

NOAA衛星의 SST資料를 利用한 時間平均流速의 推定 Estimation of Time Mean Velocities from NOAA Satellite SST Data

이태신* · 정종률*

Tae Shin Lee* and Jong Yul Chung*

要 旨 : 대한해협 해역에 대한 AVHRR/SST를 이용하여 표층의 시간평균 유속을 추정하였다. 자료의 시간간격은 조석주기와 근사하며 조류성분이 제거될 수 있는가를 조사하였다. 유속을 추정하는 방법은 역행렬법을 사용하였으며 추정한 결과를 조류성분을 제거한 ADCP자료 및 Odamaki(1989)의 관측결과와 비교하였다. 분석결과에 의하면 조류운동이 있는 해역에 대한 AVHRR/SST 자료로부터 시간평균유속을 추정하는 경우에 조류성분을 제거할 수 있는 가능성이 있는 것으로 나타났다.

Abstract : A time mean surface velocity field was estimated from AVHRR/SST in the Korea Strait. Time duration of SST data set was not different from tidal period and tidal elimination was investigated. The velocity field was estimated by inverse method and compared with results of ADCP observation and results of Odamaki(1989). In accordance with results, tidal component was eliminated partially in case that there were a little difference between total time interval of SST data set and tidal period.

1. 서 론

NOAA 위성의 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)자료를 이용하여 산출한 SST(Sea Surface Temperature)를 추적자료하여 해수표층의 유속을 추정하는 연구는 Vastano와 Border(1984)가 Oyashio전선부근의 해류를 형태추적법으로 추정한 이후로 Emery 등(1986)이 시간 연속인 SST영상에서 상관계수를 계산하여 최대우도방향으로 유속을 추정한 최대상관계수법과 해수흐름과 관련된 물리법칙을 이용하여 유속을 추정한 역행렬법(Kelly, 1989)으로 발전하였다.

최대상관계수법은 Emery이후로 회전유체에 대하여 수행한 연구(Kamachi, 1989)와 확산의 효과와 열속(heat flux)을 고려한 연구(Wahl과 Simpson, 1990) 등이 있으며 이방법은 영상자료처리의 일부로서 SST자료의 취득과 동시에 자동처리를 목적으로 개발되었으며 유속추정까지 처리속도가 빠른 반면에 상관계수의 하한치를 설정해야하는 불확정성이 있다(Kubota와 Shirota, 1993) 역행렬법은 열방정식의 이

류항에 있는 이류속도를 계산하는 방법으로서 산출한 SST에 포함된 오류에 기인하여 발생될 수 있는 추정유속의 오류를 최소화하기 위하여 제한요소로서 가중치가 포함된 발산최소화, 운동에너지최소화, 와도최소화를 이용하였다. Kelly(1989) 이후로 역행렬법은 유속에 대한 적합함수(fitting function)를 개선한 연구(Kelly와 Strub, 1992)와 가중치의 크기를 설정하는 기준에 대한 연구(Lee, 1994) 등이 있다.

NOAA위성은 극궤도위성으로서 상승궤도(ascending mode)와 하강궤도(descending mode)에 따라 한반도 주변해역에 대하여 1일 2회의 수신이 가능하므로 현재운용되고 있는 NOAA 9, 10, 11, 12, 14호의 AVHRR자료를 수신하면 1일 약 10개의 SST영상을 산출할 수 있다. 이와같은 자료들은 시간간격이 약 1~5시간으로서 전체 자료를 이용하는 경우에 전체 시간동안의 평균유속을 추정할 수 있다.

본 연구에서는 대한 해협해역에 대한 6개의 SST영상을 이용하여 역행렬법에 의하여 표층의 시간 평균유속을 추정하였다. 역행렬법의 방정식체계는 열방정식과 가중치가 포함된 발산최소화의 제한요소로

*서울대학교 해양연구소 (Research Institute of Oceanography, Seoul National University, Seoul, Korea)

구성되며 열방정식의 오류항은 SST자료에 의하여 수온경사를 알 수 있으므로 선형화된다. 분석결과에 의하면 대한해협 의 동수도와 서수로를 통하여 동해로 유입되는 해류형태와 쓰시마섬 북동해역의 남서반류가 나타났으며 이와같은 결과를 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)자료 및 기존자료와 비교하였다.

2. 자료 및 방법

2.1 자료

AVHRR자료는 서울대학교 해양연구소에 설치되어 있는 TeraScan체계를 이용하여 수신하였으며 SST산출에 이용된 자료는 Table 1과 같다.

SST는 다음과 같은 다중채널분석법(Sea Space, 1993)을 이용하여 산출하였다.

$$SST = C_1T_4 + C_2(T_4 - T_5) + C_3(T_4 - T_5)(\sec\theta - 1) + C_4(\sec\theta - 1) + C_5$$

여기에서 계수 C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 는 Table 2과 같고 θ 는 주사각도이며 T_4 와 T_5 는 각각 AVHRR채널 4, 5의 휘도온도(brightness temperature)이다.

Table 1. Observing time of satellite images

Data	Time	Satellite	Data	Time	Satellite
B	1992.11.17 04:23	NOAA-11	C	1992.11.17 07:32	NOAA-10
D	11.17 15:47	NOAA-11	E	11.17 18:35	NOAA-10
F	11.18 04:11	NOAA-11	G	11.18 07:08	NOAA-10

Table 2. Coefficients of MCSST algorithm

Satellite	Time	C1	C2	C3	C4	C5
NOAA-10	Day	1.1	0	0	0	0
	Night	1.1	0	0	0	0
NOAA-11	Day	1.01345	2.659762	0.526548	0	-0.918
	Night	1.052	2.397089	0.959766	0	-1.316

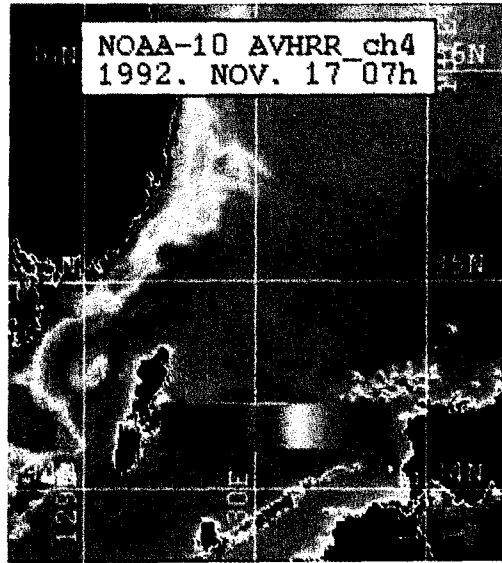
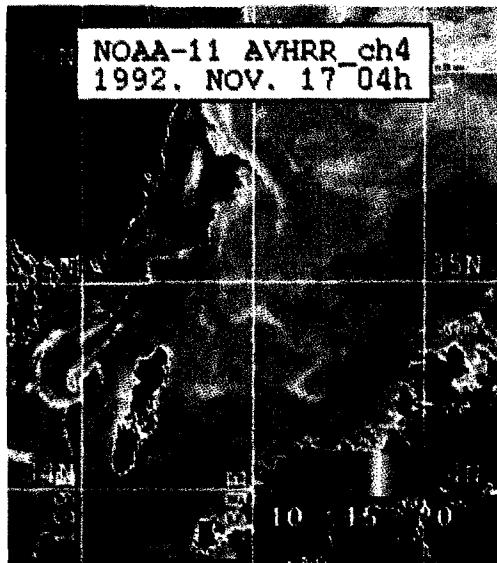


Fig. 1. SST image of the Korea Strait.

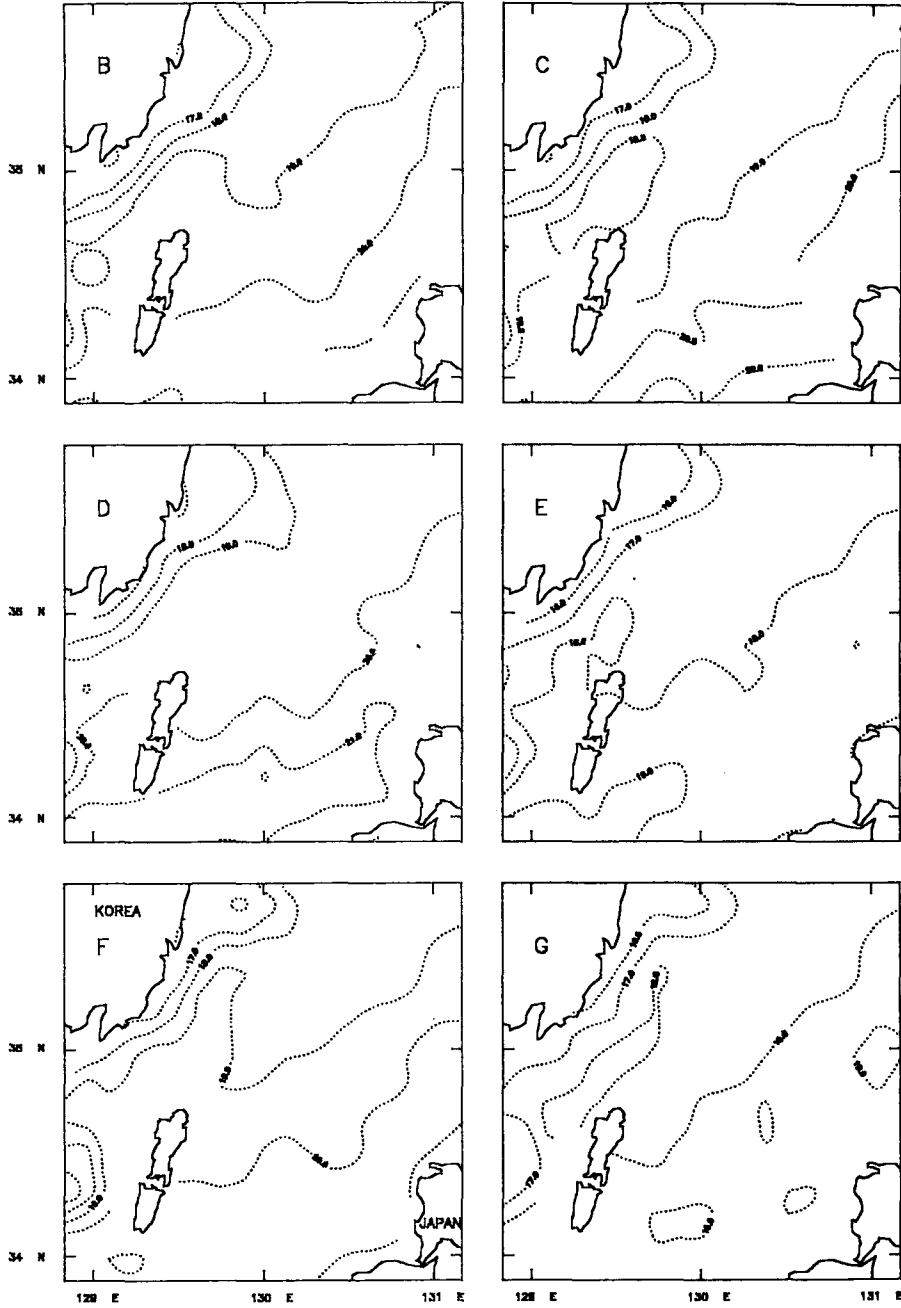


Fig. 2. SST map of data set.

Fig. 1은 분석한 SST영상자료 B와 C이며 Fig. 2는 자료 B~G의 SST분포이다.

2.2 방법

방정식 체계는 다음과 같이 열방정식과 가중치가

있는 발산 최소화이다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T = \kappa \nabla^2 T + Q_f \quad (1)$$

$$\omega \nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (2)$$

여기에서 \mathbf{u} 는 이류속도, κ 는 온도 확산계수, Q_f 는 열

속)이며, ω 는 가중치이다.

열방정식에서 유속의 크기를 10^{-1}ms^{-1} 로 하고 연안지역에서 나타나는 열전선의 수온경사의 크기를 $1 \text{ k}/10 \text{ km}$ 로 하면(Fedorov, 1983) 이류항의 크기는 $O[10^{-5}]$ 이고 열확산계수를 $10^2 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 로 하면 확산항은 $O[10^{-6}]$ 이 된다. 따라서 확산항의 상대적으로 무시 가능하다. 또한 해수표면에서 열속을 결정하는 주요한 요인인 기상변화의 규모는 해수운동의 규모보다 크므로 연구해역내($O[10^6]$)에서는 열속이 일정한 것으로 가정하였다. 이와같은 가정에 따라 열속은 연속된 SST영상자료의 공간평균온도의 차이에 의하여 산출할 수 있으며 staggered 격자체계에서 식 (1), (2)는 다음과 같이 차분식(trapezoidal implicit scheme)으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} & [(U_{i,j,n+1} + U_{i+1,j,n+1})/2] \times [(T_{i+1,j,n+1} - T_{i-1,j,n+1} \\ & + T_{i+1,j,n} - T_{i-1,j,n})/(4t)] + [(V_{i,j+1,n+1} + V_{i,j-1,n+1})/2] \\ & \times [(T_{i,j+1,n+1} - T_{i,j-1,n+1} + T_{i,j+1,n} - T_{i,j-1,n})/(4t)] \\ & = -[(T_{i,j,n+1} - T_{i,j,n})/2t] + Q_D \end{aligned} \quad (3)$$

$$\omega[(U_{ij} - U_{i-1j})/l + (V_{ij} - V_{ij-1})/l] = 0 \quad (4)$$

여기에서 i, j 는 격자상의 격자점이며 n, l 은 각각 시간과 격자크기이고 Q_D 는 SST평균의 차이이다.

위 식은 격자화된 연구해역의 모든 격자에서 성립되며 임의의 격자에서 6개의 SST영상자료로부터 5개의 선형화된 열방정식과 1개의 연속방정식이 성립된다. 이와같이 모든 격자에서 성립되는 선형식의 체계는 연구해역의 유속장에 대하여 $G\mathbf{m} = \mathbf{d}$ 의 행렬식 형태가 되며 G 는 SST의 공간분포에서 계산할 수 있는 계수행렬이고 \mathbf{m} 은 미지수 속도벡터이며 \mathbf{d} 는 SST의 시간변화에서 계산할 수 있는 자료벡터이다. 이와같이 구성되는 행렬식은 과결정체계(overdetermined)가 되며 IMSL package(1989)의 SVD(Singular Value Decomposition)로 해를 구했다.

본 연구에서는 미지수벡터 \mathbf{m} 에 해당하는 속도 U 를 다음과 같이 Fourier 급수로 전개하여 전개계수를 미지수로 하였다.

$$\begin{aligned} U(x,y) = \sum [& A_{ki} \cos(k\pi x/L) \times \cos(l\pi y/L) + B_{ki} \sin(k\pi x/L) \\ & \times \cos(l\pi y/L) + C_{ki} \cos(k\pi x/L) \times \sin(l\pi y/L) \\ & + D_{ki} \sin(k\pi x/L) \times \sin(l\pi y/L)] \end{aligned} \quad (5)$$

여기에서 L 은 연구해역의 크기이며 V 속도도 위와

같이 전개했다.

가중치 ω 의 의미는 역행렬법이 최소자승법을 기본으로 하고 있으므로 유속장을 추정하는 과정에서 열방정식에 대한 연속방정식의 상대적인 중요성을 나타내는 추정요소의 의미가 있으며 식 (3), (4)로 구성되는 체계에는 $O[10^{-1}]$ 의 크기에서 유속을 가장 잘 추정할 수 있는 것으로 알려져 있다(Lee, 1994).

3. 결과 및 토의

Table 1의 자료를 이용하여 대한해협해역의 시간평균유속을 추정한 결과는 Fig. 3와 같다. 행렬식은 $5 \times (N-2)^2$ ($N=21$, 격자수)의 식이 구성되나 육지와 구름이 있는 부분을 제외하면 1209개가 되며 미지수는 Fourier급수를 5차 전개한 162개의 계수이다. 역행렬법으로 계수를 계산하고 다시 유속장을 산출하였다. Fig. 4의 유속장은 전체 시간간격이 23시간 48분인 자료 BCDEF와 시간간격이 23시간 36분인 CDEFG에서 각각 추정한 유속장을 평균한 것이다. 이와같은 시간간격이 M_2 와 O_1 의 주기와 일치하지는 않으나 S_2 와 K_1 의 주기에는 근사하므로 Fig. 3의 시간평균유속장에는 일주조와 반일주조의 일부성분이 제거된 것으로 사료된다. AVHRR/SST자료를 이용하여 추정한 유속장은 동시성과 광역성이 유지되므로 결과의 검증은 SST자료가 취득된 시간동안 여러지

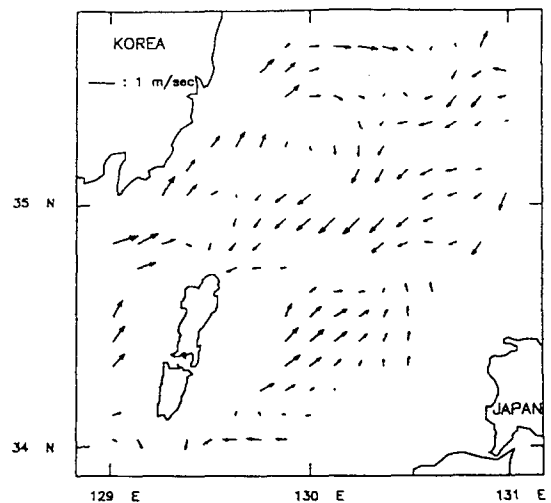


Fig. 3. Time mean surface velocity field (estimated) (data BCDEF and CDEFG).

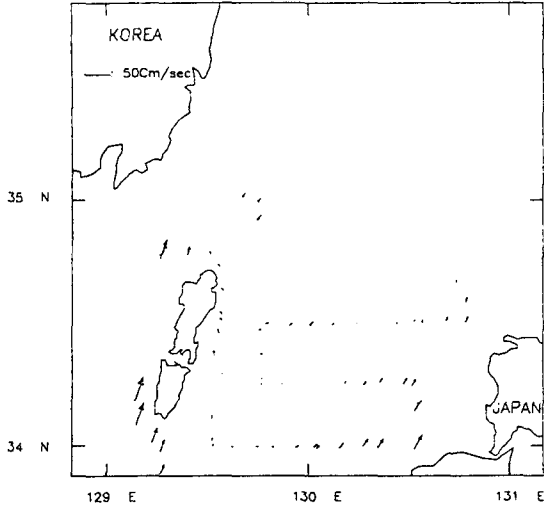


Fig. 4. Mean velocity based on ADCP observation.

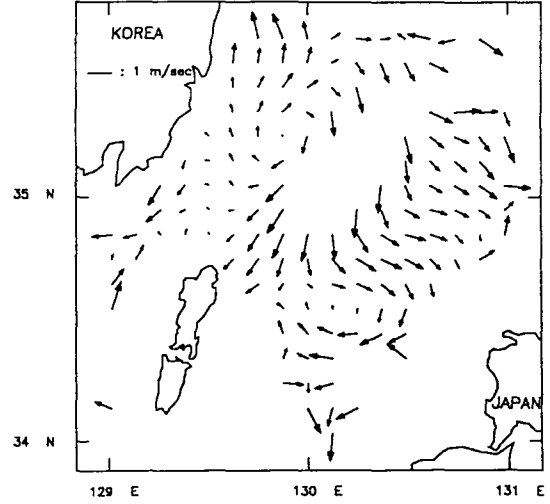


Fig. 6. Estimated velocity field (data CD). (1~9 hours after high tide).

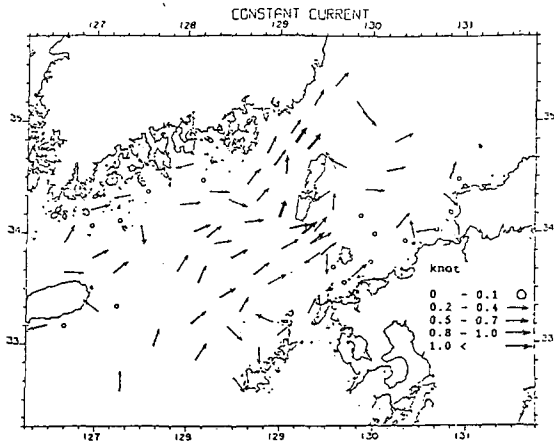


Fig. 5. Mean current in the Korea Strait (Odamacki, 1989).

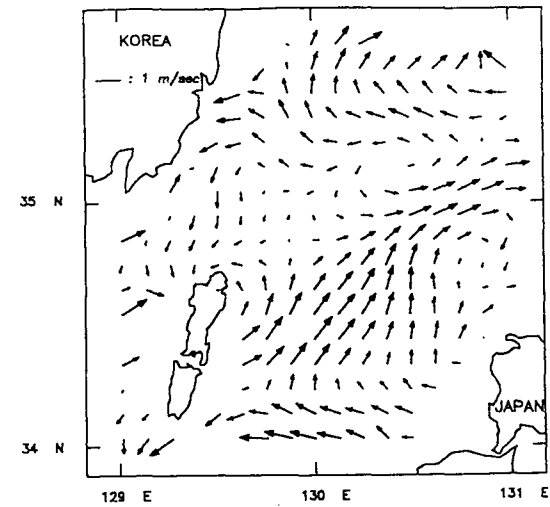


Fig. 7. Estimated velocity field (data DE). (1~9 hours after high tide).

점에서 이루어진 현장관측자료에 의하여 가능하다. Fig. 4는 1992년 11월 17일~11월 19일에 대한해협에서 관측한(KORDI, 1993) ADCP자료를 이용하여 Candela 등(1992)이 제시한 방법에 따라 M_2 성분을 제거한 결과(부록참조)이며 Fig. 5는 Odamaki(1989)가 제시한 결과이다.

관측 및 기존자료와 추정유속자료의 정량적 비교는 각 자료의 한계로 할 수 없으나 각각의 유속장에는 유사성이 있다. 즉, Fig. 3, 4, 5에 공통적으로 서수도를 따라 북동방향으로 흐르는 흐름이 있고 추정유속장과 Odamaki의 자료에는 이 흐름이 한국연안을 따라 지속되고 35°20'N~35°30'N 사이에서 연안으로부터

멀어지는 것으로 나타났다. 동수로의 흐름은 세 자료에서 뚜렷한 유사성이 나타나지 않으나 쓰시마섬 북동해역에는 비교자료와 추정유속장에서 남서방향의 흐름이 공통적으로 나타났다. 이와같은 가시적인 분석결과는 조류성분의 일부가 제거되었음을 나타내는 것으로 추정된다. 추정의 근거는 역행렬법이 최소자승법을 기본으로 하고 있는 점으로서 SST자료의 일부를 이용하여 추정한 유속장이 Fig. 6과 Fig. 7에 나타난 바와같이 연구해역에서 창, 낙조류의 분포를

나타내는 반면에 전체자료를 이용한 경우에는 각각 연속자료에서 추정되는 유속의 평균유속을 나타내게 된다.

부 록

n개의 분조로 이루어진 조류는 다음과 같이 표시 된다.

$$U(x,y,t) = U_0(x,y) + \sum [a(x,y) \times \cos(\omega t - kx - ly - \theta)] \quad (6)$$

이것을 다시쓰면

$$U(x,y,t) = U_0(x,y) + \sum [B_r(x,y) \times \cos(\omega t) + C_r(x,y) \times \sin(\omega t)] \quad (7)$$

따라서 최소자승법에 의해 조화분해를 하면

$$\partial \mu^2 / \partial U_0 = 0, \quad \partial \mu^2 / \partial B_s = 0, \quad \partial \mu^2 / \partial C_s = 0$$

여기에서 $\mu = [U(x,y,t) - U'(s,y,t)]^2 \quad s = 1, 2, 3, \dots, k$

U' 은 관측치(부록 Fig. 8)이며 이것을 만족하는 미지수 U_0, B_r, C_r 을 구하는 것이다.

위식은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} U_0 &= \sum [B_r \cos(\omega t)] = U' \\ U_0 \cos(\omega t) + \sum B_r \cos(\omega t) \times \cos(\omega t) &= U' \\ \sum C_r \sin(\omega t) \times \sin(\omega t) &= U' \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (8)$$

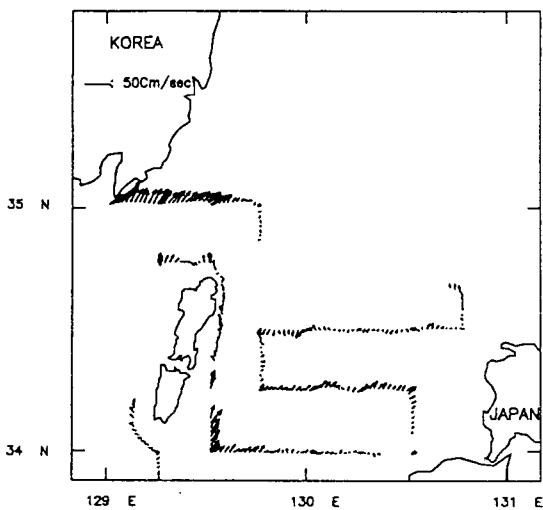


Fig. 8. ADCP results in the Korea Strait.

이와같은 방정식이 매 관측시마다 만들어지며 체계는 미지수가 방정식보다 많은 미결정체계가 된다. 즉 4개분조를 조화분해하는 경우에는 매 관측시마다 9개의 미지수가 만들어지며 식은 3개가 만들어진다. 그러나 $B_r(x,y)$ 와 $C_r(x,y)$ 를 임의의 함수로 하여 그 계수를 미지수로 하면 과결정체계로 할 수 있다.

이와같은 임의의 함수에 의해 결정되는 조화상수 $H(x,y) = (B_r^2(x,y) + C_r^2(x,y))^{1/2}$, $\delta(x,y) = \arctan(B_r/C_r)$ 를 기준에 알려져 있는 대상해역의 조류에 적합시키는 제한요소를 쓸 수 있다. B_r 과 C_r 을 (x,y) 의 제곱 형태인 다항식으로 표시하면

$$B_r(x,y) = \sum_{j=0}^{DP} \sum_{k=0}^j a_{jk} \times x^j \times y^k$$

여기에서 DP는 다항식의 차수이다. $C_r(x,y)$ 도 같은 방법으로 전개하여 식 (8)에 대입하며 식 (8)은 다항식의 계수를 미지수 벡터로 하는 과결정체계의 행렬식으로 표시할 수 있다. 여기에서는 M_2 분조만 조화분해 하였다. 대한해협의 조류도에 대해서는 알려진 것이 없으므로 Nishida(1980)에 의해 보고된 조석도를 근거로 하여 무조위점이 나타나는(35°30'N, 131°10'E)을 다항식의 원점으로 하였다.

참고문헌

KORDI, 1993. 한국해역 종합 해양자원도 작성연구: 대한해협(2차년도)이태신, 1994.
 NOAA/AVHRR 자료를이용한 표층이류 추정. 박사학위논문, 서울대학교.
 Candela, J., Beardsley, R.C. and Limeburner, R., 1992. Separation of tidal current in ship-mounted acoustic doppler current profiler observations. *J. Geophys. Res.*, **97**, C1, pp. 769-788.
 Emery, W.J., Thomas, A.C., Collins, M.J., Crawford, W.R. and Mackas, D.L., 1986. An objective method for computing advective surface velocities from sequential infrared satellite images. *J. Geophys. Res.* **91**, C11, pp. 12865-12878.
 Fedorov, K.N., 1983. Lecture note on coastal and estuarine studies(the physical nature and structure of oceanic front) Spring-Verlag.
 IMSL STAT/Library, 1989. FORTRAN subroutines for statistical analysis, ver. 1-1.
 Kamachi, M., 1989. Advective surface velocities derived from sequential images from rotational flow field: limitation and applications of maximum cross-correlation method with rotational registration. *J. Geophys. Res.* **94**, pp. 18227-18223.

- Kelly, K.A., 1989. An inverse model for near surface velocity from infrared images, *J. Phys. Oceanogr.*, **19**, pp. 1845-1864.
- Kelly, K.A. and Strub, P.T., 1992. Comparison of velocity estimates from advanced very high resolution radiometer in the coastal transition zone, *J. Geophys. Res.*, **97**, C6, pp. 9653-9668.
- Kubota, M. and Shirita, M., 1993. Methods for estimating sea surface velocity from NOAA/AVHRR images, *J. Remote Sen. Japan*, 2, No. 3, pp. 169-187.
- Nishida, H., 1980. Improved tidal charts for the western parts of the North Pacific Ocean, No. 15, Rep. of Hydrographic Res.
- Odamaki, M., 1989. Tides and tidal currents in the Tusima Strait, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **45**, pp. 65-82.
- Sea Space, 1993. TeraScan reference manual, ver 1-3.
- Vastano, A.C. and Border, S.E., 1984. Sea surface motion over an anticyclonic eddy on the Oyashio front, *Remote Sensing Environ.*, **16**, pp. 87-90.
- Wahl, D.D. and Simpson, J.J., 1990. Physical processes affecting the objective determination of near surface velocity from satellite data, *J. Geophys. Res.*, **95**, C8, pp. 13511-13528.