

석유화학 반응기 모니터링을 위한 연속체 구조물 변형 평가 기술

공원식^{1,2}, 최현선¹, 김형규¹, 이진혁¹, 김현영^{1*}
¹(주)피레타 부설연구소, ²조선대학교 첨단소재부품공학과

Evaluation Technique for Motion of Continuum Structures to Monitor Petrochemical Reactors

Wonsik Kong^{1,2}, Hyunseon Choi¹, Hyeonggyu Kim¹, Jinhyuk Lee¹, Heonyoung Kim^{1*}

¹Research Institute, PILETA Co., Ltd

²Department of Materials Science and Engineering, Chosun University

요약 일반적으로, 반응기는 구조물의 형태에 따라 관형 반응기와 탑형 반응기로 구분된다. 탑형 반응기의 경우 지상에서 수직으로 원기둥 형태로 시공되어 구조적으로 기초 부분에 높은 하중이 작용한다. 특히, 해안 근처에 화학 플랜트 구조물이 건설되어 있어 해풍 영향이 크게 작용하여 위험성이 높다. 이로 인해 주기적인 흔들림에 의한 기초 부분 손상은 보강을 요구하며, 손상이 크게 발생하는 경우 설비 운용이 중단되어 비용 손실이 발생한다. 이를 위해, 본 연구에서는 진동에 취약한 연속체 구조물의 모니터링을 위한 기술을 개발하였고 실제 현장에 대한 적용성 평가를 수행하였다. 변위 감시 기술의 경우 실시간 움직임을 측정하기 위해 가속도 센서를 적용하였고, 변형 이론을 적용하여 구조물 최상부의 움직임을 측정하였다. 실험 결과, 건전한 구조물의 경우 15 mm 이내의 움직임을 보였고, 기초 부분이 손상된 구조물은 150 mm 이하의 움직임을 보였다. 본 연구를 통해 기존 기술과 동시에 적용하는 경우 적은 수의 센서를 이용하여 구조물의 움직임을 높은 정확도로 감시가 가능할 것으로 판단된다.

Abstract Generally, reactors in a petrochemical plant are tubular or column according to their structural shape. The column-type reactor generates a heavy load on the base because it is constructed vertically from the ground. In addition, these structures are influenced by the sea breeze because they are built offshore. Hence, the base parts are damaged due to periodic vibration and require reinforcement. Moreover, economic loss occurs due to the operating plant's break time during high-level damages of the structures. So, a technique of monitoring the continuum structures weakened by vibration is developed in this study. Furthermore, the technique's applicability has been evaluated to apply this technique to plant sites. The motion at the top of the structure has been estimated through a monitoring technology using accelerometers and the deformation theoretical method. The results indicate that the displacement of a robust structure is under 15 mm, and that of a damaged structure in the base is under 150 mm. Hence, it is concluded that the movement of the structure can be monitored with high accuracy using a small number of sensors when the present method is applied simultaneously with conventional technology.

Keywords : Accelerometer, Continuum Structures, Monitoring Techniques, Petrochemistry Plant, Reactor

이 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임.
(20217010100090, 표준 가스복합화력 플랜트용 초초임계압 배열회수보일러 기술개발)

*Corresponding Author : Heonyoung Kim(Pileta Co., Ltd.)

email: hykim@pileta.co.kr

Received November 8, 2021

Revised January 17, 2022

Accepted February 4, 2022

Published February 28, 2022

1. 서론

석유화학 플랜트에서의 반응기는 다양한 원료의 화학 반응을 위해 이용되는 구조물이다. 특히, 운송수단이나 난방에 필요한 연료를 생산하는 정유산업과 식음료 및 제약/바이오 등의 다양한 원료를 생산하는 분야의 핵심 장치이다. 반응기는 일반적으로 조작방법에 따라 회분식(batch type)과 연속식(continuous type)으로 분류되며, 구조물의 형태에 따라 관형(tubular type) 및 탑형(column type)으로 나뉜다[1]. 탑형 반응기의 경우 지상에서 수직으로 원기둥 형태로 시공되어 환경적으로 기초 부분이 높은 외력에 노출된다. 특히, 원재료의 동선을 최소화하기 위해 항구 근처에 화학 플랜트들이 건설되어 있어 해풍의 영향이 크게 작용한다. 이로 인해 주기적인 흔들림에 의한 기초 부분 손상은 주기적인 보강을 요구하며, 손상이 크게 발생하는 경우 설비 운용이 중단되어 시간 및 비용적인 피해가 발생한다[2]. 이에 대한 평가를 위해 실시간으로 구조물의 변형을 감지하기 위한 기술이 요구되며, 정량적인 평가 지표가 요구된다.

구조물의 건전성을 평가하기 위해 적용되는 일반적인 기법으로는 변형률 센서(strain gage)와 온도 센서(thermocouple)와 같은 상용 센서 및 광섬유와 압전센서 등을 이용한 건전성 감시 기법들이 있다[3-5]. 변형률 센서는 높은 응력이 발생 가능한 기초 부분에 적용되고, 고온의 반응열에 노출되는 부분에는 온도 센서를 적용하여 열변형을 감시하고 있다. 위 센서들 기반의 모니터링 기법은 국부적인 재료 변형에 대한 것으로, 구조물의 전체적인 움직임을 직관적으로 평가하기 위해서는 구조체 거동에 대한 감시 기술이 필요하다.

연속체 구조물의 경우 초장대 교량 및 초고층 빌딩과 같이 높은 종횡비(aspect ratio)를 갖고 있어 강성이 높은 재료로 구성되어도 변형이 크게 발생할 수 있다[6]. 특히, 화학 플랜트 구조물에서 사고가 발생하는 경우 화학 물질의 유출로 이어질 수 있어 피해 복구의 장기화 가능성이 높다. 이를 방지하기 위해 설계 시 구조물의 진동 특성을 반영하여 시공되며, 외부 환경적 요인에 의한 변형 모니터링이 요구된다[7,8].

따라서, 본 연구에서는 진동에 취약한 연속체 구조물의 모니터링을 위한 기술을 개발하였다. 그리고, 본 개발 기술에 대한 검증은 위한 실제 현장 적용성 평가를 수행하였다. 실제 현장에서 가동되는 화학플랜트의 기초 부분에서 손상이 발생한 화학 반응기가 있어, 이에 대한 움직임을 모니터링할 수 있는 기술에 대한 요구를 받아 본

기술에 대한 적용성 평가를 수행하였다. 순간적인 움직임을 측정하기 위해 가속도 센서를 이용 하였으며, 변형 이론을 기반으로 신호처리를 통해 실시간으로 구조물의 움직임을 평가하였다.

2. 본론

2.1 구조물 최상부 변형 추정 이론

일반적으로 진동은 시간에 대한 식 (1)과 같이 표현되며, 시간에 대한 미분을 통해 가속도는 식 (2)와 같다.

$$z = A \cos(\omega t + \phi) \quad (1)$$

$$\ddot{z} = \frac{d^2 z}{dt^2} = -A \omega^2 \cos(\omega t + \phi) \quad (2)$$

여기서, ω 는 각진동수(angular frequency), ϕ 는 위상차, t 는 시간, z 는 변위, A 는 최대 변위이다. 이를 이용하여 가속도 신호를 분석하여 변위값으로 변환하기 위한 정보를 취득한다[9].

한편, 외팔보 구조물을 강체(rigid body)로 가정하고 굽힘 각도가 미소($\theta \ll 1$)한 경우 Fig. 1과 같이 선형 처짐(deflection)의 거동으로 가정할 수 있어 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

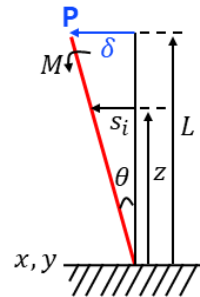


Fig. 1. Beam structure in condition of infinitesimal deformation

$$E I s_i''(z) = M = P(L - z) \quad (3)$$

여기서, E 는 탄성계수, I 는 관성모멘트, M 는 모멘트, P 는 하중, L 은 구조물 높이, s_i 는 굽힘 변수, z 는 높이 변수이다.

그리고, 구조물 전체적으로 변형 후의 상태를 동일한

굽힘 각도와 높이로 가정하고 최상부의 변위를 δ 로 설정하는 경우 높이 변수($z = s_i L / \delta$)를 굽힘 변수로 치환할 수 있다. 이를 이용하여 정리하면 식 (4)와 같이 표현된다.

$$s_i'' + \frac{PL}{EI\delta} s_i = \frac{P}{EI} L \quad (4)$$

또한, $PL/EI\delta = k^2$ 로 가정하면 식 (5)와 같이 되고, 일반해(general solution)로 표현하면 식 (6)과 같이 된다[10].

$$s_i'' + k^2 s_i = k^2 \delta \quad (5)$$

$$s_i = s_i^H + s_i^P = A \sin(kz) + B \cos(kz) + \delta \quad (6)$$

구조물을 강체로 가정하여 기초 부분이 고정 지지인 경우 변형($s_i(0) = 0 \rightarrow B = -\delta$)과 기울기 변화가 없기($s_i'(0) = 0 \rightarrow A = 0$) 때문에 식 (7)과 같다. 그리고, 최상부에서의 변형($s_i(L) = \delta$)을 고려하면 식 (8)과 같이 표현된다.

$$s_i(z) = \delta(1 - \cos kz) \quad (7)$$

$$\cos(kL) = 0 \rightarrow kL = \frac{n\pi}{2} \quad (n = 1, 3, 5 \dots) \quad (8)$$

위 식들을 정리하면 식 (9)와 같은 형태로 표현되며, 구조물의 기계적 물성값 없이 모든 구조물의 최상부 변위를 추정할 수 있다.

$$s_i = \delta \left[1 - \cos \left(\frac{\pi}{2L} z \right) \right] \quad (n = 1) \quad (9)$$

최종적으로, 구조물의 최상부 변위를 모니터링하기 위해서는 최상부에 센서를 적용하는 방법이 이상적이다. 하지만, 실제 적용 환경에 따라 구조물의 중간 높이에서 측정하는 상황을 고려하여 임의의 높이에서 최상부 변형을 측정할 수 있는 식 (10)을 적용하였다.

$$s_i = \frac{s_M}{1 - \cos \left(\frac{\pi}{2L} z_M \right)} \left[1 - \cos \left(\frac{\pi}{2L} z \right) \right] \quad (10)$$

여기서, z_M 는 측정 높이, s_M 는 측정 높이에서의 변위이다.

본 연구에서는 위 과정들을 이용하여 연속체 구조물의 변형을 모니터링하고 최상부의 변위를 추정하였다.

2.2 변형 추정 실험 구성

진동을 측정하기 위해 Fig. 2와 같이 가속도 센서(352C33, PCB Piezotronics Inc.)를 구조물에 적용하여 DAQ(NI 9230, National Instrument Co.)를 이용하여 10 Hz의 샘플링 속도로 가속도 신호를 측정하였다. 그리고, 가속도 신호를 시간에 대해 적분을 하여 변위를 도출하였다. 가속도 센서 2개를 적용하여 Fig. 3과 같이 데카르트 좌표계(Cartesian coordinate)에 맵핑하여 2차원(x, y)으로 구조물의 형상을 추정하였다.

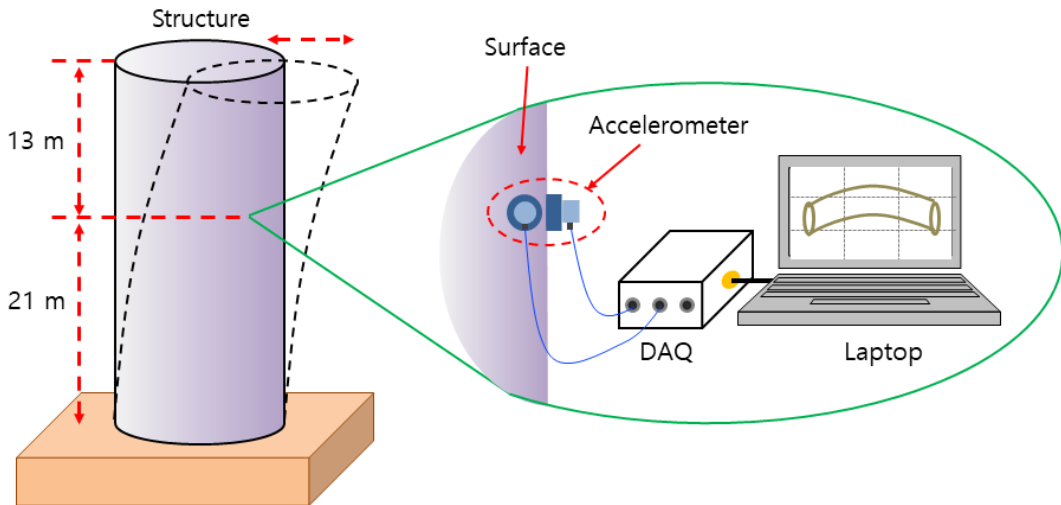


Fig. 2. Schematic diagram of experimental setup for estimating structure deformation

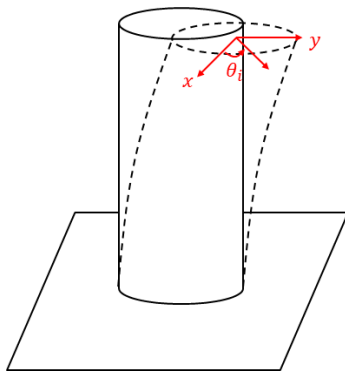


Fig. 3. Coordinates of top in condition of infinitesimal deformation

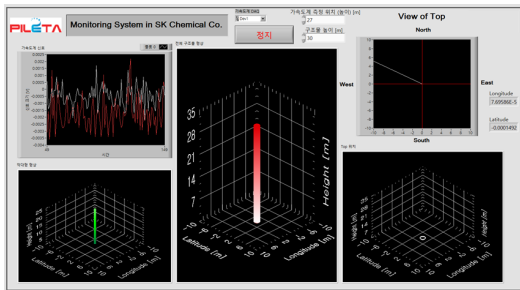


Fig. 4. Data acquisition and signal processing software

신호처리는 LabVIEW를 이용하여 Fig. 4와 같이 변위 추정 알고리즘이 적용된 실시간 모니터링 프로그램을 개발하여 실험에 적용하였다.

실시간 변형 모니터링의 대상 구조물은 DMT(Demethyl Terephthalate) 반응기로 높이 34 m의 탑형 구조물이다. 구조물에서 가속도계를 적용한 높이는 검사자 접근이 가능한 21 m의 높이에 적용하였으며, 총 60분 동안 데이터를 취득하였다. 그리고, Fig. 5와 같이 바람에 의한 변형을 추정하기 위한 시험을 건전한 반응기와 기초 부분이 손상된 반응기 총 2개의 구조물에 적용하여 적용성을 평가하였다. 실험 수행 일자는 폭우가 예보된 2021년 5월 28일 오후 3시경부터 시작하였으며, 약 20분 후 폭우와 함께 강풍이 발생하였다. 두 반응기에 대해 가속도 신호를 측정하였으며, 변형 모니터링을 수행하였다.

3. 실험 결과

구조물의 최상부 움직임을 2차원으로 모니터링하기 위해 각각의 구조물에 2개의 가속도 센서를 적용하였으

며, 움직임이 많은 방향을 Direction 1로 설정하고 상대적으로 적은 움직임을 보이는 방향을 Direction 2로 설정하여 결과를 도출하였다.

Table 1. The weather conditions in Dong-gu, Ulsan city

Date		Issued at 15:00~16:00 PM 28 May, 2021
Condition		Rain
Temp	Min.	12.1 ℃
	Max.	26 ℃
Wind speed	Min.	3.0 m/s
	Max.	7.3 m/s

※ Korea meteorological administration, CMA

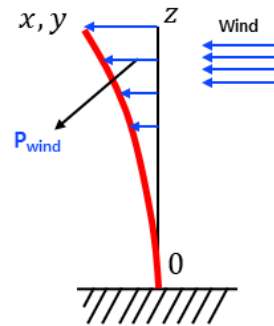


Fig. 5. Estimate of reactor perturbation depending on wind

해안에서 불어오는 바람의 방향(direction 2)으로 가속도 신호가 크게 측정되고, 수직 방향(direction1)으로는 상대적으로 신호의 크기가 낮게 나타났다.

구체적으로, 건전한 반응기의 경우 Fig. 6, Fig. 7과 같이 0.5 m/s^2 이하의 낮은 가속도 신호를 보였으며, 기초 부분이 손상된 반응기는 Fig. 8, Fig. 9과 같이 4 m/s^2 이하의 신호를 보였다.

해안에 위치한 반응기의 주위 환경에 의해 바람에 의한 영향이 크게 작용하였다. 그리고, 측정 당일 날씨의 경우 폭우가 예보되었으며, 폭우가 시작되는 시점에 약 한 시간 동안 데이터를 취득하여 진동이 큰 신호를 측정할 수 있었다. 가속도 센서 신호를 이용한 반응기 최상부의 움직임을 예측한 결과 두 반응기 간의 큰 차이를 보였다. 손상이 없는 건전한 반응기의 최상부 움직임은 Fig. 10과 같이 약 15 mm 이하로 움직이는 것을 확인하였고, 기초 부분이 손상된 반응기는 Fig. 11과 같이 순간적으로 최대 150 mm 이하의 변위를 보였다. 이는 중형비가 큰 연속체 구조물의 기초 부분이 손상되어 최상부의 움직임이 상대적으로 크게 나타난 것으로 판단된다. 이로 인해 외부 환경의 영향이 크게 작용하는 것을 확인하였다.

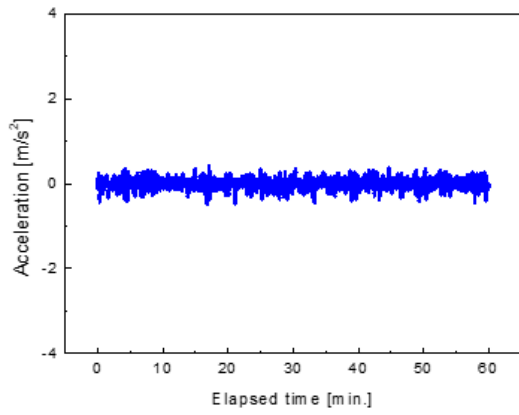


Fig. 6. Accelerometer signals in direction 1 of robust reactor

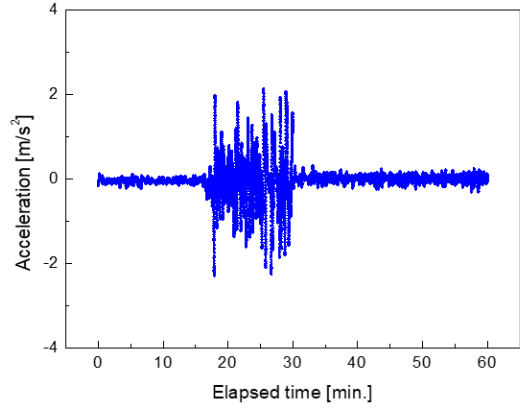


Fig. 9. Accelerometer signals in direction 2 of damaged reactor

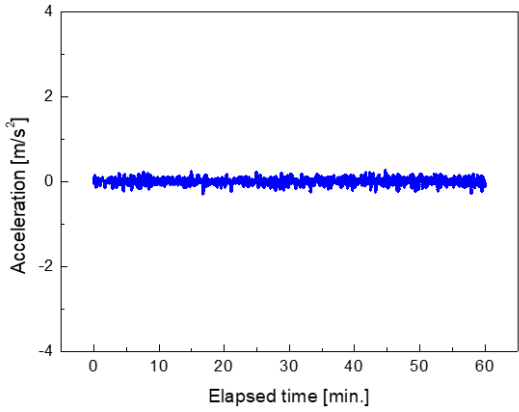


Fig. 7. Accelerometer signals in direction 2 of robust reactor

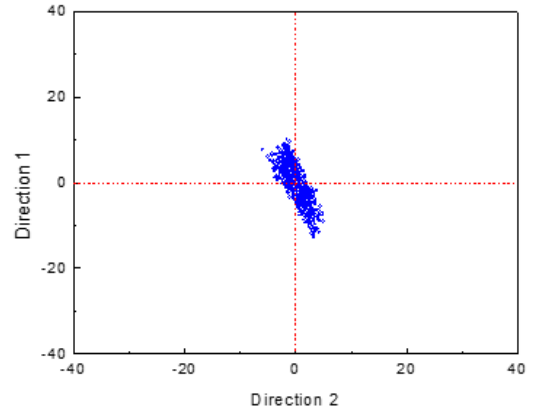


Fig. 10. Result of motion on robust reactor structure

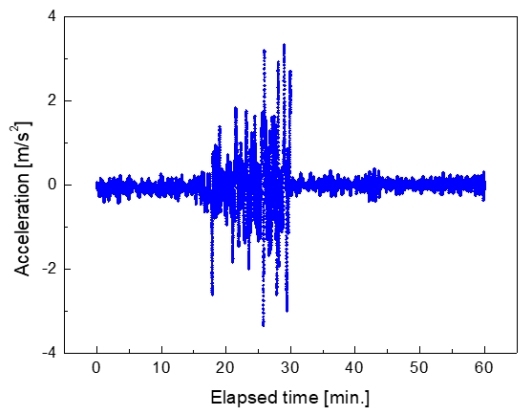


Fig. 8. Accelerometer signals in direction 1 of damaged reactor

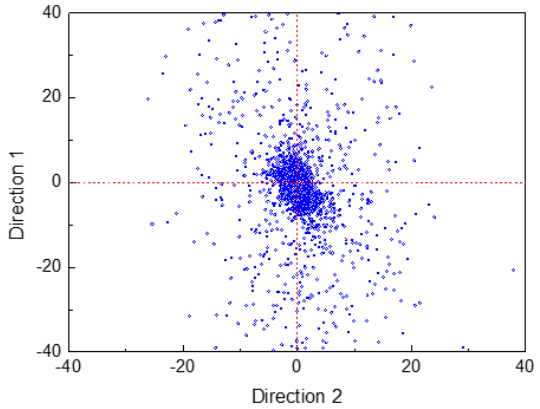


Fig. 11. Result of motion on damaged reactor structure

본 실험을 통해 가속도 센서를 이용한 연속체 구조물의 최상부 움직임에 대한 모니터링이 가능함을 확인하였다.

3. 결론

본 연구에서는 중형비가 큰 기동형 연속체 구조물의 최상부 움직임을 모니터링하기 위한 기술을 개발하여 현장 적용성 평가를 수행하였다. 이를 위해 가속도 신호 및 구조물의 변위를 추정할 수 있는 이론을 적용하여 반응기의 최상부 움직임을 측정하였으며, 구체적인 결과는 다음과 같다.

1. 실험을 통해 가속도 신호를 분석한 결과 건전한 반응기 최상부의 움직임 분포는 약 15 mm 이내 수준에서 움직이는 것으로 확인됨.
2. 기초 부분이 손상된 반응기의 경우 변위가 대부분 15 mm 이내에 분포되어 있지만, 강풍에 의한 150 mm 이하의 높은 변위가 도출됨.
3. 결론적으로, 가속도 센서를 이용하여 반응기의 변위 측정이 가능함을 확인하였고, 추가적으로 실제 구조물의 최상부 변위를 측정하는 경우 정확도 향상까지 기대할 수 있을 것으로 판단됨.

기존 기술과 본 연구에서 개발한 기법을 동시에 적용하는 경우 적은 수의 센서를 이용하여 구조물의 움직임을 높은 정확도로 모니터링할 수 있을 것으로 판단된다.

References

[1] D. Y. Kim, H. S. Kang, M. C. Cha, Y. W. Lee, Y. G. Park, E. S. Lee, "A Study on the Design and Experiments of a Coil-Type Continuous Reactor for Viscosity Fluid", *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol.36, No.5, pp.479-484, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.7736/KSPE.2019.36.5.479>

[2] Y. S. Byun, "A Study on the Improvement of Preventive Measures for Improving the Safety of Chemical Reactor", *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol.24, No.4, pp.32-38, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.7842/kigas.2020.24.4.32>

[3] J. W. Kim, C. G. Lee, S. H. Park, "Real-time Health Monitoring of Pipeline Structures Using Piezoelectric Sensors", *Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection*, Vol.14, No.6, pp.171-178, 2010
DOI: <https://doi.org/10.11112/jksmi.2010.14.6.171>

[4] J. H. Lee, D. H. Kim, "Application of Fiber Optic Sensors for Monitoring Deflection and Deformation of a Pipeline", *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol.36, No.6, pp.460-465, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.7779/JKSNT.2016.36.6.460>

[5] H. Kim, D. Kang, "Evaluation on real-time multi-point sensing performance of IoT-based hybrid measurement system", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.19, No.4, pp.543-550, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.4.543>

[6] W. Chung, D. Kang, "Application of FBG sensors for monitoring of railroad bridge", *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol.24, No.3, pp.25-28, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.22636/MKCI.2012.24.3.25>

[7] H. J. Jung, S. Lee, S. Kim, H. An, J. H. Lee, "Investigation of Seismic Behavior of Low-Rise Piloti Structure according to Seismic Design and Base Isolation of Columns", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.33, No.3, pp.271-278, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.4334/JKCI.2021.33.3.271>

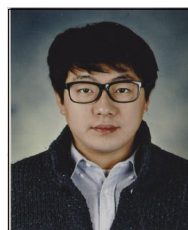
[8] S. H. Eem, I. K. Choi, "A Shape of the Response Spectrum for Evaluation of the Ultimate Seismic Capacity of Structures and Equipment including High-frequency Earthquake Characteristics", *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol.24, No.1, pp.1-8, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.5000/EESK.2020.24.1.001>

[9] J. Chung, H. H. Yoo, "Dynamic analysis of a rotating cantilever beam by using the finite element method", *Journal of Sound and vibration*, Vol.249, No.1, pp.147-164, 2002.
DOI: <https://doi.org/10.1006/jsvi.2001.3856>

[10] T. Beléndez, C. Neipp, A. Beléndez, "Large and small deflections of a cantilever beam", *European journal of physics*, Vol.23, No.3, pp.371, 2002.
DOI: <https://doi.org/10.1088/0143-0807/23/3/317>

공 원 식(Wonsik Kong)

[정회원]



- 2014년 2월 : 조선대학교 금속재료공학과 (공학사)
- 2016년 2월 : 조선대학교 첨단부품소재공학과 (공학석사)
- 2016년 2월 ~ 현재 : ㈜피레타 부설연구소 선임연구원
- 2021년 3월 ~ 현재 : 조선대학교 첨단부품소재공학과 박사과정

<관심분야>

금속 소재 수명평가, 금속 신소재 개발

최 현 선(Hyunseon Choi)

[정회원]



- 1998년 8월 : 한양대학교 물리학과 (이학사)
- 2004년 1월 ~ 2006년 12월 : 한국 전력공사 전력연구원 위촉연구원
- 2006년 8월 : 충남대학교 기계설 계공학과 (공학석사)
- 2007년 7월 ~ 현재 : ㈜피레타 대 표이사

<관심분야>

비파괴검사, 재료 수명평가 및 예측 진단

김 현 영(Heonyoung Kim)

[준회원]



- 2013년 2월 : 서울과학기술대학교 기계공학과 (공학사)
- 2015년 2월 : 서울과학기술대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2019년 3월 ~ 2021년 2월 : 한국 철도기술연구원 연수연구원
- 2021년 4월 ~ 현재 : ㈜피레타 부설연구소 선임연구원

<관심분야>

광섬유 센서, 구조 건전성 감시, 복합재료

김 형 규(Hyeonggyu Kim)

[정회원]



- 1990년 2월 : 영남대학교 기계공 학과 (공학사)
- 1992년 2월 : 영남대학교 기계공 학과 (공학석사)
- 1993년 1월 ~ 2020년 3월 : 두산 중공업 기술연구원 수석연구원
- 2021년 5월 ~ 현재 : ㈜피레타 부설연구소 상무이사

<관심분야>

설비 건전성, 설비 수명평가, 설비 신뢰성 예측진단

이 진 혁(Jinhyuk Lee)

[정회원]



- 2008년 2월 : 서울과학기술대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2015년 2월 : 서울과학기술대학교 에너지시스템공학과 (공학박사)
- 2016년 2월 ~ 2018년 9월 : 한국 전력공사 전력연구원 위촉연구원
- 2018년 12월 ~ 현재 : ㈜피레타 부설연구소 책임연구원

<관심분야>

구조건전성감시, 비파괴검사, 광섬유센서, 신호처리