

북극 다산기지에서의 플럭스 발자취 기후도와 플럭스 자료 품질

이방용* · 최태진* · 이희준** · 윤영준*

*한국해양연구원 부설 극지연구소 극지응용연구부

**기상연구소 예보연구실

Flux Footprint Climatology and Data Quality at
Dasan Station in the Arctic

Bang Yong Lee* · Taejin Choi* · Hee-Choon Lee** · Young-Jun Yoon*

*Korea Polar Research Institute, KORDI, Korea

**Forecast Research Lab., Meteorological Research Institute, Korea

ABSTRACT Turbulent fluxes of heat, water vapor, and CO₂ have been measured since August, 2003 at Dasan Station (78° 55' N, 11°50'E) in the Arctic. These data can allow us to better understand the interactions between the Polar ecosystems and the atmosphere together with those at King Sejong Station in the Antarctic. Due to the buildings and measurement platforms around the flux tower, it is required to evaluate how they influence measured flux data. By using one-year turbulence statistics data and footprint model, flux footprint climatology was analyzed together with data availability. The upwind distance of source area ranged from 150 to 300 m, where the buildings and measurement platforms existed. However, flow distortion due to them may be not a major factor to reduce the data availability significantly. Based on, the dominant wind direction of SW and footprint climatology, the location of flux tower is considered suitable for flux measurement.

Key words flux footprint climatology, flux data quality, Dasan Station, the Arctic

1. 서론

한국해양연구원 부설 극지연구소는 2002년 4월 북극에 다산기지를 개소하였다. 다산 기지는 노르웨이의 북쪽에 있는 스발바르(Svalbard) 군도의 스피츠베르겐(Spitsberg) 섬 내의 니-알순(Ny-Alseund)(78° 55' N, 11° 50'E)에 위치한다. 극지연구소에서는 2003년 8월부터 다산기지에 에디 공분산 시스템을 설치하여 이곳 식생과 대기간의 에너지, 수분 및 이산화탄소 플럭스를 연속 관측해 오고 있다. 에디 공분산 방법은 고속으로 관측된 연직 속도의 변동분과 측정하고자 하는 물리량의 변동분에 근거해서 연직 플럭스를 산출한다. 특히, 풍속 관측이 중요한데 풍속 관측시 장애물들의 방해가 없어야 한다. 그러나 관측지는 많은 외국 연구진들이 설치한 측기, 건물 등이 있어 이들이 관측 자료에 영향을 미칠

수 있다. 따라서 이 연구에서는 다산기지에 설치한 3.45 m 플럭스 타워에서 관측된 난류 통계 자료에 주변 지형 물들이 어떠한 영향을 끼치는 가를 살펴 보고자 한다. 이를 위하여 2003년 8월부터 2004년 7월까지 관측된 난류 통계량과 플럭스 발자취 분석 모형을 이용하여 플럭스 발자취 기후(flux footprint climatology)를 분석하고, 관측된 자료의 품질과 플럭스 발자취 기후도로부터 주변 구조물의 영향을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 이론적 배경

에디 공분산 방법

지표면 근처에서는 분자 확산이, 위로는 난류에 의한

수송이 지배적이다. 따라서 지면과 대기간에 교환되는 물리량 (즉, 플럭스)은 지표면에서의 분자 확산을 계산하면 알 수 있지만 분자 확산은 직접 측정할 수 없다. 하지만 보전 방정식에 의하면 지표면이 수평적으로 균질 (수평 이류항 무시) 하고 편평(평균 연직 풍속을 0으로 가정) 하며, 정체성(시간 도함수 항을 무시)을 가정하면 분자 확산은 임의의 높이에서의 난류에 의한 평균 연직 공분산과 같다. 이 공분산은 정밀도가 높고 반응속도가 빠른 기기로 측정할 수 있다. 예로, 임의의 기체에 대한 플럭스(F)에 레이놀즈 평균을 적용하면 다음과 같다(Swinbank, 1951).

$$F(\equiv \overline{wx\rho_a}) = \rho_a \overline{wx} + \rho_a \overline{w'x'} \quad (1)$$

여기서, “-”는 시간 평균 그리고 “ ’ ”는 평균으로부터의 변동분, w 는 연직 풍속, x 는 기체의 혼합비, 즉 건조 공기의 밀도에 대한 기체의 밀도를 나타낸다. 기기나 지표면이 기울어져 있지 않으면 $\overline{w} = 0$ 이므로 식 (1)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F = \rho_a \overline{w'x'} \quad (2)$$

따라서 플럭스는 난류에 의한 평균 연직 공분산으로 표시할 수 있다.

지면 거칠기(roughness length)

플럭스 발자취 분석의 선행조건으로 지면의 거칠기 길이(z_0)가 필요하다. 지면 거칠기는 대기가 중립 안정도일 때 관측 높이(z_m)에서의 평균 수평 풍속($\overline{U}(z_m)$)의 대수프로필로부터 평가 가능하다(Arya, 2001).

$$\frac{\overline{U}(z_m)}{u_*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{z_m}{z_0}\right) \quad (3)$$

여기서, u_* 는 마찰 속도 그리고 k 는 von Karman 상수이다. 관측지의 지면은 대부분의 지역을 여름에는 키가 작은 현화식물, 지의류, 이끼가 지면을 덮고 있고, 겨울에는 눈이 덮고 있다. 따라서 지표면의 거칠기가 크게 다르지 않을 것이며, 또한 모형 적용의 편의를 위해 전 분석 기간에 대한 중앙값인 0.003 m를 전 분석기간 동안의 단일 값으로 사용하였다. Llyod *et al.* (2001)은 다

산 기지에서 약 2 km 떨어져 있으며, 지면상태가 비슷한 곳에서 여름철 거칠기 길이가 0.003 m임을 보였다.

플럭스 발자취

플럭스 발자취(flux footprint)란 플럭스 타워의 풍상측 지표면에 존재하는 각 (플럭스)발원 요소가 관측된 플럭스에 대한 기여의 정도를 나타낸다(Schmid, 1997). 본 연구에서는 이류 확산 방정식의 해석해에 근거한 플럭스 발원지 모형 FSAM (http://www.indiana.edu/~climate/SAM/SAM_FSAM.html)을 이용하여 관측된 플럭스에 90% 기여하는 풍상측 면적을 평가하였다. 사용된 FSAM의 입력 변수와 그 크기는 $z_m/z_0 \sim 1150$, $1 < \sigma_v/u_* < 6$, $z_m/L < 0.25$ 이다. 여기서 σ_v 와 L 은 각각 측면 바람(v)의 표준 편차, 마찰 속도 그리고 Obukhov 길이이다.

플럭스 발자취 기후도를 평가하기 위해 품질 평가 기준을 통과한 자료를 이용하여 5 m x 5 m 격자 간격으로 플럭스 발자취를 평가하였다. 그런 후 측면 방향 플럭스 발자취를 적분한 플럭스 발자취를 1° 간격으로 구분한 후, 해당 풍향의 각 격자에 대해 산술 평균하였다. 각 방향의 플럭스 발자취는 최대 기여 지점을 100으로 하는 정규화된 기여도이다.

2.2 관측지

스발바르 군도내 스피츠베르겐 섬의 북동쪽 해안에 위치한 관측지를 항공 촬영한 사진을 Fig. 1에 나타내었다. 관측지는 크게 북쪽으로는 기지 건물, 남쪽으로는 산, 북동-동쪽으로는 바다가 있으며, 서쪽으로 취주 거리가 가장 길다. 관측 타워를 중심으로 북쪽으로는 서쪽으로부터 노르웨이 기지(약 340°, 약 80 m, Fig. 1의 (1)), 프랑스-한국 (약 10°, 약 70 m, (2)), 그리고 중국 (약 70°, 타워로부터 약 90 m, (3))가 위치한다. 각 건물의 높이는 약 10 m이다. 같은 방향의 약 32 m 거리에 폭과 깊이가 약 1 m의 도랑이 동서 방향으로 뻗어 있다. 20° 방향, 약 10 m 거리에 약 폭 0.3 m의 10 m 타워(4)가 위치해 있으며, 같은 방향 약 45 m 떨어진 곳에 높이 약 3 m, 폭 약 7 m인 목조 건물(5)이 있다. 100°, 60 m 거리에 높이 2.5 m, 폭 4 m인 목조 건물(6)이, 120° 방향, 약 35 m 거리에 높이 2.5, 폭 2 m인 목조 건물(7)이 위치한다. 180° 방향의 약 30 m 떨어진 곳에 경사가 있

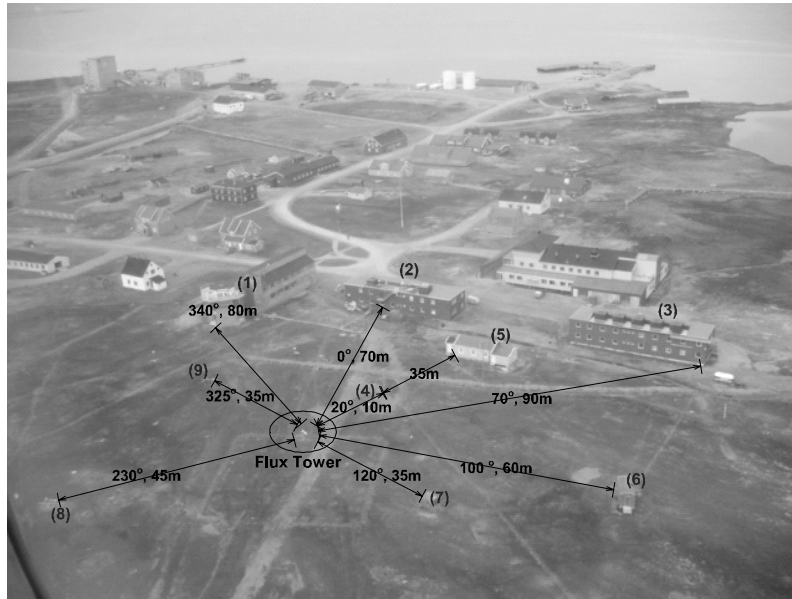


Fig. 1 Landscape of the site viewed from an airplane.

은 후 (높이 < 1 m), 평평한 지형이 나타난다. 같은 방향으로 약 57 m에 거리에 1.2 m 높이의 목재 4개가 약 폭 1.2 m를 형성하고 있고, 그 뒤로 9 m부터 언덕(약 1 m 높이)이 다시 시작된 후 평평해진다. 약 300 m 이상 떨어진 곳에 100 m 정도 높이의 산이 동서 방향으로 뻗어 있다. 타워로부터 230° 방향의 약 32 m 거리에는 언덕 (높이 1 m로 완만함)이 시작되고, 언덕 위 측, 약 45 m 거리에는 높이 1.5 m 정도의 측기용 구조물(8)이 있다. 끝으로 325° 방향의 약 35 m 거리에는 높이 1.5 m의 측기 구조물(9)이 있다.

2.3 관측 및 자료 처리

2.3.1 관측

난류 에너지, 수분 및 이산화탄소를 관측하기 위해 삼차원 초음파 풍속계(CSAT3, Campbellsci Inc.)와 개회로 적외선기체 분석기(LI7500, Licor)를 설치하였다. 관측 높이(z_m)는 3.45 m이며, 두 기기 간의 간격은 0.15 m이다. 초음파 풍속계는 270° 방향을 향하고 있으며, 측정 속도는 20 Hz이다. 30분 평균된 난류 통계량 자료가 약 1년 동안 자료 집록기(CR5000, Campbellsci. Inc.)에 집록되었으며, 생 자료(raw data)는 관측 초기 일부가 집록되었다.

2.3.2 자료 처리

에디 공분산 방법의 적용 및 난류에 대한 이해를 쉽게 하기 위해서 바람 부는 방향으로의 좌표축 회전이 필요하다. 특히, 벡터량을 관측하는 삼차원 초음파 풍속계와 지면과 수직이 되지 않을 경우 나타나는 평균 연직 풍속(\bar{w})은 좌표축 회전을 하게 되면 주어진 평균 시간 동안의 평균 연직 풍속을 0으로 만들 수 있다. 하지만 이 좌표축 변환 방법은 중규모 기상현상에 의해 발생할 수 있는 \bar{w} 및 평균 시간 선택으로 인하여 생길 수 있는 선택적 오차를 고려할 수 없게 된다. Planar fit 좌표축 회전은 지면의 경사 및 설치 기기의 기울어짐을 고려한 후에도 식 (1)의 $\bar{w} \neq 0$ 이 아닌 연직 풍속을 표현하기 위해서 장기간의 자료를 이용한 회귀 평면으로 연직 좌표 회전을 수행하는 방법이다(Wilczak *et al.* 2001). 이 방법을 적용하기 위해서는 풍속을 측정하는 삼차원 초음파 풍속계의 일정 기간 위치 변동이 없어야 한다. 본 연구에서의 삼차원 초음파 풍속계는 약 1년 동안 위치 변동이 없었다. 이 좌표 회전 방법을 적용하기 위해 타워를 중심으로 8개의 풍향 지역으로 구분하고, 각각의 풍향에 대해 관측된 난류 통계량들에 대해 Planar fit 좌표축 회전(Hong and Kim, 2002)을 적용하였다. 그리고 평균 수평 풍속(U)이 1 ms^{-1} 이상, kinematic 운동량 플렉스($u'w'$)가 음의 부호를 갖는 경우 그리고 이론과 관측 적

Table 1 The availability of data (%) after the application of each quality criteria except N.

	WD	N	U	u'w'	ITC	σ_v/u_s	z_m/L		WD	N	U	u'w'	ITC	σ_v/u_s	z_m/L
N	338	226	80	78	30	30	30	S	158	665	68	37	25	14	6
	349	246	82	76	15	14	14		169	455	56	25	11	5	3
	11	102	71	65	30	29	29		180	356	52	23	10	7	6
	0	268	90	79	44	44	44		191	313	45	17	9	4	4
NE	23	66	42	27	14	12	12	SW	203	382	54	26	13	5	4
	34	69	19	17	13	13	13		214	405	57	32	19	8	7
	45	59	24	20	19	19	19		225	516	61	32	19	10	9
	56	69	28	16	12	12	12		236	793	73	37	25	17	12
E	68	92	42	40	30	29	29	W	248	721	76	47	31	23	17
	79	186	52	41	35	33	33		259	571	73	43	33	25	19
	90	462	77	71	60	59	59		270	388	69	47	38	27	23
	101	1214	90	83	79	78	78		281	295	71	56	43	34	29
SE	113	1875	93	88	84	82	81	NW	293	449	83	78	71	70	69
	124	1424	88	81	71	65	58		304	545	89	84	79	79	79
	135	1350	84	70	58	50	33		315	403	84	81	67	67	67
	146	1020	80	65	49	31	14		326	312	81	78	42	42	42

WD: Wind direction, N: Number of data used. The numbers in wind direction indicate the rounding-off lower limit at bin wind direction of 11.25°. For example, 338 means the bin wind direction of 337.5° - 348.75°.

분 난류 통계량(ITC)간의 30% 이내의 차이를 만족하는 자료를 선정하였다(최태진 등, 2004).

3. 결 과

관측된 자료 수(N)에 대해 품질 평가 기준에 따른 자료의 가용성을 Table 1에 표시하였다. 관측된 자료 수(N)는 남동풍 계열이 가장 많아 이 풍향이 주풍향임을 알 수 있다. NE와 E의 일부 구간의 자료 수가 가장 적다. U, u'w', 그리고 ITC 조건에서 자료 가용성이 가장 작은 곳은 NE와 S-SW의 경계구간이다. NE 구간은 목조 건물(그림 1의 (5))의 영향이 큰 것으로 보이나 S-SW의 경계 구간에 대해서는 자료의 가용성이 낮은 것에 대한 이유는 더 분석이 필요하다. 왜냐하면 이 구간에서는 관측에 영향을 미칠 구조물이 없기 때문이다. 2005년 8월부터 자료 집록 시스템의 개선으로 현재의 관측지에서 생 자료(raw data)가 연속적으로 집록되고 있다. 생 자료를 이용한 스펙트럼 분석 등을 포함한 다양한 난류 통계 분석은 이 구간의 낮은 자료 가용성의 원인을 밝힐 수 있을 것으로 사료된다. 반면에 E와 SE의 경계 구간이 가장 자료의 가용성이 큰데 이 풍향에서 관측 자료수가

가장 많기 때문에 이 결과는 고무적이다.

Fig. 2는 1° 마다의 풍향에 대해 플럭스 발자취의 정규화된 기여도를 나타낸 것이다. 범례의 100은 관측된 플럭스에 가장 크게 기여하는 풍상측 거리를 가리킨다.

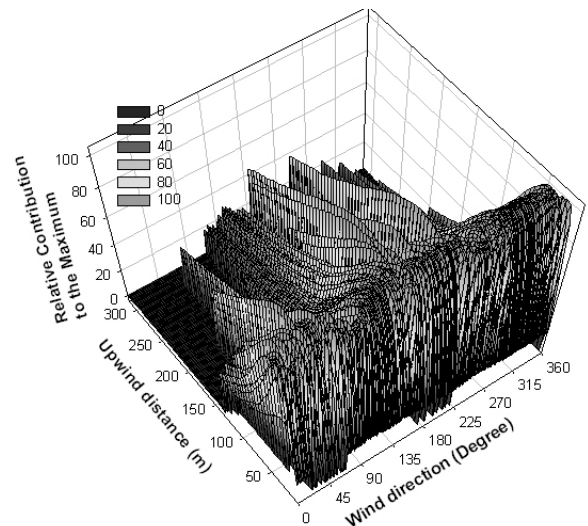


Fig. 2 The relative flux contribution with bin wind direction of 1°. The highest value at each bin wind direction was assigned 100.

풍향에 따라 관측된 플럭스 발자취에 최대 기여하는 풍상측의 거리는 풍향에 따라 크게 다르지 않았으며, 그 거리는 대략 20-50 m 이고, 그 중 45 m 부근이 가장 많았다. 이 분석은 품질이 좋은 것으로 판단된 자료를 사용하였기 때문에 특정 방향의 플럭스 발자취가 위의 범주에 포함된다면 그때 관측된 플럭스의 자료는 품질이 좋을 가능성이 많다. 예를 들면, 플럭스 타워로부터 북쪽(340-70°)에 기지 건물들이 위치(Fig. 1)하는데 이곳에서의 플럭스 발자취는 평균적으로 약 150 m를 넘지 않았다. 이 거리는 실제 플럭스 타워로부터 기지 건물들의 거리의 약 2배이지만 최대 기여하는 거리는 50 m 이내이기 때문에 북풍 계열의 바람이 불어도 일부 자료는 품질이 좋을 수 있음을 의미한다. 나머지 풍향 구간의 경우 관측된 플럭스에 기여하는 풍상측 거리가 약 300 m까지이다. 이 거리는 Fig. 1에서 나타난 대부분의 건물 또는 측기 구조물이 포함된다. 하지만 Table 1의 자료의 가용성에 근거하면 이 구조물들이 관측에 미치는 영향은 심각하지 않은 것으로 나타났다. 예를 들면 Fig. 1의 (6)-(9)로 인한 자료의 손실은 Table 1에 근거하면 크지 않다. 다만 340°에 위치한 노르웨이 기지의 경우 ITC 평가에서 상대적으로 큰 자료의 손실(Table 1의 NE-326 구간)을 가져오지만 실측 자료 수는 많지 않다.

4. 요약 및 결론

극지연구소에서는 북극 다산기지에 2003년 에디 공분산 시스템을 설치하여 북극 지역 식생과 대기간의 에너지, 수분 및 이산화탄소 플럭스를 연속 관측해 오고 있다. 그러나 관측지는 많은 외국 연구진들이 설치한 측기 구조물, 건물 등이 산재해 있는 주변 환경 속에 있다. 이 연구에서는 2003년 8월부터 2004년 7월까지 관측된 난류 통계량과 플럭스 발자취 분석 모형을 이용하여 플럭스 발자취 기후(flux footprint climatology)를 분석하고, 관측된 자료의 품질과 플럭스 발자취 기후도로부터 주변 구조물의 영향을 평가하였다.

플럭스 발자취 기후도에 의하면 플럭스 발원지는 평균적으로 타워로부터 300 m 이내이며, 최대 기여하는 거리는 20-50 m였다. 타워 주변의 측기 구조물과 건물들이 모두 플럭스 발원지 내에 위치하지만 최대 기여하는 발원지의 거리는 구조물과 건물보다 가까운 곳에 위치하였다. 결론적으로 주변의 구조물이 자료의 가용성에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 보인다. 또한 SE 방향의 주 풍향은 현재의 플럭스 타워의 위치가 타당한 것으로 보인다.

사 사

이 연구는 한국해양연구원 부설 극지연구소의 ‘북극 환경특성 연구(PE05007)’사업과 ‘극지기반 첨단 종합 기술 개발(PG05010)’ 사업의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

- 최태진, 이방용, 이희춘, 그리고 심재설, 2004, 남극 세종기지에서의 지표 플럭스 관측: 1) 난류 특성과 현열 플럭스, *Ocean and Polar Res.*, **26(3)**, 453-463.
- Arya, S.P., 2001, *Introduction to micrometeorology*, Academic Press, California, 420 p.
- Hong, J.K. and J. Kim, 2002, On processing raw data from micrometeorological field experiments. *Korean J. Agric. Forest Meteorol.*, **4(2)**, 119-126.
- Lloyd, C. R., R. J. Harding, T. Friborg, and M. Aurela, 2001, Surface fluxes of heat and water vapour from sites in the European Arctic, *Theor. Appl. Climatol.* **70**, 19-33.
- Schmid, H. P., 1997, Experimental design for flux measurements: Matching scales of observations and fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, **87**, 179-200.
- Swinbank, W. C., (1951.), The measurement of vertical transfer of heat, water vapor and momentum in the lower atmosphere with some results, *J. Meteorol.*, **8**, 135-145.
- Wilczak, J.M., S.P. Oncley, and S.A. Stage, 2001, Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary. Layer Meteorol.*, **99**, 127-150.