

Article

OMP 방법으로 분석한 하계 동해의 수계 특성

김일남* · 이동섭

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

Summer Hydrographic Features of the East Sea Analyzed by the Optimum Multiparameter Method

Il-Nam Kim* and Tongsup Lee

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

Abstract : CREAMS II carried out an intensive hydrographic survey covering almost entire East Sea in 1999. Hydrographic data from total 203 stations were released to public on the internet. This paper summarized the results of water mass analysis by OMP (Optimum Multiparameter) method that utilizes temperature, salinity, dissolved oxygen, pH, alkalinity, silicate, nitrate, phosphate and location data as an input data-matrix. A total of eight source water types are identified in the East Sea: four in surface waters (North Korea Surface Water, Tatar Surface Cold Water, East Korean Coastal Water, Modified Tsushima Surface Water), two intermediate water types (Tsushima Middle Water, Liman Cold Water), two deep water types (East Sea Intermediate Water, East Sea Proper Water). Of these NKSW, MTSW and TSCW are the newly reported as the source water type. Distribution of each water types reveals several few interesting hydrographic features. A few noteworthy are summarized as follows: The Tsushima Warm Current enter the East Sea as three branches; East Korea Coastal Water propagates north along the coast around 38°N then turns to northeastward to 42°N and moves eastward. Cold waters of northern origin move southward along the coast at the subsurface, which exemplify the existence of a circulation cell at the intermediate depth of the East Sea. The estimated volume of each water types inferred from the OMP results show that the deep waters (ESIW + ESPW) fill up *ca.* 90% of the East Sea basins. Consequently the formation and circulation of deep waters are the key factors controlling environmental condition of the East Sea.

Key words : 최적화 다인자 분석(OMP), 동해(East Sea), 기원해수(source water type), 부피(volume)

1. 서 론

동해는 북서태평양의 연해로서 아시아 대륙과 일본열도로 둘러싸인 반폐쇄된 지역해이다. 동해는 마름모꼴에 가까운 형태로 남북과 동서 방향 대각선 길이는 약 1,000 km에 이르고 표면적은 $1.1 \times 10^6 \text{ km}^2$ 인 크지 않은 바다이다. 그러나 내부는 수심이 깊은 세 개의 분지로 이루어져

다. 최대 수심은 4,049 m나 되고 평균 수심은 약 1,600 m로서 해수부피는 약 $1.69 \times 10^6 \text{ km}^3$ 이다(Kim *et al.* 1991). 동해는 지중해처럼 생겼지만 일본분지 북쪽에서 심해수가 만들어지기 때문에 대양적인 특징도 지니고 있어서 “축소판 대양(miniature ocean)”이란 별명이 붙여지게 되었다(이와 승 1994; Kim *et al.* 2001).

동해는 중앙부의 40°N 부근에 발달한 아극전선(subpolar front)을 경계로 남쪽의 난수역과 북쪽의 냉수역으로 나뉜다. 난수역은 대한해협으로 유입되는 해수에서 열과 염을

*Corresponding author. E-mail : oneman01@pusan.ac.kr

공급받고 쏘야, 쓰가루 해협을 통해 북서태평양으로 내보낸다(Yasui *et al.* 1967; Moriyasu 1972). 냉수역에서는 겨울철 표층 냉각으로 중·심층수가 만들어지기 때문에 동해 내부 전체의 열·염 순환을 구동시키는 중요한 과정이 일어난다(Kim *et al.* 1991; Seung and Kim 1993).

동해에 대한 연구는 총독부 수산과에서 1917년 5월에 구룡포에서 울릉도에 이르는 정선을 설정하고 약 10해리 간격으로 11개의 정점과 울릉도 주변에 4개의 정점 등 총 15개의 정점에서 정선관측을 시작으로, 1919년에는 울릉도~독도간 정선을 조사하였고, 1932년에는 동해를 포함한 한반도 전 주변해역에서 동시관측을 하였고 이를 기초자료로 하여 수괴와 순환의 기본 형태를 제시하였다. 1942년 이후에는 제2차 세계대전으로 인해서 해양자료가 군사비밀로 분류되어 해양관측이 제대로 이루어지지 않았다. 1945년 8월 이후에는 간헐적으로 해양관측이 이루어졌고, 1952년 이후에야 연안 및 정선해양관측이 재개되면서, 오늘날까지 해양관련 기관과 학자들이 연구를 진행해왔다(한 1992; 이와 승 1994).

Lim and Chang(1969), 박(1972), Lim(1973), An(1974), 김과 김(1983) 등은 대한해협 저층냉수에 관한 기원과 구조에 관해 연구를 하였고, Kawabe(1982a, b), Yoon(1982a, b), Hong and Cho(1983), Byun and Chang(1984), Seung(1992) 등은 관측 자료와 모델 등을 이용하여 대마난류수의 유입량, 복상 한계 및 계절적 변화에 대한 연구를 하였으며, An(1974), 김과 김(1983), Lee(1983), Seung(1984), Lee and Na(1985), Lee and Kim(2003) 등은 울기 연안에서 발생하는 용승의 물리·화학적 특성과 냉수의 기원에 관해 언급을 하였다. 또한 Kim *et al.*(1991) 등은 울릉분지 내의 물리·화학적 특성에 대한 연구를, 문 등(1996, 1998), 조 등(1997), 양 등(1997)은 동해 아극전선역을 중심으로 물리·화학·생물학적인 특성에 대해서 연구를 하였다. 그리고 최근에는 동해 내부 심층순환의 변화에 대한 연구가 활발하다(김 등 2003; Gamo *et al.* 2001; Kim *et al.* 2001; Kang *et al.* 2003).

1930년대 일본인 Uda가 50여 척의 선박을 동원하여 동해 전 해역에 대해 조사한 이래 수 십년간 냉전시대가 지속되어 북부해역에 대한 조사가 불가능해서 동해 전체에 대한 이해가 진전되지 않았다(이와 승 1994). 하지만 최근에 한국-일본-러시아 공동협력 분위기가 조성되면서 Uda의 조사 이후로 60년 만에 동해 북부에 대한 공동조사 CREAMS I이 1993년~1996년까지 수행되면서 동해에 관한 새로운 사실들이 밝혀지기 시작하였다.

CREAMS I을 통해 Kim *et al.*(1996) 등은 동해 고유수를 세부적으로 나눌 수 있음을 보여주었고, 중층에서 과거에 비해 수온과 용존 산소가 증가하였는데 이는 최근에 중층수의 활발한 형성이 있음을 암시하였다. Kim and

Kim(1996)은 심층수 형성 모드가 과거에는 저층수 형성에서 최근에는 중·심층수 형성으로 변화되었고, Moving-Boundary Box 모델을 이용하여 표층에서 냉각으로 인해 침강된 해수가 완전한 심층수로 전환되는데 걸리는 시간이 대략 80년 정도라고 예상하였다.

CREAMS I에서는 대부분 동해 북부 해역에 대해 조사하였고, 과거에 비해 동해의 새롭게 변화된 사실에 초점을 맞추었다. 동해 전체에 대한 이해를 높이기 위해 1999년 7월~8월에 걸쳐 동해 남·북부를 포함하는 CREAMS II가 수행되었다. 동해의 해황 및 순환에 대해 Uda(1934)가 해류 모식도를 발표한 이후 Naganuma(1972) 등이 이를 보완했지만 전반적인 순환 형태는 별 차이가 없었으며(김과 정 1989), 그 이후로는 각 해류의 변동성 및 심층 순환에 대한 연구가 활발하였다.

그래서 Uda(1934)가 발표한 이후의 동해 전반적인 흐름에 관해서 살펴볼 필요가 있다. 대부분의 연구자들이 물리적인 특성만을 이용한 사례가 많았으며, 김 등(1991)이 결보기 산소소모율과 영양염들을 이용하여 동해 해수의 새로운 추적자로서 활용 가능성을 제시하였다. CREAMS II에서 관측한 자료는 수온, 염분, 용존산소, pH, 알칼리도, 규산염, 인산염, 질산염 등 물리·화학 인자들을 포함하고 있어 우리나라 해역처럼 다양한 기원해수가 혼합하여 이루어지는 해역에서는 Tomczak and Large(1989)가 제시한 잔차가 최소인 혼합률을 계산하는 OMP(Optimum Multi-parameter) 방법이 적절함을 김(2001)이 보였다.

본 연구에서는 CREAMS II 자료를 이용하여 첫째, 수온, 염분, 용존 산소 등 3개 변수들을 적절하게 조합하여 조건을 달리하면서 자료들을 위도-경도 평면상에 표시하는 방법으로 기원해수를 정의하고, 둘째, 위의 방법으로 선정된 기원해수를 이용하여 OMP 방법으로 혼합률을 정량화하여 각 기원해수의 흐름을 살펴보고자 한다.

2. 재료 및 방법

자료

CREAMS II는 1999년 6월 17일~7월 21일까지 동해 남부 해역을 대상으로 정점 1에서 정점 113에 대해 1차 조사를 하였고, 동년 7월 22일~8월 11일까지 동해 북부 해역을 대상으로 정점 114에서 정점 203에 대해 2차 순항조사를 하였다(Fig. 1). 조사자료는 CTD(수온, 염분, 용존 산소) 연속 측정 자료와 수심별 채수시료에서 pH, 알칼리도, 영양염(규산염, 인산염, 질산염), CFC 등을 측정하였으며, 개괄적인 자료를 인터넷 http://sam.ucsd.edu/onr_data/hydrography.html에 게시하였다.

인터넷에 게재된 자료 중 위도, 경도, 수심 등 위치 정보를 포함한 수온, 염분, 용존 산소, pH, 알칼리도, 규산염,

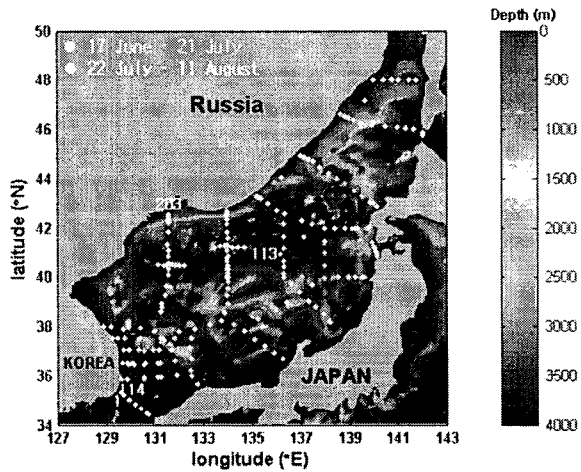


Fig. 1. Map showing the hydrographic stations and topography of study area.

인산염, 질산염 자료로 2644×11 자료행렬을 만들어 OMP 분석에 사용하였다.

OMP 알고리즘

OMP 이론적인 배경

OMP 분석의 기본적인 구조는 다음과 같이 표현된다.

$$Gx - d = R$$

식에서, G 는 기원해수(source water type)의 특성치로 구성된 행렬이고, x 는 혼합물, d 는 관측값, R 은 잔차(residuals)를 나타낸다. n 개의 수괴를 표현하는데 m 개의 기원해수 특성치가 있어야 하고 분석을 위해서 $m-1$ 개의 변수가 이용된다.

G 행렬은 $m \times n$, 혼합물 x 는 $n \times 1$, 관측값 d 는 $m \times 1$ 의 차원(dimension)을 가진다. 그리고 G 행렬의 마지막 행과 d 의 마지막 원소는 1이 되는데, 이는 해수의 질량을 보존 시키기 위함이다.

간단한 예로, $n=m=3$ 인 경우에는 T-S 분석에서 고전적인 삼각도법(classical mixing triangle)을 구성하여 수괴 혼합률을 구할 수 있고, 다인자 분석방법(multiparameter analysis)은 $n=m$ 인 경우지만 $n > 3$ 인 경우에 적용된다. 두 분석방법에는 잔차(residual vector)가 존재하지 않는데 이는 $n=m$ 인 정방행렬(square matrix)이기 때문에 역행렬(inverse matrix)이 존재하여 inverse method에 의해서 정확하게 해를 구할 수 있기 때문이다.

그러나 OMP 분석에서는 $m > n$ 인 과다 선형 방정식(overdetermined linear system)으로 구하고자 하는 해의 개수보다 방정식이 많은 경우로 주어지게 된다. G 행렬의 모든 행은 선형독립(linearly independent)이며, 구하고자 하는 해 x 는 $R^T R$ 최소가 되도록 한다.

x 의 모든 원소들은 양의 값 또는 음의 값을 가지게 되는데, 물리적인 현상인 혼합은 음의 값을 가질 수 없기 때문에 OMP 분석방법에서는 다음과 같은 강제조건

(가) 질량보존 조건: $\sum_{i=1}^n x_i = 1$

(나) 비음수해 조건: $x_i \geq 0$

에 의해서 해의 공간(solution space)인 $S(x)$ 에서 Kuhn-Tucker(Menke 1984) 이론으로 $R^T R$ 을 최소화하는 해를 구하게 된다(Tomczak and Large 1989).

OMP 분석 절차

OMP는 다음과 같은 세 가지 가정에 근거를 두고 있다.

(가) 수괴(water mass)는 수형(water type)에 의해서 정의 될 수 있다.

(나) 분석에 이용되는 변수들은 상호간에 선형 독립적(linearly independent)이다.

(다) 모든 수괴는 수형들의 혼합물로 표현될 수 있다. 위의 3가지 가정을 기본으로 하여,

첫째, 기원해수 특성치를 구하여 $m \times n$ 인 G 행렬을 구성한다.

둘째, OMP 분석에 이용되는 변수들이 각각 표시하는 단위와 분산 정도가 다르기 때문에 다음과 같은 식을 이용하여 정규화(normalize)시킨다.

$$G'_{ji} = (G_{ji} - G_j) / \sigma_j \tag{1}$$

여기서, $G_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n G_{ji}$, $\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (G_{ji} - G_j)^2}$

셋째, 가중치를 구한다. 가중치를 부여하는 이유는 분석에 이용된 변수들의 정확성, 정밀도가 모두 다르기 때문에 해를 구하는데 각각이 기여하는 정도를 반영시키기 위함이다.

Tomczak and Large(1989)는 기원 해수가 출현하는 해역에서의 분산과 G 행렬에서의 각 변수의 분산을 이용하여 두 분산의 비율을 가지고 가중치를 계산하였다. 즉,

$$W_j = \sigma_j^2 / \delta_{jmax} \tag{2}$$

여기서 σ_j^2 는 G 행렬에서 구한 변수의 분산값, δ_{jmax} 는 기원 해수에서 구한 변수의 가장 큰 분산값이다.

하지만 위 식의 경우에는 시·공간적인 변화가 적은 큰 대양에서 적합하지만 계절적 변화가 심한 우리나라 해역에서는 적절치 못하다고 판단되어 Tomczak and Large (1989)가 제시한 가중치 산출식 (2)를 수정하여 다음과 같은 식

$$W_j = \sigma_j / \text{measurement error} \quad (3)$$

을 써서 가중치를 구하였다. 단, 여기에서 사용된 변수 중에서 수온과 염분이 보존적인 성질이 가장 강하기 때문에 수온과 염분의 가중치는 같게 두었으며, 수온에서 구한 값을 이용하였다(Table 1).

넷째, 잔차(residual)를 최소화시키는 $w(Gx - d) = R$ 의 해를 구하기 위하여 강제조건 (가), (나)와 다음과 같은 식

$$\begin{aligned} R^T R &= (Gx - d)^T W^T W (Gx - d) \\ &= \sum_{j=1}^m W_j^2 \left(\sum_{i=1}^n G_{ji} x_i - d_j \right)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

을 이용한다.

3. 결과 및 토의

기원해수 판별

OMP 분석을 위해서는 먼저 기원해수를 찾아내서 특성을 제시하여야 한다. 물리학자들은 통상적으로 수온-염분 분포도를 분석해서 기원해수를 찾아낸다. 하지만 동해 심층처럼 수온과 염분이 미세한 변화를 보이는 곳에서는 (Fig. 6 of Kim *et al.* 1996) 기원해수로 정의해도 설득력이 크지 못하다. 또한 수온-염분 분포도 만으로는 기원해수의 공간적인 분포 특징이 쉽게 드러나지 않는다. 그래서 이 연구에서는 수온-염분 분포도 방법에 용존 산소를 추가하여 조건을 달리하면서 주어진 데이터들이 위도-경도 평면상에서 어떻게 분포하는지를 분석해서 기원해수를 정의하였다(Fig. 2). 그 결과 CREAMS II로 조사한 하계의

Table 1. Weight values assigned to each parameter for the OMP analysis.

Parameter	Temp	Sal	DO	Silicate	Nitrate	Phosphate	Alkalinity	pH
Weight value	103	103	25	30	18	1	37	24

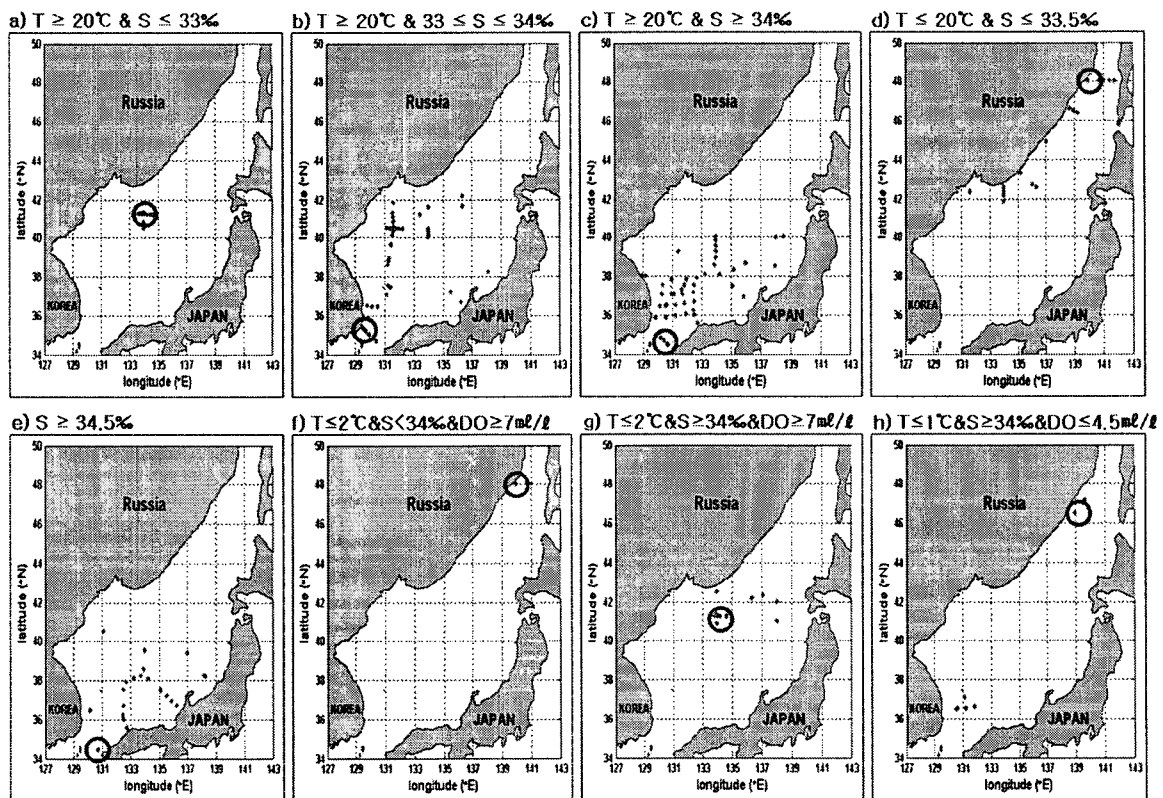


Fig. 2. Focal region (blue circle) and hydrographic stations (red dots) of each source water types. T, S and DO properties are shown for each water types; a) NKSW (North Korea Surface Water), b) EKCW (East Korean Coastal Water), c) MTSW (Modified Tsushima Surface Water), d) TSCW (Tartar Surface Cold Water), e) TMW (Tsushima Middle Water), f) LCW (Liman Cold Water), g) ESIW (East Sea Intermediate Water), h) ESPW (East Sea Proper Water).

동해는 총 8개의 성질이 다른 해수의 조합으로 이루어져 있는 것으로 판단되었다.

먼저, 고온이면서 최저염한 특성을 지닌 해수가 동해 중·북부 41°N 부근 표층에서 분포하였다. 이와 유사한 특성을 가지는 해수가 조 등(1997)이 1995년 10월 동해 아극전선 연구 수행중에 발견된 바 있다. 위도 37.5°N, 경도 133.5°E 부근에서 표층에서부터 수심 30 m까지 염분 32‰ 이하의 저염수가 출현하였는데, 연구자들은 이를 동해표층저염수(LSSW: Low Saline Surface Water)라고 정의하였고 양자강 유출수가 기원이라 보고하였다. 그런데 지금까지 아극전선 북쪽으로 양자강 희석수가 이동하는 것을 보여준 연구 결과가 없기 때문에 NKSW(North Korea Surface Water)라고 명명하였다(Fig. 2a). 이 해수덩이는 동해 북부 해역에서 최저염 표층수로 정의된다.

또 다른 저염 표층수가 일부는 대한해협에서 동해 연안을 따라 동해북부 해역까지 분포하고 있으며, 일부는 일본 연안에 분포하고 있다(Fig. 2b). 이는 대마난류의 한 지류로 동해 연안을 따라서 북상하는 동한난류(East Korean Warm Current)와 관계가 깊은 것으로 보이지만(Lee and Chung 1981), 동한난류수의 특성치가 명확하게 제시되어 있지 않기 때문에 이를 분포지역의 특징에 따라 EKCW(East Korean Coastal Water)라 하였다.

세 번째로, 고온-고염 표층수가 대한해협 동수도에서 북-북동방향으로 동해남부와 중부에 분포하고 있다(Fig. 2c). 이는 대마난류의 한 지류가 대한해협 동수도를 통해 동해로 북상하는 형태를 보이고 있으며, 박(1978)과 양 등(1991)이 정의한 대마난류 표층수(수온 > 20°C, 염분 < 33.80‰)와 수온의 범위는 일치하지만 염분의 특성치는 더 높기 때문에 MTSW(Modified Tsushima Surface Water)라 새롭게 정의하였다.

네 번째로 저온-저염 특성을 보이는 표층수가 타타르 해협에서 시베리아 연안을 따라서 분포하고 있었다(Fig. 2d). 이러한 저온-저염 표층수는 지금까지 알려지지 않았으며, 오호츠크해에서 타타르 해협을 통해 동해로 유입되었을 것으로 생각되었다. 새로 밝혀진 이 해수를 타타르 해협의 명칭을 따서 TSCW(Tatar Surface Cold Water)라 정의하였다.

다섯 번째로 염분이 34.5‰ 이상인 고염 해수가 대한해협에서 일본쪽 해안을 따라서 분포하였다(Fig. 2e). 이는 고염인 특징이 뚜렷한 대마난류 중층수이며(박 1978; 김과 김 1983; 양 등 1991), 지금까지 쓰이던 TMW(Tsushima Middle Water)로 그대로 표기하였다.

여섯 번째로 저온-저염(< 34‰)하면서 용존산소가 풍부한 중층수가 타타르 해협에서 발견되었다(Fig. 2f). 이는 타타르 해협을 통해 시베리아 연안 및 동해 북·서부 연안을 따라서 순환하는 리만해류(또는 북한한류)에서 기원

한 것으로서(Seung 1992) LCW(Liman Cold Water)라 정의하였다.

일곱 번째 기원해수로 LCW와 특성이 유사하고 LCW에 비해 고염($\geq 34\%$)인 특성을 보이는 해수가 동해 중부 40°N~42°N 해역에 분포하였다(Fig. 2g). Kim and Chung(1984)은 동해 중층수를 수온이 1~3°C이며, 염분은 34.05‰ 미만, 고용존 산소(>6.5 mll/l)로 정의한 바 있으며, Kim *et al.*(1991) 등은 수온 1.2~2.7°C, 염분 34.02~34.11‰로 정의하였다. 따라서 이 해수덩이는 동해 중층수임 알 수 있었고, ESIW(East Sea Intermediate Water)을 그대로 따랐다.

여덟 번째로, 1°C 이하의 저온이면서도 용존 산소 농도가 낮은 특성을 가지는 해수가 시베리아 연안과 동해 남부 37°N 부근에서 보였다(Fig. 2h). 이 해수는 지금까지 동해고유수(East Sea Proper Water)라고 알려진 것과(박 1979; 김과 김 1983; Uda 1934; Lim and Chang 1969; Kim *et al.* 1996) 일치하는 특성을 보여주었다. Lim and Chang(1969)은 동해 고유수를 수온 1°C 이하, 염분 34.00~34.05‰ 범위를 가지는 해수라고 정의하였고, 김과 김(1983)은 수온, 염분으로는 북한 한류수와의 구분이 모호하기 때문에 용존 산소량이 낮음(5.5~6.5 mll/l)을 특징으로 제시하였으며, 양 등(1991)은 수온 1°C 이하, 염분 34.02~34.16‰, 용존 산소 5.4~5.9 mll/l 범위로 정의하였다.

동해 고유수에 대한 관련 연구문헌을 대조해보면 조사 지역과 시기가 다르기 때문에 학자들마다 정의를 내린 기준에서 적지 않은 차이가 드러났다(김과 김 1983). 기원해수가 될 수 있는 조건의 관점에서 본다면, 외부에서 유입되는 해수라면 최초 유입되는 곳에서 기원 해수를 찾을 수 있고, 내부에서 생성되는 해수라면 최초 발생 지역을 찾아서 정의 할 수가 있다. 기원 해수로서 인정되고 있기는 하지만 생성 해역에 대한 정보가 부실해서 특성치가 불확실하다면 인자를 추가시켜 구분하는 것이 바람직해 보인다. 예를 들어 동해 고유수는 동해 내부에서 생성된 영향력이 큰 기원 해수로 인정되고 있지만 생성 해역에 대해서는 아직까지 명확하게 알려져 있지 않다. 결과적으로 수온과 염분 특성치가 불확실하게 알려져 있어서 다른 기원해수와 식별이 불분명하였다. 하지만 용존 산소를 고려하면 구분이 가능해진다. 동해 고유수를 공통적으로 인정하는 수온은 1°C 이하이며, 염분은 34‰ 이상이고, 용존 산소는 5 mll/l 이하라는 세가지 조건을 모두 만족시키는 해수로 정의하면 혼돈을 피할 수 있다.

동해 해수의 대부분을 차지하는 동해 고유수는 동해 북부의 표층 어느 곳에서 형성된 것만은 틀림없으나 이제 막 생성장소와 규모가 드러나는 단계에 와 있다(Talley *et al.* 2003). 여기에 더해서 심층수 생성이 기후변화의 영향으로 널뛰기 생성 또는 일시적 중단 가능성이 제기되었으

Table 2. Source water types and their characteristic parameter values used in the OMP analysis.

SWT	Features*	Focal Site	Focal depth (m)	Temp (°C)	Sal (‰)	DO (m//l)	SiO ₄ (μmol kg ⁻¹)	NO ₃ (μmol kg ⁻¹)	PO ₄ (μmol kg ⁻¹)	Alk (μmol kg ⁻¹)	pH
NKSW	surface HT&LS	40.668°N 133.988°E	4	23.697	32.658	4.91	3.20	0.14	0.02	2177.3	8.00
EKCW	surface HT&LS	35.350°N 129.550°E	5	21.381	33.706	5.08	3.30	0.05	0.07	2248.3	8.08
MTSW	surface HT&HS	34.422°N 130.725°E	3	22.464	34.220	4.99	1.90	0.04	0.04	2262.0	8.07
TSCW	surface LT&LS	48.001°N 139.989°E	4	13.620	32.750	5.98	2.20	0.02	0.06	2210.4	7.91
TMW	middle HS	34.422°N 130.725°E	55	19.528	34.504	4.91	2.90	0.85	0.17	2281.6	8.02
LCW	middle HDO&LS	48.001°N 140.752°E	34	1.742	33.829	7.90	6.20	3.61	0.45	2262.6	7.80
ESIW	deep HDO&HS	41.286°N 133.875°E	148	1.436	34.042	7.16	16.80	11.44	0.91	2264.5	7.68
ESPW	deep LDO<	46.483°N 138.972°E	1091	0.175	34.065	4.45	89.40	25.86	2.12	2284.6	7.39

*H(L)T: high (low) temperature; H(L)S: high (low) salinity; H(L)DO: high (low) dissolved oxygen.

며(Seung 1992), 또한 이미 1950년대 이후로 이 같은 급격한 변동을 겪고 있다는 증거를 제시하는 논문이 최근에 여럿 발표되었다(김 등 2003; Kim *et al.* 2001; Gamo 2001). 최근의 연구 결과에 따르면 동해 고유수는 Kim *et al.*(1996)의 주장대로 세 종류의 심해기원해수로 분류되어야 한다. 하지만 이들간의 특성 차이가 매우 미세하기 때문에 이 연구에서 사용하는 방법으로는 식별이 불가능하므로, 여건상 동해 고유수란 명칭을 그대로 사용하였다.

기존의 학자들이 동해 고유수에 대해 정의를 내린 기준을 보면, 수온 1°C 이하에 대해서는 공통적이고 염분 34‰을 기준으로 조금 변동이 있고, 용존 산소 값에 대해서는 다소 차이를 보이고 있다. 그래서 이 범위라면 누구나 인정할 수 있는 수온 1°C 이하, 염분 34‰ 이상, 용존 산소 4.5 m//l 이하로 기준을 잡아 동해 고유수의 기원해수 특성치로 정의하였다. 이 범위를 만족하는 관측 자료들은 동해 북부와 동해 남부 해역에서 각기 분리되어 분포하고 있었다. 동해 고유수의 생성 지역이 북부 해역임을 감안하여 기원 해수 특성치를 시베리아 연안 부근에 위치한 정점에서 추출하였고, 각 기원해수의 특성치는 Table 2에 요약해서 정리하였다.

기원해수의 분포

표층수와 중층수

표층수인 NKSW, EKCW, MTSW, TSCW와 중층수인 TMW, LCW의 수심에 따른 수직 분포를 Fig. 3에 그리고 세력이 가장 강한 수심에서 수평 분포를 Fig. 4에 조성비

율로 나타내었다.

NKSW(North Korea Surface Water)는 조성비 50% 이상을 기준으로 보면 표층에서 대략 수심 20 m까지 영향을 미침을 알 수 있고(Fig. 3a), 중심 세력은 표층과 수심 5 m 사이에 있으며 이 구간을 평균하여 수평 분포를 나타내었다(Fig. 4a). NKSW는 동해 중부 40°N~42°N 부근에 국지적으로 위치하고 있다. 이 연구에서 새로 규정한 NKSW는 동해 북서 해역 표층에 있는 저염수인데, 북한 영해 내의 자료가 없는 관계로 확실치는 않지만 북한 연안 또는 시베리아 연안에서 기원했을 것으로 여겨진다.

EKCW(East Korean Coastal Water)는 혼합률 50% 이상을 기준으로 하여 표층에서 대략 수심 30 m까지 영향을 미침을 알 수 있고(Fig. 3b), 중심 세력은 표층과 수심 10 m 사이에 있으며, 이 구간을 평균하여 수평 분포를 나타내었다(Fig. 4b). EKCW는 대한해협 서수도를 통과하여 동해 연안을 따라서 38°N 부근까지 북상하다가 계속 북진을 못하고 이안되면서 42°N 부근까지 북동진하는 흐름을 보이다가 그 이후로는 동진하는 흐름을 보였다.

Seung(1992)은 동한난류가 약 38°N 부근까지만 북상하고 북한난류와 충돌하며 북진이 저지되면서 이안되고, 이후 대체적으로 위도에 평행하게 흐르면서 사행한다고 하였다. 본 연구에서 동한난류의 특성을 보여주는 EKCW는 동해 연안을 따라서 북상하다가 38°N 부근에서 이안되는 현상은 일치하였지만, 위도에 평행하게 흐른다는 관측과는 맞지 않았다.

Seung and Kim(1993)은 수치모델을 통해 동한난류의

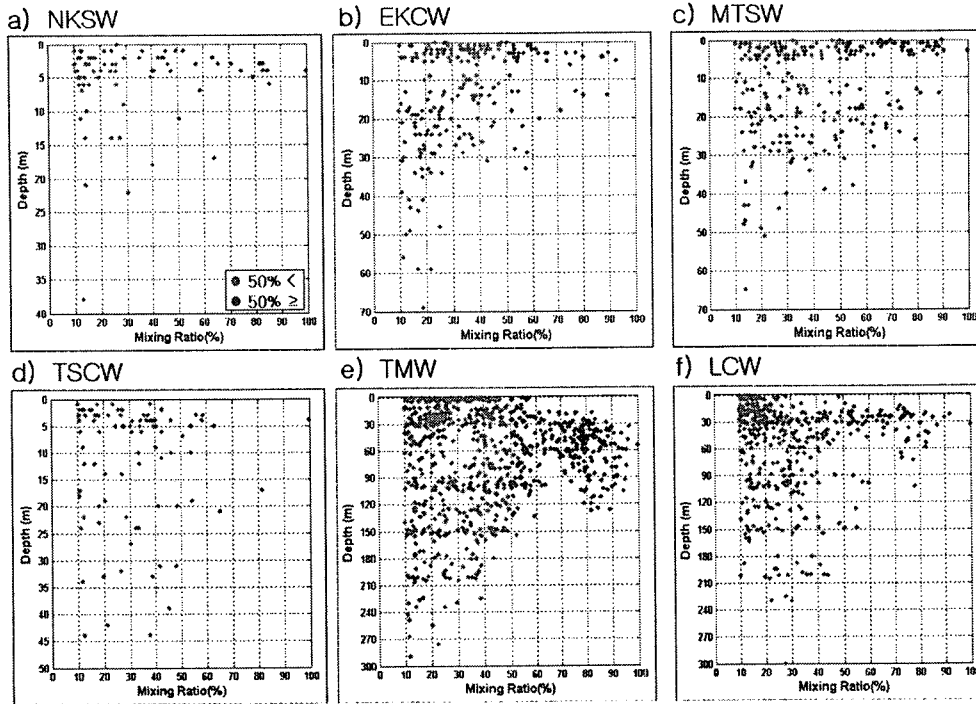


Fig. 3. Vertical profile of mixing ratio (%) of each source water types in the East Sea; a) NKSW (North Korea Surface Water), b) EKCW (East Korean Coastal Water), c) MTSW (Modified Tsushima Surface Water), d) TSCW (Tartar Surface Cold Water), e) TMW (Tsushima Middle Water), f) LCW (Liman Cold Water).

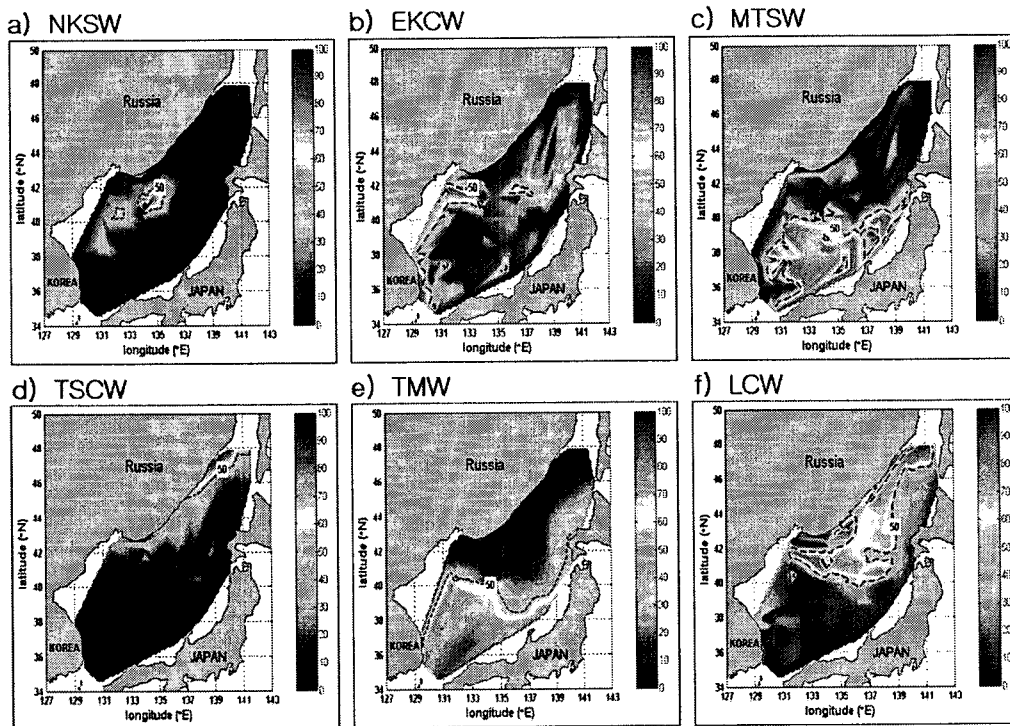


Fig. 4. Result of mixing ratio by OMP analysis (%) for each source water types at the dominating depth; a) NKSW (0-5 m), b) EKCW (0-10 m), c) MTSW (0-10 m), d) TSCW (0-10 m), e) TMW (60-70 m), f) LCW (30-40 m).

이안을 재현하였다. 이안점은 38°N 보다 북쪽으로 치우쳐서 나타났지만, 이안된 이후의 흐름은 이 연구의 결과와 유사하였다. 하지만 Seung and Kim(1993)은 모델을 수행하면서 서안 경계류의 관성 효과가 보다 과대 평가되면서 이안점이 실제보다 북쪽에 치우치게 된 것으로서 개선해야 할 점이라고 하였다.

아직까지 동해연안을 따라서 북상하는 대마난류의 지류가 계속 북상을 하는지와 이안점이 늘 38°N 부근인지는 북한 영해를 조사하지 못하기 때문에 확실하지 않다. 따라서 직접 조사할 기회가 생기기 전까지는 위성자료에 의존할 수 밖에 없는 상황이다.

MTSW(Modified Tsushima Surface Water)는 표층에서 대략 수심 40 m까지 영향을 미치고(Fig. 3c), 중심 세력은 표층에서 수심 10 m 구간에 있으며, 이 구간을 평균하여 수평 분포를 나타내었다(Fig. 4c). MTSW는 대한해협 동수도로 유입되어 중부의 40°N 부근까지 영향을 미치고 대체로 일본 연안을 따라 올라가서 쓰가루 해협을 통해 빠

져나가는 흐름을 보였다.

TSCW(Tatar Surface Cold Water)는 표층에서 대략 수심 20 m 부근까지 영향을 미침을 알 수 있고(Fig. 3d), 중심 세력은 표층에서 수심 10 m 사이에 있고, 이 구간을 평균하여 수평 분포를 나타내었다(Fig. 4d). TSCW는 타타르 해협을 통해 시베리아 연안을 따라서 블라디보스톡까지 약하게 남하하는 흐름을 보였고, EKCW 세력에 의해 더 남하하지 못하고(Fig. 4b) 시베리아 연안에만 머무르는 것으로 보였다.

TMW(Tsushima Middle Water)는 조성비 50% 이상을 기준으로 하여 표층에서 수심 150 m 부근까지 영향을 미치고(Fig. 3e), 중심 세력은 수심 30 m에서 120 m 구간에 위치하고 있으며, Hong and Cho(1983)가 제시한 중심 세력의 수심 46 m~135 m와 대체로 부합하였다. 수평 분포는 중심 세력의 중간 수심인 60 m와 70 m를 평균하여 나타내었다(Fig. 4e). TMW는 대한해협을 통과하여 타타르 해협 방향으로 동해 중부 40°N 부근까지 북상을 하다가

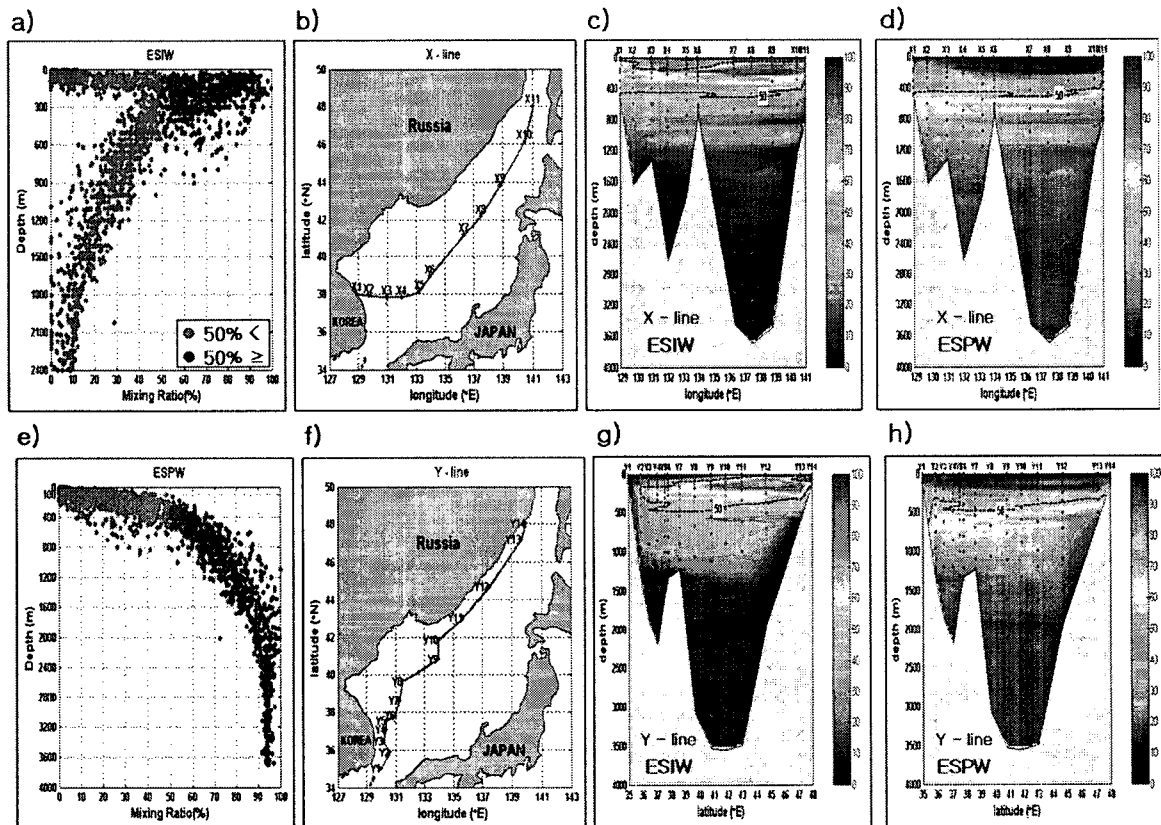


Fig. 5. OMP analysis result of mixing ratio (%) of deep source water types (ESIW&ESPW); a) vertical profile of mixing ratio of ESIW (East Sea Intermediate Water) in the study area, b) map showing X-line hydrographic stations, c) mixing ratio of ESIW in X-line, d) mixing ratio of ESPW in X-line, e) vertical profile of mixing ratio of ESPW (East Sea Proper Water) in the study area, f) map showing Y-line hydrographic stations, g) mixing ratio of ESIW in Y-line, h) mixing ratio of ESPW in Y-line.

북부의 냉수 세력에 막혀 사행하는 흐름을 보이며 일본 연안을 따라 쓰야 해협까지 북상하는 흐름을 보였다.

LCW(Liman Cold Water)는 표층에서 수심 150 m까지 영향을 미치는 것으로 보였고(Fig. 3f), 중심 세력은 수심 20 m에서 60 m 구간에 있었고 중간 수심인 30 m와 40 m를 평균하여 수평 분포를 나타내었다(Fig. 4f). LCW는 타타르 해협에서 기원을 했음을 알 수 있고, 타타르 해협에서 시베리아 연안과 동해 중부 40°N 부근까지 영향을 미쳤다. 40°N 남쪽으로는 세력을 확장하지 못하고 서진하면서 동해 북서 연안을 따라서 동해 중부 연안까지 남하하는 것으로 보였다.

심층수

조성비 50% 이상을 기준으로 하여 ESIW(East Sea Intermediate Water)는 표층 부근에서 대략 수심 900 m까지 영향을 미치고(Fig. 5a), ESPW(East Sea Proper Water)는 수심 100 m에서 바닥까지 영향을 미치는 것으로 나타났다(Fig. 5e). 동해 해수 부피의 대부분을 차지함을 알 수 있었고, 중심 세력을 정의하기가 모호하여 경도에 따른 변화를 보여주는 X-line과 위도에 따른 변화를 보이는 Y-line을 구성하여 ESIW와 ESPW의 흐름에 대해 살펴보았다.

먼저, 중부 연안에서 타타르 해협까지 연결하는 X-line에서 ESIW는 수심 50 m에서 400 m 부근까지 중심 세력을 형성하고, 타타르 해협에서 중부 연안쪽으로 남하하는 흐름을 보였다. 특히, 조성비 50% 등치선이 정점 X7 이후로 수심이 깊어지다가 중부 연안 지점인 X1, X2에 이르면서 상승하는 모습을 보였다(Fig. 5c). ESPW는 ESIW 바로 밑에 위치하며, 조성비 50% 등치선을 기준으로 하여 X-line의 수심 400 m 보다 깊은 곳은 모두 ESPW로 채워져 있었다(Fig. 5d).

대한해협에서 타타르 해협까지 연결하는 Y-line에서 ESIW는 표층 부근에서 수심 500 m까지 중심 세력을 형성하며, 타타르 해협에서 대한해협쪽으로 남하하는 흐름을 보였다. 남하 한계는 36°N 부근의 정점 Y2까지 중심 세력이 위치하고 있고 정점 Y1까지는 영향을 미치지 않는 것으로 보이지만(Fig. 5g), 추후 더 정밀한 조사가 요구되는 부분이다. ESPW는 ESIW의 바로 밑에 위치하고 있고, 수심 500 m 이하로는 ESPW 해수로 대부분 채워져 있었다(Fig. 5h). ESPW는 동해 전체에 걸쳐 분포하고 해수 부피의 대부분을 차지하고 있었다.

조성비 검증

OMP 분석에서 요구되는 조건 중에 하나가 기원해수의 질량보존(mass conservation)이다. 즉, 각각의 관측값은 정의된 기원해수의 혼합으로 이루어져있고 혼합률 합은

100%가 되어야 한다는 것이다. 예를 들어서 A라는 관측값에 대해 계산된 기원해수의 혼합률 합이 120%라면, 기원해수 보존에 관한 잔차(residual)는 20%가 되고 정의된 기원해수 외의 다른 특성을 가지는 또 다른 기원해수가 존재함을 의미한다. 그래서 잔차는 기원해수를 얼마만큼 잘 규정했는지를 판단할 수 있는 근거를 마련해준다.

본 연구에서는 하계 동해에 존재하는 기원해수로 8개를 선정하였으며, 새로 관측된 동해 북부 해역에 존재하는 표층 저염수인 NKSW와 대마난류수의 지류이면서 기존에 알려진 특성과는 조금 상이한 MTSW를 포함하는 것이 타당한 지를 검토하기 위해서, NKSW와 MTSW를 제외시키고 기원해수가 6개일 때와 NKSW를 포함시켜 7개일 때, 기원해수를 모두 포함한 8개일 때 기원해수 보존에 관한 잔차를 비교 검토하였다(Fig. 6).

먼저, 기원해수가 6개일 때 수심에 따른 잔차의 수직 분포를 보면(Fig. 6a), 표층에서 수심 200 m 부근에서 잔차가 5% 이상 자료들이 분포하고 있고, 잔차가 최대 50%까지 나타났다. 잔차가 5%가 넘는 자료들을 Fig. 6b에 위·경도 평면상에 표시하였다. 잔차가 10% 이상인 자료들은 위도 38°~42°N, 경도 131°~135°E 부근인 중·북부 해역에 집중되어 있으며, 이는 표층 저염수인 NKSW가 분포하고 있는 지역이다(Fig. 2a). 그리고 동해 남부 연안에서 일본 연안까지 산발적으로 잔차가 5% 이상인 자료들이 나타나고 있다. 이는 대마난류수의 흐름과 일치함을 알 수 있으며 대부분의 자료들이 표층에 위치하였다(Fig. 6b). 따라서 기원해수가 6개일 때에는 잔차가 비교적 커서 추가로 기원해수를 선정해야 할 필요가 있음을 나타내었다.

다음으로 NKSW를 포함시켜 기원해수로 7개를 고려했을 때 변화를 살펴보았다. 수심에 따른 잔차의 수직 분포를 보면(Fig. 6c), 기원해수가 6개일 때에 비해 잔차가 10%가 넘는 자료들이 많이 줄어들었고 최대 20% 이내로 나타났다. 잔차가 5% 이상인 자료가 표시된 위·경도 분포를 보면(Fig. 6d), 여전히 동해 남부 해역에 집중되어 있음을 알 수 있다. 기원해수가 6개일 때 비해서 잔차가 20% 이내로 줄어들었지만 여전히 잔차가 표층 부근에서 높게 나타나고 있다.

마지막으로, MTSW를 포함한 기원해수가 8개일 때 잔차를 살펴보았다. 표층에서 저층까지 5% 이내의 잔차 범위를 나타내었고, 특히 기원해수가 6개, 7개일 때 표층 부근에 높게 분포하던 잔차들이 만족할 만한 신뢰도 범위 내로 분포하였다(Fig. 6e). 따라서 하계 동해에 분포하는 기원해수로 8개를 고려하는 것이 가장 타당하다고 판단되었다.

기원해수의 부피 추정

동해의 수심 300 m 이하에서 수온 0~1°C, 염분 33.96

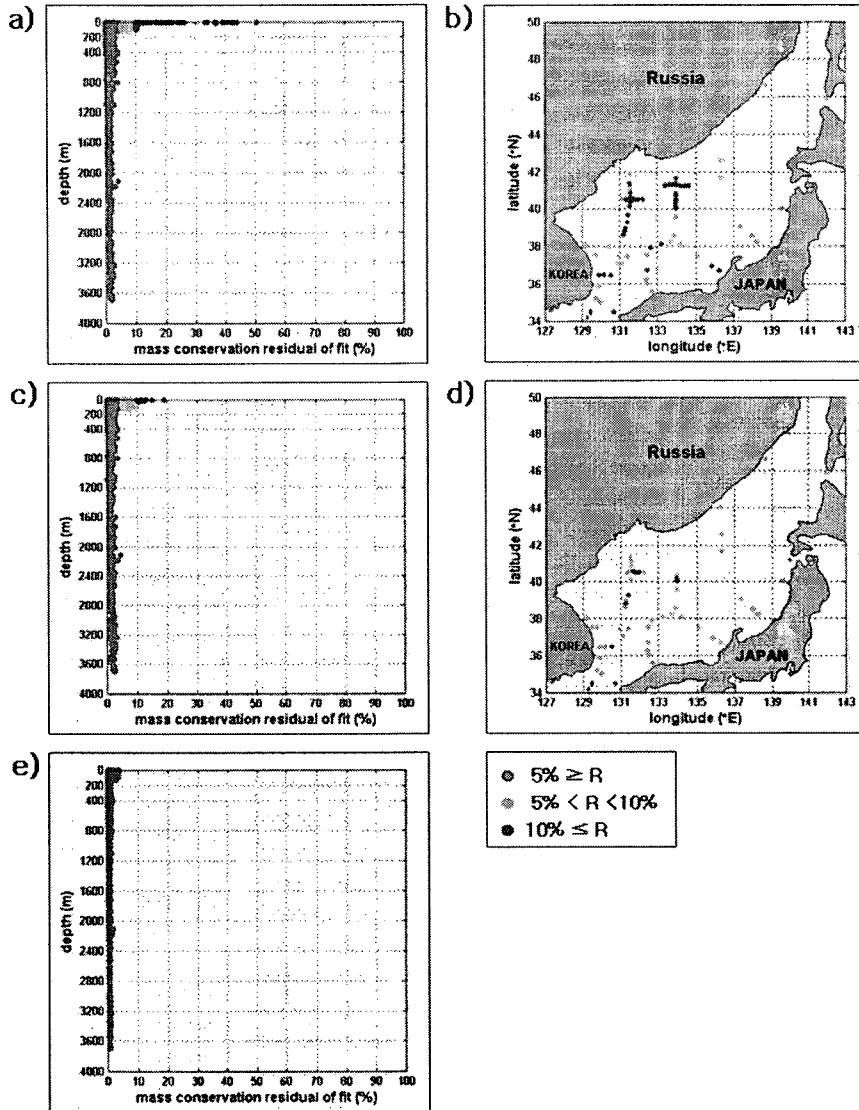


Fig. 6. Mass conservation residuals calculated by the number of source water types; a) vertical profile of residuals for six source water types, b) map showing the residual of more than 5% for six source water types, c) vertical profile of residuals for seven source water types, d) map showing the residual of more than 5% for seven source water types, e) vertical profile of residuals for eight source water types.

~34.14% 범위의 ESPW가 동해 전체 부피의 80% 이상을 차지하는 것으로 알려져 있다(Yasui *et al.* 1967). ESPW가 동해 전체 상당한 부피를 차지하고 있음을 앞에서 언급한 바 있다(Fig. 5d, 5h, 7d). 이 연구에서는 각 기원해수의 부피를 정량적으로 추정하기 위해 조성비 50% 이상을 기준으로 부피를 계산하였다.

강(1999)은 동해의 특정 수심에서의 면적이 수심에 따라 직선적으로 감소하고 동해를 사각뿔을 뒤집어 놓은 모양이라고 가정하였으며, 각 수괴에 대한 부피 계산법을 제시하였다. 동해 전체의 표면에 비해 본 연구 해역의 표

면적이 작기 때문에 각 기원해수의 혼합률이 50% 이상 되는 최소·최대 위/경도로 구한 면적에서 연구 해역의 최소·최대 위/경도(34-48°N, 128-142°E)로 구한 면적비를 도입하여 강(1999)이 제시한 부피 계산법을 사용하였고, 계산 결과를 Table 3에 정리하였다.

동해의 전체 부피 중 대략 90% 정도가 심층수(ESIW & ESPW)로 채워져 있고, 중층수(TMW & LCW)가 5%, 표층수(EKCW & TSCW & NKSW & MTSW)는 2% 미만으로 계산되었다.

ESPW가 72%로 가장 많은 부피를 차지하였고, 그 다음

Table 3. Calculated volume of each source water types. Water mass consists mainly of a single water type ($\geq 50\%$) is counted as corresponding source water type. Area at depth z m (A_z) is described very accurately as a function of depth and the surface area (A_0) of 1.013×10^{12} m² by an equation of $A_z/A_0 = -2.82 \times 10^{-4} \cdot z + 0.9647$ ($r^2 > 0.99$).

SWT	NKSW	EKSW	MTSW	TSCW	TMW	LCW	ESIW	ESPW	
Location	36.435°N ~ 41.587°N 129.891°E ~ 134.672°E	34.667°N ~ 46.133°N 128.883°E ~ 140.491°E	34.422°N ~ 41.400°N 128.934°E ~ 140.168°E	42.430°N ~ 48.000°N 131.591°E ~ 142.021°E	34.422°N ~ 45.990°N 129.184°E ~ 141.657°E	38.017°N ~ 48.000°N 129.184°E ~ 141.742°E	35.834°N ~ 48.000°N 128.883°E ~ 142.025°E	35.834°N ~ 48.000°N 128.883°E ~ 142.025°E	
	Depth range (m)	1-17	0-33	0-38	3-21	1-155	10-150	19-900	117-3697
	Thickness (m)	16	33	38	21	155	150	900	3697
	A_z/A_0	0.964	0.965	0.965	0.964	0.964	0.952	0.959	0.932
Occupied area (%)	0.15	0.67	0.40	0.26	0.73	0.61	0.80	0.80	
Volume ($\times 10^{12}$ m ³)	0.8	7.2	4.9	1.5	36.7	27.6	232.6	897.6	
Volume (%)	0.1	0.6	0.4	0.1	2.9	2.2	18.6	71.8	

은 ESIW가 약 19%로 동해의 대부분을 심층수로 채워져 있음을 직접적으로 알 수 있었고 또한 동해의 심층순환이 동해 전체 해양환경에 커다란 영향을 미칠 수 있음을 간접적으로 알 수 있었다.

동해 연구의 필요성

1930년대 Uda 이후 동해 전반에 대한 총괄적인 조사가 CREAMS II에 의해 수행되었고, OMP 분석방법을 통해 새로운 사실들을 알 수 있었다. 반면에 새로운 사실에 대한 검증과 변화를 추적하기 위해 향후에 연구할 과제가 더욱 많아졌음을 느끼게 된다. 동해의 중요성은 학자마다 조금씩 다른 관점에서 파악할 수 있을 것이나, 무엇보다도 동해가 대양에 비해 빠른 속도로 변화하고 있는 조짐이 드러남에 따라 최소한 5년에 한번 정도는 CREAMS II 규모의 해양조사가 우리나라 주도로 이루어지는 것이 가장 바람직하다.

이 연구와 관련지어 간략히 몇 가지를 언급하자면, 첫째, 동해는 항시 8개의 기원해수로 구성될 수 있는지, 다른 계절에는 몇 개로 정의될 수 있는지, 그리고 동해 북부 해역 표층에 분포하는 저염수 NKSW의 기원과 북부 해역 표층순환에 어떠한 영향을 미치는지를 알아낼 필요가 있다. 기원해수에 대한 정의가 정확히 이루어지면 각 기원해수의 정량적인 흐름을 파악함으로써 동해의 시·공간적인 순환 시스템을 보다 쉽게 이해할 수가 있을 것이다.

둘째, 대한해협을 통해 동해 상층부에 열과 염을 공급하는 대마난류수는 물리적인 해수순환, 해양생물의 시·공간적인 분포 및 대기로의 열에너지 전달 등 동해 해양환경에 커다란 영향을 미치는 해류 중에 하나로 대마난류수의 변동성에 대하여 많은 학자들이 관심을 가졌다. 본 연

구에서는 대마난류가 3개의 가지로 나뉘어져 동해로 유입되는 것으로 나타났다. 하지만, 대마난류수의 3분지설(Yoon 1982a, b; Kawabe 1982b), 2분지설(Byun and Chang 1984), 사행설(Moriyasu 1972) 등 대마난류수가 대한해협 입구에서 동해로 유입되는 형태에 대해 다양한 의견이 제시되었고, Byun and Chang(1984)은 동해로 유입되기 전에 이미 2개의 분지로 나뉘어져 유입된다고 주장하였다. 이와 같이 다양한 현장 관측과 의견을 제시하고 있다. 대부분의 연구가 한 해역에 국한된 경우가 많기 때문에 남해 동부-동해 남부를 잇는 조사를 한다면 보다 정확한 대마난류수의 변동 양상을 파악할 수 있을 것이다.

셋째, 이번 연구에서 EKCW(East Korean Coastal Water)가 42°N 부근까지 북상하면서 시베리아 연안을 따라서 남하하던 TSCW(Tatar Surface Cold Water)의 흐름을 가로막는 분포를 보였다. 이로 인해 동해 북부 표층순환이 달라지고 유기적 관계에 있는 중·심층수 순환과도 관련이 있을 것으로 판단된다. 따라서 동해 연안을 따라서 북상하는 대마난류수의 한 지류가 과연 늘 38°N 부근에서 이안되어 동진하는지, 아니면 계속 북상을 하는지, 북상에 따른 동해 북부 표층순환에 어떤 영향을 미치는지에 대한 추후 연구가 필요할 것으로 생각된다.

넷째, 난류수는 대한해협을 통해, 한류수는 타타르 해협을 통해 동해로 유입되고, 40°N을 기준으로 경계를 이루었으며, 동해 북부해역에서 생성된 냉수들은 대부분 연안을 따라 동해 남부해역으로 이동함을 보였다. 이는 동해 중층 및 심층의 해양환경을 좌우하는 중요한 흐름 중에 하나이다. 이전까지의 연구에서는 연안을 따라서 냉수들이 내려오는 사실은 감지를 하였지만, 이번 연구에서처럼 동해 내부 순환의 큰 축이 되는 흐름은 파악하지 못하였

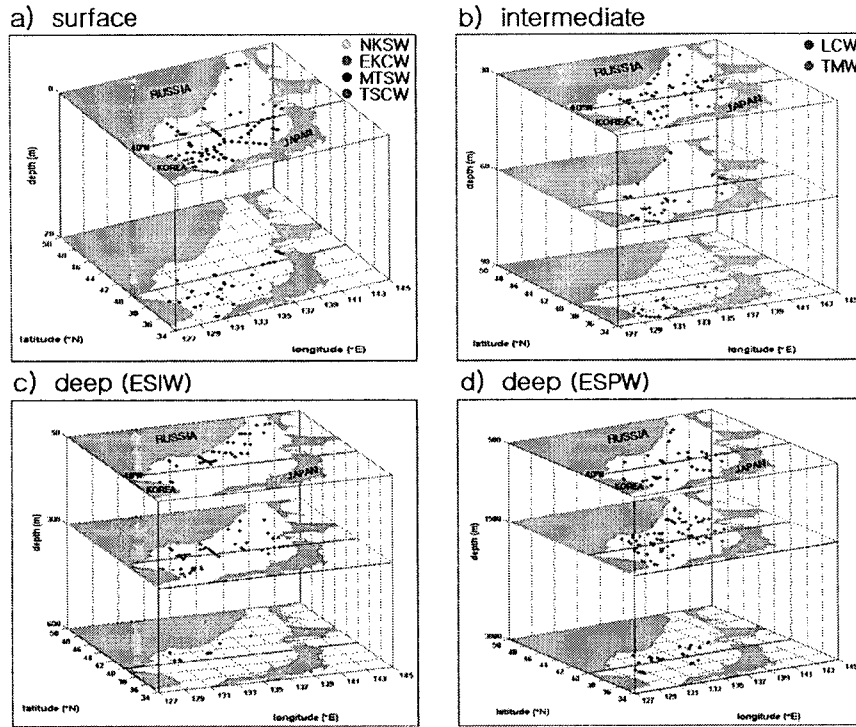


Fig. 7. Stacked charts of hydrographic station of dominant (mixing ratio $\geq 50\%$) water type at selected depths ; a) surface waters (●NKSW, ●EKCW, ●MTSW, ●TSCW), b) intermediate waters (●LCW, ●TMW), c) deep water (ESIW), d) deep water (ESPW).

다. 따라서 동해 내부 순환의 큰 줄기가 북부에서 연안을 따라 남부로 이동하는 흐름인지에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 생각된다.

마지막으로, 물리·화학인자들을 이용한 OMP 분석 방법이 우리나라 해역처럼 시·공간적으로 복잡한 양상을 보이는 해역에서 효율적인 분석방법임을 보였고, 수집 단계에서부터 OMP 분석에 맞추어 이루어진다면 보다 정확한 기원해수의 혼합률을 정량화 할 수 있을 것이다.

4. 요약

하계 동해의 기원 해수

T-S diagram 방법에다 용존 산소를 추가시키고, 자료를 위도-경도 평면상에서 표시하는 방법으로 기원해수를 판별하였다. 하계에 동해에서 총 8개의 기원해수가 판별되었다. 표층해수로는 1) 고온-저염의 EKCW, 2) 고온-최저염의 NKSW, 3) 고온-고염의 MTSW, 4) 저온-저염의 TSCW의 4종류와 5) 최고염의 TMW, 6) 저온-저염-고농도의 산소를 가지는 LCW인 2종류의 중층수 그리고 심층수로 7) 저온-고염-고농도의 산소를 가지는 ESIW, 8) 최저온-고염-저농도의 산소를 가지는 ESPW 8종류로 구분

할 수가 있었다. 특히, 동해 중·북부 해역에서 발견된 최저염의 NKSW(North Korea Surface Water), 기존에 알려진 대마난류 표층수에 비해 고염의 특징을 보여준 MTSW(Modified Tsushima Surface Water), 그리고 타타르 해협에서 시베리아 연안을 따라 남하하는 TSCW(Tatar Surface Cold Water) 등이 이번 연구에서 새롭게 정의되었다.

조성비로 본 기원 해수의 흐름

총 8개의 기원 해수에 대해 조성비 50% 이상을 기준으로 한 각 기원해수의 흐름을 Fig. 7에 나타내었다. 먼저 표층의 흐름을 보면, EKCW는 대한해협 서수도를 통해 동해 연안을 따라 북상하는 흐름을 보였고, MTSW는 대한해협 동수도를 통해 동해로 진입하여 40°N 부근까지 영향을 미쳤다. TSCW는 타타르 해협에서 시베리아 연안을 따라서 블라디보스톡 부근까지 남하를 하였고, NKSW는 동해 중부의 40°N~42°N 부근에 국지적으로 분포하였다 (Fig. 7a).

중층에서는, TMW가 40°N 부근까지 영향을 미쳤고, 동해 북부 해역에서 기원한 LCW와 ESIW에 세력에 막혀 더 북진을 못하고 동진하는 것으로 판단되었다. LCW는

동해 북부해역에서 반시계 방향의 순환하는 흐름과 연안을 따라서 남하하는 흐름 두 종류의 흐름이 있는 것으로 판단되었다(Fig. 7b).

심층에서는, ESIW가 동해 북부 연안을 따라 36°N 부근까지 남하하는 흐름을 보였고, ESPW는 수심 500 m 부근에서 시베리아 연안을 따라 남부 연안까지 남하하는 한 줄기가 있음을 알 수 있었다. 점차 수심이 깊어지면서 동해 남·북부 전체를 ESPW로 채우고 있어 어떤 흐름의 특징보다는 동해 전체의 상당한 부피를 차지함을 알 수 있었다(Fig. 7d).

동해 북부해역에서 생성되는 냉수들이 연안을 따라서 동해 남부해역으로 이동하는 흐름을 보여주었다. 따라서 동해 내부 순환의 큰 줄기는 연안을 따라 흐르는 냉수들의 흐름이며, 매년 동해남부 해역에 발생하는 용승 현상도 이러한 흐름의 연장선에 있음을 짐작할 수 있다(Lee and Kim 2003).

사 사

저자들은 본 연구의 기원 해수를 설정하는데 자문해 주신 부경대학교 원격탐사실의 이재철 교수님과 김대현 박사께 감사드립니다. 그리고 OMP 운용에 김현철 선생이 도움을 많이 주었습니다. 논문을 심사하여 주신 심사위원의 노고에도 감사드립니다.

참고문헌

- 강동진. 1999. 동해의 탄소 순환에 관한 연구. 이학 박사학위 논문, 서울대학교, 81p.
- 김경렬, 이태식, 김 구, 정종률. 1991. 울릉분지 해역 동해 중층수의 화학적 특성. *한국해양학회지*, 26(3), 278-287.
- 김영의, 정종률. 1989. 동해의 해수 순환에 대한 Numerical Modelling 연구 I. 폐쇄해역으로 가정한 경우. *한국해양학회지*, 24(2), 96-108.
- 김일남. 2001. 최적화 다인자 분석방법(OMP)을 적용한 남해 수계 분석. 이학 석사학위 논문, 부산대학교. 121p.
- 김재연, 강동진, 김 용, 조진형, 이창래, 김경렬, 이동섭. 2003. 상자 모형으로 추정된 동해의 생물 펌프. *한국해양학회지*, 8(3), 295-306.
- 김철호, 김 구. 1983. 한국 동해안에 출현하는 냉수괴의 특성과 기원. *한국해양학회지*, 18(1), 73-83.
- 문창호, 양성렬, 양한섭, 조현진, 이승용, 김석윤. 1998. 동해 극전선역의 영양염류 순환과정 VI. Chlorophyll a 분포, 신생산 및 질산염의 수직확산. *한국수산학회지*, 31(2), 259-266.
- 문창호, 양한섭, 이광우. 1996. 동해 극전선역의 영양염류 순환과정 I. 추계 수괴와 영양염 분포와의 관계. *한국수산학회지*, 29(4), 503-526.
- 박청길. 1972. 대한해협 수온 및 염분의 시간적 변동. *한국해양학회지*, 7(1), 15-18.
- 박청길. 1978. 한국 동해안 냉수괴의 해양화학적 고찰. *한국수산학회지*, 11(2), 49-54.
- 박청길. 1979. 한국 동해의 용존산소 분포의 특성에 관한 연구. *한국해양학회지*, 14(2), 67-70.
- 양한섭, 김성수, 강창근, 조규대. 1991. 한반도 근해의 해류와 해수특성 III. 한국 동해 중부 극전선역에 출현하는 수괴의 화학적 특성. *한국수산학회지*, 24(3), 185-192.
- 양한섭, 문창호, 오석진, 이행필. 1997. 동해 극전선의 영양염류 순환과정 II. 1995년 동계 입자태 유기탄소 및 유기질소의 분포. *한국수산학회지*, 30(3), 442-450.
- 이홍재, 송영호. 1994. 한국 해양물리 연구의 현황과 발전: 문헌검토. *한국해양학회지*, 29(1), 121-131.
- 조현진, 문창호, 양한섭, 강원배, 이광우. 1997. 동해 극전선역의 영양염류 순환 과정 III. 1995년 10월 동해 중부 및 북부 해역의 수괴와 영양염의 분포. *한국수산학회지*, 30(3), 393-407.
- 한상복. 1992. 한반도 주변의 해양관측: 과거, 현재, 미래. *한국해양학회지*, 27(4), 332-341.
- An, H.S. 1974. On the cold water mass around the southeast 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.
- Gamo, T., N. Momoshima, and S. Tolmachev. 2001. Recent upward shift of the deep convection system in the Japan Sea, as inferred from the geochemical tracers tritium, oxygen, and nutrients. *Geophys. Res. Lett.*, 28(21), 4143-4146.
- Hong, C.H. and K.D. Cho. 1983. The northern boundary of the Tsushima Current and its fluctuations. *J. Oceanol. Soc. Kor.*, 18(1), 1-9.
- Kang, D.-J., S. Park, Y.-G. Kim, K. Kim, and K.-R. Kim. 2003. A moving-boundary box model(MBBM) for oceans in change: an application to the East/Japan Sea. *Geophys. Res. Lett.*, 30(6), 1299, doi:10.1029/2002GL016486.
- Kawabe, M. 1982a. Branching of the Tsushima Current in the Japan Sea, Part I: data analysis. *J. Oceanogr. Soc. Jap.*, 38, 97-107.
- Kawabe, M. 1982b. Branching of the Tsushima Current in the Japan Sea, Part II: numerical experiment. *J. Oceanogr. Soc. Jap.*, 38, 183-192.
- Kim, K. and J.Y. Chung. 1984. On the salinity minimum and dissolved oxygen maximum layer in the East Sea (Sea of Japan). p. 55-65. In: *Ocean hydro-dynamics of the Japan and East China Seas*. Elsevier, Amsterdam.

- Kim, K.-R. and K. Kim. 1996. What is happening in the East Sea (Japan Sea)?; recent chemical observations during CREAMS 93-96. *J. Oceanol. Soc. Kor.*, 31(4), 164-172.
- Kim, K., K.-R. Kim, and D. Min. 2001. Warming and structural changes in the East Sea(Japan Sea): A clue to future changes in global oceans? *Geophys. Res. Lett.*, 28(17), 3293-3296.
- Kim, K., K.-R. Kim, J.Y. Chung, H.S. Yoo, and S.G. Park. 1991. Characteristics of physical properties in the Ulleung Basin. *J. Oceanol. Soc. Kor.*, 26(1), 83-100.
- Kim, K., K.-R. Kim, Y.G. Kim, Y.K. Cho, 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 observation: water masses and eddies in the East Sea. *J. Oceanol. Soc. Kor.*, 31(4), 155-163.
- 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(5), 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.
- Menke, W. 1984. Geophysical data analysis: discrete inverse theory. Academic, San Diego, Calif.
- Moriyasu, S. 1972. The Tsushima Current. p. 353-369. In: *Kuroshio-its physical aspects*. ed. by H. Stommel and K. Yoshida. Univ. of Tokyo Press, Tokyo.
- Naganuma, K. 1972. The oceanographical conditions in the Japan Sea. p. 32-38. In: *Gyokaikyo Handobukku (Handbook of Fish. Oceanogr.)*. Zengyoren Gyokaikyo Center.
- 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.
- Seung, Y.H. and K. Kim. 1993. A numerical modeling of the East Sea circulation. *J. Oceanol. Soc. Kor.*, 28(4), 292-304.
- Talley, L.D., V. Lobanov, V. Ponomarev, A. Salyuk, P. Tishchenko, I. Zhabin, and S. Riser. 2003. Deep convection and brine rejection in the Japan Sea. *Geophys. Res. Lett.*, 30(4), 1159, doi: 10.1029/2002GL016451.
- Tomczak, M. and D.G.B. Large. 1989. Optimum multiparameter analysis of mixing in the thermocline of the eastern Indian Ocean. *J. Geophys. Res.*, 94, 16141-16149.
- Uda, M. 1934. The results of simultaneous oceanographical investigations in the Japan Sea and its adjacent waters in May and June, 1932 (in Japanese). *J. Imp. Fish. Exp. Sta.*, 5, 57-190.
- Yasui, M., Y. Yasuoka, K. Tamioka, and O. Shiota. 1967. Oceanographic studies of the Japan Sea (1) water characteristics. *Oceanogr. Mag.*, 19, 177-192.
- Yoon, J.H. 1982a. Numerical experiment on the circulation in the Japan Sea, Part : formation of the East Korean Warm current. *J. Oceanogr. Soc. Jap.*, 38, 43-51.
- Yoon, J.H. 1982b. Numerical experiment on the circulation in the Japan Sea, Part : formation of nearshore branch of the Tsushima Current. *J. Oceanogr. Soc. Jap.*, 38, 119-124.

Received Aug. 3, 2004

Accepted Nov. 10, 2004