

아라비아海의 潮汐 Modelling of Tides for the Arabian Sea

노상준* 김동훈* 최병호**

1. 序論

페르시아(아라비아)灣과 紅海를 포함하는 남위 10도이상의 아라비아海의 해양 역학을 이해하기 위한 첫단계로서 전해역을 1/6° (270×246)의 해상도를 가진 조석모형에 의해 주분조의 조석체계를 산정하는 과업을 시작하였다. 이 아라비아海의 몰다이크공화국은 해면에 낮게 노출된 국가로서 지구 온난화에 따른 해면상승에 의해 민감한 지역이다. 아라비아海의 조석모형을 이용한 조석 추정은 위성고도계자료(Topex/Poseidon 및 ERS-1)로 부터 해면변위를 신뢰성있게 추출하기 위해 필수적인 과업으로 우선 M₂ 조석체계로서 부터 시작하여 주요 조석분조의 공간적인 분포를 산정하고자 한다.

2. 潮汐模型

대양조석에 대한 지배방정식은 지구의 곡률 및 편향력을 고려하여 지구좌표계 상에 수립되었으며 동수력학적 비선형 이류항과 자승마찰항, 기조력항을 고려한 수직 적분된 방정식으로 그 형태는 다음과 같다.

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \left[\frac{\partial}{\partial x} (HU) + \frac{\partial}{\partial \phi} (HV \cos \phi) \right] = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{R \cos \phi} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{V}{R \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} (U \cos \phi) - \frac{UV \tan \phi}{R} \\ = 2\omega \sin \phi V - \frac{g}{R \cos \phi} \frac{\partial (\alpha \xi - \beta \xi_0)}{\partial x} - \frac{k_b U (U^2 + V^2)^{1/2}}{H} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{U}{R \cos \phi} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{V}{R} \frac{\partial V}{\partial \phi} + \frac{U^2 \tan \phi}{R} \\ = -2\omega \sin \phi U - \frac{g}{R} \frac{\partial (\alpha \xi - \beta \xi_0)}{\partial \phi} - \frac{k_b V (U^2 + V^2)^{1/2}}{H} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,

t : 時間
 $x\phi$: 經度 및 緯度
 ξ : 靜水面上에 대한 水位
 h : 靜止海面下의 水深
 $H = h + \xi$: 總水深
 R : 地球曲率半徑
 ω : 地球回轉의 角速度
 U, V : 水深平均된 流速成分

$U = \frac{1}{h + \xi} \int_{-h}^{\xi} u(z) dz$
 $V = \frac{1}{h + \xi} \int_{-h}^{\xi} v(z) dz$
 $u(z), v(z)$: 靜止海面下 水深 z 에서의 x, ϕ 方向의 流速成分
 ξ_0 : 平衡潮汐
 α, β : 潮汐포텐셜, 地球潮汐 및 大洋潮汐 附與로 인한 質量再配置에 따른 係數

* 成均館大學校-韓國海洋研究所 學研課程
 ** 成均館大學校 工科大學 土木工學科

모형의 경계에서는 흐름이 없다고 가정하고 남위 10° 와 경도 78°E부근의 개방경계에 대해서 Schwiderski의 1° 격자체계의 지구대양조석자료를 이용하였다. 모형에 있어서 지배적 인자는 기조력, 지구조석과 大洋潮汐附與로 인한 영향이 지배적으로 작용하며 지구가 탄성체라 가정할 때 두 전자의 영향은 평균조석(Equilibrium)에 대해 β_0 로 나타내는 데(Schwiderski 등,1978) 여기서,

$$\beta = 1 + k - h$$

이고, k, h는 중력攪亂 등을 지구조석 相關關係로 표현할 때의 係數로 Love number라 칭하며 일반적으로 모든 분조에 대해 k=0.3, h=0.61을 취하고 있으나 Topex/Poseidon Satellite Tidal Committed가 提案한 Wahr(1981)의 연구자료인 각 분조별 Love number는 Table 1과 같으며 본 연구에서는 이 값들을 이용하였다.

Table 1. Love number and tidal potential amplitudes

Constituent	k	h	H_n
M2	0.302	0.609	0.24408
S2	0.302	0.609	0.11355
N2	0.302	0.609	0.04674
K2	0.302	0.609	0.03090
K1	0.256	0.520	0.14246
O1	0.298	0.603	0.10128
P1	0.287	0.581	0.04713

각 분조에 대한 평균조석(Equilibrium) ξ_{on} 는 다음과 같다.(Cartwright,1978 ; Schwiderski,1978)

$$\begin{aligned} \xi_{on} &= H_n \cdot \cos^2 \phi \cos(\alpha_n t + 2\lambda + V_n) & : \text{半日週潮} \\ &= H_n \cdot \sin 2\phi \cos(\alpha_n t + \lambda + V_n) & : \text{日週潮} \end{aligned}$$

여기서 H_n 는 Table 1에서 주어진 진폭 α_n 는 각속도, V_n 는 천문 상수이며 본 연구에서는 $V_n=0$ 으로 채택하였다.

Ray와 Sanchez(1989)의 연구에 따르면 대양조석의 부여로 인한 질량 재배치에 따른 탄성체 지구의 변형을 誘發하는 대양조석력은 대양조석의 위상과 그 값의 일정 비율 가정함으로써 산정하였고 Foreman 등(1982)은 위성 고도계 관측자료로 부터 조석성분 제거를 위한 연구에서 Ray와 Sanchez(1989)의 연구 결과에서 일주조인 경우는 0.94, 반일주조인 경우는 0.953의 값을 각각 제시함에 따라 모든 분조에 대해 $\alpha=0.946$ 을 취하였는데 본 연구에서도 이 값들을 적용하였다.

상기식 (1)~(3)은 시간 t에서 전 격자체계에 이들 변화 값들을 산정하는 양해법인 유한차분기법을 이용하였는데 Flather와 Heaps(1975)와 Choi(1980)의 해석방법인 매 격자 중심에서의 공간차분과 시간차분 격자체계는 해상도가 높은 1/6°×1/6°체계로 구성하였고 수심은 NOAA의 DBDB5 (Digital Bathymetric Data Base 5 Minute)의 자료를 입력하였다. 본 모형은 반일주조인 M2분조에 대해서 안정한 값을 얻기 위해 실행기간을 동수력학적으로 平衡한 25일간 실행하였다. CFL안정 조건이 안정된 계산을 위한 지침으로 이용되어 Δt 는 약 30초로 산정되었다. 진폭과 위상을 계산하는 데 있어서는 마지막 조석주기의 값을 이용하여 Fourier분석을 통하여 분석처리하였다.

3. 模型의 算定結果

모형에 의해 산정된 반일주조(M_2)의 조석분포는 Schwiderski의 조석도(Fig. 1)와 조석파급 형태와 분포에서 유사한 결과를 얻었다. Fig. 2는 모형에서 산정된 반일주조(M_2)의 조석도를 제시하며 등조석도(등진폭 및 등위상도)는 Schwiderski의 조석도에서 제시되는 무조점의 위치가 잘 재현되었다. 수치모형의 결과로 보아 무조점의 위치는 개방경계조위와 조석포텐셜에 민감함을 알 수 있다. 모형에 의해 산정된 결과와 관측치의 비교를 위해 Fig. 3에서와 같이 홍해, 페르시아灣, 아프리카 북동쪽 연안, 인도 서부 연안으로 4구역으로 나누어 60지점의 관측값과 모형산정값과의 비교가 이루어졌다. 여기서 사용된 관측 값은 IHB(International Hydrographic Bureau) Tidal Constant Database에서 제시하는 값을 사용했다. 홍해와 아프리카 북동부연안의 위상에서 계산값이 관측값보다 좀더 크게 나오는 경향이 있으나 계산값과 관측값의 전반적인 진폭과 위상의 양상이 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 M_2 분조의 조류타원도로 조석분포의 크기와 방향을 제시하고 있다. 페르시아灣과 인도의 서측의 Cambay만과 Kachchh만에서 조류가 강하게 나타나고 있으며 Aden灣에서 紅海로 연결되는 지역에서도 조류가 증가됨을 알 수 있다. Fig. 4에는 조류가 강하게 나타나는 페르시아灣지역과 인도의 서측의 Cambay만과 Kachchh만을 확대하여 조류의 크기와 방향을 제시하고 있다.

Fig. 5는 회전진폭도를 나타내고 있는데 Aden만과 호르므즈海峽 아프리카 동측연안, 인도남측을 제외하고는 아라비아海의 대부분의 지역이 반시계방향의 회전이 우세함을 알 수 있다.

Fig. 6은 반장축도를 나타내며 조류타원도에서 나타난 것과 같이 페르시아灣과 Aden灣에서 紅海로 들어가는 海峽과 인도의 서측해안의 Cambay만에서의 유속이 강하고 그 변화도 큰 것을 알 수 있다. Fig. 7은 조류타원도에서 장축과 단축의 비를 나타내는 것으로 조류의 경향을 나타내고 있다.

4. 結 論

조석수치모형을 통해 수심이 낮아지는 페르시아灣, 紅海지역과 인도 북서측 지역에서 강한 조류를 확인할 수 있었고, 조류의 회전방향과 무조점의 위치등 아라비아海의 조석특성의 파악이 이루어졌는데 조석의 파급형태 및 진폭에서는 기존의 Schwiderski 조석도와 유사한 결과를 제시하나 페르시아灣內에서나 아프리카 북동측연안, 인도 서측연안의 관측지점에서 큰 변화를 보였다. 따라서 본 모형의 개선을 위해서는 천해지역에 있어 세력자체계의 구성과 개방경계에서의 조위와 위상의 개선이 필요하다. 또한 지구 온난화에 따른 수위상승이 미칠 이 지역의 조석특성변화등을 연구함이 필요하며 이렇게 개선된 모형은 위성고도계 해면 관측자료로부터 아라비아海의 역학관계를 연구하는데 이용될 수 있다.

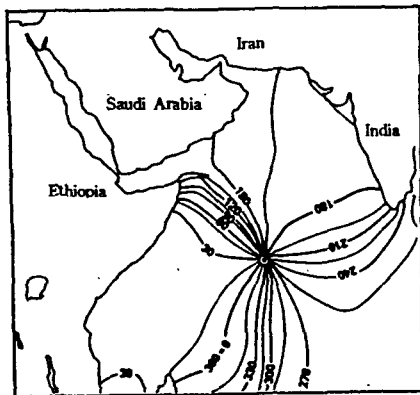
5. 參考 文獻

- Schwiderski, E.W., 1978. Global Ocean Tides, Part No. 2 :the semidiurnal principal lunar tide(M_2), Atlas of Tidal Charts and Maps, NSWC/DL TR Naval Surface Weapons Center, NSWC TR 79-414.
- Choi, B.H., 1980. A Tidal Model of the Yellow sea and the Eastern China Sea, Korea Ocean Research and Development Institute, Report No. 80-82
- Choi, B.H. and Ko, J.S., 1994. Modelling of tides in the Bay of Bengal, Journal of the Korean Society of Coastal Ocean Engineers, Vol. 6, No. 3, pp. 290~297.

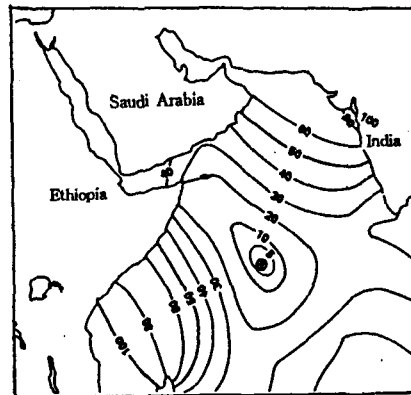
Ko, J.S., 1993. Modelling of Tides in the East Asian Marginal Seas, MSc thesis Department of Civil Engineering, Sung Kyun Kwan University.

Woo, S.B., 1994. Tidal Computation for the Southeastern Waters of Korea, MSc thesis Department of Civil Engineering, Sung Kyun Kwan University

Choi, B.H., 1988. A Tidal Model of the Arabian Gulf. Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 8, No. 2, pp. 67-76.



(a) co-tidal line in degree
(referred to Greenwich)



(b) co-amplitude line in cm

Fig. 1. Tidal charts by Schwiderski

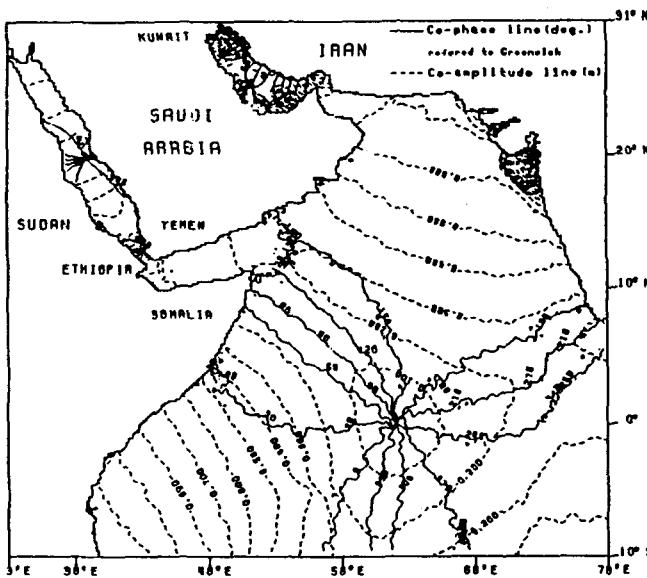


Fig. 2. Computed tidal of semi-diurnal (M_2) tide for Arabian Sea

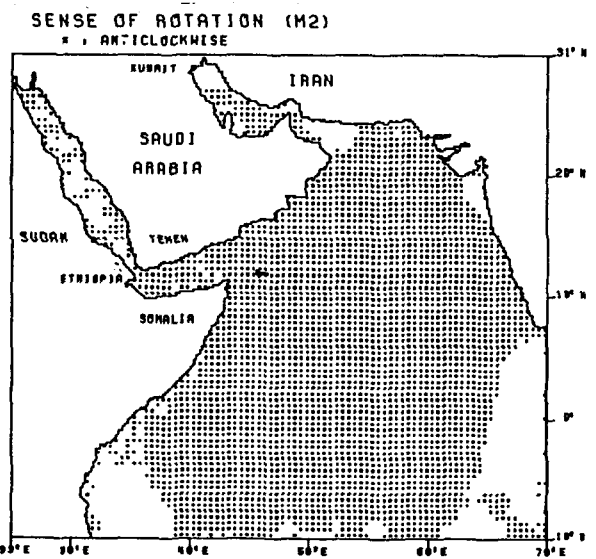
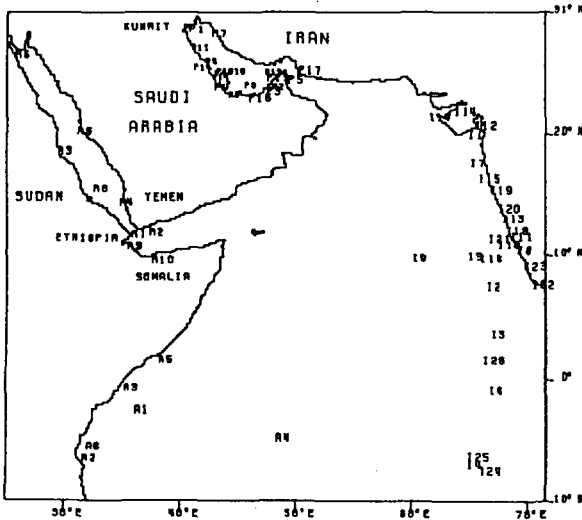


Fig. 5. M_2 Sense of rotation
(* : anticlockwise)

(a) Selected locations for comparing observed data (M₂)



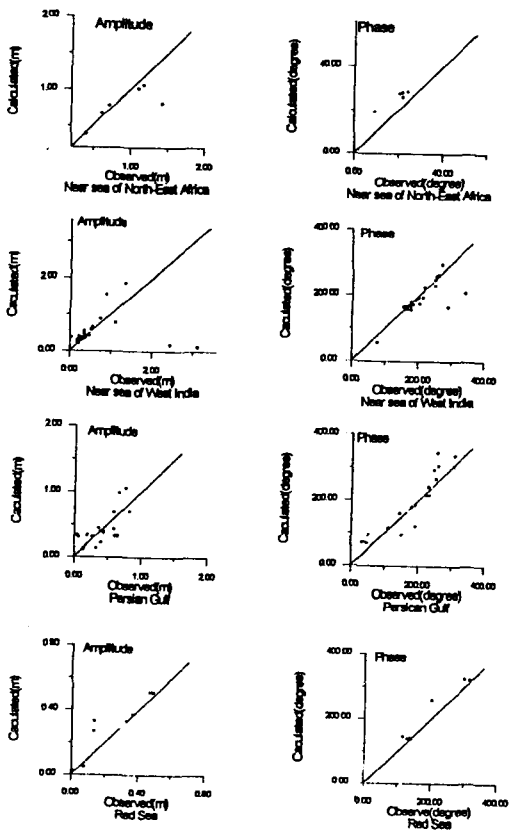
(b) Comparison of tidal measurement & calculations

STATION	LAT (N)	LONG (E)	Amplitude (m)		Phase (degree)		
			obs	cal	obs	cal	
I1	Port Aibert victor	20.95	71.53	0.874	1.530	270	295.04
I2	Mincoy	8.28	73.53	0.263	0.270	177.9	178.09
I3	Male Atoll	4.18	73.50	0.230	0.190	218	233.99
I4	Egmont Island	-6.65	71.37	0.370	0.310	252	258.29
I5	Punta Palmas	10.82	71.83	0.234	0.380	289.4	163.65
I6	Gan	-0.57	73.22	0.293	0.270	248	247.95
I7	Calicut	11.25	75.77	0.317	0.350	158	165.4
I8	La Gualra	10.62	66.93	0.048	0.360	161.7	164.19
I9	Tellicherry	11.75	75.48	0.399	0.390	155	163.05
I10	Quilon	8.88	76.57	0.219	0.230	192	185.81
I11	Bhavnagar	21.80	72.15	3.124	0.130	160	156.01
I12	Bhaktal	13.97	74.53	0.357	0.540	160	156.01
I14	Navlakhi	22.97	70.45	2.475	0.180	78.0	54.83
I14	Jalgarh	17.30	73.23	0.749	0.870	167.8	166.07
I15	Kavaratti	10.57	72.83	0.318	0.340	178.1	167.28
I16	Trombay(Bombay)	18.03	72.95	1.335	1.86	248	229.32
I17	Okha	22.47	69.09	1.117	0.760	204.1	173.71
I18	Manglore	12.85	74.83	0.358	0.460	177.9	167.85
I18	Achra	16.20	73.43	0.562	0.640	108.4	156.36
I20	Karwar	14.80	74.10	0.519	0.580	178	156.14
I21	Nindakara	8.83	76.53	0.176	0.230	192.7	185.81
I22	Trivendrum	8.47	76.93	0.210	0.210	189.4	192.87
I23	Vilinzam	8.37	76.98	0.191	0.210	211.8	192.87
I24	Cochin	9.97	76.25	0.195	0.300	185.4	170.89
I25	Diego Garcia	-7.27	72.38	0.480	0.400	260	262.08
I26	Eagle Island	-6.17	71.37	0.320	0.300	256	257.38

P1	Pao	29.97	48.50	0.824	0.70	247.1	293.44
P2	Port Rashid,Dubai	25.25	55.27	0.442	0.39	233.4	215.92
P3	Abu Zabi	24.48	54.35	0.41	0.22	260	305.23
P4	Berri-Dawhat A.A	27.22	49.72	0.44	0.36	34	70.97
P5	Khasab Bay	26.20	56.25	0.67	0.98	192	185.87
P6	Zellaq	26.05	50.46	0.049	0.33	192	121.15
P7	Kharg Island	29.27	50.33	0.364	0.44	145	161.43
P8	Jazrat Das	21.15	52.88	0.079	0.3	310	336.09
P9	Dalma,Jazrat	24.47	52.32	0.142	0.11	111.2	116.44
P10	Bahrain Apro.B	23.37	50.78	0.63	0.33	60.0	69.14
P11	Ras-al-Khafj	28.42	48.52	0.327	0.13	252.5	205.92
P12	Manamah Anch	26.23	50.68	0.62	0.32	53	94.69
P13	Jazrat Sirri	25.90	54.55	0.39	0.39	230.8	242.38
P14	Ras at Tannura	26.65	50.17	0.595	0.43	39.4	73.88
P15	Jezlat Tumbh	26.27	55.3	0.591	0.69	225.3	215.9
P16	Halat-al-Mubarras	24.45	53.37	0.283	0.31	257	344.77
P17	Little Quoin Island	26.47	56.55	0.768	1.06	181	180.4
P18	Mina Salman	26.23	50.6	0.661	0.32	152.2	94.69

A1	Santana	-2.27	43.58	1.436	0.82	263.7	26.55
A2	Zanzibar	-6.17	39.18	1.186	1.06	20.6	27.58
A3	Chisimale	-0.37	42.55	0.722	0.79	21.9	28.05
A4	Port Victoria	-4.62	55.45	0.404	0.38	9.4	19.21
A5	Mogadiscio	2.02	45.37	0.624	0.67	24.2	28.47
A6	Mesaje Island	-5.23	39.8	1.116	1.01	22.0	25.99

R1	Perim	12.65	43.42	0.365	0.37	136.1	139.03
R2	Aden	12.78	44.98	0.475	0.51	134	140.89
R3	Port Sudan	19.6	37.25	0.009	0.02	201.5	257.88
R4	Kamaran	15.32	42.45	0.328	0.33	300.1	324.13
R5	Jidda	21.33	39.00	0.074	0.05	127.6	139.49
R6	Ashraf	27.78	33.72	0.134	0.33	114.5	145.2
R7	Ijloubt1	11.6	43.13	0.463	0.51	139.2	138.78
R8	Uarmil Island	16.48	40.18	0.132	0.27	315	322.34
R9	Ijloubt2	11.58	43.13	0.485	0.51	136.1	138.78
R10	Berbera	10.43	45.02	0.475	0.51	135	141.19



(c) Observed and computed amplitude and phase in Arabian Sea (M₂)

Fig. 3. Comparison of measurement and calculation (M₂)

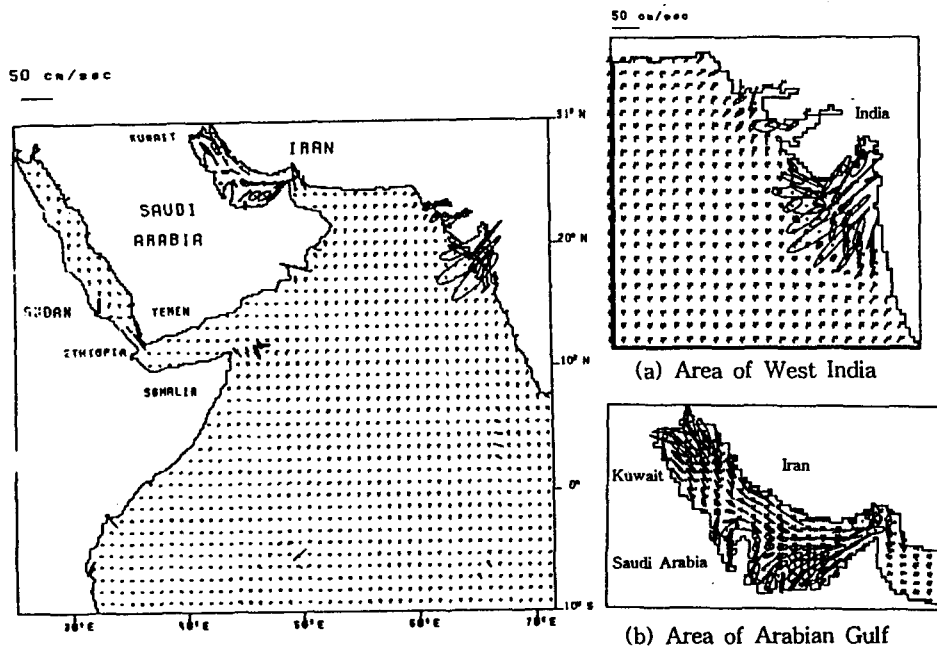


Fig. 4. Computed tidal ellipses of M_2 tide

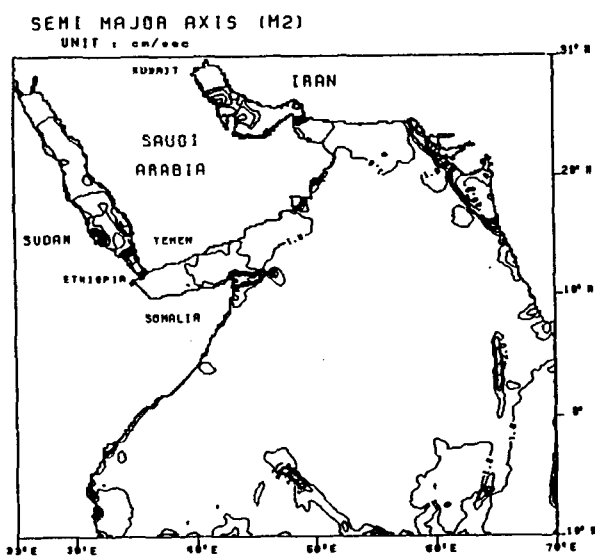


Fig. 6. Semi Major axis (M_2) (cm/sec)

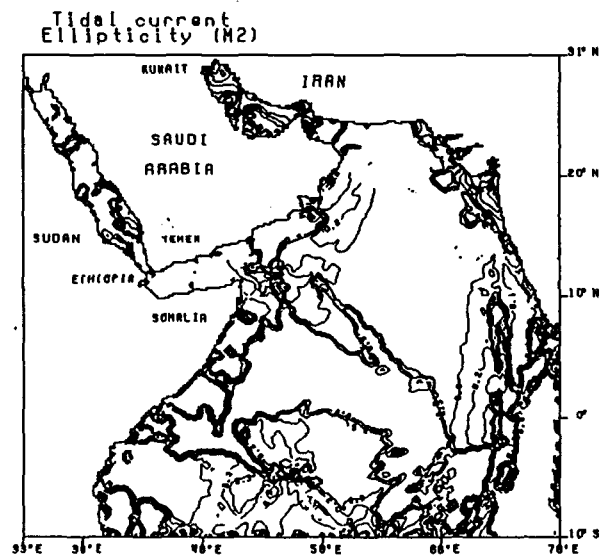


Fig. 7. Tidal current Ellipticity (M_2)