

# 東支那海의 土砂移動經路

## Sediment Transport Paths of the East China Sea

崔 秉 昊\*  
Choi, Byung Ho

### Abstract

A non-linear numerical tidal model of the Yellow Sea and the East China Sea is used to derive the mean and maximum bed stress, the mean and maximum transport potential on the continental shelf. It has provided a preliminary assessment of relation between sediment transport paths and the mean and maximum bed stress distribution determined from the numerical model.

### 要 旨

黃海 및 東支那海의 非線形潮汐모델을 利用하여 大陸棚上의 平均, 最大海底摩擦應力 및 平均, 最大土砂移動포텐셜을 求하였다. 모델로부터 算定된 平均, 最大海底摩擦應力의 分布와 土砂移動經路와의 聯關性에 對한 初期推定이 이루어졌다.

### 1. 序 論

黃海 및 東支那海陸棚은 世界的으로 淺海海域面積의 큰 部分을 차지하는 海域이며 複雜한 沿岸形態 및 海底地形은 外洋으로부터 波及되어온 海洋潮汐을 크게 變化시킨다. 또 하나의 特記할 物理現象은 黃河로부터 堆積土가 年間 11 億 5 千萬屯<sup>1)</sup>, 長江(揚子江)으로부터는 年間 5 億屯<sup>2)</sup>의 尙大한 量이 勃海灣 및 東支那海로 流出되고 있다. 이 海域의 海流 및 海面變化의 主要因은 潮汐現象이며 土砂의 移動現象은 潮流移動에 크게 左右된다. Pingree 와 Griffiths<sup>3)</sup>는 北西歐洲陸棚의 研究에서 非線形二次元모델을 利用하여 潮流에 의한 最大海底摩擦應力과 平均海底摩擦應力의 分布를 求하여 이 두 벡터成分의 分布가 土砂移動經路의 研究에 有用함을 이미 提示한 바 있다.

前回の 研究<sup>4)</sup>에서 開發된 黃海 및 東支那海의 모델에 의한 潮流算定結果는 最近 東支那海의 北緯 30度近海에서 實施된 美·中共共同海洋觀測(USA-PRC Marine Sedimentation Dynamics Study의 一環)을 통한 數個地點의 長期潮流觀測을 통해 Larsen 과 Cannon<sup>5)</sup>에 의해 比較檢討되어 採擇된 모델의 外海境界條件值들이 合理的인 것임이 檢證되었다. 本 研究는 黃海 및 東支那海의 非線形二次元 數值모델로부터 最大, 平均海底摩擦應力 및 土砂移動 포텐셜分布로 求하여 土砂移動經路를 初期推定하는데 目的이 있다. 附隨的으로 利用된 研究의 接近方法은 人爲的으로 放流된 類似物質의 移動經路를 推定하는데 應用될 수 있을 것이다. 例를 들면 近來에 牙山灣을 비롯한 主要工業港의 接近水路 浚渫作業이 이루어지고 있는 데 浚渫土의 投棄場所가 잘못 選定되면 浚渫地域으로 土砂는 되돌아 올 것이다. 또한 海上投棄된 廢棄物 亦是 類似한 經路를 取할 것이며 海底에 埋設된 海底電線이 土

\*正會員·成均館大學校 工科大學 土木工學科 副教授

砂移動에 의해 露出될 것인가의 與否도 重要한 推定事項일 것이다.

## 2. 潮汐數值모델

球面座標上에 形成된 移流加速項과 海底摩擦項이 包含한 非線形潮汐모델의 基本方程式<sup>(6,7)</sup>은 下記와 같다.

$$\frac{1}{R \cos \phi} \left\{ \frac{\partial}{\partial \lambda} (Hu) + \frac{\partial}{\partial \phi} (Hv \cos \phi) \right\} + \frac{\partial \xi}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{R \cos \phi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{v}{R} \frac{\partial u}{\partial \phi} - \frac{uv \tan \phi}{R} - 2\omega \sin \phi v + \frac{k_b u \sqrt{u^2 + v^2}}{H} + \frac{g}{R \cos \phi} \frac{\partial \xi}{\partial \lambda} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{R \cos \phi} \frac{\partial v}{\partial \lambda} + \frac{v}{R} \frac{\partial v}{\partial \phi} + \frac{u^2 \tan \phi}{R} + 2\omega \sin \phi u + \frac{k_b v \sqrt{u^2 + v^2}}{H} + \frac{g}{R} \frac{\partial \xi}{\partial \phi} = 0 \quad (3)$$

式 (1)~(3)은 垂直積分된 水動力學的 方程式인데 여기서,

- $t$  時間
- $\lambda, \phi$  東經 및 緯度
- $\xi$  靜止海面上의 海面水位
- $h$  靜止海面下의 水深
- $H=h+\xi$  總水深
- $R$  地球의 曲率半徑
- $g$  重力加速度
- $\omega$  地球回轉의 角速度
- $k_b$  海底摩擦係數
- $u', v'$  靜水面下 水深에서의  $\lambda, \phi$  方向의 流速成分
- $u, v$  水深平均된 流速成分으로 下記와 같다.

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

上記式 (1)~(3)은 移流項의 境遇 Roberts 와 Weiss<sup>(6)</sup>에 의해 提示된 angled-derivative scheme

을 利用하여 數值解를 求하였다. 境界條件으로서 陸地境界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. 基本式 (1)~(3)의 有限差分形의 式은 그림 1에 提示된 有限差分格子體系를 利用하여 黃海 및 東支那海의 潮汐現象을 研究하기 위해 數值的으로 풀이되었는 데 仔細한 數值解析에 의한 解는 이미 紹介되어 있으므로 여기서는 省略키로 한다.

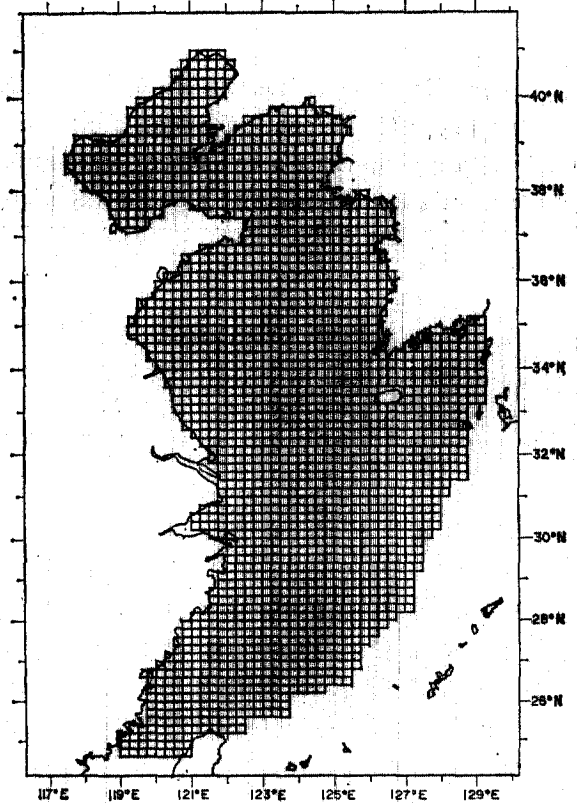


그림 1. Finite-difference grid system of two-dimensional East China Sea shelf model.

球面座標格子體系의 格子間隔은 緯度上 1/5 度, 經度上 1/4 度로서 84 個의 行과 48 個의 列의 配列로서 構成되었으며, 格子間隔은 北緯 38 度에서 約 12 海里이다. CFL 安定條件이 安定된 計算을 위한 指針으로 利用되어 決定된  $\Delta t$ 는 4 太陰分으로서 每潮汐週期當 180 個의 timestep을 形成하였다. 外海境界面은 200 m의 水深을 連結하는 陸棚端(continental shelf edge)을 取하였는

데 境界條件으로는 Ogura의 既存潮汐圖<sup>(4)</sup>에서 抽出한 潮位의 變化로서 規定하였으며 每 timestep 境界面을 通過하는 流速은 連續方程式으로 求해진다. 水深資料는 이 海域의 海圖들로부터 再編輯하여 平均海面下의 水深으로 換算되어 모델에 入力되었다. 一連의 外海境界值를 調節시키는 實驗을 通하여 算定值와 沿岸潮位觀測值가 서로 漸近하도록 努力하였는데 海底摩擦係數  $K$ , 는 一定한 값, 0.0025를 取하고 變化하는 摩擦係數에 의한 모델調整은 試圖되지 않았다. 모델에 의한 各 格子點에서의  $\xi, u, v$ 의 算定은  $t=0$  일 때  $\xi=u=v=0$ 인 初期靜止狀態로부터 出發하였는데 淺海에서는 海底의 摩擦消散率이 높아 初期攪亂效果가 빨리 除去되어 3~4 潮汐週期부터는 安定된 潮汐體系가 形成되었다. 7 潮汐週期の 每格子點에서의  $\xi, u, v$ 가 每 timestep 磁氣데이프에 貯藏되어  $M_2$  分潮,  $M_4$  分潮의 調和常數를 抽出하기 위한 Fourier 分析 및 土砂移動에 關聯되는 變數들을 算定하는데 利用되었다. 모델에 利用된 時間과 遲角은 東經 135 度 子午線을 通過하는 時刻을 太陰時 0 時(遲角은 0 度)로 하였는데 모델의 正確度는  $M_2$  潮位의 境遇, 振幅은 10%, 遲角은 10 度內의 誤差範圍를 가지며 潮流의 境遇는 Larsen 과 Cannon<sup>(5)</sup>에 依해 觀測值와 모델의 算定值가 좋은 一致를 보이는 것이 檢證되었다.

### 3. 모델 結果

#### 3.1 $M_2$ 潮汐 및 $M_4$ 潮汐

모델로부터 算定된  $M_2$  潮位의 分布가 그림 2에 提示되어 있다. 이 結果는 이미 發表<sup>(4)</sup>되었으므로 여기서 討論하지 않기로 한다. 1/4 日週期인  $M_4$  潮位의 分布는 그림 3((a)는 等振幅線圖, (b)는 等遲角線圖)에 提示되어 있는데  $M_4$  無潮點의 位置는 그림 3(a)에 1cm의 閉合된 等振幅線으로 提示되어 있다. 觀測潮位分析에 의한  $M_4$  潮位의 調和常數가 存在하는 數個所에서 모델의 算定值와 比較한 結果가 表 1에 提示되어 있는데 振幅 및 遲角이 標準偏差 4.1 cm, 93 度로 相當히 分散되어 있다. 이 結果는 短期觀測值의 分析에 의한  $M_4$  分潮의 不安定한 값과 모

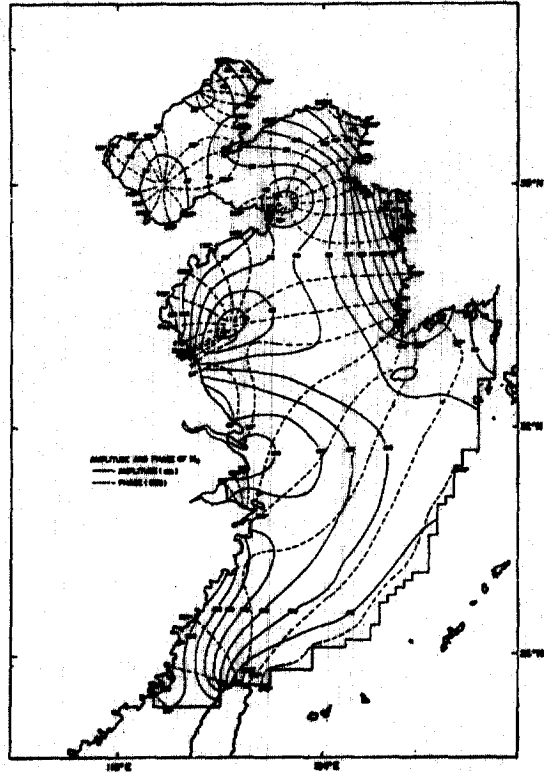


그림 2. Computed  $M_2$  tidal chart

表 1. Comparison of  $M_4$  tide from numerical model results with values from tidal stations (phase in degree referred to 135°E)

Station	Position of Station	Observed		Calculated	
		H	K	H	K
Inchon	37°29'N 126°37'E	8	107	12	95
Gunsan	36°59'N 126°43'E	18	164	17	131
Mokpo	34°47'N 126°24'E	18	300	7	130
Jeju	33°31'N 126°35'E	8	356	3	153
Taku	38°59'N 117°42'E	11	142	7	242
Dairen	38°56'N 121°39'E	1	330	3	290
Ryozyun	38°48'N 121°15'E	1	229	2	326
Chinwan-gtao	39°54'N 119°10'E	4	121	3	167
Newchang	40°38'N 122°10'E	12	286	10	306
Weiheiwei	37°30'N 122°10'E	3	262	3	306
Shanghai	31°21'N 121°30'E	21	27	17	16
Plover point	31°46'N 120°58'E	15	170	18	120

델에 利用된 海底摩擦係數 값이  $M_4$  分潮의 算定

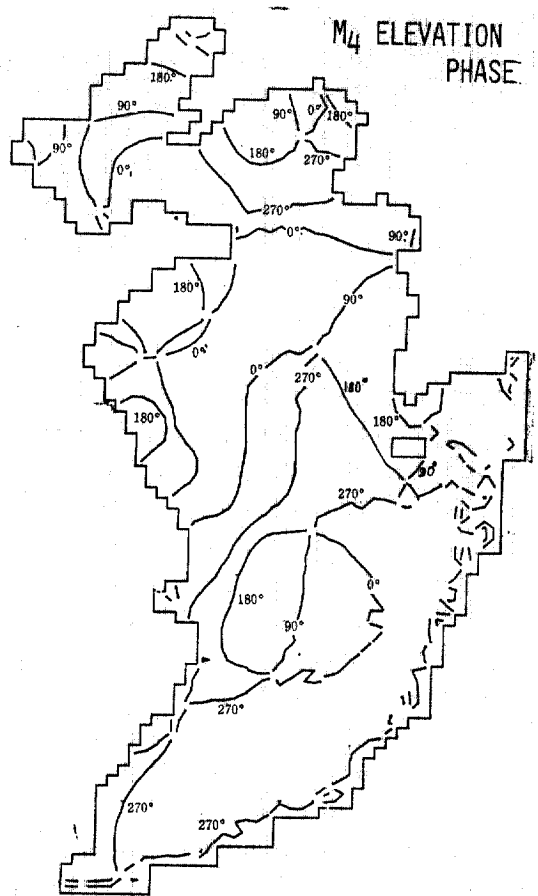
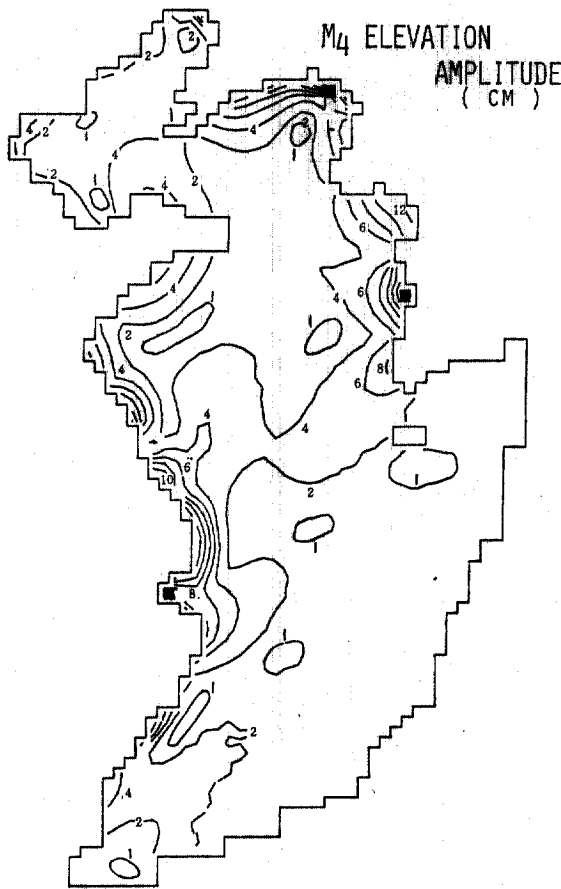


그림 3. (a) Coamplitude chart of  $M_4$  tidal elevation

그림 3. (b) Cophase chart of  $M_4$  tidal elevation

을 위해서는 適合하지 않은 것에도 部分的으로 起因하는 것 같다. 海水의 混合 및 擴散에 큰 影響을 주는 潮流의 分布는 東向, 北向成分의 振幅과 遲角 및 이를 綜合하여 潮流橢圓으로 提示할 수 있다. 그림 4는  $M_2$  潮流의 分布를 東向, 北向成分 潮流의 振幅, 遲角으로 提示하고 있으며 이를 合成한  $M_2$  潮流橢圓圖가 그림 5에 提示되고 있다. 潮流橢圓圖는 長軸, 短軸의 크기, 配列 및 潮流의 回轉方向을 提示하는데 長短軸의 相對的인 크기는 潮流의 橢圓性을 나타낸다. 即 西韓灣, 京畿灣, 濟州海峽, 杭州灣, 臺灣海峽에서는 강한 往復性潮流가 發生하며 北緯 32度 隣近의 陸棚上에 강한 回轉性潮流가 發生하는 것을 그림 5는 보여주고 있다. 또한 長軸의 配列方向은 黃海와 東支那海陸棚體系의 潮汐의 波及方向을 提示하는데 等振幅圖, 等潮時圖와 더불어

이 海域의 一般의인 潮汐力學을 잘 說明해 주고 있다. 그림 6(a)~6(d)는  $M_4$  潮流의 東向, 北向成分의 振幅과 位相을 提示하는데  $M_2$  潮流가 강한 海域에서 一般的으로  $M_4$  潮流가 強하며 節線分布가 많은 것이 보여지고 있다. 이와 같이 東支那海陸棚의 主太陰半日週潮( $M_2$ )는 複雜한 樣相을 보이고 있는데  $M_4$  潮汐이 더불어 言及된 것은  $M_2$  潮汐과  $M_4$  潮汐의 相互關係가 密接한 關聯이 있기 때문이다.

### 3.2 平均海底摩擦應力 및 最大海底摩擦應力

모델로부터 海底摩擦應力은

$$\tau_B = \rho K_b u |u| \quad (5)$$

의 式으로 算定되는데 平均摩擦應力  $\bar{\tau}_B$  는  $\overline{u|u|}$  로부터 最大摩擦應力  $\tau_{Bmax}$  는  $u_{max}|u_{max}|$  로부터 求해진다. 算定된 平均 및 最大海底摩擦應力배터

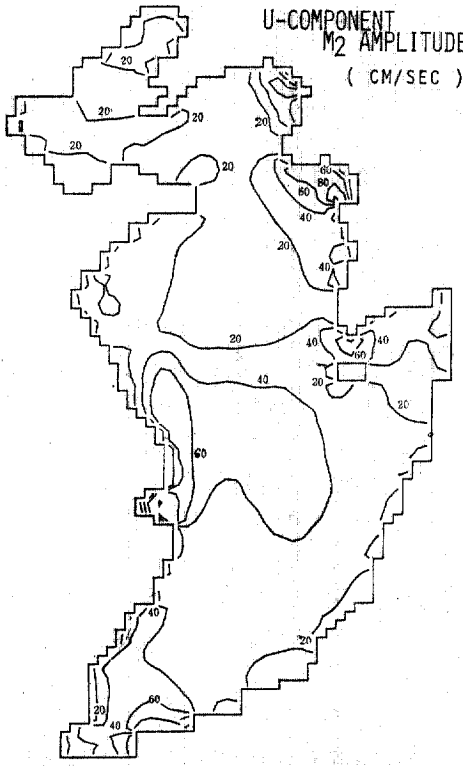


그림 4. (a) M<sub>2</sub> amplitude of *u*-component tidal current

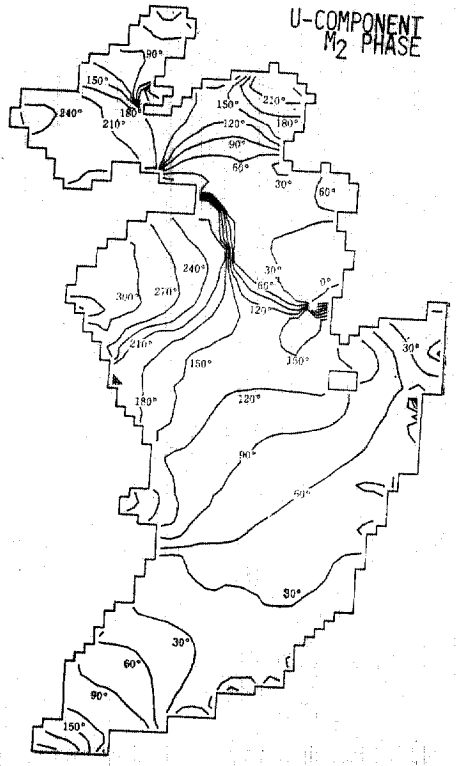


그림 4. (b) M<sub>2</sub> phase of *u*-component tidal current

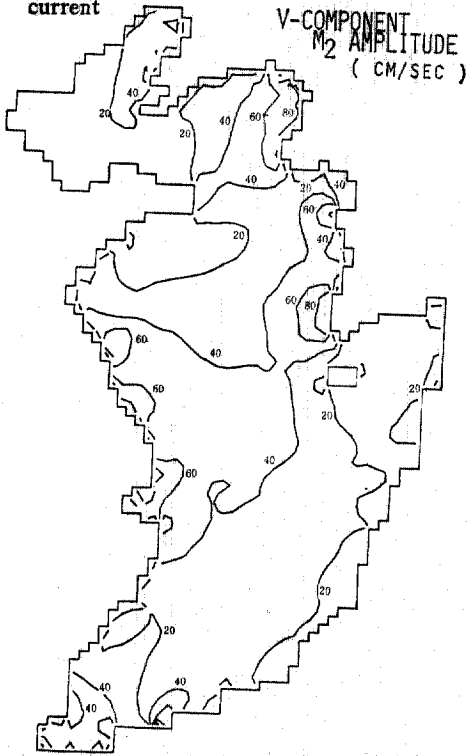


그림 4. (c) M<sub>2</sub> amplitude of *v*-component tidal current

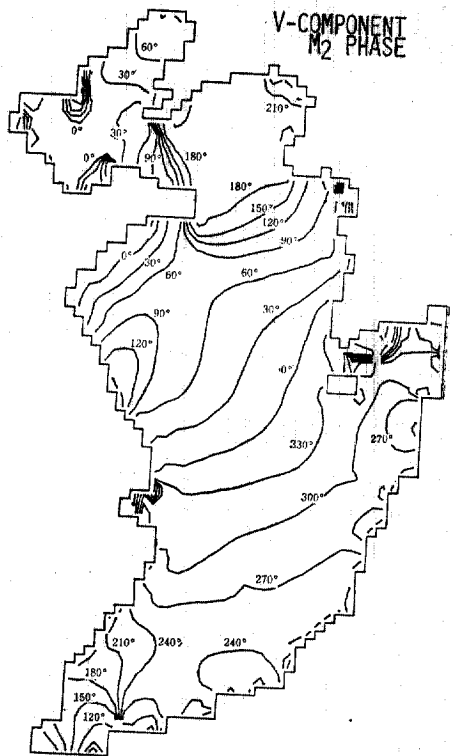


그림 4. (d) M<sub>2</sub> phase of *v*-component tidal current

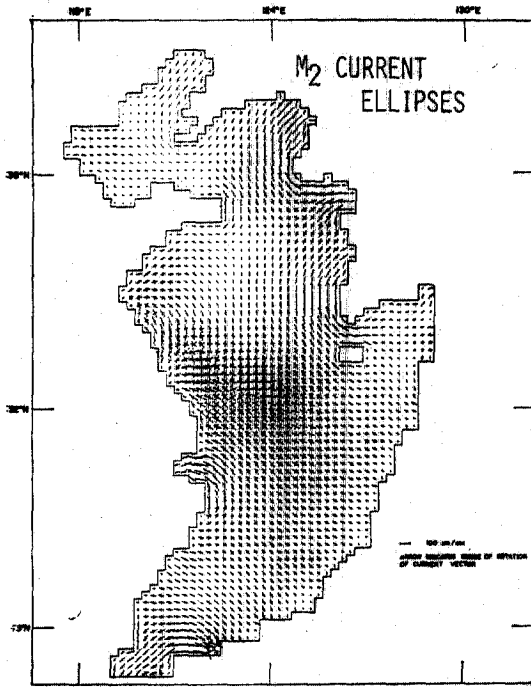


그림 5. Principal axes of  $M_2$  tidal current ellipses.

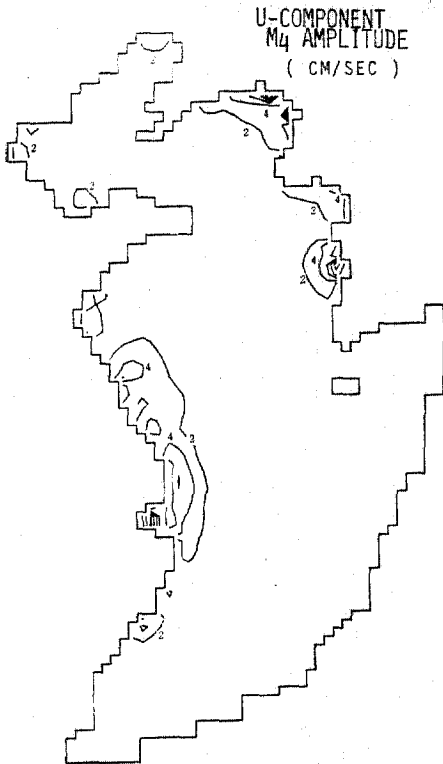


그림 6. (a)  $M_4$  amplitude of  $u$ -component tidal current

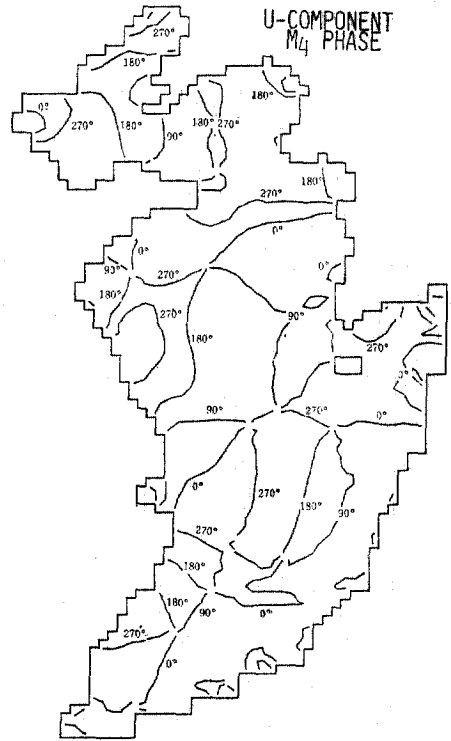


그림 6. (b)  $M_4$  phase of  $u$ -component tidal current

의 分布가 그림 7 및 그림 8에 提示되어 있으며 등應力線의 分布는 그림 9 및 그림 10에 提示된다. 높은 應力分布는 潮流가 강한 西韓灣, 京畿灣 및 杭州灣에서 發生한다. 應力벡터의 分布에서 土砂移動과 密接한 關聯을 갖는 것은 最大海底應力벡터의 分布이므로 仔細히 檢討해 必 要가 有하다. 그림 8에 示하듯 西韓灣, 京畿灣 及 杭州灣의 內灣의 應力벡터는 內側으로 向하고 有하다. 이는 이 海城에서 漲潮流가 優勢한 反面 落潮流는 弱하나 相對的으로 오랜 持續時間을 갖기 때문이다. 이의 物理的 要因으로는  $M_2$  潮流와  $M_4$  潮流를 包含하는 複合潮 及 潮汐殘差流가 漲落潮曲線의 非對稱形狀을 誘發시킨다. Stride<sup>(10)</sup> 는 北海陸棚의 土砂移動研究에서 海底 sand wave의 非對稱形狀 及 傳播方向을 尖頭落潮와 尖頭漲潮의 強度差에 의한 것이라 說明하였으며, Pingree와 Griffiths<sup>(3)</sup>는 土砂移動經路를  $M_2$  潮流와  $M_4$  潮流의 相互作用에 의한 摩擦應力의 分布로서 理論的으로 說明하였다. 前述된 應力벡터가 內灣으로 向하는 境遇는 灣으로 들어가는

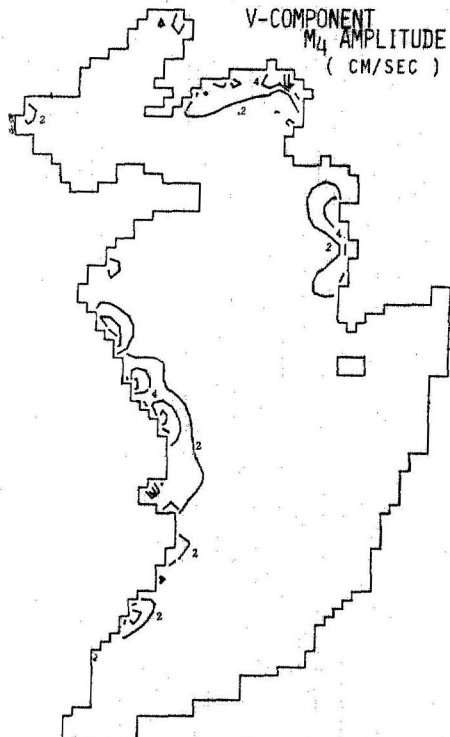


그림 6. (c)  $M_4$  amplitude of  $v$ -component tidal current

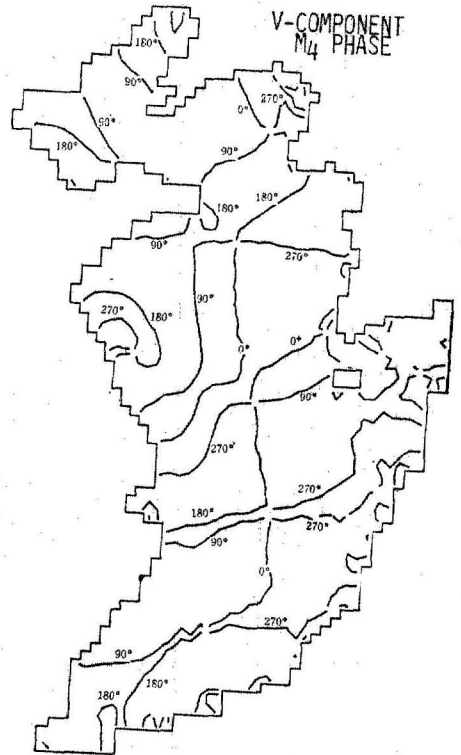


그림 6. (d)  $M_4$  phase of  $v$ -component tidal current

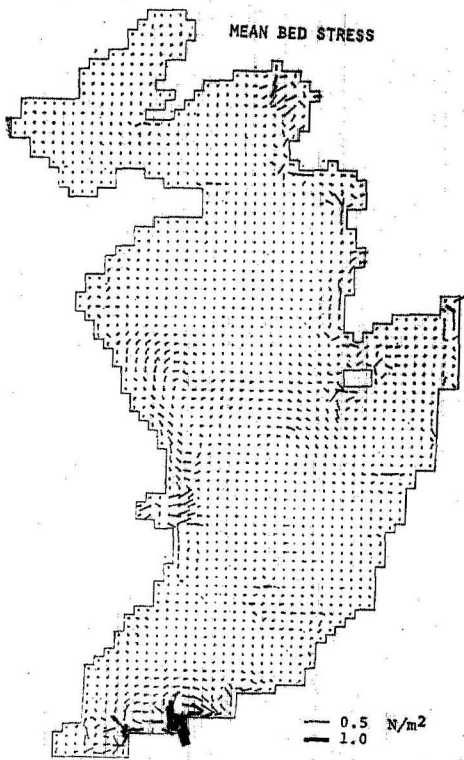


그림 7. Mean bed stress vectors

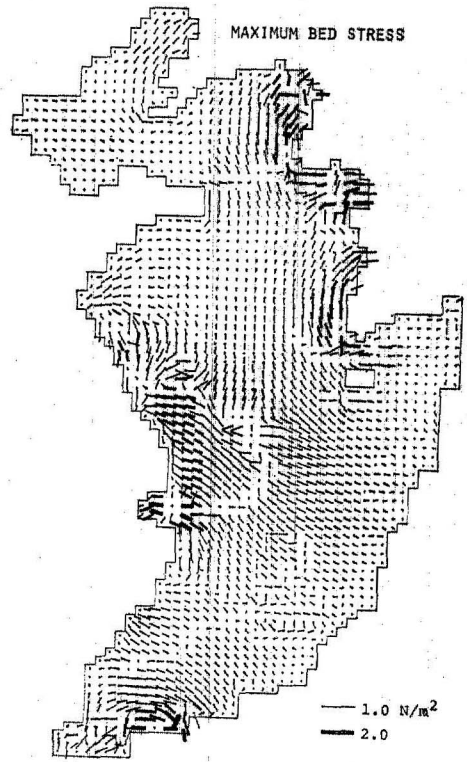


그림 8. Maximum bed stress vectors

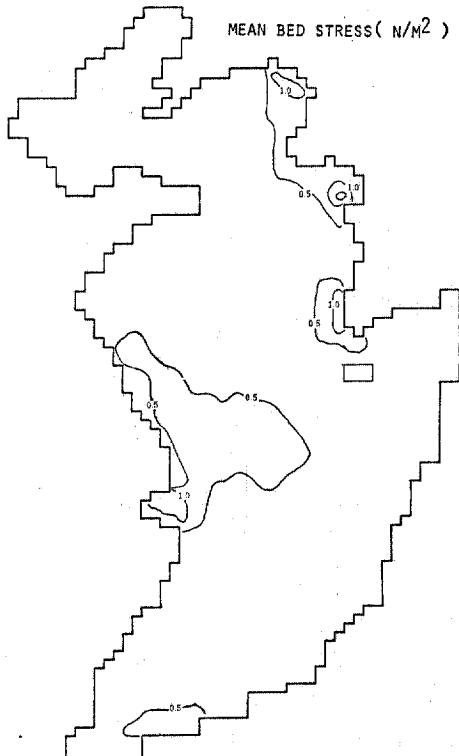


그림 9. Mean bed stress

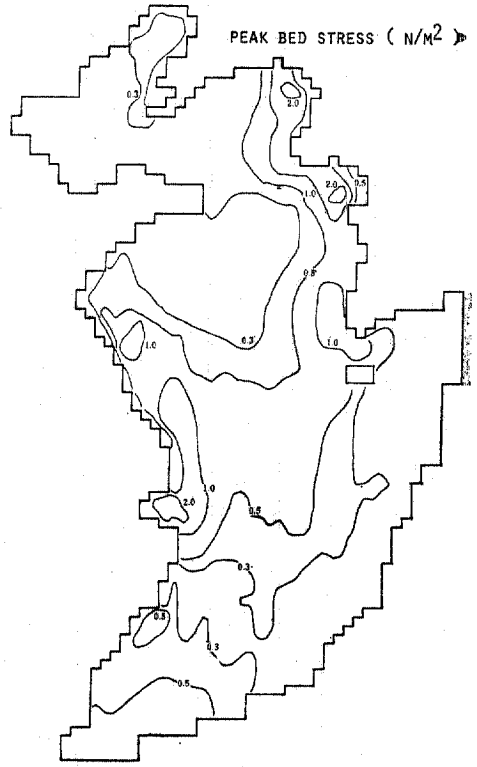


그림 10. Maximum bed stress

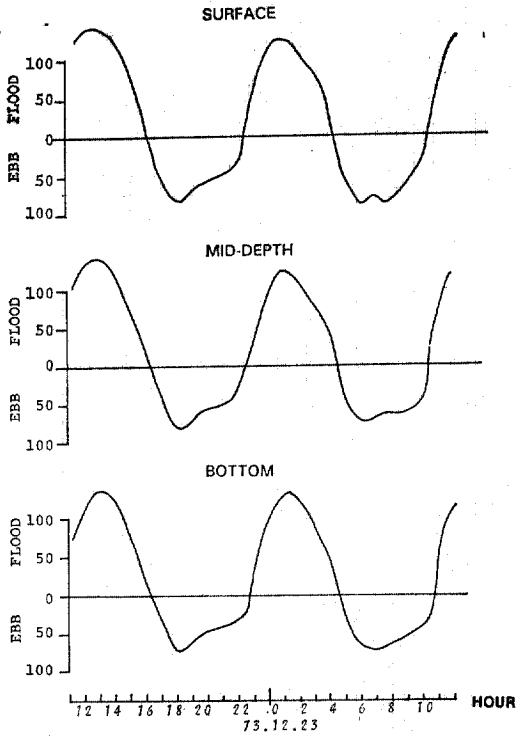


그림 11. Observed tidal currents at Asan Bay

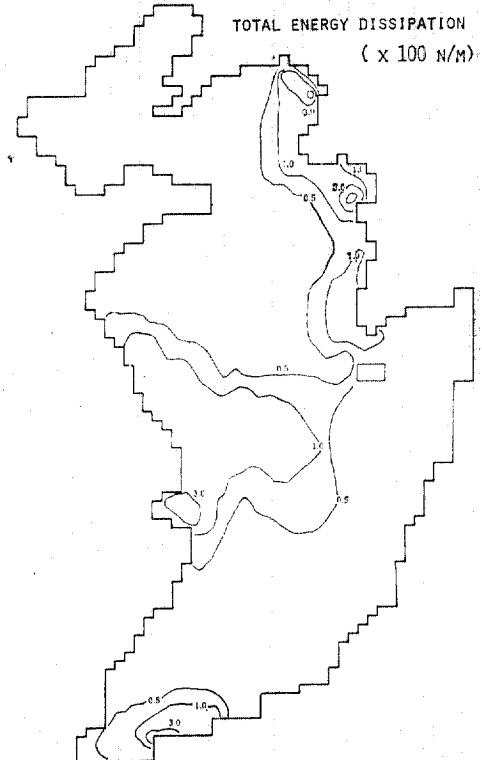


그림 12. Total energy dissipation in the East China Sea.



潮流의 運動에 너지는 消散되기 때문에 들어가는 運動에 너지는 灣에서 나가는 運動에 너지보다 커야 되는데 그림 11에 表示된 牙山灣의 潮流曲線(11)과 같은 경우에 나타난다. 높은 海底應力分布는 강한 潮流가 發生하는 海域과 一致하며 높은 浮遊砂濃度를 갖는 海域과도 一致하는 것으로 알려져 있다. 그림 8에 提示된 最大海底應力벡터의 分布에서 또한나 特記할 事項은 無潮點( amphidromic point)附近에서 應力벡터는 서로 不同 方向으로 發散(divergence)하는 것인데 山東半島 및 中國海岸中部의 無潮點附近에서 이 傾向은 뚜렷하며 西韓灣, 京畿灣을 包含하는 우리 나라 西海岸, 大揚子江砂推地域, 杭州灣 等의 높은 潮汐에너지應力을 갖는 海域과도 一致하는데 그림 12에 提示된 한 潮汐週期를 通한 總에너지消散이 100 N/m 되는 線과 거의 一致한다. 流速의 四乘은 海底掃流砂의 移動포텐셜을 提示하는 變數로서 利用되는데 모델에 의해 算定된 最大流

速에 의한 最大移動포텐셜의 分布가 그림 13에, 그리고 한 潮汐週期에 對한 平均流速에 의한 平均移動포텐셜의 分布가 그림 14에 提示되어 있는데 西韓灣, 京畿灣 및 杭州灣이 높은 移動포텐셜을 提示하고 있어 이 海域의 뚜렷한 動的堆積體系를 再確認시키고 있다. Pingree와 Griffiths는 北海의 土砂移動經路의 推定에서 土砂移動은 주로 尖頭應力에 의하여 移動된다고 敍述하였다. 上記事項들을 土臺로 하여 黃海, 東支那海의 土砂移動經路를 一次의으로 推定한 것이 그림 15에 提示된다. 掃流砂의 發散 및 堆積推定海域이 各已 表示되어 있는데 우리 나라 西海岸 및 中國中部沿岸에 應力벡터가 收歛(converge)하는 海域에 掃流砂의 堆積可能性이 높다.

#### 4. 討 議

本 研究에서 모델에 의해 誘導된 平均海底摩

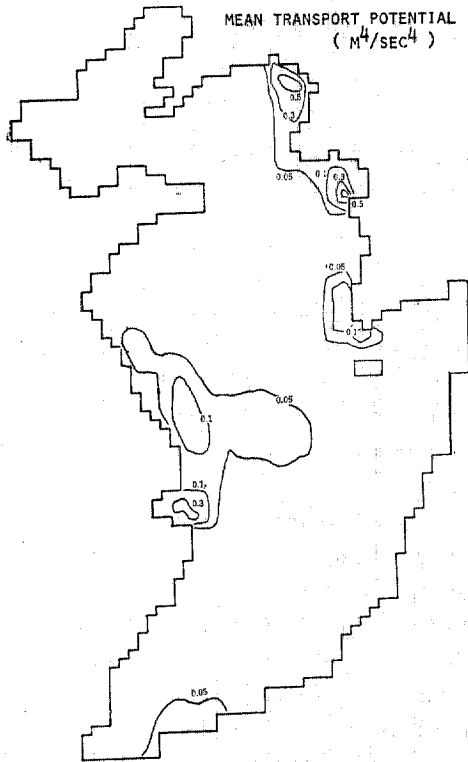


그림 13. Mean transport potential in the East China Sea

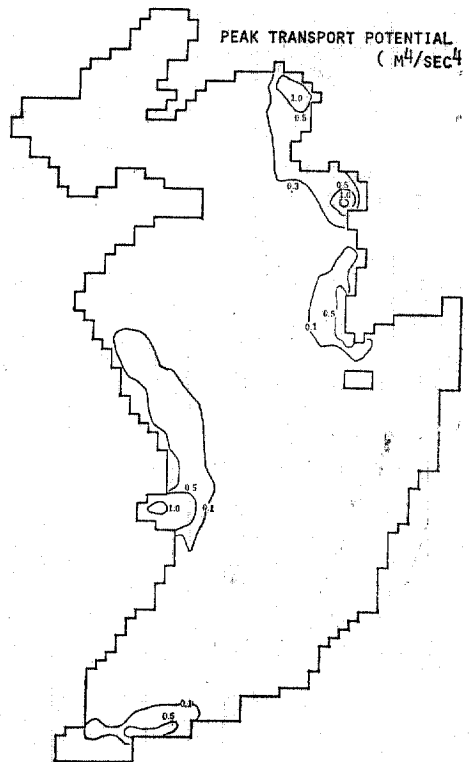


그림 14. Maximum transport potential in the East China Sea.

## 5. 結 論

近年에 長江(揚子江)의 流出水가 黃海, 東支那海의 陸棚體系에 미치는 影響에 대한 堆積學的 研究가 主要研究課題로서 美·中共共同海洋 觀測을 통해서 活潑한데 于先 이 海域의 海水流動 現象의 徹底한 糾明이 先行되어야 動力學的 堆積體系에 대한 理解가 可能하다. 이와 關聯하여 一連의 動力學的 流動모델을 利用한 循環研究가 遂行되고 있으며 本 研究는 그 一環으로 이루어 졌다. 推定된 土砂移動經路를 立證하기 爲해서 는 좀 더 廣範圍하고도 仔細한 現場資料가 必要하다. 追後의 모델研究는 3次元 流動解析모델<sup>(12)</sup>의 應用일 것이며 바람, 波浪에 의한 影響, 土砂의 粒經別 分布도 考慮될 수 있는 모델의 開發이라 思料된다. 西韓灣, 牙山灣, 錦江河口等 을 잘 解像시킬 수 있는 모델에 의한 局地的인 動的堆積體系의 研究도 始作되어야 할 것인데 適合한 裝備 및 觀測機器를 利用한 現場觀測프로 그램이 必須的으로 遂行되어야 한다.

## 謝 辭

本 研究의 一部는 1983年度 韓國科學財團의 部分的인 研究費支援에 의해 遂行되었다.

## 參 考 文 獻

1. Yunshan, Q. and L. Fan. The effect of sediment loads discharged by Huanghe River on sedimentation in Bohai Sea and Huanghai Sea. *Paper presented to Symposium on Sedimentation on the Continental Shelf*, April 1983, Hangzhou, China.
2. Milliman, J.D. and Y. Zuosheng. Transfer of suspended sediment from the Changjiang River to the East China Sea. *Paper presented to Symposium on Sedimentation on the Continental Shelf*, April 1983, Hangzhou, China.
3. Pingree, R.D. and D.K. Griffiths. Sand transport paths around the British Isles resulting from  $M_2$  and  $M_4$  tidal interactions. *Journal of the Marine Biological Association of the U.K.*, 1979, 59, pp. 497~513.

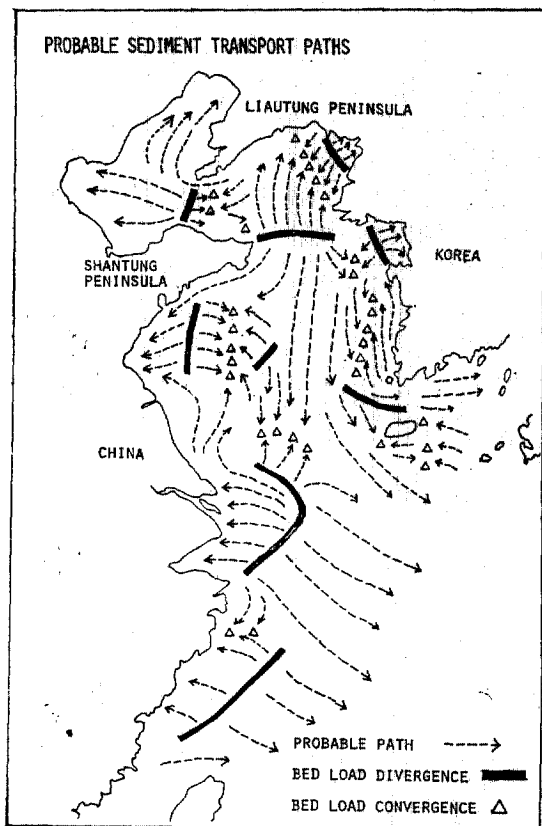


그림 15. Probable sediment transport paths in the East China Sea

擦力 및 最大摩擦力の 分布는  $M_2$  潮汐과  $M_4$  潮汐外에  $M_6, M_8, M_{10}$  및 潮汐殘差流의 效果가 除去되지 않은 것이다. 理論式에서 이 값들은 實際보다 過大推定될 수 있으나 모델算定結果는 대체적으로 微少한 값을 가졌으므로 分離하지 않았다. 嚴密하게 말하면 潮汐殘差流의 分布가 前回の 研究<sup>(4)</sup>에서 提示되었는데 모델의 格子가 12海里이므로 局部的地形을 잘 解像시키지 못하기 때문에 實際에 있어서는  $M_2$ 와  $M_4$  潮汐에 依한 摩擦力和 그 程度가 비슷하거나 局部的으로 커서 結果에 큰 影響을 줄지도 모른다. 또한 季節的인 海流循環, 北西季節風, 颱風에 의한 堆積土移動이 考慮되어야 할 事項이나 本 研究에서는 包含되지 않았다.

4. Choi, B.H. A tidal model of the Yellow Sea and the Eastern China Sea. *Korea Ocean Research and Development Institute(KORDI) Rep.* 80~02, 1980, 72p.
5. Larsen, L.H. and G.A. Cannon. Tides in the East China Sea. *Paper presented to Symposium on Sedimentation on the Continental Shelf*, April 1983, Hangzhou, China.
6. Flather, R.A. A tidal model of the North-West European continental shelf. *Memoires de la Societe Royale des Sciences de Liege, Ser 6, 10*, 1976. pp.141~164.
7. Davies, A.M. A numerical model of the North Sea and its use in choosing locations for the deployment of offshore tide gauges in the JONSDAP '76 oceanographic experiment. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, 29, 1977, pp.11~24.
8. Roberts, K.V. and N.O. Weiss. Convective difference schemes. *Math. Comput.* 20, 1967, pp. 272~299.
9. Ogura, S. The tides in the seas adjacent to Japan. *Bulletin of Hydrographic Department, Imperial Japanese Navy*, 1933, 7, 189p.
10. Stride, A.H. *Sediment transport by the North Sea. in, North Sea Science*, (ed. E.D. Goldberg). Cambridge: MIT Press, 1973, pp.101~130.
11. 韓國産業基地開發公社, 牙山灣 海象調査報告書, 建設部, 1974, 55p.
12. Choi, B.H. *A three-dimensional model of the East China Sea. Ocean Dynamics of the Japan and East China Seas*. Elsevier Science Publishers (in Press).

(接受: 1983. 10. 31)