

# 탄성파를 이용한 구조물의 결함 진단

- 실시간 모니터링과 GNN 기반 예측 -

이승상, 서병훈, 김동수

Department of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering, Seoul National University

## 연구 배경 및 목표

### 연구 배경

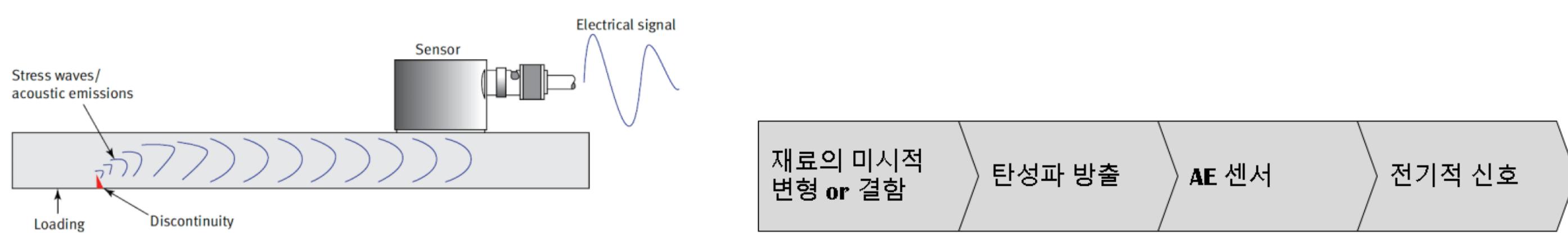
- 음향 방출 검사와 같은 비파괴 검사 기술은 구조물의 내부 결함을 실시간으로 탐지하는 데 사용되고 있음
- 음향 방출 기술은 건축물 및 교량, 파이프라인과 배관, 항공, 자동차, 원자력 산업 등 다양한 곳에 활용되고 있음
- GNN(Graph Neural Network)을 바탕으로 탄성파를 이용한 실시간 모니터링 시스템을 구축하여 센서 데이터를 기반으로 결함이 생길 가능성 있는 부분을 예측하고, 구조물의 수명을 연장하는 기술을 필요로 하고 있음

### 연구 목표

- 강판 구조물에서의 결함 감지 및 시각화  
Arduino-Python 연동 시스템을 이용하여 강판 구조물에서 발생한 결함의 위치와 세기를 실시간으로 추정하고, 시각화 기술을 이용해 직관적으로 확인하는 시스템 제작
- 프레임 구조물에서의 결함 감지 및 시각화  
프레임 구조를 그래프 구조로 변환한 다음, Arduino-Python 연동 시스템을 이용하여 프레임 구조물에서 발생한 결함의 위치와 세기를 실시간으로 추정하고, 시각화하는 시스템 제작  
각 부재에서의 발생한 각각의 결함들을 누적한 데이터를 Graph Neural Network(GNN)을 활용하여 부재별 파괴 정도를 예측하고, 시각화하여 구조물의 상태를 종합적으로 평가할 수 있는 시스템 제작

## 자료 및 방법

### ◆ 음향 방출 & 탄성파



- 음향 방출 (Acoustic Emission) 기술은 금속 재료의 인장 시험 시 재료의 미시적 변형이나 파괴에 의해서 탄성파가 발생함.
- 이를 이용하여 AE 센서를 이용한 실시간 비파괴검사 기술이 발전함.

### ◆ UTM 실험을 통한 부재 파괴 기준 및 dB 감쇄 기준 산정

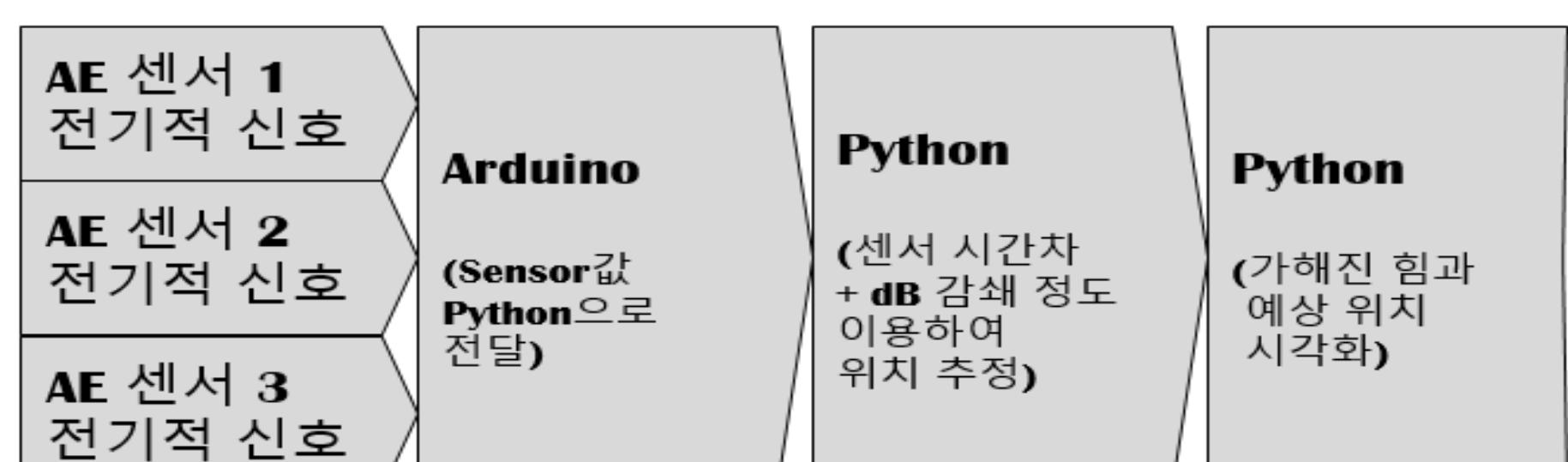
- 프레임의 부재인 파이프를 가지고 실험 진행
- UTM에 센서를 연결하여 파괴하는 동안 탄성파 dB 데이터를 측정하여 거리를 변화시키면서 dB 감쇄 기준을 산정하고자 하였고, 변위-하중 그래프를 얻어 파괴 기준을 산정하고자 함.

### ◆ Arduino 장치 및 Arduino – Python 연동 시스템 구성

- 아두이노 장치의 경우 센서 3개를 이용하여 각 위치에서 데이터를 수집함
- 파이썬에서 아두이노 장치에서 받은 정보를 이용해 센서의 피크 시간 차와 각 센서별 피크 dB 두 가지를 얻어냄

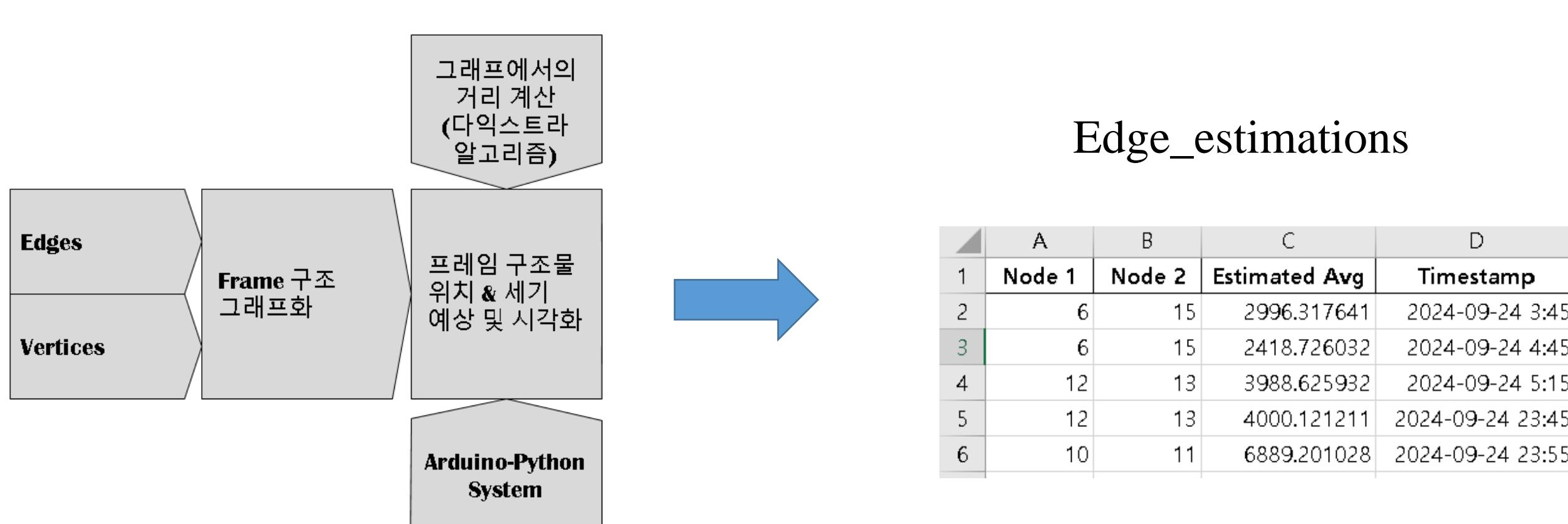
### ◆ 강판 구조물에서의 결함 위치와 세기 실시간 예상 및 시각화

- 강판 구조물에서 센서 피크 시간차와 dB 감쇄 정도를 이용하여 위치를 계산하는데, 센서의 정보를 읽는 최소 시간 간격(0.02ms)을 해결을 위해 dB 감쇄 정도를 사용



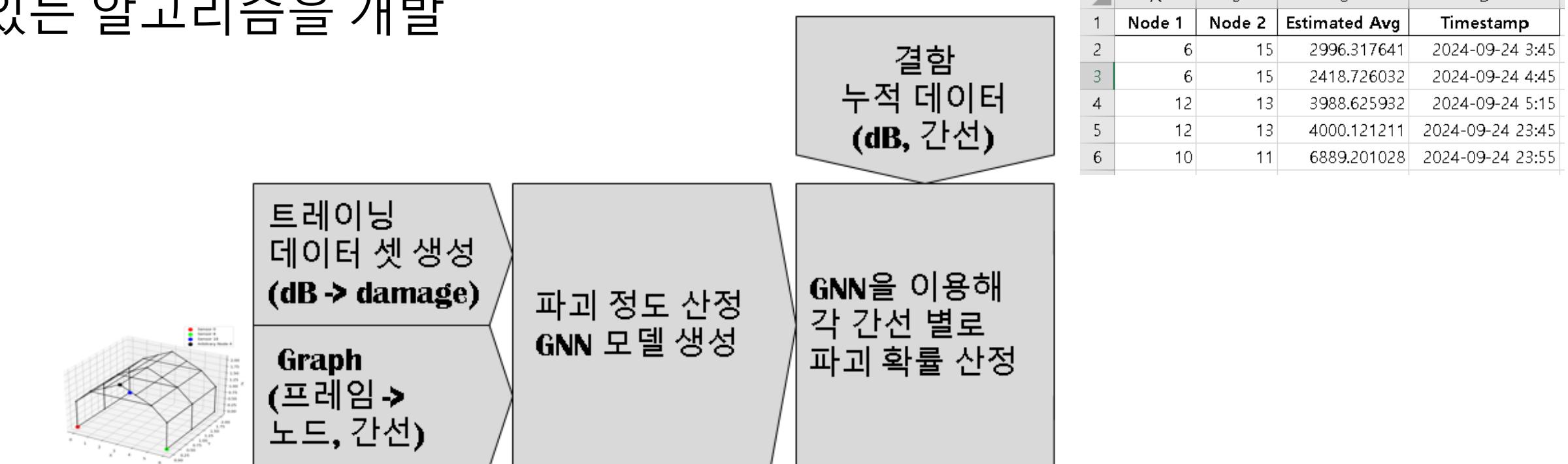
### ◆ Frame→Graph 구현 및 프레임 구조물 결함 실시간 예상과 시각화

- 프레임 구조물을 직접 시각화하기 위해 Edges, Vertices.csv 파일을 만들고, Edges 파일은 간선을 나타내기 위해 양쪽 두 노드를 표현, Vertices 파일은 각 노드별 3차원 공간 위치를 넣어줌
- 이를 다익스트라 알고리즘을 이용해 거리를 계산하여 감쇠를 고려하면 비슷한 방법으로 시각화 가능



### ◆ 프레임 구조물에서 GNN을 활용한 부재별 파괴 정도 파악 및 시각화

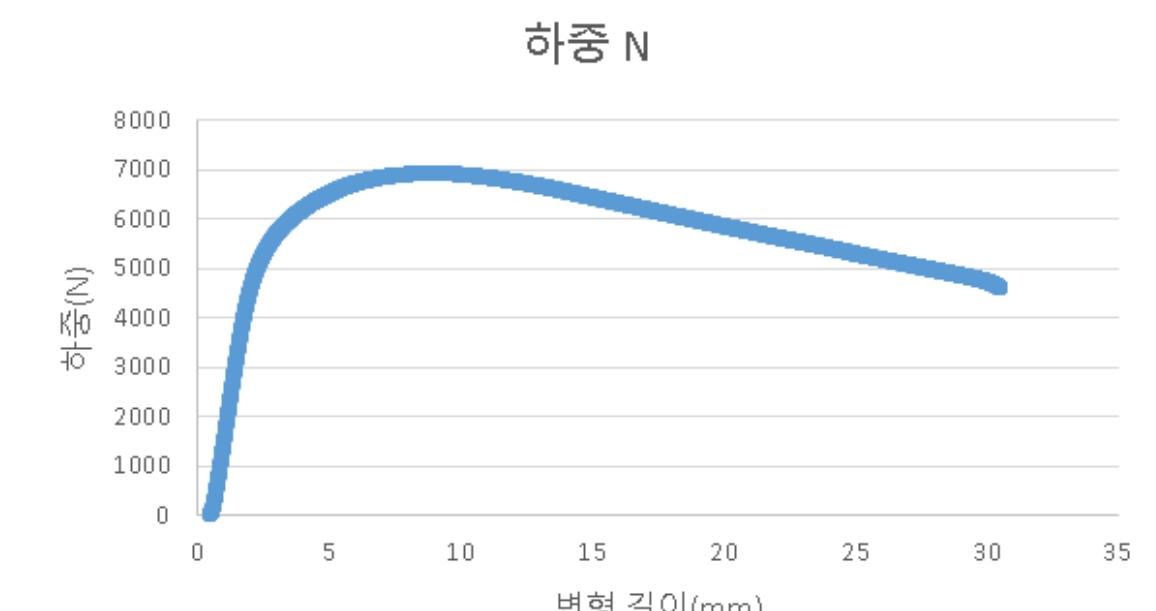
- 프레임 구조의 절점과 부재가 각각 그래프에서의 노드와 간선에 대응될 수 있기 때문에 프레임 구조를 그래프 형태로 변환하여 학습한 데이터셋을 기반으로 하루의 결함 누적 데이터를 입력해주면 GNN을 통해 각 간선 별 파괴 정도를 예상할 수 있는 알고리즘을 개발



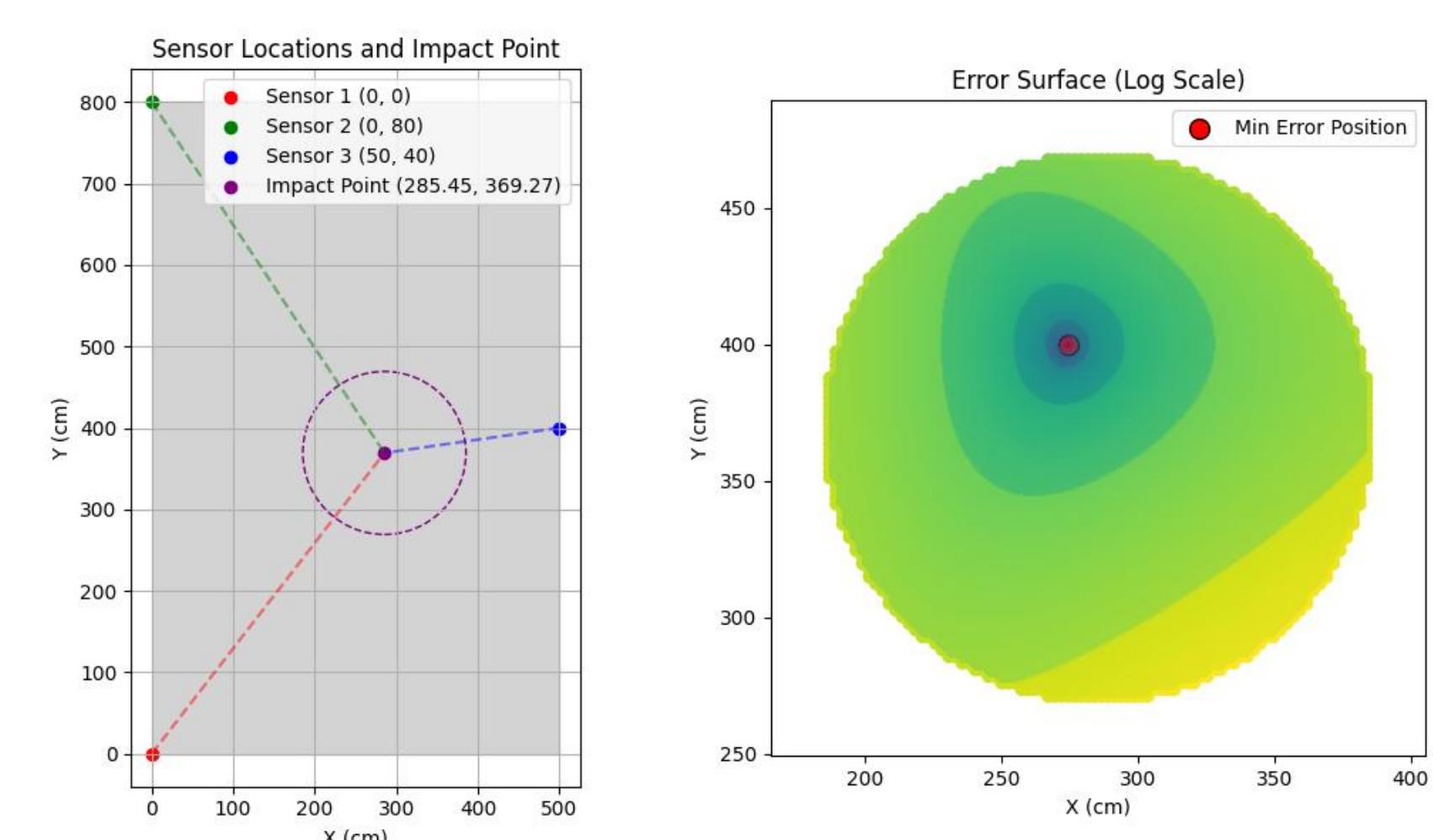
## 결과 및 논의

### ◆ UTM 실험을 통한 부재 파괴 기준 및 dB 감쇄 기준 산정

- dB 감쇄를 피크 시간을 기준으로 고려하였을 때 지수함수적으로 감소하는 경향을 보임
- 부재 파괴 기준 산정에는 다음 그림에서 단위 변형 길이 당 하중이 가장 높은 지점에 도달하면 파괴로 기준을 산정

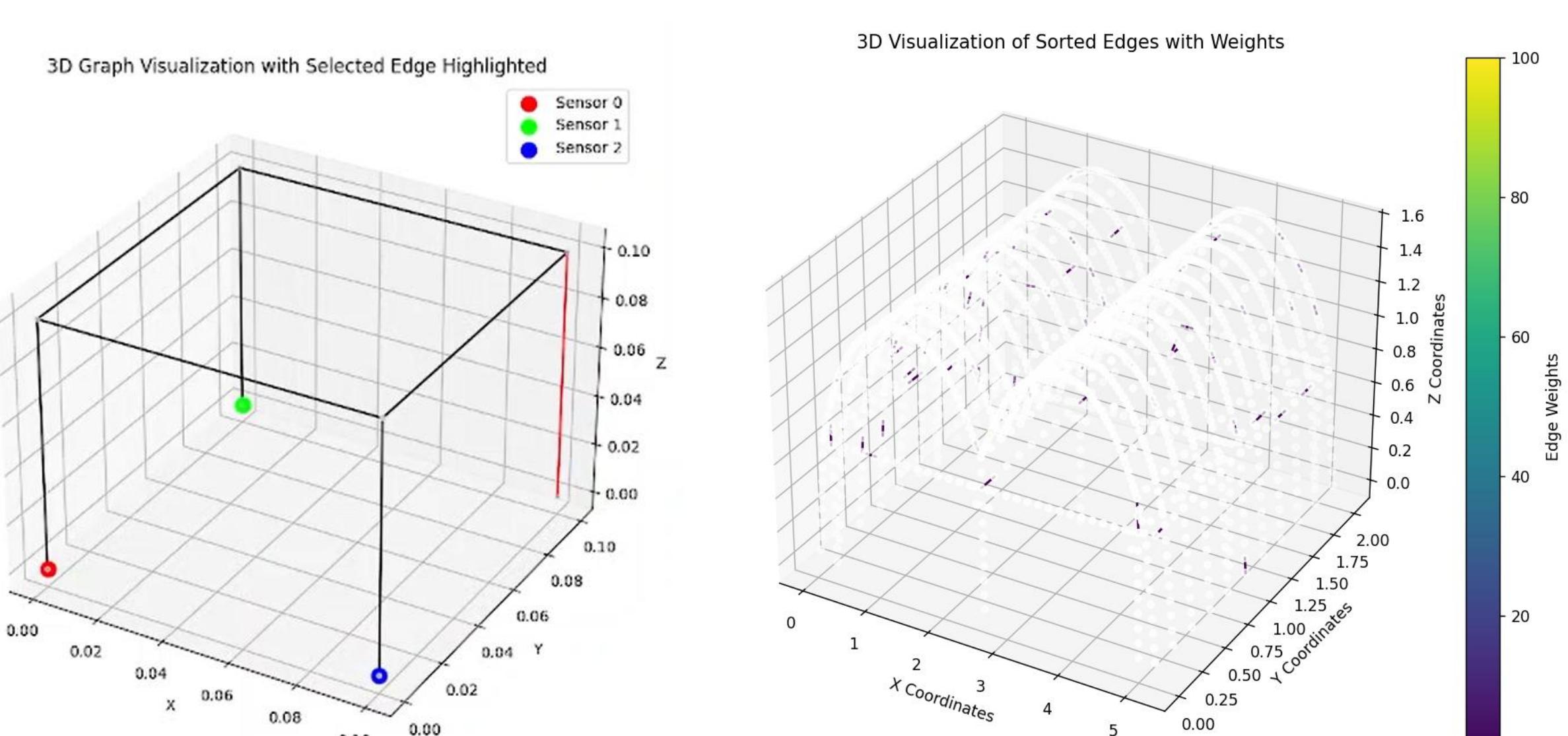


### ◆ 강판 구조물에서의 결함 위치와 세기 실시간 예상 및 시각화



- 왼쪽 그림은 강판 구조물에서 센서 피크 시간 차를 이용하여 얻어낸 결함 발생 지점의 위치를 예상하고, 최소 시간 간격에 대한 오차 원을 시각화하여 제공
- 오른쪽 그림은 오차 원 내부에서 dB 차이를 고려하였을 때 가장 감쇄에 대한 에러가 적게 나타나는 지점의 위치를 시각화하여 제공

### ◆ 프레임 구조물에서의 결함 위치와 실시간 세기 예상 및 시각화



- 왼쪽 그림은 프레임 구조물에서 다익스트라 알고리즘을 이용해 센서 피크 시간 차를 얻어내어 dB 감쇄를 이용한 결함 발생 지점의 간선을 표시
- 오른쪽 그림은 실제 프레임 구조물을 그래프 input으로 넣어, 결함 누적 데이터를 GNN model에 넣어 결함 정도를 색깔을 이용해 시각화

## 결론

- 강판 구조물과 프레임 구조물에서 결함 위치와 세기를 실시간으로 감지하는 시스템을 제작하기 위해서 파이썬을 통한 알고리즘으로 시각화하였다.
- 프레임 구조물에 거리에 의한 감쇠를 위해 거리를 그래프 거리 이론 중 하나인 다익스트라 알고리즘을 사용하여 간선과 센서의 거리를 단순히 계산하여 명확하게 프레임 구조물의 결함 지점 간선을 파악하고 시각화하며 GNN모델에 입각해 결함정도를 시각화 한 것을 확인할 수 있다..
- 다만, 실제 프레임 구조물이 파괴될 때 음향 방출 센서를 이용하여 측정된 데이터셋이 없기 때문에 GNN기반 모델의 성능을 정확하게 평가하기에는 어려움이 있다.
- 실제 농업 구조물에 설치하여 매일 파괴 데이터를 확보하여 시스템의 신뢰 정확도를 파악한다면 농업 구조물에서의 상용화가 기대된다.