

洛東江 河口의 潮汐과 流動

柳 青 魯 · 張 善 德

國立釜山水產大學

TIDE AND TIDAL CURRENT IN THE ESTUARY OF THE NAKDONG RIVER

Cheong-ro Ryu and Sun-duck Chang

National Fisheries University of Busan

ABSTRACT

Tidal waves and the fluctuation of current are studied by use of observed data on tidal level, flow velocity and river discharge in the estuarine region of the Nakdong River.

Observed data on the tidal level at five stations are used to obtain the fluctuation of amplitude and phase of tides, and the change of the wave speed versus distance from the river mouth. Combining these tidal data with the vertical distribution of horizontal velocity data, some characteristics of the periodic tidal flow are deduced:

(1) Diminishing rates of the tidal amplitude ratio η/η_0 at high tide were $0.058\%_{\text{H}}/\text{km}$ at spring tide and $0.038\%_{\text{H}}/\text{km}$ at neap tides. The constant of phase change, K , was $0.035 \text{ rad}/\text{km}$.

(2) While proceeding landward, the shape of the tidal wave changes from symmetrical to asymmetrical. The traveling speed of the tidal wave crest was estimated to be $3.6\sim 5.2 \text{ m}/\text{sec}$, while that of the tidal wave trough was $2.4\sim 3.5 \text{ m}/\text{sec}$.

(3) The flowing speed of the water varies periodically in accordance with the tidal period. The maximum speed of landward flow appeared approximately at two hours before the high tide, while that of seaward flow at two hours before the low tide.

(4) The upstream boundary is deduced approximately to be 50 km at spring tide and 44 km at neap tide from the tidal velocity decreasing. The tidal influence area is estimated approximately to be 65 km from the tidal amplitude damping.

序 論

洛東江은 流域이 約 $2.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ 이고 길이가 525km에 달하는 大河川으로 農業, 工業, 生活用水 등 영남지방의 用水 공급원으로서 重要하다. 最近에는 河口域에서 淺海漁場, 洪水對策, 浚渫, 河道改修, 干拓, 埋立, 河口堰 建設 등 다양한 利用 開發이 計劃 또는 實施되고 있다. 따라서 이 河口域의 효율적 利用과 管理를 위하여는 河口水의 流動을 支配하는 要因인 河川潮汐에 關

한 基礎的인 研究가 不可缺하다.

河口潮汐의 振幅과 鹽分, 河川流量 등 物理的 要因과 河床기울기, 河幅, 水深 등 地形的 條件이 河川 下流域에서 海洋潮汐의 傳播에 影響을 준다. 河口와 淺海의 潮汐에 關한 理論的 研究를 보면, 一定한 形態의 水路에서 流體運動을 線形的으로 解析한 Defant (1960), Dronkers (1964), Lennon (1972) 및 Officer (1975)의 보고가 있다. 한편, 密度傾度의 影響에 따른 速度分布에 對한 研究가 Unoki (1967, 1968) Albert et al. (1970), Hansen and Rattray (1972), Pearson

and Winter (1977), 및 Bjornand Greer (1978) 등에 의해 시도되었으며, 최근에는 河口模型實驗 및 數學的 모델링에 의한 研究가 활발하게 進行되고 있다(Wang and Alan, 1978).

本論에서는 潮令 및 潮時에 따라 河口域에서 同時觀測한 潮位와 流速, 流量 등 資料를 利用하여 洛東江 河口의 潮汐과 潮汐波의 傳播에 따른 流速變動에 관하여 검토하였으며, 上向流限界(upstream boundary) 및 潮汐 영향범위에 대하여도 考察해 보았다.

資料 및 方法

潮汐波의 河川內 傳播의 특징을 알기 위하여 4個의 觀測點(鳴旨, 龜浦, 勿禁, 三浪津)을 選定하여 사리매(1978年 4月 8~9日, 5月 22~23日, 9月 2~3日) 및 조금매(1978年 4月 15~16日, 9月 9~10日)에 每時間 同時觀測을 實施하였다. 아울러 鳴旨, 月村, 勿禁의 水位 自記記錄資料 59日分을 使用하여 式(1)에 의해 各分潮에 對한 調和分解를 實施하였다.

또한 潮汐波 傳播에 의한 水平運動을 알기 위하여, 같은 觀測期間에 鳴旨-龜浦의 4개 橫斷面 12個 觀測點(A斷面: St. 1~5, B斷面: St. 6~8, C斷面: St. 9, D斷面: St. 10~12)에서 電氣 流向流速計(Toho Dentan CM-2)를 使用하여,

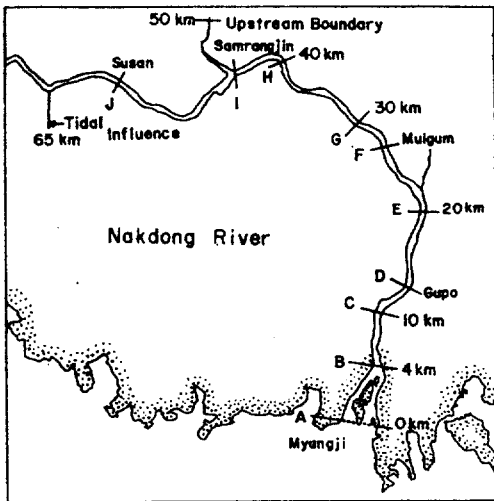


Fig. 1. Observational stations in the estuary of the Nakdong River.

漲潮時 및 落潮時에 水深 1m 間隔으로 流向流速을 測定하였다. 潮汐週期에 따른 流速變動을 알기 위해 鳴旨(section A)와 龜浦(section D)에서 25時間 流動觀測을 實施하였고, 河口 斷面 A로부터 각각 4km, 24km, 31km 地點에서 실시한 UNDP 1975年度 觀測資料를 함께 使用하여 分析하였다.

各 斷面에서 潮令 및 潮汐週期에 따른 潮位, 流速과의 關係에서 河口距離에 따른 位相의 遲角과 振幅을 式(1)에서 구하고, 減衰파라미터(μx)와 位相變動(kx)을 式(2)에 의하여, 그리고 潮汐振幅比를 式(4)와 式(5)에 의해 計算하였다. 이 計算値와 潮位 및 流速觀測資料로서 潮汐現象에 의한 上向流限界(upstream boundary) 및 潮汐 영향범위 등을 調査하였다.

潮汐에 의한 水位變動은

$$\eta_r = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i \sin\left(\frac{2\pi}{T_i} t + \delta_i\right) \quad (1)$$

- 단 a_0 : 平均水位
- a_i : i 제 分潮의 振幅
- T_i : i 제 分潮의 週期
- δ_i : i 제 分潮의 位相
- η_r : 任意地點의 潮位

로 나타낼 수 있다. 感潮河川의 任意地點 및 任意時間의 潮位는 Ippen (1966)에 의하면

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 = a_0 [e^{-\mu x} \cos(\sigma_1 - kx) + e^{\mu x} \cos(\sigma_1 + kx)] \quad (2)$$

- 단 η_1 : x 軸 方向의 正의 振幅
- η_2 : x 軸 方向의 負의 振幅
- μx : 減衰 파라미터
- kx : 位相變動
- σ_1 : 位相

로 나타낼 수 있다. 또한 河口域의 任意地點에서 高潮時는 $\frac{\partial \eta}{\partial t} = 0$ 일 때 나타나므로 어느 地點의 最大振幅은

$$\eta_H = 2a_0 \sqrt{\frac{1}{2} (\cos 2kx + \cosh 2\mu x)} \quad (3)$$

이고, $\eta_{oH} = 2a_0$ 이므로 河川內의 潮汐波 振幅比는

$$\frac{\eta_H}{\eta_{oH}} = \sqrt{\frac{1}{2} (\cos 2kx + \cosh 2\mu x)} \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다.

- 단 η_{oH} : 河口로부터의 距離가 0인 地點의 最大振幅

η_{IH} : 任意地點의 最大振幅
 感潮區域에서 減衰振動潮汐의 速度變動은

$$u = \frac{\eta_{IH}}{h} C_0 \frac{k_0}{\sqrt{\mu^2 + k^2}} \cdot \frac{[e^{-\mu x} \cos(\sigma_1 - kx + \alpha) - e^{\mu x} \cos(\sigma_1 + kx + \alpha)]}{\sqrt{2 \cos 2kl + \cosh 2\mu l}} \quad (5)$$

단 η_{IH} : 外洋潮汐의 最大振幅

h : 平均水深

C_0 : 傳播速度

k_0 : $x=0$ 에서의 位相

鹽水流入과 관련시키기 위해 河口의 任意地點에서의 最大流速(σ_{1M})은 $\frac{\partial u}{\partial t} = 0$ 일 때 나타나므로 式(5)에서

$$\sigma_{1M} = \tan^{-1} (-\tan kx \coth \mu x) - \alpha \quad (6)$$

단, $\alpha = \tan^{-1} \frac{\mu x}{kx}$

로 나타내어진다. 式(6)의 값을 式(5)에 代入시

키면 河川內 任意地點($x=l$)에서의 最大流速과 外海入口에서의 最大流速을 구할 수 있다.

結果 및 考察

1. 潮汐波의 傳播

河口距離에 따른 潮汐振幅의 變化는 鳴旨를 基點으로 하여 45km 範圍 內에서는 사리때에 0.058 η_{oH} /km, 조금때에 0.038 η_{oH} /km로서, 사리때에 距離에 따른 振幅의 減少率이 큰 것으로 나타났다. 한편 各 分潮別 振幅 減少現象은, 가장 우세한 半日週潮의 경우 그 變化率이 거의 같게 나타났으며 1日潮, 1/4日潮의 影響은 그 振幅이 10cm를 넘지 않았다. 各 觀測點에서의 高潮時間과 高潮時 位相(σ_{1H})의 觀測을 비롯한 潮汐觀測資料는 Table 1과 같고, 河口로부터의

Table 1. Tidal data of the estuary of Nakdong River

Tide	Station	Distance from Myungji (km)	Tidal amplitude (cm)	η_{xH}/η_{oH}			Time of high-water tH (hrs)	H.W. phase σ_{1H}	Phase change kx	Damping parameter μx
				N	M ₂	S ₂				
Spring tide	Myungji	0	154	1.00	1.00	1.00	0	0	0	
	Gupo	13.6	142	0.92	0.93	0.95	1	28°	46.7°	
	Mulgum	26.5	128	0.83	0.84	0.88	2	57°	69.4°	
	Samrangjin	45.3	114	0.74			3	87°	89.9°	
Neap tide	Myungji	0	65	1.00			0	0	0	
	Gupo	13.6	64	0.98			1	29°	44.7°	
	Mulgum	26.5	85	0.85			2	58°	69.1°	
	Samrangjin	45.3	54	0.83			3	87°	88.1°	

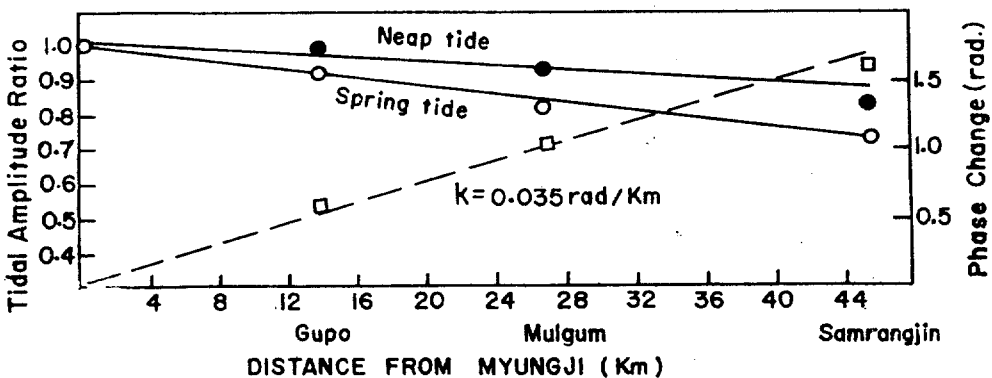


Fig. 2. Tidal amplitude ratio and phase change (kx) versus distance from Myungji ($x=0$) in the estuary of Nakdong River.

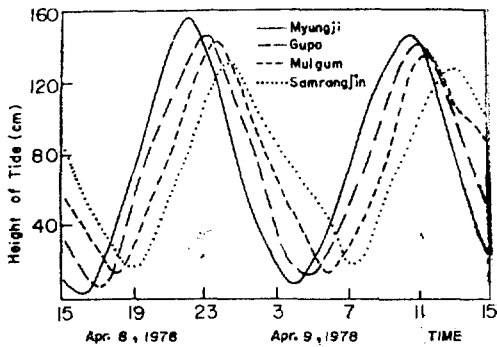


Fig. 3. Fluctuation of tide level in the estuary of Nakdong River.

Table 2. Asymmetric characteristics of the tidal wave in the estuarine region of the Nakdong River on April 9, 1978

Station	Propagation time		Difference of time
	Crest-Trough	Trough-Crest	
Myungji(A)	6h12m	6h03m	0h09m
Gupo(D)	6h25m	5h55m	3h30m
Weolchon(E)	6h30m	5h45m	0h45m
Mulgum(F)	6h40m	5h40m	1h00m
Samrangjin(I)	6h45m	5h15m	1h30m *3h00m

* September 20, 1978

Table 3. The traveling time and speed of tidal wave in the estuarine region of Nakdong River

Between stations	Distance (km)	Crest		Trough	
		Traveling time (min.)	Speed (m/s)	Traveling time (min.)	Speed (m/s)
Myungji-Gupo	13.6	60	3.78	81	2.80
Gupo-Mulgum	12.9	60	3.58	90	2.39
Mulgum-Samrangjn	18.8	60	5.22	90 *180	3.48 *1.74

* September 20, 1978

距離에 따른 位相變動 및 振幅減衰는 Fig. 2와 같이 直線의 變化를 보였다.

河口距離가 멀어짐에 따라 潮汐振幅은 減少하고, 마루의 前面이 急하고 後面이 緩慢한 河口潮汐의 特性을 볼 수 있다(Fig. 3). 이 波形的 非對稱性을 量的으로 理解하기 위해, 마루에서 골, 골에서 마루까지의 平均時間을 Table 2와 같이 나타냈다. Table 2에서 時間差는 上流로 갈수록 커지며, 觀測結果 이 값은 河川流量에 따라 크게 달라지는데, 三浪津에서 濁水時($Q_f < 50m^3/sec$)에 1時間 30分, 平水時($50m^3/sec < Q_f < 100m^3/sec$)에는 3時間으로서, 그 差가 顯著하게 나타났다. 여기서 Q_f 는 江동에서의 流量을 뜻한다. 觀測點間 마루와 골의 位相速度는 時間과 區間距離에서 Table 3과 같이 나타나며, 河床기울기가 작기 때문에 마루와 골의 傳播速度 및 潮汐振幅의 減衰率은 下流部(鳴旨—三浪津)에서 작게 나타나고 上流部에서는 河床 기울기의 增加와 함께 減衰率이 顯著히 커지는 것 같다. 또한 下流部에서의 距離에 따른 潮汐遲延率은 $2\sim 3^\circ/km$ ($4\sim 6min/km$)로서 比較的 큰 값을 나

타내었다. 이것은 河床기울기가 작으나 水深이 얇고 屈曲이 심한 때문에 摩擦에 의한 遲延率이 커진 때문이다.

2. 河川潮汐에 의한 流速變動

河川內的 潮汐波 傳播에 따라 河口域의 흐름은 一定한 週期를 갖고 上向流(landward flow) 또는 下向流(seaward flow)를 보인다(Fig. 4a와 4b). 上向流의 持續時間은 河口로부터의 距離가 멀어질수록 減少하고 있으며, 下向流의 持續時間은 增加한다(Table 4). 流速은 上向流와 下向流 모두 河口距離가 멀어질수록 減少하고 있다(Table 5). 또한 上向流나 下向流 모두 조금때 보다 사리때 流速이 강한 現象을 보인다. 특히 上向流의 경우 上流(24km 및 31km 地點)에서는 潮汐프리즘의 差에 의한 感潮上限의 下降과 上向流限界의 下降등의 影響에 대하여 流速은 민감한 反應을 보이며, 流量에 따라 이 地域의 흐름은 多樣하게 變化하는 複雜한 現象을 보인다.

河口로부터 13.9km 地點인 龜浦(Section D)에서 25時間 連續觀測한 結果를 사용하여 上·

下向流의 最强流速時 斷面의 瞬間流速分布 및 流量을 Fig. 5에 나타내었다. 最强流速은 下向流時 90cm/sec, 上向流時 40cm/sec 이고 流量은 各各 725m³/sec, 438m³/sec 로서 그 差는 287m³/sec 였다. 이때의 進동流量(Q)은 50m³/sec 였다.

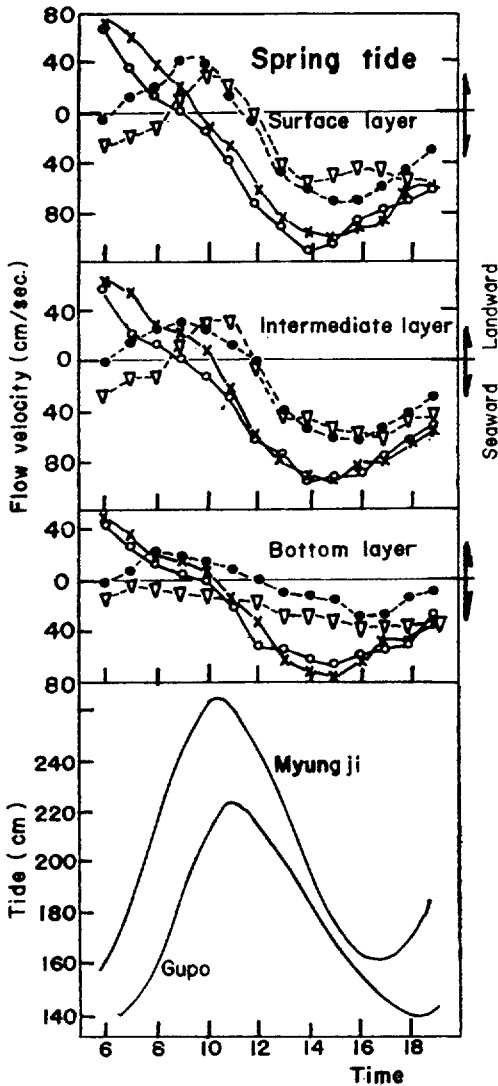


Fig. 4a. Variations of the flow velocity of surface, intermediate and bottom layer at 0km, 4km, 24km and 31km from the river mouth during the spring tide. Open circle denotes the velocity at the mouth, while cross denotes that at 4km, solid circle that at 24km and triangle that at 31km from the mouth.

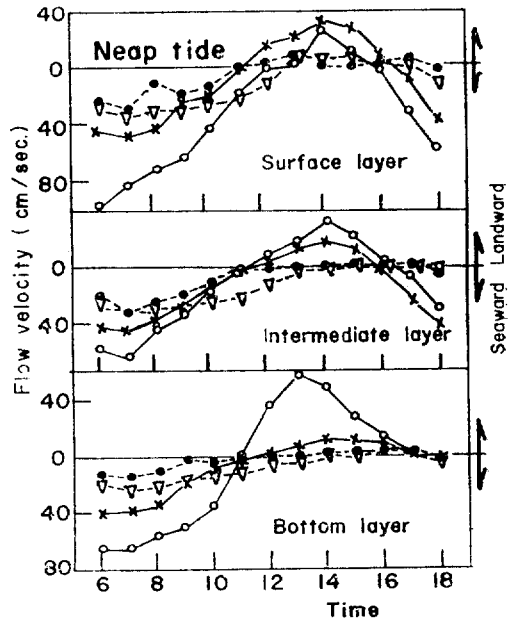


Fig. 4b. Variations of the flow velocity of surface, intermediate and bottom layer at 0km, 4km, 24km and 31km from the mouth during the neap tide.

Table 4. Landward and seaward flow time with respect to the distance from the river mouth

Tide	Direction of flow	Flow time (hrs)			
		0km	4km	24km	31km
Spring tide	Landward	6	6	5.5	3.5
	Seaward	6	6.5	7.5	9.5
Neap tide	Landward	6	5	3	2
	Seaward	6	8	8	7

또한 潮汐週期에 對한 層別 流速變化는 高·低潮時와 一定한 時間差를 두고 過期的으로 變化함을 알 수 있다. 즉 最大上向流速은 低潮 4시간 後(高潮 2時間 前)에 나타난 반면, 最大下向流速은 高潮 4시간 後(低潮 2時間 前)에 나타났다. 또 表層과 底層의 流速差는 上向流의 경우 거의 差가 없이 均一하며, 下向流의 경우는 50~60cm/sec 나 되어 一般的인 河口流의 特性이 나타난다(Fig. 6). 이러한 流速分布 경향으로부터 河口域에 密度流가 存在함을 알 수 있으며, 最强流速時는

Table 5. Maximum flow velocity with respect to the distance from the river mouth

Tide	Direction of flow	Layer	Flow velocity (cm/sec)			
			0km	4km	24km	31km
Spring tide	Landward	Surface	68	72	44	40
		Intermediate	57	63	30	30
		Bottom	44	50	21	8
	Seaward	Surface	111	101	70	58
		Intermediate	95	95	60	60
		Bottom	70	80	32	44
Neap tide	Landward	Surface	26	28	4	8
		Intermediate	33	20	3	4
		Bottom	56	13	3	3
	Seaward	Surface	100	49	30	35
		Intermediate	62	45	30	32
		Bottom	33	38	14	24

$$t_{V_{max}} = tH - 2 \text{ (上向流)}$$

$$= tL - 2 \text{ (下向流)} \quad (7)$$

단, tH : 高潮時
 tL : 低潮時
 $t_{V_{max}}$ 最强流速時

로 나타낼 수 있다. 이러한 流速과 潮汐과의 關係는 全體 感潮區域에서, 대체로 잘 適用된다. 河口域의 縱斷 上向流의 最强流速 減衰率에서 上向流限界(upstream boundary)는 漲水流量 50 m³/sec 以下の 湧水時에는 사리때 河口로부터 50km, 조근때 40km까지로 推定된다.

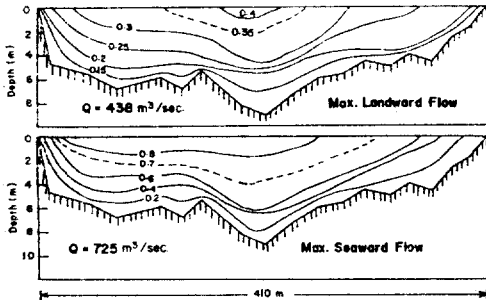


Fig. 5. Maximum seaward and landward flow velocity in cm/sec at Gupo on September 3, 1978.

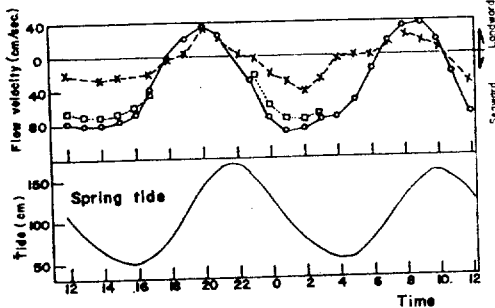


Fig. 6. Distribution of flow velocity and tidal curve at Gupo during 25hrs on Sept. 2~3, 1978.

要 約

漸令에 따라 河口域의 18個 觀測點에서 潮位, 流速, 流量觀測 자료를 사용하여 河口域의 潮汐波 傳播와 그에 따른 流速의 變動 狀態를 분석한 결과는 다음과 같다.

(1) 潮汐波의 振幅은 河口域 0~45km 범위에서 單位距離當 사리때 0.058η_{0H}/km, 조근때 0.038η_{0H}/km로 減少하며, 位相變動率은 k = 0.035rad/km이다(Q_J < 50m³/sec).

(2) 波形은 距離가 멀어짐에 따라 마루의 前面이 急하고 後面이 완만하다. 이 波形의 非對稱性은 鳴旨에서 0h08m으로 거의 外洋潮汐과 같으나, 三浪津에서는 湧水時(Q_J < 50m³/sec)에 약 1h30m, 平水時(100m³/sec < Q_J < 50m³/sec)에 약 3h00m의 差가 있다. 이것은 流量에 따른 感潮區域의 下降과 關係가 있다. 波速은 마루가 約 4m/sec 이고 골이 約 3m/sec 정도이다.

(3) 流速은 潮汐週期에 따라 週期的으로 變

한다. 最强流速은 上向流일 때 $tH-2$ 에, 下向流일 때 $tL-2$ 에서 나타난다.

(4) 最大速度 減衰로부터 上向流限界(upstream boundary)를 求하면 江동에서의 流量이 $50\text{m}^3/\text{sec}$ 以下인 濁水期의 沙리때 약 50km , 조금때 약 40km 로 推定된다. 振幅減衰 및 河床기울기로부터 潮汐의 影響범위를 求하면 河口로부터 約 65km 로 推定된다.

文 獻

- Albert, J., A. Hanke and R. Harriss 1970. Studies on the geochemistry and hydrography of the Charlotte Harbor estuary, Florida. Oceanography Dept., Fla. State Univ., 4:1-19.
- Bjorn, K., J.E. Greer 1978. Hydrography of the Santee River during moderate discharge conditions. I., Estuaries, 1(2):111-119.
- Defant, A. 1960. Physical Oceanography, 2:457-474.
- Dronkers, J.J. 1964. Tidal computation in rivers and coastal waters. North Holland Publishing Company, Amsterdam, 221-408.
- Hansen, D.V. and Maurice Rattray, Jr. 1972. Estuarine circulation induced by diffusion. J. Mar. Res., 30:281-294.
- Hayami, S., N. Watanabe and S. Unoki 1967. On the distribution and fluctuation of current and chlorinity in the estuary of Kiso sansen Survey Team No. 4.
- Hayami, S., N. Watanabe and S. Unoki 1968. *ibid* No. 5.
- Ippen, A.T. (1966): Tidal dynamics in estuaries, Part I. in Estuary and coastline hydrodynamics, McGraw-Hill, 493-522
- Lennon, G.W. 1972. An intensive analysis of tidal data in the Thames Estuary. Univ. of Liverpool Tidal Inst., 171-193.
- Officer, C.B. 1975. Physical oceanography of estuaries, 100-350.
- Pearson, C.E. and D.F. Winter 1977. On the calculation of tidal currents in homogeneous estuaries (I). J. Phys. Oceanogr., 7(4):520-531.
- Rattray, M.J., and D.V. Hansen 1961. A similarity solution for circulation in an estuary. J. Mar. Res., 20:121-133.
- Unoki, S. 1967. Flow of estuarine waters in three rivers of Kiso. Bull. on Coastal Ocean, 6(1):100-121 (in Japanese).
- Unoki, S. 1969. Investigation of tides in estuaries (2). Proc. 16th Conf. on Coastal Eng. Japan, 377-384 (in Japanese).
- Wang, D.P. and J.E. Alan 1978. Non-tidal variability in the Chesapeake Bay and Potomac River. J. Phys. Oceanogr., 8:225-232.