

Note

<https://doi.org/10.7850/jkso.2024.29.1.056>  
pISSN : 1226-2978 eISSN : 2671-8820

## 수중글라이더를 활용한 동해 최초 연속 물성 단면 관측 보고

임규창<sup>1</sup> · 박종진<sup>2\*</sup><sup>1</sup>경북대학교 경북해양과학연구소 연구교수, <sup>2</sup>경북대학교 지구시스템과학부/경북해양과학연구소 교수

# Report about First Repeated Sectional Measurements of Water Property in the East Sea using Underwater Glider

GYUCHANG LIM<sup>1</sup> AND JONGJIN PARK<sup>2\*</sup><sup>1</sup>Research Professor, Kyungpook Institute of Oceanography, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea<sup>2</sup>Professor, Kyungpook Institute of Oceanography/School of Earth System Sciences, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea\*Corresponding author: [jjpark@knu.ac.kr](mailto:jjpark@knu.ac.kr)

Editor Hanna Na

Received 17 November 2023; Revised 10 January 2024; Accepted 16 January 2024

### ABSTRACT

동해에서 수행된 국내 최장기 수중글라이더 운용 및 연속 단면 관측 결과를 보고한다. 본 연구팀은 수중글라이더를 활용하여 2020년 9월 18일부터 12월 21일까지 총 95일 동안 국립수산물과학원(NIFS) 정선 관측 106 라인에 거의 일치하는 37.9°N 위도선을 따라 동경 129.1°E ~ 131.5°E 사이를 6회 왕복하는 국내 최초의 연속 물성 단면 관측을 성공리에 수행하였다. 본 수중글라이더는 2020년 9월 18일 129.1°E 위치에서 투하되어 9월 19일부터 88일간의 비행 관측을 수행하였고, 2020년 12월 15일부터 6일간 129.2°E 위치에서 위치 제어 유지(Virtual Mooring) 후 회수되며 전체 운용을 마무리하였다. 표층부터 800 dbar 수심까지 톱니형태의 궤적을 그리면서 총 수평거리 2550 km를 비행하는 동안 글라이더의 경로 이탈은 RMS 거리 262 m를 벗어나지 않을 정도의 매우 안정적인 경로 추종 모드를 보여줬다. 비행 관측을 통해 획득한 총 12개의 고해상도 물성 횡단면 자료로부터 수온과 염분의 연속적인 변동이 보이는 아중규모 특성을 확인하였고, 국립수산물과학원(NIFS)의 격월 선박 관측 자료와 비교함으로써 시공간 해상도 차이에 따른 뚜렷한 특성을 발견하였다. 첫째는 공간 해상도 차이에 따른 결과로 표층 전선역의 세기 및 이동, 수온약층 강화현상 등 아중규모 현상들이 글라이더 횡단면 자료에서만 뚜렷하게 관찰되었다. 이러한 아중규모 구조는 현행 선박 관측 자료의 정점 간격(25 km) 보다 작다는 특징이 있었는데, 동해 내 아중규모 구조의 이해를 위해서는 고해상도 관측이 필요함을 의미한다. 둘째는 시간 해상도 차이에 따른 결과로 글라이더 자료에서 추출한 평균 7일 간격의 수온과 염분 시계열이 대략 6주 주기를 갖는 월중변동(Intramonthly variation) 특성을 보인다는 것과 대략 1주 동안 급격한 관측치의 변동이 나타난다는 것을 확인하였다. 이는 격월 정선 관측 자료에는 확인되지 않는 특징이다. 따라서, 정선 관측해역의 물성 변동을 이해하기 위해서는 선박 관측과 비교하여 상대적으로 비용이 저렴하고 효율적인 글라이더 관측을 통한 보완이 필요하다고 여겨진다. 마지막으로 두 플랫폼 간 관측치의 편차를 확인하였는데, 이러한 편차의 요인을 공간 규모에 기초한 정점의 정의 및 시간 규모에 따른 변동성, 그리고 각 플랫폼의 CTD 측정 장비의 교정 관점에서 논하였다.

We for the first time made a successful longest continuous sectional observation in the East Sea by an underwater glider during 95 days from September 18 to December 21 2020 in the Korea along the 106 Line (129.1°E ~ 131.5°E at 37.9°N) of the regular shipboard measurements by the National Institute of Fishery Science (NIFS) and obtained twelve hydrographic sections with high spatiotemporal resolution. The glider was deployed at 129.1°E in September 18 and conducted 88-days flight from September 19 to December 15 2020, yielding twelve hydrographic sections, and then recovered at 129.2°E in December 21 after the last 6 days virtual mooring operation. During the total traveled distance of 2550 km, the estimated deviation from the predetermined zonal path had an average RMS distance of 262 m. Based on these high-resolution long-term glider measurements, we conducted a comparative study with the bi-monthly NIFS measurements in terms of spatial and temporal resolutions, and found distinguished features. One is that spatial features of sub-mesoscale such as sub-mesoscale frontal structure and intensified thermocline were detected only in the glider measurements, mainly due to glider's high spatial resolution. The other is the detection of intramonthly variations from the weekly time series of temperature and salinity, which were extracted from glider's continuous sections. Lastly, there were deviations and bias in measurements from both platforms. We argued these deviations in terms of the time scale of variation, the spatial scale of fixed-point observation, and the calibration status of CTD devices of both platforms.

**Keywords:** Underwater glider, Longest continuous sectional observation, High-resolution measurement, Sub-mesoscale feature, Intramonthly variation

## 1. 서론

수중글라이더는 부력을 변화시켜 물속을 수직으로 이동하며 자료를 수집하는 아르고 플로트와 유사한 방식을 갖지만, 날개를 부착하여 잠항 및 부상 과정 동안 활강함으로써 수평적으로 능동적 이동이 가능하도록 고안된 해양 관측 로봇의 일종이다(Stommel, 1989; Webb *et al.*, 2001). 별개의 추진 시스템이 필요하지 않기 때문에 에너지 소모가 작아 수개월에서 약 1년에 이르는 장기 운항이 가능하며, 약 1~2 km의 공간 해상도로 표층부터 수심 1000 m까지 수평 공간관측 뿐 아니라 위치 유지 제어(Virtual Mooring)을 통해 시계열 정지 관측까지 수행함으로써 해양 관측 분야의 무인화를 견인하고 있다(Park, 2013).

수중글라이더 운용기술의 현대화가 이뤄진 2000 년 중반 이후, 해외에서는 스프레이 글라이더가 2004년 11월 미국 동부 연안에 투하되어 최대 속도 2.5 m/s(글라이더 평균 이동 속력의 10배)의 멕시코 만류를 가로지르는 1000 km 여정을 성공리에 마쳤고, 2009년에는 WRC (Webb Research Cooperation) 회사에서 개발한 Slocum 글라이더가 221일 동안 운항하여 7000 km 달하는 대서양 횡단에 성공하였다(Park, 2013). 또한 호주 IMOS는 유사한 Slocum 글라이더를 활용하여 330일간 인도양을 가로질러 호주 서해안에서 스리랑카까지 약 7,570 km를 비행하는 새로운 세계 기록을 수립하였다. 수중글라이더의 장기간 운용 시도는 무인 해양관측의 실효성을 높이는데 있어 필수적인 과정이며, 해역별 가장 경제적인 관측 방안을 수립하기 위한 기초 정보 획득 차원에서 필요하다. 그러나, 국내에서는 이제까지 수개월 단위의 장기간 수중글라이더 관측 운용 시도가 없었으며, 특정 관측 라인을 따라서 연속적으로 관측을 수행한 사례도 없었다.

본 관측팀은 국내 최초로 2020년 9월 18일부터 12월 21일까지 총 95일 동안 NIFS 정선 관측 106 라인 구간을 6회 왕복하는 연속 물성 단면 관측을 성공적으로 수행하였다. 이는 2017년 18일 간의 국내 최장 기간 및 최장 거리 운용 기록(Park, 2019) 이후, 공개된 바 국내 수중글라이더 운용에 있어 획기적으로 향상된 새로운 기록으로 볼 수 있다. 전체 운용 기간 중, 마지막 6일간의 위치 유지 제어(Virtual Mooring)을 제외하고 88일간 총 2550 km를 비행하는 동안 글라이더의 경로 이탈 정도는 평균 제곱근 거리(Root-Mean-Squared Distance)로 산출하였을 때 평균 262 m를 기록하였으며, 안정적인 경로 추종이 이뤄졌음을 확인하였다. 장기간 운용에 더하여 정밀한 운용은 수중글라이더 관측 자료의 활용에 있어서 매우 중요한데, 본 관측에서 기록된 평균 262 m의 경로 이탈 정도는 로스비 변형 반경이 약 10 km인 동해의 상황을 고려하였을 때 정점 관측으로 볼 수 있다(Park, 2019); 다이내믹 포지셔닝(Dynamic Positioning, 자동 위치 유지 장치)이 없는 선박의 CTD 정점 관측의 경우 해류와 바람으로 인해 CTD 관측 동안 선박이 수 백m 이상을(심해 관측의 경우) 이동할 수 있으며, 심해 계류선 관측에서도 해류에 의해 계류선이 수 백m ~ 수 km까지 이동하고(Ocean Climate Stations, 2023), ARGO 플로트 또한 수온 및 염분의 수직구조 관측 시 1~2 km 는 쉽게 이동한다(Park *et al.*, 2005).

글라이더 장기 운용과 관련하여 선박 관측과 비용을 직접적으로 정량 비교하는 것은 간단하지 않지만, 선박 관측에 부수적으로 따르는 선원 인건비, 연료비 및 식료품비 등 하루에 수만 달러가 소요되는 비용까지 고려하였을 때, 글라이더 및 ARGO 플로트와 같은 무인 관측이 선박 관측과 비교하여 훨씬 저렴하다는 것은 분명한 사실이다. 또한, 1년 365일 날씨와 관계없이 관측을 수행할 수 있는 글라이더와 1년중 해역, 기상, 임무에 따라 30~50% 정도의 기간만 관측을 수행하는 선박 관측 간 운용방식에도 큰 차이는 있다. Bruvik *et al.*(2020)에 따르면, 유사한 무인 관측 시스템으로서 글라이더와 ARGO 플로트의 운용 비용 비교 시 글라이더 관측 비용이 ARGO 플로트 관측 비용의 대략 3배 정도가 된다고 하였다. 하지만, 글라이더의 운용 일수가 늘어나거나 대수가 증가하는 경우 규모의 경제 원리에 따라 거의 같아지는 것으로 보고하였다(Bruvik *et al.*, 2020). 따라서, 이러한 글라이더 장기운용 상 이점을 토대로 판단해 볼 때, 광역 해양 정보를 선박 관측과 비교하여 저렴한 비용으로 확보하는데 있어 수중글라이더는 매우 적합한 플랫폼이라 할 수 있다.

Fig. 1에 나타난 것처럼, 본 수중글라이더의 관측 경로(붉은색 원)는 2 개월 마다 정기적으로 수행되는 국립수산과학원(NIFS) 정선 관측 중 106 라인(검은색 원)과 거의 일치한다. 하지만, 실제로는 약간 아래에 위치해 있는데, 이는 수중글라이더의 운용 과정에서 정선관측 선박과의 충돌을 방지하기 위해 106 라인에서 남쪽으로 1 km 떨어진 위도로 글라이더 경로를 설정했기 때문이다. 그림에도 10 km 이상의 해양 관측 변수의 공간 규모에 비해 1 km는 매우 작기 때문에 이들 관측을 모두 동일 정점 관측(동일 관측 라인)으로 간주할 수 있다.

두 플랫폼의 관측 및 자료 해상도 특징을 간단히 살펴보면 다음과 같다. 공간 해상도의 관점에서 보면, 수중글라이더는 톱니 모양으로 비행하며 관측을 수행하는데, 이에 따른 잠항 시 및 부상 시 수평 관측거리는 평균적으로 약 1.8 km이고 수직 관측거리는 약 0.2 m이다. 반면 정선 관측 선박은 수평 거리 약 25 km마다 24 Hz의 샘플링 속도와 대략 1 m/s의 수직 이동 속도를 갖는 CTD를 이용하여 하강 시 및 상승 시 모두 관측을 수행하며, 상승시킬 때 표준 수심에서 채수를 진행하기 때문에 일반적으로 하강 시 CTD 자료만을 활용한다. 이에 따라 정선 관측의 원자료는 대략 1/24 m의 수직 관측 간격을 갖지만, 웹에 제공되는 자료는 표층부터 500 m 수심까지 10 m에서 100 m까지 증가하는 수직거리를 갖는다. 결과적으로 글라이더 자료는 공개된 정선 관측 자료에 비해 높은 수평 및 수직 공간 해상도를 가진다. 따라서, 두 플랫폼 간 공간 해상도의 차이로 인해 두 관측 자료로부터 얻은 물성의 공간 구조는 그 규모에 따라 차이를 보일 수 있다.

본 보고서에서는 각 플랫폼으로부터 접치는 관측 시기에 획득한 횡단면을 비교함으로써 공간 해상도 차이에 따른 수온과 염분의 변동 및 공간 구조의 특징에 대하여 논한다. 덧붙여, 단일 횡단면을 관측하는데 있어 수중글라이더는 평균 7일이 소요되는 반면 정선 관측은 하루가 걸리기 때문에, 동일 정점에 대한 관측 시점의 불일치로 인해 물성의 시간 변동이 공간의 구조적 변동에 투영될 수 있다(Rudnick and Cole, 2011). 따라서, 뚜렷한 대비를 보이는 공간 특성들은 변동의 시간 규모를 고려하여 논한다.

시간 해상도 관점에서 보면, 수중글라이더 관측의 경우 횡단면의 각 위치는 횡단면 간 시간 간격이 다르게 나타난다. 글라이더의 반환이 일어나는 가장자리에서는 시간 간격이 약 2 주에 이르지만, 횡단면의 가운데 점에 가까울수록 관측 시간의 간격이 일정하게 수렴된다. 따라서, 본 보고서에서는 물성의 시간 변동을 관찰하기 위해 평균적으로 7일 간격을 보여주는 중간 위치를 기점(Fig. 1의 별 표시)으로 수온과 염분을 추출하여 시계열을 만든다. 반면 정선 관측은 격월로 수행되기 때문에 모

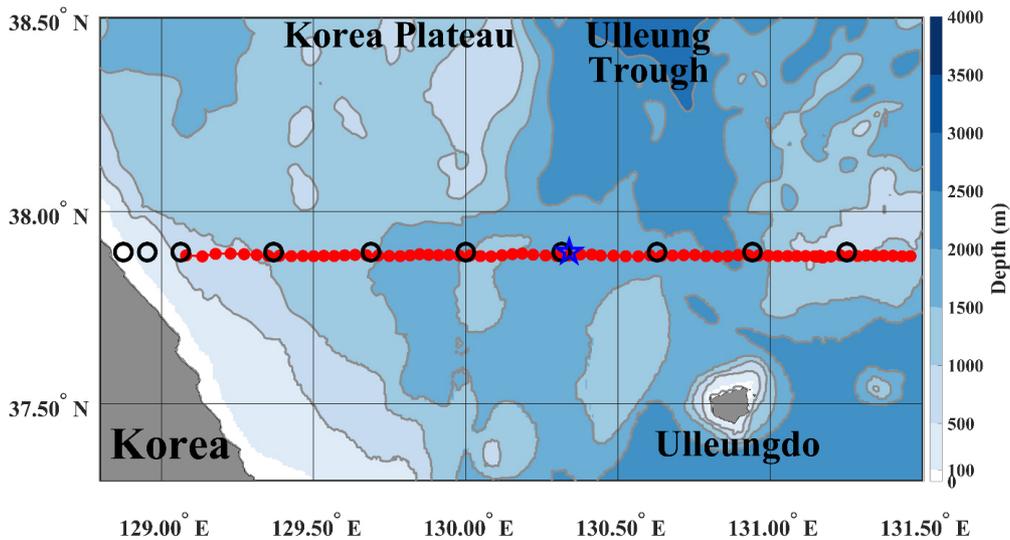


Fig. 1. Bottom topography of the study area. The glider's climbing points (red dots) are plotted along with the shipboard locations (black circles) of NIFS Line 106, where a blue star indicates the mid-point of the observation line.

든 정점에서 횡단면 간 시간 간격은 약 2개월이 되는데, 이는 정선 관측 자료가 계절변동이나 경년변동 등 장기 변동을 탐색하기 위한 자료로서는 유용하지만, 월중변동과 같은 단기 변동 탐색에는 적합하지 않음을 의미한다. 본 보고서에는 장기 변동을 나타내는 정선 관측 자료를 기준으로 삼아, 글라이더 관측 자료로부터 획득한 수온과 염분 시계열을 이용하여 물성의 월중변동을 탐색한다. 본 글라이더 장기 관측 자료는 2020년 전체 정선 관측 자료 중 단 두 개 표본(10월, 12월)에 대응하기 때문에 표본 개수를 늘리기 위해 8월 관측 표본을 추가하였고, 그에 따라 8월에 수행된 수중글라이더 왕복 횡단 자료를 포함하였다.

본 보고서의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 수중글라이더 관측 절차 및 특성에 대한 내용과 함께 정선 관측 자료와의 비교 분석을 위한 원자료의 전처리 과정을 소개하고, 수중글라이더 CTD 관측 과정에서 나타나는 열지연 오차(Thermal lag error)에 대한 설명과 열지연 교정(Thermal lag correction) 결과를 제시한다. 제3장에서는 두 플랫폼 관측 자료의 비교 분석 결과를 제시하고, 제4장에서는 요약과 토의를 제시한다.

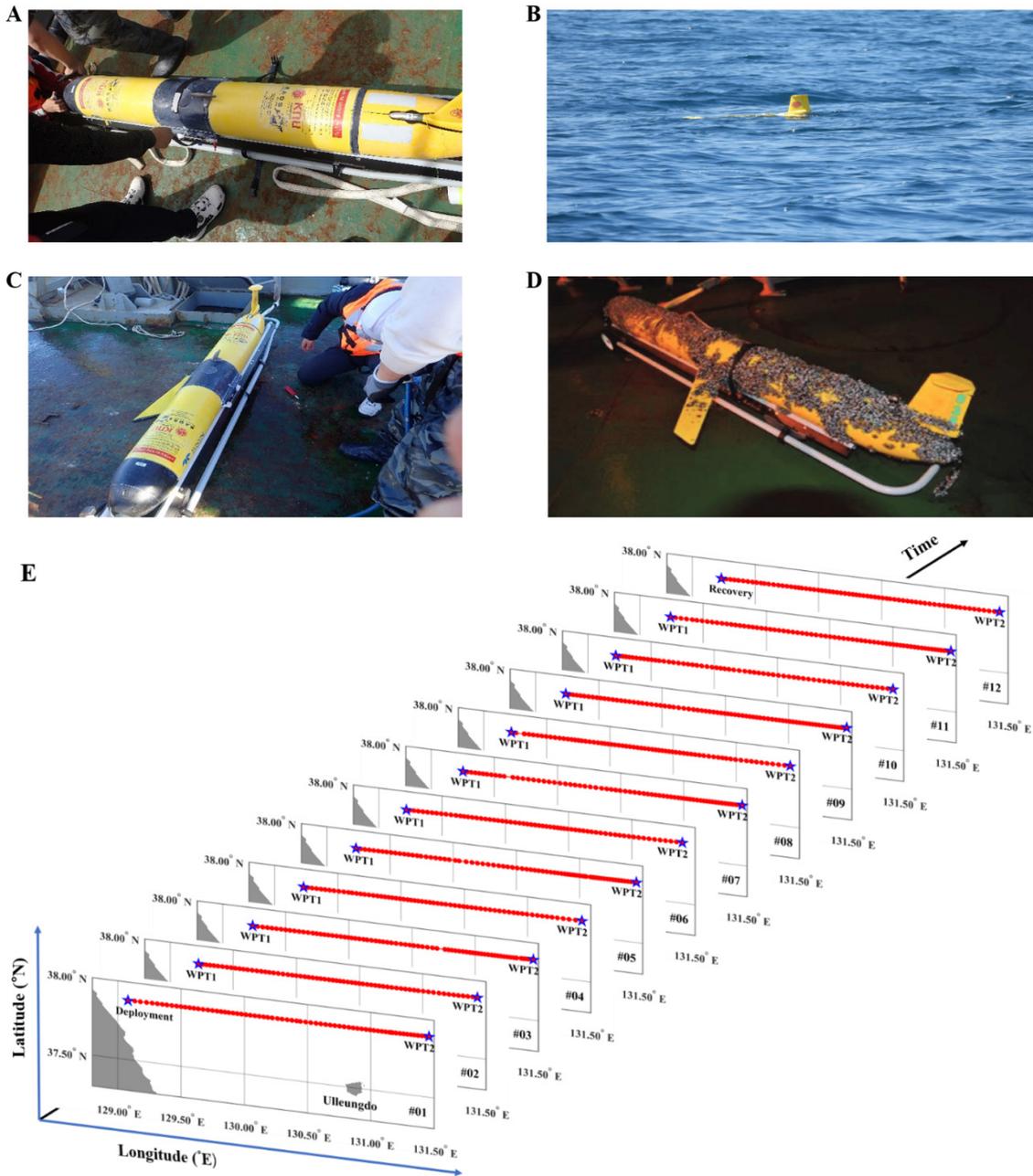
본 보고서의 목적은 시공간 해상도가 다른 수중글라이더 관측 자료와 정선 관측 자료의 비교 분석 결과를 토대로 정선 관측 자료의 실질적인 활용을 위해 두 플랫폼의 동시 관측 및 수중글라이더를 활용하여 정선 관측을 보완할 수 있는 보완 관측의 필요성에 대한 근거를 제시하는 것이다.

## 2. 관측 자료 특성

### 2.1 글라이더 관측 내용 및 자료 전처리

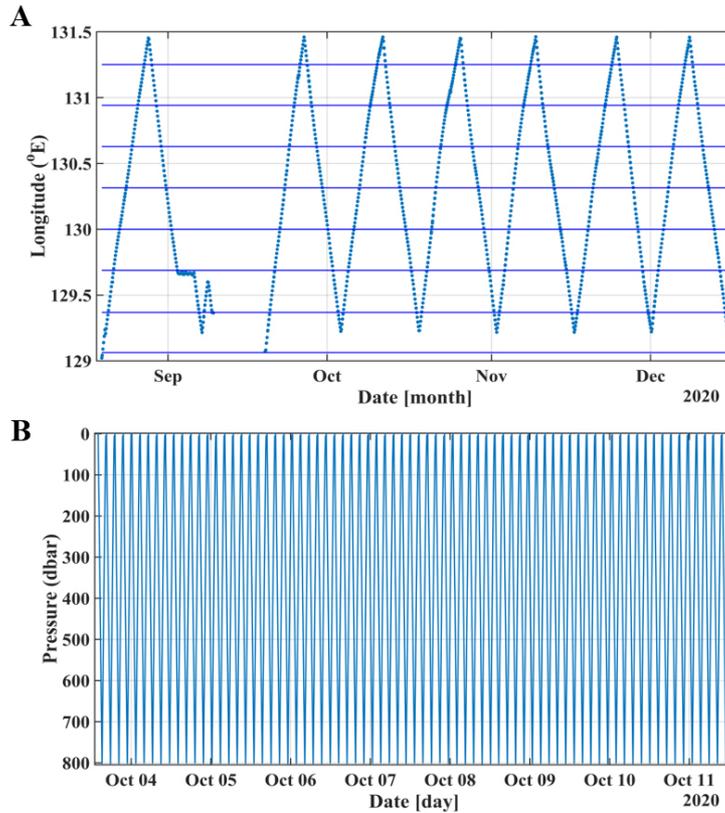
본 관측에서 사용한 수중글라이더는 Teledyne Webb Research사의 Slocum G2-Deep glider이며 수심 1000 m까지 잠항할 수 있는 심해용 글라이더이다(Fig. 2 A-C). Fig. 2 A-C는 본 관측에서의 글라이더 장기 운용 전후의 수중글라이더의 상태 변화를 보여주고 있다. Fig. 2A는 투하 전 글라이더 상태를 나타내고, Fig. 2B는 투하 직후 해상에서의 모습을 보여주고 있으며(2020년 9월 18일), Fig. 2C는 중간 회수 없이 95일간 연속 운용 후 회수된 직후의 상태를 나타낸다(2020년 12월 21일). 수중글라이더의 장기 운용에는 일반적으로 장기간 비행 동안 수중의 여러 생물이 글라이더 몸체에 들러붙는 바이오 파울링(biofouling) 문제가 발생할 수 있다(Haldeman *et al.*, 2016). Fig. 2D는 수중글라이더에 발생하는 파울링의 사례로서 Global Argentine Basin Array of the OOI (Ocean Observatories Initiative)에서 운용되어 남대서양 아르헨티나 연안에서 2016년 5월 2일에 회수한 글라이더의 파울링 현상을 보여준다(Nichols and Raghukumar, 2020). 반면에 본 센터의 수중글라이더 경우에는 Fig. 2C에서처럼 3개월 가량의 운용 후 매우 깨끗한 상태를 보여주고 있다. 바이오 파울링은 정도의 차이가 있을 뿐 어느 해역이든 발생한다. 하지만, 동해에서 대략 3개월 운용 후에도 본 글라이더에 바이오 파울링이 거의 없었던 이유는 자체적으로 개발한 anti-fouling 도료를 도포했기 때문이며, 이에 대해서는 보완관계상 자세한 언급은 어렵다. 다만, 이를 통해 본 글라이더 관측에서 파울링에 의한 측정 장비의 오류 가능성이 매우 낮음을 유추할 수 있다.

Fig. 2E에 표시한 수중글라이더의 GPS 위치 그래프는 수중글라이더 운용 전체 기간에 걸친 글라이더의 비행 경로를 총 12개의 횡단면에 대해 시간 순으로 보여준다. 본 글라이더는 2020년 9월 18일 오후 4시에 129.1°E 위치에 투하된 후(Fig. 2E, 단면 #01), 9월 19일 오전 1시까지 위치 유지 제어 모드로 해당 위치를 유지하도록 제어되었다가 이후 경로 추종 모드로 두 반환점 WPT1 과 WPT2를 6회 왕복하는 연속 단면 관측 미션을 수행하였다. 경로 추종 모드를 마친 2020년 9월 15일 오후 3시부터 6일 동안 위치 유지 제어 모드로 글라이더를 제어한 후, 9월 21일 오후 1시에 회수하였다(Fig. 2E, 단면 #12). Fig. 2E의 글라이더 비행 궤적에서 볼 수 있듯이, 전체 운용 기간 동안 글라이더의 위치 유지 및 경로 유지가 매우 잘 이뤄졌음을 알 수 있다.



**Fig. 2.** (A) Slocum G2-deep glider (KG643) before diving for the long-term operation, (B) the glider taken right before flying along the NIFS 106 line on Sep. 18, 2020. (C) The glider recovered right after the long-term operation, (D) an overseas case of glider's condition displaying notable fouling after a long-term operation, and (E) GPS position of the underwater glider during flight for all transects; # No. denotes the sequentially obtained transection.

Fig. 3A는 8 월 왕복 횡단 자료를 포함하여 장기 운용 미션 동안의 글라이더 경로를 표층 GPS 자료를 이용하여 도시한 것이다. 단, 장기 운용의 경우 경로 추종 모드 궤적만을 표시하였다. Fig. 3A의 파란색 점은 시간에 대한 수중글라이더의 경도 위치 변화를 보여주는데, 각 점은 글라이더가 표층에 나타난 위치를 표시하였기 때문에 표층에서 글라이더 관측 정점의 수평 간격이 매우 조밀함을 알 수 있다. 반면에 파란 가로선은 정선 관측 정점을 나타내고 있으며 정선 관측 정점의 수평 간격이 매우 성기게 분포함을 알 수 있다. Fig. 3B는 10월 3 ~ 11일 기간 동안 외해로 비행하는 글라이더의 수직 궤적을 표층부터 800

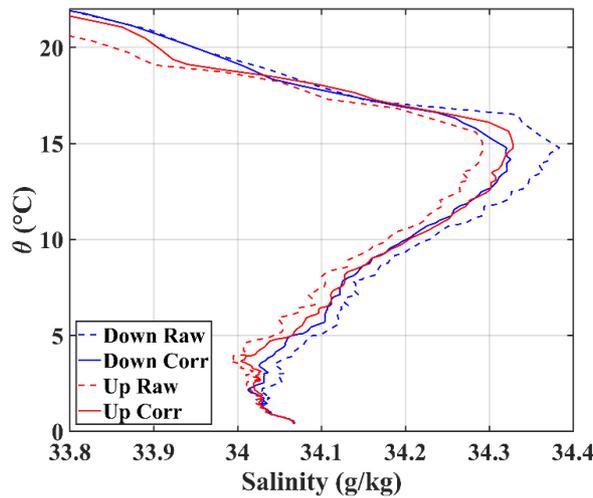


**Fig. 3.** (A) Longitude GPS position of the underwater glider in time, with blue lines denoting longitudinal locations of NIFS 106 stations. (B) Yo profiles of the underwater glider in time during the outbound glider flight in October 3-11.

dbar 수심까지 시간에 대하여 도시한 것이다. 정선 관측 정점에 비해 글라이더 관측 자료가 수평적으로 매우 높은 해상도를 가짐을 알 수 있다.

본 관측에 활용한 Slocum 글라이더에는 Seabird사의 GPCTD뿐 아니라, Chl-a와 CDOM 및 700 nm backscatter 센서 장비가 추가적으로 탑재되었으며, 본 연구에서는 CTD 관측 자료만 활용하였다. GPCTD는 과거 아르고 플로트에서 활용하던 SBE-41CP를 개량하여 수중글라이더 전용으로 개발한 것으로 175 mW의 저전력을 소모하도록 고안되었으며 1 Hz의 샘플링 속도를 갖는다(Park, 2013). 비록 선박에서 활용하는 24 Hz의 SBE-9에 비할 수는 없지만, 수중글라이더의 수직 이동 속도가 약 0.2 m/s이므로 1 m 간격 이내에 여러 개의 샘플을 수집할 수 있다.

위의 과정을 통해 획득한 CTD자료에 대해서는 다음과 같은 전처리를 수행한 후, 분석에 활용한다. 우선, Vertical filtering을 수행하여 자료에 존재하는 노이즈를 제거하고, 열지연 오차(Thermal lag error) 현상에 대한 보정을 수행한다. 일반적으로 염분은 온도 센서와 전기전도도 센서의 측정값을 이용하여 산출하며 전도도는 수온의 영향을 크게 받는다. 즉, 전기전도도 센서가 온도구배가 큰 영역을 이동하며 측정하는 경우 온도 센서의 수온과 전도도 센서 내 실제 수온 사이에 불일치가 발생하는데, 이로 인해 최종 산출된 염분의 정확도가 낮아질 수 있다. 이러한 수온 불일치는 수온 센서의 열적 관성, 수온센서와 전도도 센서 사이의 거리, 전도도 내의 열적 관성에 의해 발생하며, 그 영향으로 인해 염분값은 잠항 시에는 실제보다 높고 부상 시에는 실제보다 낮은 경향을 보인다. 따라서, 정확한 염분을 얻기 위하여 전기전도도 자료의 후처리과정이 필요하다. SBE-9의 경우 24 Hz 관측이기 때문에 약 0.05초의 수온 시간 지연(Temperature time lag)를 보정하는 것이 중요할 수 있으나(Choi *et al.*, 2009), 글라이더 CTD는 1 Hz이므로 Align CTD 과정을 수행하더라도 유의미한 개선이 이루어지지 않기 때

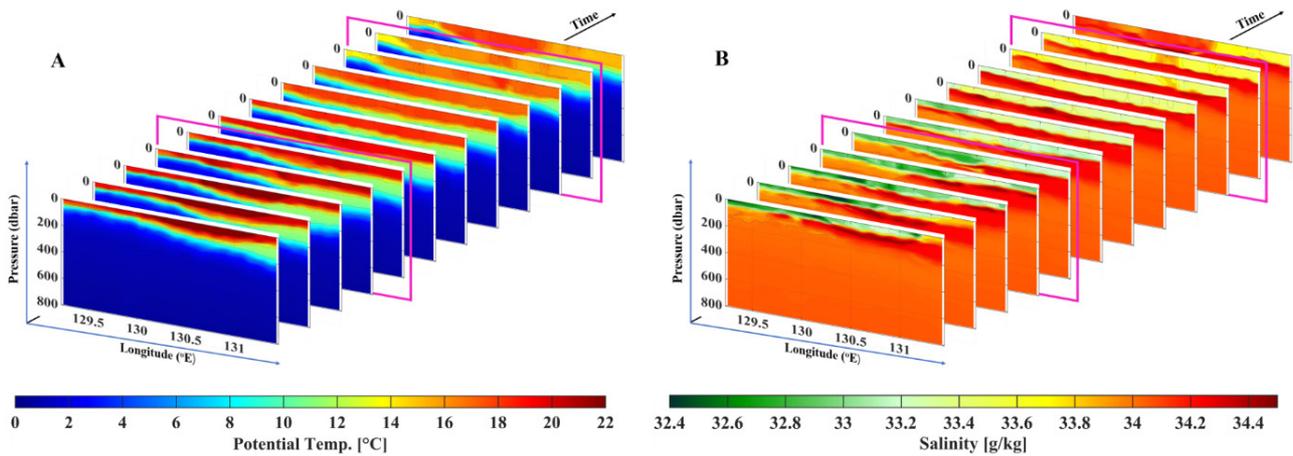


**Fig. 4.** Comparison of thermal lag corrections with raw measurements for a pair of up-and-down cast profiles. All glider data in this note are thermal-corrected.

문에 국제 글라이더 회의에서도 Align CTD 과정을 제외하고 있다. 선박 관측에서는 다운 캐스트 시에는 CTD 관측 위주로, 업 캐스트 시에는 CTD 관측과 함께 채수 위주로 운영하는 경우가 대부분인 반면에 글라이더는 업 캐스트와 다운 캐스트를 일정하게 수행하므로 실제 관측 자료를 이용하여 cellTM parameter를 계산한 후 열지연 오차 보정에 적용한다(Garau *et al.*, 2011). Fig. 4는 예시로 같은 정점에서 한 쌍의 업 캐스트 자료와 다운 캐스트 자료에 대한 염분 프로파일을 교정 전후로 비교한 것이다. 앞서 언급한대로 전체 관측 수심에 대해 업 캐스트 시 염분의 하향 편향과 다운 캐스트 시 염분의 상향 편향이 확인되는데, 열지연 오차 보정을 통해 업-다운 캐스트 쌍의 편차가 줄어들면서 일관되고 정확한 자료가 얻어진다(Garau *et al.*, 2011; Wagawa *et al.*, 2020). 노이즈 제거 및 열지연 오차 보정을 마친 자료에 대해서는 1 m 수심 간격으로 bin-average 과정을 통해 표준 형식(Standard format)으로 변환을 수행하고, 연속적으로 측정된 자료에 대한 Spike 검증 및 밀도 역전 검증(Density inversion test)을 수행하여 최종 오류로 판별된 자료를 제거한다. 마지막으로 최종 자료에 대한 수평 필터링을 통해 고주파 자료를 제거함으로써 전처리를 마친다.

수중글라이더의 관측 정점은 센서 기반으로 3 차원적으로 계측되나 2 차원에 투영하는 과정에서 시간과 수심 축의 평면 자료로 변환된다. 이때 2 차원 공간상에 표기되는 정점 위치는 톱날 모양으로 나타나기 때문에 관측 정점의 공간 분포가 Yo-ing 특성을 보인다. 이 경우, 관측 자료의 공간 밀도 비규칙성이 발생하고 격자모델 생성시 추정 관측치에 관측점 경향성을 유발한다(Park *et al.*, 2012). 따라서, 본 논문에서는 추측 항법 체계로부터 산출한 관측 정점 위치를 고려하여 전처리를 마친 원자료에 대해 격자 모델을 생성하였다. 수중글라이더가 표층에서 800 dbar 수심까지 이동하는데 대략 1시간 30분이 걸리고, 그 시간 동안 수평 평균 이동거리는 1.8 km이고 정점 간 수직 거리는 대략 0.2 m이기 때문에 격자 크기는 2 km x 1 m로 정하였다. 수직 격자 크기를 1 m로 정한 까닭은 본 글라이더의 CTD 자료 품질이 각각 2 Hz, 4 Hz의 관측 주기를 가지는 기존의 SBE-19 혹은 19plus의 CTD와 유사하다는 것과 일반적인 CTD 관측데이터 처리가 low-pass filter 이후 1 m 크기의 bin-average 형태로 이뤄지기 때문이다. 국제 글라이더 데이터 처리 과정에서 1m의 bin-average 형태를 권장한다. 하지만, 정확도 측면에서 SBE-9의 24 Hz CTD 보다는 떨어질 수 있다.

반면 NIFS 자료는 수평으로는 25 km의 정점 간격을 가지며, 수직적으로는 0, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 125, 150, 200, 250, 300, 400, 500 dbar의 수심에 해당하는 총 14개의 정점을 가진다. 하지만, 두 플랫폼의 관측 자료로부터 물성의 횡단면 공간 구조 비교를 위해 수중글라이더 자료와 동일한 격자 크기로 격자 모델을 생성하였다.



**Fig. 5.** Transections of potential temperature (A) and salinity (B) from glider observations from 19 Sep. to 15 Dec. 2020. Each transect takes a week on average. Red rectangles denote the transects corresponding to the bi-monthly measurements by NIFS, in time, say 22 Oct. and 4 Dec.

## 2.2 자료의 시간 해상도

NIFS의 정선 관측 106 라인을 따라 수행되는 선박 관측은 매년 2월부터 12월까지 격월 단위의 횡단 자료를 생산하기 때문에 월중변동(Intramonthly variation)을 기술하는데 분명한 한계를 가진다. 반면, 동일 관측 라인을 따라 수행되는 수중글라이더의 횡단 관측에 소요되는 시간은 평균 7일이며, 연속 관측 수행 시 정선 자료에 비해 높은 시간 해상도를 갖기 때문에 횡단면 상에 나타나는 물성의 월중변동을 상대적으로 잘 기술할 수 있다. Fig. 5는 수중글라이더의 연속 단면 관측을 통해 얻은 수온과 염분 횡단면을 시간순으로 나타낸 것이다.

Fig. 5A는 수중글라이더의 수온 횡단면을 시간 순으로 도시한 것이고, Fig. 5B는 염분 횡단면을 도시한 것이다. 각 연속 횡단면에서 보라색 테두리는 글라이더 관측 시기가 NIFS 선박 관측과 겹치는 횡단면을 나타낸다. 해당 시기의 두 플랫폼 횡단면 비교 결과는 제3장에서 제시된다. Fig. 5에서 보여지는 두 물성의 연속 횡단면으로부터 표층에서 패치 구조의 월중변동 양상을 확인할 수 있는데, 이는 NIFS의 격월 정선 관측 자료로는 포착이 어렵다. 즉, 물성의 짧은 시간 변동 특성을 탐색하는데 있어 격월 정선 관측 자료의 한계가 분명히 드러난다.

## 3. 관측 자료의 비교 분석 결과

### 3.1 공간 해상도에 따른 횡단면 비교

공간 해상도에서 큰 차이를 보이는 정선 관측과 수중글라이더 관측의 비교 분석을 위해, 두 플랫폼의 관측 자료로부터 관측 시기가 겹치는 수온 횡단면을 Fig. 6에 도시하였다. Fig. 3A에서 확인할 수 있듯이, 두 플랫폼의 경도 라인 관측 구간은 서로 다르다. 정선 관측은 129.0633 ~ 131.2517 °E 구간에서 수행된 반면, 글라이더 장기 관측은 129.2230 °E부터 대략 131.5 °E 지점에 이르는 관측 구간을 가진다. 따라서, 횡단면에 나타난 물성의 구조적 특징을 공간 규모(크기)로 정확하게 비교하기 위해 동서 구간은 각 플랫폼의 격자 모델이 일치하는 구간으로 설정하였고, 경도 129.2230 °E 지점을 원점으로 하여 경도를 km 단위로 변환하였다. Fig. 3A의 8월 단면 관측 궤적을 보면 외해에서 내해로 들어오는 시기의 관측은 위치 유지 모드를 포함하여 내해 근방에서 짧게 왕복하는 복잡한 행태를 보이는데, 8월 NIFS 정선 관측 시기와 겹치지 않아 제외되었다. 결과적

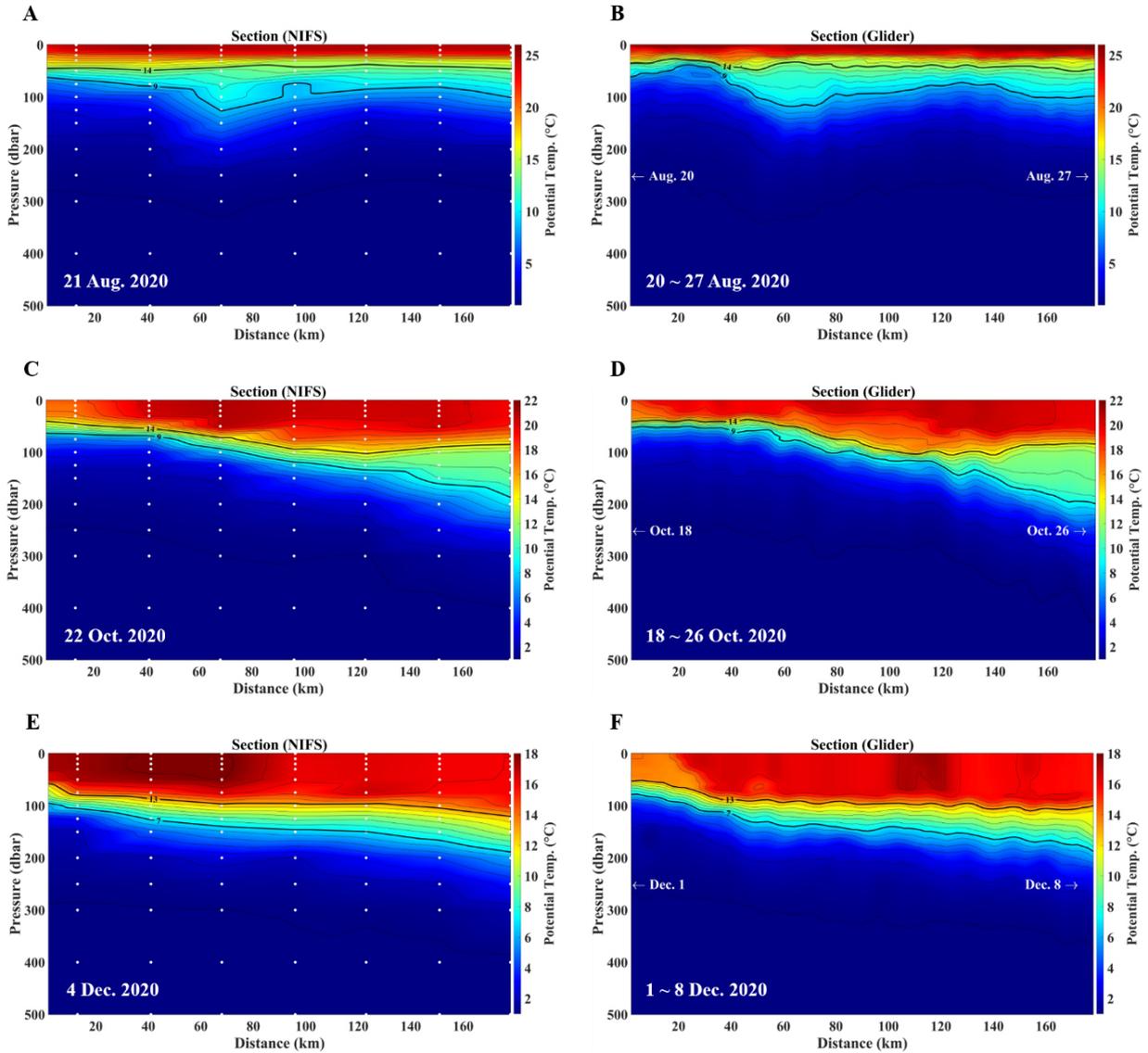


Fig. 6. Sections of potential temperature are compared between NIFS (A, C, E) and glider measurements (B, D, F).

으로 Fig. 6에 나타난 글라이더 단면 자료는 모두 내해에서 외해로 나가면서 얻어진 것이다(Fig. 6 글라이더 단면도 화살표 표기 참조). 이를 통해 횡단면 상 동일 정점에서의 물성 특징을 두 플랫폼의 관측 시점 차이의 관점에서 살펴볼 수 있다.

수온약층에서 나타나는 변동 특성을 분명하게 탐색하기 위해 횡단면 상 수온약층의 상부와 중하부를 굽은 등온선으로 표시하였다. 8월 수온 단면(Fig. 6A, B)에서는 수온약층이 전체 경도 구간에 걸쳐 수심에 따른 변화없이 두 단면에서 동일한 거시적 구조를 보이고 있고, 60 km 지점에서 대략 50 km 크기의 렌즈 구조 또한 동일하게 관측된다. 하지만, 30 km 근방에서 나타나는 수온약층 강화 현상은 대략 10 km의 아중규모 특징을 보이며 글라이더 단면에서만 관측된다. 관측 시점상 두 플랫폼 간 1일 이내의 시간차가 존재하기 때문에 짧은 주기의 물성 변동에 기인했을 가능성을 배제할 수는 없지만, 고해상도 글라이더 자료에 기인한 관측 결과 가능성이 보다 타당해 보인다. 해당 지점(30 km)이 정선 관측의 두 정점 사이에 있다는 것 또한 주지할 필요가 있는데, 격자 모델을 생성하는 과정에서 선형 내삽의 결과 25 km 이하의 아중규모 구조가 포착되지 않을 수 있기 때문이다. 반면 100 km 지점에서는 수온약층 강화현상이 정선 자료에서만 관측되는데, 해당 지점이 정선 관측의 정점

과 일치한다는 점과 두 플랫폼의 관측 시점이 대략 2~3일의 시간차를 가진다는 점을 고려할 필요가 있다. 일반적으로 고해상도 자료가 아중규모 구조를 더 잘 포착한다고 했을 때, 100 km 지점에서의 구조적 불일치는 짧은 시간 동안의 변동에 기인했다고 볼 수 있다.

10 월 단면에서는 외해로 나갈수록 수온약층이 깊어지는 특징과 관측 구간의 동쪽 끝에서 거시적 렌즈 구조가 관측되는 현상이 두 플랫폼의 횡단면에서 동일하게 관측되고, 연안 근처에서의 전선역 중심(60 km 지점) 또한 두 플랫폼에서 일치함을 확인할 수 있다. 내해(0~40 km) 구간에 걸쳐 글라이더 단면에서 관측되는 수온약층 강화 현상은 공간 해상도 차이에 기인하는 것과 대략 3~4일에 이르는 관측 시점의 시간차에 기인하는 것을 모두 고려해야 할 것으로 보인다. 하지만, 110 km 근방에서 나타나는 수온약층 강화현상은 관측 시점이 거의 일치하기 때문에, 공간 해상도의 결과라고 볼 수 있다. 외해에서 관측되는 거시적 렌즈 구조는 이동에 대한 것뿐만 아니라, 시간 규모에서도 추가적인 단서를 제공한다. 관측 시점의 시간차가 대략 4일에 이르는데도 동일하게 관측된다는 사실은 해당 렌즈 구조의 수명 및 이동에 대한 단서를 제공한다.

12월 단면에서도 40 km 지점에서 수온약층 강화현상이 글라이더 단면에 나타난다. 정선 관측 정점과 일치한다는 점을 고려할 때, 이러한 관측 차이는 대략 2일의 관측 시간차에 기인하는 것으로 보인다. 연안(20~40 km)에서의 전선역 구조 또한 글라이더 관측 자료에서 상대적으로 분명하게 나타난다. 동해 연안에서의 물리적 구조가 빠르게 변하는 것을 생각해 보면, 연안에서 나타나는 아중규모 구조의 특징이 두 플랫폼에서 차이를 보이는 것은 공간 해상도 차이만이 아니라 관측 시점의 불일치에 기인할 수 있다는 것은 분명해 보인다.

전선역의 이동과 관련하여, 10월과 12월 글라이더 단면 관측 자료를 비교해보는 것은 의미가 있다(Fig. 6D, F). 연안에서의 전선역 구조를 보면, 10월에 대략 70 km 지점에 위치한 전선역 중심이 12월에는 30 km 지점으로 이동하는 것으로 나타나는데, 이러한 현상은 동한 난류의 계절 변동성과 깊은 관련성을 보여준다. 일반적으로 동한 난류의 주축은 여름에 북한 한류의 등장과 함께 동쪽으로 이동하고, 겨울에는 연안으로 이동하는 경향을 보인다(Chang *et al.*, 2004; Tanioka, 1968). 이러한 특징은 선박 자료에서도 나타나지만, 12월 단면의 전선역 중심 위치에서 차이를 보인다; 중심 위치가 글라이더 자료에서는 30 km 인 반면, 선박 자료에서는 10 km에 나타난다. 이러한 차이는 관측 시점의 차이에 기인할 수 있는데, 0~40 km 해역에서 두 플랫폼의 관측 시점은 대략 2~3 일의 차이를 보인다.

Fig. 7은 수온 횡단면과 동일한 기준으로 두 플랫폼의 관측 자료에 기초하여 염분 횡단면을 도시한 것이다. 전체 기간에 걸친 염분의 변동을 탐색하기 위해 수온 횡단면과는 달리 염분값의 변동 범위를 모든 횡단면에 대하여 일치시켰다. 8월 횡단면 비교에서의 흥미로운 특징은 수심 50~150 dbar 구간에서 저염 패치의 관측 위치가 글라이더 횡단면의 경우 0~40 km 구간에서 관측된 반면 정선 횡단면의 경우엔 80~110 km 구간에서 관측된다. 이들의 관측시간을 비교해 보면, 해류의 흐름이 빠른 연해(0~40 km)에서 글라이더 관측은 8월 20일 오전 6시부터 8월 21일 14시까지 외해 방향으로 수행된 반면, 정선 관측은 8월 21일 14시부터 16시까지 대략 2시간 가량 내해 방향으로 수행되었고, 외해(80~110 km)에서 글라이더 관측은 23일 7시부터 24일 14시까지 수행된 반면 정선 관측은 21일 9시부터 12시 사이에 수행되었다. 염분은 수괴의 특징적인 물리량이기 때문에, 해당 해역에서의 저염 패치는 두 플랫폼의 관측 시간차 동안 수괴의 이동과 같은 물성의 빠른 변동이 일어났다고 볼 수 있다. 거시적으로는 연안 표층에서의 저염 패치 구조와 50 dbar 수심 근방에서 60~180 km 구간에 걸쳐 분포하는 고염 패치 구조가 동일하게 관측된다.

10월의 경우에도 전체적인 거시적 구조는 두 플랫폼의 단면에 대해 동일하게 관측된다. 표층에서는 강한 저염 패치가 연안에서 모두 관측되며, 외해(80~180 km)에서는 수심 50~250 dbar 구간에서 고염 패치가 두 단면에서 동일하게 나타난다. 하지만, 110 km 근방의 수심 100 dbar에서 나타난 국소 저염 패치구조는 글라이더 관측 단면에서만 나타나는데, 이 영역이

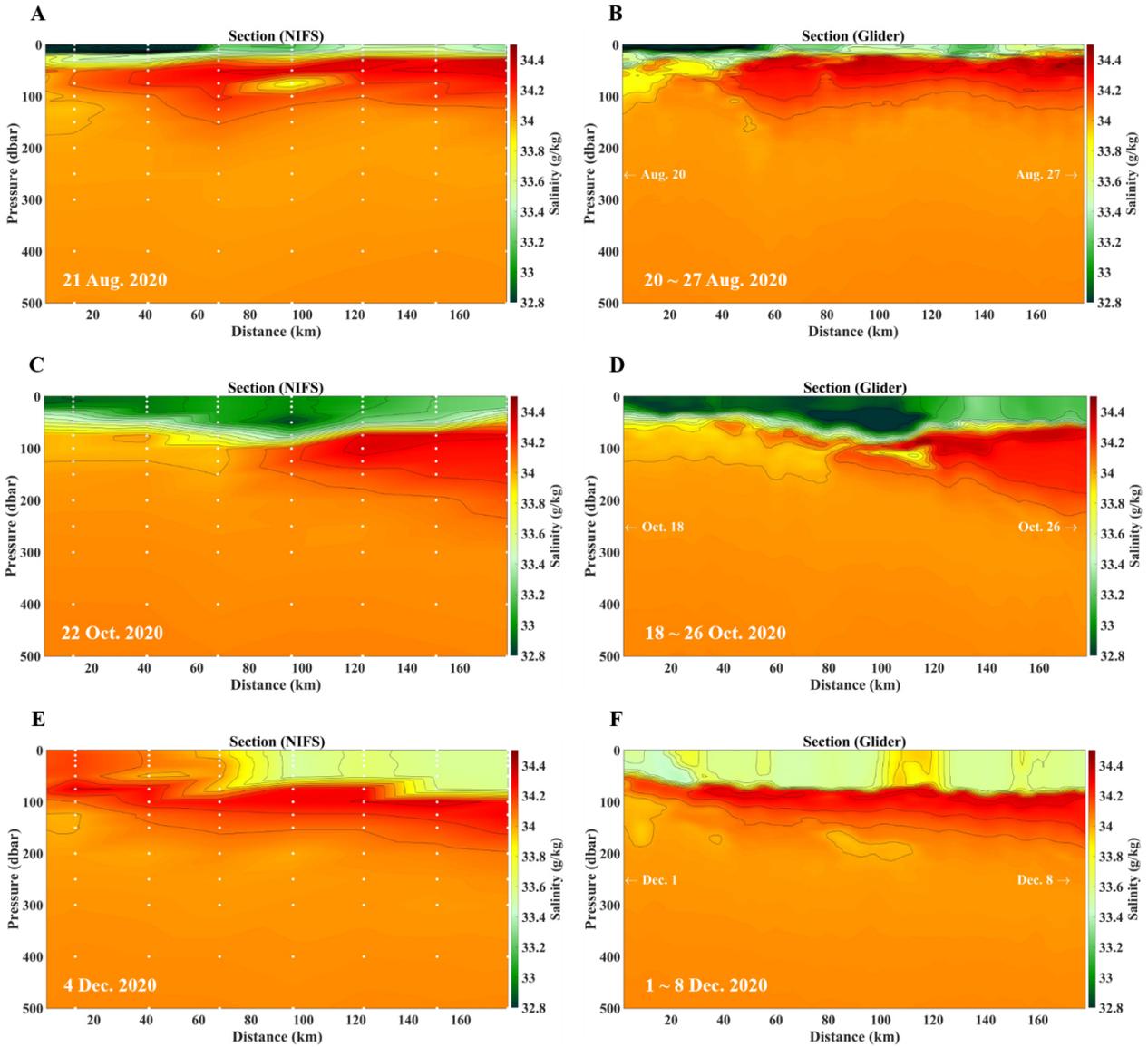


Fig. 7. Sections of salinity are compared between NIFS (A, C, E) and glider measurements (B, D, F).

20 km 수평 크기를 갖는 아중규모 패치 형태를 띠며 정선 관측의 두 정점 사이에 있다는 사실은 주지할 필요가 있다. 해당 패치 끝단에서의 관측시간을 비교해 볼 때, 글라이더 관측은 10월 21일 13시부터 22일 5시까지 외해 방향으로 수행된 반면 정선 관측은 22일 7시부터 9시까지 내해 방향으로 수행되었다. 정선 관측 위치와 일치하는 패치의 오른쪽 끝단(120 km 부근) 및 왼쪽 끝단(100 km 부근)에서 관측 시간차가 각각 2시간과 20시간으로 나타난 점을 고려할 때, 빠르게 변화하는 아중규모 구조의 관측을 위해서는 시공간적으로 촘촘한 관측이 필요하다고 여겨진다. 글라이더 단면(Fig. 7D)의 수심 100 dbar 근방에서 40 ~ 80 km 수평 구간에 걸쳐 관측되는 고염 패치 구조 또한, 공간 해상도와 관측 시점 차이에 기인한 현상으로 볼 수 있다.

두 플랫폼의 12월 단면에서도 수심 50 ~ 150 dbar 구간에 존재하는 고염 패치 구조는 전체적으로 동일하게 관측된다. 반면에 표층에서의 저염 분포는 60 km 지점에서 근해와 외해 간 대비를 보인다. 이는 표층에서의 물성 변동이 두 플랫폼의 관측 시간 차이에 준하는 시간 동안 빠르게 일어났을 가능성을 말해준다. 100 dbar 수심 근방에서 관측되는 고염 패치 구조 또한 글라이더 단면에서 상대적으로 뚜렷하게 나타나는데, 공간 해상도와 관측 시간차에 따른 결과로 보여진다. 결과적으로

아중규모 구조의 탐색에 있어 고해상도 자료의 이점과 함께, 규모가 작을수록 변동 주기도 짧아지기 때문에 두 플랫폼의 물성 단면을 해석할 때 관측 시점의 차이가 중요하다는 점을 확인할 수 있다.

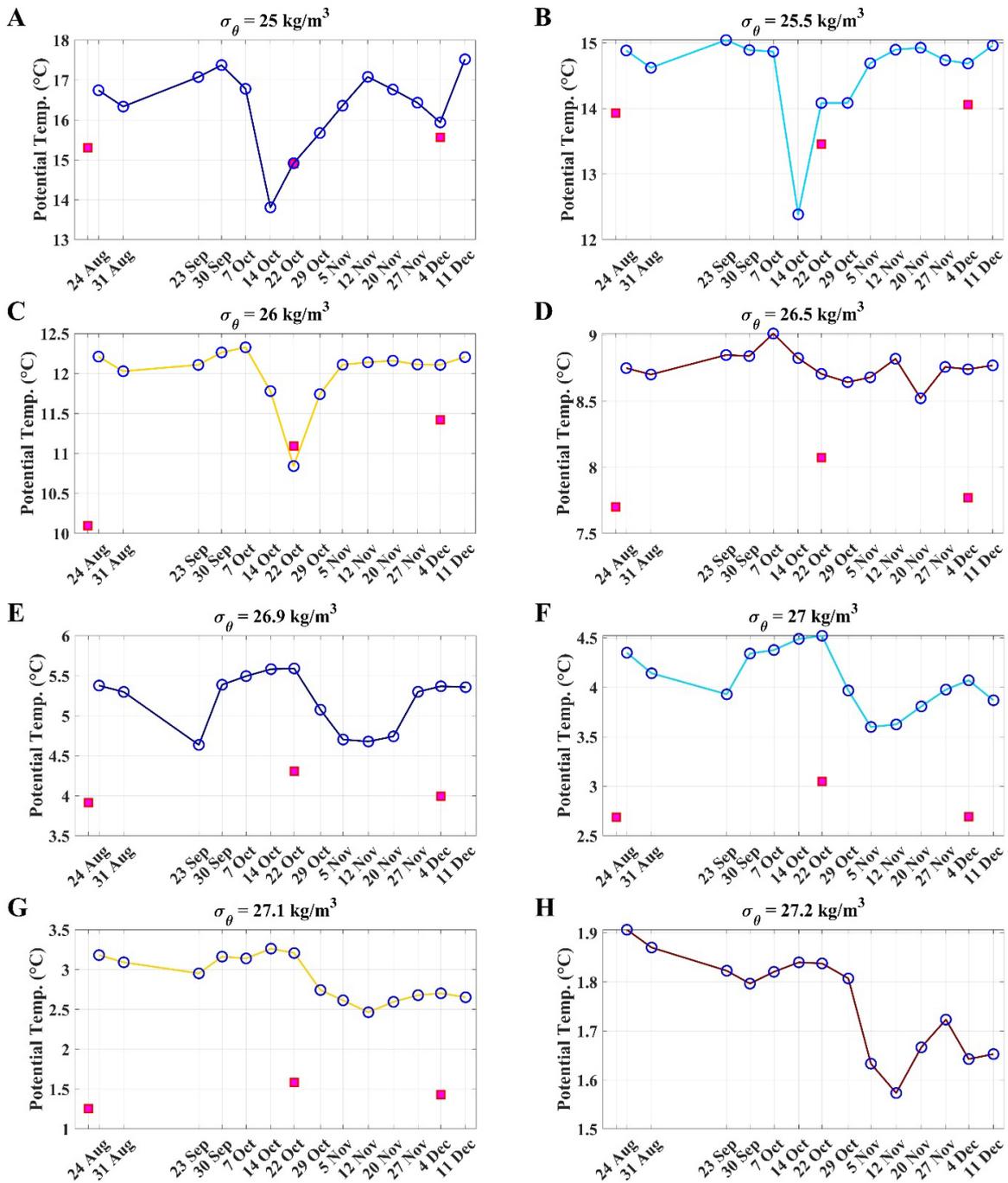
### 3.2 시간 해상도에 따른 물성 변동 비교

두 플랫폼의 관측 자료를 시간 해상도 관점에서 비교 분석하기 위하여, 시계열 비교 분석을 수행했다. 두 자료 모두에서 일정한 샘플링 간격의 시계열을 도출하기 위해 각 횡단면의 중간 위치(Fig. 1 별 표시)에서 수온 및 염분을 각각 추출하였다. 시계열을 도출할 때에는 두 가지 기준을 적용하였는데, 표층부터 중층에 이르는 8개의 등밀도면을 따라 수온과 염분을 추출하는 방식과 수심을 기준으로 8개의 등압력면을 따라 수온과 염분을 추출하는 방식이다. 등밀도면을 따라 수온과 염분을 추출한 까닭은 글라이더와 같은 이동 플랫폼의 관측값이 등압력면에서는 내부파의 영향을 받을 수 있기 때문에 이 영향을 최소화하기 위해서이다(Rudnick and Cole, 2011).

글라이더 자료와 정선 자료로부터 등밀도면을 따라 추출한 수온 시계열을 Fig. 8에 도시하였다. 그림에서 정선 자료의 격월 시계열은 보라색 사각형으로 표시되어 있다. 글라이더 수온 시계열로부터 분명하게 나타나는 특징은 표층(Fig. 8A-C)과 중층(Fig. 8E-H)에서 수온 거동이 위상 차이를 보인다는 것이다. 반면에 Fig. 8D의 하부 밀도약층( $26.5 \text{ kg/m}^3$ )에서 나타난 수온 거동은 이들과 분명한 차이를 보이고 있다. 즉, 10월 7일의 국소 극대값과 11월 20일의 극소값 사이에서 나타나는 하부 밀도약층의 수온 거동은 같은 구간의 표층 및 중층 어느 쪽의 거동과도 유사하지 않으며, 마치 표층의 진동 형태가 중층의 진동 형태로 진화하는 과정의 중간 단계처럼 보인다. 이에 대해서는 추후 내부파와 같은 파동의 전파 관점에서 심층적인 분석이 필요하다고 여겨진다. 표층( $25 \sim 26 \text{ kg/m}^3$ )에서는 10월 14일과 22일 사이에 극소값이 나타났으나, 중층( $26.9 \sim 27.2 \text{ kg/m}^3$ )에서는 해당 시기에 극대값이 관측된 후 대략 5주가 지난 11월 5일과 20일 사이에 극소값이 나타난다. 이러한 위상 반전의 특징이 정선 관측 자료에서는 매우 약하게 나타나며, 글라이더 자료에서 나타난 표층과 중층 간 극소값의 출현 시간차가 대략 5주라는 사실 또한 확인이 어렵다. 더하여, 글라이더 자료에서 관측되는 대략 6주 주기의 진동하는 거동 또한 정선 자료에서는 확인할 수 없다. 이는 관측해역에서 정선 관측의 샘플링 간격보다 짧은 월중변동 특성을 갖는 아중규모 물리과정이 존재함을 의미하며, 이러한 거동을 계절 특성의 관점에서 보다 정확히 진단하기 위해서는 1년 정도의 장기 글라이더 연속 단면 관측이 필요할 것으로 보인다.

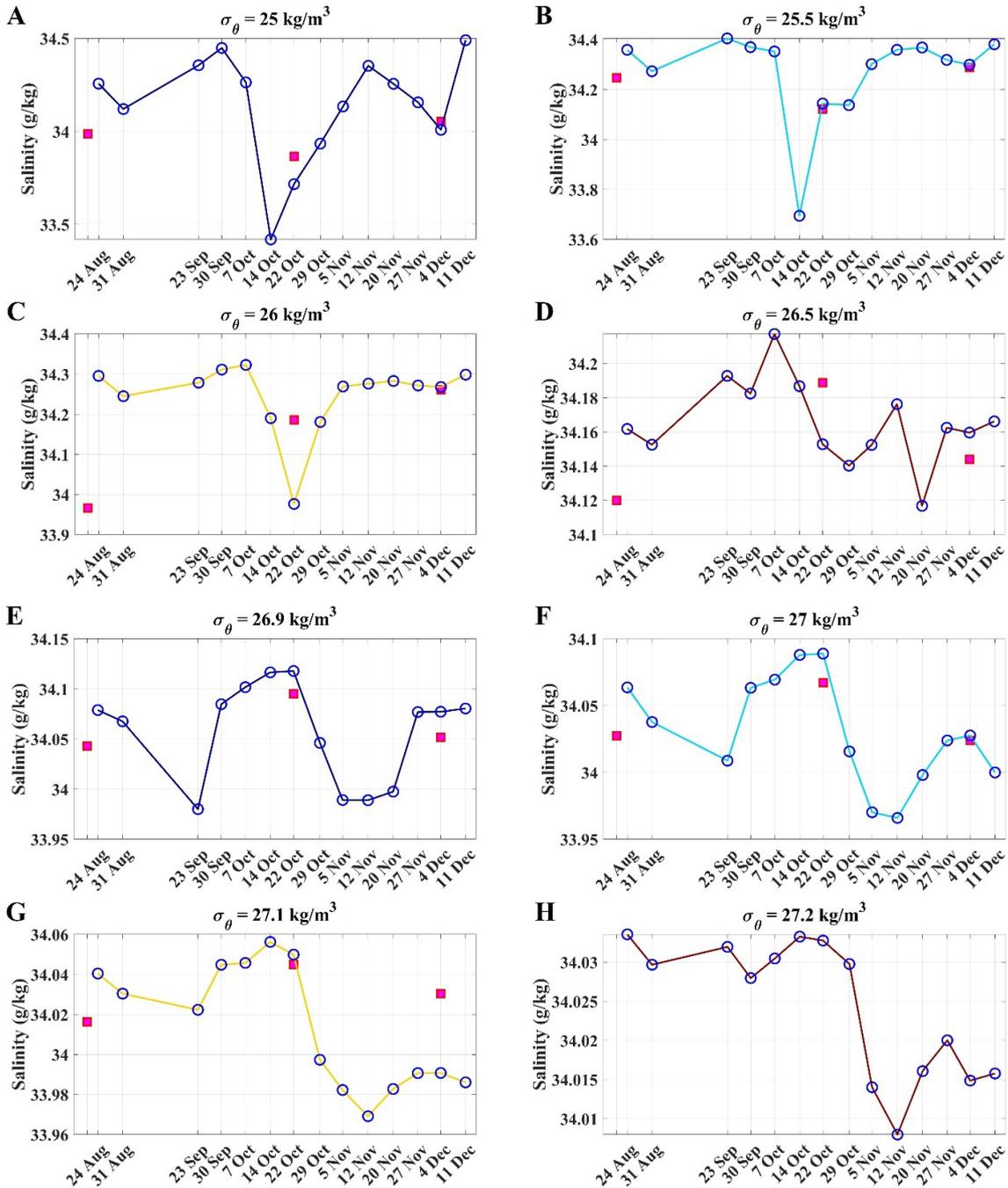
등밀도면 상에서 추출한 염분 시계열은 Fig. 9에 도시되었다. 글라이더의 수온 시계열 변동과 비교했을 때, 거시적 거동은 유사한 패턴을 보인다. 이는 등밀도면을 따라 추출한 것에 기인한다고 볼 수 있는데, 밀도는 온도와 염분에 의해 거의 결정되기 때문이다. 특히,  $26.9 \sim 27.1 \text{ kg/m}^3$  구간에서의 염분 변동은 뚜렷한 월중변동 특성을 보인다. 즉, 대략 40일 주기의 저염고염 변동을 일으키는 물리적 과정이 중층에 존재함을 의미한다. 정선 관측 자료에 나타난 염분의 거동은 수온의 경우와 거의 같다.

등압력면을 따라 추출한 수온과 염분 시계열을 Fig. 10 과 Fig. 11에 각각 도시하였다. 등밀도면 상에서의 수온 및 염분의 변동 패턴과 비교했을 때, 수온의 경우 등압력면에 대한 변동은 진동하는 패턴보다는 선형적으로 증감하는 경향이 거시적으로 두드러지게 나타난다. 특히, 표층(Fig. 10A, B)에서의 감소하는 경향은 계절성이 분명해 보인다. 반면에 수심 100 dbar에서는 증가하는 경향이 나타나는데, 수심에 따른 이와 같은 상반된 경향은 거시적 특징을 보인다는 점에서 두 플랫폼의 시간 해상도 영향을 크게 받지 않는 것으로 여겨진다. 하지만, 150 m이하의 수심에서 대략 11월을 기점으로 일정하게 유지되던 수온이 갑자기 튀는 특징이 나타나며, 이는 글라이더 자료에서만 관측된다. 따라서, 이러한 아중규모 변동을 포착하기 위해서는 고해상도 자료가 반드시 필요할 것으로 판단된다.



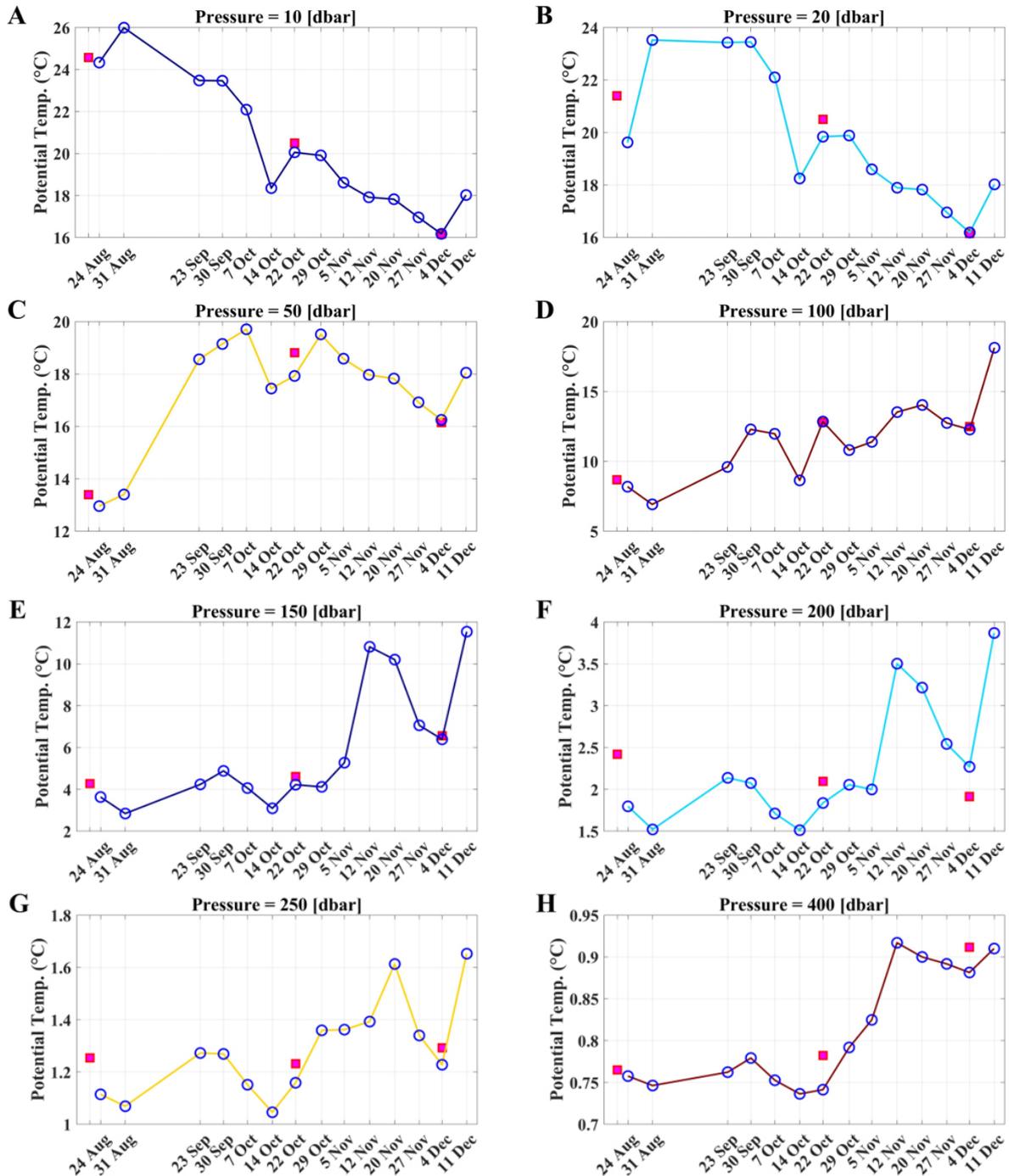
**Fig. 8.** Temporal evolution of potential temperature along isopycnals during glider observations (From 20 Aug to 15 Dec), along with the NIFS measurements (21 Aug, 22 Oct and 4 Dec) for surface layer (A-D) and intermediate layer (E-H).

Fig. 11A-C에서의 염분 시계열 거동은 두 플랫폼에서 매우 유사하게 나타나는데, 여름에서 가을로 갈수록 염분이 감소했다가 겨울로 가면서 서서히 증가하는 양상이 명백한 계절성 변동으로 보인다. 반면, 수심 100 dbar에서 나타난 거동을 보면 (Fig. 11D), 서서히 증가하는 거시적 거동은 두 플랫폼에서 유사하게 관측되지만, 9월 30일과 10월 7일 및 11월 12일과 11월 20일의 글라이더 자료는 선박 자료의 거동과 비교했을 때 크게 벗어나는 행태를 보이는데(Fig. 11D), 이러한 거동은 수온의 증충(Fig. 10E-H)에서 나타난 튀는 현상처럼 이중규모 변동으로 보인다. 이러한 튀는 현상은 수심 150 및 200 dbar(Fig 11



**Fig. 9.** Temporal evolution of salinity along isopycnals during glider observations (From 20 Aug to 15 Dec), along with the NIFS measurements (21 Aug, 22 Oct and 4 Dec) for surface layer (A-D) and intermediate layer (E-H).

E-F)에서도 유사하게 나타나는데, 11월 12일 시점에서 증가하기도 하고(Fig. 11E) 감소하기도 한다(Fig. 11F). 이러한 변동 특성은 저염 혹은 고염 수괴의 이류에 의한 것으로 판단되기는 하나, 관측 데이터의 한계로 단정짓기는 어렵다. 전체적인 변동 특성을 이해하기 위해서는 해당 수심에서의 고해상도 장기 자료가 필요해 보인다.



**Fig. 10.** Temporal evolution of potential temperature along isobarics during glider observations (From 20 Aug to 15 Dec), along with the NIFS measurements (21 Aug, 22 Oct and 4 Dec) for surface layer (A-D) and intermediate layer (E-H).

### 3.3 관측치 불일치-편차와 편향

Figs. 8-11의 시계열 비교에서 확인되었듯이, 두 플랫폼의 수온과 염분 측정치 사이에 불일치가 나타난다. 이러한 관측치 불일치는 크게 두 요인에 의해 발생하는데, 관측 정점 불일치와 관측 시점 불일치다. 앞서 언급했듯이, 관측 시점 불일치는 선박과 글라이더 관측 플랫폼의 특성상 피할 수 없으며, 관측 정점 불일치는 기본적으로 선박 관측 라인과 글라이더 관측 라인

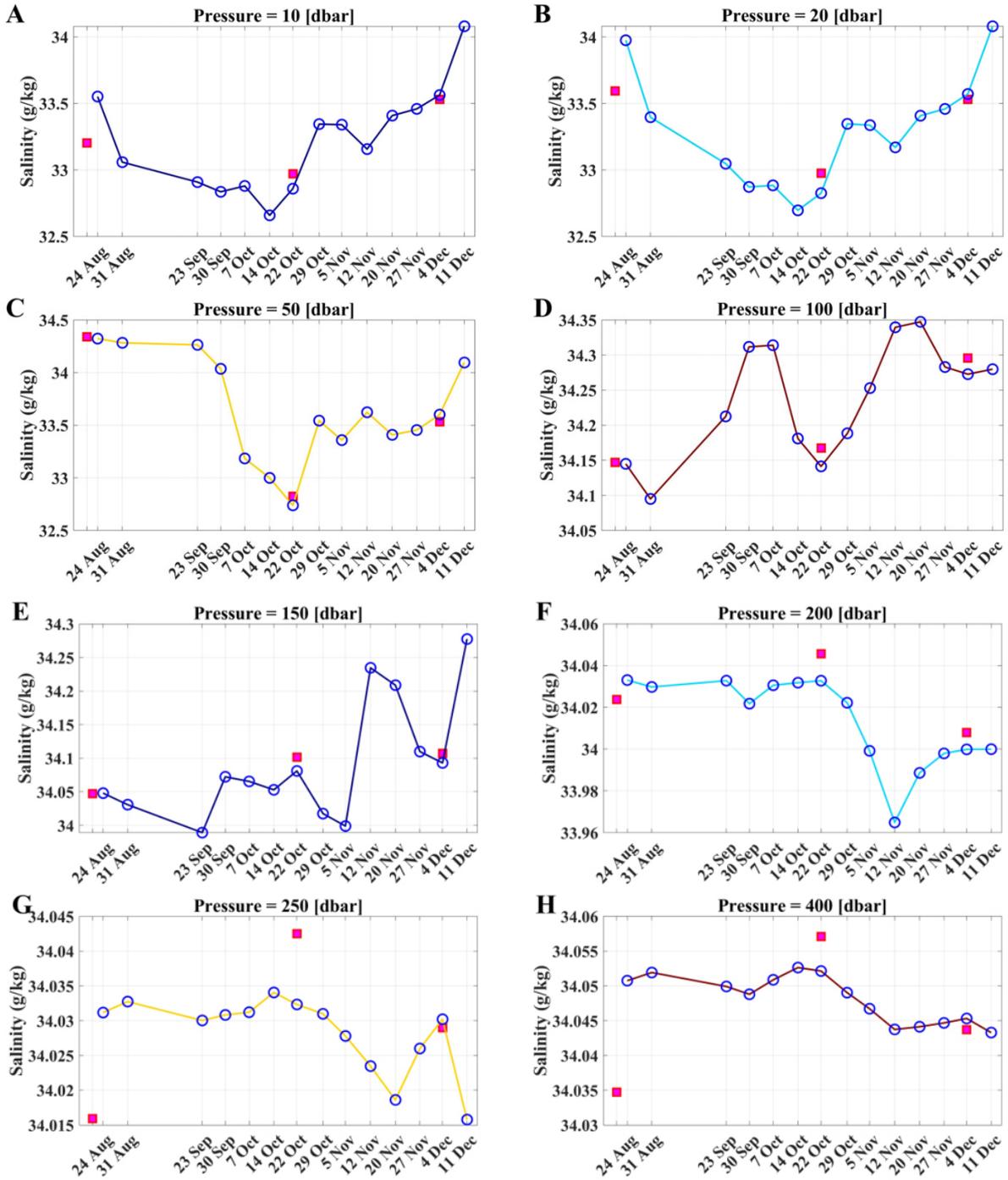


Fig. 11. Temporal evolution of salinity along isobars during glider observations (From 20 Aug to 15 Dec), along with the NIFS measurements (21 Aug, 22 Oct and 4 Dec) for surface layer (A-D) and intermediate layer (E-H).

간 남북방향 거리가 대략 1 km라는 사실에 기인한다. 따라서, 두 플랫폼의 관측치 차이(편차)는 수온과 염분의 공간적 및 시간적 변동 규모와 관련하여 논해야 한다.

시간 규모의 관점에서 보자면, 단일 횡단면 기준으로 선박은 대략 24시간이 소요되는 반면 글라이더는 평균 7일이 소요되기 때문에 관측 시점의 차이에 기인하는 편차는 충분히 예상 가능하다. 동일 정점에서 수온과 염분의 변동 시간 규모가 7일

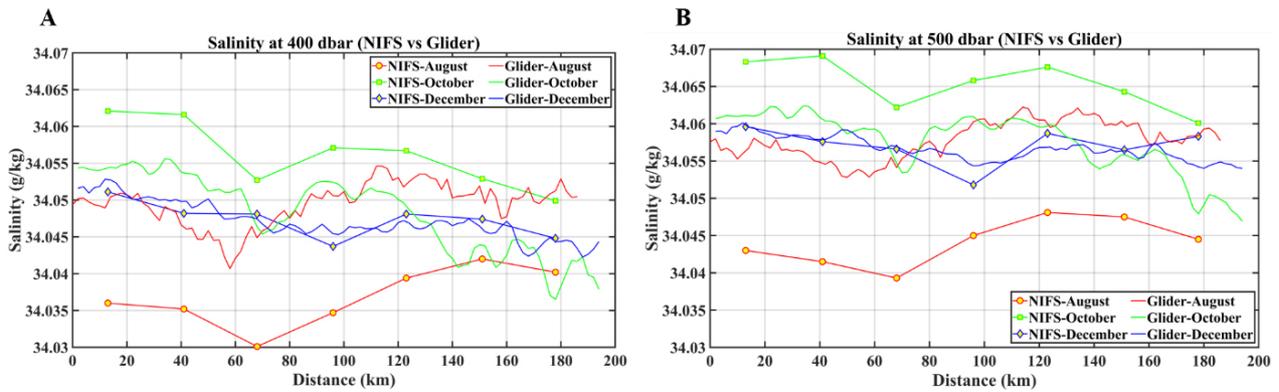


Fig. 12. Salinity comparison at two depths with (A) 400 dbar and (B) 500 dbar, respectively, for salinity bias.

이상이라면, 두 플랫폼의 관측치 편차는 매우 작을 것이다. 하지만, 7일 이내라면 편차는 불가피하며, 편차의 정도는 가장 단순한 경우에 두 플랫폼의 관측 시간 차이에 비례하는 경향을 보일 것이다. Figs. 10-11에서 가장 큰 편차는 8월 자료에서 나타나는데, 이는 전형적인 시간차 효과에 기인한다고 볼 수 있다. 왜냐하면, 해당 정점(Fig. 1 별표시점)에서 정선 관측(8월 21일)과 글라이더 관측(8월 24일) 사이에 대략 3일 간격의 시간차가 존재하기 때문이다.

공간 규모 관점에서는 정점의 기준이 중요하다. 앞서 언급한대로 10 km의 공간 규모를 정점으로 정의할 수 있다면, 즉 그렇게 정의한 정점 내에서 수온과 염분이 일정한 시간 동안 큰 변동을 보이지 않는다면 편차는 작게 나타날 것이다. 하지만, 정점의 공간 규모가 1 km 이내인 경우에는 두 플랫폼의 관측 라인이 기본적으로 남북 방향으로 1 km의 거리만큼 떨어져 있기 때문에 두 관측 라인은 서로 다른 정점에 있다고 볼 수 있으며, 그로 인한 편차는 피할 수 없다. Figs. 10-11의 10월 및 12월의 정선 자료는 글라이더와 관측 일자를 일치시켰기 때문에 시간차에 따른 영향은 상당히 배제된다. 따라서, 공간 규모 관점에서 보면 12월 자료에서는 매우 작은 편차를 갖기 때문에 정점의 공간 규모가 두 플랫폼의 관측 위치를 모두 포함할 정도로 크다고 볼 수 있지만, 10월 자료에서는 12월과 달리 상대적으로 큰 편차가 나타난다. 단순히 공간 규모 관점에서 본다면, 10월의 정점 규모는 1 km 보다 작을 수 있다는 가능성을 완전히 배제하기는 어렵다.

수온 및 염분 시계열에서 확인된 편차 경향에 대해 언급해야 할 또 한 가지 중요한 점은 등밀도면에서 추출한 시계열에서 더 큰 편차가 나타났다는 사실이다. 이는 수온과 염분으로부터 밀도를 산출하고 특정 등밀도에서 수온과 염분을 추출하는 과정에서 내삽으로 인한 영향이 낮은 수직 해상도의 정선 자료에 반영된 결과라고 볼 수 있다. 해상도가 낮을수록 내삽으로 인한 추정치의 불확실성이 커진다. 등압력면의 경우엔 정선 관측 정점에서 직접 관측치를 추출했기 때문에 정선 자료에 내삽 영향이 없다.

Fig. 12는 두 플랫폼의 관측 시기가 겹치는 세 횡단면에 대한 공간적 거동을 비교하기 위해, 정선 정점인 400 dbar 와 500 dbar 수심에서 염분 관측치를 추출하여 도시한 것이다. 성긴 공간 해상도를 가지는 선박 관측 자료에 대해 내삽으로 인한 편차를 제거하기 위해 정선 정점을 선택했다. 기본적으로 수평 위치에 따라 두 플랫폼의 관측 시점은 0~6일 정도의 시간차를 가지며, 공간적으로는 남북 방향으로 1 km의 거리와 측정 과정에서의 선박과 글라이더의 경로 이탈 정도를 고려할 수 있다. Fig. 12에 도시된 염분 자료를 편차의 관점에서 볼 때, 12월에는 두 플랫폼의 관측치가 매우 작은 편차를 보이지만, 8월과 10월에서는 흥미로운 편향(편차의 방향이 일관되게 나타나는 현상) 특성이 관찰된다. 거시적 거동 양상(경향)은 유사하게 나타나지만, 8월에는 염분이 글라이더 관측에 비해 정선 관측에서 낮게 측정된 데 반해 10월에는 반대로 정선 관측에서 높게 측정된다. 이러한 편향 특성은 두 가지 관점에서 설명이 가능하다고 여겨진다.

첫번째 관점은 관측 해역(정선관측 106 라인)과 아극전선역(Sub-Polar Front)간 밀접한 관련성이다. 동서 방향으로는 글라이더 관측 자료의 경우 대략 10 km 크기로 수평 필터링을 통해 관측치를 평활화 하였지만, 남북 방향으로는 관측이 이뤄지지 않았기 때문에 자료 평활화를 할 수 없었다. 그리고, 전선역에서는 일반적으로 물성의 공간 구배(Gradient)가 크게 나타난다. 따라서, 8월과 10월에 관측된 염분 편향은 전선역에서의 구배 효과일 수도 있다. 그리고 그러한 구배가 12월에 완화되었을 수 있다. 정확한 판단을 위해서는 추가적인 자료 분석이 필요하기 때문에 본 보고서에서는 가능성으로 제시한다.

두번째 관점은 두 플랫폼에서 사용한 관측 장비의 편향 가능성이다. 관측 장비는 필히 주기적인 교정을 거쳐야 하는데, 교정 시기에 다른 기기로 교체되었을 경우 관측치의 편향이 나타날 수 있다. CTD 장비 교정의 명시된 유효 기간은 따로 존재하지 않으며, 일반적으로 1~2년에 한번 교정을 하는 것으로 생각하고 기관마다 다르게 적용한다. CTD는 바이오 파울링으로 인해 교정한 뒤 극단적으로 몇 일만에 편향이 생길 수도 있고, 관리가 잘되는 경우 1~2년 지나도 일관성을 유지할 수 있다. 글라이더의 경우에는 투하전에 최신 교정된 글라이더와 비교 검증을 수행한 뒤 임무를 수행하도록 하고 있으며, 바다에서 임무를 수행한 일자가 365일을 넘는 경우와 교정한 지 2년이 넘은 경우 및 비교 검증 시 염분이 0.005 g/kg 이상 벗어나는 경우 다시 교정을 하도록 하고 있다. 본 관측에서는 교정을 마친 CTD 장비를 위의 조건에 따라 8월 왕복 횡단면 관측과 9월에 수행된 장기 연속 단면 관측에 그대로 사용하였다. 그리고, Fig. 2C에서 확인할 수 있었듯이, 전체 관측 기간 동안 심각한 파울링 문제가 없었기 때문에 관측 장비의 성능 저하 가능성이 크다고 볼 수 없다. 하지만, 국립수산과학원으로부터 확보한 선박 CTD 장비의 교정에 대한 정보에 따르면, 선박관측에서 사용한 CTD는 매 관측 시기마다 각기 다른 시기에 교정되었음이 확인되었다. 8월 관측 장비는 2016년에 교정되었고, 10월 및 12월 관측 장비는 2020년 6월과 8월에 각각 교정되었다. 이에 따르면, Fig. 12에서 나타난 8월의 염분 편향의 경우 선박 CTD 장비가 교정 후 3년 이상 경과하였기 때문에 염분 자료가 낮게 모의되었을 수 있지만, 10월 염분 편향은 단순히 교정만으로 설명하기에는 한계가 있다. 이에 대해서는 추후에 체계적인 비교 연구가 수행되어야 할 것으로 보인다.

시간에 대한 영향성을 논할 수도 있지만, 횡단면 전 수평 구간에 걸쳐 일정한 방향으로 편차가 발생하도록 변동이 일어났을 가능성이 높아 보이지는 않는다.

Fig. 13은 앞서 Fig. 12에서의 편향 요인을 다른 각도로 탐색하기 위해 두 플랫폼 간 관측 시점이 거의 일치하는 수평 정점(Fig. 1 별 표시)에 대하여 추출한 수온 및 염분 자료로부터 TS 도표를 도시한 것이다. 해당 정점에서 글라이더 자료는 격자 모델의 전체 수심에서 수온과 염분을 추출하였고 정선 자료는 격자 모델이 아닌 실제 관측 정점에서 추출하였다. 그리고, 각 플랫폼의 관측 장비가 염분 편향에 미친 영향을 평가하기 위해 격월 변동폭이 작게 나타나는 중층 영역(수심 200~500 dbar)에 한정하였다.

Fig. 12에서와 마찬가지로, 8월과 10월 자료에서의 염분 편향이 Fig. 13에서도 전체 수심에 대해 나타난다. 흥미로운 점은 글라이더에서 측정한 염분은 두 시기에 약간의 편차는 있지만, 거의 유사한 값을 보인다는 것이다. 반면에 선박에서 측정한 염분은 극단적으로 나뉘며 격월 간 큰 변동성을 보인다. 12월에 이르면, 이러한 편향성은 사라지고, 두 플랫폼에서 측정한 염분은 거의 일치한다.

앞서 두 플랫폼 관측 자료의 편향에 대한 두 가지 가능성을 제시하였는데, 남북 방향으로 대략 1 km 떨어져 있다는 것만으로 이 정도의 염분 변동이 수심 200 dbar 이하의 중층에서 격월 간격으로 일어날 수 있다는 가능성은 상당히 회의적으로 보인다. 그보다는 글라이더에서 측정한 염분의 거동이 오히려 타당해 보인다. 표층은 대기와 해수 사이의 복잡하고 다변한 상호작용에 의해 변화가 급격하게 일어날 수 있지만, 수심 200 dbar 이하의 중층에서는 이러한 변동이 크지 않을 것으로 판단되기 때문이다. 따라서, CTD 장비에 기인하는 염분 편향성을 완전히 배제하기는 어려울 듯 하다.

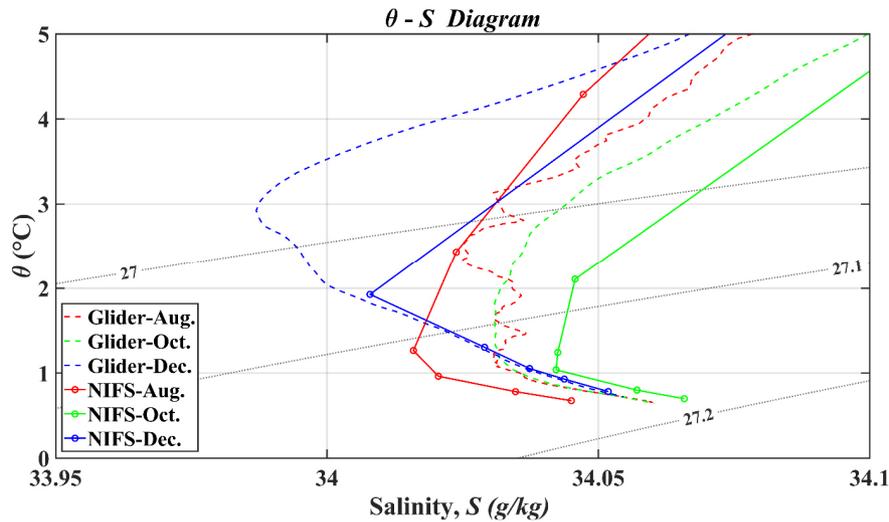


Fig. 13. T-S diagram for NIFS and glider datasets at the mid-point of the observation line in the intermediate layer.

#### 4. 결론 및 토의

본 보고서에서는 Teledyne Webb Research사의 Slocum G2-Deep glider를 활용한 국내 최초의 연속 물성 단면 측정의 결과를 소개했다. 전체 95일의 운용 시간 동안 NIFS 정선 관측 106 라인을 따라 총 2550 km를 비행하였고, 평균 제곱근 거리 (Root-Mean-Square) 기준 262 m의 경로 이탈을 기록함으로써 매우 안정적인 경로 추종 모드 운용 제어가 동해에서 가능성을 확인하였다. 동적 위치유지 시스템이 장착되지 않은 정선 관측의 경우, 수심에 따라 다르지만 CTD 관측 동안 선박이 해류와 바람에 의해 수십~수백 미터까지 정점에서 이탈할 수 있다는 것을 고려할 때, 글라이더의 경로 추종 모드 제어 기술은 놀라운 성취라 할 수 있다.

본 보고서에서는 수중글라이더를 활용한 연속 단면 관측의 성공적인 결과물인 12개의 횡단면(Fig. 2E)을 이용하여, 같은 관측 해역에서 정기적으로 관측이 수행되고 있는 NIFS의 정선 단면 관측 자료와 비교함으로써 시공간 해상도 차이에 따른 횡단면 상 물성의 시공간적 특성에 차이가 나타남을 확인하였다.

첫째, 공간 해상도 차이에 따른 가장 큰 특성은 아중규모 구조를 포착함에 있어 정선 자료는 분명한 한계를 드러냈다는 것이다. Fig. 6의 수온 단면에서 나타났듯이, 수평 크기 25 km 이하의 수온약층 강화 현상 및 전선면의 이동 등과 같은 아중규모 구조의 변동은 오직 글라이더 관측 자료에서만 확인되었다. 마찬가지로 Fig. 7의 염분 단면에서도 거시적인 분포는 두 플랫폼에 대해서 동일하게 나타나지만, 아중규모 패치 구조는 오직 글라이더 자료에서만 나타났다. 이러한 사실은 정선 관측의 정점 간격보다 작은 아중규모 염분 패치의 거동을 중요하게 다뤄야 하는 경우, 고해상도 관측이 필요함을 의미한다.

둘째, Figs. 8-11에 도시한 수온과 염분의 시계열 변동에서 확인되었듯이, 등밀도면에서 추출한 수온과 염분은 뚜렷한 월중변동을 보여주었다(Figs. 8, 9). 표층과 중층에서 나타난 월중변동의 대략적인 주기는 유사했지만, 극값의 출현 시점에서는 두 수심 사이에 약 2주 정도의 시간차가 나타났다. 수심에 따른 이러한 특성이 우연적인지 아니면 특정한 물리적 과정과 관련이 있는지 여부는 좀더 긴 단면관측을 통해 추후 확인되어야 할 것으로 여겨진다.

등압력면 상에서 추출한 수온 및 염분(Figs. 10, 11)의 시계열에서는 수심에 따른 변동 특성이 뚜렷하게 나타나지 않았다. 표층에서는 전체적으로 정선 자료와 글라이더 자료에서의 거동이 매우 유사한 특징을 보였지만, 중층에서는 약한 진동 특성이 글라이더 자료에서만 확인되었다. 하지만, 대략 1주 시간 동안 튀는 거동이 관측된 것은 짧은 변동성을 가진 아중규모 현

상이 존재할 수 있음을 보여줌과 동시에 이런 특성들이 관측해역 도처에 존재한다는 가능성을 의미한다고 볼 수 있다.

두 플랫폼 간 관측치의 불일치(편차)는 관측 특성 상 불가피하며, 이 문제를 본 보고서에서는 시공간 규모의 관점에서 논하였다. 정점을 정의할 때, 공간적인 규모를 대략 10 km로 둔다면 두 플랫폼의 관측 지점이 정점에 있을 때의 관측치는 거의 같아야 한다. 이 경우 관측 시점이 중요시되는데, 관측 시점은 해당 정점에서의 물성 변동 시간과 관련되어 있다. 즉, 본 보고서의 수중글라이더 관측 특성에 따라 대략 1주일 시간 동안 물성의 변동이 크게 나타나지 않는다면, 두 플랫폼의 정점 내 관측치는 거의 동일해야 한다. 하지만, 실제 우리가 확인한 결과는 두 플랫폼 간 관측치가 수심에 따라 상당한 편차를 보였으며, 8월과 10월 단면에서는 흥미로운 편향 특성(Figs. 12, 13)이 확인되었다.

편차와 편향에 대해서는 물성(수온, 염분)의 변동을 시공간 규모에 따라 해석함으로써, 두 플랫폼 간 동일 정점에서의 관측 시간차와 동일 시점에서의 관측 지점간 거리로써 물성의 변동을 야기하는 물리적 과정의 규모(아중규모)에 대한 단서를 얻을 수도 있다. 하지만, 측정 장비의 교정에 기인하는 가능성도 완전히 배제할 수는 없다. 앞서, 언급한대로 선박 CTD 장비는 매 시점(8, 10, 12월)마다 교정을 수행하여 관측에 사용했고, 글라이더는 사전에 교정한 장비를 전체 관측 기간 동안 교체 등의 변동 없이 사용하였다.

장비 교정의 영향성을 정량적으로 비교하기 위해, 깊은 수심에서는 물성 변동이 크게 일어나지 않는다는 가정으로부터 염분의 변동을 횡단면의 중간 위치(Fig. 1의 별표시)에서 수심 500 dbar를 기점으로 비교하였다. Fig. 12의 100 km 위치에서 8월부터 12월 기간 동안의 염분 변동폭을 계산해 보면, 글라이더 관측치가 대략 0.005 g/kg 염분 변화를 나타낸 반면 선박 관측치는 해당 기간에 걸쳐 0.020 g/kg의 변동을 보여준다. 이는 8월과 10월 정선 자료에서 염분 변동이 매우 크게 일어났음을 의미하며, 해당 해역에서의 주요한 변동을 설명해주는 메커니즘이 없다면 측정 장비에 기인했다고 볼 수밖에 없다. Fig. 13의 TS 도표에서 표준편차로 추정된 염분 변동의 크기는 0.75°C 수온을 기점으로 글라이더 자료에서는 0.0027 g/kg였고, 선박 자료에서는 0.0122 g/kg였다. 두 경우 모두 정선 관측이 글라이더 관측에 비해 대략 4배의 편차를 보였다. 이들 결과로부터 선박 관측 장비의 교정에 대한 오류 가능성을 완전히 배제하기는 어려우며, 다른 한편으로는 정선 관측 라인과 글라이더 관측 라인 간 거리(남북 간 대략 1 km)에 기인하는 물성의 변동 메커니즘을 고민할 필요가 있어 보인다.

결론적으로 매번 달라지는 정선 선박 관측의 시간적 일관성을 체크하고 부족한 시공간적 자료를 보완하기 위해서 선박 관측과 비교하여 운용 비용이 저렴하고 운용 방식이 효율적인 수중글라이더 연속 단면 관측이 계속 수행될 필요가 있다. 또한 동해에는 공간적으로 중규모 및 아중규모 구조와 현상이 존재하고 있으며 시간적으로도 2개월의 간격으로 분해되지 않는 월중변동(intraseasonal)이 강하게 존재하고 있어 정선관측 자료 해석에 있어 에일리어징(aliasing) 문제를 야기할 수 있으므로 시공간적으로 더 촘촘한 관측을 통한 정선 관측의 보완이 필요할 것으로 사료된다.

## 사 사

이 논문 작성 과정에서 정선 관측자료 현황에 대해 설명해주신 국립수산물과학원 이준수 박사님께 감사의 말씀을 드리며, 이 논문은 2020년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행되었고(RS-2020-KS201379, ‘수중글라이더 핵심부품 장비 기술개발 및 운용센터 구축’ 사업), 2023년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행되었으며(RS-2023-00256005, 고품질 준실시간 해양그리드 데이터서비스 체계 개발), 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(2022R1A2C10014059).

## 참고문헌(References)

- Bruvik, E.M., I. Fer, K. Våge and P.M. Haugan, 2020. A revised ocean glider concept to realize Stommel's vision and supplement Argo floats. *Ocean Sci.*, **16**: 291-305.
- Chang, K.-I., W.J. Teague, S.J. Lyu, H.T. Perkins, D.-K. Lee, D.R. Watts, Y.-B. Kim, D.A. Mitchell, C.M. Lee and K. Kim, 2004. Circulation and currents in the southwestern East/Japan Sea: Overview and review. *Prog. Oceanogr.*, **61**(2-4): 105-156.
- Choi, A.-R., Y.-G. Park, H.-S. Min and K.H. Kim, 2009. The Improvement of CTD Data through Post Processing. *Ocean and Polar Research*, **31**(4): 339-347.
- Garau, B., S. Ruiz, W.G. Zhang, A. Pascual, E. Heslop, J. Kerfoot and J. Tintore, 2011. Thermal lag correction on Slocum CTD glider data. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **28**: 1065-1071.
- Haldeman, C.D., D.K. Aragon, T. Miles, S.M. Glenn and A.G. Ramos, 2016. Lessening biofouling on long-duration AUV flights: Behavior modifications and lessons learned. *OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey*, Monterey, CA, USA: 1-8.
- Nichols, C.R. and K. Raghukumar, 2020. Introduction. In: *Marine Environmental Characterization. Synthesis Lectures on Ocean Systems Engineering*. Springer, Cham, pp. 6.
- Ocean Climate Stations, 2023. Available at: <https://www.pmel.noaa.gov/ocs/Papa> [2023/11/17].
- Park, J., 2013. Underwater Glider: Its Applicability in the East/Japan Sea. *Ocean and Polar Research*, **35**(2): 107-121.
- Park, J., 2019. First Observational Finding of Submesoscale Intrathermocline Eddy in the East Sea using Underwater Glider. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **24**(2): 332-350.
- Park, J., K. Kim, B.A. King and S.C. Riser, 2005. An Advanced Method to Estimate Deep Currents from Profiling Floats. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **22**: 1294-1304.
- Park, Y., S. Lee, Y. Lee, S.K. Jung, N. Jang and H.-W. Lee, 2012. Report of East Sea Crossing by Underwater Glider. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **17**(2): 130-137.
- Rudnick, D.L. and S.T. Cole, 2011. On sampling the ocean using underwater gliders. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **116**: C08010.
- Stommel, H., 1989. The Slocum Mission. *Oceanography*, **2**(1): 22-25.
- Tanioka, K., 1968. On the East Korean Warm Current (Tosen Warm Current). *Oceanographical Magazine*, **20**: 31-38.
- Wagawa, T., Y. Kawaguchi, Y. Igeta, N. Honda, T. Okunishi and I. Yabe, 2020. Observations of oceanic fronts and water-mass properties in the central Japan Sea: Repeated surveys from an underwater glider. *Journal of Marine Systems*, **201**: 103242.
- Webb, D.C., P.J. Simonetti and C.P. Jones, 2001. SLOCUM: An underwater glider propelled by environmental energy. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, **26**(4): 447-452.