

제주도 함덕주변의 해류특성에 관한 연구

양 성 기

제주대학교 해양토목공학과

A Study on the Characteristics of Circulation around Hamduk in Cheju Island

Sung-Kee Yang

*Department of Ocean Civil Engineering, Cheju National University,
Cheju-do 690-756, Korea*

Circulations around Hamduk in Cheju Island were investigated based on the observed current data from 17 stations including a point mooring station. The data indicated current speed was 30-50 cm/sec and its direction turned out to be mainly west and north-south during the period of spring and neap tide, respectively. CTD data from the mooring station showed that temperature are about 16.5 °C and salinity was about 34.3 psu from bottom to surface. From the figure of CTD time series, it was found that the temperature and the salinity were not affected by tidal current. The velocity of semi-diurnal components were dominated by the north-south current.

To know the general circulation pattern of the tidal Current, numerical experiment has been conducted. Based on shallow water equation, the numerical model used the finite different experiment using finite different method revealed that the circulation forced by M_2 -tide were basically well-corresponded to the observation. The result from the model showed that the strong currents headed from east to west and its velocity was about 20 cm/sec, and when the current approached to Hamduk beach, the direction of current appeared to be changed from east-west to north-south.

Key words : Circulation, Spring tide, Neap tide, Tidal current, Semi-diurnal components, Numerical experiment

서 론

사면이 바다로 둘러싸인 제주도는 해상·기상관측 부위와 같은 역할을 수행할 수 있는 천해의 해역에 위치하고 있다. 이 해역의 주변

에는 각종 이질 수계가 상호 복잡하게 혼합하며 경계를 이루고 있어서 해양학적으로 대단히 중요한 field가 되고 있으며, 해수의 순환 및 유동은 각종 시간 및 공간 스케일을 가지고 장·단기 변동을 하고 있다.

제주도 북안에 위치하고 있는 함덕연안해역은 해안선이 비교적 단순하고 해수욕장이 발달해 있으며, 수심이 약 30 m내외인 천해로서 남해안과 접해 있다. 최근들어 함덕 주변해역의 연안역에서는 해양환경 및 오염의 문제가 대두됨에 따라 주변해역으로 오염물질의 확산과 이에 대한 대비책이 필요한 시점에 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 우선 오염물질의 확산에 직접적인 영향을 주는 해수유통의 구조 및 시간적 변동특성을 파악하는 것이 매우 중요한 일이다. 함덕주변 해역의 해황 및 기상에 관한 연구는 방 동(1990)과 양 동(1992)의 연구가 있으나, 해수유통에 관해서는 지금까지 자세히 연구된 바가 없으며, 더우기 현장관측과 수치모델을 동시에 비교 검토한 연구는 거의 없다.

본 연구에서는 이러한 함덕주변 해역의 해류계를 파악하기 위하여 25시간 동안 표·저층에 유향유속계를 계류시켜 해양관측을 실시하고, 여기서 얻은 해류관측자료를 최소자승법에 의한 조석조화분해법으로 표·저층간의 해류특성을 규명하였다. 또한 이 관측자료에 의해 천해파 모델을 이용한 수치실험을 실행하여 함덕 주변해역의 해수유통구조를 파악하고자 하였다.

해조류 관측과 조석의 조화분해

본 연구해역의 해류특성을 파악하기 위하여 Fig. 1에 나타낸 St. C지점에서 제주대학교 실습선 백경호를 이용하여 1994년 6월 2일에 25시간동안 수심 5 m와 15 m에 전기유향유속계(Alec사)를 설치하여, 유향과 유속을 각각 관측하였다. 관측방법은 조사선을 관측지점에 계류시켜 매 30분 간격으로 25시간동안 표·저층에 대하여 유향과 유속을 측정하였다. 이때 CTD(Sea-bird사)를 사용하여 수심에 대해 연속적으로 수온과 염분의 관측도 동시에 실시되었다. 또한, 조시에 따른 해수의 유통을 창

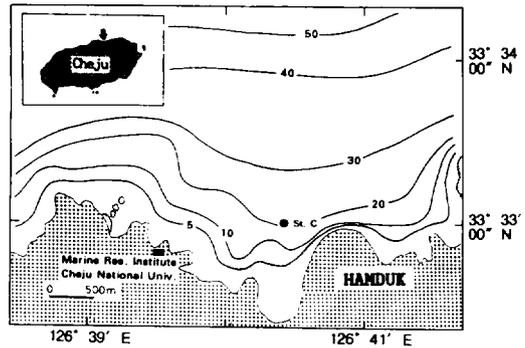


Fig. 1. Bathymetry chart of Hamduk area in Cheju Island(depth in meters).

조류와 낙조류시로 나누어 조사하였다.

최소자승법에 의한 조석의 조화분해

본 연구에서는 현장관측을 통하여 얻어진 유향·유속의 자료를 다음의 최소자승법에 의한 조석조화분해법을 이용하여 해조류의 조석성분을 계산하였다.

$$\epsilon = \sum_{i=1}^n (y(t) - a \cos(\omega t - \phi))^2$$

ϵ 은 실측치와 계산치와의 차이가 되며, 여기서 \cos 함수를 다시 전개하여 정리하면,

$$\epsilon = \sum (y(t) - \alpha \cos \omega t - \beta \sin \omega t)^2$$

여기서,

$$\alpha = a \cos \phi, \beta = a \sin \phi \text{ 이다.}$$

윗식의 오차를 최소로 하기 위해서는 ϵ 를 α 와 β 에 대하여 미분한 값이 0이 되어야 한다. 따라서

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial \alpha} = -2 \sum (y(t) - \alpha \cos \omega t - \beta \sin \omega t) \cos \omega t = 0$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial \beta} = -2 \Sigma (y(t) - \alpha \cos \omega t - \beta \sin \omega t) \sin \omega t = 0$$

윗 식을 matrix로 전개하면 아래와 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} \Sigma \cos^2 \omega t & \Sigma \sin \omega t \cos \omega t \\ \Sigma \sin \omega t \cos \omega t & \Sigma \sin^2 \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma y(t) \cos \omega t \\ \Sigma y(t) \sin \omega t \end{bmatrix}$$

여기서 α 와 β 를 각각 구하고, 다음과 같이 정리하면 구하고자 하는 진폭 a 와 위상 ϕ 를 얻을 수 있다.

$$a = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}$$

$$\phi = \tan^{-1}(\beta/\alpha)$$

이상의 식을 이용하여 관측된 유속을 조화 분해하여 계산한 결과를 Table 1에 나타내었다. Table 1을 보면 일주조보다 반일주조가 강하게 나타나고 있으며, 표층에서 저층으로 갈수록 유속이 뚜렷이 약해 짐을 알 수 있다. 그리고 Table 1에서 잔차류(항류)의 크기를 보면 대체적으로 조석성분보다는 월씬 약하지만

표층의 경우 함덕연안을 향하는 남쪽방향의 항류가 강한 반면, 저층의 경우 서쪽방향의 항류가 강함을 알 수 있다.

여기서 해류, 일주조 및 반일주조의 시간적 변동특성을 자세히 알아보기 위하여 Table 1의 값에 근거하여 이들에 대한 stick vector diagram을 Fig. 2, 3, 4에 각각 나타내었다.

Fig. 2는 관측된 유속을 U와 V성분으로 각각 나누어 표층과 저층에 대하여 나타낸 것이다. 표층이 저층보다 유속이 약 2배 이상으로 강함을 알 수 있고, 반일주조의 성분이 강하게

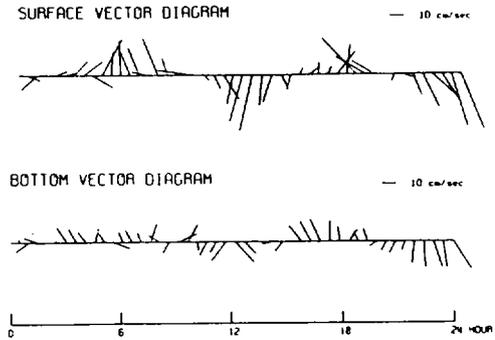


Fig. 2. Stick vector diagram of observed currents at St. C in Hamduk area.

Table 1. Harmonic analysis for the tidal current in Hamduk area

	surface				bottom			
	speed (cm/sec)		dir. (Degree)		speed (cm/sec)		dir. (Degree)	
	U-comp.	V-comp.	U-comp.	V-comp.	U-comp.	V-comp.	U-comp.	V-comp.
semi-diurnal current	5.5	20.0	47.7	176.3	2.5	10.6	297.6	158.15
diurnal current	5.5	5.0	9.25	87.7	1.1	2.6	130.6	147.0
tidal residual current	0.3	-1.5			-1.6	0.1		

나타남을 알 수 있다. Fig. 3은 반일주조의 stick vector diagram을 나타낸 것이다. 유속이 대체로 남북방향의 성분이 강하고 표층이 저층보다 약 2배정도 강함을 알 수 있다. Fig. 4는 일주조의 성분을 diagram으로 나타내었는데 전반적으로 반일주조보다 크기가 약 1/3정도에 지나지 않음을 알 수 있다. 이상의 결과를 살펴보면, 함덕 주변의 유속은 반일주조성분보다 탁월하며, 표층과 저층의 유속차가 상당히 큼을 알 수 있다. 또한 유속의 흐름 방향은 대체로 남북방향이 강함을 알 수 있다.

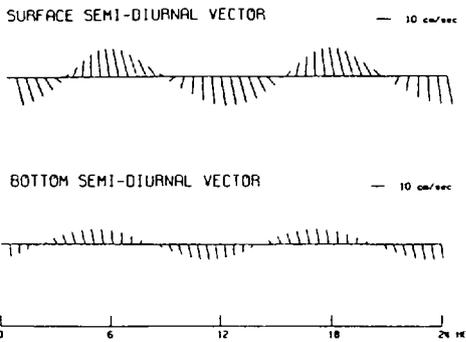


Fig. 3. Stick vector diagram of the semi-diurnal current at St. C in Hamduk area.

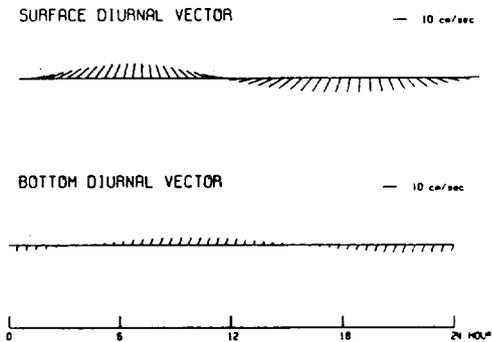


Fig. 4. Stick vector diagram of the diurnal current at St. C in Hamduk area.

해조류의 분포 특성

제주도 북안과 남안 외해의 조류는 외해의

조류는 동서방향의 왕복조로서, 창조류는 해안선과 평행하게 서류하며 낙조류는 동류하고 있다. 북안의 조류는 해안과 평행하게 흐르고, 제주항 북쪽 약 7.4 km부근에서 서류는 저조 후 2~4시간에서 고조 후 2~3시간까지, 동류는 고조 후 2~3시간에서 저조 후 2~3시간까지 흐르며, 이때의 최대 유속은 1.3 kn이다(수로국 발행 해도 (1987, No. 254) 및 한국연안수리지 (1981)). 이 유속은 제주도 남안의 0.5 - 0.8kn보다 강한 편이다.

함덕연안의 해수유동을 조사하기 위하여 대·소조기에 창조류 및 낙조류로 나누어 각각 조사하였다. 사용된 관측계기는 Alec사의 전자유속계(유향, 유속, 수온 등)로서 Fig. 5, 6, 7, 의 해양관측 정점의 표층과 저층에서 조사되었다.

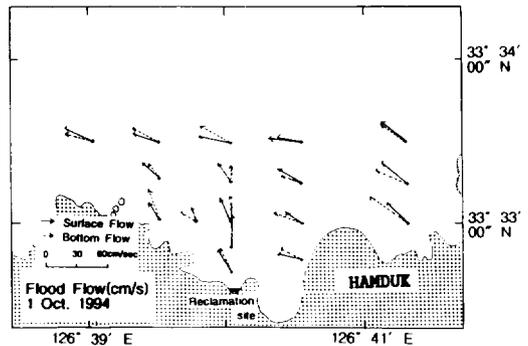


Fig. 5. Observed current vector tide patterns of flood flow during neap tide in Hamduk area.

Fig. 5는 소조기 창조류시의 해수유동을 나타낸 것이다. 해수의 유동은 전반적으로 서향 또는 북서향하고 있으나, 함덕연안의 중앙부해역은 연안에서 외해를 향해 직각 방향으로 유출되고 있음을 알 수 있다. 이때 유속은 함덕연안 해역이 7 - 40 cm/sec이나 외해역은 이보다 강한 30 - 50 cm/sec의 유속을 보이고 있다.

대조기 낙조류시는 함덕에 위치한 제주대학교 해양연구소 앞 해역에서 약한 순환류를

보이고 있으나 대부분 북동류를 나타내고 있다(Fig. 6). 함덕연안의 중앙부해역에서는 연안류로 보이는 흐름이 해안선에 직각방향으로 외해를 향하고 있다. 일부 관측점에서 서쪽을 향하는 현상은 지형적인 효과로 판단된다. 따라서 낙조류시는 함덕해수욕장 부근해역에서부터 수심이 상대적으로 깊은 외해역을 따라 북동류로 유출되고 있음을 알 수 있다. 소조기의 낙조류시(Fig. 7)는 전반적으로 동류를 나타내고 있는데, 이때의 최대 유속은 50-60 cm/sec를 보이고 있다.

함덕연안 부근의 낙조류시 흐름은 연안에서 북동방향으로 유출되고, 외해에서 동류하는 것

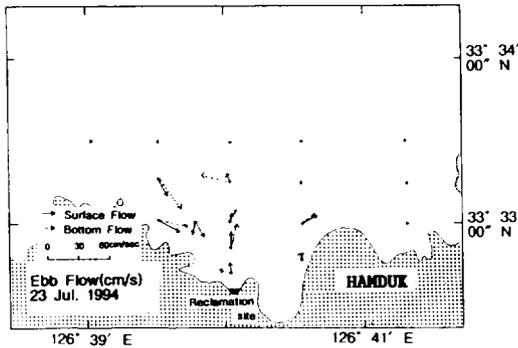


Fig. 6. Observed current vector patterns of ebb flow during spring tide in Hamduk area.

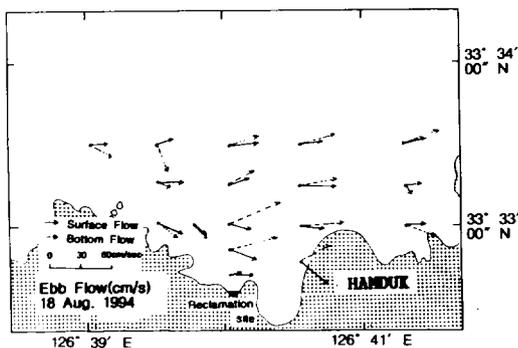


Fig. 7. Observed current vector patterns of ebb flow during neap tide in Hamduk area.

으로 판단된다. 저층에서의 유황도 표층과 거의 같은 양상을 보이고 있다. 다만 표층의 유속보다 연안역 일부 해역의 저층에서는 약간 강하게 나타나고 있다. 창조류는 함덕 외해에서 연안역으로 유입되고, 외해역에서 일부는 다시 서류하고 있는 해수유동을 보이고 있다. 표·저층간 유동의 양상도 거의 같게 나타나며, 경우에 따라서는 표층에서 보다 저층에서 강하게 나타나기도 한다.

CTD 시계열

Fig. 8은 Fig. 1의 St. C점에서 1994년 6월 2일부터 3일까지 매 30분 간격으로 25시간 동안 해조류 관측과 동시에 CTD에 의해 관측된 염분 및 수온의 연직분포를 나타낸 것이다. 관측기관은 소조기에 해당되어 조석의 영향은

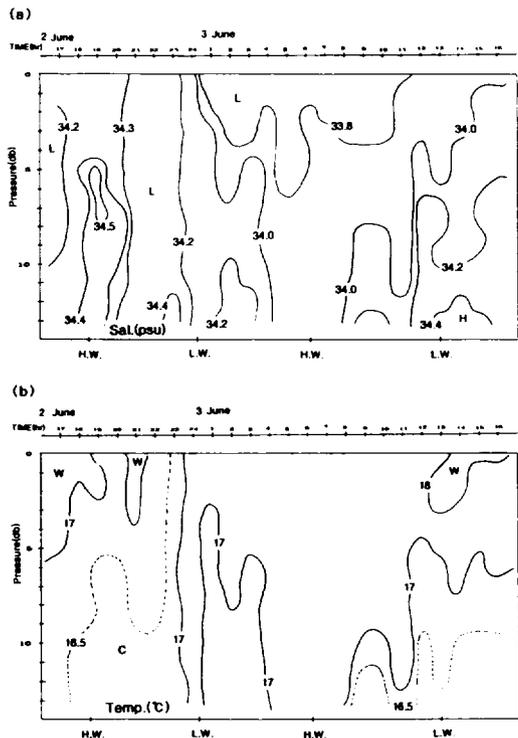


Fig. 8. Salinity(a) and temperature(b) vs for CTD time series St. C in June 1994.

그다지 크지않은 시기이다. 최대 염분값은 창조류시 약 1시간동안 8 m 수심에서 34.5 psu의 core상으로 나타나며, 이때 수온은 16.5 °C를 나타내고 있다. 이 core는 창조류시 저층에서는 34.2 - 34.4 psu의 고염분역이, 창조류시에는 34.0 - 34.4 psu의 고염분역이 나타나고 있다. 이때 낙조류시에는 5 m 이심의 저층에서 16.5 °C이하의 저수온역이 나타나고 있으며, 창조류시에는 상대적인 고수온역이 나타나고 있다.

수 치 모 델

지배방정식

본 연구에서는 관측자료에 근거하여 천해파 모델을 이용한 수치실험을 실행하여 함덕주변의 조석에 의한 전반적인 해수유동의 구조를 파악하였다. 또한, 실험결과는 앞에서 계산된 해류 관측결과와도 비교되었다.

해수유동을 지배하는 운동방정식 및 연속 방정식은 아래와 같고(Heaps, 1978),

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial uU}{\partial x} + \frac{\partial uV}{\partial y} - fV = -gH\frac{\partial \eta}{\partial x} + A_h\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}\right) - \tau\sqrt{u^2 + v^2}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial vU}{\partial x} + \frac{\partial vV}{\partial y} + fU = -gH\frac{\partial \eta}{\partial y} + A_h\left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2}\right) - \tau\sqrt{u^2 + v^2}$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0$$

U, V 는

$$U = \int_{-h}^{\zeta} u dz, \quad V = \int_{-h}^{\zeta} v dz$$

이며, 각 변수 및 계수의 정의는 다음과 같다.

t : 시간

x, y : 직교 좌표계 상에서 각 동쪽 및 북쪽 방향의 좌표

u, v : 연직적으로 평균된 x 및 y 방향의 유속

h : 평균해면으로 부터의 수심

ζ : 평균해면으로부터 연직상방의 해면 변위

H : 수심 (= $h + \zeta$)

ϕ : 모델 적용해역의 기준위도(34 ° N)

개방경계조건은 Hearn and Holloway(1990)에 의한 방사조건을 사용했다. 즉 개방경계에서 만의 방향으로 직각인 유속 u 는

$$\frac{u}{\sqrt{gH}} = \frac{\zeta}{H}$$

으로 나타낸다.

모델해양

Fig. 9는 본 수치모델계산을 위하여 사용된 수심도를 나타내고 있고, 격자 각각의 길이는 250 m이다. 모델의 수심도를 살펴보면, Fig. 1의 수심 분포와 같이 등심선이 해안선에 비교적 평행하여 함덕에서 외양으로 갈 수록 점차 깊어지는 경향을 나타내고 있다. 따라서 조류

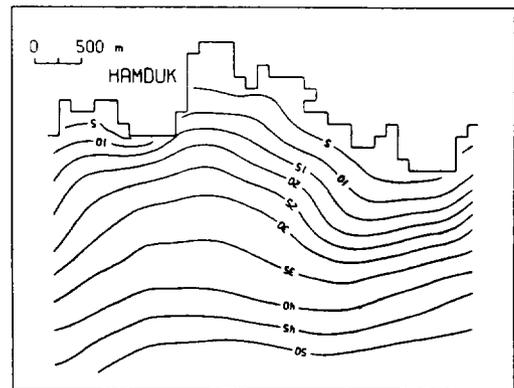


Fig. 9. Bathymetry chart for numerical computation(depth in meters)

의 흐름도 주로 해안선에 평행하고 육상에 가까워 질수록 연직방향의 흐름이 강해질 것으로 사료된다.

조류타원도

수치실험결과와 관측결과를 비교해 보기 위해 반일주조성분에 대한 유속과 위상을 구하여 Fig. 10과 같이 조류타원도로 나타내었다. 이 그림을 보면 계산치는 정북에서 약 30° 정도 오른쪽으로 기울어진 반면 관측치는 정북에서 약 5° 정도 왼쪽으로 기울어져 있어서, 유속 관측치와 계산치의 위상차는 약 35° 정도 차이남을 알 수 있다. 유속의 차이를 살펴보면 관측치는 약 20 cm/sec인 반면, 계산치는 15 cm/sec로 비교적 약하게 나타났다. 전반적으로 계산치가 관측치보다 약간 작게 나타났지만, 관측치와 계산치가 거의 비슷한 경향을 나타내고 있다. 따라서 본 모델은 함덕 주변해역 유속의 변화를 잘 나타내 주고 있는 것으로 사료된다.

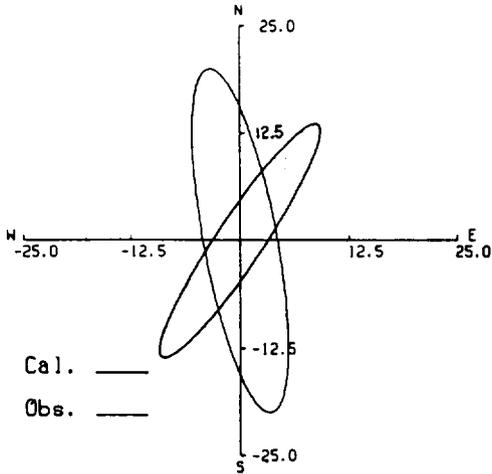


Fig. 10. Comparison of the tidal current ellipses between computed and observed results.

유속분포도

Fig. 11은 창조류시 최강 유속의 분포도를 나타내고 있다. 최강 유속의 경우 함덕의 동쪽

($L_w + 3 \text{ hr}$)

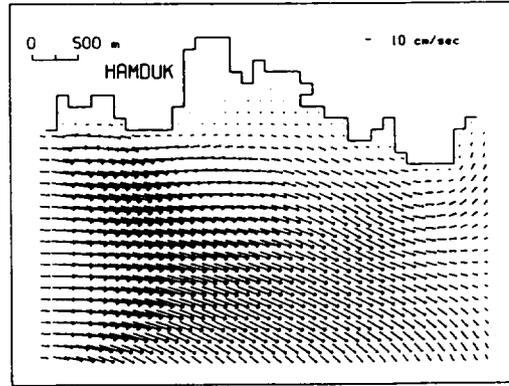


Fig. 11. Computed M_2 maximum flood current in Hamduk area.

($L_w + 6 \text{ hr}$)

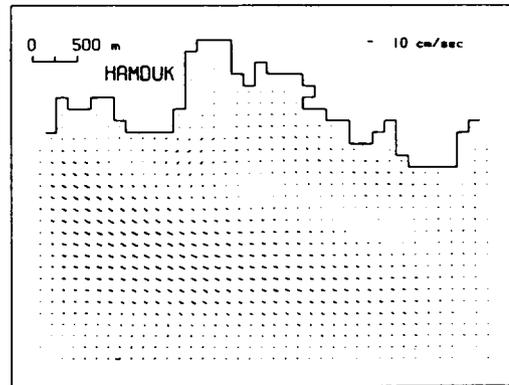


Fig. 12. Computed M_2 current during the high water in Hamduk area.

에서 서쪽으로 흐름이 약 20 cm/sec로 강하게 나타남을 알 수 있다. 그리고 서쪽으로 갈수록 흐름이 약해지는 경향이 있는데, 이는 동쪽에서 유입된 해수가 북쪽과 남쪽으로 동시에 분산되기 때문인 것으로 사료된다. Fig. 12는 만조위때의 유속분포로 거의 흐름이 정지되어 있음을 알 수 있다. Fig. 13은 낙조류 최강 유속을 나타내고 있으며, 흐름이 창조류 때와는 반대로 서쪽에서 동쪽으로 흘러 나감을 알 수 있고, 창조류때와 방향만 거의 반대방향이고

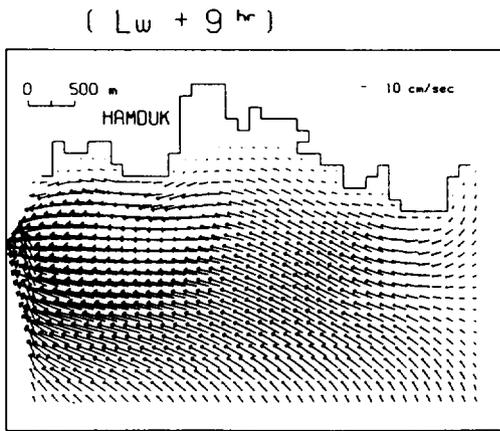


Fig. 13. Computed M_2 maximum ebb current in Hamduk area.

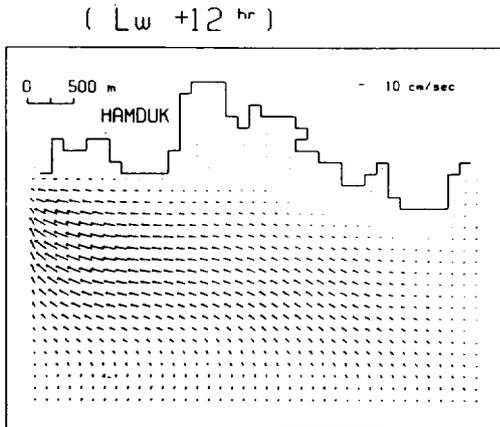


Fig. 14. Computed M_2 current during the low water in Hamduk area.

흐름의 크기는 비슷하다. Fig. 14는 저조위때의 유속분포를 나타내고 있다. 이 경우 해면이 가장 낮아 있을때이며, 흐름이 거의 정지되어 있음을 알 수 있다. 이상의 결과를 보면 함덕 외양으로 갈수록 동-서 방향의 유속이 탁월한 반면 육지쪽으로 가까워 질수록 유속은 약하지만 남북방향의 유속이 발달함을 알 수 있다.

요약 및 결론

함덕주변해역 해류의 특성을 알아 보기 위

하여 표층과 저층의 해류관측과 천해파 모델을 이용한 수치실험을 수행하였다. 그 결과 함덕주변의 해류는 조석류가 탁월하며, 조석성분 중에서도 특히 반일주조 성분이 탁월함을 알 수 있었다. 즉 반일주조는 약 20 cm/sec에 달하는 반면, 일주조는 약 8cm/sec로 반일주조가 일주조보다 약 3배 정도 큼을 알 수 있었다. 또한, 잔차류는 표·저층간의 흐름방향이 다르고 유속의 크기는 2 cm/sec미만으로 약함을 알 수 있었다.

수치실험의 결과 전반적으로 함덕주변의 조석류의 변동은 주로 동서방향의 흐름이 강하게 나타났으나, 함덕해안으로 올수록 흐름이 강해짐을 알 수 있었다. 이러한 현상은 현장관측 결과에서도 잘 나타내주고 있다. 전반적인 유속분포는 거의 10 - 20 cm/sec의 크기로 나타났다. 그리고 동쪽으로의 유속이 서쪽으로의 유속보다 강하게 나타났는데, 이는 동쪽에서 서쪽으로 해수가 흐름경우 서쪽과 남쪽으로 흐름이 동시에 빠져 나가는 반면, 서쪽에서 동쪽으로 흐를때는 북쪽에서 유입되는 해수와 서쪽에서 유입된 해수가 동시에 동쪽으로 빠져나가기 때문인 것으로 사료된다.

참고 문헌

- 방익찬, 노홍길, 김유근, 김태희, 1990. 제주도 북방 함덕해역에서의 기상과 해황의 관계. 제주대학교 논문집, 30:31-52.
- 양성기, 노홍길, 손태준, 박원배, 1992. 제주도 연안해역의 해황 및 기상이 어획생산량의 변동에 미치는 영향. 제주대학교 논문집, 34:51-76.
- Chapman, D. C., 1985. Numerical treatment of cross-shelf open boundaries in a arotropic coastal ocean model, J. phys. Oceanogr., 16:1060-1075.
- Heaps, N. S. 7 1978. Linearized vertically-integrated equations for residual circulation

제주도 함덕주변의 해류특성에 관한 연구

in coastal seas. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Jahrgang 31, Heft 5:147-169.
Hearn, C. J., and P. E. Holloway., 1990 A three-dimensional barotropic model of the

response of the Australian North West Shelf to tropical cyclones. J. Phys. Oceanogr., 20:60-80