

Article

2015년 4월에 제주 서부해역에서 발생한 수온역전층 특성

김성현*

한국해양과학기술원 해양방위·안전연구센터
(49111) 부산광역시 영도구 해양로 385

Characteristics of Water Temperature Inversion Observed in a Region West of Jeju Island in April 2015

Seong Hyeon Kim*

Marine Security and Safety Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology
Busan 49111, Korea

Abstract : In-situ observations were carried out in April 2015 to investigate the occurrence of water temperature inversion in a region west of Jeju Island. Analysis of in-situ in the western part of Jeju island showed that cold water moved to the southeast from the surface to the middle layer and warm water moved from the middle to the lower layer of the northwest direction. The water temperature inversion occurred at 84 stations (63.1%) out of 133 stations. At the boundary of the water temperature inversion layer, it was formed in the middle layer and disappeared. In the strongly appearing, it started from the middle layer to the lower layer. The shape of the water temperature inversion layer was different. As a result of horizontal water temperature slope analysis of the water temperature inversion zone, maximum 0.23°C/km was obtained and the mean was 0.06°C/km. The role of water temperature inversion as an indicator to determine the formation of water front. As a result of the water mass analysis, Jeju Warm Current Water and Tsushima Warm Current Water of high temperature and high salt intruded from the middle to the bottom. In the middle layer occurred as the Yellow Sea Cold Water of low water temperature and low salinity expanded.

Key words : water temperature inversion layer, water temperature front, Yellow Sea Cold Water, Jeju Warm Current Water, Tsushima Warm Current Water, T-S diagram, Jeju Island

1. 서 론

일반적으로 해양에서 수온은 수심이 깊어짐에 따라 점 점 수온이 감소하는데 어떤 수심에서는 오히려 중·하층의 수온이 상층보다 상승하는 경우가 있으며, 이를 수온역전 (Temperature Inversion, TI)이라고 한다(Cho et al. 1993; KSO 2005). 이러한 수온역전층의 발생 원인으로는 첫째, 해면으로부터의 열손실로 인한 표층 부근의 수온역전 (Hao et al. 2010), 둘째, 다른 수괴의 이류(advection)에 의

한 수온역전(Kang 1983), 셋째, 전선역에서의 혼합 과정에서 생기는 수온역전(Kim and Cho 1982)을 들 수 있다. 우리나라 주변 해역의 경우 수온역전 현상은 서로 다른 수괴가 만나는 해역인 연안용승해역(Lee 1978), 극전선해역(Kim and Cho 1982) 등에서 주로 발생하며, 이러한 해역의 경계부근에는 수온전선과 같은 복잡한 해양물리적 특성이 나타난다(Nagata 1967). Cho and Park (1990)에 의하면, 제주도 동부해역에서 하계에 발생하는 수온역전 현상은 고온고염의 대마난류수가 저온저염의 한국남안연안 수 사이를 침투하여 생기는 수온역전과 저온저염의 한국

*Corresponding author. E-mail: kenta81@kiost.ac.kr

남안연안수가 고온고염의 대마난류수 사이를 침투하여 생기는 수온역전으로 보고하였다. Kim et al. (1982)은 서해에서 겨울과 여름의 수온전선 현상에 대한 조사결과 겨울이 여름보다 7배정도 많은 것으로 보고하였으며, 겨울에는 표면 냉각 효과, 여름에는 다른 수괴의 경계에서 발생한다고 하였다.

한국 남해에서 발생하는 수온역전현상을 연구한 Lee and Koo (2009)에 의하면, 남해에서는 서로 다른 성질의 수괴(한국남안연안수와 대마난류수)가 계절별로 서로 팽창, 감소를 반복하면서 전선을 형성하고, 전선해역에서 수온역전현상이 주로 발생한다고 보고하였다. 또한, 황해 입구에서 연구한 Lie et al. (2015)에 의하면, 황해 입구는 황해저층냉수와 제주난류수가 만나는 해역이며, 겨울에 수온역전 현상은 상층에는 차가운 한국연안수가 있고, 하층에는 따뜻한 제주난류수가 존재하면서 수온역전이 발생한다고 하였다. 또한 Lie et al. (2019)는 황해 동계에 발생하는 대역전(Large Temperature Inversions)은 차갑고 가벼운 연안수가 있는 해역에 제주난류수 및 황해난류수의 이류(advection)작용으로 생성되는 열염전선역(thermohaline frontal zones)에서 발생한다고 하였다. 동중국해와 황해에서 발생하는 수온역전층에 관하여 통계적으로 분석한 Hao et al. (2010)에 의하면, 35° N 이하에서 한국연안수와 황해난류수 및 제주난류수가 만나는 제주 부근에 발생하며, 수온역전층이 깊고, 강하다고 하였다. 그리고 Pang et al. (2017)은 동계 황해 남부에서 발생한 수온역전에 대한 모델링 결과 북풍에 의한 에크만 수송으로 수온역전층이 발생한다고 하였다.

수온역전층은 대부분 전선역에서 발생하며, 해양생물에 다양한 영향을 미치는 전선역 분포 파악에도 주요한 지표가 될 수 있다. 제주도 부근에서는 발생하는 수온역전층은 대부분 서로 다른 수괴가 만나면서 발생되며, 수괴의 경계에서는 열염전선역이 수반된다. 수온전선의 정량적인 결정은 대부분 수온의 수평경도($\Delta T_h / km$)를 이용하여 나타낸다. Yang et al. (1998)은 우리나라의 남해, 서해, 대한해협 수평경도가 0.10°C/km, 동중국해 0.07°C/km로 구분하였고, Uda (1959)는 수온의 수평경도가 0.03 ~ 0.27°C/km 이상인 지역을, Gong (1982), Park and Choi

(1995)는 0.06°C/km 이상인 지역을, Na et al. (1991)은 남해에 대해 2월에는 0.03 ~ 0.15°C/km라고 했으며, 4월에는 0.05 ~ 0.12°C/km라고 했다. Ullman and Cornillon (1999)은 평균 0.21°C/km인 지역을, Schick et al. (2004)은 0.36°C/km 이상인 지역을, Park and Chu (2006)는 0.01 ~ 0.02°C/km 이상인 지역을 수온전선역이라 제시하였다. 각 연구자들의 수온전선 범위를 요약하면, 0.01 ~ 0.36°C/km의 범위를 보인다. 본 연구에서는 수온역전층이 발생한 해역에 대한 수온의 수평경도를 계산하여, 수온전선과의 관계를 살펴보았다.

연구해역에 영향을 미치는 대표적인 수괴는 양자강희석수(Changjiang Diluted Water, CDW), 대마난류수(Tsushima Warm Current Water, TWCW), 제주난류수(Jeju Warm Current Water, JWCW), 쿠로시오분지류(Kuroshio Branch Current Water, KBCW), 황해저층냉수(Yellow Sea Bottom Cold Water, YSBCW) 등이 있다. 수괴 중 양자강희석수는 제주 근해의 표층으로 유입되는 수괴로서 수온 23°C 이상, 염분 31 psu 이하의 수괴로 분류된다(Gong et al. 1996). 그리고 제주도 동편에서 우회하여 남해의 대마도를 통과하여 동해로 유입되는 대마난류수(Lie and Cho 1997)는 수온 14.0°C 이상, 염분 34.1 psu 이상으로 구분된다(KOSEF 1990). 제주 서부에서 제주도를 시계방향으로 우회하여 제주 해협을 통과한 후 대한 해협으로 향하는 JWCW는 수온 12°C 이상, 염분 33.5 ~ 34.0 범위를 가지는 수괴로 구분하였다(Lie et al. 2000). 또한 제주 우측을 통과하는 해류를 대마난류수와 구분하여 KBCW라고 부르며, 34.0 psu 이상의 염분 값을 가지는 해수로 구분하였다(Lie et al. 2000). 그러나 KBCW와 TWCW는 염분 값에서 단지 0.1 psu 차이를 보이며, 유사한 특성으로 판단하였고, TWCW에 KBCW를 포함하여, TWCW의 수괴 범위를 본 논문에서 수온 14.0°C 이상, 염분 34.0 psu 이상으로 구분하였다.

이전까지 연구된 황해저층냉수에 대해서는 여러 연구자들의 구분 기준이 상이하다. Nakao (1977)는 황해 중앙해역의 저층에서 동계에 형성되어 춘계에서 추계까지 나타나는 10°C이하 수온과 32.0 ~ 32.5 psu 범위의 염분 값을 갖는 해수로 분류로 분류하였고, Gong et al. (1996)은

Table 1. Range of water temperature and salinity value by water mass in the near Jeju Island

Parameter	CDW	YSCW	JWCW	TWCW (KBCW)
Temperature (°C)	23 ≤ T	5 ≤ T ≤ 14.5	12 ≤ T	14 ≤ T
Salinity (psu)	31 ≥ S	32.0 ≤ S < 33.5	33.5 ≤ S < 34.0	34.0 ≤ S

CDW: Changjiang Diluted Water

YSCW: Yellow Sea Cold Water

JWCW: Jeju Warm Current Water

TWCW: Tsushima Warm Current Water, KBCW; Kuroshio Branch Current Water

14.5°C 이하 수온과 33.7 psu 이하 염분으로 구분하였으며, Hur et al. (1999)은 40년간 황해와 동중국해 자료를 집괴 분석하여 10.0°C 이하 수온과 33.2 psu 이하 염분으로 구분하였다. 또한 Jang et al. (2011)은 수온 13.2°C 이하, 염분 32.6 ~ 33.7 psu로, Park (1986)은 12°C 이하 수온과 33.5 psu 이하의 염분을 갖는 해수로 구분하였다. 황해저층냉수에 관해서는 일관된 정의가 없으며, 본 연구에서는 황해저층냉수를 제주난류수와 구분하기 위하여, 수온 5 ~ 14.5°C, 염분 32.0 ~ 33.5 psu 범위로 설정하였다. 황해저층냉수는 수온약층 아래에 존재하는 수괴로 관측해역의 표층까지 일괄적으로 적용하는 것은 제주도 서쪽해역의 표층에도 황해저층냉수가 분포하는 것으로 잘 못 이해할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 황해저층냉수를 황해냉수(YSCW: Yellow Sea Cold Water)로 표현하여 수온역전층의 상부 수괴와 하부 수괴를 구분하였다. 이상의 수괴의 범위를 Table 1에 정리하였으며, 이를 이용하여 수온역전층 내의 수괴를 구분하였다.

본 연구에서는 다양한 해류가 공존하는 제주도 근해에서 발생하는 수온역전층을 파악하기 위하여, 2015년 4월에 해양물리조사를 수행하였고, 측정된 자료를 바탕으로 수온역전층의 특성과 수온전선과의 관계를 분석하였다.

2. 재료 및 방법

조사 방법

조사 해역은 제주도 서부해역으로, 33° 10' ~ 34° 00'N, 124° 00' ~ 125° 45'E에서 2015년 4월 22일부터 4월 25일까지 한국해양과학기술원의 연구선인 이어도를 이용하였다(Fig. 1). 정점간격은 동서 5'(약 7.68 km), 남북 10'(18.52 km)으로 설정하여 133개 정점(●)에서 XBT (eXpendable

BathyThermograph: Probe type T-10, Lockheed Martin Co.)를 이용하여 관측하였다. 그리고 수온역전층에 대한 수온 및 염분을 분석하기 위하여 2개의 정점(○)에서 CTD 9-11plus (Conductivity Temperature Depth; SeaBird Co.) 조사를 수행하였다. 수온 및 염분에 대한 정선별 비교를 위하여 2015년 4월의 국립수산과학원의 312, 313 정선(◆)의 자료를 이용하여 수온역전층의 수괴를 파악하였다.

조사 장비 제원

2015년 4월 현장 조사시 XBT probe T-10을 사용하였으며, 수온 정확도는 ±0.1°C, 연직 분해능은 65 cm이며, 최대 선속 10 knots까지 측정이 가능하고, 최대 관측 수심은 200 m이다. XBT의 자료 획득은 universal serial bus data acquisition system (Lockheed Martin MK21)을 이용하여 실시간 현장에서 확인가능하다. XBT는 수온만 측정하기 때문에 염분 값이 부족하다. 이를 보완하기 위하여 이어도 호에 장착된 thermosalinograph (TSG; Sea-Bird Electronics SBE21)으로 측정된 표층 염분 값을 이용하였다.

본 연구에서 관측한 XBT 관측자료의 정확도 검증을 위해 SeaBird사의 CTD9-11plus를 사용하여 2개 정점에 대한 수심별 수온 및 염분을 관측하여 비교하였다. CTD9-11plus의 수온측정범위는 -5 ~ 35°C, 정확도는 0.001°C, 전기전도도는 0 ~ 70 mmho/cm이고, 정확도는 0.003 mmho/cm이며, 샘플 주기는 24 Hz로 1초에 24번 측정이 가능하다. CTD의 운용 매뉴얼(SBE 2016)에 따르면 하강 및 상승시 속도는 1m/s 이하로 측정해야하며, CTD에 의한 관측자료의 해상도는 1 m / 24회 ≒ 4cm로 계산된다.

분석 방법

제주도 서부해역에서 측정한 수온 분포를 분석하기 위

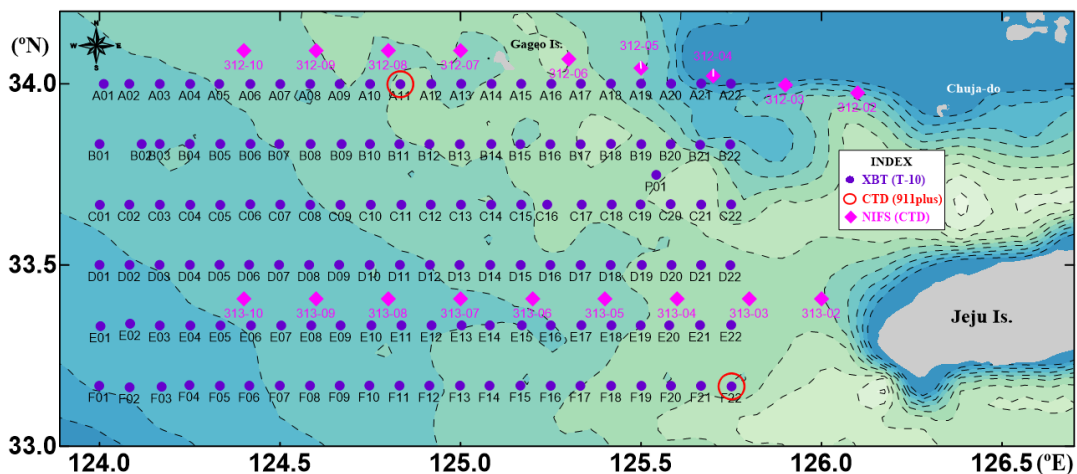


Fig. 1. Station of physical observation in region west of Jeju island

하여 수평분포 및 정선별 연직분포를 그렸다. 그리고 수온 역전층의 정량적 분석을 위하여 수온역전층 수온 차이 (ΔT)는 0.1°C , 수온역전층의 두께(ΔD)는 10 m 이상을 기준으로 산출하였다(Fig. 2). 수온역전이 발생한 해역에 대한 수온의 수평 기울기를 파악하기 위하여 거리별 수온

변화를 식 (1)과 같이 계산하였다.

$$\nabla T_h = \sqrt{\left(\frac{\Delta T_h}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T_h}{\Delta y}\right)^2} \quad (1)$$

여기서 ∇T_h 는 정점 사이 수온차이, Δx 는 경도간격인 5' (7.68 km), Δy 는 위도 간격인 10'(18.52 km)이며, 이를 km 단위로 변환하여 계산하였다. 수온역전층의 수괴 분석을 위하여 CTD로 측정한 2개 정점과 국립수산과학원의 312, 313 정선의 수온 및 염분 자료를 이용하여 T-S도를 작성하여 분석하였다.

3. 결과 및 토의

CTD와 XBT 자료 비교 및 검증

XBT에 의하여 획득한 수온자료의 신뢰도를 검증하기 위하여 수온역전층이 발생하지 않은 정점(CTD 1)과 수온역전층이 발생한 정점(CTD 2)의 수온 관측 값을 비교하였다(Fig. 3). 수온역전층이 발생하지 않은 CTD 1정점에서의 수심별 수온의 편차는 평균 0.07°C 이었고, 수온역전층이 발생한 CTD 2정점에서의 수심별 수온의 편차는 평균 0.08°C 이다. XBT 수온 정확도가 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 이며, CTD와 수심별 수온의 평균 편차는 모두 정확도 범위 내에 존재하였다.

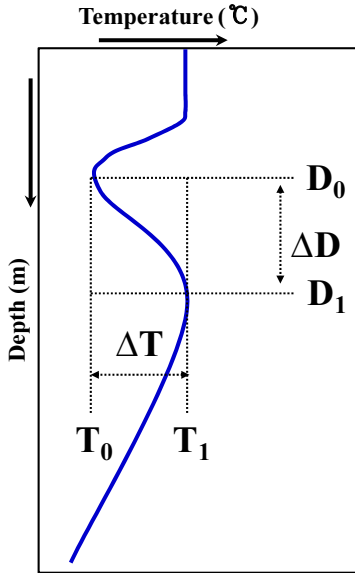


Fig. 2. A schematic diagram showing of a water temperature inversion layer

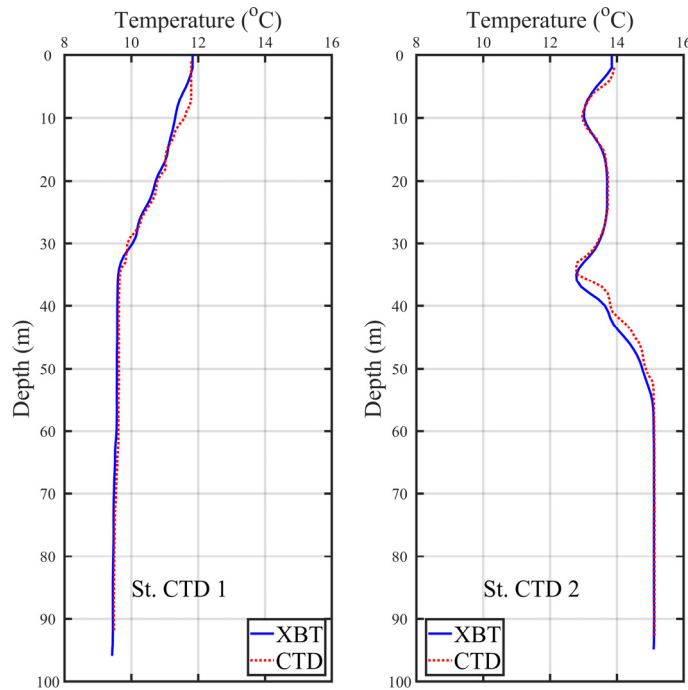


Fig. 3. Comparison of water temperature observed by XBT and CTD at the CTD 1 (left, typical water temperature condition) and CTD 2 (right, occurrence water temperature inversion)

연구선에서 XBT 측정 후에 CTD를 측정하면서 시간 경과에 따라 조류 및 바람 등에 의하여 측정 위치가 이동되면서 수심별 수온 차이가 다소 발생하였으며, 수온의 편차가 발생한 수심대는 수온약층 부근이고, 수온의 연직 형태는 큰 차이가 없었다. 제주 서부해역에서 XBT로 측정된 수온자료의 정확도를 CTD 수온자료와 비교한 결과, 수온역전층 분석이 가능한 수온자료 정확도를 확인하였으며, 이를 이용하여 수온역전층의 특성을 해석하였다.

수온 수평분포 분석 결과

연구해역의 수온 수평분포를 파악하기 위하여 Fig. 4에 수심 10, 40, 70 m의 수온 수평분포도를 표시하였다. 수심 10 m에서 수온은 11 ~ 13°C의 수온분포를 보이며, 남동쪽해역에서 13°C로 그 이외의 해역 보다 다소 높게 나타났다. 수심 40 m에서는 9 ~ 14°C의 수온분포를 보이며, 남동쪽해역에서 14°C의 수온이 존재한다. 수심 70 m의 수온 수평분포를 보면 9 ~ 15°C로 나타났으며 남동쪽해

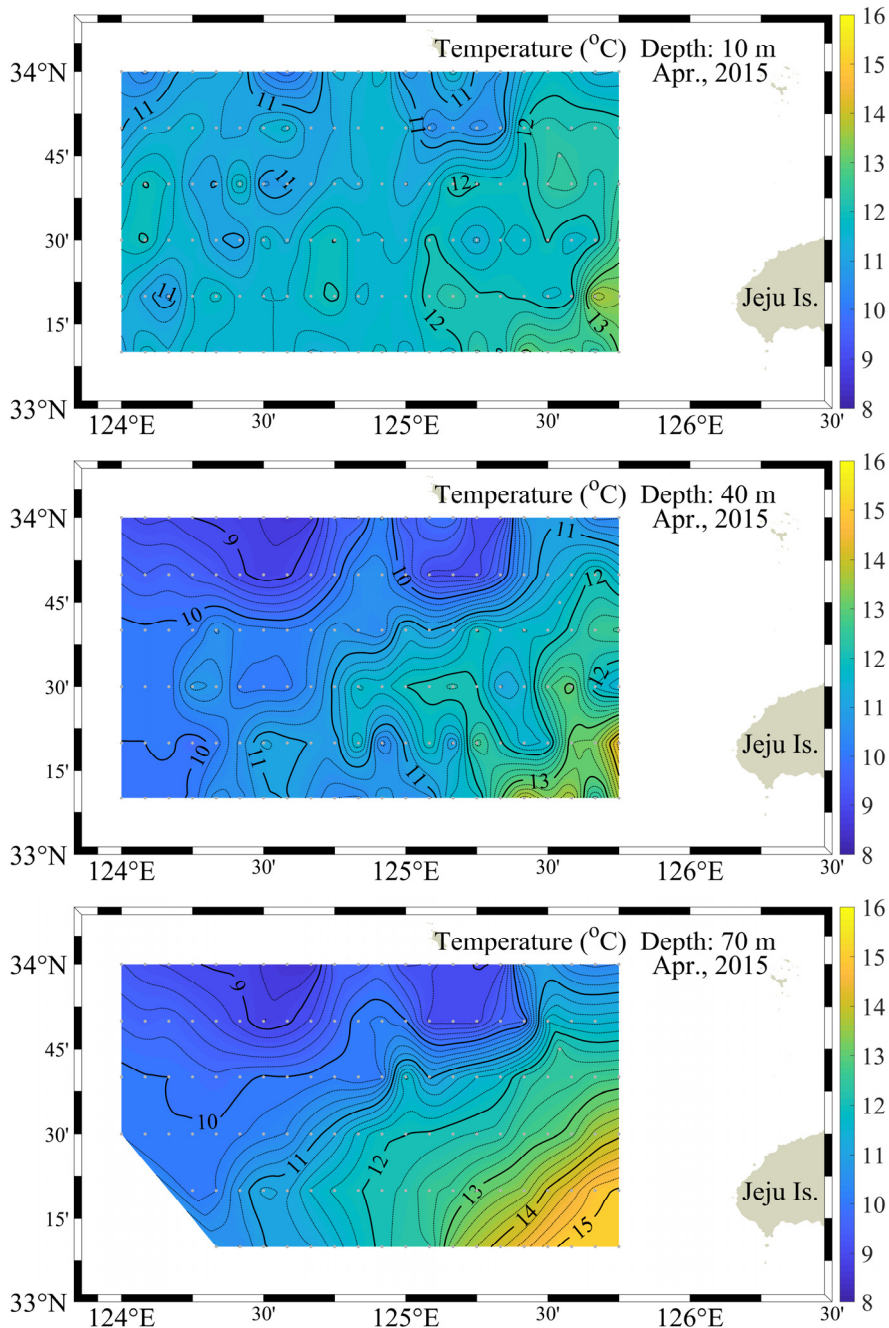


Fig. 4. Horizontal distribution of water temperature at depth 10, 40 and 70 m

역이 수심 10 m보다 오히려 높게 나타났다. 수온 수평분포 분석 결과, 연구해역에서 표층보다 중층이나 저층에서 수온이 높게 나타나는 수온역전층(temperature inversion layer)이 남동쪽해역에서 뚜렷하게 나타났다.

수온 연직분포 분석 결과

연구해역에서 발생한 수온의 수심별 구조를 파악하기 위하여 동서정선(Fig. 5)과 남북정선(Fig. 6)의 연직수온분포를 그렸다. 연구해역 동서정선의 연직수온분포는 맨 위

부터 A, C, F 정선을 표시하였다. 수온역전층이 발생하지 않은 A 정선에서는 표층혼합층은 수심 10 m 이내로 얇고 수온은 12°C, 그 이심에는 약한 수온약층이 존재하며, 해저혼합층이 9 ~ 10.6°C로 분포하였다. 125° 30'E (A18)부근에서 약 10.8°C의 해저혼합층이 존재한다. C정선에서는 전체적으로 10 ~ 13°C의 수온분포를 보이며, 동쪽역의 수심 40 m 이심에서는 수온 12°C 보다 높은 수온이 분포하였다. 연구해역의 남쪽인 F 정선은 표층과 중층사이에는 수온 12 ~ 13°C가 존재하고, 표층에는 13°C이상이다.

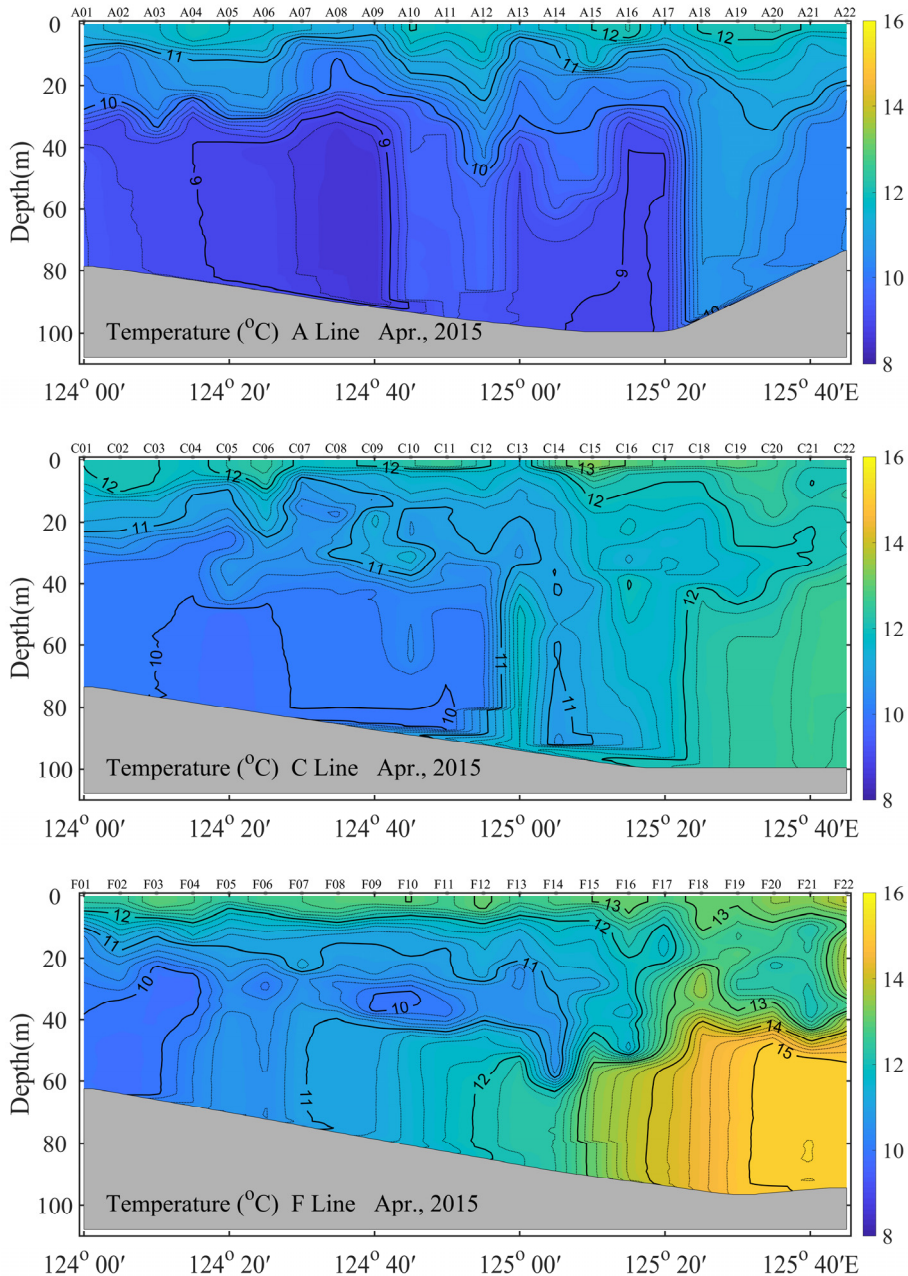


Fig. 5. Vertical distribution of water temperature at line A, C and F

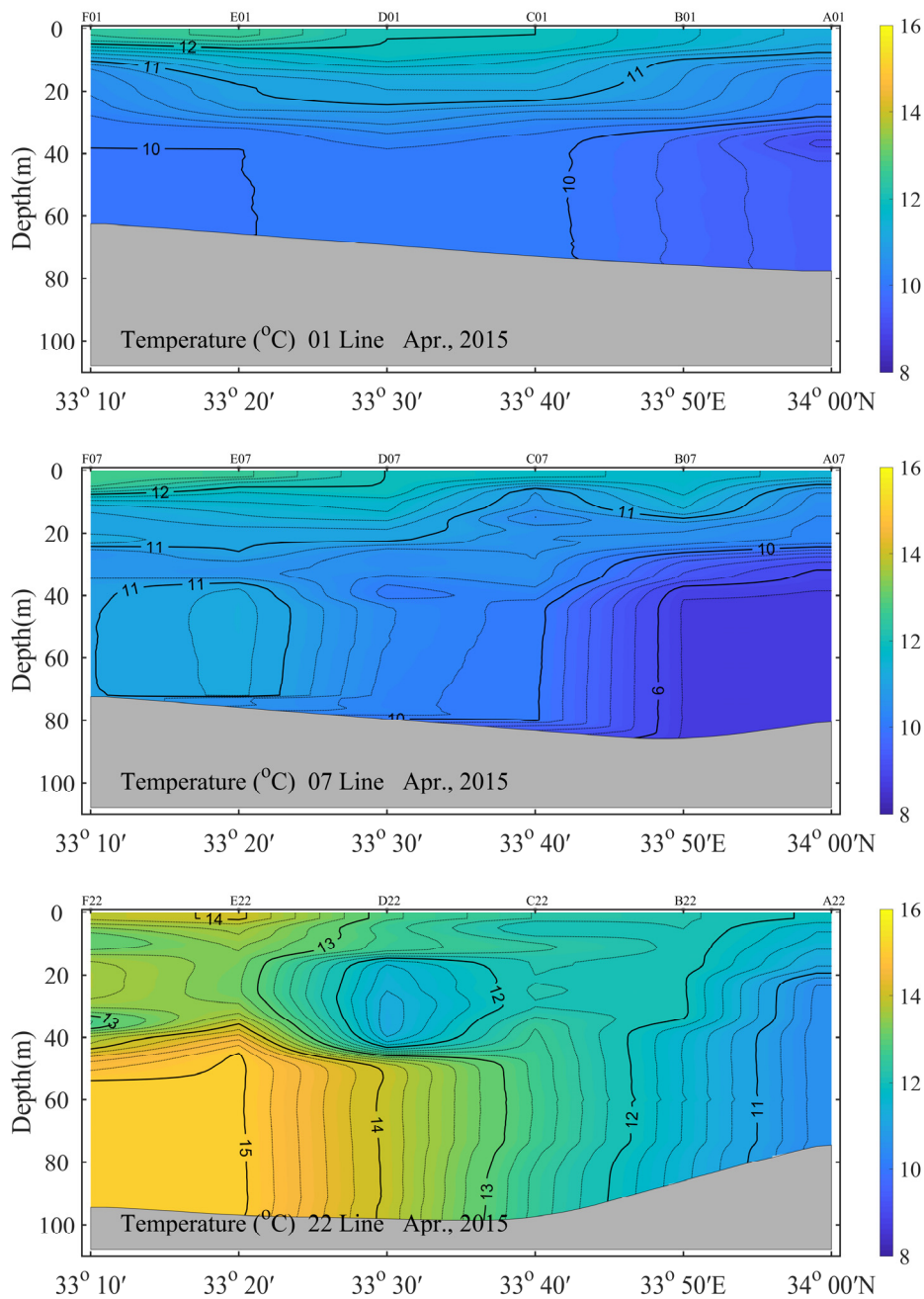


Fig. 6. Vertical distribution of water temperature at line 01, 07 and 22 (showing Fig. 5)

동쪽해역의 중층에서 저층까지 14 ~ 15°C 고수온이 중앙해역으로 유입되는 것이 확인된다. 따라서 연구해역의 남동쪽해역의 중층과 저층에서 따뜻한 해수가 침투하는 것을 확인할 수 있으며, 기존에 존재하던 해수와 만나면서 중층과 저층의 수온이 높게 나타나는 수온역전층을 발견할 수 있다. 본 연구해역에서는 일반적으로 A 정선과 같은 수온이 지배적으로 존재한다. 그러나 A 정선을 제외한 나머지 정선에서는 고온의 수괴가 중층 및 저층에 나타나

표층보다 저층의 수온이 높은 수온역전층이 발생하였다. 연구해역 남북정선의 수온연직구조를 분석하였다(Fig. 6). 여기서 1번 정선은 서쪽해역이고 22번 정선은 동쪽해역이다. 1번 정선에서는 표층의 수온이 높고 저층의 수온이 낮은 일반적인 수온구조를 보이고 있으며, 7번 정선에서부터 중층 및 저층이 북쪽보다 남쪽이 높게 나타나는 현상을 볼 수 있다. 연구해역의 동쪽역에 해당하는 22번 정선의 수온 연직분포를 분석하면, 중층 및 저층에서 14

~ 15°C의 수온이 강하게 북쪽으로 향하는 형태이다. 정선 별 수온연직분포 결과, 수평분포에서 보았듯이 표층보다 중층 및 저층에서 수온이 높게 나타나는 수온역전현상을 뚜렷하게 확인할 수 있다. 그리고 중·저층에 분포하는 따뜻한 해수가 동남쪽에서 북서쪽으로 향하는 형태이다.

수온역전층 발생 해역 분석

연구해역에서 관측한 수온자료를 이용하여 수온역전층이 발생한 정점과 발생하지 않은 정점을 분석하였다(Fig. 7). 전체 정점 133개중 84개 정점에서 수온역전층이 발생하였으며, 63.1%를 차지하였다. 수온역전층은 대부분 연구해역 남동쪽해역에서 분포하고 있으며, 북쪽해역과 남서쪽해역에서는 수온역전층이 소수 발생하였다. 수온역전층의 분포가 마치 남동쪽에서 북서방향으로 전진하는 형태이다. 그리고 연구해역의 중간에서는 수온역전층이 불연속적으로 나타났다. 이 해역이 수온역전층의 경계로 판단된다.

수온역전층의 형태별 분포해역을 파악하기 위하여 수온역전층이 발생된 해역과 발생되지 않은 해역의 수온연직구조를 분석하였다(Fig. 8). 경계해역으로 판단되는 C 정선중에서 수온역전층이 발생하지 않은 C01 정점의 수온분포를 보면 수심 10 ~ 40 m까지 수온약층이 형성되었다. 수온역전층이 발생한 C05와 C09 정점의 수온연직구조에서는 수온역전층이 중층에서 형성되어 소멸되었다. F 정선중에서 수온역전층이 형성되지 않은 F01 정점의 수온연직구조는 표층부터 수심 30 m까지 수온약층이 형성되었고, 그 이심부터는 10°C의 해저혼합층이 나타났다. 반면에 수온역전층이 발생한 F04 정점은 수심 30 m부터 50 m까지 수온역전층이 나타났고, F20 정점에서는 수심

30 m부터 80 m 이상까지 수온역전층이 나타났다. 수온역전층의 발생 경계 부근에서는 수온역전층이 중층에서 생성되어 소멸되었으며, 수온역전층이 강하게 형성된 해역에서는 중층에서 시작하여 해지면 가까이 형성되는 형태별 차이를 보였다. 수온역전 현상이 발생된 해역에 대해서 수온역전층의 형태로 수온역전층의 경계를 파악한 Cho and Park (1990)의 결과와 유사하다.

수온역전층 수심 및 수온 분석

연구해역에서 수온역전층이 발생한 수심과 수온역전층의 깊이를 분석하기 위하여 Fig. 9에 수온역전층이 시작되는 수심(D₀, (a)), 수온역전층이 끝나는 수심(D₁, (b)) 및 수온역전층의 두께(ΔD, (c))를 나타내었다. 수온역전층이 시작되는 수심(D₀)의 분포를 살펴보면, 수온역전층은 수심 10 ~ 54 m에서 시작하고, 연구해역의 남동쪽 해역에서 시작 수심이 깊게(수심 30 ~ 40 m) 나타났다. 따라서 수온역전층이 대부분 중층부터 시작된 것을 확인할 수 있다. 수온역전층이 끝나는 수심(D₁)의 분포를 보면, 수심 20 ~ 90 m까지 나타났다. C 정선의 일부 정점에서 수심 20 m에서 끝났으며, 수온역전층이 넓게 분포하는 남동쪽해역에서 대부분 70 m 이상까지 깊게 형성되었다. 중층에서 시작된 수온역전층이 대부분 해지면 부근까지 깊게 형성된 것을 알 수 있다. 수온역전층이 시작되는 수심과 수온역전층이 끝나는 수심의 차이인 수온역전층의 두께(ΔD)를 보면, 수온역전층이 발생한 경계는 10 ~ 20 m 내외로 얇게 형성되었고, 수온역전층이 주되게 형성된 연구해역 남동쪽 해역에서 50 m 이상으로 나타나고 북서방향으로 가면서 수온역전층 두께가 40 m에서 20 m로 감소하였다.

연구해역에서 수온역전층이 발생한 수심의 수온(T₀,

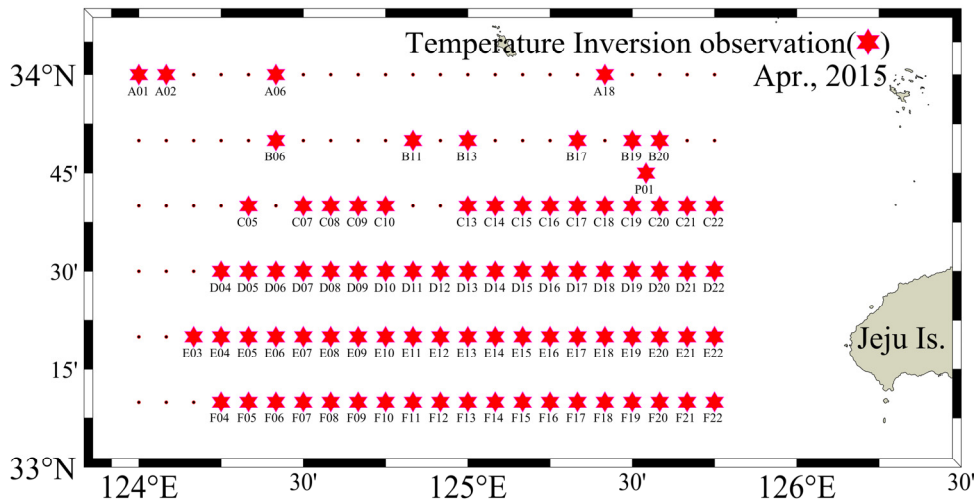


Fig. 7. The distribution of water temperature inversion layer occurrence in the observation area

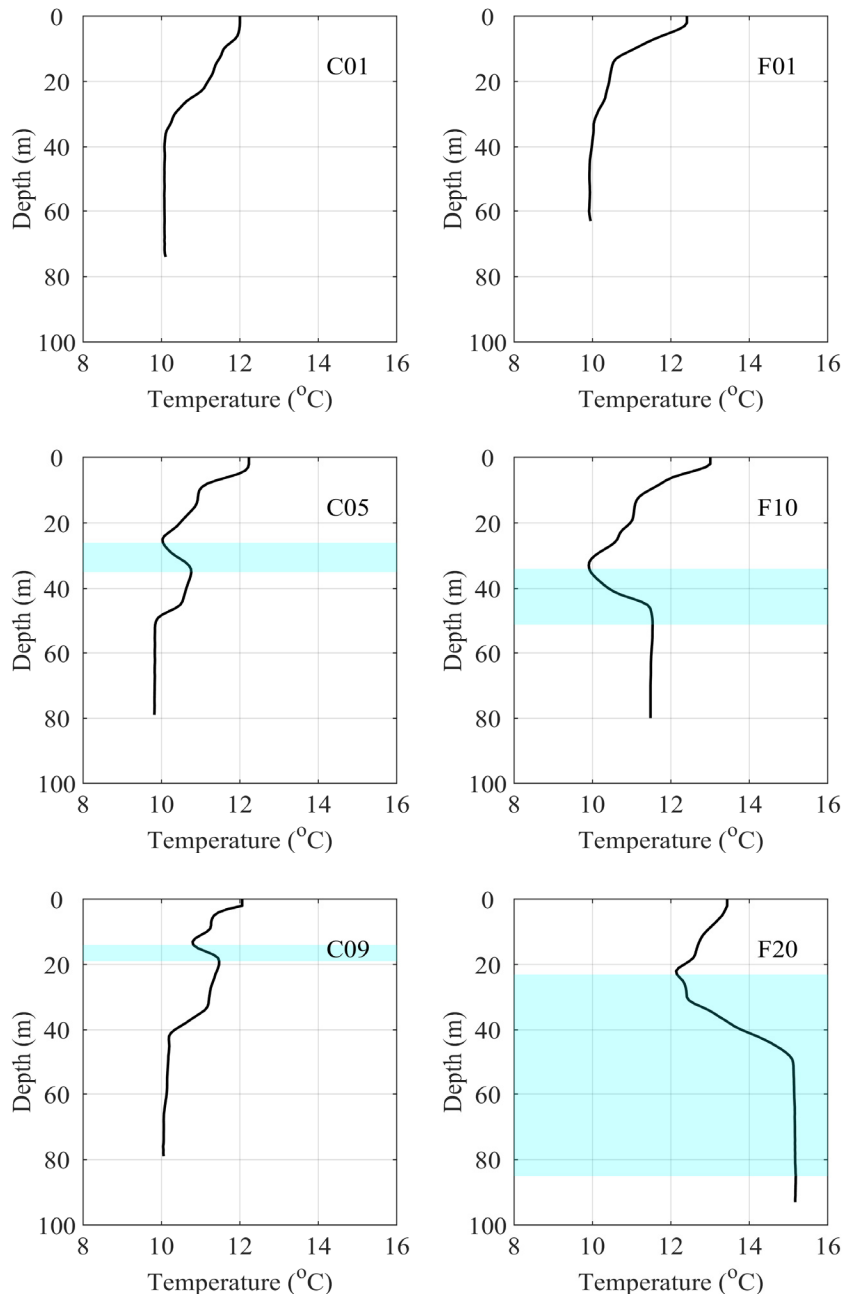


Fig. 8. The distribution of water temperature profile at several stations in the C line (left) and the F line (right). Shading is water temperature inversion layer

(a)과 수온역전층이 끝나는 수심의 수온(T_1 , (b)분포를 분석하여 수온 차이(ΔT , (c))를 살펴보았다(Fig. 10). 수온 역전층이 시작되는 수심(T_0)의 수온 분포를 보면, 수온역 전층이 발생한 남동해역에서 수온이 13°C로 높았으며, 북 서방향으로 갈수록 수온이 점점 낮아져 8°C까지 분포하 였다. 수온역전층이 끝나는 수심의 수온분포(T_1)를 살펴 보면, 남동쪽 해역에서 15°C로 가장 높게 나타났고, 대부 분 10°C 이상의 수온 분포를 보였다. 수온역전층이 시작

되는 수심의 수온 수평분포와 수온역전층이 끝나는 수심 의 수온분포 차이(ΔT)를 보면, 수온역전층이 발생한 경계 는 0.5°C 내외로 차이가 적었으며, 남동쪽 해역에서 최대 3.0°C 이상의 수온차이를 보였다.

수온역전층의 두께는 10 ~ 50 m까지 분포하였다. 수온 역전층이 시작된 수심이 40 m 이상 되는 남동쪽 해역은 중층 및 저층으로 난수가 유입되어 나타났고, 수온차이는 3.0°C 이상으로 높았다. 반면에 수온역전층의 경계부근에

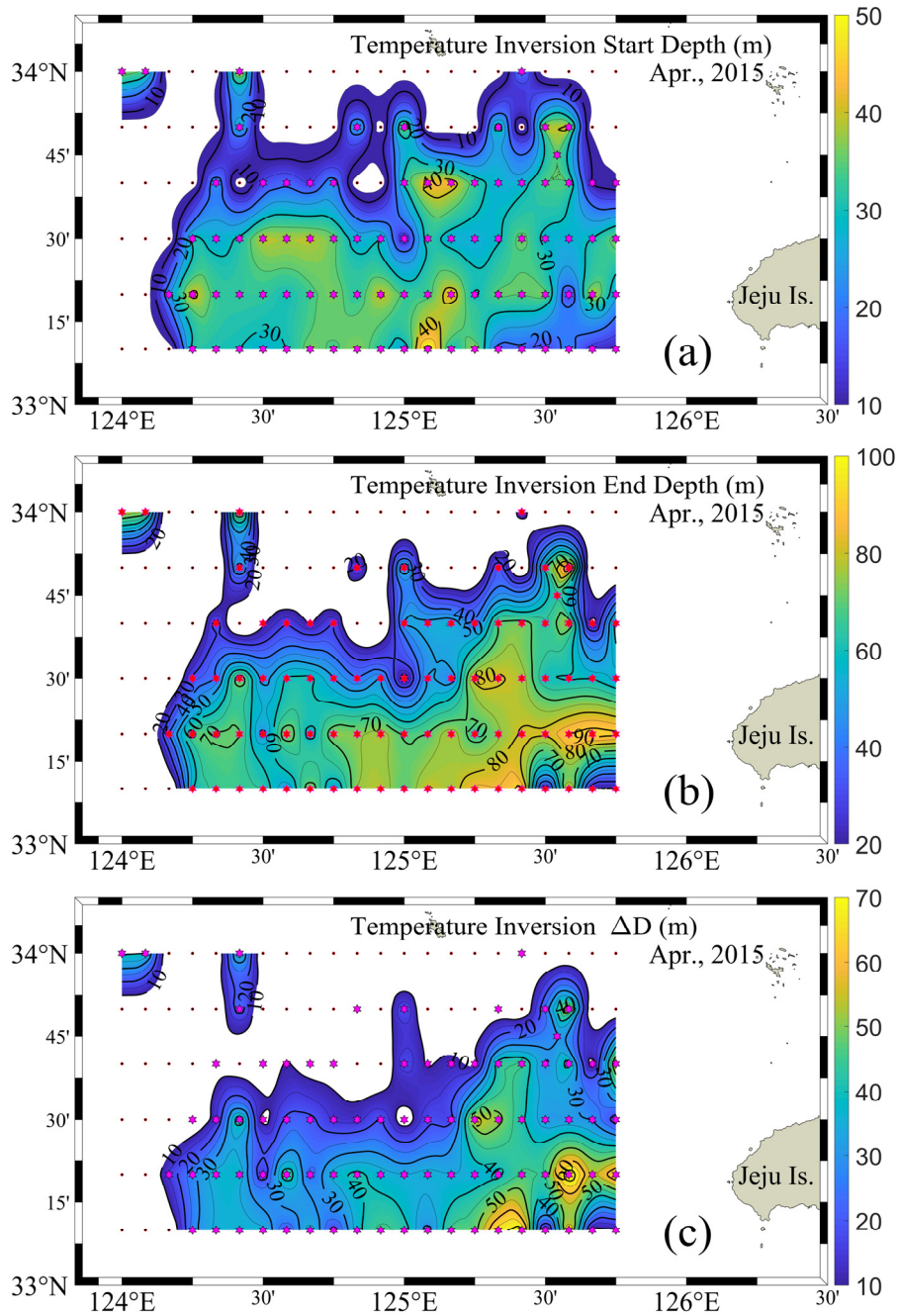


Fig. 9. (a) is the starting depth distribution for TIL, (b) is the end depth distribution for TIL and (c) is the TIL thickness depth (m), (TIL; water temperature inversion layer)

서는 수온역전층이 수심 10 ~ 20 m 이내에서 시작되어 수심 20 ~ 30 m에서 소멸되는 형태를 보였으며, 수온차이는 0.5°C 내외로 상대적으로 낮게 나타났다. 따라서 수온역전층의 시작 수심 및 수온 차이를 이용하여 수온역전층의 경계 및 특성을 파악할 수 있었다.

수온역전층 발생 해역 수온 수평경도 분석

제주도 서부해역에서 관측한 수온역전현상에 대한 경계를 확인하기 위하여 수온 수평경도를 수심 10 m, 40 m 및 70 m에 대하여 분석하였다(Fig. 11). 그림의 별표시는 수온역전이 발생한 정점을 나타내며, 수온 수평경도는 °C/km의 값으로 표현하였으며, 각 수심별 수온 수평분포(10, 11, 12 및 13°C)를 동시에 표현하였다. 수심 10 m의

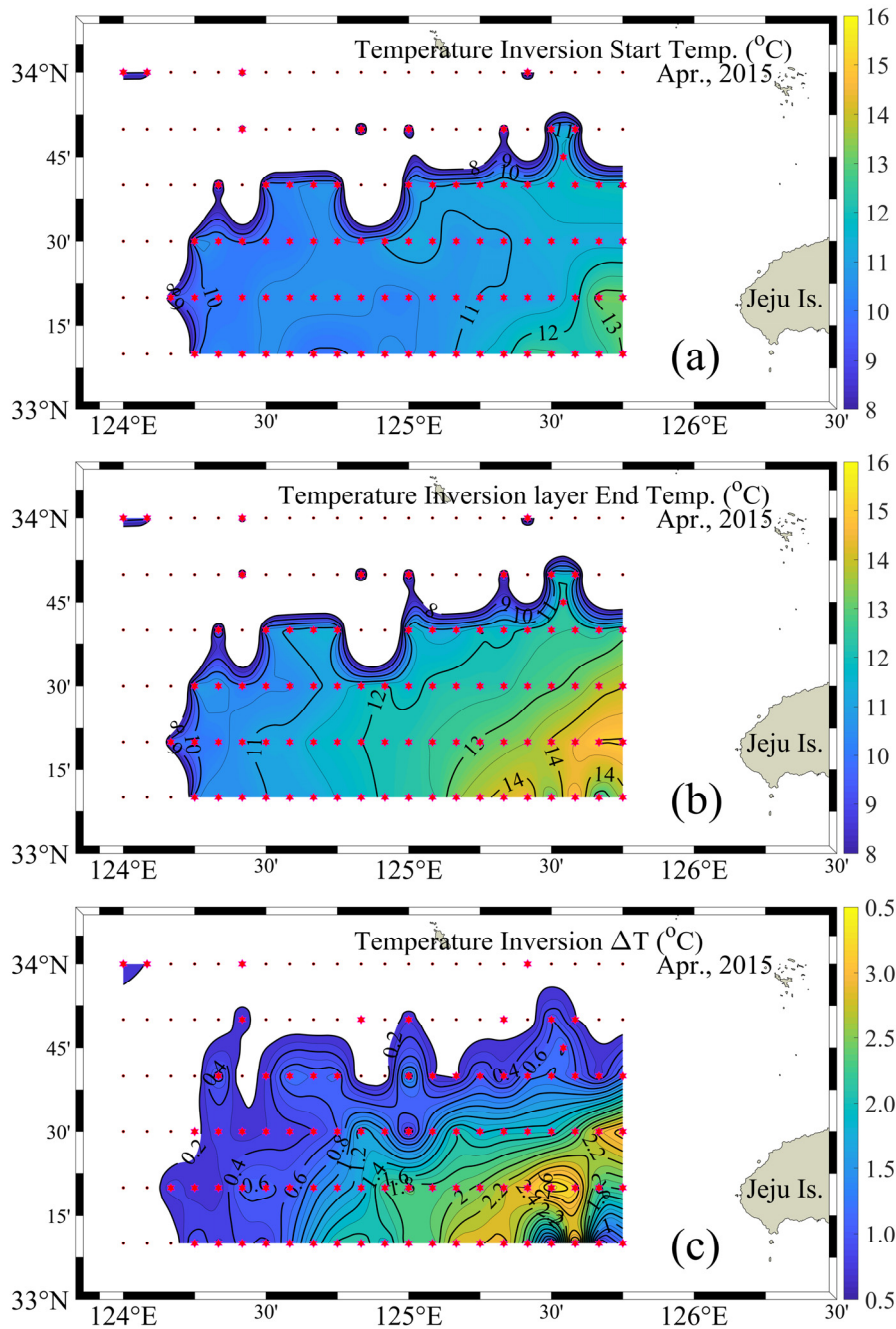


Fig. 10. (a) is the distribution of water temperature at starting depth of TIL, (b) is the distribution of water temperature at end depth of TIL and (c) is the different water temperature between (a) and (b), (TIL; water temperature inversion layer)

수온 수평경도를 보면 수온 12 ~ 13°C 사이에서 0.15°C/km 로 높게 나타났다. 수온의 수평경도가 가장 크게 나타난 수심 40 m에서는 수온 10 ~ 11°C 사이에서 0.23°C/km 이 상의 높은 값을 보였으며, 수온 10°C의 등온선에서 0.10 °C/km의 값을 보이며, 이 부분이 수온역전 발생의 경계로 판단된다. 수심 70 m에서는 수온역전 발생의 경계로 수온

10°C의 등온선이 나타났으며, 수온 10 ~ 11°C 사이에서 수온의 수평경도가 0.05 ~ 0.15°C/km로 높게 나타났다. 수온 수평경도를 0.03°C/km ~ 0.36°C/km로 분석하였 는데, (Yang et al. 1998; Uda 1959; Gong 1982; Park and Choi 1995; Na et al. 1991; Ullman and Cornillon 1999; Park and Chu 2006) 연구해역에서 나타난 수온의 수평경

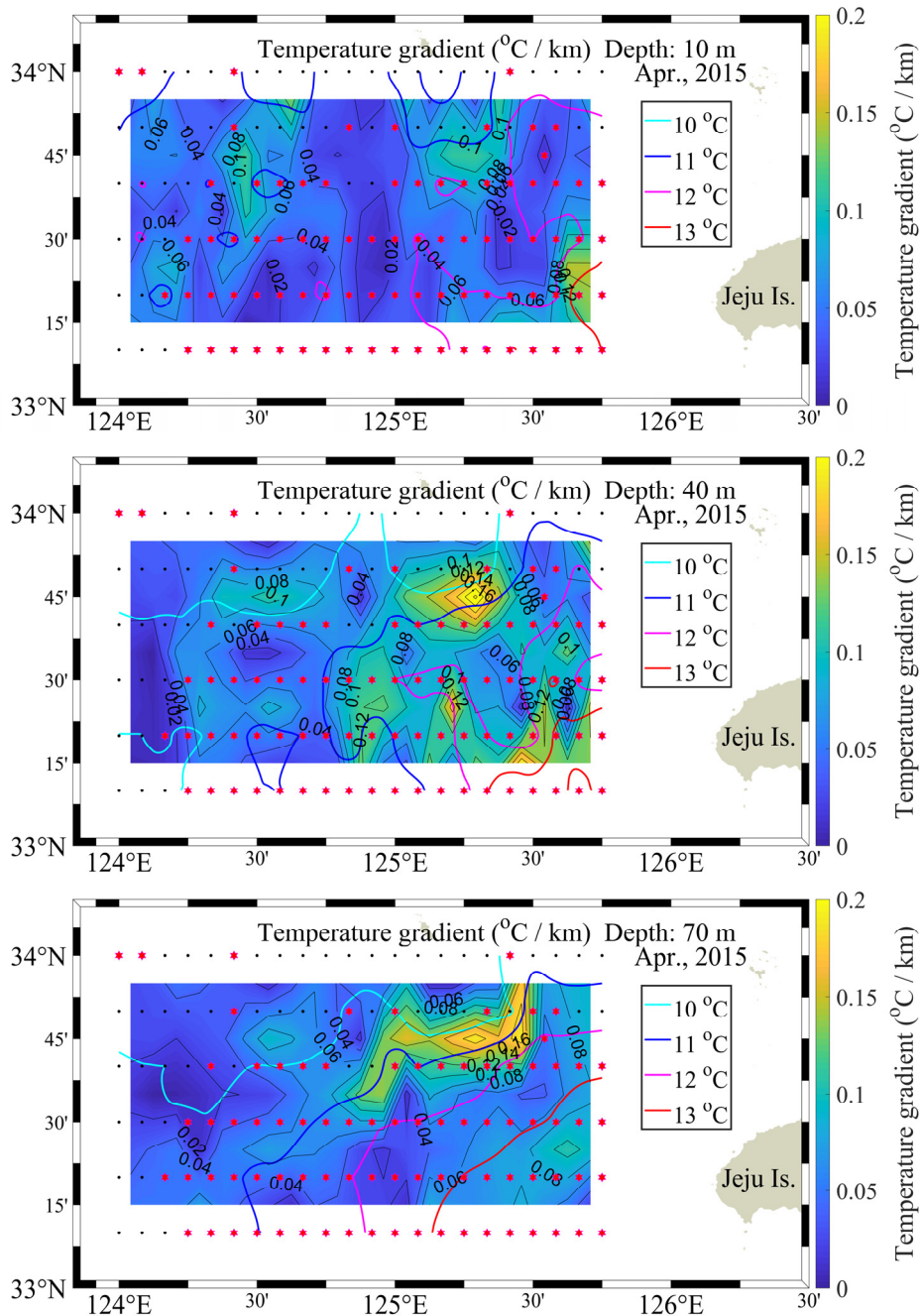


Fig. 11. The distribution of horizontal water temperature gradient ($^{\circ}\text{C}/\text{km}$) at depth 10 m, 40 m and 70 m

도가 최대 $0.23^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 까지로 나타났고, 평균값은 $0.06^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 이었다. 제주도 서방해역에서 수온역전 현상이 발생한 해역은 서로 다른 수괴가 만나서 발생하는 경계로 판단되며, 수온역전 현상이 주로 전선역에서 발생한다는 Nagata (1967) 및 Cho and Park (1990)의 결과와 일치한다. 또한, Lie et al. (2019)는 황해 동계에 발생하는 대역전(Large Temperature Inversions)은 차갑고 가벼운 연안수가 있는 해역에 제주난류수 및 황해난류수의 이류(advection)작용

으로 생성되는 열염전선역(thermohaline frontal zones)에서 발생한다고 하였으며, 이는 수온역전 현상이 수온전선의 분포를 판단하는 지표(index)로 활용할 수 있음을 뒷받침 해준다.

수온역전층의 수괴 분석

수온역전 현상의 수괴를 정량적으로 분석하기 위하여 수온역전 미발생 정점(CTD 1)과 발생 정점(CTD 2)의 수

온, 염분, 밀도를 비교하였다(Fig. 12). 그리고 두 정점의 수온, 염분을 이용하여 T-S diagram에서 수괴의 분포를 파악하였다. 수온역전이 발생하지 않은 CTD 1 정점에서는 수온 12°C 이하, 염분 33.4 psu 이하로 분포하였고, 수심 10 ~ 30 m 사이에 수온약층이 형성되어 있으며, 염분 약층도 동일한 수심에서 나타났다. 반면, 수온역전이 발생한 CTD 2 정점의 연직단면도를 보면, 수온역전층이 수심 35 m부터 발생하여 수심 52 m까지 나타났다. 염분 값에서는 수온역전층이 발생한 수심 35 m부터 33.5 psu가 나타났고, 저층까지 서서히 증가하여 수심 50 m 이상부터는 34.3 psu로 균일하게 분포하였다. T-S diagram에서 2개 정점을 비교하면, CTD 1 정점의 수괴는 전체가 황해냉수(YSCW) 범위내에 분포하였다(Table 1). 이에 반해 CTD 2정점에서는 상층은 황해냉수 범위에 포함되고, 수심 35 ~ 45 m의 수괴는 제주난류수(JWCW) 범위에, 수심 45 m 이상부터는 대마난류수(TWCW)의 범위로 나타났다.

본 연구에서 염분 관측 자료가 부족하여 국립수산과학원(NIFS)의 312, 313 정선의 2015년 4월 자료를 이용하여 수온역전 현상에 대한 수괴를 분석하였다. 조사해역의 A 정선과 유사한 위치인 312 정선의 수온, 염분 및 밀도의 연직분포를 살펴보면, 수온역전 현상은 발생하지 않았고, 수온은 8 ~ 11°C, 염분은 32.9 ~ 33.5 psu 범위, 밀도는 25.5 ~ 25.8로 전층에서 큰 차이가 없었다(Fig. 13). 조사해역의 E 정선과 비슷한 위치인 313 정선의 수온은 10 ~ 15°C, 염분은 32.2 ~ 34.2 psu 범위로 분포하였으며, 313-09정점부터 313-02정점까지 수심 40 m 이심에서 수온역전이 광범위하게 발생하였다. 서쪽에서 동쪽으로 수심 20 ~ 40 m 부근에서 수온 10.5 ~ 12°C의 냉수가 중층으로 유입되고, 저층에서는 12 ~ 15°C 난수가 저층으로 유입되면서 수온역전 현상이 발생하였다(Fig. 14). 염분도 마찬가지로 표층부터 수심 30 m까지 32.6 psu 이하의 저염수가 서쪽에서 동쪽으로 이동하고, 수심 40 m 이심의 동쪽

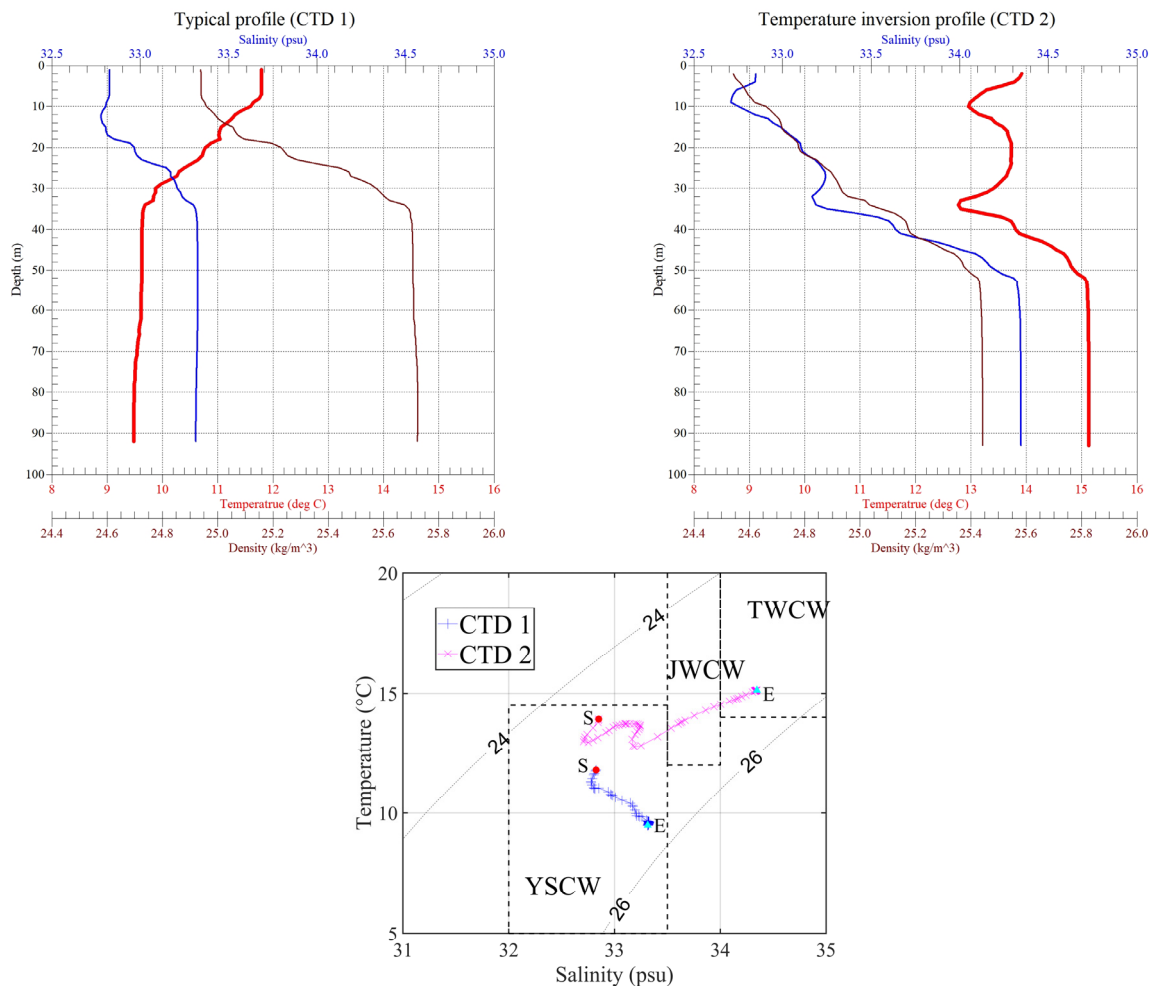


Fig. 12. Water temperature, salinity and density of CTD 1 and CTD 2 vertical profile (upper) and the distribution of T-S diagram (lower)

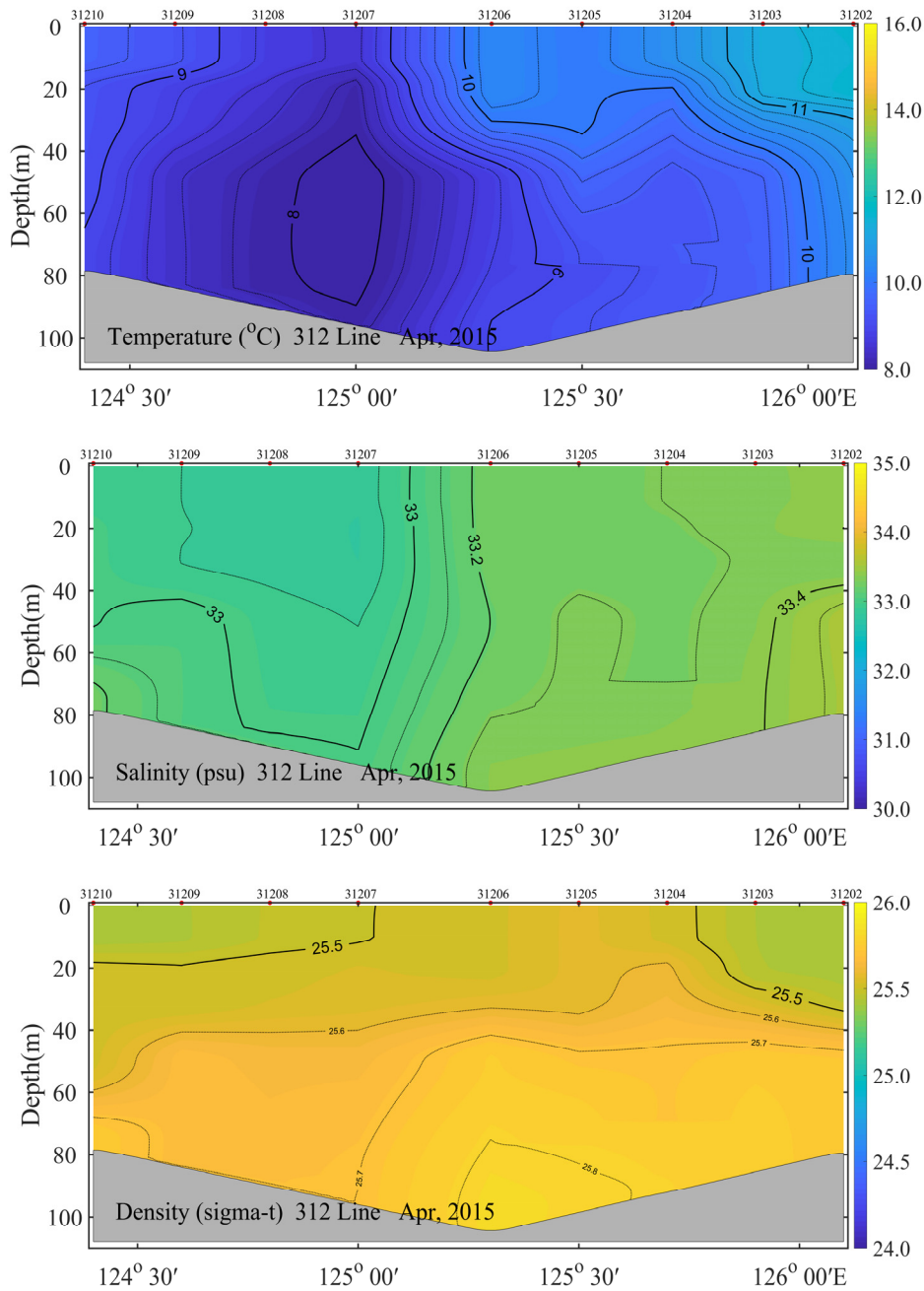


Fig. 13. The vertical distribution of water temperature, salinity and density profile at line 312 of NIFS in Apr. 2015

은 34.2 psu이었고, 서쪽은 33.4 psu 이하로 고염수가 동쪽에서 서쪽으로 이동하는 형태였다.

2개 정선의 T-S diagram으로 수괴를 분석하면(Fig. 15), 312 정선의 경우는 황해냉수 범위인 염분 33.5 psu 이하에 모두 포함되어 있다. 이에 반해 수온역전이 발생한 313 정선의 경우는 황해냉수, 제주난류수, 대마난류수의 특성을 가진 수괴가 수심별로 복합적으로 나타났다. 연구해역에서 발생한 수온역전층은 중층부터 저층까지 두껍게 형성

성되었으며, 이러한 원인은 고온(고염)이고, 밀도가 높은 수괴(제주난류수, 대마난류수)가 중층 및 저층으로 침투하면서 수온역전층이 발생한 것으로 판단된다. Cho and Park (1990)은 제주도 동부해역에서 하계에 발생하는 수온역전 현상은 고온 고염의 대마난류수가 저온저염의 한국남안연안수 사이를 침투하여 생기는 수온역전과 저온저염의 한국남안연안수가 고온고염의 대마난류수 사이를 침투하여 생기는 수온역전현상으로 분석하였으나, 정량

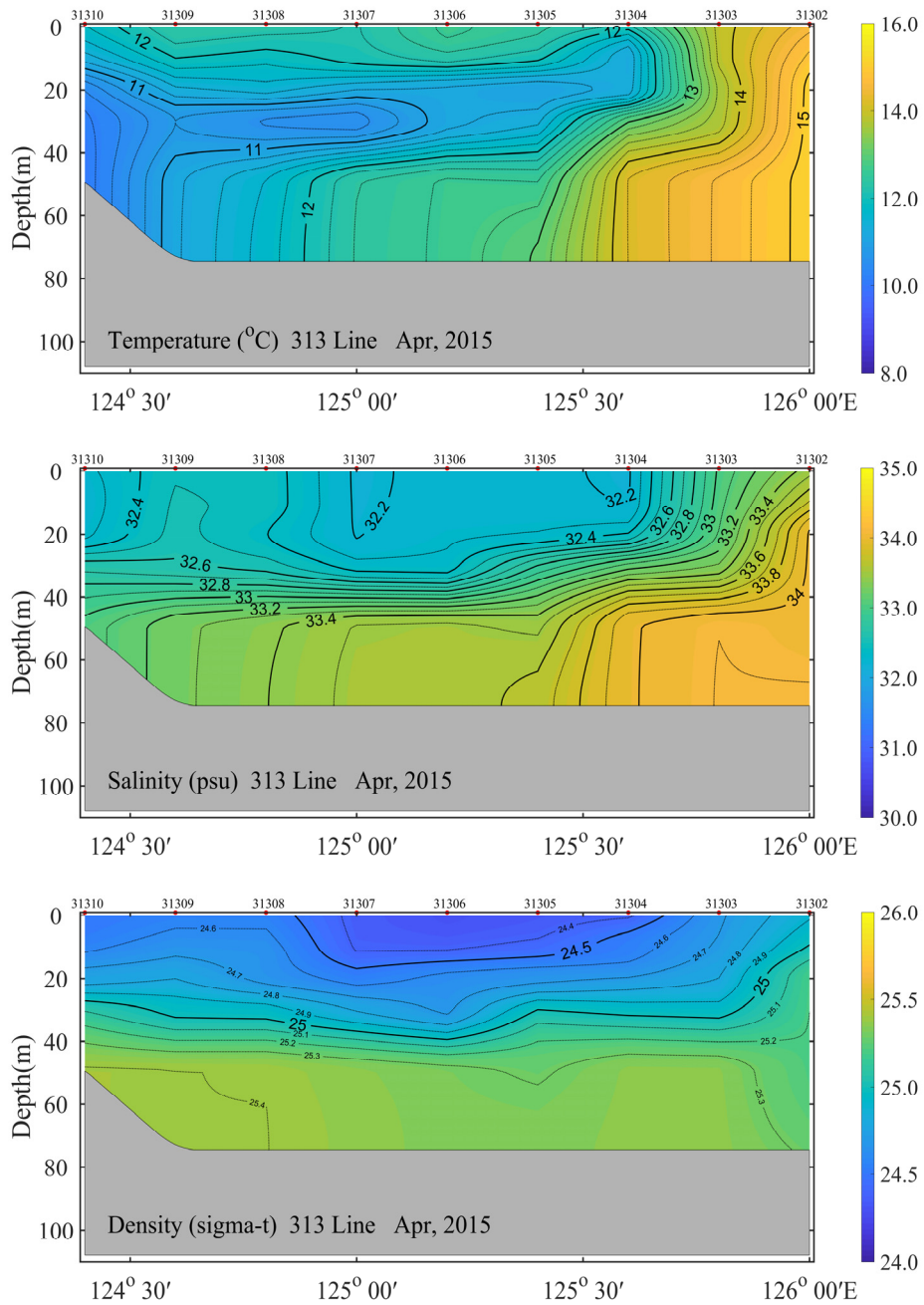


Fig. 14. The vertical distribution of water temperature, salinity and density profile at line 313 of NIFS in Apr. 2015

적 제시는 부족하였다. 본 연구에서는 T-S diagram에서 수괴의 정량적 범위를 통하여 수온역전층의 상층은 황해 냉수, 중·저층은 제주난류수 및 대마난류수의 특성을 파악하였다.

그리고 제주 서부해역의 수온조사 결과 수온역전층은 연구해역 남동쪽해역에서 대부분 형성되었다. Hao et al. (2010)과 Lie et al. (2015)의 연구 결과에서는 수온역전층은 일반적으로 두 수괴가 만나는 경계해역에서 발생하며,

Lee and Koo (2009)는 남해에서는 서로 다른 성질의 수괴 (한국남안연안수와 대마난류수)가 계절별로 서로 팽창, 감소를 반복하면서 전선을 형성하고, 전선해역에서 수온역전현상이 주로 발생한다고 하였다. Kim et al. (1982)는 동계에 발생하는 수온역전은 표면 냉각효과 때문으로 보고하였으나, 본 연구에서는 동계(4월) 수온역전층 분석결과 다른 수괴 성분이 만나는 경계에서 발생한 것이 기존 연구와 차별점이며, 수괴의 범위를 정의하여 T-S diagram

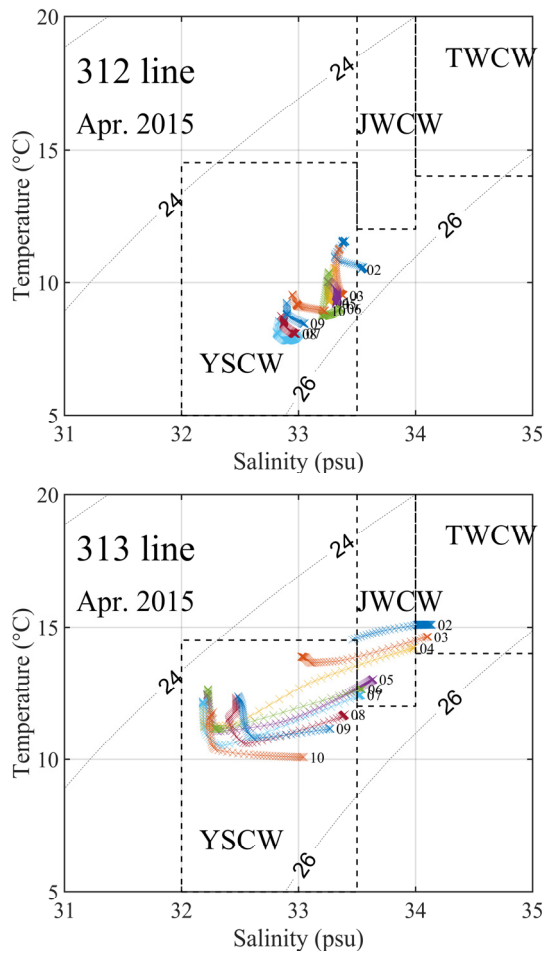


Fig. 15. The distribution of T-S diagram at line 312 (upper) and 313 (lower) of NIFS in Apr. 2015

분석으로 수온역전층을 발생시키는 수괴의 정량적 파악이 기존 연구와 큰 차이점이라 할 수 있다.

4. 결 론

2015년 4월에 제주 서부해역에서 발생한 수온역전층은 중층에서 저층까지 상대적으로 고온수가 침투하는 형태로 나타났다. 수온역전층은 표층부터 중층에서 냉수가 남동 방향으로 이동하고, 저층에서는 난수가 북서 방향으로 이동하는 형태이었다. 수온역전층의 형태별 비교결과 수온역전층의 경계에서는 중층에서 형성되어 중층에서 소멸되었지만, 수온역전층이 강하게 형성된 해역에서는 중층에서 시작하여 저층까지 나타났다. 수온역전층의 발생 수심 및 수온을 비교하면, 경계역에서는 수온역전층의 시작 수심이 10 ~ 20 m이었고, 두께는 10 ~ 20 m로 분포하였고, 수온차이는 0.1 ~ 0.6°C이었다. 반면에, 수온역전층이 강하게 형성된 해역에서는 30 ~ 40 m에서 시작되어 30 ~

60 m의 두께로 저층까지 나타났고, 수온차이는 1.0 ~ 3.0°C까지 크게 나타났다. 수온역전층의 발생 경계 부근과 수온역전층이 강하게 형성된 해역은 수온역전층의 발생 수심 및 수온차이 등의 형태별 특성이 다르게 나타났다.

수온역전층이 발생한 해역의 수온 수평경도 분석 결과 최대 0.23°C/km까지로 나타났고, 평균은 0.06°C/km이었다. Nagata (1967) 및 Cho and Park (1990)은 전선대에서 수온역전이 빈번히 발생한다고 하였으며, 전선대가 강한 곳에서는 수온역전층의 복잡한 구조가 많이 나타난다고 하였다. 수온 수평경도 계산 결과 수온역전층의 발생과 수온전선의 위치가 유사하게 나타났다. 따라서 수온역전층은 수온전선의 분포를 판단할 수 있는 지표가 될 수 있다. 수온역전층의 T-S diagram을 이용한 수괴분석 결과 고온고염의 제주난류수와 대만난류수가 중층부터 저층까지 침투하였고, 중층에는 저온저염의 황해냉수가 확장하면서 발생하는 수온역전층의 수괴 특성을 밝혔다.

그러나 본 연구는 2015년 4월 1회 조사 결과로 조사해역에서 발생하는 수온역전 현상에 대한 통계적(월별) 분석이 부족하다. 연구해역에서 발생하는 수온역전 현상의 통계적 분석을 위하여 연구해역을 확대하여(황해 및 동중국해 포함) 계절 및 공간적 연구가 필요하다. 그리고 일부 수온역전층은 저층으로 침투하는 고온고염의 수괴로 인하여 수온 및 염분의 공간적 변화가 일어나고, 이로 인하여 저서생물 생태계에 영향을 미칠 수 있으며, 이와 관련된 추가 연구가 필요하다.

사 사

본 연구는 해양수산부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 “종합해양과학기술기 구축 및 활용연구(2단계, PM61730)”와 해양경찰청의 지원을 받아 수행된 “선체 내 생존자 수색 및 생존성 확보 기술 개발 (PN61990)” 사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

참고문헌

- Cho KD, Lee JC, Heo SH (1993) Introduction to oceanography. Taehwa Publisher, Seoul, 84 p
- Cho KD, Park SW (1990) Inversion phenomena of temperature off East Cheju Island in summer, 1986. Bull Korean Fish Tech Soc 26(3):265-274
- Gong GC, Chen YLL, Liu KK (1996) Chemical hydrography and chlorophyll a distribution in the East China Sea in summer: implications in nutrient dynamics. Cont Shelf Res 16(12):1561-1590. doi:10.1016/0278-4343(96)00005-2
- Gong Y (1982) A study of oceanic thermal fronts in the

- southwestern Japan Sea. *Bull Fish Res Dev Agency* **28**:25–54
- Hao J, Chen Y, Wang F (2010) Temperature inversion in China seas. *J Geophys Res-Oceans* **115**(C12):C12025 doi:10.1029/2010JC006297
- Hur HB, Jacobs GA, Teague WJ (1999) Monthly variations of water masses in the Yellow and East China Seas, November 6, 1998. *J Oceanogr* **55**(2):171–184
- Jang ST, Lee JH, Kim CH, Jang CJ, Jang YS (2011) Movement of cold water mass in the northern East China Sea in summer. *J Kor Soc Oceanogr* **16**(1):1–13
- Kang YQ (1983) On the generation of temperature inversions in the upper layer of the ocean. *J Kor Soc Oceanogr* **18**(1):43–48
- Kim HJ, Cho KD (1982) Inversion phenomena of density in the Japan Sea. *J Kor Soc Oceanogr* **17**(2):51–58
- Kim HJ, Yoon HJ, Yang SK (1982) Inversion phenomena of temperature in the Yellow Sea. *Kor J Fish Aquat Sci* **18**(2):91–96
- KOSEF (1990) Tsushima current and circulation in the East Sea (Sea of Japan), KOSEF, Korea Science and Engineering Foundation, Daejeon, 90 p
- KSO (2005) Marine science terminology dictionary. Academy Books, Seoul, 509 p
- Lee CI, Koo DH (2009) Effects of water temperature inversion on the stratification variation in October and December in the South Sea of Korea. *Korean Soc Mar Environ Saf* **15**(3):165–171
- Lee KB (1978) Study on the coastal cold water near Ulsan. *Kor J Fish Aquat Sci* **13**(2):5–10
- Lie HJ, Cho CH (1997) Surface current fields in the eastern East China Sea. *J Kor Soc Oceanogr* **32**(1):1–7
- Lie HJ, Cho CH, Jung KT (2015) Occurrence of large temperature inversion in the thermohaline frontal zone at the Yellow Sea entrance in winter and its relation to advection. *Kor J Fish Aquat Sci* **120**(1):417–435. doi:10.1002/2014JC010653
- Lie HJ, Cho CH, Lee JH, Lee S, Tang Y (2000) Seasonal variation of the Cheju warm current in the northern East China Sea. *J Oceanogr* **56**(2):197–211
- Lie H-J, Oh K-H, Cho C-H, Moon JH (2019) Wintertime large temperature inversions in the Yellow Sea associated with the Cheju and Yellow Sea warm currents. *Kor J Fish Aquat Sci* **124**:4856–4874. doi:10.1029/2019JC015180
- Na JY, Lee SW, Cho KD (1991) A study on sea water and ocean current in the sea adjacent to Korea peninsula-The vertical structure of temperatures in the East Sea of Korea. *Kor J Fish Aquat Sci* **24**(4):215–228
- Nagata Y (1967) On the structure of shallow temperature inversions. *J Oceanogr Soc Japan* **23**(5):221–230
- Nakao T (1977) Ocean variability in relation to fisheries in the East China Sea and Yellow Sea. *J Fac Mar Sci Technol Tokai Univ* **10**:199–367
- Pang IC, Moon JH, Lee JH, Hong JS, Pang SJ (2017) Modeling temperature inversion in southeastern Yellow Sea during winter 2016. *J Geophys Res-Oceans* **122**(5):3848–3860. doi:10.1002/2017JC012718
- Park JH, Choi KH (1995) A study on the fishing ground and the prediction of fishing conditions of mackerel, *Scomber Japonicus* Houttuyn. *Bull Nat Fish Res Dev Agency* **49**:25–35
- Park S, Chu PC (2006) Thermal and haline fronts in the Yellow/East China Seas: Surface and subsurface seasonality comparison. *J Oceanogr* **62**(5):617–638
- Park YH (1986) Water characteristics and movements of the Yellow Sea warm current in summer. *Prog Oceanog* **17**:243–254. doi:10.1016/0079-6611(86)90047-9
- SBE (2016) 911plus CTD brochures. <https://www.seabird.com/profiling/sbe-911plus-ctd/family-downloads?productCategoryId=54627473769> Accessed 19 May 2020
- Schick RS, Goldstein J, Lutcavage ME (2004) Bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) distribution in relation to sea surface temperature fronts in the Gulf of Maine (1994–96). *Fish Oceanogr* **13**(4):225–238. doi:10.1111/j.1365-2419.2004.00290.x
- Uda M (1959) Oceanographic seminars. 2-watermass boundaries-“Siome”. Frontal theory in oceanography. *Board Can Ms Rep Ser* **51**:10–20
- Ullman DS, Cornillon PC (1999) Satellite-derived sea surface temperature fronts on the continental shelf off the northeast US coast. *J Geophys Res-Oceans* **104**(C10):23459–23478. doi:10.1029/1999JC900133
- Yang JY, Kim SH, Rho HK (1998) A study on the temperature fronts observed in the South-West Sea of Korea and the northern area of the East China Sea. *J Korean Fish Soc* **31**(5):695–706

Author's Information

Seong Hyeon Kim

Post Doctoral Scientist, Korea Institute of Ocean Science & Technology

Received Aug. 7, 2019

Revised Jan. 7, 2020

Accepted Apr. 7, 2020