

동해 해수의 질소:인의 비

이동섭¹ · 노태근²

¹부산대학교 해양학과

²한국해양과학기술원 해양관측·자료실

Seawater N/P ratio of the East Sea

TONGSUP LEE¹ AND TAE-KEUN RHO²

¹Department of Oceanography, Pusan National University

²Ocean Observation and Information Section, Korea Institute of Ocean Science and Technology

해양에서 질소와 인은 해양의 주된 일차생산자인 식물플랑크톤의 성장을 제한하는 원소이다. 우연히도 대양 해수의 N/P 비는 16이란 상수를 보이며, 질산염과 아질산염의 몰농도를 인산염의 몰농도로 나눈 값으로 계산된다. 해양내부의 생태계 역학과 생지화학적 순환 이해에 아주 유용하게 쓰여왔다. 동해는 독자적인 해수연직순환 체제를 보유한 작은 대양의 특성을 가지고 있고 적절한 반응시간과 연구를 위한 접근성이 좋기 때문에 기후변화와 관련된 연구를 진행하기에 적합하고 N/P 비를 이용하여 기후변화에 관련된 환경변화에 관한 논문이 최근에 자주 발표되고 있다. 그런데 인용되는 N/P비는 논문마다 달라서 해석에 혼선을 빚기도 하므로 기존의 영양염 자료 가운데 자료의 품질에 대한 신뢰도가 높은 자료를 선별해서 동해 N/P비의 대표값을 찾아 보았다. 2000년도를 기준으로 동해 전체를 대상으로 계절적 수온약층 아래의 수심이 300 미터를 넘는 해수의 N/P는 12.7 ± 0.1 로 괄목할 만하게 좁은 범위로 나타났다. 향후 추가적인 연구를 통한 새로운 N/P 비 값이 제시되기 전까지는 본 연구에서 제시된 값이 사용되어 상이한 N/P 비로 인한 생지화학적인 순환과 생태계 반응에 대한 해석에서 혼선이 최소화 되기를 희망한다.

Nitrogen and phosphorus are the limiting elements for growth of phytoplankton, which is a major primary producer of marine ecosystem. Incidentally the stoichiometry of N/P of ocean waters, measured by the (nitrate + nitrite)/phosphate ratio converges to a constant of 16. This characteristic ratio has been used widely for the understanding the ecosystem dynamics and biogeochemical cycles in the ocean. In the East Sea, several key papers were issued in recent years regarding the climate change and its impact on ecosystem dynamic and biogeochemical cycles using N/P ratio because the East Sea is a “miniature ocean” having her own meridional overturning circulation with the appropriate responding time and excellent accessibility. However, cited N/P values are different by authors that we tried to propose a single representative value by reanalyzing the historical nutrient data. We present N/P of the East Sea as 12.7 ± 0.1 for the year 2000. The ratio reveals a remarkable consistency for waters exceeding 300m depth (below the seasonal thermocline). We recommend to use this value in the future studies and hope to minimize confusion for understanding ecosystem response and biogeochemical cycles in relation to future climate change until new N/P value is established from future studies.

Keywords: Redfield ratio, N/P, East Sea

서론

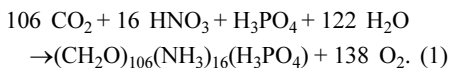
해양이 가진 경이로운 특성 가운데 하나는 표층에서 살다가 죽고 나면 가라앉는 작은 생물 가운데 생체량에 있어서 절대 우위를 차지하고 있는 동·식물 플랑크톤의 체성분을 구성하는 질소:인의 화

학량 비와 심해의 해수에 녹아 있는 질산염과 아질산염 형태로 존재하는 무기 질소: 인산염 형태로 존재하는 무기 인의 화학량 비가 아주 가깝다는 사실이다. 역사적으로 이는 하버드 대학의 생리학자 Alfred C. Redfield(1934)가 플랑크톤 시료(생시료와 사체) 분석 결과를 발표한 논문에서 처음 언급되었다. 플랑크톤을 이루는 생물군이 몹시 다양하며 지역에 따라 각기 다른 플랑크톤 군집이 발달한다는 사실에도 불구하고 N/P의 분석 결과가 모두 20:1(나중에 오

늘날의 값인 16:1로 수정되었음) 가까이로 수렴하는 뜻밖의 결과를 얻었다.

Redfield는 해수의 N/P 비에 해양 플랑크톤이 적응한 결과이거나 아니면 역으로 해수가 생물의 세포 원형질의 성분에 지배된 것 가운데 하나일 것이라고 상호배타적인 두 가설을 제시하였다. 이는 닭이 먼저인가 달걀이 먼저인가 하는 인과관계에 대한 딜레마 상황이다. 그로부터 약 25년 뒤에 Redfield(1958)는 두 번째 가설이 맞는 것으로서 생물이 해수의 화학을 조절하고 있다('biological control of chemical factors')는 견해를 내놓았다. 이 논문에서 플랑크톤의 질소대 인의 화학량 비가 전 지구의 해양에서 연안이든 외양이든 가리지 않고 질산염:인산염의 화학량적 비를 16:1에 놀랍도록 가깝게 만들어 놓았다고 설명했다.

해양학 교과서에 자주 언급되는 Redfield ratio는 탄소, 질소, 인의 원자수비(또는 몰 비)인 C/N/P=106:16:1로서 이런 실험으로 얻은 값에 대한 이론적 설명을 시도한 것이 Redfield-Ketchum-Richards의 방정식(Redfield *et al.*, 1963)이다:



Redfield 비는 해양학에서 비교적 일찍 등장한 경험식으로서 생물학과 화학을 연결시키면서, 주요 생지화학 원소들 사이의 비에 대한 정량적인 정보를 담고 있어서 수치 계산이나 수치모형 구축 등 해양학에서 활용도가 매우 높다.

동해에 대해서는 1998-2000년에 수행된 국제공동조사 ONR JES Program이 각별한 의미를 갖는다. CREAMS II 조사라 부르기도 하는데 이는 1993년에 결성된 한-미-일-러가 참여하는 연구 프로그램인 CREAMS(Circulation Research of the East Asian Marginal Seas)의 선행 조사가 있었기 때문이다. 이 조사로 동해 전역에 대한 영양염 자료가 생산된 것이 계기가 되어 N/P 비 특성이 주목 받게 되었는데 주된 이유는 값이 전 대양 대표값인 16보다 유의하게 낮게 나타났기 때문이다.

이 같은 특징은 일본의 역사적인 자료를 분석한 Yanagi(2002)의 동해의 물질수지 논문에서도 언급되었는데, 동해로 유입되는 해수와 비교할 때 동해 내부에서 N/P 비가 줄어든 것으로 보이기 때문에 질소를 제거하는 탈질작용이 동해 내부에서 활발할 것이라 예상했다. 하지만 동해의 심층수에는 질산염보다 선호되는 산화제인 산소가 충분히 많이 있기 때문에 질소의 대량 제거가 어떤 과정을 통해 일어나는지에 대한 추가적인 설명이 필요하다. 이에 더해 최근에 알려진 질소고정 남세균의 서식이나 대기를 통한 질소의 대량 공급을 감안할 때 낮은 N/P는 더욱 설명하기 어려운 수수께끼로 남게 된다.

Redfield의 관점에서 동해 플랑크톤 군집의 생화학적 조성(또는 종 조성)이 특이할 것이라는 예상부터 수중 또는 표층 퇴적물에서 질소의 제거 또는 N/P 비가 낮은 물의 남북연직순환(meridional overturning circulation)에 이르는 학문 분야 별로 각기 상이한 설명이 가능한 만큼 다양한 가설 검증이 가능한 매우 흥미로운 과학적 소재이다. 이런 맥락에서 이 노트는 이미 언급한 바와 같이 N/P 비에 대한 학술적 역사를 간략히 소개하고, 지금까지 논문에서 동해의 N/P 비가 어떤 값으로 제시되고 인용되었는지 용례를 살펴 보고, 낮은 N/P 비에 대해 제시된 설명에 대한 토의 순으로

전개하였다. 비록 동해는 북서태평양의 소규모 지중해이지만 기후 변화의 관점에서는 역동적인 '작은 대양'이라 불리는 매력적인 천연 실험실이기 때문에 동해 특이적 현상과 전 지구 변화와의 관련성은 면밀히 검토되어야 할 당위성을 가지고 있다. 그래서 궁극적으로는 낮은 N/P 비가 동해에서만 특이적인 해양학적 현상들과 어떻게 맞물려 있는지를 논의하여 동해 연구에 대한 관심을 제고하고자 하였다.

동해의 N/P 비는 얼마인가?

동해 해수의 N/P 비값은 Kim *et al.*(2012)의 Table 1과 Kim and Kim(2013)의 Table 1에 제시한 바 있다. Table 1은 Kim *et al.*(2012)의 Table 1에 최근의 자료를 추가한 것이다. 동해 전체에 대한 N/P 비는 11.40-14.70의 범위로 발표되었으며 이는 모두 Redfield 비인 16보다 현저하게 낮다. 하지만 자료의 범위는 상당히 넓은 편이어서 참값 또는 대표값은 얼마인가 하는 질문이 제기된다. 이를 논하기 앞서 해수 영양염 측정에 대한 현재의 기술적 능력에 대한 평가를 약속할 필요가 있다.

WOCE와 JGOFS가 효시가 된 전 대양 영양염 측정 결과에 대한 평가를 보면 참여한 측정 팀의 재현성과 정밀도는 높으나 심층 자료에서 실험실 별 상당한 크기의 체계적인 편차(offset)이 발견되어 정확도에서는 문제가 있음이 드러났다. 여기서 영양염 분석 정도 표준물질(CRM; certified reference material)이 부재한 것이 걸림돌로 지적되어 CRM 개발을 위한 노력이 시작되었고 한편으로는 분석 장비의 개량도 진행되었다. 현행 질산염의 분석 표준절차(SOP; standard operation procedure)에 구리-카드뮴 환원관이 쓰이는데 이의 운용은 까다로워서 여전히 실험실마다 조금씩 다른 결과를 내놓게 한다. 특기할 만한 사항은 Table 1에 기재된 값 가운데 일본의 역사적 자료를 모은 Yanagi(2002)의 N/P 비가 11.4로 가장 낮다는 사실이다. 이는 한일간에 측정값의 편차(offset)이 존재한다는 간접적인 증거로 받아들여진다.

최근 해양연구과학위원회(Scientific Committee on Ocean Research, SCOR)는 전 세계적으로 실험실 별로 측정된 영양염 자료들간의 상호 비교성 향상을 목표로 Working Group 147이 2017년까지 3년간 활동하도록 승인하였다. WG 147 활동기간 동안 일본 JAMSTEC과 KANSO사가 공동으로 영양염 표준물질을 제조하여 저렴한 가격에 보급하고, 개발도상국가 연구자들의 영양염 분석능력을 향상 시키기 위한 워크숍을 개최하여 전세계 대양에서 측정되는 영양염(질산염, 인산염, 규산염등)이 전체 농도 범위의 1% 이내에서 상호 비교성을 갖도록 노력하고 있다(Rho *et al.*, 2015).

결론적으로 아직 전 세계적으로 통용되는 CRM이 없기 때문에 참값을 알기는 어렵다. 하지만 N/P 비는 실제 측정하지 않는 연구자들도 종종 활용하기 때문에 동해에 대해 대표값을 설정하는 것은 은행에서 외환에 대해 환율을 고시하는 것과 비슷한 이유로 해서 필요하다. 대표값을 설정하는데 필요한 자료의 자격 요건은 이력 추적 가능성(traceability)이라 판단된다. 자료 생산에 대한 이력을 추적할 수 있으면 후일 자료의 바로잡기가 가능하기 때문이다. 이력 추적에 반드시 필요한 요건은 메타 데이터 작성으로 집약된다.

Table 1에 사용된 영양염 자료 가운데 현재 메타데이터에 쉽게 접근이 가능한 것은 1999-2000년의 ONR-JES 자료뿐이다. 이 자

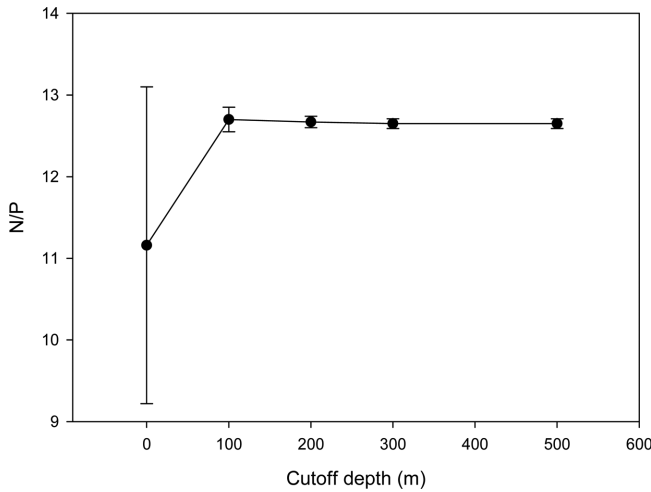


Fig. 1. N/P ratios (mean ± 1 sd.) calculated from the ONR-JES 1999 nutrients dataset. Data from deeper than the designated cutoff depth are included in N/P calculation ($n_0 = 3,813$).

료는 동해 전역을 대상으로 생산되었기 때문에 지역 대표성을 가지며 Scripps Oceanographic Institution의 분석 전문팀이 담당하였기 때문에 자료의 정도관리 수준이 해양학적 일관성의 원리 (oceanographic consistency; Boyle and Edmond, 1975)를 충족시키고 있다. 자료는 웹 주소 http://sam.ucsd.edu/onr_data/hydrography.html에 공개되어 있다. 1999년도 하계조사 결과는 11.2 ± 3.9 ($n = 3813$)이고, 2000년도의 동계 조사의 결과는 12.6 ± 0.6 ($n = 1662$)이다. 계절에 따른 차이가 나는 이유는 여름철 성층기에 표층에 질산염이 거의 고갈되어 낮은 N/P 비를 보이는 자료의 수가 많기 때문에 표준편차에서도 큰 값을 보인다. 질산염의 농도가 $5 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 이상인 자료 쌍에 대한 N/P 비는 12.7 ± 0.3 ($n = 3215$)로서 겨울철 자료보다 약간 큰 값을 보인다. 수심에 대한 여름철 N/P 비 자료를 보면 100 미터보다 얕은 층에서 낮은 값이 집중적으로 분포하는데 수심 300 미터를 넘는 곳에서는 값이 안정화되어 12.67

± 0.12 ($n = 2137$)에 수렴하는데 (Fig. 1) 이는 겨울철 조사 평균값과 거의 일치한다. 특기할 사항은 표층 혼합대 아래부터 300 미터 사이에 심층 평균보다 뚜렷하게 높은 N/P 비를 보이는 해수가 존재하는데 이는 대한해협을 통해 진입하는 해수가 가진 신호로서 울릉분지에 집중 분포하고 있다.

CREAMS/PICES의 후속 프로그램인 EAST-I/PICES 동해 조사 (2007-2015)에서 영양염 분석은 2012년 이후에 엄격한 정도관리 체계를 도입하며 안정화 되었다. EAST-I 자료는 해양조사보고서 (cruise report)가 작성되어 있으며 현재 메타 데이터를 구축 중에 있다. 2012년도 이후 자료 가운데 일본분지에서 ONR-JES 정점과 같은 정점의 질산염과 인산염 수심 단면 자료를 Fig. 2에 함께 수록하였다. 자료의 질 비교는 영양염의 농도가 비교적 일정한 1,500 m 이심 구간에서 평가할 수 있다. Fig. 2로 판단할 때 EAST-I의 영양염 분석 수준은 ONR-JES에 상응한 수준에 도달했다고 판단된다. 정도관리 체계가 갖추어진 2012년도 이후 EAST-I 조사 자료에 근거한 N/P 비는 12.7 ± 0.5 ($n = 522$)이다. 이는 CREAMS/PICES 값보다 약간 큰 데 일본분지 위주의 자료여서 분지 별 차이가 반영된 것인지 시간 경과에 따른 변화인지는 후속 연구에서 다루어야 할 내용이다.

결론적으로 앞으로 다음 번 N/P 비값에 대한 논문이 발표되기 전까지는 동해의 N/P 비 대표값으로 12.7 ± 0.1 가 더 적절할 것으로 사료된다. 지금까지 연구자들은 Table 1에 보인 바와 같이 각기 다른 N/P 비값을 사용하여 왔으며 권장한 N/P 비 대표값으로 대체할 경우에 기존 논문의 결과와 결론이 상당 부분 달라질 수도 있다. 이 노트의 목적은 기존 논문에 대한 수정 요구에 있는 것이 아니라 지금부터라도 미래에 수정 가능한 대표값을 채택하여 사용하는 것이 과학이 확보하고자 추구하는 속성 가운데 하나인 객관성을 확보하는데 훨씬 유용하다는 점을 강조하려는데 있다.

동해의 N/P 비가 낮은 이유는 무엇인가?

Redfield 이후에 원소간의 화학량 비에 대한 연구가 어떻게 전

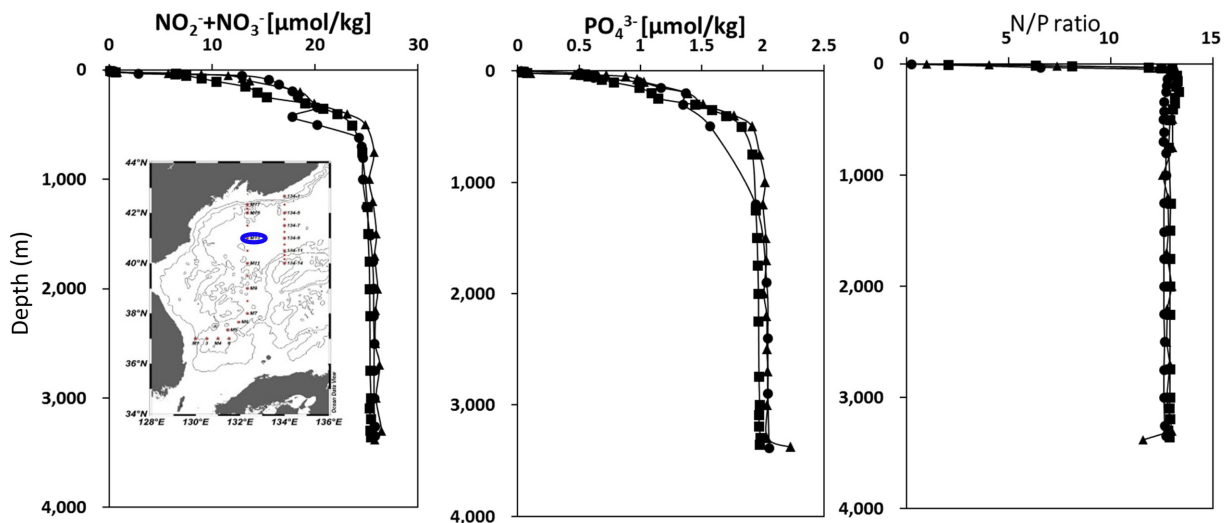


Fig. 2. Comparison of nutrients profiles of ONR-JES 1999 (circles) and EAST-I/PICES (squares for 2012, and triangles for 2014) in the central Japan Basin of the East Sea. Map shows the sampling sites: a) nitrate + nitrite, b) orthophosphate, c) N/P ratios.

Table 1. Compilation of the East Sea seawater N/P ratio appeared in the published papers

Ref.	N/P ratio		
	Whole basins [§]	Ulleung Basin	season
Kido and Nishimura (1973)	13.60 (≥0 m)		summer
Shim <i>et al.</i> (1989)		12.54 (≤100 m)	spring
Chung <i>et al.</i> (1989)		13.40 (≤150 m)	fall
Yang <i>et al.</i> (1991)		12.10 (≤500 m)	fall
		9.80 (≤500 m)	winter
Moon <i>et al.</i> (1996)		14.36 (≤1000 m)	fall
Chen <i>et al.</i> (1996)	14.70 (300-600m)		summer
	13.00 (≥2000 m)		
Yanagi (2002)	11.40 (≥0 m)		composite
Kim <i>et al.</i> (2011)	13.06 ± 0.03 (≥1,000 m)		cited there in
Kim <i>et al.</i> (2012)*	12.40 (≥300 m)		summer
Kim and Kim (2013) [†]	<10 (10-30m) 13 ± 1 (200-3500 m)		composite
range		11.40-14.70	

[§]Whole basin includes Japan Basin, Yamato Basin, Ulleung Basin

*1999 CREAMS II (ONR JES) survey data (subset)

[†]CREAMS and EAST-I Hydrographic transect data (UB-WJB): April 2001, April 2002, May 2004, October 2005, May 2007, July 2009

개되어 왔는가는 N/P 비가 낮은 이유를 논의하기 앞서 잠시 언급할 필요가 있어 보인다. Redfield 비는 앞서 언급한 바와 같이 1958년도에 실험식으로 제시된 이후에 이론적 배경을 찾는 연구가 시도 되었다. 1963년에는 식 (1)의 Redfield-Ketchum-Richards 방정식으로 이론적 배경을 가진 모습으로 변모되었다. 이후 연구들을 상세하게 다루는 것은 이 노트의 범위를 벗어나므로 간략히 소개하면, Redfield 비는 후속 연구로서 작지 않은 크기의 변동성이 발견되었으며(Weber and Deutsch, 2010), 이러한 변동성에 대한 최근의 연구는 식물플랑크톤의 생리를 탐구하는 분자수준 연구(Arrigo, 2004)부터 박테리아가 광합성을 시작한 지구 초기의 역사에 이르기까지(Planavsky, 2014) 범위가 넓다.

이 노트와 관련 지어서는 두 갈래 길로 연구가 진행되어 왔다고 요약할 수 있다. 하나는 현장의 POM을 수거해서 현대식 장비로 분석하는 것(e.g., Martiny *et al.*, 2014)이고, 다른 하나는 세포의 조성에 대한 생리학적 접근(e.g., Arrigo, 2004)이다. 이런 노력으로 얻은 결과를 한 줄로 요약하자면 POM의 N/P 비는 Redfield가 분석한 것보다 넓은 범위와 지역적 변동성을 보인다는 것이다 (Martiny *et al.*, 2014). 따라서 Redfield의 원소간 화학량적 비에 대한 수정안이 계속 제시되어 왔고, 현재도 진행형이며, 친생물원소를 추가하는 노력(e.g., Morel *et al.*, 2003)도 계속 시도되고 있다.

생물공급 가설

우선 Redfield의 견해에 따르면 우리가 모든 대양의 해수에서 거의 일정한 N/P(~15) 비를 보게 된 이유는 평균적으로 N/P=16 조성을 가진 유기물의 분해와 산화의 결과물이다. 따라서 동해처럼 N/P 비가 대양과 확연히 다른 경우가 심해로 공급되는 유기물의 특이한 N/P 비 조성에 기인한 것인지를 최우선적으로 살펴 보아야 한다. 이렇게 조절될 가능성을 뒷받침 할 수 있는 근거는 이미 학계에 보고되어 있다. 남세균과 식물플랑크톤이 영양염 제한에 맞추어 체내 N/P 비를 매우 유연하게 조절하는 생리적 조절(Geider and La Roche, 2002)과 종에 따라 N/P 비 조성이 크게 다른 중

조성적 조절(Klausmeire *et al.*, 2004)이 있다. 하지만 동해의 N/P 비에 대한 공급 조절(생리적 조절 또는 종조성적 조절)을 다룬 논문은 아직 없다.

대기를 통한 인위적인 질소의 유입이 현저하거나(Kim *et al.*, 2011), 질소의 부족을 남세균이 주도하는 질소 고정으로 해소한 경우라면 낮은 N/P 비를 가진 유기물의 공급 가설은 설득력이 약화된다. 상당량의 질소가 외부에서 표층 해양으로 공급되는 경우에 표층 해양의 식물플랑크톤에서 생성되는 유기물의 N/P 비는 해수의 비 보다 높을 것이므로 동해 심층해수의 N/P 비가 Redfield 비인 16보다 낮은 것은 생물 공급이 아닌 다른 과정에서 원인을 찾아야 한다.

분해조절 가설

생물의 공급 조절에 대한 대안적 가설은 동해의 해양학적 특성에서 이끌어 낼 수 있다. 동해 표층 퇴적물의 높은 유기탄소 함량(Lee *et al.*, 2010)은 수층에서 유기물의 분해 효율이 대양에 비해 낮음을 시사한다. 표층 퇴적물의 유기물이 신선한 상태인지 아니면 난분해성인지는 현재 방사성 탄소로 진단하는 연구가 EAST-I에서 진행 중이다. 대양이 비교적 일정한 N/P 비를 보이려면 심해로 공급된 유기물이 분해가 잘 되고 해수가 잘 섞인다는 조건을 필요로 하는데 만일 수층에서 분해가 불완전하다면 공급 외의 조건으로도 설명이 가능해진다.

동해는 대양에 비해 수심이 얕고(평균 수심 약 1,600 m), 수온 약층의 두께도 얇으며, 대양에서 통상 1 km 부근 수심에 발달하는 산소최소층도 발달하여 있지 않다. 따라서 겨울철에 냉각이 일어나면 등밀도선을 따라 활발한 해수의 이동과 섞임이 가능하기 때문에 표층에서 생성된 유기물(용존+입자)이 심해로 신속하게 주입될 가능성이 크다. 이 가설을 뒷받침 할 수 있는 다른 배경으로 동해의 수온이 매우 낮다(< 0.1 °C)는 특성을 들 수 있다(강 등, 2001). 동해의 수온약층은 표층 가까이 발달하고 수온이 낮다. 동해가 대양에 비해 상대적으로 얕은 수심과 낮은 심층 온도로 인해 수주

내 침강 유기물의 분해 속도를 낮추어 표층 퇴적물에서 유기물의 함량이 높은 것을 설명할 수 있다.

퇴적된 유기물은 초기속성과정을 거치면서 공극수 내 질산염이 산화제로 사용되는 탈질과정(denitrification)이 일어나게 된다. 그러면 공극수내 질산염이 선택적으로 소비되므로 N/P 비 값이 낮은 공극수의 영향으로 저층 해수의 N/P 비가 공급된 유기물에 비해 낮게 조절된다. ONR-JES 조사에서 저층 아질산염의 발견은 아질산염이 탈질과정의 중간산물이기 때문에 탈질과정이 활발함을 시사하고 있다. 동해의 영양염 수심분포(Fig. 2)를 보면 해저 가까이 자료에서 인산염은 약간 늘어나는 반면에 질산염은 약간 줄어드는 것이 보여 이들 뒷받침하고 있다. 하지만 정량적 관점에서 동해 내부 전체 해수의 N/P 비를 실효적으로 낮출 수 있는 규모인지는 더 연구되어야 할 과제이다.

분해조절 가설이 극복해야 할 또 다른 문제는 해저 접한 면에 발달해 있는 탁한 저층 혼합수(benthic adiabatic layer)의 존재이다. 지금까지의 관측결과를 보면 동해 해저에서 잘 발달된 곳은 약 200미터 두께를 가진다. 높은 탁도와 낮은 용존산소 특징은 이 층이 역학적으로 매우 안정함을 시사하고 있기 때문에 표층 퇴적물에 의한 N/P 비 조절 영향이 그 위의 수층으로 전파되는 데 커다란 장애 요인으로 작용하기 때문이다.

해수순환 가설

또 다른 가설은 동해의 해수순환 특성에서 추출할 수 있다. 동해가 ‘작은 대양’이라 불리게 된 결정적인 특징인 남북연직순환(meridional overturning circulation)은 Ocean Conveyor Belt보다 훨씬 느린 편이지만 동해의 규모가 작기 때문에 대양의 1,000년 규모에 대비해서 100년 규모로 순환의 시간 규모는 훨씬 작다. 남북연직순환이 표층의 해수를 심해로 직접 내려 보내기 때문에 표층 해수의 N/P 비가 심해의 N/P 비를 조절하게 된다. Kim and Kim (2013)은 동해 표층 해수의 N/P 비가 통상 Redfield 비보다 훨씬 작음(<10; Table 1 참조)을 직시해서 남북연직순환이 동해 내부의 N/P 비특성을 지배한다고 설명하였다. 동해에 잘 발달되어 있는 중규모 소용돌이(mesoscale eddy)도 역동적인 해수 섞임을 도와주므로 이들 또한 기여할 가능성이 점쳐진다.

한편 대한해협으로 유입되는 해수는 우기(고수온기)에는 유광층에서는 영양염이 모두 소비되어 영양염이 무시할 정도로 결핍되어 있고 그 하부의 수층의 N/P 비는 대양과 비슷하다. 이는 하부의 해수의 주된 기원이 쿠로시오 또는 북태평양 해수이기 때문이다. 갈수기(저수온기)에 해수의 N/P 비는 더욱 대양의 특성에 가깝다. 따라서 해수순환 가설은 표층 해수에 N/P 비가 낮은 이유를 설명해야 되는 데 Kim and Kim(2013)은 N/P 비가 13인 유광층 아래 해수가 용승하고 표층에서 N/P 비가 16인 유기물이 만들어져 표층 해수의 N/P 비가 표층 아래에서 유입되는 해수의 N/P 비 보다 더욱 낮아지는 것으로 설명하고 있다. 이것은 생물공급 가설과 정면으로 배치되는 주장이며, 심층수의 N/P 비가 낮은 원인을 설명하는데 내려보낸 유기물의 기여를 무시해야 하므로 논리적으로 무리가 있다.

복합가설

이는 앞 선 세 가설이 모두 일부 기여하고 있을 가능성을 고려한 것이다. 예컨대 대한해협으로 들어오는 해수의 N/P 비가 동중

국해에서 생지화학 과정으로 변형되어 대양 평균에 비해 조금 낮고, 이것이 반영되어 생산되는 유기물의 N/P 비도 조금 낮고, 유기물의 분해도 덜 이루어져서 표층 퇴적물에서 탈질과정에 의한 질산염의 소비로 인해 N/P 비가 재차 낮아지고, 이런 해수가 표층으로 공급되어 N/P 비를 낮추는 과정이 시간 규모가 짧은 해수순환과 맞물려 반복되어 현재의 낮은 N/P 비 특성을 가지게 되었다고 설명하는 것이다.

동해 분지 내에서 영양염의 질량이 보존 되려면 외부에서 해수 유동과 대기 유입 그리고 약간의 육상 유입으로 들어온 플럭스와 같은 양이 퇴적물로 묻혀 제거되어야 한다. 동해에 알짜로 더해진 질소가 제거 과정(어획 포함)으로 동등한 양이 제거되면 정상상태가 유지될 것이다. 반면에 인의 경우에는 탈질과정에 상응하는 제거 기작이 존재하지 않기 때문에 상대적으로 인의 수층 축적이 이루어질 가능성이 높아진다. 이러한 추측은 동해의 낮은 N/P 비를 효과적으로 설명할 수 있다. 하지만 실제 동해 심층수의 인산염의 농도가 $2 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 초반대로 마지막 빙하기가 물러 간 이후부터 짧은 시간규모로 해수 순환이 계속되어 왔다고 가정하면 추후에 모델로서 검증해 보아야 할 사안이기는 하지만 결코 높은 편이 아니다. 따라서 동해에는 인을 효율적으로 제거하는 기작이 작동하고 있다고 보아야 마땅할 것이다.

동해의 대륙 사면과 대륙대는 평범한 갈색 표층 퇴적물로 덮여 있지만 심해평원에 해당하는 평탄한 대지는 특이하게도 철과 망가니즈가 다량 함유된 적색 다금속질 퇴적물로 덮여 있다. 철과 망가니즈의 수산화 광물이나 산화 광물은 인산염을 선택적으로 잘 흡착하기 때문에 인을 퇴적물에 가두는 작용을 하고 있는 것으로 판단된다. 이런 논리를 따르면 온난화의 여파로 동해 저층에 대한 산소의 공급이 줄게 되면 인이 퇴적물로부터 용출될 것이라 전망할 수 있다.

지금까지의 논의에서 동해 해수의 N/P 비에 대한, 더 나아가 Redfield stoichiometry에 대한 이해는 동해의 생지화학 과정과 순환을 이해함에 있어 핵심 요소라 결론을 내릴 수 있다. 아울러 이는 현 상태뿐만 아니라 과거부터 미래에 이르기까지 기후 변화의 관점에서 주목 받아야 할 대상이다.

앞으로 우리는 무엇을 조사(연구)해야 하는가?

(지금까지) 유독 해양 생태계에서만 나타나는 친생물 원소 사이의 보편적인 비례 관계는 해양생태계를 통한 물질 순환을 이해하는데 아주 유용한 길잡이이다. 먼저 대양의 해수에서 모두 같은 비례가 발견된다는 사실은 지구의 해양은 하나이다라는 평범한 듯 하면서도 학술적으로 들여다 보면 볼수록 의미가 깊고 넓은 주제를 관통한다.

왜 모든 해양이 같은 Redfield 비를 보이는가에 대해서는 이미 두 가지 가설이 제시되어 있다. 생태계 평균화(ecosystem averaging) 가설은 플랑크톤의 계절적 천이나 먹이망을 통한 상호작용을 거치며 평균화된다는 견해이다. 나머지는 순환에 의한 평균화(circulation averaging)로서 해양의 순환 시간 규모는 1,000년 정도인데 비해 질소와 인의 해양 체류시간은 최소 이것의 10배 이상이어서 Redfield 비는 해수의 움직임과 섞임에 의해 “평균화”된 결과로 보는 것이다. 이것이 지니는 의미는 무엇일까? Redfield가

애초에 플랑크톤의 세포 구성비가 장소를 불문하고 같아서라고 답한 것은 후속 연구의 검증을 통과하지 못했다(e.g., Geider and La Roche, 2002). 즉 생물이 해수의 조성을 지배한다는 설명은 총론으로 보면 맞지만 시공간적 변동성이 적지 않음이 드러났기 때문에 각론에서는 맞지 않는다. 즉 생물지배설 보다는 생물 되먹임설이 더욱 적절하다.

평균값이란 특성은 지금까지 알려진 동해의 해수 순환의 시간 규모는 100년 미만이고 질소와 인의 체류시간은 이보다 최소한 10배 이상 길 것으로 예상되므로 동해 심층수의 N/P 비는 어디서나 같아야 한다는 귀무가설을 세울 수 있게 해 준다. 나쁜 소식은 우리가 플랑크톤의 원소 조성을 조사하는 것은 나름 의미가 있는 노력이지만 단지 몇 군데에서 몇 차례에 조사한다고 해서 동해의 특징적인 N/P 비를 바로 이해하기는 어려울 수 있다는 데 있다. 여하튼 만일 통계적으로 유의하게 다른 N/P 비가 관측된다면 이는 매우 강력한 국지적 해양현상이 존재함을 알려주는 전조가 될 것이다. 따라서 추후 동해에 서식하는 플랑크톤에서 이들 원소들의 조성비에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.

동해의 규모는 작지만 내부에 남서부의 용승이나, 시공간적으로 다양한 규모로 발달하는 중규모 소용돌이, 저층 혼합층의 발달, 다금속질 표층퇴적물의 존재, 열수나 해저 용출 등 N/P 비의 결정에 기여할 수 있는 다양한 해양현상들이 존재한다. N/P 비에 대한 국지적인 교란은 흥미로운 연구 주제라 판단된다. 또한 질소순환에 대한 인간의 교란으로 인해서 미래 해양의 N/P 비가 커질 것이란 전망도 있어 이에 따른 동해 생태계의 반응에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

외부로부터 동해로 공급되는 인의 주공급원은 대한해협을 통해 유입하는 해수가 수송하는 것이다. 이 플럭스와 동해 심층수 용존 인산염의 재고량으로 추정된 인의 체류시간은 10⁴년 규모이다. 이는 마지막 빙하가 녹아 동해로 해수의 공급이 재개된 시간과 맞먹는 규모이다. 따라서 동해의 N/P 비는 단순 계산만으로도 정상상태에 도달해 있다고 보기 어렵다. 이로 볼 때 N/P 비는 앞으로도 바뀌어 나갈 것이지만 단지 느리게(하지만 대양에 비해서는 엄청 빠르게) 진행될 것이다. 다시 말해 현재 동해의 생지화학적 순환은 빙하기 때 동해의 상태에 여전히 구속을 받고 있다고 보아야 할 것이다. 고해양학적 연구도 흥미로운 주제 가운데 하나이다.

지금까지 Redfield 비에 관한 논의는 주로 표층의 식물플랑크톤의 성분비와 심층 해수의 무기화합물 조성 위주로 논의되어 왔다. 이는 표층의 입자태 물질과 심층에서 이들의 분해 산물인 용존태 물질에 초점을 맞춘 것인데 여기에 표층의 용존태(주로 용존유기물)와 심층의 입자태 물질과 용존유기물을 포함하는 포괄적인 접근을 시도하면 새로운 과학적인 정보를 얻게 될지도 모른다. 총량과 이들의 분배는 온난화를 비롯한 인위적인 외압에 예민하게 반응할 가능성이 높기 때문이다.

외압에 의한 변화는 인류의 미래가 걸린 중차대한 사안으로 이미 공감대를 이루고 있으며 이를 파악하기 위해서 앞으로의 연구는 N/P 비에 국한되지 않고 C/N/P 비로 확장되어야 한다. Redfield Redfield 비의 혁혁한 기여 가운데 하나는 모델을 통해 생물학적인 해양의 탄소 제거량을 추정하는데 편리한 도구로 쓰이고 있다는 데 있다. 하지만 식물플랑크톤의 N/P 비가 같더라도 C/N 비와 C/P 비가 달라질 수 있는 것(Martiny et al., 2014)이 최근에 밝혀졌기

때문에 온난화나 산성화의 진행 속도가 대양보다 빠른 동해에서 C/N/P 비를 조사하는 것은 아주 시의 적절한 연구주제이다. 특히 동해의 남부는 아열대 해역, 북부는 아극역 해역으로 대비되는 특성을 지니고 있다. 이처럼 동해는 상이한 환경에 대한 접근성이 뛰어나기 때문에 동해는 이들 주제에 대한 서로 상이한 환경에 미치는 영향을 효율연구를 수행하기 유리한 조건을 을 가지고 있다. 향후 동해에서 이러한 연구들이 활발하게 진행되어 'Redfield revisited'라는 검색어로 논문을 찾을 때 동해의 연구 결과가 추가 되어 널리 인용되는 날이 오기를 기대 해 본다. 이 노트에서 심층 논의되지 못한 Redfield 비에 대한 중요한 정보는 Nature Geoscience의 Focus "Redfield ratio at 80(2014)"를 참조하기 바란다.

사 사

이 단보는 해양수산부가 지원한 EAST-I의 수행으로 획득한 동해의 영양염 분석법 개발과 정도평가를 거친 현장자료의 획득이 계기가 되어 작성되었다. 영양염 표준물질 개발을 지원해 준 한국해양과학기술원의 해양관측조사 표준화사업(PO01050)에도 간접적으로 도움을 받았음을 밝힌다. ONR-JES 자료를 공개하여 준 SIO의 Tally 교수에게 감사 드린다. 이 연구는 부산대학교의 기초학술지원비의 지원을 받아 수행되었다.

참고문헌(References)

- Arrigo, K.R., 2004. Marine microorganisms and global nutrient cycles. *Nature*, **437**: 349–355.
- Boyle, E.A. and J.M. Edmond, 1975. Copper in surface waters south of New Zealand. *Nature* **253**: 107–109.
- Chen, C.-T.A., G.C. Gong, S.-L. Wang, and A.S. Bychkov, 1996. Redfield ratios and regeneration rates of particulate matter in the Sea of Japan as a model of closed system. *Geophys Res Lett.* **23**(14): 1785–1788. doi: 10.1029/96GL01676.
- Chung, C.S., J.H. Shim, Y.C. Park, and S.G. Park, 1989. Primary productivity and nitrogenous nutrient dynamics in the East Sea of Korea. *Sea*, **24**: 52–61. (in Korean)
- Geider, R. and J.L. Roche, 2002. Redfield revisited: variability of C:N/P in marine microalgae and its biochemical basis. *Eur. J. Phycol.* **37**: 1–17.
- Kido, K. and M. Nishimura, 1973. Regeneration of silicate in the Ocean. *J. Oceanogr.*, **29**, 185–192, doi: 10.1007/BF02108525.
- Kim, I.-N., D.H. Min, and T. Lee, 2012. Deep Nitrate Deficit Observed in the highly oxygenated East/Japan Sea and its possible cause. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, **23**(6): 671–683.
- Kim, T.-H. and G. Kim, 2013. Changes in seawater N: P ratios in the northwestern Pacific Ocean in response to increasing atmospheric N deposition: Results from the East (Japan) Sea. *Limnol. Oceanogr.*, **58**(6): 1907–1914.
- Kim, T.-W., K. Lee, R.G. Najjar, H.-D. Jeong, and H.J. Jeong, 2011. Increasing N abundance in the northwestern Pacific Ocean due to atmospheric nitrogen deposition. *Science*, **334**: 505–9, doi 10.1126/science.1206583.
- Klausmeier, C.A., E. Litchman, T. Daufresne, and S.A. Levin, 2004. Optimal nitrogen-to-phosphorus stoichiometry of phytoplankton.

- Nature* **429**: 171–174.
- Lee, K.E., D.-J. Kang, and K.-R. Kim, 2001. Degree of CaCO_3 in the East Sea. *J. Korean Soc. Oceanogr: The Sea*, **6**(4): 242–248.
- Lee, T., D. Kim, B.-K. Khim, and D.-L. Choi, 2010. Organic carbon cycling in Ulleung Basin sediments, East Sea. *Ocean. Polar Res.*, **32**(2): 145–156.
- Martiny, A.C. *et al.*, 2014. Concentrations and ratios of particulate organic carbon, nitrogen, and phosphorus in the global ocean. *Sci. Data* 1:140048 doi: 10.1038/sdata.2014.48.
- Moon, C.H., H.S. Yang, and K.W. Lee, 1996. Regeneration processes of nutrients in the polar front area of the East Sea I. Relationship between water mass and nutrient distribution pattern in autumn. *J. Korea. Fish. Soc.*, **29**: 503–526. (in Korean)
- Morel, F.M.M., A.J. Milligan, and M.A. Saito, 2003. Marine bioinorganic chemistry: the role of trace metals in oceanic cycles of major nutrients. In *The Oceans and Marine Chemistry* (ed. H. Elderfield), vol. 6, *Treatise on Geochemistry* (ed. H. D. Holland and K.K. Turekian), pp. 113–43. Oxford: Elsevier-Pergamon.
- Planavsky, N.J., 2014. The elements of marine life. *Nature Geoscience* **7**: 855–856.
- Redfield A.C., 1934. On the proportions of organic derivations in sea water and their relation to the composition of plankton. In *James Johnstone Memorial Volume*. (ed. R.J. Daniel). University Press of Liverpool, pp. 177–192.
- Redfield, A.C., 1958. The biological control of chemical factors in the environment. *Am. Sci.*, **46**: 205–221.
- Redfield, A.C., B.H. Ketchum, and F.A. Richards, 1963. 2. The influence of organisms on the composition of sea-water. In: *The Sea*, v. 2, edited by Hill, M.N. and others, Interscience, New York and London. pp. 26–77.
- Rho, T., E.-S. Kim, S.-H. Kahng, and S.-R. Cho, 2015. International trend towards comparability of global oceanic nutrient data: SCOR Working Group 147 (Towards Comparability of Global Oceanic Nutrient Data, COMONUT) activity. *Ocean Polar Res.* **37**: 225–233.
- Shim, J.H., S.R. Yang, and W.H. Lee, 1989. Phytohydrography and the vertical pattern of nitracline in the southern waters of the Korean East Sea in early spring. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, **24**: 15–28. (in Korean)
- The Redfield Ratio at 80. *Nature Geoscience Focus* (Dec. 2014).
- Weber, T. S. and C. Deutsch, 2010. Ocean nutrient ratios governed by plankton biogeography. *Nature* **467**:550–554. doi:10.1038/nature09403.
- Yanagi, T., 2002. Water, salt, phosphorus and nitrogen budgets of the Japan Sea. *J. Oceanogr.*, **58**, 797–804, doi: 10.1023/A:1022815027968.
- Yang, H.S., S.S. Kim, C.G. Kang, and K.D. Cho, 1991. A study on sea water and ocean current in the sea adjacent to Korea Peninsula. III. Chemical characteristics of water masses in the polar front area of the central Korean East Sea. *J. Korea. Fish. Soc.*, **24**: 185–192. (in Korean)

2015년 9월 21일 원고접수

2015년 11월 23일 수정본 접수

2015년 11월 24일 수정본 채택

담당편집위원: 강동진