

보안 과제(), 일반 과제(O) / 공개(O), 비공개()
국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종보고서

발 간 등 록 번 호
11-1613000-001907-01

R&D /
15CTAP-C097367

공사현장을 위한 드론을 이용한 현장 데이터 수집 및
지반변형의 적응형 관리시스템 개발을 위한
기초기술 개발

최종보고서

2017. 09. 01

주관연구기관 / 홍익대학교 산학협력단

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘공사현장을 위한 드론을 이용한 현장 데이터 수집 및 지반변형의 적응형 관리시스템 개발을 위한 기초 기술 개발’(연구개발 기간 : 2015. 6.~ 2017. 6.) 과제의 최종보고서 2부를 제출합니다.

2017 . 09. 01.

주관연구기관명 : 홍익대학교 산학협력단 황 기 연



주관연구기관책임자: 김 태 식

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	15CTAP-C097367	해당 단계 연구 기간	2015.06.18. ~2017.06.17	단계구분	2/2
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	창의도전연구분야 창조형모험			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	공사현장을 위한 드론을 이용한 현장 데이터 수집 및 지반변형의 적응형 관리시스템 개발을 위한 기초 기술 개발			
연구책임자	김 태 식	해당단계 참여 연구원 수	총: 7 명 내부: 7 명 외부: 0 명	해당단계 연구개발비	정부: 50,000천원 기업: 천원 정부 외: 천원 계: 50,000천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 9 명 내부: 9 명 외부: 0 명	총 연구개발비	정부:100,000천원 기업: 천원 정부 외: 천원 계:100,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	홍익대학교 산학협력단			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	
요약				보고서 면수 50	

- 본 연구과제는 공사현장 주변의 지반 변형 관리를 목적으로 함.
- 드론 및 사물인터넷을 활용하여 계측 센서가 측정한 데이터를 효율적으로 수집하는 방안을 개발.
- 적응형 관리시스템을 위한 빠른 전산 시뮬레이터 구축.
- 지반 변형에 따라 변화된 지반 물성 값을 재산정하는 분석 기술 및 알고리즘 개발.

〈 국문요약문 〉

연구의 목적 및 내용	- 본 연구의 최종 목표는 도심지 공사현장 주변의 지반 변형 관리를 목적으로 하는 적응형 관리시스템(Adaptive management)을 개발하는데 있다. 이를 위해, 드론(Drone) 및 사물인터넷(IoT)을 이용하여 효율적인 현장 데이터 수집방안을 개발하고, 공사가 진행됨에 따라 변화하는 지반 물성 값을 재산정하는 기술을 개발하고, 다양한 모델에 범용적으로 적용 가능한 물성 값 재산정 알고리즘을 탑재한 전산시뮬레이터를 구축하기 위함이다.				
연구개발성과	- 드론 및 사물인터넷을 이용한 현장 데이터 수집 기술: 드론이 계측 센서에 접근하여 센서에 저장되어있는 데이터를 다운로드 받아 전산 시뮬레이터로 전송함. - 지반 변형에 따라 변화된 지반 물성 값을 재산정하는 범용 알고리즘: 물성 값을 변화시켜가며 반복적으로 전산해석을 수행하여, 변형 예측 값이 현장에서 발생한 변형에 빠르고 효율적으로 수렴하도록 하는 기술. - 지반 변형의 적응형 관리시스템을 위한 전산 시뮬레이터 구축: 적응형 관리(Adaptive management)를 위해 지반 변형 자료와 전산 시뮬레이션 자료를 지속적으로 비교 분석하기 위한 전산 시스템.				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	- 본 연구과제의 성과는 추후 실용화 과제를 통해 머지않은 미래에 현장에서 활용이 가능하리라 판단된다. 본 연구 과제의 최종 성과물인 드론, 시뮬레이터, 재산정 분석 기술 및 알고리즘 등을 서로 유기적으로 연결하여 실험실 단계에서 충분히 검토를 거치고, 추후 현장에서 사용되는 계측 장비들과의 인터페이스를 개발한다면 현장 적용에는 무리가 없을 것으로 판단된다.				
핵심어 (5개 이내)	적응형 관리	사물인터넷	드론	구성모델	지반변형

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	– In this research, we develop an adaptive management system for ground deformation around construction site. To achieve this goal, the method to effectively collect the measurement data would be developed using drone and internet of things (IOT). The algorithm to back calculate the soil engineering properties based on ground deformation that takes place during construction also would be investigated.				
Results	– Drone approaches to the monitoring sensors, and downloads the data. Then drone sends the data to the simulator. – Algorithm to optimize the soil engineering properties that evolves during construction. – Numerical simulator that can conduct the algorithm.				
Expected Contribution	– In the near future, the development results of this research can be used in construction site after commercialization process. After conducting laboratory scale tests for the proof and developing the interface between the developed system and the measurements using in the field, this research results can be utilized in the construction sites.				
Keywords	Adaptive management	Internet of Things	Drone	Constitutive model	Ground deformation

< Contents >

1. Research summary	7
2. Status of domestic and overseas technology development	16
3. Research contents and results	19
4. Research objective achievements and effects	42
5. Plan to utilize research achievements	45
6. Overseas science and technology information	46
7. Security rating of research achievements	47
8. Research facilities and equipments registered in NTIS	48
9. Implementation of safety measures in laboratories	49
10. Representative research achievements	50
11. Miscellaneous	51
12. Reference	52

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	7
2. 국내외 기술 개발 현황	16
3. 연구 수행 내용 및 성과	19
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	42
5. 연구개발성과의 활용 계획	45
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	46
7. 연구개발성과의 보안등급	47
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	48
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	49
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	50
11. 기타 사항	51
12. 참고 문헌	52

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

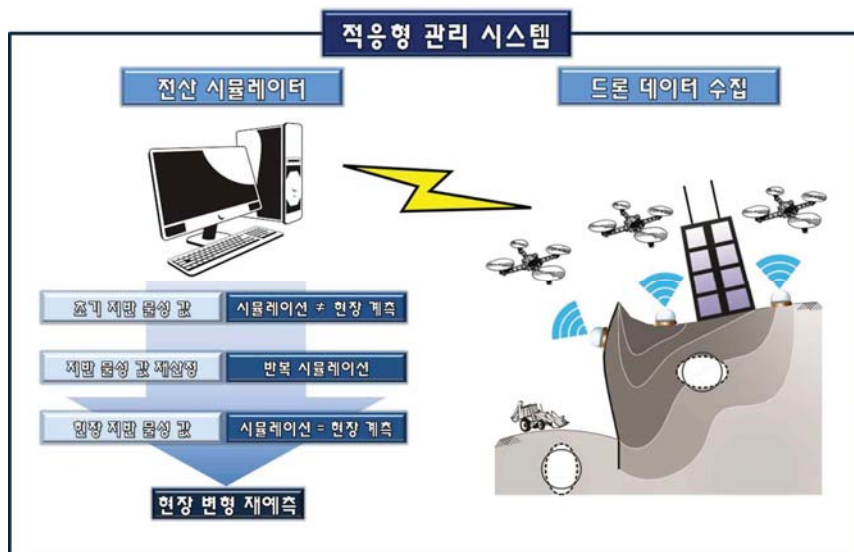
본 연구의 최종 목표는 도심지 공사현장 주변의 지반 변형 관리를 목적으로 하는 적응형 관리시스템(Adaptive management)을 개발하는데 있다. 이를 위해, 드론(Drone) 및 사물인터넷(IOT)을 이용하여 효율적인 현장 데이터 수집방안을 개발하고, 공사가 진행됨에 따라 변화하는 지반 물성 값을 재산정하는 기술을 개발하고, 다양한 모델에 범용적으로 적용 가능한 물성 값 재산정 알고리즘을 탑재한 전산시뮬레이터를 구축하기 위함이다.

2. 연구개발의 필요성

가. 연구개발과제의 설명

(1) 추진목적

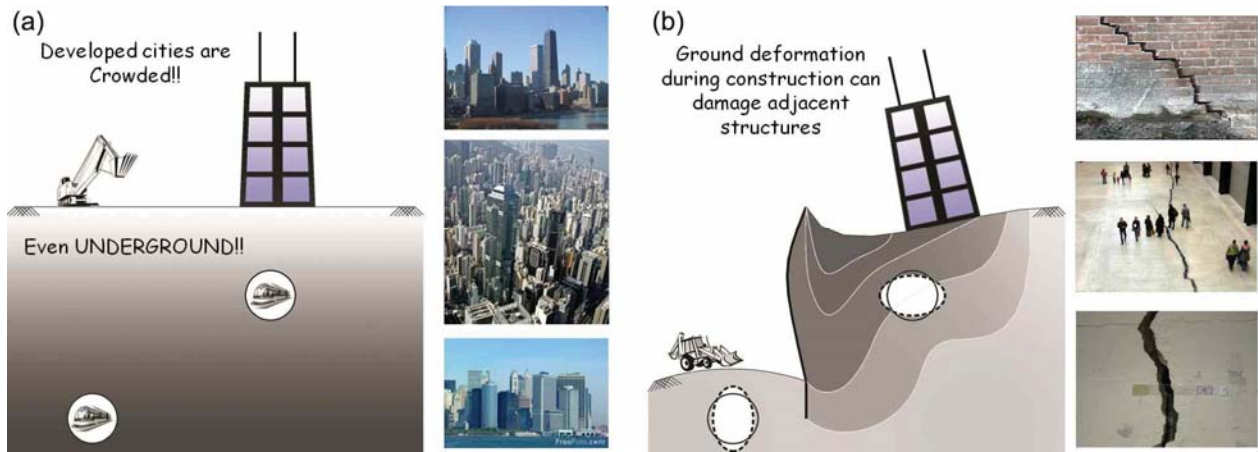
- 본 과제의 연구 목표는 드론 및 사물인터넷을 이용하여 지반 변형 데이터를 수집하고, 지반의 변형에 따라 변화하는 지반의 물성 값을 분석하여 재산정하는 기술을 개발하고, 다양한 모델에 범용적으로 적용 가능한 물성 값 재산정 알고리즘을 탑재한 전산 시뮬레이터 구축을 통해 적응형 관리시스템(Adaptive management) 개발에 있다.



[그림 1.1] 적응형 관리시스템 (Adaptive management system) 개념 일러스트레이션

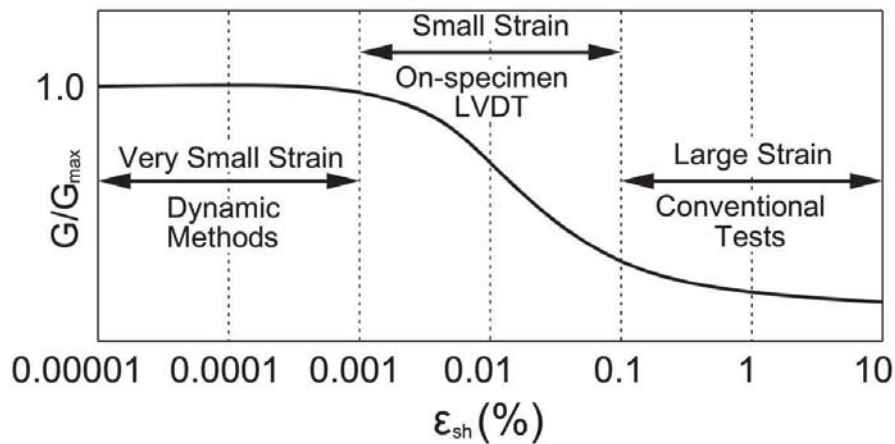
(2) 추진배경

- 지반 공학은 흙을 원위치에서 다루는 학문으로, 지반 구조물의 충분한 안전율을 확보하여 파괴를 방지하는데 초점을 맞춰 발달해 왔다. 그러나 현대 사회로 접어들어 지반 구조물에 관한 다양한 요구들이 생겨나면서 충분한 안전율과 더불어 사용성(Serviceability)을 중시한 기술도 필요로 하게 되었다. 예를 들어, [그림 1.2]에 나타난 바와 같이 도심지의 경우 기존 구조물들이 현장에 인접한 경우가 많아 안전율 확보와 더불어 공사로 인한 인접 구조물의 균열과 같은 피해를 주지 않기 위해서는 지반의 변형까지도 관리해야 한다. 즉 지반 변형과 관련된 기술 요구사항도 더욱 높아지고 있다.



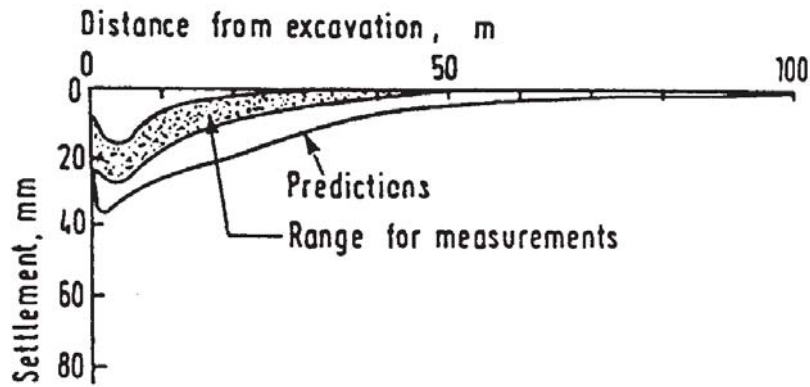
[그림 1.2] (a) 도심 공사 현장의 경우 지상 뿐 아니라 지하의 경우도 지하철 및 각종 관거들이 매설되어 매우 복잡하다; (b) 도심지에 위치한 지반공학 관련 공사현장의 경우, 지반의 변형을 고려하지 않으면 주변 구조물들에 균열 나아가 파괴와 같은 피해를 유발할 수 있다.

- 지반의 변형을 관리하기 위해서는 공용 하중 상태에서의 지반 거동을 모사할 수 있어야 한다. 일반적으로 현장에서 계측된 공용 하중 상태에서 지반의 변형률은 0.1% 이하이며, 이 구간에서는 [그림 1.3]에서 보인 바와 같이 지반 강성의 비선형성이 두드러진다고 알려져 있다. 이러한 특성을 고려할 수 있는 구성 모델은 몇몇 종류들이 있으며 현재에도 국내외에서 개발 중에 있다.



[그림 1.3] 변형률에 따른 지반의 강성 감쇠 곡선 (Kim 2011)

- 지반 거동의 예측에 있어서 중요한 요소는 지반 거동을 정확하게 모사할 수 있는 구성모델과 더불어 적절한 입력 변수의 사용이라 할 수 있다 (Burland 1989; Hight and Higgins 1995). 그러나 지반조사를 통해 산정된 지반의 강성은 공사가 진행됨에 따라 변하게 되어, 원지반 상태에서 측정된 값과는 상이하게 된다. [그림 1.4]에 나타난 바와 같이 강성의 변화를 고려하지 않은 예측은 전체침하량은 계측 값보다 크게 측정되어 비경제적이며, 부등침하하는 계측 값보다 작게 예측하여 불안전할 수 있다. 따라서 지반의 변형을 관리하기 위해서는 공사 중 지반의 강성의 변화를 고려한 적응형 관리(Adaptive management) 기술이 필요하다.



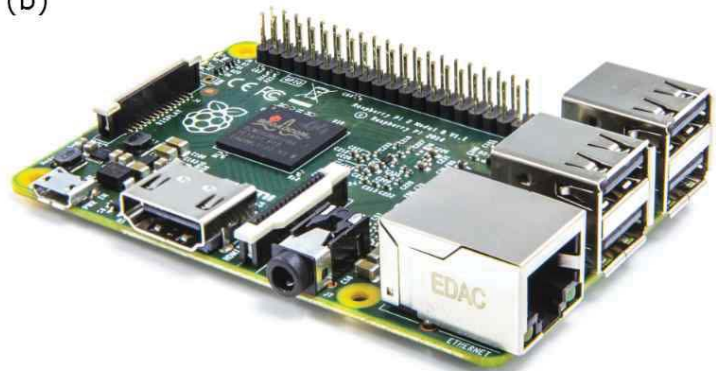
[그림 1.4] 19 m 깊이의 굴착 현장 침하형상의 예측 값과 계측 값 비교 (Hight and Higgins 1995)

- 적응형 관리(Adaptive management)는 현상을 지속적으로 관찰하고, 변화가 발견되면 그에 적응할 수 있게끔 시스템을 변경하는 방법으로, 공사중 지반의 변형 예측 및 관리에 적합한 방안이라고 할 수 있다. 지반의 변형을 예측할 때 구성모델을 이용하여 수치해석을 수행하게 된다. 지반의 종류에 따라 적용 가능한 구성모델들은 다양하며, 각 모델들은 다양한 변수들을 사용하게 된다. 따라서 특정 구성모델에만 적용 가능한 연구를 수행한다면 그 적용성이 현저히 떨어질 수밖에 없다. 구성모델이 사용하는 변수와 변형과의 상관관계를 범용적으로 평가할 수 있는 방법을 고려하고 자동으로 평가하는 알고리즘을 개발하는 연구를 수행할 계획이다. 이는 연구 성과의 적용성을 높일 수 있는 창의적인 방법이라 할 수 있다.
- 최근 정보 통신 기술의 발달은 토목공학과 관련한 많은 부분에 발전 가능성을 제시하였다. 현재의 스마트 폰과 같은 스마트 기기들의 하드웨어 성능은 불과 수년 전의 PC 성능과 큰 차이가 없다. 또한 사물인터넷(IOT, Internet of Things)의 발달은 전자정보통신의 비전공자들도 충분히 필요한 기능 구성을 가능하게 만들었다. 현장 계측 센서에서 수집한 데이터를 사물인터넷을 이용하여 드론과의 근거리 통신을 통해 수집한다면 지반의 변형관리에 있어서 한 단계 진일보 할 수 있을 것으로 판단된다.

(a)



(b)



[그림 1.5] 사물인터넷(Internet of Things)에 널리 활용되는 기기: (a) 아두이노(Arduino)는 오픈소스를 지향하는 마이크로 컨트롤러를 내장한 기기 제어용 기판으로 컴퓨터 메인보드의 단순 버전으로 다양한 센서와 부품을 연결할 수 있다. (b) 라즈베리파이(Raspberry Pi)는 영국의 라즈베리파이 재단이 학교에서 기초 컴퓨터 과학 교육을 증진시키기 위해 만든 컴퓨터이다. 교육용으로 만들어졌으나, 간단한 구성의 컴퓨터로 복잡한 회로의 구성을 모르는 비전공자도 손쉽게 활용할 수 있어 많은 공학분야에서 활용도가 점차 확대되고 있다.

(3) 기술적·경제적 성과

- 현재 우리나라의 경우 발달된 IT 기술을 이용, 상시 인터넷 접속을 통한 현장 계측 관련 기술이 발달하고 있으나 드론 및 사물인터넷을 활용하여 센서와의 근거리 통신을 통한 계측정보 수집과 같은 기술은 미미하다. 또한 계측된 자료의 수집을 통한 단순한 데이터베이스 축적 수준으로, 공학적 의미를 시스템적으로 파악하여 지반 변형관리에 적용하는 것과 같은 고난도의 기술은 미흡하다. 현장의 정보를 효율적으로 수집, 처리할 수 있는 지반 변형의 적응형 관리 시스템이 개발된다면 우리나라의 건설 기술은 퀀텀점프를 이룰 수 있을 것으로 판단한다. 또한 이를 바탕으로 해외 건설시장에서 기술우위를 점하여 국가의 경제에 이바지할 것으로 판단한다.

나. 연구개발의 중요성

(1) 기술개발의 중요성

(가) 기술적 측면

- 드론 및 사물인터넷을 이용한 현장 데이터 수집 기술:

드론에 다양한 종류의 카메라를 탑재하여 촬영된 영상을 이용하여 공학적 의미를 분석하는 사례는 있으나, 센서의 계측 값을 수집하는 역할을 하는 사례는 없었다. 보통 공사 현장에 위치하는 센서들은 사람들이 돌아다니며 다운로드 받는 형태를 취하게 되거나, 최첨단 센서의 경우 부대시설 설치를 통해 네트워크에 유·무선으로 직접 연결되어 데이터를 전송하게 된다. 공사현장은 거친 환경으로 인해 이런 형태는 적절하지 않을 수 있다. 근거리 통신 모듈 및 저장 모듈을 탑재하고 배터리로 구동되는 센서를 설치하고, 계측 데이터를 드론이 하면 더욱 진일보한 형태의 계측이 가능할 것으로 예상된다.

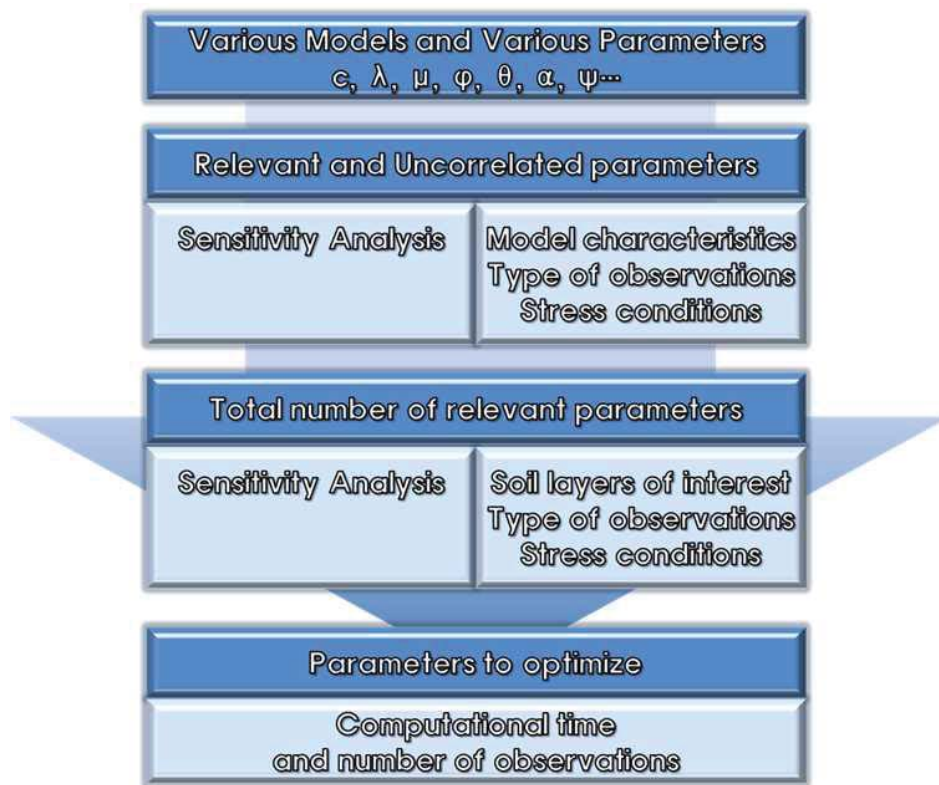


[그림 1.6] 드론을 이용한 계측 자료 수집

- 지반 변형에 따라 변화된 지반 물성 값을 재산정하는 범용 알고리즘:

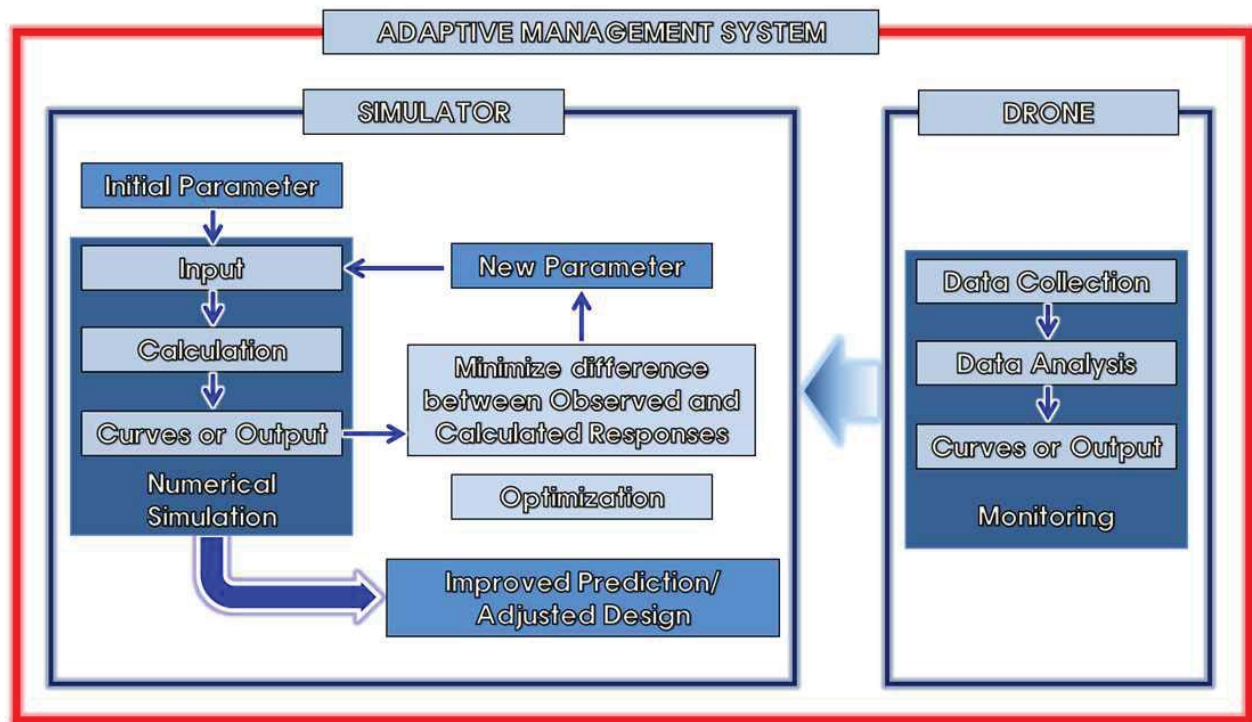
앞서 언급한 바와 같이 지반의 물성 값은 지반의 변형이 진행됨에 따라 변하게 된다. 이를 재산정하기 위해서는 현장의 변형 계측 값을 바탕으로 전산 시뮬레이션을 수행하여야 한다. 전산 시뮬레이션을 수행할 때 지반의 종류 및 특성에 따라 다양한 종류의 구성 모델을 사용할 수 있으며, 구성 모델마다 사용하는 변수들은 다양하고 각각의 변수들이 지반의 변형 예측에 미치는 영향은 각기 다르다. 따라서, 일반적인 지반의 물성 값 재산정을 위해서는 전산 시뮬레이션에 사용된 구성 모델을 특정하는 것은 부적절하며, 범용적으로 사용가능한 알고리즘의 개발을 해야 한다.

- 이를 위해 개개의 변수들이 지반의 변형에 미치는 영향을 분석하는 알고리즘, 즉 복합민감도 (CSS, Composite Scaled Sensitivity)를 분석하는 알고리즘이 필요하다. CSS 값이 높은 변수들을 대상으로 상호간의 상관관계(Correlation)를 평가하여, 지반 변형을 가장 잘 묘사할 수 있는 변수를 선정하게 된다. 선정된 변수를 변화시켜가며 지반 변형의 전산 시뮬레이션 결과와 현장 계측 값을 비교하여 전산 시뮬레이션 결과 값이 현장 계측 값에 유사하게 만드는 변수를 당시 지반 상태의 지반 물성 값으로 결정하게 된다.
- 이러한 복잡한 일련의 과정을 통해야만, 특정 구성 모델에 국한되지 않고 범용성을 확보한 알고리즘을 구성할 수 있을 것으로 판단한다.



[그림 1.7] 물성 값 재산정을 위한 알고리즘 흐름도

- 지반 변형의 적응형 관리시스템을 위한 전산 시뮬레이터 구축:
지반의 물성 값은 지반의 변형에 따라 변화한다. 지반 변형에 따라 변화된 지반 물성 값을 재산정하는 범용 알고리즘을 통해 어떤 지반의 물성 값을 재산정 대상으로 할 것인지 결정하고, 전산 시뮬레이션을 수행하여, 현장에서 드론이 수집해온 데이터와 비교하는 역할을 하는 시뮬레이터가 필요하다.
- 드론과 사물인터넷을 이용한 현장 데이터 수집과 앞서 언급한 알고리즘을 탑재하여 빠르게 시뮬레이션을 수행할 시뮬레이터의 구축을 통해 본 연구 과제의 최종 목표인 지반의 적응형 관리 시스템을 구현할 수 있다.



[그림 1.8] 전산 시뮬레이터를 이용한 적응형 관리 시스템 흐름도

(나) 경제산업적 측면

- 세계적으로 볼 때 많은 시설 및 사람들이 도시에 밀집해 있으며, 이미 포화 상태임에도 불구하고 꾸준히 도심 공간에 대한 수요가 생기고 있다. 제한된 토지 내에 공간을 창출하기 위해 더 높거나 더 깊은 구조물을 짓고 있고 원활한 운송을 위해 대중교통을 더 깊은 곳에 건설하고 있다. 이런 과정들은 도시화가 지속되는 한 계속될 것이며, 공사 중 발생하는 인접 구조물의 피해를 막기 위해 지반 변형에 대한 관리 및 계측 자료 수집 방안과 관련된 연구가 필요할 것으로 전망된다.
- 현재 우리나라는 지속적 경제성장을 위한 신성장동력을 찾기 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 해외 건설 시장의 규모는 2013년 10조 달러에서 2017년 17조 달러로 성장할 것으로 전망하고 있다. 해외 건설 시장에서 5% 정도만 우리나라가 수주한다 하더라도 건설 산업이 석유제품(562억 달러), 반도체(504억 달러), 자동차(472억 달러)등의 현재 우리나라 수출 주력 산업을 월등히 뛰어넘는 최대 성장 동력이 될 수 있다.
- 우리나라의 해외 건설 연간 수주액은 2005년 109억 달러에서 2010년 716억 달러로 5년 동안 약 7배 급성장 후 중국, 미국 등의 해외 건설사들과의 치열한 경쟁으로 인해 주춤하고 있다. 기술적 우위를 확보해야만 수주 경쟁에서 살아 남을 수 있을 것으로 판단하며, 저가 수주가 아닌 기술 우위를 이용한 수주를 통해서만이 국가의 이득을 창출해 낼 수 있을 것으로 판단한다.
- 본 연구 과제는 국내 건설 기술을 한 단계 업그레이드 시킬 수 있는 과제로 해외 건설 시장에서 국내기업의 경쟁력을 높일 수 있을 것이다. 정부주도의 지원을 통한 기술 개발을 통해 국가의 신성장동력으로서의 건설 산업을 기대해 볼 수 있다.

(다) 사회문화적 측면

- 우리나라는 산업화에 따라 도시화가 급속히 진행되었고, 도심에 구조물들이 포화상태임에도 공간에 대한 수요가 꾸준히 증가하고 있다. 부산 및 잠실의 롯데월드와 같은 초고층 건물의 건설을 통해 신공간을 창출하였고, 교통문제 해결을 위해 깊숙한 곳 까지 다수의 지하철을 건설하였다. 그림 [1.9]에 보인 최근 언론에 보도된 피해 사례들과 같이 도심 공사는 지반변형과 관련된 문제를 유발한다. 무형적으로는 불안감 조성, 유형적으로는 건물의 침하 및 지역 일대 부동산 가격하락과 같은 피해를 유발하고 있다. 한전부지 초고층 현대사옥 건설과 같은 도심 공사가 계획되고 있는 현실에서, 공사 중 인접 구조물들의 피해를 막기 위해 지반의 변형과 관련된 적응형 관리 시스템은 반드시 필요하다.



[그림 1.9] (a) 지하철 공사로 인해 발생한 지하차도 침하로 인한 도로 손실; (b) 인근 대규모 터파기 공사로 인한 건물 침하

(2) 정부지원의 필요성

- 정부는 국민의 안전을 최우선으로 두고 있는 정책들을 펴고 있다. 안전을 강조하기 위해 기존의 “안전행정부” 내에 안전과 관련된 조직을 행정자치와 분리하여 “국민안전처”로 승격하였다. 본 연구과제는 공사로 인한 지반의 변형과 관련한 과제로 안전과 밀접한 관련을 맺고 있어 정부의 정책 로드맵과 그 방향을 같이하고 있다.

다. 연구개발 단계(TRL에 근거하여 기술)

- 본 연구과제의 최종 성과물은 1)드론 및 사물인터넷을 이용한 현장 데이터 수집기술; 2) 지반 변형에 따라 변화된 지반 물성 값을 재산정하는 범용 알고리즘 개발; 3) 지반 변형의 적응형 관리시스템을 위한 전산 시뮬레이터 구축이 있다. 세 가지 최종성과물의 TRL 단계는 다음과 같다.
- 드론 및 사물인터넷을 이용한 현장 데이터 수집 기술:
현장의 효율적 데이터 수집을 위해, 센서가 측정한 데이터는 센서에 저장하고, 드론이 접근하여 저장된 정보를 근거리 통신을 이용하여 다운로드하는 방식을 구현하는 과정이다. 이는 관련 개념을 기술적으로 구현하기 위한 단계에 해당되어 TRL 3에 해당된다.
- 지반 변형에 따라 변화된 지반 물성 값을 재산정하는 범용 알고리즘 개발:
지반 변형에 따라 변화된 지반의 물성 값 재산정을 위해서는 변형과 모델 변수간의 상관관계를 파악해야 한다. 반복적인 시뮬레이션을 통해 이론적 수준에서 정립되어있는

개념을 기술적으로 구현하는 과정이다. 이는 실험실에서 알고리즘을 구현하는 TRL 3에 해당된다.

- 지반 변형의 적응형 관리 시스템을 위한 전산 시뮬레이터 구축:

적응형 관리(Adaptive management)는 현상을 지속적으로 관찰하고, 변화가 발견되면 그에 적응할 수 있게끔 시스템을 변경하는 방법으로 이를 지반공학에 적용하기 위한 시도 과정이다. 이는 기술적 개념정립단계인 TRL 2와 실험적 증명 단계인 TRL 3에 해당된다.

구분		표기	단계 별 설명	
기초연구 단계	TRL 1	☐	TRL 1	이론적 연구단계
	TRL 2	☐	TRL 2	기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	☒	TRL 3	실험적 증명 단계
	TRL 4	☐	TRL 4	실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	☐	TRL 5	유사환경 시험 단계
	TRL 6	☐	TRL 6	유사환경 기술시범 단계
실용화 단계	TRL 7	☐	TRL 7	실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	☐	TRL 8	시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	☐	TRL 9	현장적용/사업화 단계

라. 타산업 연계 및 국제협력 가능성

- 본 연구과제는 토목공학의 한 분야인 지반공학에서 드론 및 사물인터넷(IOT)를 활용함으로써, 전자정보통신 및 항공분야와의 연구협력이 포괄적으로 가능하다.
- 현장 계측에 관련된 항목을 지반공학에 국한하지 않고 포괄적으로 확대하여 다양한 구조물에 적용할 수 있을 것으로 판단한다. 예를 들어, 교량, 댐 등의 모니터링에도 적극적으로 활용할 수 있을 것으로 예상된다.

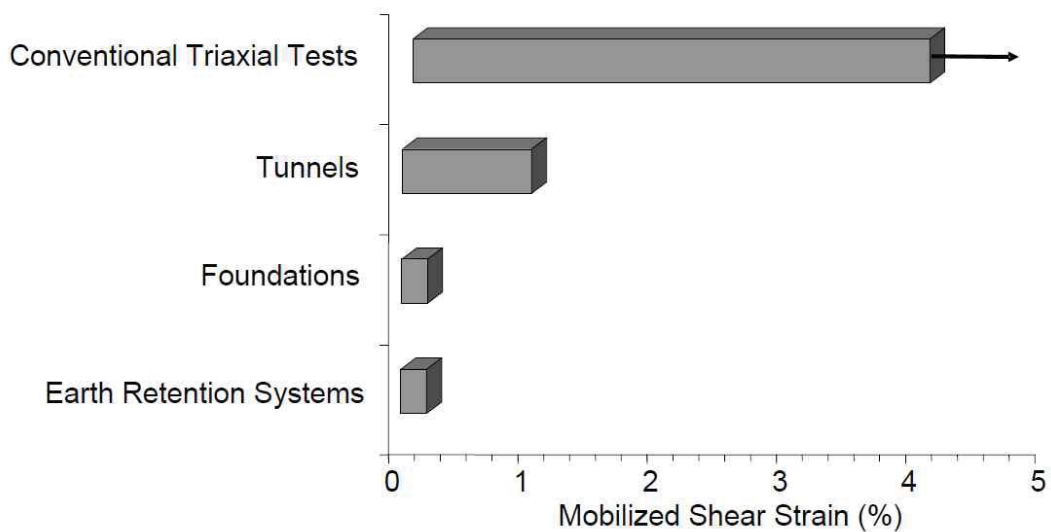
3. 연구개발 범위

- 본 연구과제는 공사현장 주변 지반의 변형을 관리하는 적응형 관리시스템 (Adaptive management) 개발에 있다. 적응형 관리 시스템과 관련한 내용은 다음의 세 가지로 세분화 될 수 있다. 1) 드론 및 사물 인터넷을 이용한 현장 데이터의 수집, 2) 지반의 물성 값 재산정 알고리즘, 3) 전산 시뮬레이터. 이와 관련한 연구내용은 다음과 같다.
- 근거리 통신 모듈 및 데이터 저장 모듈이 탑재된 계측 센서를 이용하여, 센서가 계측한 데이터 값을 센서가 저장을 한다. 드론(Drone)이 센서에 접근하여, 드론-센서간 근거리 통신을 통해 센서에 저장되어있던 데이터를 드론이 다운로드 받는다. 즉, 인터넷 망 상시 접속을 통한 현장 계측 데이터의 수집이 아닌, 드론과 센서의 사물인터넷(IOT)을 이용하여 데이터를 수집함으로써, 센서의 설치비 및 유지 관리 측면에서 유리할 것으로 판단된다. 또한 페어링을 통해 허락된 기기로부터 데이터를 전송 받음으로써 보안적인 측면에서도 유리할 것으로 판단된다.
- 발생하는 지반의 변형에 따라 지반의 물성 값은 변한다. 특히 지반의 변형과 관련이 있는 지반의 강성은 지반의 변형에 따라 그 값이 급격히 변하는 특성이 있다. 따라서 정확한 지반의 변형 예측을 위해서는 지반 변형에 따라 변화하는 물성 값을 분석하여 재산정하는 기술이 필요하다. 또한 재산정된 물성 값을 이용하여 전산 시뮬레이션을 실시하여 지반의 변형을 다시 예측해야한다. 이 과정들은 지속적, 반복적으로 수행되어야 하며, 이를 위해서는 전산 시뮬레이터의 구축이 반드시 필요하다.
- 지반의 구성 물질은 다양하며, 구성물질의 특성에 따라 지반의 변형 예측을 위해 사용해야 하는 구성 모델은 다양하다. 따라서 특정 구성 모델에 국한 되지 않고, 범용적으로 사용이 가능해야 그 실용성이 있다고 할 수 있다. 따라서 다양한 구성 모델에 적용 가능한 물성 값 재산정 범용 알고리즘의 개발이 반드시 수행되어야 한다.
- 공사 중 발생하는 지반의 변형을 설계 시 예측 값과 지속적으로 비교하여 지반 물성 값을 업데이트하고 설계를 개선하는 것은 기존의 설계 및 시공 흐름을 한 단계 업그레이드 하는 창의적이고 도전적인 연구 내용이다.
- 본 연구과제의 단계는 비실용화 단계로 추후 실용화를 위한 기초 기술 개발에 있다. 연구가 진행되는 2년 이라는 시간 및 연구비를 고려해 볼 때, 공사현장을 섭외하여 시스템을 구축하고 평가한다는 것은 제약이 따른다. 따라서 전산 시뮬레이터 구축 후 실내시험 및 시뮬레이션을 통한 적응형 관리 시스템을 개발하는 것이 본 연구 단계에서는 적절할 것으로 판단된다.

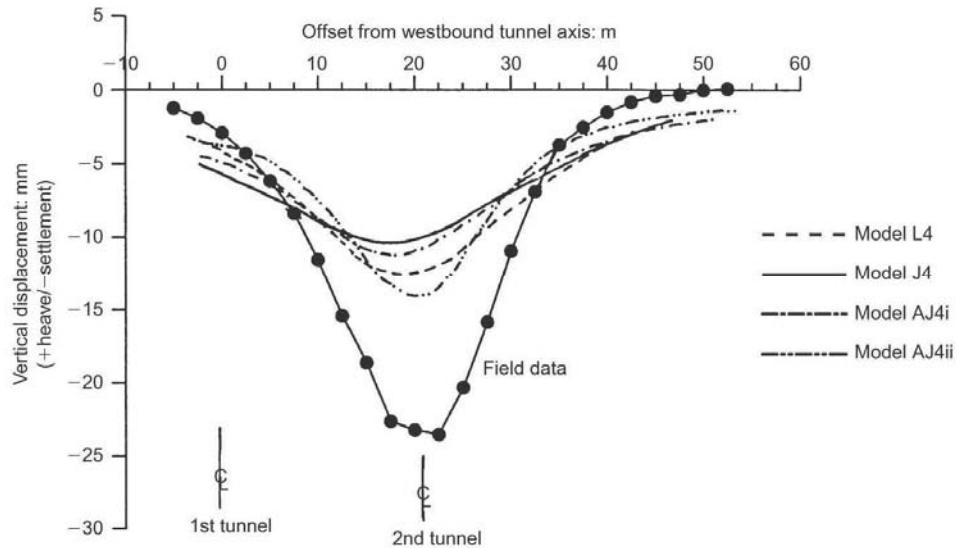
제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 국내외 연구동향 및 학술적 흐름 분석

- 조사의 한계와 수많은 불확실성을 내포하고 있는 흙을 원위지에서 다룬다는 특징으로 인해 지반 공학관련 기술의 발달은 주로 충분한 안전율을 확보하여 지반의 파괴를 방지하는데 초점을 맞춰 발달해왔다. 그러나 현대에 들어 지반의 파괴방지에 그치지 않고, 지반의 변형까지도 관리해야하는 기술수요가 생겨나기 시작했다. 예를 들어, 도심지의 경우 기존 구조물들이 현장에 인접한 경우가 많아 안전율 확보와 더불어 공사로 인한 인접 구조물의 균열과 같은 피해를 주지 않기 위해 지반의 변형까지도 관리해야한다.
- 공사 중 지반의 거동에 대한 분석이 Burland (1989)에 의해 이루어 졌다. 설계가 잘 이루어진 경우, 대부분의 공사현장에서 발생하는 지반의 변형률은 0.1 %정도인 것으로 파악되었다. 이는 파괴 시 발생하는 변형률과는 큰 차이를 보인다. 즉, 지반의 거동을 분석해야 하는 경우 미소한 변형률에서의 거동이 중요하며, 이 구간의 지반 강성은 급작스러운 변화를 보이는 것으로 알려져 있다 (Atkinson and Sallfors 1991).

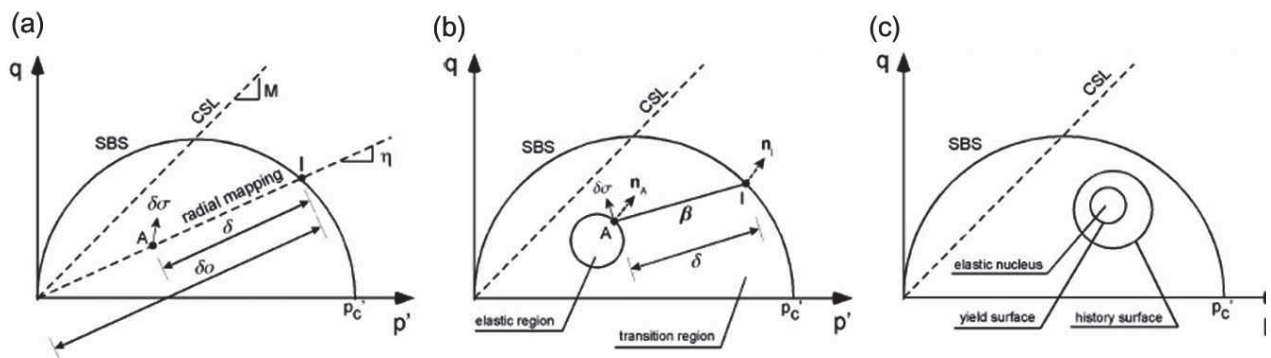


[그림 2.1] 구조물에서 일반적으로 발생하는 전단 변형률과 실내시험에서의 전단변형률 (Atkinson 2000)



[그림 2.2] 터널 굴착중 지반 침하량의 측정 값과 예측 값의 비교 (Addenbrooke et al. 1997): 미소변형률 구간에서의 지반거동 특성을 반영하지 않고 전산 해석을 통해 예측할 경우, 실제 공사중 발생하는 지반의 변형과는 큰 차이가 나타나게 된다.

- 지반의 변형을 예측하기 위해서 많은 미소변형률 구간에서의 거동특성을 분석하는 연구들이 진행되었다 (e.g., Burland 1989, Puzrin and Burland 1998, Clayton and Heymann 1999, Gasparre et al. 2007, Jardine 1992, Kim and Finno 2012, Finno and Kim 2012, Kim and Finno 2014). 나아가 거동의 분석에 그치지 않고, 이를 모사할 수 있는 구성 모델들도 개발되고 있다 (e.g., Whittle et al. 1993, Stallebrass and Taylor 1997, Masin 2005).



[그림 2.3] 지반의 미소변형을 고려할 수 있는 탄소성 모델의 예시: (a) Bounding surface model; (b) Two-surface model; (c) Three-surface model

- 지반의 미소변형률 구간에서의 거동 분석 및 이를 모사할 수 있는 구성 모델의 개발과 더불어, 지반의 물성 값의 공사 중 변화를 적용하기 위한 방안들이 연구 되었다. 즉 구성 모델들을 잘 개발한다 하더라도 전산 시뮬레이션을 위한 지반 물성 값을 잘 산정하지 못한다면 지반 변형을 정확히 예측하기는 힘들기 때문이다. 복잡한 구성 모델이 사용하는 변수 중에는 물리적인 의미를 갖고 있어서 실내 또는 현장 시험을 통해 그 값을 산정 가능한 경우도 있지만, 그렇지

많은 변수들도 있다. 이런 변수 값들의 효율적 산정을 위해 parameter optimization 기술들이 사용되었다 (Calvello and Finno 2004, Rechea et al. 2007, Sarabia 2012).

- Parameter optimization 기술을 전산 시뮬레이션 예측 값과 현장 계측 값을 비교하는데 적용한다면, 공사 단계별로 변화하는 현장의 지반 물성 값을 추적해내는데 효율적으로 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 즉 현상을 지속적으로 관찰하고, 변화가 발견되면 그에 적응할 수 있게끔 시스템을 변경하는 방법인 적응형 관리(Adaptive management) 기법의 지반 공학 분야로의 응용이라고 할 수 있다.
- 최첨단 분야인 드론을 활용 하는 많은 응용분야가 생겨나고 있다. 군사, 물류, 유통, 방송 등 많은 분야에서 이미 활용되거나 활용성을 위한 응용 기술 개발이 이루어지고 있다. 토목 공학 분야에서는 넓은 현장의 모니터링에 관한 활용방안이 논의되고 있으나, 드론에 장착된 카메라를 통해 확보된 영상의 분석을 통해 데이터를 수집하는 방향으로 발달하고 있다.

2. 국내외 관련 기술 특허 동향

- 본 연구 과제는 기초 기술 연구 단계 또는 실험적 증명 단계이므로 특허와 직접적인 연관성을 가지는 실용 기술 개발 단계는 아니다. 그러나 드론을 이용한 계측 데이터 수집과 관련하여 특허 출원이 가능하리라 예상된다.
- 본 연구과제에서 특허의 대상으로 삼고 있는 핵심성과와 주요어인 “드론,” “센서”등을 사용하여 국내 특허 검색을 실시한 결과, 본 연구과제에서 제안하고 있는 내용과 유사한 내용의 특허는 검색되지 않았다.
- 해외 특허 검색을 위해 “Drone,” “Sensor”등을 사용하여 특허정보검색서비스를 통해 해외 특허 검색을 실시한 결과 1,759개의 특허가 검색되었다. 본 과제와 상관관계가 없는 특허를 배제하기 위해 “Music,” “Missile,” “Submarine,” “Game,” “Water,” “Audio,” “Ultrasound,” “Bio,” “Tree,” “Ion,” “Wing”등을 검색 배제 단어로 정하여 재검색 한 결과 34개의 특허가 검색되었으나, 본 과제와 유사한 특허는 검색되지 않았다.
- 국내와 해외 기술 특허 동향을 살펴보면, 드론 자체에 대한 항법, 제어, 영상 처리 등에 관한 기술들은 찾을 수 있었으나, 드론과 사물인터넷을 이용한 센서 데이터의 수집과 관련된 내용은 없었다.

3. 국내외 기술현황에서 차지하는 위치

- 스마트 폰과 같이 근거리 통신이 가능한 모듈을 드론에 탑재하여 계측기와의 근거리 통신을 통해 데이터를 수집하는 기술은 활발히 연구 및 기술개발이 진행된 적이 없다. 따라서 국내외 기술현황에서 차지하는 위치는 선도하는 위치에 해당한다.
- 지반 변형을 계측하고, 지반변형에 따라 변화하는 지반 물성값을 추적하는 연구는 국외에서 진행이 되었다. 적응형 지반변형 관리 차원에서 알고리즘을 만들고 구현하는 연구는 2010년 전후하여 국외 일부대학에서 진행이 되었던 바, 본 연구의 수준은 선진국과 동등하다고 할 수 있다.

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

1. 연구 수행 내용

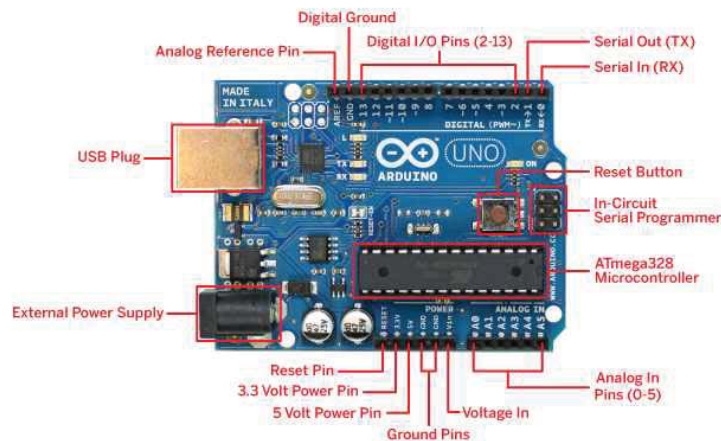
가. 드론 및 사물인터넷을 이용한 현장 데이터 수집 기술

- 드론이 계측 센서에 접근하여 근거리 통신을 이용하여 센서에 저장되어 있는 계측 데이터를 다운로드 받는 기술임.

(1) IOT를 이용한 계측 센서부 구성

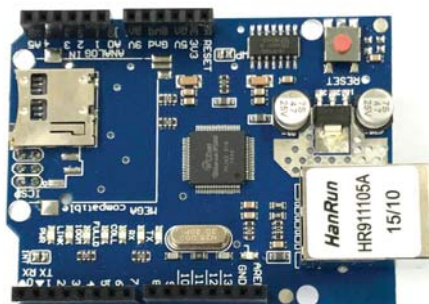
(가) 하드웨어 구성

- MCU: 센서의 데이터를 처리하는 Micro Controller Unit(MCU)는 아두이노(Arduino)중 우노(Uno) 모델을 사용하였다. 아두이노 우노의 디지털 입출력 핀, 아날로그 핀등에 관한 정보는 [그림 3.1] 과 같다.



[그림 3.1] 아두이노 우노의 보드 및 핀 구성

- 저장모듈: 아두이노에 저장기능을 부여하기 위해 쉘드를 사용하였다. 쉘드는 아두이노 보드에 연결하여 아두이노의 성능을 확장시키는 하드웨어로, 본 연구에서는 센서의 계측 데이터를 SD 메모리에 저장하는 것으로 구성하였다. 이를 위해 사용할 수 있는 쉘드는 SD 카드 쉘드 혹은 이더넷 쉘드를 사용할 수 있다. 이더넷 쉘드의 경우, 이더넷 기능과 함께 Micro-SD 소켓이 제공되어 추후 연구의 확장성을 고려하여 본 연구에서는 이더넷 쉘드를 사용하였다. [그림 3.2]는 이더넷 쉘드를 나타낸다.



[그림 3.2] 이더넷 쉘드

- 근거리 통신 모듈: 아두이노에 연결할 수 있는 근거리 통신 모듈로는 Zigbee, XBee, 블루투스(Bluetooth) 등이 있다. 본 연구에서는 데이터 수집자로 스마트폰을 활용할 것을 계획하였기 때문에, 스마트폰에서 기본적으로 제공하는 근거리 통신 모듈인 Bluetooth를 활용하기로 결정하였다. 블루투스 모듈로는 범용적으로 저렴하게 유통되는 HC-06 모델을 사용하였다. [그림 3.3]은 블루투스 모듈을 나타낸다.



[그림 3.3] 블루투스 모듈, HC-06

- 실시간 시계: 아두이노 우노가 가지고 있는 MCU도 시계가 내장이 되어있다. 그러나 아두이노의 전원이 꺼질 경우 시간정보가 초기화되기 때문에 MCU에 내장되어 있는 시계를 데이터의 계측 시점에 사용하기에는 한계가 있다. 따라서 별도의 실시간 시계(Real time clock, RTC)를 아두이노에 연결하고 RTC의 시간을 계측시간에 활용해야 한다. [그림 3.4]는 RTC 모듈을 나타낸다.



[그림 3.4] RTC 모듈

- 계측 센서: 본 연구에서는 MCU, 저장모듈, 근거리 통신 모듈 등을 연결하여 계측데이터를 저장하고 근거리 통신을 통해 통신을 하게 만드는데 그 목적이 있다. 본 연구에서 아두이노에 연결할 수 있는 센서 중 간단하게 값을 읽어 낼 수 있는 토양수분센서 YL-69를 사용하여 프로토타입을 구성하였다.
- [그림 3.5]는 아두이노 우노, 이더넷 쉘드, 블루투스 모듈, RTC, 계측 센서가 연결되어 있는 모습을 나타낸다. 전원은 스마트폰 보조 충전용을 사용되는 3.7 V, 5000 mAh 배터리를 사용하였다.



[그림 3.5] 아두이노를 이용하여 계측 시스템을
구성한 모습

(나) 하드웨어 펌웨어 구성

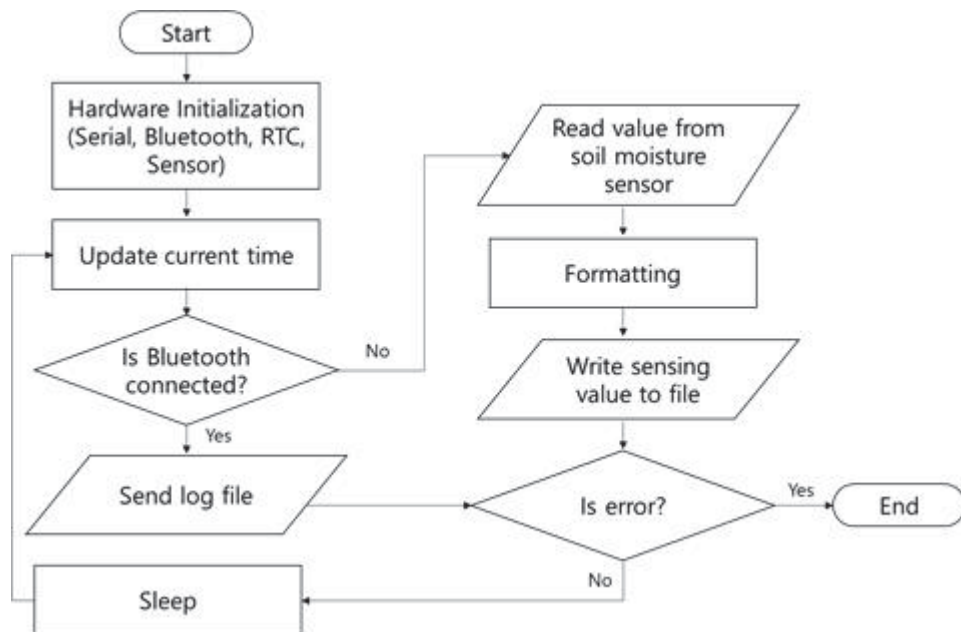
- 블루투스 모듈은 아두이노의 디지털 8번 9번 핀을 사용하였다. 8번 핀은 TX로 9번 핀은 RX로 세팅하였다. Serial통신으로 데이터 전송속도는 9600 bps로 세팅하였다.
- RTC의 경우 RST는 3번 핀, DAT는 4번 핀, CLK는 5번 핀으로 연결하였으며 GND는 6번 핀으로, VCC는 7번 핀으로 연결하였다.
- 저장 모듈에 datalog.txt가 생성되게끔 코딩하였으며, 해당 텍스트 파일이 한번에 한 개씩만 열리도록 세팅하였다. 블루투스 모듈이 활성화가 안 되면 계속해서 datalog.txt 파일에 계속 데이터 값의 저장이 이루어지고, 블루투스가 활성화 될 경우 계측을 멈추고 저장된 계측값을 블루투스를 통해 전송하는 것으로 펌웨어를 구성하였다. 다음은 펌웨어 코드를 나타내며, [그림 3.6] 동작 과정을 나타내는 흐름도이다.

```
#include <SoftwareSerial.h>
#include <SPL.h>
#include <SD.h>
#include <virtuabotixRTC.h>
SoftwareSerial BTSerial(9, 8);
File myFile;
// Real Time Clock Setting//
virtuabotixRTC myRTC(5, 4, 3); //CLK, DAT, RST
const int chipSelect = 4;
void setup() {

    Serial.begin(9600);
    BTSerial.begin(9600); // set the data rate for the BT
    port
    while (!Serial) {
        ; // wait for serial port to connect. Needed for native
        USB port only
    }
    // RTC Pin setting
    pinMode(7, OUTPUT); //Pinmode setting for VCC
    pinMode(6, OUTPUT); //Pinmode setting for GND
    myRTC.setDS1302Time(00, 12, 11, 4, 26, 6, 2017);
    Serial.print("Initializing SD card...");
    // see if the card is present and can be initialized:
    if (!SD.begin(chipSelect)) {
        Serial.println("Card failed, or not present");
        // don't do anything more:
        return;
    }
    Serial.println("card initialized.");
}

void loop() {
    //RTC
    digitalWrite(7, HIGH); //Set the pin 7 for VCC
    digitalWrite(6, LOW); //Set the pin 6 for GND
    int analogPin = 0;
    int sensor = analogRead(analogPin);
    float wc;
    wc = sensor;
    dataString = String(wc);
    File dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
    if (dataFile)
    {
        myRTC.updateTime();
        dataFile.print(myRTC.dayofmonth);
        dataFile.print("/");
        dataFile.print(myRTC.month);
        dataFile.print("/");
        dataFile.print(myRTC.year);
```

```
        dataFile.print(" ");
        dataFile.print(myRTC.hours);
        dataFile.print(":");
        dataFile.print(myRTC.minutes);
        dataFile.print(":");
        dataFile.print(myRTC.seconds);
        dataFile.print(" ");
        dataFile.println(dataString);
        dataFile.close();
        Serial.print(myRTC.dayofmonth);
        Serial.print("/");
        Serial.print(myRTC.month);
        Serial.print("/");
        Serial.print(myRTC.year);
        Serial.print(" ");
        Serial.print(myRTC.hours);
        Serial.print(":");
        Serial.print(myRTC.minutes);
        Serial.print(":");
        Serial.print(myRTC.seconds);
        Serial.print(" ");
        Serial.println(dataString);
    }
    else
    {
        Serial.println("error opening datalog.txt");
    }
    {
        //BT -> Data -> Serial
        if (BTSerial.available())
        {
            Serial.write(BTSerial.read());
            Serial.println(dataString+"1");
        }
        //Serial -> Data -> BT
        myFile = SD.open("datalog.txt");
        if (myFile)
        {
            while (myFile.available())
            {
                //dataString.toCharArray(datachar,64);
                BTSerial.write(myFile.read());
                Serial.println(dataString+"2");
            }
            myFile.close();
        }
    }
    delay(1000);
}
```

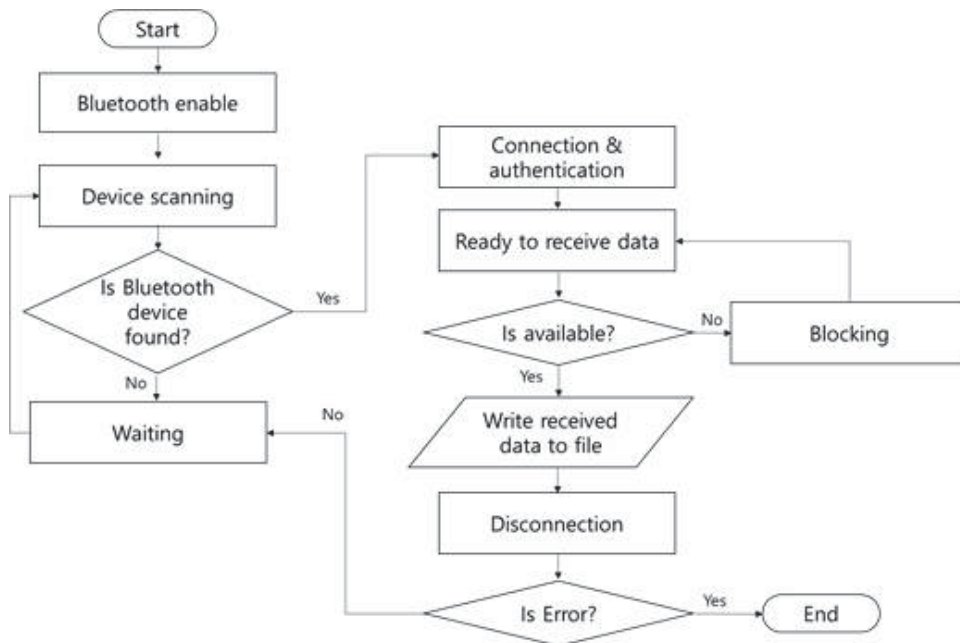


[그림 3.6] 계측 장치 동작 과정

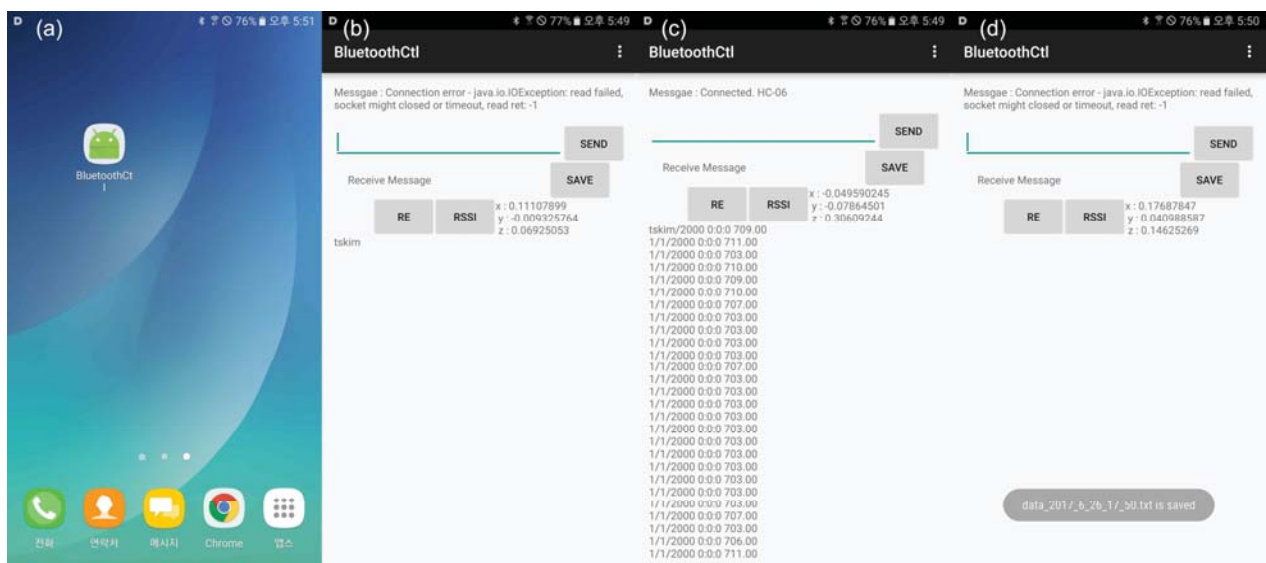
(2) 데이터 수집을 위한 드론탑재 스마트폰의 어플리케이션 개발

(가) 어플리케이션 구성

- 데이터 수집에 사용한 스마트폰은 안드로이드폰을 사용하였으며, 안드로이드 버전 6.0.1의 마쉬멜로우를 사용하였다. 스마트폰의 블루투스 모듈을 활성화하고, 센서부의 블루투스 모듈과 페어링(pairing)이 되면 데이터를 다운로드 받아 저장하는 것으로 어플리케이션을 구성하였다. [그림 3.7]은 데이터 수집자 동작 과정을 나타내는 흐름도이고, [그림 3.8]은 어플리케이션의 아이콘, 블루투스 페어링 전 상태, 블루투스 페어링 후 데이터 다운로드 모습, 다운로드 완료 후 저장되는 모습을 나타낸다.



[그림 3.7] 데이터 수집을 위한 스마트폰 동작 과정



[그림 3.8] 어플리케이션의 작동 모습; (a) 아이콘, (b) 블루투스 페어링 전 대기 상태, (c) 블루투스 페어링 후 센서부로부터 계측 데이터 다운로드 모습, (d) 다운로드 완료 후 저장

(나) 드론탑재

- 스마트폰을 드론에 손쉽게 이탈착하기 위하여 벨크로를 사용하였다. 벨크로의 부착력만으로도 스마트폰을 충분히 드론에 부착하고 드론이 비행할 수 있는 것을 확인하였으며, 센서부에 접근하였을 때, 자동으로 블루투스 페어링되어 데이터를 다운로드 받음을 확인하였다.



[그림 3.9] 스마트폰을 탑재한 드론의 비행 모습; 기체이외에 장치를 부착하고도 자세를 제어하며 비행할 수 있다.

(3) 효율적 드론 기반 데이터 수집 기법: 란데부 포인트 교체 기법

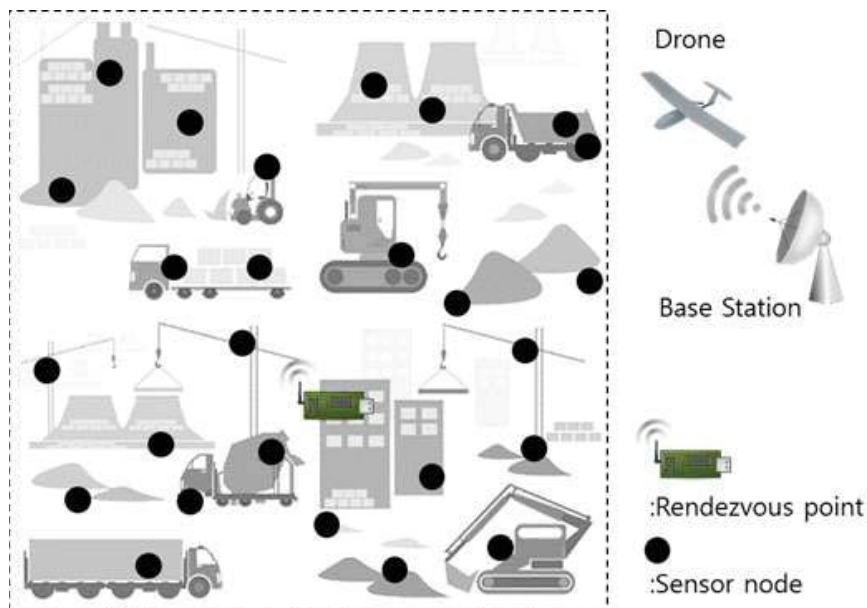
(가) 개요

- 일반적으로 수년간 진행되는 토목공사기간을 고려해 볼 때, 배터리로 구동되는 센서를 사용하는 경우 에너지 절약이 이슈가 된다. 드론이 모든 센서에 일일이 접근하여 근거리 통신을 통해 센서에서 데이터를 다운로드 받는 방식은 드론이나 센서 모두 에너지 절약 측면에서 바람직하지 않다. 또한 언제나 가변적이고 거친 공사현장의 상황을 고려해볼 때 드론이 활발하게 공사현장을 비행하는 것은 안전하지 않다.
- 공사현장에 설치된 여러 센서들 중 하나를 드론과의 란데부 포인트로 지정하고, 지정된 센서로 다른 센서들이 데이터를 전송하게끔 설정한다면, 드론은 란데부 포인트로 설정된 센서로만 접근하여 데이터를 다운로드받으면 된다. 이런 방식이 안전하며, 센서와 드론의 에너지 절약 측면에서 효율적일 수 있다.
- 그러나 란데부 포인트를 하나의 센서로만 고정하면 해당 센서의 배터리만 지속적으로 소모하게 되어 그 기능을 일찍 상실할 수 있으므로, 란데부 포인트를 효과적으로 교체해 줄 필요가 있다.

(나) 란데부 포인트 교체 기법

① 시스템 개요 및 란데부 포인트

- 드론이 임의의 경로를 통해 공사 현장을 방문하면서 데이터를 수집할 때 공사장 곳곳과 장비에 부착되어 흩어져 있는 센서들과 직접 통신하여 데이터를 수집하는 것은 불가능하다. [그림 3.10]에서와 같이 공사현장 전체 데이터를 수집하는 하나의 란데부 포인트를 선정한다. 란데부 포인트는 공사 현장 내의 여러 센서들로부터 데이터를 수집하여 병합하고 드론이 자신의 통신 반경 내에 들어오면 병합된 데이터를 드론에게 전송한다.



[그림 3.10] 드론을 통한 공사현장 데이터 수집 개요

- 드론을 활용한 데이터 수집에서 LEACH와 같이 확률에 따라 임의로 랑데부 포인트를 선정하거나, L-LEACH와 같이 사전 정의 가능한 변수를 반영하여 고정된 비행경로 상에서 랑데부 포인트를 선정하는 방법이 사용된다. 그러나 기존의 드론을 활용한 데이터 수집에서 랑데부 포인트 선정 방법들은 배터리 기반으로 동작하는 센서 노드들의 에너지 잔량을 고려하지 않기 때문에 랑데부 포인트의 과도한 에너지 소모를 유발하여 무선 센서 네트워크 전체의 수명을 단축시키는 문제를 유발한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 제안 기법은 에너지 잔량이 많고 드론과의 거리가 짧은 노드를 랑데부 포인트로 선정함으로써 무선 센서 네트워크의 수명과 드론의 비행 가능 거리를 증가시키고 배치된 센서 노드들의 추가적인 배터리 교체 없이 효율적으로 공사현장의 데이터를 수집할 수 있도록 해준다.

② 랑데부 포인트 교체 알고리즘

- 무선 센서 네트워크의 수명을 연장하기 위해서는 각 센서 노드들의 에너지 소모를 균등하게 유지하는 것이 중요하다. 랑데부 포인트는 일반 센서 노드들에 비해 에너지 소모가 크기 때문에 드론의 데이터 수집 주기마다 교체하는 것이 필요하다. 제안 기법에서는 랑데부 포인트 선정을 위해서 각 센서 노드가 다음 식과 같은 역치 값(Threshold value)과 0에서 1사이의 난수 값을 생성하고, 난수 값이 역치 값($T(n)$) 보다 작을 때만 새로운 랑데부 포인트로 선정 된다.

$$T(n) = \begin{cases} \frac{E_n^{cur}}{E_n^{avg}} \times \left[\frac{(1-\alpha)\rho}{1-\rho \times (r \bmod \frac{1}{\rho})} + \alpha \rho \times f(RSSI_n) \right], n \in R \\ 0, n \notin R \end{cases}$$

$$, \text{ where } f(RSSI_n) = \frac{R_{\max} - RSSI_n}{R_{\max} - R_{\min}}$$

- 역치 값은 크게 센서 노드의 에너지 잔량과 드론과의 거리를 반영하는 부분으로 나눌 수 있다. 에너지 잔량을 반영하는 부분은 전체 노드의 에너지 잔량 평균에 비해 해당 노드의 현재 남아있는 잔량을 비교한다. 해당 노드의 에너지 잔량이 전체 평균보다 높을 때는 랑데부 노드로 선정될 가능성이 높아지고 반대의 경우에는 선정 가능성이 낮아진다.
- 센서 노드와 드론 사이의 거리를 반영하는 부분은 Received Signal Strength Indication (RSSI) 측정을 통해 결정된다. 드론 진입 시 각 센서 노드에서 드론의 브로트캐스팅 메시지를 수신했을 때의 $RSSI(RSSI_n)$ 를 측정한다. 이렇게 측정된 RSSI는 드론과의 거리가 가까울 경우에는 최대 RSSI ($R_{\max}$)와 가까워져 랑데부 노드로 선정될 가능성이 높아지고 거리가 멀수록 최소 RSSI($R_{\min}$)와 가까워져 랑데부 노드로 선정될 가능성이 낮아진다.
- 제안된 기법의 경우 랑데부 포인트 선정과정에서 확률에 기반을 두고 있기 때문에 랑데부 포인트가 선정되지 않거나 두 개 이상의 랑데부 포인트가 동시에 선정될 가능성이 있다. 먼저 랑데부 포인트가 선정되지 않았을 때는 랑데부 포인트 교체가 발생하지 않고 기존의 랑데부 포인트가 연이어 데이터 수집과 드론으로의 데이터 전송을 수행한다.

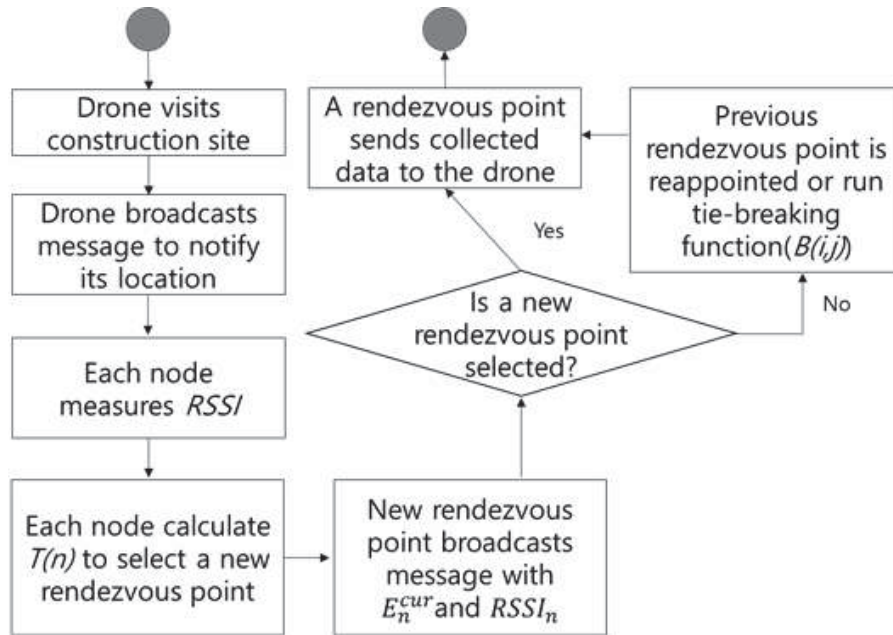
- 두 개 이상의 랑데부 포인트가 선정됐을 경우에는 다음 식과 같은 타이브레이킹(tie-breaking) 함수를 활용한다. 랑데부 포인트로 선정된 노드들은 자신의 선정 여부를 알리는 브로드캐스팅 메시지 전송 시 역치 값 계산에 사용된 자신의 현재 에너지 잔량과 RSSI를 포함하여 전송한다. 각 노드들이 두 개의 랑데부 포인트로부터 메시지를 전송 받으면 $B(i, j)$ 을 계산하고 값이 0.5 이상이면 i 노드를, 0.5 미만이면 j 노드를 랑데부 포인트로 선정한다.

$$B(i, j) = (1 - \alpha) \frac{E_i^{cur}}{E_i^{cur} + E_j^{cur}} \times \alpha \frac{RSSI_i}{RSSI_i + RSSI_j}$$

Notation	Description
$T(n)$	Threshold value of sensor node n
E_n^{cur}	Current energy level of node n
E_n^{ave}	Average residual energy of all nodes
ρ	Percentage of rendezvous points
α	Weight between residual energy and distance to the drone
r	The number of rounds
R	A set of rendezvous point candidates
$RSSI_n$	RSSI between the drone and node n
R_{max}	Maximum range of RSSI
R_{min}	Minimum range of RSSI

③ 드론을 활용한 데이터 수집 과정

- [그림 3.11]는 드론을 활용한 공사현장의 데이터 수집 과정을 보여준다. 드론은 데이터 수집을 위해 해당 사이트로 이동하고 자신의 도착 사실을 주변 노드에게 전송하면 센서 노드는 드론과의 거리를 측정하기 위해 통신 모듈의 RSSI 값을 측정한다. 드론이 해당 사이트에서 데이터 수집을 위해 머물기 직전에 랑데부 포인트 교체 작업이 진행된다. 이를 위해 해당 사이트의 각 노드들은 역치 값을 계산하고 새롭게 선정된 랑데부 포인트는 주변 노드들에게 자신의 주소, 현재 에너지 잔량(E_n^{cur}), 측정된 RSSI($RSSI_n$)를 포함한 메시지를 알리고 주변 노드들로부터 데이터를 수집한다. 만약 드론이 데이터를 수집하기 전까지 새로운 랑데부 포인트가 선정되지 않으면 기존의 랑데부 포인트가 연이어 데이터 수집 작업을 진행하며 두 개 이상의 랑데부 포인트가 선정되면 타이브레이킹 함수를 반복적으로 수행하며 하나의 랑데부 포인트를 결정한다. 드론은 랑데부 포인트로부터 해당 사이트의 데이터를 전송을 완료한 후에 BS으로 귀환한다.



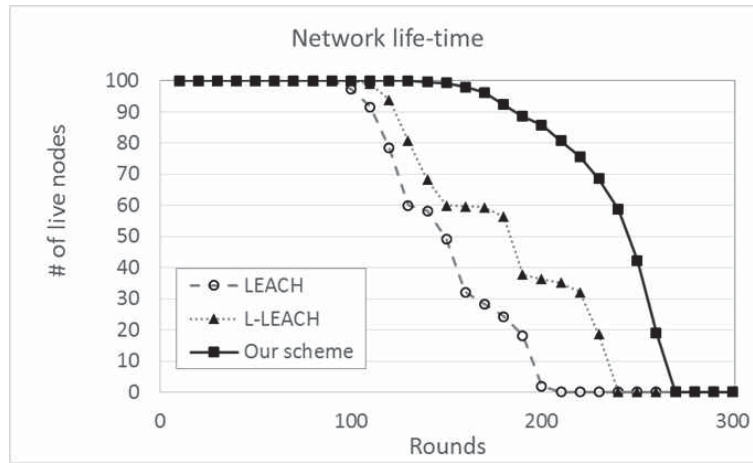
[그림 3.11] 드론을 이용한 공사현장의 계측 데이터 수집 과정

④ 시뮬레이션 결과 및 분석

- 본 연구에서 수행한 연구내용과 LEACH와 L-LEACH와 비교한 결과를 분석하였다. 시뮬레이션은 SIDnet-SWANS에서 진행하였으며, 입력변수는 다음과 같다.

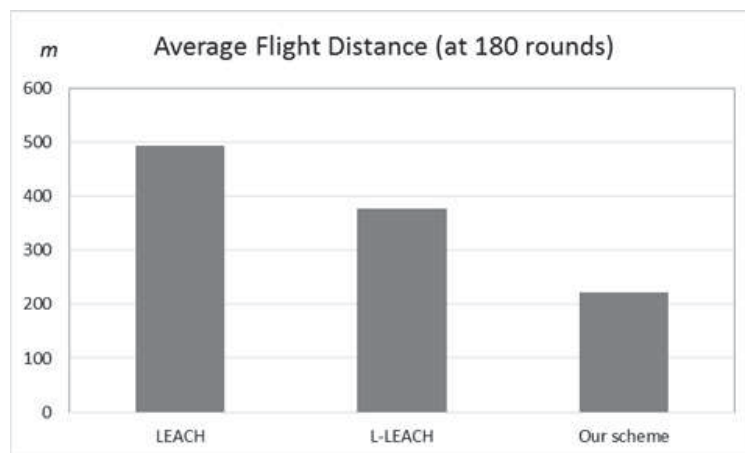
Configuration	Value
Field size	1km X 1km
Number of nodes	100
Communication range	150m
Initial energy	2J
Tx energy	50nJ/bit * d2
Rx energy	50nJ/bit
ρ	0.01
α	0.1
$R_{\max}/R_{\min}$	-40/-100dBm

- [그림 3.12]은 각 기법별 라운드에 따른 생존 노드의 수를 비교한 결과이다. LEACH의 경우 임의의 위치에 랑데부 포인트가 생성되기 때문에 일부 지역에 랑데부 포인트 선정이 집중되어 에너지 소모가 급증하는 문제가 발생하였다. L-LEACH의 경우에는 필드의 중앙 드론의 데이터 수집 위치로 가정하고 에너지 잔량과 거리를 고려하여 랑데부 포인트를 선정하기 때문에 LEACH와 같은 문제는 줄어들지만 필드의 중앙에 랑데부 포인트가 집중 되는 문제를 유발한다. 제안 기법에서는 에너지 잔량뿐만 아니라 동적인 드론의 위치까지 고려하여 랑데부 포인트를 선정하기 때문에 다른 기법들에 랑데부 포인트가 균등하게 분포하게 되고 네트워크 수명이 증가한다.



[그림 3.12] 네트워크 수명 비교

- [그림 3.13]은 무선 센서 네트워크가 유지(노드의 40%이상이 생존)되는 180라운드 동안 드론의 평균 비행 거리를 비교한 것이다. LEACH의 경우 드론의 위치를 반영하지 않기 때문에 매 라운드마다 드론의 비행 거리의 차이가 심하고 평균 비행 거리도 가장 길었다. L-LEACH의 경우는 드론이 필드의 중앙 부분을 방문하는 횟수가 많기 때문에 라운드별 변화폭은 크지 않다. 제안 기법의 경우 드론의 동적인 진입 위치 변화를 고려하기 때문에 드론과 가장 가까운 센서 노드가 랑데부 포인트로 선정되는 경우가 많아 평균에서도 가장 짧은 비행 거리를 보였다.



[그림 3.13] 드론의 평균 비행시간 비교

나. 지반 변형에 따라 변화된 지반 물성 값을 재산정하는 범용 알고리즘

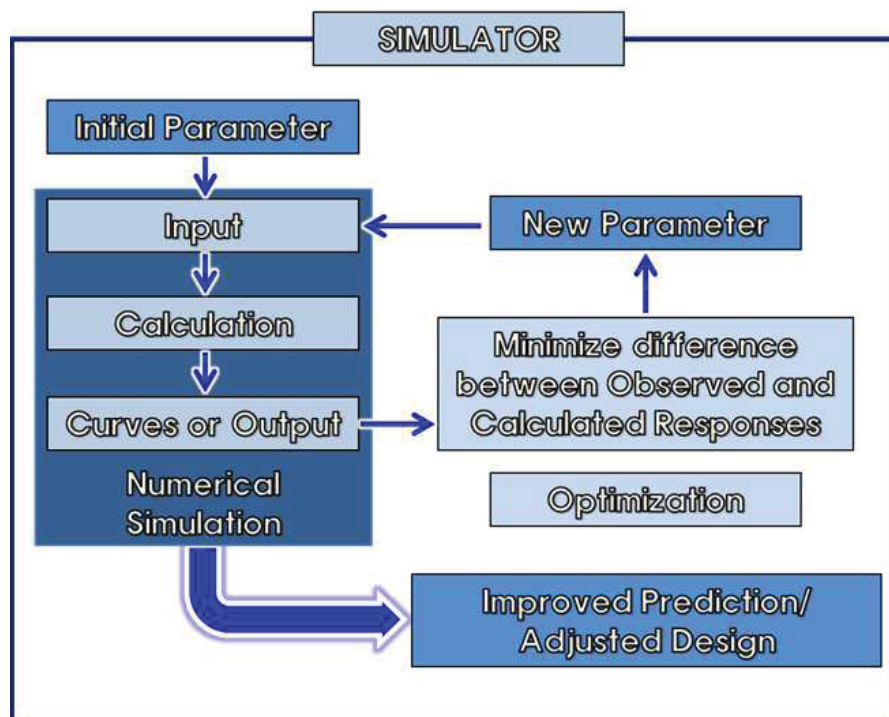
- 지반의 변형이 발생함에 따라 변화되는 물성 값을 계측된 지반 변형값을 기준으로 재해석하여 지반의 물성 값을 추적해냄.

(1) 개요

- 지반공학관련 프로젝트를 진행하기 위해서는 현장 및 실내 시험 등을 통해 지반의 물성 값을 평가해야 하며, 그 값에 따라 설계 및 시공이 진행된다. 설계 단계에서 일반적으로 사용하는 전산 해석에서 예측한 결과와 시공 중 현장에서 계측한 값과 비교해보면 일치하지 않는 경우가 많다. 이는 설계 단계에서 사용한 지반 물성 값이 공사 중 발생하는 다양한 사건들에 영향을 받아 그 값이 변하여 발생하는 것으로, 변화한 물성 값을 전산 해석에 반영해야 정확한 현장 예측이 가능하다.
- 적응형 관리 기술(Adaptive management technique)은 센서, IT, 전산해석 기술 등을 활용하여, 지반공학관련 프로젝트에서 발생하는 다양한 문제를 해결하는 도구를 의미한다. Peck (1969)이 제안한 “관측방법(Observation method)”을 기본 틀로 사용하여 적응형 관리 기술을 적용한다면, 지반공학관련 프로젝트의 설계 적정성을 시공현장과 비교하여 평가하는데 적절히 사용할 수 있다.
- 현대는 센서, IT, 전산해석 기술의 발달로 현장의 정보를 필요로 하는 곳에 빠르게 전달하고 해석 할 수 있는 환경이 구축되어 있다. 이런 환경에서 지반공학관련 문제에서 적응형 관리 기술을 사용하는데 있어서 핵심 요소는 현장 계측 사항을 정량적으로 설계에 반영할 수 있는 물성 값의 역해석이라 할 수 있다. 즉 초기 설계에 사용한 물성 값을 현장 상황에 맞추어 역계산하여 업데이트하는 것이 필요하다.
- 적응형 관리 기술은 다양한 용도로 사용이 가능하다. 지반 공학 관련 프로젝트중 도심지 굴착 현장의 경우, 굴착 현장 주변에 인접한 구조물이 많아 지반의 변형 관리가 중요하다. 지반의 변형 예측과 관계있는 물성 값 중 강성은 지반에서 발생하는 변형에 따라 변화하는 것으로 알려져 있다. 따라서 꾸준히 지반 강성 값을 업데이트해야할 필요성이 있다.
- 본 연구에서는 관측한 값을 바탕으로 물성 값을 재산정하는 알고리즘인 “적응형 관리 기법”의 핵심인 역해석을 통한 최적화를 구현하였다. Hardening Soil (HS)의 구성모델을 사용하였으며, 복합민감도(Composite Scaled Sensitivity, CSS)분석을 실시하여 CSS 값이 높은 입력변수를 최적화 대상으로 선정하였다. 시카고 연약 점성토를 대상을 실시한 삼축시험 결과 값을 관측 값(Observation)으로 사용하여 삼축시험 전산해석을 실시하였다. 또한 이 값을 정해(Reference)로 사용하여 가상의 굴착현장(Synthetic excavation)에 대해 역해석 알고리즘을 적용하여, 정해에 수렴하는지 확인하였다.

(2) 역해석 기법

- [그림 3.14]는 적응형 관리 기법의 핵심인 역해석 흐름도를 나타낸다. 설계 단계에서 평가한 초기 지반 물성 값을 사용하여 전산 해석을 수행하여 공사 중 지반의 거동을 분석한다. 전산 해석결과와 현장 모니터링 값을 비교하여 그 차이의 제곱을 목적함수(Object function)으로 설정하고 목적함수를 최소값으로 만드는 지반 물성 값을 새로운 물성 값으로 업데이트 한다. 전산 해석결과와 모니터링 값을 비교하는 대상은 현장의 특성에 맞게 선정할 수 있다. 예를 들어, 지반의 변형이 주요한 현장은 변형을 대상으로 선정할 수 있으며, 간극 수압이 주요한 현장은 간극수압을 그 대상으로 선정하여 목적함수를 설정할 수 있다.



[그림 3.14] 적응형 관리기법 흐름도: 역해석

- 구성 모델은 다양한 여러 입력 변수를 사용하며 입력변수 마다 목적함수에 미치는 영향이 다르다. 따라서 역해석을 수행할 때 여러 입력 변수에 대해 동시에 수행하면 효율이 떨어지며, 입력 변수 상호간의 간섭으로 인해 목적함수를 최소로 만들기 어렵다. 따라서, 여러 입력 변수 중 목적함수에 미치는 영향이 큰 변수를 선정하여 그 변수들에 대하여 역해석을 수행하는 것이 효율적이다. 이를 위해서 각 입력 변수에 대해 복합 민감도 분석(Composite Scaled Sensitivity)을 실시하였다. 입력변수 값의 1%를 자극 값(Perturbation)으로 사용하여 목적함수가 변하는 정도를 평가하여 CSS 값을 결정하였다.

(3) 삼축시험 전산해석

- 삼축시험에 대해서 PLAXIS 2D를 사용하여 유한 요소해석을 실시하였다. 구성 모델은 HS모델을 사용하였으며, 시카고 빙적 점성토에 대해서 비배수삼축압축시험 (Triaxial Compression, TC)과 인장시험(Reduced Triaxial Extension, RTE) 데이터 중 전단변형률(Shear strain, ε_{sh}), 축차 응력(Deviatoric stress, q), 과잉간극수압(Excess pore water pressure, u_e)을 관측 값으로 사용하였다.

(가) 복합민감도 분석

- HS 모델의 입력변수에 대해 다음 식을 이용하여 CSS 분석을 실시하였다.

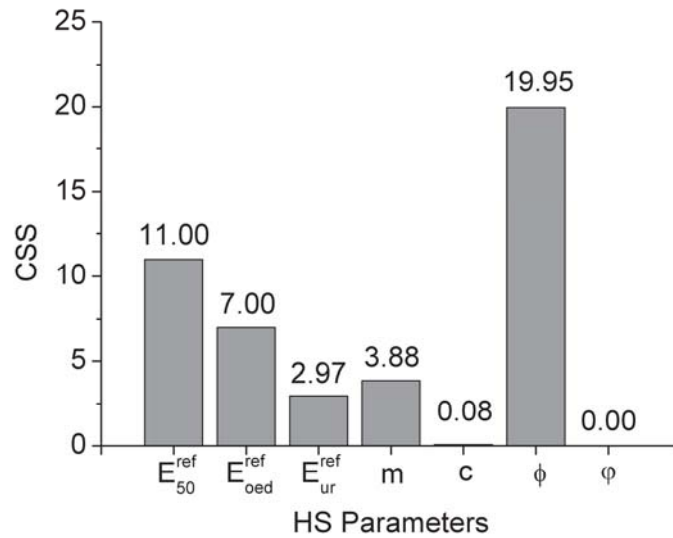
$$CSS_j = \left[\sum_{i=1}^{ND} \left(\left(\frac{\partial y_i'}{\partial b_j} \right) b_j w_{ii}^{1/2} \right)^2 \right]^{1/2} \Big|_b / ND$$

여기서, y_i' 는 i번째 계산 값, b_j 는 j번째 입력 변수, $\frac{\partial y_i'}{\partial b_j}$ 는 i번째 계산 값의 j번째 입력 변수에 대한 민감도, w_{ii} 는 i번째 관측 값의 가중치, ND는 관측 값의 개수를 각각 의미한다. HS 모델의 입력변수는 다음과 같다.

Parameters	Description	Units
E_{50}^{ref}	Plastic straining due to primary deviatoric loading	kN/m ²
E_{oed}^{ref}	Plastic straining due to primary compression	kN/m ²
E_{ur}^{ref}	Elastic loading/unloading	kN/m ²
m	Stress dependent stiffness according to a power law	-
c	Cohesion	kN/m ²
ϕ	Friction angle	°
ψ	Dilatancy angle	°

- E_{50}^{ref} 는 삼축시험 결과인 응력-변형률 곡선에서 강도의 50%에 해당하는 모빌라이제이션에서의 할렬강성(Secant modulus)에 해당되며, E_{ur}^{ref} 는 제하 및 재하를 통해 산정하는 Young's modulus 로 탄성거동을 모사하며, E_{oed}^{ref} 는 항복이후 소성부피변화를 모사하기 위해 사용하는 변수로 압밀시험으로부터 산정한다.

- [그림 3.15]에 나타난 바와 같이, 한계상태를 정의하는 마찰각 ϕ 의 CSS값이 가장 큰 것으로 나타났으며, E_{50}^{ref} , E_{oed}^{ref} , m , E_{ur}^{ref} 의 순으로 CSS가 큰 것으로 나타났다.



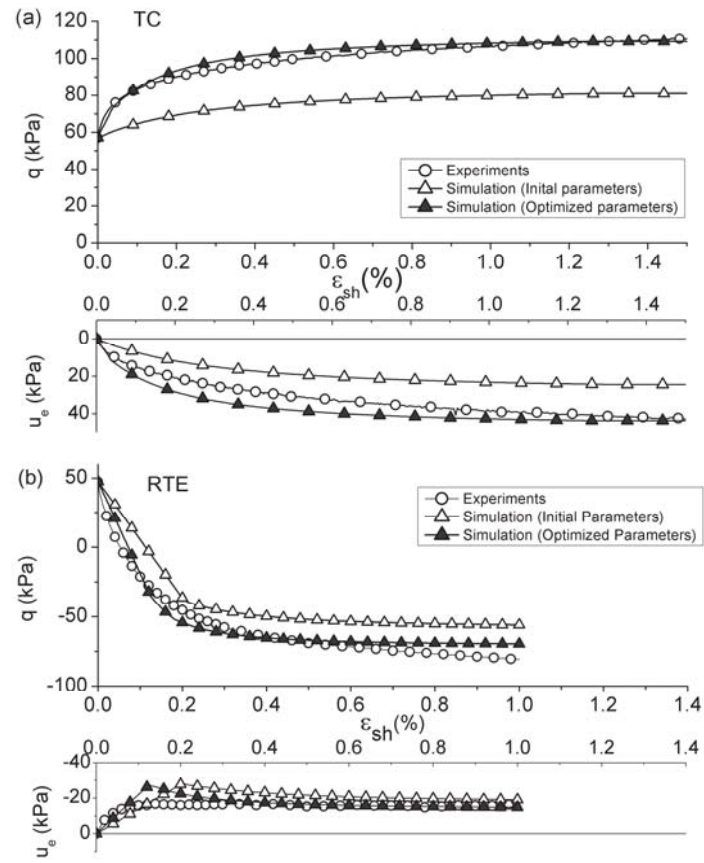
[그림 3.15] HS모델의 CSS

- 이 결과에 따라 삼축시험 결과를 이용한 입력변수의 최적화는 ϕ 와 E_{50}^{ref} 에 대하여 수행하였으며, E_{oed}^{ref} 와 E_{ur}^{ref} 는 E_{50}^{ref} 의 최적화 결과에 따라 종속적으로 변하게끔 설정하였다.

(나) 물성 값 변화 평가

- 역해석의 성능 검증을 위해 전산 해석에 사용한 초기 물성 값은 시험결과를 정확하게 묘사하지 못하는 값을 의도적으로 사용하였다. 역해석을 통한 입력변수의 최적화는 앞서 언급한 바와 같이 CSS값이 높은 입력변수인 ϕ 와 E_{50}^{ref} 를 대상으로 실시하였다.
- [그림 3.16]은 삼축시험 결과와 전산해석 결과를 나타낸다. 초기 물성 값을 사용하여 전산해석을 수행한 결과, 의도했던 바와 같이 시험결과를 정확하게 반영하지 못했다. 적용형 관리 기법의 핵심인 역해석을 통한 물성값의 최적화를 수행한 결과, 전산해석결과가 삼축시험 결과를 잘 묘사함을 확인할 수 있었다.

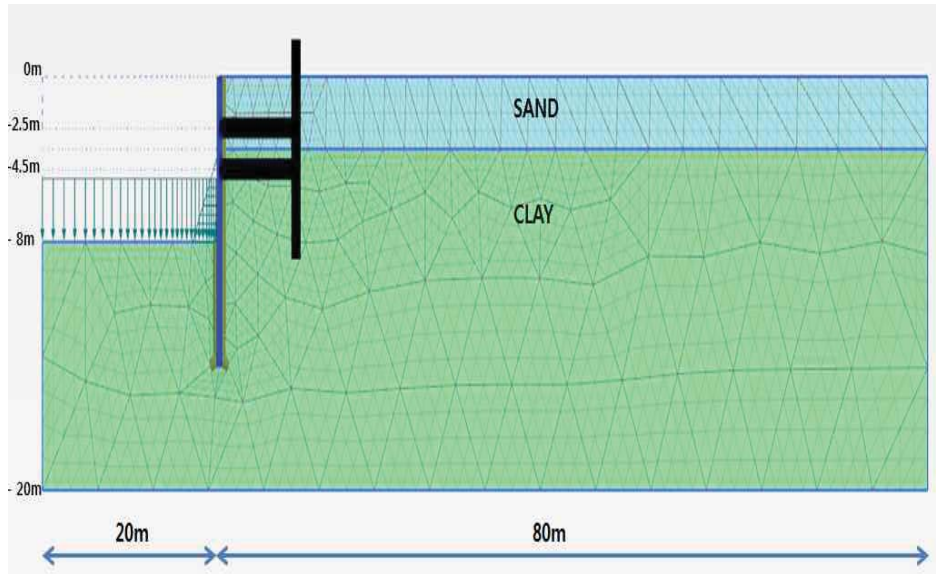
Parameters	Initial	Optimized
E_{50}^{ref}	5,000 kPa	7,877 kPa
E_{oed}^{ref}	3,500 kPa	5,514 kPa
E_{ur}^{ref}	15,000 kPa	23,631 kPa
m	0.5	0.5
c	0 kPa	0 kPa
ϕ	20°	28.8°
ψ	0°	0°



[그림 3.16] 삼축압축시험 전산해석 결과; (a) TC,
(b) RTE

(4) 가상의 굴착 현장 모사

- 깊은 굴착 현장에 대한 적응형 관리 기법의 적용성 평가를 위해 [그림 3.17]과 같이 가상의 굴착현장(Synthetic excavation site)을 설정하여 비배수 상태로 전산해석을 실시하였으며, 시공순서는 다음과 같다.



[그림 3.17] 유한요소해석 모델

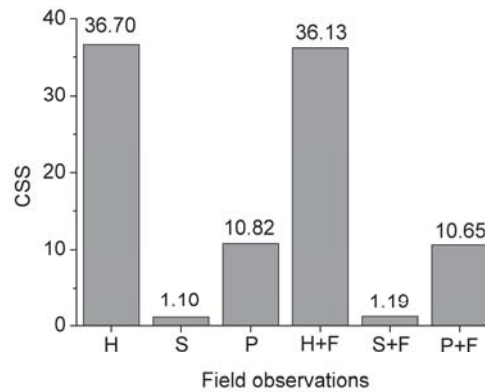
<시공 순서>

Stage No.	Activity
1	Sheet pile installation
2	Excavation up to - 2.5 m
3	Strut installation at - 2.5 m
4	Excavation up to - 4.5 m
5	Strut installation at - 4.5 m
6	Excavation up to - 8 m

- 삼축시험에서 최적화된 물성 값을 참값(Reference parameter)으로 간주하여 해석을 실시하여 그 결과를 정해로(Reference)로 사용하였다. 최적화에 사용한 물성 값은 CSS값이 높은 입력변수인 E_{50}^{ref} 를 사용하였다. ϕ 는 한계상태를 정의할 때 사용하는 입력변수로, 가상의 굴착 현장이 파괴에 이르지 않는다는 가정 하에 ϕ 를 배제하고 E_{50}^{ref} 만을 고려하여 역해석을 실시하였다. 전산 해석 결과를 살펴보면, 발생한 전단변형률의 범위는 0~0.3%로, 지반이 파괴에 이르지 않은 것을 확인할 수 있었다.
- “Sand”층에 대해서는 Mohr-Coulomb모형을 적용하였으며, $E=15,000$ kPa, $\phi=25^\circ$, $c=0$, $\nu=0.3$ 을 사용하였다. 본 연구에서는 “Sand”층의 역해석을 통한 입력변수 최적화는 실시하지 않았다.

(가) 복합 민감도 분석

- 가상의 굴착현장에서 측정 가능한 관측 값들에 대해서 민감도 분석을 실시하였다. 굴착 지지벽체의 수평변위(H), 배면지반의 침하(S), 간극수압(P), 버팀대힘(F)에 대해서 E_{50}^{ref} 값이 1% 변할 때 각각의 값이 변하는 정도를 정량적으로 분석하였다. 또한 H와 F, S와 F, P와 F의 조합에 대해서도 민감도 분석을 실시하였다. [그림 3.18] 각각의 관측 값에 대한 민감도를 나타낸다. E_{50}^{ref} 의 1% 변화에 대해 굴착 지지벽체의 수평변위(H)가 가장 민감한 것으로 나타났으므로, H를 관측 대상으로 정하였다.



[그림 3.18] 현장 관측 값의 CSS

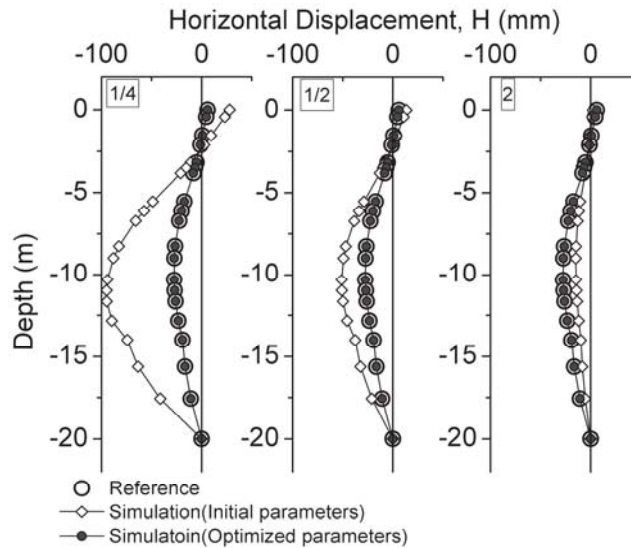
(나) 역해석 알고리즘 평가

- Reference parameter 의 E_{50}^{ref} 값과 다른 값을 초기 물성 값으로 입력하고 최적화 알고리즘을 이용한 최적화를 통해 입력 변수 값이 Reference parameter 값으로 수렴하는지에 대해서 조사하였다. Reference parameter E_{50}^{ref} 값의 “1/4,” “1/2,” “2” 배의 값을 초기 입력 값으로 사용하였으며, m, c, ϕ , ψ 에 대해서는 Reference parameter 값을 그대로 사용하였다.

<초기 입력 변수>

Parameters	1/4	1/2	2
E_{50}^{ref} (kPa)	1,969	3,938	1,5754
E_{oed}^{ref} (kPa)	1,378	2,757	11,028
E_{ur}^{ref} (kPa)	5,907	11,814	47,262
m	0.5	0.5	0.5
c (kPa)	0	0	0
ϕ (°)	28.8	28.8	28.8
ψ (°)	0	0	0

- [그림 3.19]에 보인바와 같이 각각의 초기 입력 변수들을 입력하여 전산 해석을 수행하였을 경우, 예상하는 바와 같이 Reference와 차이를 나타냈다. 입력변수 “1/4”의 경우가 Reference와의 차이가 가장 컸으며, 입력변수 “2”의 경우가 그 차이가 가장 작았다. 그러나, Fig. 6에 나타난 바와 같이 역해석을 통해 입력변수를 최적할 경우 초기 물성 값에 관계없이 벽체의 수평변위 H가 Reference값에 모두 수렴하는 것을 확인 할 수 있었다.



[그림 3.19] 전산해석 결과: 벽체의 수평변위

- 벽체의 수평변위 H가 역해석을 통해 Reference에 수렴하였을 때의 물성 값은 다음과 같다. 입력 물성 값들을 살펴보면 Reference로 사용한 삼축시험에서 Optimized 물성 값과 거의 유사함을 확인할 수 있다.

<최적화된 물성값>

Parameters	1/4	1/2	2
E_{50}^{ref} (kPa)	7,857	7,871	7,698
E_{oed}^{ref} (kPa)	5,500	5,510	5,389
E_{ur}^{ref} (kPa)	23,635	23,631	23,647
m	0.5	0.5	0.5
c (kPa)	0	0	0
ϕ (°)	28.8	28.8	28.8
ψ (°)	0	0	0

(5) 요약

- 본 연구에서 관측한 값을 바탕으로 물성 값을 재 산정해내는 알고리즘인 “적응형 관리 기법”의 핵심인 역해석을 통한 최적화를 구현하였다.
- 복합민감도(CSS) 분석을 통해 그 값이 큰 입력 변수를 선정하여 최적화시켰다.
- 삼축시험은 TC와 RTE에 대해 비배수상태로 전산해석을 실시하였다. 역해석을 통한 최적화 결과, 관측 값을 잘 모사할 수 있는 물성 값을 성공적으로 찾을 수 있었다.
- 가상의 굴착현장에서는 삼축시험으로부터 산정한 지반의 물성 값을 현장의 물성 값으로 간주하고, 이때의 굴착 지지벽체의 수평 변위를 관측 값으로 사용하였다. 다양한 초기 물성 값을 사용하여 전산해석을 수행하였고, 이 결과에 최적화 알고리즘을 적용하면 전산해석 결과가 현장 값으로 수렴하는지 평가하였다. 최적화 알고리즘을 적용한 결과, 현장 계측 값으로 전산해석 결과 값이 거의 동일하게 일치함을 확인할 수 있었다.

다. 지반 변형의 적응형 관리시스템을 위한 전산 시뮬레이터 구축

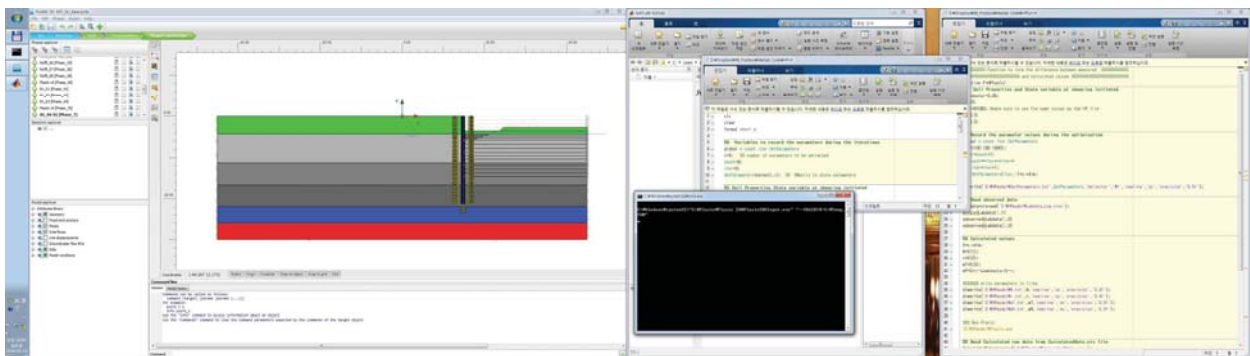
- 지반 변형에 따라 변화된 지반 물성 값을 재산정하는 범용 알고리즘을 탑재하고 시뮬레이션을 수행할 시뮬레이터를 구축함.

(1) 시뮬레이터 하드웨어

- Xeon 프로세서 CPU E5-2683 v3를 두 개 장착하여 총 물리 코어 개수 24개, 하이퍼스레딩을 이용한 코어개수 48개로 동시 연산처리에 적합하도록 구성하였다. 또한, 메모리는 서버용 ECC 128 GB를 장착하여 연산과정 중에 저장해야하는 dump memory를 충분히 감당할 수 있도록 하였다.

(2) 시뮬레이터 소프트웨어

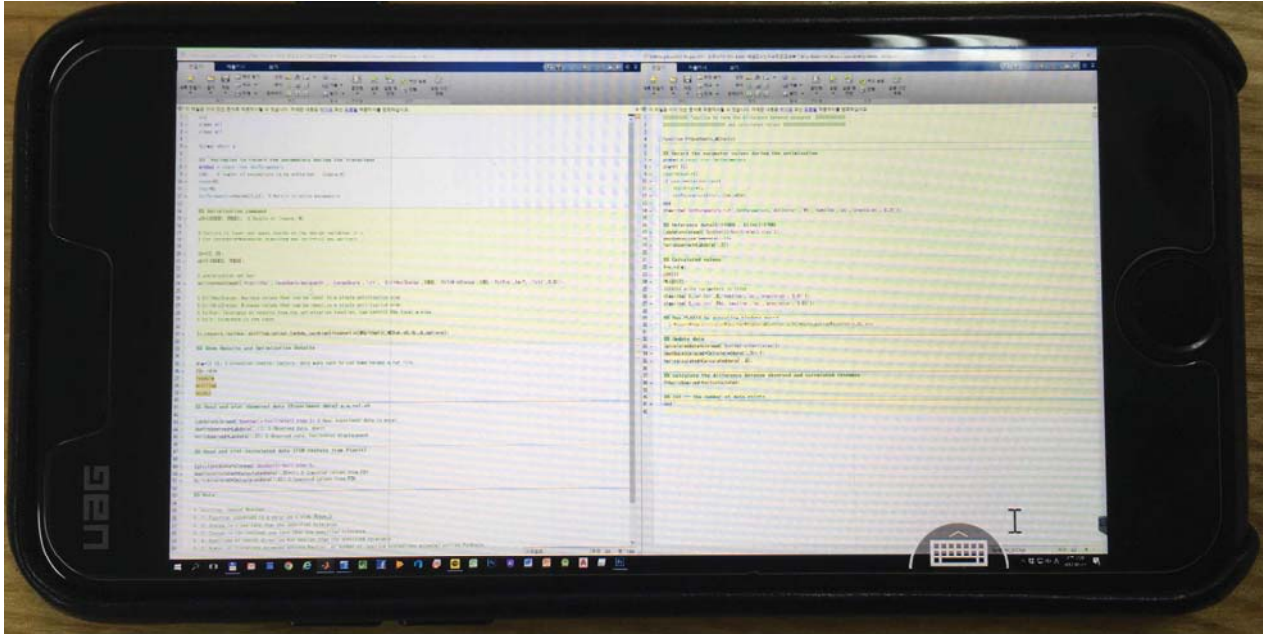
- 지반 변형의 적응형 관리시스템을 위한 전산 시뮬레이터의 핵심 연산부분인 유한요소 해석 프로그램은 PLAXIS 2D를 사용하였다.
- 최적화 알고리즘의 구현 및 시뮬레이션의 제어할 프로그램으로 MATLAB을 사용하였다. MATLAB을 이용하여 유한요소해석 프로그램의 결과 값을 불러들이고, Reference로 사용할 값과 비교하는 역할을 수행하였다. 최적화를 위해 Levenberg-Marquardt 알고리즘을 사용하였다.
- PLAXIS를 이용한 유한요소해석 수행 중, MATLAB의 연산결과를 입력해야하는 공정이 있다. 이 공정을 자동으로 수행하기 위해 자동화 프로그램인 Autohotkey를 사용하였고 이를 컴파일하여 작성한 실행파일로 시뮬레이션의 자동화를 구현하였다.



[그림 3.20] 시뮬레이터 구현 화면; 시뮬레이션을 제어 및 물성값 최적화는 MATLAB을 사용하였고, 유한요소해석 프로그램은 PLAXIS 2D를 사용하였으며, MATLAB의 연산값을 유한요소로 입력하는 task는 Autohotkey를 사용하여, Reference값에 수렴할 때까지 시뮬레이션이 자동으로 이루어지도록 함.

(3) 스마트 기기등을 활용한 정보처리 현황 상시 확인 및 제어 방안

- 시뮬레이터를 사무실이 아닌 현장에서 시뮬레이션 상황을 파악하거나, 시뮬레이션을 실행시킬 필요가 있을 때, 원격으로 시뮬레이터에 접속할 필요가 있다. [그림 3.21]은 스마트폰을 이용하여 시뮬레이터에 접속한 모습을 나타낸다.



[그림 3.21] 스마트폰을 이용하여 전산시뮬레이터 접속한 모습; 시뮬레이션을 구동시킬 수 있으며, 시뮬레이션의 상황을 확인할 수 있다.

2. 연구개발성과

가. 기술적 성과

- 본 연구를 통해 달성한 기술적 성과는 다음과 같다.

(1) 기술 개발 성과

- 드론이 계측 센서에 접근하여 근거리 통신을 이용하여 센서에 저장되어있는 계측 데이터 다운로드 받는 기술
- 스마트폰에 내장되어있는 근거리통신 모듈을 활용하여 계측기의 데이터를 다운로드 받을 수 있는 어플리케이션 개발
- 드론 및 센서의 배터리 절약을 위해 효율적인 데이터 수집 알고리즘 개발
- 지반의 변형이 발생함에 따라 변화되는 물성 값을 계측된 지반 변형값을 기준으로 재 해석하여 지반의 물성 값을 추적 알고리즘 작성 및 구현

(2) 연구 실적물

- 일반학술지게재: 4건
- 특허출원: 2건

나. 경제적 성과

- 본 연구는 TRL2 단계에 해당하는 “기초연구단계”와 TRL3 단계에 해당하는 “실험단계”에 해당하여 연구개발성과 중 경제적 성과는 없음.

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

가. 연구목표 I: 드론 및 사물인터넷을 이용한 현장 데이터 수집 기술

연구목표	구분	연구개발기간							진도(%)	
		1차년도				2차년도				
		1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4		4/4
현장데이터 수집을 위한 드론의 비행가능 시간 및 성능 조사									100	
통신 모듈의 탑재가 가능한 드론 구비									100	
드론에 탑재 가능한 스마트 기기, 저장 및 통신 모듈 구비									100	
사물인터넷을 이용한 현장 계측 데이터 저장 및 송신 방안 개발									100	
프로토타입 개발 및 성능 시험									100	

나. 연구목표 II: 지반 변형에 따라 변화된 지반 물성값을 재산정하는 범용 알고리즘

연구목표	구분	연구개발기간								진도(%)
		1차년도				2차년도				
		1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	
다양한 구성 모델에서 사용하는 변수 조사										100
지반 물성 값과 지반 변형의 상관관계 문헌 조사										100
알고리즘 검증을 위한 시험 데이터 입수										100
계측값과 예측값의 오차를 줄여나가는 방안 조사										100
알고리즘 구현을 위한 코딩										100
민감도 분석을 통한 지반의 변수 분석 기법 개발										100

다. 연구목표 III: 지반 변형의 적응형 관리시스템을 위한 전산 시뮬레이터 구축

연구목표	구분	연구개발기간								진도(%)
		1차년도				2차년도				
		1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	
지반공학 전산 시뮬레이션에 적합한 소프트웨어 구비									100	
스마트 기기등을 활용한 정보처리현황 상시 확인 및 제어 방안 연구									100	
전산 시뮬레이터를 위한 멀티코어 프로세서 전산장비 구축									100	
적응형 관리 시스템에 대한 모의 시험 실시									100	

2. 관련 분야 기여도

가. 연구목표 I: 드론 및 사물인터넷을 이용한 현장 데이터 수집 기술

- 기존 기술 수준: 드론을 이용하여 공사현장의 계측 센서의 값을 다운로드 받는 기존 기술 없음.
- 개발 기술 수준: XBee, ZigBee 또는 Bluetooth등의 근거리 통신 기술을 이용, 센서와 페어링을 통해 접근을 허가받은 드론이 계측 값을 전송 받음. 드론이 센서들을 돌아다니며 계측 값 수집함.
- 기여도: 일반적으로 많이 보급된 스마트폰을 데이터 수집 장치로 활용할 수 있도록 기술을 개발하여 현장 데이터의 수집을 용이하게 하였으며, 인력으로 수집하기 어려운 곳에 드론이 접근하도록 함으로써 데이터 수집의 안전성과 편의성을 높였다.

나. 연구목표 II: 지반 변형에 따라 변화된 지반 물성값을 재산정하는 범용 알고리즘

- 기존 기술 수준: 기존 기술의 경우 특정 구성모델들의 물리적 의미가 없거나 시험을 통해 찾기 힘든 변수들의 적절한 값을 찾기 위해 parameter optimization 수행.
- 개발 기술 수준: 다양한 구성 모델에서 사용되는 물성 값들 중 목적함수(objective function)에 따라 주요한 역할을 수행하는 물성값을 찾아냄. 다양한 물성 값 사이의 상관관계 분석을 실시하여 최적의 지반 물성 값의 조합을 찾아 냄.
- 기여도: 목적함수에 영향을 미칠 수 있는 다양한 입력변수들 중 그 효과가 큰 입력변수들을 찾아내고, 그런 입력변수들 사이의 상관관계를 분석하여 최적화의 효율을 높였다. 이를 통해 지반변형에 따라 변화하는 지반 물성값 추적에 효율성을 높였다.

다. 연구목표 III: 지반 변형의 적응형 관리시스템을 위한 전산 시뮬레이터 구축

- 기존 기술 수준: 현장의 데이터를 수집하여 보관하는 단순 데이터베이스 역할을 수행함. 수집된 데이터를 분석하여 공학적 의미를 찾아내고, 이를 바탕으로 전산 시뮬레이션을 수행하여 업데이트하는 기술은 없음.

-
- 개발 기술 수준: 드론으로부터 데이터를 전송받아 보관하는 데이터베이스 역할. 이를 바탕으로 연구목표Ⅱ의 알고리즘을 이용하여 전산 시뮬레이션을 실시하여 지반의 물성 값을 재산정 함. 재산정한 물성 값을 이용하여 지반의 변형을 재예측 함.
 - 기여도: 연구목표Ⅱ의 알고리즘을 구현하는 빠른 전산 시스템을 구축하여, 다음 공사단계의 지반 변위를 재예측하게 함으로써, 도심지와 같이 지반의 변형이 민감한 곳의 지반변형 관리에 기여함.
-

제5장. 연구개발성과의 활용계획

1. 추가연구의 필요성

- 일반적으로 드론에는 짐벌(Gimbal)과 함께 카메라가 탑재되어있다. 드론에 스마트폰을 탑재하여 데이터를 다운로드받고, 이 카메라를 활용하여 현장의 영상정보를 획득한다면 현장 유지관리 기술이 진일보 할 것으로 판단한다. 이와 관련한 추가의 응용 연구가 필요할 것으로 판단하며, 비탈면 유지관리 등에 적용하는 것이 적절할 것으로 판단한다.
- 본 연구에서 역해석을 통해 지반 물성값의 변화를 추적해내는 핵심 알고리즘은 Levenberg-Marquardt를 사용하였다. 최근들어 인공지능망 관련 알고리즘 및 컴퓨팅 파워의 발달로 지반의 물성값 추적에 적용할 만한 기술들이 개발되고 있다. 이 기술들을 물성값 추적에 적용하는 추가의 연구가 필요하다고 판단한다.

2. 타 연구에의 응용

- 본 연구에서는 많은 사람들에게 보급되어 있는 스마트폰과 4차 산업혁명 시대의 키워드인 드론을 활용하여 연구를 실시하였다. 스마트폰은 계측데이터 수집에 필요한 근거리 통신 모듈, 저장 모듈, 원거리 통신 모듈 등의 기술이 집약되어있다. 어플리케이션의 개발여하에 따라서 확장 가능성은 다양하다.
 - 본 연구에서는 스마트폰의 근거리 통신모듈인 블루투스를 활용하여 계측기의 데이터를 다운로드 받는 기술을 개발하였다. 드론에 스마트폰을 탑재하여 데이터를 수집하였으나, 드론을 사용하지 않아도 이 기술은 구현이 가능하여 핸드헬드(Handheld)형태로도 응용이 가능할 것으로 판단한다.
-

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

- 해외의 경우, 드론에 장착하는 장치들을 다양화하여 항공에서 지반의 정보를 계측하는 경우가 늘어나고 있다. 예를 들어, 드론에 Multispectrometer를 장착하여 가시광선 뿐 아니라, 다양한 파장의 빛에 대한 영상을 획득하여 분석한다.
 - 드론에 Gimbal에 장착된 카메라로 다양한 2차원 영상을 이용하여, 3차원 형상을 재구성하고 이를 토대로, 토공량의 변화 등을 추적하는데 활용한다.
 - 과거에는 인공지능 알고리즘을 작성하고, 인공지능을 학습시키는데 막강한 컴퓨팅 파워가 소요되었다. 그러나 근래 들어 Tensorflow와 같은 Deep learning 도구가 발달되고, GPGPU를 활용한 병렬계산 기법들이 발달하면서 토목공학분야의 인공지능 전공분야에 대한 진입장벽이 많이 낮아졌다. 이를 활용한다면, 지반 물성 값의 추적에 활용할 수 있을 것으로 판단한다.
-

제7장. 연구개발성과의 보안등급

해당사항 없음.

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

해당사항 없음.

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

1. 연구 실적

- 일반학술지 논문은 4편을 출판하였으며, 특허출원은 2건을 달성하였다.

2. 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	푸리에 기술자 분석을 이용한 단일 흡 입자의 형상 분석	홍익대 학교	교신 저자	한국지반 환경공학 회 논문집	-	2016.03.01	단독 사사	
2	논문	드론의 지반공학분야 활용을 위한 시스템 설계 및 구현	홍익대 학교	제1 저자	한국인터 넷방송통 신학회 논문집	-	2016.06.30	단독 사사	
3	논문	트랩도어 하강이 일어나는 모형 입자 입상체에서 광탄성 측정 기법을 이용한 흡 아치 구조의 변화 조사	홍익대 학교	교신 저자	한국지반 공학회 논문집	-	2016.10.01	단독 사사	
4	논문	공사현장에서 효율적인 드론 기반 데이터 수집을 위한 랑데부 포인트 교체 기법	홍익대 학교	제1 저자	한국인터 넷방송통 신학회 논문집	-	2017.02.28	단독사사	
5	특허 출원	드론 및 사물인터넷을 이용한 계측데이터 수집 시스템 및 그 방법	홍익대 학교	발명 자	대한민국	-	2015.10.27	단독사사	

제11장. 기타 사항

해당사항 없음.

제12장. 참고 문헌

1. 김태식, 정진만, 민홍 (2016), “드론의 지반공학분야 활용을 위한 시스템 설계 및 구현”, 한국인터넷방송통신학회 논문집, 제16권, 제3호, pp. 173-178.
2. 김태식, 정진만, 민홍 (2017), “공사현장에서 효율적인 드론 기반 데이터 수집을 위한 랑데부 포인트 교체 기법”, 한국인터넷방송통신학회 논문집, 제17권, 제1호, pp. 153-158.
3. 구본휘, 김태식 (2017), “적응형 관리 기법을 이용한 지반 물성 값의 평가”, 한국지반환경공학회 논문집, 제18권, 제2호, pp. 47-51.
4. 김태식, 정영훈 (2017), “조건부 합성 기법을 이용한 굴착 배면 침하량 분포의 정밀 산정”, 한국지반환경공학회 논문집, 제17권, 제8호, pp. 39-44.
5. Addenbrooke T.I., Potts D.M. and Puzrin A.M. (1997). "The influence of pre-failure soil stiffness on the numerical analysis of tunnel construction." *Geotechnique*, Vol. 47, No.3, pp. 693-712.
6. Atkinson, J.H. (2000). "Non-linear soil stiffness in routine design: 40th Rankine Lecture." *Geotechnique*, Vol. 50, No. 5, pp. 487-508.
7. Al-Tabbaa A, and Muir Wood D. (1989). "An experimentally based 'bubble' model for clay", In *Numerical Models in Geomechanics*, NUMOG 3, Pietruszczak S, Pande GN (eds). Elsevier Applied Science: London, pp 91-99.
8. Atkinson, J.H. and Sallfors, G. (1991). "Experimental determination of stress-strain-time characteristics in laboratory and in situ tests. Proceedings of the 10th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering", Florence, Vol. 3, pp 915-956.
9. Burland, J. B. (1989). "Ninth Laurits Bjerrum Memorial Lecture. 'Small is beautiful'. The stiffness of soils at small strains." *Can. Geotech. J.*, Vol. 26, No. 4, 499-516.
10. Clayton, C.R.I., and Heymann, G. (1999). "Stiffness of geomaterials from small strain triaxial and field geophysical tests. Proceedings of the Second International Symposium on Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials", Torino, Vol. 1, pp 65-71.
11. Finno, R. J. and Calvello, M. (2005), "Supported excavations: Observational method and inverse modeling", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, No. 7, pp. 826-836.
12. Finno, R. J., and Kim, T. (2011). "Effects of stress path rotation angle on small strain responses", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 138, No. 4, pp. 526-534.
13. Gasparre, A., Nishimura, S., Minh, N. A., Coop, M. R., and Jardine, R. J. (2007). "The stiffness of natural London Clay." *Geotechnique*, 57(1), pp. 33-47.
14. Hight, D.W., and Higgins, K.G. (1995). "An approach to the prediction of ground movements in engineering practice: Background and application." *Proceedings of First International Conference on Pre-Failure Deformation Characteristics of Geomaterials*, Sapporo, Vol. 2, pp. 909-945.
15. Jardine, R.J. (1992). "Some observations on the kinematic nature of soil stiffness", *Soils and Foundations*, 32(2), pp. 111-124.
16. Kim, T., and Finno, R.J. (2012). "Anisotropy evolution and irrecoverable deformation

-
- in triaxial stress probes”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(2), pp 155–165.
17. Kim, T., Han, J-T. and Cho, W. (2015), “Nonlinear stress-strain response of soft Chicago glacial clays”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 19, No. 4, pp. 1139–1149.
 18. Koo, B. H. (2017), “Evaluation of soil parameter using adaptive management algorithm”, Master thesis, Hongik University.
 19. Masin, D. (2005). “A hypoplastic constitutive model for clays. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*”, Vol. 29, No. 4, pp. 311–336.
 20. O. C. Ghica et al., (2008). “SIDnet-SWANS: a simulator and integrated development platform for sensor networks applications,” in *Proc.of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems*, pp. 385–386.
 21. Peck, R. B. (1969), “Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics”, *Géotechnique*, Vol. 19, No. 2, pp. 171–187.
 22. Puzrin, A. M., and Burland, J. B. (1998). “Non-linear model of small-strain behaviour of soils”, *Geotechnique*, 48(2), pp. 217–234.
 23. Smith, P.R., Jardine, R.J., and Hight, D.W. (1992). “Yielding of Bothkennar clay”, *Geotechnique*, Vol. 42, No. 2, pp. 257–274.
 24. Stallebrass, S. E., and Taylor, R.N. (1997). “The development and evaluation of a constitutive model for the prediction of ground movements in overconsolidated clay”, *Geotechnique*, Vol. 47, No. 2, pp. 235–253.
 25. Tatsuoka, F., and Shibuya, S. (1991). Deformation characteristics of soils and rocks from field and laboratory tests. *Proc. 9th Asian Regional Conf. on Soil. Mech. Found. Eng.*, Vol. 2, Bangkok, pp. 101–170.
 26. Whittle, A. J. , Hashash, Y. M. A. , and Whitman, R. V. (1993). Analysis of deep excavation in Boston. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 119, No. 1, pp. 69 - 90.
-

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

