

## 역해석을 이용한 가시설공사 현장관리 시스템 개발

## Development of Site Management System for Temporary Facility Construction Using Back Analysis

윤영만\*

Youngman Yun\*

Assistant Professor, Department of Civil Safety Engineering, Suwon Science College, Hwaseong, Republic of Korea

\*Corresponding author: Youngman Yun, gmy1025@ssc.ac.kr

## ABSTRACT

**Purpose:** The purpose of this study is to develop a system that enables quick on-site response using real-time decision-making by sharing the results of measurement and management performed in the field for safe temporary construction. **Method:** It is possible to take preemptive responses during construction by identifying the safety factors of construction conditions from measurement results and determining the risk factors such as soil properties and variability of climate change that can occur during construction by simultaneously using the back analysis method reflected in the measurement system and structural review. **Result:** we developed a back analysis algorithm of the SUNEX program to cope with the discrepancies between the design results and measured results due to inconsistency between site conditions and design properties, unexpected loads, and outdoor environment. The process of matching the measurement result with the analysis result can be confirmed in the safety management system. **Conclusion:** Gateway was used to communicate with real-time measurement results and safety management system program. It was made possible to preemptively respond to risk factors that may occur in the field.

**Keywords:** Real-time Decision-making, Soil properties, Climate change, SUNEX Program, Back Analysis Algorithm, Safety Management System, Gateway, Preemptive Response.

## 요약

**연구목적:** 본 연구에서는 안전한 가시설 공사를 위해서 현장에서 수행하고 있는 계측관리 결과를 현장 관리자와 구조검토자가 공유하여 실시간 의사결정을 이용한 빠른 현장대처가 가능한 시스템을 개발하고자 한다. **연구방법:** 계측시스템과 가시설 구조검토시 반영하는 역해석 기법을 동시에 이용하여 계측 결과로부터 시공상태의 안전성을 파악하고 공사중 발생할 수 있는 위험요인을 판단하여 시공중 선제적 대응할 수 있는 가시설 공사중 지반물성치 및 기후변화의 이변성에 대응하는 시스템을 도입하였다. **연구결과:** 현장여건과 설계 물성치의 불일치 및 예상치 못한 하중 및 외기환경으로 설계에서 예측한 설계결과와 계측결과와의 차이 발생에 대처할 수 있는 SUNEX 프로그램의 역해석 알고리즘을 개발하고 계측결과와 해석결과가 일치하는 과정을 확인하는 안전관리시스템을 개발하였다. **결론:** 실시간 계측결과 값을 수집하여 외부서버 및 안전관리 시스템 프로그램과 통신할 수 있는 게이트웨이를 제작하여 개발한 안전관리 시스템에서 실시간으로 해석결과 값과 비교가 가능하도록 하여 현장에서 발생할 수 있는 위험요인에 대한 선제적 대응이 가능하도록 하였다.

**핵심용어:** 실시간 의사결정, 지반물성치, 기후변화, SUNEX프로그램, 역해석 알고리즘, 안전관리시스템, 게이트웨이, 선제적 대응

Received | 31 August, 2019

Revised | 4 September, 2019

Accepted | 31 December, 2019

 OPEN ACCESS


This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in anymedium, provided the original work is properly cited.

© Society of Disaster Information All rights reserved.

## 서론

터파기 가시설 공사에서 경제적이고 안전한 공사를 위해서 계측관리를 수행하고 있지만 계측결과 획득 및 계측보고서를 작성 후에 현장관리자와 구조검토자가 결과 공유하여 안전성 확보에 대한 대처를 수행하는데 많은 시간이 소요되어 실시간 의사결정을 이용한 빠른 현장 대처가 어려운 실정이다.

현재의 가시설 공사현장은 관측법에 의한 계측데이터 관리를 기반으로 시공관리를 하고 있지만 태풍, 홍수와 같은 기상재해로 인해 급격하게 변하는 시공현장 위험요인들의 내재뿐만 아니라 현장여건과 상이한 설계 지반 물성치 반영이 실시간으로 이루어지지 못하는 안전관리로는 분명한 한계가 있어서 설계시 예측한 가시설의 변위 및 응력값과 상이한 계측결과가 도출되는 상황에서는 시공사가 현장에서 향후 터파기 단계에서 발생할 수 있는 계측결과 값을 빠르게 예측할 수 있는 시스템이 필요하다. 굴착이전에 결정된 토질 정수자료에 대해서 정확한 범위내에서 조정하는 역해석 알고리즘을 이용하면 시공계측값과 거의 유사한 해석결과 값을 얻을 수 있다.(Jang et al., 2002; Lee et al, 2006; Kim et al., 2013; Park, 2014)

계측시스템과 가시설 구조검토시 반영하는 역해석 기법을 동시에 이용하여 계측결과로부터 시공 상태의 안전성을 파악하고 공사중 발생할 수 있는 위험요인을 판단하여 공사중 지반물성치 및 기후변화의 이변성에 선제적 대응이 가능한 안전관리 시스템 개발을 하고자 한다.

개발하고자하는 범위는 가시설 설계에서 예상한 측면파일의 변위, 스트럿과 앵커에서 발생하는 하중, 지반침하등과 같은 해석 결과값과 시공 중 발생한 실시간 계측데이터를 근거로 하는 역해석 기법을 이용하여 안전성 검토 및 문제 해결하는 시스템이다. 가시설 현장의 일반적인 지반조건은 성토구간보다는 자연토 구간이기 때문에 같은 현장에서도 굴착 위치에 따라 물성치가 다르고 가시설 설계 시에 완벽한 지반조사를 이용한 방법이 불가능하므로 각 지반조건에 따른 평균치의 물성치를 이용하여 설계하고 공사중 지반의 거동을 계측 관리하여 대책을 수립하는 방법을 이용하므로 본 연구에서는 가시설 설계시 국내에서 범용으로 사용하는 SUNEX 프로그램을 이용하여 역해석시 고려해야할 매개변수에 대한 검증과 SUNEX 프로그램에 역해석 과정을 개선한 검토결과를 확인하는 과정을 포함한다.

## 이론적 배경

### 연구개발대상의 국내현황

굴착 가시설 설계단계에서 시공 시에 가시설 구조에 재하되는 토압과 가시설 구조에서 발생하는 변위 및 휨모멘트, 전단력 등의 결과값을 예측하는 여러 방법들이 개발되고 개선되어 왔다(Park, 2014). 개선된 설계방법에 의한 예측 결과값도 현장여건의 차이로 인해 현장시공 시에 위험을 초래하거나 비경제적인 과다설계가 되는 결과에 대해서는 불가항적인 상황이다. 현장조건이 정확히 반영하지 못한 지반 물성치를 근거로 시공 시에 가시설의 불안정성 및 과다시공을 방지하기 위해 공사 초기 단계의 계측 값을 설계에서 도출된 결과 값과 비교분석하여 설계에서 사용한 지반의 마찰각이나 지반반력계수와 같은 지반 물성치를 보정하고 향후 굴착단계에서 좀 더 신뢰성 있는 예측이 필요한 실정이다.

### 가시설 역해석 알고리즘

굴착 공사를 위한 설계에서 흙막이구조와 지반조건, 시공순서와 같은 설계변수를 입력하여 가시설의 변위 및 휨모멘트,

전단력, 지보공의 축력등과 같은 응답변수를 구하는 방법이 정해적이고 Fig. 1과 같이 시공 중에 계측한 응답변수가 설계단계에서 도출된 결과값과 상이할 경우 설계변수 값을 조정하여 응답변수와 계측결과가 일치하도록 설계변수를 구하는 과정이 역해석이다.

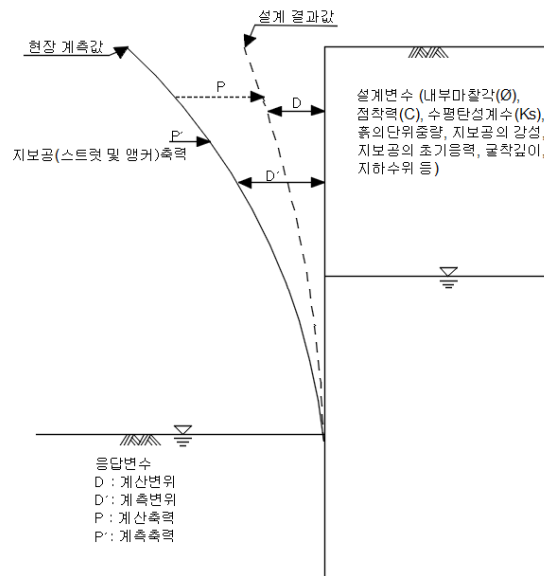


Fig. 1. Design response value and Measurement value during construction

역해석에서 도출된 응답 값과 시공 중의 계측 결과값의 차이가 최소가 되도록 하는 것이 역해석의 목적이고 이때 적용한 목적함수는 다음과 식 (1)과 같이 고려할 수 있다(Jang et al., 2002).

$$\text{목적함수} = \| \text{시공중 계측값} - \text{설계응답값} \| \tag{1}$$

### 시스템개발에서 고려한 역해석 설계변수

응답변수에 직접 관련된 설계변수 중에서 가시설 벽체나 지보공의 강성, 지하수위 등도 직접적으로 영향을 주지만 공사현장에서 알고 있는 고정 값이므로 역해석에서 고려하는 설계변수에서는 제외하고 SUNEX 프로그램에서는 흙의 마찰각( $\phi$ )과 지반반력계수( $k_s$ ), 지보공의 변형 등을 고려한다. (Kim, 2008; Park, 2014; Lee, 2016)

역해석의 설계변수로 고려한 마찰각( $\phi$ )과 흙의 점착력( $c$ )을 이용한 주동토압하중( $p_a$ )은 Rankine 토압이론 식 (2)와 같이 결정하고 주동토압계수는 식 (3)과 같다.

$$p_a = ka \times \gamma \times h - 2 \times c \sqrt{ka} \tag{2}$$

$$\text{여기서, } ka = \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right) \tag{3}$$

주동토압을 정하는 마찰각( $\phi$ )과 흙의 점착력( $c$ )의 조합은 다수 존재하므로 다음 식 (4)과 같이 흙의 점착력( $c$ )이 고려된 주동토압하중( $p_a$ )을 상재하중으로 나는 겉보기 주동토압계수( $ka'$ )를 역해석 과정에서 사용한다.(Terzaghi et al., 1967)

$$ka' = \frac{ka \times \gamma \times h - 2 \times c \sqrt{ka}}{\gamma \times h} = \frac{p_a}{\gamma \times h} \tag{4}$$

계측 결과 값과 거의 일치하는 가시설 계산 결과 값을 구하기 위해서는 반복적인 주동토압계수의 수정과정이 필요하지만 토압계수 범위를 미설정시에는 실제 현장여건에 부합되지 않은 결과가 도출될 수 있기 때문에 상·하한 값 고려가 필요하고 지반반력계수( $k_s$ , Ground reaction coefficient)는 일반적으로 응답변수에 큰 영향을 주지는 않지만 토압계수만으로 목적함수를 최소화 할 수 없는 현장여건일 경우에 지반반력계수를 조정함으로써 목적함수를 최소화하는 역해석 방법을 반영한다. 흙막이 벽체가 굴착방향으로 발생하면 지보공의 축력값이 증가하고 배면방향으로 이동하면 축력값이 감소하는 것과 같이 지보공의(Strut & Anchor) 축력 값은 흙막이 벽체의 변위와 비례하는 것이 원칙이지만 계측결과에서 지보공의 축력이 증가하지 않지만 흙막이 벽체변위가 증가하는 거동발생에 대해서는 역해석에서 지보공의 크리프 변형으로 가정하여 고려한다. 역해석에 반영하는 설계변수들에 대한 상·하한 값은 다음 Table 1과 같이 고려한다.

**Table 1.** Design Variables and Limits Values for Back Analysis

Design Variables for Back Analysis	Lower Limit	Initial Value	Upper Limit
Coefficient of Active Earth Pressure	0.01	Active Soil Pressure Coefficient for Surface	Static Coefficient of Earth Pressure
Coefficient of Passive Earth Pressure	1	1/ $ka$	Initial Value $\times$ 5
Ground Reaction Coefficient	Input Value $\times$ 0.3	Input Value	Input Value $\times$ 5
Creep of Supports	-50mm	0	+50mm

**안정적인 역해석을 위한 검토**

역해석 기법에는 여러 가지 방법이 있지만 시스템 개발을 위해 적용한 SUNEX 프로그램에서는 정해석과 역해석 라이브러리 모듈과 반복의 소통을 하면서 계측결과 값과 설계결과 값의 차이를 최소로 하는 설계변수를 찾아내는 직접법을 사용한다.

Fig. 2와 같이 SUNEX 프로그램의 정해석 과정에서는 설계변수의 초기값(X)과 상한값(Xu), 하한값(XL)을 역해석 모듈에서 이용하고 설계변수(X) 및 정보(Info)를 가져온 후 정해석을 수행한다. 정해석에 의해 도출된 계산결과 값과 계측결과 값의 차이인 목적함수(OBJ)가 Zero에 가까워지도록 반복 해석한다.

계측결과 값과 계산결과 값의 차이인 목적함수를 최소화 시키는 설계변수는 유일해(One Solution)가 아닌 다수의 해(Multiple Solution)가 도출되는 경우에 불필요한 반복해석을 방지하기 위해 식 (5)와 같은 수정된 목적함수(Modified Objective)를 고려한다.

$$\text{수정 목적함수} = \| \text{계측결과값} - \text{구조계산값} \| + \| \text{현재의 설계변수값} - \text{설계변수의 초기값} \| \times \text{계수} \tag{5}$$

Fig. 3의 역해석 모듈에서는 계측결과 값과 최적의 목적함수를 이용하여 계산한 변위를 동시에 나타내고 반복적인 역해석을 진행하면서 계측결과 값과 해석결과 값을 일치시키며, 설계변수중에서 주동토압계수, 수동토압계수, 지반반력계수 및 지보공의 크리프변형에 대한 하한값(XL)과 상한값(Xu), 최적의 값(X)을 나타낸다.

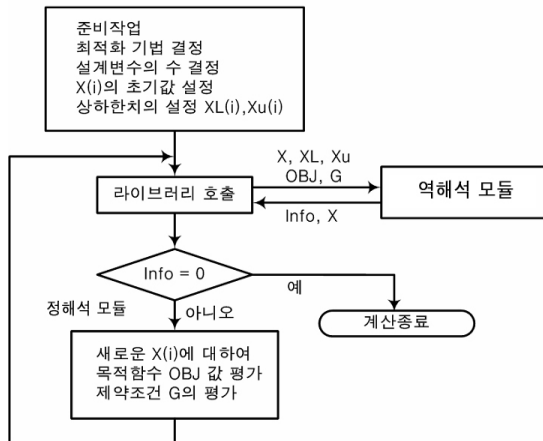


Fig. 2. Combining Forward and Back Library Modules of SUNEX Program

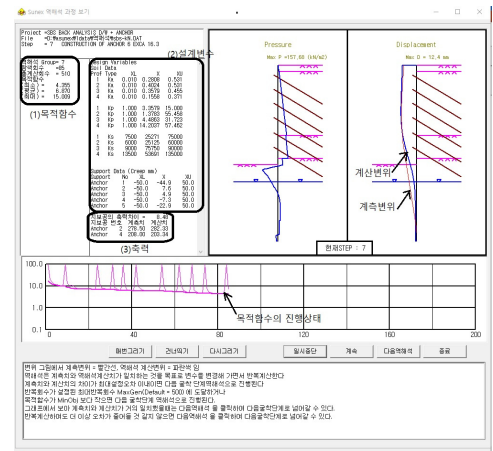


Fig. 3. Analysis by SUNEX Back Module

## 가시설 공사 현장관리 시스템 개발

### 시스템 개발범위

계측시스템과 가시설 역해석 프로그램을 결합하여 Table 2에서 제시한 대처방안과 같이 계측결과 값을 이용하여 시공 상태의 안정성을 확인함과 동시에 향후 추가 터파기공사의 안정성을 판단하여 현장에서 선제적 대응이 가능하도록 하며, 역해석을 이용한 현장관리 시스템은 기존 터파기 가시설 공사에서 시행하는 계측시스템과는 달리 실시간 계측데이터를 연동한 관측설계법과 역해석 기법을 포함하는 안전관리 프로그램이다.

Table 2. Reasonable Field Treatment according to Measurement Result

Construction Measurement Result case	Reasonable Field Treatment
Initial Measurement Result $\approx$ Design Respons	- Thorough Control of the Process Presented in the Design
Initial Measurement Result $<$ Design Respons	- Establishing Economic Construction Method using Back Analysis
Initial Measurement Result $<$ Design Respons (But Groundwater rise is expected)	- Thorough Control of the Process Presented in the Design - Establishment of Construction Method after Reviewing Reinforcement of Temporary Facilities - Overall Review of Construction Method
Initial Measurement Result $>$ Design Respons	- Review after Modifying the Ground Conditions that Converge to the Initial Measurement Results

### 안전관리 시스템 기능

개발한 가시설 안전관리 시스템의 실시간 모니터링을 나타내는 Fig 4에서는 시공현장에 설치한 계측기의 위치 및 계측결과 값을 보여줄 수 있으며 점선으로 표기한 내용은 다수의 센서(Sensor)를 갖는 지중경사계, 변형율계, 건물경사계를 나타낸다. 테스트베드 시행중인 OO 가시설 현장을 모니터링한 Fig 4에서는 지중경사계의 센서(Sensor)가 36개이므로 스크롤바(Scroll Bar)를 이용하여 모든 센서 값을 확인할 수 있으며 화면 상단의 프로그램기능 및 좌측의 최근분석과 센서리스트를 포함한다.

Fig 5에서는 SUNEX 프로그램을 이용하여 분석된 최근정보를 확인할 수 있고 토압 및 벽체변위, 전단력 휨모멘트를 포함하고 있으며 각 단면력에 대한 안전율을 동시에 표현한다.

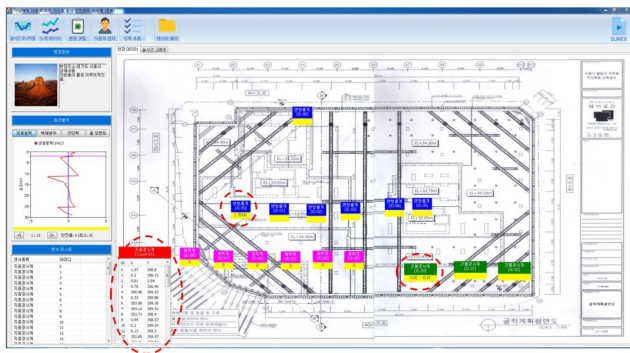


Fig. 4. Real Time Monitoring Screen



Fig. 5. Recent Analysis by SUNEX Program

실시간 센서별 모니터링은 Fig. 6과 같이 안전관리 시스템의 센서리스트(Sensor List)에서 센서를 선정하고 우측 모니터링에서 실시간그래프를 선택하게 되면 그래프로 확인가능하다. Fig. 7에서는 계측이력결과를 확인할 수 있고 계측시기 및 누적된 계측결과 값의 조회와 Export 기능을 이용한 엑셀파일 변환기능을 포함한다.

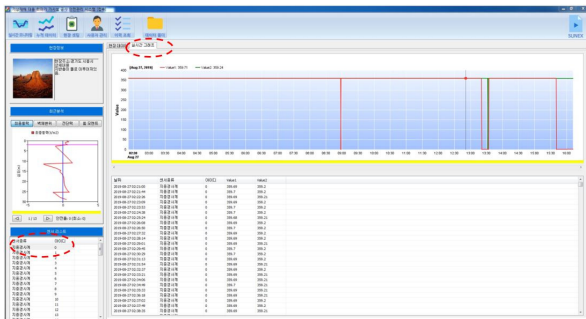


Fig. 6. Real Time Sensor Monitoring

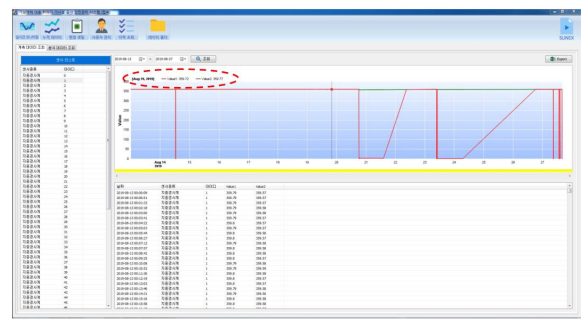


Fig. 7. Sensor Monitoring for the Past

Fig. 8과 Fig. 9의 분석데이터 조회에서는 SUNEX 프로그램의 역해석 모듈을 이용하여 분석된 정보를 수행시기별로 확인하는 기능이며 변위그래프에서는 계측결과 값과의 차이를 나타내는 목적함수 최소화 결과를 포함하도록 하였다.

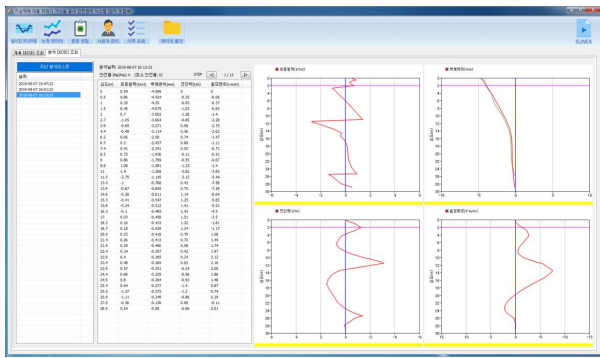


Fig. 8. Inquiry of Analysis Data

분석일자: 2019-08-07 16:13:33  
 안전율 (Mp/Ma): 0 (최소 안전율: 0)      STEP 1 / 13

심도(m)	최종활력(t/m <sup>2</sup> )	변위변위(mm)	전단력(t/m)	휨모멘트(t-m/m)
0	0.54	-4.599	0	0
0.5	0.86	-4.424	-0.35	-0.08
1	0.35	-4.25	-0.82	-0.37
1.5	0.45	-4.075	-1.02	-0.83
2	0.7	-3.902	-1.28	-1.4
2.7	-1.05	-3.664	-0.85	-2.28
3.9	-0.65	-3.271	0.08	-2.73
4.4	-0.49	-3.114	0.36	-2.62
6.2	0.06	-2.58	0.74	-1.47
6.7	0.2	-2.437	0.68	-1.11
7.4	0.41	-2.241	0.52	-0.71
8.5	0.72	-1.936	-0.11	-0.51
9	0.86	-1.799	-0.55	-0.67
9.8	1.08	-1.581	-1.33	-1.4
11	1.4	-1.268	-2.82	-3.85
11.5	-2.75	-1.145	-3.13	-5.44

Fig. 9. Back Analysis Results by SUNEX Program

### 시스템과 실시간 계측과의 연계기능

가시설 설계에서 예측하거나 반영하지 못한 위험요인에 대한 현장관리를 위해 개발한 안전관리 시스템은 Fig. 10과 같이 실시간 제어 모니터링이 가능한 데이터 로거(Data Logger)와 시공자에게 계측데이터 및 분석 자료를 실시간으로 공유할 수 기능을 포함한다. 데이터 로거는 가시설 공사에서 활용되는 위험요소들을 계측하여 안전관리 프로그램의 서버로 센싱 데이터를 전송하는 기능을 가지며 센서 한 종을 측정할 수 있는 전용 데이터로거와 다수의 센서들에게 동시 적용할 수 있는 공용 데이터로거로 구분한다.

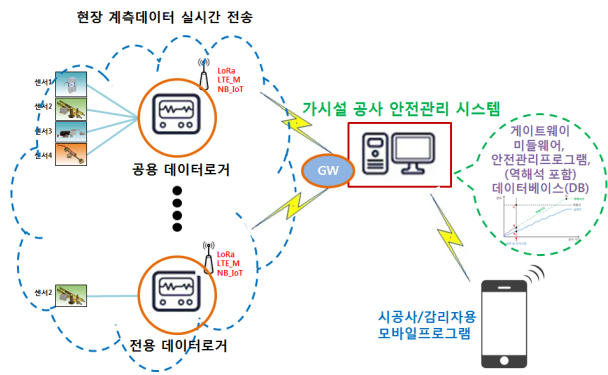


Fig. 10. Site Management System for Temporary Facility

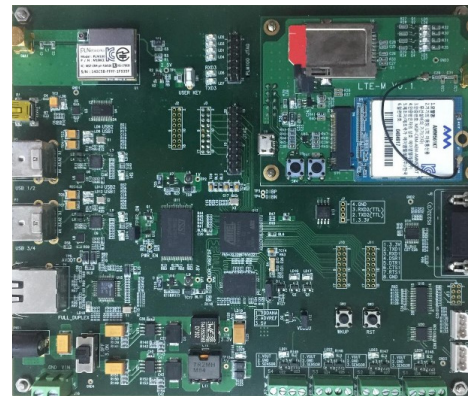


Fig. 11. Gateway Unit of LoRa, LTE-M

데이터 로거로부터 센싱데이터를 제공받아 실시간 현장 안전상태를 안전관리 시스템에서 확인하고 위험요소 및 지반 물 성치의 부정확성으로 인해 과다한 계측결과 발생시에는 시스템과 연동한 SUNEX 역해석 모듈을 이용하여 추후공정에 대한 위험성을 판단하는 기능이 개발한 시스템에 포함하고 있다.

실시간 계측결과 값을 수집하여 외부서버 및 안전관리 시스템 프로그램과 통신할 수 있는 게이트웨이는 Fig. 11과 같이 제작하였다.

## 결론

본 논문에서는 가시설 터파기 공사 중에 실시간 계측시스템과 역해석 모듈을 결합하여 계측결과로부터 실시간 안정성 파악 및 향후 굴착계획 및 지반물성치 변화에 따른 선제적 대응이 가능한 안전관리 시스템을 개발하였으며 정보화시공 현장관리시스템의 구축으로 설계 및 시공의 최적화가 가능할 것으로 판단된다.

- (1) 현장여건과 설계 물성치의 불일치 및 예상치 못한 하중 및 외기환경으로 설계에서 예측한 설계결과 값과 계측결과 값과의 차이가 발생 할 경우 SUNEX 프로그램에서 적용할 수 있는 역해석 알고리즘을 개발하고 역해석에 적용하는 설계 변수들에 대한 상·하한값의 기준을 제시하여 현장여건과 유사한 변위 형상도를 예측할 수 있다고 판단된다.
- (2) 실시간 수집한 계측결과 값을 외부서버 및 안전관리 시스템 프로그램과 통신할 수 있는 게이트웨이를 제작하고 안전관리 시스템에서 실시간으로 해석결과 값과 비교하여 선제적 재난대응이 가능할 수 있다고 판단된다.
- (3) 실시간 현장관리를 위하여 계측과 역해석 결과 값을 이용한 현장여건의 변화에 대한 선제적 대응설계를 포함하고 있는 가시설 안전관리 시스템을 개발하였고 현재 OO 가시설 현장에서 개발시스템을 이용한 테스트베드를 시행중이며 현장의 안정성 확보에 대한 개선 효과를 확인할 예정이다.

## Acknowledgment

본 연구는 중소기업벤처부와 한국산업기술진흥원의 “지역특화산업육성(R&D, P00005018)”사업의 ‘기상재해 대응터파기 가시설 공사 안전관리 시스템 개발’의 연구비지원을 받아 수행된 연구결과이며, 이에 감사드립니다.

## References

- [1] Jang, C.S. Kim, S.S. (2002). “Application of genetic Algorithm to the Back Analysis of the Underground Excavation System.” *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 2002, pp. 109-128.
- [2] Kim, G.-S. (2008). A Study on the Displacement Analysis of Surrounding Ground in Earth Retaining Excavation. Master. Dissertation, Chosun University, Korea.
- [3] Kim, Y.-J., Lee, Y.-J. (2013). “Development of a Back Analysis Program for Reasonable Derivation of Tunnel Design Parameters.” *Journal of the Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 15, No. 3, pp. 357-373.
- [4] Lee, K., Lee, S., Yoon, H. (2006). “A Verification for Determination of Soil Properties Using Field Measurement and Back Analysis.” *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 7, No. 5, pp. 5-11.
- [5] Lee, M.-H. (2016). Effect of Berm on the Displacement Behavior of Temporary Earth Retaining Wall During Excavation. Ph.D. Dissertation, Korea Maritime & Ocean University, Korea.
- [6] Park, H.-J. (2014). “A Study on the Displacement Prediction Method using the Inverse Analysis Algorithm.” *Journal of The Korea Institute of Information and Communication Engineering*, Vol. 18, No. 4, pp. 920-926.
- [7] Park, K.-H. (2014). Estimation of Horizontal Subgrade Reaction Modulus for Earth Retaining Wall. Ph.D. Dissertation, University of Seoul. Korea.
- [8] Terzaghi, K., Peck, R.B. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley and Sons, New York, US.