

GK-2A AMI
Algorithm Theoretical Basis
Document

해류(Sea Surface Current)

박경애, 서울대학교

Version 1.0

2019. 04. 15.



국가기상위성센터
National Meteorological Satellite Center

<수정 이력>

문서 버전	수정내용	과학코드 버전	수정일	작성자
0.1	초안 작성	0.1.0.0	2016.01.17	박경애 김희애
0.2	Proxy 자료가 NOAA/AVHRR 채널자료에서 Himawari-8/AHI 채널자료로 대체됨.	0.2.0.0	2017.01.18	박경애 김희애
0.5	입력 자료가 GK-2A/AMI 해수면온도 자료로 변경됨.	0.5.0.0	2018.11.20	박경애 김희영
1.0	최종 해류 산출 알고리즘 반영	1.0.0.0	2019.04.15	박경애 김희영

<목차>

1. 개요.....	1
1.1 목적.....	1
1.2 사용자.....	1
1.3 내용.....	1
1.4 관련 문서.....	1
2. 알고리즘 소개.....	2
2.1 개요.....	2
2.2 알고리즘 흐름도.....	2
2.3 입력자료.....	3
2.3.1 L2.....	3
2.3.2 보조 자료.....	4
2.3.3 알고리즘 상수 및 임계값.....	4
2.4 이론적 배경.....	5
2.5 수학적 설명.....	5
2.6 산출물.....	7
3. 모의자료 및 검증.....	8
3.1 모의 입력자료 및 검증자료.....	8
3.1.1 모의 입력자료.....	8
3.1.2 해류 산출 결과.....	9
3.1.3 검증자료.....	10
3.2 검증 방법.....	10
3.3 검증 결과.....	11
4. 현업운영 시 고려사항.....	13
4.1 수치계산 고려사항.....	13
4.2 프로그래밍 및 절차상의 고려사항.....	13
4.3 품질 평가 및 진단.....	13
4.4 예외사항 처리.....	13
4.5 검증 알고리즘.....	13
5. 가정 및 제한.....	15

5.1 성능	15
5.2 예상 센서 성능	15
5.3 개선을 위한 사전 계획	15
6. 참고문헌	16

<표 목차>

표 2.1 L2 자료 입력 목록.....	3
표 2.2 보조 자료 입력 목록.....	4
표 2.3 알고리즘 상수 및 임계값 입력 목록.....	4
표 2.4 해류 알고리즘 산출 결과물 목록.....	7
표 3.1 산출 해류 검증 결과.....	11

<그림 목차>

그림 2.1. 해류 산출 알고리즘 흐름도.....	3
그림 2.2. 형상 추적 기법의 원리.....	6
그림 3.1. 해류 산출 알고리즘에 적용한 Himawari-8/AHI 산출 해수면온도 예시 자료 그림 (a) 2017년 4월 30일 01:00 UTC, (b) 2017년 4월 30일 04:00 UTC.....	8
그림 3.2. ZSSD 알고리즘으로 산출된 해류 예시 (2017년 4월 30일 01:00 UTC). (a) 품질 관리 미적용. (b) 품질 관리 적용.....	9
그림 3.3. 표층 뜰개 자료로 계산한 해류 (2016년 4월). 색은 각 지점에서 표층 뜰개의 속력을 의미함.....	10
그림 3.4. 평균 해수면 고도 (Maps of Absolute Dynamic Topography, MADT) 자료로 계산한 지형류. ZSSD 알고리즘으로 산출한 해류와 지형류의 (b) 속력 차이와 (c) 방향의 차이 분포.....	12
그림 4.1. 지역 해양순환 모델 예시 그림 자료 (KMA 제공).....	14

약어표

ABI	Advanced Baseline Imager
AHI	Advanced Himawari Imager
AMI	Advanced Meteorological Imager
ATBD	Algorithm Theoretical Base Document
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
AVISO	Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic
GK-2A	Geostationary Korea Multi-Purpose Satellite - 2A
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
KMA	Korea Meteorological Administration
L2	Level 2
MADT	Maps of Absolute Dynamic Topography
MCC	Maximum Cross Correlation
NCOM	Navy Coastal Model
NOAA	National Oceanic Atmospheric Administration
QC	Quality Control
RMSE	Root Mean Squared Error
ROMS	Regional Oceanic Modeling System
SSC	Sea Surface Current
SST	Sea Surface Temperature
UTC	Coordinated Universal Time
ZSSD	Zero-mean Sum of Squared Distances

1. 개요

1.1 목적

- 본 이용자 사용설명서(ATBD)에서는 GeoKOMPSAT-2A (GK-2A) 위성의 Advanced Meteorological Imager (AMI) 센서 자료로부터 해류를 산출하기까지의 과정을 간략하게 제시하고 있음.
- 알고리즘을 이해하기 위해 필요한 물리적인 배경과 수치 계산 정보, 현업 운영 시 고려사항, 알고리즘 적용을 위한 여러 가정들과 제한점 등의 내용을 포함하고 있음.

1.2 사용자

- 이 ATBD는 해류 산출 알고리즘의 이론적 원리나, 산출된 해류 정보를 통해 연구를 진행하고자 하는 사람들을 위한 것임.
- 해류 산출 알고리즘을 충분히 숙지하고, 발전시키고자 하는 사용자들에게 해류 산출 과정에 필요한 기본적인 정보를 제공함.

1.3 내용

- AMI 자료로부터 해류를 산출하기까지 필요한 개괄적인 정보를 다루고 있으며, 다음과 같은 내용으로 구성되어 있음.
- 시스템 개요 : AMI 센서의 세부 사항과 해류 산출 알고리즘의 결과물 특성에 대한 설명을 제공함.
- 알고리즘 소개 : 알고리즘의 일반적인 흐름과 입·출력 자료, 알고리즘과 관련된 이론적 원리 및 수치 계산을 설명함.
- 현업 운영 시 고려사항 : 프로그래밍 및 절차상 고려사항, 품질 평가 및 진단, 최종 산출물이 가질 수 있는 문제점과 한계점 등을 포함한 예외 사항 처리에 관한 내용으로 구성되어 있음.
- 가정 및 제한 : 알고리즘을 사용할 때 고려해야할 가정과 알고리즘의 성능을 개선하기 위한 계획을 다루고 있음.

1.4 관련 문서

- 해류 산출 시 GK-2A/AMI의 해수면온도 자료가 핵심 입력 자료로 활용되므로, 해당 변수에 대한 GK-2A/AMI의 ATBD를 참조하는 것이 해류 산출 알고리즘을

이해하는 데 도움이 될 것임.

- 위성 자료를 이용하여 해류를 산출하는 경우는 GK-2A/AMI와 함께 GOES-R/ABI가 유일하므로, ABI의 ocean dynamics ATBD를 참고할 수 있음.

2. 알고리즘 소개

2절에서는 해류 산출 알고리즘의 전반적인 구조에 대한 간략한 설명과 함께, 알고리즘을 이해하는데 필요한 이론적, 수학적 배경을 소개하고 있다.

2.1 개요

지난 수 십 년간 인공위성 자료를 활용하여 표층 해류를 산출하기 위한 연구가 지속적으로 이루어져왔으며, 위성 영상 자료에 나타나는 해양 현상의 이동을 추적함으로써 해수의 움직임을 유추하는 형상 추적 기법이 대표적인 방법 중 하나이다. 구름 이동 벡터를 계산하기 위해 Leese(1971)가 제시한 Maximum Cross Correlation(MCC) 알고리즘을 형상 추적 기법에 적용하여 표층 해류를 산출하는 방법이 제시되었으며(Emery, 1986), MCC 알고리즘은 지금까지도 가장 보편적으로 활용되고 있다. 하지만 MCC 알고리즘은 최종 산출물을 얻기까지 많은 시간이 소요되기 때문에, 실시간 결과물이 필요한 기상 목적으로 활용하기에는 적절하지 않다고 판단하였다. 따라서 MCC 알고리즘의 대안으로서, Marchello(2007)가 제안한 Zero-mean Sum of Squared Distances (ZSSD) 알고리즘을 적용하고자 한다. ZSSD 알고리즘 역시 MCC 알고리즘과 마찬가지로 형상 추적 기법을 기반으로 하는 방법이나, 해류 산출에 활용되는 연속된 두 장의 인공위성 영상 사이의 통계적 상관성을 계산하는 방법에서 차이가 있다. 본 알고리즘은 상대적으로 연산 과정이 단순하고 처리 속도가 빠른 장점이 있으며, NOAA GOES-R/ABI의 ocean dynamics product algorithm에서도 이 방법을 기초로 하고 있다.

2.2 알고리즘 흐름도

ZSSD method의 개략적인 단계는 그림 2.1에 나타난 flow chart와 같다. 먼저 관측 시간 기준 3시간, 6시간, 12시간, 24시간 이전의 AMI 해수면온도 자료가 존재한다면 이를 모두 입력한 후, 관측 시간의 해수면온도 영상과 위 시간 간격에 해당하는 해수면온도 영상에서 산출 window내 자료가 95% 이상 존재하는 청천 영역의 자료를 추출한다. 영상 간 시간 간격을 달리한 두 장의 영상으로 ZSSD 알고리즘을 적용하여 표적의 이동을 파악한 후에 벡터를 계산하고, 품질 검사 단계를 통해 오차 벡터를 제거해준다. 이렇게 입력된 4장의 영상에 대하여 해류 벡터 산출이 모두 완료되면 이를 평균하여 해당 화소 위치의 최종 변위 벡터를 출력한다.

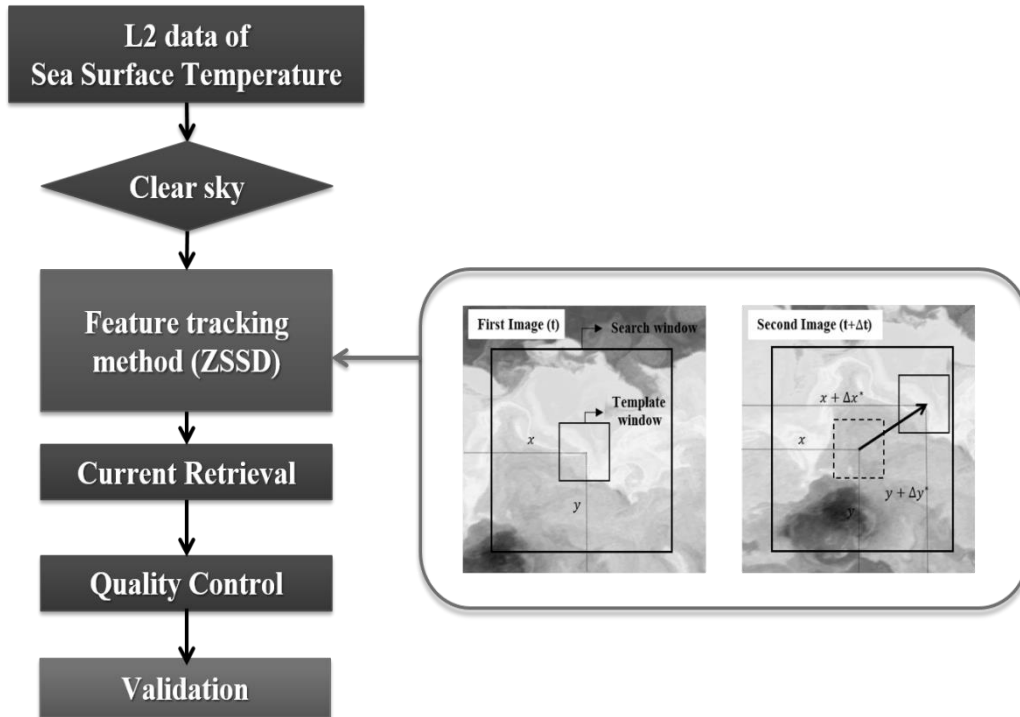


그림 2.1 해류 산출 알고리즘 흐름도

2.3 입력자료

이 절에서는 해류 벡터를 계산하기 위해 필요한 자료들에 대한 정보를 제공한다. 해류 벡터 알고리즘은 기본적으로 각 화소 당 한 개의 해류 벡터가 산출되도록 설계되었으며, 산출된 해류 벡터는 해당 화소를 중심으로 하는 **template box** 영역에서의 흐름을 대표한다.

2.3.1 L2

표 2.1은 GK-2A/AMI 관측 자료를 사용하여 산출되는 L2 자료 중 해류 산출 알고리즘에 입력 자료로 활용되는 자료를 정리한 것이다.

표 2.1 L2 자료 입력 목록

Name	Description	Dimension
AMI Sea Surface Temperature	Quality-controlled sea surface temperature of AMI	grid (number of rows, number of columns)

2.3.2 보조 자료

표 2.2에는 해류 산출 알고리즘에 입력되는 보조 자료들을 정리하였다.

표 2.2 보조 자료 입력 목록

Name	Description	Dimension
Latitude	Pixel latitude	grid (number of rows, number of columns)
Longitude	Pixel longitude	grid (number of rows, number of columns)
Satellite zenith	AMI satellite zenith angles	grid (number of rows, number of columns)
land/sea mask	A land/sea and coast mask	grid (number of rows, number of columns)

2.3.3 알고리즘 상수 및 임계값

표 2.3에는 해류 산출 알고리즘에 입력되는 인공위성 영상자료에 대한 해상도 정보, 알고리즘 계수, 품질 검사를 위한 임계값 등의 정보를 정리하였다.

표 2.3 알고리즘 상수 및 임계값 입력 목록

Category	Description	Dimension
Constant	<ul style="list-style-type: none"> • window size • time interval between two consecutive images • spatial resolution of input data • radius of the earth 	Single ASCII file
Threshold	<ul style="list-style-type: none"> • correlation coefficient • maximum and minimum speed of output data • speed and direction difference for quality control • ratio of NaN values in the calculating window 	Single ASCII file

2.4 이론적 배경

인공위성 영상 자료에 ZSSD 알고리즘을 적용하여 해류 벡터를 산출하는 기본 원리는 영상에 나타나는 형상의 형태학적 특징을 추적하여 해수의 이동을 파악하는데 있다. 이때, 해수면온도의 경우에는 eddies, filaments 등과 같은 현상이 추적의 대상이 될 수 있다 (Marcello et al., 2008). 해류 벡터를 산출하기 위해서는 주어진 시간 동안 추적의 대상이 되는 형상의 형태가 변하지 않아 형상이 이동하는 것을 추적할 수 있어야 한다는 가정이 필요하다. 하지만 유체의 특성상 해양에서 발생하는 구조는 유동적으로 변하게 된다.

또한 이러한 구조의 시간적·공간적 변동성은 표적이 되는 영역의 크기를 결정할 때도 영향을 준다. 표적으로 설정한 영역의 크기가 작을수록 같은 영역에서 산출되는 해류 벡터의 수가 많아지고 그 분포도 복잡하므로, 추적의 대상이 규모가 작고 시간에 따른 변화가 큰 현상일 때 적합하다. 반대로 표적의 영역이 클수록 동일한 영역에서 산출되는 해류 벡터 수가 줄어들고 해류 벡터를 공간적으로 평균한 것과 같은 단순한 분포가 나타나므로, 공간 규모와 시간 규모가 큰 현상을 대상으로 할 때 더 유리하다.

2.5 수학적 설명

다음의 내용은 해류 산출에 필요한 수치 계산 과정과 각 단계에서 고려해야 할 사항을 다루고 있다. 일단 동일한 위치를 관측한 연속된 두 개의 AMI 해수면온도 영상을 입력 자료로 선택한다. 이 때 선정된 영상은 표적이 될 수 있는 구조가 분명하게 드러날 수 있도록 구름이 없는 맑은 날의 영상이어야 한다.

다음으로 첫 번째 영상(t)에서 구름이 없는 영역(template box)을 선정된 후, 두 번째 영상(t + Δt)에서도 template box와 같은 사이즈의 영역(search box)을 추출하여, 식 (2.5.1)을 통해 두 영역 사이의 ZSSD 값을 구한다. 이 때 template box와 search box는 정사각형 모양이고, 그 크기가 서로 동일해야 하며, box size는 홀수로 지정해주어야 한다.

$$ZSSD(x + \Delta x, y + \Delta y) = \sum_{i=-N}^N \sum_{j=-N}^N \{ [I_t(x, y) - \bar{I}_t] - [I_{t+\Delta t}(x + \Delta x + i, y + \Delta y + j) - \bar{I}_{t+\Delta t}] \}^2 \quad (2.5.1)$$

이 때 연산에 소요되는 시간을 단축시키기 위하여, 두 영상 사이의 시간 간격과 기준에 알려진 관측 해역의 해류 속도를 고려하여 search box가 위치할 수 있는 영역(search area)을 결정하고, search area 내에서 search box가 이동할 수 있도록 한다. 이렇게 search area 내에서 search box가 화소 단위로 이동하며 ZSSD 값을 계산하고, 그 중에 ZSSD 최솟값을 갖는 영역(match box)을 찾는다. 이와 같은 원리를 그림 2.2에 정리하여 나타내었다.

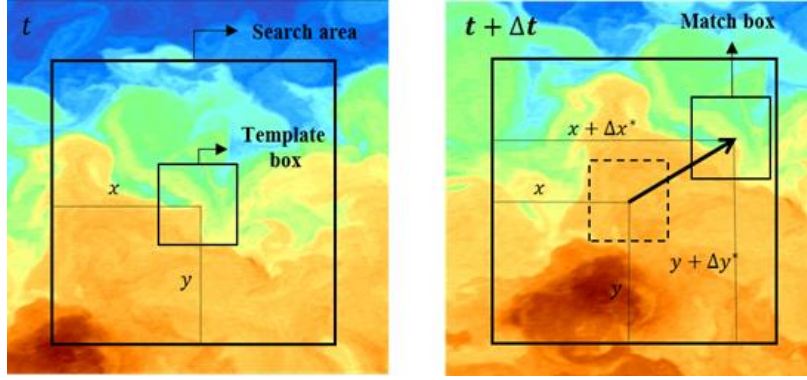


그림 2.2 형상 추적 기법의 원리

이렇게 두 번째 영상에서 match box의 위치가 결정되면, 첫 번째 영상의 template box가 여기로 이동한 것으로 간주하고, 두 영역 사이의 시간 간격과 거리를 고려하여 변위 벡터(displacement vector)를 구한다. 벡터를 산출할 때는 구면좌표계를 가정하고 식 (2.5.2)와 식 (2.5.3)을 통해 변환한 거리를 이용한다. 이 식에서 θ_1 과 ϕ_1 은 template box의 위·경도 값이고, θ_2 와 ϕ_2 는 match box의 위·경도 값이다.

$$\Delta x = R_E(\theta_1 - \theta_2)\cos\left(\frac{\phi_1 + \phi_2}{2}\right) \quad (2.5.2)$$

$$\Delta y = R_E(\phi_1 - \phi_2) \quad (2.5.3)$$

이렇게 산출된 평균 벡터는 품질 검사 과정을 거치게 된다. 형상 추적 기법으로 산출된 표층 해류 벡터 중에는 실제 해수의 흐름과 다른 경우가 포함될 수 있다. 예를 들어, 해양-대기 경계에서 강하게 부는 바람이나, 해수면의 국지적인 가열로 인하여 해수면은 구조가 표층 해류와 무관하게 변형되는 경우에는 제시된 방법으로 표층 해류를 산출하기 어려우며, 해수 표면에 뚜렷한 패턴이 나타나지 않는 경우에도 형상 추적 과정에서 오류가 발생할 가능성이 크다. 따라서 산출된 표층 해류를 해석하기 이전에 결과에 포함된 오차를 제거해 줄 필요가 있다. 본 연구에서는 표층 해류장의 정확도를 높이기 위하여 두 가지 품질 검사 방법을 적용하였다. 우선 가장 보편적으로 활용되고 있는 상관계수의 한계값을 설정하는 방식을 적용하였다. 식 (2.5.4)를 통해 두 template box와 match box 사이의 상관계수를 구하고, 그 결과 값을 품질 검사 과정에 포함시킨다. 두 영역 사이의 상관계수(r)를 고려한 품질 검사를 시행하여 한계값 이하의 낮은 상관 계수를 보이면, 결과적으로 해당 화소에서 산출된 벡터는 신뢰도가 떨어지는 것으로 판단하여 해당 벡터를 최종 산출물에 포함시키지 않는다.

$$r = \frac{\sum_{i=-N}^N \sum_{j=-N}^N [I_t(x+i, y+j) - \bar{I}_t] [I_{t+\Delta t}(x+\Delta x+i, y+\Delta y+j) - \bar{I}_{t+\Delta t}]}{\sqrt{\sum_{i=-N}^N \sum_{j=-N}^N [I_t(x+i, y+j) - \bar{I}_t]^2} \sqrt{\sum_{i=-N}^N \sum_{j=-N}^N [I_{t+\Delta t}(x+\Delta x+i, y+\Delta y+j) - \bar{I}_{t+\Delta t}]^2}} \quad (2.5.4)$$

또한, 표층 해류의 시간적, 공간적 변동이 적으므로 중심 벡터가 주변 벡터와 비교해보았을 때 속력과 방향성 면에서 일관성을 유지할 수 있다는 특성을 이용한 최근접 비교 방식(Nearest-neighbor comparison method)을 활용하여 오차로 판단되는 표층 해류 벡터를 제거시켰다(Barton, 2002).

2.6. 산출물

표 2.4는 해류 산출 알고리즘으로 산출되는 결과물의 간략한 정보를 제공하고 있다. 최종적으로 각 지점에서 산출된 해류의 속력, 방향 및 quality flag의 정보가 출력되며, 정확도를 살펴보기 위한 RMSE와 bias 값도 함께 출력된다.

표 2.4 해류 알고리즘 산출 결과물 목록

Name	Category	Description	Dimension
SSC	Product	latitude (degree)	grid(xsize, ysize)
		longitude (degree)	
		speed (m/s)	
		direction (degree)	
		quality flag	
Error statistics	Product	RMSE and bias	Single ASCII file

3. 모의자료 및 검증

3.1 모의 입력자료 및 검증자료

3.1.1 모의 입력자료

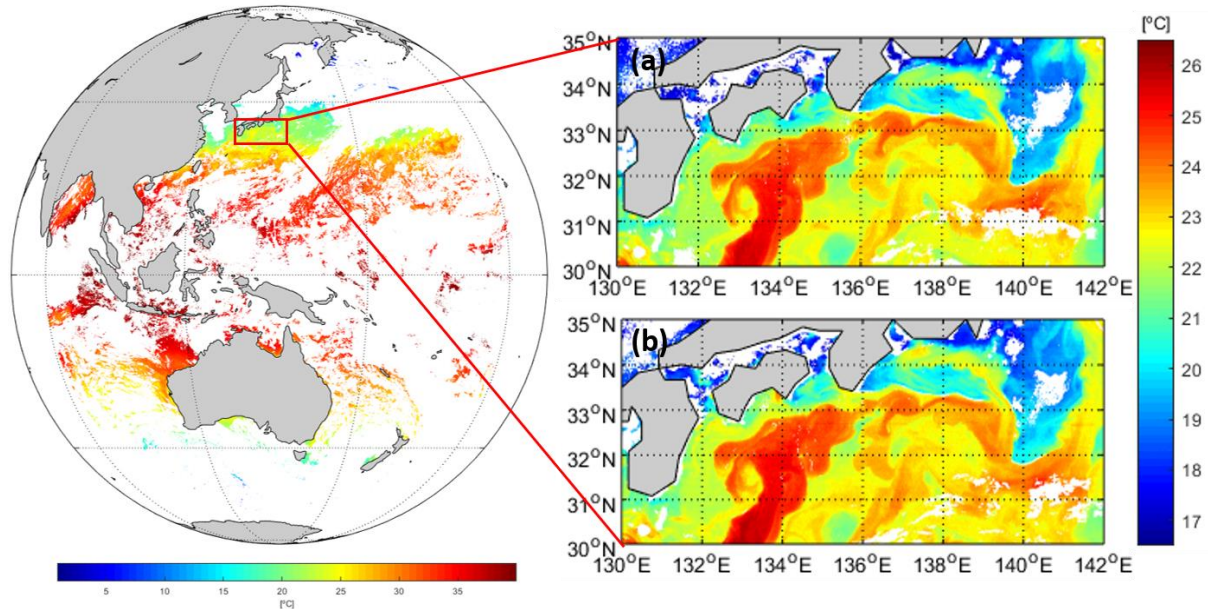


그림 3.1 해류 산출 알고리즘에 적용한 Himawari-8/AHI 산출 해수면온도 예시 자료 그림 (a) 2017년 4월 30일 01:00 UTC, (b) 2017년 4월 30일 04:00 UTC.

알고리즘 테스트를 위하여, GK-2A/AMI 해수면온도 산출 알고리즘으로부터 계산된 Himawari-8/AHI 해수면온도 자료를 입력 자료로 사용하였다. 전구 영역을 기준으로 시·공간해상도는 각각 10 분, 2 km 이며, 동일한 영역에 대하여 관측 시간 기준 3 시간, 6 시간, 12 시간, 24 시간 이전의 해수면온도 영상이 존재한다면 이를 모두 입력하여 계산에 사용하였다. 서로 다른 시간 간격을 갖는 두 장의 영상으로 표적의 이동을 추적하여 해류 벡터 산출이 완료되면 이를 평균하여 해당 화소 위치의 변위 벡터를 최종적으로 출력하게 된다. 그림 3.1 은 입력 자료의 예시 그림으로, (a), (b)에서와 같이 산출 window 내 구름이 5% 미만인 청천 영역의 자료만 해류 산출에 활용될 수 있다.

또한 해류 산출을 위해서는 기본적으로 육지/해양 mask 자료가 필요하다. 육지/해양 mask 파일이 입력되면 화소별로 육지인지 아닌지 판단하여 육지가 아닌 화소만 해류 벡터 계산을 수행하게 된다. 해류 벡터는 level 2 의 해수면온도 자료를 입력받으므로 구름 mask 자료의 경우 이미 적용이 되어있는 상태이며, 추가로 해수면온도 품질 관리 mask 역시 적용되어 있다. 이를 통해 구름이나 여러 다른 에러값들이 최소화된 청천 영역에 대하여 해류를 계산하도록 한다.

3.1.2 해류 산출 결과

2017년 4월 30일 01:00 UTC와 04:00 UTC의 Himawari-8/AHI 해수면온도 자료에 본 알고리즘을 적용하여 얻은 결과를 그림 3.2에 도시하였다. 품질 관리 적용 전과 후의 결과를 그림 4.2(a)와 (b)에 각각 나타내었다. 품질 관리를 위해 template box와 match box의 상관계수가 0.8 이상인 영역에서만 벡터를 산출하도록 하였다. 또한 계산된 해류장을 3×3 으로 나눈 후에 영역의 중심에 위치한 해류의 속력과 방향을 기준으로 주변 해류의 속력이 0.5-2배 범위에 포함되며 방향의 차이가 50° 미만의 값을 갖는 경우에만 중심 해류를 신뢰할 수 있는 결과라 판단하고 최종 해류로 산출하였다. 그 결과 일본 남쪽 연안을 따른 흐름과 사행 현상이 특징적으로 관측되었으며, 쿠로시오 표층 해류의 남쪽 경계와 맞닿아 있는 $32^\circ\text{N}, 136^\circ\text{E}$ 부근과, 사행 경로와 이어진 $31^\circ\text{N}, 142^\circ\text{E}$ 부근에서 발생한 소용돌이(eddy)의 존재도 확인할 수 있었다.

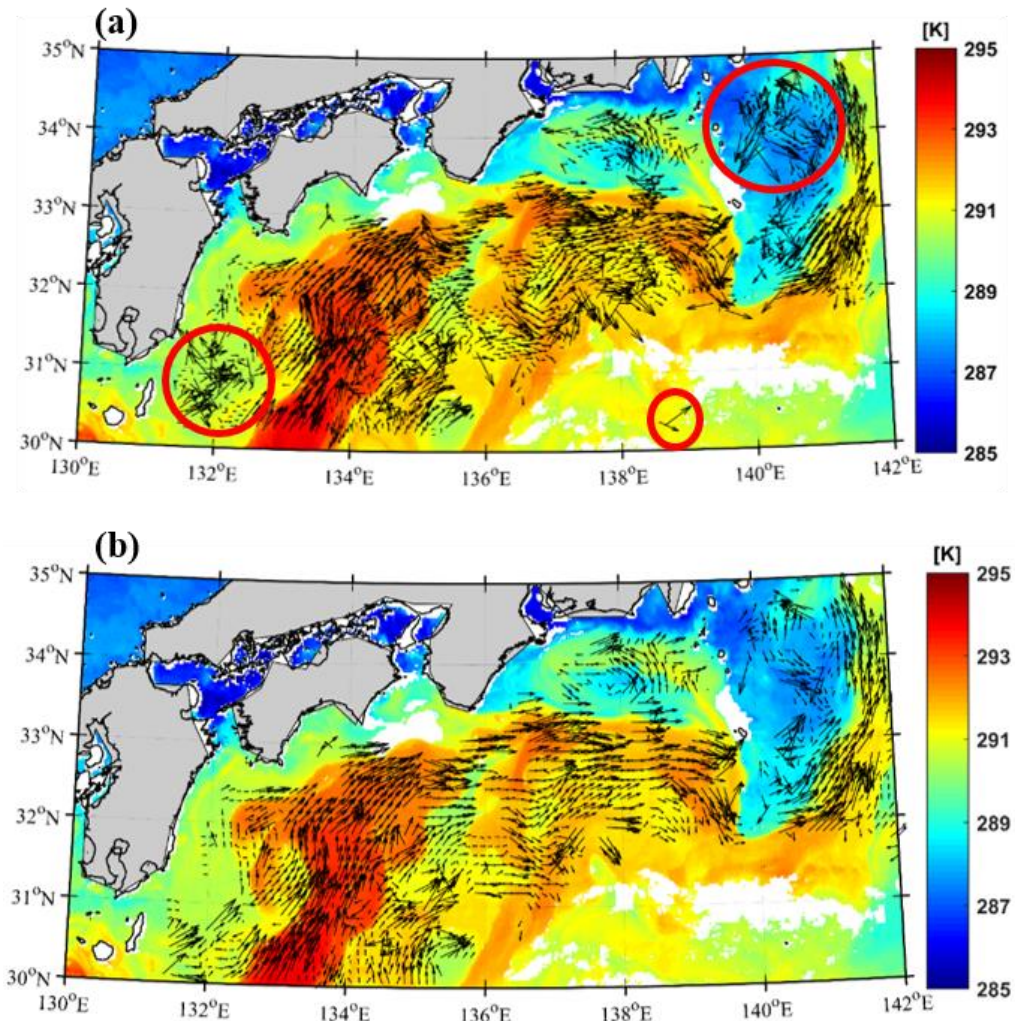


그림 3.2 ZSSD 알고리즘으로 산출된 해류 예시 (2017년 4월 30일 04:00 UTC). (a) 품질 관리 미적용. (b) 품질 관리 적용.

ZSSD method를 적용하기 위해서는 ZSSD가 적용되는 해역의 특성에 맞는 template box와 search area의 크기를 설정해주어야 한다. 현재 알고리즘 내에서는 template box의 크기를 11×11 로 고정하였으며, 지형류 유속 자료와 표층 뜰개 자료로 계산한 월 평균 유속 자료를 바탕으로 두 영상 자료의 시간 간격이 3 시간일 때의 search area의 크기를 25×25 로 결정하였다. 이는 해당 해역에서의 평균적인 해류의 속도와 방향을 고려하여 template box가 이동할 수 있는 영역의 크기를 제한함으로써 match box를 결정할 때 발생할 수 있는 오차를 최소화하기 위한 것이다.

3.1.3 검증자료

최종적으로 산출된 해류를 검증하기 위해 기상청(KMA)에서 제공하는 인공위성 추적 표층 뜰개 자료를 사용하였다. 표층 뜰개의 위치 및 시간 정보를 활용하여 계산한 해류와 형상 추적 기법으로 산출한 결과의 일치점 자료를 선별하여 정확도를 평가하였다. 그림 3.3은 2016년 4월 동안 표층 뜰개 자료의 위치와 속력을 나타낸 예시 그림이다.

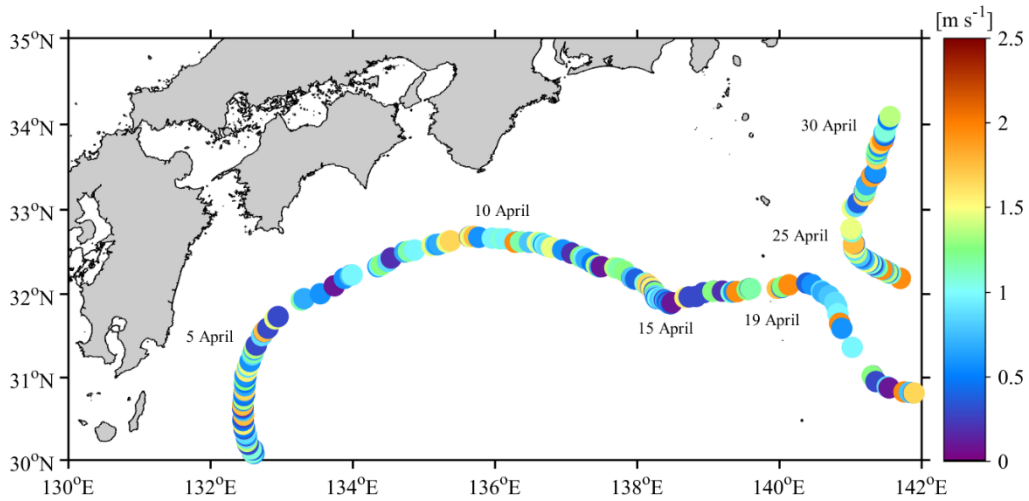


그림 3.3 표층 뜰개 자료로 계산한 해류 (2016년 4월). 색은 각 지점에서 표층 뜰개의 속력을 의미함.

3.2 검증 방법

표층 뜰개 자료로 해류를 계산할 때 강한 바람 등의 요인으로 실제 표층 해류와는 다른 움직임이 발생할 수 있으므로 검증에 활용하기에 앞서 통계적 기법을 적용하여 오차로 판단되는 자료를 제거하였다. 3 ms^{-1} 이상의 값은 분석에서 제외시켰고, 평균값에서 2σ (표준편차) 범위 밖의 값도 오차로 간주하였다. 검증 과정을 수행하기 위한 일치점 자

료 생산을 위하여 GK-2A 기준 화소를 중심으로 ± 6 시간 이내, 3×3 화소 이내 가장 가까운 표층 뜰개 부이 지점을 일치점 자료로 선정하여 일치점 자료를 구축하였다. 산출 해류의 정확도는 표층 해류 속력과 방향에 대한 제곱평균오차(Root Mean Square (RMS) error)와 편차(bias)로 나타내었으며, 각 오차는 식(3.2.1), (3.2.2)와 같이 계산할 수 있다.

$$\text{Bias} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_i - v_i) \quad (3.2.1)$$

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_i - v_i)^2} \quad (3.2.2)$$

위 식에서 n 은 일치점의 개수이고, V_i 와 v_i 는 각각 형상 추적 기법으로 산출한 표층 해류와 표층 뜰개 자료로 계산된 표층 해류이다.

3.3 검증 결과

본 알고리즘을 적용하여 2017년 4월 1일부터 30일까지 총 1개월 간의 해류 벡터를 산출하여 모의검증실험을 수행하였다. 산출된 해류 속력의 제곱평균오차와 편차 값은 각각 0.33 ms^{-1} , 0.06 ms^{-1} 으로 나타났고, 해류 방향의 제곱평균오차와 편차는 각각 17.33° , 2.23° 의 값을 보였다(표 3.1).

표 3.1 산출 해류 검증 결과

	Speed (m/s)		Direction (°)	
	RMS	Bias	RMS	Bias
표층 해류(SSC)	0.33	0.06	17.33	2.23

인공위성 추적 표층 뜰개 자료로 계산한 해류는 실제 표층 해류와 가장 유사한 값을 얻을 수 있다는 장점이 있지만, 넓은 영역에서 산출되는 위성 영상 표층 해류에 대응되는 모든 지점의 자료를 획득하기에 어려움이 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 AVISO(Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic)에서 제공하는 MADT(Map of Absolute Dynamic Topography)로부터 계산한 지형류 유속 벡터장을 검증에 함께 활용하였다(그림 3.4(a)). 비록 ZSSD 알고리즘으로 산출한 해류 지형류 성분뿐만 아니라 바람의 효과로 발생하는 에크만 편류(Ekman drift), 조류 등이 모두 혼재되어 나타나지만, 연안 일부를 제외한 대부분의 해역에서는 통상적으로 지형류 성분의 비중이 다른 성분에 비해 크게 나타나기 때문에 인공위성 고도계 자료로 계산한 해류가 정성적인 검증 자료로서 가치가 있다고 판단된다. 단, 자료의 시간 해상도가 1일이고 공간 해상도가 약

25 km이기 때문에 아직까지는 그림 3.4(b), (c)와 같이 정성적인 비교 정도로만 활용이 가능하다.

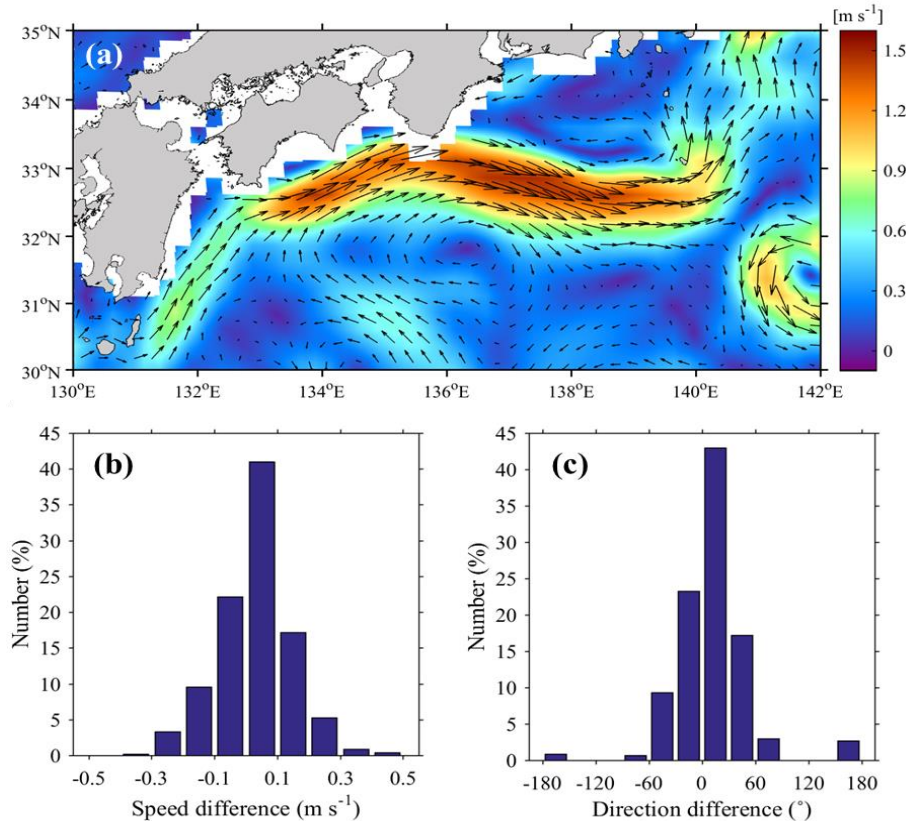


그림 3.4(a) 평균 해수면 고도 (Maps of Absolute Dynamic Topography, MADT) 자료로 계산한 지형류. ZSSD 알고리즘으로 산출한 해류와 지형류의 (b) 속도 차이와 (c) 방향의 차이 분포.

4. 현업운영 시 고려사항

4.1 수치계산 고려사항

- 구름, 해빙, 안개 마스크를 적용하여 청천 영역에서만 해류가 산출될 수 있도록 해야 함.
- Template box와 search area는 정사각형 형태여야 하며, 정사각형 한 변의 크기는 홀수여야 함.
- 각각의 template box에 대응하는 해류 벡터는 template box의 중심 화소에 위치시켜야 함.

4.2 프로그래밍 및 절차상의 고려사항

- 해류 산출 알고리즘에서 수치계산에 가장 많은 시간이 소요되는 부분이 ZSSD를 계산하고 ZSSD 최소값을 찾는 과정이므로, 처리 속도의 개선을 위해서는 이 부분을 수정 보완해야 함.

4.3 품질 평가 및 진단

- 해류 벡터가 산출되는 지점에서 구름, 안개, 해빙으로 인한 오염이 있는지를 판단하고, 오염되지 않은 화소일 경우 그 화소에서 산출된 벡터의 상관계수와 공간 균일성을 확인한 후에 두 품질 관리를 모두 통과한 경우에만 최종 산출물로 출력한다.

4.4 예외사항 처리

- 해류 산출 시 3시간, 6시간, 12시간, 24시간 전의 해수면온도 영상이 입력 자료로 사용된다. 6시간, 12시간, 24시간 전의 영상 중 자료의 부재가 발생할 경우에는 3시간 전의 영상 자료로 해류 벡터를 산출할 수 있도록 한다. 만약 3시간 전의 입력 자료가 부재할 경우에는 해류 벡터 산출을 할 수 없다.

4.5 검증 알고리즘

해양에서 발생하는 실제 해류의 관측 자료를 실시간으로 얻는 것은 쉬운 일이 아니다. 연안 가까이에 설치된 계류 부이나 표층 뜰개 자료를 얻을 수 있지만 매우 제한적이고, 연구조사선에 의한 관측도 불규칙적이고 외부로 잘 공개되지 않기 때문에 실시간으로 혹은 준실시간으로 자료를 얻기가 용이하지 않다. 따라서 실측 자료의 부재 시 대체할 수 있는 방안이 필요하며, 그 중 대표적인 경우가 수치모델 자료이다. NOAA GOES-R/ABI

ocean dynamics product algorithm에서도 미군 해군의 NCOM (Navy Coastal Model) 자료를 검증자료로 활용하고 있다.

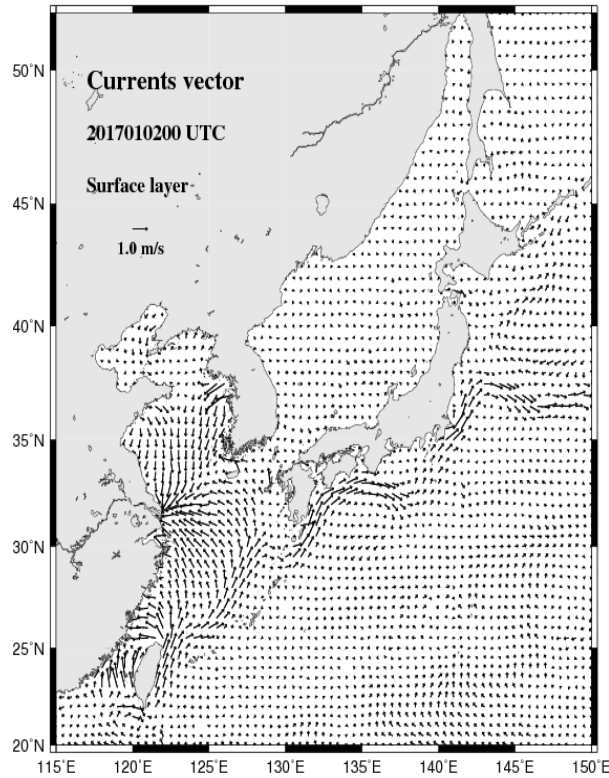


그림 4.1 지역 해양순환 모델 예시 그림 자료 (KMA 제공)

한반도 주변 해역의 경우, 기상청에서 지역 해양순환모델(ROMS)을 사용하여 해양 순환을 모의한 결과를 그림 4.1과 같이 제공하고 있다. 동아시아 해역 (115-150° E, 20-52° N)에 대하여 3시간 간격으로 72시간 예측 가능한 이 자료는 현재 기상청에서 1일 1회 제공되고 있으며, 해류 모의 결과의 공간 해상도는 약 8 km이다. 공간 해상도 측면에서는 해류 알고리즘으로 산출한 해류 벡터를 검증하기에 적절한 자료로 여겨진다. 하지만 아직 모델로 산출한 해류의 정확도에 대한 평가가 이루어지지 않았기 때문에 알고리즘 산출물에 대한 검증 자료로써 충분히 신뢰할 수 없다는 한계점이 있다.

5. 가정 및 제한

5.1 성능

- 잘못된 구름, 해빙, 안개 마스크 정보가 입력되어 실제 해수면온도 값이 아닌 정보가 화소로 인식될 경우 이미지 매칭 과정에서 오차가 발생하여 최종 해류 산출물의 정확도가 저하될 것으로 예상됨.
- Template box와 search area의 크기를 어떻게 설정하느냐에 따라 산출되는 해류 벡터의 정확도가 달라지므로, 영역 크기를 설정할 때 해당 해역에서의 해류에 대한 기본적인 정보를 참고해야 함.
- 해류 산출물의 정확도는 매치업 개수에 따라 크게 좌우되므로, 안정적인 정확도 산출을 위해서는 매치업 자료를 축적하여 충분한 검증 기간을 확보하는 것이 필요함.

5.2 예상 센서 성능

- 해당 사항 없음.

5.3 개선을 위한 사전 계획

- Window의 크기, 영상 간 산출 시간 간격, 품질 검사에 적용되는 임계값 등의 정보는 산출된 벡터를 해석하고 연구에 적용하는 데 중요한 영향을 미치며, 이러한 값들은 여러 단계의 시험을 실시하여 경험적으로 최종 결정할 예정임.
- 산출된 해류 벡터의 정확도 평가를 위해서는 적절한 검증 자료를 활용하는 것이 반드시 필요하므로, 이를 위해 다각도로 긴밀한 협력관계가 요구됨.

6. 참고문헌

- Barton, I.J., 2002. Ocean currents from successive satellite images: The reciprocal filtering technique, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(10): 1644-1689.
- Bowen, M., W.J. Emery, J.L. Wilkin, P.C. Tildesley, and I.J. Barton, 2002. Extracting multiyear surface currents from sequential thermal imagery using the maximum cross-correlation technique, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(10): 1665-1676.
- Emery, W.J., M.J. Collins, W.R. Crawford, and D.L. Mackas, 1986. An objective method for computing advective surface velocities from sequential infrared satellite images, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 91(C11): 12865-12878.
- Huang, N.E., 1979. On Surface drift currents in the ocean, *Journal of Fluid Mechanics*, 91(1): 191-208.
- Leese, J.A., C.S. Novak, and B.B. Clark, 1971. An automated technique for obtaining cloud motion from geosynchronous satellite data using cross correlation, *Journal of Applied Meteorology*, 10(1): 118-132.
- Marcello, J., Eugenio, F., and Marqués, F, 2007. Performance of region-based matching techniques to compute the ocean surface motion, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Barcelona, Spain, Jul 23-28, pp. 937-940. 937-940
- Marcello, J., F. Eugenio, F. Marqués, F. Hernández-Guerra, and A. Gasull, 2008. Motion estimation techniques to automatically track oceanographic thermal structures in multisensor image sequences, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(9): 2743-2762.
- Matthews, D.K., and W.J. Emery, 2009. Velocity observations of the California Current derived from satellite imagery, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114(C8).
- Tokmakian, R., P.T. Strub, and J. Mclean-Padman, 1990. Evaluation of the maximum cross-correlation method of estimating sea surface velocities from sequential satellite images, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 7(6): 852-865.
- Wahl, D.D., and J.J. Simpson, 1990. Physical processes affecting the objective determination of near-surface velocity from satellite data, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 95(C8): 13511-13528.