

사장교 케이블의 잔설 제거용 점검 로봇 개발

김재환, 서동우*, 정규산, 박기태
한국건설기술연구원

Development of Inspection Robot for Removing Snow on Stays of Cable-Stayed Bridge

Jaehwan Kim, Dong-Woo Seo*, Kyu-San Jung, Ki-Tae Park

Sustainable Infrastructure Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

요약 국내외적으로 케이블리지 교량에서 케이블의 착설 및 잔설 등이 낙설됨에 따라 안전사고가 발생하고 있다. 낙설에 의한 직접적인 피해뿐만 아니라 교통사고 등 추가적인 2차 피해가 발생하고 있어, 이에 대한 대책 마련이 필요하다. 이를 예방하기 위한 다양한 방안들이 제시되고 있지만, 안전성과 실용성에서는 여전히 문제점을 가지고 있다. 본 연구에서는 기존 방법 중 능동적인 잔설 제거 방법 중 하나인 케이블 로봇을 활용하고자 하였고, 잔설 제거의 효율을 높이기 위하여 로봇의 등반 능력을 높이는 다양한 방법이 적용되었다. 교량 케이블의 다양한 직경에 적용할 수 있도록 로봇의 가용 범위를 유동적으로 조절할 수 있게 하였다. 또한, 케이블 잔설 제거 로봇의 활용성을 높이기 위하여 케이블의 표면 상태를 실시간으로 점검할 수 있도록 고해상도 카메라를 설치하고, 장력 측정을 위하여 3축 가속도계와 장력 변환 알고리즘을 추가하여 잔설제거 뿐만 아니라 겨울철 이외에도 케이블 점검 로봇으로 활용될 수 있도록 개발하였다. 성능 검증을 위하여 실내 및 현장 실험을 수행하였고, 향후 점검 로봇에 대한 개선사항에서 대해서도 제안 하였다.

Abstract Safety accidents have been reported due to falling accumulated snow from cables of cable-supported bridges. In addition to the direct damage caused by falling snow, secondary damage, such as traffic accidents, can occur. Various methods have been proposed to prevent these accidents, but there are still problems in safety and practicality. In this study, a cable robot type was selected as one of the active methods for removing accumulated snow on cables. An attempt was made to increase the climbing ability of the robot to improve the efficiency of snow removal. In addition, the available range of cable diameter for the robot can be adjusted flexibly to be applied to cables used in the field. A high-resolution camera was also installed to check the surface condition of the cable in real time to increase the utility, and be used as a cable inspection robot. A three-axis accelerometer and a tension conversion algorithm were added to measure the tension force of cables. To verify the performance, indoor and field experiments were conducted, and future improvements for the inspection robot were proposed.

Keywords : Snow, Snow Removing, Cable, Cable-Stayed Bridge, Field Test, Safety

*Corresponding Author : Dong-Woo Seo(Korea Institute of Technology)

email: dwseo@kict.re.kr

Received November 11, 2019

Accepted March 6, 2020

Revised December 3, 2019

Published March 31, 2020

1. 서론

건설기술 및 관광산업 발달로 케이블 지지 교량(사장교, 현수교 등 특수교로 지칭)의 수가 국내외적으로 급격하게 증가하고 있는 실정으로, 현재 국내에는 70여개소의 특수교가 건설되어 운용 중에 있다. 국내의 경우 대부분의 특수교는 지형적 특성으로 인하여 주로 해안가 및 해상에 위치하고 있고, 요구되는 공용수명이 100년 이상으로 설계되어 있어 기존 교량 유지관리와는 차별화가 요구된다[1]. 특수교는 구조적 특성상 차량이 통행하는 보강거더 상면에 주탑과 케이블이 연결되는데, 동절기 강설시에 교량의 주탑 및 케이블에 부착되어 쌓인 눈이 결빙되고, 이후 진동이나 기온상승 등으로 낙하하는 현상이 발생된다[2]. 이러한 잔설 낙하는 직접적인 1차사고 뿐만 아니라 운전자의 주의 분산으로 인한 2차사고가 발생할 수 있다. 일례로, 국내에서는 서해안에 위치한 목포대교와 인천대교에서 낙빙 또는 낙설로 인하여 차량 파손 사례가 보고되었다[3]. 그리고 이러한 현상이 과거에는 강설량이 많은 한랭지역에서 주로 발생하였으나, 최근에는 기후변화로 인해 그 이외의 지역에서도 낙설사례가 증가하고 있는 추세이다. 게다가 국내 특수교의 낙설 및 낙빙 관련 규정은 현재까지 미비한 실정이며, 이에 대한 사고 발생 예방을 위한 잔설제거 전략 수립이 필요한 실정이다.

현재 케이블 위 잔설제거를 위한 다양한 방법들이 적용되고 있다[4-6]. 우선, 인력에 의한 방법으로 교량 관리 작업자가 직접 투입되기 때문에 강설이나 강풍 시 작업자의 안전을 확보하기 어려우며, 강풍이나 눈이 내리는 시간이 길어질수록 교통 통제가 길어지고 제거 작업이 지연될 수 있다. 전기저항발열 시스템은 저항 소자가 삽입된 재료를 얼음이 생기는 표면 부에 설치하여 열을 통하여 얼음을 녹이는 방법으로 상대적으로 간단하게 착빙 방지 및 제빙 역할을 할 수 있지만, 용설수에 의해 생기는 고드름을 방지하기 위한 추가적인 조치가 필요하고, 높은 전기료 등으로 인한 많은 유지관리 비용이 발생한다. 이외에는 착설방지제, 콘크리트방식도장, 방수도료 등으로 도장하거나 도장된 패널을 설치하여 눈을 미끄러져 내리게 하는 방법으로 착빙이나 착설을 제어하는 방식으로 효과적이다. 하지만, 이러한 방법은 주기적인 관리가 필요한 시공방법이기에 시공성과 경제성 검토가 필요하다. 로봇에 의한 방법은 앞서 언급된 잔설 제거 방법과 비교하여 소규모 인력으로도 운용이 가능한 장점이 있지만, 느린 잔설제거 속도와 로봇의 등반 각도가 제한되는 한계점이 여전히 존재한다.

본 연구에서는 특수교 유지관리의 일환으로 주요 구조 부재인 케이블의 잔설 제거 로봇을 제작하여 선제적 대비로 낙설에 의한 사고를 예방하고, 기존의 잔설제거 로봇의 문제점을 개선하는데 주목적을 두고 있다. 그리고 잔설제거 로봇의 성능 검증을 위해 실내 및 현장에서 시험 평가를 실시하였고, 향후 잔설 제거 로봇의 효율적인 활용 방안 및 추가적인 개선사항에 대해서도 기술하였다.

2. 잔설제거 로봇 제작

2.1 잔설제거 로봇 설계 및 제작

케이블 잔설제거 로봇은 크게 기구 부, 카메라 부, 모터 및 모터 컨트롤러 부, 로봇 컨트롤러 부, 통신 부, 소프트웨어로 나누어 개발하였으며, 진행 과정은 Fig. 1과 같다. 그리고 제작 과정에서 잔설제거 성능 및 케이블 직경별 적용성 향상에 주안점을 두었다. 그리고 작업의 효율성을 높이기 위해 경량형 로봇 제작 및 현장 사용성을 고려하여 잔설제거 브러쉬 성능향상을 중점적으로 고려하였다.

2.2 잔설제거 로봇 주요 제원

케이블 잔설제거 로봇 설계 시 우선 배터리, 모터, 컨트롤러 등이 들어가는 구동부와 케이블을 이동하기 위한 바퀴부 그리고 잔설 제거를 위한 잔설제거부 크게 3가지를 고려하여 제작하였다. 또한, 이를 바탕으로 케이블의 직경에 따른 연결방법을 고려하였다.

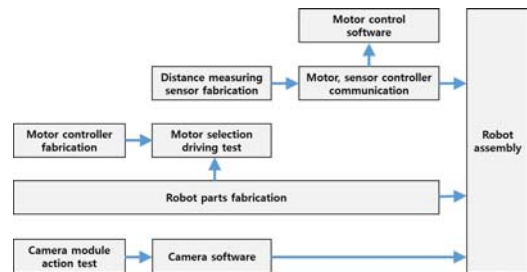


Fig. 1. Design process for snow removing robot

Fig. 2.에서 보는바와 같이, 잔설제거 로봇은 3개의 구동부 모터와 우레탄 바퀴를 장착하여 케이블 등반 능력을 극대화 시켰으며, 50-200 mm의 케이블 직경에 장착이 가능하도록 가변 직경 조절부를 만들었다. 잔설제거 브러쉬는 등반시 작은 힘으로 회전시키는 방식을 적용하

였고, 소형 카메라를 장착하여 실시간 제설 상태 및 케이블 덕트 상태를 원격으로 확인 할 수 있도록 하였다. 로봇의 경량화와 내구성능을 향상시키기 위해서 전체적인 프레임은 알루미늄으로 제작하였다. 마지막으로 케이블 등반시 흔들림 방지 및 지상에서 원격제어를 용이하게 하기 위해서 컨트롤러를 로봇 하부에 위치하도록 설계하여 로봇 무게중심이 지면으로 향할 수 있도록 하였다.

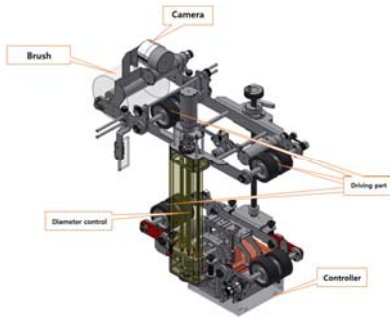


Fig. 2. 3D-image for snow-removing robot

잔설제거 로봇의 기본적인 제원은 Table 1.과 같다. 크기는 271 mm × 615 mm × 762 mm(높이)이고, 무게는 14 kg 미만이다. 통신은 무선 원격제어 방식으로 고성능 802.11 an/ac 장비를 이용하였고, 통신 주파수는 5 GHz방식을 사용하여 일반적인 2.4 GHz에서 발생하는 주파수 간섭을 배제시켰다. 배터리는 충전식 리튬 폴리머 배터리(4Cell 15.2 V 4480 mAh)를 2 Set 병렬로 연결하여 최소 2시간 이상 로봇 운영이 가능하도록 하였고, 충전시 탈부착이 가능하게 설계하였다. 배터리 용량부족이나 통신 두절시 출발위치로 자동 복귀하는 시스템을 적용하였다.

Table. 1 Design specifications of de-icing robot

| Item | Spec. |
|------------------------|--|
| Dimension | - 271 mm×615 mm×762 mm |
| weight | - 14kg |
| Battery | - Lithium polymer battery 4Cell 15.2V 4480 mAh × 2 |
| Wireless communication | - IEEE 802.11 an/ac 5GHz 2×2 MIMO - Frequency band: 5180~5805 MHz, - Bandwidth: 20/40 MHz - Output: wireless (5G): 23 dBm |
| Other | - wireless Wi-fi controller, battery - Automatic return to starting position when battery is low or communication is lost - Light weight and corrosion resistance using aluminum materials |

2.3 잔설제거 로봇 주요 기능

잔설제거 로봇의 주요 성능은 측정부, 구동부와 컨트롤러로 구분하여 설명할 수 있다. 측정부에서는 IP 카메라와 로터리 엔코더로 구성된다. 고해상도(1920 × 1080 pixel) IP 카메라를 이용하여 케이블의 표면 상태를 촬영하고, 촬영된 이미지를 무선 Wifi 공유기를 통하여 컨트롤러 컴퓨터에 무선 전송하여 실시간 점검이 가능하도록 하였다. 로터리 엔코더는 바퀴의 회전수를 측정하여 로봇의 이동거리를 계산, 이를 컴퓨터 컨트롤러에 표시될 수 있도록 하였다.

구동부는 모터와 모터드라이버로 구성되며, 모터는 PGM32-2953(12 V) 모델의 DC 모터를 사용하였으며, 감속기는 1/100이다. 12 kgf·cm의 토크와 80 rpm의 회전속도를 가진다. 모터 드라이버는 모터를 구동하기 위한 연결 장치로 ZXMHC 3F381N8 모델을 사용하였다.

마지막으로 컨트롤러는 노트북 컴퓨터에 IP카메라 영상화면 및 케이블 잔설제거 로봇을 구동시킬 수 있는 프로그램이다. 컨트롤러 프로그램에 표시되는 로봇의 주요 상태는 전압(0~100%), 각도(0~90°), 고도, 브레이크 상태, 로봇의 이동거리, 배터리 연결 상태이다. 프로그램으로 제어 가능한 로봇 동작은 전·후방 움직임, 멈춤 그리고 위치 지정 및 지정 위치로의 움직임이다.

3. 잔설제거 로봇 성능검증 실험

3.1 성능검증 실내 실험

성능검증 실내 실험에서는 케이블 잔설제거 로봇의 등반능력에 중점을 두어 실시하였다. 등반능력 실험을 위하여 4 m의 원형봉을 이용하여 실험을 실시하였다. Fig. 3.과 같이 원형봉의 기울기와 무게추 장착여부에 따라 등반능력을 측정하는 실험을 수행하였다.

케이블 잔설제거 로봇의 실내실험 결과 기능적인 부분에서 만족스러웠다. 특히 기존의 로봇에서의 문제점으로 지적된 등반속도에 대해서는 알루미늄 자재를 사용한 경량화와 우레탄 바퀴를 사용하여 모터 과부하를 막아 안정적인 등반이 가능하도록 하였다.

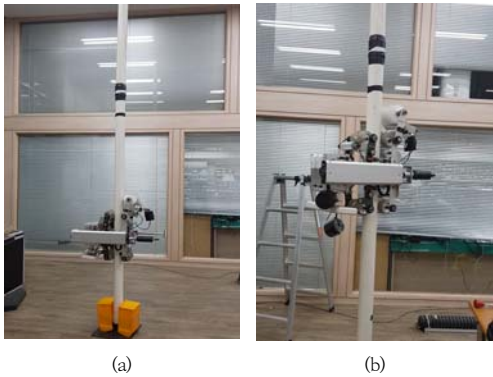


Fig. 3. Testing for ascending/descending capability of snow removing robot
(a) Without weight (b) With 6kg weight

주행능력 성능 평가 결과는 Fig. 4와 같다. 케이블 각도(45°, 60°, 90°)에 따른 등반속도 차이는 거의 나타나지 않는 것을 확인 할 수 있다. 다만 6 kg 무게추를 추가로 달고 등반할 때 45°에서는 큰 차이가 나지 않았지만, 60°와 90°에서는 약간의 속도 감소가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 케이블 표면 상태를 고려하지 않은 상태에서, 현재 제작된 잔설제거 로봇에 최대 4.2 kg 무게추가 케이블 등반 성능에 영향을 주지 않을 것으로 예상된다.

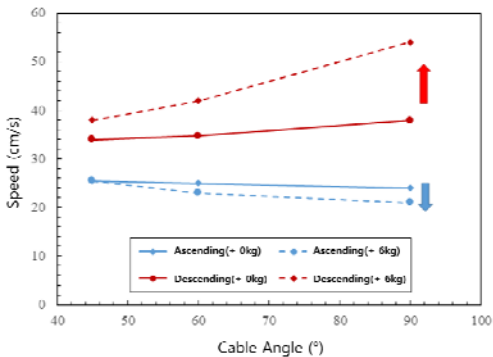


Fig. 4. Driving performance of snow removing robot

한편 등반속도와 하강속도에서 확연한 차이가 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 무게추가 없을 때, 하강속도는 등반속도에 비해 대략 10 cm/s가 빨라지는 것을 확인할 수 있었다. 6 kg 무게추를 추가하였을 경우 경사각도가 증가할수록 속도 증가폭이 급격하게 증가하였다. 그 예로, 케이블 각도가 90°일 때, 등반속도에 비해 하강속

도가 2배 이상 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 추가 부속물의 무게가 급격하게 증가할 경우, 하강시 주행속도의 증가에 따른 문제 발생에 대해서도 검토할 필요가 있을 것으로 판단된다.

3.2 성능검증 현장 실험

잔설제거 로봇의 성능 검증을 위하여 테스트베드 교량을 선정하여 현장 실험 수행하였다. 테스트베드 교량 선정은 잔설 및 낙설로 인한 사고 이력이 있는 교량 중 사장교 1개소를 선정하여 실시하였다. 해당교량은 단경간 타정식 강합성 사장교로 경간장 400 m, 너비 23.9 m의 왕복 4차로로 되어있다[7]. 케이블 잔설제거 로봇 성능 검증 실험은 경사각도 27.3° 케이블에서 수행되었다.

Fig. 5와 같이 현장 실험에서 실내 시험과 동일하게 6kg 하중 추가 여부 따른 등반 및 하강속도를 측정하였다.



Fig. 5. Testing snow removing robot on the cable

등반 성능 결과는 Table 2.에서 알 수 있듯이 실내 실험에서 얻어진 값과 크게 차이가 나지 않는 것을 확인할 수 있었다. 특히 케이블 각도 45° 이하일 때 6 kg 이상의 추가 부속물을 설치하고 등반할 때 주행능력에 큰 영향을 미치지 않을 것을 알 수 있다.

Fig. 6.에서 보는 바와 같이 케이블 표면에 존재하는 잔설이 브러쉬를 통해 어느 정도 제거된 것을 확인할 수 있다.

Table. 2. Driving performance of de-icing robot in the site

| Ascending speed (cm/s) | | Descending speed (cm/s) | |
|------------------------|--------|-------------------------|--------|
| w/o weight | w/ 6kg | w/o weight | w/ 6kg |
| 26.0 | 27.0 | 33.4 | 33.7 |

케이블 잔설제거 로봇의 추가 기능으로 케이블 위에서 이동하면서 실시간으로 케이블 표면 상태를 확인할 수 있다.



Fig. 6. The condition of cable surface after operating snow removing robot

케이블 잔설제거 로봇을 겨울철뿐만 아니라 상시적으로 활용하기 위하여 점검 기능을 추가하여 개발하였다. 본 실험에서 잔설 제거 로봇의 장력 측정 기능을 확인해 보았다. 해당 케이블은 설계장력은 3,967 kN이며 완공 직후 측정된 장력은 4,283 kN, 10,000일이 경과한 후 측정된 장력은 4,193 kN으로 측정되었다. 케이블 잔설 제거 로봇에 부착된 3축 가속도 센서를 이용하여 케이블의 장력을 측정하였을 때 케이블 50 m 지점에서 4,586 kN, 100m 지점 4,535 kN, 150 m 지점 4,641 kN로 10,000일 경과한 후 측정된 장력 4,193 kN과 비교시 각각 9.4%, 8.2%, 10.7% 높게 측정됨을 확인할 수 있었다.

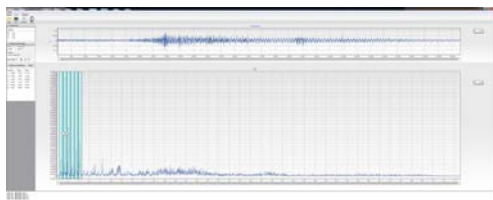


Fig. 7. 150 m point measuring cable acceleration and tension conversion

장력이 높게 측정된 원인이 준공 후 활하중과 사하중의 증가에 의한 영향으로 추정되며, 이에 대한 장기적인 상세 분석이 필요한 것으로 판단된다. 잔설제거 로봇의 장력 측정 기능을 활용하여 센서 추가 부착이나 측정위

치에 제한받지 않고 장력을 측정 할 수 있어 케이블 안전 관리의 효율성 제고가 기대된다.

3.3 유지 방안 및 개선 사항

케이블 잔설제거 로봇의 경우 지속적인 운용을 위해서는 유지관리가 중요한 부분이다. 특히, 브러쉬 및 바퀴의 경우 마모 정도에 따라 주기적으로 교체를 해야 로봇의 구동의 문제가 발생하지 않을 것으로 판단된다. 사장교 케이블 잔설제거 로봇은 실내 및 실외 실험을 통하여 성능을 검증하였고, 사용성을 본 연구를 통하여 평가하였다. 향후 본 연구에서 개발한 사장교 케이블 잔설제거 로봇 시제품의 보완 및 개선 사항은 다음과 같다.

주요 개선사항으로는 배터리 추가, 등반능력의 향상 및 이미지 영상의 다각화로 나누어 볼 수 있다. 잔설 제거 로봇을 점검용으로 활용하기 위해서는 배터리 추가하여 작업시간 연장 등을 통하여 효율성을 높일 필요성이 있다.

배터리 1개 추가시 로봇의 작업 운용시간이 대략 1시간 이상 증가하기 때문에 로봇 자중을 고려하여 추가 배터리 설치를 고려할 필요가 있다고 판단된다. 많은 케이블 수와 긴 길이에 따라 로봇의 주행 능력 향상이 요구된다. 현재 구동부는 3개의 모터로 구성되어 있는데, 구동부 모터를 추가하게 되면 로봇의 등반능력을 더 향상시킬 수 있다.

그리고 성능 실험에서 확인했듯이 등반 각도는 등반능력을 평가하는 중요한 요소 중에 하나이기에 구동부의 모터를 추가하는 것은 로봇의 주행안정성을 확보할 수 있는 하나의 방법으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 케이블지지 교량 유지관리의 일환으로 케이블 낙설에 의한 사고를 예방하고자 잔설제거 로봇을 개발하였고, 결론은 다음과 같다.

1. 케이블 잔설제거 로봇에서 잔설제거 성능 향상 외에도 다양한 케이블 직경에 대처하기 위하여 로봇의 적용 가능한 케이블 직경을 유동적으로 설정할 수 있게 개발하였다. 그리고 로봇의 이동성 및 주행능력을 향상시키기 위하여 로봇을 경량화를 시켰다. 이러한 보완점들이 현장 적용성을 향상시킬 수 있었다고 판단된다.

2. 잔설제거 로봇의 성능검증을 위하여 실내의 시험을 수행하였다. 실내의 시험을 통하여 로봇의 잔설 제거 성능, 등반성능, 무선통신 성능, 작업 시간 등에 대한 성능을 검증하였다.
3. 향후 잔설제거 로봇의 사용성 및 활용도를 향상시키기 위하여 점검 기능(표면 촬영 및 장력 측정)을 추가하여, 겨울철 이외에서 케이블 점검 로봇으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.
4. 향후 개선 방향은 케이블 수와 길이 증가에 따라 로봇의 주행 능력 향상을 위하여 배터리 및 구동 모터 성능 향상이 필요하며, 이미지 영상의 다각화함으로써 케이블 점검 로봇으로서의 기능을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] KSCE, Specification on Design of Cable-supported bridge, Technical Report, Korean Society of Civil Engineers, Korea, 2006.
- [2] J. H. Roldsgaard, A. Kiremidjian, C. T. Georgakis, M.H. Faber, "Preliminary probabilistic prediction of ice/snow accretion on stay cables based on meteorological variables," *Proceedings of 11th International Conference on Structural Safety & Reliability Conference*, ICOSSAR 2013, New York, USA, Jun. 2013.
- [3] KICT, A study on systematic maintenance for offshore bridge, Technical Report, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea, pp.179, 2017.
- [4] K. Kleissl, C. T. Georgakis, "Bridge ice accretion and de- and anti-icing systems: A review," *Proceedings of the 7th International Cable Supported Bridge Operators' Conference*, ICSBOC 2010, Jiangsu, China, pp. 161-167, 2010.
- [5] L. Nutthavit, *Ice Prevention and Weather Monitoring on Cable-Stayed Bridges*, Master's thesis, The University of Toledo, Ohio, USA, 2014.
- [6] H. J. Jung, T. H. Yang, B. S. Jang, "Field application of a robotic system on cable stays of Incheon Bridge for snow removal," *Proceedings of 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, ISARC Seoul, South Korea, pp. 1415-1416, Jun. 2011.
- [7] J. H. Kim, K. H. Lee, C. H. Son, Y. P. Kim, Plan and Design of Dongi 1st Bridge, Technical Report, Yooshin, pp. 312-327, 2010.

김 재 환(Jaehwan Kim)

[정회원]



- 2007년 2월 : 연세대학교 대학원 토목공학과 (콘크리트공학 석사)
- 2018년 6월 : Heriot-Watt Univ. 토목공학과 (콘크리트공학 박사)
- 2019년 8월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 박사후연구원

<관심분야>

콘크리트 내구성, 전기적 저항성, SHM

서 동 우(Dong-Woo Seo)

[정회원]



- 2008년 5월 : Bucknell University 토목환경공학과 (구조공학 석사)
- 2013년 2월 : Northeastern Univ. 토목환경공학과 (구조공학 박사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수석연구원

<관심분야>

내풍공학, 구조물 유지관리, 구조물 SHM

정 규 산(Kyu-San Jung)

[정회원]



- 2010년 2월 : 충북대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2016년 8월 : 충북대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2016년 8월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수석연구원

<관심분야>

토목구조, 구조물 유지관리, 보수·보강

박 기 태(Ki-Tae Park)

[종신회원]



- 1994년 2월 : 연세대학교 대학원 토목공학과 (구조공학 석사)
- 2006년 2월 : 연세대학교 대학원 토목공학과 (구조공학 박사)
- 1994년 2월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 연구위원

〈관심분야〉

시설물 유지관리, 건설-IT 융합