

## 금강하구 연안에서 고주파 레이더로 관측된 표층해류에 대한 객관적 유속산출 적용

황진아 · 이상호\* · 최병주 · 김창수  
군산대학교 해양학과, BK21 새만금환경연구팀

### Application of Objective Mapping to Surface Currents Observed by HF Radar off the Keum River Estuary

JIN-A HWANG, SANG-HO LEE\*, BYOUNG-JOO CHOI, AND CHANG-SOO KIM  
*Department of Oceanography, BK21 Saemankeum Environmental Research Team,  
Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea*

금강하구 연안역에서 고주파 레이더를 사용하여 2008년 12월부터 2009년 2월까지 표층류를 관측하였는데, 관측된 표층류 자료는 전파의 간섭과 기상 상황에 따라 일시적으로 관측이 이루어지지 않는 구역들이 있었다. 결측된 구역의 자료를 보충하기 위하여 최적보간 과정을 개발하여 적용하였다. 금강하구 연안역에서 표층류의 공간적 상관성의 특성을 조사하고 최적보간법을 이용하여 공간적 결측 구역을 보충하였으며, 보간된 표층류의 시공간적 분포와 산출유속 오차 패턴을 조사하였다. 연구해역 표층 순환에서 조류가 우세하므로 연안역 관측 지점들 사이의 표층 해류 간 상관계수가 0.7 이상이었다. 원 자료를 보간하기 위해 관측 자료공분산( $C$ ), 지역화한 공간평균 공분산( $C_{sm}^G$ ), 지수함수를 이용한 맞춤 평균공분산( $C_{fit}$ )을 사용하였다. 최적보간이 결측 구간을 채우고, 관측 자료의 시계열 중에서 뾰족하게 튀어나온 비정상적인 자료 부분을 억제하였으며, 그 결과 보간한 유속 자료의 분산은 원 자료의 분산보다 작았다. 공간적 자료획득률이 70% 이상(이하)일 때,  $C_{sm}^G$  ( $C_{fit}$ )를 이용하면  $C$ 를 이용한 경우에 비해 보간 오차가 상대적으로 작았다.

Surface currents were observed by high-frequency (HF) radars off the Keum River estuary from December 2008 to February 2009. The dataset of observed surface currents had data gaps due to the interference of electromagnetic waves and the deteriorating weather conditions. To fill the data gaps an optimal interpolation procedure was developed. The characteristics of spatial correlation in the surface currents off the Keum River estuary were investigated and the spatial data gaps were filled using the optimal interpolation. Then, the temporal and spatial distribution of the interpolated surface currents and the patterns of interpolation error were examined. The correlation coefficients between the surface currents in the coastal region were higher than 0.7 because tidal currents dominate the surface circulation. The sample data covariance matrix ( $C$ ), spatially averaged covariance matrix with localization ( $C_{sm}^G$ ) and covariance matrix fitted by an exponential function ( $C_{fit}$ ) were used to interpolate the original dataset. The optimal interpolation filled the data gaps and suppressed the spurious data with spikes in the time series of surface current speed so that the variance of the interpolated time series was smaller than that of the original data. When the spatial data coverage was larger (smaller) than 70% of the region, the interpolation error produced by  $C_{sm}^G$  ( $C_{fit}$ ) was smaller compared with that by  $C$ .

**Key words:** Optimal Interpolation, HF radar, Covariance

### 서 론

해양에서 표층 유속의 분포와 변화 특성을 관측하기 위해 개발된 고주파 레이더(High Frequency radar)는 해면 중력 파랑으로부터 후방 산란된 전파를 해석하여 표층 유속벡터를 구한다. 이 레이더는 연안에 관측 장비를 설치하므로 관리가 용이하며 장기간 관

측이 가능하고 넓은 해역의 유동장을 동시에 관측하고 자료를 실시간으로 획득한다. 이러한 이유로 고주파 레이더는 해안선이 복잡하고 수심의 변화가 크며 시간적으로 강물의 유입량이 변화하고 바람응력에 영향을 받는 해양환경에서도 조밀한 간격으로 해수 유동장을 모니터링하기에 매우 유용하다(Prandle, 1987; Paduan and Graber, 1997; Knight and Howarth, 1999; Haus *et al.*, 2000; Hisaki *et al.*, 2001; Kovacevic *et al.*, 2004). 고주파 레이더로 관측된 표층류는 해양순환연구 분야뿐만 아니라 유류오염 확산 예측

\*Corresponding author: sghlee@kunsan.ac.kr

과 방재, 선박항해 및 정박지 선정, 군사작전, 하구역의 담수 확장 모니터링 등의 분야에도 널리 이용되고 있다.

고주파 레이더는 해면을 향하여 무지향성으로 전파를 발사하고 해면파랑에 의한 '브래그 산란 효과(Bragg scattering effect)'에 의해 되돌아오는 전파에 표층흐름으로 인한 도플러(Doppler) 효과가 내포되어 있으므로 주파수 차이를 분석하여 레이더 안테나로부터 거리와 방향별로 극좌표계 상의 방사상 벡터들을 얻을 수 있다 (Barrick *et al.*, 1977). 레이더는 설정된 방사상 선 방향 거리간격 내에서 후방 산란된 전파신호의 수신 방향각의 방향 폭(directional width)에 따라 스펙트럼 정보를 산출하고, 미국 Codar사 제품의 경우 MUSIC algorithm을 사용하여 방사상 벡터들을 구한다(Lipa and Barrick, 1983, 1996). 감지거리(detection range)와 공간적 분해능(resolution)은 사용 주파수(파장)에 따라 한정되며, 감지거리가 멀어질수록 방사상 벡터(radial vector)의 방향간 거리간격이 넓어지므로 설정된 수신 방향각의 방향 폭 및 방사상 거리 간격의 제약도 받는다.

표층속도는 적어도 두 곳 이상에서 방사상 벡터를 관측하여 벡터 합성해야 얻어진다. 합성 유속벡터의 정확도는 기하학적 감소(GDOP, geometric dilution of precision, Chapman *et al.*, 1997)에 의해 영향을 받는다. GDOP는 관측구역 내의 한 지점이 두 개의 레이더가 설치된 위치들과 이루는 각(두 레이더의 방사상 선들 사이 각)과 거리에 의해 레이더 유속 오차가 증폭될 수 있는 정도를 나타내며(Wells and Beck, 1987; Chapman and Graber, 1997), 사이 각이 0°와 180°에 가까울수록 합성된 유속벡터의 오차는 증가한다.

레이더 관측 유속자료에는 전파의 주파수대역, 전개형태, 기상 및 해상상태, 레이더 안테나 주변의 조건과 환경 등에 따라 신호대 잡음비율이 증감하는 효과와 불확실한 신호에 의한 측정오차가 포함되어 있고, 위의 각 요인들에 따라 오차가 달라질 수 있다(이 등, 2008). 고주파 레이더가 표층류를 관측할 때 위의 여러 가지 요인들에 의해 시공간적으로 발생하는 결측 구역과 오차는 동시에 광역에 걸쳐 연속적으로 관측한 표층유속을 생성하는데 결정적 장애요소이다. 기본적으로 주된 결측의 원인은 전력단절과 안테나 주변의 일시적, 영구적 장애형성에 의한 전파교란에 의한 것이며, 이를 극복하기 위해서는 먼저 관측 안테나 위치가 주의 깊게 선정되어야 하고 안정적인 전력공급이 확보되어야 한다. 부수적이지만 레이더를 이용한 관측방법에 내재된 유속 결측의 요인으로서 거리가 멀어질수록 잡음(noise)이 많이 포함되고 기상상태에 따라 전파강도가 변화하기 때문에 도플러 스펙트럼으로부터 설정된 각 방향과 거리에 걸쳐 방사상 벡터를 산출하지 못하여 합성벡터가 생산되지 않는 구역이 발생한다.

군산대학교는 2002년부터 금강하구 연안역에 고주파 레이더를 운영하여 표층해류를 관측해오고 있다(Fig. 1). 본 연구에서는 금강하구 연안역에서 고주파 레이더를 이용하여 1) 관측한 표층해류의 공간적 상관성분포 특성을 알아보고, 2) 객관분석(objective analysis) 방법을 이용 및 개선하여 공간적으로 결측된 자료에 대한 유속산출(mapping)을 수행하고, 3) 산출된 유속의 시간적, 공간적 특성과 산출오차에 대하여 조사하고자 한다.

연구해역은 금강하구를 포함하고 서쪽으로 갈수록 수심이 점진적으로 깊어지는 천해역이며, 새만금 복측 방조제가 고군산군도와 연결되어 새로운 해안선을 이룬다. 황해의 조석구조에 의해 조석이 남에서 북쪽으로 전파되는 곳이며(Choi, 1980; Lee and Beardseley,

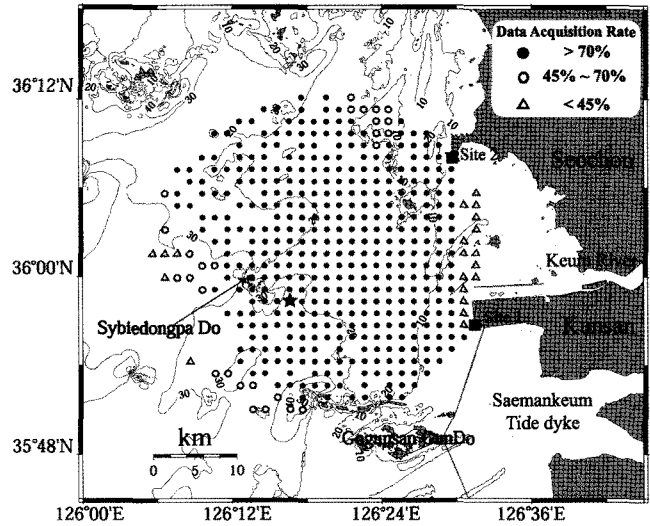


Fig. 1. Observation points of surface current measured by high-frequency radar at site 1 (Bieung-Do) and site 2 (Seochon) off the Keum River estuary. Bottom bathymetry is contoured in 10 m interval. Closed circles are the points of surface current measured by with temporal coverage more than 70%. Open circles and triangles denote temporal coverages of data acquisition 45~70% and 23~45%. Star is a grid point used in Fig. 9 for the comparison of current speed time series.

1999), 대조기의 조차는 6.5 m 정도로서 해수유동 에너지의 대부분이 조류 에너지이다. 조석형태는 반일주조 형이고, 조류는 50 cm/s 내외로 왕복성이 우세하다. 창조류는 전반적으로 북동쪽으로 흐르고 반시계방향으로 전류되며 낙조류는 남서쪽으로 흐른다(국립해양조사원, 2005; 김 등, 2006). 계절적 해면 가열생각과 담수유출에 의해 밀도장의 변화가 크고, 동계에는 담수유입이 감소하지만 강한 북서풍이 탁월하다. 최근에 완성된 새만금 방조제로 인해 해안선이 크게 변화되었고, 이로 인해 조류와 연안역 순환이 변화되었다. 이 등(2008)은 레이더로 관측한 유속의 정밀도를 분석한 바 있으며, 이 등(2003), 김 등(2008), Son *et al.*(2007)은 방조제 건설로 인한 저염수 플룸의 거동과 유속의 변화, 바람 및 담수유출에 의한 조하주기(subtidal period) 운동의 변화를 연구한 바 있다. 연구해역에서 대규모적인 환경변화에 따른 해수 유동변화를 파악하기 위해서는 연속적이고 장기간에 걸친 해수유동에 대한 공간적 조사가 필요하여 고주파 레이더를 이용한 표층류 관측이 지속되고 있지만, 관측구역의 일부에서 결측이 발생하기도 하며 전파 잡음과 기상악화 등으로 인해 자료의 질과 정확성 및 연속성이 떨어지는 때가 있어 이를 보완해야 할 필요성이 있다.

관측 자료(dataset)에서 결측된 영역에 자료를 보간(interpolation)하여 넣고 잡음을 최소화하며, 원본자료보다 좀 더 이상적인 자료를 만들어주는 과정에서 다양한 보간법을 사용한다. 이들 보간법은 대부분 기존자료로부터 구한 공분산 행렬(covariance matrix)을 이용하고 있는데, 객관분석법(objective analysis method, Bretherton *et al.*, 1976), 주요 경험직교함수 모드(EOF mode)를 구하여 결측 자료를 보완하는 방법(Boyd *et al.*, 1994; Houseago-Stokes and Challenor, 2004), 기대치 최대화 방법(expectation maximization method, Beckenbach and Washburn, 2004), 그리고 normal mode 분석법(Lippahardt *et al.*, 2000) 등이 연구되어 왔다. 최근에 Kim

et al.(2007)은 객관분석을 발전시켰으며, 관측 자료에서 직접 구한 공분산 행렬을 사용하는 방법과 시-공간에 걸쳐 평균된 공분산을 사용하는 방법을 제시한 바 있다. 다른 방법들과 달리 객관적 분석법중의 하나인 최적화 보간법(optimal interpolation)은 관측지역 내에서 일시적으로 일부구역에서만 자료가 획득되었다더라도 결측구역의 보간이 가능하며, 또한 보간된 값의 오차(error)가 얼마나 되는지도 계산할 수 있다.

**자료 및 방법**

**자료**

군산 비응도(Site 1)와 서천 마랑리(Site 2)에 설치되어있는 고주파 레이더는 동일기종(25 MHz, CODAR)으로서 사용된 주파수도 매우 유사하다(Fig. 1). 최대 감지거리는 45 km, 유속측정 수심은 해면 하 1 m 정도이며, 거리 및 방향 분해능은 각각 1.5 km와 5°로 설정되었고 이상적 전파전개 형태를 적용하고 있다. 본 연구에서는 2008년 12월 01일부터 2009년 2월 28일까지 약 90일 동안 1시간 간격으로 관측된 표층 유속자료를 사용하였으며 1.5 km 거리

의 등간격 격자점들에서 방사상 유속벡터를 합성하였다. 이 기간 동안 총 담수유출량은  $1.5 \times 10^6 \text{ m}^3$  정도로서 평균적인 연간 유출량  $6 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{yr}$ 에 비해 매우 적었다.

Fig. 2(a)는 연구해역에서 레이더로 관측된 낙조시의 전형적인 표층흐름 분포를 보여준다. 남서쪽으로 흐르는 표층해류는 대부분 조류이며 유속은 대략 50 cm/s 내외이다. 연구해역의 서쪽 가장자리에는 유속이 상대적으로 작고, 결측된 지점이 많다. 이는 두 레이더로부터 거리가 멀고, 두 레이더의 방사상 벡터간 거리가 증가하여 1.5 km 간격의 격자점에서 합성유속 벡터가 생산되지 않았기 때문이다. 한편, Fig. 2(b)와 같이 기상악화 등으로 관측구역이 줄어들면 합성 유속벡터가 생성되는 구역이 협소해지게 된다. 이 경우 공간적 보간을 통하여 결측 구역의 속도를 구할 수 있지만, 어느 한 레이더 관측소에서 방사상 벡터가 모두 결측된 경우에는 합성유속 벡터를 생산할 수 없다.

90일 기간 동안 각 격자점에서 총 관측 시간에 대한 시간적 자료 획득률(temporal coverage of data acquisition)을 각 지점별로 계산하였을 때, 가장 낮은 획득률을 보인 정점에서는 23% 정도이고, 대부분 정점에서 획득률은 70% 이상이었다(Fig. 3a). 본 연구에서

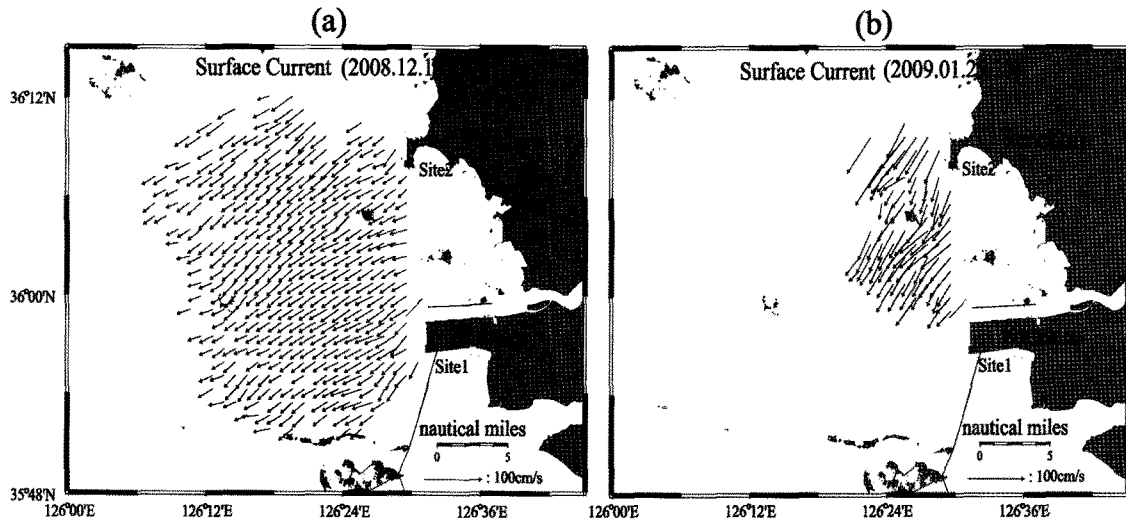


Fig. 2. (a) A typical example of surface current vector in the ebb tide period in the study area on December 2008. (b) Partially observed surface currents for weather degeneration on 25 January 2009.

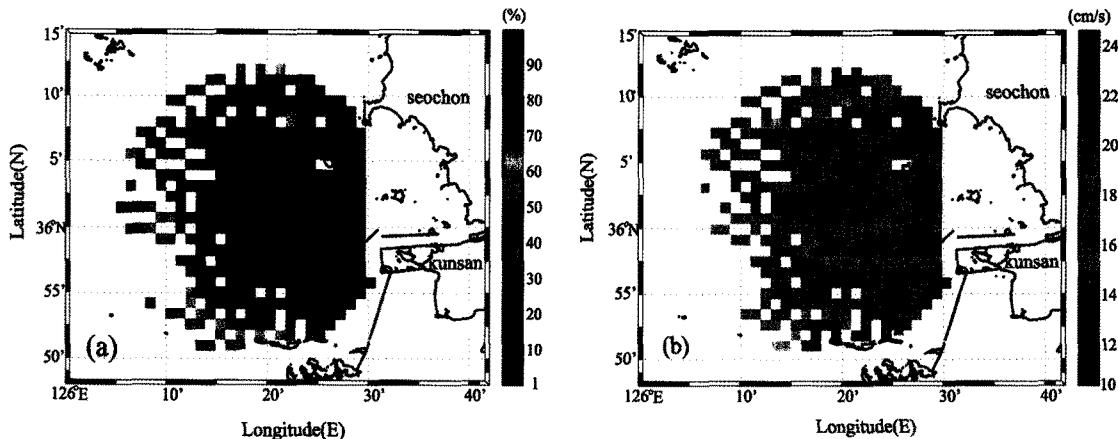


Fig. 3. (a) A map of temporal data coverage at all grid points. (b) The standard deviation of surface current speed in the grid points of temporal data coverage more than 45%.

는 시간적 획득률이 23% 이상인 지점들을 대상으로 분석하였으며 분석에 사용된 전체 격자수는 446개이고 각 지점의 위치는 Fig. 1 과 같다. 시간적 자료 획득률이 45% 이상인 격자점 수는 426개로 서 전 격자의 90% 정도이다. 시간적 자료 획득률이 70% 이상인 격자점 수는 399개이고 전 격자의 86%를 차지한다.

Fig. 3b는 시간적 자료 획득률이 45% 이상인 격자점들에서 유속의 표준편차를 보여준다. 유속의 표준편차는 10~25 cm/s 사이의 값을 보인다. 표준편차의 공간적 평균은 17.78 cm/s이고 중앙값 (median)은 17.58 cm/s로서 두 값은 거의 같다. 이러한 편차는 기본적으로 연구해역의 왕복성 조류의 시간변화에 기인한다. 표준편차는 관측구역의 북측 가장자리 부근에서 크고, 고군산 군도 북측, 금강하구 입구 북서쪽 주변과 하구 입구에서 서쪽에 있는 십이동 파도를 잇는 구간에서 크다. 관측구역의 중앙부에서는 강한 조류 유속과 동서방향을 따라 상대적으로 낮은 시간적 자료 획득률(Fig. 3a)로 인해 표준편차가 크고, 고군산군도 주변에서는 강한 조류와 함께 섬에 의한 전파교란에 의해 표준편차가 크게 나타나는 것으로 해석된다(이 등, 2008). 또한 관측구역 북측 가장자리와 금강하구 입구 주변은 GDOP가 큰 값이어서 관측오차가 크고 유속의 표준편차에 큰 관측오차가 포함된 것으로 판단된다.

객관적 보간법에 의한 유속산출에 전체 격자점들 중에서 시간적 획득률이 70% 이상인 지점의 자료만을 이용하였다. 90일 동안 시간적 획득률이 70% 이상인 격자점들에 대해 상대적인 공간적 획득률(spatial coverage of data acquisition)의 변화는 Fig. 4와 같다. 2009년 1월 하순 이후는 공간적 자료획득률은 대부분 70% 이상이었지만 그 이전에는 획득률이 50% 미만이 되는 경우가 자주 발생하였다.

**방법**

**공분산과 상관계수:** 객관분석을 하기위해 먼저 두 지점 X와 X'에서 모두 유속이 관측된 시계열 자료가 N개일 때, 자료 공분산(sample data covariance) 행렬 C는 (1)과 같이 계산된다.

$$C(X, X') = \frac{1}{N(X, X')} \sum_{t \in (X \cap X')} U(X, t) U^T(X', t) \quad (1)$$

여기서 U는 평균이 제거된 관측유속 벡터의 시계열이고, U<sup>T</sup>는 U의 전치행렬, N은 두 지점에서 동시에 관측된 시간 수이다. 총 관측점수를 M, 관측기간의 시간수를 L이라 하면 C는 2ML 개수만큼

의 요소를 가지며, 결국으로 인하여 N<L이 된다. 자료 공분산은 (2)와 같이 참 공분산 C와 관측에 포함된 오차(측정오차, 결측과 유한관측기간에 의한 통계적 오차 등) 공분산 Q의 합으로 표현될 수 있다.

$$C(X, X') = C_c(X, X') + Q(X, X') \quad (2)$$

두 지점 간의 유속성분 상관계수 ρ는 (3)과 같다.

$$\rho(X, X') = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_u(X)} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_v(X)} \end{bmatrix} C(X, X') \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_u(X')} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_v(X')} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_{uu} & \rho_{uv} \\ \rho_{vu} & \rho_{vv} \end{bmatrix} \quad (3)$$

σ<sub>u</sub>(X), σ<sub>v</sub>(X)는 각각 동서방향 유속(u)과 남북방향 유속(v) 시계열의 표준편차이다.

**객관적 유속산출:** 자료 공분산 행렬은 원 자료에서 시간평균을 제거한 편차로부터 계산되므로 편차에 대한 객관적 유속산출(objective mapping)은 (4)와 같이 주어진다(Emery and Thompson, 1997).

$$\tilde{d} = b d = (COV_{dm})^T (COV_{dd})^{-1} d \quad (4)$$

여기서 d는 관측유속의 편차유속 벡터,  $\tilde{d}$ 는 산출된 유속의 편차 유속 벡터, b는 구해야 할 관측지점에서 적용되는 가중계수(weights) 벡터이다. COV<sub>dm</sub>은 자료-모델 공분산 행렬, COV<sub>dd</sub>는 자료-자료 공분산행렬이다. 유속산출 지점들이 자료가 관측된 지점들과 같고 COV<sub>dm</sub>가 관측오차를 갖지 않는다면 두 공분산은 같게 된다.

(4)에서 객관적 유속을 산출하는데 가장 큰 어려움은 자료가 정상적(stationary)이며, 균질성(homogeneous)을 가지고 구조가 정방적(isotropic)이라고 하더라도 자료 결측으로 인해 COV<sub>dd</sub>가 반드시 양의 고유값을 갖지 않을 수 있다는 점이다. 음의 고유값을 가질 때 유속산출은 최적화 되지 않으며 조잡한 결과를 초래하기도 하고(Bretherton et al., 1976), 또한 음의 기대치승 오차(negative expected square error)를 산출하기 때문에(Emery and Thompson, 1997) 역행렬이 구해지지 않을 수 있다. 이러한 문제점들을 극복하며 가중계수 b를 구하기 위해 사용되는 방법은 자료에서 추세(trend)를 제거하여야 하며, 양질의 기존 관측 자료들을 이용하여 구하기도 한다.

관측 자료로부터 가중계수를 산출하기 위해 다음과 같이 공분산

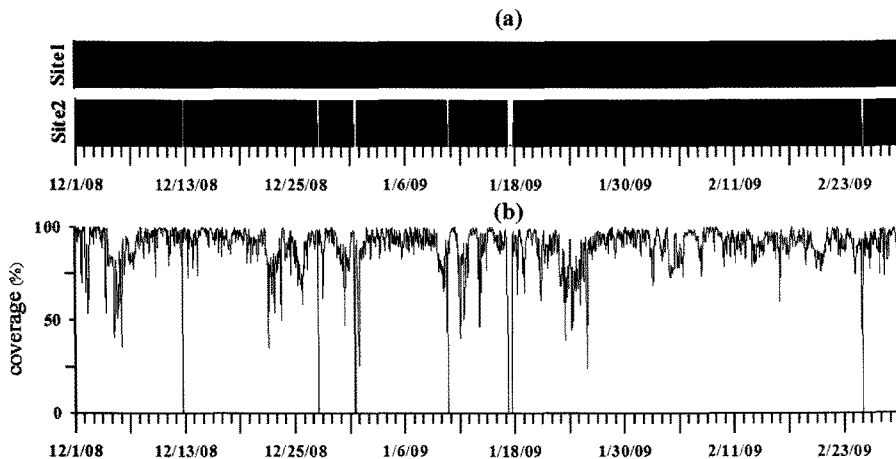


Fig. 4. (a) The timeline of available radial velocities at each radar site. (b) The time series of the spatial coverage in percentage for the region with temporal data coverage above 70%.

행렬을 적용하였다(Kim et al., 2007).

$$COV_{dm}(X, X') = C(X, X') \quad (5)$$

$$COV_{dd}(X, X') = C(X, X') + R \quad (6)$$

$R$ 은 조직화(regularization) 행렬이며, 관측에 수반되는 오차 공분산으로 관측 자료에 포함된 잡음수위로 정의되고, 자료의 유한성, 결측 효과 등이 포함되어 있다. 자료 공분산  $C$ 는 결측 등에 의해 항상 양의 고유값들만 갖지는 않으므로  $COV_{dd}$ 의 역행렬을 구하기 위해서는  $R$ 이 필요하다. 여기서  $R = \gamma^2 I$ 로 가정할 수 있으며,  $\gamma^2$ 은  $C$ 의 가장 작은 음의 고유값 (음의 고유값 중에서 절대치가 가장 큰 값)보다 커야하고,  $I$ 는 단위행렬이다. Kim et al.(2007)은 원본 자료에서 구한 공분산 행렬  $C$ 의 평균분산(mean variance)의 10%에 해당하는 값을  $\gamma^2$ 로 사용하였으며, 5~15%에 해당하는 값을 사용하였을 때 정성적으로 같은 결과를 보인다고 하였다. 본 연구에서 자료공분산  $C$ 로부터 구한 평균 분산의 10%에 해당하는 크기는 약  $49 \text{ cm}^2/\text{s}^2$  정도이며, 이를  $\gamma^2$ 로 적용하였다.

Kim et al.(2007)은 (4)에서 관측구역에 공히 적용될 수 있는 공분산 행렬을 구하기 위해 공간적으로 평균된 공분산 행렬( $C_{sm}(X, X')$ , smoothed (homogeneous) covariance)을 구하였다. 이를 위해 일정 구역 내의 상관계수를 공간적으로 평균한 상관계수( $\bar{\rho}$ , sample mean correlation)와 자료평균 표준편차( $\bar{\sigma}$ , sample mean standard deviation)를 이용하였다.

$$\bar{\rho}(\Delta X) = \frac{\sum_{v,x} N(X, X+\Delta X) \rho(X, X+\Delta X)}{\sum_{v,x} N(X, X+\Delta X)} = \begin{bmatrix} \bar{\rho}_{uu} & \bar{\rho}_{uv} \\ \bar{\rho}_{vu} & \bar{\rho}_{vv} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$C_{sm}(X, X') = \bar{\rho}(\Delta X) \bar{\sigma}(X) \bar{\sigma}(X') \quad (8)$$

여기서  $\Delta X = (n\Delta s, m\Delta s)$ 는  $X$ 로부터의 변위이며,  $n$ 과  $m$ 은 정수이다. 본 연구의 경우  $\Delta s = 1.5 \text{ km}$ 이다.  $\bar{\rho}$ 를 구하기 위해서는 먼저 각 격자점에 대해 특정반경( $r_0$ ) 내의 격자점들에서 상관계수를 구하여 국지적(local) 상관계수( $\hat{\rho}$ ) 분포를 구한다. 다음으로 국지적 상관계수 분포들을 중앙 점을 기준으로 재정리하고 중앙 점으로부터 동일 위치에 있는  $\hat{\rho}$ 의 평균치를 구하면 자료평균 상관계수가 얻어진다. 공간평균 공분산을 구할 때, 유속성분간의 교차상관계수( $\bar{\rho}_{uv}$ )는 무시하였다. (8)에서  $\bar{\sigma}$ 의 공간적 분포 특성을 고려하여  $\bar{\sigma}$ 의 대표치(중앙 값 혹은 공간평균값)를 사용하거나 혹은 간단한 평면 혹은 이차원 곡면으로 맞추어 사용할 수 있다(Kim, et al., 2007). 본 연구에서는 공간평균치를 사용하였다.

국지적 상관계수는 거리에 따라 변화되는 형태에 의해 가우스 혹은 지수함수 등으로 맞추어 사용하기도 한다. 이때 거리에 따라 국지적 상관계수를 구할 반경( $r_0$ )의 크기를 미리 결정해야 하는데, 이 반경은 상관계수가 현저히 줄어드는 반경으로 볼 수 있고, 국지적 상관계수 분포를 특정함수로 맞추한 후 맞춤함수의 특성으로부터 국지적 상관거리 규모(de-correlation length scale)를 구할 수 있다(Kim et al., 2007). 또한,  $\bar{\rho}$ 도 분포 특성에 따라 함수로 맞춤할 수 있으며 이를 이용하여 (9)와 같이 맞춤 평균 공분산(fitted mean covariance)을 구할 수 있다. 맞춤함수  $f(\Delta X)$ 를 구하는 구체적인 방법은 다음 절에서 소개한다.

$$C_{\mu}(X, X') = f(\Delta X) \bar{\sigma}(X) \bar{\sigma}(X') \quad (9)$$

한편, (8)에서 얻어진 공간평균 공분산 행렬의 특성에 따라 역행렬이 구해지지 않을 경우도 있다. 이를 극복하기 위하여 거리에 따라 크기가 감소하는 함수  $G(\Delta X)$ 를 곱하여 (10)과 같이 지역화한 공간평균 공분산(smoothed covariance with localization) 행렬을 사용하기도 한다.  $G(\Delta X)$  함수는 지역화 함수(localization function)로서 물리적인 거리가 멀어서 실제적인 상관성이 작은 두 지역 간의 상관계수를 줄여주기 위하여 사용된다(Gaspari and Cohn 1999).

$$C_{sm}^G(X, X') = G(\Delta X) \cdot C_{sm} \quad (10)$$

## 결 과

### 상관계수 특성

각 유속성분들이 공간적으로 서로 얼마나 상관성이 있는지 알아보기 위해 시간적 자료획득률이 70% 이상인 지점들 중에서 임의의 지점에 대한 상관계수의 공간적 분포를 구하였다(Fig. 5~7). 관측영역에서 임의로 중앙부의 한 지점, 연안 쪽과 외해 쪽에서 남쪽 구역과 북쪽구역으로 나누어 두 지점씩, 모두 5개 지점을 선정하였다.

관측해역 중앙부 한 지점에서 자료획득률이 70% 이상인 지점들에 대한 남북과 동서방향 유속 성분의 상관계수 분포는 Fig. 5와 같다.  $\rho_{uu}(X, X')$ 는 동서방향 유속성분에 대해 선택된 원지점( $X$ , 그림에서 흑색 원으로 표시)과 그 외 모든 지점( $X'$ )에 대한 상관계수 분포이고,  $\rho_{vv}(X, X')$ 는 같은 방법으로 남북방향 유속성분에 대해 구한 상관계수이다. 각 유속성분의 상관계수는 거리에 따라 상관계수가 감소하는 분포 특성을 보이고 선택된 점( $X$ )을 중심으로 비교적 높은 공간적 대칭성을 보이며, 대부분 지역에서 0.7 이상이다.  $\rho_{uv}(X, X')$ 는 두 레이더 설치장소를 연결하는 기저선(baseline)을 따라 낮은 상관성을 보이고, 고군산군도, 새만금북방조제 및 하구입구 해안선부근에서 작은 값을 갖는다.  $\rho_{vv}(X, X')$ 는 0.7 이상인 구역이 동서방향 유속의 경우에 비해 좁고, 중앙 점으로부터 거리에 따라 상관성이 감소하는 율이 크다. 중앙 점의 유속은 금강하구 입구, 새만금방조제와 고군산군도의 해안선 부근 정점들의 유속과 상관성이 낮고 또한 연구해역 남서쪽 외해의 정점들과도 낮은 상관성을 갖는다.

북쪽과 남쪽 구역의 연안 쪽과 외해 쪽 지점들에서  $\rho_{uu}(X, X')$ 는 거리가 멀어질수록 상관계수가 낮아지는 특성을 보이며(Fig. 6) 대부분의 지역에서 0.7 이상이지만, 원지점에 대한 공간적 대칭성이 낮고, 상관계수가 0.8 이상인 구역이 주로 동서방향으로 분포한다. 상관계수가 작은 지역은 중앙 점에 대한 상관계수 분포의 경우와 유사하다.  $\rho_{vv}(X, X')$ 의 공간적 분포는 0.8보다 높은 값의 범위가  $\rho_{uu}(X, X')$ 에 비해 좁다(Fig. 7). 남쪽 연안 부근 지점의 경우(Fig. 7d)를 제외하면 관측 구역의 남서쪽 가장자리 부근에서 특히 낮은 상관성이 나타나 중앙부 한 지점에 대한  $\rho_{vv}(X, X')$  분포(Fig. 5b)와 유사하다.

### 공간 평균된 상관계수

앞 절에서 살펴본 임의의 5개 지점에 대한 공간적 상관계수는 분석대상 지역 내 대부분에서 0.7 이상의 높은 값을 보였다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 시간적 자료획득률이 70% 이상인 각 격자점에 대한 국지적 상관계수를 모두 사용하여 (7)의 공간 평균된

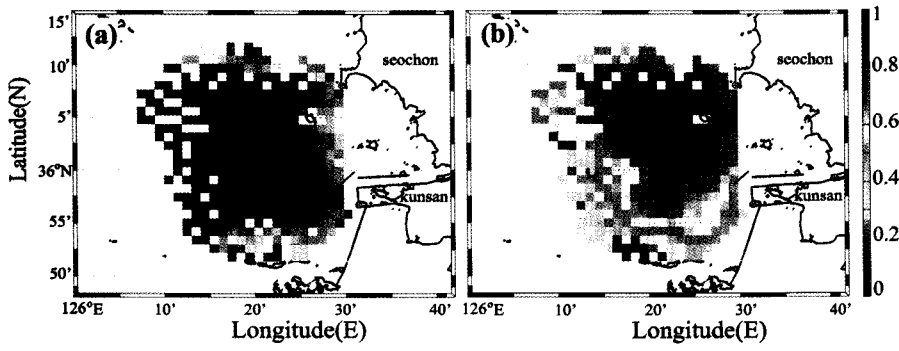


Fig. 5. Correlation coefficients for (a) the eastward and (b) northward components between a reference point ( $126^{\circ}21.6'E$ ,  $36^{\circ}02.7'N$ ) in the middle and the other points in the data set with 70% and more temporal coverage.

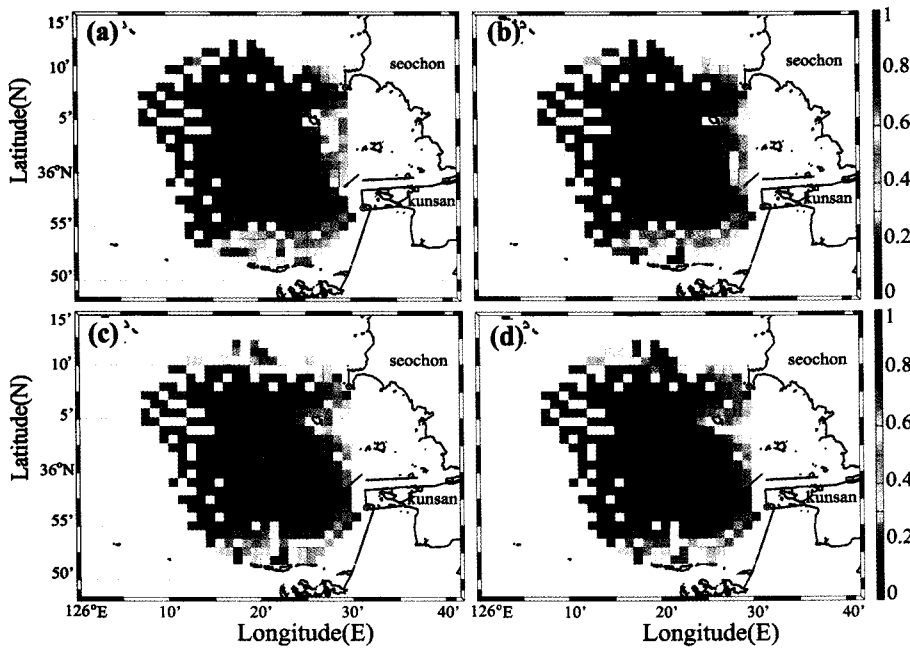


Fig. 6. The correlation coefficients for the eastward current component,  $\rho_{uu}(X, X')$ , between a reference point,  $X$ , and all other grid points,  $X'$ . The four reference points are two offshore (a and c) and two near-shore points (b and d).

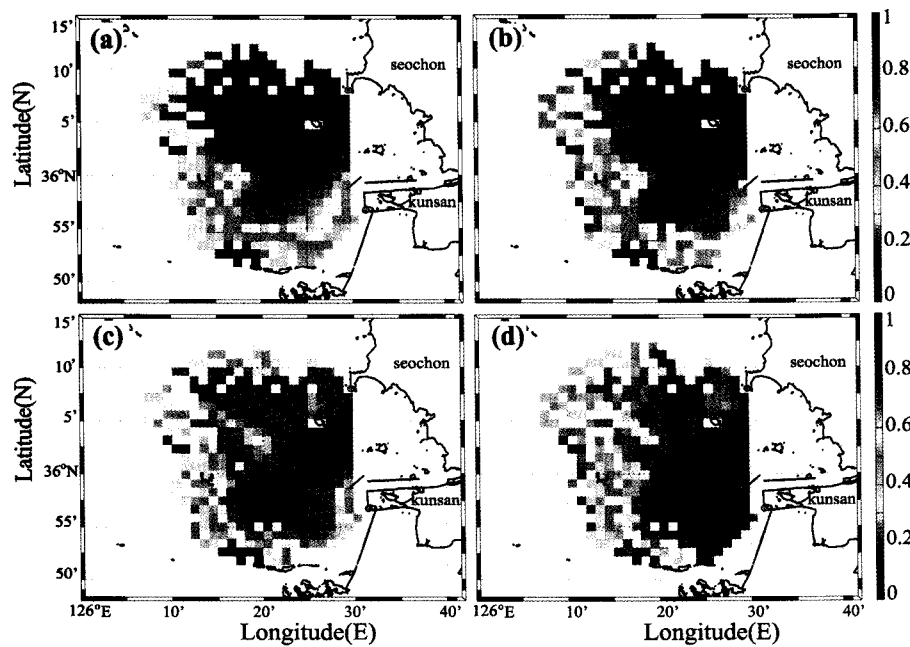
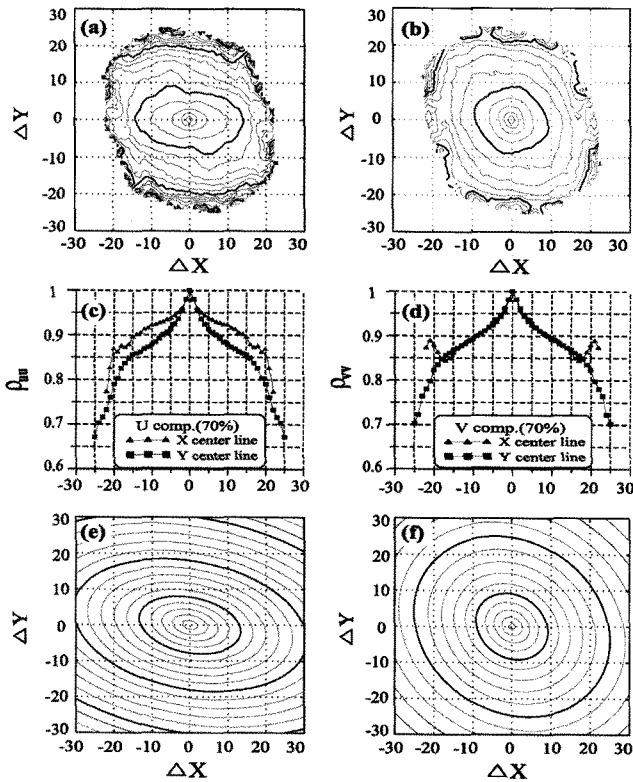


Fig. 7. As in Fig. 6 except for the northward current component,  $\rho_{vv}(X, X')$ .



**Fig. 8.** The spatially averaged correlation coefficient between (a) eastward current component,  $\bar{\rho}_{uu}$ , and (b) northward current component,  $\bar{\rho}_{vv}$ , using local correlation coefficient from data set with temporal coverage more than 70%. Profiles of (c)  $\bar{\rho}_{uu}$  and (d)  $\bar{\rho}_{vv}$  along the longitudinal (latitudinal) axis cutting the ellipse center are presented with triangles (squares). Exponential functions fitted to  $\bar{\rho}_{uu}$  and  $\bar{\rho}_{vv}$  by in equation (11) are displayed in (e) and (f), respectively. The three thick contours represent correlation coefficients of 0.9, 0.8 and 0.7, respectively, from the center. The interval of thin contours is 0.02.

상관계수  $\bar{\rho}$ 의 분포를 구하였다(Fig. 8a-b). 상관계수가 0.8 이상인 구역은 중앙 점에 대해 타원 형태를 보이지만, 동서와 남북방향 속도성분에서 타원의 장축방향이 다르다. 공간 평균된 상관계수  $\bar{\rho}$ 는 동서 및 남북방향 유속 모두에 대해서  $\Delta X = \pm 25\Delta s$ 까지 0.7 이상이다.

공간 평균된 상관계수 타원의 중앙 점을 통과하는 동서(x), 남북(y) 방향 축을 따라  $\bar{\rho}$ 가 중앙 점으로부터의 거리에 따라 변화되는 형태는 Fig. 8c-d와 같다. 두 축 상에서  $\bar{\rho}$ 는 중앙으로부터  $\pm 15\Delta s$ 까지는 지수 함수적으로 감소하고, 이보다 먼 곳에서는 거리에 따라 가우스 함수적으로 감소하는 특성이 나타났다. 하지만, 동서방향에서  $\bar{\rho}_{vv}$ 는 중앙 점으로부터  $17\Delta s$ - $23\Delta s$  떨어진 거리에서 오히려 증가하는 변화를 보였다.

$\bar{\rho}$  분포를 (11)과 같은 평면공간에 대한 함수로 맞춤하였다.

$$f(\Delta X) = \exp[-[a(\Delta X)^2 + b(\Delta X)(\Delta Y) + c(\Delta Y)^2]^d] \quad (11)$$

여기서 상수 a, b, c, d는  $\bar{\rho} - f(\Delta X)$ 가 최소가 되게 하는 값들을 찾은 것이고, (11)에서 구해진 함수를 (9)에 적용하면 함수맞춤 평균 공분산을 구할 수 있다. 맞춤함수를 찾는데 적용된 범위를 반경  $25\Delta s$ (37.5 km)까지 하였을 때 상수들은 Table 1과 같고, 맞춤함수

**Table 1.** Coefficients (a, b, and c) and exponent (d) of the exponential function fitted to the spatially averaged correlation coefficients within the radius of  $25\Delta s$

	a	b	c	d
$\bar{\rho}_{uu}(\Delta x, \Delta y)$	$0.4 \times 10^{-4}$	$0.2 \times 10^{-4}$	$1.1 \times 10^{-4}$	0.45
$\bar{\rho}_{vv}(\Delta x, \Delta y)$	$0.4 \times 10^{-4}$	$0.1 \times 10^{-4}$	$0.4 \times 10^{-4}$	0.375

는 Fig. 8e-f와 같은 분포를 보인다.

지수 d는 Kim, et al.(2007)이 일정한 값으로 적용한 0.5보다 조금 작다. 하지만, 지수함수의 감소 상수 a, b, c는 Kim, et al.(2007)이 구한 값들보다 대략 1/100배 정도 작은 값이며, 이로 인해 맞춤함수로부터 구한 공간평균 상관계수는 유속성분에 따라  $98\Delta s$ - $190\Delta s$  범위의 상관거리 규모를 갖는다. 이러한 상관거리 규모는 관측구역보다 매우 큰 규모이다. 맞춤함수를 찾는데 적용된 범위를 반경  $15\Delta s$ 로 하였을 때 맞춤함수에 의한 상관거리는  $122\Delta s$ - $231\Delta s$ 의 범위였다.

연구해역은 조류가 해수유동 속도의 90% 이상을 차지하는 대조차 환경이다. 또한 조류타원의 주축은 북동-남서방향으로 향하며, 조류타원의 이심률도 해안선과 섬 주변을 제외하면 공간적인 변화가 적다(Son et al., 2007; 김 등, 2006). 동서와 남북방향 유속에 대한  $\bar{\rho}$ 의 값이  $\pm 25\Delta s$ 까지 0.7 이상이며 맞춤함수에 의한 상관거리가 매우 큰 결과는 연구해역의 해수유동이 거의 동시적으로 변화하며 공간적 차이가 적은 조류에 의해 지배되고 있음을 제시한다. 한편, 본 연구해역에서 운영되고 있는 고주파 레이더는 관측범위가 최대 45 km ( $30\Delta s$ )이다. 연구해역의 동쪽으로는 육지 해안선이 있으며 남쪽으로는 고군산군도가 있다. 이러한 해안선 부근에서는 국지적으로 속도장 변화가 나타나게 되며, 외해역과 다른 속도장이 형성된다. 따라서  $\bar{\rho}$  분포가 중앙으로부터  $\pm 15\Delta s$ 보다 먼 거리에서 큰 변화율을 보이며 작은 값이 되는 분포특성을 갖는 것은 대상해역의 폭이 45 km 보다 좁다는 것과 인접한 해안선과 섬들의 영향에 의한 효과로 사료된다.

한편, (5), (8) 그리고 (11)에서 구해진 세 가지 공분산들을 이용하여 (4)에서 유속산출을 하였을 때 조직화 행렬 R이 사용되었지만, 공간평균 공분산  $C_{sm}(X, X')$ 의 역행렬이 구해지지 않았다. 본 연구에서는 지역화 함수로서  $G = \exp\{-[(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2]/2k^2\}$ 의 가우스 함수를 사용하여 (10)과 같이 지역화한 공간평균 공분산(smoothed covariance with localization)  $C_{sm}^G$ 을 구하였다.  $k=10\Delta s$ 를 사용하였을 때  $C_{sm}^G$ 의 역행렬이 구해졌고, 거리  $r = [(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2]^{1/2} = 15\Delta s$ 에서  $G=0.37$ 이 된다.  $k>11\Delta s$ 의 G를 만들어 적용한 경우  $C_{sm}^G$ 의 역행렬은 구해지지 않았다.

### 산출유속의 비교

자료 공분산(C), 지역화한 공간평균 공분산( $C_{sm}^G$ ), 함수맞춤 평균공분산( $C_{\beta}$ )을 이용하여 결측된 유속 자료를 보간하고, 각 공분산으로 보간된 자료의 특성을 비교하였다. 먼저 보간된 유속 자료들의 시간 변화 특성을 살펴보고 그 다음 공간적인 특성을 살펴본다.

**시간영역:** 연구해역에서 외해 쪽의 한 정점( $126^{\circ}15.5'E$ ,  $35^{\circ}58.7'N$ , Fig. 1 참조)에서 2009년 1월 22일부터 1월 25일까지 고주파 레이더가 측정된 표층해류는 23일 11시~12시, 24일 4시~5시, 7시, 16시~17시 그리고 21시, 25일 4시와 20시에 관측되지 않았다. 이 지점에서 시간적 자료획득률은 70% 이상이며, 공간적 자료획득률

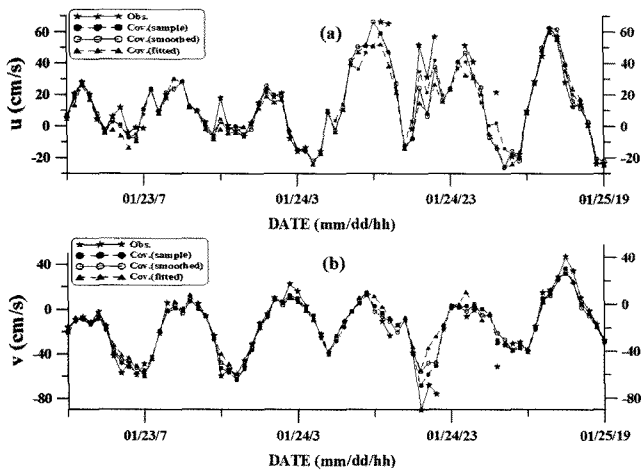


Fig. 9. Sample time series of the eastward (a) and northward (b) current component; observed data (star), the objectively mapped data using the sample covariance (closed circle), the smoothed covariance with localization (open circle) and the fitted covariance (triangle).

은 23일 11시에 50%이고 그 외에는 모두 70% 이상이었다. 이 기간 동안 결측된 자료를 최적 보간법을 이용하여 주변지점들의 관

측된 자료들로부터 보간하였다(Fig. 9).

자료 공분산( $C$ ), 지역화한 공간평균 공분산( $C_{sm}^c$ ), 맞춤함수 평균공분산( $C_{\mu}$ )을 이용하여 구한 보간 값은 관측된 값과 매우 유사하며, 결측된 시간에 모두 비슷한 값을 보이는 유속을 복원하였다. 최적 보간법을 이용하여 보간한 유속 자료의 분산은 원 자료의 분산보다 약간 작다. 이것은 보간 과정에서 관측 자료의 시계열 중에서 뾰족하게 튀어나온(spiky) 비정상적인 자료 부분(spurious data)이 억제되었음을 의미한다. 이는 특정 지점에 비정상적인 관측 자료가 존재할 때 그 주변에 있는 점들에서 얻어진 유속정보를 이용하여 보정하였기 때문이다.

**공간영역:** 공간적 자료획득률이 26%, 76%, 90%로 다를 때 세 가지 공분산을 이용하여 시간적 획득률이 70% 이상인 지점들에 대하여 보간된 유속 벡터의 분포가 어떤 특성을 갖는지 비교하였다(Fig. 10). 첫 번째 열은 관측된 유속벡터의 분포로서 공간적 자료획득률에 따라 외해 쪽에서 유속관측 자료가 많아진다. 두 번째 열은 자료 공분산, 세 번째 열은 지역화한 공간평균 공분산 그리고 네 번째 열은 맞춤함수로부터 구한 평균공분산을 이용하여 보간한 표층 유속벡터 분포이다. 최적화 보간법을 사용하면 관측 자료가 매우 작은 구역에서 획득되더라도 결측 정점들에서 표층 유속을 보간할 수 있기 때문에 관측된 범위가 전체 관측범위 절반이 되지 않아도 결측 구역에서 유속이 복원됨을 보여준다(Fig. 10a-d). 하지

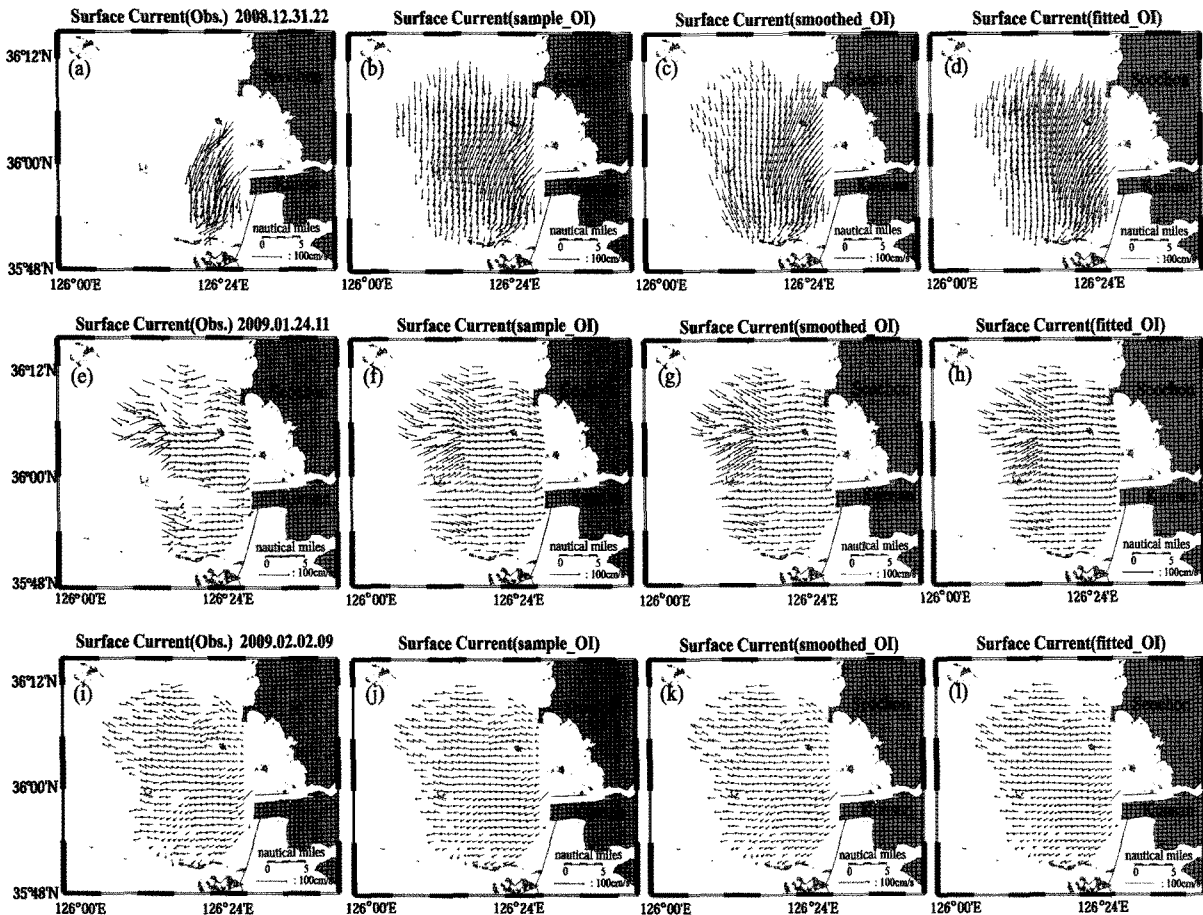


Fig. 10. The left column panel is the observed current field in the region with data coverage of (a) 26%, (e) 76% and (i) 90%, the next column panels are the current field mapped using the sample covariance matrix (b, f and j), the smoothed covariance matrix with localization (c, g and k), and the fitted covariance matrix (d, h and l) from (a), (e) and (i), respectively.



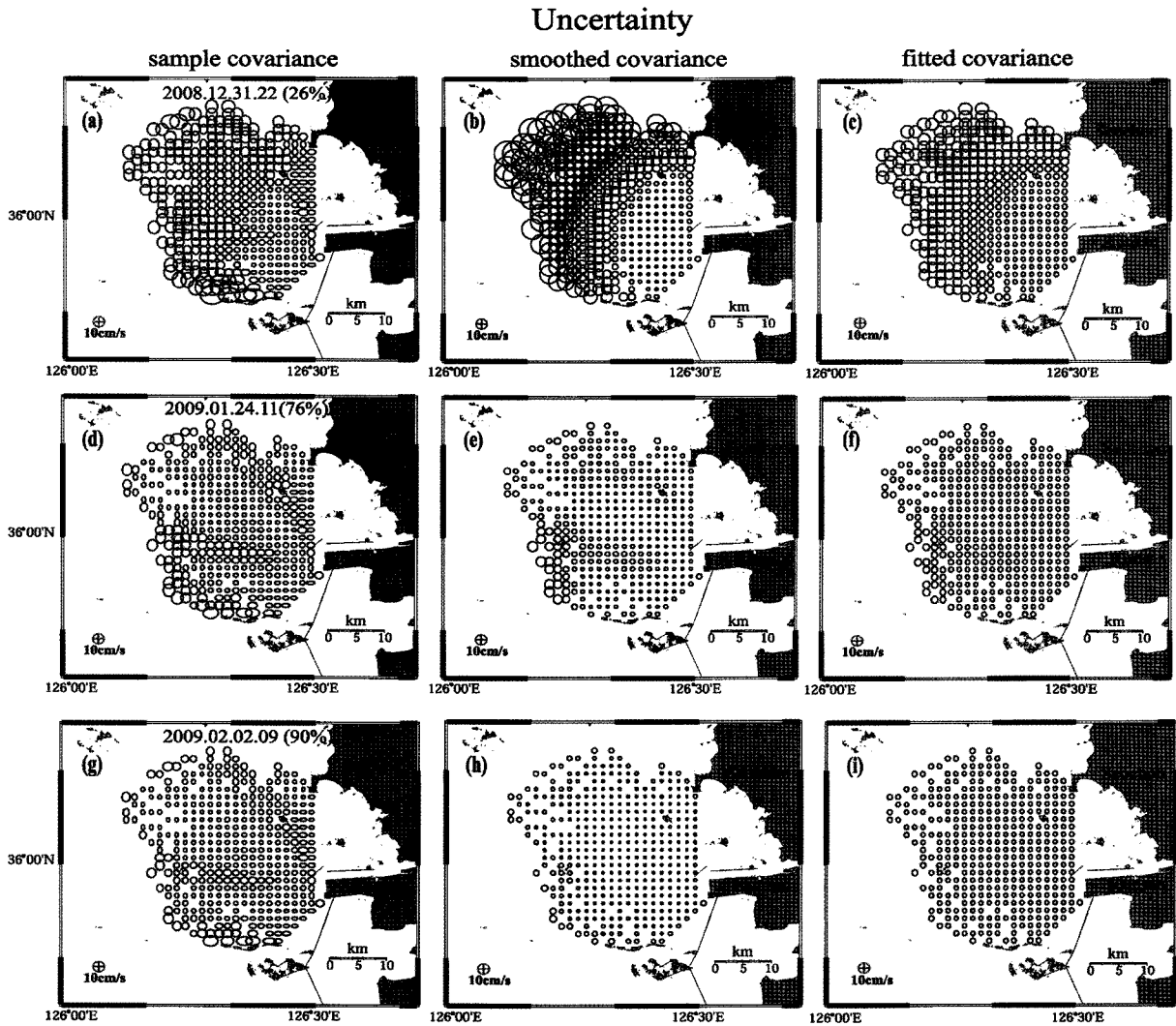


Fig. 11. Left column panels (a, d and g) display uncertainty ellipses corresponding to the mapped current vector field for different spatial coverages using the sample covariance matrix in Fig. 10, middle column panels (b, e and h) do uncertainty ellipses using the smoothed covariance matrix with localization, and right column panels (c, f and i) do using the fitted covariance matrix.

만, 공간적 자료획득률(관측범위)에 따라 보간되는 유속벡터가 다르다는 것을 알 수 있다.

공간적 자료획득률이 26%로 제일 작은 12월 31일에 보간된 유속벡터를 비교해보면 결측된 구역에서 흐름의 분포가 관측된 구역의 흐름분포와는 크기와 방향에서 많이 차이난다, 또한 보간에 사용된 공분산에 따라 각각 다른 것을 알 수 있다. 지역화한 공간평균 공분산으로 보간한 표층 흐름분포는 자료 공분산과 함수맞춤 평균공분산으로 산출한 흐름분포와 비교해볼 때 보간된 구역에서 흐름의 방향과 크기가 현저히 다르게 나타났다. 공간적 자료획득률이 76%와 90%인 1월 24일과 2월 2일에 세 가지 공분산을 사용하였을 때 보간된 유속벡터는 관측된 유속벡터와 잘 일치하는 크기와 방향을 보이고 보간된 유속장이 관측된 유속장에 비해 부드러운 분포이다. 결측된 구역에서도 세 가지 공분산을 사용하여 보간된 유속벡터는 관측된 유속의 전체적인 흐름분포를 잘 반영한다.

**불확실성**

공간적 영역에 대한 보간 유속의 비교는 공간적 자료획득률에

따라 보간 유속의 불확실성(오차)이 현저하게 달라질 수 있음을 제시한다. 공분산을 사용하여 보간한 유속이 관측률에 따라 어떠한 오차를 갖는지 알아보기 위하여 (12)와 같이 오차  $e(X)$ 를 계산하였다(Emery and Thompson, 1997).

$$e(X) = \sqrt{[d(X) - \tilde{d}(X)]^2} \tag{12}$$

Fig. 10에서 제시된 세 가지 공분산으로 보간한 유속에 포함되어 있는 오차를 방향정보를 포함한 타원으로 나타내었다(Fig. 11). 보간한 유속의 오차는 세 가지 경우 모두 공간적 자료획득률이 증가하면 오차가 작아진다. 하지만, 유속이 관측된 지점에 비해 결측 지점에서 산출된 유속의 오차가 확연히 크다.

공간적 자료획득률이 동일한 경우, ‘어떤 공분산을 적용하여 유속을 산출하였는가?’에 따라 오차의 크기가 달라진다. 공간적 자료획득률이 제일 작은 26%일 때, 결측된 지점들에서는 지역화한 공간평균 공분산으로 산출된 유속 오차가 다른 공분산으로 산출된 유속오차에 비해 현저하게 크고, 결측된 지점이 관측된 구역에서 멀어질수록 산출된 유속의 오차가 증가한다. 하지만, 유속이 관측된

구역에서의 오차는 오히려 작다. 이러한 경향은 공간적 자료획득률이 증가하여도 나타났다. 따라서 공간적 자료획득률이 높을 때 지역화한 공간평균 공분산을 사용하면 산출된 유속의 오차가 가장 작아지게 된다. 자료 공분산과 함수맞춤 평균공분산에 의해 산출된 유속의 오차를 비교해 보면 공간적 자료 획득률이 90 %로 높을 때에는 함수맞춤 평균공분산에 의해 산출된 유속의 오차가 공간적으로 거의 균일한 크기를 가지며, 공간적 자료획득률이 76 % 이상일 때는 결국구역 주변과 관측구역의 외곽구역에서 함수맞춤 평균공분산에 의해 산출된 유속의 오차가 자료공분산에 의해 산출된 유속오차보다 작아진다.

시간적 자료 획득률이 70% 이상인 지점들에서 세 가지 공분산으로 산출된 유속오차의 시간적 평균치 분포를 비교해 보면(Fig. 12), 시간평균 오차가 가장 작은 경우가 지역화한 공간평균 공분산을 사용한 경우임을 알 수 있다. 산출유속의 오차를 대표치로 비교해 보기 위하여 시간평균 오차를 다시 공간적으로 평균해 보았다. 자료공분산을 사용한 경우에는 오차가 동서방향 4.9 cm/s, 남북방향 5.0 cm/s이고, 지역화한 공간평균 공분산을 사용한 경우에는 동서방향 2.2 cm/s, 남북방향 3.1 cm/s이며, 함수맞춤 평균공분산을 사용한 경우에는 동서방향 4.3 cm/s, 남북방향 4.7 cm/s 이었다. 모든 경우 산출유속 오차의 시-공간 평균치는 5.0 cm/s보다 작다. 연구해역의 조류가 50 cm/s 정도의 유속을 가지므로 이러한 오차는 대략 관측 유속의 10% 정도에 해당한다.

토 의

자료 공분산 행렬에서 음의 고유값 개수와 크기는 공분산 산출에 사용된 자료집단 내에 얼마나 많은 결측 자료가 포함되어있는지에 따라 좌우된다(Kim et al., 2007). 만약 자료가 100% 존재한다면 행렬은 음의 고유값을 갖지 않을 것이다. 즉, 음의 고유값들은 참 공분산에 대한 자료 공분산의 오차 척도이다. 본 연구에서는 Kim et al.(2007)이 사용한 바와 같은 방법으로 균등한 분산( $\gamma^2$ )을 갖는 주 대각 공분산( $R$ )을 자료 공분산에 더해줌으로써 공분산 행렬이 특이성을 갖지 않게 만들고, 역행렬을 구할 수 있게 하였다. 여기서  $\gamma^2$ 은 가장 작은 음의 고유값이 양의 값이 되게 할 정도로 충분히 커야 하지만, 공분산의 오차도  $\gamma^2$ 의 값에 따라 증가하게 된다. 결과적으로 최적화 보간에 의한 유속산출 오차는 오직 공간적 자료 획득률에 의해 결정되며, 공분산의 역행렬을 구하기 위해 취해지는 과정에 포함된 불확실성은 결국 자료수와 유속측정 오차에

기인한다. 본 연구에서 사용된 값은  $\gamma=7$  cm/s이고, 이 값은 산출유속의 기대오차에 해당한다. Fig. 12에서 시간적 자료획득률이 70% 이상인 지점들에 대한 유속산출의 시-공간적 평균 오차들은 조직화 행렬을 더해줌에 의해 기대된 오차보다 작았다.

상관계수의 공간분포는 관측위치에 따라 변화한다(Fig. 5~7). 상관계수는 중심으로부터 약 15 $\Delta s$  이내의 범위에서는 관측위치에 관계없이 모두 지수 함수적으로 감소하는 분포를 갖는다. 그러나 15 $\Delta s$  밖에서 상관계수는 관측위치에 따라 공간적 변화가 크다. 공간적으로 평균한 상관계수(Fig. 8a-d)도 중심으로부터 약 15 $\Delta s$  이내에서는 거리에 따라 지수 함수적으로 감소하지만, 중심으로부터 15 $\Delta s$  보다 먼 곳에서는 상관계수가 거리에 따라 불규칙한 변화가 발생하고 거리에 따라 많이 감소한다. 하지만, 중심에서 거리가 15 $\Delta s$  이상인 지점들에서도 공간평균 상관계수가 0.7 이상으로 높은 상관분포를 보이기 때문에 이 공간 평균 상관계수 분포를 최적화 보간법에 적용하면 해류를 보간하려는 정점으로부터 물리적으로 먼 거리에 있는 정점들의 자료들이 많은 영향을 주어 보간된 해류에 큰 오차가 포함된다. 물리적으로 먼 거리에 위치한 정점들에서 관측된 자료들의 기여도를 줄이기 위하여 (9)와 같은 가우스 함수( $G$ )를 공간평균 상관계수 분포에 곱하였다. 본 연구에서는 이와 같은 방법으로 개선된 상관계수 분포에 유속의 표준 편차를 곱하여 지역화한 공간평균 공분산을 구하여 사용하였다.

공간평균 공분산 행렬은 조직화 행렬의 주 대각성분( $\gamma^2$ )이 49~250  $cm^2/s^2$ 의 범위 내 값을 더해 주었을 때도 역행렬이 구해지지 않았다. 이는 공간평균 상관계수의 공간적 구조특성 때문인 것으로 보이며, 이러한 공간적 구조에 의해 행렬이 매우 작은 음의 고유값을 가지게 되었을 것이다(Kim et al., 2007). 한편, 매우 큰 값의  $\gamma^2$ 을 갖는 조직화 행렬을 더해 준다면 산출유속의 오차는 증가하게 되어 보간의 의미를 잃게 된다. 공간평균 공분산 행렬에 곱해준 지역화 함수는 등방성을 갖는 가우스 함수이다. 본 연구에서  $k=10\Delta s$ 가 사용된 가우스 함수의 특성거리(e-folding distance)는 14.14 $\Delta s$ 이다. 따라서 지역화 함수의 적용은 유속산출 지점이 관측유속이 있는 구역으로부터 14 $\Delta s$  이상 떨어져 있다면 두 지점 간의 상관성이 매우 작아지게 하는 효과를 만든다.

Fig. 11에서 공간적 자료획득률이 70% 이상인 경우에는 지역화 함수가 적용된 공분산을 사용하였을 때 유속이 산출된 모든 지점에서의 오차가 다른 공분산을 사용하였을 때의 오차보다 작아 지역화 함수를 적용하는 것이 물리 현상적으로 타당하고 오차가 작은 유속을 산출(mapping)할 수 있음을 의미한다. 하지만, 공간적

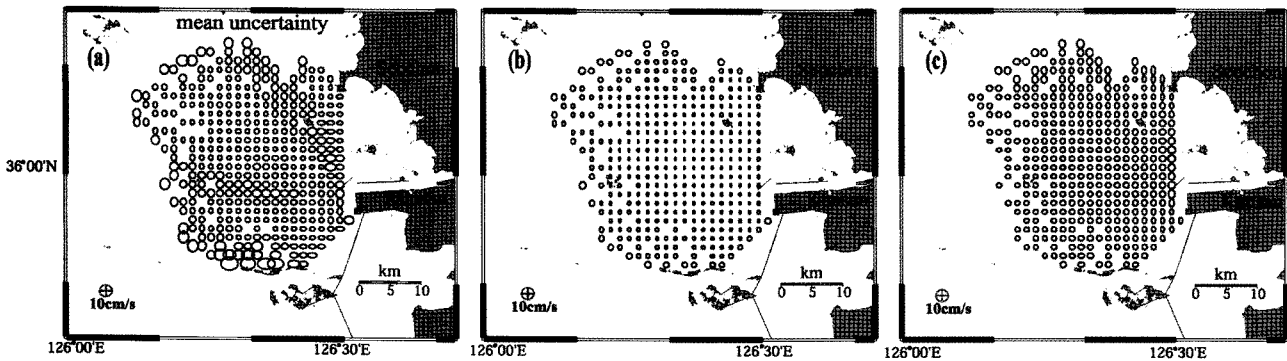


Fig. 12. Time averaged uncertainty ellipses corresponding to the mapped current vector field in the region with data coverage more than 70% using the sample covariance (a), the smoothed covariance with localization (b), and the fitted covariance (c).

자료획득 범위가 26%인 경우(Fig. 11b)에는 자료가 관측된 구역으로부터 거리가 멀어질수록 유속산출 오차가 증가하였다. 결국 구역이 넓을 때에는 지역화 함수가 적용된 공분산을 사용하면 결국 구역에서 산출유속 오차가 크게 증가하여 보간 유속을 이용하기 어렵게 만든다. 공간평균 상관계수분포를 지수함수로 맞추어 산출한 맞춤함수 평균공분산을 사용하면 다른 두 가지 공분산을 사용하였을 때보다 산출유속 오차의 공간적인 차이가 작은 결과를 보였다(Fig. 12). 특히, 공간적 자료획득률이 매우 낮은 시기에도 산출유속의 오차가 작았다(Fig. 11c). 따라서 본 연구해역에서는 공간적 자료획득률이 70% 이하로 낮을 때에는 맞춤함수 평균공분산을 이용하여 유속을 보간하는 것이 적당하다고 판단된다.

관측유속에는 전파교란과 기상상태에 의한 신호-대-잡음비의 증가로 인한 오차가 포함되어 있다. 이러한 오차는 대부분 단 주기에 걸쳐 큰 변화폭을 갖는 현상으로 나타난다. 본 연구에서는 잡음수준의 단 주기 변동을 제거하지 않고 원시 관측자료를 사용하여 객관적 분석에 의한 유속산출을 하였다. Fig. 9에서 객관적 보간에 의한 산출유속에는 원시 관측자료에 비해 뾰족하게 튀어나온(spiky) 비정상적인 자료 부분(spurious data)이 다소 억제되었지만, 보다 나은 유속산출을 위해서는 객관적 분석을 실행하기 이전에 관측 자료에 포함된 관측오차를 제거하는 과정이 필요할 것이다.

본 연구에서 평가된 산출유속의 오차는 정확도의 기하학적 감소(GDOP)에 의한 오차와는 완전히 다르다. 연구해역의 최대 GDOP는 2.8이고 대부분의 관측정점은 2.4 내외이다(Fig. 13). Kaplan *et al.*(2005)은 고주파 레이더로 관측된 유속 자료에서 GDOP가 2보다 큰 정점들의 자료는 사용하지 않았지만 본 연구에서는 GDOP 값에 관계없이 시간적 자료획득률이 70% 이상인 정점들을 모두 사용하였다. 따라서 본 연구에 사용된 관측유속은 GDOP에 상관없이 모두 동등하게 양질의 자료라고 가정된 것이고, 유속산출의 오차는 다만 자료획득률에 의해서만 결정된 것이다. 하지만, 관측된 유속은 GDOP에 의해 동서방향과 남북방향의 유속에 측정오차를 포함하므로 관측 유속의 분산이 증가하게 한다. Fig. 8에서 중앙으로부터 거리가 15As 이상 떨어진 영역에서는 공간평균 상관계수가 급격히 혹은 불규칙적으로 감소하였으며, 이는 대부분 GDOP가 2.0 이상인 관측정점들에서 얻어진 자료들에 의해 발생하였다. GDOP가 2.0 이하인 관측지점들만을 사용하여 공간평균 상관계수분포를 구하면 이러한 급격한 변화를 줄일 수 있겠지만, 보간에 의한 유속산출 지점들의 공간적 영역이 많이 줄어들게 된다.

본 연구에서도 Kim *et al.*(2007)이 토의한 바와 같은 몇 가지 가정이 객관적 유속산출 과정에 전제되어 있다. 이들은 1) 관측 유속의 평균치가 산출유속의 평균치와 같을 것이라는 가정, 2) 유속성분 간의 상관성이 무시될 수 있다는 가정, 3) 유속의 상관거리와 표준편차가 공간적으로 동일할 것이라는 가정들이다. 가정 1)은 관측 및 산출 유속사이에 치우침(bias)이 없을 것이라는 가정이므로 이를 만족하기 위해서는 치우침이 없는 충분히 많은 관측 자료가 유속산출에 사용되어야 할 것이다. 가정 2)는 본 연구해역에서 주된 해수유동이 조류이므로 무시될 수 없는 가정이다. 본 연구에서  $\bar{\rho}_w$ 를 계산하여 보았을 때 공간적으로 차이를 보였지만 0.5~0.8 범위의 값이었다. 이를 공간평균 공분산 계산에 포함하면 산출유속의 방향성이 다소 개선될 수 있을 것으로 기대되지만 본 연구에서는 계산의 편의를 위하여 무시하였다. 앞으로  $\bar{\rho}_w$ 를 포함하는 공분산의 유속산출 효과와 유의성에 대한 분석이 필요하다.

본 연구에서는 3)의 가정을 바탕으로 (8)과 같이 공간평균 공분산을 산출할 때 공간 평균된 유속편차를 사용하였다. 시간적 자료획득률이 70% 이상인 지점들에서 계산된 성분별 유속 표준편차의 분포는 Fig. 14와 같다. 유속편차를 공간적으로 평균하면 동서(남북)방향 성분에서 24.8 cm/s(25.0 cm/s)이고, 공간적 표준편차는 동서(남북)방향 성분에서 3.6 cm/s(3.2 cm/s)가 되어 공간적 평균치의 15% 미만이다. 동서방향과 남북방향의 표준편차는 지역적으로 차이를 보인다. 동서방향 유속의 표준편차는 두 레이더 설치지점

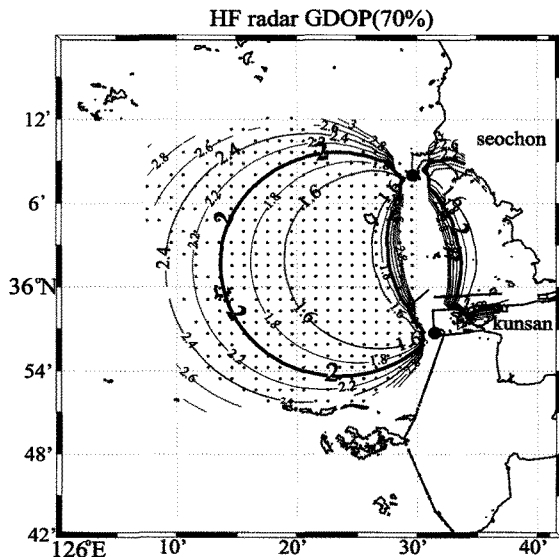


Fig. 13. Map of Geometric Dilution of Precision (GDOP) for the HF radar measurement domain.

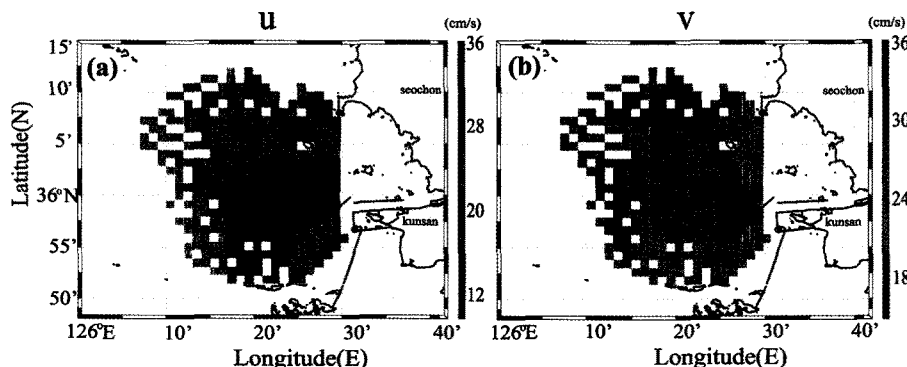


Fig. 14. The standard deviations of eastward (a) and northward (b) current component in the region within temporal coverage more than 70%.

사이에서 큰 값이고 각 레이더 설치지점 전방에서 작은 값이다. 남북방향 유속의 표준편차는 관측해역의 북쪽에서 금강하구 입구를 잇는 선 주위에서 크고 서쪽 외해에서는 작다. 이러한 표준편차의 공간적 차이를 무시하고 공간평균 표준편차를 사용하여 평균공분산을 산출하였으므로 본 연구에서 이용된 공간평균 공분산은 공간적 분포가 부드럽게 되었을 것임에도 불구하고 역행렬은 구해지지 않았다. 앞으로 공분산의 역행렬이 구해지지 않는 경우에 대한 연구도 필요하다.

연구에 사용된 관측 자료는 금강으로부터 담수 유입이 매우 적은 겨울철 자료이다. 90일 동안 관측된 유속자료를 사용하였으므로 조류변화는 충분히 보간할 수 있는 유속산출이 되었다고 판단된다. 하지만, 겨울철에는 연구해역에 북풍계열의 탁월풍이 발달하며 수층이 균질해진다. 이는 담수유입과 태양가열 등에 의해 성층화가 진행되고 풍계도 달라지는 여름철의 표층흐름 환경과는 다르다. 따라서 본 연구에서 산출된 공간평균 공분산과 이를 함수 맞춤한 공분산이 겨울과 다른 시기와 계절에도 적용될 수 있는가에 대한 연구가 필요하다. 이를 위해서는 앞으로 '구해진 공간평균 상관계수의 분포(Fig 8)와 표준편차의 분포(Fig. 14)가 시기적으로 일정한가?'에 대한 평가가 진행되어야 하고, 조류와 비조류 유속을 분리하여 비조류 유속의 공간적 상관성을 분석하는 연구가 요구된다.

## 결 론

금강하구 연안역에서 고주파 레이더를 사용하여 표층해류를 2008년 12월 1일부터 2009년 2월 28일까지 90일 동안 한 시간 간격으로 관측하였다. 관측된 표층해류 자료는 전파의 간섭과 기상 상황에 따라 일시적으로 관측이 이루어지지 않는 구역들이 발생하였다. 이와 같이 결측된 자료를 보충하기 위하여 먼저 금강하구 연안역에서 표층해류의 공간적 상관성분포 특성을 알아보고, 최적 보간법을 이용하여 공간적으로 결측된 자료에 대한 유속산출(mapping)을 수행하였으며, 산출된 유속벡터의 시간적, 공간적 특성에 대하여 조사하였다. 연구해역은 조류의 영향이 강한 곳으로서 대부분의 지역에서 표층해류의 상관계수가 0.7 이상으로 멀리 떨어진 지역에도 높은 상관성을 가진다. 그러나, 섬과 해안선 근처 그리고 두 레이더 설치장소를 연결하는 기저선(baseline)을 따라 낮은 상관성을 가진다.

자료 공분산(C), 지역화한 공간평균 공분산( $C_{sm}^G$ ), 함수맞춤 평균 공분산( $C_{\mu}$ )을 만들고 이들 세 가지 공분산을 이용하여 결측된 해류벡터 자료를 보간하고, 각 공분산으로 보간된 자료의 특성을 비교하였다. 관측 자료의 시계열 중에서 뾰족하게 튀어나온(spiky) 비정상적인 자료 부분(spurious data)을 최적 보간법이 억제하고 수정하므로 보간한 유속 자료의 분산은 원 자료의 분산보다 약간 작다. 자료의 공간적 획득률이 70% 이상일 때는 지역화한 공간평균 공분산을 사용하고, 공간적 획득률이 그 이하일 때는 맞춤 평균 공분산을 사용하면 보간 오차가 작고 보간 오차가 영역 전체에서 비교적 균일하다. 본 연구지역은 겨울철 90일 동안 대부분의 경우 공간적 획득률이 70% 이상이어서 지역화한 공간평균 공분산을 사용한 경우에 시간평균 보간 오차가 가장 작았다. 앞으로 산출유속의 치우침(bias) 정도, 유속성분간의 교차상관계수를 포함하는 효과 및 공간적으로 차이는 유속 표준편차의 적용효과에 대한 연구가 필요하며, 계절에 따른 공분산 행렬의 변화에 대한 연구가 요구된다.

## 사 사

본 연구는 국토해양부의 '해양환경보존을 위한 새만금 연안시스템 연구 프로젝트'의 연구비 지원과 군산대학교 '2008년도 교수장기해외연수 연구 프로그램'의 지원으로 수행되었다. 자료수집과 분석에 도움을 준 강 찬영, 김 대한, 김 종규, 황 초룡, 문 흥배 군에게 감사한다.

## 참고문헌

- 김창수, 이상호, 손영태, 권효근, 이광희, 김영배, 정우진, 2006. 새만금 4호 방조제 완성 전후 HF레이더로 관측된 표층 M2조류의 변화. *한국해양학회지(바다)*, **11**: 37-48.
- 김창수, 이상호, 손영태, 권효근, 이광희, 최병주, 2008. 새만금 연안역에서 HF radar에 의해 관측된 조류주기 표층해류의 변화. *한국해양학회지(바다)*, **13**(1): 56-66.
- 이상호, 문홍배, 백혜연, 김창수, 손영태, 권효근, 최병주, 2008. 금강하구 연안역에서 HF radar로 측정된 유속의 정확도. *한국해양학회지(바다)*, **13**(1): 42-55.
- 이상호, 최현용, 손영태, 권효근, 김영곤, 양재삼, 정해진, 김종구, 2003. 하계 서해안 새만금 연안역 주변 저염수와 순환. *한국해양학회지(바다)*, **8**(2): 138-150.
- Barrick, D.E., M.W. Evans, and B.L. Weber, 1977. Ocean surface currents mapped by radar, *Science*, **198**: 138-144.
- Beckenbach, E., and L. Washburn, 2004. Low frequency waves in the Santa Barbara Channel observed by high frequency radar, *J. Geophys. Res.*, 109, C02010, doi: 10.1029/2003JC001999.
- Boyd, J.D., E.P. Kennelly, and P. Pistek, 1994. Estimation of EOF expansion coefficients from incomplete data, *Deep Sea Res., Part I*, **41**(10): 1479-1488.
- Bretherton, F.P., R.E. Davis, and C.B. Fandry, 1976. A technique for objective analysis and design of oceanographic experiment applied to MODE-73, *Deep Sea Res.*, **23**: 559-582.
- Chapman, R.D., L.K. Shay, H.C. Graber, J.B. Edaon, A. Karachintsev, C.L. Trump, and D.B. Ross, 1997. On the accuracy of HF-radar surface current measurements: inter-comparisons with ship-based sensors, *J. Geophys. Res.*, **102**(C8): 18,737-18,748.
- Choi, B.H., 1980. *A tidal model of the Yellow Sea and the Eastern China Sea*. Korea Ocean Reserch and Development Institute (KORDI), Report 80-02, pp72.
- Emery, W.J. and R.E. Thomson, 1997. *Data analysis methods in physical oceanography*, Elsevier, 638 pp.
- Gaspari, G., Cohn, S.E., 1999. Construction of correlation functions in two and three dimensions. *Quart. J. Roy Meteor Soc.*, **125**: 723-757.
- Haus, B.K., J.D. Wang., J. Martinez-Pedraja, and N. Smith., 2000. Remote radar measurement of shelf currents off Key Largo, Florida, USA. *Estuarine, Coastal and Shelf Sciences*, **51**: 533-569.
- Hisaki, Y., T. Tokeshi, W. Fujiie, K. Sato., and S. Fujii., 2001. Surface current variability east of Okinawa Island obtained from remotely sensed and in situ observational data. *J. Geophys. Res.*, **106**(12): 31057-31073.
- Houseago-Stokes, R.E. and P.G. Challenor., 2004. Using PPCA to estimate EOFs in the presence of missing values, *J. Atmos. Oce-*

- anic Technol.*, **21**: 1471–1480.
- Kaplan D.M. and John Largier, and Louis W. Botsford, 2005. HF radar observations of surface circulation off Bodega Bay (northern California, USA), *J. Geophys. Res.*, **110**, C10020, doi:10.1029/2005JC002959.
- Kim, S.Y., E.J. Terrill, and B.D. Cornuelle, 2007. Objectively mapping HF radar-derived surface current data using measured and idealized data covariance matrices, *J. Geophys. Res.*, **112**: C06021, doi:10.1029/2006JC003756.
- Knight, P. J., Howarth, M. J., 1999. The flow through the northern channel of the Irish Sea. *Continental Shelf Research*, **19**: 693–713.
- Kovacevic, V., M. Gacic., I. M. Mosquera., A. Mozzoldi, A. Mazzoldi., and S. Marinetti., 2004. HF radar observations in the northern Adriatic: surface current field in front of the Venetian Lagoon. *J. Marine Systems*, **51**: 95–122.
- Lee, S.H. and Beardsey, 1999. Influence of stratification on residual tidal currents in the Yellow Sea. *J. Geophys. Res.* **104**(C7): 15679–15701.
- Lipa, B.J., and D.E. Barrick., 1983. Least squares methods for the extraction of surface currents from CODAR crissed-loop data: Application at ARSLOE, *IEEE J. Oceanic Eng.*, **13**(2), 507–513.
- Lipa, B.J., and D.E. Barrick., 1996. *Comparison of direction-finding and beam-forming in HF radar ocean surface current mapping*. Phase 1 SBIR Final report. Contract No. 50-DKNA-5-00092. NOAA, Rockville, MD.
- Lippahardt, B.L., Jr., A.D. Kirwan Jr., C.E. Grosch., J.K. Lewis., and J.D. Paduan, 2000. Blending HF radar and model velocities in Monterey Bay through normal mode analysis, *J. Geophys. Res.*, **105**(C2): 3425–3450.
- Paduan, J.D. and Graber, H.C., 1997. Introduction to HF radar, reality and myth. *Oceanography*, **10**: 36–39.
- Prandle, D. 1987. The fine structure of near shore tidal and residual circulations revealed by H.F. radar surface current measurements. *J. Physical Oceanography*, **17**: 231–245.
- Son, Y.T., S.H. Lee., C.S. Kim., J.C. Lee., and G.H. Lee., 2007. Surface current variability in the Keum River Estuary (South Korea) during summer 2002 as observed by high-frequency radar and coastal monitoring buoy. *Continental Shelf Research*, **27**: 43–63.
- Wells, D., and Beck, N., 1987. *Guide to GPS positioning* (second print), Canadian GPS Associates, Fredericton, N.B.

---

2010년 11월 2일 원고접수

2010년 12월 9일 수정본 채택

담당편집위원: 장경일