

동해 난수역의 일차생산에 대한 대한해협 유입 영양염의 기여

이동섭* · 노태근
부산대학교 해양학과

Contribution of Nutrient Flux through the Korea Strait to a Primary Production in the Warm Region of the East Sea

TONGSUP LEE* AND TAEKEUN RHO

Department of Oceanography, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

대륙주변해인 동해의 일차생산력은 조사하기 쉬운 듯하지만 해황의 역동적 변동성 때문에 현장 관측으로 파악하기 매우 어렵다. 이 연구에서는 난수역의 평균적인(총)일차생산 배경값을 생지화학적 가설에 기반하여 추정하였다. 계산에 사용된 비혼합-부상 가설은 일단 일차생산이 오로지 대한해협을 통해 수송된 영양염에 의해서만 일어난다고 가정했을 경우로서, 결과(209 gC m⁻² y⁻¹)는 발표된 위성기반 순일차생산력과 대등한 것으로 나타났다. 그런데 일차생산이 100% 신생산에 의존한다고 가정했기 때문에 이 구속을 풀어 신생산지표를 0.6이라 가정하면 일차생산력은 40% 가량 높아진다. 결과는 오로지 대한해협을 통해 유입되는 영양염만으로도 기존에 알려진 일차생산을 지지하고도 남음을 말해준다. 그런데 배경값을 구하기 위해 배제시켰던 여러 가지 변동 요인들, 예컨대 용승, 지하수 유입, 대기 유입, 해양 투기, 태풍 등 배경에 더 해지는 교란은 모두 일차생산을 추가로 부양하는 요인이고, 여기에 아직 정량화 되지 못한 초미소남세균의 광합성에 대한 기여까지 고려하게 되면 실제 일차생산력은 배경값의 두 배 이상도 가능할 것으로 추정된다. 이 경우에 일차생산력은 신생산지표가 0.6으로 알려진 페루 용승역과 비등한 규모가 된다.

In situ measurement of a primary production in East Sea, a marginal sea with a fair accessibility, is nonetheless an arduous task because of dynamic variability. In this study, we estimated the mean value of background (gross) primary production over the warm region of the East Sea based on a biogeochemical hypothesis. We propose an immiscible-shoaling hypothesis for the estimation of primary production, which assumes that primary production in the warm region occurred only by the nutrient supply through the Korea Strait. Annual primary production thus estimated is 209 gC m⁻²y⁻¹, which is comparable to the satellite-based estimates of net primary production in the region. However, since this hypothesis assumes that primary production is based on only the new nutrients supplied to the system, primary production would increase by 40% if we release the assumption, and assume $f=0.6$. This suggests that nutrient influx through the Korea Strait alone is more than enough to support primary production previously reported. Primary production may increase as much as two times if we considered other external perturbations excluded intentionally to estimate the background level of primary production, such as coastal upwelling, submerged ground water discharge, aeolian input, ocean dumping, and mixing by typhoons as well as the contribution of cyanobacteria that has not been quantified in the region. This implies the primary production in the warm region of the East Sea would be comparable to that of the Peru upwelling region with $f=0.6$.

Key words: nutrient flux, primary production, immiscible-shoaling hypothesis, East Sea

서 론

해양의 일차생산은 해양이 어떻게 작동하는 지를 이해하는데 있어서 아마도 물리적 상태 변수들 못지않게 영향력이 가장 큰 변수

라 지목된다. 대륙주변해는 특히 생물 생산력이 높아서 과학적 이해뿐만 아니라 경제적 중요성 때문에 일차생산을 파악하는 것이 요구된다. 이 논문의 대상 지역인 동해 아극전선 이남의 난수역의 일차생산은 양호한 접근성에도 불구하고 소규모의 단기 변동성이 강한 해황 특성과 국가간 자료 교환의 어려움 등으로 인해 정량적으로 파악하기가 어렵다.

Received December 11, 2012; Revised February 12, 2013; Accepted May 6, 2013
*Corresponding author: tlee@pusan.ac.kr

현장 관측 자료 부족은 1998-2000년도에 수행한 ONR JES 프로그램으로 크게 해소되었다. 이 광역탐사의 결과로 동해를 일차생산의 변동성 관점에서 네 개의 생물지리구역으로 나누어 보게 되었다. 봄과 가을의 두 차례에 걸쳐 식물플랑크톤 번성이 일어나며, 남부의 난수역이 북부의 냉수역에 비해 생산성과 변동성이 큰 것으로 밝혀졌다(Ashjian *et al.* 2005). 하지만 위 조사에 SeaSoar 같은 고분해능 중단 관측장비가 동원되었고, 광역 위성 영상을 동시에 분석하였음에도 불구하고 전 계절 현장관측이 수행된 것은 아니기 때문에 일차생산에 대한 자료와 이해는 여전히 제한적이다.

지금까지 동해의 일차생산에 대한 가장 포괄적인 연구로 위성해석 분석 알고리즘을 활용한 Yamada *et al.*(2005)을 들 수 있다. 저자들은 난수역을 생산력이 더 높은 우리나라 쪽 울릉분지와 낮은 일본 쪽 아모토분지로 갈리는 것으로 파악하였으며, 일차생산력은 각기 $222 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ 와 $191 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ 라 발표하였다. 뒤 이어 국내 학자들이 주도하여 울릉분지에서 일차생산이 높은 원인에 대한 고찰이 있었다. Yoo and Park (2009)은 남서 연안 해역의 용승이, 김 등(2007)은 중규모 소용돌이(eddies)가 높은 일차생산의 주역이라고 발표 하였다. 이들 과정은 중요하기는 하지만 서부 난수역의 일차생산에 대해 비정기적(episodic)으로 기여하는 과정이어서 평상시의 바탕 일차생산성의 특성에 대해서는 별도로 추정해 볼 필요가 있다. 예컨대 난수역이 동해 전체 표면적, 약 10^6 km^2 에서 점유하는 비율을 40%로 보고, 혼합층 두께를 50 m, 그리고 대한해협을 통한 해수 유입을 평균 $2.5(\pm 0.5) \text{ Sv}$ (Na *et al.* 2009)로 하면 어렵잡아 계산한 체류시간은 100일 규모($\sim 90\pm 30$ 일)이다. 체류시간이 짧기 때문에 난수역의 표면혼합층 또는 유광대는 이류가 주도하는 환경이며, 이류의 파생 산물인 소용돌이 때문에 기초생산의 시공간적 변동성이 매우 클 것이라는 점을 시사한다. 그런데 이러한 역동적인 변동성을 모두 반영하는 현장 조사는 사실상 거의 불가능에 가깝다.

해색위성은 시공간적 분해능이 높아서 훌륭한 대안이 될 수 있다(Yoon *et al.* 2012). 성과는 혼합층 바닥 가까이에서 거의 상시 존재하는 아표층 엽록소 최대층(이하 SCM: subsurface chlorophyll maximum)을 제대로 반영하는 알고리즘 확보에 달려있다. SCM의 존재는 Behrenfield and Falkowski(1997)의 VGPM(Vertically Generalized Production Model)의 기본 전제와 부합하지 않는다. 게다가 SCM의 일차생산력은 지금까지 평가된 적이 드물기 때문에 위성 기반 일차생산성 측정에도 상당한 불확실성이 포함되어 있다고 보아야 마땅하다.

이 논문에서는 가설 적용과 지화학적 단순 물질균형 관점에서 동해 난수역의 배경 일차생산력을 간접적으로 추정하고 기존 결과와 비교해 보았다. 여기서 ‘배경’이란 단서를 붙인 이유는 토의 부분에서 다시 다루겠지만 소용돌이와 용승에 의해 지지되는 시공간적 변동성이 큰 일차생산을 일단 논의에서 제외했음을 뜻한다.

재료 및 방법

비혼합-부상 가설

이 가설은 대한해협으로 진입하는 해수의 유광대 아래에 풍부한 들어있던 영양염이 난수역의 아표층엽록소최대층(SCM)을 만들어 놓는다는 사실에(노 등 2012) 바탕을 두고 사고실험적으로 확대 해석한 것이다. SCM이 만들어지고 유지되려면 우선 쓰이지 않은

영양염을 가지고 대한해협으로 진입한 저층 해수가 다른 해수와 섞이지 않은 상태로 유광대로 부상하여야 한다. 만일 혼합을 겪게 된다면 혼합층이 깊어져서 SCM이 유지되지 못하게 된다. 실제로는 수온이 0°C 에 가까운 동해 저층수 위로 최저수온이 14°C 가 넘는 난류수가 흐르는 상황이므로 밀도성층이 강하게 발달하기에 적절한 여건을 충족하고 있다. 그래서 일단 연직확산이 아주 제한적이라고 가정하면 난수역의 일차생산은 기본적으로 대한해협에서 공급되는 영양염에 전적으로 의존해야만 한다. 하지만 대한해협에서 흘러드는 해수의 유광대 또는 상부 혼합층에는 영양염이 거의 없다. 이는 동중국해와 남해를 거치면서 영양염이 이미 일차생산에 다 쓰인 결과이다. 영양염은 밀도약층과 그 아래 해수에만 풍부한데 이것이 사용된다면 유광층으로 부상되어야 한다. 이는 좁은 해협을 통과한 해수가 넓은 지역으로 퍼지면서 두께가 점차 얇아져서 가능할 것이라는 것이 비혼합-부상(immiscible-shoaling) 가설의 요지이다.

난수역에 대한 현장 관측 결과를 보면 SCM은 저수심대에서 용존산소 최대층과 일치한다(노 등 2012). 이는 광합성의 결과로 쉽게 납득이 되는 부분이다. 그런데 바로 아래에 용존산소 최소층이 자리잡고 있으며 염분이 높은 해수 특징을 보인다. 이 고염이면서 용존산소가 낮은 불연속층은 해저에 접한 대한해협으로 진입한 해수이다. 즉, 쿠로시오에서 기원한 해수이되 표층수는 아닌 해수이다. 이렇듯 SCM-용존산소최대층 바로 아래에 용존산소최대층-최고염수가 짝을 이루고 있는 것은 울릉분지 전역에서 관측되며 이는 비혼합-부상 가설을 강력하게 지지한다(Fig. 1).

가설에 따르면 난수역에서 용존산소 최소층은 대한해협 해수의 저층수이자 진광대의 바닥이면서 상부혼합층의 바닥이란 아주 특별한 층으로 해석된다. 이전에는 난수역에 발달된 강력한 성층이 일차생산에 미치는 제약의 가능성은 전혀 주목 받지 못했고, SCM이 널리 발달하는 것이 일반적인 특성이었다는 정도로 다루어졌다.

배경 일차생산력의 추정에 쓰인 또 다른 가정은 질량보존의 관점에서 단순화 시킨 것으로 대한해협을 통해 공급된 영양염이 모두 광합성에 쓰인다는 것이다. 이렇게 되려면 대한해협을 통과할 때에는 유광층 아래에 있던 영양염이 풍부한 저층수가 이루어지면서 유광층 안으로 떠올라서 가지고 있던 영양염이 광합성에 쓰여야 한다. 이 같은 시나리오는 뒤에 더 논의 되겠지만 난수역에서 SCM 바로 아래에 용존산소 최소층이 존재하는 것과 잘 부합된다.

인 플럭스-기반 배경 일차생산의 추정

대량영양염(macronutrients) 가운데 순환 방식이 가장 단순한 인(P)을 골라 플럭스를 계산하였다. 대한해협으로 유입되는 인의 플럭스는 용존무기인(DIP), 용존유기인(DOP)과 입자물 유기인(POP)으로 나누어 볼 수 있다. 대한해협으로 유입하는 해수 수송량(Takikawa and Yoon 2005)에 기여하는 기원수로는 쿠로시오, 장강 유출수, 동중국해 대륙붕수, 남해 연안수와 대한해협저층냉수를 고려하였다. 이들의 기여도는 월별 염분 수치를 이용하여 산정하였고(최, 2008) 기여도에 문헌에 나와있는 기원수의 인산염 농도를 곱해서 플럭스를 구했다(Table 1). POP는 Yanagi (2002)의 값을 해수 수송량 2.5 Sv 에 대해 정규화하여 간접적으로 구했다. Yanagi (2002)가 추정된 대한해협 유입수의 총 인의 평균농도는 0.74 M 로서 이 가운데 POP 기여분이 0.11 M 이기 때문에 DIP+DOP 플럭스에 $0.74/0.63$ 을 곱해서 총인의 플럭스를 구했다. 해수 유입은 Takikawa and Yoon(2005)

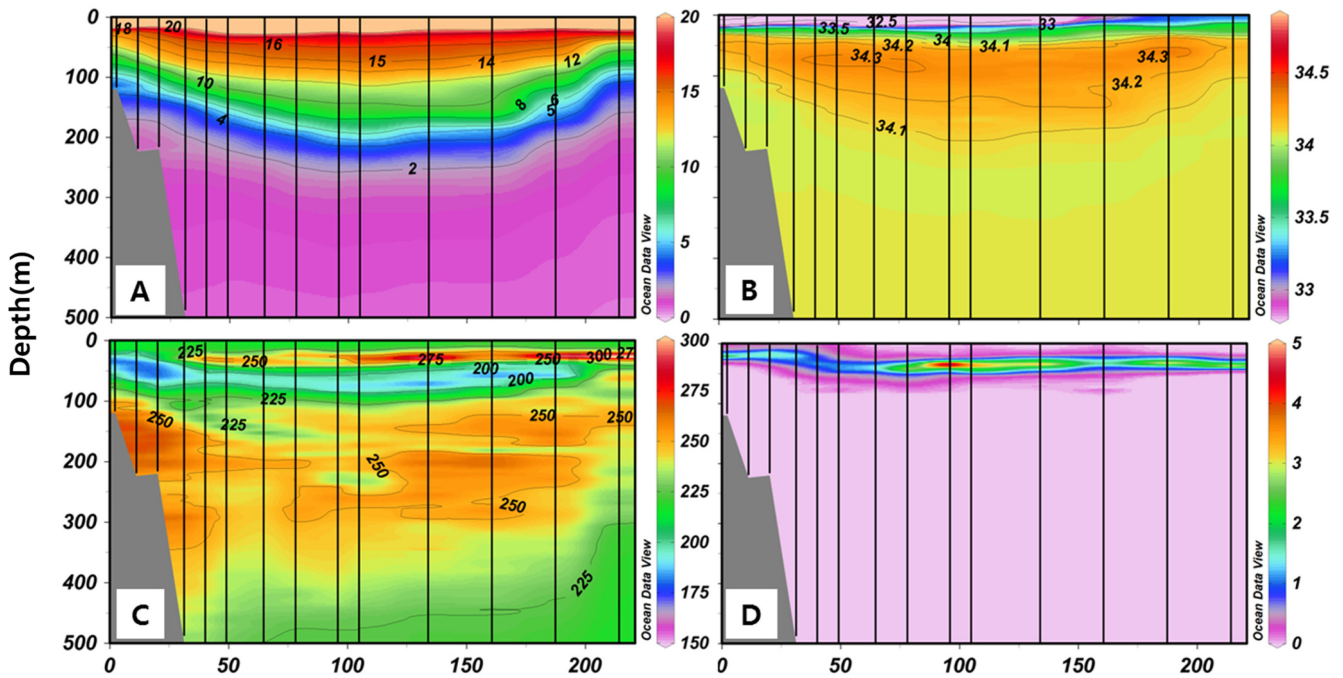


Fig. 1. Cross sections of (A) temperature (°C), (B) salinity (‰), (C) dissolved oxygen ($\mu\text{mol kg}^{-1}$), and (D) fluorescence (arbitrary unit) along the 37°N in the Ulleung Basin in August 2009.

Table 1. Annual flux of phosphorus flux through the Korea Strait calculated from long term averaged volume transport of Takikawa and Yoon (2005) and source water contribution estimated from salt budget.

Phosphorous components	Flux ($\times 10^{10}$ mol P y^{-1})	Source water contribution in % (P concentration mol/kg)				
		Kuroshio	ECS SW [§]	Changjiang discharge	Coastal waters	KSBCW [†]
Dissolved inorganic P	3.81	98 (0.38-1.61) ¹	0.43 (0.18) ¹	0 ^{‡,2}	0.81 (0.83) ³	0.76 (1.63)
Dissolved organic P	1.66	-	-	6.5 (1.2) ²	93.5 (40.8) ³	-
Particulate organic P	0.96 ⁴					
Total	6.43					

[§]East China Sea Shelf Waters.

[†]Korea Strait Bottom Cold Water.

[‡]All DIP is assumed to be converted to DOP (see text).

Data source: 1. Zhang *et al.* 2007; 2. Whang, 2006; 3. Water Information System; 4. Recalculated from Yanagi (2002) to a Korea Strait volume transport of 2.5 Sv.

의 장기간 월 평균 해수 유입량 자료를 사용하였다. 연간 해수 유입량은 2.53 Sv으로 Na *et al.*(2009)의 2.5 Sv과 차이가 크지 않다.

용존무기인은 쿠로시오가 주공급원이고, 용존유기인은 남해 연안수가 주공급원이다. 장강이 배출한 용존무기인은 모두 광합성을 거쳐 용존유기인으로 유입되는 것으로 가정하였는데 이것의 기여도는 6.5% 정도로 추정되었다. 계절에 따라 출현하는 대한해협저층수의 기여도는 무시할 정도였다.

대한해협을 통한 인의 연간 플럭스로부터 동해 난수역에 대한 일차생산력을 추정하는 데 쓰인 가정을 다시 정리하면 다음과 같다.

가정 1. 대한해협을 통해 유입된 총인(6.43×10^{10} mol P y^{-1} ; Table 1)은 모두 일차생산에 쓰인다. 즉, 유입된 용존유기인과 입자유기인도 현장 재무기화를 거쳐 일차생산에 기여하는 것으로 보였다.

가정 2. 모든 인은 일차생산에 단 한 번만 쓰이고 전부 아표층으로 송출(export)된다. 이는 신생산 지표(f)가 1.0인 극단적인 경우에 해당한다.

결과 및 토의

비혼합-부상 가설과 가정을 적용하여 계산된 동해 난수역의 총 일차생산력(GPP)은 $209 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ 이다(Table 2). 이 값은 Yamada *et al.*(2005)이 제시한 한국쪽 서부와 일본 쪽 동부의 순일차생산력(NPP)인 각기 $222 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ 와 $191 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ 에 가깝다. GPP와 NPP의 차이(10%~30%)를 감안하면 조금 작은 값에 해당한다.

일차생산력 추정에는 불확실성 발생 요인이 여럿 있다. 먼저 난수역의 면적을 전체의 40%로 잡은 것을 아극전선역을 난수역과 냉수역에 반반씩 편입시켜 고려할 경우에 50%가 된다. 이 경우에 결과는 $167 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ 로 줄게 되어 20% 감소 요인이 된다. 대한해협을 통한 해수 수송량도 중요한 변수가 된다. 그런데 최근의 연구 결과는 2.5 ± 0.5 Sv에서 크게 벗어나지 않으므로 이 역시 최대 ± 20% 불확실성 요인이라 평가된다.

인의 자료로 탄소 고정을 추정하는데 쓰인 C: P화학량비도 결과에

Table 2. Biogeochemically constrained annual mean primary productivity ($\text{gC m}^{-2}\text{y}^{-1}$) in the warm region of the East Sea and data used for calculation

Variables	Values	Remarks
Surface water volume	$1.96 \times 10^4 \text{ km}^3$	
KS volume transport	2.5 Sv	Na <i>et al.</i> (2009)
Total P flux	$6.43 \times 10^{10} \text{ mol P y}^{-1}$	see Table 1
C flux equivalent	$6.81 \times 10^{12} \text{ mol C y}^{-1}$	C:P = 106:1
C unit conversion	$8.17 \times 10^{13} \text{ gC y}^{-1}$	
Annual mean primary productivity	$209 \text{ gC m}^{-2}\text{y}^{-1}$	for 40% of surface area (= $0.4 \times 9.78 \times 10^5 \text{ km}^2$)

영향을 준다. 제시한 결과는 전통적으로 사용되어 온 Redfield 비 106:1로 계산한 것이다(Table 2). C:P의 보고된 최대값은 123 ± 10 (Körtzinger *et al.* 2001)이다. C:P=123을 사용하면 계산 결과는 $242 \text{ gC m}^{-2}\text{y}^{-1}$ 로 약 15% 높아진다. 지금까지 논의된 요인들은 비슷한 크기(~20%)의 변동 요인들로서 한쪽으로 쏠려 영향을 주지 않으므로 결과에 30% 넘게 불확실도를 발생시키지는 않을 것으로 평가된다.

보다 심각한 변동 요인으로 들만 한 것은 최근에 일차생산에서 관심 대상으로 주목을 받고 있는 연안 용승과 이것과 소용돌이와의 상호작용으로 만들어지는 고생산성 필라멘트를 계산에서 고려하지 않은 것과, 재생산이 0이라고 한 가정 2의 적용이다. 이 논문에서는 대한해협에서 유입된 인 가운데 쓰이지 않고 외부로 유출되는 양과 용승으로 공급된 양이 같다고 가정하고 계산하였다. 다소 무리해 보이는 이 가정을 도입한 이유는 해수의 경우에는 냉수역으로 나간 양만큼 용승으로 되돌아 오면 정상상태가 유지되지만 인(영양염)의 경우에는 농도가 거의 0인 표층 해수가 빠져나가고 영양염이 풍부한 용승 해수로 보충되기 때문에 간단한 상자 모형에서조차 정상상태가 유지되지 않기 때문이었다. 동해의 해수 순환이 역동적이기 때문에 비정상상태 모형은 수십년 이내에 받아들이기 어려운 커다란 변화를 예측 결과로 내놓기 쉽다.

동해가 반드시 정상상태이어야 할 당위성은 없으므로 용승에 의한 기여를 추가분으로 고려 할 수도 있다. Yanangi(2002)는 동해에서 인의 용승 플럭스를 $2.07 \times 10^{10} \text{ mol P y}^{-1}$ 으로 추정된 바 있다. 아극전선역에서는 용승이 일어나지 않으므로 냉온수역에서 반반씩 용승이 일어난다고 가정하면 총인 플럭스는 $6.43 \times 10^{10} \text{ mol P y}^{-1}$ 에서 $7.47 \times 10^{10} \text{ mol P y}^{-1}$ 로 늘게 되고 일차생산력 추정치는 $243 \text{ gC m}^{-2}\text{y}^{-1}$ 으로 약 15% 상향조정된다.

일차생산 추정에 쓰인 것 가운데 가장 문제가 되는 것은 DIP가 단 한차례 쓰이고 유광대 밖으로 내보내진다고 하는 가정 2, 즉 인의 표층수 재순환 효율을 0으로 본 것이다. 이는 일차생산 배경값의 최소한의 규모를 알아보려 설정된 가정이다. 통상 외해의 유광대에 있는 영양염은 평균 10번 가량 재순환을 거친 다음에 빠져나가는 것으로 알려져 있다. 여하튼 평균적인 외해에 비해 인이 입자로 변환되는 층은 유광대의 바닥에 아주 가깝고 표층 혼합층의 두께도 얇으며 빈영양 환경이 아니므로 표층 재순환 효율은 외해보다는 훨씬 낮을 것으로 예상된다. 그런데 인의 재순환을 작게 잡아서 평균 한 번 일어난다고 하면 일차생산 추정치는 두 배로 늘게 된다. 이 경우에 기존 보고값과 상충하지 않으려면 공급된 인은 반만 쓰이고 반은 그대로 내보내져야 한다. 동중국해를 거쳐 대한해협으로 진입하는 표층 해수가 장강이라는 거대한 영양염 공급원을 가지고 있음에도 영양염이 고갈된 상태인 점과, 동해 표층수에

영양염이 역시 고갈되어 있는 사실에 비추어보면 이러한 계산 결과는 기존의 일차생산력이 크게 과소평가 되었을 가능성에 무게를 실어준다.

울릉분지에 대해 잠정 보고된 신생산 지표는 $f=0.6$ 이다(강창근 미공개 자료). 이를 적용하면 재생산이 40% 추가되므로 일차생산은 40% 상향 조정되어 $292 \text{ gC m}^{-2}\text{y}^{-1}$ 가 되고 Yamada *et al.*(2005)의 추정치에 대해 비례 식을 적용하면 일본쪽 동부의 일차생산은 $252 \text{ gC m}^{-2}\text{y}^{-1}$ 으로 계산된다. GPP에서 10-30%를 제한 것을 NPP로 보면 신생산을 고려했을 때 대한해협으로 유입된 영양염이 단독으로 지지할 수 있는 일차생산은 기존의 NPP추정값을 넘어선다. 울릉분지의 신생산에 대해 이전에 보고된 값으로 Moon *et al.*(1998)의 $0.03\text{--}0.72$ 과 $64 \text{ gC m}^{-2}\text{y}^{-1}$ (Hahm and Kim, 2001)이 있는데 후자는 일차생산을 $180\text{--}200 \text{ gC m}^{-2}\text{y}^{-1}$ 로 보았을 때 $f=0.32\text{--}0.35$ 에 해당한다. 총일차생산 추정값이 신생산 지표에 매우 민감하기 때문에 신생산 지표는 일차생산 추정에 커다란 불확실성 요인으로 작용한다.

신생산 정의에서 '새' 영양염은 강물 유입이나 강수에 의한 것도 포함하지만 다수의 논문이 유광층 아래에서의 연직 플럭스를 주목하고 있는 것에 반해 비혼합-부상 가설에서는 이류로 비롯되는 공급이 새 영양염이 추가 되므로 상황이 크게 달라서 기존에 발표된 지표를 바로 적용하기 어렵다.

또 다른 변동 가능성은 과도한 부상(over-shoaling)으로 대한해협 유입수의 두께가 매우 얇아지거나 불연속면의 물리적 파괴로 동해 내부의 영양염이 일차생산에 쓰이는 경우이다. 그런데 이 경우 또한 일차생산을 과소평가하게 만든다.

지금까지 논의된 일차생산은 배경값에 관한 것이었다. 여기서 고려되지 않은 일차생산을 촉진시키는 물리적 과정, 예컨대 용승이나 태풍에 의한 성층 파괴와, 지금까지 시행되어 온 해양투기와 같은 인위적인 부영양화는 배경값에 더해 일차생산을 부양할 것이다. 이 밖에도 과소평가에 이르게 할 요인은 더 있다. 대표적인 최근 연구 결과는 지하수의 유입(Kim *et al.* 2008), 대기 침적(Kim *et al.* 2011)과, 아직 동해에서 광합성 기여도가 정량적으로 평가되지 못한 초미소남세균(picocyanobacteria)의 존재이다. 요약하자면 지금까지 동해 냉수역에서 수행된 일차생산력 추정 연구 결과는 크게 과소평가 되었을 소지가 아주 높다는 것이다. 앞으로의 평가에서는 기존 측정 방법을 반복 적용하는 것보다는 새로운 측정법을 적용하는 것이 바람직해 보인다. 예컨대 최근에 제안된 삼중산소 동위원소 측정법(Luz and Barkan 2000)이 좋은 대안의 하나가 될 것으로 보인다.

동해는 지구변화에 따른 해양의 반응을 미리 알아볼 수 있는 척후병의 역할이 크게 기대되는 곳이다. 동해는 현재 역동적으로 변화하고 있는 중이며 일차생산 또한 예외일 수 없다. 온난화된 세계

에서 대부분의 해양에서 일차생산의 감소가 예상되고 있는 가운데 비혼합-부상 가설은 온난화에 따라 난류 흐름이 강화되어 대한해협을 통한 해수 수송량이 늘게 되면 일차적으로는 동해 난수역의 일차생산 배경값이 높아 질 것으로 예견하고 있다. 온난화에 의한 성층 강화뿐만 아니라 이류의 강화에 의한 수괴 안정도의 약화도 함께 고려되어야 할 것이다. 향후 SCM을 이루는 플랑크톤-미생물 조합이 동해 외부에서 계속해서 동중국해-쿠로시오 계에서 유입되는지를 확인해 보고, 만일 이러한 접종가설(inoculation hypothesis)이 긍정적이라면 이는 비혼합-부상 가설에 크게 힘을 실어주게 될 것이다.

사 사

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었습니다. 논문의 완성도를 높이는데 도움을 크게 주신 심사자 두 분께 깊이 감사 드립니다.

참고문헌(References)

- 김동선, 김경희, 심정희, 유신재, 2007. 동해 울릉분지에서 봄과 여름동안 시계방향 외류가 영양염과 염류소에 미치는 영향. 한국해양학회지 바다, **12**: 280-286.
- 노태근, 이동섭, 김규범, 장경일, 나태희, 김경렬, 2012. 동해 전역에 장기간 발달하는 아표층 염류소 최대층과 수괴의 물리 화학적 특성과의 상관관계. Ocean Polar Res., **34**: 413-430.
- 물환경정보시스템-국립환경과학원. <http://water.nier.go.kr/>.
- 최정운, 2008. 장강유출수가 동해 표층 염분에 미치는 영향. 석사학위논문, 부산대학교, 81 pp.
- Ashjian, C.J., C.S. Davis, S.M. Gallager and P. Alatalo, 2005. Characterization of the zooplankton community, size composition, and distribution in relation to hydrography in the Japan/East Sea. Deep-Sea Res. II, **52**: 1363-1392.
- Behrenfeld, M.J. and P.G. Falkowski, 1997. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. Limnol. Oceanogr., **42**: 1-20.
- Hahn, D. and K.-R. Kim, 2001. An estimation of the new production in the southern East Sea using helium isotopes. J. Kor. Soc. Oceanogr., **36**: 19-26.
- Luz, B. and E. Barkan, 2000. Assessment of oceanic productivity with the triple isotope composition of dissolved oxygen. Science, **288**: 2028-2031.
- Kim, G., J.-W. Ryu and D.W. Hwang, 2008. Radium tracing of submarine groundwater discharge (SGD) and associated nutrient fluxes in a highly-permeable bed coastal zone, Korea. Marine Chemistry, **109**: 307-317.
- Kim, T.-W., K. Lee, R.G. Raymond, H.-D. Jeong and H.J. Jeong, 2010. Increasing N abundance in the Northwestern Pacific Ocean due to atmospheric nitrogen deposition. Science, **334**: 505-509.
- Körtzinger, A., J.I. Hedges and P.D. Quay, 2001. Redfield ratio revisited: removing the biasing effect of anthropogenic CO₂. Limnol. Oceanogr., **46**: 964-970.
- Moon, C.H., S.R. Yang, H.S. Yang, H.J. Cho, S.Y. Lee and S.Y. Kim, 1998. Regeneration processes of nutrients in the polar front area of the East Sea. IV. Chlorophyll a distribution, new production and the vertical diffusion of nitrate. J. Kor. Fish. Soc., **31**: 267-285.
- Na, H., Y. Isoda, K. Kim, Y.H. Kim and S.J. Liu, 2009. Recent observations in the straits of the East/Japan Sea: a review of hydrography, currents and volume transports. J. Mar. Syst., **78**: 200-205.
- Takikawa, T. and J.-H. Yoon, 2005. Volume transport through the Tsushima Straits estimated from sea level difference. J. Oceanogr., **61**: 699-708.
- Zhang, J., S.M. Liu, J.L. Ren, Y. Wu and G.L. Zhang, 2007. Nutrient gradients from the eutrophic Changjiang Estuary to the oligotrophic Kuroshio waters and re-evaluation of budgets for the East China Sea Shelf. Prog. Oceanogr., **74**: 449-478.
- Whang, B., 2006. Cultural eutrophication in the Changjiang (Yangtze River) plume: History and perspective. Estu. Coas. Shelf Sci., **69**: 471-477.
- Yamada, K., J. Ishizaka and H. Nagota, 2005. Spatial and temporal variability of satellite primary production in the Japan Sea from 1998 to 2002. J. Oceanogr., **61**: 857-869.
- Yanagi, T., 2002. Water, salt, phosphorus and nitrogen budgets of the Japan Sea. J. Oceanogr., **58**: 797-804.
- Yoo, S. and J. Park, 2009. Why is the southwest the most productive region of the East Sea/ Sea of Japan? J. Mar. Syst., **78**: 301-315.
- Yoon, J.-E., J. Park and S. Yoo, 2012. Comparison of primary productivity algorithms for Korean waters. Ocean Sci. J., **47**: 473-487.

2012년 12월 11일 원고접수

2013년 2월 12일 수정본 접수

2013년 5월 6일 수정본 채택

담당편집위원: 강창근