

# 박막형 압전 센서를 활용한 사질토 지반 지중 응력 측정 방법론

## Methodology to Measure Stress Within Sand Ground Using Force Sensing Resistors

김 동 균<sup>1</sup> Kim, Dong Kyun  
우 상 인<sup>2</sup> Woo, Sang Inn

### Abstract

Stress is an invisible physical quantity, necessitating the use of earth pressure cells for its measurement within the ground. Traditional strain-gauge type earth pressure cells, due to their rigidity, can distribute stress within the ground and subsequently affect the accuracy of earth pressure measurements. In contrast, force sensing resistors are thin and flexible, enabling the minimization of stress disturbance when measuring stress within the ground. This study developed a system that utilizes force sensing resistors to measure ground stress. It involved constructing a soil chamber for calibrating the force sensing resistors, assessing the variability of measurements from resistors embedded in sand ground, and verifying the attachment of pucks to the sensing area of the resistors.

### 요 지

응력은 비가시 물리량이므로, 지반 내부에서 이를 측정하기 위해서는 토압계가 필요하다. 기존의 스트레인 게이지 기반 토압계는 큰 강성을 가지며, 이는 지반 내부 응력을 교란시켜 토압 측정의 정확성에 영향을 준다. 박막형 압전 센서는 얇고 유연하므로, 이를 활용할 경우 지반 내부 응력의 교란을 최소화하여 지중응력을 측정할 수 있다. 본 연구에서는 박막형 압전 센서를 활용하여 지반 내부의 응력을 측정하기 위한 시스템을 구축하였다. 박막형 압전 센서를 교정하기 위한 챔버를 제작하여 사질토 지반 내부에 매설된 박막형 압전 센서의 측정 변동성과 센서의 감지 영역에 부착된 픽으로 인한 측정 토압의 재현성 향상을 반복실험을 통해 확인하였다.

**Keywords :** Calibration, Force sensing resistor, Measurement, Sand, Stress

### 1. 서 론

토사 지반의 파괴는 응력 공간상에서 지반 내부의 응력 Mohr원이 파괴 포락선에 접할 때 발생한다. 따라서 지반의 파괴 과정을 정확하게 이해하기 위해서는, 지반

내부의 응력을 정확히 측정하여야 한다. 현재까지 많은 연구(Keskin et al., 2023; Keskin et al., 2008; Lee et al., 2022; Lim, 2004; Nam and Lee, 2010; Useche-Infante et al., 2018)에서 센서(혹은 계측기)를 이용하여 지반 내 토압을 실험적으로 측정하였다. Useche-Infante et al.(2018)

1 정회원, 인천대학교 건설환경공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Incheon National Univ.)

2 정회원, 인천대학교 건설환경공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Incheon National Univ., Tel: +82-32-835-8461, siwoo@inu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2024년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

는 원형기초 하부의 모형 지반 내부에 원통형 로드셀을 설치하여, 지반의 상대밀도에 따른 연직응력 분포를 실험적으로 파악하였다. Keskin et al.(2008)은 사질토 지반 내부에 스트레인 게이지 기반의 압력변환기를 설치하여 정사각형 얇은 기초에 대한 연직응력 증분의 분포를 측정하였으며, Keskin et al.(2023) 사질토 지반의 내부에 압력변환기를 설치하여 원형기초로 인한 연직응력 증분의 분포를 측정하였다. Lee et al.(2022)은 사질토 지반의 상부에 중공블록을 설치하여 실내 평판 재하 실험을 진행하였으며, 지반 내부에 매설된 스트레인 게이지 타입의 토압계를 통해 중공블록 기초 공법의 보강 효과를 파악하였다. Lim(2004)은 대상 등분포 하중이 작용하는 사질토 지반 내부의 연직 응력 증분을 스트레인 게이지 타입의 토압계를 활용하여 측정하였으며, 이를 Boussinesq의 탄성해와 비교하였다. Nam and Lee(2010)은 사질토 지반 내부에 스트레인 게이지 타입의 토압계를 설치하여 지반의 상대 밀도 및 지반의 상부에 성토된 자갈층이 지반 내부의 연직 토압에 미치는 영향을 분석하였다. 상기 언급한 연구(Keskin et al., 2023; Keskin et al., 2008; Lee et al., 2022; Lim, 2004; Nam and Lee, 2010; Useche-Infante et al., 2018)에서는 지반 내 토압을 측정하기 위해 금속 재질의 강성이 큰 압력계를 이용하였다. 하지만 Peattie and Sparrow(1954)와 Weiler Jr and Kulhawy(1982)에 따르면, 지반과 센서 사이의 큰 강성 차이는 측정 토압의 정확성에 영향을 줄 수 있다. 따라서 본 연구에서는 토압계의 강성이 지반 내부 토압 측정의 정확성에 미치는 영향을 최소화하기 위해 비교적 강성이 적은 박막형 압전 센서를 활용하고자 한다.

최근 몇몇 지반공학 관련 연구(Al-Khafaji et al., 2022; Paikowsky et al., 2006; Shin et al., 2022; Żarkiewicz and Qatrameez, 2021)에서는 박막형 압전 센서를 활용하여 토압을 측정하였다. Żarkiewicz and Qatrameez(2021)은 Single point 타입 압전 센서의 배열 형태인 촉각센서를 말뚝 절반 깊이의 지반 내부에 매설하여, 말뚝에 수직으로 작용하는 하중이 주변 사질토 지반의 연직 및 횡방향 응력 분포에 미치는 영향을 확인하였다. Paikowsky et al.(2006)은 사질토 지반과 얇은 기초 모형체 사이에 촉각 센서를 설치한 후, 기초에 대상 등분포 하중 재하 시 접지압 분포를 실험적으로 파악하였다. Shin et al.(2022)은 스프링과 대시팟이 적용된 변위 말뚝에 Single point 타입의 압전 센서를 부착하여 주변에 작용하는 횡토압을 측정하였다. Al-Khafaji et al.(2022)는 강성을 가진

압밀 셀의 벽면에 Single point 타입의 압전 센서를 부착하여, 횡방향 구속 조건에서 흙의 정지토압계수를 실험적으로 평가하였다. 종합해 보면, 현재까지 박막형 압전 센서를 이용하여 토압을 측정하는 대부분의 연구에서는 챔버의 벽면, 얇은 기초의 밑면, 말뚝의 주변에 박막형 압전 센서를 부착하여 센서의 한 면이 단단한 벽체와 맞닿은 상황에 사용되고 있다. 즉, 지반에서 지반 구조물로 전이되는 연직 및 횡방향 토압을 측정하는데 박막형 센서를 사용하였다. 하지만, 구조물에 작용하는 토압의 경우, 기존 금속 케이싱 적용 토압계를 이용하여서도 충분히 합리적인 측정이 가능하다. 또한 박막형 압전 센서의 배열 형태인 촉각센서는 응력의 분포를 확인하기 위해 사용될 수 있는 효과적인 응력 측정 센서이지만, 지반 내부에 매설된 상황에서는 배열 구조로 인한 넓은 면적이 지반 거동에 영향을 줄 수 있으므로 주의가 필요하다. 이에 반해 Single point 압전 센서는 비교적 적은 면적을 가지고 있으므로 촉각센서에 비해 범용적으로 활용될 수 있다.

박막형 압전 센서는 얇고 유연하다. 따라서, 이를 활용하여 지반의 거동과 응력 경로의 교란을 최소화 하면서 지반 내부 응력을 측정할 수 있다. 하지만 현재까지 Single point 박막형 압전 센서를 이용하여 안정적이고 재현성 있는 명확한 토압 측정 방법론이 구축되지 않은 실정이다. 이에 본 연구는 박막형 압전 센서를 이용하여 사질토 지반 내부의 응력을 측정하는 방법론을 제안하고자 한다.

본 연구에서는 박막형 압전 센서를 마이크로컨트롤러(Microcontroller)의 일종인 아두이노에 연결하여 계측값을 측정하고 기록하였다. 압전 센서를 교정하기 위한 챔버를 제작하였으며, 센서가 구조물에 부착된 경우(한쪽 면만 흙에 맞닿은 경우) 및 지반 내부에 센서가 매설된 경우(양쪽면 모두 흙에 맞닿은 경우)에 토압 측정값을 기록하여 그 변동성을 평가하였다. 또한, 센서 감지영역에 균등하게 압력을 분포시키기 위해 부착되는 펄의 효율성을 각각의 경우에 검증하였다. 모든 경우에 있어서 토압 측정의 변동성은 결정계수를 통해 평가하였다.

## 2. 실내 실험

### 2.1 박막형 압전 센서의 원리 및 활용

Fig. 1은 박막형 압전 센서의 구조를 도식화 하여 보여 준다. 박막형 압전 센서의 가장 외부에는 Flexible substrate

층이 존재하여 물리적 손상으로부터 센서를 보호하며, 외부 환경으로부터 센서 내부를 격리시킨다. Fig. 1에서 은 재질의 Conductive layer는 센서에 입력 및 출력되는 전압을 전달한다. 센서의 중앙에는 Pressure-sensitive layer가 있으며, Pressure-sensitive layer의 전기저항은 가해지는 압력에 따라 변화한다. 센서의 정중앙에 위치하는 Adhesive layer는 센서의 각 층을 결합한다.

Fig. 2는 박막형 압전 센서의 작동 원리를 도식화 하여 설명한다. Fig. 2와 같이 Pressure-sensitive layer는 2개의 Force pad가 비전도성의 Polymer film 위아래에 위치한다. Polymer film 내부에는 매우 작은 다수의 Conductive filler 입자가 섞여 있다. 센서에 힘이 가해지지 않는 경우, Fig. 2(A)와 같이, Conductive filler 입자는 서로 연결되어 있지 않으며, Polymer film은 비전도성이므로, 5 MΩ 이상의 큰 전기 저항을 가지게 되어, Force pad 간의 전압이 거의 전달되지 않는다. 만일 박막형 압전 센서에  $\sigma_1$ 의 압력이 가해진다면, Fig. 2(B)와 같이, Pressure-

sensitive layer는 압축되고, Conductive filler 입자가 연결되어 Conductive path가 형성된다. 이에 따라, Pressure-sensitive layer의 전기저항이 감소하며, Force pad 사이에서 전압이 전달된다. Fig. 2(C)와 같이  $\sigma_2$  보다 더 큰 압

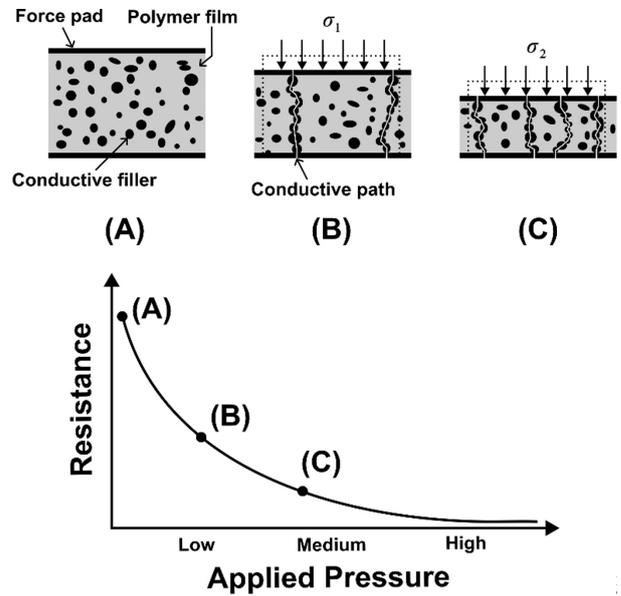


Fig. 2. Operating principle of a force sensing resistor (modified after Kootahi and Leung (2022))

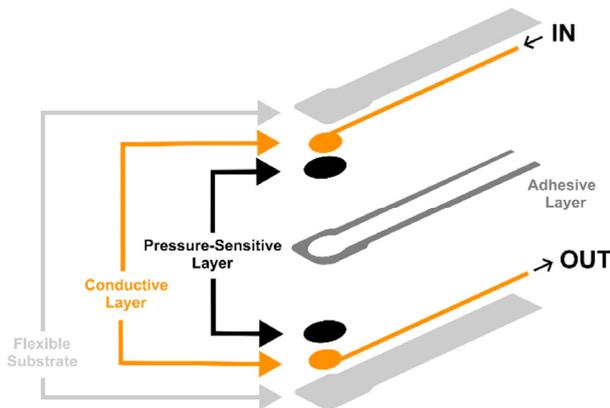


Fig. 1. Schematic diagram of the structure of a force sensing resistor



Fig. 3. Force sensing resistor used in this study (Flexiforce A201 sensor)

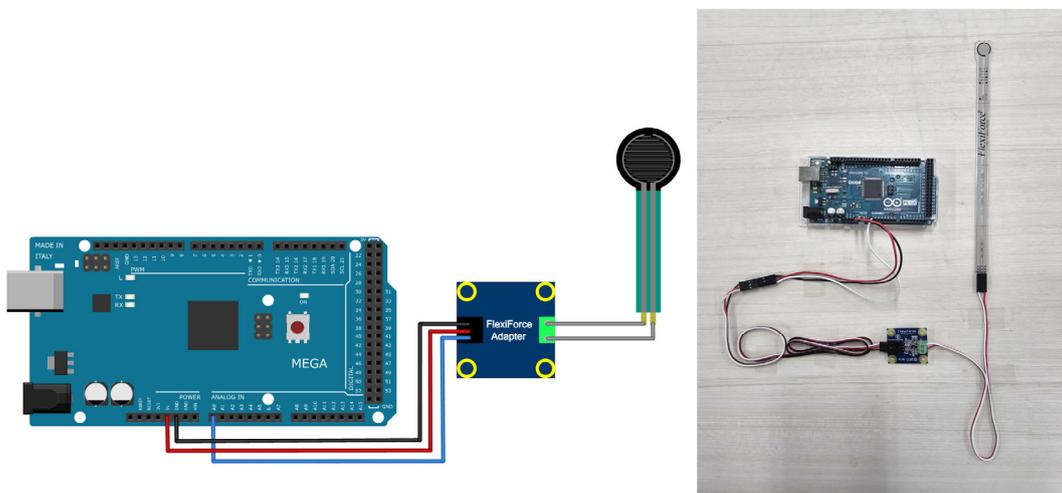


Fig. 4. Wiring diagram (left) and photo (right) with Arduino, Flexiforce adapter, and force sensing resistor

력인  $\sigma_2$ 가 센서에 가해진다면, 더 많은 Conductive path가 형성되며, 이에 따라 전기저항은 더 감소하고, 더 큰 전압이 Force pad 사이에서 전달된다. 즉, 센서에 더 큰 힘이 가해질수록 더 많은 Conductive path가 형성되고, 이에 따라 Fig. 2의 그래프와 같이 센서의 전기저항은 감소하고, 더 큰 전압이 출력된다.

본 연구에서는 압전 센서로 Tekscan사의 Flexiforce A201 센서(Fig. 3)를 사용하였다. 박막형 압전 센서는 Phidgets사의 Flexiforce Adapter를 통하여 Fig. 4와 같이 마이크로콘트롤러인 아두이노 메가 2560으로 연결된다. 마이크로콘트롤러는 회로 및 센서에서 발생하는 미세한 데이터 변동을 제거하기 위해 1ms 간격으로 10개 데이터를 측정 후, 이를 평균하여 출력한다.

## 2.2 센서 교정용 챔버

Fig. 5는 박막형 압전 센서 교정을 위해 제작한 챔버의 도식도 및 전경을 보여준다. 챔버는 하부 프레임과 상부프레임, 탑 캡으로 구성된다. 챔버 내부에는 직경 10cm, 높이 2cm의 모형지반을 조성할 수 있다. 상하부 프레임은 정밀하게 결합되도록 설계되었으며, 볼트로 결합하여 프레임 간의 상대 회전을 방지하였다. 하중을 모형지반으로 전달하는 탑 캡의 직경은, 챔버 내부 직경보다 소폭 작아, 가해지는 하중이 프레임으로 전달되지 않고 온전히 모형지반으로 전달되도록 하였다.

## 2.3 모형지반 조성

Weiler Jr and Kulhawy(1982)에 따르면, 센서의 감지 직경이 입자의 평균 입경에 비해 충분히 크지 않을 경

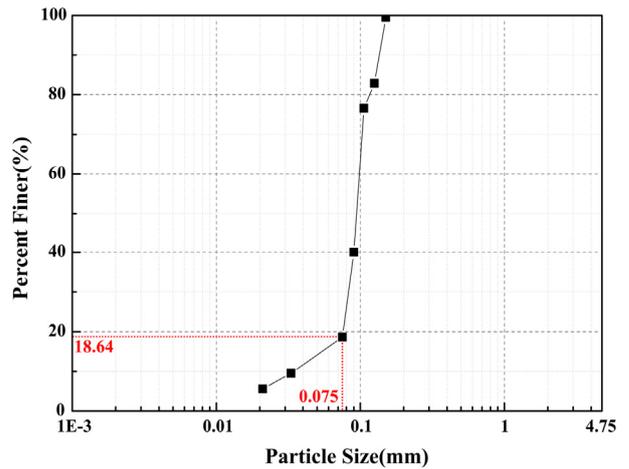
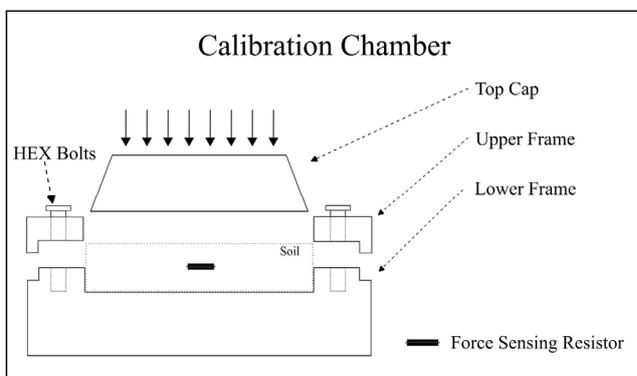


Fig. 6. Particle size distribution curve of the sand applied in this study

우, 토압 측정의 변동성을 증가시킨다. 본 연구에서는 100번 체를 100% 통과하는 파쇄 모래(규사 8호)를 사용하였다. 체분석 시험(KS F 2302) 수행 결과, 200번 체를 통과 백분율이 18.64%이었다. 200번체 통과분에 대해서는 비중계 시험(KS F 2302)을 수행하였다. Fig. 6은 체분석 및 비중계 시험을 통해 산정한 시험모래의 입도 분포 곡선이다. 시료의  $D_{10}$ ,  $D_{30}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{60}$ (통과 백분율 10%, 30%, 50%, 60%에 해당하는 입자의 크기)는 각각 0.0345, 0.0827, 0.0942, 0.0985mm로 측정되었다. 이에 따라, 균등계수  $C_u(= D_{60}/D_{10})$ 는 2.85, 곡률계수  $C_c(= D_{30}^2/(D_{10}D_{60}))$ 는 2.01로 산정되었으며, 통일분류법에 따르면 시료는 입도가 나쁜 모래(SP)로 분류된다. 비중 시험(KS F 2308) 수행 결과, 시험모래의 비중은 2.628로 측정되었으며, 이는 석영의 비중인 2.65와 유사하다. 즉, 종합해 보면 시험모래는 빈입도의 석영질 모래이다.

시험모래에 대해 최대 최소 간극비 시험(ASTM D 4254)



(a)



(b)

Fig. 5. Calibration chamber: (a) schematic diagram (b) photo

을 수행한 결과, 최소 간극비  $e_{min} = 0.95$ , 최대 간극비  $e_{max} = 1.30$ 으로 측정되었다. 모형지반의 다짐도는 토압 측정을 위한 센서의 교정에 큰 영향을 주는 요소이다 (Labuz and Theroux, 2005; Theroux et al., 2001). 즉, 합리적인 토압 측정을 위해서는 모형지반을 균질하게 조성할 필요가 있다. 이에 따라 본 연구에서는 반복 실험 중, 균질하게 모형지반을 조성하기 위해 건식 침전법 (Ishihara, 1993)을 활용하였다. 건식 침전법을 활용하여 시험모래에 대해 모형지반을 조성한 결과, 그 간극비의 범위는 1.13에서 1.18로 측정되며, 그 평균은 1.165 정도로 산정되었으며, 상대밀도  $D_R$ 은 약 61%이다.

## 2.4 실험 방법 및 조건

Fig. 7은 토압 측정을 위한 박막형 압전 센서 교정 시스템의 전경을 보여준다. 교정 시스템은 모형 지반에 하중을 재하하기 위한 인장압축 시험기와, 교정 챔버, 박막형 압전 센서, 압전 센서 제어를 위한 마이크로컨트롤러 및 PC로 구성된다. 인장압축 시험기에 부착된 휠을 통해 모형지반에 하중을 천천히 가하여 충격의 영향을 최소화하였다.

이론적으로 감지영역에 수압과 같은 등분포 하중이 가해지는 조건에서 박막형 압전 센서의 안정적인 활용이 가능하다. 하지만 흙은 입자로 구성되어 있으므로,

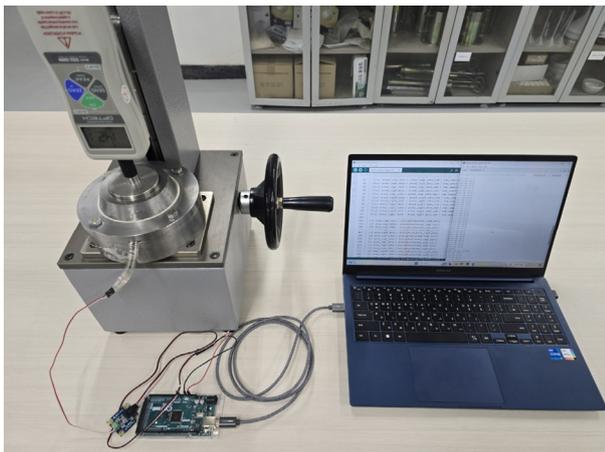


Fig. 7. Overview of the calibration system with a force sensing resistor embedded in the ground

감지영역에는 이산하중이 작용하며, 이는 박막형 압전 센서를 통한 토압의 측정에 있어 재현성을 저해하는 요소 중 하나이다. 이를 보완하기 위해 이산하중을 감지영역에 균질하게 분배할 필요가 있으며, Tekscan(2020)은 센서의 감지영역에 펍(얇은 원형 디스크)을 부착할 것을 제안하였다. 본 연구에서는 펍의 유무에 따른 토압 측정의 변동성을 검토하였으며, 펍을 적용할 경우, PETG (Polyethylene terephthalate glycol-modified) 재질의 펍을 센서 감지영역에 부착하였다. Table 1은 펍의 재질인 PETG의 물성을 나열하여 보여준다. 펍을 적용할 경우, 압전 센서가 흙 입자와 맞닿은 직경 9.75mm의 감지영역에 타공 원형 펀치를 통해 가공된 직경 9mm, 두께 0.5mm의 원형 펍을 0.1mm 두께의 양면 테이프를 통해 부착하였다.

본 연구의 실험 과정은 다음과 같다. (1) 챔버의 벽면에 구리사를 도포하여 벽면마찰을 저감한다. (2) 챔버의 하부 프레임에 건식 침전법을 사용하여 센서의 하부지반을 조성한 후 높이 1cm에 맞추어 레벨링을 진행한다. (3) 상부 프레임에 0.075mm 두께의 테이프를 통해 박막형 압전 센서를 부착하고, 육각 볼트를 통해 하부프레임과 결합한다. (4) 박막형 압전 센서의 상부 지반을 조성하기 위하여 다시 건식 침전법을 사용한 후, 높이 1cm에 맞추어 레벨링을 진행한다. (5) 모형지반에 충격이 가해지지 않도록 주의하며 센서가 설치된 모형지반 위에 탐 캡을 올려놓은 후 인장압축 시험기를 통해 모형지반에 약 5kPa 간격으로 하중을 증가하였다.

일반적으로 첫번째 하중 재하 단계에서는, 가하는 하중과 센서의 출력값은 선형관계를 형성한다(Zhu et al., 2009). 하중 제거 및 재재하 단계에서는 지반 내부의 소성변형의 영향으로 하중과 센서 출력값은 비선형적 관계를 형성한다. 본 연구에서는 반복되는 실험에 대해서 첫 하중 재하 단계에서 얻어진 데이터를 이용하여, 하중과 센서 출력값의 선형관계의 재현성 및 유사성을 평가하였다.

본 연구에서는 센서의 설치 위치 및 펍의 유무에 따라 5개의 실험 조건을 설정하였으며, 이는 Table 2와 같다. Table 2의 WP 조건에서는 센서의 성능을 검증하기

Table 1. Material properties of PETG (Polyethylene terephthalate glycol-modified)

| Specific Gravity | Tensile Strength (MPa) | Percent Elongation (%) | Bending Strength (MPa) | Flexural Modulus (MPa) | Load Deformation Temperature (°C) |
|------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------------------|
| 1.27             | 54                     | 29%                    | 77.7                   | 2140                   | 69                                |

Table 2. Experiment case setup

| Case    | Application of Pucks | Thickness of the Pucks | Sensor Installation Location |
|---------|----------------------|------------------------|------------------------------|
| WP      | O                    | 0.5 mm                 | On a steel plate             |
| WOP_TOP | X                    | -                      | On the model ground          |
| WOP_IN  | X                    | -                      | Inside the model ground      |
| WP_TOP  | O                    | 0.5 mm                 | On the model ground          |
| WP_IN   | O                    | 0.5 mm                 | Inside the model ground      |

위해서 흙에 닿지 않고 강재판 위에 센서를 설치하고, 재하 하중 대비 센서의 출력값을 확인하였다. 본 연구에서는 박막형 압전 센서의 양쪽 면이 흙과 맞닿은 경우 (Table 2의 WOP\_IN 및 WP\_IN)과 센서의 한쪽 면이 강성을 가진 벽체에 맞닿은 경우(Table 2의 WOP\_TOP 및 WP\_TOP)를 비교하여 센서의 감지 면적에 닿은 매질의 영향을 파악하고, 펙이 부착된 경우(Table 2의 WP\_IN 및 WP\_TOP)와 펙이 부착되지 않은 경우(Table 2의 WOP\_IN 및 WOP\_TOP)를 비교하여 펙이 토압 측정의 재현성에 미치는 향상 효과를 확인하고자 한다. Table 2의 각 실험 조건에 대해 4회 반복 실험을 수행하였으며, 하중과 압전 센서의 출력값에 대해 추세선(Regression line)을 구축하고, 결정계수( $R^2$ )를 산정하여, 각 조건에 대해 토압 측정의 재현성 및 변동성을 비교하였다.

### 3. 실험 결과 및 토의

본 연구에서는 흙입자에 접촉하지 않은 센서에 하중을 가하고 그 출력값을 기록하여, 센서 자체의 재현성을 평가하였다(WP). 감지영역의 직경이 9.75mm 센서를 강재 판 상부에 설치한 후, 직경 9mm의 강재 지그를 통해

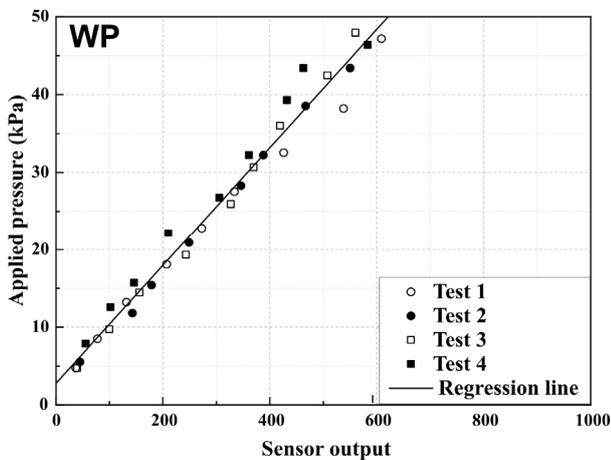


Fig. 8. Calibration results of a force sensing resistor on the steel plate (WP)

약 5kPa씩 하중을 증가시키며 출력값을 기록하였다. Fig. 8은 센서에 가해진 하중과 박막형 압전 센서의 출력값의 관계를 보여준다. Fig. 8에서 가로축은 압전 센서에서 출력된 아날로그 데이터이며, 세로축은 센서에 가해진 하중이다. 동일한 조건에서 4회 반복 실험하였으며, 이를 기반으로 선형 추세선을 산정하였다. Fig. 8에서 보여지듯, 하중의 증가에 따라 센서의 출력값이 선형적으로 증가하였으며, 이는 센서의 선형성을 나타낸다. 반복 실험 결과를 종합하여 산정한 결정계수( $R^2$ )는 0.9781로, 본 연구에 사용된 박막형 압전 센서는 충분한 재현성을 가지는 것으로 판단된다.

Fig. 9는 펙이 박막형 압전 센서에 부착되지 않았을 때, 토압 측정값과 하중 사이의 관계를 보여준다. Fig. 9(a)에서 압전 센서는 지반 상부에 위치하여, 한 면은 강성을 가진 탑 캡과 맞닿아 있으며, 한 면은 흙입자와 맞닿아 있다. Fig. 9(b)에서는 압전 센서는 지반 내부에 매설되었다. 각 실험은 4회 반복하였으며, 선형 추세선을 통해 토압 측정의 재현성을 확인하였다. Fig. 9(a)에서는 하중이 증가함에 따라, 압전 센서 출력값은 비교적 선형적으로 증가하며, 결정계수는 0.9447로 측정되어, 센서가 고강성의 구조물에 부착될 경우, 비교적 안정적으로 토압을 측정할 수 있음을 확인하였다. 지반 내부에 센서가 매설된 경우(Fig. 9(b)), 압전 센서 출력값과 하중의 관계는 실험을 반복함에 따라 때때로 선형적 혹은 비선형적 관계를 보였으며, 결정계수는 0.7063으로 센서의 한 면이 강성을 가진 벽체와 맞닿은 경우(Fig. 9(a))에 비해 토압 측정의 변동성이 커, 재현성 있는 토압의 측정이 어려움을 확인하였다. 이는 센서의 양면이 흙입자와 맞닿을 경우, 지반 상부로부터 압전 센서를 지나 지반 하부로 전이되는 이산적인 힘이, 유연한 박막형 압전 센서를 변형시키며, 이로 인해 토압 측정의 재현성이 떨어진 것으로 판단된다.

Fig. 10은 박막형 압전 센서에 펙을 부착하였을 때, 토압 측정값과 하중 사이의 관계를 보여준다. Fig. 10(a)

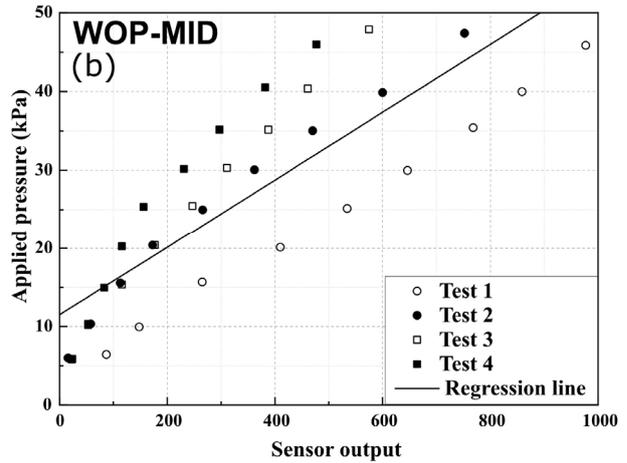
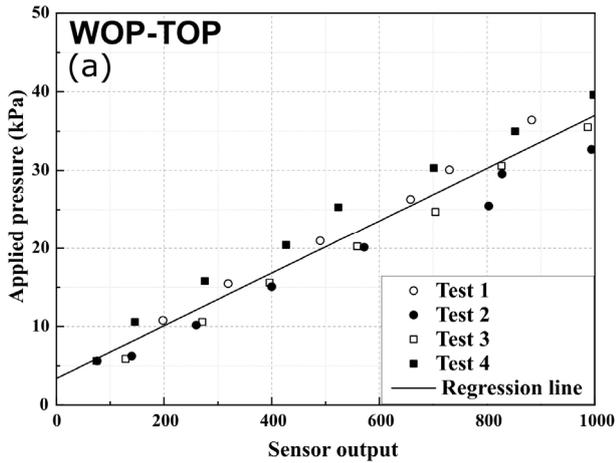


Fig. 9. Calibration results of force sensing resistors without a puck: (a) sensor attached to the top cap (WOP-TOP), (b) sensor embedded in the sand ground (WOP-MID)

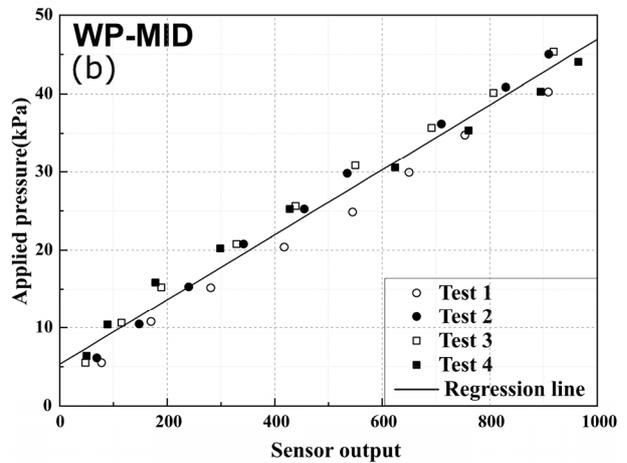
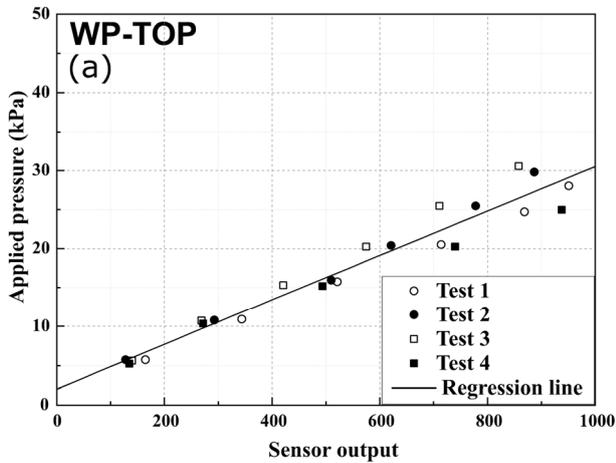


Fig. 10. Calibration results of force sensing resistors with pucks: (a) sensor attached to the top cap (WP-TOP), (b) sensor embedded in the sand ground (WP-MID)

에서 압전 센서는 지반 상부에 위치하여, 한 면은 강성을 가진 탑 캡과 맞닿아 있으며, 한 면은 흙입자와 맞닿아 있다. Fig. 10(b)에서는 압전 센서는 지반 내부에 매설되었다. 마찬가지로 각 실험은 4회 반복하였으며, 선형 추세를 통해 토압 측정의 재현성을 확인하였다. 펙이 부착된 압전 센서의 한 면이 견고한 벽체와 맞닿은 경우(Fig. 10(a)), 반복된 4회의 실험에서 하중의 증가에 따라 압전 센서 출력값이 선형적으로 증가하였으며, 결정계수는 0.9468로 펙이 없는 경우(Fig. 9(a))와 유사한 값이 산정되었다. 따라서, 센서의 한 면이 강성을 가진 구조물과 맞닿을 경우, 압전 센서의 감지영역에 부착된 펙의 영향이 크지 않은 것으로 파악되었다. 감지영역의 양면에 펙이 부착된 압전 센서를 지반에 매설한 경우(Fig. 10(b)), 상부하중과 센서 출력값은, 펙이 부착되지 않은 경우(Fig. 9(b))와는 다르게, 비교적 선형적 관계를

가진다. 이 경우, 결정계수는 0.9761로 산정되어, Fig. 9(b)와 비교하였을 때, 펙을 적용할 시 지반 내부에 설치된 압전 센서의 측정 변동성은 크게 감소하였다. 이를 통해 박막형 압전 센서의 감지 영역에 부착된 펙은 지반 내부에 매설된 압전 센서의 토압 측정 변동성을 저감할 수 있음을 확인하였다.

Table 3은 각 실험 조건에 대해서 반복실험 결과 산정

Table 3. Coefficient of determination ( $R^2$ ) for each experimental case

| Case    | Coefficient of Determination |
|---------|------------------------------|
| WP      | 0.978                        |
| WOP_TOP | 0.945                        |
| WOP_MID | 0.706                        |
| WP_TOP  | 0.947                        |
| WP_MID  | 0.976                        |

된 결정계수를 나열한다. 종합해보면, 강성을 가진 구조물에 부착할 경우, 퍽의 부착 없이도 박막형 압전 센서는 토압을 재현성을 확보하면서 측정할 수 있다(Table 3의 WOP\_TOP). 하지만 압전 센서가 지반 내부에 매설될 경우, 퍽이 없을 경우(Table 3의 WOP\_MID) 결정계수가 작아, 신뢰성 있는 토압 측정이 의심된다. 이를 보완하기 위해 약강성의 퍽을 센서 감지영역에 부착할 경우(Table 3의 WP\_MID), 결정계수가 크게 증가하여 토압 측정의 재현성이 확보됨을 확인하였다.

#### 4. 요약 및 결론

박막형 압전 센서는 스트레인 게이지 타입의 토압계에 비해 얇고 유연하며 작은 강성을 가지고 있어, 지반 거동의 교란을 최소화하여 정확한 지반 내부 응력의 측정에 활용 가능하다. 또한, 스트레인 게이지 타입의 토압계에 비해 경제적이며, 측정 부수 장비 또한 경제적으로 구축할 수 있다.

본 연구에서는 구조물에 부착될 경우 및 지반 내부에 매설될 경우에 대해 박막형 압전 센서를 활용하여 토압을 측정하는 실험적 방법론을 구축하기 위해 교정 실험을 반복 수행하였다. 압전 센서가 지반 내부에 매설되어 지중응력을 측정하는 상황과 강성을 가진 구조물에 맞닿아 구조물에 전달되는 토압을 측정하는 상황을 모두 모사하기 위해 챔버를 제작하였다. 또한, 센서의 감지영역에 부착된 퍽이 토압 측정의 재현성에 미치는 영향을 확인하였다.

센서가 강성을 가진 구조물에 맞닿은 경우, 퍽의 유무에 상관없이 토압 측정의 재현성이 충분함을 확인하였다. 반면, 지중에 센서를 매설하여 지중 응력을 측정한다면, 퍽을 부착하지 않은 경우, 토압 측정의 재현성이 현저히 떨어지며 이는 토압 측정의 신뢰성 또한 감소시킨다. 하지만, 퍽을 부착한 경우, 흡입자로부터 전달되는 이산적 하중을 퍽이 센서로 균등하게 분배하여 토압 측정의 재현성이 크게 상승하는 것을 확인하였다.

본 연구는 박막형 압전 센서를 활용하여 지중 응력을 합리적으로 그리고 신뢰성 있게 측정하는 방법론을 제시한다. 이를 바탕으로, 실내 모형실험, 현장 실험, 지반 구조물 시공 및 유지관리에서 간단하게 합리적이고 경제적인 지반 내부 응력 측정이 박막형 압전 센서를 활용하여 가능하리라 생각된다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(No. 2022R1F1A1074378).

## 참고문헌 (References)

1. Al-Khafaji, K. R., Fattah, M. Y., and Al-Recaby, M. K. (2022), "Measurement of the Lateral Earth Pressure Coefficient of Clayey Soils by Modified Oedometer Test", *Engineering and Technology Journal*, Vol.40, No.11, pp.1376-1384.
2. ASTM D4254 (2006), "Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density", *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
3. Ishihara, K. (1993), "Liquefaction and Flow Failure during Earthquakes", *Geotechnique*, Vol.43, No.3, pp.351-451.
4. Keskin, M. S., Bildik, S., and Laman, M. (2023), "Experimental and Numerical Studies of Vertical Stresses Beneath the Circular Footings on Sand", *Applied Sciences*, Vol.13, No.3.
5. Keskin, S., Laman, M., and Baran, T. (2008), "Experimental Determination and Numerical Analysis of Vertical Stresses under Square Footings Resting on Sand", *Teknik Dergi*, Vol.19, No.4, pp.4521-4538.
6. Kootahi, K. and Leung, A. K. (2022), "Effect of Soil Particle Size on the Accuracy of Tactile Pressure Sensors", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.148, No.10.
7. KS F 2032 (2002), "The Method for Particle Size Distribution of Soils", *Korean Standard*, Korean Agency for Technology and Standards, Chungcheonbuk-do, Korea.
8. KS F 2308 (2016), "Standard Test Method for Density of Soil Particles", *Korean Standard*, Korean Agency for Technology and Standards, Chungcheonbuk-do, Korea.
9. Labuz, J. F. and Theroux, B. (2005), "Laboratory Calibration of Earth Pressure Cells", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.28, No.2, pp.188-196.
10. Lee, C., Shin, E., and Yang, T. (2022), "Analysis of Reinforcement Effect of Hollow Modular Concrete Block on Sand by Laboratory Model Tests", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.38, No.7, pp.49-62.
11. Lim, J. (2004), "An Experimental Investigation of Boussinesq's Theoretical Value of Vertical Stress Increment in Sandy Soil Mass Caused by Surface Strip Loading", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.20, No.9, pp.7-15.
12. Nam, H.-S. and Lee, S.-H. (2010), "Characteristics of Vertical Stress Distribution in Sandy Soil According to the Relative Compaction and Composition of the Soil Layer", *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol.52, No.2, pp.43-50.
13. Paikowsky, S. G., Palmer, C. J., and Rolwes, L. E. (2006), "The Use of Tactile Sensor Technology for Measuring Soil Stress Distribution", *GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age*, pp.1-6.
14. Peattie, K. R. and Sparrow, R. (1954), "The Fundamental Action

- of Earth Pressure Cells”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol.2, No.3, pp.141-155.
15. Shin, S., Lee, H., and Woo, S. I. (2022), “Experimental Assessment of Reduction in the Negative Skin Friction Using a Pile with a Member Responding to Ground Deformation”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.38, No.3, pp.5-16.
  16. Tekscan (2020), *Best practices in mechanical integration of the FlexiForce™ sensor*, Tekscan Inc, South Boston, MA.
  17. Theroux, B., Labuz, J. F., and Dai, S. (2001), “Field Installation of an Earth Pressure Cell”, *Transportation Research Record*, Vol.1772, No.1, pp.12-19.
  18. Useche-Infante, D., Aiassa-Martínez, G., Arrúa, P., and Eberhardt, M. (2018), “Scale Model to Measure Stress under Circular Footings Resting on Sand”, *International Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.15, No.7, pp.877-886.
  19. Weiler Jr, W. A., and Kulhawy, F. H. (1982), “Factors Affecting Stress Cell Measurements in Soil”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol.108, No.12, pp.1529-1548.
  20. Żarkiewicz, K., and Qatrameez, W. (2021), “Assessment of Stress in the Soil Surrounding the Axially Loaded Model Pile by Thin, Flexible Sensors”, *Sensors*, Vol.21, No.21, pp.7214.
  21. Zhu, B., Jardine, R., and Foray, P. (2009), “The Use of Miniature Soil Stress Measuring Cells in Laboratory Applications Involving Stress Reversals”, *Soils and Foundations*, Vol.49, No.5, pp.675-688.

Received : April 13<sup>th</sup>, 2024

Revised : April 15<sup>th</sup>, 2024

Accepted : April 15<sup>th</sup>, 2024