

GLORYS를 이용한 2007년 8월 동해 에디 특성 파악

전상규

국립부경대학교 지구환경시스템과학부 해양학전공

Characterization of Eddy Features in the East Sea in August 2007 Using GLORYS

SANGGYU JEON

Division of Earth and Environmental System Sciences, Pukyong National University, Busan,
Republic of Korea

1. 서론

해양의 중규모 에디는 전 세계 바다에 널리 분포하며, 운동량, 열, 질량 등 해양의 전달 과정에서 중요한 역할을 한다(Penghao Wang, 2022). 일반적으로 에디는 지구 자전으로 인한 베타효과(β -effect)로 인해 서쪽으로 이동하며, 남북 방향으로의 이동도 일어나 전 지구적 규모에서 수평 열과 염분 수송을 발생시킨다(Changming Dong, 2014). 소용돌이로 불리는 에디는 회전 방향에 따라서 시계 방향으로 회전하는 난수성 에디와 시계 반대 방향으로 회전하는 냉수성 에디로 구분된다. 난수성 에디의 중심 온도는 주변보다 높으며 평균 직경과 수명은 각각 100~150 km 와 3~4개월로 알려져있다(Lee and Niiler, 2010; 진현근, 2019). 일반적으로 해양의 대규모 운동에서 베타효과에 의해 발생하는 로스비파(Rossby Wave)의 속도는 5-10 cm/s이다(Penghao Wang, 2022). 에디 또한 유사한 속도로 이동하기 때문에 에디 구조를 관찰하는데 어려움이 있다. 반면 동해에서 발생하는 울릉 난수성 에디는 이동속도가 느려 움직임이 거의 나타나지 않기 때문에 다른 지역에서 발생하는 에디에 비해 구조를 파악하는데 용이하다(Lee and Niiler, 2010).

에디는 다양한 요소의 상호작용으로 인해 발생하므로 예측에 어려움을 겪는다. 그러나 인공위성의 관측에 의해 얻은 해면 고도 자료로 동해에서 발생하는 에디의 대략적인 위치를 확인할 수 있다. 천천히 이동하긴 하지만 짧게는 30일에서 길게는 일 년이 넘도록 장기간 지속되는 동해의 에디를 현장관측을 통해 수온구조, 염분, 유속 등 에디의 구조 및 특성을 파악하는 데에는 어려움이 있다. 이와 같은 이유로 본 연구에서는 중규모 에

디의 운동을 모의할 수 있는 고해상도의 모델 자료를 이용해 2007년 8월에 발달한 에디의 특성을 살펴보고자 한다.

본 연구의 순서는 다음과 같다. 2장에서 연구에서 사용한 자료와 분석 방법에 대해 설명하고, 3장에서 재분석 자료에 모의된 2007년 8월 동해에서 발달한 난수성 에디의 구조 및 특성을 서술했다. 4장에서는 3장에서 나타난 결과들을 분석하고 요약했다.

2. 자료 및 방법

본 연구에서는 수치모델 자료를 사용하였다. 사용한 모델 자료는 위성 관측을 통한 해수면 온도, 해수면 이상(SLA, Sea Level Anomaly), 해빙 농도 및 현장 관측으로 수집된 수심에 따른 온도와 염분 자료가 동화되어 있는 Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS)의 Global Ocean Physics Reanalysis (이하 GLORYS)이다. 모델의 공간 해상도는 $1/12^\circ$ 이고, 연직으로 50개의 층으로 구성되어 있다(CMEMS, 2023). 모델 결과를 검증하기 위해 CMEMS의 Global Ocean Gridded L 4 Sea Surface Heights And Derived Variables Reprocessed 1993 Ongoing을 사용하여 위성 고도계 격자 해수면 이상(SLA) 자료와 GLORYS 자료의 Sea surface height above geoid (이하 SSH)와 비교하였다. 연직 수온구조는 국립수산물과학원에서 격월로 조사하는 정선해양관측자료를 사용하여 비교를 진행하였다.

에디의 발생을 판단하기 위해 GLORY의 SSH 자료에서 5개 이상의 독립적인 등고선이 나타날 때 에디가 생성되는 위치와 시기를 확인하였다. 이 에디를 발달한 연도와 월을 기준으로 WE07-08이라 명명하고 0.49 m와 92.3 m에서 나타난 WE07-08 내부의 수온, 염분, 유속 등을 정량적으로 파악하였다. 이후 에디의 중심을 찾기 위해 제한된 범위에서 SSH 최대가 나타나는 위도와 경도를 에디가 지속된 기간동안 하루마다 추출하고 동일한 SSH 값이 나타나는 위치가 있는 경우 위도와 경도의 평균을 내어 에디의 중심으로 판단하였고 이를 통해 에디의 이동을 나타내었다. 에디의 면적을 구하기 위해 contour 내부에 포함된 점 하나당 50 km²로 계산하였고 contour 내부에서 나타난 SSH의 최댓값과 최소값의 차이인 해수면 높이 진폭 (SSH Amplitude)를 나타내었다(Fig. 1). 이후 에디의 중심 기준으로 남북방향 위도면과 동서방향 경도면으로 나타낸 수온과 염분의 연직구조를 나타내었고, 마찬가지로 유속도 방향에 맞게 연직구조로 나타내었다. 수온과 염분의 연직구조를 알아보기 위해 동해에서 나타나는 대표적인 수괴의 특징으로 10°C와 5°C 등온선을 나타내었고, 34.0와 34.3 등염분선을 함께 나타내어 살펴보았다.

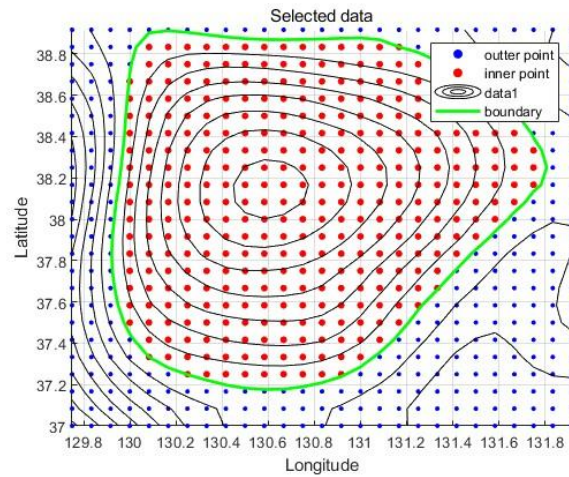


Fig. 1. Data Selection Method

3. 결과

3.1. 모델 자료 검증

CMEMS의 위성 고도계 자료와 GLORYS 자료를 사용하여 재분석자료가 2007년 8월의 해수면 높이를 잘 모의하는지 확인해본 결과, WE07-08 발달시기인 8월 위도 울릉도 인근의 해수면 높이의 구조가 위치에 맞게 잘 모의되었다(Fig. 2).

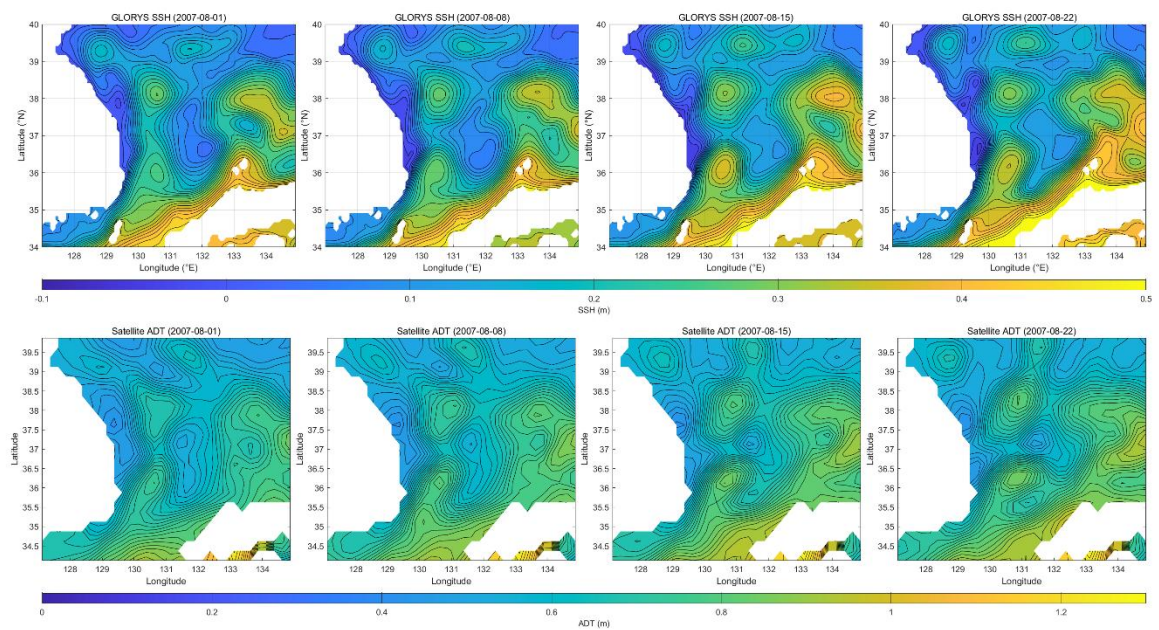


Fig. 2. GLORYS SSH (top), Satellite ADT (bottom) in August, 2007

마찬가지로 국립수산물과학원 CTD 정선관측자료와 GLORYS 자료를 사용하여 재분석자료가 수온의 단면구조를 잘 모의하는지 비교해보았다. 정선관측은 격월로 진행하기 때문에 울릉도 인근을 통과하는 105번 정선관측라인 자료를 사용해 2007년 수온의 단면구조를 비교한 결과 재분석자료가 수온의 단면구조를 잘 모의하는 것으로 나타났다(Fig. 3). 이어서 WE07-08의 생성, 최대 규모 발달, 소멸 시기를 구분하고 각각의 시기마다 나타난 구조 및 특성을 기술하였다.

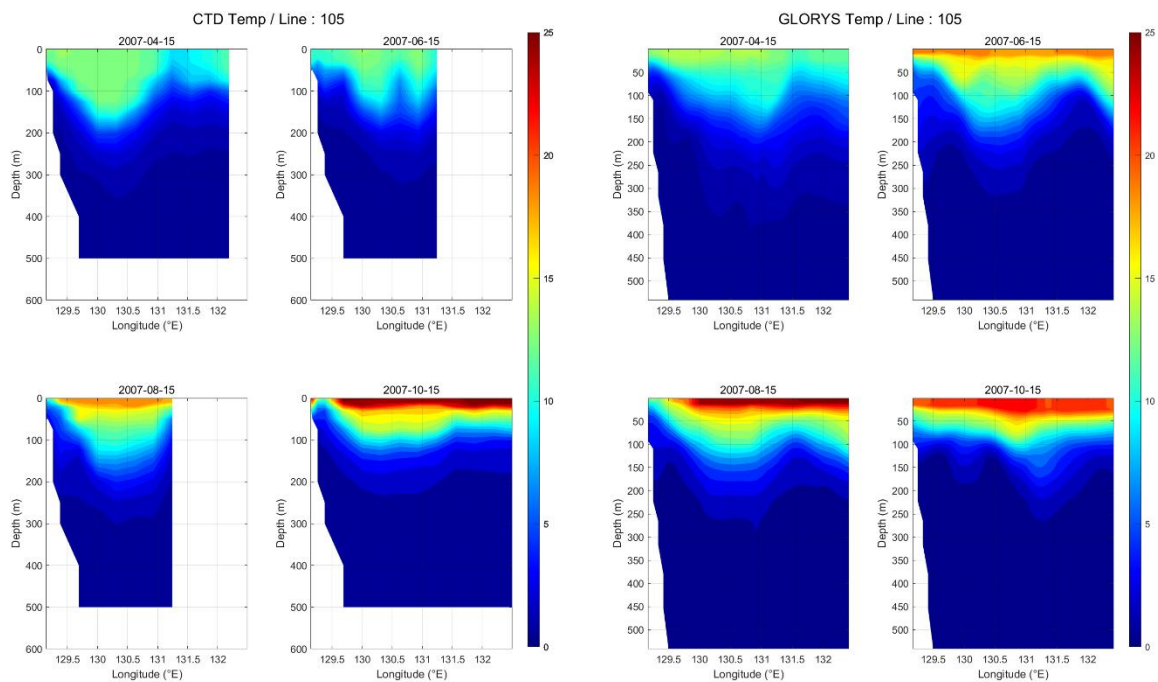


Fig. 3. CTD temperature data (left), GLORYS temperature data (right) in 2007

3.2. WE07-08의 생성

WE07-08는 2007년 7월 30일 생성되었다. 생성 당일 표층의 평균 유속은 23.78 cm/s로 나타났고, 표층 유속의 최대는 41.81 cm/s로 에디 중심 서쪽에서 관찰되었다(Fig. 4). 이시기 에디 내부 표층 수온의 평균은 23.48 °C로 나타났으며, 표층 염분의 평균은 33.48이었다. 수심 92.3 m의 에디 내부 평균 유속은 16 cm/s였고, 최대 유속은 26 cm/s로 유속은 표층이 상대적으로 더 빨랐지만, 최대 유속이 나타난 위치는 표층과 동일하게 에디 중심 서쪽에서 나타났다(Fig. 4). WE07-08 생성 당일 에디 내부에서 해수면 높이(SSH)의 최댓값과 최솟값의 차이인 해수면 높이 진폭(Sea Surface Height amplitude)은 8.42 cm였다.

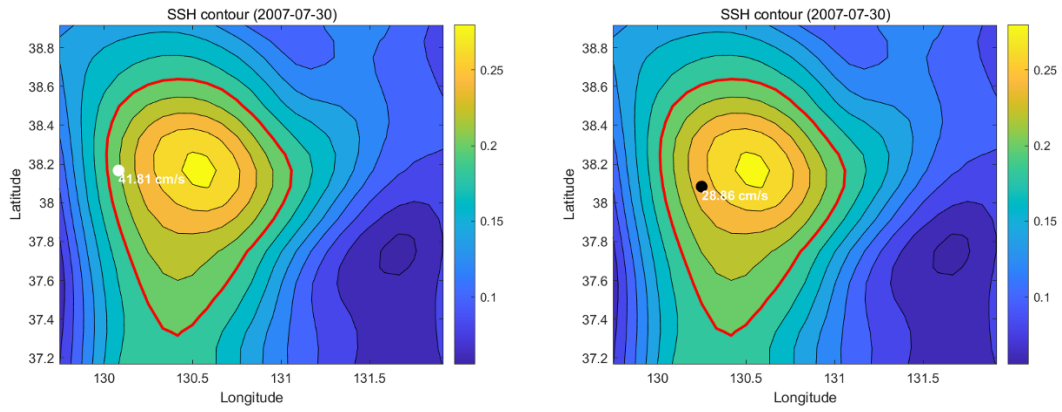


Fig. 4. SSH contour for 30th July 2007, red line is the boundary of eddy, and white point is where the maximum velocity appears at 0.49m (left), the black point is where the maximum velocity appears at 92.3m (right)

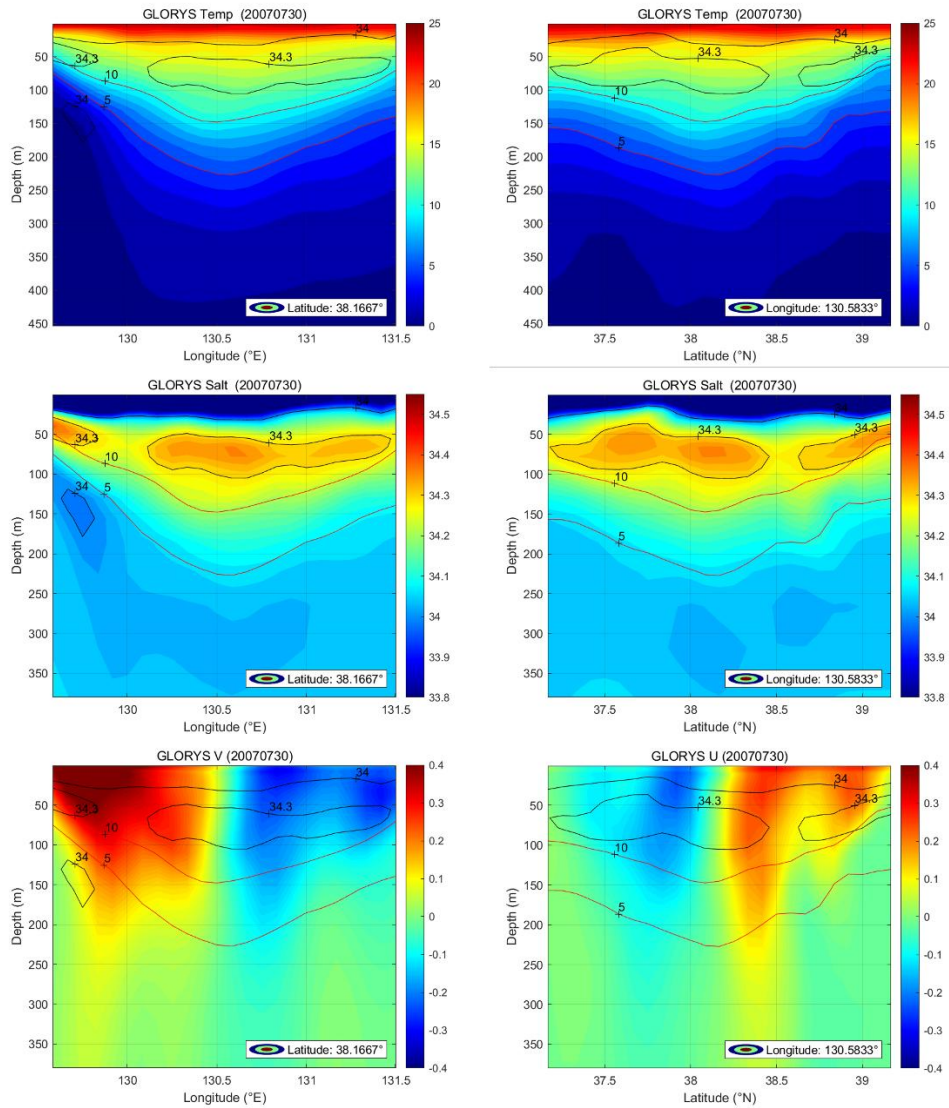


Fig. 5. Zonal (left) and meridional (right) temperature (top), salinity (middle), and velocity section across WE07-08 (bottom)

이 시기 에디의 중심을 기준으로 수온, 염분, 유속 각각을 동서방향과 남북방향 수직 단면으로 나타내었다(Fig. 5). WE07-08의 수온 구조는 동서방향과 남북방향 모두 U자 형태를 보이는데 이는 일반적으로 에디에서 나타나는 수온 구조이다. 염분의 경우 에디 내부에서 가장 높게 나타났으며, 동서방향 수직단면과 남북방향 수직단면에서 각각 동쪽에 비해 서쪽이, 남쪽에 비해 북쪽의 염분이 더 높은 것으로 보이는데 이는 고염의 동한난류의 영향에 의해 나타났다고 판단된다. 유속은 동서방향 유속보다 남북방향 유속의 세기가 더 강하게 나타난다. 이러한 특징은 이 시기 남북방향으로 더 길쭉한 WE07-08의 모습과 연관성이 있어보였다. 또한 남북방향 유속에서 남쪽에서 북쪽으로 흐르는 북향류가 남향류에 비해 강하게 나타났는데, 이는 앞서 말한 동한난류의 영향에 의해 나타난 것으로 판단된다.

3.3. WE07-08의 최대 규모 발달

WE07-08의 해수면 높이 진폭은 8월 14일에 14.77 cm로 가장 컸으며, 이는 WE07-08가 생성되었던 7월 30일과 비교하였을 때 약 2배에 달한다. 따라서 이 시기를 WE07-08가 가장 발달했던 시기로 판단하였다. 이 시기 에디 내부 표층 수온의 평균은 24.05 °C였으며, 표층 염분의 평균은 33.16이었다. 표층의 평균 유속은 25.34 cm/s로 나타났고, 최대 유속은 67.25 cm/s로 에디의 서쪽에서 나타났다. 수심 92.3 m에서 에디 내부의 평균 유속은 15 cm/s였고, 최대 유속은 32.04 cm/s였으며 표층과 동일하게 에디 중심 서쪽에서 나타났다(Fig 6). 생성 당일과 비교하였을 때 최대 유속이 나타나는 위치가 표층과 수심 92.3 m에서 모두 에디의 중심에서 멀어졌다.

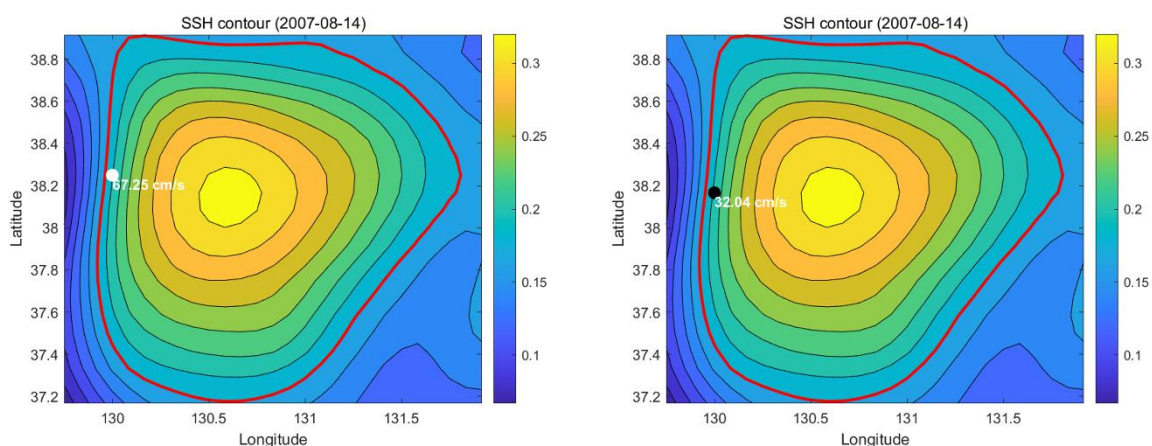


Fig. 6. Same as Fig. 4, but for 14th August 2007

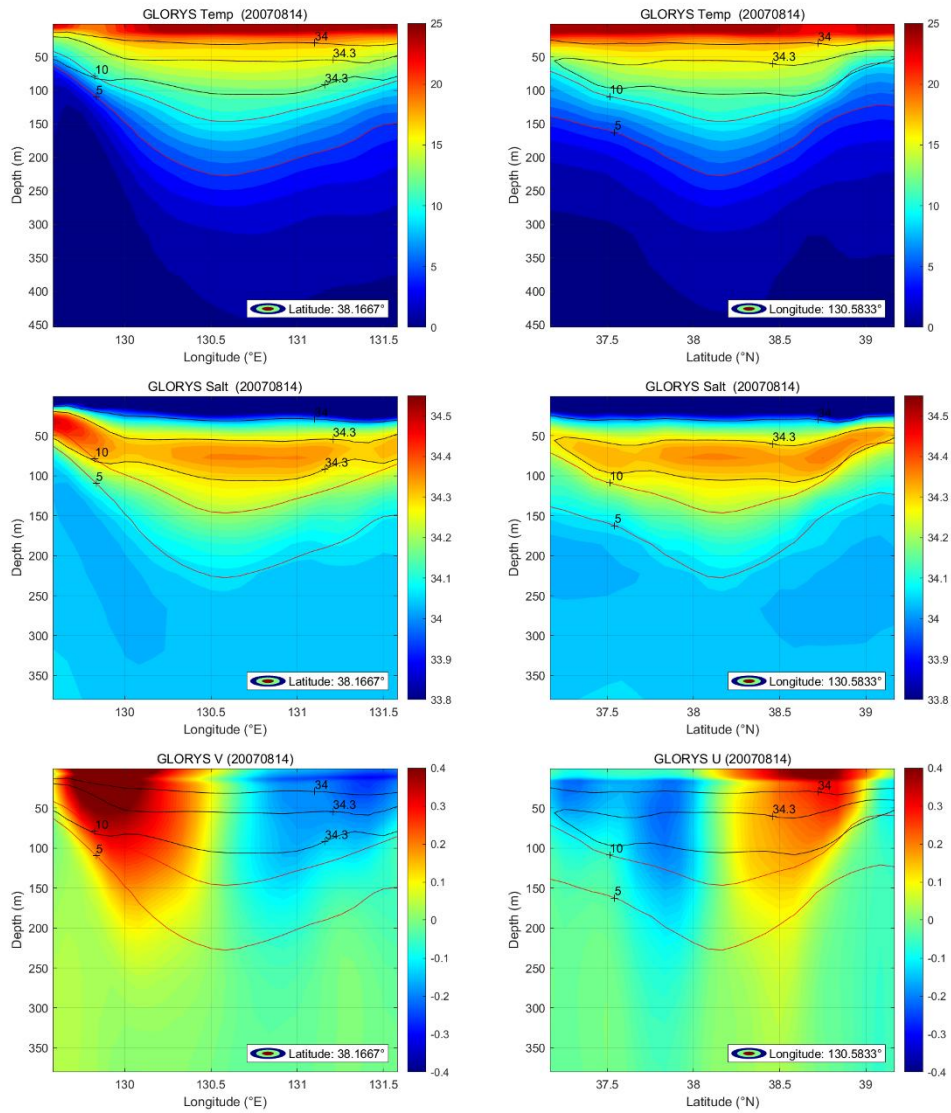


Fig. 7. Same as Fig. 5, but for 14th August 2007

Fig. 5와 마찬가지로 WE07-08가 최대 발달했을 때의 수온, 염분, 유속의 단면구조를 나타내었다(Fig. 7). 수온 단면구조는 육안으로 변화를 파악하기 힘들어 뒷부분에선 5 °C와 10 °C 등온선을 따로 그려 나누었던 3개의 시기를 확인했다(Fig. 11 & Fig. 12). 염분은 생성 당일에 비해 에디 중심의 염분이 높아졌으며 북향류와 동향류의 염분이 각각 남향류와 서향류보다 높은 것은 동일하나 생성 당일보다 염분이 더 높았다. 이 시기에 WE07-08의 서쪽은 굴곡지지않은 직선 형태였다. 이러한 에디의 형태는 동한난류의 영향으로 강해진 북향류가 나머지 남향류, 동향류, 서향류에 비해 높게 나타난 결과로 판단된다. 또한 생성 당일 약했던 서향류가 최대 발달 시기에 비교적 강해진 것을 확인할 수 있다.

3.4. WE07-08의 소멸

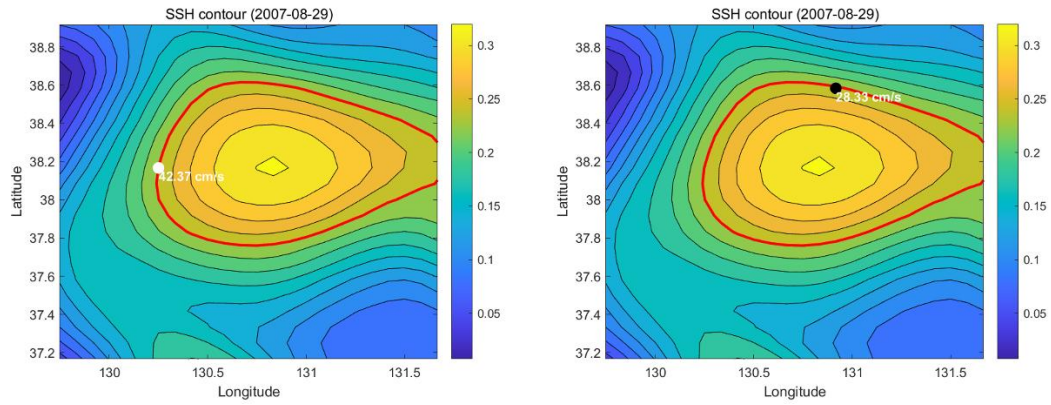


Fig. 8. Same as Fig. 4, but for 29th August 2007

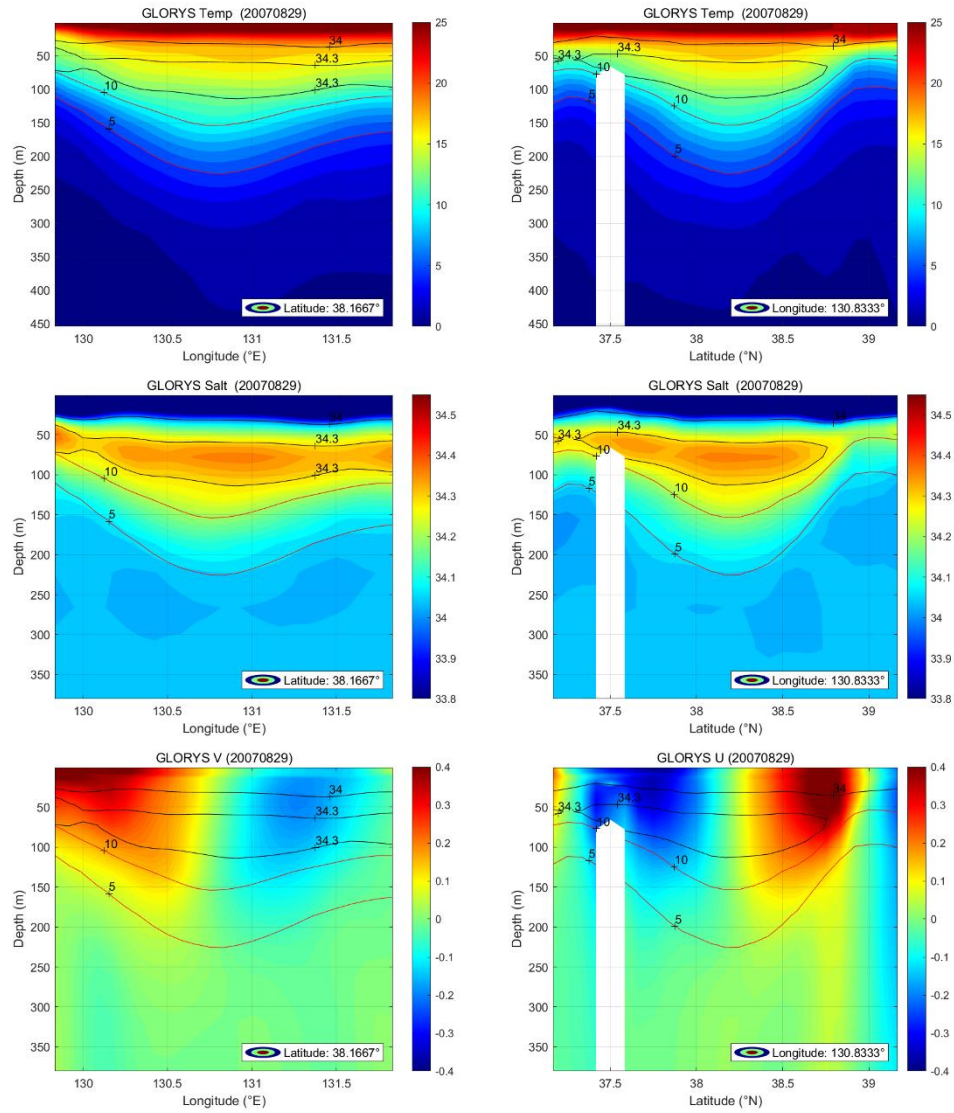


Fig. 9. Same as Fig. 5, but for 30th August 2007

WE07-08는 2007년 8월 30일에 소멸되었다. 소멸 전날인 8월 29일 해수면 높이 진폭은 8.18 cm였으며, 에디 내부의 표층 수온과 표층 염분의 평균은 각각 25.74 °C와 33.55였다. 에디 내부 표층 유속의 평균과 최대는 각각 24.6 cm/s와 42.37 cm/s로 나타났으며 최대 유속은 에디의 서쪽에서 나타났다. 수심 92.3 m에서의 평균 유속과 최대 유속은 각각 18 cm/s와 0.28 cm/s였다. 앞선 두 시기에선 표층과 92.3 m에서 유속의 최대가 나타나는 곳이 에디 중심의 서쪽으로 동일하였는데 소멸 전날 92.3 m에서 유속의 최대는 에디 중심의 북쪽에서 나타났다(Fig. 8).

수온과 염분의 수직 단면을 봤을 때, 남북방향 단면에서는 수온과 염분 모두 에디의 일반적인 특징인 U자 형태의 구조가 뚜렷하다. 하지만 동서방향 단면을 보았을 때 수온과 염분의 구조가 U자 형태를 유지하지 못하고 에디의 동쪽이 붕괴된 모습을 확인할 수 있다. 이는 앞선 두 시기와 비교하였을 때 북향류와 남향류의 유속이 감소하고, 동향류와 서향류의 유속이 높아진 유속 단면과 연관성이 있어보였다. WE07-08의 소멸 전날 모양도 생성 당시 남북방향으로 길쭉했던 모양과 달리 동서방향으로 길쭉해진 모습을 확인할 수 있다.

3.5. WE07-08의 생애

WE07-08이 생성되고 소멸되기까지 나타난 시간에 따른 에디 내부 특성의 변화를 나타내었다(Fig. 10). 에디 내부의 표층 수온은 시간에 따른 특별한 변화를 보이지 않고 계속해서 증가하였다. 에디 내부의 평균 염분은 WE07-08가 생성된 이후 점차 감소하다가 8월 7일에 염분이 가장 낮았고 이후 다시 점차 증가하였다. 에디 내부의 평균 유속의 경우 21~29 cm/s내로 큰 차이가 나타나진 않았지만 에디 내부의 최대 유속의 경우 30~80 cm/s로 평균 유속에 비해 큰 차이가 나타났다. 에디 내부의 최대 유속이 가장 빨랐던 시기에 최대 유속이 에디의 서쪽에서 나타났다는 점에서 이러한 차이는 WE07-08가 동한 난류의 영향을 많이 받은 시기와 적게 받은 시기의 차이에서 비롯된 것으로 판단된다. 시간에 따른 WE07-08면적의 변화를 보면 에디 내부 평균 유속이 가장 느렸던 8월 4일 이후 급격하게 증가하였다. 또한 WE07-08의 면적이 점차 커지는 것이 아닌 1-2일 만에 급격하게 확장한 뒤에 천천히 크기가 줄어드는 것을 알 수 있다. 해수면 높이 진폭은 WE07-08가 최대로 발달하였을 때를 판단하는 지표로 사용하였다. 해수면 높이 진폭이 14.77 cm로 가장 컸던 8월 14일을 최대 규모로 발달한 시기로 보았을 때, 해수면 높이 진폭은 WE07-08가 생성된 이후 점차 증가하다가 최대 규모로 발달한 이후 점차 감소하였다.

각 시기별 남북방향 5 °C와 10 °C 등온선의 변화를 살펴보면 등온선이 가장 깊은 곳을 에디 중심 인근으로 보았을 때, WE07-08의 중심이 시간이 지남에 따라 북쪽으로 이

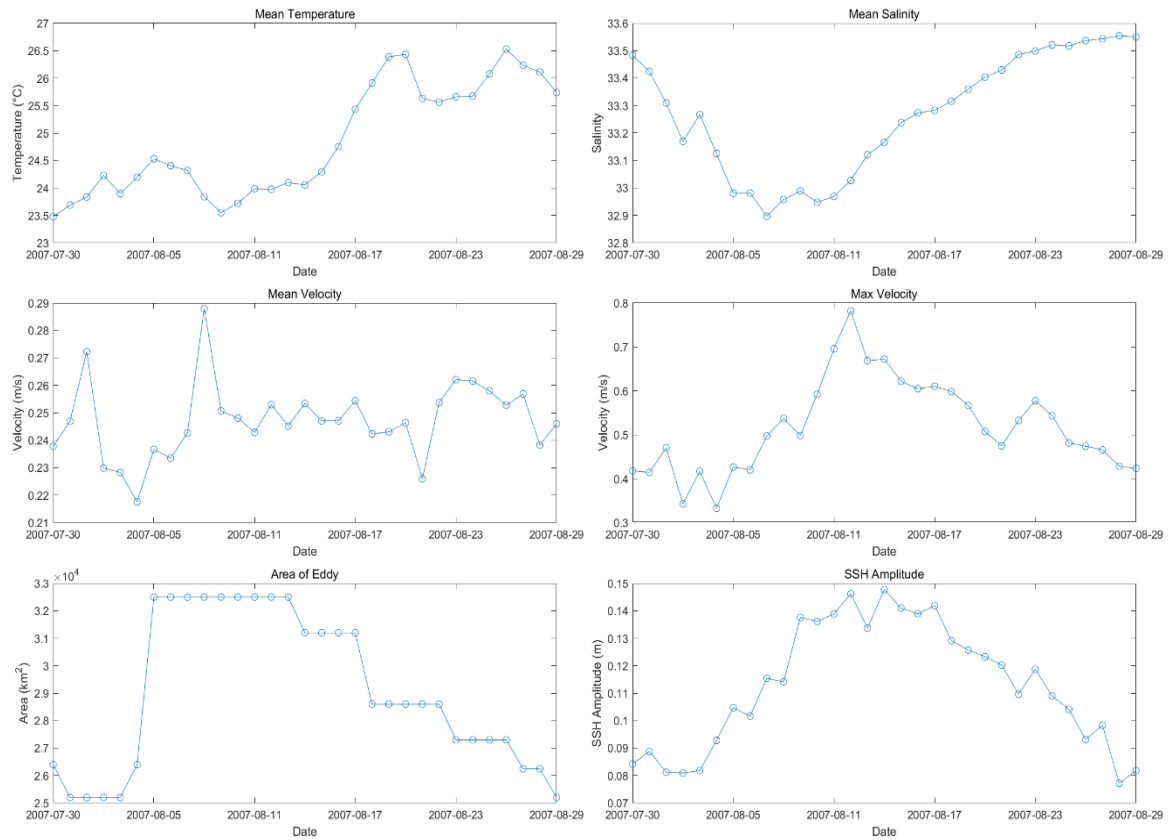


Fig. 10. Changes in characteristics of WE07-08

동하는 것을 알 수 있다. 또한 U자 형태의 수온 구조를 가지며 각각의 등온선 깊이가 점점 깊어지는 것을 확인할 수 있다(Fig. 11).

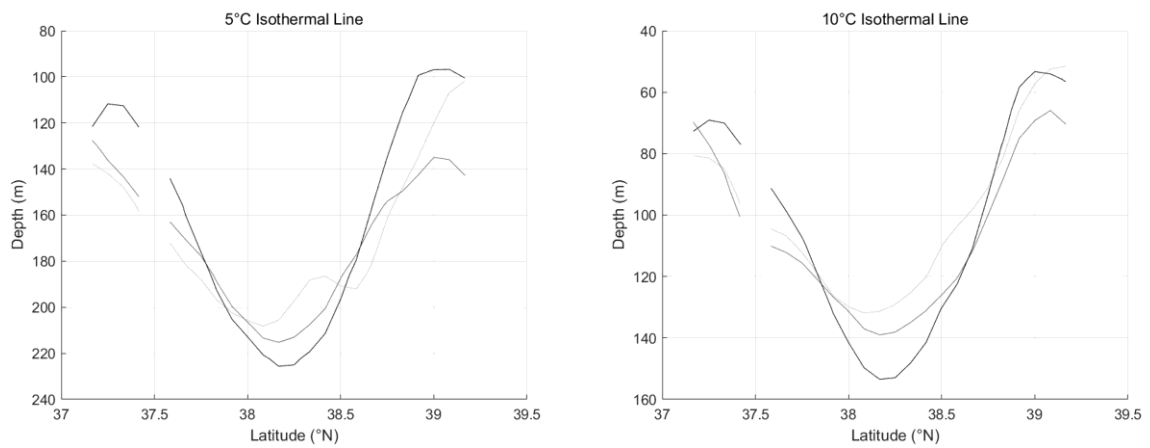


Fig. 11. Isothermal lines on the time of creation (white) to before the time of extinction (black). north-south direction

반면 WE07-08의 소멸 직전 시기 수온 단면에서 언급했던 것처럼 동서방향으로 5 °C와 10 °C 등온선의 변화를 보았을 때, 시간이 지남에 따라 에디의 수온 구조가 U자 형태를 유지하지 못하고 무너지며 에디가 소멸되는 모습을 확인할 수 있었다. 또한 남북방향의 등수온선 깊이 변화와는 달리 동서방향의 등수온선 깊이 변화에는 뚜렷한 변화를 찾을 수 없었다(Fig. 12).

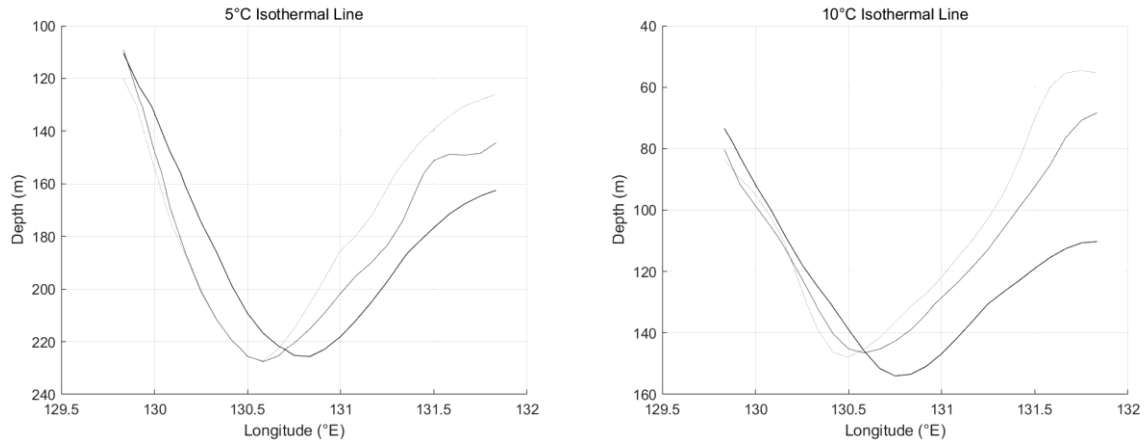


Fig. 12. Same as Fig. 11, but for east-west direction

마지막으로 GLORYS 자료의 SSH가 최대가 나타나는 위도와 경도를 찾아 에디 중심의 이동을 나타냈다(Fig. 13). 에디가 생성되고 소멸된 기간 동안 WE07-08의 중심은 남북방향으로 약 0.2 °, 동서방향으로 약 0.5 ° 이동하였으며 위도 38 °N를 기준으로 대략적인 이동거리를 계산하였을 때, 한 달 동안 약 64.7 km를 이동하여 이를 초당 속도로 계산하면 WE07-08의 이동속도는 약 2.4 cm/s으로 서론에서 언급한 일반적인 에디의 이동속도가 5-10 cm/s과 비교했을 때 이동속도가 절반 이상 느렸으며, 생성과 소멸 지점의 차이는 약 25.6 km로 거의 이동하지 않은 에디라고 할 수 있다(Fig. 13).



Fig. 13. WE07-08 movement path

4. 요약 및 제언

본 연구에서는 수치모델인 GLORYS 자료를 이용하여 2007년 8월 울릉도 북쪽에서 발달한 난수성 에디의 이름을 WE07-08로 명명하고 그 구조와 특성을 기술하였다. WE07-08은 2007년 7월 30일 생성되고 8월 14일에 최대로 발달하여 8월 29일을 마지막으로 소멸하였다.

각 시기마다 에디의 모양에 차이가 있었는데 이는 에디 내부 유속 구조와 연관성이 보였다. 각 시기의 유속 구조를 보면 동한난류의 영향으로 북향류의 유속이 가장 빨랐다. 소멸 직전 시기에는 앞선 두 개의 시기와 다르게 에디 내부에서 동향류와 서향류의 세기가 강해졌다. 이로 인해 동서방향의 등온선 구조가 U자 형태를 유지하지 못하고 에디의 동쪽 등온선의 깊이가 깊어지게 되면서 WE07-08가 소멸하였다.

WE07-08 내부의 염분은 생성되었을 당시보다 동한난류의 영향이 컸던 시기가 지나면서 증가하였고 소멸 직전까지 유지되었다. 본 연구에서는 다루지 않았지만, 이미 생성된 에디와 고염의 해류가 만나 어떻게 상호작용하여 에디 중심의 염분을 높이는지 알아보는 것도 앞으로의 좋은 연구주제가 될 수 있다.

WE07-08가 소멸하기 직전 남북방향의 수온구조는 U자 형태였다. 반면 동서방향의 수온구조는 U자 형태를 유지하지 못했다. 이는 에디를 파악할 때 남북방향과 동서방향 모두 고려해야 한다는 점을 시사했다. 또한 국립수산과학원에서 격월로 진행되는 정선관측은 동해에서 동서방향으로 진행하여 남북방향의 세밀한 수온 구조를 확인하는데 어려움이 있다.

수치모델자료는 공간 및 시간 해상도에 따라 계산에 필요한 자원이 달라진다. 해상도

가 낮을 경우 계산 비용은 줄어들지만 에디와 같은 해양의 작은 규모의 현상을 표현하지 못하게 된다. 또한 해양 수치모델은 현실에 가깝게 재현할뿐 필연적으로 실제와의 차이가 발생한다는 한계가 있다. 따라서 에디의 구조와 특성을 파악하고 더 나아가 예측하기 위해서는 정확도가 높은 관측자료를 사용하여 모델과 자료동화를 거쳐 오차를 최대한 줄여 실제와 가까운 모델을 개발할 필요성이 있다.

참고문헌

- 진현근, 박영규, 박균도, & 김영호. (2019). 동해 난수성 에디의 장기간 지속에 관하여. *한국해양학회지*, 24(2), 318-331.
- Lee, D. K., & Niiler, P. (2010). Eddies in the southwestern East/Japan Sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 57(10), 1233-1242.
- Dong, C., McWilliams, J. C., Liu, Y., & Chen, D. (2014). Global heat and salt transports by eddy movement. *Nature communications*, 5(1), 3294.
- Wang, P., Mao, K., Chen, X., & Liu, K. (2022). The three-dimensional structure of the Mesoscale Eddy in the Kuroshio extension region obtained from three datasets. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(11), 1754.