Article

이여도 해양과학기지에서의 에디 공분산 방법을 이용한 플럭스 관측

이희춘¹ · 이방용^{2*} · 김 준¹ · 심재설³¹연세대학교 대기과학과/지구환경연구소
(120-749) 서울시 서대문구 신촌동 134²한국해양연구원 부설 극지연구소³한국해양연구원 연안·항만공학연구본부
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29호

Tower-based Flux Measurement Using the Eddy Covariance Method at Ieodo Ocean Research Station

Hee Choon Lee¹, Bang Yong Lee^{2*}, Joon Kim¹, and Jae-Seol Shim³¹*Department of Atmospheric Sciences/Global Environment Laboratory
Yonsei University, Seoul 120-749, Korea*²*Korea Polar Research Institute, KORDI*³*Coastal and Harbor Engineering Research Division, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea*

Abstract : Surface energy and CO₂ fluxes have been measured over an ocean at Ieodo Ocean Research Station of KORDI since May 2003. Eddy covariance technique, which is a direct flux measurement, is used to quantitatively understand the interaction between the ocean surface and the atmospheric boundary layer. Although fluxes were continuously measured during the period from May 2003 to February 2004, the quality control of these data yielded <20% of data retrieval. The atmospheric stability did not show any distinct diurnal patterns and remained near-neutral to stable from May to June but mostly unstable during fall and winter in 2003. Sensible heat flux showed a good correlation with the difference between the sea water temperature and the air temperature. The maximum fluxes of sensible heat and latent heat were 120 Wm⁻² and 350 Wm⁻² respectively, with an averaged Bowen ratio of 0.2. The ocean around the tower absorbed CO₂ from the atmosphere and the uptake rates showed seasonal variations. Based our preliminary results, the daytime CO₂ flux was steady with an average of -0.1 mgCO₂m⁻²s⁻¹ in summer and increased in winter. The nighttime CO₂ uptake was greater and fluctuating, reaching up to -1.0 mgCO₂m⁻²s⁻¹ but these data require further examination due to weak turbulent mixing at nighttime. The magnitude of CO₂ flux was positively correlated with the half hourly changes in horizontal mean wind speed. Due to the paucity of quality data, further data collection is needed for more detailed analyses and interpretation.

Key words : 이여도 해양과학기지(Ieodo Ocean Research Station), 에디 공분산(eddy covariance), 열 플럭스(heat flux), 이산화탄소 플럭스(CO₂ flux)

*Corresponding author. E-mail : bylee@kopri.re.kr

1. 서 론

지면과 대기와의 에너지 및 물질의 교환을 정량화하고 그것을 이해하려는 노력이 다양하게 추진되고 있으며, 네트워크를 통해서 여러 지역에 대한 연구가 종합적으로 진행되고 있다(Kim *et al.* 2002). 에디 공분산 방법은 대기과 지면과의 에너지 및 물질의 교환량을 난류 관측을 통해 직접 관측하는 방법이다. 그러나 에디 공분산 방법을 정확히 적용하기 위해서는 수반되는 이론적 가정을 필수적으로 고려하여야 한다(Massman and Lee 2002). 해양에서는 취주거리(fetch)의 제한이 없으므로, 무엇보다 영구 구조물상에서 최적의 관측 타워 설치와 관측, 선별된 플럭스 자료에 대한 정확한 보정이 중요하다.

지구 표면에서 2/3 정도는 바다로 덮여 있다. 하지만 해양과 대기와의 상호작용에 대한 연구는 지표면에서의 연구에 비해서 관측의 어려움 등으로 인하여 많이 수행되지 못하였다. 해양에서의 플럭스 관측은 부이와 선박 등에서의 관측 방법이 이용되었지만 고정된 타워에서 에디 공분산 방법을 이용한 경우는 많지 않다(Smith *et al.* 1991). 부이와 선박에서의 관측은 고정된 타워에 비해 그 움직임으로 인하여 분석이 상대적으로 간단하지 않다. 우리나라의 이어도 해양과학기지는 바다에 위치하고 있어서 연안에서의 고정된 지점에서 수행되는 관측과 달리 육지의 영향이 거의 없다. 더욱이 우리나라에 영향을 미치는 많은 태풍의 진로(Fig. 1)에 위치하고 있어서, 그 지점에서의 해양과의 에너지 교환에 대한 정량적인 분석은 기상 예보 모형에 대한 기준 값으로 사용할 수 있는 등 기상학적 및 해양학적으로 매우 중요하다.

Fig. 1. Annual average passes of typhoon toward Korean Peninsula during the period from 1971 to 2000 (from <http://www.typhoon.or.kr>).

기후변화의 주요 원인 중에 하나인 이산화탄소의 순환을 이해하는 것은 주요 연구의 주제가 되고 있다. 그 순환 중 해양과 대기간에 이루어지는 이산화탄소 교환량 추정에는 많은 불확실성을 가지고 있는 것으로 알려지고 있다(McGills *et al.* 2001). 따라서 해양에서의 이산화탄소 교환량은 전 지구적인 이산화탄소 순환에 있어서 매우 중요한 요소로 여겨지므로 직접적인 플럭스 관측 방법인 에디 공분산 방법을 이용한 관측은 중요한 실험이 된다.

이 연구에서는 이어도 해양과학기지에 설치된 플럭스 관측 시스템을 이용하여 2003년 5월 초부터 2004년 2월까지 측정된 자료의 분석과 해양에서의 에너지 및 이산화탄소 교환에 대한 정량적인 결과에 대해 논의하고, 아울러 측정의 현황 및 문제점을 제시하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

에디 공분산 방법

에디 공분산 방법은 보존 방정식을 통해서 얻어진다. 관측 장소가 수평적으로 균질하고 편평하여 이류의 효과를 무시할 수 있으며, 측정변수의 시간에 따른 변화를 무시할 수 있고, 측정 변수의 흡원과 발원이 없다는 가정을 만족한다면 에디 공분산 값으로 플럭스를 산출할 수 있다(Baldocchi *et al.* 1988).

$$F = \overline{w'c'}$$

위 식에서 w 는 연직 풍속이고 c 는 측정하고자하는 변수이며, ‘—’는 시간 평균을, 그리고 ‘—’는 평균값으로부터의 편차를 의미한다. 즉, 현열 및 잠열 플럭스에 적용하면 각각 연직 풍속과 온도의 공분산($H = \rho C_p \overline{w'\theta'}$) 그리고 연직 풍속과 수증기 밀도의 공분산($LE = L_v \overline{w'\rho_v'}$)을 통해서 얻어진다. 여기서, ρ 는 공기 밀도, C_p 는 정압비열 그리고 L_v 는 증발 잠열을 나타낸다. ρ_v 는 수증기 밀도를 나타낸다. 이 연구에서 정압비열은 $1004.67 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$, 증발 잠열은 $[2.501 - 0.00237 \times T(^{\circ}\text{C})] \times 10^6 \text{ Jkg}^{-1}$ 을 이용하였다.

좌표축 변환 및 밀도 보정

에디 공분산 방법의 적용 및 난류에 대한 이해를 쉽게 하기 위해서 바람 부는 방향으로의 좌표축 변환이 이루어져야한다. 바람이 해수면에 평행하게 불더라도, 설치된 기기의 기울어짐으로부터 나타나는 0이 아닌 연직 풍속은 좌표축 변환을 하게 되면 주어진 평균 시간 동안의 평균 연직 풍속을 0으로 만들 수 있다. 하지만 이 좌표축 변환 방법은 중규모 기상현상으로 얻어지는 0이 아닌 연직 풍속 및 평균 시간 선택으로 인하여 생길 수 있는 선택적 오차를 고려할 수 없게 된다. 이에 Wilczak *et al.*(2001)이

제시한 PFM(Planar Fit Method)을 이용하여 좌표축 변환을 수행하였다. 이것은 지면의 경사 및 설치 기기의 기울어짐을 고려한 후에도 0이 아닌 연직 풍속을 표현하기 위해서 장기간의 자료를 이용한 회귀 평면으로 연직 좌표 변환을 수행하는 방법이다.

에디 공분산 방법은 관측지가 수평적으로 넓고 균질한 경우 평균 연직 속도가 0이 됨을 가정한다. 하지만 Webb *et al.*(1980)은 지표면으로부터 열이나 수증기의 연직으로의 동시 수송이 있을 때 평균 연직 바람 성분이 0이 아니므로 이 평균 연직 바람 효과에 의한 플럭스를 고려해야 함을 지적하였다. 이처럼 수증기와 열의 동시 수송에 의한 밀도 보정 효과에 대해서는, 특히 열플럭스 값이 크게 측정되는 지역에서 이산화탄소 또는 메탄 등 미량기체의 플럭스를 측정하고자 하는 경우 이 밀도 변동 효과에 의한 보정량이 작지 않으므로 주의를 기울여야 한다.

관측 자료

이어도 해양과학기지는 제주도 남쪽의 마라도에서 서남 방향으로 149 km 정도 떨어진 곳(32.12275°N, 125.18246°E)에 있다. 타워는 기지 roof deck의 동남쪽 모서리에서 대략 3 m 정도 떨어진 안쪽에 설치되어 있다. Roof deck의 높이는 해수면으로부터 33.5 m 정도이다(<http://ieodo.kordi.re.kr>). 플럭스 산출을 위한 바람 성분 및 스칼라 성분에만 관측은 2003년 5월 초부터 시작되었으며 전원 공급의 문제 등으로 인하여 2004년 2월 초까지의 기간에 대해서는 기간 중 대략 70%(자료의 품질은 고려되지 않았음) 시간에 대해서만 자료를 얻을 수 있었다. 플럭스 산출을 위한 관측 시스템은 3차원 초음파 풍향풍속계(CSAT3, Campbell Sci., Logan, UT) 및 이산화탄소/수증기 분석기(LI7500, LICOR, Lincoln, NE)가 이용되고 있으며 roof

Fig. 2. Photo of flux measurement tower at Ieodo Station.

deck으로부터 대략 9.3 m(해수면으로부터 대략 43 m)의 높이에 설치되어 있다(Fig. 2). 관측은 10 Hz의 간격으로 이루어지며 이 관측 자료는 자료 집록 장치(CR5000, Campbell Sci., Logan, UT)에 10 Hz로 관측된 생 자료 및 30분 통계 값들이 실시간으로 1GB PCMCIA 카드에 저장된다.

플럭스 타워에서 관측되는 자료와 더불어 추가적인 분석을 위해서 보조적인 관측 자료가 이용되었다. 해수면으로부터 약 14 m의 깊이에 설치된 초음파 유속계(Vector, NORTEK AS, Norway)에서 얻어지는 해수 혼합층의 수온 측정자료와 관측타워의 약 2 m 높이에 설치된 온/습도계(HMP45A, Vaisala, Finland)와 일사계(MS-802, EKO, Japan)를 통해 측정되는 온도 및 일사량 자료를 사용하였다.

자료의 선택 및 처리

풍향 및 풍속

이어도 해양과학기지 구조물의 규모는 미기상 현상을 측정하는 측면에서 매우 크기 때문에 난류 관측을 통하여 플럭스를 관측하는 에디 공분산 방법 적용에 있어서는 구조물에 의한 난류의 깨짐 현상 및 열 플럭스의 변화 등을 유발하기 쉽다. 따라서 해양과 대기와의 상호작용 분석을 위해서는 기지 구조물의 영향이 적은 해양 쪽에서 불어오는 풍향의 고려는 필수적인 요소가 된다. 또한 적절한 풍속 이상의 바람은 해수면 위 대기층의 기계적인 혼합이 잘 이루어지게 하므로 관측 높이 아래에서 일어날 수 있는 물리량이 저장되는 현상을 막을 수 있게 한다. 이와 관련하여 Lee(1998)는 보존 방정식으로부터 지표면과 대기와의 순 교환량을 에디 공분산 방법으로 얻어지는 양과 더불어 관측높이 아래에서 일어나는 저장량을 수식으로 제시한 바 있다. Fig. 3은 2003년 5월부터 2004년 2월까지의 풍향의 계절적인 변화를 나타낸 것이다. 2003년 5월에는 북풍계열의 바람이 주를 이루고 있지만 여름철은 동남풍 계열의 바람이 불고 있다. 9월경까지는 동남풍 바람이 주로 불지만 그 이후에는 북서풍이 주를 이루면서 풍향이 변하고 있다. 관측 타워의 위치가 기지 roof deck의 동남쪽에 위치하고 있고 주변 기기의 영향을 고려하여 북동쪽과 남동쪽 사이에서 불어오는 동풍계열의 바람이 불어올 때의 자료를 플럭스 분석에 이용하였다. 따라서 북서풍이 주를 이루는 겨울철 기간에 대해서는 상당 부분의 자료들이 이 기준을 만족하지 못하였다. Fig. 4는 풍속의 빈도 분포를 나타내고 있다. 관측된 자료의 90% 이상의 자료는 풍속 2 ms^{-1} 이상의 바람이 불고 있어서 풍속에 의한 제한 요소는 극히 적은 것으로 나타났다. 2 ms^{-1} 이하의 바람이 불 때의 자료는 분석에 포함하지 않았다.

Fig. 3. Seasonal variation of wind direction.

Fig. 4. Frequency distribution of wind speed.

관측 기기의 오염

Fig. 5는 이산화탄소/수증기 분석기의 window가 오염된 상태 여부를 판단할 수 있는 AGC 값의 변화와 오염된 상태의 모습을 나타낸 것이다. 기기 매뉴얼에서는 관측

window가 청결한 상태에서의 일반적인 AGC 값의 범위가 55-65%라고 되어 있다. 분석에 이용된 자료는 AGC 값의 범위가 65% 이하일 때만을 이용하였고 관측된 자료의 20% 정도만이 이 범위를 만족하였다. 이런 기기의 오염은 바다의 해염 등에 의한 것으로 판단되어지며 광학적인 방법으로 관측되어지는 다른 자료에 대해서도 주의가 요망된다.

자료처리

좌표축 변환을 위해 PFM을 적용하였으며(Wilczak *et al.* 2001), Webb *et al.*(1980)이 제시한 밀도 보정이 이루어졌다. 자료의 품질 검사를 위하여 Foken and Wichura (1996)가 제시한 방법을 기초로 하여 특정 기준을 정하였다. 풍속, 풍향, 운동량 플럭스 및 ITC(Integral Turbulence Characteristics), AGC 값 등에 대한 점검이 이루어졌으며 이를 통해서 적절한 자료를 선택하였다. 자료처리 과정 및 자료처리 프로그램에 대한 자세한 설명은 Hong and Kim (2002)에 잘 제시되어 있다.

Fig. 5. Variation of AGC value and photo of open path infrared CO₂/H₂O analyser with a contaminated window.

3. 결과 및 토의

ITC(Integral Turbulence Characteristics)

직접적인 난류 측정을 통하여 플럭스를 구하는 에디 공분산 방법에서는 ITC를 통해 측정된 자료의 품질 검증할 수 있다. 지표층에서의 난류는 일정한 형태의 특성을 지니고 있다. ITC는 Monin-Obukhov 상사 이론에 따라 대기에서 관측된 기상 관측 요소들이 대기안정도($z/L =$

$$-\frac{(g/\theta)(\overline{w'\theta'})_0}{u_*^3/kz}; z \text{는 관측 높이, } L \text{은 Obukhov length를}$$

나타낸다. k 는 von Karman 상수이며 g 는 중력가속도, u_* 는 마찰속도, $(\overline{w'\theta'})_0$ 는 지표면에서의 온도 플럭스를 나타낸다)의 일정한 함수 형태로 표현된다. Fig. 6과 7은 대기안정도에 따른 연직 풍속의 상사 함수와 연직 풍속 및

Fig. 6. Similarity function of vertical wind speed.

Fig. 7. Correlation coefficient of vertical wind speed and air temperature.

온도의 상관계수를 나타낸 것이다. 연직 풍속에 대한 상사 함수는 Kaimal and Finnigan(1994)이 제시한 대기가 불안

Fig. 8. Variation of atmospheric stability.

정 할 때의 함수 값을 잘 표현하고 있는 것을 알 수 있다. 연직 풍속 및 온도에 대한 상관계수 값은 대기가 불안정 할 때 0.5, 중립일 때 0, 안정할 때 -0.4 로 알려져 있다 (Kaimal and Finnigan 1994). 이어도 기지에서 관측된 값은 안정할 때만 -0.3 정도였으며 다른 안정도에서는 그 값들을 잘 표현하고 있었다. 이 결과들은 이어도 기지에서 관측된 난류 자료들이 ITC 분석을 통하여 품질이 나쁘지 않음을 나타내는 것이다.

현열 및 잠열 플럭스

Fig. 8은 대기안정도의 변화를 나타낸 것이다. 2003년도 5월부터 10월까지의 자료를 통해서 육상에서와 같은 일변화는 찾아보기 힘들었으며, 6월까지의 평균적으로 안정한 대기층을 보이고 있다. 상대적으로 7월부터는 불안정한 대기를 보이고 있다. 이것은 Fig. 9의 해수 혼합층의 온도와 기온의 변화를 통해서 그 근거를 찾을 수 있었다. 2003년도 10월부터 2004년도 2월까지의 자료는 대부분의 기간에 걸쳐서 해수 혼합층의 온도가 기온보다 높은 것을 보였다. 단지 6월부터 9월까지의 해수 혼합층 온도자료의 변동폭이 크게 나타났는데 이런 변동 형태에 대한 의문으로 인하여 다른 해수 혼합층 온도 관측 자료와의 비교분석을 통한 품질 검증이 요구되었다. 이로 인하여 7월부터 대기안정도가 평균적으로 불안정하게 나타나는 것에 대한 근거를 Fig. 9에서는 찾을 수 없었다.

Fig. 10은 기온 경도(해수 혼합층의 온도와 기온의 차이) 그리고 43 m에서 관측된 풍속을 대기가 불안정한 때에 대하여 현열 플럭스와 비교하였다. 그림에서 알 수 있듯이 결정계수 값이 0.8 이상으로 잘 묘사하였다. 이 선형 관계를 통하여 에디 공분산 방법으로 관측할 수 없었던 기간에 대한 현열 추정이 가능하였다. 에디 공분산 방법으로 관측된 현열 플럭스의 최대 값은 대략 120 Wm^{-2} 정도였

Fig. 9. Variation of air temperature and sea water temperature.

Fig. 10. Relationship between sensible heat flux and wind speed and temperature data (T_a : air temperature, T_s : sea water temperature, U_{43} : wind speed at 43 m high).

Fig. 11. Variation of sensible and latent heat fluxes (symbols indicate the mean of whole measurement values (after data screening) for each month and error bars indicate the standard deviation of those).

다. 현열 플럭스의 일변화는 현열 플럭스의 크기 및 방향에 의해서 주로 결정되는 대기안정도가 뚜렷한 일변화를 보이지 않는다. Fig. 8의 결과와 같이 뚜렷한 일변화를 보이지 않았다. 현열 플럭스와 일사량의 관계를 보았을 때도 특정한 관계는 나타나지 않았다(not shown).

Fig. 11은 현열 및 잠열 플럭스 값 중에서 자료 선택 기준을 적용한 후 제외되지 않은 자료에 대한 월별 변동을 나타낸다. 현열 플럭스 값이 잠열 플럭스 값에 비해서 관측 기간 동안 평균적으로 작게 나타났다. 그 변동도 크지

Fig. 12. Diurnal variation of energy fluxes. Circles indicate the sensible heat fluxes and squares the latent heat fluxes at 21 Aug. 2003. Triangle-ups indicate the sensible heat fluxes and triangle-downs the latent heat fluxes at 26 Nov. 2003. Color-filled symbols mean the acceptable values after data screening.

Fig. 13. Ratio between sensible and latent heat flux in unstable atmospheric condition.

않았지만 조금씩 증가추세를 보이다가 2003년 12월에서 가장 큰 평균값을 나타내고 있다. 잠열 플럭스 값의 경우는 2003년 8월에 비해서 9월과 11월에는 큰 평균값을 나타내었다.

Fig. 12는 2003년 8월 21일과 11월 26일의 에너지 플럭스 값들의 일 변동을 나타낸 것이다. 두 날에 대해 모두 앞서 제시된 적절한 자료의 선택 기준을 적용한 후에는 상당수의 자료들이 분석에서 제외되는 것을 알 수 있다. 현열 및 잠열 플럭스 값의 차이는 Fig. 11의 8월과 11월의 플럭스 값 비교 결과와 같은 형태를 보이고 있다.

Fig. 13은 대기가 불안정할 때 현열 플럭스와 잠열 플럭스의 비를 나타낸 것이다. 이 분석을 통하여 구할 수 있는

Table 1. The result of density variation correction for carbon dioxide flux.

Period	H	LE	F_CO ₂ _raw	F_CO ₂	α
Aug. 2003	6.5	40.9	-0.0044	0.0235	1.19
Nov. 2003	26.5	198.7	-0.6654	-0.5449	0.84

H : Sensible heat flux (Wm^{-2})

LE : Latent heat flux (Wm^{-2})

F_CO₂_raw : Carbon dioxide flux before density variation correction ($\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)

F_CO₂ : Carbon dioxide flux after density variation correction ($\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)

α : slope of linear regression ($F_{\text{CO}_2} = \alpha \times F_{\text{CO}_2_raw}$)

보웬 비 값은 대략 0.2 정도였다. 보웬 비는 순 복사에너지 성분이 대기로 재 배분되는 에너지들의 양적 비율(즉, 현열플럭스/잠열플럭스)을 나타내고 이 값은 해수면의 특성에 따라서 변하게 되는 값이다. 해양에서는 따뜻한 해수면을 따라 찬 공기의 강한 이류가 발생할 때는 보웬 비 값이 1에 가까울 수 있지만 일반적인 보웬 비 값은 1보다 훨씬 작은 값으로 알려져 있다(Arya 2001). 에디 공분산 방법으로 관측된 잠열 플럭스 최대 값은 대략 350 Wm^{-2} 정도였다.

이산화탄소 플럭스

이산화탄소 플럭스는 Webb *et al.*(1980)이 제시한 밀도 변동 보정에 의해서 그 값이 변하게 된다. 그 변화되는 양은 현열 및 잠열 플럭스 값의 크기에 영향을 받게 된다. Table 1은 2003년 8월과 11월 중 관측된 자료에 대한 밀도 변동 보정 결과를 나타낸 것이다. 각 플럭스 값들은 분석된 값의 평균값을 나타낸 것이고 그 결과의 비율은 선형회귀선의 기울기로부터 얻어진 것이다. 이산화탄소 플럭스 절대 값이 크게 관측된 11월의 경우 그 효과가 16% 정도로 나타났다.

Fig. 14는 이산화탄소 플럭스와 30분 평균 풍속의 변화와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보면, 2003년 8월

과 11월 중 연속된 시간에 대한 자료를 선택하여 계절적인 이산화탄소 플럭스의 정량적인 차이를 볼 수 있었다. 음의 부호는 대기에서 해양 방향으로의 이산화탄소 흐름을 나타낸 것이다. 8월의 이산화탄소 플럭스 값은 $-0.1 \text{ mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 이하의 값이 측정되었다. 상대적으로 11월의 이산화탄소 플럭스 값은 풍속의 변화가 없는 때를 기준으로 $-0.5 \text{ mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 정도의 값이 측정되었으며 풍속이 변화가 크게 나타났을 경우는 $-1.0 \text{ mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 정도의 값도 측정되었다. 이산화탄소 플럭스 값이 풍속의 변화와 선형적인 관계를 나타낸 것은 Smith *et al.*(1991)의 결과와 다르지 않았다. 11월에 측정된 $-1.0 \text{ mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 정도의 값은 해남 농경지에서 8월에 관측된 최대 이산화탄소 플럭스 값과 비견할 만큼 큰 값이었다(Lee *et al.* 2003).

Fig. 15는 이산화탄소 플럭스의 월별 변동을 나타낸 것으로 계절적인 이산화탄소 플럭스 값의 변화를 알 수 있다. 2003년 8월에는 0에 가까운 값을 보이지만 9월에는 그 절대 값이 증가하였고 11월에는 Fig. 14의 결과와 거의 비슷하게 나타났다. 이산화탄소 플럭스 값의 정량적인 분석은 앞서 언급한 관측 기기의 오염 및 풍향의 고려 등의 이유로 매우 적은 자료만을 통해서 분석한 것이다. Fig. 16은 Fig. 14에서 분석된 이산화탄소 플럭스 값의 일변화를 나타낸 것이다. 밤 시간을 제외하고는 CO₂ 플럭스의 일변화가 거의 없음을 알 수 있다. 자료 선택 기준을 적용

Fig. 14. Relationship between CO₂ flux and half hourly change of wind speed.

Fig. 15. Variation of carbon dioxide flux (symbols and error bars indicate the same as Fig. 11).

Fig. 16. Diurnal variation of carbon dioxide flux. Circles indicate the carbon dioxide flux at 21 Aug. 2003 and squares at 26 Nov. 2003. Color-filled symbols mean the acceptable values after data screening.

하기 전과 후의 값들을 모두 나타내었는데, 일부자료를 제외하고는 크게 다르지 않음에도 기준 적용 후 대부분의 자료들이 분석에서 제외되었으므로 선택 기준을 다소 완화할 수 있을 것으로 판단된다. 적은 자료로 인하여 이 연구에서 분석된 관측 자료가 특정 시간에 치우친 선택적 오류를 가지고 있으므로 이에 대한 추가 분석과 지속적인 자료의 축적이 필요하다.

4. 결론 및 제언

이어도 해양과학기지에서 2003년 5월부터 에디 공분산 방법을 적용하여 플럭스 산출을 위한 관측 시스템이 설치 운용되기 시작되었다. 에디 공분산 방법을 적용하기 위한 제한적 요소들이 고려되어 해양과 대기와의 상호작용이 정량적으로 분석되었다.

풍향은 5월에는 북풍계열의 바람이었지만 여름에는 동남풍 계열의 바람이 9월 이후는 북서풍이 주로 불었다. 기지의 동남쪽에 설치된 타워의 위치를 고려하여 북서풍인 경우의 자료는 분석에서 제외되었고, 따라서 연속적인 자료를 이용한 분석이 어려웠다. 풍속의 경우는 대부분의 시간에 걸쳐서 적절한 풍속(2 ms^{-1}) 이상의 바람이 불었다. 이산화탄소와 수증기 플럭스를 관측하는 광학기기의 경우, 해염 등에 의한 window 오염이 문제점으로 드러났고 정기적인 기기 관리가 자주 필요한 것으로 나타났다.

현열 플럭스는 해양 혼합층과 기온과의 관계에 의해서 주로 결정되었으며 특정 일변화는 나타나지 않았다. 5월부터 6월까지의 중립 또는 안정한 대기층이 관측되었지만 7월 이후부터 10월까지의 대부분 불안정한 대기가 관측되었다. 최대 현열 플럭스 값은 대략 120 Wm^{-2} 정도였으며

평균 보웬 비 값은 0.2 정도였다.

이산화탄소 플럭스 값은 여름철과 겨울철에 양적인 차이가 뚜렷하였다. 여름철 한 낮에 관측된 이산화탄소 플럭스 값은 일변화를 보이지 않았으며, 평균 $-0.1 \text{ mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 정도의 일정한 값을 보였다. 겨울철 한 낮에는 해양에 의한 이산화탄소의 흡수가 증가하였으나 일변화는 보이지 않았다. 특히 야간 또는 새벽에 많은 변화를 보였으며 최대 $-1.0 \text{ mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 정도의 값이 관측되었고, 풍속의 변화와 음의 상관관계를 가진 선형관계를 나타내었다. 에디 공분산 방법을 적용하는 과정에서 여러 가지 기상학적 또는 기기적 제한으로 인해 연속적인 시간에 대한 플럭스 자료의 확보가 어려웠다. 적절한 시스템의 재설치 및 주기적인 기기 관리를 통해 보다 많은 자료를 확보하고, 플럭스 발자국(footprint) 분석과 관측지를 포함하는 고분해능 위성자료를 활용한 비교 및 규모확장(upscaling)에 관한 연구가 우선적으로 필요하다.

사 사

이 연구는 한국해양연구원의 ‘이어도 해양과학기지 활용 연구(PM24103)’ 및 환경부의 ‘차세대 핵심 환경기술 개발사업(Eco-technopia 21 project)’의 일환으로 수행되었다. 이 연구에 사용된 자료의 획득 및 플럭스 타워의 관리에 도움을 준 한국해양연구원의 민인기 님과 B&P International Co.의 홍경하 대리님께 감사드린다. 아울러 논문의 세심한 검토와 질적 향상을 위해 조언을 아끼지 않으신 심사위원들께 감사드린다.

참고문헌

- Arya, S.P. 2001. Introduction to Micrometeorology. 2nd edition, Academic Press, New York. 420 p.
- Baldocchi, D.D., B.B. Hicks, and T.P. Meyers. 1988. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. *Ecology*, 69, 1331-1340.
- Foken, Th. and B. Wichura. 1996. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. *Agric. Forest Meteorol.*, 78, 83-105.
- Hong, J.K. and J. Kim. 2002. On processing raw data from micrometeorological field experiments. *Korean J. Agric. Forest Meteorol.*, 4(2), 119-126.
- Kaimal, J. and J. Finnigan. 1994. Atmospheric Boundary Layer Flows: Their structure and measurement. Oxford University Press, New York. 289 p.
- Kim, J., W. Kim, C. Cho, B. Choi, H. Chung, B. Lee, K. Kim, K. Kim, M. Kim, B. Lee, D. Lee, G. Lee, J. Lee,

- J. Lim, J. Oh, E. Park, J. Shim, J. Yun, and C. Rho. 2002. KOFLUX: A new tool to study the biosphere-atmosphere interactions in Asia. p. 215-229. In: *Ecology of Korea*. ed. by D. Lee. 215-229.
- Lee, H.C., J. Hong, C. Cho, C. Choi, S. Oh, and J. Kim. 2003. Surface exchange of energy and carbon dioxide between the atmosphere and a farmland in Haenam, Korea. *Kor. J. Agric. Forest Meteorol.*, 5(2), 61-69.
- Lee, X. 1998. On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation. *Agric. Forest Meteorol.*, 91, 39-49.
- Massman, W.J. and X. Lee. 2002. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. *Agric. Forest Meteorol.*, 113, 121-144.
- McGills, W.R., J.B. Edson, J.D. Ware, J.W.H. Dacey, J.E. Hare, C.W. Fairall, and R. Wanninkhof. 2001. Carbon dioxide flux techniques performed during GasEx-98. *Mar. Chem.*, 75, 267-280.
- Smith, S.D., R.J. Anderson, E.P. Jones, R.L. Desjardins, R.M. Moore, O. Hertzman, and B.D. Johnson. 1991. A new measurement of CO₂ eddy flux in the nearshore atmospheric surface layer. *J. Geophys. Res.*, 96, 8881-8887.
- Webb, E.K., G.I. Pearman, and R. Leuning. 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, 106, 85-100.
- Wilczak, J.M., S.P. Oncley, and S.A. Stage. 2001. Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Bound. Layer Meteorol.*, 99, 127-150.

Received Apr. 26, 2004

Accepted Jun. 6, 2004