

해창만의 수질환경변동 및 담수방류의 영향평가

이대인 · 조현서* · 이문옥*

부경대학교 환경시스템공학부, 여수대학교 해양시스템학부*

(2003년 10월 30일 접수, 2003년 12월 8일 승인)

Effect of the Freshwater Discharge on Water Quality Variation and in Haechang Bay, Korea

Dae-In Lee · Hyeon-Seo Cho* · Moon-Ok Lee*

Div. of Environmental System Engineering, Pukyong National University

Div. of Ocean System, Yosu National University*

(Manuscript received 30 October 2003; accepted 8 December 2003)

Abstract

Seasonal characteristics of water quality and effect of the freshwater discharge during open the tide embankment in Haechang Bay were evaluated. In the freshwater, where interior of the tide embankment, COD and Chl-a exceeded about 4mg/L and 10mg/m³, respectively, independent of season, while in the seawater they showed high values in April and July in contrast to the other period due to input of freshwater and increase of phytoplankton, respectively. The content of seawater inorganic nitrogen maintained a relatively high level at inner part of the bay, whereas high values of inorganic phosphorus content was distributed at all over the bay. The limiting factor for algal growth was nitrogen with respect to the N/P ratio. The compass of influence by the freshwater discharge in April was quite different with water pollutants. As a result of the salinity variation with time, the freshwater extended strongly to offshore from the surface layer without mixing with depth when open the tide embankment, and reached within about one hour at a station which is 3.5km from the tide embankment. To effective water quality management of Haechang Bay, discharge rate and pollutant loads should be controlled.

Key words : water quality, freshwater discharge, Haechang Bay, tide embankment

I. 서론

본 연구의 대상해역인 해창만은 한반도 남서해안의 고흥군 여자만 입구에 위치하는 소규모 내만으로서 육지와 크고 작은 섬 등으로 둘러싸인 천해이고 지형적으로는 협소하지만 굴과 바지락 등 패류양식이 활발하게 이루어져 왔으나, 최근에는 생산성이 급격히 저하되고 있는 실정이다. 특히, 만의 상류에는 1963년부터 농지조성을 목적으로 간척사업이 시행되어 1991년에 총 3개의 전동식 배수갑문이 준공되었고, 그 후 이 일대의 해역이 배수갑문 개폐에 의한 담수유출로 담수와 해수가 만나는 기수지역으로 변하는 등 만내의 수질환경이 영향을 받게 되었다(여수대학교 해양학과, 1999).

일반적으로 자연발생적으로 형성된 하구해역 및 내만에서는 외부유입 특히, 육상으로부터 담수유입의 영향에 따라 수질이 일정한 변동특성을 나타내고 수생생물들도 시간에 따라 점진적으로 환경에 적응하는 안정한 기수환경인 반면에, 본 연구지역과 같이 연안간척 및 담수확보차원에서 건설된 방조제와 하구둑이 존재하고 있는 곳은 인위적인 수문개폐에 의해 담수가 불규칙적으로 유출되어 물의 흐름과 염분의 급격하고 순간적인 변화가 일어날 수 있고 담수에 포함된 미처리된 오염물질이 유출되어 해역의 수질변동이 클 뿐만 아니라 그 환경에 적응된 생물들에게 매우 큰 스트레스를 미칠 수 있다. 이러한 영향의 크기는 담수방류량에 의해 결정된다(Fisher *et al.*, 1988; 藤原建紀, 1997)고 할 수 있다.

최근 연안역에서 담수를 저장하는 다양한 구조물사업이 활발히 진행되고 있어서 이에 따른 영향을 평가하고 예측하는 것은 중요한 수질관리의 연구측면이다. 이러한 배경하에서 본 연구자는 다른 하구해역에서 유체역학-저차생태계모델을 이용해서 담수방류에 의한 염분확산과 수질을 시뮬레이션한 바 있다(이대인 등, 2000; 이대인·박정길, 2002). 그러나, 수치모델링을 이용해서 환경

을 예측하기 이전에 하구해역에서 실제로 담수가 방류되었을 때 방류 전과 후의 단기간 수질변화와 연속적인 시간변동을 실측·평가하는 것은 기본적인 선행연구이지만, 현장조사의 어려움 등에 의해 거의 이루어지지 않았다.

따라서, 본 연구에서는 실측을 통하여 해창만의 계절별 수질특성과 공간적인 변동을 파악하고 그리고 방조제의 수문개방시 담수와 오염물질이 인근 연안역에 미치는 영향권과 수질변화특성을 평가하여 해역의 효율적인 이용 및 관리를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 조사방법

해창만 수질의 시·공간적 변동특성을 평가하기 위해서 Fig. 1에서 보는 바와 같이 방조제 수문내의 3개 지점(A, B와 C)과 방조제 밖 해역의 26개 정점(1~26)에서 1997년 7월 21일(하계), 10월 19일(추계), 1998년 2월 26일(동계) 및 4월 11일(춘계)의 썰물시기에 각각 현장조사를 실시하였다. 또한, 배수갑문 개폐의 영향을 파악하기 위하여 춘계 조사시에 갑문을 개방하여 담수방류 전과 후에 수질조사를 실시하였으며, 특히, 수문 A에서 약 3.5km 떨어진 정점 F에서는 담수방류 전후 30분 간격으로 연속관측을 병행하였다. 관측을 시작한 오전 10시는 썰물 시작시간과 일치하였으며, 관측이 종료된 오후 5시 30분은 썰물에서 밀물로 바뀌고 난 후 약 1시간되는 시점이었다. 최초 담수방류는 썰물 후 약 1시간(1호와 3호 수문)과 2시간(2호 수문) 경과후였으며 개방후 약 두 시간 동안 담수를 방류하였다. 방류한 두 시간 동안 1호, 2호 및 3호 수문의 방류량은 각각 168,282.0m³, 167,275.0m³과 168,282.0m³이었고, 총방류량은 약 503,839.0m³로 추정되었다(여수대학교 해양학과, 1999).

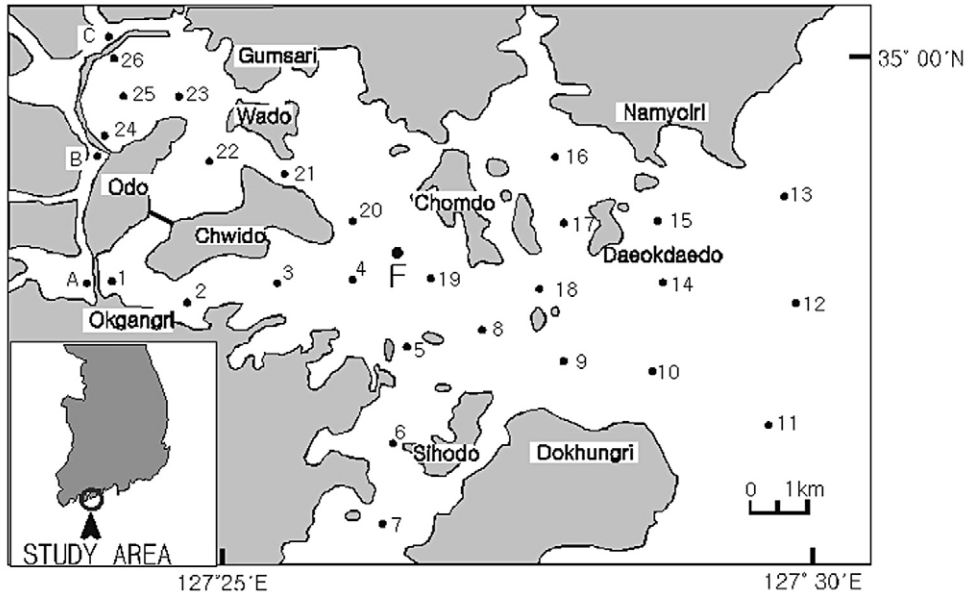


Fig. 1. Sampling stations of the study area.

2. 분석방법

관측시 모든 정점에서 수층별로 채수했으며, 수온과 염분은 현장측정하였고 나머지 수질항목들은 실험실로 운반후 즉시 분석하였다. pH, 총부유물질(TSS), 용존산소(DO), 화학적 산소요구량(COD)과 영양염류인 암모니아성 질소($\text{NH}_4^+\text{-N}$), 아질산성 질소($\text{NO}_2^-\text{-N}$), 질산성 질소($\text{NO}_3^-\text{-N}$), 인산염 인($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) 및 규소($\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$) 등을 海洋觀測指針(日本氣象協會, 1985), 新編水質汚濁調査指針(日本水産資源保護協會編, 1980) 및 Standard Methods(APHA, AWWA, WPCF., 1992)에 의거하여 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 수질환경의 시·공간적 변동특성

주요 수질인자의 계절별 변동특성은 Fig. 2와 같다. 수층 유기물함량의 지표인 화학적 산소요

구량(COD)은 하계에 0.68 5.08mg/L, 추계에 0.10 5.78mg/L, 동계에 0.16 4.36mg/L 그리고 춘계에는 0.13 5.98mg/L의 범위로 하계에 가장 높고 동계에 가장 낮은 평균값을 보였다. 공간적으로는 방조제내 담수에서는 계절에 상관없이 약 4mg/L이상의 고농도를 보여 육상으로부터 방조제내로 유입하는 유기물의 오염부하량이 상당함을 나타내었다. 해역에서는 방조제 인근 정점인 1~3과 23~26에서는 춘계에 담수방류의 영향으로, 나머지 정점에서는 하계에 식물플랑크톤의 증식에 의한 영향으로 최대분포를 나타내었고, 이때에는 농도가 2mg/L이상이므로 해역수질환경기준 III등급에 해당하였다. 또한, 추계에도 대부분 방조제 인근 지역에서 2mg/L이상을 초과하였다. 그러나, 동계에는 대부분 1mg/L이하로 상대적으로 낮은 분포를 보였다. 따라서, 이 해역에서는 강우시는 담수방류에 의해 유입COD의 영향을, 하계에는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 식물플랑크톤의 증가에 의한 자생COD의 영향을 많이 받는다고 판단할 수 있다.

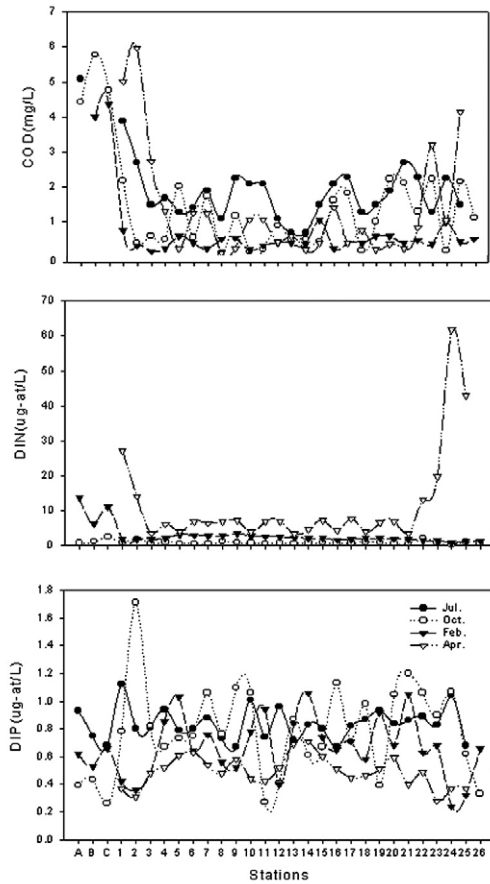


Fig. 2. The variation of COD, DIN and DIP distribution in Haechang Bay, Korea.

암모니아성 질소, 질산성 질소와 아질산성 질소의 합인 용존무기질소(DIN) 분포는 추계에는 0.33~2.41 $\mu\text{g-at/L}$, 동계에는 1.06~13.67 $\mu\text{g-at/L}$ 그리고 춘계에는 3.42~61.78 $\mu\text{g-at/L}$ 의 변동범위로 추계에 낮았고 춘계에 상대적으로 높은 농도를 보였다. 하계에는 암모니아와 질산성 질소의 자료부족으로 DIN농도를 파악하지 못하였다. 다만, 하계 아질산성 질소의 농도는 0.02~6.98 $\mu\text{g-at/L}$ 범위로 방조제 인근 정점에서 고농도를 보였다. 동계에는 담수에서 약 10 $\mu\text{g-at/L}$ 이상, 해역에서 2 $\mu\text{g-at/L}$ 이하로 뚜렷한 차이를 보였다. 특히, 담수가 방류된 춘계에는 방조제 인근 정점들인 1, 2

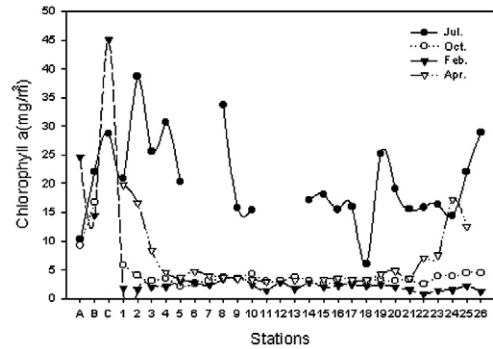


Fig. 3. The variation of Chl-a distribution in Haechang Bay, Korea.

와 23~26에서 10~60 $\mu\text{g-at/L}$ 정도의 매우 높은 농도를 보였고, 나머지 정점에서도 다른 계절에 비해 큰 값을 나타내어서 담수방류가 해역 무기질소의 중요한 유입원임을 암시하였다.

용존무기인(DIP)은 하계에 0.67 1.12 $\mu\text{g-at/L}$, 추계에 0.26~1.71 $\mu\text{g-at/L}$, 동계에 0.24~1.06 $\mu\text{g-at/L}$ 그리고 춘계에는 0.28~0.71 $\mu\text{g-at/L}$ 의 변동범위를 보였으며, 가장 높은 평균값은 추계에, 가장 낮은 평균값은 춘계에 나타났다. DIN과는 다르게 DIP는 담수에서 해역에 비해 높은 농도를 보여주지 않았고 오히려 추계에는 낮은 분포를 보여준 것이 특징이었고, 춘계 담수방류시기에서도 뚜렷한 증가는 없는 것으로 나타났다. 해역은 정점별로 약 0.4~1.2 $\mu\text{g-at/L}$ 로 변동이 심한 특성을 나타내었고, 대부분 적조발생기준인 0.48 $\mu\text{g-at/L}$ (日本水産資源保護協會, 1972)를 초과하는 농도였다.

해역의 N/P비는 대부분 16이하로 무기질소가 식물플랑크톤 등 기초생산자의 성장을 제한하는 것으로 판단되었다(Redfield *et al.*, 1963).

식물플랑크톤 현존량의 간접지표인 Chl-a는 Fig. 3과 같이 하계에는 5.93 38.58 mg/m^3 , 추계에는 2.06 16.67 mg/m^3 , 동계에는 0.8 45.1 mg/m^3 그리고 춘계에는 2.93 19.79 mg/m^3 의 범위를 보였다. 방조제내의 담수에서는 사계절 모두 10 mg/m^3 이상으로 부영양화기준(National Academy of Science,

1972)을 초과하는 고농도를 보였다. 특히, 동계에 15~45mg/m³범위로 최대를 나타내었는데, 이러한 농도분포는 동계 갈수기에 낙동강에서 나타나는 Chl-a의 증가현상과 유사하였다(박청길 등, 2000). 해역에서는 대부분 5mg/m³이하로 상대적으로 낮은 분포를 나타내었지만, 하계에 대부분 정점에서 10mg/m³이상의 고농도를 나타내어 다른 계절에 비해 매우 높은 분포를 보였다. 이것은 고농도의 영양염류 존재하에서 일사량이 좋은 하계에 식물플랑크톤의 급격한 증식에 의한 영향으로 사료된다. 이러한 결과는 향후 해창만 인근 지역인 나로도 해역과 여자만 등에서 최근 적조의 빈발과도 관련지어 고려해 볼 필요가 있을 것이다. 또한, 담수방류가 있었던 춘계에 방조제 인근 정점들에서도 10mg/m³이상의 농도를 보여서 담수영향을 적게 받는 정점보다 고농도를 나타내었다. 따라서, 이 해역에서는 하계에 일사량 등 다른 환경조건이 뒷받침되면 식물플랑크톤의 고농도 집적이 일어날 가능성이 매우 크며, 담수방류에 의해서도 큰 영향을 받는 것으로 판단되었다.

2. 수문개방시 담수가 수질에 미치는 영향 평가

수문개방에 따른 담수유출이 수질에 미치는 영향을 파악하기 위하여 춘계 담수방류 전과 후의 수질조사 결과, COD는 Fig. 4와 같이 담수 방류 전에는 방조제내에서는 2.45~4.31mg/L, 해역은 0.27~1.53mg/L범위를 보였지만, 방류후에는 해역에서 0.13~5.98mg/L범위로 대부분 정점에서 농도가 증가하였다. 특히, 방조제 인근인 취도 내측 정점들에서는 약 2~3배 이상 급증하는 양상을 보였지만, 나머지 정점에서는 뚜렷한 차이는 없었다. Chl-a 또한 방류전 방조제내에서는 16.59~23.37mg/m³, 해역은 2.24~10.75mg/m³범위였지만, 방류후에는 해역에서 2.93~19.79mg/m³범위로 증가하였고, 취도 인근의 정점들에서 뚜렷한 증가를

보였고 취도 외측 정점들에서는 큰 변화는 없는 것으로 나타났다.

DIN은 Fig. 5와 같이 방류전에는 방조제내에서 38.4~69.29µg-at/L, 해역에서 2.85~8.87µg-at/L범위를 보였는데, 방류후에는 해역에서 3.42~61.78µg-at/L범위로 방조제 인근 정점인 1~2와 22~25에서 큰 폭으로 상승했고, 다른 정점들은 변화가 거의 없었다. DIP는 방류전 방조제내에서 0.16~0.45µg-at/L, 해역은 0.17~0.68µg-at/L범위를 보였는데, 방류후에는 해역에서 0.28~1.71µg-at/L범위로 방조제 인근에서 다소의 증가는 있었지만 DIN에 비해서 뚜렷한 변동은 없는 것으로 나타났다. 전체적인 분포에 있어서 방조제 내측과 외측사이에서 뚜렷한 농도차는 나타나지 않았다. 이 지역의 담수가 기본적으로 무기인보다 무기질소의 농도가 매우 높아서 담수방류시 해역의 수질이 받는 응답성이 차이나는 것으로 해석된다.

한편, 연속시간관측 정점인 F에서 담수방류후 시간에 따른 수질의 응답성을 파악해 본 결과는 Fig. 6과 같다. 염분분포는 표층은 31.9~33.30, 중층은 33.7~33.79 그리고 저층은 33.7~33.93범위로 3m층과 저층은 담수방류의 영향에 관계없이 시간에 따라 거의 일정한 분포를 나타낸 반면, 표층은 방류전 약 32.7의 값이 수문 1호와 3호를 열어서 담수를 방류한 약 30분후에 다소 감소한 후 다시 증가하였고, 2호 수문개방시 15~30분후 재감소한 후 점차 증가하여 저층과 염분차가 작아지는 경향을 보였다. 염분의 변동결과로 볼 때, 수문개방시 담수는 중·저층과 혼합하지 않고 표층으로 강하게 확산되어 약 3.5km에 떨어진 지점까지 1시간이내에 도달하는 것으로 판단되었고, 영향권의 범위와 도달하는 시간은 방류량에 의해 결정된다고 할 수 있다.

COD는 표층에서 0.19~0.66mg/L, 중층은 0.11~0.63mg/L 그리고 저층은 0.19~0.70mg/L범위로 표층이 상대적으로 다른 층보다 농도변동이 심했는데, 1호와 3호 수문개방시 30분후와 2호 수문개

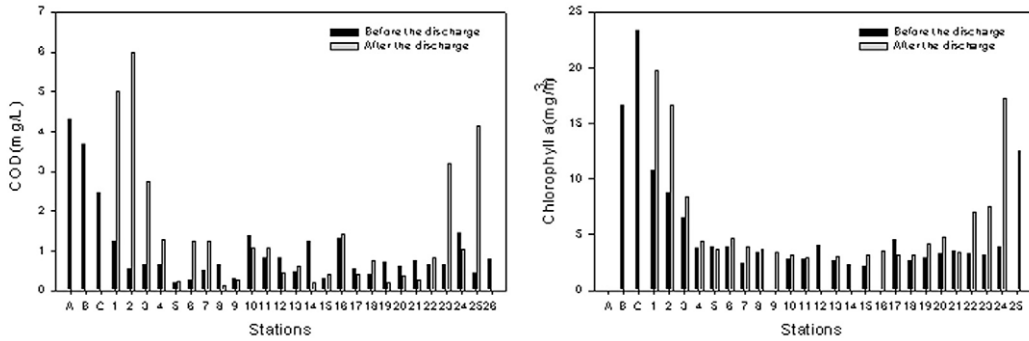


Fig. 4. Distribution of COD and Chl-a by the freshwater discharge in April.

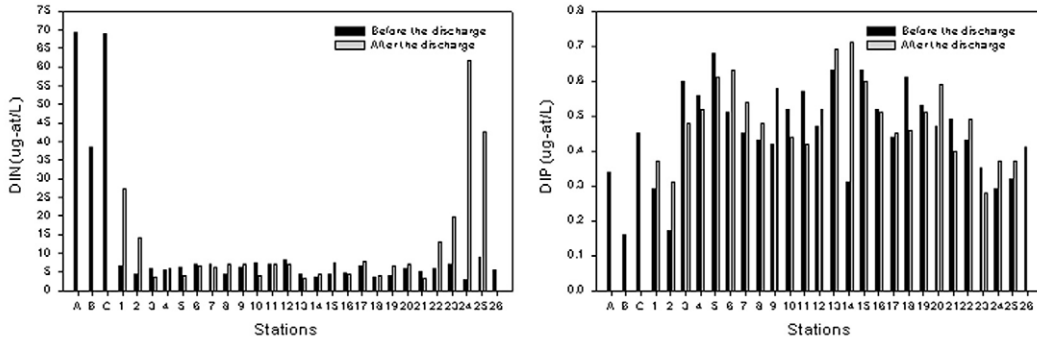


Fig. 5. Distribution of DIN and DIP by the freshwater discharge in April.

방시 30~60분후에서 다소 증가하였고 그 후 대체적으로 감소하는 경향을 보였다. 중층과 저층에서는 뚜렷한 영향을 보이지 않았다. DIN은 표층에서 3.00~7.44 $\mu\text{g-at/L}$, 중층은 2.18~11.44 $\mu\text{g-at/L}$ 그리고 저층은 3.88~9.57 $\mu\text{g-at/L}$ 범위로 표층은 다른 층보다 저농도였고 수문개방후 거의 일정한 농도를 보이다가 방류후 약 3시간 30분부터 다소의 증감을 반복하였다. 3m층과 저층에서는 시간에 따라 농도변동이 심했고, 담수방류의 영향이 뚜렷하게 나타나지 않았다. DIP는 표층에서 0.22~0.75 $\mu\text{g-at/L}$, 중층은 0.37~0.71 $\mu\text{g-at/L}$ 그리고 저층은 0.35~1.08 $\mu\text{g-at/L}$ 범위로 DIN과 마찬가지로 다소의 불규칙한 농도변동은 있었으나 담수방류의 영향은 뚜렷히 나타나지 않았다.

3. 종합적 고찰

해창만은 방조제를 통한 담수방류량의 세기에 따라 영양염, 유기물의 유입과 식물플랑크톤의 분포에 큰 영향을 미치는 것으로 파악되었다. 특히, 춘계 강우시 약 50만톤 가량의 담수유출로 방조제 인근 지역에서 순간적인 수질변화가 일어나는 것으로 확인되었다. 해역의 물질분포와 밀접한 관련이 있는 이 지역의 해수유동은 춘계 실측 시기인 대조기때 담수방류시, 즉, 낙조시는 만 내측에서 빠져나가는 흐름과 덕흥리 좌측 시호도를 통과해서 북향하는 흐름이 침도 남측부근에서 상접하여 외해로 유출하는 양상을 보였고, 창조시는 반대의 패턴을 보였다. 유속은 침도 남측에서 약 30~50cm/sec, 방조제 인근에서는 약 10cm/sec

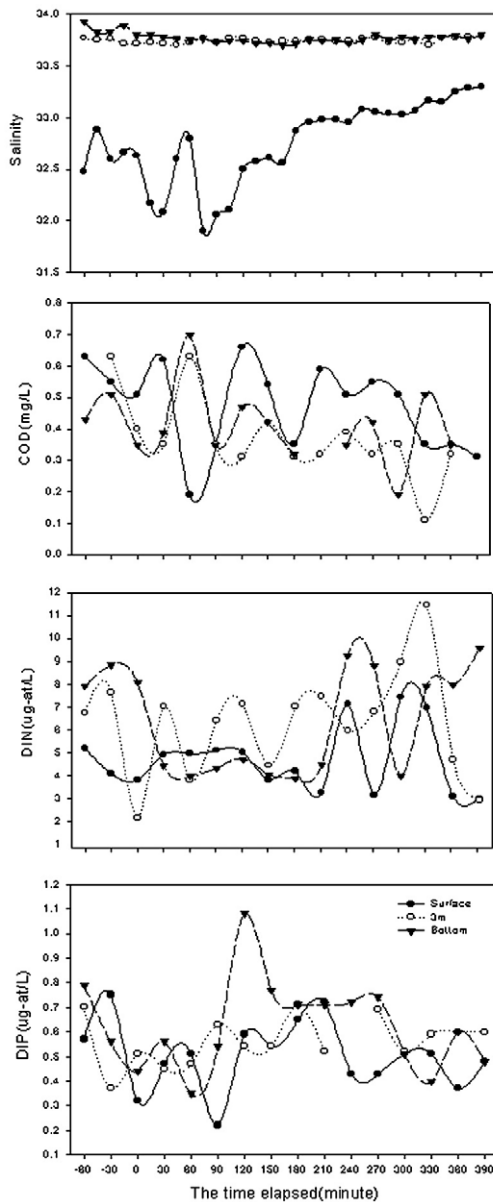


Fig. 6. Temporal changes of salinity, COD, DIN and DIP by the freshwater discharge in April.

범위로 나타났다(여수대학교 해양학과, 1999). 이러한 유동장에서 담수방류는 그 영향권이 조석에 따라 확장·축소될 것이라 충분히 짐작된다.

또한, 오염물질에 따라서도 담수유출의 영향권

과 반응시간이 다소 차이나는 것으로 평가되었는데, 이것은 오염물질에 대한 유입부하량과 해역에서의 거동이 차이이기 때문으로 해석할 수 있다. 화학적 산소요구량의 경우 영향권은 와도, 취도와 옥강리 동단을 잇는 해역, 영양염은 와도와 취도 남북을 잇는 해역 그리고 Chl-a는 침도 내측을 잇는 해역으로 평가되었다. 춘계 강우시 두 시간동안 약 50만톤의 담수방류후 오염물질의 시간변동으로 볼 때, 3.5km 떨어진 지점까지 약 1시간이내에 담수가 도달하는 것으로 나타났지만, 그 영향이 뚜렷하지는 않았다. 즉, 춘계 담수방류의 양으로 볼 때, 그 직접적인 영향권은 3.5km이내에 국한된다고 사료된다. 그러나, 담수방류량이 늘어나면 영향권도 증가할 것으로 사료되어서 이 지역의 효율적 수질관리를 위해서는 수문개방시 개방시간에 따른 방류량 및 담수내로 유입하는 오염원조절 등이 필요한 것으로 나타났다.

IV. 결 론

해창만의 계절별 수질환경변동과 배수갑문 개방에 따른 담수방류시 해역 수질에 미치는 영향을 평가한 결론은 다음과 같다.

1) 화학적 산소요구량은 방조제내 담수에서는 계절에 상관없이 약 4mg/L이상의 고농도를 보였다. 해역에서는 방조제 인근 정점인 1~3과 23~26에서는 춘계에 담수방류의 영향으로, 나머지 정점에서는 하계에 식물플랑크톤의 증식에 의한 영향으로 2mg/L이상을 나타내었고, 동계에는 대부분 1mg/L이하로 상대적으로 낮은 분포를 보였다.

2) 담수방류가 해역 무기질소의 중요한 유입원으로 나타났고, 용존무기인은 0.4~1.2 μ g-at/L로 무기질소에 비해서 담수방류의 영향을 상대적으로 적게 받는 것으로 나타났다. 해역의 N/P비는 대부분 16이하로 무기질소가 식물플랑크톤 등 기초생산자의 성장을 제한하는 것으로 판단되었다.

3) Chl-a는 방조제내의 담수에서 사계절 모두

10mg/m³이상으로 부영양화기준을 초과하는 고농도였고, 해역에서는 대부분 5mg/m³이하로 상대적으로 낮은 분포를 나타내었지만, 하계의 대부분 정점과 담수방류가 있었던 춘계의 방조제 인근 정점들에서 10mg/m³이상으로 크게 증가하였다.

4) 춘계 담수방류의 영향권은 화학적 산소요구량의 경우는 와도, 취도와 옥강리 동단을 잇는 해역, 영양염은 와도와 취도 남북을 잇는 해역 그리고 Chl- α 는 침도 내측을 잇는 해역으로 평가되었다.

5) 두 시간 동안 약 50만톤의 담수방류후 시간에 따른 염분의 응답성을 파악해 본 결과, 담수는 중·저층과 혼합하지 않고 표층에서 외해로 강하게 확산되어 1시간이내에 3.5km 떨어진 정점에 도달하는 것으로 판단되었다.

6) 오염물질의 유입부하량과 해역에서의 거동이 다르기 때문에 물질에 따라서 영향권과 반응시간이 다소 차이나는 것으로 평가되었고, 해역의 효율적 수질관리를 위해서는 수문개방시 개방시간에 따른 방류량 및 담수내로 유입하는 오염원조절이 필요한 것으로 나타났다.

참고문헌

- 박청길, 송교욱, 신성교, 이석모, 송미경, 백경훈, 2000, 동계 낙동강 하류 물금수역에서의 수질악화 원인구명, 한국물환경학회지, 16(3), 305-314.
- 여수대학교 해양학과, 1999, 해창만 배수갑문 시설에 따른 어업권 피해조사 보고서.
- 이대인, 김동명, 김형철, 이석모, 박청길, 2000, 洛東江 河口海域의 식물플랑크톤 極大域 變動에 관한 數値시뮬레이션-II. 식물플랑크톤 극대역 변동의 수치시뮬레이션-, 한국환경과학회지, 9(5), 375-384.
- 이대인, 박청길, 2002, 낙동강 하구해역의 동계 수질모델링, 한국물환경학회지, 18(5), 449-460.
- 藤原建紀, 1997, 淡水影響域における エスチユアリ-循環流と 生物・物質輸送, 海と空, 73(1), 23-30.
- 日本氣象協會, 1985, 海洋觀測指針.
- 日本水産資源保護協會, 1972, 水産環境水質基準, 1-24.
- 日本水産資源保護協會編, 1980, 新編水質汚濁調査指針.
- APHA AWWA WPCF, 1992, Standard methods for the examination of water and waste water, 18th edition.
- Fisher, T.R., Harding, L.W.Jr., Stanley, D.W. and L.G. Ward, 1988, Phytoplankton, nutrient, and turbidity in the Chesapeake, Delaware and Hudson estuaries, Estuarine Coastal and Shelf Sci., 27, 61-93.
- National Academy of Science, 1972, A report of the committee on water quality criteria, Washington, DC.
- Redfield, A.C., Ketchum, B. and F.A. Richards, 1963, The influence of organisms on the composition of seawater, In: The Sea, Vol. 2, M.H. Hill, ed. Wiley, New York, 26-77.