

Article

하계 대한해협 저층냉수의 물리·화학적인 특성 및 기원

김일남* · 이동섭

부산대학교 자연과학대학 해양과학과
(609-735) 부산시 금정구 장전동 산30번지

Physicochemical Properties and the Origin of Summer Bottom Cold Waters in the Korea Strait

Il-Nam Kim* and Tongsup Lee

Department of Marine Science, College of Natural Science
Pusan National University, Busan 609-735, Korea

Abstract : Hydrographic survey in the Korea Strait has long history that has begun in August 1917 at the Busan - Tsushima cross section, still continues to date. However, chemical properties of bottom cold water found exclusively in the western channel of the Korea Strait during summer did not receive much scientific attention. The aim of the study is to decipher the enigmatic origin of the Korea Strait Bottom Cold Water (KSBCW) in terms of chemical properties. The physicochemical properties of the KSBCW are extracted from the CREAMS II hydrographic data. OMP method was applied to analyze origin of the KSBCW quantitatively. The KSBCW is well defined by low temperature below 10°C. The cold waters exhibited the local presence near the coast at about 120 m depth with a thickness of 20 m to 30 m. The cold water was characterized by relatively cold, saline and higher chemical concentrations than adjacent waters. The KSBCW seems to have different origin from that of the coastal upwelled waters at the Ulgi-Gampo because it is saline, denser and contains considerably less dissolved oxygen than upwelled waters. The physicochemical properties are reported to have noticeable annual variations which suggest the complex origin of the KSBCW. OMP analysis show that the KSBCW is a mixture of three water types; TMW (24%), ESTW (36%) and ESPW (40%). Relationship between the KSBCW and the East Sea circulation is traced by mapping the water masses that have similar T, S and DO of KSBCW. The result showed that the KSBCW is most possibly an extension of southward flowing coastal intermediate waters. From these results, we expect that the monitoring KSBCW will provide us valuable information about the East Sea circulation.

Key words : 대한해협(Korea Strait), 최적화 다인자 분석(OMP), 대한해협 저층냉수(Korea Strait Cold Water), 동해 순환(East Sea circulation)

1. 서 론

동해는 대한해협, 쓰가루해협, 쓰야해협, 타타르해협 등 4개의 해협을 통해 주변해와 해수를 교환한다. 그 가운데 대한해협은 동해로 열과 염을 운반하는 주 통로이다(Yun *et al.* 1992). 그리고, 남해와 동중국해의 여러 수괴들이

좁은 해협으로 모여 통과하게 되므로 해황이 복잡하다(이 등 1984). 대한해협에서 동해로 진입하는 해류들의 시·공간적 변동성은 동해 남부는 물론 동해 전체 순환시스템에 대한 가장 중요한 외압으로 지목되었다(Ro *et al.* 1995).

대한해협에 대한 해양조사는 1917년 8월에 부산에서 대마도까지 서수도를 횡단하는 정선에 6개의 관측점을 설정해서 조사한 것을 시작으로, 1922년 5월부터 매달 관측

*Corresponding author. E-mail : radionuclides@hanmail.net

이 실시되었고, 1961년부터는 격월로 체제를 바꾸어 지금까지 계속되고 있어, 세계적으로 유서가 깊은 시계열 자료가 생산되는 곳 가운데 하나이다(한 1992; Lim 1973).

대한해협에 관한 연구는 크게 표층과 저층에 대한 것으로 나누어 볼 수 있다. 표층에 관한 연구는 고온-고염한 대마난류수가 남해에서 대한해협을 통해 동해로 유입되는 형태에 관한 것이 주류를 이루고(김과 김 1983; Uda 1934; Lee and Chung 1981; Yoon 1982; Byun and Chang 1984; Seung 1992), 저층에 관한 연구는 서수도 저층에 존재하는 대한해협 저층냉수(KSBCW: Korea Strait Bottom Cold Water)의 특성에 관한 연구가 주를 이루었다. 지금까지 대한해협을 통한 유입이 더 큰 관심을 받았기 때문에 저층냉수에 대한 연구는 상대적으로 부족하여 아직 모르는 부분이 많다.

대한해협 저층냉수에 관한 초창기 연구들을 살펴보면, Nishida(1926)가 고온-고염한 대마난류수는 동수도보다 서수도에서 최대 유속을 보임에도 불구하고 서수도 저층에 매년 냉수가 출현한다고 처음으로 보고하였다. Uda(1936)는 이러한 냉수가 부산 근방까지 도달한다고 하였다.

Defant(1961)는 개방해역인 남해와 폐쇄해역인 동해를 이어주는 대한해협에는 성질이 다른 두 수괴가 존재하는데 서로 반대 방향으로 흐른다고 하였고, Fukuoka(1962), Chang and Uda(1968)는 동해 내부에 존재하는 냉수가 남쪽으로 확장되어 나타나는 현상이라 하였다.

Lim and Chang(1969)은 대한해협 저층 냉수는 서수도만 존재하고, 6월부터 냉수가 나타나기 시작하여 9월에 최대 수온이 낮아지고 8월에 가장 강한 흐름을 보인다고 하였다. 그리고 이 저층냉수를 수온 10°C 이하, 염분 34.0~34.3인 해수로 정의하였다.

한(1972)은 겨울철 동해의 열수지와 대한해협 저층냉수 형성이 밀접한 관계가 있음을 제시하였고, Lim(1973)은 저층냉수는 염하구의 염뿔기(salt wedge) 형태와 비슷한 모양을 보이며 기원은 동해 고유수라고 하였다.

An(1974)은 대한해협 저층냉수는 동해 고유수와 대마난류 중층수의 혼합으로 이루어지고, 밀도가 두 해수의 중간 값을 가지며, 동해남부 연안에서 용승으로 나타나는 냉수와는 다르다고 하였다.

Kim and Legeckis(1986)은 위성 사진을 근거로 하여 1981년 봄에 동한난류(EKWC)가 형성되지 않았는데, 아마도 이는 저층 냉수의 움직임과 관련이 있을 것으로 제시하였다.

양 등(1994)은 동해남부의 기원이 불명확한 10°C 이하의 냉수괴를 수온에 대한 용존 산소 및 Ra 동위체 도표를 분석해서 이 해수의 기원이 북한한류수라고 주장하였다.

Cho(1995), Cho and Kim(1996)은 대한해협 저층냉수의 두께가 얇으면 연안의 상층수가 충분히 얇아지지 못하

여, 연안을 따른 강한 북상류가 형성되지 않고, 두께가 충분히 두꺼우면 상층수의 두께가 얇아져 음의 상대와도가 증가하여 연안을 따라 강한 북상류가 나타난다고 하였다. 즉 대한해협 저층냉수의 변동이 동한난류 형성에 중요한 역할을 한다고 주장하였다.

조 등(1997)은 냉수의 두께는 20~70 m 가량이고, 냉수의 두께는 조류와 관련이 있다고 하였다. Cho and Kim(1998)은 대한해협 저층냉수는 연안에서 약 50 km 정도 내에서 발견되고, 약 20~50 m 두께를 가지며, 동해 고유수가 아니라 최소 염분층이 서수도로 흘러 든다고 하였다.

최근에 김(2002)은 유동성에 초점을 맞추어 수온의 연직구배율이 극대치를 보이는 층 하부를 대한해협 저층냉수로 새롭게 정의를 하였고, 저층냉수의 출현율과 두께의 공간적인 분포를 정량적으로 제시하였다. Johnson and Teague(2002)은 이전의 연구와는 대조적으로, 겨울에 최소, 여름에 최대를 보이는 1년 주기의 대한해협 저층냉수의 출현을 발견하지 못했고, 오히려 3월과 6월에 지속적인 냉수의 관입이 발생하고, 다시 12월과 1월에 이러한 현상이 보이며, 저층 냉수의 출현은 지형류 수송(geostrophic transport)에 달려 있다고 해석하였다. 즉, 지형류 수송이 줄면 냉수의 관입이 가능하여 발견되고, 반대로 늘면 냉수의 관입을 막아 출현하지 못한다는 것이다.

이상을 정리하면, 대한해협 저층냉수의 물리적인 특성은 수온 10°C 이하, 염분 34 내외임을 알 수 있고, 기원에 관해서는 동해 고유수, 동해 고유수와 대마난류 중층수의 혼합수, 북한한류수, 동해중층수 등 다양하게 제기되어 아직까지 기원이 밝혀지지 않았다. 또한 대한해협 저층냉수가 지닌 화학적인 특성에 관해서도 거의 관심을 두지 않았음을 알 수 있다.

최근에 Lee and Kim(2003)은 매년 여름에 울산-감포 해역에 나타나는 냉수괴는 물리·화학적 특성으로 보면 그 기원이 북한 한류수라고 하였다. 이런 맥락에서 대한해협 저층냉수가 울산-감포 해역에 나타나는 용승 냉수와 기원이 같은지도 궁금한 사항 가운데 하나이다. 왜냐하면, 동해 내부의 해수가 남해로 흘러 나가는 것이 동해의 열·염순환 벨트의 한 성분을 이루고 있는 것인지 아니면 국지적인 현상인지에 대한 이해도를 높여야만 동해 순환 시스템을 보다 잘 이해할 수 있기 때문이다.

Cho(1995), Cho and Kim(1996) 등이 주장한 바대로 대한해협 저층냉수가 동한난류 형성에 중요한 역할을 하며, 김과 이(2004)가 제시한 것처럼 대마난류수의 한 지류가 동해 북부 해역까지 북상해서 북부 해역에 열과 염을 공급하는 주요한 원천이 될 수 있다면, 대마난류수의 변동이 동해의 해양환경에 상당한 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. 따라서, 대한해협 저층냉수의 정확한 기원을 파악하게 되면 동해 내부의 순환에 대해 이해를 높여주게 될 것이

고, 앞으로는 저층냉수의 기원과 거동 분석만으로도 동해 남부와 남해의 해황 변동에 대한 조짐을 파악하게 될 것으로 기대된다.

이 논문에서는 지금까지 보고된 대한해협 저층냉수의 기원을 파악하고자 한 것으로 기존의 물리 자료에 화학인자를 추가해서 이전보다 정량적인 분석을 시도하였다. 먼저 울산-감포 연안에 용승한 표층 냉수와 비교해서 기원이 같은지를 살펴보고, 다르다면 기원해수 측면에서 어떻게 차이가 나는지를 검토하고, 마지막으로 저층냉수가 기원해수간의 어떤 조합으로 생성되었는지를 다인자 최적화(OMP: Optimum Multiparameter) 방법으로 정량분석을 시도하였다.

2. 재료 및 방법

지금까지 발표된 문헌의 자료 외에 새로 분석한 자료로는 CREAMS II에서 1999년 6월~8월까지 동해 남·북부 해역을 조사한 자료 가운데 대한해협 주변 정점의 자료를 사용하였다(Fig. 1). 활용한 자료는 CTD(수온, 염분, 용존 산소) 연속 측정 자료와 수심별 채수 시료에서 측정된 pH, 알칼리도, 영양염(규산염, 인산염, 질산염) 등으로 구성되어 있으며, 인터넷 웹주소 http://sam.ucsd.edu/onr_data/hydrography.html에 공개된 자료를 사용하였다.

인터넷에 게시된 자료 중 위도, 경도, 수심 등 위치 정보를 포함한 수온, 염분, 용존 산소, pH, 알칼리도, 규산염, 인산염, 질산염 자료로 행렬을 만들어 OMP 분석에 사용하였고, 분석방법에 대해서는 김과 이(2004)에서 상세히 다룬 바 있다. 이 논문에서는 대한해협 부근에 위치

한 정점 자료를 가지고 임의의 횡단면을 구성하여 물리·화학적 특성을 분석하였다(Fig. 1).

3. 결과 및 토의

저층냉수의 물리·화학적 특성

Nishida(1926)가 대한해협 저층냉수에 관해 처음 보고한 이후로, Lim and Chang(1969)은 하계 대한해협에서 발견되는 10°C 이하의 냉수를 저층냉수라 정의하였다. 그 이후의 많은 학자들도 여름에 수온이 가장 낮아지고, 세력이 강하며, 학자마다 약간의 차이가 있지만 대부분 10°C 이하를 판별 기준으로 설정하였다(박 1972; 조 등 1997; Lim 1973; Cho and Kim 1998; Johnson and Teague 2002). 따라서 이 논문에서도 수온 10°C 등온선을 위주로 물리·화학적 특성을 살펴보았다.

대한해협 부근 수직 단면

앞에서 언급한 바와 같이 대한해협 부근의 정점들로 가상의 정선 X를 구성하였다(Fig. 1). 정선의 단면도에 드러난 물리 특성을 살펴보면, 수온이 20°C를 넘는 해수가 수심 30 m 부근까지 덮고 있고, 표층에서 바닥까지 고온인 대마난류수의 영향이 우세함을 알 수 있다(Fig. 2a). 정점 X1-X2에서 수심 120 m 부근에 수온 10°C 이하의 냉수가 자리잡고 있었으며, 두께는 20~30 m 정도였다. Lim and Chang(1969), Johnson and Teague(2002)는 6월부터 저층냉수가 나타나기 시작한다고 보고하였고, 조 등(1997)은 냉수의 두께는 20~70 m라고 하였다. 이러한 보고와 CREAMS II의 동해 남부 자료가 6월~7월 사이에 수집된 것임을 감안하면, 대한해협에 저층냉수가 출현하기 시작하는 시기였던 것으로 판단된다.

염분은 대략 수심 30 m를 경계로 표층에 34 이하인 해수와 저층에 34가 넘는 해수로 구분되었고, 고염인 대마난류 중층수의 세력이 더 우세하였다. 수온 10°C 등온선에서 염분 범위는 34.1~34.3으로 나타났다(Fig. 2b).

대략 수심 30 m까지는 밀도(σ_t)가 24 이내인 가벼운 해수가 표층을 덮고 있었고, 밀도가 25인 등치선은 X1에서 수심 30 m에 있던 것이 동쪽으로 사선 방향으로 깊어지는 구조를 보여 가벼운 해수와 무거운 해수를 구분하는 경계 역할을 하였다. 수온 10°C 등온선의 밀도는 26.2~27.0 범위였다(Fig. 2c). 정점 X1-X3의 저층에는 밀도 역전층이 나타나는데 이는 실제 밀도 역전이 있었던 것이 아니라 윤곽을 결정하는 프로그램의 알고리즘에 기인한 허상이었다.

화학적인 특성을 살펴보면, 용존 산소는 대략 수심 30 m를 경계로 하여 표층으로 갈수록 5 m//보다 높아지는데 반해 아래로 갈수록 5 m//보다 낮아지는 분포를 보

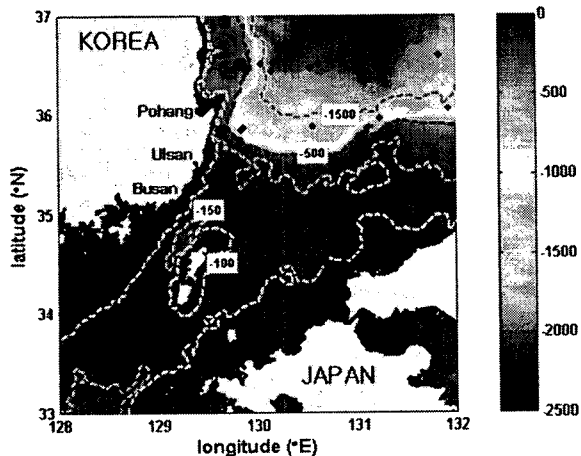


Fig. 1. Map of the 23 CREAMS II hydrographic stations near the Korea Strait. Only the stations that are discussed in the text are assigned names. Negative numbers indicate the depth in meter.

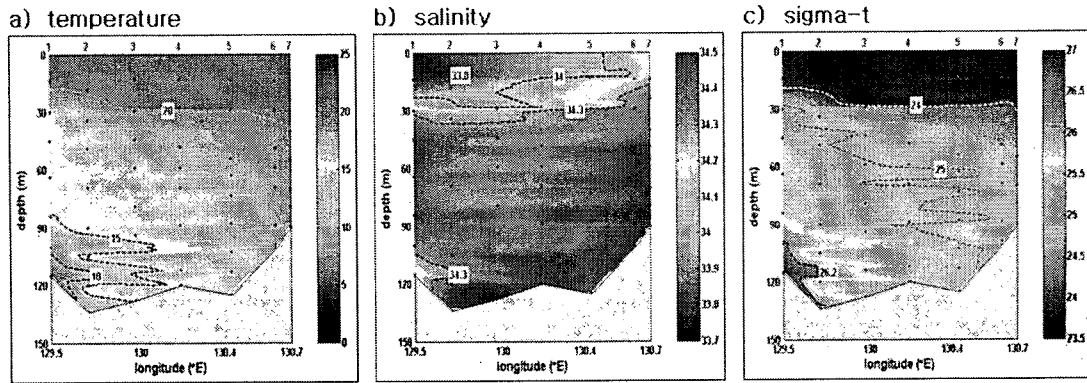


Fig. 2. Vertical profiles of physical properties along the X-section: a) temperature ($^{\circ}\text{C}$), b) salinity, and c) density (σ_t). Note that the temperature inversions (and hence force density inversion) is a false image due to an internal error of contour program.

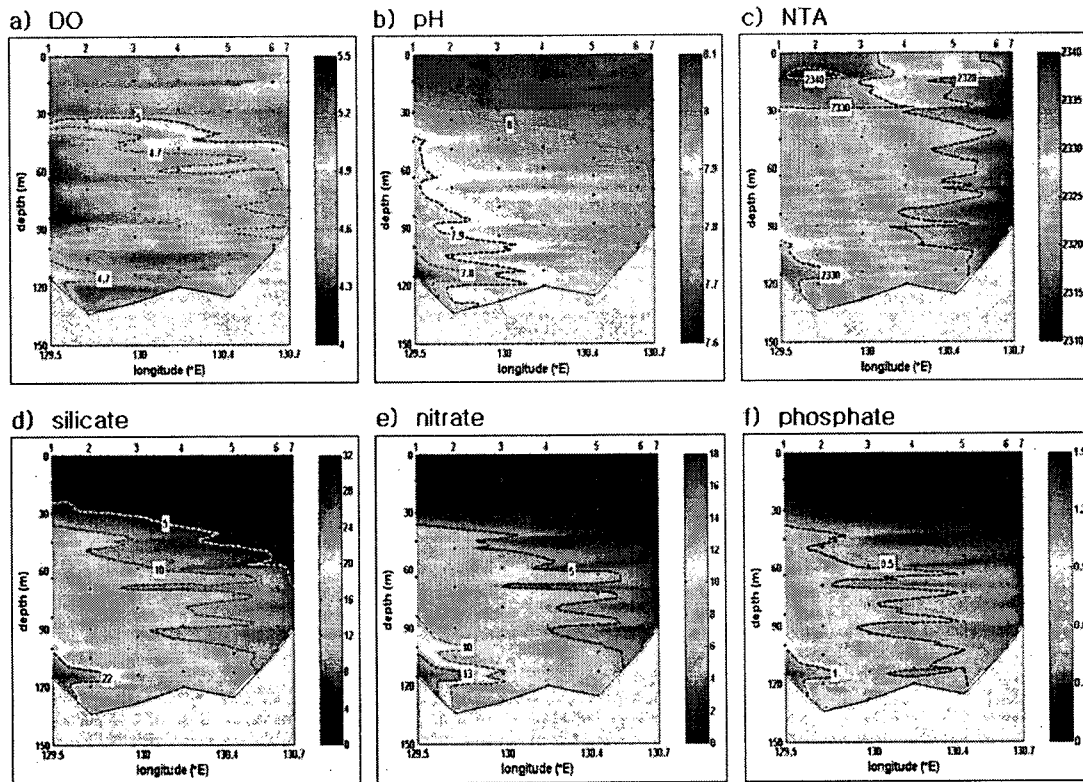


Fig. 3. Vertical profiles of chemical properties along the X-section: a) dissolved oxygen (mll), b) pH, c) normalized total alkalinity ($\mu\text{mol kg}^{-1}$), d) silicate ($\mu\text{mol kg}^{-1}$), e) nitrate ($\mu\text{mol kg}^{-1}$), and f) phosphate ($\mu\text{mol kg}^{-1}$).

였다. 수온 10°C 등온선에서 용존산소는 $4.7\sim 5.0$ mll 범위였다(Fig. 3a).

pH는 등수심에서 보면 대체로 동쪽으로 갈수록 값이 높게 나타났고, pH가 7.9 보다 작은 해수는 X1-X3에서만 분포하였다. 특히 X1에서는 수심 40 m 아래에서 나타났다. X1-X2 구간의 중·저층에 있는 해수의 화학특성이 다

름을 보이고 있었다. 수온 10°C 등온선에서 pH는 7.6~7.8 범위를 보였다(Fig. 3b).

염분 35에 대해 정규화한 알칼리도(NTA: normalized total alkalinity)는 X5-X6 사이에 $2,320$ $\mu\text{mol kg}^{-1}$ 등치선이 연직으로 경계를 이루며 X6, X7에서는 알칼리도가 낮은 해수로 채워져 있고, X1-X3의 표층에서 수심 30 m가

지는 알칼리도가 높은 해수가 자리잡고 있었다(Fig. 3c). 그 사이에는 2,320~2,330 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ 사이를 보이는 해수가 대부분을 차지하고, X1-X2 저층은 2,320 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ 보다 낮은 해수로 채워져 있다.

NTA는 수괴 구별에 좋은 인자로 판단된다. NTA 관점에서 보면 대한해협에는 모두 4개의 수괴가 있었던 것으로 보인다. NTA는 특히 대마난류의 표층수와 중층수를 구분할 때 유용한 쓰임새를 보여주었다. 수온 10°C 등온선에서 NTA는 2,330~2,337 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ 범위를 보였다.

영양염(규산염, 질산염, 인산염)은 대체로 서로 비슷한 분포 경향을 보였다. 등수심면에서 보면 한국 연안쪽에서 높은 값을 나타내었고, 표층에는 농도가 낮고 수심이 깊어지면서 농도가 늘어났다. 수온 10°C 등온선에서 규산염은 22~32 $\mu\text{mol kg}^{-1}$, 질산염은 13~18 $\mu\text{mol kg}^{-1}$, 인산염은 1~1.5 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ 의 범위를 나타내었다(Fig. 3d-f).

이상을 정리하면, 대한해협 저층냉수는 한국측 정점 X1-X2의 수심 120 m 부근에 20~30 m 두께로 국지적으로 얇게 나타났다. 그렇지만 세력이 약해 냉수가 갯 출현하기 시작하는 시기로 판단되었다. 하지만 주변 해수와의 물리·화학적 특성이 뚜렷하게 구별되었다. 주변 해수(대마난류 중층수)에 비해 저온, 저염하였으며, 고려 대상인 화학적 인자들의 농도가 일률적으로 높은 특징을 보였다.

대한해협 저층냉수와 울기-감포 연안 냉수

지역적으로 서로 가까이 나타나는 두 냉수는 모두 여름철에 관측되는 특성을 지니는데 대한해협에서는 저층에서, 울기-감포 연안에서는 표층에 나타난다. 특히 후자는 울기-감포 사이의 해역에서 자주 관측되기는 하지만 멀리 부산의 기장과 일광에서도 나타나기 때문에 두 냉수는 같은 수괴에 기원을 두고 있을 가능성도 배제할 수 없다.

이들에 대한 이전의 연구를 살펴보면, 김과 김(1983), Lee(1983), Seung(1984), Lee and Na(1985)는 울기 연안에서 발생하는 용승의 물리적인 특성과 냉수의 기원에 관해 연구하였고, Nishida(1926), Lim and Chang(1969), Lim(1973), Cho and Kim(1998)은 대한해협 저층냉수의 기원과 구조, 그리고 변동에 관해 연구하였다. 울기-감포 해역의 용승에 의한 냉수와 대한해협 저층냉수를 직접 비교 검토한 연구 사례는 없었고, 단지 An(1974)이 대한해협 저층냉수는 동해고유수와 대마난류 중층수가 섞인 것

이고, 용승 냉수는 북한한류수로서 두 냉수의 기원이 다르다고만 언급하였다. 그 이후로 두 냉수를 비교 검토한 연구는 없었으며, 최근에 Lee and Kim(2003)이 울산-감포 연안에서 발생한 용승한 해수(USCW; Upwelled Surface Cold Water)의 물리·화학적(수온, 염분, 밀도, 용존 산소, 알칼리도, pH) 특성을 자세히 제시하면서, 두 냉수의 물리·화학 특성을 직접 비교할 수 있게 되었다. 두 냉수의 물리·화학 특성치는 Table 1에서 대비하였다.

용승냉수(USCW: Upwelled Surface Cold Water)는 표층 가까이에 위치하여 상대적으로 깊은 곳에 위치하는 대한해협 저층냉수(KSBCW: Korea Strait Bottom Cold Water) 보다 수온이 높았으며, 염분은 KSBCW가 0.2~0.5 ‰ 고염한 특징을 보였다. 용존 산소는 KSBCW가 USCW에 비해 1~1.3 mll 낮아서 USCW에 비해서 표층을 떠난 지 오래된 해수임을 알 수 있었다. 밀도(σ_t)로 보면 KSBCW가 26 이상으로 훨씬 무거운 해수임을 알 수 있고, pH도 KSBCW가 낮아서 USCW에 비해 좀더 깊은 곳에 있었던 해수임을 나타내었다. NTA로 보면 USCW는 동해 내부에서 기원한 해수에 가깝고(Lee and Kim 2003), KSBCW는 쿠로시오 해수와 섞인 것을 시사하는 상대적으로 낮은 값을 보였다. 동해 내부 해수의 전형적인 NTA 값은 2,400 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ 이고(박 1997), 쿠로시오 해수는 2,294.5 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ (Peng *et al.* 1999)인데, KSBCW는 두 해수의 중간 값인 2,347 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ 을 나타내었다. 영양염에 관해서는 USCW에 대한 관측 자료가 없어 비교할 수가 없었다. 다만, 용존 산소 농도로 추정할 때 KSBCW의 결보기산소소가 크기 때문에 영양염 농도가 좀더 높을 것으로 짐작된다. 영양염은 앞으로 조사해서 비교해 볼 가치가 높은 인자로 여겨진다.

두 냉수의 물리·화학적 특성을 비교 분석한 결과로 대한해협 저층냉수는 울기-감포 해역에서 발견되는 용승 냉수보다 차고, 고염해서 좀더 무거운 반면, 용존산소는 더 많이 소모되어 더 오래된 해수임을 알 수 있었다.

Lee and Kim(2003)은 용존산소를 근거로 하여 용승 냉수가 북한한류수에서 기원했을 것으로 보고하였다. 그런데 저층냉수의 용존 산소는 4.7~5.0 mll 로서, 6.0 mll 이상을 보이는 북한한류수와 확연히 차이가 나게 적다. 이러한 농도는 오히려, 김과 이(2004)가 정의한 Tsushima Middle Water(4.91 mll)와 Modified Tsushima Surface Water(4.99

Table 1. A comparison of physicochemical properties of the Upwelled Surface Cold Water (USCW) with those of the Korea Strait Bottom Cold Water (KSBCW).

Cold water	Temp (°C)	Sal	DO (mll)	Sigma-t	pH	NTA ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	SiO ₄ ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	NO ₃ ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	PO ₄ ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)
USCW	13-15	33.8-34.1	5.7-6.0	25.14-25.47	7.71-7.94	2393-2465	nd	nd	nd
KSBCW	10≤	34.1-34.3	4.7-5.0	26.20-26.90	7.60-7.80	2330-2337	22-32	13-18	1-1.5

m//l)에 더 가까워서 두 냉수의 기원이 다르다는 것을 알려준다. 대한해협 저층냉수의 기원에 관해서는 다음 절에서 자세히 서술하였다.

대한해협 저층냉수의 기원

지금까지 대한해협 저층냉수의 기원에 관해 다양한 의견이 제시되었다. 초기에는 동해 내부에서 기원한 해수라고만 하였고(Nishida 1955; Fukuoka 1962; Chang and Uda 1968), Lim and Chang(1969), Lim(1973)은 동해 고유수로 지목하였으며, An(1974)은 동해 고유수와 대마난류 중층수가 혼합된 해수라고 하였다. 임(1983), 김(2002)은 북한 한류수가 대한해협 서수도 저층에 도달한다고 하였고, 양 등(1994)은 Ra 동위체를 추적자로 이용하여 동해 남부 연안해역에 출현하는 10°C 이하 냉수괴는 북한 한류수 기원이라고 주장하였지만, 울산-감포 해역의 연안용승의 기원에 초점이 맞추어져 있었다. Cho and Kim (1998)은 동해 고유수가 아니라 염분최소수괴(T: 1-5°C; S ≤ 34.05)가 대한해협 저층냉수의 기원이라 하였다. 이상과 같이 대한해협 저층냉수의 기원에 대해서 제기된 기존 주

장은 Table 2에 정리하였다.

여기서 1990년대 중반 이전 논문에서 동해고유수라 함은 그 이후에 논문에서 쓰이고 있는 것과 다름을 짚고 넘어갈 필요가 있다. CTD가 도입되어 연속측정이 가능해지기 이전에는 표층수와 심층수 사이의 염분최소를 보이는 해수가 발견되지 않았다. 따라서 그 이전의 동해고유수는 이 염분 최소층을 포함한 것이고 90년대 초반의 CREAMS 이후부터는 염분최소층을 동해고유수에서 분리하여 동해중층수(East Sea Intermediate Water)로 구별해서 쓰고 있다. 한편 동해고유수는 심층수 형성에 대한 최근의 연구 결과를 통해 더 자세하게 구분되었지만(Kim *et al.* 1996) 각 수괴의 특성값 사이의 차이가 너무 작아서 OMP 분석에서는 적용할 수 없었기 때문에 편의상 동해중층수 아래의 해수를 통칭해서 동해고유수로 부르고 있음을 밝혀둔다.

기존 연구 중에서, Lim and Chang(1969)과 Lim(1973)만이 Wüst(1935)의 “core layer” 방법을 이용하여 혼합률 관점에서 기원에 관해 접근하였다. Lim(1973)은 대한해협 저층냉수의 기원을 동해 고유수라고 보고, 동해 고유수가 얼마나 혼합되어 있는지를 월별로 계산하였으며, 6월에는 32~42%, 7월에는 31~50%, 8월에는 39~56%, 9월에는 30~60%를 차지한다고 하였다.

본 연구에서는 기존의 혼합률 접근 방법을 화학적인 특성치를 고려하는 방향으로 더 확장시키기 위해 OMP 분석법을 처음으로 적용해서 저층냉수의 기원에 관해서 살펴보고자 하였다. 여기서 사용한 동해 기원해수의 정의에 대한 내용은 다른 논문(김과 이 2004)에서 자세히 다루었다.

물리·화학 특성치 관점

물리·화학적인 특성치 관점에서 대한해협 저층냉수의 기원을 살펴보기 위해, 김과 이(2004)가 규정한 동해의 총

Table 2. Published source water type of the Korea Strait Bottom Cold Water compiled from the previous studies.

Source water type	Sources
ESPW (East Sea Proper Water)	Lim and Chang (1969) Lim (1973)
ESPW (East Sea Proper Water) + TMW (Tsushima Middle Water)	An (1974)
NKCW (North Korea Cold Water)	Lim (1983) Kim (2002)
SMLW (Salinity Minimum Layer Water)	Cho and Kim (1998)

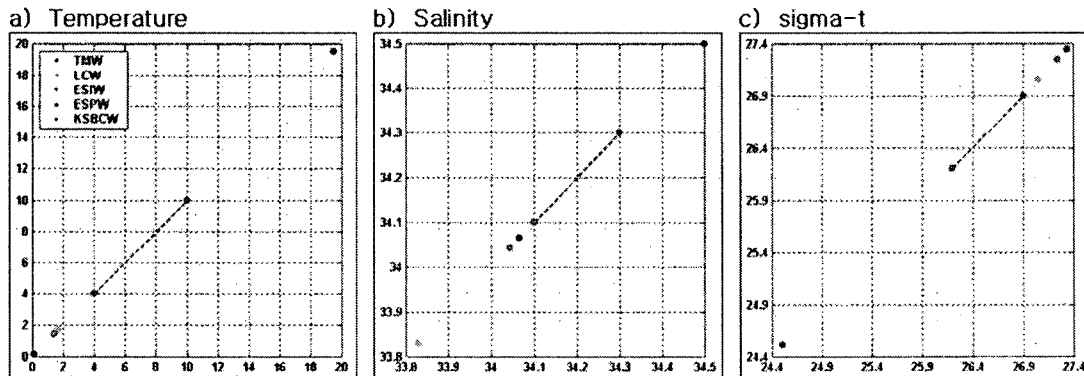


Fig. 4. Comparison of the physical properties of the KSBCW (Korea Strait Bottom Cold Water) with those of the source water types of TMW (Tsushima Middle Water), LCW (Liman Cold Water), ESIW (East Sea Intermediate Water), ESPW (East Sea Proper Water); a) temperature (°C), b) salinity and c) density (σ_t).

8개의 기원해수(EKCW: East Korean Coastal Water, NKSW: North Korea Surface Water, MTSW: Modified Tsushima Surface Water, TSCW: Tatar Surface Cold Water, TMW: Tsushima Middle Water, LCW: Liman Cold Water, ESIW: East Sea Intermediate Water, ESPW: East Sea Proper Water) 중, 지금까지 기원으로 보고된 TMW, LCW(=NKCW), ESIW, ESPW 4개의 기원해수와 수온 10°C 이하로 정의한 대한해협 저층냉수와의 물리·

화학 특성치를 서로 비교하였다(Fig. 4).

KSBCW의 수온은 TMW와 ESPW의 중간에 위치하였고, LCW와 ESIW에 가까웠다(Fig. 4a). 염분은 ESIW와 TMW의 중간에 위치하였고, ESPW에 가까웠다(Fig. 4b). 밀도는 LCW에 가까운 값을 보여, 무거운 해수임을 나타내었다(Fig. 4c).

KSBCW의 용존 산소는 TMW에 가까웠고(Fig. 5a), pH는 LCW와 ESIW가 범위 내에 위치하였다(Fig. 5b). NTA

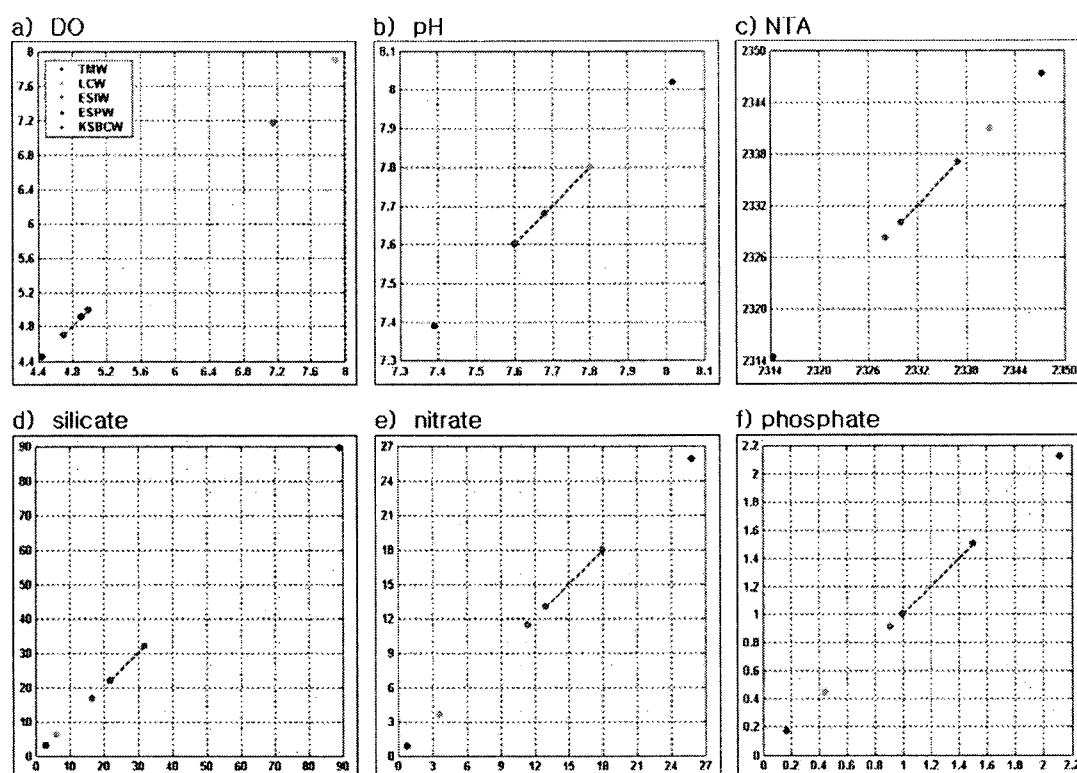


Fig. 5. Comparison of chemical properties of the KSBCW (Korea Strait Bottom Cold Water) with those of potential source water types (TMW: Tsushima Middle Water, LCW: Liman Cold Water, ESIW: East Sea Intermediate Water, ESPW: East Sea Proper Water): a) DO (ml/l), b) pH, c) NTA ($\mu\text{mol kg}^{-1}$), d) silicate ($\mu\text{mol kg}^{-1}$), e) nitrate ($\mu\text{mol kg}^{-1}$) and f) phosphate ($\mu\text{mol kg}^{-1}$).

Table 3. Physicochemical properties of the potential source water types of the Korea Strait Bottom Cold Water.

S.W.T name	Temp ($^{\circ}\text{C}$)	Sal	Sigma-t	DO (ml/l)	pH	NTA ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	SiO_4 ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	NO_3 ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	PO_4 ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)
TMW	19.528	34.504	24.51	4.91	8.02	2314.4	2.90	0.85	0.17
LCW	1.742	33.829	27.05	7.90	7.80	2340.9	6.20	3.61	0.45
ESIW	1.436	34.042	27.25	7.16	7.68	2328.2	16.80	11.44	0.91
ESPW	0.175	34.065	27.34	4.45	7.39	2347.3	89.40	25.86	2.12
KSBCW	4-10	34.1-34.3	26.2-27.0	4.7-5.0	7.6-7.8	2330-2337	22-32	13-18	1-1.5
Matched water types	LCW, ESIW	ESPW	LCW	TMW	LCW, ESIW	LCW, ESIW	ESIW	ESIW	ESIW

TMW: Tsushima Middle Water, ESIW: East Sea Intermediate Water, LCW: Liman Cold Water, ESPW: East Sea Proper Water.

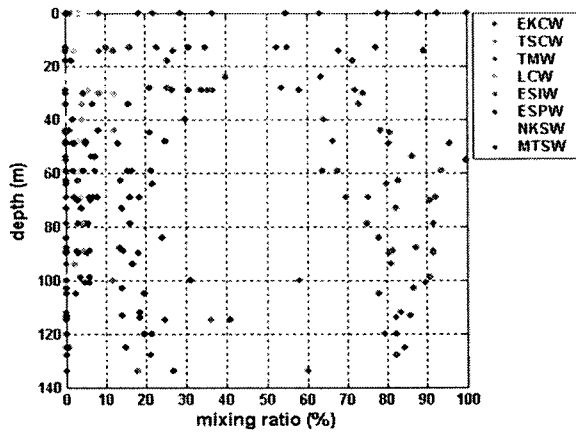


Fig. 6. A diagram representing the results of the OMP analysis on the source water type mixing. Waters at each depth in the X-section are deconvoluted to source water types. NKSW (North Korea Surface Water), EKCW (East Korean Coastal Water), MTSW (Modified Tsushima Surface Water), TSCW (Tartar Surface Cold Water), TMW (Tsushima Middle Water), LCW (Liman Cold Water), ESIW (East Sea Intermediate Water), ESPW (East Sea Proper Water).

는 ESIW와 LCW의 중간 값을 보였고(Fig. 5c), 영양염은 ESIW와 ESPW 값 사이에 있었지만, ESIW의 특성치에 가까웠다(Fig. 5d-f).

각 인자의 특성치 관점에서 KSBCW의 기원으로 보이는 후보를 살펴보면, 수온으로는 LCW와 ESIW이고 염분으로는 ESPW이며, 밀도로는 LCW이다. 용존 산소로는 TMW이고, pH로는 LCW와 ESIW이며, NTA로는 LCW와 ESIW이고, 영양염은 모두 ESIW임을 나타내었다(Table 3). 따라서 개별 물리·화학 인자의 특성치로는 Table 2에 정리된 바와 마찬가지로 기원에 관해서 다양한 의견이 제시될 수 있는데, 이는 대한해협 저층냉수가 단일해수가 아닐 것이라는 점을 강력히 시사하고 있다.

OMP 분석 결과

우선 동해에서 발견된 8종류의 모든 기원해수에 대해 OMP 분석결과 중에서 대한해협 부근에 설정한 X-정선에 해당하는 결과만을 발췌해서 Fig. 6으로 제시하였다. 각 기원해수의 수심에 따른 조성비 분포를 보면, 전체적으로는 표층에서 저층까지 TMW의 영향이 주도적이다. 그 밖에 표층에서는 EKCW와 MTSW 두 해수가 조성에 참여

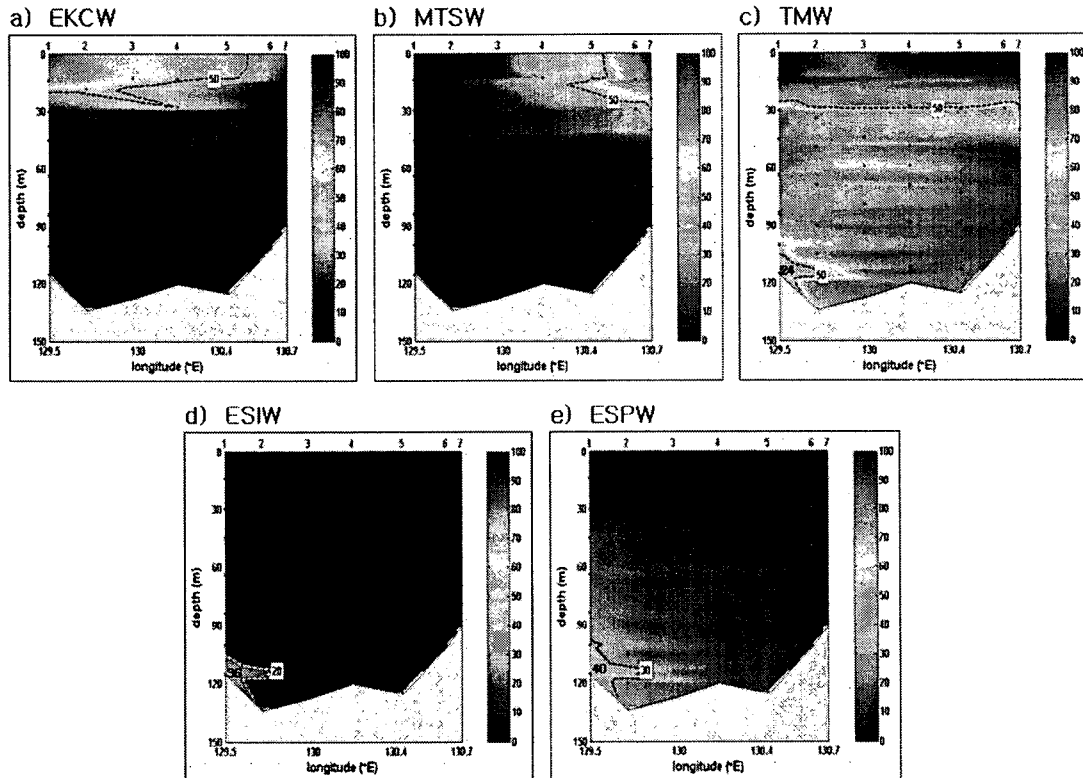


Fig. 7. The results of the OMP analysis on mixing ratio (%) in X-section are presented as cross sections for each source water types; a) EKCW (East Korean Coastal Water), b) MTSW (Modified Tsushima Surface Water), c) TMW (Tsushima Middle Water), d) ESIW (East Sea Intermediate Water), e) ESPW (East Sea Proper Water).

하고 있고, 중·저층에서는 ESPW가 참여하였으며, ESIW가 미약하게 영향을 주는 것으로 나타났다.

다음으로는 대한해협 해수에 대해 EKCW, MTSW, TMCW, ESPW, LCW의 5가지 기원해수만 고려해서 살펴 보았다(Fig. 7). 먼저, EKCW는 표층에서 대략 수심 30 m 부근까지 영향을 미치고, X1-X2에 중심 세력이 위치하고 있었다. 대한해협 서수도 상층부를 통해 동해로 북상함을 나타내었다(Fig. 7a). MTSW는 표층에서 수심 30 m 부근까지 X5-X7에서 혼합률 50% 이상을 보였고, 동수도로 진입하는 모습을 보였다(Fig. 7b). TMW는 수심 30 m 이하에서 우세하게 분포하였고, 대한해협 저층냉수가 형성된 X1-X2의 수심 120 m 부근에서는 혼합률 24~50% 정도를 나타내었다(Fig. 7c).

ESIW는 X1-X2의 수심 120 m 부근에서만 혼합률 20~36% 정도를 보였다(Fig. 7d). ESPW는 동수도보다 서수도의 중·저층에서 영향을 미치며, X1-X2의 수심 120 m 부근에서 혼합률 30~40% 정도를 나타내었고(Fig. 7e), Lim (1969)이 6~7월에 대해 계산한 동해 고유수의 혼합률 30~50% 값과 유사한 범위를 보였다.

혼합률 계산 결과는 Table 4에 정리하였다. 대한해협 저층냉수의 중심은 TMW(24%) + ESIW(36%) + ESPW(40%)로 구성되어 있고, 동해의 내부에서 기원한 해수가 우세함을 알 수 있다. 경계 부분에서는 TMW(50%) + ESIW(20%) + ESPW(30%)로 구성되어, TMW의 영향이 우세해지는 것으로 나타났다.

그런데 ESPW는 통상 동해 내부에서 수심 200 m가 넘는 곳에서 발견되는 해수로서 수심 120 m 정도인 대한해협의 저층냉수를 만드는데 크게 기여한다는 결과는 역학적인 설명을 필요로 한다. 또한 ESIW의 남하는 최대 10 cm sec^{-1} 로 유속계로 직접 측정되는데 반해 ESPW의 남하는 실측된 예가 없어서(조양기, personal communication) OMP 분석 결과는 앞으로 검증을 거쳐야 하는 것이다. 이에 대한 가능한 설명으로는 저층냉수가 더 북쪽의 깊은 곳에서 만들어진 다음에 지형을 따라 얽은 곳으로 흘러 내려 올 가능성이 있다. 이 경우 ESPW도 직접 냉수 형성에 참여할 수 있다.

ESPW를 제외시키고 OMP 분석하면 ESPW 조성비만큼

Table 4. The relative contribution of each source water type (%) to the Korea Strait Bottom Cold Water as calculated by OMP analysis in its core and boundary.

Source water type	Core	Boundary
TMW (Tsushima Middle Water)	24	50
ESIW (East Sea Intermediate Water)	36	20
ESPW (East Sea Proper Water)	40	30

이 ESIW로 바뀌어 늘어난다. 이 경우가 Cho and Kim (1996)의 주장과 더욱 잘 부합한다. 하지만 결과의 신뢰도의 지표가 되는 잔차가 10%까지 늘어난다. 이는 고려된 기원 해수만으로는 설명되지 않는 해수 부피가 10%나 됨을 뜻하는 것으로 ESPW를 고려했을 경우인 5% 미만에 비해 만족스럽지 못한 해답이 된다. 여기서 역학적인 설명과 최적화된 해답 사이의 불일치는 향후 연구로 미루기로 한다.

결과를 불확실하게 만드는 다른 요인은 ESIW의 특성치가 명확하게 규정되기 어렵다는 점이다. 이 해수는 동해 북부의 표층에서 침강하여 동해 남부로 이동하는데, 생성 시에 동해수 부피의 70%를 차지하는 동해 심층수로부터 완전히 독립적이기 어렵고 이동하는 동안 혼합과 확산에 의한 변질을 겪기 때문에 조성비의 신뢰도를 떨어뜨린다. 발생지부터 대한해협에 이르는 동안의 ESIW의 특성 변화는 동해에서 흥미로운 연구 주제 가운데 하나로 지목할 만하다.

대한해협 저층냉수와 동해 내부 순환과의 관계

대한해협 저층냉수의 특성치와 일치하는 자료들의 공간적인 분포를 파악하기 위해 김과 이(2004)가 제시한 수온, 염분, 용존 산소 등 3개 변수들을 조합하여 자료들을 위도-경도 평면상에 표시하는 방법을 이용하였다. 대한해협 저층냉수의 필요조건으로는 Table 1에 제시한 바와 같이, 수온 10°C 이하, 염분 34.1~34.3, 용존 산소 4.7~5.0 mll 를 적용했다. 조건을 만족하는 자료는 위도-경도 평면상에 등수심선과 함께 나타내었으며(Fig. 8 and Fig. 1) Table 5에 정리하였다.

조건을 만족하는 자료들이 북쪽에서 남쪽으로 해안선을 따라서 분포하고 있고, 수심 100~500 m 사이의 대륙붕면을 따라서 연결됨을 알 수 있다(Fig. 8). 즉, 북쪽에서 남쪽으로 연안과 평행한 대륙붕 면을 따른 내부의 흐름이 있음을 유추할 수 있다(김과 이 2004).

대한해협 저층냉수의 특성치와 일치하는 자료들의 수심 분포를 보면, 37°N 부근의 Y4에서는 수심 50 m 근방에 위치하고, Y3에서는 114 m, Y2에서는 75~95 m로 대체적으로 남쪽으로 오면서 점차 깊어지는 모습을 보였다. 그리고 Y2에서는 특성치와 일치하는 수심이 75~95 m를 보여 냉수의 두께가 적어도 20 m가 됨을 알 수 있었다(Table 5).

기원해수를 분석한 결과는 TMW, ESIW, ESPW가 서로 섞여 있음을 나타내었고, 이는 상층에서는 TMW가 북상하고, 저층에서는 ESIW와 ESPW가 남하하는, 서로 반대 방향의 흐름과 이에 따르는 섞임이 있었음을 지시한다(Table 5).

이상을 정리하면, 이 연구의 결과로 대한해협 저층냉수는 물리·화학 특성치 관점에서는 단일 기원해수가 아님이 분명하게 드러났다. OMP 분석 결과에 따르면 저층냉

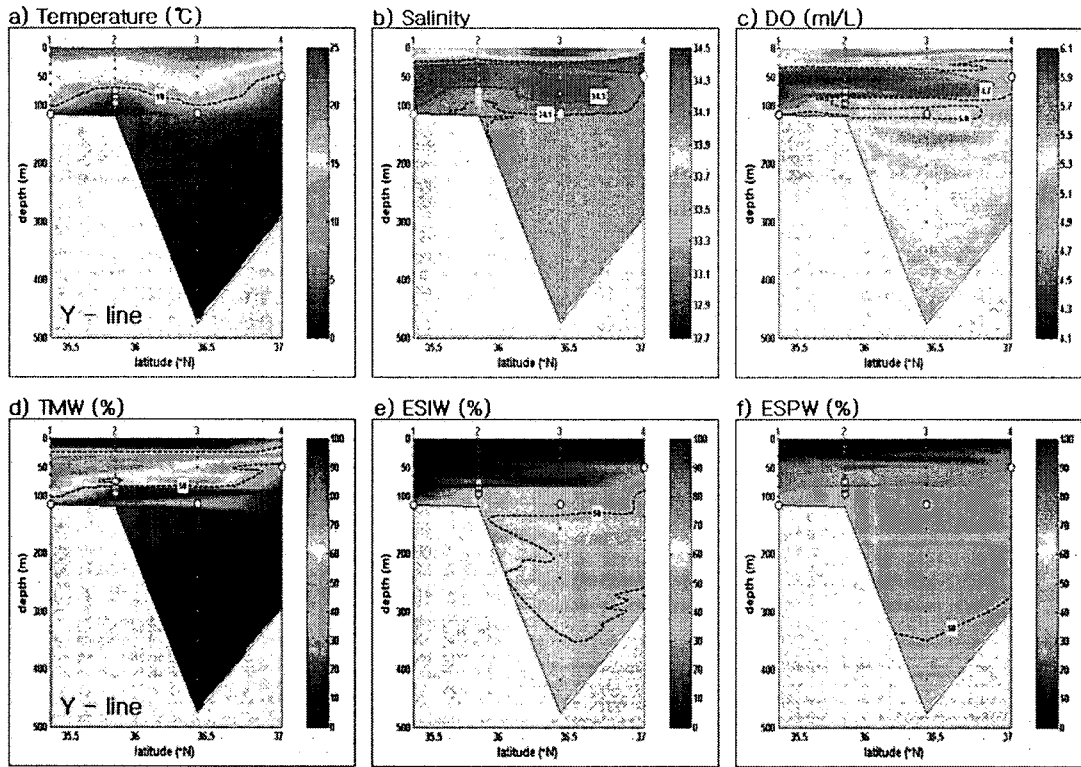


Fig. 8. Vertical profiles of physical properties along the Y-section: a) temperature, b) salinity, c) dissolved oxygen (m/l). Boundary conditions for the Korea Strait Bottom Cold Water are marked by dotted lines; d)-f) are the graphic presentation of OMP analysis on source water mixing, d) TMW (Tsushima Middle Water), e) ESIW (East Sea Intermediate Water), f) ESPW (East Sea Proper Water).

Table 5. Hydrographic data meet the qualification of the Korea Strait Bottom Cold Water. Last three columns represent the result of optimum multiparameter (OMP) analysis on source water type mixing percentage.

Sta.	Lat (°N)	Long (°E)	Depth (m)	Temp (°C)	Sal	DO (m/l)	pH	NTA ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	SiO ₄ ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	NO ₃ ($\mu\text{mol g}^{-1}$)	PO ₄ ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	TMW (%)	ESIW (%)	ESPW (%)
Y1	35.35	129.55	115	4.8	34.2	5.00	7.65	2338.9	31.3	17.0	1.4	24	36	40
			75	7.9	34.2	4.92	7.73	2331.1	25.2	14.3	1.2	39	28	33
Y2	35.83	129.63	85	4.3	34.1	4.99	7.61	2335.4	31.6	17.8	1.5	20	38	42
			95	2.7	34.1	5.00	7.56	2334.0	33.1	19.6	1.6	11	45	44
Y3	36.44	129.89	114	7.6	34.2	4.83	7.75	2337.9	24.0	14.5	1.1	38	28	34
Y4	37.00	129.70	49	8.7	34.2	4.88	7.75	2325.0	23.3	13.5	1.1	43	27	30

수는 TMW, ESIW, 그리고 ESPW의 3가지 기원이 다른 해수의 혼합물로 나타났다. 그리고, 대한해협 저층냉수는 연안을 따라서 남하하는 동해 내부 순환의 결과물로 해석할 수 있었다.

이번 연구만으로는 대한해협 저층냉수의 기원 해수가 늘 TMW, ESIW와 ESPW로만 만들어지는지는 알 수가 없다. 따라서, 대한해협 부근의 해황이 동해 전체 순환의 중요한 경계 조건이 되고, 대한해협 저층냉수가 동해 내부

순환의 고리 상에 있음을 참작하면, 저층냉수의 기원에 대해 지속적인 모니터링을 하게 되면 동해내부의 순환을 이해하는데 크게 기여할 수 있을 것이라 여겨진다. 한편 최근에 김(2001)은 지금까지 알려진 것과는 달리 동해에서 기원한 냉수가 남해로 크게 확장될 수 있음을 보였다. 이는 동서남해가 종래의 해류도가 제시하는 것 보다 훨씬 강력하게 연결되어 있음을 가리키는 것이어서 예의주시할 필요가 있다.

4. 요약 및 결론

여름철에 대한해협 서수도 저층에는 냉수가 일시적으로 발견된다. 한편 여름철에 울기·감포의 표층에서도 용승 냉수가 나타난다. 이 둘의 기원이 같은지를 알아보기 위해 먼저 대한해협 저층냉수의 가장 뚜렷한 특징인 수온 10°C 이하인 해수의 물리·화학 특성들을 살펴보았다. 그리고 이들 특성치와 울산·감포 연안의 용승 냉수의 특성치를 비교 분석한 결과 이들의 기원은 서로 다른 것으로 판명되었다. 그리고 대한해협 저층냉수에 대해서는 다인자최적화(Optimum Multiparameter) 방법을 적용시켜서 기원해수 혼합률 관점에서 대한해협 저층냉수의 기원을 분석하였다.

조사시기인 초여름에 대한해협 저층냉수는 서수도쪽 수심 100 m 부근에 국지적으로 분포하였고, 냉수의 두께는 20~30 m에 불과해서 냉수가 갯 출현하기 시작하는 시기였던 것으로 판단되었다. 주변 해수(대마난류 중층수)에 비해 물리적인 특성은 저온·저염이었고, 화학적인 특성은 화학적 변수들의 농도가 높은 해수임을 나타내었다.

대한해협 저층냉수는 울산·감포 연안의 표층에 출현하는 냉수보다 고염이고, 오래된 해수이며, 좀더 무거운 해수임을 나타내어, 두 냉수간의 물리·화학적 특성이 달랐고, 또한 기원이 확실하게 다를 수 있었다.

대한해협 저층냉수의 기원에 관해서는 물리·화학 특성에 따라서 Tsushima Middle Water, Liman Cold Water, East Sea Intermediate Water, East Sea Proper Water 등으로 다양하게 제시되어 이미 단일 기원해수가 아닐 것으로 예상되었다. 다인자 최적화 방법으로 분석한 결과는 저층 냉수는 단일 기원해수가 아님을 지지하였고, TMW, ESIW, ESPW가 섞인 혼합수로 제시되었다. 대한해협 저층냉수는 연안을 따라서 남하하는 동해 내부 순환고리의 종단에 있는 것으로 유추되는데 이것이 남해까지 확장되어 남해 저층 냉수를 이루는지도 향후 연구 대상이다.

이번 연구만으로는 저층 냉수의 기원해수 조성의 변동성을 알 수가 없다. 또한 저층냉수가 남해의 어디까지 확장되는지 범위도 아직은 알려지지 못했다. 이런 궁금함에 더해 대한해협 부근에서 해황이 동해 전체 순환의 중요한 경계 조건이고, 저층냉수가 동해 내부 순환 고리와 연결되어 있음을 고려할 때, 지속적인 모니터링과 관심을 가져볼 가치가 충분하다고 판단된다.

사 사

미흡했던 논문이 송영호, 조양기 두분 심사위원의 지적과 조언으로 많이 향상되었음을 밝힙니다. 논문은 CREAMS II 자료를 사용한 것으로 이 조사에 참여한 분

들에게 바칩니다.

참고문헌

- 김윤배. 2002. 대한해협 저층냉수의 시공간 변동성 연구. 이학 석사학위 논문, 부산대학교. 37-41 p.
- 김일남. 2001. 최적화 다인자 분석방법(OMP)을 적용한 남해 수계 분석. 이학 석사학위 논문, 부산대학교. 121-122 p.
- 김일남, 이동섭. 2004. OMP 방법으로 분석한 동해의 수계 특성. *Ocean Polar Res.*, 26(4), 581-594.
- 김철호, 김 구. 1983. 한국 동해안에 출현하는 냉수괴의 특성과 기원. *한국해양학회지*, 18(1), 73-83.
- 박선영. 1997. 동해 심층수에서의 탄소 수지에 관한 연구. 이학 석사학위 논문, 서울대학교. 105 p.
- 박정길. 1972. 대한해협 수온 및 염분의 시간적 변동. *한국해양학회지*, 7(1), 15-18.
- 양한섭, 김평중, 이재철, 문창호. 1994. Ra동위체로 본 하계 동해 남부 연안해역에 출현하는 10°C 이하 냉수괴의 기원. *한국수산학회지*, 27(4), 404-412.
- 이원재, 조규대, 추효상. 1984. 해양 화학적 특성으로 본 대한해협의 수계. *한국수산학회지*, 17(3), 219-229.
- 임근식. 1983. 한국동남해역 냉수괴의 특성 및 기원. 이학 석사학위 논문, 서울대학교. 40 p.
- 조양기, 김 구, 김영규. 1997. 대한해협 서수도 냉수의 구조와 역학. *한국해양해양공학학회지*, 9(3), 132-139.
- 한상복. 1992. 한반도 주변의 해양관측: 과거, 현재, 미래. *한국해양학회지*, 27(4), 332-341.
- 한영호. 1972. 1월의 동해 남서해역에서의 열수지와 대한해협의 냉수괴. *한국해양학회지*, 7(1), 19-23.
- An, H.S. 1974. On the cold water mass around the south-east coast of Korean peninsula. *J. Oceanol. Soc. Kor.*, 9(1), 10-18.
- Byun, S.K. and S.D. Chang. 1984. Two branches of Tsushima Warm Current in the western channel of the Korea Strait. *J. Oceanol. Soc. Kor.*, 19(2), 200-209.
- Chang, S. and M. Uda. 1968. Oceanic front in the western part of the Japan Sea. Summary Report. Annual Meet. Oceanogr. Soc. Japan. Tokyo, Apr. 5-9, 1968.
- Cho, Y.K. 1995. Hydrography and a hydraulic model of currents in the Korea Strait. Ph.D. Thesis, Seoul National University. 142 p.
- Cho, Y.K. and K. Kim. 1996. Seasonal variation of the East Korea Warm Current and its relation with the cold water. *La mer*, 34, 172-182.
- Cho, Y.K. and K. Kim. 1998. Structure of the Korea Strait Bottom Cold Water and its seasonal variation in 1991. *Cont. Shelf Res.*, 18, 791-804.
- Defant, A. 1961. Physical Oceanography. Pergamon Press, New York. 729 p.

- Fukuoka, J. 1962. Characteristics of hydrography of the Japan Sea. *J. Oceanogr. Soc. Jap.*, 20, 180-188.
- Johnson, D.R. and W.J. Teague. 2002. Observations of the Korea Strait bottom cold water. *Cont. Shelf Res.*, 22, 821-831.
- Kim, K., K.-R. Kim, J.-Y. Chung, B.-H. Choi, S.-K., Byun, G.H. Hong, M. Takematsu, J.-H. Yoon, Y. Volkov, and M. Danchenkov. 1996. New findings from CREAMS observations: water masses and eddies in the East Sea. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 31, 155-163.
- Kim, K. and R. Legeckis. 1986. Branching of the Tsushima Current in 1981-83. *Prog. Oceanogr.*, 17(3-4), 256-276.
- Lee, J.C. 1983. Variation of sea level and sea surface temperature associated with wind-induced upwelling in the southeast coast of Korea in summer. *J. Oceanol. Soc. Kor.*, 18(2), 149-160.
- Lee, J.C. and J.Y. Na. 1985. Structure of upwelling off the southeast coast of Korea. *J. Oceanol. Soc. Kor.*, 20(3), 215-228.
- Lee, J.C. and W. Chung. 1981. On the seasonal variations of surface current in the eastern sea of Korea. *J. Oceanol. Soc. Kor.*, 16(1), 1-11.
- Lee, T. and I.N. Kim. 2003. Chemical imprints of the upwelled waters off the coast of the southern East Sea of Korea. *J. Oceanol. Soc. Kor.*, 38(3), 101-110.
- Lim, D.B. 1973. The movement of the cold water in the Korea Strait. *J. Oceanol. Soc. Kor.*, 8(1), 46-52.
- Lim, D.B. and S.D. Chang. 1969. On the cold water mass in the Korea Strait. *J. Oceanol. Soc. Kor.*, 4(2), 71-82.
- Nishida, K. 1926. Report of the oceanographic investigation. *J. Imp. Fish. Exp. Sta.*, 1, 68.
- Nishida, K. 1955. Results of oceanographic investigation of the Japan Sea and adjacent waters. Hiroshima Univ. 42 p.
- Peng, T.H., J.J. Hung, R. Wanninkhof, and F.J. Millero. 1999. Carbon budget in the East China Sea in spring. *Tellus*, 51B, 531-540.
- Ro, Y.J., M.J. Park, S.R. Lee, and J.C. Lee. 1995. Structures and variability of the T-S field and the current across the Korea Strait. *J. Oceanol. Soc. Kor.*, 30(4), 237-249.
- Seung, Y.H. 1984. A numerical experiment of the effect of coastline geometry on the upwelling along the east coast of Korea. *J. Oceanol. Soc. Kor.*, 19(1), 24-30.
- Seung, Y.H. 1992. A simple model for separation of East Korean Current and formation of North Korean Cold Current. *J. Oceanol. Soc. Kor.*, 27(3), 189-196.
- Uda, M. 1934. The results of simultaneous oceanographic investigations in the Japan Sea and its adjacent waters in May and June, 1932 (in Japanese). *J. Imp. Fish. Exp. Sta.*, 5, 57-190.
- Uda, M. 1936. Results of simultaneous oceanographic investigations in the Japan Sea and its adjacent waters in October and November, 1933 (in Japanese). *J. Imp. Fish. Exp. Sta.*, 7, 51-151.
- Wüst, G. 1935. Schichtung und Zirkulation des Atlantischen Ozeans. Das bodenwasser und die Stratosphäre. *Wissenschaftliche Ergebnisse der Deutschen Atlantischen Expedition "Meteor" 1925-1927*, 6, 109-288.
- Yoon, J.H. 1982. Numerical experiment on the circulation in the Japan Sea, Part : Formation of the East Korean Warm current. *J. Oceanogr. Soc. Jap.*, 38, 43-51.
- Yun, J.H., S.H. Kang, K.D. Cho, and C.H. Moon. 1992. On the Bottom Water in the Western Channel in the Korea Strait(1): The inflow path of the bottom cold water. *J. Kor. Fish. Soc.*, 25(1), 1-14.

Received Aug. 27, 2004

Accepted Nov. 29, 2004