

항주만의 조석 시뮬레이션 Tidal Simulation for Hangzhou Bay

김양근¹, 민병일², 육진희², 박원영², 최병호³
 Yang Keun Kim¹, Byung Il Min², Jin Hee Yuk², Won Young Park² and Byung Ho Choi³

1. 서 론

항주만은 황해 서측의 남쪽에 위치하여 동서방향으로 펼쳐진 깔대기 형상(funnel shape)을 하고 있다. 그 중심은 위도 30° 15'N, 경도 120° 10'E에 위치하고 있으며, 동측은 동중국해로 열려 있고, 너비는 대략 100km 정도이다. 서측으로는 점점 좁아져서 사포(乍浦, Zhapu) 부근에서는 너비가 약 20km 정도인데, 이 해역의 지배적인 물리적 현상은 조석이며, 만의 전면은 얇고 평평한 지역으로서 평균수심은 10m 이하이다. 북측 해안을 따라서는 강한 조류의 영향으로 인해 부분적으로 50m 이상 깊게 패인 곳이 존재하여 자연적인 항구의 좋은 조건이 되어 양산군도에 심수항이 현재 건설되고 있는데 2020년경에 완공되면 세계에서 가장 큰 컨테이너항이 될 것인데, 불원간 1단계 개발에 즈음하여 부산신항과 경쟁적인 물류수송경쟁이 전개될 것이다. 항주만의 북서측단에 위치한 사포의 서측으로는 만이 급격히 좁아져서 항주에서는 그 너비가 1km가 된다. 이 지역에서는 해양의 조석과 하구의 흐름의 혼합된 영향이 나타나며 진행하여오는 조석은 급격히 알아지는 수심의 영향으로 인하여 증폭되며 황해 전체에서 뚜렷한, 세계적으로 알려진 조석단파(용조)가 발생하는데 (사진 1), 해안공학적으로 중요한 물리현상이다. 한편 만의 수심이 알아짐과 더불어 강한 조류는 이 지역으로 많은 양의 퇴적상황(sedimentation)을 야기시켜 거대한 사주를 형성한다. 많은 양의 퇴적물이 장강으로부터 유입되어 북측의 사주가 동측으로 발달하고 있으며 만의 입구에 퇴적되고 있다. 강한 창조류는 만의 내측을 침식하게 되는

데 이 결과로 이 부분의 해안선은 북측으로 후퇴하게 된다. 한편 만의 남측은 보다 복잡한 양상을 보이고 있으며 깊은 수로가 양산 군도의 섬들 사이에 형성된다. 본 연구는 1980년 초반에 항주만에서 수행된 미·중국 니토 연구의 현장 관측 프로그램이 천안문 사건으로 모델링 연구로 속개되지 않아 귀중한 현장 관측 자료를 활용하고 또한 이 해역의 개발에 따른 수리환경 예측을 위한 체계적 연구를 염두에 두고 시작되었다.



사진 1. 항주만에서의 조석단파(용조)

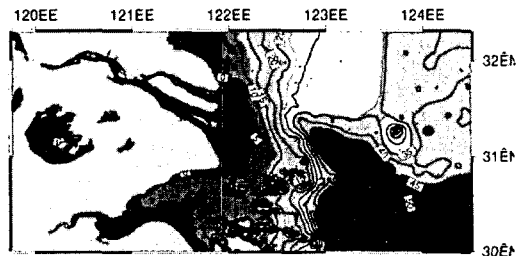


Fig. 1. 항주만의 수심도

1 극동건설 토목부장
 2 성균관대학교 토목환경공학과
 3 성균관대학교 토목환경공학과 교수

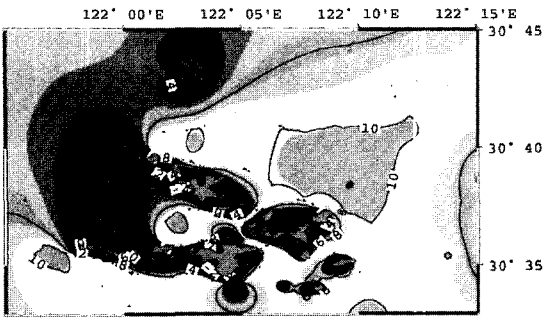


Fig. 2. 양산군도 해역의 수심도

2. FDM 모델에 의한 조석 산정

첫단계의 모델링은 황해의 세격자 기본모형(Choi, 1990)의 경도상 $1/12^\circ$, 위도상 $1/15'$ 의 기본격자를 1:3 격자 세분화 기법을 이용한 동적연결체계에서 항주만 해역은 고해상 등지화시킨 모형(김, 1996)으로서 8개 분조의 조석체계를 재현시켰으며, 주요한 퇴적모수를 산정하였다. Fig. 3은 항주만이 기본

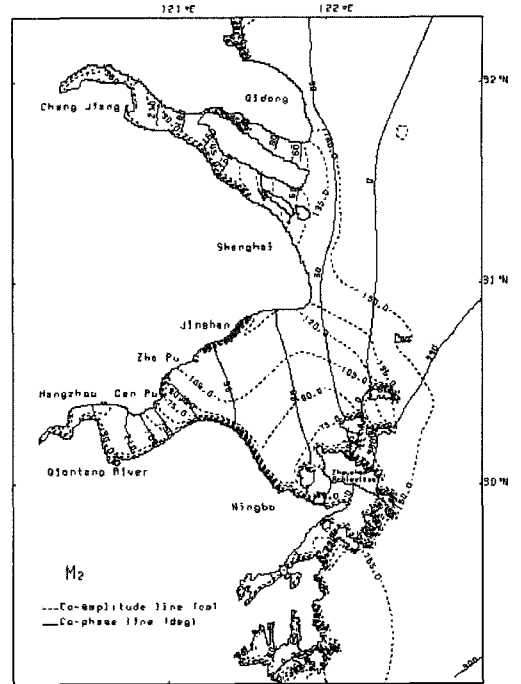


Fig. 4. 항주만에서의 M₂분조의 조석도

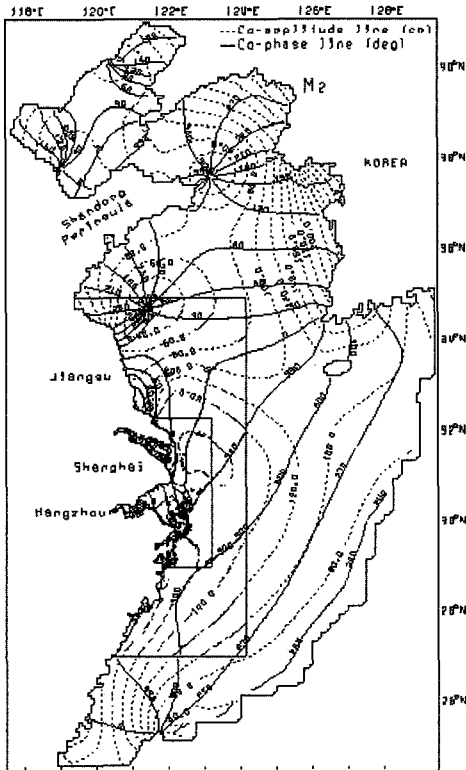


Fig. 3. M₂ 분조의 조석도

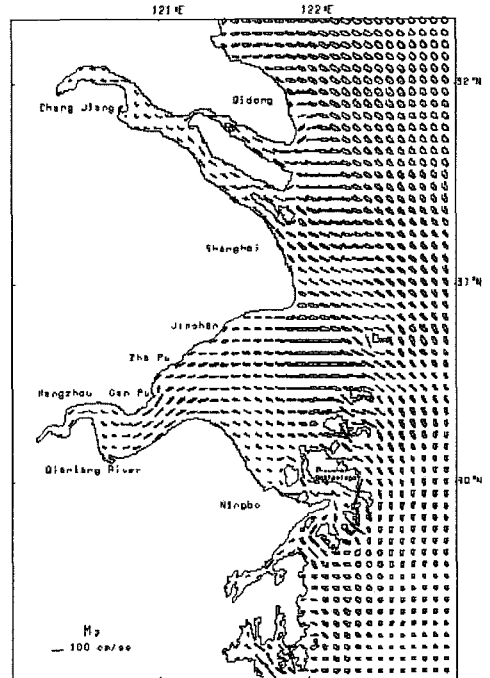


Fig. 5. 항주만에서의 M₂분조의 조류다윈도

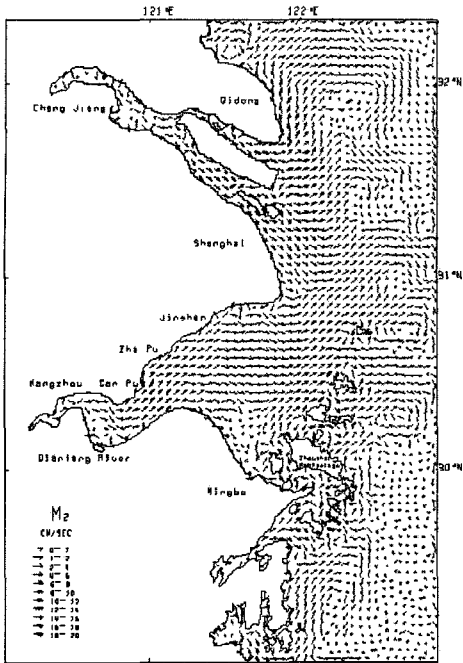


Fig. 6. M_2 분조의 조석 항류도

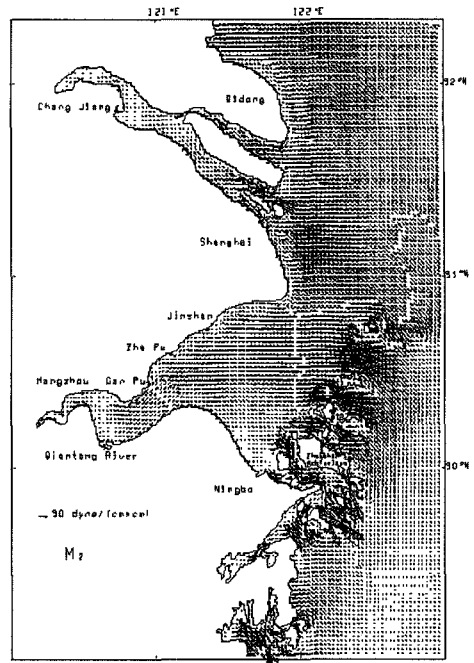


Fig. 8. M_2 분조의 최대바닥응력 벡터도

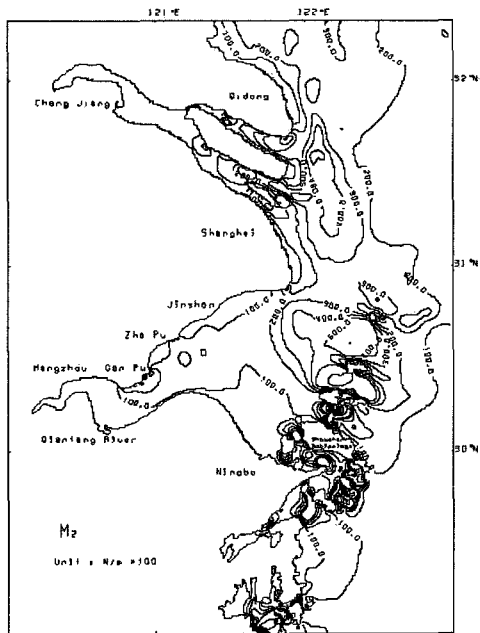


Fig. 7. M_2 분조의 에너지 소산량 분포도

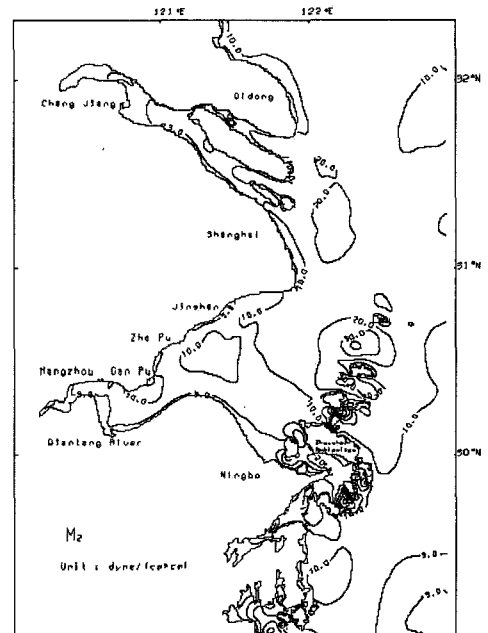


Fig. 9. M_2 분조의 최대바닥응력 등치선도

격자에서 1:9로 두 번의 동적결합을 시킨 모형의 전체 조석분포도이며 Fig. 4는 경도상 $1/108^\circ$ 와 위도상 $1/135^\circ$ 의 해상도를 갖는 동적형 격자에서 산정된 결과이며 Fig. 5는 이 격자에서의 M_2 조류타원도의 분포를 제시하고 있다. 이 모형 역시 자세한 항주만의 조석을 재현하고는 있으나 수많은 섬들의 영향으로 인한 조석순환의 형태를 해상시키기에는 유한격자체계 모형으로서의 근본적인 제약점을 갖고 있다. Fig. 6은 이 세부역의 조석항류 즉 잔차류(조석에 의해 교정된 흐름)의 분포를 나타내는데 항주만 내의 간푸와 자푸 사이에서는 잔차류가 조류의 진행방향인 해안선을 따라 외측으로 발생하는데 부유토사의 외측 이동을 시사한다. 한편 항주만의 남측 해안에서는 주산군도의 영향으로 농보 부근에 극히 약한 흐름이 나타나고 있어 전단강에서 배출되는 토사의 일부는 이 부근에서 퇴적되는 것이 시사된다. Fig. 7은 에너지 소산도를 제시하는데 장강하구와 주산군도에서 뚜렷하게 큰 소산이 일어난다. Fig. 8과 9는 최대마찰응력의 등치선도와 벡터도를 제시하는데 주산군도 섬들 사이의 수로와 장강 하구에서 20 dyne/cm^2 의 큰 응력이 제시되고 있으며 벡터도를 보면 항주만 입구에서는 남북을 연결하는 선을 경계로 만 내측을 향하는 벡터와 만 외측을 향하는 벡터와 항주만의 복단의 동서를 연결하는 경계로 역시 내외측을 향하는 벡터가 산정되고 있어 이는 이 경계가 모래와 같은 소류사의 이동 즉 발산이 이루어지는 경계로서 해석될 수 있다. 장강에서는 이러한 과정에 의해 소류사의 내측이동이 거대한 사주를 형성시키고 항주만의 장기적인 퇴적을 유발시키는 반면 섬 사이의 강한 벡터는 소류사의 이동이 강하여 깊은 수심을 유발하게 된 배경으로 설명될 수 있다. 이 모형이 전반적으로는 고해상도를 갖지만 현재의 양산제도와 같은 작은 섬들을 해상하기에는 적합하지는 못하였다.

3. FEM 모델에 의한 조석 산정

3.1 항주만 및 양산군도 해역 조석시물레이터의 정밀유한요소격자 수립

김(2000)의 논문에서 수립된 황해 및 동중국해를 해상하는 격자(Fig. 10(a))는 약 38,000개의 절점과 73,000개의 요소를 가진다. 이 격자를 기본으로 하여, 항주만 및 양산군도 해역을 자세히 해상하는 약 135,000개의 절점과 263,000개의 요소를 가지는 유한요소 격자(Figs. 10(b), 10(c))를 새로이 제작하고 기존의 격자와 합성하여 항주만 및 양산군도 해역을 자세히 해상하는 황해 및 동중국

해 전역을 포함하는 격자를 제작하였다. Fig. 10(b)와 10(c)는 항주만 해역과 양산군도 해역의 상세격자를 보여 주는데, 해안과 하구, 만 등의 특성을 잘 해상시키기 위해서 항주만 부근의 격자는 최소 격자간격 200m로 하고, 양산항은 최소 격자간격을 30m로 하여 유한요소격자를 생성하였다. 이 접근은 이 해역의 복잡한 해안선, 수심변화 및 개발안에 따른 배열안을 수용하기 위해서는 비구조적 메쉬인 유한요소체계가 합리적이며 또한 신뢰성있는 상세한 흐름 양상이 재현될 수 있기 때문에 채택하였다.

3.2 수치시물레이션 결과

수립된 격자체계에서 황동중국해의 M_2 분조의 조석을 산정하였다. 계산은, ADCIRC (Advanced Dirculation model for oceanic, coastal and estuarine waters) (Luettich 등, 1992; Luettich and Westerink, 2000) 모형을 성균관대학교 토목환경공학과 해안해양역학연구실의 64개로 구성된 리눅스 베어울프 클러스터링 (Linux Beowulf Clustering) 시스템(최 등, 2004) 기반에서 병렬 수행하였다. ADCIRC 모형의 수행 중 영역분할(Fig. 11)은 Metis 및 HSFC (Hibert Space Filling Curve) 기법에 의해 수행될 수 있는데 Metis 기법은 spectral partitioning 방법보다 영역분할 및 속도가 빠르며 행렬처리 및 저장에서 우월하기 때문에 이 기법을 사용하였다 (Chippada 등, 1996).

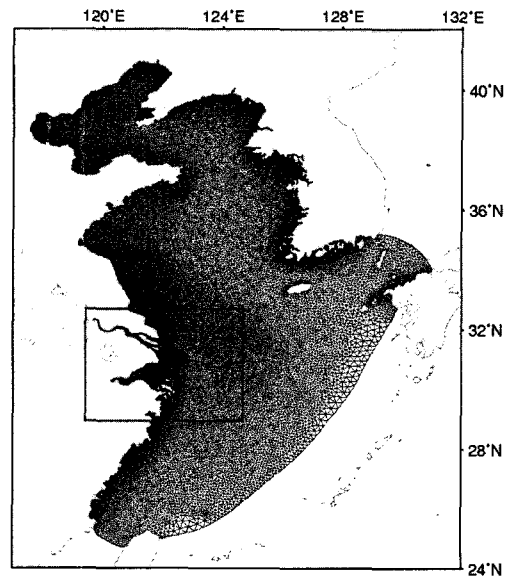


Fig. 10(a). 황해 및 동중국해 유한요소격자

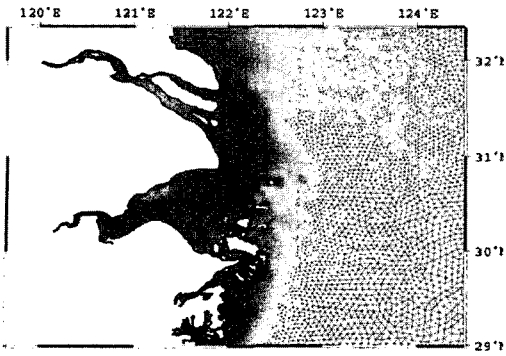


Fig. 10(b). 항주만 유한요소 격자

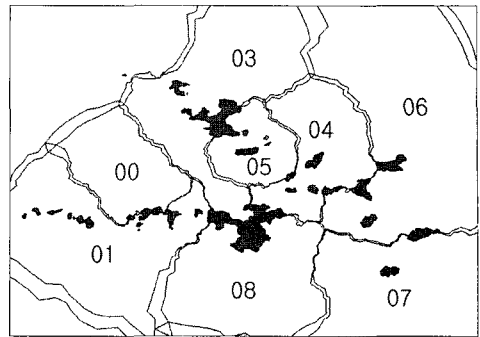


Fig. 11(b). 병렬계산을 위한 CPU 할당에 따른 영역분할도 (양산군도 해역)

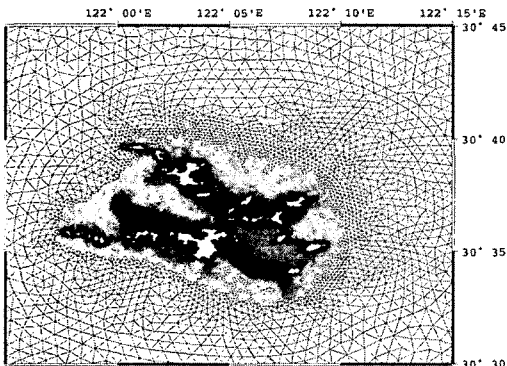


Fig. 10(c). 양산군도 해역의 유한요소격자

적용된 모형의 신뢰성 검증은 이미 기존의 연구(Choi and Lee, 2003; 최 등, 2004)에서 수행되었기 때문에 본 논문에서는 재술하지 않기로 한다.

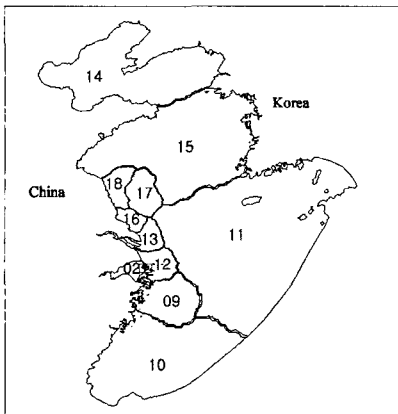


Fig. 11(a). 병렬계산을 위한 CPU 할당에 따른 영역분할도(황해 및 동중국해)

Fig. 12는 M_2 분조의 모형 전영역과 항주만 및 양산군도 해역의 조석도로서, 전영역에서의 조석의 분포는 기존의 연구 분포와 일치한다. Fig. 12(b), 12(c)에서 항주만에서의 진폭은 1~1.2m, 양산항에서는 약 1.15m로 산정되었다.

Figs. 13과 14는 산정된 항주만과 양산군도 해역의 창, 낙조시의 M_2 분조의 조류벡터도이고, Fig. 15는 두 해역에서의 조류타원도를 보여 준다. 두 해역에서 조류의 회전성은 극히 적으며 왕복성 조류가 양산 군도의 배열을 따라 우세한 것이 잘 재현되고 있다.

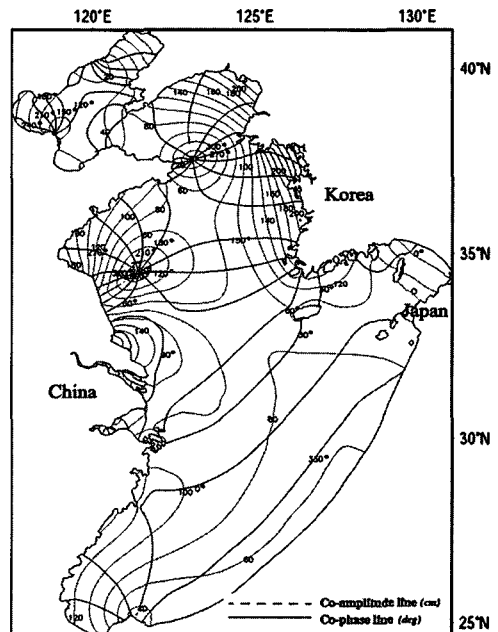


Fig. 12(a). M_2 분조에 의한 황·동중국해의 조석도

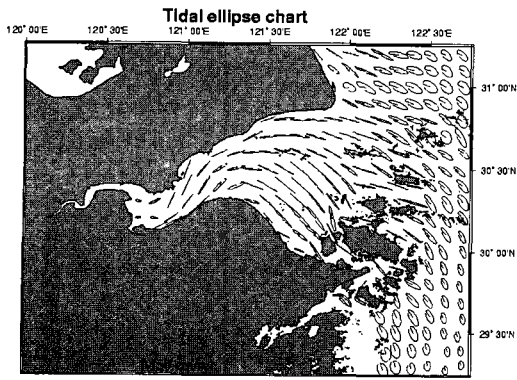


Fig. 15(a). 항주만 일대의 M_2 분조의 조류타원도

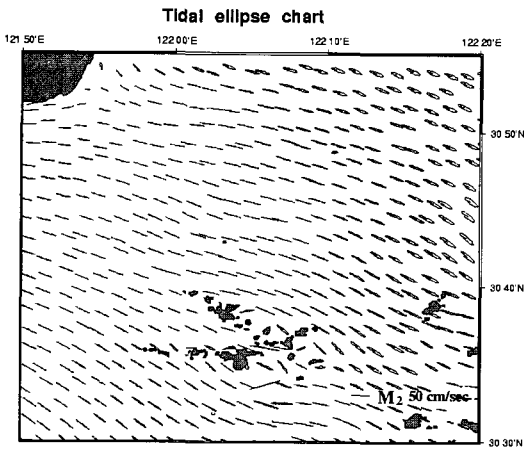


Fig. 15(b). 양산군도 해역의 M_2 분조의 조류타원도

3.3 토사이동 모수에 의한 토사이동 추정

3.3.1 조석 잔차류

조석 잔차류(조석 항류)는 매 노드에서의 한 조석주기 평균된 유속을 제시하는 것으로 부유토사를 포함하는 부유물, 오염물질 확산을 추정하는 지표가 될 수 있다. Fig. 16에 의하면, 항주만 및 양산군도에서는 나조가 우세한 것을 볼 수 있고, 양산군도 남서측에 조석 와동이 제시되고 있다. 물론 이 와동은 평균 조석 상황만을 예시하는 것으로서 바람의 효과라든지 상류 담수 유입 등의 흐름은 고려되지 않은 상황이지만, 이러한 조석와동은 부유토를 포집 시키는 역할을 하므로 장기적인 니토 퇴적의 패턴이 높은 것으로 제시되고 있다. 이는 인근에서 방출되는 부유성 오염 물질 역시 같은 과정이 일어날 수 있음을 간접적으로 제시하는 지표가 된다.

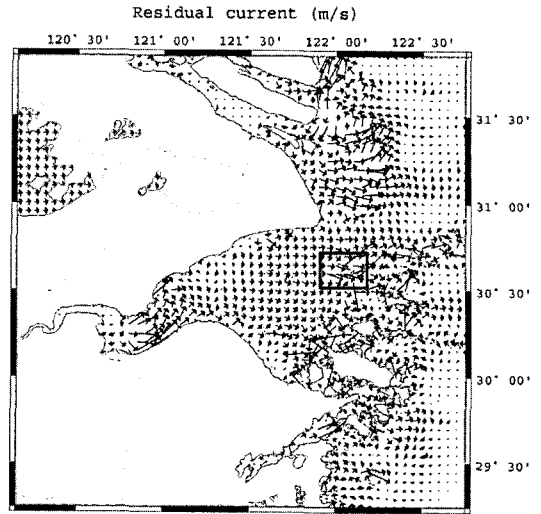


Fig. 16(a). 항주만에서의 조석 잔차류

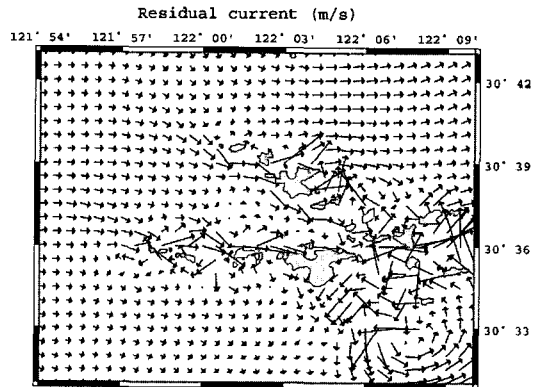


Fig. 16(b). 양산군도에서의 조석 잔차류

3.3.2 에너지 소산량

해저에서의 조석마찰에 의한 에너지 소산 분포가 Fig. 17에 제시된다. 이는 유사하게 최대해저마찰응력에 의해 소류사가 이동할 수 있는 포텐셜을 제시하는데 항주만에서 약 3 N/m, 양산군도 해역에서 약 5N/m로, 항주만보다 크게 산정된 것을 볼 수 있다.

3.3.3 해저마찰응력(최대 및 평균) 벡터 및 등치선도

해저마찰응력(τ)은 해저의 거칠기에 의한 해류와 파도의 복합작용으로 발생한다. 해저마찰 응력은 해저면의 변화와 변화 정도를 평가 가능한 지표를 $\tau = \rho_w f_b u |u|$ 으로 산정한다. 여기에서, ρ_w : 물의 밀도, f_b : 마찰 계수; u : 수심평균 유속이며, 해저 마찰 계수 (f_b)는 식(1)과 같다.

$$fb = 2 \frac{k^2}{(\ln(30H/k_{n-1}))} \quad (1)$$

여기서, k: Von Karmann constant, H: 수심, k_n : 해저 마찰이다. 현재의 실험에서는 이 해역의 유동현상은 조류가 주도적인 유동을 유발시킴으로 조석 마찰의 관점에서 최대 전단응력의 분포를 산정하였는데 제시되는 벡터는 소류사(모래)의 이동 방향을 나타낸다. 최대전단응력의 강도가 클 경우, 니토 저질의 경우에도 이러한 이동은 가능한 것으로 알려져 있다. Figs. 18, 20은 한조석 주기당 최대(평균) 유속에 의한 해저 마찰 응력의 분포가 제시되고 있는데 최대 마찰응력과 평균마찰응력의 벡터 방향이 일치할 경우는 소류사의 이동방향은 더 신뢰성이 있게 된다. 여기서 두 벡터의 방향이 수렴하면 퇴적이 일어나며 두 벡터의 방향이 발산하는 지점에서는 세굴이 일어나는 것으로 해석하면 되는데 대상 해역의 벡터 분포는 복잡한 것으로 제시 되고 있다. Fig. 19에서 제시된 바와 같이 최대해저마찰응력의 분포가 항주만은 약 1 N/m^2 정도, 양산군도 해역에서는 약 3 N/m^2 로 산정되어 소류사의 이동이 활발한 동적 퇴적체계임을 명시하고 있다. 이는 이 해역의 해저 토사가 평형적인 상황에 있지 않고 흐름의 변화, 토사 공급 상황에 따라 계속적으로 동적 이동을 제시한다.

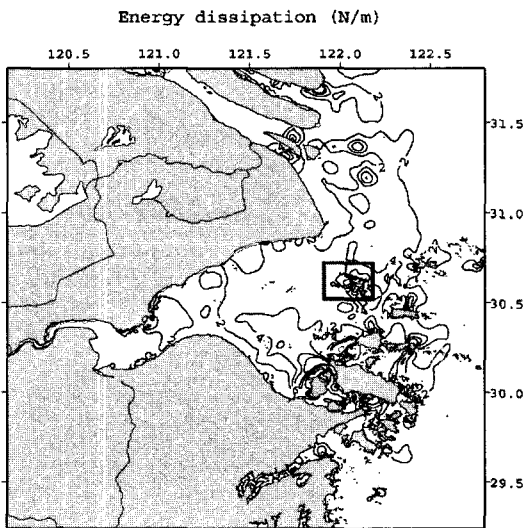


Fig. 17(a). 항주만에서의 에너지소산량 분포도

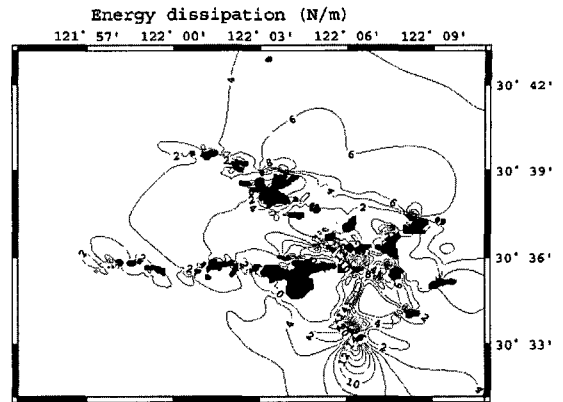


Fig. 17(b). 양산군도 해역의 에너지소산량 분포도

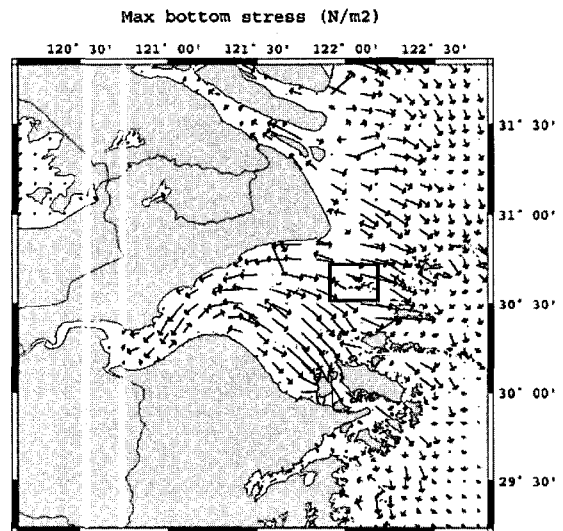


Fig. 18(a). 항주만의 최대해저마찰응력 벡터도

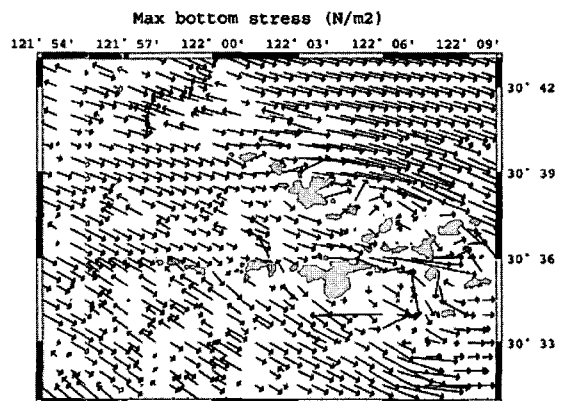


Fig. 18(b). 양산군도의 최대해저마찰응력 벡터도

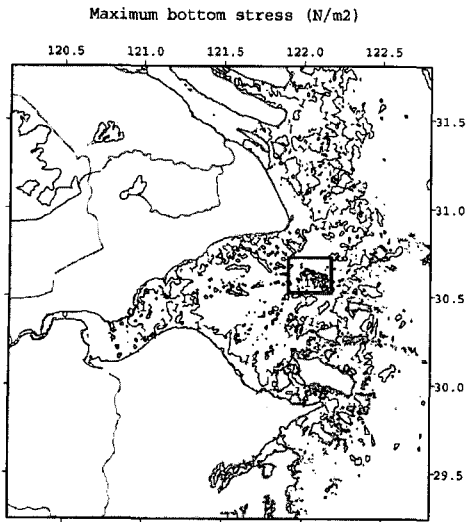


Fig. 19(a). 항주만의 최대해저마찰응력 등치선도

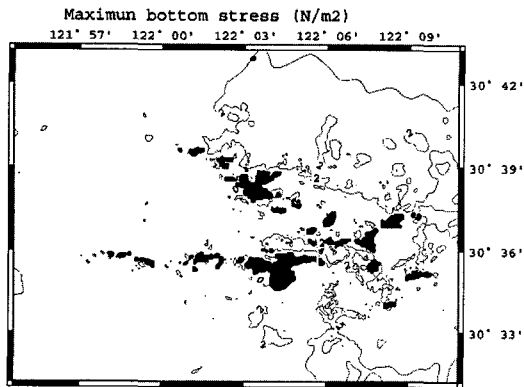


Fig. 19(b). 양산군도의 최대해저마찰응력 등치선도

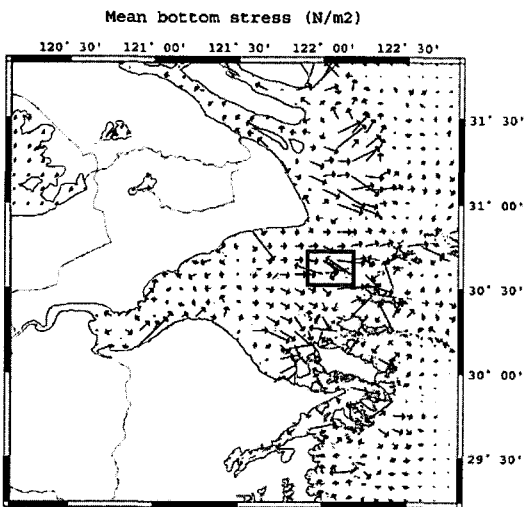


Fig. 20(a). 항주만의 평균해저마찰응력 벡터도

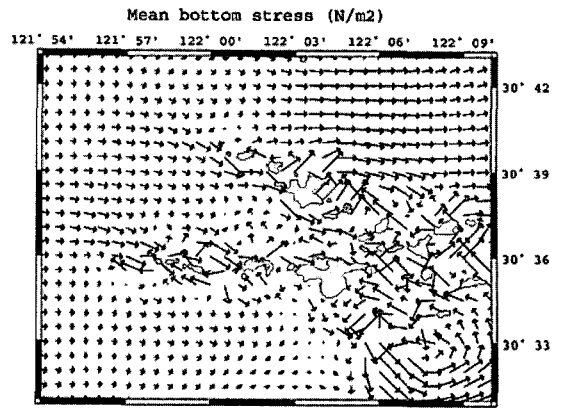


Fig. 20(b). 양산군도의 평균해저마찰응력 벡터도

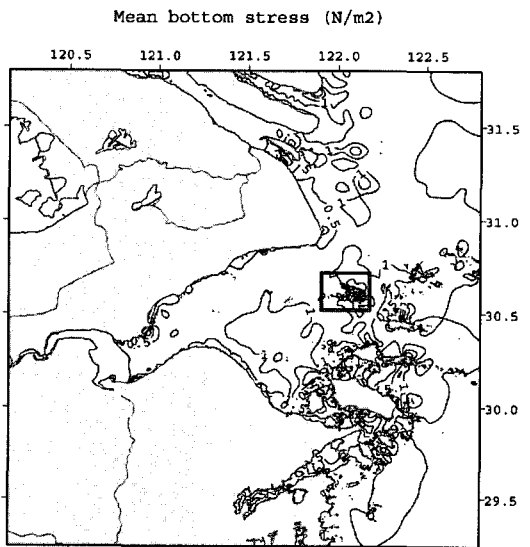


Fig. 21(a). 양산군도의 평균해저마찰응력 등치선도

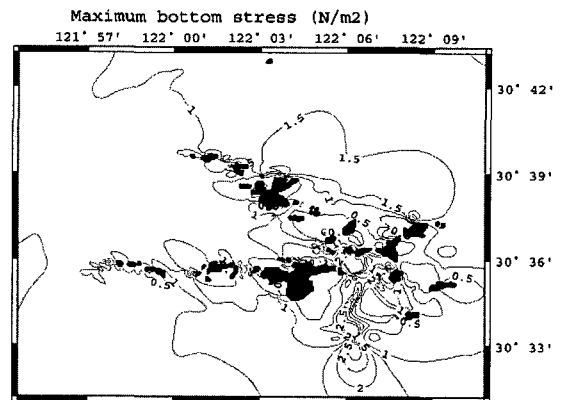


Fig. 21(b). 양산군도의 평균해저마찰응력 등치선도

3.3.4 최대이동포텐셜의 분포

경험적인 토사이동 공식들은 대부분 유속의 3~4승에 비례하는 항을 포함하고 있다. 따라서 편의상 유속의 4승을 최대이동포텐셜이라 칭하였다. 그림 22는 산정된 최대이동포텐셜 분포로서, 양산 군도 해역이 항주만보다 크게 산정되고, 그 양상이 매우 복잡한 것을 볼 수 있다.

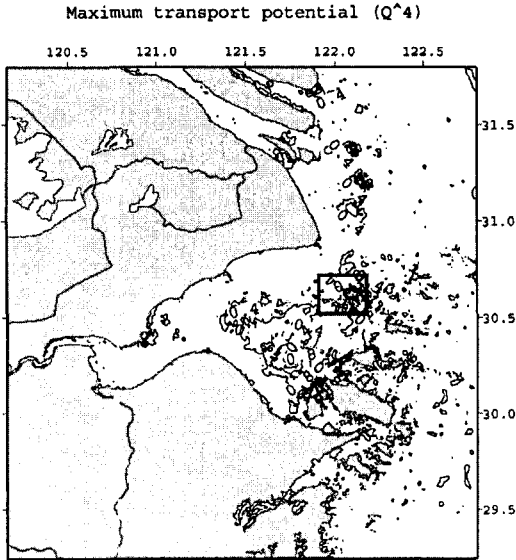


Fig. 22(a). 항주만의 최대이동포텐셜 등치선도

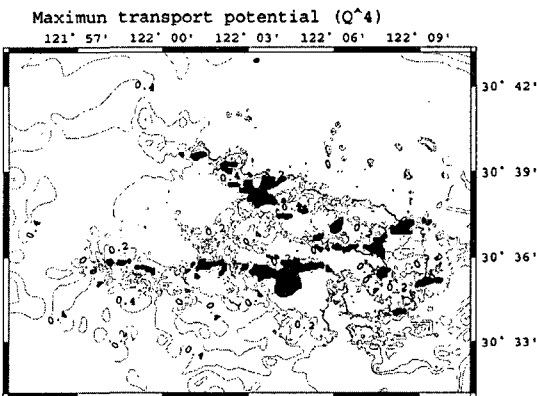


Fig. 22(b). 양산군도의 최대이동포텐셜 등치선도

4. 결 론

황해체계에서 경기만과 더불어 가장 특성적인 조석환경을 갖는 항주만의 조석과 조석 관련된 물리과정 그리고 개발에 따른 조석 수리 환경의 평가를 접근할 수 있는 체계 구성을 위한 초기 노력

을 서술하였다. 이 해역의 조석 단파가 포함되는 조석 산정 시스템이 근년에 급속하게 능력이 확장되는 전산시스템에 의해 향후 10년 이후에는 가능할 것으로 전망되는 바, 중국과의 공동연구, 협력 연구를 염두에 두고 본 과업은 수행되고 있다.

참고문헌

- 김경옥 (2000). 유한요소모형을 이용한 황해 및 동중국해의 조석산정. 석사학위논문, 성균관대학교.
- 김양근 (1996). 장강하구의 조석 수치 모형. 석사학위논문, 성균관대학교.
- 최병호, 민병일, 육진희 (2004). 인천 해역의 국지해양조석시뮬레이터에 의한 지역적 토사이동 추정. 조석환경에서의 국지세굴 워크숍 논문집, 85-103.
- 최병호, 이한수 (2004). 한반도 해안선 매핑을 위한 해안선 데이터 베이스의 작성 전략, 한국의 해안선 정립을 위한 워크숍 논문집, 81-87.
- Chippada, S., Dawson, C.N., Martinez, M.L. and Wheeler, M.F., (1996). Parallel computing for finite element methods of surface water flow, in computational methods in surface flow and transport problems, Vol. 2 of Computational Methods in Water Resources XI, A.A. Aldama, J. Aparicio, C.A. Brebbia, W.G. Gray, I. Herrera, and G.F. Pinder, editors, 63-70.
- Choi, B.H. and Lee, H.S., (2003). Preoperational simulation of dike closure for Saemangeum tidal barriers, Proc. of Workshop on Hydro-environmental Impacts of Large Coastal Developments, 91-118.
- Choi, B.H., (1990). Development of fine-grid numerical tidal models of the Yellow Sea and East China Sea. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 2(4), 231-234.
- Luetlich, R.A. and Westerink, J.J., (2000). A (parallel) advanced circulation model for oceanic coastal and estuarine waters, http://www.marine.unc.edu/C_CATS/adcirc/adcirc.htm.
- Luetlich, R.A., Westerink, J.J. and Scheffner, N.W., (1992). ADCIRC: An advanced three-dimensional circulation model for shelves, coasts, and estuaries, Report 1: Theory and methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL, Technical Report DRP, 92(6), USAE, Vicksburg, p137.