

무인지상차량(UGV) 설상이동성 향상을 위한
데이터 측정 기술 연구

Study on Data Measurement Technology for Over-Snow
Mobility of Unmanned Ground Vehicle(UGV)



2021. 1. 29

한 국 해 양 과 학 기 술 원
부 설 극 지 연 구 소



제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “ 무인지상차량(UGV) 설상이동성 향상을 위한 데이터 측정 기술 연구”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2021. 1. 29.



연구 책임자 : 정창현

참 여 연 구 원 : 이주한, 김형권, 윤동진,
신동섭, 김수환, 최형규,
정지용, 이강현, 주동찬,
김고홍



보고서 초록

과제관리번호	PE19520	해당단계 연구기간	1년	단계 구분	1/ 1
연구사업명	중 사업명				
	세부사업명	신진연구원 지원과제			
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	무인지상차량(UGV) 설상 이동성 향상을 위한 데이터 측정 기술 연구			
연구책임자	정창현	해당단계 참여연구원수	총 : 11 명 내부 : 11 명 외부 : 0 명	해당단계 연구비	정부: 30,000 천원 기업: 0 천원 계: 30,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 부설 극지연구소 기술지원실		참여기업명	해당 없음	
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위탁연구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약					보고서 면수
<ul style="list-style-type: none"> - 설상에서 구동하는 무인 지상 차량 이동 성능을 측정에 필요한 데이터 항목 연구 - 선정된 데이터 항목들을 이용하여 기 제작된 무인 지상 차량 이동 성능 예측 - 데이터 항목 수집을 위한 실험 방법 및 장치 연구 - 극지에서 활용할 수 있는 시험 장치 및 실험 방법 설계 - 시험 장치 개발 및 테스트 수행 - 향후 극지 현장에서 시험 장치 활용 및 데이터 수집 계획 수립 					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	무인지상차량, 빙설 주행, 험지 주행, 지형역학, 이동 로봇			
	영 어	unmanned ground vehicle, icy driving, rough terrain driving, terramechanics, mobile robot			

요 약 문

I. 제 목

- 무인지상차량(UGV) 설상이동성 향상을 위한 데이터 측정 기술 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 연구 개발 목적
 - 무인지상차량(UGV) 설상이동성 연구에 필요한 실험 방법 및 데이터 수집 체계 정립
- 연구 개발의 필요성
 - 극한 환경에서의 연구 활동은 항상 위험을 수반하기 때문에 연구의 무인화, 자동화를 위한 장비 개발을 필요로 함
 - 극지연구소의 남극 내륙 진출 계획에 따라 남극의 연구 영역 확대가 예상되며 이에 따라 연구의 효율성을 높이기 위한 기술 도입, 개발이 필요함
 - Polar Research Equipment社は 미국 Dartmouth 대학에서 개발한 Cool Robot, Yeti와 자체 개발한 Frosty Boy라는 육상 모바일 로봇을 활용하여 고객 맞춤형 극지 데이터 수집 서비스를 제공하는 사업을 하고 있음
 - 극지연구소에서는 자체적으로 무인지상차량(UGV)을 개발하여 크레바스 탐사에 활용하고 있으며 더욱 높은 수준으로 나아가기 위해서는 기초 분야 연구를 수행할 수 있는 기반 마련 필요

III. 연구개발의 내용 및 범위

- UGV 설상 이동 성능 연구에 필요한 수집 데이터 항목 및 측정 방법 정립
 - 논문 연구를 통한 자료 조사
 - 관련 전문가 면담 및 관련 기관 방문을 통한 조사 및 분석
 - 기존 데이터를 활용한 수집 데이터 항목 검증
- 측정 방법론 검증을 위한 샘플 제작 및 테스트 진행
 - 수집이 필요한 파라미터 항목별 측정 방법 조사 및 아이디어 도출
 - 측정 수행에 필요한 실험 장비 설계 및 제작
 - 예비 실험 수행
- 향후 데이터 수집 및 활용 계획 수립
 - 무인지상차량(UGV)를 활용한 데이터 수집 계획 수립
 - 수집된 데이터 보관 및 활용 계획 수립

IV. 연구개발결과

- 논문 연구를 통하여 빙설 주행 성능 측정에 필요한 데이터 항목 및 관계식 도출
- 도출된 항목과 관계식, 기존에 수집한 극지 현장 데이터를 활용하여 무인지상차량의 빙설 주행성능 예측(관련 내용으로 학술대회발표 및 국내 논문 투고)
- 극지 현장에서의 빙설 주행 성능 측정에 필요한 데이터 항목을 수집하기 위한 실험 방법 및 실험 장비 구상
- 구상한 실험 장비 설계, 제작 및 실험실 단위 실험을 통하여 기능 검증
- 향후 실험 장비 및 무인지상차량(UGV)를 활용한 데이터 수집 계획 수립

V. 연구개발결과의 활용계획

- 남극 기지 주변 빙설에서 무인지상차량의 빙설 주행 성능 측정에 필요한 데이터를 측정하여 향후 차량 개발 및 운행에 활용
- 무인지상차량 운행 중에 측정 가능한 데이터를 수집하여 향후 다양한 빙설 지형에 적합한 차량 개발 및 운행에 활용



SUMMARY

I. Title

Study on Data Measurement Technology for Over-Snow Mobility of Unmanned Ground Vehicle(UGV)

II. Purpose and Necessity of R&D

○ Purpose of R&D

- Establishment of experimental methods and data collection systems necessary for research on mobility ability on snow in Unmanned Ground Vehicles (UGVs).

○ Necessities of R&D

- Research activities in extreme environments always involve risks, so it is necessary to develop equipment for unmanned and automated research
- In accordance with the Korea Polar Research Institute's plan to advance into the inland of Antarctica, the research area in Antarctica is expected to be expanded. Accordingly, it is necessary to introduce and develop technology to increase the efficiency of research.
- Polar Research Equipment Co., Ltd. is in the business of providing customized polar data collection service using Cool Robot and Yeti developed by Dartmouth University in the United States and a mobile robot called Frosty Boy developed by itself.
- The Korea Polar Research Institute has developed its own Unmanned Ground Vehicle (UGV) and is using it for exploration of crevasses, and in order to advance to a higher level, it is necessary to establish a foundation for conducting basic field research.

III. Contents and Extent of R&D

- Establishment of collected data items and measurement methods necessary for the research of UGV mobility on ice and snow
 - Collecting data through paper research
 - Investigation and analysis through interviews with related experts and visits to related organizations
 - Verification of collected data items using existing data

- Sample production and testing to verify measurement methodology
 - Investigate measurement methods for each parameter item that needs to be collected and derive ideas
 - Design and manufacture of experimental equipment necessary for measurement
 - Preliminary experiment
- Establish future data collection and utilization plans
 - Establish a data collection plan using an Unmanned Ground Vehicle (UGV)
 - Establish a plan for storing and using collected data

IV. R&D Results

- Derive data items and relational expressions necessary for measuring ice and snow driving performance through thesis research
- Predicting the driving performance of unmanned ground vehicles on ice and snow by using the derived items, relational expressions, and previously collected polar field data (presented at a conference and submitted a domestic journal with the contents)
- Design of experimental methods and experimental equipment to collect data items necessary for measuring ice and snow driving performance in polar sites
- Design of experimental methods and experimental equipment to collect data items necessary for measuring ice and snow driving performance in polar sites
- Functional verification through conceived experimental equipment design, production, and laboratory unit experiments
- Establish a data collection plan using experimental equipment and unmanned ground vehicles (UGVs) in the future

V. Application Plans of R&D Results

- Measure the data necessary to measure the ice and snow driving performance of unmanned vehicles in the ice and snow around the Antarctic stations and use it for future vehicle development and operation
- Collecting measurable data while driving an unmanned ground vehicle and using it for vehicle development and operation suitable for various ice and snow terrain in the future

CONTENTS

Chapter 1 Introduction	1
1. Overview	2
2. Research Contents and Strategies	3
Chapter 2 Current R&D Status in Korea and Other Nations	6
1. Domestic Technology Development Status	6
2. Overseas Technology Development Status	8
Chapter 3 Contents and Results of R&D	13
1. Research on Items and Methods for Measurement of Mobility on Snow	13
2. Prediction of UGV Mobility on Snow	20
3. Study of Test Methods and Devices for Collecting Data	29
4. Development of Test Equipment and Experiment	35
Chapter 4 R&D Goal Achievement and External Contribution	44
Chapter 5 Application Plan of R&D Results	46
Chapter 6 References	48
The Report for Reviews	51

목 차

제 1 장 서론	1
제 1 절 과제 개요	2
제 2 절 연구내용 및 추진 체계	3
제 2 장 국내외 기술개발 현황	6
제 1 절 국내 기술개발 현황	6
제 2 절 국외 기술개발 현황	8
제 3 장 연구 개발 수행 내용 및 결과	13
제 1 절 설상 이동성 측정에 필요한 데이터 항목 및 방법 연구	13
제 2 절 무인지상차량 설상 이동성능 예측	20
제 3 절 데이터 항목 수집을 위한 시험 방법 및 장치 연구	29
제 4 절 시험 장치 개발 및 테스트	35
제 4 장 연구 개발 목표 달성도 및 대외기여도	44
제 5 장 연구 개발 결과의 활용계획	46
제 6 장 참고문헌	48
최종 결과보고서에 평가의견 반영사항	51

그림 목 차

그림 1 극지연구소 무인지상차량(MK-S)	6
그림 2 영상, 조작 성능 테스트를 위한 소형로봇 플랫폼	7
그림 3 휠-트랙 구동 아이디어 검증을 위한 구동 모듈 샘플	7
그림 4 SnoBot	8
그림 5 SnoBot-2	8
그림 6 Cool Robot	8
그림 7 Yeti	8
그림 8 Plate-sinkage apparatus	10
그림 9 Apparatus used for drawbar-pull measurements	10
그림 10 눈의 밀도 및 온도 프로파일 측정	10
그림 11 Tire에 의한 20cm깊이의 fresh snow 변형 시뮬레이션	11
그림 12 Wheel performance test-bed (Harbin Institute of Technology, China)	11
그림 13 (a) Wheel-soil interaction testbed, (b) data acquisition system (Ritsumeikan University, Japan)	12
그림 14 휠의 성능 평가에 대한 다양한 접근 방법들	14
그림 15 트랙 차량 성능 예측을 위한 단순 모델	16
그림 16 다양한 homogeneous 지형의 압력-침하 상관관계	17
그림 17 차량-지면 상호작용 변수 활용 방법	19
그림 18 무인지상차량 이동성능 예측	20
그림 19 단순화한 휠-지면 상호작용 모델	21
그림 20 스키드 조향 방식 도식화 모델	23
그림 21 주행 시험 지면(습지(좌), 빙설(중), 해빙(우))	26
그림 22 테스트 지면별 주행토크(습지(상), 빙설(중), 해빙(하))	27
그림 23 베바미터의 구성	30
그림 24 차량에 부착된 형태의 베바미터 장비	30
그림 25 직접전단강도 시험기	31
그림 26 MIT 휠 테스트베드	32
그림 27 일본 토호쿠 대학 휠 테스트베드	32
그림 28 중국 Harbin 공과대학 휠 테스트베드	32
그림 29 전북대 항공우주로봇 및 메카트로닉스 연구실에서 제작한 휠테스트베드	34
그림 30 실험용 달탐사 로버	34
그림 31 평판 재하 시험 컨셉	36
그림 32 전단시험 컨셉	37
그림 33 제작된 시험장치	38

그림 34 시험장치 User Interface	39
그림 35 시험 장치 실내 시험	39
그림 36 두 종류의 가압 플레이트(지름 12cm, 15cm)	40
그림 37 시험 결과 그래프	41
그림 38 데이터 수집 계획	42
그림 39 데이터 관리 체계 구축 세미나	43
그림 40 논문성과	45
그림 41 지면-차량 상호작용 시험장치와 무인지상차량 활용 계획	46
그림 42 지형역학의 적용가능 분야	47



표 목 차

표 1 주요 수집 데이터 항목(예시)	9
표 2 월-지면 간 상호 작용 분석 방법별 장단점 비교	15
표 3 반 실험적 방법 활용을 위한 데이터 항목 및 계측 방법	18
표 4 월과 지면 특성 파라미터	21
표 5 데이터 항목 수집을 위한 시험 방법 및 장치 연구	33
표 6 시험 장치 사양	37



제 1 장 서 론

제 1 절 과제 개요

1. 배경 및 필요성

- 극한 환경에서의 연구 활동은 항상 위험을 수반하기 때문에 연구의 무인화, 자동화를 위한 장비 개발을 필요로 함
- 극지연구소의 남극 내륙 진출 계획에 따라 남극의 연구 영역 확대가 예상되며 이에 따라 연구의 효율성을 높이기 위한 기술 도입, 개발이 필요함
- Polar Research Equipment社は 미국 Dartmouth 대학에서 개발한 Cool Robot, Yeti와 자체 개발한 Frosty Boy라는 육상 모바일 로봇을 활용하여 고객 맞춤형 극지 데이터 수집 서비스를 제공하는 사업을 하고 있음
- 극지연구소에서는 자체적으로 무인지상차량(UGV)을 개발하여 크레바스 탐사에 활용하고 있으며 더욱 높은 수준으로 나아가기 위해서는 기초 분야 연구를 수행할 수 있는 기반 마련 필요

□ 기술적 측면

- 극지용 무인지상차량(UGV)을 개발, 운영하고 있는 기관들에서는 개발, 운용 과정에서 주변 환경에 따른 차량의 운용 정보를 면밀히 기록함으로써 후속적인 무인 이동 플랫폼 개발, 설상에서의 차량 거동 연구 등에 활용하고 있음
- 무인지상차량(UGV)의 이동 성능과 관련된 데이터들을 수집하는 것은 기술적으로 어렵지 않지만 객관적이고 향후 활용성 높은 데이터 확보를 위해서는 센서들과 IoT 기술을 활용한 데이터 수집 방법론 도출 및 실험 기술 확보가 필요
- 차량과 지면과의 역학 분석을 통하여 장비의 개발, 평가 또는 선택 과정에서 다양한 활용이 가능

□ 경제·산업적 측면

- 극지연구소에서 자체적으로 개발 중인 무인지상차량(UGV)의 설상 이동 성능을 향상시킬 수 있는 기반을 마련함으로써 향후에도 다양한 형태의 무인지상차량을 자체적으로 개발할 수 있는 역량 확보 필요
- 무인지상차량(UGV)과 관련된 기술을 보유한 업체, 기관들은 다양하게 존재하고 있으며

높은 수준의 기술을 확보하고 있는 곳도 많이 있지만, 설상 이동 성능에 대해 연구하는 기관은 거의 없기 때문에 관련 기술 개발을 외부에서 도입할 경우 많은 비용이 소모

- 미국 Cold Regions Research and Engineering Laboratory에서는 수십 년 동안 수집한 겨울 차량 실험 데이터베이스를 구축하고 이를 활용하여 추운 지역에서의 차량 이동 성능 시뮬레이션 알고리즘 개발하는 등 수집된 데이터를 다양한 형태로 활용 가능

□ 과학적 측면

- 급변하는 기후변화, 해수면 상승 등으로 인하여 극지에 대한 연구 필요성이 높은 상황이지만 척박한 환경으로 인하여 연구 활동의 무인화, 자동화에 대한 수요가 증대되고 있음. 이에 대응하기 위해서는 설상 환경에서의 무인 이동 기술에 대한 체계적인 접근이 필요
- 극한 지역의 선도적 과학 역량 확보와 주요 이슈 선점, 수월성 있는 극지 연구를 수행하기 위해서는 새로운 극지연구의 플랫폼과 장비 활용이 필요
- 눈과 같이 부드러운 지면에서 거동하는 이동체에 대한 연구는 비슷한 환경의 달 탐사 로버, 화성 탐사 로버에도 활용될 수 있기 때문에 상호 보완적인 연구로써 활용 가치가 높음

□ 사회·문화적 측면

- 최근 이슈가 되고 있는 4차 산업혁명 기술을 접목하여 극지에서 무인 차량을 운용하고 IoT 기술을 활용하여 관련 데이터를 수집함으로써 극지 연구에 대한 사회적 관심 도출 가능
- 타 기관에서는 접근하고 연구하기 힘든 환경에서 구동하는 무인 이동체의 데이터 확보 기반을 마련함으로써 극지연구소의 특화된 연구 영역을 개척할 수 있으며 이를 통하여 극지 연구 활동 홍보에 활용 가능

2. 연구 목표

- 무인지상차량(UGV) 설상 이동 성능 연구에 필요한 수집 데이터 항목 및 측정 방법 정립
 - 논문 연구를 통한 자료 조사
 - 관련 전문가 면담 및 관련 기관 방문을 통한 조사 및 분석
- 측정 방법론 검증을 위한 샘플 제작 및 테스트 진행
 - 수집이 필요한 파라미터 항목별 측정 방법 조사 및 아이디어 도출

- 측정 방법에 따른 필요 샘플 제작 및 측정 테스트 진행
- 향후 데이터 수집 및 활용 계획 수립
 - 무인지상차량(UGV)를 활용한 데이터 수집 계획 수립
 - 수집된 데이터 보관 및 활용 계획 수립



제 2 절 연구 내용 및 추진 체계

1. 연구 내용

◎ 수집 데이터 항목 정의

- 논문 연구 및 전문가 자문을 통하여 무인지상차량의 설상 이동 성능 연구에 필요한 수집 데이터 항목 정의
- 설상에서의 무인지상차량의 이동 성능에 관한 데이터 항목들 위주로 중요도, 측정 용이성, 타 기관 활용 예 등을 종합적으로 검토하여 항목 정의

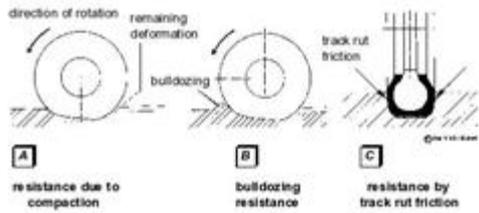
<예시>

- ◎ Vehicle parameters
 - Weight
 - Ground clearance
 - Nominal ground pressure
 - Wheel diameter
 - ...
- ◎ Snow& Env. parameters
 - Pressure-sinkage
 - Cohesion
 - Sliding friction
 - Temperature
 - ...
- ◎ Mobility parameters
 - Sinkage
 - Resistance
 - Traction
 -



◎ 데이터 항목에 대한 수집 방법 연구

- 논문 연구 및 전문가 자문 등을 통하여 앞서 선정된 데이터 항목들에 대하여 수집 방법 조사
- 극지 환경을 잘 모사할 수 있는 방법, 구현 난이도, 타 기관 연구 내용 등을 종합적으로 고려

- ◎ Nominal ground pressure
 - Calculation, Measurement, ...
 - ◎ Pressure-sinkage
 - 모델링 식 검토(Reece's model, Bernstein's model, Bekker's model, N2M model, Wong's model, ...)
 - 모델링 계수 도출을 위한 실험 장치 및 방법 조사
- 
- ◎ Resistance
 - 설상에서 휠 또는 트랙에 작용하는 저항의 종류 및 측정 방법 등 조사
- 
- ◎ 기타 항목들에 대한 조사....



◎ 데이터 수집 방법론 정립

- 데이터 수집 방법에 대하여 벤치마킹, 아이디어 도출, 전문가 자문 등을 통하여 구체화하고 검증이 필요한 부분에 대해서는 샘플 제작 및 테스트를 통하여 방법론 정립
- 현재 운용 중인 극지용 무인지상차량을 이용하여 검증 가능한 방법들을 검증하여 실용적인 방법론 도출



◎ 데이터 수집 및 활용 계획 수립

- 정립된 수집 데이터 항목과 방법론에 대하여 언제, 어떻게 수집, 보관, 활용할지 등에 대한 계획 수립
- 데이터 수집이 용이하도록 도출된 수집 항목, 항목별 시험 방법 등을 매뉴얼화



- ◎ 기존에 개발된 중형 무인지상차량과 소형 플랫폼 샘플에 변위, 압력, 힘 등을 측정할 수 있는 센서들을 부착하거나 필요한 장치들을 샘플 제작하여 구현 가능성 검증



◎ 데이터 항목별 수집 시기

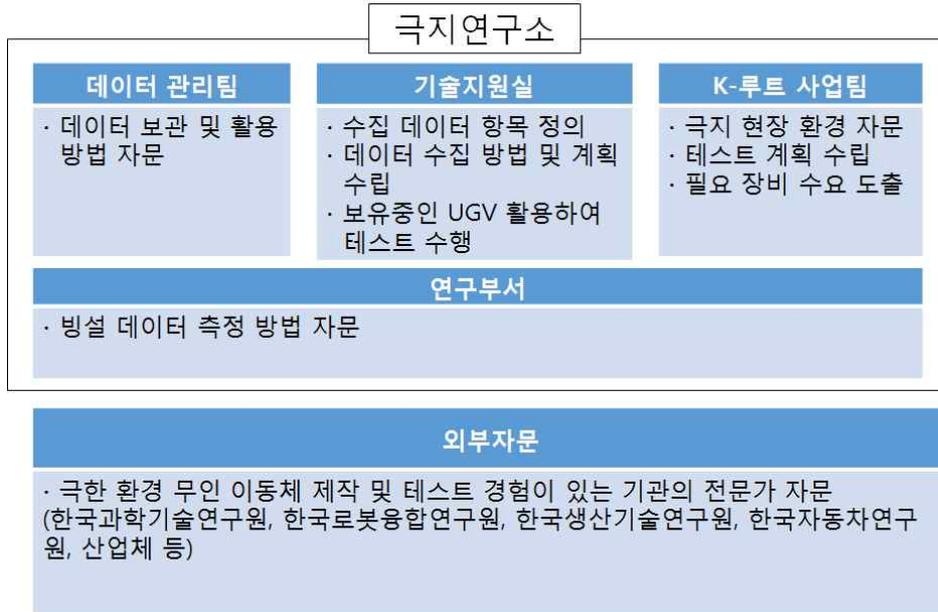
- 무인지상차량 개발 시
: Vehicle parameters, ...
- 무인지상차량 성능시험 시
: Performance parameters, ...
- 극지 운용 시
: Snow&Env. Parameters, Mobility parameters, ...

◎ 데이터 보관 및 공유 계획

- 항목별 포맷, 단위 등 설정
- 지속적인 접근이 필요한 항목에 대한 접근 용이성 검토
- 데이터 Visualization 등 검토

2. 추진 체계

- 극지기술개발·지원부 내 기술지원실, 데이터 관리팀, K-루트 사업팀이 협력하여 과제수행
- 노지에서 운용되는 차량 시험에 대한 연구를 수행하는 기관들로부터 기술 자문



극지연구소

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내 기술개발 현황

- 극지연구소에서는 2018년도부터 극지 탐사용 무인지상차량을 개발하고 있으며 2019-2020 남극 하계 시즌에 브라우링패스 구간에서 크레바스 탐사에 처음 활용



그림 1 극지연구소 무인지상차량(MK-S)

- 설계 과정에서 도출되는 파라미터인 Weight, Ground clearance, Wheel size 등과 탐사 과정에서 무인지상차량 성능과 관련된 Velocity, Duration, Range, Path-following tolerance 등의 데이터 확보 수행
- 한국과학기술연구원(KIST)와 극지연구소 공동으로 극지에서 활용할 수 있는 소형 사이즈 육상 로봇에 대한 기획 연구를 수행하고 샘플 플랫폼 제작



그림 2 영상, 조작 성능 테스트를 위한 소형로봇 플랫폼



그림 3 휠-트랙 구동 아이디어 검증을 위한 구동 모듈 샘플

- 설상에서 구동하는 차량의 이동 성능에 대한 국내 연구는 거의 없으며, 노지에서 구동하는 차량의 성능 연구는 농업용 차량, 군용 차량, 달/행성 탐사 로버를 중심으로 연구가 이루어지고 있음

제 2 절 국외 기술개발 현황

1. 미국, Cold Regions Research and Engineering Laboratory(CRREL)

- SnoBot, Cool Robot, Yeti 등을 개발하면서 Vehicle parameters, Snow parameters, mobility parameters 등 아래 표와 같이 주요 데이터들을 지속적으로 수집하여 데이터 베이스 화하고 후속적인 개발에 활용하고 있음



그림 4 SnoBot



그림 5 SnoBot-2



그림 6 Cool Robot



그림 7 Yeti

표 1 주요 수집 데이터 항목(예시)

구분	항목	단위
Vehicle parameters	Weight	N
	Ground clearance	m
	Nominal ground pressure	kPa
	Wheel diameter	mm
	Wheel width	mm
	Tire Pressure	kPa
	Track width	m
	Track length	m
	Track gauge	m
Mobility parameters (Dimensionless)	Sinkage	
	Compaction resistance	
	Gross traction	
	Net traction	
	Turning index	
Snow parameters	Pressure-sinkage slope	kPa/m
	Cohesion	kPa
	Internal friction angle	deg
	Track-snow sliding friction	
Environmental parameters	Temperature	℃
	Wind	m/h
Performance parameters	Maximum speed	m/s
	Average speed	m/s
	Duration	h
	Range	m
	Path-following tolerance	m

- 객관적인 데이터 수집을 위하여 기존의 수동적인 수집 방법을 센서 등을 활용하여 자동화하거나, 필요한 측정 장비를 직접 제작하여 활용하고 있음



그림 8 Plate-sinkage apparatus

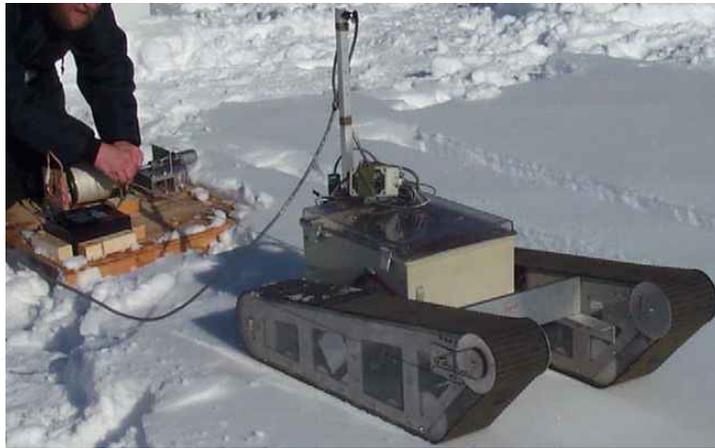


그림 9 Apparatus used for drawbar-pull measurements



그림 10 눈의 밀도 및 온도 프로파일 측정

- 축적된 데이터를 활용하여 다양한 분야의 시뮬레이션, 이론 연구, 신규 모델 개발 등에 활용

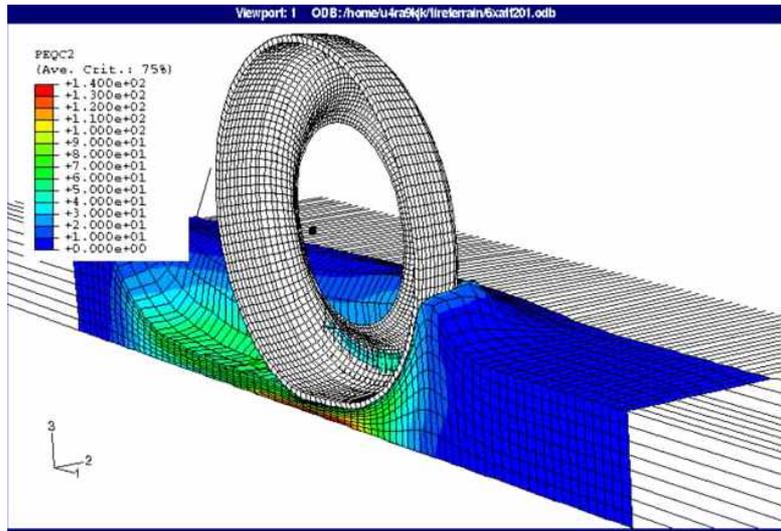


그림 11 Tire에 의한 20cm깊이의 fresh snow 변형 시물레이션

2. 일본, 중국

- 달이나 화성과 같이 부드러운 지면에서 이동하는 탐사 로봇에 활용하기 위하여 휠과 지면 간 상호작용을 연구하기 위한 실험 장치 제작 및 시물레이션 연구 활동을 활발히 진행

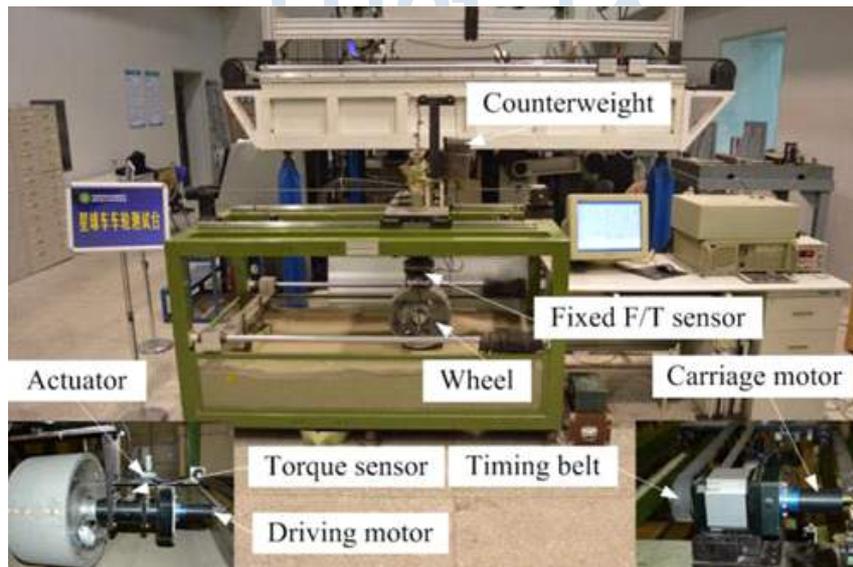


그림 12 Wheel performance test-bed (Harbin Institute of Technology, China)

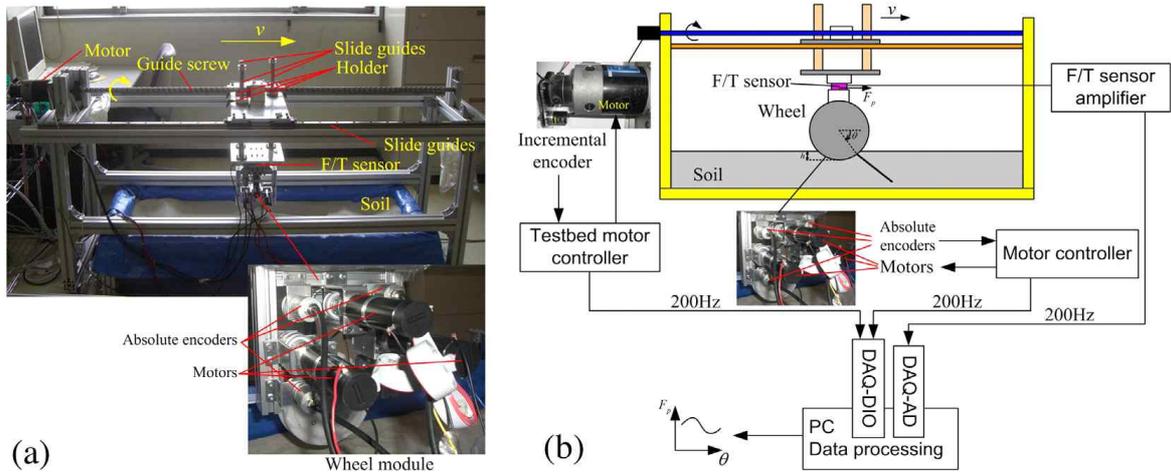


그림 13 (a) Wheel-soil interaction testbed, (b) data acquisition system (Ritsumeikan University, Japan)



제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1 절 설상 이동성 측정에 필요한 데이터 항목 및 방법 연구

1. 배경 이론

- 기동성은 차량을 목표 지점으로 이동시킬 수 있는 능력으로써 아스팔트와 같은 포장도로와 달리 야지 환경에서 차량의 기동성은 노면을 구성하는 물질의 종류와 상태에 따라 많은 차이를 보임
- Bekker, Wong, Bogdanoff, Wedenborn 등의 연구 결과에 따르면 지형 표면의 기하학적 성질을 측정하고 특징짓기 위한 방법은 잘 확립되어 있으나, 야지 차량의 성능을 평가하는데 있어 지형의 기계적 성질을 측정하거나 특징화하기 위해 일반적으로 수용되거나 표준화된 방법은 없음
- 지형의 기계적 특성은 야지 차량의 성능 및 기동성에 제한성을 부여하기 때문에 지형 표면의 기하학적 성질과 지형의 기계적 성질을 측정하고 특징화하는 것이 필요
- 지형의 기계적 성질 측정 방법
 - 원추관입기법
 - 베바미터 기법
 - 토목공학에서 사용되는 토질역학 기법
- 월 또는 트랙과 노면 간의 상호작용을 연구하는 방법론은 크게 세 가지로 분류
 - 경험적 방법(Empirical Method) : 원추 지수(Cone Index)를 사용하는 실험적인 방법으로 차량의 기동성(Mobility)을 예측
 - 전산해석방법(Computational Method) : 유한요소법(Finite Element Method), 개별요소법(Discrete Element Method)
 - 매개변수 분석방법(Methods for parametric analysis) : 전단응력과 수직응력을 사용하여 월과 토양사이의 상호 작용을 모델링하고 실험을 통해 토양 변수를 얻음전산해석방법과 경험적 방법의 단점을 극복할 수 있으며 Bekker에 의하여 정립되고, Reece와 Wong에 의해 발전

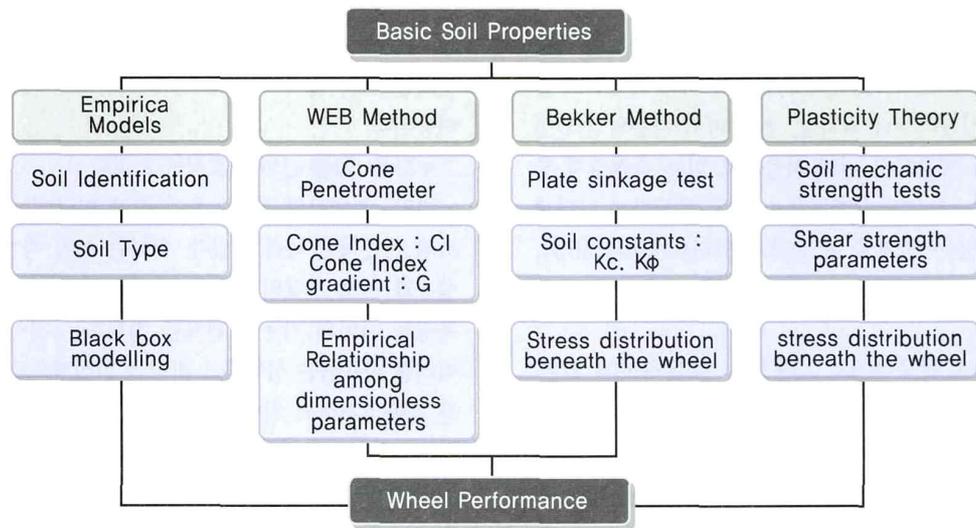


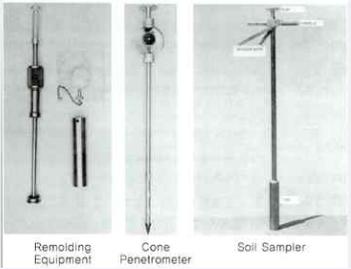
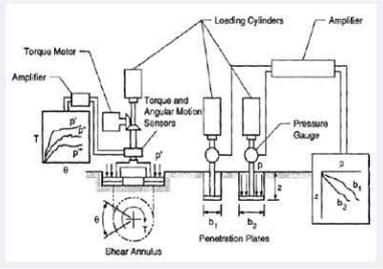
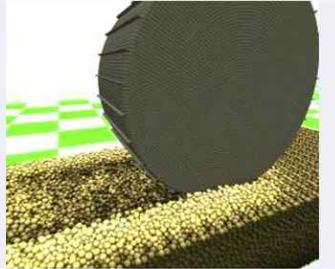
그림 14 휠의 성능 평가에 대한 다양한 접근 방법들

2. 휠-지면 간 상호 작용 분석 방법 비교

- 경험적 방법에서는 주로 원추 관입 시험기를 활용하여 지형 특성을 평가한다. 원추 관입 시험기를 지면에 관입시켜 얻어지는 수치를 토대로 경험적으로 지형에 관한 특성관계식을 유도하는 방법이다. 이런 경험적 방법은 다른 방법들에 비하여 쉽게 지형을 예측할 수 있다는 장점이 있지만, 측정 가능한 실험 변수가 제한적이며 측정 결과가 실험환경에 많은 영향을 미치고, 또한 다양한 분야에 적용되는데 한계가 있다.
- 해석적 방법은 컴퓨터의 계산 능력을 기반으로 지형의 형태를 유한한 요소 혹은 불연속체로 나누고 수치적인 분석을 통하여 지형을 모델링하는 방법으로 유한요소법(FEM, Finite Elements Method)과 이산요소법(DEM, Discrete Element Method)이 사용된다. 해석적 방법은 지형 모델을 예측하기 위하여 많은 계산 시간이 요구되어, 연약지반에서 실시간으로 지형 정보를 예측해야하는 주행시스템이나 탐사로버에는 적합하지 않다.
- 반 실험적 방법은 해석적 방법과 경험적 방법의 단점을 극복할 수 있는 지형 모델링 방법으로 Bekker에 의하여 정립되어 최근에는 행성 탐사로버의 지형 연구나 JAXA에서 개발한 점핑 로봇 등 주행성능을 향상시키기 위한 소형 이동로봇의 연구에 활용되고 있다. 반 실험적 방법은 휠과 지형사이의 상관관계에 관한 물리적 모델을 구하고, 실험 장치를 이용한 측정을 병행하여 주행특성을 예측하는 방법이다.
- 경험적 방법, 해석적 방법, 반 실험적 방법의 장단점은 아래 표와 같이 정리된다. 세 가지 방법 중 극지에서 운용하는 차량의 이동 성능을 예측하고 설계에 활용하기 위해서는 반

실험적인 방법이 가장 적합하다.

표 2 휠-지면 간 상호 작용 분석 방법별 장단점 비교

방법	경험적 방법	반 실험적 방법	해석적 방법
설명	<ul style="list-style-type: none"> 원추관입시험기를 이용하여 지형특성 평가 지형 수치와 경험을 토대로 기동성 예측 	<ul style="list-style-type: none"> 휠과 지형사이의 상관 관계 물리적 모델 설정 실험장치를 이용한 측정을 병행하여 주행특성 예측 	<ul style="list-style-type: none"> 컴퓨터 기술을 활용하여 유한요소법(FEM)과 이산요소법(DEM)으로 차량-지형간 상호작용 계산
장비	 <p>Remolding Equipment, Cone Penetrometer, Soil Sampler</p>		
장점	<ul style="list-style-type: none"> 쉽게 지형 예측 	<ul style="list-style-type: none"> 차량 성능에 영향을 주는 주요설계인자 고려 	<ul style="list-style-type: none"> 특정 양상을 상세히 분석 가능
단점	<ul style="list-style-type: none"> 측정 가능한 실험변수 제한적 다양한 분야 적용에 한계 	<ul style="list-style-type: none"> 경험적 방법보다 복잡한 실험 	<ul style="list-style-type: none"> 환경의 복잡성을 고려한 해석 어려움

3. 차량 성능 관련 주요 변수 검토

- 반 실험적 방법을 활용하기 위해서 휠과 지형사이의 상관관계의 물리적 모델에 대하여 조사하고 차량 성능과 관련된 모델식을 구성하는 항목들에 대하여 조사하였다.
- 차량의 이동 성능은 크게 저항과 견인력에 의하여 결정되며 빙설 지형에서 구동하는 차량의 경우는 지형과의 관계에 의해 많은 영향을 받는다.
 - Resistance : 빙설 지형에서는 주로 침하(sinkage)에 의해 저항 발생
 - Tractive effort and Slip : 구동부에서 발생하는 토크는 차량을 이동시키는 추진력을 발생시키지만 슬립(slip)과도 연관이 있음

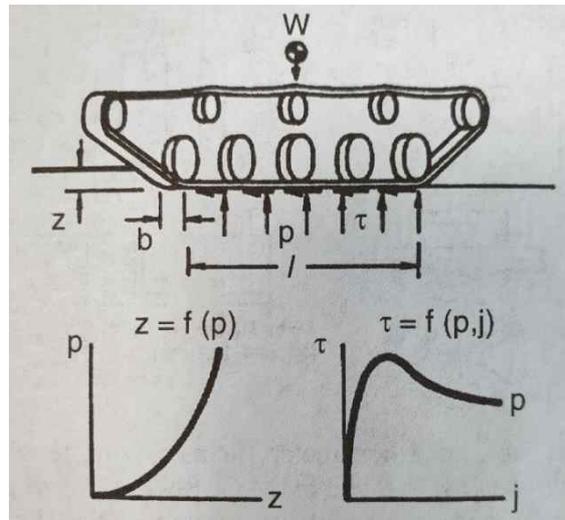


그림 15 트랙 차량 성능 예측을 위한 단순 모델

- 차량과 빙설 지형 사이의 상호작용에 의한 힘을 나타내는 지형모델은 크게 수직응력과 전단응력에 따른 모델로 나눌 수 있다. 수직응력에 따른 지형모델은 압력-침하간의 관계식으로 표현되며, 전단응력에 의한 지형모델은 모어-쿨롱 모델과 전단변위-전단응력의 관계식으로 표현된다.

○ 압력-침하 상관관계

- 지면을 깊이로 따른 질적 변화가 없는(homogeneous) 상태로 가정하면 압력-침하 상관관계는 아래 그림 중 하나의 형태를 따르고 스프링 상수 K 를 이용하여 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$p = Kz^n$$

- 지면을 비선형 스프링으로 가정하면 스프링 상수 K 는 아래와 같이 표현된다.

$$K = \frac{k_c}{b} + k_\phi$$

- 여기서 p 는 압력, b 는 지면과 접촉된 사각 평판의 너비 또는 원판의 반지름과 같이 접촉부의 치수를 나타낸다. z 는 침하량, n 은 침하 지수, k_c 는 지면변형 점착계수, k_ϕ 는 지면변형 마찰계수를 나타낸다.

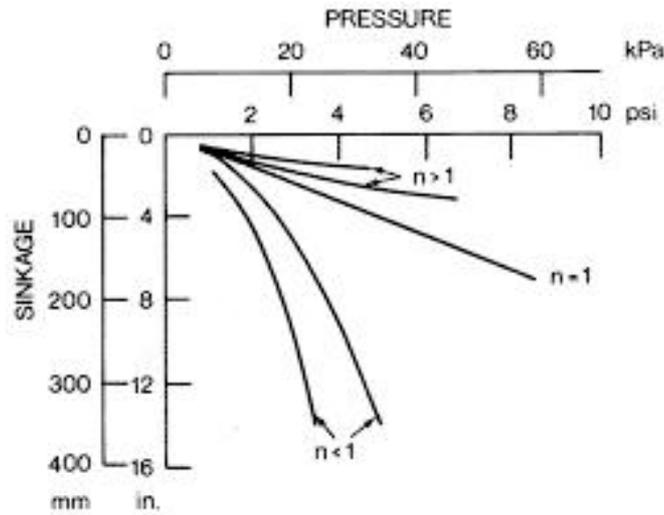


그림 16 다양한 homogeneous 지형의 압력-침하 상관관계

○ 전단응력-전단변위 상관관계

- 차량의 추력과 이와 관련된 슬립을 예측하기 위해서는 지면과 차량 간의 전단응력-전단변위 상관관계가 필요하다.
- 전단응력-전단변위 상관관계는 베바미터 기술을 이용하여 측정할 수 있으며 지면에 다양한 크기의 수직 압력을 가할 때 다른 종류의 전단 장치들을 이용하여 구할 수 있다.
- 상당한 현장 데이터들을 근거로 세 가지 종류의 전단응력-전단 변위 관계가 존재하는 것으로 알려져 있다.
- 헐거운 결합 상태의 모래, 포화 점토, 새롭게 내린 건조한 눈은 전단 변위에 따라 전단 응력이 초반에 급격하게 증가하고 이후에는 변위량이 일정한 값에 도달하게 된다. 이러한 종류의 전단응력-전단변위 관계는 Janosi and Hanamoto에 의해 아래의 식과 같이 제안되었다.

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_{\max}(1 - e^{-j/K}) \\ &= (c + \sigma \tan \Phi)(1 - e^{-j/K}) \end{aligned}$$

여기서 τ 는 전단 응력, j 는 전단 변위, c 는 지면의 응집력, Φ 는 지면의 전단 저항각, K 는 전단 변형 매개변수 이다.

- 차량-지형 상호변수는 앞에서 언급된 모델 식 외에도 지면의 특성에 따라 다양한 모델식들이 파생되어 나와 있지만 본 과제에서는 실험의 편의성을 고려하여 가장 기본 모델식들을 기준으로 필요한 데이터들을 도출하였으며 도출된 항목들은 아래 표와 같다.

- 아래 표에서 차량 변수를 설계 변수 또는 제작 이후 실측을 통하여 구할 수 있고, 차량 성능은 완성된 차량을 시험하여 구할 수 있다. 하지만 차량-지형 상호작용 변수를 도출하기 위해서는 앞서 설명한 베바메타와 같은 별도의 시험 장치를 필요로 한다.

표 3 반 실험적 방법 활용을 위한 데이터 항목 및 계측 방법

구분	항목	약어	단위	계측방법	
차량 변수	공통	차체 무게	W	N	CAD 데이터, 저울 측정
		차고 높이	H	m	CAD 데이터, 자 측정
		무게중심	C	m	CAD 데이터
	휠	휠 폭	b	m	CAD 데이터, 부품 사양서, 자 측정
		휠 지름	D	m	CAD 데이터, 부품 사양서, 자 측정
		접지압	p0	kPa	휠 접촉 면적으로부터 계산
		공기압	pi	kPa	압력 센서 측정
		휠 강성에 의한 압력	pc	kPa	공기압과 차체 무게에 따라 변화
	트랙	평균 접지압	pgr	kPa	pi와 pc의 합을 나타내며 일반화된 변형차트 활용
		트랙 폭	b	m	CAD 데이터, 부품 사양서, 자 측정
		트랙 길이	l	m	CAD 데이터, 부품 사양서, 자 측정
	차량-지형 상호작용 변수	스프로킷 피치원 반지름	r	m	CAD 데이터, 부품 사양서, 자 측정
압력침하 지수		n		압력-침하 상관관계 실험	
지면변형 접촉계수		kc	N/cm ⁿ⁺¹	압력-침하 상관관계 실험	
지면변형 마찰계수		kø	N/cm ⁿ⁺²	압력-침하 상관관계 실험	
침하량		z0	m	수식에 의한 도출, 초음파 센서 측정	
응집력		c	kPa	전단력-전단변위 상관관계 실험	
내부 마찰각		Ø	deg	전단력-전단변위 상관관계 실험	
전단력 변형 변수		K	m	최대전단응력에서의 전단변형양으로 부터 도출	
견인 저항		Rt	N	견인되는 상태에서 로드셀 이용 측정	
슬립률	i		이론속도와 실제속도로부터 계산		
차량 성능	구름저항	RR	N	모터 토크 측정, 지형 모델 이용하여 계산	
	견인력	Tw	N	모터 토크 측정, 지형 모델 이용하여 계산	
	경사등관능력	Φmax	°	모터 토크 측정, 지형 모델 이용하여 계산	
	차량 속도	V	m/s	GPS 데이터 측정, 모터 RPM으로 계산	

- 적절한 실험을 통하여 차량-지형 상호작용 변수를 구할 수 있으면 이를 매개로 차량 설계시 목표 성능 사양을 만족하는 설계 변수를 도출할 수 있으며 반대로 완성된 차량의 성능 측정하여 설계가 적절히 이루어졌는지 평가하는 것이 가능하다.



그림 17 차량-지면 상호작용 변수 활용 방법



제 2 절 무인지상차량 이동성능 예측

본 절에서는 앞 절에서 도출된 변수 항목들을 이용하여 실제로 차량 성능을 예측할 수 있을지를 평가해보았다. 기 개발된 무인지상차량을 차상으로 차량의 성능 예측 값과 실제 계측된 계측 값을 비교하여 변수 선정의 적절성을 확인하였다.

다만 차량-지형 상호작용 변수는 아직까지 극지 현장에서 측정된 값이 없기 때문에 타 연구의 데이터를 활용하거나 실제 극지 현장 경험 등을 토대로 가정하였다.

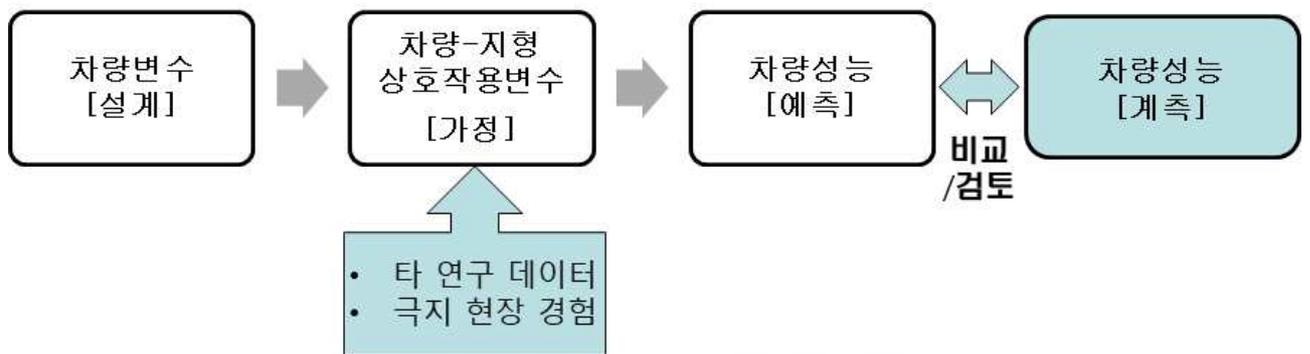


그림 18 무인지상차량 이동성능 예측

1. 구름저항 계산

- 평지에서 휠을 이용하여 이동하는 차량에 작용하는 구름저항(R_R)은 휠 변형에 의한 저항(R_t), 차량 내부 마찰에 의한 저항(R_i), 지면 변형에 의한 저항(R_c)으로 구성되며 아래와 같이 표현된다.

$$R_R = R_t + R_i + R_c$$

- 포장도로에서 운행되는 차량의 구름저항은 대부분 타이어의 변형에 소요되는 일에 의해서 발생되며 포장도로의 표면은 변형되지 않는 것으로 가정한다. 하지만 반대로 표면의 변형이 심한 지면 위에서 구동하는 차량의 경우 노면의 변형에 의한 저항이 크게 작용하여 동력 소모의 주요 원인이 되며 타이어의 지면 접촉 면적이 넓어지면서 타이어 변형에 의한 저항은 줄어들게 된다. 본 차량에 사용된 ATV용 19인치 타이어는 차체의 무게 대비 타이어 공기압과 타이어 골격의 강성에 의한 압력이 차체의 무게에 의해 발생하는 압력보다 훨씬 크기 때문에 타이어 변형에 의한 저항(R_t)은 없는 것으로 가정하였다.
- 내부 마찰에 의한 저항(R_i)는 모터, 감속기, 타이어가 직결로 연결되는 구성을 감안하여

감속기의 기계효율($\eta=0.95$)만을 고려하여 다음과 같이 산정하였다.

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

- 여기서, F_g 는 휠 하나에 작용하는 수직 하중으로 245N이다. 지면 변형에 의한 저항(R_c)는 식 (3)에 의하여 계산되며 폭 b 의 플레이트를 지면 깊이 z_0 까지 가압할 때 단위 길이 당 수행된 수직 방향 일과 동일하다. Bekker에 의해 제안된 이 응력 분포에 대한 가정은 강체 휠의 지면 변형에 의한 저항 R_c 는 휠이 깊이 z_0 의 자국을 내는데 수행한 수직 방향 일과 같음을 의미한다.

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

- 여기서, b 는 휠의 폭, k_c 는 지면변형 점착계수, k_ϕ 는 지면변형 마찰계수, n 은 침하 지수를 나타내며 보통 실험적인 방법을 통하여 도출한다.

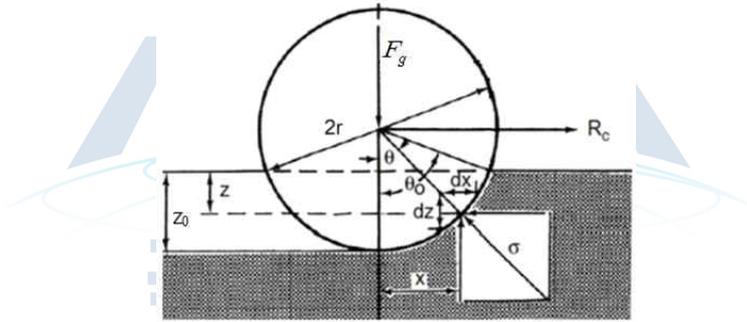


그림 19 단순화한 휠-지면 상호작용 모델

- 하지만 개발 단계에서 남극 현장의 눈을 시료로 측정된 데이터가 없었기 때문에 타 지역의 눈을 대상으로 실험한 데이터와 극지 현장에서의 활동 경험 등을 근거로 휠과 남극 지표면과의 특성 계수를 아래 표와 같이 정리하였다.

표 4 휠과 지면 특성 파라미터

계수	값
b , Width of wheel	0.18m
D , Diameter of wheel	0.483m
k_c , Modulus of snow cohesion	2kN/m^{n+1}
k_ϕ , Modulus of snow friction	255kN/m^{n+2}
n , Pressure sinkage exponent	1

- 설정된 지면 계수와 지면에 가해지는 압력을 Bekker가 제안한 pressure-sinkage equation에 대입하면 다음과 같이 침하량을 구할 수 있다.

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

- 여기서, p는 수직 방향 압력이다. 가정한 휠-지면 특성 계수를 대입하여 설상차와 사람의 침하량 z_0 을 계산하면 각각 17~20cm, 10cm 정도 침하되는 수준으로 다소 부드러운 눈이 쌓인 경우를 가정하여 계수를 보수적으로 설정하였음을 알 수 있다. 개발된 차량의 침하량은 약 5cm로 예상되었다.
- 설정된 계수들을 위에서 설명한 저항 R_c 도출식에 대입하면 지면 변형에 의해 각 휠에 약 59.2N의 저항이 작용하는 것을 예측할 수 있다. 따라서 각 휠에 작용하는 구름저항은 아래와 같이 총 71.5N으로 도출되었다.

$$R_R = R_t + R_i + R_c = 0 + 12.3 + 59.2 = 71.5\text{N}$$

- 각 휠에 작용하는 수직 하중으로 나누어 구름저항 계수로 표현하면 $R_R/F_g=0.29$ 가 된다.

2. 스키드 턴 저항 계산

- 기 개발한 무인지상차량의 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.

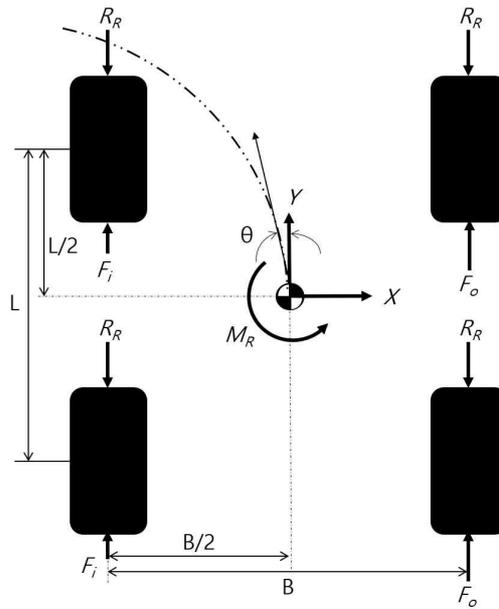


그림 20 스키드 조향 방식 도식화 모델

- 스키드 턴은 안쪽 휠과 바깥쪽 휠의 추력 F_i 와 F_o 의 차이에 의해 조향이 이루어지며, 각 휠에는 지면과의 작용에 의해 저항 R_R 과 회전저항모멘트 M_R 이 위의 그림과 같이 작용하게 된다. 계산을 단순화하기 위해 무게 중심의 위치는 플랫폼의 센터로, 전·후 휠에서 발생하는 추력은 동일하다고 가정하였다. 또한 평지에서 저속의 정상 상태를 가정하여 원심력과 가속도의 영향을 무시하면 다음의 식이 성립한다.

$$F_o + F_i - 2R_R = 0$$

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

- 따라서 안쪽과 바깥쪽 휠의 추력은 다음과 같다.

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

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

- R_R 은 플랫폼이 직선 주행시 발생하는 저항으로 앞서 구한 R_c 값과 같다. 눈에서 주행하는 차량에 발생하는 M_R 은 주로 눈을 측면으로 밀어내는데 필요한 힘에 의해 발생된다. 이 힘은 눈의 비중을 무시하고 눈이 수동적으로 파괴되는 힘만 고려하면 다음과 같이 모델링할 수 있다.

$$\sigma_p \approx 2c \tan(45 + \Phi/2)$$

- 여기서 σ_p 는 passive pressure(kPa)이다. 앞서 기술한 바와 같이 남극 해당 지역 눈의 c 와 Φ 값은 아직 데이터가 없지만 하계 시즌에는 눈이 잘 뭉쳐지기 때문에 점착력 c 를 7~10kPa로 가정하면 Φ 는 6~15°로 예상할 수 있다. 이 경우 가장 큰 σ_p 값은 22.2kPa 이다. 하나의 휠이 눈에 50mm 침하된 경우 눈을 밀어내는 면적은 약 0.01m²이므로 플랫폼이 제자리에서 회전하는 경우 M_R 의 값은 다음과 같다.

$$M_R = 22.2kPa \times 0.01m^2 \times \frac{L}{2} \times 4 = 0.27kNm$$

- 따라서 F_o 는 232.8N가 된다. 이는 선정된 구동부가 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 방향 전환에 필요한 동력은 충분한 것으로 판단하였다.

3. 견인력 계산

- 오프로드 차량은 구름저항을 극복하고 남은 추진력을 가속이나 경사 등판과 같은 견인력으로 사용한다. 따라서 소요가 예상되는 견인력을 고려하여 주행토크를 계산하고 구동부품을 선정할 수 있다. 우선 크레바스 탐지를 위한 레이더 장비를 견인하는데 힘이 필요하다. 빙하투과레이더의 무게는 약 147N으로 바닥 면적이 0.9m² 정도 되는 튜브에 싣고 견인한다. 견인 장비가 지면을 변형시키면서 발생하는 저항을 계산하면 약 0.004N으로 무시해도 될 정도로 작다. 반면에 마찰에 의한 저항은 눈과 고무 표면과의 마찰계수가 0.02 정도로 예상되므로 장비 견인 시 발생하는 견인저항(R_T)는 다음과 같이 계산된다.

$$R_T = 147 \times 0.02 = 2.9N$$

- 차량이 장비를 견인하면서 경사를 오를 때 작용하는 중력의 저항 R_G 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

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

- 여기서, F_{IPR} 은 휠 하나가 견인하는 장비의 무게, Φ_{\max} 는 차량이 오를 수 있는 최대 경사 각이다. 탐사 목표 지역의 경사도와 일반적인 사스트루기 지형의 경사를 고려하여 Φ_{\max} 를 20°로 설정하면 중력에 의한 저항 R_G 는 약 96.4N이 계산된다. 따라서 각 휠은 평지 주행 시는 $R_R + R_T = 74.4N$ 이상, 장비를 견인하면서 경사를 오를 때는 아래와 같이 170.8N

이상의 견인력을 발생시킬 수 있어야 한다.

$$R_R + R_T + R_G = 71.5 + 2.9 + 96.4 = 170.8\text{N}$$

- 앞서 계산한 저항 값들과 휠의 직경을 고려하여 각 휠에서 최대속력 2.5m/s 이상, 최대토크 41.2Nm 이상의 출력을 발생시킬 수 있도록 구동부를 구성하였다.
- 실제 눈에서 휠 구동 시에는 지면의 전단 파괴에 따라 전달할 수 있는 견인력이 제한된다. Bekker는 최대 전단응력 τ 가 아래의 Mohr-Coulomb 파괴기준에 의해 좌우된다고 가정하였다.

$$\tau = c + p \tan \Phi$$

- 여기서 c 는 지면의 점착력, Φ 는 내부 마찰각을 나타낸다. 휠을 따라 분포하는 압력 $p(\theta)$ 를 측정해서 적분해야 하지만, 휠의 침하량이 아주 작다고 ($z_0 \ll D/2$) 가정하면 휠과 지면과의 접촉면이 거의 평평하기 때문에 휠이 발생시킬 수 있는 견인력(T_w)을 위 식으로부터 최대 압력 p_0 에 대한 식으로 표현할 수 있다.

$$T_w / F_g = c / p_0 + \tan \Phi$$

- 앞서 기술한 바와 같이 남극에서 눈 시료에 대한 측정 자료가 아직 없기 때문에 남극 눈의 정확한 c 와 Φ 값을 구할 수 없었다. 하지만 남극 외에 다양한 빙설 지형에서 측정된 데이터가 존재하며 다른 연구 결과들을 통하여 눈에서 구동하는 타이어 또는 트랙의 T_w / F_g 값은 보통 0.3~0.6의 범위에 놓여있음을 알 수 있다.
- 본 플랫폼이 평지에서 구동할 때 필요한 T_w / F_g 값은 0.29로 평지에서는 자유롭게 이동하는데 문제가 없을 것으로 판단하였다. 하지만 탐사 장비를 끌면서 20°이상의 경사를 오르기 위해서는 T_w / F_g 값이 0.68 이상 이어야하기 때문에 탐사 장비를 끌면서 가파른 경사를 오르기 위해서는 p_0 를 낮출 필요가 있음을 예상할 수 있다. 따라서 남극 현장에서 이러한 문제가 발생할 경우를 대비하여 타이어에 스파이크를 박아서 휠과 눈과의 접촉 면적을 넓힐 수 있도록 대책을 마련하였다.

4. 무인지상차량 운용 데이터를 이용한 계산 검증

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

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



그림 21 주행 시험 지면(습지(좌), 빙설(중), 해빙(우))

- 아래 그림은 각 지형의 비교적 평평한 구간에서 등속 주행시 휠 구동 토크를 나타낸다. 모터의 구동 토크는 아두이노 기반으로 제작된 DAQ의 SD카드에 저장된 모터의 소모 전류로부터 계산하였다. 습지에서는 전륜 평균 토크 11.3Nm, 후륜 평균 토크 14.9Nm, 빙설 지형에서는 전륜 평균 토크 12.3Nm, 후륜 평균 토크 18.9Nm, 해빙 지형에서 전륜 평균 토크 9.8Nm, 후륜 평균 토크 10.8Nm를 기록하여 빙설 지형에서 가장 큰 저항이 발생함을 알 수 있었다.

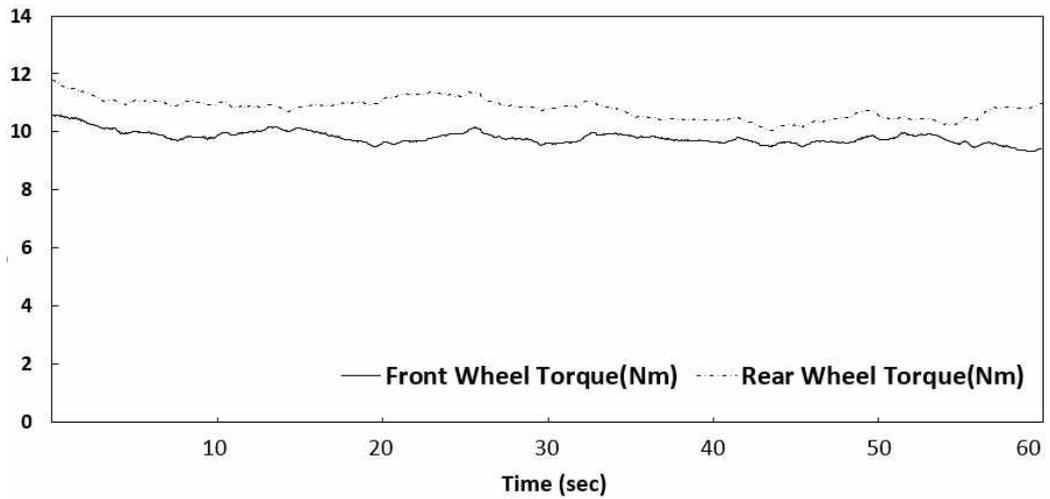
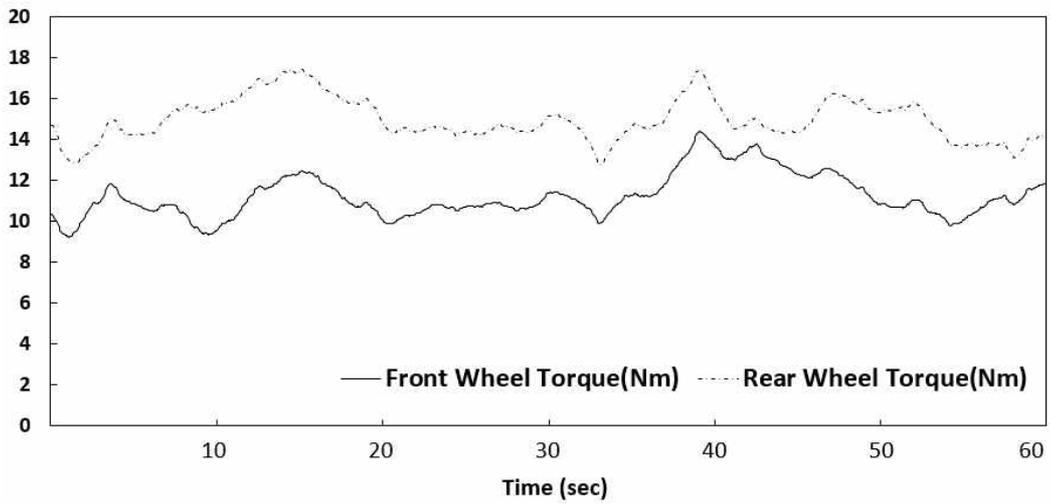
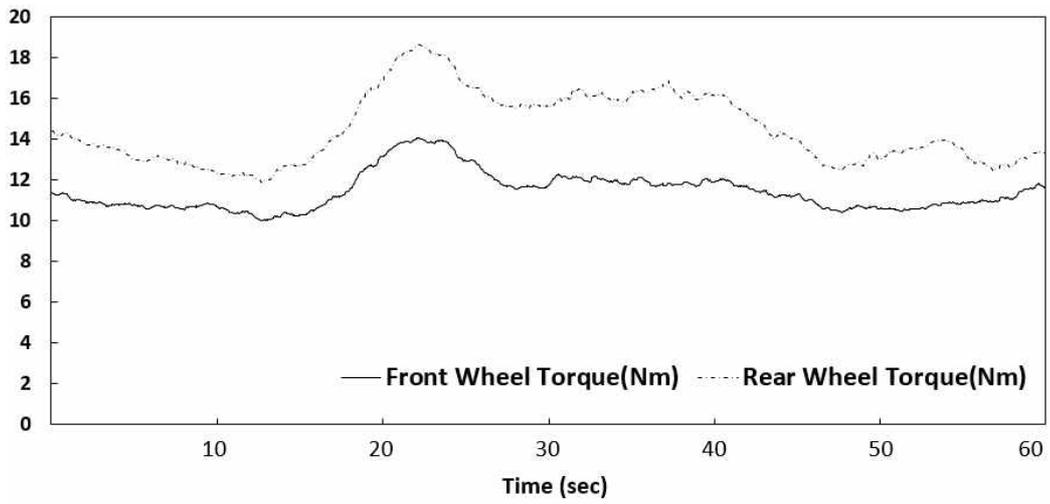


그림 22 테스트 지면별 주행토크(습지(상), 빙설(중), 해빙(하))

- 토크 값을 근거로 예측한 구름저항 계수는 습지 0.24, 빙설 0.25, 해빙 0.19 로 초기 예측 값 0.29에 비해서는 작은 값을 보였지만 이는 지면의 계수를 다소 보수적으로 예측한 영향으로 판단할 수 있다. 또한 모터의 토크는 후륜에서 항상 더 크게 작용하였으며 이는 차량의 무게 중심이 뒤쪽에 있기 때문인 것으로 보인다. 전후륜의 토크 차이는 습지 24%, 빙설 35%, 해빙 9% 의 차이를 보였다. 무른 지형일수록 무게 중심에 따라 전후륜의 침하량 차이가 커지면서 지면 변형에 의한 저항도 함께 커지기 때문인 것으로 판단된다.
- 결론적으로 남극에서의 경험을 토대로 선정된 남극 빙설 지형과 차량과의 상호관계식과 실제 차량 운행으로부터 도출한 차량의 빙설 지형 이동 성능은 약 16% 정도의 차이를 보였지만 이는 빙설 지형을 다소 부드러운 눈으로 가정하여 하중에 따른 침하가 실제보다 크게 표현된 영향으로 판단되었다. 따라서 실제 남극 현장 빙설 지형과 차량과의 상호관계를 계측한다면 보다 더 정밀하게 차량의 이동 성능을 예측할 수 있을 것으로 예상된다.



제 3 절 데이터 항목 수집을 위한 시험 방법 및 장치 연구

일반적으로 지형과 차량 사이의 상관관계에 따른 물리적 현상을 수학적으로 모델링하고자 하는 경우 한계가 있기 때문에 경험적 방법이 보완적으로 사용된다. 보편적으로 사용되고 있는 지형 모델링 방법으로 Bekker에 의해 정립된 반 실험적 방법이다.

1. 기존 시험 장치 검토

○ 베바미터

- 차량-지형간의 상호작용에 관련된 지형의 특성은 야지 차량에 의해 지형에 작용하는 하중과 유사한 하중조건하에서 가장 잘 측정할 수 있다는 전제하에 Bekker가 최초로 이 기법을 시도하였다. 차량은 지형 표면에 수직하중과 전단하중을 가한다. 따라서 이것을 모사하기 위해, 베바미터는 두 개의 독립된 시험장치로 구성된다. 하나는 평판재하시험(plate penetration test)이고 다른 하나는 전단시험(shear test)이다. 평판재하시험에서, 압력-침하 관계는 차량주행부의 접촉영역을 모사하기 위해 적절한 크기의 평판을 이용하여 측정된다. 이들 측정값을 기초로 하여 차량의 침하와 운동저항을 예측할 수 있다. 한편, 베바미터가 실제 차량의 성능을 정확히 예측하기 위해서는 시험평판의 크기는 실제 타이어나 궤도의 접촉영역과 비교될 수 있어야 한다.
- 전단시험은 지형의 전단강도와 전단응력-변위 관계를 측정하고, 이로부터 차량의 최대 견인력과 견인력-슬립 특성을 평가할 수 있다. 또한 슬립에 의한 추가적인 차량의 침하와 차량 주행부의 반복통과 성능을 예측하기 위해서는 반복하중에 대한 지형의 반응과 지형의 슬립-침하 특성을 측정해야 한다.
- 한편, 베바미터는 현장에서 지형의 특성을 특정하는데 있어 원추관입시험기에 비해 복잡하고 많은 시간이 소요되지만, 현재 야지 차량의 견인성능을 예측하기 위해 사용되고 있는 측정장치 중 지형-차량의 상호작용을 가장 유사하게 나타낼 수 있는 장치로 보고되고 있다.

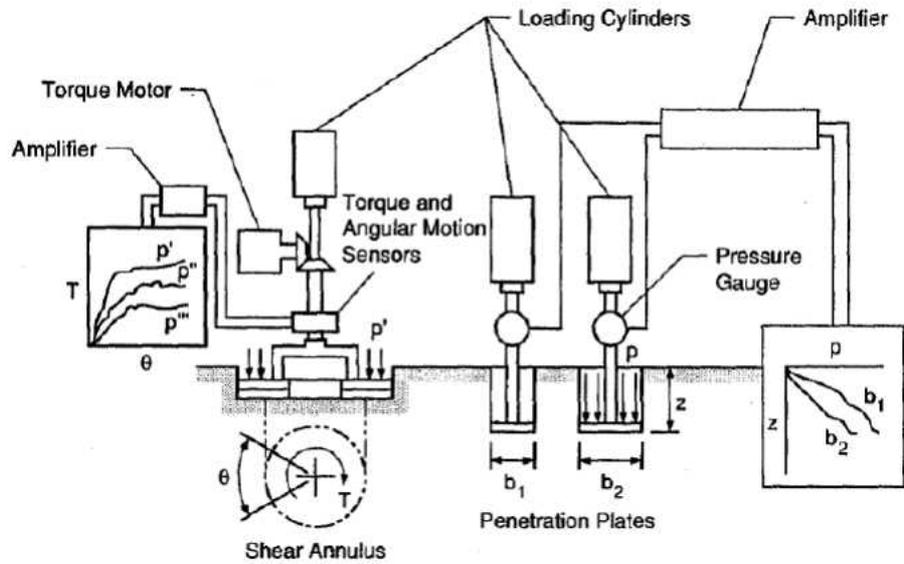


그림 23 베바메터의 구성



그림 24 차량에 부착된 형태의 베바메터 장비

○ 직접전단강도 시험기

- 토목공학에서, 토양의 특성들은 종종 전단강도, 전단 계수(shear modulus), 밀도, 간극비(void ratio) 등으로 기술된다. 이러한 매개변수들을 측정하기 위해서는, 필드에서 채취한 토양 시료를 실내 실험실로 옮겨와 시험을 수행한다.
- 지형의 전단강도는 일반적으로 삼축압축시험기 및 직접전단시험기를 사용하여 측정된

다. 필드에서 지형 특성의 측정은 실내에서 수행한 토양 특성의 측정보다 확실한 이점이 있다. 그 중 주요한 장점은 토양이 교란되지 않는 고유의 상태에서 측정이 가능하다는 것이며 이것은 실험실에서 시험을 하기 위한 샘플링 작업 동안에 지형 샘플의 교란을 제거할 수 있다는 것이다. 더군다나 필드시험은 이동형 데이터획득장비 및 관련 장비를 사요할 때 일반적으로 비용이 적게 들며 분석이 빠르다.

- 토목공학에서 토질역학을 위해 사용되는 절차 및 시설장비들이 특히 필드에서 차량의 기동성 연구와는 맞지 않기 때문에 단지 제한적인 사용에 이용된다.

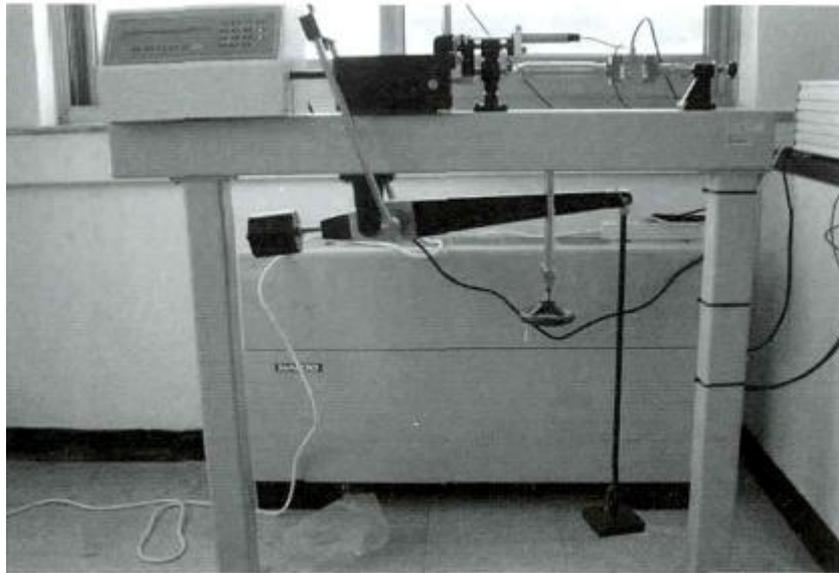


그림 25 직접전단강도 시험기

○ 휠 테스트베드

- 휠 테스트베드는 실제 차량의 접촉영역을 모사한 평판을 사용하여 실험하는 베바메터와 달리 실제 휠과 유사한 형상의 실험장치를 직접 지면에 수직 하중을 가하면서 테스트할 수 있는 실험장치이다. 미국 MIT에서는 최초로 휠 테스트베드를 제작하고 이를 이용하여 실시간 지형특성 분석 및 탐사로버 휠의 주행성능을 예측하였다.
- 하지만 휠 테스트베드는 제한된 영역에서 실험이 가능하고 휠의 사이즈에 따라 테스트베드도 함께 커져야하기 때문에 다양한 종류의 휠을 대상하는 실험하는 것은 어렵다.

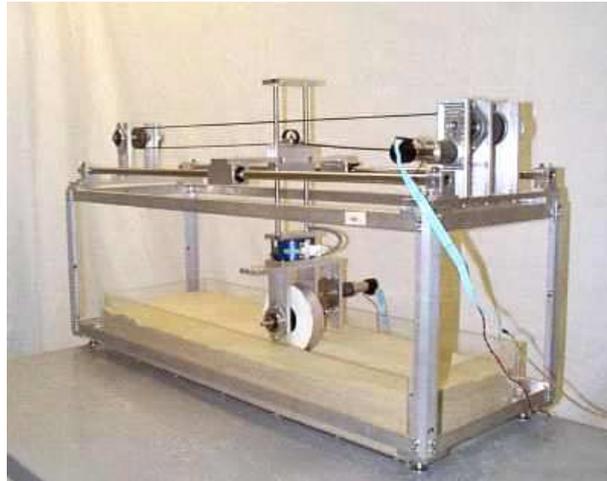


그림 26 MIT 휠 테스트베드

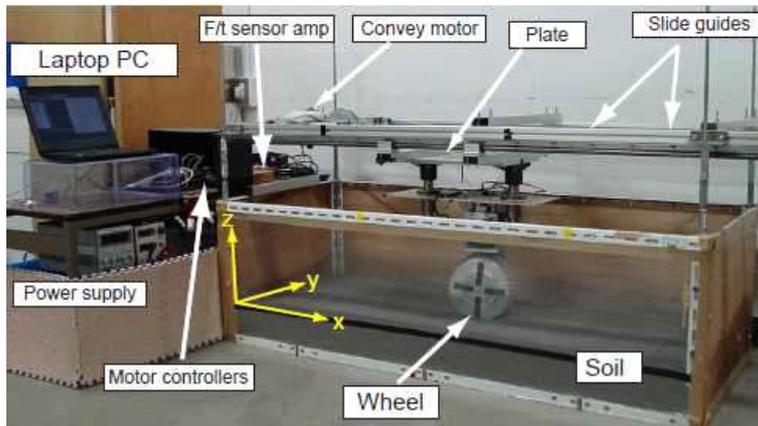


그림 27 일본 토호쿠 대학 휠 테스트베드



그림 28 중국 Harbin 공과대학 휠 테스트베드

○ 시험장치 비교

- 앞 서 살펴본 시험 장치들의 장단점을 아래 표와 같이 정리하였다. 각 시험 장치들은 장단점을 갖고 있지만 공통적으로 야외 설상 현장에서 용이하게 측정을 진행할 수 있는 시험 장치는 없다.

표 5 데이터 항목 수집을 위한 시험 방법 및 장치 연구

	베바미터	직접전단강도 시험기	휠-테스트 베드
설명	· 평판재하시험(plate penetration test)와 전단 시험(shear test) 각각의 시험 수행	· 토목공학에서 주로 활용 · 필드에서 채취한 토양 시료를 실험실로 옮겨서 시험 수행	· 휠-지면 접촉 환경과 움직임을 유사하게 구현하여 계측
장점	· 지형-차량의 상호작용을 가장 유사하게 구현	· 토양 고유의 상태에서 측정 가능	· 실시간 지형특성 분석 및 휠 주행 성능 예측 가능
단점	시험이 복잡하고 많은 시간 소요	· 필드 차량의 기동성 연구에는 제한적으로 사용 가능	· 이동속도가 느린 행성 탐사 로버에 주로 활용

○ 연구기관 방문(전북대)

- 극지 현장에서 설상 지면의 특성을 측정할 수 있는 시험 장치 설계를 위하여 달 탐사 로버 이동메커니즘 설계 및 주행성능 평가 연구를 진행하고 있는 전북대학교 항공우주로봇 및 메카트로닉스 연구실 방문하여 자문을 구하였다.(2020년 6월 22일)
- 연구내용 : 달 탐사 로버가 착륙지점에 따른 에너지 획득 조건 차이나 연약지반에서 탐사 로버 휠과 지형과의 상호작용에 의한 슬립 및 침하와 같은 제약 조건을 극복하기 위해서는 경사지형을 고려한 지형역학에 기초한 탐사로버 휠과 지형사이의 동적특성 분석 및 에너지 관점에서의 착륙지점에 따른 에너지 획득 모델 수립에 대한 연구 수행
- 방문성과
 - : 로버의 이동 성능 평가를 위한 사전 실험 활동과 실험 장치에 대한 설명
 - : 실험 방법에 대한 노하우 및 주의할 점

: 실험 장비 및 조성중인 실험장 설명->자체 시험 장치 개발 후 시험지원 가능



그림 29 전북대 항공우주로봇 및 메카트로닉스 연구실에서 제작한 휠테스트베드

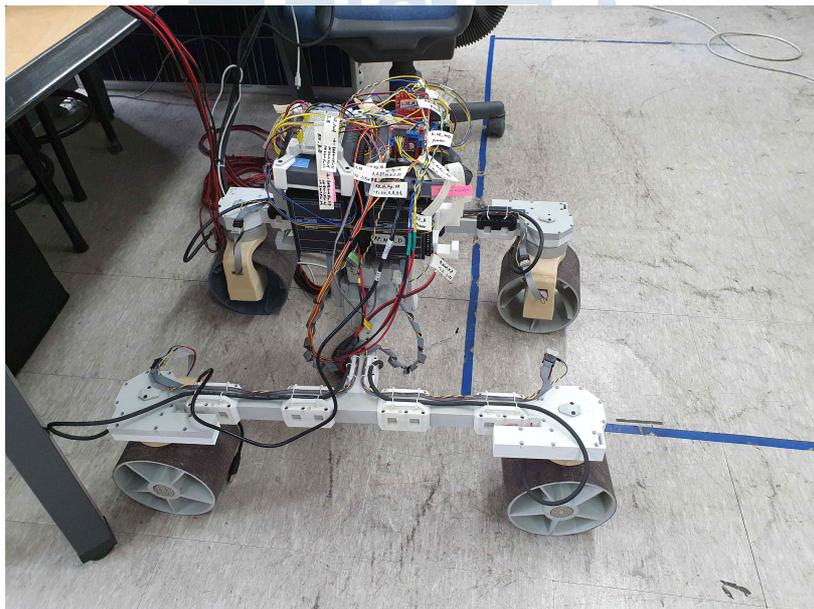


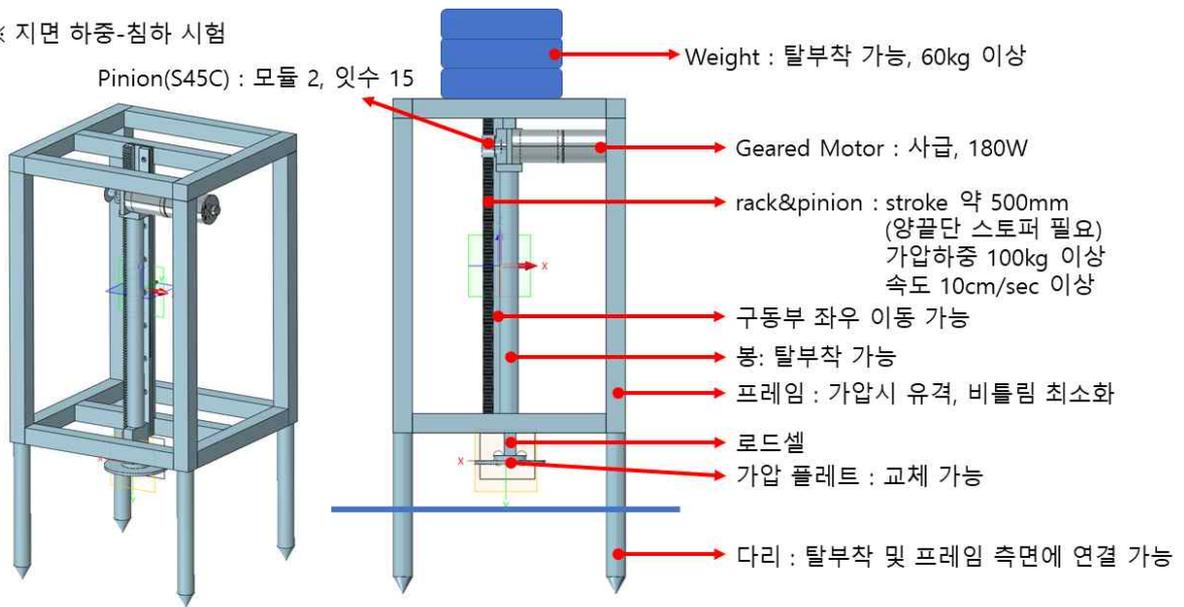
그림 30 실험용 달탐사 로버

제 4 절 시험 장치 개발 및 테스트

1. 시험 장치 개념 설계

- 앞 절에서 살펴본 바와 같이 차량-지면 상호관계 측정을 위한 여러 종류의 실험 장치들이 있지만, 극지와 같은 야외 현장에서 간편하게 계측을 할 수 있는 장비는 찾기 어려웠다. 따라서 현장 운반과 활용 조건들을 고려하고 필수적인 실험만을 수행할 수 있는 시험 장치에 대한 개념 설계를 진행하였다.
- 시험 장치는 다음 두 가지 사양의 충족을 중점으로 설계 진행하였다.
 - 필수 측정 항목 : 수직 압력에 대한 지면 변위량 측정, 차량의 최대 견인력 측정
 - 현장 활용성 : 아라온 선적을 통한 남극 운송 가능, 2인 1조로 운용 가능
- 필수 측정 항목은 앞서 도출한 데이터 항목들을 계측할 수 있도록 선정하였다. 다양한 면적을 갖는 평판을 조립하여 수직 하중에 대한 지면의 압력 침하 지수, 지면변형 점착계수, 지면변형 마찰계수를 도출할 수 있도록 고려하였다. 노면의 전단 파괴를 측정하기 위해서는 수직 하중을 변화시키면서 전단하중에 대한 변위를 측정해야하지만 이를 위한 기능을 추가시 시험 장치가 복잡해지고 운반, 운용이 어려워지기 때문에 하나의 시험 장치의 설치방향에 따라 수직 방향 하중과 수평 방향 하중을 모두 측정할 수 있도록 설계하였다.
- 시험 장치는 기본적으로 남극 현장에서 사용하는 것을 감안하여 설계를 진행하였다. 장비 본체와 가압 하중에 대한 반력을 버틸 수 있는 Weight 부품을 별도로 운반할 수 있도록 설계하였다. 본체는 약 30kg, Weight 부품은 각 10kg으로 10개를 제작하였다. 남극 현장에서 활용하는 무인지상차량이 이미 제작되어있기 때문에 이를 활용하여 실험을 진행할 수 있도록 구성하였다. 시험 차량에 Weight 부품을 설치하여 이에 따른 수직 침하량과 견인력 변화를 계측할 수 있도록 하였다.
- 지면 하중-침하 시험은 아래 그림과 같이 시험 장치를 수직으로 세우고 수직 방향으로 가압플레이트에 압력을 가하면서 지면 변위량을 모터 엔코더와 별도의 외부 엔코더를 이용하여 변위량을 측정할 수 있도록 설계하였다. 가압 플레이트는 종류를 바꿔서 조립할 수 있도록 하여 면적을 변경함으로써 압력 크기를 바꿔가면서 테스트를 진행할 수 있다. 수직방향 가압 시에는 시험 장치가 중력 반대방향으로 반력을 받기 때문에 이로 인해 시험 장치가 움직이지 않도록 Weight 부품을 시험 장치 상단에 조립할 수 있도록 구성하였다.

※ 지면 하중-침하 시험



※ 전장 박스, 케이블베어, 리니어 엔코더 추가

그림 31 평판 재하 시험 컨셉

- 지면의 전단 파괴를 측정하여 전단응력-변위 측정을 위해서 시험 장치를 수평으로 설치하여 측정할 수 있도록 구성하였다. 앞서 설명한 베바메터와 같은 장치는 측정을 위한 플레이트를 제작하고 플레이트를 지면에 수평하게 설치하고 수직하중과 토크를 동시에 가하면서 측정을 수행한다. 하지만 본 과제에서 개발하는 시험 장치는 현장 실험이 용이해야하고 복잡한 시험 장치를 제작할 수 있는 예산 확보가 어려워서 아래 그림과 같이 이미 개발된 차량을 이용하여 견인력을 측정할 수 있도록 설계하였다.

※ 견인력 시험

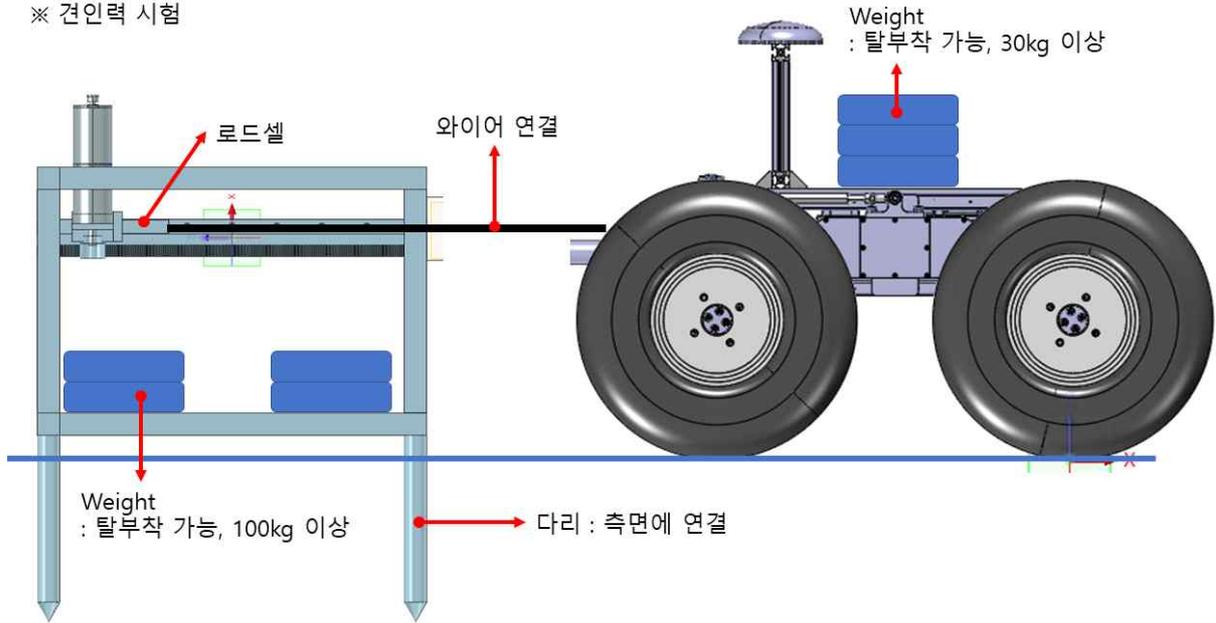


그림 32 전단시험 컨셉

2. 시험 장치 제작 및 테스트 수행

- 시험 장치는 개념 설계에서 도출된 기능들을 만족하도록 상세 설계하여 제작을 진행하였다. 제작된 시험 장치의 사양은 아래 표와 같다.

표 6 시험 장치 사양

구분	내용	비고
가압 하중	100kg	
가압 스트로크	450mm	
가압 속도	10cm/sec 이상	
시험 장치 하중	30kg	
기타	커버를 장착하여 외부 환경으로부터 중요 부품 보호	



그림 33 제작된 시험장치

- 시험 장치의 User Interface는 아래 그림과 같이 구성하였다. 모터의 각 종 상태를 제어하고 모니터링 할 수 있으며 이를 통하여 가압 크기와 속도를 제어할 수 있다. 또한 가압 플레이트 상단에 설치된 로드셀 센서로 부터 가압 크기를 측정하고 광학식 리니어 스케일러를 이용하여 변위를 실시간으로 측정하고 기록할 수 있도록 구성하였다. 그리고 주요 관심 그래프인 압력-변위 그래프는 별도의 그래프로 확인하고 데이터를 백업할 수 있도록 기능을 갖추었다.

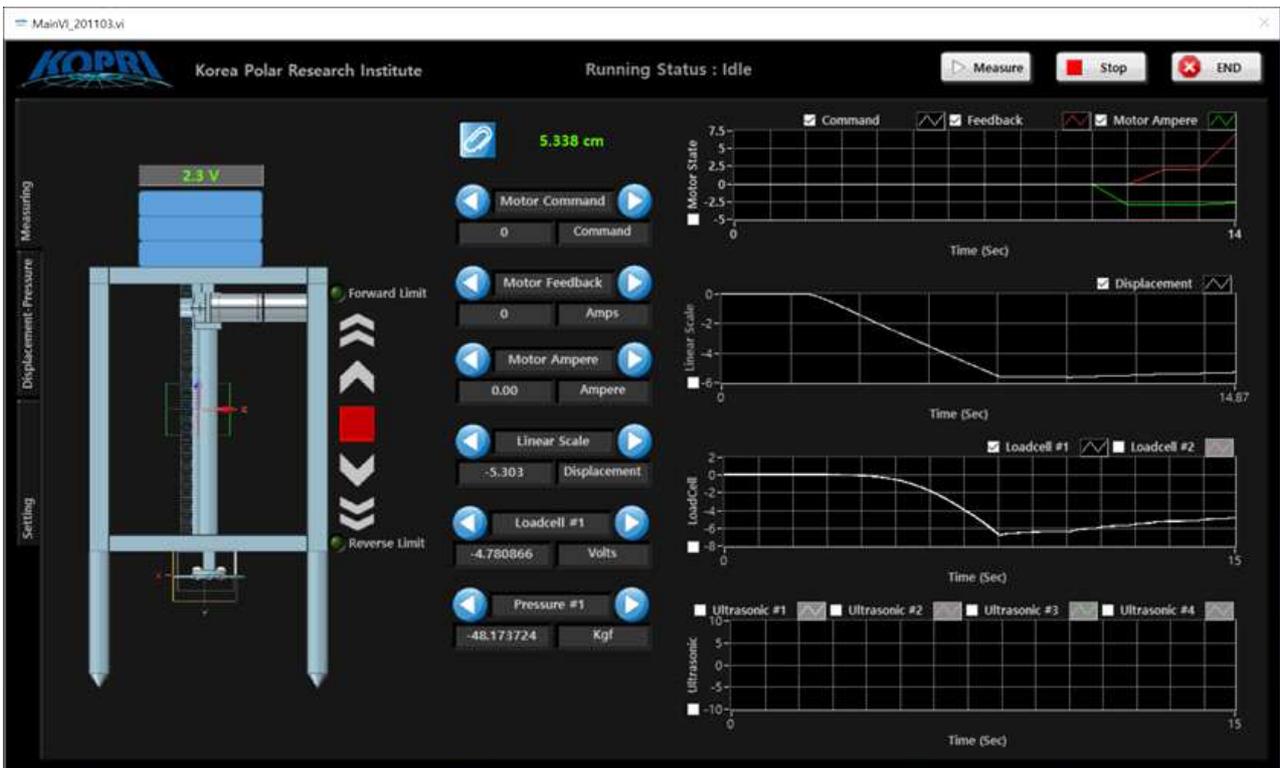


그림 34 시험장치 User Interface

- 제작된 시험 장치는 실험실 내에서 실험을 실시하였다. 코로나-19 전염병 확산으로 인하여 외부 출장 및 시험이 어려운 상황이 지속되어 아래 그림과 같이 실내에서 약간의 탄성이 있는 포장재를 활용하여 하중에 따른 변위 량을 측정하는 시험을 수행하였다.



그림 35 시험 장치 실내 시험

- 가압 하는 플레이트를 아래 사진과 같이 두 종류로 변경하면서 압력 변화에 따라 변위의 변화가 발생하는지 확인하였다. 플레이트로 지면에 가압하는 속도는 2.5cm/sec로 일정하게 유지하면서 하중과 변위를 측정하였다.

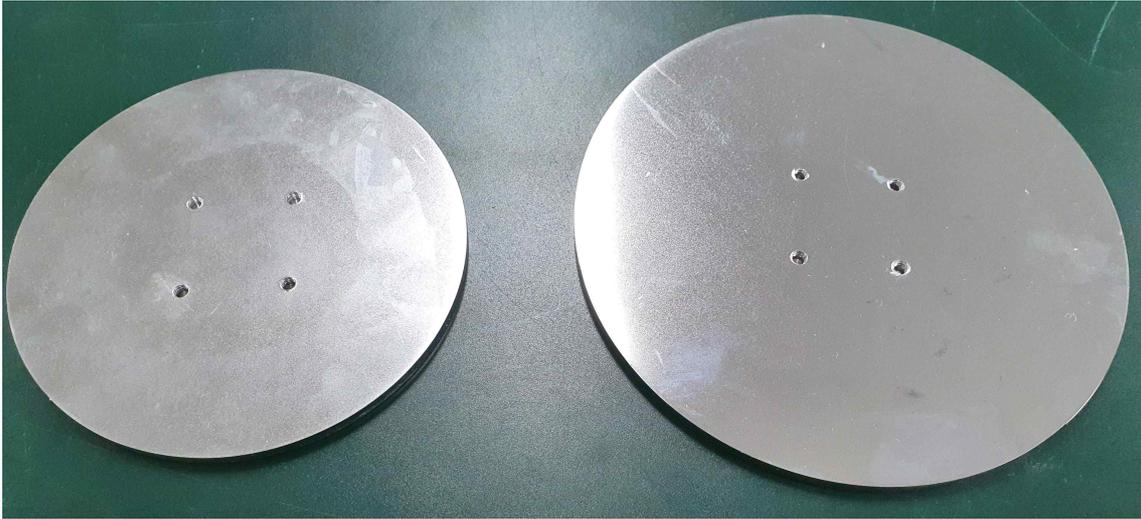


그림 36 두 종류의 가압 플레이트(지름 12cm, 15cm)

- 압력-변위 그래프는 아래 그래프와 같이 도출되었다. 압력에 따라 일정하게 변위량이 커지는 것을 확인하였고, 가압 플레이트를 변경하여 가압 크기를 바꾼 경우에도 유의미한 차이를 보이며 변위량을 측정할 수 있음을 확인하였다. 시험 결과에 따라 실제 빙설 지형에서도 의미 있는 실험이 가능할 것으로 판단할 수 있었다.
- 차량의 견인력 측정을 통한 지면의 전단 파괴를 측정하는 실험은 시험 장치를 지면에 단단히 고정하는 것이 불가하여 실내에서는 진행을 하지 못하였다. 향후 외부 출장이 가능해지면 시험 장치를 고정할 수 있고 지면 특성이 균일한 모래 또는 눈으로 이루어진 지면에서 시험을 진행할 계획이다.

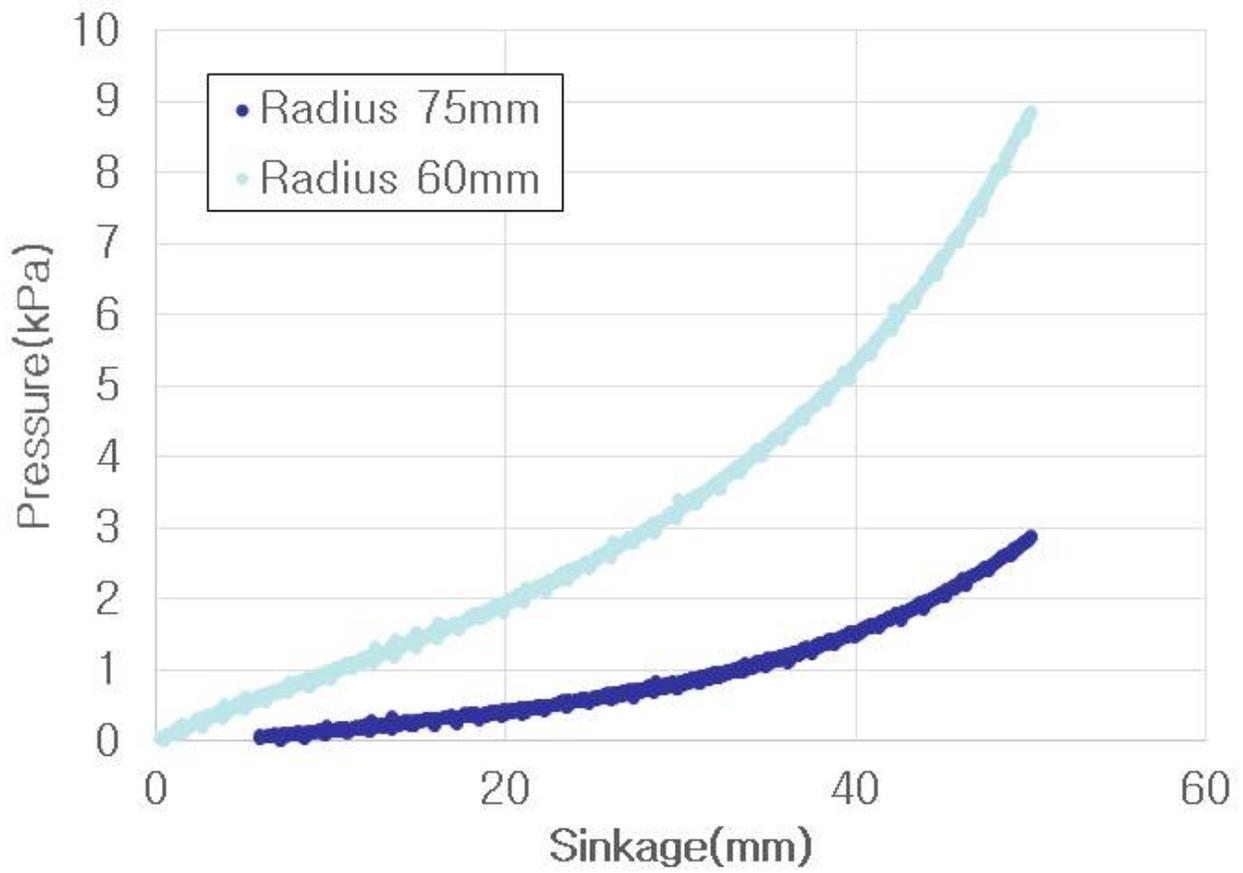


그림 37 시험 결과 그래프

극지연구소

제 5 절 데이터 수집 및 활용 계획 수립

1. 데이터 수집 및 활용 계획 수립

○ 아래 그림과 같이 도출된 데이터 항목들에 대하여 데이터 수집 방법과 계획을 수립하였다. 차량 변수는 차량 설계 항목으로 설계 치수와 직접적인 측정이 가능하며 구동부의 휠 또는 트랙 여부에 따라 항목을 설정하였다. 차량-지형 상호작용 변수는 앞서 제작한 시험 장치를 이용하여 각 변수 항목을 측정할 수 있도록 계획을 수립하였으며, 극지에서 운용 중인 차량을 활용하여 추가적인 측정을 진행하고 실험 결과를 비교 분석할 수 있도록 계획하였다. 이 밖에 차량 성능과 환경 변수를 함께 기록하여 주변 환경에 따른 차량-지형 상호작용이 어떠한 변화가 있는지, 성능에는 어떠한 변화가 발생하는지 검토할 수 있도록 측정 항목들을 추가하였다.

구분	항목	약어	단위	
차량 변수	공통	자체 무게	W	N
		자고 높이	H	m
		무게중심	C	m
	휠	휠 폭	b	m
		휠 지름	D	m
		접지압	p_0	kPa
		공기압	p_i	kPa
		휠 강성에 의한 압력	p_c	kPa
		평균 접지압	p_{gr}	kPa
	트랙	트랙 폭	b	m
		트랙 길이	l	m
		스프로킷 피치원 반지름	r	m
차량-지형 상호작용 변수	압력침하 지수	n		
	지면변형 점착계수	k_c	$N/cm^{\eta+1}$	
	지면변형 마찰계수	k_s	$N/cm^{\eta+2}$	
	침하량	z_0	m	
	응집력	c	kPa	
	내부 마찰각	ϕ	deg	
	전단력 변형 변수	K	m	
차량 성능	견인 저항	R_t	N	
	슬립률	i		
	구름저항	R_R	N	
	견인력	T_w	N	
환경변수	경사등판능력	ϕ_{max}	°	
	차량 속도	V	m/s	
	눈의 밀도		g/cm^3	
	온도		°C	
	풍속		m/s	
	풍향			

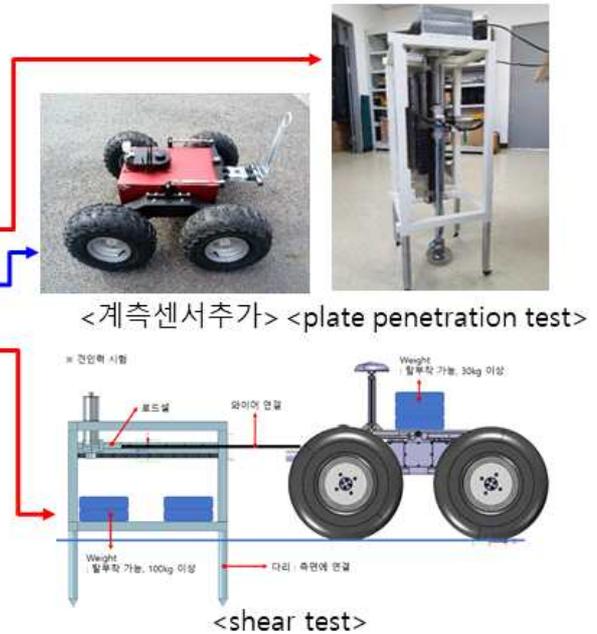


그림 38 데이터 수집 계획

2. 데이터 관리 체계 구축 및 활용 검토를 위한 세미나 개최

○ 측정된 데이터들을 잘 관리하고 활용하기 위한 논의를 위하여 빅 데이터 플랫폼을 구축하여 운영하고 있는 한국해양과학기술원(KIOST) 연구원들을 초빙하여 세미나를 진행하였다.

- 일시 : 2020년 10월 23일
- 장소 : 극지연구소 본관동 9층 다산회의실
- 내용 : 빅 데이터 플랫폼 개요 및 KIOST 구축 사례
- 발표자 : KIOST 최현우 박사, 이철용 박사



그림 39 데이터 관리 체계 구축 세미나

제 4 장 연구 개발 목표 달성도

1. 계획대비 연구 성과 달성도

대부분의 연구 개발 목표를 달성하였으나 코로나-19의 영향으로 인하여 야외 테스트 진행에 있어서 미진한 부분이 발생하였다.

구 분	연구 개발 목표	연구개발 내용 및 범위	목표달성도
1차년도 (2019.12. ~2020.11.)	○UGV 설상 이동 성능 연구에 필요한 수집 데이터 항목 및 측정 방법 정립	- 논문 연구를 통한 자료 조사 - 관련 전문가 면담 및 관련 기관 방문을 통한 조사 및 분석	100%
	○측정 방법론 검증을 위한 샘플 제작 및 테스트 진행	- 수집이 필요한 파라미터 항목별 측정 방법 조사 및 아이디어 도출 - 측정 방법에 따른 필요 샘플 제작 및 측정 테스트 진행	90%
	○향후 데이터 수집 및 활용 계획수립	- 무인지상차량(UGV)를 활용한 데이터 수집 계획 수립 - 수집된 데이터 보관 및 활용 계획 수립	100%

2. 추가 성과

국내 학술 발표 1건, 국내 학술지 투고 1건

극지 연구 지원용 무인지상차량(UGV) 개발

Development of an Unmanned Ground Vehicle (UGV) for Polar Research Support

정창현, 김형권, 윤동현, 이주현

* 극지연구소 극지기술개발 지원부 (CTL) 032-760-5406, E-mail: jookim@kopri.ac.kr

Abstract The Korea Polar Research Institute (KOPRI) has developed an unmanned ground vehicle (UGV) to support research activities in the harsh environment of Antarctica. In order to overcome the rough terrain of Antarctica, the vehicle features over 25cm ground clearance, four-wheel-drive by a 400W high-power motor, and passive joints and differential links to allow four point contact in rough terrain. The UGV is also designed to run for more than 2 hours on the Antarctic ice sheet at a speed of 2.5m/sec. The control unit uses open-source hardware and software in consideration of rapid function implementation and ease of customization in the future. In November 2019, the UGV succeeded in autonomous driving along the 2.6km section of the Browning Pass around Jang Bogo Station, Antarctica.

Keywords: unmanned ground vehicle, polar science, polar rover

1. 서론

지구 온난화, 해수면 상승과 같은 범지구적인 환경 문제들로 인하여 환경 변화에 민감한 남극권 연구의 중요성이 점점 높아지고 있다. 하지만 초현, 갈프, 엘라, 크레바스와 같은 극지 연구 활동에는 많은 제약이 따른다. 이러한 제약을 극복하기 위해서 많은 연구자들이 극지 연구용 무인화, 자동화를 위한 연구를 진행하고 있다. 미국의 CRESU/Gold Regions Research and Engineering Lab에서는 이미 오래 전부터 무인지상차량용 극지 연구용 플랫폼기 형태의 대량 배너기를 이용하여 구동되는 'Cool Robot'과 지표투과레이더를 탑재하고 다니면서 크레바스를 탐지할 수 있는 'Yes'와 같은 자율주행차량을 개발하여 활용하고 있다[1, 2].

본 논문에서는 다양한 극지 연구 활동 지원을 목적으로 개발된 무인지상차량 플랫폼에 대하여 기술하였다.

2. 설계

* 본 작품은 극지연구소 지원연구사업(2019-2020)에서 지원받아 연구개발됨

빙하 크레바스 탐지용 무인지상차량 (UGV) 개발

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

정창현, 김형권, 윤동현, 이주현

(Changhyun Chang*, Hyung-Kwon Kim*, Dong-Hyun Yoon*, Jookim Lee*)
Yeosu Polar Research Institute

Abstract Research activities in Antarctica have a number of risk factors, such as cold, strong wind and isolated environment. Among them, crevasses, which are glacier deep cracks, can cause fatal accidents since they are difficult to locate because they are covered with snow. In this paper, we present the developmental consideration, design, and deployment of an unmanned ground vehicle (UGV) that can explore ice-sheet and be used in various polar research fields. We first customized the developed UGV to remotely detect crevasses to prevent such accidents. In order to overcome the harsh terrain of Antarctica, the vehicle features over 250mm ground clearance, four-wheel-drive with a 400W high-power motor, and passive joints and differential links to allow four-point contact on rough terrain. The UGV is also designed to run for more than 2 hours on the Antarctic ice sheet at a speed of 2.5m/sec. The control unit uses open-source hardware and software in consideration of rapid function implementation and ease of customization in the future. In November 2019, the UGV succeeded in detecting crevasses by towing an ice penetrating radar (IPR) along the 2.6km section of the Browning Pass around Jang Bogo Station, Antarctica. Heading angle errors due to a magnetic compass which do not work well in Antarctica, and the vibration and misalignment of the traction device for towing research equipment need to be improved.

Keywords: unmanned ground vehicle, polar rover, polar science

1. 서론

지구 온난화로 인한 기후 상승과 더불어 해수면 상승, 이상 기후, 생태계 다양성 훼손 등과 같은 전 지구적인 문제들이 빈번하게 발생함에 따라 환경 변화에 민감한 남극권의 연구가 더욱 중요해지고 있다. 하지만 당시 연구 활동에는 초현, 갈프, 엘라, 크레바스, 무국한 얼음표, 고압권 환경과 같은 제약이 있다. 이러한 제약한 환경 속에서 탐사할 수 없게 하기 위한 방법으로 극한 환경에서 운용 가능한 무인 플랫폼을 개발하고, 이를 활용하는 연구들이 진행되고 있으나 아직까지 실제 활용 사례는 많지 않다.

가장 최근 대학에서 개발한 2XRMAD는 4륜구동 자율주행으로 남극의 록무 아이스 지역에서 순회할 수 있거나 사용되었다[1]. 하지만 이 로봇은 소형 55V 정도의 모터에 72kg의 무게로 대안기반을 사용하였으며, 지면에 가해지는 높은 압력으로 인하여 크레바스 위험 지역에서 구동하기에는 위험이 따른다. NASA에서 제작한 'COOLROVER'는 그린란드에서 지표면의 눈과 빙판 얼음 모니터링에 활용되는

이었다. 스노우 모핑의 목적을 활용하여 제작하였으므로 무게는 약 300kg, 대량 센서들을 포함한 높이는 약 100cm이다. 대량 배너기를 구동하여 탐사할 때 기 온도를 일으키지 않고 지표투과레이더를 이용하여 탐사에 있어 저준위는 행로를 조사할 수 있지만, 평균 이동 속도가 약 2km/h로 느리고 환경에 대처하는데 필요한 비용과 전문 지식으로 인하여 극지에는 거의 활용되고 있지 않다.

미국의 CRESU/Cold Regions Research and Engineering Lab에서는 극지 환경에서 구동 가능한 자율주행차량 'Cool Robot'과 'Yes'를 개발하여 남극과 그린란드와 같은 극한 지역에서 과학 데이터를 수집하는데 활용하고 있다. 두 차량 모두 전기 모터로 구동되는 4륜 구동으로 제작되었다. 'Cool Robot'은 대량 센서시스템부터 전력을 공급받아 탐사 할 수 있는 남극의 해빙 시대에 장기간을 주행하여 과학 데이터를 수집할 수 있다. 하지만 평균 이동 속도가 1.4km/h로 느리고, 차량의 차장을 움직이고 있던 대량 센서 배열로 인하여 장애물을 극복하거나 눈에 빠질 경우 추락하는에 어려움이 있다. 'Yes'는 지표투과레이더를

*Corresponding Author
Manuscript received 2020.06.28, revised 2020.11.17, accepted 2020.11.21
정창현, 극지연구소 기술개발지원팀(ch.chang@kopri.ac.kr, ORCID iD: 0000-0002-4311-0170)
김형권, 극지연구소 기술개발지원팀(hw.kim@kopri.ac.kr, ORCID iD: 000-0003-460-2400)
윤동현, 극지연구소 기술개발지원팀(dh.yoon@kopri.ac.kr, ORCID iD: 000-0001-6244-1370)
이주현, 극지연구소 극지기술개발지원부(jookim@kopri.ac.kr, ORCID iD: 0000-0002-3282-7376)
* 본 논문은 극지연구소 지원연구사업 지원연구사업(2019-2020)에서 지원하여 연구개발됨.
* 이 논문은 2020. 02.25의 제4차 보충 기고제출된 특집호에 게재되어 있습니다.

그림 40 논문성과



제 5 장 연구 개발 결과의 활용 계획

1. 연구 개발 결과 활용 계획

- 코로나-19 확산으로 인하여 실외에서 진행하지 못했던 시험 장치 실험을 국내에 있는 모래사장, 스키장과 같이 균질한 노면에서 추가 실험을 진행하여 개선 보완
- 남극 현장에서 크레바스 탐지를 위해 무인지상차량(UGV) 운용 시 시험 장치를 함께 운송하여 남극 현장의 빙설 지형에 대하여 실험을 수행하고 이후 UGV 운행 결과와 비교하여 지면 차량 상호작용 모델링 식을 개선함으로써 데이터 신뢰도 향상

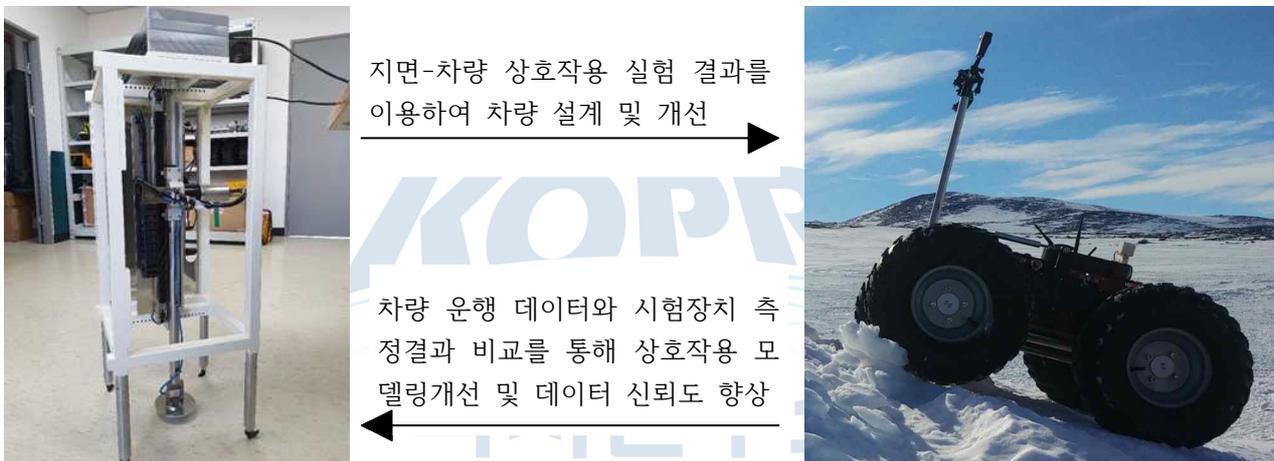


그림 41 지면-차량 상호작용 시험장치와 무인지상차량 활용 계획

- 측정 결과를 기반으로 UGV의 현재 사용 중인 휠의 적합성을 판단하고 필요시 새로운 형태의 휠 또는 트랙을 설계하여 UGV의 설상 이동성능을 향상시킬 수 있는 연구에 활용
- 현재 남극 내륙 육상에서 이루어지는 다양한 육상 활동에 대한 평가 및 개선 연구를 수행할 수 있음. 예를 들어 미답지 탐사단 이동시 설질에 따른 에너지 사용량 예측, SUV 차량의 적정 타이어 공기압 설정, 설상차의 트랙 장력 조절 등을 통하여 이동성 향상, 에너지 효율 향상과 같은 연구에 활용 가능
- 극지의 노면에서 이동하는 이동체의 다양한 연구에 활용 가능

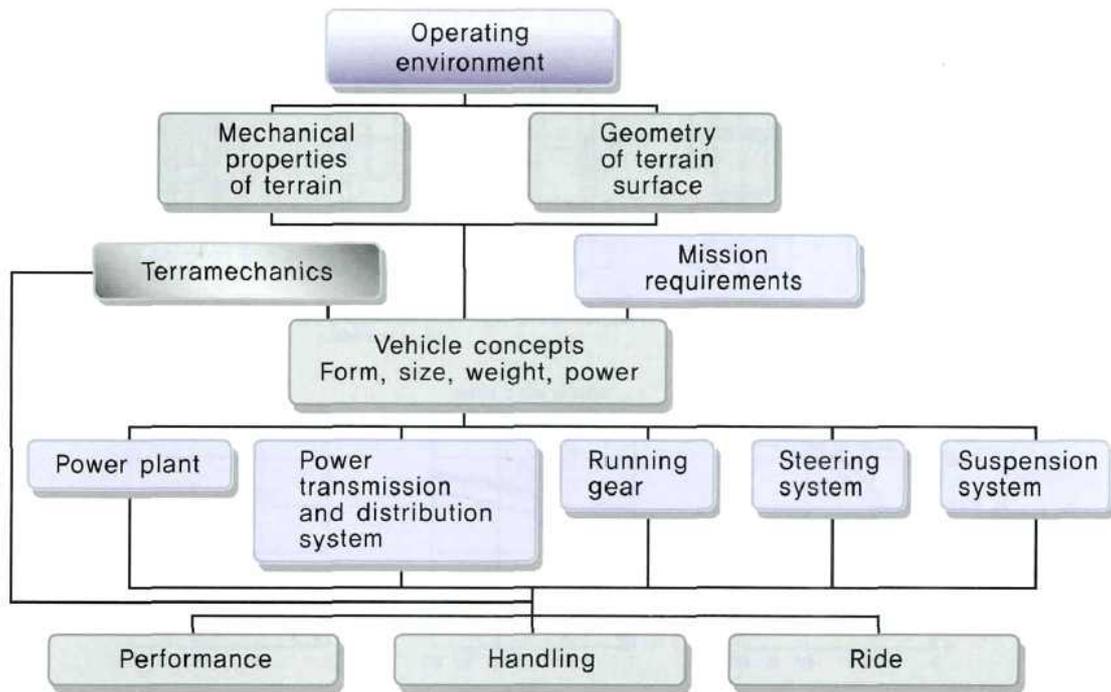


그림 42 지형역학의 적용가능 분야



제 6 장 참고문헌

이병용, 구상화, 신용재, “지형역학(Terramechanics)에 대한 이해와 발전 동향” 국방과 기술 (394), 2011.12, pp. 76-87

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.

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.

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.

G. Trisca, M. Robertson, H. Marshall, L. Koenig, and M. Comberiate, “GROVER: An autonomous vehicle for ice sheet research,” *American Geophysical Union, Fall Meeting*, San Francisco, CA, USA, Dec. 2013.

J. H. Lever, J. C. Weale, R. G. Alger and G. L. Blaisdell, “Mobility of cargo trains during year two of the proof-of-concept South Pole traverse,” ERDC/CRREL Technical Report TR- 04-22, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, NH, 2004.

J. Jin and J. Jo, “Triple Inertial Sensor Redundancy for the Attitude Control of a Small Multi-Copter-Type Drone and Flight Tests Using Pixhawk,” *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 25, Issue 5, pp. 452-462, 2019.

J. Lever, A. Delaney, L. Ray, E. Trautmann, L. Barna, and A. Burzynski, “Autonomous GPR sur-

veys using the Polar Rover Yeti,” *Journal of Field Robotics*, vol.30, Issue 2, pp. 194-215, Mar./Apr. 2013.

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.

J. Y. Wong, *Theory of Ground Vehicle*, 4th Ed., John Wiley & Sons, New Jersey, 2008.

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*, vol. 25, Issue 12, pp. 1109-1115, 2019.

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.

M. G. Bekker, *Theory of Land Locomotion*, University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1956.

PX4 Development Guide, <https://dev.px4.io>

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.

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.

T. Lee, S. Cho, S. Lee, C. Roh, and Y. Kang, “Design of an autonomous antarctic exploration plat-

forms through manipulations of All-Terrain Vehicles,” *2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo*, Busan, pp. 281–284, Jun. 2016.

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.



최종 결과보고서에 평가의견 반영사항

평가 의견서

발표자	평가의견
정창현	<p>과제명: 무인지상차량(UGV) 설상이동성 향상을 위한 데이터 측정 기술 연구</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 성과활용 방안 및 기대효과 <ul style="list-style-type: none"> - 관측에 필요한 다양한 센서를 장착하여 여러 연구현장에서 활용 요망 - 장보고기지 주변의 실측값을 활용하여 자료 보강을 한다면 남극대륙에서 활용도가 높을 것으로 판단됨 - 극지역 무인지상차량 성능 향상을 위한 기초 자료 수집 기술 향상 ○ 최종보고서에 반영할 내용 <ul style="list-style-type: none"> - 샘플 테스트를 연구과제 종료 후 수행할 방법(또는 제안)을 보고서에 포함 요망 - 본 연구의 결과를 향후 어떤 주제(과제)로 발전시키고자 하는가를 최종보고서에 기재 요망 ○ 기타 종합의견 <ul style="list-style-type: none"> - 외부 여건으로 인해 샘플 테스트가 제대로 완수되지 않은 점이 아쉬우나 극지역 현장 연구를 위한 자체 기술 개발이라는 측면에서 의의가 큼 - 남극 빙설 특성과 국내 빙설 특성이 차이가 있겠지만 국내 빙설의 물리적 특성이 모두 동일한 것이 아니므로 국내에서도 일정부분 테스트 가능할것으로 판단됨 - 남극 대륙의 표면은 부드러운 눈 보다는 대부분 거친 얼음으로 덮여 있으므로 얼음 표면을 대상으로 차량-지면 상호작용 변수 측정을 위한 현장 실험 진행 요망

연구·정책지원사업 최종 결과보고서 평가의견 반영사항

과제 구분	(신진연구지원과제)											
과제명	무인지상차량(UGV) 설상이동성 향상을 위한 데이터 측정 기술 연구(계정번호:PE19520)	연구기간	2019.12.01 ~ 2020.11.30									
연구책임자	정창현	연구비(직접비)	30,000 천원									
과제개요, 연구성과 및 최종 결과보고서 평가의견 반영 사항												
<p>(1) 과제목적</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ UGV 설상 이동 성능 연구에 필요한 수집 데이터 항목 및 측정 방법 정립 ○ 측정 방법론 검증에 위한 샘플 제작 및 테스트 진행 ○ 향후 데이터 수집 및 활용 계획 수립 <p>(2) 최종성과</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 논문 연구를 통하여 설상 기동성 측정에 적합한 데이터 항목들을 선정 ○ 선정된 항목들을 이용하여 기 제작된 무인지상차량의 설상 이동 능력을 예측하고, 실제 현장에서 측정된 성능 데이터와 비교 분석을 수행하여 선정된 데이터 항목들의 적절성 확인 ○ 데이터 항목들을 측정하기 위한 장비 및 시험 방법을 비교검토하고 적정 방법 선정하고 이에 필요한 시험 장비를 현장에서 운용하기 용이하도록 설계 제작 ○ 제작한 시험 장비를 이용하여 실험실 레벨에서 지면 침하 시험을 수행하여 결과 도출 ○ 향후 무인지상차량 운용시 측정할 데이터 항목과 측정 계획 수립 <p>(3) 성과의 향후 연구소 활용방안 또는 기대효과</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 제작된 시험 장치를 이용하여 남극 현장의 빙설 지형의 특성을 계측하고 이를 무인지상차량 설계, 운용, 평가에 활용 ○ 남극 내륙 개척과 더불어 지상에서 많은 활용이 예상되는 차량, 로봇 등에 대한 사양 선정 및 운용 방법에 대한 추가 연구 가능 <p>(4) 최종 결과보고서에 평가의견 반영 사항</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 10px;"> <thead> <tr> <th style="width: 40%;">평가의견</th> <th style="width: 40%;">반영사항</th> <th style="width: 20%;">비고</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> ○ 샘플 테스트를 연구과제 종료 후 수행 방안 제시 </td> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> ○ 국내 모래사장, 스키장과 같이 균질한 지면으로 된 시험장에서 추가 시험 계획 ○ 남극 현장에서 UGV 운용시 추가 시험을 병행하여 실시 계획 </td> <td style="vertical-align: top; text-align: center;"> 연구보고서 p.46 참조 </td> </tr> <tr> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> ○ 본 연구의 결과의 향후 발전 방안 제시 </td> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> ○ UGV의 설상 이동능력을 개선하고 UGV의 시험 결과를 활용하여 남극 지면의 모델식 개선 </td> <td style="vertical-align: top; text-align: center;"> 연구보고서 p.46 참조 </td> </tr> </tbody> </table>				평가의견	반영사항	비고	<ul style="list-style-type: none"> ○ 샘플 테스트를 연구과제 종료 후 수행 방안 제시 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 국내 모래사장, 스키장과 같이 균질한 지면으로 된 시험장에서 추가 시험 계획 ○ 남극 현장에서 UGV 운용시 추가 시험을 병행하여 실시 계획 	연구보고서 p.46 참조	<ul style="list-style-type: none"> ○ 본 연구의 결과의 향후 발전 방안 제시 	<ul style="list-style-type: none"> ○ UGV의 설상 이동능력을 개선하고 UGV의 시험 결과를 활용하여 남극 지면의 모델식 개선 	연구보고서 p.46 참조
평가의견	반영사항	비고										
<ul style="list-style-type: none"> ○ 샘플 테스트를 연구과제 종료 후 수행 방안 제시 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 국내 모래사장, 스키장과 같이 균질한 지면으로 된 시험장에서 추가 시험 계획 ○ 남극 현장에서 UGV 운용시 추가 시험을 병행하여 실시 계획 	연구보고서 p.46 참조										
<ul style="list-style-type: none"> ○ 본 연구의 결과의 향후 발전 방안 제시 	<ul style="list-style-type: none"> ○ UGV의 설상 이동능력을 개선하고 UGV의 시험 결과를 활용하여 남극 지면의 모델식 개선 	연구보고서 p.46 참조										

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.