

〈論 文〉

## 錦江河口の 非線形 潮汐

Tidal Asymmetry in the Keum River Estuary

崔 秉 昊\*  
Choi, Byung Ho

## Abstract

Tidal asymmetry in the Keum River Estuary has been investigated from the observed tides. Despite strong frictional attenuation within the estuary, the  $M_4$  tides reach significant amplitude, resulting in strong tidal distortion. The observed asymmetry over the area shows that generally more intense flood flows transport more sediment than do less intense ebb flows of longer duration. This causes filling of the estuary as evidenced by sand flats spreaded over the inner area. The spatial distribution of peak bottom stress associated with the dominant  $M_2$  and  $M_4$  tides calculated via two-dimensional numerical tidal model suggest that present tidal sedimentation regime may be altered, especially in the approach channel to outer Kunsan Port and downstream part of the dike, due to the construction of barrier.

## 要 旨

錦江河口の 非線形(非對稱) 潮汐을 觀測結果로 부터 調査하였는 데 河口에서의 강한 海底摩擦에 의한 에너지消散에도 不拘하고  $M_4$  分潮는 擴幅되어 강한 潮汐非對稱現象을 惹起시킨다. 觀測된 潮汐非對稱은 긴 持續時間의 落潮보다 相對的으로 짧은 持續時間의 강한 漲潮流速이 土砂의 移動을 增大시키는 데 이 現象이 河口의 埋沒을 誘發시켜  $M_2$  內域에 分布된 砂洲의 形成要因인 것으로 推定된다.  $M_2$  分潮와  $M_4$  分潮에 關聯된 尖頭海底應力の 分布를 2次元潮汐 數值모델에 의해 算定했는데 結果는 現存의 潮汐堆積體系中 掃流砂의 分布는 河口둑 建設로 인해 外港接近水路와 河口둑 下流部에 變化를 가져올 것으로 初期推定된다.

## 1. 序 論

우리나라 西海岸의 河口에서는 主太陰半日週潮( $M_2$ )의 倍潮인  $M_4$  分潮와  $M_2$  分潮와 主太陽半日週潮( $S_2$ )의 非線形 動水力學的 相互作用때문에 發生되는  $MS_4$  分潮가 뚜렷하게 큰 分潮임이 觀測되어 왔다.<sup>(1)</sup> 특히  $M_2$  分潮와  $M_4$  分潮의

振幅比와 位相差 및 潮汐恒流의 영향에 따라 潮汐의 非線形性이 크게 左右되는 데 潮流의 境遇  $M_2$  分潮와  $M_4$  分潮의 位相이 一致할 때( $M_2$  分潮 位相의 2倍= $M_4$  分潮의 位相) 落潮에 比해 相對的으로 짧은 漲潮持續時間과 큰 尖頭漲潮流速을 갖는 것이 잘 알려져 있다.<sup>(2)</sup> 이 非線形性은 淺深의 河口의 地質學的 形成過程 및 河口에서 的 航行을 위한 接近水路의 安定性에 큰 影響을

\* 成均館大學 工大教授·土木工學科

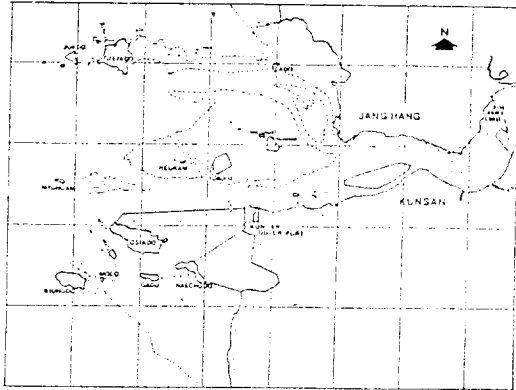


그림 1. 錦江河口の 位置圖

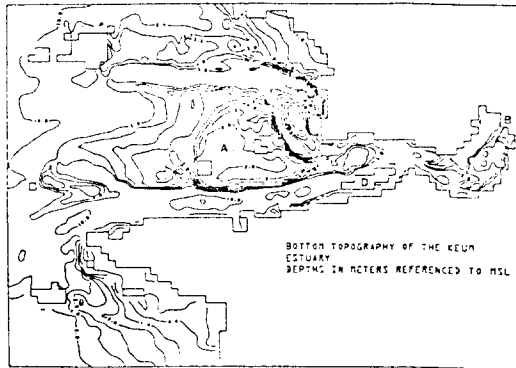


그림 2. 錦江河口の 水深圖(A : 大竹島砂洲, D : 海望洞砂洲, B : 龜浦砂洲)

미치는 데漲潮가 優勢한 河口에서는 引込되는 土砂를 河口로부터 效果의으로 流出시키는 能力이 缺如되며 落潮가 優勢한 河口는 아마도 安定性있는 水路가 維持되는 것으로 推論할 수 있다.

錦江河口の 內域(그림 1, 그림 2 참조)에는 大規模의 大竹島砂洲, 海望洞砂洲, 長項港 앞의 砂洲, 群山內港上流側의 砂洲가 長期間의 地質學的 過程을 통해 形成되어 있다.<sup>(3)</sup> 이 砂洲들의 形成機構를 水理學的인 觀點에서 多角度로 살펴보고 現在 望月里에 建設中인 河口둑이 河口의 全般的인 堆積體系에 長期的으로 如何한 影響을 줄 것인가에 대한 推定을 遂行하는 課業이 基礎研究의 側面에서 뿐만 아니라 航行水路의 安定性을 包含하는 實用的 側面에서도 重要하다. 本稿에서는 錦江河口の 利用可能한 現場 潮流觀測資料들을 概括하여 非線形形態를 判別 하므로써 現存의 砂洲의 可能한 形成機構를 推論하였으며 또한 潮汐數值모델의 結果로서 河口

둑의 建設에 의한 潮汐遮斷이 堆積體系에 미치는 影響을 初期推定하였는 데 河口의 掃流砂 輸送機構를 우선 定性的으로 다루었다.

## 2. 錦江河口の 觀測潮流

錦江河口の 潮流觀測은 1953年 9~10月 水路局(當時 海軍所屬)에서 解放後 처음으로 實施한 미 있으며<sup>(4)</sup> 그以後 1966年 5~6月 潮流豫報와 潮流概況圖 作成을 目的으로 群山內港 棧橋 앞(그림 3의 H10)에서 15日 連續觀測과 航路上의 10個 定點에서 12時間觀測을 遂行하였다.<sup>(5)</sup> 이 結果는 群山外港建設의 妥當性調查를 위한 水理實驗의 入力資料<sup>(6,7)</sup> 및 外港開發基本計劃에 利用되었다.<sup>(8)</sup> 그 以後 1971年 古群山島 水路附近의 地質調查時의 潮流觀測, 1977年 11月期間의 群山內港 水路部附近의 航路整備調查를 위한 定點觀測<sup>(9)</sup>, 1979年 3月期間의 臨海工業基地建設을 위한 飛鷹島주위의 定點觀測<sup>(10)</sup>이 簡易的으로 實施된 바 있다.

1980年 以後의 觀測은 建設된 外港의 埋沒現象이 深刻함에 따라 外港의 浮遊砂特性을 調査하기 위한 潮流觀測<sup>(11)</sup>이 外港 全面位置에서 實施되었으며 農振公은 河口둑 建設에 따른 水文調查<sup>(12)</sup>로서 群山外港과 河口둑位置區間에 1982年 6月中 6個斷面에서 潮流觀測을 25時間 遂行하였다. 群山港 建設事務所는 河口둑建設에 따른 航路에서의 埋沒影響을 調査하기 위한 觀測事業을 1982년부터 시작했는데 同年 11年<sup>(13)</sup>, 1984年 11月<sup>(14)</sup>, 1985年 6月<sup>(15)</sup> 및 11月期間<sup>(16)</sup>에 外港과 望月里區間의 定點潮流觀測이 遂行되

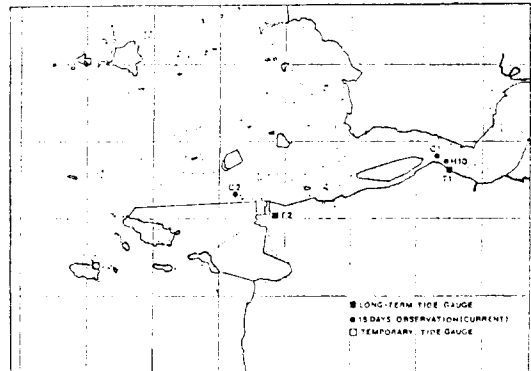


그림 3. 錦江河口の 潮汐觀測位置

表-1 群山內, 外港水路潮流의 調和常數

부 조	위치 상수	H10		C1		C2	
		H	K	H	K	H	K
M <sub>2</sub>		80.2	28.5	110.7(114.5)	21.6( 25.3)	133.2(107.5)	357.0( 9.2)
S <sub>2</sub>		24.0	81.4	42.2( 40.7)	76.5( 74.9)	42.4( 46.3)	55.2( 44.3)
N <sub>2</sub>				32.9( 38.0)	11.2( 11.0)	29.3( 6.1)	359.7(327.0)
K <sub>1</sub>		6.2	197.3	10.1( 7.6)	198.7(206.6)	10.3( 9.1)	177.6(191.0)
O <sub>1</sub>		3.2	150.7	5.7( 6.9)	152.9(158.9)	4.3( 4.3)	148.1(183.6)
M <sub>4</sub>		2.7	308.7	15.6( 11.8)	55.6( 69.9)	32.0( 12.3)	33.3( 25.8)
MS <sub>4</sub>		1.4	9.2	7.1( 12.2)	99.4, 106.2)	14.6( 14.3)	97.3( 54.0)

註) 1. H는 分潮의 振幅(cm/sec), K는 局地遲角임.  
 2. 括弧안은 86年의 分析結果임.  
 3. H10은 交通部 水路局의 1966年 觀測結果임.

었다. 1986년에는 이 觀測範圍를 外海側으로 擴大하여 여러 定點의 潮流觀測이 實施<sup>(17)</sup>되었는 바 15日 連續觀測이 85年 6月 20日~7月 4日 및 86年 4月 1日~4月 15日 期間에 群山內港(그림 3의 C1) 및 群山外港(그림 3의 C2)의 水路에서 遂行되었다. 表-1은 66年, 85年, 86年의 15日 連續觀測潮流의 調和分析結果<sup>(5)(14)(15)</sup>이다.

表-1에서 66年의 結果는 隣近 C1 定點에서 的 近年의 分析結果와 分潮의 振幅이 相異하여 C1, C2의 結果만을 取하고자 하는 데 位相은 全般的인 一致를 C1과 보이는 것으로 보아 潮流의 季節的 變化等的 變動要素를 감안하더라도 流況이 20年 期間을 通해 바뀐 것으로도 推定된다. 두 位置의  $M_4/M_2=0.10\sim 0.24$ 로서  $M_4$  分潮의 影響이 相當히 크며 位相은  $2K_{M_2}\approx K_{M_4}$ 의 傾向을 나타내어 두 分潮의 複合된 潮流形態는 落潮<sup>(19)</sup>에 比해 상대적으로 짧은 漲潮時間과 강한 尖頭漲潮流速으로 特徵지워진다. 群山內港과 外港에서 的  $M_2$  潮位의 上記分析에 의한  $M_2$  潮流와 的 位相差는 各己  $70^\circ, 78^\circ$ 로서 進行波보다 定常波의 狀況에 漸近하는 것을 알 수 있는 데 이 是 外海潮汐이 錦江河口로 波及되는 過程에서 縮小된 河口의 地形效果와 알아지는 水深에 의해 反射效果를 갖는 것으로 解析된다. 그림 4와 그림 5는 85年 6月 大潮時, 小潮時의 潮位(點線) 및 潮流(實線) 觀測曲線으로 內港과 外港位置의 漲潮가 優勢한 潮流形態 및 潮流와 潮位의 位相差가 잘 提示되어 있다.

錦江河口 潮汐의 非線形效果는 潮位의 境遇에도 뚜렷한 데 이 海域의 利用可能한 潮位資料의 分析結果<sup>(18)</sup>는  $M_4/M_2$ 의 比가 古群山諸島의 末島, 河口入口에 位置한 竹島, 群山外港, 群山內港, 望月里 河口둑位置에서 各己 0.032, 0.042, 0.065, 0.087, 0.117로서  $M_4$  分潮의 影響이 擴大된다. 그림 6은 群山內港에서 的 1年 潮位(77年)의 스펙트럼으로서 潮位에너지가 1/4日, 1/6日 分潮에서 뚜렷하여 1/8日 分潮에서도 에너지가 集中되어 있으며 相應하는  $M_4, MS_4, M_6$  分浸의 振幅은 19cm, 12cm, 4.5cm로서 世界的으로도 錦江河口의 現象이 가장 뚜렷하다.

$M_2$  分潮와  $M_4$  分潮의 複合現象에 의한 그림 4

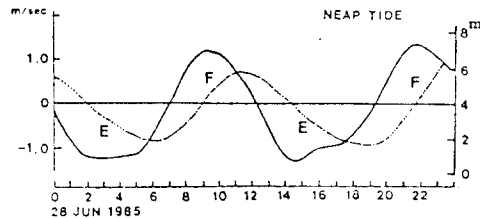
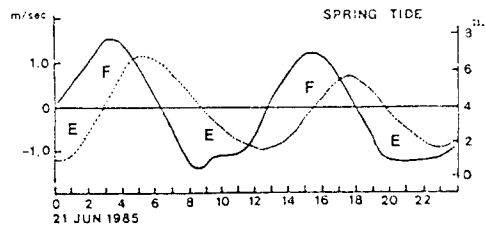


그림 4. C1에서 的 大潮 및 小潮時 觀測潮位(點線) 및 潮流(實線)

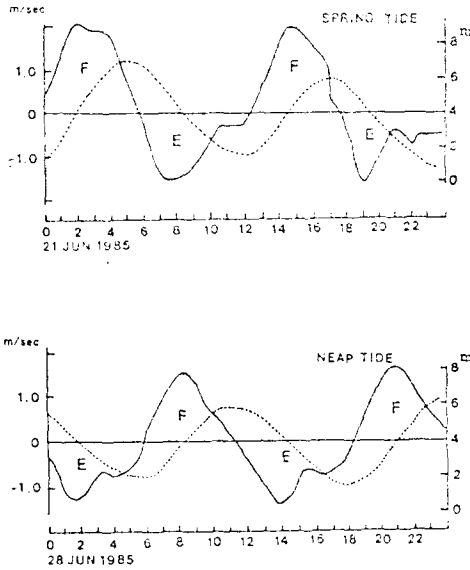


그림 5. C2에서의大潮 및 소潮時 觀測潮位(點線) 및 潮流(實線)

와 5에 提示된 潮流體系에서는 漲潮持續時間이 落潮持續時間보다 짧지만 流速의 自乘을 積分한 값을 比較하면 오히려 漲潮時가 큰 값을 갖게되며 벡터平均된 應力의 方向도 漲潮流의 方向이 된다. 따라서 海底土砂(掃流砂)의 實質的인 移動은 尖頭流速(漲潮)의 方向으로 일어나는 데  $M_2$  分潮와  $M_4$  分潮의 流速方向이 一致할 境遇 더 確定的인 推論이 可能하다.<sup>(19)</sup> 錦江河口의 內域에서의 潮流流動은 水路를 따라 往復性向이므로 尖頭應力 卽 尖頭流速의 方向이 掃流砂의 移動方向을 提示한다는 假定은 妥當한 것으로 두 流速觀測의 結果 및 그림 7과 그림 8에 提示된 平均大潮時와 平均小潮時의 底層(水深의 10/8 位置) 尖頭流速의 優勢方向을 根據로 한 推論은

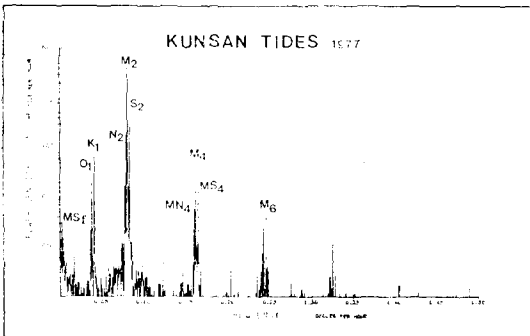


그림 6. 1977年 群山內港 관측조위의 스펙트럼

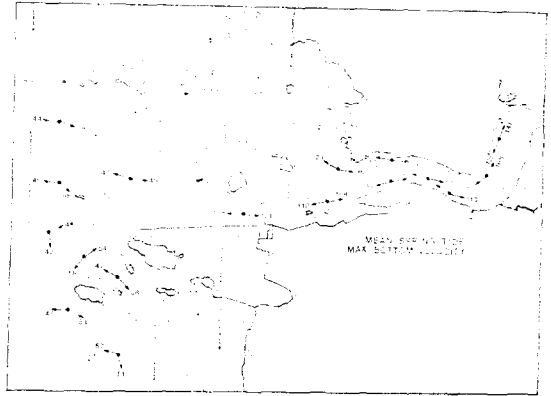


그림 7. 錦江河口의 平均大潮時 底層의 最大流速 벡터分布

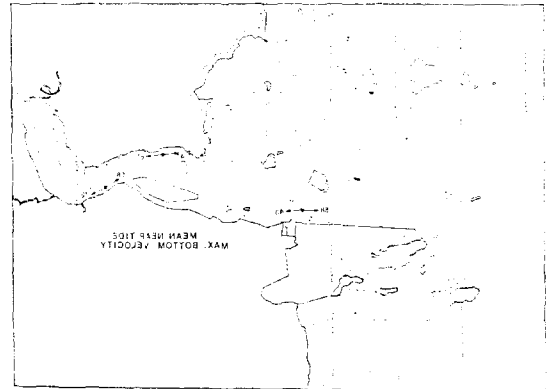


그림 8. 錦江河口의 平均大潮時 底層의 最大流速 벡터

錦江河口體系의 土砂移動은 基本的으로 上流側으로 移動한다는 것(up-estuary migration)으로 潮流에 의한 이 移動機構(transport mechanism)에 의해 長期的으로 錦江河口의 砂洲가 形成된 것으로 初期推定된다.

### 3. 河口獨建設에 의한 堆積體系의 變化

前節에 叙述된 潮流에 의한 尖頭應力의 強度와 方向이 海底土砂의 移動方向을 決定한다는 接近方法을 採擇하여 錦江河口의 潮汐體系를 再現시키는 數值모델을 樹立하여 尖頭應力의 分布를 算定하고 또한 河口獨에 의해 潮汐傳播가 遮斷된 狀況에서의 相應하는 尖頭應力分布를 比較檢討함으로써 堆積體系의 變化可能性을 診斷하고자 한다.

그림 9는 廣域의 錦江河口의 2次元潮汐모델의 有限格子體系로서, 總格子數는 23,103個이며 格子間隔은 300m이다. CFL 安定條件이 安

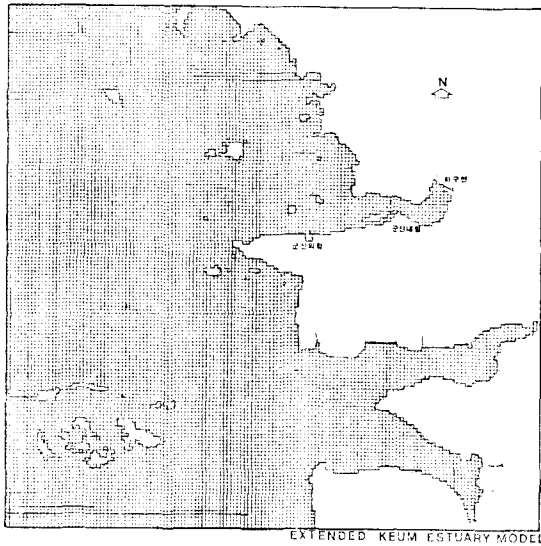


그림 9. 錦江河口 潮汐모델의 2次元 有限格子體系

定된 計算을 위한 指針으로 利用되어 決定된  $\Delta t$  는 11,943 秒로서 每潮汐週期當 3,744 個의 timestep 을 形成하였다. 利用된 數值積分法은 移流 加速項과 海底摩擦項이 包含된 直交座標系上의 非線形 潮汐方程式<sup>(20)</sup>을 每時間間隔 積分하므로써 水位 및 流速을 算定하는 데 移流加速項의 境遇, angled-derivative 技法<sup>(21)</sup>을 利用하였다. 外海境界條件은 時間에 따른 海面水位 및 流速 成分의 變化로서 規定지워지는 데 外海境界를 다른 潮汐觀測資料가 無어 推論한 이 海域의 等 潮汐圖<sup>(18)</sup>로부터 代表潮汐의 振幅과 位相을 抽出하여 入力하였다. 모델에서 外海開放境界의  $M_4$  潮汐은 入力되지 않았으며 內部的으로 發生 하는 것으로 初期推論하였다. 水深資料는 이 海域의 海圖와 沿岸地形圖들로부터 再編輯하여 平均海面下의 水深으로 換算되어 모델에 入力되었 는 데 이 水深資料에 의한 等深線이 그림 2에 提示된 바 錦江河口의 複雜한 海底狀況은 滿足 스텝게 解像되고 있다. 一連의 數值實驗을 통하여 算定値와 沿岸潮位觀測値가 서로 漸近하도록 努力하였는 데 海底摩擦係數  $K_b$ 는 아래와 같이 水深( $H$ )에 따라 變化하도록 하였다(심해의  $M_2$  潮汐에 대해 最適値인  $K_b=0.0025$ <sup>(20)</sup>와 淺水效果는 증가하는 값을 취함).

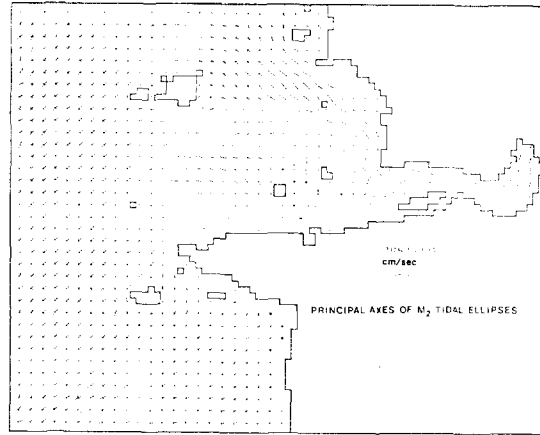


그림 10. 모델에 의해 算定된  $M_2$  潮流橢圓의 配列

$H > 25.0(m)$	$K_b = 0.0025$	
$20.0 < H < 25.0$	$K_b = 0.0030$	(1)
$15.0 < H < 20.0$	$K_b = 0.0035$	
$10.0 < H < 15.0$	$K_b = 0.0040$	
$H < 10.0$	$K_b = 0.0045$	

淺海에서 海底의 摩擦消散率이 높아 初期攪亂이 빨리 除去되어 4 潮汐週期의 結果를 取하였다. 그림 10은 河口의 內部域에서의 算定된 平均潮汐狀況의 潮流橢圓의 長, 短軸의 配列을 提示하는 데 潮流의 回轉性은 一般的으로 反時計方向이나 群山內, 外港의 接近水路와 大竹島北端의 水路에서의 潮流는 回轉性이 無는 往復性潮流임이 뚜렷하게 提示된다. 모델로부터의 海底摩擦應力  $\tau_B$  은

$$\tau_B = \rho K_b u |u| \quad (2)$$

의 式으로 算定되는 데 平均摩擦應力  $\overline{\tau_B}$  은  $\overline{|u|u|}$  로부터 尖頭摩擦應力  $\tau_{max}$  는  $u_{max}|u_{max}|$  로부터 구해진다. 여기서 유속  $u$  는 모델로부터 算定된 수심평균 유속이다. 河口獨이 建設되어 潮汐傳播가 遮斷되기 前(open barrier)과 完全히 遮斷된 狀況(closed barrier)의 모델에 의해 算定된 平均潮汐狀況에서의 尖頭應力벡터의 分布가 그림 11과 그림 12에 各已 提示되는데 이 最大摩擦應力은  $M_2$  潮汐과  $M_4$  潮汐의 應力에 潮汐恒流에 의한 應力도 加算된 結果이다. 그림 11에서 的 應力벡터의 分布를 보면 오식島左側, 有父島

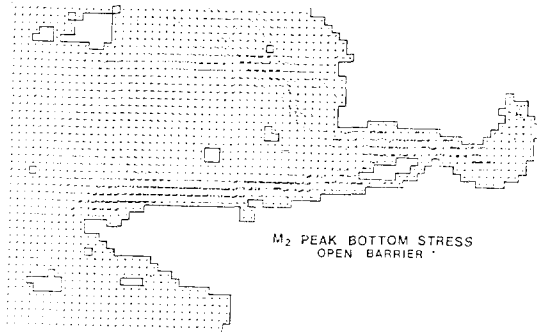


그림 11. 하구둑 建設前의 海底摩擦應力 벡터의 分布(모델 結果)(1 격자=1N/m<sup>2</sup>)

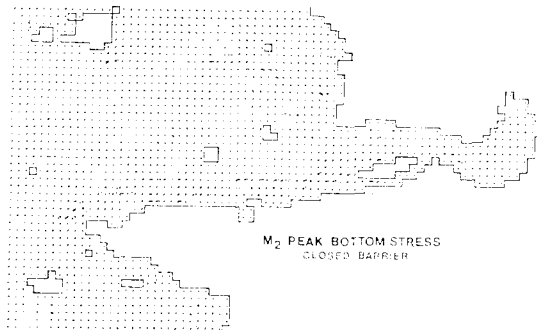


그림 12. 하구둑 建設後의 海底摩擦應力 벡터의 分布(모델 結果)(1 격자=1N/m<sup>2</sup>)

左側, 長項港 西側水路에서 벡터의 收斂(converging) 및 潮汐渦(tidal eddy)의 形態를 보여 堆積을 誘發시키는 것으로 砂洲들의 形成機構를 說明할 수 있으며 大竹島 北西間에서는 右側方向의 벡터와 河口入口(長項)에서는 西側方向의 벡터가 示唆하는 土砂移動에 의해 大竹砂洲의 長期的 形成機構가 說明된다. 또한 內港과 河口 碇區間의 上流側 方向의 應力벡터는 土砂移動이 上流側으로 일어나 龜浦砂洲의 形成要因이며 外港水路에서의 應力벡터는 西向으로 掃流砂의 移動은 外海側으로 일어난다. 그림 12에 提示된 河口둑 建設後의 뚜렷한 變化는 外港接近水路에서의 全體的인 應力벡터가 東向으로 反轉되어 內側으로의 土砂移動이 提示되는 點과 內港과

河口碇 區間은 流速減少로 인하여 이 區間에서 의 潮流에 의한 土砂移動은 顯著히 減少되는 點이다. 그림 13과 그림 14는 河口둑 建設前後 尖頭應力의 等值線圖를 提示하는 데 外港水路에서 算定된 尖頭應力은 1N/m<sup>2</sup>(10dyn/cm<sup>2</sup>) 이상을 유지하므로 外港前面의 海底質의 中央粒徑은 0.053~0.163mm인 泥土質土砂이므로 이러한 土砂를 移動시키기 위한 限界應力인 2~2.2dyne/cm<sup>2</sup>(22) 보다 5倍程度 超過하는 바 潮流에 의한 充分한 掃流力이 發生된다.

#### 4. 結 論

M<sub>2</sub>分潮 및 M<sub>4</sub>分潮의 相互作用이 主가 되는 錦江河口의 非線形潮汐現象이 河口內域에 發達된 砂洲의 形成機構에 重要な 役割을 하고 있음

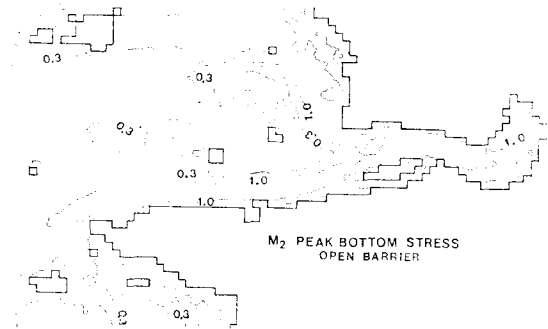


그림 13. 하구둑 건설前의 海底摩擦應力의 等值線(단위 : N/m<sup>2</sup>)

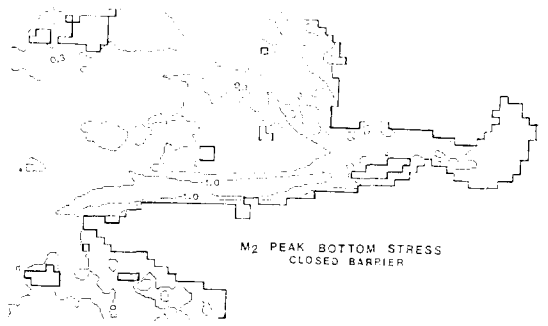


그림 14. 하구둑 建設後의 海底摩擦應力의 等值線(단위 : N/m<sup>2</sup>)

을 提示하였다. 河口둑에 의해 上流로의 潮汐傳播가 遮斷될 境遇에 現存의 堆積體系는 內港과 河口둑區間, 外港水路 및 長項港 西側水路에 長期的으로 뚜렷한 變化가 있을 것으로 海底의 尖頭應力分布를 潮汐數值모델로 부터 算定하여 推論하였다. 重要的 事項은 現存의 外港水路는 落潮가 優勢하여 全體的으로 安定性있는 水路를 維持하는 것으로 보여지는 데 河口둑에 의해 흐름이 最強漲潮가 最強落潮보다 優勢한 水路로서 反轉되는 現象이 推定되므로 이 境遇 적어도 掃流砂를 排出시킬 수 있는 能力은 減少된다. 勿論 이 推定에서 潮流와 河川流量, 外海沿岸流, 波浪과의 相互作用은 考慮되지 않았으므로 이러한 外力조건들이 조류현상과 복합되어 實際의 土砂移動은 더욱 複雜한 樣相을 이룰 것이다. 또 한 建設된 河口둑의 河川으로 부터 供給되는 土砂를 遮斷시킬 수 있는 實質의 能力에 의해서도 外港水路부의 掃流砂移動이 影響을 받을 것이다.

#### 參 考 文 獻

- 1) 崔秉昊, 1984. 우리나라 主要港灣의 潮位分析. 韓國測地學會誌, 第3卷 第1號, pp.10~30.
- 2) Aubrey, D.G. and Speer, P.E., 1985. A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems, Part 1: observations. Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol.21, pp. 185~205.
- 3) 崔秉昊, 1986. 錦江河口 潮間帶 砂洲의 變遷過程, 港灣協會誌(港灣) 1986.10.
- 4) 李錫祐, Personal Communications
- 5) 金三文, 1966. 群山港의 潮流. 水路年報, pp.164~181.
- 6) 國立建設研究所; 1968. 群山港水理模型實驗資料調查 綜合報告書. 都進綜合設計.
- 7) 建設部; 1970. 群山外港 基本計劃報告書.
- 8) 湖南國土建設局; 1969. 群山外港開發基本計劃調查報告書.
- 9) 建設部; 1977. 航路整備調查報告書.
- 10) 產業基地開發公社; 1979. 群山臨海工業基地 基本計劃樹立을 위한 海洋調査.
- 11) 群山港建設事務所; 1980. 群山外遊浮港砂 調查研究報告書.
- 12) 農業振興公社; 1983. 錦江( )地區河口堰 水文調査報告書.
- 13) 群山港建設事務所; 1982. 群山港 水深測量 用役報告書.
- 14) 仁川地方海運港灣廳; 1984. 浚渫計劃 및 次年度 調查用役報告書.
- 15) 群山港建設事務所; 1985. 錦江河口 水理現象調査報告書(中間報告).
- 16) 群山港建設事務所; 1985. 錦江河口水理現象調査報告書.
- 17) 群山港建設事務所; 1986. 錦江河口水理現象調査 現地資料 調査報告書.
- 18) 崔秉昊, 李錫祐, 1986. 錦江河口の 觀測潮汐. 港灣協會誌(港灣), 1986.10.
- 19) Pingree, R.D. and Griffiths, D.K., 1979. Sand transport paths around the British Isles resulting from  $M_2$  and  $M_4$  tidal interactions. J. Mar. Biol. Ass. U.K., Vol.59, pp.497~513.
- 20) 崔秉昊, 1980. 黃海 및 東支那海의 潮汐모델. 海洋開發研究所 報告書 80-02.
- 21) Roberts, K.V. and Weiss, N.O., 1967. Convective difference schemes. Math. Comput., Vol.20, pp.272~299.
- 22) Sternberg, R.W., Larsen, L.H. and Miao, Y. T., 1985. Tidally-driven sediment transport on the East China Sea continental shelf. Continental Shelf Research, Vol.4, Nos. 1/2, pp.105~120.