

금강하구둑 건설로 인한 조석체계 변화모의

서 승 원¹⁾

1. 서론

금강하구는 복잡한 지형적 변화 및 천해특성에 기인된 조석의 현상이 뚜렷이 나타나는 곳인데, 금강하구둑의 건설로 이 일대에 조석체계의 변화가 예견되어 왔다. 그 중에서 하구둑 건설전의 조석 전파를 해석한 최 및 안(1985)의 해석과 하구둑에 의한 조석체계의 변화를 예측한 최 및 오(1987)의 연구결과가 있는데, 이 연구들에서는 1차원의 동수역학 모형을 이용하여 조석체계의 변화를 초기 추정한 바 있다. 그리고 소류사 이동 기작을 정상적으로 밝히기 위한 연구로서 2차원 모형을 적용한 최(1988)의 비선형 조석현상 해석이 있다.

1차원 동수역학모형을 이용하여 장항과 오식도를 잇는 하구를 개방경계로 취하고, 종방향으로 매 1 km마다 격자체계를 구성하여 해석한 최 와 오 (1987)의 하구둑 영향 초기추정 결과는, 하구둑의 건설로 주요분조인 M_2 , S_2 , K_1 , O_1 의 경우는 진폭이 증가되는 확폭 현상이 현저히 나타나 M_2 분조는 208.4cm에서 215.7cm로 7cm의 증폭, S_2 분조는 74.5cm 에서 80.2cm로 6cm의 확폭이 예견되었다. 이러한 결과는 기존에 하구둑이 건설된 영산강의 조석을 하구둑 건설 전·후로 구분하여 분석한 연구인 최(1984)의 결과에서도 나타난 바와 같이 기존 조석체계가 하구둑 건설로 인하여, 실제 확폭되어 나타난 것과 비교한 바 그 영향은 대체로 일치한다.

그러나 연구자들이 지적한 바와 같이 개방경계의 설정이 해석 대상과 그리 멀지 않은 곳에 설정되어, 이로 인한 수치적 영향과 1차원 모형을 적용한 제한성 등에 기인되어 그 결과의 신뢰성은 다소 의문시 되었었다.

정상적으로나마 하구둑 건설에 따른 영향을 예측한 이 결과들은 일반적으로 조위상승에 따른 위험성을 예견할 수 있게 하는데, 조위상승은 곧바로 하구역에 위치한 도시하수의 배수갑문의 기능을 저하시켜 홍수시에 고조위의 상승으로 침수구역이 확대되는 피해를 나타내기도 하고, 인근에 축조된 연안구조물의 안정성 저하를 야기시키기도 한다. 따라서 인위적인 공사의 영향을 사전에 보다 면밀히 파악함으로써 부정적인 영향을 최소화하도록 하여야 할 것이다.

금강하구둑 공사가 완공된 이후 그 동안 줄곧 수문의 폐쇄가 이루어지지 못하고 계속 개방되어 자유로운 유통이 되다가 1994년 8월 31일 비로소 수문이 폐쇄되어 완전한 체질이 된 바 있어 본 연구에서는 이러한 금강하구 수문 폐쇄 전후의 조석체계의 변화를 매시간 실측된 군산 내항 및 외항의 검조소 자료를 바탕으로 분석 비교 하므로써 기존 연구에서 추론하였던 결과와 비교하고 또 다른 한편으로는 2차원 동수역학 모형을 금강 하구를 포함한 고군산 일대 해역에 적용하여 공사로 인한 조류 변화의 현상을 밝히고자 한다.

그러나 현재의 연구는 제한적으로 수행되어 수문 개폐 전후의 6개월씩 12개월간의 자료를 분석하였고, 2차원 동수역학 모형에서는 주요분조로써 M_2 , S_2 , K_1 , O_1 의 4개 분조만 고려되었다.

1) 군산대학교 공과대학 해양공학과

2. 조화분석

2.1 검조자료 획득 및 분석

군산 내항 및 외항에 위치한 검조소는 1994년 초부터 자동 검조시스템을 도입하여 운영하고 있는데 매분 단위의 측정된 자료가 자동으로 저장되고 있다. 이렇게 저장된 자료는 수로국의 각 사무소에 설치된 computer와 modem을 통하여 해당 검조소에 접속한 후 자료를 전송 받게된다. 수신된 자료는 여러 단계의 변화과정을 거쳐 처리되어 일별 및 월별의 자료로 편집되는데, 본 연구에서는 월별 처리된 검조 자료로 1994년 3월 ~ 1995년 2월까지 12개월간의 매시간 자료를 수집하여 이용하였다.

이 기간은 금강하구 수문을 닫기전 6개월, 닫은 후 6개월이 포함되어, 인위적인 하구 유수의 변화가 확연히 나타난다. 조석자료의 조화분석에 적용한 프로그램은 Canada 해양 연구소의 Foreman(1977)이 발표한 package를 이용하였다.

2.2 조화분석 자료의 비교 검토

전술한 방법에 의하여 군산내항과 외항에 대한 조화 분석한 결과를 표 1과 2에 각각 수록하였다. 여기서 진폭은 cm 단위로 표시하였고, 위상각은 Greenwich 기준 지각이다.

표1. 금강하구둑 개폐에 따른 군산내항의 조석 조화분석

분조 \ 조위변화	수문개방 (94.8.31.이전)		수문닫음 (94.9.1. 이후)		확폭(cm)
	진폭(cm)	지각(deg)	진폭(cm)	지각(deg)	
M_2	212	127	228	123	+16
S_2	75	186	87	177	+12
K_1	34	299	33	299	- 1
O_1	25	258	25	262	-

표2. 금강하구둑 개폐에 따른 군산외항의 조석 조화분석

분조 \ 조위변화	수문개방 (94.8.31.이전)		수문닫음 (94.9.1. 이후)		확폭(cm)
	진폭(cm)	지각(deg)	진폭(cm)	지각(deg)	
M_2	220	118	224	117	+ 4
S_2	82	174	87	169	+ 5
K_1	36	294	35	297	- 1
O_1	26	256	26	259	-

상기 분석결과를 비교하면 금강하구 수문 폐쇄로 인하여 반일 주조인 M_2 및 S_2 분조에 대해 군산 외항은 각각 4cm 및 5cm의 진폭의 증가가 유발되었고, 군산 내항은 더욱 크게 확폭되어 16cm 및 12cm의 증가로 나타났다. 일주조인 K_1 분조에 대해서는 진폭이 1cm 낮게 났으나 O_1 분조는 진폭의 변동이 거의 없는 것으로 나타났다.

이와 같은 폐쇄하구로 변화게된 인위적 영향에 따라 진폭의 증가는 1차원 동수역학 모형을 이용하여 금강하구둑의 영향을 초기 추정하고 예측하였던 최 및 오(1987)의 결과에 따르면 하구둑 전면에서 M_2 및 S_2 분조의 증폭은 7 cm 및 6 cm로 예측되었고, K_1 및 O_1 분조는 거의 변화가 없었던 것으로 기록되었다.

따라서 최 (1987)의 연구결과는 하구둑 건설의 영향을 정성적으로는 예측하였으나 1차원 모형

의 제한된 모형적용 및 너무 근접한 외해 개방경계의 설정 등으로 정량적으로는 미흡하게 예측하였다. 물론 근래에 금강하구 일대에서 준설 및 도류제 공사, 호안 및 새만금 간척 공사등의 추가적인 인위적 영향도 현재 상태의 조석 변화를 일으키는 인자로 작용하여 실제적으로 매우 복잡하게 진폭 및 지각의 변화가 나타났을 것으로 추정된다.

3. 조류변화 해석

금강 하구둑의 영향으로 인한 일대 하구의 조류 변화를 예측하고 금강하구 일대의 각종공사로 인한 인위적 영향을 분석하기 위하여 2차원 유한요소 동수역학 모형을 적용하여 해석한다.

3.1 2차원 비선형 동수역학모형

조류운동을 묘사하는 지배방정식은 수심평균화된 형태의 Navier-Stokes 방정식으로서 연속식과 운동량식은 다음과 같은데 비선형 항들을 우변으로 놓고, 선형의 마찰항을 운동량식의 양변에 고려하면 다음의 비선형 천수방정식을 얻게된다. (Baptista et al., 1989)

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = -\frac{\partial(un)}{\partial x} - \frac{\partial(vn)}{\partial y}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} - fv + \lambda u = \left[\lambda - c_f \frac{\sqrt{(u^2+v^2)}}{h+\eta} \right] u - (u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + fu + \lambda v = \left[\lambda - c_f \frac{\sqrt{(u^2+v^2)}}{h+\eta} \right] v - (u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y})$$

여기서 η 는 평균해면으로부터의 수면변위(L), h 는 평균해면에서 해저까지의 수심(L), u, v 는 x, y 방향의 유속성분(L/T), g 는 중력가속도(L/T²), f 는 Coriolis 인자(T-1), c_f 는 해저마찰계수 그리고 λ 는 선형화된 마찰인자 이다.

위의 식으로 주어지는 조류운동에 관한 기본방정식은 경계에서의 조위 혹은 외적 강제함수가 주기적이라고 가정하면 조위, 유속도 주기적으로 간주된다. 즉, $\eta(x, y, t) = Re\{\hat{\eta}(x, y)e^{i\omega t}\}$, $u(x, y, t) = Re\{\hat{u}(x, y)e^{i\omega t}\}$, $v(x, y, t) = Re\{\hat{v}(x, y)e^{i\omega t}\}$.

여기서 $\hat{\eta}$ 는 조위의 복소수 진폭을 나타내고, \hat{u} , \hat{v} 는 조류속의 복소수 진폭을 의미하며, $i = \sqrt{-1}$ 이고, ω 는 조석 분조의 각속도를 의미한다. 조화함수 형태의 천수방정식은 더이상 시간 의존항이 있지 않은 단순한 식으로 표현된다.

3.1 유한요소식 구성

위의 식에 대하여 Galerkin의 가중잔차 방법을 적용하는데, 공간 미분항들에 대한 부분적분을 한후 Gauss 정리와 경계조건을 대입하고 비선형항들을 우변으로 정리하면 가중잔차식이 구성된다. 모든 비선형항들은 모두 우변으로 한데 묶어 정리하여 반복 계산에 의해 연속적으로 새로운 값으로 치환될 수 있도록 하였다.

가중함수의 임의성을 고려하여 전영역에 관하여 조합하면 아래의 유한요소식을 얻게 된다.

$$i\omega \mathbf{M}_\eta \hat{\boldsymbol{\eta}} - \mathbf{D} \hat{\mathbf{U}} = \hat{\mathbf{P}}_\eta^{\text{lin}} + \hat{\mathbf{P}}_\eta^{\text{nl}}$$

$$i\omega \mathbf{M}_U \hat{\mathbf{U}} + \mathbf{M}_F \hat{\mathbf{U}} + \mathbf{M}_C \hat{\mathbf{U}} + \mathbf{g} \mathbf{D}^T \hat{\boldsymbol{\eta}} = \hat{\mathbf{P}}_{\Delta-\text{fric}}^{\text{nl}} - \hat{\mathbf{P}}_{\text{conv}}^{\text{nl}}$$

여기서 $\boldsymbol{\eta}$ 는 조위벡타, \mathbf{U} 는 조류속 벡타, \mathbf{D} 는 1계 미분항으로 이루어진 행렬을, \mathbf{M}_η 는 연속방정식에서의 계수행렬을, \mathbf{M}_U 는 운동량방정식에서의 질량행렬을, \mathbf{M}_F 는 선형화된 마찰행렬을, \mathbf{M}_C 는 Coriolis 행렬을, $\hat{\mathbf{P}}_\eta^{\text{lin}}$ 는 유출입이 고려된 경계의 벡타, $\hat{\mathbf{P}}_\eta^{\text{nl}}$ 는 연속방정식의 유한진폭항등의 비선형이 고려된 벡타, $\hat{\mathbf{P}}_{\Delta-\text{fric}}^{\text{nl}}$ 는 운동량방정식내에서 선형화된 마찰과 비선형 마찰과의 차이를 나타내는 벡타를 $\hat{\mathbf{P}}_{\text{conv}}^{\text{nl}}$ 는 이송가속 영향을 나타내는 벡타를 의미한다.

이처럼 비선형항이 기본방정식의 우변으로 정리되었고, 이러한 조화벡타항은 반복계산에 의해 구해지는데 먼저 계산된 값이 새것으로 치환된다. 풀이과정은 먼저 비선형을 무시한 상태에서 선형의 모델로 간주하여 해를 구한다. 다음단계는 선형모델로부터 구해지는 해를 이용해서 시간적으로 연관된 비선형벡타인 $\hat{\mathbf{P}}_\eta^{\text{nl}}(t)$, $\hat{\mathbf{P}}_{\Delta-\text{fric}}^{\text{nl}}(t)$, $\hat{\mathbf{P}}_{\text{conv}}^{\text{nl}}(t)$ 를 구한다. 이들 시간의존 비선형항들은 근사적으로 여러개의 조화급수로 표현가능하므로 최소자승 조화분해법에 의해 일련의 분조들로 표현될 수 있다. 따라서 최종적인 해는 이들 분조들에 대해 수렴이 될때까지 반복적으로 계산하여 구한다. (Westerink et. al., 1988)

3.3 FEM 이산화 및 경계조건

연구대상해역은 그림 1과 같이 매우 복잡한 지형으로 여기에서 상세 조류 해석을 하기 위해서는 불규칙한 지형을 적절히 표현하도록 이산화가 되어야 한다.

그림 2에는 수문을 닫은 후의 이산화가 도시되고 있다. 이때에 이산화된 총 요소수와 절점수는 2311과 1344이다. 조류 해석을 위한 수치모형에는 M_2, S_2, K_1, O_1 의 4개 분조의 조위 및 위상각이 그림에 보이는 4개의 모서리에 개방경계치로 입력 되었다. 이때 위상각은 동경 135°를 기준으로 한 값이고 좌상과 좌하에서의 조위값은 전후의 새만금 해역에 관한 해수유동 연구(서, 1994)에서 계산된 값을 추출하여 입력하였다. 해저·마찰에 영향을 미치는 영향을 고려하기 위한 계수로 0.002 ~ 0.004의 값을 적용하였다.

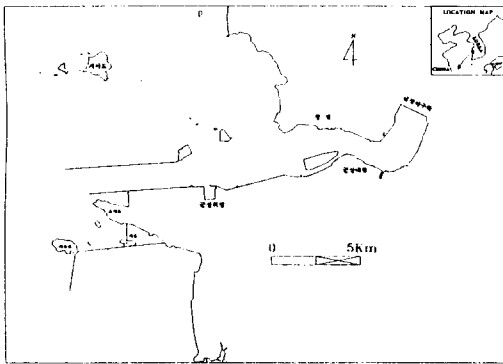


그림 1. 대상해역의 위치도

3.4 수치실험결과

금강하구둑의 수문개폐의 영향을 해석하기 위하여 금강하구역 일대를 포함한 새만금해역에 대한 이산화를 실시하였다. 그림 2에는 수문을 닫은 이후의 현재(95년 12월)상태에 대한 이산화가 도시되고 있고, 그림 3과 4는 앞서 기술한 2차원 동수역학 조석모형을 이용하여 해수유동을 모의

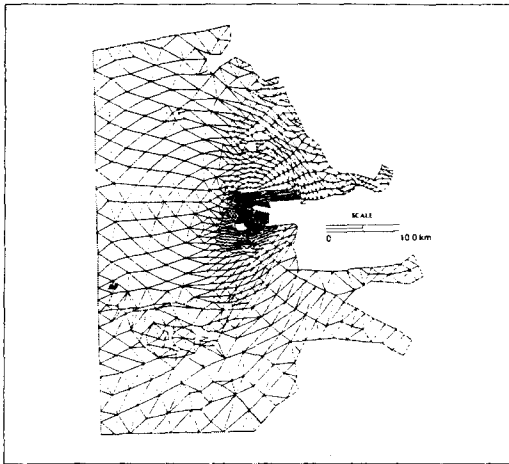


그림 2. 수문폐쇄된 현재상태의 이산화

한 결과중 특징적으로 대조시의 창조와 낙조시의 유동장을 표현하고 있다. 본고에는 수록되지 않았지만 과거상황에 대한 이산화, 유동장 그리고 실측유속과의 비교도 수행되었다. 수치모형에 의한 결과를 관측한 유속과 비교하여 매우 만족스러운 결과가 도출되어 모형의 신뢰성을 인정케 한다. 본 모형에 의하여 산출된 조석을 하구둑 수문개방과 폐쇄로 나누어 비교하여 표 3에 수록하였다.

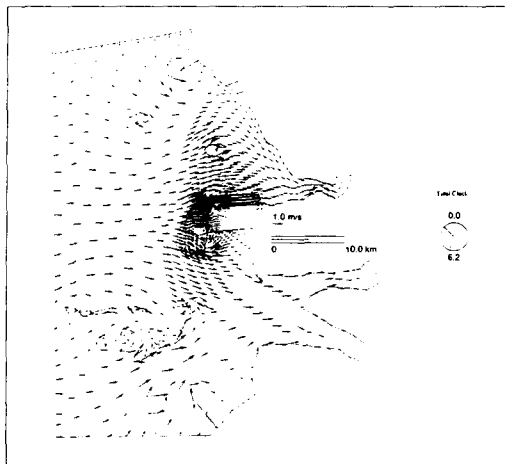


그림 3. 현재상태의 대조 창조시 유동장

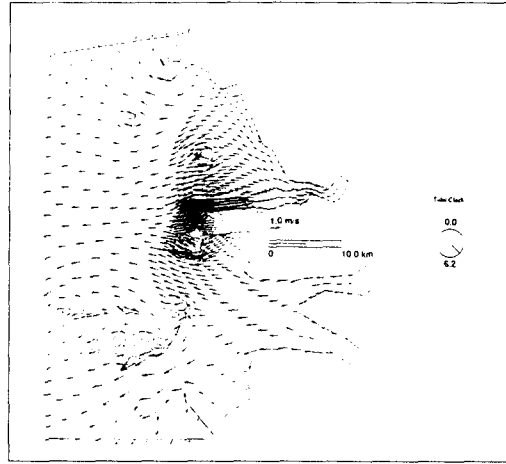


그림 4. 현재상태의 대조 낙조시 유동장

표 3. 2차원 동수역화모형에 의한 조석변화 예측결과

분조	조위변화	군산내항 조위(cm)		군산외항 조위(cm)	
		수문개방	수문폐쇄	수문개방	수문폐쇄
M ₂		211	228	219	224
S ₂		77	83	78	81
K ₁		38	37	38	37
O ₁		25	24	25	24

4. 결과분석

실시간으로 관측된 조석자료를 조화 분해하여 금강하구둑 수문의 개폐영향을 살펴본 결과, 수문의 닫음으로 인하여 군산내항에서의 조위는 대조시에 28cm 상승하고, 군산외항에서는 9cm 상승되는 것으로 나타났다. 2차원 동수역학모형에 의한 결과도 상응되는 결과를 제공하는데 역시 대조시를 기준으로 살펴보면, 내항에서는 23cm, 외항에서는 8cm 가 수문의 폐쇄로 인하여 조위상승이 유발되는 것으로 해석되었다. 실제 자료를 분석한 것과는 다소 크기가 작게 나타났지만, 본 동수역학모형에 의한 결과로 만족스럽게 조석 및 조류의 변화를 예측할 수 있는 것으로 인식된다.

본 연구의 결과는 기존에 1차원 동수역학모형을 이용하여 하구둑의 영향을 초기 추정한 대조시 13cm 보다 2차원 모형에서는 10cm, 실제로는 15cm 상승된 결과를 보임으로써 본 연구에 이용된 2차원 모형이 보다 현실적으로 인위적인 영향에 의한 조석 및 조류의 변화를 예측가능케하는 것으로 판단된다.

5. 결론

금강하구둑의 건설로 인한 조석체계의 변화를 실시간 관측한 조석자료로부터 조화분해하고 2차원 동수역학모형을 이용하여 해석한 결과 군산내항에서는 과거보다 대조시에 23 - 28cm, 외항에서는 8 - 9cm의 조위상승이 나타남이 확인되었다. 이러한 결과는 실제 수문의 개폐가 이루어지기 전에 1차원 모형을 이용하여 예측되었던 결과보다는 큰 것으로 군산항 일대 구조물에 대하여 조위상승에 따른 심도 있는 공학적인 평가를 요구한다. 본 연구에 이용된 2차원 유한요소 동수역학모형이 정량적으로 만족스럽게 조석, 조류의 변화를 파악할 수 있었다.

6. 참고문헌

- 서승원, 1994, “방조제 축조 영향해석에서의 유한요소모형”, 한국해양-해양공학회지 6권2호, 196-204.
- 최병호, 1984, “영산강하구의 방조제 건설에 따른 조위변화, 대한토목학회논문집, 4권 2호, 113-124
- 최병호·안원식, 1985, “금강 감조구간의 조석전파”, 한국수문학회지, 18권 1호, 67-73.
- 최병호·오윤근, 1987, “금강하구둑에 의한 조석변화의 초기추정”, 한국수문학회지, 20권 2호, 161-168.
- 최병호, 1988, “금강하구의 비선형조석”, 한국수문학회지, 21권 1호, 87-93.
- Baptista,A.M., Westerink,J.J. and Turner,P.J., 1889, Tides in the English Channel and Southern North Sea. A frequency domain analysis using model TEA-NL, Adv. Water Resources, 12 : 166~183.
- Foreman, M.G.G., 1977, "Manual for tidal heights analysis and prediction", Pacific Marine Science Report 77-10, Institute of ocean Science, British Columbia, 101p.
- Westerink,J.J., et al., 1988, A frequency-time domain finite element model for tidal circulation based on the least-squares harmonic analysis method, *Int. J. Numerical Methods in Fluids*, 8(7) : 813~843.