東支那海의 循環 및 油類擴散모델

Circulation and Oil Spill Movement Models of the East China Sea

崔 秉 昊*
Choi, Byung Ho

Abstract

The initial stage of an investigation aimed at setting up a system for the prediction of tides and surges in the Yellow Sea and East China Sea are described. The structure of the proposed scheme is to take pressure data from the weather charts, then to process the data in order to provide the necessary meteorological forcing data to the sea model, which then computes the associated waterlevels and currents. The procedure of predicting the drift and spreading of pollutants using the flow field from the tide and surge computation scheme are also briefly described. Some preliminary results of predicting oil spreading in the Inchon Bay are presented and discussed. An indication of further development of the system is also given.

要 旨

黃海와 東支那海의 潮汐 및 海溢을 推定하기 위한 體系樹立의 初期硏究課程이 敍述되었다. 提示된 體系는 日氣圖의 氣壓資料로부터 氣象外力入力資料를 作成하여 海洋모델에 의하여 海水位變化와 海流를 算定하는 技法이 骨格을 이룬다. 이 初期體系에 의해 算定된 流況을 利用하여 汚染物質의 移動擴散을 推定하는 過程도 簡單히 敍述되었으며 仁川灣의 油類擴散 및 移動推定의 初期結果가 提示되었으며 또한 討議되었다. 提示된 體系의 追後改善을 위한 討議도 收錄되었다.

1. 序 論

力學原理에 立脚한 垂直積分된 2次元 水動力學的 數値모델은 實際海面의 變化를 滿足하게 算定할 수 있음이 過去 20餘年間의 硏究를 通해 立證되어 沿岸地形變化에 따른 潮位의 變化推定 및 暴風海溢을 豫報하는 體系에까지 널리 利用되어 왔다. 2次元모델에 의해 算定되는 水深平均된 流速分布는 槪略的인 海水流動 및 海水輸送量을 評價하는데 亦是 利用되어 왔다. 그러나 淺海에서의 汚染物質 및 浮遊砂, 掃流砂 等의 擴散, 移動樣相을 糾明하는 데는 海流의 3次元的 分布에 대한 資料가 必須的이다. 이러한 3次元的 海流分布를 廣大한 海域에서의 現場觀測을 通해 調査하는 데는 技術的, 財政的으로 큰 難點이 있으므로 海水의 內部摩擦에 관한 適切한 假定을 根據로 한 3次元數値모델이 비로소 適

*正會員·成均館大學校 工科大學 副敎授, 土木工學科

用되기 始作하고 있으며 이의 開發 및 改善을 위한 硏究는 앞으로 數年間 繼續될 展望이다[1]. 이러한 趨勢에 부응하여 前回의 硏究에서 提示된 東支那海 및 京畿灣모델은 本 硏究에서는 實際氣象 및 潮汐狀況下에서의 3次元的 實際海流(three-dimensional real time current)를 算定할 수 있는 體系로서 改善이 이루어 졌다. 前半部의 硏究는 實際의 氣象條件 및 潮汐狀況下의 海水流動을 短期豫報 또는 hindcast하는 海洋豫報體系를 樹立하는 데 力點을 두었으며 後半部는 이를 土臺로 各種擴散모델(油類擴散, 浮遊砂 및 掃流砂移動, 汚染物質 및 熱擴散移動)의 骨格을 作成한 바 油類擴散境遇를 例示하였다.

이러한 數値모델硏究는 現場海洋觀測資料와 서로 補完하며 改善이 遂行되고 있는 데 現在까지 潮位觀測 分析結果는 黃海, 東支那海의 全沿岸에 걸친 資料들로서 潮汐모델의 檢證을 위해 利用되었으며 實際海面의 檢證은 現在 우리나라 沿岸觀測所資料만이 利用되나 不遠間 中國의 資料들이 國際資料센타를 通해 入手可能할 것으로 여겨진다. 또한 1980~81年期間의 美國·中共共同海流觀測資料가 모델의 算定海流를 檢證하기 위해 1次的으로 利用되었으며 1985~86年期間에는 黃海全域에 걸친 長期現場海流觀測프로그램이 推進中인 바 이 海域의 모델들은 더 精密度를 갖는 豫報모델로서 改善될 수 있는 展望이 있다.

現在 國際的인 協力은 1981年 每2年 會議로서 組織된 東海·東支那海硏究(Japan and East China Sea Study) 프로그램 및 1980~83年期間의 美·中共 共同海洋觀測프로그램을 通해 이루어지고 있다. 또한 1980年 沿岸에서의 汚染物質의 輸送에 관한 WESTPAC 會議에서는 汚染物質의 擴散 및 輸送이 海洋 및 沿岸海水의 動的循環特性에 의해 直接的인 影響을 받는 바 各國이 "Survey of current and tide in the coastal and nearshore waters of WESTPAC region"事業에 積極 參與하기를 勸奬하였으며 1981年의 Jakarta WESTPAC-Ⅱ會議에서는 이 課題를 沿岸 및 陸棚海洋學의 主課題로서 選定한 바 本 硏究는 이러한 趣旨와도 脈絡을 같이하여 遂行되었다.

2. 海水循環모델

非線形 移流項을 包含하는 2次元 連續方程式과 運動方程式은 海水密度는 均一하다는 假定下에 球面座標系와 直交座標系에서 下記와 같이 記述될 수 있다.

여기서 x, y는 直交座標系, χ, ϕ는 球面座標系이며 t는 時間, ξ는 海面變位, h는 靜水面下水深, $H=h+\xi$, ρ는 海水密度, R은 地球의 半徑, ω는 地球回轉의 角速度, g는 重力加速度, P_a는 海面 氣壓, f는 地球의 偏向力係數, F_s, G_s는 各己 東向, 北向의 바람에 依한 海面應力,

$$\frac{1}{R\cos\phi}\left\{\frac{\partial}{\partial\chi}(Hu)+\frac{\partial}{\partial\phi}(Hv\cos\phi)\right\}+\frac{\partial\xi}{\partial t}=0, \tag{1}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{u}{R\cos\phi}\frac{\partial u}{\partial\chi}+\frac{v}{R}\frac{\partial u}{\partial\phi}-\frac{uv\tan\phi}{R}-2\omega\sin\phi v+\frac{k_b u\sqrt{u^2+v^2}}{H}+\frac{g}{R\cos\phi}\frac{\partial\xi}{\partial\chi}$$
$$-\frac{F_s}{\rho H}+\frac{1}{\rho R\cos\phi}\frac{\partial P_a}{\partial\chi}=0, \tag{2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{u}{R\cos\phi}\frac{\partial v}{\partial\chi}+\frac{v}{R}\frac{\partial v}{\partial\phi}+\frac{u^2\tan\phi}{R}+2\omega\sin\phi u+\frac{k_b v\sqrt{u^2+v^2}}{H}+\frac{g}{R}\frac{\partial\xi}{\partial\phi}$$
$$-\frac{G_s}{\rho H}+\frac{1}{\rho R}\frac{\partial P_a}{\partial\phi}=0, \tag{3}$$

$$\frac{\partial\xi}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(Hu)+\frac{\partial}{\partial y}(Hv)=0, \tag{4}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}-fv+\frac{ku(u^2+v^2)^{1/2}}{H}+g\frac{\partial\xi}{\partial x}+\frac{1}{\rho}\frac{\partial P_a}{\partial x}-\frac{F_s}{\rho H}=0, \tag{5}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+fu+\frac{kv(u^2+v^2)^{1/2}}{H}+g\frac{\partial\xi}{\partial y}+\frac{1}{\rho}\frac{\partial P_a}{\partial y}-\frac{G_s}{\rho H}=0, \tag{6}$$

u, v는 東向, 北向의 水深平均된 流速으로 $u=\frac{1}{H}\int_{-h}^{\xi}u'dz$, $v=\frac{1}{H}\int_{-h}^{\xi}v'dz$인데 u', v'는 水深 z에서의 流速成分이다. (1)~(3)式 및 (4)~(6)式은 Sielecki-Hansen의 格子體系에서 有限差分法으로 近似解를 求하는 데 仔細한 過程은 이미 紹介[2,3]되었으므로 여기서는 省略한다. 解는 $\xi=u=v=0$인 初期靜止條件으로부터 求해지는데 境界條件으로는 陸地의 閉鎖境界面에 直角인 成分의 流速은 없는 것으로 假定하였으며 外海의 開放境界는 海水面의 變化 ξ를 時間과 空間의 函數로서 提示하며 放射條件이 더불어서 賦與된다.

非線形 移流項을 除外하는 3次元連續方程式과 運動方程式은 海水密度가 均一하다는 假定下에 球面座標系와 直交座標系에서 아래와 같이 記述될 수 있다.

$$\frac{\partial\xi}{\partial t}+\frac{1}{R\cos\phi}\left[\frac{\partial}{\partial\chi}\int_0^h u\,dz+\frac{\partial}{\partial\phi}\int_0^h v\cos\phi\,dz\right]=0, \tag{7}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}-fv=\frac{-g}{R\cos\phi}\frac{\partial\xi}{\partial\chi}+\frac{\partial}{\partial z}\left(N\frac{\partial u}{\partial z}\right)-\frac{1}{\rho R\cos\phi}\frac{\partial P_a}{\partial\chi}, \tag{8}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+fu=\frac{-g}{R}\frac{\partial\xi}{\partial\phi}+\frac{\partial}{\partial z}\left(N\frac{\partial v}{\partial z}\right)-\frac{1}{\rho R}\frac{\partial P_a}{\partial\phi}, \tag{9}$$

$$\frac{\partial\xi}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\int_0^h u\,dz+\frac{\partial}{\partial y}\int_0^h v\,dz=0, \tag{10}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}-fv=-g\frac{\partial\xi}{\partial x}-\frac{1}{\rho}\frac{\partial F}{\partial z}-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P_a}{\partial x}, \tag{11}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+fu=-g\frac{\partial\xi}{\partial y}-\frac{1}{\rho}\frac{\partial G}{\partial z}-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P_a}{\partial y}, \tag{12}$$

여기서 u, v는 水深 z에서의 東向, 北向의 流速成分이며 F, G는 各己 東向, 北向의 流體內部剪斷力이다.

$$F=-\rho N\frac{\partial u}{\partial z},\quad G=-\rho N\frac{\partial v}{\partial z} \tag{13}$$

인데, N은 垂直渦粘性係數이며 (χ,ϕ,z,t) 또는 (x,y,z,t)의 函數로서 假定한다. 上記式을 풀기 위해 表面과 海底의 境界條件이 다음과 같이 提示된다.

$$-\rho\left(N\frac{\partial u}{\partial z}\right)_0=F_s,\quad -\rho\left(N\frac{\partial v}{\partial z}\right)_0=G_s \tag{14}$$

$$-\rho\left(N\frac{\partial u}{\partial z}\right)_h=F_B,\quad -\rho\left(N\frac{\partial v}{\partial z}\right)_h=G_B \tag{15}$$

여기서 F_s, G_s는 東向, 北向成分의 바람에 依한 海面應力을, F_B, G_B는 東向, 北向의 海底摩擦力을 提示한다. 海底의 滑動境界條件을 取할 때 $F_B=k_b\rho u_h(u_h^2+v_h^2)^{\frac{1}{2}}$, $G_B=k_b\rho v_h(u_h^2+v_h^2)^{\frac{1}{2}}$인데 k_b는 海底摩擦係數이다. 上記式들의 解는 水平方向의 두 流速成分 u, v를 水深從屬的인 連續函數 $f_r(z)$와 水平的으로 空間 및 時間의 函數인 A_r, B_r을 Galerkin 方法에 依해 展開하므로서 求해진다. 仔細한 敍述은 京畿灣의 3次元모델[4], 東支那海의 3次元모델[5]의 硏究를 통해 이루어졌으므로 再述치 않는다.

3. 擴散모델

2次元 移流擴散모델의 基本方程式은 다음과 같다.

$$\frac{\partial c}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(E_x\frac{\partial c}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(E_y\frac{\partial c}{\partial y}\right)-u\frac{\partial c}{\partial x}-v\frac{\partial c}{\partial y} \tag{16}$$

여기서 u, v는 流速成分이며 E_x, E_y는 方向別擴散係數이며 c는 保存量의 濃度를 나타낸다. 亂流擴散 및 移流에 依한 變位 및 擴散을 考慮한 擴散係數 E_x, E_y는 一般的으로 流速成分에 比例하게 現場觀測을 通하여 取하는 것이 常例이다. 有限差分體系로 展開된 上記式은 線形聯立方程式의 體系이며 Multi-stage Implicit 方法[6]에 依해 滿足할 만한 解를 求할 수 있다.

保存量의 濃度의 潮汐週期內의 短期推定(short-term prediction)을 위해서는 前述된 循環모델에서 算定된 瞬間流速이 入力되며 適切한 初期條件과 境界條件이 取해진다. 初期境界條件은 全 모델海域에 任意의 濃度를 賦與하거나 外部로부터 物質이 投入될 境遇는 全海域의 初期濃

度는 없는 것으로 規定한다. 閉鎖境界面에서의 境界條件은 境界面을 가로질러 移流, 擴散이 일어나지 않는 것으로 하였다. 汚染物質源은 任意位置에서 任意濃度가 瞬間的으로 放流(slug discharge)되는 境遇, 持續的 및 斷續的인 境遇를 各己 明示할 수 있도록 하였다. 이 短期推定 모델의 格子體系는 2 km 以下의 細部格子循環모델(仁川灣모델, 京畿灣南部海域모델 및 細部格子黃海모델)과 結合하여 運用될 수 있도록 하였다. 汚染物質의 擴散移動을 長期推定(long term prediction)하는 體系도 亦是 樹立되었는 데 이 境遇는 循環모델에서 算定된 瞬間流速은 潮汐週期平均된 恒流流速 및 바람에 의한 恒流成分, 河川流出水에 依한 流速 等이 (16)式의 u, v 成分으로 入力된다. 長期推定모델은 ADI 方法(Alternating Direction Implicit)[7]이 利用되어 數値解를 求하였는 데 Δt 는 1~2 日을 取하였으며 E_x, E_y 는 恒流流速에 關聯되므로 短期推定모델의 境遇보다 큰 값을 取한다. 上記의 두 形態의 移流擴散은 그 時間縮尺이 다르므로 獨立的인 모델로 運用되었는 데 仔細한 適用結果는 別途로 報告될 예정이다.

4. 油類擴散過程 및 모델

油類流出 擴散形態의 物理機構를 調査하기 위해서는 海水의 流動現象에 관한 適確한 知識이 必要하다. 이는 油類擴散이 流出된 油類와 海洋水의 水動力學的 狀況과의 相互過程에 의해 일어나기 때문이다. 水動力學的 狀況은 循環모델을 基礎로한 實際海流豫報體系에 의해 時間的, 空間的으로 推定이 遂行된다. 流出된 油類擴散은 여러 段階에 걸쳐 그 形態가 外力平衡에 의해 變形된다. 外力平衡條件은 重力-貫性力, 重力-粘性力, 表面張力-粘性力 및 表面蒸發이 包含되며 流出油類의 量 및 特性도 重要하다. Fay[8] 및 Hoult[9]는 이를 便宜上 3 段階의 領域으로 나누어 各 領域에서 軸對稱 擴散半徑을 다음과 같이 提示하였다.

重力-貫性力領域 : $r(t)=1.14(\Delta g\, Vt^2)^{\frac{1}{4}}$ (17)

重力-粘性力領域 : $r(t)=1.45(\Delta g\, V^2 t^{\frac{3}{2}}/\nu^{\frac{1}{2}})^{\frac{1}{8}}$ (18)

表面張力領域 : $r(t)=2.3(\sigma^2 t^3/\rho^2\nu)^{\frac{1}{4}}$ (19)

여기서 r 은 擴散半徑(m), t 는 時間(秒), V 는 流出體積(m³), g 는 重力加速度, $\Delta=(\rho-\rho_0)/\rho$; ρ 는 海水密度, ρ_0 는 油類의 平均密度(kg/m³), ν 는 물의 動粘性係類(m²/sec)이며 σ 는 表面張力(kg/sec²)이다. 그림 1은 油類의 流出體積에 따른 各 領域과 時間과의 關係를 提示하고 있는데 各 段階의 最終時間과 식 (17)~(19)의

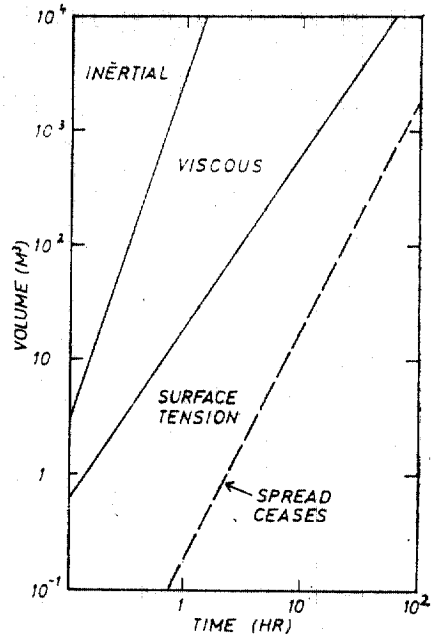

그림 1. 油類擴散領域의 所要時間[9]

半徑을 展開하면 下記式으로 各己 提示된다.

慣性力에 의한 流出(inertial spread)

$$t_i=(1.27)^4(V/\Delta g\nu)^{\frac{1}{3}} \quad (20)$$

$$r_i=(1.45^2/1.14)(\Delta g\, V^5/\nu^2)^{\frac{1}{12}} \quad (21)$$

粘性力에 의한 流出(viscous spread)

$$t_v=(1.45/2.30)^2(\rho/\sigma)(\Delta g\nu)^{\frac{1}{3}}V^{\frac{2}{3}} \quad (22)$$

$$r_v=(1.45^{\frac{3}{2}}/2.30^{\frac{1}{2}})(\rho\Delta g\, V^2/\sigma)^{\frac{1}{4}} \quad (23)$$

表面張力에 의한 流出(surface tension regime)

$$t_s=(10^{10}V^{\frac{3}{2}}\rho^2\nu/\pi^2(2.30)^4\sigma^2)^{\frac{1}{3}} \quad (24)$$

$$r_s=(10^5 V^{\frac{3}{4}}/\pi)^{\frac{1}{2}} \quad (25)$$

流出油類의 特性 및 體積이 明示되면 式(20)~(25)에 의해 初期擴散移動半徑이 決定되며 潮流와 바람에 의한 海流에 의한 油類輸送이 評價된다. 過去의 研究[10]들은 바람에 의해 惹起되는

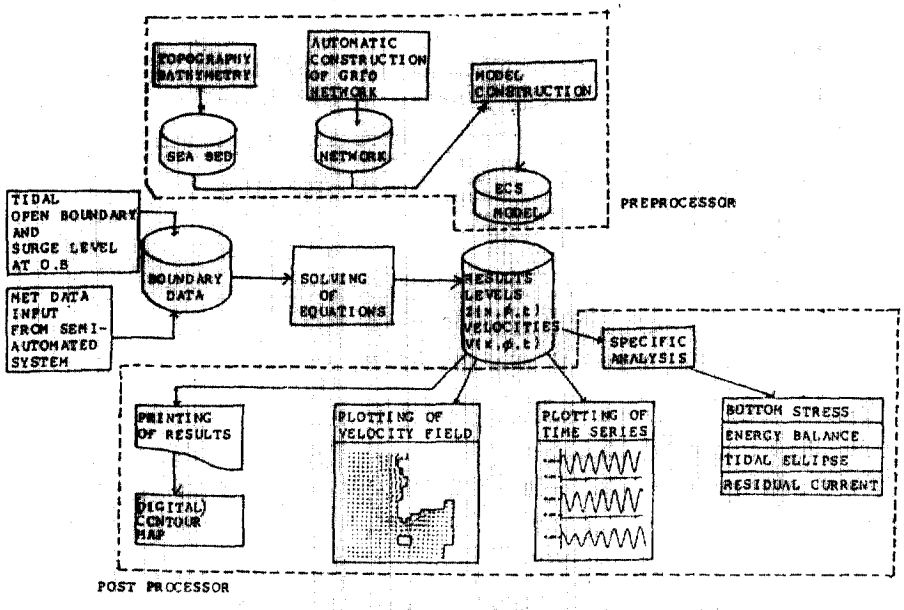

그림 2. 黃海와 東支那海의 實際海流算定體系의 概略圖

海流의 强度를 風速의 3%로서 取하여 利用하였으나 本 硏究에 提示되는 方法은 모델에 依한 實際海流豫報體系에 依한 것이다.

前述된 初期擴散過程에서 流出된 油類의 物理的, 化學的, 生物學的인 過程에 依한 質量變化(emulsification, biogradation, evaporation)는 現段階에서 考慮하지 않았으며 短週期 風波에 依한 海流도 除外하였다.

最終的으로 海洋 및 氣象條件에 依한 一定期間(N日間) 油類擴散 및 移動距離(R_N)는 下記와 같이 提示된다.

$$R_N=\sum_{i=1}^{N}(r_{si}+r_{wi}+r_{ti}) \qquad (26)$$

여기서 r_{si}는 i번째 날의 擴散移動半徑, r_{wi}는 i번째 날의 바람에 依한 海流에 依한 移動距離, r_{ti}는 i번째 날의 潮流에 依한 恒流에 依한 移動距離이다. 制限條件으로 最强潮流에 依한 3時間移動距離를 R_T이라 할 때 $R_N \leq R_T$인 境遇에는 $R_N=R_T$로서 制限시킨다. 式(26)은 流速樣相이 緩慢히 變하는 海域에서의 流出油類에 依한 被害區域을 設定하는 基準으로 提示된다.

5. 體系의 構成

前述된 循環모델(2次元, 3次元모델)을 根幹으로 하는 實際海流의 hindcast 및 豫報體系가 그림 2에 提示되어 있다. 循環 모델의 氣象入

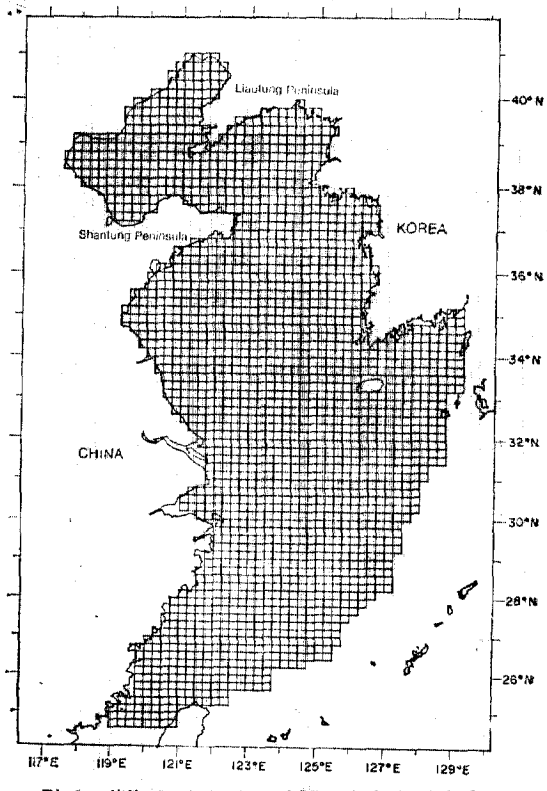

그림 3. 黃海와 東支那海 陸棚모델의 格子體系

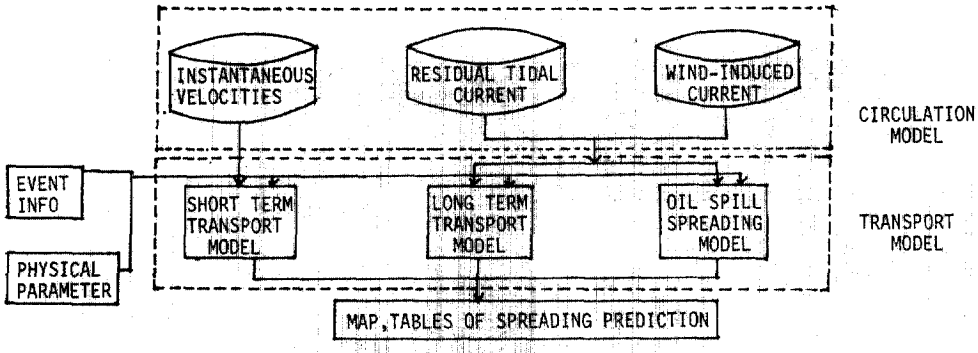

그림 4. 汚染物質의 擴散·移動推定體系의 概略圖

力을 短時間에 遂行하는 過程을 樹立하는 데 주력하였는 바 on-line digitizing 體系를 利用하여 日氣圖의 等壓線을 digitizing 하기만 하면 一連의 interactive 프로그램을 利用하여 그림 3에 提示된 陸棚모델의 每 格子마다 風速, 海面應力 및 氣壓傾斜가 算定되어 最小限의 手作業에 依해 過程이 處理되도록 하였다. 循環모델에 依해 算定된 瞬間流速들은 file 로서 作成되어 特定分析 및 擴散모델과 油類擴散 및 移動모델에 入力된다. 그림 4는 保存物質의 特性 및 狀況을 規定하는 入力에 依해 擴散 및 移動樣相을 推定하는 體系를 提示하고 있다.

敍述된 體系를 利用하여 實際海流 및 汚染擴散推定을 短時間에 on-line 作業으로 遂行하여 狀況對處를 위한 決定에 直接的으로 도움이 될 資料를 即刻的으로 提供하기 위해서는 高速의 컴퓨터가 必要한 데 國際的인 趨勢는 이러한 豫報體系는 vector array processing 電算組織에 樹立되고 있다. 代案으로서 統計的으로 過去의 氣象 및 海洋狀況을 類形化하고 亦是 敍述된 體系를 利用하여 諸類形에 對한 豫報圖(prediction diagram)를 提示하는 方案이 있으나 이 境遇 亦是 尨大한 作業과 豫算이 必要한 바 어떠한 體系를 實務에 利用하는 것이 適合한 가를 選擇하는 것은 追後 熟考할 事項이다.

6. 初期結果

近年에 黃海와 東支那海의 海水流動을 調査하기 爲해 樹立된 一連의 모델들은 今回의 硏究에서 實際海流狀況을 算定할 수 있는 段階로서 改善되었다. 그림 5와 그림 6은 陸棚모델에 依한 海水循環形態를 提示하는 데 前者는 3次元循環모델[11]에 依한 實際海流豫報體系를 利用하여 1978年 7月 30日 9時의 算定된 實際海面(cm) 및 表層, 中間水深, 底層의 實際海流를 例示하고 있으며 後者는 京畿灣海域을 잘 解像시킬 수 있도록 構成된 細部格子와 大格子를 動的連結技法을 利用하여 結合한 黃海陸棚모델[12]에 依한 潮流算定結果를 例示하고 있다. 그림 7과 그림 8은 京畿灣의 3次元모델[4]과 仁川灣의 2次元모델[3]을 利用하여 算定한 潮流의 分布를 例示하고 있다. 모델에 依한 瞬間流速 및 海面水位 算定結果들은 磁氣테이프에 收錄되어 特定分析을 爲해 利用되며 또한 短期擴散推定모델에 入力되어 汚染物質의 擴散推定에 利用된다. 그림 9는 京畿灣의 3次元모델[4]에 依한 平均潮汐狀況下의 底層潮流에 依한 最大海底摩擦力의 分布를 算定한 것인바 底層의 掃流砂의 移動方向을 槪略的으로 提示하고 있다. 이 結果는 海上投棄된 浚渫土의 移動 및 海底質에 包含된 重金屬의 移動推定에 利用될 수 있다. 그림 10 亦是 陸棚全域에 걸친 掃流砂의 移動形態를 推定[13]한 것인 바 海底土에 有害한 放射性物質 및 重金屬이 沿岸으로 放出될 때 이 物質들이 掃流砂에 包含되어 移動하는 經路 및 堆積可能한 海域을 提示하는 데 우리나라 西海岸의 淺海域의 堆積可能海域이 南北方向으로 提示되고 있다.

바람에 依한 海流分布 및 潮流의 恒流成分이 汚染擴散 및 油類擴散移動의 評價에 重要한 水動力學的인 要素임은 이미 强調되었는 데 京畿灣모델에 依한 冬季의 北西風(海面應力, 10dyne

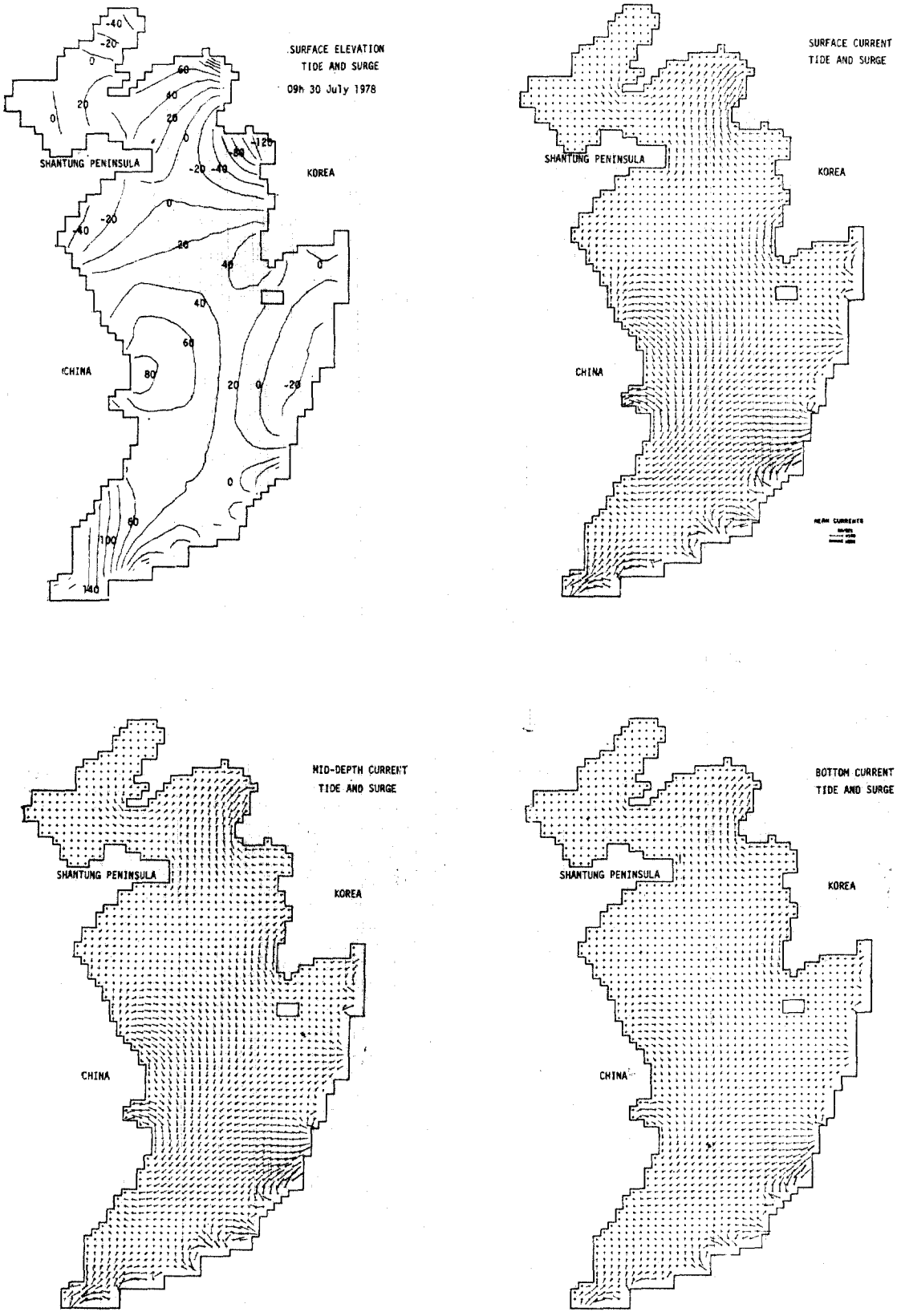

그림 5. 實際海流豫報體系에 依한 '78年 7月 30日 9時의 海面水位分布와 表層, 中間水深 및 底層의 循環形態

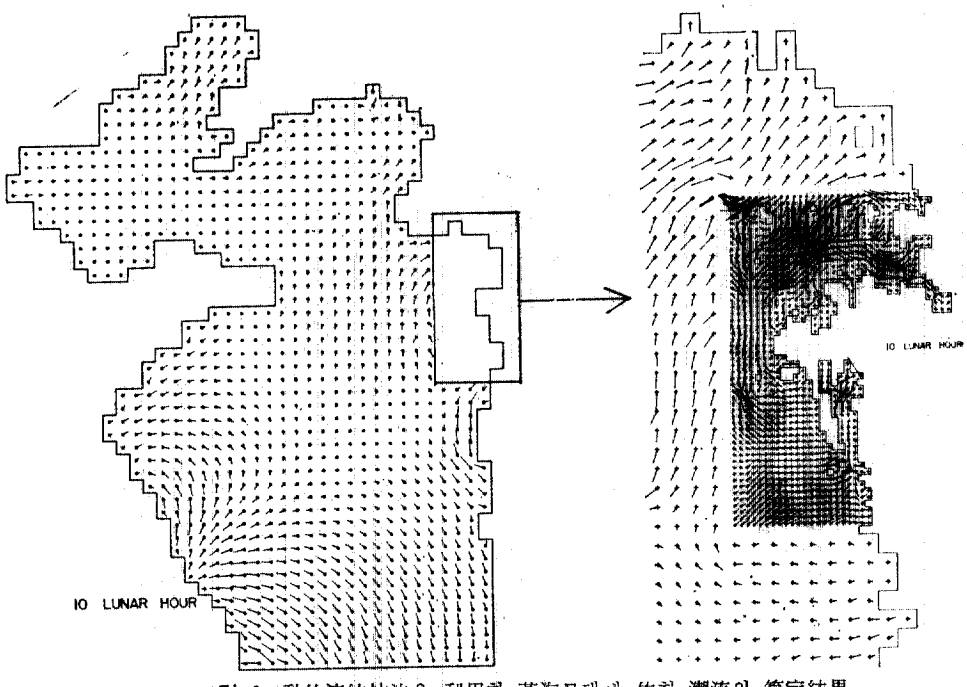

그림 6. 動的連結技法을 利用한 黃海모델에 依한 潮流의 算定結果

/cm², 風速, 約 20m/sec)에 依해 惹起된 表層의 海流形態와 平均潮汐狀況下의 潮流의 恒流流速分布가 그림 11과 그림 12에 各己 提示되어 있다. 이 冬季의 狀況이 牙山 및 平澤港에 接近하는 船舶에게는 不利한 環境與件인 바 이 條件에서 德積群島 南側東水道에서 油類流出事故가 發生했을 때의 擴散半徑과 移動距離를 例示하면 다음과 같다.

流出油類의 量이 2,000m³, 密度가 0.9g/cm³, 기름과 海水間의 表面張力을 30 dyne/cm², 물의 動粘性係數를 0.12 cm²/sec라 하여 式(17)~(25)를 利用하면 t_i=0.86 時間, r_i=0.42 km, t_s=5.5 時間, r_s=1.95 km, t_s=80 時間, r_s=5.22 km이므로 初期擴散은 3.5日에 걸쳐 6.21 km의 半徑에 일어나는 데 그림 11, 12로부터의 恒流成分을 南向으로 10 cm/sec를 取하면 3.5日間에는 約 30 km의 南側移動이 일어나 泰安半島 北側沿岸이 汚染되기 始作할 것이다. 別途로 平均潮汐狀況下의 3時間平均 最大流速을 仁川灣모델結果로부터 取하면 約 100 cm/sec로서 그 移動距離는 約 10 km에 達할 것인 데 流出時刻에 따라 漲潮, 落潮에 依한 北東 및 南西向의 移動이 反復되며 全體的인 擴散移動은 前述한 대

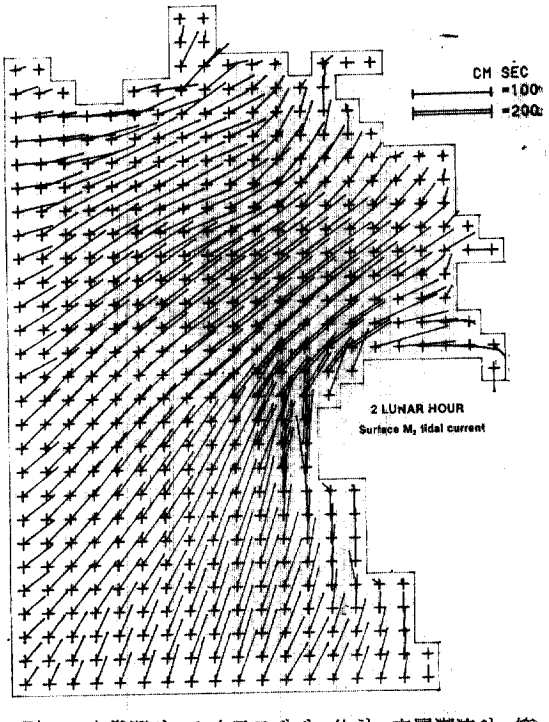

그림 7. 京畿灣의 3次元모델에 依한 表層潮流의 算定例

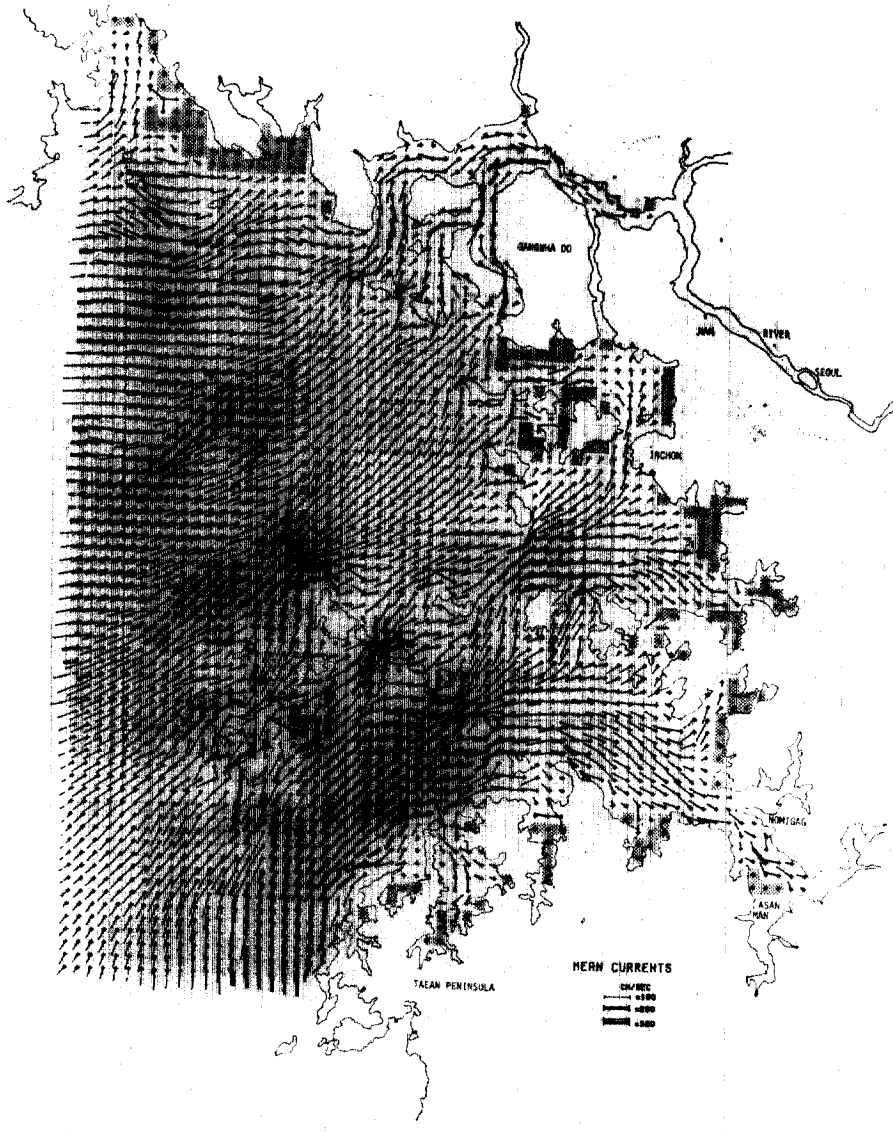

그림 8. 平均潮汐狀況下의 太陰이 135°E 子午線을 經過한 8時間後의 潮流形態.

로 南向으로 일어날 것이다. 따라서 이 海域에서 沿岸에서 10 km 以內의 海域에서 漲潮時 油類流出事故가 일어나면 沿岸은 短時間內에 汚染될 것이며 沿岸에서 멀어진 海域의 事故는 擴散 및 恒流에 依한 油類移動이 일어나는 데 潮流의 移動方向과 恒流의 方向이 비슷할 때 即 南西風 및 西風이 强한 期間에는 移動速度가 加速되어 沿岸에의 油類移動이 빨라진다. 이와 같이 油類擴散移動推定은 實際海流狀況이 賦與되면 比較的 簡單히 推定되나 流況의 實豫報가 前述한 대로 一貫的인 體系下에서 이루어져야 한다.

7. 結　論

黃海와 東支那海와 같은 半開된 淺海陸棚에서의 主가 되는 水動力學的 要素는 潮流 및 氣象狀況에 依한 海流이며 汚染擴散은 이러한 海水流動에 相互反應하는 過程이다. 本 硏究에서는 이 海域의 一連의 流動解析數値모델들이 實際海流를 hindcast 및 豫報할 수 있는 海洋豫報體系로서 改善되었다. 뚜렷한 進展은 3次元 流動解析모델이 樹立되어 이 海域의 海流의 3次元的

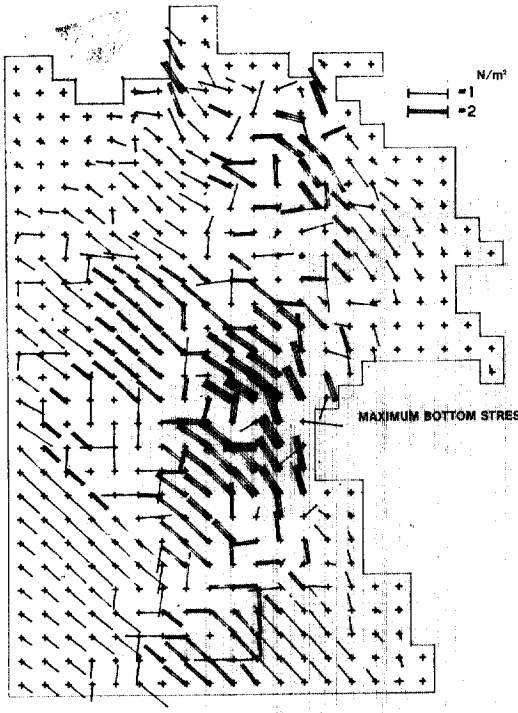

그림 9. 京畿灣의 3次元모델에 依한 最大海底摩擦力 分布의 算定.

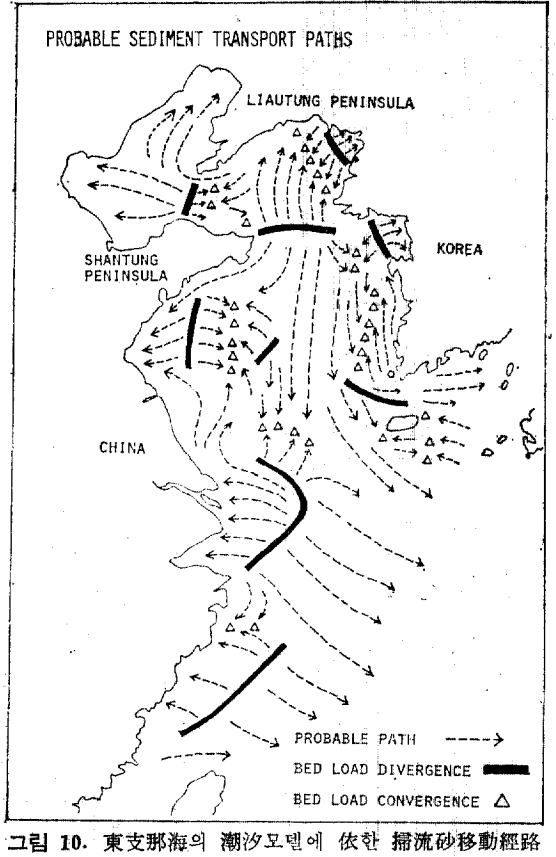

그림 10. 東支那海의 潮汐모델에 依한 掃流砂移動經路의 推定[12].

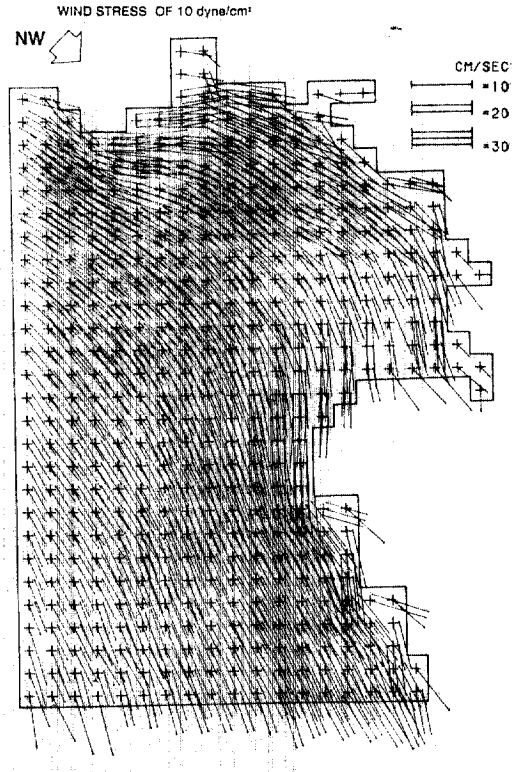

그림 11. 京畿灣의 冬季의 北西風(20m/sec)에 依한 表層의 海流形態.

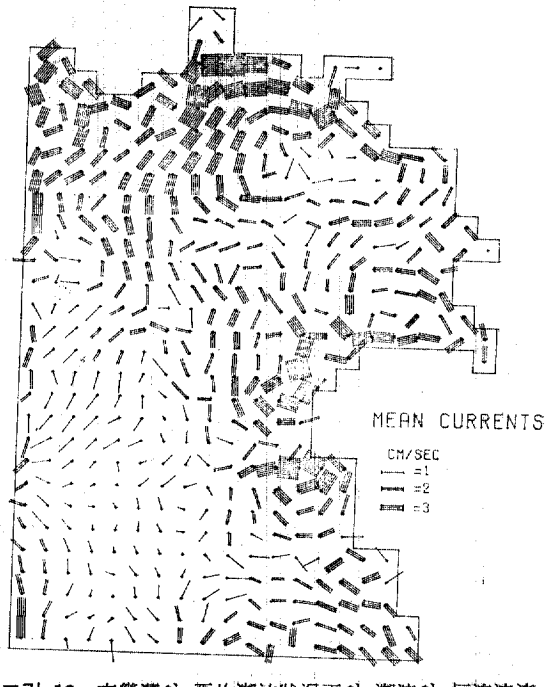

그림 12. 京畿灣의 平均潮汐狀況下의 潮流의 恒流流速 分布.

分布를 滿足할만하게 算定할 수 있어 여러 形態의 汚染擴散 및 移動에 關한 推定이 一貫的인 體系에 依해 遂行될 수 있는 骨格을 作成하였다. 그러나 提示된 體系는 결코 完璧하지 않은 데 特히 汎用的인 擴散모델을 收容하기에는 問題가 있는 바 移動擴散方程式을 Lagrangian 座標上에 構成하여 tracer 方法에 依한 解[13]를 求하는 硏究가 遂行되어야 할 것이며 廣範圍한 現場資料와의 檢證을 通한 改善이 繼續되어야 한다.

謝 辭

本 硏究는 1983 年度 韓國學術振興財團의 硏究費支援에 依해 遂行되었다.

參 考 文 獻

1. Heaps, N.S., Storm surges, 1967～1982. *Geophys. J.R. astr. Soc.*, 74, 1983, pp. 331～376.
2. Choi, B.H., A tide and surge computation for Kyonggi Bay. Bulletin of KORDI 3, 1981, pp. 13～21.
3. Choi, B.H., Tidal computation for Inchon Bay. *Journal of Korean Oceanological Society of Korea*, 15, 2, 1982, pp. 112～122.
4. Choi, B.H., A Three-dimensional numerical model of Kyonggi Bay. *Journal of Korean Oceanological Society of Korea, 18, 1*, 1983, pp. 10～20.
5. Choi, B.H., A three-dimensional model of the East China Sea. *in Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Seas*, (ed. T. Ichiye), Amsterdam, Elsevier, 1984, pp. 209～224.
6. Douglas, J. and Rachford, H.H. Jr., On the numerical solution of heat conduction problems in two and three space variables. *Trans. Amer. Math. Soc., 82*, 1956, pp. 421～439.
7. Douglas, J. and Gunn, J., A general formulation of alternating direction methods. *Numerical Mathematics, 6*, 1964.
8. Fay, J.A., *The spread of oil slicks on a calm sea. in oil on the sea*, (ed. D.P. Hoult), Plenum Press, 1969.
9. Hoult, D.P., Oil spreading on the sea. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 1972, pp. 341～368.
10. Dippner, J.W., A hindcast of the Bravo Ekofisk blow-out. *Veroff. Inst. Meeresforsch. Bremen., 19*, 1983, pp. 245～247.
11. Choi, B.H., Computation of the Typhoon surges of July-August 1978 in the East China Sea. *submitted to J. Oceanolog. Soc. Korea*, 1984.
12. 崔秉昊 東支那海의 土砂移動經路, **大韓土木學會誌, 第 3 卷第 4 號**, 1983. pp. 83～93.
13. Maier-Reimer, E. and Sunderman, J., *On tracer methods in computational hydrodynamics in Engineering application of computational hydraulics*, (ed. M B Abott and J.A. Cunge), Pitman, London, 1981.

(接受 : 1985. 1. 15)