

논문 2022-59-1-16

선형 회귀 알고리즘을 활용한 지진 재난 상황에서의 건물 안전 위험도 추정 방법

(Estimation of Building Safety Risk in Earthquake Calamity Situation
using Linear Regression Algorithm)

황 도 경*, 김 다 현*, 김 동 주*

(Dokyung Hwang, Dahyun Kim, and Dongju Kim[©])

요 약

본 논문에서는 지진 재난 상황에서 건물 안전 위험도를 추정하기 위한 선형 회귀를 이용한 새로운 방법을 제안한다. 제안한 방법은 지진으로 인해 발생할 수 있는 건물 위험 요인 중에서 지반 침하로 인한 건물 위험과 건물의 기울어짐 상태를 추정하는 것에 대해 집중되고 두 가지 상태에 대한 추정값을 활용하여 최종적으로 건물 안전 위험도를 산출한다. 건물 위험도를 추정하기 위한 기존의 통상적인 방식은 건물 붕괴의 주된 전조 증상으로(기울어짐·침하) 건물이 떨어지는 정도의 세기 혹은 지하학적으로 해석한 건물의 고유 높이 정보를 기반으로 위험도 상태를 추정한다. 본 논문에서는 종래의 수동적인 위험도 해석 방법을 개선하기 위해 선형 회귀 기반의 자동 위험도 산출 알고리즘을 제안하였으며, 회귀 알고리즘의 결과 도출을 위해 자이로 센서와 GNSS 센서 모듈을 부착한 모의 거동 장치를 구축하여 데이터를 획득하였다. 그리고 획득된 비선형 데이터를 일정한 주기로 샘플링하여 선형화 시킨 뒤, 회귀를 통한 건물의 상태정보를 추정한다. 추정된 결과는 실제 모의 관측값과 비교 실험을 통해 신뢰성 검증이 수행되었으며, 추정 값을 활용하여 대한민국 국토교통부 고시기준에 준거하여 최종적으로 해당 건물의 위험도를 판단하게 된다.

Abstract

This paper proposes a novel method using linear regression to estimate building safety risk in earthquake calamity situations. The proposed method focused on evaluating the building risk due to ground subsidence and the tilting state of the building among the building risk factors that may occur due to an earthquake. Finally, it calculates the building safety risk by using the estimates for the two states. The conventional method for estimating the risk of a building based on the intensity of the shaking degree as the main symptom of building collapse (inclination and settlement) or the inherent height of the building is analyzed geometrically to estimate the risk state. This paper proposes an automatic risk calculation algorithm based on linear regression to improve the conventional manual risk calculation method. And, to derive the results of the regression algorithm, data are acquired by building a simulation device with a gyro sensor and a GNSS (Global Navigation Satellite System) sensor module attached. Then, the obtained non-linear data are sampled at regular intervals, linearized, and then the state information of the building is estimated through regression. A tested the calculated results for reliability through comparison experiments with actual simulated observations. The risk level is finally determined based on the standards announced by the Ministry of Land, Infrastructure, and Transport of the Republic of Korea using the estimated values.

Keywords : Building safety risk, Linear regression, Automatic calculation of building safety risk, Machine learning, Building safety simulator

*비회원, 포항공과대학교 인공지능연구원 연구부(Research Division, POSTECH Institute of Artificial Intelligence)

[©] Corresponding Author(E-mail: kkb0320@postech.ac.kr)

※ 본 과제는 행정안전부 지역맞춤형 재난안전 연구개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구이며(20015427), 과학기술 정보통신부 과학기술기반 지역수요맞춤형 R&D지원 사업으로부터 지원받아 수행되었습니다(CN20120GB001).

Received ; October 22, 2021

Revised ; October 29, 2021

Accepted ; November 9, 2021

I. 서론

현대 건축물에서 고층 건물 비중이 높아짐에 따라 지반 침하 혹은 건물의 기울어짐으로 인한 건물 붕괴 위험 안전도의 중요성은 점증되고 있으며, 시설물에 대한 위험도 평가 체계 또한 고도화되고 있다^[1, 2]. 아울러 최근 국내 경주(2016)·포항(2017)에서 발생한 규모 5.4이상의 지진으로 인해 지진 재난 상황에서 건물 침하 및 기울어짐으로 인한 붕괴 위험도는 더욱 부각되고 있다^[3, 4]. 포항 지진의 경우, 재난 직후 지진으로 인한 지반 액상화 현상을 관찰하였으며 이로 인해 건물이 기울어지는 사례가 빈번히 발생하고 있는 상황에서 건물 위험 안정성에 대해 신속하고 효율적인 평가 방안이 필요한 상황이다. 수치적 예시로 포항 지진 당시 56,622건의 사유 시설과 417건의 공공시설물이 손상되었고, 경주 지진의 경우 총 4,996건의 사유 시설과 182건의 공공 시설물이 손상되었다^[6, 7]. 이에 따라 건축물 붕괴 상황에서 피해를 최소화하기 위한 방안으로 건물 손상을 사전에 파악하여 사고에 대비하는 방식으로 대처되어 왔다. 침하로 인한 붕괴 예방의 경우 침하 특성에 대한 분석, 지반 공사 상황에서의 침하 위험도 분석, 건물 안정성 평가를 위한 신뢰성 분석에 대한 연구가 주를 이루었다^[8~11]. 실제로 건물이 붕괴되기 전, 전조 증상은 수개월 전에 발현한다고 하여 실시간성으로 관측이 될 필요성은 없으나^[5], 포항·경주 지진과 같이 재난 상황에서의 종래의 특성 분석 방식은 인적 자원의 제한점을 가진다. 건물의 기울어짐에 대해서는 관측 장비를 활용하여 건축물 전문가의 기하학적 해석을 하는 방식 혹은 센서를 설치하여 기울기를 예측하는 방식, 그리고 대상 건물의 이미지 촬영 후, 영상 처리 기법을 활용하여 기울기를 실측하는 방식이 있다^[6, 12~14]. 관측 장비를 활용한 기하학적 해석과 영상 처리 기법의 활용 방안은 건물을 촬영하는데 시간적·인적 자원과 추가적으로 전문가의 소견에 의한 해석이 필요함에 따라 침하 특성 분석과 같이 실효성이 떨어진다는 제한점을 가진다. 반면 센서를 활용한 기울기 특성 분석의 경우 해석을 위해 선제적으로 투입되어야 하는 자원이 없다는 점에서 관리가 용이한 장점을 가지고 있으나, 실제 지진이 발생하거나 기울어지는 건물에 대한 센서 값의 선택이 없다는 점에서 데이터 특성 분석에 대한 제한됨에 따라 분석 결과에 대해 신뢰성이 부족하다는 단점을 가진다.

본 논문에서 제안하는 건물 안전도 위험 분석 방법은 침하 특성에 대응하기 위한 GNSS 센서 (GNSS :

Global Navigation Satellite System)와 기울기 특성에 대응하기 위한 자이로 센서 모듈을 활용함으로써 관리의 용이성과 모의 거동 발생 장치를 활용한 수직, 수평 변위 데이터를 구축하고 각각의 상황에 대해 회귀적인 해석을 통해 신뢰성을 확보하였다. 아울러 센싱된 비선형 데이터의 선형적 해석을 통한 방법론의 제안과 일반·진행성·급격 3가지 단계의 침하·기울어짐 위험도 분석을 통해 지진 재난 상황에 국한된 것이 아닌 일반적인 상황에서의 건물 안전 위험성 평가에 적용될 수 있는 범용성 또한 가지고 있다.

II. 관련 연구

1. 침하 특성 분석 및 감지 시스템

건물 안전 위험성 평가에 요인을 줄 수 있는 침하는 크게 지반 침하, 건물 침하로 구분 짓는 것이 통상적이거나 본 논문에서는 건물 침하에 대한 내용을 다루기로 한다. 건물 침하의 경우 건물 내부 인명 피해뿐만 아닌 건축물 구조에 따라서 연관 건축물 파괴를 초래할 수 있다^[21]. 더불어 지진 재난 상황 시(규모 2.0 이상) 건물 침하에 대한 발생 추이는 2015년 평균이 31.8회에 비해, 2016년 이후 평균 169.5회로 약 5.33배 이상 증가하였다^[15]. 일반적으로 지진 재난 상황에서 건물 침하는 세 가지 상황(균등, 전도, 부동)으로 구분하고 있으나, 제안된 방법은 지진 재난 상황에 국한되지 않고, 일반적인 상황에서의 사용을 고려하여 일반(침하가 발생하지 않은 상태), 진행성(침하가 점차 발생하고 있는 상태), 그리고 급격 침하 세 가지 상태로 구분하기로 한다.

일반적으로 건물 침하 위험에 대비하기 위한 방안으로는 크게 측정 장비를 이용한 지반과 건물 정보를 획득한 특성 분석과 센서를 이용한 감지 시스템으로 구분된다.

먼저, 침하 특성에 대한 분석 방식은 대상 건물의 주변 지반의 침하가 건물에 미치는 영향과 침하 발생 후 건물의 변화 추이를 관찰하는데 의의가 있다^[8~11]. 특성 방식의 경우 주 목적은 침하 자체의 특성 분석에 목적이 있으므로 침하 위험성에 대한 정보와 진행성 침하의 경우 경향성 추정이 불가능한 제한점을 가진다.

센서를 이용한 특성 분석의 경우 주로 GNSS 센서를 이용한 침하 감지 시스템 구현 방식이 있다^[16~18]. 센서를 이용할 경우, 1절에서 언급한 바와 같이 특성 분석을 위한 관리의 용이성과 정밀한 침하 특성 관측이 가능하다. 그러나 일반적인 상황에 사용이 가능하지 않고

지진 재난 상황에서의 특성 분석을 주로 하고 있으며 침하 특성 분석 자체에 의의를 두고 있다는 점에 한계가 있다.

2. 기울기 특성 분석 및 감지 시스템

기울기 특성 분석을 통한 건물 안전 위험도 추론 방법의 경우 관측 장비 혹은 영상을 촬영한 직접적인 관측과 센서를 사용하는 방식으로 침하 특성 분석과 동일한 선행 기술의 특성을 가진다.

관측 장비와 영상 처리 기법을 활용한 방식의 경우 많은 인력과 시간을 투입이 필요하여 지진과 같은 재난 상황에서 효과적이고 신속한 대응이 제한된다^[12, 13].

자이로 센서를 사용한 기울기 특성 분석은 센싱 데이터의 저주파통과필터 (LPF : Low Pass Filter) 연산 후, 기울기를 측정하는 방식이 제안되었으며, 제안된 방법은 신속하고 효율적인 감시 체계 구축이 가능한 이점을 보유하고 있다. 그러나 센싱 데이터를 이용한 경우 직접적인 측정 방식에 비해 자원 관리 측면에서 많은 이점을 보유하고 있으나 건축물의 기울어짐이 서서히 진행되고 있는 상태의 경우 기울기 경향성 파악이 어렵고, 센싱 데이터를 활용하여 수동으로 기울어짐에 대한 위험도 분석을 별도로 진행해야 하는 제한점이 있다^[6, 14].

3. 제안된 건물 안전 위험도 특성 분석 시스템

본 논문에서는 센싱 데이터 기반의 시스템을 구축하여 관리의 용이성 확보와 센싱된 데이터의 회귀 분석을 통해 건물 침하·기울기의 진행성 특성의 경향 파악 또한 가능하다. 아울러 모의 변위 발생장치 데이터를 활용한 회귀 모델 도출을 수행하고, 도출된 회귀 모델의 추정 값과 변위 발생 장치의 센싱된 데이터 값 (GT : Ground Truth)의 비교 실험을 통한 오차 측정과 더불어 최종적으로 과거 발생하였던 건물 붕괴 데이터를 복원하여 제안된 방법을 적용한 신뢰성 검증을 수행하였다. 제안된 방법은 건축물의 침하·기울기 2가지 특성을 분석하고 종합적인 위험도를 산출하는 시스템이며, 침하·기울기 2가지 특성 모두 일반·진행성·급격 3가지 상태로 구분 짓는다. 3가지 상태 구분에 대한 기준은 대한민국 국토교통부 건물 안전 위험성 평가의 고시 기준을 준거하며 침하·기울기에 대한 위험도를 수치화 하여 사용자에게 제공함으로써 가시성 또한 확보하였다^[19].

III. 모의 데이터 구축 환경

건물 침하 특성 상황을 모의하기 위해 상하 방향의 변동을 발생과 기울기 특성 분석을 위해 진동·경사 변화로 구성된 복합 변위를 발생시킬 수 있는 실내·외 설치형 모의거동 발생장치를 아래 그림 1과 같이 구성하였다.

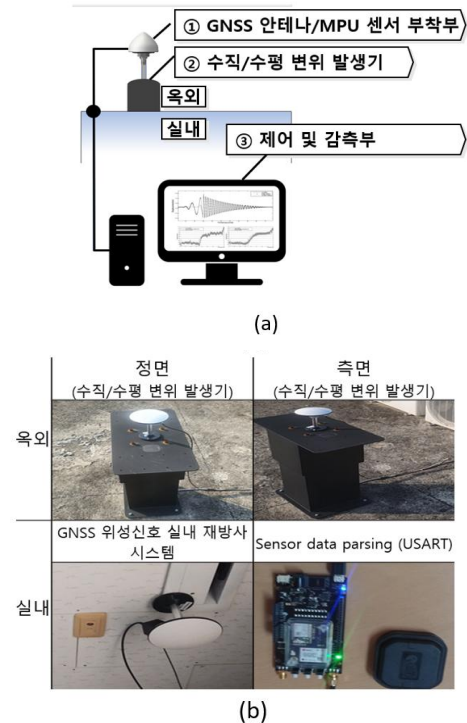


그림 1. 모의 변위 데이터 취득 환경: (a) 데이터 취득 시스템 블록도, (b) 데이터 구축 환경(실사)

Fig. 1. The environment of simulated displacement data acquisition: (a) Data acquisition system block diagram, (b) Data building environment.

회귀 모델 도출을 위한 모의 거동 장치는 침하 특성 분석을 위한 GNSS 위성 신호를 이용한 침하량 측정과 자이로 센서 모듈을 활용하여 수평 변위 측정을 위해서 그림 1과 같이 옥외 섹션과 실내 섹션으로 구분하였다.

직접적인 수평 변위 측정은 아래 그림 2와 같이 건물 고유 높이 정보를 활용하여 대한민국 국토 교통부 고시 기준인 허용 변위 $\delta = H/500$ 을 초과하는 경우 위험 상태로 간주하며 센서를 활용한 방법 또한 건물 옥상부에 센서를 설치하는것이 일반적이다. 때문에 구성된 모의 거동 장치 또한 옥외 섹션에 센서를 부착하고 실내 섹션에서 센싱 데이터를 수집하는 구조로 설계 되었다.

구축된 모의 거동 발생 장치에 사용된 센서는 GNSS-위성항법시스템 (GPS-RTK2 : Global Positioning

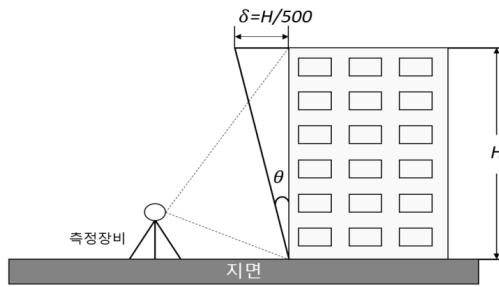


그림 2. 건물에 대한 직접적인 수평 변위 측정
Fig. 2. Direct horizontal displacement measurement relative to the building.

System-Real Time Kinematic) 센서와 6축 자이로/가속도 센서 (MPU-6050 : Motion Processing Units)를 사용하였다. 그리고 모의 거동 상황은 실제 건물의 기울어짐과 침하 상황이 급격하거나 서서히 진행되기 때문에 단·중·장주기 진동을 발생하여 구분하였으며, 구체적인 모의 거동 상황 요약은 다음 표 1과 같다.

표 1. 모의 거동 장치를 활용한 수직/수평 변위 시뮬레이션 상황 구분

Table 1. Classification of vertical/horizontal displacement simulation situations using a simulation device.

상황 구분		단·중·장 주기 진동		
		일반	진행성	급격
수평 (기울기)	변위	없음	0.01° 미만의 경사 변화 지속 (시점 랜덤)	0.01°~0.10° 범위의 경사 변화
	진동	0.5Hz 미만 범위의 진동	0.5~5Hz 범위의 진동	
수직 (침하)	변위	없음	2mm 이하의 수직 변위 지속 (시점 랜덤)	1~10cm 범위의 수직 거동
	진동	0.5Hz 미만 범위의 진동	0.5~5Hz 범위의 진동	

구축된 모의 거동 데이터는 크게 수평, 수직과 주기는 모터 진동의 주파수에 따라서 단·중·장기로 구분된다. 그리고 제안된 방법의 상태 분류 기준인 일반, 진행성, 그리고 급격 상황에 따라 각각의 다른 변위 기준을 적용하여 사용자가 설계한 다양한 종류의 복합 거동을 모델링하여 각각의 변위 거동을 발생시켰으며, 아래 그림 3과 그림 4는 각각 침하, 기울기에 해당하는 모의 거동 데이터 취득 결과를 나타낸다.

그림 3과 센싱된 침하 데이터의 경우 일반(Normal), 급격(Immediate) 상황은 1시간의 데이터 수집 범위를 확

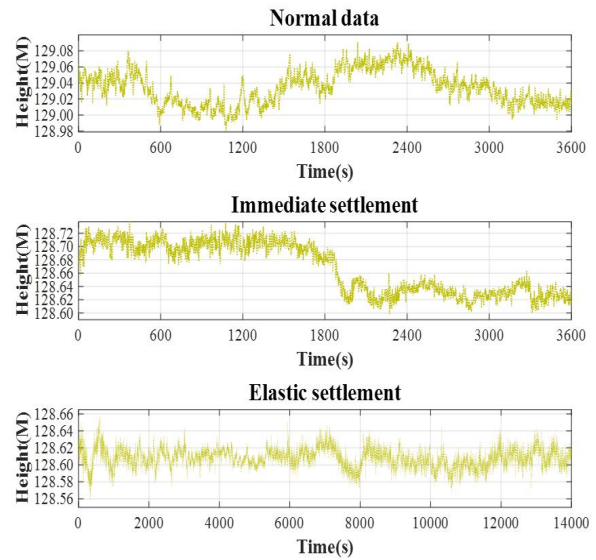


그림 3. 모의 거동 장치를 활용한 침하 데이터: 일반, 급격, 진행성

Fig. 3. Settlement data using the simulator: normal, immediate, and elastic.

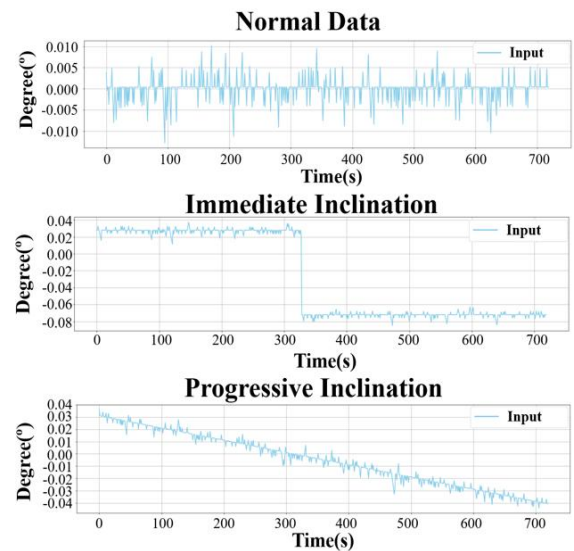


그림 4. 모의 거동 장치를 활용한 기울기 데이터: 일반, 급격, 진행성

Fig. 4. Building tilt data using the simulator: normal, immediate, and progressive.

인할 수 있지만 진행성(Elastic)의 경우 4시간의 범위를 가진다. 실제 진행성 침하 사례의 경우 일반 상황 데이터와 매우 유사한 형태의 기울기를 보여주며, 모의 거동 상황 또한 실제 상황과 유사하게 구성을 하였기 때문에 진행성 침하의 거동 범위 또한 매우 미세한 수치로 수집하였다.

때문에 제안된 방법을 사용한 진행성 침하를 추정하

기 위한 일반적인 시간 주기는 4시간이 소요되는 경향이 있어 수집 범위 또한 그림 3과 같이 표현 하였다. 그러나 제안된 방법을 실사용적인 측면을 고려하였을 때, 샘플링 주기를 2개로 구분하는 것은 2개의 시스템 동작을 의미한다. 때문에 제안된 방법은 센싱된 데이터의 초기 평균 값과 1시간 후의 평균 값을 비교하여 지속적인 상태 업데이트를 하는 방식으로 침하를 추정한다.

기울기 데이터의 경우 그림 4에서 일반, 급격, 진행성 세가지 상태 모두 720s의 수집 주기를 확인할 수 있고, 실제 건물의 기울기 변위 발생 상황에서는 매우 미세한 기울어짐의 범위를 기준으로 판단한다. 이것을 수치적으로 확인한다면, 그림 2의 측정 방식과 같이 측정 건물의 높이가 1M라고 가정했을 때, 국토교통부에서 안전 범위로 허용하는 변위의 범위는 다음과 같다.

$$\delta = \text{Arctan}(1/500) = 0.1145^\circ \quad (1)$$

따라서 기울기 상태 추정의 경우, 침하 추정과는 다르게 측정 변위의 범위 자체가 매우 미세하다. 그리고 미세한 변위의 변화가 있는 경우 침하의 진행성 주기와는 달리 일반 상황과 진행성 상황의 경계점을 확정하기 용이한 측면이 존재하기 때문에 3가지 상태에 대한 샘플링 주기가 모두 동일하다.

IV. 실험

1. 선형화 데이터 생성

모의 거동 장치를 활용한 센서의 원시 데이터는 그림 3과 그림 4에서 확인할 수 있듯이 비선형적인 특성을 가진다. 여기서 비선형적 해석을 통한 침하 혹은 건물의 기울어짐 상태 결과를 추정할 경우 일반 상황과 진행성 상황의 경계점이 없는 경우가 발생할 수 있다. 때문에 본 논문에서는 회귀 연산을 수행하기 전, 센싱 데이터 분포의 기댓값인 평균치를 사용하여 입력 데이터를 선형화 샘플링 작업을 우선하며, 아래 그림 5와 그림 6은 각각 그림 3과 그림 4에 대한 샘플링된 결과를 나타낸다.

그림 5와 그림 6의 각각의 샘플링 주기는 전체 측정 데이터의 1/6의 주기로 샘플링이 수행된다. 즉, 침하 데이터의 경우 $3600/6=600s$, 기울기 데이터의 경우 $720/6=120s$ 주기로 샘플링이 수행된다.

샘플링 주기 선정은 60s 간격으로 60s-측정 데이터 범위까지 샘플링을 수행한 결과, 샘플링 주기가 너무 짧으면 원시 데이터의 비선형 기울기를 유사하게 반영

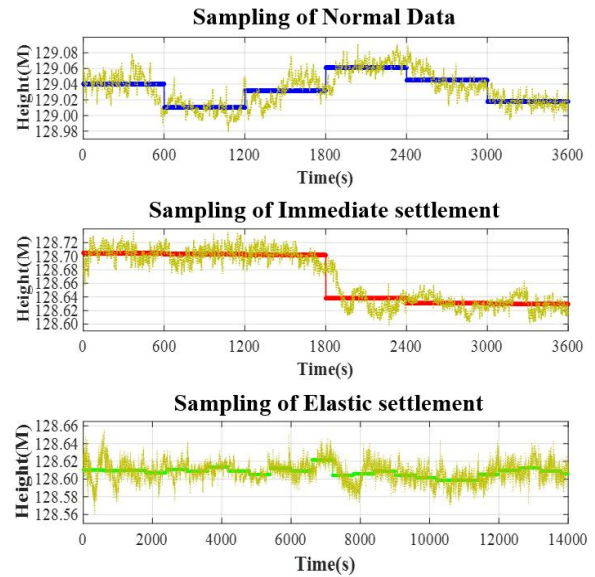


그림 5. 샘플링된 모의 침하 거동 데이터

Fig. 5. Results of Sampled simulated settlement data.

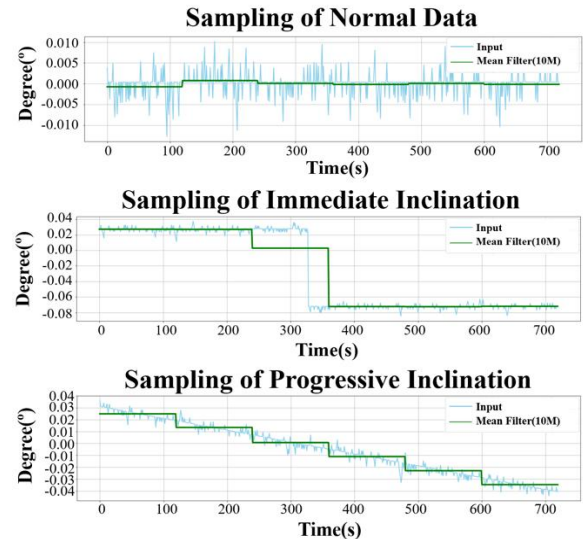


그림 6. 샘플링된 모의 거동 건물 기울기 데이터

Fig. 6. Results of Sampled simulated building tilt data.

하며, 반대로 샘플링 주기가 너무 큰 경우 원시 데이터의 표본 추출 연산과 유사한 결과를 도출하기 때문에, 측정한 결과 중 가장 적절한 주기인 전체 측정 데이터의 1/6의 주기를 사용한다.

2. 선형화 모델

그림 5와 그림 6의 샘플링된 선형화 데이터에 대한 선형 회귀 연산을 수행하고 측정 건물의 침하와 기울기 위험성을 추정한다. 그림 5와 그림 6에서 샘플링 된 데이터에 대한 선형 회귀식은 다음과 같이 나타낸다.

$$Y = wX + b \quad (2)$$

여기서 Y 는 응답 변수 즉, 건물의 높이와 기울기에 해당하는 벡터이며, X 는 독립 변수 즉, 측정 시간에 대한 벡터이다. 그리고 b 는 y 절편에 해당하는 변수이며, w 는 선형 회귀의 기울기를 나타낸다. 선형 회귀 모델은 회귀된 관측값과 샘플링된 참값의 오차 제곱의 비용을 최소화 하는 직선의 기울기를 찾는 문제이므로, 여기서 오차를 최소화하는 비용함수를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$Cost(w, b) = \min \sum_{i=1}^m (wx_i + b - y_i)^2 \quad (3)$$

여기서 전체 측정 데이터의 1/6의 주기로 샘플링 연산이 수행되므로

$$Cost(w, b) = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 (wx_i + b - y_i)^2 \quad (4)$$

식 (4)와 같이 나타낼 수 있고, 궁극적으로 $Cost(w, b)$ 가 '0'에 가장 가까운 직선의 기울기를 찾는 것이므로, $Cost(w, b)$ 가 가장 작은 직선의 기울기를 가지게 하는 w 와 b 의 값을 찾는 문제로 귀결된다. 따라서 샘플링된 응답 변수와 종속 변수인 X 와 Y 는 상수로 취급되고 w 와 b 를 편미분하기 위해 식 (4)를 다음과 풀어서 정리하면

$$Cost(w, b) = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 (w^2 x_i^2 + 2x_i b w - 2b y_i - 2x_i y_i w + b^2 + y_i^2) \quad (5)$$

여기서 w 와 b 에 대해서 편미분하면

$$w = \frac{\partial Cost(w, b)}{\partial w} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 (2x_i^2 w + 2x_i b - 2x_i y_i) \quad (6)$$

$$w = \frac{\partial Cost(w, b)}{\partial w} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^6 (x_i w + b - y_i) x_i \quad (6)$$

$$b = \frac{\partial Cost(w, b)}{\partial b} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^6 (x_i w - y_i + b) \quad (7)$$

$Cost(w, b)$ 가 '0'에 가장 근접하게 수렴하는 w 와 b 를 찾는 문제이므로

$$w = \sum_{i=1}^6 x_i y_i = \sum_{i=1}^6 x_i^2 w + \sum_{i=1}^6 b x_i \quad (8)$$

$$b = \sum_{i=1}^6 y_i = \sum_{i=1}^6 x_i w + \sum_{i=1}^6 b \quad (9)$$

식 (8)과 (9)처럼 정리할 수 있다. 두 식을 연립하기 위해, 행렬식으로 표현하면

$$\begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i \\ \sum x_i & 6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum x_i y_i \\ \sum y_i \end{bmatrix} \quad (10)$$

이므로, w 는 크래머 룰에 의해

$$w = \frac{6 \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{6 \sum x_i^2 - \sum x_i \sum x_i} \quad (11)$$

식 (11)과 같이 정리되고, 여기서, X 에 대한 기댓값을 다음과 같이 정의하면,

$$E(X) = \frac{1}{m} \sum X \quad (12)$$

즉, 식 (11)을 X 와 Y 에 대한 기댓값 형태로 표현하여

$$w = \frac{E(XY) - E(X)E(Y)}{E(X^2) - E(X)E(X)} \quad (13)$$

식 (13)과 같이 표현할 수 있다. 그러므로 w 는 X 에 대한 분산과 X 와 Y 에 대한 공분산의 형태로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$w = \frac{Cov(X, Y)}{Var(X)} \quad (14)$$

또한 '0'에 수렴하는 절편 b 를 찾는 문제이므로 식 (7)을 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$b = \sum_{i=1}^6 b = \sum_{i=1}^6 y_i - \sum_{i=1}^6 x_i w = \frac{\sum y_i - \sum x_i w}{6} \quad (15)$$

이것을 기댓값 형태로 표현하면

$$b = E(Y) - E(X) \cdot w \quad (16)$$

즉, 측정 대상인 센싱 데이터를 샘플링 작업을 거쳐 단순 선형회귀를 찾는 문제로 귀결되므로 식 (13)과 (16) 같이 Global optimum을 찾는 문제로 해석할 수 있다.

3. 침하 특성 분석 회귀 모델

제안된 방법은 X 와 Y 에 대한 공분산과 분산의 기댓값으로 $Cost(w, b)$ 가 '0'에 수렴하는 선형 회귀 기울기와 절편을 찾는 문제로 측정 대상 건물의 위험도를 종합적으로 판단한다. 그리고 침하 특성 분석의 경우 일반, 급격, 진행성 3가지 상태로 분류하기로 하였고, 이에대한 선형 회귀 결과는 아래 그림 7과 같다.

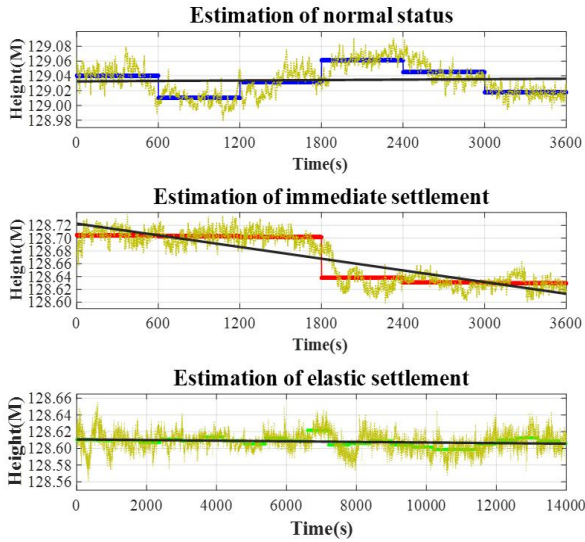


그림 7. 침하 특성 분석에 대한 선형 회귀 결과
Fig. 7. Results of linear regression for settlement characterization.

제안된 방법은 침하, 기울기 특성 모두 선형 회귀를 활용하여 종합 위험도를 판단하는데 만약 센싱된 데이터에 대해서 비선형 회귀를 이용한 추정을 할 경우 일반 상황과 진행성 상황에서 추정 오차율이 더 높게 나타날 수 있다. 아래 그림 8은 침하 특성에 대해 비선형 회귀를 이용한 추정 결과를 나타내는데 결과에서 살펴보면 진행성 침하 상황보다 일반 상황에서의 y축에 대한 결과 값 차이가 더 심하게 추정된다.

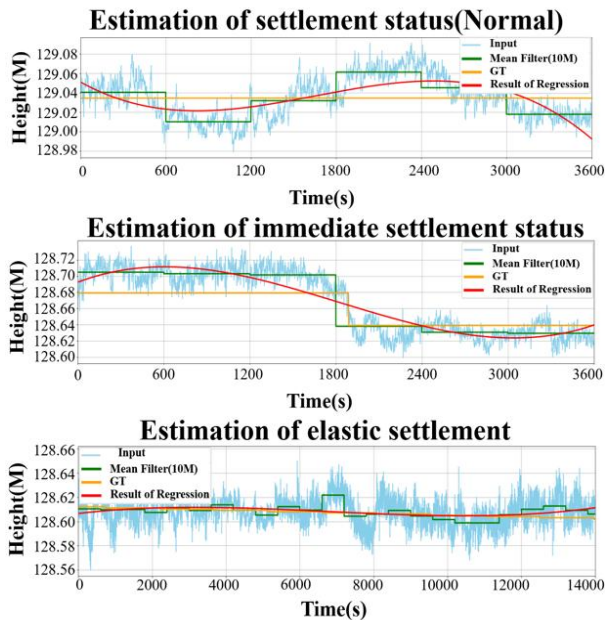


그림 8. 침하 특성 분석에 대한 비선형 회귀 결과
Fig. 8. Results of logistic regression for settlement characterization.

즉, 역설적으로 실제론 일반 상황이지만 비선형 회귀 추정을 할 경우, 일반 상황을 진행성 침하로 분류할 오차가 크다는 것을 나타낸다.

따라서, 제안된 방법은 선형 회귀 모델을 활용한 기울기 추정으로 건물 안전 종합 위험도를 판단하고, 진행성 침하의 경우 추정된 기울기 값을 활용하여 앞으로의 침하 추이를 예상할 수 있으며, 아래 그림 9는 3가지 상황에 대하여 GT와 회귀된 기울기의 비교 결과이며, 표 2는 그림 9의 결과에서 GT와 선형 회귀 모델의 추정 오차에 대한 요약을 나타낸다.

표 2. 침하 상황 별 회귀 오차

Table 2. Error results for each settlement state.

상태	일반	급격	진행성
오차 범위 (mm)	3.13	29.24	2.21

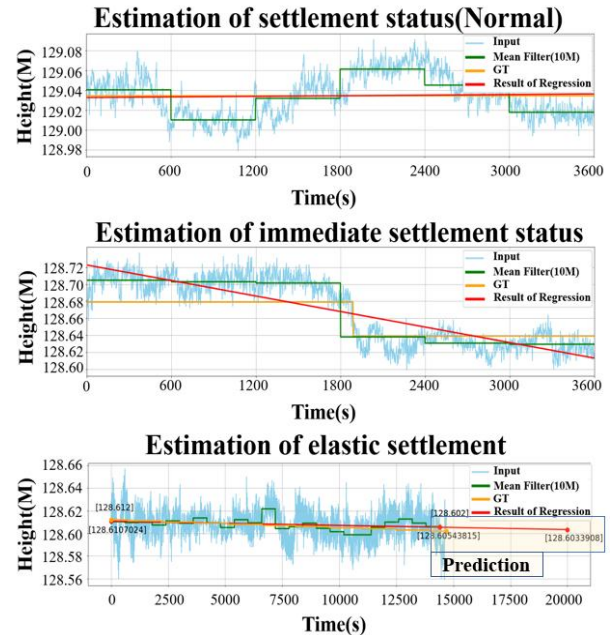


그림 9. 침하 특성 분석에 대한 선형 회귀 비교 실험 결과
Fig. 9. Results of linear regression comparison experiment for settlement characterization.

침하 상태에 대한 오차를 확인한 결과 급격 침하를 제외한 일반과 진행성 침하의 경우 각각 3.13, 2.21mm의 오차를 확인하였으며, 최종적인 위험 판단을 위한 대한민국 국토교통부의 건물 침하 안전기준은 표 3과 같다. 아울러 제안된 방법의 실증을 위해, 과거 실제 건물이 붕괴된 사건인 1995년 삼풍백화점 붕괴사고의 대한민국 국가 기록원 데이터를 복원하였다^[20]. 아래 그림 10은 국가 기록원에 기록된 삼풍 백화점의 침하 기록이다.

표 3. 대한민국 국토교통부의 건물 침하 상태 평가 기준
Table 3. Criteria for evaluating the settlement condition of buildings by the Ministry of Land, Infrastructure, and Transport of the Republic of Korea.

평가 등급	최대 침하량 범위 (cm)		상태 정의
	비진행성	진행성	
A	$x < 8$	$x < 5$	침하 미발생
B	$8 \leq x < 12$	$5 \leq x < 8$	경미한 침하
C	$12 \leq x < 16$	$8 \leq x < 12$	지속적 관찰 필요
D	$16 \leq x < 20$	$12 \leq x < 15$	심각한 침하
E	$20 \leq x$	$15 \leq x$	매우 심각한 침하

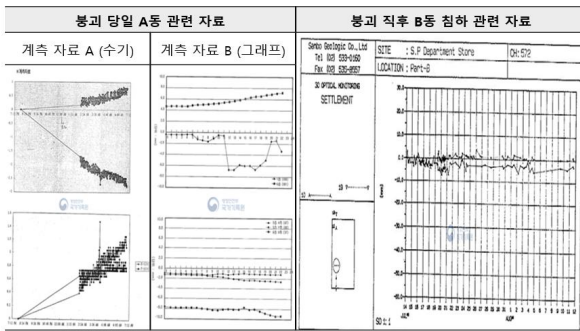


그림 10. 대한민국 국가 기록원에 기록된 삼풍 백화점 침하 관련 자료
Fig. 10. The Sampoong department store settlement was record data (in Korea National Archives).

기록은 붕괴 사고 당일 08:00~13:00 5시간 동안의 붕괴 사고 건물인 A동의 총 35cm 침하 기록과 더불어 B동이 건물구조가 A동과 동일하다는 가정하에 사고 직후 B동의 진행성 침하 경향을 반영하여 데이터를 복원하였다. 그리고 아래 그림 11은 각각 복원된 침하 데이터

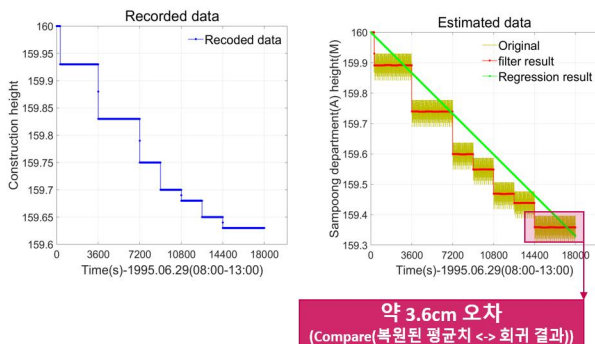


그림 11. 제안된 방법의 실증 결과: 과거 삼풍 백화점 A동의 붕괴 당일 침하 기록에 대한 실증 (대한민국 국가 기록원 소장 자료)
Fig. 11. Demonstration results of the proposed method: Demonstrate the record of sinking on the day of the collapse of Sampoong Department Store Building 'A' (Data from the National Archives of Korea).

그림 11. 제안된 방법의 실증 결과: 과거 삼풍 백화점 A동의 붕괴 당일 침하 기록에 대한 실증 (대한민국 국가 기록원 소장 자료)
Fig. 11. Demonstration results of the proposed method: Demonstrate the record of sinking on the day of the collapse of Sampoong Department Store Building 'A' (Data from the National Archives of Korea).

와 선형 회귀 결과이다.

그림 11의 결과에서 사고 당일 A동의 급격 침하와 사고 직후 B동의 진행성 침하 경향을 반영한 복원 데이터에 회귀 추정 결과 약 3.6cm의 오차를 확인할 수 있다.

4. 기울기 특성 분석 회귀 모델

기울기 특성 분석의 경우 침하와는 다르게 평균 제곱근 (RMS : Root Mean Square) 값을 활용한 영점 보정을 선형화 작업 후, 수행하게 되는데, 이는 모든 건물별로 고유 기울기 값이 존재하기 때문이다. 아울러 센서로부터 수신한 데이터의 측정 오차가 발생해 이상치 데이터에 해당하는 고주파 영역을 제할 필요가 있기 때문이다.

그리고 건물의 기울어짐 추정은 침하 특성 분석과 동

표 4. 건물 기울어짐 상황 별 회귀 오차
Table 4. Error results for each building tilt angle state.

상태	일반	급격	진행성
오차 범위 (degree°)	0.0001	0.0449	0.0009

표 5. 건물 기울기 선형 회귀 기반 기울기 측정 결과 (수치)
Table 5. Results of linear regression estimation (value).

상태	Measured	GT
정상	0.0001	0
급격	0.1449	0.071
진행성	0.0701	0.1

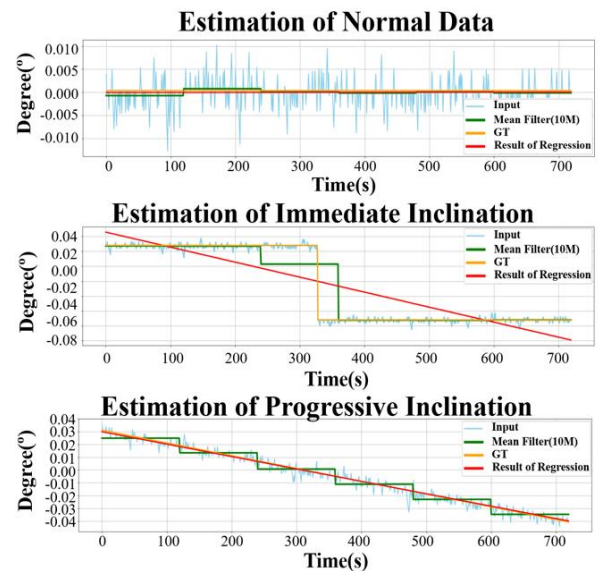


그림 12. 건물 기울기 선형 회귀 추정 결과
Fig. 12. Results of linear regression estimation.

일하게 회귀 분석된 데이터의 시작점과 끝점의 기울기 차이를 통해 최종적으로 건물의 기울기 위험도를 산출하며, 아래는 모의 거동 기울기 데이터에 대한 선형 회귀 결과를 나타낸다.

아울러 기울기 위험도 또한 국토교통부 고시기준을 준거하여 최종적인 위험도를 판단하게 되는데, 아래 표는 건물 기울기에 대한 위험도 등급 기준을 나타낸다.

표 6. 대한민국 국토 교통부의 건물 기울어짐 상태 평가 기준

Table 6. Criteria for evaluating the building tilt angle condition of buildings by the Ministry of Land, Infrastructure, and Transport of the Republic of Korea.

등급	허용 변위	기울기 (°)	정의
A	1/750 이내	$0 \leq x \leq 0.08$	정상
B	1/500 이내	$0.08 < x \leq 0.12$	주의 관찰
C	1/250 이내	$0.12 < x \leq 0.23$	정기적 계측
D	1/150 이내	$0.23 < x \leq 0.38$	보수 보강
E	1/150 초과	$0.38 < x$	긴급 보강

아울러 등급 기준에 따라 기울기 0°를 위험도 0%, 0.38°를 100% 위험도 기준을 두고, 회귀된 결과치를 표 6 에 준거하여 위험도를 산출하면 아래와 같다.

표 7. 모의 건물 기울기 데이터 건물 위험도 산출 결과
Table 7. Results of simulated building tilt angle data Building risk calculation.

상태	기울기 (°)	등급	위험도
정상	0.0001	A	0%
급격	0.1449	C	56.96%
진행성	0.0701	A	21.51%

V. 결 론

본 논문에서는 지진 재난 상황에서 건물 안전 종합 위험도를 신속하고 효율적으로 추정 할 수 있는 방법을 새롭게 제안하였다. 제안된 방식은 건물의 기울기와 침하에 대해 센싱 데이터와 선형 회귀적 해석을 통해 신속하고 효과적으로 건물 붕괴로 인한 2차 재난 사고를 예방하기 위한 목적이 있으며 실험을 통해 추정된 회귀 값의 신뢰성을 검증하였다. 기울기의 경우 정상 및 진행성 상태에서 0.001° 이내의 오차를 보였으며, 침하의 경우 정상 및 진행성 상태에서 2-3.13mm 오차를 확인하였다. 아울러 과거 건물 붕괴사고 데이터를 복원하고

제안된 알고리즘을 적용하여 추가적으로 건물 침하 정보 판단에 대한 신뢰성을 확보하였다. 아울러 제안된 방식은 국토교통부 고시 기준에 준거하여 최종적인 건물 종합 위험도를 점수 형태로 산출하여 가시성을 확보하였다. 아울러 건물 위험도 분야에서 비선형 데이터의 선형화 해석에 대한 고찰과 방법론을 제시함으로써, 지진 재난에 국한되지 않고 일반적으로 건물 종합 위험도 산출에 범용적으로 사용될 수 있을것으로 기대할 수 있다.

REFERENCES

- [1] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "2017 Architecture Statistics Summary Book", Republic of Korea, 2017.
- [2] Ministry of Public Safety and Security, "The Enhancement of disaster safety management system by the assessment of facilities risk", Republic of Korea, 2014.
- [3] Ministry of Public Safety and Security, "White paper of Pohang Earthquake", Republic of Korea, pp. 492-501, 2018.
- [4] Ministry of Public Safety and Security, "White paper of Pohang Earthquake", Republic of Korea, pp. 209-213, 2018.
- [5] Korea Fire Protection Association, "Disaster Prevention and Insurance No. 155 Special 2", Republic of Korea, pp. 16-17, 2015.
- [6] J. D. Lim, J. J. Kim and H. K. Jung, "Multi advanced Sensor-based Building Disaster Prevention Detection System," Proc. of the Korean Institute of Information and Commucation Sciences Conf. The Korea Institute of Information and Commucation Engineering, 2018.
- [7] Ministry of Land, Infrastructure and Transport. "Safety Inspection and Precise Safety Diagnosis Detailed Instructions," pp. 4-46, 2017.
- [8] E. C. Hsiao, C. H. Juang, G. T. Kung and M. Schuster, "Reliability analysis and updating of excavation-induced ground settlement for building serviceability evaluation," in Probabilistic applications in geotechnical engineering, pp. 1-1, 2007.
- [9] M. D. Boscardin and E. J. Cording, "Building response to excavation induced settlement," Journal of Geotechnical Engineering, vol. 115, no. 1, pp. 1-21, 1989.
- [10] E. C. Hsiao, M. Schuster, C. H. Juang and G. T. Kung, "Reliability analysis and updating of excavation induced ground settlement for building serviceability assessment," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 134, no.

- 10, pp. 1448-1458, 2008.
- [11] S. R. Park, E. K. Kim and G. M. Sa, "A Study on the Influence of Ground Subsidence and Stability of Buildings by Tunnel Excavation in Urban Area using Numerical Analysis and Neural Network Method," Conf. of The Korean Society For Railway, vol. 11, pp. 581-590, Jeju, Republic of Korea, May, 2007.
- [12] Y. Wang, "Comparative Analysis of Total Station Measuring Inclination and Settlement," American Journal of Civil Engineering, vol. 7, no. 2, pp. 47-51 2019.
- [13] G. Yang, J. C. Wu, Q. Hu and D. N. Lei, "Real-time monitoring of changes in building tilt angle using double square artificial marks," Indoor and Built Environment, vol. 30, no. 6, pp. 777-786, 2020.
- [14] J. D. Lim, J. J. Kim, D. E. Hong and H. K. Jung, "Safety Monitoring System of Structures Using MEMS Sensor," Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering, vol. 22, no. 10, pp. 1307-1313, 2018.
- [15] Korea Meteorological Administration., "Korea Meteorological Administration Earthquake Statistics," Republic of Korea, 2019.
- [16] S. S. Lee, S. H. Kim, S. M. Chum and S. Y. Suk, "Design and Analysis of GNSS-based Building Settlement Sensing for detecting Building Settlement on Seismic Zones," Institute of Embedded Engineering of Korea (IEMEK) Conf., pp. 223-225, Jeju, Republic of Korea, Nov. 2019.
- [17] S. H. Kim, S. S. Lee, S. H. Hwang, S. Y. Suk and S. M. Chun, "Analysis of Settlement Trend Information in GNSS-based Settlement Detector for analyzing Settlement of Buildings in Earthquake Hazard Zones," Journal of the Korean Institute of Plant Engineering, vol. 26, no. 1, pp.65-72, 2021.
- [18] S. H. Kim, S. S. Lee, S. H. Hwang, S. Y. Suk and S. M. Chun, "Implementation of GNSS-based Settlement Detector for Precise Settlement Detection on Buildings," Journal of the Korean Institute of Plant Engineering, vol. 25, no. 2, pp. 15-23, 2020.
- [19] Ministry of Land, Infrastructure and Transport. "Safety Inspection and Precise Safety Diagnosis Detailed Instructions", Republic of Korea, 2017.
- [20] National Archives of Korea, "Sampoong Department Store Collapse Accident White Paper," Republic of Korea, 1996.
- [21] B. J. Lee, S. W. Park, D. H. Kim and Y. K. Song, "Ground Subsidence Caused by the Development of Underground Karstic Networks in Limestone Terrain, Taebag City Korea," The Journal of Engineering Geology, vol. 26, no. 1, pp. 63-70, 2016.

— 저 자 소 개 —



황 도 경(비회원)
2020년 ~ 2020년 포항공과대학교
PMC 연구실 연구원
2020년 부산대학교 전자공학과
석사 졸업.
2020년 ~ 현재 포항공과대학교
인공지능연구원
연구부 연구원

<주관심분야: Data restoration, DL/ML, Image processing, Signal processing>



김 다 현(비회원)
2020년 영남대학교 정보통신공학
학사 졸업.
2020년 ~ 현재 포항공과대학교
인공지능연구원
연구부 연구원

<주관심분야: Deep Learning, Anomaly Detection, Time Series Prediction, Computer Vision>



김 동 주(비회원)
2011년 ~ 2015년 대구 경북 과학
기술원 IT 융합 연구부
선임연구원.
2015 ~ 2016년 동서대학교 컴퓨터
공학부 조교수.
2010년 성균관대학교 전기 전자
컴퓨터공학 박사 졸업.

2016년 ~ 현재 포항공과대학교 인공지능연구원
연구부 연구부장
<주관심분야: Computer Vision, Face Recognition, Deep Learning>