 영향으로 사료됨(비지형류적 성분)
- ✓ 모든 관측에서 고도계 해류보다 실측이 유속이 낮게 나타났고(비율), 이는 지형류 외의 성분이 관측되기 때문으로 사료됨
- ✓ 결정계수는 위성뜰개와 가장 좋게 계산되었음



1. 평균역학고도 MDT(Mean Dynamic Topography) 개선

MDT 계산 방법 및 장단점

	인공위성고도계 + Geoid (AVISO-CMEMS)	해수 물성자료(국립해양조사원)
방법	<ul style="list-style-type: none"> • 평균해수면(MSS), Geoid 모델 사용 ✓ 평균해수면: 위성고도계 다년 관측 ✓ Geoid: 중력관측위성 및 GPS 사용 모델 	<ul style="list-style-type: none"> • 기준 수심(조사원: 500m)으로부터 비부피(specific volume)를 적분하여 계산 ✓ 다년간의 연직 수온 염분자료사용
장점	<ul style="list-style-type: none"> • 수심에 상관없이 계산됨 • 인공위성자료를 사용하여 위치에 상관없이 계산됨 	<ul style="list-style-type: none"> • 실제 물리적 역학고도의 정의에 가까운 계산 방법
단점	<ul style="list-style-type: none"> • 정확한 MSS, Geoid 모델 필요 • MSS로부터 Geoid를 제거하는 과정에 의한 차이 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 기준 해수면(500m)이 실제 무류면이나 geoid면과 차이가 있음 • 기준 해수면보다 낮은 수심의 연안에서 계산 불가 • 다양한 해역, 계절, 장주기 변동성을 대표할 수 있는 물성 자료 습득 어려움
채택 이유	<ul style="list-style-type: none"> • 2009년 해류장 생성 당시, AVISO에서 제공하는 모델은 높은 에러와 낮은 해상도를 가지고 있었음 • 평균표층해류를 잘 재현하지 못함 	<ul style="list-style-type: none"> • 과거 자료로, 한정된 해역에서, 500 m 무류면을 가정하여 계산한 MDT 채용

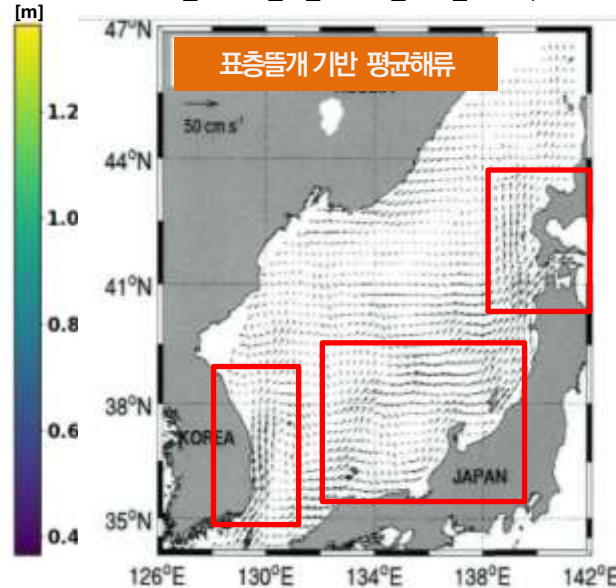
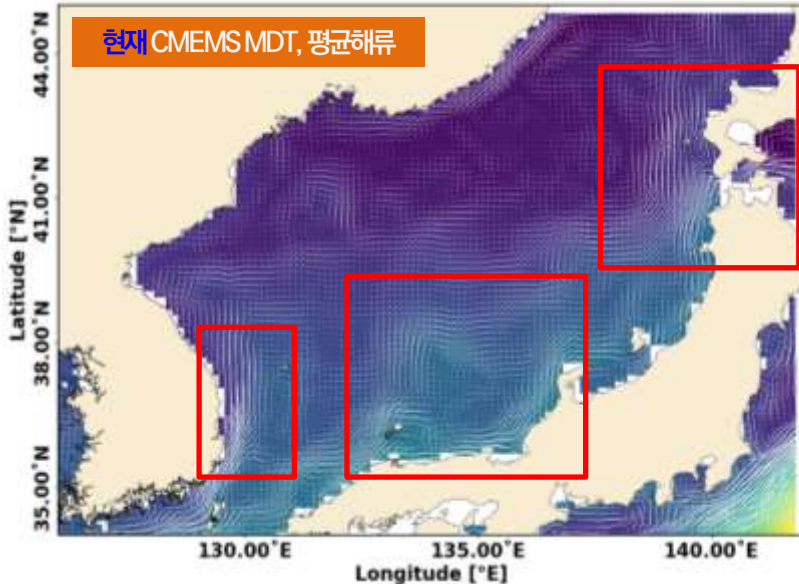


- ❖ 과거 AVISO 자료보다 신뢰성 있는 평균해류를 재현하는 MDT 생성
- ❖ 적용범위나 대표성이 떨어지는 한계점

평균역학고도 MDT(Mean Dynamic Topography) 개선

■ AVISO(CMEMS) MDT 개선

출처: 해수유동정보_정확도_및_서비스_향상_연구1, 2009년



- ✓ *GRACE 중력탐지위성 외에, 2009년 가용하지 않았던 **GOCE 중력탐지 위성 자료를 추가 사용하여 높은 해상도 및 정확도 확보
- ✓ 국립해양조사원 기 발간보고서(해수유동정보_정확도_및_서비스_향상_연구1, 2009년)에서 지적한 육지 자료 문제, 해상도 문제, 동한난류 및 쓰야해협 유동 재현 문제 등 해결됨
- ✓ 동해(East Sea)뿐만 아니라 남해, 서해 및 전구 자료 가용
- ✓ 지중해, 흑해 등 반폐쇄성 해역에서 자료는 별도로 제공(MSS에서 Geoid를 제거하는 계산방법 차이)

*GOCE: Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer, ESA(유럽항공우주국), 2009~2013

**GRACE: Gravity Recovery and Climate Experiment, NASA(미국), DLR(독일), 2002 ~ 2017

MDT 개선 해류 생성 로드맵 개요

1. 과거 실시간 해류 재처리

- 기존 국립해양조사원 MDT 및 평균 해류장과 비교
- 과거 해류 생성 알고리즘에서 MDT 만 교체하여 재처리
- 과거 생성된 국립해양조사원 표층 해류자료와 비교



2. 과거 해류 관측자료와 비교 검증

- 본 과업에서 구성한 과거 해류 정리 자료를 사용
- 구체적인 통계치 확인 및 개선 수준 비교

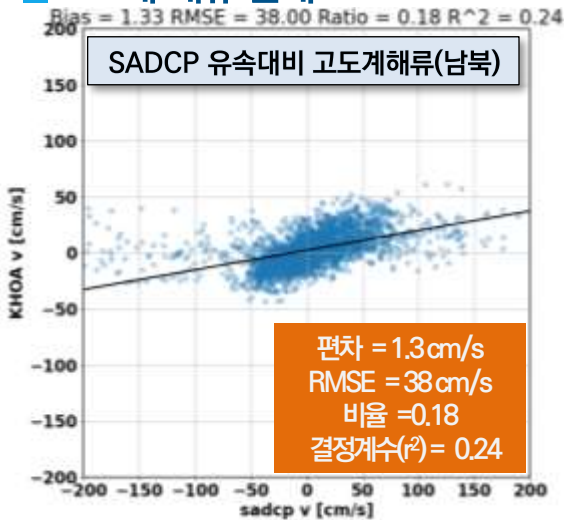


3. 현업화

- 현행유지 대비 새로운 MDT 사용자 자료 개선 정도 확인
- 자료의 표출 범위 고려
- 해류생성 알고리즘 업데이트

Ekman 해류 성분 추가

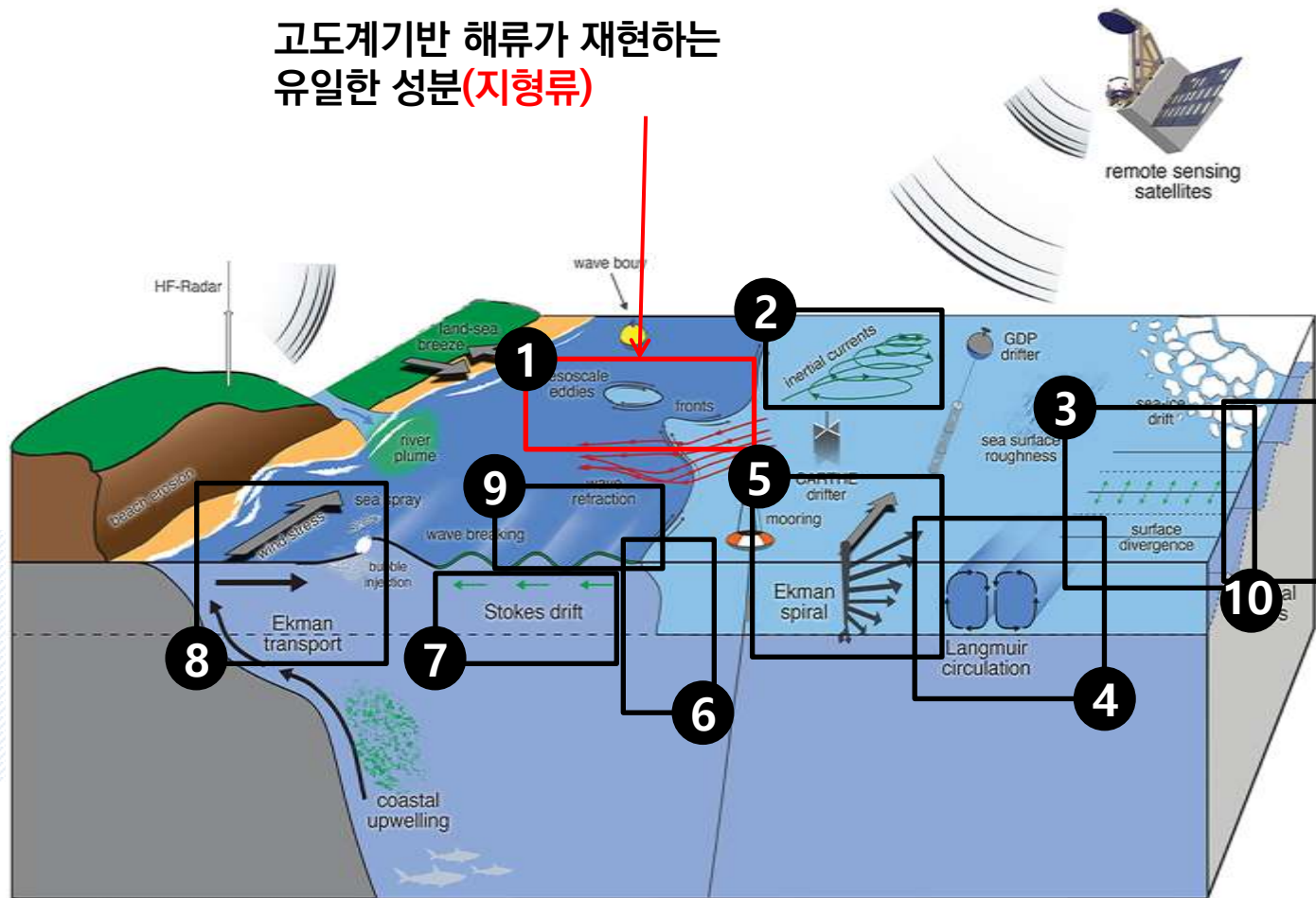
고도계 해류 한계



- ✓ 실제 유속보다 유속이 낮게 추정
 - 원인 : 자료나 계산상 오류가 아닌, 고도계 자료가 실제 해수유동 중 일부인, 지형류 성분만을 재현하기 때문
- ✓ 실제 해수유동을 재현하기 위해서 다른 성분 계산 필요

- | | |
|---------------|------------------------|
| ① 지형류 | ⑥ 저층지형류 (thermal wind) |
| ② 관성운동 | ⑦ Stokes drift |
| ③ 발산 수렴 | ⑧ Ekman 이류 |
| ④ Langmuir 순환 | ⑨ 파도 |
| ⑤ Ekman 나선 | ⑩ 조류 |

고도계기반 해류가 재현하는 유일한 성분(지형류)

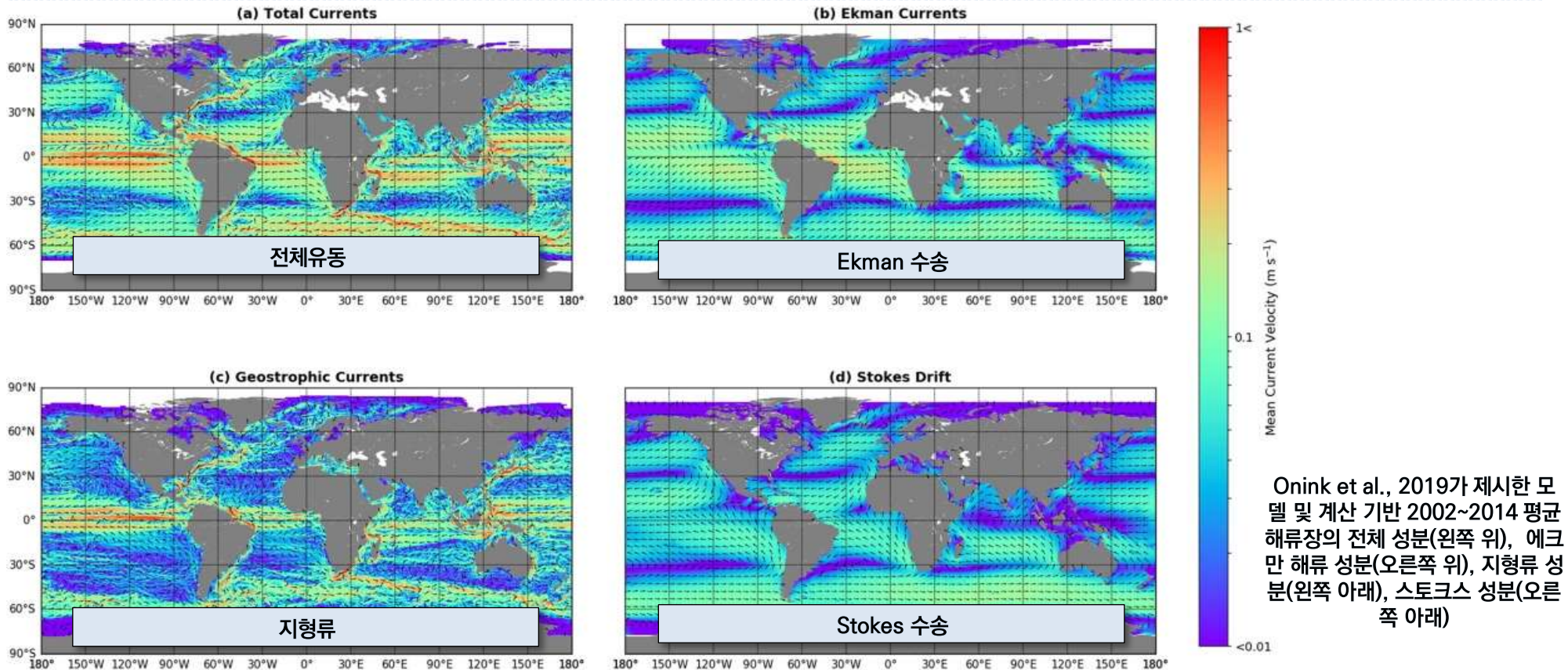


Integrated Observations of Global Surface Winds, Currents, and Waves: Requirements and Challenges for the Next Decade(Villas Boas et al., 2019)

Ekman 해류 성분 성분 추가

Ekman 수송

- ✓ Ralph and Niiler (1999): 열대태평양에서 총 해수유동의 78%를 지형류(63%), 에크만(15%)으로 설명
- ✓ Onink et al., 2019는 전구적으로 총 표층 해류를 지형류, 에크만해류, 스톡스해류로 구분하여 입자 수송량에 미치는 영향을 연구한 바 있음



인공위성 고도계 기반 해류검증 및 개선방안

- ✓ 인공위성 고도계를 기반으로 지형류를 생산할 때, 다양한 변수 및 계산방법에 의해 그 **정확도와 분해능이 달라질 수 있고 이에 검증이 필요함**
- ✓ 선박해류관측자료(SADCP)와 비교했을 때 편차는 크지 않았으나 RMSE가 크고, 선형회기 기울기가 낮고, 결정 계수가 낮게 나타남. 이는 인공위성 고도계 기반 해류가 **SADCP에서 관측되는 비지형류 성분을 관측할 수 없기 때문**으로 사료됨
- ✓ 고주파레이더(HFR)와 비교했을 때 편차, RMSE는 작았으나 결정계수는 낮게 나타남. 이는 고도계가 전반적인 흐름은 잘 계산할 수 있으나 **HFR이 관측할 수 있는 해양 최상층의 유동을 잡아낼 수 없기 때문**인 것으로 사료됨.
- ✓ 표층뜰개와 비교했을 때 다른 관측과의 비교에 비해 통계값이 잘 일치하게 나타남. 이는 표층뜰개(낙하산)가 대표하는 **중규모 유동의 흐름을 인공위성 고도계 해류 자료가 잘 모사**하기 때문으로 사료됨.
- ✓ 인공위성 고도계의 정확도는 MDT의 정확도에 영향을 크게 받아, **MDT를 개선하여 해류장의 품질을 개선**할 수 있음.
- ✓ 최대한 정확하게 고도계 기반 해류를 산출한다 해도 이는 **지형류 성분만을 의미**하기 때문에, 실제 해류를 더 잘 모사하는 해류장을 구축하기 위해 **다양한 해류 성분의 계산이 필요함**.

감사합니다