

강연선의 국부적 손상에 따른 응력 회복길이 분석 연구

서동우*, 김병철, 정규산, 나원기, 박기태
한국건설기술연구원

Study on Stress Recovery Length of 7-Wire Strand due to Local Damage

Dong-Woo Seo*, Kyu-San Jung, Byung-Chul Kim, Wongi Na, Ki-Tae Park
Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT)

요약 본 연구는 PSC(Post Tensioned Concrete) 교량 및 사장교(Cable Stayed Bridge) 등에 많이 적용되는 강연선의 국부적 손상에 따른 응력 회복길이를 분석하였다. 강연선은 PC 강선(Prestressing Strand)을 여러 줄을 꼬은 강재이며, 재료의 특성상 준공후 지속적으로 손상이 발생하며 부식 등이 주요 손상원인이다. 이에 따른 손상에 따른 성능저하가 발생하지만, 구조적인 특성상 케이블 내부의 손상 정도 및 응력 변화 패턴을 파악하기 어렵다. 교량에 적용된 케이블의 경우 설치 형상에 따라 채수 등에 따라 부식에 취약한 부분이 발생하며, 이로 인해 국부적인 손상이 발생할 수 있다. 본 연구는 교량 Post-Tensioning 또는 케이블 사장재에 주로 적용되는 강연선(7-Wire Strand)의 국부적 손상에 따른 성능저하 경향 및 응력 회복길이를 FEA 해석을 통하여 분석하였다. 향후 본 연구에서 구축하고자 하는 해석모델을 활용하여 PSC 교량 및 사장교 케이블 등의 안전성 평가 및 잔존수명 예측에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

Abstract This study examined the stress recovery length due to the local damage of a 7-wire strand, which is applied widely to PSC (Post Tensioned Concrete) bridges and cable-stayed bridges. The 7-wire strand is a multiple stranded steel of PC prestressing strand. Owing to the nature of the material, it is damaged continuously after completion with corrosion being the main cause of damage. On the other hand, due to its structural characteristics, it is difficult to grasp the degree of damage inside the cable and the pattern of stress variation. In the case of cables applied to bridges, the parts that are susceptible to corrosion are generated depending on the water supply and installation shape, which may cause local damage. This study analyzed the tendency of performance degradation and stress recovery length according to local damage of a 7-wire strand, which is applied mainly to bridge post-tensioning or stay cables. This study developed a computer-based simulation model that was validated with experimental results. The model developed in this study can be used to evaluate the safety level and estimate the remaining life span of PSC bridges or cable-stayed bridges.

Keywords : Bridge Cables, Local Damage, FEA, 7-Wire Strand, Stress Recovery Length

1. 서론

국내뿐만 아니라 전 세계적으로 강연선의 구조성능을 평가하기 위한 해석적 방법 개발을 위해 많은 연구가 진행되고 있다[1-4]. 강연선은 7연선(7-Wire Strand)이라

고도 하며 중심부 1개의 소선에 외곽 6개의 소선이 꼬여져 있는 형태이다. 그 중 유한요소해석을 통한 강연선의 구조성능 평가는 강연선의 구조형상 및 다양한 해석적 변수(접촉조건, 마찰계수 등) 등의 고려사항이 다양하여 오랜 해석시간 등과 같은 문제점이 발생하게 된다. 또한,

본 논문은 한국표준과학연구원과 한국건설기술연구원의 주요사업 융합연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Dong-Woo Seo(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

Tel: +82-31-995-0886 email: dwseo@kict.re.kr

Received October 11, 2017

Revised November 8, 2017

Accepted December 8, 2017

Published December 31, 2017

해석적 연구 결과의 신뢰성 역시 실험을 병행하여 비교해야 될 만큼 높은 수준이 아니다. 이와 같은 강연선의 해석적 단점을 보완하기 위해 다양한 방법의 해석적 연구가 수행되고 있으며, 그에 따른 실험적 검증이 병행되었다[1-4].

Chiang[1]은 6가지 설계변수(중앙소선의 반경, 외곽소선의 반경, 외곽소선 각도, 경계조건, 소선 길이, 접촉조건)에 따른 영향성 검토를 위해 실험적 연구를 병행하여 해석 결과를 분석하였다. 설계변수의 복합적인 상호작용이 강연선의 강성, 응력증대 등에 영향을 미치는 것을 확인하였다.

Shibu 등[3]은 축력을 받는 프리텐션 케이블에 대하여 경계조건을 상이하게 적용하여 유한요소해석을 수행하였다. 또한, 이론식, 실험치 등과 해석적 연구를 통하여 도출된 해석치와의 비교분석을 수행하였다.

Gerdemeli[4] 등은 상용 프로그램인 ANSYS[5]를 이용하여 강연선 피로(Fatigue)에 대한 수치해석을 수행하였다. 일반 규격의 강연선을 사용하였으며, 외곽소선의 접촉조건을 적용을 하지 않았다. 세 가지 변수(길이, 꼬임각, 하중범위)에 대한 실험을 수행하였고, 실험 결과를 반영한 피로해석을 통하여 축력에 대한 피로 수명의 변동을 확인하였다.

이와 같이 많은 연구자들로부터 다양한 이론을 통한 실험적, 해석적 연구가 수행되었다. 하지만, 강연선 손상에 따른 성능평가 연구는 국내외에서 전무한 상황이며, 이로 인해 본 연구에서는 PSC 교량 및 사장교 케이블에 주로 적용되는 강연선(7-Wire Strand)의 국부적 손상에 따른 인장성능 저하 및 응력 회복길이를 FEA 해석을 통하여 분석하였다.

FEA 비선형 모델 구축을 위하여 모델 길이, 접촉조건, 구속조건, 등의 변수에 대한 검토를 수행하였다. 응력 회복길이 분석 결과는 케이블 점검 위치 결정 등에 활용될 예정이다. 향후, 본 연구에서 구축하고자 하는 해석모델을 활용하여 다양한 강연선 손상 패턴에 대한 검토를 수행하고, 그 결과는 PSC 교량 및 사장교 케이블 등의 안전성 평가 및 잔존수명 예측 등에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

2. 강연선 FEA 해석 모델

2.1 강연선 해석을 위한 주요 변수

2.1.1 해석모델 길이

본 연구에서는 MIDAS FEA[7]를 사용하여 강연선의 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석을 통한 강연선의 구조성능 검토를 위해서 우선적으로 해석모델의 길이를 선정하였다. 유한요소해석의 특성상 강연선의 기하학적 형상을 실물과 동일하게 표현하기 위해서는 요소(Element) 크기를 감소시켜야 한다. 따라서 해석모델의 길이에 따라 요소의 수가 결정이 되지만 요소수의 증가는 해석시간 증가로 연결된다. 이와 같이 요소수와 해석시간의 연관성으로 인해 모델 길이의 결정이 중요한데 Gerdemeli[4]등에 따르면 꼬임길이(Pitch Length)의 10% ~ 16%로 해석의 일관성을 확보할 수 있다[4].

2.1.2 접촉조건

케이블 강연선의 해석적 연구를 위해서는 강연선의 기하학적 특성에 따라 접촉조건이 고려되어야 한다. 강연선은 Fig. 1과 같이 중앙소선 1개와 외곽소선 6개로 총 7개의 소선으로 이루어져 있다. 또한 6개의 외곽소선은 일정한 각도로 중앙소선 주위에 꼬여져 있으므로, 중앙소선과 외곽소선의 꼬임의 영향을 접촉조건을 사용하여 해석모델을 구축한다[4].

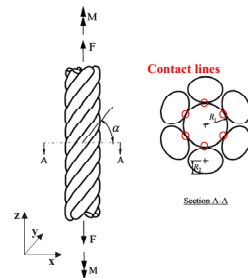


Fig. 1. Contact line[4]

중앙소선과 외곽소선의 접촉라인은 Fig. 1과 같이 형성되며, 유한요소해석 시 접촉조건을 사용하여 마찰저항에 대하여 고려한다. 마찰조건(Frictional Condition)을 위한 마찰계수(Frictional Coefficient)로 0.115를 사용하여 해석수행을 진행하였다[4].

2.1.3 구속조건

유한요소해석을 위해서는 강연선의 역할에 따른 구속조건을 결정하여야 한다. 단순 인장을 받는 케이블 강연

선의 경우 해석모델 한쪽 단부를 고정지점(Fixed Condition)으로 선택하고 하중이 재하되는 그 외의 단부에 순수 인장력만 재하하기 위한 경계조건을 설정한다.

첫 번째는 순수인장방향인 z 방향만 힘을 작용할 수 있도록 $U_x=0, U_y=0, U_z=Free, \theta_x=0, \theta_y=0, \theta_z=0$ 의 구속조건을 선택하고, 둘째로 인장력과 비틀림(Torsion)을 같이 적용할 수 있는 $U_x=0, U_y=0, U_z=Free, \theta_x=0, \theta_y=0, \theta_z=Free$ 의 조건을 검토하였다[3].

2.2 비선형 해석모델 구축

교량에 적용되는 케이블은 시간이 경과함에 따라 환경적 요인 등으로 부식이 발생될 확률이 높아진다. 교량 케이블의 요소부재인 강연선이 부식으로 인해 손상될 경우 기존 부재강도를 유지하는 것에 문제가 발생할 수 있으며, 이와 같은 부식 손상을 인식하지 못한 채 지속적으로 교량이 운용된다면 케이블의 강도저하로 인한 큰 인명사고가 발생할 우려가 있다.

본 연구에서는 케이블 강연선에 발생 가능한 부식으로 인한 손상을 고려하기 위해 강연선에 국부적인 손상을 인위적으로 유발시킨 후 인장성능 저하 및 응력 집중에 대한 회복길이를 변화 패턴을 확인하였다. 향후 연구가 진행됨에 따라 실제 부식된 강연선에 대한 분석을 수행할 예정이다.

2.2.1 비선형 해석 모델

본 연구에서는 유한요소 해석모델링을 위해 범용 해석프로그램인 MIDAS FEA[7]를 이용하여 Fig. 2와 같은 7연선 해석모델을 구축하였다. 강연선의 꼬임길이(Pitch Length)는 국부적 손상에 의한 응력 회복길이를 검토를 위해 해석 모델의 총 길이 224.1mm의 50%인 112mm로 결정하여 해석을 수행하였다.

대상 부재의 항복강도 이후 거동특성, 소성거동 등을 고려하기 위해서는 정확한 재료 특성을 고려한 재료 비선형성을 해석모델에 반영해야 한다. 본 연구에서는 한국건설기술연구원에서 선행연구로 수행한 실험자료[6] 중 무손상된 강연선의 재료거동 특성을 사용하여 재료 비선형 해석모델을 구축하였다. 본 연구에서 사용한 비선형 재료모델은 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3과 같이 강연선의 항복강도는 약 1,500MPa이며, 항복이후 소성거동 하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 강연선의 비선형 재료모델을 이용하여 다양한 해석변수에 대한 유한요소해석을 수행하였다.

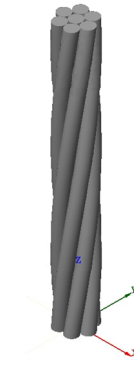


Fig. 2. Simulation model of 7-wire strand

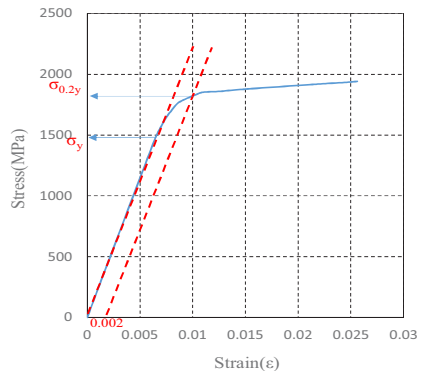


Fig. 3. Nonlinear material model of 7-wire strand

2.2.2 해석 모델링

3D Solid 요소를 사용하여 해석 모델을 구축하였다. 또한, 유한요소해석은 요소의 크기에 따라 도출되는 해석결과가 상이하기 때문에 요소크기 선정이 무엇보다 중요하다 할 수 있다. 또한, 비선형 해석의 경우 요소수에 따라 해석시간에도 큰 영향을 미치므로 다양한 조건을 고려하여 요소화(Meshing)를 수행하였다.

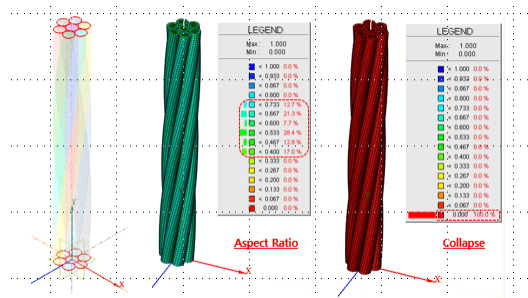


Fig. 4. Element quality review

Fig. 4는 MIDAS 프로그램을 이용하여 요소품질을 검토 결과를 나타내며, 요소의 크기 1mm, 중형비 (Aspect Ratio) 7.7%~21.3%로 균질하게 요소화 되어 우수한 요소 품질을 나타내는 것을 확인하였고, 이후 비선형 해석을 수행하였다. 비선형 해석을 위한 강연선의 총 요소수는 37,130개이다.

순수 인장력을 받는 강연선의 구조성능 검토를 위한 경계조건으로 한쪽 단부에서는 고정지점을 이용하고 모든 자유도에 대한 구속조건을 적용하였으며, 하중이 재하 되는 그 외 단부에서는 순수 인장력만이 적용될 수 있도록 $U_x=0, U_y=0, U_z=Free, \theta_x=0, \theta_y=0, \theta_z=0$ 을 적용하였다.

하중조건은 한쪽 단부에서 인장거동이 발생하도록 고려하였으며, 하중의 크기는 한국건설연구원에서 선행 연구된 실험의 인장하중 결과[6]를 사용하였다.

비선형 해석의 경우 하중 조건이 결과 수렴에 많은 영향을 미친다. 이로 인해, 통상적으로 비선형 해석 수행은 변위하중으로 진행하며, 본 연구와 같이 해석모델의 기하학적 특성이 부각되는 경우는 더욱더 그렇다. 본 연구에서는 강연선 해석의 비선형적 구조거동 검토를 위해 해석모델 단부에 약 4mm의 인장변위 하중을 재하 하였다.

강연선과 같이 여러 개의 소선(Wire)이 꼬여져 있는 해석모델의 경우 중앙에 위치한 하나의 소선과 외곽에 위치한 꼬여진 소선간의 접촉으로 인해 발생하는 마찰로 인한 구조거동을 고려하여야 한다.

본 연구에서는 중앙의 소선과 외곽소선간의 접촉조건을 고려하였으며, 외각소선간의 접촉조건은 그 영향이 미미하므로 고려하지 않았다. 또한, 중앙소선과 외곽소선의 마찰을 고려하였으며, 마찰계수는 일반적으로 사용되는 0.115를 적용하였다.

3. 강연선 FEA 해석 및 결과

3.1 강연선의 선형 해석

강연선의 선형해석은 비선형과 비교하여 짧은 해석시간으로 인해 단순 구조성능 및 강도에 대한 연구에 주로 사용된다. 하지만, 강연선의 경우 형상적 특성으로 인해 인장이 재하될 경우 중앙 소선쪽으로 변위가 발생되어 요소간의 관입이나 분리가 발생된다.

Fig. 5와 같이 인장하중으로 인해 강연선의 중앙지점에서 관입 또는 분리가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 접촉요소를 사용하여 하며, 접촉요소는 비선형 해석을 통해서 고려가 가능하다.

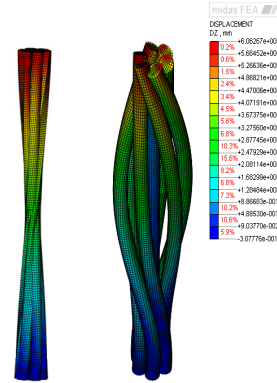


Fig. 5. Result of linear analysis of 7-wire strand

이로 인해, 본 연구의 모든 해석은 비선형 해석을 바탕으로 하지만, 단순한 변위 검토나 하중을 이용한 해석 결과가 필요할 경우에 선형해석을 통하여 결과를 도출하였다.

3.2 손상정도에 따른 강연선의 구조성능 평가

강연선 1개 소선의 단면적 기준 손상정도 10%, 30%, 50%와 무손상의 경우에 대하여 구조성능을 비교분석하였다. 강연선의 손상 상세는 Fig. 6~Fig. 7에 나타내었다.

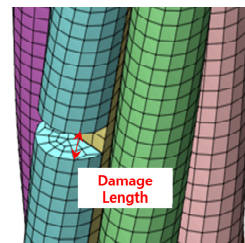


Fig. 6. Damage shape and length of 7-wire strand

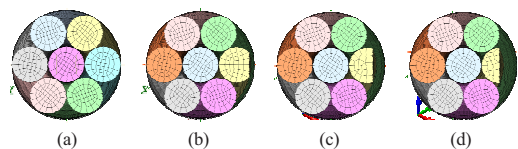


Fig. 7. Damage level in cross-section area
(a)No damage (b)10% damage (c)30% damage (d)50% damage

손상정도에 따라 무손상, 10%, 30% 및 50% 손상에 대해 검토 하였으며, 손상정도는 외곽소선의 1개의 단면적과 손상된 단면적의 비로 나타내며, 손상의 길이는 2mm로 동일하다.

손상지점에서 떨어진 이격거리에 따라 발생하는 Von-mises stress - strain 선도를 분석하였다. 여기서 Von-mises stress는 부재의 각 지점에서 응력성분들에 의한 비틀림 에너지의 크기를 나타내는 값을 말한다.

Fig. 8에서와 같이 10% 손상인 경우 Von-mises stress는 손상위치에서 가장 근접한 이격거리인 1mm에서 증가하는 것을 알 수 있으며, 무손상과 비교할 때 항복지점에서 응력이 증가되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 3mm에서 항복응력이 감소되며 점차적으로 무손상과 동일한 구조성능을 나타낸다.

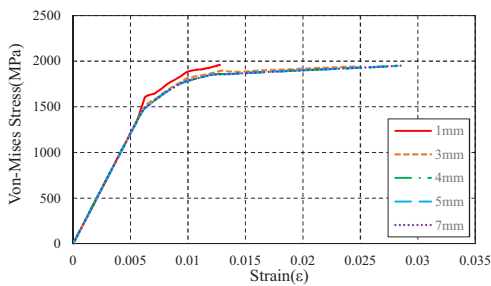


Fig. 8. Stress-strain curves at distance from damage point(10% damage)

본 연구에서는 손상지점을 기준으로 하여 단면응력을 검토할 경우 무손상과 동일한 구조성능을 보이는 지점까지 거리를 구조성능 회복길이(Recovery Length)라 한다. 즉, 10% 손상일 경우 강연선은 손상지점에서 약 4mm 지점에서 구조성능이 회복되어 무손상과 동일한 구조성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9와 같이 30% 손상인 경우 손상위치에서 가장 근접한 1mm에서 Von-mises stress가 매우 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 이격거리 3mm에서는 비선형 구조 거동을 보이지만, 항복지점에서 응력이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 이격거리가 점차 증가할수록 구조성능 및 거동은 무손상 강연선과 유사해지며 손상지점에서 이격거리 약 5mm에서 구조성능이 회복되는 것을 알 수 있다.

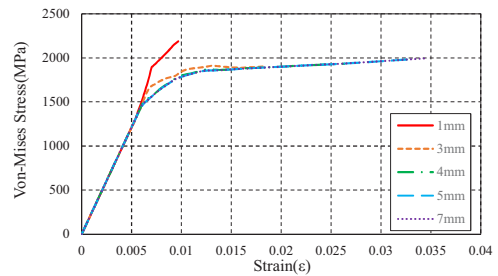


Fig. 9. Stress-strain curves at distance from damage point(30% damage)

Fig. 10과 같이 50% 손상인 경우 이격거리 7mm에서는 비선형 구조거동을 보이지만, 항복지점에서 응력이 조금 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 이격거리가 점차 증가할수록 구조성능 및 거동은 손상이 없을 때와 유사해지며, 손상지점에서 이격거리 약 11mm에서 구조성능이 회복되는 것을 알 수 있다.

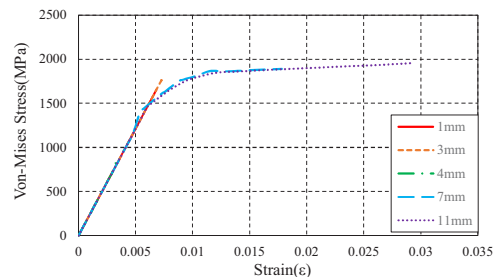


Fig. 10. Stress-strain curves at distance from damage point(50% damage)

Fig. 11은 30% 손상과 50% 손상일 때 손상지점의 응력상세를 나타낸다. 손상지점에서 응력이 증가되며, 50% 손상의 경우 30% 손상에 비해 증가범위도 넓어지는 것을 확인할 수 있다. 또한, 손상지점에서 국부적인 변형이 발생하는 것을 알 수 있다. 손상정도가 50%보다 더 증가될 경우 국부적 변형의 증가로 인해 변위가 증가될 것으로 사료된다.

강연선 1개 소선의 부식에 따른 손상정도에 대한 구조성능을 해석적 방법을 통하여 검토한 결과, Fig. 12와 같이 소선의 손상정도가 증가할수록 구조성능 회복길이(D=소선직경)가 증가되는 것을 확인할 수 있었다.

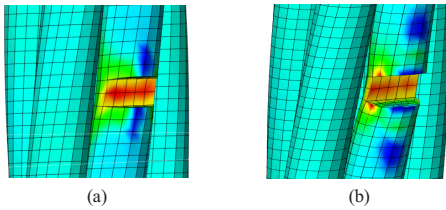


Fig. 11. Stress distribution at damage point
(a) 30% damage (b) 50% damage

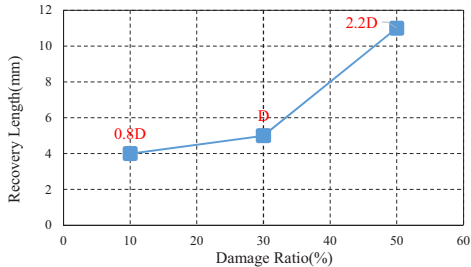


Fig. 12. Recovery length depending on degree of damage

또한, 손상정도의 증가로 인해 소선의 단면감소로 대칭적 구조거동에서 비대칭적 구조거동으로 발생되어 구조성능에 취약점으로 작용될 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 교량 케이블의 요소부재인 강연선에 대하여 비선형해석을 수행하였으며, 강연선의 총 6개의 외곽소선 중 1개 소선 손상정도(단면적 대비)에 대한 구조성능을 해석적 방법을 통하여 검토하였다.

강연선 손상소선의 손상정도 즉, 손상면적이 증가할수록 강연선의 구조성능 회복길이 증가되는 것을 확인하였다. 1개 소선의 손상정도가 50%일 때 30% 대비 회복길이가 급격히 증가하는 것을 확인하였다. 또한, 손상정도가 증가함에 따라 손상지점에서 국부적인 변형이 발생하는 것을 알 수 있다. 향후 이에 대한 면밀한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

응력 회복길이 분석 결과는 케이블 점검 위치 결정 등에 활용될 예정이다. 향후, 본 연구에서 구축하고자 하는 해석모델을 활용하여 다양한 강연선 손상 패턴에 대한 검토를 수행하고, 그 결과는 PSC 교량 및 사장교 케이블 등의 안전성 평가 및 잔존수명 예측 등에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

References

- [1] Y. J. Chiang, "Characterizing simple stranded wire cables under axial loading," *Journal of Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 24, pp. 49-66, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-874X\(97\)80001-E](https://doi.org/10.1016/S0168-874X(97)80001-E)
- [2] W. G. Jiang, J. L. Henshall, "The analysis of termination effects in wire strand using the finite element method," *Journal of Strain Analysis*, Vol. 34, No. 1, pp 31-38, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1243/0309324991513605>
- [3] G. Shibu, K. V. Mohankumar, S. Devendiran, "Analysis of a three layered straight wire rope strand using finite element method," *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 2011.
- [4] I. Gerdemeli, S. Kurt, A. S. Anil, "Analysis with finite element method of wire rope," Faculty of Mechanical Engineering, Istanbul Technical University, 2012.
- [5] ANSYS, Inc. ANSYS Workbench 11 User's Guide. 2009.
- [6] K. T. Park, O. I. Kwon, J. H. Lee, D. W. Seo, W. G. Na, J. S. Park, T. H. Kim, "Evaluation techniques for cable system/earth anchor/steel corrosion by micro and macro measured data," Internal Report, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 2016.
- [7] MIDAS, Inc., MIDAS FEA User's Guide, 2017.

서 동 우(Dong-Woo Seo)

[정회원]



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

<관심분야>

내풍공학, 구조물 유지관리, 구조물 SHM

김 병 철(Byung-Chul Kim)

[정회원]



- 2004년 9월 ~ 2007년 2월 : (주)노하우솔루션 토목구조설계
- 2009년 2월 : 서울시립대학교 토목공학과 (공학 석사)
- 2013년 2월 : 서울시립대학교 토목공학과 (공학 박사)
- 2013년 2월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 전임연구원

<관심분야>

토목구조(FEM,CFD,신호처리)

정 규 산(Kyu-San Jung)

[정회원]



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

<관심분야>

토목구조, 구조물 유지관리, 보수·보강

나 원 기(Wongi Na)

[정회원]



- 2009년 3월 : Univ. of Auckland, Engineering Dept. (공학 석사)
- 2013년 8월 : KAIST 건설 및 환경공학과 (공학 박사)
- 2013년 8월 ~ 2014년 9월 : 삼성전자 책임연구원
- 2014년 9월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 전임연구원

<관심분야>

구조물 건전성 모니터링, 드론 기반 비파괴검사, A.I.

박 기 태(Ki-Tae Park)

[정회원]



- 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