

## 仁川灣 및 漢江體系的 數值模型 A Numerical Model of Combined Incheon Bay and Han River System

崔秉昊\* · 全德一\* · 安益壯\*

Byung Ho Choi\*, Dug Il Jun\* and Ike Jang Ann\*

**要旨** : 前回の 仁川灣 2次元 模型(崔, 1980)을 改善시켜 開放境界에 8個分潮를 附與함으로써 灣全體에 潮汐을 實時間豫報할 수 있는 體系構成을 위한 試圖을 하였다. 氣象影響이 없는 期間에 대한 模型의 hindcast 結果는 沿岸觀測值와 全般的인 一致를 보였다. 또한 仁川灣 模型과 1次元 漢江模型을 動的 連結하여 한 模型體系로서 改善시켜 仁川灣 潮汐의 漢江으로의 傳播를 算定하게 하였다. 이 模型에 의해 1990年 9月의 大洪水를 算定하였으며 追後의 模型改善에 關聯된 討議를 敘述하였다.

**Abstract** □ The previous model of Incheon Bay (Choi, 1980) was refined to hindcast/forecast the tides in the Incheon Bay by prescribing the 8 tidal constituents at the open boundaries. A series of hindcast was performed for the period of meteorologically calm condition and the simulated results were compared with limited observation showing the reasonable agreements. Preliminary stage of real-time tidal prediction over the whole Incheon Bay were briefly outlined for practical purposes. The established model were further improved by dynamically interfacing, a one dimensional representation of the Han River system. With this model the tidal propagation in the Han River were computed and simulation of recent September, 1990 flood were performed. Discussion for further model development are also described.

### 1. 緒 論

世界的으로 큰 潮汐現象에 의해 特徵지워지는 仁川灣은 潮力發電計劃, 大規模 港灣 및 干拓事業 등이 活潑한 反面에 潮汐物理를 包含한 沿岸 海洋學的인 研究는 비로소 始作하는 段階에 있다. 強潮流環境에서의 觀測活動의 어려움과 軍事作戰海域에서의 海洋 調查活動의 制約이 複合的인 要因으로서 이 海域의 基礎資料確保에 障礙가 되어왔다. 그러나 大規模 港灣의 建設에 따른 大型船舶의 運用, 沿岸開拓에 따른 環境變化 또는 빈번한 大規模 油槽船 油類流出事故에 따른 災害輕減을 위한 沿岸海洋學的인 豫報의 必要性이 近來에 절실하게 되었다. 本 論文에서는 既發表된 仁川灣의 潮汐模型(Choi, 1980)을 實時間豫報體系로 改善시키기 위한 노력과 우리나라 感潮區間的 潮力學研究의 일환으로 始作된 漢江 感潮區間的 洪水/潮汐 相互作用(崔, 李 및 徐, 1987; 崔와 徐,

1987)의 繼續되는 研究로서 漢江全水系와 仁川灣을 하나의 體系로 結合시킨 動水力學模型을 樹立하는 첫 適用段階에서 1990年 9月 洪水의 算定을 遂行하였다.

### 2. 數值模型

潮汐數值模型의 格子體系는 Fig. 1과 Fig. 2에 提示된 바와 같이 1海里의 格子間隔을 갖는 仁川灣 模型과 漢江河口에서 動的連結되는 1次元模型으로 構成된다. 1次元模型은 팔당담까지의 本流만을 包含하는 간단한 模型과(崔와 徐, 1987) 支流河川을 모두 包含하는 Branched Network-Flow 模型(崔와 安, 1992)의 두 경우를 接續하여 數值實驗하였다. 1次元模型의 境遇는 우선 獨立된 模型의 狀況下에서의 數值實驗이 滿足스럽게 遂行된 연후에 動的인 接續을 遂行 하였다. 仁川灣模型은 非線形 移流項 및 摩擦項이 包含된 動水力學方程式의 解를 구하는 것으로서 자세한 數值

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

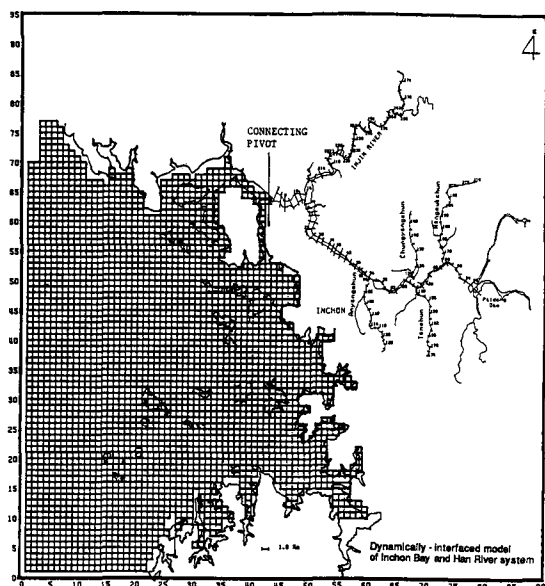


Fig. 1. Grid system for dynamically-interfaced model of Incheon Bay and Han River system.

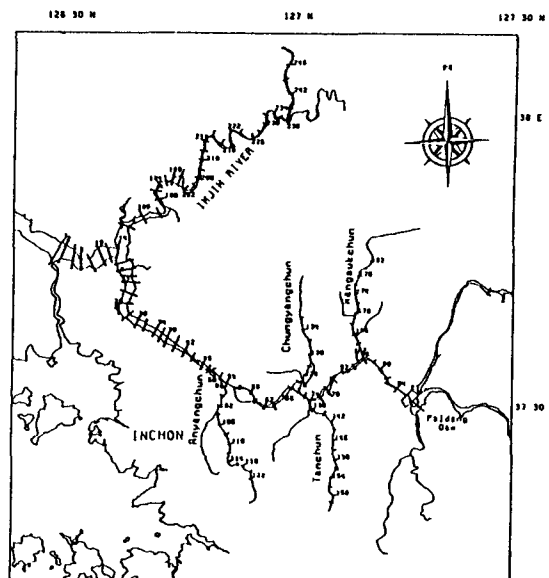


Fig. 2. Branched network for the Han River model.

解法은 여러문헌(Flather and Heaps, 1975 ; Choi, 1980)에 紹介되어 있으므로 再述치 않는다.

前回の 仁川灣 模型을 改善시켜 海面壓力傾斜項과 海底摩擦應力項을 包含하며 潮汐과 氣象影響을 獨立的, 또는 複合的으로 算定할 수 있도록 하여 潮汐과 海溢을 包含한 氣象影響의 相互作用이 考慮 될수 있도록 設計하였다. 本 論文에서는 于先 氣象의 影響은 無視할 수 있는 期間에 대한 實時間潮汐 算定에 着점을 두어 敘述하였다.

### 3. 動的連結模型의 樹立

仁川灣에서 漢江으로 播及되는 潮汐은 현재 人道橋 附近까지 傳播되는데 河川流量과 相互作用에 의한 潮汐의 變形이 이루어지는데 洪水時에는 특히 潮汐의 上流側 播及이 크게 制約받는 것으로 前回の 研究(崔, 李 및 徐, 1987 ; 崔와 徐, 1987)에서는 Godin(1985)의 理論的 研究를 數值實驗에 依해 立證하였다. 漢江의 本流外에도 支流에 의한 流入量을 無視할 수 없을 것인데 前回の 模型에서는 考慮되지 못했으므로 本 研究에서는 支流效果를 考慮한 1次元 Branched Network Flow 模型을 採擇하였다. 또한 2次元 實時間 潮汐模型에 動的連結하였기 때문에 1次元 模型의 下

流端 境界를 규정할 필요없이 外海開放境界에서 8개 分潮로서 推定한 潮汐(崔, 1987)으로 代置하였다. 動的인 連結은 Fig.1에 提示된 대로 仁川灣海域模型과 1次元 漢江 模型을 連結軸에 對해 結合시켰다. 이 連結軸 통해 河口域에서 算定된 潮汐이 漢江上流側 으로 播及되어야 하고 漢江의 上流端(八堂)에서 發生된 河川水가 下流端으로 傳達되어 潮汐方程式에서 質量保存 및 運動量 保存이 이루어져야 한다. 이러한 基本課程의 數值計算은 다음과 같은 順序로 計算된다.

- 1) 仁川灣潮汐의 開放境界(南側, 西側)에 境界潮汐을 附與하였다.
- 2) 2次元 海域模型의 各格子에 對해 潮汐算定을 遂行한다.
- 3) 連結軸에서 計算된 潮位值를 利用하여 1次元側 下流端境界潮汐을 算定한다.
- 4) 1次元側 下流端의 境界潮汐과 上流端(八堂) 및 支川의 上流에서 入力된 河川水 流入量을 境界資料로 利用하여서 洪水斷面에서는 水位, 靑水斷面에서는 流量 및 流速을 算定한다.
- 5) 1次元模型의 下流端에서 計算된 流量(斷面 2)을 利用하여 2次元軸 連結格子에서 x軸格子番號에 對해 流速(u)를 算定한다.
- 6) 河口域의 各格子點에 對해 東西方向의 流速(u)와

南北方向의 流速(v)를 計算한다.

7) 매 time-step에 대하여 (1)~(6)을 反復 計算한다.

1)의 開放境界에서의 潮汐入力은 標準調和函數로의 形態로서 表示된다.

$$\xi = \sum_{i=1}^n f_i H_i \cos(\sigma_i t + u_i + V_i - K_i)$$

여기서  $H_i$ ,  $K_i$ 는 調和常數로서 分潮의 振幅과 局地的인 遲角인데 開放 境界에서의 潮汐은 推論된 8個의 分潮  $M_2, S_2, K_1, O_1, K_2, N_2, P_1, Q_1$ 의 潮汐圖(等振幅, 位相)로부터 취했다(崔, 1987).  $\sigma_i$ 는 分潮의 角速度,  $V_i$ 는 相應하는 分潮의 125.4°E의 子午線의 平衡分潮의 位相(潮汐推定 始作日時)이며  $f_i$ ,  $u_i$ 는 振幅과 位相(遲角)의 18.6年 潮汐週期의 變化를 考慮한 nodal factor이다.

$V_i$ ,  $f_i$  및  $u_i$ 는 Schureman 의 文獻(1958), 交通部 水路局의 潮汐計算用 諸表 또는 軌道要素 s, h 및 n으로부터 아래와 같이 구해진다.

$$V_i = I_{1,i} s + I_{2,i} h + \sigma_i t$$

$$f_i = a_{1,i} + a_{2,i} \cos(n) + a_{3,i} \cos(2n)$$

$$u_i = b_{1,i} \sin(n)$$

여기서 係數  $I_1, I_2, a_1, a_2, a_3$  및  $b_1$ 은 Doodson(1921)으로부터 취한다.

本 研究의 模型體系에서는 Doodson의 起潮포텐셜의 調和理論에 根據하여 下流境界 條件은 洪水推定의 始作日時(year number와 day number)만을 入力시키면 自動的으로 特定日의 潮汐이 算定入力되게 設計하였다. Fig. 3은 結合模型(外海境界에서 8個分潮의 調和常數 指定)과 獨立模型(漢江河口 월곳리에 14개 分潮의 調和常數 賦與, 1978年의 5個月 觀測值 根據)에 의한 1984年 8月 21/22日의 河口 入口部(模型連結 附近)의 算定結果로서 推論한 外海境界條件임을 考慮할 때 滿足할 만한 一致를 보이고 있다.

#### 4. 實時間豫報模型의 構成

沿岸航海誌(Coastal Pilot)의 基礎的인 航海資料에 附加하여 航路에서 實 時間潮汐 즉 潮位 및 潮流의 空間的인 豫報資料가 航行船舶 및 操業活動에 必須的인 것이나 이러한 情報가 時間的으로 自動화된 體系로서 提供되고 있지 않다. 즉 沿岸航海誌와 더불어

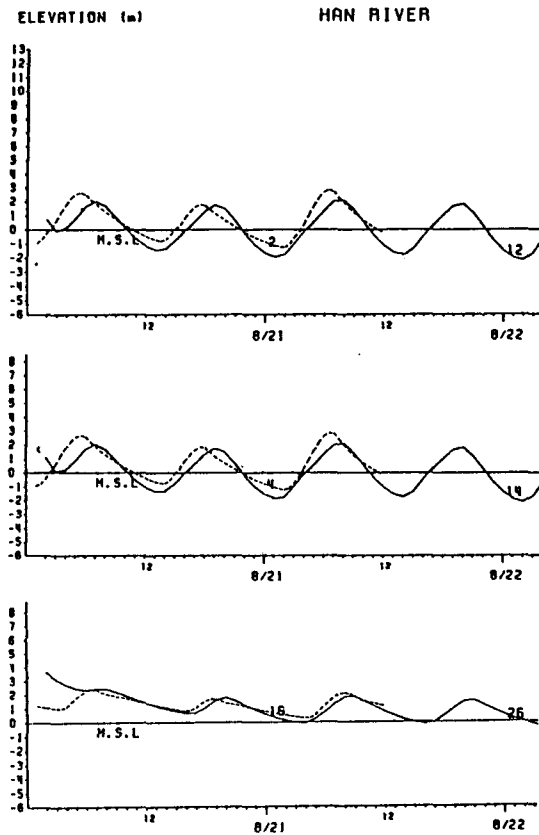


Fig. 3. Comparison of computed water levels between independent branched network model (solid line) and dynamically interfaced model (dotted line) at selected stations 2, 4 and 16.

特定한 水路의 潮流資料는 數個의 定點에서 代表的인 潮汐狀況(平均大潮, 中潮, 平均小潮)의 潮流分布를 潮位의 關係로서 外插시켜 利用하는 方法인데 프랑스에서는 潮汐係數(tidal coefficient)가 利用되며 英國 水路部(British Hydrographic Department) 역시 類似한 外插 方法을 提示하고 있다(Atlas of tides and tidal stream). 反面에 西獨水路部(Deutsche Hydrographische Institut)는 北海와 Hamburg港에 이르는 Elbe 江 接近水路의 潮流豫報를 海溢豫報體系의 骨格下에 컴퓨터에 의한 豫報結果를 抽出할 수 있도록 構成되어 있다. 美國은 特定 河口에 대한 潮汐豫報를 綜合的인 環境모니터링體系에서 構成하고 있다.

仁川灣의 潮汐推定을 위한 初期豫報方法(崔와 李, 1986)  $M_2$  潮汐模型에 依한 平均潮汐狀況의 한 潮汐週期의 潮位, 潮位算定效果는 3.0~9.0m 사이의 潮差

에 따른 5.8~6.2m를 基準(1.0)으로 한 流速補正係數 (velocity correction factor)와 潮位補正係數(height correction factor)로서 接近水路의 潮汐을 外插시켜 推定하는 方法이었다. 이 初期豫報節次는 Swanson과 Spaulding(1975)이 美國의 Narragansett 灣의 潮汐을 數值模型에 依한 平均潮汐의 外插에 依해 推定하였던 方法에 依據하였던 것이나 近年의 急速한 컴퓨터 能力의 伸長으로 이러한 平均潮汐狀況을 外插의 方法으로 利用하는 從屬의 豫報方法보다는 本 研究에서 提示되는 模型에 依한 直接算定法으로 特定時刻의 實時間豫報體系로서의 改善이 必要하게 되었다.

實時間 潮汐豫報模型은 現場에서 利用 可能한 豫報를 하기 위해서 1日 豫報, 1週日 豫報, 1個月 豫報로서 運用體系를 構成한다. 本 模型의 安定된 解를 구하기 위한 計算時間 間隔은 60秒이다. 그러므로 1日은 總 1440個의 time step을 가지게 된다. PC-386을 기준할 때 實時間 豫報模型은 1日值를 豫報하는데 概略的으로 40分 정도가 소요되고 1日에 대한 10分 間隔의 流速 및 水位 結果는 약 2.5 MB를 必要로 한다. 그러므로 1個月值 simulation을 하는데 必要한 時間은 約 20時間 정도가 소요되고 記憶容量은 約 450 MB 정도가 必要하다.

더 나은 속도의 PC와 binary format의 dataset, 光디스크를 採擇하면 潮位, 潮流의 1個月豫報도 效率的으로 構成할 수 있다. 또한 1週日 豫報는 미리 算定된 data set 에서 最終值를 選擇하는 hot start를 하여 每週潮汐 算定할 수 있도록 構成하였다. 이와 같이 過去 大容量의 computer 에서나 可能하던 simulation들이 PC 體系에서도 容易하게 되었다. 主 計算과 더불어 各種 周邊機器 즉 plotter, digitizer, laser printer 혹은 color printer를 利用하여 Graphic output 등이 提示하도록 體系構成을 하였다. 實時間 潮汐豫報의 遂行을 위해서 PC-system에서 樹立된 體系의 block diagram이 Fig. 4에 提示된다.

### 5. 模型의 結果

#### 5.1 仁川灣의 潮汐 推定

仁川灣 및 牙山灣(平澤港)에 出入하는 船舶의 接近水路인 東水道, 西水道 및 牙山灣 接近水路는 仁川港의 擴張, 牙山灣 內域의 大規模 港灣開發 등으로 더욱 船舶의 航行이 頻煩해 질 것이며 海上, 衝突,

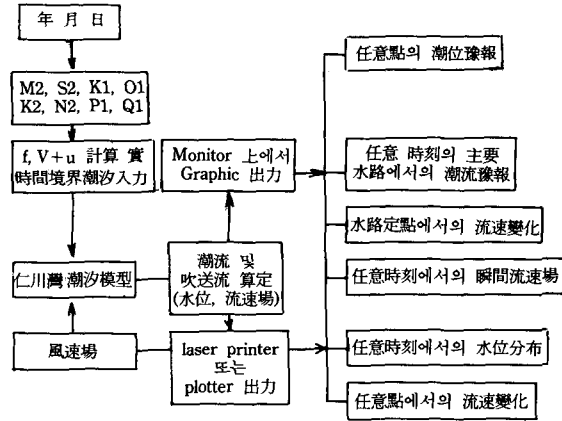


Fig. 4. 예보체계의 block diagram.

坐礁 등의 海洋事故와 油類流出의 危險性이 增大될 것이다. 특히 太安半島 北側에는 油化學工團이 造成되어 있고 潮流가 강한 長安堆 南側에로의 接近水路가 開拓되어 運用되고 있는데 現在 이 全體海域에서 불과 몇 점에서의 定點 豫報만이 水路局에서 提供되고 있는 것에 留意할 必要가 있다. 仁川港의 接近은 格列飛列島의 北에서 南西側과 北側 그리고 北東의 位置에서 靛島의 北西 1 3/4 mile 地點에서 北東의 位置로 接近이 可能하다. 北側이나 北西側으로부터의 船舶들은 木德島의 南側을 지나야만 하고(36° 56' N, 125° 47' E) 靛島 北側의 東北東을 通過해야 하는데 東水道와 西水道는 仁川의 南西側으로 大략 10 mile 地點에 있는 두개의 接近水路이다. 따라서 1次의 豫報 模型에서는 外海境界에 8個 分潮를 規定하여 時間的 豫報를 할 수 있도록 模型을 樹立 하였는데 模型의 檢證은 既知의 觀測點에서의 潮位에 대해 遂行하였다. 模型의 潮位檢證은 1975年 1月 및 1980年 10月의 各 2個月을 擇하여 檢證하였는데 Fig. 5와 Fig. 6에 제시된 바와 같이 仁川港과 牙山灣 入口(菊花島 및 魯尾角)의 觀測潮位와 模型算定値는 全般的인 一致를 보이고 있는데 差異는 이 海域의 精確한 潮汐現象을 위해서는 적어도 60個의 基本的인 Doodson 分潮가 利用되고 있는 反面에 模型에서는 8個 分潮만을 外海境界入力으로 利用하였기 때문이다. 또한 模型의 格子가 仔細한 水深變化를 解像시키는 데는 不充分하여 徹底한 潮汐檢證은 이루어지지 않았으나 既存의 漲, 落潮分布圖와는 定性的인 一致를 보였다. Fig. 7은 仁川港 및 牙山灣(平澤港)에 出入하는 船舶의 接近水路인

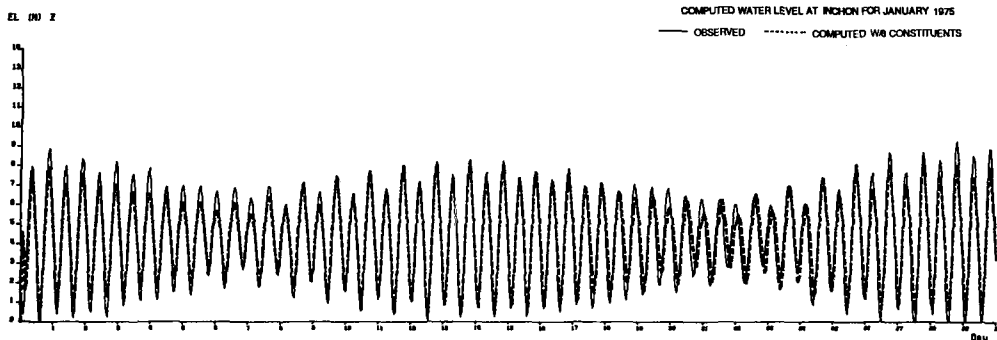


Fig. 5. Comparison between computed and observed water levels at Incheon for January, 1975.

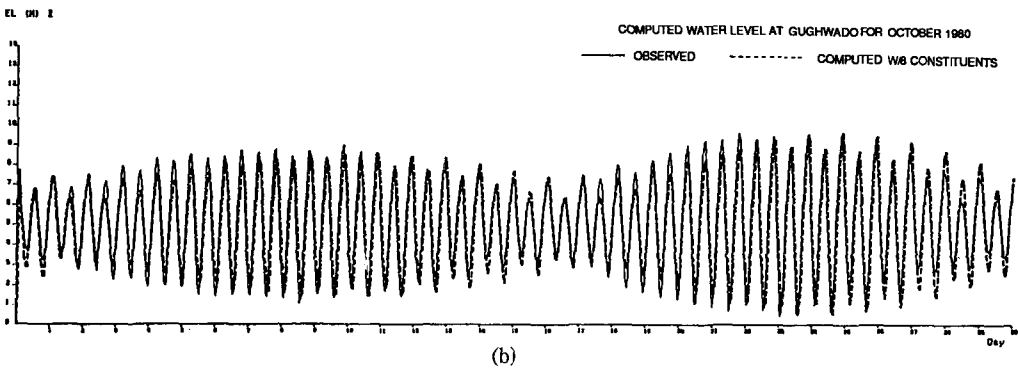
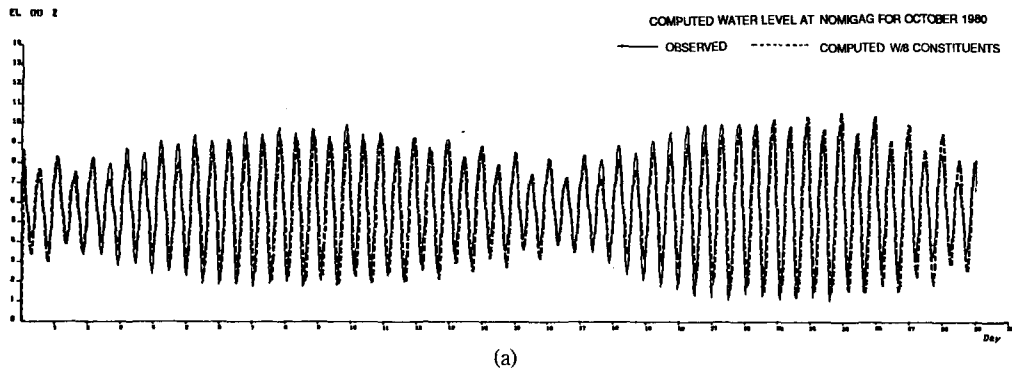


Fig. 6. Comparison between computed and observed water levels at Nomigag(a) and Gughwado(b) for October, 1980.

東水道, 西水道 및 牙山港接近水路에서의 算定된 潮汐分布(上) 및 變化(下)를 提示하고 있다.

5.2 1990年 9月 洪水의 算定

1990年 9月 10日~11日 韓半島 中北部地方에 形成된 強한 降雨帶가 滿洲 附近과 南海海上에 強하게 발달한 高氣壓사이에서 停滯된 狀況에서 中國側에서 流入된 高溫多濕한 熱帶氣流에 의해 集中豪雨가 내려

漢江流域에 大洪水를 誘發시켰다. 動的連結模型의 2次元 模型部分은 上述된 바와 같이 仁川灣 및 牙山灣 接近水路에서의 實時間 豫報模型의 根幹을 이루며 1次元 模型區間인 漢江河川區間에서는 潮汐播及 및 洪水算定을 遂行한다. 洪水 算定은 1990年 9月 9日 0時부터 9月 15日까지 7日間 遂行되었는데 서로 다른 3種의 模型을 運用하여서 水文資料, 河川의 幾何學的 諸元, 支流의 影響이 評價될 수 있도록 하였다.

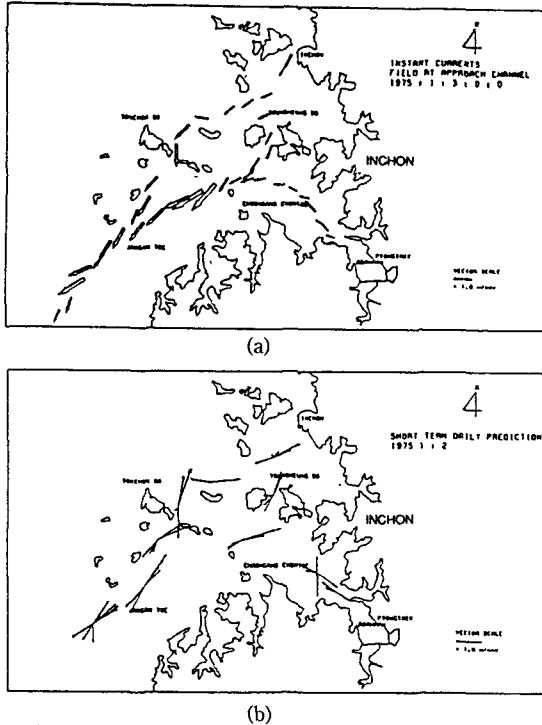


Fig. 7. Computed tidal currents at approach channel to Incheon and Asan (a) instantaneous vector fields at Oh January 3, 1975. (b) daily variations for January 2, 1975.

模型 A : 動的連結된 仁川灣 및 Branched Network Flow 漢江模型

模型 B : 單獨 Branched Network Flow 漢江模型

模型 C : 仁川灣 및 1次元 本流模型

1990 年 洪水算定을 위한 模型入力으로서 八堂댐의 放水時系列 및 schematized된 全水系的 降雨強度가 Fig. 8 및 Fig. 9에 提示되어 있다. Fig. 10과 Fig. 11은 人道橋에서 算定結果로서 人道橋의 零點標高上의 觀測水位(2.47m above M.S.L) 는 M.S.L로 換算 提示 되었다. 模型算定の 初期結果를 要約하면 다음과 같다.

가) Branched Network Flow 模型에서는 兎곳리를 下流境界로하는 單獨模型이 人道橋에서의 尖頭水位를 結合模型보다 다소 나은 推定을 한다.

나) Branched Network Flow 모형에서 臨津江 및 支流河川의 洪水時의 降雨 變化 入力이 本流에서의 尖斗水位 時刻에 影響을 준다.

다) 設計된 模型은 홍수터를 包含한 複雜한 河川

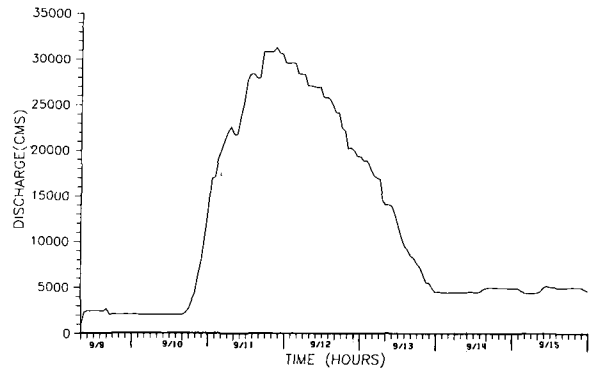


Fig. 8. Variation of discharge at paldang dam for flood of September, 1990.

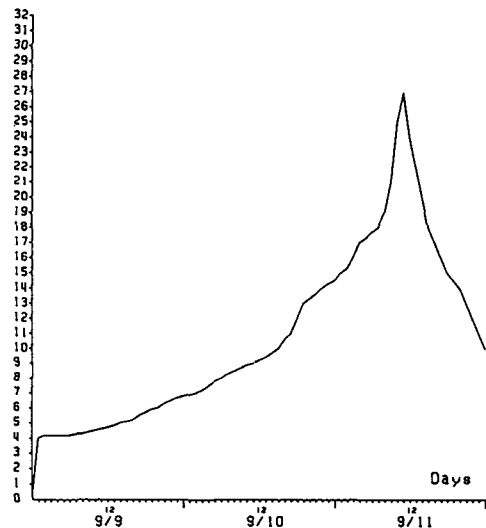


Fig. 9. Schematized rainfall variation for flood of September, 1990.

斷面을 利用하게 되어 있으나 全 河川水系的 幾何學的 諸元은 여러해 期間을 통해 觀測된 것으로 어느 特定期間의 斷面形狀은 아니다. 그럼에도 不拘하고 全體的인 洪水算定은 滿足스러웠다. 實際洪水豫報體系의 運用을 위해서는 定期的인 現實性 있는 幾何學的의 斷面入力の 維持가 重要한 關鍵일 것이다. Fig. 12는 結果模型의 算定洪水水位의 時系列을 3次元의으로 플롯한 것으로 洪水期間을 통해서는 上流의 流量에 대한 潮汐의 播及이 抑制되며 歪曲되는 形狀이 잘 提示되어 있다.

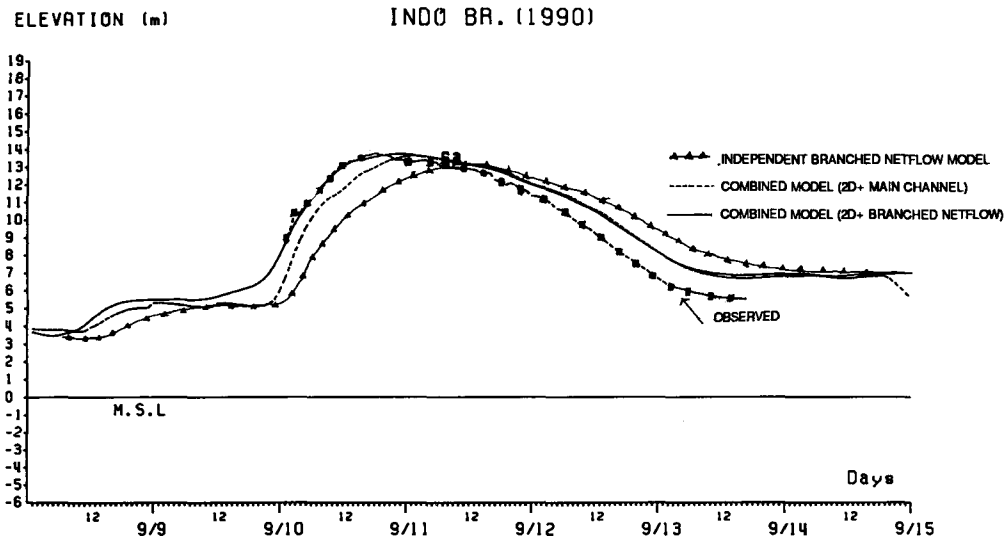


Fig. 10. Computed water levels at Indo Gyo from three different models.

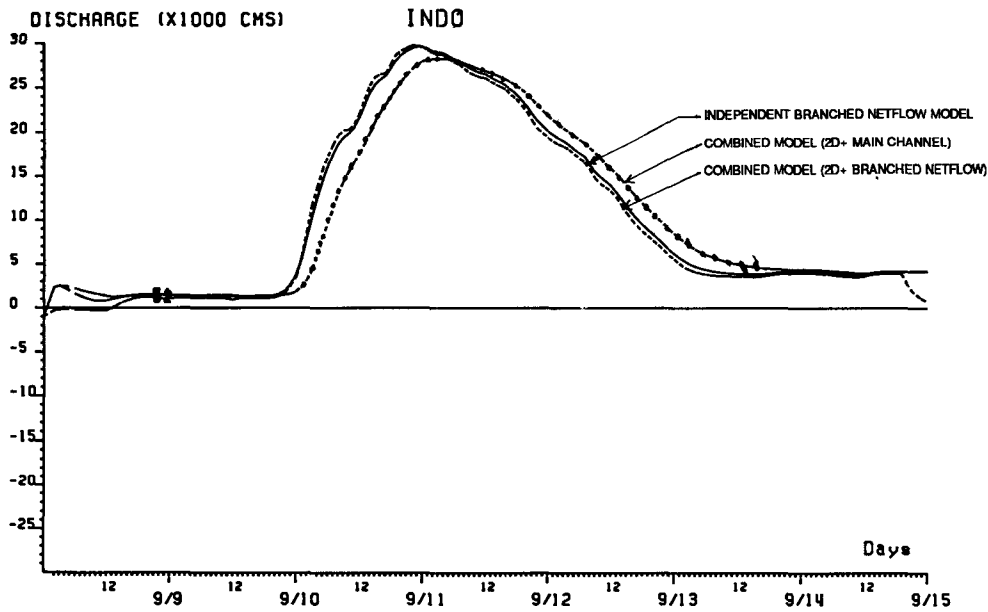


Fig. 11. Computed discharge at Indo Gyo from three different models.

### 6. 討議 및 結論

提示된 廣域의 漢江模型體系의 樹立 및 洪水算定 過程에서 걸쳐 露出된 問題點들을 敍述하면 다음과 같다. 1) 模型의 檢證에서 중요한 水位 觀測所(顛流, 金浦大橋, 人道橋)의 時系列資料가 一般적으로 不良

하고 또한 絶對的인 垂直基準(예: 우리나라 垂直 基準面)에 대해 水位觀測所의 零點標高의 不確實性(崔, 1985; 崔 等 1987) 때문에 信賴性있는 豫報模型의 樹立이 어려운 점이다. 2) 模型에서 算定되는 洪水流量에 對한 檢證은 더 難解한 部分으로 ADCP(Acoustic Doppler Current Profile)와 같은 現代的인 流量觀測

HAN RIVER 1990 FLOOD  
Hindcast

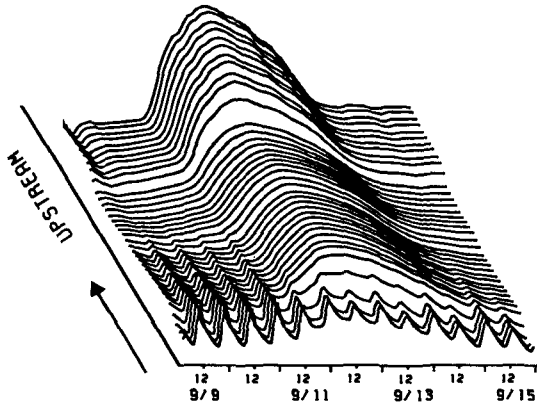


Fig. 12. Computed water levels for flood of September, 1990 from dynamically-interfaced model.

資料에 의한 模型 檢證(Gordon, 1988)이 必要하다. 3) 漢江 水系를 따른 仔細한 地形資料 및 河川斷面 data base가 樹立되어 本 研究에서 수행된 堤防내 홍수(Inbank flood) 模型에서는 精確한 斷面資料를 提供하고 堤防의 破壞에 의한 Overland flow도 豫測될 수 있도록 모형의 擴張研究가 始作되어야 한다.

上記의 制約點은 있지만 本 研究에서는 提示된 바와 같이 仁川灣과 漢江水系를 一體로 다루는 模型에서 洪水算定이 效果의으로 遂行될 수 있음을 立證하였다. 模型의 改善을 위한 努力이 向後 數 年에 걸쳐 遂行될 것인데 廣範圍한 現代의인 仁川灣의 潮汐觀測과 漢江의 水文 觀測이 必須의인 事項이다. 解像度가 높은 細格子 體系에서의 潮汐算定과 每 格子體系에 미리 計算되어 設定된 潮位, 潮流의 調和 常數로부터 迅速히 潮汐豫報를 遂行하는 研究도 現在 進行 中이다.

謝 辭

公式的인 洪水記錄의 出刊에 앞서 八堂댐 放水記

錄을 迅速하게 提供해 주신 韓國電力 給電 司令室 안용섭 課長에게 謝意를 表합니다.

參考文獻

Choi, B., 1980. Tidal computation for Incheon Bay, Journal of the Oceanological Society of Korea, 15(2), pp. 112-122.

Doodson, A.T., 1921. The harmonic development of the Tide-generating potential, Philosophical Transaction of Royal Society-London A.100, pp. 305-329.

Gordon, R.L., 1988. Measurement of the River Elbes discharge with an Acoustic Doppler Current Profile, Journal of Hydraulic Engineering.

Flather, R.A. and Heaps, N. S., 1975. Tidal computation for Morecambe Bay, Geophys. J. Roy astro. Soc., 42, pp. 489-517.

Godin, G., 1985. Modification of river tide by the discharge, Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 111(2), pp. 257-274.

Schreman, P., 1958. Manual of harmonic analysis and prediction of tides, U.S. Coast and Geodetic Survey, 317p.

Swanson, C. and Spaulding, M., 1975. Generation of tidal current and height charts for Narragansett Bay using a numerical model, Marine Technical Report 35, Marine Advisory Service, University of Rhode Island.

崔秉昊, 安元植, 金鎔潤, 1985. 우리나라 主要感潮河川에서의 보름週期 水位變化, 大韓土木學會誌, 5(3), pp. 13-20.

崔秉昊, 1987. 仁川灣 潮汐의 主分潮, 韓國港灣協會誌, “港灣”.

交通部 水路局: 潮汐計算用 諸表추보 1970-1999.

崔秉昊, 徐景錫, 1987. 漢江感潮區間의 洪水推定, 大韓土木學會誌, 7(3), pp. 133-139.

崔秉昊, 徐景錫, 吳允根, 1987. 우리나라 感潮河川水位資料의 初期分析, 成大論文集, 科學技術編 38(2), pp. 371-379.

崔秉昊, 安益壯, 1992. 漢江水系의 動水力學的 數值模型, 成大論文集, 科學技術編(提出中).

崔秉昊, 李正烈, 徐景錫, 1987. 漢江感潮區間의 潮汐傳播, 韓國水文學會誌, 20(2), pp. 151-160.

崔秉昊, 李錫祐, 1985. 仁川灣 潮汐數值모델의 沿岸航行에의 適用, 韓國港灣協會誌, “港灣”.