

벵갈灣의 潮汐 Modelling of Tides in the Bay of Bengal

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 알려진 Schwiderski의 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 대한 補正을 向上시킬 必要가 있다. 벵갈灣은 방글라데시 沿岸北側에서 發生하는 暴風海溢과 潮汐의 影響을 현저히 받는 海洋特性으로 인해 海洋學의 側面에서 關心이 高調되고 있어 初期段階로 벵갈灣 全體에 대해 1/4° 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)에 대한 數值模型實驗이 이루어졌다. 計算結果들은 既存의 Schwiderski의 潮汐圖 및 觀測資料들과의 比較·檢討가 이루어졌다.

Abstract □ As satellite altimetry is being progressed to apply with higher precision to marginal 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. The Bay of Bengal renders many conspicuous coastal oceanographic issues including tide and storm surge interactions along the upper Bangladesh coast. 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) are computed with a model having a mesh resolution of 1/4 degree over the whole Bay of Bengal. Computed results are discussed with observation and previous Schwiderski's tidal map of the region.

1. 序 論

벵갈灣의 海底地形은 U字形으로서 南側으로 開放되어 있고 世界에서 가장 큰 海底地質板인 벵갈板에 의해 生成된 內灣으로써 水深分布는 약 2,000~4,000 m이며 바닥경사가 南側方向으로 약 4,800 km에 걸쳐 거의 均一한 傾斜를 나타내고 있다. 벵갈灣 北側部에서의 潮汐現像은 Ganga 삼각주에서의 막대한 流量에 의해 影響을 받으며 大潮時의 潮差는 2.5 m~4.5 m의 값을 갖는다 (Bay of Bengal Pilot, 1978). 벵갈灣 北側에서 週期的으로 나타나는 暴風海溢은 근본적인 災害要因으로서 Johns 등 (1983)은 海溢의 變化가 複合적인 動的過程에 의해서 결정된다고 提示하고 있다. 初期段階로써 벵갈灣의 動的舉動을 把握하기 위해서 動水力學의 模型을 改善하였으며, 潮汐體系에 대한 研究가 이루어졌다.

2. 動水力學의 模型

大洋潮汐에 대한 友配方程式은 地球의 曲率 및 偏向力을 考慮하여 球面座標系 上에 樹立되었으며 動水力學의 非線形 移流項과 自乘型 摩擦項, 起潮力項을 包含한 垂直 積分된 方程式으로 그 形態는 다음과 같다.

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

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

*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)

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

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

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

- t : 時間
- χ, ϕ : 經度 및 度
- ξ : 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
- ω : 地球回轉의 角速度
- g : 重力加速度
- k_b : 自乘型 海底摩擦係數 (0.0025 채택)
- U, V : 水深 平均된 流速成分

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

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

$u(z), v(z)$: 靜止海面 下 水深 z 에서의 x, ϕ 方向의 流速成分

ξ_0 : 平衡潮汐

α, β : 潮汐포텐셜, 地球潮汐 및 大洋潮汐附與로 인한 質量 再配置에 따른 係數

模型의 境界에서는 흐름이 없다고 假定하고 北緯 2°N과 經度 78°E 부근의 開放境界에 대해서는 Schwiderski의 1° 格子體系의 地球大洋潮汐資料를 利用하였다. 模型에 있어서 支配的 因子는 起潮力, 地球潮汐과 大洋潮汐附與로 인한 影響이 支配的으로 作用하며 地球가 彈性體라 가정할 때 두 前者의 影響은 平衡潮汐에 대해 $\beta \xi_0$ 로 나타내는 데(Schwiderski 등, 1978) 여기서

$$\beta = 1 + k - h \quad (5)$$

이고 k, h 는 重力攪亂 등을 地球潮汐 相關關係로 표현할 때의 係數로 Love number라 稱하며 일반적으로 모든 分潮에 대해 $k=0.30, h=0.61$ 을 取하고 있으나 Topex/Poseidon Satellite Tidal Committed가 提案한 Wahr(1981)의 研究資料인 各 分潮別 Love num-

Table 1. Love numbers and tidal potential amplitudes

Constituent	k	h	H_n
M_2	0.302	0.609	0.24408
S_2	0.302	0.609	0.11355
N_2	0.302	0.609	0.04674
K_2	0.302	0.609	0.03090
K_1	0.256	0.520	0.14246
O_1	0.298	0.603	0.10128
P_1	0.287	0.581	0.04713

ber는 Table 1과 같으며 本 研究에서는 이 값들을 利用하였다.

各 分潮에 대한 平衡潮汐 ξ_{0n} 는 다음과 같다(Cartwright, 1978; Schwiderski, 1978).

$$\xi_{0n} = H_n \cdot \cos^2 \phi \cos(\sigma_n t + 2\lambda + V_n): \text{半日週潮} \quad (6)$$

$$= H_n \cdot \sin 2\phi \cos(\sigma_n t + \lambda + V_n): \text{日週潮} \quad (7)$$

여기서 H_n 는 Table 1에서 주어진 振幅, σ_n 는 角速度, V_n 는 天文常數이며 本 研究에서는 $V_n=0$ 로 採擇하였다.

Ray와 Sanchez(1989)의 研究에 따르면 大洋潮汐의 附與로 인한 質量再配置에 따른 彈性體 地球의 變形을 誘發하는 大洋潮汐力은 大洋潮汐의 位相과 그 값의 一定比率를 가정함으로써 算定하였고 Foreman 등(1992)은 衛星高度計 觀測資料로 부터 潮汐成分 除去를 위한 研究에서 Ray와 Sanchez(1989)의 研究結果에서 日週潮인 경우는 0.94, 半日週潮인 경우는 0.953의 값을 각각 提示함에 따라 모든 分潮에 대해 $\alpha=0.946$ 을 取하였는데 本 研究에서도 이 값들을 適用하였다.

上記式 (1)~(3)은 時間 t 에서 全 格子體系에 있어서 ξ, u, v 의 값으로 부터 $t+\Delta t$ 시각에 이들 變化값들을 算定하는 陽解法인 有限差分技法을 利用하였는데 Flather와 Heaps(1975)와 Choi(1980)의 解析方法인 每 格子 中心에서의 空間差分과 時間에 따른 前進 및 後進差分으로 解析하였다. 本 模型에서 有限差分 格子體系는 解像圖가 높은 $1/4^\circ \times 1/4^\circ$ 體系로 構成하였고 水深은 英海軍 水路部 海圖 (British Admirary Chart) N0. 4706에서 取讀하였다. 本 模型은 半日週潮나 日週潮일 경우 모두 安定한 값을 얻기 위해 實行 期間을 動水力學的으로 平衡한 5일간 實行하였다. 振幅과 位相을 計算하는데 있어서는 마지막 潮汐週期の

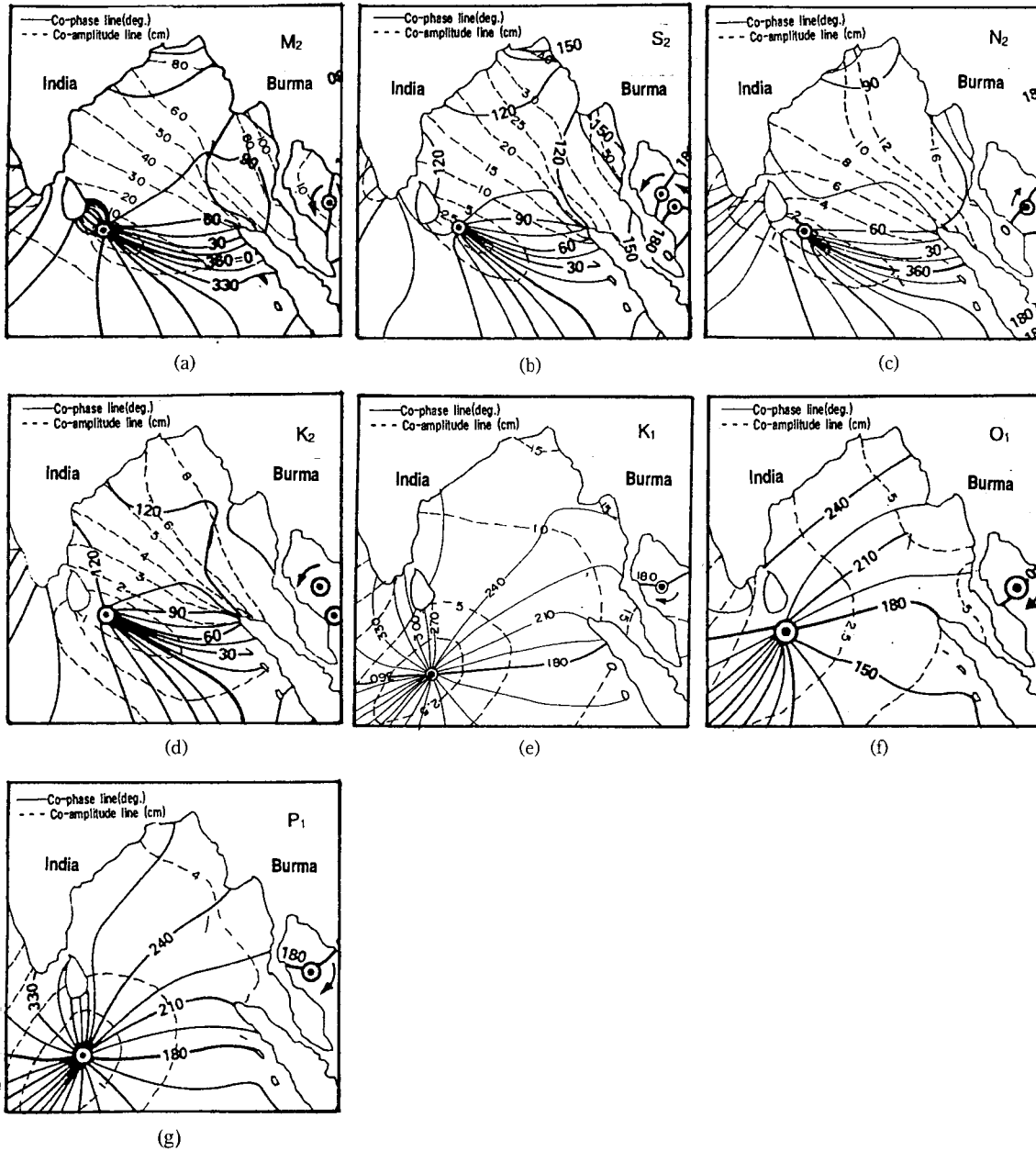


Fig. 1. Tidal charts by Schwiderski (solid line ; co-tidal line referred to Greenwich in degree, dashed line; co-amplitude line in cm).

값을 이용하여 Fourier 분석을 통하여 분석 처리하였다.

3. 模型의 算定結果

Bay of Bengal Pilot(1978)에 記錄되는 스리랑카

沿岸에서의 平均 大潮乘은 약 0~6m로서 印度의 東側沿岸인 Paradip에서 大潮乘은 약 2m로 점점 增加하며, 孟加拉灣 入口에서는 大潮乘의 變化가 2.5~4.5 m이며, 버마의 沿岸에서의 大潮乘은 약 2~2.5m이고 Irrawaddy峽谷의 北東側으로 增加하면서 孟加拉灣에서 潮位幅의 가장 큰 Marataban灣에서는 약 5.5m로 急

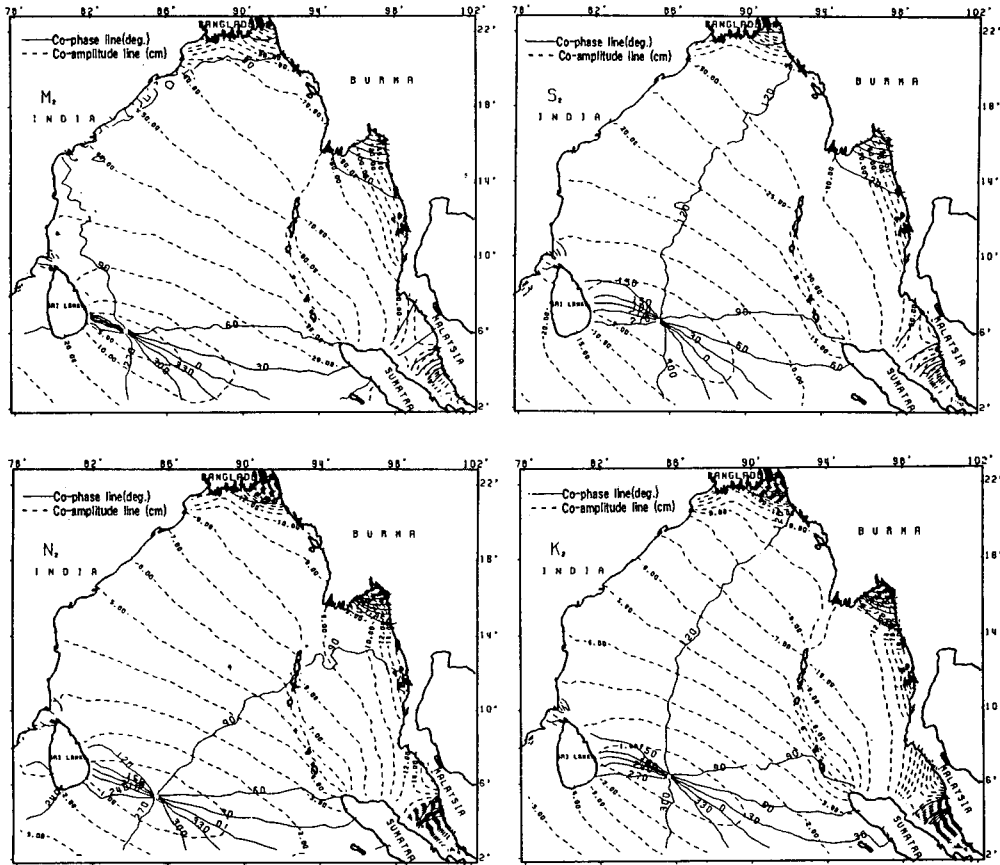


Fig. 2. Computed tidal charts of semi-diurnal(M_2 , S_2 , K_2 , N_2) tides for the Bay of Bengal.

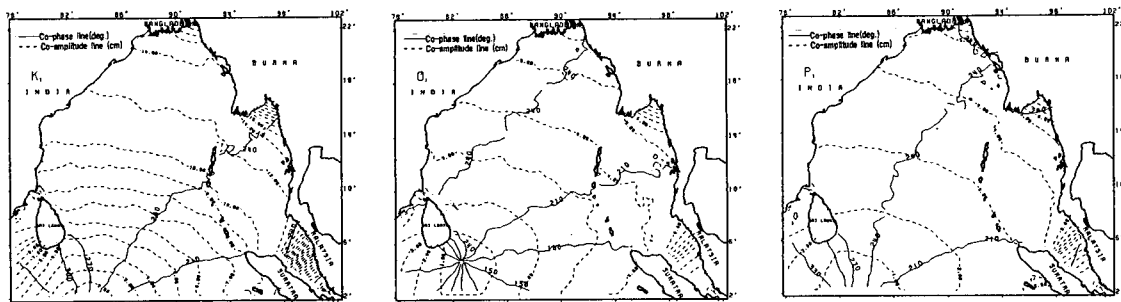


Fig. 3. Computed tidal charts of diurnal(K_1 , O_1 , P_1) tides for the Bay of Bengal.

激히 增加한다.

模型에 의해 算定된 半日週潮(M_2 , S_2 , K_2 , N_2)와 日週潮(K_1 , O_1 , P_1)의 沿岸에서의 潮汐分布는 Schwiderski의 潮汐圖(Fig. 1)와 潮汐波及形態 및 振幅의 分布에서 類似한 結果를 얻었으며, Fig. 2와 Fig. 3는 模

型에서 算定된 半日週潮와 日週潮의 潮汐圖를 提示하며 等潮汐圖(等振幅 및 等位相圖)는 Schwiderski의 潮汐圖에서 提示되는 無潮點의 位置가 잘 再現되었다. 數值實驗結果로 보아 無潮點의 位置는 開放境界潮位와 潮汐포텐셜에 敏感함을 알 수 있다. 模型에 의해

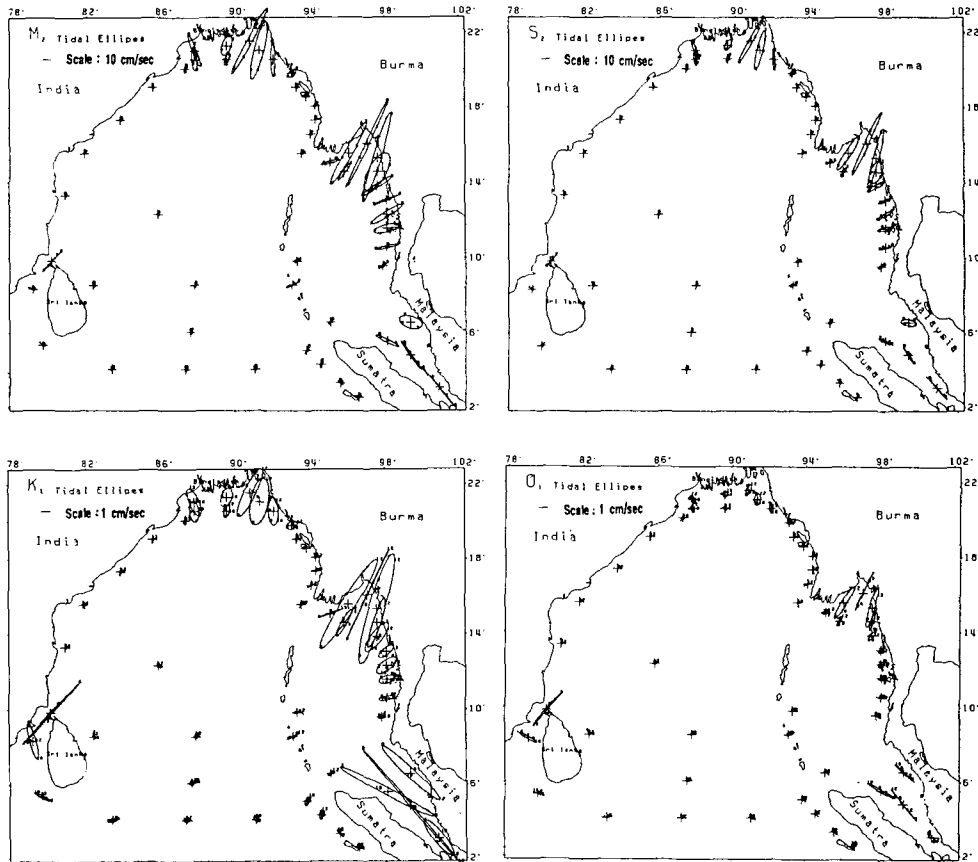


Fig. 4. Computed tidal ellipses of four major M_2 , S_2 , K_1 , O_1 tides.

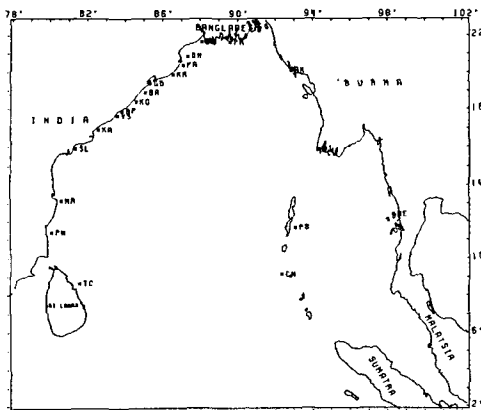
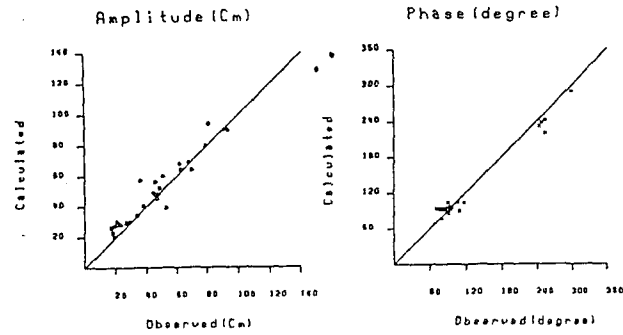


Fig. 5. Coded elevation points from which computed results are compared (TC: Tricomalee, DR: Diamond Harbour Hoogly River, AK: Akyab, DI: Diamond Island Bassein River, ME: Mergui, PB: Port Blair, PR: Pusser River, CN: Car Nicobar, MA: Madras, DH: Dhamra, PN: Port Novo, PA: Paradip, KR: Kushbhadra River, BA: Baruva, SL: Surya Lanka, GO: Godalpur, VS: Vishakhapatnam, BP: Bhimunipatnam, KG: Kalinga-Patnam, KA: Kakinada).

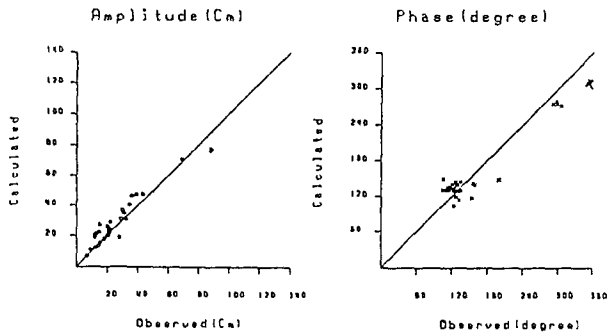
算定된 결과와 觀測值의 比較를 위해 Fig. 4에서와 같이 20個 地點을 選擇하여 그 地點에서의 7個 主要 分潮 즉, M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 分潮에 대한 計算值와 IHB(International Hydrographic Bureau) Tidal Constant Database에서 提示하는 觀測值와의 比較가 이루어졌다. 그 結果가 Fig. 6에서와 같이 提示되는데 觀측치와 計算치간의 표준편차(M_2 : 진폭 14.1%, 위상 10.7%, S_2 : 진폭 21.4%, 위상 10.5%, N_2 : 진폭 13.4%, 위상 26.0%, K_2 : 진폭 20.8%, 위상 15.2%, K_1 : 진폭 11.6%, 위상 2.6%, O_1 : 진폭 7.9%, 위상 3.5%, P_1 : 진폭 11.3%, 위상 3.3%)는 全般的으로 振幅 및 位相分布에 대해 큰 차이를 보이는데 연안에 위치한 Bangladesh Diamond Harbour Hoogly River(DR), Burma와 Malaysia사이의 Mergui(ME)지점에서의 큰 차이값이 영향을 미친 결과이다.

Fig. 4은 M_2 , S_2 , K_1 , O_1 分潮의 조류타원도로 潮流分布의 크기와 方向을 提示하고 있다. 인도의 東側



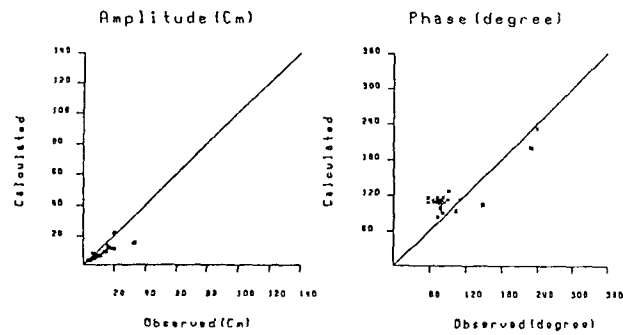
Comparison of M_2 Tide in the Bay Bengal

STATION	LAT (N)	LONG (E)	AMP(m)		PHASE(deg)	
			OBS	CAL	OBS	CAL
TC	8.55	81.22	0.177	0.187	73.0	91.7
DR	22.18	88.18	1.574	1.244	161.6	106.3
AK	20.13	92.90	0.779	0.794	85.6	84.8
DI	15.87	94.28	0.668	0.683	85.8	84.0
ME	12.43	98.60	1.675	1.341	106.2	87.0
PB	11.68	92.77	0.610	0.671	86.2	83.1
PR	21.72	89.55	0.798	0.931	104.3	101.3
CN	9.17	92.25	0.518	0.376	78.0	73.7
HA	13.10	80.30	0.332	0.330	76.3	91.5
DH	20.80	86.90	0.898	0.890	115.2	101.7
PN	11.48	79.77	0.258	0.284	91.5	94.2
PA	20.27	86.68	0.622	0.634	67.4	91.6
KR	19.85	86.05	0.501	0.593	83.6	90.6
BA	18.87	84.60	0.451	0.545	76.0	89.8
SL	15.85	80.53	0.368	0.394	77.6	89.6
GO	19.27	84.92	0.349	0.563	92.6	89.8
VS	17.68	83.28	0.475	0.466	74.0	90.1
BP	17.90	83.45	0.439	0.479	71.0	90.1
KG	18.35	84.13	0.479	0.510	76.9	90.7
KA	16.93	82.25	0.462	0.439	82.6	89.8



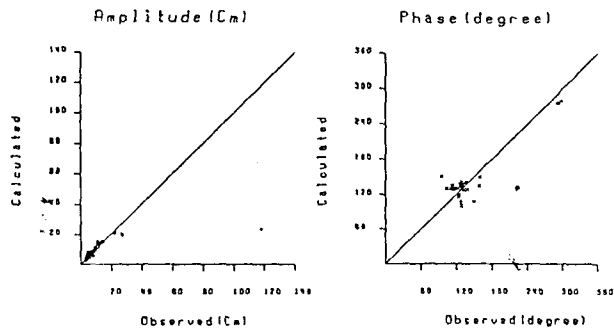
Comparison of S_2 Tide in the Bay Bengal

STATION	LAT (N)	LONG (E)	AMP(m)		PHASE(deg)	
			OBS	CAL	OBS	CAL
TC	8.55	81.22	0.064	0.059	102.6	146.9
DR	22.18	88.18	0.699	0.690	208.6	133.9
AK	20.13	92.90	0.345	0.396	122.2	118.0
DI	15.87	94.28	0.304	0.335	125.4	115.8
ME	12.43	98.60	0.892	0.767	151.8	115.0
PB	11.68	92.77	0.439	0.359	125.5	111.6
PR	21.72	89.55	0.352	0.455	153.1	100.8
CN	9.17	92.25	0.271	0.181	121.0	100.8
HA	13.10	80.30	0.137	0.137	113.6	133.6
DH	20.80	86.90	0.381	0.475	156.7	136.8
PN	11.48	79.77	0.107	0.110	127.7	137.8
PA	20.27	86.68	0.279	0.302	102.9	127.9
KR	19.85	86.05	0.213	0.277	126.7	126.0
BA	18.87	84.60	0.188	0.251	109.5	127.7
SL	15.85	80.53	0.166	0.168	110.8	132.4
GO	19.27	84.92	0.135	0.263	132.9	127.1
VS	17.68	83.28	0.209	0.212	109.2	127.2
BP	17.90	83.45	0.201	0.221	109.9	129.0
KG	18.35	84.13	0.206	0.235	112.3	127.3
KA	16.93	82.25	0.197	0.193	120.2	129.6



Comparison of N_2 Tide in the Bay Bengal

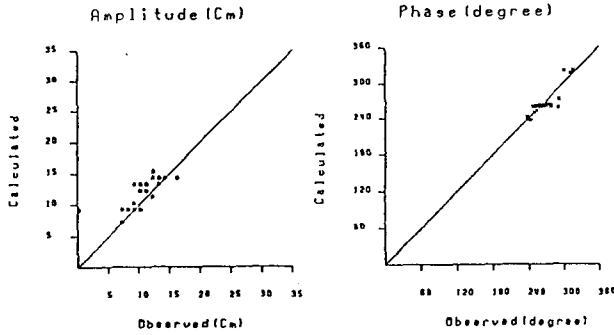
STATION	LAT (N)	LONG (E)	AMP(m)		PHASE(deg)	
			OBS	CAL	OBS	CAL
TC	8.55	81.22	0.043	0.022	55.0	113.3
DR	22.18	88.18	0.291	0.138	154.4	105.5
AK	20.13	92.90	0.158	0.106	75.1	92.1
DI	15.87	94.28	0.138	0.088	75.3	95.4
ME	12.43	98.60	0.316	0.158	100.7	92.1
PB	11.68	92.77	0.122	0.080	78.8	88.9
PR	21.72	89.55	0.147	0.120	88.7	124.4
CN	9.17	92.25	0.098	0.047	70.0	82.9
HA	13.10	80.30	0.072	0.039	69.7	110.7
DH	20.80	86.90	0.173	0.104	108.3	109.7
PN	11.48	79.77	0.031	0.031	88.0	110.0
PA	20.27	86.68	0.131	0.077	54.9	105.3
KR	19.85	86.05	0.063	0.073	75.1	106.3
BA	18.87	84.60	0.078	0.065	75.4	105.7
SL	15.85	80.53	0.046	0.046	70.9	109.3
GO	19.27	84.92	0.051	0.069	75.9	101.1
VS	17.68	83.28	0.101	0.057	66.0	106.3
BP	17.90	83.45	0.082	0.058	72.8	106.4
KG	18.35	84.13	0.091	0.062	64.2	105.8
KA	16.93	82.25	0.096	0.052	74.3	107.6



Comparison of K_2 Tide in the Bay Bengal

STATION	LAT (N)	LONG (E)	AMP(m)		PHASE(deg)	
			OBS	CAL	OBS	CAL
TC	8.55	81.22	0.020	0.017	92.0	149.2
DR	22.18	88.18	0.206	0.201	209.1	119.0
AK	20.13	92.90	0.098	0.111	121.7	116.6
DI	15.87	94.28	0.081	0.092	121.0	113.2
ME	12.43	98.60	0.256	0.194	147.3	105.1
PB	11.68	92.77	0.079	0.096	124.0	105.0
PR	21.72	89.55	0.096	0.126	157.0	147.3
CN	9.17	92.25	0.073	0.049	125.0	98.7
HA	13.10	80.30	0.038	0.037	111.0	133.0
DH	20.80	86.90	0.104	0.137	156.7	132.8
PN	11.48	79.77	0.029	0.029	127.7	135.6
PA	20.27	86.68	0.076	0.084	100.8	128.5
KR	19.85	86.05	0.058	0.069	110.3	130.2
BA	18.87	84.60	0.051	0.069	112.2	126.5
SL	15.85	80.53	0.045	0.044	110.8	132.6
GO	19.27	84.92	0.037	0.071	136.2	127.0
VS	17.68	83.28	0.056	0.056	108.3	127.4
BP	17.90	83.45	0.055	0.060	219.7	127.7
KG	18.35	84.13	0.058	0.062	112.8	127.8
KA	16.93	82.25	0.049	0.052	115.5	128.6

Fig. 6. Comparison between calculated and observed amplitudes and phases of the M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 tides.



Comparison of K_1 Tide in the Bay Bengal

STATION	LAT (N)	LONG (E)	AMP(m)		PHASE(deg)	
			OBS	CAL	OBS	CAL
TC	8.55	81.22	0.066	0.070	250.0	259.1
OR	22.18	88.18	0.153	0.167	286.1	256.5
AK	20.13	92.90	0.136	0.144	260.4	249.9
DI	15.87	94.28	0.129	0.128	246.0	247.2
ME	12.43	98.60	0.180	0.141	235.7	234.9
PB	11.68	92.77	0.122	0.113	234.5	239.4
PR	21.72	89.55	0.108	0.157	273.9	257.4
CN	9.17	92.25	0.087	0.086	241.5	234.5
HA	13.10	80.30	0.090	0.099	258.5	260.7
DH	20.80	86.90	0.122	0.151	274.2	259.8
PN	11.48	79.77	0.081	0.091	263.1	260.8
PA	20.27	86.68	0.124	0.138	243.8	257.6
KR	19.85	86.05	0.123	0.135	256.6	257.3
BA	18.87	84.60	0.107	0.129	252.9	258.2
SL	15.85	80.53	0.115	0.114	254.7	259.7
GO	19.27	84.92	0.096	0.132	266.5	258.2
VS	17.58	83.28	0.113	0.121	253.9	259.1
BP	17.90	83.45	0.109	0.123	246.0	258.7
KG	18.35	84.13	0.104	0.126	263.1	258.2
KA	16.93	82.25	0.105	0.117	256.6	259.9

Fig. 6. (Continued).

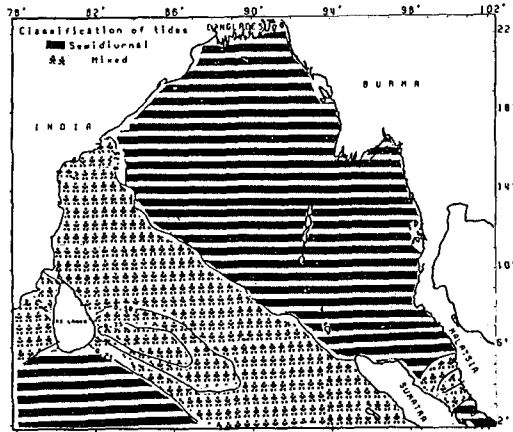


Fig. 7. Classification of tides in the Bay of Bengal.

沿岸에서의 潮流는 沿岸을 따라 微細한 分布를 가지고 있으며 潮流의 크기는 Hugli江과 Ganga江 入口部에서 増加됨을 알 수 있다. 또한 버마 沿岸과 Mergui Archipelago와 Martaban灣에서의 潮流는 强하게 나타나고 있다.

벵갈灣에서의 自然潮流特性은 形態數(Courtier, 1938)으로 表現할 수 있으며 形態數 F는

$$F = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2} \quad (8)$$

로서 Fig. 7에 제시된 바와 같이 벵갈灣은 大部分의 半日週潮($F < 0.25$)가 支配的인 地域이고 스리랑카와 수마트라 사이에는 複合的인 潮流($0.25 < F < 1.25$)이 支配的인 地域으로 크게 分類할 수 있다.

4. 結 論

潮流數值模型을 통해 벵갈灣의 潮流特性 파악이 이루어졌는데 潮流波及形態 및 振幅分布에서는 기존의 Schwiderski 潮流圖와 類似한 結果를 提示하나 연안 역의 관측위치에서 큰 變化를 보였다. 따라서 本 模型의 改善을 위해서는 淺海地域에 있어 細格子體系의 構成과 河口部에서의 觀測潮位의 入力, Cyclone이나 洪水와의 相關關係 등을 研究함이 必要하며 이렇게 改善된 模型은 衛星高度計 海面觀測資料로 부터 벵갈灣의 力學關係를 研究하는데 利用될 수 있다. 現在는 潮流豫報模型을 통해 既存의 Geosat의 衛星資料로부터 時間變動成分인 潮流成分을 除去하는 段階에 있다.

參考文獻

British Hydrographer of the Navy, 1978. Bay of Bengal Pilot, N.P.21, 187p.
 British Hydrographer of the Navy, 1992. Admiralty Tide Tables, Vol. 2, Part 2, Time & Height Differences and Harmonic Constants for the predicting the tide at Secondary Ports.
 Choi, B.H., 1980. A Tidal Model of the Yellow Sea and the Eastern China Sea, Korea Ocean Research and Development Institute, Report No. 80-02.
 Courtier, A. 1938. Marces. Paris, Service Hydrographique de la Marine, 284p.
 Flather, R.A. and Heaps, N.S., 1975. Tidal computations for Morecambe Bay, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, **42**: 489-517.
 Foreman, M.G.G., Bennett, A.F., Egbert, G.V. and Hagel-

- berg, 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.
- Johns, B., Sinha, P.C., Dube, S.K., Mohanty, U.C. and Rao, A.D., 1983. On the effect of bathymetry in numerical storm surge simulation experiments, *Computers and Fluids*, **2**(3): 161-174.
- 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 No. : A Detailed Hydrodynamical Interpolation Model, NSWC/DL TR-3866 Naval Surface Weapons Center, Dahlgren, Virginia.
- Wahr, J., 1981. Body tides on an elliptical, rotating, elastic and oceanless earth, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, **64**: 677-703.