

서남극 세종과학기지 주변 토양의 여름철과 겨울철의 지온특성 비교

전우현^{1,2} · 이진용^{1,2,*} · 임현수³ · 윤호일⁴

¹강원대학교 지질학과

²강원대학교 크리티컬존선도연구실

³부산대학교 지질환경학과

⁴한국해양과학기술원 부설 극지연구소

요 약

남극 킹조지섬 세종과학기지 주변 4개 관측지점에서 토양온도를 측정하였다. 토양온도를 이용하여 자기상관 분석, 스펙트럼 밀도분석 및 교차상관분석을 수행하였고 여름철과 겨울철의 토양온도 특성을 비교하였다. 또한 열확산계수를 산정하고 열류량 및 활동층의 두께를 계산하였다. 토양온도 측정 로거는 깊이 10, 20, 30 cm 구간에 설치하였으며 2010-2011년 약 1년간 4시간 간격으로 토양온도를 측정하였다. 깊이별 토양온도는 여름철의 경우 0°C에서 13.0°C의 범위를 보이며 겨울철에는 -16.5°C에서 -2.0°C 사이로 측정되었다. 일변화가 크며 대기 온도의 영향을 많이 받는 10 cm 보다 30 cm 깊이에서 온도변화가 적었다. 자기상관분석결과 토양 깊이가 깊어 질수록 지연시간도 길어졌으며 여름철보다 겨울철에 지연시간이 더 길었다. 스펙트럼 밀도분석 결과 전체기간 모든 관측지점에서 24시간의 주기성이 나타났으며 여름철보다 겨울철에 긴 주기성이 나타났다. 열류량은 토양 온도가 하강하는 등온기와 결빙기에는 음의 값을, 온도가 상승하는 해빙기와 온난기에는 양의 값을 보였다. 또한 활동층의 두께는 0.43~0.77 m의 범위를 보였고 평균 0.59 m로 계산되었으며 이는 기존에 보고된 값과 일치한다.

주요어: 남극, 활동층, 시계열 분석, 토양온도, 열류량

Woo-Hyun Jeon, Jin-Yong Lee, Hyoun Soo Lim and Ho Il Yoon, 2016, Comparison of thermal characteristics of soil in austral summer and winter at King Sejong Station, King George Island, Antarctica. *Journal of the Geological Society of Korea*. v. 52, no. 6, p. 901-915

ABSTRACT: The soil temperatures was monitored at 4 sites near the King Sejong Station, King George Island, Antarctica. The thermal characteristics of soil were evaluated by conducting auto-correlation, spectral density analysis, and cross-correlation and comparing characteristics of soil in summer and winter seasons using the measured soil temperatures. Also, thermal diffusion coefficient and the active layer thickness were calculated. The soil temperature loggers were installed at depths of 10, 20, and 30 cm and measured every four hours in 2010-2011. The soil temperatures in different depths range from 0 to 13.0°C in summer season and -16.5 to -2.0°C in winter season. Being more affected by air temperature, soil temperature variation was more larger at 10 cm than 30 cm. The auto-correlation of soil temperature showed longer lag times at deeper depth and those at winter than summer. All of the spectral density functions of the soil temperatures indicated diurnal periodicity, and winter season indicated longer periodicity than summer season. The obtained heat flow showed negative values during isothermal and freezing periods, but positive during thawing and warming periods. The maximum estimated active layer thickness in the study area range from 0.43 to 0.77 m with average of 0.59 m, which is consistent with previous reports.

Key words: Antarctica, active layer, time series analysis, soil temperature, heat flux

(Woo-Hyun Jeon and Jin-Yong Lee, Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea; Critical Zone Frontier Research Laboratory, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea; Hyoun Soo Lim, Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea; Ho Il Yoon, Korea Polar Research Institute (KOPRI), Incheon 21990, Republic of Korea)

* Corresponding author: +82-33-250-8551, E-mail: hydrolee@kangwon.ac.kr

1. 서론

남극 지역에서는 지질, 해양, 기후, 기상 및 생태 등 다양한 분야의 연구가 활발히 이루어지고 있으며 최근에는 기후변화에 따른 동토층(permafrost)의 변화에 대한 연구가 진행되고 있다(Han *et al.*, 2005, 2006; Kim *et al.*, 2007; Wu *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2016). 지표면과 토양온도의 변화는 태양복사와 대기로부터 열전달에 의한 영향이 크다. 극지(남극 및 북극)에서 지표와 활동층(active layer)의 온도변화는 대기온도에 따라 민감하게 반응하며 기후변화의 영향으로 활동층의 면적이 변하고 있다(Adlam *et al.*, 2010; Iijima *et al.*, 2010). 이러한 대기온도의 변화는 직접적인 가열 및 냉각에 의한 변화뿐만 아니라 북서풍일 때 증가하고 남동풍일 때 감소하는 것처럼 풍향 변화에 의해서도 간접적으로 영향을 받는다(Lee *et al.*, 2003).

또한 토양온도 변화는 대기온도, 태양복사, 운량, 토양습도, 공극률 및 눈 두께 등의 영향을 받아 계절에 따라 열확산율이 달라지며 일반적으로 여름철보다 겨울철에 열확산율이 더 높다(Han and Jung, 1994; Pringle *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2007; Ikard *et al.*, 2009). 극지에서의 계절은 온도변화에 따라 해빙기(thawing period), 등온기(isothermal period), 결빙기(freezing period) 및 온난기(warming period)로 구분된다(Roth and Boike, 2001; Han *et al.*, 2005, 2006). 동토층과 활동층은 열류량에 의해 조절되며 전도와 상전이에 의한 열의 발생 및 유체의 이동 기작 등에 의해 열전달이 결정된다(Han *et al.*, 2005, 2006). 최근 Lee *et al.* (2016)은 남극 세종과학기지 주변 토양온도와 수온 자료를 이용하여 짧은 기간(15일) 동안 시계열 분석, 열확산율 및 활동층 깊이 등을 연구하였다.

이 연구에서는 2010년 12월 23일부터 2011년 11월 28일까지 남극 세종과학기지 주변 지역의 깊이별 토양 온도 자료를 이용하여 여름철과 겨울철의 토양 온도 특성을 비교하였으며 자기상관분석, 스펙트럼 밀도분석 및 교차상관분석을 수행하였다. 그리고 깊이별 토양온도에 대해 열확산계수를 산정하고 열류량 및 활동층 두께를 계산하였다. 또한 기상자료의 기초통계 자료를 이용하여 여름철과 겨울철간의 계절 특성을 비교하였다.

2. 연구방법

2.1 연구지역

연구지역은 남극반도 북서쪽 남셰틀랜드군도의 킹조지섬 바톤반도에 위치한 남극 세종과학기지 주변 지역이다(그림 1). 킹조지섬은 길이 72 km, 폭 27 km, 면적 1,338 km²로 남셰틀랜드군도의 가운데에 위치한 가장 큰 섬이다(Chang, 1997). 세종과학기지는 킹조지섬 남서쪽에 위치한 바톤반도의 북서쪽 끝 연안에 위치한다. 세종과학기지가 위치하는 바톤반도의 하부는 화산쇄설성 퇴적암으로 이루어진 세충층이며 이를 염기성의 용암류가 부정합으로 덮고 있다(Yoo *et al.*, 2001; Chang *et al.*, 2003). 1988년부터 2004년까지 보고된 기상자료에 의하면 연 평균 기온은 -1.6°C, 연 평균 풍속은 8.0 m/s이고 연 강수량은 484 mm 이다(Choi *et al.*, 2006). 남반구에 위치한 세종과학기지는 북반구의 계절과 반대이며 월평균 대기온도는 4월부터 11월까지 영하이고 나머지 달은 영상이다(Chang *et al.*, 1998).

2.2 토양온도 및 기상자료 수집

세충과학기지 생활관동에서 동쪽방향으로 2지점(SJL1과 SJL2)과 서쪽방향으로 2지점(SJL3과 SJL4)에 토양온도로거(iButton, Dallas Semiconductor, USA, accuracy=0.5°C, resolution=0.0625°C)를 50 mL 유리병에 토양과 함께 넣어 10, 20, 30 m 깊이별로 설치하였다(그림 1). 토양온도로거를 유리병에 넣었을 때 발생하는 토양온도 변화의 시간지연 및 감쇠 효과는 크지 않은 것으로 보고되었다(Lee *et al.*, 2013). 토양온도는 2010년 12월 23일부터 2011년 11월 28일까지 4시간 간격으로 측정하였다. 기상자료는 2010년 12월 1일부터 2011년 12월 31일까지 10분 간격으로 측정된 풍향 및 풍속, 대기온도, 상대습도, 대기압, 강수량 및 태양복사 자료를 이용하였다. 이렇게 관측한 깊이별 토양온도와 기상자료를 기초통계 처리하였다. 지온의 변화과정은 크게 해빙기, 등온기, 결빙기 및 온난기 4개의 구간으로 구분할 수 있는데 2010년 12월 26일부터 2011년 2월 26일까지를 여름철(해빙기), 2011년 6월 30일부터 8월 31일까지를 겨울철(결빙기)로 구분하였다(Han *et al.*, 2005; Cho *et al.*, 2008). 또한 눈 두께 자료는 신적설량과 구적설량 자료를 이용하였으며 일강설량 자료를 이용하였다.

2.3 시계열 분석

연속적인 자료와 주기성을 가지는 자료를 통계적인 방법으로 해석하기 위해 시계열 분석에서 일반적으로 많이 사용하는 자기상관(auto-correlation)분석과 교차상관(cross-correlation)분석을 수행하였다(Larocque *et al.*, 1998; Lee and Lee, 2002; Chae *et al.*, 2008). 자기상관분석과 스펙트럼 밀도분석을 깊이별 토양온도 자료에 적용하였다. 이 방법들은 연속적인 깊이별 토양온도 자료를 시간과 주파수 영역으로 변환하여 정량화할 수 있는 분석 방법이다(Angelini, 1997; Lee and Lee, 2002; Choi and Lee, 2010). 시계열 자료가 약한 자기상관성과 짧은 기억효과를 가지면 자기상관함수는 기울기가 급해져 짧은 지연시간 안에 0에 수렴하고 반대로 강한 자기상관성과 긴 기억효과를 가지면 자기상관함수는 기울기가 완만해져 긴 지연시간 안에 천천히 감소하는 경향을 보인다(Larocque *et al.*, 1998; Lee and Lee, 2002). 이

러한 시계열 자료의 시간영역을 푸리에 변환을 통해 주파수영역으로 바꾼 스펙트럼 밀도함수를 이용하여 시계열 자료의 주기성을 해석할 수 있다.

교차상관분석은 대기온도와 깊이별 토양온도에 대하여 수행하였다. 교차상관분석에서는 두 개의 인자 중 영향을 주는 입력(input)값과 영향을 받는 출력(output)값이 있는데 대기온도를 입력값, 깊이별 토양온도를 출력값으로 설정하였다. 교차상관함수는 -1에서 1 범위를 가지며 최대값에 도달할 때까지 소요되는 시간을 지연시간이라 한다. 이 지연시간이 짧으면 두 인자간에 영향을 주고받는 시간이 빠르며 1에 가까울수록 영향이 크게 나타난다(Lee *et al.*, 2005).

2.4 열류량과 활동층 깊이

세종과학기지 주변 활동층의 열적 특성을 파악하기 위해 약 1년 동안 관측한 깊이별 토양온도 자료를 이용하여 온도, 열류량 및 활동층의 깊이를 계산하

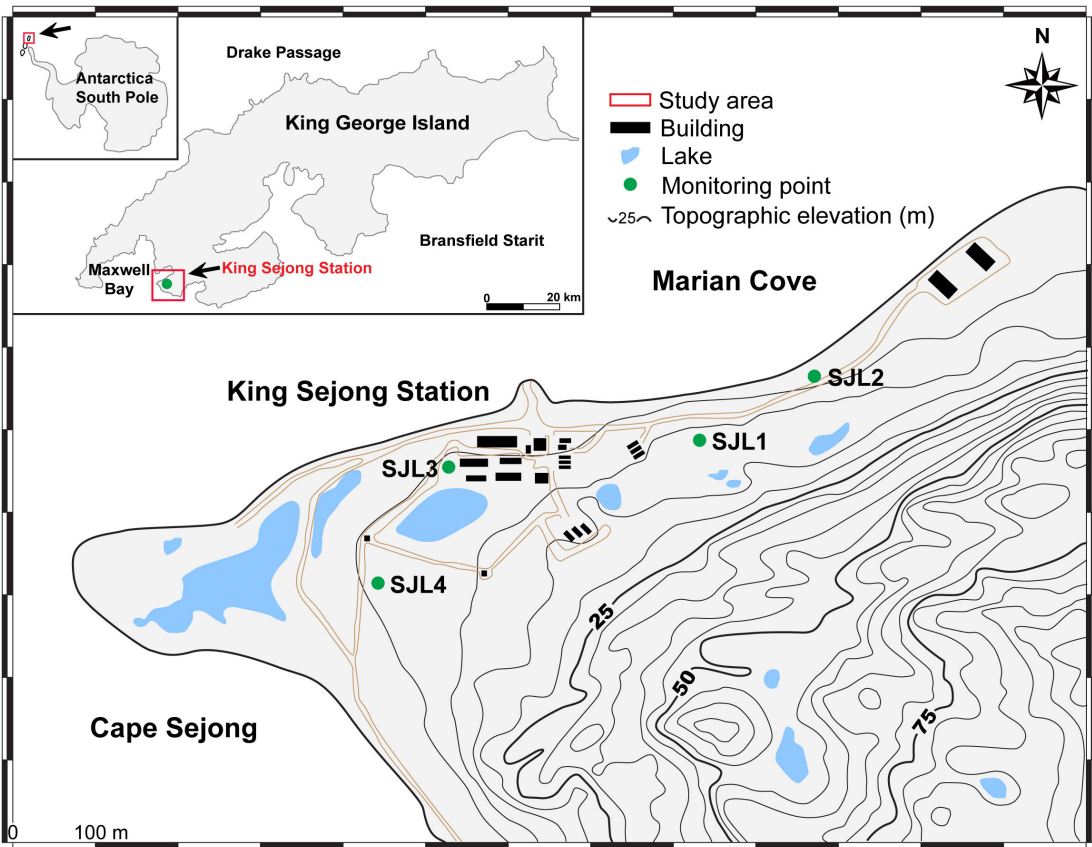


Fig. 1. Location map of the study area showing the monitoring sites for soil temperatures (SJL1 to SJL4).

Table 1. Basic statistics of air temperature, relative humidity, air pressure and solar radiation for summer (December 26, 2010 to February 26, 2011) and winter (June 30, 2011 to August 31, 2011) seasons, which were measured every 10 minutes.

Parameters	Average		Maximum		Minimum		Standard deviation	
	S	W	S	W	S	W	S	W
Air temperature (°C)	1.8	-8.6	9.1	2.9	-1.8	-21.1	1.3	5.6
Relative humidity (%)	85.8	86.6	97.8	97.4	45.6	40.3	8.8	7.3
Air pressure (hPa)	989.7	1000.2	1010.2	1026.8	959.7	969.3	8.2	11.7
Solar radiation (W/m ²)	149.0	24.7	1159.0	377.9	0	0	198.4	48.8

*S=Summer, W=Winter

였다. 열에너지 보존법칙과 푸리에의 법칙으로부터 아래와 같은 열전도방정식을 구할 수 있다(Han *et al.*, 2005, 2006).

$$\nabla^2 T + \frac{A}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

T 는 온도, A 는 열생산율(heat production rate), k 는 열전도도(thermal conductivity), α 는 열확산도(thermal diffusivity), c 는 열용량(heat capacity)이며 $\alpha = k/c$ 이다. 식(1)의 해는 표면온도 함수와 아래 식의 전달함수 컨벌루션으로 구할 수 있다(Carlsaw and Jaeger, 1959).

$$T(z, t) = \int_0^t T(0, \tau) f_T(t - \tau, z) d\tau \quad (2)$$

$$f_T(t, z) = \frac{z}{2[\pi\alpha t^3]^{1/2}} \exp\left(-\frac{z^2}{4\alpha t}\right) \quad (3)$$

열확산계수를 가정하고 식(3)에 대입한 후 다시 식(3)을 식(2)에 대입하여 온도분포를 구할 수 있다. 이렇게 계산한 온도와 실제 측정온도 사이의 RMSE (Root Mean Square Error)를 계산하여(열확산계수를 변경하여 RMSE를 최소화함) 열확산계수를 결정할 수 있다. 여기서는 열확산계수 추정을 위해 전체 모니터링 구간 중에서 중반 100~170일(2011.04.01~2011.06.10) 구간을 이용하였는데 이때는 토양온도가 모두 0°C 이하이다. 이는 식(2)의 컨벌루션에서 초기 시작온도가 0°C라는 것의 영향을 최소화하고 안정된 계산값을 보이는 구간으로 잡았으며 영하의 온도로 주로 전도에 의한 열이동을 잘 설명해주기 때

문이다(Han *et al.*, 2005, 2006). 그리고 동토층의 평균적인 열용량($c=2.2 \times 10^6$ J/m³K)을 이용하여 열류량을 계산할 수 있다.

한편 활동층의 두께를 계산하기 위해 4개 관측 지점의 30 cm 깊이에서 측정된 연 최고 온도자료를 이용하였다(Gooseff *et al.*, 2007; Ikard *et al.*, 2009). SJL1 관측지점은 2011년 01월 16일, 다른 관측지점은 2011년 1월 15일에 연 최고 온도가 측정되었다.

3. 결과 및 토의

3.1 기상측정

기상자료를 여름철과 겨울철로 나누어 통계처리하였다(표 1). 여름철의 대기온도는 평균 1.8°C, 최대 9.1°C, 최소 -1.8°C를 보였고 겨울철은 평균 -8.6°C, 최대 2.9°C, 최소 -21.1°C를 보였다(그림 2a). 1988년부터 2006년도까지 측정된 기상자료에 의하면 여름철 평균 1.7°C와 겨울철 평균 -5.1°C를 보여 연구기간 동안 겨울철 평균이 -3.4°C 더 낮았다(Cho *et al.*, 2008). 상대습도는 여름철 평균 85.8%와 겨울철 평균 86.6%로 두 계절 간 큰 차이가 없었다(그림 2b). 대기압은 여름철 평균 989.7 hPa, 겨울철 평균 1000.2 hPa로 여름철 보다 겨울철 대기압이 평균 10.5 hPa 더 높았다(그림 2c). 태양복사는 여름철 평균 149.0 W/m²이고 겨울철 평균 24.7 W/m²로 겨울철보다 여름철이 평균 124.3 W/m² 더 높았다. 여름철 강수량은 101.6 mm이었고 겨울철 강수량은 2.7 mm로 2011년 전체 강수량 593.2 mm 중 여름철 강수량이 17%에 해당하지만 강수량은 겨울철을 제외한 대부

분의 날(강수일수 170일)에 눈 또는 비의 형태로 내렸다(그림 2d). 연구기간 동안 풍향은 대체로 북서풍과 동풍이었으며 여름철 풍향의 빈도가 높은 구간은

북서풍과 동풍 순이었고 겨울철은 북서풍, 북동풍 및 동풍 순이었다(그림 3). 그리고 남풍의 빈도가 가장 낮았다. 여름철 풍속 평균은 8.0 m/s이었고 겨울철

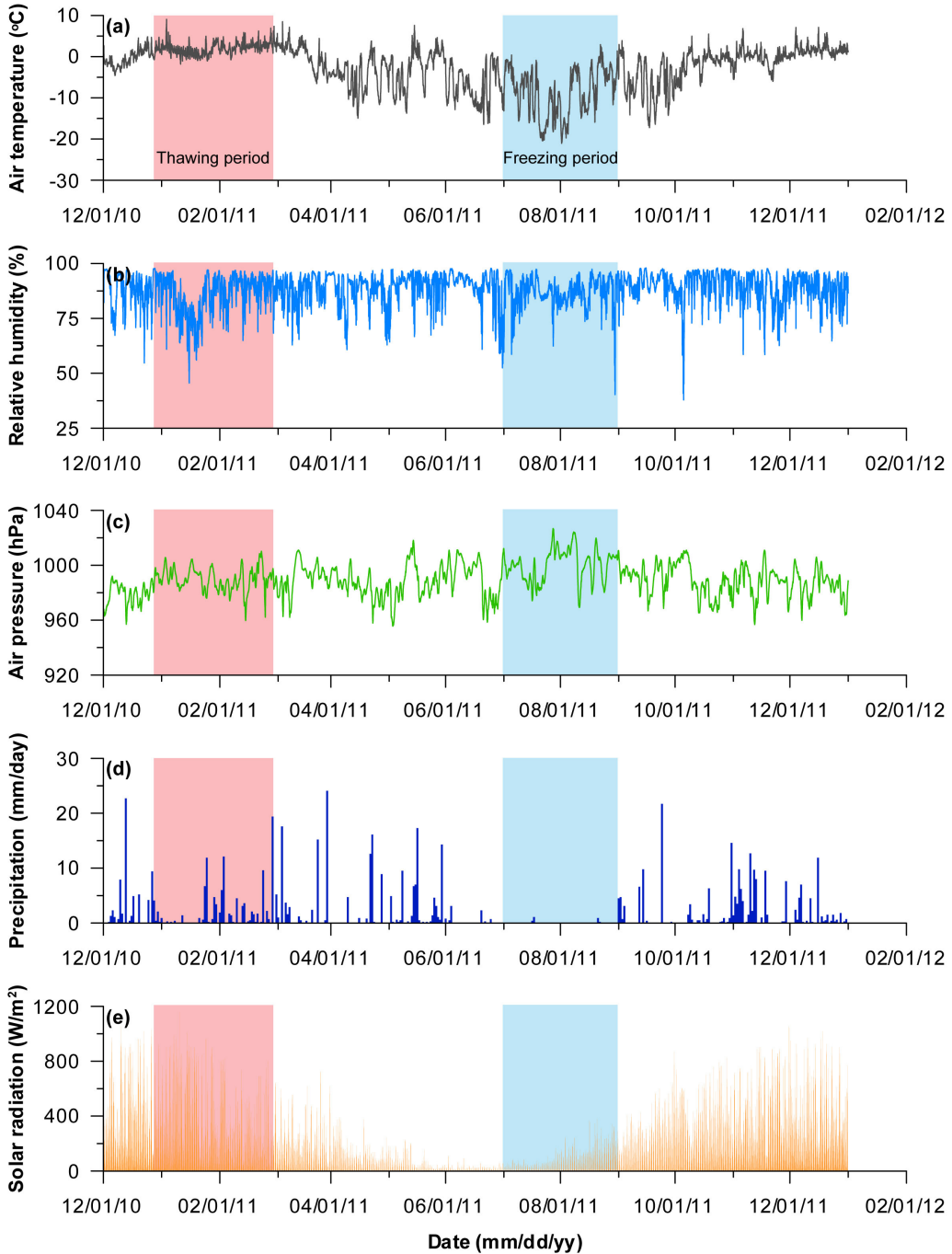


Fig. 2. Air temperature, relative humidity, air pressure, precipitation, and solar radiation measured at the King Sejong Station for December 1, 2010 to December 31, 2011.

은 6.4 m/s이었다.

3.2 깊이별 토양온도

세종과학기지 주변 활동층에서 여름철과 겨울철에 측정된 깊이별 토양온도의 평균값, 최대값, 최소값 및 표준편차를 표 2에 정리하였으며 시간에 따른 토양온도의 변화를 그림 4에 나타내었다. SJL1의 깊이별 토양온도는 여름철에 0.5°C에서 9.0°C, 겨울철에는 -16°C에서 -2.0°C의 범위를 갖는다. SJL2는 여름철에 0.5°C에서 13.0°C, 겨울철에는 -6.0°C에서 -2.0°C

의 범위를 갖는다. SJL3은 여름철에 0°C에서 11°C, 겨울철에는 -6.5°C에서 -0.5°C의 범위를 갖는다. SJL4의 토양온도는 여름철에 0°C에서 8.5°C, 겨울철에는 -16.5°C에서 -3.5°C의 범위를 갖는다(표 2). 여름철에는 모든 관측지점에서 0°C 이상의 값을 보였으며 겨울철에는 -0.5°C 이하 값을 보였다.

깊이별 토양온도 변화는 일변화가 크고 여름철의 경우 지표에 가까울수록 높지만 반대로 겨울철에는 지표에 가까울수록 낮게 관측되었다(그림 4). 이는 지표에 가까울수록 기온과 태양복사의 영향을 많이

Table 2. Basic statistics of soil temperatures (depth of 10, 20, and 30 cm) for summer (December 26, 2010 to February 26, 2011) and winter (June 30, 2011 to August 31, 2011) seasons in the study area, which were measured every 4 hours.

Site	Depth (cm)	Average		Maximum		Minimum		Standard deviation	
		S	W	S	W	S	W	S	W
SJL1	10	3.6	-8.5	9.0	-2.0	1.0	-16.0	1.3	3.4
	20	3.0	-8.5	6.5	-3.0	0.5	-15.0	0.9	3.0
	30	2.3	-8.5	4.5	-4.0	0.5	-14.0	0.6	2.6
SJL2	10	3.9	-4.7	13.0	-2.5	0.5	-6.5	1.9	1.1
	20	3.7	-4.4	8.5	-2.5	1.0	-6.0	1.3	1.0
	30	3.3	-4.0	5.5	-2.0	1.5	-5.5	0.8	0.9
SJL3	10	3.1	-3.7	11.0	-1.5	0	-6.5	1.8	1.3
	20	2.4	-2.6	4.5	-0.5	0	-4.5	0.7	1.1
	30	2.7	-3.3	7.0	-1.0	0	-5.5	1.1	1.2
SJL4	10	2.8	-9.2	8.5	-3.5	0	-16.5	1.5	3.2
	20	2.8	-8.5	6.0	-3.5	0.5	-15.0	0.9	2.8
	30	2.0	-8.2	3.5	-4.0	0.5	-13.5	0.6	2.4

*S=Summer, W=Winter

*Unit: °C

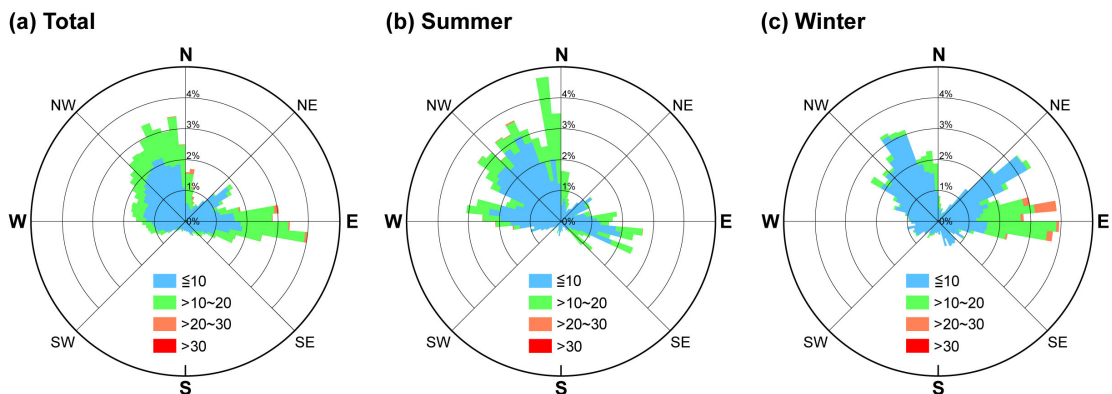


Fig. 3. Observed wind speeds and wind directions at the King Sejong Station (Unit: m/s).

받기 때문에 토양온도 변화가 크고 깊이가 증가할수록 토양온도 변화 범위가 작음을 의미한다. 그림 4는 시간에 따른 토양온도의 변화를 나타낸다. 해빙기에

지표면부터 해빙이 시작되어 해빙이 완전히 이루어진 시기인 등온기를 지나 완전히 결빙되어 낮은 온도를 유지하는 결빙기로 접어든다. 그리고 토양온도

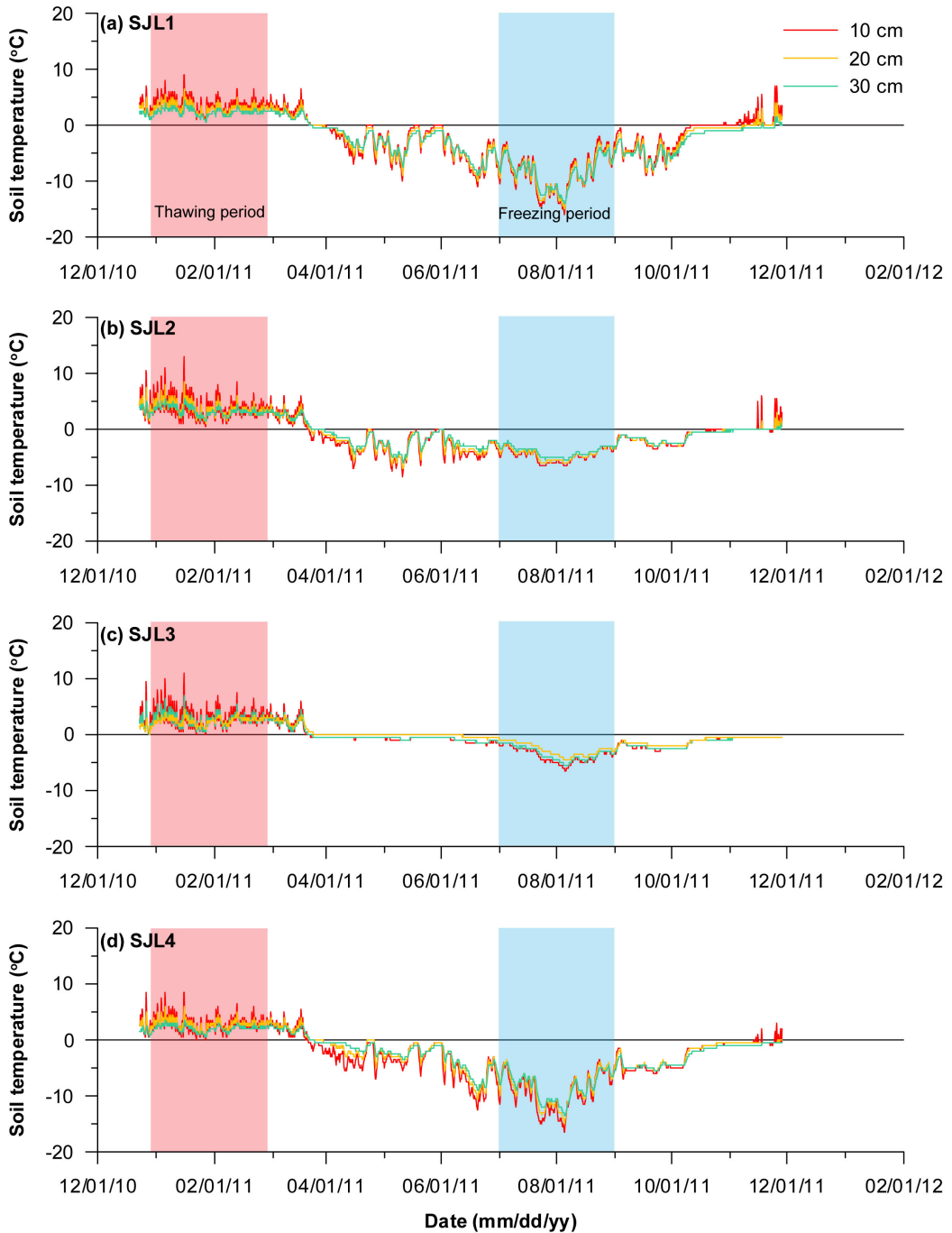


Fig. 4. Temporal variations of the soil temperature measured at 10, 20, and 30 cm in study area from December 23, 2010 to November 28, 2011.

가 지속적으로 증가하는 온난기에 이르는 것을 관찰할 수 있다. 여름철의 토양온도 변화는 모든 관측지점에서 유사한 경향을 보이지만 겨울철의 경우 큰 차이를 보인다. 결빙기에 SJL1과 SJL4에서는 시간에 따라 토양온도의 변화가 매우 크게 나타나지만 SJL2와 SJL3에서는 크게 변하지 않는다(그림 4). 이는 각 관측지점에서의 지온과 태양복사뿐만 아니라 고도 차이, 바다와의 거리 및 토양상태 등 다른 요소의 영향을 받았음을 지시한다.

3.3 눈 두께 및 대기온도와의 관계

연구기간 동안 강설량에 따른 눈 두께의 변화를 그림 5에 나타내었다. 총 강설량은 303.6 cm이며 눈은 2011년 1월 21일부터 내리기 시작해서 10월 31일에 일강설량 중 최대값인 13.8 cm를 기록한 후 점차 감소하면서 12월 25일까지 내린 것으로 관측되었다. 눈 두께의 변화도 강설량과 함께 증가하며 하루 최대 강설량을 기록한 10월 31일 이후 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 해빙기에는 강설량과 눈 두께의 변화가 거의 없지만 등온기를 거쳐 결빙기로 갈

수록 눈 두께는 증가한다. 그 후 눈 두께는 온난기에 최대값(78.2 cm)을 보인다.

각 관측지점의 깊이별 평균 토양온도와 일평균 대기온도의 관계를 눈 두께 변화별로 그림 6에 나타내었다. 2010년 12월 23일부터 2011년 11월 28일까지 341일에 대해 수행하였으며 눈이 없을 때는 77일, 20 cm 미만일 때는 54일, 20 초과 40 cm 미만일 때는 83일, 40 cm 초과 일 때는 127일이다. 세종과학기지 주변 토양은 341일 중 77일을 제외하고 264일 눈으로 덮여있다. SJL1과 SJL4는 대기온도와 토양온도가 비례하여 대기온도의 직접적인 영향을 받지만 SJL2와 SJL3은 대기온도가 -20℃ 까지 낮아져도 토양온도는 -6℃ 이하로 내려가지 않는다. 이는 시간경과에 따른 토양온도의 변화를 나타낸 그림 4에서처럼 SJL1과 SJL4는 해빙기를 지나 결빙기까지 대기온도 변화에 영향을 받지만 SJL2와 SJL3은 해빙기 때는 대기온도의 영향을 받고 등온기와 결빙기 때는 대기온도 보다 지온의 영향을 더 받는다고 해석할 수 있다.

또한 대기온도 영향뿐만 아니라 각 관측지점들의

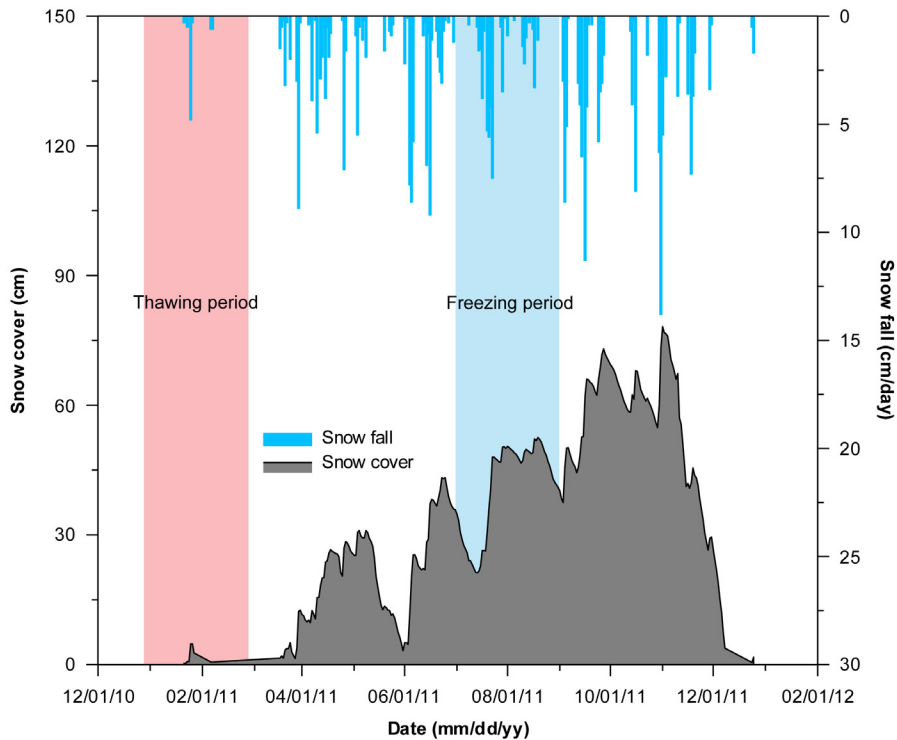


Fig. 5. Maximum depth of snow cover and snowfall measured at King Sejong Station for January to December 2011.

위치가 가깝고 고도에 따른 큰 차이가 없기 때문에 눈 두께 차이인 것으로 해석된다. 관측자료를 근거로 판단할 때 SJL1은 눈이 거의 덮여 있지 않고 SJL2는 7월 이후 계속 눈이 덮여 있는 것으로 판단된다. 그리고 SJL3은 4월부터 계속 눈이 덮여 있고 SJL4는 결빙기에는 눈이 거의 덮여 있지 않지만 9월 이후 적설량의 증가로 눈이 덮인 것으로 판단된다. 또한 모든 관측지점에서 눈 깊이가 증가할수록 토양온도도 낮아지는 것을 볼 수 있다.

3.4 자기상관분석 및 교차상과분석

각 관측지점의 깊이별 토양온도 자료에 대하여 자기상관 및 스펙트럼 밀도 분석을 수행하여 그림 7

과 8에 나타내었다. 각 관측지점의 지연시간은 자기상관함수가 0에 도달할 때까지 소요되는 시간이며 여름철과 겨울철에 따라 다르게 나타났다. 전체기간 지연시간이 가장 긴 관측지점은 86일로 분석된 SJL3이었으며 SJL2가 85일, SJL1이 83일, SJL4가 82일로 나타났다. 토양 깊이가 깊어질수록 지연시간도 길어졌다. 여름철 지연시간은 10 cm일 때 몇 시간 정도로 나타났으며 20 및 30 cm 일 때는 2~6일의 범위를 보였다. 지연시간이 짧게 나타난 여름철은 자기상관성이 낮고 약한 선형성과 기억효과를 가지는 것으로 판단된다. 겨울철 지연시간은 깊이에 큰 영향 없이 15~17일로 나타났다. 지연시간이 길게 나타난 겨울철은 여름철보다 자기상관성이 높고 강한 선형성과

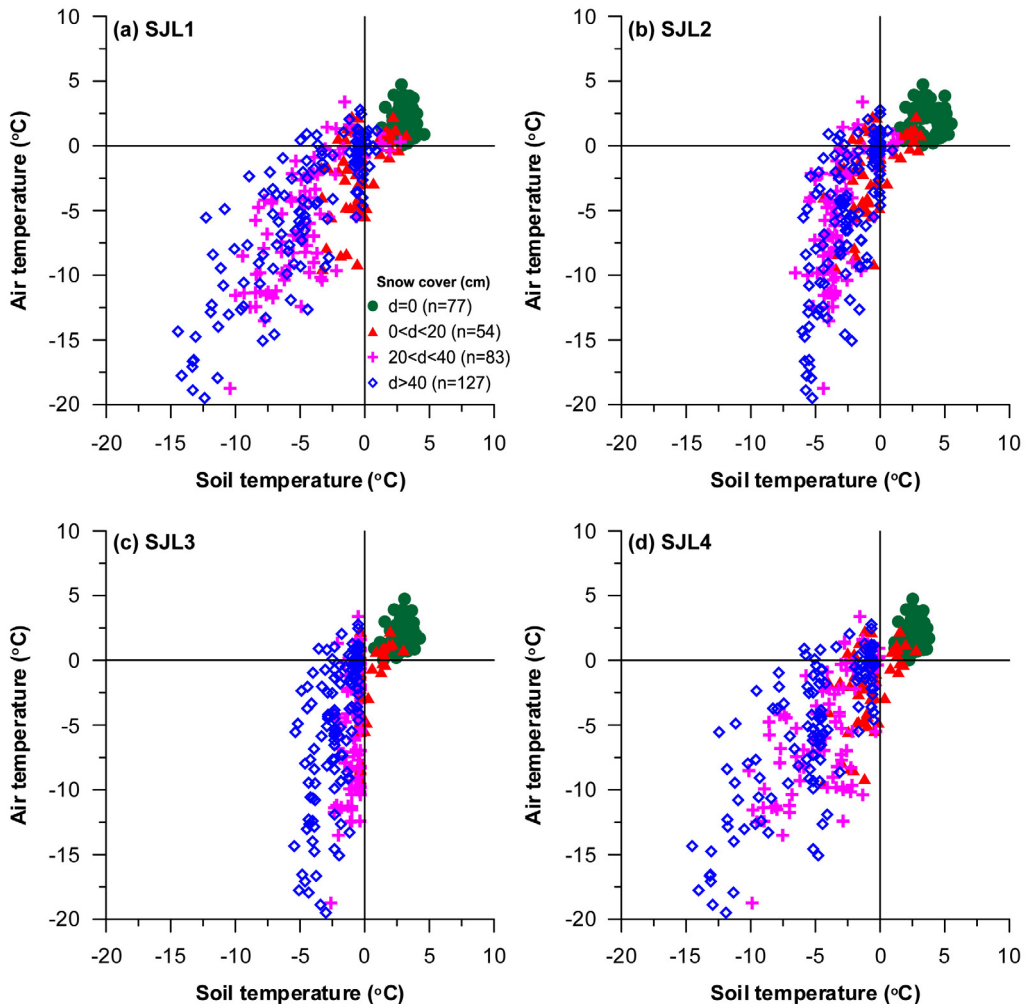


Fig. 6. Cross plots of the air and soil temperatures from December 23, 2010 to November 28, 2011.

기억효과를 가지는 것으로 판단된다. 일반적으로 토양온도의 변화는 여름철에는 대기온도와 함께 태양복사의 영향을 많이 받고 겨울철에는 대부분 대기온도의 영향을 많이 받는다(Ikard *et al.*, 2009). 각 관측

지점의 깊이별 토양온도 자료에 대하여 스펙트럼 밀도분석을 수행하여 조절시간을 산정하였다. 스펙트럼 밀도함수는 전체기간 모든 관측지점에서 24시간의 주기성이 나타나는 것으로 분석되었다. 여름철은

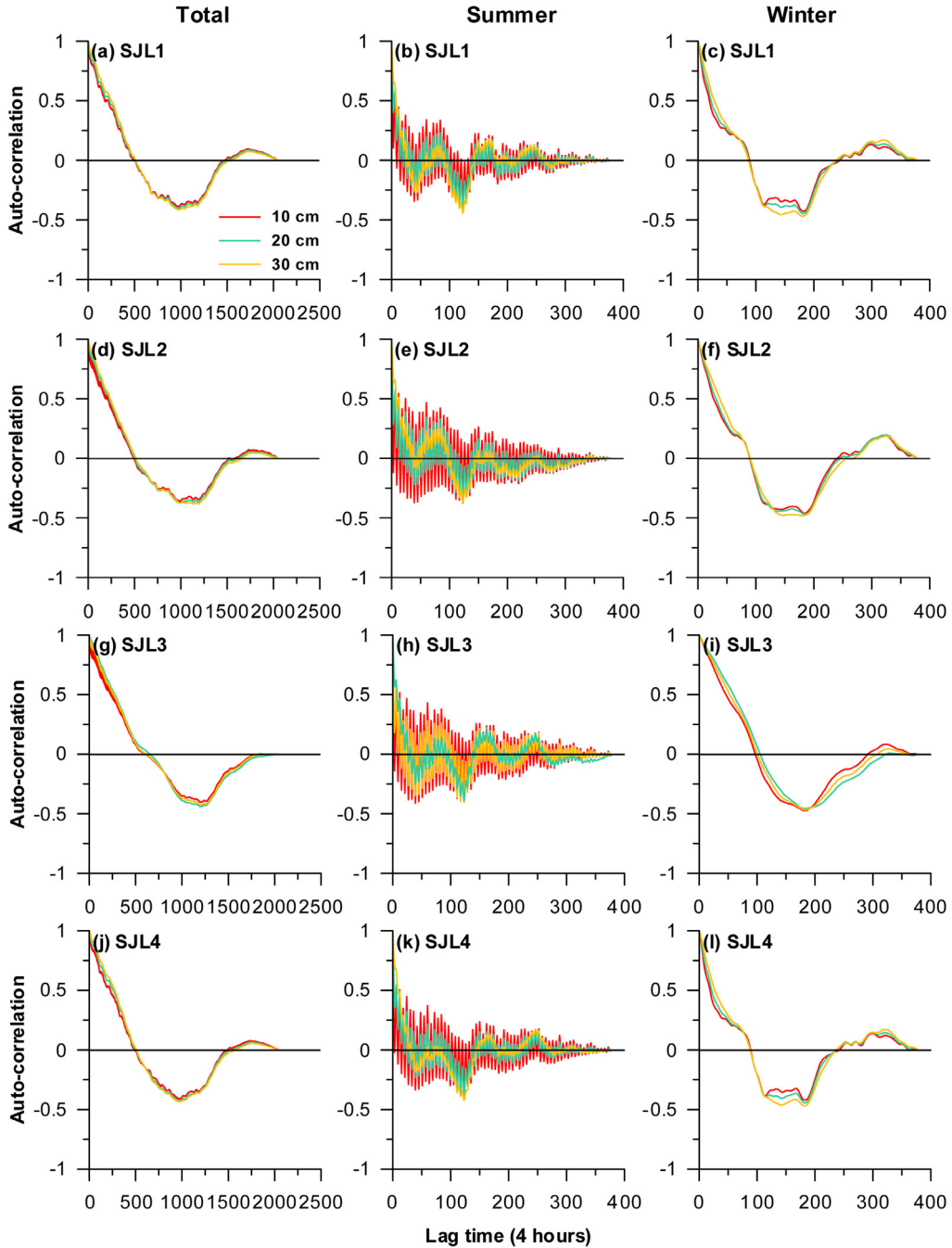


Fig. 7. Auto-correlation of four hours soil temperature (10, 20, and 30 cm).

27시간의 주기성이 나타났고 겨울철은 50일의 주기성이 나타났다.

대기온도와 깊이별 토양온도의 상관관계를 해석하기 위해 대기온도를 입력, 깊이별 토양온도를 출

력으로 하여 교차상관분석 하였다(그림 9). 분석결과 각 관측지점의 최대지연시간은 75~129일 범위를 보였으며 깊이가 증가할수록 최대지연시간도 길어졌다. 이처럼 대기온도가 토양온도 변동에 미치는 영

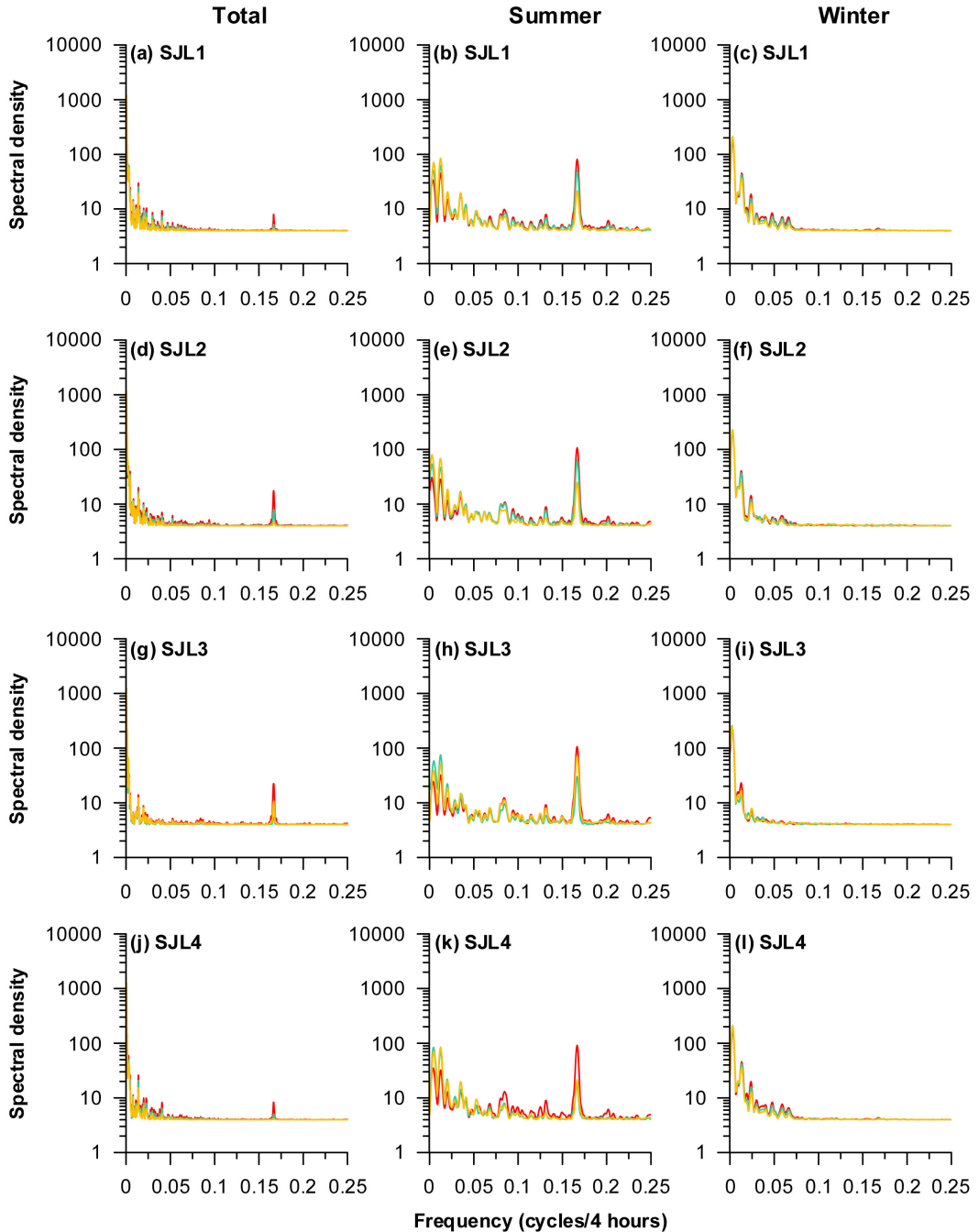


Fig. 8. Spectral density of four hours soil temperature (10, 20, and 30 cm).

향은 약 100일 전후에 나타났고 최대상관함수는 0.67~0.88 범위를 보여 두 인자는 상호연관성이 높아 그 영향력이 크다고 해석하였다. 여름철 최대지연시간은 0.7~8일 범위를 보였으며 최대상관함수는 0.32~

0.57 범위를 보였다. 즉 대기온도가 토양온도 변동에 미치는 영향이 최대 8일 이내에 빠르게 나타났 것이다. 최대상관함수 값이 작게 나타났지만 영향이 나타나는 속도가 빠르기 때문에 영향력은 크다고 해석

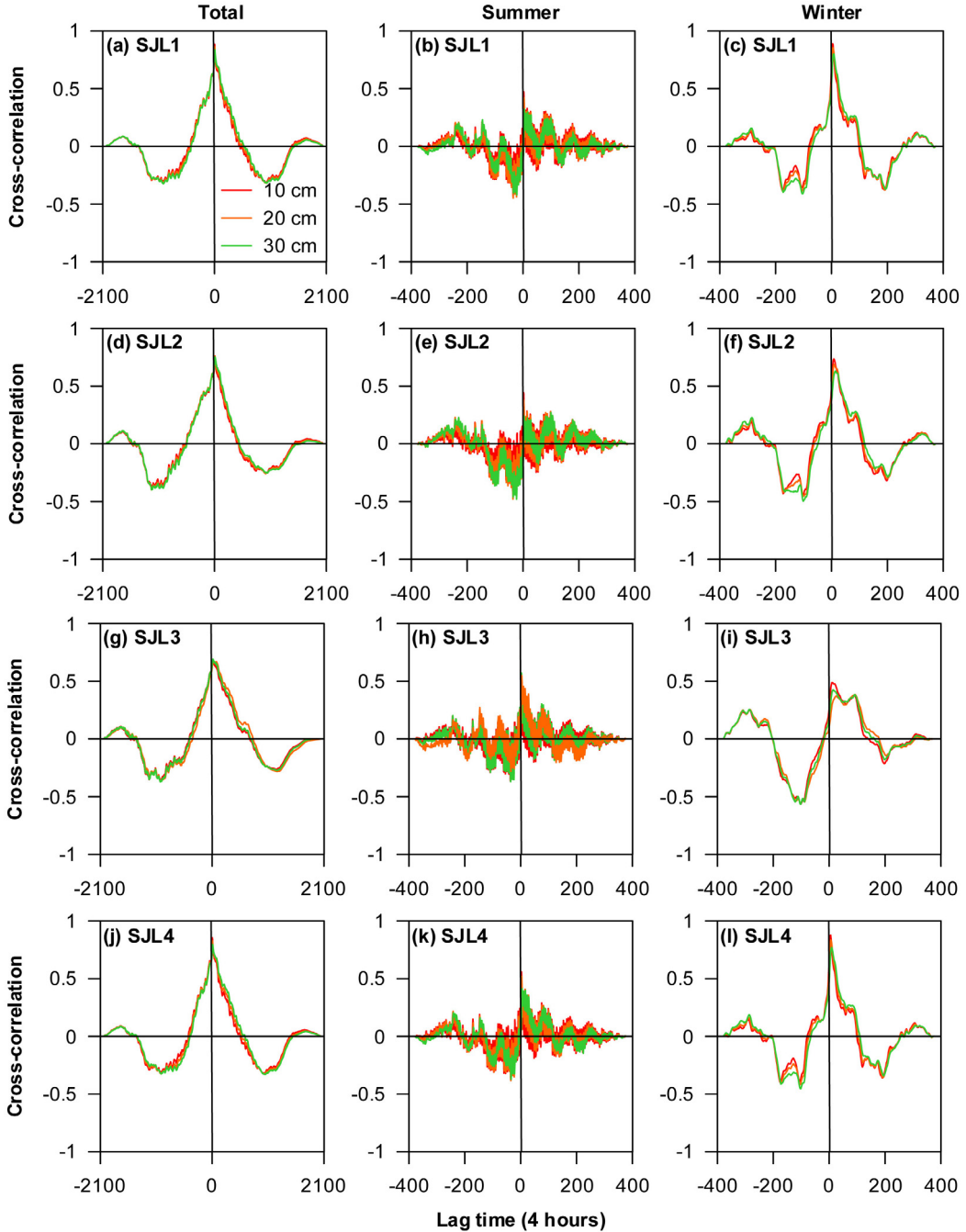


Fig. 9. Cross-correlation functions for air temperature-soil temperature (10, 20, and 30 cm).

하였다. 겨울철 최대지연시간은 16~30일 범위를 보였으며 최대상관함수는 0.38~0.89 범위를 보였다.

3.5 열류량 및 활동층 깊이

그림 10은 10 cm와 30 cm 깊이 토양온도와 동토

층의 평균적인 열용량을 적용하여 계산한 열류량을 보여준다. 전체적으로 토양온도가 하강하는 등온기와 결빙기에는 음의 열류량을 보이고 상승하는 해빙기와 온난기에는 양의 열류량을 보인다. 토양에서의 열류량 변화는 대기온도와 지표면의 냉각 및 가열에

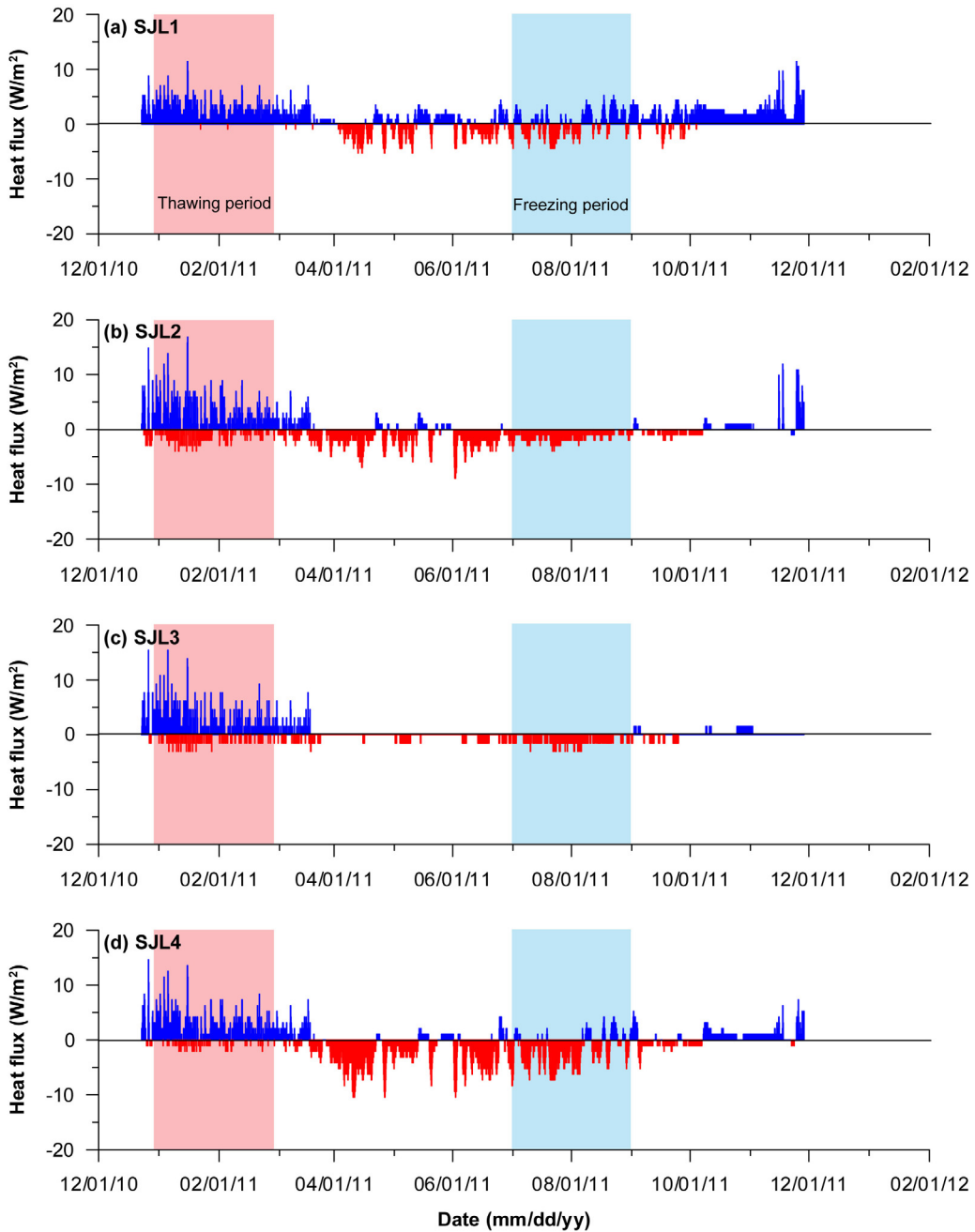


Fig. 10. Heat flux estimated from finite difference approximation for soil temperature (20 cm).

Table 3. Active layer thickness calculated using the profile of maximum soil temperatures.

Location	Date (mm/dd/yy)	T _{0.1m} (°C)	T _{0.2m} (°C)	T _{0.3m} (°C)	Active layer thickness (m)
SJL1	01/16/11	6.5	6.0	4.5	0.77
SJL2	01/15/11	8.5	8.0	5.5	0.69
SJL3	01/15/11	9.0	2.0	4.5	0.43
SJL4	01/15/11	7.5	6.0	3.5	0.48
Mean	-	-	-	-	0.59

의한 영향으로 볼 수 있다(Han *et al.*, 2006). 4개 관측지점의 30 cm 깊이에서 관측된 연 최고 온도자료를 사용하여 각 지점의 활동층 두께를 계산하였다(표 3). 관측지점에서 활동층의 두께는 0.43~0.77 m 범위를 보였으며 평균 0.59 m로 계산되어 남극의 활동층 두께인 0.4~1.5 m 범위 내에 있다(Bockheim and Hall, 2002; Lee *et al.*, 2016). 또한 Lee *et al.* (2016)에서 제시한 평균 활동층 두께인 0.54 m와 비슷한 결과를 보였다. 각 지점 활동층의 두께는 SJL1이 0.77 m로 가장 컸으며 SJL3이 0.43 m로 가장 작았다.

4. 결론

남극 세종과학기지 주변에서 2010년 12월부터 2011년 11월까지 깊이별 토양온도 자료를 이용하여 여름철과 겨울철 토양온도 특성을 비교하였다. 관측된 기상자료에 의하면 여름철 대기온도 평균은 1.8°C 이었고 겨울철 평균은 -8.6°C 이었다. 2011년 전체 강수량 593.2 mm 중 겨울철 강수량은 2.7 mm 뿐이었고 겨울철을 제외한 강수일수는 170일이었다. 시간에 따른 깊이별 토양온도의 범위는 여름철 0°C에서 13.0°C 이었고 겨울철 -16.5°C에서 2.0°C로 관측되었다. 태양복사로 일변화가 크며 토양 깊이가 깊어질수록 대기온도의 영향을 덜 받아 온도변화가 작았다. 세종과학기지 주변 토양은 341일 중 264일이 눈으로 덮여 있고 해빙기 이후 강설량의 증가와 함께 눈 두께도 증가하여 11월 1일 최대치인 78.2 cm이었다. 자기상관 분석결과 토양 깊이가 깊어질수록 지연시간도 길어졌으며 여름철보다 겨울철에 지연시간이 더 길었다. 스펙트럼 밀도함수 분석결과 깊이가 깊어질수록 최대지연시간도 길어졌으며 여름철보다 겨울철이 주기성이 더 길었다. 열류량은 토양온도가 하강하는 등온기와 결빙기에는 음의 값

을 보였고 상승하는 해빙기와 온난기에는 양의 값을 보였다. 또한 바톤반도 해안가 지역에서 활동층의 두께는 평균 0.59 m로 계산되었다.

사 사

본 연구는 한국해양과학기술원 부설 극지연구소의 지원(PP16010)을 받아 수행되었습니다. 또한 이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. NRF-2015R1A4A1041105). 건설적인 수정의견을 주신 익명의 심사위원님들께 감사드립니다.

REFERENCES

- Adlam, L.S., Balks, M.R., Seybold, C.A. and Campbell, D.I., 2010, Temporal and spatial variation in active layer depth in the McMurdo Sound Region, Antarctica. *Antarctic Science*, 22, 45-52.
- Angelini, P., 1997, Correlation and spectral analysis of two hydrogeological systems in Central Italy. *Hydrological Sciences Journal*, 42, 425-439.
- Bockheim, J.G. and Hall, K.J., 2002, Permafrost, active-layer dynamics and periglacial environments of continental Antarctica. *South African Journal of Science*, 98, 82-90.
- Carlsaw, H.S. and Jaeger, J.C., 1959, *Conduction of heat in solids*, second edition, Oxford University Press, New York, 510 p.
- Chae, G.T., Yun, S.T., Kim, D.S., Kim, K.H. and Joo, Y., 2008, Time-series analysis of three years of groundwater level data (Seoul, South Korea) to characterize urban groundwater recharge. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 43, 117-127.
- Chang, S.K., 1997, Characteristics of land surface in the vicinity of King Sejong Station, Korean Antarctic research station. *The Korean Earth Science Society*, 18,

- 443-449 (in Korean with English abstract).
- Chang, S.K., Lee, B.Y., Yoon, H.I. and Won, Y.I., 1998, Changes related to earth sciences parameter observed in the vicinity of the King Sejong Station off the Antarctic Peninsula. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 19, 533-548 (in Korean with English abstract).
- Chang, S.K., Lee, J.I., Choe, M.Y. and Hur, S.D., 2003, Geology around the King Sejong Station, King George Island off the Antarctic Peninsula. *Journal of the Geological Society of Korea*, 39, 271-286 (in Korean with English abstract).
- Cho, H.K., Kim, J., Jung, Y., Lee, Y.G. and Lee, B.Y., 2008, Recent changes in downward longwave radiation at King Sejong Station, Antarctica. *Journal of Climate*, 21, 5764-5776.
- Choi, H.M. and Lee, J.Y., 2010, Groundwater level distribution and rainfall response characteristics in Haean basin of Yanggu. *Journal of KoSSGE*, 15, 1-8 (in Korean with English abstract).
- Choi, T., Lee, B.Y., Kim, S.J., Park, Y.M. and Yoon, Y.J., 2006, The characteristics of radiation, temperature and wind direction around King Sejong Station, Antarctica. *Journal of the Korean Geophysical Society*, 9, 397-408 (in Korean with English abstract).
- Gooseff, M.N., Barrett, J.E., Northcott, M.L., Bate, B., Hill, K.R., Zeglin, L.H., Bobb, M. and Takacs-Vesbach, C.D., 2007, Controls on the spatial dimensions of wetted hydrologic margins of two Antarctic lakes. *Vadose Zone Journal*, 6, 841-848.
- Han, U. and Jung, H.C., 1994, Temperature response in the permafrost at the Sejong Station, Antarctica. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 15, 170-176.
- Han, U., Lee, C.K., Jeong, S., Lee, B.Y. and Nam, S.H., 2006, The studies on the temperature and thermal properties of the active layer soil at the Sejong Station, Antarctica. *Journal of the Geological Society of Korea*, 42, 577-586 (in Korean with English abstract).
- Han, U., Lee, C.K., Nam, S.H., Lee, B.Y. and Kim, Y., 2005, Thermal dynamics of active layer at the Dasan Station, Svalbard. *Journal of the Geological Society of Korea*, 41, 91-100 (in Korean with English abstract).
- Iijima, Y., Fedorov, A.N., Park, H., Suzuki, K., Yabuki, H., Maximov, T.C. and Ohata, T., 2010, Abrupt increases in soil temperatures following increased precipitation in a permafrost region, central Lena River basin, Russia. *Permafrost and Periglacial Processes*, 21, 30-41.
- Ikard, S.J., Gooseff, M.N., Barrett, J.E. and Takacs-Vesbach, C., 2009, Thermal characterization of active layer across a soil moisture gradient in the McMurdo Dry Valleys, Antarctica. *Permafrost and Periglacial Processes*, 20, 27-39.
- Kim, J.H., Ahn, I.Y., Lee, K.S., Chung, H. and Choi, H.G., 2007, Vegetation of Barton Peninsula in the neighbourhood of King Sejong Station (King George Island, maritime Antarctic). *Polar Biology*, 30, 903-916.
- Larocque, M., Mangin, A., Razack, M. and Banton, O., 1998, Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France). *Journal of Hydrology*, 205, 217-231.
- Lee, J.S., Kwon, T.Y., Lee, B.Y., Yoon, H.I. and Kim, J.W., 2003, Change of regional atmospheric circulation related with recent warming in the Antarctic Peninsula. *Ocean and Polar Research*, 25, 503-518 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y. and Lee, K.K., 2002, A comparative study on characteristics of waterlevel responses to rainfall in the two aquifer systems. *Journal of KoSSGE*, 7, 3-14 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y., Lim, H.S. and Yoon, H.I., 2016, Thermal characteristics of soil and water during summer at King Sejong Station, King George Island, Antarctica. *Geosciences Journal*, 20, 503-516.
- Lee, J.Y., Lim, H.S., Yoon, H.I. and Park, Y., 2013, Stream water and groundwater interaction revealed by temperature monitoring in agricultural areas. *Water*, 5, 1677-1698.
- Lee, J.Y., Yi, M.J. and Hwang, D., 2005, Dependency of hydrologic responses and recharge estimates on water-level monitoring locations within a small catchment. *Geosciences Journal*, 9, 277-286.
- Pringle, D.J., Dickson, W.W., Trodahl, H.J. and Pyne, A.R., 2003, Depth and seasonal variations in the thermal properties of Antarctic Dry Valley permafrost from temperature time series analysis. *Journal of Geophysical Research*, 108:2474. DOI: 10.1029/2002JB002364.
- Roth, K. and Boike, J., 2001, Quantifying the thermal dynamics of a permafrost site near Ny-Ålesund, Svalbard. *Water Resources Research*, 37, 2901-2914.
- Wu, Q., Zhang, T. and Liu, Y., 2010, Permafrost temperatures and thickness on the Qinghai-Tibet Plateau. *Global Planet Change*, 72, 32-38.
- Yoo, C.M., Choe, M.Y. and Jo, H.R., 2001, Volcaniclastic sedimentation of the Sejong formation (Late-Paleocene-Eocene), Barton Peninsula, King George Island, Antarctica. *Ocean and Polar Research*, 23, 97-107.

Received : May 25, 2016

Revised : August 16, 2016

Accepted : August 17, 2016