

부분적으로 폐쇄된 하구호내 장기간의 수질모의 Long-term Simulation of Water Quality on A Partly Enclosed Estuarine Lake

서승원¹, 김정훈², 황인태², 이정렬²
SeungWon Suh¹, Jung-Hoon Kim², In-Tae Hwang², and Jung Lyul Lee²

1. 서 론

담수 이용목적을 충족하기 위하여 건설된 하구호의 일반적인 특성은 육상 오염원의 유입에 능동적으로 대처할 수동역학적 반응이 자연 하구에 비하여 현저히 떨어진다. 인위적인 수문의 조작 등의 제한적인 수동적 방법에 의해서는 폐쇄된 하구호 내의 수질 개선에 크게 기여하지 못하는 경우가 발생하기도 한다. 특히 하구호는 특성상 육상에서 기원한 인산과 질산염 등의 영양염 물질이 풍부하고 이로 인하여 부영양화가 가중되고 있다. 하구호의 수질악화는 우리나라에서 뿐만 아니라 국외에서도 그 발생예가 많이 보고되고 있으며, 미국의 Chesapeake Bay가 대표적인 경우라 할 수 있다.

하구호의 수질관리를 위해서 다양한 접근방법이 시도되고 있지만, 수질모형을 수립하고 적용하면서 오염부하에 종합적으로 대처하는 방안이 현재로서는 타당한 수단으로 인식된다. 그러나 하구호의 수질모의에 필요한 인자로는 하구호의 수리특성을 잘 묘사할 수 있는 도구를 선택하는 것이 선행되어야 하며, 수체와 저질과의 상호작용을 고려할 수 있고, 외부 오염부하에 따른 영향을 적절히 모의할 수 있어야 한다. 이런 관점에서 수질모의 부분과 수동역학부분의 독립적인 운영이 필요하고 상호 연계를 고려하여야 한다. 미국내 오염이 심한 몇몇 하구에서 적용되었던 수질모의 모델인 CE-QUAL-ICM은 유한체적방법을 이용하여 완벽한 질량보존을 만족하도록 개발되고 적

용된 바 있고, 이와 연계하여 구동되는 수동역학 모형은 유한차분방법을 이용하여 결합된 형태로 하구 및 하구호의 수질예측에 이용된 바 있다(Cerco and Cole, 1994). 그러나 수동현상을 구동하는 유한차분모델이 복잡한 하구의 지형적용에 불리한 점을 극복하고자 유한요소모형을 적용하는 연구가 수행되고 있고(Wheeler, M., and Saltz, J., 1999), 이와 아울러 계산효율을 증진시키기 위해 병렬처리 기법을 적용하고 있는 연구 결과가 보고되고 있다.(Chippada et al., 1998) 그러나 이들의 연구에서도 지적된 바와 같이 기본 미분방정식의 수치 근사화 방법이 서로 다른 모형을 결합할 때의 질량보존이 완벽히 이루어지지 않는 등의 문제점들이 지적되어 왔다. 또한 시간진행형의 3차원 유한요소모형인(ADCIRC)을 적용하면서 막강한 컴퓨터의 계산 능력을 필요로 하게 되어 슈퍼컴퓨터의 병렬처리화를 고려하기도 하였다. 그러나 기본적인 문제는 수동역학 모형이 여하히 자연현상을 재현하는가가 관건이 되고, 이러한 요구조건을 충족시키는 적절한 수치모형이라면 단일 프로세서에서 처리해도 무난한 계산 작업이므로 병렬처리 등에 굳이 많은 노력을 기울이지 않아도 된다.

본 연구에서는 우리나라 하구호 중에서 인공적으로 채절되어 외해와의 해수교환이 자연적으로 원활하게 이루어지지 않고 인위적인 수문의 개폐에 따라 내외수가 교환되는 S호를 선정하여 앞서 언급한 3차원 수질모형(CE-QUAL-ICM)을 적용하여 하구호의 장기적인 수질변동을 해석하고자 하였다. 수동역학적 특

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

² 성균관대학교 토목환경공학과 (Department of Civil Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, 440-746, Korea)

성을 모의하기 위한 모형으로는 3차원의 수질모형과 연계되도록 연직방향으로 4개의 σ 층으로 구분된 모형인 TIDE3D 모형을 적용하였다. 본 고에서는 이렇게 상이한 수동역학 모형과 수질모형과의 원활한 접합을 시도하였으며 접합과정에서 발생하는 질량보존 오차로 인한 수질모의 전반에 미치는 영향을 최소화 하도록 노력하였다. 특히 장기간의 수질을 모의하기 위한 기본 사항으로 수동역학모의에서 조화특성을 고려하여 반복적으로 재현되는 하구호의 수문조작을 효율적으로 고려하도록 하였으며, 바람에 의한 단기간의 항류 효과도 고려하여 실질적으로 장기간의 수질모의에 적합한 조건을 만족하도록 하였다.

2. 부분적으로 폐쇄된 하구호

2.1 하구호 개황

S호는 평균수심 4.5m로 낮은 수심분포를 보이고 있으며, 제한된 용량에 하구호의 특성상 상류의 유역으로부터 하수와 오염부하가 유입되어 호내의 오염이 심화되고 있다. 여기에 인위적으로 축조된 방조제는 외해와의 해수유통을 근원적으로 차단하고 있어 이로 인한 폐쇄된 하구호는 단지 수문의 개폐를 통해서만 유출입되는 형태로 내부의 수질 개선이 제한적으로 이루어지는 실정이다. S호의 형상 및 유역도는 그림 1에 제시된 바와 같다.

S호 내부의 수질 개선을 위하여 다각도로 접근하는

시도로서 배수갑문 조작을 통해 해수를 유통시킴으로써 수질을 개선시키는 방안이 제시되고 있다. 본 연구에서는 배수갑문과 지천으로부터의 영향을 고려하기 위해 다음과 같이 경계조건을 주었으며 경계 위치와 지천은 그림 1에 표시하였다.

2.2 S호의 유동특성

S호의 유동은 크게 나누어 외해와 연결된 수문의 개폐에 따른 외해수와의 교환과 상류 하천으로부터의 유입 그리고 기상조건에 따라 발생된 취송류의 영향으로 대별할 수 있다. 이 중에서 정상시의 유동에 영향을 미치는 것은 단지 수문의 조작이며, 여름철의 홍수시 유입량의 증가에 따른 단기간의 유입량을 제외하면 봄, 가을 및 겨울에는 하천유입량의 영향에 의한 유동이 미미하다. 또한 바람에 의한 수표면의 응력으로 발생된 취송류는 겨울철의 계절적인 한시적 영향을 받으므로 정상시의 수동역학 특성은 인위적인 수문의 개폐에 따라 좌우된다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 이러한 유동특성을 면밀히 파악하고 적용하는 수동역학모형의 검증 및 이어지는 수질모형의 연계에 이용되도록 2000년 가을 이후 계절별로 4개의 정점에 대해 15일간의 연속적인 유향·유속을 측정하였으며 부표추적에 의한 Lagrangian 유동특성을 함께 분석하였다. 아울러 유동특성이 관측된 동일 기간에 S호 인근의 인천과 수원기상관측소의 기상자료를 입수 분석하여 바람 응력에 기인된 취송류의 영향을 분석하였다.

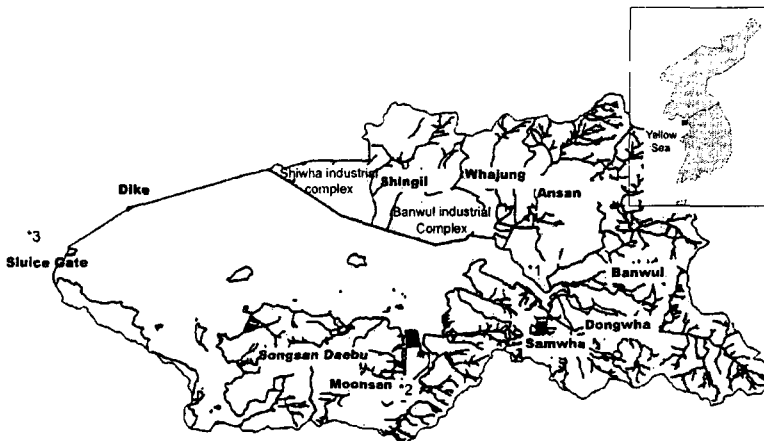


그림 1. S호 형상 및 유역

유동특성을 조사하고 분석한 바에 따르면, 실측 결과 S호의 순환과 유동에 영향을 미치는 인자로 갑문의 개폐로 인한 외해수와의 유통과 상류하천의 유입영향을 제외하고는 뚜렷한 인자가 없음에도 불구하고 배수갑문 인근의 정점을 제외하고 불규칙한 유동장이 형성되고 있다. 이와 같은 현상은 수심이 낮은 S호의 순환에 바람등의 기상이 주요인자로 작용할 수 있을 개연성이 있어, 이에 대한 규명을 하기 위하여 풍향·풍속등의 기상인자와 수리특성의 관계를 살펴보았다. 대상지역과 멀리 않은 인천 기상관측소의 기상자료를 분석하면 가을에는 동향(서풍)의 바람이 평균 4.5m/s로 나타나고, 겨울에는 동남향(북서풍)의 바람이 평균 7.9m/s로 불고 있다.

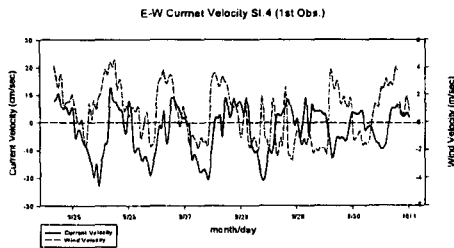


그림 2. 바람에 의한 취송류의 영향

조사결과 수리특성은 풍향, 풍속등의 기상인자와 매우 밀접한 관련이 있음을 나타냄을 알 수 있다. 대체적으로 최대 풍속이 발생한 2-6 시간 이후에 호소내부의 수리특성도 유사한 구조를 보이고 있다. 특히 상류 인근에서는 최대 10cm/sec 정도의 역상하는 유속이 바람에 의해 나타난다. 이러한 결과는 S호의 순환에 하천수의 유입, 외해수의 교환뿐만 아니라 바람에 의한 취송류의 영향이 상당한 정도로 기여하고 있음을 시사함을 알 수 있다. 따라서 수리특성을 묘사하는 모델링에 취송류에 대한 영향이 충분히 반영되어야 할 것으로 판단된다. 따라서 수동역학 모델링에서는 계절별 바람에 의한 영향을 고려하였으나, 변화하는 값을 적용하기 곤란하여 대표적인 값을 취하였다.

배수갑문의 개폐는 외해수위와 직접적으로 관련시켜 조작을 하고 있으나 내측의 수위를 조절하므로 일정한 규칙에 따라 움직이는 것이 아니고 다분히 인위적인 거동을 보인다. 한 예로 겨울철에 개폐되는 수문과 이를 통하여 외해수와 호소수의 취배수량이 그림3에 보이는 바와 같다. 그림에서 보

는 바와 같이 겨울철에는 호소 상류의 담수 유입량이 상대적으로 작아 주로 배수 갑문의 조작에 의해서만 내측의 호소수위가 유지되므로 다른 계절에 비해 매우 규칙적으로 갑문을 열고 닫으며, 이러한 규칙성은 일종의 주기를 가지는 것으로 고려

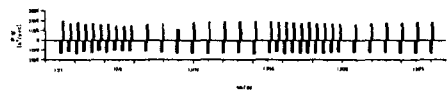


그림 3. 배수갑문 조작에 의한 취배수량

되어 모델링에 반영할 수 있다.

이러한 외적인 조건을 부여한 S호의 유동장 재현은 만족스러운 것으로 판단되며, 그 결과 중 일부가 그림4에 도시되고 있다. 대체적인 유동의 특성은 폐쇄된 하구호의 실상을 그대로 재현하고 있으며, 능동적인 순환기작이 없는 현실에서 갑문의 개폐에 의존하는 결과를 보이고 있다. 즉, S호의 순환에 영향을 미치는 것은 일차적으로 갑문의 조작에 의한 반경 5Km 내외에서의 내외수의 혼합순환과 계절적인 바람에 의한 내부에서의 순환이 주를 이룬다. 이런 수동역학적인 특성은 이어지는 수질모의에도 직접적으로 영향을 미치게 된다.

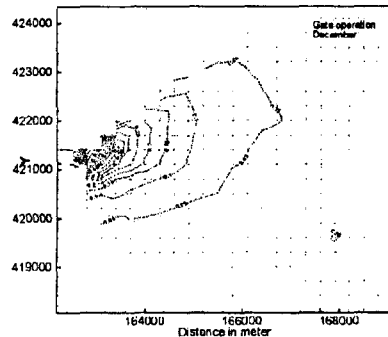


그림 4. 배수갑문부근의 유동장

3. 수동역학과 수질모델의 접합

본 연구에서 해수유동에 대한 모델로 3차원 FEM모형으로 TIDE3D 모형을 적용하였는데, 이 모형은 이미 기존의 연구(서, 1999)에서 황해 및 서해연안역에 적용되어져 3차원적인 수동역학 특성을 잘 재현한 바 있다. 그러나 적용된 모형이 유한요소 모형자체에서 질량보존을 평가(서, 2000)하는 것 이외에 해수유동

모형으로부터 얻은 유속장 결과를 ICM의 비구조화 격자로 질량보존을 만족시키며 투영시키는 방법이 필요하게 되었다. 이러한 방법은 질량보존을 충족하는 유속투영방법 (conservative velocity projection method)이라 불리우고 있다.(Chippada et al, 1997).

수동역학 모형을 통한 유속 값을 ICM에 적용할 유량으로 바꾸어 주기 위해서는 각 노드 점의 정보를 통수면 또는 셀의 값으로 보간 해주는 과정을 갖는다. FEM 기법을 적용한 모형에서의 해수유동 계산 결과는 다음 그림과 같은 한 셀에 대한 각 노드 점 (1~8)에서 유속이 주어지고 표층에 있는 셀이라면 노드(1~4)에서 수면변위가 주어지게 되어 있고, ICM모형에서는 통수면에서의 유량만을 받도록 되어 있다. 따라서

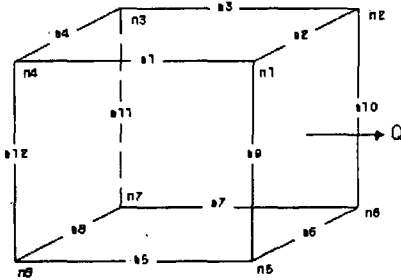


그림 5. 셀이 가지는 각 요소

ICM은 총 세 가지 형태의 해수유동 결과를 입력으로 받게 되어있는데, 하나는 간단한 BOX 모델 수준의 모의를 하기 위한 ASCII 형태의 입력파일과, 많은 격자 및 장기간 모의를 위한 Binary 형태의 입력파일이 있으며, Binary 형태의 입력은 또 다시 2차원 모의를 위한 수심 평균된 형태와 3차원 모의를 위한 형태로 나눠서 할 수 있도록 되어 있다.

수면변위에 대한 변화는 수동역학 입력 파일이 ASCII형태일 경우 전혀 반영되지 않으며, binary일 경우는 한 셀에서의 들어오는 유량과 나가는 유량의 나머지에 의해 변화되는 체적을 ICM내부에서 계산하도록 되어 있고, 표층에서만 각 셀의 체적을 수동역학 파일을 통해 바꾸어주도록 되어 있다.

유량의 계산은 수평방향과 수직방향의 계산이 서로 다른데, 본 연구에서는 수평방향의 유량을 다음과 같이 유한요소의 보간방법을 도입하여 통수면에서의 유량 플럭스에 가중치를 두어 계산하는 기법을 사용하였다. (서승원, 2000)

$$Q_f = \frac{l_e}{6} (2H_1 v_{n1} + H_1 v_{n2} + H_2 v_{n1} + 2H_2 v_{n2})$$

여기서, Q_f : 통수면에서의 유량

l_e : 통수면의 평균 선분 길이

H : 마주한 두 노드 점 1,2에서의 수위

v_{n1} : 마주한 두 노드 점 1,2에서 통수면에 연직된 유속 성분

수직방향 유속은 표면적이 수심에 비해 매우 넓다는 가정 하에 통수면의 4 노드점의 수심방향 유속 성분 w 를 평균취한 값에 통수면적을 곱한 값을 사용하였다. 그 후 유량에서 발생하는 오차가 해수유동의 결과와 비교하여 그 수면변위의 값에서 일정범위를 넘어설 경우에 한하여, 한 셀이 가지는 여섯 면의 통수면 중에서 가장 큰 유량을 가지는 통수면의 값을 보정해주는 방법을 사용한다.

유량을 보정하는 방법은 다음과 같다.

$$Q_{\max} = Q_{\max} - Q_{err}$$

여기서, Q_{\max} 는 6개의 통수면 중 가장 큰 유량을 갖는 통수면의 유량이며, Q_{err} 은 체적변호 산정시 생성된 오차 즉 유량의 총합을 뜻한다. 일반적으로 조석의 영향으로 인한 수면변위가 수 cm에 불과한 본 영역에서는 그 합이 0에 가까워야 한다고 가정하고, 보정은 체적의 변화량이 해수유동의 결과를 통해 기산된 수면변위를 넘는 해당 셀에 대해서만 적용토록 하였다. 그 이유는 체적의 변화가 심한 셀이 갑문 부근의 일부로 한정되어 있기 때문이며, 이러한 불균산정을 모든 셀을 통해 해결 경우 unstructured grid의 특징상 오차가 순차적으로 누적되어 전혀 예상치 않은 결과를 도출하는 경우가 상당 수 있었기 때문이다. 체적의 산정을 전체 공간에 대해 다시 한다는 것은 결국 모델 내에 해수유동을 다시 삽입하는 것과 다르지 않으므로, 현재의 연구방향과는 차이가 있으며, 차후 이런 문제의 해결을 위해서는 불균의 재산정보다는 해수유동을 모델 내에 삽입하는 방향으로 하는 것이 바람직하다고 생각된다.

4. 장기간의 수질모의

4.1 모델 개요

본 연구에서 이용하는 수질모델인 CE-QUAL-ICM

(Corps Engineering Quality Integrated Compartment Model)은 U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station (CEWES)에서 Chesapeake에 적용 (Cercio and Cole 1994,1995)하여 개발된 3차원 수질 모형으로서 3차원 유동모형과 연계하여 수행되고 있다. 외해와 하천을 연결하는 하구에 대해서 적용토록 설계되었지만, 수질모형 내부에서는 해수유동을 계산하지 않고 외부의 해수유동모형의 결과로부터 유량, 확산계수 그리고 계산되는 cell 체적을 입력 받는다.

CE-QUAL-ICM은 (이하 ICM) 3차원 또는 2차원의 비구조화 격자(unstructured grid)로 즉, 각 Cell(또는 Box)과 서로 인접한 Cell사이에 생기는 통수면(flow face)에서 유출율과 반응으로 정의된다. 결국 Cell과 Cell사이의 상대적인 위치는 비교적 중요하지 않은 반면 통수면과 통수면에 인접한 Cell의 정보가 중요하다고 할 수 있다. ICM의 상세한 기술은 본 고에서는 생략한다.

S호의 평균수심은 4.5m이며 최대 17.9m의 깊이를

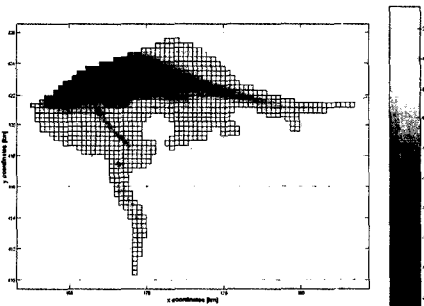


그림 6. 수심과 격자체계

가지고 있다. S호를 수치적으로 이산화하기 위해 격자(Box)는 유한요소모형과 연계되도록 설계되었지만 비정규격자를 이용하는 수동역학모델과 수질모델의 원활한 집합을 위해 수평방향으로는 300m x 300m의 일정한 형태로 총2739개로 구성하였으며, 수직적으로 3개층의 σ 좌표계로 구성하였다.

4.2 계산결과 및 토의

앞서 제시한 방법에 따라 수질을 모의한 결과 중 일부를 제시하고 이에 대한 평가를 실시한다.

실험적으로 수행된 일년간의 장기간 수질모의결과 중에서 제시된 인산염에 대한 결과를 분석하면 수치모의 초기인 10일간은 초기 조건의 영향에 따라 상류의 오염유입원 부근에서만 농도확산이 나타나고

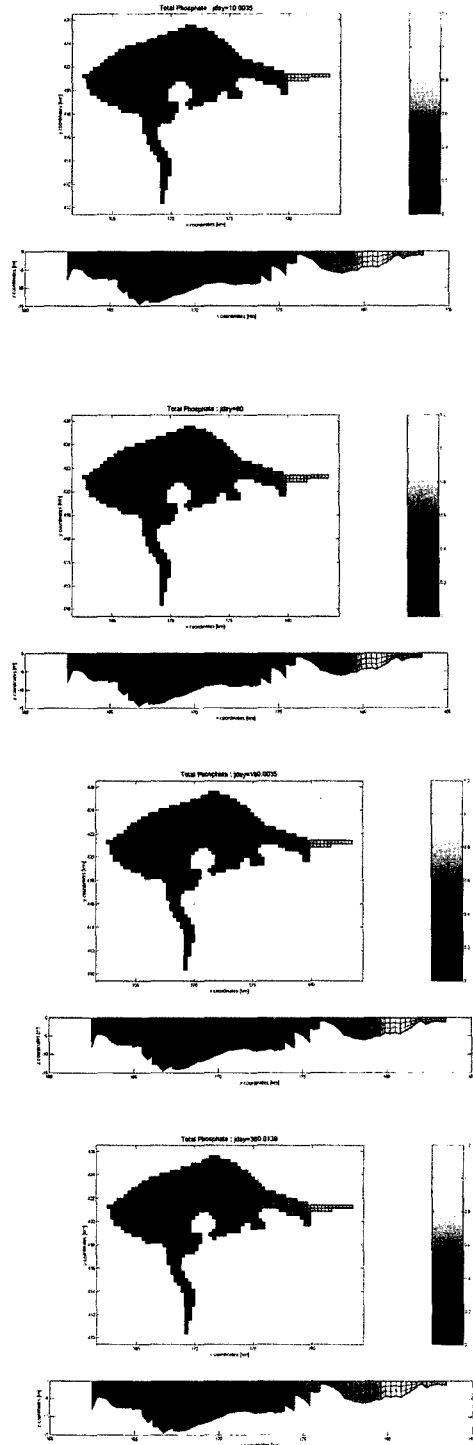


그림 7. S호의 총인 농도 모의 결과

이러한 경향은 연직방향으로도 충분히 혼합되어 하천 유입구 일부에서만 영향을 받는 것을 알 수 있다. 그러나 수동역학적인 동일한 상태하에서 모의 시간이 경과되면서 90일이 경과되면 호내의 전영역에 대해 균등한 분포를 보인 후 갑문 주위에서는 외해와의 해수 유통에 기인되어 국지적인 변화만을 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 계산이 진행되면서 이러한 경향은 크게 변화되지 않으며, 6개월이 경과된 이후에는 거의 변화양상이 비슷하게 나타난다. 즉, 폐쇄된 호내의 수동역학적 기작이 갑문과 상류의 하천수 유입에 의해서만 이루어지므로 계산이 진행되어도 안정화된 분포를 보인다. 다른 수질 항목에 대한 것도 유사한 경향을 보이고 있으며, 계산초기에 부여된 호소내의 수질에 대한 초기조건과 외해의 경계조건에 의한 영향은 최소한 30일간 수치적으로 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 이처럼 오랜시간에 걸쳐 초기조건이 영향을 미치고 있으므로 이러한 초기조건의 영향을 제거할 수 있는 최소 3개월간의 수질예측이 필요한 것으로 판단된다. 그러나 장기간의 수질모의에 있어서 시간적으로 변화되는 오염부하의 유입과 하천수의 유입 등 실시간으로 그 변화되는 조건이 모의에 반영되지 않아 다소 현실성이 떨어질 수는 있지만, 계절적으로 변화되는 특성을 재현하는 데는 만족스럽게 이용될 수 있는 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서 이산화한 공간적인 영역내에서 3차원의 수동역학 및 수질 모형을 이용한 계산시간도 개인용 컴퓨터에서 만족스럽게 실시할 수 있어 유용한 수질관리의 도구로 이용될 수 있음을 시사한다.

5. 결론

인공적인 방조제로 외해와 차단된 폐쇄된 하구호의 1년 이상의 장기간에 걸친 수질모의를 위해 3차원의 수동역학 모형과 수질모형이 적용되었다. 수동역학적 변화는 배수갑문의 조작을 효과적으로 표현하도록 변환되었으며, 폐쇄된 하구호 내의 순환에 직접적인 영향을 미치는 배수 갑문을 통한 해수의 유출입은 내외수의 혼합에는 크게 기여하지 못함을 알 수 있었다. 그러나 수표면에 영향을 미치는 계절적인 바람의 응력은 내부 순환에 바로 영향을 끼치는 것으로 분석되지만 장기간의 수동역학적 모의에 모든 사항에 대해 고려하는 것은 현실적으로 어렵다. 따라서 대표적인 상황으로 고려하여 외적인 구동력으로 취하는 것이 타당하다. 수질을 모의하는 수치모형은 기본적으로 제한체적 내에서 질량 보존을 완벽하게 표현하는 유한

체적법에 의해 전개되었으며 외부로부터의 수동역학적 모델과 접합하도록 설계되어 있지만, 본 연구에서 취한 수동역학모델은 질량보존이 완벽치 않은 유한요소법을 이산화 방법으로 취하므로써 이들 두 방법의 원활한 접합을 위한 심도 있는 시도가 있었다. 계산이 이루어지는 단위요소의 경계를 통한 유출입의 균형을 이루도록 조치되는 새로운 시도를 통하여 상이한 모델의 접합을 효과적으로 수행하였다. 1년여에 걸친 수질모의 결과 초기조건과 외적인 강제조건에 의한 영향은 계산이 시작된 30일간 정도 지속되지만 90일이 경과되면서부터는 초기조건에 의한 영향이 거의 미치지 않는 안정화된 상태에서의 수질반응 기작이 연속적으로 모의되는 것으로 나타났다. 따라서 계절적으로 변화되는 외해수와의 교환과 오염부하 등을 적절히 반영할 수 있다면, 폐쇄된 호소내의 장기간에 걸친 수질모의를 매우 만족스럽게 진행할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본연구는 지역협력 연구센터인 새만금환경연구센터(SERC), 해양수산부 해양한국발전프로그램(KSGP) 및 한국수자원공사의 지원에 의해 수행되었기에 심심한 감사의 뜻을 전한다.

참고문헌

- Cerco, C., and Cole, T., 1994. Three-dimensional eutrophication model of Chesapeake Bay. Technical Report EL-94-4, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Cerco, C.F., 1995: Simulation of long-term trends in Chesapeake Bay eutrophication, *Journal of Environmental Engineering*, vol. 121(4), p. 298-310.
- Chippada, C., Dawson, C., Parr, V.J., Wheeler, M.F., Cerco, C., Bunch, B., and Noel, M., 1998. A Parallel Water Quality Model Based on CE-QUAL-ICM, CEWES MSRC PET Technical Report 98-10, Vicksburg, MS, March.
- Chippada, S., Dawson, C.N., Martinez, M.L., and Heeler, M.F., 1997. A projection Method for Constructing A Mass Conservative Velocity Field. TICAM Report 97-09, University of Texas at Austin.
- Suh, S.W., 1999. Tidal hydrodynamic analysis for the yellow Sea and East China Sea by using a three-dimensional finite element model. *KSCE*,

19, pp.375-387.

Suh, S.W., 2000. Evaluation of Mass Balance in Hydrodynamic Simulation Using Finite Element Model. *KSCE*, 20, pp.305-315.

Wheeler. M., and Saltz. J., 1999. Multi-Component Models for Energy and the Environment, NPACI enVision, Vol. 15., No.4.