

천수만 방조제 건설로 인한 조석현상 변화 Numerical Modeling of Changes in Tides and Tidal Currents Caused by Embankment at Chonsu Bay

소재귀* · 정경태* · 채장원*

Jae-Kwi So*, Kyung-Tae Jung* and Jang Won Chae*

요 旨 : 서산 A·B지구 간척사업에 따른 방조제 축조에 따라 야기되는 천수만 내 조석현상 변화를 파악하기 위하여 수심적분 2차원 해수유동 수치모형실험을 실시하였다. 외해 개방경계조건을 확보하기 위하여 3개 지점에서 조석관측을 실시하였고 수치모형의 검증을 위하여 천수만 내 2개 지점에서 조류관측을 실시하였다. 수치모형 실험 결과는 관측된 조류 자료와 양호하게 일치하는 것으로 나타났다. 방조제 건설 전후의 절대유속을 비교해본 결과 대조기 최강 창조류를 기준으로 할 때, 북부해역, 백사수도, 중부해역, 남부해역의 순으로 유속의 감소가 크게 나타났다. 방조제 건설 후 천수만 북부에서 조간대 노출이 발생하는 시간은 약 51분 정도 빨라졌으며, 노출시간은 23분 정도 길어진 것으로 나타났다. 고조 발생 시간은 1시간 정도 앞당겨졌으며, 고조 수위는 15 cm 정도 낮아졌다.

핵심용어 : 조석, 조류, 조석모델, 조간대

Abstract □ Changes in tides and tidal currents in Chonsu Bay caused by the construction of Seosan A and B reclamation regions have been investigated using a depth-integrated two-dimensional tidal model. Three water level recorders were deployed for about one month and used for the specification of the open boundary condition. The computed currents were found to be in a good agreement with the measurements at two stations within Chonsu Bay. Comparison of the absolute velocities computed with the conditions before and after the embankment clearly shows that the reduction in tidal current amplitude is evident throughout the bay and the magnitude of the reduction increases to the north. Calculation shows that the embankment has advanced the time of drying at the northern part of the bay by about 51 minutes and has increased the exposure time by about 23 minutes. The high water time has advanced by about 1 hour, lowering the high water level by about 15 cm.

Keywords : tide, tidal currents, tide model, tidal flat

1. 서 론

천수만은 황해연안 중부지역(126°20'~126°30'E, 36°23'~36°37'N)에 위치한 수심 25 m 이내의 천해성 내만으로 태안군의 안면도, 서산시의 간월도, 보령시의 서해지선으로 둘러싸여 있다(Fig. 1). 만 입구의 폭은 약 5 km이며, 만 입구에는 많은 섬이 산재한다. 만의 길이는 안면도의 최남단인 영목과 부남호의 최북단을 기준으로 약 40 km이고 만의 폭은 죽도의 등서를

기준으로 약 9 km로써 수면적이 약 380 km²에 이르렀으나, 서산 A·B지구 간척사업(1982년 착공, 1989년 완공)에 따른 방조제 축조와 부남호 및 간월호의 담수호 조성, 홍보지구 간척사업에 따른 방조제 건설 등으로 인하여 수면적이 약 179 km²로 감소하였다. 만 북부 담수호의 면적은 A지구가 2,733×10⁴ m², B지구가 1,702×10⁴ m²이다.

천수만 주변 해역의 해저지형 및 해안선은 산재한 섬들과 넓은 조간대 등으로 인해 매우 복잡한 형태를

* 한국해양연구소 연안·항만공학연구센터 (Coastal and Harbor Engineering Research Center, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea)

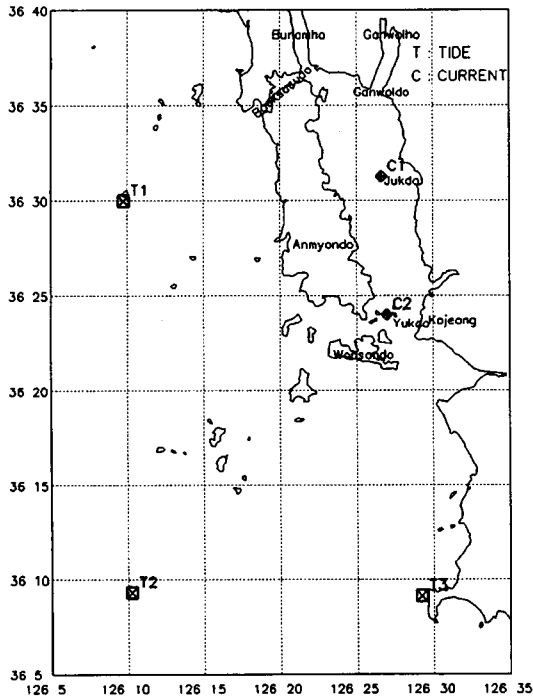


Fig. 1. Study site-Chonsu Bay.

갯는다. 만 입구에는 2개의 수로가 있는데 하나는 원산도 동쪽과 송도 사이로 들어가며, 다른 하나는 서쪽의 효자도, 소도, 추도, 노지도와 동쪽의 몽덕도, 허육도, 육도와의 사이를 통과한다. 만의 중앙부에는 7개의 작은 섬으로 구성된 죽도가 있으며, 천수만 북서쪽에 위치한 남폭 약 4 km, 폭 약 900 m에 이르는 대주와 연결되어 있다. 만으로 유입되는 하천은 모두 규모가 작으며, 만 중앙 동쪽의 금리천, 만 입구 동쪽의 상전천 등이 있다. 만 북부의 하천은 모두 담수호내로 유입된다. 따라서, 비정기적으로 방류되는 담수호로부터의 담수유입을 제외하면 하천수 유입의 영향은 미미할 것으로 생각된다.

천수만의 최대수심은 서쪽 수로 남부에서 27.5 m이다. 동쪽 수로의 경우 북부해역에서 12~14 m, 중부해역에서 10~16 m, 남부해역은 12~20 m이다. 서쪽 수로는 중부해역 10~18 m, 남부해역 20~26 m로 서쪽 수로의 수심이 더 깊다. 그러나, 수로의 길이는 동쪽 수로가 더 길다. 간조시 노출되는 지역은 천수만의 동쪽과 서쪽 가장자리에서 남북방향으로 발달되어 있고 그 외 백사수도 주변, 황도 남방, 죽도와 황도 사이의 대주, 간월도 주변, 안면도 최남단 고남 주변 등에 분포한다.

서산 A·B지구 간척사업이 진행되면서 1983년-1985년 사이 방조제 축조 물막이 공사가 완료된 후 천수만 북단으로 통하는 2개의 중심 수로가 차단된 결과, 방조제 부근의 유속이 급속히 약화되었으며, 이와 같은 급격한 흐름장의 변화는 인근 해역의 각종 해양환경 변수에 영향을 미치게 되었다(부산수산대학 연안해양연구실, 1985). 즉, 해역 내 해수혼합과정을 변화시키고 영양염의 공급과 내부순환, 용존산소 순환의 균형을 파괴하며, 지형, 해저질, 수질 등의 변화를 초래하여 결과적으로 천수만 주변해역의 생산성에 영향을 미칠 것으로 생각된다.

이 지역은 그간 간척사업 등으로 인한 해양환경 변화에 대한 논란이 계속되어 왔음에도 이에 대한 연구는 충분치 못한 실정이다. 부산수산대학 연안해양연구실(1985)은 격자간격 750 m의 수치모형실험에서 방조제 건설로 인하여 대부분의 구역에서 유속이 다소 감소하였고 특히, 만 북부에서 유속의 감소 폭이 큼을 밝혔다. 부산수산대학교 해양과학공동연구소(1994)는 격자간격 400 m의 광역모델과 200 m 격자의 협역모델을 수립하여 대조기 조건으로 방조제 영향을 검토한 바 있다. 구체적인 결과에 대해서는 언급되지 않았으며 단지 A지구 방조제 남측에서 시계방향으로 회전하며 안면대교 쪽으로 흐르는 조석잔차류가 있음을 지적하였다. 모델 결과에서 안면도 북쪽 수로부근을 제외하고는 조간대 형성을 무시하고 있으며 마찰계수로는 0.003을 사용하였다. 이 등(1997)은 격자간격 375 m의 주파수영역 유한차분 모델을 개발, 적용하여 시간영역 선형, 비선형 모형과 비교하였는데 M_2 조석이 고려되었으며 조석의 진폭 및 지각이 해저마찰력과 비선형항에 민감하게 반응한다고 보고하였다. 한국해양연구소(1997)는 격자간격 375 m, 연직 12개 층의 3차원 수치모형을 적용하여 방조제 건설 전후의 조류를 재현하였으나, M_2 분조만을 대상으로 하였고 정량적인 비교검토는 하지 않았다. 이상의 국지모델링 외에 해상도 측면에서 주목할 만한 광역모델링은 김(1994)의 연구로써 광역격자($1/12^\circ \times 1/15^\circ$)와 세부격자($1/36^\circ \times 1/45^\circ$)의 nesting 기법을 사용하여 8개 조석 분조에 대한 수치모형실험을 실시한 바 있다.

본 연구에서는 Flather and Heaps(1975) 모델을 모체로 한국해양연구소에서 지속적으로 수정 보완되어온 수심적분 2차원 해수유동 모델을 사용하여 서산 A·B지구 간척사업의 결과로 천수만의 수면적이 축소된

데 따른 조석현상의 변화를 검토하였다. 기존 모델의 경우와는 달리 조건대에서의 노출, 침수(drying, wetting) 현상을 고려하여 정확한 흐름의 재현이 이루어지도록 하였다. 본 연구에서 사용되는 모델은 수평확산항을 포함하며 외해측 개방경계의 노출도 고려 가능하도록 확장되었다. 방조제 건설로 천수만 head 부근을 비롯하여 만 내 수심이 국지적으로 변했으리라 판단되나 방조제 건설 후 수심측량 자료의 미비로 인해 전체적인 변화 경향조차 확인키 곤란하였다. 따라서, 본 연구에서는 방조제 건설 전후에 대해 같은 수심 자료를 사용하였으며, 만 내 수심의 변화에 따른 해수 유통량의 변화가 서산 A·B 지구 방조제 건설로 인한 만의 volume 변화보다 아주 작다는 가정 하에 조석체계에 어떠한 변화가 나타나는지를 논하였다. 방조제 건설 전후에 대해 구역별로 절대유속의 변화를 파악하였으며, 수개의 단면을 설정하여 유량 및 유속을 비교하였다. 또한 양식과 관련된 정보로서 조건대에 위치한 수 개 지점에서 고조 시간과 조위, 노출시간을 비교하였다.

2. 기본방정식 및 경계조건

2.1 지배방정식

대상해역이 천해역으로 수심이 상대적으로 얕으며, 해수유통의 주된 요인이 조류로써 전 층에 걸쳐 유속이 거의 균일하고 강한 유속으로 인해 상하층간의 혼합이 활발한 점을 고려하여 본 연구에서는 수심평균 2차원 수치모형을 사용하였다.

본 연구에서 사용된 유한차분 2차원 해수유통 수치모형의 기본방정식인 운동방정식과 연속방정식은 다음과 같다.

운동방정식:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + fV - \frac{\tau_{xb}}{\rho H} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y \frac{\partial U}{\partial y} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - fU - \frac{\tau_{yb}}{\rho H} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y \frac{\partial V}{\partial y} \right) \quad (2)$$

연속방정식:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(HU) + \frac{\partial}{\partial y}(HV) = 0 \quad (3)$$

여기서 t =시간, (x, y) =직교좌표계 좌표, (U, V) =유속벡터의 x, y 성분, h =평균해면하 수심, ζ =평균해면상 해수위, H =순간 총 수심($=h+\zeta$), f =전향력 계수(Coriolis parameter), g =중력가속도, (τ_{xb}, τ_{yb}) = x, y 방향 해저마찰력, A_x, A_y =수평방향 운동량 난류확산계수이다. 운동량 난류확산/분산계수는 shear flow를 수심평균함으로써 무시되는 흐름 방향의 분산을 고려하기 위해 다음과 같은 Elder(1959)의 식을 이용하여 주어진다.

$$A_x = D_c + v_T + D_s \cdot U^2/q^2$$

$$A_y = D_c + v_T + D_s \cdot V^2/q^2$$

$$q^2 = U^2 + V^2$$

여기서 v_T =수평방향 난류확산계수($=0.07 HU_s$), U_s =전단속도(shear velocity), D_s =흐름방향 분산계수($\approx 5.86 HU_s$), D_c =격자크기에 따른 correction term($\approx C\Delta xU$ or $C\Delta yV$, C 는 상수)이다.

조석·조류에너지의 감쇠를 나타내는 해저마찰력은 quadratic friction law에 의거하여 다음과 같이 주어진다.

$$\tau_{xb} = \rho k_b U (U^2 + V^2)^{1/2} \quad (5)$$

$$\tau_{yb} = \rho k_b V (U^2 + V^2)^{1/2} \quad (6)$$

여기서 k_b 는 해저 마찰력계수로 0.00235의 값을 이용하였다.

2.2 경계조건

해수유통 방정식에 대한 외해 경계면에서의 조건은 다음과 같다.

$$\zeta(x, y, t) = \sum_j f_j A_j \cos \left\{ \omega_j t + (u_j + V_j) - g_j \right\} \quad (7)$$

여기서 A_j =진폭, ω_j =위상속도(phase velocity), g_j =지각(phase lag), f_j, u_j, V_j 는 천문상수이다. 또한 개방경계면에서의 유속은 reverse continuity를 이용하여 구하였으며, 육지 경계면에서는 법선 방향 유속은 없는 것으로 정의된다. 즉,

$$U_n = 0 \quad (8)$$

이다.

경계조건 일부로서 Flather and Heaps(1975)가 제안한 조건대 처리기법에 근거한다. 마찰력항 분모에

등장하는 순간 총수심이 특이점으로 작용하는 것을 피하기 위한 수심최소치 H_{cr} 와 유속 계산 여부를 판정하기 위하여 유속계산점에 인접한 격자점으로부터 산정되는 최소수위차 ϵ 이 입력상수로 포함된다.

3. 현장조사 및 모델구성 검증

3.1 현장조사자료

해수유동 수치모형의 위해 경계조건 입력자료를 확보하기 위하여 Fig. 1에 표시된 3개 정점 T1(97년 2월), T2(96년 10월), T3(97년 2월)에서 약 1개월간 Intelligent ISTG를 사용하여 조석관측을 실시하였다. 정점 위치는 수치모형의 위해 경계면에 일치하도록 정점 T1, T2는 대체로 $126^{\circ}10'E$ 선상에, T2, T3은 대체로 $36^{\circ}10'N$ 선상에 위치하게 선정하였다. 3개 정점에서 관측된 조위의 시간변화 곡선은 Fig. 2와 같으며, 조화분석 프로그램 TIRA를 이용하여 분석한 각 정점에서의 조석 조화상수는 Table 1에 제시하였다. 서해안 일대의 공통된 특성으로 M_2 분조가 가장 우세하며 S_2 , N_2 , K_1 , O_1 등이 우세하게 나타나고 있다. M_2 분조의 진폭은 T1에서 203 cm, T2에서 192 cm, T3에서 207 cm이며, 위상은 각각 96.5° , 89.6° , 86.9° 이다. 따라서, 해안선을 따라 최대 진폭을 갖는 Kelvin 조석파가 북진하고 있음을 알 수 있다. 기 제시된 모델 결과(한국해양연구소, 1997)는 대체로 관측된 진폭보다 작게 나타나고 있으며, T2 위상이 T3 위상보다 빠른 것으로 나타

났다. 평균조차는 T1에서 약 463 cm, T2에서 약 391 cm, T3에서 약 471 cm 정도이다. 조석형태수는 0.19~0.23으로 반일주조가 우세한 혼합조다. T1에서 장주기 분조인 M_m , M_{sf} 의 반조차가 상당히 크게 나타나나 이는 관측 중 기기 이동에 따른 오차일 것으로 본다. 대표적인 천해분조의 크기는 T1에서 $M_4=5.3$ cm, $MS_4=5.6$ cm, T2에서 $M_4=6.0$ cm, $MS_4=3.7$ cm, T3에서 $M_4=8.4$ cm, $MS_4=7.5$ cm이다.

해수유동 모형을 검증하기 위하여 Fig. 1에 표시된 천수만 내의 2개 정점 중층에서 1996년 10월 28일부터 12월 10일까지 1개월 이상 Aanderaa RCM-7을 이용하여 조류관측을 실시하였으며, 조류벡터도는 Fig. 3과 같다. 정점 C1의 경우 유향은 창조 시에 북북서 방향, 낙조 시에 남남동 방향을 나타냈고 최대유속은 55 cm/s 정도로 나타났다. 유속은 5~30 cm/s가 가장 많은 비율을 보였다. C2에서는 창조 시에 거의 북향, 낙조 시에 거의 남향의 흐름을 보였으며, 최대유속은 120 cm/s 정도였다.

관측된 조류의 조화분석 결과는 Table 2와 같다. 자료의 수가 다르기 때문에 C1의 경우 18개 분조, C2의 경우 10개 분조의 조화상수가 산출되었다. C1에서 주요 분조의 장축길이는 M_2 25.7 cm/s, S_2 9.9 cm/s, M_4 3.9 cm/s, MS_4 2.9 cm/s, K_1 2.4 cm/s, M_{sf} 1.3 cm/s로 반일주조가 주류를 이루나(67%) 천해분조들도 상당히 강해서 1/4일주조도 일주조보다는 크게 나타난다. C2에서는 주요 분조의 장축길이가 M_2 71.8 cm/s, K_1 7.9 cm/s, M_4 6.0 cm/s, Z_0 2.5 cm/s로 나타났다. C1에 비해 반일주조가 더 강하게 나타나며, 일주조가 천해분조보다 강하게 나타난다. 앞서 논의된 조석의 경우에 비하여 C1, C2 모두에서 M_4/M_2 진폭비가 한 order 크게 나타나고 있다. 분석된 항류크기를 살펴보면, C1에서는 동남동 방향의 항류가 0.5 cm/s 정도로 나타난 데 비해 C2에서는 2.5 cm/s 정도의 항류가 북북서 방향으로 흐르는 것으로 나타났다. M_2 분조의 장축경사는 각각 108.9° , 83.4° 로 북북서향, 북향을 나타냈다. M_2 분조의 지각은 C1에서 149.6° , C2에서 109.1° 로 약 1시간 24분의 차이를 보였는데 이는 아마도 C2에서 M_2 분조와 S_2 분조가 섞여 계산된 데 따른 오차일 가능성이 크다.

3.2 실험조건 및 검증

수치모델링 영역은 동서방향으로 $126^{\circ}10'$ 부터 $126^{\circ}35'$ 까지 약 38 km, 남북방향으로 $36^{\circ}09'$ 부터 $36^{\circ}43'$

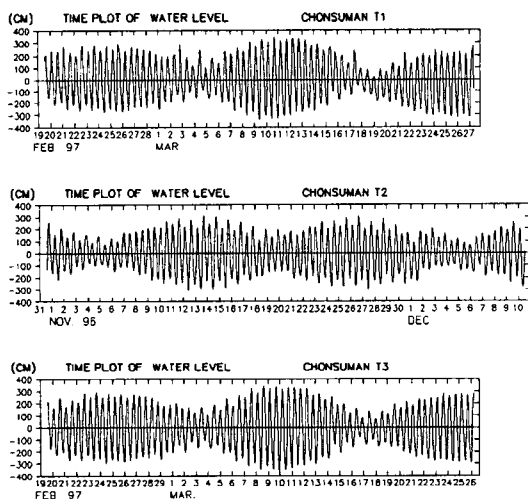


Fig. 2. Observed tidal elevations at 3 open boundary stations.

Table 1. Tidal harmonic constants analyzed from the observed water level data.

| Station | | | T1 | | T2 | | T3 | | |
|-------------|-----|------|-----------------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|
| Constituent | No. | Name | Speed (deg./hr) | H (m) | G (deg.) | H (m) | G (deg.) | H (m) | G (deg.) |
| | 1 | Z0 | 0.0000000 | 0.04 | 0.0 | 0.00 | 0.0 | 0.00 | 0.0 |
| | 2 | MM | 0.5443747 | 0.17 | 46.1 | 0.01 | 195.9 | 0.02 | 78.5 |
| | 3 | MSF | 1.0158958 | 0.16 | 139.9 | 0.03 | 320.9 | 0.04 | 125.3 |
| | 4 | Q1 | 13.3986609 | 0.06 | 214.0 | 0.05 | 196.2 | 0.06 | 198.1 |
| | 5 | O1 | 13.9430356 | 0.24 | 252.5 | 0.24 | 241.0 | 0.24 | 244.5 |
| | 6 | M1 | 14.4920521 | 0.01 | 285.7 | 0.02 | 243.8 | 0.01 | 226.8 |
| | 7 | K1 | 15.0410686 | 0.32 | 281.9 | 0.36 | 283.6 | 0.32 | 278.7 |
| | 8 | J1 | 15.5854433 | 0.03 | 274.4 | 0.03 | 315.9 | 0.02 | 312.3 |
| | 9 | OO1 | 16.1391017 | 0.05 | 48.2 | 0.01 | 228.2 | 0.02 | 76.8 |
| | 10 | MU2 | 27.9682084 | 0.04 | 136.2 | 0.03 | 145.2 | 0.03 | 91.5 |
| | 11 | N2 | 28.4397295 | 0.34 | 79.5 | 0.38 | 63.2 | 0.05 | 68.6 |
| | 12 | M2 | 28.9841042 | 2.03 | 96.5 | 1.92 | 89.6 | 0.35 | 86.9 |
| | 13 | L2 | 29.5284789 | 0.11 | 140.3 | 0.03 | 64.9 | 2.07 | 126.3 |
| | 14 | S2 | 30.0000000 | 0.79 | 150.4 | 0.72 | 140.0 | 0.10 | 140.3 |
| | 15 | 2SM2 | 31.0158958 | 0.06 | 51.3 | 0.02 | 359.4 | 0.81 | 36.1 |
| | 16 | MO3 | 42.9271398 | 0.01 | 85.3 | 0.02 | 108.9 | 0.04 | 125.1 |
| | 17 | M3 | 43.4761563 | 0.02 | 208.0 | 0.01 | 287.6 | 0.01 | 266.6 |
| | 18 | MK3 | 44.0251729 | 0.01 | 287.7 | 0.02 | 165.5 | 0.01 | 224.2 |
| | 19 | MN4 | 57.4238337 | 0.02 | 63.9 | 0.02 | 69.3 | 0.01 | 52.0 |
| | 20 | M4 | 57.9682084 | 0.05 | 89.9 | 0.06 | 89.5 | 0.04 | 78.5 |
| | 21 | SN4 | 58.4397295 | 0.03 | 55.2 | 0.01 | 73.6 | 0.08 | 112.1 |
| | 22 | MS4 | 58.9841042 | 0.06 | 146.0 | 0.04 | 121.7 | 0.01 | 134.6 |
| | 23 | 2MN6 | 86.4079380 | 0.00 | 14.1 | 0.00 | 355.8 | 0.07 | 329.0 |
| | 24 | M6 | 86.4238337 | 0.02 | 76.3 | 0.01 | 356.1 | 0.01 | 356.5 |
| | 25 | MSN6 | 87.9682084 | 0.02 | 144.4 | 0.00 | 2.4 | 0.02 | 47.2 |
| | 26 | 2MS6 | 87.9682084 | 0.01 | 147.9 | 0.01 | 32.4 | 0.01 | 56.5 |
| | 27 | 2SM6 | 88.9841042 | 0.01 | 229.5 | 0.00 | 64.2 | 0.03 | 117.6 |

*T1: 126° 09' 52" E, 36° 30' 21" N, T2: 126° 10' 22" E, 36° 09' 29" N, T3: 126° 29' 55" E, 36° 07' 34" N

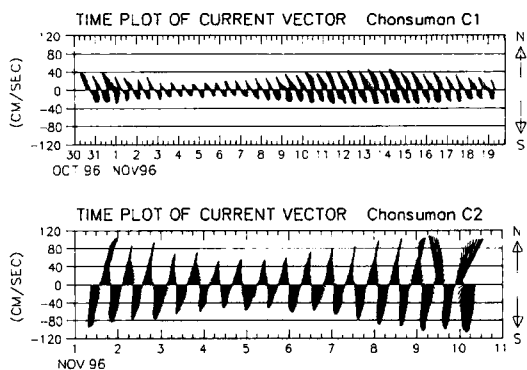


Fig. 3. Observed current vectors at 2 stations in the bay.

까지 약 66 km의 범위를 포함하는 영역으로 Fig. 4와 같이 유한차분 격자망을 구성하였다. 격자 크기는 균일하게 300 m×300 m로 하여 총 격자 수는 127×220=

27,940개이다. 이용되는 격자체계는 staggered grid system이다. 해저마찰계수 $k_b=0.00235$ 로 주었다. Coriolis계수는 36.4°N을 기준으로 하여 0.863093×10^{-4} rad/s로 일정하게 주었으며, 계산시간간격(Δt)은 7.45 s로 하였다. 조건대 관련 상수로서 $H_o=0.03$ m, $\epsilon=0.01$ m가 사용되었다.

모델영역의 수심은 수로국 발행 해도 No.322로부터 독취하여 사용하였다. 방조제 건설 전 천수만 북부 조건대 수심은 당시의 지형도를 참고하였으며, 수치모형의 안정성을 고려하여 투입과정에서 급경사 지형과 노출 지역 등에 평활화(smoothing) 과정을 거쳤다. 투입된 수심분포는 Fig. 5와 같다. 해도의 수심은 방조제 완공 전 해도와 비교해 본 결과 방조제 완공 후에도 재측심이 실시되지 않은 것으로 나타났으나, 이용 가능한 자료가 미비하여 그대로 사용하였다. 경계조건으로는 정점 T1,

Table 2. Tidal harmonic constants analyzed from the observed current data.

| No. | Const. | Speed (deg/hr) | Major _{*1} (cm/s) | Major _{*1} (cm/s) | Inc. _{*3} (deg.) | G _{*4} (deg.) | G+ (deg.) | G- (deg.) |
|-----|--------|-------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|---------------------------|--------------|--------------|
| 1 | Z0 | 0.00000000 | 0.5 | 0.0 | 20.5 | 0.0 | 339.5 | 20.5 |
| 2 | MSF | 0.00282193 | 1.3 | 0.1 | 144.0 | 93.8 | 309.8 | 237.8 |
| 3 | O1 | 0.03873065 | 0.8 | -0.3 | 71.7 | 285.6 | 213.8 | 357.3 |
| 4 | K1 | 0.04178075 | 2.4 | -0.2 | 111.1 | 162.2 | 51.0 | 273.3 |
| 5 | M2 | 0.08051140 | 25.7 | 0.3 | 108.9 | 149.6 | 40.7 | 258.5 |
| 6 | S2 | 0.08333334 | 9.9 | -0.2 | 109.6 | 27.7 | 278.1 | 137.3 |
| 7 | M3 | 0.12076710 | 0.6 | -0.2 | 86.4 | 285.3 | 198.8 | 11.7 |
| 8 | SK3 | 0.12511408 | 0.5 | 0.3 | 131.3 | 188.0 | 56.7 | 319.3 |
| 9 | M4 | 0.16102280 | 3.9 | -0.3 | 127.0 | 280.0 | 153.0 | 46.9 |
| 10 | MS4 | 0.16384473 | 2.9 | -0.2 | 123.8 | 158.6 | 34.9 | 282.4 |
| 11 | S4 | 0.16666667 | 0.6 | -0.1 | 123.0 | 17.4 | 254.3 | 140.4 |
| 12 | 2MK5 | 0.20280355 | 0.7 | -0.2 | 125.8 | 340.8 | 215.0 | 106.6 |
| 13 | 2SK5 | 0.20844741 | 0.4 | 0.1 | 35.1 | 154.6 | 119.4 | 189.7 |
| 14 | M6 | 0.24153420 | 0.9 | 0.5 | 127.7 | 35.3 | 267.6 | 163.1 |
| 15 | 2MS6 | 0.24435614 | 1.1 | 0.5 | 134.6 | 278.5 | 143.9 | 53.1 |
| 16 | 2SM6 | 0.24717806 | 0.4 | 0.2 | 31.5 | 343.0 | 311.5 | 14.5 |
| 17 | 3MK7 | 0.28331494 | 0.7 | 0.1 | 156.1 | 145.2 | 349.1 | 301.2 |
| 18 | M8 | 0.32204559 | 0.2 | -0.0 | 133.1 | 176.5 | 43.4 | 309.5 |

Station: Chonsuman C2 (126° 27' 6" E, 36° 24' 22" N)

Duration: From 9:00 1/11/96 to 8:00 10/11/96

Time zone: KST

| No. | Const. | Speed (deg/hr) | Major (cm/s) | Minor (cm/s) | Inc. (deg.) | G (deg.) | G+ (deg.) | G- (deg.) |
|-----|--------|-------------------|-----------------|-----------------|----------------|-------------|--------------|--------------|
| 1 | Z0 | 0.00000000 | 2.5 | 0.0 | 108.8 | 180.0 | 71.2 | 288.8 |
| 2 | K1 | 0.04178075 | 7.9 | -0.5 | | 199.6 | 113.3 | 285.9 |
| 3 | M2 | 0.08051140 | 71.8 | 1.7 | 86.3 | 109.1 | 25.7 | 192.9 |
| 4 | M3 | 0.12076710 | 1.7 | -0.8 | 83.4 | 102.8 | 54.4 | 151.2 |
| 5 | M4 | 0.16102280 | 6.0 | 1.4 | 48.4 | 255.1 | 171.2 | 339.0 |
| 6 | 2MK5 | 0.20280355 | 0.8 | 0.4 | 83.9 | 253.1 | 205.3 | 300.8 |
| 7 | 2SK5 | 0.20844741 | 1.4 | 0.0 | 47.8 | 334.5 | 309.3 | 359.8 |
| 8 | M6 | 0.24153420 | 1.6 | -0.5 | 25.3 | 242.5 | 197.9 | 287.1 |
| 9 | 3MK7 | 0.28331494 | 1.0 | 0.2 | 44.6 | 300.6 | 264.1 | 337.0 |
| 10 | M8 | 0.32204559 | 0.7 | -0.4 | 36.5 | 321.4 | 222.8 | 60.0 |

*1: major axis, *2: minor axis, *3: inclination of major axis, *4: phase

T2, T3에서 관측한 M_2 , S_2 2개 분조의 조화상수를 서쪽 및 남쪽 경계면의 각 격자에 내삽하여 투입하였다.

검증자료로는 정점 C1, C2에서 관측한 조류자료를 사용하였다. 두 정점에서 1996년 10월 30일부터 11월 19일까지 관측한 U, V자료를 1시간 간격으로 smoothing한 결과를 같은 기간에 대한 수치모형실험 결과와 비교하여 Fig. 6에 제시하였다. 계산된 조류의 위상은 관측치와 거의 일치하는 것으로 나타났으며, 진폭의

경우에도 대체로 양호하게 일치하였다.

4. 결 과

수치모형실험은 모든 변수 값이 0으로 정의되는 초기조건으로 시작하여 5주기(M_2 분조 기준)동안 지속되었다. 방조제 건설 전후 각각에 대하여 대조기의 조위 및 유속분포를 계산하였으며, 마지막 주기의 결과를

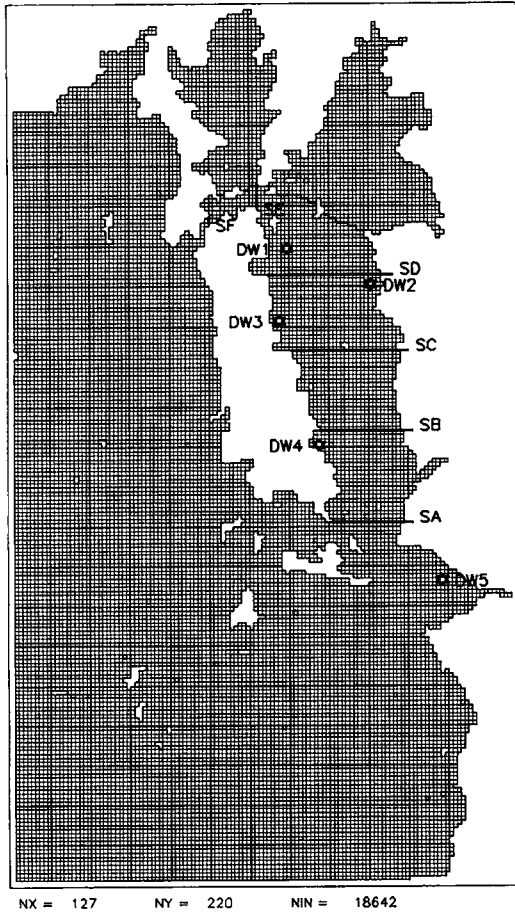


Fig. 4. Finite difference mesh for the domain.

제시하였다. 대조기 조석 1주기(M_2 분조 기준) 동안의 조류를 평균한 조석잔차류는 Fig. 7과 같다. 조석잔차류는 조석이 지형과의 상호 작용하는 과정에서 나타나며 Coriolis 효과, 마찰력, 이류항이 이의 생성 발달에 기여하는 것으로 알려져 있다(Robinson, 1983). 천수만 입구의 잔차류 분포는 매우 복잡하여 원산도 동쪽에서는 반시계방향, 그리고 원산도 동남쪽에는 시계방향의 강한 와류가 나타나며, 육도를 중심으로 하는 시계방향의 와류 좌우에는 반시계방향의 와류가 맞닿아 있다. 죽도를 기준으로 천수만 남부의 경우, 중앙부에서는 북으로 향하는 흐름이 나타나고 동쪽과 서쪽에서는 남으로 향하는 흐름이 보이며, 북부의 경우 서쪽으로 치우쳐 북으로 향하는 흐름이 B지구 방조제 전면까지 이어지고 백사수도를 통해 외해로 빠져나가는 흐름이 매우 강하다. 천해역에서는 마찰력과 이류항이 주 생성요인으로 생각되며 외해측에서는 마찰력과 이류항

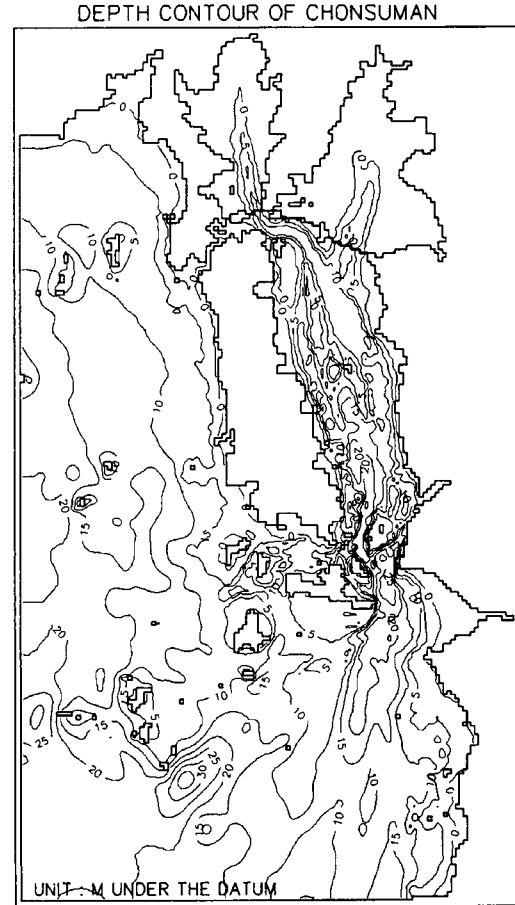


Fig. 5. Depth contours under the datum of the domain.

에 덧붙여 geostrophic balance도 상당한 역할을 하는 것으로 생각된다.

방조제 건설 후 및 건설 전 대조기 최강 창조시와 최강낙조시의 유속벡터 분포를 Figs. 8~9에 제시하였다. 먼저 창·낙조류의 특성을 살펴보면, 모델 남쪽 경계면 부근 접근수로에서의 흐름 방향은 창조류 북동방향, 낙조류 남서 방향으로써 접근수로 및 천수만 내 흐름은 대체로 수심에 평행하다. 섬 배후에는 blocking 효과가 뚜렷이 나타나고 있으며, 그 크기는 섬의 크기와 밀접한 관련을 갖는다. 앞서 언급한 잔차류 형성에서 blocking 효과가 강하게 작용함을 알 수 있다. 부산수산대학교 해양과학공동연구소(1994)의 결과는 200 m 격자임에도 불구하고 공간적 변화가 지극히 완만한 유속분포가 얻어졌는데 어떤 이유에서인지는 확실치 않으나 수치적 확산 또는 이에 상응하는 현상이

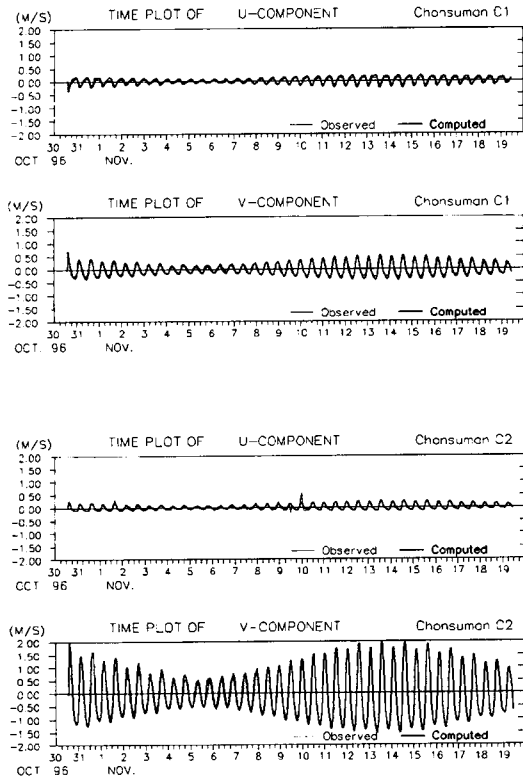


Fig. 6. Comparison of the computed and the observed current velocity components.

크게 작용한 탓으로 보인다. Fig. 8과 Fig. 9를 비교할 때, 일견하여 알 수 있는 것은 건설 전에 비해 건설 후 전반적인 유속 감소가 있다는 점으로 특히 천수만 내에 강하게 형성되었던 수로를 따라 흐르는 창·낙조류가 거의 구분되지 않고 있으며 만 입구 주변의 감소도 상당함을 알 수 있다.

방조제 건설 전후의 유속변화를 비교하기 위하여 절대유속 변화의(건설 후 대조기 최강 창·낙조 절대유속-건설 전 대조기 최강 창·낙조 절대유속) 등치도를 Fig. 10~11에 제시하였다. 유속변화를 계산할 때, 건설 전후에 같은 조시의 값을 비교했기 때문에 위상의 변화에 따른 최대치의 오차가 있을 수 있다. 절대유속은 전 해역에서 상당히 감소하는 것으로 나타난다. 천수만 입구에서 절대유속의 크기는 건설 후 약 200 cm/s 정도이며, 건설 전에는 최대 약 280 cm/s 정도로 나타났다. 따라서, 대조기 유속의 변화는 천수만 입구에서 최대 약 80 cm/s 정도가 된다. 유속의 변화가 가장 큰 곳은 물론 방조제 전면해역이다. 안면도 서쪽에서의 유속변화는 별로 없는 것으로 나타나고 있으나 만

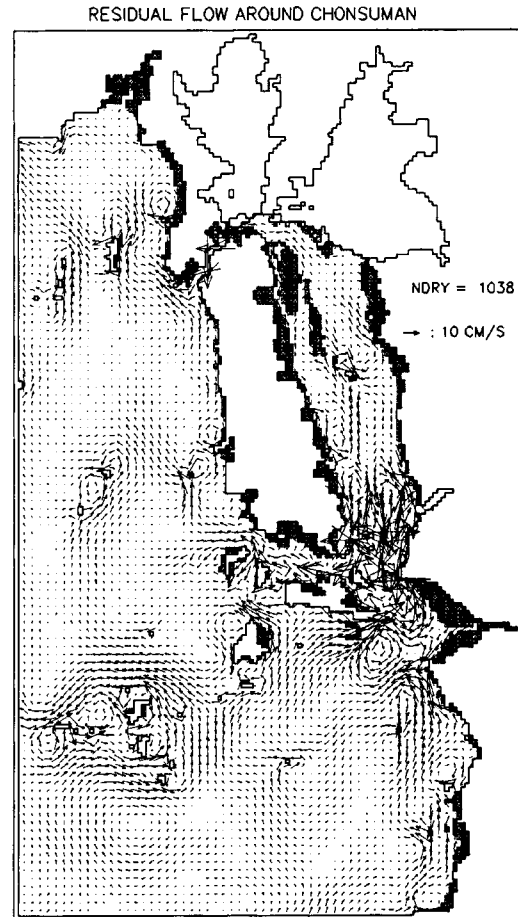


Fig. 7. Computed residual current at spring tide.

입구 및 남측 접근 수로에서는 상당한 크기의 영향이 나타나고 있다.

최강 창조류를 기준으로 할 때, 간월도와 죽도 사이에 위치한 북부해역은 방조제 건설 전에 비해 방조제 건설 후의 유속이 50~71%, 백사수도에서는 8~64%, 죽도를 중심으로 하는 중부해역은 24~54%, 남부해역의 유속은 19~28% 범위로 감소하는 등 남부해역에서 북부해역으로 갈수록 유속의 감소가 크게 나타났다. 최강 낙조류를 기준으로 할 때 유속의 감소는 북부해역에서 67~85%, 백사수도에서 48~85%, 중부해역에서 18~89%, 남부해역에서 32~48%이었다. 따라서, 전반적인 유속의 감소는 북부해역, 백사수도, 중부해역, 남부해역의 순으로 크게 나타났다.

그러나, 이상의 결과는 방조제 건설 전후 외해개방 경계가 변하지 않았다는 가정 하에 계산된 것으로 이

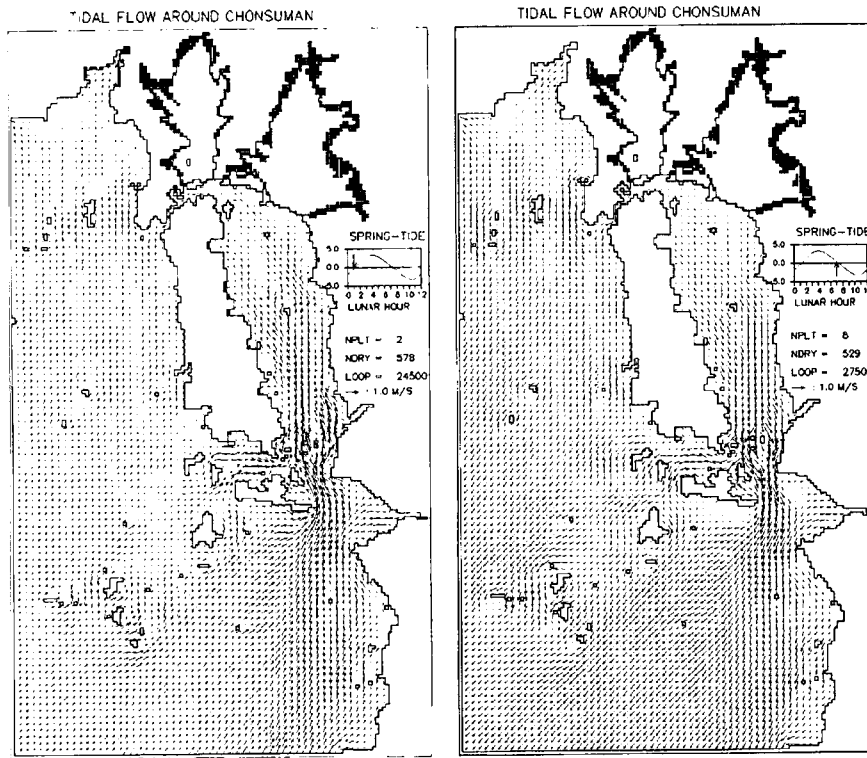


Fig. 8. The maximum flood current computed for the spring tide (after embankment).

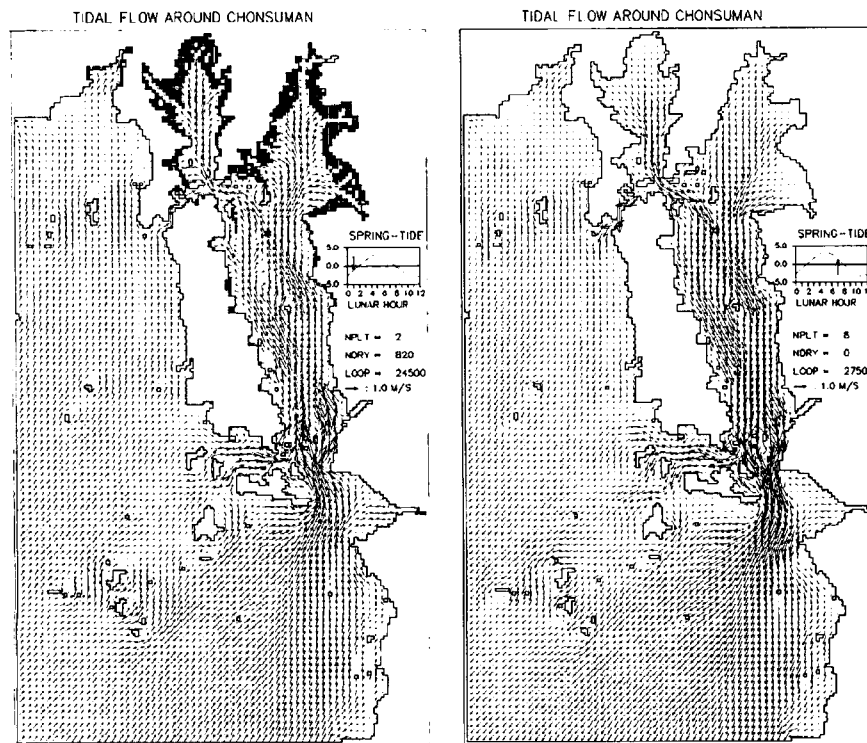


Fig. 9. The maximum flood current computed for the spring tide (before embankment).

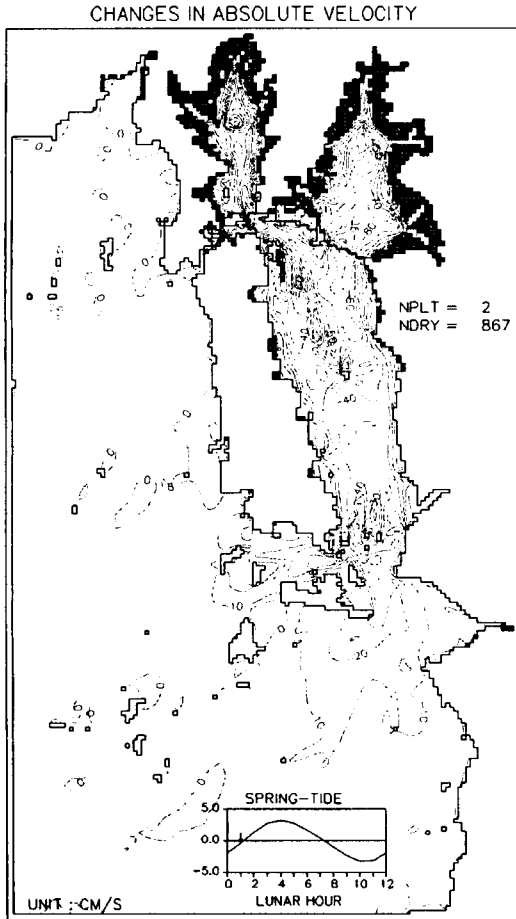


Fig. 10. Velocity changes caused by embankment (at maximum flood current, spring tide).

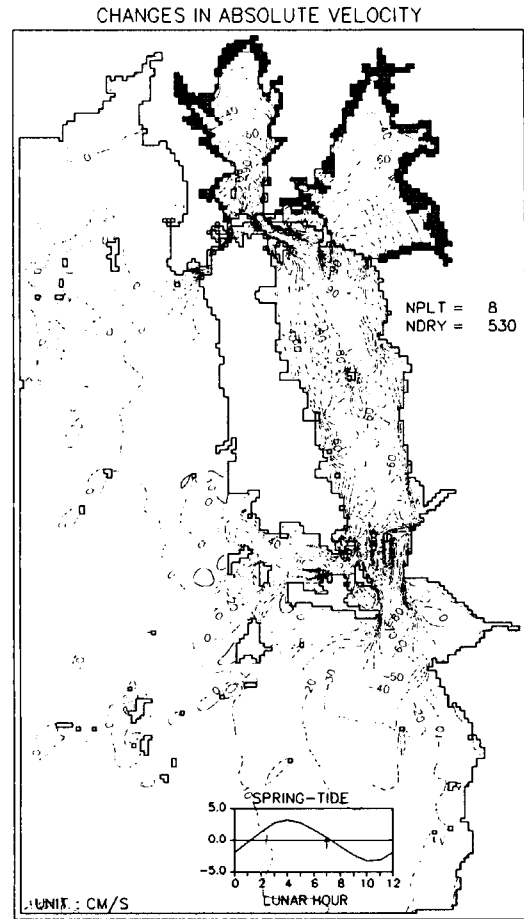


Fig. 11. Velocity changes caused by embankment (at maximum ebb current, spring tide).

에 따른 오차가 존재한다. 유속 감소가 발생하는 이유 및 개방경계에 따른 문제점을 파악하기 위하여 다음과 같은 1차원 방정식을 고려한다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + h \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \tag{9}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + rV = 0 \tag{10}$$

여기서 r 는 선형마찰계수이다. $y=y_1$ 에 만의 head가 위치하고 $y=y_2$ 에 개방경계가 위치하여 경계조건이 다음과 같이 주어진다.

$$\left(\frac{\partial \zeta}{\partial y} \right)_{y_1} = 0 \tag{11}$$

$$\zeta(y_2, t) = \text{Re} \left\{ \zeta_0 e^{i\omega t} \right\} \tag{12}$$

상기 식에서 ζ_0 는 개방경계에서 정의되는 조석파의 (복소수) 진폭, ω 는 각속도, ζ 는 미분 값이 정의되는 위치이다. 만 head에서의 경계조건은 $V=0$ 와 동등하다. 변수분리에 의거 상기 식의 해는 다음과 같이 주어진다.

$$\zeta(y, t) = \text{Re} \left\{ \zeta_0 e^{i\omega t} \frac{\cos[\beta(y - y_1)]}{\cos[\beta(y_2 - y_1)]} \right\} \tag{13}$$

$$V(y, t) = \text{Re} \left\{ -\frac{i\omega\zeta_0}{\beta h} e^{i\omega t} \frac{\sin[\beta(y - y_1)]}{\cos[\beta(y_2 - y_1)]} \right\} \tag{14}$$

여기서

$$\beta = \left(\frac{\omega^2 - i\omega r}{gh} \right)^{1/2} \tag{15}$$

방조제 건설 후 head의 위치가 $y_1+\Delta y$ 로 이동하면 다음과 같은 해가 주어진다.

$$\zeta'(y, t) = \operatorname{Re} \left\{ \zeta_0 e^{i\omega t} \frac{\cos[\beta(y-y_1)] \cos[\beta\Delta y] + \sin[\beta(y-y_1)] \sin[\beta\Delta y]}{\cos[\beta(y_2-y_1)] \cos[\beta\Delta y] + \sin[\beta(y_2-y_1)] \sin[\beta\Delta y]} \right\} \quad (16)$$

$$V'(y, t) = \operatorname{Re} \left\{ \frac{i \omega \zeta_0}{\beta h} e^{i\omega t} \frac{\sin[\beta(y-y_1)] \cos[\beta\Delta y] - \cos[\beta(y-y_1)] \sin[\beta\Delta y]}{\cos[\beta(y_2-y_1)] \cos[\beta\Delta y] + \sin[\beta(y_2-y_1)] \sin[\beta\Delta y]} \right\} \quad (17)$$

상기 해석해가 제시하는 것은 외해 개방경계를 고정시키고 방조제 건설 효과를 검토하는 경우, 만의 길이 축소로 외해경계의 유속이 변하게 되며 그 결과 만 내측의 조석, 조류 진폭이 변화하게 된다는 것이다. 외해 경계의 조석이 $\Delta\zeta_0$ 만큼 변하는 경우 조석, 유속 모두 $\Delta\zeta_0/\zeta_0$ 만큼 변화된다.

천수만의 경우 $h=20$ m, $\Delta y=12$ km, $y_2=65$ km, $y_1=0$, $r=0.00005$ 를 취하여 계산해보면 12 km 지점의 조위 진폭이 약 6.9%, 65 km 지점의 최대유속이 약 22.7% 감소되는 것으로 나타난다(마찰계수를 0.0002로 취하면 12 km 지점의 조위진폭이 약 4.7%, 65 km 지점의 최대유속이 20.8% 감소된다). 만일 ζ_0 가 감소하는 경우 감소효과는 더욱 커지게 되며 반면 증가하는 경우 유속의 감소는 작아지거나 커질 수 있다. 김(1994)의 모델링 및 기존 광역 연구 결과들을 살펴보면 서해안 개발에 따른 조석체계의 변화검토에서 조차의 감소 패턴(김(1994)의 광역모델 결과에 의하면 새만금 사업으로 인한 M_2 분조의 진폭감소가 약 10 cm 내외이며, 위상은 4° 정도 빨라지는 것으로 나타났다)이 확인되므로 같은 감소 경향이 나타난다고 가정할 때, 현재의 모델 결과가 감소효과를 다소 작게 추정하고 있다고 판단된다. 개선된 결과를 얻는 방안으로는 2가지를 고려할 수 있다. 그 하나는 방사경계조건(Flather, 1976)을 사용하는 방법이고, 다른 하나는 광역모델을 구성하고 그 결과를 이용하여 개방경계조건을 정의해 주는 방안이다. 광역모델 결과를 연결 사용하는 효과적인 방법은 nesting기법을 이용하는 것이나 300 m 해상도로 국지해역을 표현하는 경우 다단계 nesting이 필요할 것으로 사료된다.

Fig. 4에 표시된 6개의 단면(SA~SF)에 대하여 방조제 건설후 대조기 단면평균유속 및 총 유량을 시간별

로 계산하여 Fig. 12에, 그리고 방조제 건설전의 경우를 Fig. 13에 제시하였다. 그림에서 단면 SA~SD에서 양의 값은 북향(창조류), 음의 값은 남향(낙조류)을 나타내며, 단면 SE, SF에서는 양의 값이 동향, 음의 값이 서향을 나타낸다. 대조기 최대 단면평균유속은 단면 SA에서 건설 전에는 북향 154 cm/s, 남향 175 cm/s 정도이고 건설 후에는 북향 110 cm/s, 남향 101 cm/s 정도로 줄었다. 단면 SF에서는 건설 전에는 동향 179 cm/s, 서향 191 cm/s가 건설 후 동향 69 cm/s, 서향 103 cm/s로 되었다.

대조기 총 유량을 비교해 보면 단면 SA의 경우 건설 전에는 북향 102.1×10^3 m³/s, 남향 104.2×10^3 m³/s에서 건설 후 북향 64.8×10^3 m³/s, 남향 54.9×10^3 m³/s로 감소했다. 단면 SF의 경우 건설 전에는 동향 1.33×10^3 m³/s, 서향 1.86×10^3 m³/s가 건설 후 동향 0.22×10^3 m³/s, 서향 1.18×10^3 m³/s로 감소하였다. 백수도(단면 SF)에서는 방조제 건설 전후 모두 낙조가 창조보다 강하며, 수도의 수심이 얕기 때문에 조위가 어느 정도 상승한 이후에 창조가 시작되는 형태가 뚜렷이 나타난다.

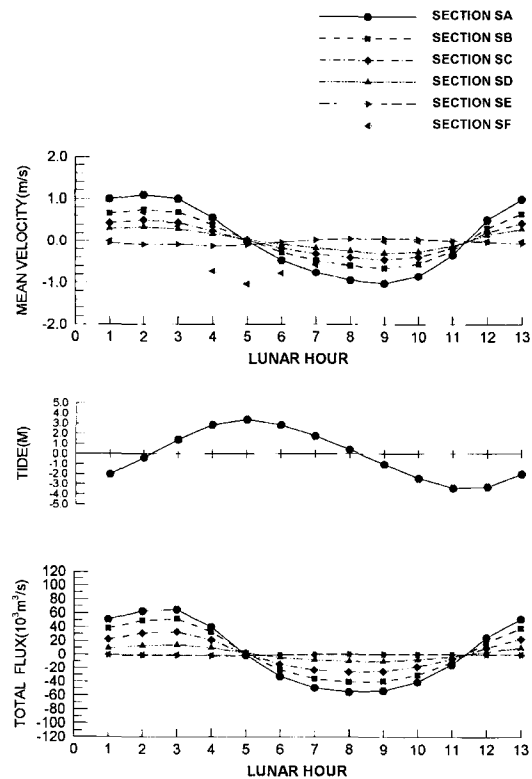


Fig. 12. Mean velocities and total fluxes through the six sections after embankment.

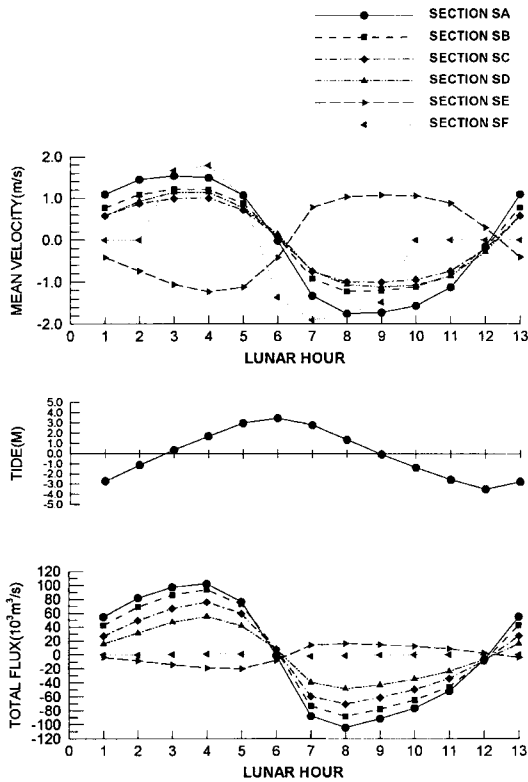


Fig. 13. Mean velocities and total fluxes through the six sections before embankment.

방조제 건설 전후의 단면 SA에서의 최대유속, 최대 유량을 비교하여 Fig. 14에 도시하였다. 수평좌표에서 3-4번은 소도, 추도를, 10번은 허육도 남쪽을, 13-14번은 육도 동쪽의 암초지대이다. 방조제 건설로 인하여 창조 때보다는 낙조 때에 최대유속 및 최대유량의 감소가 두드러지게 나타난다. 방조제 건설전 단면 SA에서의 최대유량은 8번 지점에서 북향 $13.29 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$, 남향 $16.99 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 이었으나 건설 후에는 북향 $9.62 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$, 남향 $9.66 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 감소하였다. 최대유속의 경우에는 방조제 건설 전에 북향 235 cm/s(10번), 남향 266 cm/s(8번)이었으나 건설 후에는 북향 174 cm/s(11번), 남향 156 cm/s(8번)로 감소하였다. 최대유량을 보면 육도 동쪽수로보다는 서쪽수로의 유량이 더 큰 것으로 나타난다.

천수만의 조간대 등 수심이 얇은 지역에서는 양식어업이 매우 활발하므로 이 지역의 조간대 조석현상의 변화는 양식어업의 생산성에 영향을 미칠 수 있다. 방조제 건설 전후 조간대의 노출시기, 노출시간 등의 변화를 파악하기 위하여 조간대에 위치한 천수만 내 4개

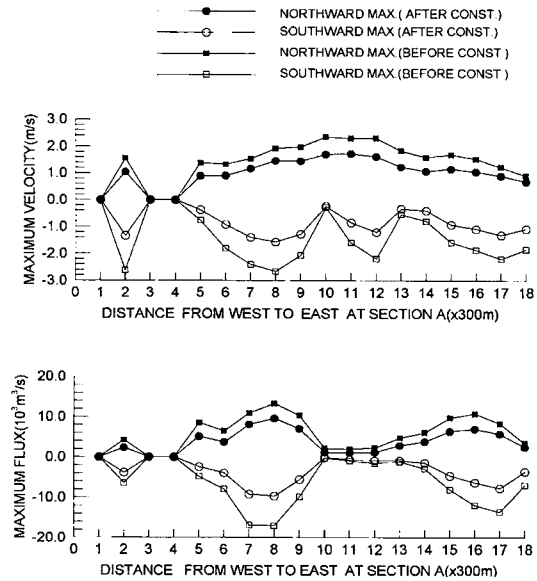


Fig. 14. Changes in maximum velocity and maximum flux along the section A after/before embankment.

지점과 천수만 입구 남쪽의 1개 지점을 선정하여(Fig. 4의 DW1~DW5) 노출상태를 비교하였다(Fig. 15). 천수만 내 4개 지역에서 조간대의 노출은 방조제 건설 후에 좀더 이른 시간에 일어나는 공통적인 특징을 보였으나 천수만 입구 남쪽 지점에서는 노출시기에 큰 변화가 나타나지 않아서 방조제 건설에 따른 영향은 거의 받지 않음을 보여주었다.

Table 3에는 방조제 건설 전후 조간대 지점에서 노출이 발생하는 시간을 비교하였다. 노출이 시작되는 시간은 방조제 건설 후에 DW1에서 약 51분, DW2에서 약 50분, DW3에서 약 43분, DW4에서 약 36분, DW5에서 약 5분 이른 것으로 나타났다. 노출기간은 방조제 건설 후에 DW1에서 약 23분, DW2에서 약 23분, DW3에서 약 21분, DW4에서 약 19분이 길어졌으나 DW5에서는 오히려 3분 정도 짧아진 것으로 나타났다.

Table 4에는 조간대에 위치한 5개 정점에서 고조 시각과 수위를 비교하였다. 고조시각은 DW1, DW2, DW3에서 약 1시간 정도, DW4에서 약 43분, DW5에서 약 13분 정도 앞당겨진 것으로 나타났다. 고조의 수위는 방조제 건설 후에 DW1, DW2, DW3에서 각각 15 cm, 10 cm, 5 cm 낮아진 것으로 계산되었으나 DW4, DW5에서는 5 cm 정도 높아진 것으로 나타났다.

조위기록을 통하여 조석변화를 살펴보기 위해 방조

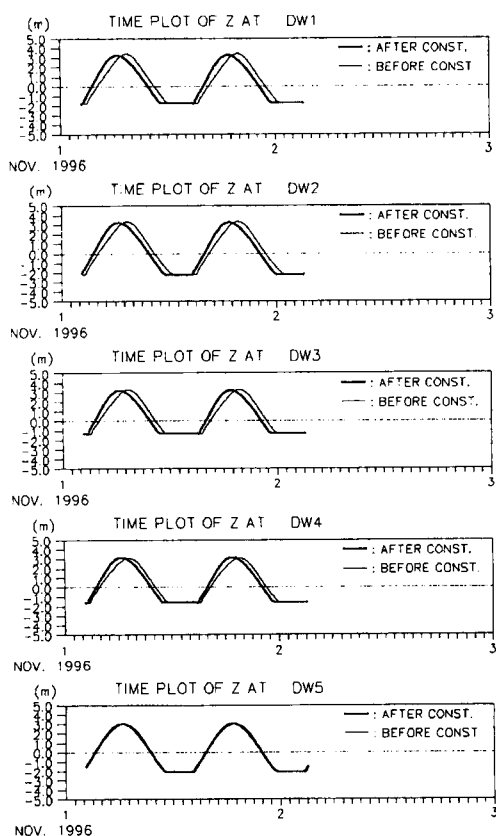


Fig. 15. Changes in tidal phase and exposing time at intertidal locations after/before embankment.

제 물막이공사 전후의 조위기록을 비교하였다. A·B 지구의 물막이 공사가 완공된 시점은 1982-1983이며, 고정리 검조소에서 조위관측을 시작한 것은 1986년이다. 따라서, 검조기록을 통한 동질자료의 비교는 불가능하였다. Table 5에서는 방조제 건설 전에 (주)해양과학기술이 고정리에서 관측한 조위분석 결과(군산수산전문대학 수산과학연구소, 1987)와 방조제 완공 후 부

Table 4. High water time and level after/before embankment.

| | After embankment | | Before embankment | |
|-----|-------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|
| | High water time (hour)* | High water level (m) | High water time (hour)* | High water level (m) |
| DW1 | 4:06:25 | 3.27 | 5:09:31 | 3.42 |
| DW2 | 4:06:25 | 3.25 | 5:00:05 | 3.35 |
| DW3 | 4:07:25 | 3.26 | 5:10:01 | 3.31 |
| DW4 | 4:08:25 | 3.18 | 4:51:38 | 3.13 |
| DW5 | 4:02:27 | 3.01 | 4:15:52 | 2.96 |

*Relative time

Table 5. Tidal harmonic constants at Kojeong before/after embankment.

| | | Before embankment | After embankment |
|-------|------------|-------------------|------------------|
| M_2 | H_m (cm) | 229.9 | 229.4 |
| | K_m (°) | 94.7 | 86.8 |
| S_2 | H_s (cm) | 87.9 | 89.1 |
| | K_s (°) | 138.3 | 130.8 |
| K_1 | H' (cm) | 45.2 | 36.1 |
| | K' (°) | 290.9 | 276.2 |
| O_1 | H_o (cm) | 29.6 | 27.2 |
| | K_o (°) | 243.2 | 247.9 |

산수산대학교 해양과학공동연구소(1994)가 고정리 검조소 검조기록을 분석한 결과를 비교하였다. M_2 분조의 경우를 보면, 방조제 건설 전에 진폭 229.9 cm, 위상 94.7° 이었고 방조제 완공 후에는 진폭 229.4 cm, 위상 86.8° 로 진폭은 별로 차이가 없으나, 위상은 7.9°(약 16분) 빨라진 것으로 나타났다. S_2 의 경우도 진폭은 87.9 cm에서 89.1 cm로 약간 증가하였고 위상은 138.3°에서 130.8°로 7.5° 정도 빨라졌다. 그러나, K_1 의 경우는 위상이 14.7° 감소한 반면, O_1 의 경우는 4.7° 증가하였고 진폭은 각각 9.1 cm, 2.4 cm 감소한 것으로 나타났다.

Table 3. Tidal flat exposure after/before embankment.

| | After embankment | | Before embankment | |
|-----|------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | Exposure (hour)* | Duration (hour) | Exposure (hour)* | Duration (hour) |
| DW1 | 9:01:02-12:39:09 | 3:38:06 | 9:52:13-13:06:58 | 3:14:45 |
| DW2 | 9:22:54-12:19:16 | 2:56:22 | 10:13:05-12:46:06 | 2:33:01 |
| DW3 | 8:38:41-12:57:32 | 2:56:22 | 9:21:54-13:19:23 | 3:57:29 |
| DW4 | 8:51:36-12:40:38 | 4:18:51 | 9:27:22-12:57:32 | 3:30:09 |
| DW5 | 9:02:32-11:59:54 | 3:49:02 | 9:07:30-12:07:51 | 3:00:21 |

*Relative time

5. 결론 및 토의

서산 A·B지구 간척사업에 따른 방조제 축조에 따라 야기되는 천수만 내 조석현상 변화를 파악하기 위하여 수심적분된 평면 2차원 해수유동 수치모형을 이용한 일련의 실험을 실시하였다. 외해 개방경계조건을 확보하기 위하여 3개 지점에서 조석관측을 실시하였고 수치모형의 검증을 위하여 천수만 내 2개 지점에서 조류관측을 실시하였다. 수치모형 실험결과는 관측된 조류 자료와 양호하게 일치하는 것으로 나타났다.

방조제 건설 전후의 절대유속을 비교해본 결과 대조기 최강 창조류를 기준으로 할 때, 방조제 건설 후 북부해역은 50~71% 범위로, 백사수도에서는 8~64% 범위로, 중부해역은 24~54% 범위로, 남부해역의 유속은 19~28% 범위로 감소하는 등 남부해역에서 북부해역으로 갈수록 유속의 감소가 컸다. 대조기 최강 낙조류를 기준으로 할 때 유속의 감소는 북부해역에서 67~85%, 백사수도에서 48~85%, 중부해역에서 18~89%, 남부해역에서 32~48%이었다. 따라서, 전반적인 유속의 감소는 북부해역, 백사수도, 중부해역, 남부해역의 순으로 컸다.

방조제 건설 전후 조간대 노출 시간을 비교해본 결과 방조제 건설 후 천수만 북부에서 노출이 발생하는 시각은 약 51분 정도 빨라졌으며, 노출시간은 23분 정도 길어진 것으로 나타났다. 고조 발생 시각은 방조제 건설 후 1시간 정도 앞당겨졌으며, 고조 수위는 15 cm 정도 낮아졌다.

방조제 건설로 천수만 head 부근의 수심이 국지적으로 변했으리라 판단되나 전체적인 변화 경향조차 확인키 곤란하다. 아마도 일부지역은 퇴적되고 일부지역은 침식되었으리라 판단된다. 만일 천수만 내 평균수심이 알아졌다면 외해측에서 퇴적물이 이동한 결과일 것이나 대상해역 내에서 보존되는지도 알 수 없다. 결국 같은 수심을 사용하고 있는 본 연구(아마도 유사연구에서 거의 마찬가지로 일 것이나)에서는 만 내 수심의 변화에 따른 해수 유통량의 변화가 서산 A,B 지구 방조제 건설로 인한 만의 volume 변화보다 아주 작다는 가정하에 조석체계 변화, 특히 조류 세기에 어떠한 영향이

나타나는지를 논하였다.

본 연구에서 적용된 모델의 제한점으로는 외해측 개방경계를 고정하고 있다는 것으로 유속 감소효과를 다소 작게 평가했을 가능성이 있음을 이론해를 통하여 검토할 수 있었다. 방사경계조건이나 광역모델과의 단계 nesting을 통하여 보다 개선된 결과도출이 가능하리라 판단된다. 본 연구에서는 해저면 마찰계수로 일정 상수를 가정하였으나, 수심변화가 매우 심한 지형이므로 Chezy or Manning 계수, 조도계수들로 표현되는 마찰계수를 사용함이 바람직할 수도 있다고 생각되며, 이 경우 이와 관련된 해저 퇴적상에 대한 자세한 자료가 요구된다.

참고문헌

- 군산수산전문대학 수산과학연구소, 1987. 고정리·송도 지역 어업권 피해 원인조사 보고서. KFCSI-87-2.
- 김영복, 1994. 한국서해안의 조석모형. 성균관대학교 토목공학과 공학박사 학위논문.
- 부산수산대학교 연안해양연구소, 1985. 천수만 방조제 건설에 따른 해양 및 어업영향조사보고서. CO85-OF 3A.
- 부산수산대학교 해양과학공동연구소, 1994. 서산 A·B지구 가두리 양식장 어류폐사 피해조사.
- 이종찬, 전기천, 김창식, 1997. 유한차분법을 이용한 주파수영역 조석모형 개발. 해양연구, 19(1): 13-20.
- 한국해양연구소, 1997. 연안수질 평가 및 예측기술 개발. 해양환경 감시 및 평가기술. BSPN00303-945-2. pp. 88-124.
- Elder, J.W., 1959. The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow. *J. Fluid Mech.*, 5, pp. 554-560.
- Flather, R.A. and Heaps, N.S., 1975. Tidal computations for Morecambe Bay, *Geophys. J. R. Astronom. Soc.*, 42, pp. 480-517.
- Flather, R.A., 1976. A tidal model of the north-west European continental shelf, *Mem. Soc. R. Soc. Liege*, Ser. 6, 10, pp. 141-164.
- Robinson, I.S., 1983. Tidally induced residual flows, In: *Physical Oceanography of Coastal and Shelf Seas* edited by B. Johns, pp. 321-356, Elsevier, New York.