

Article

기상뜰개로 관측된 동해에서의 취송류

이동규\*

부산대학교 자연과학대학 해양학과  
(609-735) 부산광역시 금정구 부산대학로 63번길 2

Wind-driven Current in the East Sea Observed from Mini-met Drifters

Dong-Kyu Lee\*

Department of Oceanography, College of Natural Sciences, Pusan National University  
Busan 609-735, Korea

**Abstract :** A wind-driven current in the East Sea from Lagrangian measurements of wind and current at 15 m using MiniMet drifters was analyzed. Spectral analysis of the current from 217 pieces of a 10 day-long time series shows the dominant energy at the inertial frequency for the current at 15 m. Wind has energy peaks at a 0.2-0.5 cycles per day (cpd) frequency band. The power spectrum of the clockwise rotating component is predominant for the current and was 1.5-2 times larger than the anticlockwise rotating component for wind. Co-spectra between the wind and current show two peak frequency bands at sub-inertial frequency and 0.5-0.3 cpd. Coherences between the wind and current at those peak frequencies are significant with 95% confidence and phase differences were 90-100°. From the phase differences, the e-folding depth is estimated as 17 m and this e-folding depth is smaller than the estimation by Chereskin's (1999) 25 m using a moored Acoustic Doppler Current Profiler and an anemometer installed at the surface buoy. The angle between the wind-driven current (or ageostrophic current) and wind from this study was also much larger than the global estimate by Rio and Hernandez (2003) using reanalysis wind and drifters. The possible explanation for the discrepancy comes from the fact that the current is driven by a wind of smaller length scale than 250 km but the satellite or the reanalysis products do not resolve winds of length scale smaller than 250 km. Large rms differences between Mini-Met and QuickSCAT wind on spatial lags smaller than 175 km substantiate this explanation.

**Key words :** wind-driven current, East Sea (Japan Sea), inertial current, angle between wind and current

1. 서 론

대양에서의 취송류는 에크만에 의해 이론이 정립되었고 수치 모델 등에 의해 사용되고 있으나 관측된 해상풍과 해류를 직접 비교하면 에크만 층에서의 바람에 의해 생성된 해류는 에크만 이론과(Ekman 1905) 다르다는 것이 밝혀졌다. Pollard and Millard (1970)는 계류관측부이에 의

해 관측된 해상풍과 해류자료를 이용하여 표층 혼합층에서의 바람 장력이 수심에 따라 선형으로 감소하는 모델 (slab model)이 가장 관측결과와 부합한다는 연구를 하였다. Ralph and Niiler (1999)는 뜰개에 의해 관측된 15 m 층의 해류와 National Center for Environment Prediction (NCEP)에 의해 기상모델로 재구성(reanalysis)된 해상풍 자료를 이용하여 에크만 층의 두께가 밀도 혼합층의 두께에 의해 결정되는 것이 아니고 바람 장력에 의해 결정되는 모델이 가장 적합하다는 것을 보였다. 반면 Chereskin

\*Corresponding author. E-mail : dglee@pnu.edu

(1995)은 Acoustic Doppler Current Profiler(ADCP)를 이용하여 수심 8 m부터 4 m 간격으로 해류를 측정하여 에크만 나선(Ekman Spiral)을 관측하였으나 에크만 층의 깊이가 지금까지 알려진 에크만 층(Ekman Layer)의 깊이보다 아주 얇게 나타난 관측결과를 보였다.

육지로 둘러 쌓여 있는 변두리 바다(marginal sea)인 동해는 주변 육지의 영향을 받아 대양(open ocean)과 다른 해양환경 특성을 가져 취송류 관측 및 연구가 많이 이루어진 대양과 취송류 특성이 다를 수 있다. 예를 들면 여름철부터 12월까지 동중국해로부터 저염수가 동해로 유입되어 여름-가을철 동해의 해수 특성이 겨울-봄철의 해수 특성과 아주 다르다. 동해에서 직접 관측에 의한 취송류 연구는 지정학적인 이유 및 활발한 어업 활동으로 인한 해상관측부지 설치의 어려움으로 이제까지 거의 이루어지지 않았다. Nam et al. (2012)은 2007년 태풍 만이가 동해를 통과할 때 태풍에 의한 취송류를 연구하였으나 해상풍과 해류는 직접관측이 아닌 원격탐사에 의한 영상(SAR: Synthetic Aperture Radar)이나 해표면 고도를 이용하여 연구하였다. Ebuchi et al. (2009)은 HF 레이더 및 ADCP를 이용하여 소야 해협에서 형성되는 소야난류(Soya Warm Current)에 대해 연구하였으나, 취송류 연구에 ECMWF에 의해 재구성된 해상풍을 이용하였고 폭 30 km 미만의 좁은 해협에서의 국지적인 연구라는 제한이 있다. 일본 기상청에 의해 야마도 해팽(rise) 부근에 1990년대부터 반영구적으로 설치된 관측 부지는 기상부이로서 해류 등의 해양 관측은 이루어지지 않고 있어 취송류 연구에는 사용할 수 없는 실정이다.

1999년부터 2001년까지 동해에서 43개의 기상뜰개를 투하하여 동해 전해역에서 15 m 깊이의 해류 및 해표면에서의 해상풍을 관측하고 QuikSCAT에 의해 관측된 해상풍을 이용하여 해발 10 m 높이의 해상풍으로 해표면 해상풍을 보정하였다. 본 논문에서 관측된 해상풍과 해류를 이용하여 동해에서의 취송류를 연구하였고 대양에서 계류해류계를 이용한 취송류 연구와 뜰개에 의한 취송류 연구와 비교하였다.

## 2. 자료 및 방법

본 연구에 사용된 기상뜰개는 표준뜰개가 측정하는 해류 및 해표면 온도 외에 해상풍 및 기압을 측정하게 설계되었다(Fig. 1). 바람의 속도는 수중음향측정기(WOTAN hydrophone)을 이용하여 수중음향의 강도를 20분 동안 5분 간격으로 4회 관측하여 주파수 1-2 kHz 사이의 음향 에너지를 구하여 추정한다(Vagle et al. 1990). 바람의 방향은 표면 부이에 부착된 날개(Fig. 1)에 의해 표면부이가 바람이 부는 방향으로 위치하게 설계하여 측정된 부이의

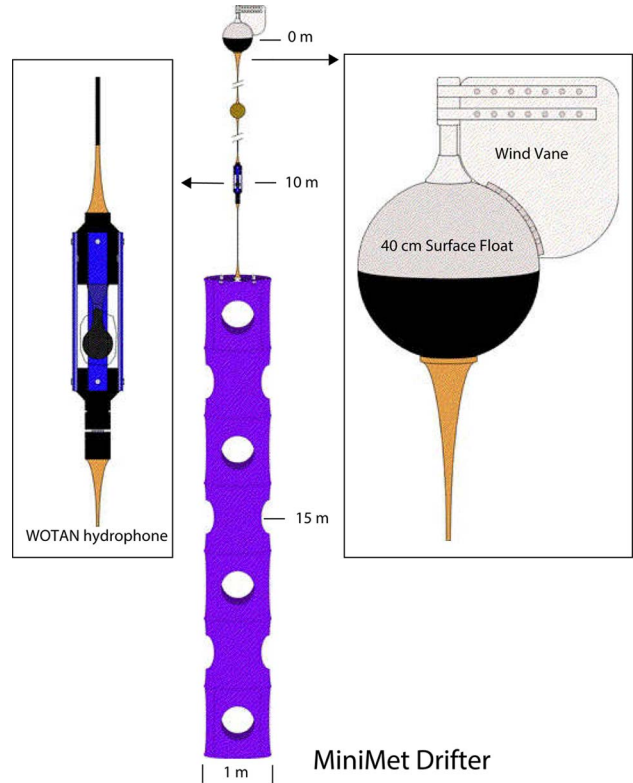


Fig. 1. Schematics of the MiniMet drifter designed for measuring wind and current at 15 m

방향과 자북과의 상대 각도를 나침반으로 측정하여 추정한다. 2011년 이후부터 사용되는 기상뜰개는 수중음향측정기를 음파풍향풍속계(sonic anemometer)로 대체하여 풍속 및 풍향을 측정한다. 기상뜰개에 의해 관측된 해상풍을 인공위성(QuikSCAT)에 의해 관측된 해상풍과 비교하여 해표면의 해상풍을 해발 10 m 층의 해상풍으로 보정하였다. QuikSCAT 위성은 극초단파(13.4 GHz)를 바다에 발사하여 반사되어 오는 전파를 측정하는 산란측정기(scatterometer)를 이용한다. 산란측정기는 반사되는 극초단파의 강도가 바람의 세기에 상관관계가 있는 해표면의 거칠정도(roughness)에 의해 변하는 특성을 이용하여 해상풍을 측정한다(Hoffman and Leidner, 2005). QuikSCAT은 25 km의 수평 해상도를 가지며 해표면에서 10 m 고도의 해상풍을 측정하게 보정되었다. 실제 관측치와 비교해본 결과 속도의 평균편차(rms difference)는 1.01 m/s였고 방향의 평균편차는 23°였다(Ebuchi et al. 2002). 본 연구에 사용된 QuikSCAT 해상풍은 L2B 자료를 [podaac.jpl.nasa.gov](http://podaac.jpl.nasa.gov)에서 내려 받아 사용하였다.

기상뜰개에 의해 관측된 해상풍과 관측시간 1시간 이내 그리고 관측지점 50 km 이내에 있는 QuikSCAT에 의한 해상풍과 비교하였다. 음향에너지에 의한 풍속 추정은 풍속이 2 m/s 이하이면 정확도가 떨어져(Vagle et al. 1990)

풍속이 2 m/s인 경우만 사용하였고 QuikSCAT에 의한 풍향은 우천 시 오차가 커지는 경향이 있어 풍향 비교 결과 차이가 90도 이상인 경우는 비교에서 제외하였다. 풍속은 Vagel et al. (1990)의 연구에 의한 관계식을 이용하지 않고 주파수 1-2 kHz의 음향에너지와 QuikSCAT에 의해 측정된 풍속과 상관관계를 구하여 해발 10 m 높이의 풍속을 추정하였다. 이에 대한 이유는 Milliff et al. (2003)에 의해 상세히 기술되어 있다. 기상뜰개에 의해 추정된 풍속과 QuikSCAT에 의해 측정된 풍속을 Fig. 2에 제시하였으며

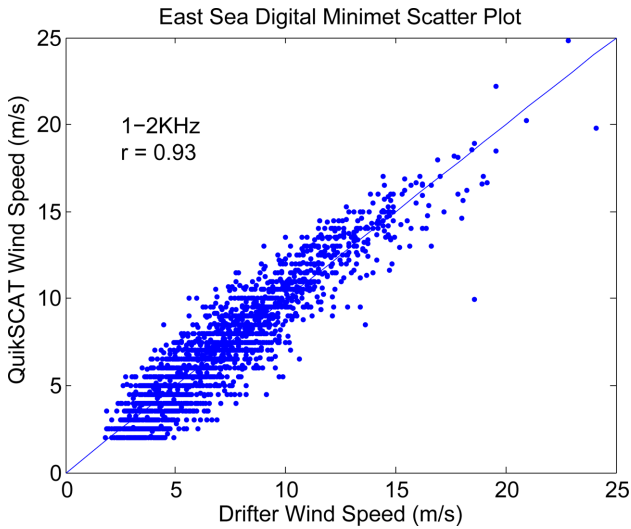


Fig. 2. Calibrated wind speed from 1-2 kHz underwater acoustic power measured by MiniMet drifters and wind speed measured from QuikSCAT

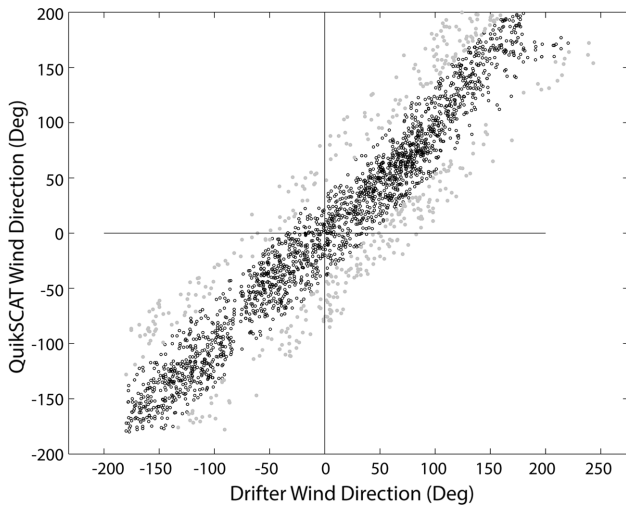


Fig. 3. Scatter plot of wind direction from MiniMet drifters and QuikSCAT for the wind direction calibration. RMS differences between MiniMet and QuikSCAT wind direction larger than two standard deviations are marked as gray color

두 풍속의 상관계수는 0.93이었다. 기상뜰개는 해표면의 풍향을 측정하기 때문에 해발 10 m의 풍향을 구하기 위하여 QuikSCAT에 의해 측정된 풍향을 이용하여 기상뜰개에 의해 측정된 풍향을 보정하였다. QuikSCAT 풍향 또한 오차가 23°로(Ebuchi et al. 2002) 연구되었기 때문에 기상뜰개와 QuikSCAT 풍향 차이의 표준편차를 구하여 두 풍향의 차이가 표준편차의 2배보다 큰 경우를(Fig. 3에서 회색으로 표시된 점) 제외하고 기상뜰개의 풍향을 보정하였다. 보정식은  $D_{minimet} = 0.98 \times D_{QuikSCAT} - 1$  으로 풍향의 경우 해표면에서 해발 10 m 높이까지의 경계층에서 거의 변하지 않았다. 기상뜰개의 풍향을 보정(calibration)하는 이유는 기상뜰개가 풍향을 부정확하게 측정하기 때문이 아니고 10 m 층의 바람을 구하기 위한 것이기 때문에 QuikSCAT에 의한 풍향을 이용하여 보정하였다고 해도 기상뜰개에 의해 측정된 풍향의 오차가 커지는 것은 아니다. 기상뜰개는 풍향과 풍속을 1.5시간마다 측정하여 저장한 후 2-5시간 마다 통과하는 ARGOS 위성에서 자료를 전송한다. 기상뜰개의 위치는 ARGOS 위성이 통과할 때만 측정이 되기 때문에 해류는 뜰개의 위치를 1.5시간 간격으로 내삽하여 구했다.

### 3. 결 과

본 연구에 사용된 기상 뜰개의 궤적을 관성주기의 해류를 제거한 다음 Fig. 4에 나타내었다. 뜰개 투하가 어려운 동해 북동부 해역과 에디가 많이 관측되는 울릉분지와 동한만을 제외한 해역에 대체적으로 자료가 고르게 분포하는 것으로 나타났다. 기상뜰개에 의해 관측되는 해류는 지형류 및 비지형류인 취송류를 모두 포함하고 있기 때문에 취송류를 연구하기 위해 먼저 해상풍의 시계열 자료를 분석한 결과 주기 10일 이내의 주기에 에너지가 가장 크다는 것을 알 수 있었다. 이에 기상뜰개의 궤적을 따라서 1.5시간 간격의 해류와 해상풍 자료를 만든 다음 10일 길이의 217개 시계열 자료를 구성하고 이 자료로부터 스펙트럼 분석을 하여 평균 파워스펙트럼 및 평균상관관계 등을 계산하였다. Fig. 5a는 해류의 분산보존 파워스펙트럼(variance preserving power spectrum)을 시계방향 성분과 반시계방향 성분으로 나누어 구한 값을 나타낸다. 10일 이하의 짧은 주기 해류 에너지는 시계방향 회전성분의 관성주기(북위 37°에서 20시간)를 가지는 관성해류(inertial current)가 압도적으로 크게 나타났다. 동해에서 반일 주기 및 일일 주기를 가지는 조류의 크기는 관성해류에 비해 아주 작게 나타났다. 뜰개를 이용하여 전 지구 해양의 표층해류를 분석한 Thompson et al. (1998)에 의하면 관성해류에 의한 관성에너지는 표층 운동에너지의 절반 정도를 차지할 정도로 크고 Park et al. (2005)는 Argo 뜰개를

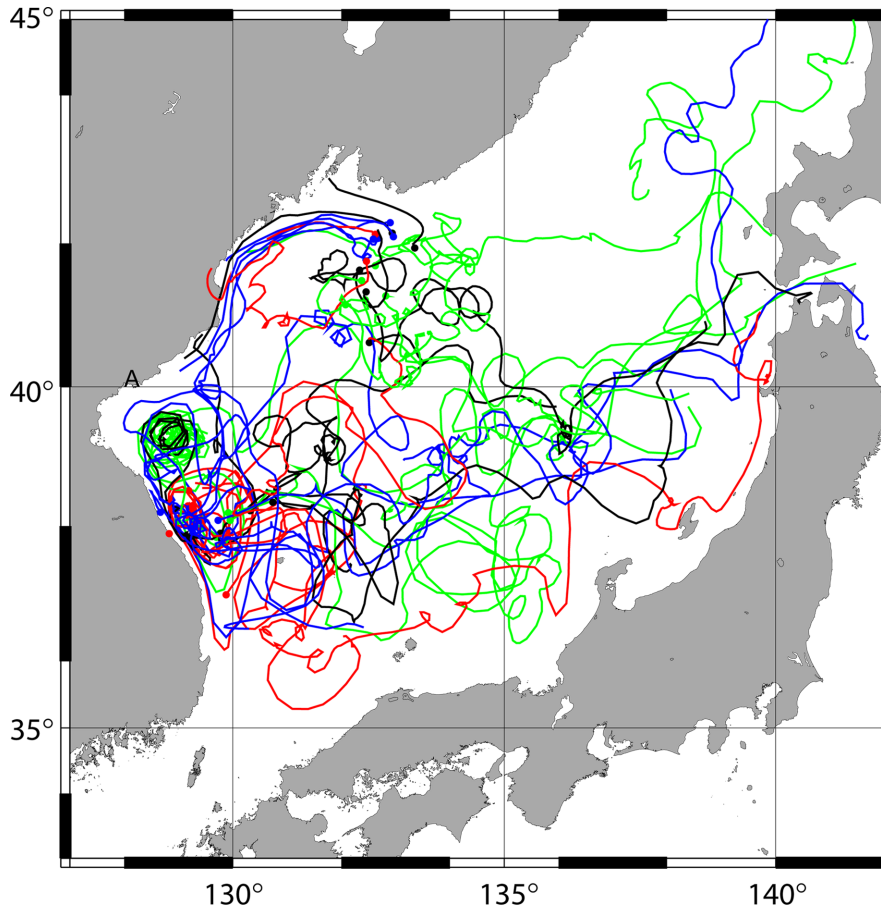


Fig. 4. MiniMet drifter tracks used for spectral analysis of wind-driven current. Solid dots indicate deployment locations of drifters

이용한 연구에서 중위도 해역(30°-45°N)에서 가장 크다는 것을 밝혔다. 반면 바람의 마찰속도(friction velocity  $U_* = \sqrt{\tau/\rho}$ , 여기서  $\tau$ 는 바람장력 그리고  $\rho$ 는 해수밀도)는 2-3일 주기의 시계방향 회전성분의 운동이 가장 크게 나타났다(Fig. 5b). Elipot and Gille (2009)에 의한 남반구 40°-42°S에서 ECMWF의 바람자료를 이용한 취송류 연구를 하였는데, 시계방향회전성분이 전 주기에서 큰 것은 본 연구의 결과와 같으나 2-3일 주기의 에너지가 3-30일 주기의 에너지와 거의 비슷한 결과를 보였다. 이 차이는 기상모델로 재구성된 ECMWF 바람장과 해류를 따라 움직이는 기상뜰개에 의해 측정된 바람장의 차이에서 기인한 것으로 사료되며 4장 토의에서 다시 설명한다. 해상풍과 해류와의 상호스펙트럼은(co-spectrum; Fig. 5c) 시계방향 회전 성분의 아관성 주파수대(subinertial frequency band)와 바람의 에너지가 가장 큰 2-3일 주기의 주파수 대역에서 크게 나타났다.

주기 별 해상풍과 해류와의 상관관계(coherence)와 위상(phase)은 Fig. 6에 나타내었는데, 아관성주파수대와 2-3일 주기 주파수대에서 95% 신뢰도보다 크게 나타나 이

주파수 대역의 해류의 주 생성 에너지는 해상풍이라고 해석할 수 있다. 위상차이는 아관성 주파수대에서 90° 2-3일 주기 주파수대에서 100°로 계산되었다.

#### 4. 토 의

기상뜰개에 의해 수심 15 m에서 측정된 해류는 바람의 시계방향회전성분에서 시계방향으로 90-100° 방향으로 관성주기에서 2-3일 주기까지 거의 같은 각도로 반응하였으며 아관성주기에서(subinertial frequency) 상관계수가 가장 크게 나타났다. Ekman (1905)에 의하면 취송류는 다음과 같이 나타낼 수가 있다.

$$\vec{U}_E = V_0 \exp\left(\frac{z}{D_e}\right) \exp\left(i\left(\frac{\pi}{4} + \frac{z}{D_e}\right)\right),$$

$$V_0 = \frac{\tau_0}{\rho \sqrt{A_v f}}; D_e = \sqrt{\frac{2A_v}{f}}.$$

여기서  $D_e$ 는 표층속도보다 1/e로 감소하는 수심이고  $A_v$ 는

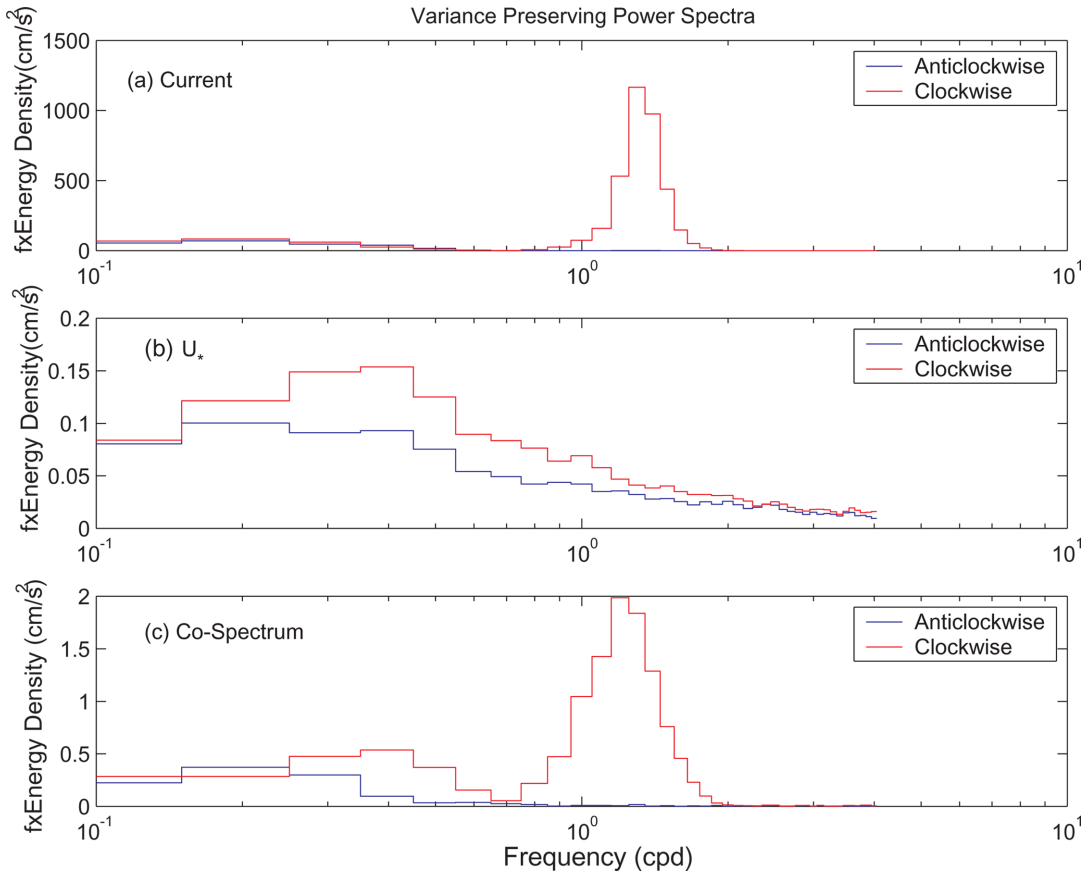


Fig. 5. Variance preserving rotary spectra from MiniMet measured (a) current, (b) wind friction velocity and (c) variance preserving co-spectrum between current and wind

에디점성계수(eddy viscosity),  $f$ 는 코리올리스 힘 그리고  $\tau_0$ 는 해표면에서의 바람장력이다.

Fig. 7에 나타낸 바와 같이 이 연구에 의해 관측된 취송류는 바람과 해류가 이루는 각도를 95°로 봤을 때 에크만층의 깊이는 약 17 m이고 약 8 m/s의 바람에 2.6 cm/s의 취송류가 발생하여 Chereskin (1995)에 의해 관측된 수심 15 m에서의 취송류(각도 80°에 3.4 cm/s의 크기 그리고  $D_e$ 는 25 m)보다 같은 크기의 바람에 다소 약한 취송류를 보였다. 이는 Chereskin (1995)의 연구에 사용된 바람은 북풍이 평균 7 m/s로 비교적 강하게 계속적으로 부는 4월부터 10월까지의 기간 만 사용하였기 때문이라고 사료된다. 그러나 적도 해역에서 Dillon et al. (1989)은 본 관측과 유사한 18 m의  $D_e$ 를 얻었다.

Ekman 층의 깊이와 성층과의 관계는 서론에서 기술한 대로 혼합층의 깊이와 Ekman 층의 깊이와 상관관계가 거의 없는 것으로 관측되었다(Ralph and Niiler 1999). 기상 뜰개에 해상풍을 관측한 시간과 해역의 해수 특성을 추정할 수 있는 방법이 월평균 해수 특성을 이용할 수 밖에 없어 성층의 영향을 정확히 분석할 수 없고 아극전선 이북

과 이남, 그리고 계절에 따른 변동을 살펴 보았으나 결과는 전체 평균과 큰 차이가 없었다. 또한 혼합층 수심이 Ekman층 수심보다 얕아져 성층이 영향을 줄 수도 있는 여름철(6-9월) 평균 바람 장력이 0.1 dyne/cm<sup>2</sup> 이하로(Lee 1999) 관측되어, 성층이 취송류에 영향을 주는 것으로 연구된 대양에 비해 아주 약하고 이렇게 약한 해상풍에 의한 취송류는 1 cm/s 이하로 뜰개에 의한 해류관측 오차범위 내에 들어 있어 성층이 취송류에 미치는 영향은 본 논문에 포함시키지 않았다.

Rio and Hernandez (2003)는 전 세계의 뜰개, 해표면 고도 자료 그리고 ECMWF에서 재구성된 해상풍 등을 이용하여 취송류를 해역 별, 계절별로 나누어 구하였는데, 바람과 취송류와의 각도는 북위 30도 이북에서 40-60°를 얻었고(45 m의  $D_e$ ), 이와 유사하게 Ralph and Niiler (1999)는 NCEP의 해상풍 자료를 이용하여  $55 \pm 5^\circ$ 를 얻었다. 이들의 연구결과는 본 연구와 아주 상이한 결과를 보이는 데 특히 바람과 취송류와의 각도에서 큰 차이가 난다. Fig. 8에 기상뜰개에 의해 관측된 해상풍과 QuikSCAT에 의해 관측된 해상풍의 관측 거리에 따른 풍속과 풍향

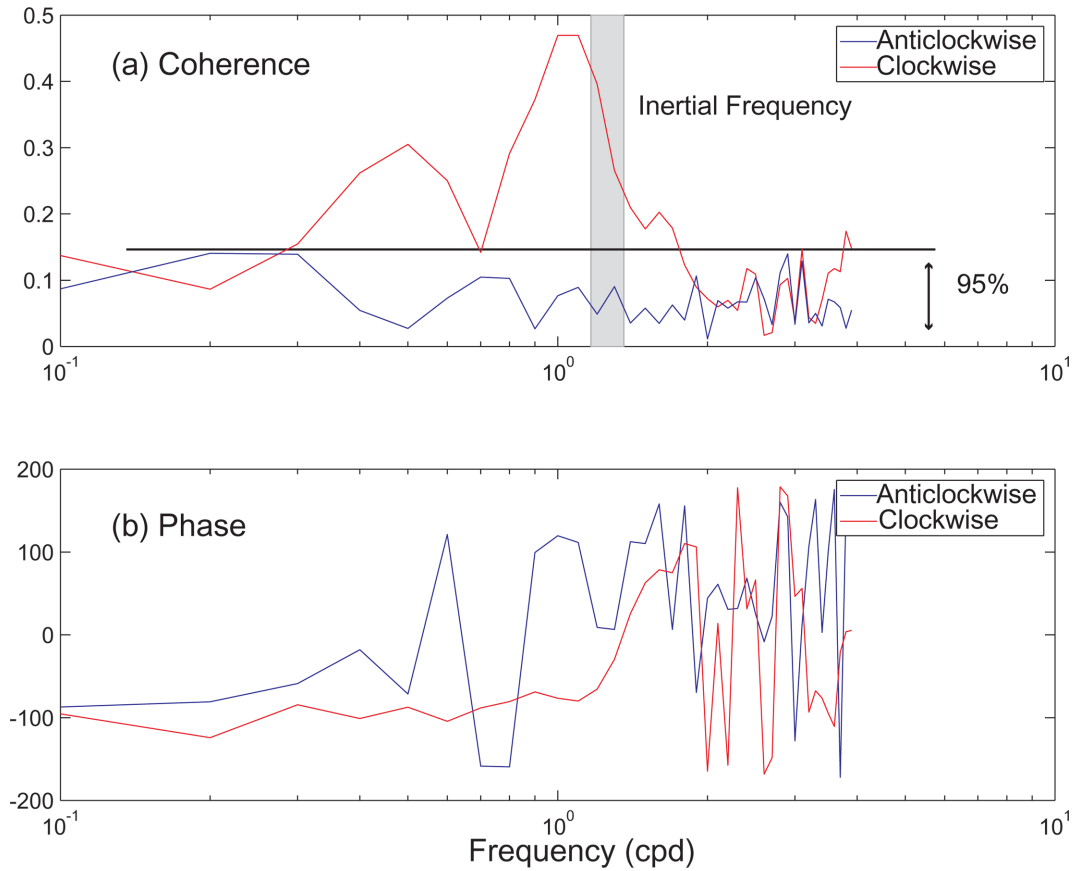


Fig. 6. (a) Coherence and (b) phase between MiniMet measured wind and current in the East Sea. Inertial frequency band is marked by gray box

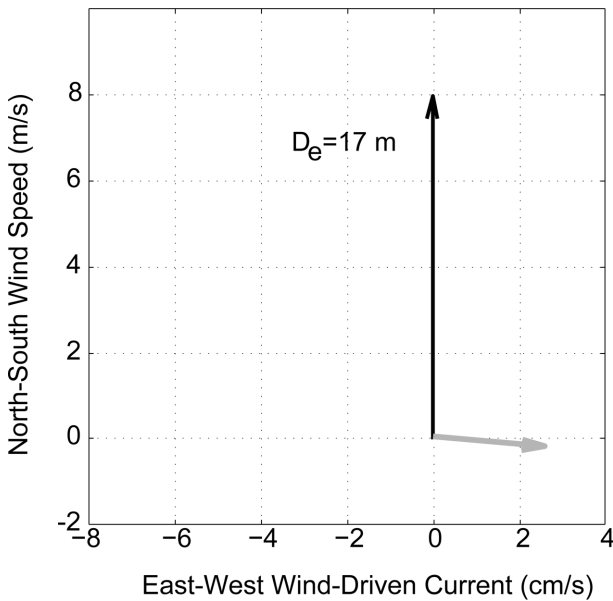
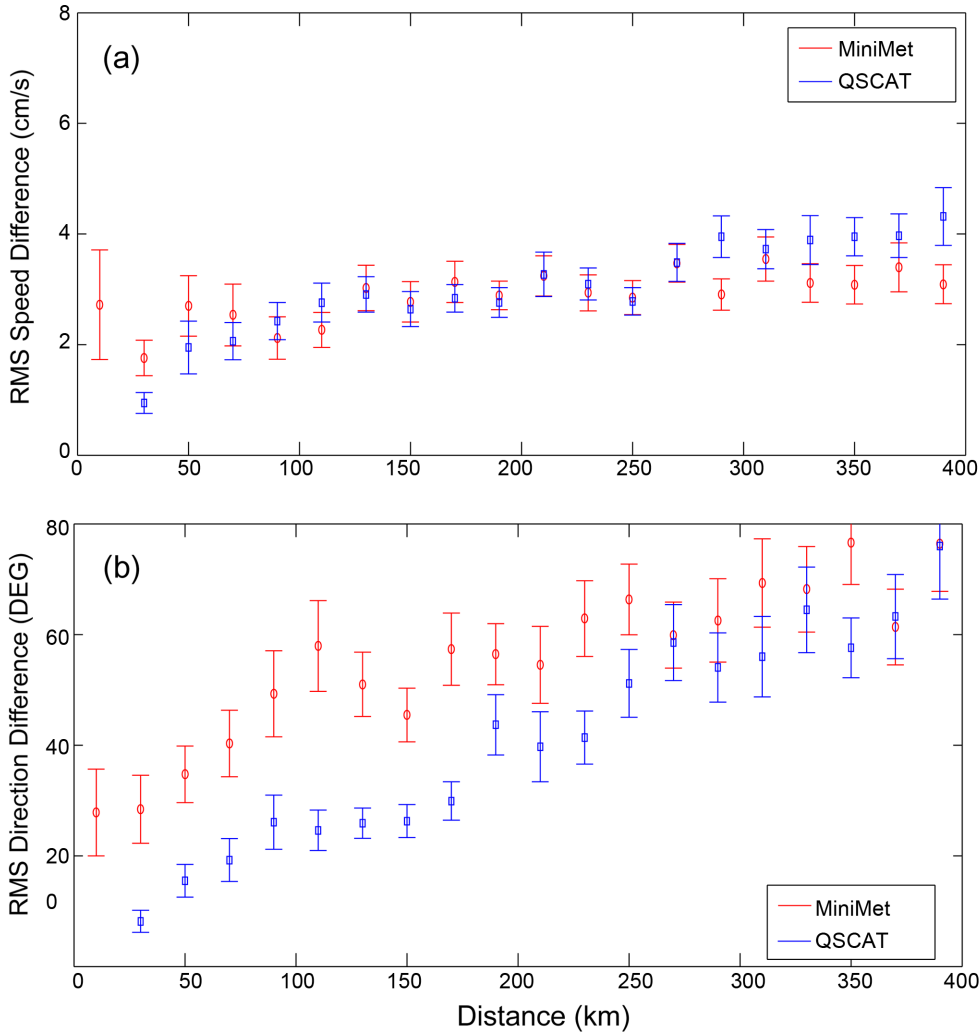


Fig. 7. Mean wind-driven current from MiniMet drifters. Scales are cm/s for current (gray arrow) and m/s for wind (black arrow)

의 평균제곱근(rms) 차이를 나타내었다. 관측거리에 따른 풍향과 풍속의 차이는 동일 시간대에 모든 기상뜰개에 의해 관측된 값들의 차이이며 20 km의 구간으로 나누어 그 차이에 대한 평균 제곱근과 표준편차를 구하였다. 예를 들면 어느 특정 시간대에 기상뜰개 3대(A, B, C)가 3 지역에서 해상풍을 관측하였다면 A-B, A-C, B-C 쌍(pair) 간의 거리 및 관측 차이 값들이 생성된다. 이렇게 만들어진 쌍들로부터 풍향 풍속 차이를 계산하였고 QuikSCAT은 각 기상뜰개와 동일한 위치와 시간에서(co-location) 관측된 풍향 풍속 값으로 계산하였다. 특히 풍향은 거리 250 km 이하에서 기상뜰개가 QuikSCAT에 의한 값보다 30-40° 정도 크게 나타났다. 풍속은 75 km 이하에서 1 m/s 정도 기상뜰개가 QuikSCAT보다 컸다. Fig. 8의 결과가 의미하는 것은 QuikSCAT이나 수평 해상도 1° 이상의 ECMWF나 NCEP 등의 해상풍 자료는 중규모(meso-scale) 크기의 변동이 포함되지 않았다는 사실이다. 본 연구에 나타난 바와 같이 아관성주기에서 취송류의 에너지가 가장 크다면 북위 37°에서 관성해류의 반경은 약 10 km 이내로 작고 주로 시계방향회전성분의 바람에 의해



**Fig. 8. RMS differences of wind speed and direction vs. spatial lag for (a) wind speed and (b) wind direction in the East Sea. Bars indicate one standard deviations**

관성해류가 생성-유지되기 때문에 취송류 연구에 사용되는 바람은 250 km 이내 규모 크기의 바람이 포함되어야만 적합하다고 볼 수 있다. 또한 본 연구의 결과와 재구성 해상풍을 사용한 연구보다 계류 해류계에 의해 관측된 해류와 더 근접한 사실이 위에 기술한 바를 뒷받침 한다고 볼 수 있다.

**사 사**

본 연구는 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

**참고문헌**

Chereskin TK (1995) Direct evidence for an Ekman balance

in the California Current. *J Geophys Res-Oceans* **100**(C9): 18261-18269

Dillon TM, Moum JN, Chereskin TK, Caldwell DR (1989) Zonal momentum balance at the equator. *J Phys Oceanogr* **19**:561-570

Ebuchi N, Graber H, Caruso M (2002) Evaluation of wind vectors observed by QuikSCAT/SeaWinds using Ocean Buoy data. *J Atmos Ocean Tech* **19**:2049-2062

Ebuchi N, Fukamachi Y, Ohshima K, Wakatsuchi M (2009) Subinertial and seasonal variation in the Soya Warm Current revealed by HF radars, coastal tide gauges and bottom-mounted ADCP. *J Oceanogr* **65**:31-43

Ekman VW (1905) On the influence of the Earth's rotation on ocean currents. *Ark Mat Astron Fys* **2**(11):1-53

Elipot S, Gille ST (2009) Estimates of wind energy input to the Ekman layer in the Southern Ocean from surface

- drifter data. *J Geophys Res* **114**:C06003
- Hoffman RN, Leidner MS (2005) An introduction to the near-real-time QuikSCAT data. *Weather Forecast* **20**:476-493. doi:10.1175/WAF841.1
- Lee D-K (1998) Sea surface wind around Korea observed by three satellite sensors (SSM/I, ERS and NSCAT). *J Korean Meteor Soc* **34**:593-601
- Milliff RF, Niiler PP, Morzel J, Sybrandy AE, Nychka D, Large WG (2003) Mesoscale correlation length scales from NSCAT and Minimet surface wind retrievals in the Labrador Sea. *J Atmos Ocean Tech* **20**:513-533
- Nam SH, Kim D-J, Moon WM (2012) Observed impact of mesoscale circulation on oceanic response to Typhoon Man-Yi (2007). *Ocean Dynam* **62**:1-12
- Pollard RT, Millard JRC (1970) Comparison between observed and simulated wind-generated inertial oscillations. *Deep-Sea Res* **17**:813-821
- Ralph EA, Niiler PP (1999) Wind-driven currents in the tropical Pacific. *J Phys Oceanogr* **29**:2121-2129
- Rio M-H, Hernandez F (2003) High-frequency response of wind-driven currents measured by drifting buoys and altimetry over the world ocean. *J Geophys Res* **108**(C8): 3283
- Thomson RE, LeBlond PH, Rabinovich AB (1998) Satellite tracked drifter measurements of inertial and semidiurnal currents in the northeast Pacific. *J Geophys Res* **103**: 1039-1052
- Vagle S, Large WG, Farmer DM (1990) An evaluation of the WOTAN technique of inferring oceanic winds from underwater ambient sound. *J Atmos Ocean Tech* **7**:576-595
- 

*Received Apr. 22, 2014*

*Revised May 28, 2014*

*Accepted Jun. 12, 2014*