

## 세종과학기지 주변 영구동토의 활동층에 대한 시간경과 전기비저항자료의 해석: 기상 및 식생 자료와의 연계해석

김관수<sup>1,2</sup> · 이주한<sup>1</sup> · 이응상<sup>3</sup> · 주현태<sup>1</sup> · 현창욱<sup>1</sup> · 박상종<sup>1</sup> · 김옥선<sup>1</sup> · 이선종<sup>2</sup> · 김지수<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>극지연구소, <sup>2</sup>충북대학교 지구환경과학과, <sup>3</sup>충남대학교 우주·지질학과

### Time-Lapse Electrical Resistivity Structures for the Active Layer of Permafrost Terrain at the King Sejong Station: Correlation Interpretation with Vegetation and Meteorological Data

Kim Kwansoo<sup>1,2</sup>, Lee Joohan<sup>1</sup>, Lee Eungsang<sup>3</sup>, Ju Hyeontae<sup>1</sup>, Hyun Chang-Uk<sup>1</sup>, Park Sang-Jong<sup>1</sup>, Kim Ok-Sun, Lee Sun-Joong<sup>2</sup> and Kim Ji-Soo<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Korea Polar Research Institute, Incheon, 21990, Korea

<sup>2</sup>Dept. of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National Univ., Cheongju, 28644, Korea

<sup>3</sup>Dept. of Astronomy, Space Science and Geology, Chungnam National Univ., Daejeon, 34134, Korea

(Received: 22 July 2020 / Revised: 11 August 2020 / Accepted: 21 August 2020)

Over the wide area, King Sejong Station and the nearby land are uncovered with snow and ice conditions. Therefore, the active layer on the permafrost has been formed to be much thicker than the other Antarctica region. Electrical resistivity survey of Wenner and dipole-dipole arrays was undertaken at a series of time in the freezing season at the King Sejong Station to delineate subsurface structure and to monitor active layer in permafrost terrain. Time-lapse resistivity structures are well in terms of the vegetation distribution, ground surface temperature, and snow depth. Horizontal high resistivity belt(>1826  $\Omega$ m) at very shallow depth is thickening with the lapse of time, probably caused by the freezing of the water in the pore spaces with decrease of ground temperature. Subsurface structures for the area of low snow-cover and vegetated zone area are comprised of 0~0.5 m deep high-resistive gravel-rich soil, 0.5~3 m deep low-resistive active layer, and the underlying permafrost. In contrast, the unvegetated area and high snow-buildup is characterized with high resistivities larger than approximately 2000  $\Omega$ m due to freezing of the soil throughout the year. Data interpretation and correlation schemes explored in this paper can be applied to confirm the active layer, which is expected to get thinner in additional survey during the thawing season.

**Key words** : time-lapse electrical resistivity, active layer, permafrost, King Sejong Station, ground temperature

남극 세종과학기지 주변은 넓은 지역에 눈과 얼음이 덮여있지 않은 육지가 드러나 다른 남극 지역에 비해 활동층이 비교적 두꺼우며 그 아래 동토층이 존재한다. 전기비저항탐사의 배열법 중 웨너 배열법과 쌍극자 배열법을 이용하여 세종과학기지 주변 동토 지역에 결빙기 기간 동안 시간 변화에 따른 활동층의 변화를 조사하였다. 시간 변화에 따른 전기비저항 결과는 식생 분포, 지상 온도 및 적설량의 상태에 따라 잘 일치하였다. 극 천부인 수평적인 고비저항대(>1826  $\Omega$ m)에서는 시간에 따른 두께 변화를 보여주었는데, 이는 지중 온도의 감소로 공극내 존재하던 공극수가 얼어 상대적으로 전기비저항 값이 높아지는 것으로 보인다. 적설이 발생하지 않는 식생활동이 활발한 구간은 깊이 0.5 m 까지 토양 속에 혼재된 많은 자갈로 인해 비저항이 높았고 깊이 0.5~3 m 에서는 그 아래 동토층이 존재한다. 반대로, 적

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided original work is properly cited.

\*Corresponding author: [geop22@chungbuk.ac.kr](mailto:geop22@chungbuk.ac.kr)

설량이 많은 식생이 존재하지 않는 구간에서는 전기비저항값이 약 2000  $\Omega\text{m}$  이상의 고비저항대가 나타나는데 이곳은 연중 얼어있는 것으로 해석된다. 결빙기에 두꺼워지는 활동층은 차후 해빙기에 추가 탐사를 할 경우 이와 반대로 접차 얇아지는 두께로 보다 명확히 검증될 수 있을 것으로 보인다.

**주요어** : 시간경과 전기비저항, 활동층, 영구동토, 세종기지, 지상온도

## 1. 서 론

남극의 98%는 얼음과 눈으로 쌓여 있으며 육지가 드러난 2%의 영역에서 많은 연구가 수행되고 있다. 지표면이 드러난 2%의 육지에서는 다양한 생물들이 공존하며 혹독한 환경속에서 적응해가며 살고 있다. 토양이 넓게 드러난 남극 세종과학기지 주변은 이끼(moss)와 지의류(lichen)가 넓게 분포하고 있다. 이 식물들은 낮은 온도, 강한 바람과 많은 눈을 견디며 조금씩 자라고 있지만 최근 지구 온난화로 인해 식물의 광합성 및 수분공급이 활발해져 그 성장 속도가 과거보다 빨라지고 있다. 자연의 영역으로만 여겨지던 남극대륙은 최근 많은 국가들이 기지를 세우면서 기지 주변 환경이 변하고 있다. 세종과학기지 또한 연구를 위해 만들어진 건물이 국지적으로 적설을 증가시켜 식생의 변화가 일어나고 있다. 종전보다 눈이 많이 쌓이는 환경이 만들어 지면서 수분공급이 활발해져 식생의 생장이 증가할 것으로 추측되었던 지역이 오히려 기존에 있던 식생들이 점차 죽어가는 곳으로 변화였다.

극 지역 및 고산지역에서 식생 바로 아래 분포하는 지질은 동토를 포함하고 있다. 여름철 최고기온 5도에 도달하는 남극의 해안 지역은 활동층의 두께가 최대 3m 가량 되지만 최고기온 15도에 도달하는 북극권에서는 활동층의 두께가 10m 가량 되어 큰 차이를 보인다.

동토지역에 대한 조사는 국제적으로 활발하게 수행되어왔다. 북극권 국가들은 서로 연합하여 연구를 진행하고(Westermann *et al.*, 2010; Briggs *et al.*, 2017) 미국, 러시아, 중국 등은 일찍이 남극기지를 건설하여 현재 대륙 내 건설된 기지를 통해 활발한 연구를 진행 중이며, 특히 극지역보다 비교적 접근이 용이한 알프스산맥, 히말라야 산맥 등 고지대에서도 동토 연구가 활발히 진행 중이며 최근에는 여기서 도출된 결과들을 글로벌 지구환경 문제에 접목하고 있다(Hubbard *et al.*, 2012; Dafflon *et al.*, 2016; Du *et al.*, 2016; Dafflon *et al.*, 2017). 또한 동토 연구와 병행하여 발달한 동토환경의 시추기술, 온도변화와 활동층의 변동 자료의 꾸준한 축적으로 동토와 활동층에

대한 이론적인 모델의 구현까지 가능해졌다(Elchin and Kevin, 2016).

동토가 없는 우리나라의 본격적인 연구는 세종과학기지의 건설 초기에 단편적으로 실시한 지질조사(Kang and Jin, 1989; Park, 1989; Jin *et al.*, 1991) 및 지구물리탐사(Kim *et al.*, 1989; Kim and Lee, 1991; Kwon and Jwa, 1991; Kim and Lee, 1992; Kim and Lee, 1993; Kim *et al.*, 1996)를 통해 시작되었다. 이 중에서 동토에 대한 탐지능이 좋은 것으로 알려진 전기비저항탐사(Kneisel, 2004)에서 전극간격이 10 m인 쌍극자 배열로 운용된 연구(Kim *et al.*, 1996)는 동토의 기저면 및 그 하부의 불투수층을 탐지하였으나 극천부의 활동층에 대한 조사에는 한계를 보였다.

이번 연구에서는 천부지질에 해당하는 결빙기 동토층의 상부와 활동층의 시간적인 변화를 파악하기 위해 그동안 쓰레기 매립지 및 누수환경탐사에서 활용되었던(Kim *et al.*, 1995; Ji and Oh, 2015; Jeong and Kim, 2019) 전기비저항탐사 모니터링기법(Ahn *et al.*, 2015; Lim, 2018)을 적용하였다. 우선 전극간격 1 m의 웨너 배열과 쌍극자 배열을 병행하여 활동층과 동토에 대한 분해능을 살펴본 후, 2020년 2월 말부터 5월 말까지 시차를 두고 수차례 고분해능 시간경과 전기비저항탐사(high-resolution time-lapse electric resistivity)를 수행하였다. 여기서 파악된 지하의 전기비저항 구조를 100 m 이하의 좁은 폭에서 극명하게 대비되어 나타나는 이 지역의 식생 분포, 적설 현상 및 지상온도 등과 연계시켜 결빙기(freezing season)에 따른 영구동토의 활동층의 변화를 해석하고자 하였다.

## 2. 영구동토층과 활동층

영구동토에 대한 첫 문헌은 1830년대 왕립지리학회(Royal Geographical Society of London)에서 러시아 Yakutsk 지역의 언땅(frozen ground)에 대한 지침을 허드슨 베이(Hudson Bay)의 한 관리에게 내린 것을 기점으로 등장하였고, 보다 체계적이고 과학적인 연구는 2차 세계대전 동안에 전락 차원에서 캐나다 브리티

쉬 콜롬비아 주 북부에서 유콘 준주를 거쳐 알래스카 까지 건설되는 알래스카 하이웨이를 건설할 때 시작되었다. 영구동토(“permafrost”)의 어원은 뮐러(S.W. Müller)가 “permanent frost”를 처음으로 사용한 것에서 기인한다(Osterkamp and Burn, 2003).

영구동토는 온도가 2년 이상 0°C 이하로 유지되는 토양을 일컫는데 지구 표면의 약 1/5을 차지하며 그 대부분은 북극이나 남극에 가까운 고위도 지역에 자리 잡고 있지만 히말라야 산맥과 알프스 산맥 등과 같이 낮은 위도의 고산지대에 존재할 수 있다. 또한 동토 내에는 얼음이 많이 포함된 환경과 그렇지 않은 곳도 있다. 최근에는 기후가 계속 따뜻해져 영구동토층이 그만큼 사라지게 되어 그동안 간혀있던 죽은 동식물의 유기물 분해로 온실가스(이산화탄소와 메탄)가 빠져나와 지구 온난화가 더 빨라지는 악순환이 시작되는 문제점도 대두되고 있다.

영구동토층 위에 존재하는 활동층(active layer)은 대기의 온도, 적설 상태, 지표수의 분포와 연관성을 갖는다. 즉, 여름철에는 온도가 0°C 이상으로 올라가고 겨울철에는 온도가 0°C 이하로 내려가면서 활동층은 지표면부터 온도변화가 일어나며 얼고 녹고를 반복한다(Fig. 1). 지표의 적설량이 많아지면 쌓인 눈은 열전도율(thermal conductivity)을 낮추고 영하인 외부 기온에 영향을 덜 받게 하는 일종의 절연체 역할을 하게 되어 활동층의 온도가 내려가는 것을 늦춘다. 반대로 기온이 영하에서 영상으로 바뀔 때는 눈이 쌓이지 않은 지면보다 온도 상승률이 작아진다.

영구동토층과 활동층의 경계면에는 활동층이 녹으면서 생기는 물이 매질의 공극을 따라 이동하는데 그 깊

이는 여름철 온도가 높아질수록 깊어진다. 동토층 밑에는 지열에 의해 온도가 0°C 이상을 유지하는 얼지 않는 층(unfrozen ground)이 존재한다. 활동층의 두께는 주로 여름철의 지표 온도에 따라 달라지는데 온도가 낮을수록 활동층은 얇게 형성되는데 유럽 PAGE 영구동토 모니터링 네트워크의 시추자료들에서 기록된 자료에 의하면 최소 0.75~3.12 m, 최대 1.0~8.55 m 까지 다양하게 나타난다(Harris, et al, 2009). 1990년 대부터는 지온변화에 의한 동토와 활동층을 체계적으로 연구하고 그 변화 양상을 통하여 고기후 복원(paleoclimate reconstruction)에 필요한 정보까지 얻어내고 있다(Han and Jung, 1994, Harrison, 1991).

### 3. 연구지역 정보

#### 3.1. 지질 및 지상환경

우리나라 최초의 남극기지인 세종과학기지(King Sejong Station)는 남세틀랜드 제도의 킹 조지(King George)섬 바톤 반도(Barton Peninsula)(남위 62° 13', 서경 58° 47')에 위치하며 1988년 2월 완공되어 현재 극지연구소 소속 17명의 연구원 및 기술원들이 상주하며 운영하고 있고 하계 기간에는 최대 100명을 수용 가능한 시설을 갖추고 있다.

연구지역인 바톤 반도의 지질환경은 안산암과 제 4기 홀로세 시대의 해양 퇴적물이 공존하며(Fig. 2) 천부 지질의 밀도는 2.2 g/cm<sup>3</sup>이며 주된 암석인 집괴암, 각력암, 석영섬록암의 밀도는 각각 2.5 g/cm<sup>3</sup>, 2.6 g/cm<sup>3</sup>, 2.7 g/cm<sup>3</sup>으로 조사된 바 있다(Kim et al, 1996). 부지의 북서쪽 방향으로는 경사가 완만한 평지이며 지표 지질 상태는 흙과 큰 자갈들이 혼재하고 부분적으로 이끼와 지의류들이 공존하여 자라고 있다. 탐사지역은 1988년 준공 당시 지어진 고층대기 관측동을 2008년 보수하며 추가로 건설한 대기·빙하 관측동에서 서쪽으로 약 25 m 떨어진 평탄한 지역으로 고층대기 관측동을 기준으로 남쪽 방향으로는 눈이 쌓이지 않고(Fig. 3a) 45 m 지점에서 북서쪽을 바라보면 특정 구간에 눈이 많이 쌓인 것을 확인할 수 있다(Fig. 3b,c). DJI사의 제품명 Inspire2 드론을 이용하여 현장 사진을 여러 장 찍은 후 Photoscan 프로그램을 이용해 고도 정보를 얻은 결과 0 m 지점의 고도는 63 m 지점에 비해 약 5 m 높은 것이 확인되었다.

고층대기 관측동이 지어지기 전 서쪽에는 이끼와 지의류가 고르게 분포하였고 소규모의 구조토(patterned ground)가 발달 되어 있었다. 그러나 해가 갈수록 일부

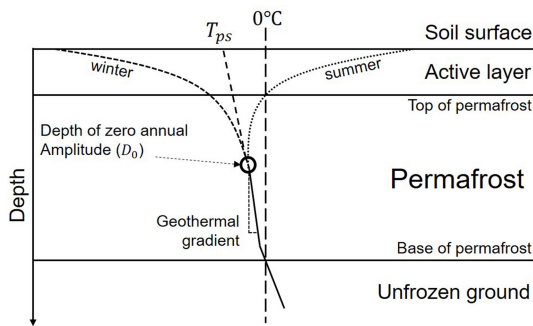
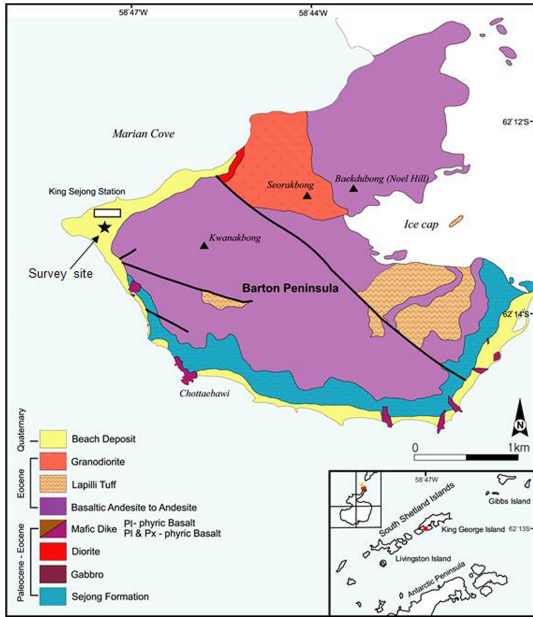
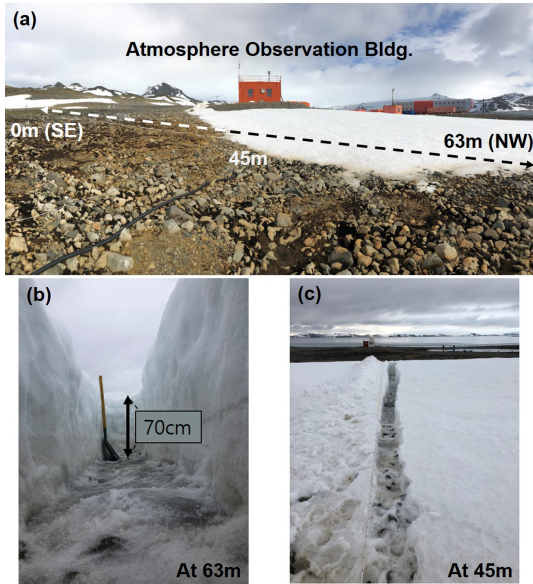


Fig. 1. Schematic temperature profiles in active layer, permafrost, and unfrozen ground.  $T_{ps}$  is the annual mean permafrost surface temperature and  $D_0$  is the depth of zero annual temperature amplitude (Modified from Osterkamp and Burn, 2003).

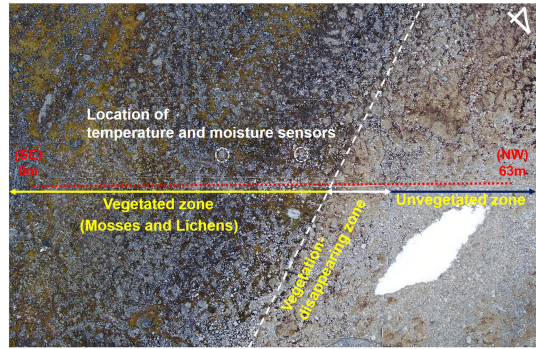


**Fig. 2.** Geological map of the Barton Peninsula. Survey site of the King Sejong Station is represented by the arrowed star.



**Fig. 3.** (a) Ground condition of survey site and photographs of the snow depth at (b) 63 m station and (c) 45 m station. Snow buildup is much higher in the northwest than in the southeast.

구간에서 식생이 줄어들다가 최근에는 식생이 완전히 사라진 영역도 생겼는데 이곳을 중심으로 주변부에 죽



**Fig. 4.** A drone-picture showing the vegetated, vegetation-disappearing, and unvegetated zones nearby the electrical survey line.

은 이끼 및 지의류를 쉽게 확인할 수 있었다(Fig. 4).

### 3.2. 식생자료

1970년대에 Rouse에 의해 제안된 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)는 식생에 강하게 반사되는 주 파장대역이 0.86 μm인 근적외선(NIR: Near Infrared)과 강하게 흡수되는 주 파장대역 0.66 μm의 적색광(RED)의 차이를 측정하여 식생을 수치로 정량화 할 때 사용하는 식생 지수이다(Rouse *et al.*, 1973; Schnur *et al.*, 2010).

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

식 (1)에 포함된 NIR과 RED는 각각 근적외선 밴드의 분광반사도와 적색밴드의 분광반사도이다. 활력도가 높거나 식생 분포 밀도가 큰 경우 다른 파장에 비해 근적외선을 더 많이 반사하고 적색광을 더 많이 흡수한다. 근적외선과 적색광의 분광반사도 값을 식 (1)에 각각 대입하여 얻는 NDVI 값은 -1~1 사이를 나타내며 1에 가까운 값일수록 식생이 활발하게 성장하는 것을 나타내고 0에 가까울수록 식생 활동이 거의 없는 돌과 흙이 존재하는 구역을 나타낸다. 일반적으로 구름, 물, 눈에서는 0에 근접하거나 음수값이 나온다. 남극의 식생 분포에 대해서도 효율적 탐지를 위해 NDVI가 사용될 수 있으며(Hughes *et al.*, 2016), 무인기에 다중분광 센서를 탑재하여 활용하면 작은 크기의 이끼나 지의류 등 남극 식생 분석에 적합한 고해상도 영상 획득이 가능하다(Turner *et al.*, 2014).

2018년 1월 8일에 eBee 무인기(Sensefly SA, Cheseaux-sur-Lausanne, Switzerland)에 탑재한 Sequoia

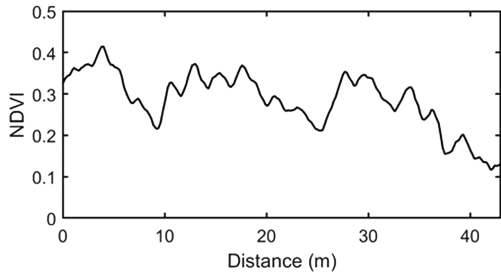


Fig. 5. NDVI value profiles from 0 m station to 42 m station, with the sample interval of 25 cm.

다중분광 센서(Parrot SA, Paris, France)로부터 영상을 획득하였다. Sequoia 다중분광 영상으로부터 산출된 NDVI는 Sentinel-2 인공위성 기반 NDVI와 비교 시  $r^2=0.91$ 의 높은 상관도가 보고되어(Fawcett *et al.*, 2020) 남극 식생과 같은 작은 공간 단위의 분석이 필요한 경우 인공위성 기반 정보와 유사한 품질의 영상 자료 획득에 사용될 수 있다. 자료 분석 결과 측정간격 25 cm로 취득한 NDVI 자료(Fig. 5)에서 0 m 지점부터 35 m 지점까지 NDVI 값이 소폭 감소하였고 부분적으로 감소한 곳은 큰 돌과 구조토 중심부에 쌓여 있던 흙의 영향으로 해석한다. 37 m 지점부터 43 m 지점까지 NDVI 값은 급속히 감소된 크기의 진동 상태를 보인다. 이것은 장기간 눈이 많이 쌓인 이유로 식생이 죽어가고 있는 구간(vegetation-disappearing zone)(Fig. 4)과 잘 부합된다. 43 m 지점부터는 측정된 당일 많은 눈이 쌓여있던 관계로 NDVI를 측정하지 못했다.

### 3.3. 기상 및 지중 온-습도 자료

남극 세종과학기지 주변은 지난 1988년~2017년 사이 30년 동안 연평균 기온은  $-1.7^{\circ}\text{C}$ , 월평균 최저기온은 7월의  $-5.5^{\circ}\text{C}$ , 월평균 최고기온은 1월의  $1.9^{\circ}\text{C}$ 이며 해가 떠 있는 시간은 남극의 하지 기준 약 20시간이고 동지 기준으로는 약 4시간이며 일교차는 크지 않다(Park *et al.*, 2019). 연평균 기온은 관측을 시작한 1988년부터 1998년까지 높아지는 경향을 보였으나 1999년부터 2010년 사이 낮아지는 경향을 보이다가 2011년부터 최근까지 다시 상승하는 경향을 보인 최근 기온의 상승 폭은 1998년 이전보다 3배가량 증가하였으며 연평균 적설량은 약 600 cm 이고 1년 동안 눈이 오는 날은 평균 193일, 비가 오는 날은 평균 95일로 1년 중 약 80%의 날에 강수가 발생했다(Park *et al.*, 2019). 세종과학기지에서 관측된 평균 풍속은 약 8 m/s

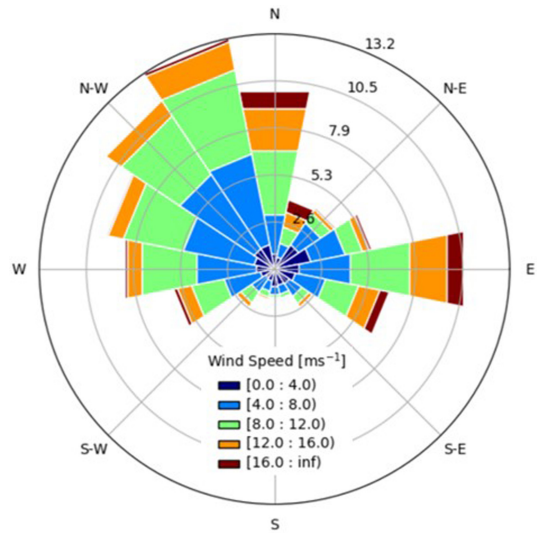


Fig. 6. Wind speed and direction dominated in the survey area during the period of the year of 1988-2017. Wind prevails in the northwest.

로 Wind Rose에서 나타난 풍향은 북서풍에 치우쳐져 있으나 동풍 또한 자주 발생하며 풍속도 강하다(Fig. 6). 특히 동풍은 비가 자주 오는 여름보다 눈이 자주 오는 겨울에 훨씬 강하게 분다(Jeon *et al.*, 2016). 바람은 진행방향에 시설물 및 건물 등과 같은 장애물이 있는 곳에서 풍속이 급격히 줄어들게 되는데 이 현상은 건물 뒷편에 와류를 발생시켜 풍향의 반대편으로 눈보라가 많은 눈을 쌓이게 한다(Tominaga *et al.*, 2011). 이 현상으로 인해 연구지역에서는 눈을 포함한 강한 동풍이 서쪽 방향으로 진행하다가 대기관측동 건물에 가로막혀 바람의 속도가 줄어들며 대기관측동 서쪽 방향으로 많은 적설을 발생시킨다. 기상측정 장비는 연구지역으로부터 남서쪽 약 90 m 떨어진 거리에 위치해 있으며 풍속계는 지면으로부터 10 m, 온도계와 강수 측정 장비는 지면으로부터 1.5 m 위에 설치되어 있다.

지중온도 및 습도는 2017년 2월 전기비저항 측선의 25, 35 m 지점에 온도와 습도 센서를 각각 (40 cm, 60 cm)와 (60 cm, 80 cm)에 1쌍씩 설치하여 2년간 토양의 안정화를 거쳐 2019년 1월 31일부터 2020년 1월 12일까지 1시간 간격(매 정시)으로 자료를 수집하였다. Fig. 7은 이 중에서 거리 25 m 지점에 대한 온-습도 자료로서 1988년부터 2017년까지의 1월을 제외한 월별 적설량을 함께 포함시켰다. 적설량은 대기 온도가 본격적으로 영하권에 머무르는 4월에 급격히

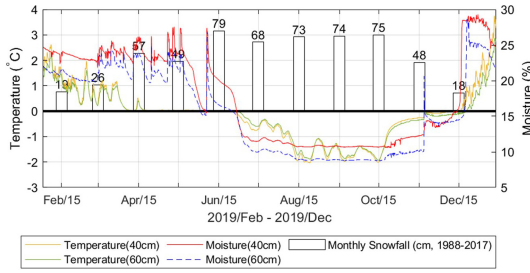


Fig. 7. Monthly snow-depth bar and temperature and moisture records which are measured by the sensors installed at depths of 40 cm and 60 cm at the 25 m station.

증가하여 6월부터 10월 사이 5달간의 적설량은 연평균 적설량의 약 2/3를 기록했다. 지중온도는 4월 초를 시작으로 0°C를 유지하다 일시적으로 4월 중순에 0°C를 넘어갔으나 6월 말부터 다시 0°C 미만으로 떨어지기 시작했다. 지중온도의 최저기온은 8월 중순부터 10월 중순 사이 -2°C를 나타냈다. 10월 중순부터 온도는 꾸준히 상승하는데 40 cm 깊이에 설치한 얇은 깊이의 센서가 60 cm에 설치된 센서 보다 온도와 습도 모두 빨리 상승하여 0°C 이상을 보이는데 이것은 깊이가 얇을수록 대기 온도의 영향을 많이 받는다는 점을 뒷받침해 준다.

4. 시간경과 전기비저항탐사 자료해석

4.1. 활동층에 대한 아치의 법칙(Archie's law)의 적용

토양에서는 공극 유체의 전기비저항이 모암의 전기비저항보다 더 중요한 역할을 한다(Archie, 1942). 즉, 암석의 공극률( $\phi$ ), 물로 채워진 공극이 차지하고 있는 부분( $s$ ), 물의 전기비저항( $\rho_w$ )을 고려한 유효(전체) 전기비저항( $\rho$ )는 다음과 같이 표현된다.

$$\rho = a\phi^m s^{-n} \rho_w \tag{2}$$

식 (2)에서 다시 설명하면  $\rho$ 와  $\rho_w$ 는 각각 암석의 유효 전기비저항과 공극수의 전기비저항이다.  $\phi$ 는 공극률,  $s$ 는 물로 채워진 공극이 차지하는 비율, 즉 포화도이며,  $a$ ,  $m$ ,  $n$ 은 각각  $0.5 \leq a \leq 2.5$ ,  $1.3 \leq m \leq 2.5$ ,  $n \approx 2$ 의 범위를 갖는다(Kim *et al.*, 2014).

여기서 공극을 채우고 있는 물이 얼음으로 대체되면 식 (2)는 식 (3)으로 바뀌진다.

$$\rho = a\phi^m (1-s)^{-n} \rho_w \tag{3}$$

공극 내에 물이 증가할 경우 식 (2)에서  $s$  값이 커

지면서  $\rho$  값은 작아지지만 결빙기간 중 지상기온이 떨어질수록 얼게 되면 식 (3)의 얼음부분 ( $1-s$ )이 감소하여 전체 전기비저항 값  $\rho$ 는 커지게 된다. 따라서 결빙기로 들어설수록 지상온도에 반응하는 천부의 고비저항대의 두께는 커지고 이와 반대로 해빙기에 접어들수록 작아질 것이다. 결빙기로 갈수록 천부의 고비저항대가 두꺼워지는 것은 토양 매질 사이의 공극을 채우고 있던 물의 일부가 얼음으로 되기 때문이다. 일반적으로 동토의 전기비저항 값은 1000  $\Omega m$  이상으로 나타나며 매질, 온도와 공극 내 분포하는 얼음의 양에 따라 달라진다(Telford, 1990).

4.2. 자료수집 및 자료처리

자료수집은 ABEM사의 LS Terrameter1을 사용하였으며 전극은 1m 간격으로 총 64개를 약 5시간 동안 설치하였다. 전극은 지표면이 완전히 녹기 시작한 2019년 1월에 접지저항을 고려해 자갈 일부를 제거하고 주변 흙을 채워 넣어 40 cm 깊이까지 설치하였다. 자료는 전극을 설치한 주변부의 안정화 기간을 충분히 고려하여 1년 후 남극의 결빙기인 2020년 2월 말부터 얻기 시작해 5월 말까지 약 2주 간격으로 3달간 총 7회 취득하였다.

탐사 배열법은 천부의 분해능에 가장 적합한 웨너 배열(Wenner array)과 깊은 투과 심도를 보이는 것으로 알려진 쌍극자 배열(dipole-dipole array)의 장점(Kim *et al.*, 2001)을 고려하여 두 개의 배열을 함께 사용하였다(Fig. 8). 즉, 활동층에 대한 정보는 웨너 배열, 동토층에 대한 정보는 쌍극자 배열 자료를 참고하였다.

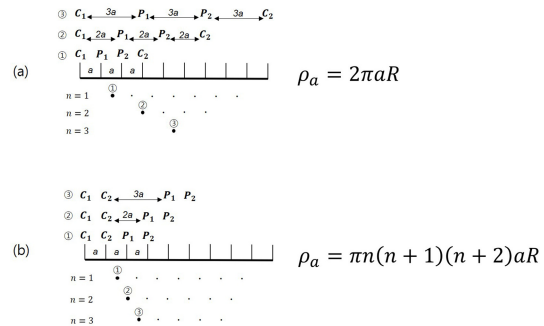
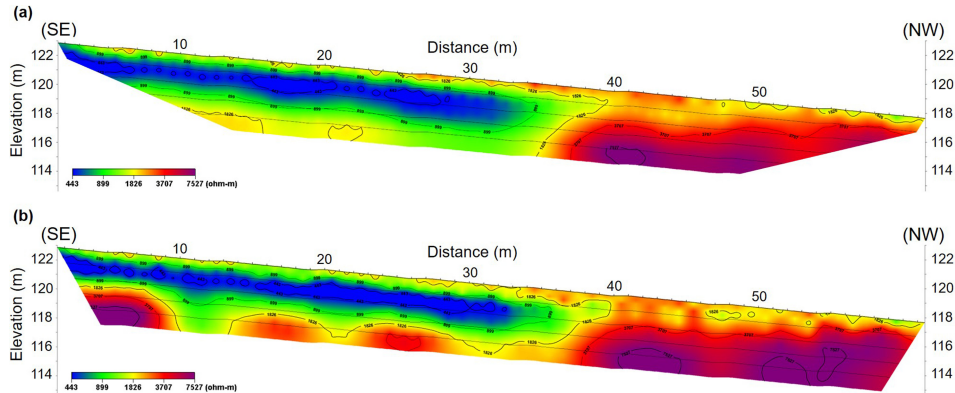


Fig. 8. Electrode of configuration and pseudo section for (a) Wenner array and (b) dipole-dipole array. C and P are current electrode and potential electrode, respectively.  $a$ : electrode spacing,  $n$ : depth index,  $R$ : resistance( $\Omega$ ),  $\rho_a$ : apparent resistivity( $\Omega m$ ).



**Fig. 9.** Electrical resistivity structures from (a) Wenner array and (b) dipole-dipole array with 1 m-electrode spacing. In terms of vertical and horizontal resolutions, Wenner array is recommended particularly at very shallow depth and the base of active layer is distinctly mapped by dipole-dipole array.

지질환경에 따라 다르지만 일반적으로 수평분해능은 전극간격이며 수직분해능은 전극간격의 1/2이다. 이 연구에서는 쌍극자 배열법에 비해 수직분해능이 상대적으로 좋은 웨너 배열법을 사용하여 극천부 지질의 시간 변화에 따른 전기비저항 자료의 변화를 살펴보고 웨너 배열법에 비해 전류가 깊이 들어가는 쌍극자 배열법의 전극 간격을 각각 1 m로 설계해 각각 측정하여 천부 지질을 해석하였다.

현장에서 연계 되는 저항값에 각 배열법에 해당하는 거리 계수(geometric factor)를 보정하여 계산된 겉보기 비저항(apparent resistivity)에 비저항 역산(resistivity inversion)을 거쳐 참 전기비저항(true resistivity) 단면을 얻었다. 역산 자료처리는 상용 프로그램인 Diprowin(Heesong Ltd., 2000)을 사용하였다.

### 4.3. 자료해석 및 토의

2020년 세종과학기지 주변 대기온도가 0°C 이상을 유지한 마지막 날인 2020년 2월 26일 1m 간격의 웨너 배열법과 1m 간격의 쌍극자 배열법을 사용하여 단면도상의 구간 및 깊이별 특성 변화를 분석하였다(Fig. 9). 웨너 배열법을 먼저 사용해 측정하였고 1시간 30분 후 쌍극자 배열법으로 자료를 취득하였다.

높은 수직분해능으로 천부 활동층의 해석에 용이한 웨너 배열법(Fig. 9a)이 쌍극자 배열(Fig. 9b)보다 3m 깊이 이내에서 비저항대의 연속성이 좋으며 비저항의 대비(약 1000 Ωm/3000 Ωm)가 식생 분포의 경계선이 되는 35~40 m 측정에서 보다 명확히 보인다. 깊이 약 50 cm까지의 극천부는 오히려 그 아래보다 높은 전기비저항(894 Ωm)을 보이는데 이것은 온·습도 센서



**Fig. 10.** A photograph of gravel-rich soil observed during the digging the soil for the installation of temperature and moisture sensors at 25 m station.

들을 설치하는 과정에서 관찰된 토양에 혼재된 많은 자갈(Fig. 10)들에 기인한 것으로 해석된다. Fig. 9a에서 약 50 m 측정부터 마지막 측정까지 극천부에서 1826 Ωm를 경계로 상대적으로 낮은 전기비저항 값을 보이는 것은 쌓였던 눈이 늦게 녹아 자갈과 토양 사이에 물이 스며든 것으로 해석된다.

식생이 분포하는 0~35 m 축점 구간의 깊이 0.5~2.5 m에서 500 Ωm 이하의 낮은 전기비저항값의 수평적인 구조가 뚜렷이 보인다. 이것은 기지의 뒤편 언덕 부근에 쌓였던 많은 눈이 녹으면서 물이 지하로 침투하여 동토층 위에서 매질의 공극을 포화시킨 것으로 해석된다. 실제로 습도 센서를 설치하기 위해 땅을 파기 시작한 2017년 1월 말 당시 25 m 지점에서는 깊이 약 70 cm 부근에서 물이 고이기 시작하였다(Fig. 10). 깊이 1 m 부근에서 분포하는 지하수는 식생이 죽어가는 구간에서는 동토에 막혀 옆으로 퍼져나가지 못하는 것으로 보이는데 이것은 대기 온도가 0°C 이상으로 올라가도 오랫동안 많은 눈이 피복되어 대기의 열을 제대로 전달받지 못해 땅이 얼어버린 것으로 해석된다.

활동층과 동토층의 경계 깊이도 상당한 차이를 보였다. 쌍극자 배열법 전기비저항 자료로 해석한 이 부분은 식생 활동이 활발한 구역에서는 기온이 0°C 이상일 경우 꾸준한 에너지 공급과 물의 침투로 인해 활동층의 두께가 약 3 m인 것으로 해석한 반면 웨너배열법 전기비저항 자료에서는 식생활동이 거의 없는 구역에서 활동층의 두께가 1 m 미만으로 해석하였다.

해당 기간의 지상온도자료(Fig. 11)를 바탕으로 2020년 2월 26일부터 2020년 5월 28일 까지 7차례 걸쳐 수집한 시간경과 전기비저항 자료(time-lapse electric

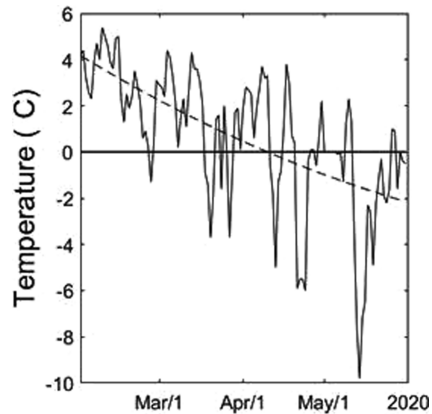


Fig. 11. Ground temperature profiles recorded from 26<sup>th</sup> February 2020 to 28<sup>th</sup> May 2020. Solid line and dashed line are the daily mean temperature and overall trend, respectively.

resistivity structure)를 해석하였다(Fig. 12). 기지 주변의 대기 온도는 3월 중순까지 0°C 이상을 유지하였으나 3월 18일부터 비교적 온도가 하강하기 시작하였다. 2월 26일 자료와 비교할 때 3월 19일 자료는 극천부에서 전기비저항값이 상승하였다. 이는 대기 온도가 영하권을 보여 극천부 부분부터 얼기 시작하여 전기비저항 값이 높아진 것으로 해석하였다. 5월 28일까지 대기의 온도는 꾸준히 하강하는 경향을 보였고 최

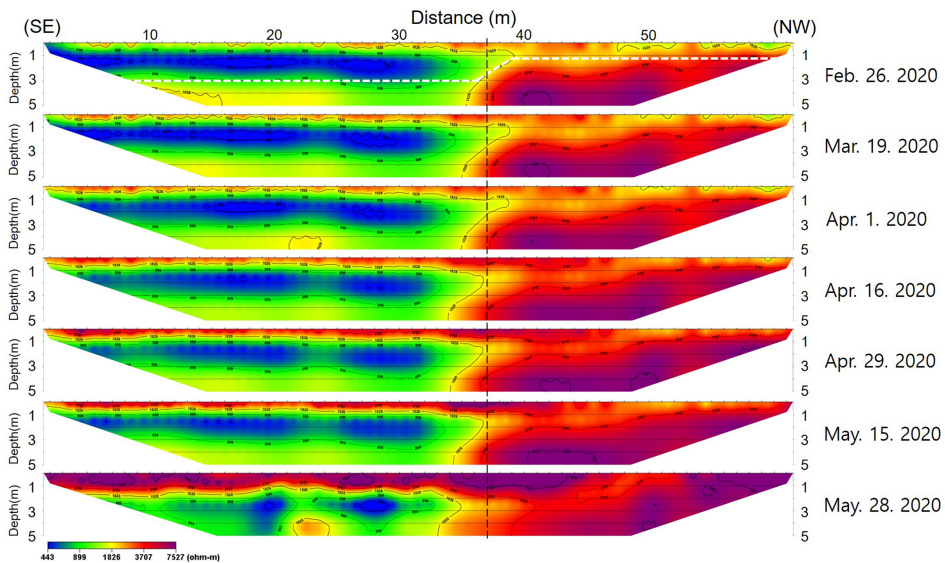
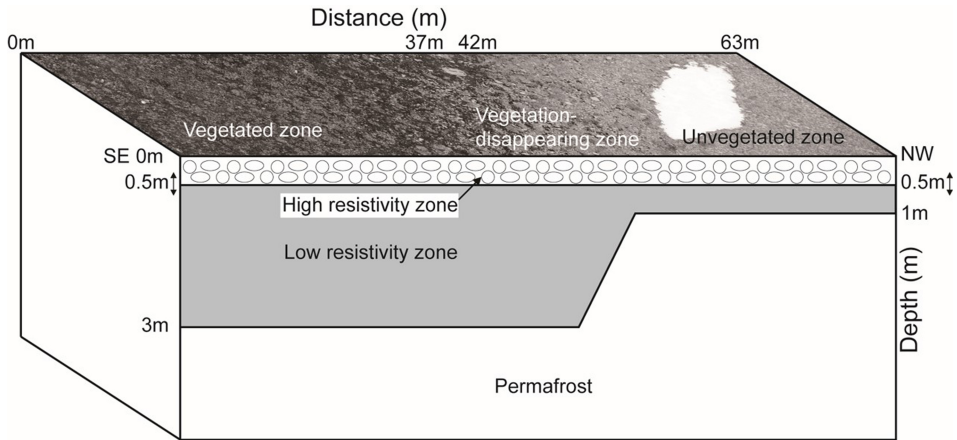


Fig. 12. Time-lapse electrical resistivity structures from 26<sup>th</sup> February 2020 to 28<sup>th</sup> May 2020. Horizontal high resistivity belt(>1826 Ωm) at very shallow depth is thickening with the lapse of time, probably caused by the freezing of the water in the pore spaces with decrease of ground temperature. The white dashed line on the top shows the base of the active layer and the black bar line is the boundary between vegetated zone and unvegetated zone.





**Fig. 13.** Schematic geometric depiction of the subsurface structures based on the electrical resistivity mapping: 0~0.5 m deep high-resistive gravel-rich soil, 0.5~3 m deep low-resistive active layer, and the underlying permafrost.

으나 5월 28일 자료에서 가장 큰 전기비저항 차이를 보였다. 이는 대기 온도가 깊이 1 m 까지 바로 영향을 주지 않아 시간지연 효과가 발생한 것이고 특히 2월 26일 자료에서 비교적 비저항값이 낮았던 50~61 m 지점의 전기비저항값이 5월 28일 자료에서 크게 상승한 것은 아래로 침투하지 못하고 극천부에 남아있던 물이 얼어붙은 것으로 보여진다. 그리고 47~52 m 구간의 상대적으로 낮은 비저항값이 나타나는 구간엔 먼저 5 cm 가량의 적설이 발생하였는데 이것은 눈의 피복에 의한 대기와 지면의 절연효과로 해당 구간의 온도를 일시적으로 높인 것으로 보인다.

전기비저항, 식생, 기상자료들을 복합해석하여 나타난 연구지역의 모식도(Fig. 13)에서 구간 0~37 m는 겨울철 눈이 많이 쌓이지 않는 곳으로 이끼와 식생이 잘 자라며 여름철 활동층의 두께는 약 3 m로 나타났다. 측점 37m에서 42m로 갈수록 식생은 줄어들었고 죽은 이끼와 지의류가 많았으며 기온이 영하로 내려가면서 활동층의 상부부터 얼기 시작하여 고비저항대가 나타났고 5월 28일 전기비저항탐사 자료에서 깊이 1 m 부근까지 언 것으로 나타났다. 활동층에서 공극을 따라 이동하는 지하수는 이 곳에 모여 사방으로 퍼지지 못하고 남동쪽으로 이동하는 것으로 보인다. 겨울철 많은 눈이 쌓여 식생이 사라진 42~63 m 구간은 여름철 활동층의 두께가 약 1 m로 상대적으로 얇은 활동층 두께를 보이며 눈이 녹아 생긴 물이 공극에 포획된 상태로 있다가 지상온도가 영하로 내려간 후 다시 얼은 것으로 보인다. 이 구간에서 활동층의 두께가 상대적으로 얇아진 것은 새로이 건설된 구조물로 인해 적설량

이 많아져서 식생이 사라지는 등 지상온도의 반응깊이가 점차 감소되어 나타난 현상으로 보인다.

## 5. 결 론

1. 웨너 배열 방법과 쌍극자 배열 방법을 적용한 전기비저항 탐사에서 극 천부 지질은 웨너 배열법은 활동층의 특징 및 변화를 파악하는데 용이하였고 쌍극자 배열법은 깊이가 약 3 m인 동토층과 활동층 사이의 경계면을 효과적으로 탐지할 수 있었다.

2. 전기비저항탐사 자료에 나타난 북서쪽의 고비저항과 남동쪽의 저비저항의 대비는 기상자료(지중온도 및 적설량), 식생의 분포 및 식생지수로 잘 설명되었다.

3. Archie의 식에서 지상온도가 내려감에 따라 매질의 공극에 분포하고 있는 물이 얼음으로 응고되어 비저항값은 증가한다. 결빙기로 갈수록 두꺼워지는 천부의 고비저항대는 활동층으로 해석된 바 이것은 지상기온이 내려감에 따라 언 땅의 두께가 깊어지기 때문이다.

4. 차후 똑같은 방법으로 얻어지게 될 해빙기의 시간경과 전기비저항 자료는 이와 반대로 공극의 얼음이 물로 용해되어 시간에 따라 활동층의 두께는 감소할 것이다.

5. 해당 지역에 극천부의 수직적인 물성변화를 빠르게 알아낼 수 있는 고분해능 지구물리탐사법인 레이더(GPR: ground penetrating radar)탐사, 매질의 속도차를 이용해 동토 및 활동층의 경계를 구분해 낼 수 있는 굴절법탐사와 식생분포의 경계를 밝혀낼 수 있는

표면파탐사(MASW: multichannel analysis of surface waves) 및 토양의 물성 조사를 추가적으로 실시한다면 시간에 따른 활동층의 두께 변화를 보다 정확히 규명할 수 있을 것으로 기대한다.

## 사 사

이 연구는 극지연구소(PE20050, PE20170)의 지원을 받아 수행되었습니다. 논문에 대한 건설적인 비평과 제안을 해주신 심사위원분들께 감사드립니다.

## References

- Ahn, T.G., Ko, C.H., Jeong, Y.J., Lee, H.S., Song, S.H. and Yong, H.H. (2015) An electrical resistivity monitoring in embankment, *Journal of the Korean Earth Science Society*, v.36, no.1, p.59-67.
- Archie, G.E. (1942) The electrical resistivity log as an aid to determining some reservoir characteristics, *Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers*, v.146, p.389-409.
- Briggs, M.A., Campbell, S., Nolan, J., Walvoord, M.A., Ntarlagiannis, D., Day-Lewis, F.D. and Lane, J.W. (2017) Surface geophysical methods for characteristic frozen ground in transitional permafrost landscapes, *Permafrost and Periglacial Process*, v.28, no.1, p.52-65.
- Dafflon, B., Hubbard, S, Ulrich, C., Peterson, J., Wu, Y, Wainwright, H. and Kneafsey, T.J. (2016) Geophysical estimation of shallow permafrost distribution and properties in an ice-wedge polygon-dominated Arctic tundra region, *Geophysics*, v.81, no.1, p.247-263.
- Dafflon, B., Oktem, R., Peterson, J., Ulrich, C., Tran, A.P., Romanocsky, V. and Hubbard, S. (2017) Coincident aboveground and belowground autonomous monitoring to quantify covariability in permafrost, soil, and vegetation properties in Arctic tundra, *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, v.122, p.1321-1342.
- Diprowin. (2000) Electrical resistivity processing program, Heesong Ltd, Korea.
- Du, E., Zhao, L., Wu, T., Li, R., Yue, G., Wu, X., Li, W., Jiao, Y., Hu, G., Qiao, Y., Wang, Z., Zou, D. and Liu, G. (2016) The relationship between the ground surface layer permittivity and active-layer thawing depth in a Qinghai-Tibetan Plateau permafrost area, *Cold Regions Science and Technology*, v.126, p.55-60.
- Elchin, J. and Kevin, S. (2016) The importance of a surface organic layer in simulating permafrost thermal and carbon dynamics, *The Cryosphere*, v.10, p.465-475.
- Fawcett, D., Panigada, C., Tagliabue, G., Boschetti, M., Celesti, M., Evdokimov, A., Biriukova, K., Colombo, R., Miglietta, F., Rascher, U. and Anderson, K. (2020) Multi-Scale Evaluation of Drone-Based Multispectral Surface Reflectance and Vegetation Indices in Operational Conditions, *Remote Sensing*, v.12, p.514.
- Han, U. and Jung, H.C. (1994) Temperature response in the permafrost at the Sejong Station, Antarctica, *Journal of the Korean Earth Science Society*, v.15, p.170-176.
- Harris, C., Arenson, L.U., Christiansen, H.H., Etzelmüller, B., Frauenfelder, R., Gruber, S., Haeberli, W., Hauck, C., Hölzle, M., Humlum, O., Isaksen, K., Käab, A., Kern-Lütschg, M.A., Lehning, M., Matsuoka, N., Murton, J.B., Nötzli, J., Phillips, M., Ross, N., Seppälä, M., Springman, S.M. and Mühll, D.V. (2009) Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses, *Earth-Science Reviews*, v.92, p.117-171.
- Harrison, W.D. (1991) Permafrost response to surface temperature change and its implications for 40,000 year surface temperature history at Prudhoe Bay, Alaska, *Journal of Geophysical Research*, v.96, p.683-695.
- Hughes, K. A., Ireland, L. C., Convey, P. and Fleming, A. H. (2016). Assessing the effectiveness of specially protected areas for conservation of Antarctica's botanical diversity. *Conservation Biology*, v.30, p.113-120.
- Hubbard, S.S., Gangodagamage, C., Dafflon, B., Wainwright, H., Petersen, J., Gusmeroli, A., Ulrich, C., Wu, Y., Wilson, C., Rowland, J., Tweedie, C. and Wulfschleger, S. D. (2012) Quantifying and relating land-surface and subsurface variability in permafrost environments using LIDAR and surface geophysical datasets, *Hydrogeology of Cold Regions*, v.21, p.149-169.
- 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*, v.52, no.6, p.901-915.
- Jeong, W.W. and Kim, M.H. (2019) Determination of leak zone of reservoir embankment by electrical resistivity survey and drilling survey, *Journal of the Korean Society for Environmental Technology*, v.20, no.3, p.204-212.
- Ji, Y.S. and Oh, S.H. (2015) Integrated analysis of electrical resistivity monitoring and geotechnical data for soft ground, *Journal of Korean Earth Science Society*, v.36, p.16-26.
- Jin, M.S., Lee, M.S., Kang, P.C. and Jwa, Y.J. (1991) Petrology and geochemistry of the volcano plutonic rocks in Barton and Weaver Peninsula, King George Island, Antarctica, *Korean Journal of Polar Research*, v.2, no.1, p.107-134.
- Kneisel, C. (2004) New insights into mountain permafrost occurrence and characteristics in glacier forefields at high altitude through the application of 2D resistivity imaging, *Permafrost and Periglacial Processes*, v.15, p.221-227.
- Kim, H.S. and Lee, K.H. (1993) Interactive interpretation methods for one-dimensional Schlumberger electrical sounding and magnetotelluric data, *Journal of Geology Society Korea*, v.29, no.5, p.493-506.

- Kim, H.S., Lee, K.H. and Hahn, J.S. (1995) Electrical surveys for mapping leachate in Nanji-Do landfill site, *The Journal of Engineering Geology*, v.5, no.3, p.259-276.
- Kim, H.S., Nam, S.H. and Kim, Y.D. (1996) Near-surface geophysical surveys using seismic and electric methods in Barton Peninsula of King George Island, Antarctica, *Journal of the Geological Society of Korea*, v.32, no.2, p.131-145.
- Kim, J.H., Yi, M.J., Song, Y.H. and Chung, S.H. (2001) A comparison of electrode arrays in two-dimensional resistivity survey, *Journal of Korean Institute of Mineral and Energy Resources Engineers*, v.38, no.2, p.116-128.
- Kim, J.S., Song, Y.S., Yoon, W.J., Cho, I.K., Kim, H.S. and Nam, M.J. (2014) *Application of New Geophysical Techniques*(2<sup>nd</sup> edition): Principle of new technologies and case studies, Sigma Press, 729p.
- Kim, Y.D. and Lee, H.W. (1991) A gravity model of geological structure in Barton Peninsula, King George Island, *Korean Journal of Polar Research*, v.2, no.2, p.87-100.
- Kwon, B.D. and Jwa, Y.J. (1991) Magnetic investigation of the Barton Peninsula, King George Island, The research on natural environments and resources of Antarctica, *Korea Ocean Research and Development Institute*, BSPG00140-400-7, p.67-90.
- Lim, S.K. (2018) Analysis of a weak zone in embankment close to a drainage using resistivity monitoring data, *Geophysics and Geophysical Exploration*, v.21, no.1, p.8-14.
- Osterkamp, T. E. and Burn, C. R. (2003) *Permafrost Encyclopedia of Atmospheric Sciences* 1<sup>st</sup> edn, ed J R Holton, J Pyle and J A Curry (Oxford: Academic), p.1717-1729.
- Park, S.J., Choi, T.J., Lee, B.Y. and Kim S.J. (2019) 30-Year Climatology Observed at King Sejong Station, Antarctica, *XIII International Symposium on Antarctic Earth Sciences*, A281.
- Rouse Jr, J. W., Haas, R. H., Schell, J.A. and Deering, D. W. (1974) *Monitoring Vegetation System in the Great Plains with ERTS*, Presented at Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, NASA, Washington, D.C, p.309-317
- Schnur, M.T., Xie, H. and Wang, X. (2010) Estimating root zone soil moisture at distant using MODIS NDVI and EVI in a semi-arid region of southwestern USA, *Ecological Informatics*, v.5, p.400-409.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. and Keys, D.A. (1990) *Applied Geophysics* (2ed edition), Cambridge University Press, Cambridge, UK. 792p.
- Tominaga, Y., Mochida, A., Okaze, T., Sato, T., Nemoto, M., Motoyoshi, H., Nakai, S., Tsutsumi, T., Otsuki, M., Uamatsu, T. and Yoshino, H. (2011) Development of a system for predicting snow distribution in built-up environments: Combining a mesoscale meteorological model and a CFD model, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v.99, no.4, p.460-468.
- Turner, D., Lucieer, A., Malenovsky, Z., King, D. H. and Robinson, S. A. (2014) Spatial co-registration of ultra-high resolution visible, multispectral and thermal images acquired with a micro-UAV over Antarctic moss beds. *Remote Sensing*, v.6, p.4003-4024.
- Westermann, S., Wollschläger, U. and Boike, J. (2010) Monitoring of active layer dynamics at a permafrost site on Svalbard using multi-channel ground-penetrating radar, *The Cryosphere*, v.4, p.475-487.