

Article

열적 수직 구조의 장기 변화로부터 유추한 동해 심층수 형성 모드의 변환: 1차원 모델 연구

채영기^{1*} · 승영호¹ · 강석구²

¹인하대학교 자연과학대학 해양학과
(402-751) 인천광역시 남구 용현동 253

²한국해양연구원 연안·항만공학연구본부
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29호

Mode Change of Deep Water Formation Deduced from Slow Variation of Thermal Structure: One-dimensional Model Study

Yeong Ki Chae^{1*}, Young Ho Seung¹, and Sok Kuh Kang²

¹Department of Oceanography, College of Natural Science
Inha University, Incheon 402-751, Korea

²Coastal and Harbor Engineering Research Division, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Abstract : Recently, it has been observed in the East Sea that temperature increases below the thermocline, and dissolved oxygen increase in the intermediate layer but decrease below it. The layer of minimum dissolved oxygen deepens and the bottom homogeneous layer in oxygen becomes thinner. It emerges very probably that these changes are induced by the mode change of deep water formation associated with global warming. To further support this hypothesis, a one-dimensional model experiment is performed. First, a thermal profile is obtained by injecting a cold and high oxygen deep water into the bottom layer, say the bottom mode. Then, two thermal profiles are obtained from the bottom mode profile by assuming that either all the deep water introduced into the intermediate layer has been initiated, say the intermediate mode, or that only a part of the deep water has been initiated into the intermediate layer, say the intermediate-bottom mode. The results, from the intermediate-bottom mode experiment are closest to the observed results. They show quite well the tendency for oxygen to increase in the intermediate layer and the simultaneous thinning of the bottom homogeneous layer in oxygen. Therefore, it can be said that the recently observed slow variation of the thermal structure might be associated with changes in the deep water formation from the bottom mode to the intermediate-bottom mode.

Key words : 동해(East Sea), 모드 변환(mode change), 중층 모드(intermediate mode), 심층수 형성(deep water formation), 열적 구조(thermal structure)

1. 서 론

동해는 한국, 일본, 러시아에 둘러 싸여 있고 대한해협,

쓰가루해협, 소야해협, 타타르해협 등 4개의 해협을 통해 북태평양과 연결되어 있는 반폐쇄성 연해이며 일본분지, 야마토분지, 울릉분지와 같은 수심 2000미터 이상의 분지들을 가지고 있다(Fig. 1). 북태평양에 비하면 작은 크기이지만 최근 연구에 의하면 동해는 온도와 염분의 수직 구

*Corresponding author. E-mail : lionfish96@hanmail.net

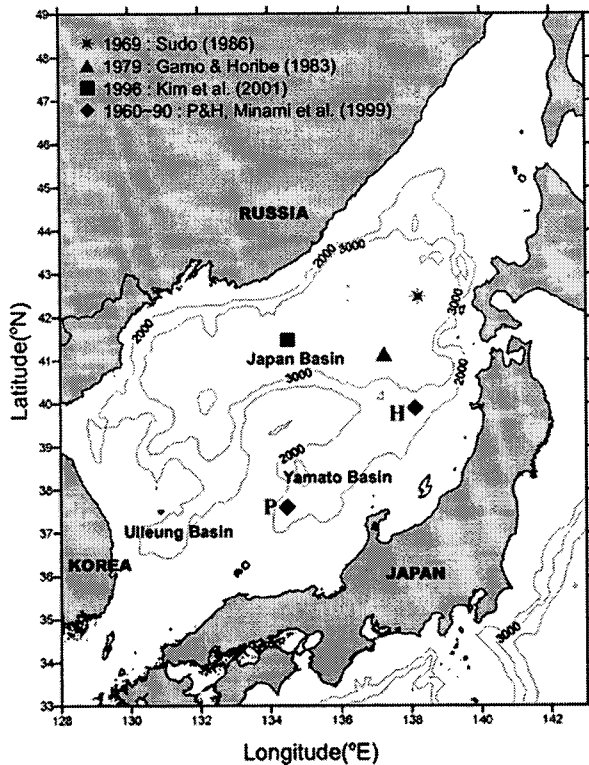


Fig. 1. Bottom topography of the East Sea and some stations of deep water measurement.

조 형태, 심층수 형성 기작 등에서 대양의 특성과 아주 유사하다는 것이 밝혀졌다(Gamo and Horibe 1983; Kim and Kim 1996; Kim et al. 1996).

1930년대 초 Uda(1934)는 일정 수심 아래의 수괴가 동해 전체적으로 물리 화학적 특성이 아주 균질하다는 것을 발견했다. Uda(1934)는 이 수괴를 동해 고유수(Japan Sea Proper Water, JSPW)라고 명명했다. 그러나 Gamo and Horibe(1983)는 동해 고유수(JSPW)를 CTD 관측 자료를 근거로 두개의 수괴로 구분하였다. 그것이 상부 층인 심층수(Deep Water)와 하부 층인 저층수(Bottom Water)이다. 그 이후 Kim et al.(1996)이 중앙수(Central Water)라는 새로운 수괴의 정의를 제의함으로써 동해 수괴의 수직 구조를 전체적으로 표층수(Surface Water, SW), 중앙수(Central Water, CW), 심층수(Deep Water, DW), 저층수(Bottom Water, BW)로 정의하였다(Kim and Kim 1996). 그러나 본 연구에서는 연구의 목적상 동해의 수괴를 표층수, 중층수(상기의 중앙수에 해당), 저층수(상기의 심층수와 저층수에 해당)로 간략히 구분하였으며, 심층수는 표층에서 형성되어 침강하는 중층수와 저층수를 통칭하는 것으로 정의하였다.

Nitani(1972)는 동해 고유수(JSPW)가 블라디보스톡의

기온과 관련이 있다고 말하였고, 다른 여러 연구에서도 기온 변화가 심층 순환에 영향을 주고 있는 것으로 밝혀지고 있다(Gamo and Horibe 1983; Gamo 1999; Kim et al. 2002). 겨울철에 동해 북부 지역에서는 표층 수온이 낮아지는 현상 그리고 증발과 얼음 형성에 의한 염분 증가의 상호 작용으로 표층수를 저층수로 가라앉히기에 충분한 밀도 증가가 일어난다(Suda 1932; Uda 1934; Nitani 1972; Sudo 1987). 실제로 동해 북부 블라디보스톡 앞바다에서는 겨울철 표층수가 수심 1000 m까지 침강하는 현상이 관측된 바 있다(Seung and Yoon 1995). 또한, Kim et al.(2002)은 블라디보스톡의 겨울철 기온이 평년보다 낮았던 2000~2001년에 동해 저층의 온도가 감소하고 용존 산소의 농도가 증가하는 것을 보여줌으로서 동해의 저층수는 동해 북부 해역에서 형성되는 것이며 그 지역의 기온이 심층 순환에 밀접한 관련을 가지고 있다는 것을 증명해 보였다. 이러한 현상은 북대서양과 웨델해 북부 지역에서 일어나는 심층수 형성 기작(Broecker 1991)과 상당히 비슷하여 동해를 대양의 축소판이라고도 하였다(Gamo 1999).

실제로 몇몇 정점에서(Fig. 1) 최근 30년간 관측된 자료들을 보면 동해의 열적 수직 구조는 중·저층에서 온도가 상승하고 있고, 용존 산소는 저층에서 감소하는 반면 중층에서는 오히려 증가하고, 용존산소 최소층(oxygen minimum depth)의 깊이도 점점 깊어지고 있으며(Gamo et al. 1986; Kim and Kim 1996; Kim et al. 1999; Gamo 1999; Kim et al. 2001) 해저 용존산소 균질층(bottom layer)의 두께가 줄어드는 경향을 보이고 있다(Gamo et al. 1986; Gamo 1999)(Fig. 2). 이러한 동해 중·저층 수괴의 변화가 심층수 형성 모드의 변화에 기인함을 입증하려는 연구가 있었다. Kang et al.(2003)과 Kim and Kim(1996)은 동해 수괴의 수직 구조가 시간적으로 변화하는 것이 심층수 형성의 모드 변화(저층 모드에서 중층 모드로)에 기인함을 Moving Boundary Box Model(MBBM)로 보여주었으며 이에 의하면 2030~2040년에는 저층수의 하부가 사라질 것으로 예측하였다. 또한, Minami et al.(1999)는 수직 1차원 이류-확산모델을 이용하여 관측된 동해 중·저층수의 변화가 심층수 형성의 중단으로 인한 것임을 보였다. 그러나 전자의 MBBM에서는 저층 하부 수괴의 두께가 감소하는 점을 보이기는 하였으나 연속된 수직 구조 변화를 볼 수 없으며 후자의 1차원 이류-확산모델에서는 중층에서 용존 산소가 증가하는 현상을 보이고 있지 못하였다. 중층은 Kim and Kim(1996)이 정의한 중앙수(CW)의 범위를 말한다. 본 연구에서는 후자의 모델을 개선하여 중층 용존산소의 증가를 재현함으로써 심층수 형성 모드의 변화와 수직 열적 구조의 변화와의 관계를 재 입증하고자 한다.

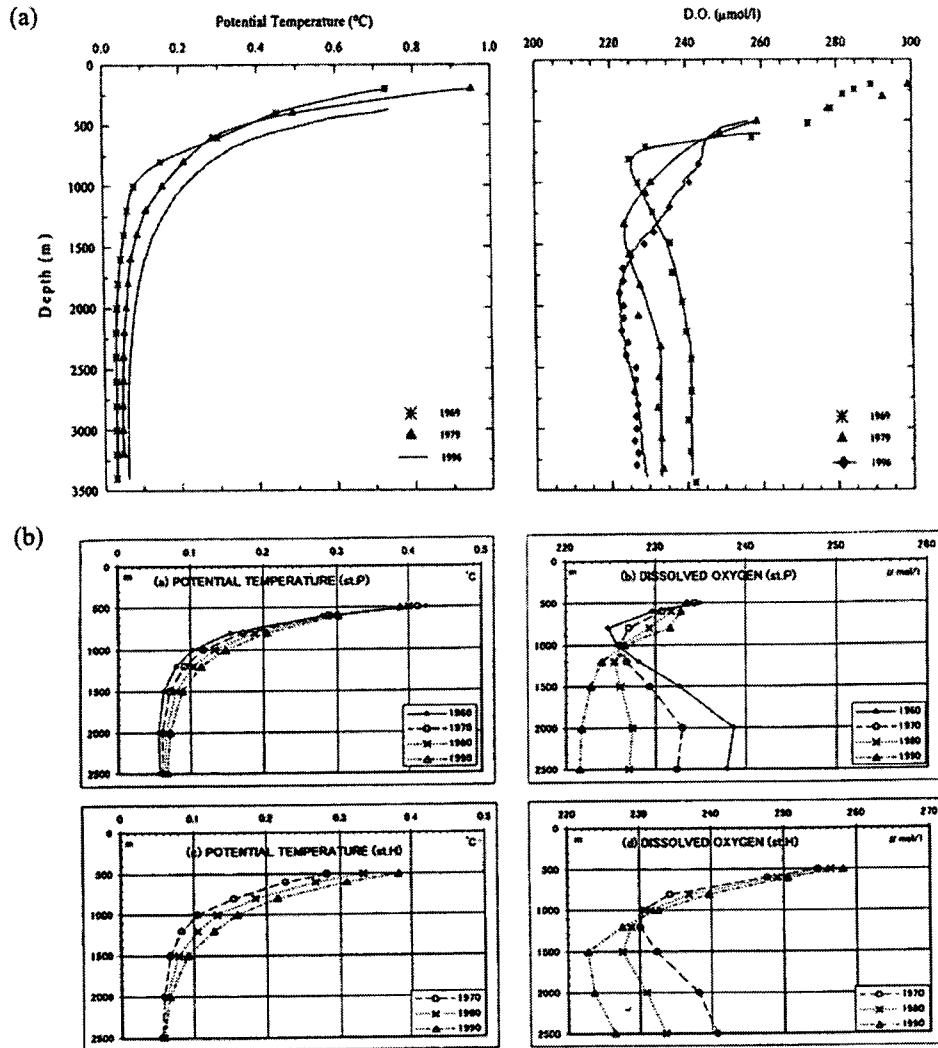


Fig. 2. Vertical profiles of potential temperature and dissolved oxygen measured in (a) the Japan Basin (after Kim and Kim 1996) and in (b) the Yamato Basin (after Minami *et al.* 1999). Measurement stations in the Japan Basin are shown in Fig. 1.

2. 모 델

본 연구에서 사용한 모델은 수직 1차원 이류-확산 모델로서 동해는 수평적으로 균질한 해양이고 동해 북부 해역에서 형성되어 침강한 심층수가 수평으로 유입한다고 가정하였다. 형성된 심층수는 저층으로 유입하는 저층모드와 중층으로 유입하는 중층모드로 구분하였으며 중층은 동해에서 수온 0.1~0.3°C의 층으로 Kim and Kim(1996)이 정의한 중앙수(CW)와 같다고 하였으며 중층 이하의 수괴를 통칭하여 저층으로 규정하였다. 심층수의 저층모드는 해저면상으로 일정한 속도로 유입하고 중층모드는 등밀도면을 따라 중층으로 유입한다고 하였다. 문제를 단순화하기 위하여 염분은 고려하지 않았으며 밀도는 수온

에 대해서만 결정된다고 가정하였다. 수심별 수온은 시간에 따라 변화하므로 중층 모드의 유입 수직 위치는 시간에 따라 변화한다.

온도 T 와 용존산소 농도 C 의 지배 방정식은 각각

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{\partial(wT)}{\partial z} + \frac{U}{A} T_{in} \quad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = k \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{\partial(wC)}{\partial z} + \frac{U}{A} C_{in} - P \quad (2)$$

가 된다. 여기서 t 는 시간, z 는 해표면으로부터 수직 상 방향으로 증가하는 수직 좌표이다. U 는 단위 수직 거리당 유입되는 심층수의 수평방향 수송량이고, A 는 수평 면적

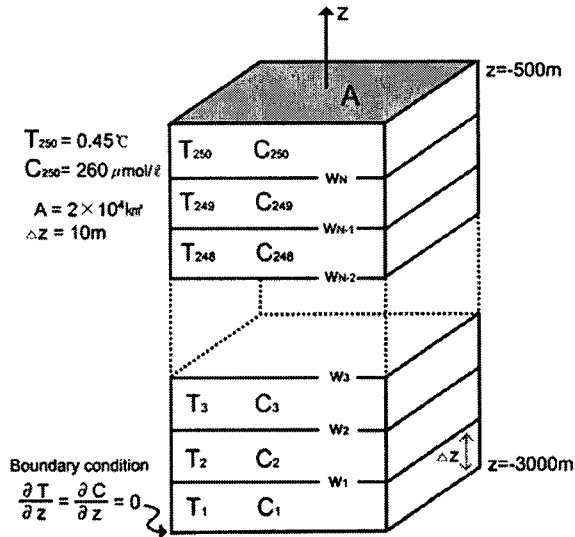


Fig. 3. Model configuration. T and C denote temperature and dissolved oxygen content. A, w and z means, respectively, surface area, vertical velocity and vertical coordinate.

이다. k , P 는 각각 수직 와동 확산계수, 용존산소 자연 감소율을 나타내고, T_{in} , C_{in} 은 각각 유입되는 심층수의 온도와 용존산소 농도를 말한다. w 는 수직 속도를 나타낸다. 수온이 T 인 임의의 수직 위치 z 에서의 w 는 연속 방정식으로부터

$$w(T) = \int_{-H}^{z(T)} \frac{U(\xi)}{A} d\xi \quad (3)$$

로 주어진다. 여기서 H 는 수심을 나타낸다.

식 (1)과 (2)의 수치해를 얻기 위하여 두께 10 m인 250

개의 box를 설정하였다(Fig. 3). 영구 수온약층의 하부에 해당하는 곳 수심 500 m~510 m에서는 심층 열염 과정과는 무관하다고 보아 일정한 수온과 용존산소를 갖는다고 가정하였다. 가장 아래 box는 수심 2990 m~3000 m를 나타내며 해저면과 접하고 있다. 경계 조건으로 첫 번째 box의 온도와 용존산소는 1969년과 1970년의 관측 자료(Kim and Kim 1996; Minami et al. 1999)를 기반으로 각각 0.45°C, 260 $\mu\text{mol/l}$ 인 상수로 주었고, 저층에는 열과 용존산소의 유동이 없는 조건(no flux)

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

를 적용하였다. 와동 확산 계수 k 와 용존산소 자연 감소율 P 는 각각 Minami et al.(1999)이 모델에 적용한 값인 1.5 cm^2/sec , 0.17 $\mu\text{mol}/\text{year}$ 를 이용하였다.

우선 심층수 형성이 저층모드인 경우에 대하여 모델을 수행하여 정상상태에 도달한 것을 기본 상태로 하고 그 후에 저층 모드의 유입량이 모두 중층 모드로 바뀌는 경우와 저층 모드의 일부가 중층 모드로 바뀌는 중-저층 모드에 대한 두 가지 모델(Fig. 4)을 수행함으로써 심층수 형성 모드의 변화에 따른 영향을 고찰하였다.

3. 모드별 열적 구조

저층 모드

지구 온난화로 인한 열적 구조의 변화가 일어나기 전에는 심층수 형성이 저층모드에만 의한 것이라 가정하고 임의의 초기 상태에서 일정량의 심층수를 저층으로 유입시킨 후 도달하는 정상상태를 구하여 이를 심층수 형성 모드의 변화 이전의 열적 구조로 보았다(Fig. 4a).

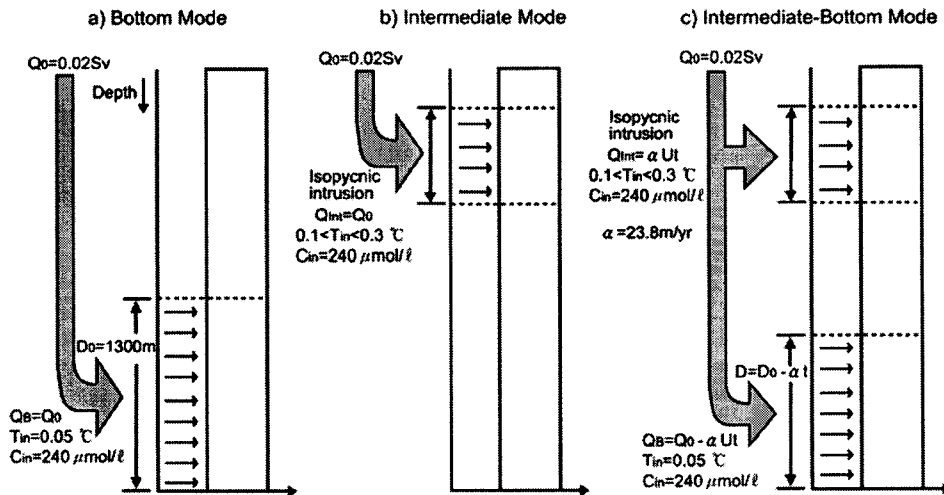


Fig. 4. Schematics showing three models of deep water formation. For detailed explanation, see text.

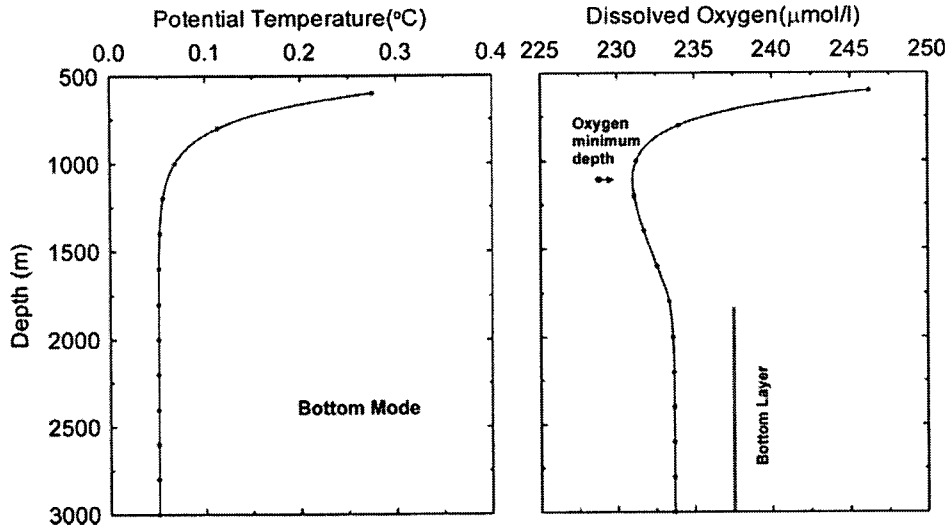


Fig. 5. Steady-state result of the bottom mode experiment.

심층수는 Kang *et al.*(2003)과 Gamo *et al.*(1986)을 근거로 0.02 Sv이 해저면으로부터 1300 m 두께에 걸쳐 균질하게 수평으로 유입하는 것으로 가정하였다. 유입수의 수온은 0.05°C, 용존산소 농도는 240 μmol/l로 하였다 (Minami *et al.* 1999). 저층 모드의 모델 결과(Fig. 5)를 보면, 1969년과 1970년의 관측 자료(Fig. 2)와 대체로 일치하는 수직 열적 구조를 보이고 있다. 특히 해저 용존산소 균질층(bottom layer)이 약 1200 m 두께로 관측치와 대체적으로 비슷하게 나타났다. 본 연구에서는 해저 용존산소 균질층을 용존산소의 수직 구배가 0.002 이하인 곳으로 정의하였다.

중층 모드

지구 온난화로 인해 심층수 형성이 저층 모드에서 중층 모드로 바뀔 경우 이에 따른 수직 열적 구조의 변화를 살펴보았다. 이에 따라 저층으로의 유입을 중단시키고 유입 총량 0.02 Sv을 모두 중층으로 등밀도면을 따라 유입하는 것으로 가정하였다(Fig. 4b). 유입 중층수는 유입 저층수와 같은 용존산소 농도 240 μmol/l를 갖으나, 밀도는 이보다 작다. 따라서 유입 중층수의 수온은 0.1~0.3°C의 범위를 갖는 것으로 설정하였다. 이는 Kim and Kim(1996)이 정의한 중앙수(CW)의 수온 범위와 같은 것이다. 수심별 수온이 시간에 따라 변화하므로 0.1~0.3°C의 수온 범위를

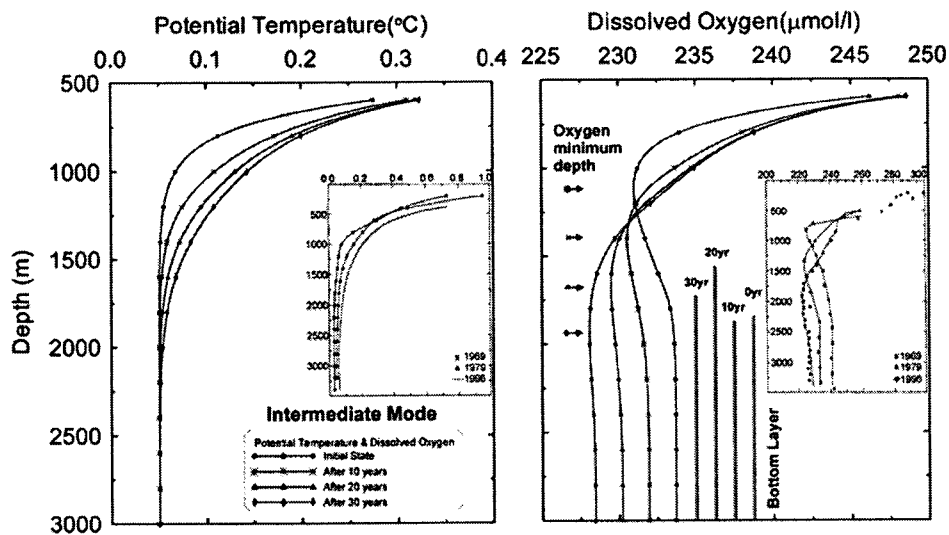


Fig. 6. Results of 30-year run of the intermediate mode experiment. For comparison, observed vertical profiles are inset.

가지는 중층수의 유입 수심은 시간에 따라 변화한다.

모델은 저층 모드의 결과(Fig. 5)를 초기 상태로 하여 30년간 수행하였다. 모델 결과(Fig. 6)에 의하면, 온도는 수심 500 m 이하 전체에서 상승하고 있고, 해저면으로 갈수록 온도의 증가치가 감소하고 있다. 이러한 경향은 관측치에서도 나타난다. 다만, 절대 온도 증가치는 관측치와 일치하지는 않는다. 용존산소는 저층에서 감소하고 중층에서는 증가하며, 용존산소 최소층의 깊이는 깊어지고 있는 것을 볼 수 있다(30년 후의 용존산소 최소층 구조는 매우 미미하게 나타남). 일정 수심별 시간에 따른 온도와 용존산소의 변화를 보면, 800 m 수심의 온도가 30년동안 0.11°C에서 0.20°C로 0.09°C 상승하였다. 중층(800 m)의 용존산소는 233.71 $\mu\text{mol/l}$ 에서 238.58 $\mu\text{mol/l}$ 로 4.87 $\mu\text{mol/l}$ 증가하였고, 저층(2500 m)의 용존산소는 233.67 $\mu\text{mol/l}$ 에서 228.38 $\mu\text{mol/l}$ 로 5.29 $\mu\text{mol/l}$ 감소하였다. 용존산소 최소층의 수심이 30년간 1110 m에서 1940 m로 깊어진 것을 볼 수 있다(Fig. 7). 다만 해저 용존산소 균질층 두께의 감소 경향이 나타나지 않는 것이 관측치와 다른 점이다.

Minami et al.(1999)의 모델에서는 저층의 유입을 중단시키고 중층의 유입이 없는 경우의 장기 변화를 보았다. 이 모델과 비교할 때 본 연구의 모델 결과는 중층의 용존산소가 증가한다는 점에서 보다 사실에 근접한다고 할 수 있겠다.

중·저층 모드

지구 온난화로 인해 심층수 형성이 저층 모드에서 부분

적으로 저층 및 중층 모드로 바뀔 경우(중·저층모드) 이에 따른 수직 열적 구조의 변화를 살펴보았다(Fig. 4c). 2000~2001년 겨울과 같이 간헐적으로 일어나는 저층수 형성(Kim et al. 2002)을 반영한다고 볼 수 있으므로 보다 적절한 물리적 가정이라 할 수 있다. Kim et al.(1996)이 정의한 중앙수 그리고 심층 및 저층수가 혼합된 수괴를 각각 본 모델에서 정의한 중층모드의 중층수와 저층모드의 저층수라고 볼 때, 본 모델은 Kang et al.(2003)의 MBBM과 유사한 것으로 볼 수 있다. 단지 본 모델에서는 유한한 몇 개의 수괴층 대신 연속적인 수직 열적 구조를 대상으로 하고 있다는 점을 차이점으로 들 수 있다. 형성된 심층수의 총량은 0.02 Sv로 고정시켰고 단지 유입 저층수의 일부가 중층으로 유입하는 것으로 가정하였다. Gamo (1999)를 근거로 하여 유입 저층수의 두께 D 가 감소율 $\alpha = -23.8$ m/year로 매년 감소하는 것으로 하였으며 유입 속도 U 는 동일한 것으로 가정하였다. 따라서 임의의 시간 t 에서 저층수의 유입 감소량은 αUt 로서 이것이 중층으로 유입하는 것으로 가정하였다(Fig. 4c). 유입 중층수의 수온 범위는 역시 0.1~0.3°C로 하였고, 용존산소는 240 $\mu\text{mol/l}$ 로 하였다.

여기서, 유입 중·저층수의 유입 조건에 대하여 몇 가지 사실을 언급하고자 한다. 첫째, 본 연구에서와 같이 유입하는 저층수의 온도(T_m)를 일정하게 유지하고 유입량을 감소시키는 대신 T_m 값을 증가시키는 방법도 고려해 볼 수가 있다. 이 경우, 저층의 수직 불안정으로 인하여 저층의 수직 혼합이 유발되어 저층수의 두께가 점차 증가할 것으로 예상된다. 본 연구에서는 이러한 현상이 실제로는

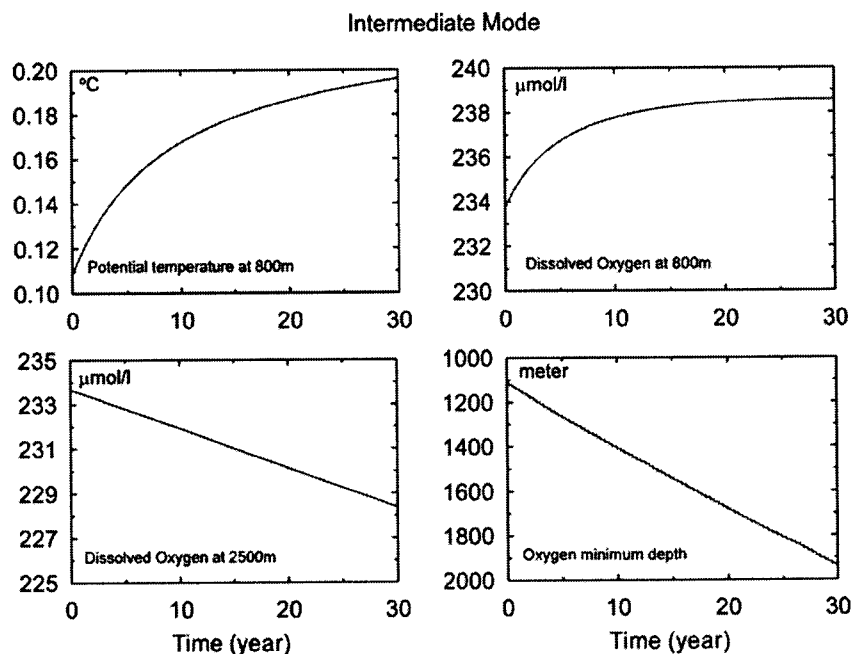


Fig. 7. Time series of temperature and dissolved oxygen for the intermediate mode experiment.

일어나지 않을 것으로 사료되어 이를 고려 대상에서 제외 하였다. 둘째, 실제의 심층수 형성은 본 연구에서 설정한 바와 같이 중·저층에 대하여만 일어나는 것이 아니고 중층에서 저층 사이에서 연속적으로 일어날 가능성이 더 많을 것으로 보인다. 이 경우, 유입 심층수의 양은 밀도의 함수로 지정되어야 하는데 이에 대한 실측 자료는 전무하다. 반면에, 유입 중·저층수의 증가 및 감소에 대하여는 대략적이거나 알려져 있다. 실제로 Kang *et al.*(2003)은

중·저층수의 유입만을 고려하여 저층수의 감소율을 추정 하였다. 따라서 본 연구에서도 연구의 초점을 중·저층수의 유입에만 맞추기로 하였다.

중층 모드와 마찬가지로 30년간 모델을 수행하였다. 중층 모드 모델 결과에서도 나타났었던 수심 500 m 이하 전 체에서의 온도 상승, 중층 용존산소 증가, 저층 용존산소 감소 그리고 용존산소 최소층 깊이가 깊어지는 현상이 비교적 잘 재현되었다(Fig. 8). 일정 수심별 시간에 따른 온

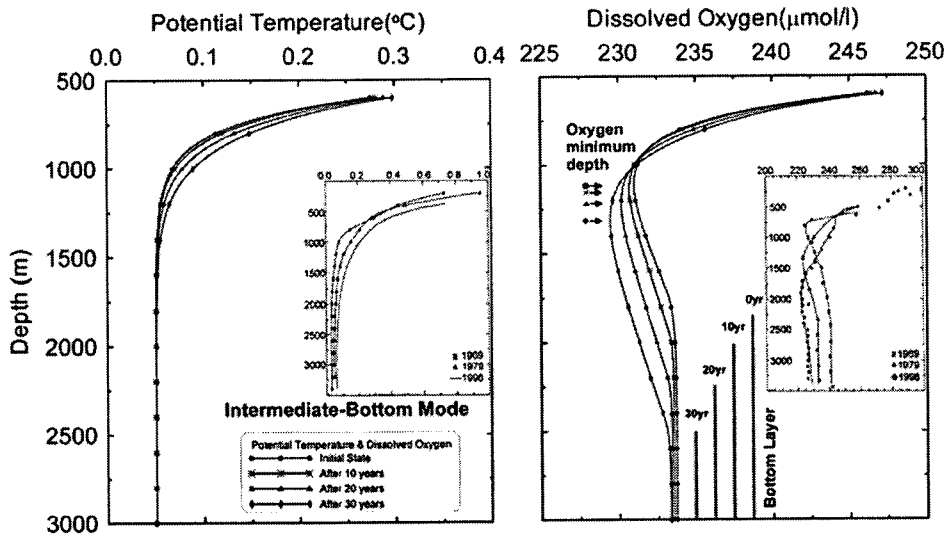


Fig. 8. Results of 30-year run of the intermediate-bottom mode experiment. For comparison, observed vertical profiles are inset.

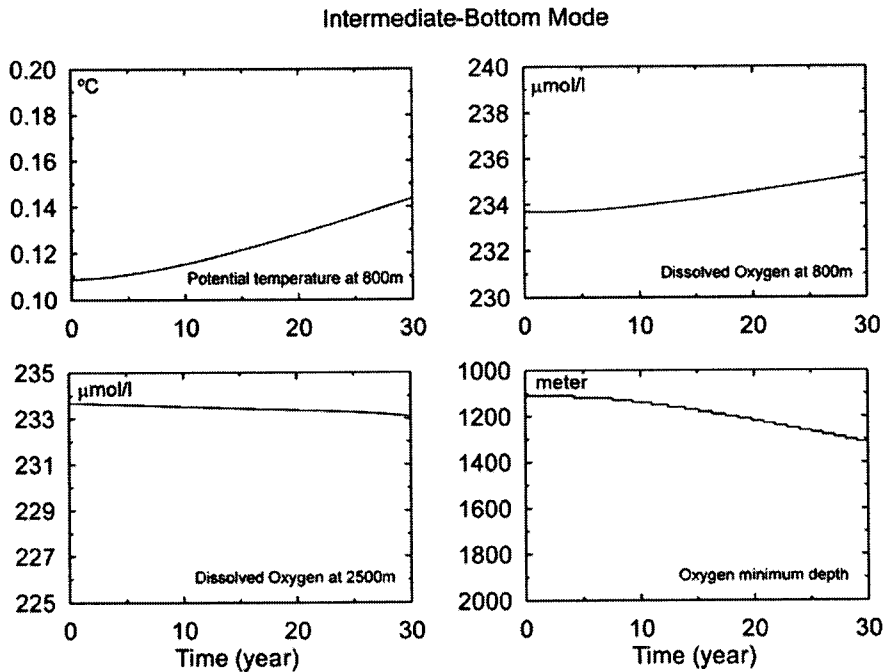


Fig. 9. Time series of temperature and dissolved oxygen for the intermediate-bottom mode experiment.

Table 1. Summary table showing the comparison between observation and model results.

	Observed data	Intermediate mode	Intermediate-bottom mode
Potential Temperature	Increase	Increase	Increase
Dissolved Oxygen in intermediate layer	Increase	Increase	Increase
Dissolved Oxygen in bottom layer	Decrease	Decrease	Decrease
Oxygen minimum depth	Deepen	Deepen	Deepen
Bottom layer thickness	Decrease	No trend	Decrease

도와 용존산소의 변화를 보면 800 m의 수심에서 온도가 30년동안 0.11°C에서 0.14°C로 0.03°C 상승하였다. 중층(800 m)의 용존산소는 233.71 $\mu\text{mol/l}$ 에서 235.33 $\mu\text{mol/l}$ 로 1.66 $\mu\text{mol/l}$ 증가하였고, 저층(2500 m)의 용존산소는 233.67 $\mu\text{mol/l}$ 에서 233.09 $\mu\text{mol/l}$ 로 0.58 $\mu\text{mol/l}$ 감소하였다. 용존산소 최소층의 수심도 1110 m에서 1310 m로 깊어진 것을 볼 수 있으며(Fig. 9) 30년 후 용존산소 최소층 구조도 중-저층모드(Fig. 6)보다 뚜렷이 나타나고 있다. 중층 모드에 비해 모든 면에서 변화 폭이 작아진 것을 확인할 수 있다. 이는 중층 모드로의 변화를 서서히 증가시킨 결과 중층으로의 유입량이 중층 모드(Fig. 6)보다 감소되어서 나타나는 현상이라 사료된다. 중-저층 모드에서는 중층 모드와는 달리 해저 용존산소 균질층 두께가 30년간 1180 m에서 510 m로 670 m 감소하고 있다(Fig. 8). 이러한 경향은 실제 관측에서도 나타나는 것이며 따라서, 중-저층 모드가 중층 모드보다 열적 구조의 변화를 더 잘 재현하고 있다 할 수 있다.

4. 모델 결과 및 논의

이상의 세 가지 경우의 심층수 형성 모드에 대한 결과를 요약해 보았을 때(Table 1) 중-저층 모드가 최근 관측되는 동해 열적 수직 구조의 장기 변화 경향을 가장 잘 보여주고 있음을 알 수 있다.

Kang et al.(2003)과 Kim and Kim(1996)은 1980년대 중반에 동해 저층 하부로의 심층수 유입이 중단되었다고 하였다. 실제로 동해 일본 분지 동부의 1977년부터 1998년 관측 자료들의 용존산소 자연 감소율은 0.76 $\mu\text{mol/l/yr}$ 으로서 이대로 유지된다면 300년 안에 동해 저층 하부는 무산소 환경이 될 것이다(Gamo 1999). 하지만 이 값은 관측 자료 값을 외삽하여 얻은 것이고 실제 일본 분지 저층에서 관측한 용존산소는 시간에 따라 증감을 보이고 있다(Gamo 1999). 이것은 저층 하부로 유입되는 심층수의 용존산소 농도가 매년 감소하고 있지만 여전히 겨울철에 간헐적으로 표층으로부터 산소를 공급받고 있기 때문으로 볼 수 있다(Gamo 1999; Kim et al. 2001; Kim et al. 2002). 한편, 1960년대 이전과 달리 최근 동해 중층에서 용존산소 균질층이 보이며 그 층의 용존산소는 높게 나타

나는 것(Min 2002)으로 미루어 보아 동해 북부 지역의 표층에서 형성된 심층수가 중층으로 유입한다는 것은 의심할 여지가 없다. 본 연구에서는 이를 근거로 중층 모드와 중-저층 모드 두 가지의 실험을 통해 동해 열적 수직 구조의 장기 변화를 일으키는 심층수의 형성 모드를 규명하고자 하였다.

심층수 형성에 관한 모델 연구로서는 Kang et al.(2003)과 Minami et al.(1999)의 것을 들 수 있다. 전자에서는 중·저층수 유입량의 변화로 인한 저층수의 감소율을 추정하였으며, 본 모델에서는 이를 확장하여 수온 및 용존산소의 연속 수직 구조 (특히 중층수의 용존산소) 변화를 보고자 하였다. 후자에서는 저층으로의 유입을 갑자기 차단시킨 후 동해의 연속 수온 구조의 장기 변화를 보는 1차원 모델을 수행하였으며, 그 결과 저층의 용존산소 감소 경향이 재현되었다. 하지만 중층의 용존산소 증가 경향은 설명되지 못하였다. 본 연구에서는 저층 유입 중단 후 중층으로의 유입을 가정하였고 그 결과 중층의 용존산소가 증가하는 것을 재현할 수 있었다. 따라서 현재 동해 중층의 용존산소 증가 경향은 중층으로의 유입 때문일 것으로 사료된다. 또한, 중-저층 모드에 대한 실험에서는 용존산소의 중층에서의 증가, 저층에서의 감소뿐만 아니라 해저 용존산소 균질층의 두께가 줄어드는 경향까지도 나타났다. 이로 미루어 볼 때, 동해 북부 해역에서 형성된 심층수가 일부는 중층, 일부는 저층으로 유입되고 있는 것으로 사료된다.

본 연구에서의 모델 결과가 관측에서 나타나는 대체적인 경향은 재현하고 있으나 실제 현상을 정확히 설명하기에는 불완전하다. 보다 사실적인 모델을 수립하기 위해서는 향후 더 많은 관측 자료가 축적되어야 할 것이다.

사 사

본 연구는 한국해양연구원의 기본사업인 “기후변화 모니터링 및 예측을 위한 요소기술 개발연구(PE87000)”의 부분적인 연구비 지원으로 수행되었습니다. 이 연구활동을 할 수 있도록 지속적인 관심과 격려로 후원해 주신 해양연구원의 강석구 박사님께 감사드립니다. 또한 이 논문을 심사하여 주시고 많은 조언을 해주신 심사위원님들께 감사드립니다.

참고문헌

- Broecker, W.S. 1991. The great ocean conveyor. *Oceanogr.*, 4, 79-89.
- Gamo, T. 1999. Global warming may have slowed down the deep conveyor belt of a marginal sea of the northwestern Pacific: Japan Sea. *Geophys. Res. Lett.*, 26, 3137-3140.
- Gamo, T. and Y. Horibe. 1983. Abyssal circulation in the Japan Sea. *J. Oceanogr. Soc. Jpn.*, 39, 220-230.
- Gamo, T., Y. Nozaki, H. Sakai, T. Nakai, and H. Tsubota. 1986. Spacial and temporal variations of water characteristics in the Japan Sea bottom layer. *J. Mar. Res.*, 44, 781-793.
- 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 th the East/Japan Sea. *Geophys. Res. Lett.*, 30(6), 1299, doi:10.1029/2002GL016486.
- Kim, K., K.-R. Kim, D.-H. Min, Y. Volkov, J.-H. Yoon, and M. Takematsu. 2001. Warming and structural changes in the East (Japan) Sea: A clue to future changes in global oceans? *Geophys. Res. Lett.*, 28(17), 3293-3296.
- 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 observations: Water masses and eddies in the East Sea. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 31(4), 155-163.
- Kim, K.-R. and K. Kim. 1996. What is happening in the East Sea (Japan Sea)?: Recent chemical observations during CREAMS 93-96. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 31(4), 164-172.
- Kim, K.-R., G. Kim, K. Kim, V. Lobanov, V. Ponomarev, and A. Salyuk. 2002. A sudden bottom-water formation during the severe winter 2000-2001: The case of the East/Japan Sea. *Geophys. Res. Lett.*, 29(8), 10.1029/2001GL014498.
- Min, H.-S. 2002. Long-term Variations of Water Properties at the Intermediate Depth in the East Sea. Ph.D. Thesis, Seoul National University.
- Minami, H., Y. Kano, and K. Ogawa. 1999. Long-term variations of potential temperature and dissolved oxygen of the Japan Sea Proper Water. *J. Oceanogr.*, 55, 197-205.
- Nitani, H. 1972. On the deep and bottom waters in the Japan Sea. p. 151-201. In: *Research in Hydrography and Oceanography*. ed. by D. Shoji. Hydrographic Department of Japan.
- Seung, Y.H. and J.H. Yoon. 1995. Some features of winter convection in the Japan Sea. *J. Oceanogr.*, 51, 61-73.
- Suda, K. 1932. On the Japan sea bottom water (in Japanese). *Kaiyo-Jiho*, 4, 221-240.
- Sudo, H. 1987. A note on the Japan Sea Proper Water. *Prog. Oceanogr.*, 17, 313-336.
- Uda, M. 1934. The results of simultaneous oceanographical investigation in the Japan Sea and its adjacent waters in May and June (in Japanese with English abstract). *J. Imp. Fish. Exp. Station*, 5, 57-190.

Received Nov. 17, 2004

Accepted Apr. 27, 2005