

새만금 인접수계의 수질예측 Water Quality Prediction Adjacent to the Saemankeum

서승원¹
Seung Won Suh¹

要 旨 : 상류의 만경강과 동진강을 포함하여 공사가 진행 중에 있는 새만금 사업의 결과로 조성될 새만금 담수호 그리고 호소 외해역에 대한 총체적인 수질관리를 위하여 일차적으로 하천수계의 수질 연속관측과 부영양화 평가를 위하여 해역에서 수질분석이 실시되었다. 수치모형의 적용성을 평가하기 위하여 기존에 만경강에 대해 적용한 정적 수질모형인 QUAL2E 의 검토도 있었다. 종합적인 수질관리에는 하천에서뿐만 아니라 하구에서 공히 이용될 동적인 모형의 필요성이 대두되었다. 연속관측 자료를 통하여 분석된 자료는 감조구간에 적용된 1 차원 동적수질모형 거동과 유사성을 보여, 향후 새만금 수계의 수질관리에는 동적모형의 확장이 필연적임을 재확인 할 수 있었다. 인근해역에서 분석된 수질 분포는 특히 만경강 하구에서 부영양화가 매우 강하게 나타나 현재 일대 해역에서뿐만 아니라 만경강 상류의 유입 영향으로 향후 조성되는 새만금 담수호의 부영양화의 가능성도 배제할 수 없는 것으로 나타나 수질저하를 예방하기 위한 지속적인 수질관리 연구가 필요한 것으로 판단되었다.

1. 서 론

본 연구는 현재 공사가 진행 중에 있는 새만금 사업의 결과로 조성될 새만금 상류의 하천, 새만금 담수호 그리고 호소 외해역에 대한 총체적인 수질관리 과업의 일환이다. 전라북도와 한국과학재단의 지원으로 1999 년도에 출발된 지역협력연구센터인 군산대학교 새만금환경연구센터(SERC)의 제 1 세부과제인 새만금 인접 수계의 수질관리 프로그램인 본 연구는 오염현황조사 및 수치모형을 이용한 현재 및 장래의 변화되는 수계내 수질예측인 nowcasting-forecasting 을 목표로 한다. 하구역의 특성상 부영양화가 예견되는바 1 차년도 사업에서는 해역의 수질현황파악에 중점을 두어 계절별로 12 개 정점에 대한 이화학적 수질분석 및 평가에 주안점을 두고 실행하였다. 또한 연속수질측정기를 연차별로 그림 1 에 보이는 새만금 수계

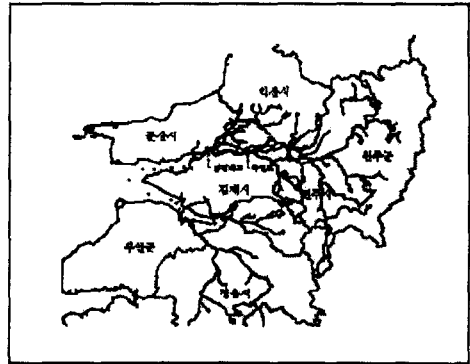


그림 1. 새만금 수계 유역도

내에 설치하여 실시간으로 수질의 변화추이를 살펴볼 수 있는 시스템을 구축 중에 있으며, 1 단계로 만경강 하구의 동적수질을 확보하였다. 이와 같은 동적 수질변화는 기존 적용되었던 정적 수질모형이 지닌 제한성을 보여준다. 따라서 본 연구

¹ 군산대학교 해양시스템공학과 (Department of Ocean System Engineering, Kunsan National University, Kunsan 573-702, Korea)

에서는 전 수계에 대한 수질관리 프로그램의 일부로 1 차원 동적모형의 적용성 및 타당성해석을 실시하였다(새만금 환경연구 센터, 2000).

2. 새만금수계 수질해석의 기존 접근방법

2.1 기존의 하천모형

만경강으로부터 유출되는 오염물질을 추정해야 새만금지구에 새로 조성될 호소의 유입오염 부하량을 산정할 수 있고, 이로부터 호수의 수질오염도를 산정할 수 있다. 새만금 수계에 대한 수질 연구로 만경강 유역에 대한 유역의 특성, 오염원의 현황 및 장래추정, 하천 수역의 수리·수문자료 조사, 기상조사 등을 실시하고, 이로부터 하천 수질 모델링을 하여 장래의 하천 수질을 예측하여 호소모델의 입력으로 이용한다. 하천 수질 모델로는 1986 년도에 환경처 주관으로 만경강에 대해 적용하여 좋은 결과를 보인 모델로 미국 환경처에서 개발하여 세계적으로 활용성을 인정받고 있는 QUAL2E 모델이 이용되었다(군산대학교, 1994). QUAL2E 모델은 13 개 수질항목의 모의가 가능하며, 이들을 필요에 따라 취사선택 할 수 있다. 모델의 수학적 원리는 하천의 수체 내에서 어떤 수질인자의 1 차원 거동을 표현하는 물질수송 방정식으로 물질의 확산, 유체에 의한 이동, 수질인자의 반응, 생성 및 분해 그리고 물질의 유입과 유출 등으로 표현되며, 이미 국내외에서 많이 활용된 바 있어, 본고에서 상세한 기술은 생략한다.

정상모델인 QUAL2E 를 이용한 만경강 수계의 수질예측은 전북 고산으로부터 감조구간을 포함하는 하구에 이르는 47 Km 구간으로 전주천과 삼천을 포함한다. 모델의 보정에는 해빙기로 인한 유량의 변화가 심하지 않고 홍수로 인한 유량의 영향이 거의 없는 1992 년 5 월말 환경처에서 실측한 자료가 사용되었다. 보정 및 검증 순서는 유량 및 수온을 먼저 수행한 다음 BOD, DO, 대장균, PO₄-P, NH₃-N, NO₃-N 을 행하였다(군산대학교, 1994).

그러나 위의 결과는 하천의 수동역학적 변동을 정적으로 가정한 모델 결과이므로 하천의 유량이 시간에 따라 변화가 크지 않은 갈수기의 만경강 증상류 부근에서는 만족스러운 결과를 얻을 수 있지만, 만경제수문 이후 하류부는 항시 조석의 영향을 받아 흐름특성 및 수질변동이 동적으로 변화되므로 이러한 정적모형의 적용은 재고되어야 한다. 연속적으로 자동측정된 자료로부터 분석된 계

절별의 수온, 염도 및 DO 변화등의 추이를 비교하여 향후 만경강 수계의 동적 및 정적 수질변화 예측에 활용한다. 그렇지만 상세한 모델 적용결과 는 이어지는 연구에서 중점적으로 비교 평가되고, 본 고에서는 정성적인 평가와 수질현황의 해석에 주안점을 둔다.

2.2 동적 하천모형

앞서 살펴본 바와 같이 기존의 수질예측모델은 하천의 수동역학계를 정상상태로 간주하고 있으므로 조석의 영향을 받지 않는 하천의 증상류 부근에서는 만족스럽게 이용되나 하천의 감조구간과 하구부분에서는 적용에 한계가 있다. 따라서 만경강 수계와 같이 비정상상태인 하천의 감조구간과 하구에서의 수질변화를 정확히 예측할 수 있는 모델이 절실히 필요하다. 본 연구에서는 이와 같은 필요성에 입각하여 수동역학계와 수질변화과정이 복잡한 감조구간과 하구에서의 수질변화를 정확히 모의할 수 있는 동적의 수치모델의 수립이 과업 목적의 하나로 실시되었다.

본 연구는 궁극적으로 새만금 수계인 만경강과 동진강의 감조하천구간과 하구에서의 수동역학계와 수질변화를 모의하기 위하여 하천구간에는 1 차원, 해양과 접한 하구부분에서는 2 차원의 연속, 운동량 및 물질보존 방정식을 기본방정식으로 취하여 불규칙 경계에 적용성이 뛰어난 유한요소법을 이용하고자 하는 것이나, 1 차원도에는 동수역학모형으로 감조하천에서 동적인 반응을 살펴볼 수 있는 모형이 구축되었다.

감조하천의 동적 특성을 묘사하기 위해서는 비정상 모델이 적용되어야 한다. 수동역학계는 1 차원 부정류 기본방정식인 연속방정식과 운동량방정식으로 설명되고, 수질모델계는 1 차원 물질 보존방정식으로써 대표된다.

본방정식은 수심 및 단면 평균화된 즉, 1 차원 연속방정식과 운동량방정식은 그리고 물질보존방정식이며 다음과 같다.

$$B \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_1 = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + u \frac{\partial Q}{\partial x} + Q \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} A + g \frac{Ad_c \partial \rho}{\rho \partial x} + g \frac{U|U|}{AC^2 R} = 0$$

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(QC)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(AD \frac{\partial C}{\partial x} \right) \pm S$$

위의 식에서 미지 값은 시간과 위치에 따라 변

화되는 수동역학계의 $Q(x,t)$ 와 $h(x,t)$ 및 물질보존 방정식의 $C(x,t)$ 이다. 이때 x 는 하천의 흐름방향을 의미하고 t 는 시간이다.

기본식을 유한요소법을 이용하여 전개하면 다음과 같다. 먼저 미지 값을 아래와 같은 시간과 위치의 함수의 결합형태로 표현되는 근사해를 도입한다. 즉,

$$Q(x,t) \cong \sum_{j=1}^N Q_j(t)\phi_j(x)$$

$$h(x,t) \cong \sum_{j=1}^N h_j(t)\phi_j(x)$$

$$C(x,t) \cong \sum_{j=1}^N C_j(t)\phi_j(x)$$

여기서 j 는 유한요소의 절점을 나타내고, ϕ_j 는 보간함수로서 본 연구에서는 선형으로 가정하였다. 즉,

$$\phi_j = \alpha_j + \beta_j x$$

유한요소식 구성 방법으로는 Galerkin의 가중잔차법으로 적용한다. 보간함수 ϕ 를 가중함수로 취하여 대상영역에 관한 식을 구성하고 전체영역에 관하여 조합하면 최종적으로 아래의 행렬식이 구성된다.

$$M\dot{U} = R_h$$

$$M\dot{C} = R_c$$

여기서 M 은 질량행렬을 나타내고 U 는 수동역학계의 미지치인 Q 와 h 를 대표하는 벡터, R_h 는 연속 및 운동량방정식의 시간 미분항을 제외한 항들을 조합하고 경계조건이 고려된 구성된 열벡터를 의미한다. 물질 수송 부분도 마찬가지이며, C 는 미지치인 농도를 대표하는 벡터, R_c 는 물질보존방정식에서 시간미분항 이외의 항들을 조합하여 경계조건이 고려된 열벡터이다. 식에서 \cdot 은 시간 미분을 나타낸다.

상기 모형에 입력한 만경강 수계의 동적인 거동을 분석한 결과 중에서 전술한 수질의 자동측정망과 연계하여 비교 가능한 항목인 DO와 염도에 대해 토의하고자 한다. 본 과업에서 적용한 동적인 수질모형은 그 적용의 초기단계로써 1차원적인 변화만을 살펴본다. 초기적용된 동적모델은 만경강 하구부터 상류방향으로 제수문까지 27.5Km를 500m로 총 55개의 구간(reach)으로 그림 2의 보는 바와 같이 모식화 하였다. 모델결과는 그림 3 및 그림 4에 수록하였는데, 여기서 수질관측 모

니터링 시스템이 설치된 지점인 만경대교는 구간 5(reach5)에 해당된다. 임의의 대표적인 증조시 1주기간을 선정하여 계산한 동적인 모델의 결과는 용존산소가 조석기간 중에 8-11ppm의 변화를 보이는 것을 나타내며, 염도는 11-22‰의 변화를 보인다. 이러한 결과는 충분히 동적인 변화를 반영하는 것으로 이해할 수 있으며, 뒤에 제시하는 수질관측 모니터링의 결과와 성향의 추이를 비교 평가할 수 있다.

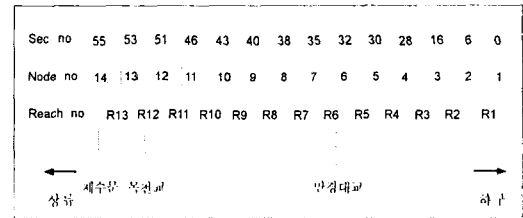


그림 2. 만경강 수계의 모식도

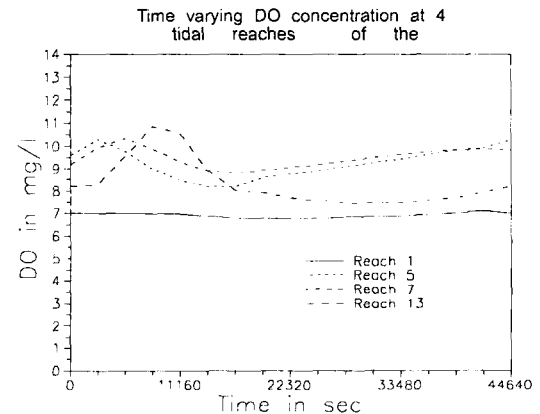


그림 3. 감조구간의 4개 특정한 정점에 대한

DO 변화추이

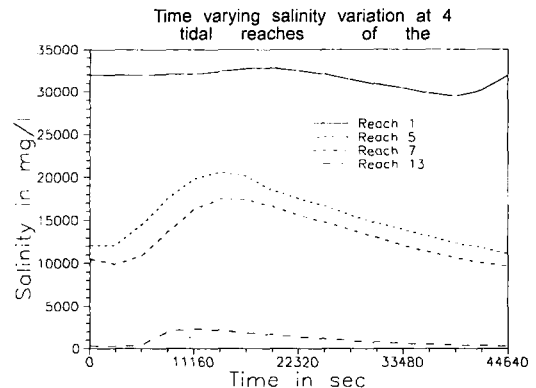


그림 4. 감조구간의 4개 특정한 정점에 대한

염도추이

3. 하구수질특성

3.1 연속측정에 의한 감조하천수질의 특성

실측은 시간 의존적인 특성의 대표성을 나타내기 위하여 각 계절별로 변화되는 수질을 분석하였으나, 우선적으로 측정된 기간 중 중조시의 동적인 변화를 하루동안에 국한하여 분석한다. 관측은 그림 5 에 보이는 바와 같이 만경대교의 수위관측 지점내부에 설치하였으며, 분석된 결과 중 특정 중조시의 2000 년 3 월 27 일 하루동안의 변화를 그림 6 과 그림 7 에 수록하였다. 관측된 조석 1 주 기간 계절별로 변화를 보이는 DO 및 염도는 시간에 따라 조석의 영향으로 매우 큰 진폭을 보이며 비선형적인 변화양상을 보이고 있어, 만경강 하구의 수질변화는 전적으로 외해에서 조석 영향을 받아 하천상류로 전파되는 감조하천의 특성을 잘 반영하고 있다.

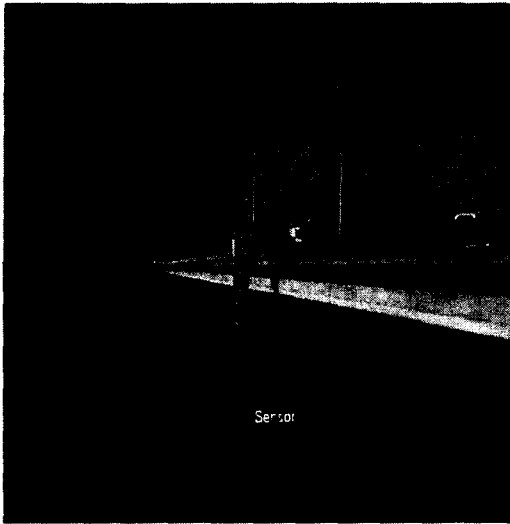


그림 5. 수질 자동측정 시스템의 설치도

용존산소는 일반 하천에서도 주야간의 일간 변화가 심하게 나타나는 것이 통상적이지만, 이렇게 감조구간에서 관측된 자료는 기상조건에 의해서 변화된다기 보다는 오히려 하루의 해수가 상류의 하천으로 전파되는 영향에 의하여 지배를 받는다. 관측된 자료는 9-12ppm 정도로 조석 한주기간 비선형적으로 변화됨이 뚜렷함을 알 수 있다. 상대적으로 수질이 저하되는 것은 상류의 만경강 하천수의 영향으로 인식되며, 점차 용존산소가 증가되는 것은 외해수의 상류전파로 기인되어 수질이 호전되는 것으로 판단된다. 염도를 측정하여 도시

2000. 3. 27

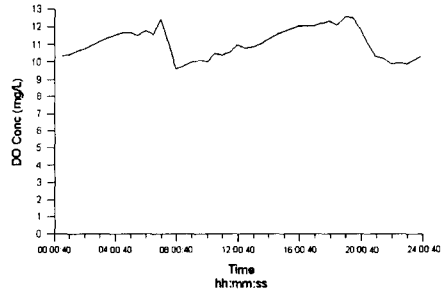


그림 6. 용존산소의 일간 변화

2000. 3. 27

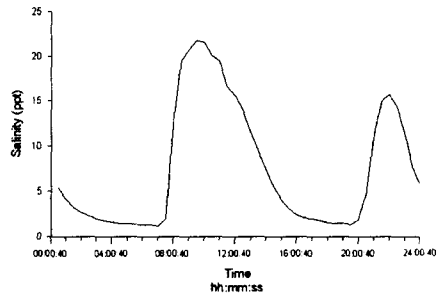


그림 7. 염도의 일간 변화

한 그림 7 에서 보는 바와 같이 조석 주기간에 2-22ppt 의 매우 큰 변화를 보이는 바, 약 3 시간의 창조시는 22ppt 까지 외해의 영향에 의하여 지배되지만, 이후 9 시간동안의 낙조시에는 2ppt 까지 저하되는 비선형 변화가 확연하게 나타나고 있다.

1 차년도 의 결과보고서 작성 시점에서는 수질 관측 시스템의 검증도 충분히 이루어지지 않았고, 모델의 결과도 완벽한 검증이 이루어지지 않은 단계이므로 연속되는 2 차년도 의 연구에서 실시간 모니터링의 계속과 동시에 검증목적의 수질관측이 이루어진 이후에는 모델의 결과와 상호 비교할 수 있는 양질의 데이터를 실시간으로 확보할 수 있어 그 의의가 매우 크다고 할 수 있다.

3.2 부영양화 평가

해역의 부영양화는 상류 하천으로부터 유입된 질소와 인의 함유에 따라 좌우된다. 새만금해역의 부영양화정도를 가늠하기 위하여 그림 8 에 보이는 바와 같이 12 개 정점에 대해 계절별로 수질을 분석하였다. 일반적인 수질의 특성도 조사되어 전

반적인 수질의 현황이 제시될 것이나 부영양화에 대해서는 보다 상세한 평가가 이루어질 것이다.

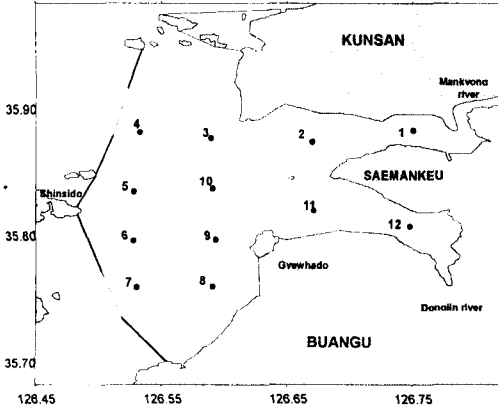


그림 8. 새만금해역 수질측정 정점도

부영양도 평가방법은 조사된 자료를 이용하여 Okaichi 가 제안한 다음 식을 사용하여 해역의 부영양도를 평가하였다(새만금 환경연구 센터, 2000).

$$\text{부영양도} = \frac{\text{COD}(\text{mg}/\ell) \times \text{TIN}(\mu\text{g} - \text{at}/\ell) \times \text{PO}_4^3\text{-P}(\mu\text{g} - \text{at}/\ell)}{3.4272}$$

이는 해역의 부영양화 지표로서 적조를 유발시키는 한계를 고려한 방법으로, 여기서는 적조 초기로 보여지는 규조의 세포수 103 개체/ml 를 한계로 해서 여기에 함유된 C 량인 0.83mg/l (COD=1mg/l)를 고려하고 N 은 7.14 $\mu\text{g-at}/\ell$, P 는 0.48 $\mu\text{g-at}/\ell$ 를 기준으로 해서 평가한다.

부영양도 지수는 1 을 기준으로 하여 1 을 초과할 경우 부영양화가 심화됨을 의미하며 1 이하인 경우는 빈영양상태를 나타낸다.

새만금 하구호의 부영양도 평가를 위해 본 조사에서 측정된 COD 와 TIN 및 DIP 자료를 이용하여 부영양도지수를 계산하였다(표 1).

부영양도지수를 보면, 7 월에 인산인이 불검출된 지점에서 부영양화지수가 계산되지 않았지만 만경하구지점을 제외하고는 낮은 지수 값을 나타내었다. 그러나 9 월, 11 월 그리고 2 월에는 용존무기질소와 인산인의 높은 농도에 기인하여 특히 만경강 하구부근에서 부영양화지수 값이 부영양화 판단 기준 값인 1 을 초과하는 아주 높은 지수 값을 나타내었다. 전체적으로 새만금 하구해역은 식물플랑크톤 성장에 필요한 질소와 인이 풍부하여

해수유동의 특성 변화에 따라서 항상 적조의 발생 가능성을 가지고 있는 해역으로 판단된다.

Table 1. Eutrophic state indices for each station in the Saemankeum estuary.

Station	July	Sept.	Nov.	Feb.
1	37.3	511.1	39.0	750.7
2	0.5	200.7	23.7	140.3
3	0.0	140.9	2.7	20.1
4	0.0	28.0	4.6	39.4
5	0.1	5.5	1.5	34.3
6	0.0	5.2	4.0	27.8
7	0.0	5.5	1.3	22.7
8	-	3.4	2.9	35.1
9	0.1	3.5	3.2	27.5
10	0.0	28.0	12.5	25.3
11	0.0	51.1	11.8	16.1
12	-	282.3	19.1	27.7

이외에 일반적인 해역의 수질을 평가하는 지표로 이용되는 용존산소, 염분 및 화학적산소요구량에 대한 관측결과는 다음과 같다. 본 고에서는 지면 관계상 각각의 수질항목에 대한 분포도는 생략하고 단지 개괄적인 면만 기술한다.

용존산소(DO)

어패류의 산란 및 성장에 중요한 역할을 하며 수괴의 혼합특성을 구명하는 인자로 이용되는 용존산소의 분포를 보면, 7 월에 6.21~8.09(평균 7.12), 9 월에 4.95~13.12(평균 6.40), 11 월에 7.77~11.92(평균 9.30), 2 월에 11.10~12.08(평균 11.69)의 범위를 나타내었다. 지점별로 큰 농도차를 나타내었는데 이는 하구역에서의 복잡한 물리, 화학적 과정에 의해 나타난 것으로 보이며, 온도에 따른 포화도의 차이로 인하여 계절별로 뚜렷한 변화특성을 잘 나타내고 있다.

염분(Salinity)

수괴의 특성을 구명하는 중요한 인자인 염분의 분포를 보면, 7 월에 18.10~30.31% (평균 28.02%), 9 월에 23.54~30.15% (평균 27.70%), 11 월에 12.20~32.30% (평균 22.10%), 2 월에 24.86~30.67% (평균 29.59%)의 범위를 나타내었다. 지점별로 하구안쪽이 하천 유입수의 영향으로 낮고 외해로 갈수록 높은 경향을 보였으며, 유입수량이 높은 만경강 하구의 영향을 상대적으로 크게 받는 경향을 보인다.

화학적 산소요구량(COD)

해수중의 유기물량을 간접적으로 나타내는 지표로서 해역의 유기오염의 척도로 이용되는 화학적산소요구량(COD)의 농도를 보면, 7 월에 0.49~2.95mg/l (평균 1.27mg/l), 9 월에 1.09~2.90mg/l (평균 2.10mg/l), 11 월에 0.78~1.44mg/l (평균 1.00mg/l), 2 월에 1.30~6.40mg/l (평균 3.14mg/l)의 범위를 나타내었다. 지점별로 7 월과 9 월에 염분의 분포 특성과 유사하게 만경강의 영향을 받는 형태를 보였고, 동계인 2 월에 만경강의 영향으로 만경강 하구 일부해역에서 해역수질기준 III등급수의 수질을 나타내었다. 전체적으로 해역수질환경기준 I~II등급의 수질을 나타내고 있다.

4. 결 론

새만금 수계의 수질관리를 위하여 적용 가능한 모델을 검토하였다. 새만금 수계에서 정확하게 수질을 모의하기 위해서는 동적모형의 적용이 필수적이며, 하천수계에는 1 차원, 하구에는 2,3 차원의 부영양화까지도 고려할 수 있는 동적모형을 적용하여야 한다. 특히 실시간으로 변화되는 수질의 계량화된 관측이 모형의 신뢰성 향상에 필수적으로 실시간 수질 모니터링이 절대적으로 필요하며, 초기 적용을 위해 구축 중인 시스템이 매우 효율적으로 활용될 수 있는 것으로 평가되었다. 감소 구간에서 관측된 용존산소는 해수가 하천으로 전파되는 영향에 의하여 전적으로 지배를 받는다. 관측된 자료는 9-12ppm 정도로 조석 한주기간 비선형적으로 변화됨이 뚜렷하다. 염도의 변화는 더욱 크게 나타나 조석 주기간에 2-22ppt의 매우 큰 비선형 거동을 나타낸다. 초기적용된 1 차원 동적모형의 수질변동인 용존산소 8-11ppm, 염도 11-22ppt의 변화 거동과 유사하여 동적모형의 타당성을 반증한다.

새만금 하구의 수질특성을 조사하고 부영양도 평가를 위하여 1999년 7월부터 2000년 2월까지 격월로 하구내 12개 정점을 대상으로 조사한 결과는 다음과 같다. 새만금 하구수질은 만경강의 생활하수 영향이 동진강의 영향보다 크게 작용하고 있으며, 하구 안쪽의 수질이 해역수질기준 III등급을 초과하는 수질을 보인 반면 하구 바깥쪽은 II~III등급수를 나타내고 있다. 영양염류 분포특성을 보면, 용존무기질소와 무기인의 계절별 변화특성은 식물플랑크톤 성장에 기인한 영양염의 소비로 인하여 하계에 가장 낮은 농도를 나타내었고,

동계로 갈수록 높아지는 경향을 보였다. 해역수질등급은 용존무기질소의 경우 III등급수를 초과한 농도를 보였고, 인산 인은 II~III등급의 수질을 나타낸다. 부영양도를 평가해보면, 7월을 제외하고는 부영양도지수가 부영양도 판단기준 값인 1을 초과한 지수 값을 나타내었다. 따라서 새만금 하구해역은 식물플랑크톤 성장에 필요한 질소와 인이 풍부하여 해수유동의 특성 변화에 따라서 항상적조의 발생가능성을 가지고 있는 해역으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 지원을 받아 수행한 지역협력연구센터인 군산대학교 새만금환경연구센터의 연구 결과의 일부임.

참고문헌

- 군산대학교, 1994, 새만금 종합개발사업 어업피해 보상 조사연구
- 새만금환경연구센터, 2000, 새만금호 인접수계의 수질예측, 1차년도 제1세부과제 연구보고서