

論 文

목포해역에서의 조석모형 적용

오 남 선* · 강 주 환**

Application of Tidal Computations for Mokpo Coastal Zone

N. S. Oh · J. H. Kang

Key Word : 조석모형(Tidal computation model), 양해법(Explicit method), 낙조우세(Ebb dominant), 목포해역(Mokpo coastal zone)

Abstract

A horizontal 2-D model which includes the wetting-drying treatment technique in the intertidal zone is applied for the prediction of tidal changes. The flow model is applied to Mokpo coastal zone and verified by measurement data. Comparing computation results with observed values for the M2 tidal constituent, agreeable correspondence is detected. The validity of the model is also proven by applying it to such areas which have narrow width and rapid velocity, irregular topography and complex geometry. Thus, this model can be used as the compatible prediction model for the tidal change and pollutant transport due to the development of Mokpo coastal zone.

1. 서론

목포 인근에서는 1970년대부터 농어촌진흥공사에 의해 영산강종합개발사업이 시작되었다. 그 1단계로 영산강 상류에 4개의 농업용수전용댐이 건설되었으며 2단계 사업으로 영산강하구언이 3단계사업으로는 영암방조제와 금호방조제가 완공되었다. 또한 현재는 4단계 방조제 건설이 진행되고 있다. 이들 사업 중 1단계사업은 영산강 상류에 댐을 건설하

여 용수를 공급하는 것을 목적으로 하고 있으며 나머지 사업은 수심이 얇은 목포해역의 간척지 개발로 농지, 수산양식지, 농어촌휴양지, 농공단지 등을 확보하는 것을 목적으로 하고 있다. 그 결과 지금까지 영산강하구언, 영암방조제, 금호방조제의 건설로 각각 35km², 130km² 그리고 60km²의 영암만내 수역이 감소하였으며 목포해역의 지형은 크게 변화하였다. 이와 같은 목포해역의 지형 변화는 필연적으로 목포해역의 해수유동, 오염확산, 퇴적물이동 양

* 정희원, 목포해양대학교 교수

** 목포대학교 토목공학과 교수

상에 커다란 변화를 유발하였다. 특히 목포지역은 간척사업에 의해서 조성된 저지대가 많이 존재하고 있는데 하구언 및 방조제의 축조후 이들 저지대의 침수사례가 자주 보고되고 있다. 또한 해수유동의 변화에 따른 침수 외에도 조류속의 변화에 따른 오염확산 형태가 계속 변화한 것으로 보이며 퇴적물이 동양상의 변화에 따라 해저지형도 서서히 변화할 것으로 보인다.

목포를 중심으로 하는 우리나라의 서남권 지역은 최근까지 낙후되어 있었으나 영산강 종합개발사업 이외에도 대불산업단지의 조성, 망운국제공항의 건설, 신외항 건설, 서해안 고속도로의 건설 등 여러 사업이 시작되면서 활기를 띠고 있다. 이러한 대규모 사업들은 목포해역과 밀접한 관계를 가지고 있다. 해역을 매립하여 농지를 확보하고 공단을 조성함에 따라 해수유동에 변화를 가져오며 이로 인하여 발생하는 조류속의 변화는 오염물질의 이동 및 확산, 퇴적물의 이동에 영향을 주게된다. 또한 공단의 조성과 시설 유치에 따라 영산강과 목포해역에 유입되는 오염 부하량도 증가하여 해역의 오염을 가속화시킬 것으로 보인다. 이와 같이 해역에서 수행되는 대규모 사업은 해역의 각종 특성을 광범위하게 바꾸게 된다. 따라서 사업의 수행에 따라 일어날 수 있는 해수유동, 오염확산, 퇴적물이동 등의 변화를 정확히 예측하는 것은 매우 중요하다. 이러한 변화를 정확히 예측함으로써 이로부터 일어날 수 있는 피해를 예견하고 이를 방지할 수 있을 것이다.

각종 사업의 수행에 따른 해역특성의 여러 가지 변화를 예측하고 이로 인한 피해를 방지하기 위해서 여러 특성 가운데 해수유동의 변화를 정확히 예측하는 것은 가장 기본적이고 중요한일이다. 즉 해수유동의 변화를 정확히 예측하고 조류속의 변화를 정확히 예측함으로써 수위상승에 따른 침수문제에 대처할 수 있고 해수유동의 변화에 따른 오염확산 및 퇴적물이동의 예측도 가능할 것이다. 따라서 여기에서는 해수유동을 모의하기 위하여 양해법에 의한 조석모형을 목포해역에 적용하고 그 결과를 분석하여 모형의 목포해역에 대한 적용가능성여부를 검토하

고자 한다. 그 결과는 향후 오염확산과 유사이동의 모의에 이용되어 오염저감 및 최소화 방안에 대한 기초자료로도 활용될 수 있을 것이다.

2. 연구동향

목포해역에 대한 조석모형의 적용을 위하여 목포해역에 적용된 조석모형의 연구동향을 살펴보기로 한다. 영산강하구언의 건설에 의한 목포해역의 조석특성 변화를 예측하기 위하여 네덜란드 기술용역단(NEDECO)은 양수표가 있는 나주에서 영산강하구의 목포외항까지에 대하여 1차원 조석수치모형을 적용한 바 있다. 네덜란드 기술단은 1963년 8월 대조기의 조석상황이 방조제 건설 후 어떻게 변화할 지에 대하여 검토하였는데 최병호(1984)에 의하면 그 결과가 실제보다 과소평가된 것으로 결론이었으며 그 원인으로 외해경계조건의 부적합성과 제한된 조석상황만이 검토된 것을 지적하였다. 또한 조석모형이 1차원모형임을 감안할 때 정확한 예측 자체가 무리인 것으로 평가하였다.

농어촌진흥공사에서는 영암방조제와 금호방조제 건설에 따른 환경영향평가를 위하여 2차원조석수치모형을 적용하고 방조제 건설에 따른 조위변화가 1-2cm 이내로 극히 적다는 결론을 내린 바 있다. 그러나 최병호(1984)의 연구에 의하면 실제로는 영암방조제 건설만으로도 목포항에서 평균만조위가 14cm이상 상승된 것으로 나타나 목포항의 조석변화를 정확히 해석하지는 못한 것으로 판단된다.

목포시 저지대의 침수문제의 해결을 위한 연구의 일환으로 전라남도(1993)에서 연구용역을 의뢰한 바 있다. 이 연구에서는 2차원 양해법적 수치모형을 적용하여 영암방조제와 금호방조제의 건설에 따른 목포해역의 조위변화를 예측하였는데 외해경계가 목포구 바로 외곽에 설치되어 있어 방조제 건설에 따라 경계부근의 조위가 변화할 수 있는 것으로 지적되었다(이석우, 1994). 이밖에도 해운항만청은 고하도항만 개발을 위한 조석수치모형을 하구언과 방조제가 모두 완성된 상태에 대하여 적용한 바 있는

데 사용된 모형은 프랑스 전력공사와 SOGREAH사가 공동으로 개발한 K-Cythere모형으로 국내에서도 광양제철소 SLAG 처리장 조성, 금강하구 수리현상 조사 및 아산항 항만 등에 적용한 사례가 있다.

최근에는 강주환(1995)이 하구언 및 방조제의 건설에 따른 목포해역의 환경변화를 검토한 바 있다. 이를 위하여 음해법에 의한 조석수치모형을 개발하였으며 수치해석에 필요한 행렬식의 계산에는 PCGS (preconditioned conjugate gradient squared)방법을 사용하였다. 모형에서는 조간대 모의를 포함하였으며 지형이 복잡한 목포해역에 적용하여 만족할만한 결과를 얻었다. 또 강주환(1996)은 목포해역의 만조위 상승이 하구언과 방조제의 건설에 따라 목포구의 조석필터 기능이 소멸되어 조석확폭현상이 야기된 것으로 결론짓고 이러한 환경변화는 목포구로부터 외해쪽으로 약 20-30km까지 영향을 미치는 것으로 결론지었다. 계속된 연구에서 강주환 등(1998)은 천해조분석을 통하여 목포 인근해역에서의 낙조우세(ebb dominant) 현상(Aubrey and Speer, 1985)을 입증하고 하구언과 방조제의 건설로 목포구의 조석필터효과가 상실됨에 따라 낙조우세가 심화된 것으로 판단하였다. 특히 목포항 인근해역에서의 조류속 감소추세와 특정해역에서의 조류속 증가에 따라 해역에서의 퇴적물 이동과 오염확산 양상이 크게 변화한 것으로 결론지었다.

3. 모형의 적용

3.1 모형의 구성

연구에 사용된 모형은 양해법에 의한 유한차분방법을 이용하였으며 국내에서는 최병호 등(1990)이 새만금해역에 대하여 최병호 등(1992), 한국해양연구소와 한국수자원공사(1993), 정신택 등(1997)이 인천만에 대하여 적용하여 만족할만한 결과를 얻은 바 있다. 따라서 본 논문에서는 다른 지역에 널리 적용되어 만족스러운 결과를 얻은 조석모형을 지형이 복잡하고 조간대가 널리 발달된 목포해역에 적

용하여 그 결과를 분석하고자 한다. 이를 위하여 영산강하구언 건설 이전의 상황에 대하여 모형을 적용하고자 한다. 사용된 모형은 수십평균된 2차원 운동방정식과 연속방정식을 직교좌표계상에서 격자간격이 일정한 조건에서 양해법(explicit scheme)을 이용하여 기술한 것으로, 기본 골격은 Flather and Heaps(1975)에 의해서 개발되었으며 방사경계 조건(radiational boundary condition), 하천 유입수 처리 및 개방경계면의 노출·침수를 고려할 수 있도록 확장된 것이다.

연구대상 해역은 천해역으로서, 조류의 연직변화는 거의 무시할 수 있으며, 해저면 부근의 경계층(boundary layer)을 제외하고는 밀도의 수평, 수직변화 효과 또한 미미하다. 따라서 모형해역내의 해수유동현상은 아래와 같은 2차원 편미분방정식으로 기술된다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Hu) + \frac{\partial}{\partial y}(Hv) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\tau_x^b}{\rho H} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\tau_y^b}{\rho H} = 0 \quad (3)$$

여기서, x, y 는 각각 평균 해수면에 위치한 직교좌표계, g 는 중력가속도, f 는 전향력 계수(Coriolis parameter), ζ 는 평균 해수면상의 순간조위, h 는 평균해수면하의 수심, H 는 순간수심($= h + \zeta$), u, v 는 각각 x, y 방향의 수평유속 성분, τ_x^b, τ_y^b 는 각각 x, y 방향의 해저마찰력 성분이다.

해저마찰력은 조석·조류 에너지의 감쇄를 나타내는 성분으로 다음 식 (4)와 같이 주어진다.

$$(\tau_x^b, \tau_y^b) = k\rho(u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}}(u, v) \quad (4)$$

여기서, ρ 는 해수의 밀도, k 는 마찰계수로서 0.00235를 사용하였다.

수치계산에는 이중소거법(double sweep method)이 사용되었는데, 이 방법은 각각 유속 u, v 를 홀수 계산시각에는 계산영역의 상단에서 하단으로 각 격자를 탐지(scanning)하면서 계산하고, 짝수 계산시각에는 하단에서 상단으로 탐지하며 계산하는 양해법이다. 식 (2)와 (3)의 비선형이류항(non-linear advective terms)의 계산에는 대각구배 계산법(angled-derivative scheme)이 이용되었으며, 조간대 영역의 처리에는 Flather and Heaps(1975)의 방법이 이용되었다.

3.2 입력 및 경계조건

주어진 해역내에서 상기한 편미분방정식의 해를 구하기 위해서는 모형의 경계조건이 필요하다. 육지와의 폐경계조건은 육지경계면과 수직한 유속성분이 없는 무흐름조건이며, 개방경계조건은 개방경계면상의 관측치 또는 기존자료(광역수치모형의 계산결과 포함)를 선형내삽한 조위가 수치로 주어지는 수치지정 경계조건이다. 개방경계조건에 필요한 수치인 해수위는 식 (5)와 같이 조화상수의 합으로 결정되며, 연속방정식으로부터 경계면에서의 유속을 계산하게 된다.

$$\zeta_B(x, y, t) = \sum A_j \cos(\omega_j t - g_j) \tag{5}$$

여기서, ζ_B 는 경계면에서의 조위, A_j 는 조석파의 경계면에서의 半潮差, ω_j 는 位相速度(phase velocity), g_j 는 遲角(phase lag)이다.

식 (5)에 의하여 개경계에서의 수위조건을 결정하기 위해서는 개경계에서의 반조차와 지각이 필요하다. 목포 인근해역은 지형이 복잡하다는 난점 외에도 수위조건에 필요한 가용자료가 많지 않다. 기준점조소인 목포외항 점조소 외에는 장기적인 조위 관측지점이 없다. 또, 각 기관에서 자체사용을 목적으로 단기점조를 몇 차례 실시한 바 있고, Choi(1980)는 황해와 동지나해 및 일본열도의 약 400개 관측지점의 주요 4개 분조에 관한 자료를 여러 문헌에서 발췌 정리한 바 있으나 관측점이 하구

내부와 인근도서에 집중하고 있어 이 자료들을 모형의 외해경계조건으로 이용할 수는 없다. 따라서 강주환(1995)은 Choi(1980)에 수록된 서해 및 동지나해의 조화상수 중 우리나라 서남해안의 값을 이용하여 경계조건을 설정한 후 계산한 계산치가 영역 내부의 관측치와 일치하도록 경계조건을 약간 수정하여 만족할만한 결과를 얻었다. 본 연구에서는 강주환(1995)이 이용한 경계조건을 이용하여 수치해석을 여러 차례 실시한 결과 경계조건을 약간 수정하여도 내부에서의 계산치가 크게 변화하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 강주환(1995)이 이용한 경계조건을 약간 수정하여 내부관측지점에서의 오차가 최소가 되도록 하였다. Table 1은 이와 같이 설정된 외해경계조건으로 본 모형에서는 M2 분조에 대해서만 해석하였다. 표에 나타난 각 점의 위치는 Fig. 1에 나타나 있으며 중간에 위치한 점들의 경계조건은 선형내삽하였다.

Table 1 M2 constituent for open boundaries

Point	Amplitude (cm)	Phase lag(°)	Point	Amplitude(cm)	Phase lag(°)
A	144.0	40.0	E	94.0	12.0
B	155.0	42.0	F	106.0	5.0
C	152.0	44.0	G	129.0	326.0
D	152.0	44.0	H	131.0	322.0

전체수치모형의 범위는 목포의 서쪽해역을 전부 포함하며, 남북방향으로 북위 34° 29'30"~34° 59'30", 동서방향으로 125° 44'30"~126° 27'30"이다. Fig. 1은 대상영역을 그림으로 나타낸 것이며 사선으로 빗금쳐진 부분은 조간대를 표시한 것이다. 그림에는 Choi(1980)에 수록된 내부관측지점의 위치가 표시되어 있다. 격자망의 구성은 x, y방향 모두 500m 등간격으로 하여 161(80km)×131(65km)=21091개로 구성하였다. 본 모형에서는 그림에 나타난 바와 같이 넓은 목포해역에 대하여 본 모형의 적용가능성을 검토한 후 향후 그 결과를 토대로 하구언과 방조제의 건설에 따른 목포항에서의 조석변

화, 오염확산형태의 변화, 퇴적물 이동양상의 변화 등을 검토하고자 한다.

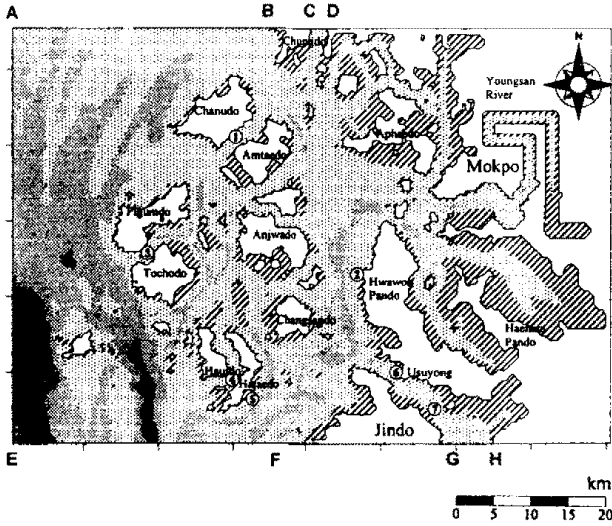


Fig. 1 Model domain and topography

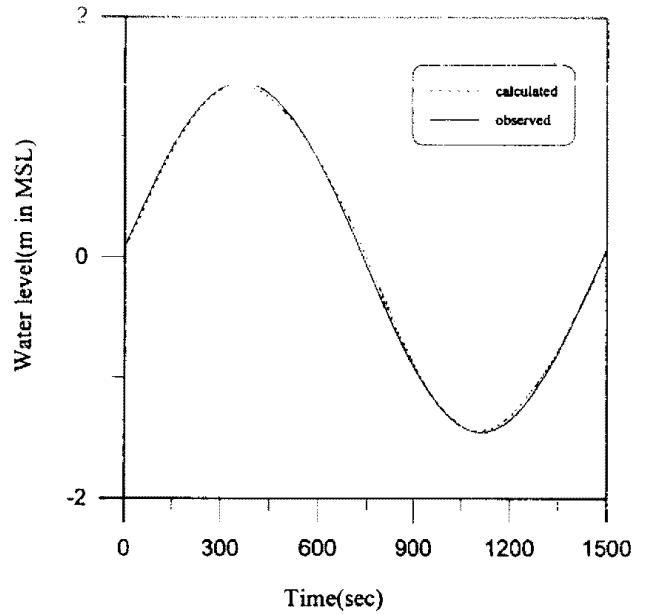


Fig. 2 Changes of tidal characteristics at No. 1

3.3 검증 및 결과분석

수립된 조석모형의 검증을 위해서 1981년 하구연 건설전 상황에 대하여 모형을 수행하고 그 결과를 관측치와 비교하였다. 각 관측지점에서의 진폭과 지각을 비교하여 Table 2에 나타내었으며 시간에 따른 조위의 변화를 관찰하기 위하여 No.1(자은도), No.2(시하도)에서의 관측치와 계산치를 Fig. 2, Fig. 3에 나타내었다. 표에서 보면 협수부인 우수영에서의 값을 제외하고는 진폭과 지각의 계산치와 관측치가 거의 일치한 것으로 나타났다. 표와 그림에서 볼 때 적용된 모형은 대상구역내의 각 점들에서 해수유동을 잘 재현하는 것으로 나타났다.

Table 2 Comparison of observed and calculated value

No.	Locality	Observed		Calculated	
		A(cm)	k(°)	A(cm)	k(°)
1	Chaundo	145.1	34	143.5	34.4
2	Sihado	129.2	29	126.0	33.3
3	Pigumdo	124.0	20	125.0	20.5
4	Hauido	110.6	14	112.5	12.2
5	Hataedo	109.0	5	108.5	7.1
6	Usuyong	116.0	15	112.0	5.9
7	Pyukpajin	131.6	324	132.0	329.6

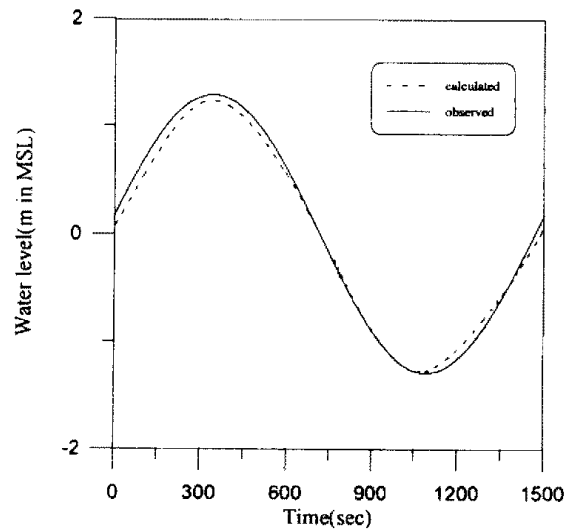


Fig. 3 Changes of tidal characteristics at No. 2

Fig. 4, 5는 각각 창조시와 낙조시의 조류속을 나타낸 것으로 구역내에서의 실제 흐름을 잘 재현하는 것으로 나타났으며 중간대에서의 흐름을 잘 모의하는 것으로 나타났다. 그림에서 창조시에는 진도를 서쪽에서 돌아 올라오는 해수와 진도의 동쪽을 따라서 울돌목을 통과하는 흐름이 화원반도를 따라 올라와 목포구에서 일부는 서계방향으로 돌아 영암

만으로 유입되고, 일부는 영산호로 일부는 압해도를 양방향으로 돌아서 무안만쪽으로 유입되는 것으로 나타났다. 또 낙조시에는 그와 반대로 무안만, 영산호, 영암만의 해수가 목포구 앞을 통과하여 화원반도를 지나 진도를 돌아나가는 것으로 확인되었다.

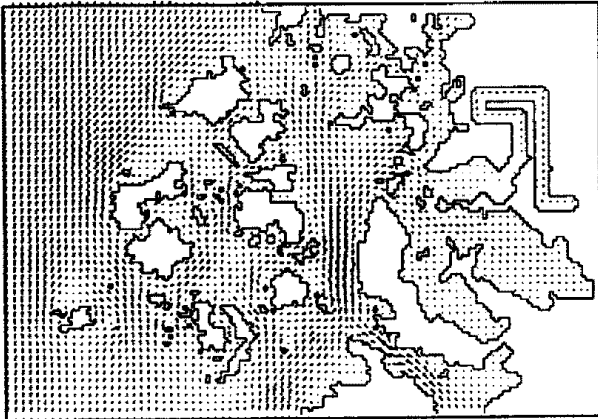


Fig. 4 Flow pattern in flood flow

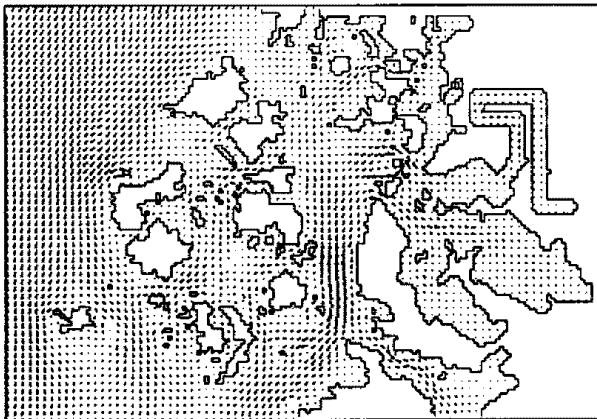


Fig. 5 Flow pattern in ebb flow

그림에서 나타난 이와 같은 흐름이 이미 완공된 하구언과 영암방조제, 금호방조제에 의해서 크게 변화할 것으로 보이며 또 현재 진행중인 4단계방조제의 체절에도 영향을 받을 것으로 판단된다. 또한 하구언과 방조제의 건설에 의하여 전술한 흐름의 변화로 목포구의 조석필터효과가 감소하여 목포항의 조위상승에도 영향을 주게될 것으로 판단된다.

대상해역에서 창조시와 낙조시의 수면형상을 Fig. 6과 7에 각각 도시하였다. Fig. 6에서 남쪽에서 북쪽으로 진행되는 조석파가 협소한 단면을 가진 목포구를 통과하지 못하면서 조석파가 지체되는 현상을 보였다. 하지만 Fig. 7에서 낙조시에는 영산호와 영암만에 축적된 해수가 창조시와 달리 원활하게 목포구를 통과하는 형태를 보였다. 그림의 결과를 볼 때 목포해역에서 나타나는 낙조우세현상은 강주환(1998)에서 연구된 바와 같이 목포구의 조석필터효과로 인해 창조시에 목포구를 통과하는 조석파가 지체되고 낙조시에는 원활하게 통과하는데 원인이 있는 것으로 판단된다.

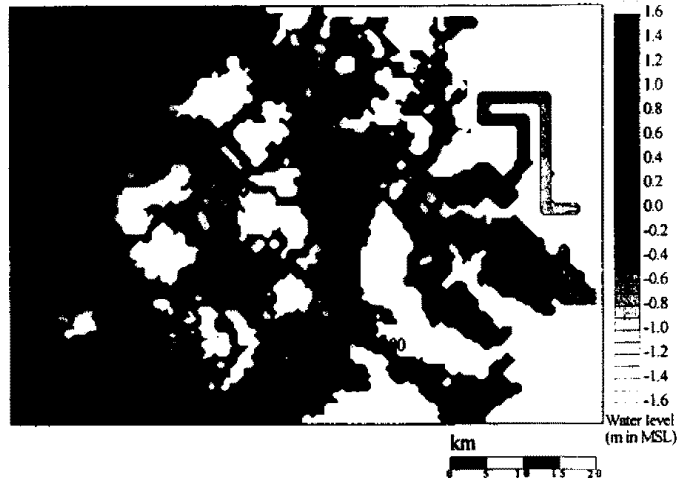


Fig. 6 Water level contour plot in flood flow

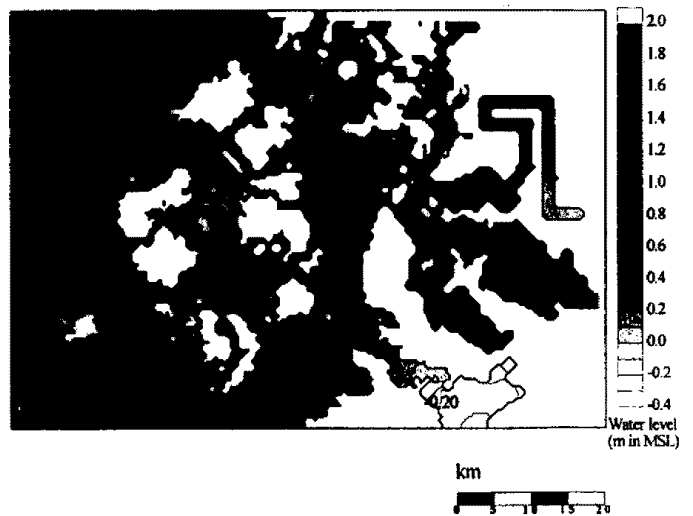


Fig. 7 Water level contour plot in ebb flow

4. 결론 및 향후 연구과제

양해법적 조석모형을 목포해역에 적용하였다. 영산강하구언 완공이전을 대상으로 모형을 수행한 결과 관측지점에서의 진폭과 지각에 대하여 만족할만한 결과를 보였다. 또 모형에서 얻어진 조류속은 실제 현상과 부합하는 것으로 나타났으며 하구언과 방조제의 완공에 따라 조류속이 크게 변화하여 목포항내의 만조수위와 조류속에 영향을 줄 것으로 보인다. 또한 그에 따른 오염확산양상과 퇴적물이동양상도 크게 변화할 것으로 보인다. 또 목포구의 조석필터효과에 의해 목포항에서의 낙조우세현상이 발생함을 확인할 수 있었다. 각 결과에서 볼 때 적용된 모형은 지형이 복잡하고 조건대가 널리 발달된 목포해역에 대하여 잘 모의하는 것으로 판단된다.

향후 본 모형에서 얻어진 결과를 바탕으로 목포항을 주 대상영역으로 하여 세부격자망을 구성하여 하구언과 방조제의 건설에 따른 목포항의 조류속과 만조위의 변화를 모의하고자 한다. 또한 그 결과를 바탕으로 하구언과 방조제의 건설에 따른 목포해역의 오염확산과 퇴적물이동양상의 변화를 예측함으로써 각종 사업에 필요한 정보를 제공하고자 한다.

참고문헌

- 1) 강주환(1995), "음해조석모형의 목포항 인근해역에의 적용", 한국해양·해양공학회지, Vol. 7(4), pp. 321-328.
- 2) 강주환(1996), "하구언 및 방조제 건설에 따른 목포해역의 환경변화", 대한토목학회논문집, Vol. 16(II-6), pp. 611-619.
- 3) 강주환, 송재준, 오남선(1998), "낙조우세와 관련된 목포해역의 조류특성 분석", 대한토목학회논문집, Vol. 18(II-2), pp. 185-193.
- 4) 이석우(1994), 한국항만수리지, 집문당.
- 5) 전라남도(1993), 목포항주변 조위상승 원인분석 및 항구대책 연구용역보고서.
- 6) 정신택, 조홍연(1997), "인천해역 개발에 따른 조석변화 및 오염물질 운송 예측", 한국 해양·해양공학회지, Vol. 9(1), pp. 1-8.
- 7) 최병호(1984), "영산강하구의 방조제 건설에 따른 조위변화", 대한토목학회 논문집, Vol. 4(2), pp. 113-124.
- 8) 최병호, 강용덕(1990), "새만금해역 방조제건설이 조석에 미치는 영향-초기평가", 한국해양·해양공학회지, Vol. 2(1), pp. 34-42.
- 9) 한국해양연구소, 한국수자원공사(1993), 경인운하 지형태분석 수치모형 실험보고서.
- 10) Aubrey, D.G. and Speer, P.E.(1985), "A Study of Non-linear Tidal Propagation in shallow Inlet/Estuarine Systems Part I:Observations", Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 21, pp. 185-205.
- 11) Choi, B.H.(1980), "A Tidal Model of the Yellow Sea and the Eastern China Sea", KORDI Report 88-02.
- 12) Flather, R.A. and Heaps, N.S.(1975), "Tidal Computations for Morecambe Bay", Geophys. J. R. astr. Soc., Vol. 42, pp. 489-517.

