

Article

남극 세종기지에서의 지표 플럭스 관측: I. 난류 특성과 현열 플럭스

최태진¹ · 이방용^{2*} · 이희춘³ · 심재설⁴¹연세대학교 지구환경연구소/³대기과학과
(120-749) 서울시 서대문구 신촌동 134²한국해양연구원 부설 극지연구소⁴한국해양연구원 연안·항만공학연구본부
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29호Surface Flux Measurements at King Sejong Station in West Antarctica:
I. Turbulent Characteristics and Sensible Heat FluxTaejin Choi¹, Bang Yong Lee^{2*}, Hee Choon Lee³, and Jae-Seol Shim⁴¹Global Environment Laboratory/³Department of Atmospheric Sciences
Yonsei University, Seoul 120-749, Korea²Korea Polar Research Institute, KORDI⁴Coastal and Harbor Engineering Research Division, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Abstract : The Antarctic Peninsula is important in terms of global warming research due to pronounced increase of air temperature over the last century. The first eddy covariance system was established at King Sejong Station located in the northern region of the Antarctic Peninsula in December of 2002 and has been operated over one year. Here, we analyze turbulent characteristics to determine quality control criteria for turbulent sensible heat flux data as well as to diagnose the possibility of long term eddy covariance measurement under extreme weather conditions of the Antarctic Peninsula. We also report the preliminary result on sensible heat flux. Based on the analyses on turbulent characteristics such as integral turbulence characteristics of vertical velocity (w) and heat (T), stationarity test and investigation of correlation coefficient, they follow the Monin-Obukhov similarity and eddy covariance flux data were reliable. ~47% of total retrieved sensible heat flux data could be used for further analysis. Daytime averaged sensible heat flux showed a pronounced seasonal variation, with a maximum of up to 300 Wm^{-2} in summer. In conclusion, continuous and long-term eddy covariance measurement may be possible at the study site and the land surface may influence the atmosphere significantly through heat transport in summer.

Key words : 남극 반도(the Antarctic Peninsula), 세종기지(King Sejong Station), 에디 공분산(eddy covariance), 난류 현열 플럭스(turbulent sensible heat flux)

1. 서 론

최근의 기후 변화 연구 결과는 1) 기후 변화의 영향이

고위도 지방에서 더 심각하게 나타나며, 2) 기후 변화의 징후가 적도나 저위도에서 보다 고위도에서 더 빨리 나타남을 보여준다(IPCC 2001). 이러한 결과는 고위도 지방이 기후변화와 관련하여 중요함을 가리킨다. 고위도 지방 중에서 남극 반도는 기후 변화 연구의 주된 관심 지역이다.

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

예를 들면, Jacka and Budd(1998)은 남극 반도에서 지난 1세기 동안 기온이 약 1.2°C 증가했음을 보였다. 이 기온 증가는 IPCC(2001)가 보고한 전구 평균 기온 상승(0.6±0.2°C)보다 두 배나 높다. Croxall *et al.*(2002)은 최근 남극 지역 seabird 군집(populations)의 변화가 지역 기후 변화에 대한 직간접적인 반응임을 보였다. 한편, Vaughan *et al.*(2001)은 남극 반도의 기온 상승을 가져온 메커니즘이 확실하지 않으며, 이를 위해서 지역 기후 모형의 필요성을 강조하였다.

남극 반도 북단 킹조지섬에 위치한 남극 세종기지(62°13'S, 58°47'W)는 1988년 2월 개소한 이래 대기, 해양, 생물, 지질 등 다양한 분야에 걸쳐서 연구활동을 수행해오고 있다. 특히, 기상분야는 1989년 세계기상기구(WMO)에 종관 기상관측소로 정식 등록(WMO Index No. 89251)된 이래 종관 기상관측을 중심으로 남극 기후 특성에 대한 연구를 수행하고 있다(이 1996). 기후적으로 세종기지는 고위도 저압대에 위치하는데, 빈번한 기압골의 통과로 기상 변화가 심하여 강수 및 강우가 자주 발생하고, 흐린 날이 많다.

세종기지 주변 역시 기후 변화와 관련된 징후들이 보고되고 있다. 김과 정(2004)은 최근 세종기지 주변에 남극곰 새끼의 갑작스런 번성이 서남극 일대의 기온 상승에 기인한 기후학적 천이의 한 단면임을 제시하였다. 정 등(2004)은 세종기지 주변에 형성되어 있는 빙벽이 후퇴하고 있으며, 이것은 지역 대기온난화로 인한 여름 해빙기의 확장에 기인하는 것으로 평가하였다. 이러한 현상들은 남극 반도에서의 기온 상승과 그에 따른 반응으로 설명될 수 있다.

예상되는 전구 기온의 상승이 지역 규모에 어떻게 영향을 미치는 가를 평가하기 위해서는 전구 규모의 기온 상승이 지역 기후와 어떻게 상호작용에 대한 이해가 필요하다. 이를 위해서 지면-대기 교환 과정에 대한 이해와 교환되는 에너지, 수증기 및 이산화탄소의 장기적인 관측이 기본적으로 요구된다. 하지만, 극심한 기후 환경으로 인하여 타 지역에 비하여 기후 관련 연구 활동이 미비한 실정이며 남극 지역의 특성에 맞는 미기상학적 연구는 거의 이루어지지 못했다. 반면에 기후 변화와 관련하여 중요한 또 다른 지역인 북극 지역에서는 이산화탄소 교환 등에 대한 연구가 활발히 수행되어 오고 있다. 북극 지역의 토양은 온도가 낮고 습하기 때문에 토양 내 유기물질 분해가 억제되어 대기 이산화탄소에 대한 흡원으로 작용해왔다(Miller *et al.* 1983). 하지만 최근의 따뜻하고 건조한 기후의 영향으로 대기 이산화탄소에 대한 발원으로 작용하고 있음이 보고되고 있다(Oechel *et al.* 1995). 한편, Oechel *et al.*(2000)은 미기상학적인 관측을 통해 이 지역의 생태계가 장기 기후 변화에 적응하여 여름철 대기 이산화탄소에 대한 흡원으로도 작용할 수 있음을 보였다.

2002년 12월에 세종기지 주변 지역에서의 지표면과 대기와의 상호작용을 통하여 지표면의 변화가 남극 대기에 어떤 물리적 영향을 미치는지 규명하고자 하는 연구를 시작하였다. 이를 위하여 에디 공분산 관측이 처음으로 시도되었으며, 현열, 잠열, 이산화탄소 및 운동량 플럭스 자료가 1년 이상 축적되고 있다. 이 연구의 목적은 2002년 12월 중순부터 2004년 2월까지 획득된 자료 중 에디 공분산 시스템 중 초음파 풍속계로 관측된 풍속 및 온도 자료를 이용하여 1) 기본적인 난류 통계량 분석을 통해, 플럭스 자료의 품질 관리 조건을 결정하고, 장기 에디 공분산 관측의 가능성을 진단하고자 한다. 그리고 2) 현열 플럭스의 예비 결과를 제시하고자 한다. 이 연구결과는 고품질의 수증기 및 이산화탄소 생산을 위한 품질 관리의 기준으로 사용될 수 있다. 그리고 이에 근거한 현열, 수증기와 이산화탄소 플럭스의 계절 변동 등의 분석은 남극 반도에서의 지표-대기 상호 작용을 정량적으로 이해하는데 중요한 근거를 제공할 것으로 기대된다.

2. 이론적 배경

이 연구에서 사용된 미기상학적 방법은 에디 공분산 방법이며, 다음과 같은 보존 방정식에 근거한다. 직교 좌표계에서 스칼라의 미분 형태의 보존 방정식은 아래와 같다(Finnigan *et al.* 2003).

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \underbrace{u \frac{\partial \bar{c}}{\partial x}}_{(I)} + \underbrace{w \frac{\partial \bar{c}}{\partial z}}_{(II)} + \underbrace{\frac{\partial \overline{w'c'}}{\partial z}}_{(III)} + \underbrace{\frac{\partial \overline{u'c'}}{\partial x}}_{(IV)} = S(0) \quad (1)$$

여기서 c 는 이산화탄소, 열, 수증기와 같은 스칼라, t 는 시간, u 는 x 방향의 수평 풍속, w 는 연직 속도이다. ‘ $\bar{\cdot}$ ’는 시간 평균, ‘ $\overline{\cdot}$ ’는 평균으로부터의 변동분이다. 위 식에서 (I)항은 저류항으로 에디 공분산 관측 높이가 낮거나 난류에 의한 연직 혼합이 강하면 무시할 수 있다. (II)과 (III)항은 수평 및 연직 이류항으로 지면이 균질하면 무시 가능하다. (IV)항은 수평 난류 발산항으로 역시 균질한 지면 위에서 무시 가능하다. (V)항은 연직 난류 발산항이며, (VI)항은 지면에서의 스칼라의 흡원/발원의 강도이다. (IV)항을 지면으로부터 관측 높이(z_r)까지 적분하면 다음과 같다.

$$\int_0^{z_r} \frac{\partial \overline{w'c'}}{\partial z} dz = \overline{w'c'}(z_r) - \overline{w'c'}(0) \quad (2)$$

지면에서의 난류는 무시할 수 있으므로,

$$\overline{w'c'}(z_r) = S(0) \quad (3)$$

따라서 한 높이에서의 고속 반응 기기(예를 들면, 초음파

풍향 풍속계, 고속 반응 적외선 기체 분석기)를 사용하여 연직 난류 공분산을 관측하면, (VI)항을 정량화할 수 있다 (최 등 1999).

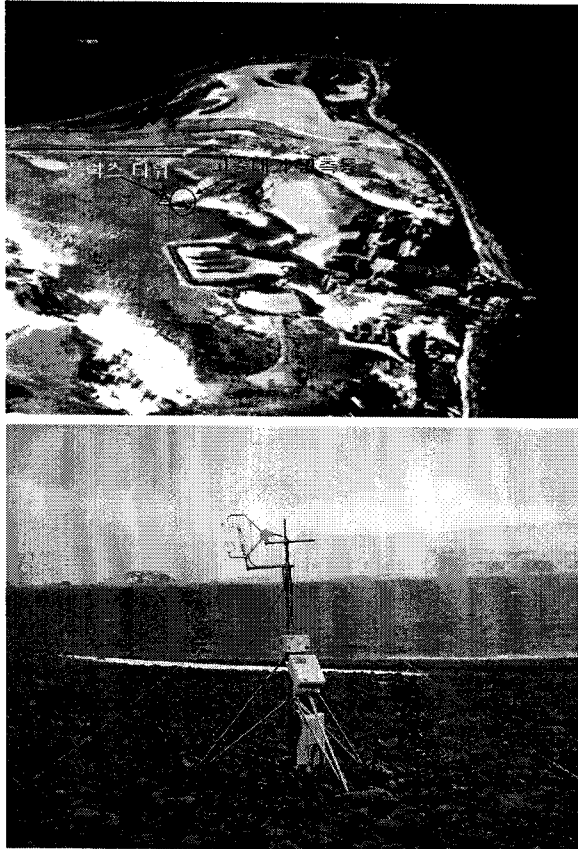


Fig. 1. (a) Landscape of King Sejong Station (top) and (b) Eddy covariance system (bottom).

3. 재료 및 방법

관측지점

남극 세종기지는 남극 반도로부터 약 100 km 북쪽에 있는 킹조지섬 바톤 반도 끝 쪽 해안에 위치하고 있다. 세종기지 주변의 플릭스 측정시스템 설치 지점은 10~30 cm 크기의 크고 작은 돌들이 토양을 덮고 있다. 돌 표면 및 돌 사이에 보이는 토양에서는 다양한 지의류(lichens)가 서식하고 있는데 그 중에서 *Usnea fasciata*-*Himantormia*가 우점종이다(이 1992). 하계기간 지의류 분포는 전체 관측지역의 절반 정도를 덮고 있는 것으로 판단된다.

관측지점 주변은 남동쪽과 북서쪽으로 5° 정도의 경사를 가지고 기울어져 있으며 200 m 이내는 대체적으로 편평하다. 그 이상의 먼 지역은 남동쪽으로 언덕이 있고 서쪽과 북쪽으로 맥스웰 만과 마리안 소만이 위치한다 (Fig. 1a).

에디 공분산 시스템

에디 공분산 방법을 이용한 플릭스 관측을 위해서 2002년 12월 15일 삼차원 초음파 풍향풍속계(CSAT3, Campbell Sci. Inc.)와 개회로 CO₂/H₂O 기체 분석기(LI7500, Li-cor)를 2.5 m 높이에 설치하였다(Fig. 1b). 초음파 풍속계와 개회로 적외선 기체 분석기 간의 거리는 0.15 m이다. 삼차원 풍향풍속계는 진북방향을 0°로 할 때 180°를 향하게 설치하였는데, 이는 약 30 m 거리를 두고 북쪽에 위치한 고층대기관측동(트레일러)의 영향으로 생기는 자료 손실을 최소화 하기 위해서이다. 생 자료(raw data)의 집록 속도는 20 Hz이며, 이 자료로부터 실시간 계산된 난류 통계량과 함께 자료 집록장치(CR5000, Campbell Sci. Inc.)에 binary 형식으로 저장되었다. 집록된 생 자료의 예

Table 1. Example of retrieved raw data. From left, time, three wind components (u , v and w in ms^{-1} , temperature measured by sonic anemometer (T_s in DegC), diagnostic (dimensionless), CO₂ density (co2 in mgm^{-3}), H₂O density (h2o in gm^{-3}), pressure (P in kPa).

"TOA5", "1139", "CR5000", "1139", "1.4.03", "CPU:ANTARC~2.CR5", "30877", "ts_data"
"TIMESTAMP", "Ux", "Uy", "Uz", "Ts", "diag_csat", "co2", "h2o", "press"
"TS", "m/s", "m/s", "m/s", "C", "unitless", "mg/(m ³)", "g/(m ³)", "kPa"
"", "Smp", "Smp", "Smp", "Smp", "Smp", "Smp", "Smp", "Smp"
"2003-12-24 11:27:44.75", 2.94, 5.809, -0.56925, -1.46593, 0, 55.538, -0.322087, 98.6341
"2003-12-24 11:27:44.8", 2.74525, 6.00225, -0.5925, -1.46262, 0, 116.45, 1.02888, 98.599
"2003-12-24 11:27:44.85", 3.16375, 6.49075, -0.70225, -1.45605, 0, 116.243, 0.897377, 98.6341
"2003-12-24 11:27:44.9", 3.0275, 6.0665, -0.409, -1.46754, 0, 104.085, 0.703088, 98.6341
"2003-12-24 11:27:44.95", 3.16075, 5.881, -0.17675, -1.49057, 0, 104.992, 0.806402, 98.6341
"2003-12-24 11:27:45", 2.882, 5.9835, -0.187, -1.4429, 0, 101.718, 0.528431, 98.6954
"2003-12-24 11:27:45.05", 3.017, 5.791, -0.17975, -1.43301, 0, 98.8702, 0.648156, 98.599
"2003-12-24 11:27:45.1", 3.3325, 5.77675, -0.5945, -1.50212, 0, 95.3923, 0.517086, 98.599

를 Table 1에 나타내었다. 기압 자료는 2002년 12월 19일부터 관측되었다. 자료의 집록 제어를 위해 고층대기관측동 내부에 컴퓨터를 설치하여, RS-232 선으로 자료 집록

장치와 연결하였다. 이를 이용하여 정기적인 컴퓨터로의 자료 집록 및 자료의 질적 상태를 확인하고, 자료를 저장하였다.

Table 2. Eddy covariance raw data retrieved from December 2002 to February 2004. From left, serial number of CD backed up at the site, Year, Folder name in the CDs, File name after converted from binary type into ASCII type using PC9000, the capacity of the ASCII file and the data retrieved period. Data format is also given.

CD number	Year	Binary (Folder name)	Ascii (File name)	Capacity	Period
					u(m/s), v(m/s), w(m/s), Ts(DegC), diag(unitless), CO ₂ (mg/m ³), q(g/m ³)
1	2002	1216	SJ_RAW_02_1216_01.DAT	18MB	02.12.15 1245-02.12.15 1615
		1217	SJ_RAW_02_1217_01.DAT	406MB	02.12.15 1355-02.12.18 1357
		1218	SJ_RAW_02_1218_01.DAT	1.3GB	02.12.18 1626-02.12.27 1548
					u(m/s), v(m/s), w(m/s), Ts(DegC), diag(unitless), CO ₂ (mg/m ³), q(g/m ³), P(kPa)
2	2002	1227	SJ_RAW_02_1227_02.DAT	302MB	02.12.27 1548-02.12.29 1953
		1229	SJ_RAW_02_1229_02.DAT	1.4GB	02.12.29 2257-03.01.08 1214
3	2003	0108	SJ_RAW_03_0108_03.DAT	2.1GB	03.01.08 1214-03.01.23 1139
4		0123	SJ_RAW_03_0123_04.DAT	1.7GB	03.01.23 1139-03.02.04 1344
5		0204	SJ_RAW_03_0204_05.DAT	1.7GB	03.02.04 1344-03.02.16 1409
6		0216	SJ_RAW_03_0216_06.DAT	2.1GB	03.02.16 1409-03.03.03 0951
7		0303	SJ_RAW_03_0303_07.DAT	1.9GB	03.03.03 0951-03.03.16 1340
8		0316	SJ_RAW_03_0316_08.DAT	2.4GB	03.03.16 1340-03.04.01 1358
9		0401	SJ_RAW_03_0401_09.DAT	2.2GB	03.04.01 1358-03.04.16 0912
10		0416	SJ_RAW_03_0416_10.DAT	2.2GB	03.04.16 0912-03.05.01 1342
11		0501	SJ_RAW_03_0501_11.DAT	2.2GB	03.05.01 1342-03.05.16 1137
12		0516	SJ_RAW_03_0516_12.DAT	2.3GB	03.05.16 1137-03.06.01 1130
13		0601	SJ_RAW_03_0601_13.DAT	2.0GB	03.06.01 1130-03.06.15 1127
14		0615	SJ_RAW_03_0615_14.DAT	2.3GB	03.06.15 1127-03.07.01 0918
15		0701	SJ_RAW_03_0701_15.DAT	2.2GB	03.07.01 0918-03.07.16 1411
16		0716	SJ_RAW_03_0716_16.DAT	2.3GB	03.07.16 1411-03.08.01 0915
17		0801	SJ_RAW_03_0801_17.DAT	2.2GB	03.08.01 0915-03.08.16 0921
18		0816	SJ_RAW_03_0816_18.DAT	2.4GB	03.08.16 0921-03.09.01 0921
19		0901	SJ_RAW_03_0901_19.DAT	2.2GB	03.09.01 0921-03.09.16 0931
20		0916	SJ_RAW_03_0916_20.DAT	2.2GB	03.09.16 0931-03.10.01 0916
21		1001	SJ_RAW_03_1001_21.DAT	2.2GB	03.10.01 0916-03.10.16 0911
22		1016	SJ_RAW_03_1016_22.DAT	2.4GB	03.10.16 0911-03.11.01 0919
23	1101	SJ_RAW_03_1101_23.DAT	2.1GB	03.11.01 0917-03.11.16 0924	
24	1116	SJ_RAW_03_1116_24.DAT	1.7GB	03.11.16 0924-03.11.28 0722	
25	1201	SJ_RAW_03_1201_25.DAT	980MB	03.12.02 1439-03.12.09 1321	
25	1209	SJ_RAW_03_1209_25.DAT	780MB	03.12.09 1321-03.12.15 0815	
26	1215	SJ_RAW_03_1215_26.DAT	1.2GB	03.12.15 0815-03.12.24 1203	
	1215	SJ_RAW_03_1215_2B.DAT	6MB	03.12.24 1127-03.12.24 1226	
27	1224	SJ_RAW_03_1224_27.DAT	1.3GB	03.12.24 1226-04.01.02 0746	
28	2004	0102	SJ_RAW_04_0102_28.DAT	2.0GB	04.01.02 0750-04.01.16 0830
29		0116	SJ_RAW_04_0116_29.DAT	2.5GB	04.01.16 0958-04.02.02 0824
30		0202	SJ_RAW_04_0202_30.DAT	2.1GB	04.02.02 0824-04.02.16 0854
31		0216	SJ_RAW_04_0216_31.DAT	2.2GB	04.02.16 0854-04.03.02 1354

자료의 정리와 분석

관측지점에서 기록된 자료의 보관과 자료 처리를 위한 과정은 다음과 같다. 자료 기록기로부터 컴퓨터로 전송되어 축적되는 binary 형식의 생 자료 및 30분 평균 자료를 매 15일마다 zip 형식으로 압축한 뒤 같은 자료를 두 벌의 compact disk(CD)에 backup하였다. 획득한 자료는 PC9000 프로그램을 이용하여 binary 형식의 파일을 ASCII 형식의 파일로 전환시킨다. ASCII로 바뀐 15일 동안의 크기는 2 GB가 넘는다(Table 2). FORTRAN 프로그램을 이용하여 PC에서 일 단위로 생 자료를 나눈다. 이 과정은 자료가 빠진 부분의 기간을 확인하고, 자료 분석을 위한 더 작은 시간 단위(예, 30분)로 쉽게 나누기 위해 수행된다.

자료 분석을 위해 사전에 2002년 12월 15일부터 2004년 2월 28일까지 생 자료를 매 30분 단위로 나누었다. Workstation에서 사용되는 FORTRAN자료 처리프로그램(홍과 김 2002)을 PC에서 작동하도록 수정하였다. 생 자료로부터 풍속 및 온도와 관련된 30분 난류 통계량을 계산하기 위해 1) 진단값이 0이며 2) 각 변수의 $m \pm 10\sigma$ (m : 평균, σ : 표준 편차) 보다 작은 자료를 이용하였다(Hong et al. 2004). 처리된 자료의 수가 18,000개(즉, 15분) 보다 많으면, 다음 분석에 사용하였다. 이 조건을 통과한 자료는 전체의 약 69%이다. 난류 통계량은 다음과 같이 처리하였다. 이 프로그램에는 세 가지 좌표회전 방법을 사용할 수 있는데, 이 연구에서는 $\bar{v} = \overline{v'w'}$ (여기서 v 는 측면 바람 성분)이 0이 되도록 하는 Triple rotation 방법(McMillen 1988)을 사용하였다. 좌표 회전이 현열 플럭스에 미치는 효과는 풍향에 따라 달랐는데 그 효과는 -2%~5%였다. 하지만 좌표 회전이 적용된 일부 현열 플럭스 값들은 좌표 회전 전의 값들과 비교해서 매우 컸다. 이 경우 좌표 회전 전과 후의 값들간의 선형 회귀식에 근거하여, 예측되는 값과 좌표 회전 후의 값과의 차이가 60 Wm^{-2} 이상인 값들은 사용하지 않았다.

지형 경사 및 거칠기

연직 변환 각도

관측 지점을 중심으로 주변 지형의 경사진 정도는 아래와 같이 평균 수평 바람에 대한 연직 풍속의 각도(연직 변환 각도, α)를 계산함으로써 평가할 수 있다.

$$\alpha = \tan^{-1}(\bar{w}/\bar{U}) \quad (4)$$

여기서 \bar{U} 는 평균 수평 풍속이다. 만약 α 가 sine 곡선 형태를 따른다면, 주변 지형은 경사가 일정하다.

거칠기 길이(roughness length)

거칠기 길이(z_0)는 아래와 같이 대기가 중립일 때 평균

수평 풍속의 대수 프로파일로부터 평가할 수 있다(Arya 2001).

$$\frac{\bar{U}(z)}{u_*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (5)$$

여기서 u_* 는 마찰속도, k 는 von Karman 상수(=0.4)이다.

적분 난류 특성(Integral Turbulence Characteristics, ITC)

적분 난류 특성(ITC)은 임의의 물리량의 표준 편차를 그 물리량의 규모 모수로 나눈 것으로 정의된다(Foken and Wichura 1996). 그리고 ITC는 관측 높이와 안정도 길이(L , Obukhov length)의 함수로 표현될 수 있다. 예를 들면, 연직 속도의 ITC는

$$\sigma_w/u_* = C_{w1}(1 + C_{w2}|z/L|)^{1/3} \quad (6)$$

이고, 열에 대한 ITC는

$$\sigma_T/T_* = C_{T1}(1 + C_{T2}|z/L|)^{-1/3} \quad (7)$$

여기서 σ 는 표준 편차, z 는 높이, T 는 온도, T_* ($= \overline{w'T}/u_*$)는 규모 모수, C_{w1} , C_{w2} , C_{T1} 그리고 C_{T2} 는 경험상수이다. 만약 부력에 의한 난류 혼합이 강하면($-z/L \rightarrow \infty$) 위 식들은 간단히 표현될 수 있는데 예를 들면, 식 (7)은 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_T/T_* = C_{T3}(-z/L)^{-1/3} \quad (8)$$

에디 공분산 시스템으로 관측된 난류 통계량을 위의 식들에 대입함으로써 경험 상수들이 평가된다. 이렇게 결정된 ITC는 에디 공분산 자료의 품질 평가에 활용됨과 동시에 다른 관측지의 난류 특성과 비교하는데 이용된다(Choi et al. 2004; Hong et al. 2004).

정체성(Stationarity)

어떤 시계열 자료가 정체성을 만족하면 그 자료의 통계량은 시간에 따라 변하지 않는다. 에디 공분산 방법을 사용하기 위해서는 이 조건이 전제되어야 한다. 정체성을 벗어나는 정도는 아래와 같이 비정체성 지수(nonstationarity ratio, NR)를 계산하여 평가할 수 있다(Mahrt 1998).

$$NR \equiv \sigma_{btw}/RE \quad (9)$$

여기서 σ_{btw} 는 레코드 간의 표준 편차(이 연구에서 사용된 레코드의 길이는 7분 30초)이고, RE 는 랜덤 에러이다. σ_{btw} 에는 랜덤 에러와 함께 비정체성 효과가 포함되어, 이상적

으로 자료가 정체성을 만족하면, $NR = 1$ 이다. 이 연구에서는 $NR \gg 2$ (Mahrt 1998)인 경우, 정체성 조건을 만족하지 않는 것으로 간주하였다.

상관 계수(Correlation coefficients)

연직 속도와 열의 상관 계수는 아래와 같이 두 변수의 공분산을 각 변수의 표준 편차로 나눈 것으로 정의된다.

$$r_{wT} = \frac{\overline{w'T'}}{\sigma_w \sigma_T} \tag{10}$$

물리적으로는 열이 연직 방향으로 얼마나 효율적으로 전달되는 가를 나타낸다(McBean and Miyake 1972). 균질한 지형에서 관측된 상관 계수는 대기 안정도에 따라 일정한 양상을 보이며, ITC와 함께 관측자료의 전반적인 품질 평가와 관측지의 난류 특성을 평가하는데 사용된다.

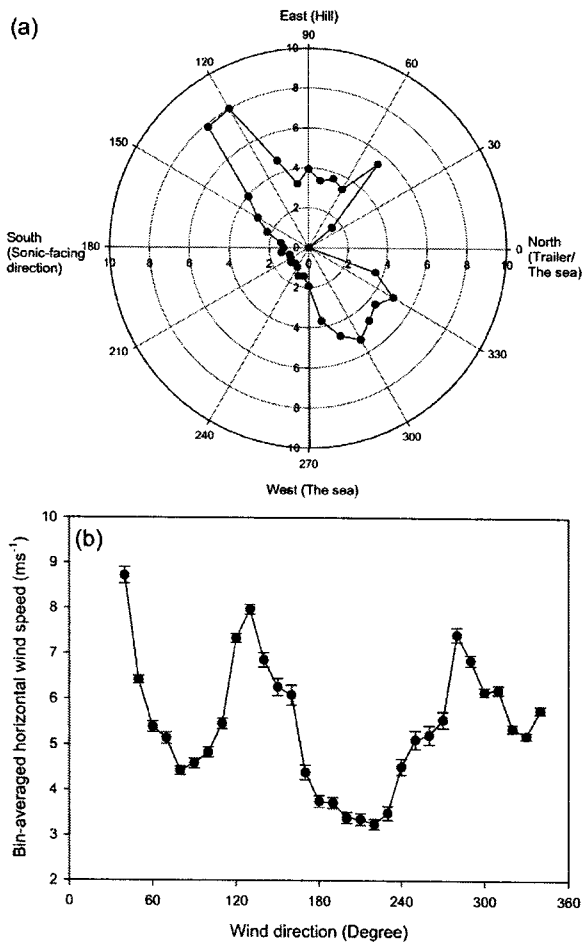


Fig. 2. (a) The frequency distribution of wind direction (top) and (b) bin-averaged mean wind speed with wind direction of 10°-interval (bottom).

4. 결과 및 논의

풍향과 풍속

Fig. 2(a)는 풍향의 빈도 분포이다. 30분 평균 두 풍속 성분을 이용하여, 풍향을 계산한 뒤, 10° 간격에 대해 풍향의 빈도(%)를 계산하였다. 분석 기간 동안 풍향은 특정 방향(남동, 북동, 북서)에서 뚜렷하다. 초음파 풍속계의 측정 부 정면에서 분 바람은 110°~140°의 구간(남동풍)에서 좁게 나타난 반면, 후면에서 분 바람의 경우 상대적으로 넓은 구간에서 나타났다. 초음파 풍속계의 정면(90°~270°)으로 분 바람이 전체의 약 40%인 반면, 나머지 약 60%는 후면에서 불었다. 후면에서 부는 바람의 경우 트레일러 등을 거쳐 온 바람이기 때문에 자료 해석에 주의를 요한다.

Fig. 2(b)는 풍속이 1.5 ms⁻¹인 자료를 이용하여 10° 풍향 구간에 대한 평균 수평 풍속의 변동을 나타낸 것이다. 180°~230°의 구간을 제외하면 평균 풍속은 4 ms⁻¹ 이상으로 바람이 강하게 불었다. 강한 바람은 마찰에 의한 난류 생성을 강화하여, 난류 관측을 하는 에디 공분산 방법 적용에 좋은 조건이 된다.

지형 및 지면 거칠기

Fig. 3은 풍향에 따른 연직 변환 각도(α)의 변동이다. 70°~360°의 풍향에 대해서 α 는 sine 곡선 형태를 보여준다. 300° 부근이 관측지점과 비교해서 고도가 가장 낮으며, 90°~120°가 상대적으로 고도가 높음을 알 수 있다. 따라서 플렉스 타워는 주 경사가 남동-북서 방향인 지형에 위치해 있다. 반면에 0°~70°에서는 다소 복잡한 모습을 보여준다. 이 현상은 플렉스 타워에서 약 30 m 북쪽에 위치한 트레일러의 영향으로 추정된다. 이 효과를 좀더 자세히

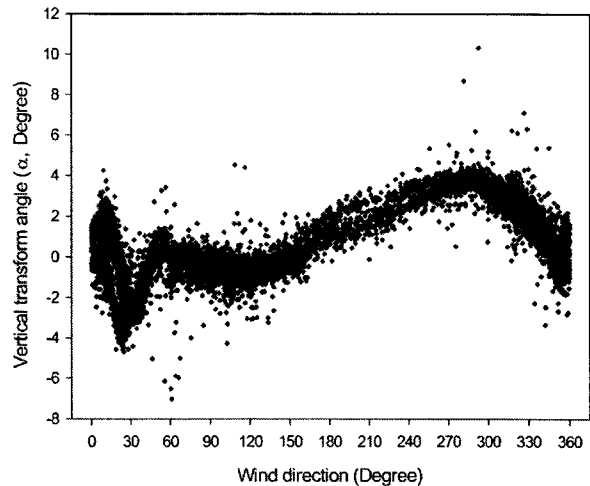


Fig. 3. The variation of vertical transform angle (α) with wind direction.

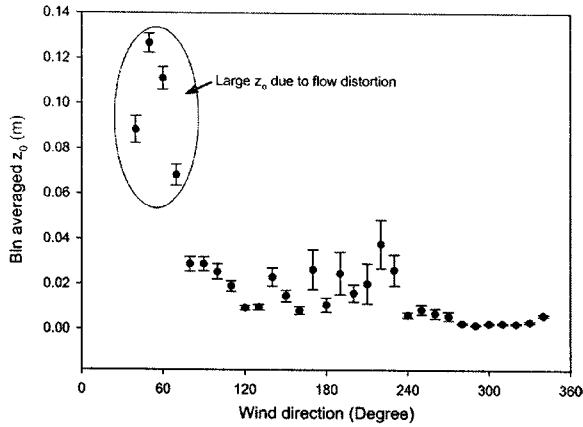


Fig. 4. The variation of bin-averaged z_0 with wind direction. Error bar means standard error of estimate.

분석하기 위해 풍향에 따른 거칠기 길이(z_0)를 평가하였다. Fig. 4는 10° 간격의 풍향에 대한 구간 평균 z_0 의 변동이다. 풍향이 $< 70^\circ$ 구간의 z_0 은 다른 풍향에서의 z_0 보다 두 배 이상 크다. 타워 주변의 지면 거칠기가 크게 다르지 않음과 연직 변환 각도가 $0^\circ \sim 70^\circ$ 부근에서 복잡한 모습(Fig. 3)이 나타난 것을 고려하면, 고층대기 관측동이 $0^\circ \sim 70^\circ$ 구간에서 플릭스 관측에 영향을 줄 수 있다. 따라서 앞으로의 난류 통계량과 플릭스에 관련된 분석에서는 풍향이 $0^\circ \sim 70^\circ$ 인 경우를 제외시켰다.

난류의 특성

적분 난류 특성(Integral Turbulence Characteristics, ITC)

풍향 $> 70^\circ$, 평균 수평 풍속 $> 1.5 \text{ ms}^{-1}$, $\overline{u'w'} < 0$ 에 해당하는 자료에 대해 연직 풍속과 열에 대한 ITC를 평가하였다. 풍향에 따라 지형 경사가 다르기 때문에(Fig. 3) 풍

향을 10° 단위로 나눈 후 대기가 중립($-0.05 < z/L < 0.05$)일 때 연직 속도의 ITC(σ_w/u_*)를 평가하였다. 그 결과 $70^\circ \sim 90^\circ$, $90^\circ \sim 150^\circ$, $150^\circ \sim 200^\circ$, $200^\circ \sim 360^\circ$ 구간에서 σ_w/u_* 값이 비슷하였으며, 값은 각각 1.48 ± 0.20 , 1.25 ± 0.13 , 1.35 ± 0.2 그리고 1.16 ± 0.16 이었다. 이 값을 근거로 각 영역에 대해 ITC를 결정하였다. Fig. 5는 $90^\circ \sim 150^\circ$ 에서의 관측된 σ_w/u_* 와 식 (6)에 근거한 fitting 곡선이다. 대기가 불안정한 경우($-z/L > 0$), 관측된 σ_w/u_* 로부터 결정된 fitting 함수는 $1.25(1 + 3|z/L|)^{1/3}$ 이다. 이것은 단순/균질한 지형에서 잘 알려진 함수, $1.25(1 + 3|z/L|)^{1/3}$ 과 같다(Kaimal and Finnigan 1994). 대기가 안정한 경우, 관측된 σ_w/u_* 에 근거한 fitting 함수는 $1.25(1 + 0.05|z/L|)$ 이고, 이 함수식 역시 단순/균질한 지형에서 잘 알려진 w 의 ITC($=1.25(1 + 0.5|z/L|)$)와 유사하다. Table 3에 풍향에 따라 결정된 경험 계수 값들이 요약 되어있다. 풍향에 따라 결정된 ITC 값은 다소 달랐는데 이것은 플릭스 타워 주변의 지형의 경사와 지표 거칠기가 다르기 때문인 것으로 보인다(Fig. 3과 Fig. 4).

Table 3. Determined empirical constants of integral turbulence characteristics of w with wind direction at King Sejong flux station. The form of $a_1(1 + b_1|z/L|)$ for unstable stability and $a_2(1 + b_2|z/L|)$ for stable stability are fitted to measurements, respectively.

Wind direction range Stability	70-90	90-150	150-200	200-360
Unstable	$a_1 = 1.48$	$a_1 = 1.25$	$a_1 = 1.35$	$a_1 = 1.16$
	$b_1 = 2.5$	$b_1 = 3$	$b_1 = 0.5$	$b_1 = 2$
Stable	$a_2 = 1.48$	$a_2 = 1.25$	$a_2 = 1.35$	$a_2 = 1.16$
	$b_2 = 0.5$	$b_2 = 0.05$	$b_2 = 0.5$	$b_2 = 0.3$

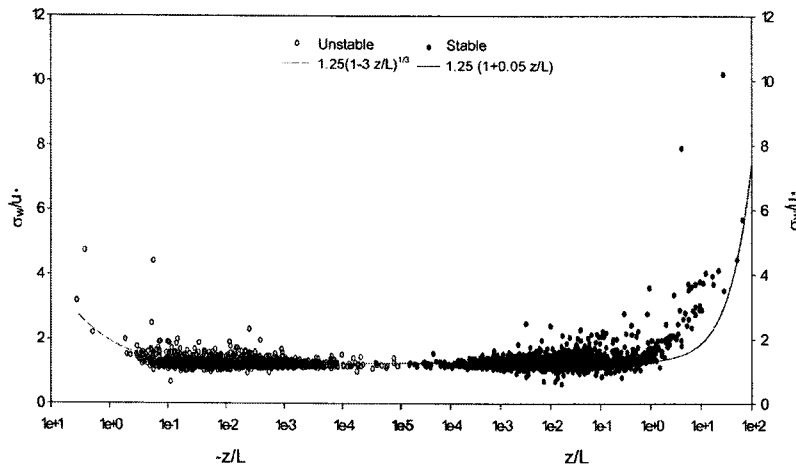


Fig. 5. Integral turbulence characteristics of w at the range of $90 \sim 150^\circ$. Dashed line (unstable stability) and solid line (stable stability) are the fitted functions determined at this study.

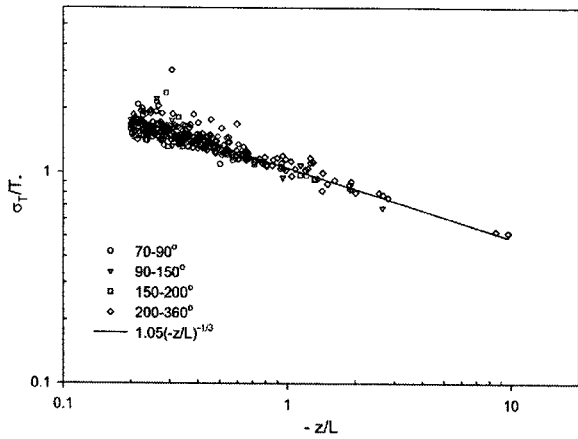


Fig. 6. The integral turbulence characteristics of T under free convection limit ($-z/L > 0.2$). Sensible heat flux with $> 30 \text{ Wm}^{-2}$ was used.

Fig. 6은 $-z/L > 0.2$ 인 경우의 T 의 ITC(σ_T/T_*)와 fitting 함수이다. 풍향에 따른 σ_T/T_* 의 변동을 조사하기 위해 풍향 구간에 따라 σ_T/T_* 를 구분하였다. σ_w/u_* 와는 달리 σ_T/T_* 는 풍향에 무관하다. 결정된 경험 상수 1.05는 다른 관측지점에서의 값과 유사하다(Kader and Yaglom 1990; Choi et al. 2004).

비정상성(nonstationarity)

Fig. 7은 분석기간 동안의 낮 시간(10:00~16:00 LST) 평균된 $\overline{w'T'}$ 의 NR의 계절 변동을 나타낸다. 이 분석을 위해 앞에서 결정된 연직속도의 ITC의 fitting 함수와 관측 값의 차이가 30% 이내인 조건을 추가로 적용하였다.

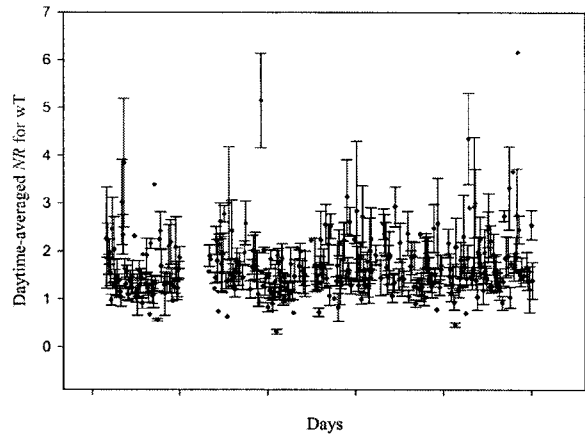


Fig. 7. The seasonal variation of daytime-averaged NR for $w'T'$ at King Sejong Station. Error bars indicate standard error of estimate.

전체적으로 NR은 < 3 이며, 따라서 이 연구에서 사용된 30분 평균 $\overline{w'T'}$ 는 정체성 조건을 만족한다. 품질 평가의 기준으로 $\overline{w'T'}$ 의 NR < 3 인 경우를 택하였다.

상관 계수(correlation coefficients)

Fig. 8은 대기 안정도에 따른 w 와 T 의 상관 계수(r_{wT})이다. r_{wT} 는 Monin-Obukhov 상사 이론을 따르며, z/L 의 함수로 예측된다. 여기서는 Choi et al.(2004)에 의해 티벳 고원에서 결정된 식, $(1 - 34.5z/L)^{1/3} / [1.12 \times 3.7(1 - 2.8z/L)^{1/3}]$ 이 비교를 위해 주어졌다. 티벳 고원에서의 r_{wT} 는 Monin-Obukhov 상사 이론을 만족하였다. 전반적으로 세종기지에서의 r_{wT} 는 Monin-Obukhov 상사 이론과 유사한

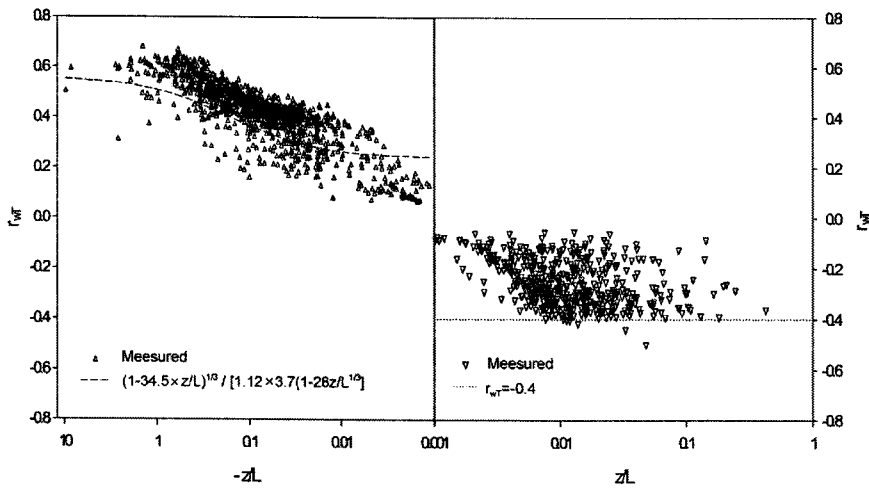


Fig. 8. Correlation coefficients for w and T when absolute value of sensible heat flux is larger than 30 Wm^{-2} . For unstable stability, short dashed line is the formulation presented by Choi et al. (2004). In case of stable stability, dotted line is given by Kaimal and Finnigan (1994).

Table 4. Quality control criteria and the availability of sensible heat flux.

Quality control criteria	Availability of sensible heat flux (%)
Spikes removal	69
Coordinate rotation	68
Wind speed > 1.5 ms ⁻¹	64
70° < Wind direction < 360°	55
$\overline{u'w'} < 0$	54
ITC of w < 30%	51
NR for $w'T' < 3$	47

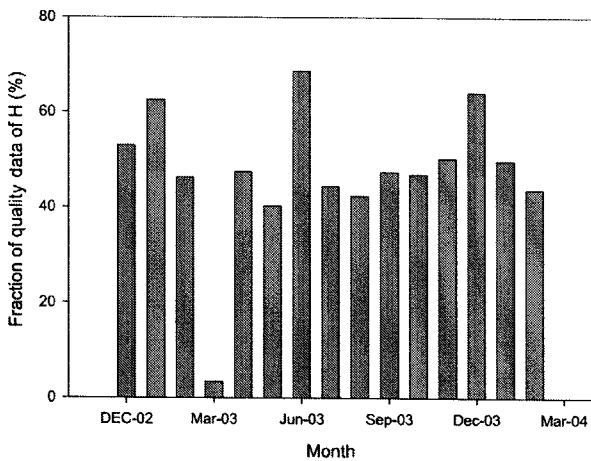


Fig. 9. The distribution of fraction of quality data of sensible heat flux with month.

모습을 보인다. 대기가 불안정할수록, 열의 전달이 더 효율적인 반면에 중립 및 안정한 경우 그 효율이 상대적으로

로 더 작아진다.

최종 산출된 현열 플럭스 자료의 분포

난류 통계량의 특성 분석에 근거하면, 초음파 풍속계는 2004년 2월까지 정상적으로 작동된 것으로 사료된다. 분석 기간 동안 총 기록된 자료의 양은 95% 이상이었다 (Table 2). Table 4는 각 단계에서의 품질 관리 조건과 이 조건을 적용한 후 남은 현열 플럭스 자료의 양을 보여준다. 1차 조건을 통과한 자료는 약 69%이다. 이 중 2차 조건(즉, 좌표 회전 효과, 풍향, 풍속, 운동량 플럭스의 부호, 연직 풍속의 ITC와 현열 플럭스의 NR)을 통과한 자료는 2003년 3월을 제외하면, 매월 40% 이상이며, 평균 47% 이다(Fig. 9). 2003년 3월의 경우, 대부분의 기간 진 단값이 0 보다 컸다.

현열 플럭스 예비 결과

Fig. 10은 2002년 12월부터 2003년 12월까지의 낮시간 (10:00~16:00 LST) 평균 하향 단파 복사와 현열 플럭스의 계절변동이다. 남극 하계기간(12월~2월)의 일 평균 하향 단파 복사는 평균적으로 200 Wm⁻² 보다 크다. 반면에 5월부터 7월까지 일 평균 하향 단파 복사는 거의 0에 가까운데 이것은 관측지점이 고위도에 위치하기 때문이다. 지표 에너지 배분은 지면에서 복사 수지로 결정된 순복사 (=하향 단파복사 + 하향 장파 복사 + 상향 단파복사 + 상향 장파복사)의 현열, 잠열 및 토양열 플럭스로의 배분을 의미한다. 낮 동안 순복사는 주로 하향 단파 복사의 지배를 받는다. 따라서 계절에 따른 뚜렷한 하향 단파 복사의 변동으로 인해, 하계기간에는 활발한 지면과 대기간의 에너지 교환이, 동계기간에는 지면과 대기간의 에너지 교환이 하계기간에 비해 상당히 작을 것으로 예상된다. 낮 시

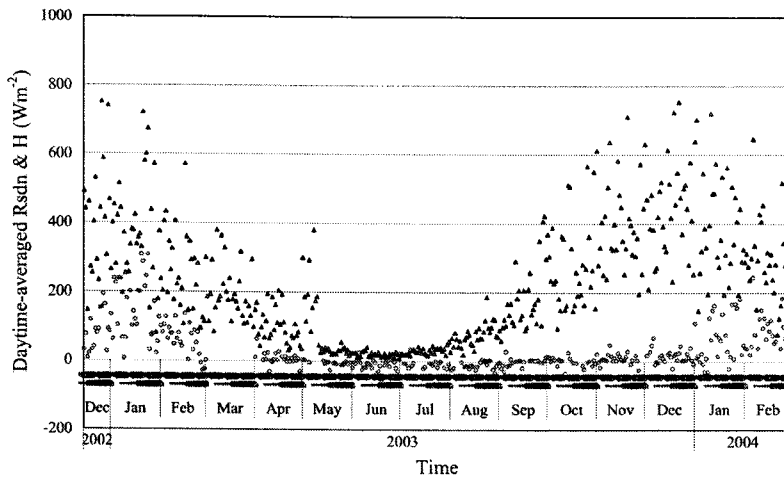


Fig. 10. Seasonal variation of daytime-averaged downward shortwave radiation (Rsdn, open-triangle) and sensible heat flux (H, open-circle).

간 평균된 현열 플럭스도 뚜렷하게 변함을 알 수 있다. 2002~2003년 하계기간 동안 현열 플럭스는 최대 약 300 Wm^{-2} 이다. 반면에 하향 단파 복사가 거의 0인 동계 기간 현열 플럭스 역시 0을 중심으로 작은 변동을 보인다. 따라서 하계기간에는 지면이 대기로의 열 공급을 통해 상당히 영향을 미칠 수 있음을 가리킨다. 하지만, 하향 단파 복사가 2003년 8월부터 뚜렷한 증가 추세를 보이는 반면에, 현열 플럭스는 2003년 12월까지 뚜렷한 증가 추세를 보이지 않는다. 보다 자세한 관측지점에서의 에너지 교환을 평가하기 위해 순복사, 잠열 플럭스, 알베도 등의 자료를 준비 중이며, 이에 대한 분석은 추후 보고할 예정이다.

5. 요약 및 결론

남극 반도 북단 킹조지섬에 위치한 세종기지에 첫 번째 에디 공분산 시스템이 설치되어, 2002년 12월 중순부터 지표 플럭스가 지속적으로 관측되어 오고 있다. 2004년 2월까지의 측정자료에 근거한 결과는 다음과 같다.

1) 중립 안정도에서의 연직 속도의 적분 난류 특성의 경험 상수 값은 지면 특성에 따라 1.16~1.48이었으며, 일반적으로 알려진 1.25~1.3과 15% 이내에서 일치하였다. 반면에,

2) 대기가 불안정한 경우($-z/L > 0.2$), 열의 적분 난류 특성 함수의 경험 상수 값은, 지면 특성과 관계 없이 1.1이었으며, Monin-Obukhov 상사이론과 잘 일치하였다.

3) 열의 연직 방향으로의 수송은 대기가 불안정할수록 Monin-Obukhov 상사이론에 의해 예측되는 값보다 컸다. 반면에 안정해질수록 열 전달 효율이 낮았다.

4) 현열 플럭스에 대한 비정체성 지수(NR)은 90% 이상이 3보다 작아 정체성 조건을 만족하였다.

이 분석에 근거하여, 품질 관리 조건들이 Table 4와 같이 결정되었다. 한편, 난류 통계량에 대한 분석은 에디 공분산 시스템 중 초음파 풍속계가 정상적으로 작동 했음을 의미하며, 자료의 품질은 좋은 것으로 간주할 수 있다. 최종 산출된 현열 플럭스 자료의 가용율은 평균 47%였으며, 2003년 3월을 제외하면 고르게 분포한다. 이런 결과는 비록 세종 기지가 극심한 기후 조건에 위치하지만, 장기 플럭스 관측이 가능하며, 기후 변화 연구의 좋은 도구로 활용될 수 있음을 의미한다.

5) 낮 평균된 현열 플럭스는 계절에 따라 뚜렷한 변화를 보였다. 특히, 하계 기간의 값은 최대 $\sim 300 \text{ Wm}^{-2}$ 이었으며, 이것은 하계 기간 지면이 열 수송을 통해 대기에 상당한 영향을 미칠 수 있음을 가리킨다.

보다 자세한 지표 에너지 배분 및 대기로의 열 수송 메커니즘을 이해하기 위해 순복사와 잠열 플럭스 등의 자료 가 준비 중이다. 아울러 이산화탄소 플럭스의 분석도 추가

적으로 이루어질 예정이다.

사 사

이 연구는 한국해양연구원 부설 극지연구소의 '남극 세종기지 주변 환경변화 모니터링(PP04102)', '북극 환경특성 연구(PP04108)' 사업 및 '차세대 핵심 환경 기술 개발 사업(Eco-technopia 21 project)'의 일환으로 수행되었다. 이 연구에 사용된 자료의 획득 및 플럭스 타워의 관리에 도움을 준 제 16차 월동연구대 이준휘 님, 제 17차 월동연구대 이재신 님께 감사드린다.

참고문헌

- 김지희, 정호성. 2004. 남극 세종기지 주변에 새로이 정착한 현화식물 남극좁새풀 개체군의 공간 분포. *Ocean Polar Res.*, 26(1), 23-32.
- 이방용. 1996. 남극 세종기지 기상관측 자료의 통계 분석을 통한 자료집 작성과 특징연구(1988~1993). 한국해양연구소 BSPE 00564-910-7.
- 이주삼. 1992. 세종기지 주변의 지의류와 선대류의 식생분포. 한국해양연구소 BSPG 00169-5-485-7.
- 정호성, 이방용, 장순근, 김지희, 김예동. 2004. 세종기지 주변에서 관찰된 빙벽 후퇴와 바다 결빙. *Ocean Polar Res.*, 26(1), 1-10.
- 최태진, 김 준, 윤진일. 1999. 농림 생태계와 대기간의 상호작용 연구를 위한 에디 공분산 방법의 사용에 대하여. *한국농림기상학회지*, 1, 60-71.
- 홍진규, 김준. 2002. 미기상학 야외실험에서 얻어지는 자료처리에 관하여. *한국농림기상학회지*, 4(2), 119-126.
- Arya, S.P. 2001. Introduction to micrometeorology, Academic Press, California, 420 p.
- Choi, T., J. Hong, J. Kim, H. Lee, J. Asanuma, H. Ishikawa, O. Tsukamoto, Z. Gao, Y. Ma, K. Ueno, J. Wang, T. Koike, and T. Yasunari. 2004. Turbulent exchange of heat, water vapor and momentum over a Tibetan Prairie by eddy-covariance and flux-variance measurements. *J. Geophys. Res.* (In revision)
- Croxall, J.P., P.N. Trathan, and E.J. Murphy. 2002. Environmental change and Antarctic seabird populations. *Science*, 297, 1510-1514.
- Finnigan, J.J., R. Clement, Y. Malhi, R. Leuning, and H.A. Cleugh. 2003. A re-evaluation of long-term flux measurement techniques. Part 1: Averaging and Coordinate Rotation. *Boundary-Layer Meteorol.*, 107, 1-48.
- Foken, Th. and B. Wichura. 1996. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. *Agr. Forest Meteorol.*, 78, 83-105.

- Hong, J.K., T. Choi, H. Ishikawa, and J. Kim. 2004. Turbulence structures in the near neutral surface layer on the Tibetan plateau. *Geophys. Res. Lett.* (in press)
- IPCC. 2001. Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. eds. by Houghton, J.T. *et al.* Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK. 881 p.
- Jacka, T.H. and W.F. Budd. 1998. Detection of temperature and sea-ice-extent change in the Antarctic and Southern Ocean, 1949-96. *Ann. Glaciol.*, 27, 553-559.
- Kader, B.A. and A.M. Yaglom. 1990. Mean fields and fluctuation moments in unstably stratified turbulent boundary layers. *J. Fluid Mech.*, 212, 637-662.
- Kaimal, J.C. and J. Finnigan. 1994. Atmospheric boundary layer flows: Their structure and measurement, Oxford University Press, New York. 289 p.
- Mahrt, L. 1998. Flux sampling errors for aircraft and towers. *J. Atmos. Sci.*, 15, 416-429.
- McBean, G. and M. Miyake. 1972. Turbulent transfer mechanism in the atmospheric surface layer. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 98, 383-398.
- McMillen, R.T. 1988. An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain. *Boundary-Layer Meteorol.*, 43, 231-245.
- Miller, P.C., R. Kendall, and W.C. Oechel. 1983. Simulating carbon accumulation in northern ecosystems. *Simulation*, 40, 119-131.
- Oechel, W.C., G.L. Vourlitis, S.J. Hastings, and S.A. Bochkarev. 1995. Change in carbon dioxide flux at the U.S. Tundra International Biological Program Sites at Barrow. *AK. Ecol. Appl.*, 5, 846-855.
- Oechel, W.C., G.L. Vourlitis, S.J. Hastings, R.C. Zulueta, L. Hinzman, and D. Kane. 2000. Acclimation of ecosystem CO₂ exchange in the Alaskan Arctic in response to decadal climate warming. *Science*, 406, 978-981.
- Vaughan, D.G., G.J. Marshall, W.M. Connolley, J.C. King, and R. Mulvaney. 2001. Devil in the Detail. *Science*, 293, 1777-1779.

Received Aug. 12, 2004

Accepted Sep. 10, 2004