

洛東江 河口海域의 식물플랑크톤 極大域 變動에 관한 數値시뮬레이션 - 1. 식물플랑크톤 극대역 변동 현황 -

이 대 인 · 홍 석 진 · 이 석 모 · 박 청 길
부경대학교 환경공학과
(2000년 6월 8일 접수)

The numerical simulation on variation of phytoplankton maximum region in the estuary of Nakdong river - 1. The state of variation of phytoplankton maximum region -

Dae-In Lee, Suk-Jin Hong, Suk-Mo Lee and Chung-Kil Park
Dept. of Environmental Engineering, Pukyong National Univ., Pusan, 608-737, Korea
(Manuscript received 8 June, 2000)

The estuary of Nakdong river is very influenced by the freshwater contained nutrients and organic materials. The response results of these influences are eutrophication and red tide outbreak in this region.

Concentration of chlorophyll *a* was 0.78~62.55 $\mu\text{g/L}$ in February, 1.20~21.29 $\mu\text{g/L}$ in April, 1.88~188.35 $\mu\text{g/L}$ in June, and 0.78~11.21 $\mu\text{g/L}$ in August, respectively. The decrease of chlorophyll *a* is considered that residence time is shorten by increase of freshwater discharge, and unfavorable growth condition of phytoplankton is created by diffusion of low salinity and increase of turbidity.

The phytoplankton maximum region located inner side of this estuary during winter season, whereas it was moved to outer side when mean discharge of the Nakdong river was increased. Therefore, the variation of phytoplankton maximum region was affected by input discharge from the Nakdong river basin.

Key words : Eutrophication, Red tide, Residence time, Freshwater discharge, Phytoplankton maximum region

1. 서 론

하구해역은 육상기원의 물질이 외양으로 유출되기 전에 거치는 점이지역(Transition zone)으로서 오염물질을 정화하는 기능과 함께 기초생산력이 매우 높은 곳이기 때문에 그 중요성이 강조되고 있다. 일반적으로 하구해역에서는 유출된 하천수가 해수와 만나면서 수직적으로는 밀도가 낮은 담수가 표층에 얇은 막으로 확산되면서 외양수와 만나서 혼합되고, 저층에서는 해수가 유입해 들어오면서 상·하층간의 염분쇄기를 형성하고 결국에는 다시 표층으로 용승해서 하나의 순환을 일으키는 Estuarine circulation이 일어난다. 또한, 수평적으로는 담수가 확산하는 과정에서 염분농도가 급격하게 변하는 염분전선 또는 River plume front가 형성되기도 한다. 이러한 물리적인 순환과정에서 물질의 흡착과 탈착, 그리고 침강과 용출이 반복되면서 복잡한 생지화학적 변화가 발생된다. 또한, 하천수에 포함된 고농도의 영양염과 유기물질은 하구순환류에 의해서 하구해역의 특정한 장소에 집적되어 장기적으로 머물면서 클로로필의 극대

층(Chlorophyll Maximum Layer)을 형성하여 생물생산력을 높이는 원인으로 작용하고 있다. 이러한 식물플랑크톤 극대역(Phytoplankton Maximum Region)의 위치는 해역의 물리적 상태, 영양염의 분포상황, 광조건, 혼합층의 깊이, 동물플랑크톤의 섭식 등 여러 요인에 관계된다.

실제로 하구해역에서 클로로필의 극대층은 육상에서의 유입부하와 조석의 영향으로 인한 전선의 형성 및 영양염의 공급기후와 밀접한 상관성을 맺어서 表層 및 亞表層에 관측되고^{1,2,3)} 그 변동은 육상으로부터 담수부하의 크기에 영향을 받는다. 또한 이러한 전선의 형성과 적조현상과의 관련성은 오래전부터 연구되어 왔다.⁴⁾

낙동강 하구해역은 1987년 낙동강의 수자원 이용목적 을 위해서 낙동강 하구둑이 건설된 후, 담수와 해수의 교환작용이 차단되어 기후환경에 적응된 생물들이 사라지게 되었고, 또한 낙동강 하구둑 수문을 열면 낙동강에 유입된 오염물질이 하구해역으로 부정기적으로 유입될 뿐만아니라 인근 하수처리장 등에서 유출되는 오염물질

도 하구주변의 수질에 영향을 미쳐 부영양화 단계를 초과하고 있고 적조현상이 빈발하고 있는 실정이다.

또한 본 대상해역에서는 예전부터 특정 공간상에 주변의 해수와 뚜렷이 구별되는 황록색 수색대가 자주 관측되고 그 원인으로서 영양염류가 풍부한 낙동강 하천수의 영향으로 인한 클로로필 극대층의 존재 때문이라 보고되었다.⁵⁾ 최근 이러한 Chlorophyll *a*의 분포는 연중 10 $\mu\text{g/L}$ 이상의 고농도를 보이고 계절마다 최대농도를 나타내는 지역이 다르게 나타나고 있다. 이 클로로필의 극대층은 식물플랑크톤의 극대역으로서 나아가서 적조 발생과 연관되므로 그 발생기작과 이동에 관한 연구는 중요한 의의가 있다고 볼 수 있다.

따라서 본 연구에서는 낙동강 하구해역에 있어서 식물플랑크톤 극대역 변동의 현황을 기술하고 그 원인에 대해서 해석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 대상해역 및 현황조사

본 연구의 대상해역은 Fig. 1과 같이 남해안의 진해만에서 부산광역시 수영만을 포함하는 광역해역 중 낙동강 하구해역에 초점을 맞추었다. 낙동강 하구해역은 연안오염 특별관리해역으로서 환경부고시에 의하면 Fig. 1에서 보는 바와 같이 가덕도 북단과 다대포 해수욕장 서북단 돌출부를 연결한 선 내측인 Region A는 해역수질환경기준 III등급으로 지정되어 있고, 가덕도 남단과 부산시 서구 암남동 남단을 연결한 선의 내측인 Region B는 II등급으로 설정되어 있다.

본 대상해역에서의 현황조사는 Fig. 1의 조사정점에서 1998년 1월에서 12월까지 해양수질, 물리, 생물과 저질조사를 실시했는데, 가덕수로 및 낙동강 하구해역 외측은 1998년 33개 정점에서, 낙동강 하구해역 내측은 1998년 5개 정점에서 수질조사를 행하였고, 외양역은 1999년 6개 정점에서 수질조사를 실시하였다. 그 밖의 자료는 부경대학교 해양과학공동연구소⁶⁾와 부산광역시 건설본부⁷⁾ 등을 참조했다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 수질특성

3.1.1. 식물플랑크톤 분포

식물플랑크톤의 극대역이 Chlorophyll *a*의 최대농도역과 상관성이 있는지 알아보기 위해서 Fig. 2와 같이 낙동강 하구해역에서 Chlorophyll *a*와 식물플랑크톤 현존량과의 상관관계를 파악해 본 결과, 그 상관계수는 0.76으로 밀접한 관계를 나타내어서 Chlorophyll *a*의 최대농도역이 식물플랑크톤의 극대역이라 평가할 수 있었다.

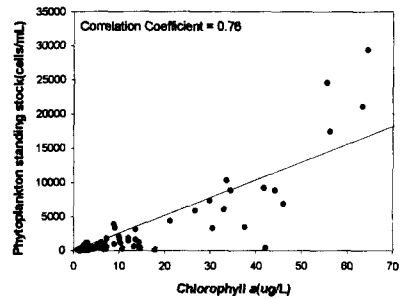


Fig. 2. Correlation between chlorophyll *a* and phytoplankton standing stock.

낙동강 하구해역의 Chlorophyll *a*의 표층분포는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 2월은 0.78~62.55 $\mu\text{g/L}$ 범위로 최대농도역은 하구해역 내측이었다. 강우로 인해서 낙동강 유출부하가 2월보다 증가한 4월에는 1.20~21.29 $\mu\text{g/L}$ 로 전체적으로 보아서 최대농도역은 가덕도 남단 및 가덕수로상에 나타났다. 실제 적조가 발생한 6월은 1.88~188.35 $\mu\text{g/L}$ 범위로 낙동강 하구해역의 외측 정점인 C3, D3와 가덕수로인 정점 F3에서 최고농도를 나타내었다. Chlorophyll *a*의 이러한 농도분포는 National Academy of Sciences⁸⁾에 의한 부영양단계 기준인 10 $\mu\text{g/L}$ 를 훨씬 초과한 상태였다. 그러나, 하계 집중강우로 인한 낙동강 유출부하가 최대를 이루었던 8월의 경우에는 0.78~

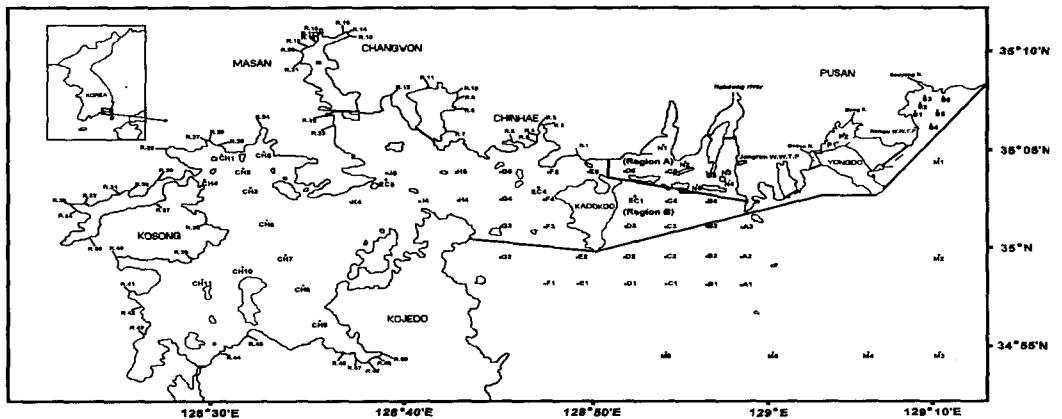


Fig. 1. The location of sampling stations in the study area.

11.21 $\mu\text{g/L}$ 범위로 최대분포는 하구해역 외측에 나타났으나, 전반적으로는 농도가 다른 시기보다 상당히 감소하였다.

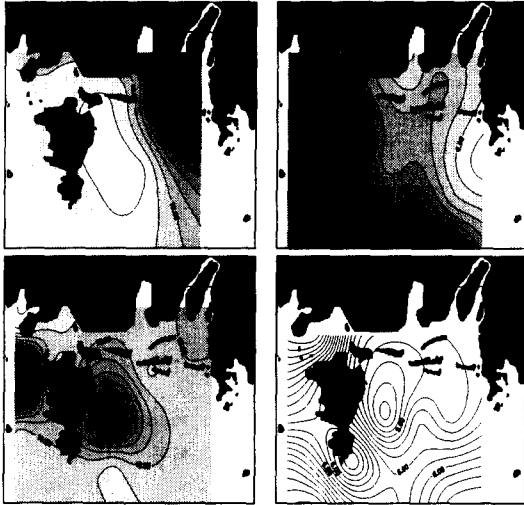


Fig. 3. Distribution of chlorophyll a ($\mu\text{g/L}$) at the surface from February to August, 1998.

3.1.2. 영양염류 분포

암모니아질소, 아질산질소, 질산질소의 합으로 나타내는 용존무기질소(DIN)의 표층분포는 Fig. 4와 같이 2월은 12.93~1351.07 $\mu\text{g-at/L}$, 4월은 10.29~434.93 $\mu\text{g-at/L}$ 범위로서 하구해역 내측에서 가장 높은 농도를 보였다. 적조가 발생한 6월은 3.00~198.00 $\mu\text{g-at/L}$ 범위로 하구해역 내측이 고농도를 보였으며, 적조발생지역에서 낮은 분포를 보였지만, 전체적으로 적조발생 가능농도인 7.14 $\mu\text{g-at/L}$ ⁹⁾이상의 농도분포를 나타내었다. 강우의 영향으로 낙동강 유출부하가 큰 8월은 29.72~605.14 $\mu\text{g-at/L}$ 범위로 하구해역 전체에 용존무기질소의 양이 급증하였다.

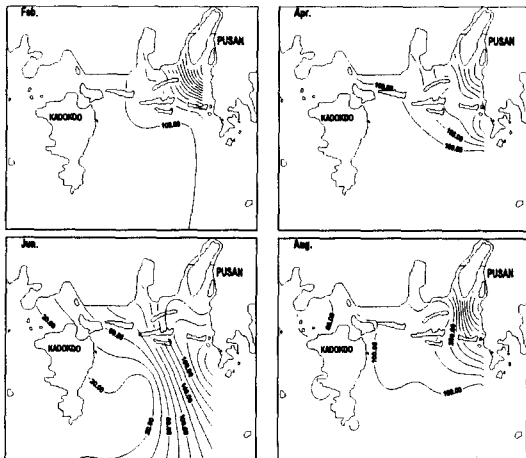


Fig. 4. Distribution of DIN($\mu\text{g-at/L}$) at the surface from February to August, 1998.

이러한 농도분포는 해역수질환경기준 III등급인 14.28 $\mu\text{g-at/L}$ 를 크게 상회하였다. 용존무기질소의 대부분은 질산질소가 차지하는 것으로 나타났다.

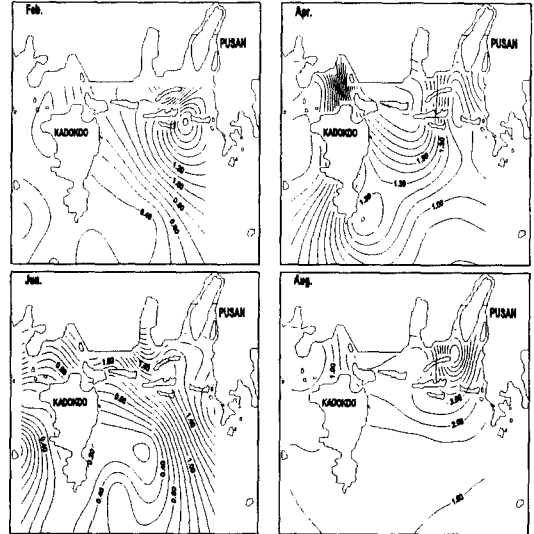


Fig. 5. Distribution of DIP($\mu\text{g-at/L}$) at the surface from February to August, 1998.

인산인의 표층분포는 Fig. 5와 같이 2월은 0.29~1.77 $\mu\text{g-at/L}$, 4월은 0.13~2.02 $\mu\text{g-at/L}$ 를 보였으며, 하구해역 내측에서 최대분포를 나타내었다. 6월은 0.16~2.23 $\mu\text{g-at/L}$ 범위로 적조가 발생한 정점에서 낮은 분포를 보였고 나머지 정점은 적조발생 가능농도인 0.48 $\mu\text{g-at/L}$ ⁹⁾를 초과했다. 8월은 0.29~6.13 $\mu\text{g-at/L}$ 범위로 대부분 해역수질환경기준 III등급인 0.97 $\mu\text{g-at/L}$ 를 넘어섰다.

낙동강 하구해역의 N/P비가 대부분 16을 넘어서고 있어서 육상에서의 질소계 영양염의 과부하를 반영한다고 할 수 있었다.

3.1.3. 낙동강 하구둑 방류량과 수질요인과의 관계

월별 낙동강 하구둑 방류량은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 2월의 경우는 일평균 약 1.3×10^7 ton이 유출되었다가 4월에는 강우의 영향으로 7.8×10^7 ton으로 증가하였고, 다시 6월에는 2.7×10^7 ton으로 감소하였다. 8월의 경우에는 하계 집중강우로 인해서 약 24.4×10^7 ton정도의 엄청난 양의 담수가 하구해역으로 유출되어 물질분포에 큰 영향을 미쳤다.

이러한 상황에서 각 월별 COD와 Chlorophyll a 와의 상관성을 살펴보면 Fig. 7과 같이 방류량이 상대적으로 적은 2월과 적조가 발생한 6월에는 상관계수가 높게 나타나서 식물플랑크톤 증식에 의한 자생-COD의 영향이 전체적 COD분포에 큰 영향을 미쳤다. 그러나, 방류량의 증가로 식물플랑크톤의 양이 상대적으로 감소했던 4월과 8월의 경우에는 그 상관계수가 0.4이하로 나타나서 전체적 COD 농도분포를 좌우하는 것은 육상유입원으로부터의 유입-COD라 판단되었다.

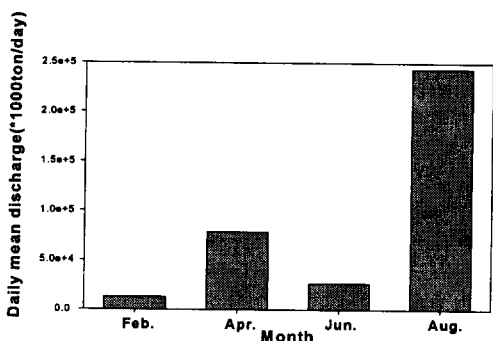


Fig. 6. The monthly variation of the Nakdong river discharge.

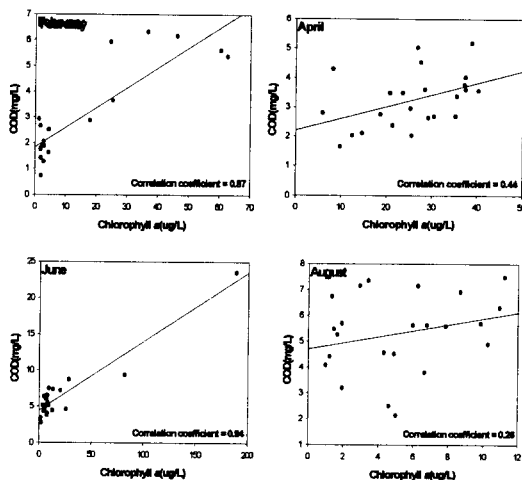


Fig. 7. The correlation between COD and chlorophyll a in February, April, June and August.

3.1.7 식물플랑크톤 극대역 변동원인 해석

본 연구에서는 식물플랑크톤 극대역 변동의 원인을 육상유입부하의 두가지 요인에서 접근하였다. 하나는 수질환경적 요인인 영양염 분포와 다른 하나는 물리적 요인인 육상유입방류량 증감에 의한 이류·확산작용이다. 그러나, 본 연구대상해역은 수질특성에서 본 바와 같이 용존무기질소와 인산인은 각각 적조발생의 가능농도인 $7.14\mu\text{g-at/L}$ 와 $0.48\mu\text{g-at/L}$ 를 훨씬 초과한 고농도의 분포를 보여서 식물플랑크톤 극대역 변동의 직접적인 원인으로 볼 수 없다.

따라서 하구둑에서의 방류량 증감에 의한 이류·확산작용의 영향에 의하여 식물플랑크톤의 극대역이 하구해역 내측과 외측사이에서 변동한다고 할 수 있다. 즉, Chlorophyll a의 2월 분포와 같이 방류량이 적은 시기는 방류수가 하구해역 내측에 체류하는 시간이 길어지고 이류·확산에 의한 영향이 적어서 극대역은 하구해역내측에 존재하지만, 4월과 8월과 같이 하구둑 방류량이 증가하면 하구해역 내측에는 방류수의 체류시간도 감소하

고, 탁도증가와 저염분에 의해서 증식작용이 불리할 뿐만아니라 활발한 이류·확산작용에 의해서 식물플랑크톤의 농도도 급격히 감소하고 따라서 극대역이 점점 하구해역 외측 및 가덕수로쪽으로 옮겨가는 현상을 나타낸다고 할 수 있다. 그리고 실제 본 대상해역에서의 적조는 6월의 Chlorophyll a 분포와 같이 하구해역 서쪽과 가덕도 남단 및 가덕수로쪽에서 잘 발생하고 있다. 따라서 이러한 배경으로 볼 때 식물플랑크톤 극대역의 변동 상황을 수치적으로 시뮬레이션하는 것이 필요하다 하겠다.

5. 결 론

낙동강 하구해역에 있어서 식물플랑크톤의 극대역 변동 현상과 낙동강 방류량의 영향을 연구한 결론은 다음과 같다.

1. 낙동강 하구해역에서 Chlorophyll a의 최대농도역이 식물플랑크톤의 극대역이라 평가할 수 있었다.
2. Chlorophyll a의 표층분포는 2월은 $0.78\sim 62.55\mu\text{g/L}$ 범위로 극대역은 하구해역 내측에, 4월에는 $1.20\sim 21.29\mu\text{g/L}$ 로 가덕도 남단 및 가덕수로상에 나타났다. 실제 적조가 발생한 6월은 $1.88\sim 188.35\mu\text{g/L}$ 범위로 가덕도 동쪽 연안과 가덕수로에서 극대역이 나타났고, 하계 집중강우로 인한 낙동강 유출부하가 최대를 이루었던 8월의 경우에는 표층에서 $0.78\sim 11.21\mu\text{g/L}$ 범위로 농도가 급격하게 감소하였다.
3. 용존무기질소와 인산인의 표층분포는 적조발생 가능농도를 초과한 과영양상태였다.
4. 방류량이 상대적으로 작은 시기와 적조발생시에는 식물플랑크톤 증식에 의한 자생-COD의 영향이 전체적 COD분포에 큰 영향을 미쳤고, 방류량이 증가했던 4월과 8월의 경우에는 유입-COD의 영향이 컸다.
5. 종합적으로 본 연구해역의 식물플랑크톤의 극대역은 하구둑에서의 방류량 증감에 의한 이류·확산작용의 영향에 따라서 하구해역 내측과 외측사이에서 轉移한다고 평가할 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) 松田治, 山本民次, 橋本俊也, 1995, 沿岸フレントと榮養塩の供給機構. 沿岸海洋研究, 33(1), 9~18.
- 2) Takeoka, H., O. Matsuda and T. Yamamoto, 1993, Processes causing the Chlorophyll a Maximum in the Tidal Front in Iyo-Nada, Japan. J. of Oceanogr., 49, 57~70.
- 3) Fujiwara, T., S. Fukui, A. Kasai, W. Sakamoto and Y. Sugiyama, 1997, Nutrients Transport and Subsurface Chlorophyll Maximum in Ise Bay. Umi to Sora, 73(2), 23~28.
- 4) Pingree, R. D., P. R. Pugh, P. M. Holligan and G. R. Forster, 1975, Summer phytoplankton blooms and red tides along tidal fronts in the approaches to the English Channel. Nature, 258, 672~677.
- 5) 박영관, 오윤근, 박청길, 1985, 낙동강 하구역에 출현

- 하는 황록색 수색대의 특성에 관한 연구. 한국해양학회지, 20(3), 30~36.
- 6) 부경대학교 해양과학공동연구소, 1999, 釜山新港 建設事業에 따른 漁業被害調査 最終報告書. 1134pp.
- 7) 부산광역시 건설본부, 1998, 신호지방공업단지 개발 사업 사후환경관리 '98년 종합보고서. 406pp.
- 8) National Academy of Science, 1972, A report of the committee on water quality criteria. Washington, DC.
- 9) 日本水産資源保護協會, 1972, 水産環境水質基準. 24pp.