

## 2014년 가을철 이에도 종합과학기지에서서의 난류 플럭스의 관측 및 분석

윤정희 · 오효은 · 하경자\*

부산대학교 지구환경시스템학부

(접수일: 2015년 9월 10일, 수정일: 2015년 11월 28일, 게재확정일: 2015년 11월 28일)

### Observation and Analysis of Turbulent Fluxes Observed at Ieodo Ocean Research Station in Autumn 2014

Junghee Yun, Hyeon Oh, and Kyung-Ja Ha\*

Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan, Korea

(Manuscript received 10 September 2015; revised 28 November 2015; accepted 28 November 2015)

**Abstract** This study investigates the characteristics of turbulent fluxes observed at Ieodo Ocean Research Station (IORS) in autumn 2014. The 10 Hz IORS data is quality controlled and calculated to be the 30 minutes turbulent fluxes. The quality control consists of five steps: a weather check, Vickers and Mahrt (VM) sequential check, VM parallel check, flag check, and direction check. Since the IORS is an open-sea station with no orographic influence, there are no significant diurnal variations for the turbulent fluxes and 10 m wind speed. According to stabilities, the unstable and semi-unstable states appear more than 28% and 70% in autumn, respectively and they have strong winds of over  $10 \text{ m s}^{-1}$ . In addition, the turbulent fluxes increase with increasing wind speed. In particular, the latent heat flux and its deviations are clearly shown because the latent heat flux is influenced by the change of both the sea surface roughness and wave height induced by the wind. To demonstrate the changes of the turbulent fluxes before and after typhoon, Vongpong (1419), which is the most intense typhoon affecting the Korean Peninsula in 2014, is considered. The turbulent flux fluctuates in accordance with the location of Vongpong. The turbulent fluxes have a large (small) variation when Vongpong approaches (retreats) at the IORS. The overall results represent that the IORS data helps us understand physical processes related to air-sea interaction by providing the valuable and reliable observed data.

**Key words:** Ieodo Ocean Research Station, Ieodo, turbulent fluxes, typhoon, Vongpong (1419)

### 1. 서 론

대기-해양 상호작용은 대기과 해양이 서로 끊임없이 현열, 잠열, 운동량 등을 교환하는 작용을 의미하며 이는 기후 시스템을 이해하는데 필수적이다 (Frankignoul et al., 1998; Kitoh and Arakawa, 1999;

Wu et al., 2006; Jang and Yeh, 2013; Roxy et al., 2013). 대기-해양 상호작용은 대서양의 멕시코 만류 (Gulf stream)나 태평양의 쿠로시오 해류(Kuroshio current)와 같은 서안 경계류에서 특히 강하게 나타나며 (Wallace and Hobbs, 2006), 서안 경계류는 엄청난 에너지를 저위도에서 고위도로 전달하고 대기에 강한 잠열 및 현열 플럭스를 전달한다 (Hsiung et al., 1985). 따라서 기상 및 기후 시스템의 이해와 정확한 예측을 위해서는 대기-해양 상호작용을 정확히 이해해야 한다 (Liu et al., 1979; Oh and Ha, 2005; Oh et al., 2007, 2010; de Szoeke et al., 2015; Kunoki et al.,

\*Corresponding Author: Kyung-Ja Ha, Division of Earth Environmental System, Pusan National University, 30 Jangjeondong, Geumjeong-gu, Busan 609-735, Korea.  
Phone : +82-51-510-2177, Fax : +82-51-515-1689  
E-mail : kjha@pusan.ac.kr

2015). 특히 쿠로시오 해류는 동중국해를 흐르면서 대기-해양 상호작용을 통해 동아시아 지역의 기상 및 기후 시스템에 막대한 영향을 주기 때문에 중요하다(Li et al., 2004; Tokinaga et al., 2009; Xu et al., 2011). 하지만 해양에서의 관측은 단기간의 집중 관측으로 계절적인 변화를 볼 수 있는 장기간 관측자료가 절대적으로 부족한 실정이며, 그나마 자료들도 열대 지역 및 근해에서 관측되어 외해(open sea)의 특성을 정확히 반영하지 못하고 있다. 이어도 종합해양과학기지(이하 이어도 기지)는 제주도 남서쪽에서 149 km 떨어진 곳(125.18°E; 32.12°N)에 위치하여, 외해의 특성을 잘 반영하고 육지의 영향을 거의 받지 않는 점이 특징이다. 또한 이어도 기지는 서쪽으로 북상하는 쿠로시오 난류의 지류가 지나가는 곳에 위치하기 때문에 대기-해양 상호작용의 관측에 유용하며, 2003년부터 기상, 해양, 환경 변수들이 지속적으로 관측되고 있어 비교적 장기간의 변화를 연구할 수 있다는 장점이 있다.

Oh and Ha (2005)에서는 해면 경정된 이어도 관측 기압과 주위의 제주, 고산, 서귀포, 성산포 지점의 해면기압의 비교를 통해 이어도 기지의 자료가 주위지역에서 관측된 자료의 패턴 및 크기와 상당히 유사함을 보였으며, Oh et al. (2014)에서는 자료의 신뢰도를 기반으로 이어도 기지의 관측 자료를 활용하여 바람 방향에 변화를 통한 장마시작일을 정의하였고, 여름철 북태평양 고기압의 확장에 따른 풍향의 변화가 이어도 기지에서 먼저 관측되어 몬순의 시작을 알리는 것을 확인함으로써 몬순 강우대에 의한 집중호우나 몬순 시기를 정의하는데 기여했다. 또한 이어도 기지는 우리나라에 상륙하는 태풍의 길목에 위치하고 있을 뿐만 아니라, 기지를 통과한 태풍의 강도가 매우 높게 나타나 한반도 상륙 태풍의 특성을 파악하는데 주요한 자료를 제공하고 있다(Moon et al., 2010). 선행연구에서 제시한 기상 자료뿐만 아니라 이어도 기지의 난류 플럭스의 특징도 역시 유의하게 나타났다. Oh and Ha (2007)에서는 난류 플럭스의 계절적인 변화가 일변화보다 뚜렷하게 나타나는 특징을 보였으며, 계절적인 안정과 불안정 비율의 변화는 해수면 온도와 기온 차이의 계절변화와 밀접한 관련을 가지고 있었다는 것을 밝혔다. 이러한 분석은 중위도 외해에서의 계절에 따른 대기-해양 상호작용을 조금 더 정량적으로 이해하는데 많은 도움을 주기 때문에 중요하다. 하지만 이어도 기지에서의 플럭스 관측은 2008년 이후 일시적으로 중단되었다가 2014년 6월부터 재기되었기 때문에 난류 플럭스 자료의 신뢰성을 재분석할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 2014년 관측기간 중 원시 자료의 결측이 적고 후처리 과정 후 남아 있는 자료의 수가 많은 9, 10, 11월 가을철에 초점을

맞추어 분석이 이루어졌으며, 이어도 플럭스 자료의 신뢰도를 재평가하여 자료의 활용가능성을 강조하고, 난류 플럭스의 특징에 대해 살펴보고자 한다. 또한 2014년 가을철 이어도 종합과학기지에 영향을 준 태풍 봉풍(1419)의 사례 분석을 예로, 태풍 근접 전후 난류 플럭스 자료의 특징 및 효용성을 보이고자 한다. 2장에서는 관측된 원시자료에 대한 설명 및 난류 플럭스의 계산 과정을 보여주며 3장에서 자료의 질 개선을 위한 후처리 과정 및 자료의 신뢰도 검정을 보여준다. 4장에서는 이어도 자료를 이용한 2014년 가을철 난류 플럭스의 특징에 대해 살펴보고, 5장에서 10월에 발생한 태풍 봉풍(1419) 접근 전후의 난류 플럭스 변화에 대해 분석하였다. 6장에서 본 연구의 주요 결론들을 요약하였다.

## 2. 자료 및 방법

### 2.1 플럭스 관측 현황

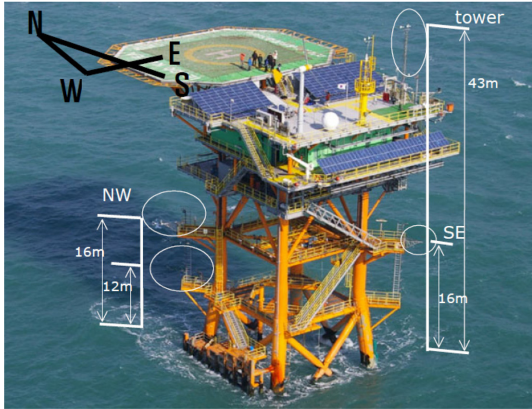
이어도 기지에서는 에디 공분산 시스템(Open Path Eddy Covariance System)을 이용하여 난류 플럭스 자료를 관측하고 있다(Fig. 1). 2008년 이전과 2014년도의 이어도 난류 플럭스 자료를 제공하는 방법에는 차이가 존재하는데, 이전의 에디 공분산 시스템은 3차원 초음파 풍향풍속계인 CSAT3 (Campbell Sci. Inc.)과 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 기체 분석기인 LI-7500 (Campbell Sci. Inc.)으로 구성되었지만, 2014년에는 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 기체 분석기가 EC150 (Campbell Sci. Inc.)로 교체되었다. 또한 2008년까지 135°의 남동(SE) 방향과 315°의 북서(NW) 방향에서 관측하였으나, 현재는 165°의 SE 방향과 300°의 NW 방향에 위치하여 관측한다. 또한 해수면으로부터 16 m의 고정식 지지대와 12 m의 이동식 지지대가 설치되어 있어 2006년도부터는 계절에 따라(여름철은 SE 방향, 겨울철은 NW 방향) 설치 장소를 옮기면서 12 m와 16 m의 높이에서 동시에 관측한다(Fig. 1).

에디 공분산 시스템에서는 수평 방향의 바람 성분과, 연직 방향의 바람 성분, 수증기 밀도, 이산화탄소 밀도, 온도, 기압의 기본 변수가 관측되며, 자료의 측정 및 저장 속도는 10 Hz이다. 본 연구에서는 10 Hz의 기본 변수로 에디 공분산 방법을 이용하여 30분 평균의 마찰속도, 잠열 플럭스, 현열 플럭스를 각각 계산하여 분석에 이용하였으며 식은 아래와 같다(식 (1)-(3)).

$$u_* = (\overline{w'u'^2} + \overline{w'v'^2})^{1/4} \quad (1)$$

$$LE = L_v \overline{\rho_v'w'} \quad (2)$$

$$H = \rho_a C_p \overline{T'w'} \quad (3)$$



**Fig. 1.** Platform of Ieodo Ocean Research Station (IORS). Circles show position of Open Path Eddy Covariance System (OPEC). This figure is adopted from Oh et al. (2007).

**Table 1.** Periods of turbulent flux data observed at Ieodo Ocean Research Station (IORS) in 2014.

NW		SE	
Year	Period	Year	Period
2014	6/12~8/20	2014	8/22~9/12
	8/22~9/12		9/15~10/25
	9/15~11/23		10/27~11/23
	11/26		11/26

식(1)에서  $u_*$ 는 마찰 속도를 나타내며,  $w$ 는 연직 방향의 바람 성분,  $u, v$ 는 수평 방향의 바람 성분을 나타낸다. 식(2)에서  $LE$ 는 잠열 플럭스를 나타내며,  $L_v$  ( $= 2.5008 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$ )는 증발 잠열,  $\rho_a$ 는 수증기 밀도를 나타낸다. 식(3)에서  $H$ 는 현열 플럭스를 나타내며,  $\rho_a$  ( $= 1.225 \text{ kg m}^{-3}$ )는 공기 밀도,  $C_p$  ( $= 1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )는 정압 비열,  $T$ 는 온도를 나타낸다. 각 식에서 ‘-’는 30분 시간 평균을, 그리고 ‘’는 평균값으로부터의 편차를 의미한다.

Table 1은 2014년에 이어도 기지에서 관측된 플럭스 자료의 기간을 나타내며, 관측된 에디 공분산 시스템의 높이는 16 m이다. NW 방향의 경우, 원시 자료 내에 결측이 많이 존재하며, 수증기 밀도의 관측 오류로, 본 연구에서는 SE 방향의 가을에 해당하는 9월 1일부터 11월 26일까지(결측된 9월 13~14일, 10월 26일, 11월 24~25일 제외)의 자료만을 사용하였다.

## 2.2 관측 자료의 표준화

본 연구에서는 3장의 이어도 자료의 신뢰도 검정과 4장의 2014년 가을철 난류 플럭스의 특징을 살펴보기

위하여 16 m에서 관측된 바람을 10 m로 표준화하였다. 16 m에서 관측된 바람을 일반적인 해상풍 고도인 10 m로 변환하기 위하여, Oh and Ha (2005)와 Oh et al. (2014)와 같이 모닌-오부코프(Monin-Obukhov) 이론을 이용하였다.

$$u_z = \frac{u_*}{\kappa} \left[ \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \Psi_M\left(\frac{z}{L}\right) + \Psi_M\left(\frac{z_0}{L}\right) \right] \quad (4)$$

$$L = \frac{u_*^2 T}{\kappa \theta_* g_0} \quad (5)$$

$$\theta_* = -H(\rho_a c_p u_*)^{-1} \quad (6)$$

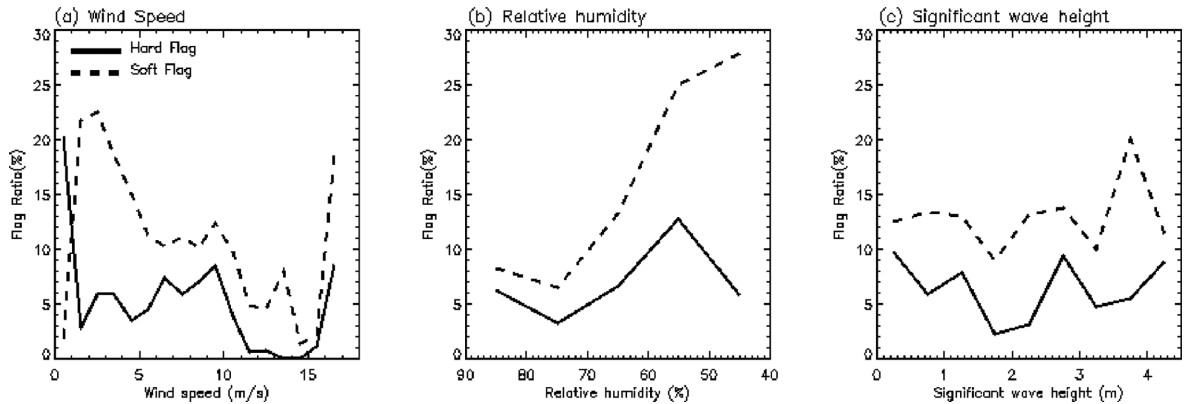
식(4)에서  $u_z$ 는  $z$  고도에서의 풍속,  $u_*$ 는 마찰속도를 나타내며,  $\kappa$  ( $= 0.4$ )는 Karman 상수,  $z_0$ 는 외해와 연안지역에서의 거칠기 길이의 중간 정도인  $5 \times 10^{-4} \text{ m}$ 로 정의하여 이용하였다(Stull, 1988; Oh and Ha, 2005; Oh et al., 2014).  $\Psi_M$ 는 운동량에 대한 안정도 함수,  $L$ 은 Monin-Obukhov 길이이다.  $L$ 은 식(5)로 정의되며, temperature scale  $\theta_*$ 는 식(6)으로 정의된다. 식(4)를 중립 상태로 가정하여 안정도 함수  $\Psi_M$ 를 0으로 두고,  $z$  고도에 각각 10 m와 16 m를 적용하면 간단하게 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$u_{10 \text{ m}} = u_{16 \text{ m}} \times \frac{\ln\left(\frac{10 \text{ m}}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{16 \text{ m}}{z_0}\right)} \quad (7)$$

## 3. Quality Control

### 3.1 Quality Control

이어도 기지에서 관측된 원시 자료는 후처리 과정을 통하여 자료의 질(Quality)을 개선할 수 있으며, 본 연구에서는 Oh et al. (2010)과 Oh et al. (2011)에서 제안된 Quality Control (QC)의 과정이 적용되었다. QC는 총 다섯 개의 단계로 구성되어 있으며, 각 단계에 해당하는 조건을 만족하지 못할 경우 결측 값(missing data)으로 처리된다. 첫 번째 단계에서는 Weather check를 통하여 강수일과 안개일을 제거한다. Weather check는 (a) 강수 0, (b) 상대습도 85% 미만, (c) 시정 2 km 초과와 세 가지 조건을 고려하며, 모두 만족하면 다음 단계로 진행한다. 이 과정은 초음파풍향풍속계가 물방울에 의해 매우 민감하게 반응하기 때문에 필수적이다. 이 단계에서의 강우량(Rainfall, mm), 상대습도(Relative Humidity, %), 시정(Visibility, m)은 국립해양조사원(Korea Ocean Observing and Forecasting System, KOOFS)에서 제공하는 이어도 기



**Fig. 2.** The error flag ratio of water vapor as a function of (a) horizontal wind speed, (b) relative humidity, and (c) significant wave height in September-October-November (SON). The solid (dotted) line indicates the hard (soft) flagged error ratio, respectively.

지의 기상 자료를 사용하였다. 만약 이 변수들이 결측인 경우, 해당 자료를 제거하지 않고 다음 단계를 수행하였다. 두 번째와 세 번째 단계에서는 Vickers and Mahrt (1997, VM)에서 제시한 방법인 VM sequential check와 VM parallel check가 이루어지며 플래그가 결정된다. 플래그는 hard flag와 soft flag로 구별되며, hard flag는 물리적으로 발생할 수 없으며 기기나 자료의 기록 문제로 인한 오류를, soft flag는 물리적으로 가능하지만 뒤는 자료의 오류를 의미한다. VM sequential check는 각 변수의 range check와 spike check로 구성되며 이 단계에서 이상 값(abnormal data)이 제거되며, VM parallel check에서는 amplitude resolution, skewness and kurtosis, haar mean and variance, dropout check를 통해 hard flag와 soft flag를 구분한다(Oh et al., 2011). 네 번째 단계에서 결정된 총 hard flag의 수가 2개 이상이면 제거된다. 마지막 단계에서 30분 평균 풍향을 이용하여 방향 체크가 수행된다. 이 단계는 관측 구조물로 인하여 흐름이 변형될 수 있기 때문에 필수적이다. 본 연구에서는 30분 평균 풍향이  $30^\circ$ 보다 크고  $300^\circ$ 보다 작은 경우를 만족하지 않을 때 해당 자료를 제거하였다.

### 3.2 Quality Control 과정에서 제거된 에러 플래그

QC과정에서 제거된 에러 플래그와 기상 및 해양 변수간의 관계를 살펴보기 위하여 Oh et al. (2011)과 같이 수증기와 연직 속도의 에러 플래그를 풍속, 상대습도, 유의파고에 따른 함수로 나타내었다. 본 연구에서는 Oh et al. (2011)과 다르게 분석 기간 중 KOOFS에서 제공한 시정의 결측 비율이 매우 높아 시정과 에러 플래그간의 관계에 대하여 분석이 이루어지지 않았다. 수증기의 경우, 풍속이  $15 \text{ m s}^{-1}$  이상의 강한

바람에서 hard flag와 soft flag의 비율이 급격히 증가하는 것을 보였으며, 이 원인은 Oh et al. (2011)과 같이 해염입자에 의한 것으로 보인다. 그러나  $2 \text{ m s}^{-1}$ 보다 작은 약한 바람에서는 hard flag는 급격히 증가하는 반면, soft flag는 급격히 감소하는 것을 보였다(Fig. 2a). Oh et al. (2011)은 상대 습도가 감소할수록 soft flag의 비율이 10%까지 증가하며, 상대습도가 증가함에 따라 hard flag가 20%까지 증가하는 결과를 보였다. 하지만 본 연구에서는 선행연구와 유사하게 상대 습도가 약 75% 이상으로 증가할수록 hard flag가 약 10%까지 증가하는 결과를 보였지만, 상대습도가 약 55~75%일 때는 상대습도가 감소함에 따라 soft flag와 hard flag가 모두 증가하는 결과를 보였다(Fig. 2b). 또한 수증기 에러 플래그는 유의파고와 뚜렷한 연관성을 보이지 않았다(Fig. 2c). Oh et al. (2011)은 수증기의 에러 플래그와 풍속 및 유의파고의 관계가 서로 비슷한 경향을 나타냈으며, 이 결과는 유의 파고와 풍속간의 긴밀한 관계를 의미한다. 그러나 본 연구에서는 기존 연구와 다른 결과를 도출하였으며, 이는 분석 계절의 차이와 더불어 추후 고려해야 할 부분으로 사료된다.

연직 속도의 경우, 풍속이  $15 \text{ m s}^{-1}$  이상의 강한 바람에서 hard flag와 soft flag의 비율이 급격히 증가하였다. 그러나  $2 \text{ m s}^{-1}$ 보다 작은 약한 바람에서는 hard flag는 급격히 증가하였지만, soft flag는 급격히 감소하는 것을 보였다(Fig. 3a). 이는 수증기 에러 플래그와 풍속과의 관계와 유사하다(Fig. 2a). 또한 상대습도가 증가할수록 hard flag의 비율이 10%까지 증가하였으며(Fig. 3b), 유의파고가 1 m보다 작을 때 유의파고가 감소할수록 hard flag와 soft flag의 비율은 각각 5%와 8%까지 급격히 증가하였다(Fig. 3c).

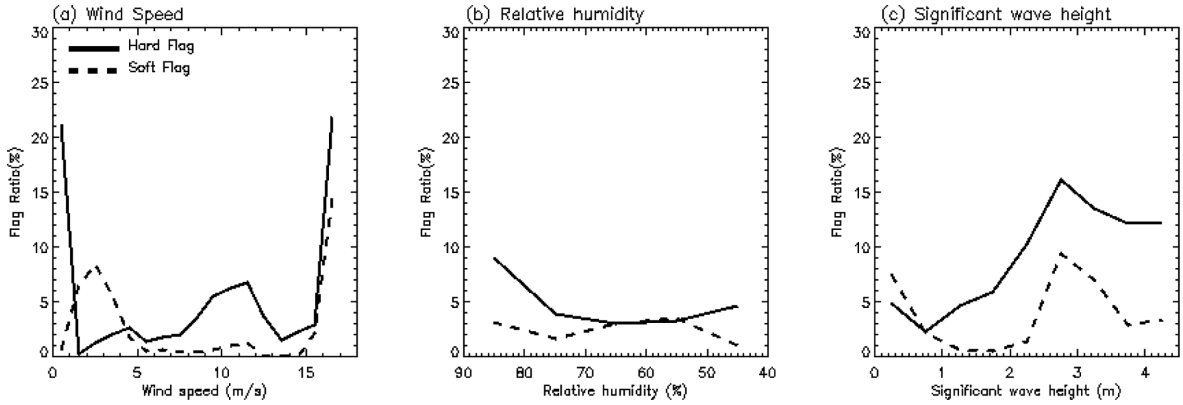


Fig. 3. The same as Fig. 2 except for w-component wind.

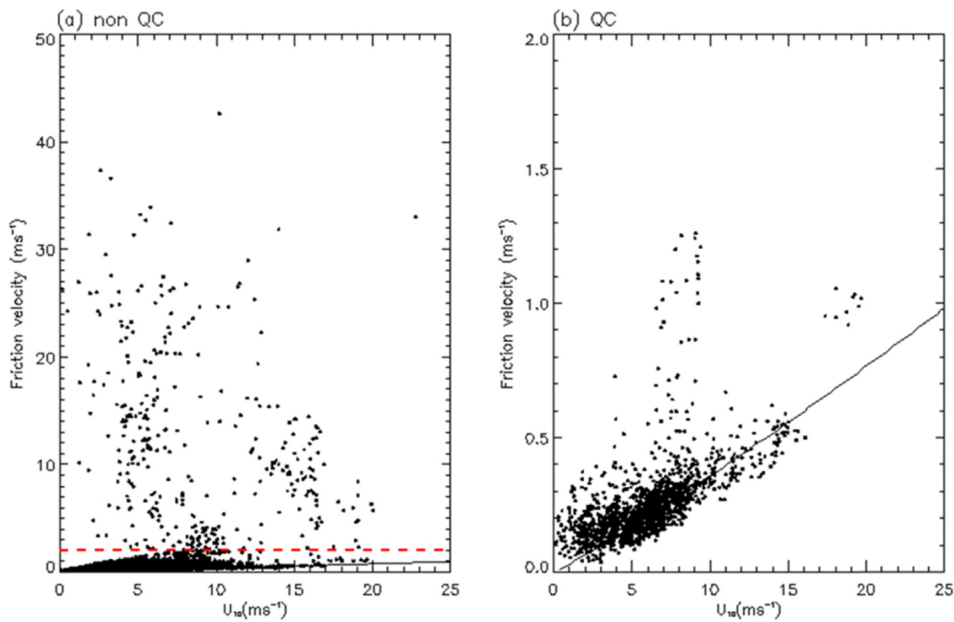


Fig. 4. Scattered diagrams between wind speed and friction velocity with (a) non QC and (b) QC in September-October-November (SON). The dotted line indicates friction velocity is 2.0 and the solid line is the relationship between the fiction velocity calculated using Charnock relation and 10 m wind speed in neutral condition.

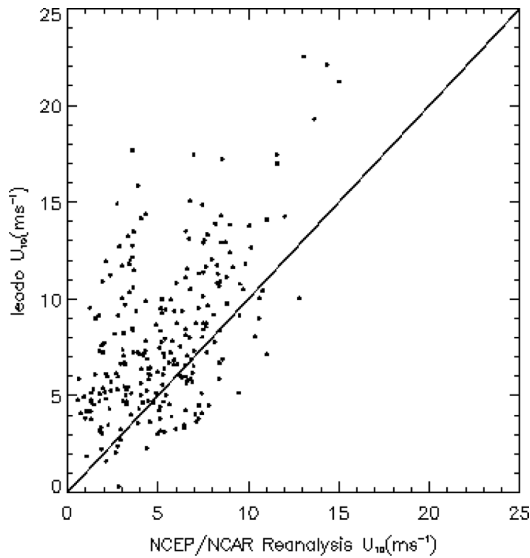
### 3.3 Quality Control 적용 여부

QC의 적용 여부에 따른 마찰속도( $u_*$ )와 풍속의 관계를 살펴보기 위하여 (a) QC 적용 전과 (b) QC 적용 후로 구분하여 비교하였다(Fig. 4). 실선은 상사 이론에서 중립상태를 가정하였을 때 풍속과 마찰속도의 관계를 대수 프로파일로부터 구한 값이다. 여기서  $\kappa$  ( $=0.4$ )는 Karman 상수이며,  $z_0$ 는 Charnock 관계식 (Charnock, 1955)으로부터 구하였다.  $\alpha_c$  ( $=0.016$ )는 Charnock계수이다.

$$\bar{U} = u_* \left( \frac{1}{\kappa} \right) \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \quad (8)$$

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

(a) QC 적용 전의 관측 값은 실선에서 많이 벗어나는 2.0 이상의 큰 이상 값들을 포함하고 있으며, (b) QC 적용 후 이러한 이상 값들이 제거되어 나타난다. 또한 대체적으로 풍속과 마찰속도의 관계식을 잘 만



**Fig. 5.** Scatter diagram of six hourly 10 m wind speeds (the observed data at the Ieodo Ocean Research Station (IORS) versus NCEP/NCAR reanalysis data) in September-October-November (SON).

족하고 있다.

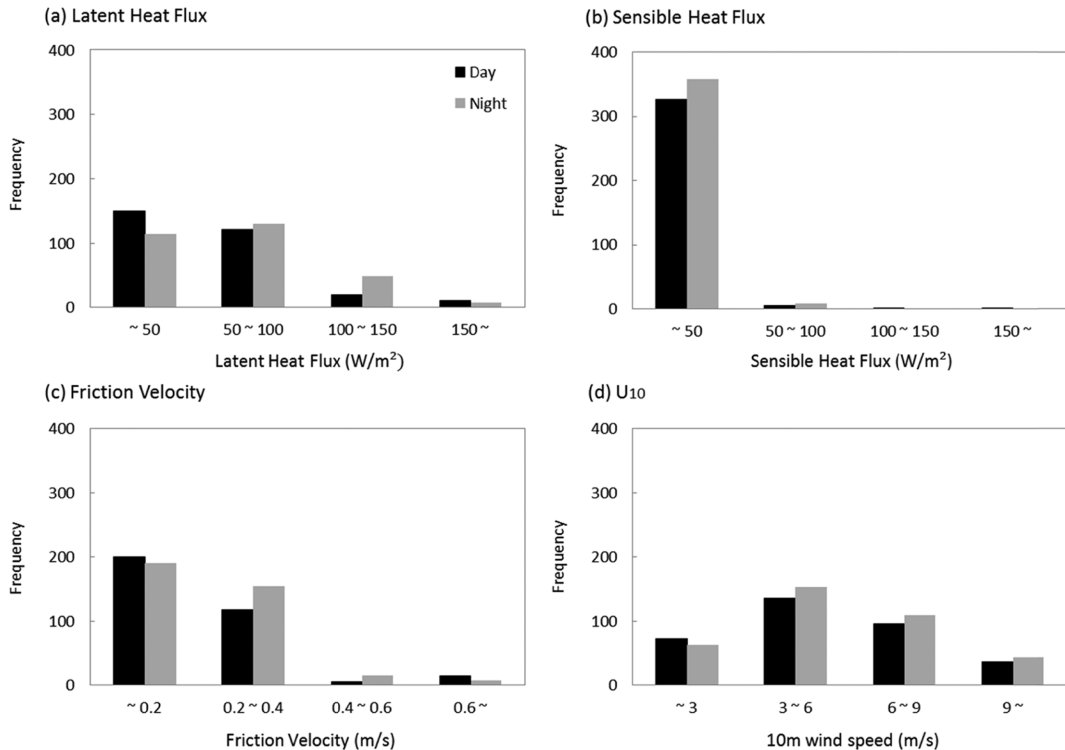
### 3.4 신뢰도 검증

QC적용 후 10 m로 표준화 된 이어도 기지 풍속 자료와 동일 지역의 NCEP/NCAR (National Centers for Environment Prediction/National Center for Atmospheric Research) 재분석 자료1의 풍속을 비교하여 신뢰도를 평가하였다(Fig. 5). 재분석 자료는 이어도 풍속에 비해 전체적으로 약간 작게 나타났으며, 이는 Oh et al. (2005)에서 재분석 자료가 이어도 풍속에 비해 전체적으로 약간 크게 나타난 것과 다른 결과이다. 그러나 두 자료의 상관계수는 0.71로 유의한 상관관계를 보이고 있기 때문에 이어도 기지에서 관측된 분석기간에 해당하는 바람 자료의 신뢰도가 매우 높으며 이전에 생산된 자료와 같이 앞으로 그 활용가능성이 크다고 판단된다.

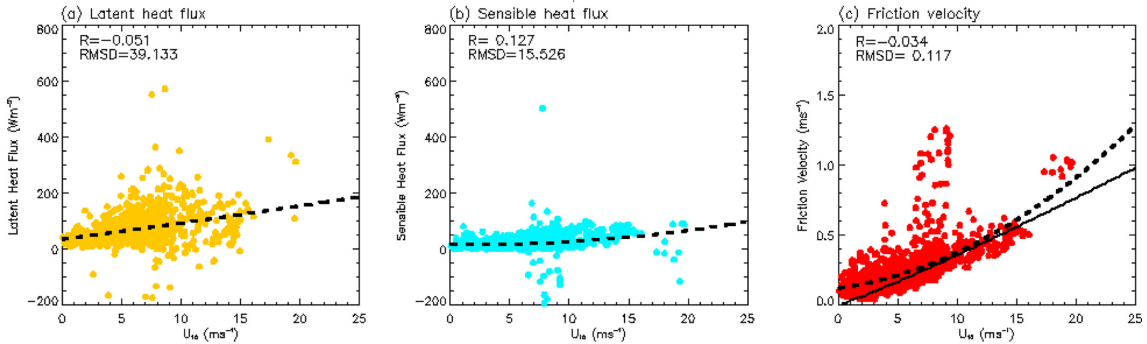
## 4. 2014년 가을철 난류 플럭스의 특징

### 4.1 난류 플럭스의 일변화

외해는 풍속과 기온이 뚜렷한 일주기를 보이는 내



**Fig. 6.** Frequency distribution of (a) Latent heat flux, (b) Sensible heat flux, (c) Friction velocity, and (d) 10 m wind speed ( $U_{10}$ ) during the day and night in September-October-November (SON). The black (gray) bar indicates frequency during the day (night), respectively.



**Fig. 7.** Relationship between 10m wind speed and (a) Latent heat flux, (b) Sensible heat flux, and (c) Friction velocity in September-October-November (SON). The dotted line indicates the regression line and the solid line indicates the relationship between the friction velocity calculated using Charnock relation and 10m wind speed in neutral condition.

륙지역과 달리, 강한 풍속이 나타나며 온도와 풍속, 난류 플럭스의 일주기가 없는 것이 특징이다(Oh and Ha, 2005; Oh et al., 2007). 본 연구에서는 2014년 가을철 이어도 기지 자료에서도 이러한 특징이 나타나지를 확인하고자 하였다.

난류 플럭스와 표준화된 10 m 풍속에 대하여 주간(day)을 0800 LST~1600 LST, 야간(night)을 2000 LST~0400 LST로 구분하여 발생 빈도를 나타내었다(Fig. 6). Oh et al. (2007)과 같이, 잠열 플럭스, 현열 플럭스, 마찰속도, 10 m 풍속은 주간과 야간의 차이를 크게 보이지 않았다. 잠열 플럭스는 150 W m<sup>-2</sup> 이상의 다양한 분포를 보였으며, 현열 플럭스는 잠열 플럭스와 비교하여 대부분의 값이 0~50 W m<sup>-2</sup>에 분포하였다. 마찰 속도는 대부분이 값이 0.4 m s<sup>-1</sup>보다 작은 구간에 분포하였으며, 10 m 풍속은 고르게 나타났으며, 3~6 m s<sup>-1</sup>의 구간이 가장 많이 분포하는 정규 분포의 모습을 보인다.

**4.2 난류 플럭스와 풍속과의 관계**

2014년 가을철의 난류 플럭스와 풍속과의 관계를 살펴보기 위하여 산포도를 보였따(Fig. 7). 2014년 가을철 잠열 플럭스는 풍속에 따라서 2차식  $y = 0.0174x^2 + 5.615x + 34.811$ 으로 회귀하였으며, 풍속에 따라 증가하는 모습을 보였으나, 풍속이 커질수록 동시에 편차도 커졌다. 실제 값과 회귀 식과의 차이를 나타내는 RMSD (Root Mean Square Deviation)는 39.133이며 10 m s<sup>-1</sup> 이상의 바람에서는 -200~600 W m<sup>-2</sup>의 범위의 편차가 크게 나타났다. 풍속에 따라 잠열 플럭스가 증가하는 동시에 편차가 커지는 것은 해양의 잠열 플럭스는 풍속 이외에도 바람으로 인한 해수면의 거칠기의 변화, 파고 등에 많이 영향을 받기 때문이다(Zhang and Perrie, 2001; Andreas and Decosmo, 2002; Subrahmanyam and Ramachandran, 2002; Oh

**Table 2.** The number of data and its frequency in terms of the three stability classes in September-October-November (SON) 2014.

Stability	A:	B:	C:
	Stable	Semi-unstable	Unstable
The number of data	5	128	312
(Frequency)	(1.12%)	(28.76%)	(70.11%)

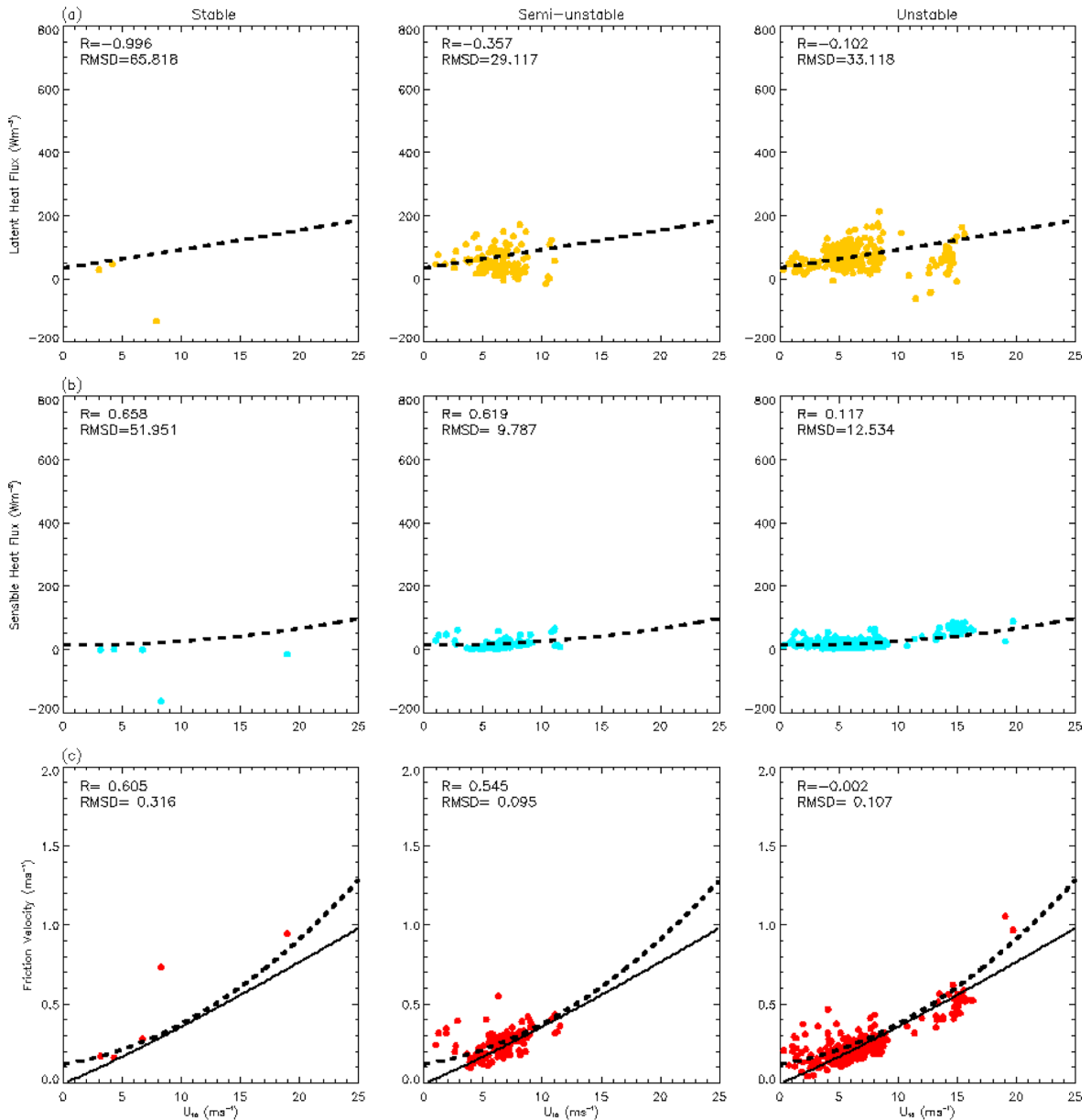
et al., 2007). 현열 플럭스는 풍속에 따라 2차식  $y = 0.1515x^2 - 0.4815x + 15.101$ 으로 회귀하였으며, RMSD가 15.526으로 잠열 플럭스보다 작다. 풍속에 따라 증가하는 모습을 보이며, 잠열 플럭스 보다 풍속과 뚜렷한 상관관계를 보인다. 마찰 속도는 풍속에 따라 2차식  $y = 0.0014x^2 + 0.0116x + 0.1196$ 으로 회귀하였으며, RMSD는 0.117이다. 상사이론에서 중립상태를 가정했을 때의 관계식과 거의 일치하였다. 또한 5~10 m s<sup>-1</sup>에서 편차가 크게 나타났다.

Oh et al. (2007)과 같이 안정도에 따른 난류 플럭스와 풍속과의 관계를 살펴보기 위하여 안정도는 안정도 변수 z/L로 판별하였으며, L은 Monin-Obukhov 길이이다. 안정도는 z/L과 기온( $\theta_a$ )과 수온( $\theta_s$ )의 관계를 이용하여 안정, 준-불안정, 불안정으로 구분하였다(Oost et al., 2000; Oh et al., 2007). 본 연구에서는 KOOFS에서 제공하는 이어도 기지의 0 m의 수온을 사용하였으며, 자료의 결측으로 안정도를 계산할 수 없는 경우는 고려하지 않았다. 각 안정도의 기준은 다음과 같다.

- Stable:  $z/L > 0$
- Semi-Unstable:  $z/L < 0, \theta_a > \theta_s$
- Unstable:  $z/L < 0, \theta_a < \theta_s$

2014년 가을철의 총 445개 자료 중 안정도 비율은 안정 1.12%, 준-불안정 28.76%, 불안정 70.11%으로





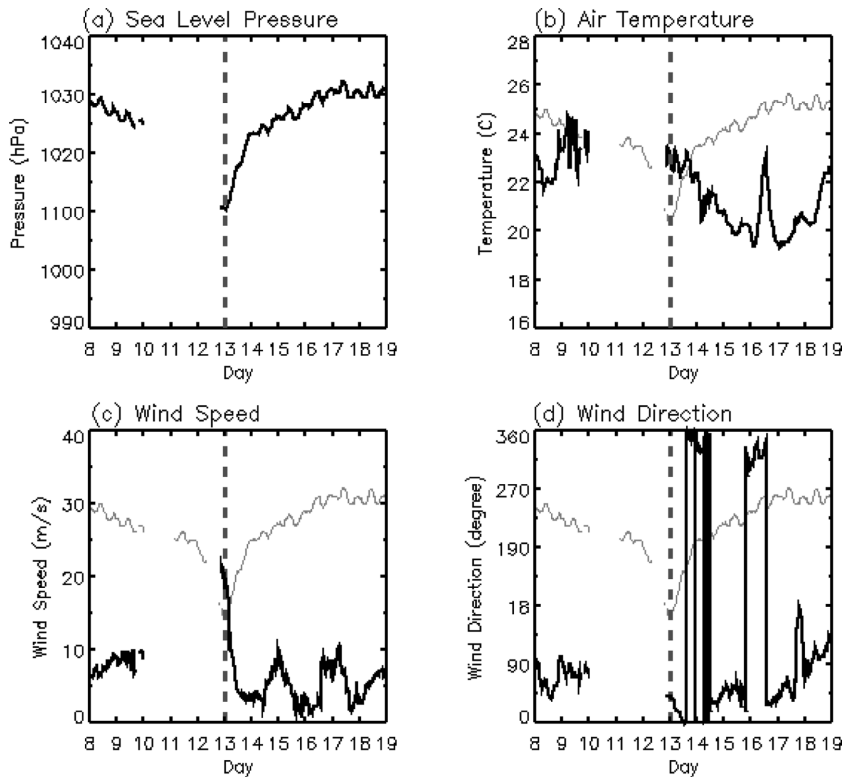
**Fig. 8.** Relationship between 10m wind speed and (a) Latent heat flux, (b) Sensible heat flux, and (c) Friction velocity according to the three stability classes in September-October-November (SON). The dotted line indicates the regression line in Fig.7 and the solid line indicates the relationship between the friction velocity calculated using Charnock relation and 10m wind speed in neutral condition.

나타났으며(Table 2), 이는 비록 2014년 가을철에 준-불안정의 비율이 증가하였지만, Oh et al. (2007)에서 가을철의 불안정 비율이 높게 나타난 결과와 일치한다. 가을철은 해수면 온도가 기온보다 높아지는 시기이며, 이어도 기지는 서쪽으로 북상하는 쿠로시오 난

류의 지류가 지나가는 곳에 위치하기 때문에 불안정의 비율이 크게 나타나는 것으로 사료된다(Oh et al., 2007).

안정한 상태에서는 분류된 자료의 수가 매우 적어 잠열 플럭스, 현열 플럭스, 마찰속도의 풍속과의 명확한 관계를 살펴볼 수 없었으며, 불안정한 상태에는 준-





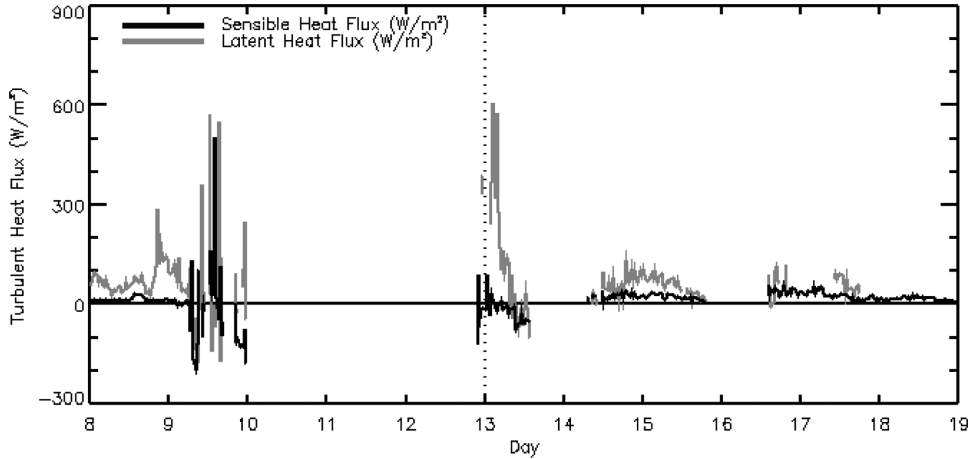
**Fig. 9.** Time series of (a) sea level pressure (SLP), (b) air temperature, (c) wind speed, and (d) wind direction during the passage of the typhoon Vongfong (1419). The thin line represents SLP and the dotted vertical line indicates the closest point to the Ieodo Ocean Research Station (IORS).

불안정 상태일 때보다  $10 \text{ m s}^{-1}$  이상의 강풍이 많이 존재 하였다. 다른 두 상태(안정과 불안정)에서보다 준-불안정 상태에서의 잠열 플럭스와 풍속의 관계가 2014년 전체 가을철에서의 관계와 높은 상관관계를 보이고 있었으며(-0.357) RMSD 역시 29.117로 가장 작게 나타났다. 현열 플럭스는 준-불안정 상태와 불안정 상태에서 거의 0에 가까운 값을 보였으며, 준-불안정한 상태의 현열 플럭스와 풍속간의 관계가 2014년 가을철 관계를 나타내는 회귀식과의 상관계수는 0.619로 불안정 상태보다 상관관계가 높게 나타났으며, RMSD가 9.787로 가장 작게 나타났다. 마찰속도도 역시 준-불안정한 상태에서의 상관관계가 높게 나타났으며(0.545) RMSD가 0.095로 가장 작게 나타났다. 이것은 준-불안정 상태에서 가을철 잠열 및 현열 플럭스와 마찰 속도의 각 변수와 10 m 풍속과의 관계를 더 설명하고 있다는 것을 의미하며 또한 이 상태에서의 RMSD가 전체 상태에서의 RMSD 보다 작아진 것으로 보아 준-불안정 상태일수록 앞서 구한 관계식의 관계를 잘 만족한다는 것을 의미한다.

### 5. 사례분석: 태풍 봉풍(1419)

이러도 기지는 한반도 상륙 태풍의 강도 및 진로 특성 파악과 예측을 위한 최적의 장소에 위치하고 있다(Moon et al., 2010). 2014년 한해 동안 북서태평양에서 총 23개의 태풍이 활동하였으며, 그 중 4개의 태풍[너구리(2014년 8호 태풍, 1408), 할롱(1411), 나크리(1412), 봉풍(1419)]이 한반도에 영향을 주었다. 본 연구에서는 분석 기간 중 발생한 봉풍을 사례로 선정하여 분석이 이루어졌다. 봉풍은 2014년에 발생한 19호 태풍으로, 2014년에 발생한 태풍 중 가장 강하게 발달한 태풍으로 기록되었으며, 10월 3일 2100 LST에 괌 동남동 부근의 해상에서 발생하여 10월 14일 0900 LST에 일본 센다이 동북동 부근의 해상에서 온대저기압으로 변질하였다. 봉풍은 10월 12~13일에 우리나라 영향을 주었다.

태풍의 중심이 기지를 가장 근접했던 10월 13일 전후 5일간의 기압, 온도, 풍속, 풍향의 시간에 따른 변화를 살펴보면, 태풍의 중심이 기지에 가장 근접한 13



**Fig. 10.** Time series of latent heat flux and sensible heat flux during the passage of the typhoon Vongfong (1419). The black (gray) solid line indicates sensible (latent) heat flux, respectively. The dotted black line is the closest point to the Ieodo Ocean Research Station (IORS).

일에 가장 낮은 기압이 관측되었으며(Fig. 9a), 태풍이 근접하면서 온도가 상승하고, 이어도 기지가 태풍의 영향권 내에 들어가면서 온도가 하락하는 모습을 보였다(Fig. 9b). 또한, 태풍의 중심이 기지와 가장 가까이 근접할 때 최대 풍속이 관측되었고(Fig. 9c), 풍향은 시간에 따라 반시계방향으로 변화하였다(Fig. 9d). 태풍 봉풍이 이어도 기지를 근접하기 전후의 잠열 플럭스와 현열 플럭스의 변화를 살펴보면, 봉풍의 중심이 경도 130°E, 위도 20°N 부근에 위치한 9일부터 플럭스의 동요(fluctuation)가 나타나기 시작하였으며, 13일 이후 잠열 플럭스와 현열 플럭스의 크기가 급격히 줄어드는 것으로 미루어 태풍의 영향권에서 벗어난 것으로 보인다(Fig. 10). 이는 태풍의 근접에 따른 풍속의 변화와 관련 있다(Potter et al., 2015; Zhang et al., 2015). Potter et al. (2015)은 2010 Impact of Typhoons on the Ocean in the Pacific (ITOP) campaign을 통해 필리핀 해에 위치한 Extreme Air-Sea Interaction (EASI) buoy에서 관측된 자료를 통하여 2010년에 발생한 태풍인 차바(Chaba)가 관측지에 가장 근접에 하였을 때 최대 풍속과 최대 운동량 플럭스가 나타나는 것을 보였다. Zhang et al. (2015)는 Kuroshio Extension Observatory (KEO)의 관측 자료를 이용한 General Ocean Turbulent Model (GOMT) 실험을 통하여 2006년에 발생한 태풍인 야기(Yagi) 접근 기간의 현열 및 난류 플럭스의 변화를 분석했다. 이 결과, 태풍이 가장 근접하기 1일 전부터 플럭스의 동요가 보였으며, 태풍이 가장 근접한 시기에 플럭스 값이 가장 크게 나타났다. 플럭스 동요가 나타나는 시점은 태풍의 크기와 이동속도, 이동경로 등에 따라 달라질 것으로 보

인다.

태풍이 이어도 기지에 가장 근접하기 전 3일간의 자료가 QC 과정에서 결측 값으로 제거되었을 뿐만 아니라 원시 자료에 결측이 많이 존재하여 플럭스의 변화를 명확히 살펴볼 수 없었지만 4일전부터 플럭스의 동요를 보였으며 근접 이후 급격히 그 영향이 줄어드는 것으로 이어도 기지에서 태풍 활동 전후의 해양의 난류 플럭스 변화를 살펴볼 수 있었다는 점에 의의가 있다. 특히, 이어도 기지는 다른 자료들과 비교하여 플럭스 자료의 장기적이고 지속적인 관측이 가능하기 때문에 결측이 발생하지 않도록 장비의 관리와 보수가 이루어 진다면, 태풍 활동 전후의 난류 플럭스의 변화를 계속해서 살펴볼 수 있을 것이다.

## 6. 요약 및 결론

이어도 기지의 자료는 육지의 영향을 받지 않고 외해의 특성을 그대로 드러내어 여름과 겨울 몬순의 시작과 같은 계절적 특징과 해상에서의 악기상과 같은 분석에 이용이 가능하다. 본 연구에서는 2014년에 재관측된 이어도 플럭스 자료의 신뢰성을 재평가하고, 이를 이용하여 2014년 가을철 난류 플럭스의 특징을 살펴보았으며, 이어도 기지에 영향을 준 태풍 봉풍의 근접 전후의 난류 플럭스 자료의 분석을 통해 이어도 기지의 난류 플럭스 자료의 효용성을 보였다.

본 연구에서는 Oh et al. (2010)에서 정의한 QC 방법을 이용하여 이어도 기지 자료의 질을 개선하였으며, Oh and Ha (2005)와 같이 QC 적용 후 자료와 NCEP/NCAR 재분석 자료1의 비교를 통해 재관측된

이어도 기지의 관측 자료의 활용 가능성을 확인한 후 분석이 이루어졌다. 2014년 가을철에는 잠열 및 현열 플럭스, 마찰속도, 10 m 풍속의 일변화를 보이지 않았다. 난류 플럭스와 풍속과의 관계를 살펴보았을 때, 잠열 플럭스는 풍속에 따라 증가하는 모습을 보였으나, 풍속이 커질수록 동시에 편차도 커졌다. 이는 해양의 잠열 플럭스는 풍속 이외에도 바람으로 인한 해수면의 거칠기의 변화, 파고 등에 많이 영향을 받기 때문이다(Zhang and Perrie, 2001; Andreas and Decosmo, 2002; Subrahanmanyam and Ramachandran, 2002; Oh et al., 2007). 현열 플럭스도 풍속에 따라 증가하는 모습을 보였으며, 잠열 플럭스보다 풍속과 뚜렷한 상관관계를 보였다. 마찰 속도는 상사이론에서 중립상태를 가정했을 때의 관계식과 거의 일치하였으며, 5~10 m s<sup>-1</sup>에서 편차가 크게 나타났다. 2014년 가을철의 약 70%가 불안정한 상태로 나타났으며, 안정도에 따른 가을철 난류 플럭스의 변화를 살펴보았을 때, 불안정한 상태에는 준-불안정 상태일 때보다 10 m s<sup>-1</sup> 이상의 강풍이 많이 존재 하였다. 하지만 안정한 상태에서는 자료의 수가 매우 적어 잠열 플럭스, 현열 플럭스, 마찰속도의 풍속과의 명확한 관계를 살펴볼 수 없었다. 잠열 플럭스, 현열 플럭스, 마찰속도는 세 안정상태 중 준-불안정한 상태에서 회귀식과의 상관관계가 불안정 상태보다 높게 나타났으며, RMSD도 가장 작게 나타났다.

이어도 기지는 한반도 상륙 태풍의 강도 및 진로 특성 파악과 예측을 위한 최적의 장소에 위치하고 있다(Moon et al., 2010). 태풍의 중심이 기지에 가장 근접한 13일에 가장 낮은 기압이 관측되었으며, 태풍이 근접하면서 온도가 상승하고, 이어도 기지가 태풍의 영향권 내에 들어가면서 온도가 하락하는 모습을 보였다. 또한 태풍의 중심이 기지와 가장 가까이 근접할 때 최대 풍속이 관측되었으며, 풍향은 시간에 따라 반시계방향으로 불었다. 붕풍의 중심이 경도 130°E, 위도 20°N 부근에 위치한 9일부터 현열 플럭스와 잠열 플럭스의 동요(fluctuation)가 나타나기 시작하였으며, 13일 이후 잠열 플럭스와 현열 플럭스의 크기가 급격히 줄어드는 것으로 미루어 태풍의 영향권에서 벗어난 것으로 보인다. 태풍이 기지에 근접해오는 3일전의 원시 자료가 결측되어 플럭스의 변화를 살펴볼 수 없었지만 4일전부터 플럭스의 동요를 보였으며 근접 이후 급격히 그 영향이 줄어드는 것으로 이어도 기지에서 태풍 활동 전후의 해양의 난류 플럭스 변화를 살펴볼 수 있었다는 점에 의의가 있다.

난류 플럭스는 풍속 이외에도 바람으로 인한 해수면의 거칠기의 변화, 파고 등에 많이 영향을 받기 때문에 여러 해양 변수간의 관계를 밝히기 위한 분석이 더 필요할 것이며, 이어도 종합해양기지의 자료는 활

용가치가 높으므로 결측이 발생하지 않도록 지속적인 장비의 관리와 보수가 이루어져야 한다.

### 감사의 글

이 논문은 2015년 해양수산부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(종합해양과학기지 구축 및 활용연구 II)입니다.

### REFERENCES

Andreas, E. L., and J. Decosmo, 2002: The signature of sea spray in the hexos turbulent heat flux data. *Bound.-Layer Meteor.*, **103**, 303-333.

Charnock, H., 1955: Wind stress on a water surface. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **81**, 639-640.

De Szoeki, S. P., J. B. Edson, J. R. Marion, C. W. Fairall, and L. Bariteau, 2015: The MJO and Air-Sea Interaction in TOGA COARE and DYNAMO. *J. Climate*, **28**, 597-622.

Frankignoul, C., A. Czaja, and B. L'Heveder, 1998: Air-sea feedback in the North Atlantic and surface boundary conditions for ocean models. *J. Climate*, **11**, 2310-2324.

Hsiung, J., 1985: Estimates of global oceanic meridional heat transport. *J. Phys. Oceanogr.*, **15**, 1405-1413.

Jang, H.-Y., and S.-Y. Yeh, 2013: Analysis of Atmosphere-Ocean Interactions over South China Sea and its Relationship with Northeast Asian Precipitation Variability during Summer. *Atmosphere*, **23**, 283-291.

Kitoh, A., and O. Arakawa, 1999: On overestimation of tropical precipitation by an atmospheric GCM with prescribed SST. *Geophys. Rese. Lett.*, **26**, 2965-2968.

Kunoki, S., A. Manda, Y.-M. Kodama, S. Iizuka, K. Sato, I. Fathrio, T. Mitsui, H. Seko, Q. Moteki, S. Minobe, and Y. Tachibana, 2015: Oceanic influence on the Baiu frontal zone in the East China Sea. *J. Geophys. Res.*, **120**, 449-463.

Li, Z., S. Zhaobo, N. Donghong, and Z. Gang, 2004: Impact of previous Winter kuroshio SSTA on Summer rainfall in China. *Acta Oceano Sinica*, **19**, 76-82.

Liu, W. T., K. B. Katsaros, and J. A. Businger, 1979: Bulk parameterization of air-sea exchanges of heat and water vapor including the molecular constraints at the interface. *J. Atmos. Sci.*, **36**, 1722-1735.

Moon, I.-J., J.-S. Shim, D.-Y. Lee, J.-H. Lee, I.-K. Min, and K.-C. Lim, 2010: Typhoon Researches Using the Jeodo Ocean Reserch Station: Part I. Importance and Present Status of Typhoon Observation, *Atmosphere*, **20**, 247-260.

- Oh, H.-M., and K.-J. Ha, 2005: Analysis of marine meteorological characteristics at Ieodo Ocean Research Station from 2003 to 2004. *Atmosphere*, **41**, 671-680.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, J.-S. Shim, Y.-K. Hyun, and K.-S. Yun, 2007: Seasonal characteristics of turbulent fluxes observed at Ieodo Ocean Research Station. *Atmosphere*, **17**, 421-433.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, K.-Y. Heo, K.-E. Kim, S.-J. Park, J.-S. Shim, and L. Mahrt, 2010: On drag coefficient parameterization with post processed direct fluxes measurements over the ocean. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **46**, 513-523.
- \_\_\_\_\_, K.-E. Kim, K.-J. Ha, L. Mahrt, and J.-S. Shim, 2011: Quality control and tilt correction effects on the turbulent fluxes observed at an ocean platform. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **50**, 700-712.
- Oh, H., K.-J. Ha, and J.-S. Shim, 2014: Analysis for Onset of Changma Using Ieodo Ocean Research Station Data. *Atmosphere*, **24**, 189-196.
- Oost, W. A., C. M. J. Jacobs, and C. Van Oort, 2000: Stability effects on heat and moisture fluxes at sea. *Bound.-Layer Meteor.*, **95**, 271-302.
- Potter, H., H. C. Graber, N. J. Williams, C. O. Collins III, R. J. Ramos, and W. M. Drennan, 2015: In situ measurements of momentum fluxes in typhoons. *J. Atmos. Sci.*, **72**, 104-118.
- Roxy, M., Y. Tanimoto, B. Preethi, P. Terray, and R. Krishnan, 2013: Intraseasonal SST-precipitation relationship and its spatial variability over the tropical summer monsoon region. *Clim. Dynam.*, **41**, 45-61.
- Stull, R. B., 1988: *An introduction to boundary layer meteorology*. Kluwer academic publishers, 670 pp.
- 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.
- Tokinaga, H., Y. Tanimoto, S.-P. Xie, T. Sampe, H. Tomita, and H. Ichikawa, 2009: Ocean frontal effects on the vertical development of clouds over the western North Pacific: In situ and satellite observations. *J. Climate*, **22**, 4241-4260.
- Vickers, D., and L. Mahrt, 1997: Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data. *J. Atmos. Oceanic. Technol.*, **14**, 512-526.
- Wallace, J. M., and P. V. Hobbs, 2006: *Atmospheric Science: An Introductory Survey*. Academic Press, 483 pp.
- Wu, R., B. P. Kirtman, and K. Pegion, 2006: Local air-sea relationship in observations and model simulations. *J. Climate*, **19**, 4914-4932.
- Xu, H., M. Xu, S.-P. Xie, and Y. Wang, 2011: Deep Atmospheric Response to the Spring Kuroshio over the East China Sea. *J. Climate*, **24**, 4959-4972.
- Zhang, L., C. Guan, C. Sun, S. Gao, and S. Yu, 2015: Upper Ocean Thermal Responses to Sea Spray Mediated Turbulent Fluxes during Typhoon Passage. *Adv. Meteorol.*, **2015**. [Available online at <http://dx.doi.org/10.1155/2015/752947>.]
- Zhang, Y., and W. Perrie, 2001: Feedback mechanisms for the atmosphere and ocean surface. *Boundary-Layer Meteorol.*, **100**, 321-348.