

黃海 및 東支那海의 成層·混合모델

A Stratification/Mixing Model of the Yellow Sea and the East China Sea

崔秉昊*
Choi, Byung Ho

Abstract

A simple stratification/mixing model has been developed for shelf waters of the Yellow Sea and the East China Sea. The results are summarized in the form of maps of stratification parameter which utilized the estimates of tidal dissipation from non-linear two-dimensional tidal model of the region. Ultimate aim of this study is to evaluate the applicability of the tidal mixing criteria to the Yellow Sea especially for the offshore region near Taean Peninsula in the west coast of Korea using hydrographic data and computed stratification parameter.

要 旨

黃海 및 東支那海 陸棚의 成層·混合모델이 提示되었다. 結果는 이 海域의 非線形 潮汐모델로부터 算定된 潮汐에너지의 消散量을 根據로 한 成層係數의 分布圖로서 提示되었다. 海洋資料와 算定된 成層係數를 利用하여 우리 나라 西海岸 泰安半島 近海의 潮境에 이러한 潮汐混合條件의 適用如否를 檢討하는 것이 窮極의인 研究目標이다.

1. 序 論

海洋前線은 性質이 다른 두 水塊의 急激한 境界를 指稱하는 데 便宜上 大規模 海洋前線, 西岸境界流 外廓의 前線, 大陸棚端에서의 前線, 沿岸 湧昇域에서의 前線, 河川流出水에 依한 噴流前線, 淺海 潮汐前線 등으로 나뉘어진다. 近來에 大陸棚의 淺海域에서의 前線 特히 潮汐前線(潮境, tidal front)은 水深과 潮汐數值모델에 依해 算定된 流速의 두 變數로서 그 位置를 推定할 수 있음이 여러 研究者들^(1,2,3)에 依하여 提示된 바 있으며 廣範圍한 海洋觀測 및 環境衛星, 航空寫

眞을 통해 이를 立證하는 研究가 活潑하게 展開되고 있다. 이러한 海洋前線은 重要한 物理學的, 化學的, 生物學的 境界面을 提示하는 데 研究⁽⁴⁾에 依하면 特히 生物學的 活動이 活潑하여 植物性플랑크톤이 群集에서 漁場形成과 密接한 關係에 있는 것으로 發表되었다. 이는 前線域에서 垂直的인 海水運動, 鹽分, 溫度 等의 交換이 強하게 일어나기 때문이다. 以外에도 浮遊物質 亦是 前線域을 따라 群集되므로 赤潮現象을 包含한 汚染現象과도 關聯이 있을 것으로 推定되므로 環境學的 側面에서도 海洋前線이 갖는 意味는 至大하다.

前回の 研究에서 開發된 黃海 및 東支那海의

*正會員·成均館大學校 工科大學 副教授 土木工學科

모델에 의한 潮流算定結果는 最近 美·中共 共同海洋觀測 프로그램중 東支那海 數個地點의 長期潮流觀測을 通해 Larsen 과 Cannon⁽⁶⁾에 依해 比較檢討된 바 算定된 結果와 觀測結果가 一致를 보였으며 採擇된 모델의 外海境界條件值들이 合理的인 것임이 檢證되었다. 本研究은 이 黃海 및 東支那海의 非線形 二次元 數值모델로부터 成層係數(stratification parameter)를 算出하여 分布圖를 作成하는 데 一次의인 目的이 있으며 窮極의으로는 우리 나라 西海岸 泰安半島近海 및 其他海域의 潮境에 이러한 潮汐混合條件의 適用與否를 檢討하는 데 目的이 있다.

2. 成層·混合모델 및 成層係數

Simpson, Allen 과 Morris⁽⁶⁾ 및 Simpson 과 Bower⁽⁷⁾는 成層을 이루는 水塊와 垂直混合을 이루는 水塊의 境界 即 前線의 位置를 提示하기 爲해 에너지概念을 利用하여 接近하였다. 垂直混合條件을 이루기 爲한 포텐셜에너지는 다음과 같이 定義된다.

$$V = \bar{V}h = \int_{-h}^0 (\rho - \bar{\rho})gzdz, \quad \bar{\rho}h = \int_{-h}^0 \rho dz \quad (1)$$

여기서 ρ 는 海水密度, h 는 水深이며 $\bar{\rho}$ 는 垂直平均된 密度이다. V 에 對한 陽의 入力은 바람과 潮汐에 依한 攪亂에 依해 供給되며 成層을 誘發시키는 陰의 入力은 表面水溫上昇인데 경우에 따라 河川水의 流入 및 降雨現象도 包含된다. 密度에서 鹽分의 變化度가 無視할 程度일 때 半日週潮의 潮汐週期를 通한 포텐셜에너지의 平均變化率은 다음과 같다.

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{\alpha g Q h}{2C} + \frac{4}{3\pi} \varepsilon k_b \rho u_b^3 + \delta k_s \rho \bar{W}^3 \quad (2)$$

여기서 α 는 體積膨脹係數, Q 는 表面熱量流入率, C 는 比熱, u_b 는 海底의 潮流振幅, k_b 는 u_b 에 關한 摩擦係數, ρ_s 는 空氣密度, \bar{W} 는 潮汐週期에 平均된 風速, k_s 는 (表面抗力係數 $\times \gamma$), γ 는 風速에 對한 表層海流強度의 比率이다.

上記式에서 ε 과 δ 는 潮流에너지 및 海面風에 依한 에너지 變化中 垂直混合의 포텐셜에너지變化에 寄與하는 效率로서 初期의 接近으로서는 常數로서 取扱되며 恒流에 依한 포텐셜에너지의

移流現象은 無視되는 데 이 경우 常數效率모델(constant efficiency model)이라 稱한다. 이 假定과 $\frac{dV}{dt} = 0$ 의 條件은 前線의 位置를 爲한 成層境界條件을 下記式 (3), (4)로서 提示한다.

$$\frac{\alpha g Q h}{2C} = \frac{4}{3\pi} \varepsilon k_b \rho u_b^3 + \delta k_s \rho \bar{W}^3 \quad (3)$$

$$a \left(\frac{u_b^3}{Qh} \right) + b \left(\frac{\bar{W}^3}{Qh} \right) = 1 \quad (4)$$

Hunter⁽⁸⁾는 海底의 潮流振幅 u_b 를 水深平均된 潮流速度 u_T 와 理論의으로 聯關시켰다.

$$\langle |u_T|^3 \rangle = \frac{4}{3\pi} u_b^3 \quad (5)$$

여기서 括弧는 潮汐週期에 對한 平均을 나타낸다. 式 (5)를 式 (4)에 代入하여 整理하면

$$Q = \frac{a \langle |u_T|^3 \rangle + b \bar{W}^3}{h} \quad (6)$$

이며 여기서 a, b 는 常數로서 Q 가 joule/m²/day, u_T, \bar{W} 가 m/sec 및 h 가 m 의 單位일때 a 는 2.28×10^9 , b 는 4.21×10^5 의 값⁽⁷⁾을 갖는다. 即

$$Q = \frac{2.28 \times 10^9 [\langle |u_T|^3 \rangle + (\bar{W}/17.6)^3]}{h} \quad (7)$$

인데 Hunter⁽⁸⁾는 平均風速에 相當하는 混合效率을 提示하는 換算流速(equivalent water current, EWC)을 다음과 같이 提示하였다.

$$EWC = \bar{W}/17.6 \quad (8)$$

海水面 熱量流入率 Q 는 季節의인 變化를 하는데 潮境이 發生하는 夏節期에는 一定한 값으로 假定할 때 $\langle |u_T|^3 \rangle/h$ 의 값이 式 (7)로서 주어지는 位置에 前線이 생기게 되고 이 값을 境界로 成層 및 垂直混合이 이루어지므로 成層係數는 다음과 같이 定義된다.

數值모델로부터 算定될 수 있는 u_T 와 換算流速으로 Hunter⁽⁸⁾가 提示하는 成層係數는

$$S_H = \log_{10} [\{ \langle |u_T|^3 \rangle + EWC^3 \} / h], \quad (9)$$

이며 Pingree 와 Griffiths⁽¹⁾가 提示한 成層係數는

$$S_P = -\log_{10} [k_b \langle |u_T|^3 \rangle / h] \quad (10)$$

인데 u_T, h 는 c.g.s. 單位이며 k_b 값은 0.0025이다. Simpson 과 Bower⁽²⁾가 提示하는 成層係數는

$$S_S = -\log_{10} [u_s^3 / h] \quad (11)$$

로서 u_s, h 는 m.k.s. 單位이며 u_s 는 大潮期 表層 潮流振幅으로 u_T 와는 $u_s^3 = 6.67 \langle |u_T|^3 \rangle$ 의 關係가 있다. 上記의 세 成層係數는 바람이 考慮되지 않는 경우에는

$$S_H = -(S_P + 1.4) = -(S_S + 0.8) \quad (12)$$

의 關係가 成立된다. 따라서 成層·混合모델에 依한 成層條件을 成層係數와 海面 熱量流入率과의 關係로 表示하면 다음과 같다.

$$S_H = \log_{10} [Q / (2.28 \times 10^9)] = \log_{10}(Q) - 9.4 \quad (13)$$

3. 모델 結果

前述된 대로 成層係數는 潮汐數值모델로부터 算定된 水深平均된 流速資料로부터 求할 수 있다. 黃海 및 東支那海의 陸棚潮汐모델은 地球의 曲率 및 緯도에 따른 偏向力이 考慮되기 爲하여 球面座標系上에서 樹立되었는 데 格子網은 經度上 1/4 度, 緯度上 1/5 度의 格子要素로서 그림 1에 提示된 바와 같이 約 4,200 個의 格子로 構成되는 데 折半이 海上格子點이며 格子間隔은 北緯 38 度에서 約 12 海里이다. 이 모델의 仔細한 內容 및 結果는 이미 發表⁽⁹⁾되었으므로 여기

서는 省略키로 한다. 이 모델의 海上格子點에서 潮流의 成分이 每 4 太陰分마다 算定되어 磁氣 데이프에 保管되어 있으므로 成層係數를 求하기 爲해서는 各 格子點에서의 $\langle |u_T|^3 \rangle$ 을 求하면 된다.

Pingree 와 Griffiths⁽¹⁾는 式 (3)을 바람의 影響을 無視하고, 다음과 같이 整理하여 表面熱量 流入率 Q 의 變化에 따른 水柱의 安定條件, R 을 潮汐에너지 消散率에 依한 垂直混合條件을 維持하기 爲해 必要한 토포설에너지의 所要率로서 表示하여 既 提示된 式 (10)의 形態로서 成層係數를 提示하였다.

$$R = \frac{g\alpha Qh/2C}{\rho k_s \langle |u_T|^3 \rangle} \propto \frac{h}{k_s \langle |u_T|^3 \rangle} \quad (14)$$

여기서 $h/k_s \langle |u_T|^3 \rangle$ 의 等值線圖은 單位水柱當 質量, ρh 를 平均에너지 消散率로서 나누면 求할 수 있다. 이 係數의 逆數, $[h/k_s \langle |u_T|^3 \rangle]^{-1}$ 는 $L^2 T^{-3}$ 의 次元을 가지며 亂流理論에 重要한 變數인 單位質量當 에너지消散率인데 黃海 및 東支那海의 單位質量當 潮汐에너지消散率의 分布가 그

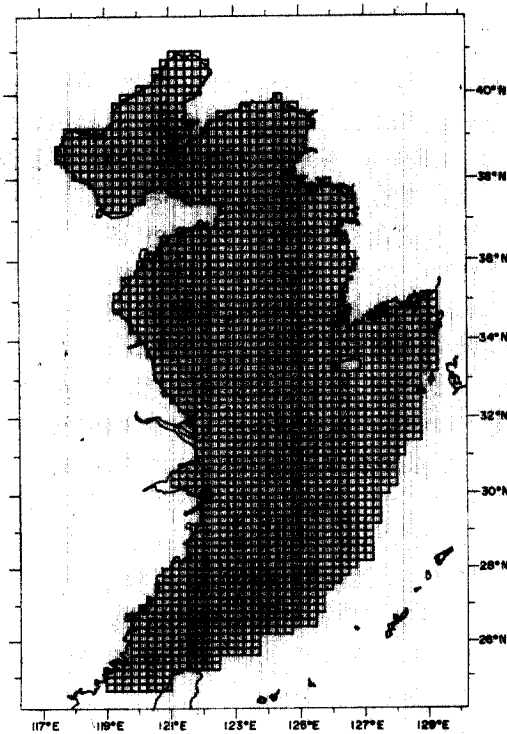


그림 1. 黃海 및 東支那海 陸棚潮汐모델의 有限格子體系

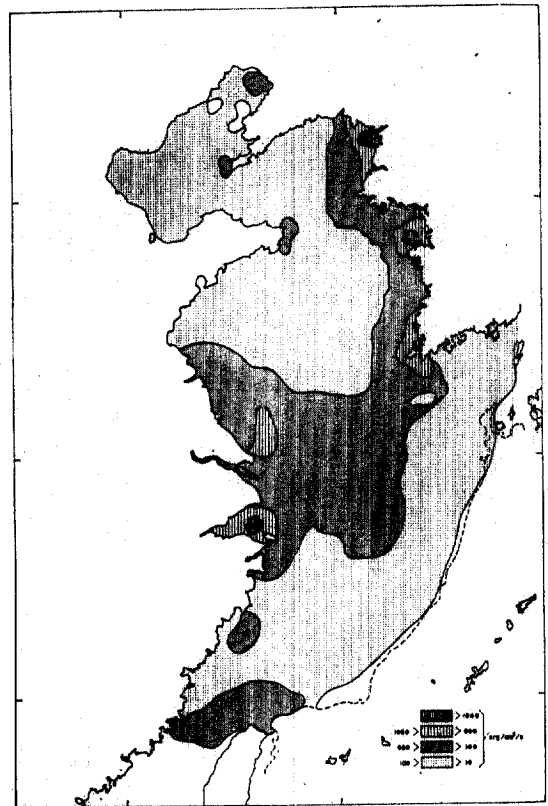


그림 2. 潮汐에너지 平均消散率 分布圖

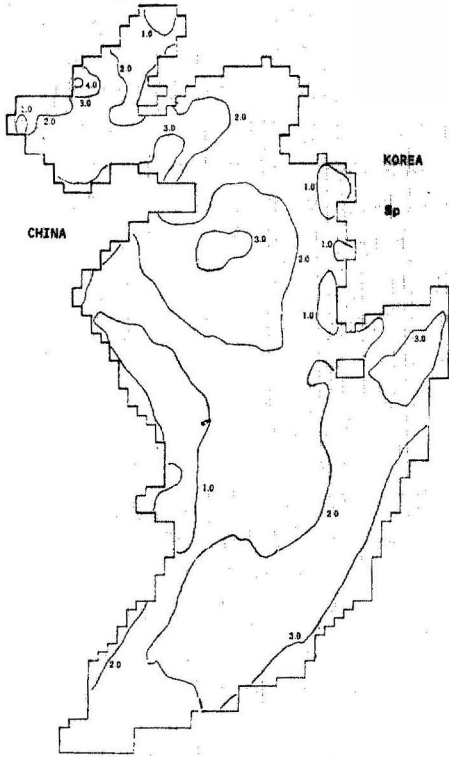


그림 3. 成層係數(S_p)分布圖

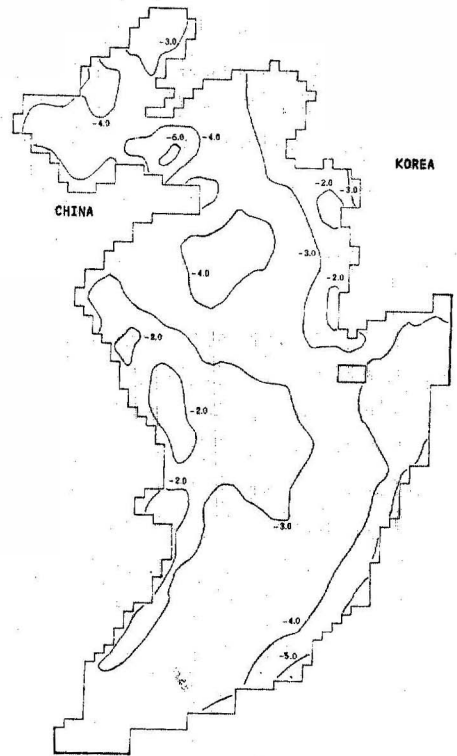


그림 5. 成層係數(S_H)分布圖

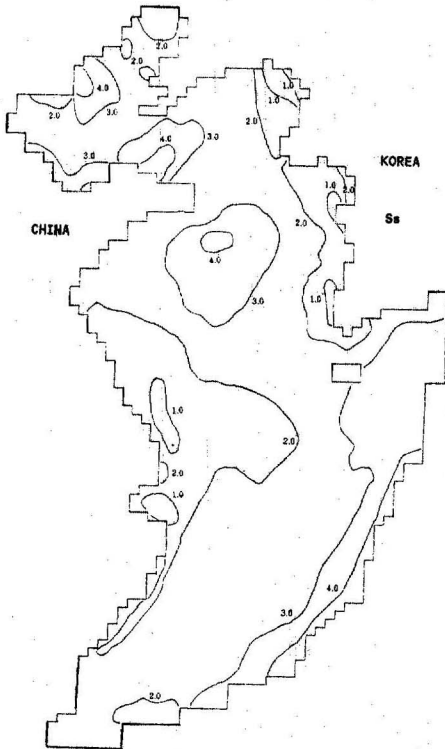


그림 4. 成層係數(S_s)分布圖

림 2에 提示되어 있다. 높은 에너지消散率을 나타내는 海域은 우리 나라 西韓灣, 泰安半島 北側 및 西側海域, 西海岸 大黑山島 近海, 長江河口 및 杭州灣海域으로 潮流가 強하여 沿岸을 따라 垂直 強混合된 水塊가 形成되어 潮境이 形成될 可能性이 많은 海域임을 示唆하고 있다. 그림 3, 4, 5는 潮汐數值모델의 結果를 利用한 바람의 影響은 考慮되지 않은 成層係數 S_p , S_s , S_H 를 各 己 提示하고 있다. 그림 6~그림 10은 換算流速이 0.1406(風速 2.5 m/s), 0.3906(風速 6.9 m/s), 0.5625(風速 9.9 m/s), 0.7656(風速 13.5 m/s) 및 1.0(風速 17.6 m/s)일 境遇의 成層係數 S_H 의 分布를 提示한다. 그림 11은 우리 나라 京畿灣 隣近海域의 成層係數 S_p 의 分布를 三次元 京畿灣 潮汐모델⁽¹⁰⁾로부터 算定한 것인데 大體的으로 그림 3의 大格子網 陸棚모델로부터 導 出한 結果와 一致한다.

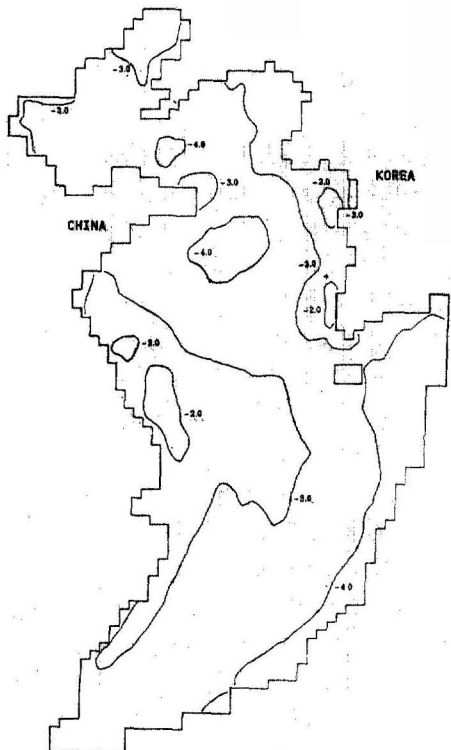


그림 6. 換算流速 0.1406 인 境遇의 成層係數(S_H) 分布圖

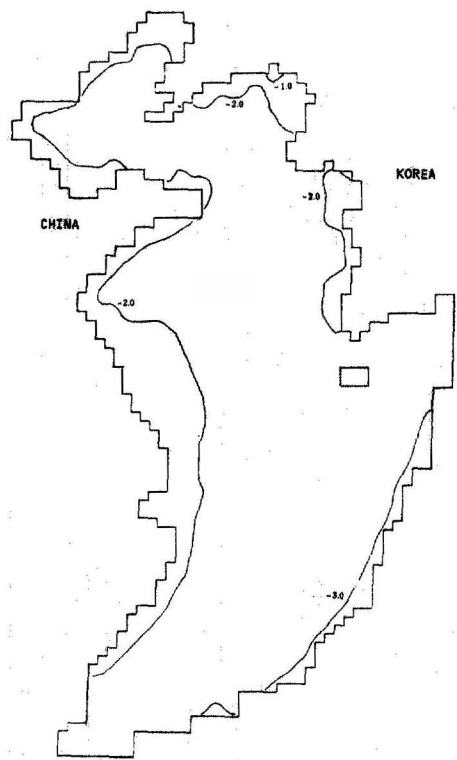


그림 8. 換算流速 0.5625 인 境遇의 成層係數(S_H) 分布圖

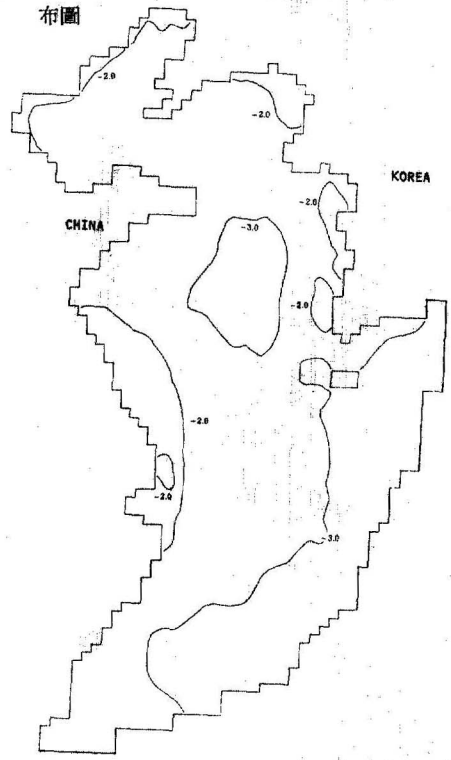


그림 7. 換算流速 0.3906 인 境遇의 成層係數(S_H) 分布圖

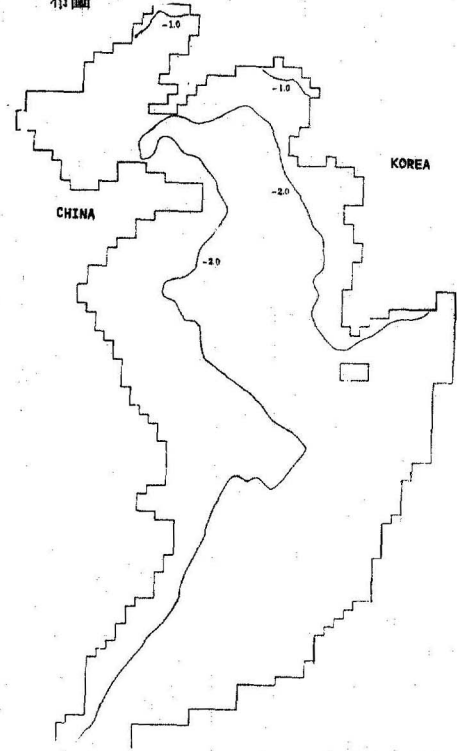


그림 9. 換算流速 0.7656 인 境遇의 成層係數(S_H) 分布圖

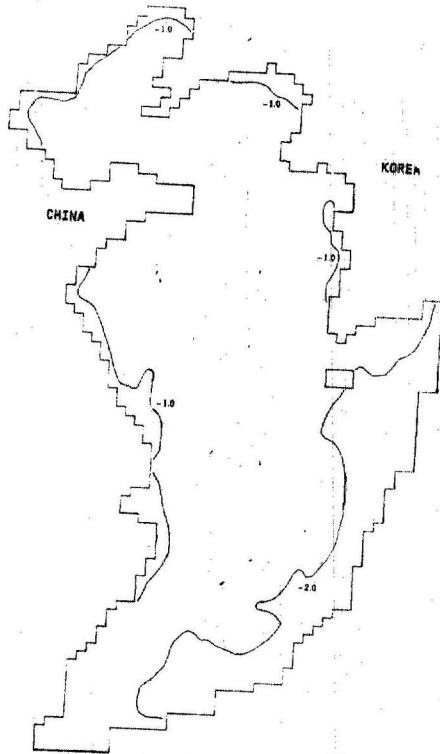


그림 10. 換算流速 1.0 인 境遇의 成層係數(S_p)分布圖

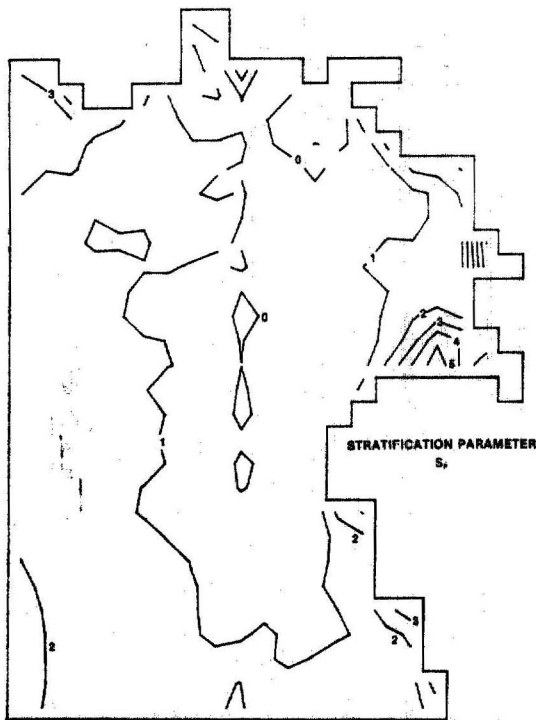


그림 11. 京畿灣近海의 成層係數(S_p)分布圖

4. 討 論

우리 나라 西海岸의 夏季節(7, 8月)의 Q 値는 $0.2 \sim 0.4 \text{ cal/cm}^2/\text{min}^{(11)}$ 인 바 이는 概略的으로 $10^7 \text{ joules/m}^2/\text{day}$ 이다. 이에 相應하는 限界成層係數는 式 (13)에 依하면 $S_p \approx 1$, $S_H \approx -2.4$, $S_S \approx 1.6$ 인데 Q 값의 算定이 上記値에서 3~4 倍 變化되면 成層係數의 값도 $\pm 0.5 \sim \pm 0.6$ 變化된다. 北西歐洲陸棚의 北海에서의 S_p 값은 1.5로 發表⁽¹⁾되었는데 이는 表面熱量 流入率 即 浮力入力이 世界的으로 海域에 따라 크게 變化하는 데 緣由한다. 提示된 成層係數 分布圖를 보면 우리나라의 境遇 西海岸 泰安半島 및 大黑山島 近海에 潮境이 形成되는 것으로 提示되는 데 이는 水產振興院의 定線 海洋觀測資料에 依한 北緯 35 度 51 分(定線 309)에서 8 月中 觀測된 成層, 混合의 境界水域과 概略的으로 一致한다.⁽¹¹⁾ 一次的으로 $S_p = 1.0$ 의 基準에 依하여 潮境의 平均

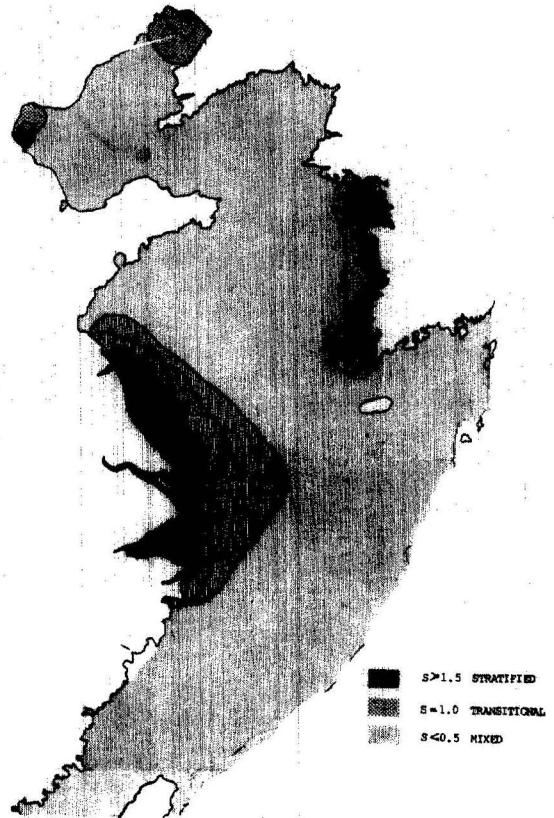


그림 12. 潮汐數值모넬로부터 推定된 潮境의 位置

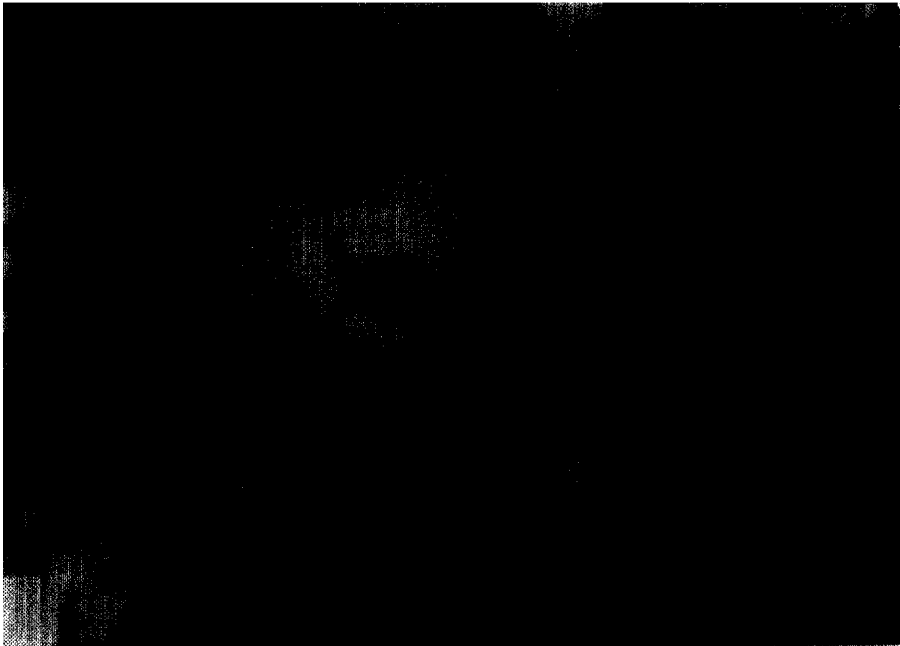


그림 13. 1979年 9月 11~9月 13日 우리나라 近海의 放射海面 溫度分布 重合影像(NOAA-06 衛星)

位置를 推定한 것이 그림 12에 提示된다. 바람의 影響이 潮境形成에 미치는 效果는 成層係數 S_H 에 依해 그림 6~그림 10에 提示된 바 風速이 增加할수록 潮境의 位置는 沿岸쪽으로 移動되며 風速 10 m/s 以上인 경우 黃海 및 東支那海의 海水는 全海域에 걸쳐 垂直混合되는 것을 모델結果는 提示하고 있다. 이 海域의 年平均 風速을 5~7 m/s로 概略할 때 그림 8이 年中 平均된 潮境位置를 推定한다. 그림 13은 美國 商務省 環境衛星 NOAA-06에 依한 1979年 9月初 우리나라 近海의 放射海面 溫度分布의 重合影像인데 沿岸水域에는 低溫의 表層海水가, 黃海中部에는 高溫의 表層海水가 分布된 것을 提示하는 바 夏節期에는 이 溫度勾配가 더 클 것이므로 適切한 衛星寫眞에 依하면 潮境의 分布狀況을 더 仔細히 研究할 수 있을 것이다. 本 研究에서 提示된 成層·混合모델의 制約點으로서 는 潮汐에너지에 依한 垂直混合 포텐셜에너지에 寄與하는 效率이 Simpson等⁽⁶⁾ 및 Fearnhead⁽¹²⁾가 1%以內로서 提示한 結果가 利用되었지만 實

際적으로는 우리 나라 西海岸의 境遇 強潮流가 沿岸을 沿해 흐르고 있어 더 큰 效率이 誘發될 수 있다는 點, 潮汐에너지 消散率을 算定하는 過程에서 水深平均된 流速이 利用되어 實際의 潮流分布와 底層流速의 摩擦係數와의 關係가 明確히 導入되지 않은 點과 浮力入力으로서 鹽分變化度가 無視된 點인데 河川流出水가 큰 海域에서 이 影響은 無視될 수 없을 것이다. 이외에도 우리나라 西海岸의 경우 潮境의 位置變化를 推定함에 있어서 半日週潮와 더불어 日週潮에 依한 潮流影響 即 大潮-中潮-小潮의 2週潮汐變化가 追後の 研究에는 考慮되어야 할 事項이다.

5. 結 論

近年에 黃海의 陸棚力學에 關한 研究가 美·中共共同 海洋觀測을 爲始하여 活潑한 데 本 研究는 이러한 趨勢에 따라 黃海 및 東支那海의 成層·混合모델을 開發하여 그 結果를 成層係數分布圖로서 提示하였다. 研究結果는 成層水와 混

合水の境界面即潮境의 平均의 位置를 推定하는 데 一次的으로 利用될 수 있다. 모델의 開發 및 더 正確한 潮境의 推定, 그 變化度를 立證하기 爲한 海洋觀測을 통한 廣範圍하고도 仔細한 現場資料가 必要하며 特別 環境衛星高眞의 利用이 徹底하게 追後에 이루어져야 할 것이다. 開發되고 있는 東支那海의 3次元 潮流流動 解析 모델⁽¹³⁾을 利用하여 좀 더 信賴性있는 潮汐에너지 消散率을 評價하는 일도 必要할 것이다. 이러한 一連의 研究는 夏節期에 우리 나라 西海岸을 沿한 潮境이 海洋의 生産性和 密接한 關係를 가지므로 海洋資源의 管理側面에서도 重要하다.

謝 辭

本 研究의 一部는 1983年度 韓國科學財團의 部分的인 研究費支援에 依해 遂行되었다.

參 考 文 獻

1. Pingree, R.D. and D.K. Griffiths, Tidal Fronts on the Shelf Seas around the British Isles. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 83, No. C 9, pp. 4615~4622, 1978.
2. Simpson, J.H. and D. Bowers, Shelf Sea fronts' Adjustment Revealed by Satellite IR Imagery. *Nature*, Vol. 280, No. 5724, pp. 648~651, 1979.
3. Hunter, J.R., A Stratification/Mixing Model of Kuwait Waters. *Kuwait Institute for Scientific Research Report MB-6*, 1981.
4. Holligan, P.M., Biological Implication of Fronts on the Northwest European Continental Shelf. *Phil. Trans. R. Soc. London*, A302, pp. 547~562, 1981.
5. Larsen, L.H. and G.A. Cannon, Tides in the East China Sea. *Paper presented to Symposium on Sedimentation on the Continental Shelf*, April 1983, Hangzhou, China.
6. Simpson, J.H., C.M. Allen and N.C.G. Morris, Fronts on the Continental Shelf. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 83, No. C9, pp. 4607~4614, 1978.
7. Simpson, J.H. and D. Bowers, Models of Stratification and Frontal Movement in Shelf Seas. *Deep-Sea Research*, Vol. 28A, No. 7, pp. 727~738, 1981.
8. Hunter, J.R., An Appraisal of the Physical Oceanography of Kuwait Waters: Existing Knowledge and Future Research Need. *Kuwait Institute for Scientific Research Report MB-6*, 1980.
9. Choi, B.H., A Tidal Model of the Yellow Sea and the Eastern China Sea. *Korea Ocean Research and Development Institute Report 80~02*, p. 72, 1980.
10. 崔秉昊, 京畿灣의 三次元 流動解析모델, 韓國海洋學會誌, 第18卷, 1號, pp. 10~20, 1983.
11. Han, C.I., Tidal Mixing vs Thermal Stratification off the West Coast of Korea. *MS Report*, 1982, Seoul National University.
12. Fearnhead, P.G., On the Formulation of Fronts by Tidal Mixing around British Isle. *Deep-Sea Research*, Vol. 22, pp. 311~321, 1975.
13. Choi, B.H., *A Three-Dimensional Model of the East China Sea. Ocean Dynamics of the Japan and East China Seas*, 1984. Elsevier Science Publishers(in Press).

(接受: 1984. 3. 29)