

## 牙山灣의 潮汐數值模型

### A Numerical Tidal Model of the Asan Bay

崔 秉 吳\*  
Choi, Byung Ho

#### Abstract

A two-dimensional nonlinear tidal model of the Asan Bay has been formulated to examine the tide and related hydraulic phenomena. The  $M_2$  tidal regime was first computed using the model and the model also was to derive the maximum bed stress and transport potential in the region. Preliminary assessment of relation between sediment transport and the maximum bed stress distribution determined from the model are described.

#### 要 旨

牙山灣의 潮汐과 關聯水理現象을 調査하기 위한 2次元 非線形潮汐模型을 樹立하였다. 첫 단계로서 主太陰半日週潮의 潮汐體系를 算定하였으며 海底最大摩擦應力과 토사이동포텐셜을 산정하여 토사이동과의 관련성을 초기추정하였다.

#### 1. 序 論

京畿灣의 內域에 위치하는 牙山灣은 黃海에서 가장 큰 潮差와 상응하는 強潮流環境에 의해 濁도가 심한 動的沿岸環境을 조성하고 있다. 黃海에서 京畿灣 특히 인천항 및 아산만의 조석이 특히 큰 이유로서는 지구의 자전효과에 의해 우리나라 서해안을 따라 북상하는 조석파가 웅진반도에 의해 차단되어 京畿灣으로 파급되는데 인천과 아산에 이르는 경로가 평균수심을 10m, 만륙성길이를 100km로 가정할 때 약 10시간의 共振週期를 갖는 灣體系를 형성하여 조석의 기본주기인 12.4시간에 가깝게 되어 큰 조석이 생기는 것으로 부분적인 설명을 할 수 있다(崔, 1980).<sup>(1)</sup>

이러한 복잡한 조석환경을 갖는 황해에서 가장 큰 潮差를 갖는 牙山灣에 대규모항만이 건설될때 京畿灣 內域의 조석체계는 변화를 가져오며 상응하는 동적퇴적체계도 변화될 것으로 생각되므로 실제적인 항만개발에 앞서 기존수리현상에 대한 충분한 이해가 필요하다. 京畿灣內域의 沿岸水理環境을 下記의 潮汐數值모델들에 의해 규명하고자 하는 일련의 노력이 1980年代 初半부터 이루어져왔는데 다음과 같다.

- 가) 京畿灣전역 4海里 格子間隔體系에 의한 2次元 및 3次元 流動模型 (崔, 1982;崔, 1984)<sup>(2-3)</sup>
- 나) 인천만의 1海里 格子間隔體系에 의한 2次元 流動模型 (崔, 1980)<sup>(4)</sup>
- 다) 동적결합에 의한 京畿灣의 1 1/3 海里格子體

\*正會員 · 成均館大學校 工科大學 教授, 土木工學科

系로 구성된 球面座標體系 黃海模型 (崔, 1981)<sup>6)</sup>

라) 京畿灣의 남부해역을 약 810m 格子間隔體系로 구성된 球面座標體系模型 (崔, 1985)<sup>6)</sup>

본 논문에서는 충분히 상세한 격자망이라 판단되는 200m의 格子體系에 의한 牙山灣의 潮汐數值모델을 수립하고 이 海域의 평균적인 조석상황을 나타내는  $M_2$  分潮의 算定에 의해 潮汐體系와 堆積體系를 형성하는 기본적인 水理變數들을 檢討코져 한다.

2. 牙山灣의 潮汐數值模型

利用된 數值模型은 有限差分(finite-difference) 技法을 근거하며 偏向力(Corioris force), 非線形移流項(advective term)과 摩擦項(friction term)이 포함된 潮汐 方程式의 解를 2次元 直角座標系上에서 求하는 것이며 支配方程式은 다음과 같다. (Flather & Heaps 1975)<sup>7)</sup>

연속방정식 (Continuity equation):

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (Hu) + \frac{\partial}{\partial y} (Hv) = 0 \quad (1)$$

수심평균차 운동 방정식 (Depth-mean equation of motion)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv + \frac{k_u u(u^2 + v^2)^{1/2}}{H} + g \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial x} - \frac{F^{(x)}}{H} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - fu + \frac{k_v v(u^2 + v^2)^{1/2}}{H} + g \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial y} - \frac{G^{(y)}}{H} = 0 \quad (3)$$

여기서 각 記號는 다음과 같다.

- t : 時間
- $\xi$  : 靜上海水面上의 海面水位
- h : 靜上海水下의 水深
- H : 總水深 ( $H=h+\xi$ )
- f : Corioris 係數(균일한 것으로 가정,  $f=2w \sin \phi$ ,  $\phi$  : 위도)
- k : 海低摩擦 係數( $k=0.0025-0.0035$ )
- g : 重力加速度
- $\rho$  : 海水密度 (均一한 것으로 假定)
- $P_a$  : 海面氣壓

$F^{(x)}$ ,  $G^{(y)}$  : 海面에 미치는 바람應力の x, y成分  
 $u'$ ,  $v'$  : 海面上 Z위치에서 直角座標 x, y의 增加方

向으로의 速度成分.  
 水深平均된 流速 (Depth-mean current) u, v는 다음과 같이 정의된다.

$$u = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\xi} u' dz, \quad v = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\xi} v' dz \quad (4)$$

上記式에서 動壓力 効果는 무시되고 靜水力學의 成分을 가지며 수심평균된 유속이 산정되므로 境界層 두께는 均一流速分布의 假定에 근거한다.

非線形海低摩擦項을 包含한 上記式 (1)-(3)은 移流項(davection term)의 境遇 Roberts와 Weiss<sup>8)</sup>에 依해 提示된 angled-derivative scheme을 利用하여 數值解를 求하였다. 境遇條件으로서 陸地境遇에 直角인 方向의 流速은 없는 것으로 假定하였으며 外海境界面의 境界條件은 時間에 따른 海面水位 및 流速成分의 變化로서 規定지워진다. 모델은 淺海의 干潮時 露出되는 潮干帶를 適切히 다룰 수 있도록 하였으며 또한 潮汐 및 暴風 海溢에 對한 該當項을 選擇할 수 있도록 設計되어 이 두 現象을 各己 또는 相互作用의 研究 및 實際 海面豫報를 爲해서는 同時에 組合할 수 있도록 수 있도록 프로그램하였다. 이러한 潮汐模型運用體系가 그림 1.에 提示된다. 첫 段階로서 式(2), (3)에서 氣象外力을 나타내는 海面應力項과 海面壓力勾配項을 除外시키므로 순수한 潮汐만을 算定하였다. 基本式(1)-(3)의 有限差分形의 式은 그림 2.에 提示된 有限差分格子體系를 利用하여 牙山灣의 潮汐 流動現象을 研究하기 爲해 數值的으로 풀이되었는데 仔細한 數值解析에 依한 解는 여러 文獻에 紹介되어 있으므로 여기서는 省略키로 한다.

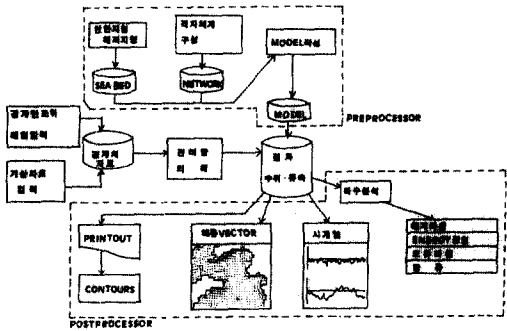


그림 1. Schematic diagram for numerical modeling of tide and surge

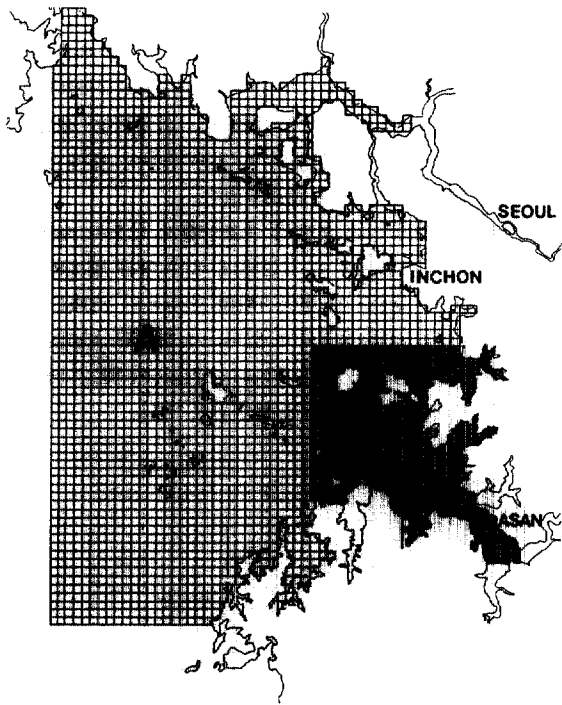


그림 2(a)

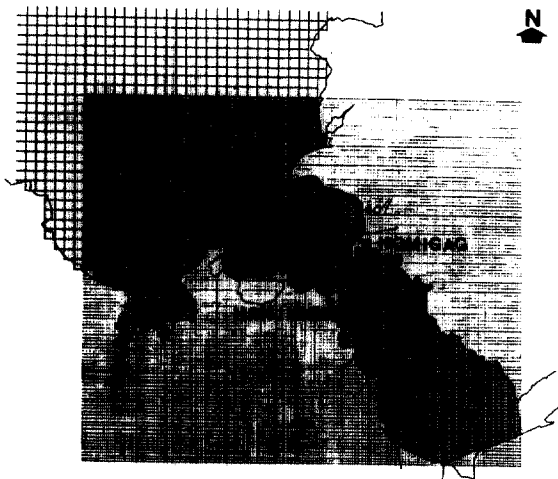


그림 2(b)

그림 2. Finite-difference grid system of Incheon Bay models. (a) A,B,C indicate Incheon Bay, Intermediate Area, Asan Bay model respectively, (b) fine-mesh system of Asan Bay model.

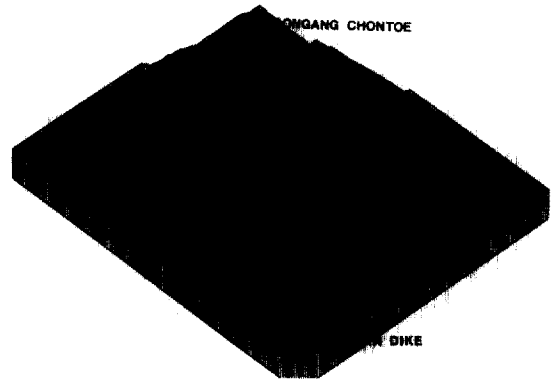


그림 3. Perspective plot of bathymetry in Asan Bay model.

牙山城모델은 국화도 동측을 남북으로 종단하는 서측경계의 동측과 입파도 부근을 지나는 동서로 횡단하는 북측경계이남을 모델範圍로 하고 있다. 모형의 有限格子體系가 그림 2.(b)에 提示되는데 中間域모형의 남동측에 위치한다. 格子間隔은 205.8 m (1/9해리)이며 總格子數는 15,276個(134×114)인데 양해안정조건을 만족시키기 위한  $\Delta t=4.4$ (秒)로서 한潮汐週期當 9,720 timestep을 形成하여 상당한 計算時間을 요하는 模形으로서 潮汐現象을 검토하기 위해서는 충분히 세격자체계로서 사료된다. 그림 3.은 이 해저지형을 남동향에서 조감한 투시도인데 접근수로에 인접하여 중앙천퇴가 뚜렷하게 제시되어 있다. 모형은 인천만(그림 2(a)의 A) 및 중간역모형(그림 2(a)의 B)으로부터 산정된 결과를 상호보완하여 외해경계의 평균조석의 조건을 부여하였다.

牙山城모형의 수립단계는 경계입력을 중간역모형에서 취하는 수치실험과 두 모형을 동적연결하는 안을 동시에 수치실험하였는데 연결부의 조건대에서 발생하는 불안정성이 감소되지 아니하고 따라서 질량보존이 완전하게 되지 못하므로써 본 논문에서는 아산만의 단독모형 결과만을 제시한다. 모형 수치실험을 위해 이용된 기본파라미터들은 다음과 같다.

$$f=0.00014584 \times 0.60815 \text{ sec}^{-1}$$

$$H_0=100\text{cm}$$

$$K_0=0.0025-0.0035$$

$$\Delta S=205.77 \text{ m}$$

$\Delta t = 0.00123457$  태움시

상기의 파라미터에서  $K_b$  값의 적용범위에 대한 근거는 다음과 같다.

Bazin의 식  $k = 0.0013(1 + M/\bar{R})$  ( $R$ 은 경심,  $M = 0.1 - 3.2$ )에서 Taylor<sup>(9)</sup>는 Irish해에서 수심이 80 m일때(해저가 암)  $k = 0.002$ 로서 제시한 바 있는데 Chezy계수와는 아래와 같이 연결지을 수 있다.

$$K_b = 9.81/C^2 (C = 70 \text{ m}^{1/2} \text{ sec}^{-1} \text{ 일때 } k = 0.002)$$

실제로  $C$  값은 해저조건에 따라 변화하나 수심의 함수로서 개략적으로 다음과 같이 표시할 수 있다.<sup>(10)</sup>

$$C = 19.4 \ln[0.9(h + \xi)]$$

상기식을 이용할 경우 천심에서 과다한 크기의  $K_b$  값이 산정되므로 금번 모델에서는 다음과 같은 변화되는  $K_b$ 를 채택하였는데 이 계수가 통상적으로 모델 값의 산정 결과를 조정하는 역할도 수행한다.

$$\begin{aligned} h + \xi > 20 & K_b = 0.0025 \\ 20 > h + \xi > 15 & K_b = 0.0030 \\ 15 \text{ m} > H & K_b = 0.0035 \end{aligned}$$

### 3. 모델의 결과

#### 3.1 潮位

일련의 test run을 통해서 현존상황의  $M_2$  潮汐體系를 수립하였는데 檢證結果는 表 1에 수록되어 있다. 牙山灣내부의 만호리의 振幅은 다소 과소 推定되나 全般的으로 진폭은 2%이내에서 만족스럽게 再現되는데 牙山灣내부의 단기검조차료에 의한  $M_2$  도 年中 3-4cm 이상 변하는 불안정성을 갖고 있다.

#### 3.2 潮流

87년 潮流觀測<sup>(11)</sup>에 의한  $M_2$  潮流의 진폭은 PC-2지점 (북위 36도 59분 08초, 동경 126도 47분 20초; 노미각 남측)에서 북향성분이 26cm/sec 동향성분이 74cm/sec인데, 算定  $M_2$  潮流는 33cm/sec, 동향성

表 1. 牙山灣모델 · 算定潮位の 檢證

위 치	평 균 조 석			
	관측치		계산치	
	H	K	H	K
노미각	289	140	290	144
한진각	286	149	289	145
만호리	300	154	295	152

주) H는 진폭(cm)

K는 度(135°E基準)

분이 70cm/sec이었으며, 노미각 좌측 LNG부두근방에서는 관측  $M_2$  潮流는 북향성분이 31cm/sec 동향성분이 15cm/sec인데 算定  $M_2$  潮流는 북향성분이 32cm/sec 동향성분이 13cm/sec로서 潮流의 공간적 變化가 潮位보다 심하며 또한 적은 海面(壓力)傾斜에 대해서도 算定되는 潮流는 민감하게 변하는 數值모델의 特性을 비추어 보아 算定된 潮流體系가 만족하게 檢證되었다.

牙山灣모델에 의한 算定된 증조상황의 潮流시 流速分布가 그림 4에 提示되어 있는데 수로를 따른 潮流의 波及形態가 잘 提示되며 中央천퇴의 천심부의 流速은 감소된 形態로서 잘 提示되고 있다. 이 算定된  $M_2$  流速의 북향 및 동향성분을 각기 Fourier分析하여 潮流타원으로 提示한 그림이 그림 5에 提示되어 있다.

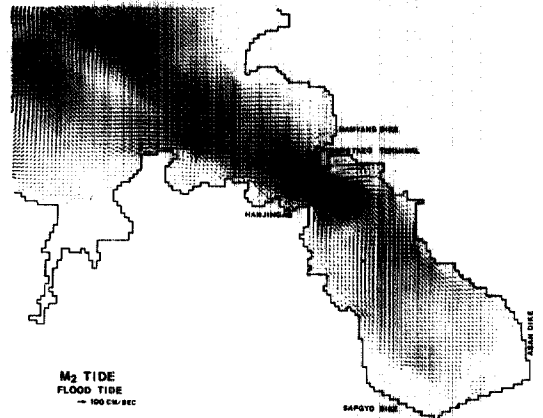


그림 4. Computed  $M_2$  tidal currents at flood tide in Asan Bay.

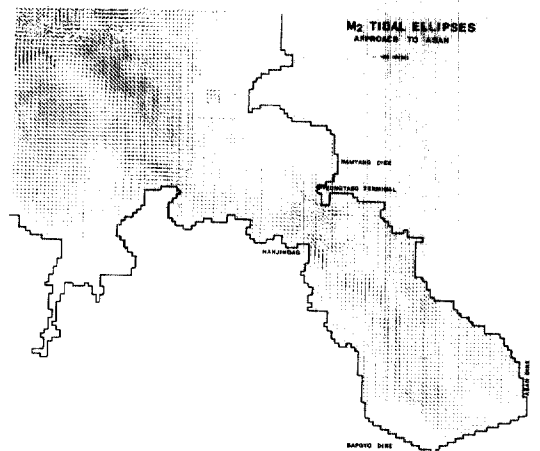


그림 5. Computed  $M_2$  tidal current ellipses from the Asan Bay model.

그림 6는 백터의 크기를 과장시켜 提示한  $M_2$  潮流타원도인데 천심부, LNG terminal부근, 중앙천퇴의 얕은부분등의 조류타원을 보면  $M_2$  潮流가 상대적으로 크고 주파급방향이 반드시  $M_2$  조류의 과급방향과 일치하는 것은 아닌 것을 提示해 주고 있다.

### 3.3 潮汐恒流

그림 7은 潮汐數值模型에서 算定된 潮汐週期時間平均된 潮汐(平均循環)場으로 中央淺堆上에는 시계방향의 數 km에 해당하는 渦流가 形成되나 접근수로부와 牙山灣 내부에서의 潮汐恒流의 방향은 전

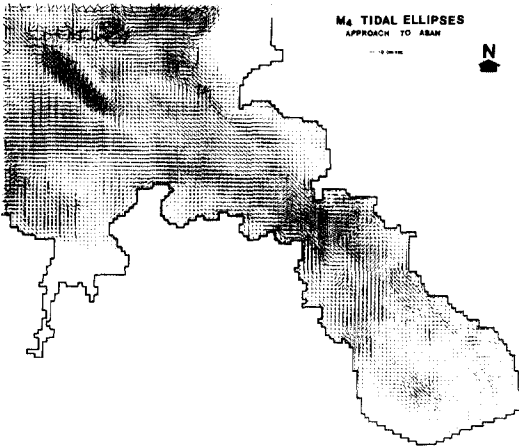


그림 6. Computed  $M_2$  tidal current ellipses from the Asan Bay model.

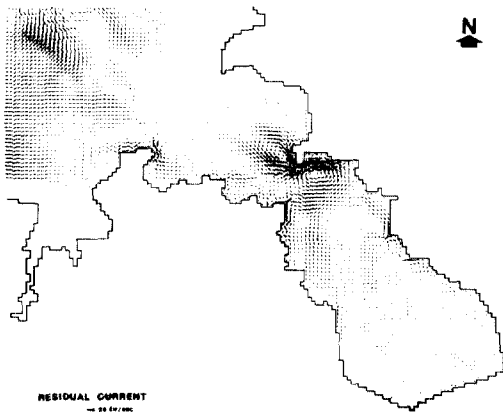


그림 7. Eulerian residual current computed from the Asan Bay model.

반적인 내측방향에 추가하여 소규모의 渦流가 存在하는데 성구미리우측 및 평택항 전면 박지부에는 소규모 시계방향적 渦流가 形成되며 牙山灣 내역에는 입구부에 가까운 좌측수로에는 시계방향적 渦流와 이에 平衡을 이루는 우측부의 소규모 반시계방향적 渦流와 그 남동측 牙山防潮堤 서측에는 반시계방향적 渦流가 形成되는 것을 모형결과가 提示하고 있다.

이러한 渦流의 發生은 牙山灣의 경우 渦度(vorticity)에 起因하는 것으로 海低剪斷應力에 의해 發生 또는 減衰되는 渦流가 潮汐運動에서는 移流效果에 의해 平均循環(渦流)로 轉移되는 것으로 알려져 있다. 渦流의 中心部는 상대적으로 낮은 壓力部가 形成되어 細粒土砂를 집적시키는 役割을 하는데 渦流의 흐름을 따라 수직적으로 회전성 2차류가 발생하여 조석사주를 형성시키는 한 요인이라고 주장하는 이론<sup>(12)</sup>도 있다.

牙山灣내역의 海底地形을 變化시키는 주 요인은 灣 외측으로부터 土砂인입이며, 아산호 및 삼교호에서의 방출되는 土砂(泥土, 細砂)는 부유사의 形態로서 운반된다고 할때 港灣建設의 경우에는 항만 배치에 따른 渦流에 의한 潮汐교란(tidal stirring)에 의한 泥土의 堆積가 能성도 높을 것이다.

### 3.4 最大海底應力分布

半日週期를 갖는 潮汐과 1/4日 週期를 갖는 潮汐의 복합성분에 의한 最強潮流와 潮汐恒流에 의한 最大海底應力백터는 潮汐週期를 海底土砂의 이동 방향을 제시하는 지표로서 利用되어 왔다.<sup>(13)</sup> 그림 8에 제시된 應力백터분포는 모델의 서측경계에서 외해측방향을 제시하고, 성구미리 북측에서 분기하는 양상을 제외하고는 전반적으로 접근수로에서 내륙측으로 이동하는 形態를 提示하며 노미각/한진각의 만입구 및 牙山灣내역에서도 내측이동백터가 算定되고 있어 내만측에 사주가 형성되는 요인으로도 생각될 수 있다. 그림 9에 제시된 등치선도에 의하면 아산/노미각의 협수로와 아산만 접근수로에서의 평균적인 최대응력 백터값은 약  $4N/m^2$  및 약  $2N/m^2$ 에 각기 해당되는데 이 높은 海低摩擦應力은 활발히 海底土砂移動을 유발한다.

模型結果는 사주의 장기적 이동방향이 最大海底應力백터로서 남동측의 이동을 재확인시키며 국지적이동은 조석사주의 횡단면의 비대칭성을 고찰하

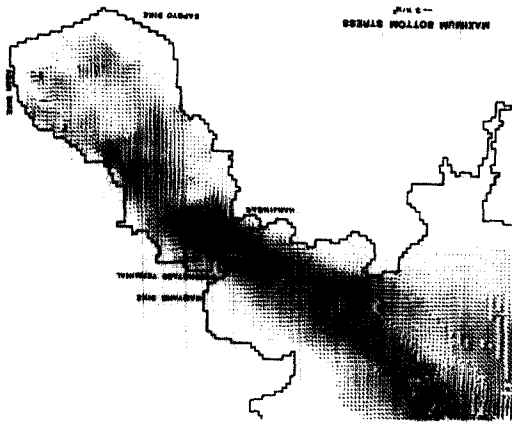


그림 8. Distribution of maximum bed stress vectors from the Asan Bay model.

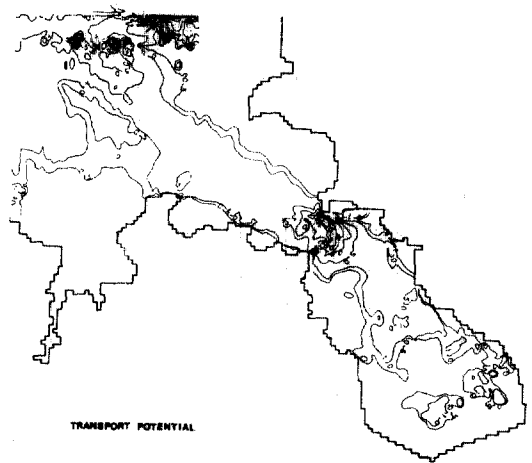


그림 10. Distribution of peak transport potential from the Asan Bay model(unit :  $m^3/sec^4$ ).

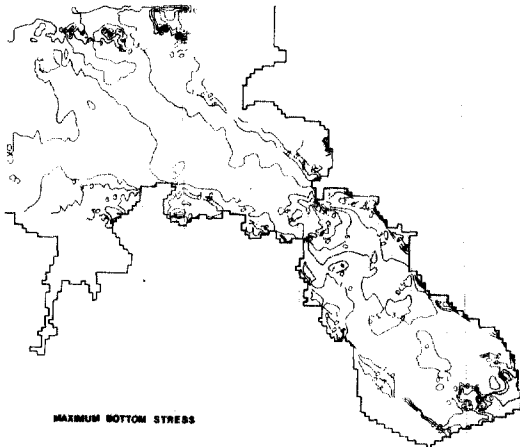


그림 9. Distribution of Maximum bed stress contours from the Asan Bay model(unit :  $N/m^2$ ).

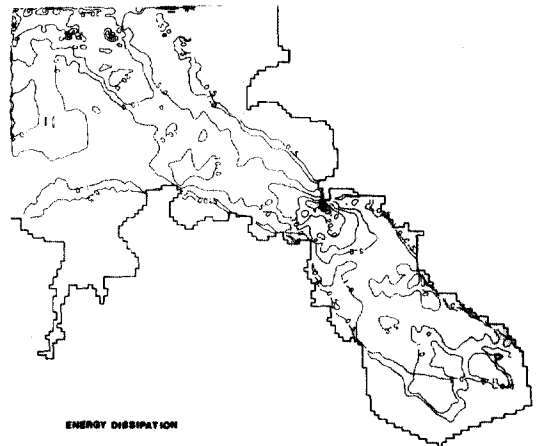


그림 11. Distribution of total energy dissipation from the Asan Bay model(unit :  $x10N/m$ ).

면 사주상의 반시계방향적 와류에 의해 북동향으로 전체적이동이 장기적으로 진행되고 있음을 경험적 모형<sup>(4)</sup>이 제시한다. 牙山灣내측에 港灣이 建設될 경우 流速의 감소로 인한 潮汐恒流 및 最大應力벡터의 크기를 급격히 감소되면 사주의 이동은 현재 보다는 완속으로 이루어 질것이나 사주상에 해류관측을 수행하여 확실한 이동양상을 파악하는 일이 중요하다. 종래의 해안공학적 연구에서는 土砂移動의 예측은 수년의 時間縮尺에 局限되어 上述된 50

-100年 기간에 발생가능한 해저지형의 변화는 고려되지 못했었다.

### 3.5 최대土砂移動포텐셜 및 에너지消散

土砂移動을 算定하는 既存의 式들은 流速의 (3-4)乘으로 提示된다(例: Engelund-Hansen 式). 그림 10에 제시된 바와같이 민감하게 변화되는 (최대유속)<sup>4</sup>의 분포를 보면 접근수부에서는 전체적으로  $1m^4/sec^4$ 을 초과하며 부분적으로  $7-8m^4/sec^4$ 을 높은 값을 가져 현존의 상황이 높은 토사이동능

력을 갖고 있음이 提示된다. 아산내역에 대규모항만이 건설되면 접근수로의 유속이 전체적으로 감소되어 토사이동능력은 감소될 것으로 추정된다.

그림 11에는 한 조석주기를 통한 총에너지소산을 나타내는데 중앙천퇴 복측수로와 아산만입구인 노미각-한진각구간에는 국지적으로 300N/m의 높은 소산이 일어난다. 경기만전역의 평균에너지소산율( $0.58 \times 10^9 W$ )<sup>(4)</sup>의 큰 부분을 이 아산역에서의 해저마찰에서 기인한다.

#### 4. 結 論

비교적 세격자망체계인 약 200m의 格子間隔의 牙山灣모델을 수립하여 數值實驗을 통한 水理環境 調査를 하였다. 數值實驗結果는 潮位, 潮流의 分布 및 현존 潮汐體系에 따른 動的堆積體系의 부유사 이동의 판별기준은 潮汐恒流(잔차류)의 변화양상으로서, 소류사이동의 판별기준은 海底最大摩擦應力 벡터 및 最大土砂移動포텐셜의 parameter로서 서술하였다. 조석전파에 따른 牙山灣의 수리현상 및 이에 대한 퇴적역학의 연구는 근본적으로 어려운 문제이며 장기간에 걸쳐 적절한 실험시설과 철저한 현장관측을 통해서만 가능할 것이다. 그럼에도 불구하고 실제적인 개발사업은 이러한 기초연구의 지원없이 進陟되고 있는 바 우리나라 해안-해양공학의 발전 및 개발사업의 성공적인 수행을 위해서는 조직적인 장기연구가 필요하다.

#### 參 考 文 獻

1. Choi, B.H., "A tidal model of the Yellow Sea and the Eastern China Sea.", Korea Ocean Research and Development Institute Report 80-02, 1980.
2. Choi, B.H., "A tide and surge computation for Kyonggi Bay", *Bulletin of KORDI*, Vol. 3. No.1, 1981, pp. 15-21.
3. 崔秉昊, "京畿灣의 三次元流動解析모델", *韓國海洋學會誌*, 第18卷 第1號, 1983, pp. 10-20.
4. Choi, B.H., "Tidal computation for Incheon Bay", *J of Oceano. Soc. of Korea*, Vol. 15, No. 2, 1980,

pp. 112-122.

5. 최병호, "서해안 방조제 건설에 따른 M<sub>2</sub>조석의 영향", 한국 과학기술원 보고서 81-01, 1981.
6. 崔秉昊, "京畿灣 南部海域의 M<sub>2</sub>潮汐影響", *大韓土木學會論文集*. 第3卷 第2號, 1983, pp. 97-107.
7. Flather, R.A. and Heaps, N.S., "Tidal computations for Morecambe Bay", *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, Vol. 42, 1975, pp. 487-517.
8. Robert, K.V. and Weiss, N.O., "Convective difference scheme", *Math. Comput.* Vol 20. 1967, pp. 272-299.
9. Taylor, G.I., "Tidal friction in the Irish Sea", *Phil. Trans. Roy. Soc.(A)*. Vol. 220, 1918.
10. Leendertse, J.J., "Aspects of a computational model for long water wave propagation", Rand Memorandum, RH-5299-PR, Santa Monica, California, 1967.
11. 建設部, "西海岸 港灣開發妥當性 調査用役 海象調査報告書", 1987.
12. Heathershaw, A.D. and Hammond, F.D.C., "Secondary circulation near sand banks and in coastal embayments", *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, Vol 33, No.4, 1980.
13. Pingree, R.D. and Griffiths, D.K., "Sand transport paths around the British Isles resulting from M<sub>2</sub> and M<sub>4</sub> tidal interactions", *J.Mar. Biol.Ass.U. K.*, Vol.59, 1979, pp.497-513.
14. Kenyon, N.H., Belderson, R.H., Stride, A.H. and Johnson, M.A., "Offshore tidal sand banks as indicators of net sand transport and as potential deposits", in *Holocene sedimentation in the North Sea Basin*, S.D.Nio, R.T.E.Schuttenhein, T.C.E. van Weering,(ed)., Int. Assoc. Sedimentologist Spec. Pub. 5, 1981, pp. 257-268.

(接受 : 1990. 3. 15)