

## 남극 세종기지의 에너지 평형

김 준<sup>1,\*</sup> · 조희구<sup>1</sup> · 정연진<sup>1</sup> · 이윤곤<sup>1</sup> · 이방용<sup>2</sup>

<sup>1</sup>연세대학교 지구환경연구소/대기과학과

<sup>2</sup>한국해양연구원 부설 극지연구소

(2006년 3월 31일 접수; 2006년 6월 12일 승인)

## Surface Energy Balance at Sejong Station, King George Island, Antarctica

Jhoon Kim<sup>1,\*</sup>, Hi Ku Cho<sup>1</sup>, Yeon Jin Jung<sup>1</sup>, Yun Gon Lee<sup>1</sup> and Bang Yong Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Global Environment Laboratory/Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul

<sup>2</sup>Korea Polar Research Institute, KORDI

(Manuscript received 31 March 2006; in final form 12 June 2006)

### Abstract

This study examines seasonal variability of the surface energy balance at the King Sejong Station, Antarctica, using measurements and estimates of the components related to the balance for the period of 1996 to 2004. Annual average of downward shortwave radiation at the surface is  $81 \text{ Wm}^{-2}$  which is 37% of the extraterrestrial value, with the monthly maximum of  $188 \text{ Wm}^{-2}$  in December and the minimum of  $8 \text{ Wm}^{-2}$  in June. These values are relatively smaller than those at other stations in Antarctica, which can be attributed to higher cloudy weather conditions in Antarctic front zone. Surface albedo varies between  $\sim 0.3$  in the austral summer season and  $\sim 0.6$  in the winter season. As a result, the net shortwave radiation ranges from  $117 \text{ Wm}^{-2}$  down to  $3 \text{ Wm}^{-2}$  with annual averages of  $43 \text{ Wm}^{-2}$ . Annual average of the downward longwave radiation shows  $278 \text{ Wm}^{-2}$ , ranging from  $263 \text{ Wm}^{-2}$  in August to  $298 \text{ Wm}^{-2}$  in January. The downward longwave radiation is verified to be dependent strongly on the air temperature and specific humidity, accounting for 74% and 79% of the total variance in the longwave radiation, respectively. The net longwave radiation varies between  $25 \text{ Wm}^{-2}$  and  $40 \text{ Wm}^{-2}$  with the annual averages of  $30 \text{ Wm}^{-2}$ . Accordingly, the annual average energy balance is dominated by radiative warming of a positive net all-wave radiation from September to next March and radiative cooling of a negative net all-wave radiation from April to August. The net all-wave radiative energy gain and loss at the surface is mostly balanced by turbulent flux of sensible and latent heat. The soil heat flux is of negligible importance in the surface energy balance.

**Key words:** radiation balance, longwave radiation, shortwave radiation, Antarctica

### 1. 서 론

극지방은 지구의 기후계에서 매우 중요한 역할을 하고 있다. 비록 인간의 문명 지역과 멀리 떨어져 있을 지라도 극지 대기는 전 지구의 날씨와 그리고 대부분

중위도 지방에서 살고 있는 사람들에게도 직접 영향을 미치고 있다 (Studinger, 2005). 따라서 극지 대기와 지표와의 열교환은 지구 기후 변화에 크게 관계되어 있다. 그러므로 남극대기가 지구 기후에서 열의 싱크 역할을 어떻게 하고 있는지는 현재 중요한 과제로 되어 있다. 이와 관련하여 남극 대륙의 에너지 수지에 관한 연구는 몇몇 관측소에 대하여 이루어진 바 있다 (Schlatter, 1972; King *et al.*, 1996; Bintanja and Broeke, 1995; Bintanja, 2000; Reijmer and Oerlemans, 2002; Broeke *et al.*, 2004). 그러나 이들 연구는 대부분 남극 대륙의  $65^{\circ}\text{S}$  이상의 고위도 동북부와 해안 지역 여름철에 국한되었다. 남극 세종기지는 George King

\*Corresponding Author: Jhoon Kim, Global Environment Laboratory/Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, 134 Sinchon-dong, Seodaemoon-gu, Seoul 120-749, Rep. of Korea.  
Phone : +82-2-2123-5682, Fax : +82-2-365-5163  
E-mail: jkim2@yonsei.ac.kr

섬의 62°13' S, 58°47' W에 위치하여 온난 해양성 한대기단 (maritime polar air mass)과 차고 건조한 남극기단 (Antarctic air mass) 사이에 남극 전선이 형성되는 고위도 저압대에 속한다. 그러므로 고위도 (>65°S)의 해안과 내륙의 에너지 평형과는 큰 차이가 있을 것으로 예상된다. 이 연구의 목적은 세종기지의 에너지 평형의 각 성분을 최근 관측한 자료를 사용하여 월별 특징을 밝히고자 한다. 그러므로 지표의 순 복사, 현열 그리고 잠열과 같은 에너지 평형 성분을 정량적으로 분석한다.

## 2. 관측

1996년부터 현재까지 남극 세종기지의 전천 태양 복사량은 Eppley Precision Pyranometer로 유효 파장 범위 285-3000 nm 그리고 하향 장파 (적외선) 복사량은 Eppley Precision Infrared Radiometer (Pyrgeometer)로 유효 파장범위 4000-50000 nm의 복사량을 1996년 1월부터 2004년 12월까지 매일 10분 간격으로 각각 관측하고 있다. 그 밖에 전 자외선 복사량 (295-385 nm)은 Eppley UV photometer로, 홍반 자외선 복사량 (280-320 nm)은 Robert-Berger형 UV-Biometer (Solar Light Model 501)로 그리고 UV-A 복사량 (320-400 nm)은 UVA meter (Solar Light Model 501)로 각각 5분-10분 간격으로 매일 측정하고 있다. 이들 측정기는 거의 2년마다 각각 제작 회사로 보내어 정밀 재검증을 받아 운영되고 있으며, 검증기간 동안 결측을 막기 위하여 각 측기와 동일한 모델의 측기를 복수 설치하여 운영함으로써 자료의 충실성과 신뢰성을 유지하고 있다. 동시에 중관 기상 관측 시스템도 함께 구축하여 그 밖의 기상 요소를 동시에 관측하고 있다. 그리고 1998년부터는 Brewer 분광 광도계 (SCI-TEC #122)를 설치하여 오존 전량과 파장별 자외선 복사량 (290-340 nm)을 자동으로 측정하고 있다. 이 연구에서는 1996년부터 2004년까지의 관측 자료를 사용하였다.

## 3. 결과 및 토의

### 3.1 복사 기후

일 적산 태양 복사량은 태양 천정각 (SZA), 가조시간, 운량과 에어러솔 등에 의하여 크게 변한다. 세종기지에서 태양 고도가 제일 높은 값은 동지 남중시간에

약 50° (서울 하지 77°, 동지 30°)이다. 따라서 가조시간은 동지 때 약 19시간, 하지 때 약 5시간 (서울 하지 15시간, 동지 9시간)이 된다. 운량 (n, oktas)은 세종기지가 남극 전선에 속해 있으므로 Table 1에서 보는 바와 같이 연평균 6.8 (서울 4.0)로 나타나 완전 흐린 날씨 ( $7 \leq n \leq 8$ )가 전 날씨의 60%를 차지하고 있다. 계절별 빈도 분포는 연 분포와 거의 같다. 에어러솔 (AOD)은 맑은 날씨에 5개 파장 (306.3, 310.1, 313.5, 316.8, 320.1 nm)에 대해서 평균 0.20, 여름 0.19, 겨울 0.10으로 파장에 따라서는 큰 차이가 없다. 남극 겨울은 일조시간이 짧고, 맑은 날씨가 거의 없어 AOD 분석이 불가능하다.

전천 일사량과 전 자외선 복사량은 동지 남중 시간에  $447 \text{ Wm}^{-2}$ 와  $29 \text{ Wm}^{-2}$  그리고 Table 1에서 여름 (12,1,2월)에 최대  $158.3 \text{ Wm}^{-2}$ 와  $9.3 \text{ Wm}^{-2}$ 를 보였으며, 겨울 (6,7,8월)에 최소  $15.0 \text{ Wm}^{-2}$ 와  $2.9 \text{ Wm}^{-2}$ , 연평균 값은  $81.1 \text{ Wm}^{-2}$ 와  $5.7 \text{ Wm}^{-2}$ 로 각각 나타났다. 이 전천 일사량은 서울의 여름  $155.1 \text{ Wm}^{-2}$ , 겨울  $86.8 \text{ Wm}^{-2}$ 와 연평균  $131.9 \text{ Wm}^{-2}$  (기상청, 2001)와 비교된다. 이와 같이 전천 일사량은 세종기지의 남극 여름과 서울의 여름 값은 가조시간 때문에 거의 같음을 알 수 있다. 홍반 자외선B 복사량은 여름에  $2.7 \times 10^{-2} \text{ Wm}^{-2}$ 로 최대값을 나타냈고, 겨울에  $0.1 \times 10^{-2} \text{ Wm}^{-2}$ 로 최소값이 나타났다. 연평균 값은  $1.3 \times 10^{-2} \text{ Wm}^{-2}$ 로서 연평균 전천 일사량의 약 0.02%에 해당하였다. 이들 값은 서울 (여름 30.1, 겨울 6.9, 연평균  $18.5 \text{ Wm}^{-2}$ )과 비교된다 (조희구 등, 2001). 그리고 UV-A 복사량은 여름에  $1.3 \text{ Wm}^{-2}$ 로 최대값을 나타냈고 겨울에  $0.1 \text{ Wm}^{-2}$ 로 최소값을 나타내어 계절변화가 뚜렷하고 연평균  $0.7 \text{ Wm}^{-2}$ 로 나타났다. 적외선 복사량은 연평균  $279.9 \text{ Wm}^{-2}$ 로 여름은  $295.5 \text{ Wm}^{-2}$ , 겨울은  $264.0 \text{ Wm}^{-2}$ 이다. 상대 습도는 연평균 88.4%로 계절 변화가 거의 없다. 비습은 겨울의 2.3에서 여름의 3.9 g/kg로 연평균 3.1 g/kg가 된다. 세종기지는 남쪽과 동쪽에 산과 고지대가 있고 기저 평면과 서쪽이 바다인 배산 임수형의 주변 지형을 갖고 있다. 따라서 뒤쪽 산으로부터 불어 내려오는 바람의 통풍로를 건물물이 막고 있어 동계에는 블리저드 현상으로 각 건물 사이에 많은 눈이 쌓인다. 3월부터 12월초까지 많은 강설 현상으로 지면이 눈으로 덮이며, 나머지 기간 동안에는 지형적인 영향으로 적설 지역과 노출 지역이 공존한다. 블리저드는 월평균 1.6회, 지속 시간은 매회 평균 21시간 30분 정도가 된다. 연평균 풍속은  $8.1 \text{ ms}^{-1}$ 로 계절 변화가 거

**Table 1.** Climate summary of daily mean solar irradiance, infrared irradiance and meteorological data at King Sejong Station(1996-2004).

Component	Spring (SON)	Summer (DJF)	Autumn (MAM)	Winter (JJA)	Year
Global Solar (Wm <sup>-2</sup> )	112.7	158.3	38.6	15.0	81.1
Total UV (Wm <sup>-2</sup> )	7.7	9.3	2.7	2.9	5.7
UV-A [2000-2003] (Wm <sup>-2</sup> )	1.1	1.3	0.3	0.1	0.7
EUVB×10 <sup>2</sup> (Wm <sup>-2</sup> )	1.9	2.7	0.4	0.1	1.3
Infrared (Wm <sup>-2</sup> )	277.4	295.5	282.7	264.0	279.9
Temperature (°C)	-2.2	1.7	-0.5	-4.4	-1.4
Pressure (mb)	987.6	986.7	990.9	990.2	988.9
Relative humidity (%)	88.8	88.6	87.9	88.3	88.4
Cloudiness (oktas)	6.8	6.9	6.8	6.8	6.8
Specific humidity (g/kg)	2.9	3.9	3.2	2.3	3.1
Wind speed (ms <sup>-1</sup> )	8.4	7.1	8.2	8.8	8.1
Precipitation (mm)	107.3	166.0	150.9	116.4	540.6

의 없고 풍향은 주로 여름에 북서풍계가, 겨울에 남동 풍계가 우세하게 나타나지만 전반적으로 탁월풍은 북서풍계이다. 연평균 강수량은 540.6 mm로 봄이 107.3 mm로 제일 적고 여름과 가을이 많아 각각 166.0 mm, 150.9 mm가 된다.

### 3.2 단파 복사

에너지 평형은 다음 식과 같이 표시할 수 있다.

$$R_N = S(1 - A) - L = SH + LH + G \quad (1)$$

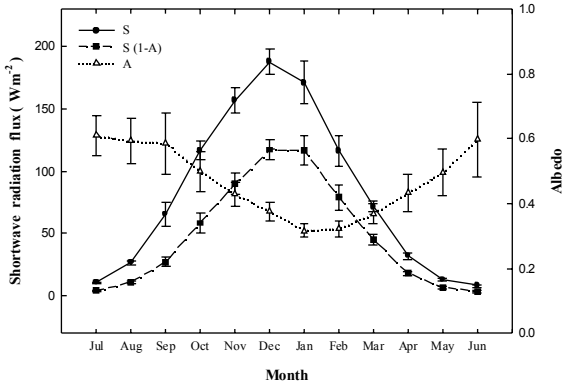
여기에서 R<sub>N</sub>은 순 장단파 복사 속, S는 하향 단파 복사 속 (전천 일사량), A는 알베도, L은 순 장파 복사 속 (L=L<sup>↑</sup>-L<sup>↓</sup>), SH는 현열 속, LH는 잠열 속 그리고 G는

지중열 속을 의미한다.

#### 3.2.1 하향 단파 복사 속

이 연구에서 사용된 하향 단파 복사 속은 관측된 값이다. 월별 평균 하향 단파 복사 속 (S)의 변화를 Fig. 1에 나타내었다. 월 평균 최대값은 12월의 187.6 Wm<sup>-2</sup>로 대기 밖 값 (TOA)의 37.9%, 최저값은 6월의 8.1 Wm<sup>-2</sup>로 TOA의 58.5%이며 그리고 연평균 81.2 Wm<sup>-2</sup>로 TOA의 36.7%에 불과하다.

하향 단파 복사 속은 주로 태양고도, 일조시간과 운량에 영향을 받는다. 세종기지에서 남중시간에 태양고도가 연중 가장 높은 때는 동지 (12월22일)에 약 51°, 가장 낮은 때는 하지 (6월22일)에 약 4°이다 (서울 하지 77°, 동지 30°). 따라서 가조시간은 동지 때 약 19시간, 하지 때 약 5시간이 된다 (서울 하지 15시간, 동지



**Fig. 1.** Annual cycle of downward shortwave radiation flux (S), albedo (A) and net shortwave radiation flux [S(1-A)] at King Sejong Station.

9시간). 이와 같이 세종기지는 태양 고도와 가조시간의 연변화가 서울에 비하여 크다. 따라서 운량 (oktas)은 극전선이 주로 머무는 지역에 속하여 연평균 운량 6.8 (서울 4.0)로 나타나 완전 흐린 날씨 ( $7 \leq n \leq 8$ )가 전 날씨의 60%를 차지하고 있다. 그러므로 하향 단파 복사 속은 운량이 많아 다른 고위도 지방에 비하여서도 적은 편이다. 특히 남극점 (연평균 운량은 3-5 oktas) 그리고 남극 대륙의 서부 Dronning Maud Land의 4개 지점 (72°S~75°S, 0°E~16°W, SL 34~2892 m)에서 측정된 하향 단파 복사 속은 120-150  $Wm^{-2}$ 로 세종기지

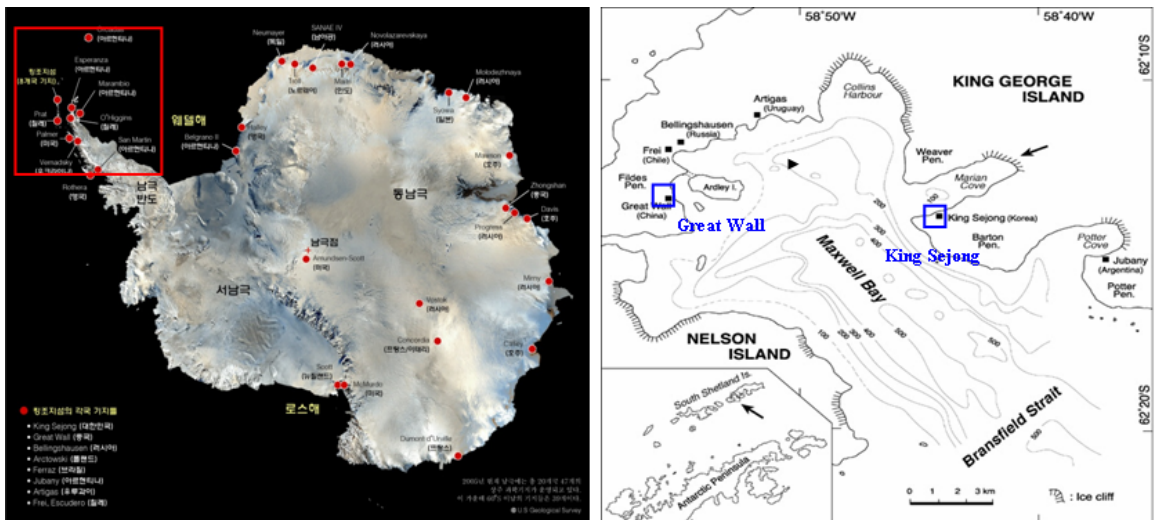
의 81.2  $Wm^{-2}$ 보다 모두 많은 편이다 (Dutton *et al.*, 1990; Broeke *et al.*, 2004).

**3.2.2 알베도**

세종기지에서 상향 단파 복사 속 (태양 복사의 반사량)의 관측 자료가 없으므로 세종기지 (SJ)와 같은 위도권에서 서쪽으로 약 10 km 떨어진 중국의 Great Wall Station (GW; 62°13'S, 58°57'W)의 하향과 상향 단파 복사 속 자료 (1993.5.-1994.12.) (Bian *et al.*, 1995)를 사용하였다 (Fig. 2). Table 2는 GW의 하향과 상향 태양 복사 속을 나타낸 것이다. 이들 값으로 GW의 월별 알베도 (A)를 계산하였다. 두 관측 지점 사이의 하향 태양 복사 속과 기온과의 관계를 Fig. 3a와 Fig. 3b에 표시하였다. 이 그림에서 보는 바와 같이 두 관측소에서의 태양 복사 속과 기온의 값은 서로 잘 일치한다. 하향 태양 복사 속과 기온에서 통계적으로 매우 높은 유의 수준  $P < 0.0001$ 로 매우 유효하며 결정계수 ( $R^2$ )는 두 경우 모두 약 0.99로 매우 높다. 그 밖에 기압과 운량에서도 매우 비슷하였다. 이와 같은 관계로 GW와 SJ의 알베도 값이 같다고 가정하였다. 따라서 GW의 알베도와 SJ의 기온과의 관계를 Fig. 3c에 나타내었고 회귀식은 다음과 같다.

$$A(GW) = -0.043 \times T_a(SJ) + 0.41 \quad (2)$$

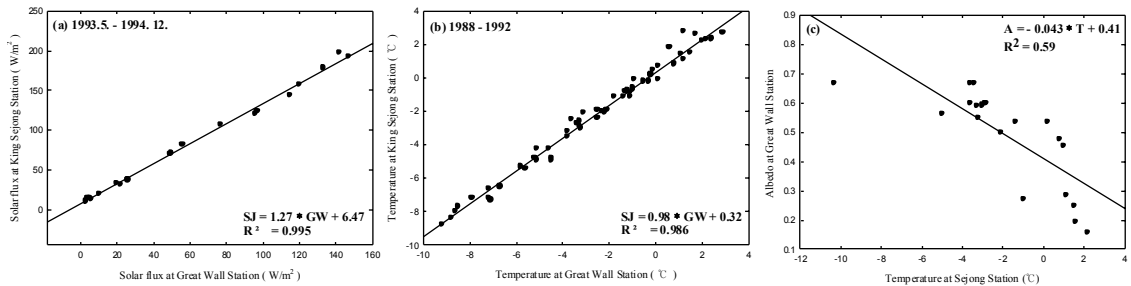
$$R^2 = 0.59$$



**Fig. 2.** Map of the Antarctic continent (left) and King George island (right) showing the locations of King Sejong and Great Wall Stations.

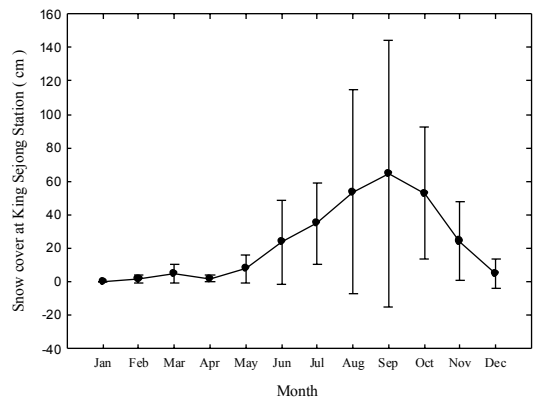
**Table 2.** Monthly mean downward and upward solar radiation fluxes measured for the period of May 1993 through December 1994 at Great Wall Station (Bian *et al.*, 1995).

	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	YEAR
Downward solar flux (Wm <sup>-2</sup> )	115	77	56	26	7	3	5.5	21	49.5	96.5	126.5	144.5	60.63
Upward solar flux (Wm <sup>-2</sup> )	18	15	16	7	4	2	3.5	12	29.5	53	62	52.5	22.88
Albedo	0.16	0.20	0.29	0.27	0.57	0.67	0.64	0.57	0.60	0.55	0.49	0.36	0.38



**Fig. 3.** The relationship between at King Sejong Station (SJ) and Great Wall Station (GW) for (a) global solar flux, (b) air temperature and (c) between albedo at GW and air temperature at SJ (1993.5.—1994.12.).

식(2)에 의하여 월별로 계산한 세종기지의 알베도 (A)를 Fig. 1에 나타내었다. 이 그림에서 보는 바와 같이 알베도는 5월에서 10월까지 0.5-0.6으로 비교적 높고 11월에서 4월까지 0.3-0.4로 낮으며 연평균 0.47로 나타났다. 중국 GW의 경우 (1993-2004)는 역시 6월의 0.67이 월 최대값이고 1월 0.16이 월 최저값으로 연평균 0.38로 SJ보다 낮은 편이다. Broeke *et al.* (2004)은 남극 대륙의 서부 위도 72°S 이상의 고위도 Dronning Maud Land에서 4년간 (1998-2001)의 자료로 분석한 결과 연평균 알베도는 0.84-0.88로 나타났다. 지표 알베도의 위도별 위성 관측 자료에 의하면 1월과 7월 모두 60°S 부근을 기하여 극으로 향할수록 알베도는 약 0.1에서 0.8로 증가하였다 (Li *et al.*, 1997). Fig. 4는 세종기지의 적설량을 표시한 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 알베도가 초겨울 6월 최대값을 나타낸 것은 적설량이 약 20 cm로 세종기지 주변 전체를 덮고 있고 비교적 신 적설에 속하기 때문으로 생각된다. 9월은 약 60 cm로 월 최대값을 나타내고 있다. 5월부터 10월까지 알베도가 약 0.50 이상으로 이 기간에 지표면은 적설로 완전히 지면을 덮고 있음을 알 수 있다. 적설면의 알베도는 주로 운량, 눈 입자의 크기, 적설기간 (snow



**Fig. 4.** Annual cycle of snow cover (1988-1993).

age)과 그리고 그 월의 태양 천정각에 영향을 받는다 (Wiscombe and Warren, 1980). 구름은 지면에 도달하는 태양 복사를 많이 산란시켜 태양 천정각이 보통 50° 이상이 되는 남극 대륙에서는 알베도를 감소시킨다 (Broeke *et al.*, 2004). 이와 같은 이유로 구름이 많은 세종기지에서의 알베도는 비교적 작다고 생각된다.

### 3.2.3 순 단파 복사 속

지표가 흡수한 순 하향 단파 복사 속[S(1-A)]은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 12월에  $117.3 \text{ Wm}^{-2}$ 로 최대가 되고 6월은  $3.3 \text{ Wm}^{-2}$ 로 최저로 나타나고 연평균  $43.2 \text{ Wm}^{-2}$ 를 보여 대기 밖 값의 19.2%를 나타낸다. 따라서 입사 단파 복사 속을 지표가 순 흡수하는 비율은 6월-9월이 약 40%, 여름(1-2월)이 78%로 여름은 겨울에 비하여 약 2배가 된다. 서부 Dronning Maud Land에서는 알베도가 세종기지보다 크므로 순 흡수량은  $15\text{-}23 \text{ Wm}^{-2}$ 에 불과하다 (Broeke *et al.*, 2004).

### 3.3 장파 복사

장파 복사는 단파 (태양) 복사와 달리 24시간 계속 지표면에 입사 (하향)하고 지표면으로부터 방출 (상향)한다. 그러므로 장파 복사는 지표면의 에너지 수지에 중요한 성분의 하나이다.

#### 3.3.1 하향 장파 복사 속

이 연구에서 사용된 하향 장파 복사 속은 관측된 값이다. 이 하향 장파 복사 속 ( $L^{\downarrow}$ )을 월별로 분석하여 Fig. 5에 표시하였다. 이 그림에서 월 최대값은 1월의  $297.6 \text{ Wm}^{-2}$ 이고 월 최저값은 8월의  $263.1 \text{ Wm}^{-2}$ 로 연교차가 비교적 적으며 연평균  $279.9 \text{ Wm}^{-2}$ 로 나타났다. 이와 같이 하향 장파 복사 속은 하향 단파 복사 속에 대하여 1.6배, 32.5배 그리고 3.4배가 각각 된다.

하향 장파 복사 속 ( $L^{\downarrow}$ )은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 대기 중의 기온, 수증기량에 영향을 크게 받는다. Fig. 6a에서  $L^{\downarrow}$ 와 기온 ( $T_a$ )과의 관계를 1차 회귀식의

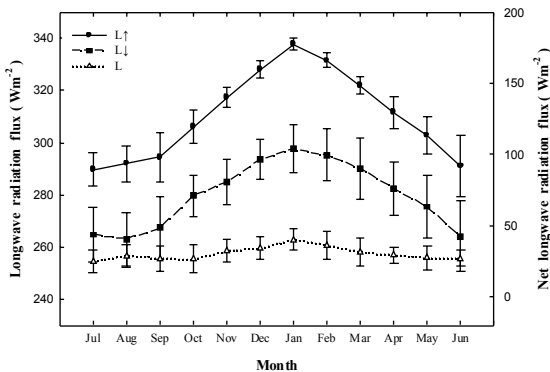


Fig. 5. Annual cycle of downward ( $L^{\downarrow}$ ), and upward ( $L^{\uparrow}$ ) longwave radiation fluxes, and net longwave radiation flux (L).

로 식(3)과 같이 나타내었다. 이 두 관계는 유의 수준  $P < 0.001$ 로 매우 유의하다.

$$L^{\downarrow} = 4.84 \times T_a + 286.50 \quad (3)$$

$$R^2 = 0.74$$

이 식에서 기온변화에 대한  $L^{\downarrow}$ 의 감응도는  $\frac{dL^{\downarrow}}{dT} = 4.84 \text{ Wm}^{-2}\text{C}^{-1}$ 로 나타났다. 이때 식(3)은 기온으로 전 분산 (total covariance)의 74%를 설명할 수 있다.

$L^{\downarrow}$ 와 비습(q)의 관계는 다음 식과 같다 (Fig. 6b).

$$L^{\downarrow} = 20.02 \times q + 218.05 \quad (4)$$

$$R^2 = 0.79$$

이 관계의 유의 수준  $P < 0.001$ 로  $L^{\downarrow}$ 는 q의 영향을 크게 받고 있다.  $L^{\downarrow}$ 와 운량 (n)과의 관계는 기온과 비습에 비하여  $R^2$ 가 낮아  $L^{\downarrow}$ 와 n과의 관계를 Fig. 6c에서 보는 바와 같이 약 11%를 설명하였다. Brunt (1932)는  $L^{\downarrow}$ 와 수증기압 (e, mb)과의 관계를 다음과 같이 표시하였다.

$$\frac{L^{\downarrow}}{\sigma T_A^4} = a + b\sqrt{e} \quad (5)$$

$$R^2 = 0.13$$

이 연구에서 유의 수준  $P < 0.001$ 로 상수 a와 b는 0.82와 0.037로 각각 나타났다 (Fig. 6d). Brunt는 프랑스에서 관측 실험을 통해  $a=0.60$ ,  $b=0.042$ 를 얻어 이 연구의 결과와 비슷한 값을 보였다 ( $R^2=0.99$ ). 이와 같이  $L^{\downarrow}$ 는  $T_a$ 와 q와는 상관관계가 비교적 높고 n과  $\sqrt{e}$ 는 낮았다. 이 연구에서  $T_a$ , q, n의 세 변수로 유의 수준  $P < 0.001$ 의 매우 유의 상태에서  $L^{\downarrow}$ 를 추정할 수 있는 다중회귀모형을 다음과 같이 구하였다.

$$L^{\downarrow} = 0.534 \pm 0.884 \times T_a + 17.300 \pm 3.558 \times q + 4.235 \pm 1.565 \times n + 198.288 \pm 15.074 \quad (6)$$

$$R^2 = 0.81$$

이 식의 추정값의 표준 오차는  $7.0387 \text{ Wm}^{-2}$ 이다.

#### 3.3.2 상향 장파 복사 속과 순 장파 복사 속

세종기지에서는 상향 장파 복사의 관측 자료가 없기

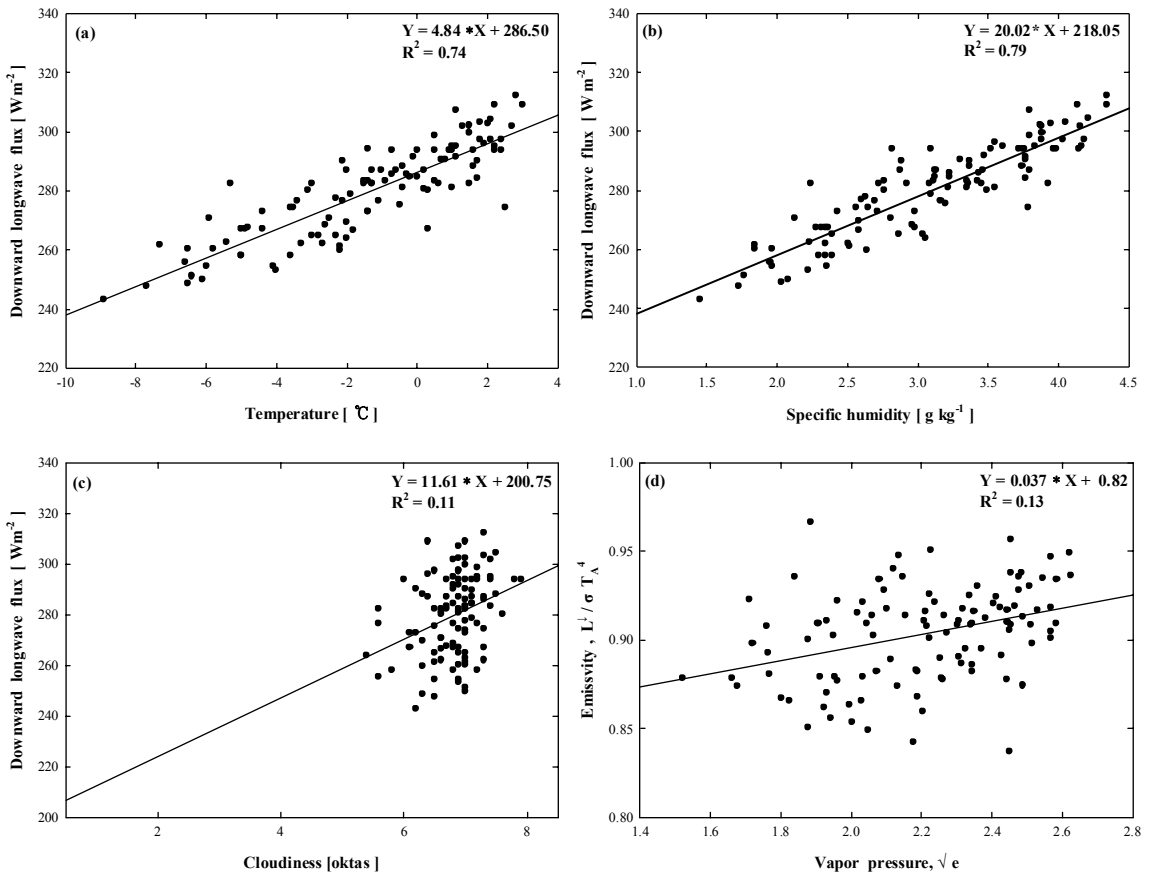


Fig. 6. Monthly mean downward longwave radiation flux as a function of (a) air temperature, (b) specific humidity, (c) cloudiness and (d) vapor pressure ( $\sqrt{e}$ ), respectively.

때문에 지표면 온도를 구하여 Stefan-Boltzmann 법칙에 의하여 구하였다. 지표면 온도를 구하기 위하여 사용된 2003년 1월-6월과 2004년 8월-12월까지의 깊이별 지중온도 (지하 20, 40, 50, 60, 70, 80 cm)의 관측 값을 Table 3에서 표시하였다. Table 3의 여섯 깊이의

지중온도를 사용하여 Fig. 7에서 보는 예와 같이 월별 깊이별 지중온도를 표시하였고 지중 온도는 깊이에 따라 1차 회귀식으로 표현되었다. 이 회귀식을 외삽법으로 지표면 온도 ( $T_s$ )를 구하여 기온 ( $T_a$ )과 함께 Table 4에 표시하였다.

Table 3. Monthly mean ground temperature with depth at King Sejong Station.

Depth (cm)	2003						2004				
	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
20	3.65	2.86	0.06	-0.26	-2.36	-8.82	-4.98	-3.64	-1.88	-0.01	1.46
40	2.90	2.47	0.05	0.12	-1.39	-6.80	-3.06	-	-	-	-
50	2.75	2.41	0.04	0.11	-1.31	-6.61	-4.30	-3.40	-1.91	-0.74	0.53
60	2.03	1.98	-0.03	0.09	-0.69	-5.77	-	-	-	-	-
70	1.99	1.98	0.02	0.15	-0.73	-5.10	-3.75	-3.12	-1.83	-0.87	0.10
80	1.24	1.52	-0.06	0.05	-0.44	-3.98	-3.47	-3.01	-1.88	-1.08	-0.27

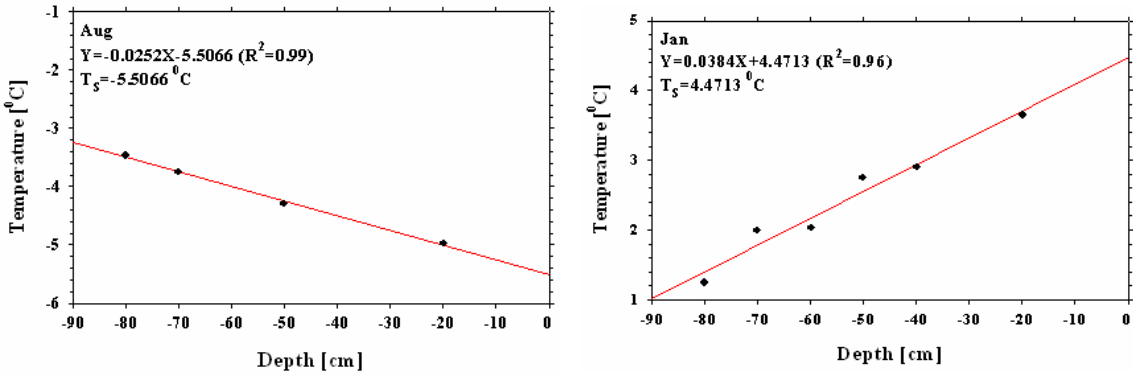


Fig. 7. Ground temperature with depth.

Table 4의 기온 ( $T_a$ )과 지표면 온도 ( $T_s$ )의 차  $\Delta T_m$  ( $=T_a - T_s$ )를 월별로 Fig. 8과 같이 표시하여 최적 곡선을 구하였다. 이 곡선의  $\Delta T_m$ 은 월 (M)의 2차 함수로 유의 수준  $P < 0.001$ 로 유의하며 다음 식과 같이 나타났다.

$$\Delta T_m = -0.11 \times M^2 + 1.49 \times M - 3.87 \quad (7)$$

$$R^2 = 0.80$$

식(7)의 회귀 모형에 의하여 기온과 지표면 온도차를 월별로 먼저 구하고 관측기온 ( $T_a$ )으로부터 지표면 온도 ( $T_s$ )를 다음과 같이 구하였다 (Fig. 10).

$$T_s = T_a - \Delta T_m \quad (8)$$

이와 같이 이 연구에서 장기간(1996-2004)의 월별  $\Delta T_m$ 은 식(7)을 만족한다고 가정하였다.

상향 장파 속은 계산된 지표온도 ( $T_s$ )로 Stefan-Boltzmann 법칙 ( $\epsilon \sigma T_s^4$ )에 의하여 구한 값으로 Fig. 5에 나타내었다. 이와 같이 얻어진 상향 장파 복사 속

값들은 복사 전달 모델 (CLIRAD, Chou *et al.*, 2001)을 이용하여 검증해 본 결과, 앞에서 관측된 하향 장파 복사 속과의 일관성이 확인되었다. 이 그림에서 월 최대 상향 장파 복사 속은 1월의  $337.8 \text{ Wm}^{-2}$ 이고 월 최

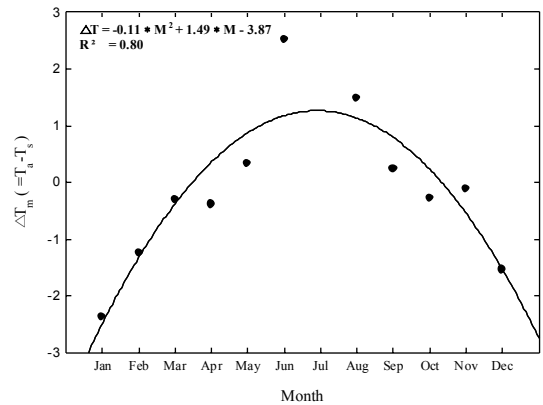


Fig. 8. Difference between air temperature and surface temperature and the best fitting curve.

Table 4. Monthly constants in the regression equation ( $T_{soil} = aZ + b$ ).

	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
$a = \frac{\partial T}{\partial Z}$ (°C/m)	3.84	2.12	0.18	-0.47	-3.12	-7.58	-	-2.52	-1.06	-0.05	1.72	2.79
b	4.47	3.34	0.11	-0.21	-2.82	-10.22	-	-5.51	-3.87	-1.90	0.27	1.99
$R^2$	0.96	0.95	0.69	0.45	0.94	0.98	-	0.99	0.98	0.17	0.95	0.99
$T_s$ (°C)	4.47	3.34	0.11	-0.21	-2.82	-10.22	-	-5.51	-3.87	-1.91	0.27	1.99
$T_a$ (°C)	2.1	2.1	-0.2	-0.6	-2.5	-7.7	-	-4.0	-3.6	-2.2	0.2	0.5



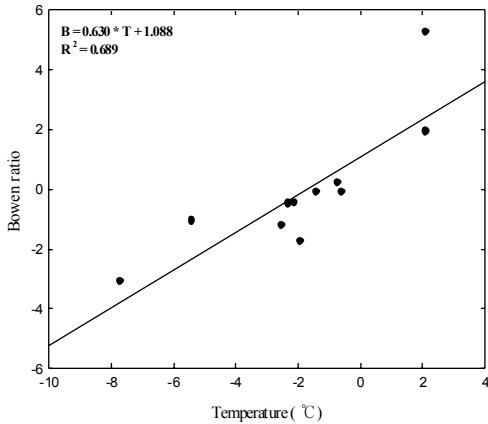


Fig. 9. Relationship between Bowen ratio and air temperature.

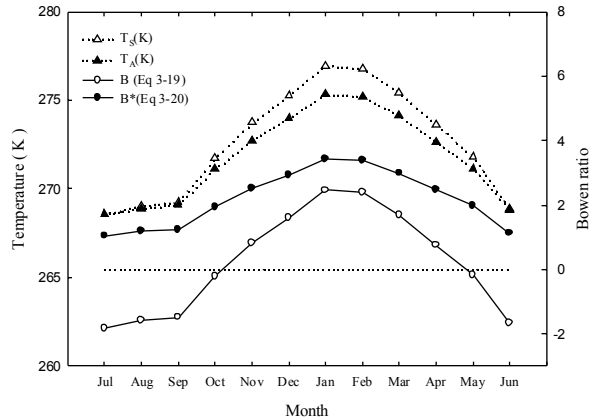


Fig. 10. Annual cycle of air temperature, surface temperature and Bowen ratio.

Table 5. Amplitude corresponding to soil depth.

Depth, z (cm)	$T_{max}-T_{min}$	Amplitude, $\delta$	$\ln \delta$
20	12.49	6.25	1.83
40	9.70	4.85	1.58
50	9.36	4.68	1.54
60	7.80	3.90	1.36
70	7.09	3.55	1.27
80	5.22	2.67	0.98

소값은 7월의  $289.8 \text{ Wm}^{-2}$ 로 연평균  $310.1 \text{ Wm}^{-2}$ 로 나타났다.

순 장파 복사 속 ( $L=L^{\uparrow}-L^{\downarrow}$ )을 상향 복사 속과 하향 복사 속의 차로 구하여 Fig. 5에 표시하였다. 순 장파 복사 속은 상향 복사 속부터 하향 장파 복사 속을 제한 값이기 때문에 지표의 유효 장파 방출량을 의미한다. 그림에서 보는 바와 같이 L은 모든 월에 대하여 순 방출 복사 속만 존재한다. 월 최대 L값은 1월의  $40.2 \text{ Wm}^{-2}$ , 월 최저 L값은 7월의  $25.0 \text{ Wm}^{-2}$ 로 연 평균  $30.2 \text{ Wm}^{-2}$ 였다.

### 3.4 순 장단파 복사 속과 지중열 속

전 파장의 순 복사 속 ( $R_N$ )은 식(1)과 같이 지표의 순 단파 복사 속의 흡수량 [ $S(1-A)$ ]과 순 장파 복사 속의 방출량 (L)의 차로 표시된다. 이 관계식에 의하여 순 장단파 복사 속 ( $R_N$ )을 월별로 구하였다.

지표면과 지중 깊이 (D) 사이에 단위 시간 전열 속 G는 다음 식으로 표시된다.

$$G = - \int_0^D (\rho C)_m \frac{\partial T}{\partial t} dz \quad (9)$$

여기에서 z는 깊이, D는 지온의 연교차가 없는 깊이,  $(\rho C)_m$ 은 지중 D 깊이까지의 평균비열용량이다. 지중 열 속은 단위 시간과 깊이에 대한 온도차에 비례하므로 다음 식과 같이 표시된다.

$$G = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \quad (10)$$

여기에서 비례상수  $\lambda$ 는 토양의 열전도율이다. 식(9)과 (10)에서

$$\frac{\partial G}{\partial z} = -(\rho C)_m \frac{\partial T}{\partial t} \quad (11)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (12)$$

가 된다. 여기에서  $K = \frac{\lambda}{(\rho C)_m}$ 는 토양의 열확산율을 의미한다. 지표면 온도의 진폭  $\Delta T_0$ 를  $\Delta T_0 = \frac{(T_{\max} - T_{\min})}{2}$ , 온도변화의 주기 P를 12개월, 이에 해당하는 각속도를  $\omega$ , 최고온도가 나타나는 달을 3개월째로 하는 시간 t의 이들 경계조건을 각각 취하였을 때 식(12)의 해는 Carslaw and Jaeger (Sellers, 1965)에 의하여 다음과 같이 주어졌다.

$$\Delta T = \Delta T_0 \exp[-z(\omega/2K)^{\frac{1}{2}}] \sin[\omega t - (\omega/2K)^{\frac{1}{2}} z] \quad (13)$$

식(13)에서 지중 z 깊이에서 진폭  $\delta$ 와 열 확산율 K는 다음과 같은 방법으로 구하였다 (조희구 · 이태영, 1975).

$$\delta = \Delta T_0 \exp[-z(\omega/2K)^{\frac{1}{2}}] \quad (14)$$

따라서 진폭  $\delta$ 되는 지중의 임의의 깊이 z는 다음 식과 같이 주어진다.

$$z = (2K/\omega)^{\frac{1}{2}} \ln \Delta T_0 - (2K/\omega)^{\frac{1}{2}} \ln \delta \quad (15)$$

식(15)에서

$$(2K/\omega)^{\frac{1}{2}} \ln \Delta T_0 = a \quad (16)$$

$$(2K/\omega)^{\frac{1}{2}} = b \quad (17)$$

라고 놓으면

$$z = a - b \ln \delta \quad (18)$$

가 된다. a와 b는 토양의 K값과 경계조건에 의하여 구해진다. 그러나 여기에서는 K의 측정값이 없으므로 지중온도의 연 변화에 의하여 a와 b를 회귀분석법에 의하여 결정한다 (조희구 · 이태영, 1975). 지중 깊이 z에 따르는  $\ln \delta$ 의 값은 다음 Table 5와 같다. Table 5를 사용하여 식(18)의 상수, a와 b를 156.22와 -71.12로 각각 구하였다 ( $R = -0.976$ ). 식(12)에서  $\omega = \frac{2\pi}{T} = 1.99 \times 10^{-7} \text{ sec}^{-1}$ 이므로  $K = \frac{b^2 \omega}{2} = 5.18 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ sec}^{-1}$ 로 나타났다. 식(10)에서 토양의 열전도율  $\lambda$ 는  $\lambda = (\rho C_p)_m K$ 를 의미하므로 이 연구에서 동결토양의 열용량은 약  $0.5 \text{ cal cm}^{-3} \text{ K}^{-1}$ 을 택하였다 (Sellers, 1965). 그러므로  $\lambda = 0.109 \text{ J m}^{-1} \text{ K}^{-1} \text{ sec}^{-1}$ 로 나타났다. 따라서 식(10)의 지중열 속 G를 Table 4의 월별 평균  $\frac{\partial T}{\partial Z}$ 을 사용하여 구하였다. 여기에서 세종기지의 토양 열전도율  $\lambda$ 의 정확한 값은 장기간 관측값으로 더 깊이 조사되어야 할 값이다.

### 3.5 현열 속과 잠열 속

Choi (2005)는 세종기지에서 맑은 날씨에 현열 속을 2002년 12월부터 2004년 2월까지 관측된 자료를 분석한 바 있다. Table 6은 2003년 1월-12월까지의 관측한 평균 현열 속과 잠열 속이다. 이 기간에서 Table 6에서 알 수 있는 바와 같이 2003년 1월에 현열 속은  $104.6 \text{ Wm}^{-2}$ , 잠열은  $19.9 \text{ Wm}^{-2}$ 로 Bowen 비가 5.3으로 매우 크다. 4월부터 11월까지는 현열 속과 잠열 속의 이동 방향은 서로 반대로 나타났다. 특히 6월의 Bowen 비는 -3.1로 나타났다. Bowen 비를 Bintanja (2000)와 같은 방법으로 기온의 1차 회귀식으로 Fig. 9에 나타내었다. 유의 수준  $P = 0.002$ 로 유의하며 Bowen 비(B)는 다음 식과 같다.

$$B = 0.630 \times T_a(^{\circ}\text{C}) + 1.088 \quad (19)$$

$$R^2 = 0.69$$

**Table 6.** Sensible and latent heat flux at King Sejong Station (2003) (Choi, 2005).

Month	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
Sensible heat flux ( $\text{Wm}^{-2}$ )	104.6	38.8	-	-1.3	-12.8	-10.8	-9.1	-14.4	-3.5	-5.5	-1.4	4.5
Latent heat flux ( $\text{Wm}^{-2}$ )	19.9	20.1	-	11.4	10.5	3.5	8.7	8.3	7.2	11.6	14.0	20.4
Bowen ratio	5.3	1.9	-	-0.1	-1.2	-3.1	-1.1	-1.8	-0.5	-0.5	-0.1	0.2
Air temperature( $^{\circ}\text{C}$ )	2.1	2.1	-	-0.6	-2.5	-7.7	-5.4	-1.9	-2.3	-2.1	-1.4	-0.7

Bintanja (2000)는 남극 대륙의 북서 부근 (Western Dronning Maud land; 74°35'S, 11°13'W) 7개 관측소에서 Bowen 비 ( $B^*$ )와 기온과의 관계를 다음 식으로 구한 바 있다.

$$B^* = 0.3494 \times T_a(^{\circ}\text{C}) + 2.6625 \quad (20)$$

$$R^2 = 0.97$$

이와 같이 Bowen 비는 기온과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

이 연구에서 식(19)와 식(20)으로부터 월별 평균 기온을 사용하여 월별 평균 Bowen 비 ( $B, B^*$ )를 각각 구하여 Fig. 10에 나타내었다. 이 그림에서 보는 바와 같이  $B$ 와  $B^*$ 는 월 최대값이 1월의 2.46과 3.42, 최소값은 7월의 -1.82와 1.05로 각각 나타났다. 전 파장 순 복사속 ( $R_N$ )에서 지중열 속 ( $G$ )을 제한 값 ( $R_N - G$ )으로부터 Bowen 비 ( $B, B^*$ )를 이용하여 현열 속 ( $SH, SH^*$ )과 잠열 속 ( $LH, LH^*$ )을 각각 다음 관계식을 이용하여 구하였다.

$$R_N - G = SH + LH \quad (21)$$

$$LH = \frac{R_N - G}{B + 1} \quad (22)$$

이와 같이 먼저 식(22)에 의하여  $B$ 와  $B^*$ 로 잠열 속을 구하고 식(21)으로부터 현열 속을 각각 구하였다. 식(19)의  $B$ 에 의한 결과를 Fig. 11에 표시하였다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 대체로 현열 속과 잠열 속

의 이동방향은 겨울에 서로 상반되나 여름에는 두 열속이 모두 같은 방향으로 지표로부터 대기로 이동된다. 이와 같이 Bowen 비 ( $B$ )로부터 구한 현열 속과 잠열 속은 월에 따라 설명이 불가능할 정도로 불안정한 값을 나타내고 있다. 그러므로 세종기지에서 에너지 평형을 평가하기 위하여 장기간의 현열 속과 잠열 속의 관측 자료가 필요함을 알 수 있다. 그러므로 이 연구에서는 식(20)의 Bowen 비  $B^*$ 를 선택하고  $SH$ 와  $LH$ 를 구하였다.

세종기지의 에너지 평형 성분 ( $R_N, SH, LH, G$ )의 연 변화를 Fig. 12에 표시하였다. 이 그림에서 보는 바와 같이  $R_N$ 에서 지표는 여름(9월-3월)에 복사 에너지의 과잉을 나타내고 겨울(4월-8월)에 복사 에너지의 부족을 나타낸다.  $R_N$ 의 월 최대값을 12월에  $82.7 \text{ Wm}^{-2}$ , 월 최소값은 6월에  $-23.7 \text{ Wm}^{-2}$ 로 연평균  $13.0 \text{ Wm}^{-2}$ 로 나타났다. 현열 속과 잠열 속은 여름에 지표로부터 대기로 모두 상향되고 겨울에는 대기로부터 지표로 모두 하향한다.  $SH$ 와  $LH$ 의 월 최대값은 12월의  $61.5 \text{ Wm}^{-2}$ ,  $20.9 \text{ Wm}^{-2}$ 로 나타났고 월 최저값은 6월의  $-12.1 \text{ Wm}^{-2}$ ,  $-10.7 \text{ Wm}^{-2}$ 로 각각 나타났다. 그리고 연평균  $SH$ 와  $LH$ 가  $9.5 \text{ Wm}^{-2}$ 와  $4.3 \text{ Wm}^{-2}$ 로 각각 나타났다. 지중열 속은 4월-10월 사이에 지중에서 지표로, 11월-3월 사이에는 지표로부터 지중으로 전달된다. 이들 양은  $1 \text{ Wm}^{-2}$ 이하로 에너지 평형에서 무시할 정도로 적다. King *et al.* (1996)에 의하면 겨울(6월-7월)의 남극점에서는  $R_N$ 이  $-20.6 \text{ Wm}^{-2}$ ,  $SH$ 가  $18.7 \text{ Wm}^{-2}$  그리고  $G$ 는  $1.9 \text{ Wm}^{-2}$ 로 나타났으며 세종기지의 동남쪽에 위치한 Halley 기지 ( $75^{\circ}\text{S}, 26^{\circ}\text{W}$ )에서는  $R_N$ 이

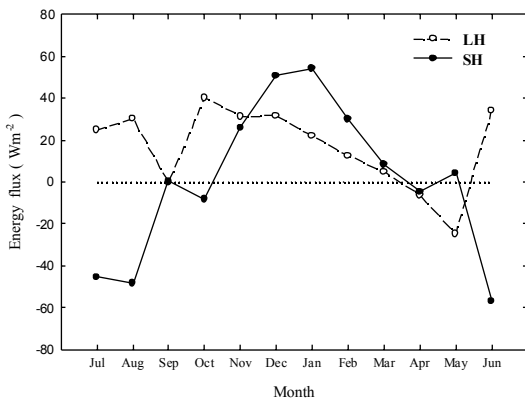


Fig. 11. Annual cycle of sensible heat flux (SH) and latent heat flux(LH) from the Bowen ratio, B (Eq. 3-19).

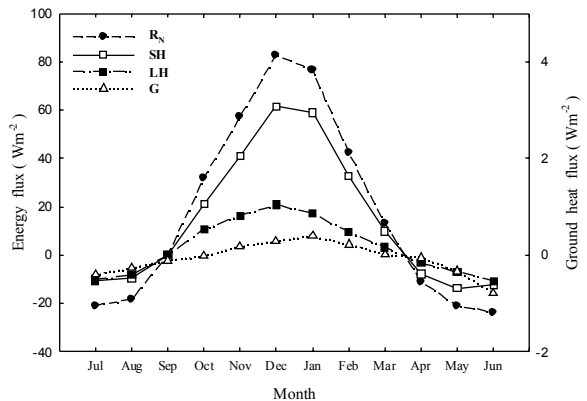


Fig. 12. Annual cycle of energy balance components for the King Sejong Station.

-22.03 Wm<sup>-2</sup>, SH가 11.64 Wm<sup>-2</sup>, LH가 0.79 Wm<sup>-2</sup> 그리고 G는 2.33 Wm<sup>-2</sup>로 각각 밝힌 바 있다. 이와 같이 세종기지의 순 복사 속은 두 다른 지점과 비슷한 값을 보였으나 다른 성분은 차이가 있음을 알 수 있다.

이 연구에서 구한 월 평균 현열 속(SH)은 월 평균 기온과 지면 온도차 ( $\Delta T_m = T_a - T_s$ )에 비례함을 Fig. 13a에서 알 수 있다. 이들 두 성분의 관계식은 유의 수준  $P < 0.001$ 로 유의하며 다음과 같다.

$$\begin{aligned} SH &= -21.81 \times \Delta T_m + 11.16 \\ R^2 &= 0.91 \end{aligned} \quad (23)$$

이와 같이 현열 속은 온도차에 의하여 91%를 설명할 수 있다. 이 온도차  $\Delta T_m$ 은 식(7)에서 월의 2차 함수로 표시되었다. 현열은 이 온도차뿐만 아니라 풍속에도 비례한다. 이와 같이 현열 속은 이론적으로 공기 역학적 방법들 (bulk aerodynamic formulas)의 일반식 (예: Hartman, 1994; Sellers, 1965)은 다음과 같다.

$$SH = C_p \rho C_{DH} U (T_s - T_a) \quad (24)$$

식(24)에서  $C_p$ 는 정압비열,  $\rho$ 는 공기밀도,  $C_{DH}$ 은 기온에 대한 열 전달계수 (현열 전달에 대한 항력계수) 그리고  $U$ 는 풍속을 각각 의미한다. 세종기지에서 월별 평균 풍속 (고도 10 m)은 월에 따라 7 ms<sup>-1</sup> (12-3월)~9 ms<sup>-1</sup> (8-10월)로 큰 차이가 없다. 그러나 풍속  $U$ 를 고려하여 Fig. 13b에 나타내고 유의 수준  $P < 0.001$ 로 식(23)을 다음과 같이 구하였다.

$$\begin{aligned} SH &= -2.92 \times U \Delta T_m + 13.16 \\ R^2 &= 0.91 \end{aligned} \quad (25)$$

이 식은 풍속  $\bar{U} \approx 8 \text{ ms}^{-1}$ 로 월에 따라 큰 변화가 없으므로 식(23)과 거의 같다. 식(24)에서 현열의 항력 전달 계수  $C_{DH}$ 는 월에 따라 9월 ( $1.1 \times 10^{-5}$ )을 제외하고  $1 \times 10^{-3} \sim 5.5 \times 10^{-3}$ 을 나타내고 특히 여름 (12-3월)에  $3 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-3}$ 으로 안정한 값을 갖는다. 9월은 순 장단파 복사 속이 거의 0에 가깝고 따라서 현열 속도 또한 거의 0에 가깝기 때문이다. Schlatter (1972)는 수치 실험에서 남극점의 현열을 계산할 때 대기 안정도 중립 상태에 대하여  $C_{DH} = 1.5 \times 10^{-3}$  (풍속 고도  $Z_1 = 4 \text{ m}$ )의 값을 사용하였다. 이와 같은 결과는 이 연구에서 구한 현열 속이 타당성 있는 값을 설명하여 준다. 그러나 세종

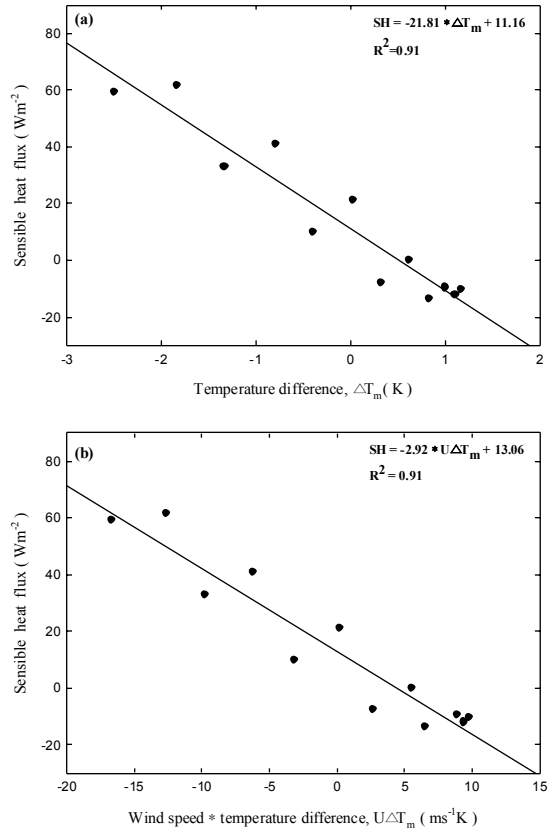


Fig. 13. Relationship between sensible heat flux and (a) temperature difference, (b) wind speed · temperature difference.

기지의 에너지 평형을 보다 정확하게 평가하기 위해서는 현열 속 성분의 연구가 더 이루어져야 한다.

Fig. 12로부터 겨울 (4-9월)과 여름 (10-3월)을 크게 나누고 연 평균과 함께 에너지 평형의 모식도를 Fig. 14에 표시하였다. 이 그림에서 지표는 겨울에 부족한 순 장단파 복사 에너지 15 Wm<sup>-2</sup>를 현열 속 9 Wm<sup>-2</sup>와 잠열 속 6 Wm<sup>-2</sup>로 보충하고 여름에 과잉된 순 장단파 복사에너지 51 Wm<sup>-2</sup>를 현열 속 38 Wm<sup>-2</sup>와 잠열 속 13 Wm<sup>-2</sup>로 지표로부터 대기로 방출하고 있다. 연평균 지표는 18 Wm<sup>-2</sup>의 복사 에너지의 과잉이 있으나 난류 열속 (현열 속 14 Wm<sup>-2</sup>, 잠열 속 3 Wm<sup>-2</sup>)에 의하여 지표로부터 대기로 전달된다. 이와 같이 세종기지에서의 표면에서 복사 에너지의 과부족은 주로 현열과 잠열의 난류 속에 의하여 에너지 평형을 유지하고 있음을 알 수 있다.

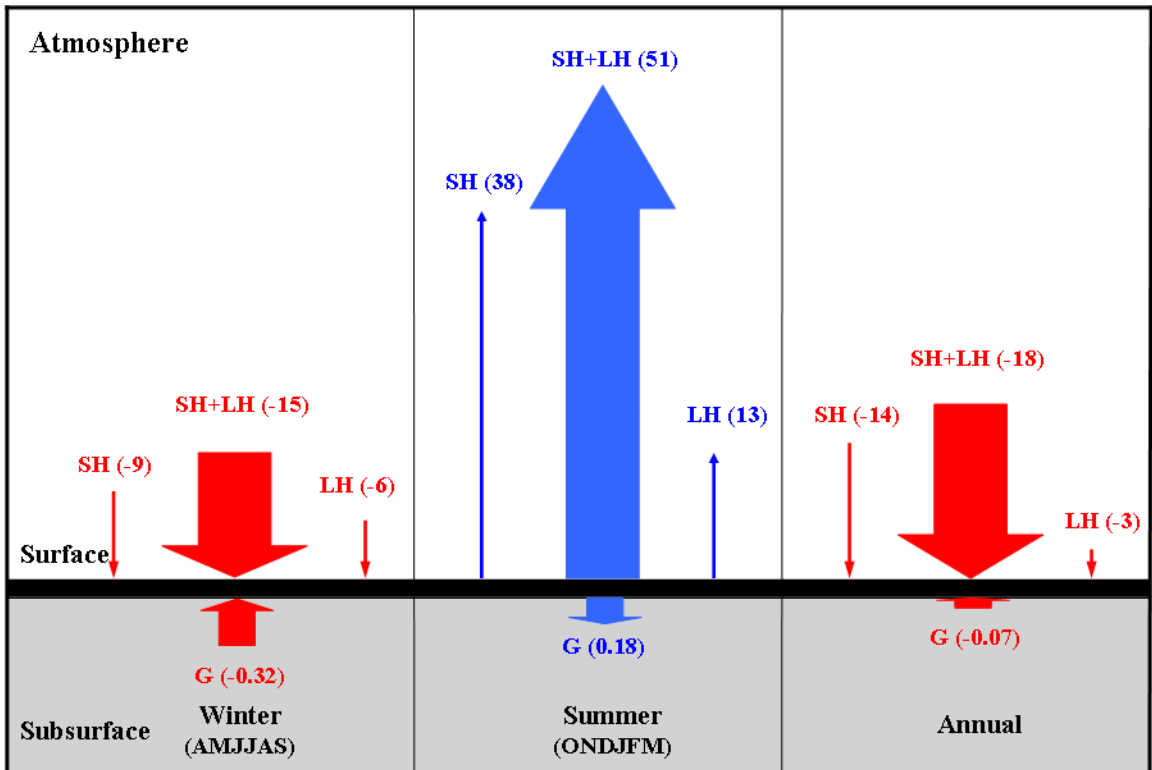


Fig. 14. Schematic representation of the surface energy balance at King Sejong Station. Components are shown as they are directed on average (1996-2004). Number in parenthesis means energy flux (Wm<sup>-2</sup>).

#### 4. 요약 및 결론

이 연구에서 하향 단파 복사 속과 하향 장파 복사 속은 1996년부터 2004년까지 9년간 관측한 값을 사용하였다. 지표 알베도는 세종기지에서 서쪽으로 약 10 km 떨어진 Great Wall 중국 관측소의 관측값을 세종기지의 기온 함수로 표시하여 구하였다. 상향 장파 복사 속은 지중 온도의 관측값을 사용하여 지표면 온도를 구하여 Stefan-Boltzmann 법칙으로 계산하였다. 그리고 Bowen 비 (B)는 남극 대륙의 7개 관측소에서 구한 B-기온 관계식을 사용하여 구한 후 이 B로부터 현열 속과 잠열 속을 계산하였다. 이와 같은 방법으로 세종기지의 에너지 평형의 각 성분을 월별로 평가하였다. 하향 단파 복사 속의 월 최대값은 12월에 188 Wm<sup>-2</sup>, 월 최소값은 6월에 8 Wm<sup>-2</sup>로 크게 변하고, 연평균 값은 81.2 Wm<sup>-2</sup>로 대기 밖의 36.7%에 불과하다. 이들 값은 세종기지가 남극 전선이 형성되고 있는 지역이므로 운량이 연평균 6.8 oktas로 남극 대륙의 다른

지역에 비하여 적다. 알베도는 1월과 2월에 최소 0.30, 6월과 7월에 최대 약 0.60을 나타내었다. 이로 인해 지면의 순 단파 복사 속은 12월과 1월에 최대 117 Wm<sup>-2</sup>, 6월에 최소 3 Wm<sup>-2</sup>로 적으며 연평균 43 Wm<sup>-2</sup>로 나타났다. 하향 장파 복사 속은 월 최대값이 1월에 298 Wm<sup>-2</sup>, 최소값이 8월에 263 Wm<sup>-2</sup>로 월별 변화가 비교적 적으며 연평균 값은 278 Wm<sup>-2</sup>로 나타났다. 그리고 하향 장파 복사 속은 기온과 비습에 강하게 의존하고 있으며 이들은 전 분산의 74%, 79%를 각각 설명하고 있다. 순 장파 복사 속은 1월에 최대 40 Wm<sup>-2</sup>, 7월에 25 Wm<sup>-2</sup>로 연평균 값 30 Wm<sup>-2</sup>였다. 순 장단파 복사 속은 월에 따라 4월과 8월 사이에 11-24 Wm<sup>-2</sup>의 음의 값을 나타내고 10월과 3월 사이에 32-83 Wm<sup>-2</sup>의 양의 값을 보였다. 이와 같이 겨울에는 지표에서 복사 에너지의 부족을, 여름에는 복사 에너지의 과잉을 나타내었다. 지표면은 이 복사 에너지의 부족량과 과잉량을 주로 현열과 잠열의 난류 속에 의하여 에너지 평형을 유지하였다. 현열 속은 기온과 지면 온도와의 차에 비

례하고 이 차는 월의 2차 함수로 표시되었다. 따라서 이 차는 지면온도가 기온보다 1월에 2.5°C 더 높고 7월에 1.2°C 더 낮았다. 지중열 속은 에너지 평형에 무시할 정도로 적다. 세종기지의 에너지 평형을 보다 정확하게 평가하기 위해서는 상향 단파 복사 속과 상향 장파 복사 속의 측정이 요구된다. 따라서 현열 속, 잠열 속 그리고 지중열 속을 위해 장기적인 측정 자료가 필요하다.

## 사 사

본 연구는 극지연구소 기본 연구사업 “극지 대기 및 기후변화 연구 (PE06030)”와 2단계 두뇌한국 21 사업에 의해 지원되었습니다.

## 참고문헌

- 기상청, 2001 : 한국 기후표(1971-2000). 기상청, 632pp.
- 조희구, 이방용, 이준석, 박선우, 2001 : 한국 전역의 지표 흥반 자외선 복사의 계절기후. *한국기상학회지*, **37**, 525-539.
- 조희구, 이태영, 1975 : 한국 전역의 열수지 연구. *한국기상학회지*, **11**, 11-20.
- Bian, L., L. Lu, P. Jia, X. Zheng, and Y. Wang, 1995 : Chinae Data Report No.9. Polar Research Institute of China, 270pp.
- Bintanja, R., 2000 : Surface heat budget of Antarctic snow and blue ice : Interpretation of spatial and temporal variability. *J. Geophys. Res.*, **105**, 24387-24407.
- \_\_\_\_\_, and M. V. D. Broeke, 1995 : The surface energy balance of Antarctic snow and blue ice. *J. Appl. Meteor.*, **34**, 902-926.
- Broeke, M. V. D., C. Reijmer and R. V. D. Wal, 2004 : Surface radiation balance in Antarctica as measured with automatic weather stations. *J. Geophys. Res.*, **109**, D09103.
- Brunt, D., 1932 : Notes on radiation in the atmosphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **58**, 389-420.
- Choi, T., 2005 : Sensible and latent heat flux at King Sejong Station, in private communication.
- Chou, M. D., M. J. Suarez, X. -Z. Liang, and M. M. -H. Yan, 2001 : A thermal infrared radiation parameterization for atmospheric studies. NASA Tech. Memo. 104606, **19**, 56pp.
- Dutton, E. G., R. S. Stone, D.W. Nelson and B. G. Mendonca, 1990 : Recent interannual variations in solar radiation, cloudiness, and surface temperature at the South Pole. *J. Climate*, **4**, 848-858.
- Hartman, D. L., 1994 : *Global Physical Climatology*, Academic Press, 411 pp.
- King, J. C., P. S. Anderson, M. C. Smith and S. D. Mobbs, 1996 : The surface energy and mass balance at Halley, Antarctica during winter. *J. Geophys. Res.*, **101**, 19, 119-19128.
- Li, Z., L. Moreau and A. Arking, 1997 : On solar energy disposition : A perspective from observing and modeling. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 53-70.
- Reijmer, C. H., and J. Oerlemans, 2002 : Temporal and spatial variability of the surface energy balance in Dronning Maud Land, East Antarctica. *J. Geophys. Res.*, **107**, 4759.
- Sellers, W. D., 1965 : *Physical Climatology*. The Univ. of Chicago Press, 272pp.
- Schlatter, T. W., 1972 : The local surface energy balance and subsurface temperature regime in Antarctica. *J. Appl. Meteor.*, **11**, 1048-1062.
- Studinger, M., 2005 : Science opportunities for a long-range Antarctic research aircraft. *EOS*, **86**, 39-40.
- Wiscombe, W. J., and S. G. Warren, 1980 : A model for the spectral albedo of snow. I: Pure snow. *J. Atmos. Sci.*, **37**, 2712-2733.