

사장교 케이블의 장력 추정을 위한 인공신경망 모델 개발

김기중¹, 박유신^{1*}, 박성우²

¹(주)세니츠코퍼레이션 기술연구소, ²한국시설안전공단 특수교관리센터

Development of Artificial Neural Network Model for Estimation of Cable Tension of Cable-Stayed Bridge

Ki-Jung Kim¹, Yoo-Sin Park^{1*}, Sung-Woo Park²

¹Institute of Technology, CENITS Corporation Inc.

²Long Span Bridge Management Center, Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation

요약 본 연구에서는 사장교의 케이블 가속도계로부터 확보한 방대한 계측데이터의 활용을 확대하고자 인공지능 기반의 케이블 장력 추정 모델을 개발하였다. 케이블 장력 추정 모델은 진동법에 따른 장력 추정 과정에서 고유진동수를 판정할 수 있는 알고리즘을 핵심으로 하며 학습데이터 구성에 적합하고 판정 결과에 대한 성능이 확보될 수 있도록 입력층, 은닉층, 출력층으로 구성되는 인공신경망(Artificial Neural Network)을 적용하였다. 인공신경망의 학습데이터는 케이블 가속도 계측데이터를 진동수로 변환 후 구성하였으며 고유진동수를 중심으로 일정한 패턴을 갖는 특성을 활용하여 기계학습을 진행하였다. 학습데이터 구성 시 다수 패턴의 고유진동수를 대표할 수 있도록 다양한 크기의 진폭을 갖는 진동수를 사용하고 일정 수준으로 진동수를 누적하여 사용할 경우 고유진동수에 대한 판정 성능이 개선됨을 확인하였다. 장력 추정 모델의 성능을 판단하기 위해 계측분석 기술자에 의해 추정된 장력의 관리기준과 비교하였다. 케이블 가속도계로부터 확보한 139개의 진동수를 입력값으로 사용하여 검증을 수행한 결과 실제 정답과 유사하게 고유진동수를 판정하였고 고유진동수에 의해 케이블의 장력을 추정된 결과는 96.4%의 수준으로 관리기준에 부합하는 결과를 보여주고 있다.

Abstract An artificial intelligence-based cable tension estimation model was developed to expand the utilization of data obtained from cable accelerometers of cable-stayed bridges. The model was based on an algorithm for selecting the natural frequency in the tension estimation process based on the vibration method and an applied artificial neural network (ANN). The training data of the ANN was composed after converting the cable acceleration data into the frequency, and machine learning was carried out using the characteristics with a pattern on the natural frequency. When developing the training data, the frequencies with various amplitudes can be used to represent the frequencies of multiple shapes to improve the selection performance for natural frequencies. The performance of the model was estimated by comparing it with the control criteria of the tension estimated by an expert. As a result of the verification using 139 frequencies obtained from the cable accelerometer as the input, the natural frequency was determined to be similar to the real criteria and the estimated tension of the cable by the natural frequency was 96.4% of the criteria.

Keywords : Artificial Neural Network, Cable-Stayed Bridge, Acceleration, Frequency, Cable Tension

*Corresponding Author : Yoo-Sin Park(CENITS Corporation Inc.)

email: park_ysin@naver.com

Received November 18, 2019

Accepted March 6, 2020

Revised December 20, 2019

Published March 31, 2020

1. 서론

최근 구조 부재로 케이블을 활용하는 교량이 많이 건설되고 있어 케이블의 거동 분석에 따른 교량 유지관리 방안의 확보가 필요한 상황이다. 특히, 현수교나 사장교 등의 케이블 교량은 장대교량에서 많이 채택되고 있는 구조형식으로 규모면에서 중요성이 크고, 사장교와 같은 케이블지지 교량의 경우 대부분의 하중을 케이블이 지지하므로 유지관리에서의 케이블 장력 관리는 무엇보다 중요한 핵심사항이다[1-2].

케이블 장력 추정 방법은 케이블에 가해지는 장력을 직접적으로 확인하는 방법으로 초기 비용이 들고 유지관리의 문제가 있을 수 있는 직접법과 교량의 케이블에서 진동을 계측하여 역으로 장력을 추정하는 진동법인 간접법이 있다. 장력 추정 작업은 장비설치, 계측 및 후속 작업이 복잡하고 비용이 많이 들며 현장의 각종 환경조건에 따른 오차 요인이 크다는 문제점이 있어 작업의 부담이 적고 현장 적용이 가능한 케이블 장력 추정 시스템을 구축하려는 시도가 많이 이루어지고 있다[3-4]. 또한 케이블지지 장대교량의 실제 거동의 파악과 안전성 확보를 위해 전산화된 실시간 계측시스템을 도입하고 있다[5].

이러한 시도에 의해 현재 사장교와 같은 장대교량의 케이블에는 가속도계를 부착하여 0.01초의 시간 간격으로 가속도를 계측하고 실시간 저장하고 있으나 케이블 장력 추정을 위한 모니터링은 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 실시간 계측에 의해 확보되는 방대한 케이블 가속도 데이터의 활용을 확대하고 계측분석 기술자가 케이블의 장력을 추정하는 방법을 대체하여 필요로 하는 시점에 분석이 가능하도록 인공지능을 기반으로 실시간 계측자료를 활용, 분석할 수 있는 새로운 기법을 개발하였다.

본 연구의 목표는 진동법에 따른 장력 추정에서 고유진동수를 판정할 수 있는 인공신경망을 이용한 케이블 장력 추정 모델을 개발하는 것이다. 연구과정에서 인공신경망 적용을 위한 학습데이터 구성과 평가기준에 의해 모델의 적정성을 판단하고 계측 분석 기술자에 의해 추정된 장력의 관리기준과 비교하여 케이블 장력 추정 모델의 성능을 검증하였다.

2. 본론

2.1 케이블 장력 추정 모델 개발

2.1.1 인공신경망 알고리즘

인공지능의 한 분야인 인공신경망(ANN: Artificial Neural Network, 이하 ANN)은 생물학(통상 인간)의 뇌 구조(신경망)를 모방하여 모델링한 수학적 모델이다. ANN은 비선형 모델로 패턴 인식과 함께 다양한 방법으로 결함을 자동 탐지하는 데 널리 사용되고 있다. 즉, 많은 입력들에 의존하면서 일반화할 수 있는 함수를 추측하고 근사치를 낼 경우 사용한다. 입력으로부터 값을 계산하는 뉴런 시스템의 상호연결로 표현되고 적응성이 있어 패턴인식과 같은 기계학습을 수행할 수 있다[6]. 따라서 본 연구에서 다루는 고유진동수는 일정한 패턴을 갖는 특성에 착안하여 모델의 기계학습을 위한 알고리즘으로 입력층, 은닉층, 출력층으로 구성되는 ANN을 적용하였다.

사장교 케이블의 가속도 계측데이터를 활용하여 학습데이터를 구성하고 인공신경망에 의한 기계학습을 통하여 고유진동수의 해당여부를 판정하는 알고리즘을 개발하였다. 고유진동수 판정 결과를 활용하여 고유진동수와 케이블 장력을 추정할 수 있다. Fig. 1에 장력 추정에 대한 절차를 표현하였다.

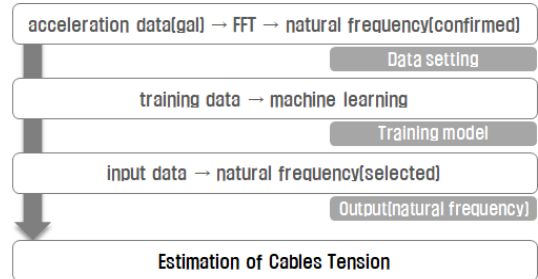


Fig. 1. Cable tension estimation procedure

일반적으로 학습데이터에 적용된 학습 규칙을 인공신경망에서 인식하고 학습을 진행한다. 학습된 결과는 검증데이터 입력 시 인공신경망이 인지하고 있는 학습 규칙에 근거하여 출력 값을 표시하게 된다. 학습데이터 구성의 적정성을 판단하기 위해 학습데이터의 수량과 구성을 변화시켜 알고리즘에 적합하고 고유진동수 판정 결과에 대한 성능이 확보될 수 있도록 하였다.

2.1.2 학습데이터 구성 및 성능 판정 기준

케이블 진동수의 특성 분석을 통해 고유진동수에서 진폭은 상대적으로 주변의 진폭보다 크게 유지되고 고유진동수는 일정 구간마다 반복되는 특성을 확인하였다. 또한

고유진동수를 중심으로 진폭의 변화는 유사한 형상을 유지하고 있어 일반 구간과의 형상 차이를 보이고 있다. 이러한 케이블 진동 주파수의 특성을 이용하여 학습데이터로 구성하고 고유진동수의 패턴을 학습하도록 하였다.

Fig. 2에서와 같이 케이블 진동 주파수의 특성은 교량의 케이블 가속도계에서 10분 동안 0.01초 간격으로 획득된 계측데이터를 고속푸리에변환(FFT: Fast Fourier Transform, 이하 FTT) 후 확인할 수 있다. 학습데이터는 이러한 진동수 특성을 반영하기 위하여 주파수 변환 시 2^{13} 인 8,192개의 가속도 데이터를 사용하였다. 또한 다양한 진동수 특성을 반영하기 위하여 다수의 교량과 케이블에 대한 진동수를 학습데이터로 포함시켰다.

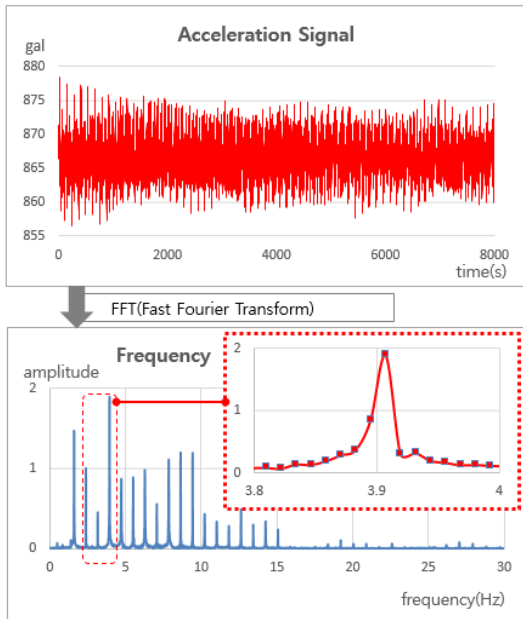


Fig. 2. Vibration frequency of cable

학습데이터 구성에 따른 분석 모델의 성능을 평가하기 위한 기준을 설정하였다. 일반적으로 모델의 성능 평가를 위해서 정밀도(precision), 재현율(recall), 그리고 F1 score 측면에서 성능 평가를 진행한다. 정밀도, 재현율, F1-score는 모델의 정확성을 판단하기 위해 활용되는 대표적인 요소들이다[7].

본 연구에 적용하는 진동수 데이터는 고유진동모드에 해당하는 진동수와 모드 제외 진동수로 구분되는데 고유진동모드 진동수는 전체 진동수 데이터에 비해 적게 분포하고 있다. 이와 같이 데이터의 구성이 한쪽으로 치우쳐 있을 때 일반적으로 모델의 성능을 평가하는 기준으

로 정밀도, 재현율, F1-score를 사용하는 것이 합리적이다. 정밀도는 모델의 관점에서 모델이 판정한 결과의 정확성을 평가하고 고유진동수로 판정한 수를 기준으로 실제 고유진동수의 포함 비율을 의미한다. 재현율은 정답의 관점에 비중을 두고 있으며 예측에 의해 정답을 판정하는 수준을 평가하는 기준으로 모델의 민감도를 확인할 수 있으며 전체 고유진동수의 수를 기준으로 판정 중에 실제 고유진동수의 포함 비율을 의미한다. F1-score는 정밀도와 재현율의 조화평균으로 정밀도와 재현율이 높고 F1-score가 클수록 모델의 성능은 우수한 것으로 판단한다.

2.1.3 고유진동수 추출 및 장력 추정

인공신경망에 의한 학습과정에서 고유진동수에 해당하는 진동수를 판정하게 되고 판정된 다수의 진동수의 관계를 검토하여 고유진동모드를 추정하였다. 고유진동모드 추정은 케이블 진동 특성 중 고유진동수에 해당하는 진동수는 일정 간격을 유지하는 특성과 고유진동모드로 판정되는 진동수는 진폭이 최대일 때의 진동수에 대해 정수배를 유지한다는 조건을 고려하여 적용하였다.

인공신경망에 의해 추정된 고유진동수를 장력 추정 공식을 활용하여 케이블의 장력을 추정하였다. 케이블 장력의 추정을 위해 현의 진동이론에 의해 장력과 고유진동수 관계를 활용하여 Eq. (1)과 같이 계산하였다[8].

$$T = \frac{4wl^2}{g^2} \frac{f_n^2}{n^2} \quad (1)$$

Where, w denotes weight per unit length, l denotes effective length, g denotes gravity acceleration, f_n denotes n^{th} natural frequency in Hz

2.2 케이블 장력 추정 모델 적용

2.2.1 학습데이터 적용

최적의 학습데이터를 구성하기 위해 다양한 진동수를 적용하고 고유진동수의 판정 결과를 분석하였다. 진폭이 작은 진동수와 진폭이 큰 진동수를 혼합하고 다수 교량의 진동수를 누적시켜 학습하는 경우 정답의 검출 성능이 양호한 것으로 확인되었다. 또한 학습한 교량과 다른 교량의 진동수에 대한 고유진동수를 판정할 경우 진동수가 작은 구간의 고유진동수 판정 결과는 양호하여 정답에 근접한 검출 결과를 얻을 수 있고 고유진동수 판정 성능이 확보되는 것으로 분석되었다.

결과적으로 인공신경망을 통한 학습데이터는 다양한 진폭의 크기와 고유진동수 유형을 대표할 수 있는 진동수를 다수 혼합하여 구성하는 것이 고유진동수의 판정에 효과적인 것으로 분석되었다. 학습데이터에 적용한 진동수는 Table 1과 같이 대상 교량 중, 6개 교량의 14개 케이블 가속도계에서 확보한 진동수를 사용하였고 진폭의 크기, 고유진동모드 진동수의 변화, 상시 및 비상시의 진동수 변화 고려 등을 고려하여 다양하게 선정하였다.

Table 1. Training data

Bridge	Sensor	Amplitude (max)	Interval of frequency
Hwatae	CAC_I03	1.19	0.706Hz
Hwatae	CAC_I07	4.26	0.516Hz
Hwatae	CAC_I02	3.17	0.402Hz
Hwatae	CAC_I04	0.02	0.726Hz
Hwatae	CAC_I05	0.09	0.417Hz
Jindo	CAC008	15.60	0.585Hz
Jindo	CAC008	8.90	0.586Hz
Jindo	CAC008	15.56	0.585Hz
Samcheonpo	CAC010	8.20	1.052Hz
Samcheonpo	CAC026	3.49	0.999Hz
Samcheonpo	CAC002	0.59	0.935Hz
Samcheonpo	CAC020	0.63	1.365Hz
Yeonggwang	CAC_I09	0.19	1.155Hz
Geobukseon	EQK_TGPY	3.54	1.110Hz
Donggang	CAC_I02	0.08	2.075Hz
Donggang	CAC_I03	0.04	2.075Hz

2.2.2 장력 추정 모델의 적용 결과

케이블 가속도 장력 추정 모델은 사전에 인공신경망에 의해 학습된 모델에 케이블 가속도계로부터 확보한 진동수를 FFT에 의해 변환한 값을 입력 값으로 사용하였다. 장력 추정 모델의 검증을 위한 진동수는 17개소의 교량에 부착된 가속도계로부터 확보한 진동수를 활용하였다. 총 113개 가속도계에서 변환된 139개 진동수를 검증 데이터로 사용하였다. 고유진동모드 진동수의 판정 수준과 단일 모드 진동수 및 장력 추정 값을 대상 교량의 계측분석 기술자가 추정된 관리기준과 비교하여 검토하였다.

추정 모델에 의해 출력된 결과를 모델 성능 평가 기준으로 표현할 경우, 고유진동모드로 판정한 진동수 중 실제 정답의 비율인 정밀도는 평균 0.68이고 실제 정답을 고유진동모드로 판정한 진동수의 비율인 재현율은 평균 0.88로 분석되었다. 139개 진동수 중 정밀도 보다는 재현율이 높은 경향을 보이고 있고 고유진동모드 판정에 의해 정밀도와 재현율의 조화평균값인 F1-score는 0.75

로 분석되었다. Fig. 3-5와 같이 평가 구간별로 진동수의 분포를 표현하면 다수의 교량이 0.7 이상의 재현율과 F1-score 분포를 보이고 있다. 성능 분석 결과에서 139개 진동수 중 정밀도 보다는 재현율이 높은 경향을 보이는 것은 실제 정답을 높은 수준으로 정확하게 판정하고 있다는 것을 의미한다. 인공신경망을 통해 고유진동모드에 해당하는 진동수를 판정하는 것이 목적이기에 학습 모델의 판정 결과는 양호한 것으로 판단된다. Fig. 6에 정밀도, 재현율, F1-score가 가장 높게 분석된 고유진동수의 판정 결과를 나타내었다.

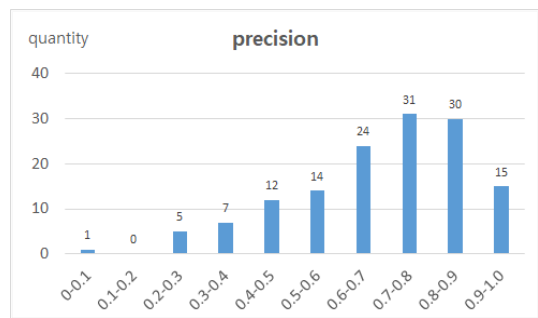


Fig. 3. Analysis result(precision)

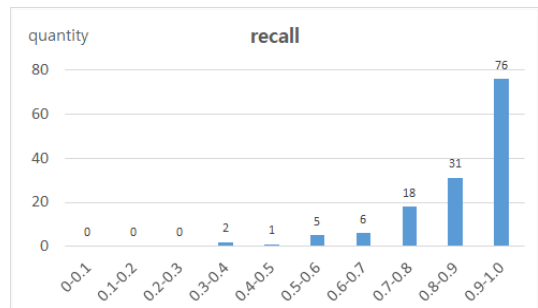


Fig. 4. Analysis result(recall)

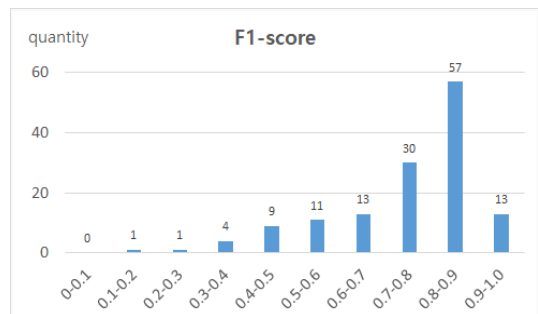


Fig. 5. Analysis result(F1-score)

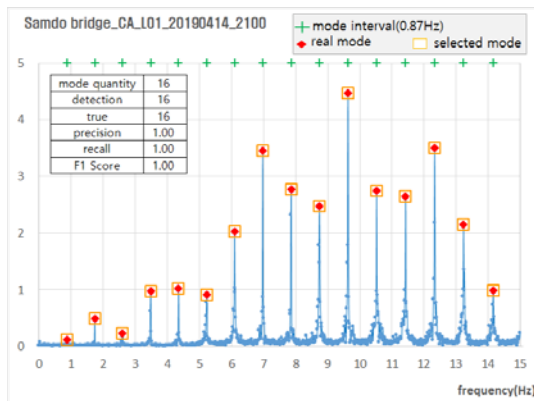


Fig. 6. Selected mode by developed model

케이블의 장력 추정은 인공신경망에 의한 고유진동수 판정 이후 판정된 진동수에 의한 고유모드를 추출 후 장력 추정 공식에 의해 계산하였다. Fig. 7에 대상 교량의 케이블 장력 관리기준과 추정된 장력의 비를 표시하였다. 139개 진동수로부터 추정된 장력과 관리기준의 비가 95-105% 범위 내에 134개가 분포하고 있어 관리기준 대비 96.4%의 수준으로 기준에 부합하는 결과를 보여주고 있다.

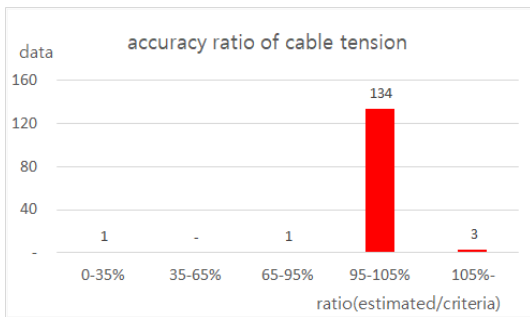


Fig. 7. Accuracy ratio of cable tension

3. 결론

본 연구에서는 케이블의 장력 추정이 가능한 인공신경망 모델의 개발을 완료하고 성능을 검토하였다. 케이블 가속도 계측데이터를 활용하여 학습데이터를 구성하고 기계학습을 통하여 학습데이터와 다른 진동수 입력 시 고유진동수 판정 및 케이블의 장력을 계산하였다. 연구의 수행 과정에서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 다수 형상의 진동수 패턴을 대표할 수 있도록 다양

한 진폭을 갖는 진동수를 누적하여 학습데이터로 사용할 때 고유진동수 판정 성능이 개선된다.

- 2) 케이블 장력 추정 모델에 대해 검증용 진동수로 성능을 검토한 경우, F1-score는 평균 0.75 이상을 보이고 있어 실제 고유진동수를 비교적 정확하게 판정하는 것으로 판단된다.
- 3) 고유진동수 판정 결과를 활용하여 추정된 케이블 장력은 관리기준 대비 96.4%의 수준으로 인공신경망을 활용한 케이블 장력 추정 모델의 성능은 계측 분석기술자의 추정 장력인 관리기준에 부합하는 결과를 보이는 것으로 판단된다.

References

- [1] S. K. Kim, H. M. Koh, J. W. Lee, I. H. Bae, "Signal Analysis from a Long-Term Bridge Monitoring System in Yongjong Bridge", *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol.10 Issue 6 Serial No.52, pp.9-18, 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5000/EESK.2006.10.6.009>
- [2] H. J. Lee, "Study on the Efficient Application of Vision-Based Displacement Measurements for the Cable Tension Estimation of Cable-Stayed", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.17, No.9 pp.709-717, 2016
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.9.709>
- [3] S. Cho, C. B. Yun, S. H. Sim, "Evaluation of Cable Tension Forces Using Vibration Method for a Cable-stayed Bridge under Construction", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol.29, No.2, pp.38-44, 2014.
DOI: <https://dx.doi.org/10.14346/JKOSOS.2014.29.2.038>
- [4] S. W. Kim, N. S. Kim, "Multi-point Displacement Response Measurement of Civil Infrastructures Using Digital Image Processing", *Procedia Engineering*, Vol.14, pp.195-203, 2011.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.023>
- [5] S. J. Nam, S. S. Yhim, "Evaluation of Tension of Stay Cable using MBM (Measurement-based Model)", *Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection*, Vol.18, Issue 3, pp.93-100, May 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.11112/jksmi.2014.18.3.093>
- [6] K. M. Lee, Caleb Vununu, S. H. Lee, K. R. Kwon, "Sound Monitoring System of Machining using the Statistical Features of Frequency Domain and Artificial Neural Network", *Journal of Korea Multimedia Society*, Vol.21, No.8, pp.837-848, Aug. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.9717/kmms.2018.21.8.837>

- [7] J. W. Lee, D. W. Lee, Y. C. Lee, W. S. Hwang, S. W. Kim, "Improving the accuracy of top-N recommendation using a preference model", *Information Sciences*, Vol.348, No.20, pp.290-304, Jun. 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2016.02.005>
- [8] Y. C. Park, S. M. Choi, B. G. Lee, N. J. Kim, "Estimation of Stay Cable Tension Using String Vibration Theory", *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.9, No.2, pp.17-22, 2009.

김 기 중(Ki-Jung Kim)

[정회원]



- 1993년 2월 : 연세대학교 일반대학원 토목공학과 (공학석사)
- 1993년 1월 ~ 1998년 6월 : 동부건설(주) 기술연구소
- 2003년 8월 ~ 2004년 9월 : University of California 객원연구원
- 2005년 6월 ~ 현재 : (주)세니츠코퍼레이션 대표이사

<관심분야>

토목, 토목구조

박 유 신(Yoo-Sin Park)

[정회원]



- 2002년 2월 : 동국대학교 일반대학원 토목공학과 (공학석사)
- 1997년 1월 ~ 1999년 9월 : 동아건설산업(주) 플랜트사업부
- 2002년 1월 ~ 2004년 12월 : 한라산업개발(주) 환경사업부
- 2010년 9월 ~ 현재 : (주)세니츠코퍼레이션 이사

<관심분야>

토목, 토목구조

박 성 우(Sung-Woo Park)

[정회원]



- 1996년 2월 : 연세대학교 일반대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2002년 2월 : 연세대학교 일반대학원 토목공학과 (박사과정수료)
- 2000년 6월 ~ 2016년 3월 : 한국시설안전공단 진단본부
- 2016년 3월 ~ 현재 : 한국시설안전공단 특수교관리센터

<관심분야>

토목, 토목구조