

# 이에도 종합해양과학기지에서 관측된 난류 플럭스의 계절적 특성

오현미<sup>1</sup> · 하경자<sup>1,\*</sup> · 심재설<sup>2</sup> · 현유경<sup>3</sup> · 윤경숙<sup>1</sup>

<sup>1</sup>부산대학교 지구환경시스템학부

<sup>2</sup>한국해양연구원

<sup>3</sup>기상연구소

(2007년 11월 27일 접수; 2007년 12월 31일 승인)

## Seasonal Characteristics of Turbulent Fluxes Observed at Ieodo Ocean Research Station

Oh, Hyun-Mi<sup>1</sup>, Kyung-Ja Ha<sup>1,\*</sup>, Jae Seol Shim<sup>2</sup>, Yu-Kyung Hyun<sup>3</sup> and Kyung-Sook Yun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Division of Earth Environmental System, Pusan National University

<sup>2</sup>Korea Ocean Research & Development Institute

<sup>3</sup>National Institute of Meteorological Research

(Manuscript received 27 November 2007; in final form 31 December 2007)

### Abstract

We have investigated the seasonal characteristics of surface turbulent fluxes observed at Ieodo Ocean Research Station from 2005 to 2006. Both 10Hz and 30 minutes flux data are quality controlled, and tilt correction is performed in 10Hz data before quality control. The turbulent fluxes of open sea shows clear seasonal variations, though diurnal variations are barely shown. The seasonal ratio of stable and unstable conditions are closely related to the temperature difference between sea surface and air. In stable and semi-stable condition, latent and sensible heat fluxes have very small values without any relationship with wind speed. Though friction velocity shows slightly increasing trend with wind speed, it has many outliers. In unstable condition, turbulent fluxes increased with wind speed. Especially, latent heat flux increased rapidly during DJF. The latent heat flux at high wind speeds is more scatter.

**Key words:** Ieodo station, open sea, surface turbulent fluxes, stability, tilt correction

### 1. 서론

지구 표면의 70% 이상은 해양, 담수, 빙하의 세 가지 형태의 물로 이루어져있다. 그렇기 때문에 기상 및 기후 시스템의 이해와 정확한 예측을 위해서는 대기와 해양의 상호작용을 정밀하게 관측하는 것이 중요하다. 대기-해양 상호작용을 관측하는 것은 해상에 관측 플랫폼을 설치해야 하는 문제 때문에 육지에서 비슷한 관

측을 하는 것 보다 본질적으로 어렵다. 초기에는 항해하는 배에서 측풍기구 (pilot balloon)를 이용하여 대기해양 상호작용을 관측하였으며 (Wilmot, 1917; Murrow and Henry, 1965), 1960년대에는 큰 규모의 현장 관측으로 연구의 방향이 옮겨갔다 (International and Scientific Management Group of GATE, 1974; Webster and Lukas, 1992). GATE (Global Atmospheric research program atlantic Tropical Experiments), 그리고 TOGA (Tropical Ocean Global Atmosphere), TOGA-COARE (Tropical Ocean Global Atmosphere and Coupled Ocean Atmosphere Response Experiment)와 같은 관측 프로젝트들이 대표적이다. 해양에서 관측된 자료는 단기간의 집중관측으로 계절적인 변화를 볼 수 있는 장기간 관측 자료가 거의 없으며, 대부분 열대 지역에서 관측

\*Corresponding Author: Kyung-Ja Ha, Division of Earth Environmental System, College of Natural Science, Pusan National University, Pusan, Korea.  
Phone : +82-51-510-2177, Fax : +82-51-515-1689  
E-mail: kjha@pusan.ac.kr

되거나 근해에서 관측이 되었다. 이어도 해양과학기지 (한국해양연구원, 1999, 2000, 2001)는 마라도 남서쪽 149km의 해상에 위치하여, 지형의 영향을 받지 않는 중위도 외양의 특징을 관측할 수 있다 (오현미와 하경자, 2005). 특히 장마가 내륙에서 시작되기 전 이어도에서 관측한 풍향은 장마의 시작 및 종료 시 뚜렷한 변화로 시종을 알 수 있는 지표로 사용되고 있으며 2003년부터 현재까지 기상, 해양, 환경 변수들이 지속적으로 관측이 되고 있어 외양의 기상상태의 비교적 긴 기간의 변화를 연구할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 이어도에서 관측된 자료 중 난류 플럭스의 계절적인 특징을 보고자 하였다. 이러한 연구는 중위도 외양에서의 대기-해양 상호작용을 정량적으로 이해하는데 많은 도움이 될 것으로 기대된다.

## 2. 관측 및 자료

이어도 난류 플럭스 관측에 사용된 에디 공분산 시스템 (OPEC, Open Path Eddy Covariance System)은 세 방향의 풍속, 기온, 수증기, 이산화탄소의 양을 고속으로 감지하여 에디 공분산 방법 (Businger, 1986; Kaimal and Finnigan, 1994)으로 현열, 잠열, 운동량, 이산화탄소의 플럭스를 측정하는 시스템이다. 에디 공

분산 시스템은 3차원 초음파 풍향풍속계인 CSAT3 (Campbell Sci. Inc.)과  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$  기체 분석기인 LI-7500 (Campbell Sci. Inc.)으로 구성되어 있다. 자료의 측정 속도는 10 Hz이며 30분 평균 난류 플럭스가 저장된다.

계절에 따라 여름철에는 남동 방향, 겨울철에는 북서 방향으로 관측 위치를 바꾸어서 설치하며 그 위치는 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 2에 보면 북서와 남동 16 m 높이에 설치된 지지대는 고정식이며, 구조물에서 바다 쪽으로 2 m 길이로 설치되어 있다. 아래쪽 12 m에는 이동식 지지대가 설치되어 있으며 2006년도부터는 계절에 따라 설치 장소를 옮기면서 12 m와 16 m에서 동시에 관측하고 있다. 2003년부터 관측된 자료의 목록을 Table 1에 나타내었다.

## 3. 자료의 처리

### 3.1 tilt correction

초음파 풍향풍속계에서 관측한 자료는 일반적으로 바람이 부는 방향으로 좌표축을 회전하며, 이를 tilt correction이라고 한다. tilt correction을 수행하면 초음파 풍향 풍속계가 지면과 수직이 되지 않을 경우에 나

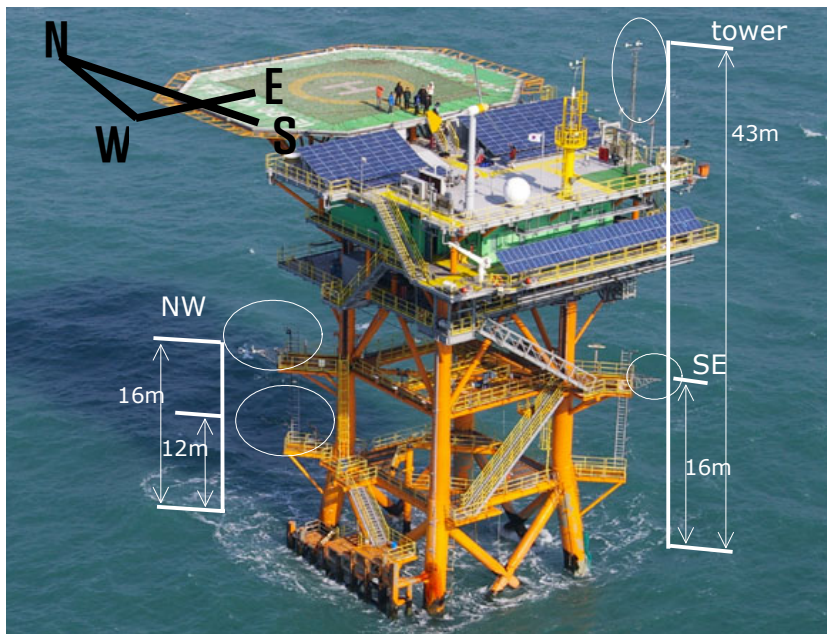


Fig. 1. Platform of Ieodo Ocean Research Station (IORS). Circles show position of eddy covariance systems (OPEC system).

타나는 연직 풍속을 0으로 만들 수 있다. Tanner and Thurtell (1969)가 원안을 제안한 이래로 다양한 tilt correction 방법이 개발되었다 (Wesely, 1970; McMillen,

1988; Kaimal and Finnigan, 1994; Paw U *et al.*, 2000; Wilczak *et al.*, 2001; Finnigan *et al.*, 2003; Finnigan, 2004; Lee *et al.*, 2004).

이어서도에서 관측한 자료에는 Vickers and Mahrt (2006)가 제안한 방법을 적용하였다. 우선 풍속이  $0.5 \text{ ms}^{-1}$ 보다 작거나, 풍속이  $1 \text{ ms}^{-1}$ 보다 작고 연직 바람이  $0.05 \text{ ms}^{-1}$ 보다 작으면 결측값으로 처리하였다. 지면과 경사도를 나타내는  $T_{ang}$ 는 식 (1)과 같이 계산된다. 여기서  $w$ 는 연직방향의 풍속이며,  $wspd$ 는 수평풍속이다.

$$T_{ang} = \text{atan}(w, \text{wspd}) \times 180/\pi \quad (0 \leq T_{ang} \leq 90) \quad (1)$$

$\bar{u}$ 는 동서방향 풍속의 1 시간 평균된 값이며,  $\bar{v}$ 는 남북방향 풍속의 평균값이다.

$$\zeta = \text{atan}(\bar{v}, \bar{u}) \quad (2)$$

$$\cos z = \cos(\zeta), \quad \sin z = \sin(\zeta) \quad (3)$$

$$\cos t = \cos(t_{wdir}), \quad \sin t = \sin(t_{wdir}) \quad (4)$$

$t_{wdir}$ 는  $45^\circ$  간격으로 풍향을 평균한 값이다. 식 (3)과 (4)에서 계산한 값을 이용하여 새로운  $u, v, w$ 값을 계산하였다.

$$u_{new} = (u \times \cos z + v \times \sin z) \times \cos t + w \times \sin t \quad (5)$$

$$v_{new} = -u \times \sin z + v \times \cos z \quad (6)$$

$$w_{new} = w \times \cos t - u \times \cos z \times \sin t - v \times \sin z \times \sin t \quad (7)$$

### 3.2 자료의 Quality Control (QC)

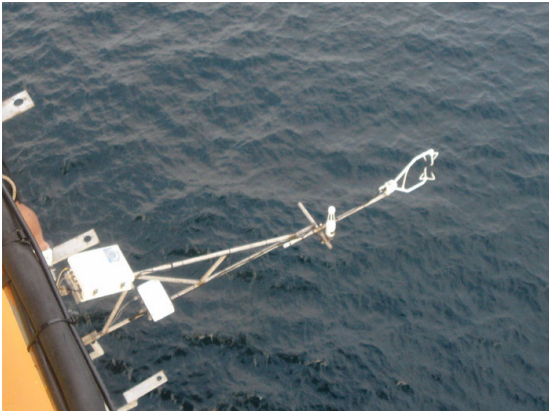
플릭스 자료의 질을 개선하기 위하여 QC를 수행하였다. Fig. 1에서 보듯이 16 m, 12 m의 관측기기는 구조물에서 약 2 m 정도 떨어져 설치되어 있어, 구조물 쪽에서 바람이 불 때는 구조물로 인하여 바람이 변형이 되며 이는 플릭스 자료에 오차를 발생시킬 수 있다. 따라서 남동에서 관측할 때는 풍향이  $45^\circ - 225^\circ$  사이일 때만을, 북서에서 관측할 때는 풍향이  $45^\circ - 225^\circ$  사이일 때를 제외하고 분석에 사용하였다.

그리고 강수일에 관측된 자료는 모두 제외하였다. 강수일의 경우 관측 센서에 물방울 입자가 붙어 관측에 오차를 만들 수 있기 때문이며 안개일도 강수일과 같은 이유로 분석에서 제외하였다. 안개일은 타워에서

(a)



(b)



(c)



Fig. 2. (a) Northwestward boom at 16 m, (b) portable boom at 12 m and (c) southeastward boom at 16 m.

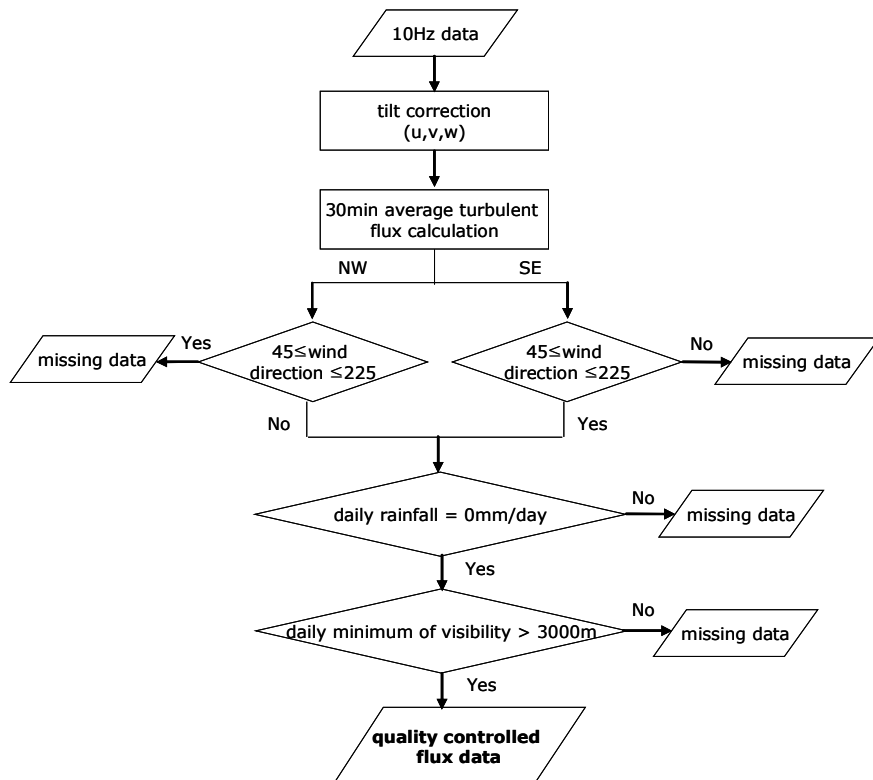
**Table 1.** Periods of turbulent flux data observed at IORS from 2003 to 2007. Shadings show the analyzed period in this study.

NW		SE	
Year	Period	Year	Period
2004	2004/10/14~2004/12/10(16m)	2003	2003/05/10~2003/10/10(43m)
	2004/12/10~2005/03/05(16m)	2004	2004/02/11~2004/03/26(43m)
2005	2005/05/02~2005/06/16(16m)		2004/03/26~2004/06/01(43m)
	2005/06/16~2005/08/14(16m)		2004/06/02~2004/07/14(43m)
	2005/08/14~2005/10/05(16m)	2005	2005/03/10~2005/03/15(16m)
2006	2005/10/09~2006/01/12(16m)		2005/05/02~2005/06/16(16m)
	2006/01/12~2006/01/19(12m)		2005/06/16~2005/08/14(16m)
	2006/01/12~2006/01/19(16m)	2006	2006/07/31~2006/10/13(12m)
			2006/07/24~2006/07/26(16m)
		2007	2007/09/14~2007/10/02(12m)
			2007/08/31~2007/10/02(16m)

관측된 가시거리가 3000 m 이하일 때를 안개일로 정하였다. 자료의 처리에 대한 전체 과정은 Fig. 3에 순서대로 나타내었다.

### 3.3 tilt correction 및 QC 후 자료의 개선

이어도에서 플럭스를 관측 중 10 Hz 자료가 기록된 기간은 타워에서 관측된 2004년 2월 11일부터 3월 18일



**Fig. 3.** Flow chart of quality control procedure.

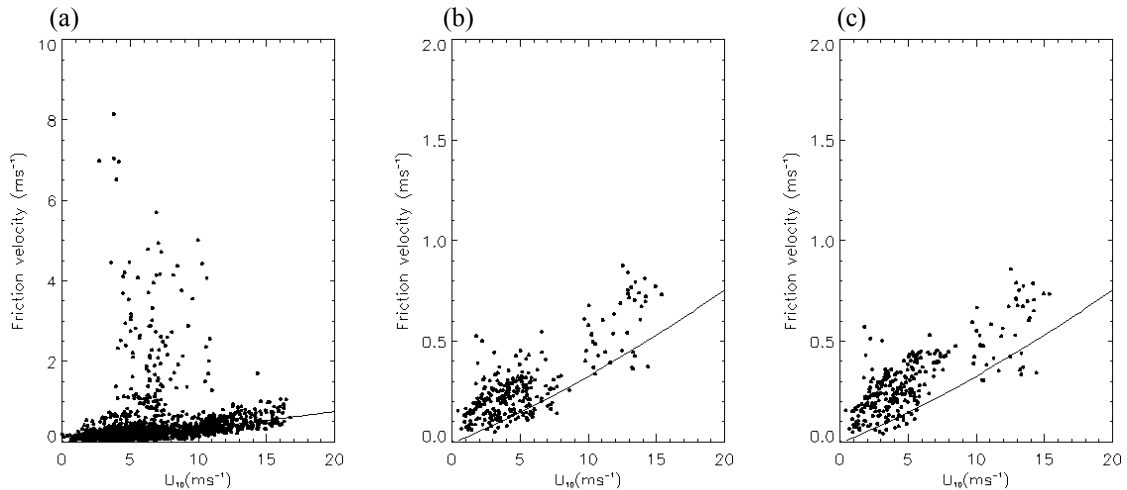


Fig. 4. Scattered diagrams between wind speed and friction velocity with (a) non QC, (b) QC and (c) tilt correction and QC.

과, 북서쪽 16 m에서 관측한 2005년 5월 2일에서 5월 4일까지이다. 그 외의 기간에는 에디 공분산 시스템이 10 Hz로 관측하였으니 집록장치 (CR5000, Campbell Sci. Inc.)에 저장될 때 기계적인 오류로 30 분 자료만 기록이 되고 10 Hz 자료는 기록이 되지 않았다. 비교적 긴 기간의 10 Hz 자료가 있는 2004년 자료를 이용하여 앞서 보인 tilt correction과 QC를 거친 후 자료의 질의 개선을 보이고자 한다. 이 후에 분석에서 보일 30 분 평균자료는 tilt correction을 제외하고 QC만 수행이 된 자료이다.

Fig. 4에 마찰속도 ( $u_*$ )와 풍속의 관계를 (a) QC를 하기 전, (b) QC만 하였을 때, (c) QC와 tilt correction을 함께 수행하였을 때 나누어 산포도로 보였다. 실선은 상사이론에서 중립상태를 가정하였을 때 풍속과 마찰속도의 관계를 대수 프로파일로부터 구한 값 (식 (8))을 표시한 것이다. 여기서  $k$ 는 von Karman 상수 (=0.4)이며,  $z_0$ 는 Charnock 관계식 (Charnock, 1955) 으로부터 구하였다 (식 (9)).  $\alpha_c$ 는 Charnock 계수로 0.016을 사용하였다.

$$\overline{U} = u_* \times \left( \frac{1}{k} \right) \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \quad (8)$$

$$z_0 = \frac{\alpha_c u_*}{g} \quad (9)$$

어떤 QC도 수행하지 않은 상태 (a)에서 관측값은 실선에서 많이 벗어나는 2.0 이상의 큰 이상치들을 포함하고 있음을 알 수 있다. 3.2절에서 설명한 QC만을 적용한 경우 (b)로도 이러한 많은 이상치들이 사라졌으며,

풍속과 마찰속도의 관계식을 잘 만족하고 있음을 알 수 있다. Tilt correction 및 QC를 적용한 (c)는 (b)와 거의 유사한 분포를 보인다. 식 (8)과 마찰속도의 RMSE (Root Mean Square Error)는 (b)에서  $0.13 \text{ ms}^{-1}$ , (c)에서  $0.14 \text{ ms}^{-1}$ 로 큰 차이가 없었다. 그러므로 10 Hz 자료가 없을 경우 tilt correction 없이 QC만 적용한 30분 평균 플릭스 자료를 분석에 사용하여도 큰 무리가 없을 것으로 사료된다.

#### 4. 분석

본 연구에서는 해상에서 관측된 난류 자료의 계절적인 특징을 보고자 한다. Table 1에서 보였듯이 2003년부터 2007년도 현재까지 5년의 관측 자료가 있으나 2003년부터 2004년 7월까지의 43 m 타워에서 관측이 되었으며, 2004년 10월부터 현재까지 플랫폼 아래쪽의 16 m에서 플릭스 관측이 되고 있다. 2004년 10월 14일부터 12월 10일 기간에는 기체 분석기인 LI-7500의 고장으로 잠열 플릭스가 관측되지 않았기 때문에 제외하였다. 분석에 사용된 기간은 Table 1에 음영을 넣어 표시하였다. 전체 분석 자료 중 QC 과정을 거쳐서 26.5%의 자료만 분석에 사용되었다.

##### 4.1 이어도 주위의 계절적 특성

이어도에서는 수온염분계를 이용하여 2003년부터 지속적으로 수온을 관측하고 있다. 그러나 수온염분계가 해저 10 m에 설치되어 있어서 해수면 온도로 사용

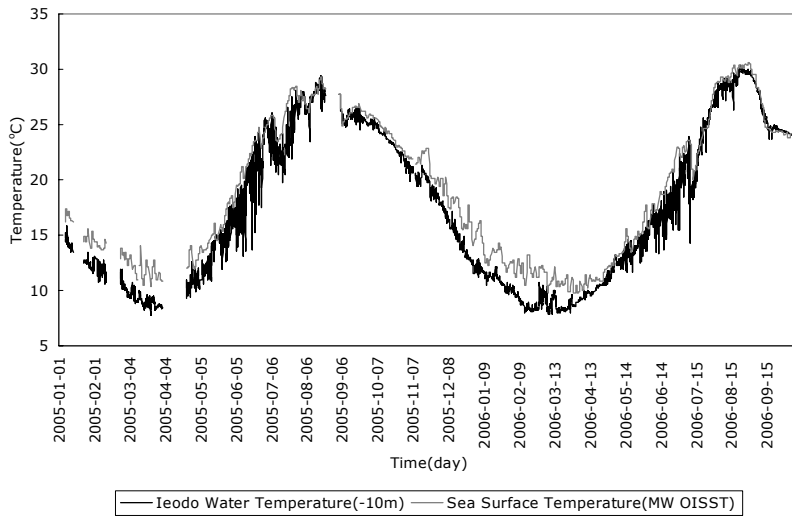


Fig. 5. Time series of the 10 m water temperature below the sea and the sea surface temperature (MW OISST) at IORS.

하기는 무리가 있다. Fig. 5에 이어도에서 관측한 10 m 수온과 위성에서 관측한 해수면 온도 (MW OISST, Microwave Optimally Interpolated Sea Surface Temperature)의 2005 - 2006년의 시계열을 보였다. MW OISST는 NASA (National Aeronautics and Space Administration)의 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) 위성에서 탑재된 TMI (TRMM Microwave Imager)의 microwave 영상과 NASA의 AQUA 위성에서 탑재된 AMSR-E(Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS) microwave 영상으로부터 0.25 °

의 해상도로 최적화된 해수면 온도를 산출한 것이다. 이어도에서 관측한 10 m 수온은 MW OISST의 해수면 온도와 그 경향이 잘 맞으나, MW OISST보다 전체적으로 낮으며 3 - 4월의 경우 전체적으로 4-5 °C 정도 차이가 나는 것을 알 수 있다. 외양에서는 표층과 저층의 혼합이 왕성한 연안역의 수온과 달리, 황해 저층의 냉수가 봄철에서 가을철에 걸쳐서 표층 가까이 형성되는 계절적인 수온약층에 의해 대기와의 열 교환이 거의 차단되어 수온약층 하부에 황해 저층 냉수가 형성된다 (이충일 등, 2007). 10 m 수온과 해수면 온도와의

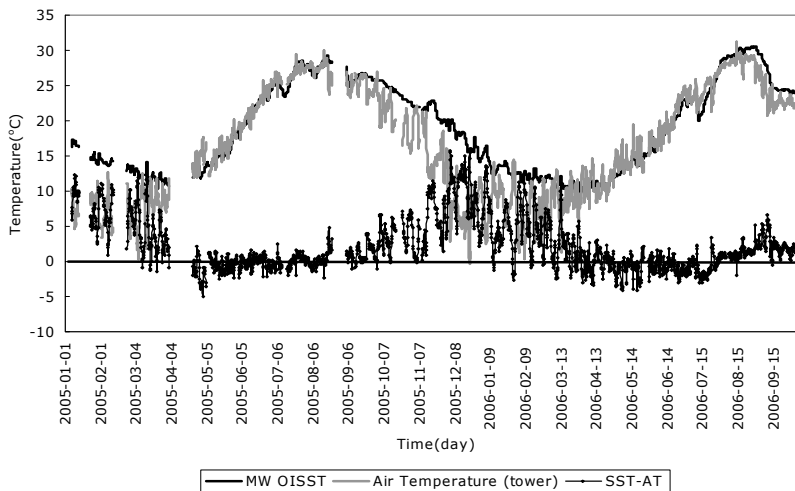


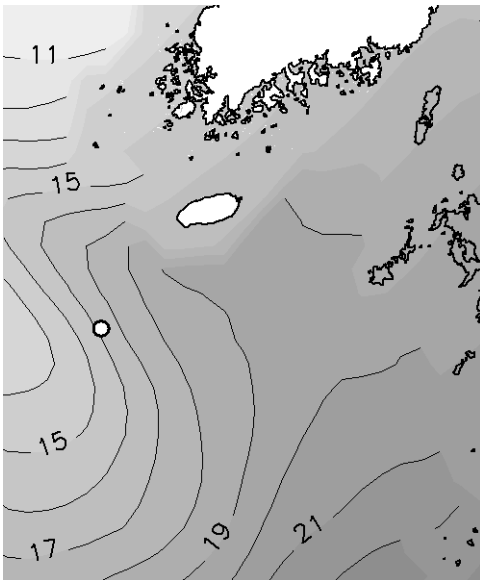
Fig. 6. Time series of sea surface temperature (MW OISST), air temperature at 43 m tower (AT) and difference between both value (SST-AT).

차이는 이러한 외양의 특성으로 인하여 나타나는 것으로 생각된다. 그러므로 해수면 온도와 기온의 차이는 기상타워에서 관측한 기온과 MW OISST를 이용하여 살펴보았다.

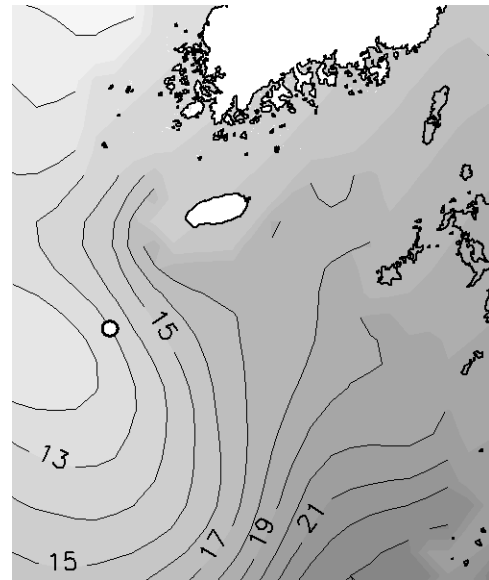
Fig. 6에서 보면 1월은 해수면 온도가 기온보다 5°C 이상 높으며 봄철로 접어들면서 이러한 차이가 줄어드는 것을 알 수 있다. 5월부터 8월까지의 기온과 해

수면 온도의 차이가 거의 나지 않으며, 9월 중순부터 다시 해수면 온도와 기온의 차이가 커지고 있다. 이러한 변화는 이어도 주변의 해류와 기온의 계절 변화에 따라 나타난다. 이어도 주위의 해류의 변화를 알아보기 위하여 해수면 온도장의 2005년도 계절 평균을 Fig. 7에 보였다. DJF (December January February) 시기에는 이어도 기지의 중심으로 서북쪽에서는 찬 대

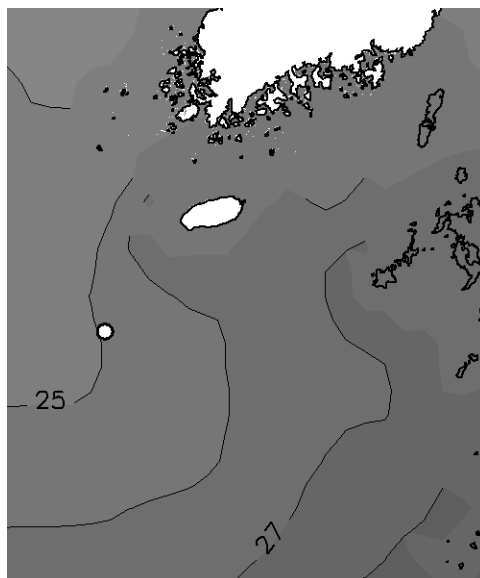
(a) DJF



(b) MAM



(c) JJA



(d) SON

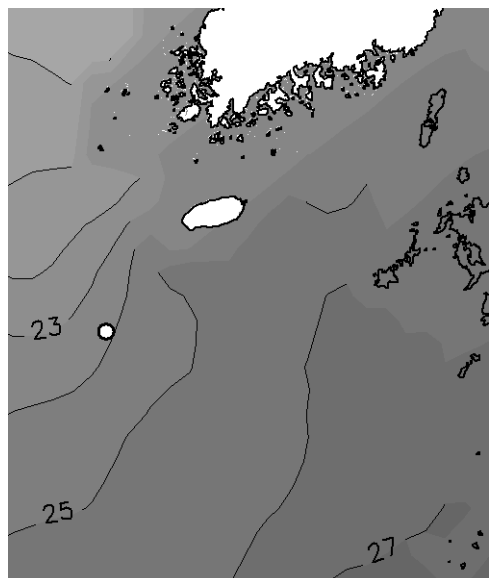
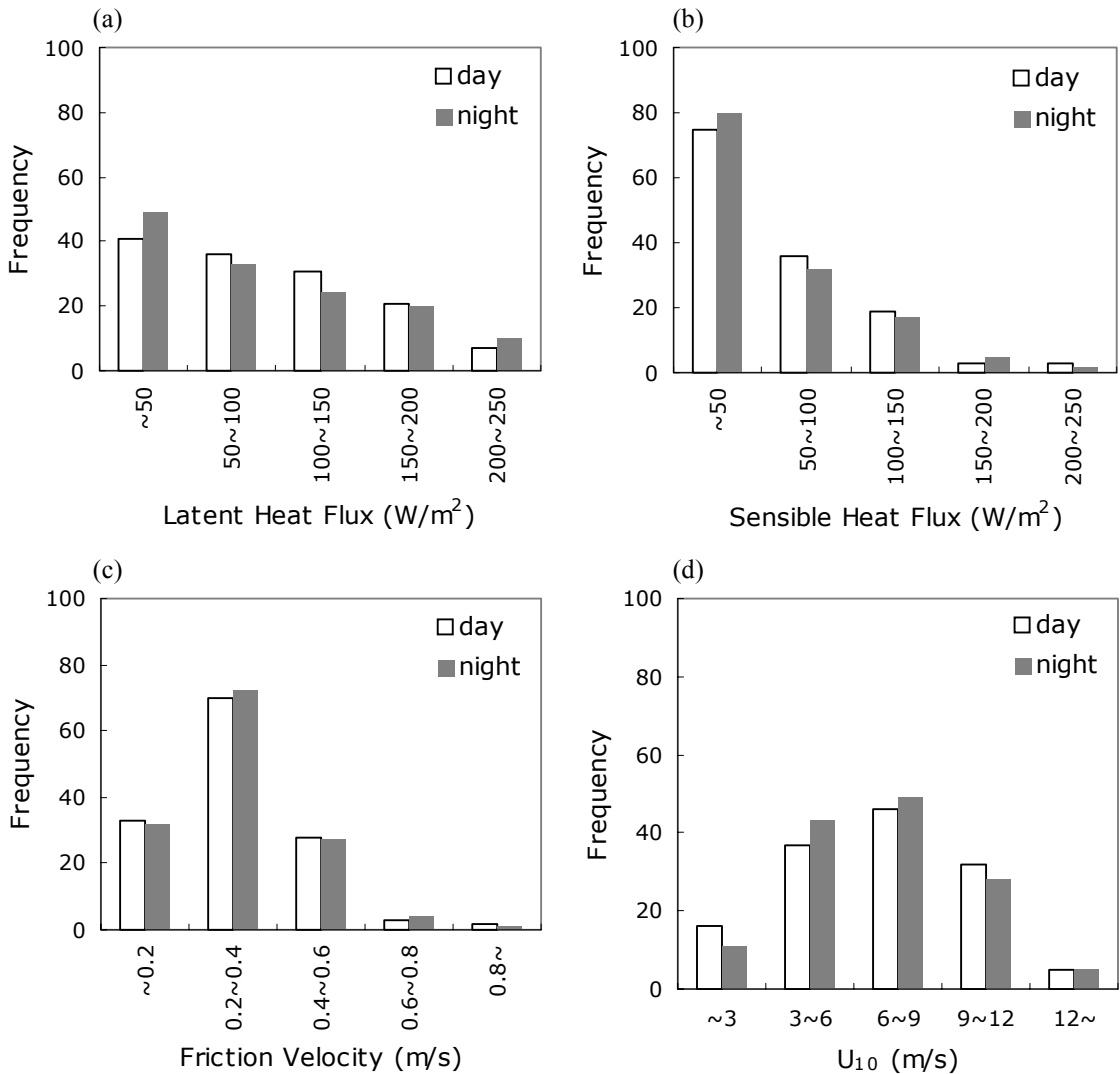


Fig. 7. Seasonal averages of sea surface temperature (MW OISST). (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA and (d) SON.

류의 영향을 받은 황해 한류가 내려오고 있으며, 남쪽 아래에서 올라온 쿠로시오 난류의 서해쪽 지류가 남동쪽에서 서북쪽으로 올라가고 있는 것을 알 수 있다. 3월과 4월은 해수 혼합층이 깊어지는 해양의 동계로 황해 한류가 MAM (March April May) 시기에 더욱 차가워진 것을 알 수 있다. JJA (June July August)와 SON (September October November) 시기에는 높은 기온과 쿠로시오 난류의 영향으로 수온이 이어도 주위의 수온이  $20^{\circ}\text{C}$  이상 유지된다. 2006년도의 해수면 온도의 계절 평균은 논문에서는 보이지 않았지만 2005년과 비슷한 모습을 보였다.

#### 4.2 난류 플럭스의 일변화

이어도는 기온과 풍속에서 뚜렷한 일주기를 보이지 않았다 (오현미와 하경자, 2005). 난류 플럭스에서 일변화가 뚜렷이 나타나는지 알아보기 위하여 Fig. 8에 난류 플럭스와 10 m 풍속 ( $U_{10}$ ) 자료의 주간과 야간의 도수 분포표를 보였다. 주간은 1200 LST를 기준으로 4시간 전후인 0800 LST에서 1600 LST를 평균하였으며, 야간은 2400 LST를 기준으로 4시간 전후의 시간을 평균하였다. 잠열 플럭스는  $200\text{ Wm}^{-2}$ 까지 고른 분포를 보이고 있으며, 주간과 야간의 차이는 크게 없다.



**Fig. 8.** Frequency distribution of turbulent fluxes and  $U_{10}$  during the day and night. (a) Latent heat flux, (b) sensible heat flux, (c) friction velocity and (d)  $U_{10}$ .



현열 플릭스 역시 주간과 야간의 차이는 없으며, 잠열 플릭스와 달리 대부분의 값이 0 - 100 Wm<sup>-2</sup> 구간에 분포하고 있다. 마찰속도와 U<sub>10</sub> 도 주, 야간의 차이는 미미한 것을 알 수 있으며, U<sub>10</sub> 은 6 - 9 ms<sup>-1</sup> 구간이 가장 많이 분포하는 정규 분포의 모습을 보인다.

### 4.3 안정도의 계절적 특성

플릭스 자료의 계절적 특성을 알아보기 위하여 2004년 12월부터 2006년 10월까지 관측한 자료를 계절별로 분류하여 안정도를 판별하였다. QC 후 계절별로 자료의 숫자가 500개 이상이 되는 경우만 선정하여 분석하였다. 안정도는 안정도 변수 z/L로 판별하였으며, 여기서 모닝-오부코프 길이 L의 정의는 식 (10)과 같다.

$$L = \frac{-\theta u_*^3}{gx w' T'_v} \quad (10)$$

안정도는 z/L과 기온과 수온의 차이를 이용하여 다음과 같이 안정, 불안정, 준-불안정으로 구분하였다 (Oost *et al.*, 2000). 준-불안정은 z/L은 음수로 불안정이나 기온이 해수면온도보다 높아서 온도 프로파일은 안정한 상태로 정의하였다.

Stable (z/L > 0)

Unstable (z/L < 0, θ<sub>a</sub> < θ<sub>s</sub>)

Semi-Unstable (z/L < 0, θ<sub>a</sub> > θ<sub>s</sub>)

Table 2는 계절별에 따른 안정도의 비율이다. DJF 기간에는 불안정이 97.1%로 관측이 되었으며, MAM 기

간에는 DJF와 달리 안정이 59.8%, 준-불안정이 9.8%로 관측이 되었다. JJA 기간에는 안정이 28.1%이나 준-불안정도 23.8%나 관측이 되었다. SON의 경우 대부분이 불안정으로 관측되었다. 계절에 따른 이러한 안정도의 비율의 변화는 앞서 보인 해수면 온도와 기온의 차이와 관련이 깊다. DJF 기간에는 해수면온도가 기온보다 최대 10도 이상 차이가 나는 불안정한 상태를 유지하다가 5월부터 8월초까지 기온과 해수면 온도가 차이가 거의 나지 않게 된다. 따라서 DJF 기간에는 대부분이 불안정이며, 안정과 준-불안정의 비율이 MAM과 JJA 시기에 높아지는 것을 알 수 있다. SON 기간도 해수면 온도가 기온보다 높아진 시기이기 때문에 대부분이 불안정한 것으로 생각된다.

### 4.4 안정도에 따른 난류 플릭스와 풍속과의 관계

이어도는 연안이나 내륙과 달리 외양의 강풍지대로 강한 풍속이 난류 플릭스와 어떤 관계를 가지는지 알아보고자 한다. 우선 안정도에 따른 차이를 보기 위하여 안정과 불안정이 골고루 분포하였던 JJA 시기의 난류 플릭스와 풍속의 관계를 안정도 별로 Fig. 9에서 살펴보았다. 잠열 플릭스는 안정일 때 풍속과 관련 없으며 거의 0에 가까운 값들을 보이며, 불안정 할 때는 풍속의 크기에 따라서 증가하는 것을 알 수 있다. 현열 플릭스도 마찬가지로의 경향을 보이며 준-불안정 시 이상치가 많이 보이고 있다. 이러한 결과는 대기가 안정하여 성층화되면 난류의 활동이 저지되어 난류 플릭스 역시 0에 가까운 값이 되기 때문인 것으로 생각된다.

마찰속도의 경우 불안정일 때 마찰속도와 풍속의 관계식을 잘 따르고 있으나 안정과 준-불안정일 때는 이상치들이 많이 발생하는 것을 알 수 있다. Oost *et al.* (2000)

**Table 2.** Seasonal frequency of the three stability classes.

Season	DJF	MAM	JJA	SON
Period	2004/12/10 ~ 2005/2/28	2005/3/1 ~ 2005/5/30	2005/6/5 ~ 2005/8/31 2006/8/3 ~ 2006/8/31	2006/9/1 ~ 2006/10/13
A: Stable	47 (2.1%)	294 (59.8%)	219 (28.1%)	3 (0.2%)
B : Unstable	2137 (97.1%)	150 (30.5%)	374 (48.1%)	1205 (99.8%)
C: Semi-unstable	16 (0.7%)	48 (9.8%)	185 (23.8%)	0 (0%)

는 네덜란드의 Noordwijk 지역의 연해부근의 플랫폼에서 진행된 ASGAMAGE (Air Sea GAS EXchange, Marine Aerosol and Gas Exchange) 프로젝트에서 관측한 자료를 이용하여 안정도가 열과 수분 플럭스에 미치는 영향을 살펴보았다. 안정도로 구분하여 본 벌크 전달 계수와 풍속의 관계는 Fig. 9와 마찬가지로 불안정할 때는 풍속과 관련이 있으나 안정과 준-불안정일 때 풍속과의 관계가 잘 나타나지 않았다. Ha *et al.* (2007)는 안정할 때 난류 단속성이 증가하며 특히 약풍일 때 단속성의 증가 현상이 두드러진다고 밝혔다. 이것은 안정도가 커짐에 따라 대기의 성층에 의해 혼

합이 억제되고, 이로 인해 증가된 연직 쉬어가 다시 혼합을 야기시키는 과정에 기인한다. 안정과 준-불안정일 때  $3 \text{ ms}^{-1}$  이하의 약한 풍속에서 마찰속도의 변동성이 매우 큰 것은 Ha *et al.* (2007)의 결과와 일치하는 것을 알 수 있다.

안정과 준-불안정 시 난류 플럭스가 거의 0에 가까운 값을 보이거나 이상치들을 보이기 때문에 앞으로의 분석에서는 안정과 준-불안정을 제외하고 불안정 시의 난류 플럭스와 풍속의 관계를 계절에 따라서 분석해보고자 한다.

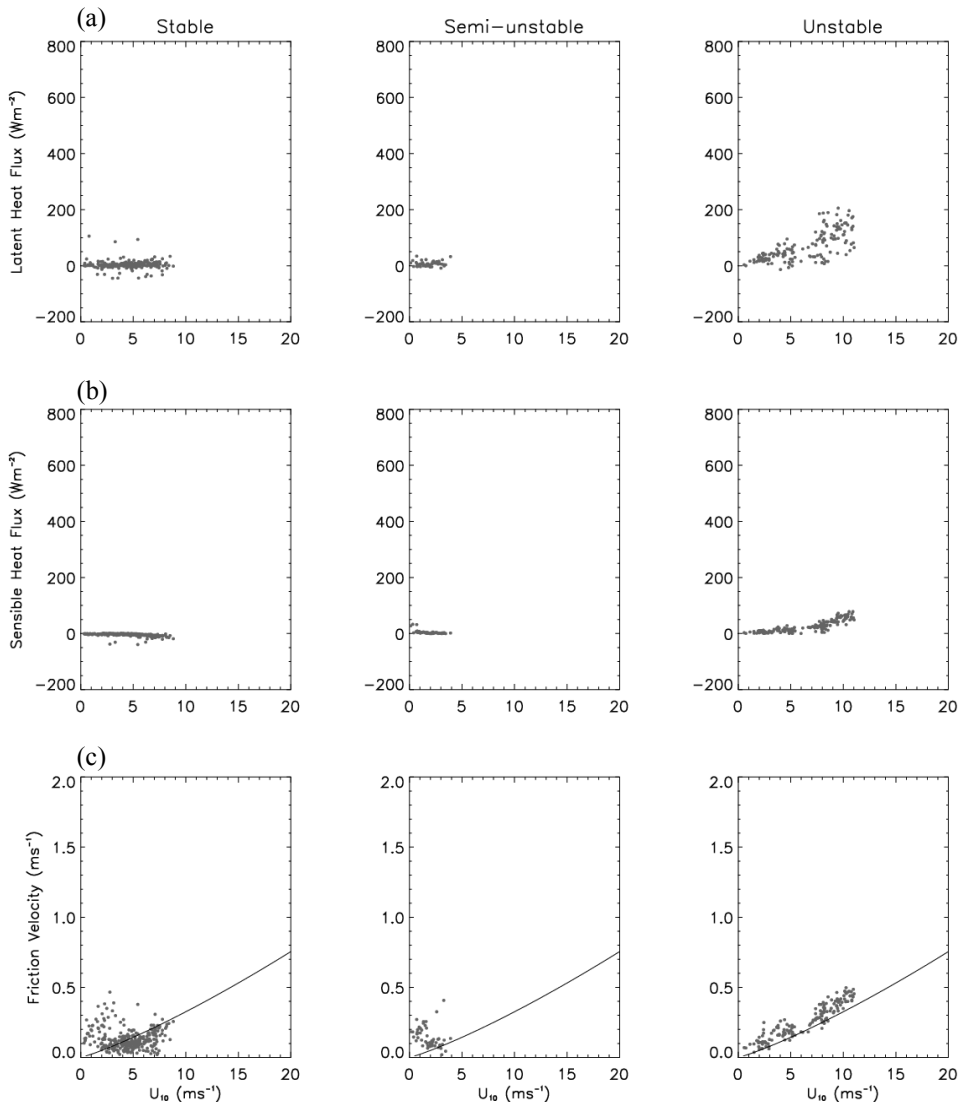


Fig. 9. (a) Latent heat flux, (b) sensible heat flux and (c) friction velocity as a function of wind speed for JJA.

4.5 계절에 따른 난류 플럭스와 풍속과의 관계

Fig. 10에는 계절에 따른 난류 플럭스와 풍속의 관

계를 나타내었다. DJF (Fig. 10a) 기간에는  $10 \text{ ms}^{-1}$  이상의 강풍이 다른 계절에 비하여 많이 존재한다. 잠열 플럭스는 풍속에 따라서 증가하는 모습을 보이거나

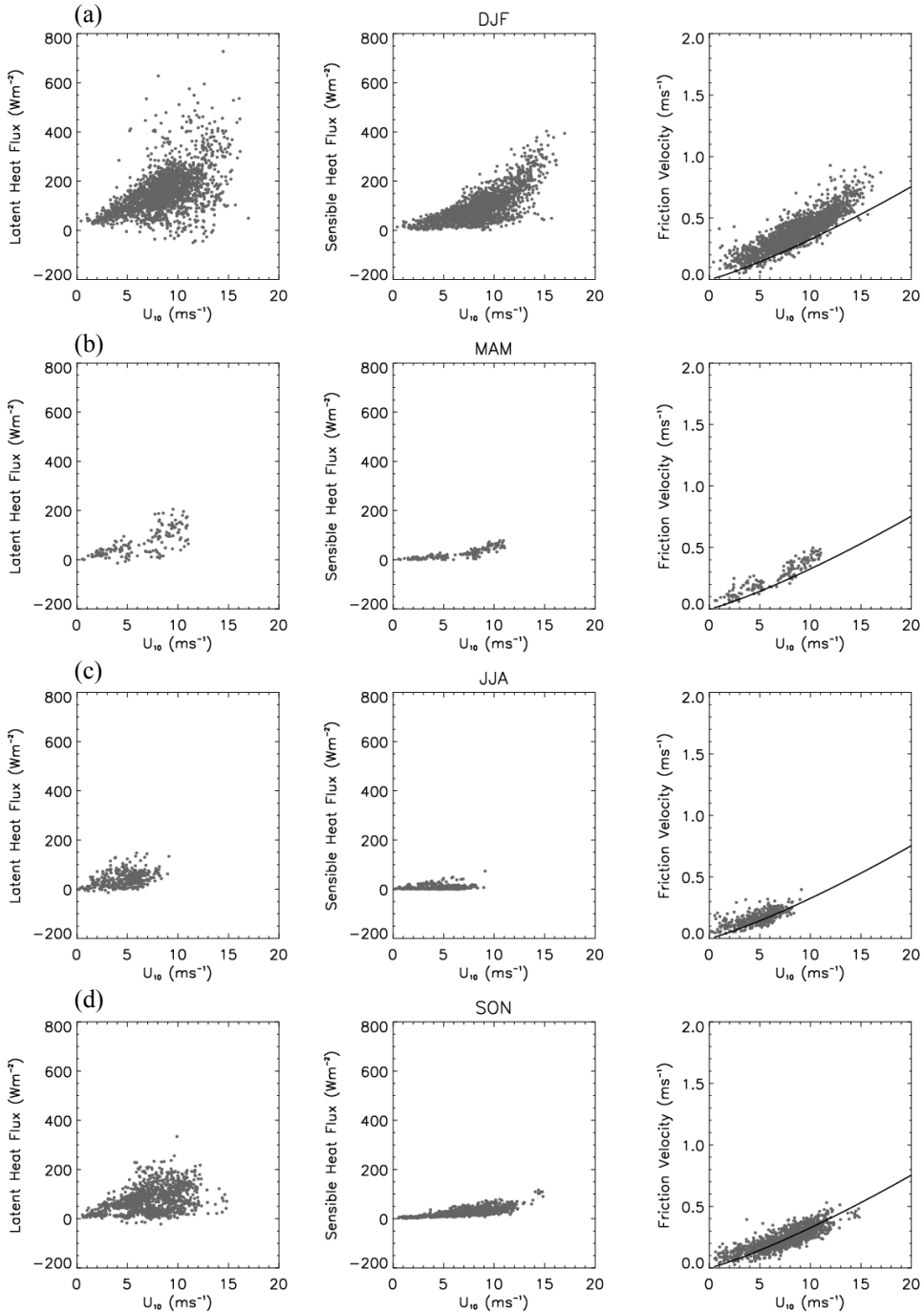


Fig. 10. Latent heat flux, sensible heat flux and friction velocity as a function of wind speed for (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA and (d) SON.

$\text{ms}^{-1}$  이상의 바람에서 -50에서  $700 \text{ Wm}^2$ 까지 값의 편차가 큰 것을 알 수 있다. 현열 플릭스 역시 풍속에 따라 증가하는 모습을 보이나 최대값이 약  $400 \text{ Wm}^2$  정도로 잠열 플릭스보다는 전체적으로 작다. 마찰 속도에서 실선은 3장에서 보인 상사이론에서 중립상태를 가정하였을 때 풍속의 대수 프로파일로부터 구한 관계식을 보인 것이다. 마찰 속도는 관계식보다 전체적으로 높은 값을 보이며 특히  $10 \text{ ms}^{-1}$  이상일 때 관계식 보다 기울기가 커졌다. MAM (Fig. 10b) 기간에는 DJF 기간보다 잠열과 현열 플릭스의 값이 작으며, 특히 현열이 많이 작은 것을 알 수 있다. JJA (Fig. 10c) 기간도 MAM 기간과 잠열, 현열 플릭스의 분포가 비슷하며 현열 플릭스의 경우 거의 0에 가까운 값을 보이고 있다. SON (Fig. 10c) 기간에는 MAM, JJA 기간보다  $10 \text{ ms}^{-1}$  이상의 바람의 빈도가 높으며 잠열 플릭스는 풍속에 따라 증가하는 모습을 보이나 DJF 시기와 마찬가지로 풍속이 커질수록 잠열의 편차가 늘어나는 것을 알 수 있다. 현열 플릭스는 DJF 기간과 달리 거의 0에 가까운 값을 보이다  $5 \text{ ms}^{-1}$  이상의 풍속에서 풍속에 따라 증가하는 분포를 보인다. 마찰속도는 관계식과 잘 일치하고 있다. 잠열 플릭스가 풍속에 따라 증가하나 풍속이 커질수록 값의 편차가 커지는 것은 Subrahanmanyam and Ramachandran (2002)이 INDOEX, IFP-99 (INDian Ocean Experiment, Intensive Field Phase-99)에서 관측한 난류 플릭스와 풍속과의 관계와 잘 일치하고 있다. 이는 해양의 잠열 플릭스는 풍속 뿐만 아니라 바람으로 인한 바다의 거칠기의 변화, 파고, 파령과 같은 해양 변수에 의해서도 많이 좌우될 수 있기 때문이다. Andreas and Decosmo (2002)는 HEXOS (Humidity EXchange Over the Sea) 프로그램에서 파도로 인한 물보라의 효과가 잠열 플릭스에 가장 뚜렷하게 나타나,  $10 \text{ ms}^{-1}$ 의 풍속에서는 10%,  $15 - 18 \text{ ms}^{-1}$ 의 풍속에서는 10 - 40%의 영향을 끼친다고 하였으며, 현열 플릭스에도  $15 \text{ ms}^{-1}$  이상의 풍속에서 적어도 10%의 영향을 준다고 하였다. 그리고 Zhang and Perrie (2001)은 대기와 해양의 피드백 메카니즘에서 잠열과 현열 플릭스는 풍속이 증가할수록 증가하며 파령이 작을수록 플릭스의 증가가 빠른 것을 보였다.

## 5. 결론

이어도 해양과학기지는 외양에서 지속적인 플릭스 관측이 가능한 중요한 관측 지점으로 2005년에서

2006년에 관측된 2년간의 플릭스 자료를 이용하여 플릭스 자료의 계절적인 특징을 보고자 하였으며, tilt correction과 QC를 통하여 자료의 품질을 개선하였다.

이어도에서 관측된 플릭스 자료는 내륙에서 관측된 플릭스 관측 자료와 달리 일변화를 거의 보이지 않았으며, 2년간의 안정도 판별 결과 일변화보다는 계절적인 변화가 큰 것을 알 수 있었다. 계절적인 안정과 불안정의 비율의 변화는 해수면 온도와 기온 차이의 계절 변화와 밀접한 관련을 가지고 있었다. 이어도 기지는 서쪽으로 북상하는 쿠로시오 난류의 지류가 지나가는 곳에 위치하여, 가을철과 겨울철에는 해수면 온도가 기온보다 높아 열적으로 불안정한 상태를 유지한다. 그러나 해양의 겨울인 3월, 4월과 5월에는 해수면 온도 및 수온이 하강하여 4월에서 8월 사이에는 기온과 해수면 온도의 차이가 크지 않게 되며 안정의 비율 증가하였다. 안정, 준-불안정의 비율이 50%를 넘는 JJA 시기의 난류 플릭스와 풍속의 관계를 보면, 안정과 준-불안정 시 잠열과 현열은 풍속과는 거의 관련없이 0에 가까운 작은 값을 보이며, 불안정 시 잠열과 현열 플릭스가 풍속이 증가함에 따라 증가하는 모습을 보였다. 마찰속도는 안정과 준-불안정시 풍속과 마찰속도의 관계식을 나타낸 실선에서 많이 떨어진 이상치들을 보였으며, 이는 Ha *et al.* (2007)이 밝힌 안정하며 약풍일 때 난류 단속성이 증가하는 현상과 일치하는 것을 알 수 있었다. 준-불안정은 대부분 안정할 때의 특성과 비슷한 분포를 보여, 안정과 준-불안정 시의 플릭스 자료를 제외하고 불안정할 때의 난류 플릭스와 풍속의 관계만을 분석하였다.

각 계절별로 풍속이 증가함에 따라 난류 플릭스가 증가하는 모습을 보였으며, 특히 DJF 시기에는 잠열 플릭스가 풍속에 따라 매우 빠르게 증가하는 모습을 보였다. 잠열 플릭스는 풍속이 증가하면서 그 값이 분포하는 편차도 매우 커졌는데 이는 해양의 특성으로 인한 것으로 파도로 인한 물보라와 파령과 같은 해양 변수가 영향을 미칠 것으로 생각된다. 이러한 관계를 밝히기 위해서는 앞으로 해양 변수와 플릭스와의 관계 분석이 더 필요할 것으로 생각된다.

## 감사의 글

본 연구는 해양수산부에서 시행하는 “해양과학기술 연구개발과제”와 교육인적자원부의 “BK21 2단계 사업”의 지원을 받았습니다.

## 참고문헌

- 한국해양연구원, 1999: 1999 이어도 종합해양과학기지 구축사업 보고서. 해양수산부 연구보고서, 678 pp.
- 한국해양연구원, 2000: 2000 이어도 종합해양과학기지 구축사업 보고서. 해양수산부 연구보고서, 454 pp.
- 한국해양연구원, 2001: 2001 이어도 종합해양과학기지 구축사업 보고서. 해양수산부 연구보고서, 608 pp.
- 오현미, 하경자, 2005: 2003-2004년도 이어도 기지 해상 기상 특성 분석. *한국기상학회지*, **41**, 671-680.
- 이영선, 하경자, 전은희, 2004: 한반도 남서해안의 기후학적 연안지대의 경계와 특징. *한국해양학회지-바다*, **9**, 137-170.
- 이충일, 이종희, 김동선, 2007: 한국 서해에서 수온 및 염분에 미치는 기상 인자의 영향. *해양환경안전학회지*, **18**, 29-37.
- Andreas, E. L. and J. Decosmo, 2002: The signature of sea spray in the hexos turbulent heat flux data. *Boundary-Layer Meteorol.*, **103**, 303-333.
- Businger, J. A., 1986: Evaluation of the accuracy with which dry deposition can be measured with current micrometeorological techniques. *J. Appl. Meteorol.*, **25**, 1100-1124.
- Charnock, H., 1955: Wind stress on a water surface. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **81**, 639-640.
- Finnigan, J. J., R. Clement, Y. Malhi, R. Leuning and H. A. Cleugh, 2003: A re-evaluation of long-term flux measurement techniques. Part I: averaging and coordinate rotation. *Boundary-Layer Meteorol.*, **107**, 1-48.
- Finnigan, J. J., 2004: A re-evaluation of long-term flux measurement techniques. Part II: coordinate systems. *Boundary-Layer Meteorol.*, **113**, 1-41.
- Murrow, H. N. and R. M. Henry, 1965: Self-induced balloon motions. *J. of Appl. Meteorol.*, **4**, 131-138.
- International and Scientific Management Group of GATE, 1974: GATE, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **55**, 711-744.
- Ha, K.-J., Y.-K. Hyun, H.-M. Oh, K.-E. Kim and L. Mahrt, 2007: Evaluation of boundary layer similarity theory for stable conditions in CASES-99. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 3474-3283.
- Kaimal, J. C. and J. J. Finnigan, 1994: Atmospheric boundary layer flows-their structure and measurement. Oxford University Press, 289 pp.
- Lee, X., J. J. Finnigan and K. T. Paw U, 2004: Coordinate systems and flux bias error. in X. Lee, W. Massman, B. Law (eds). *Handbook of micrometeorology: A guide for surface flux measurement and analysis*. Kluwer Academic Publishers, 250 pp.
- McMillen, R. T., 1988: An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain. *Boundary-Layer Meteorol.*, **43**, 231-245.
- Oost, W. A., C. M. J. Jacobs and C. Van Oort, 2000: Stability effects on heat and moisture fluxes at sea. *Boundary-Layer Meteorol.*, **95**, 271-302.
- Paw U, K. T., D. D. Baldocchi, T. P. Meyers and K. B. Wilson, 2000: Correction of eddy-covariance measurements incorporating both advective effects and density fluxes. *Boundary-Layer Meteorol.*, **97**, 487-511.
- Subrahmanyam, D. B. and R. Ramachandran, 2002: Air-sea interface fluxes over the Indian Ocean during INDOEX, IFP-99. *J. of Atmos. and Solar-Terr. Phys.*, **64**, 291-305.
- Tanner, C. B. and G. W. Thurtell, 1969: Anemometer measurements of Reynolds stress and heat transport in the atmospheric surface layer. Res. and Develop. Tech. Rept. ECOM-66-G22F, University of Wisconsin, 82 pp.
- Vickers, D. and L. Mahrt, 2006: Contrasting mean vertical motion from tilt correction methods and mass continuity. *Agric. and Forest Meteorol.*, **138**, 93-103.
- Webster, P. J. and R. Lukas, 1992: TOGA COARE: The Coupled Ocean - Atmosphere Response Experiment. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **73**, 1377-1416.
- Wesely, M. L., 1970: Eddy correlation measurements in the atmospheric surface layer over agricultural crops. Ph. D. Dissertation, University of Wisconsin, 102 pp.
- Wilczak, J. M., S. O. Oncley and S. Stage, 2001: Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary-Layer Meteorol.*, **99**, 127-150.
- Wilmot, E. E., 1917: Free-air data in the Hawaiian island, July, 1916. *Mon. Wea. Rev.*, **45**, 52-55.
- Zhang, Y. and W. Perrie, 2001: Feedback mechanisms for the atmosphere and ocean surface. *Boundary-Layer Meteorol.*, **100**, 321-348.