

# 국내 하중계 성능검증과 신뢰성 시험 연구

## Performance Verification and Reliability Test of Load Cell Gauge in Korea

김 영 배<sup>1</sup> Kim, Yeong-Bae 박 영 배<sup>2</sup> Park, Yeong-Bae  
이 성 원<sup>3</sup> Lee, Seong-Won 이 강 일<sup>4</sup> Lee, Kang-Il

### Abstract

Monitoring the site of an underground construction wall is crucial to confirm the stability of the supports and ground due to excavation. In particular, it is essential to maintain the accuracy of a load cell gauge, which identifies the load of the support transmitted from the excavated ground. However, research on verification methods and regulations that can identify the accuracy of load cell gauges at construction sites is inadequate, which is a problem as load cell gauges are installed without proper performance inspections. In this study, performance tests were conducted by a complete investigation of load cell gauges sold in Korea and comparing them with foreign products to determine defect causes. In addition, the criteria for selecting a load cell gauge were presented, and the results of this study were considered to help select a highly reliable load cell gauge.

### 요 지

흙막이 현장에서 계측은 굴착으로 인한 지보재와 지반의 안정성 확인을 위해 필수적으로 수행해야 하는 중요한 요소이다. 특히, 굴착지반에서 전달되는 버팀대의 하중 전달 추이를 확인하는 하중계는 정확도 유지가 필수적이다. 그러나, 건설 현장에서는 하중계의 정확도를 파악할 수 있는 검증 방법, 규정 등의 연구가 부족하여 제대로 된 성능검사 없이 설치됨에 따라 문제가 되고 있다. 본 연구에서는 국내 현장에 사용되는 하중계를 전수조사하여 성능검사를 실시하고 외국 제품과의 비교를 통해 불량 원인을 파악하였다. 하중계의 성능검증을 통해 성능검사 기준을 제시하였으므로 본 연구 결과는 신뢰성 높은 하중계를 선택하는 데 도움이 될 것으로 판단된다.

**Keywords :** Accuracy, Cause of failure of load cell gauge, Load cell plate, Verification method and regulations

- 1 정희원, 대진대 토목환경공학과 박사수료, 한국건설계측검교정센터(주) 대표 (Member, Ph. D. Candidate, Civil and Environmental Engrg. at Daejin Univ., President of Korea Construction Instrument Calibration Center Co. Ltd.)
- 2 비희원, 대진대 스마트시티 건설융합공학과 박사과정, 서울교통공사 부장 (Ph. D. Student, Dept. of Smart City Construction Convergence Engrg. at Daejin Univ., General Manager of Seoul Transportation Corporation)
- 3 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 선임연구위원 (Member, Ph. D. Senior Research Fellow, Dept. of Geotechnical Engrg. Research, Korea Institute of Civil Engineering & Building Technology, Tel: +82-31-910-0226 Fax: +82-31-910-0211, swlee@kict.re.kr, Corresponding author, 교신저자)
- 4 정희원, 대진대학교 스마트건설환경공학부 교수 (Member, Prof., Smart Construction and Environmental Engrg. at Daejin Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2024년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2023 by the Korean Geotechnical Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서론

흙막이 굴착 현장에서 가시설 부재의 안정성을 파악하기 위해 설치되는 하중계의 신뢰성은 매우 중요하다. 최근 국토교통부에서는 지반 취약 구간 등에 대해 굴착공사 시 경사계, 수위계, 하중계 등에 대해 실시간 자동화 계측으로 지반 상태를 지속적으로 관찰하고 허용기준 초과 시 공사 중지 등 조치를 취하도록 하고 있다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2023). 그중에 하중계는 가시설 현장의 자동화 계측기 중에서도 중요도가 1순위로 선정될 정도로 높은 것으로 나타났다(KICT, 2013).

건설계측기기 산업이 국내에 도입된 40여 년이 경과됨에도 불구하고 건설계측 관련 규정 및 제도의 미비로 인해 현장에서는 검증되지 않은 저품질의 계측기기가 사용되고 있다. 국토교통부는 ‘건설기준 표준시방서(KCS 10 50 10)’에서 “모든 계측기기는 완제품 상태에서 검증 절차를 통과한 KOLAS 인증제품 또는 공인기관으로부터 이와 동등 이상의 품질을 인증받은 제품 중에서 선정하는 것을 원칙”으로 하는 규정을 제시하였다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2021). 현재 가시설 현장에 사용되는 다양한 형식과 크기의 하중계는 계측기 제조사의 자체 시험성적서에만 의존하고 있는 실정이다. 제대로 된 계측기기의 성능검사와 검·교정 관련 규정, 그리고 이를 점검하고 통제할 방법이 없음에 따라 성능 기준에 적합하지 확인되지 않은 계측기기가 현재까지 적용 및 설치되고 있다고 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 국내 현장에 사용 중인 하중계의 성능검증을 위해 계측기 제조사 13개사에서 판매되고 있는 하중계의 전수조사와 성능검사를 통해 하중계의 문제점을 파악하고, 외산 제품과의 비교하여 신뢰성을 높이기 위한 성능검증 방법과 개선 방안을 제시하고자 한다.

## 2. 하중계 성능검사 기준의 검·교정 관련 규정

### 2.1 하중계의 종류 및 활용

하중계(Load cell gauge)는 Fig. 1과 같이 버팀대의 축력이나 어스앵커의 긴장력을 측정하여 설계치와 비교 및 검토함으로써 배면 지반 및 토류 구조물의 거동과 정착부의 이상 유무 등을 파악하여 버팀보 및 어스앵커의 전반적인 안정 문제를 검토하기 위한 계측기이다(Woo and Lee, 2013). 일반적으로 흙막이 구조물에서 버팀대(Strut)에 대한 계측의 경우에는 버팀대 부재의 단위 단면적의 응력 상태를 측정(kgf/cm<sup>2</sup>)하는 변형률계(Strain gauge) 보다는 버팀대에 전달되는 축 하중 전체를 측정(tf)하는 하중계의 계측 결과에 대한 신뢰도가 높음에 따라 하중계가 갈수록 많이 적용되는 추세이다. 변형률계는 축력을 받는 강재의 경우는 웹(Web), 휨모멘트를 받는 재는 플랜지(Flange)에 설치하는 것이 원칙이나 설치 시에 잘 지켜지지 않고 있고, 대상 부재와 같은 신축을 하여야 하는 강재용 변형률계 경우 반드시 용접에 의한 방법으로 설치해야 함에도 설치의 편의상 일반 접착제를 사용하는 경우가 많음에 따라 변형률계 결과에 대한 신뢰도는 하중계보다 낮은 실정이다(Choi, 2015). 국내에 주로 사용되는 하중계는 스트러트(Strut)에 설치된 버팀대용 하중계(Fig. 1(a))와 어스앵커(Earth anchor) 하중계(Fig. 1(b))가 있다.

하중계는 센서 종류에 따라 진동현식과 전기식으로 구분되는데 국내 건설 현장에서는 대부분 진동현 방식을 사용하고 있으므로 본 연구는 진동현식 하중계에 대해 성능시험을 진행하였다. 진동현식 센서(Vibrating wire sensor)는 물리량의 변화에 따라 탄성체의 고유진동수가 변화하는 현상을 이용한 센서로서 작동 원리는 진동현(Vibrating wire : 경강선)을 센서 구조에 맞게 플랜지

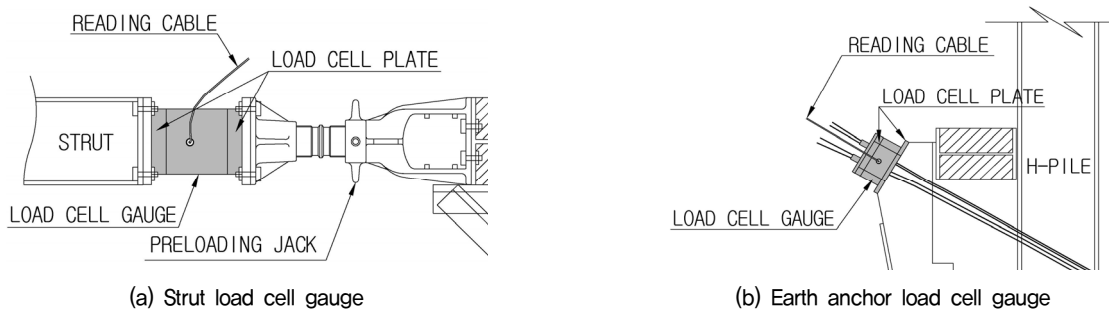


Fig. 1. Location and method of installation of load cell gauge

등의 고정단에 고정하고 전자력을 형성시킬 수 있는 마그네틱 코일(Magnetic coil)을 진동현에 위치 시켜 출력 장치에서 마그네틱 코일에 신호를 입력하면 순간 강한 전자력이 형성되어 진동현의 진동이 발생하고 마그네틱 코일을 통하여 진동현의 진동은 공진주파수로 측정되며 출력장치에 초당 진동수(Frequency:Hz)로 표시된다. 진동현식 센서의 장점은 주파수로 측정되기 때문에 전기적인 노이즈(Noise) 영향을 적게 받음으로 습도에 강해서 방수성이 좋고, 온도계수가 낮으며, 긴 전송 거리와 장기적인 안정성을 가짐으로써 제조 신뢰성만 확보된다면 반영구적인 계측이 가능함에 따라 토목 현장에서 넓게 통용되고 있다(Ace Instrument, 2023).

## 2.2 하중계의 구조와 온도보정

일반적인 진동현식 하중계(Fig. 2)는 열처리된 강재 내부 실린더에 3개의 변형률계(Strain Gauge)가 일정한 각도(120°)로 장착된 형태로써 측정값은 각 게이지에서 측정되는 진동수의 평균을 산정하며 하중계가 압력을 받으면 그에 따른 변위가 발생하고 이를 다시 응력 및 하중으로 환산하는 방식이다. 편심 방지와 정확한 값을 얻기 위해서 3~6개의 진동현 변형률계를 고강도의 강 실린더에 내장하여 하중 변화를 측정하기도 한다. Geokon에서는 변형률계가 장착된 고강도의 강 실린더는 항복 하중의 30% 미만을 유지하도록 설계하기를 권장하였다(Geokon, 2023).

하중계의 온도보정은 로드 셀(Load cell)의 강(Steel) 재료와 거의 동일한 온도계수를 갖는 진동 현(Wire)을 사용

하여 제작하기 때문에  $^{\circ}\text{C}$ 당  $-1.5 \text{ Digits}[\text{Digits} = \text{Hz}^2/1000]$  정도로 미미하므로 거의 영향이 없다(Geokon, 2023). 그러나, 현장에서 버팀대 축력 결과에 대한 온도 변화는 계절에 따른 온도 상승으로 인한 온도 하중이 발생되어 버팀대의 축력이 증가하는 결과를 보인다(Kwon and Lee, 2006). 따라서, 공사 기간과 사계절을 고려한 온도변화량을 산출하여 버팀대에 온도 하중을 결정할 필요성이 있고, 하절기에는 고온 현상이 지속되므로 버팀대의 설계기준은 최소값으로 보고 반영하는 것이 바람직하다. 설계 시 온도에 의해 발생하는 버팀대의 축력 증가량에 대한 설계기준은 12tf를 반영하고 있다(Park and Kim, 2019).

## 2.3 하중계의 성능검사 관련 규정

행정안전부는 “계측기기 성능검사 기준에 관한 규정”에 대한 성능검사 대상, 범위, 기준 등을 제시하고, 성능검사 환경, 방법을 규정하였다(Public Notice of the Ministry of Public Administration and Security, 2021a). 하중계의 계측기기 성능검사 기준에 의한 성능검사의 범위는 외관검사, 측정 변위의 정확도 검사, 구조·기능검사를 포함하고, 최대하중(정격 하중)의 전 범위에 걸쳐서 검사하여야 하며, 검사 하중점은 최소 10개 이상을 선정하고, 전 최대용량까지 3회 이상 성능검사를 한다. 측정 범위는 1500kN 이내, 분해능은 0.1% FS 이하, 정확도는 1.0% FS 이하여야 한다. 국토교통부는 ‘지반공사 표준시방서(KCS 11 10 15)’에서 하중계는 현장의 작용 가능한 최대하중의 200% 이상의 용량을 갖는 것을 사용하기를 제안하였고(Ministry of Land, Infrastructure and

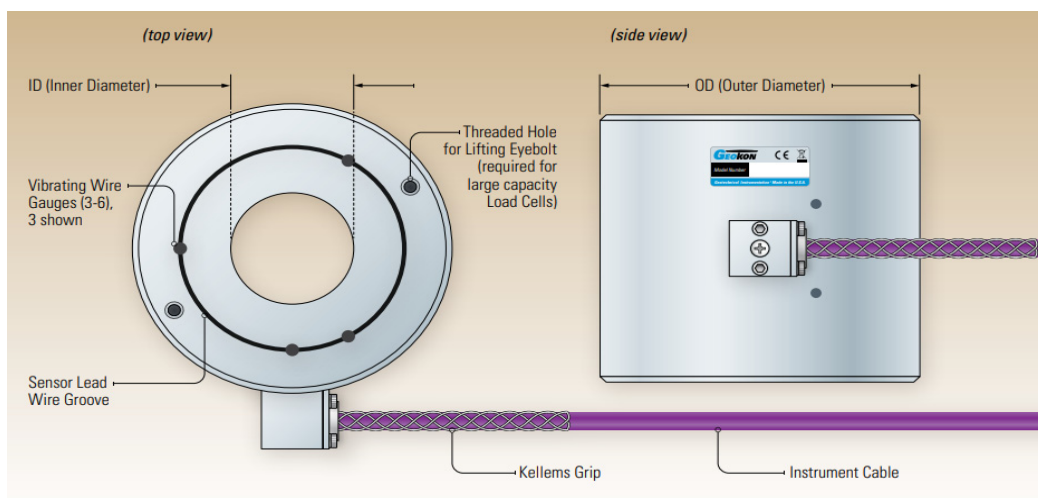


Fig. 2. Vibrating wire Load cell gauge components (Geokon company, 2023)

Transport, 2021), 서울시의 경우 하중계의 사양은 측정 범위는 최대 200tf, 정확도는  $\pm 0.5\%$  FS 이내, 작동온도는  $-20^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ 이고, 온도보정을 위한 온도센서는 내장 되어야 함을 언급하였다(Seoul Metropolitan Government Infrastructure Headquarters, 2015). 하지만, 하중계의 측정 범위는 현장과 구조물의 설계하중에 따라 하중계 용량의 크기가 다를 수 있으므로 하중계 선정 시에 주의가 필요하다. 따라서, 하중계는 현장의 작용 가능한 최대하중의 200% 이상의 용량을 가진 하중계를 선정 후 최대용량의 150%까지 시험(Over range)한 하중계를 선정하여야 하고, 정확도(Accuracy)는 1.0% FS 이하의 하중계를 선택할 것을 제안한다.

### 3. 하중계의 성능검사

하중계의 정확한 성능검증을 위해서 성능검사에 지장이 없는 장소로 독립된 공간을 확보하고, 검증 장치들은 온도와 습도에 민감하므로 성능검사 공간은 정밀한 검증 시험을 위해 표준시험실에 항온 항습기를 설치하여 상시 온도  $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$ , 습도  $50 \pm 2\%$ 를 유지하도록 하였다(Public Notice of the Ministry of Public Administration and Security, 2021b). 하중계의 성능검사 장소로는 검사의 공정성을 높이기 위해 공인기관의 성능검사 및 시험 환경 조건을 갖춘 경기도 소재의 한국인정기구(KOLAS) 인정업체인 “한국건설계측검교정센터”에서 성능검증 시험을 실시하였다(KOLAS, 2023). 또한 행정안전부의 “계측기기 성능검사 기준에 관한 규정”에 따라 하중계의 성능검사 기준인  $\pm 1\%$  F.S 이하의 정확도를 만족하는 조건으로 성능검증 시험을 하였다(Public Notice of the Ministry of Public Administration and Security, 2021c).

### 3.1 하중계의 성능검사 방법

먼저 국내 계측기 제조사 13개 사의 하중계(100tf)의 자체 시험성적서를 검토한 후, 외관검사, 구조·기능검사를 실시하고, 성능검사는 한국인정기구(KOLAS)에서 공인 검·교정된 하중 측정 표준기(분해능 : 0.1kN, 최대용량 : 2000kN)를 이용하여 1차 시험을 하였다. 하중계 성능검사 장치는 Fig. 3과 같이 ① 상부 고정장치, ② 하부 고정장치, ③ 시험용 하중계, ④ 하중 재하 실린더, ⑤ 자동제어 및 기록 장치 순으로 구성되어 있다.

1차 하중계 재하시험 후 결과에 대한 정확도를 재확인하기 위해 시험 결과가 양호한 4개 사의 하중계에 대해 또 다른 공인기관(KOLAS)에서 2차 시험을 하였다. 또한, 객관적인 평가를 위해 진동현식의 계측기기 분야에서 세계적으로 우수한 미국 Geokon 사의 하중계(Fig. 4(b)) 1개를 국산 대비 15배 정도의 고가에 구매하여 국산 하중계의 시험 결과와 대비하여 검토하였다.

### 3.2 성능검사 기준과 제조사 자체 성적서의 비교검토

13개 사 제조사의 자체 시험성적서와 하중계 성능검사 기준(Table 2)과 비교한 결과, Table 1과 같이 하중계 시험(Over range) 기준인 최대 용량(100 tonf)의 약 150%까지 재하시험을 하는 회사는 2개 사(C, D사)이며, 검사 하중점을 최소 10개 이상하여야 한다는 기준에는 4개 사(F, G, H, J사)만 만족하고 있고, 3회 성능검사 시험 횟수 기준에 대해 거의 1~2회만 시행하고 있는 것으로 조사되었다. 계산식의 경우 직선식(Linearity : 1차 함수), 다항식(Polynomial : 2차 함수), 직선+다항식을 혼용하고 있으며, 직선식을 많이 사용하는 것으로 조사되었다.

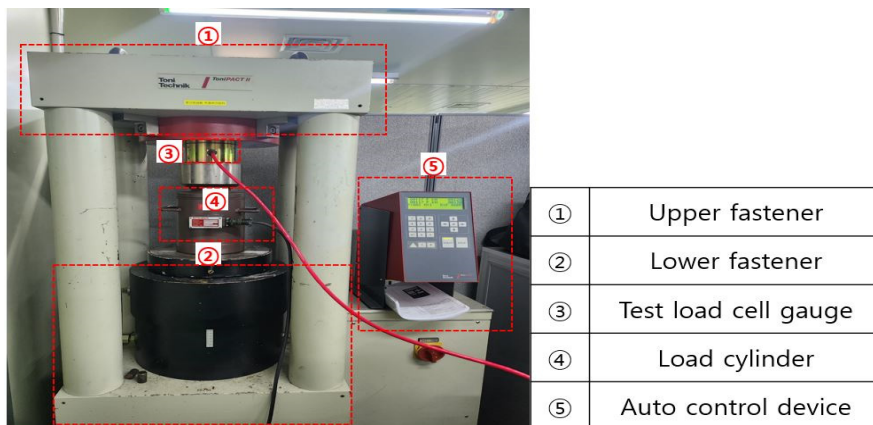
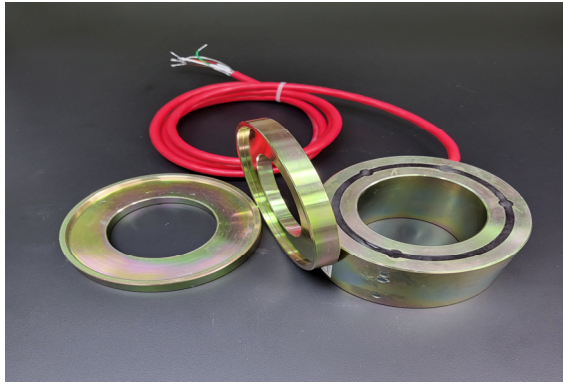


Fig. 3. Load cell gauge performance test device details



(a) A domestic load cell gauge



(b) A foreign-made load gauge (Geokon)

Fig. 4. Load cell gauge including plate

Table 1. Comparison of self-test report of load cell gauge by company

Company	Test load (tonf)		Test load point (Criteria : 10 stage)		Testing method by company		
	Max. load (140)	Test status	Stage	Compare	Calculation formula	No. of tests	Criteriacompare (3times)
A	100	OK	5	NG	Linearity	2	NG
B	120	OK	6	NG	Linearity	2	NG
C	140	OK	7	NG	Linearity	1	NG
D	140	OK	7	NG	Linearity	Unable to check	NG
E	100	OK	5	NG	Lin~+Poly~	1	NG
F	100	OK	10	OK	Lin~+Poly~	2	NG
G	100	OK	10	OK	Linearity	2	NG
H	100	OK	10	OK	Unable to check	1	NG
I	100	OK	5	NG	Lin~+Poly~	1	NG
J	100	OK	10	OK	Lin~+Poly~	2	NG
K	100	OK	5	NG	Linearity	2	NG
L	100	OK	5	NG	Polynomial	1	NG
M	100	OK	5	NG	Polynomial	1	NG

이는 제조사가 정확한 결과 산정을 위해 자체적으로 적합한 계산식을 선정하여 적용하고 있다.

제조사의 자체 성적서와 성능검사 기준을 종합하여 대비해 보면 13개 사 모두 하중계 성능검사 기준을 지키지 않는 것으로 파악되었다.

### 3.3 성능검사 기준에 맞는 성능검사 절차서 작성

행안부의 ‘성능검사 기준에 관한 규정’을 토대로 Table 2과 같이 하중계 성능검사 절차서를 작성하였다(Public Notice of the Ministry of Public Administration and Security,

Table 2. Load cell gauge performance test procedure

No.	Performance inspection procedures
1	The load measurement standard used in the performance inspection shall be capable of loading the load in order of increase and decrease
2	The condition of the load cell gauge and normal operation shall be checked. Conduct a manual measurement of the load cell for normal operation and check whether there is any inability to measure and whether the results are similar to the calibration sheet.
3	Normal operation is checked by applying a pre-load to the maximum load of the load cell gauge.
4	Match the central axis of the load cell gauge with the central axis of the calibrator to prevent eccentric error.
5	It shall be inspected at least three times over the entire range of the maximum load (120° rotation for each test). The inspection load points shall be selected at least five, which are the same load points as the manufacturer's own report, and the distribution shall be uniform if possible.
6	After loading the load cell gauge, load it until no load.

2021c). 성능검사 절차서에 따라서 3회 이상 시험을 하는 것이 원칙이지만 본 시험에서는 하중계 시험 결과와 제조사 자체 성적서의 일치 여부를 파악하기 위해서 1~2회씩 시험한 제조사의 자체 성적서를 근거하여 2회씩 성능검사 시험을 하였으며 그 시험 결과를 자체 성적서와 비교하였다.

### 3.4 하중계 본체의 외관검사

국내산 하중계의 외관검사(Fig. 4(a)) 결과 Table 3과 같이 외경은 평균 11.8cm, 내경은 평균 7.5cm, 높이는 평균 9.2cm, 무게는 평균 5.2kgf로 조사되었고, 외산(Geokon)의 외관검사(Fig. 4(b)) 결과 고강도의 강재를 사용하며 외경 11.4cm, 내경 7.6cm, 높이 11.4cm, 무게 5.3kgf로 확인되었다. 하중계의 실린더 내부에 장착된 3개 진동 현식 센서에 대한 작동 여부에 대한 구조·기능검사는 양호한 것으로 나타났다.

편심 방지, 정확도 향상, 균등한 하중 분산을 위해 실린더 내부에 장착된 변형률 센서는 예전에는 6개의 센서를 사용하다가 원가 절감 등의 이유로 5개, 4개로 줄어다가 현재는 3개의 센서로 제작되고 있다. 이에 따라 편심 발생이 예상되는 대용량의 하중계와 장기간 계측 관리를 해야 할 중요 구조물에는 센서 망실을 대비하여 4~6개의 센서로 제작된 하중계를 사용할 것을 권장하고, 센서 망실 시에는 편심 보정식으로 실제 하중에 가까운 값을 획득하여야 할 것으로 판단된다.

### 3.5 어스앵커용 플레이트의 외관검사

어스앵커 하중계는 잭(Jack)과 플레이트(Bearing plates) 사이에 설치되어 하중을 측정하는 구조이다. 현장에서

하중계를 설치 시에는 원통형 실린더의 중간에서 잭을 당겨 하중 분포가 하중계에 분산되어야 하지만 정교한 설치가 되지 않으면 편심이 발생할 수 있으므로 하중 재하 시 편심 방지용 플레이트(Bearing plates)가 편심을 분산시키는 역할을 한다.

Geokon에 의하면 하중계의 용량이 커지면 원형 실린더의 크기 및 단면적이 커져야 하고, 플레이트도 두꺼워야 함에 따라 Fig. 4(b)의 좌측과 같이 하중계 용량이 75~200 tonf의 경우 최소 38~64mm 두께의 플레이트를 사용하기로 권장하고 있다(Geokon, 2023). 국내에서 주로 사용되는 13개 사의 100tf 하중계의 경우 Fig. 4(a)의 좌측과 같이 상·하부 플레이트 외관검사 결과(Table 4) 플레이트의 평균 두께는 평균 14mm를 보였다. Geokon의 두께 38mm와 비교하면 국내산은 37% 정도로 얇은 것으로 확인되었다. 국산 플레이트의 평균 두께는 외산 대비 37%나 작으므로 편심 방지를 위해 두꺼운 플레이트의 사용이 필요한 것으로 나타났다. 향후 어스앵커 하중계와 스트러트 하중계의 플레이트 두께와 편심 방지를 위한 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다. 일본에서는 과도한 편심이 예상될 경우 하중을 분산시키는 편심 방지용 볼베어링(Ball-bearing) 플레이트에 제작하여 사용하기도 한다.

### 3.6 하중계의 1차 성능검증

국산 13개 사, 외산 1개 사의 하중계 본체의 1차 재하 시험 결과는 Table 5, Table 6과 같다.

하중계 본체의 단계별 하중 재하시험 결과 Table 5과 같이 13개 사 중에 A사 1개 사만이 정확도 기준에 만족하는 0.98% FS로 나타났고, 전체 합격률은 7.7%로 조사되었다. A사의 재하시험 그래프는 Fig. 5(a)과 같이 양

Table 3. Appearance inspection results of load cell gauge body (cm)

Company	Exterior External diameter	Internal diameter	Height	Weight (kgf)	Structural and functional inspection
Domestic Aver	11.8	7.5	9.2	5.2	○
Foreign (Geokon)	11.4	7.6	11.4	5.3	○

Table 4. Domestic load cell gauge plate appearance inspection results (mm)

Company	Exterior Height	Thickness	External diameter	Internal diameter
Domestic Aver	18.5	14.0	129.9	75.7
Foreign (Geokon)	41.3	38.1	127.1	75.7

Table 5. Load test results of domestic load cell gauge body (tonf)

Load Company	Test	20.0	40.0	60.0	80.0	100.0	Result
A	1	19.9	40.4	60.9	81.4	101.7	0.98% < 1.0% FS OK
	2	19.8	40.4	60.8	81.3	101.7	
	Aver	19.8	40.4	60.8	81.4	101.7	
B	1	21.0	40.3	60.4	80.6	101.0	1.57% > 1.0% FS
	2	21.0	40.4	60.3	80.6	101.0	
	Aver	21.0	40.3	60.4	80.6	101.0	
C	1	19.2	37.6	56.2	75.4	94.7	-5.16% > 1.0% FS NG
	2	19.3	37.6	56.3	75.4	94.8	
	Aver	19.2	37.6	56.3	75.4	94.8	
D	1	28.7	47.4	66.6	86.0	105.7	13.87% > 1.0% FS NG
	2	29.0	47.8	66.8	86.2	105.8	
	Aver	28.9	47.6	66.7	86.1	105.7	
E	1	24.2	44.3	64.9	85.9	107.3	10.93% > 1.0% FS NG
	2	24.2	44.4	65.0	85.9	107.3	
	Aver	24.2	44.3	64.9	85.9	107.3	
F	1	15.7	36.3	56.3	76.4	96.7	-8.88% > 1.0% FS NG
	2	15.7	36.4	56.4	76.5	96.7	
	Aver	15.7	36.4	56.3	76.4	96.7	
G	1	28.5	47.7	67.3	87.1	107.4	17.68% > 1.0% FS NG
	2	28.1	47.4	67.1	87.1	107.1	
	Aver	28.3	47.5	67.2	87.1	107.3	
H	1	17.0	36.8	56.2	76.1	96.1	-7.62% > 1.0% FS NG
	2	17.1	36.7	56.2	76.1	96.1	
	Aver	17.0	36.8	56.2	76.1	96.1	
I	1	20.7	40.7	61.1	81.4	102.2	2.53% > 1.0% FS NG
	2	21.1	40.9	61.3	81.7	102.2	
	Aver	20.9	40.8	61.2	81.6	102.2	
J	1	41.0	36.7	42.0	66.7	90.3	27.55% > 1.0% FS NG
	2	48.7	63.6	73.1	85.1	104.6	
	Aver	44.8	50.1	57.6	75.9	97.5	
K	1	20.2	38.8	57.6	76.6	96.1	2.25% > 1.0% FS NG
	2	20.8	39.4	58.1	77.1	96.5	
	Aver	20.5	39.1	57.8	76.8	96.3	
L	1	9.0	26.6	44.4	62.8	81.5	-30.77% > 1.0% FS NG
	2	9.1	26.6	44.5	62.8	81.5	
	Aver	9.1	26.6	44.5	62.8	81.5	
M	1	14.5	34.8	55.3	75.9	96.7	-11.31% > 1.0% FS NG
	2	14.5	34.8	55.3	75.9	96.7	
	Aver	14.5	34.8	55.3	75.9	96.7	

Table 6. Load test results of foreign load cell gauge (tonf)

Load Company	Test	20.0	40.0	60.0	80.0	100.0	Result
Foreign (Geokon)	1	20.3	39.8	59.7	79.9	100.3	0.33% > 1.0% FS OK
	2	20.3	39.8	59.7	79.9	100.3	
	3	20.3	39.8	59.7	79.9	100.3	
	Aver	20.3	39.8	59.7	79.9	100.3	

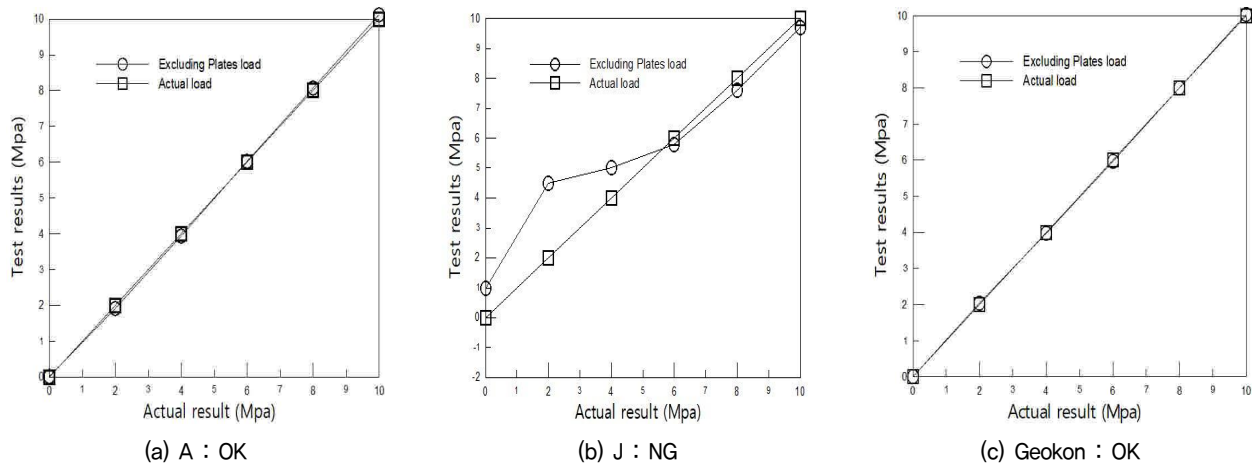


Fig. 5. Graph of load test results of domestic and foreign load cell gauge

호한 결과를 보인다. 정확도 기준에 만족하지 못하는 하중계의 경우 실제 작용하중보다 -30.77~27.55%의 차이를 보이며 92.3%의 불합격률을 보였다. 불합격률이 높은 원인은 고강도의 강 실린더와 정확한 변형률계의 미사용, 정밀하지 못한 제작 공정 및 자체 노하우(know-how) 부족, 공인기관의 성능검사 미시행 등이 주요 원인인 것으로 판단된다. 불합격을 보인 12개 사 중 J사의 재하시험 그래프는 Fig. 5(b)와 같다.

Geokon의 경우 재하시험 결과 Table 6과 같이 0.33% FS 로 제조사 자체 시험성적서의 정확도 기준(0.5% FS) 을 만족하고 국내 정확도 기준(1.0% FS 이내)을 만족하는 양호한 결과를 보였다. 3회 재하시험 결과, Fig. 5(c) 과 같이 그래프 양상은 변화 없이 일정함을 알 수 있다.

### 3.7 플레이트를 포함한 재하시험

이스앵커 플레이트(Plate)를 포함한 국내산 하중계(Fig. 4(a))의 단계별 재하시험 결과 13개 사 중에서 A, K사, 2개 사는 -0.43~0.7% FS 로  $\pm 1.0\%$  FS 이하의 기준에 만족하는 결과를 보였고, 합격률은 15.0%로 나타났다. Table 7과 같이 A사는 하중계 본체시험과 플레이트 포함 시험에서도 정확도 기준( $\pm 1.0\%$  FS) 이내의 양호한 결과를 보였다. K사는 하중계 본체시험에서 2.25% FS 을 보이며 정확도 기준을 초과했지만, 플레이트를 포함한 시험에서는 -0.43% FS로 기준에 만족하는 결과를 보였다. K사가 플레이트를 포함한 재하시험에서 통과한 것은 재하 시 본체와 플레이트에 작용하는 하중 분산의 영향으로 추정된다. 일반적으로 하중계의 오차가 발생하는 원인은 가압판(Bearing plate)의 뒤틀림, 하중계와

가압판의 마찰, 편심 하중, 탄성 거동, 온도 효과 등에 의해 영향을 받을 수 있다(Geokon, 2023).

Table 7에서와 같이 플레이트를 포함한 하중계 재하시험에서 정확도 기준에 미달하는 11개 사의 시험 결과 -44.94~33.68% FS 차이를 보이는 것으로 조사되었다. 이는 Table 5의 하중계 본체의 시험 결과(-30.77~27.55% FS)보다 -14.17~6.13% FS 이상을 초과하는 결과를 보였다. 이는 Table 4와 같이 외산(Geokon)의 38mm 두께 보다 63%나 얇은 14mm 두께의 플레이트를 사용함에 따라 재하 시 편심 발생 등 하중이 제대로 분산되지 못하는 것이 주요 원인인 것으로 추정된다.

플레이트를 포함한 Geokon의 재하시험 결과는 Table 8과 같이 -0.18% FS 을 보이며 본체시험 결과(Table 6)인 0.33% FS 보다 2배 이상 정확한 것으로 나타났다. 이는 진동현식 센서와 하중계 본체의 정밀도, 적합한 플레이트 두께 적용 등의 영향으로 판단되며, Geokon 사 자체 품질 성적서(specification)의 정확도(accuracy)  $\pm 0.5\%$  FS 이내를 만족하는 결과를 보였다. 해외에서 수입되는 장거리 운송 등의 불리한 여건에도 측정 수치가 거의 변하지 않는 정확도를 보였다.

국내 제조사의 자체 시험성적서와 재하시험 결과 비교는 Table 9와 같이 모두 불합격되는 것으로 나타났다. A 사의 경우에도 0.98% FS 로 자체 시험성적서의 정확도 기준을  $\pm 0.5\%$  FS 이하로 정함에 따라 불합격되는 것으로 조사되었다. 각 제조사는 자체 재하시험 시에 Plate 를 제외하여 시험을 하고 있다. 상기의 시험 결과로 판단해 볼 때 플레이트를 포함한 하중계의 성능검사 방법에 대해 현장계측에서의 정확도 확보를 위해 검토해 보아야 할 것으로 판단된다.



Table 7. Load test result of domestic load cell gauge including plate (tonf)

Company \ Load	Test	20.0	40.0	60.0	80.0	100.0	Result
A	1	21.0	40.0	59.8	79.6	99.6	0.7% < 1.0% FS OK
	2	20.9	40.0	59.8	79.6	99.6	
	Aver	20.9	40.0	59.8	79.6	99.6	
B	1	21.4	41.4	61.6	81.8	102.1	3.27% > 1.0% FS NG
	2	21.4	41.4	61.6	81.8	102.1	
	Aver	21.4	41.4	61.6	81.8	102.1	
C	1	18.5	37.2	56.1	75.3	94.8	-5.48% > 1.0% FS NG
	2	19.0	37.6	56.7	75.9	95.3	
	Aver	18.7	37.4	56.4	75.6	95.0	
D	1	28.8	48.2	67.5	87.1	106.8	15.11% > 1.0% FS NG
	2	29.2	48.7	68.0	87.4	107.1	
	Aver	29.0	48.4	67.8	87.3	106.9	
E	1	22.2	41.6	62.2	83.4	105.1	5.82% > 1.0% FS NG
	2	22.4	41.9	62.5	83.5	105.2	
	Aver	22.3	41.8	62.3	83.5	105.1	
F	1	18.2	38.5	58.6	78.7	98.8	-3.63% > 1.0% FS NG
	2	18.2	38.4	58.6	78.7	98.8	
	Aver	18.2	38.5	58.6	78.7	98.8	
G	1	24.0	44.0	64.1	84.7	106.2	12.98% > 1.0% FS NG
	2	27.7	46.7	66.4	86.4	106.7	
	Aver	25.9	45.3	65.3	85.5	106.5	
H	1	19.0	38.6	58.3	78.2	98.2	-3.08% > 1.0% FS NG
	2	19.0	38.6	58.3	78.2	98.3	
	Aver	19.0	38.6	58.3	78.2	98.3	
I	1	15.6	38.3	58.7	79.3	99.9	-4.22% > 1.0% FS NG
	2	18.7	38.4	59.1	79.5	100.0	
	Aver	17.1	38.4	58.9	79.4	99.9	
J	1	35.0	58.5	71.1	102.2	90.9	33.68% > 1.0% FS NG
	2	45.0	61.9	48.6	97.7	95.3	
	Aver	44.8	50.1	57.6	75.9	97.5	
K	1	20.3	39.6	59.2	78.9	98.8	-0.43% < 1.0% FS OK
	2	20.5	39.9	59.4	79.1	98.9	
	Aver	20.4	39.7	59.3	79.0	98.9	
L	1	4.5	19.7	36.6	54.9	73.8	-44.94% > 1.0% FS NG
	2	4.5	19.7	36.6	55.0	73.9	
	Aver	4.5	19.7	36.6	54.9	73.9	
M	1	12.9	30.8	49.1	67.6	86.6	-21.22% > 1.0% FS NG
	2	12.7	30.8	49.0	67.6	86.6	
	Aver	12.8	30.8	49.1	67.6	86.6	

Table 8. Load test result of foreign load cell gauge including plate (tonf)

Company \ Load	Test	20.0	40.0	60.0	80.0	100.0	Result
Foreign (Geokon)	1	20.2	39.81	59.8	79.9	100.1	-0.18% > 1.0% FS OK
	2	20.2	39.81	59.8	79.9	100.1	
	Aver	20.2	39.81	59.8	79.9	100.1	

Table 9. Load loading test result depending on the presence or absence of plate (tonf)

Company	Result	Accuracy			Self spec. (% FS)	Criteria	Evaluation
		Plate (○)	Plate (×)	Difference			
A	0.70	0.98	0.28	> ± 0.5	±1.0% FS less than	NG	
B	3.27	1.57	-1.70	> ± 1.0			
C	-5.48	-5.16	0.32	> ± 1.0			
D	15.11	13.87	-1.23	> ± 0.5			
E	5.82	10.93	5.10	> ± 0.5			
F	-3.63	-8.88	-5.24	unmarked			
G	12.98	17.68	4.70	unmarked			
H	-3.08	-7.62	4.54	> ± 0.5			
I	-4.22	2.53	6.74	unmarked			
J	33.68	27.55	-6.13	unmarked			
K	-0.43	-2.25	1.82	unmarked			
L	-44.94	-30.77	-14.17	unmarked			
M	-21.22	-11.31	-9.91	unmarked			

### 3.8 하중계의 방수 시험

진동현식 센서는 진동현의 주파수로 측정됨에 따라 습도에 강하고 방수성이 좋다. 지하수가 유출 조건에서 하중계의 내구성을 확보하기 위해 물속 1m 아래에서 30 분간 담그는 방수 시험(KSC IEC 60529 규격(IP□7))에서 국내·외산 하중계 모두 기준에 충족하는 것으로 판정되었다(Industrial Standards Council, 2017). 하지만, 하중계의 방수 능력을 알기 위해 7일 이상 물에 담그는 시험을 하였는데, 약 2~3일 경과 후부터 대부분의 하중계 외부가 부식되는 결과를 보임에 따라 열처리 가공 등 부식 방지에 대한 대책이 필요한 것으로 판단된다.

국내의 하중계 성능검증 시험 결과로 볼 때 하중계는 현장의 작용 가능한 최대하중의 200% 이상의 용량을 가진 하중계를 선정하고, 성능검사는 최대용량의 약 150% 까지 초기 재하한 후, 최대하중의 전 범위에 걸쳐서 검사하여야 하고, 검사 하중점은 최소 10개 이상을 선정하고, 최대하중까지 3회 이상 성능검사를 하며 ± 1.0% FS 이하의 정확도를 유지하도록 할 것을 제안한다.

### 4. 하중계의 2차 성능검증

공인기관(KOLAS)에 의한 1차 검증 시험 결과 불량률이 약 92%로 높게 나타남에 따라 1차 시험 결과의

Table 10. Results of the second load cell gauge test by an calibration institution (tonf)

Company	Load	Test	Load				Result
			20.0	40.0	60.0	80.0	
A	1	20.6	41.1	61.4	81.8	102.3	0.94% < 1.0% FS OK
	2	19.6	40.0	60.2	80.6	100.0	
	3	19.8	40.2	60.5	80.7	101.2	
	Aver	20.0	40.4	60.7	81.0	101.1	
B	1	21.8	41.6	61.8	81.9	101.9	3.31% > 1.0% FS NG
	2	21.5	41.2	61.2	81.2	101.7	
	3	21.6	41.3	61.3	81.5	101.9	
	Aver	21.7	41.4	61.4	81.5	101.8	
C	1	17.0	36.7	56.4	76.2	96.1	4.97% > 1.0% FS NG
	2	18.2	37.8	57.5	77.2	97.3	
	3	18.5	38.1	57.8	77.6	97.4	
	Aver	17.9	37.5	57.2	77.0	96.9	
F	1	18.3	38.0	57.9	77.6	97.5	4.42% > 1.0% FS NG
	2	18.4	38.1	58.0	77.8	97.7	
	3	18.2	38.0	57.9	77.7	97.7	
	Aver	18.3	38.0	57.9	77.7	97.7	

Table 11. Analysis of 1st and 2nd test results of company A and B (digit)

Test Load	A Company				B Company			
	1	2	Difference	Error rate (%)	1	2	Difference	Error rate (%)
0	7983.2	7993.8	- 10.6	0.13	6516.3	6540.9	- 24.6	0.38
20	7557.0	7563.6	- 6.6	0.09	6202.7	6225.7	-23.0	0.37
40	7141.5	7127.7	13.8	0.19	5896.2	5897.1	-0.9	0.02
60	6717.0	6695.3	21.7	0.32	5582.8	5567.0	15.8	0.28
80	6287.0	6262.1	24.9	0.40	5262.8	5236.7	26.2	0.50
100	5852.0	5833.0	19.0	0.33	5939.2	4903.0	36.2	0.74
Avg.				0.24%				0.38%

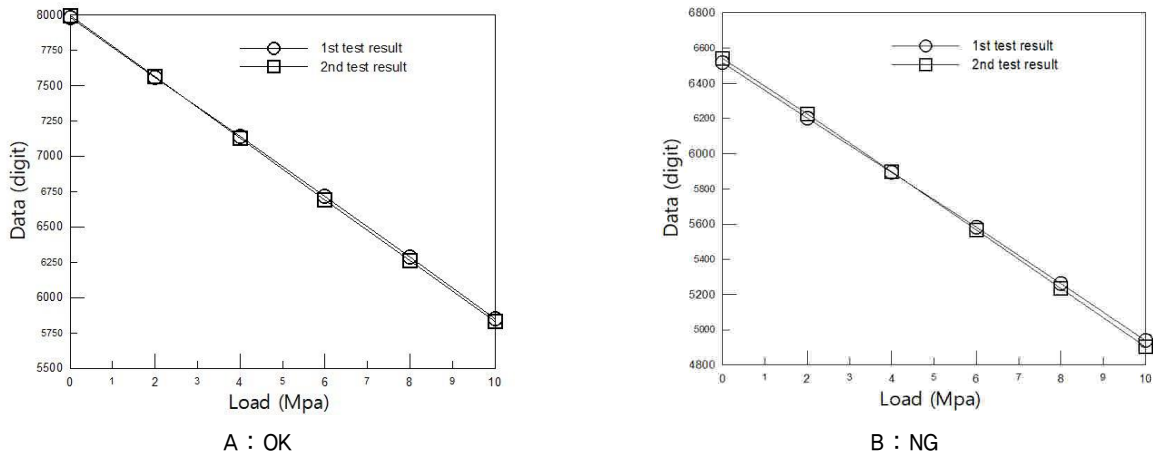


Fig. 6. Graph of 2nd performance test results of company A and B

정확도 검증은 재차 확인하기 위해 1차 성능검사에서 양호한 결과를 보인 임의의 A, B, C, F 4개 사의 하중계에 대해서 또 다른 공인 검·교정기관(KOLAS)에서 2차 시험을 하여 단계별로 3회 재하시험을 실시한 결과는 Table 10과 같다.

2차 시험 결과는 1차 결과(Table 5)와 같이 4개 사 중 A사를 제외한 3개 사의 불량률(%)은 비슷하게 나타났고, B, C, F사의 경우, B사와 유사한 결과를 보였다. 1, 2차의 공인기관(KOLAS)에 의한 A, B사의 1, 2차 재하시험 결과를 비교해 보면 평균 오차율(%)은 0.24%, 0.38%로서 Table 11, Fig. 6에서와 같이 1차 시험과 비슷한 양상의 결과 및 그래프를 보였다. 따라서, 공인기관에 의한 2차 시험 결과, 국산 13개 사의 1차 시험 결과에 대한 정확도에 대한 문제는 없는 것으로 확인되었다.

### 5. 결론

국내 흙막이 현장에서 검증되지 않고 사용 중인 하중계의 성능검증을 위해 하중계 성능검사 규정에 따라 전수조사하고, 공인기관에 의한 1, 2차 성능검사를 통해

하중계의 불량률, 불량 원인 등을 파악하고 성능검사 기준 및 절차를 제시하였다. 또한 성능검증의 신뢰성 향상을 위해 외산 제품(Geokon)과의 비교하여 개선 방안을 도출하였다.

- (1) 진동현식 하중계 국산 13개 사와 외산(Geokon) 1개 사의 본체와 플레이트의 외관검사, 구조·기능검사를 통해 그 차이점을 파악하였다. 문헌조사를 통해 하중계 성능검사 절차(서)를 제시하고, 하중 측정 표준기를 이용하여 하중계의 단계별 재하시험을 수행하였다. 공인기관에 의한 1차 시험 결과 불량률이 높게 나타남에 따라 시험 결과의 정확도 재확인을 위해 2차 시험을 하였으나 1차 시험과 거의 일치된 결과를 보였다.
- (2) 하중계는 현장의 작용 가능한 최대하중의 200% 이상의 용량을 가진 하중계를 선정하여야 하고, 성능검사는 최대용량의 약 150%까지 초기 재하(Over range)한 후, 최대하중(정격 하중)의 전 범위에 걸쳐서 검사하여야 한다. 검사 하중점은 최소 10개 이상을 선정하고, 최대하중까지 3회 이상 성능검사를 하며 ± 1.0%

FS 이하의 정확도를 유지하여야 한다.

- (3) 국산 하중계의 성능검사 결과, 정확도 기준( $\pm 1.0\%$  FS 이하)을 통과한 제조사는 1개 사이고, 나머지 12개 사는 불합격(92%)을 보였다. 불량률의 주된 원인은 고강도의 강 실린더와 정확한 변형률계의 미사용, 제작 노하우(know-how) 부족, 공인기관에 의한 성능검사 미시행 등으로 추정된다. 국산 하중계 플레이트의 경우 외산(38mm)에 비해 14mm로 63%나 얇은 두께로 제작되었고, 플레이트를 포함한 재하 시험 결과 본체시험보다  $\pm 14\%$  FS 더 불량한 결과를 보이므로 편심 발생 시 취약할 것으로 예상된다. 외산(Geokon) 하중계의 성능검사 결과, 제조사 자체 성적서( $\pm 0.5\%$  FS 이하)와 국내의 정확도 기준에 모두 만족하는 결과를 보였고, 플레이트를 포함한 하중계 시험 결과(-0.18% FS)는 본체시험(0.33% FS)보다 2배 정도 더 정확하게 나타났다.
- (4) 신뢰도 높은 하중계는 건설 표준시방서(KCS 10 50 10)에 언급된 바와 같이 검증 절차를 통과한 공인기관의 품질 인증 제품을 선정하여야 한다. 본 연구는 향후 하중계의 성능검사를 위한 세부 규정 마련과 고도화된 하중계 개발에 도움이 될 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2023년 건설기술연구사업의 ‘도심 지하 교통 인프라 건설 및 운영 기술 고도화 연구’ 연구단의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 저자 기여도

김영배는 성능검증 수행 및 데이터 정리, 해석 및 분석, 원고 작성하였고, 박영배는 성능검증 수행 및 데이터 정리, 원고 편집하였고, 이성원은 성능검증 계획 및 원고를 검토하였고, 이강일은 연구개념 및 원고검토를 하였다.

## 참고문헌 (References)

1. Ace Instrument Home page (2023), [http://aceco.co.kr/home/pdf/Down\\_01.pdf](http://aceco.co.kr/home/pdf/Down_01.pdf) (Oct 26, 2023).
2. Choi, J.S. (2015), Basic civil engineering measurement, Goomi Book, Seoul, Chapter 6.2.4.
3. Geokon Home page (2022), [https://www.geokon.com/content/manuals/4900\\_Load\\_Cell.pdf](https://www.geokon.com/content/manuals/4900_Load_Cell.pdf) (Oct 26, 2023).
4. Industrial Standards Council (2017), KS C IEC 60529, Chapter 14.1.
5. Korea Institute of Construction Technology (2013), Development of underground excavation and stabilization technology for expansion of underground space in use, Chapter 4.2.
6. Kwon, O.S. and Lee, J.S. (2006), “Countermeasure Against the Increase of Axial Force in Strut due to Thermal Load-A Case Study”, Technical Presentation, *Korean Association of Professional Engineers Soil Mechanics & Foundation Engineer*, Vol.2006 No.-[2006] pp.193-198.
7. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2021), KCS 10 50 10 (Measurement), Chapter 2.1.
8. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2021), KCS 11 10 15 (Ground measurement during construction), Chapter 3.12.2.1.
9. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2023), Underground Safety Impact Assessment, Standard Manual, Revised 3rd edition, Chapter 7.1.
10. Park, L.G., Kim, T.O., Seo, Y.H., An M.H., Oh, M.J., Yoo, S.H. and Hong, Y.S. (2019), “Current Status and Collapse Cases of Earthen Barrier Facilities”, *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.35, No.4, pp.50-67.
11. Public Notice of the Ministry of Public Administration and Security (2021a), No. 2021-64 Chapter 2, Chapter 4.
12. Public Notice of the Ministry of Public Administration and Security (2021b), No. 2021-64 Chapter 4.1.
13. Public Notice of the Ministry of Public Administration and Security (2021c), No. 2021-64 Chapter 4.2.22.
14. Seoul Metropolitan Government Infrastructure Headquarters (2015), Improvement of measurement management of Seoul subway, Seoul Metropolitan Government Urban Infrastructure Headquarters, Chapter 2.4.2.
15. Woo, J.T. and Lee, R.C. (2013), Construction measurement, Goomi Book, Seoul, Chapter 4.3.6.

Received : December 4<sup>th</sup>, 2023

Revised : December 11<sup>th</sup>, 2023

Accepted : December 12<sup>th</sup>, 2023