

## 빙하 크레바스 탐지용 무인지상차량 (UGV) 개발

Development of Unmanned Ground Vehicle (UGV) for Detecting Crevasses in Glaciers

저자	정창현, 김형권, 윤동진, 이주한
(Authors)	Changhyun Chung, Hyoung-Kwon Kim, Dong-Jin Yoon, Joohan Lee
출치	<u>제어로봇시스템학회 논문지</u> <u>27(1)</u> , 2021.1, 61-68 (8 pages)
(Source)	Journal of Institute of Control, Robotics and Systems <u>27(1)</u> , 2021.1, 61-68 (8 pages)
발행처	<u>제어로봇시스템학회</u>
(Publisher)	Institute of Control, Robotics and Systems
URL	http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE10511874
APA Style	정창현, 김형권, 윤동진, 이주한 (2021). 빙하 크레바스 탐지용 무인지상차량 (UGV) 개발. 제어로봇시스템학회 논문 지, 27(1), 61-68.
이용정보 (Accessed)	한국해양과학기술원 203.250.***.193 2021/02/03 15:51 (KST)

#### 저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독 계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

#### Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

# 빙하 크레바스 탐지용 무인지상차량 (UGV) 개발

## Development of Unmanned Ground Vehicle (UGV) for Detecting Crevasses in Glaciers

· 정 창 현\*<sup>●</sup>, 김 형 권<sup>●</sup>, 윤 동 진<sup>●</sup>, 이 주 한<sup>●</sup>

(Changhyun Chung<sup>1,\*</sup>, Hyoung-Kwon Kim<sup>1</sup>, Dong-Jin Yoon<sup>1</sup>, and Joohan Lee<sup>1</sup>)

<sup>1</sup>Korea Polar Research Institute

**Abstract:** Research activities in Antarctica face a number of risk factors, such as cold, strong winds, and isolated or dangerous environments. Among them, crevasses, which are deep cracks in glaciers, can cause fatal accidents since they are difficult to locate as they are covered with snow. In this paper, we present the development, design, and deployment of an UGV (Unmanned Ground Vehicle) that can explore ice-sheets and be used in various polar research fields. The developed UGV was customized to remotely detect crevasses and prevent related accidents. In order to adapt to the harsh terrain of Antarctica, the vehicle features ground clearance over 260 mm, four-wheel-drive ability with a 400W high-power motor, as well as passive joints and differential links to allow for four-point contact on rough terrain. The UGV is also designed to run for more than two hours on the Antarctic ice sheet at a speed of 2.5 m/sec. The control unit uses open-source hardware and software for rapid function implementation and ease of future customization. In November 2019, the UGV detected crevasses successfully by towing an IPR (Ice Penetrating Radar) along the 2.6 km section of the Browning Pass around Jang Bogo Station, Antarctica. Further improvement is required for heading angle errors due to magnetic compass malfunctions in Antarctica, and for the vibration and misalignment of the traction device for the towing research equipment.

Keywords: unmanned ground vehicle, polar rover, polar science

#### I. 서론

지구 온난화로 인한 기온 상승과 더불어 해수면 상승, 이상 기후, 생태계 다양성 훼손 등과 같은 전 지구적인 문 제들이 빈번하게 발생함에 따라 환경 변화에 민감한 남·북 극의 연구가 더욱 중요해지고 있다. 하지만 극지 연구 활동 에는 혹한, 강풍, 빙하, 크레바스, 부족한 인프라, 고립된 환 경과 같은 많은 제약들이 있다. 이처럼 열악한 환경 속에서 연구를 수행하기 위한 방편으로 극한 환경에서 운용 가능 한 무인 플랫폼을 개발하고, 이를 활용하는 연구들이 진행 되고 있으나 아직까지 실제 활용 사례는 많지 않다.

카네기 멜론 대학에서 개발한 'NOMAD'는 4륜구동 자율 주행로봇으로 남극의 블루 아이스 지역에서 운석을 수집하 는데 사용되었다[1]. 하지만 이 로봇은 소형 SUV 정도의 크기에 725 kg의 무게로 내연기관을 사용하였으며, 지면에 가해지는 높은 압력으로 인하여 크레바스 위험 지역에서 구동하기에는 위험이 따른다. NASA에서 제작한 'GROVER' 는 그린란드에서 지표면의 눈과 만년설 모니터링에 활용되 었다[2]. 스노우 모빌의 트랙을 활용하여 제작하였으며 무 게는 약 360 kg, 태양 전지판을 포함한 높이는 약 180 cm이 다. 태양 에너지로 구동되어 대기 오염을 일으키지 않고 지 표투과레이더를 이용하여 빙상에 눈이 적충되는 형태를 조 사할 수 있지만, 평균 이동 속도가 약 2 km/h로 느리고 현장 에 배치하는데 필요한 비용과 전문 지식으로 인하여 최근 에는 거의 활용되고 있지 않다.

미국의 CRREL(Cold Regions Research and Engineering Lab.) 에서는 극지 환경에서 구동 가능한 자율주행차량 'Cool Robot'[3]과 'Yeti'[4]를 개발하여 남극과 그린란드와 같은 극한 지역에서 과학 데이터를 수집하는데 활용하고 있다. 두 차량 모두 전기 모터로 구동되는 4륜 형태로 제작되었 다. 'Cool Robot'은 태양 전지판으로부터 전력을 공급받아 해가 항상 떠있는 남극의 백야 시즌에 장거리를 주행하며 관측 데이터를 수집할 수 있다. 하지만 평균 이동 속도가 1.4 km/h로 느리고, 차량의 사방을 둘러싸고 있는 태양전지 패널로 인하여 장애물을 극복하거나 눈에 빠졌을 경우 빠 저나오는데 어려움이 있다. 'Yeti'는 지표투과레이터를 견인 하면서 크레바스를 찾아낼 수 있도록 개발되었으며 남극에

#### \*Corresponding Author

Manuscript received August 28, 2020; revised September 7, 2020; accepted November 25, 2020 정창현: 극지연구소 기술개발지원실 선임기술원(ch.chung@kopri.re.kr, ORCiD<sup>®</sup> 0000-0002-4511-017X) 김형권: 극지연구소 기술개발지원실 기술원(clew21@kopri.re.kr, ORCiD<sup>®</sup> 0000-0003-4662-2406) 윤동진: 극지연구소 기술개발지원실 기술원(dj\_yoon@kopri.re.kr, ORCiD<sup>®</sup> 0000-0001-6244-1598) 이주한: 극지연구소 미래기술개발부 책임연구원(joohan@kopri.re.kr, ORCiD<sup>®</sup> 0000-0003-2382-7054) \*\* 본 논문은 극지연구소 기본연구사업 신진연구원 지원과제(PE19520)와 주요사업(PE20020)에서 지원하여 연구하였음. \*\* 이 논문은 2020 제35회 제어·로봇·시스템학회 학술대회에 초안이 발표되었음. 서 실제로 많은 데이터를 수집하여 공개하였다. 최근에는 일부 빙설 지형에서 이동 불능 상태에 빠지는 문제점 해결 과 크레바스 인식률을 향상시키기 위한 연구가 진행 중이다.

중국의 CHINARE(Chinese National Antarctic Research Expedition)에서는 남극의 광범위한 지역에서 과학적 조사를 수 행할 수 있는 로버를 개발하였다[5]. 상용 ATV 차체에 자 율주행에 필요한 센서와 네비게이션 알고리즘을 추가하여 무인화 하였으며, 빙설에서 이동성을 강화하기 위하여 네 개의 삼각형 트랙을 장착하였다. 유인 차량을 무인화하였기 때문에 유인, 무인 활용이 가능하고 차량의 신뢰성이 높은 장점이 있지만 차체가 크고 무겁기 때문에 운송, 셋업, 운 용에 있어서 다수의 인력을 필요로 한다.

국내에서도 크레바스 탐지용 로봇 플랫폼 개발을 목표로 상용화된 ATV의 각 조정부에 구동 장치를 설치하여 무인 화하고 남극과 유사한 환경에서 실험한 연구[6]와 남극 대 륙탐사에 적합한 자율주행 경로설계 및 추적기법에 대한 연구[7, 8]가 있었지만 극지 현장에서의 실증은 이루어지지 못하였다. 국내 극지 연구자들은 대부분 유인 설상차에 의 존하여 크레바스 탐사를 수행하고 있다. 설상차 앞 쪽에 레 이더를 설치하여 위험지역의 탐사를 수행하며 설상차에는 보통 운전자와 레이더 신호를 분석하는 연구원 총 2인이 탑승하여 실시간으로 크레바스 유무를 판단한다. 따라서 진 행 속도가 느리고 작업자들은 위험에 상시 노출된다. 이러 한 위험성으로 인하여 극지 연구에 있어서 무인 플랫폼 활 용 수요가 증가하고 있다.

본 논문에서는 이러한 수요에 맞추어 개발된 무인지상차 량 플랫폼에 대하여 기술한다. 개발된 플랫폼은 눈과 얼음 으로 덮여있는 빙상에서 주행이 가능하도록 설계되었으며, 극지 연구에 필요한 장비나 센서들을 차체에 장착하거나 견인할 수 있도록 개발되었다[9]. 완성된 플랫폼은 남극 장 보고 과학기지 인근 다양한 지형에서의 주행 테스트를 통 하여 성능을 검증하였다. 또한 플랫폼 후면 견인 고리에 빙 하투과레이더(Ice Penetrating Radar)가 설치된 튜브형 썰매 를 연결하여 남극 장보고 과학기지에서 남극 내륙으로 진 입하는 브라우닝 패스 구간에서 크레바스 탐지를 수행하였다.

#### Ⅱ. 플랫폼 설계

무인지상차량 플랫폼은 크레바스 탐지 외에도 극지의 극 한 환경에서 다양한 연구 활동을 지원할 수 있도록 목표 개발 사양을 표 1과 같이 설정하였다. 헬기를 이용한 운송 이 가능하도록 차량의 중량과 크기를 제한하고, 남극의 하 계 시즌에 헬기 운송이 가능한 지역에서 운용하는 것을 가 정하여 사용 환경 조건을 설정하였다. 본 장에서는 플랫폼 이 기본 설계 사양을 만족하면서 빙설 지형 주행을 고려한 구동부 설계, 극지의 사스트루기(sastrugi)와 같이 표면이 고 르지 않은 지면을 극복하기 위한 차체 설계, 오픈소스 플랫 폼을 활용한 제어부 설계에 대하여 기술한다.

#### 1. 차량 이동성능

차량-지형간의 상호작용에 따른 차량의 이동성능을 정량 화하기 위한 이론은 Bekker에 의해 처음제안되었다[10]. Wong 은 이 이론에 대하여 더 확장된 방법론을 제시하였다[11]. 표 1. 플랫폼 설계 사양

Table 1. Design specifications of the platform

항목	설계사양
차체 사이즈(mm)	<1100(W)×1030(D)×600(H)
차체 중량+Payload(N)	< 981
지상고(mm)	> 260
견인 중량(N)	> 147
최대 속력(m/sec)	> 2.5
운용 범위(km)	> 10
운용 시간(hour)	> 2
사용 온도(°C)	-20 ~ 0

본 절에서는 앞서 제시된 이론들을 이용하여 남극의 빙설 지형에서 휠에 작용하는 구름저항과 견인력을 예측하였다.

1.1. 구름저항 계산

평지에서 휠을 이용하여 이동하는 차량에 작용하는 구름 저항(*R<sub>k</sub>*)은 휠 변형에 의한 저항(*R<sub>i</sub>*), 차량 내부 마찰에 의한 저항(*R<sub>i</sub>*), 지면 변형에 의한 저항(*R<sub>c</sub>*)으로 구성되며 아래와 같이 표현된다.

$$R_R = R_t + R_i + R_c \tag{1}$$

포장도로에서 운행되는 차량의 구름저항은 대부분 타이 어의 변형에 소요되는 일에 의해서 발생되며 포장도로의 표면은 변형되지 않는 것으로 가정한다. 하지만 반대로 표 면의 변형이 심한 지면 위에서 구동하는 차량의 경우 노면 의 변형에 의한 저항이 크게 작용하여 동력 소모의 주요 원인이 되며 타이어의 지면 접촉 면적이 넓어지면서 타이 어 변형에 의한 저항은 줄어들게 된다. 본 차량에 사용된 ATV용 19인치 타이어는 차체의 무게 대비 타이어 공기압 과 타이어 골격의 강성에 의한 압력이 차체의 무게에 의해 발생하는 압력보다 훨씬 크기 때문에 타이어 변형에 의한 저항(R)은 없는 것으로 가정하였다.

내부 마찰에 의한 저항(*R*<sub>i</sub>)는 모터, 감속기, 타이어가 직 결로 연결되는 구성을 감안하여 감속기의 기계효율(*n*=0.95) 만을 고려하여 다음과 같이 산정하였다.

$$R_i = (1 - \eta) \times F_g = 12.3 \text{ N per wheel}$$
(2)

여기서, F<sub>g</sub>는 휠 하나에 작용하는 수직 하중으로 245N이다. 지면 변형에 의한 저항(R<sub>c</sub>)는 식 (3)에 의하여 계산되며 폭b 의 플레이트를 지면 깊이 z<sub>0</sub>까지 가압할 때 단위 길이 당 수행된 수직 방향 일과 동일하다. Bekker에 의해 제안된 이 응력 분포에 대한 가정은 강체 휠의 지면 변형에 의한 저 항 R<sub>c</sub>는 휠이 깊이 z<sub>0</sub>의 자국을 내는데 수행한 수직 방향 일과 같음을 의미한다[10].

$$R_c = b \left[ \left( \frac{k_c}{b} + k_{\varPhi} \right) \frac{z_0^{n+1}}{n+1} \right]$$
(3)

여기서, b는 휠의 폭, k,는 지면변형 점착계수, k,는 지면변 형 마찰계수, n은 침하 지수를 나타내며 보통 실험적인 방 법을 통하여 도출한다.

하지만 개발 단계에서 남극 현장의 눈을 시료로 측정한



그림 1. 단순화한 휠-지면 상호작용 모델[10].

Fig. 1. Simplified wheel-soil interaction model [10].

#### 표 2. 휠과지면특성파라미터.

Table 2. Parameters of wheel and terrain properties.

계수	값
b, Width of wheel	0.18 m
D, Diameter of wheel	0.483 m
$k_c$ , Modulus of snow cohesion	2 kN/m <sup>n+1</sup>
$k_{\Phi}$ , Modulus of snow friction	255 kN/m <sup>n+2</sup>
n, Pressure sinkage exponent	1

데이터가 없었기 때문에 타 지역의 눈을 대상으로 실험한 데이터[11]와 극지 현장에서의 활동 경험 등을 근거로 휠과 남극 지표면과의 특성 계수를 표 2와 같이 정리하였다.

설정된 지면 계수와 지면에 가해지는 압력을 Bekker가 제안한 pressure-sinkage equation에 대입하면 다음과 같이 침 하량을 구할 수 있다[10].

$$z_0 = \left(\frac{p}{k_c/b + k_{\Phi}}\right)^{1/n} \tag{4}$$

여기서, p는 수직 방향 압력이다. 가정한 휠-지면 특성 계 수를 대입하여 설상차와 사람의 침하량 z<sub>0</sub>을 계산하면 각각 17~20 cm, 10 cm 정도 침하되는 수준으로 다소 부드러운 눈 이 쌓인 경우를 가정하여 계수를 보수적으로 설정하였음을 알 수 있다. 개발된 차량의 침하량은 약 5 cm로 예상되었 다.

설정된 계수들을 식 (3)에 대입하면 지면 변형에 의해 각 휠에 약 59.2N의 저항이 작용하는 것을 예측할 수 있다. 따 라서 각 휠에 작용하는 구름저항은 아래와 같이 총 71.5N으 로 도출되었다.

$$R_R = R_t + R_i + R_c = 0 + 12.3 + 59.2 = 71.5 \,\mathrm{N}$$
(5)

각 휠에 작용하는 수직 하중으로 나누어 구름저항 계수 로 표현하면  $R_R/F_g = 0.297$  된다.

1.2. 견인력 계산

오프로드 차량은 구름저항을 극복하고 남는 추진력을 가 속이나 경사 등판과 같은 견인력으로 사용한다. 따라서 소 요가 예상되는 견인력을 고려하여 주행토크를 계산하고 구 동부품을 선정할 수 있다. 우선 크레바스 탐지를 위한 레이 더 장비를 견인하는데 힘이 필요하다. 빙하투과레이더의 무 게는 약 147 N으로 바닥 면적이 0.9 m<sup>2</sup> 정도되는 튜브에 실 고 견인한다. 견인 장비가 지면을 변형시키면서 발생하는 저항을 식 (3)과 (4)를 이용하여 계산하면 약 0.004 N으로 무시해도 될 정도로 작다. 반면에 마찰에 의한 저항은 눈과 고무 표면과의 마찰계수가 0.02 정도로 예상되므로[12] 장 비 견인 시 발생하는 견인저항(*R*<sub>7</sub>)는 다음과 같이 계산된다.

$$R_T = 147 \times 0.02 = 2.9 \,\mathrm{N} \tag{6}$$

차량이 장비를 견인하면서 경사를 오를 때 작용하는 중 력의 저항 R<sub>G</sub>는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$R_G = (F_g + F_{IPR}) \times \sin(\Phi_{\max}) \tag{7}$$

여기서,  $F_{IPR}$ 은 휠 하나가 견인하는 장비의 무게,  $\varphi_{max}$ 는 차량이 오를 수 있는 최대 경사각이다. 탐사 목표 지역의 경사도와 일반적인 사스트루기 지형의 경사를 고려하여  $\varphi_{max}$ 를 20°로 설정하면 중력에 의한 저항  $R_G$ 는 약 96.4N이 계 산된다. 따라서 각 휠은 평지 주행시는  $R_R + R_T = 74.4$  N 이 상, 장비를 견인하면서 경사를 오를 때는 아래와 같이 170.8 N 이상의 견인력을 발생시킬 수 있어야 한다.

$$R_R + R_T + R_G = 71.5 + 2.9 + 96.4 = 170.8 \,\mathrm{N} \tag{8}$$

앞서 계산한 저항 값들과 휠의 직경을 고려하여 각 휠에 서 최대속력 2.5 m/s 이상, 최대토크 41.2 Nm 이상의 출력을 발생시킬 수 있도록 구동부를 구성하였다.

실제 눈에서 휠 구동 시에는 지면의 전단 파괴에 따라 전달할 수 있는 견인력이 제한된다. Bekker는 최대 전단응 력 <sup>τ</sup>가 아래의 Mohr-Coulomb 파괴기준에 의해 좌우된다고 가정하였다[10].

$$\tau = c + p \tan \Phi \tag{9}$$

여기서 c는 지면의 점착력, Φ는 내부 마찰각을 나타낸다. 휠에서는 그림 1과 같이 휠을 따라 분포하는 압력 p(θ) 를 측정해서 적분해야 하지만, 휠의 침하량이 아주 작다고 (z<sub>0</sub><<D/2) 가정하면 휠과 지면과의 접촉면이 거의 평평하기 때문에 휠이 발생시킬 수 있는 견인력(T<sub>w</sub>)을 식 (9)로부터 최대 압력 p<sub>0</sub>에 대한 식으로 표현할 수 있다.

$$T_w/F_g = c/p_0 + \tan\Phi \tag{10}$$

앞서 기술한 바와 같이 남극에서 눈 시료에 대한 측정 자료가 아직 없기 때문에 남극 눈의 정확한 *c와 Φ* 값은 구 할 수 없었다. 하지만 남극 외에 다양한 빙설 지형에서 측 정된 데이터가 존재하며 다른 연구 결과들을 통하여 눈에 서 구동하는 타이어 또는 트랙의 *T<sub>w</sub>/F<sub>g</sub>* 값은 보통 0.3~0.6의 범위에 놓여있음을 알 수 있다[13,14]. 본 플랫폼이 평지에 서 구동할 때 필요한 *T<sub>w</sub>/F<sub>g</sub>* 값은 0.29로 평지에서는 자유롭 게 이동하는데 문제가 없을 것으로 판단하였다. 하지만 탐사 장비를 끌면서 20° 이상의 경사를 오르기 위해서는 *T<sub>w</sub>/F<sub>g</sub>* 값이 0.68 이상이어야 하기 때문에 탐사 장비를 끌면서 가 파른 경사를 오르기 위해서는 *p*<sub>0</sub>를 낮출 필요가 있음을 예 상할 수 있다. 따라서 남극 현장에서 이러한 문제가 발생할 경우를 대비하여 타이어에 스파이크를 박아서 횔과 눈과의 접촉 면적을 넓힐 수 있도록 대책을 마련하였다.



- 그림 2. 플랫폼 3D 모델링(평면도(상), 측면도(하)).
- Fig. 2. 3D modeling of the platform (Top view (top), Side view (bottom).

#### 2. 플랫폼 디자인 및 부품 선정

그림 2와 같이 플랫폼은 크게 바디부, 구동부, 제어부로 구성되어 있으며 좌우측 구동부는 힌지 조인트로 바디부 측면에 고정되어 피칭 방향으로 자유롭게 움직일 수 있다. 또한 좌우측 구동부를 링크로 서로 연결하고 바디부 중간 에 조인트로 연결하여 좌우 구동부가 각각 피칭 방향으로 움직일 경우 바디부는 평균 피치각을 유지할 수 있도록 구 성하였다. 이러한 구조로 인하여 혐지에서도 네 바퀴가 항 상 지표면에 닿을 수 있고, 바디부 역시 안정적인 자세를 유지할 수 있다.

바디부는 대부분 배터리가 자리를 차지하고 있으며 모터 드라이버와 전원 연결을 위한 릴레이와 스위치를 포함하고 있다. 배터리는 손쉽게 충전 또는 교환이 가능하도록 바디 부 전면에 스냅 패스너로 고정되는 도어를 설치하였다. 또 한 주행 중 눈이나 물이 내부로 침투하지 못하도록 커버는 실리콘과 스폰지 테이프를 적용하고, 구동부가 연결되는 힌 지 조인트는 오일씰을 설치하여 실링 처리 하였다. 바디부 는 남극의 사스트루기와 같이 표면이 고르지 않은 지면이 차체 배면과 맞닿아 불도징 저항이 발생하지 않도록 노면 으로부터 바디부 바닥 지상고를 260 mm 이상 확보하였다.

구동부는 모터, 감속기, 휠 순서로 직렬 연결되어 있으며 각 휠에 하나의 모터와 감속기를 연결하여 각 휠을 개별적 으로 제어할 수 있도록 하였다. 또한 모터와 지면 장애물과 의 간섭을 최소화하기 위하여 앵글형 감속기를 사용하여 휠 구동축과 모터를 수직으로 연결하였다. 모터와 감속기의 용량은 앞서 계산한 필요 최대토크와 차량의 목표 최대 속 력을 기반으로 선정하였다. 지름 19인치 타이어를 장착하고 2.5 m/s 이상으로 주행하기 위한 휠의 최대 회전속도 V<sub>wheel</sub> 는 다음과 같다.

$$V_{wheel} = 2.5m/s \times \frac{1000}{19 \times 25.4 \times \pi} \times 60 = 98.9rpm \quad (11)$$

휠의 출력단에서 필요한 최대 토크는 41.2 Nm이므로 최 대 속도에서 최대 토크를 내기 위해 필요한 동력 P는 다음 과 같다.

$$P = 41.2Nm \times 98.9rpm \times \frac{2\pi}{60} = 426.7W$$
(12)

따라서 최대 출력 426.7 W 이상을 낼 수 있는 모터가 필 요하지만 극지 현장에서의 다양한 불확실성 요소들을 고려 하여 정격 출력 400W급 BLDC 모터를 선정하였다. 이 모 터는 감속기를 통해 휠 출력단에서 최대 65 Nm의 토크를 낼 수 있다.

조향 방식은 유지보수 및 제어 편의성을 위하여 스키드 턴 방식을 채용하였다. 스키드 턴은 회전시 발생하는 측면 저항을 추가로 극복해야하기 때문에 앵커만 조향 방식에 비해 큰 동력을 필요로 한다. 따라서 확보한 동력 내에서 조향 가능 여부를 간략화한 모델을 이용하여 검증하였다.

스키드 턴은 안쪽 휠과 바깥쪽 휠의 추력  $F_i$ 와  $F_o$ 의 차이에 의해 조향이 이루어지며, 각 휠에는 지면과의 작용 에 의해 저항  $R_R$ 과 회전저항모멘트  $M_R$ 이 그림 3과 같이 작용하게 된다. 계산을 단순화하기 위해 무게 중심의 위치



그림 3. 스키드 조향 방식 도식화 모델[11]. Fig. 3. A schematic model of skid-steering [11].

는 플랫폼의 센터로, 전·후 휠에서 발생하는 추력은 동일하 다고 가정하였다. 또한 평지에서 저속의 정상 상태를 가정 하여 원심력과 가속도의 영향을 무시하면 다음의 식이 성 립한다.

$$F_{o} + F_{i} - 2R_{R} = 0 \tag{13}$$

$$B(F_o - F_i) - M_R = 0 (14)$$

따라서 안쪽과 바깥쪽 휠의 추력은 다음과 같다.

$$F_o = R_R + \frac{M_R}{2B} \tag{15}$$

$$F_i = R_R - \frac{M_R}{2B} \tag{16}$$

R<sub>R</sub>은 플랫폼이 직선 주행 시 발생하는 저항으로 식 (5) 에서 구한 값과 같다. 눈에서 주행하는 차량에 발생하는 M<sub>R</sub> 은 주로 눈을 측면으로 밀어내는데 필요한 힘에 의해 발생 된다. 이 힘은 눈의 비중을 무시하고 눈이 수동적으로 파괴 되는 힘만 고려하면 다음과 같이 모델링할 수 있다[15].

$$\sigma_p \approx 2c \tan\left(45 + \Phi/2\right) \tag{17}$$

여기서  $q_{e}$ 는 passive pressure (kPa)이다. 앞서 기술한 바와 같이 남극 해당 지역 눈의 c 와  $\phi$  값은 아직 데이터가 없 지만 하계 시즌에는 눈이 잘 뭉쳐지기 때문에 점착력 c를 7~10kPa로 가정하면 식 (10)의 예상 결과 값으로부터  $\phi$ 는 6~15°로 예상할 수 있다. 이 경우 가장 큰  $q_{e}$  값은 22.2kPa 이다. 하나의 휠이 눈에 50 mm 침하된 경우 눈을 밀어내는 면적은 약 0.01 m<sup>2</sup>이므로 플랫폼이 제자리에서 회전하는 경 우  $M_{R}$ 의 값은 다음과 같다.

$$M_{R} = 22.2kPa \times 0.01m^{2} \times \frac{L}{2} \times 4 = 0.27kNm$$
 (18)

식 (15)로부터 F<sub>6</sub>는 232.8N가 된다. 이는 선정된 구동부 가 낼 수 있는 최대 추력 269N보다 작다. 또한 실제 운용 시에는 견인 장비로 인하여 제자리 회전 또는 급격한 방향 전환이 어렵고 이에 따라 측면 저항도 줄어들기 때문에 방 향 전환에 필요한 동력은 충분한 것으로 판단하였다.

배터리는 1,320 Wh 용량의 리튬이온전지 2개를 설치하여 총 2,640 Wh의 에너지를 확보하였다. 앞서 계산한 구동에 필요한 최대 동력은 426.7 W × 4 wheel = 1706.8 W 이지만 평 지 구동에는 식 (5)와 (8)의 비율에 의해 약 42%의 동력이 필요할 것으로 예상된다. 이 경우 예상가능 구동 시간은 3.68시간이므로 저온(-10~-20°C)에서의 방전 용량을 60%로 가정하면 약 2.2시간 구동이 가능하다.

주요 부품들은 사용 온도가 -20℃인 제품들을 선정하였 으며 감속기 내부 구리스는 저온 윤활 성능이 좋은 제품으 로 교체하였다. 또한 구동시 발열이 발생하는 모터 드라이 버를 배터리 상부에 배치하여 배터리 사용 조건을 개선하 였다.

최종 제작된 플랫폼의 구동 부품 사양과 외형은 표 3, 그림 4와 같다.

표 3. 플랫폼 구동 부품 사양.

Table 3. Specifications of platform driving parts.

· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		사양
모터 (각 휠)	정격 출력(W)	400
	정격 속도(rpm)	3000
	최대 속도(rpm)	3500
	정격 토크(Nm)	1.3
	최대 토크(Nm)	2.6
감속기 감속비		1:25
배터리 에너지(Wh)		1,320 x 2
휠 지름(m)		0.48



그림 4. 장애물을 넘어가는 완성 차량.

Fig. 4. Developed unmanned ground vehicle crossing an obstacle.

3. 제어부 설계

제어부는 그림 5와 같이 Rover Control System, Motor Controller, Radio Transmission System 등으로 구성하였다. Rover Control System은 오픈소스 기반으로 주행 필수 기능의 신 속한 적용이 가능하고 향후 극지 환경에서의 특수 기능 추 가가 용이한 Pixhawk를 사용하였다[16]. 주로 쿼드콥터 무 인항공기에 활용되는 오픈하드웨어 제품인 Pixhawk는 주로 비행 환경에서 사용되기 때문에 저온에 대한 내구성을 기 본적으로 갖추고 있으며, 저렴한 비용과 범용성으로 무인항 공기 외에도 다양한 플랫폼에 사용되고 있다[17].

Rover Control System은 PWM (Pulse Width Modulation) 신호를 Motor Controller에 보내서 모터를 제어하며 사용자 가 조종기를 이용하여 직접 제어하거나 자율 주행 알고리 즘을 이용하여 주행 명령을 생성할 수 있다. 사용자가 원거 리에서 조종기로 직접 제어하는 경우 Rover Control System 은 Radio Transmission System으로부터 사용자의 명령을 PPM (Pulse Position Moulation)신호로 입력받아 모터를 제어한다. 사용된 통신 모듈은 900 MHz 대역 주파수를 사용하며 안테 나 및 지상통제시스템의 설정에 따라 40 km가 넘는 장거리 통신까지 지원한다. 따라서 배터리 용량과 최대 속도를 고 려하였을 때 도달할 수 있는 반경 10 km 범위 내에서 제어 가 가능하며 예기치 못하게 통신이 두절되는 상황에서는 출발지로 복귀하도록 셋팅하였다. 또한 사용자는 시리얼 통 신을 통해 출력된 플랫폼의 상태 정보 수신할 수 있다.

자율 주행은 Pixhawk에 적용된 오픈소스 알고리즘과 펌 웨어를 사용하였다. Rover Control System에 내장된 센서



그림 5. 제어부 블록다이어그램.

Fig. 5. Block diagram of control part.

(IMU, Magnetometer, 기압계 등)와 외장된 센서(GSP 및 추 가 IMU)들의 데이터를 입력 받아 확장칼만필터 알고리즘을 통해 무인지상차량의 위치(위도, 경도, 고도) 및 속도, 자세 (롤, 피치, 요) 등의 상태 추정치를 연산하며 이렇게 생성된 플랫폼 상태 추정치와 주행 명령으로부터 주행 알고리즘 연산을 통해 모터의 구동 명령을 생성하여 PWM (Pulse Width Modulation)신호 형태로 Motor Controller로 전달한다. 또한 플랫폼의 위치, 속도, 모터 소모 전류, 배터리 등 상태 정보를 저장하기 위하여 아두이노 기반의 하드웨어를 추가 하였으며 모터 드라이버로부터 모터의 소모 전류, 엔코더 값, 제어 신호 등을 모니터링하고 저장할 수 있도록 하였다.

#### Ⅲ. 주행 실험 및 크레바스 탐지

개발된 무인지상차량의 성능실험은 2019년 11월 남극 하 계 시즌에 남극 장보고 과학기지 인근에서 수행되었다. 기 지 주변의 다양한 상태의 지면에서 구동 시험과 크레바스 탐지 레이더를 견인하여 크레바스 위험 구역 무인 탐사를 수행하였다.

1. 주행 시험

주행 시험은 그림 6과 같이 남극 장보고 과학기지 주변 습지, 빙설, 해빙 지형에서 수행하였다.

그림 7은 각 지형의 비교적 평평한 구간에서 등속 주행 시 휠 구동 토크를 나타낸다. 모터의 구동 토크는 아두이노 기반으로 제작된 DAQ의 SD카드에 저장된 모터의 소모 전 류로부터 계산하였다. 습지에서는 전륜 평균 토크 11.3 Nm,



그림 6. 주행 시험 지면(습지(좌), 빙설(중), 해빙(우)).

Fig. 6. Driving test ground(wet soil(left), ice and snow(middle), sea ice(right)).





후륜 평균 토크 14.9 Nm, 빙설 지형에서는 전륜 평균 토크 12.3 Nm, 후륜 평균 토크 18.9 Nm, 해빙 지형에서 전륜 평 균 토크 9.8 Nm, 후륜 평균 토크 10.8 Nm를 기록하여 빙설 지형에서 가장 큰 저항이 발생함을 알 수 있었다.

토크 값을 근거로 예측한 구름저항 계수는 습지 0.24, 빙 설 0.25, 해빙 0.19 로 초기 예측 값 0.29에 비해서는 작은 값을 보였지만 이는 지면의 계수를 다소 보수적으로 예측 한 영향으로 판단할 수 있다. 또한 모터의 토크는 후륜에서 항상 더 크게 작용하였으며 이는 차량의 무게 중심이 뒤쪽 에 있기 때문인 것으로 보인다. 전후륜의 토크 차이는 습지 24%, 빙설 35%, 해빙 9% 의 차이를 보였다. 무른 지형일수 록 무게 중심에 따라 전후륜의 침하량 차이가 커지면서 지면 변형에 의한 저항도 함께 커지기 때문인 것으로 판단된다.

자율 주행 기능 시험을 위하여 목표 경로점을 설정하고 경로 추종 여부를 확인하였다. 남극 이동 전 국내에서 수행 한 시험의 경우 경로를 추종하면서 자율 주행을 수행하는 데 별다른 문제가 발생하지 않았다. 하지만 남극 현장 시험 에서는 경로를 추종하며 자율 주행에는 성공하였으나, 과도 한 경로 추종 오차가 발생하는 것을 확인하였다. 이는 차량 의 해당 값 오류로 인한 문제로 판단된다. 주행 전 지자기 센서 교정 작업을 진행하였기 때문에 주행 초기에는 이상 이 없었으나 주행 중 비정상적인 해당 오프셋이 발생이 확 인되었다. 특히 급격한 주행 방향 전환 시 헤딩 값에 과도 한 오류가 확인되었다. 이는 남극 장보고 기지의 지형적 특 성에 의한 것으로 자북과 진북의 편각이 약 133도로 크고 극에 가까울수록 변화가 크기 때문에 지자기 센서의 헤딩 값과 GPS기반 헤딩 값의 차이로 인하여 확장 칼만필터 알 고리즘의 오류를 일으킨 것으로 판단된다.

#### 2. 크레바스 탐지

제작된 차량을 이용하여 크레바스 위험 지역에서 무인탐 사를 수행하였다. 탐사 루트는 남극 장보고 과학기지에서 남극 내륙 빙상으로 올라가는 길목에 위치한 브라우닝 패 스 2.6 km 구간으로 다수의 크레바스가 존재하여 남극 내륙 탐사를 위해서 매년 설상차를 이용하여 유인 탐사를 수행 하였던 구간이다. 그림 8과 같이 사용주파수 250 MHz의 빙 하투과레이더를 후면 견인 고리에 연결하고 자율 주행으로 탐사를 수행하였다. GPS 데이터 기준 최고속도 2.6 m/s, 평 균속도 1.8 m/s로 측정되었으며 약 25분간 계획한 탐사 루 트를 주행하는데 성공하였다. 모터 엔코더 데이터를 기준으 로 계산된 차량의 평균속도는 1.9 m/s로 약 5% 정도의 슬립 이 발생한 것으로 판단된다.

주행 구간의 경사는 ±5도 이내로 급격한 경사 구간이 없었 으며 주행 중 휠의 토크는 순간 최대 84 Nm를 기록하였으나 대부분 0~30 Nm 사이에서 안정적인 상태를 유지하였다.

빙하투과레이더는 견인되는 과정에서 낮은 마찰력으로 인하여 차량의 이동 방향과 제대로 정렬이 되지 않거나 굴 곡이 있는 지면에서는 지면 위로 튀는 현상을 보이기도 하 였지만 수집한 데이터를 이용하여 크레바스 유무를 확인할 수 있었다.

빙하투과레이더를 이용한 탐사 결과는 무인탐사를 통하 여 수집된 레이더 신호를 분석하여 그림 9와 같은 그래프 로 표현된다. 날씨와 기온 등의 변화로 인한 눈 속성의 변 화가 레이더의 에너지에 반영되어 눈이 쌓여있는 레이어를 확인할 수 있다. 크레바스가 없는 구역에서는 대부분 수평 하게 레이어를 이루며 쌓여있지만, 크레바스가 위치한 영역 에서는 경사를 이루며 회절된 레이어들을 확인할 수 있다. 크레바스 수직 벽의 잔해들로 인하여 수평 눈 레이어의 반 사 신호가 간섭을 받아 회절하게 되며, 또한 안테나가 크레 바스 공극 위에 있으면 반사에너지가 크게 떨어지게 되는 것을 확인하여 눈에 덮여 가려진 크레바스의 위치를 추정 할 수 있다. 이러한 크레바스의 위치, 크기 등의 추정은 관 련 전문가에 의하여 이루어지며 향후에는 기계학습을 통한 자동화를 계획하고 있다.







그림 9. 브라우닝패스 구간에서 수집한 레이더 그래프. Fig. 9. Radar graph collected from Browning Pass section.

#### IV. 결론

남극에서의 자율 주행 시 과도한 경로 추종 오차가 발생 하는 문제점과 견인되는 탐사 장비의 방향 정렬이 고르지 않고 상하 요동이 발생하는 문제점들이 일부 발견되었지만 크레바스 위험이 상존하는 구간에서 무인지상차량을 이용 하여 크레바스 위치를 판별할 수 있었다.

향후에는 헤딩 값 오류를 해결하기 위하여 듀얼 안테나 GPS를 활용하여 방위각을 설정하거나 주행 경로를 기반으 로 방위각을 업데이트하도록 하여 지자기 센서 사용을 최 소화할 계획이다. 또한 실제 남극 현장 지면의 특성과 휠과 의 관계를 측정할 수 있는 데이터 수집 장치를 개발하여 남극 현장의 데이터를 수집하고 개선된 무인지상차량을 개 발하는데 활용할 계획이다. 본 연구를 통해 남극에서 수집 된 무인지상차량 플랫폼의 데이터와 향후 실험 장치를 이 용하여 수집할 남극 지면 특성 데이터는 극지 현장에서 활 용할 수 있는 다양한 형태의 지상차량의 개발 및 극지 육 상연구 활동에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

#### REFERENCES

- D. Apostolopoulos, M. Wagner, B. Shamah, L. Pedersen, K. Shillcutt, and W. Whittaker, "Technology and field demonstration of robotic search for Antarctic meteorites," *International Journal of Robotics Research*, vol. 19, no. 11, pp. 1015-1032, Nov. 2000.
- [2] G. Trisca, M. Robertson, H. Marshall, L. Koenig, and M. Comberiate, "GROVER: An autonomous vehicle for ice sheet research," *American Geophysical Union, Fall Meeting*,

68

San Francisco, CA, USA, Dec. 2013.

- [3] L. Ray, J. Lever, A. Streeter, and A. Price, "Design and power management of a solar-powered "Cool Robot" for polar instrument networks," *Journal of Field Robotics*, vol. 24, Issue 7, pp. 581-599, Jul. 2007.
- [4] J. Lever, A. Delaney, L. Ray, E. Trautmann, L. Barna, and A. Burzynski, "Autonomous GPR surveys using the Polar Rover Yeti," *Journal of Field Robotics*, vol. 30, Issue 2, pp. 194-215, Mar./Apr. 2013.
- [5] Y. He, C. Chen, C. Bu, and J. Han, "A Polar Rover for large-scale scientific surveys: design, implementation and field results," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 12, Issue 10, May 2015.
- [6] T. Lee, S. Cho, S. Lee, C. Roh, and Y. Kang, "Design of an autonomous antarctic exploration platforms through manipulations of All-Terrain Vehicles," 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Busan, pp. 281-284, Jun. 2016.
- [7] S. H. Cho, Y. S. Kang, and T. K. Lee, "Trajectory tracking experiment of autonomous mobile robot for crevasse detection on arctic environment," *Proc. of 2015 Spring Conf. Korean Society for Precision Engineering*, Jeju, Korea, pp. 490-491, May 2015.
- [8] K. J. Kim, G. E. Padilla, B. S. Sim, and K. H. Yu, "Path planning and following based on the fast marching method(FMM)/feedback control for lunar exploration rover on digital elevation model(DEM)," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 25, Issue 12, pp. 1109-1115, 2019.
- [9] C. Chung, H. Kim, D. Yoon, and J. Lee, "Development of an unmanned ground vehicle (UGV) for polar research support," *Proc. of ICROS Annual Conference 2020*, Sokcho, Korea, pp. 5-6, Jul. 2020.
- [10] M. G. Bekker, *Theory of Land Locomotion*, University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1956.
- [11] J. Y. Wong, *Theory of Ground Vehicle*, 4th Ed., John Wiley & Sons, New Jersey, 2008.
- [12] S. R. Cho, "Test assessment of frictional coefficient between model ice and automobile tire," *Proc. of 2015 Annual Autumn Conf. & Exhibition The Korean Society Of Automotive Engineers*, Gyeongju, Korea, pp. 409-410, Nov. 2015.
- [13] G. L. Blaisdell, R. W. Richmond, S. A. Shoop, C. E. Green, and R. G. Alger, "Wheel and tracks in snow: validation study of the CRREL shallow snow mobility model," CRREL Report 90-9, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, NH, 1990.
- [14] J. H. Lever, J. C. Weale, R. G. Alger, and G. L. Blaisdell, "Mobility of cargo trains during year two of the proofof-concept South Pole traverse," ERDC/CRREL Technical Report TR- 04-22, Cold Regions Research and Engineering

Laboratory, Hanover, NH, 2004.

- [15] J. Lever, S. Shoop, and R. Bernhard, "Design of lightweight robots for over-snow mobility," *Journal of Field Robotics*, vol. 46, Issue 3, pp. 67-74, Jun. 2009.
- [16] PX4 Development Guide, https://dev.px4.io
- [17] J. Jin and J. Jo, "Triple inertial sensor redundancy for the attitude control of a small multi-copter-type drone and fight tests using pixhawk," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 25, Issue 5, pp. 452-462, 2019.



## 정 창 현

2004년 성균관대 기계공학부 졸업. 2010 년 UST 지능형로봇공학 석사. 2013년 동 경공업대학 기계정보환경학 박사. 2004 년~2008년 삼성전자 생산기술연구소 선 임연구원. 2013년~2017년 한화테크원 로 봇사업부 수석연구원. 2018년~현재 한국

해양과학기술원 부설 극지연구소 재직. 관심분야는 필드 로봇 설계, 극지 탐사/연구 장비 개발.



### 김 형 권

2007년 홍익대학교 기계시스템디자인공 학과 졸업. 2009년 한양대학교 메카트로 닉스공학과 석사. 2009년~2013년 케이엔 알시스템 기술연구소 전임연구원. 2013 년~2018년 한화 종합연구소 선임연구원, 2018년~현재 한국해양과학기술원 부설

극지연구소 재직. 관심분야는 로봇, 사물인터넷, 극지 탐사/연 구 장비 개발.



# 윤동진

2011년 국민대 기계자동차공학부 졸업. 2013년 동 대학원 석사. 2013년~2017년 퍼스텍 선임연구원. 2017년~현재 한국해 양과학기술원 부설 극지연구소 재직. 관 심분야는 필드로봇, 무인항공기, 극지 탐 사/연구 장비 개발.



## 이 주 한

1999년 공주대 지질학 학사. 2001년 서울 대 지구물리학 석사. 2008년 UST 극지과 학 박사. 2008년~현재 한국해양과학기술 원 부설 극지연구소 미래기술개발부 부 장. 관심분야는 빙하레이더를 이용한 빙 하 및 하부구조 연구.