Article

동해 중층에 발달하는 인산염 대 규산염 비의 불연속층

김봉국¹ · 이동섭^{1*} · 김일남²

¹부산대학교 자연과학대학 해양시스템과학과
(609-735) 부산시 금정구 장전2동

²오스틴 텍사스대학교 해양연구소
Port Aransas, TX 78373, USA

Phosphate vs. Silicate Discontinuity Layer Developed
at Mid-Depth in the East Sea

Bong-Guk Kim¹, Tongsup Lee^{1*}, and Il-Nam Kim²

¹Department of Oceanography, College of Natural Sciences
Pusan National University, Busan 609-735, Korea

²Marine Science Institute
University of Texas at Austin, USA

Abstract : The CREAMS (Circulation Research of the East Asian Marginal Sea) survey in 1999 revealed a sharp mid-depth discontinuity of the phosphate:silicate ratio in all basins of the East/Japan Sea. Incidentally, this discontinuity layer corresponds to the oxygen minimum layer. Directly below the discontinuity layer, oxygen concentration is increased. This increase in oxygen concentration is interpreted as a proof of intermediate water formation. Oxygen minimum indicates that the water parcel is old and stable against mixing. So it seems to be an efficient barrier to vertical exchange of materials. This means that, once materials enter the lower domain, they rarely return to the upper domain. Therefore, the biogeochemistry of the East/Japan Sea depends heavily on material input through the Korea Strait, and flux is expected to be sensitive to the climate change. As a result, the East/Japan Sea ecosystem seems vulnerable to tipping (regime shift), which occurred on a decadal time scale.

Key words : intermediate water, nutrients discontinuity, biogeochemistry

1. 서 론

동해의 심층이 수온이 매우 낮으며 산소가 비교적 풍부한 균질한 해수로 채워져 있다는 특징은 Uda (1934)에 의해 처음 관측되었으며, 그는 이 해수를 단일한 수괴라고 간주하고 고유수(Proper Water)라 명명하였다. 이후로 관측 장비의 개선에 힘입어 Nitani (1972)는 수온의 연직 구

배에 근거하여 이 해수를 Deep Water, Upper Bottom Water, Lower Bottom Water로 구분하였다. 한편 Gamo and Horibe (1983)는 수온과 용존 산소, 규산염 자료에서 나타나는 불연속면에 근거하여 이 해수를 Deep Water와 Bottom Water로 구분하였다.

Miyazaki (1953)와 Kajiura et al. (1958)은 동해 중층에서 주위보다 산소가 풍부하며 염분이 낮은 해수를 발견하였다. 그 후 Kim and Chung (1984)이 이러한 특성을 지닌 해수를 울릉 분지에서도 발견하였고, 이 해수를 동해

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

중층수(East Sea Intermediate Water; ESIW)라 명명하였다. Kim et al. (1991)의 연구에서 동해 중층수의 시공간적 변동에 대해 살펴 본 결과, 이 해수가 다양한 연변동을 보이는 것으로 밝혀졌다. Seung (1997)은 모델을 통한 연구에서 동해 중층수가 아극전선(subpolar front) 아래에서 섭입되어 한국의 동안을 따라 남하하며 반시계 방향으로 순환할 것이라 예측하였다. 이후 Shin et al. (1998)의 연구에서 실제로 동해 중층수가 여름철에 남쪽으로 확장된다는 것을 관측하여 동해 중층수의 순환이 한국측 학자들에 의해 확인되었다.

이후 CREAMS 탐사에서 수심 약 1500 m 부근에서 염분 최소층이 발견되었고, 이는 동해의 모든 분지에서 존재하는 것으로 확인되었다. 기존의 동해 심층수(ESDW :

East Sea Deep Water)는 CREAMS 탐사 이후 동해 중앙수(ESCW : East Sea Central Water)와 동해 심층수로 세분되었으며, 염분 최소층이 그 경계가 되었다. 현재 동해의 수괴는 수심에 따라 Surface Water, Intermediate Water, Central Water, Deep Water, Bottom Water로 총 5개의 층으로 구분하고 있다(Kim et al. 1996; Kim et al. 2004).

이처럼 동해의 수괴에 대한 연구는 수온이나 염분과 같은 물리적 인자를 이용하는 방법이 주도하여 왔으며, 생지화학적 인자를 이용한 경우는 산소를 제외하고는 거의 드물었다(Sudo 1986). 수온과 염분은 해양에서 가장 보존성이 뛰어나므로 해수를 구분하는데 가장 선호된다. 하지만 동해 심층의 경우 수온과 염분의 변동 폭이 각각 0.002°C , 0.004 psu로 지극히 작기 때문에 이 정도 변동에 근거한

Fig. 1. Station map of CREAMS expedition in 1999. Dots indicate station locations and dashed lines indicate the divisions of East Sea basins in this study.

수괴 구분에 회의적인 시각도 남아 있으며 각 수층 경계면의 안정도가 지금까지 비교, 토의된 바 없다.

한국학자들이 주도하여 1993년에 시작된 CREAMS 탐사는 현대 관측기술을 동원하여 동해 전역을 조사한 최초의 탐사라는 커다란 의미를 지닌다. 이를 통해 생지화학적 인자들의 광역 분포도 처음으로 알려졌다. 본 연구에서는 CREAMS의 영양염 자료를 분석하였으며 인산염 대 규산염의 비에서 동해 전역에 걸쳐 확실한 불연속면이 존재함을 발견하였다. 이에 대해 이 불연속면과 기존 수괴 분류와의 관계와 불연속면이 나타나는 이유에 대해 살펴 보았으며, 이를 통해 동해의 수괴가 어떠한 특성을 보이는지에 대해 생지화학적 측면에서 그 의미를 고찰하였다.

2. 자 료

본 연구에서는 1999년 7-8월 CREAMS 동해탐사 자료 중 수온, 용존 산소, 영양염 자료를 이용하였으며, 원 자료는 홈페이지(http://sam.ucsd.edu/onr_data/hydrography.html)에 공개되어 있다. 이 자료의 지적 소유권은 Scripps Institution of Oceanography의 Lynn Talley 박사에게 있다. 수심별 해수 시료는 24-bottle rosette-CTD sampling system으로 채취되었다.

영양염의 분석은 Scripps ODF 팀이 Technicon AA-II CFA 방식으로 하였으며, 규산염의 경우 Bernhardt와 Wilhelms (1967)의 방법을 따랐고, 질산염과 인산염의 경우 Armstrong (1967)의 방법을 따랐다.

용존 산소의 자료는 CTD-DO sensor로 측정된 자료를 Winkler 적정법으로 분석한 해수 자료로 보정한 것이다. CTD에 장착하여 용존 산소 측정에 사용한 센서는 Sensormedics Oxygen Sensor s/n 6였고, 해수 시료 분석은 Dosimat UV-endpoint detection automatic titration system을 이용하여 이루어졌다.

바닥에 의한 교란 효과를 피하기 위해 탐사 정점 중 수심이 2000 m 이상인 심해저 평원 정점의 자료만을 골라 사용하였다. 이 탐사의 정점도는 Fig. 1에 도시하였다.

3. 결 과

CREAMS에서 해수에서 측정된 인산염과 규산염 자료를 그림으로 나타내면 어떤 수심에서 두 영양염의 비에서 뚜렷한 불연속면이 나타나는 것을 확인할 수 있다(Fig. 2). 이러한 불연속면의 존재는 상하 층간의 효과적인 혼합 단절로 해석할 수 있으며, 영양염의 비를 지시하는 직선의 기울기가 달라진다는 점은 각 영역의 생지화학적 환경이 다르다는 것을 의미한다. 기존의 물리 인자에 의한 수괴 구분 연구에서는 이러한 불연속면의 존재에 주목하지 않

Fig. 2. Silicate/phosphate concentration of seawater in the East Sea. Whole data plot of CREAMS 1999 cruise ($n=3799$). The two slopes of phosphate/silicate in the upper layer and lower layer are 20.5 and 205.3, respectively. The changing point of the slopes in this plot coincides with the oxygen minimum layer in the East Sea.

Table 1. Basin specific depth of the mid-depth oxygen minimum layer in the East Sea. Standard deviation is shown in parentheses (WJB : Western Japan Basin, EJB : Eastern Japan Basin, YB : Yamato Basin, UB : Ulleung Basin)

Depth (m)	WJB	EJB	YB	UB
	897	711	562	543
	(152)	(136)	(79)	(84)

았기 때문에 또 다른 관점에서의 설명을 필요로 하는 부분이다.

우선 불연속면이 나타나는 수심을 자세히 살펴보기 위해 동일본 분지(Eastern Japan Basin; EJS), 서일본 분지(Western Japan Basin; WJS), 울릉 분지(Ulleung Basin; UB), 야마토 분지(Yamato Basin; YB)로 나누어 각 분지에서 불연속면이 나타나는 수심을 살펴 보았다(Table 1). 그 결과 서일본 분지에서 900 m 부근으로 가장 깊게 나타났고, 그 다음으로 동일본 분지에서 710 m 부근에 나타났으며, 야마토 분지와 울릉 분지에서는 각각 560 m, 540 m 부근으로 불연속면의 수심이 얕아졌다. 불연속면이 나타나는 수심에서의 수온과 염분을 살펴 본 결과, 뚜렷한 특징이 나타나지 않았으며, 이를 통해 이 수심에서 물리적인 인자를 통한 불연속면의 확인은 어렵다는 것을 알 수 있었다.

불연속층에서 용존산소가 어떠한 분포 특성을 보이는지 살펴 보기 위해 수심에 따른 용존 산소의 구배를 식 (1)과 같이 정의하고, 울릉 분지에 대해 그려 보았다(Fig. 3).

Fig. 3. Dissolved oxygen gradient in the Ulleung Basin. Arrow indicates the depth at which the DO gradient converges to 0.

$$\text{Gradient of DO}(i) = \frac{\text{DO}(i+1) - \text{DO}(i)}{\text{depth}(i+1) - \text{depth}(i)} \quad (1)$$

식 (1)에서 i 는 각 정점에서의 수심을 지시하는 인덱스이다. Fig. 3의 수심에 따른 용존 산소의 구배가 특정 수심에서 0에 가까운 값으로 수렴하는 것을 확인할 수 있는데, 이 수심이 Table 1에서 살펴 본 각 분지에서의 불연속면이 나타나는 수심과 일치한다. 그리고 용존산소의 구배가 0으로 수렴하는 수심에서 용존산소는 최소값을 나타낸다. 산소 최소층은 산소의 공급과 소비 관점에서 몇 가지 조합으로 만들어 질 수 있는데 이 경우는 산소의 공급이 가장 작은 층이라 해석된다. 즉, 심층으로는 심층수 형성과 등밀도선을 따라 혼합되어 산소가 공급되는데 이 층이 이들의 혜택에서 소외된 층일 확률이 높다고 판단된다.

앞에서 확인한 것처럼, 용존산소가 최소가 되는 수층을 경계로 인산염 대 규산염의 비가 변한다. 인산염은 주공급원이 비교적 잘 분해되는 세포질인데 반해 규산염은 분해가 어려운 규조의 껍데기이므로 인산염은 수중공급이 우세하고 규산염은 바닥에서의 공급이 우세하다는 차이가 있다. 따라서 이 불연속면을 경계로 아래 층에서는 심층수끼리 위 층에서는 중층수끼리 혼합이 일어나되, 이 불연속면은 매우 안정해서 두 수괴를 효과적으로 갈라놓고 있는 것으로 보인다. 여기서 그림으로 자료를 제시하지는 않았지만 산소 최소층과 영양염 비의 불연속면은 다른 분지에서도 모두 일치한다.

생지화학적 환경 특성을 살펴 보기 위해 울릉 분지의 겉보기 산소 소모량(AOU)대 인산염의 비를 그려 보았다 (Fig. 4). 해양에서 AOU는 식 (2)와 같이 정의되어 있다.

$$\text{AOU} = [\text{O}_2]_s - [\text{O}_2]_m \quad (2)$$

Fig. 4. AOU vs phosphate in the Ulleung Basin. Arrow indicates the discontinuity in terms of AOU vs phosphate slope. The same trend appears in the AOU vs nitrate plot.

이 식에서 $[\text{O}_2]_s$ 는 현장 해수의 온위(potential temperature)와 염분에서의 포화 산소 농도이며, $[\text{O}_2]_m$ 은 해수에서 실제로 측정된 산소 농도이다. Fig. 4을 살펴 보면 인산염 대 규산염의 비와 마찬가지로 불연속면이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 위 층에서 아래 층보다 기울기가 큰 것을 볼 수 있는데, 이는 상층에서 단위 산소를 소비하여 재생산되는 유기물의 양이 하층에 비해 더 많다는 것을 의미한다.

산소와 영양염의 연직 단면도를 그려 본 결과, 산소 최소층(인산염 대 규산염 비 불연속면) 아래에서 산소가 약간 증가하며, 규산염을 제외한 영양염들이 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 5). 이 수심에서 산소를 생산하고 영양염을 소비할 수 있는 기작이 존재하지 않으므로 산소가 풍부하고 영양염이 적은 표층 해수가 유입되었다고 해석하는 것이 타당하다. 그리고 이러한 빈영양염의 표층 해수 유입은 산소와 영양염의 연직 단면도에 변화를 야기하였고, 이는 동해의 물질 순환에 강력하게 영향을 미친다는 것을 의미한다. 따라서 표층 기원의 해수 유입이 상하층간의 혼합을 저지하고 있으며 그 결과, 바로 위 층은 산소 공급에서 소외되어서 산소 최소층이 형성되었다고 판단된다. 또한 표층 기원 해수 유입이 인산염과 규산염의 비 그림에서 뚜렷한 불연속면이 존재하게 하는 원인이라 여겨진다.

4. 결론 및 토의

Fig. 5에서 확인되는 중층의 표층 기원수 유입 수심 바로 상부에 발달한 산소 최소층에서 인산염 대 규산염 불

Fig. 5. DO and nutrients in the Ulleung Basin. Arrows indicate the depth at which the inflow of the surface origin water is expected. Directly below this depth, an oxygen minimum layer developed (~P:Si discontinuity).

연속 특징이 나타난다. 산소 최소층은 이 층이 수리역학적 으로 안정하여 다른 해수와 잘 혼합되지 않으며, 또한 나 이가 많음을 보여준다. 따라서 이 불연속면을 경계로 동해 해수는 연직 혼합이 잘 일어나지 않는다고 판단된다. 이 층이 이류의 관점에서 부동층(level of no motion)인지, 경 계면 위아래로 해류의 방향이 달라지는지는 흥미로운 연 구 주제이다. 또한 산소최소층과 일치하는 인산염대 규산 염의 불연속면이 동해 여러 분지에서 각기 다른 수심에서 나타난다는 것 또한 주목할만한 사실이다. 이러한 현상은 중층수가 유입되는 수심이 각 분지마다 다르다는 것으로 해석할 수 있다.

한편 동해 중층수 형성은 지구온난화에 민감하다고 이 미 보고된 바 있다(Kang et al. 2003, Kang et al. 2004). 따라서 이 층은 충분히 감시할만한 가치가 있는 대상이다. 온난화에 따라 이 층의 수심이 알아지게 될 것으로 예 상된다.

중층수가 분지 전역에 존재하므로 동해의 대부분 해역 에서 심층수와 표층수의 교환이 제한적일 것으로 보인다. 즉 유기입자가 심해로 침강하게 되면서 아래 층까지 가지 고 내려간 원소는 표층으로 원활하게 되돌아 오지 못하고

심층에 축적될 것이다. 만약 심층에서 표층으로의 무기 영 양염 공급이 미약하다면 동해의 생물 생산성은 제한될 수 밖에 없는데 이는 높은 어업 강도가 시사하는 높은 생산 력과 상반된다. 따라서 외부에서 동해로 유입되는 해류가 심해로 빠져나간 부분을 충당하고 있는 것으로 보이며, 동 해 심층은 물질 수지 관점에서 트랩 역할을 하여 물질을 계속 축적하고 있다고 판단된다. 그리고 이는 지구온난화 대응과 관련해서 비상시에는 포집한 이산화탄소를 동해 심층에 폐기해서 시간을 벌 수 있는 가능성을 보여준다.

산소최소층을 경계로 인산염과 규산염의 비가 달라지는 것은 두 영양염의 본질적인 차이로 설명될 수 있다. 인이 분해가 쉽게 되는 세포질에 들어있는데 반해 규산염은 수 층에서는 분해가 더디고 주로 바닥에 쌓인 다음에 분해되 는 단단한 껍데기에 들어있는 차이를 보인다. 따라서 인산 염 대 규산염의 기울기는 주로 아래 층에서 해저로부터 규산염의 공급에 따라 주도된다. 그러므로 불연속면은 아 래 층의 혼합이 어느 깊이까지 일어나는지를 보여주는 좋 은 지시자이다.

영양염의 연직 단면도에서 질산염과 인산염의 경우에는 표층 기원 해수의 유입 효과를 확인할 수 있었음에 반해

규산염에서는 식별되지 않았다(Fig. 5). 이는 중층수가 아극 전선에서 섭입될 때 인산염과 질산염은 표층의 낮은 농도가 보존되는데 반해 규산염은 상대적으로 농도가 높은 물이 표층 가까이에 있어서 혼합을 통해 높은 기성(preformed) 농도를 가지게 되는 것이 아닌가 하는 추측을 낳게 한다. 이는 추후의 연구를 통해 증명되어야 할 부분이다.

동해의 N 대 P의 비는 대양 평균값인 15에 비해 낮은 13 정도를 보이며, 이는 본 연구에서 밝혀진 강력한 2층 분리 구조를 보이는 생지화학적 해수 체계와 관련이 있어 보인다. 표층에서 내려보내기 생산은 Redfield 비를 따르고, 용승이 원활하지 않으면 질산염은 탈질산염화 과정을 거치면서 Redfield 비보다 줄게 된다. 따라서 이는 동해의 N 대 P의 비가 왜 작은지를 잘 설명할 수 있다. 한편 시스템이 유지되려면 아래 층으로 빠져나간 영양염은 신생산으로 보충되어야 한다. 그런 의미에서 대마난류는 동해 생태계에 큰 영향을 미친다. 대마난류는 열과 염뿐만 아니라 생물 생산성을 좌우하는 영양염의 주공급자이다. 이러한 중요성은 일찌감치 감지되었지만 아직까지 동해에서 질소, 인, 탄소의 물질 수지 모형은 미완성인 상태이다(Yanagi 2002). 즉, 동해의 물질 순환에 대한 중요한 기작이 아직 파악조차 되어 있지 않아 이에 대한 더 활발한 연구가 필요한 실정이다.

사 사

CREAMS 탐사 참여자 분들께 깊은 감사를 드립니다. 그들의 노고와 헌신이 없었더라면 이 논문의 주제는 발견되지 못했을 것입니다. 김봉국은 BK21 프로그램과 EAST-I의 지원을 받았으며 이 연구는 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- Armstrong FAJ, Stearns CR, Strickland JDH (1967) The measurement of upwelling and subsequent processes by means of the Technicon AutoAnalyzer and associated equipment. *Deep Sea Res* **14**(3):381-389
- Bernhardt H, Wilhelms A (1967) The continuous determination of low level iron, soluble phosphate and total phosphate with the AutoAnalyzer. *Tech Symp* **1**:385-389
- Gamo T, Horibe Y (1983) Abyssal circulation in the Japan Sea. *J Oceanogr Soc Japan* **39**:220-230
- Kajiura K, Tsuchiya M, Hidaka K (1958) The analysis of oceanographical condition in the Japan Sea. *Rep Develop Fisher Resour in the Tsushima Warm Current* **1**:158-170
- Kang DJ, Park SY, Kim YG, Kim K, Kim KR (2003) A moving-boundary box model (MBBM) for oceans in change : An application to the East/Japan Sea. *Geophys Res Lett* **30**(6). doi:10.1029/2002GL016486
- Kang DJ, Kim K, Kim KR (2004) The past, present and future of the East/Japan sea in change : a simple moving-boundary box model approach. *Prog Oceanogr* **61**:175-191
- Kim K, Kim KR, Chung JY, Choi BH, Byun SK, Hong GH, Takematsu M, Yoon JH, Volkov Y (1996) New findings from CREAMS Observations: Water masses and eddies in the East Sea. *J. Kor Soc Oceanogr* **31**:155-163
- Kim K, Kim KR, Kim YG, Cho YK, Kang DJ, Takematsu M, Volkov Y (2004) Water masses and decadal variability in the East Sea (Sea of Japan). *Prog Oceanogr* **61**:157-174
- Kim K, Chung JY (1984) On the salinity minimum and dissolved oxygen maximum layer in the East Sea (Sea of Japan). *Elsev Oceanogr Ser* **39**:55-65
- Kim CH, Lie HJ, Kim KS (1991) On the intermediate water in the southeastern East Sea(Sea of Japan). In: Takano K (ed) *Oceanography of Asian Marginal Seas*. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, pp 129-141
- Miyazaki M (1953) On the water masses of the Japan Sea. *Bull Hokkaido Reg Fish Res Lab* **7**:1-65
- Nitani H (1972) On the deep and bottom waters in the Japan Sea. In: Shoji D (ed) *Research in Hydrography and Oceanography*. Hydrographic Department of Japan Maritime Safety Agency, Tokyo, pp 151-201
- Seung YH (1997) Application of the ventilation theory to the East Sea. *J of Kor Soc Oceanogr* **32**:8-16
- Shin CW, Byun SK, Kim C, Seung YH (1998) Southward intrusion of the East Sea intermediate water into the Ulleung Basin: observations in 1992 and 1993. *J of Kor Soc Oceanogr* **33**:146-156
- Sudo H (1986) A note on the Japan Sea Proper Water. *Prog Oceanogr* **17**:313-336
- Uda M (1934) The results of simultaneous oceanographical investigations in the Japan Sea and its adjacent waters in May and June 1932. *J Imp Fish Exp Sta* **5**:57-190
- Yanagi T (2002) Water, salt, phosphorus and nitrogen budget of the Japan Sea. *J Oceanogr* **58**:797-804

Received Aug. 11, 2010

Revised Sep. 1, 2010

Accepted Sep. 14, 2010