

韓國 南西海域의 潮汐 算定 Tidal Computations for the Southwestern Sea of Korea

崔秉昊* · 鄭紅和* · 趙暘基**

Byung Ho Choi*, Hong Wha Chung* and Yang-Ki Cho**

要 旨 : 2차원 조석모형을 이용하여 한국 남서해역의 주요 8개 분조($M_2, S_2, K_1, O_1, N_2, K_2, P_1, Q_1$)에 대하여 조석도와 조류타원도를 제시하고 관측지와 비교하였다. 모델결과 본 해역에서는 반일주조가 우세한 조석의 형태를 보인다. 제주해협 조류에 의한 최대 수송량은 약 $4.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ 로 추산되며 이는 해류에 의한 수송량의 약 8배이다.

Abstract □ A two-dimensional numerical tidal model is formulated to reproduce tides in the Southwestern Sea of Korea. Tidal charts and ellipses of eight major tidal constituents ($M_2, S_2, K_1, O_1, N_2, K_2, P_1, Q_1$) are presented. Model results show that the semi-diurnal tides are dominant in this area. Maximum transport by tides in the Cheju Strait is about $4.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ which is greater by eight times than that by residual current.

1. 서 론

남해와 황해가 만나는 한국 남서해역은 주위 해역과 기상의 영향으로 해황이 시공간적으로 크게 변한다(공, 1971; 강, 1971, 강, 1974; 조와 김, 1994). 조류를 제외한 평균해류는 황해쪽이 수 cm/sec이고(해양연구소, 1986; Harkema and Hsueh, 1987), 제주해협 쪽이 10~20 cm/sec이다(김, 1979; 장, 1984). 제주해협의 해수 유동에 관해서는 최근 많은 연구 관심 대상이 되고 있다. 기존의 관측된 해류자료들을 이용하여 Miita and Ogawa(1984)는 제주해협의 수송량을 $5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{sec}$ 라고 추정하였으며, 남해에 염보존 Box모형을 적용하여 조 등(1995)은 대한해협 서수도를 통과하는 대마난류수의 약 30%가 제주해협을 통과한 해수라고 산정하였다.

생물량의 분포, 오염물질의 확산 그리고 퇴적물의 이동 등과 밀접한 관련을 맺고 있는 해수 유동은 해류뿐만 아니라 조류에 의해서도 크게 영향을 받는다. 수심 100m 미만의 천해인 남서 해역은 조류가 수 십 cm/sec로 조석운동이 매우 활발한 해역이다(Choi,

1980). 특히 섬과 섬 사이 또는 섬과 육지 사이인 수로들에서는 조류가 매우 크다. 본 연구 해역 내 명랑수도는 조류의 최강유속이 약 5 m/sec로 우리나라에서 가장 큰 곳으로 알려져 있다. 최근 산업의 발전에 따라 항만 건설과 매립 등이 이루어지고 있거나 계획되고 있다. 이러한 인위적인 해안선 변경이 이루어지면 연안의 조석체계 변화가 야기되고 이로 인한 해수운동의 구조도 변하리라고 생각된다.

본 연구에서는 남서해역의 조석을 실시간 예보체계로 개선시키기 위한 노력과 앞으로 예상되는 대규모 항만 및 간척사업 등으로 발생할 수 있는 조석체계의 변화에 대한 이해를 위한 기초연구의 일환으로 지금까지 본 해역에서 사용된 조석 수치모형의 격자보다 훨씬 조밀한 격자 구조를 이용하여 주요 8개 분조의 조석에 대하여 수치모형 실험을 실시하였다.

2. 조석 수치 모형

이용된 수치모형은 유한차분(finite difference)기법을 근거하며 코리올리힘, 비선형 이류항(advection)과

*成均館大學校 土木工學科 (Department of Civil Engineering, Sung Kyun Kwan University, Suwon Science Campus, Suwon, Korea)

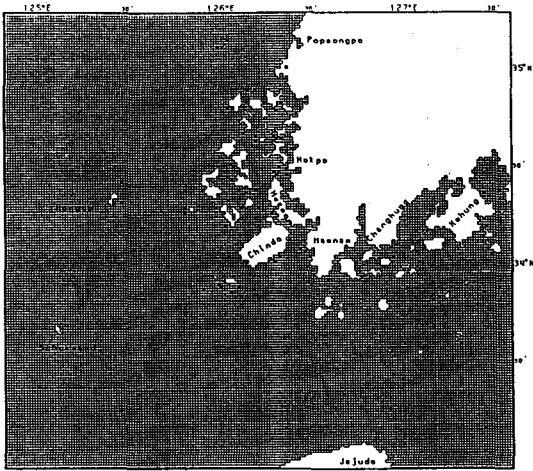


Fig. 1. Grid system for study area.

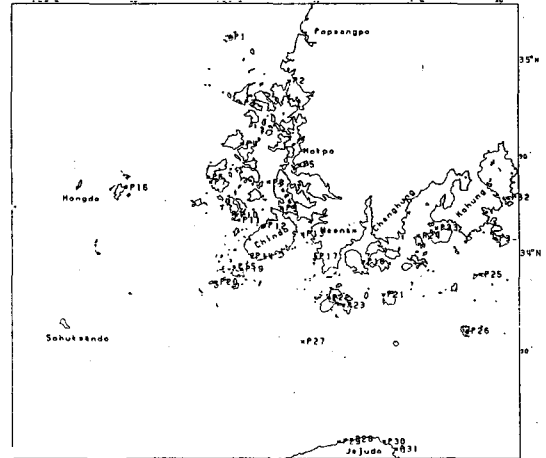


Fig. 2. Tidal stations to compare between observed and computed value.

마찰항이 포함된 조석 방정식의 해를 2차원 직교좌표계 상에서 구하는 것이며 지배 방정식은 다음과 같다(Flather and Heaps, 1975).

운동방정식:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

수심 평균된 운동방정식:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv + \frac{k_b u \sqrt{u^2 + v^2}}{H} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu + \frac{k_b v \sqrt{u^2 + v^2}}{H} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} = 0 \tag{3}$$

- t : 시간
- η : 정지해수면상의 해면수위
- h : 정지해수하의 수심
- H : 총 수심($H=h+\eta$)
- f : 코리올리계수($=2\omega \sin\phi$, ϕ : 위도)
- k_b : 해저마찰계수(0.0025~0.0035)
- g : 중력가속도
- u, v : 수심 평균된 유속

경계조건으로서 육지경계에 직각인 방향의 유속은 없는 것으로 가정하였고 간조시 노출되는 조간대를

적절히 다룰 수 있도록 하였다. 외해 경계면의 경계 조건은 시간에 따른 해면수위 및 유속성분의 변화로 규정 지워진다.

기본식 (1)~(3)의 유한차분형의 식은 Choi(1980)의 방법과 같다. 본 모형의 격자크기는 가로, 세로 모두 1250m이고 총 격자 수는 35422개(가로: 199개, 세로: 178개)이고(Fig. 1) CFL 안정조건을 고려한 Δt 는 10 초로 선택하였다. Fig. 2는 수치모형의 결과를 관측치 (Choi, 1980)와 비교하기 위하여 선정된 정점들이다.

3. 계산결과

3.1 M₂분조와 S₂분조

Fig. 3은 산정된 M₂ 분조의 조석도이다. 위상은 남해의 고흥반도에서 약 270°, 서해의 범성포 부근에서 약 60°로 연안을 따른 약 300 km의 거리에서 약 150°의 차이를 나타낸다. 특히 진도부근의 경우 위상변화가 다른 지역의 약 2배이다. 진폭은 남서 개방경계에서 60 cm이고 전체적으로 북쪽으로 향할수록 그리고 연안 쪽으로 향할수록 커져 범성포 쪽에서 약 170 cm이다. Fig. 4는 관측치와 계산치의 진폭과 위상의 비교 결과이다. 진폭은 몇 개 정점을 제외하고 관측치가 계산치보다 수 cm 정도 크다. 위상은 360° 이하인 남해 쪽에서 계산치가 관측치보다 약 10° 늦고 서해의 경우 일부 관측값들이 계산치보다 10° 이상

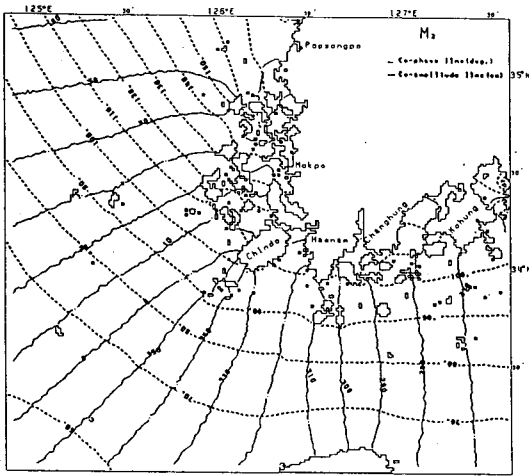


Fig. 3. Computed tidal chart for the M_2 tide.

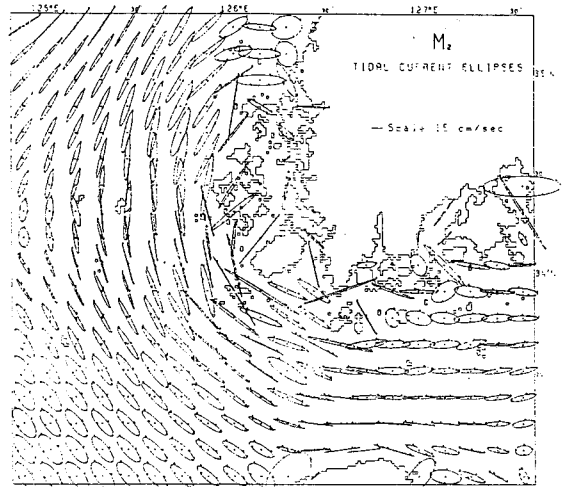


Fig. 5. Computed tidal ellipse for the M_2 tide.

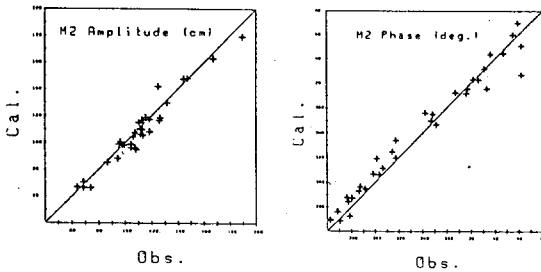


Fig. 4. Comparison between calculated and observed amplitudes and phases for the M_2 tide.

늦다. Fig. 5는 조류타원도로서 조류가 모두 시계방향의 회전성을 나타내며, 제주해협 쪽에서는 주로 동서방향으로 서해쪽에서는 남북방향으로 왕복성 운동이 크다. 조류의 크기는 10~70 cm/sec이고 일부 수로에서는 1 m/sec 이상이다.

Fig. 6은 S_2 분조의 조석도이다. 동쪽 경계의 위상은 약 280° 이고 북쪽 경계의 위상은 100° 정도로 약 180° 의 위상차가 나타난다. 주기가 비슷한 M_2 분조의 위상차보다 약 30° 큰 값이다. M_2 분조의 경우처럼 진도 연안의 위상변화가 다른 지역의 약 2배이다. 진폭은 M_2 분조의 경우처럼 북쪽과 연안으로 갈수록 커진다. 그러나 그 값은 20~60 cm로 M_2 분조의 약 1/3배이다. Fig. 7은 S_2 분조의 관측치와 계산치의 진폭과 위상의 비교 결과이다. 진폭의 경우 계산치가 관측치보다 평균 5 cm 정도 크다. 위상은 남해의 경우 대부분 계산치가 관측치보다 평균 5° 정도 늦고 서해 쪽의 경우 관측치가 더 늦은 경우가 많다. Fig. 8은 S_2 분조의

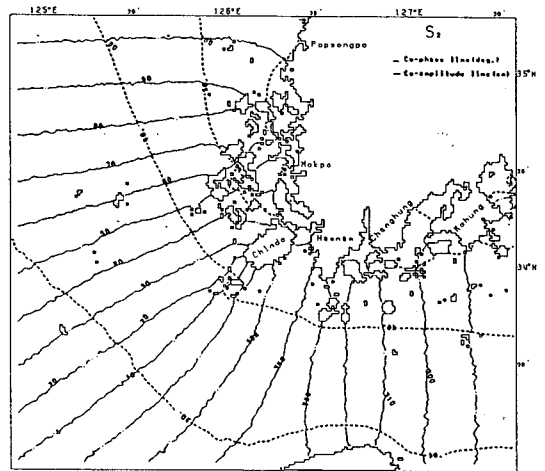


Fig. 6. Computed tidal chart for the S_2 tide.

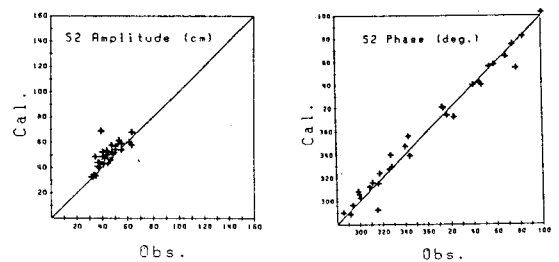


Fig. 7. Comparison between calculated and observed amplitudes and phases for the S_2 tide.

조류타원도로서 조류의 크기는 M_2 분조보다 훨씬 작은 10~20 cm/sec의 크기를 갖는다. M_2 분조의 조류타원

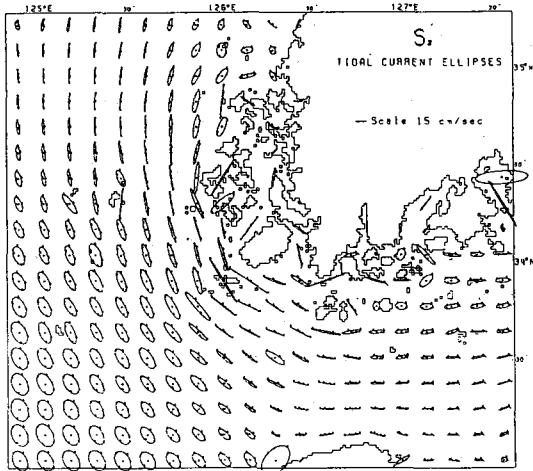


Fig. 8. Computed tidal ellipse for the S_2 tide.

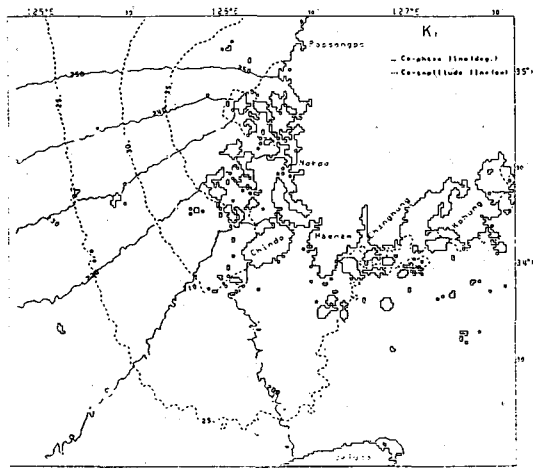


Fig. 9. Computed tidal chart for the K_1 tide.

과 비교하여 보면 단축의 길이는 거의 변함이 없는데 비해 장축의 길이가 줄어 시계방향의 회전성이 더 강화되었다.

3.2 K_1 분조와 O_1 분조

Fig. 9는 K_1 분조의 조석도이다. 남해안의 경우 위상이 190~200° 사이로 공간적인 차이가 거의 없고 서해안의 경우 100 km에 약 40~50°의 위상변화를 보여, 동쪽 경계면과 북쪽 경계면 사이 위상차이는 50~60°이다. 진폭은 남해의 경우 대부분 25 cm 미만으로 비교적 일정하고 서해안의 경우 연안에서 35 cm 이상이고 외해는 25 cm 미만이다. Fig. 10은 K_1

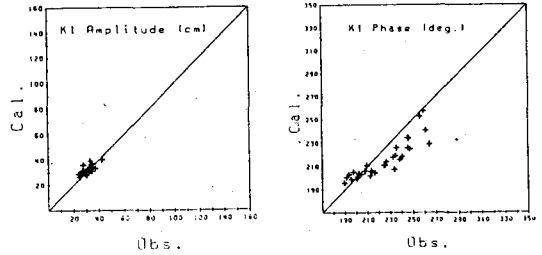


Fig. 10. Comparison between calculated and observed amplitudes and phases for the K_1 tide.

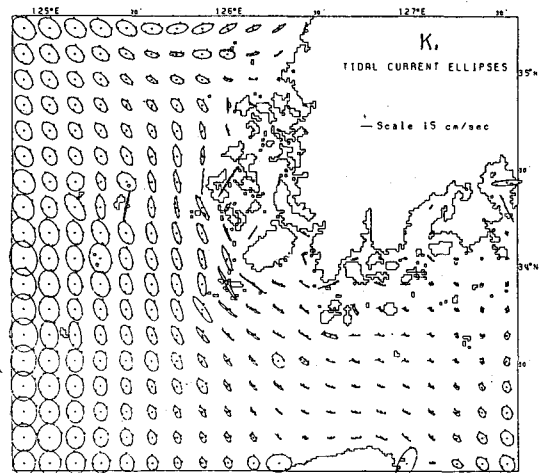


Fig. 11. Computed tidal ellipse for the K_1 tide.

분조의 진폭과 위상에 대한 관측치와 계산치의 비교 결과이다. 진폭은 관측치와 모델결과가 수 cm의 차이를 보인다. 위상은 210° 이하의 남해역에서는 계산결과가 약 10° 더 늦고 서해의 경우 관측치가 10~20° 더 늦다. Fig. 11은 K_1 분조의 조류타원도로서 대부분이 회전성 흐름을 나타내고 있고 그 방향은 M_2 분조와 S_2 분조의 경우처럼 모두 시계방향이다. 조류의 크기는 남해에서 10 cm/sec 이하이고 서해에서 10 cm/sec 이상이다.

Fig. 12는 O_1 분조의 조석도이다. K_1 분조의 경우처럼 남해의 위상은 공간적인 차이가 거의 없고 서해안의 경우 100 km에 약 50°의 위상변화가 있다. 진폭은 남해가 대부분 20 cm 미만이고 서해는 15~35 cm이다. 진폭은 모든 정점에서 계산치가 관측치보다 5~15 cm 크다(Fig. 13). 위상은 180° 이하인 남해의 경우 계산치가 관측치보다 늦고 서해의 경우 북부의 두개 정점을 제외하고 모든 정점에서 관측치가 늦다. 조

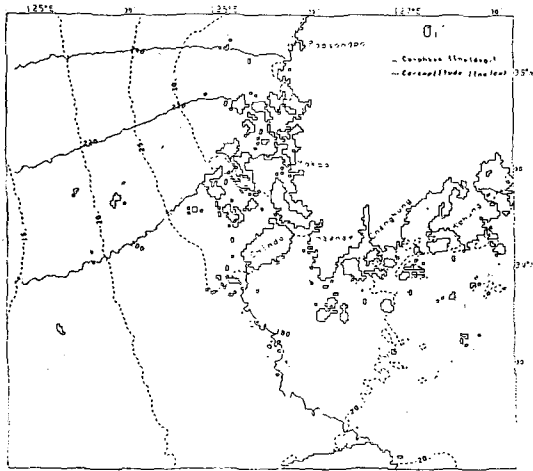


Fig. 12. Computed tidal chart for the O_1 tide.

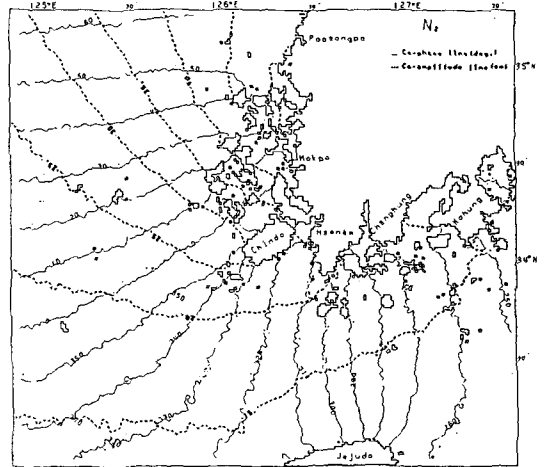


Fig. 15. Computed tidal chart for the N_2 tide.

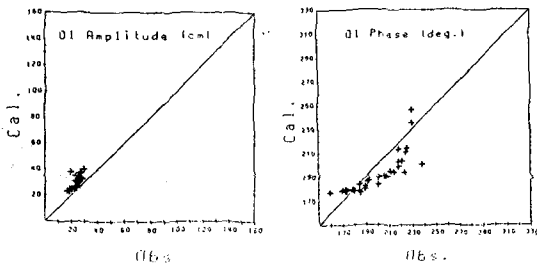


Fig. 13. Comparison between calculated and observed amplitudes and phases for the O_1 tide.

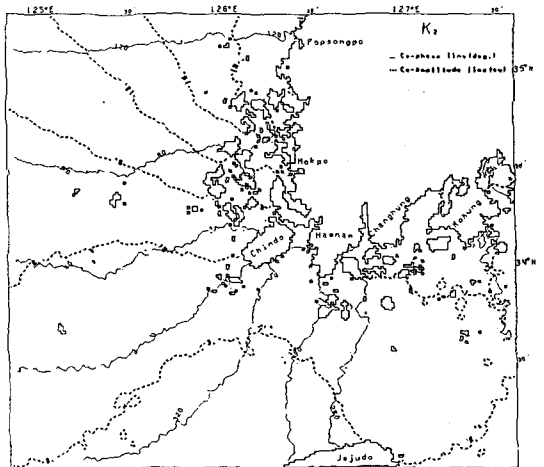


Fig. 16. Computed tidal chart for the K_2 tide.

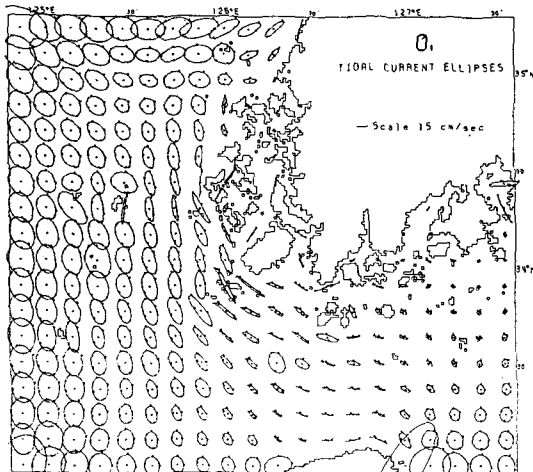


Fig. 14. Computed tidal ellipse for the O_1 tide.

류타원의 구조는 K_1 분조와 유사하다(Fig. 14).

3.3 기타 분조

N_2 분조의 동쪽경계와 북쪽경계의 위상차이는 약 170° 이고 진폭은 남해안에서 $15\sim 20$ cm, 서해안에서 $45\sim 50$ cm이다(Fig. 15). K_2 분조는 O_1 이나 K_1 분조의 경우처럼 남해안의 위상은 공간적으로 비교적 일정하다(Fig. 16). 진폭은 남해안이 6 cm, 서해안이 $6\sim 18$ cm이다. P_1 분조의 위상은 동쪽과 북쪽이 약 70° 차이를 보이거나 남해의 경우 다른 일주조의 경우처럼 공간적인 변화가 크지 않다(Fig. 17). 진폭은 남해안이 약 $6\sim 8$ cm, 서해안이 10 cm 이상이다. 남해에서 대부분의 분조들은 위상이 동서 방향으로 변하는데 Q_1 분조는 남북방향으로 변한다(Fig. 18). 진폭은 남해안이 $8\sim 12$ cm이고, 서해안이 $15\sim 22$ cm이다.

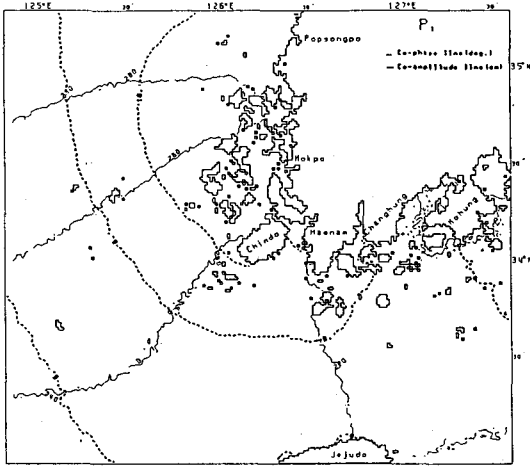


Fig. 17. Computed tidal chart for the P₁ tide.

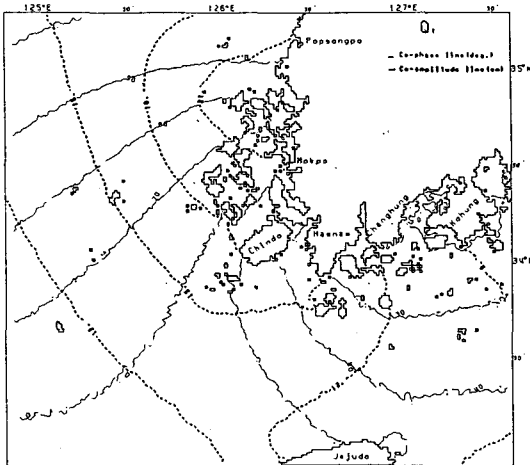


Fig. 18. Computed tidal chart for the Q₁ tide.

3.4 제주해협의 수송량

조류에 의한 제주해협의 수송량을 알아보기 위하여 해남반도에서 제주도에 이르는 단면상에서 주요 4개 분조의 수송량을 계산하였다. M₂분조에 의한 수송량이 가장 크며 최대 수송량은 약 2.5×10⁶ m³/sec이다 (Fig. 19). S₂분조에 의한 수송량은 약 1.0×10⁶ m³/sec이고, O₁분조와 K₁분조에 의한 수송량은 각각 약 0.7×10⁶ m³/sec, 약 0.5×10⁶ m³/sec이다. 분조들의 조합으로 나타낼 수 있는 최대 수송량은 약 4.2×10⁶ m³/sec이다. 이는 제주해협 내 조류를 제외한 해류에 의한 수송량 약 0.5×10⁶ m³/sec보다 약 8배 큰 값으로서 제주해협내 해수의 유동이 조류에 의해 주로

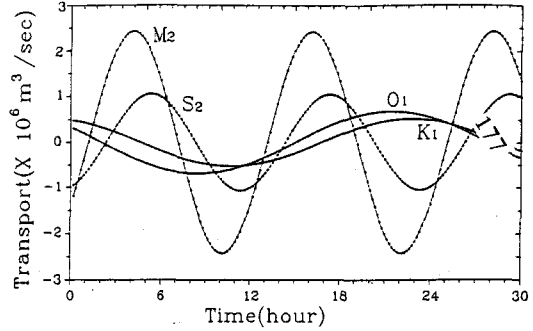


Fig. 19. Transports by tidal currents in the Cheju Strait.

결정됨을 보여준다.

4. 토의 및 결론

한국 남서해역의 주요 8개 분조(M₂, S₂, K₁, O₁, N₂, K₂, P₁, Q₁)를 2차원 조석모형을 수립하여 산정하여, 조석도와 조류타원도를 제시하고 관측치와 비교하였다. 계산치와 관측치의 진폭차는 대부분 수 cm이다. 위상차는 해역별로 달라 남해의 경우 계산치가 5~10° 늦고 서해의 경우 계산치가 오히려 빠르다.

모델결과의 진폭은 M₂분조가 100~170 cm, S₂분조가 20~60 cm이고, K₁분조와 O₁분조는 20~35 cm로 반일주조가 우세한 조석의 형태이다. 전반적인 흐름은 밀물때 제주해협에서 서향하는 해수가 서해에서는 제주도 서쪽에서 북향하는 해수와 함께 북향하는 흐름으로 바뀌고 반대로 썰물때는 서해에서 남향하는 해수의 일부가 제주해협에서 동향하는 흐름으로 바뀐다. 조류의 크기는 반일주조가 수 십 cm/sec이고 일주조가 10 cm/sec 내외이다. 조류타원도를 보면 M₂분조와 S₂분조의 경우 제주해협에서는 직선의 왕복운동을 하며 서해에서는 시계방향의 회전운동을 한다. K₁분조와 O₁분조의 경우는 전반적으로 회전운동을 한다.

제주해협의 조류에 의한 수송량은 최대 4.2×10⁶ m³/sec로 추산되며 이는 해류에 의한 수송량의 약 8배로서 해협내 해수의 유동이 대부분 조류에 의하여 결정됨을 알 수 있다. 추후 제주도와 고흥반도 사이에 놓인 해저 전화선의 전압변화로부터 얻어질 수 있는 제주해협의 수송량과 모델에서 얻어진 수송량을 비교함으로써 제주해협 내 해류의 구조와 변화를 보다

정확하게 이해하는 데 큰 도움이 되리라고 생각된다.

참고문헌

강철중, 1970. 한국 서해 해황의 계절적 변동에 관하여, 국립수산진흥원 연구보고, 8: 9-29.
 강철중, 1974. 한국 남해안 연안수의 계절변동에 관한 연구, 국립수산진흥원 연구보고, 12: 107-121.
 공 영, 1971. 한국 남해안 전선에 관한 연구, 한국해양학회지, 6(1): 25-36.
 김복기, 1979. 제주해협내 해류에 관한 연구, 국립수산진흥원 연구보고, 25: 7-16.
 장경일, 1984. 제주해협내 해류의 구조와 역학, 서울대학교 대학원 석사학위논문, 62pp
 조양기, 김 구, 1994. 여름철 남해 저온수의 특성과 기원, 한국해양학회지, 29(4): 414-421.
 조양기, 김 구, 노홍길, 1995. 여름철 남해의 저염화와 수

송량, 한국해안·해양공학회지, 7(2).
 최병호, 1984. 황해 및 동지나해의 성층·혼합모델, 대한토목학회논문집, 4(2): 125-132.
 해양연구소, 1986. 한국 해역 종합 해양 자원도 작성연구, 황해: 봄, 가을, 겨울철, 523pp.
 Choi, B.H., 1980. A tidal model of the Yellow Sea and the Eastern China Sea, Report 80-02, Korea Ocean Research and Development Institute.
 Flather, R.A. and Heaps, N.S., 1975. Tidal computations for Morecombe Bay, *Geophys. J. R. Soc.*, 42: 489-517.
 Harkema, R. and Hsueh, Y., 1987. A complication of moored current meter data in the Eastern Yellow Sea in January-April 1986, Technical report of Florida Stat. Univ., 147pp.
 Miita, T. and Ogawa, Y., 1984. Tsushima currents measured with current meters and drifts, In: Ocean hydrodynamics of the Japan and East China Seas, edited by T. Ichiye, Elsevier, 67-76.