

담수유입에 의한 식물플랑크톤의 대량번식 후의 연안 수질변동 특성

이영식* · 박영태** · 김귀영** · 최용규* · 이필용*

*남해수산연구소 **국립수산과학원

Characteristics of Coastal Water Quality after Diatom Blooms Due to Freshwater Inflow

Young Sik LEE*·Young Tae PARK**·Kui Young KIM**·Yong Kyu CHOI*·Pil-Yong LEE*

*South Sea Fisheries Research Institute, Yeosu Jeonnam 556-820, South Korea

**National Fisheries Research and Development Institute, Pusan 619-900, South Korea

요 약 : 연안해역의 수질특성 및 일차생산 증가 메커니즘을 이해하는 데에 기초 자료로 활용하기 위하여, 많은 양의 담수 유입 후 규조류가 대량 번식한 상태와 담수가 유입되지 않고 적조가 발생하지 않은 상태의 해수의 수질특성을 조사하였으며 그 결과를 요약하면 아래와 같다. 1) 호우로 많은 양의 담수가 유입된 해역에서 규조류인 *Skeletonema costatum*와 *Thalassiosira* spp.가 각각 1,200~5,000 cells/mL, 750~1,200 cells/mL의 농도로 관찰되었다. 2) 규조류가 대량으로 증식하지 않은 곳보다 규조류가 대량으로 증식한 곳에서 수온, pH, 용존산소농도가 높게 조사되어, 두 곳 사이의 거리가 20m 정도에 불과함에도 불구하고 두 곳간의 수질특성 차이는 뚜렷하게 나타났다. 3) 규조류가 대량으로 증식하지 않은 곳보다 규조류가 대량으로 증식한 곳에서 질소, 인, 규소의 농도가 낮게 조사되어, 호우로 질소, 인, 규소 보다는 규조류가 증식하기 위해 필요한 미량원소가 육지로부터 풍부하게 유입된 것으로 보인다. DIN/DIP, DIN/SiO₂-Si 비는 모두 규조류가 대량 증식한 정점과 그렇지 않은 정점간의 뚜렷한 차이는 없었다.

핵심용어 : 연안해역, 규조류의 대량 증식, 호우, 수질, 질소, 인, 규소

ABSTRACT : In order to study the characteristics of water quality in coastal water and mechanism of phytoplankton blooms, factors of water quality were investigated in diatom bloom area due to rainfall event and no diatom bloom area. Diatom blooms occurred after heavy rain and the dominant species were *Skeletonema costatum*(1,200~5,000 cells/mL) and *Thalassiosira* spp.(750~1,200 cells/mL). In diatom bloom area, water temperature, pH, and dissolved oxygen were observed at higher level than in no diatom bloom area. Although these two areas were only 20 meters apart from each other, sharp difference in coastal water quality between two areas was observed. In diatom bloom area, concentrations of nitrogen, phosphorus, and silicate were observed at lower level than in no diatom blooms area. This seems to be due to inflow of much trace metal such as Fe, Mo, Se and so on than nitrogen, phosphorus, and silicate by rainfall events. However, distinct differences in DIN/DIP and DIN/SiO₂-Si between these two areas were not observed.

KEY WORDS: Coastal water, Diatom bloom, Heavy rain, Water quality, Nitrogen, Phosphorus, Silicate

1. 서 론

연안해역은 육지의 생활하수, 축산폐수, 산업폐수 등이 쉽게 유입되는 곳이며, 호우 시에는 많은 양의 담수가 유입되는 해역이다. 또 해수의 체류시간이 길고, 외해수와 혼합이 비교적 어려운 곳이다. 이로 인해 연안해역은 짧은 시간 내에 유기물(COD)이나 식물플랑크톤이 대량으로 증가하여 투명도가 감

소하고, 저층에서는 빈 산소 수층이 형성되기도 한다. 이처럼 연안해역은 육지의 영향과 지리적 여건으로 수질이 급격히 변동한다.

이렇게 짧은 시간 내에 다양한 원인에 의해 급변하는 연안해역의 수질을 정확히 알고 그 이유를 파악하는 것은 연안해역에 대한 수질관리정책을 세우거나, 효과적으로 이용하기 해서 매우 중요하다(Cho et al., 2004). 그러나, 기상이나 조사선의 사정 등으로 급변하는 연안해역의 수질을 정확히 모니터링하기는 간단하지가 않다. 한 예로, 대부분의 적조는 한 장소에서 발생하여 2~5일 후에는 원전 소멸된다(이, 1997; Lee et al., 1996; Lee, 2002).

이 연구에서는 연안해역의 수질특성 및 일차생산 증가 메커니

* 대표저자 : 정희원, leeys@momaf.go.kr 061) 690-8958

** ytpark@nfrdi.re.kr 051) 720-2521

** kykim@momaf.go.kr 051) 720-2530

* ykchoi@momaf.go.kr 061) 690-8952

* pylee@nfrda.re.kr 061) 690-8900

증을 이해하기 위해, 여수 돌산도 동부 연안해역에서 많은 양의 담수 유입 후 규조류가 대량 번식한 상태와 담수가 유입되지 않고 적조가 발생하지 않은 상태의 해수의 수질특성을 연구하였다.

2. 재료 및 방법

여수 돌산도 동부 연안해역은 호우 시에는 많은 양의 섬진강 담수가 광양만을 거쳐 유입되고, 호우 후에는 규조류가 대량으로 증식하는 해역이다(Lee, 2002). 따라서, 여수 돌산도 동부 연안해역에 대하여, 여수, 순천시지역에 2002년 7월 5일에 112.5mm의 강우가 관측된 후 규조류가 대량으로 증식한 2002년 7월 10일에 수질환경을 조사하였다. 조사는 담수가 많이 유입되어 규조류가 대량으로 증식한 두 곳(정점)과 담수의 유입이 거의 없고 규조류가 거의 증식하지 않은 두 곳에서 하였다. 정점간 거리는 그 경계를 기준으로 담수의 영향이 아주 적고 플랑크톤이 많이 번식하지 않은 남쪽을 향하여 10m(St. B), 50m(St. A), 담수가 많이 유입되고 플랑크톤이 대량 번식한 북쪽을 향하여 10m(St. C), 50m(St. D) 위치이다(Fig. 1). 그리고, 이동시간을 포함하여 조사에 소요된 시간은 30분 정도였다.

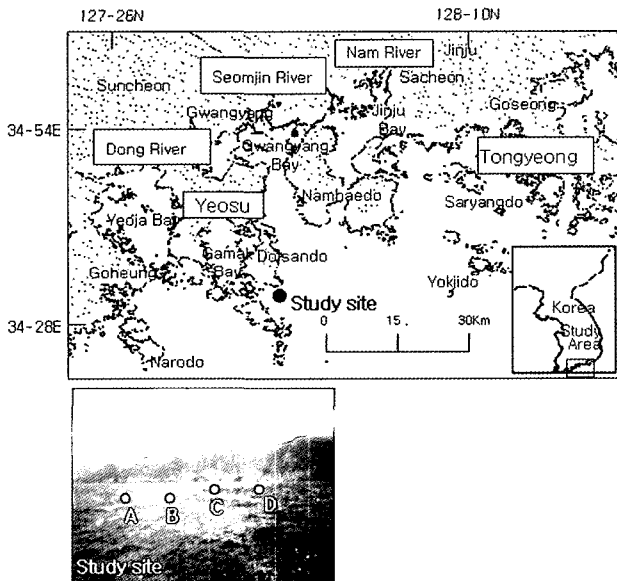


Fig. 1. Location and picture of study area around eastern coast of Dolsando, Korea.

수온, 염분, pH, 용존산소, Chl.은 다항목 수질측정기(YSI, 6920)로 현장에서 측정하였다. 영양염 분석용 시료는 표층(0.2 m), 저층(10 m)에서 Van Dorn 채수기로 채수하였으며, NH_4^+-N , NO_3^--N , NO_2^--N , DIP, SiO_2-Si 는 해양환경 공정시험방법(해양수산부, 2002)에 따라 측정하였다. 식물플랑크톤의 대량번식은 현장에서 육안, 그리고 휴대용 현미경(SWIFT, FM-31)으로 확인하였으며, 정확한 종과 밀도는 현미경(Olympus, BX 50)으로 실험실에서 검정하였다

(Fukuyo et al., 1990).

조사대상 해역으로 유입되는 담수의 수질특성을 이해하기 위해, 조사대상해역의 주요 담수유입원인 섬진강 표층해수(섬진강교)와 비교대상으로 순천시 동천(순천시 풍덕교)의 표층수에 대하여 월 2회 이상 조사하였다. Chl. a는 분광광도계로 해양환경공정시험방법(해양수산부, 2002)에 따라 측정하였으며, 그 외는 위와 같이 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 섬진강과 동천의 수질

Fig. 2에 섬진강과 동천의 표층수에 대한 염분, pH, 질소, 인, 규소, Chlorophyll a, DIN/DIP, $\text{SiO}_2-\text{Si}/\text{DIN}$ 의 변동을 나타냈다. 섬진강과 동천에서 염분의 변동범위는 각각 0.06~29.57‰(평균 14.26‰), 0.03~0.81‰(평균 0.17‰)로 조사되었으며, 동천보다 섬진강에서 강우량이 적은 겨울과 봄에 염분이 높게 나타났다. pH는 섬진강과 동천에서 각각 6.86~8.40(평균 7.72), 6.69~9.31(평균 8.05)로 조사되었다. NH_4^+-N 는 섬진강에서 0.07~31.89 μM (평균 4.13 μM), 동천에서 0.60~12.38 μM (평균 3.55 μM), NO_3^--N 는 섬진강에서 9.39~99.26 μM (평균 57.52 μM), 동천에서 64.09~232.42 μM (평균 102.20 μM), NO_2^--N 는 섬진강에서 0.21~4.03 μM (평균 1.03 μM), 동천에서 0.28~11.25 μM (평균 2.05 μM), DIP는 섬진강에서 0.08~1.25 μM (평균 0.57 μM), 동천에서 0.28~5.50 μM (평균 1.57 μM), SiO_2-Si 는 섬진강에서 1.13~212.92 μM (평균 70.60 μM), 동천에서 54.77~232.63 μM (평균 130.72 μM)로 조사되어, NO_3^--N , DIP, SiO_2-Si 는 섬진강보다 동천에서 두 배정도 높게 나타났다. Chl. a는 섬진강에서 1.13~27.48(평균 6.93), 동천에서 0.82~29.31 $\mu\text{g}/\text{L}$ (평균 6.85 $\mu\text{g}/\text{L}$)로 비슷하게 조사되었다. DIN/DIP는 섬진강에서 24.89~374.90(평균 153.03), 동천에서 12.51~378.63(평균 100.75), DIN/ SiO_2-Si 비는 섬진강에서 0.07~4.02(평균 1.14), 동천에서 0.58~3.34(평균 1.32)로 조사되었다.

3.2 수질인자의 변동

Fig. 3에 수심별 수온, 염분, pH, 용존산소, Chl. 농도의 변동을 나타냈다. 평균 수온은 정점 A, B, C, D에서 각각 21.39, 21.18, 22.79, 22.35 $^{\circ}\text{C}$ 였으며, 정점 A, B보다 C, D에서 약간 높게 나타났다. 수심에 따른 수온은 정점 A, B에서는 큰 변화는 없어 보인다. 그러나, 정점 C, D에서는 표층에서 약 24 $^{\circ}\text{C}$ 였으며, 2m에서는 22 $^{\circ}\text{C}$ 로 낮아졌다. 평균 염분은 정점 A, B, C, D에서 각각 32.57, 32.61, 30.93, 31.03‰로 조사되었으며, 정점 A, B보다 C, D에서 낮게 나타났다. 수심에 따른 염분은 정점 A, B에서는 거의 일정하였으나, 정점 C, D에서는 표층에서 약 29.7‰였으며, 수심의 증가와 더불어 급격히 증가하여 2m에서는 31.5‰정도까지 높아졌다.

일반적으로 수심이 얇은 강물의 수온은 여름철의 더운 날씨의 영향으로 수심이 깊은 바다의 수온보다 높다. 그리고, 이번 조사해역은 위에서도 언급한 것처럼 호우로 섬진강 등으로부터 많은 양의 담수가 유입되는 해역이다(Lee, 2002). 따라서, 겨우 20m 정도 떨어져 있는 정점에서 위와 같은 수온과 염분의 차이는 호우로 수온이 높은 담수가 많이 유입되었기 때문으로 보인다.

약 180%로 아주 높게 나타났다. 식물플랑크톤이 대량으로 증식하면 물속의 CO₂의 흡수로 탄산농도가 감소하게 된다. 이로 인해 pH는 상승하게 된다. 그리고, 광합성작용으로 산소를 배출하게 된다. 이번 조사에서 규조류가 대량으로 증식하지 않은 해역보다 증식한 해역에서 뚜렷하게 pH는 높게 나타났다으며, 용존산소농도는 규조류가 대량으로 증식한 곳에서 180%로 과포화 상태로 조사되어, 규조류가 대규모로 증식하지 않은 해역과 증식한 해역의 차이가 뚜렷하게 나타났다.

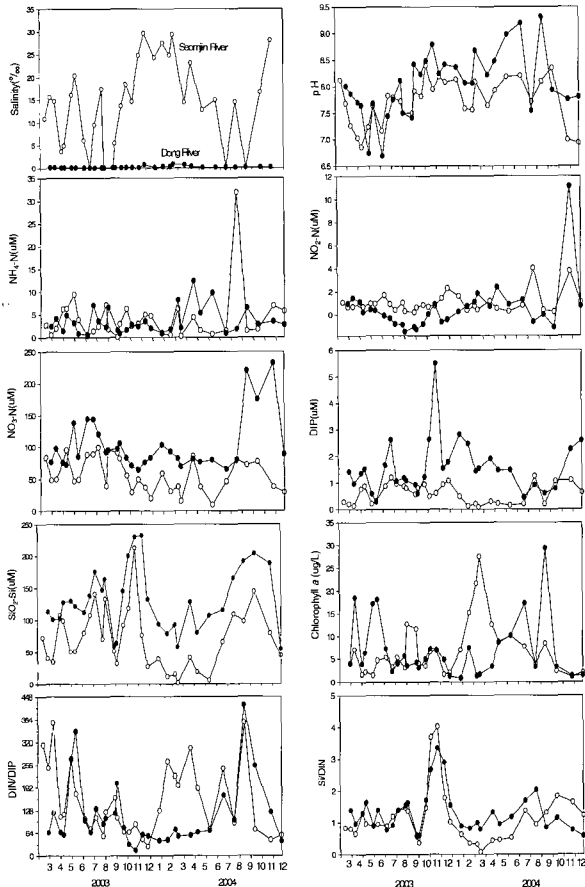


Fig. 2. Spatial distributions of salinity, pH, NH₄-N, NO₂-N, NO₃-N, DIP, SiO₂-Si, Chlorophyll *a*, DIN/DIP, and SiO₂-Si/DIN at Seomjin and Dong River water.

pH는 정점 A, B, C, D에서 평균치가 각각 7.98, 7.91, 8.16, 8.16으로 조사되었으며, 정점 A, B보다 C, D에서 높게 나타났다. 수심별 pH는 수온, 염분과 같이 정점 A, B에서는 표층에서 약간 높게 나타났으나, 정점 C, D에서는 표층에서 약 8.3로 아주 높게 나타났다. 평균 용존산소농도는 정점 A, B, C, D에서 각각 109.3, 102.6, 153.4, 154.7%로 조사되었으며, 규조류가 대량으로 발생하지 않은 정점 A, B보다 규조류가 대량으로 발생한 C, D의 표층에서 아주 높게 나타났다. 수심에 따른 용존산소농도는 수온, 염분과 같이 정점 A, B에서는 약간 높게 나타났으나, 정점 C, D에서는 표층에서

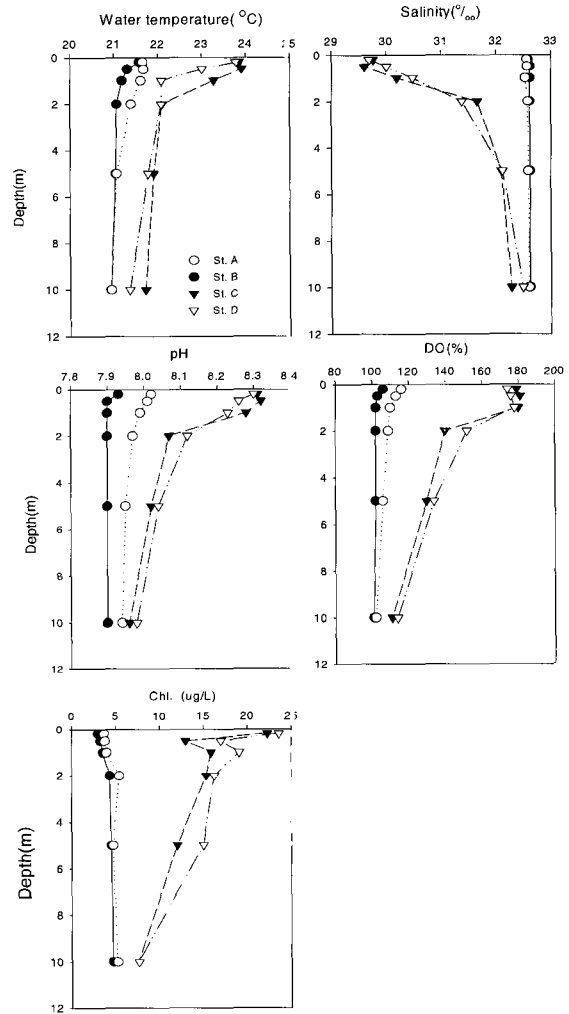


Fig. 3. Spatial distributions of water temperature, salinity, pH, DO, and chl. at stations A, B, C, and D.

3.3 규조류의 대량 증식

평균 Chl. 농도는 정점 A, B, C, D에서 각각 4.47, 3.90, 14.35, 16.42 μg/L로 조사되었으며, 염분이 높은 남쪽 정점 A, B보다 염분이 낮은 북쪽 정점 C, D의 표층에서 아주 높게 나타났다(Fig. 3). 수심별 그 농도는 정점 A, B에서는 수심 2m에서 약간 높게 나타났으나, 정점 C, D에서는 표층에서 아

주 높게 나타났다. 정점 A, B에서는 적조는 관찰되지 않았으며, 정점 C, D에서 *Skeletonema costatum*와 *Thalassiosira* spp.가 각각 1,200~5,000 cells/mL, 750~1,200 cells/mL가 관찰되었다. 조사해역의 평상시 식물플랑크톤의 제한영양염은 질소이므로(Lee, 2002), 이번 조사에서 규조류가 대량으로 증식하기 위해서는 우선 질소가 공급되어야 한다. 그리고, 이번 조사해역의 주요 담수원인 섬진강의 질소와 규소의 농도가 아주 높게 조사되었다(Fig. 2). 따라서, 호우로 많은 양의 담수유입과 함께 질소, 규소 등 규조류가 증식하기에 필요한 여러 영양물질이 풍부하게 공급되어 규조류가 대량으로 번식한 것으로 보인다.

3.4 영양염 농도 변동

표층과 수심 10m에서 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, DIN, DIP, $\text{SiO}_2\text{-Si}$, DIN/DIP, DIN/ $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 비의 변동을 Fig. 4에 나타냈다. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도범위는 0.34~2.13 μM 로 표, 저층 모두 정점 B에서 약간 높게 조사되었다. $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 의 농도범위는 0.04~0.44 μM 로 조사되었다. 정점별 그 농도는 표층에서는 정점 A와 B에서 높게 조사되었으며, 저층에서는 정점별 큰 차이는 없어 보이며, 0.4 μM 정도로 조사되었다. $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 농도범위는 0.52~5.65 μM 로 표층에서는 정점 A와 B에서 높게 조사되었으며, 저층에서는 5 μM 정도로 정점별 큰 차이는 없어 보인다. DIP 농도범위는 0.10~0.50 μM 로 표층에서는 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 과 비슷하게 정점 A와 B에서 높게 조사되었으며, 저층에서는 정점 D에서 0.33 μM 로 가장 낮게 조사되었다. $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 농도 범위는 2.14~18.77 μM 로 조사되었다. 표층에서는 정점 A, B에서 각각 18.34, 18.77 μM 로 높게 나타났으며, 정점 C, D에서는 각각 6.26, 2.14 μM 로 정점 A, B보다 아주 낮게 조사되었다. 저층에서는 정점별 큰 차이 없이 16.72~18.31 μM 로 조사되었다.

일반적으로 호우가 발생하여 많은 양의 담수가 유입되면 그 영향을 받는 해역에서 질소, 인, 규소의 농도는 아주 높다(이, 1997; Lee et al., 1996; Lee, 2002). 이번 조사에서 규조류가 대량으로 증식하지 않은 곳보다 규조류가 대량으로 증식한 곳에서 염분농도가 낮게 조사되어 섬진강 등으로부터 많은 양의 담수가 유입된 것으로 보인다(Fig. 3). 따라서, 섬진강 담수에 많이 녹아있는 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 이나 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 의 농도는 규조류가 대량으로 발생한 정점 C, D에서 규조류가 대량으로 증식하기 전에는 상당히 높았을 것으로 추측할 수 있다. 그러나, 이번조사에서는 질소, 인, 규소의 농도가 낮게 조사되었다. 그 이유로는 질소, 인, 규소 보다는 규조류가 증식하기 위해 필요한 미량원소가 육지로부터 더 많이 유입되었거나, 또는 조사해역의 해수에서 그 농도가 높아 *Skeletonema costatum*와 *Thalassiosira* spp. 등의 식물플랑크톤이 상대적으로 질소, 인, 규소를 많이 흡수했기 때문으로 보인다. DIN/DIP, DIN/ $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 비는 식물플랑크톤 증식의 제한영양염을 검토하는데 사용되고 있다(Caraco et al., 1987; Fisher et al.,

1992; Hecky and Kilham, 1988). 이번 조사에서 DIN/DIP 비의 변동범위는 7.6~16.6이며, 표, 저층 모두 정점 B에서 높게 조사되었으나, 대부분 16 이하로 조사되었다. 그리고, DIN/ $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 비의 변동범위는 0.15~0.44였으며, 표층에서는 정점 B, C에서 낮게 조사되었고, 그 비가 1 이하로 조사되었다 따라서, 식물플랑크톤 증식에 있어 가장 부족한 영양염은 질소, 인, 규소 중에서 질소인 것으로 보인다. 그러나, DIN/DIP, DIN/ $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 비 모두 규조류가 대량 증식한 곳과 그렇지 않은 곳간의 뚜렷한 차이는 없었다.

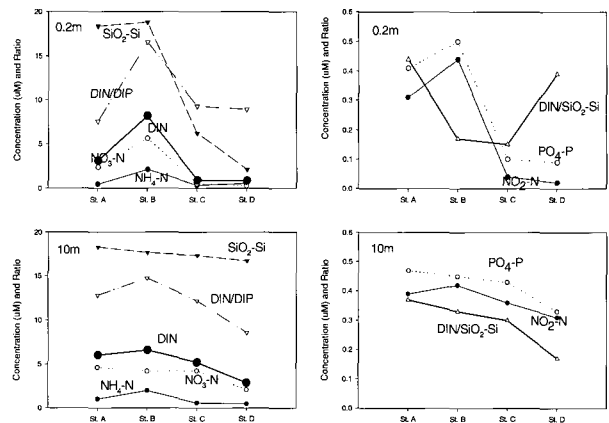


Fig. 4. Spatial distributions of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, DIN, DIP, $\text{SiO}_2\text{-Si}$, DIN/DIP, DIN/ $\text{SiO}_2\text{-Si}$ at surface water(0.2m) and 10m depth at stations A, B, C, and D.

4. 결론

연안해역의 수질특성 및 일차생산 증가 메커니즘을 이해하는데 기초 자료로 활용하기 위해, 많은 양의 담수 유입 후 규조류가 대량 번식한 상태와 담수가 유입되지 않고 적조가 발생하지 않은 상태의 해수의 수질특성을 조사하였으며 그 결과를 요약하면 아래와 같다.

- 1) 호우로 많은 양의 담수가 유입된 여수 돌산도 동부 연안해역에서 규조류인 *Skeletonema costatum*와 *Thalassiosira* spp.가 각각 1,200~5,000 cells/mL, 750~1,200 cells/mL로 관찰되었다.
- 2) 규조류가 대량 증식하지 않은 곳보다 규조류가 대량 증식한 곳에서 수온, pH, 용존산소농도가 높게 조사되어, 두 곳 사이의 거리가 20m 정도에 불과함에도 불구하고 두 곳간의 수질특성 차이는 뚜렷하게 나타났다.
- 3) 규조류가 대량으로 증식하지 않은 곳보다 규조류가 대량으로 증식한 곳에서 질소, 인, 규소의 농도가 낮게 조사되어,

호우로 질소, 인, 규소 보다는 규조류가 증식하기 위해 필요한 미량원소가 육지로부터 더 많이 유입된 것으로 보인다. 그러나, DIN/DIP, DIN/SiO₂-Si 비 모두 규조류가 대량 증식한 정점과 그렇지 않은 정점간의 뚜렷한 차이는 없었다.

감사의 글

이 연구는 국립수산과학원(RP-2005-ME-031)에 의해 운영되었으며, 현장조사에 적극 협조해주신 탐구 11호 승무원께 깊이 감사드립니다. 아울러 이 논문을 세밀하게 검토해주신 두 분의 심사위원님께 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] 이영식(1997), 히로시마만에 있어서 부영양화의 원인, 대한환경공학회지, 19, pp. 371~380.

[2] 해양수산부(2002), 해양환경공정시험방법, 330pp.

[3] Caraco, N., A. Tamse, O. Boutros and I. Valiela(1987), Nutrient limitation of phytoplankton growth in brackish coastal ponds, Can. J. Fish. Aqua. Sci.,44, pp. 473~476.

[4] Cho, H.-S., D.-I. Lee, Y.-H. Yoon, M.-O. Lee and D.-M. Kim(2004), Temporal variation of water quality of the western Chinhae Bay in summer, Journal of the Korea Society for Marine Environmental Engineering, 7, pp. 13~21.

[5] Fisher, T. R., E. R. Peele, J. W. Ammerman and L. Harding(1992), Nutrient limitation of phytoplankton in Chesapeake Bay, Mar. Ecol. Prog. Ser., 82, pp.51~63.

[6] Fukuyo, Y., H. Takano, M. Chihara and K. Matsuoka(1990), Red tide organisms in Japan - an illustrated taxonomic guide-, Uchida Rokakuho, Tokyo, Japan, 430pp.

[7] Hecky, R. E and P. Kilham, 1988, Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: A review of recent evidence on the effects of enrichment, Limnol. Oceanogr., 33, pp. 796~822.

[8] Lee, Y. S., 2002, An influence of inflowing freshwater on the diatom blooms in the eastern coast of Dolsan, Yosu, Korea, J. of KSEE, 24, pp. 477~488.

[9] Lee, Y. S., T. Yamada, T. Seiki, T. Mukai, K. Takimoto and M. Okada, 1996, Effect of freshwater due to heavy rain on phytoplankton growth in Hiroshima Bay, Jpn. Soc. Water Environ., 19, pp. 995~1003.

원고접수일 : 2006년 2월 21일

원고채택일 : 2006년 5월 15일