

매립으로 인한 광양만의 유동변화 수치실험

추 호 상

여수대학교 해양학과

(2001년 12월 31일 접수; 2002년 7월 2일 채택)

Numerical experiments for the changes of currents by reclamation of land in Kwangyang Bay

Hyo-Sang Choo

Dept. of Oceanography, Yeosu National University, Yeosu City, 550-749, Korea

(Manuscript received 31 December, 2001; accepted 2 July, 2002)

This study presents an investigation of the changes of the currents in Kwangyang Bay due to the construction of harbor, reclamation and coastal developments. Currents were simulated by the numerical experiments with a diagnostic multi-level model and using the seasonal oceanographic data of temperature, salinity and ocean current. The values of kinetic and potential energies for the currents were calculated in cases of three topographical changes; before coastal developments, the existing state and after completion of the development project in Kwangyang Bay. The changes of currents due to the coastal developments are as follow; Kinetic energies of tide induced residual currents and wind driven currents decreased by 35~40 percent and 5 percent respectively, however those of density currents increased by 10 percent since the decrease of the coastal areas. Kinetic energy of residual currents including tide induced residual currents, density currents and wind driven currents reduced by 10 percent compared with before the coastal developments. Decrease of current velocity was greatest in summer. Therefore, in summer it was assumed that the Kwangyang Bay is more easily polluted by stratification and decrease of residual current than before the coastal developments carried out.

Key word : Kwangyang Bay, residual current, topographical change, numerical experiment, tidal energy

1. 서 론

광양만은 남해안 중부 여수해만 북쪽에 위치한 내만으로 동서 길이 약 17 km, 폭은 넓은 곳이 약 9 km 로 여수 해만을 통해 남해와 연결되고 또, 노랑 수도를 통해 인접한 진주만과 연결된다. 만 중앙부에는 묘도, 금오도 등의 작은 섬들이 산재하고 중심은 내만의 서쪽과 북쪽이 대략 5m 이하, 동쪽의 노랑 수도와 남동쪽의 여수해만과 이어지는 수로는 약 20m 이상이다. 광양만은 반일구조가 지배적인 조류가 탁월한 해역이나 만 북부의 섬진강과 수어천을 통해서만 연간 $5.8\sim 8.7\times 10^8$ 톤의 담수가

유입되고 있어¹⁾ 밀도 성층과 함께 Estuary 순환도 형성된다.

광양만은 1970년대 이후 광양제철소 건립²⁾을 필두로 급격한 경제발전으로 공업단지가 조성되어 왔고, 앞으로도 광양만 광역 개발 계획³⁾에 따르면 2001년 까지 $10,657\times 10^3$ m²의 광양항권 공업단지가 조성될 예정으로 있다. 따라서 이러한 개발로 인한 해양 환경 변화를 예측하기 위한 환경 영향 평가가 꾸준히 이루어져 왔고 현지 관측도 상당량 행해졌다.^{4,5)} 그러나 이들은 주로 해당 연안 사업 개발역 주변을 중심으로 이루어진 조사에 의한 것으로 광양만 전체를 대상으로한 광범위한 해황 조사 결과는 거의 없는 실정이다. 한편, 광양만 내 매립지 건설로 인한 해안 및 해저 지형 변화는 만내 해수 유동과 잔차류를 변동시키게 되고, 따라서 광양만의 유동 구조와 잔차류를 정확히 파악하기 위

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

추 호 상

해서는 조류 뿐만 아니라 광양만의 순환구조에 영향을 주는 밀도류와 취송류가 고려된 수치실험이 요구된다.

본 연구는 현재의 광양만의 유동구조와 해황 특성을 파악하고, 연안역 개발로 인한 광양만내의 해황 변동과 유동 변화를 규명하기 위해, 광양만 전역의 계절별 해황조사와 유동 관측 조사를 실시하였다. 또 진단 모델 실험을 통해 밀도류와 취송류, 조석 잔차류의 역할을 정량화하고 과거와 현재 미래의 연안역 개발에 따른 이들 각각의 유동 변화량을 정량 예측하였다.

2. 자료 및 방법

2.1. 대상해역

Fig. 1에 광양만과 대상해역의 3차원 수심도를 나타낸다. 대상해역은 북으로 광양, 남으로 여수반도, 동으로 남해도로 둘러싸인 가로 28.4 km, 세로 24.4 km의 해역을 대상으로 하였다. 대부분의 영역이 수심 40 m 미만이고 비교적 수심이 깊은 영역은 남해도와 여수 반도 사이에서 남북으로 남해도 서쪽 연안을 따라 존재한다. 연직 방향으로는 5개 층(해면~3 m, 3~6 m, 6~10 m, 10~20 m, 20~70 m)으로 분할하여 수치 계산하였다. 수평격자는 가로, 세로 모두 400 m의 간격으로 하였다.

광양만은 1980년대부터 연안역 개발이 시작되어 앞으로 2010년까지 많은 지형 변화를 유발시킬 매립지와 공단이 조성될 예정으로 있다. 1986년에서 1999년까지 광양만 내 매립으로 인한 지형 변화 과정을 Fig. 2(a)와 (b)에 나타낸다. 본 실험은 만내 대표적 매립지인 광양 제철소가 건설되기 전의 개발 전 지형(Case A)과 본 연구가 시행된 시점의 지형(Case B), 그리고 향후 개발 사업 완료 후 지형(2010년 광양항 광역 기본 계획 완료 후, Case C)으로 나누어 시행하였다. Case A의 수심은 1973년 12월 작성된 1:20,000 해도(수로국, No.241)를 기본으로 선형보간 후 입력하였다. Case A, B, C의 등수심도를 Fig. 3에 나타낸다.

Case B는 광양제철소, 여천 산업단지, 울촌 제 1 산업단지, 하동 화력발전소, 광양항 컨테이너 부두 등이 건설된 상태의 육안지형으로 관련 해도는 1986년 12월, 1991년 6월, 1995년 5월, 1999년 9월에 개정되어진 1:50,000 해도(No.251)들이 있다. 본 연구를 위한 현장 조사는 1997~1999년에 이루어졌고 따라서 1995년 5월 발간된 해도에 1997년 10월까지 완료된 매립 공사 결과³⁾가 포함된 수심을 Case B의 수심으로 하였다. Case C는 울촌 제2 공단, 항만 연관단지, 여천 확장단지, 묘도 준설토 투

기장, 초남공단, 황금공단, 중마지구, 하동 매립지 사업 등으로 광양만 남서 해안과 하동 남서쪽 섬진강 하구 주변에 많은 매립이 조성될 예정의 지형 변화를 가정하였다.

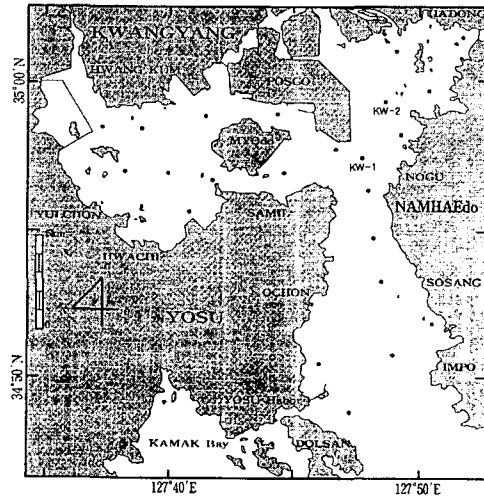


Fig. 1. Observational stations of CTD and tidal currents(KW-1 and KW-2) (above) and a three dimensional mesh surface drawing (below) for the study area of Kwangyang Bay.

2.2. 밀도, 조석, 바람 응력장 및 조류에너지

2.2.1. 밀도장

광양만 전 해역(Fig. 1)에서 춘계(1998. 5. 29), 하계(1997. 8. 23), 추계(1998. 11. 6), 동계(1998. 1. 21) 22개 정점에서 수온·염분 관측을 실시하였다. 관측은 CTD(SBE-19, 정도; 수온 $\pm 0.01^\circ\text{C}$, 염분 ± 0.02 PSU)로 실시하였다. 관측시 조시에 따른 해황 변화를 가능한 배제하기 위해 22개 정점의 조사를 4~7시간에 끝내었다.

한편, 해수 유동 조사는 Fig. 1에 나타난 KW-1, KW-2 정점에서 유속계(ACM-200PC; Electromagnetic current meter, Japan Alec Co.)로 25시간 연

매립으로 인한 광양만의 유동변화 수치실험

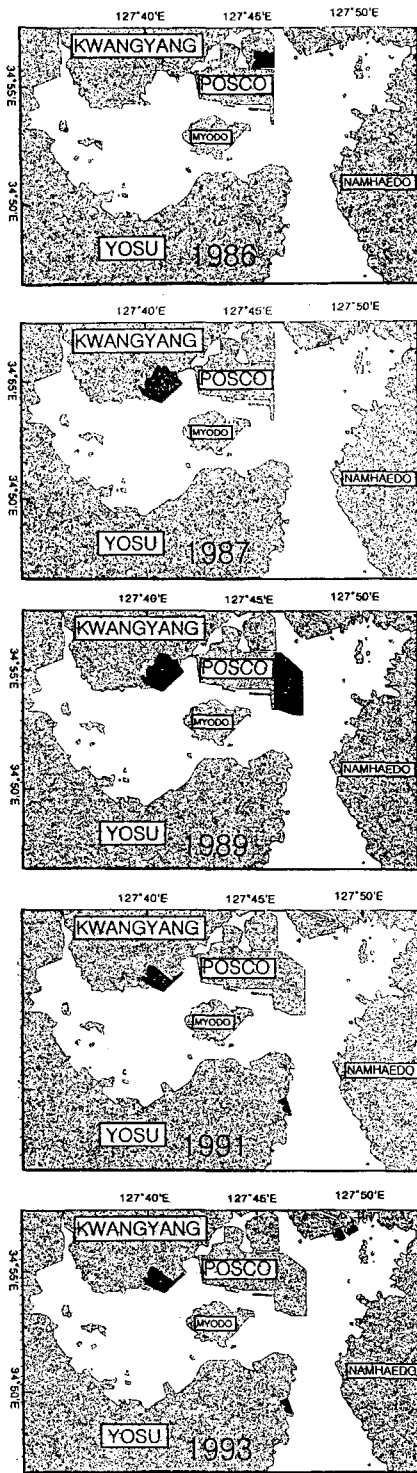


Fig. 2(a). Changes of coastal areas due to the reclamation in the study area of Kwangyang Bay from 1986 to 1993. In figure dark colours designate the areas of under construction.

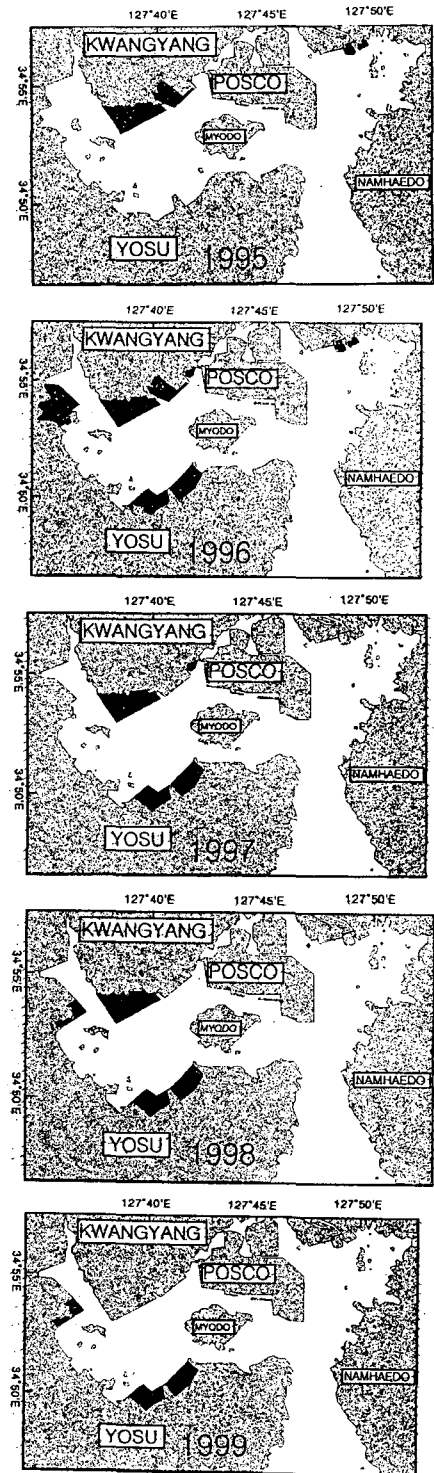


Fig. 2(b). Changes of coastal areas due to the reclamation in the study area of Kwangyang Bay from 1995 to 1999. In figure dark colours designate the areas of under construction.

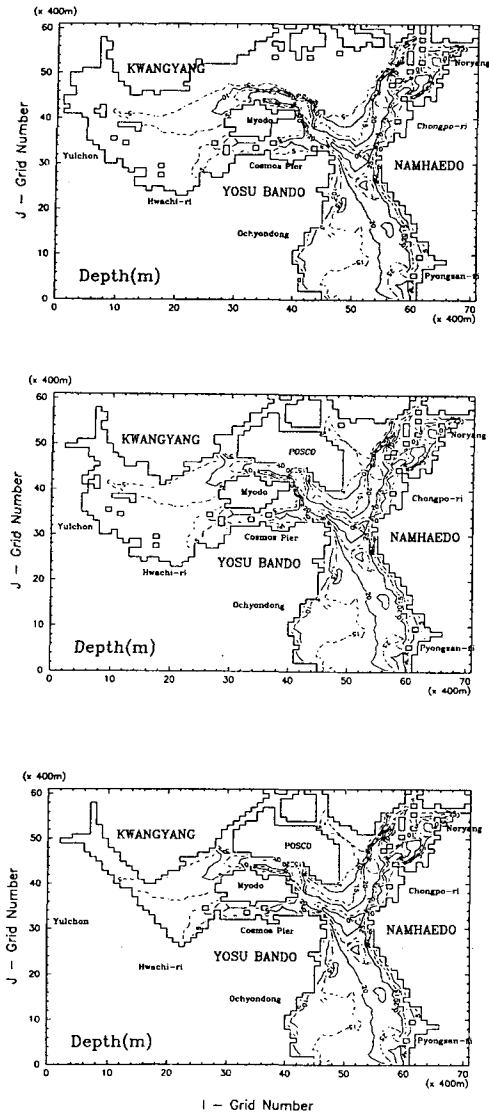


Fig. 3. Depth contours assumed by the changes of coastal areas in Kwangyang Bay. The upper, the middle and the lower designate before the reclamation, the present and after completion of all reclamation plans of Kwangyang Bay.

속 측류하였다. 관측은 1997년 8월 19~20일(하계, 대조기) 수심 약 14 m의 정점 KW-1의 표면(0 m), 5 m, 7 m, 10 m(저층)에서 10~15분 간격으로, 동계(1998년 1월 16~17일, 대조기)는 수심 약 30 m의 KW-2 지점의 표면(0 m), 4 m, 20 m(저층)에서 5~30분 간격으로, 춘계(1998년 5월 29~30일, 대조기)는 KW-2 지점의 표면(0 m), 10 m, 25 m(저층)에서 15분 간격으로 측정하였다.

진단 모델에 필요한 밀도장은 계절별 수온·염분 자료로부터 Knudsen 상태방정식에 따라 계산하여 관측치를 계산 격자치로 보간하였다. 관측 데이터에서 계산 격자에 맞는 밀도를 구하기 위해 먼저, 선형보간으로 깊이 방향으로 기존의 관측치에서 각 층의 밀도를 계산한 다음, 구하고자 하는 격자점에서 관측점까지의 거리 L_i 에 반비례하는 가중치로 (1) 식에 따라 수평적 객관보간을 하여 격자점의 밀도를 추정하였다.

$$\rho_{ob} = \frac{\sum_i \rho_{oi}}{\sum_i \frac{1}{L_i}} \quad (1)$$

한편, 이 영향역의 반경은 3 km로 하고 이 반경 내 3개 이상의 관측점이 없을 경우는 영향 반경을 1 km씩 증가시켜, 적어도 3개의 관측점을 이용하여 보간하였다. 또 구해진 격자점의 밀도를 평활화하기 위해 그 자신과 인접한 8개 격자에서 밀도를 평균하여, 그 격자의 밀도로 하였다.

2.2.2. 수치모델

진단 모델은 주어진 밀도장에 대응하는 운동을 계산하는 모델로, 유속장이 관측된 수온과 염분에서 얻어진 밀도장에 대응되도록 결정된다. 따라서 진단 모델은 밀도장에 대해서는 현장을 재현하게 되어 예측모델 보다 한층 더 신뢰성이 높다고 할 수 있다. 본 연구에 사용된 모델은 藤原 등⁶⁾에 의해 개발된 진단모델로, 이 모델로 추정된 흐름은 초음파 도플러 유속계(ADCP)에 의한 실측치와의 비교에서 실제의 흐름을 잘 재현하고 있음이 밝혀져 있다.^{6,7)}

본 연구에서 사용한 기초 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla_h \cdot (UU) + \frac{\partial(UW)}{\partial z} + fk \times U = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nabla_h \cdot (\nu_h \nabla_h U) + \frac{\partial}{\partial z} (\nu_v \frac{\partial U}{\partial z}) + T_s \quad (2)$$

$$\nabla_h \cdot U + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \int_{-H}^{\eta} U dz = 0 \quad (4)$$

$$p = g \int_z^{\eta} \rho dz \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla_h \cdot (U\rho) + \frac{\partial(W\rho)}{\partial z} \\ = \nabla_h \cdot (K_h \nabla_h \rho) + \frac{\partial}{\partial z} (K_v \frac{\partial \rho}{\partial z}) + \gamma(\rho_{ob} - \rho) \end{aligned} \quad (6)$$

$$T_s = -(u \cdot \nabla_h)u - w \frac{\partial u}{\partial z} \quad (7)$$

$$UU = \begin{bmatrix} UU & UV \\ VU & VV \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서 $U(U,V)$ 는 수평 2차원 잔차류 벡터, W 는

연직유속, ν_h 는 수평 미분 연산자, $f(= 2\Omega \sin\phi)$, Ω 는 지구 자전 각속도, ϕ 는 위도(34.8 °N)는 코리올리 파라미터, k 는 연직 단위벡터, p 는 수압, $\nu_h(= 0.016 \times T_p \times U_{am}^2(m/s)$: T_p 는 조석주기, U_{am} 은 조류진폭), $\nu_v(= \nu_h \times 10^{-5})$ 은 각각 수평·연직 와동 점성계수, T_s 는 조석응력, $g(=9.8m/s^2)$ 는 중력가속도, η 는 평균수면에서의 수위 상승량, H 는 수심, ρ 는 밀도, K_h, K_v 는 각각 수평·연직 난류 확산계수, γ 는 계수($=0.5/\Delta t$; Δt 는 시간 step), ρ_{ob} 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(7)의 뒷줄은 1 조석 주기의 평균을 뜻한다. 계산에서 수평·연직 난류 확산계수는 수평·연직 와동 점성계수의 크기와 같은 크기로 하였다.

경계조건은 자유 수면에 대해

$$\rho \nu_v \frac{\partial U}{\partial z} \Big|_{z=\eta} = \rho_a \gamma_a^2 |W_w| W_w \quad (9)$$

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

$$\nu_v \frac{\partial U}{\partial z} \Big|_{z=-h} = \gamma_b^2 U U \quad (10)$$

이 되고 여기서 $\gamma_b^2(=0.0026)$ 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.

2.2.3. 조석 및 바람 응력장

광양만 유동은 반 일주 조류가 탁월한 해역으로 계산영역 남쪽(여수~남해)과 동쪽(남해도 노량해역) 외해의 경계조건은 반 일주 조위의 변동을 주었다. 조위변동은 $\zeta = A \cos((2\pi / T) \cdot t - \phi)$ 로 나타내는 여현함수로 하였다. 여기서 A 는 조위진폭, ϕ 는 위상각, T 는 반 일주 조석의 주기이다. 조류는 탁월한 반 일주 분조 만을 고려하여, 주기적 정상상태에 도달한 1 주기 조석분을 (7)식에 따라 조석 응력을 계산하였다.

바람은 광양만에서 계절별 수온, 염분 관측과 KW-1, KW-2 정점에서 유동 관측이 이루어진 1998년 1월 16일(동계), 1998년 5월 29일(춘계), 1997년 8월 19일(하계), 1998년 11월 6일(추계)의 여수(34 °44'N, 127 °44'E)와 남해(34 °47'N, 127 °

52'E) 기상대에서 측정된 평균 풍향 풍속 자료⁸⁻¹¹⁾를 이용하였다. 일반적으로 해상풍은 육상풍의 2배 정도로 알려져 있으므로 관측된 평균 풍속의 2배를 대상해역의 전 영역에 균일하게 적용하였다. 한편, 시간적으로 변동하는 풍속 벡터장을 모델에 적용할 수도 있으나, 결과의 해석을 간단히 하기 위해 실험 기간 내내 평균 풍속의 정상풍으로 하였다. 모델 실험에 주어진 시기별 평균 풍속을 Table 1에 나타낸다.

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

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

2.2.4. 조류에너지

조류 모델에서 임의의 n-번째 grid를 통과하는 조류에너지 flux¹²⁾ E_n 은

$$E_n = \frac{g}{2} \times V_n \times H_n \times \cos \phi_n^{VH} \quad (12)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 g 는 중력가속도, V_n 은 n-번째 grid를 통과하는 조류의 체적 수송 진폭(amplitude of tidal volume transport), H_n 은 n-번째 grid에서의 조석 진폭, ϕ_n^{VH} 는 조류의 체적 수송과 조위 변화 간 위상차이다. 한편, 계산에서 각 수층의 각 grid에서 계산된 조류 에너지 flux는 전체 5개 수층에 대해 더해졌다. 각각의 grid를 통과하는 조류에너지 flux vector는 반 일주 조류에 의한 조류 에너지 흐름의 크기와 방향을 나타내는 지표로 간주할 수 있다.

한편, 반 일주 조류(M_2)의 에너지 손실은 아래의 식¹³⁾으로 계산할 수 있다.

$$E' = \frac{4}{3\pi} \times \gamma_b^2 \times S \times \left(\frac{V}{A}\right)^3 \quad (13)$$

여기서 γ_b^2 는 해저 마찰 계수(bottom frictional coefficient, $=2.6 \times 10^{-3}$), S 는 각 grid의 표면적, A 는 각 grid의 단면적, V 는 각 grid를 통과하는 조류 체적 수송의 진폭을 나타낸다. 조류 에너지 flux에서와 같이 각 층에 대해 계산된 마찰 손실량은 전체 5개 층에 대해 더해졌다. 반 일주 조류의 에너지는 주로 해저 마찰에 의해 손실된다.

한편, 잔차류의 운동에너지는

$$KE = \frac{1}{2} \int_i \int_j \sum_{k=1}^5 \rho(i, j, k) \times h_k \times V(i, j, k)^2 dx dy \quad (14)$$

과 같다. 여기서 $\rho(i, j, k)$ 는 k-번째 수층의 (i,j) grid에서의 밀도이고, h_k 는 k-번째 수층의 깊이,

$V(i, j, k)$ 는 k -번째 수층의 (i, j) grid에서의 잔차류 속도이다.

한편, 연직 혼합 상태에 대한 해역의 포텐셜(위치)에너지¹⁴⁾는

$$PE = \int_i \int_j \int_0^z \sum_{k=1}^K | \rho(i, j, k) - \bar{\rho}(i, j) | \times g \times Z \, dz dx dy \quad (15)$$

로 주어진다. 여기서 $\bar{\rho}(i, j)$ 는 (i, j) grid에서 수심 평균된 밀도이고 g 는 중력 가속도($= 9.8m \, s^{-2}$), Z 는 수심이다. 위치 에너지가 크면 해역의 성층이 큼을 의미한다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 조류 및 조류 에너지 변화

Fig. 4는 1997년 8월 하계 KW-1 정점, 1998년 1월 동계 KW-2 정점, 5월 춘계 KW-2 정점에서 각각 조사된 조류타원과 수치 모델로 계산한 해당 지점의 조류타원이다. 각 그림에 조류의 주기적 왕복 성분이 제외된 잔차류의 크기와 방향을 화살표로 나타냈다. 여기서 현장 관측치의 잔차류는 조류의 비 선형성에 의한 조석 잔차류와 밀도류, 취송류 등의 성분이 함께 포함된 것이나, 계산치의 잔차류는 조석 잔차류만을 나타낸 것이다. 하계 KW-1 정점과 동계 KW-2 정점, 춘계 KW-2 정점의 반 일 주조의 장, 단축 크기는 계산치와 관측치가 거의 유사하여 본 모델에 의한 조류의 재현이 잘 이루어졌음을 알 수 있다. 한편, 하계 KW-1 정점의 잔차류는 계산치의 조석 잔차류와 비교해 유속은 약간 작고 유향은 같다. 동계 KW-2 정점의 잔차 유속은 조석 잔차류(계산치)와 유사하나 유향이 약 90°차이 난다. 춘계 KW-2 정점의 잔차류는 북북동 방향 약 3 cm/s 이나 조석 잔차류는 북북서 방향 약 4 cm/s 였다. 이와같이 현장 관측에 의한 잔차류가 조류 계산에 의한 조석 잔차류와 같지 않은 것은 실제 현장의 흐름에 밀도류나 취송류 등의 흐름들이 복합되어져 나타나기 때문인 것으로 생각된다.

조류 에너지 flux vector와 조류 에너지 손실 분포를 Fig. 5에 나타낸다. 광양만 내 수심이 얕은 해역은 조류 에너지 flux 크기가 매우 작다. 조류 에너지 flux는 대체로 남서쪽으로 진행하고 있다. 조류 에너지 손실이 큰 곳은 광양만 남쪽 입구 남해도 부근으로 약 100 Joule · s⁻¹이다. 묘도 북쪽과 POSCO 북쪽 섬진강 하천 부근, 여수 반도와 남해도 사이는 약 20 Joule · s⁻¹ 이상으로 다른 해역에 비해 마찰 손실이 크다. 조류에너지 flux와 해저 마찰 손실량, 그리고 조류 수송량 진폭과 만 전체 단면적의 크기를 Table 2에 나타낸다.

Table 2. M₂ tidal energy flux E(t), M₂ tidal energy dissipation due to friction E(f), amplitude of tidal volume transport V and cross sectional area A in the Kwangyang Bay

(unit: ×10 ⁴)			
E(t); (Joules s ⁻¹)	E(f); (Joules s ⁻¹)	V; (m ³ s ⁻¹)	A; (m ²)
425.6	1.8	265.7	674.6

한편, 광양만 종합개발에 따른 만 내 유동 변화를 정량적으로 보기 위해, 개발 전 광양만에 대한 Case A와 개발이 진행중인 현재의 Case B 그리고 앞으로 약 10년 후까지 개발이 계획된 Case C 각각에 대해 조류 에너지 변화를 계산하여 Table 3에 나타냈다. E(t)는 반 일주조에 대한 조류 에너지 flux, E(f)는 조류의 해저마찰에 의한 에너지 손실, V는 조류 수송량 진폭 그리고 A는 광양만 내 전체 단면적을 나타낸다.

Table 3. Changes of M₂ tidal energy flux E(t), M₂ tidal frictional energy dissipation E(f), amplitude of tidal volume transport V and cross sectional area A due to the topographical changes in the Kwangyang Bay

(unit: ×10 ⁴)			
	Case A	Case B	Case C
E(t); Joules s ⁻¹	429.4 (100)	425.6 (99.1)	388.6 (90.5)
E(f); Joules s ⁻¹	3.5 (100)	1.8 (51.1)	1.6 (45.4)
V; m ³ s ⁻¹	308.8 (100)	265.7 (86.0)	234.6 (76.0)
A; m ²	694.1 (100)	674.6 (97.2)	650.5 (93.7)

한편, Case A에 대한 각 계산치를 100으로 보았을 경우의 백분율을 괄호속에 기록하였다. 개발이 진행됨에 따라 유역 면적이 줄어들고 유동도 약해진다. 조류 에너지는 광양만이 전체적으로 개발이 이루어지고 난 후(Case C)가 개발 전(Case A)에 비해 약 10% 정도 감소된다. 마찰 손실 에너지는 매립으로 인한 천해 유역 축소로 약 50% 정도 감소한다. 조류 수송량 진폭은 개발로 인해 만내 단면적 감소(약 6%)로 평균 해면 등의 수위가 다소 높아지고 유속이 감소됨에 따라 약 25% 정도 감소한다.

3.2. 조석 잔차류 변화

표층(1층)의 Case A, B, C에 대한 조석 잔차류 분포 변화를 Fig. 6에 나타낸다. Case C는 Case A에 비해 대체로 유속이 줄어들었고 서쪽 내만에 형성되는 반시계 방향의 eddy도 Case C에서는 거의

매립으로 인한 광양만의 유동변화 수치실험

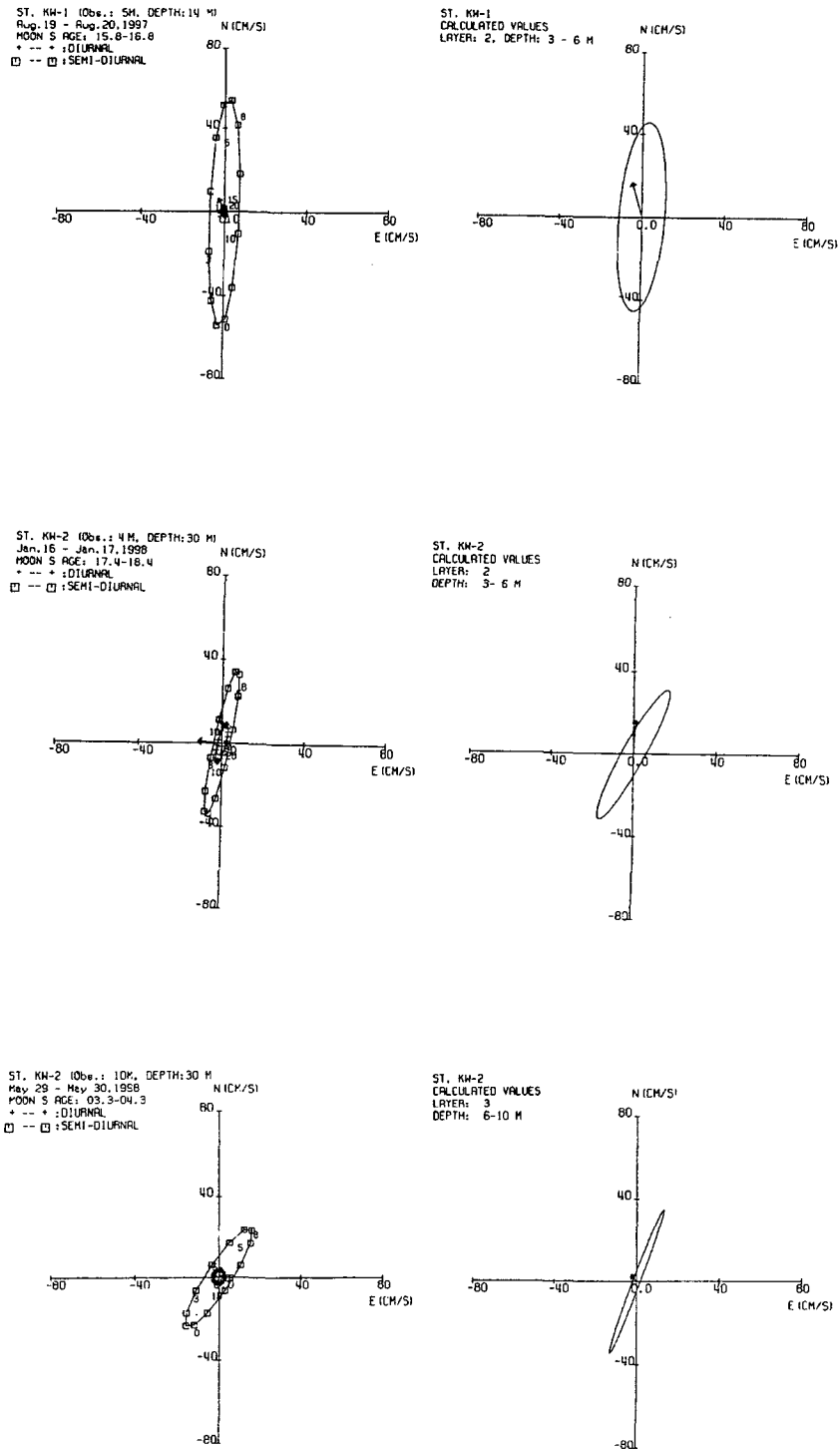


Fig. 4. Observed (left) and calculated (right) tidal current ellipses at KW-1 during August (top), KW-2 during January (middle) and May (bottom) in Kwangyang Bay.

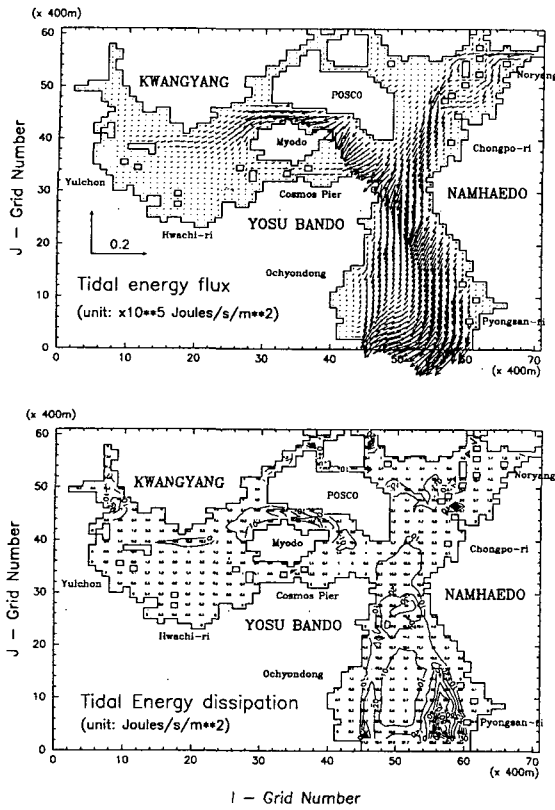


Fig. 5. Calculated tidal energy flux(above) and tidal energy dissipations(below) for M2 tidal current.

소멸된다. 묘도 동쪽과 POSCO 남쪽의 반시계 방향 eddy도 매우 약해진다. POSCO 동쪽의 흐름은 개발 후에도 대체로 동일하나 유속이 작아진다. 만 남쪽 입구해역은 소규모 eddy의 변화가 나타난다. 각 Case에 대한 조석 잔차류 변화를 정량 파악하기 위해 각 계절별 조석 잔차류에 의한 광양만 전역의 운동에너지를 Table 4에 나타낸다.

Table 4. Changes of seasonal kinetic energy of tide-induced residual current due to the topographical changes in the Kwangyang Bay (unit: $\times 10^9$ Joules s^{-1})

	Case A	Case B	Case C
Jan. 1998	KE:10.095	KE: 7.511 (74.4)	KE: 6.582 (65.2)
May 1998	KE:10.927	KE: 7.495 (68.6)	KE: 6.567 (60.1)
Aug. 1997	KE:10.892	KE: 7.472 (68.6)	KE: 6.547 (60.1)
Nov. 1998	KE:10.916	KE: 7.488 (68.6)	KE: 6.561 (60.1)

Table 4에서 Case A에 대한 값을 100으로 했을

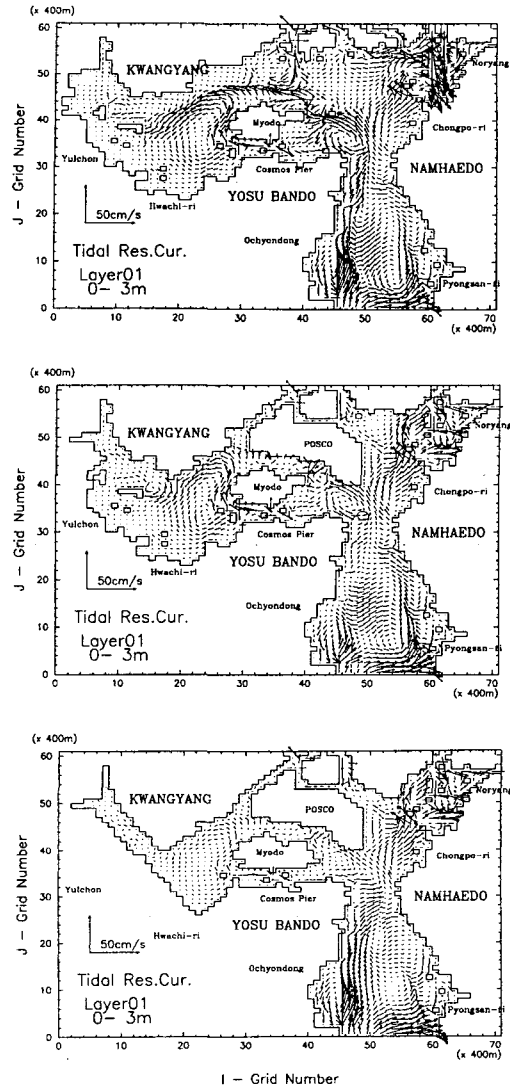


Fig. 6. Calculated tidal residual currents in the experimental case of A(top), B(middle) C (bottom).

때, Case B, C에 대한 백분율을 괄호안에 기록하였다. 광양만 개발에 따른 조석 잔차류 변화는 전 계절에 대해 약 35~40% 감소하는 것으로 나타난다. 이 결과는 매립 등으로 인해 광양만 내 조석 잔차류 유속이 35%이상 감소됨을 뜻하는 것으로 물질 이동이나 해수 교환에 영향을 미치는 조석 잔차류가 작아져 만 내 오염이 점차 크질 것임을 시사한다. 계절에 따른 변화는 모델 계산시 계절별 밀도의 차이로 동계가 계절 중 에너지가 가장 크고, 하계가 가장 작다. 그러나 계절별 차는 그리 크지 않다.

3.3. 밀도류 변화

수온, 염분 분포에 따른 각 계절별 밀도류 분포 중, 하계 표층(1층)의 Case A, B, C에 대한 밀도류 분포를 Fig. 7에 나타낸다. 각 Case에 대한 밀도류 분포 변화는 조석 잔차류에 비해 거의 없다. 이는 개발로 인한 매립이 수심과 해저 지형, 육안 지형 등의 변화를 일으켜 대기에서의 열 유입에 다소의 차가 생겨 수괴 구조가 얼마간 바뀔 것으로 예상되나, 모델에서는 Case B인 현재의 수온, 염분 구조를 기본으로 grid 보간을 하여 밀도 분포를 결정하였다. 따라서 단지 유역 면적이 줄어든 것에 따른 밀도류 변화만 계산된 것이다. 보다 정확한 밀도류 변화를 보기 위해서는 개발 전 Case A와 개발 후 Case C 때 관측된 광양만 전 해역의 수온, 염분 자료에 의한 밀도류 분포 계산이 있어야 할 것으로 생각된다.

각 계절의 밀도류 변화에 의한 운동에너지와 위치에너지 변화를 Table 5에 나타낸다.

Table 5. Changes of seasonal kinetic and potential energy of density-driven current due to the topographical changes in the Kwangyang Bay (unit: $\times 10^9$ Joules s^{-1})

	Case A	Case B	Case C
Jan. 1998	KE: 0.560 PE: 9.972	KE: 0.563 (100.5) PE: 10.052 (100.8)	KE: 0.598 (106.8) PE: 10.042 (100.7)
May 1998	KE: 0.841 PE: 15.883	KE: 0.867 (103.1) PE: 15.870 (99.9)	KE: 0.921 (109.5) PE: 15.706 (98.9)
Aug. 1997	KE: 1.553 PE: 26.868	KE: 1.565 (100.8) PE: 26.864 (100.0)	KE: 1.654 (106.5) PE: 26.671 (99.3)
Nov. 1998	KE: 0.335 PE: 4.565	KE: 0.331 (98.8) PE: 4.578 (100.3)	KE: 0.356 (106.3) PE: 4.568 (100.1)

운동에너지는 전 계절에 걸쳐 $0.3 \sim 1.7 \times 10^9$ Joules s^{-1} 의 범위로 조석 잔차류에 의한 운동에너지의 약 1/10에 해당한다. 이는 밀도류가 조석 잔차류에 비해 매우 작음을 의미한다. 운동에너지는 대체로 Case A에서 Case B, Case C로 갈수록 최대 약 10% 까지 증가한다. 이는 개발로 인해 유역 면적이 줄어들면 육지 면적이 상대적으로 늘고 따라서 육지와 해양의 비열 차로 인한 수평 온도 차가 커져 나타난 현상으로 생각된다. 한편, 위치에너지는 8월이 가장 크고 11월이 가장 낮다. 개발에 따른 위치에너지(성층) 변화는 춘, 하계인 5월과 8월은 약간 작아지나 추, 동계인 11월과 1월은 약간 커진다.

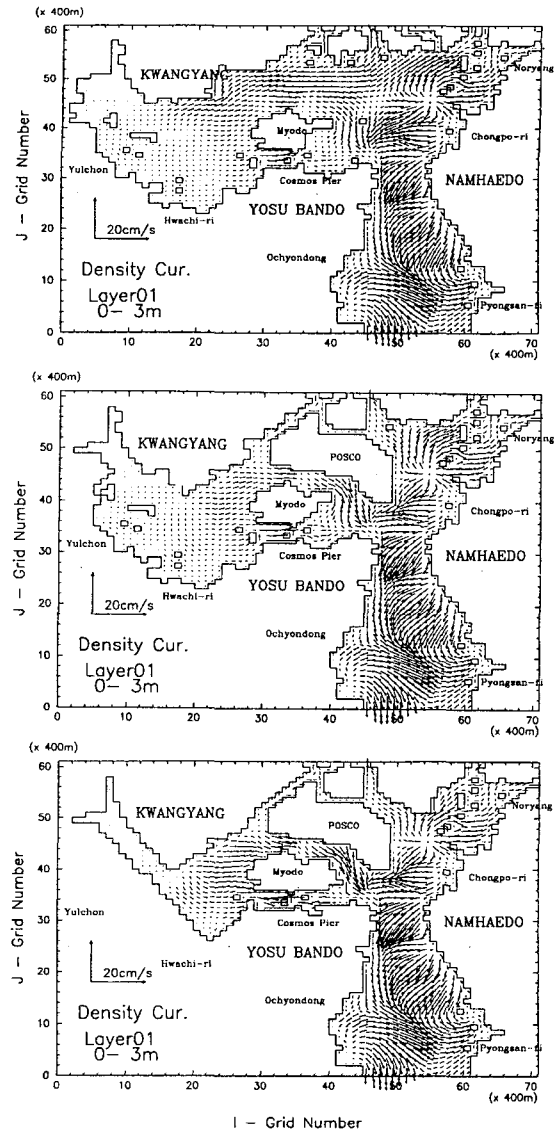


Fig. 7. Calculated tidal residual currents in the experimental case of A(top), B(middle) C (bottom).

3.4. 취송류 변화

하계 표층(1층)의 Case A, B, C에 대한 취송류 분포 변화를 Fig. 8에 나타낸다. 매립으로 인한 유역 면적 축소로 동일한 바람 응력이 광양만에 작용했다고 하면 취송류는 축소된 유역 면적 만큼 감소할 것이다. 각 계절별 취송류 변화에 따른 운동에너지 변화를 Table 6에 나타낸다.

취송류에 의한 운동에너지는 $2.0 \times 10^9 \sim 37.0 \times 10^9$ Joules s^{-1} 크기로 풍속이 작은 하계는 작고 풍속이 큰 동계는 크다. 조석 잔차류 운동에너지 $7.0 \times 10^9 \sim 10.0 \times 10^9$ Joules s^{-1} 에 비해 동계는 4~5배 정도

추 효 상

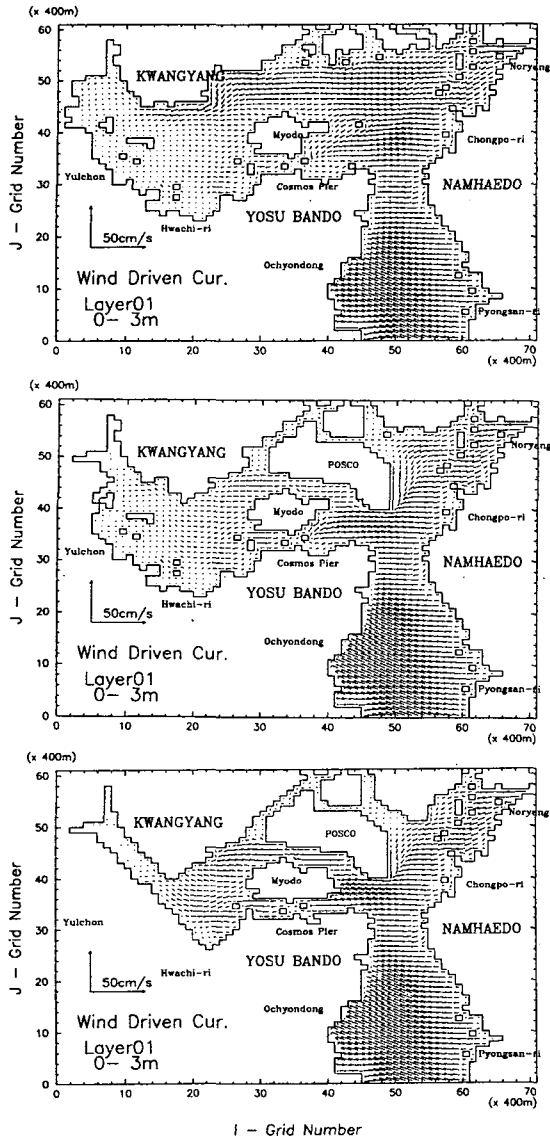


Fig. 8. Calculated wind driven currents in the experimental case of A(top), B(middle) C(bottom).

Table 6. Changes of seasonal kinetic energy of wind-driven current due to the topographical changes in the Kwangyang Bay (unit: $\times 10^9$ Joules s^{-1})

	Case A	Case B	Case C
Jan. 1998	KE:36.657	KE:35.447 (96.7)	KE:35.802 (97.7)
May 1998	KE:12.242	KE:12.552 (102.5)	KE:12.768 (104.3)
Aug. 1997	KE: 2.322	KE: 2.180 (93.9)	KE: 2.290 (98.6)
Nov. 1998	KE 9.766	KE: 9.431 (96.6)	KE: 9.575 (98.0)

크고 하계는 1/3~1/5 로 작다. 춘계와 추계는

조석 잔차류의 운동에너지와 같은 정도이다. 개발에 따른 운동에너지의 변화는 춘계인 5월을 제외하면 대체로 5% 전후로 줄어들었다. 이는 위에서 언급한 바와 같이 매립으로 인한 유역면적의 축소 때문인 것으로 보인다. 5월의 경우 운동에너지가 증가한 것은 그 원인을 추측하기 어려우나 다른 계절에 비해 취송류 유향이 수심이 깊은 만 남쪽 입구 방향과 대략 일치해 취송류 수심이 다소 깊어져 나타난 현상이 아닌가 생각되나 정확하지 않다. 그러나 동일 바람일 경우, 응력 방향에 따른 운동에너지 변화는 만의 형태에 따라 차이가 있을 것으로 예상된다.

3.5. 잔차류 변화

3.5.1. 조석 잔차 밀도류

조석 잔차류와 밀도류가 복합되어 있을 경우의 흐름을 조석 잔차 밀도류라 할 때, 하계 표층의 Case A, B, C에 대한 조석 잔차 밀도류 분포 변화를 Fig. 9에 나타낸다. 조석 잔차 밀도류는 해역에 바람이 전혀 없는 상태로 가정할 수 있다. 만 서쪽 내만의 흐름은 Case A에 비해 Case C 때, 매우 약해진다. 묘도와 POSCO 주변 흐름도 유속 크기가 크게 줄어든다. 각 계절별 조석 잔차 밀도류 변화에 따른 운동에너지와 위치 에너지의 변화를 Table 7에 나타낸다.

Table 7. Changes of seasonal kinetic and potential energy of tide-induced residual and density-driven current due to the topographical changes in the Kwangyang Bay (unit: $\times 10^9$ Joules s^{-1})

	Case A	Case B	Case C
Jan. 1998	KE:13.377	KE:11.644 (87.0)	KE:12.187 (91.1)
	PE:10.711	PE:10.669 (99.6)	PE:10.527 (98.3)
May 1998	KE:14.924	KE:13.193 (88.4)	KE:14.936 (100.1)
	PE:16.221	PE:16.190 (99.8)	PE:15.961 (98.4)
Aug. 1997	KE:15.118	KE:13.760 (91.0)	KE:15.710 (103.9)
	PE:26.830	PE:26.898 (100.3)	PE:26.683 (99.5)
Nov. 1998	KE:13.315	KE:11.616 (87.2)	KE:12.353 (92.8)
	PE: 5.716	PE: 5.526 (96.7)	PE: 5.377 (94.1)

운동에너지는 $12.0 \times 10^9 \sim 16.0 \times 10^9$ Joules s^{-1} 범위로 조석 잔차류 에너지와 밀도류 에너지를 단순히 더한 것보다 값이 크다. 이는 서로 다른 외력에 의한 흐름의 결합이 선형적이지 않음을 의미한다. 운동에너지는 성층(위치에너지)이 강한 하계에 크고 성층이 약한 추계에 작다. 그러나 절대치에 비해 계절에 따른 차는 크지 않다. 개발에 따른 변화

매립으로 인한 광양만의 유동변화 수치실험

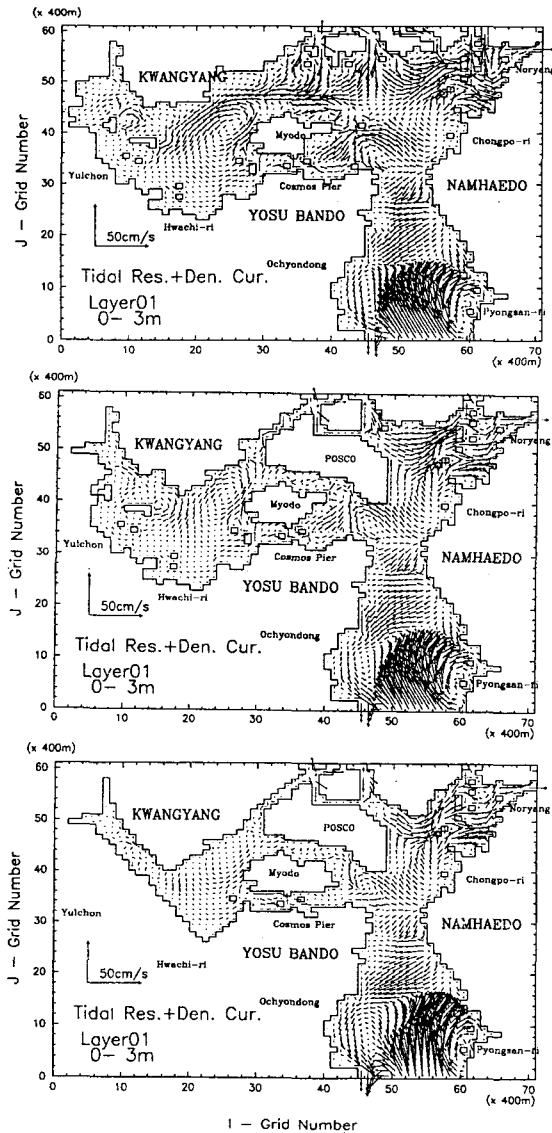


Fig. 9. Calculated currents including the tidal residual currents and density currents in the experimental case of A(top), B(middle) C(bottom).

는 Case B에서 Case C로 5~12% 정도 증가한다. 그러나 Case A에서 Case B로는 9~13% 정도 감소했다. 이는 조석 잔차류 운동에너지가 Case A에서 Case B로 약 30%, Case B에서 Case C로 약 9%정도 감소한 것과 밀도류 운동에너지는 Case A에서 Case B로 약 3%, Case B에서 Case C로 약 7%정도 증가한 것과 관련하여 밀도류 운동에너지가 Case A에서 Case B로 증가한 것 보다 Case B에서 Case C로 증가한 비율이 2배 이상 큼에 따라 조석 잔차류 운동에너지의 감소 비율을 증가하여 오히려 증가되어진 것이 아닌가 생각된다. 따라서

개발에 따른 밀도류 영향은 전체 흐름에서는 그리 크지 않으나 조석 잔차류 등의 비선형 효과와 복합될 때는 그 영향력이 크짐을 알 수 있다. 특히 성층이 큰 춘계와 하계에는 개발전에 비해 개발 후에 운동에너지가 더 크게 나타난다.

위치에너지는 밀도류 단독일 경우보다 약간 크다. 개발에 따른 영향으로는 밀도류 단독의 경우와 같이 약간 감소한다.

3.5. 조석 잔차 취송류

조석 잔차류와 취송류가 복합되어 졌을 경우의 흐름을 조석 잔차 취송류라 할 때, 하계 표층의 Case A, B, C에 대한 조석 잔차 취송류 분포 변화를 Fig. 10에 나타낸다. 조석 잔차 취송류는 해역의 밀도 분포가 수평적으로 거의 균일한 상태(추계와 같은 상태)에 여러 형태의 바람이 불었을 경우를 가정할 수 있다. 만 서쪽 내만의 흐름은 Case A에 비해 Case C는 유속이 다소 작다. 묘도와 POSCO 주변도 유속변화가 크지 않다. 각 계절별 조석 잔차 밀도류 변화에 따른 운동에너지의 변화를 Table 8에 나타낸다.

Table 8. Changes of seasonal kinetic energy of tide-induced residual and wind-driven current due to the topographical changes in the Kwangyang Bay

(unit: $\times 10^9$ Joules s^{-1})

	Case A	Case B	Case C
Jan. 1998	KE:42.645	KE:39.714 (93.1)	KE:38.806 (91.0)
May 1998	KE:19.580	KE:18.348 (93.7)	KE:17.394 (88.8)
Aug. 1997	KE:14.884	KE:13.000 (87.3)	KE:13.311 (89.4)
Nov. 1998	KE:18.690	KE:17.079 (91.4)	KE:18.440 (98.7)

Case A의 운동 에너지는 $13.0 \times 10^9 \sim 43.0 \times 10^9$ Joules s^{-1} 로 8월을 제외하고 조석 잔차류와 취송류 각각의 에너지를 더한 것 보다 작다. 이는 조석 잔차 밀도류의 경우와 반대이다. 취송류와 조석 잔차류의 방향이 서로 반대일 경우 유동이 약화되기 때문인 것으로 보인다. 한편, 8월은 취송류가 제일 작아 8월을 제외하면 조석 잔차 취송류의 운동에너지가 조석 잔차 밀도류보다 더 크다.

운동에너지는 Case A에서 Case C로 약 10% 정도 감소하여, 지형 변화와 유역 면적 감소로 인해 조석 잔차류가 감소하고 취송류 유역이 감소되어진 것으로 추정된다. 그러나 Case B에서 Case C로는 동계와 춘계가 2~6% 정도 감소한 것에 비해 하계와 추계는 2~7% 증가한 것으로 나타난다. 이는 동, 춘계의 표층 취송류 방향은 남~남서이나 추계

추 호 상

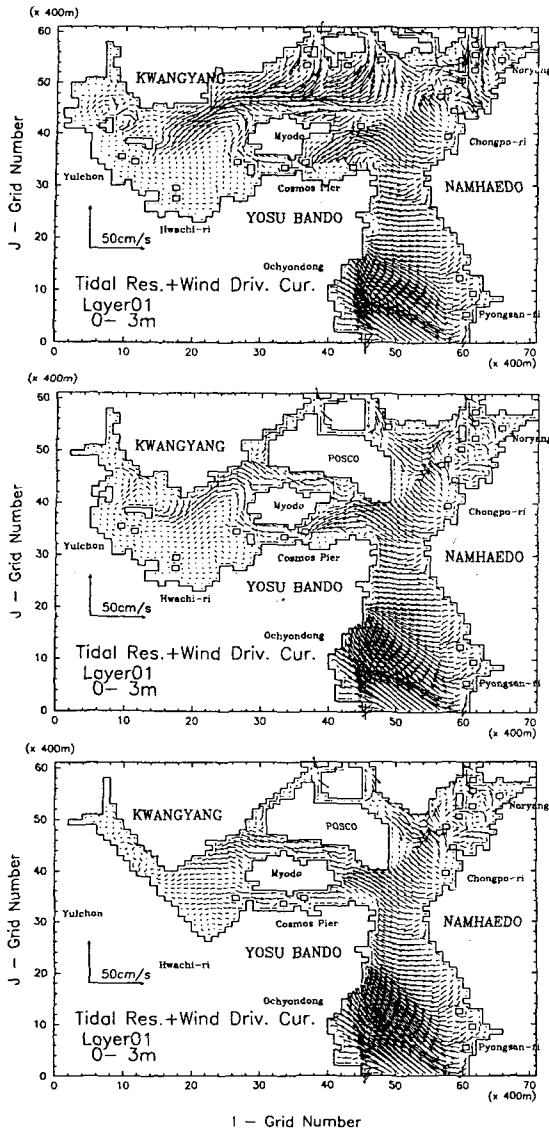


Fig. 10. Calculated currents including the tidal residual currents and wind driven currents in the experimental case of A(top), B(middle) C (bottom).

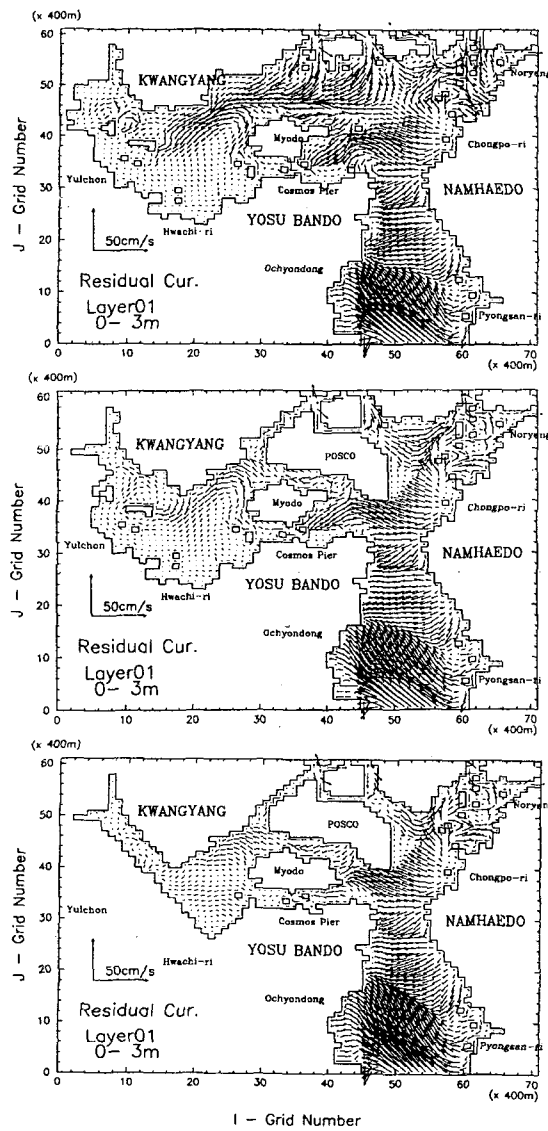


Fig. 11. Calculated residual currents including the tidal residual currents, density currents and wind driven currents in the experimental case of A(top), B(middle) C(bottom).

는 동~북동, 하계는 취송류 유속이 매우 작은 것과 관련이 있는 듯하다. Case B에서 Case C로의 주된 변화는 서쪽 내만 천해역의 광범위한 매립이다. 따라서 매립에 따른 조석 잔차류 감소보다 수심이 깊은 만 남북 방향에서의 취송류 유향과 관계되어진 것으로 보이나 확실하지 않다.

3.5.3. 조석 잔차 밀도 취송류(잔차류)

조석 잔차류와 밀도류, 취송류가 복합되어 있을 경우의 흐름을 잔차류라 할 때, 하계 표층의 Case

A, B, C에 대한 잔차류 분포 변화를 Fig. 11에 나타낸다. 잔차류는 실제 광양만에 주어질 수 있는 외력이 대부분 포함된 현장의 상황을 가장 잘 나타낸 흐름이라 가정할 수 있다. 서쪽 내만의 흐름은 Case A에서 Case C로 갈수록 점차 약해진다. 각 계절별 잔차류 변화에 따른 운동에너지와 위치에너지의 변화를 Table 9에 나타낸다.

Case A의 운동 에너지는 $14.0 \times 10^9 \sim 44.0 \times 10^9$ Joules s^{-1} 로 8월을 제외하고 조석 잔차류, 밀도류, 취송류 각각의 에너지를 더한 것 보다 작다. 이 결

매립으로 인한 광양만의 유동변화 수치실험

Table 9. Changes of seasonal kinetic and potential energy of residual flow(tide-induced residual, density-driven and wind-driven current) due to the topographical changes in the Kwangyang Bay

	Case A	Case B	Case C
Jan. 1998	KE:44.039 PE:10.709	KE:41.144 (93.4) PE:10.667 (99.6)	KE:40.249 (91.4) PE:10.524 (98.3)
May 1998	KE:21.311 PE:16.222	KE:20.185 (94.7) PE:16.191 (99.8)	KE:19.350 (90.8) PE:15.960 (98.4)
Aug. 1997	KE:16.355 PE:26.828	KE:13.895 (85.0) PE:26.896 (100.3)	KE:14.622 (89.4) PE:26.681 (99.5)
Nov. 1998	KE:19.274 PE: 5.713	KE:17.657 (91.6) PE: 5.522 (96.7)	KE:19.074 (99.0) PE: 5.374 (94.1)

과는 조석 잔차 취송류에서도 같다. 즉, 하계와 같이 해양 표면에 부는 바람이 약하고 성층이 강해지는 시기는 밀도류 영향이 전체 흐름에서 매우 중요하나, 그 외의 시기는 취송류 역할이 가장 크다. 따라서 운동에너지는 동계가 $40.0 \times 10^9 \sim 44.0 \times 10^9$ Joules s^{-1} 로 가장 크고, 그 다음이 춘계 $19.0 \times 10^9 \sim 21.0 \times 10^9$ Joules s^{-1} , 추계 $18.0 \times 10^9 \sim 19.0 \times 10^9$ Joules s^{-1} , 하계 $14.0 \times 10^9 \sim 16.0 \times 10^9$ Joules s^{-1} 이다. 위치에너지는 반대로 하계가 약 27.0×10^9 Joules s^{-1} 로 가장

크고 성층이 약한 추계가 약 5.0×10^9 Joules s^{-1} 로 가장 작다.

운동에너지는 Case C에서 약 10% 정도 감소한다. 이는 해수 유동이 개발 전과 비교해 약 10% 정도 감소했다는 의미이기도 하다. 하계의 운동에너지가 가장 크게 감소했는데, 이는 하계의 위치에너지가 개발전과 개발 후가 그다지 큰 변화가 없는 것과 관련하여 성층은 강화되고 유동은 약해져 오염이 점차 진행될 가능성이 크다. 11월 추계의 운동에너지는 계절중 가장 크고 위치에너지는 가장 작아 하계와 반대였다. 한편, Case B에서 Case C로 변화는 동계와 춘계는 운동에너지가 약 2% 감소했으나, 하계와 추계는 4~7% 정도 증가하였다. 이는 앞서 언급된 바와 같이 하계는 취송류가 가장 작고 추계는 취송류 방향이 다른 계절과 반대(동쪽)인 것에서 광양만 내 해양표면에 부는 바람이 광양만의 해수 유동에 매우 큰 영향을 줄을 알 수 있다.

한편, 이등¹⁵⁾은 광양만 개발에 따른 광양만 연안역 변화량을 위성 Landsat 자료를 이용하여 추적한 결과 1988~1994년(7년) 동안 약 5%의 연안역이 감소되었음을 밝혔다. 이는 광양만이 1995~2001년(7년) 현재까지 개발이 진행되고 있고, 대략 과거와 같은 강도로 개발이 이루어지고 있다고 가정한다면 광양만은 개발 전에 비해 약 10%의 연안역 감소가 이루어진 것으로 추정되어 모델 결과와 잘 일치한다.

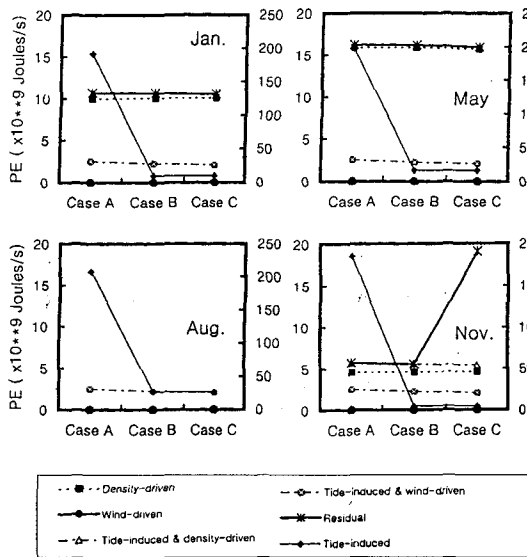


Fig. 12(a). Changes of the calculated kinetic energy in the experimental case of A, B and C at the time of January (top left), May (top right), August(bottom left) and November (bottom right) respectively.

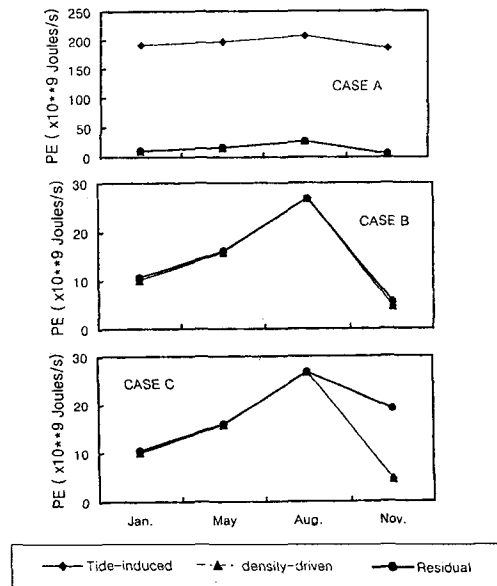


Fig. 12(b). Changes of the calculated kinetic energy in January, May, August and November at the experimental case of A(top), B(middle) and C(bottom) respectively.

3.6. 운동에너지 변화

계절별 운동에너지의 각 실험 Case에 대한 변화를 Fig. 12(a)에 나타낸다. 운동에너지는 동계(1월)에 취송류와 조석 잔차 취송류, 잔차류가 탁월하고 Case A에서 Case C로 갈수록 에너지가 감소한다. 춘계(5월)는 잔차류, 조석 잔차 취송류 그리고 조석 잔차 밀도류가 크다. 하계(8월)는 잔차류, 조석 잔차 밀도류, 조석 잔차 취송류의 순이나 Case C에서 조석 잔차 밀도류가 잔차류보다 에너지가 더 커, 하계는 밀도 효과가 전체 유동에 큰 역할을 함을 알 수 있다. 추계(11월)는 잔차류와 조석 잔차 취송류가 탁월하다. 계절에 따라 밀도류에 의한 에너지가 가장 작고 그 다음이 조석 잔차류, 그리고 취송류이나, 바람이 약한 하계는 취송류가 조석 잔차류보다 작다.

각 실험 Case에 대한 운동에너지의 계절 변화를 Fig. 12(b)에 나타낸다. 조석 잔차류에 대한 운동에너지의 계절변화는 없고, 밀도류는 계절에 따라 그 변화가 크나 절대치가 작아 다른 흐름에 비해 무시할 만 하다. 조석 잔차 밀도류도 계절 변화가 크지 않다. 계절 변화가 가장 큰 흐름은 잔차류, 조석 잔차 취송류, 취송류이다. 이들 3가지 흐름의 계절 변화는 주로 취송류의 계절 변화에 의한 것이다.

4. 요 약

광양만역 종합개발로 인한 만 내 유동 변화를 정량 파악하기 위해, 광양만 전역에 대한 계절별 해황조사, 계절별 유동 조사 및 진단 다중 모델을 이용하여 광양만 순환류 구성 요소에 대한 변화량을 운동에너지와 위치에너지 계산을 통해 규명하였다.

- 1) 개발이 진행됨에 따라 유역 면적이 줄어들고 유동도 약해진다. 조류 에너지는 광양만이 개발되기 전에 비해 종합 개발 10년 후, 약 10% 감소한다. 마찰 손실은 약 50% 감소한다.
- 2) 광양만 개발로 인한 조석 잔차류는 약 35~40% 감소한다.
- 3) 조석 잔차류의 약 1/10 정도인 밀도류는 하계에 크고 추계에 작으며, 개발로 인해 약 10% 증가한다.
- 4) 취송류는 풍속이 작은 하계에 작고 풍속이 강한 동계에 크다. 취송류는 개발로 인해 약 5% 감소한다.
- 5) 조석 잔차류+밀도류는 하계에 크고 추계에 작다. 개발에 따른 변화는 현재~10년 후 약 5~12% 증가하나, 개발 전 과거~현재는 9~13% 감소했다.
- 6) 조석 잔차류+취송류는 개발에 따라 약 10%

감소한다.

- 7) 조석 잔차류+밀도류+취송류의 잔차류는 개발 10년 후가 개발 전에 비해 10% 감소한다. 이는 2차원적 조류 에너지 Flux 변화 결과와 일치한다. 계절별로는 하계가 가장 크게 감소하여, 종합 개발 후 성층강화와 잔차유속 감소로 오염이 크게 진행될 가능성이 있다.
- 8) 광양만내의 순환류 요소 중 계절 변화가 가장 큰 흐름은 잔차류이고 그 다음이 조석 잔차 취송류, 취송류, 조석 잔차 밀도류 그리고 가장 작은 것이 밀도류이다. 잔차류의 계절 변화는 주로 취송류 변화에 의한다.

참 고 문 헌

- 1) 이석우, 1994, 한국 항만 수리지, 117-144.
- 2) 포항제철, 1982, 광양만 광양제철소 부지조성에 대한 영향보고서, 제 2권, 40pp.
- 3) 유신 코퍼레이션(주), 세광종합기술단(주), 1998, 광양항 광역개발 기본계획 용역 중간보고서(2차), 132-133.
- 4) 포항제철, 1996, 광양제철소 조강증산 발전설비 증설 건설 사업 환경영향평가서, 182-192.
- 5) 여수지방해운항만청, 1997, 광양항 묘도 준설토 투기장 가호안 축조공사 환경영향평가서, 95-121.
- 6) 藤原正幸, 大橋行三, 藤原建紀, 1997, 診断モデルによる8月の紀伊水道における残差流シミュレーション, 海岸工学論文集, 44, 411-415.
- 7) 藤原正幸, 藤原建紀, 大橋行三, 杉山陽一, 2000, 伊勢灣の秋季の残差流, 海の研究, 9, 91-100.
- 8) 기상청, 1996, 기상연보, 156pp.
- 9) 기상청, 1997, 기상월보(8월), 14pp.
- 10) 기상청, 1998a, 기상월보(1월), 12pp.
- 11) 기상청, 1998b, 기상월보(5월), 14pp.
- 12) Yanagi, T., H. Takeoka, and H. Tsukamoto, 1982, Tidal energy balance in the Seto Inland Sea, J. Oceanogr., 38, 293-299.
- 13) Taylor, G.I., 1919, Tidal friction in the Irish Sea, Phil. Trans. Roy.Soc., A220, 1-193.
- 14) Simpson, J.H., C.M. Allen, and N.C.G. Morris, 1978, Fronts on the continental shelf, Journal of Geophysical Research, 83, 4607-4614.
- 15) Lee, B.G., H.S. Choo, and G.H. Lee, 2000, Change of coastal ocean according to Kwangyang Bay development based on Landsat TM images, Environmental Sciences, 4(3), 149-156.