

FIT模型에 의한 木浦港의 潮汐特性 分析

강주환*

1. 서론

하구언과 방조제의 축조와 시기를 같이 하여 목포내항 부근의 만조시 수위가 크게 상승하여 목포시 저지대 곳곳에 침수문제를 야기시키고 있으며, 저조위는 하구언 건설 이전보다 낮아져 연안 해운이 발달된 목포항에서 선박의 항해에 지장을 받는 등 이중의 고통을 받고 있는 실정이다. 이와 더불어 목포구의 조류속이 건설전에 비해 급격히 감소됨에 따라 외해수와 내해수의 해수교환이 여의치 않게 되었으며, 최근 크게 문제시되고 있는 영산호의 수질과 목포시의 폐수발생량을 감안하면 장차 목포항 인근의 해수오염이 크게 우려되는 실정이다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 기초적 연구로서 본 연구를 통해 목포해역의 조석특성분석을 위한 수치모형인 FIT(fully implicit tidal)모형을 개발하였는데, 조간대 모의가 포함된 본모형은 복잡한 영역의 수치해석에 특히 장점이 있다고 알려진 완전음해법을 채택하였고 음해법에 수반되는 행렬식의 효율적 계산을 위해 PCGS(preconditioned conjugate gradient squared) 방법을 사용한 모형이다.

본 연구의 해석대상 영역인 목포 인근해역의 수심도를 Fig.1에 도시하였는데, 동서로는 영산강 일부와 나주군도까지 80km, 남북으로는 진도로부터 중도까지 55km의 영역 내부에 자은도, 비금도 및 장산도 등을 비롯한 수많은 크고 작은 섬들이 산재해 있으며, 사퇴 및 해저협곡의 발달이 두드러진 수심이 매우 복잡한 수역이다. 목포항으로 통하는 주수로는 목포구로 대표될 수 있는데 내부의 드넓은 갑조해역의 해수 유출입을 담당하기에는 단면이 그리 크지 않아 이곳에서는 매우 강한 조류속이 관측되고 있다. 또한 화원반도 남단에는 조석위상차에 기인하여 국내에서 조류속이 가장 빠른 울돌목이 해석대상영역에 포함되어 있으며, 자은도와 암태도를 비롯한 여러 섬들이 서로 인접해 있어서 섬사이의 좁은 단면을 통과하는 해수도 역시 강한 유속을 보이고 있다. 한편 천수효과로 인해 내륙쪽으로 갈수록 조차가 커지는 일반적인 경향과는 달리 목포항에서의 대조차는 318.6cm로 목포구에서의 340cm보다 오히려 약 20cm 작다고 알려져 있다(이, 1994).

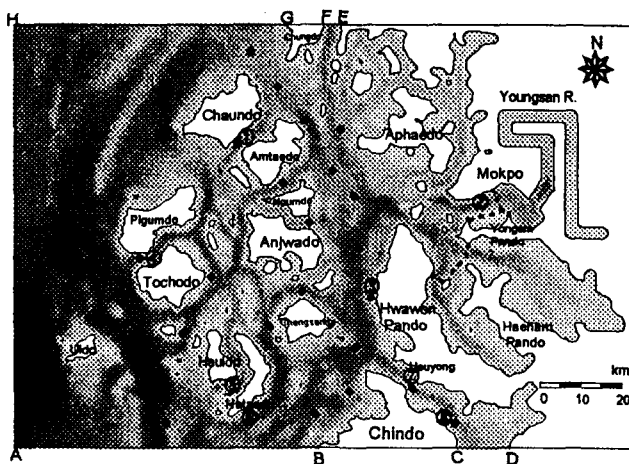


Fig. 1. Model Domain and Bottom Topography

*목포대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Mokpo National University, Muan-Gun, Cheon Nam, 534-729, Korea)

2. FIT모형의 구성

수심적분된 2차원 천수방정식의 형태는 다음 식(1)과 같다.

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \lambda u - fv = 0 \quad (1.b)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \lambda v + fu = 0 \quad (1.c)$$

여기서 t, x, y 는 시간과 공간에 대한 독립변수, η 는 수면변위, u, v 는 각각 x, y 방향 유속, $H(=\eta+h)$ 는 총수심, h 는 기준면으로부터의 수심, 마찰계수 $\lambda=g(u^2+v^2)^{1/2}/(C^2H)$, g 는 중력가속도, $C=H^{1/6}/n$, n 은 Manning의 조도계수, $f(=2\omega \sin\phi)$ 는 Coriolis계수, ω 는 지구의 자전각속도로 $0.0000728 \text{ rad/sec}$ 이며 ϕ 는 위도이다.

이 식에 대한 유한차분방법은 Wilders등이 제시한 바 있는 방법을 채택하였다. 즉, 매시간단계를 둘로 나누어 1단계에서는 연속방정식을 양해법으로 차분하여 수면변위를 구하고 운동방정식을 음해법으로 차분하여 유속을 구하게 된다. 2단계에서는 운동방정식을 유속에 대한 양해법으로 차분하여 연속방정식에 대입한 후 연속방정식을 수면변위에 대한 음해법으로 표현하여 반복계산에 의해 해를 구하게 된다. 1단계에서 유속을 구하는 경우와 2단계에서 수면변위를 구하는 과정에서 양방향음해법이 도입되었기 때문에 각각에 대한 행렬식을 풀어야 한다. 구성된 행렬식은 sparse matrix의 해를 구할 경우 많이 쓰이는 CG(conjugate gradient)방법으로 풀 수 있지만 이 방법은 대칭행렬일 경우에만 수렴성이 보장되므로 직접 적용할 수 없고 전치행렬을 곱해준 CGS(conjugate gradient squared)방법을 사용해야 한다. CGS방법은 비대칭 행렬식에도 수렴성이 보장되는 방법으로 1단계의 유속을 계산할 때 사용될 수 있지만 행렬식의 형태에 따라 수렴속도는 큰 차이를 보이게 된다. 2단계의 수면변위 계산시 수렴속도가 현저하게 떨어지므로 preconditioning을 통한 PCGS(preconditioned CGS)방법을 사용하게 되며 SSOR(symmetric SOR)방법으로 해를 구하게 된다.

3. 모형의 적용

해석영역 내부에서 식(1)과 같은 천수방정식의 해를 구하기 위해서는 초기조건과 경계조건이 필요하다. 수면변위에 관한 초기조건은 경계조건에 대한 내삽법을 사용하였고 유속에 관한 초기조건은 모든 격자점에서 0으로 하는 것이 일반적이지만 이 경우 본모형에서는 특이행렬이 형성되므로 0에 가까운 0.001m/sec 의 값을 부여하였다. 육지와외의 폐경계조건은 경계에 수직한 방향의 유속이 0이라는 조건을 사용하였으며, 외해의 개경계조건은 다음 식과 같은 분조의 합을 Fig.1의 경계점 A~H에 부여하였고 사이값은 선형보간하였다.

$$\eta(x, y, t) = A_0 + \sum f \cdot A_i \cos(V_0 + u + \omega_i t - k_i) \quad (2)$$

여기서 A_0 는 평균해수면, f 는 천문학적으로 결정되는 1에 가까운 값으로서 약 18.6년의 주기를 갖는 값, A_i 는 분조별 반조차, V_0+u 는 기원시 $t=0$ 에서의 인수, ω_i, k_i 는 각각 분조별 위상속도와 지각이다. 또한 경계조건은 Table 1에 제시하였으며 격자수는 x, y 방향 각각 160개와 110개이며 공간 격자간격은 양방향 모두 500m이고 시간격자간격은 경제성을 고려하여 60sec로 하였다.

Table 1. Harmonic constants of M_2 constituent for open boundaries

	Cell No. (x, y)	Amplitude (cm) Phase lag (°)		Cell No. (x, y)	Amplitude (cm) Phase lag (°)
A	(1, 1)	104.0, 6.0	E	(121, 111)	153.0, 43.0
B	(79, 1)	110.0, 5.0	F	(80, 111)	153.0, 43.0
C	(116, 1)	154.0, 309.0	G	(69, 111)	156.0, 40.0
D	(134, 1)	154.0, 309.0	H	(1, 111)	145.0, 38.0

하구언 및 방조제 건설 이후의 관측자료가 많지 않기 때문에 개발된 모형의 검증은 1981년 이전인 하구언 건설전 상황에 대해서 실시하였다. 우선 영역내부의 8개지점에서 조위에 대한 계산치와 관측치를 비교한 결과를 Table 2에 제시하였으며 이 중 외해경계에서 가장 먼 세 곳인 No.1(자은도), No.2(목포항)와 No.3(시하도)에서는 시간에 따른 조위의 변화를 관측치와 함께 Fig.2, Fig.3과 Fig.4(그림 생략)에 도시하였다. 이를 보면 약 반 주기 후부터는 초기조건의 영향이 나타나지 않고 있으며, 울돌목과 인접한 No.7(우수영) 지점을 제외하고는 파고와 위상 모두 계산치가 관측치와 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

Table 2. Comparison of observed and calculated amplitude and phase for the M_2 tide

No.	Locality	Observed		Calculated		Difference	
		A (cm)	k (°)	A (cm)	k (°)	A (cm)	k (°)
1	Chaundo	145.1	34	143.4	34	-1.7	0
2	Mokpo	122.6	60	122.9	62	0.3	2
3	Sihado	129.2	29	127.8	27	-1.4	-2
4	Pigumdo	124.0	20	125.2	19	1.2	-1
5	Hauido	110.6	14	113.8	13	3.2	-1
6	Hataedo	109.0	5	109.2	6	0.2	1
7	Usuyong	116.0	15	109.5	8	-6.5	-7
8	Pyukpajin	131.6	324	130.4	323	-1.2	-1

계산된 유속장의 정확성을 검증하기 위하여 수로국에서 1986년에 발간한 조류도를 이용하였다. 이는 하구언 건설이후의 자료이므로 하구언 인근해역을 제외한 Fig.1에 표시한 29개 지점에서 유속계산치와 비교하였다. 조류도에 제시된 유속은 평균대조기의 경우이고 계산유속은 M_2 분조만을 고려한 평균조에 대한 것이므로 직접적인 비교는 문제가 있겠지만 위치별 유속크기의 상대적 비교는 의미가 있으므로 최강창조류를 Fig.5, 최강낙조류를 Fig.6에 도시하였다. 이를 보면 몇개 지점을 제외하고는 관측치와 계산치에서 상대적인 유속크기가 일치되고 있음을 알 수 있으므로 모형의 정확성을 입증할 수 있다.

달의 동경 135° 통과시각과 그로부터 달시간(lunar hour)으로 3, 6, 9시간 후의 계산된 전체적인 유속장을 Fig.7~Fig.10(Fig.8, 9, 10 그림 생략)에 각각 제시하였다. Fig.1의 수심도와 비교해보면 자은도 서쪽에 형성된 해저협곡 부근에서 빠른 유속을 보이고 있으며 사퇴부근에서는 느린 유속을 보이고 있는 등 실제현상과 부합하고 있음을 알 수 있다. 또한 시시각각 변하는 폐경계도 잘 묘사하고 있어 목포구 내부에 광범위하게 형성된 조간대의 수치적 모의도 무리없이 이루어지고 있다.

영역내의 등조차도와 등조시도를 Fig.11(그림 생략)과 Fig.12(그림 생략)에 각각 도시하였는데 조차는 남서쪽의 2.1m로부터 북동쪽으로 갈수록 커져 중도에서는 3.1m를 보이고 있으며, 우수영 부근에서 2.3m로 주변에 비해 가장 작은 값을 보이다가 울돌목을 지나 진도의 동쪽 부근인 경계부근으로 갈수록 급격히 커지는 양상을 나타내고 있다. 또한 목포구를 전후해서도 큰 차이를 보이고 있는데 목포구 서쪽에서 2.7m인 조차가 목포구 동쪽에서는 2.5m로 감소되고 있으며 목포항 일대에서 최소의 조차를 보인 후 내륙쪽으로는 또다시 증가하여 영암호 안쪽에서는 3m 정도를 보이고 있다. 목포항 일대의 조차가 최소가 되는 까닭은 전술한 바와 같이 목포항으로의 주된 통로가 되고 있는 목포구의 단면이 안쪽의 넓은 수역으로의 유출입 유량을 감당하기에는 너무 협소하기 때문에 목포구가 조석파의 진행에 있어서 일종의 완충기능을 하기 때문이다. 또한 Fig.12의 등조시도를 보면 전체적인 조석파의 진행방향은 남쪽에서 북쪽을 향하고 있으며 울돌목 부근과 목포구 부근에서 조석파의 지체현상을 보이고 있다.

현재 목포항 일대에는 Fig.1에 점선으로 표시한 바와 같이 하구언과 영암방조제 및 금호방조제로 안쪽의 넓은 수역이 외해와 차단된 상태인데 이로 인해 목포구를 통과하는 조류속이 현저히 감소되어 목포항 일대의 오염문제가 심각하게 대두될 전망이다. 목포구의 완충기능도 더이상 기대할 수 없어 목포항의 조차가 목포구에서보다 오히려 더 커지게 된 까닭에 목포항 일대의 침수문제가 야기된 것이다.

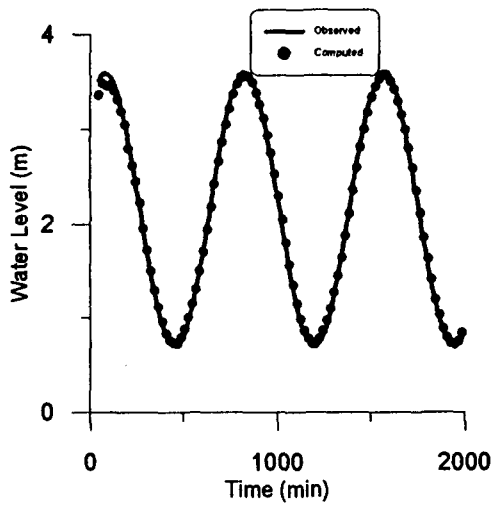


Fig.2. Comparison of Water Level at Pt. 1.

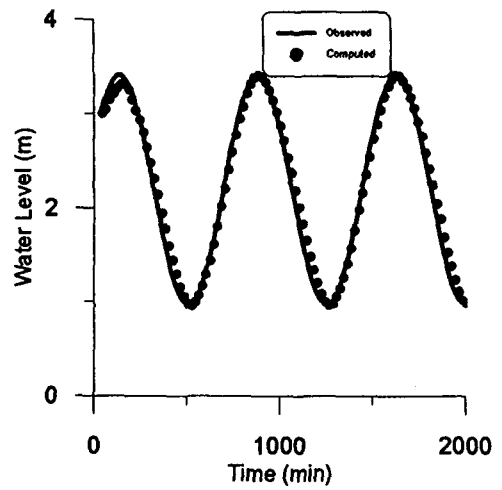


Fig.3. Comparison of Water Level at Pt. 2.

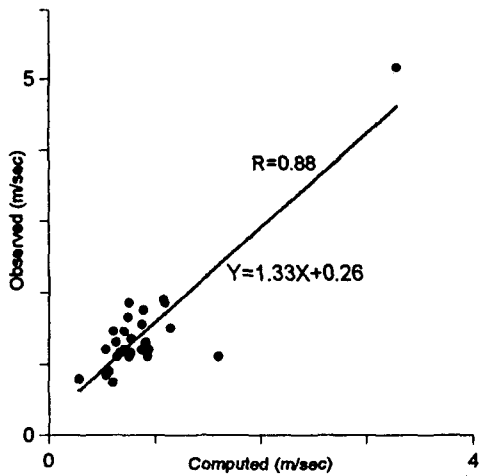


Fig.5. Comparison of Velocity at Flood

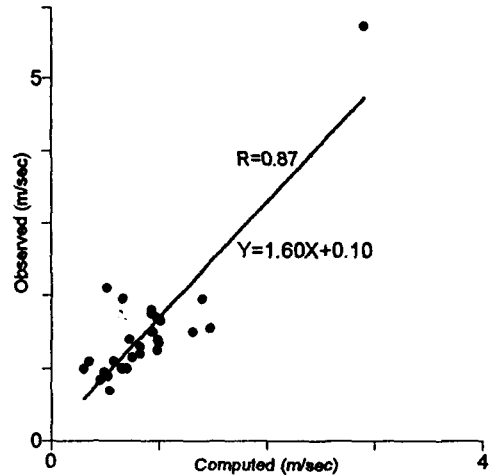


Fig.6. Comparison of Velocity at Ebb

4. 결론 및 토의

목포항 인근해역의 조석특성 분석을 위하여 양방향 모두 음해법적으로 차분한 후 PCGS방법을 사용하여 SSOR방법으로 해를 구하게 되는 FIT모형을 개발한 후 목포해역에 적용하여 모형을 검증하였다. 수심이 복잡한 해역에서 특히 장점이 있다고 알려진 본모형의 조위와 유속에 대한 검증을 통해 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었으며 조건대의 수치적 모의도 무리없이 이루어지고 있다.

개발된 모형을 사용하면, 하구언과 방조제 건설 후 목포구의 완충효과가 둔화됨에 따라 목포항 일대 조석의 확폭현상을 규명할 수 있으며, 목포구의 조류속 감소에 따른 목포해역 오염실태 파악 및 예측에도 기여할 수 있을 것이다.

참고문헌

- 강주환, 박상현, 이길성, 1993. 음해법을 이용한 천수방정식의 수치해석, 대한토목학회 논문집, 13(3): 119-127.
- 이석우, 1994. 영산강하구둑 건설에 따른 목포항의 조위의 변화, 항만, 27-37.
- 전라남도, 1993. 목포항주변 조위상승 원인분석 및 항구대책 연구용역보고서.
- 최병호, 1984. 영산강하구의 방조제 건설에 따른 조위변화, 대한토목학회 논문집, 4(2): 113-124.
- Bayliss, A., Goldstein, C.I., and Turkel, E., 1983. An Iterative Method for the Helmholtz Equation, *J. of Computational Physics*, 49.
- Choi, B.H., 1980. A Tidal Model of the Yellow Sea and the Eastern China Sea, *KORDI REPORT* 80-02.
- Panchang, V.G., Pearce, B.R., Wei, G. and Cushman-R., B., 1991. Solution of the Mild-Slope Wave Problem by Iteration, *Applied Ocean Research*, 13(4): 187-199.
- Weare, T.J., 1979. Errors Arising from Irregular Boundaries in ADI Solutions of the Shallow-Water Equations, *Int. J. for Numerical Methods in Engineering*, 14: 921-931.
- Wilders, P., van Stun, L., Stelling, G.S. and Fokkema, G.A., 1988. A Fully Implicit Splitting Method for Accurate Tidal Computations, *Int. J. for Numerical Methods in Engineering*, 26: 2707-2721.

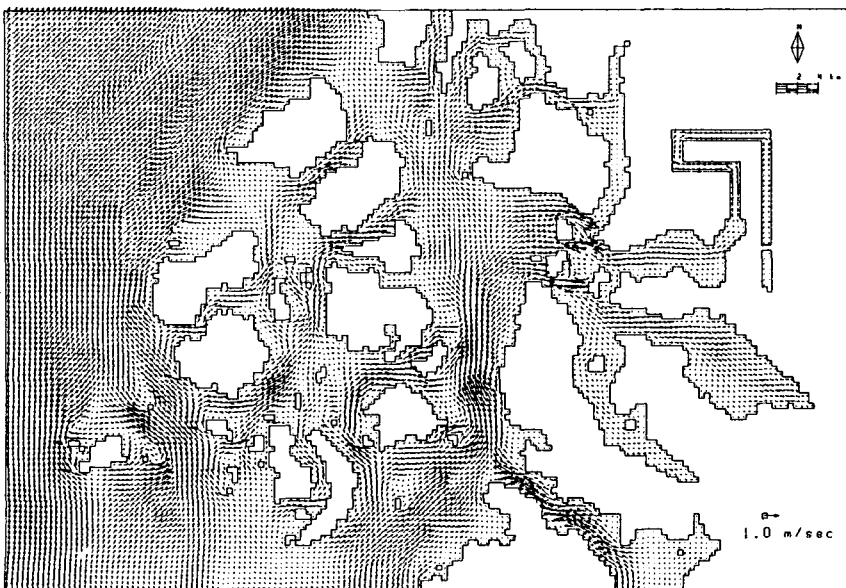


Fig. 7. Tidal Flow Pattern at lunar 0 hr of 135 °E