

남극 바톤반도의 토양수분과 지온의 시계열적 특성 및 활동층의 열확산계수 산정

김창성¹ · 이진용^{1,*} · 김희정¹ · 전우현¹ · 김기태²

¹강원대학교 지질·지구물리학과 지질학전공

²극지연구소 실용화연구사업단

요 약

본 연구에서는 남극 바톤반도 해안에서 내륙으로 1.5 km 이격한 경사각(18, 15, 8°)이 다른 3개 관측지점에서 토양수분 및 지온을 측정하였다. 이들의 시계열적 특성을 파악하기 위하여 자기상관분석, 스펙트럼분석 및 교차상관분석을 하였다. 또한 활동층의 열적 특성을 해석하기 위해 열확산계수를 산정하고 두께를 추산하였다. 토양수분 및 지온 센서는 5, 10, 15, 20 cm 깊이에 설치하였고 2019년 12월 19일부터 2020년 1월 4일까지 17일간 5분 간격으로 측정하였다. 토양수분 함량이 모든 지점의 20 cm 깊이에서 가장 많았다. 0.5 mm/day 이하의 강우는 토양수분 함량에 영향을 미치지 못했다. 토양온도는 최대 13.2°C, 최소 -0.6°C였으며 중앙값은 깊어질수록 낮았고 12월 20일 1~5시를 제외하고는 24시간 동안 0°C 이상이였다. 자기상관분석 결과 경사각이 완만한수록 토양수분에 대한 지연시간이, 알을수록 토양온도에 대한 지연시간이 짧았다. 토양수분의 주기는 2.5-4.7 일, 토양온도의 주기는 1.0-1.1일이였다. 기온(입력)과 토양온도(출력)에 대한 교차상관분석 결과, 입력값을 태양복사로 했을 때보다 지연시간이 더 짧고 상관계수가 더 컸다. 열확산계수는 0.01-121.94 mm²/sec의 범위(중앙값=0.34-0.59 mm²/sec)였다. 이 중앙값은 동일 방법을 이용한 기존 연구의 값(0.4-3.3 mm²/sec)의 최솟값에 가까웠다. 활동층의 두께는 23.6-38.6 cm이며 이는 기존에 연구된 바톤반도 해안 근처(0.2 km 이내)의 활동층 두께(41-77 cm)보다 얇다. 이렇게 열확산계수가 작고 활동층 두께가 얇은 이유는 이번 연구지역이 기존 연구보다 해안으로부터 멀리 떨어져 있기 때문으로 사료된다.

주요어: 토양수분, 토양온도, 시계열 분석, 열확산계수, 활동층 두께

Chang-Seong Kim, Jin-Yong Lee, Heejung Kim, Woo-Hyun Jeon and Kitae Kim, 2020, Evaluation of time series of soil moisture and soil temperature and computation of apparent thermal diffusivity of active layer in the Barton Peninsula, Antarctica. *Journal of the Geological Society of Korea*. v. 56, no. 5, p. 571-585

ABSTRACT: We have examined soil moisture and soil temperature of three sites in the Barton Peninsula, Antarctica. Auto-correlation, spectral analysis, and cross-correlation analysis were conducted using time series data. In addition, apparent thermal diffusivity was computed and active layer thickness was calculated. Soil moisture and soil temperature meters were installed at depths of 5, 10, 15, 20 cm, and measured every five minutes during summer 2019-2020. The soil moisture content was the largest at 20 cm depth at all sites. Rainfall below 0.5 mm/day could not affect the soil moisture content. The soil temperature in deeper depth was low. The soil temperature was above zero except for one day (December 20, 2019). The auto-correlation of soil moisture indicated shorter lag time at gradual slope and that of soil temperature indicated shorter lag time at shallower depth. The cycle of soil moisture was between 2.5 and 4.7 days, and the cycle of soil temperature was between 1.0 and 1.1 days. The cross-correlation of air temperature-soil temperature showed shorter lag time and larger correlation coefficient than that of solar radiation-soil temperature. The apparent thermal diffusivity (ATD) ranged from 0.01 to 121.94 mm²/sec (median=0.34-0.59 mm²/sec). The median values were close to that of minimum of previous study (0.4-3.3 mm²/sec) using same methods. The active layer thickness ranged from 23.6 to 38.6 cm. The ATD is smaller and active layer thickness is thinner than that near the coast (within 0.2 km) because the study area is located 1.5 km from the sea.

Key words: soil moisture, soil temperature, time series analysis, apparent thermal diffusivity, active layer thickness

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

(Chang-Seong Kim, Jin-Yong Lee, Heejung Kim and Woo-Hyun Jeon, Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea; Kitae Kim, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Republic of Korea)

1. 서론

남극은 지구상에서 기후변화에 가장 민감한 지역이며, 지질, 기후, 해양 및 생물 등 다양한 분야의 연구가 활발히 진행되고 있다(Oliva *et al.*, 2019; Ravindra and Rajan, 2020; Srivastava, 2020; Thamban, 2020). 극지 또는 상부 고위도 지역에서는 토양층을 활동층(active layer)과 영구동토층(permafrost)으로 구분할 수 있다(Han *et al.*, 2006). 활동층은 계절에 따라 융해와 동결이 반복되는 토양층을 의미하고 영구동토층과의 경계(permafrost table)까지 녹을 수 있으며 기후변화의 영향을 받는다(Yeom *et al.*, 2014). 영구동토층은 토양온도가 0°C 이하로 2년 이상 지속되는 곳이다(Kim *et al.*, 2019). 이 층은 활동층이 융해되어 발생한 토양수분이 영구동토층과의 경계보다 하방으로 이동하지 못하도록 막는 불투수층 역할을 한다(Jeon *et al.*, 2009; Yeom *et al.*, 2014; Hong *et al.*, 2016).

토양수분은 불포화대 내의 공극에 있는 물이다. 그런데 이것의 분포 및 거동을 이해하는 것은 수문학적 과정을 이해하는 데 필수적이다. 이는 크게 흡착수(hygroscopic water), 모세관수(capillary fringe water) 및 중력수(gravitational water) 세 가지 형태로 존재한다(Cho *et al.*, 2017; 그림 1). 흡착수는 분자력에 의해 토양 입자 표면에 얇은 막을 형성한 물이다. 흡착수량이 많아져 공극에 채워진 물이 표면장력으로 유지되면 이를 모세관수라고 한다. 공극이

포화되어 잉여 토양수분이 발생했을 때 중력의 영향을 받아 하향이동하는 물을 중력수라고 한다(Ha *et al.*, 2016). 일반적으로 토양수분 함량에 영향을 미치는 주요 인자로는 강수량(유입)과 증발산량(유출)이 있다. 그런데 강수량은 강우량 및 적설량 그리고 증발산량은 식생에 의한 증산작용, 토양온도, 기온, 일사량(태양복사), 상대습도 및 풍속과 관련이 있다(Han *et al.*, 2009; Gwak and Kim, 2012; 그림 1).

활동층의 열전달은 깊이 및 계절에 따라 그 특성이 다르기 때문에 매우 복잡하다(Han *et al.*, 2006). 이는 주로 토양수분의 분포 및 거동, 열전도, 상전이 등의 영향을 받는다(Ikard *et al.*, 2009). 따라서 활동층의 열적 특성을 정량적으로 평가하기 위해서는 상기 인자들에 대한 이해가 필요하다. 그 방법에는 토양수분 및 지온의 시계열적 특성을 분석하는 것과 토양층의 열확산도를 산정하는 것이 있다. 이와 관련하여 Lee *et al.* (2016)은 남극 세종과학기지 부지 내의 토양온도 시계열 자료에 대하여 자기상관분석(auto-correlation), 스펙트럼분석(spectral analysis) 및 교차상관분석(cross-correlation)을 한 결과 자기상관성은 깊어질수록 강하고 토양 온도는 24시간 주기를 보이며 토양온도에 기온 및 일사량이 영향을 미친다고 해석했다. Ikard *et al.* (2009)은 남극 맥머도 기지 주변 Lake Fryxell에서 토양수분 함량이 증가함에 따라 활동층의 겉보기 열확산계수가 증가한다고 평가했다. 또한 토양층 내 수분 함량이 많을수록 활동층 두께가 두껍고 수분 함량이 적을수록 얇

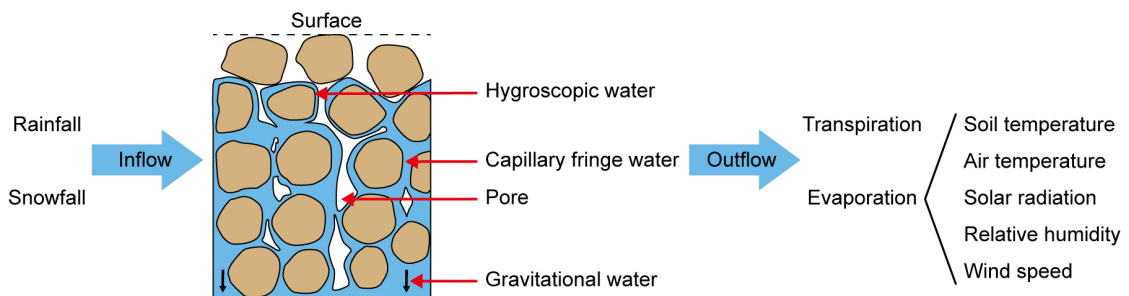


Fig. 1. Soil moisture types in unsaturated zone and factors affecting soil water content (modified from Gwak and Kim, 2012).

기 때문에 토양수분 함량이 온도 변화에 영향을 미친다고 판단하였다. Han *et al.* (2006)은 세종과학기지 기상관측소로부터 5 m 떨어진 곳에서 50 cm 깊이를 경계로 물의 증발 및 응결의 상전이가 반대로 나타나는 이유는 깊이별 함수율 차이가 있기 때문에 토양층이 동결되는 정도가 깊이마다 다르기 때문이라고 해석하였다.

남극 바톤반도 활동층의 열적 특성에 대한 연구는 활발히 진행되고 있다(Choi *et al.*, 2004; Han *et al.*, 2006; Jeon *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2019). 하지만 열적 특성에 주요한 영향을 미치는 토양수분에 대한 연구는 미비하다. 따라서 본 연구의 목적은 토양수분과 지온의 시계열적 특성, 활동층의 열확산계수 및 두께를 평가하는 것이다.

2. 연구방법

2.1 연구지역

바톤반도는 남극반도 남세틀랜드제도 킹조지섬

의 남서쪽 약 62°S, 58°W 부근에 위치해 있으며 세종과학기지가 있는 곳이다(그림 2). 북서쪽의 해안가는 마리안소만(Marian Cove), 남쪽의 해안가는 맥스웰만(Maxwell Bay)과 접한다. 이곳에는 최고봉(해발고도 266.3 m)인 백두봉을 포함하여 11개의 봉우리가 있고 해안을 따라 남서쪽에는 나래절벽이 위치하며 촛대바위 부근에는 남극특별보호지역(ASP, Antarctic Specially Protected Area)인 펭귄서식지(Narebski Point, ASPA No. 171)가 있다(KOPRI, 2019). 지표 지질은 대부분이 화성암류(현무암질 안산암, 화강섬록암, 화산력 응회암, 섬록암)와 화산쇄설성 퇴적암(세종층)으로 이루어져 있다(Chang *et al.*, 2003; Lee *et al.*, 2019).

이곳은 주변빙하(periglacial) 지형이 나타나는 곳으로 영구동토층과 활동층이 존재한다(Jeon *et al.*, 2009). 활동층은 바다로부터의 거리, 해발고도 및 위도에 따라 두께가 다르다(Bockheim *et al.*, 2007; Yeom *et al.*, 2014). 연구지역은 해안 근처(0.2 km 이내)에 위치한 세종과학기지에서부터 남동쪽으로 1.5 km 떨어

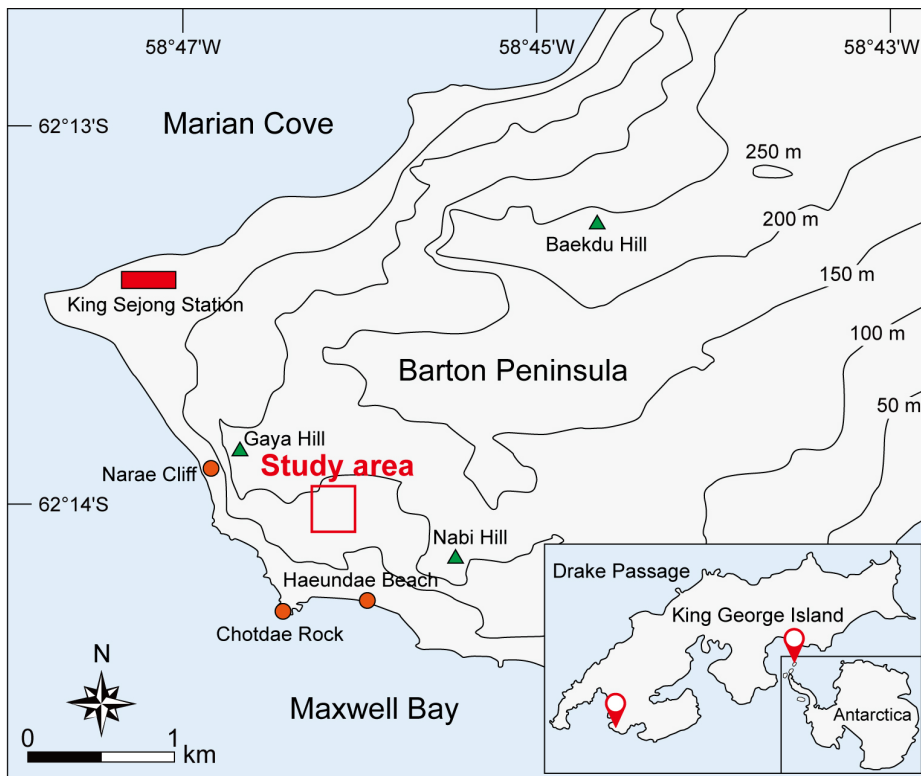


Fig. 2. Topographical map of Barton Peninsula, King George Island, Antarctica.

진 거리에 있고 가야봉(126 m)과 나비봉(129.2 m) 사이 고원(해발고도=68-95 m)으로 가파른 경사(18°)부터 완만한 경사(8°)로 이루어져 있다(그림 2, 3). 사면 최하단 인근에는 폭 5 m 이내의 표층수(용빙설수)가 흐르고 이는 해운대해빈까지 이어진다.

2.2 현장조사 및 자료수집

연구지역 선정을 위해 육안으로 확인 시 모래 및 실트 크기의 입자로 구성된 표층인지, 식생이 없어 토양수분 유출에 영향을 주는 증산의 영향을 최소화할 수 있는 곳인지, 지표물 가리는 지형물이 없어 세종과학기지 부지 내에 설치된 자동기상관측소(AWS,

automatic weather station)에서 측정한 기상자료와의 괴리를 최소화 할 수 있는 지역인지 등을 고려하였다(그림 3a). 토양수분(ASM1-3)과 지온(AST1-3) 모니터링 지점은 동일한 위치(ASM=AST)이며 각 ASM1, 2, 3의 경사각은 18, 15, 8°, 해발고도는 95, 82, 68 m이다(그림 3b). ASM3의 동쪽으로 15 m 정도 떨어진 곳에는 해운대해빈까지 흐르는 계류가 시작된다. 토양수분 및 지온 센서는 각 지점의 5, 10, 15, 20 cm 깊이에 설치하였고(그림 3c) 지표에 수분 및 온도 데이터를 저장할 수 있는 로거를 설치하였다. 자료 수집은 2019년 12월 19일부터 2020년 1월 4일까지 17일간 5분마다 하였다.

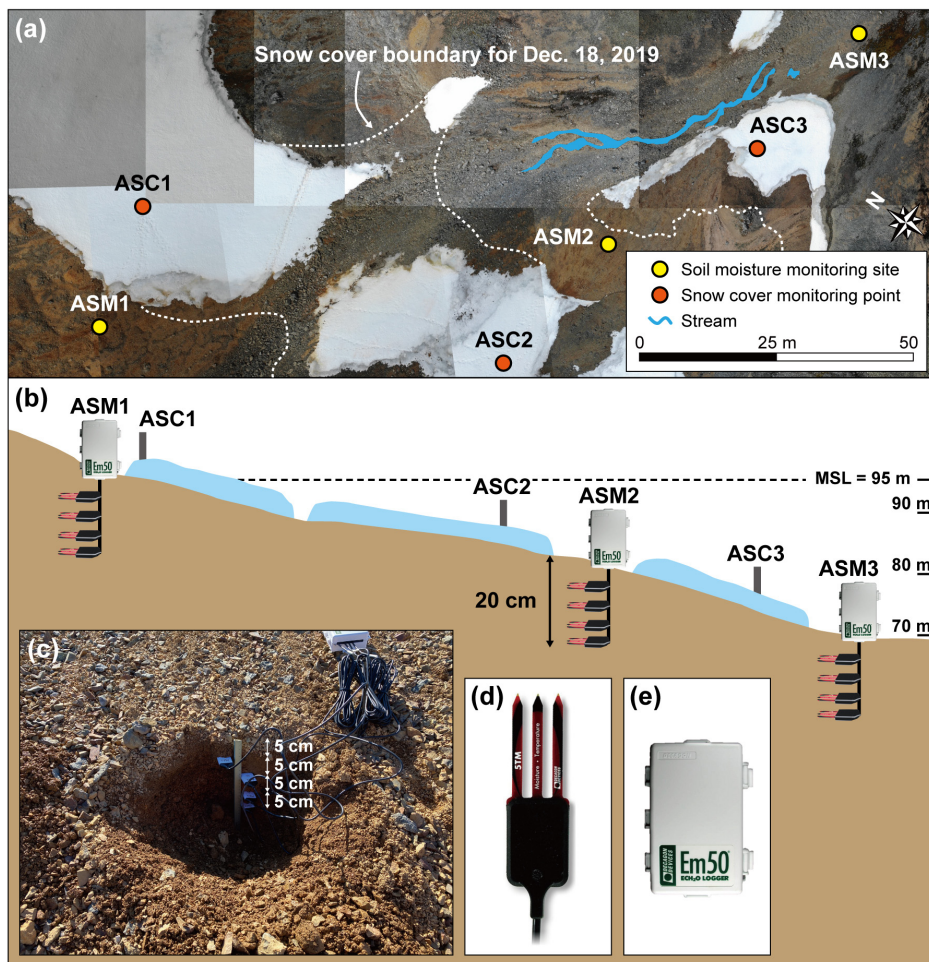


Fig. 3. (a) Soil moisture and soil temperature monitoring stations (location of ASM=AST) of the study area. This photograph was taken on December 31, 2019, (b) schematic diagram of profile of the study area, (c) a volumetric water content monitoring station, (d) 5TM (modified from Decagon Devices, 2010), (e) Em50 (modified from Decagon Devices, 2014).

토양수분의 경우 열용량 및 FDR (frequency domain reflectometry) 방식으로 수분함량을 측정하는 5TM (Decagon, U.S.)을 사용하였다(그림 3d). 이 센서는 토양수분뿐만 아니라 토양온도도 측정하는데 빨간색 끝단에서는 수분을 측정하고 검은색 끝단에서는 온도를 측정(NTC thermistor)한다(Decagon Devices, 2010). 데이터 로거는 Em50 (Decagon, U.S.)을 사용하였고(그림 3e) 이 로거는 한 번에 36,000개 정도의 자료를 보유할 수 있기 때문에(Decagon Devices, 2014) 최대한의 수분 및 온도 자료를 얻기 위해 5분마다 측정하였으며 각 지점별 자료 개수는 31,918, 36,640, 36,112개이다. 적설량의 변화는 ASM으로부터 30 m 떨어진 지점(ASC 1-3, 그림 3b)에서 확인하였다. 각 ASC의 적설량은 12월 19일부터 1월 4일까지 각 84.4, 80.0, 60.2 cm 두께에서 65.4, 65.7, 60.2 cm만큼 감소하였다. GPS 장비인 eXplorist (Magellan, U.S.)를 사용하여 모니터링 지점의 위경도 및 해발고도를 측정하였고 드론(Mavic 2 pro, DJI, China)을 이용하여 연구지역 상공을 촬영하였다. 한편 모니터링 장비 매설 시 ASM1, 3의 각 23.0, 25.5 cm 깊이부터는 토양층이 동결되어 있어 더 이상 굴착이

곤란하였고 기온이 계속 상승하는 시점이었기 때문에 이를 활동층과 영구동토층의 경계라고 판단하지는 않았다.

토양수분 및 지온에 영향을 미치는 요인을 알기 위해 연구기간 동안의 기상자료를 세종과학기지 기후변화감시 위탁관측소로부터 획득하였다. 이 기상자료는 세종과학기지 부지 내 AWS에서 측정한 것으로 일강수량 및 10분마다 측정한 기온, 일사량, 상대습도 및 풍속 자료를 얻었다. 연구기간동안 강우는 총 14회 있었고 최대일강수량은 4.2 mm, 누적강수량은 28.1 mm이다. 강설은 총 3회 있었지만 쌓일 만큼의 양이 아니었기 때문에 누적적설량은 0 mm이다. 기온 및 일사량의 경우 주간(03:00-23:00)에는 일중 높은 값들이 분포하였고 야간(23:00-03:00)에는 일중 낮은 값들이 분포하였으며 상대습도는 이와 반대였다(그림 4). 기온은 최대 7.6°C, 최소 -1.9°C였으며 12월 19, 20, 23, 24일을 제외한 13일 동안 기온은 종일 영상을 유지하였다. 12월 22일부터 1월 4일까지의 기상자료(n=1,946) 중 56%가 상대습도 90%를 넘었기 때문에 이때의 수증기량은 포화상태에 가까웠다고 판단했다. 풍속은 0.3-14.4 m/s (평균

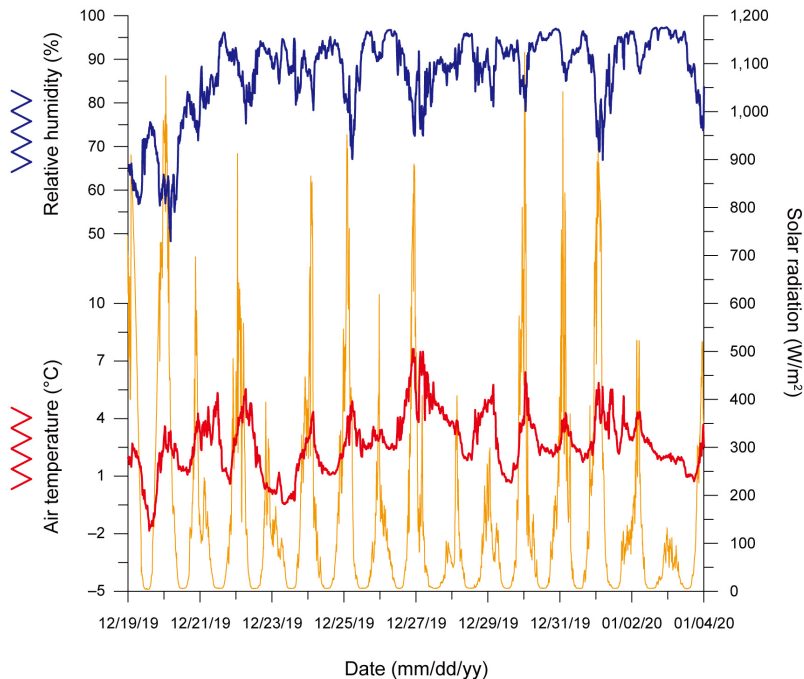


Fig. 4. Variation in weather conditions (air temperature, solar radiation, and relative humidity) measured every 10 minutes at the AWS of King Sejong Station from December 19, 2019, to January 4, 2020.

=5.6 m/s)의 범위를 보였다.

2.3 시계열 분석 및 열확산도 산정

토양수분 및 지온 시계열 자료의 연속적인 변동 특성, 외부자극에 대한 반응정도 및 주기성을 알기 위해 자기상관 및 스펙트럼분석을 하였다(Yun *et al.*, 2018). 1부터 시작하는 자기상관함수값이 0에 이르기까지의 지연시간(lag time)을 보고 자기상관성을 판단하였다(Jeon *et al.*, 2016). 자기상관성이 높을수록 지연시간이 길고 장기간 동안 영향 받았다는 것으로, 자기상관성이 낮을수록 지연시간이 짧고 단기간 동안 영향 받았다는 것으로 해석하였다(Choi *et al.*, 2011). 주기성은 시계열 자료의 시간 영역을 푸리에 변환하여 주파수 영역으로 바꾼 스펙트럼밀도함수를 통해 정량적으로 평가하였다(Park *et al.*, 2013).

교차상관분석은 영향을 주는 인자를 입력값(input)으로, 영향을 받는 인자를 출력값(output)으로 설정하여 두 인자간의 상관관계를 계산했다. 토양수분에 영향을 미치는 인자는 토양온도, 기온, 일사량 및 상대습도로 설정했으며(Ruosteenoja *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2020) 토양온도에 영향을 미치는 인자는 기온 및 일사량으로 설정했다(Jeon *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2019). 시계열 분석 시 자료를 1시간 단위로 하였는데 5분마다 측정된 12개 자료의 평균값으로 하였다. 교차상관함수값이 가장 큰 곳까지를 지연시간이라고 하였으며 이것이 짧을수록 영향을 빠르게 미치고 함수값이 클수록 영향 정도가 크다고 해석하였다(Choi *et al.*, 2011).

열확산계수는 현장에서 측정한 토양온도 자료를 이용하여 산정할 수 있다(Ikard *et al.*, 2009). 본 연구에서는 유체 흐름 등 비전도성 열전달에 의한 온도변화를 배제한 단순화된 1차원 열전도 모델에 대한 해석해(analytical solution) 방법을 이용해 겉보기 열확산계수(apparent thermal diffusivity, ATD)를 계산하였다(Koo *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2018). 이 방법과 관련된 진폭(식 1), 대수(식 2) 및 위상방정식(식 3)을 통해 ATD를 추산하였다(Lee *et al.*, 2016).

$$\alpha = \frac{\omega}{2} \left[\frac{z_2 - z_1}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \right]^2 \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{2\omega(z_2 - z_1)^2}{\left[\ln \frac{(T_1 - T_3)^2 + (T_2 - T_4)^2}{(T'_1 - T'_3)^2 + (T'_2 - T'_4)^2} \right]^2} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{1}{2\omega} \left[\frac{z_2 - z_1}{\delta t} \right]^2 \quad (3)$$

상기 방정식의 각 매개변수 중 α 는 열확산계수(mm^2/sec), ω 는 각주파수, z 는 측정 깊이, ΔT 는 해당 깊이의 진폭, T 는 z_1 에서 $\pi/2$ 간격으로 측정한 온도, T' 는 z_2 에서 $\pi/2$ 간격으로 측정한 온도, δt 는 위상차이다. 진폭방정식은 한 지점의 두 깊이에서 측정한 온도 변화에 대한 진폭을 이용하여 열확산계수를 구하는 방법이다(Pringle *et al.*, 2003). 진폭은 토양온도의 1주기 내 최대 및 최소온도 차이로 계산했다(Lee *et al.*, 2016). 위상차는 1주기 내 최대 및 최소온도의 측정 시간차로 계산했다(Koo *et al.*, 2003).

한편 활동층 두께는 각 관측 지점에서 20 cm 깊이의 토양온도가 가장 높았던 날에 대한 5, 10, 15, 20 cm 깊이의 토양온도를 이용하였다(Lee *et al.*, 2016). AST1은 12월 27일, AST2 및 AST3은 1월 1일에 연구기간 중 최고 토양온도가 측정되었다. 가로축을 토양온도, 세로축을 토양온도 측정 깊이로 설정한 후 선형회귀 추세선을 도시하였고 지표면($y=0$)으로부터 토양온도가 0°C 일 때($x=0$)의 깊이까지를 활동층 두께로 판단하였다. 0°C 를 기준으로 활동층 두께를 판단한 이유는 영구동토층은 0°C 이하로 2년 이상 유지되는 곳이기 때문이다(Kim *et al.*, 2019).

3. 결과 및 토의

3.1 토양수분 및 지온 변화

그림 5는 지점별 토양수분의 변화를 시간 순으로 나타낸 것이다. ASM1의 20 cm 깊이(=ASM1-20), ASM2-5, ASM3-15, ASM3-20의 변동폭은 각각 0.148, 0.128, 0.327, 0.360 m^3/m^3 (15, 13, 33, 36%)로 다른 측정 지점보다 상대적으로 더 컸으며 나머지 지점의 변동폭은 0.1 m^3/m^3 미만이었다(그림 5). 깊이별 토양수분 함량 중앙값의 경우 모든 지점의 20 cm 깊이에서 수분함량이 가장 많았고 ASM1은 20, 15, 5, 10 cm 순, ASM2는 20, 5, 10, 15 cm 순, ASM3는 20, 15, 10, 5 cm 깊이 순으로 단위부피당

수분 함량이 많았다(표 1).

12월 23, 31일, 1월 3일에도 강우(0.3-0.5 mm/day)는 있었지만 토양수분량의 증가는 없었다(그림 5). 이는 0.5 mm/day 이하의 강우 시에는 연구지역 토양층 20 cm 깊이 이내의 수분 함량에 영향을 못 미쳤다는 것을 말한다. 이는 토양층 내로 수분이 침투하기 전에 증발했거나 침투했더라도 극소량만 침투했기 때문이라고 판단했다. 강우에 가장 민감한 지점은 ASM3이며 특히 20 cm 깊이에서 가장 민감하고 강우 강도에 상관없이 약 $0.3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 의 등락폭을 보인다. 다른 지점 및 깊이의 경우 강우에 따른 수분 함량의 증가가 일부 지연되기도 했다.

Cho *et al.* (2017)은 토양층 내 수분 거동에 대하여 상대적으로 더 가파른 상부사면의 토양수분은 수

직방향으로 흐르는 영향이 수평방향으로 흐르는 영향보다 더 크기 때문에 얕아질수록 토양수분 함량이 더 많았고 완만한 하부사면에서는 수평방향으로 흐르는 수분의 영향을 더 받아 깊어질수록 단위부피당 수분함량이 더 많다고 제시하였다. 이를 참고했을 때 ASM3는 수평방향으로 흐르는 수분의 영향을 받아 깊어질수록 수분 함량이 많고 ASM1, 2는 수직방향으로 흐르는 수분 흐름이 있기 때문에 얕은 곳의 수분 함량도 20 cm만큼 많은 것으로 해석했다.

그림 6은 시간에 따른 토양온도 변화에 대한 것이다. 12월 20일 1~5시에 토양온도가 0°C 이하(최저 -0.6°C)로 낮아졌을 때를 제외하면 연구기간 동안의 토양온도는 종일 영상으로 유지되었다. AST2-5의 토양온도의 중앙값이 다른 지점보다 최대 2°C 더 높

Table 1. Median of volumetric soil water content at different depths (5-20 cm) at ASM1-3.

Site	Volumetric soil water content (m^3/m^3)			
	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
ASM1	0.176	0.132	0.182	0.199
ASM2	0.219	0.173	0.123	0.265
ASM3	0.105	0.143	0.158	0.270

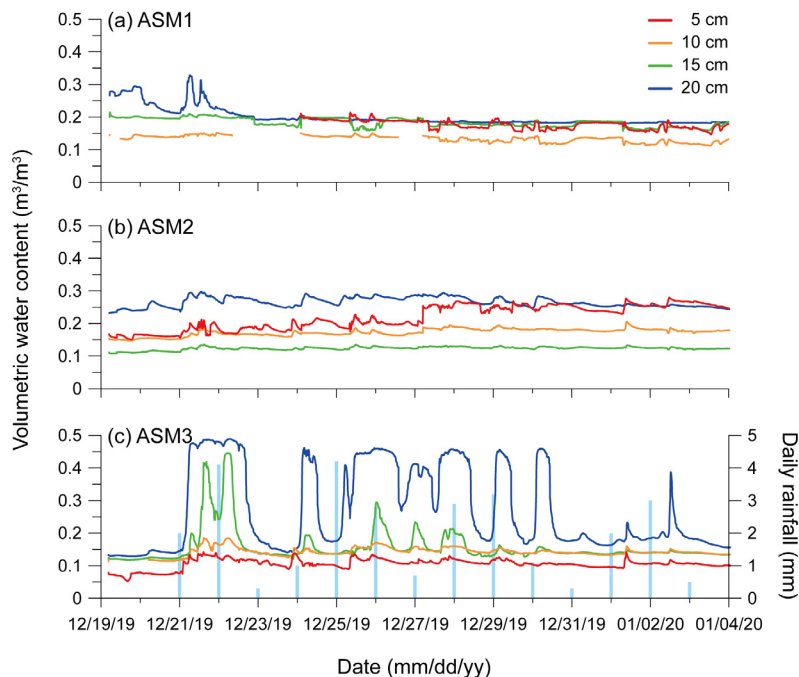


Fig. 5. Varying soil moisture contents measured every 5 minutes at depths of 5-20 cm at ASM1-3 from December 19, 2019 to January 4, 2020.

았다. 토양온도 중앙값의 경우 깊어질수록 낮지만 최솟값의 경우는 깊이와 큰 관련이 없는 것으로 판단했다(표 2).

기상자료와 비교했을 때 모든 지점에서 기온보다 일사량 시계열 자료와 더 부합하였다(그림 4, 6). 특히 다른 지점보다 AST3의 시계열 자료가 상승 및 하락 변동이 더 심하다. 자료 수집기간 중 12월 23, 28 일, 1월 3일에는 토양온도, 일사량, 기온이 다른 날보

다 상대적으로 낮고 이때의 상대습도는 다른 기간 보다 더 큰 값이 분포한다(그림 4, 6). ASM (=AST) 1 및 3의 일부 기간에 바람에 의해 5TM과 Em50이 분리되었고 이 기간의 토양수분 및 지온은 측정하지 못했다(그림 5, 6).

3.2 시계열적 특성

토양수분에 대한 자기상관분석 결과로 지연시간

Table 2. Statistics of soil temperature at different depths (5-20 cm) at AST1-3.

Site		Soil temperature (°C)			
		5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
AST1	Max	13.0	8.2	5.9	4.6
	Min	0.2	0.3	0.1	0.6
	Median	3.0	2.5	1.7	1.7
AST2	Max	12.1	10.6	11.4	12.2
	Min	0.3	0.3	0.3	0.1
	Median	3.1	2.4	1.8	1.1
AST3	Max	13.2	9.2	7.5	5.7
	Min	-0.6	0.2	0.3	0.2
	Median	2.8	2.4	2.0	1.3

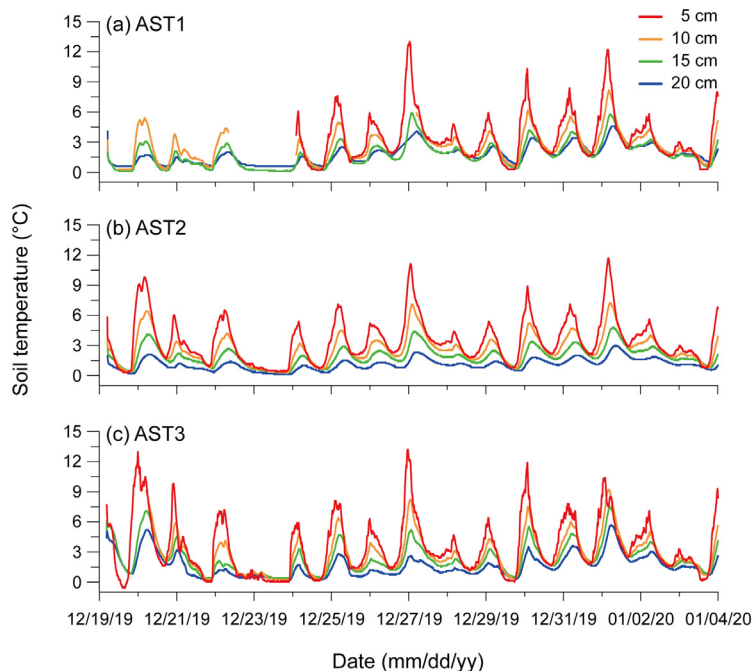


Fig. 6. Varying soil temperatures measured every 5 minutes at depths of 5-20 cm at ASM1-3 from December 19, 2019 to January 4, 2020.

은 완만할수록 짧았고 가장 짧은 지연시간을 보인 곳은 ASM3-10으로 20시간이었으며 상관함수가 가장 빠르게 감소한 곳 또한 ASM3-10이었다. ASM1-3의 각 지연시간은 145시간, 44-179시간, 20-36시간이었다. ASM3의 지연시간은 다른 지점보다 짧기 때문에 자기상관성이 낮으며 외부 영향에 대해 빠르게 반응한다는 것으로 해석하였다(그림 7). 이러한 시계열적 특성은 ASM3의 강우에 민감한 토양수분 시계열 자료에 잘 부합한다(그림 5). ASM3와 달리 ASM1은 외부 영향에 대해 가장 느리게 반응하는 지점인 것으로 판단했다. 스펙트럼분석 결과의 경우 17일 동안 측정했기 때문에 10일 이상인 주기는 신뢰하기 어렵다고 판단하였다. 10일 미만의 주기는 2.5-4.7일이었고 ASM1-5, 15가 2.5, 2.6일, ASM3-10, 15가 3.7, 4.7일의 주기를 보였다(그림 7).

토양온도에 대한 지연시간은 모든 지점에서 얕을수록 짧았고 가장 짧은 곳은 AST1-5로 7시간이었다(그림 8). 이는 기온이 높고 일사량이 많은 아침에는 토양온도가 지표면부터 증가했다가 밤에는 지표면부터 감소한다고 해석하였다. 토양온도 시계열 자료에 대한 주기가 크게 둘로 나뉘었는데 1-1.1일 주기와 5.3-6.0일 주기로 나뉘어졌다(그림 8). 이 중 후자는 일반적으로 알려진 일주기(1일) 및 연주기(365일)와 관련이 없고(Koo *et al.*, 2003) 뚜렷한 스펙트럼 밀도를 보이지 않는 기온(최대값=46.1)의 영향을 받은 것으로 보아 실제 AST1-20, AST2-20, AST3-20의 주기는 모두 1일로 판단했다(그림 8, 9). 기온 및 태양복사의 영향이 20 cm 깊이까지지는 더 얕은 깊이보다는 다르게 더 늦게 도달하기 때문으로 판단했다.

그림 10은 입력값을 토양온도, 기온, 일사량 및 상

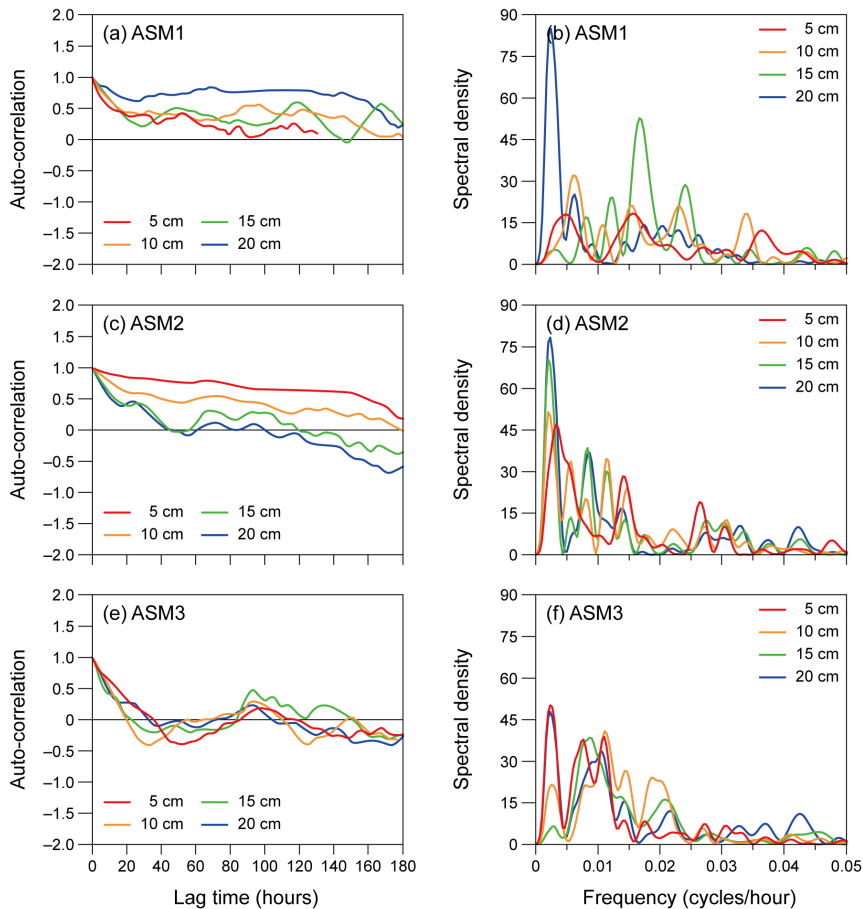


Fig. 7. Auto-correlation and spectral density functions of hourly soil moisture contents at different depths (5-20 cm) at ASM1-3.

대습도로 출력값을 토양수분으로 한 교차상관분석 결과이다. 그림 11은 입력값을 기온 및 일사량으로 출력값을 토양온도로 한 교차상관함수이다. 토양온

도-토양수분, 기온-토양수분의 경우 깊어질수록 지연시간이 증가했다(그림 10). ASM1의 경우 평균 최대지연시간이 가장 짧은 것은 일사량으로 5시간, 평

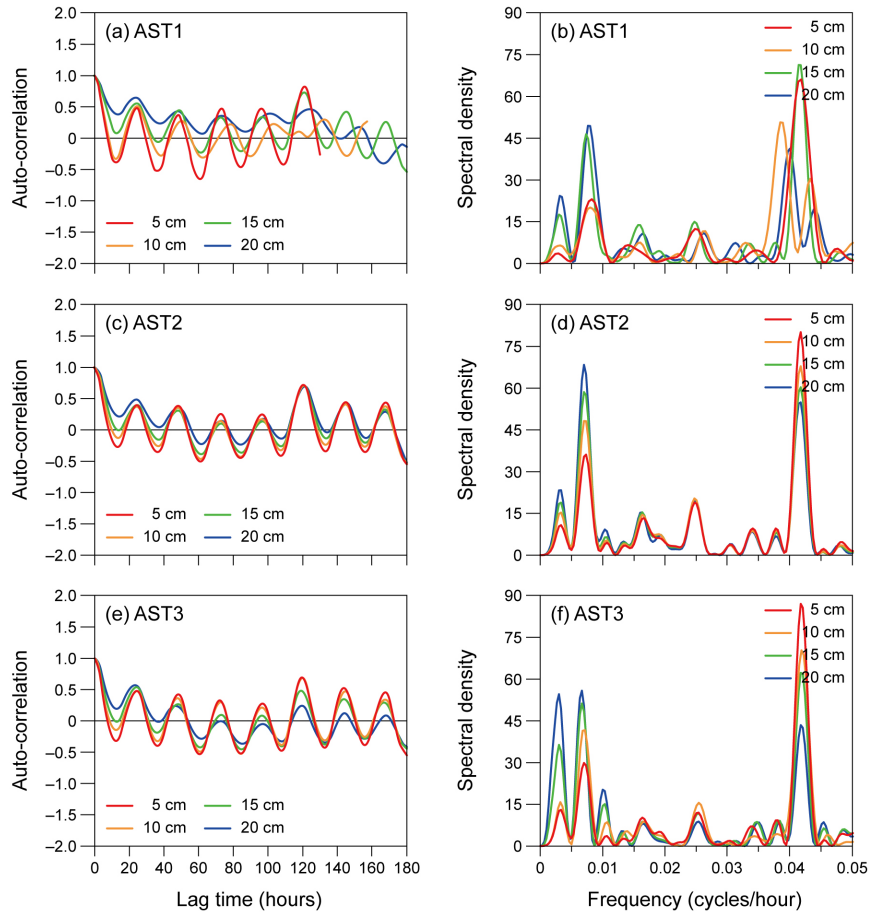


Fig. 8. Auto-correlation and spectral density functions of hourly soil temperatures at different depths (5-20 cm) at AST1-3.

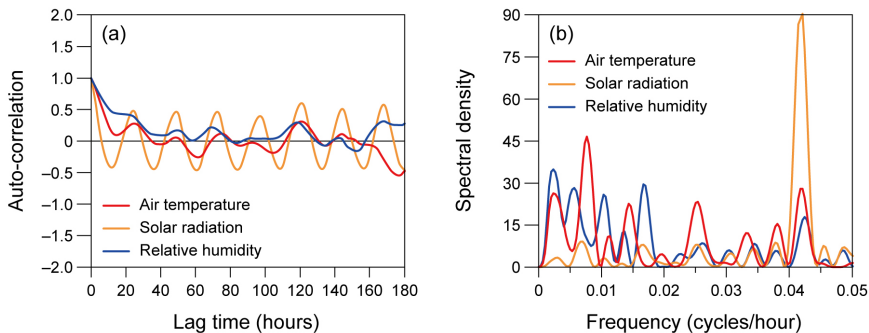


Fig. 9. Auto-correlation and spectral density functions of weather conditions (air temperature, solar radiation, and relative humidity) at Barton Peninsula.

균 최대교차상관계수가 가장 큰 것은 기온으로 0.55이다. ASM2의 경우 평균 최대지연시간이 가장 짧은 것은 기온으로 0.3시간, 평균 최대상관계수가 가장 큰 것은 상대습도로 0.59이다. ASM3의 경우 평균 최대지연시간이 가장 짧은 것은 상대습도로 13.5시간, 평균 최대상관계수가 가장 큰 것은 기온으로 0.44이다. 기온-토양온도는 일사량-토양온도보다 모든 지점에서 평균 최대지연시간이 짧고 AST3를 제외한 지점에서 평균 최대상관계수가 더 크다.

3.3 활동층의 열확산도 및 두께

토양온도 시계열 자료에 진폭, 대수 및 위상방정

식을 적용하여 겉보기열확산계수를 산정하였다(그림 12). 열확산계수는 $0.01\text{--}121.94 \text{ mm}^2/\text{sec}$ 의 범위(각 방정식에 따른 중앙값=0.59, 0.34 및 $0.59 \text{ mm}^2/\text{sec}$)였으며 전체 계수 중 94%가 $0.1\text{--}10 \text{ mm}^2/\text{sec}$ 의 범위였다. 진폭 및 대수방정식으로 구한 열확산계수의 중앙값과 관련하여 AST2에서는 알을수록 계수가 크다. AST1, 3에서는 10-15 cm 깊이에서 열확산이 가장 잘되었고 다른 깊이에서는 이보다 덜 확산되었다. 위상방정식으로 구한 모든 지점 및 깊이의 열확산계수 중앙값은 $1.33\text{--}1.39 \text{ mm}^2/\text{sec}$ 범위를 보였는데 이는 토양온도 시계열 자료의 위상차가 크지 않기 때문에 중앙값의 차이가 크지 않은 것($0.06 \text{ mm}^2/\text{sec}$)

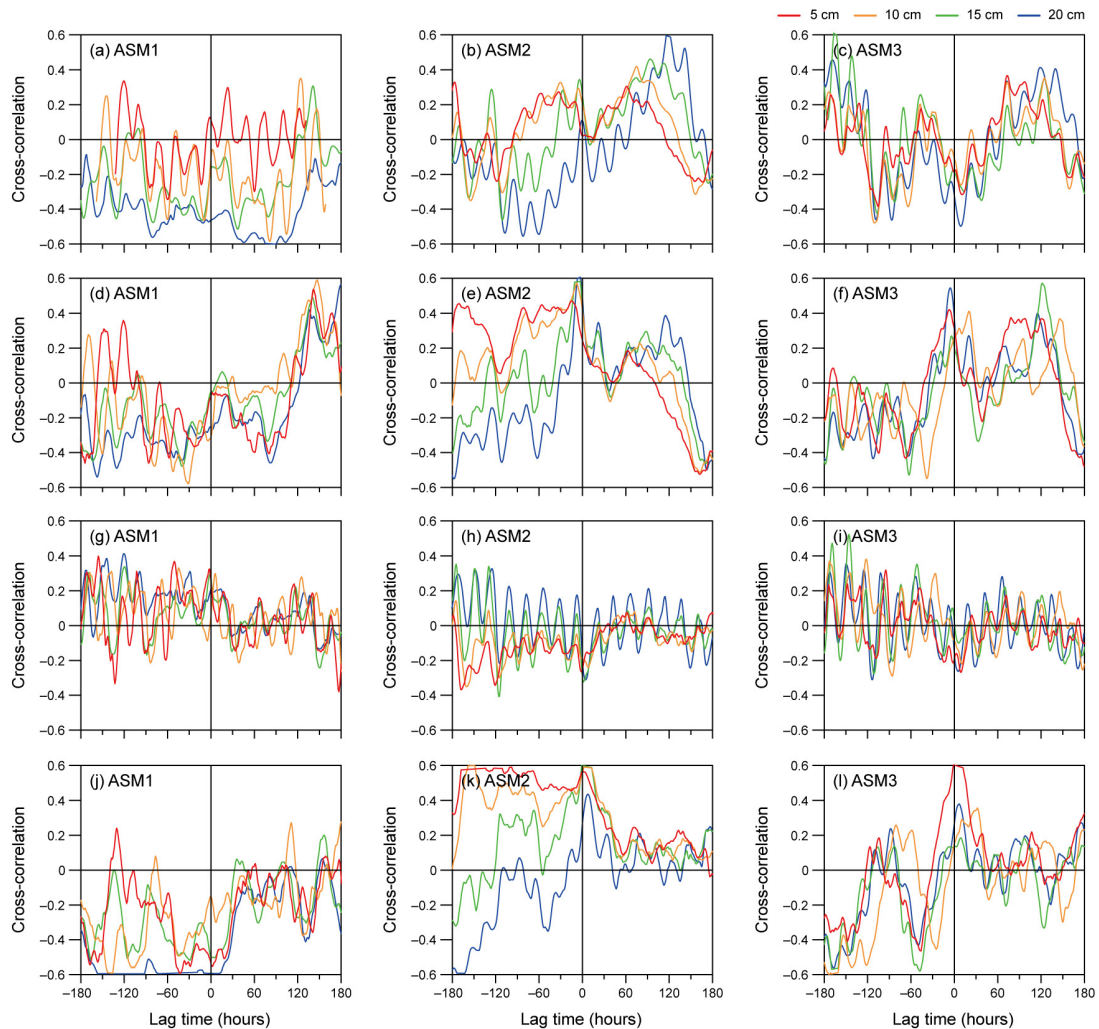


Fig. 10. Cross-correlation functions between (a-c) soil temperature, (d-f) air temperature, (g-i) solar radiation, (j-l) relative humidity (input) and volumetric soil water content (output) at different depths at ASM1-3.

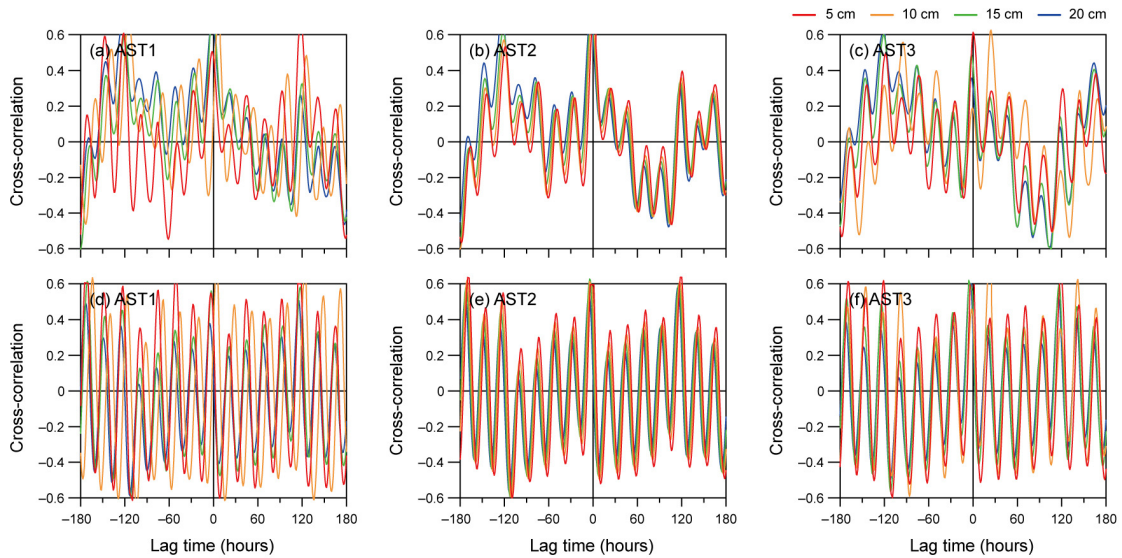


Fig. 11. Cross-correlation functions between (a-c) air temperature, (d-f) solar radiation (input) and soil temperature (output) at different depths at ASM1-3.

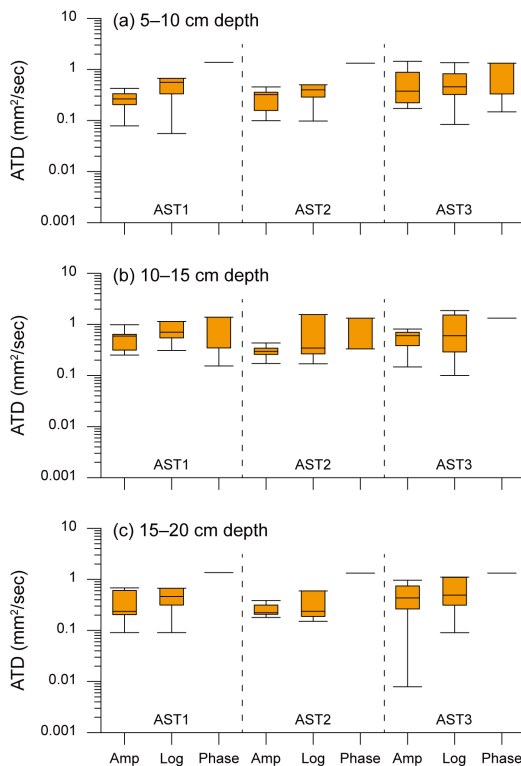


Fig. 12. Estimates ($n=15$) for apparent thermal diffusivity (ATD) with different depth intervals using three methods (amplitude, logarithmic, and phase equation).

이하)으로 사료된다.

Lee *et al.* (2016)은 2010년 12월 21일부터 2011년 1월 9일까지 10-30 cm 깊이의 남극세종과학기지 부지 내 토양온도 시계열 자료를 가지고 진폭, 대수 및 위상방정식을 사용하여 결보기열확산계수를 계산하였으며 이들 계수는 $0.02\text{--}29.21 \text{ mm}^2/\text{sec}$ 의 범위 (중앙값= $0.4\text{--}3.3 \text{ mm}^2/\text{sec}$)를 보였다. 동일 방법으로 구한 본 연구의 계수는 상기 중앙값의 최솟값에 가깝다. 이는 본 연구지역이 해안 근처(0.2 km 이내)로부터 1.5 km 나 떨어져 있어 토양수분 함량 및 토양온도의 외부 영향에 대한 민감도가 더 작기 때문이라고 해석했다. Kim *et al.* (2019)은 세종과학기지 부지 내 활동층의 2010년 12월 23일부터 2011년 11월 28일까지의 온도 시계열 자료에 대해 유한요소법을 적용하여 열확산계수를 산정하였고 그 계수는 $1.1\text{--}1.4 \text{ mm}^2/\text{sec}$ 의 범위를 보였다. Han *et al.* (2006)은 2003년과 2004년의 세종과학기지 기상관측소 바로 근처 토양의 20-80 cm 깊이의 온도에 대해 유한차분법을 이용하여 $0.8\text{--}1 \text{ mm}^2/\text{sec}$ 범위의 열확산계수를 구하였다. 해석해가 아닌 방법을 적용한 상기 두 연구의 열확산계수 범위는 본 연구의 계수 중앙값보다 더 크다. 기존 연구와 비교해봤을 때 해안 근처일수록 열확산이 더 잘 일어난다는 것으로 해석했다.

Table 3. Active layer thickness computed using profiles of the maximum soil temperature. Date of occurrence was used at date of the maximum soil temperature at 20 cm depth.

Site	Date (mm/dd/yy)	Soil temperature (°C)				Active layer thickness (cm)
		5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	
AST1	12/27/19	13.0	7.9	5.9	4.1	25.0
AST2	01/01/20	11.7	7.2	4.8	3.0	23.6
AST3	01/01/20	10.4	9.2	7.5	5.7	38.6

활동층 두께는 AST1-3에서 각각 25.0, 23.6, 38.6 cm로 추산되었다(표 3). 토양수분 및 온도 측정 장비 매설 시 굴착이 곤란한 토양층 깊이는 2019년 12월 19일에 AST1, 3에서 각각 23.0, 25.5 cm였다. 장비 설치 시점 이후로 온도가 상승하면서 동결되었던 토양층이 더 녹은 것으로 판단했다. Lee *et al.* (2016)은 세종과학기지 부지 내 토양온도 최댓값을 사용하여 활동층 두께를 41-70 cm, Jeon *et al.* (2016)은 43-77 cm로 계산하였다. Bockheim *et al.* (2007)이 시추자료를 토대로 계산한 맥머도 계곡(McMurdo Dry Valleys)의 활동층 두께는 고원지역(Mt. Fleming 등)에서 20 cm 이내, 해안으로부터 내륙 60 km 이내 지역(Wright Valley 등)에서 20-45 cm, 해안지역(Marble Point 등)에서 45-60 cm이다. Hong *et al.* (2016)이 계산한 동적 콘 관입기의 누적 타격횟수 기울기가 변하는 알래스카 활동층 두께는 57 cm이다.

4. 결 론

우리는 본 연구에서 남극 바톤반도 세종기지 주변 토양수분 및 지온의 시계열자료를 이용하여 자기 상관분석, 스펙트럼분석 및 교차상관분석을 수행하였고 활동층의 열확산계수 및 활동층 두께를 평가하였다. 그 결과 아래와 같은 주요 결과를 도출하였다.

토양수분 함량은 경사가 완만한 지점(8°)에서는 깊을수록, 가파른 지점(15-18°)에서는 20 cm 깊이를 제외하고 얕을수록 많다. 따라서 경사가 완만할 때는 수평적인 수분 흐름의 영향을, 가파를 때는 수직적인 수분 흐름의 영향을 더 받는 것으로 해석된다. 자기상관함수 분석 결과 ASM3의 지연시간(20-36 시간)은 외부 영향에 대해 다른 지점보다 빠르게 반응하는 것을 지시한다. 이는 토양수분 함량이 강우 강도에 상관없이 약 0.3 m³/m³의 등락폭을 보인 것과 기온이 0°C 이하일 때 이 지점의 토양온도만 영

하였던 사실과 일치한다.

본 연구의 바톤반도 열확산계수 중앙값 범위(0.34-0.59 mm²/sec)는 동일 방법으로 계산한 계수의 중앙값 범위(0.4-3.3 mm²/sec)의 최솟값에 가깝고 다른 방법으로 계산한 것(0.8-1.4 mm²/sec)보다 작다. 또한 기존 연구의 활동층 두께보다 2.4-53.4 cm 만큼 더 얇다. 이는 바다로부터 1.5 km 떨어진 본 연구지역과는 달리 기존 연구는 해안 근처(0.2 km 이내)의 토양온도에 대한 것이기 때문에 토양수분 함량 및 지온의 외부 영향에 대한 민감도가 해안 근처에서 더 크기 때문으로 해석했다.

감사의 글

이 논문은 극지연구소의 지원을 받아 연구되었으며(과제번호 PE20030) 또한 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(No. NRF-2015R1A4A1041105). 아울러 논문을 심사해주신 익명의 심사위원님들께 감사의 말씀을 드립니다.

REFERENCES

- Bockheim, J.G., Campbell, I.B. and McLeod, M., 2007, Permafrost distribution and active-layer depths in the McMurdo Dry Valleys, Antarctica. *Permafrost and Periglacial Processes*, 18, 217-227.
- 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, M., Gwak, Y. and Kim, S., 2017, The estimation of soil moisture characteristic curve and model parameters in a steep hillslope. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 17, 175-184 (in Korean with English abstract).

- Choi, H.M., Lee, J.Y., Ha, K. and Kim, G.P., 2011, The study on time series analysis of groundwater data and groundwater recharge in Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 21, 337-348 (in Korean with English abstract).
- Choi, T., Lee, B.Y., Lee, H.C. and Shim, J.S., 2004, Surface flux measurements at King Sejong Station in West Antarctica: I. turbulent characteristics and sensible heat flux. *Ocean and Polar Research*, 26, 453-463 (in Korean with English abstract).
- Decagon Devices, 2010, 5TM Operator's Manual. Pullman, U.S., 26 p.
- Decagon Devices, 2014, Em50/Em50R/Em50G Operator's Manual. Pullman, U.S., 77 p.
- Gwak, Y.S. and Kim, S.H., 2012, Soil evaporation evaluation using soil moisture measurements at a hillslope on a mountainous forest. *Journal of Korea Water Resources Association*, 45, 557-568 (in Korean with English abstract).
- Ha, K., Kim, Y. and Kim, S.Y., 2016, Monitoring of soil water content and infiltration rate by rainfall in a water curtain cultivation area. *Journal of the Geological Society of Korea*, 52, 221-236 (in Korean with English abstract).
- Han, S., Ahn, J.H. and Kim, S., 2009, The stochastic behavior of soil water and the impact of climate change on soil water. *Journal of Korea Water Resources Association*, 42, 433-443 (in Korean with English abstract).
- 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).
- Hong, W.T., Kang, S., Park, K. and Lee, J.S., 2016, Evaluation of active layer depth using dynamic cone penetrometer. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, 17, 49-54 (in Korean with English abstract).
- Ikard, S.J., Gooseff, M.N., Barrett, J.E. and Takacs-Vesbach, C., 2009, Thermal characterisation of active layer across a soil moisture gradient in the McMurdo Dry Valleys, Antarctica. *Permafrost and Periglacial Processes*, 20, 27-39.
- Jeon, W.H., Lee, J.Y., Lim, H.S. and Yoon, H.I., 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*, 52, 901-915 (in Korean with English abstract).
- Jeon, Y.M., Kim, S.B., Choe, M.Y. and Sohn, Y.K., 2009, Characteristics and origin of patterned ground in the Barton peninsula, King George Island, Antarctica. *Journal of the Geological Society of Korea*, 45, 29-46 (in Korean with English abstract).
- Kim, H., Lee, J.Y. and Kim, K., 2019, Estimation of thermal diffusivity of soils in Antarctica using temperature time series data. *Episodes*, 42, 245-252.
- Kim, H., Lee, K.K. and Lee, J.Y., 2018, Comparison of Carslaw and Jaeger method and finite element method to estimate temperature of soil in Antarctica. *Episodes*, 41, 51-58.
- Kim, J.J., Kim, C.S. and Lee, J.Y., 2020, Comparison of potential groundwater recharge in the rainy season of 2017 and 2018 by modeling with soil moisture in the Haeen Basin, Yanggu. *Journal of the Geological Society of Korea*, 56, 63-76 (in Korean with English abstract).
- Koo, M.H., Kim, Y., Suh, M. and Suh, M.S., 2003, Estimating thermal diffusivity of soils in Korea using temperature time series data. *Journal of the Geological Society of Korea*, 39, 301-317 (in Korean with English abstract).
- KOPRI, 2019, <https://www.kopri.re.kr/kopri/html/infra/020103.html?mode=V&no=2de028837cfa6faa33fad34603b6c482&GotoPage=1> (September 30, 2019).
- 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, Y.I., Choi, T. and Lim, H.S., 2019, Petrological and geochemical compositions of beach sands of the Barton and Weaver peninsulas of King George Island, West Antarctica: implications for provenance and depositional history. *Episodes*, 42, 149-164.
- Oliva, M., Antoniadou, D., Serrano, E., Giralt, S., Lium, E.J., Granados, I., Rabes, S.P., Toro, M., Hong, S.G. and Vieira, G., 2019, The deglaciation of Barton Peninsula (King George Island, South Shetland Islands, Antarctica) based on geomorphological evidence and lacustrine records. *Polar Record*, 55, 177-188.
- Park, Y.Y., Mok, J.K., Jang, B.J., Park, Y.C. and Lee, J.Y., 2013, Influence of open and closed loop geothermal cooling and heating systems on hydrogeological properties. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 649-659 (in Korean with English abstract).
- Pringle, D.J., Dickinson, 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, B10, 2474.
- Ravindra, R. and Rajan, S., 2020, Advances in Antarctic geoscience studies: Indian contributions. *Episodes*, 43, 563-574.
- Ruosteenoja, K., Markkanen, T., Venalainen, A., Raisanen, P. and Peltola, H., 2018, Seasonal soil moisture and drought occurrence in Europe in CMIP5 projections for

- the 21st century. *Climate Dynamics*, 50, 1177-1192.
- Srivastava, R.K., 2020, Early Cretaceous alkaline/ultra-alkaline silicate and carbonatite magmatism in the Indian Shield - a review: implications for a possible remnant of the Greater Kerguelen Large Igneous Province. *Episodes*, 43, 300-311.
- Thamban, M., 2020, Palaeoclimatic records from Antarctica and southern ocean: a review of Indian contributions. *Episodes*, 43, 575-585.
- Yeom, K.J., Kim, K.I., Kim, Y.P., Oh, K.H. and Kim, W.S., 2014, Finite element analysis of gas pipelines depend on the Arctic of active region. *Journal of the Korean Institute of Gas*, 18, 72-77 (in Korean with English abstract).
- Yun, S.W., Shin, G.S. and Lee, J.Y., 2018, Evaluation on hydrogeologic characteristics of the paddy fields in the Hae-an Basin, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 54, 399-413 (in Korean with English abstract).

Received : August 7, 2020

Revised : September 11, 2020

Accepted : September 14, 2020