

〈論 文〉

漢江感潮區간의 潮汐傳播

Tidal Propagation in the Han River

崔 秉 昊* 李 正 烈** 徐 景 錫***
Choi, Byung Ho Lee, Jung Lyul Suh, Kyung Suck

Abstract

The development of the tidal asymmetries and the effect of an increased discharge on tide propagating into the Han River was studied quantitatively via numerical integration of one-dimensional equations. The model results indicated that some tidal components including M_4 , MS_4 , M_6 were actually be amplified over a segment of the river. The computed results on the effects of increased discharges on the tide were in good agreement with theoretical inference (Godin, 1985).

要 旨

漢江下流部 感潮區간의 潮汐非對稱現象의 發達過程 및 河川流出水의 潮汐傳播에의 影響이 1次元 方程式의 數值積分法에 의해 定量的으로 調査되었다. 모델結果는 M_4, MS_4, M_6 分潮를 包含하는 一部分潮들의 振幅이 一部河川區間에서 擴幅되는 것을 提示하였다. 增加되는 河川流出水의 潮汐에 대한 影響을 算定한 結果는 理論的인 推論(Godin, 1985)과도 一致하는 結果를 가졌다.

1. 序 論

漢江感潮區間에서는 일찌기 1916년에 同時水位觀測이 遂行되어 潮汐非對稱現象을 뚜렷하게 觀測한 記錄을 嚆矢로 하여 自動水位記錄體系에 의한 長期水位觀測이 遂行되어 오고 있다. 그러나 이 感潮區간의 水位變化를 再現시킬 수 있는 不定流모델의 開發이 遲延된 理由로는 河口入口部의 觀測이 어려워 適切한 境界潮汐條件을 賦與할 수 없었으며 河川斷面의 幾何學的 諸元들을 確保할 수 없었음을 들 수 있다. 本研究은 이러한 基本的인 制約條件內에서 江華大橋에서

1978年 5~10月期間의 潮位觀測資料를 境界資料로서 取하고 河口入口部의 未洽한 斷面資料들은 海圖를 參照하여 最善의 推論에 의해 力學原理에 立脚한 1次元 潮汐모델을 樹立하였다. 初期課業으로 河床摩擦係數, 平均河床勾配의 調整等을 통한 일련의 數值實驗에 의해 樹立된 感潮區간의 觀測水位를 再現시키는 1次元모델을 利用하여 漢江感潮區간의 潮汐非對稱現象의 發達過程 및 河川流出水의 增加에 따른 潮汐과의 相互作用을 檢討하였다. 研究의 窮極的인 目標은 感潮區간의 豫報모델(operational forecast model)의 樹立에 있다. 漢江感潮區간의 洪水位 豫警報, 汚染物質擴散推定等이 實用的인 側面에서 重要

* 成均館大學校 工大 土木工學科, 教授

** 서울大學校 大學院

*** 成均館大學校 工大 大學院

한 일인데 現在 漢江感潮區間의 洪水豫警報體系는 未洽하며 汚染狀況 역시 매우 深刻하다.

2. 1次元 漢江모델

漢江感潮區間의 潮汐運動을 算定하기 위한 1次元모델은 非線型 移流項 및 非線型摩擦項(quadratic friction term)을 包含하며 모델의 基本方程式은 다음과 같다.

$$b \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(uQ)}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} A + g \frac{Q|Q}{AC^2R} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

여기서,

- t 時間
- x 水路의 흐름方向距離
- b 水路幅
- h 任意水平基準面에 대한 水位(=η+d+z₀)
- z₀ 任意水平基準面에 대한 河床高
- d 平均水位에 대한 水路의 水深

- η 平均水位에 대한 水位
- Q 斷面流水量
- q 水路의 單位距離當 支川流入水量
- u 水路의 斷面平均流入速度
- g 重力加速度
- A 水路의 斷面積
- C Chezy 係數

모델은 그림 1과 같은 62個의 斷面으로 構成되는 데 陽解差分法에 의해 奇數의 斷面에서는 水位가 算定되며 偶數의 斷面에서는 流量, 流速이 算定된다. 仔細한 모델의 數值解析方法은 여러 文獻^{1),3)}에 紹介되어 있으므로 再述치 않는데 利用된 方法은 Harleman과 Lee³⁾에 의한 陽解差分法이다. 모델의 62個의 斷面은 1km의 等間隔으로 나뉘어졌으며 各水路斷面은 梯形斷面으로 模式化되었는데 地形資料의 不足으로 仔細한 斷面의 貯溜면적은 포함되지 않았다. 陽解差分計算을 위한 Courant 安定條件을 滿足시키는 時間間隔(Δt)은 60秒를 取하였다. 河口入口인 節片 1에서의 境界條件은 隣近 江華大橋에서의 1978年 5個月觀測值의 潮汐分析結果中 14個主

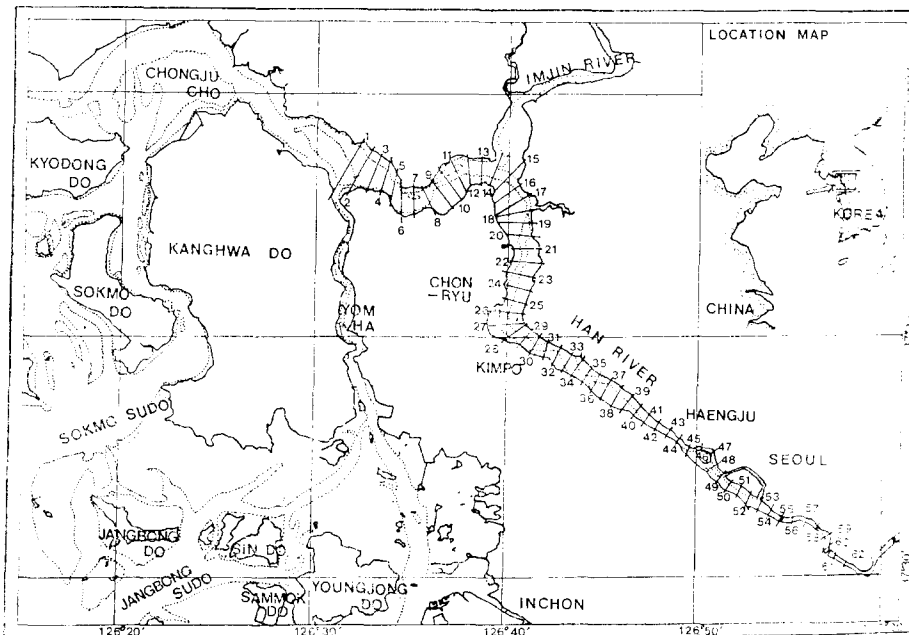


그림 1. 漢江感潮區間의 1次元 動水力學的 모델. (斷面 1은 월곶리, 斷面 62는 人道橋附近이다)

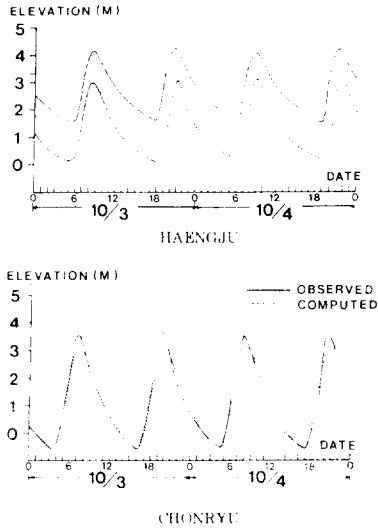


그림 2. 杏州, 顛流의 水位觀測值와 모델算定值의 比較(1959年 10月). $Q=50\text{m}^3/\text{sec}$ 의 上流流出.

要分潮를 利用하여 調和理論⁴⁾에 立脚한 推定值로서 規定하였는 데 1959年 10月, 1960年 5月, 1983年 7月, 1984年 6月の 潮汐算定을 遂行하는 것으로 潮汐모델을 樹立하였다. 採擇된 Manning係數는 0.02~0.035의 範圍內에서 上流로 갈수록 크게 취하였는데 이 파라메터는 算定值와 觀測值와를 接近시키기 위한 調整役割로도 利用되었다.

그림 2와 그림 3은 모델樹立을 위한 算定結

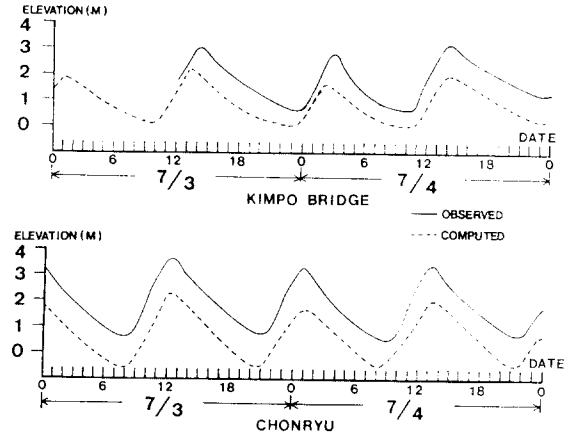


그림 3. 金浦大橋, 顛流의 水位觀測值와 모델算定值의 比較(1983年 7月). $Q=50\text{m}^3/\text{sec}$ 의 上流流出.

果(點線)와 觀測值(實線)의 比較인 바 振幅과 位相이 좋은 一致를 보이는 데 下流端의 境界條件이 調和常數에 의한 推定值임을 考慮할 때 만족할만한 모델結果이다. 觀測值와 算定值間의 一貫的인 上下誤差(offset)의 原因은 平均海面과의 相對的인 높이로 提示되는 水位標의 零點標高의 不確實性和 모델 地形資料入力の 不確實性에서 起因될 수 있는 데 무리한 모델變數에 의한 調整보다는 追後의 改善을 위한 留保的인 事項으로 하였다.

그림 4는 上流端의 流出量이 $50\text{m}^3/\text{sec}$ 인 境

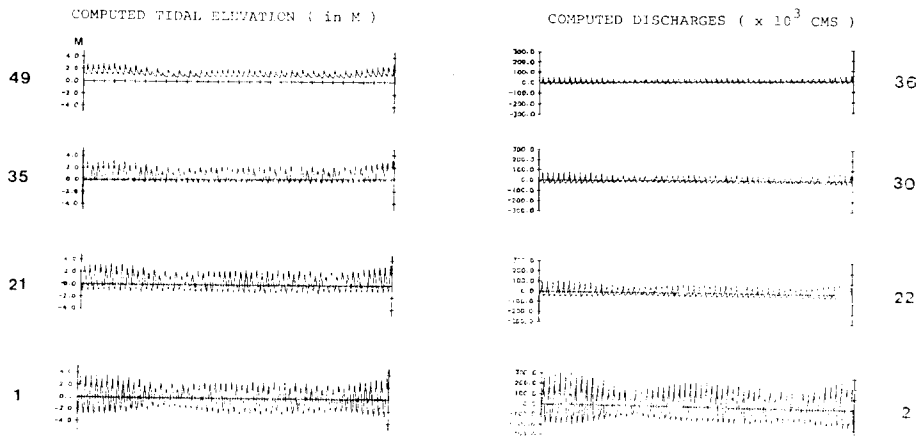


그림 4. 모델에 의해 算定된 水位 및 斷面流量(1959年 10月, 上流流出은 $50\text{m}^3/\text{sec}$)

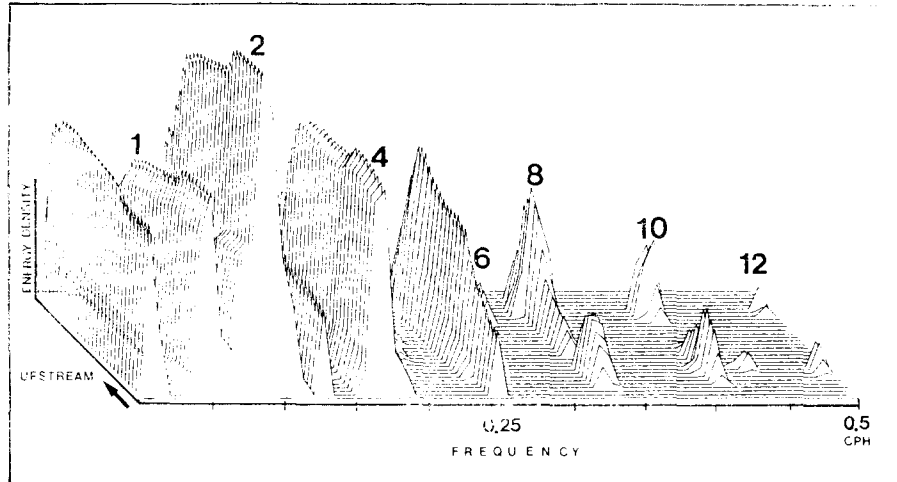


그림 5. 모델에 의해 算定된 漢江感潮水位의 스펙트럼 (1959年 10月 조석, 水位산정점은 下端인 斷面 1로부터 3, 5, 7...61의 位置임).

遇 1959年 10月の 算定된 水位와 斷面流量을 提示한 것으로 感潮區間의 上流域인 斷面 49의 楕圓形 潮位非對稱 및 보름週期水位變化가 잘 提示되어 있다. 崔等(1985)⁵⁾은 漢江感潮區間에서 小潮時의 平均水面이 大潮時의 平均水面보다 낮아지는 基準面顛到가 일어나는 區間을 金浦와 杏州間으로 初期推定한 바 있다. 算定된 水位時系列을 스펙트럼分析하면 周波帶에 따른 에너지 分布를 얻을 수 있는데 그림 5는 上述된 1959年 10年期間의 算定水位에 대한 스펙트럼을 Hidden line 플롯팅시킨 것이다. 이 그림에서 天文力에 의한 日週潮, $\frac{1}{2}$ 日, $\frac{1}{4}$ 日, $\frac{1}{6}$ 日 週潮外에 感潮區間에서 새로이 發生되는 $\frac{1}{8}$ 日, $\frac{1}{10}$ 日, $\frac{1}{12}$ 日 週潮의 分布가 잘 提示되는데 Godin은 理論的인 解析⁶⁾에 의해 感潮區間上流部의 非線型 潮汐은 $\frac{1}{20}$ 日 週潮까지 有意振幅을 구할 수 있음을 提示한 바 있다. 表-1은 顛流, 杏州, 舊龍山에서 算定된 1個月의 時系列을 英國海洋研究所의 潮汐分析프로그램⁷⁾(Tidal Institute Recursive Analysis Program)을 利用하여 調和常數를 求한 것이다. 河口人口의 境界條件은 1959年 10

月の 潮汐狀況을 維持하면서 上流端의 河川流出이 $50\text{m}^3/\text{sec}$ 인 境遇에 追加하여 $200, 1000, 2000\text{m}^3/\text{sec}$ 의 定常流出條件에 대해서도 數值實驗을 하였으며 每水位算定格子の 算定時系列을 調和 分析하였다. 그림 6은 上流端의 河川流出이 $50\text{m}^3/\text{sec}$ 와 $1000\text{m}^3/\text{sec}$ 인 境遇의 算定水位의 變化樣相을 提示한 것인데 增加된 河川流出에 의해 潮汐의 上流波及이 抑制되는 것을 例示해 주고 있다.

그림 7과 그림 8은 增加되는 河川流出에 의한 漢江感潮區間에 傳播되는 潮汐의 主要分潮들의 調和常數의 變化樣相을 提示한다. 提示된 그림 7의 分潮들의 振幅變化는 主分潮(K_1, O_1, M_2, S_2, N_2)의 境遇 類似한 形態의 振幅減少를 보이며 M_2 의 倍潮(M_4, M_6) 및 淺海潮(MS_4)는 一定 區間에서 振幅이 擴大된다. 特히 M_6 分潮의 擴幅現象이 뚜렷하며 L_2, μ_2 分潮는 一定 區間에서 振幅減少가 일어나지 않는다. 一般的으로 分潮들의 振幅은 增加되는 河川流出에 反應하여 減少를 가져온다. 提示된 그림 8의 局地遲角의 變化는 河川流出의 增加에 따라 下流域은 거의 影響을 받지 않고 上流域에서 影響을 받는다.

〈表-1〉 모델算定水位의 調和常數(1959年 10月조석)

位 置	顯 流		杏 州		舊 龍 山	
	H	K	H	K	H	K
Z ₀	0.63	0.0	0.86	0.0	1.86	0.0
Mm	0.18	347.85	0.19	345.89	0.05	346.97
MS _r	0.19	44.34	0.21	48.43	0.04	58.82
Q ₁	0.05	265.57	0.04	287.31	0.01	354.33
O ₁	0.19	283.16	0.16	305.23	0.008	347.74
M ₁	0.01	322.69	0.01	337.08	0.01	309.53
K ₁	0.22	331.12	0.17	356.05	0.02	313.10
J ₁	0.007	348.75	0.009	345.67	0.01	353.70
OO ₁	0.02	327.73	0.02	13.78	0.02	133.26
μ_2 (MU ₂)	0.13	319.27	0.09	16.01	0.03	273.61
N ₂	0.24	223.78	0.17	257.90	0.03	338.93
M ₂	1.27	212.20	0.88	253.97	0.04	309.69
L ₂	0.07	221.59	0.06	292.76	0.03	132.01
S ₂	0.35	266.71	0.23	303.69	0.03	17.49
2SM ₂	0.01	111.27	0.01	172.99	0.007	63.02
MO ₃	0.03	70.76	0.04	141.18	0.005	299.97
M ₃	0.004	347.27	0.01	56.69	0.003	103.94
MK ₃	0.06	125.19	0.07	196.17	0.005	286.64
MN ₄	0.11	1.92	0.12	89.39	0.01	257.64
M ₄	0.30	356.42	0.30	85.85	0.02	243.09
SN ₄	0.02	279.42	0.05	47.33	0.02	315.91
MS ₄	0.19	53.27	0.18	142.00	0.01	294.82
2MN ₆	0.04	117.18	0.06	278.77	0.007	160.29
M ₆	0.06	131.10	0.11	273.74	0.009	150.07
MSN ₆	0.01	140.87	0.03	260.67	0.01	220.52
2MS ₆	0.07	176.86	0.11	331.97	0.008	200.15
2SM ₆	0.02	237.88	0.02	29.98	0.004	229.93

註：H는 分潮의 振幅(m), K는 局地遲角(度)

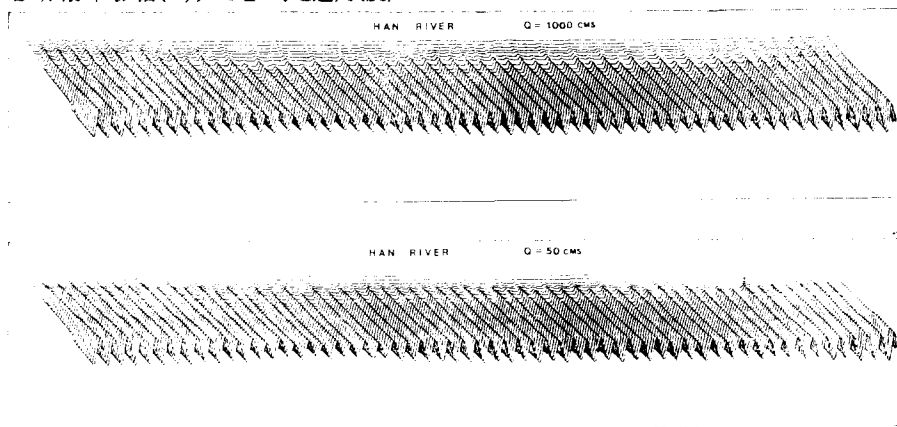


그림 6. 上流의 河川流出이 1000m³/sec 와 50m³/sec 일 境遇의 河口潮汐의 傳播

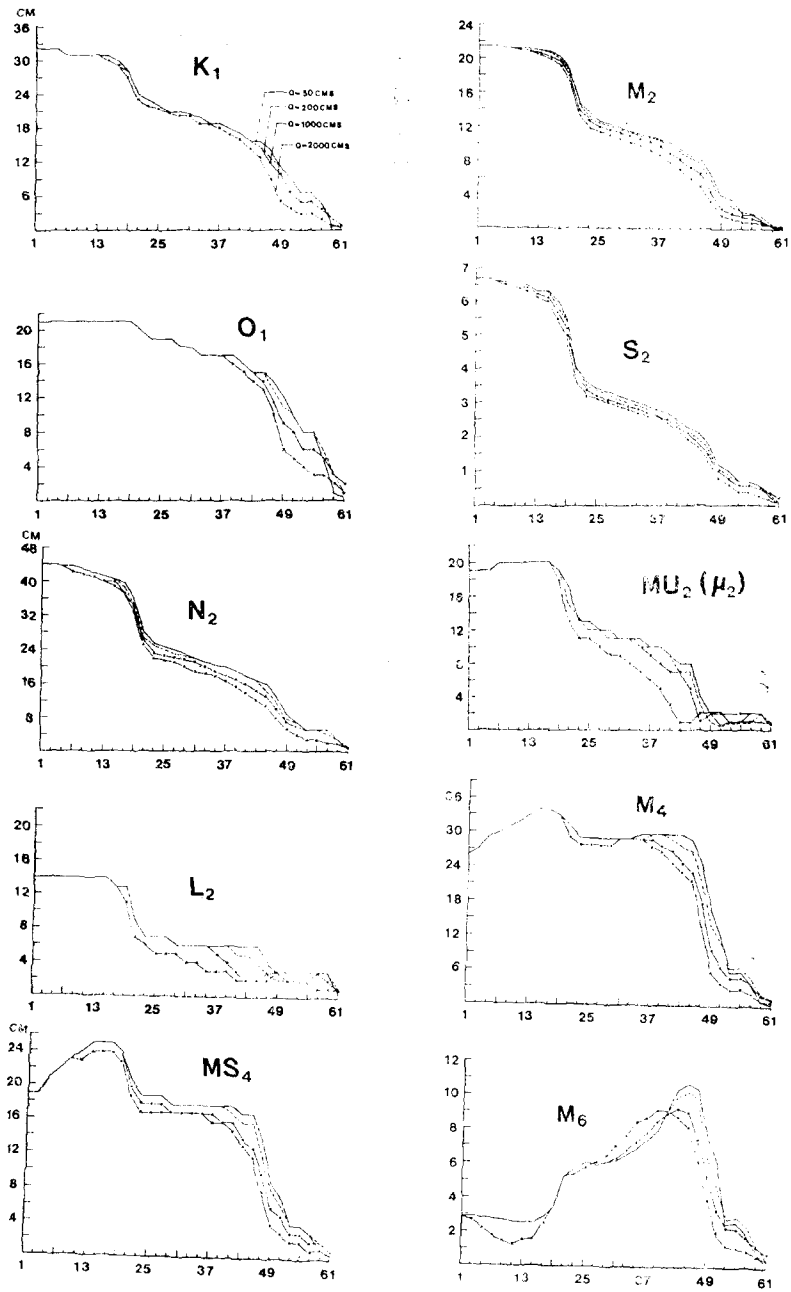


그림 7. 漢江感潮區間의 河川流出水の 增加(50, 200, 1000, 2000m³/sec)에 따른 主分潮의 振幅의 變化

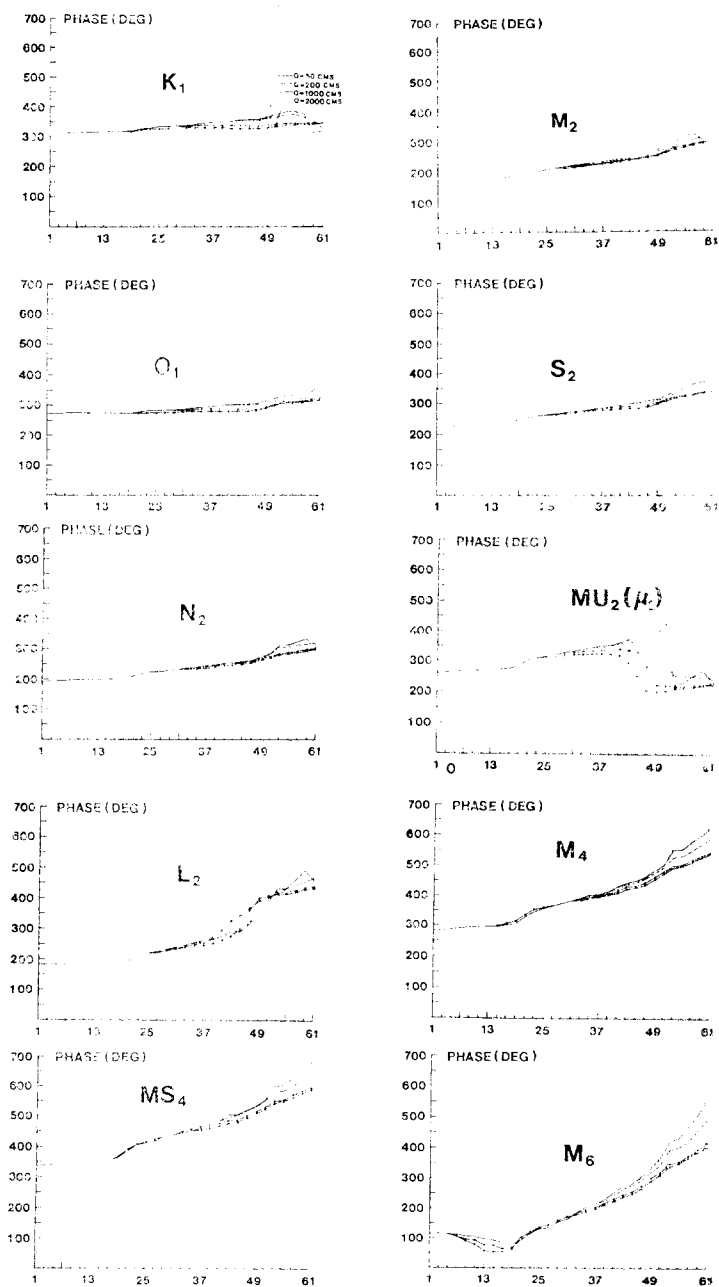


그림 8. 漢江感潮區間의 河川流出水의 增加(50, 200, 1000, 2000m³/sec)에 따른 主分潮의 位相變化

3. 河川流出水の 増加에 따른 潮汐波及의 變化

그림 9, 10, 11 은 顛流(下流域), 杏州(中間域) 및 舊龍山位置(上流域)에서 大潮時 및 小潮時의 增加되는 河川流出에 대한 潮位의 變化樣相과 低, 高潮到達時間의 變化를 提示하는데 表-2 는 潮汐波及의 時間的 變化를 數值化하였다. 이 圖表에 의하면 河川流出의 增加에 따라 下流域에서는 高潮到達時間이 빨라지며 低潮到達時間은 遲延되나 上流域에서는 이와 反對로 高潮到達時間은 遲延되고 低潮到達時間은 빨라진다. 또한 一定한 河川流出에 對해서는 上流域에서 小潮時의 低潮到達時間보다 빨라지는 것이 提示된다. 表-3, 4, 5 는 여러 流出狀況에 따른 主分潮의 局地遲角의 變化와 相應하는 分潮의 傳播에 遲延되는 時間을 提示하고 있는데 日週潮인 O_1 分潮과 半日週潮인 M_2 分潮를 比較할 때 下流域에서는 日週潮가 더 빨리 傳播되나 上流域으로 갈에 따라 半日週潮가 더 빨리 傳播되고 있다.

Godin⁸⁾은 감조구간을 潮流에 의한 時間從屬의인 流速成分과 定常狀態로 본 上流의 流出에 의한 流速成分에 의해 우세한 정도에 따라 上流域, 中間域, 上流域으로 나누었으며 河川流出水

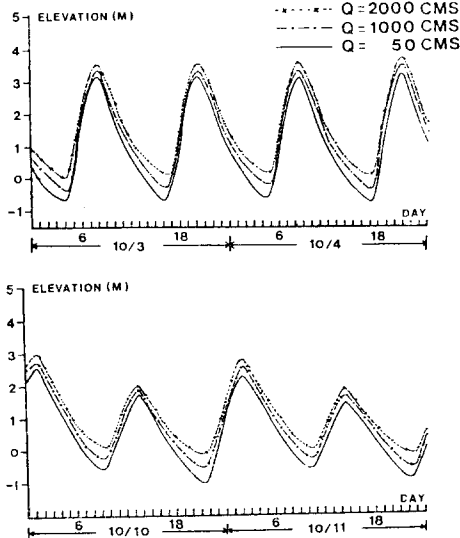


그림 9. 모델에 의해 算定된 大潮, 小潮時의 顛流에서의 河川流出에 따른 潮位의 變化

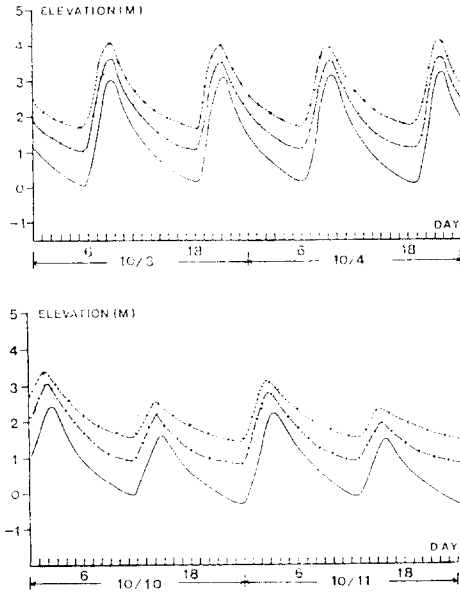


그림 10. 모델에 의해 算定된 大潮, 小潮時의 杏州에서의 河川流出에 따른 潮位의 變化

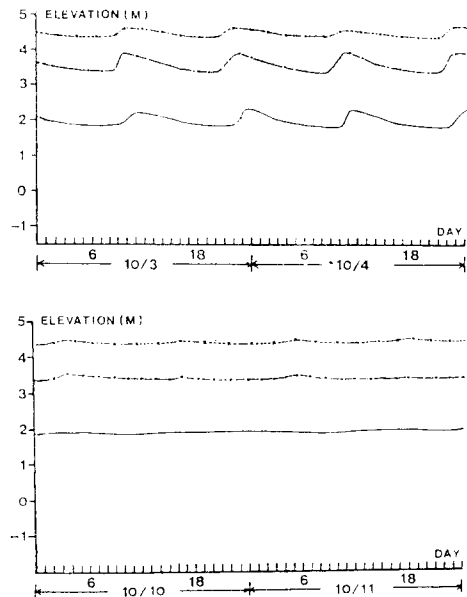


그림 11. 모델에 의해 算定된 大潮, 小潮時의 舊龍山에서의 河川流出에 따른 潮位의 變化

表-2 河川流出의 증가에 따른 低高潮의 到達時間

Station	Spring tide						Neap tide					
	CHONRYU		HAENGJU		GUYONGSAN		CHONRYU		HAENGJU		GUYONGSAN	
	HW	LW	HW	LW	HW	LW	HW	LW	HW	LW	HW	LW
Q=50CMS	4 ^h	8 ^h 30 ^m	3 ^h	9 ^h	2 ^h	10 ^h 40 ^m	4 ^h 20 ^m	8 ^h 20 ^m	3 ^h 20 ^m	9 ^h 30 ^m	—	—
Q=1000CMS	3 ^h 50 ^m	8 ^h 50 ^m	2 ^h 50 ^m	9 ^h 10 ^m	2 ^h 50 ^m	10 ^h 10 ^m	4 ^h	8 ^h 30 ^m	3 ^h	10 ^h	2 ^h	10 ^h
Q=2000CMS	3 ^h 30 ^m	9 ^h 10 ^m	2 ^h 40 ^m	9 ^h 20 ^m	3 ^h 10 ^m	10 ^h	4 ^h	8 ^h 40 ^m	3 ^h	10 ^h 20 ^m	3 ^h	9 ^h 50 ^m

表-3 河川流出이 50m³/sec 일 경우 主分潮의 位相과 傳播時間

St. No	Local phase lag (deg)									Time delay (hour)														
	K ₁	O ₁	M ₂	S ₂	N ₂	M ₄	MS ₄	M ₆	K ₁	O ₁	M ₂	S ₂	N ₂	M ₄	MS ₄	M ₆								
1.	310.5	274.3	171.1	224	190.5	286	338.5	115.3	1.37	0.59	1.37	1.42	1.11	1.17	1.24	0.17								
25.	331.1	283.2	212.2	266.7	223.8	356.4	53.3	131.1																
43.	356.1	305.2	253.9	303.7	257.9	85.9	142.0	273.7									1.67	1.47	1.39	1.23	1.14	1.49	1.48	1.58
59.	313.1	347.7	309.7	175	338.9	243.1	294.8	150.1									2.87	2.83	1.86	2.45	2.7	2.62	2.55	2.62

(註 : 1은 月串里, 25는 顛流, 43은 金浦大橋, 59는 舊龍山)

表-4 河川流出이 1000m³/sec 일 경우 主分潮의 位相과 傳播時間

St. No	Local phase lag (deg)									Time delay (hour)														
	K ₁	O ₁	M ₂	S ₂	N ₂	M ₄	MS ₄	M ₆	K ₁	O ₁	M ₂	S ₂	N ₂	M ₄	MS ₄	M ₆								
1.	310.5	274.3	171.1	224	190.5	286	338.5	115.3	1.34	0.53	1.38	1.44	1.09	1.23	1.3	0.16								
25.	330.6	282.3	212.7	267.3	223.4	0.1	56.5	130.3																
43.	339.4	289.1	241.4	294.1	252.2	68.9	124.5	245.8									0.58	0.45	0.95	0.89	0.96	1.14	1.13	1.28
59.	346.7	323.3	298.4	342	300.8	177.0	226.7	39.9									0.48	2.28	1.9	1.6	1.62	1.80	1.70	1.71

表-5 河川流出이 2000m³/sec 일 경우 主分潮의 位相과 傳播時間

St. No	Local phase lag (deg)									Time delay (hour)														
	K ₁	O ₁	M ₂	S ₂	N ₂	M ₄	MS ₄	M ₆	K ₁	O ₁	M ₂	S ₂	N ₂	M ₄	MS ₄	M ₆								
1.	310.5	274.3	171.1	244.4	190.5	286	338.5	115.3	1.06	0.24	1.34	1.40	1.09	1.28	1.35	0.24								
25.	326.5	277.9	211.4	266.2	223.3	2.97	59.2	136.7																
43.	329.6	281.7	237.1	286.4	247.4	64.5	117.5	240.1									0.21	0.25	0.85	0.67	0.80	1.02	0.97	1.15
59.	344.6	320.8	296.8	340.9	298.9	172.9	222.7	31.7									1	2.61	1.99	1.82	1.72	1.80	1.75	1.68

의 증가에 따른 各區間의 特性을 解析的 모델에 의해 考察하였는데 Godin의 推論을 要約하면 表-6과 같다.

本 研究에 의한 일련의 數值實驗에 의한 結果

들은 Godin이 提示한 解析的 모델에 의한 推論과 좋은 一致를 보여주고 있어 Godin의 推論이 옳았음을 立證시켜주고 있다.

表-6 Godin의 理論的 推論의 要約⁸⁾

感潮區間의 領域	河川流出의 增加				一定流出條件					
	潮 差	平均水位	低 潮	高 潮	小 潮			大 潮		
					平均水位	高 潮	低 潮	平均水位	高 潮	低 潮
上 流 域	감 소	증 가	빨리 발생	지 연	하 강	축 진	축 진	상 승	지 연	지 연
中 間 域	감 소									
下 流 域			지 연	축 진						

4. 結 論

月串里와 漢江人道橋를 各己 上下端의 境界面으로 하는 漢江의 1次元 感潮區 間潮汐모델을 樹立하여 基本的인 潮汐의 波及形態와 河川流出水의 增加에 따른 潮汐의 變化를 初期試圖로서는 滿足스럽게 再現시켰다. 漢江感潮部와 같이 뚜렷한 非線型 河川潮汐이 觀測되는 感潮河川은 世界的으로도 드물어 河川의 潮汐力學을 研究하는 데 매우 價値있는 現場임에도 不拘하고 感潮水位資料의 質은 深刻한 實情에 있으며 河口入口部의 地形的 諸元의 不確實性이 모델의 改善에 障礙가 되고 있어 追後의 徹底한 現場觀測과 過去感潮水位資料의 再整備가 時急하다. 또한 過去의 大洪水에 대한 仔細한 hindcast 研究를 통한 經驗을 蓄積한 후 forecast 體系로의 改善이 防災側面에서 重要한 事項이다.

參 考 文 獻

- 1) Dronkers, J.J., "Tidal Computations for Rivers and Coastal Waters", North-Holland, 1964.
- 2) Balloffet, A., "One-dimensional Analysis of Floods and Tides in Open Channels",

Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 95, No. HY4, 1969.

- 3) Harleman, D.R.F. and Lee, C.H., "The Computation of Tides and Currents in Estuaries and Canals", Technical Bulletin No.16, Committee on Tidal Hydraulics, Corps of Engineers, U.S. Army, 1969.
- 4) Doodson, A.T. and Warburg, H.D., "Admiralty Manual of Tides", London: HMSO, 1941.
- 5) 崔秉昊, 安元植, 金鎔潤, "우리나라 主要感潮河川에서의 보름週期 水位變化," 大韓土木學會 論文集, 第5卷 第3號, 1985.
- 6) Godin, G., "Eight years of Observations on the Water Level at Quebec and Groulons 1962~1969 : Part 1-Analysis of Tidal Signal", Department of Environment, Fisheries and Marine Service, MS report No.31, 1973.
- 7) Murray, M.T., "Tidal Analysis with an Electric Digital computer", Cashiers Oceanog., 1963.
- 8) Godin, G., "Modification of River Tides by the Discharge", Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol.3, No.2, 1985.