

교량용 거더 원격 정밀거치 로봇의 수평위치 조정 기능 검증

박영수, 이상윤*

한국건설기술연구원 구조연구본부

Verification of Horizontal Position Adjustment Function of Remote Precision Installation Robot for Bridge Girder

Young-Soo Park, Sang-Yoon Lee*

Department of Structural Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

요약 건설 공사의 고층화, 대형화에 따른 건설 재해가 증가되고 있으며, 재해 발생 시 대부분이 중대 재해와 직결된다. 또한, 건설 현장의 전문 인력의 고령화, 청년층의 건설업 기피 현상 등으로 인한 인력 부족현상이 늘어나고 있다. 작업자의 안전과 인력의 문제를 해결하기 위하여 로봇을 이용한 연구와 적용이 늘어나고 있다. 건설 산업에서 로봇은 작업자의 근력을 보조하거나 작업자의 투입이 어려운 환경에서 작업자를 대신하여 필요한 작업을 수행할 목적으로 활용될 수 있다. 최근, 교량 건설 과정에서 교량용 거더의 거치를 위한 사고 위험이 높은 교각 위에 투입되는 작업자를 로봇으로 대신하기 위한 원격 정밀거치 로봇이 개발되고 있다. 본 연구에서는 원격 정밀거치 로봇의 수평위치 조정 기능의 수행여부를 검증하기 위한 실험모형을 이용한 실험을 수행하였다. 실험 결과로부터 원격 정밀거치 로봇을 이용하여 교량용 거더의 수평위치 조정이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다. 원격 정밀거치 로봇의 개발이 완료되어 건설 현장에 적용된다면 건설현장의 산업재해 저감에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

Abstract In the construction industry, robots may assist workers or perform necessary tasks for them in environments where the task is difficult. Recently, a remote precision installation robot has been developed to replace a worker on a pier, where there is a high risk of an accident when controlling the position of a bridge girder during a bridge construction process. In this study, an experiment was performed using a mock-up to verify the function of horizontal position adjustment of the robot. The experimental results confirmed that it is possible to adjust the horizontal position of the bridge girder using the robot. If the development of the robot is completed and it is applied to construction sites, it is expected to contribute to reducing industrial accidents.

Keywords : Construction, Bridge, Industrial Accident, Robot, Remote Control

1. 서론

건설 현장은 중량물을 다루거나 높은 곳에서 작업이 이루어지는 등 사고가 발생할 수 있는 다양한 요인을 가지고 있으며, 사고가 발생하는 경우에 심각한 재해로 이어질 가능성이 높다. 건설 현장의 사고 위험을 저감시키

기 위해 작업자를 보호할 수 있는 다양한 연구가 이루어지고 있다[1-3]. 로봇 역시 건설 현장의 안전성을 향상시키기 위한 적극적인 수단으로 활용될 수 있다. 로봇은 인력에 비해 큰 힘, 높은 정확도, 빠른 속도가 요구될 때 효율적으로 활용될 수 있다. 건설 산업에서 로봇 또는 자동화된 장비는 작업자의 근력을 보조하거나 작업자의 투입

이 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원이 시행하고 한국도로공사가 총괄하는 "스마트건설기술개발 국가R&D사업 (과제번호 22SMIP-A158708-03)"의 지원으로 수행하였습니다.

*Corresponding Author : Sang-Yoon Lee(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

email: sylee@kict.re.kr

Received September 30, 2022

Revised November 24, 2022

Accepted January 6, 2023

Published January 31, 2023

이 어려운 환경에서 작업자를 대신하여 필요한 작업을 수행할 목적으로 활용될 수 있다[4-6].

교량용 거더를 거치하는 과정에서 거더의 위치를 정밀하게 조정하기 위해 교각 위에 작업자가 투입되는데, 높은 위치에서 이루어지는 작업으로 인해 추락과 같은 상당한 사고의 위험이 있다고 할 수 있다. 사고 예방을 위하여 교량 건설 시 정밀 거치를 위하여 다양한 연구가 수행되어지고 있다. 하지만, 교량 시공을 간접적으로 지원하는 연구[7-9]이며, 교량에 사용되는 로봇의 목적은 대부분 점검과 조사로 제한적이다.

본 논문에서는 교각 위에 투입되는 작업자를 대신하여 거더의 위치를 정밀하게 조정하는 것을 목적으로 원격 정밀거치 로봇을 개발하고 있다[10-12]. 이상윤 등은 원격 정밀거치 로봇에 대한 개념설계를 수행하고, 수치해석을 활용한 검토를 통해 원격 정밀거치 로봇의 수평위치 조정 기능에 대한 수행 가능성을 확인하였다[13].

본 논문에서는 해석적으로 확인된 원격 정밀거치 로봇의 수평위치 조정 기능 수행 여부를 초기 모델에 대한 실물모형(Mock up)을 활용하여 실험적으로 검토하였다. 또한, 수평위치 조정 중 원격 정밀거치 로봇의 동작 특성을 검토하였다.

2. 원격 정밀거치 로봇의 개요

원격 정밀거치 로봇(Fig. 1의 Installation equipment)은 교량용 거더의 상면에 연결되어 거더를 들어 올리고 최종적으로 내려놓기 위한 인양장치(Fig. 1의 Lifting jack)와 거더의 수평위치를 조정하기 위한 매니플레이터로 구성되며, 매니플레이터는 거더의 길이방향을 기준으로 원격 정밀거치 로봇의 양 측면에 설치된다. 거더를 인양하고 최종적으로 거치하기 위해서는 Fig. 2와 같이 두 대의 원격 정밀거치 로봇을 두 대의 크레인으로 거더의 양단에 각각 연결하여 사용한다. 거더의 수평위치를 조정하기 위한 원격 정밀거치 로봇의 제어는 지상에 설치되는 원격 제어 시스템(Fig. 1의 Remote control system)에서 이루어진다.

거더의 수평위치 조정은 두 대의 크레인으로 거더가 교량 받침 근처로 이동된 이후에 이루어진다. 거더가 미리 설정된 오차범위(본 연구에서는 ± 100 mm로 설정) 내에서 교량 받침 근처로 이동되고 나면, 크레인은 정지하고 매니플레이션 시스템의 수직 방향 유압잭의 스트로크(stroke)를 늘려 교각 상면에 접지하도록 하고, 약 2

tonf 수준이 지압력을 유지한다. 수직 유압잭에 의해 원격 정밀거치 로봇이 교각 상면에 접지되고 나면, 수평 방향으로 배치된 유압잭의 스트로크를 조정하여 목표 지점까지 거더의 위치 조정한다. 거더의 위치를 조정하기 위해서는 2 대의 원격 정밀거치 로봇에 설치된 총 4 대의 매니플레이터가 동기화되어 제어된다.

원격 정밀거치 로봇을 제어하는 동안에 크레인은 작동하지 않는 상태로 유지되는데, 크레인에 의해 와이어의 상단이 고정된 상태에서 거더의 수평위치를 조정하고 나면, 거더 무게 중심이 이동한 영향으로 인해 제자리로 돌아가려는 복원력이 발생하게 된다. 이렇게 수평방향으로 발생하는 복원력은 교각 상면의 접지면에서 수평마찰력으로 저항하게 되며, Fig. 3과 같이 거더가 회전하지 않은 한 거더는 제자리로 복원되지 못한다. 이러한 거더 수평위치에 대한 역학적인 원리는 이상윤 등이 수행한 해석적인 검토에서 확인된 바 있다[13].

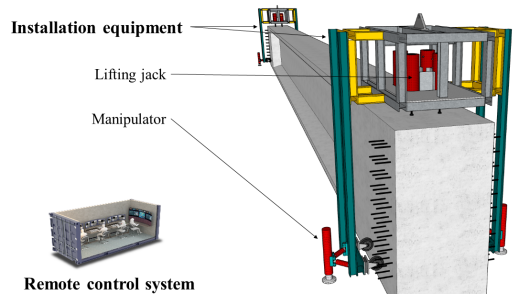


Fig. 1. Composition of Remote Precise Installation System for Bridge Girder [13]

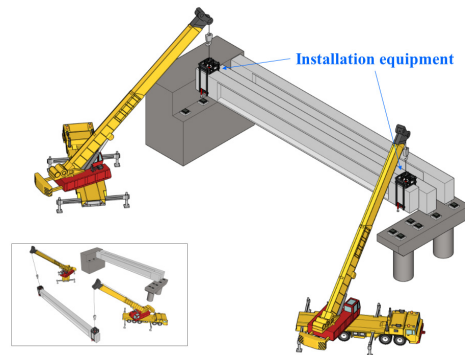


Fig. 2. Conceptual illustration: bridge girder installation with the remote precision installation equipment [13]

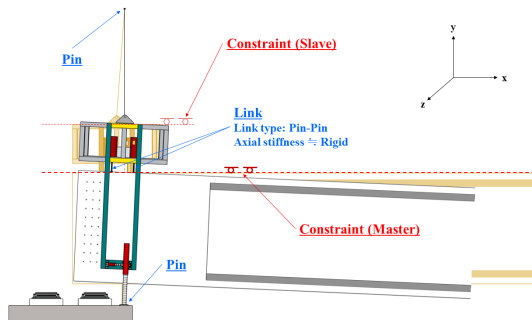


Fig. 3. Conceptual illustration: conflicts against constraints in an assumed situation that girder returns after horizontal positioning [13]

3. 수평위치 조정 기능 검증 실험

수평위치 조정 기능 검증 실험은 해석적으로 확인된 원격 정밀거치 로봇을 이용한 거더의 수평위치 제어 기능을 실험적으로 검증하기 위해 수행되었다.

원격 정밀거치 로봇의 기능 검증 실험을 위해 개발된 초기 모델에 대한 실물모형(Mock up)을 제작하였다. 실물모형을 이용한 기능 검증 실험을 위한 세팅은 Fig. 4와 같다. 원격 정밀거치 로봇에 설치되는 매니플레이터는 개발을 위한 설계가 진행 중에 있었기 때문에, 실물모형에는 수동으로 수평위치 조정 기능을 구현할 수 있도록 하려면 Fig. 5와 같이 3개 축 방향(수직축, 수평 2 개 축)의 유압잭으로 구성된 수평위치 조정 장치를 설치하였다. 실험에 사용된 교량용 거더는 높이 1.4 m, 길이 30 m의 실제 교량용 거더를 길이만 11.1 m로 축소하여 제작한 것으로, 중량은 약 25 tonf 정도이다. 실험은 조건의 변화 없이 1회 반복 수행하였다. 추후 시작품 제작이 완료되면 다양한 조건에서의 검증 실험을 수행할 예정이다.

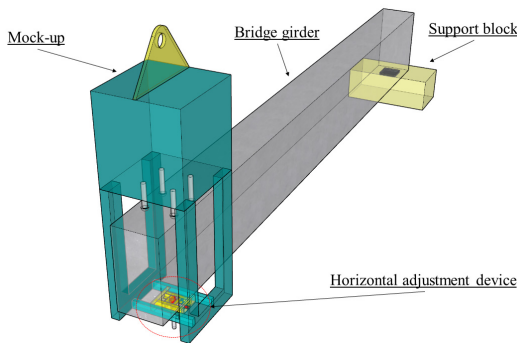


Fig. 4. Concept of horizontal adjustment function test setting

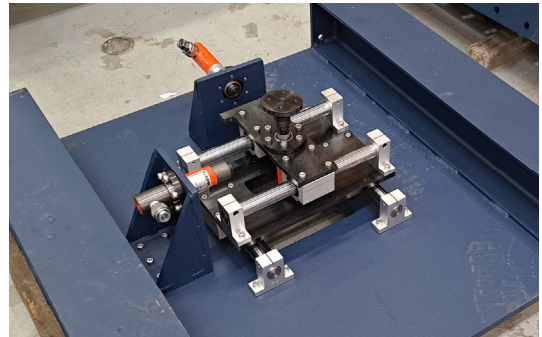


Fig. 5. Horizontal adjustment device for mock-up

원격 정밀거치 로봇의 수평위치 조정 기능 검증은, 실물모형을 거더에 연결한 뒤, 실험실 상부에 설치된 크레인으로 실물모형을 약 20 mm 정도 들어 올린 상태에서 거더 한쪽의 수평위치를 조정하는 방법으로 수행하였다. 실험실에 거더 정밀거치 로봇 실물모형과 교량용 거더를 이용하여 실험준비가 완료된 상태는 Fig. 6과 같다. 거더의 수평위치 조정은 Fig. 6에 표기된 수동 유압펌프(Hydraulic pump)를 이용하여 3 개 축의 유압잭(Hydraulic jack)을 작동시키는 방식으로 수행하였다.

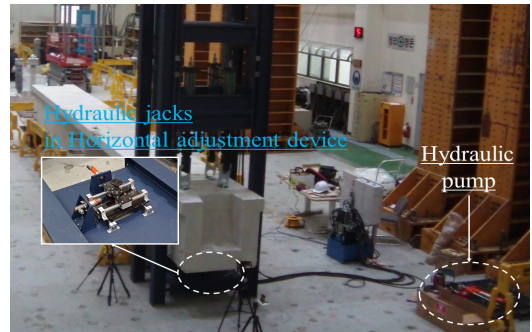


Fig. 6. Hydraulic jacking system for horizontal position adjustment

수평위치 조정 기능 검증을 위한 실험 순서는 Table 1과 같으며, 각 단계(Step) 별로 거더가 움직이는 방향은 Fig. 7과 같다.

Table 1. Process of test

Process	Explanation
Step 1	Lifting the Remote Precision Installation Robot Mock up and Girder
Step 2	Adjusting(move) position of girder in longitudinal direction
Step 3	Adjusting(move) position of girder in transverse direction
Step 4	Setting down the girder

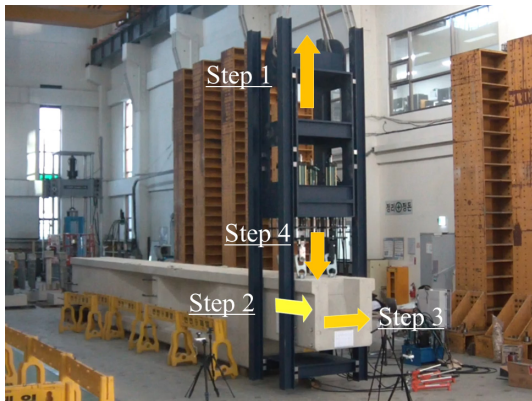


Fig. 7. Direction of movement in each step

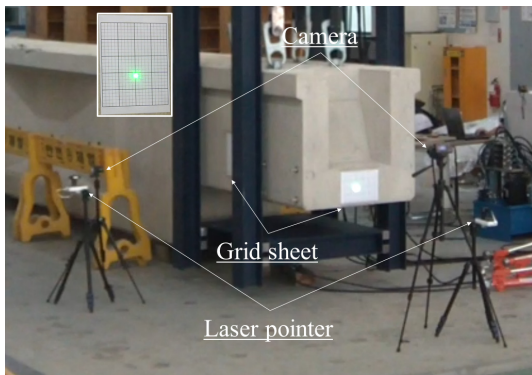


Fig. 8. Setting for measurement

각 단계별로 실험을 진행하면서 거더의 위치 변화를 측정하기 위해 Fig. 8과 같이 레이저 포인터를 이용한 계측을 수행하였다. 레이저 포인터를 이용한 계측을 위해 10 mm 간격의 격자가 인쇄된 종이를 측정하고자 하는 거더의 단부면과 측면에 부착하였으며, 바닥에 지지된

받침대에 레이저 포인터를 고정시켜 거더에 부착된 종이 격자망 위에 레이저 포인트가 투영되도록 하였다. 격자망 위에 투영된 레이저 포인트는 카메라를 이용하여 영상으로 취득하였으며, 격자망 상의 레이저 포인트의 위치 변화로부터 거더의 위치 변화량을 계산하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

Fig. 9은 각 거더 정밀거치 로봇의 수평위치 조정 기능 검증 실험을 수행하면서 각 단계별로 촬영된 격자 종이와 레이저 포인트를 정리한 것이다. 두 대의 카메라에서 각각 촬영된 영상의 음향과 주변 환경의 변화를 참고하여 두 영상을 동기화 한 뒤, 각 단계별로 수동으로 거더의 수직/수평 위치 조정이 완료된 시점에서 이미지를 추출하였다. Fig. 9에서 Step 0은 거더의 위치에 대한 아무런 변화도 이루어지지 않은 시점을 의미한다.

실험의 각 단계별로 추출된 이미지로부터, 50 mm 크기의 짧은 격자 4개로 이루어진 사각형(Fig. 10의 파랑색 사각형)의 오른쪽 아래 모서리를 기준으로 레이저 포인트 포인트의 위치를 계산하였다. 레이저 포인트의 위치는 중심점을 기준으로 산정하였으며, 레이저 포인트의 중심점은 Fig. 10에 나타난 것과 같이 레이저 포인트에 매핑된 유사한 크기를 갖는 원의 중심을 기준으로 추출하였다.

Fig. 11은 각 단계별 레이저 포인트의 위치에 대한 분석으로부터 계산된 거더의 위치를 각 단계별로 나타낸 것이다. Fig. 11의 실선은 거더의 단부면에 설치된 격자 종이로부터 계산된 측정값이고, 점선은 거더의 측면에 설치된 격자 종이로부터 계산된 측정값을 나타낸 것이다.

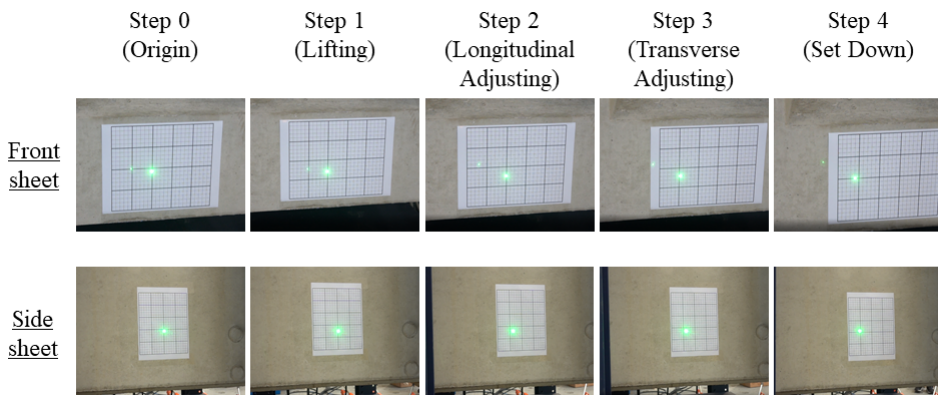


Fig. 9. Movement of points on sheets in each step

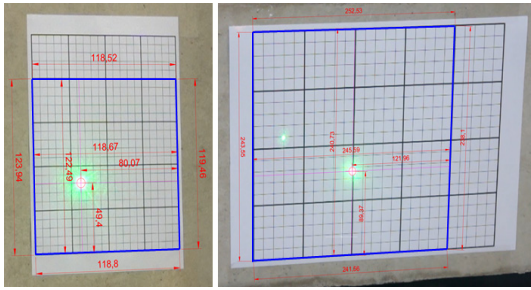


Fig. 10. Example of position calculation

실험의 첫 번째 단계(Step 1)에서 원격 정밀거치 로봇 실물모형을 들어 올리면서 수직 방향으로 약 20 mm 위치 이동이 있었던 것을 확인할 수 있다. 실물모형을 들어 올린 이후, 수직 유압잭의 스트로크를 신장시켜 실험실 바닥에 접지시키고 소정의 지압력(약 1 tonf)이 작용하도록 하였는데, 이 과정에서는 거더의 위치 변화는 발생하지 않았다. 실물모형을 들어 올리는 과정에서 단부(Front Sheet)와 측면부(Side Sheet)에서 측정한 거더 높이의 차이가 약 5 mm 정도 발생하였는데, 이러한 높이차는 두 측정 위치 간의 거더 길이 방향 거리로 인해 발생한 것으로 판단된다. 이때 발생한 높이 차이는 실험 단계가 진행되면서 큰 변화 없이 유지되는 것을 확인할 수 있었다.

Step 2에서는 유압잭에 의해 거더의 길이방향으로 약 38 mm 정도 위치가 이동하는 것을 확인할 수 있으며, Step 3에서도 유압잭에 의해 거더의 폭 방향으로 약 46

mm 정도 위치가 이동하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과로부터, 해석적으로 확인되었던 원격 정밀거치 로봇의 수평위치 조정 기능이 유효하다는 것을 실험적으로도 확인할 수 있었다.

거더의 수평위치를 조정하는 단계(Step 2, Step 3)에서 거더의 수직 위치가 아랫방향으로 변화하는 것을 확인할 수 있었는데, 이러한 현상은 거더의 수평방향 이동에 의해 원격 정밀거치 로봇이 기울어지면서 발생하는 것으로 판단된다. 거더의 길이방향으로 수평위치를 조정하는 과정(Step 2)에서 거더의 폭 방향으로도 위치 변화가 발생하였으나 미세한 수준(약 0.5 mm)이었다. 거더의 폭 방향으로 수평위치를 조정하는 과정(Step 3)에서도 거더의 길이방향으로 위치 변화가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이 때 발생한 변화량은 약 1.7 mm로, 원격 정밀거치 로봇의 위치제어 정밀도를 확보하기 위해서는 이에 대한 보완이 필요할 것으로 판단된다.

실험의 마지막 단계인 Step 4에는 원격 정밀거치 로봇 실물모형에 탑재된 유압잭을 이용하여 거더를 내려놓는 과정에서 10 mm 이상의 추가적인 수평변위(Fig. 11의 붉은색 원 및 화살표)가 발생하였다. 이러한 현상은 거더를 내려놓는 과정에서 바닥에 접지된 유압잭의 접지면이 미끄러진 데에 가장 큰 원인이 있는 것으로 판단되며, 시제품을 개발하고 검증하는 과정에서 재검토가 필요할 것으로 판단된다.

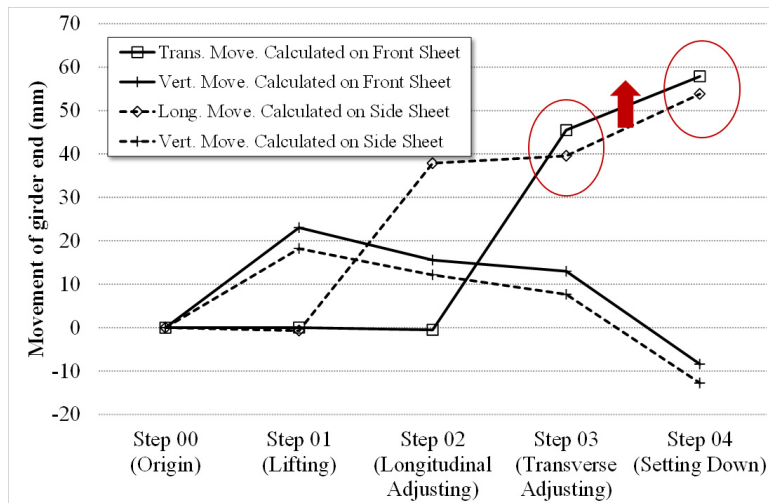


Fig. 11. Movement of girder in each step

5. 결론

본 연구에서는, 건설 현장에서 사고 위험이 높은 곳에 투입되는 작업자를 로봇으로 대신하여 안전성을 향상시키기 위한 기술 개발의 일부로, 해석적으로 확인된 원격 정밀거치 로봇의 수평위치 조정 기능 수행 여부를 검증하기 위해 실물모형을 이용한 실험을 수행하였다.

실험 수행 결과, 제안된 원격 정밀거치 로봇을 이용하여 교량용 거더의 수평위치 조정이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다. 다만, 거더의 수평위치 조정 이후에 교량용 거더를 최종적으로 내려놓는 과정에서 계획되지 않은 수평 이동이 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 앞으로 남은 원격 정밀거치 로봇의 개발 과정에서 최종적인 거치 위치에 대한 오차를 최소화하기 위한 고려가 있어야 할 것으로 판단된다.

본 연구로부터 확인된 오차 발생 요인을 해소하고 개발 의도에 따라 원격 정밀거치 로봇의 개발이 완료되어 건설 현장에 적용된다면 건설현장의 산업재해 저감에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

References

[1] J.Y. Kim, S.S. Ahn, and J.H. Kang, "Development of Location/Safety Tracking System for Construction Site Workers by Using MEMS Sensors," *Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 49, no. 1, pp. 12-17, March 2012.
UCI: G704-F00451.2012.49.1.006

[2] S.Y. Park, S.H. Yoon, and J. Heo, "Image-Based Automatic Detection of Construction Helmets Using R-FCN and Transfer Learning," *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, vol. 39, no. 3, pp. 399-407, Jun. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.12652/Ksce.2019.39.3.0399>

[3] S.H. Kim, C.S. Kang, and H.G. Ryu, "IoT-based Dangerous Zone Alarming System for Safety Management in Construction Sites," *Journal of the Korea Convergence Society*, vol. 10, no. 10, pp. 107-115, Oct. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.15207/JKCS.2019.10.10.107>

[4] de Santos, P. G., Estremera, J., Garcia, E., and Armada, M., "Power assist devices for installing plaster panels in construction," *Automation in Construction*, vol. 17, no. 4, pp. pp. 459-466., 2008.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2007.08.006>

[5] Y.B Ham and S.J Park. "Development of gondola-type building management robot platform and mechanism for moving/tasking on building outer-wall," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, vol. 30,

no. 4, 375-382, 2013.

DOI: <https://doi.org/10.7736/KSPE.2013.30.4.375>

[6] Pan, M. Pan, W. Determinants of Adoption of Robotics in Precast Concrete Production for Buildings. *J. Manag. Eng.* vol. 35, no.5, pp. 1-13, 2019.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)me.1943-5479.0000706](https://doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.0000706)

[7] Braun, A. Borrmann, A. Combining inverse photogrammetry and BIM for automated labeling of construction site images for machine learning. *Autom. Constr.* vol. 106, 102879, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102879>

[8] Oraee, M.; Hosseini, MR.; Papadonikolaki, E.; Palliyaguru, R.; Arashpour, M. Collaboration in BIM-based construction networks: A bibliometric-qualitative literature review. *Int. J. Proj. Manag.* vol. 35, pp. 1288-1301, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iproman.2017.07.001>

[9] S Yoon, Q Wang, H Sohn. Optimal placement of precast bridge deck slabs with respect to precast girders using 3D laser scanning. *Autom. Constr.* vol. 86, pp. 81-98, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.11.004>

[10] Lattanzi, D. Miller, G. Review of Robotic Infrastructure Inspection Systems. *J. Infrastruct. Syst.* vol. 23, no.3, pp. 1-16, 2017.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)is.1943-555x.0000353](https://doi.org/10.1061/(asce)is.1943-555x.0000353)

[11] S. Jiang, J. Zhang. Real-time crack assessment using deep neural networks with wall-climbing unmanned aerial system. *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.* vol. 35, no.6 pp. 549-564, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1111/mice.12519>

[12] S.T Nguyen, H.M La. A Climbing Robot for Steel Bridge Inspection. *J. Intell. Robot. Syst. Theory Appl.* , vol. 102, pp. 1-21, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10846-020-01266-1>

[13] S.Y. Lee, Y.S. Park, S.W. Lee, T.I. Chung, and J.J. Song, "Conceptual Design of Remote Precise Installation System for Bridge Girders," *The Journal of Korea Robotics Society*, vol. 16, no. 3, pp. 199-206, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.7746/jkros.2021.16.3.199>

박 영 수(Young-Soo Park)

[정회원]



<관심분야>

교량 유지관리, 시공자동화

- 2011년 2월 : 세종대학교 공과대학 건설환경공학과 (공학석사)
- 2016년 2월 : 세종대학교 공과대학 건설환경공학과 (공학박사)
- 2018년 11월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 구조연구본부 수석연구원

이 상 윤(Sang-Yoon Lee)

[정회원]



- 2003년 2월 : 한양대학교 토목환경공학과 (구조공학석사)
- 2013년 8월 : 고려대학교 사회환경시스템공학과 (구조공학박사)
- 2003년 1월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수석연구원

〈관심분야〉

프리랩 구조, 건설 로봇