

동해 심층수의 수괴 안전성

문덕수 · 정동호 · 신필권 · 김현주

한국해양연구원 해양개발시스템연구본부

Water Mass Stability of Deep Ocean Water in the East Sea

D.S. Moon, D.H. Jung, P.K. Shin, H.J. Kim

*Ocean Development System Laboratory, KORDI / KRISO

KEY WORDS : Deep Ocean Water 해양심층수, East Sea 동해, Water Mass stability 수괴 안전성, East Sea Proper Water 동해고유수, Temporal and spatial distribution of seawater temperature 수온의 시공간적인 분포

ABSTRACT : Oceanographic observation and qualitative analysis for deep ocean water in the East Sea were carried out from January 2003 to January 2004, in order to understand the characteristics of deep sea water in the East Sea. Temporal and spatial variation of water masses were discussed from survey of the study area including the coastal sea of Kwangwon province in where the polar front mixing cold and warm water masses were formed. On the basis of the vertical profiles of temperature, salinity and dissolved oxygen, water masses in the study area were divided into 5 major groups; (1) Low Saline Surface Water (LSSW), (2) Tsushima Surface water (TSW), (3) Tsushima Middle Water (TMW), (4) North Korea Cold Water (NKCW) and (5) East Sea Proper Water (ESPW). In winter, surface water in coastal sea of Kwangwaon Kosung region were dominated by North Korean Cold Water (NKCW). As Tsushima warm current were enforced in summer, various water masses were vertically emerged in study area, in order of TSW, TMW, NKCW and ESPW. It is highly possible that the LSSW which occurred at surface water of september is originated from influx of fresh water due to the seasonal rainy spell. Nevertheless water masses existed within surface water were seasonally varied, water quality characteristics of East Sea Proper Water (ESPW) under 300 m did not changed all the seasons of the year.

1. 서 론

동해는 평균 수심이 약 1,500 m 로 비교적 수심이 깊고, 북태평양의 연해인 동시에 반폐쇄성인 해양 특성을 가지고 몇 개의 서로 다른 수괴가 수직적으로 분포하고 있는 해역이다. 특히, 수심 300 m 이하에서 수온 1 °C 이하의 동해고유수가 전 해수의 90 %을 차지하고 있다 (Yasui et al., 1967). 동해 표층수괴는 대한해협을 통해 유입되는 대마난류와 동해 연안을 따라 남하하는 북한한류수가 있으며, 동해 표층수는 대마난류의 영향을 크게 받으며, 이 수괴들의 분포는 시공간적인 변화를 보인다 (Gong and Son, 1982). 대마난류수는 동지나해수와 쿠로시오의 혼합에 의해 형성되며, 대마난류의 지류인 동한난류는 우리나라 동해안을 따라 북상하면서 중·저층의 동해고유냉수나 북한한류수와 접촉하여 수직적으로 약층을 이루고, 수평적으로 극전선을 이룬다 (Yang et al., 1991). 이러한 극전

선은 매년 형성되나 그 구조나 위치는 년별, 계절별로 변화한다고 알려져 있다 (An and Chung, 1982)

현재까지 동해에서 행해진 해양 물리·화학적 연구로 Park (1978)이 인산염과 용존산소 분포를 이용한 냉수괴의 형성과 혼합과정을 설명하였으며, Kim and Chung (1984)은 동해 서남해역에서 동해 중층수의 염분과 용존산소에 관한 연구를 하였고, Hong et. al., (1984)은 동해 연안역의 이상저온 현상에 관한 논문을 발표하였다. 동해의 생지화학적 순환 과정에 관한 연구로, Shim and Park (1986)은 한국 동남해역의 기초생산력과 질소계 영양염의 동적관계 연구에서 영양염 재순환과 국지적인 용승 및 연안수 유입으로 인하여 기초생산력과 식물 부유생물의 성장을 증가시키고 있다는 것을 밝혔다. Chung et. al. (1989)은 식물플랑크톤에 의한 일차생산력 및 동물플랑크톤에 의한 영양염 재생률 등을 측정하였다. 입자태 유기탄소 및 유기질의 분포 (Yang et. al., 1997) 연구 와 극전선역의 수괴

와 영양염 분포에 관한 연구 (Cho et. al., 1997) 및 Chlorophyll a 분포, 신생산 및 질산염의 수직확산 (Moon et. al., 1997)에 관한 연구를 통해 동해 극전선의 영양염류 순환과정을 밝히고 있다.

해양심층수에 대한 정의는 다양하게 이루어지고 있지만 해양학적 측면에서 일본 수산심층수 협의회는 “해양심층수는 광합성에 의한 유기물 생성이 일어나지 않고 분해가 탁월하며, 겨울철 해수의 연직 혼합작용이 도달하지 않는 수심 이하에 있는 해수”라고 정의하였다. 동해고유수 (East Sea Proper water)는 태양광이 도달하지 않는 수심 300 m 이상의 깊은 곳에 존재하여 연중 안정된 저온성을 유지하고 있으며, 세균, 병원균 등의 유기물은 거의 없을 뿐 아니라 해양식물의 생장에 필수적인 영양염류나 미네랄 등의 무기물이 풍부한 해수자원이다(豊田孝義, 1999).

동해고유수는 해양심층수의 자원적 특성을 보유하고 있는 고품위 해수자원인 것으로 밝혀지고 있으며, 2000년부터 자원의 안정성에 대한 조사가 진행되고 있다. 그러나, 해양심층수의 안정성은 한류 및 난류의 세력변화나 대기와 해양의 상호작용에 의한 순환 및 혼합 등에 의해 해양 물리적 거동에 따라 변동할 수 있으며, 이에 대한 조사, 분석 및 검토가 필요하다. 본 연구는 극전선이 형성되는 동해 중부 연안해역에 있어서 각종 수괴의 수직적 분포와 이 수괴들의 화학적 특성 및 변화에 대해 월별 고찰하였다.

2. 본 론

2.1 해역 조사 및 분석방법

동해고유수는 수심 300m 이하의 심해 역에 존재하며, 동해 전체 체적의 90% 이상을 차지하는 자원인 것으로 평가되고 있다. 동해 전체의 해수 특성에 관한 기존 자료로는 1961년 이후 국립수산진흥원에 의해 수집된 자료와 한국해양연구원에서 1994년부터 1997년까지 수집한 자료가 있다 (KORDI, 1998). 그러나, 이들 자료는 동해고유수의 일반적 특성을 설명하기에 충분하지만, 심층수 취수 예정 해역의 국지적 특성과 동해의 장기적인 수온변동과 관련하여 계속적인 상세조사가 필요하다.

연구 대상 해역은 강원도 고성군 죽왕면 해역 (북위 38° 20', 동경 128° 34'; Fig. 1)과 강원도 고성부터 속초까지 500 m 수심을 중심으로 한 해역 (Fig. 2) 이다. 강원도 고성군 죽왕면 해역은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 해저협곡이 외해로부터 북서 측으로 뻗어져 들어와서 급격한 해저경사를 이루며 해안선에서 가까운 위치에 300 m 이상의 심층수 취수가 가능한 곳이다. 매년 극전선이 형성된다고 알려진 37° N ~ 39° N 의 동해 중부 연안 역 수심 500 m을 중심으

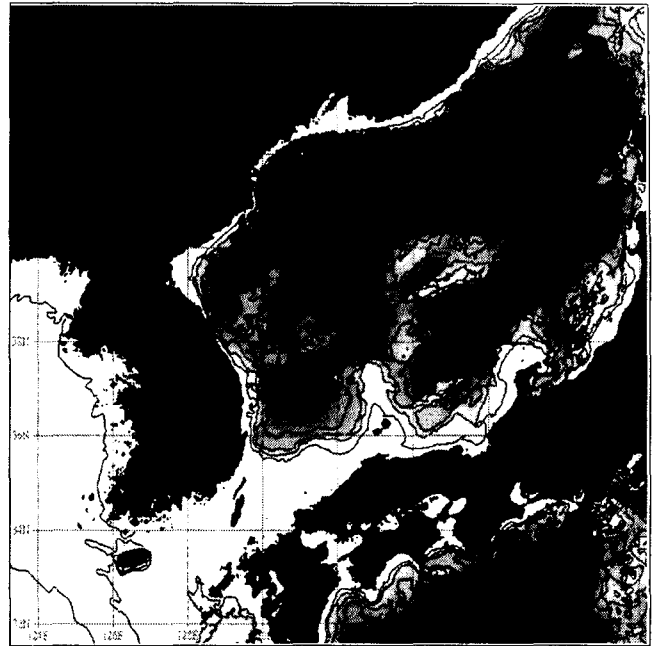


Fig. 1. Map showing location of the sampling station and distribution of East Sea Proper Water.

로한 남북 단면에서 해양조사를 실시하였다 (Fig. 2).

심층수 취수 예정 해역에서의 연중 수괴의 구조와 동해고유수의 안정성을 조사하기 위하여 해양조사는 매월 1회씩 이루어졌다. 수직 해류구조를 파악하기 위하여

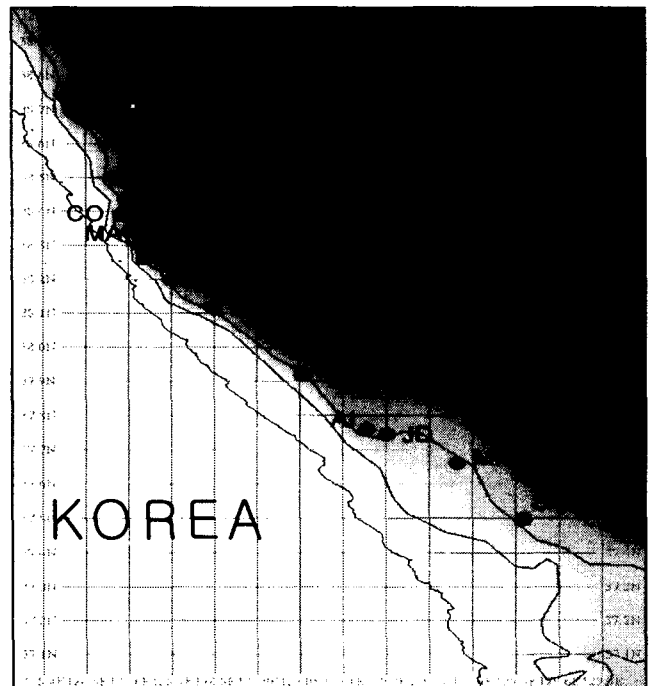


Fig. 2. Location of the sampling stations and oceanographic bathymetry of the East Sea.

현장에서 ADCP를 25시간 이상 계류하였으며, CTD (염분,

수온, 수심 측정 장치; Idronaut)을 이용하여 수심별로 수온과 염분, 용존산소 (Dissolved Oxygen), Chlorophyll-a, pH을 측정하였다. 또한 용존산소와 영양염 (Nutrient)의 농도 측정을 위한 시료를 반돈 채수기 등을 이용하여 채취하였다.

채수된 시료에서 용존산소는 Winkler 적정법 (Carpenter, 1965)으로 측정하였고, 영양염은 Strickland and Parsons

힘들지만 극전선역의 하계에 나타나는 와류의 영향인 것으로 추정된다 (Taegue, 2004). 8월의 수온-염분 수직분포에서 표층 수온은 7월 보다는 낮게 나타난 반면, 표층 염분은 약간 증가 하였다. 이러한 결과는 8월 초 강한 일사량에 의해 표층수의 염분도 증가와 8월 말에 나타난 장마에 의해 일사량 부족이 수온에 반영된 결과로 추정된다. 9월의 수온-염분 수직분포에서 표층수는 고온

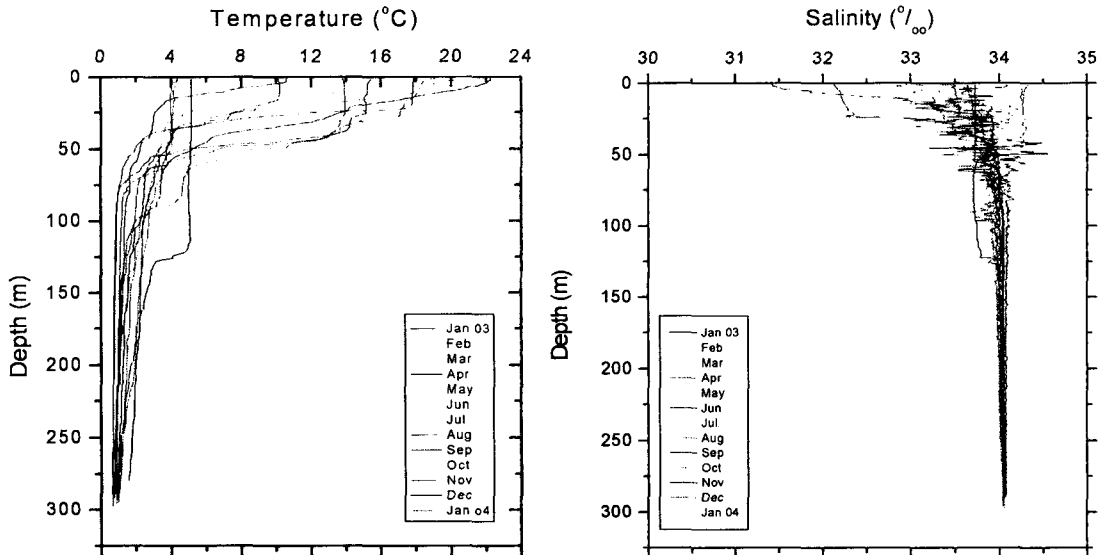


Fig. 3. Vertical profiles of temperature and salinity at the upper 300 m from January 2003 to January 2004.

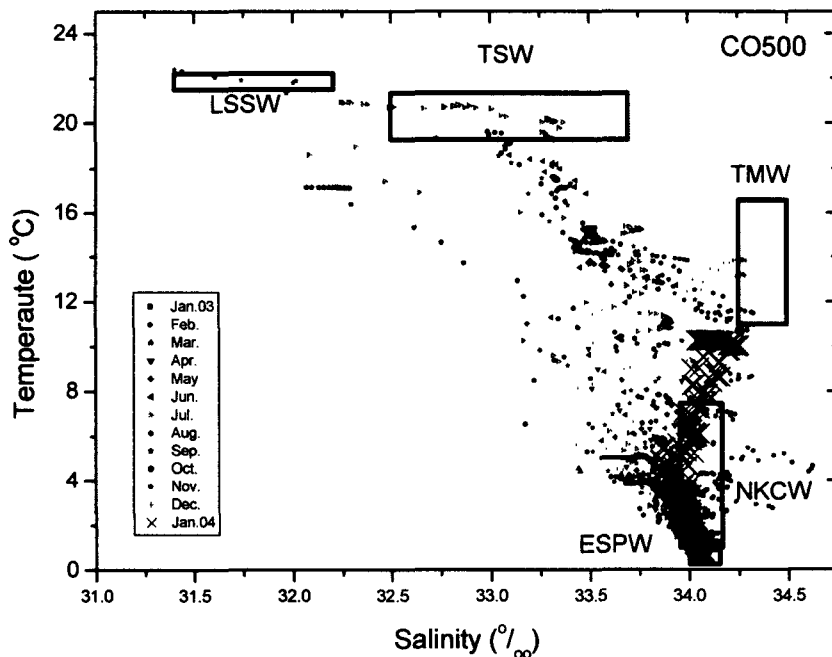
(1972)의 비색법으로 질산염 (Nitrate+Nitrite), 암모니아 (Ammonia), 규산염 (Silicate), 인산염 (Phosphate)을 측정하였다. 영양염 분석을 위한 해수 시료는 선상에서 각 정점에서 수심별로 채수한 해수는 분석시까지 냉동 보관하였다 (해양수산부, 1997).

2.2 수온과 염분의 수직분포의 월변화

개발대상 해역의 심층수에 대한 수질 안정성을 살펴보기 위해 약 1년에 걸쳐 수온 및 염분의 수심별 분포특성을 정리하여 Fig. 3에 그 결과를 도시하여 나타내었다. 월별 수온의 연직분포는 1월, 2월 3월을 포함한 겨울철에 수온약층이 약화되며, 표면혼합층이 수심 150 m 이상까지 두텁게 형성되는 것을 볼 수 있다. 특히, 2월과 3월에 수온약층이 가장 약하게 나타나고 있다. 4월, 5월, 6월로 진행되면서 동한 난류의 복상이 강화되면서, 표층수온은 점차 상승하여 수온약층이 강화되고, 표면혼합층의 두께도 5 m에서 15m로 점차 두터워 졌다. 그러나 7월의 조사 결과에서는 수온의 불연속면이 각각 25 m, 75 m, 170 m의 수심에서 나타나는 특이한 현상이 보였으며, 7월의 염분 수직분포에서도 수온의 불연속면에 염분이 낮아지는 현상이 관측되었다. 이에 대한 원인은 아직 단언하기

저염의 수괴 특성을 나타내고 있는데, 이는 8월 말에 시작되어 9월 중순에 끝난 장마의 영향을 반영한 결과이다. 즉, 장마가 끝난 후 일사량 증가에 따라 표층 수온은 증가한 반면, 장마로 인한 담수의 유입으로 인하여 염분의 저하를 초래하였다. 이러한 동해 저염표층수 (Low Salinity Surface Water; LSSW)는 Cho et. al. (1997)에 의하면, 중국의 양자강 유출수가 유입된 것으로 알려져 있지만, 장마가 끝난 직후 9월 중순에 동해에 나타나는 것으로 미루어 양자강 유출 수보다는 동해 연안에서 장마로 인한 담수의 유입에 기인한 요인이 크게 작용한 것으로 추정된다. 10월, 11월, 12월로 진행되면서 표층수의 수온은 점차 낮아지고, 염분은 점차 증가 하였다. 특히하계 동계에서 하계로 진행될 때의 표면혼합층의 두께는 5 m - 15 m로 얇은 반면, 하계에서 동계로 시간이 지날 때는 표면 혼합층의 두께가 25 m에서 50 m로 두꺼워 졌다. 이는 강원도 고성군 해역을 지배하는 수괴가 하계에는 쓰시마 표층수의 영향을 받다가 여름철 이후 북한난류의 영향으로 바뀐다는 것을 의미한다.

년중 수심별 수온의 변동폭을 살펴보면, 표층에서는 17.08 °C, 수심 50 m에서는 8.54 °C, 수심 100 m에서는 2.68 °C, 수심 150 m에서는 0.62 °C, 수심 200 m에서는 0.43 °C, 수심 250 m에서는 0.37 °C, 수심 300 m에서는 0.24 °C



로 나타났다. 한편 동해의 서쪽에 위치한 일본 토야마현 (富山灣深層水利用研究會 [2000])에서는 ± 1 °C의 변동 폭을 가진 수심층이 수심 300 m 임을 감안하면 이러한 변동 폭은 한류의 영향을 강하게 받는 동해 서측에서 보다 안정되어 있음을 알 수 있으며 수심 300 m 이하의 심층수에서 그 변동 폭이 훨씬 적은 안정된 특성을 가지고 있음을 알 수 있다.

따라서, 강원북부 해역의 경우에는 수심 300 m 이상에서는 연중 수온이 안정된 상태를 유지되는 것을 알 수 있다. 따라서, 대상해역에서 안정된 해양심층수 자원의 취수 수심 결정에 이와 같은 분석 결과를 활용할 수 있을 것이다.

2.3 동해에 나타나는 수괴 분석

본 조사 해역에서 수온, 염분, 용존산소 등의 차이에 따라 수괴는 동해표층 저염수 (LSSW: Low Saline Surface water), 대마난류 표층수 (TSW: Tsushima Surface Water), 대마난류 중층수 (TMW: Tsushima Middle Water), 북한한류수 (NKCW: North Korean Cold Water), 동해고유수 (ESPW: East Sea Proper Water) 등 5개의 수괴와 각 수괴들이 혼합된 혼합수 (MW: Mixed water)로 구분된다 (Fig. 4). 본 연구의 결과와 이미 보고된 동해에 존재하는 각종 수괴들의 물리화학적 특성치를 요약하면 Table 1과 같다. 대마난류 표층수와 중층수는 수온과 염분으로 뚜렷이 구별되나, 북한한류수와 동해 고유수의 염분값은 거의 같은 범위로 두 수괴의 구별이 불가능하다. 그러나, Park (1978; 1979)과 Kim and Kim (1981), Yang et. al. (1991)

등은 용존산소 농도로부터 위 두 수괴를 구분하였다.

이들 수괴들의 특성치를 월별로 비교해 보면, 1월, 2월, 3월의 경우 표층 150 m 까지 냉각된 대마난류 표층수와 북한한류수의 혼합수가 나타나며, 수심 150-250 m에는 북한한류수가 존재하며 250 m 이하에는 동해고유수가 있다. 4월에 표층 5 m 에 대마난류 중층수의 특성을 가진 수괴가 나타나고, 그 이하의 수심에는 대마난류와 북한한류의 혼합수, 북한한류수, 동해 고유수가 나타났다. 5월에 강원도 고성 연안해역 (수심 500 m)에는 대마난류 표층수와 대마난류 중층수의 혼합수가 수심 20 m 에 나타나고, 6월에는 본격적인 대마난류 표층수가 유입되면서 7월에는 표층 25 m 까지 대마난류표층수가 나타난다. 특히 7월에 수심 25m, 75m 그리고 180 m에 수온의 불연속면이 존재하고 이 수심들에 염분최소층이 관측되었다. Kim et. al. (1991) 등은 이러한 염분최소층으로 가면서 영양염이 감소하는 경향을 보여준 하부 약층수의 일부 해수들은 동해 중층수로 알려진 저염분, 고용존산소의 수괴에 해당하는 해수들로 해석했다. 또한 7월에는 동해고유수가 300 m 이하의 수심에서 나타나는 등 복잡한 수괴 구조를 보여주고 있어, 이 시기에 동해 중서부 해역에 자주 발생하는 울릉 와류에 의한 영향인 것으로 생각된다 (Taegue et. al., 2004). 9월 해양조사에는 동해 저염표층수 (LSSW)가 관측되었는데 이 수괴는 8월 말부터 9월 중순까지 장마로 인하여 다량의 담수가 해양에 유입된 것에 기인한다. Cho et. al., (1997) 등은 동해저염표층수는 중국의 양자강 유출수가 유입된 것으로 해석하였지만, 장마가 끝난 직후 9월

중순에 동해에 이 수괴가 나타나는 것으로 미루어 양자강 유출 수의 유입보다는 동해 연안으로 담수의 유입으로 해석하는 것이 타당하리라 생각된다. 10월과 11월에는 동해 표층저염수와 대마난류 표층수괴의 혼합수의 냉각이 일어나면서 수온이 떨어지는 것이 관측되었다. 12월이 되면 대마난류 표층수의 유입이 강원도 고성해역까지 진출하지 못하며 대마난류 중층수가 표층에서 관측되었다.

동해고유수가 나타나는 수심은 250 m 이하에 나타나지만, 대마난류가 강해지는 하계(7월, 8월, 9월)에는 300 m에서 관측되기도 한다. 특히 7월에 와류가 극전선역에 존재할 경우 동해고유수는 와류의 영향을 받아 300 m 이하의 수심에서 관측되기도 한다. 그러나 동해고유수의 수질 특성은 수온 1 ℃이하, 염분 34.00-34.16 ‰, 용존산소는 5.50 - 6.50 ml/l로 일정하며, 영양염의 농도도 연중 일정하여 심층수 수괴의 안정성이 입증되었다.

3. 결론

동해 중서부 연안의 극전선역에 있어서 년 중 매월 각 수괴의 수직분포 특성과 이 수괴들의 화학적 성질에 대하여 연구하였다. 또한 해양 심층수 자원의 개발 및 이용을 위하여 자원학적 특성에 기초한 품질기준을 정립하고 이를 연구개발 및 실용화하기 위하여 강원 북부해역의 해양 심층수 특성에 대한 다년간 조사 및 분석이 수행되었다. 그 결과는 시간적, 공간적 및 생태환경적 안정성 측면에서 다음과 같이 요약될 수 있다.

1) 대상 해역의 해양심층수는 일반적으로 알려진 해양 심층수의 자원적 특성을 양호하게 만족하고 있으며, 저에너지 관점에서는 일본 북해도의 심층수 자원과 유사한 300 m 이하에서 년 중 1 ℃ 이하의 안정성을 보유하고 있다.

2) 수온의 연직분포 특성을 살펴보면 계절적 수온약층이 뚜렷하며, 표층수는 약 17 ℃의 범위를 변동하지만 수심 300 m 이상의 동해 고유수는 연 중 약 0.2 ℃이하의 범위 이내에서 일정함을 알 수 있었다.

3) 동계의 경우, 수온약층의 상부에는 표층 냉각된 대마난류수가, 하부수층에는 동해고유수가 분포하고 있다. 그러나, 하계에는 수직적으로 동해 저염표층수, 대마난류 표층수, 중층수, 북한한류수 및 동해고유수가 분포한다. 특히, 수온 약층 상부의 표층수는 연 중 월별로 각각 다른 수괴가 나타났다가 사라지는 순환을 반복하지만, 300 m 이하의 수심에 존재하는 동해고유수는 연중 일정한 수온과 염분, 영양염 성분을 유지하고 있다.

4) 동해고유수가 나타나는 수심은 250 m 이하에 나타나지만, 대마난류가 강해지는 하계(8월, 9월)에는 300 m에서 관측되기도 한다. 특히 와류가 7월에 극전선역에 존재

할 경우 동해고유수는 와류의 영향을 받아 300 m 이하의 수심에서 관측되기도 한다.

5) 장마기간이 끝난 9월에 동해저염 표층수(LSSW)가 강원도 고성해역에 관측된 것은 연안지역에서 담수의 다량 유입에 기인한다.

6) 강원도 대상해역에서 영양염은 표층에서 낮고 수온약층에서 증가하여 동해고유수에서 최대로 풍부하였다. 또한 중금속, 미생물, 방사능 등에 대한 생태환경적 안정성도 심층수에서 안전하였다.

6) 따라서, 해양심층수의 3대 특성을 설명되고 있는 저온성, 청정성 및 부영양성이 대상해역에서는 수심 300 m 이하에서는 안정되게 만족되고 있으므로 해양심층수 자원의 개발 및 관리에 효과적으로 활용할 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 해양수산부의 지원으로 수행된 '해양심층수 다목적 이용 개발(4)' 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Han-Soeb Yang, Seong-Soo Kim, Chang-Geun Kang and Kyu-Dae Cho, "A study on sea water and ocean current in the sea adjacent to Korea peninsula, III Chemical characteristics of water mass in the polar front area of the central korea east sea", Bull. Korean Fish. Soc. 24(3), 185-192, 1991 (in Korean)
- [2] Hyun-Jin Cho, Chang-Ho Moon, Han-Seob Yang, Won-Bae Kang and Kwang Woo Lee, "Reneration processes of nutrients in the polar front area of the East Sea, III Distribution patterns of water masses and nutrients in the middle northern East Sea of Korea in October", 1995, Bull. Korean Fish. Soc. 30(3), 393-407, 1997 (in Korean)
- [3] Chang-Ho Moon, Sung-Ryull Yang, Han-Seob Yang, Hyun-Jin Cho, Seung-yong Lee and Seok-yun Kim, "Reneration processes of nutrients in the polar front area of the East Sea, IV Chlorophyll a distribution, new production and the vertical dissusion of nitrate", Bull. Korean Fish. Soc. 31(2), 259-266, 1998 (in Korean)
- [4] Kyung-Ryul Kim, Tae Si-da Rhee, Kuh Kim and Jong Yul Chung, "Chemical charateristics of the East Sea Intermediate water in the Ulleung Basin", J Oceano. Soc. Kor., 26 (3), 278-290, 1991