

## 東아시아 海域의 潮汐 模型 Modelling of Tides in the East Asian Marginal Seas

崔秉昊\* · 高珍錫\*\*

Byung Ho Choi\* and Jin Seok Ko\*\*

**要 旨** : 沿近海에서의 衛星高度計 資料의 正確度가 向上됨에 따라 既存에 잘 알려져 있는 Schwiderski의 全球的 模型보다 더 正確한 潮汐模型으로 衛星高度計 資料에서의 潮汐成分에 對한 補正을 向上시킬 必要가 있다. 初期段階로 오호츠크海, 南中國海와 北西太平洋域을 包含하는 東아시아 全 海域에 對해 既存의 潮汐模型보다 解像圖가 높은 1/6度 格子體系의 潮汐模型을 樹立하여 半日週潮( $M_2, S_2, N_2, K_2$ )와 日週潮( $K_1, O_1, P_1, Q_1$ )의 潮汐體系에 對한 數值模型實驗을 遂行하였다. 計算된 結果들과 이 海域에서의 觀測值와 既存의 經驗的 潮汐圖 및 Schwiderski의 潮汐圖와 比較分析이 이루어졌다.

**Abstract** □ As satellite altimetry is being progressed to apply with higher precision to maginal seas, it is necessary to improve correction procedures for tidal signals in altimetry with more accurate tidal model than the well-known model of Schwiderski for studying marginal sea dynamics. As a first step, tidal regime of semidiurnal tides ( $M_2, S_2, N_2, K_2$ ) and diurnal tides ( $K_1, O_1, P_1, Q_1$ ) were computed with finer details of formulation of tidal model over the East Asian Marginal Seas covering the Okhotsk Sea and South China Sea and part of Northwest Pacific Ocean with mesh resolutions of  $1/6^\circ$ . Computed results were discussed with observations, previous tidal charts and Schwiderski's tidal map of the region.

### 1. 緒 論

東아시아 海域은 緯度  $0\sim 63^\circ\text{N}$ , 經度  $98^\circ 30'\sim 165^\circ\text{E}$ 에 位置하는 海域으로 北西太平洋 海域과 Kamchatka 半島로부터 Kuril列島, 日本, Ryukyu列島, Taiwan, Philippine群島를 이어 Borneo 北側을 잇는 大陸斜面을 境界로 沿岸에 位置한 Okhotsk海, 東海, 黃海, 南中國海를 包含한다. 地形的 特性은 北西太平洋 海域은 日本南側에 位置한 Mariana群島, Marshal群島를 中心으로 4,000~5,000 m의 水深 分布를 보이며 陸棚으로 둘러싸인 東海, Okhotsk海, 南中國海는 2,000 m 以上の 水深分布를 보이고 있는 데 黃海는 다른 地域과 달리 100 m 以內的 水深 分布를 보이고 있다. Okhotsk海는 Kuril列島를 통해 北西太平洋 海域과 連結되어 있고 東海는 大韓海峽을 통해 黃海, Tsugaru海峽과 Soya海峽을 통해 北西太平洋,

Mamiya海峽을 통해 Okhotsk海와 連結되어 있고, 黃海는 Ryukyu列島를 통해 北西太平洋과 連結되어 있고, 南中國海는 台灣海峽(Taiwan Strait)을 통해 黃海, Bashi海峽을 통해 北西太平洋, Sumatra와 Borneo사이의 南側 海峽을 통해 Java海와 連結되어 있다.

外力에 依해 生成된 潮汐의 進行 方向 및 크기를 表示하는 潮汐圖(tidal chart)는 大陸棚, 섬, 沿岸 및 深海에서 觀測된 潮汐 資料들로부터 內插法 等을 利用한 潮汐圖와 理論的 또는 經驗的 境界 條件과 初期 條件 等을 附與하여 適切한 動水力學的 支配 方程式의 解를 求하여 振幅과 位相에 對한 等值線圖를 作成한 潮汐圖들이 提示되고 있다.

最近들어 地理, 測地, 海洋, 氣象, 天文, 航空技術 等에서 GEOS-3, SEASAT, GEOSAT 等 衛星高度計 로부터 蒐集된 資料들의 利用이 活潑히 展開되고 있는 데 時間從屬의 이 아닌 海面變位(sea surface topogra-

\*成均館大學校 工科大學 土木工學科 (Department of Civil Engineering, Sung Kyun Kwan University, Suwon, Korea)

\*\*成均館大·韓國海洋研究所 學研課程 (SKKU-KORDI Joint Program on Coastal and Ocean Engineering)

phy)은 衛星에서 測量한 瞬間海面에서 潮汐에 依한, 氣象에 依한, 地球에 依한 潮汐 및 長期間의 海面 變化等 海面의 變動 成分을 除外한 것으로서 正確한 海面 決定을 위해서는 海洋의 物理 特性인 潮汐現象을 糾明하는게 重要하다.

本 研究에서는 東아시아 海域의 全般的인 潮汐舉動을 把握하기 위해 既存의 1° 以上の 格子 體系로 構成되는 全球의 潮汐模型들에서는 提示하지 못하는 沿岸域 및 陸棚海域等에서의 解像圖가 높은 結果를 提示하기 위해 1/6°×1/6° 體系의 格子構成을 갖는 潮汐 數值 模型을 樹立하였다. 潮汐 模型의 實驗으로는 co-oscillating tide만에 依한 境遇와 co-oscillating tide와 地球潮汐이 考慮된 起潮力(tide generating potential)을 同時에 考慮한 模型으로부터 自乘形 海底摩擦項外的 移流項은 考慮하지않은 境遇와 移流項을 包含한 境遇에 對해 檢討가 이루어진 後 半日 週潮인 M<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> 分潮들과 日週潮인 K<sub>1</sub>, O<sub>1</sub>, P<sub>1</sub>, Q<sub>1</sub> 分潮들에 對한 各各의 數值實驗이 이루어졌고 主 潮汐 分潮에 對한 觀測值와의 比較는 Ogura(1933), Luther와 Wunsch(1974), Krohn(1984)에서 提示된 觀測值의 調和 常數들과 比較, 檢證되었다. 長週期 分潮인 M<sub>r</sub>, M<sub>m</sub>, S<sub>sa</sub> 分潮의 境遇는 計算 數值 實驗 대신에 Schwiderski의 1° 格子體系의 潮汐資料가 內插法에 依해 處理되었다.

## 2. 基本 方程式

潮汐方程式은 地球의 曲率 및 緯도에 따른 偏向力을 考慮하여 地球座標系 上에 樹立되었는 데 水理學的 非線形 移流項과 自乘型 摩擦項이 包含되는 그 形態는 다음과 같다.

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \left[ \frac{\partial}{\partial \lambda} (HU) + \frac{\partial}{\partial \phi} (HV \cos \phi) \right] = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{R \cos \phi} \frac{\partial U}{\partial \lambda} + \frac{V}{R \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} (U \cos \phi) \\ - \frac{UV \tan \phi}{R} = 2\omega \sin \phi V + \frac{-g}{R \cos \phi} \cdot \\ \frac{\partial (\alpha \xi - (1+k-h)\xi_0)}{\partial \lambda} - \frac{k_b U (U^2 + V^2)^{1/2}}{H} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{U}{R \cos \phi} \frac{\partial V}{\partial \lambda} + \frac{V}{R} \frac{\partial V}{\partial \phi} + \frac{U^2 \tan \phi}{R}$$

$$\begin{aligned} = -2\omega \sin \phi U + \frac{-g}{R} \frac{\partial (\alpha \xi - (1+k-h)\xi_0)}{\partial \phi} \\ - \frac{k_b V (U^2 + V^2)^{1/2}}{H} \end{aligned} \quad (3)$$

t : 時間

$\lambda, \phi$  : 東經 및 緯度

$\xi$  : 靜水面上에 對한 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

$\omega$  : 地球回轉의 角速度

g : 重力加速度

$k_b$  : 海底摩擦係數

U', V' : 靜止海面下 水深 z에서의  $\lambda, \phi$  方向의 流速成分이며, 水深 平均된 流速은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} U &= \frac{1}{H + \xi} \int_{-H}^{\xi} U'(z) dz \\ V &= \frac{1}{H + \xi} \int_{-H}^{\xi} V'(z) dz \end{aligned} \quad (4)$$

起潮力項인  $(1+k-h)\xi_0$ 에서  $\xi_0$ 는 平衡潮汐(equilibrium tide)으로서 半日週潮와 日週潮 및 長週期 分潮의 境遇 各各 다음 式으로 주어진다(Schwiderski, 1979, 1981a-c).

半日週潮 :  $v=2, \xi_0 = K \cdot \cos^2 \phi \cos(\sigma t + 2\lambda)$

日週潮 :  $v=1, \xi_0 = K \cdot \sin^2 \phi \cos(\sigma t + \lambda)$

長週期潮 :  $v=0, \xi_0 = K/2 \cdot (3\cos^2 \phi - 2) \cos \sigma t$

上記式에서 起潮力項은 地球潮汐과 大洋潮汐의 影響을 考慮한 것인 데 만약에 地球가 完全流體라면 自由表面은 平衡 潮汐의 形態로 反應할 것이고 反對로 地球가 完全固體라면 自由表面은 전혀 反應이 없다. 地球潮汐은 潮汐力에 依한 影響들에 對해 地球의 反應으로 地球는 附與된 힘에 對해 彈性的으로 反應한다. 따라서 Newton의 平衡潮汐에 該當하는 天體의 힘과 大洋潮汐에 起因한 重力攪亂, 地球潮汐에 起因한 重力攪亂 및 大洋潮汐을 附與함에 따른 地殼反應에 起因하는 重力攪亂 等を 地球潮汐의 相關關係로 表現하는 데, 平衡潮汐(equilibrium tide)에 對한 地球의 彈性的 反應은 주어진  $\xi_0$ 에 對해  $h \cdot \xi_0$ 의 크기로 나

**Table 1.** List of harmonic constituents of equilibrium tides

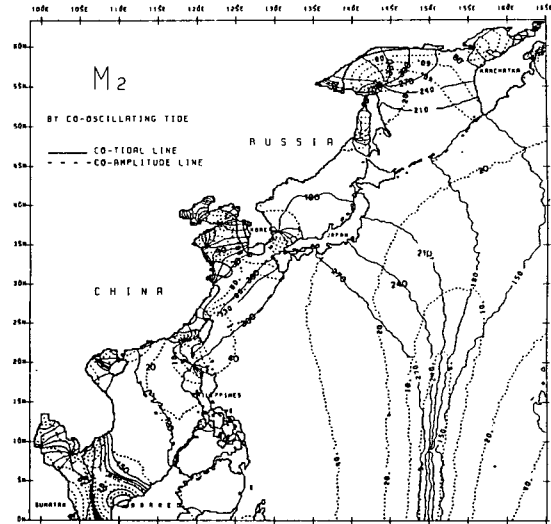
Constituent	Amplitude (m)	Frequency (1/sec)
M <sub>2</sub>	0.242334	1.40519 × 10 <sup>-4</sup>
S <sub>2</sub>	0.112841	1.45444 × 10 <sup>-4</sup>
K <sub>2</sub>	0.030704	1.45842 × 10 <sup>-4</sup>
N <sub>2</sub>	0.046398	1.37880 × 10 <sup>-4</sup>
K <sub>1</sub>	0.141565	0.72921 × 10 <sup>-4</sup>
O <sub>1</sub>	0.100574	0.67598 × 10 <sup>-4</sup>
P <sub>1</sub>	0.046843	0.72523 × 10 <sup>-4</sup>
Q <sub>1</sub>	0.019256	0.64959 × 10 <sup>-4</sup>
M <sub>f</sub>	0.041742	0.53234 × 10 <sup>-5</sup>
M <sub>m</sub>	0.022026	0.26392 × 10 <sup>-5</sup>
S <sub>sa</sub>	0.019446	0.03982 × 10 <sup>-5</sup>

**Table 2.** List of Love numbers of equilibrium tides

Constituent	k	h
M <sub>2</sub>	0.302	0.609
S <sub>2</sub>	0.302	0.609
K <sub>2</sub>	0.302	0.609
N <sub>2</sub>	0.302	0.609
K <sub>1</sub>	0.256	0.520
O <sub>1</sub>	0.298	0.603
P <sub>1</sub>	0.287	0.581
Q <sub>1</sub>	0.298	0.603

타나고(h는 彈性係數), 이 때 일어나는 質量的 再配置는 重力포텐셜을 增加시켜 이를 다시  $k \cdot \xi_0$ 만큼 上昇시킨다(k는 彈性係數). 이 둘의 組合으로 起潮力에 依한 平衡潮汐은 固體地球上에  $(1+k-h)\xi_0$ 의 높이로 나타나는 데 이 때 係數  $(1+k-h)$ 를 Love number로 稱하는 데 地球 潮汐을 考慮한 平衡 潮汐은  $k=0.30$ ,  $h=0.61$ 가 되어  $0.69\xi_0$ 의 크기로서 平衡潮汐(Equilibrium tide)보다 더 낮게 나타난다(Pingree와 Griffiths, 1987). 대부분의 潮汐模型에서는 起潮力을 考慮할 境遇 Love number를 0.69로서 採擇하고 있는 데 Wahr (1981)의 研究에서는 各 分潮別 Love number들을 Table 2와 같이 提示하고 있는 데 아래의 값들은 Foreman과 Bennett(1992)의 研究에서 衛星觀測資料로부터 海面變動成分을 除去할 때 適用한 값들이다.

$\alpha$ 는 大洋潮汐의 附與로 因한 質量再配置에 따른 固體地球의 變形으로 Schwiderski(1980)는 0.9를 採擇하여 大洋潮汐을 算定하였고, Foreman(1992)은 衛星高度計 觀測으로부터 潮汐 除去를 爲한 研究에서 提示하는 Ray와 Sanchez(1989)의 研究 結果는 日週



**Fig. 1.** Computed tidal chart of M<sub>2</sub> tide (solid line; co-tidal line referred to Greenwich in degree, dashed line; co-amplitude line in cm, tide generating potential term excluded).

潮인 境遇는 0.94, 半日週潮인 境遇는 0.953값을 提示하였는 데 Topex/Poseidon Satellite Tidal Committee가 提案한 0.946을 취하였다. 本 研究에서는 初期 試圖로 Love Number는 0.69,  $\alpha$ 는 1.0을 採擇하였다.

上記式 (1)~(3)은 有限差分技法을 이용하였고 移流項을 包含할 境遇는 Flather와 Heaps(1975)에서 遂行되었듯이 奇數번째 計算은 u를 먼저 計算하고 v를 計算하였고, 偶數번째 計算은 v를 먼저 算定하고 u를 計算하는 angled derivative 方式을 使用하였다. 入力 條件은 每 格子의 中心에는 靜水面(平均海面)下 水深이 定義되며 NOAA의 DBDB5(Digital Bathymetric Data Base 5 Minute)의 水深資料로부터  $1/6^\circ \times 1/6^\circ$  格子體系에 入力하였다. CFL 安定條件이 安定된 計算을 위한 指針으로 利用되어  $\Delta t$ 는 약 20초로 算定되었다. 海底摩擦係數  $k_b$ 는 一定한 값으로 0.0025를 取하였고, 模型에 依한  $\xi$ , U, V의 算定은  $t=0$ 일 때  $U=V=0$ 인 初期 靜止狀態로부터 出發하였다.

### 3. 潮汐 數值 模型 實驗

**3.1 Co-Oscillating Tide에 의한 M<sub>2</sub> 分潮의 算定**  
 開放境界에서의 大洋潮汐은 Schwiderski(1979)의 潮汐模型 結果로부터 M<sub>2</sub> 分潮에 對한 振幅과 位相을

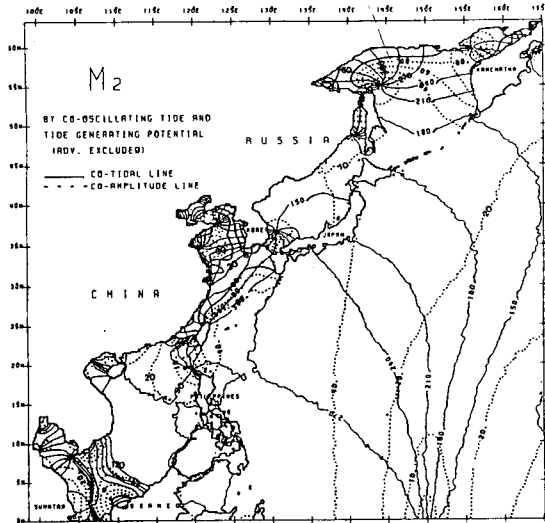


Fig. 2. Computed tidal chart of  $M_2$  tide (solid line; co-tidal line referred to Greenwich in degree, dashed line; co-amplitude line in cm, advection term excluded).

開放境界條件으로 入力하여 潮汐波及이 全般的으로 安定된 20번째 潮汐週期에 對한 Fourier 分析을 通해 振幅과 位相을 求하여 Fig.1과 같은 潮汐圖를 作成하였는 데 全般的으로 潮汐圖의 形態가 Nishida(1980)의 經驗的 潮時圖와 매우 類似함을 알 수 있었다. 北西太平洋部에서는 經度 150°E를 基準으로 潮汐波及이 東側에서 西側으로 波及되며 北西太平洋海域, Ryukyu 列島, Kuril 列島에서의 潮時分布 및 潮差分布가 Schwiderski의 潮汐圖(1979)와 잘 一致하고 있으나, Nishida의 潮汐圖(1980)와는 Kuril列島 및 日本 北側 北海島 附近에서 1時間의 位相差가 提示되고 있고, 潮差에 있어서도 Ryukyu 列島와 Kuril 列島에서 큰 값을 提示하고 있다. Kuril列島를 通해 進入된 潮汐은 Okhotsk 海에서는 Sakhalin 東側에서의 無潮點은 再現되지 않으나 Penzynski 灣 入口와 Santar 섬 近處인 Sakhalin 北側에 無潮點이 再現되고 있다. 東海에서는 無潮點의 形態가 大韓海峽 및 Mamiya 海峽에서 滿足스럽게 나타나고 있고, 黃海에서는 Pohai 灣에서는 弱한 無潮點 形狀이 보이며 山東半島의 無潮點 體系가 잘 提示되고 있다. 그러나 Bashi 海峽을 通한 潮汐波及이 南中國海로 波及되면서 Philippine 群島 北側에 既存 潮汐圖에 나타나지 않는 無潮點을 生成하고 있는 點이 特異한 結果이고, Tonkin 灣에서 弱한 無

Table 3. Comparison of pelagic tidal measurement and calculation ( $M_2$  tide, amp: H(cm), phase: g(deg-ree))

Station		Ray*		Schwiderski		Model	
Lat	Long	H	g	H	g	H	g
9.5N	138.1E	41	294	40	296	40	276
26.6N	142.2E	30	268	27	262	34	237

註)\*Cartwright와 Ray(1990)의 深海조위관측자료

潮點이 나타나고 있으며, Sumatra 北側의 Thailand 灣 및 Sumatra 東側에서 매우 遲滯되는 潮汐波及 形狀을 提示하면서 Thuy(1968) 및 Fang(1986)의 潮汐圖와 매우 類似한 結果를 提示하고 있다.

### 3.2 Co-Oscillating Tide와 起潮力에 依한 $M_2$ 分潮의 算定

#### 3.2.1 移流項을 包含치 않은 境遇

이 模型의 結果는 Fig.2에 提示되는 바와 같이 北西太平洋部의 潮汐波及形態는 起潮力을 包含하지 않은 境遇보다는 緩慢한 潮時分布帶를 形成하나 大體로 Ogura(1933a) 및 Nishida(1980)의 經驗的 潮時圖와 北西太平洋 海域 및 Kuril列島에서 位相 分布 및 潮差 分布가 잘 一致하고 있음을 알 수 있다. 그러나 Ryukyu 列島 및 Ryukyu 列島 南側 海域에서 潮汐波及이 30分程度 빨리 波及됨을 알 수 있다. Okhotsk 海의 Sakhalin 北側 沿岸과 Penzynski 灣 入口部에서의 無潮點과 東海의 大韓海峽과 Mamiya 海峽에서의 無潮點, 黃海에서의 山東半島 東岸 및 南側部の 無潮點은 起潮力을 包含하지 않은 境遇와 類似하며 南中國海에서는 Philippine 群島에서의 無潮點을 除外하고 Fang(1986)과 Thuy(1968)의 潮汐圖와 類似한 模型 結果를 提示하고 있는 데, Fang(1993)의 研究에서는 Philippine 群島 北側의 Bashi 海峽에서 弱한 無潮點의 生成을 提示한 바 있다. 또한 既存 潮汐圖들에 나타난 黃海 北側의 Bohai 灣과 Liaodong 灣에서의 無潮點이 明確치는 않으나 弱하게 提示되고 있다. 潮差 分布를 比較하면 北西太平洋海域, 東海 및 黃海에서는 Nishida(1980)의 經驗的 潮汐圖 및 JODC(1985)의 經驗的 潮汐圖와 類似한 分布를 보이는 데 Okhotsk 海에서는 潮差 分布가 Okhotsk 海 中央部에서 若干 크게 計算되고 Santar 섬 周邊 및 Penzynski 灣 附近의 潮差는 類似한 分布를 보이고 있다. 南中國

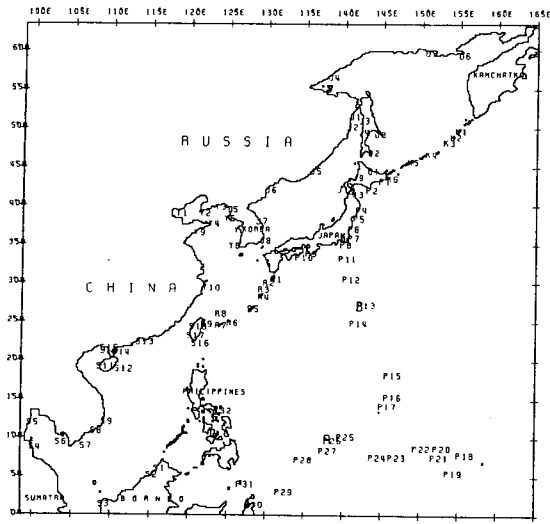


Fig. 3. Selected locations for comparing observed data ( $M_2$ ).

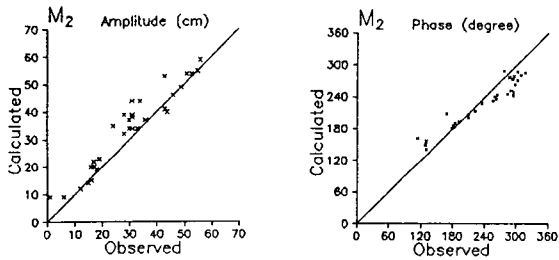


Fig. 4. Observed and computed amplitudes and phases in Pacific Ocean ( $M_2$ ).

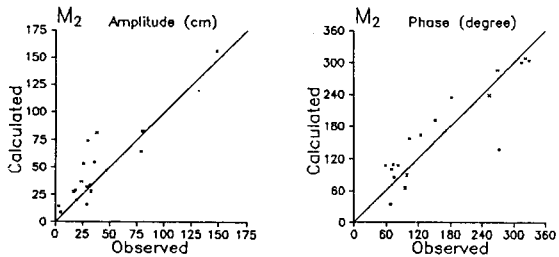


Fig. 5. Observed and computed amplitudes and phases in South China Sea ( $M_2$ ).

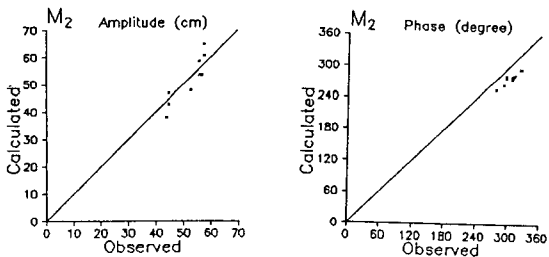


Fig. 6. Observed and computed amplitudes and phases in Ryukyu Island ( $M_2$ ).

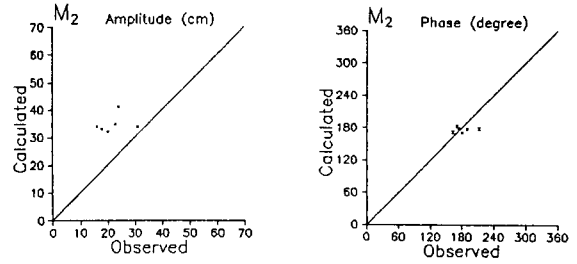


Fig. 7. Observed and computed amplitudes and phases in Kuril Island ( $M_2$ ).

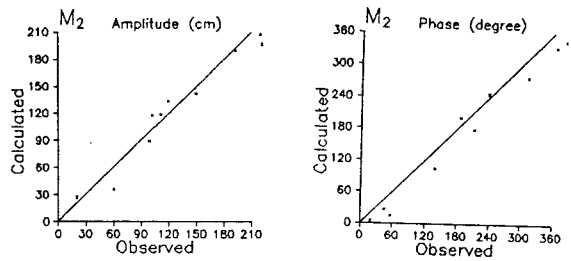


Fig. 8. Observed and computed amplitudes and phases in Yellow Sea and East China Sea ( $M_2$ ).

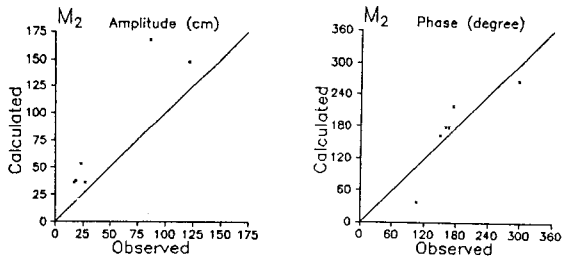


Fig. 9. Observed and computed amplitudes and phases in Okhotsk Sea ( $M_2$ ).

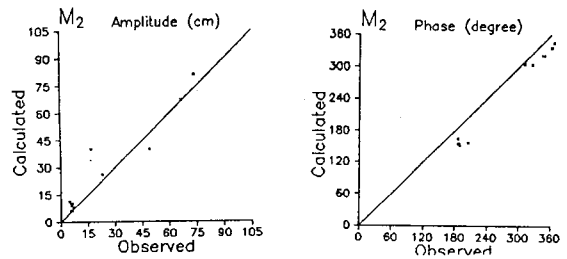


Fig. 10. Observed and computed amplitudes and phases in East Sea ( $M_2$ ).

해에서는 全般的으로 潮差分布帶가 Fang(1986)과 Thuy(1968)의 等潮差圖에서 提示된 潮位 分布와 類似하며 起潮力을 包含치 않은 境遇보다 潮差 分布에서 良好한 結果를 보이고 있다.

Table 3은 世界 大洋에서 深海 潮汐 觀測(Pelagic

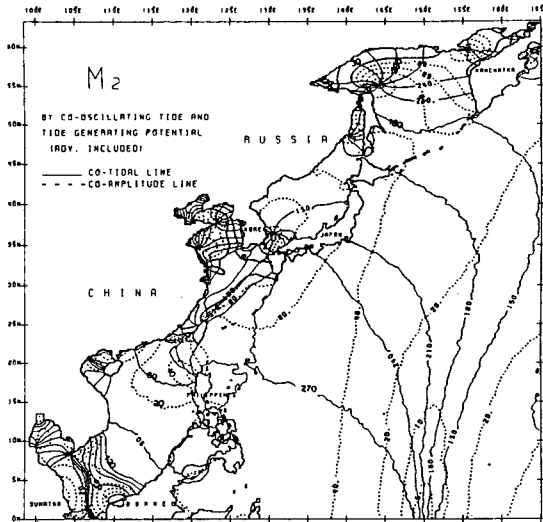


Fig. 11. Computed tidal chart of  $M_2$  tide (solid line; co-tidal line referred to Greenwich in degree, dashed line; co-amplitude line in cm).

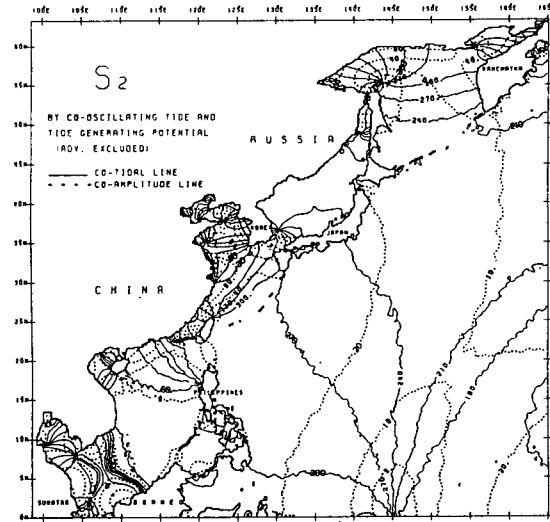


Fig. 12. Computed tidal chart of  $S_2$  tide (solid line; co-tidal line referred to Greenwich in degree, dashed line; co-amplitude line in cm, advection term excluded).

tidal measurement)이 이루어지는 80地點中 東아시아海域에 位置한 深海觀測值(Cartwright와 Ray(1990); Foreman을 통해 제공 받음)와 Schwiderski(1982)의 NSWC 模型에 依한 計算值 및 本 模型에 依한 調和常數 比較인 데 潮差分布는 비슷하나 位相에 있어서 Schwiderski의 模型結果가 良好함을 提示하고 있는 데, 本 模型에서 提示되는 潮汐圖에서 알 수 있듯이 Mariana 群島와 Caroline 群島를 中心으로 Ryukyu 列島로 潮汐波가 빨리 波及됨으로 因한 것임을 알 수 있다.

Fig. 4~Fig. 10은 Ogura(1933a), Wunsch(1974), Krohn(1984) 등의 沿岸 및 深海 地域에서의 觀測值들과 數值 模型 結果들과의 地域別 比較들로서 比較 位置는 Fig. 3과 같고 北西太平洋에서의 比較는 Mariana 群島에서 Caroline 群島에 이르는 觀測值들로 數值模型 結果는 位相에서 보다시피 潮汐波及이 若干 빠른 分布를 보이고 있으나, Ryukyu 列島에서의  $M_2$  潮汐에 對한 觀測值와 計算值의 比較는 計算值가 潮差分布 및 位相은 잘 一致하고 있다. Kuril 列島 및 Okhotsk海 沿岸에서의 觀測值와 計算值와의 比較는 大體的으로 潮差가 크게 計算되는 데 이는 Ogura(1933a)의 經驗的 潮汐圖에서 Sakhalin 東側沿岸의 無潮點의 位置이며 其他地域은 良好한 結果를 提示하고 있고, 黃海 沿岸, 東海 및 南中國海에서의 比較

結果는 良好한 結果를 提示하고 있다.

### 3.2.2 移流項을 包含한 境遇

이 模型에서는 淺海領域에서 보다 나은 結果를 얻고자 移流項을 包含하고 海底摩擦의 影響을 考慮하기 위해 海底摩擦係數를 200 m 以上の 深海에서는 0.001, 100~200 m의 水深의 境遇에는 0.001~0.0025, 100 m 이하의 境遇는 0.0025로 하는 數值 模型을 樹立한 후 結果를 分析하여 Fig. 11과 같은 潮汐圖을 提示하였다. 이 境遇 潮汐圖의 特徵은 移流項을 包含치 아니한 境遇와 比較해 相異한 點은 Philippine 群島 北側에 나타난 無潮點이 西側으로 若干 移動되면서 弱한 無潮點의 形態를 提示하고 있고,  $M_2$  分潮의 潮汐振幅이 黃海 南側 大陸棚에서 增幅되는 傾向을 보이고 있으며 東海 東側에 나타났던 10 cm 以上の 潮差 分布帶가 弱해지면서 東海 西側의 韓國 東側沿岸에 約 5 cm 程度 크게 나타난다. 그러나 全般的으로 北西 太平洋 海域 및 淺海 領域에서 보다 나은 結果를 얻지 못하였는데 特히 Ogura(1933)와 Nishida(1980)의 經驗的 潮汐圖과 Choi(1980) 및 Fang(1986) 등의 數值 模型 結果에서 提示된 Bohai 灣과 Liaodong 灣에서의 無潮點의 形態가 明確히 再現되지 못하였다.

### 3.3 半日週潮( $S_2$ , $K_2$ , $N_2$ )의 算定

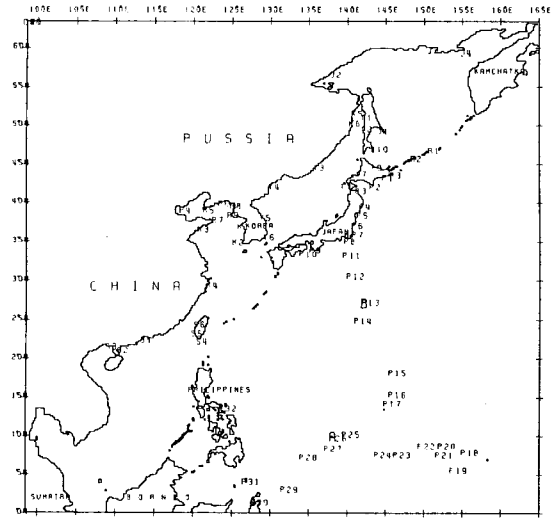
**Table 4.** Comparison of pelagic tidal measurement and calculation ( $S_2$  tide, amp: H(cm), phase: g(degree))

Station		Ray		Schwidorski		Model	
Lat	Long	H	g	H	g	H	g
9.5N	138.1E	14	322	13	326	15	284
26.6N	142.2E	11	288	11	285	21	249

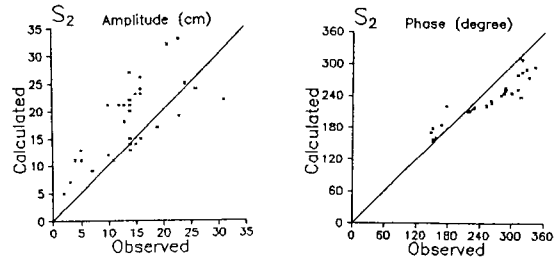
東아시아 海域에 있어서  $S_2$  分潮,  $K_2$  分潮,  $N_2$  分潮에 對한 潮汐 舉動을 把握하기 위해 自乘形 海底 摩擦項만이 考慮되고 移流項의 影響이 包含되지않은 模型으로 co-oscillating tide와 地球潮汐이 考慮된 起潮力이 包含된 境遇에 對해 CFL陽解 安定 條件을 滿足하는  $\Delta t$ 를  $S_2$ 는 20秒,  $K_2$ 는 19.945秒,  $N_2$ 는 21.097秒로 하여 各各의 潮汐圖를 作成하였다.

**3.3.1  $S_2$  分潮**

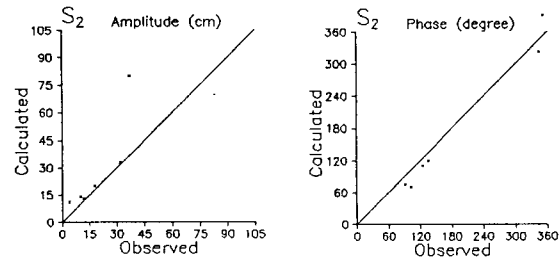
$S_2$  分潮의 數值 模型 結果는 Fig. 12과 같은 潮汐圖로서 提示되는 데  $M_2$  分潮에 依한 潮汐舉動에서 나타나는 潮汐圖와 比較해 볼 때 無潮點의 體系에 있어서는 類似한 結果로 提示됨을 알 수 있으나 北西太平洋部에서는  $M_2$  分潮에서  $150^\circ E$ 를 軸으로 等潮時線이 遲滯되면서 變換한 것이  $145^\circ E$ 를 軸으로하여 西側方向으로 潮汐波가 波及됨을 보이며  $30^\circ$  程度의 位相差를 보이고 있다. Okhotsk海에서는  $60^\circ$  程度의 位相差를 보이고, Philippine海에서는  $M_2$  分潮에서 提示되었던 無潮點의 形態가 再現되지 않았고 Bashi Channel을 통한 潮汐波가 南西 方向으로 波及됨을 보이고, Thailand灣 및 黃海와 東海에서는  $M_2$  分潮와 類似한 潮汐 波及 形態를 보이고 있다. 等潮差圖에 나타난 潮差 分布는  $M_2$  分潮에 比해 大洋에서는 50% 程度의 振幅을 나타내고, 陸棚 및 沿岸域에서는 40% 以下の 값들을 보이고 있다.  $S_2$  分潮의 數值模型結果에 있어서 深海觀測資料와의 比較는 Table 4에 提示되는데  $M_2$  分潮에서와 마찬가지로 Caroline 群島에서는 潮差는 良好한 값을 보이고 있으나 位相에서 1時間 程度 빨리 波及되고 있고, Mariana 群島에서는 潮差 또한 큰 값을 提示하고 있다. Fig. 14~Fig. 20은 Fig. 13에서의 東아시아 海域의 觀測值와 模型의 算定值를 地域別로 比較한 것으로 北西太平洋地域의 Mariana群島에서 Caroline群島에서 潮差는 一部 地域에서 5~10 cm 程度 크게 算定되고 位相에 있어



**Fig. 13.** Selected locations for comparing observed data ( $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$  tide).



**Fig. 14.** Observed and computed amplitudes and phases in Pacific Ocean ( $S_2$ ).



**Fig. 15.** Observed and computed amplitudes and phases in South China Sea ( $S_2$ ).

서는 20~30° 程度 빨리 전파되고 있음을 보이고 있다. 南中國海 및 Ryukyu 列島와 Kuril 列島 및 東海에서는 振幅 및 位相이 一部 地域을 除外하고 잘 一致하고 있음을 알 수 있고, 黃海에서는 振幅은 크게 나타나나 位相은 잘 一致하며, Okhotsk海에서는 振幅이 若干 크게 算定되고 位相은 一部 地域에서 1時間 程度의 差異를 보이고 있다.

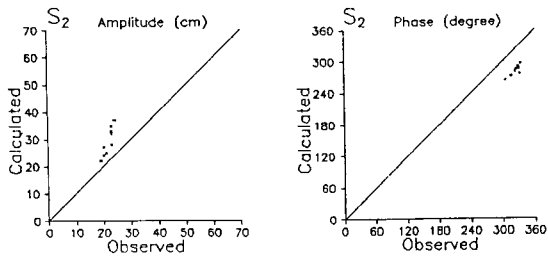


Fig. 16. Observed and computed amplitudes and phases in Ryukyu Island ( $S_2$ ).

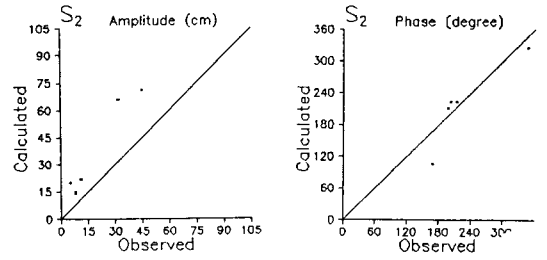


Fig. 19. Observed and computed amplitudes and phases in Okhotsk Sea ( $S_2$ ).

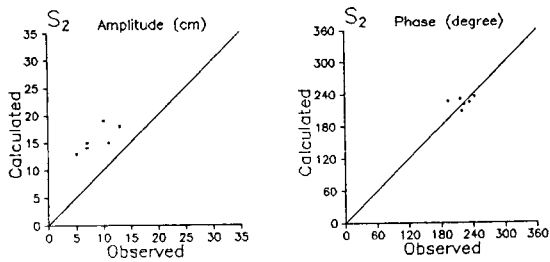


Fig. 17. Observed and computed amplitudes and phases in Kuril Island ( $S_2$ ).

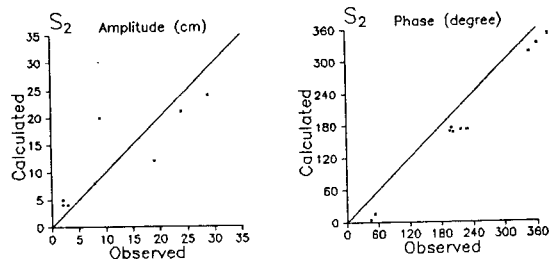


Fig. 20. Observed and computed amplitudes and phases in East Sea ( $S_2$ ).

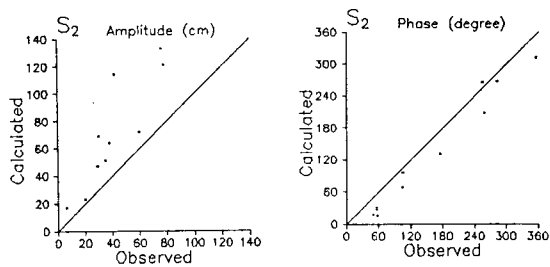


Fig. 18. Observed and computed amplitudes and phases in Yellow Sea and East China Sea ( $S_2$ ).

### 3.3.2 $K_2$ , $N_2$ 分潮

$K_2$  分潮와  $N_2$  分潮의 境遇는 觀測值의 缺如로 比較 및 檢證이 이루어지지 않는 데  $K_2$  分潮의 數值 模型結果는 Fig. 21에 提示되며 無潮點의 體系等에서  $M_2$ ,  $S_2$  分潮의 數值 模型 結果에서 提示된 等潮時圖와 類似한 形態를 보이고, Schwiderski(1981f)의 等潮時圖에 나타난 北西太平洋地域에서의 無潮點은 赤道에서 1個所가 나타나고 있음이 特徵이다. Schwiderski (1981f)의 潮汐圖에서는 Tonkin 灣 및 Thailand 灣에서 無潮點의 生成 可能性을 提示하고 있는 데, Tonkin 灣에서 弱한 無潮點體系를 보이고 Thailand 灣에서는 3個의 無潮點 形態를 나타내고 있다. 그러나  $M_2$ ,  $S_2$  分潮들의 模型 結果에서 明確히 提示되지 않았던 Bo-

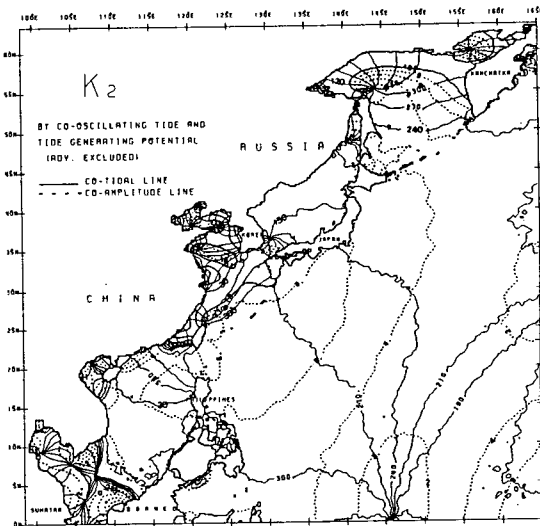


Fig. 21. Computed tidal chart of  $K_2$  tide (solid line; co-tidal line referred to Greenwich in degree, dashed line; co-amplitude line in cm, advection term excluded).

hai灣과 Liaodong 灣에서는 無潮點의 體系가 再現되고 있다. 等潮差圖에서는 Schwiderski(1981f)의 等潮差圖와 類似한 分布를 보이는 데 全地域에 걸쳐 振幅의 크기는 10 cm 以下の 差異를 보이고 있다.  $N_2$



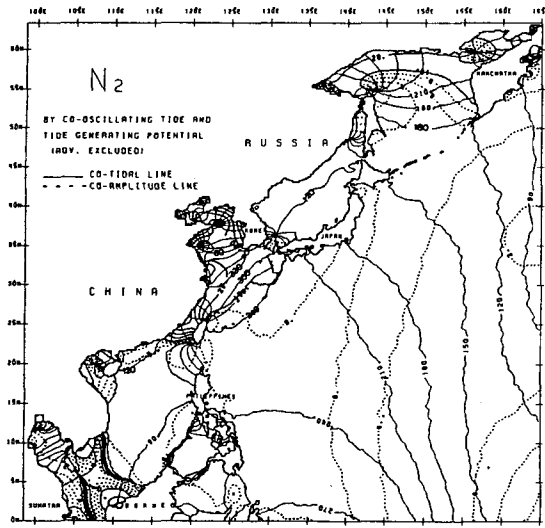


Fig. 22. Computed tidal chart of  $N_2$  tide (solid line; co-tidal line referred to Greenwich in degree, dashed line; co-amplitude line in cm, advection term excluded).

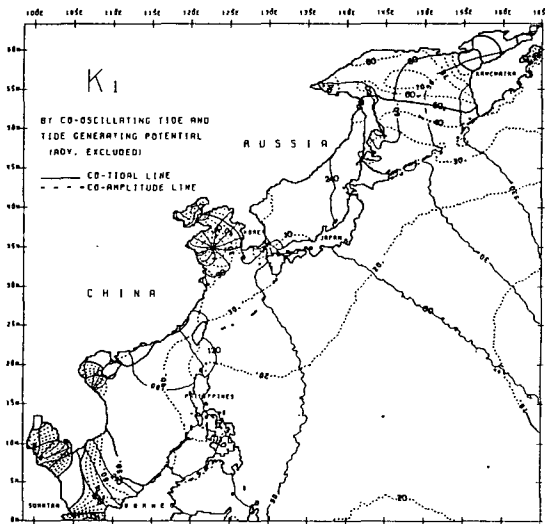


Fig. 23. Computed tidal chart of  $K_1$  tide (solid line; co-tidal line referred to Greenwich in degree, dashed line; co-amplitude line in cm, advection term excluded).

분조의 결과는 Fig. 22으로서 北西太平洋海域에서 全般的으로 潮汐의 波及이 다른 半日週潮에 비해 빠른 波及 樣相을 보여주고 있고, Okhotsk海, 東海, 黃海, 東中國海 및 南中國海에 있어서는 다른 半日週潮의 無潮點體系와 類似한 形態임을 提示하고 있고, 振幅에

Table 5. Comparison of pelagic tidal measurement and calculation ( $K_1$  tide, amp: H(cm), phase: g(degree))

Station		Ray		Schwiderski		Model	
Lat	Long	H	g	H	g	H	g
9.5N	138.1E	19	73	19	73	18	85
26.6N	142.2E	16	55	17	54	19	71

있어서는 全地域에 걸쳐  $K_2$  분조와 비슷한 分布를 보이고 있다.

### 3.4 日週潮( $K_1, O_1, P_1, Q_1$ )의 算定

日週潮의 潮汐算定은 半日主潮들과 같은 入力條件들로 模型을 構成하여 CFL 安定條件을 滿足하는 計算間隔은  $K_1$  분조는 19.945秒,  $O_1$  분조는 21.517秒,  $P_1$  분조는 20.06秒,  $Q_1$  분조는 22.39秒로하여 20 cycle에 걸쳐 數值實驗을 통해 20번째의 結果로부터 潮汐圖를 作成하였다.

#### 3.4.1 $K_1$ 分潮

Fig. 23과 같은  $K_1$  분조의 潮汐圖에 提示되는 特徵으로는 半日週潮에 의한 潮汐 現象과는 달리 大洋에서 波及되는 潮汐波가 南西方向으로 波及되면서 Kuril 列島를 통한 潮汐波는 Okhotsk海에서 西側으로 波及되고, Ryukyu 列島를 통해 黃海로 波及되는 潮汐波는 Bohai 灣과 山東半島 南側部에서 明確한 無潮點體系를 提示하고 있으며, 大韓海峽을 통해 東海로 波及되는 潮汐波는 韓國 東南端側에 無潮點 體系를 보여주고 있다. 또한 大洋으로부터 直接 東海로 波及되는 潮汐波는 좁은 Tsugaru 海峽을 通過하면서 弱한 無潮點 體系를 보이며, Kuril列島를 通過한 潮汐波가 西側으로 波及되면서 Soya海峽으로 進行하는데 이 때 明確한 無潮點의 形態를 提示하고 있다. 本數值 模型의 結果는 既存의 經驗的 潮汐圖인 Ogura (1933), Nishida(1980) 및 JODC(1985)의 潮汐圖과 類似한 結果임을 알 수 있다. 또한 Thuy(1968) 및 Fang (1986)의 數值 模型 結果에서 提示된 Thailand 灣에서의 無潮點과 Tonkin 灣 西南側에서의 半 無潮點 體系가 再現되고 있음을 알 수 있고, 南中國海에서의 日週潮의 特性이 強함을 半日週潮들의 等潮差圖들과 比較해 볼 때 잘 알 수 있다.  $K_1$  분조의 數值模型 結果에 있어서 深海觀測資料와의 比較는 Table 5에

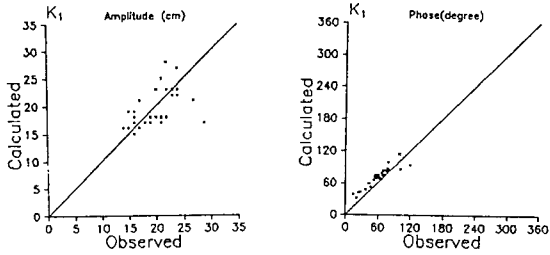


Fig. 24. Observed and computed amplitudes and phases in Pacific Ocean ( $K_1$ ).

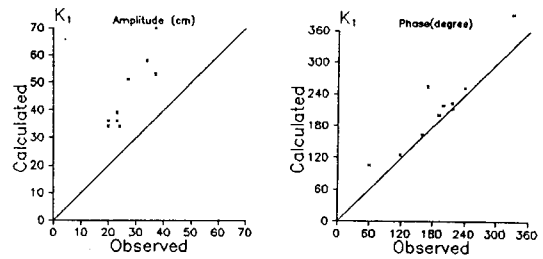


Fig. 28. Observed and computed amplitudes and phases in Yellow Sea and East China Sea ( $K_1$ ).

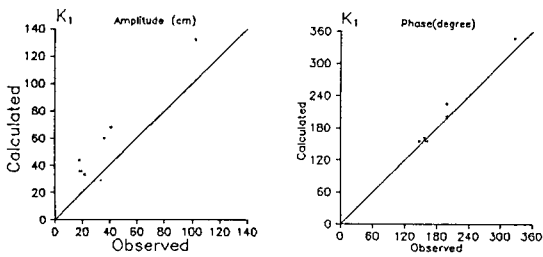


Fig. 25. Observed and computed amplitudes and phases in South China Sea ( $K_1$ ).

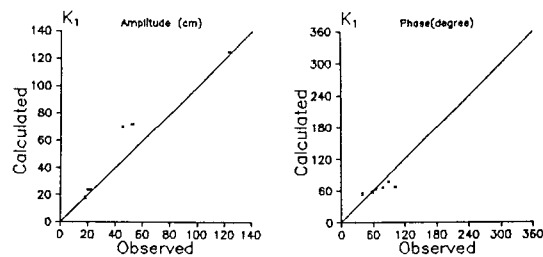


Fig. 29. Observed and computed amplitudes and phases in Okhotsk Sea ( $K_1$ ).

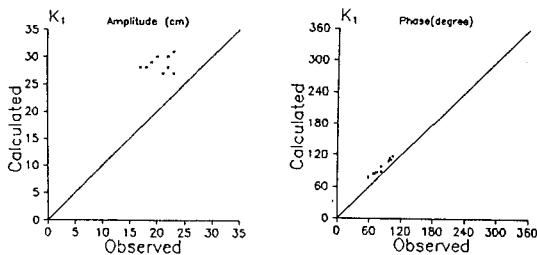


Fig. 26. Observed and computed amplitudes and phases in Ryukyu Island ( $K_1$ ).

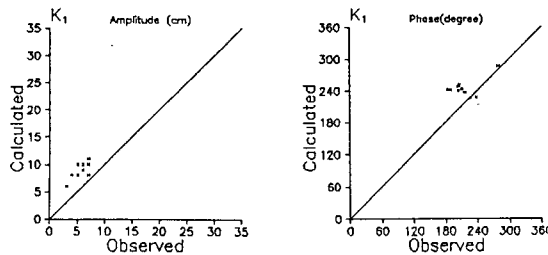


Fig. 30. Observed and computed amplitudes and phases in East Sea ( $K_1$ ).

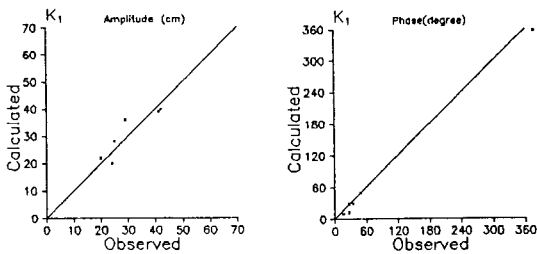


Fig. 27. Observed and computed amplitudes and phases in Kuril Island ( $K_1$ ).

提示되는 데 半日週潮에서와 달리 Caroline 群島 및 Mariana 群島에서 潮差는 良好한 값을 보이고 있으나 位相에서 30分~1時間 程度 늦게 波及되고 있다. Fig.

24~Fig. 30은 Fig. 13에 提示된 位置에서의 Ogura (1933)의 觀測值들과  $K_1$  分潮에 對한 數值 模型의 結果와의 比較로서 北西太平洋 地域, 南中國海, Kuril 列島 地域 및 Okhotsk海에서 振幅 및 位相이 잘 一致됨을 알 수 있고, Ryukyu 列島에서는 若干 큰 振幅을 나타내어 黃海 및 東海에서 若干 큰 값들을 提示하고 있으나 全般的으로 潮汐波의 波及形態等이 잘 나타나고 있다.

### 3.4.2 $O_1$ 分潮

Fig. 30에 提示되는  $O_1$  分潮의 潮汐數值模型 結果는  $K_1$  分潮의 潮汐 現象과 無潮點體系等 全般的으로 類似하나 等潮時線의 分布 形態에 있어서  $K_1$  分潮와 15° 程度의 位相差를 보이고 있다. 等潮差圖의 分布에

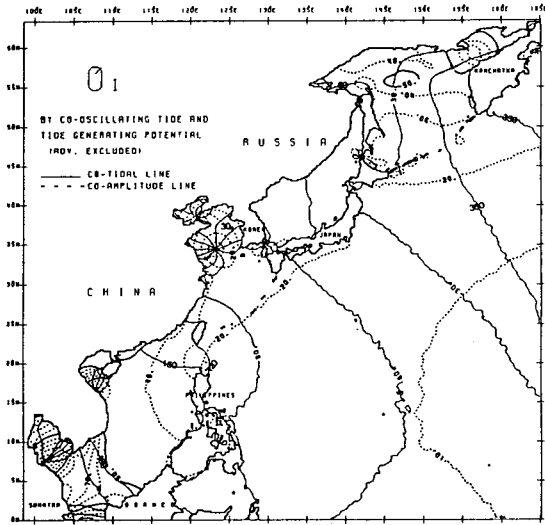


Fig. 31. Computed tidal chart of  $O_1$  tide (solid line; co-tidal line referred to Greenwich in degree, dashed line; co-amplitude line in cm, advection term excluded).

Table 6. Comparison of pelagic tidal measurement and calculation ( $O_1$  tide, amp: H(cm), phase: g(deg-ree))

Station		Ray		Schwidorski		Model	
Lat	Long	H	g	H	g	H	g
9.5N	138.1E	12	56	12	55	12	71
26.6N	142.2E	13	33	12	35	14	56

있어서는 Okhotsk海, 黄海, 東海, Thailand灣에서  $K_1$  分潮의 約 60% 程度로 나타나고, 北西太平洋 地域 및 南中國海에서는 振幅 크기가 비슷하게 分布된다.  $O_1$  分潮의 數值 模型 結果에 있어서 深海에 觀測資料와의 比較는 Table 6에 提示되는 데  $K_1$  分潮와 마찬가지로 Caroline 群島 및 Mariana 群島에서 潮差는 良好한 값을 보이고 있으나 位相에서 30分~1 時間 程度 늦게 波及되고 있다. Fig. 32~Fig. 38은 Ogura(1933)의 觀測值들과  $O_1$  分潮에 對한 數值 模型의 結果와의 比較로서 北西太平洋 地域, 南中國海, Okhotsk海에서 振幅 및 位相이 잘 一致됨을 알 수 있고 Ryukyu 列島에서 約 5 cm 程度의 振幅이 增幅되어 黄海 및 東海에서 若干 큰 값들을 提示하고 있으나  $K_1$  分潮와 마찬가지로 等潮時線의 分布 等 全般的으로 潮汐波의 波及形態 등이 잘 나타나고 있

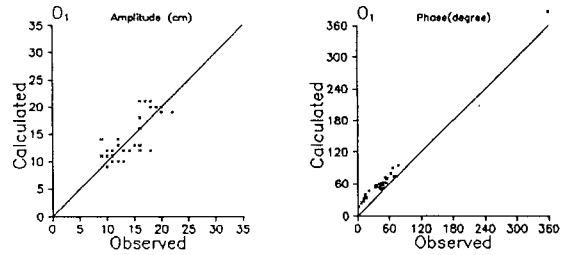


Fig. 32. Observed and computed amplitudes and phases in Pacific Ocean ( $O_1$ ).

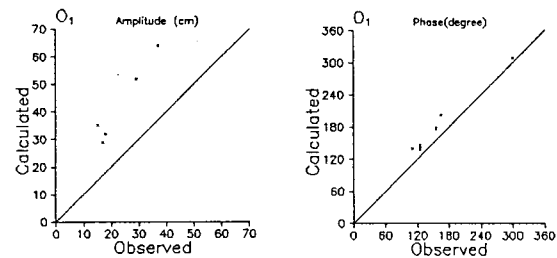


Fig. 33. Observed and computed amplitudes and phases in South China Sea ( $O_1$ ).

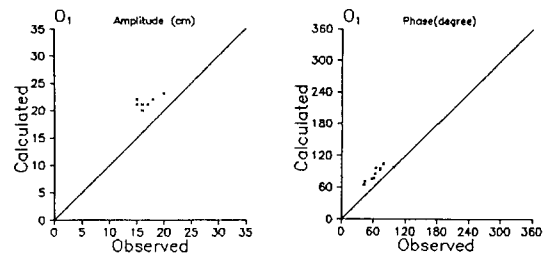


Fig. 34. Observed and computed amplitudes and phases in Ryukyu Island ( $O_1$ ).

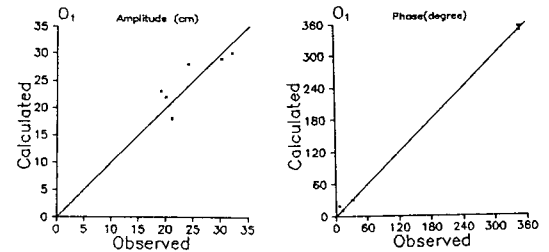


Fig. 35. Observed and computed amplitudes and phases in Kuril Island ( $O_1$ ).

다.

### 3.4.3 $P_1$ 및 $Q_1$ 分潮

Fig. 38에 提示되는  $P_1$  分潮의 數值 模型 結果는  $K_1$ ,

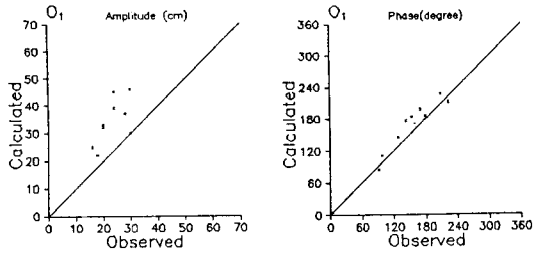


Fig. 36. Observed and computed amplitudes and phases in Yellow Sea and East China Sea ( $O_1$ ).

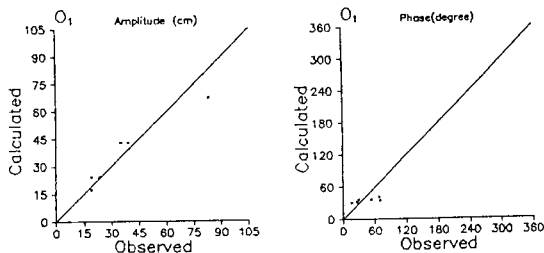


Fig. 37. Observed and computed amplitudes and phases in Okhotsk Sea ( $O_1$ ).

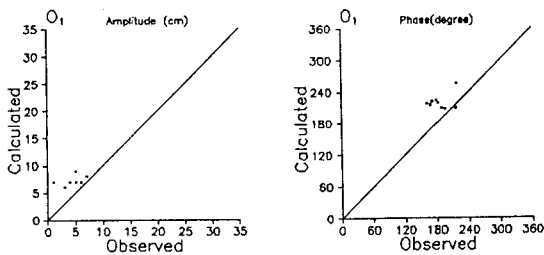


Fig. 38. Observed and computed amplitudes and phases in East Sea ( $O_1$ ).

$O_1$  分潮의 數值模型結果에서 提示된 等潮時圖와 類似的 形態를 보이는 데  $K_1$  分潮의 數值 模型 結果에 比較해 北西太平洋 地域에서는 1/4 程度의 振幅을 나타내고 位相差는  $15^\circ$  程度이며, Okhotsk海에서는 位相差는 거의 비슷하며 振幅은 1/3 程度를 나타내고, 黃海 및 南中國海에서는 位相差는  $15^\circ$  程度이고 振幅은 1/3 程度의 分布를 보이고 있다. Fig. 40에 제시되는  $Q_1$  分潮의 數值 模型 結果는  $K_1$ ,  $O_1$ ,  $P_1$  分潮들과는 달리 Soya 海峽에서 더 明確한 無潮點을 나타내며 Bohai 灣에서의 無潮點은 北側으로 若干 移動되어 나타나고 山東半島 南側에 나타났던 無潮點이 南東側으로 크게 移動되어 나타나고 있다. Tonkin 灣에서는 無潮點이 若干 東側으로 移動되고 北

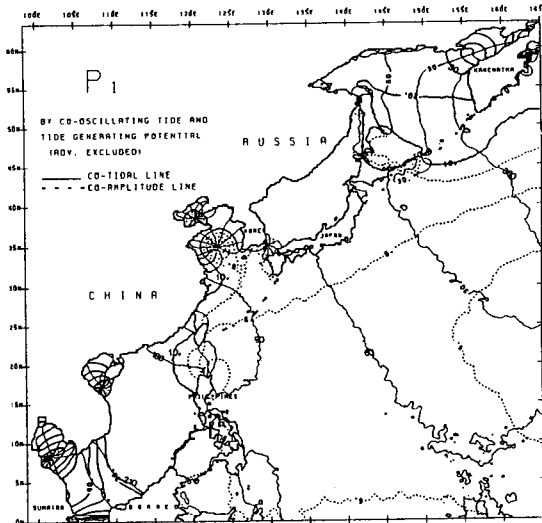


Fig. 39. Computed tidal chart of  $P_1$  tide (solid line; co-tidal line referred to Greenwich in degree, dashed line; co-amplitude line in cm, advection term excluded).

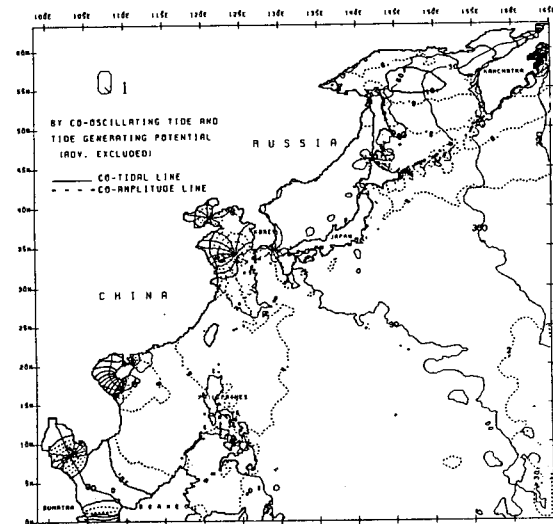


Fig. 40. Computed tidal chart of  $Q_1$  tide (solid-line; co-tidal line referred to Greenwich in degree, dashed line; co-amplitude line in cm, advection term excluded).

端側에 弱한 無潮點體系를 보이고 Thailand 灣에서는 明確한 1個의 無潮點 形態를 나타내고 있다.  $K_1$  分潮의 數值模型結果와 比較해 볼 때 北西太平洋 地域에서는 位相差는  $30^\circ$  程度이며 波及方向이 南西方向으로 變形되고 있다. 南中國海에서 또한  $K_1$ ,  $O_1$ ,  $P_1$

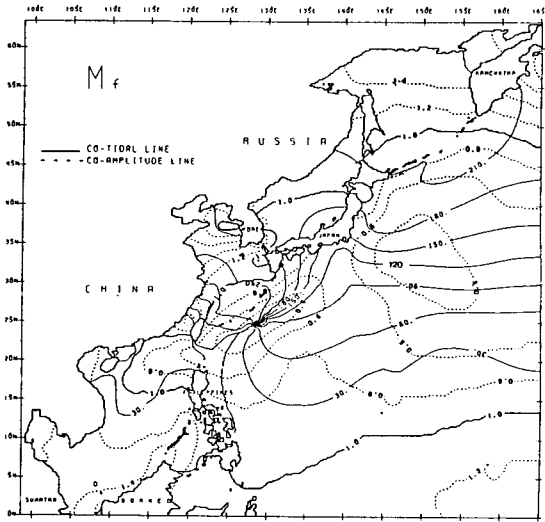


Fig. 41. Tidal chart of  $M_f$  tide in the East Asian Marginal Seas (solid line; co-tidal line referred to Greenwich in degree, dashed line; co-amplitude line in cm).

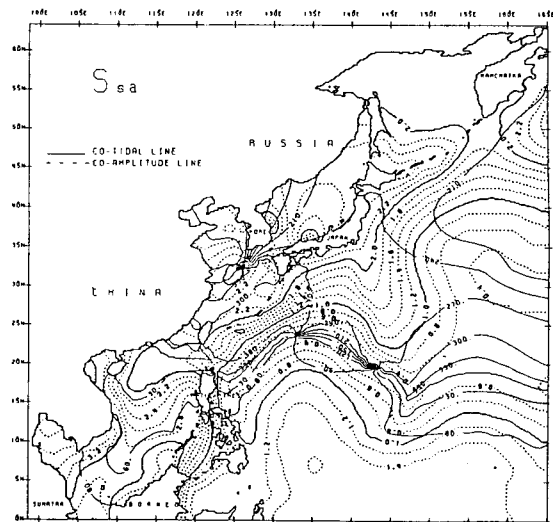


Fig. 43. Tidal chart of  $S_{sa}$  tide in the East Asian Marginal Seas (solid line; co-tidal line referred to Greenwich in degree, dashed line; co-amplitude line in cm).

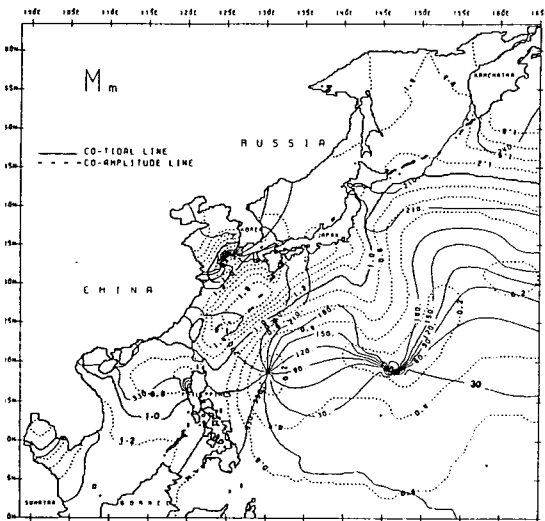


Fig. 42. Tidal chart of  $M_m$  tide in the East Asian Marginal Seas (solid line; co-tidal line referred to Greenwich in degree, dashed line; co-amplitude line in cm).

分潮들에서 Bashi 海峡을 통해 Philippine海로 南西方向으로 波及되던 것이 크게 變形되어 西側 方向으로 波及됨을 알 수 있다.

### 3.5 長週期 分潮( $M_f$ , $M_m$ , $S_{sa}$ )의 分布

半日週潮 및 日週潮와는 달리 長週期 分潮의 算定은 많은 計算時間이 要求됨에 따라 潮汐 模型을 利用한 計算은 이루어지지 못했는데 Schwiderski(1982)의  $M_f$ ,  $M_m$ ,  $S_{sa}$  分潮들에 對한  $1^\circ$  格子體系의 世界 大洋 潮汐 資料로부터 조화상수 dataset을 구하기 위해  $1/6^\circ$ 의 格子構成을 하여 內插法을 통해 調和常數를 求하고 東아시아海域에 있어서 潮汐圖를 Fig. 41~Fig. 43와 같이 作成하였는데 潮汐圖들에 提示되는 長週期 分潮의 特性은 振幅에서는 全般的으로 2 cm以下의 分布를 보이고 있고  $M_f$  分潮의 潮汐 波及形態는 北西太平洋에서 北側方向으로 波及되면서 Ryukyu列島 南側에서 無潮點을 提示하고,  $M_m$ ,  $S_{sa}$  分潮의 境遇는 北西太平洋 2個所와 黃海 南側部에서 無潮點體系를 提示하고 있다.

## 4. 結 論

本 研究에서는 東아시아海域에서의 既存의 經驗的 潮汐圖와 動水力學的 潮汐數值模型을 利用한 潮汐圖들이 解像圖가 낮은 大洋 潮汐圖와 局地領域에 局限된 潮汐圖들로 因해 東아시아 海域 全般에 對한 潮汐特性을 把握함에 있어 充分한 資料를 提示하지 못하고 있음에 따라 大洋潮汐과 地球潮汐이 考慮된 起潮力의

影響을 包含하는 2次元 動水力學的 潮汐模型으로부터 調和常數 dataset을 構成하고 潮汐圖를 作成함으로써 東아시아 海域에서의 全般的인 潮汐擧動을 把握할 수 있는 土臺를 마련하였다. 그러나 北西太平洋海域, Okhotsk海 및 黃海의 一部地域에서 模型의 結果가 既存의 觀測値와 相異함을 提示함에 따라 模型을 構成함에 있어 潮汐方程式의  $\alpha$ 값인 大洋 潮汐附與로 인한 重力變移의 影響, 起潮力에서의 Love number 및 海底摩擦係數와 潮汐方程式에서 移流項의 影響에 對한 檢討를 통해 信賴性있는 調和常數 dataset을 提示하여 衛星高度計 資料 利用時 더 正確한 海面變位算定에 對한 資料로 利用될 수 있도록 하여야 할 것이다.

參考文獻

崔秉昊, 1984. SEASAT 衛星을 利用한 東支那海의 海洋測地學의 研究. 韓國測地學會誌, 第2卷, 第2號, pp. 21-28.

崔秉昊, 1986. 東支那海의 海面變位算定. 韓國測地學會誌, 第4卷, 第1號, pp. 1-12.

Bogdanov, C.T., 1961a. New charts of the cotidal lines of semidiurnal tidal waves ( $M_2$  and  $S_2$ ) for the Pacific Ocean, *Sov. Oceanogr.*, No. 71, pp. 28-31.

Bogdanov, C.T., 1961b. New charts of the cotidal lines of diurnal tide ( $K_1$  and  $O_1$ ) for the Pacific Ocean, *Sov. Oceanogr.*, Vol. 1, pp. 46-49.

Bogdanov, C.T. and Magarik, V., 1967. Numerical solutions to the problem of distribution of semidiurnal tides  $M_2$  and  $S_2$  in the world ocean (transl.), *Dokl. Akad. Nank SSSR*, Vol. 172, pp. 1315-1317.

Cartwright, D.E. and Ray, R.D., 1990. Oceanic tides from GEOSAT altimetry. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 95, No. C3 pp. 3069-3090.

Choi, B.H., 1980. A tidal model of the Yellow sea and the Eastern China Sea, Korea Ocean Research and Development Institute. KORDI Report 80-02.

Choi, B.H., 1986. Preliminary results on computation of the sea surface topography over the East China Sea, Proceedings of 7th Asian Conference on Remote Sensing.

Choi, B.H., 1990. Development of fine-grid numerical tidal models of the Yellow Sea and the East China Sea, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 2, No. 4, pp. 231-234.

Choi, B.H. and Lee, H.J., 1993. A tidal model of the East Sea, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 5, No. 3, pp. 250-262.

Choi, B.H. and Fang, G., 1993. A review of tidal models for the East China and Yellow Seas, *Journal of the Korean Society of Coastal Ocean Engineers*, Vol. 5, No. 2, pp. 151-171.

Fang, G., 1986. Tide and tidal current charts for the marginal seas adjacent to China, *Chinese J. of Oceanology and Limnology*, Vol. 4, No. 1, pp. 1-16.

Fang, G. and Cao, D., 1993. A numerical model for tides and tidal currents in the South China Sea, The Seventh Japan and East China Seas Study/Pacific Marginal Seas Workshop.

Flather, R.A. and Heaps, N.S., 1975. Tidal computations for Morecombe Bay, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, No. 42, pp. 489-517.

Foreman, M.G.G., Bennett, A.F., Egbert, G.V. and Hagelberg, C., 1992. The removal of tidal elevations from satellite altimeter measurements, *Proceedings of IX International Conference on Computational Methods in Water Resources*, Denver, Colorado, USA.

Japan Oceanographic Data Center, 1984. Tidal harmonic constants catalogue, JODC Catalogue No. 4, 115 p.

Japan Oceanographic Data Center, 1984. Tidal current data catalogue, JODC Catalogue No. 16, 236 p.

Kim, K.Y., 1992. Numerical experiments on  $M_2$  tide in the Okhotsk Sea, MSc Thesis. Department of Oceanography, Seoul National University.

Krohn, J., 1984. A global ocean tide model for the  $M_2$ -tide with refined grid-resolution in shelf-areas, Erschienen im Eigenverlag des Instituts für Meereskunde, Hamburg Univ., pp. 79-209.

Lee, H.J., 1992. Numerical investigation of tides and long waves in the East Sea (Japan Sea), MSc thesis Department of Civil Engineering, Sung Kyun Kwan University.

Luther, D.S. and Wunsch, C., 1974. Tidal charts of the Central Pacific Ocean, *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 5, pp. 222-230.

Nishida, H., 1980. Improved tidal charts for the western part of the North Pacific Ocean, Report of Hydrographic Research, Japanese Hydrographic Department, No. 15, pp. 55-70.

Odamaki, M., 1989a. Tides and tidal currents in the Tushima Strait, *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, Vol. 45, pp. 65-82.

Odamaki, M., 1989b. Co-oscillating and independent tides of the Japan Sea, *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, Vol. 45, pp. 217-232.

Ogura, S., 1933a. On the tidal currents and tides in the northern part of the Hwang Hai (Yellow Sea), *Hydrographic Bulletin*, 12: 47-61.

Ogura, S., 1933b. On the tides in the Liautung Gulfs, *Hydrographic Bulletin*, 12: 47-61.

Ogura, S., 1933c. The tides in the seas adjacent to Japan, *Bulletin of the Hydrographic Department, Imperial Japanese Navy*, 7: 1-189 and Appendices.

Pingree, R.D. and Griffiths, D.K., 1987. Tidal friction for semidiurnal tides, *Continental Shelf Research*, Vol. 7, No. 10, pp. 1181-1209.

Ray, R.D. and Sanchez, B.V., 1989. Radial deformation of the earth by oceanic tidal loading, NASA Technical Memorandum 100743.

Schwiderski, E.W., 1978. Global ocean tides, part I: a detailed hydrodynamical interpolation model, Naval Su-

- face Weapon Center, NSWC/DL TR-3866.
- Schwiderski, E.W., 1979. Global ocean tides, part II: the semidiurnal principal lunar tide ( $M_2$ ), Atlas of Tidal Charts and Maps, Naval Surface Weapon Center, NSWC TR 79-414.
- Schwiderski, E.W., 1981a. Global ocean tides, part III: the semidiurnal principal solar tide ( $S_2$ ), Atlas of Tidal Charts and Maps, Naval Surface Weapon Center, NSWC TR 81-122.
- Schwiderski, E.W., 1981b. Global ocean tides, part IV: the diurnal luni-solar declination tide ( $K_1$ ), Atlas of Tidal Charts and Maps, Naval Surface Weapon Center, NSWC TR 81-142.
- Schwiderski, E.W., 1981c. Global ocean tides, part V: the diurnal principal lunar tide ( $O_1$ ), Atlas of Tidal Charts and Maps, Naval Surface Weapon Center, NSWC TR 81-144.
- Schwiderski, E.W., 1981d. Global ocean tides, part VI: the semidiurnal elliptical lunar tide ( $N_2$ ), Atlas of Tidal Charts and Maps, Naval Surface Weapon Center, NSWC TR 81-218.
- Schwiderski, E.W., 1981e. Global ocean tides, part VII: the diurnal principal solar tide ( $P_1$ ), Atlas of Tidal Charts and Maps, Naval Surface Weapon Center, NSWC TR 81-220.
- Schwiderski, E.W., 1981f. Global ocean tides, part VIII: the semidiurnal luni-solar declination tide ( $K_2$ ), Atlas of Tidal Charts and Maps, Naval Surface Weapon Center, NSWC TR 81-222.
- Schwiderski, E.W., 1981g. Global ocean tides, part IX: the diurnal elliptical lunar tide ( $Q_1$ ), Atlas of Tidal Charts and Maps, Naval Surface Weapon Center, NSWC TR 81-224.
- Schwiderski, E.W., 1982. Global ocean tides, part X: the fortnightly lunar tide ( $M_f$ ), Atlas of Tidal Charts and Maps, Naval Surface Weapon Center, NSWC TR 82-151.
- Schwiderski, E.W., 1983. Ocean tidal research and its applications-highlight to promote worldwide cooperation, NSWC/K104, Dahlgren, Virginia, 22448.
- Thuy, N.N., 1969. Some peculiarities of the formation of tidal phenomena in the South China Sea, *Okeanologia* 9(2): pp. 222-230.
- Wahr, J., 1981. Body tides on an elliptical, rotating, elastic and oceanless earth, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, Vol. 64, pp. 677-703.