

다층 진단 모델에 의한 광양만의 잔차류 수치 실험

추효상·이병걸^{*}·이규형
여수대학교 해양학과, ^{*}제주대학교 해양토목과
(2001년 10월 12일 접수; 2002년 1월 17일 채택)

Numerical simulation of residual currents by diagnostic multi-level model in Kwangyang Bay, Korea

Hyo-Sang Choo, Byung-Gui Lee^{*} and Gyu-Hyung Lee

Dept. of Oceanography, Yosu National University, Yosu 550-749, Korea

^{*}Dept. of Ocean & Civil Engineering, Cheju National University, Cheju 690-756, Korea

(Manuscript received October 12, 2001; accepted 17 January, 2002)

In order to estimate the quantitative roles of the tide induced residual currents, density currents and wind driven currents on the residual currents in Kwangyang Bay Korea, numerical experiments with a diagnostic multi-level model were carried out. Density currents were calculated from the temperature and salinity data observed in January, May, August and November 1998.

Anti-clockwise circulations are formed at the western inner part of the bay, the location from the east of Myodo Is. to the south of POSCO Co. and the place between Yeosu peninsula and Namhae Is. from the calculation results of the tide induced residual currents. Velocities of the density currents are less than 3cm/s at the western inner part of the bay and about 5cm/s at the southern entrance of the bay. Density currents get strong in summer and weak in autumn. Wind driven currents at the surface layer flow in the directions of the given winds which are the daily mean winds when the temperature and salinity observations are carried out. In the middle and lower layers, however the wind driven currents flow in the opposite direction to the surface currents as supplementary currents. The surface wind driven currents are greater than the tide induced residual currents or the density currents.

The calculated residual currents including the tide induced residual currents, density currents and wind driven currents agree with the results of the current observations approximately. In the Bay, the wind driven currents affect on the residual currents greatest and tide induced residual currents and density currents do in the second place and the third place.

Key words : Kwangyang Bay, Residual currents, Tide induced residual currents, Density currents, Wind driven currents, Numerical experiments, Diagnostic multi-level

1. 서 론

광양만은 남해안 중부 여수해만 북쪽에 위치한 내만으로 동서 길이 약 17km, 폭은 넓은 곳이 약 9km로 여수 해만을 통해 남해와 연결되고 또, 노

량 수도를 통해 인접한 진주만과 연결된다. 만 중앙부에는 묘도, 금오도 등의 작은 섬들이 산재하고 수심은 내만의 서쪽과 북쪽이 대략 5m 이하, 동쪽의 노량 수도와 남동쪽의 여수해만과 이어지는 수로는 약 20m 이상이다. 광양만은 만 북부의 섬진강과 수어천을 통해 연간 $5.8\sim8.7\times10^8$ 톤의 담수가 유입되고 있고 섬진강의 평균유량은 약 $120\text{m}^3/\text{s}$ 정도이다.¹⁾ 계절적 섬진강 하천수의 유입량 변동은 하구

Corresponding Author; Hyo-Sang Choo, Dept. of Oceanography, Yosu National University, Yosu 550-749, Korea
Phone : +82-61-659-3144
E-mail : choo@yosu.ac.kr

추효상·이병길·이규형

주변의 성층 발달 정도를 결정하고 Estuary 순환을 형성하여 하층은 표층과 반대 방향의 흐름에 의한 물질 수송이 이루어진다. 한편, 광양만은 춘·계기는 남서풍, 추·동계는 북서풍이 우세하나, 해수 유동은 일반적으로 조류에 의한 영향이 크고, 반일주조가 지배적이다.

한편, 광양만 주변 연안역은 1970년대 이후의 급격한 경제발전으로 공업단지가 조성되었고, 앞으로도 광양만 광역 개발 계획²⁾에 따라 2001년 까지 $10,657 \times 10^3 \text{ m}^2$ 의 광양항권 공업단지가 조성될 예정으로 있다. 따라서 이러한 광양만 내 매립지 건설로 인한 해안 및 해저 지형의 변화는 만내 해수 유동 변화와 잔차류를 변동시킨다. 만내 대부분의 물질 수송은 조석 잔차류 영향이 커, 2차원 조류 수치 실험만으로도 대략적인 흐름을 파악할 수 있으나 광양만과 같이 하천수 유입량이 많아 염분 차가 크고, 얕은 수심으로 기상조건에 조속히 반응하는 해역은 수평적 밀도 분포 차이에 따라 발생하는 밀도류와 바람에 의한 취송류도 만내의 해수유동에 중요한 역할을 한다. 따라서 광양만의 유동 구조와 잔차류를 좀더 명확히 하기 위해서는 조류 뿐만이 아닌 밀도류와 취송류 효과가 고려된 잔차류 실험이 요구된다.

광양만은 광양제철소 건립을 필두로 지금까지 개발로 인한 해양 환경 변화를 예측하기 위한 환경 영향 평가^{3~5)}가 꾸준히 이루어져 왔고, 현지 관측도 상당량 행해졌다^{6~8)}. 그러나 이들 자료들은 주로 해당 사업 개발역 주변을 중심으로 이루어진 것으로, 광양만 전체를 대상으로 한 광범위한 해황 조사 결과는 거의 없다. 본 연구는 개발이 진행 중인 현재 광양만의 유동 구조와 잔차류를 파악하기 위해 광양만 전역에 대한 계절별 해황조사와 2개 정점에서 유동 관측 조사를 실시하였다. 이들 관측치들은 다층 진단 모델 실험을 통해 밀도류와 바람에 의한 취송류, 조석 응력에 의한 조석 잔차류의 역할을 정량화하고 그 결과를 현장 유동 관측자료로 검증하였다. 이러한 연구는 연안역 개발이 많이 이루어졌고 또 앞으로 상당수 이루어질 예정인 광양만에서 국소적으로 수행되는 개발에 따른 해수 유동 변화 예측과 함께 만 전역의 해수 유동 변화를 파악하기 위해 반드시 수행되어져야만 한다.

2. 수치실험

2.1. 진단모델

진단 모델은 주어진 밀도장에 대응하는 수괴운동을 계산하는 모델로, 유속장이 관측된 수온과 염분에서 얻어진 밀도장에 대응되도록 결정된다. 따라서

진단모델은 밀도장에 대해서는 현장을 재현하게 되어 예측모델 보다 한층 더 신뢰성이 높다고 할 수 있다.

본 연구에서 사용한 기초 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla h \cdot (UU) + \frac{\partial (UW)}{\partial z} + fk \times U = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nabla_h \cdot (\nu_h \nabla_h U) + \frac{\partial}{\partial z} (\nu_r \frac{\partial U}{\partial z}) + T, \quad (1)$$

$$\nabla_h \cdot U + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \int_{-H}^H Udz = 0 \quad (3)$$

$$p = g \int_z^H \rho dz \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla_h \cdot (U\rho) + \frac{\partial (W\rho)}{\partial z} = \nabla_h \cdot (K_h \nabla_h \rho) + \frac{\partial}{\partial z} (K_v \frac{\partial \rho}{\partial z}) + \gamma(\rho_{mb} - \rho) \quad (5)$$

$$T_s = -(u \cdot \nabla_h)u - w \frac{\partial u}{\partial z} \quad (6)$$

$$UU = \begin{bmatrix} UU & UV \\ VU & VV \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 $U(U,V)$ 는 수평 2차원 잔차류 벡터, W 는 연직유속, ∇_h 는 수평 미분 연산자, $f (= 2\Omega \sin \Phi)$, Ω 는 지구 자전 각속도, Φ 는 위도(34.8°N)는 코리올리 파라메터, k 는 연직 단위벡터, p 는 수압, $\nu_h (= 0.016 \times T_p \times U_{am}^2 \text{ m/s})$: T_p 는 조석주기, U_{am} 은 조류 진폭, $\nu_r (= \nu_h \times 10^{-5})$ 은 각각 수평·연직 와동 점성계수, T_s 는 조석용력, $g (= 9.8 \text{ m/s}^2)$ 는 중력가속도, η 는 평균수면에서의 수위 상승량, H 는 수심, ρ 는 밀도, $K_h (= 1 \text{ m}^2/\text{s})$, $K_v (= 1 \text{ cm}^2/\text{s})$ 는 각각 수평·연직 난류 확산계수, γ 는 계수($= 0.5/\Delta t$; Δt 는 시간 step), ρ_{mb} 는 관측치로부터 추정된 밀도, $u(u,v)$ 는 수평 2차원 M_2 분조 유속 벡터, w 는 M_2 분조의 연직 유속, t 는 시간, z 는 연직 상방을 양(+)으로 한 좌표축, 식(6)의 윗줄은 1 조석 주기의 평균을 뜻한다.

경계조건은 자유 수면에 대해

$$\rho \nu_r \frac{\partial U}{\partial z} \int_{z=-H}^H = \rho_a \gamma \frac{2}{\rho} |W_w| W_w \quad (8)$$

여기서 ρ_a 는 공기의 밀도($= 1.23 \text{ kg/m}^3$), γ 는 자유 수면의 마찰계수($= 0.0013$), W_w 는 수평 2차원 풍속 벡터이다. 해저에서는,

$$\nu_r \frac{\partial U}{\partial z} \int_{z=-H}^H = \gamma \frac{2}{\rho} |U| U \quad (9)$$

이 되고 여기서 γ ($= 0.0026$)는 해저마찰 계수이다. 육지 경계는 no-slip 조건으로 했다. 조석 응력은 barotropic 조건에서 조류 계산을 하여 구한다. 이때 조류진폭도 계산하여 ν_h 를 평가할 때 사용한다.

기초 방정식의 이산화에는 유한 차분법을 사용하였고, 비 정상항에는 전진 차분, 이류항에는 상류 차분, 확산항에는 중심차분을 사용하여 근사하였다.

다층 진단 모델에 의한 광양만의 잔차류 수치 실험

2.2. 대상해역

Fig. 1에 대상해역과 해황조사 정점 위치 그리고 수치 모델에 사용된 대상해역의 수심을 나타낸다. 북으로는 광양, 남으로는 여수반도, 동으로는 남해도로 둘러싸인 가로 28.4km, 세로 24.4km의 해역을 대상으로 하였다. 대부분의 영역이 수심 40m 미만이고 비교적 수심이 깊은 영역은 남해도~여수 반도의 남해도 연안에 존재한다. 연직으로는 5개 층(해면~3m, 3~6m, 6~10m, 10~20m, 20~70m)으로 분할하여 수치 계산하였다. 수평격자는 가로, 세로 모두 400m로 하였다. 광양만은 1980년대부터 연안 역 개발이 시작되어 앞으로 2010년 까지 많은 지형 변화를 유발시킬 매립지와 공단이 조성될 예정으로

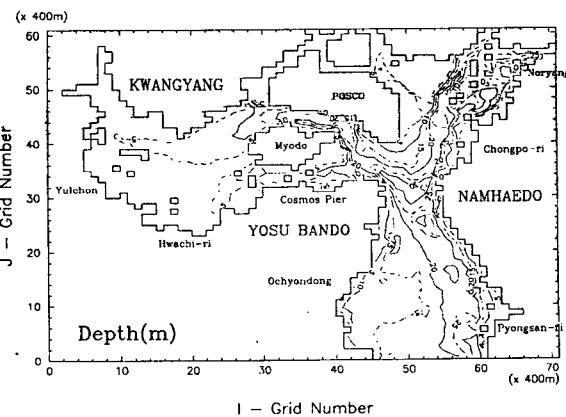
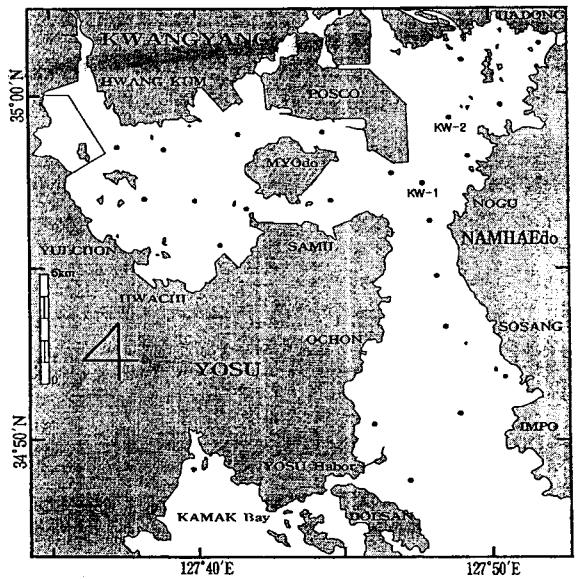


Fig. 1. Observational stations of CTD and tidal currents (KW-1 and KW-2) (above) and depth contours (below) in the study area of Kwangyang Bay.

있다. 본 실험에 사용된 수심은 광양제철소, 여천 산업단지, 율촌 제 1산업단지, 하동 화력발전소, 광양항 콘테이너 부두 등이 건설된 상태의 육안지형으로 관련 해도는 1999년 9월에 개정되어진 1:50,000 해도(No.251)를 사용하였다.

3. 밀도장

본 연구를 위해 광양만 전역을 대상으로 조사한 수온·염분 관측은 춘계 2회(1998. 5. 29, 1999. 4. 28), 하계 4회(1997. 8. 23, 1998. 9. 24, 1999. 7. 19, 1999. 7. 29), 추계 1회(1998. 11. 6), 동계 2회(1998. 1. 21, 1999. 1. 19)로, Fig. 1에 나타낸 광양만내 22개 정점에서 CTD(SBE-19, 정도; 수온 $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$, 염분 $\pm 0.02\text{‰}$)로 실시하였다. 관측은 조시에 따른 해황 변화를 가능한 배제하기 위해 22개 정점의 조사를 4~7시간에 끝내었다.

해수 유동 조사는 Fig. 1에 나타낸 KW-1, KW-2 정점에서 25시간 연속 측류(ACM-200PC; Electromagnetic current meter, Japan Alec Co.) 하였다. 관측은 1997년 8월 19~20일(하계, 대조기) 수심 약 14m의 정점 KW-1의 표면(0m), 5m, 7m, 10m(저층)에서 10~15분 간격으로, 동계(1998년 1월 16~17일, 대조기)는 수심 약 30m의 KW-2 지점의 표면(0m), 4m, 20m(저층)에서 5~30분 간격으로, 춘계(1998년 5월 29~30일, 대조기)는 KW-2 지점의 표면(0m), 10m, 25m(저층)에서 15분 간격으로 25시간 연속 측류하였다.

진단 모델에 필요한 밀도장은 현장 관측 결과와의 검증을 위해 유동 관측이 행해진 시기의 계절별 수온·염분 자료를 택하였다. 춘계는 1998. 5. 29, 하계는 1997. 8. 23, 동계는 1998. 1. 21 관측된 수온·염분 자료를 취하였고 추계는 유동관측이 이루어지지 못한 관계로 1998. 11. 6일 관측된 자료를 사용하였다.

밀도는 Knudsen 상태방정식에 따라 계산한 후, 모델 영역의 격자에 맞게 보간하였다. 공간적으로 듬성듬성한 관측 데이터에서 계산 격자에 맞는 밀도를 구하기 위해 먼저, 각 관측점에서 깊이 방향으로 선형보간하여 각 층의 밀도를 계산한 다음, 구하고자 하는 격자점에서 관측점까지의 거리 L_i 에 반비례하는 가중치로 (10) 식에 따라 수평적 객관보간을 하여 격자점의 밀도를 추정하였다.

$$\rho_{ob} = \sum_i \frac{\rho_i}{L_i} / \sum_i \frac{1}{L_i} \quad (10)$$

한편, 영향역 반경은 3km로 하고 이 반경내 3개 이상의 관측점이 없을 경우, 영향 반경을 1 km씩 증가시켜 적어도 3개의 관측점을 이용하여 보간하였다. 또 구해진 각 격자의 밀도를 평활화하기 위해

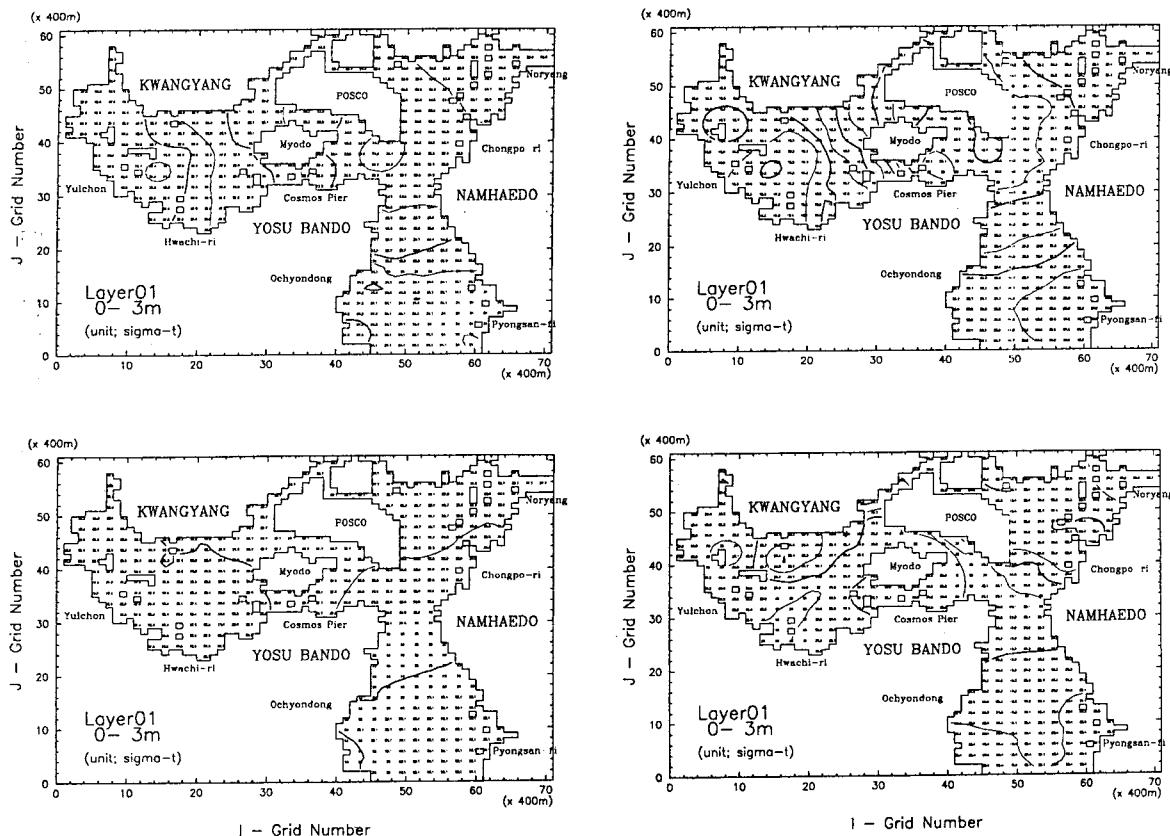


Fig. 2. Horizontal distributions of the calculated density (σ_t) from the observed temperature and salinity data during May (top left), August (top right), November (bottom left) and January (bottom right) in Kwangyang Bay.

자신과 인접한 8개 격자의 밀도를 평균 하였다. 보간된 각 계절별 표층(1 layer) 수평 밀도 분포를 Fig. 2에 나타낸다.

밀도(시그마-t)는 춘계에 만 남쪽 남해 외해가 24.0이상으로 크고, 묘도 서쪽 내만은 23.0 이하로 작다. 묘도와 POSCO 동쪽은 23.5~23.8로 중간 정도이다. 밀도는 묘도 동쪽에서 만 서쪽으로 갈수록 점차 낮아진다. 또 만 남쪽 입구에서 POSCO 동쪽 까지 점차 낮아지나, 여기서 북쪽 노량수로까지 밀도가 다시 높아진다. 하계는 춘계에 나타난 밀도 분포 패턴이 더욱 강화된 형태로 나타난다. 즉, 묘도 동쪽에서 서쪽 만내로 갈수록 밀도는 20.0~18.2로 낮아지고, 만 남쪽 입구에서 POSCO 동쪽 까지 20.9~19.9로 낮아지나 여기서 다시 노량수로까지는 20.4로 높아진다. 따라서 춘, 하계는 묘도 동쪽에서 만 서쪽 천해의 저 밀도역, 만 남쪽의 고 밀도역, 그리고 POSCO 동쪽에서 노량수로까지 중간 밀도 역으로 구분된다. 추계는 만 남쪽 23.0 이상에서 북으

로 갈수록 점차 낮아지고 묘도 서쪽 천해역이 22.6 정도로 가장 낮다. 그러나 춘, 하계의 묘도 동쪽을 경계로 한 밀도 분포 특성은 두드러지지 않다. 동계는 추계와 유사하게 만 남쪽이 26.4 이상으로 크고 북으로 갈수록 25.4로 점차 낮아진다. 서쪽 내만의 북쪽 해역도 밀도가 낮다. 한편, 동, 추계는 춘, 하계와 달리 남에서 북으로 갈수록 밀도가 점차 낮아진다.

4. 조석 및 바람 응력장

광양만은 반 일주 조류가 탁월한 해역으로 계산 영역 남쪽(여수~남해)과 동쪽(남해도 노량해역) 외해 경계조건은 반 일주 조위의 변동을 주었다. 조위 변동은 $\zeta = A \cos ((2\pi / T) \cdot t - \phi)$ 의 여현함수로 하였다. 여기서 A 는 조위진폭, ϕ 는 위상각, T 는 반 일주 조석의 주기이다. 조류에 관해서는 탁월한 반 일주 분조 만 고려하여, 주기적 정상상태에 도달한 1 주기 조석분을 (6)식에 따라 조석 응력을 계산하였다. 표층의 조석 응력 분포를 Fig. 3에 나타낸다.

다층 진단 모델에 의한 광양만의 잔차류 수치 실험

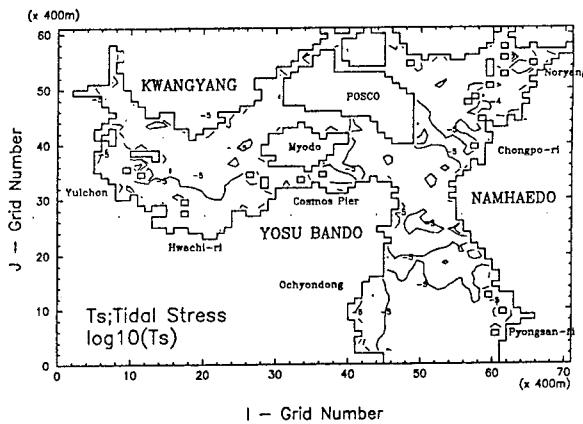


Fig. 3. Calculated tidal stresses(T_s) for M_2 tidal currents at the first layer of the model.

조석 응력은 만 전체가 약 10^{-5}m/s^2 전후로, 한국 남해안 평균 $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{m/s}^2$, 남해 연안 만내 평균 $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{m/s}^2$ 의 중간 쯤으로 광양만은 조석 응력 분포로 보면 한국 남해 연안의 개방형 만에 속한다. POSCO 북쪽의 하천 수로를 제외하고 조석 응력이 큰 곳은 묘도 남동쪽 일부와 POSCO 동쪽 하동 연안해역의 약 10^{-4}m/s^2 이다.

바람은 광양만에서 계절별 수온, 염분 관측과 KW-1, KW-2 정점의 유동 관측이 이루어진 1998년 1월 16일(동계), 1998년 5월 29일(춘계), 1997년 8월 19일(하계), 1998년 11월 6일(추계)의 여수($34^{\circ}44'N, 127^{\circ}44'E$)와 남해($34^{\circ}47'N, 127^{\circ}52'E$) 기상대에서 측정된 평균 풍향 풍속 자료⁹⁻¹²⁾를 이용하였다. 일반적으로 해상풍은 육상풍의 2배 정도로 알려져 있으므로, 관측된 평균 풍속치의 2배를 대상해역에 균일하게 적용하였다. 한편, 시간적으로 변동하는 풍속 벡터장을 모델에 적용할 수도 있으나, 결과에 대한 해석을 간단히 하기 위해 실험 기간 내내 평균 풍속과 주 풍향을 적용한 정상풍으로 하였다. 모델 실험에 주어진 시기별 평균 풍속을 Table 1에 나타낸다.

Table 1. Daily mean winds given in the wind vector field

Day	May 29	Aug.19	Nov. 6	Jan.16
Wind	NNW 4.4 (m/s)	ENE 2.7 (m/s)	SW 4.1 (m/s)	NNE 6.4 (m/s)

5. 결과 및 고찰

5.1. 조류

광양만내 22개 지점의 1~5층에서 계산된 조류 타원을 Fig. 4에 나타낸다. 만 남쪽 입구는 조류 타

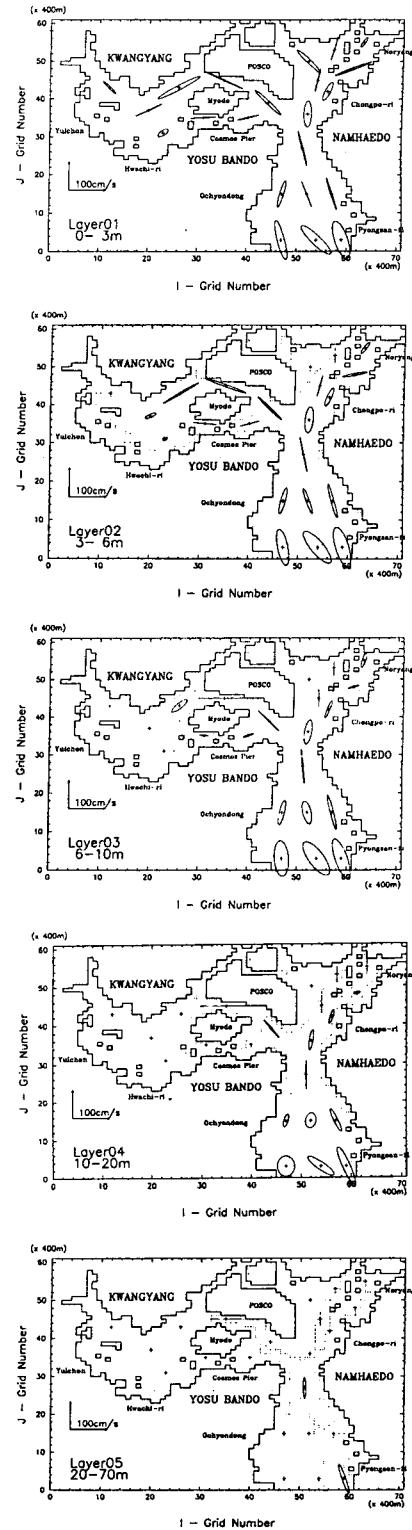


Fig. 4. Calculated M_2 tidal current ellipses at five layers of the model.

추 호 상 · 이 병 결 · 이 규 형

원의 단축이 어느 정도 길이를 가지나, 만 서쪽과 만 동쪽으로 갈수록 단축의 길이가 짧아져 조류는 거의 왕복성을 나타낸다. 수층간 조류 타원의 패턴은 큰 차이가 없다.

Fig. 5(a), (b)에 하계(1997년 8월), 동계(1998년 1월), 춘계(1998년 5월)의 KW-1과 KW-2 정점에서 각각 조사된 조류타원과 수치 모델로 계산된 해당 지점의 반 일주조의 조류타원을 나타낸다. Fig. 5(a)는 하계 KW-1 정점 수심 5m와 7m, 동계 KW-2 정점 수심 4m에서 관측된 것으로, 하계는 반 일주조의 조류 타원에서 장, 단축의 크기가 계산치와 거의 유사하다. 5m 잔차류는 계산치와 약간의 차이는 있으나 거의 같은 유향이다. 수심 7m에서 관측된 잔차류는 5m와 달리 유향이 동쪽이다. 동계는 조류 타원의 장, 단축 방향과 크기가 계산치와 거의 같다. 잔차류는 관측치와 계산치의 크기는 유사하나 유향이 약 90 ° 차이 난다. 이는 현장의 잔차류가 조류에 의한 잔차류와 밀도류, 취송류 및 이들 흐름이 복합되어 나타나기 때문인 것으로 생각된다. Fig. 5(b)는 춘계(1998년 5월) KW-2 정점 표면(0m), 10m, 25m 수심의 조류 타원이다. 0m, 10m, 25m의 반일주 조류는 주로 북북동~북동이고 표층이 유향의 분산이 크다. 관측에 나타난 잔차류는 표면이 남동 방향으로 유속이 다소 크나, 10m와 25m는 유향이 북~북서방향이고 유속은 작다. 계산치도 0m가 크고, 10m, 25m는 작다. 유향은 각 수층에서 다르게 나타난다. 관측에 의한 잔차류 크기가 수심에 따라 다르고, 계산치의 유향과도 다른 것은 하계와 동계가 같다.

5.2. 조석 잔차류

1~4층의 조석 잔차류 분포를 Fig. 6에 나타낸다. 조석 잔차류는 barotropic한 흐름이라 표, 중, 저층의 패턴이 큰 차이는 없으나 지형이나 수심 변화에 따른 비 선형적 특성으로 국소적 변화를 보인다. 대체로 묘도 서쪽의 광양만 내부는 약한 반시계 방향 환류가 형성되고 묘도 동쪽, POSCO 남쪽 그리고 여수 반도 북쪽 해역에도 반시계 방향의 환류, 그리고 POSCO 동쪽에서 노량수도까지의 광양만 동쪽 해역은 북동류가 형성된다. 광양만 남쪽 여수 반도~남해도의 수심이 비교적 깊은 해역에도 반 시계 방향의 환류가 형성되어 있다. 따라서 광양만은 대체로 반 시계 방향의 환류가 조석 잔차류로 발달되어 있는 유동 특성을 지닌다.

5.3. 밀도류

계절별 수층별 밀도 분포에 따라 계산된 밀도류 중, Fig. 7에 표층(1 layer)에 대한 계절별 밀도류 분

포를 나타낸다. 한편, 각 계절에 대한 수층(5개 층)별 밀도류 분포 모두를 나타낼 수 없는 관계로 표층에 대한 결과만 제시하였다. 춘계는 묘도 서쪽 내만역이 2~3cm/s 미만으로 매우 약하다. 만 남쪽 입구에서 POSCO 동쪽까지 5cm/s 미만의 흐름이 존재하나 유향의 공간적 분포가 복잡하고 또, 수심에 따른 변화도 나타난다. 하계는 밀도 성층이 나타나고 해역별 밀도 차가 계절중 가장 커, 계산된 밀도류 크기도 계절중 가장 크다. 서쪽 내만역의 표층과 중, 저층 유향은 서로 달랐다. 만 남쪽에서 POSCO 동쪽까지 밀도류가 복잡하게 분포하는 것은 춘계와 유사하다. 추계는 계절중 가장 밀도류가 약하게 나타난다. 만 남쪽에서 POSCO 동쪽 까지의 유속도 매우 작다. 이는 추계의 밀도가 공간적으로 가장 균일하기 때문인 것으로 생각된다. 동계는 밀도가 연직적으로 균일하나 만 남쪽에서 POSCO 동쪽 까지 수평적 밀도 변화가 커, 추계보다 유속이 크다. 그러나 만 서쪽 천해역은 유속이 매우 작다.

5.4. 취송류

Table 1의 계절별 평균 풍속에 의한 표층의 취송류 분포를 Fig. 8에, 그리고 수심에 따른 취송류 변화를 보기 위해 풍속이 가장 큰 동계의 중(2 layer), 저층(3 layer)의 취송류 분포를 Fig. 9에 나타냈다. 모델에 주어진 바람 응력은 조류가 정상 상태에 도달한 이후의 1조석 주기에 대해 적용하였다. 춘계는 북북서 풍에 따라 표층에는 남남서류가 우세하다. 서쪽 내만역은 광양 연안에서 남~남서류한 취송류가 유품, 화치리 연안에 퇴적되어 연안을 따라 반시계 방향으로 약하게 회전한다. 한편, 유품, 화치리 연안에 퇴적된 취송류는 중, 저층에서 그 보충류로 북북서류하게 된다. 만 남쪽입구에서 POSCO 동쪽은 수심이 만 서쪽 천해역보다 깊어 남남서 방향의 취송류는 중층까지 미치게 된다. 따라서 저층은 북동방향의 보충류가 형성된다. 하계는 동북동 풍으로 계절중 가장 평균 풍속이 약하다. 취송류는 표층이 대체로 서류이나 중, 저층은 동~남동류이다. 추계는 남서풍으로 취송류는 표층에서 북동류한다. 수심이 얕은 서쪽 내만은 중, 저층에서 남서류가 나타난다. 만 남쪽에서 POSCO 동쪽의 중층까지는 약하게 북동 방향의 취송류가 남아있으나 저층에서는 만 서쪽 천해역과 같이 취송류와 반대 방향의 남서류가 형성된다. 동계는 북북동풍으로 계절중 가장 평균 풍속이 크다. 풍속이 큰 만큼 취송류의 유속도 계절 중 가장 크다. 표층의 흐름은 한 전체적으로 남서방향이나 수심이 얕은 서쪽 내만은 중, 저층에서 북동류가 나타난다(Fig. 9). POSCO 동쪽의 중층

다층 진단 모델에 의한 평양만의 잔차류 수치 실험

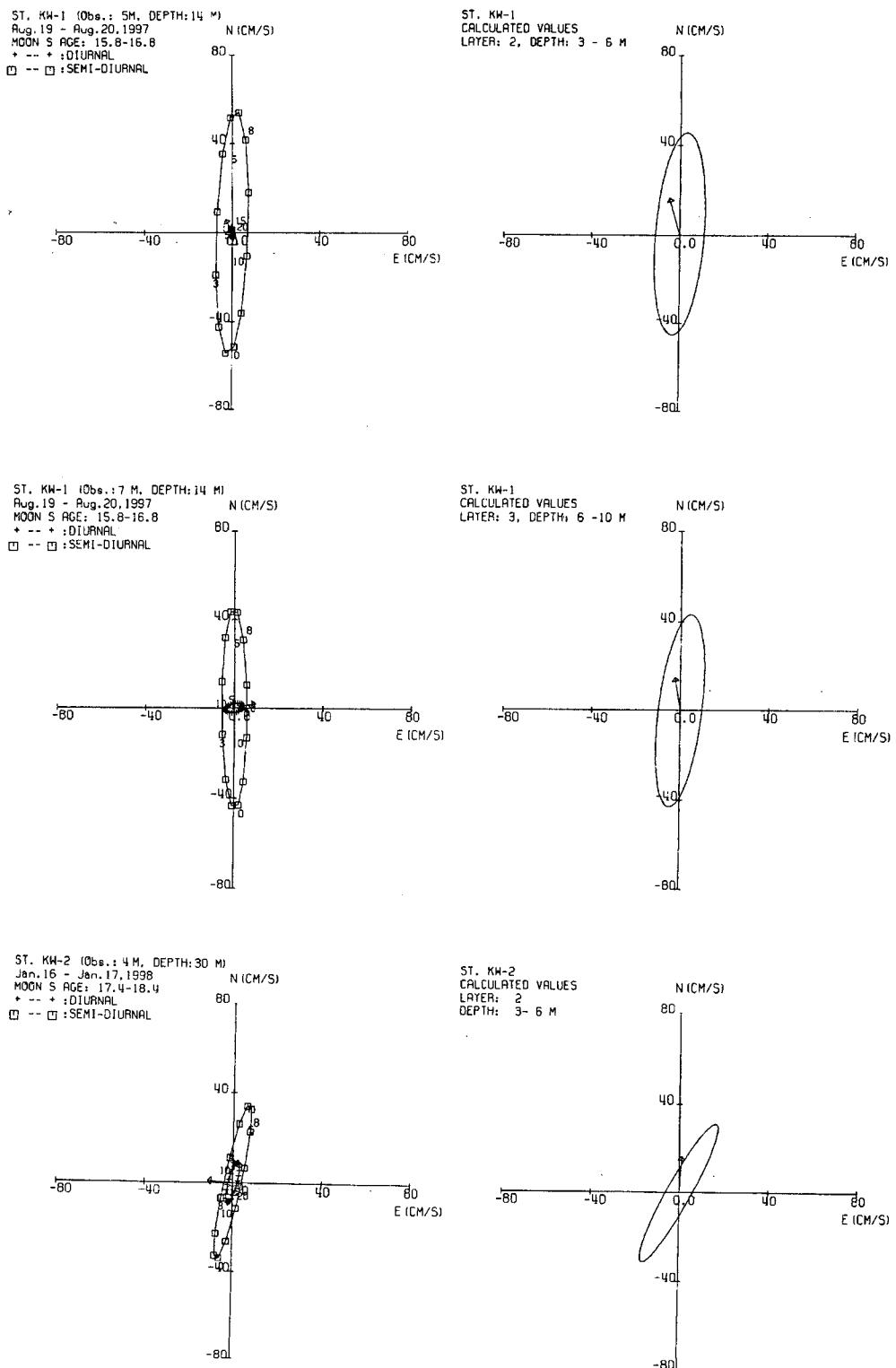


Fig. 5(a). Observed (left) and caculated (right) tidal current ellipses at 5m (top) and 7m (middle) depth of the station KW-1 during August, and 4m (bottom) depth of the station KW-2 during January in Kwangyang Bay.

추 호 상 · 이 병 결 · 이 규 형

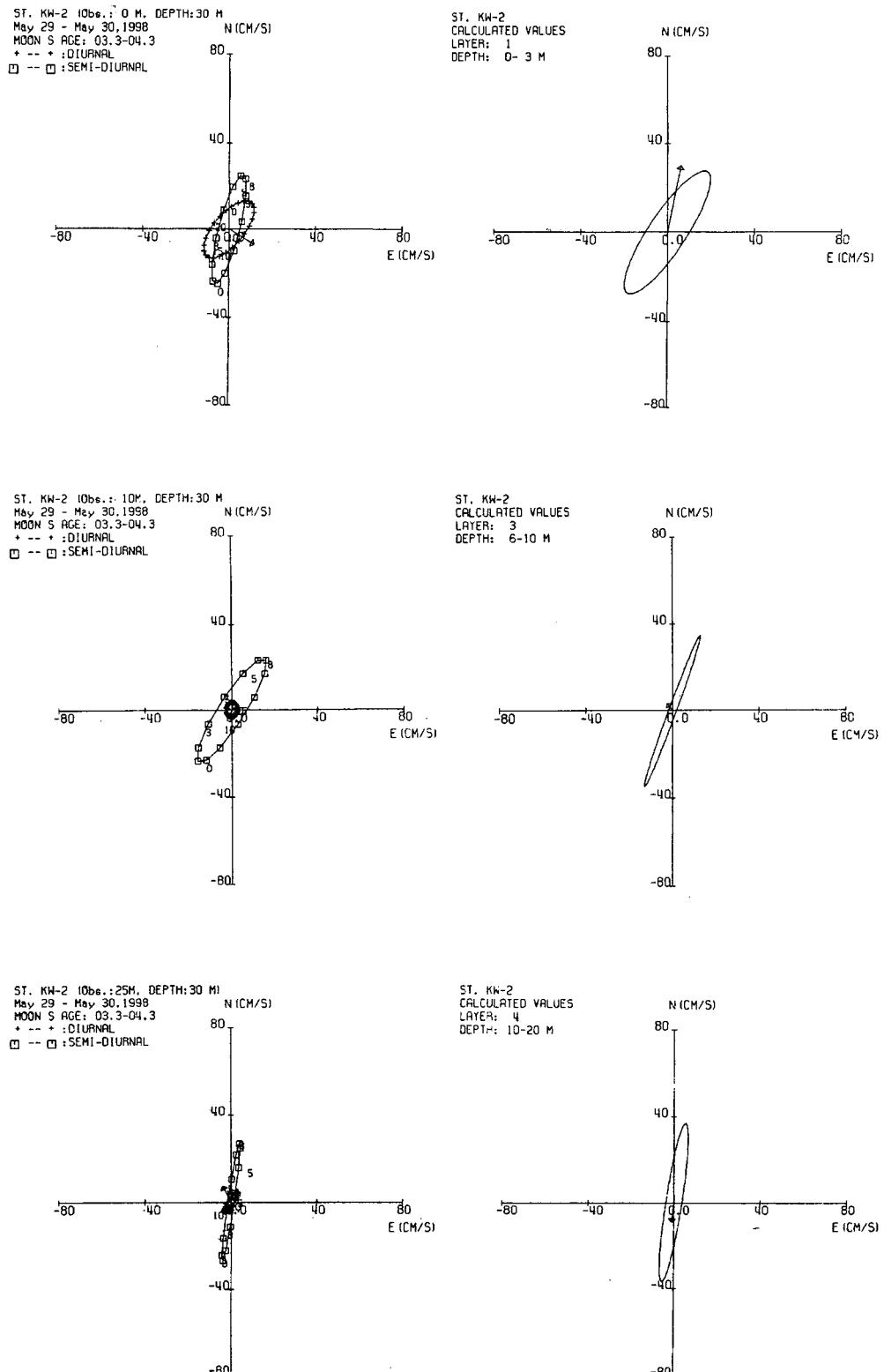


Fig. 5(b). Observed (left) and calculated (right) tidal current ellipses at 0m (top), 10m (middle) and 25m (bottom) depth of the station KW-2 during May in Kwangyang Bay.

다층 진단 모델에 의한 광양만의 잔차류 수치 실험

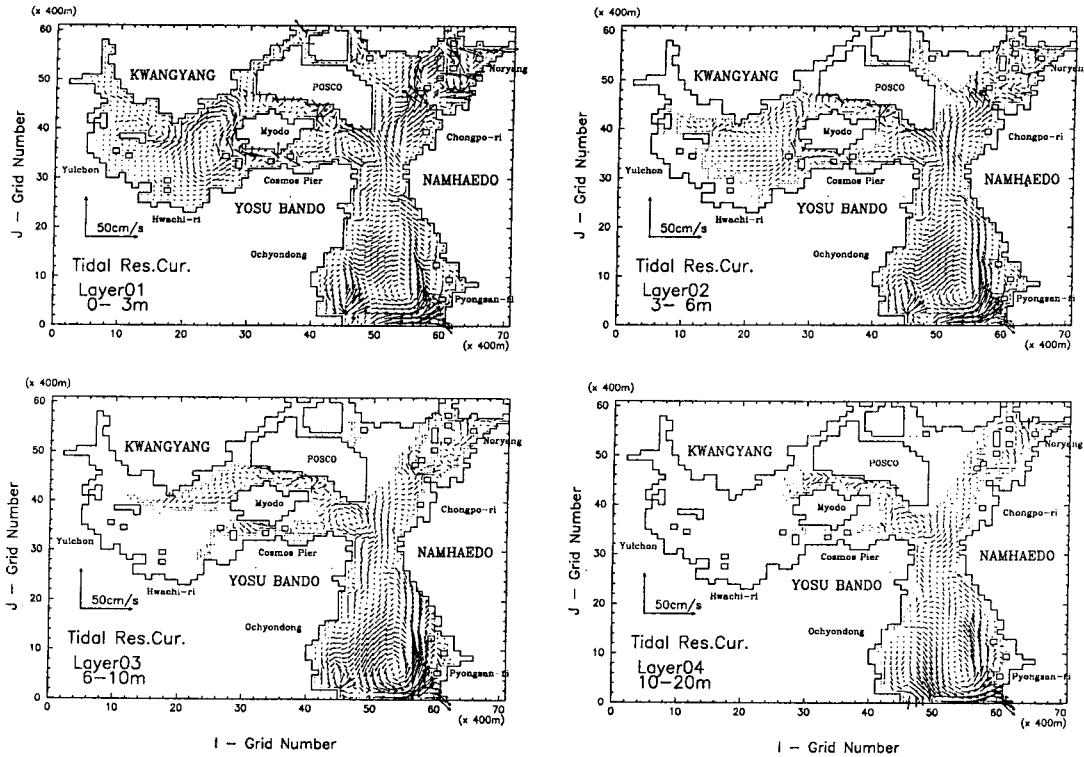


Fig. 6. Calculated tidal residual currents at four layers of the model.

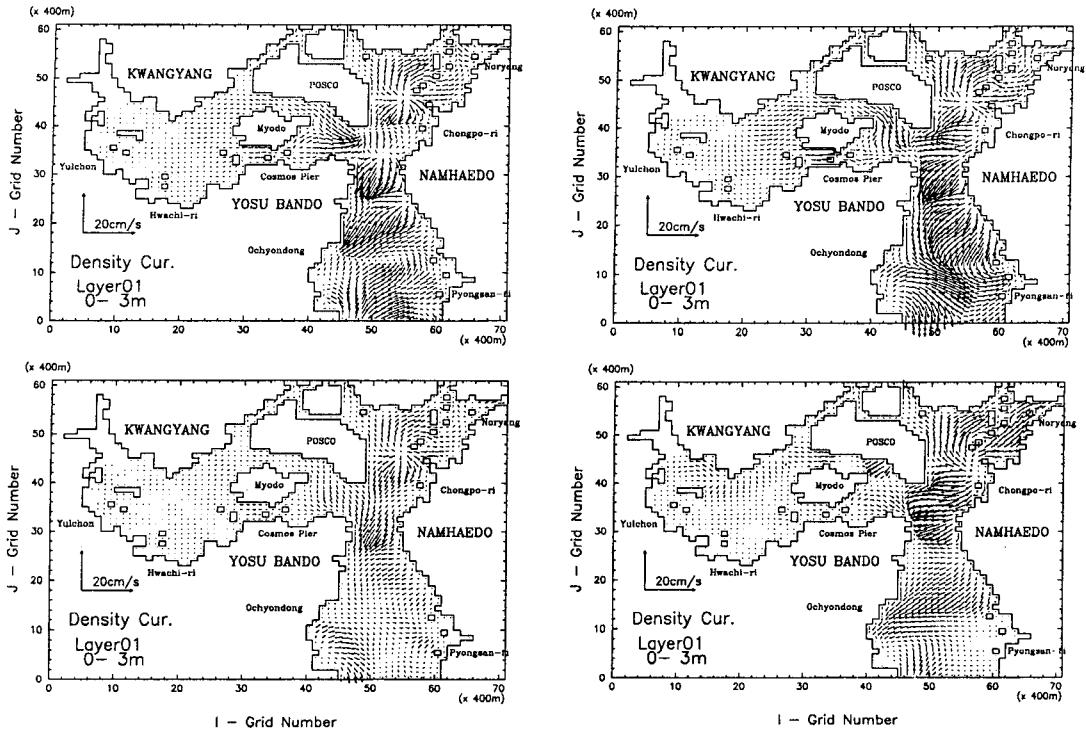


Fig. 7. Calculated density currents from the density distributions during May (top left), August (top right) November (bottom left) and January (bottom right) in Kwangyang Bay.

추효상·이병걸·이규형

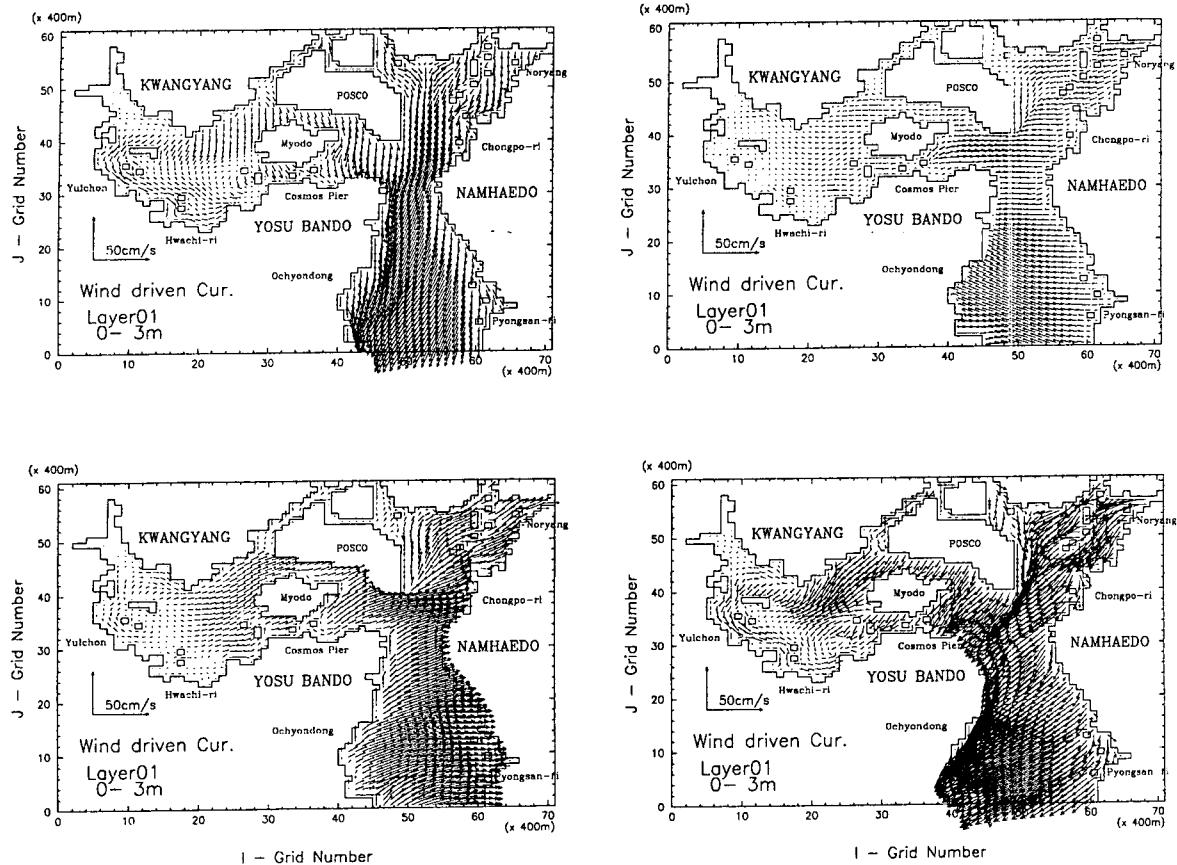


Fig. 8. Calculated wind driven currents from the observed daily mean wind during May (top left), August (top right), November (bottom left) and January (bottom right) in Kwangyang Bay.

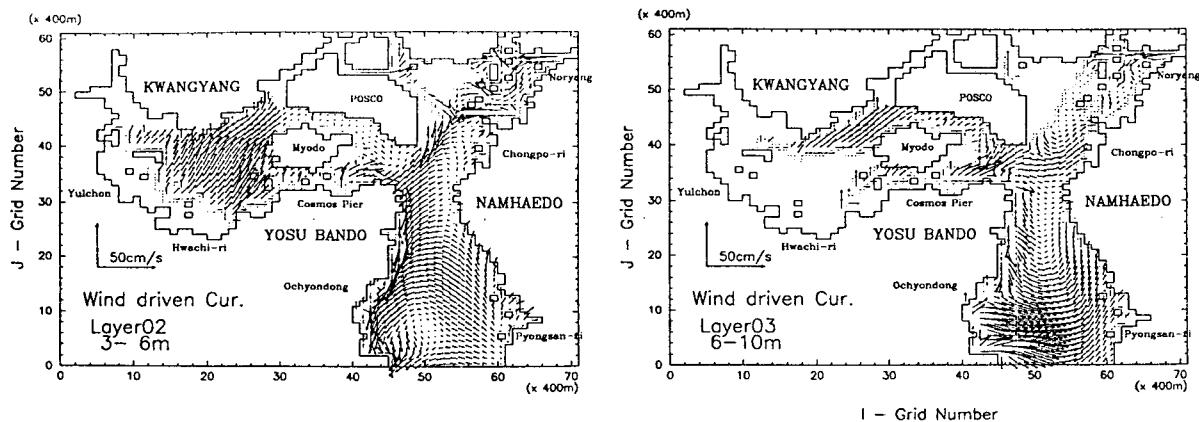


Fig. 9. Calculated wind driven currents at the second (above) and the third (below) layer of the model during January (bottom right) in Kwangyang Bay.

은 남서 방향의 흐름이 있으나, 저층은 만 서쪽과 같이 취송류와 반대 방향의 동~북동류가 형성된다.

계절적 밀도 변화에 따른 밀도류와 바람에 의한 취송류를 비교해 볼 때 두 흐름 중 취송류가 월등히

다층 진단 모델에 의한 광양만의 잔차류 수치 실험

거, 광양만도 어느 연안역이나 천해의 만과 같이 바람이 만내 유동에 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다. 또, 표층 취송류 크기가 조석 잔차류 크기 보다 커, 동계와 같이 바람이 강한 시기는 취송류가 물질 수송을 지배하는 연안류 중 가장 탁월할 것으로 보여진다. 그러나 중, 저층은 조석 잔차류가 더 탁월하다. 한편, 지금 까지 알려진 바로는 광양만에 파랑이 발달할 정도의 충분한 수역이 없고, 외해로부터 파랑의 파급도 제한적이고, 파랑이 여수 해안을 북진하는 경우 이외에는 파랑의 영향이 크지 않는 것으로 보고 되고 있으나, 본 수층 별 실험 결과는 우세한 계절풍에 의한 영향이 표층의 취송류를 발달시키는 것으로 나타난다. 그러나 이것은 바람의 세기를 해상에 적용시키기 위해, 관측된 풍속 자료보다 더 세계 실험에 적용시킨 결과에 의한 것으로도 여겨져 향후 관측치와 계산치의 보다 정량적인 비교 검토가 요구된다. 한편, 밀도류는 조석 잔차류, 취송류의 3가지 흐름 중, 가장 크기가 작다.

5.5. 잔차류 계산 결과와 관측치의 비교

각 계절의 조석 잔차류, 밀도류, 취송류가 포함된 표, 중, 저층의 잔차류 분포를 Fig. 10(a)~(d)에 나타낸다. 춘계(Fig. 10(a))의 표층은 취송류 유향과 유사하게 대체로 남서류이다. 중, 저층은 표층과 유향이 대체로 반대이다. 중, 저층은 남해도와 여수반도 북단을 연결하는 지점에서 흐름이 나누어진다. 이 지점에서 만 남쪽 입구까지는 남해도 연안을 따라 여수 반도 연안으로 흐르는 반 시계방향의 환류가 형성되고 POSCO 동쪽에서 노량수로까지는 대체로 북~북동류이다. POSCO 남쪽에서 묘도 사이 좁은 수로는 유향이 일정하지 않으나 대체로 북향이다. 묘도 서쪽 내만역은 중, 저층에서 북향류가 형성된다.

하계(Fig. 10(b))는 취송류 영향이 타 계절에 비해 상대적으로 작다. 서쪽 내만의 표층은 약한 남서류이나 중, 저층은 동류로 나타난다. 하계도 춘계와 같이 남해도와 여수반도 북단을 연결하는 해역의 중, 저층에서 흐름이 나누어진다. POSCO와 여수반도 사이의 좁은 수로는 반시계 방향의 작은 eddy가 형성된다. 하계는 춘계에 비해 밀도류와 조석 잔차류 영향이 유동 패턴에 더 크게 작용한다. 추계 잔차류(Fig. 10(c))는 표층과 수심이 얕은 서쪽 내만이 취송류와 유사한 패턴이나, 만 남쪽과 POSCO 동쪽 노량수로 중, 저층은 조석 잔차류 패턴과 유사하다. 추계는 계절중 밀도류 영향이 가장 작다. 동계의 잔차류(Fig. 10(d)) 패턴은 취송류 영향이 가장 크다. 표층 잔차류는 취송류의 유향, 유속과 거의 같다. 그

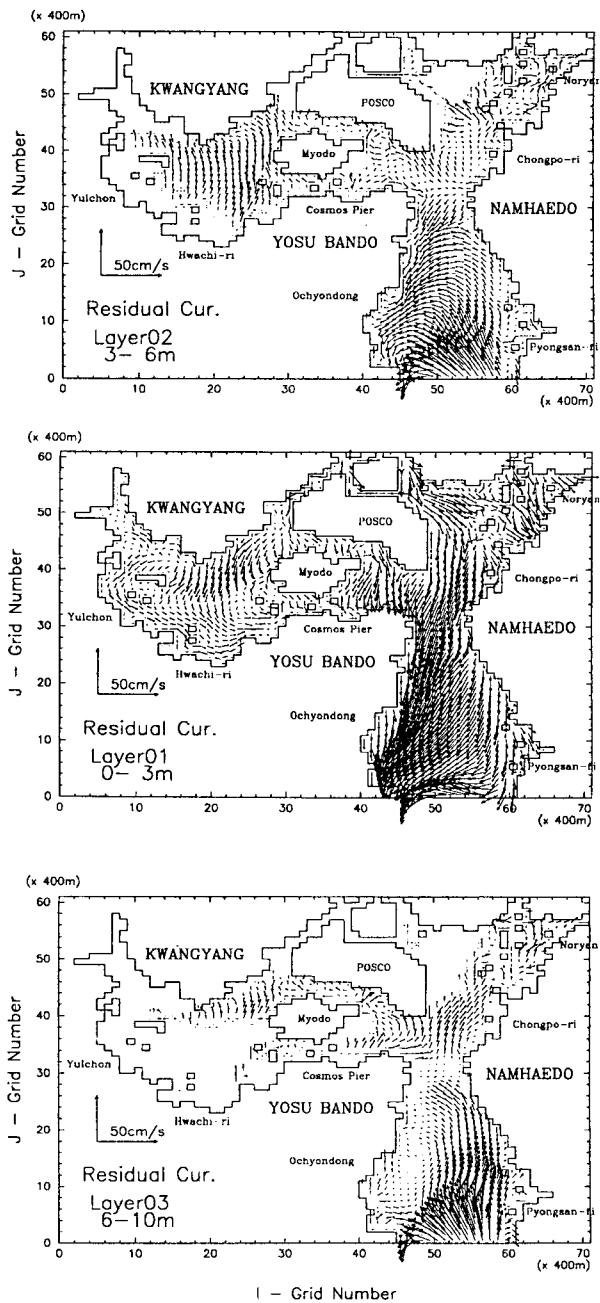


Fig. 10(a). Calculated residual currents from the distributions of tidal stress, density and wind in May, 1998 at the first (top), the second (middle) and the third(bottom) layer of the model.

러나 POSCO 동쪽의 중, 저층은 흐름의 분산이 크다.

광양만에서의 잔차류는 대체로 취송류의 영향을 많이 받고 다음으로 조석 잔차류, 밀도류 순이다. 한편, 이들 잔차류 계산치는 현장에서 주어질 수 있는

추 흐 상 · 이 병 검 · 이 규 형

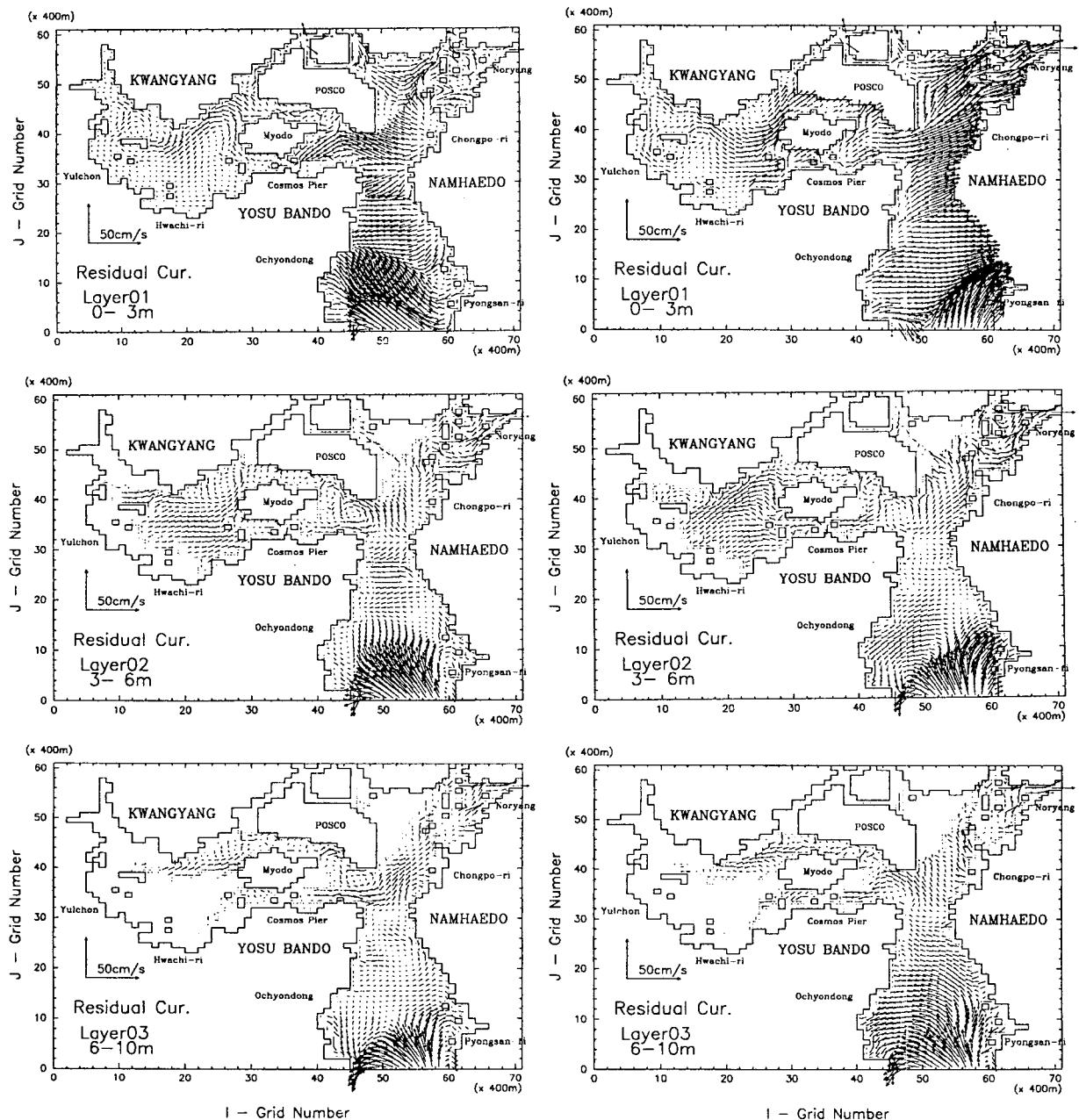


Fig. 10(b). Calculated residual currents from the distributions of tidal stress, density and wind in August, 1997 at the first (top), the second (middle) and the third(bottom) layer of the model.

모든 factor를 고려한 것이므로 실제 현장에서 관측된 잔차류와 비교될 수 있다. Fig. 11(a)~(c)는 춘계 KW-2 정점, 하계 KW-1 정점, 동계 KW-2 정점에서 조사된 잔차류와 동일 지점의 해당 수심에

Fig. 10(c). Calculated residual currents from the distributions of tidal stress, density and wind in November, 1998 at the first (top), the second (middle) and the third(bottom) layer of the model.

서 계산된 잔차류를 비교한 것이다. 춘계(Fig. 11(a)) KW-2 정점에서 계산치와 관측치의 잔차류 크기는 3개 수심에서 대체로 유사하나 표면(0m)의 유향이 약 90도 차이 난다. 표층은 바람에 의한 추

다층 진단 모델에 의한 광양만의 잔차류 수치 실험

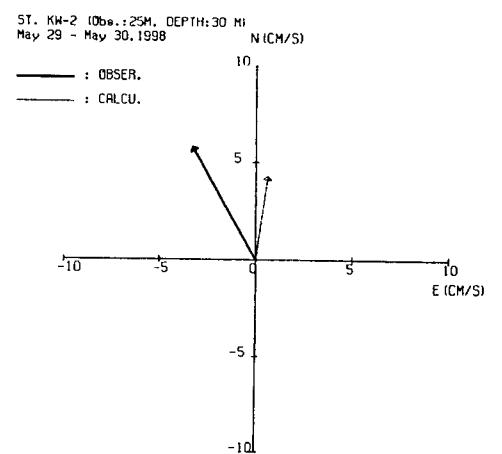
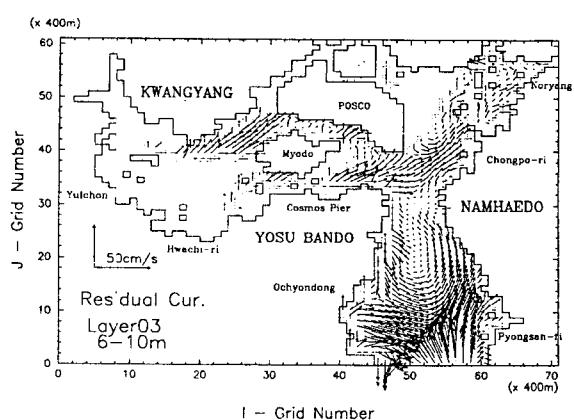
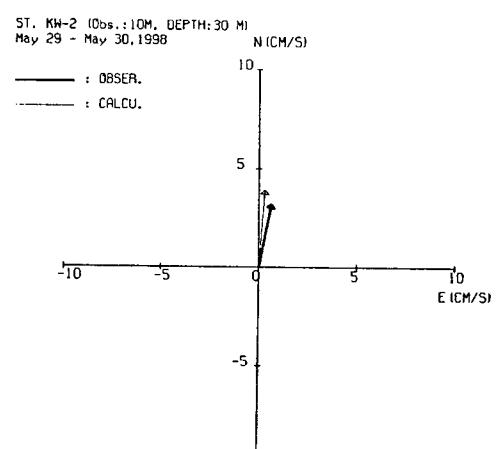
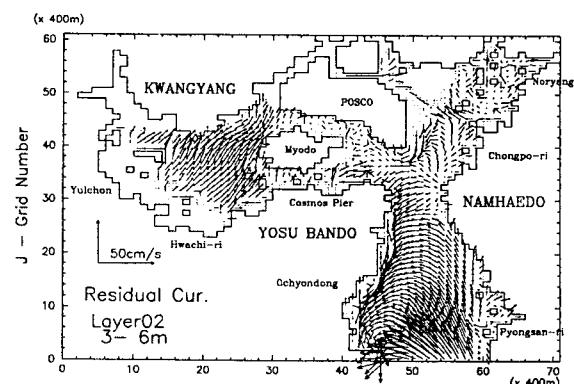
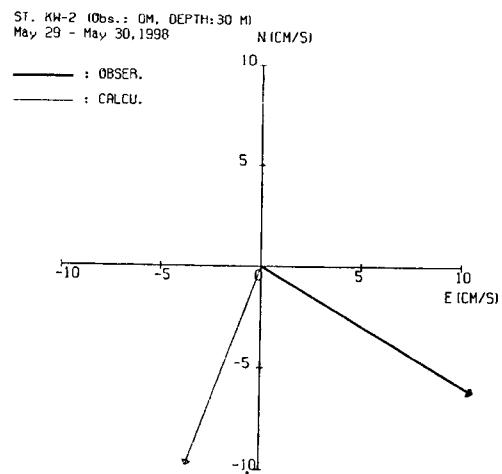
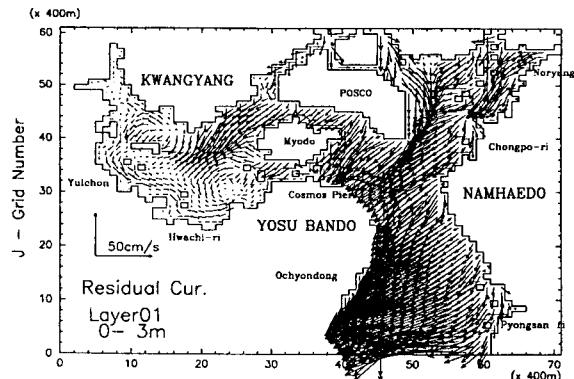


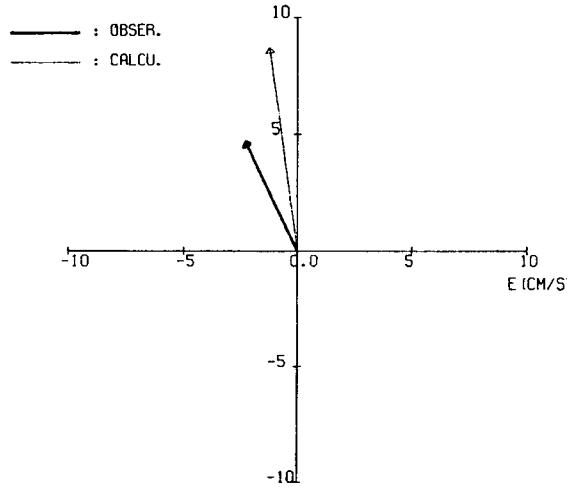
Fig. 10(d). Calculated residual currents from the distributions of tidal stress, density and wind in January, 1998 at the first (top), the second (middle) and the third(bottom) layer of the model.

송류 영향이 매우 크게 나타나므로 관측치에 나타나는 1일 동안의 바람과 해당일의 평균 풍향 풍속 입력에 의한 계산치와는 다소 차이가 있을 수 있다. 또 취송류는 약간의 수심 변동에 따라 유향이 매우

Fig. 11(a). Observed (thick line) and calculated (thin line) residual currents at the surface (top), 10m (middle) and 25m (bottom) depth of station KW-2 during May in Kwangyang Bay.

추 호 상 · 이 병 결 · 이 규 형

ST. KW-1 (Obs.: 5M, DEPTH: 14 M)
Aug.19 - Aug.20, 1997



ST. KW-1 (Obs.: 7M, DEPTH: 14 M)
Aug.19 - Aug.20, 1997

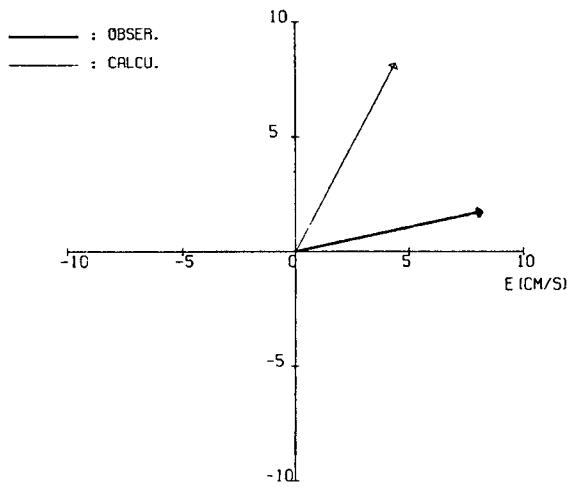
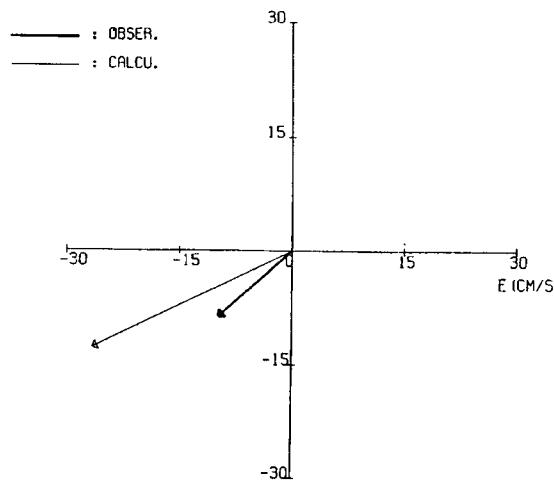


Fig. 11(b). Observed (thick line) and calculated (thin line) residual currents at 5m (above) and 7m (below) depth of station KW-1 during August in Kwangyang Bay.

크게 변하므로 고정된 수심의 관측치와 0~3m 까지 평균된 유향은 약간 다를 수 있다. 10m 수심의 관측치와 계산치는 거의 일치한다. 25m 수심은 계산치가 관측치보다 약간 작고 유향도 30도 정도 차이 난다. 하계(Fig. 11(b)) KW-1 정점의 5m와 7m에서 관측된 잔차류는 계산치와 약간의 유향 차이는 있으나 대체로 유사하다. 마찬가지로 동계(Fig. 11(c)) KW-2 정점 표면과 4m의 잔차류도 계산치와 크기와 방향에 약간의 차는 있으나 대체로 일치한다. 이는 수심별 진단 다층 모델에 현장 관측으로 구한 밀

ST. KW-2 (Obs.: 0M, DEPTH: 30 M)
Jan.16 - Jan.17, 1998



ST. KW-2 (Obs.: 4M, DEPTH: 30 M)
Jan.16 - Jan.17, 1998

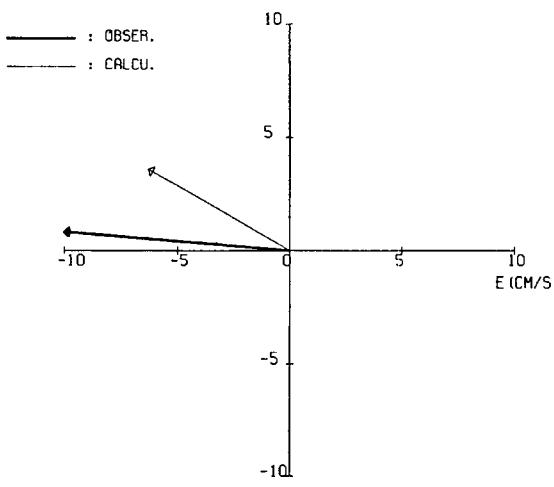


Fig. 11(c). Observed (thick line) and calculated (thin line) residual currents at 0.m (above) and 4m (below) depth of station KW-2 during January in Kwangyang Bay.

도, 관측 당일의 바람 그리고 조석 조건을 입력하여 계산된 잔차류가 현장에서 측정된 잔차류를 대체로 잘 재현하고 있음을 의미한다.

한편, 잔차류가 수심에 따라 이와같이 다른 것은 수심과 해저 지형 변화 등에 의한 조석 잔차류의 영향도 있으나 그 보다는 취송류와 밀도류의 영향에 의한 것이 더 클 것으로 생각된다. 유동 관측이 이루어진 시기의 해당 정점 부근의 수온, 염분 및 밀도의 연직 분포를 Fig. 12에 나타낸다. 춘계(1998.5.29) KW-2 정점 주변의 수온, 염분, 밀도의

다층 진단 모델에 의한 광양만의 잔차류 수치 실험

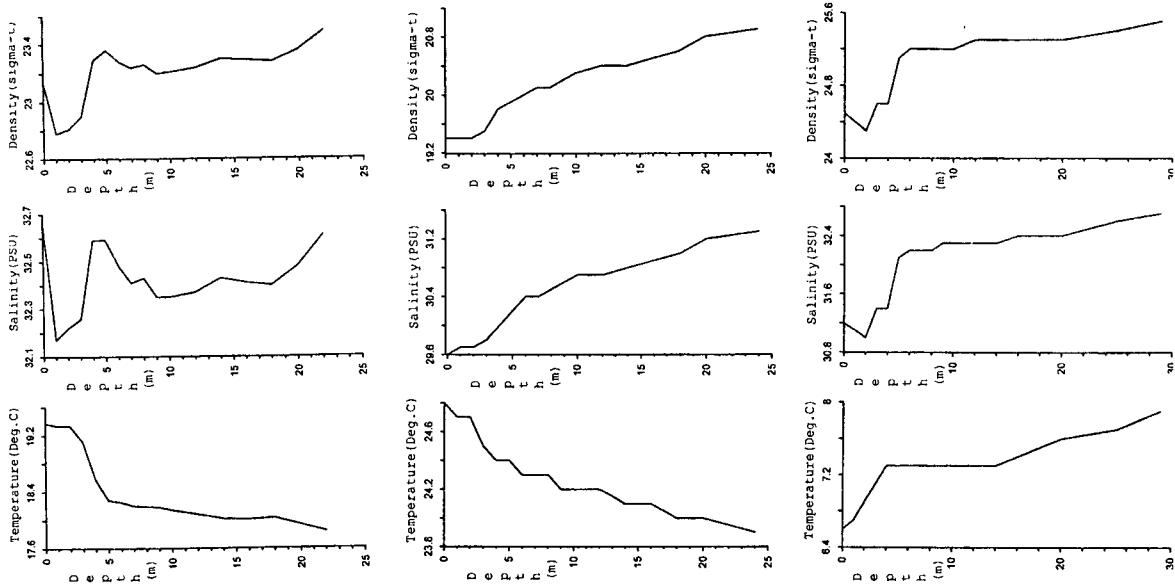


Fig. 12. Vertical profiles of temperature, salinity and density at CTD station near KW-2 during May (top), KW-1 during August (middle) and KW-2 during January (bottom) in Kwangyang Bay.

연직 단면에서 수온은 표층 0~2m가 표층 혼합층, 2~5m가 수온약층, 5m 이심이 저층 등온층이다. 염분은 표면이 높았다가 이후 낮은 상태에서 수심 5m 까지 점차 증가하여 수심 5m 이내에서 변화가 크다. 밀도도 염분 분포와 유사하다. 춘계 KW-2 정점의 잔차류 변화(Fig. 11(a))에서 수심 10m와 25m의 잔차류는 수심에 따라 유속이 약간 줄어들었을 뿐 유향은 대체로 유사하다. 그러나 표면(0m)은 유속 크기와 유향이 10~25m 수심과 다르다. 이는 수괴의 연직 구조에서 0~2m까지 표층에 미치는 바람 영향과 5m 이하의 등 밀도층에 의한 것으로 추측된다. 하계(1997. 8.23) KW-1 주변은 춘계과 같이 0~2m의 표층 혼합층, 2~5m의 약층 그리고 6m 이심의 변화가 작은 층으로 구분된다. 잔차류(Fig. 11(b))는 5m와 7m에서 측정되었고 두 수심간 잔차류는 약 90도 정도의 유향차가 난다. 동계 KW-2 주변은 기온 하강과 강한 바람으로 인해 표층 혼합층이 0~4m로 깊어진다. 6m 이심은 수온, 염분, 밀도에 거의 변화가 없다. KW-2 정점의 잔차류(Fig. 11(c))는 0m 와 4m가 대체로 서향류로 취송류 영향을 받는 것으로 보여지고, 수괴 구조에서 나타난 표층 혼합층 범위에 해당한다.

6. 결 론

잔차류는 해역의 수심과 해저 지형에 의한 조석 잔차류와 하천수나 계절적 수온 변화에 따른 연안 밀도류 그리고 수심이 얕은 천해의 폐쇄적 만에 주

요하게 작용하는 바람 용력에 의한 취송류 영향에 따라 관측 시기 및 관측 수심에 따라 각기 달리 나타나 해역의 순환 메카니즘에 주요하게 작용한다.

광양만 전역에 대한 계절별 해황조사, 계절별 유동 조사 및 다층 진단 모델을 이용하여 광양만의 조류, 조석 잔차류, 밀도류, 취송류 및 이들 모든 조건이 포함된 잔차류가 광양만의 해수 유동에 정량적으로 어떻게 작용하는지 조사하였다.

1) 조류는 반 일주조가 탁월하며, 만 남쪽 입구에서 평균 50cm/s, 유속이 큰 곳은 만 남쪽의 남해도 서쪽, 남해도~여수반도, POSCO~묘도 사이로 약 60cm/s 이상이다. 만 서쪽과 만 동쪽은 거의 왕복성 조류 패턴이다. 수심이 깊어질수록 왕복성 조류 패턴이 더 두드러진다.

2) 조석 잔차류는 묘도 서쪽 내만, 묘도 동쪽~POSCO 남쪽~여수 반도 북쪽, 그리고 여수반도~남해도 사이에 반시계 방향의 순환류를 형성한다.

3) 밀도류는 만 서쪽 천해역이 3cm/s 미만이고 수심이 비교적 깊은 만 남쪽 입구가 5cm/s 정도이다. 밀도류는 하계에 가장 크고, 추계에 가장 작다.

4) 취송류는 해양 표면에 주어진 풍향 및 풍속에 따라 표층(0~3m)에 주로 형성되나 그 이하 중, 저층은 표층 취송류 유향과 반대 방향의 보충류가 형성된다. 표층 취송류 유속 크기는 조석 잔차류나 밀도류보다 크다.

5) 조석 잔차류, 밀도류, 취송류 모두가 포함된 잔차 호흡에 취송류의 영향이 가장 크게 나타나고 다

추 호 상 · 이 병 결 · 이 규 형

음이 조석 잔차류, 밀도류 순이다. 현장에서 측정된 잔차류와 현장의 역학적 조건이 모두 입력되어 계산된 계산치는 대체로 잘 일치하여 진단 다중 모델 실험에 의한 광양만의 잔차류는 잘 재현되었다.

감사의 글

본 연구는 1997년 교육부 학술연구조성비(해양수산과학 1997-022-H00019)에 의하여 연구된 내용의 일부로서 연구기회를 제공해 준 관계기관에 감사를 표한다.

참 고 문 헌

- 1) 이석우, 1994, 한국 항만 수리지, 117-144.
- 2) 유신 코퍼레이션(주), 세광종합기술단(주), 1998, 광양항 광역개발 기본계획 용역 중간보고서(2차), 132-133.
- 3) 포항제철, 1982, 광양만 광양제철소 부지조성에 대한 영향보고서 제 2권, 40.
- 4) 포항제철, 1983, Effects of reclamation of land for Kwang Yang Steel Works, Final Report, PAH, Sogreah, 42.
- 5) 포항제철, 1984, Effects of reclamation of land for Kwang Yang Steel Works, Detailed model study, Comprehensive report, PAH, Sogreah, 24.
- 6) 포항제철, 1983a, 광양만-지진도 장기 조석 관측 보고서, (주) 한국해양과학기술, 63.
- 7) 포항제철, 1983b, 광양제철소 부지주변 하해조사 보고서, (주) 한국해양과학기술, 1, 200.
- 8) 포항제철, 1984a, 광양제철소 부지주변 하해조사 보고서, (주) 한국해양과학기술, 321.
- 9) 기상청, 1996, 기상연보, 45.
- 10) 기상청, 1997, 기상월보(8월), 18.
- 11) 기상청, 1998, 기상월보(1월), 23.
- 12) 기상청, 1998, 기상월보(5월), 24.