

錦江河口域의 水動力學的 變化 (2) - 數值實驗을 中心으로 -

Hydrodynamic Changes in the Keum River Estuary (2)

- By Numerical Model Tests -

서 승 원*

Seung Won Suh*

要 旨 : 금강하구에서 대규모 공사의 영향으로 인한 수동역학적 변화를 해석하기 위하여, 2차원 유한요소 수동 역학모형을 적용하였다. 수치모형을 조석과 조류변화 해석에 적용한 결과 금강하구둑의 수문이 열렸을 때와 닫혔을 때는 조석체계가 급격히 변화되어 M_2 , S_2 분조가 각각 군산내항에서 17 cm 및 6 cm 확폭되고, 군산외항에서는 5 cm 및 3 cm 확폭되는 것을 알 수 있었다. 연차별 단계별로 진척되는 공사로 인한 조류와 해저 퇴적성향의 변화 결과는 도류제 축조로 조류속이 증가되는 것이 뚜렷하게 나타났으며, 금강하구역의 동적평형을 이루는 해저마찰 응력은 0.4 N/m^2 로 분석되었다. 일대해역의 퇴적을 R 은 최대마찰응력 τ 와 상관관이 있으며 $R=0.37-0.40 \ln \tau$ 의 관계로 설명된다.

핵심용어 : 유한요소모형, 조석확폭, 동적평형, 해저마찰응력

Abstract □ In order to find out hydrodynamic changes due to huge complex constructions in the Keum River Estuary, two-dimensional finite element model is applied. Model results show that gate closing of the estuary dam yields tide amplifications at Kunsan Inner Port to 17 cm and 6 cm of M_2 and S_2 , while 5 cm and 3 cm of amplification at Kunsan Outer Port. Tidal currents in the main channel due to stepwise flow-guide dikes construction have been simulated and show that dynamic equilibrium bottom shear stress is 0.4 N/m^2 on this Keum River Estuary. Sedimentation rates R have correlation with maximum bottom shear stress τ , $R=0.37-0.40 \ln \tau$.

Keywords : finite element model, tide amplification, dynamic equilibrium, bottom shear stress

1. 서 론

본 연구는 실제 관측을 통하여 고찰한 금강하구에서 다양한 공사로 인하여 발생된 수동역학적 변화연구(서, 1998)에 이어서 수치모형을 통하여 비교 고찰하기 위하여 수행되었다. 2년여에 걸쳐서 관측된 해수유동과 수심의 변화는 지역적으로 뚜렷한 수동역학적 변화상을 나타내는 것으로 보고되는데, 수치모형에서도 이와 같은 변화가 재현되고 장래의 변화되는 외적인 인자가 직간접적으로 유동장과 해저의 퇴적환경에 영향을 끼치는 지를 파악하는 것이 대규모 공사로 인한 금강하구역의 수동역학을 이해하는데 있어서 매우 중요

하다고 할 수 있다.

관측된 자료를 분석한 결과(서, 1998)에 의하면 국지적으로 유동장의 급변이 해저 퇴적상에 지대한 영향을 미치고 있으며, 금강하구의 비용도를 중심으로 하여 축조되는 새만금4호 방조제 및 군장국가공단의 서측 호안의 배후지에서는 매우 급속한 퇴적환경이 조성되고 이와는 상이하게 북측 및 남측도류제 사이 구간인 금강하구 주수로에서는 지속적인 세굴환경이 조성됨을 알 수 있었다.

따라서 본 연구에서는 수치모형을 Fig. 1에 보이는 일대 해역에 적용하여 전회의 연구(서, 1998)에서 28개 정점에서 관측한 결과와 상호 비교하는 hindcast

*군산대학교 해양시스템학과 (Department of Ocean System, Kunsan National University, Kunsan 573-702, Korea)

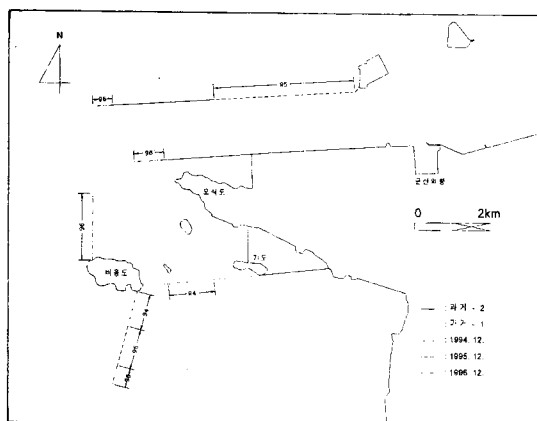


Fig. 1. Map showing study area and complex construction for the Keum River Estuary.

작업을 거쳐, 현재 상황의 유동장을 재현하는 nowcast 작업과 장래의 변화되는 영향을 고려하는 forecast 작업을 포함하도록 한다.

적용된 수치모형은 수심적분된 2차원의 모형으로서 조화유한요소모형 방법을 이용하고 있다. 수치모형의 운용과 해석에서는 금강하구둑 수문막음으로 인한 영향이 군산 내외항 일대의 조석 및 조류에 미치는 영향과 군장국가공단 조성지 주위에서의 영향이 포함되도록 하였다. 최종적으로는 본 연구에서 추론된 해저마찰용력과 금강하구역의 수심의 변화와의 상관관계를 설정함으로써 장래의 변화를 예측하고자 노력하였다.

2. 수치모형의 수립

금강하구역의 단계별 공사로 인한 수동역학적 변화를 해석하는 도구로써 2차원 수심적분의 유한요소모형을 선정하여 단계별 진척된 공사로 인한 유동장의 변화 및 퇴적환경의 변화를 파악하고자 한다. 수치모델로 고려될 수 있는 모델들중 주기적으로 변화되는 연안의 해수유동을 효과적으로 모의할 수 있고 조석의 조화합성이 용이한 모델로 조화유한요소 방법에 근거한 2차원 조화유한요소 모델을 본 연구의 해석도구로 선정하였다.

2.1 기본방정식

기본식에는 다음과 같은 가정이 고려되었다. 즉, 해수의 밀도는 일정하고, 정수압분포가 성립하며, 수평방향의 운동량분산(와점성)이 무시되고 해면에서는 압

력이 일정하다. 이와 같은 가정하에 3차원의 방정식으로부터 유도된 수심평균의 Navier-Stokes 기본방정식은 다음과 같다. 즉, 2차원의 수심 평균화된 연속식과 운동량식은 다음과 같은데 비선형 항들을 우변으로 놓고, 선형의 마찰항을 운동량식의 양변에 고려하면 식 (1)~식 (3)의 비선형 천수방정식을 얻게된다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = - \frac{\partial(u\eta)}{\partial x} - \frac{\partial(v\eta)}{\partial y} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} - f v + \lambda u =$$

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

$$\frac{\partial v}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + f u + \lambda v =$$

$$\left[\lambda - c_f \frac{\sqrt{(u^2+v^2)}}{h+\eta} \right] v - \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (3)$$

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/T^2), f 는 Coriolis 인자(T^{-1}), c_f 는 해저마찰계수 그리고 λ 는 선형화된 마찰인자이다.

위의 식 (1)~식 (3)으로 주어지는 조류운동에 관한 기본방정식은 경계에서의 조위 혹은 외적 강제함수가 주기적이라고 가정하면 조위, 유속도 주기적으로 간주된다. 즉, $\eta(x, y, t) = \text{Re}\{\hat{\eta}(x, y)e^{i\omega t}\}$, $u(x, y, t) = \text{Re}\{\hat{u}(x, y)e^{i\omega t}\}$, $v(x, y, t) = \text{Re}\{\hat{v}(x, y)e^{i\omega t}\}$

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 다음과 같이 더이상 시간 의존항이 있지 않은 단순한 식으로 표현된다.

2.2 유한요소식

기본식의 적분으로 Galerkin의 가중잔차 방법을 적용하는데, 공간 미분항들에 대한 부분적분을 한 후 Gauss 정리와 경계조건을 대입하고 비선형항들을 우변으로 정리한다. 가중잔차식내의 변수들은 요소 내에서 함수 값이 연속이 되어야 하는 최소한 C^0 연속성을 만족하는 함수로 근사화될 수 있다. 연구에 따라서는 조위에 C^0 연속성을, 유속에는 C^1 연속성을 만족하는

함수가 혼용되기도 하나, 이렇게 혼용할 특이한 이유는 없다. 계산영역내 임의의 절점에서의 미지치는 식 (4)로 표현되는데,

$$\mathbf{a}(x, y) = \boldsymbol{\phi}(x, y) \mathbf{a}^{(n)} \quad (4)$$

여기서 좌변은 미지의 변수들을 대표하고, $\boldsymbol{\phi}(x, y)$ 는 C^0 연속성을 만족하는 선형보간함수를 의미하며, $\mathbf{a}^{(n)}$ 은 변수들의 절점값을 나타낸다. 일련의 과정을 거쳐 가중함수의 임의성을 고려한 후 전영역에 관하여 조합하면 다음의 최종적인 유한요소식을 얻게 된다(서, 1993; 1994).

$$i\omega \mathbf{M}_\eta \hat{\boldsymbol{\eta}} - \mathbf{D} \hat{\mathbf{U}} = \hat{\mathbf{P}}_{\text{fric}}^{\text{int}} + \hat{\mathbf{P}}_{\text{fric}}^{\text{ext}} \quad (5)$$

$$i\omega \mathbf{M}_U \hat{\mathbf{U}} + \mathbf{M}_F \hat{\mathbf{U}} + \mathbf{M}_C \hat{\mathbf{U}} + \mathbf{g} \mathbf{D}^T \hat{\boldsymbol{\eta}} = \hat{\mathbf{P}}_{\text{fric}}^{\text{ext}} - \hat{\mathbf{P}}_{\text{conv}}^{\text{int}} \quad (6)$$

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, $\mathbf{P}_{\text{fric}}^{\text{int}}$ 는 유출입이 고려된 경계의 벡타, $\mathbf{P}_{\text{fric}}^{\text{ext}}$ 는 연속방정식의 유한진폭항등의 비선형이 고려된 벡타, $\mathbf{P}_{\text{fric}}^{\text{ext}}$ 는 운동량방정식 내에서 선형화된 마찰과 비선형 마찰과의 차이를 나타내는 벡타를 $\mathbf{P}_{\text{conv}}^{\text{int}}$ 는 이송가속 영향을 나타내는 벡타를 의미한다.

비선형항이 기본방정식의 우변으로 정리되었고, 이러한 조화벡타항은 반복계산에 의해 구해지는데 먼저 계산된 값이 새것으로 치환된다. 풀이과정은 먼저 비선형을 무시한 상태에서 선형의 모델로 간주하여 해를 구하는데 이렇게 되면 서(1993)가 비교 연구하였던 선형의 모델인 TEA로 귀착된다. 다음단계는 선형모델로부터 구해지는 해를 이용해서 시간적으로 연관된 비선형벡타인 $\mathbf{P}_{\text{fric}}^{\text{int}}(t)$, $\mathbf{P}_{\text{fric}}^{\text{ext}}(t)$, $\mathbf{P}_{\text{conv}}^{\text{int}}(t)$ 를 구한다. 이들 시간의존 비선형항들을 근사적으로 여러개의 조화급수로 표현 가능하므로 최소자승 조화분해법에 의해 일련의 분조들로 표현될 수 있다. 따라서 최종적인 해는 이들 분조들에 대해 수렴이 될 때까지 반복적으로 계산을 하여 구한다.

따라서 본 연구에서 이용한 조화조류모형은 기존의 유한차분, 유한요소법에 근거한 시간진행모형들에 비하여 시간의존성이 배제됨으로써 장기간의 조류를 용이하게 재현할 수 있는 장점이 있고, 또한 천체운동에 의하여 나타나는 조석을 관심 있는 여러 개의 분조의

조합으로써 용이하게 설명할 수 있다. 아울러 배조, 복합조등과 같은 천해조의 영향도 쉽게 포함시킬 수 있어 각각의 중첩된 복합영향을 자연스럽게 모의할 수 있는 장점이 있다. 그러나 간사지의 침출처리는 되지 않는 제한성이 있다.

2.3 기본입력자료

해수유동 모형을 구동하기 위해서는 기본적인 입력자료로서 대상해역의 지형과 수심자료가 필수적인데, 본 연구에서는 이들의 자료를 1993년에 해양조사원에서 간행한 해도 302번으로부터 Digitizer를 이용하여 자동 입력하였다.

해저지형에 대한 기본적인 수심자료 이외에 외해경계에 부여되는 조석의 진폭이나 해수의 유출입량 등이 명시되어야 한다. 즉, 외적인 강제조건으로 부여되는 자료로는 통상 외해경계의 조위와 위상각이 정의되는데 본 연구에서는 측정된 조위의 자료가 없기 때문에 본 연구해역을 포함하는 연구의 결과(서, 1994)에서 도출한 M_2 , S_2 분조의 조위 및 위상각을 입력한 결과로부터 준용하여 입력하였다. Fig. 2에는 1996년 10월 당시의 상황을 재현하기 위한 전체해역에 대한 유한요소 이산화망이 도시되고 있고, Fig. 3에는 남·북측도류제 및 군장국가공단조성 그리고 새만금 4호 방조제공사가 이루어지는 금강하구 대상해역을 확대하여 도시한 것이 표현되었다.

조석의 여러 분조 중 대표적인 분조로 주태음반일주조와 주태양반일주조가 이용된 것은 본 연구대상 해역의 조석형태수가 0.20로써 반일주조가 우세하기 때문이다. Table 1에는 대상해역의 특정 4지점 즉, 우상, 좌상, 좌하 및 우하의 각 꼭지점에서의 조위와 위상각이

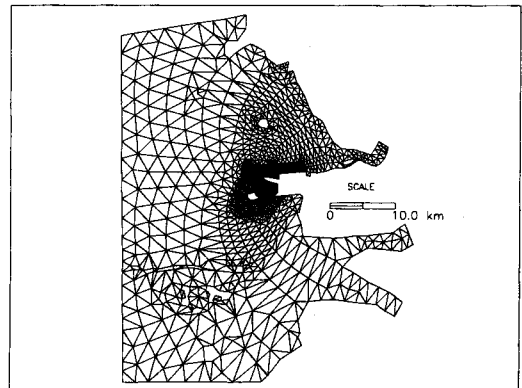


Fig. 2. Finite element meshes for entire domain.

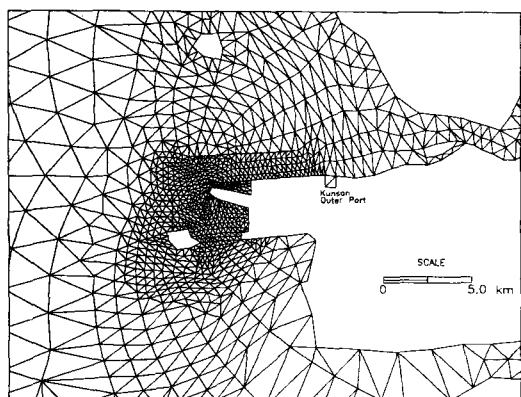


Fig. 3. Finite element meshes for the Keum River Estuary.

Table 1. Open boundary conditions applied to numerical model simulation.

Locations	M ₂		S ₂	
	Amp (cm)	Phase (rad)	Amp (cm)	Phase (rad)
Upper right	210	1.789	76	2.523
Upper left	202	1.761	72	2.548
Lower left	199	1.601	71	2.425
Lower right	221	1.711	78	2.537

동경 135도를 기준으로 하여 수록되었다. 이들 특정점 사이의 외해 개방 경계치는 보간된 값이 이용되었다.

대상해역에서 해저마찰에 영향을 미치는 조도계수는 0.0020~0.0025의 범위의 값을 사용하였다. 본 연구는 순수하게 조석의 영향에 따른 순환과 이로 인한 영향을 살펴보기 위하여 시도되었으므로 바람에 의한 순환은 연구에서 제외하였다.

3. 모형실험

3.1 조석체계 변화모의

금강하구둑 수문 닫음 영향이 인근 군산 내항과 외항의 조석에 미치는 영향을 본 연구에서 채택한 2차원

모형을 이용하여 수치 실험한 결과 Table 2와 같이 군산 내항에서는 반일주조인 M₂와 S₂ 분조의 진폭이 각각 17 cm와 6 cm 증가되었으며, 외항에서는 5 cm와 3 cm의 증가가 나타났다. 그러나 일주조는 -1 cm의 변화로 거의 변화가 없음을 나타낸다. 앞서의 연구(서, 1998)에서 기존 검조자료를 바탕으로 해석한 결과와 비교하면, 수문의 닫음으로 인하여 군산 내항에서의 조위는 대조시에 28 cm 상승하고, 군산 외항에서는 9 cm 상승되는 것으로 나타났으나 2차원 수동역학모형에 의한 결과도 상응되는 결과를 제공하는데 역시 대조시를 기준으로 살펴보면, 내항에서는 23 cm, 외항에서는 8 cm가 수문의 폐쇄로 인하여 조위상승이 유발되는 것으로 해석되었다. 실제 자료를 분석한 것과는 다소 크기가 작게 나타났지만, 본 수동역학모형에 의한 결과로 만족스러운 것으로 인식된다.

본 연구의 결과는 기존에 1차원 수동역학모형을 이용하여 하구둑의 영향을 초기 추정한 최·오(1987)가 제시하였던 대조시 13 cm에 비하여 2차원 모형에서는 23 cm, 검조기록을 조화분해한 결과는 28 cm 상승된 결과를 보임으로써 본 연구에 이용된 2차원 모형이 보다 현실적으로 인위적인 영향에 의한 조석 및 조위의 변화를 예측하는 것으로 판단된다.

3.2 공사단계별 변화모의

공사로 인하여 변화되는 오식도와 비응도 인근의 금강하구둑 해수유동과 퇴적환경변화에 관한 수치실험에서는 전술한 모형의 원리에 입각하여 과거 및 현재 그리고 미래의 상황에 대한 해수유동과 이로 인한 해저질의 변화를 모색하기 위하여 6단계로 구분하여 수치실험을 실시하였다(토지공사, 1994, 1995, 1996).

설정된 상황은 비응도와 가도사이의 호안공사가 전혀 없었던 과거-2, 가도와 비응도 사이의 호안이 축조되는 과거-1, 1994년 12월, 1995년 12월 그리고 1996년 10월 당시의 상황 및 금강하구에서의 공사가

Table 2. Changes of tidal amplitude due to gate operation of Keum River Estuary Dam by numerical simulation.

Constituents	Amplitude (cm)	Kunsan Inner Port		Kunsan Outer Port	
		Gate opened	Gate closed	Gate opened	Gate closed
M ₂		211	228	219	224
S ₂		77	83	78	81
K ₁		38	37	38	37
O ₁		25	24	25	24

완료된 미래의 상황으로 일대 해역에서 조사가 이루어진 1994년도부터 매년 말의 변화된 영향을 수치모형에서 재현하도록 노력하였다. 이 중에서 본 고에서는 1995년 및 1996년 당시 상황 재현 결과를 간략히 다룬다.

1995년도 당시의 상황은 1994년 12월에 비하여 북측도류제가 시작된 명암부터 유부도까지 연결된 점과 비응도에서 시작된 새만금 4호 방조제가 직전년도와는 2배정도 연장되어 있다. 군장국가공단 조성사업으로 비응도와 가도 사이의 호안공사가 완료된 상태이며, 항만청에서 실시하는 북측 및 남측도류제 공사가 진행 중으로 남측도류제는 오식도의 북서측 전면까지 공사가 진행된 상태로 북측도류제는 명암부터 유부도까지 사석공이 완료된 상태이다. 이로부터 1년이 경과한 1996년 10월 상황은 비응도에서 북향하는 호안축조가 진행된 것과 남측도류제가 전년에 비하여 다소 연장된 것 그리고 새만금방조제는 진척상태가 더디어 제 4호 방조제가 비응도로부터 약 2 km 진행된 상태로써 1년전에 비하여 1 km 정도 연장된 것이 1995년에 비하여 유동장의 변화를 유발하는 달라진 외적인 환경의 변화이다.

1년에 걸친 복합적인 금강하구에서의 공사에도 불구하고, 전반적인 유동장은 크게 차이가 나지 않는다. 본 연구의 대상지인 군장국가공단을 주변으로 서측으로부터 들어오는 조류가 비응도와 오식도를 중심으로 양분되어 비응도 이남은 만경강 하구로 흐르고 이북은 오식도를 돌아 군산항 수로로 향하며, 특히 도류제가 축조된 이 부근에서는 매우 강한 유속이 대조시에는 약 1.3 m/s 내외로써 1년전에 비하여 약 0.1 m/s의 증가효과를 보이고 있다. 특이점은 새만금4호 방조제가 진척되면서 방조제 끝단에서 창낙조시에 보다 강한 유동장이 형성되어 1.3 m/s 내외의 매우 강한 유동을 보이며 상대적으로 비응도와 가도를 잇는 호안 남측의 내부에는 유속이 감소됨을 알 수 있다. 이렇게 변화되는 유동장은 후술될 퇴적환경의 변화에 직접적으로 영향을 끼치게 된다.

또하나 주목할 점은 현재의 해수유동 환경이 과거와 다르게 일부 유동이 단절되면서 도류제 구간인 군산항 주수로 부근해역에 전에 보다 비하여 강한 유동장이 형성된다는 것이다. 즉, 전에 비하여 약 0.1 m/s 내지 0.3 m/s 이상의 유속증가를 유발하였으며 이 영향은 군산 내항의 수로까지도 미치는 것으로 수치실험 되었다.

3.3 실측자료와의 비교검토

본 연구에서 15일간의 연속조류관측을 95년에 2회 및 96년에 2회 실시하여 대조와 소조를 모두 포함하는 비교를 실시하였다(토지공사, 1995, 1996). 그 결과가 본 고에서는 도시되지 않았지만 비교 결과 유향 및 유속 모두 관측치와 실험치가 잘 일치된다. 수치실험에 의한 결과도 도류제 구간에서는 동서방향의 왕복성 조류가 우세하고 평균대조시에 최강조류가 1.1 m/s에 다르므로 모의되어 관측된 값과 잘 일치된다.

도류제의 서측입구에서 동절기에 20일간 관측된 연속조류벡터와 수치실험치가 대체로 잘 일치하고, 수치실험에 의한 유속이 약간 크게 산정 되었다. 유향도 관측치는 거의가 동서방향이나 계산에 의한 유향은 약 10도 가량 편향된 결과를 보인다.

3.4 유동변화

수치실험조건으로 설정한 상황별 변화를 공사가 진행되는 인근해역에 대해 살펴본 바와 같이 유동의 변화는 금강하구에서 진행되는 호안 축조공사로 인하여 현격히 나타났고, 유속의 크기뿐만 아니라 급격한 유향의 변화를 초래하였다. 과거-2 상황에서 과거-1 상황으로 공사가 진행되면서 그리고 1994년과 1995년 및 1996년 당시의 상태로 이어지면서 군장국가공단 조성지는 폐쇄된 만으로 변하게 되어 퇴적환경이 조성되는 반면, 외곽지는 유속의 증가를 초래하게 된다. 즉, 도류제가 설치된 군산항 주수로의 유속은 공사가 진전되면서 과거에 비하여 최대 유속의 증가가 0.2~0.3 m/s 정도 증가되었다. 이러한 경향은 공사가 완전히 종료된 미래의 상황으로도 이어져 과거와 달리 동서로 유출입하던 유향이 동북 및 남서로 유출입하는 유향으로 변화가 예견되고, 유속의 증가를 유발하는 것으로 수치실험 되었다.

공사 진척되는 상황별로 변화되는 금강하구역에서의 유동 양상을 전체적으로 면밀하게 파악하기는 곤란하므로 본 논문에서는 앞서의 연구(서, 1998)에서 제시 하였던 조류관측정점 A~J중 특정 점을 선정하여, 도류제와 비응도 주위에 위치한 정점 C 및 정점 E에서 계산된 조류의 특성변화를 그림으로 작성하여 Fig. 4에 수록하였다.

도류제 구간에 위치한 정점C 주위에서는 공사로 인한 유동의 변화가 직접적으로 크게 미치지 못하지만 공사가 진행되면서 점차 유속의 증가를 유발하고 유향

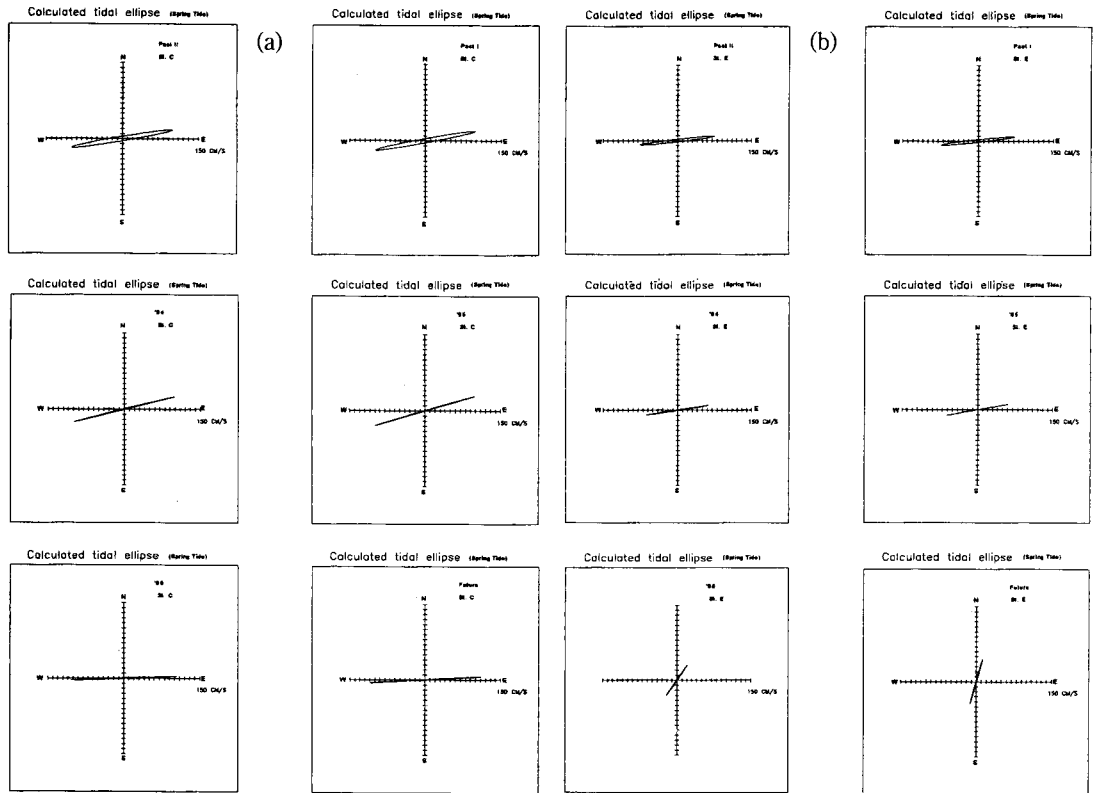


Fig. 4. (a) Computed tidal ellipses for various conditions at station C, (b) Computed tidal ellipses for various conditions at station E.

은 동서방향으로 전환되는 것을 알 수 있다. 그렇지만 비용도를 중심으로 정점 E에서는 새만금 4호 방조제의 축조 영향을 직접적으로 받아 유속이 급격히 감소하고 유향도 동서방향에서 거의 남북방향으로 변화되는 것으로 보여 공사로 인한 인위적인 환경의 변화가 해수유동에 직접적으로 영향을 미친다. 따라서 이 일대해역에서는 향후 공사가 지속적으로 이루어지면서 급격한 유동장의 변화가 꾸준히 나타날 것으로 판단된다.

4. 최대마찰응력의 산정

기존의 서해연안에 대하여 토사이동경로를 추정한 연구성과에 따르면, 마찰응력 0.3 N/m^2 이 해저질의 특성상 세굴과 퇴적이 동시에 발생할 수 있는 한계응력으로 보고되고 있다(최, 1983).

본 고에서는 수동역학변화 모의를 위해 적용한 2차원 수심적분모형에서 해저마찰응력을 산정하여, 각 공사단계별로 변화되는 최대마찰응력 양상을 살펴보았다. Fig. 5에는 수치모형으로부터 도출된 6가지 각각의

상황에 대한 응력의 변화상중 일부가 도시되는데 이를 고찰하면, 94년 당시상황과 비교하여 1년이 경과한 95년 12월 당시상황은 전년에 비하여 군산항 주수로의 북측 도류제가 연장되었고, 새만금 방조제의 진척이 진행된 상황인데 여타 해역은 전년에 비하여 마찰응력의 뚜렷한 변화가 없는 반면에 새만금방조제 끝단에서는 상당한 변화가 보여 1.5 N/m^2 이상 되는 강한 응력이 형성되고, 가도와 비용도 호안 이남에서는 0.1 N/m^2 이하의 영역이 점차 확대되면서 이 해역에서의 퇴적이 상당히 진전되고 있는 것을 나타내고 있다. 이로부터 1년이 경과한 1996년 10월 당시상황은 비용도에서 축조되기 시작한 북향한 토지공사의 서측호안 끝단과 새만금 방조제 끝단에서는 $2\sim3 \text{ N/m}^2$ 정도 되는 강한 응력이 나타나고 이로 인하여 호안축조시 투입된 상당량의 사석재 및 성토재가 유실될 수 있음을 시사하고 있다.

그러나 공사가 완전히 종료된 이후의 미래에 대한 유동장과 이로 인한 최대 해저마찰응력은 거의 전 해역이 0.5 N/m^2 이상으로 변하게 되어 동적평형 혹은

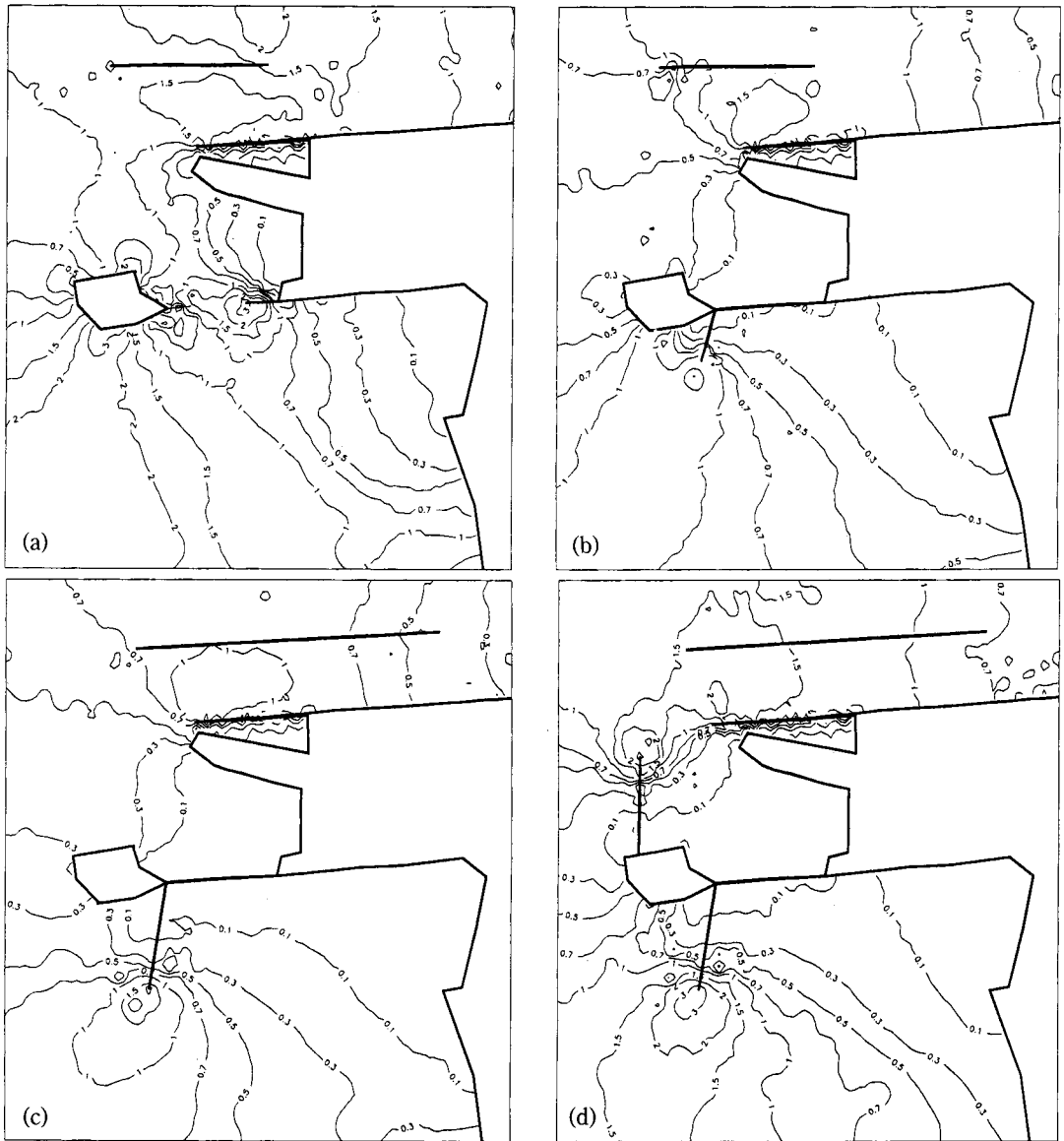


Fig. 5. (a) Maximum bottom shear stress (N/m^2) at past-1 status. (b) Maximum bottom shear stress (N/m^2) in 1994, (c) Maximum bottom shear stress (N/m^2) in 1995, (d) Maximum bottom shear stress (N/m^2) in 1996.

세굴이 유지되는 상황으로 전이되고, 주수로 부분은 더욱 응력이 증가되어 지속적인 세굴이 일어날 수 있을 것으로 예측된다. 특히 남측도류제와 비응도의 북측으로 이어지는 호안과의 경계에서는 외해에서 주수로로 유출입되는 강한 조류에 의하여 $2 N/m^2$ 이상의 매우 강한 해저마찰응력장을 형성하고 있어, 이 일대 해역에서 공사완료 후에도 세굴이 지속적으로 나타날 것으로 예측되어 그동안 준수심 확보를 위하여 준설 하였던 비경제적인 면이 일소되는 긍정적인 환경으로

의 전이가 예상된다.

5. 퇴적물 변화와 마찰응력의 상호관계

전회의 연구(서, 1998)에서 보듯이 2년여에 걸쳐 28개 정점에 대한 지속적인 수심의 변화를 조사 분석한 결과 국부적으로 세굴과 퇴적이 뚜렷하게 나타나고 있음을 알 수 있었는데, 이와 같은 자연적인 해저지형의 변화는 일차적으로 최대 마찰응력의 변화에 기인되

어 나타난다고 할 수 있으며, 부차적으로는 폭풍과 같은 이상파랑의 내습 혹은 홍수시 하구둑 수문 열고 닫음 등으로 단시간 내에 유량과 유속의 증가가 해저지형의 변화를 유발할 수 있다.

그러나 지속적으로 강한 영향을 미치는 것은 해수유동에 기인된 마찰응력의 변화이며 부차적인 영향은 계량화하여 표현하기 어려우므로, 본 고에서는 직접적인 영향만을 고려함으로써 관측한 지형의 변화와 최대 해저마찰응력간의 관계를 살펴보았다. 수심관측을 실시한 94년 8월과 최종적으로 관측을 실시한 96년 10월의 자료를 바탕으로 각 관측한 시기의 유동장을 재현하여 마찰응력을 산정하고, 이들의 관계를 도식화하여 분석하였다(토지공사, 1996). 그러나 관측한 일부 정점에서 수심변화는 일관된 경향을 보이지 않아 해석에서 제외하였으며, 또한 8개 정점은 변화경향이 일관성을 유지하지 않아 역시 해석에서 제외하였다. 총 20개의 정점에 대한 전단응력 변화에 따른 퇴적 및 세굴변화를 Table 3에 수록하였고, 그 결과에 대한 평가를 실시하였다.

가도와 비응도를 잇는 호안 이남의 10개 정점 중 8개 정점은 상황변화에 따른 유동장과 이로 인한 해저마찰응력의 변화에서 살펴본 바와 같이 시간이 경과되면서 퇴적이 진행되는 것을 알 수 있는데, 가장 퇴적이 심한 곳은 정점1로써 2년에 걸쳐 2 m 이상의 퇴적을 보이고 있으나 이는 마찰응력의 변화에 따른 해저지형의 변동이라기 보다는 호안 가까이에 위치한 영향으로 계절적 혹은 이상 기상 요인에 의해 호안 축조재료가 유실된 영향으로 퇴적이 심화된 것으로 판단된다. 그렇지만 이외의 정점 2~정점 8은 대체적으로 유사한 연간 20 cm 내외의 퇴적률을 보이면서 지형의 변화가 뚜렷하여 새만금방조제 축조가 진행되면서 감소된 유동의 변화에 직접적으로 영향을 받은 것으로 판단된다. 이 해역의 마찰응력은 0.2~0.15 N/m² 정도에 속하면서 퇴적이 진행되는 것을 알 수 있으나, 정점 6~정점 8은 0.4~0.2 N/m² 구간에 속하면서 퇴적이 진행되는 것을 보이고 있다.

북측 도류제와 남측도류제 사이의 구간에 위치한 정점 20~27에서는 정도의 차이는 있으나 시간이 경과하면서 즉, 도류제가 축조되면서 지속적으로 세굴이 일어나는 것을 알 수 있는데 도류제의 서측단에 위치한 정점 20~22에서는 마찰응력이 0.6 N/m²~2.0 N/m²으로 매우 급격하게 증가되고 있고, 이로 인하여 세굴도 심화된다. 역시 주수로 구간에 위치한 정점 23~27도 마찰응력의 증가에 영향받아 세굴이 지속된다. 최소 연간 16 cm, 최대 연간 97 cm의 세굴이 주수로에서 관측된다.

이상의 결과를 플롯팅하여 Fig. 6에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 최대 해저마찰응력이 0.4 N/m² 보다 작은 정점들에서는 뚜렷한 퇴적이 진행되는 것이 확인되고, 이보다 응력이 커지면 세굴되는 양상이 나타난다. 따라서 마찰응력 0.4 N/m²가 금강하구 해역에서의 임계 해저 마찰응력으로 인식된다.

이와 같은 금강하구역의 최대 해저마찰응력에 대한 세굴·퇴적의 관계식을 도출하고자 전체 정점에 대하여 해저마찰응력에 대한 퇴적률의 상관관계를 회귀분

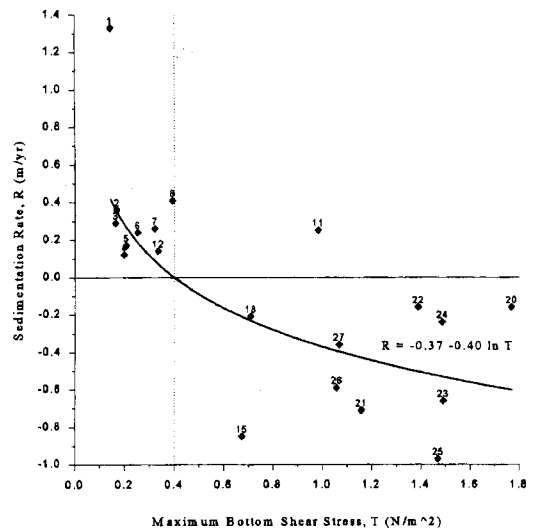


Fig. 6. Sedimentation rate for 20 stations depending on bottom shear stress. (Numbers above marking are stations on Fig. 1. of Suh (1998)).

Table 3. Sea bottom elevation changes vs. maximum shear stress for 20 stations.

Station	1	2	3	4	5	6	7	8	11	12	15	18	20	21	22	23	24	25	26	27
Shear stress (N/m ²)	0.14	0.17	0.16	0.20	0.21	0.25	0.32	0.39	0.98	0.33	0.67	0.71	1.77	1.16	1.39	1.49	1.40	1.47	1.06	1.07
Depth Change rate (m/yr)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.33	0.36	0.29	0.12	0.17	0.24	0.26	0.41	0.25	0.14	0.85	0.21	0.16	0.71	0.16	0.66	0.24	0.97	0.59	0.36

석하여 다음의 경험적인 결과를 얻었다.

$$R = -0.37 - 0.40 \ln \tau \quad (7)$$

여기서 $R(\text{m/yr})$ 은 퇴적률 변화를 나타내고, $\tau(\text{N/m}^2)$ 는 본 연구에서 이용한 2차원 수심적분모형으로부터 산정된 해저마찰응력을 나타낸다.

6. 결과 고찰

금강하구에서 대규모 공사의 영향으로 인한 수동역학적 변화를 해석하기 위하여, 2차원 유한요소 수동역학모형을 적용하였다. 수치모형을 조석과 조류변화 해석에 적용한 결과 금강하구둑의 수문이 열렸을 때와 닫혔을 때는 조석체계가 급격히 변화되어 M_2 , S_2 분조가 각각 군산내항에서 211 cm → 228 cm로 17 cm, 77 cm → 83 cm로 6 cm 확폭되고, 군산외항에서는 219 cm → 224 cm로 5 cm 및 78 cm → 81 cm로 3 cm 확폭되는 것을 알 수 있었다. 이는 조석전파가 차단됨으로써 조석에너지가 감소하천인 금강상류로 전파, 소산되지 못하고 반사되어 하구둑 전면으로부터 군산내항과 외항으로 조석경사를 이루고 있음을 반영한다.

년차별 단계별로 진척되는 금강하구에서의 공사로 인한 조류와 해저 퇴적성상의 변화를 수치실험에 의하여 분석한 결과는 금강하구의 도류계 축조로 조류속이 증가되는 것이 뚜렷하게 나타났으나 호안축조 배후면에서는 급격한 유속의 둔화를 보인다. 그렇지만 호안축조 끝단에서는 1.5 m/s 이상의 강한 유동장이 형성되어 축조재료가 유실되는 현상이 나타난다.

실측과 수치실험 결과를 통하여 도출된 금번 연구성과로부터 금강하구역의 동적평형을 이루는 해저마찰

응력은 0.4 N/m^2 로 분석되었는데, 이는 기존 서해연안의 토사이동과 관련된 임계값 0.3 N/m^2 보다 상회하며 통상적인 한계마찰응력보다는 다소 큰 것으로 판단된다. 금강하구 일대해역의 수심은 해저마찰응력이 한계마찰응력보다 크면 세굴이 지속되고, 이보다 작으면 퇴적되는데 수심변화율은 $R = -0.37 - 0.40 \ln \tau$ 의 관계로 설명된다. 향후의 지속적인 연구가 이어지면 보다 명확한 수심변화의 관계가 정립될 수 있을 것이나, 조류에 의한 금강하구역의 해저마찰응력의 변화는 직접적으로 퇴적환경의 변화를 유발하고 있다.

사 사

본 연구의 일부는 한국토지공사 군산직할사업단의 도움으로 수행되었기에 이에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

- 서승원, 1993. 연안 수동역학 모의를 위한 시간진행 및 조화 유한요소모형 특성, 한국해양·해양공학회지, **5(4)**: 406-413.
- 서승원, 1994. 방조제 축조 영향해석에서의 유한요소모형, 한국해양·해양공학회지, **6(2)**: 196-204.
- 서승원, 1998. 금강하구역의 수동역학적 변화(1) -관측자료를 중심으로-, 한국해양·해양공학회지, **10(1)**: 10-17.
- 최병호, 1983. 동지나해의 토사이동 경로, 대한토목학회 논문집, **3(4)**: 83-93.
- 최병호, 오윤근, 1987. 금강하구둑에 의한 조석변화의 초기추정, 한국수문학회지, **20(2)**: 161-168.
- 한국토지공사, 1994, 1995, 1996. 군장국가공단 군산지구 개발사업 시행에 따른 해수 유동조사.