The Journal of the Oceanological Society of Korea
Vol. 19, No. 1, p. 36-43, June 1984.

三次元數値모델을 利用한 東支那海의 定常均一風의 應力에 依한 海流의 算定

崔 秉 昊
成均館大學校 土木工學科

Computation of Currents Driven by a Steady Uniform Wind Stress on the East China Sea using a Three-dimensional Numerical Model

Byung Ho Choi
Dept. of Civil Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 170

要約：複雜한 沿岸地形 및 水深變化를 考慮한 黃海 및 東支那海의 三次元 水動力學的 數値모델을 開發하여 定常均一風의 應力에 依한 海流의 垂直分布를 算定하였다. 北西風 및 南西風의 秒速 約 10m에 該當하는 海面應力 1.6dyne/cm²에 依한 陸棚體系의 反應을 調査하기 爲한 數値實驗에서 動的 循環形態를 提示하고 討議하였다.

Abstract: A three-dimensional hydrodynamical numerical model of the Yellow Sea and the East China Sea is formulated having irregular coastal boundaries and non-uniform depth distribution represntative of nature. The developed model is used to derive the currents driven by a steady uniform wind stress on the Yellow Sea and the East China Sea. Numerical experiments have been performed with the model to determine the response of the shelf to stationary wind stress fields suddenly imposed on the shelf for wind directions of NW and SW winds and wind stress of 1.6 dyn/cm². The dynamical feature of the derived circulation are presented and discussed.

序 言

前回의 硏究에서 崔(1982)는 二次元 水動力學的 數値모델을 利用하여 東支那海의 定常均一風에 依한 水深平均된 海流의 分布를 算定하였다. 그러나 바람에 依한 海流는 水深에 따라 그 크기와 方向이 顯著하게 變化하는 것이 北西歐洲 陸棚의 硏究(Davies, 1980)에서 提示되고 있어 三次元모델에 依한 硏究가 必要하였다. 近來에 우리나라 京畿灣의 潮流流動 및 바람應力에 依한 海流循環形態가 三次元모델을 利用하여 算定되었으며(崔, 1983), 이를 擴大適用하여 黃海, 東支那海陸棚의 主太陰半日週潮(M_2)의 三次元的 潮流分布도 滿足스럽게 算定되었다(崔, 1984).

다음 段階로서 本 硏究에서는 亦是 三次元數値모델을 利用한 定常均一風에 依한 東支那海의 三次元的 海流分布가 調査되었는 데 窮極的으로 氣象學的 要因에 依한 陸棚海의 循環形態를 把握하기 爲한 試圖이다. 이러한 力學모델을 利用한 陸棚의 循環形態를 糾明하려는 一連의 硏究가 北西歐洲陸棚 特히 北海에서 活潑하다(Sündermann ed., 1983). 本 硏究의 意圖는 類似한 接近方法을 利用하여 黃海, 東支那海의 陸棚力學을 理解하는 데 도움이 될 結果를 提示하는 데에도 있다.

三次元 東支那海모델은 이미 報告된 二次元 東支那海모델(崔, 1980)과 同一하게 經度上 0.25度, 緯度上 0.2度의 解像度를 갖는 有限差分格子體系(Fig. 1)에서 樹立되었으며 實際의 水深과 沿岸形態를 取하였다. 數値解析技法은 英國海洋硏究所의 모델技法이다. 水平海流의 垂直分布는 基本函數를 簡單한 餘弦函數로 利用한 Galerkin 方法에 依하여 非線形 海底摩擦項이 包含된 基本方程式의 解로 求하였다. 따라서 本 모델은 多層모델, 垂直格子型모델과 달리 海流의 連續

原稿接受 1984年 4月 12日.

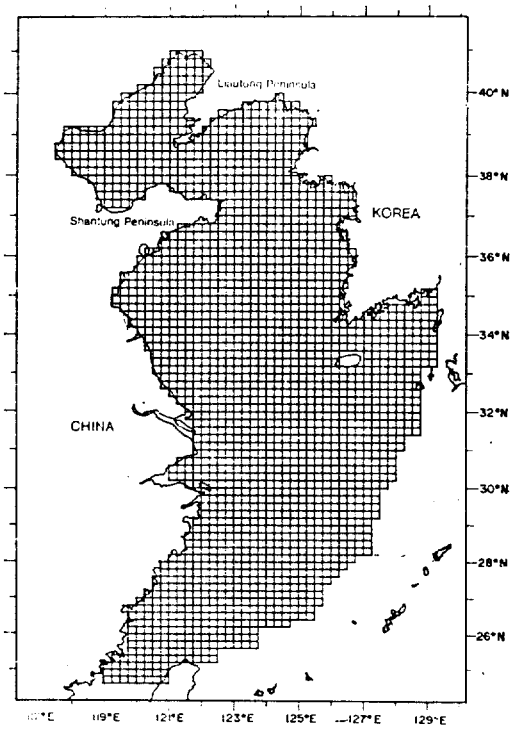

Fig. 1. The Yellow Sea and the East China Sea model finite difference grid.

的 分布를 求할 수 있다. 數値모델을 利用하여 海流의 潮汐成分, 恒流成分에 對한 三次元的 分布를 定量的으로 調査할 수 있게 됨에 따라 沿岸工學的인 應用으로서 海洋構造物에 作用하는 外力, 表層汚染物質의 擴散, 浮遊砂 및 掃流砂의 移動, 陸棚의 플럿싱時間, 海水交換時間 等의 環境硏究가 活潑해 질 展望이다.

三次元 數値모델

水平方向의 剪斷力을 無視하고 非線形 移流項을 除外했을 때 海水密度가 均一하다는 假定下에 球面座標系에서 運動方程式은 아래와 같이 記述될 수 있다.

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

$$\frac{\partial u}{\partial t}-\gamma v=\frac{-g}{R\cos\phi}\frac{\partial \xi}{\partial \chi}+\frac{\partial}{\partial z}\left(N\frac{\partial u}{\partial z}\right), \tag{2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+\gamma u=\frac{-g}{R}\frac{\partial \xi}{\partial \phi}+\frac{\partial}{\partial z}\left(N\frac{\partial v}{\partial z}\right), \tag{3}$$

여기서

χ, ϕ 東經 및 北緯座標
z 靜止海面下의 水深座標
t 時間
ξ 海面變位
h 靜止海面下의 水深
ρ 海水密度
R 地球의 曲率半徑
γ 偏向力係數($\gamma=2\omega\sin\phi$)
ω 地球의 回轉角速度
g 重力加速度
u, v 水深 z에서의 東向 및 北向成分
N 垂直渦粘性係數

ξ, u, v를 爲한 式 (1)(2) 및 (3)의 解를 求하기 爲해서는 海水表面과 海底面의 適合한 境界條件이 提示되어야 한다.

海水表面의 條件은

$$-\rho\left(N\frac{\partial u}{\partial z}\right)_0=F_s,\quad -\rho\left(N\frac{\partial v}{\partial z}\right)_0=G_s, \tag{4a, b}$$

인데 여기서 F_s, G_s는 χ, ϕ方向의 海面에 作用하는 바람에 依한 剪斷力이며 添字는 $z=0$일때의 條件임을 表示한다. 海底條件으로 海底($z=h$)에서의 滑動境界條件(slip boundary condition)을 假定하고 또한 海底摩擦의 自乘法則을 適用하면

$$-\rho\left(N\frac{\partial u}{\partial z}\right)_h=K\rho u_h(u_h^2+v_h^2)^{1/2},$$

$$-\rho\left(N\frac{\partial v}{\partial z}\right)_h=K\rho v_h(u_h^2+v_h^2)^{1/2}, \tag{5a, b}$$

로 表示된다. K는 海底摩擦係數이며 常數로서 取扱하였다. ξ, u, v를 求하기 爲해 式 (4)(5)의 境界條件을 滿足하는 式 (1)(2)(3)의 解를 求한다. 流速의 두 成分 u, v를 m個의 水深從屬的인 函數 $f_r(z)$(基礎函數)와 水平面 및 時間從屬的인 係數 $A_r(\chi, \phi, t)$와 $B_r(\chi, \phi, t)$로 展開하면 다음과 같다.

$$u(\chi, \phi, z, t)=\sum_{r=1}^{m}A_r(\chi, \phi, t)f_r(z), \tag{6}$$

$$v(\chi, \phi, z, t)=\sum_{r=1}^{m}B_r(\chi, \phi, t)f_r(z). \tag{7}$$

垂直空間領域에 Galerkin方法을 適用하여 式(2)(3)에 各各 基礎函數 f_k를 곱하고 z軸에 對하여 0서부터 h까지 積分한다. 여기에 垂直渦粘性係數를 包含하는 項을 積分하면 境界條件(4a, b)와 (5a, b)가 包含되게 되어 式 (8)(9)가 形成된다.

$$\int_0^h \frac{\partial u}{\partial t} f_k dz = \gamma \int_0^h v f_k dz - \frac{g}{R\cos\phi} \frac{\partial \xi}{\partial \chi} \int_0^h f_k dz - f_k(h) K u_h (u_h + v_h^2)^{1/2} - \int_0^h N \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial f_k}{\partial z} dz, \quad (8)$$

$$\int_0^h \frac{\partial v}{\partial t} f_k dz = -\gamma \int_0^h u f_k dz - \frac{g}{R} \frac{\partial \xi}{\partial \phi} \int_0^h f_k dz - f_k(h) K v_h (u_h^2 + v_h^2)^{1/2} - \int_0^h N \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial f_k}{\partial z} dz, \quad (9)$$

여기서 $k=1, 2, \cdots, m$. 이다. 上記式에서 海面 및 海底境界條件은 $f_k(0)$ 및 $f_k(h)$의 積으로 提示되어지며 零이 되지 않기 爲한 條件은 아래와 같이 f_k가 選擇되어야 한다.

$$f_k(0) \neq 0, \quad f_k(h) \neq 0 \quad (10)$$

基礎函數 $f_r(z)$의 選擇에 있어서 10個의 餘弦函數의 展開가 水深에 따른 海流의 變化形態를 充分히 提示해 줄 수 있음이 發表되었다(Davies, 1980; Davies와 Furnes, 1980; Choi, 1984). 따라서 本 硏究에서도 餘弦函數들이 利用되어

$$f_r = \cos \alpha_r \frac{z}{h} \quad (11)$$

이며 α_r의 適切한 選擇은

$$\alpha_r = (r-1)\pi, \quad r=1, 2, \cdots, m. \quad (12)$$

으로서 提示된다. 이 境遇에

$$f_r'(0) = 0, \quad f_r'(h) = 0 \quad (13)$$

의 條件이 滿足되어야 한다. 여기서 $f_r' = df_r/dz$ 이다.

式 (11)에 주어진 f_r은 아래의 式

$$\frac{d}{dz}\{N(\chi, \phi, t) f_r'(z)\} = -\lambda_r(\chi, \phi, t) f_r(z) \quad (14)$$

의 eigenfunction들인데 eigenvalue $\lambda_r(\chi, \phi, t)$는 아래와 같다.

$$\lambda_r(\chi, \phi, t) = N(\chi, \phi, t)\alpha_r^2/h^2. \quad (15)$$

垂直渦粘性係數 N은 垂直座標 z에 獨立的인 特殊한 境遇가 考慮되었다.

式 (14)(15) 및 式 (13)을 利用하여 式 (8)(9)의 N을 包含하는 項을部分的으로 積分하고 式 (6)(7)의 展開를 式 (8)(9)에 代入하면 一連의 偏微分 方程式이 된다. 仔細한 式의 展開는 Davies (1980)에 依해 提示되었으므로 여기서는 再述않기로 한다. 이 偏微分 方程式은 모델化된 陸棚海全體에 걸쳐 ξ, Ar, Br의 變化를 求하기 爲해 初期 및 境界條件에 符合되도록 時間增分에 따라 積分될 수 있다. 따라서 式 (6)(7)의 展開를 利用하면 Ar, Br로부터 任意水深의 海流가 算定될 수 있다. 方程式의 解를 求하기 爲해서 水平空間과 時間을 一定間隔으로 나누어야 하는데 水平空間은 ξ, u, v가 格子點의 서로 다른 位置에서 求해지는 有限格子體系로서 構成된다. 解는 아래와 같은 靜止狀態의 條件으로부터 求해진다.

$$\xi = Ar = Br = 0 \text{ at } t=0, \quad (r=1, 2, \cdots, m). \quad (16)$$

$t \geq 0$일 境遇 閉鎖境界面에는 海流의 垂直成分이 없는 것으로 假定한다.

$$Ar \cos\phi + Br \sin\phi = 0, \quad (r=1, 2, \cdots, m), \quad (17)$$

여기서 ϕ는 陽의 χ方向과 이루는 傾斜角이다. 外海의 開放境界面의 條件은 모델內部의 攪亂現象이 波及되어 나갈 수 있도록 放射條件을 아래와 같은 水深平均된 流速, q와 海面變位 ξ와의 關係로 미리 設定하므로서 考慮되었다.

$$hq = (gh)^{1/2}\xi \quad (18)$$

또한 上記의 陸棚境界의 水深平均된 流速과 式 (6)(7)의 展開의 各 項과의 關係를 아래와 같이 假定하였다.

$$A_r = B_r = 0 \quad (r=2, 3, \cdots, m) \quad (19)$$

또한

$$A_1 = \frac{q_u}{a_1}, \quad B_1 = \frac{q_v}{a_1} \quad \left(a_1 = \frac{1}{h}\int_0^h f_1(z) dz\right) \quad (20)$$

여기서 q_u, q_v는 式 (18)에서 求한 陸棚端의 外海開放境界의 水深平均된 流速의 u, v 成分이다.

모델 結果 및 討議

靜止水面狀態로 부터 定常均一風이 36時間 持續된 後의 流速分布를 求하였다. 海面의 摩擦應力은 1.6dyn/cm²을 取했고 이는 約 10ms⁻¹의 風速(Phillips, 1966)에 該當되며 風向은 北風, 南風體系의 北西風 및 南西風을 擇하였다. Fig. 2

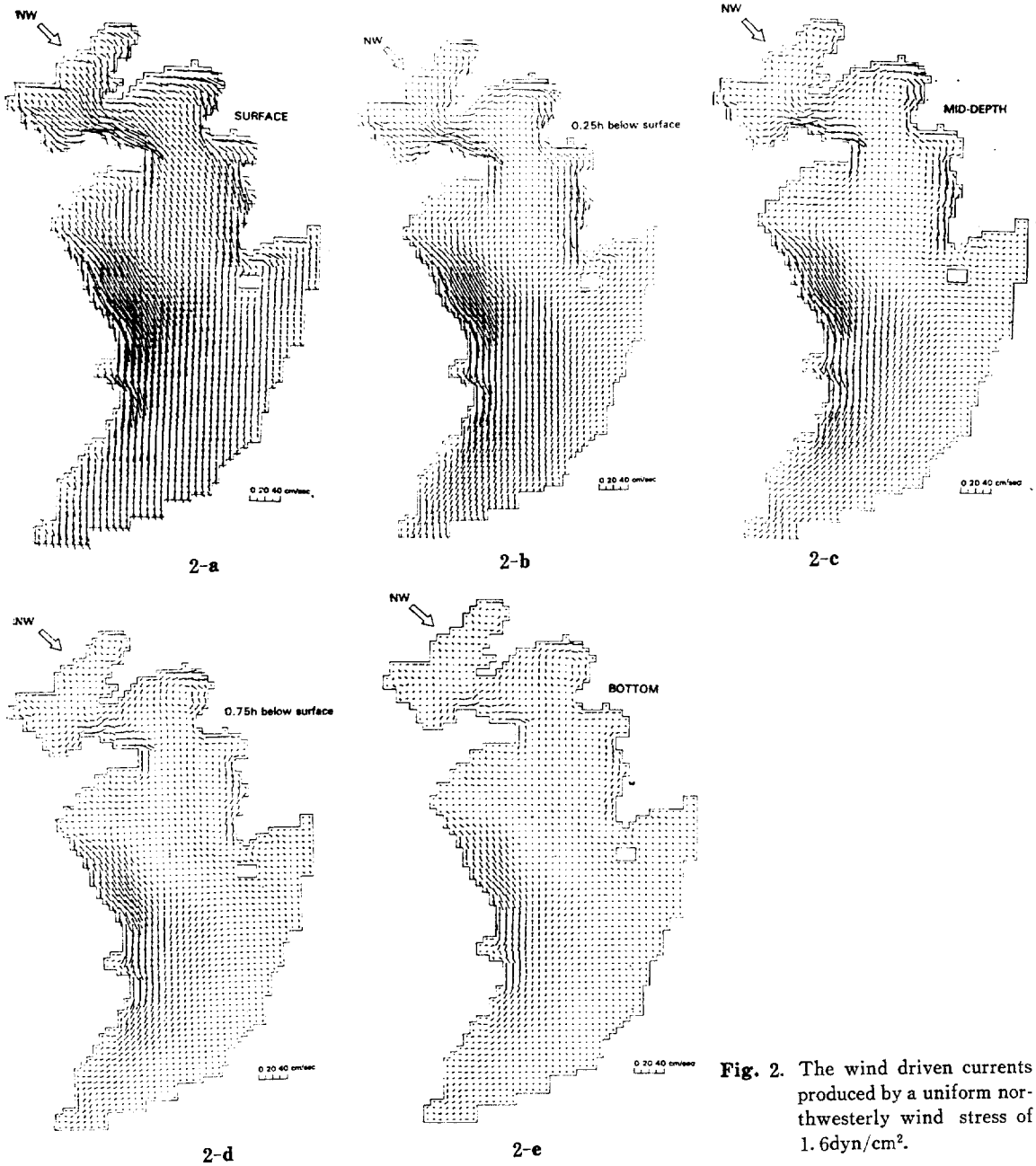

Fig. 2. The wind driven currents produced by a uniform northwesterly wind stress of 1.6dyn/cm^2.

와 Fig. 3은 이러한 北西風 및 南西風의 海面應力에 依해 惹起된 表層, 1/4水深, 中間水深, 海底에서 算定된 海流分布를 提示하고 있다.

Fig. 2에서 2(a)는 北西風이 불때 表層海流分布로서 全體的으로 風向에 直接 反應하여 南東向의 海流分布를 나타내나 東支那海上에서는 南向海流分布를 보이고 있다. 海流强度는 沿岸을 따라 相對的으로 强하며 特히 西韓灣으로부터 우리나라 西海岸을 沿한 海流, 山東半島 北側沿岸, 杭州灣附近의 中國沿岸의 海流가 두드러 진 分布를 提示하고 있다. 2(b)는 北西風이 불 때 表層에서 1/4水深下의 海流分布로서 濟州島隣近東側, 南側海域에서 南西向의 海流가 發生하며 濟州海峽에서는 時計方向의 渦流가 發生한다.

2(c)는 北西風이 불 때 中間水深에서의 海流分布로서 遼東灣, 勃海灣北側, 西韓灣, 京畿灣外側, 山東半島南側, 濟州海峽東側에 時計方向 渦流가 形成된 것이 提示되는 데 西韓灣의 境遇 渦流의 强度가 뚜렷하다. 모델의 外海境界面인 陸棚端의 東側 即 濟州島東側 九州隣近海域에서는 逆流(return flow)가 發生하여 東側으로 흐르다가 南西方向으로 轉向하는 循環形態가 提示된다. 2(d)는 表層으로부터 3/4水深下의 海流分布로서 中間水深에서 提示된 渦流의 分布는 强度는 多少 弱하지만 同一形態를 維持하는데 東側外海境界에서 발생한 흐름이 더 北向으로 逆流하는 傾向을 보인다. 이 흐름은 黃海中心部의 thalweg를 따라 北上하여 山東半島 南側에서 反

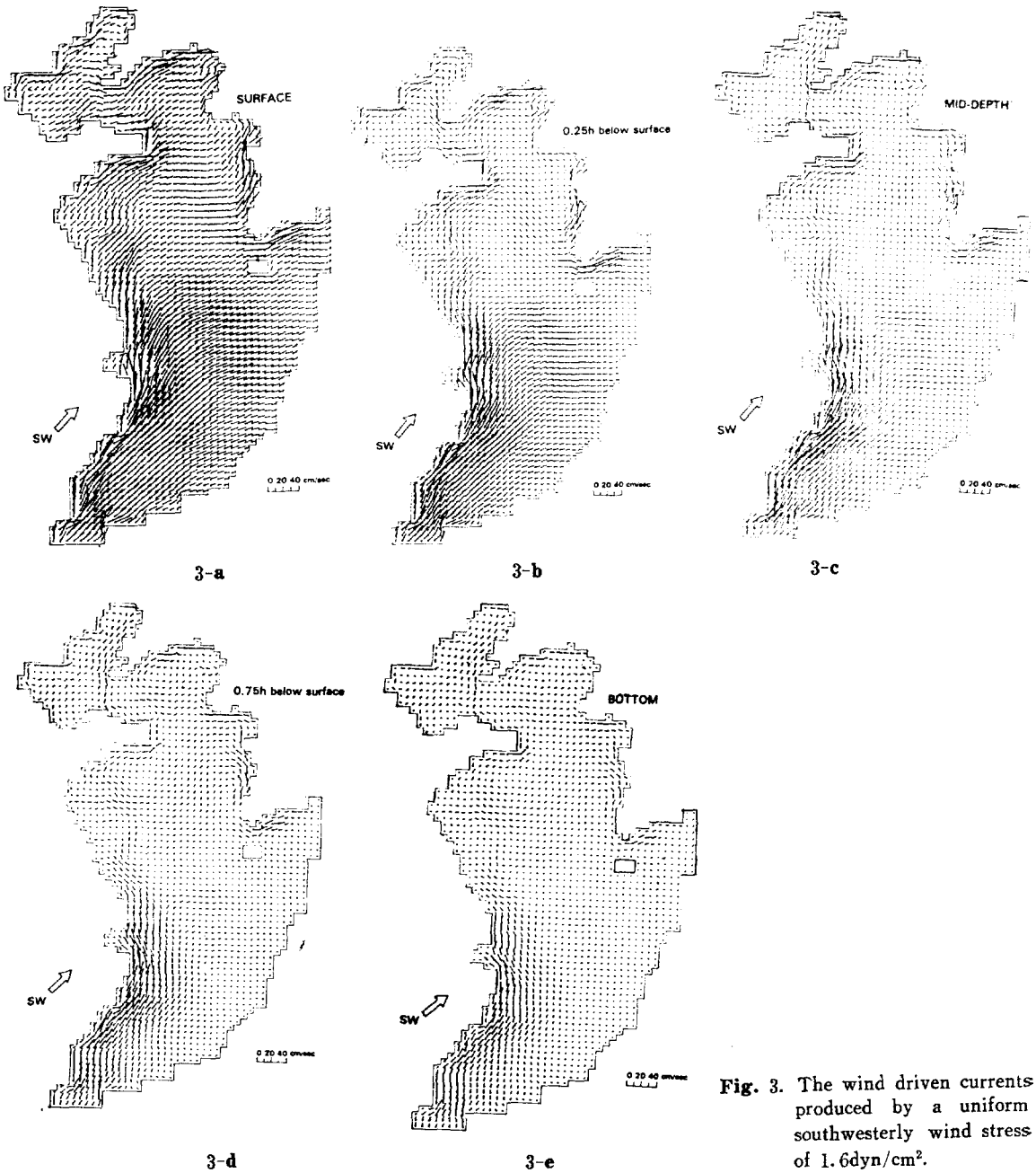

Fig. 3. The wind driven currents produced by a uniform southwesterly wind stress of 1.6dyn/cm^2.

時計方向으로 轉向하여 中國沿岸의 强한 沿岸流와 合流된다. 優勢한 南西方向의 흐름이 東支那海에서 提示되고 있다. 2(e)는 海底의 흐름分布를 나타내는 것으로서 黃海中心部 全般에 北向의 逆流가 發生하며 우리나라 西海岸의 渦流는 南北方向으로 그 强度는 弱하지만 擴大되며 陸棚端에서의 逆流는 東支那海에서 反時計方向으로 轉向되어 臺灣海峽으로 流出되는 循環形態가 提示되고 있다.

Fig. 3에서 3(a)는 南西風이 불때 表層海流分布로서 亦是 風向에 直接 反應하는 分布를 나타낸다. 杭州灣, 西韓灣, 우리나라 西海岸 및 南海岸에서 海流强度가 相對的으로 優勢하다. 3(b)는 南西風이 불 때 表層에서 1/4水深下의 海流分布인데 臺灣海峽을 通해 流入되는 흐름이 東那支海에서 東側으로 轉向되어 陸棚外海로 流出되는 循環形態와 中國沿岸을 따라 北上한 흐름이 山東半島 南部에서 南東向으로 轉向되여 一部는 우리나라 西海岸을 따라 北上하는 흐름과 一部는 濟州海峽을 通해 東側으로 流出되는 循環形態를 提示하고 있다. 3(c)는 南西風이 불 때 中間水深에서의 海流分布로서 勃海灣, 山東半島北側, 西韓灣, 우리나라 西海岸에 反時計方向의 渦流循環形態가 提示되고 있으며 山東半島南側에는 時計方向 및 反時計方向 渦流循環形態가 보인다. 黃海中心部의 thalweg를 따라 發生된 逆流가 濟州海峽을 通해 東側으로 流出되는 循環形態가 亦是 提示되고 있다. 3(d) 및 3(e)는 3/4水深下 및 海底에서의 海流分布를 各各 提示하고 있는 데 中間水深에서 發達된 渦流循環形態 및 强度가 減衰해 가는 傾向이 보이며 海流强度 亦是 全般的으로 減衰하나 杭州灣隣近中國의 中南部沿岸, 우리나라 西海岸, 濟州海峽東側海域에는 두드러진 海流循環이 持續된다.

崔(1982)는 前回의 硏究에서 二次元 東支那海 모델을 利用하여 1.6dyn/cm²의 海面應力을 갖는 北西風 및 南西風에 依해 惹起된 水深平均된 海流의 分布를 提示한 바 있는 데 本 三次元모델의 結果와 比較하면 中間水深에서의 循環形態와 類似한 結果이었다. 그러나 提示된 바와 같이 三次元모델의 算定結果에 依하면 바람에 依한 海流의 垂直分布는 水深에 따라 그 强度와 方向

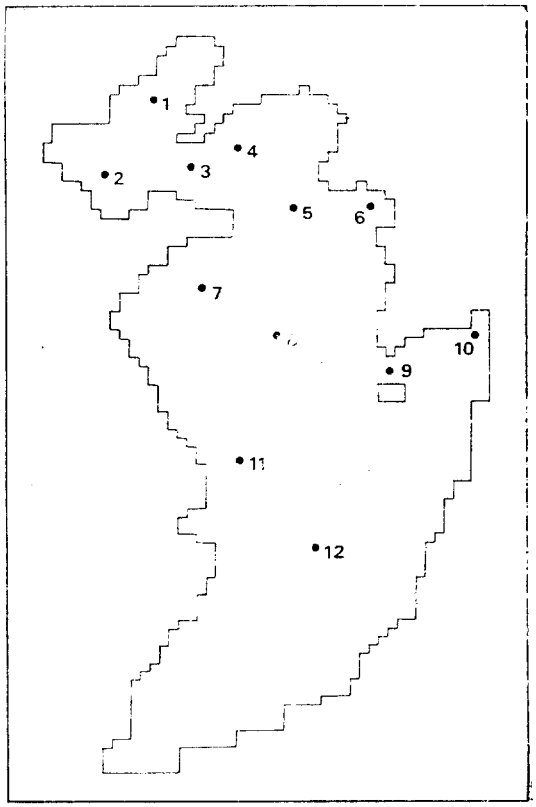

Fig. 4. Selected points from which computed vertical profiles of u and v are presented.

이 懸隔하게 다른 것을 알 수 있다. 潮流에 依한 流速의 垂直分布는 水深에 따라서는 그 强度가 相當히 變化되지만 方向은 크게 變化되지 않음은 東支那海의 三次元 潮汐모델(崔, 1984)의 結果로서 提示되었다. 바람에 依해 發生된 海流의 連續的인 垂直分布를 提示하기 爲해서 三次元모델의 格子體系上에서 Fig. 4에 提示된 12個所가 選定되었다. Fig. 5는 北西風에 依해 惹起된 海流의 連續的인 垂直分布이며 Fig. 6는 南西風에 依해 惹起된 海流의 連續的인 垂直分布인 바 水深에 따른 海流强度 및 方向의 큰 變化가 亦是 提示되고 있다.

結 言

海流의 垂直分布를 算定할 수 있는 三次元 東支那海모델이 樹立되어 陸棚海에서 바람에 依해 惹起되는 循環形態를 初期結果로서는 滿足스럽게 算定할 수 있었으며 이는 陸棚海의 循環形態

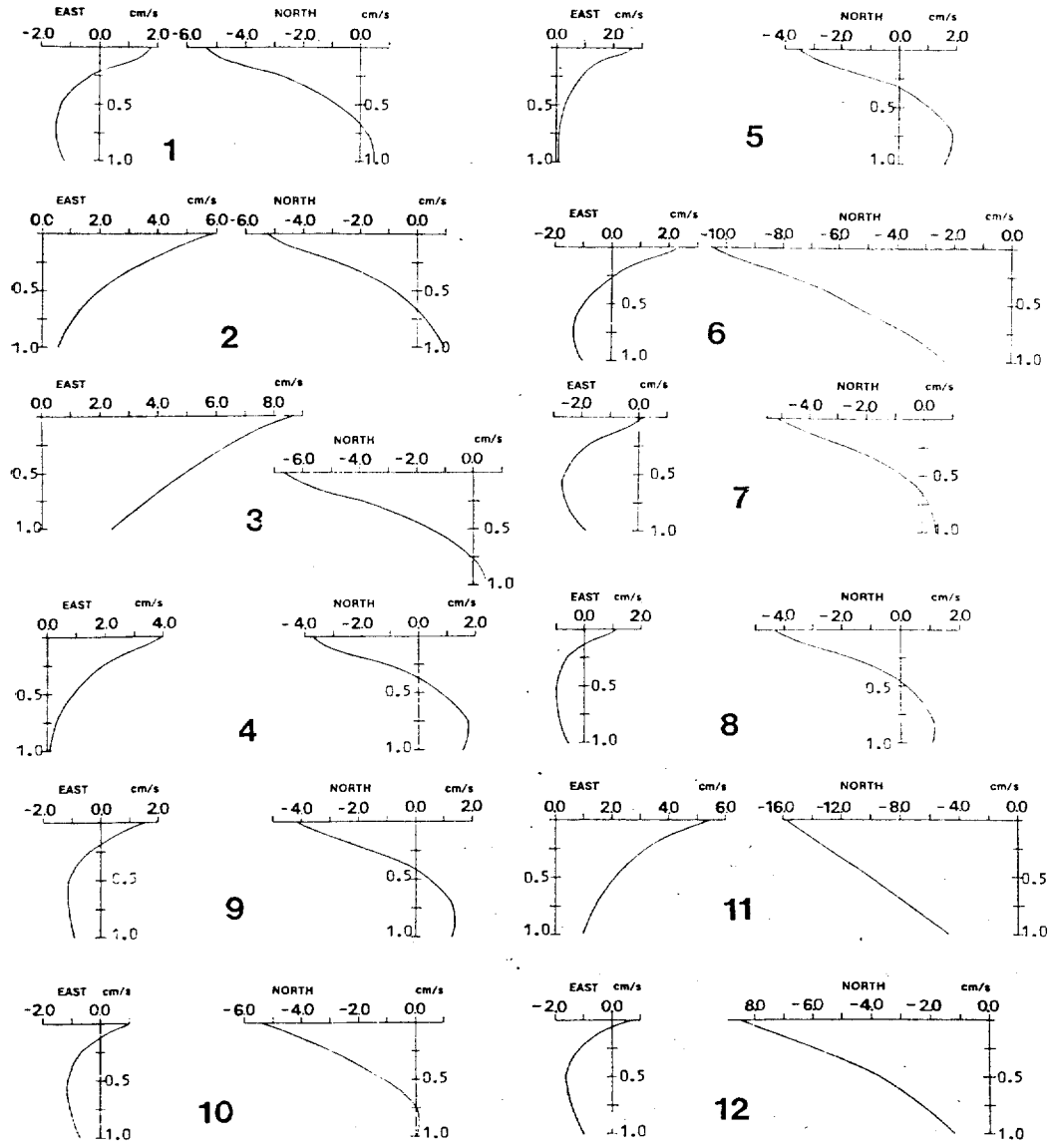

Fig. 5. The vertical profiles of u and v for northwesterly wind stress of 1.6dyn/cm^2 at selected points.

를 徹底하게 糾明하기 爲한 初期試圖이다.

北海의 境遇와 類似하게 東支那海의 境遇도 바람에 依해 發生되는 海流는 水深의 變化에 따라 그 强度와 方向이 크게 變化되는 것이 모델結果로서 提示되었다. 주어진 外力條件에 따라 特異한 渦流形態가 大陸棚海의 數個所에서 發生되는 것이 또한 提示되었는 데 이러한 海流의 三次元的 分布는 陸棚海의 循環形態를 理解하는 데 必須的인 事項이다. 追後의 硏究로는 季節的으로 平均된 氣象狀況下에서의 陸棚海의 循環形態를 糾明하는 일이 必要할 것이며 氣象狀況이 뚜렷한 여름이나 겨울의 特定期間을 對象으로 三次元모델에 依한 數値實驗을 遂行하여 觀測結果와 比較하는 硏究가 必要하다. 現在 1983年 11月의 觀測資料와 比較하기 爲한 三次元모델의 數値實驗이 遂行中에 있다.

謝 辭

本 硏究는 83年度 韓國科學財團의 硏究費支援에 依해 遂行되었다.

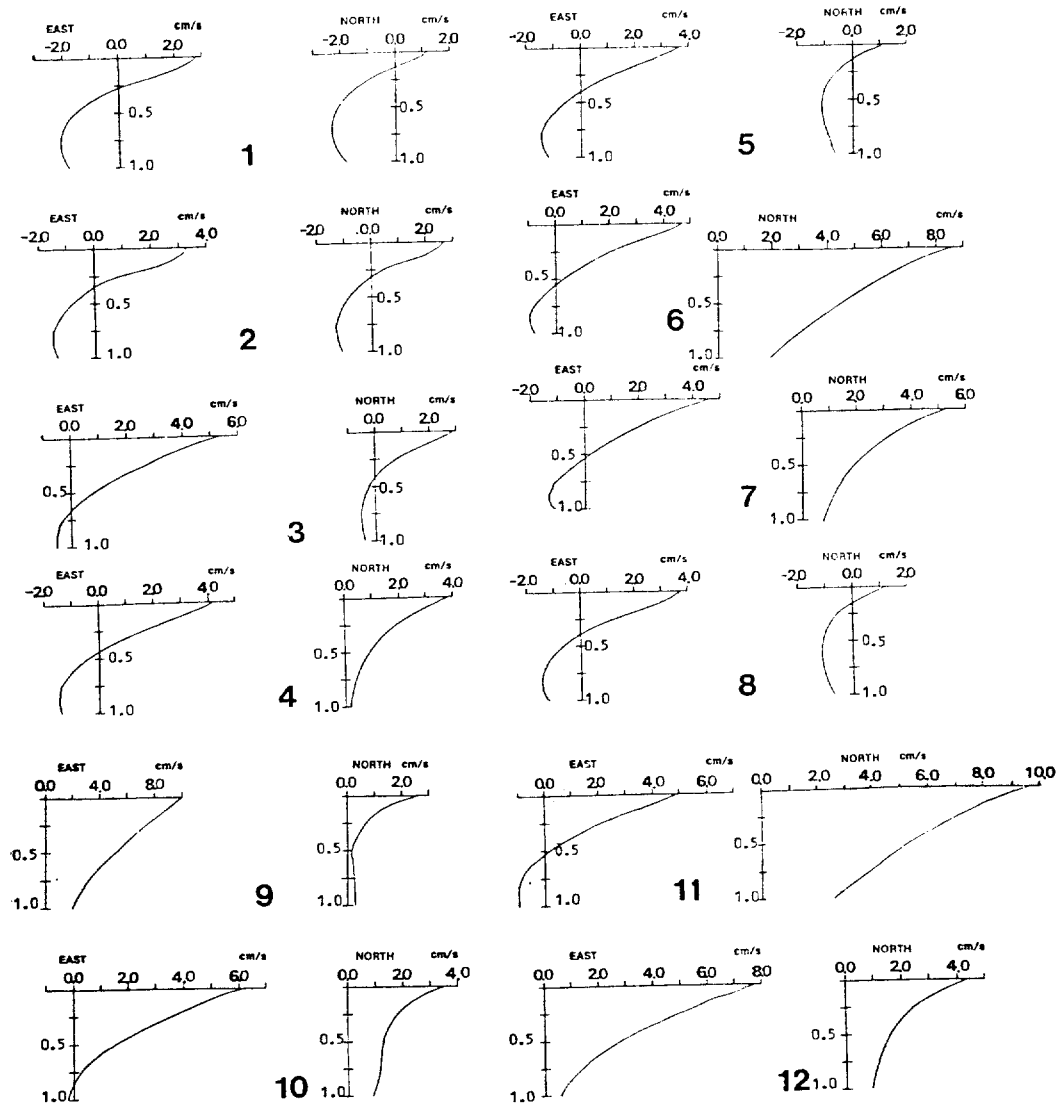

Fig. 6. The vertical profiles of u and v for southwesterly wind stress of 1.6dyn/cm^2 at selected points.

參 考 文 獻

崔秉昊, 1983. 京畿灣의 三次元 流動解析모델. 韓國海洋學會誌, 18(1):10-20.

Choi, B.H., 1980. A tidal model of the Yellow Sea and the Eastern China Sea. Korea Ocean Research and Development Ins. (KORDI), Rep. 80-02, 72p.

Choi, B.H., 1982. Note on currents driven by a steady uniform wind stress on the Yellow Sea and the East China Sea. La mer, Tome 20(2): 65-74.

Choi, B.H., 1984. A three-dimensional model of the East China Sea. Ocean Dynamics of the Japan and East China Seas. Elsevier Science Publishers (in press).

Davies, A.M., 1980. Application of numerical models to the computation of the wind-induced circulation of the North Sea during JONSDAP' 76. "Meteor" Forsch-Ergebnisse, Reihe A, No. 22, Seite 53-68.

Divies, A.M. and Furnes, F.K., 1980. Observed and computed M_2 tidal currents in the North Sea. J. Phy. Oceanogr., 10:237-257.

Phillips, O.M., 1966. The dynamics of the upper ocean. Cambridge University Press, 261p.

Sünderman, J. and Lenz, W., (ed.) 1983. North Sea dyamics. Springer-Verlag. 686p.