아라비아灣의 潮汐모델

A Tidal Model of the Arabian Gulf

崔 秉 昊*
Choi, Byung Ho

Abstract

A fully non-linear two-dimensional model for studying basic tidal dynamics within the Arabian Gulf has been formulated. The model extends to the east as far as continental shelf edge and has a mesh resolution of 1/12 degree latitude by 1/10 degree longitude. The developed model was used to investigate the distribution of dominant M_2, S_2, K_1, O_1 and N_2 tides adopting the open boundary tidal information from Schwiderski's global ocean tidal model. Computed coamplitude and cophase charts were presented independently and comparison between these charts and existing Admiralty tidal charts were made. Maximum bottom stress vector during the semidiurnal period due to M_2 and M_4 tides are also presented to suggest the possible direction of sediment movement in the region.

要 旨

本 硏究에서는 아라비아灣(페르시아灣)의 基本的인 潮汐力學을 硏究하기 위한 2次元 潮汐數値 모델을 樹立하였다. 모델外海境界는 灣東側의 陸棚端에 位置하며 緯度上 1/12°, 經度上 1/10°의 格子解像度를 갖는다. 樹立된 모델은 M_2, S_2, K_1, O_1 및 N_2 分潮의 分布를 調査하기 위해 일차적으로 利用되었는데 外海開放境界條件은 Schwiderski의 海洋潮汐 모델로부터 취하였다. 主分潮의 獨立的인 等振幅과 等位相圖가 提示되었으며, 旣存英國水路部의 潮汐圖와도 比較檢討되었다. M_2分潮와 M_4分潮에 의한 半日週期의 最大海底應力벡터가 이 海域의 土砂移動 方向을 推定하기 위해 提示되었다.

1. 序 論

아라비아灣은 아라비아半島의 南東端에 位置하고 있으며 平均 길이는 900~1,000km, 幅는 50~350km 이며, 約 240,000km²의 水面積을 갖고 있는데 平均水深은 30m 의 淺海이며 홀므즈海峽에 의해 오만灣과 連結되어 있다. 이 海域에서 우리나라 建設會社들이 活潑한 建設活動을 展開한 바 있으며, 또한 原油輸送으로 인해 世界的으로 海運活動이 活潑한 海路를 形成하고 있다. 이 海域의 淺海海洋力學을 硏究하기 위하여 國際聯合環境保護 프로그램(UNEP)에서 Kuwait Action Plan 이라는 題下로 새로운 技法들을 適用한 海洋 모델링을 勸奬하고 있는 데 모델의 檢證, 改善을 위한 協力機關으로는 ROP-

* 正會員 · 成均館大學 工科大學 敎授, 土木工學科

ME(Regional Organization for the Protection of the Marine Environment)가 設置되어 있다. 上記機關들이 主管한 學會에서 Le Provost[1]는 이 海域의 旣存모델들에 대한 比較評價를 통해 모델의 改善方向을 提示하였는 바 球面座標系의 採擇, 移流項을 包含한 非線型모델, 細格子體系, 潮汐相作互用의 考慮 및 改善된 摩擦項의 包含等이다.

本稿에서는 이 淺海域의 潮汐現象을 動水力學的인 原理에 立脚하여 上記 提案된 改善點을 收容하는 數値모델에 의해 調査한 初期結果를 收錄하는데 目的을 두고 있다.

2. 모 델

潮汐方程式은 地球의 曲率 및 緯度에 따른 偏向力을 考慮하여 球面座標系上에 樹立되었는 데 非線型 移流項과 子乘型 摩擦項이 包含되며, 그 形態는 下記와 같다.

$$\frac{\partial \xi}{\partial t}+\frac{1}{R\cos\phi}\left\{\frac{\partial(dU)}{\partial x}+\frac{\partial(dV\cos\phi)}{\partial \phi}\right\}=0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t}-2\omega\sin\phi V+\frac{U}{R\cos\phi}\frac{\partial U}{\partial x}+\frac{V}{R\cos\phi}\frac{\partial}{\partial\phi}(U\cos\phi)=\frac{-g}{R\cos\phi}\frac{\partial\xi}{\partial x}-\frac{1}{\rho R\cos\phi}\frac{\partial P}{\partial x}-\frac{kU(U^2+V^2)^{\frac{1}{2}}}{d}+\frac{F^{(s)}}{\rho d} \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t}+2\omega\sin\phi U+\frac{U}{R\cos\phi}\frac{\partial V}{\partial x}+\frac{V}{R}\frac{\partial V}{\partial\phi}=\frac{-g}{R}\frac{\partial\xi}{\partial\phi}-\frac{1}{\rho R}\frac{\partial P}{\partial\phi}-\frac{kV(U^2+V^2)^{\frac{1}{2}}}{d}+\frac{G^{(s)}}{\rho dL} \quad (3)$$

式 (1)~(3)은 垂直積分된 動水力學的 方程式인 데 여기서,

t : 時間

x, ϕ : 東經 및 緯度

ξ : 靜止海面에 대한 水位

h : 靜止海面下의 水深

$d=h+\xi$: 總水深

R : 地球의 曲率半徑

g : 重力加速度

ω : 地球回轉의 角速度

k : 海底摩擦係數

$F^{(s)}, G^{(s)}$: x, ϕ 方向의 바람에 의한 海面應力成分

P : 海面氣壓

U', V' : 靜止海面下水深 z에서의 x, ϕ 方向의 流速成分이며, 水深平均된 流速은 下記와 같다.

$$U=\frac{1}{h+\xi}\int_{-h}^{\xi}U'(z)dz$$

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

上記式 (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 아라비아灣의 潮汐 및 氣象影響에 의한 海面變化를 硏究하기 위해 數値的으로 풀이되었는 데 詳細한 有限差分式은 이미 紹介[2,3]되어 있으므로 여기서는 省略한다. 非線型 移流項은 'angled derivative' 方法[4]을 採擇하여 處理하였다. 球面座標系 數値모델의 格子解像度는 經度上 1/12°, 緯度上 1/10°로서 約 9km에 該當하는데 아라비아灣全體의 潮汐樣相을 硏究하기 위한 基本 모델로는 適合한 解像度를 갖는다고 생각된다. 每格子의 中心에는 靜水面(平均海面)下 水深이 定義되며, 海圖(British Admiralty 및 NOAA/NOS)로부터의 水深을 補正시킨 水深을 入力하였다. 그림 2는 이 水深資料를 次元的으로 鳥瞰한 것으로 아라비아側의 얕은 水深과 이란 沿岸側의 相對的으로 깊은 水深이 뚜렷한 非對稱을 提示하고 있다. 數値모델을 潮汐과 氣像影響에 의한 海溢과의 相互作用도 算定할 수 있도록 汎用的으로 設計되었으나 本 硏究에서는 上記基本式 (2)(3)에서 氣象影響을 나타내는 海面應力項과 壓力傾斜項을 除外시킴으로써 순수한 潮汐만을 算定하였다. CFL 安定條件이 安定된 計算을 위한 指針으로 利用되어 採擇된 Δt는 133.078秒로서 1潮汐週期當 336個의 timestep을 形成하였다. 海底摩擦係數 k는 一定한 값 0.0025를 取하였다. 모델에 依한 ξ, U, V의 算定은 $t=0$일 때 $U=V=0$인 初期靜止狀態로부터 出發하였는 데 淺海에서는 海底의 摩擦消散率이 높아 初期攪亂效果가 빨리 除去된다. 境界條件으로서 陸地境界에 直角인 方向의 流速은 없는 것으로 假

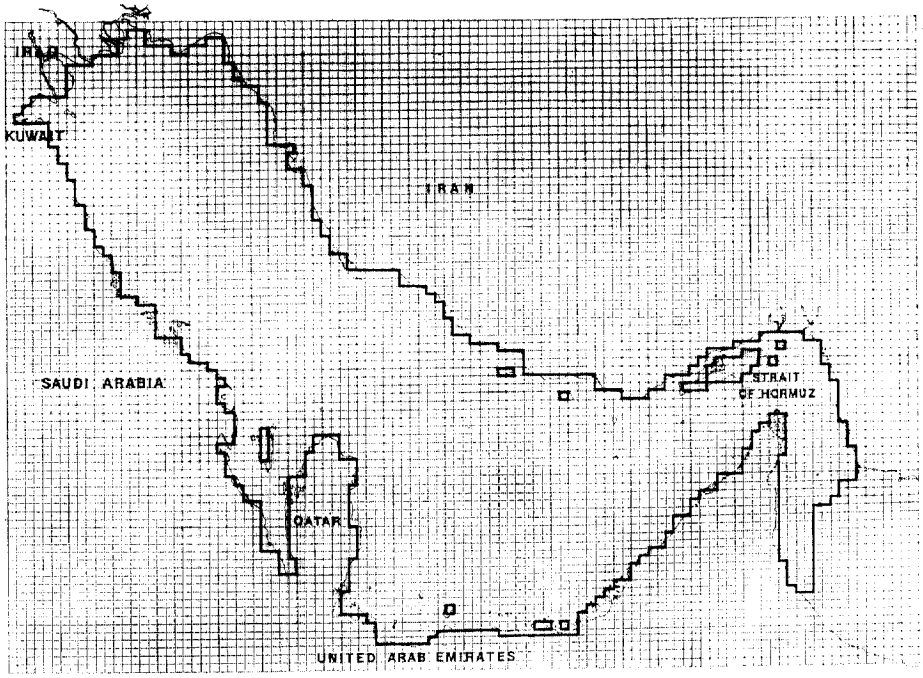


그림 1. 아라비아灣 潮汐모델의 有限格子體系

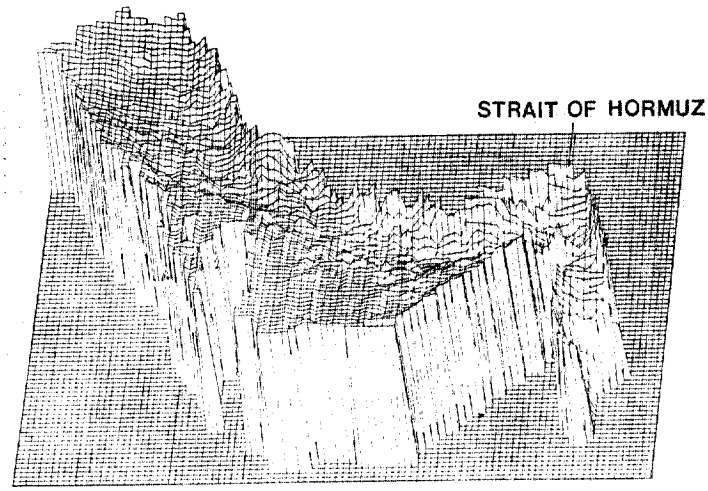


그림 2. 아라비아灣水深의 3次元的 透視圖(陸地部分은 人爲的으로 下降시킴)

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. 開放境界의 潮汐變化 ξ_T는 調和理論에 立脚하여 下記와 같다.

$$\xi_T(x,\phi,t)=Z_0(x,\phi)+\sum_{i=1}^{n} f_i H_i(x,\phi)\cos[V_i+\sigma_i t+u_i-g_i(x,\phi)] \quad (5)$$

여기서 Z_0 : 平均海面

f_i, u_i : 分潮의 振幅과 位相의 18.6年 變化를 考慮한 nodal factor,

H_i : 分潮 i의 振幅

σ_i : 分潮의 角速度

V_i : Greenwich에서 $t=0$에서 平衡分潮에 相應하는 位相

g_i : 分潮의 遲角

이다. 本 硏究에서는 오만灣에 位置한 外海境界潮汐條件을 Schwiderski의 모델[5](Global Ocean Tidal Model)에서 M_2 分潮만을 취한 M_2 分潮모델 및 $M_2, S_2, K_2, N_2, K_1, O_1, Q_1, P_1$ 潮汐의 8個分潮를 複合的으로 取해 特定 1個月間의 潮汐을 模擬發生시키고 이를 每格子點에서 調和分析하여 主分潮인 M_2, S_2, K_1, O_1 및 N_2潮汐의 等潮汐圖를 提示하였다. 이 海域의 平均潮汐狀況을 提示하는 M_2潮汐모델의 結果로는 最大海底摩擦應力의 分布를 算定하여 堆積學的 推論의 根據가 될 수 있게 하였다.

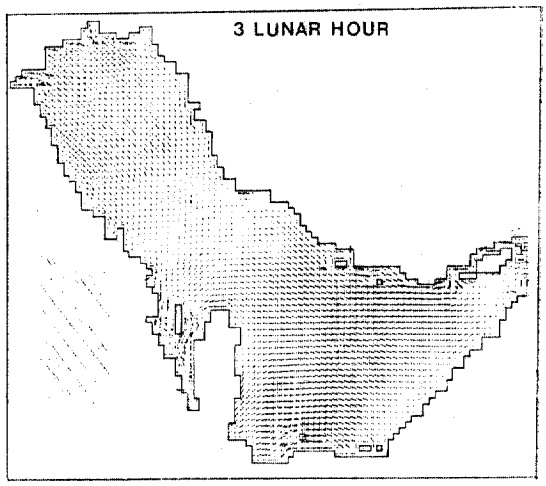


그림 3. 모델에 의해 算定된 潮流分布(中潮時 太陰이 東經 60度를 通過한 後 3時間後의 狀況으로 한 格子크기는 20cm/sec 임)

3. 모델結果

3-1, M_2 潮汐모델

平均潮汐狀況을 나타내는 M_2潮汐의 算定을 위해서 陸棚端의 M_2潮汐의 振幅 및 位相(東經 60度基準)은 Schwiderski의 Global Ocean Tidal Data로부터 取하여 開放境界條件으로 利用함으로서 遂行하였다. 6번째 潮汐週期의 모델 格子마다 算定된 潮位 및 x, ϕ 方向의 流速이 每 10分마다 磁氣테이프에 收錄되어 일련의 分析過程을 거친 結果가 提示된다. 그림 3은 太陰이 東經 60度를 通過한 後 3時間 後(3太陰時)의 算定된 潮汐벡터의 分布인데 Iraq와 Qatar에 이르는 區間에서의 落潮流와 Hormuz와 Qatar 區間의 漲潮流가 例示되어 있다. 本 모델에 採擇된 基本潮汐方程式이 非線型이므로 開放境界面

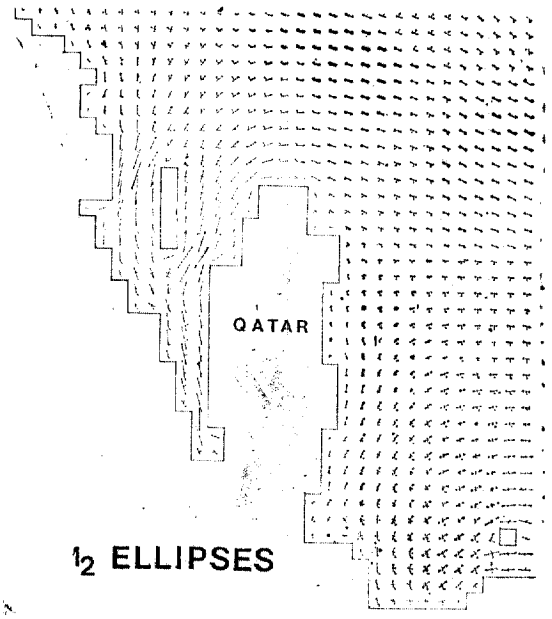


그림 4. 모델에 의해 算定된 M_2潮流楕圓圖 (한 격자 크기는 40cm/sec 에 해당함).

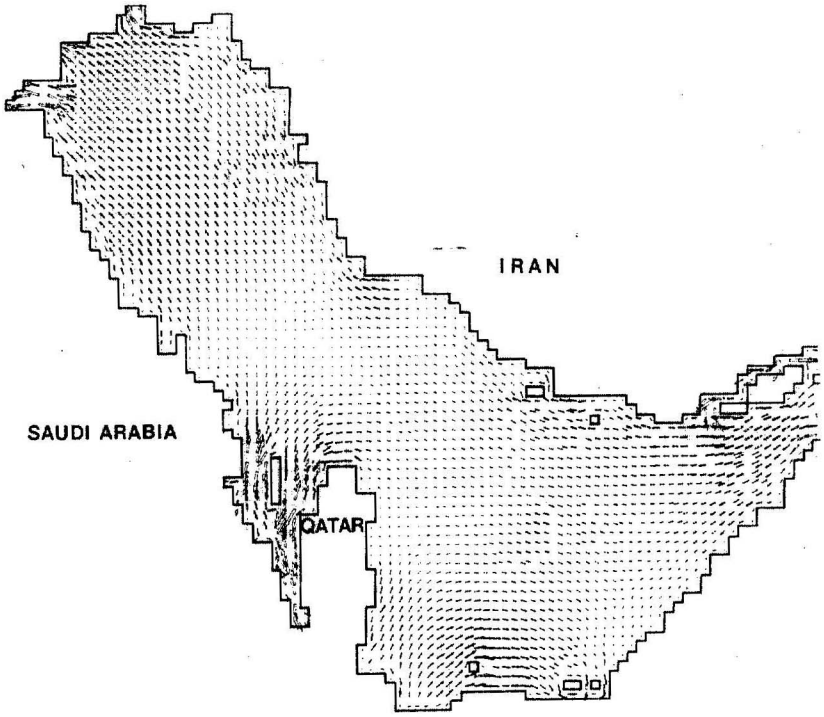


그림 5(a). 最大海底摩擦應力벡터의 分布(한 격자크기는 0.2N/m²에 해당)

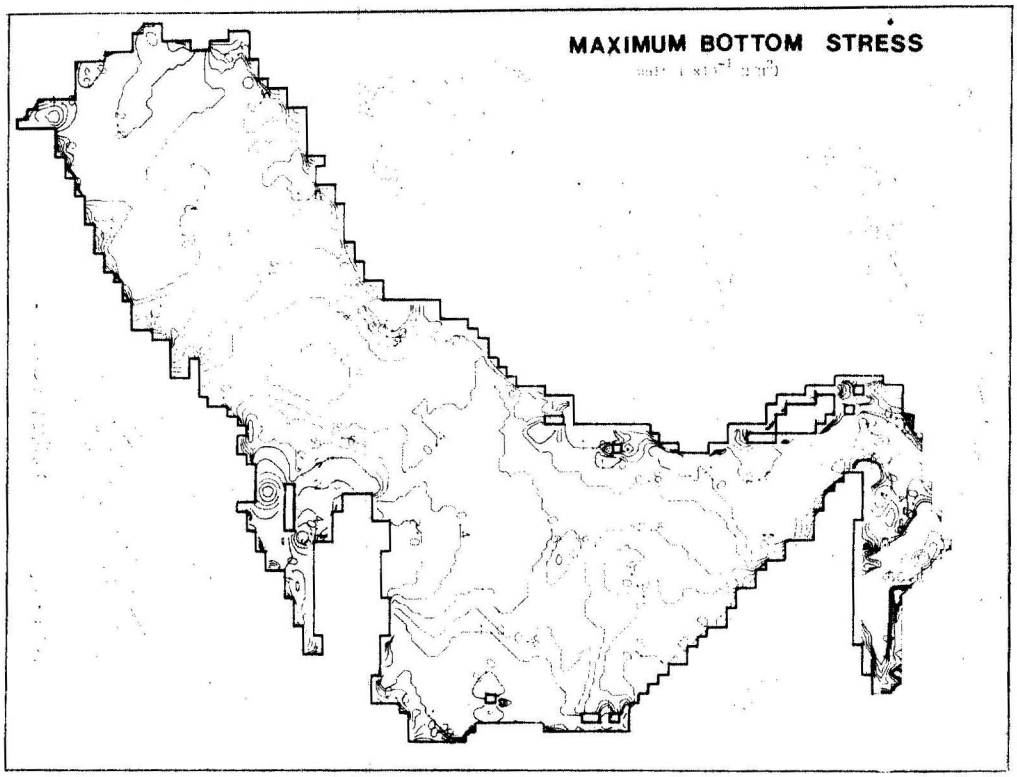


그림 5(b). 最大海底摩擦應力의 等値線圖

에 入力되는 週期의 倍數週期의 harmonic이 發生하므로 基本潮汐週期의 分潮의 振幅과 位相을 알기 위해서는 算定된 每格子點의 潮位(流)時系列을 Fourier 分析한다. 潮流의 境遇 Fourier 分析된 x, ϕ 方向성분의 流速(振幅, 位相)을 合成하면 潮流楕圓이 每格子點에서 算定된다. 그림 4는 모델에 의해 算定된 M_2潮流楕圓으로서 半長軸과 半短軸이 各己 最强 및 最低流速을 나타내며, 長軸의 配列方向이 潮汐의 波及 方向을 提示하는데 Bahrain의 兩側을 통과하는 潮流는 中潮狀況에서 50cm/sec 程度로서 아라비아灣도 局地的으로는 강한 潮流가 發生한다. 모델로부터 海底摩擦應力은

$$\tau_B = \rho k \vec{U} |\vec{U}| \qquad (6)$$

로 算定되는 데 流速을 最大漲潮 또는 最大落潮를 取할 때 最大潮汐摩擦應力(maximum tidal stress)의 分布는 그림 5(a)와 같은 벡터分布圖 및 5(b)와 같은 等 應力線圖로서 提示된다. 이 最大摩擦應力은 海底에 堆積된 土砂를 移動시킬 수 있는 潮流의 能力을 相對的으로 評價할 수 있는 變數로서 아라비아灣의 北西端의 內側應力벡터는 이 部近에 잘 發達된 線型砂州들의 生成機構를 物理的으로 定性的인 觀點에서 說明해주고 있으며 Qatar 右側 Bahrain 周邊海域에서는 發散, 收斂되는 벡터는 土砂의 洗掘, 堆積可能性이 높아 動的 堆積環境이 造成되고 있다. 一般的으로 瞬間的인 海底土砂의 輸送率은 流速의 四乘에 比例하는 데 이는 모래移動이 波浪影響을 除外한 境遇 最强流速時에 일어나는 것을 意味하는 바 潮流의 非線型性에 의한 漲落潮의 强度差가 移動方向을 決定한다.[6] 그림 5의 벡터算定을 위해 採擇된 最强流速은 潮流(M_2, M_4 分潮)와 潮汐殘差流(恒流)가 複合된 것이다.

3-2. 等潮汐圖

그림 6은 英國海軍水路部(British Admiralty hydrographic department)가 沿岸觀測値를 土臺로 經驗的으로 作成한 等潮汐圖[7]로서 M_2, S_2 K_1 分潮의 等振幅과 等遲角(位相)을 各己 提示한다. 이 그림에서 半日週潮는 2個의 뚜렷한 無潮點과 日週潮는 1個의 無潮點이 잘 提示되는데 이러한 體系는 Kelvin-Taylor 無潮點體系[8]라 稱하며 한쪽이 閉鎖되고 回轉影響을 받는 矩形水路에서의 數學的인 解로서도 잘 알려져 있다. 潮汐圖가 提示하는 Hormuz 海峽을 通해 Arabia 灣에 波及되는 潮汐에너지는 Kelvin 波의 形態로서 Iran 側沿岸을 따라 進行하여 灣의 北西端에서 反射되어 아라비아側 沿岸을 따라 되돌아오는 데 서로 다른 두 方向의 Kelvin 波의 複合現象에 의해 無潮點體系가 形成된 것이다.

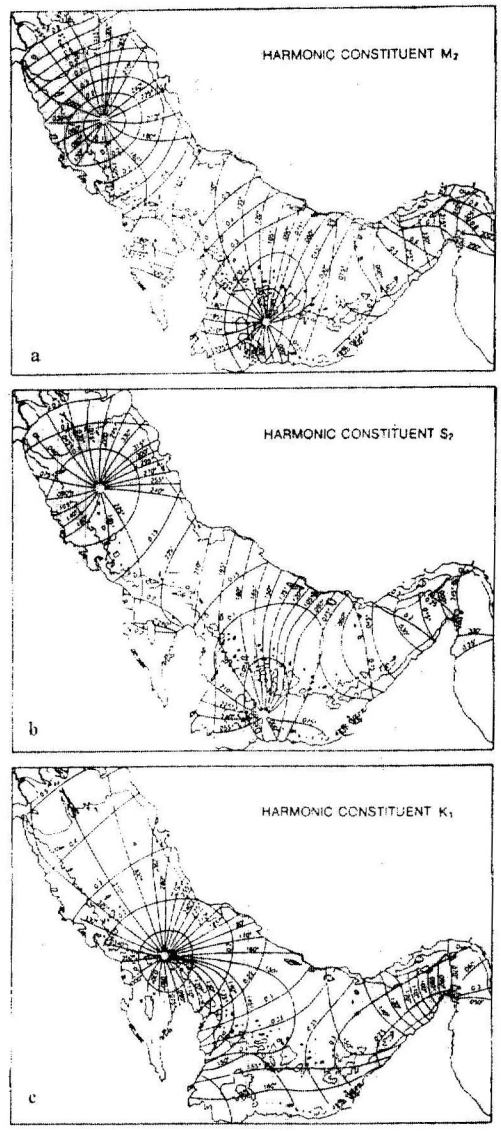


그림 6. 英國水路部의 等潮汐圖(−4H time zone 基準)

潮汐數値모델에 의한 等潮汐圖를 作成하기 위해서 陸棚端의 開放境界에는 Schwiderski의 潮

汐모델에서 $M_2, S_2, K_2, N_2, K_1, O_1, Q_1$ 및 P_1 分潮의 調和常數를 取하여 1987年 1月期間에 대해 潮汐算定을 遂行하였다. 每格子點의 每時間算定水位를 磁氣테이프에 收錄하여 初期攪亂 效果를 除去시키기 위해 첫 2일의 算定結果를 除外시킨 다음 每格子의 算定潮位의 調和分析을 하여 主分潮(M_2, S_2, K_1, O_1, N_2)의 調和常數(振幅, 位相)를 그림 7~그림 11의 獨立된 潮汐圖로서 提示하였다.

算定된 M_2潮汐圖(그림 7)는 經驗的인 旣存潮汐圖(그림 6(a))와 두 無潮點의 位置도 잘 一致하며, 振幅과 位相도 一般的인 一致를 보이나, Hormuz 海峽과 灣北西端에서는 實際보다 振幅이 10cm 程度 낮게 提示된다. 算定된 S_2潮汐圖(그림 8) 亦是 旣存潮汐圖(그림 6(b))와 定性的인 一致를 보이나 灣北西端에서는 5cm 程度 過少推定하는 데 旣存潮汐圖에서도 提示된 United Arab Emirates 北側岸의 偏倚된 無潮點의 位置(M_2보다 南側으로 移動)가 모델에서 잘 再現되었음을 提示한다. 算定된 K_1潮汐圖(그림 9)에서 振幅은 實際보다 全般的으로 5cm 程度 過少推定을 하지마는 Bahrain 및 Qatar 北側의 無潮點의 位置는 旣存潮汐圖(그림 6(c))와 잘 一致한다. 旣存潮汐圖에서 提示되지 않은 O_1, N_2 分潮를 算定하여 그림 10과 그림 11에 提示하였는 데 O_1分潮의 無潮點은 K_1分潮와 거의 一致하나 N_2分潮의 境遇는 M_2分潮와 比較할 때 東側 및 東南東側 移動이 各己 提示되고 있다.

本 硏究의 모델에 의한 潮汐圖가 갖는 意味는 이 海域의 旣存潮汐모델에[9~12] 의한 潮汐圖들은 開放境界의 潮汐條件을 單獨潮汐 및 簡易複合法으로 취급하여 分潮間의 相互作用이 適切히 考慮되지 않은 反面 本 硏究에서는 前述한 바와같이 1個月期間의 實際潮汐을 算定하는 合理的인 接近方法에 의한 結果인 點이다. 따라서 獨立潮汐圖를 改善시키면 이 海域全體의 信賴性 있는 潮汐情報가 可能하다.

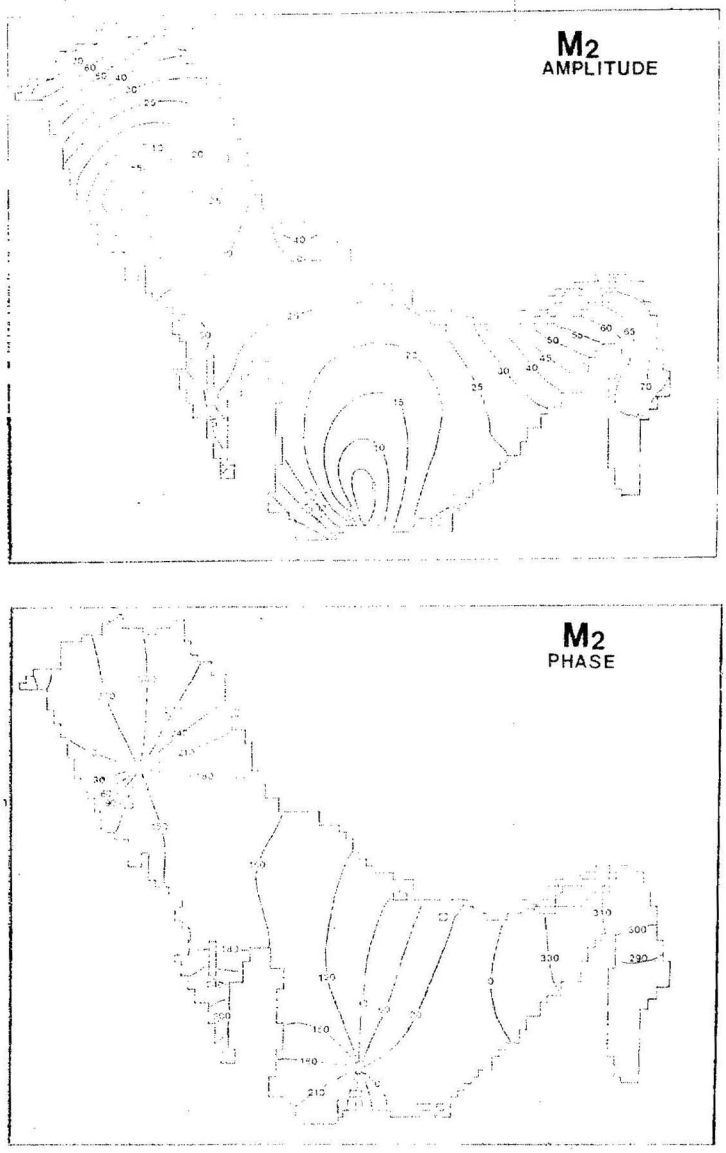
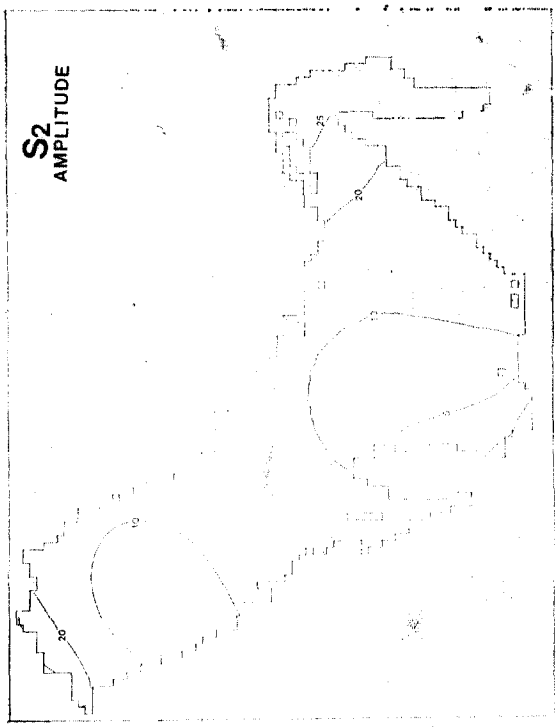


그림 7. M_2分潮의 等振幅 및 等位相圖(振幅 : cm, 位相 : 度)



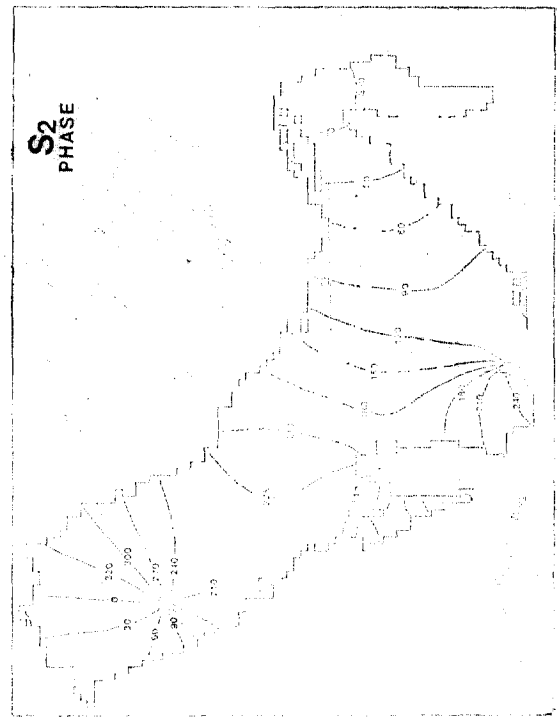
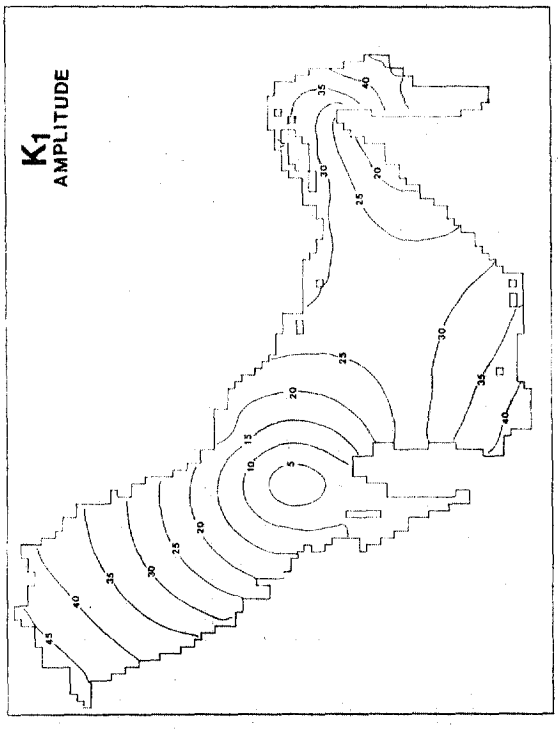


그림 8. S_2分潮의 等振幅 및 等位相圖



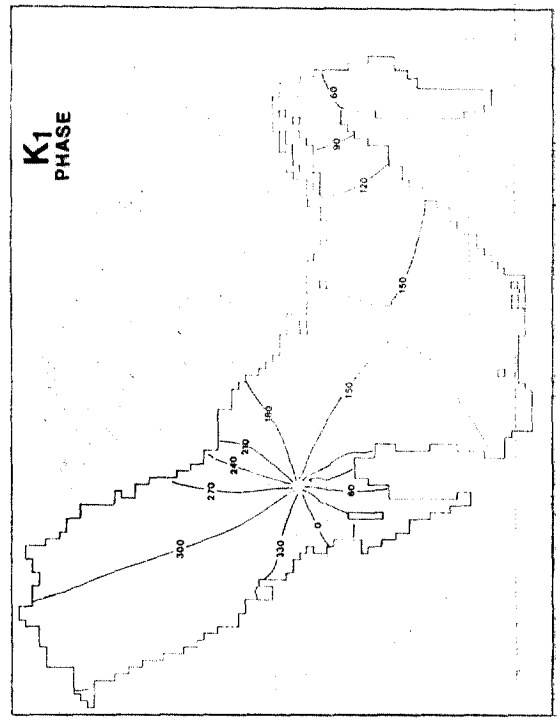
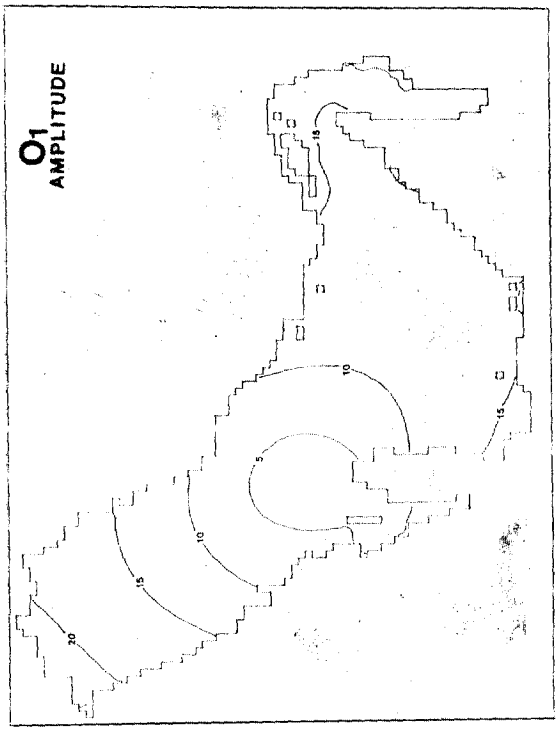


그림 9. K_1分潮의 等振幅 및 等位相圖



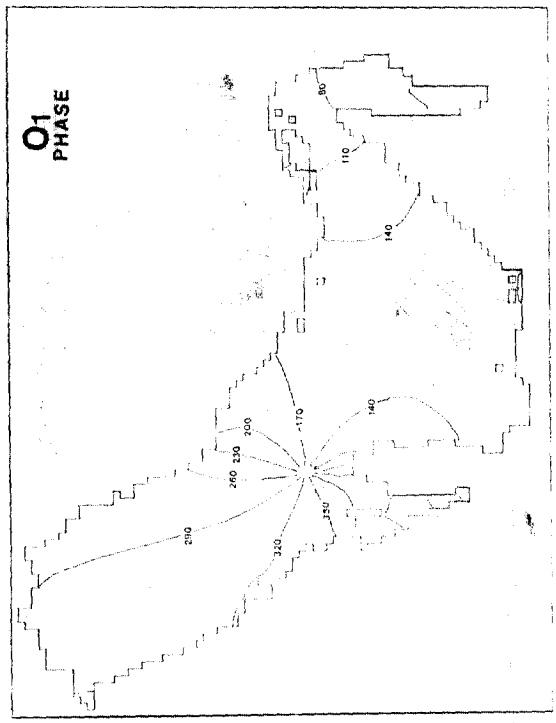
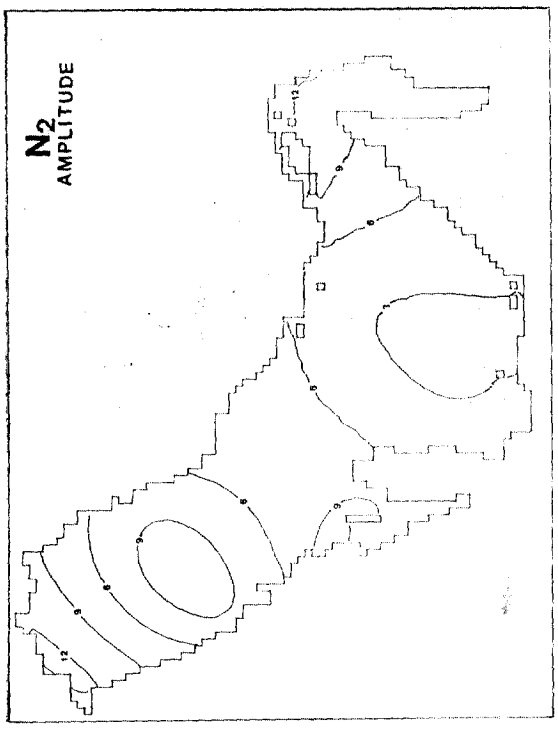


그림 10. O_1分潮의 等振幅 및 等位相圖



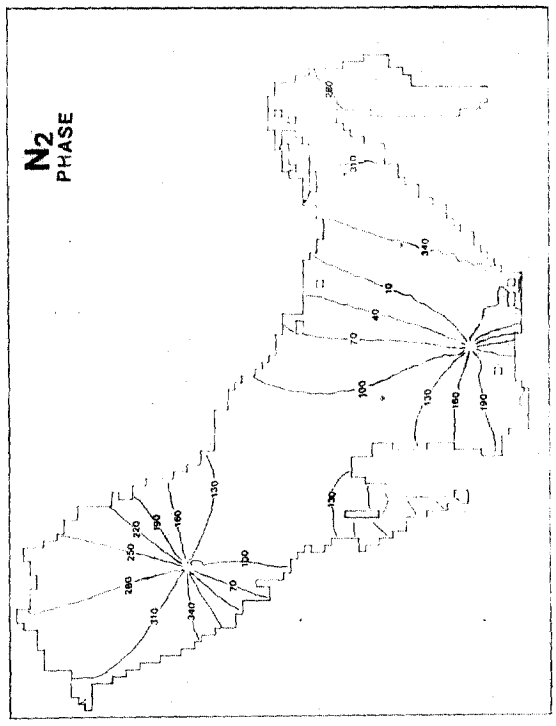


그림 11. N_2分潮의 等振幅 및 等位相圖

4. 結　論

아라비아 灣全域의 2次元的 非線型 潮汐모델을 樹立하여 平均潮汐을 代表하는 M_2分潮 및 4個 主分潮의 等潮汐圖를 提示하였는데 觀測値를 根據한 旣存의 潮汐圖와 一般的인 一致를 보였다. 이 海域의 潮流觀測을 包含한 海洋觀測에 의해 提示된 基本모델을 改善시키면 海域全體의 潮汐豫報體系의 樹立과 더불어 局地的인 硏究를 위한 細格子網의 潮汐모델과 3次元모델의 樹立에 使用할 것이다.

謝　辭

IBM 3083에 의한 數値모델算定은 KAIST System Engineering Research Institute의 Software Engineering Center로부터 支援받은 바 이에 謝意를 表한다. 모델作成에 있어서는 韓國에너지硏究所 徐景錫君의 助力이 있었다.

參 考 文 獻

1. Le Provost, C., "Models for tides in the KAP Region," in Oceanographic modelling of the Kuwait Action Plan(KAP) Region, *Unesco report in marine science*, 28, 1984, pp. 25～36.
2. 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, pp. 141～164.
3. Choi, B.H., "*A tidal model of the yellow Sea and the Eastern China Sea*," Korea Ocean Research and Deveopment Institute (KORDI) Rep. 80～02, 1980, 72p.
4. Roberts, K.V. and Weiss, N.O., "Convective difference schemes," *Math. Comput.*, 20, 1967, pp. 272～299.
5. Schwiderski, E.W., "*Global ocean tides: Atlas of tidal charts and maps*," Naval Surface Weapons Center, NSWCTR 79～414, 1979.
6. Belderson, R.H. and Stride, A.H., "Tidal current fashioning of a basal bed", *Marine Geology*, 4, 1966, pp. 237～257.
7. Admiralty Charts, Persian Gulf, Principal Harmonic Constituents.
8. Taylor, G.I., "Tidal oscillations in gulfs and rectangular basins," *Proceedings of the London Mathematical Society*, 2 : 10, 1921, pp. 148～181.
9. Lardner, R.W., Belen, M.S. and Cekirge, H.M., "Finite difference model for tidal flows in the Arabian Gulf," *Comp. and Math Appls*, 8 : 6, 1982, pp. 425～444.
10. Von Trepka, L., "Investigations of the tides in the Persian Gulf by means of a hydrodynamic-numerical model," *Proceedings of the Symp. on Math. Hydrody. Invest of Phys. Processes in the Sea*, Inst. für Meer. der Univ. Hamburg, 10, 1968, pp. 59～63.
11. Evans-Roberts, D.J., "*Tides in Persian Gulfs*", Consulting Engineers, 1979.
12. Danish Hydraulic Institute, "*Application of System 21 in the Gulf*," Horsholm, Denmark, 1980.

(接受 : 1988. 2. 23)