

당항만의 여름과 가을의 부영양화 평가

김성재[†]·유영진

경상대학교 해양과학대학 해양환경공학과

Estimation of Eutrophication during Summer and Fall in Danghang Bay

Sung Jae Kim[†]·Young Jin Yoo

Department of Marine Environmental Engineering, College of Marine Science, Gyeongsang National University

(Received : 11 September 2017, Revised: 23 September 2017, Accepted: 23 September 2017)

요약

당항만의 입구(진해만)부터 거산소류지 바로 아래까지 22개의 조사정점을 설정하고 여름은 2013년 8월, 9월(초순), 가을은 10월, 11월에 해역의 부영양화를 조사하였다. 여름철 총클로로필(TChl) 농도는 가을보다 평균 약 3.7배 높은 농도를 나타내었다. 여름에 당항만 중심에 가까운 조사정점들이 담수가 유입하는 바깥쪽 조사정점들보다 평균 약 1.8배 높은 농도를 나타내었다. 여름과 가을에 당항만은 모든 조사정점에서 부영양화 지수(eutrophication index, EI)가 1을 초과함으로써 다른 조건이 갖추어지면 항상 적조가 발생할 수 있는 해역으로 나타났다. 여름과 가을에 EI는 만 입구에서 만의 내측(마동호 예정해역)으로 이동함에 따라 증가하는 추세를 나타내었고, 특히 가을은 조사정점 13~22(마동호 예정해역)에서 급격히 증가하여 나머지 조사정점보다 평균 약 2.3배 높은 값을 나타내었다. 여름과 가을에 당항만은 질소가 조류 성장의 제한영양염류(limiting nutrient)로 나타났으나 여름 장마기간 중에는 인이 제한영양염류로 나타났다. 여름과 가을에 당항만의 EI와 COD, DIN, DIP 사이의 다중선형회귀분석은 유의한 양의 상관관계를 나타내었고, DIP가 EI에 가장 큰 영향을 미치는 변수임을 나타내 주었다. 한편 여름에 TChl과 COD, DIN, DIP, DSI 사이의 다중선형회귀분석은 유의한 양의 상관관계를 나타내었고, DIP가 TChl 농도에 가장 큰 영향을 미치는 변수임을 나타내 주었다. 가을은 TChl과 모든 지표들 사이에 유의한 상관관계가 나타나지 않았다.

핵심용어 : 당항만, 화학적산소요구량, 용존성 무기질소, 용존성 무기인, 부영양화 지수, 제한영양염류, 다중선형회귀분석

Abstract

In 2013, August and September(early) as summer and October and November as Fall the probe of eutrophication has been done at 22 sampling points from the entrance of Danghang Bay (Jinhae Bay) to Geosan reservoir. In Danghang Bay, total chlorophyll(TChl) concentration of summer was 3.7 times higher than that of fall, and sampling points closer to the center showed 1.8 times higher concentrations than sampling points near the fringe where fresh water encountered. Eutrophication Index(EI) exceeded 1 at all sampling points in Danghang Bay during summer and fall, and if other conditions for algae growth met there was a possibility red tide to bloom at any place. There was a tendency of EI to gradually increase moving up from the entrance of bay to the inner side during summer and fall. Especially there was a sudden increase by 2.3 times higher at sampling points of 13~22 (planned region as Madong reservoir) than at other points during fall. Nitrogen was a limiting nutrient for growth of algae during summer and fall in Danghang Bay, but phosphorus was a limiting nutrient during summer rainy season. During summer and fall, multiple linear regression analysis between EI and COD, DIN, and DIP showed a significant positive relationship and that DIP was the most effective variable. Whereas multiple linear regression analysis between TChl and COD, DIN, DIP, and DSI showed a significant positive relationship and that DIP was also the most effective variable during summer. There was no significant correlation between TChl and the other parameters during fall.

Key words : Danghang Bay, COD, DIN, DIP, eutrophication index, limiting nutrient multiple linear regression equation

1. 서 론

수심이 낮은 육지 내만은 자연적으로도 부영양화가 되기

쉬운 해역이다. 이러한 해역이 유역으로부터 점 및 비점오염원을 포함한 담수유입과 주기적인 외해수의 교환이 있을 경우 생물학적이고 물리적인 큰 변동을 나타낸다(Borum, 1977; Ittekkot et al., 2000). 하천수가 유입하는 만에서 영양염류는 주로 도시하수로부터 점오염물질, 농경지 유출수로부터 비점오염물질, 강우로부터의 비점오염물질, 저질의 용출 등이다(Borum, 1997; Pereira-Filho et al., 2001;

[†] To whom correspondence should be addressed.
Department of Marine Environmental Engineering, Gyeongsang National University, Korea
E-mail: sngkim@gnu.ac.kr

Hauxwell and Valiela, 2004). 과거 수십년 동안 연안 해역에서 인간활동에 의한 인과 질소의 오염부하량(anthropogenic loadings of phosphorus and nitrogen)이 지속적으로 증가해오고 있다(Hauxwell and Valiela, 2004). 그리고 이것은 세계적인 추세이다(Meeuwing, 1999; Cloern, 2001; Hauxwell and Valiela, 2004; Thomann and Mueller, 1987).

대단히 높은 인위적인 질소와 인의 부하량에도 불구하고 연안 해역은 주로 질소가 제한 영양소인 반면 담수역에서는 인이 제한 영양소가 된다. 그리고 조류의 성장은 N:P, Si:P, Si:N의 비(ratio)에 따라서 영양적으로 제한을 받는다(Meeuwing, 1999; Yin et al., 2001; Rocha et al., 2002; Domingues et al., 2005).

당항만은 지형적 특성에 따라 친환경수변공간성이 높은 구조적 환경을 갖추고 있고, 다양한 해양레저스포츠 프로그램을 진행할 수 있는 적지가 되고 있다. 고성군은 당항만 일원의 '슬로 파크' 조성을 위하여 당항만 역사·생태 공간 조성사업을 계획하고 있으며, 이 사업을 통하여 자연생태보전과 지속가능한 발전이 조화를 이루어 당항포관광지, 마동호, 거류산과 연계한 관광벨트를 조성하고 당항만과 연계한 새로운 랜드마크 조성으로 생태 녹색관광의 거점으로 개발하고자 한다(Goseong County, 2016). 그러므로 당항만의 생태녹색관광 자원화 사업의 성공적인 도약을 위해 당항만의 부영양화 수질의 개선은 필수적인 상황이다. 본 연구에서는 당항만의 여름과 가을 조사정점별 부영양화 수질의 변동을 평가하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 조사개요

육지내만(inlet)의 특성상 여름과 가을의 극적인 수온 변화를 겪는 당항만의 부영양화의 특성을 파악하기 위하여 고성군 당항만의 입구(진해만)부터 거산소류지 바로 아래까지 22개의 조사정점을 설정하고 여름은 2013년 8월, 9월(초순), 가을은 10월, 11월에 각각 시료를 채취하였다. 시료의 채취 및 처리는 각 조사정점에서 일반항목 분석을 위한 수질시료는 표층수(수면으로부터 1m 아래)와 저층수(바닥으로부터 약 1m 위)를 니스킨 채수기로 채수하여 1L 용량의 폴리에틸렌병에 담고 4°C의 온도의 ice box에 보관하여 실험실로 운반하고 즉시 분석하였다. 총클로로필(TChl)은 현장에서 다항목수질측정기(YSI 6600, USA)를 사용하여 한 조사정점에서 5회 연속으로 측정하였다. 투명도(SCCHD)는 투명도판(직경 30cm)을 사용하여 현장에서 측정하였다. Fig. 1은 당항만의 유역경계와 조사정점을 나타내는 위성지형도이다.

2.2 분석방법

조사해역의 해수의 부영양화 특성을 파악하기 위하여 화학적산소요구량(chemical oxygen demand, COD), 용존성 무기질소(dissolved inorganic nitrogen, DIN: $\text{NH}_3\text{-N} +$

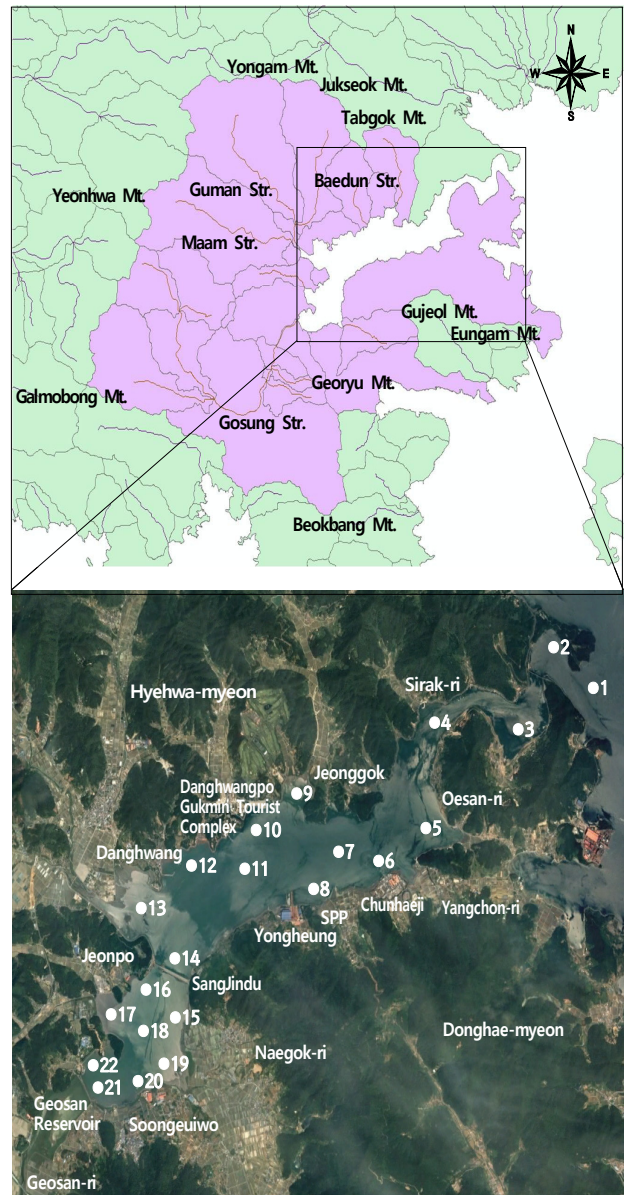


Fig. 1. Maps of basin area of Danghang Bay and its sampling sites.

$\text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$), 용해성 무기인(dissolved inorganic phosphorus, DIP: $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$), 용존성 규산규소(dissolved silica, DSi: SiO_2) 등을 해양환경공정시험기준(MOF, 2013)에 따라 분석하였다.

2.3 부영양화 지수(eutrophication index, EI) 계산

EI의 판정방법에는 호소의 경우 Carson지수 등을 이용하여 평가하고 있으나(Kim, 1995) 해역의 부영양화 지표로서는 적조를 유발시키는 한계를 고려하는 방법이 있다. 이 방법은 적조 초기로 보여지는 규조의 세포수 103개체/mL를 한계로 해서 여기에 포함된 탄소량으로 0.83mg/L(COD 1mg/L)를 고려하고 N, P에 대해서는 각각 적조발생 가능농도(JFRPA, 1973)인 $7.14\mu\text{g-at N/L}$ (0.1 mg/L), $0.48\mu\text{g-at P/L}$ (0.0149mg/L)를 EI 1로 해서 평가하는 방법으로써

Okaichi(1985)는 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$EI = \frac{(COD)(DIN)(DIP)}{3.43} = 671.76 (COD)(DIN^*)(DIP^*)$$

여기서 DIN($\mu\text{g-at N/L}$)는 암모니아성 질소, 아질산성 질소, 질산성 질소의 농도를 합한 것이다. DIP($\mu\text{g-at P/L}$)는 $\text{PO}_4\text{-P}$ 를 나타낸다. DIN*, DIP*는 mg/L 단위이다. 당항만의 각 조사점별 변화는 Fig. 2에 나타나 있다.

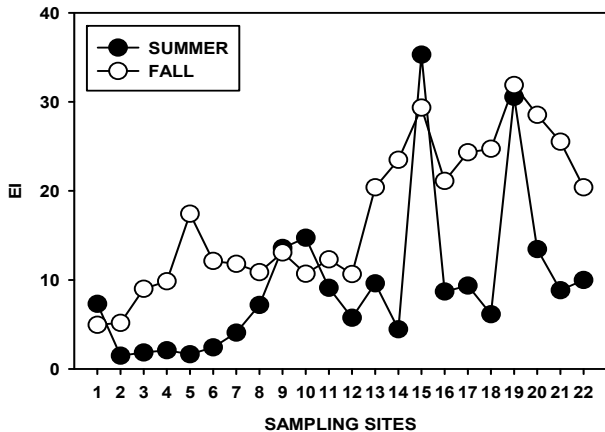


Fig. 2. Distribution of EI in Danghang Bay in summer and fall.

3. 결과 및 고찰

3.1 당항만 및 주변 유역의 개황

당항만은 한반도의 남동쪽 진해만의 서쪽에 깊숙이 위치하고 있고, 굴곡이 심한 리아스식 해안으로서 진해만과 인접한 입구에서 거산소류지까지 만의 총길이(동서방향)는 약 13.6km, 입구 폭은 약 0.36km, 만 중앙의 가장 넓은 폭(남북방향)이 약 1.6km로 되어 있다. 당항만은 이처럼 입구는 병목처럼 좁고 긴 수리기하학적(hydrogeometry)으로 반폐쇄성 육지 내만(inlet)의 형태를 하고 있다. 당항만의 수심은 조사점 6, 7을 경계로 수심이 급격히 얕아지고 만안쪽으로 가면서 조사점 8(SPP 조선소 앞), 10~12(당항포 국민관광지 앞), 14와 18(마동호 예정해역 중심)에서 3~4m의 수심을 나타내었다. 당항만은 수심은 대략 평균 5.9m로 매우 얕고 해수 유동 속도는 30cm/sec 이하로 느리다. 지형적 여건에 의해 바람과 조류의 영향을 적게 받아 외해수와의 교환율이 1일 약 1.5%에 불과할 정도로 소통이 불량하다(Kim et al., 2016). 또한 유역하천의 길이가 짧고, 직선적이며 하상경사가 급하여 하천을 통하여 유입되는 오염물질의 영향을 크게 받고 있다(Chapra,1997; Lee et al., 1991). 당항만의 조위는 평균조차가 약 1.9m이고 대조차는 약 2.6m, 소조차는 약 1.2m 정도이다(Kim, 2001).

당항만 유역은 동경 128° 13′ 54″ ~128° 23′ 01″, 북위 34° 56′ 12″ ~35° 07′ 17″ 에 위치하며, 유역 동쪽은 진해만과 접하여 있고, 북쪽은 적석산, 탑곡산, 용암산, 서쪽은 연화산, 갈모봉산, 남쪽은 벽방산, 거류산 등의 분수령

에 의해 유역경계를 이루고 있다. 당항만 해안선의 총 길이는 약 42.7km, 해역의 총 면적은 약 16.1km²이고, 당항만의 유역에는 크고 작은 약 17개 이상의 하천이 흐르고 있다. 산지가 당항만을 병풍처럼 에워싸고 있으므로 하천은 유로가 짧고 대체로 직선상이며 하상경사가 급한 것이 특징이다. 연중 물이 흐르는 주요한 하천은 고성천, 마암천, 구만천, 배둔천 등으로서 유역 면적은 각각 19.7, 20.6, 34.2, 12.3km²이다.

유역내 연평균 강우량은 약 1,489mm이고, 6~9월의 강우량이 연강우량의 57.2%이고, 연평균 기온은 14.4°C, 최고기온은 34.0°C, 최저기온은 -7.7°C, 연평균 습도는 70.8%이다 (BROM, 2015).

3.2 부영양화 평가

해역의 부영양화를 나타내는 지표로서 SCCHD, COD, DIN, DIP, DSi, TChl 등이 있다. 조사정점에 따른 이들 지표의 변화를 분석함으로써 당항만의 부영양화 상태를 평가할 수 있다. 조사해역의 부영양화지표 분석결과(여름은 8월과 9월초 결과를 평균, 가을은 10월과 11월 결과를 평균)는 Fig. 3에 나타나 있다.

3.2.1 투명도(SCCHD)

당항만 해수의 SCCHD 변화는 여름은 1.0~3.0m 범위에 평균 1.5m이고, 가을은 0.6~7.7m 범위에 평균 2.7m를 나타내었다. Fig. 3에서 당항만은 조사점 1~7(만 입구에서 중간)까지와 8~22(중간에서 만의 내측(마동호 예정해역))까지 2개의 해역으로 나누어 여름과 가을의 투명도의 변화에 차이가 나타나는 것을 알 수 있다. 특히 가을은 이 두 해역의 투명도가 큰 차이를 나타내었다. 조사점 8~22에서 여름과 가을의 투명도는 계절적 차이를 나타내지 않았다. 모든 투명도는 수심보다 작은 값을 나타내었다.

Kim(2003)의 조사에 의하면 여름철 장마기간 동안 당항만의 SCCHD 변화는 0.7~1.2m 범위에 평균 1.1m(조사점 14~22)를 나타내었다. 이는 장마로 인하여 유역으로부터 담수와 함께 많은 부유물질(주로 부유토사)이 유입되었기 때문인 것으로 생각된다.

투명도에 의한 바다, 강, 호수 등과 같은 수계의 영양단계는 투명도가 4m보다 크면 빈영양상태, 2~4m이면 영양상태, 2m보다 작으면 부영양상태로 나누기도 한다(USEPA, 1974; NAS and NAE, 1972). 이 분류에 의하면 당항만은 여름은 만의 입구에 위치한 조사점 1~5 제외하고 부영양상태를 나타내었으나 가을은 조사점 1~5와 7(만 입구에서 중간)에서 빈영양단계를, 조사점 8, 9, 11~22(중간에서 만의 내측(마동호 예정해역))에서 여름과 동일하게 부영양상태를, 조사점 6, 10에서 영양단계를 나타내었다.

3.2.2 화학적 산소요구량(COD)

당항만 해수의 COD 변화는 여름은 0.4~5.6mg/L 범위에 평균 2.2mg/L이고, 가을은 0.7~3.1mg/L 범위에 평균

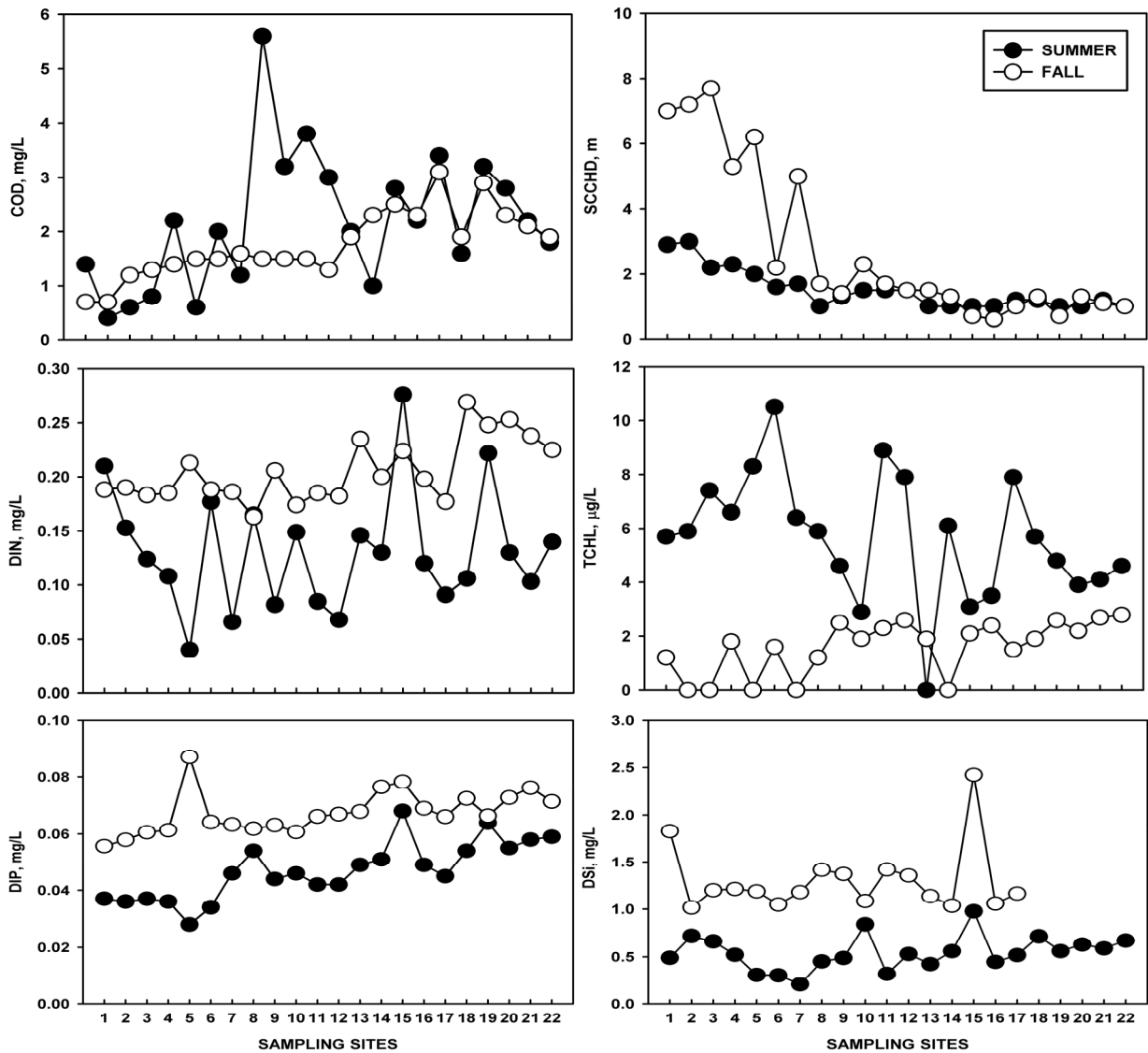


Fig. 3. Distribution of the results of parameter's analysis in Danghang Bay in summer and fall.

1.8mg/L를 나타내었다. Fig. 3에서 COD 농도는 여름에 조사정점별 다소 큰 변화를 나타내었고, 특히 조사정점 9~12에서 높은 값을 나타내었다. 이 해역은 당항포국민관광지 주변해역으로서 생활하수 등의 유입이 있는 것으로 생각된다. 반면에 가을은 큰 변화를 나타내지 않았으나 조사정점 15~22(마동호 예정해역)에서 여름과 동일한 변화를 나타내었다. 여름과 가을 모두 만의 내측으로 이동함에 따라 증가하는 현상을 나타내었다.

Kim(2003)의 조사에 의하면 여름 장마기간 중 당항만의 COD는 1.78~3.92mg/L 범위에 평균 2.93mg/L(조사정점 15~22), 2.65~3.41mg/L 범위에 평균 3.01mg/L(조사정점 6~14)이었다. 이는 본 조사의 여름철 COD 평균값보다 약간 큰 값을 나타내었다.

3.2.3 용존성 무기질소(DIN)

당항만 해수의 DIN 농도의 변화는 여름은 0.066~0.276mg/L

범위에 평균 0.131mg/L이고, 가을은 0.163~0.269mg/L 범위에 평균 0.205mg/L를 나타내었다. Fig. 3에서 DIN 농도는 여름에 조사정점에 따라 큰 변화와 함께 가을보다 평균 약 36.1% 낮은 농도를 나타내었다. 가을은 큰 변화를 나타내지 않았으나 만의 내측으로 이동함에 따라 증가하는 현상을 나타내었다.

Kim(2003)의 조사에 의하면 여름 장마기간 중 당항만의 DIN 농도는 0.46~1.02mg/L 범위에 평균 0.7mg/L(조사정점 15~22), 0.50~0.66mg/L 범위에 평균 0.57mg/L(조사정점 6~14)이었다. 이는 본 조사의 여름철 DIN 평균값보다 약 5배 큰 값을 나타내었다. 장마로 인하여 유역으로부터 질소 오염물질의 다량 유입으로 인한 결과라고 생각된다.

3.2.4 용존성 무기인(DIP)

당항만 해수의 DIP 농도의 변화는 여름은 0.028~0.068mg/L 범위에 평균 0.047mg/L이고, 가을은 0.056~0.087mg/L

범위에 평균 0.067mg/L를 나타내었다. Fig. 3에서 DIP 농도는 여름에 조사정점에 따라 다소 변화와 함께 가을보다 평균 약 29.8% 낮은 농도를 나타내었다. 가을은 거의 일정한 변화를 나타내었다. 여름과 가을 모두 만의 내측으로 이동함에 따라 증가하는 현상을 나타내었다.

Kim(2003)의 조사에 의하면 여름 장마기간 중 당항만의 DIP 농도는 0.049~0.059mg/L 범위에 평균 0.054mg/L(조사정점 15~22), 0.049~0.054mg/L 범위에 평균 0.052mg/L(조사정점 6~14)이었다. 이는 본 조사의 여름철 DIP 평균값보다 약간 큰 값을 나타내었다.

영양염류 농도로서 부영양화의 한계는 DIN이 0.1mg/L 이하, DIP가 0.02mg/L 이하가 된다(WEMD-MOE, 1973). 이 기준에 의하면, Table 2에서 여름과 가을 당항만의 DIN과 DIP의 평균농도는 각각 0.131, 0.047mg/L와 0.205, 0.067mg/L로서 조사해역은 부영양상태에 있음을 알 수 있다.

3.2.5 용존성 규산규소(DSi)

당항만 해수의 DSi 농도의 변화는 여름은 0.206~0.977mg/L 범위에 평균 0.545mg/L이고, 가을은 1.017~2.422mg/L 범위에 평균 1.303mg/L를 나타내었다. Fig. 3에서 여름은 SS 농도가 높게 나타난 조사정점 15에서 DSi 농도도 높게 나타났다. 이는 DSi가 주로 유역으로부터 암석의 풍화나 토양의 침식작용에 의하여 생성되고 하천수와 함께 해양으로 흘러들어 오기 때문이다(Conley and Malone, 1992). 가을이 여름보다 평균 약 2.4배 높은 농도를 나타내었다.

EGge and Aksnes(1992)는 육지 내만에서 부피 11m³, 깊이 4m의 플라스틱 bag을 육지 내만에 설치하고 규산염 농도를 조절하면서 조류 성장 실험을 하였고, DSi 농도가 0.056mg/L(2.0 μM) 이상이면 규조류가 편모조류에 대하여 성장의 우위를 선점한다고 보고하였다. 당항만은 여름과 가을에 전체 조사정점에서 0.056mg/L를 초과함으로 규조류가 조류 성장의 우위를 차지한다고 생각된다. 규소는 미량 필요한 영양염류로 인식되기도 하나, 규조류에게는 세포벽을 형성하는 주요한 물질로서 식물성 플랑크톤의 동적변화에 매우 중요한 요소로 간주된다.

3.2.6 총클로로필(TChl)

당항만 해수의 TChl 농도의 변화는 여름은 0.0~10.5 μg/L 범위에 평균 5.9 μg/L이고, 가을은 0.0~2.8 μg/L 범위에 평균 1.6 μg/L를 나타내었다. Fig. 3에서 여름은 조사정점에 따라 큰 변화를 나타내었으나 가을은 큰 변화를 나타내지 않았다. 여름은 가을보다 평균 약 3.7배 높은 TChl 농도를 나타내었다. 이는 해역에 걸쳐서 번식한 조류(적조)에 의하여 DIN과 DIP가 흡수 동화함으로서 여름이 가을보다 DIN이 평균 약 36.1%, DIP가 약 29.8% 낮은 농도를 나타내는 데 기여한 한 요인이 되었다. 이와 같은 것은 일시적인 현상으로서 조류의 증식이 사라지면 자연의 메카니즘에 따라 다시 농도가 증가하는 것이 일반적이다(Thomann and Mueller, 1987; Schindler, 1977).

Fig. 3에서 여름철 TChl 농도는 당항만 중심에 가까운 조사정점 1~8, 11, 12, 14, 17, 18이 담수가 유입하는 유역에 가까운 바깥쪽 조사정점 9, 10, 13, 15, 16, 19~22보다 평균 약 1.8배 높은 농도를 나타내었다. 이는 여름철 담수 유입으로 유역에 가까운 쪽에 낮은 염분도가 형성되기 때문이다(Lee and Moon, 2008, Iwasaki, 1979). 특히 외산리~천해지 앞(조사정점 5, 6), 당항포 국민관광지 앞(조사정점 11, 12), 전포마을 앞(조사정점 17) 해역에서 7.9~10.5 μg/L의 매우 높은 농도가 나타났다. 조사해역에서 가장 높은 TChl 농도(10.5 μg/L)는 9월 천해지 앞(조사정점 6) 해역에서 나타났다.

Kim(2003)의 조사에 의하면 여름 장마기간 중 당항만의 TChl 농도는 5.2~7.6 μg/L 범위에 평균 6.4 μg/L(조사정점 15~22), 3.8~4.7 μg/L 범위에 평균 4.2 μg/L(조사정점 6~14)를 나타내었다. 이는 본 조사의 여름철 TChl 평균값보다 약간 작은 값을 나타내었다.

3.2.7 부영양화 지수(eutrophication index, EI)

본 연구에서 당항만의 종합적인 부영양화는 EI로서 평가한다. EI가 1를 초과하는 것은 다른 조건이 갖추어진다면 언제나 적조가 발생할 수 있는 가능성이 있음을 나타내는 것이며, 그 값이 커질수록 적조의 발생 가능성뿐만 아니라 일단 발생한 뒤에 그 정도가 심해진다는 것을 의미한다. EI가 1를 초과하는 것은 탄소, 질소, 인과 같은 영양염류에 관한 한 적조가 발생할 수 있는 충분조건을 갖추고 있다는 것을 뜻한다. 그러나 적조가 발생하는 데는 이 밖에도 광량, 수온, 미량원소 등의 많은 인자가 관련되어 있으므로 EI가 1을 초과한다고 해서 반드시 적조가 발생하는 것은 아니다. 또 이 식은 규조류의 발생을 기준으로 하였기 때문에 다른 종의 발생에 이용할 때는 주의 깊게 적용해야 한다.

당항만 해수의 EI의 변화는 여름은 1.5~35.3 범위에 평균 9.4이고, 가을은 5.0~31.9 범위에 평균 17.2를 나타내었다. 모든 조사정점에서 EI가 1를 초과함으로서 조사해역은 다른 조건이 갖추어지면 항상 적조가 발생할 수 있는 해역을 알 수 있다(Fig. 2).

Kim(2003)의 조사에 의하면 여름 장마기간 중 당항만의 EI는 43.0~136.1 범위에 평균 76.2(조사정점 15~22), 55.3~65.1 범위에 평균 59.6(조사정점 6~14)을 나타내었다. 이는 본 조사의 여름철 EI 평균값보다 약 7배 큰 값을 나타내었다. 장마로 인하여 유역으로부터 탄소, 질소, 인 등 오염물질이 만대로 유입되고 담수로 인하여 염분도가 낮아지므로 조류(적조)의 성장이 둔화된 결과라고 생각된다.

가을이 여름보다 2배 정도 높은 EI를 나타낸 것은 여름에 다량 발생한 조류(적조)에 의하여 영양염류(질소, 인)가 흡수되어 해수중의 농도가 낮아졌기 때문이다(Table 2 DIN, DIP 참조). Fig. 2에서 여름에 조사정점 15(내곡리), 19(도망개(외곡천))에서 특히 높은 EI가 나타났고, 반면에 가을에 조류의 성장이 적으므로 조사정점 13~22(마동호 예정해역)에서 EI가 급격히 증가하여 나머지 조사정점보다 평

균적으로 대략 2.3배 높은 값을 나타내었다. 여름 장마기간 중 EI의 급격한 증가는 당항만의 육지내만(inlet)으로서의 수리기하학적 특성(hydrogeometric properties)의 결과라고 생각된다.

3.2.8 N/P 비 및 Si/N/P 비의 분석

① N/P 비

여러 환경수계 내의 각 요소의 복잡한 상호작용으로 인하여 N/P 비(제한인자개념)를 부영양화 현상의 해석에 이용할 때는 주의 깊게 적용해야 한다. 즉 조류의 성장률을 결정하는 인자(rate-determining factors: 개개의 영양소, 온도, 햇빛 등)와 어떤 영양소가 조류의 최대성장을 제어하는 인자(limiting factor)인가를 구분해야만 한다(Stumm and Morgan, 1981). 만약 어떤 수계에서 조류의 번식을 제어하기 위하여 질소 영양염류를 제거하면 N/P 비의 값이 작아지는 결과를 초래하고, 변경된 N/P 비로 말미암아 조류의 종(species)이 바뀌어 진다. 담수에서 낮은 N/P 비(4 이하)는 질소를 고정할 수 있는 유독한 청녹조류(blue-green algae)를 다량 번식시켜 매트모양으로 수면을 뒤덮게 하지만, 높은 N/P 비는 청녹조류의 과도한 증식상태를 보다 덜 불유쾌한 종으로 바뀌게 한다. 그러므로 N/P 비가 부영양화의 전체 상황을 설명해 줄 수 없고, 질소-인-조류의 농도 사이의 초보적인 관계를 이해하는 수단으로 사용해야 한다(Stumm and Morgan, 1981; Thomann and Mueller, 1987). Table 1은 조사해역의 조류성장의 제한영양염류를 나타내는 N/P 비의 값이다.

Table 1에서 당항만 해수의 N/P 비의 변화는 여름은 1.4~5.7 범위에 평균 2.8이고, 가을은 2.4~3.8 범위에 평균 3.0을 나타내었다. Kim(2003)의 조사에 의하면 여름 장마기간 중 당항만 표층 해수의 N/P 비의 변화는 9.3~18.8 범위에 평균 13.0(조사정점 15~22), 9.2~12.2 범위에 평균 11.0(조사정점 6~14)을 나타내었다

본 연구의 여름과 가을은 전체 조사정점에서 N/P 비가

10 이하로서 조류 성장의 제한영양염류(limiting nutrient)가 질소이었으나 Kim(2003)이 조사한 여름 장마기간 중에는 N/P 비가 10 이상으로서 인이 제한영양염류로 나타났다. 이는 당항만이 조석에 의하여 해수의 유입을 주기적으로 받는 내만이라 할지라도 장마시 유역의 점 및 비점오염원으로부터 과잉의 질소 영양염류의 유입을 받아 인이 제한영양염류가 되는 담수 수계의 특징을 나타내기 때문이다(Stumm and Morgan, 1981; Thomann and Mueller, 1987). 또한 당항만은 여름에 장마의 유무에 따라 N/P 비가 크게 변화하는 특징을 나타내었다.

그러므로 조류는 성장할 때 영양염류를 이용하기 시작하여 영양염류중 한 성분(제한영양염류)이 소진되어 조류의 성장을 더 이상 유지할 수 없어서 조류의 양적 증가가 중단되는 농도까지 계속하여 이용한다(Thomann and Mueller, 1987)는 것을 고려할 때 장마시 주변 유역의 영향을 직접적으로 받는 당항만에서 조류(적조)의 폭발적 성장을 조절하는 데는 유역 하천으로부터 점 및 비점오염원인 인과 질소를 통제하는 것이 유효한 방법이라고 생각된다.

② Si/N/P 비

해양이나 호수에서 광합성반응 중인 조류는 원형질 원소비(element ratio) C/N/P \approx 106:16:1을 구성하도록 수중의 탄소(CO₂ 또는 HCO₃⁻)와 함께 질소(NO₃⁻, NH₄⁺) 및 DIP를 흡수한다(Redfield, 1934, 1958). 규산염을 이용하는 규조류에 대해서는 C:Si:N:P \approx 106:15:16:1가 제안되었다(Harrison et al., 1977).

영양염류가 풍부한 해양에서 규조류를 구성하는 Si:N:P의 원자 구성비는 대략 16:16:1이다(Redfield, 1958; Brzezinski, 1985; Xu et al., 2008). N, P 및 Si에 의하여 조류의 성장에 제한이 일어날 때 기존의 Redfield ratio에 편차가 발생하는 것이다. DSi에 의한 제한의 조건을 양론적으로 평가하고 Table 2와 같은 기준을 제시하였다(Pavlidou et al., 2004; Xu et al., 2008). Table 3은 조사

Table 1. N/P ratios for sampling sites in Danghang Bay in summer and fall

Sampling Site	N/P Ratio		Sampling Site	N/P Ratio	
	Summer	Fall		Summer	Fall
1	5.7	3.4	13	3.0	3.5
2	4.3	3.3	14	2.5	2.6
3	3.4	3.0	15	4.1	2.9
4	3.0	3.0	16	2.4	2.9
5	1.4	2.4	17	2.0	2.7
6	5.2	2.9	18	2.0	3.7
7	1.4	3.0	19	3.5	3.8
8	3.1	2.6	20	2.4	3.5
9	1.9	3.3	21	1.8	3.1
10	3.2	2.9	22	2.4	3.2
11	2.0	2.8	Average	2.8	3.0
12	1.6	2.7			

Table 2. Limiting nutrients criteria by Si/N/P ratio for various water bodies

Limitation	Level
N limitation	DIN:DIP<16 and DIN:DSi<1
P limitation	DIN:DIP>16 and DSi:DIP>16
Si limitation	DIN:DSi>1 and DSi:DIP<16

해역의 Si/N/P 비에 의한 조류성장의 제한영양염류의 비의 값을 나타내고 있다. Table 4는 Table 2의 기준에 따른 각 조사정점에서의 Si/N/P 비에 의한 제한영양염류를 나타내고 있다.

Table 4로부터 당항만은 여름과 가을에 Si/N/P 비에 있어서도 모든 조사정점에서 질소가 제한영양소로 나타났다.

Table 3. Si/N/P ratios for sampling sites in Danghang Bay in summer and fall

Sampling Site	Si/N/P Ratio					
	Summer			Fall		
	DIN/DIP	DIN/DSi	DSi/DIP	DIN/DIP	DIN/DSi	DSi/DIP
1	5.7	0.4	13.2	3.4	0.1	32.7
2	4.3	0.2	20.0	3.3	0.2	17.5
3	3.4	0.2	17.9	3.0	0.2	19.7
4	3.0	0.2	14.5	3.0	0.2	19.9
5	1.4	0.1	11.0	2.4	0.2	13.7
6	5.2	0.6	8.9	2.9	0.2	16.4
7	1.4	0.3	4.5	3.0	0.2	18.7
8	3.1	0.4	8.4	2.6	0.1	22.9
9	1.9	0.2	11.1	3.3	0.1	21.8
10	3.2	0.2	18.3	2.9	0.2	17.8
11	2.0	0.3	7.6	2.8	0.1	21.5
12	1.6	0.1	12.6	2.7	0.1	20.3
13	3.0	0.3	8.6	3.5	0.2	16.7
14	2.5	0.2	11.6	2.6	0.2	13.6
15	4.1	0.3	14.4	2.9	0.1	31.1
16	2.4	0.3	9.1	2.9	0.2	15.3
17	2.0	0.2	11.5	2.7	0.2	17.7
18	2.0	0.1	13.3	3.7	-	-
19	3.5	0.3	13.4	3.8	-	-
20	2.4	0.4	6.5	3.5	-	-
21	1.8	0.2	10.2	3.1	-	-
22	2.4	0.2	11.4	3.2	-	-
Average	2.8	0.2	11.6	2.8	0.2	19.8

Table 4. Limiting nutrients by Si/N/P ratios for sampling sites in Danghang Bay in summer and fall

Sampling Site	Limiting Nutrient		Sampling Site	Limiting Nutrient	
	Summer	Fall		Summer	Fall
1	N	N	13	N	N
2	N	N	14	N	N
3	N	N	15	N	N
4	N	N	16	N	N
5	N	N	17	N	N
6	N	N	18	N	N
7	N	N	19	N	N
8	N	N	20	N	N
9	N	N	21	N	N
10	N	N	22	N	N
11	N	N	Average	N	N
12	N	N			

3.3.9 회귀분석에 의한 부영양화 평가

부영양화 지수와 적조 발생에 대한 요인과 각 지표의 기여도를 평가하기 위하여 SigmaPlot(Ver. 13)의 Systat Software를 이용하여 1차 선형 및 다중선형회귀분석을 수행하고 그 결과를 Table 5에 나타내었다.

Table 5에서 여름과 가을에 EI와 COD, DIN, DIP 사이의 상관관계는 ANOVA(p) 값이 모두 $p < 0.05$ 로서 유의한 양의 상관관계를 나타내었다. 그리고 회귀계수(β)는 모든 지표에 대하여 가을이 여름보다 더 큰 값을 나타냄으로 EI에 대한 더 큰 영향을 나타내었다. 이는 여름은 강우에 의하여 유역으로부터 COD, DIN, DIP 물질이 유입하고 조류(적조)의 성장에 의한 소진 등으로 조사정점간 변화가 크지만 가을은 조류(적조)에 의한 소진이 미약하고 조사정점간 변화가 상대적으로 작기 때문인 것으로 생각된다. EI와 DSi 사이에는 여름은 유의한 상관관계가 성립되었으나 가을은 전혀 상관성을 나타내지 않았다.

Table 5에서 여름과 가을에 EI와 COD, DIN, DIP 사이의 다중선형회귀분석은 p 값이 모두 $p < 0.001$ 로서 유의한 양의 상관관계를 나타내었다. 그리고 결정계수(R^2)은 각각 0.911, 0.990으로서 이 회귀식의 추정치는 표본을 90% 이상 잘 설명해 주었다. β 값은 여름과 가을 모두 DIP가 가

장 큰 값(각각 272.192, 174.996)을 나타내어 EI에 가장 큰 영향을 미치는 변수임을 나타내 주었다.

Table 5에서 여름은 TChl과 EI, DIP, DSi 사이에서 유의한 상관관계를 나타내었으나 COD, DIN 사이에서는 유의한 상관관계를 나타내지 않았다. 가을은 TChl과 모든 지표들 사이에 유의한 상관관계가 나타나지 않았다. 한편 여름에 TChl과 COD, DIN, DIP, DSi 사이의 다중 선형회귀분석은 p 값이 모두 $p = 0.012$ 로서 유의한 양의 상관관계를 나타내었고, R^2 은 0.513으로서 이 회귀식의 추정치는 표본을 51.3% 설명해 주었다. β 값은 DIP가 가장 큰 값(90.695)을 나타내어 TChl에 가장 큰 영향을 미치는 변수임을 나타내 주었다.

4. 결 론

당항만 해역의 부영양화를 평가한 결과는 다음과 같다.

SCCHD에 의한 당항만의 영양단계는 여름은 만 전체가 부영양상태를 나타내었으나 가을은 조사정점 1~7(만 입구에서 중간)까지는 빈영양 또는 영양단계를, 조사정점 8~22(중간에서 만의 내측(마동호 예정해역))까지는 여름과 동일하게 부영양상태를 나타내었다.

Table 5. Regression analysis among TChl, COD, DIN, DIP and Eutro in Danghang Bay in summer and fall (N=22)

Season	Parameter	ANOVA(p)	R	R ²	Regression Equation
Summer		0.015	0.512	0.263	EI = 1,811 + (3,512 * COD)
		0.001	0.645	0.416	EI = -3,671 + (99,782 * DIN)
		< 0.001	0.748	0.560	EI = -19,912 + (624,527 * DIP)
		0.003	0.599	0.359	EI = -4,682 + (25,916 * DSi)
		< 0.001	-	0.911	EI = -23,677 + (3,759 * COD) + (92,522 * DIN) + (272,192 * DIP)
		0.006	-0.562	0.316	TChl = 7,213 - (0.130 * EI)
		0.261	-0.250	0.063	TChl = 6,848 - (0.397 * COD)
		0.098	-0.361	0.131	TChl = 7,683 - (12,911 * DIN)
		< 0.001	-0.656	0.431	TChl = 11,937 - (126,601 * DIP)
		0.007	-0.559	0.313	TChl = 9,032 - (5,589 * DSi)
Fall		0.012	-	0.513	TChl = 12,319 - (0.190 * COD) + (1,238 * DIN) - (90,659 * DIP) - (3,344 * DSi)
		< 0.001	0.905	0.819	EI = -3,607 + (11,747 * COD)
		< 0.001	0.747	0.558	EI = -25,609 + (208,647 * DIN)
		< 0.001	0.671	0.450	EI = -32,567 + (737,251 * DIP)
		0.800	0.057	0.003	EI = 15,276 + (1,485 * DSi)
		< 0.001	-	0.990	EI = -31,227 + (8,706 * COD) + (103,380 * DIN) + (174,996 * DIP)
		0.067	0.397	0.158	TChl = 0,765 - (0,049 * EI)
		0.082	0.379	0.144	TChl = 0,535 + (0,602 * COD)
		0.086	0.375	0.140	TChl = -1,029 + (12,823 * DIN)
		0.786	0.061	0.004	TChl = 1,044 + (8,250 * DIP)
	0.476	0.160	0.026	TChl = 0,954 + (0,508 * DSi)	
	0.173	-	0.299	TChl = 0,064 + (0,578 * COD) + (13,806 * DIN) - (45,826 * DIP) + (0,610 * DSi)	

※ β 값은 선형회귀직선 식의 계수 값임.

※ ANOVA(p) 값이 작을수록 변수들 사이에 상관관계의 확률이 더 높아 진다. $p < 0.05$ 이면 독립변수로 종속변수를 예측할 수 있다. p 값이 0.05 이상이면 두 변수 사이에 유의한 상관관계가 존재하지 않는다(SigmaPlot, 2013).

COD는 여름에 조사정점별 큰 변화를 나타내었으나 가을은 큰 변화를 나타내지 않았다. 여름과 가을 모두 만의 내측으로 이동함에 따라 COD 농도가 증가하는 현상을 나타내었다.

DIN은 여름에 조사정점에 따라 큰 변화와 함께 가을보다 평균 약 36.1 낮은 농도를 나타내었다. 가을은 큰 변화를 나타내지 않았으나 만의 내측으로 이동함에 따라 증가하는 현상을 나타내었다.

DIP는 여름에 조사정점에 따라 다소 변화와 함께 가을보다 평균 약 29.8% 낮은 농도를 나타내었다. 가을은 거의 일정한 변화를 나타내었다. 여름과 가을 모두 만의 내측으로 이동함에 따라 증가하는 현상을 나타내었다.

DSi는 가을이 여름보다 평균 약 2.4배 높은 농도를 나타내었다.

당항만 해수의 TChl 농도의 변화는 여름은 조사정점에 따라 큰 변화를 나타내었으나 가을은 큰 변화를 나타내지 않았다. 여름은 가을보다 평균 약 3.7배 높은 TChl 농도를 나타내었다. 여름철 TChl 농도는 당항만 중심에 가까운 조사정점이 담수가 유입하는 유역에 가까운 바깥쪽 조사정점보다 평균 약 1.8배 높은 농도를 나타내었다.

여름과 가을에 당항만은 모든 조사정점에서 EI가 1를 초과함으로써 다른 조건이 갖추어지면 항시 적조가 발생할 수 있는 해역으로 나타났다. 가을에 조사정점 13~22(마동호 예정해역)에서 EI가 급격히 증가하여 나머지 조사정점보다 평균적으로 대략 2.3배 높은 값을 나타내었다.

N/P 비는 여름과 가을에 전체 조사정점에서 10 이하로서 조류 성장의 제한영양염류(limiting nutrient)가 질소이었으나 여름 장마기간 중에는 10 이상으로서 인이 제한영양염류가 되는 담수 수계의 특징을 나타내었다.

여름과 가을에 당항만의 EI와 COD, DIN, DIP 사이의 다중 선형회귀분석은 유의한 양의 상관관계를 나타내었고, 회귀식의 추정치가 표본을 90% 이상 잘 설명해 주었다. β 값은 여름과 가을 모두 DIP가 EI에 가장 큰 영향을 미치는 변수임을 나타내 주었다. 한편 여름에 TChl과 COD, DIN, DIP, DSi 사이의 다중 선형회귀분석은 유의한 양의 상관관계를 나타내었고, 회귀식의 추정치는 표본을 51.3% 설명해 주었다. β 값은 DIP가 TChl 농도에 가장 큰 영향을 미치는 변수임을 나타내 주었다. 가을은 TChl과 모든 지표들 사이에 유의한 상관관계가 나타나지 않았다.

사 사

이 연구는 2014년도 경상대학교 연구년제연구교수 과제임.

References

BROM(2015). *Meteorological Statistics Data(2006~2015)*, Busan Regional Office of Meteorology, Busan, Korea.
 Borum, J(1997). Ecology of coastal waters and their response

to eutrophication. In: Sand-Jensen, K, Pedersen, O. (Eds.), *Freshwater Biology, Priorities and Development in Danish Research*, G.E.C. Gad, Copenhagen, Denmark, pp. 102-115.
 Brzezinski, MA(1985). The Si:C:N ratio of marine diatoms: interspecific variability and the effect of some environment variables, *J. Phycol.*, 15, pp. 305-311.
 Chapra, SC(1997). *Surface Water-Quality Modeling*, McGraw-Hill, New York.
 Cloem, JE(2001). Our evolving conceptual model of coastal eutrophication problem, *Marine Ecology Progress Series*, 210, pp. 223-253.
 Conley, DJ and Malone, TC(1992). Annual cycle of dissolved silicate in Chesapeake Bay: implications for the production and fate of phytoplankton biomass, *Mar Ecol Prog Ser*, 81, pp. 121-128.
 Domingues, RB, Barbosa, A and Galvão, H(2005). Nutrients, light and phytoplankton succession in a temperate estuary (the Guadiana, south-western Iberia), *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 64, pp. 249-260.
 Egge, JK and Aksnes, DL(1992). Silicate as regulating nutrient in phytoplankton competition, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 83, pp. 281-289.
 Gosung County(2016). *White Paper of Gosung County*, pp. 213-215, Gosung, Korea.
 Harrison, PH, Conway, H, Holmes, W and Davis, D(1977). Marine diatoms grown in chemostats under silicate or ammonium limitation. III. Cellular chemical composition and morphology of *Chaetoceros debilis*, *Skeletonema costatum*, and *Thalassiosira gravida*. *Mar. Biol.*, 43, pp. 19-31.
 Hauxwell, J and Valiela, I(2004). Effects of nutrient loading on shallow seagrass-dominated coastal systems: patterns and processes, In: Nielsen, SL, Banta, GT and Pedersen, MF (Eds.), *Estuarine Nutrient Cycling: The influence of Primary Producers*, Kluwer Academic Publishers, London, pp. 59-92.
 Howarth, RW and Marino, R(2006). Nitrogen as the limiting nutrient for eutrophication in coastal marine ecosystems: Evolving views over three decades, *Limnol. Oceanogr.*, 51, pp. 364-376.
 Ittekkot, v, Humborg, C and Schafer, P(2000). Hydrological alterations and marine biogeochemistry: a silicate issue? *Bioscience*, 50, pp. 776-782.
 Iwasaki, H(1979). Physiological ecology of red tide flagellates, *Biochemistry and Physiology of Protozoa*, 1, pp. 357-393.
 JFRPA(1973). Water quality standards for fisheries environment, *Japan Fisheries Resource Protection Association*, pp. 11-13.
 Kim, JH(1995). *Management of Water Quality*, Donghwa Publication Company, Seoul, Korea.

- Kim, MK(2001). *An experimental study on the seawater flow in bay*, Master's Thesis, Korea Maritime University, Busan, Korea.
- Kim, NS, Kang, H, Kwon, MS, Jang, HS, and Kim, JG(2016). Comparison of seawater exchange rate of small scale inner bays within Jinhae Bay, *J. of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, 19(1), pp. 74–85. [Korean Literature]
- Kim, SJ(2003). *Investigation of the pollution of Top Sediment and the Upper Water in the Sea planned as Madong Reservoir and the Adjacent Sea for both the Understanding of its Eutrophic State and the Counterplan*, Korea Agricultural Infrastructure Corporation, Ansan, Korea.
- Lee, CW, Kwon, YT, and Han, SD(1991). *A Report on Investigation of Pollution over Jinhae Bay*, Ministry of Environment, p. 195, Seoul, Korea.
- Lee, MO and Moon, JH(2008). Marine environmental in the Neighborhood of the Narado as the first outbreak region of Cochlodinium polykrikoides blooms, *J. of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, 11(3), pp. 113–123. [Korean Literature]
- Meeuwing, JJ(1999). Predicting coastal eutrophication from land–use: an empirical approach to small non–stratified estuaries, *Marine Ecology Progress Series*, 176, pp. 231–241.
- MOF(2013). *Standard Methods for the Examiantion of Marine Environment*, Ministry of Oceans and Fisheries, Seoul, Korea.
- NAS/NAE(1972). *Water Quality Criteria, a Report of the Committee on Water Quality*, National Academy of Science and National Academy of Engineering, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Okaichi, T(1985). The Cause of Red–Tide in Neritic Waters, *Japan Fisheries Resources Conversation Association*, p. 58–75.
- Pavlidou, A, Kontoyiannis, H and Psyllidou–Giouranovits, R(2004). Trophic conditions and stoichiometric nutrient balance in the Inner Saronikos Gulf (Central Aegean) Fresen, *Environ. Bull.*, 13, pp. 1509–1514.
- Pereira–Filho, J, Schettini, CAF, Rörig, L and Siegle, E(2001). Intratidal variation and net transport of dissolved inorganic nutrients, POC and chlorophyll a in the Camboriú River Estuary, Brazil. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 53, pp. 249–257.
- Redfield, AC(1934). *On the Proportions of Organic Derivatives in Sea Water and their Relation to the Composition of Plankton*, Liverpool University Press, Liverpool, pp. 176–192.
- Redfield, AC(1958). The biological control of chemical factors in the environment, *Am. Sci.*, 46, pp. 205–221.
- Rocha, C, Galvão, H and Barbosa, A(2002). Role of transient silicon limitation in the development of cyanobacteria blooms in the Guadiana estuary, south–western Iberia, *Marine Ecology Progress Series*, 228, pp. 35–45.
- Schindler, DW(1977). *Science*, 195, p. 260.
- Shapiro, J(1973). *Science*, 179, p. 382.
- SigmaPlot(2013). Using SigmaStat Statistics in SigmaPlot, Systat Software, USA.
- Spiro, TG and Stigliani, WM(1980). *Environmental Science in Perspective*, State University of New York Press, Albany.
- Stumm, W and Morgan, JJ(1981). *Aquatic Chemistry*, John Wiley & Sons Pub. Co., New York.
- Tamminen, T and Anderson, T(2007). Seasonal phytoplankton nutrient limitation patterns as revealed by bioassays over Baltic Sea gradients of salinity and eutrophication, *Marine Ecology Progress Series*, 340, pp. 121–138.
- Thomann, RV and Mueller, JA(1987). *Principles of Surface Water Quality Modeling and Control*, Harper & Row, Publishers, New York.
- USEPA(1974). *The Relationships of Phosphorus and Nitrogen to the Trophic State of Northeast and North–Central Lakes and Reservoirs*, National Eutrophication Survey Working Paper No. 23.
- WERD–MOE(1974). *Water Pollution(2nd Ed.)*, Ministry of Environment, Tokyo, Japan.
- Xu, J, Ho, AYT, Yin, K, Yuan, X, Anderson, DM, Lee, JHW, and Harrison, PJ(2008). Temporal and spatial variations in nutrient stoichiometry and regulation of phytoplankton biomass in Hong Kong waters: influence of the Pearl River outflow and sewage inputs, *Mare Pollut Bull.*, 57, pp. 335–348.
- Yin, K, Qiam, P, Wu, MCS, Chen, JC, Huang, L, Song, X and Jian, W(2001). Shift from P to N limitation of phytoplankton growth across the Pearl River estuarine plume during summer, *Marine Ecology Progress Series*, 221, pp. 17–28.