

원형 변위계 개발

심낙훈¹ · 최익창^{2,+}

Development of a Circular Displacement Meter

Nakhoon Shim¹ and Ikchang Choi^{2,+}

Abstract

Generally, a straight displacement meter is used to obtain displacement data to verify the safety of structural members and structures. A straight displacement meter is also used to measure the absolute displacement in research laboratories or safety inspection sites such as bridges and buildings. In this study, for structures in which the displacement sensor could not be fixed at the location where the displacement was to be measured, a circular displacement meter was manufactured to measure the displacement by installing a displacement gauge on the structure itself. In other words, when measuring the horizontal displacement of an upper part, such as a wind tower, a circular displacement meter was installed inside the wind tower to integrate it with the structure, applying the principle that the structure itself can be used as a displacement meter. This circular displacement meter can be installed and used inside a circular structure. Whereas in the case of a telephone pole, it can be installed outside to measure displacement. It can be manufactured in various sizes and used.

Keywords: Circular displacement meter, Internal displacement, Wind tower, Horizontal displacement, Relative displacement

1. 서 론

다양한 산업현장에서 구조물의 변위를 측정하는 것은 매우 중요하다. 왜냐하면 구조물에 작용하는 하중 대비 변위를 파악하는 것은 그 구조물의 안정성을 파악하는 가장 쉽고도 정확한 방법이기 때문이다. 일반적으로 산업현장에서는 핀(pin) 타입의 일자형 변위계 또는 약간의 변형된 형태의 변위계를 주로 사용한다. 이러한 변위계는 변위를 측정하기 위하여 변위계를 지반이나 또는 움직이지 않는 고정점과 대상 구조체 사이에 고정해서 변위계 핀(pin)의 이동량으로 변위를 측정하는 방식이다.

핀 타입의 변위계는 고정을 해야 하기 때문에 고정을 할 수 없는 구조물의 변위에 대해서는 측정할 수 없는 한계가 있다. 그러나 산업현장에서는 변위계를 고정할 수 없는 여러 형태의

구조물이 존재한다. 일례로, 풍력발전 타워는 상시 수평방향으로 흔들리기 때문에 타워의 건전성을 평가하기 위하여 상단부의 수평 변위를 측정하는 것이 매우 중요하지만, 현재로서는 그 수평 변위를 측정할 방법이 없는 실정이다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 고정점이 없이 구조물의 상대변위를 측정할 수 있는 원형 변위계(CDM, circular displacement meter)를 개발하였다. 본 연구에서 개발한 원형 변위계는 풍력 타워와 같이 원형 단면이면서 변위계를 고정할 지지점이 없는 위치에서의 변위를 측정할 경우에 매우 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 연구 방법

2.1 센서의 개념 및 원리

원형 변위계는 Fig. 1과 같이 변위를 측정하고자 하는 대상 구조물 또는 부재의 내부를 따라 대상 구조물의 내부 직경과 유사한 형태로 설치하게 된다.

원형 변위계 자체는 탄성 및 복원성이 우수한 강판을 가공하여 원형으로 조립하며, Fig. 2 와 같이 하중이 작용하는 방향과는 직각방향에 강판 한쪽당 내부와 외부에 각각 1개씩 스트레인 게이지를 부착하여 총 4개의 게이지를 부착한다.

¹ (주)에스티엔 (STN Co., Ltd.)

Ga-305, 10, Ujeong-ro, Naju-si, Jeollanam-do, 58322, Korea

²목포해양대학교 해양건설공학과(Department of Ocean Civil Engineering, Mokpo Maritime University)

91, Haeyangdaehak-ro, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Korea

⁺Corresponding author: ichoi@mmu.ac.kr

(Received: Jun. 5, 2024, Revised: Jun. 20, 2024, Accepted: Jun. 26, 2024)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<https://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.

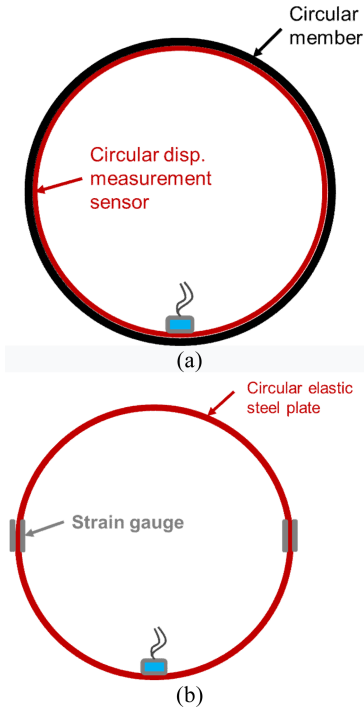


Fig. 1. Schematics and install method of Circular displacement meter ; (a) Installation of sensors inside pipes, (b) Schematics of circular displacement meter

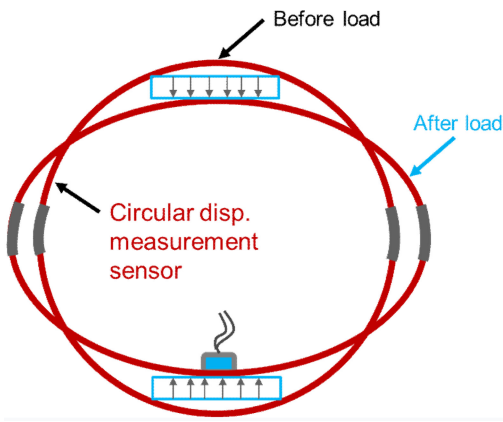


Fig. 2. Working principle of Circular Displacement Meter

이로써 Full Bridge 회로를 구성하여 휘스톤브리지(wheatstone bridge)를 구성할 수 있게 된다. 외부에서 구조물에 하중이 작용하면 원형 부재에는 Fig. 2와 같이 변형이 발생하게 되며, 이때 원형 강판에 부착된 4개의 스트레인게이지에서 측정된 신호를 조합하여 변위로 환산할 수 있다. 이때 무엇보다 중요한 것은 원형 변위계를 구성하는 강판의 탄성과 두께에 따라 측정 신호의 응답범위와 응답 주파수가 달라지기 때문에 구조물의 크기와 용도에 따라 최적의 제품 설계가 필요하다.

원형 변위계에 부착된 4개의 스트레인게이지에 의해 구성되는 휘스톤브릿지의 작동원리는 Fig. 3과 같다.

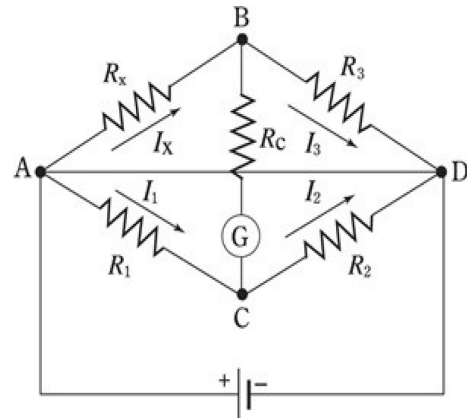


Fig. 3. Wheatstone bridge circuit

Fig. 3에서 R_1, R_2 의 저항값은 이미 알고 있으며, R_3 는 가변 저항으로 저항값을 변화시킬 수 있는 저항이고, R_x 는 측정하고자 하는 미지의 저항이다. 가변 저항 R_3 를 적당히 조절해서 검류계에 전류가 흐르지 않으면 B점과 C점의 전위는 같다. 그러므로 A와 B 사이의 전위차와 A와 C 사이의 전위차는 같다.

$$V_{AB} = V_{AC}$$

마찬가지로 B와 D사이의 전위차와 C와 D사이의 전위차도 같다.

$$V_{BD} = V_{CD}$$

그러므로

$$V_{AB} = V_{AC} \Rightarrow I_1 R_1 = I_X R_X$$

$$V_{BD} = V_{CD} \Rightarrow I_2 R_2 = I_3 R_3$$

여기서 $I_1 = I_2, I_X = I_3$ 이므로

$$R_1 R_3 = R_2 R_X$$

R_1, R_2, R_3 의 저항값은 이미 알고 있으므로

$$R_X = \frac{R_1 R_3}{R_2}$$

2.2 센서의 설계 및 시제품 제작

2.2.1 센서 설계

원형 변위계는 Fig. 4와 같이 원형의 변위계로서 탄성을 가진 강판을 절단하고 휘어서 제작하는 것을 기반으로 설계한다.

이러한 원형 센서를 구성하는 설계 인자는 Fig. 5와 같이 센서의 직경을 결정하는 강판의 길이와 센서의 측정 범위 및 정밀도를 결정하는 강판의 두께 및 폭으로 구성된다. 길이는 적용하고자 하는 대상 구조물의 크기에 따라 결정하면 되기 때문에 쉽게 결정할 수 있는 반면에, 강판의 두께는 원형 센서의 직경

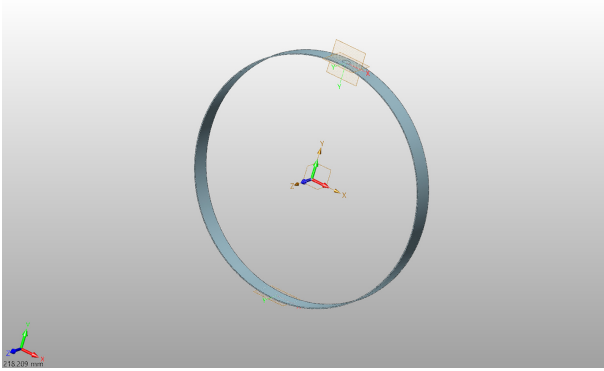


Fig. 4. Design model of circular displacement meter

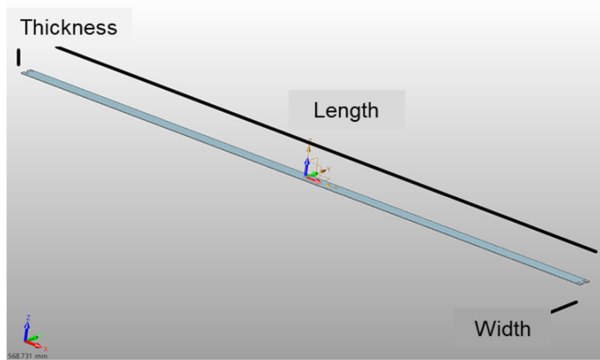


Fig. 5. Design factors for circular displacement meter

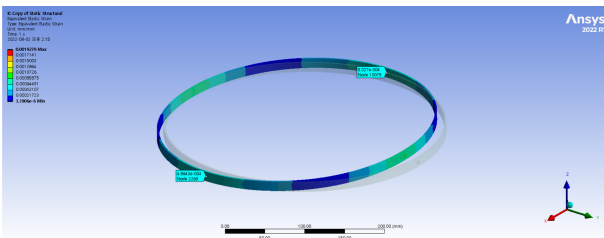


Fig. 6. CDM model with a diameter of 350 mm

에 따라 민감해질 수 있는 요소이기 때문에 신중하게 결정해야 한다.

본 연구에서는 시중에서 많이 사용되는 직경 350 mm 강관을 대상으로 사용할 수 있는 원형 변위계를 설계하기 위하여 범용 구조해석 프로그램인 Ansys를 사용하였다. 그리고 이 강관을 사용하여 검증 시험을 실시하였으며, 시험에 사용한 강관의 직경은 400 mm, 두께는 7 mm, 총 길이는 12 m 이다.

길이에 비해 강관의 직경이 작아서 강관의 변형이 크지 않을 것으로 예상하여, 측정 범위는 30 mm로 하고 측정 주파수 20 이상으로 설계하였다.

Fig. 6은 직경 350 mm 원형 변위계의 설계 모델이며, Fig. 7은 센서에 임의의 하중을 작용시켰을 때의 변형도를 나타낸 것이다.

이때 무엇보다 중요한 것은 원형 변위계를 구성하는 강관의 탄성과 두께에 따라 측정 신호의 응답 범위와 응답 주파수가 달

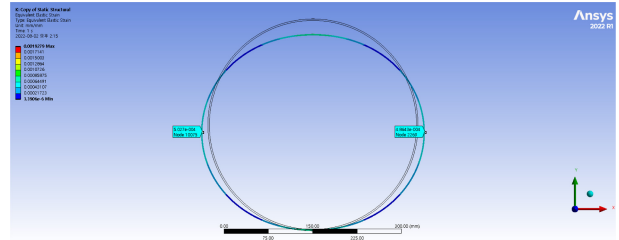


Fig. 7. Strain diagram of a CDM with a diameter of 350 mm

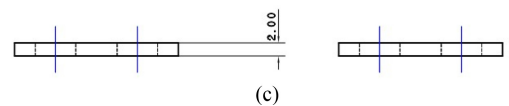
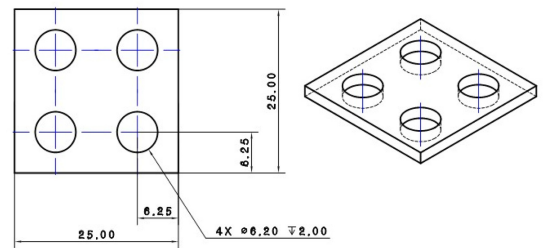
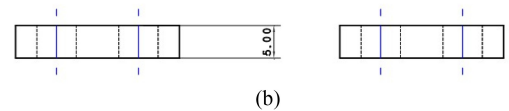
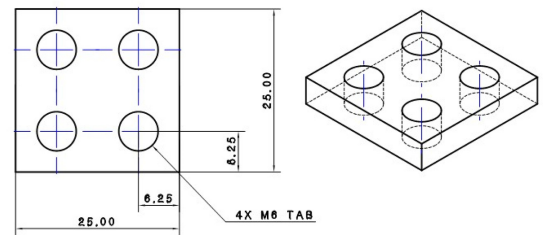
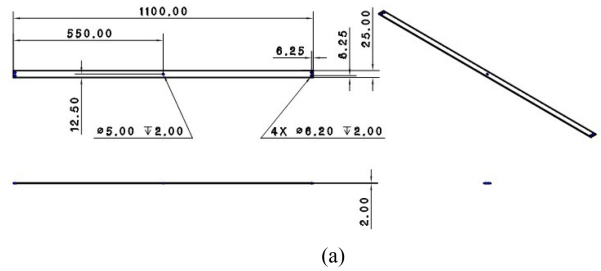


Fig. 8. Prototype drawing of circular displacement meter ; (a) Body drawing, (b) Connection block drawing, (c) Connection cover drawing

라지기 때문에, 구조물의 크기와 용도에 따라 최적의 제품 설계가 필요하다.

반복적인 구조해석을 통하여 검증 시험에 적합한 최적의 센서 제원을 결정하였으며, 이를 이용하여 시제품을 제작하였다. 그 시제품 도면을 Fig. 8에 나타내었다.



(a)



(b)

Fig. 9. Prototype of circular displacement meter ; (a) For interior installation, (b) For external installation

2.2.2 시제품 제작

설계 도면을 이용하여 Fig. 9와 같은 두 종류의 시제품을 제작하였다. Fig. 9 (a) 내부 설치용은 원형 파이프의 내부에 설치하여 변위를 측정하는 원형 변위계이고, Fig. 9 (b) 외부설치용은 콘크리트 전신주와 같은 원형 솔리드 구조물에 설치하여 균열 및 부피 팽창량을 측정하는 용도의 센서이다. 두 제품은 센서 연결 블록의 위치만 링(ring)의 외부 또는 내부라는 것만 다르고 다른 제원은 모두 동일하다.

이러한 시제품의 제작과정에서도 재료 선정의 오류 및 가공의 오류 등으로 인하여 반복적인 시행착오를 겪으면서 센서 시제품을 제작하기 까지 다양한 반복적인 시도를 수행하였다.

2.3 부재 성능시험

원형 변위계 시제품의 성능을 검증하기 위하여 Fig. 10과 같은 시중에서 판매되는 직경 400 mm, 길이 10 m짜리 강관 두 개를 연결하여 Fig. 11과 같이 성능시험을 수행하였다. Fig. 12와 같이 강관 시험체의 한쪽은 단단히 고정하여 고정단의 경계 조건으로 하였으며, 반대쪽은 자유단의 경계조건으로 둔 상태에



Fig. 10. Steel pipe specimen for testing



Fig. 11. Performance test using structure



Fig. 12. Boundary conditions for performance testing (fixed end)

서 횡방향으로 하중을 작용시켰다.

원형 변위계는 강관의 연결부 위치에 Fig. 13과 같이 강관 내



Fig. 13. Installation of circular displacement meter



Fig. 14. Straight displacement meter installed externally

부에 설치하였으며, 일반적으로 사용하는 일자형 변위계 데이터와 비교하기 위하여 Fig. 14와 같이 내부 변위 센서와 같은 위치의 외부에 일자형 변위계를 설치하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 센서 자체의 공인 성능시험 결과

원형 변위계 시제품을 공인시험기관에 의뢰하여 센서 자체에 대한 성능시험을 수행하였으며, 시험결과를 Table 1에 정리하였다. 원형 변위계의 제작 오차는 0.6%이며, 10 mm 단위의 변위량에 따른 측정결과에서 설계 측정 범위인 30 mm 이하까지는 1.0% 이하의 오차를 나타냈다. 반면에 설계 범위 이후에는 오차가 다소 증가하는 경향을 나타냈다. 따라서 본 연구에서 설계한 원형 변위계는 설계 범위 내에서 정밀도가 매우 우수한 것을 확인할 수 있었다.

Table 1. Official test results of circular displacement meter

item	dia. (mm)	Measurement results according to the displacement change (mm)				
		10	20	30	40	50
#1	348.94	10.41	20.48	30.15	39.79	49.52
#2	346.82	10.01	19.90	29.79	39.62	49.32
#3	347.72	9.85	19.42	29.63	38.71	48.50
Ave.	347.83	10.09	19.94	29.86	39.38	49.12
error (%)	±0.6	±0.9	±0.3	±0.5	±1.6	±1.8

RDT350 Steel Pipe Test

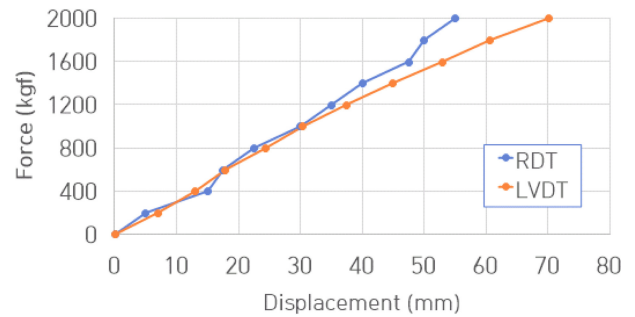


Fig. 15. Load-displacement graph of test using 400 mm diameter steel pipe

3.2 부재 성능시험 결과

직경 350 mm 원형 변위계를 직경 400 mm 강관 내부에 설치하여 강관의 고정부로부터 9.0 m 위치에 20 kN의 하중을 횡방향으로 작용시켜 시험을 진행한 결과를 Fig. 15에 나타내었다. 센서 설계 측정 범위인 30 mm까지는 원형 변위계 측정 결과가 외부 일자형 변위계(LVDT, linear variable displacement transducer)의 측정 결과와 경향이 대체로 일치하는 반면에, 30 mm 이상에서는 두 변위계의 측정값이 다소 차이가 나는 것을 알 수 있었다.

이렇게 차이가 나는 이유는, 원형 변위계를 파이프 내부에 설치함에 있어서 단단히 고정하지 못한 것이 가장 큰 원인으로 밝혀졌다. 즉 원형 변위계와 강관 사이에 50 mm의 유격이 있기 때문에, 일자형 변위계로 측정된 변위와 원형 변위계로 측정된 값이 다소 차이가 발생한 것으로 판단된다.

따라서 400 mm 강관 내부에 밀착시킬 수 있는 원형 변위계를 설치하면 강관과 센서 사이의 유격을 최소화하여 부재 변형 및 변위를 측정하는 오차도 최소화시킬 수 있을 것으로 판단된다.

다시 말해서, 실제 강관 내부에 원형 변위계를 설치할 경우에는 강관 내경을 충분히 고려하여 내부에 밀착시켜 설치할 수 있도록 센서를 제작하여 설치하면 오차를 최소화 할 수 있을 것이다.

그리고 마찬가지로 외부에 설치하는 경우에도 파이프의 외경을 고려하여 파이프 외부에 밀착시킬 수 있는 원형 변위계를 제

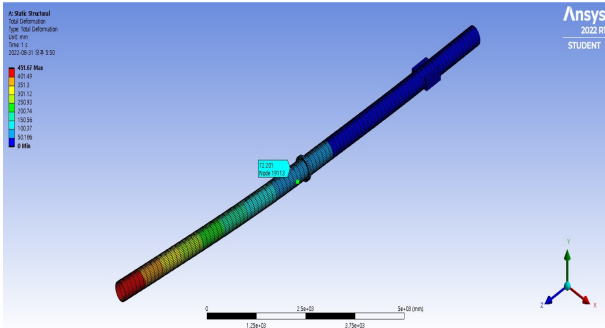


Fig. 16. Structural analysis of round pipe test specimen

작하여 밀착시켜 설치하면 상대적으로 정확한 측정값을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

3.3 구조해석

원형 변위계의 성능시험에 사용한 강관 부재에 대한 구조해석을 수행하였다. Fig. 16과 같이 범용 구조해석 프로그램인 Ansys 2022 R1을 사용하였으며, 실제 성능시험에서 진행한 위치에 시험 최대 하중인 20 kN을 작용시켰다. 이때 원형 변위계를 설치한 위치에서의 해석에 의한 변위는 약 72 mm 발생하였으며, Fig. 15의 외부 일자형 변위계에서 측정된 변위계와 유사한 결과를 나타내었다.

4. 결 론

본 연구의 목적은 풍력 타워와 같이 원형 단면이면서 변위측정기를 고정할 지지점이 없는 켄틸레버 구조 자유단의 변위를 측정하고자 하는 경우에, 개발하고자 하는 원형 변위계를 구조물의 내부 벽면을 따라 원형으로 설치하여 구조물 자체를 변위계 시스템으로 활용할 수 있는 변위계를 개발하는 것이다.

(1) 원형 변위계는 평판형 강관을 등갈게 연결하는 연결 블럭과 하중이 작용하는 방향에 직각으로 부착되는 4개의 스트레인 게이지로 구성된다. 원형 변위계의 측정 범위와 주파수 등의 성능은 강관의 탄성과 두께에 따라 좌우된다. 다시 말해서 목표로 하는 성능의 제품을 설계하기 위해서는 강관의 재료와 적용 대상 구조물에 적합한 최적의 두께를 신중하게 결정해야 한다.

(2) 원형 변위계 시제품을 공인시험기관에 의뢰하여 센서 자체에 대한 성능시험을 진행한 결과, 센서 제작 오차는 0.6%로 다소 양호한 것으로 나타났다. 그리고 10 mm 단위의 변위량에 따른 측정결과에서, 설계 측정 범위인 30 mm 이하까지는 1.0% 이하의 오차를 나타낸 반면에, 설계 측정 범위 이후에는 오차가 다소 증가하는 경향을 나타냈다. 따라서 본 연구에서의 원형 변위계 시제품은 정밀도 및 성능이 우수하여 각종 실험실이나 산

업 현장에서 구조물의 유지관리 용도로 사용이 가능할 것으로 판단된다.

(3) 직경 350 mm 원형 변위계를 직경 400 mm 강관 파이프에 설치하여 실증 시험을 수행한 결과, 센서 설계 측정 범위인 30 mm까지는 원형 변위계의 측정 결과가 외부 일자형 변위계의 측정 결과와 경향이 대체로 일치하는 반면에, 30 mm 이상에서는 두 변위계의 측정값이 다소 차이가 나는 것으로 나타났다. 이렇게 차이가 나는 이유는, 원형 변위계를 파이프 내부에 설치함에 있어서 단단히 고정하지 못한 것이 가장 큰 원인으로 파악되었다.

(4) 따라서 400 mm 강관 내부에 밀착시킬 수 있는 원형 변위계를 설치하면 강관과 센서 사이의 유격을 최소화하여 부재 변형 및 변위를 측정하는 오차도 최소화시킬 수 있을 것으로 판단된다. 다시 말해서, 실제 강관 내부에 원형 변위계를 설치할 경우에는 강관 내경을 충분히 고려하여 내부에 밀착시켜 설치할 수 있도록 센서를 제작하여 설치하면 오차를 최소화 할 수 있을 것이다. 그리고 외부에 설치하는 경우에도 파이프의 외경을 고려하여 파이프 외부에 밀착시킬 수 있도록 설치하면 상대적으로 정확한 측정값을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2024년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신사업의 연구결과입니다(2021RIS-002).

REFERENCES

- [1] H. Jo, J. W. Park, B. F. Spencer Jr., and H. J. Jung, "Development of high-sensitivity wireless strain sensor for structural health monitoring", *Smart Struct. Syst.*, Vol. 11, No. 5, pp. 477-496, 2013.
- [2] T. L. Floyd and D. M. Buchla, *DC/AC Fundamentals: A systems approach*, Boston, Pearson, MA, pp. 236-242, 2013.
- [3] A. S. Khan and X. Wang, *Strain measurements and stress analysis*, Upper Saddle River, Prentice Hall, NJ, pp. 56-68, 2001.
- [4] S. Park, W. Kwon, K. Joe, and S. Lee, "Measurement of Clamp Load of Hollow Bolt Using Linear Variable Differential Transducer Sensor", *Trans. Korean Soc. Auto. Eng.*, Vol. 30, No. 9, pp. 703-708, 2022.
- [5] S. Park, I.-G. Kim, H. Lee, and M.-S. Kim, "Prediction for Large Deformation of Cantilever Beam Using Strains", *J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci.*, Vol. 43, No. 5, pp. 396-404, 2015.
- [6] H. O. Kim, Y. H. Lee, Y. J. Kim, and H. D. Huh, "Structural Safety of 3 MW Class Wind Turbine with Various Hole Pat-

- tern Arrangements”, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 42, No. 11, pp. 697-704, 2018.
- [7] S. H. Shin, J. Y. Kim, J. Y. Woo, D. G. Kim, and T. S. Jin, “Estimation of Displacements Using Artificial Intelligence Considering Spatial Correlation of Structural Shape”, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, Vol. 36, No. 1, pp. 1-7, 2023.
- [8] H. S. Jeong, K. S. Han, and Y. S. Lee, “Measurement of Retaining Tensile Load with the Relative Displacement Detector of Ground Anchors”, *J. Korean Geotech. Soc.*, Vol. 33, No. 10, pp. 59-69, 2017.
- [9] J. S. Bang, S. R. Kim, J. W. Han, and J. W. Lee, “Damage Estimation Method for Wind Turbine Tower Using Modal Properties”, *J. Korea Inst. Struct. Maint. Insp.*, Vol. 16, No. 2, pp. 87-94, 2012.