

금강 하구의 장기 관측 자료 분석

정용훈 · 김영태 · 채운주 · 이충원 · 고경란 · 김소영 · 정주영 · 양재삼*
군산대학교 해양정보과학과

Analysis of Long-Term Monitoring Data From the Geum River Estuary

YONG HOON JEONG, YEONG TAE KIM, YOUN ZOO CHAE, CHOONG WOON RHEE, KYUNG RAN KO,
SOH YOUNG KIM, JU YOUNG JEONG AND JAE SAM YANG*
Department of Ocean Information Science, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

금강 하구 해수의 장기적 수질 변화를 이해하기 위해 수행된 연구의 일부로서, 하구 내 고정점에서 1996년 6월부터 2004년 4월까지 매일 관측한 수질 변화 자료를 다양한 통계 분석법을 이용하여 분석하였다. 전체적으로 금강 하구 내 수질은 금강 담수의 유입에 의한 요인(요인 1: 28.3%), 퇴적물의 재부유나 도시 하수의 유입에 따른 질산화 과정 등을 포함하는 화학적인 요인(요인 2: 18.6%), 식물플랑크톤의 일차생산으로 대표되는 생물학적인 요인(요인 3: 13.5%)에 의하여 60% 이상이 결정되었다. 조사 기간을 평균할 때 담수의 유입에 의한 영향이 가장 크게 나타났으며, 특히, 유량이 평균치거나 혹은 보다 적을 때 금강 유량이 더욱 효과적으로 금강 하구 내 환경 인자에 영향을 주었다. 반면 요인 2와 요인 3은 계절적으로 차이를 보이는데, 이러한 원인은 생물 활동의 시기와 관계가 있을 것으로 보인다. 특히 2004년 금강 하구 내 엽록소-a의 대증식 기간에는 요인 3인 생물학적인 요인이 가장 중요한 것으로 나타났다. 생물학적 요인의 대표적인 인자인 엽록소-a에 대해 다중회귀분석을 수행한 결과, 금강 하구 내에서 엽록소-a의 농도를 결정하는 가장 중요 인자는 인산염과 N/P 비율로 나타났다. 따라서 갈수기(특히, 봄철) 동안 인산염은 금강 하구 내에서 식물플랑크톤의 성장을 제한하는 인자로 작용하고 있음을 알 수 있다.

To investigate the long-term variation of water qualities, we have daily monitored physio-chemical characteristics of surface water in the Geum River estuary from June 1996 to April 2004. We found that the water qualities were determined by three dominant factors : 1. fluvial input from Geum River (28.3%), 2. chemical processes such as nitrification and phosphate addition originated from sediment resuspension and domestic sewage input (18.6%), 3. biological processes such as nutrient consumption by primary producers (13.5%). The factor 1 (fluvial input) effectively affected the water quality of the estuary particularly during the normal or low river discharge. The factor 2 (chemical processes) and the factor 3 (biological processes) showed distinct seasonal differences due to their relative strengths of biological activities. The factor 3 was a governing parameter during the period of spring algal bloom in 2004. For the spring period, an empirical equation derived from the multi-regression analyses showed that the *in-situ* chlorophyll-a distributions in the estuarine water were successfully simulated by the phosphate concentrations and N/P ratios. Therefore we suggest that phosphate functions as a limiting factor for the primary productivity in the Geum River estuary for the dry season, especially during spring.

Keywords: Geum River Estuary, Chlorophyll-a, Phosphate

서 론

하구는 육지로부터 해양까지 이동되는 경로의 중간 과정으로서 담수와 해수의 물리적인 혼합, 생물체에 의한 영양염의 흡수와 용출, 무기물질과의 흡착 및 탈착 현상이 일어난다. 이러한 하구의 제반과정들은 계절적인 특성을 갖고 있으며, 하구 내에서 도시하

수의 유입 등 인간 활동에 의한 영향을 받기도 한다.

금강 하구에 관련된 연구들은 하구연 건설 이전에 수행된 식물플랑크톤의 분포와 군집구조(Shim and Yang, 1982), 엽록소의 분포(기와 김, 1987)와 질산화작용에 관한 연구(김과 기, 1987)가 있다. 하구연 수문의 작동 이후 금강 하구 내 생태계의 다양한 변화가 있을 것으로 예상되었고, 따라서 이러한 하구 환경 변화에 대한 장기적인 모니터링의 결과로서 하구 환경에 대한 500일간의 연속관측(이와 양, 1997)과 영양염의 계절적인 분포(양 등, 1999)가

*Corresponding author: yangjs@kunsan.ac.kr

보고되었다. 이들 연구는 금강 하구 내 영양염 변화 등 수질 변화를 매일 관측하면서 영양염의 장기적인 변화 경향을 추적하였다.

그러나 이들의 연구는 금강 담수의 유입, 퇴적물의 재부유, 생물 활동 등에 대하여 시간적으로 어느 항목이 상대적으로 중요한가에 대한 언급이 없었다. 단지 금강 담수의 유입에 의한 영향을 갈수기와 풍수기로 나누어 포괄적인 연구를 수행했다. 비록 이후 금강 하구에서 환경 변화의 상대적 중요성을 다룬 연구(김, 1998)가 있었으나, 이 연구는 하구엔 건설 이전의 자료를 사용하였으며, 그 자료 또한 분기별로 하루 동안 조사된 것으로 금강 하구와 같이 조석이 탁월하여 일일(diurnal) 환경변화의 폭이 연간(annual) 변화폭을 상회할 수 있는 환경에는 사용에 한계가 있었다. 따라서 이러한 연구로는 금강 하구와 같이 비주기적으로 배출되는 금강 담수의 영향, 계절적인 변화, 연간 변화가 동시에 출현하는 복잡한 환경에서 발생하는 식물플랑크톤의 단기간 증식과 같은 현상을 이해하기에는 무리가 있었다. 그러므로 본 연구는 1995년 이후 금강 하구의 고정 정점에서 매일 측정된 자료를 이용해 금강 담수의 유입, 퇴적물 재부유 및 저층의 용출, 생물 활동 등 하구 내 수질 현상에 중요한 3대 요소에 대한 상대적 중요성을 밝히는데 목적이 있다. 특히 금강담수의 유입량이 풍부한 풍수기보다는 담수의 유입이 상대적으로 적은 갈수기를 집중적으로 연구하여 이들 3대 요소에 대한 상대적 역할을 규명하는데 목적이 있다.

지역 개괄

금강 수계는 한강, 낙동강에 이어 국내 3대 강의 하나로서 발원지인 전라북도 진안에서 군산 하구까지 총연장이 약 400 km에 달하며, 집수면적은 약 9,800 km²에 달한다. 군산 내항 검조소의 상류 4 km 지점에 건설된 금강 하구엔은 1983년 착공되어 1988년에 군산과 장항을 연결하는 총 1,841 m 길이의 하구엔이 완공되었으나, 수문을 작동하지 않다가 1994년 8월 31일 이후로 수문을 정상 가동하여 하구엔으로서의 역할을 시작하였다. 하구엔 완공 후 금강하구는 창조시 상류와 완전히 막힌 형태가 되고 낙조시에 비주기적으로 담수가 방출되는 독특한 하구환경이 되었다. 또한 계절적인 금강 담수 방출량의 변동은 하구의 순환형태를 변경할 뿐만 아니라 부유사의 퇴적과 이동에 영향을 미치며 생화학적 환경 특성요인의 변화를 가져온다(양 등, 1999).

재료 및 방법

시료 채취

시료 채취 지점은 금강 하구엔으로부터 약 4 km 하류지역인 군산 검조소에서 원칙적으로 매일 최고조시에 표층 해수를 채취하였다(Fig. 1). 영양염류(암모니움염, 아질산염, 질산염, 인산염)와 부유현탁물질, 염분, 수온, 엽록소-a 등 8개 항목을 측정하였으며, 보조 자료로서 기상청의 강수량 자료와 금강 홍수통제소의 유량 자료를 사용하였다.

분석 항목 및 방법

수온과 염분은 Salinometer(T.S-DIGITAL LAB TSURUMI SEIKI, YSI 30)를 이용하여 현장에서 측정하였다. 부유현탁물질

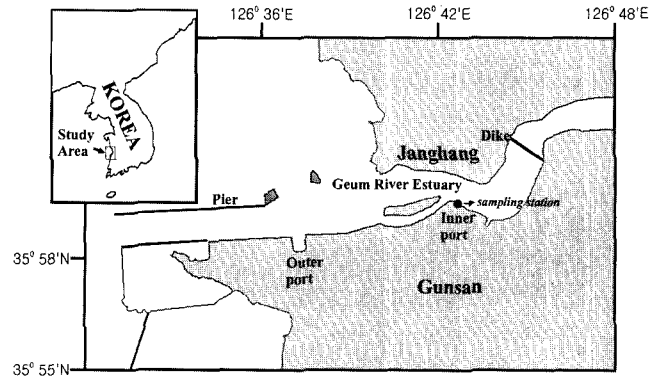


Fig. 1. Sampling location in the Geum River Estuary.

은 시료 500 ml를 GF/C 여과지로 여과 후 건조기로 103°C에서 1 시간 30분 건조 후 함량을 측정하였다. 인산염은 몰리브덴산 암모니움(ammonium molybdate) 용액, 황산, 아스코르빈산(ascorbic acid), 타르타르산 안티모닐 칼륨(potassium antimonyltartrate) 용액의 혼합 시약으로 반응시킨 후 885 nm에서 정량 측정하였다(Parsons et al., 1984). 암모니움염은 페놀로 고정 후 니트로프루시드 나트륨(sodium nitroprusside) 용액, 알칼리 용액, 차아염소산 나트륨(sodium hypochlorite) 용액, 산화제로 반응시킨 후 640 nm에서 정량 측정하였다(Solorzano, 1969). 아질산염은 숄퍼닐 아미드(sulfanilamide) 용액과 나프틸에틸렌디아민염산염(naphthylethylene diamine dihydrochloride) 용액으로 반응시킨 후 543 nm에서, 질산염은 Cd-Cu 환원 칼럼을 통하여 아질산염으로 환원시킨 후 아질산염과 동일한 방법으로 정량 측정하였다(Parsons et al., 1984). 엽록소는 여과 후 여과지를 90% 아세톤과 1% 탄산마그네슘 용액에 냉장 보관하여 24시간 후에 원심분리로 분리하여 630, 647, 664, 750 nm에서 정량 측정하였다. 정량 측정은 분광광도계(UV-160A, 1750 SHIMADZU)를 사용하였다.

자료 분석

금강 하구역의 환경 인자에 대한 자료 분석은 1996년 6월부터 1999년 5월까지의 매일 측정된 자료와 그 이후 2004년까지 매주 측정된 자료를 사용하였고, 매주 측정된 자료를 보강하기 위하여 2004년 3월 19일부터 2004년 4월 10일까지 식물플랑크톤의 대증식기 동안 매일 측정하였다.

금강 하구역의 환경 변화를 이해하기 위한 전체적인 접근 방법은 먼저 금강 담수의 연간 유량 변화를 비교하고, 갈수기와 풍수기를 비교하며, 이들 시기 동안 금강 담수의 영향과 같은 물리적인 조건, 퇴적물로부터 용출과 질산화작용과 같은 화학적인 작용, 식물플랑크톤의 영양염 소모와 같은 생물 활동의 영향을 분리하여 상대적 중요성을 파악하기 위하여 몇 가지 통계 분석 기법을 이용하였다.

먼저 상관분석을 이용해 환경 인자들 상호간의 관계를 분석하였고, 인자분석을 통해 여러 항목들을 몇 가지 요인으로 축소시켜 환경 변화의 상대적 중요성을 분석 하였다. 요인분석(factor analysis)은 여러 변수들 중 보다 간결하고 명료한 관계를 가지는 요인을 추출하기 위하여 각 변수간의 상관행렬을 이용해서 주대각선상의

값을 변형시키지 않는 그대로 공통 분산치 1.0의 값을 추정치로 하여 요인행렬을 추출한 뒤 회전시키지 않는 요인행렬을 추출하는 주대각성분 요인추출법을 이용하였다. 최초요인을 추출한 뒤 회전시키지 않는 요인행렬로부터 몇 개의 요인을 추출하기 위하여 고유치가 최소 1.0 이상의 요인을 추출하였다. 요인이 해당되는 변수를 설명해주는 의미를 가진 요인 부하량을 산출한 뒤, 여러 요인이 비슷한 요인 부하량을 나타낼 경우 변수들이 어떤 요인에 높게 작용 하는지를 알아보기 위하여 요인축을 회전시켰다. 요인회전 방법은 여러 종류가 있으나 직각회전방식 중에서 각 요인은 다른 요인과 상호 독립적이면서 하나의 요인에 높게 적재되는 변수의 수를 줄여서 요인을 해석하는데 중점을 주는 Varimax 방식을 적용하였다. 또한 특정 항목에 영향을 미치는 항목들을 이해하기 위해 다중회귀분석을 하였다. 염록소-a에 대한 다른 조사 항목의 영향 정도를 알기위하여 다중회귀분석을 실시하여 회귀식을 유도하였으며, 관측값과 회귀값의 결정계수(R^2)는 0.5이상인 자료만 이용하였다. 통계 분석은 SPSS(ver., 11.5)를 이용하였으며 자세한 분석방법은 다변량데이터의 통계분석(노, 1999), SPSSWIN을 이용한 통계분석(정과 최, 1999), 통계분석론(허, 2001)을 따랐다.

결과 및 토의

금강의 유량과 강수량

지난 10년간 기상청 자료를 이용해 연간 누적 강수량을 그림에 도시하였다(Fig. 2). 연 평균 강수량은 1,217 mm로 나타났다. 본 연구의 시작이 1996년 6월부터 시작되었으므로 각 연도의 자료는 개년 6월 초부터 다음해 5월 말까지 연 단위로 정리하였다. 지난 10년간 평균 강수량을 보면, 1996년~1997년, 1999년~2000년, 2001년~2002년 3개년은 강수량이 적은 해였고, 1997년~1998년, 2002년~2003년, 2003년~2004년은 평균적인 해였으며, 1998년~1999년, 2000년~2001년은 강수량이 많은 해였다. 이 기간 동안 군산 강수량과 공주 관측소(금강 홍수통제소)의 유량은 양의 상관관계를 보였다(Fig. 3). 따라서 금강의 유량 자료는 금강 하구 내 영향을 주는 금강 담수의 영향을 지시하는 유용한 자료로 사용하였다.

금강 하구의 환경 인자와 금강 유량의 상관관계

조사 기간 동안 연 단위의 금강 유량과 금강 하구 내에서 측정된 환경 인자들의 상관관계를 비교한 것이 Table 1에 있다. 전체

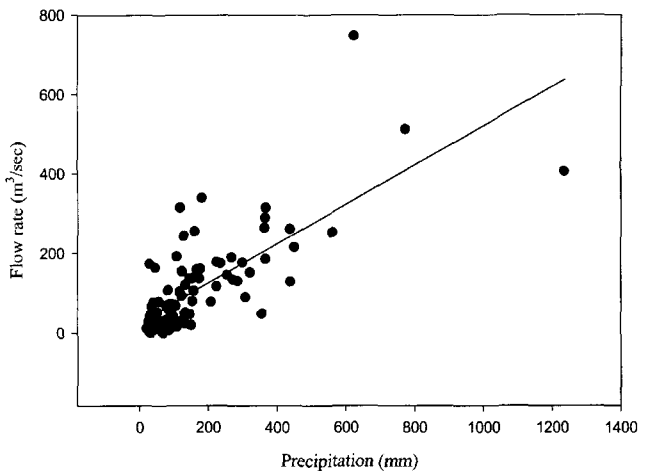


Fig. 3. Relationship between precipitation and the flow rate of the Geum River. The flow rate was obtained from Geum River Flood Control Office at Gongju, Chungnam province.

적으로 가장 뚜렷하고 일관된 상관관계는 모든 시기 동안 유량에 대하여 염분이 음의 상관관계를 갖는 점이다. 이런 결과로부터 금강 담수의 영향이 금강 하구 내 환경을 결정하는 가장 중요한 일차적인 인자가 될 수 있음을 알 수 있다. 그러나 다른 환경 인자들은 상관관계의 유무가 매년 다르게 나타났다. 따라서 금강 담수를 통한 영양염의 유입은 단순한 희석의 효과에 의해 영향을 받는 것으로 생각되지 않는다. 또한 여기서 주목할 사항은 강수량이 크게 나타났던 1998년~1999년, 2000년~2001년은 염분을 제외한 다른 환경 인자들이 유량이 적었던 다른 연도에 비하여 상관관계가 미약하게 나타난 점이다. 이것은 유량이 지나치게 큰 해에는 금강 하구 내 환경 인자를 결정하는데 유량의 영향이 감소된다는 것을 의미한다. 오히려 유량이 평균치거나 혹은 보다 적을 때 유량이 더욱 효과적으로 금강 하구 내 환경 인자에 영향을 주게 된다는 점이다. 따라서 유량의 효과를 계절별로 보기 위하여 1년을 풍수기(6, 7, 8월)와 갈수기(9월부터 5월까지)로 구분하여 상관관계를 알아본 것이 Table 2이다. 갈수기의 경우 금강의 유량과 하구 내 염분이 전체적으로 상관관계가 나타나고 있으나, 풍수기에는 잘 나타나지 않고 있다. 따라서 이후 자료의 분석은 계절별로 보다 세분하여 분석하였다.

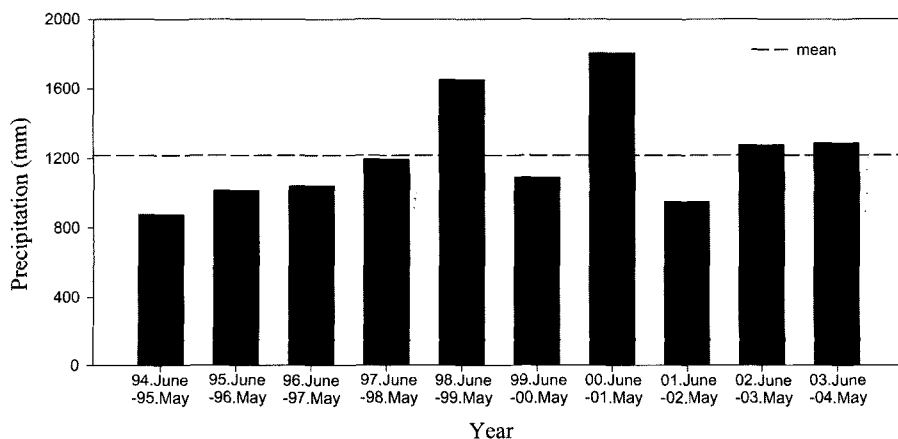


Fig. 2. Annual precipitation from 1994 to 2004.

Table 1. The overall relationships between flow rate of the Geum River and the environmental parameters in the Geum River Estuary

Period	Salinity	SS	Chl-a	PO ₄ ³⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	DIN
96-97	-0.619				0.794		0.396	0.370
97-98	-0.595	0.470			0.354		0.658	0.590
98-99*	-0.561					-0.307		
99-00	-0.402	0.467					0.370	
00-01*	-0.519	0.316						
01-02	-0.714			0.573	0.566	0.376		
02-03	-0.603	0.716	0.469	0.571				
03-04	-0.626	0.683		-0.330				

*wet years

Correlation is significant at the 0.05 level.

Table 2. Relationships between the flow rate of the Geum River and the environmental parameters in the Geum River Estuary during the rainy¹ and dry² months

Period	Dry months	Rainy months
96-97	Sal., NO ₂ ⁻	SS, NO ₂ ⁻
97-98	NO ₃ ⁻ , DIN	Sal., NO ₃ ⁻ , DIN
98-99	Sal., PO ₄ ³⁻	
99-00	Sal., SS, NH ₄ ⁺	
00-01	Sal., SS	PO ₄ ³⁻
01-02	Sal., PO ₄ ³⁻ , NO ₂ ⁻ , DIN	Sal., PO ₄ ³⁻ , NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻
02-03	Sal., SS, Chl-a, PO ₄ ³⁻ , NH ₄ ⁺	SS
03-04	Sal.	SS, Chl-a, NH ₄ ⁺ , PO ₄ ³⁻ , DIN

1. rainy months: June, July & August

2. dry months: other months except rainy months

Correlation is significant at the 0.05 level.

Table 3. Eigen values and cumulative percentages of factors from factor analysis

Factor	Eigen value	% of Variance	Cumulative %
1	2.260	28.248	28.248
2	1.491	18.636	46.884
3	1.076	13.445	60.329
4	0.933	11.664	71.994
5	0.852	10.644	82.638
6	0.584	7.298	89.936
7	0.439	5.493	95.429
8	0.366	4.571	100.000

요인분석(Factor Analysis)

조사 기간 중 1996년 6월부터 1999년 5월까지 매일 측정된 자료를 이용해 염분, 부유현탁물질, 질산염, 아질산염, 암모니아염, 인산염, 엽록소-a, N/P 비율 등 총 8가지 항목에 대한 전체적인 요인분석을 행한 결과는 Table 3에 있다. 추출된 8개의 최초요인 중 보다 나은 해석을 위하여 주대각성분 추출방법에 의해서 요인수를 결정했다. 이 때 요인수를 결정하는데 여러 방법이 있으나, 본 연구에서는 고유치(eigen value) 기준으로 판단하였다. 고유치는 요인을 설명하는 분산의 크기를 나타낸 것으로서 고유치가 1보다 크다는 것은 하나의 요인이 변수 1개 이상의 분산을 설명한다. 따라서 고유치가 1 이하인 경우 1개의 요인이 변수 1개의 분산을 설명할 수 없으므로 요인으로서의 의미가 없어 제외하고 1 이상이

Table 4. Rotated factor matrix extracted from factor analysis

Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Sal.	-0.802	-0.053	0.080
SS	0.500	-0.057	0.029
Chl-a	-0.097	0.144	0.663
PO ₄ ³⁻	0.020	0.745	-0.456
NO ₂ ⁻	0.503	0.552	0.073
NH ₄ ⁺	0.023	0.801	0.279
NO ₃ ⁻	0.736	0.300	0.202
N/P	0.259	-0.099	0.809

되는 3개 요인을 추출하였다. 요인 1의 기여율은 28.3%, 요인 2의 기여율은 18.6%, 요인 3의 기여율은 13.5%로서 요인 1에서 3까지 누적기여율은 60.4%로써 전체 수질변동의 60% 이상을 설명할 수 있다. 그리고 최초 인자 부하량을 분석한 결과로부터 요인 적재량이 어떤 요인에 높게 적재되어 있는지의 여부를 판단하기 위하여 Varimax법으로 회전시켜 요인과 수질 변수와의 관계를 보다 정확하게 설명할 수 있는 결과를 Table 4에 나타냈다.

요인 1은 염분과 음의 인자 부하량, 부유현탁물질과 질산염과는 양의 인자 부하량을 가지므로 요인 1은 “금강 담수 유입으로 인한 요인”으로 설정하고, 요인 2는 인산염, 아질산염, 암모니아염과 양의 인자 부하량을 가지므로 “퇴적물의 재부유나 도시 하수의 유입에 따른 질산화과정 등을 포함하는 화학적인 요인”으로 잠정적으로 정하였고, 요인 3은 엽록소-a, N/P비율과 양의 인자 부하량을 가지므로 “식물플랑크톤의 일차생산으로 대표되는 생물학적인 요인”으로 설정하였다. 세 가지 요인 중에서 담수의 유입이 가장 중요한 요인으로 나타났고 이러한 점은 이와 양(1997), 양 등(1999)에 의해서 이미 지적되었던 부분이다.

연도별, 계절별 요인 분석에 의해 요인을 추출한 결과는 Table 5에 있다. 전체적으로 금강 하구역의 수질은 요인 1인 “담수의 유입으로 인한 요인”을 가장 많이 받는 것으로 나타났다. 그 반면 요인 2인 “퇴적물의 재부유나 도시 하수의 유입에 따른 질산화작용 등 화학적인 작용”과 요인 3인 “식물플랑크톤에 의한 영양염의 소모와 같은 생물학적인 요인”은 계절별로 상대적인 중요성이 다르게 나타났다. 요인 3(생물활동에 의한 영향)은 하구 내 전체적인 수질을 결정하는데 있어 상대적인 중요성이 세 번째이지만, 계절별로 봄과 여름과 같이 생물활동이 활발한 시기에는 두 번째 중요한 요인으로 수질 변화에 기여하고 있는 것으로 나타났으며 가

Table 5. Relative importance of each factor among the different seasons from June 1996 to May 1999

	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Total	Sal., NO ₃ ⁻ , SS (①)	NH ₄ ⁺ , PO ₄ ³⁻ , NO ₂ ⁻ (②)	Chl-a, N/P (③)
Spring	Sal., NH ₄ ⁺ , PO ₄ ³⁻ , NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ (①)	Chl-a, N/P, SS (③)	
Summer	Sal., NO ₃ ⁻ , SS (①)	Chl-a, NH ₄ ⁺ , NO ₂ ⁻ (③)	PO ₄ ³⁻ , N/P (②)
Fall		not significant	
Winter	Sal., NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ (①)	PO ₄ ³⁻ , N/P (②)	Chl-a, SS (③)
spring algal bloom*	Chl-a, PO ₄ ³⁻ , N/P, NO ₂ ⁻ (③)	NH ₄ ⁺ , SS (②)	Sal., NO ₃ ⁻ (①)

①: effect of physical impact including fluvial input from Geum River
 ②: effect of chemical processes including nitrification followed by sediment resuspension and sewage inflow
 ③: effect of biological activities including primary production
 *: 2004.03.19~04.10

을철에는 이러한 3대 요인이 어떠한 요인도 주도적으로 나타내지 못하였다.

한편, 생물 활동이 활발한 시기인 봄철 엽록소-a의 대증식(bloom) 기간을 선택해(2004년 3월 19일부터 2004년 4월 10일까지) 조사한 결과 생물 활동으로 인한 요인이 42.5%, 재부유나 도시 하수에 유입에 의한 요인이 22.3%, 담수 유입에 의한 요인이 12.9%를 보였다(Table 5). 따라서 갈수기(특히, 봄철)에 생물 활동으로 인한 요인은 금강 하구 내에서 가장 중요한 위치를 차지하고 있음을 알 수 있다.

다중회귀분석(Multiple Regression Analysis)

요인 3인 생물활동의 대표적인 인자인 엽록소-a 농도에 대하여 계절별/유량별로 분석한 결과가 Table 6에 있다. 조사 기간 중 금강의 유량이 극도로 적었던 10 case(50 m³/sec 이하)와 유량이 매우 크게 나타난 7 case(200 m³/sec 이상)에 대하여 각 case 별로 분석하였다. 각 case는 약 15일 간에 걸친 조사 기간이 포함되었다. 금강의 유량이 극도로 적게 나타난 10번의 case(50 m³/sec 이

하)를 조사한 결과, 봄철에 염분의 영향이 작아진 대신, 인산염과 N/P 비율이 중요한 공통 인자로 나타났으며, 가을철에도 염분의 영향 대신, 암모니움염과 아질산염이 중요 인자로 출현하였고, 겨울철 또한 염분 대신 암모니움염, 인산염, 부유물질이 공통 인자로 나타났다. 반면 여름철에는 유량이 대체적으로 크게 나타나 이 case에 해당하는 경우가 없었다.

금강의 유량이 매우 크게 나타난 7 case는 대부분 봄, 여름철에 집중되고 가을, 겨울철에는 거의 없었다. 이 경우에도 유량이 매우 적었던 case에서 발견하였던 것과 마찬가지로 엽록소-a의 농도에 대한 염분의 영향은 대폭 축소되었다 대신, 봄철에 있던 2번의 case에는 인산염과 N/P 비율이 공통 인자로 나타나 유량이 극도로 적었던 case와 항목에서 차이가 없음을 알 수 있다. 더구나 유량이 대체적으로 가장 크게 나타나는 여름철의 4 case에서 또한 인산염과 N/P 비율이 공통 인자로 나타났다. 비록 1 case 밖에 없지만 가을철에도 유량이 극도로 적은 경우와 마찬가지로 암모니움염과 아질산염이 공통 인자로 나타났다. 따라서 유량이 매우 크거나 적더라도 같은 계절에는 유사한 항목이 하구 내 엽록소-a의

Table 6. Seventeen extreme case studies used in multiple regression analysis for chlorophyll-a by the flow rate of the Geum River and seasons

Each season	Flow rate < 50 m ³ /sec	Flow rate > 200 m ³ /sec
	Spring	1. PO ₄ ³⁻ , N/P, NO ₃ ⁻ 2. PO ₄ ³⁻ , N/P, NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ 3. PO ₄ ³⁻ , N/P, Sal., NO ₂ ⁻
Summer		13. PO ₄ ³⁻ , N/P, NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻ 14. PO ₄ ³⁻ , N/P, Sal., NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻ 15. PO ₄ ³⁻ , N/P, Sal. 16. PO ₄ ³⁻ , N/P, DIN, SS
Fall	4. NH ₄ ⁺ , NO ₂ ⁻ , Sal., PO ₄ ³⁻ 5. NH ₄ ⁺ , NO ₂ ⁻ 6. NH ₄ ⁺ , NO ₂ ⁻ , Sal., N/P	17. NH ₄ ⁺ , NO ₂ ⁻ , SS, NO ₃ ⁻ , N/P
Winter	7. NH ₄ ⁺ , PO ₄ ³⁻ , SS, NO ₃ ⁻ 8. NH ₄ ⁺ , PO ₄ ³⁻ , SS, NO ₂ ⁻ 9. NH ₄ ⁺ , PO ₄ ³⁻ , SS, Sal., NO ₃ ⁻ , N/P 10. NH ₄ ⁺ , Sal.	

- 1: 97.02.28~03.16
- 2: 97.03.17~04.02
- 3: 97.04.16~05.06
- 4: 96.10.13~10.24
- 5: 96.11.11~11.24
- 6: 97.11.14~12.06
- 7: 96.11.25~12.08
- 8: 96.12.09~12.23
- 9: 97.01.10~01.25
- 10: 97.12.12~12.23
- 11: 97.05.19~05.31
- 12: 98.05.11~05.23
- 13: 97.06.01~06.13
- 14: 97.06.14~06.28
- 15: 98.08.02~08.17
- 16: 98.08.18~09.02
- 17: 98.10.04~10.19

*ten extremely low fluvial flow cases: 1~10
 *seven extremely high fluvial flow cases: 11~17
 *each case covers approximately 15 days which span a full half-month tidal cycle.

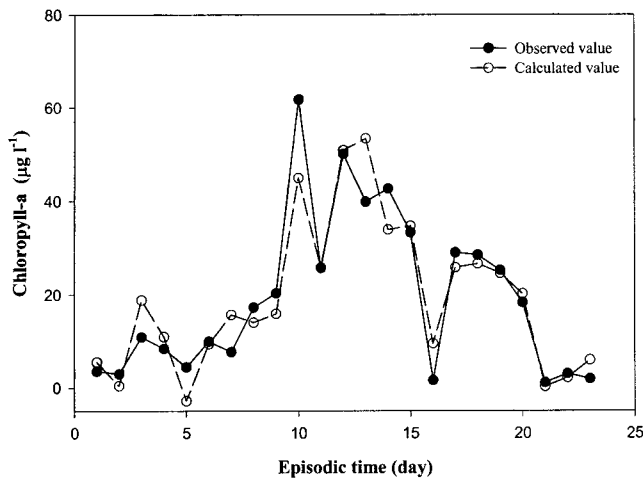


Fig. 4. Comparison between calculated and observed chlorophyll-a concentration during the algal bloom from March to April 2004.

농도를 결정하고 있으며 엽록소-a의 증식이 가장 크게 나타나는 봄, 여름철에 인산염과 N/P 비율이 매우 중요한 인자임을 알 수 있다. 최근 연구에 의하면 하구 내에서 인산염은 식물플랑크톤의 제한 인자로 흔히 지적되고 있다(Gayoso, 1998; Grelowski *et al.*, 2000; Sierra *et al.*, 2002; Huang *et al.*, 2003; Gao and Song, 2005).

봄철, 평균적인 유량(81 m³/sec)을 보이며, 식물플랑크톤이 대량 증식을 보인 약 15일 간(2004년 3월 19일부터 4월 10일까지)을 선택해 지금까지 나타난 식물플랑크톤에 영향을 주는 3대 요인, 즉 염분, 인산염, N/P 비율을 인자로 하여 다중회귀분석을 한 결과 얻은 다중회귀방정식은 다음과 같다.

$$\text{Chl-a} = 34.954 + (-0.451 \times \text{Sal.}) + (-14.101 \times \text{PO}_4^{3-}) + (0.011 \times \text{N/P}) \quad (1)$$

식 (1)을 이용하여 엽록소-a의 계산값(회귀값)과 실제 관측값을 비교한 것이 Fig. 4이며, 이때, 엽록소-a의 회귀값과 관측값의 결정계수는 0.87로서 서로 일치하고 있음을 보인다. 식 (1)에서 사용한 인자들은 이전에 검토하였던 금강의 유량이 비정상적으로 크거나 적은 17개의 case 때와 마찬가지로 인산염과 N/P 비율을 식 (1)에 적용하였을 때 엽록소-a의 현장값을 잘 표현할 수 있다. 따라서 식 (1)에서 포함시켰던 염분의 상대적 영향력에 대한 검증이 필요하였다.

식 (1)에서 각 항목의 값을 금강 하구에서 발견할 수 있는 평균 값으로 고정시키면서, 다른 항목을 변화시켜 상대적인 민감도를 검증하였다. 염분 항목을 금강 하구 내 평균 염분(19.2 psu)에 고정시킨 후 다른 두 가지 항목을 변화시킨 결과, 엽록소-a의 농도 변화폭은 54.52 µg l⁻¹인 반면, 인산염의 하구 내 평균농도 (0.86 µmol l⁻¹)와 N/P 비율의 평균값(466.72)을 각각 고정시킨 후 염분을 변화시킨 결과로 생긴 엽록소-a의 농도 변화폭은 9.61 µg l⁻¹에 불과하여 금강 하구 내 엽록소-a의 농도 변화는 염분 변화보다는 인산염과 N/P 비율의 변화에 보다 민감하게 반응한다는 것을 알 수 있다. 따라서 갈수기(특히, 봄철) 식물플랑크톤의 대증식 기간 동안 금강 하구 내 인산염은 식물플랑크톤의 성장에 제한 인자로 작용하고 있음을 알 수 있다.

사 사

본 논문은 군산대학교 해양개발연구소 특별 사업과 새만금환경 연구센터(RRC) 지원으로 연구된 것입니다. 본 연구의 시료채취와 실험을 같이 해준 군산대학교 해양정보과학과 화학실험실 최재훈, 박창완, 채병우, 허용 군에게 감사드립니다.

참고문헌

- 기준학, 김경렬, 1987. 금강 하구에서의 화학적, 생물학적 제과정에 관한 연구, II. Chlorophyll-a 분포결정 요인에 관하여. 한국해양학회지, 22: 207-215.
- 김경렬, 기준학, 1987. 금강 하구에서의 화학적, 생물학적 제과정에 관한 연구, I. 질소계 화합물의 순환: 전반적 고찰. 한국해양학회지, 22: 191-206.
- 김중구, 1998. 다변량 해석기법에 의한 금강 하구역의 수질평가. 한국환경과학회지, 7: 591-598.
- 노형진, 1999. 다변량데이터의 통계분석. 석정, 661 pp.
- 이용혁, 양재삼, 1997. 금강 하구역에서 영양염류, 엽록소, 부유물질과 염분변화에 대한 500일간의 연속관측. 한국해양학회지 "바다", 2: 1-7.
- 정충영, 최이규, 1999. SPSSWIN을 이용한 통계분석. 무역경영사, 518 pp.
- 양재삼, 정주영, 허진영, 이상호, 최진용, 1999. 금강하구의 물질수지, I. 영양염의 계절적 분포. 한국해양학회지 "바다", 4: 71-79.
- 허만형, 2001. 통계분석론. 범문사, 728 pp.
- Gao, X. and J. Song, 2004. Phytoplankton distributions and their relationship with the environment in the Changjiang Estuary, China. *Mar. Pollut. Bull.*, 50: 327-335.
- Gayoso, A.M., 1998. Long-term phytoplankton studies in the Bahia Blanca estuary, Argentina. *ICES J. Mar. Sci.*, 55: 655-660.
- Grelowski, A., M. Pastuszek, S. Sitek and Z. Witek, 2000. Budget calculations of nitrogen, phosphorus and BOD₅ passing through the Oder estuary. *J. Mar. Syst.*, 25: 221-237.
- Huang, X.P., L.M. Huang and W.Z. Yue, 2003. The characteristics of nutrients and eutrophication in the Pearl River estuary, South China. *Mar. Pollut. Bull.*, 47: 30-36.
- Parsons, T.R., Y. Maita and C.M. Lalli, 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press, New York, 173 pp.
- Shim, J.H. and J.S. Yang, 1982. The community structure and distribution of phytoplankton of the Keum River Estuary. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 17: 1-11.
- Sierra, J.P., A. Sanchez-Arcilla, J. Gonzalez Del Rio, J. Flos, E. Movellan, C. Mosso, R. Martinez, M. Rodilla, S. Falco and I. Romero, 2002. Spatial distribution of nutrients in the Ebro estuary and plume. *Continental Shelf Res.*, 22: 361-3780.
- Solórzano, L., 1969. Determination of ammonia in natural waters by the phenylhypochlorite method. *Limnol. Oceanogr.*, 14: 799-801.

2005년 3월 4일 원고접수

2005년 6월 3일 수정본 채택

담당편집위원: 강창근