

사장교 케이블용 7연선 손상 패턴과 구조성능 수준과의 관계 분석

서동우*, 나원기, 김병철, 박기태
한국건설기술연구원

The Relationship between Damage Pattern and Structural Performance for 7-Wire Strand of Stay Cables

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

요약 본 연구는 사장교 케이블의 주요 부재로 쓰이는 MS(Multi-strand) 타입 7연선의 손상 패턴과 성능수준과의 관계를 파악하기 위해 시도되었다. 사장교 케이블은 준공후 지속적으로 손상이 발생하며 부식 등이 주요 손상원인이다. 이에 따른 손상에 따라 성능저하가 발생하지만 구조적인 특성상 케이블 내부의 손상 패턴을 점검하기 어려우며, 이에 따른 성능저하 수준을 정량적으로 평가하기 어려운 실정이다. 본 연구에서는 강연선의 손상 패턴과 성능수준과의 관계를 도출하기 위해 실내실험 및 FEA(Finite element analysis) 해석을 통하여 결과를 비교 분석하였다. 그리고 7연선의 손상을 모사하기 위해 기계적 정밀가공으로 인위적인 손상을 인가하여 성능평가를 수행하였다. 분석 결과 강연선의 손상 크기와 관계없이 손상이 발생한 직후 급격한 구조성능 저하가 발생하며, 강연선 성능수준 평가를 위한 변수로 손상량 이외에 손상 형태가 고려되어야 함을 실험적 및 해석적으로 도출하였다. 향후 본 연구에서 구축하고자 하는 손상 패턴 및 손상량에 따른 DB를 구축하여 사장교 케이블의 안전 관리에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

Abstract This study investigates the relationship between the damage patterns and structural performance levels of a multi-strand 7-wire strand that is used as an important member of stay cables. Stay cables are continuously damaged after completion, and corrosion is the main cause. However, it is difficult to check the damage pattern inside the cable due to its structural characteristics, and it is difficult to evaluate the degradation level of the damage quantitatively. This study derives the relationship between the damage pattern and the performance level of the stranded wire by comparing results and analyzing them through an indoor experiment and finite element analysis. In order to simulate the damage of a 7-wire strand, artificial damage was applied by mechanical precision machining to perform a performance evaluation. The results of the analysis show that regardless of the damage size of the strand, the structural performance deteriorated immediately after the damage. It was experimentally and analytically deduced that the type and amount of damage should be considered as a parameter for evaluating the performance level of the strand. This information can be used for the safety management of a cable stayed bridge by constructing a database according to the pattern and amount of damage.

Keywords : Cable stayed bridge, 7-wire strand, Damage pattern, Structural performance, FEA

1. 서론

최근 들어 우리나라의 대부분의 교량이 노후화됨으로

인해 시설물 유지보수 및 관리에 대한 관심이 집중되고 있다[1]. 노후화된 교량에 대한 유지보수 및 관리는 차후에 발생할 수 있는 대형 인명사고를 미연에 방지할 수

*Corresponding Author : Dong-Woo Seo (KICT)

Tel: +82-10-2054-4510 email: dwseo@kict.re.kr

Received September 21, 2017

Revised (1st October 27, 2017, 2nd November 2, 2017)

Accepted November 3, 2017

Published November 30, 2017

있는 방법이기도 하다. 1970년대부터 시작된 건설 활성화로 인해 앞으로 10년 후에는 30년 이상 노후 교량 시설물이 2배 이상으로 급증할 것이고, 이에 따른 유지관리 비용도 급증할 것으로 보인다. 이에 따른 대비책을 강구하여 체계적인 전략을 마련하여야 할 것으로 보인다 [1,2,3].

현행 유지관리 방법인 시설물의 안전점검 및 정밀안전진단은 현장조사 및 각종 시험에 의해 시설물의 물리적/기능적 결함과 내재되어 있는 위험요인을 발견하고, 이에 대한 신속하고 적절한 보수·보강 방법 및 조치방안 등을 제시함으로써 시설물의 안전을 확보하는 것을 목적으로 한다[3]. 하지만, 세부지침에 따라 육안점검(또는 목측, Visual inspection)에 기반한 상태평가만을 수행하는 것은 사장교 및 현수교와 같은 교량에 대한 정확한 안전점검에 대한 기술적 한계가 있다. 이로 인해 교량 케이블 부재의 정확한 정밀안전진단을 위한 다양한 연구가 수행되고 있다.

사장교 및 현수교와 같은 케이블 교량은 케이블의 부식 등에 따른 손상으로 인한 구조성능 평가는 정확한 정밀안전진단을 위해 필수 항목이라 할 수 있다. 사장교 케이블은 부식 등으로 인한 손상이 발생하며 이로 인해 성능저하가 발생한다. 하지만 구조적인 특성상 케이블 내부 손상 패턴을 점검하기 어려우며, 이에 따른 성능저하 수준을 정량적으로 평가하기 어려운 실정이다[4].

본 연구는 사장교 케이블의 주요 부재로 쓰이는 MS(Multi-strand) 타입 강연선의 손상 패턴과 성능수준과의 관계를 파악하기 위해 인장실험 및 FEA 해석을 수행하였다.

2. 실험 및 해석 방법

2.1 실내(인장)실험

케이블 손상에 따른 성능평가를 위해 실내 실험을 수행하였고, 유한요소해석(Finite element analysis, FEA)과 비교 분석을 통해 다양한 변수에 대한 영향을 분석하였다.

강연선에 하중을 인가하기 위해 최대 하중용량이 1,000 kN이고 최대 변위가 500mm인 UTM (Universal test machine)을 사용하였다(Fig. 1).



Fig. 1. 1,000 kN UTM at KICT

동일제강의 직경 15.2 mm 강연선을 1.5 m로 절단하여 사용하였으며, 중앙지점인 0.75 m에 단계별 손상을 발생시켰다. 손상 수준별 케이블 인장 성능을 평가하기 위해 강연선을 Fig. 2와 같이 단계별로 손상을 발생시켰다.

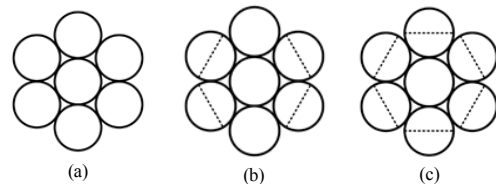


Fig. 2. 7-wire strand damage pattern
(a)No damage (b)Damage level 1 (c)Damage level 2

1단계에서는 7 연선 중 4개에 손상을, 그리고 2단계에서는 6개에 손상을 발생시켰다. 케이블 시편은 Fig. 3과 같이 밀링머신을 사용하여 정밀하게 손상을 발생시켜 제작하였다. 두 가지 방법으로 손상시킨 강연선에 대하여 동일한 실험을 실시한 후 특성을 확인하였다[5].



Fig. 3. Artificial Damage using milling machine on 7-wire strand

손상 수준별 케이블 인장 성능 검증 실험을 위해 무손상 5개, 1단계 손상 5개, 2단계 손상 5개의 강연선을

사용하였다[6]. 실험 세팅은 Fig. 4와 같고 쉘기가 포함된 상부 모노콘과 하부 모노콘 사이의 거리가 1,208 mm, 상부 이동 지지대와 하부 고정 지지대 사이가 1,000 mm로 세팅하여 실험을 수행하였다.

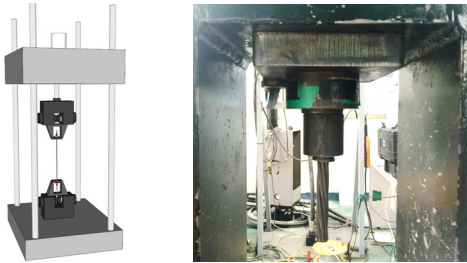


Fig. 4. Test specimen setting

센서는 강연선의 중앙에 2개의 전기저항식 변형률 센서를 설치하였고, 강연선 900 mm의 상하에 각각 하나씩 LVDT를 설치하였다. 이때 LVDT는 독립적인 지지대에 고정하여 설치하였다. 또한 손상이 인가되어 있는 단면의 건전한 소선에 변형률계를 부착하여 변형률을 측정하였다. 실험 시작 전 강연선을 고정하는 쉘기의 정착 강도를 높이기 위해 50 kN의 하중을 제하하여 하중을 제거하여 변위제어로 초당 0.04 mm의 속도로 하중을 재하하였다[7].

2.2 FEA(Finite element analysis) 모델

본 연구에서는 손상 수준별 케이블의 인장 성능을 평가하기 위한 유한요소해석을 실시하였다. 유한요소해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS[8]를 사용하였으며, 3차원 요소인 Solid 요소를 사용하였다[9]. 해석 모델은 강연선 중 SWPC7PL을 대상으로 하였으며, 길이는 1 m로 모델링하였다. SWPC7PL의 역학적 성질은 Table 1에 제시하였다.

Table 1. Mechanical properties of 7-wire strand

Diameter (mm)	Steel Areal (mm ²)	Tensile Load (kN)	Yield Load at 0.2% (kN)	Elastic Modulus (GPa)
15.2	138.7	261.0	222.0	199.1

해석 모델의 손상 위치는 중앙부의 소선을 제외한 외측 6개의 소선을 대상으로 변수를 설정하였으며(Fig. 5), 손상 형상은 강연선의 외측 단면적 절반이 절단된 형태

로 모델링하였다(Fig. 6). 손상강연선 수량 및 위치는 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Modeling parameters : Damage quantity and location

Model no.	Damage quantity	Damage location
0-1	0	-
1-1	1	1
2-1	2	1,2
2-2	2	1,3
2-3	2	1,4
3-1	3	1,2,3
3-2	3	1,2,4
3-3	3	1,3,5
4-1	4	1,2,3,4
4-2	4	1,2,3,5
4-3	4	1,2,4,5
5-1	5	1,2,3,4,5
6-1	6	1,2,3,4,5,6

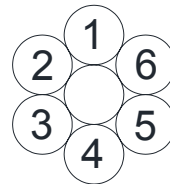


Fig. 5. Numbering of damage location for 7-wire strand

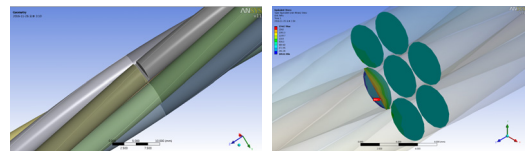


Fig. 6. FEA modeling with applied damage and cross-section view

해석 모델의 경계조건은 강연선의 한쪽 끝단의 면을 고정단으로 가정하였으며, 반대쪽의 각 강연선마다 각각 하중을 재하 하였다.

3. 실험 및 해석 결과

3.1 인장실험 결과

인장시험 결과 측정된 최대 하중, 최대 변위, 최대 변형률을 Table 3~5에 나타내었고, 평균값(Aver.)과 표준편차(S.D.)를 제시하였다.

Table 3. Tensile test result for no damage case

No.	Max. load (kN)	Max displacement (mm)	Max. Strain ($\mu\epsilon$)
1	265	120.54	25,785
2	264	139.43	23,625
3	273	138.87	33,143
4	272	78.56	30,378
5	274	79.11	34,679
Aver.	270	111.3	29,522
S.D.	4.7	30.60	4722

Table 4. Tensile test result for damage level 1

No.	Max. load (kN)	Max displacement (mm)	Max. Strain ($\mu\epsilon$)
1	157	39.22	2,360
2	147	54.92	1,851
3	155	51.20	2,425
4	154	41.14	2,346
5	147	62.83	2,154
Aver.	152	49.86	2,227
S.D.	4.7	9.81	233

Table 5. Tensile test result for damage level 2

No.	Max. load (kN)	Max displacement (mm)	Max. Strain ($\mu\epsilon$)
1	143	23.20	2,064
2	153	24.07	2,233
3	151	26.71	2,195
4	147	23.74	2,283
5	161	22.85	2,467
Aver.	151	24.11	2,248
S.D.	6.8	1.53	147

최대 하중은 무손상 강연선이 270 kN으로 가장 크게 측정되었고, 1단계 손상 강연선이 152 kN, 2단계 손상 강연선이 151 kN로 측정되었다. 무손상 강연선 및 1단계 손상 강연선의 표준편차가 4.7로 가장 평균 근처에 집중된 값을 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

Strain-load 관계는 Fig. 7에서 확인할 수 있다.

실험 결과 강연선 파단 형태는 무손상 강연선의 경우 중양에서 파단되고, 1, 2단계 손상 강연선의 경우 중앙에서 파단되는 특성을 나타내었다. 무손상 시험체 파단 형태가 썬지에서 나타난 점은 썬지 부분의 손상으로 인한 영향일 수 있어 향후 실험에서는 이를 보완한 실험 방법을 적용할 필요가 있다고 판단된다.

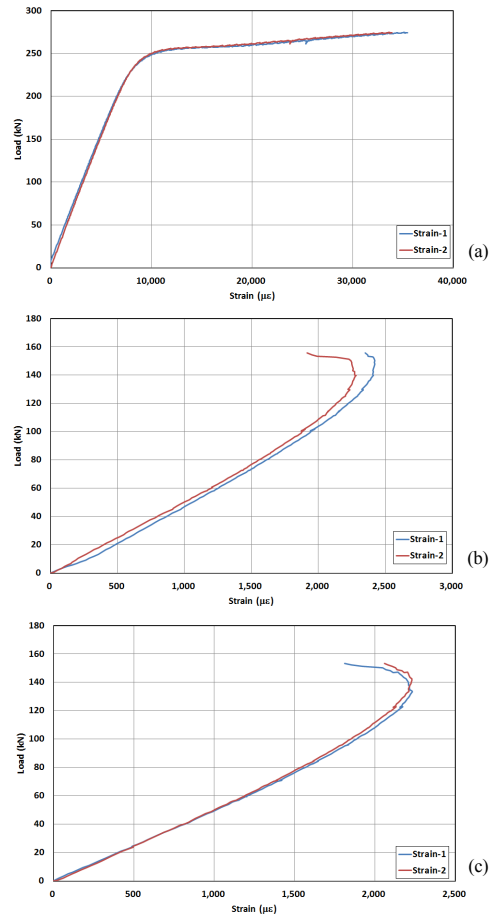


Fig. 7. Test results : Strain-load relationship
 (a)No damage(No. 5) (b)Damage level 1(No. 4)
 (c)Damage level 2(No. 2)

인장시험 결과 1단계 및 2단계 손상에 의한 7연선의 최대 인장강도가 비슷한 수준으로 측정되었다. 2단계 손상의 경우 1단계에 비해 손상량은 단면적 기준 약 2배로 컸지만 최대 인장성능이 유사한 수준인 이유는 손상 위치의 비대칭성으로 인한 응력 집중이 대칭인 경우에 비해 더 컸다고 판단된다. 변형률은 손상 위치의 비손상 소선에서 측정하였고, 해당 위치의 변형률은 손상 크기와 상관관계가 미미하다고 판단된다.

3.2 FEA 해석 결과

인장해석은 Table 6~7과 같이 0.2% 항복하중 및 인장하중에 도달할 때의 응력(항복응력 및 인장응력)에 도달할 때의 하중을 구하였다. 해석 결과, 손상 전인

Model 0-1의 최대 인장강도가 273 kN으로 실험결과인 270 kN과 유사하여 해석 모델을 신뢰할 수 있다고 판단하였다.

Table 6. Analysis results : Yielding load and displacement

Model no.	Damage quantity	Damage location	Yielding	
			load(kN)	Disp.(mm)
0-1	0	-	246.00	7.676
1-1	1	1	164.12	3.033
2-1	2	1,2	158.38	5.076
2-2	2	1,3	173.82	6.348
2-3	2	1,4	174.66	6.378
3-1	3	1,2,3	147.30	5.382
3-2	3	1,2,4	152.12	5.558
3-3	3	1,3,5	168.74	6.166
4-1	4	1,2,3,4	138.78	5.074
4-2	4	1,2,3,5	153.92	5.628
4-3	4	1,2,4,5	161.66	5.914
5-1	5	1,2,3,4,5	148.86	5.446
6-1	6	1,2,3,4,5,6	149.52	5.470

Table 7. Analysis results : Maximum load and displacement

Model no.	Damage quantity	Damage location	Maximum	
			load(kN)	Disp.(mm)
0-1	0	-	273.00	82.300
1-1	1	1	182.13	54.907
2-1	2	1,2	175.76	52.986
2-2	2	1,3	192.90	58.152
2-3	2	1,4	193.83	58.433
3-1	3	1,2,3	163.47	49.280
3-2	3	1,2,4	168.82	50.892
3-3	3	1,3,5	187.26	56.452
4-1	4	1,2,3,4	154.01	46.429
4-2	4	1,2,3,5	170.81	51.494
4-3	4	1,2,4,5	179.40	54.084
5-1	5	1,2,3,4,5	165.20	49.802
6-1	6	1,2,3,4,5,6	165.93	50.022

Fig. 8은 무손상(Model 0-1) 및 6개 소선 손상(Model 6-1)의 경우 해석모델의 응력 분포를 나타내었다.

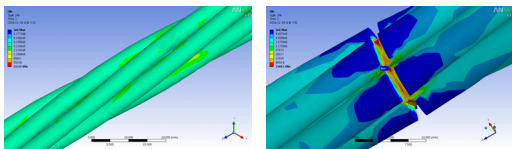


Fig. 8. FEA modeling with applied damage and cross-section view

손상수준에 따른 강연선의 항복강도 및 최대 인장강도 변화 추세는 Fig. 9에서 확인할 수 있다. 손상된 소선의 수가 동일한 경우, 강연선 손상 위치가 이격되어 있을수록 강도가 증가하는 경향을 나타내었다. 즉 손상된 강연선 중 가장 큰 강도는 손상위치가 대칭인 강연선 중 손상된 소선 수가 가장 작은 Model 2-3으로 나타났으며, 가장 작은 강도는 손상 위치의 비대칭성이 가장 큰 Model 4-3으로 나타났다.

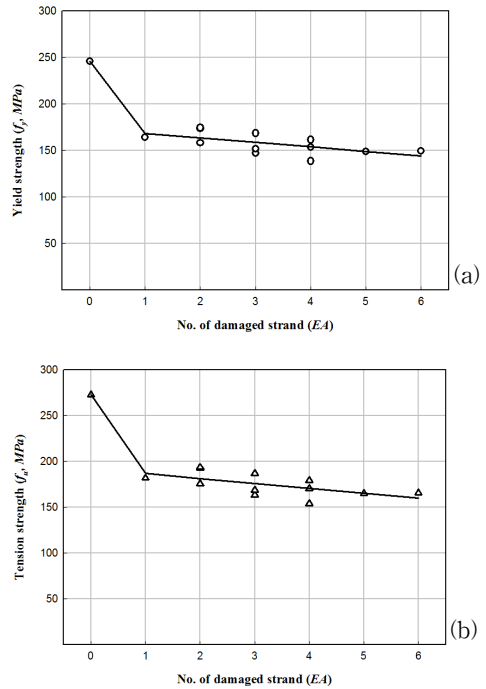


Fig. 9. Test results : Damage level vs. strength (a)Yield strength (b) Max. tensile strength

이와 같은 현상은 손상 단면으로 인한 강연선의 기하학적 비대칭이 원인인 것으로 판단된다. 즉 손상위치가 대칭인 경우(Model 2-3, Model 3-3 등) 손상위치의 면 내에서 대칭의 응력분포를 나타내지만, 비대칭일 경우 강연선 면내의 편중된 응력집중 현상이 발생하기 때문에 항복하중 및 인장하중이 감소하는 경향을 나타내었다고 판단된다.

하지만 강연선 손상 위치의 비대칭성으로 인한 성능 저하는 항복응력에서 크게 나타나며, 최대인장강도에서는 그 크기가 상대적으로 작게 나타났다. 이는 손상 위치의 비대칭성으로 인한 응력집중으로 특정 소선이 항복하

기 시작하지만 다른 소선이 하중을 분담하기 때문에 최대 인장강도는 손상 위치의 비대칭성 보다는 손상량의 영향을 더 받는다고 보인다.

손상 위치에 따른 항복강도와 최대 인장강도는 손상되지 않은 강연선의 강도에 약 56%~71%로 분포하고, 손상된 강연선간의 강도 차이는 약 1.26배 차이를 나타내었다. 즉 강연선은 손상이 발생할 경우, 항복강도와 인장강도가 급격하게 감소하며, 손상된 소선의 수와 위치에 따른 강도 변화는 큰 차이를 나타내지 않았다. 따라서 강연선은 손상이 발생할 경우 손상 소선 수와 관계없이 구조안전성에 심각한 영향을 미칠 것으로 판단된다.

손상된 소선의 수가 동일한 경우, 강연선 손상 위치가 이격되어 있을수록 강도가 증가하는 경향을 나타내었다. 즉 손상된 강연선 중 가장 큰 강도는 손상 위치가 대칭인 강연선 중 손상된 소선 수가 가장 작은 Model 2-3으로 나타났으며, 가장 작은 강도는 손상 위치의 비대칭성이 가장 큰 Model 4-3으로 나타났다. 이와 같은 현상은 손상 단면으로 인한 강연선의 기하학적 비대칭이 원인인 것으로 판단된다. 즉 손상 위치가 대칭인 경우(Model 2-3, Model 3-3 등) 손상 위치의 면내에서 대칭의 응력 분포를 나타내지만, 비대칭일 경우 강연선 면내의 편중된 응력집중 현상이 발생하기 때문에 항복 하중 및 인장 하중이 감소하는 경향을 나타내었다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 강연선 손상 패턴과 성능수준과의 관계를 도출하기 위해 인장실험 및 FEA 해석을 통하여 결과를 비교 분석하여 평가하였다.

강연선은 손상이 발생할 경우에는 항복강도와 인장강도가 급격하게 감소하며, 손상된 소선의 수와 위치에 따른 강도 변화는 큰 차이를 나타내지 않았다. 따라서 강연선은 손상이 발생할 경우, 손상 소선 수와 관계없이 구조안전성에 심각한 영향을 미칠 것으로 판단된다.

손상된 소선의 수가 동일한 경우, 강연선 손상 위치가 이격되어 있을수록 강도가 증가하는 경향을 나타내었다. 손상 위치가 대칭인 경우 손상 위치의 면내에서 대칭의 응력 분포를 나타내지만, 비대칭일 경우 강연선 면내의 편중된 응력집중 현상이 발생하기 때문에 항복 하중 및 인장 하중이 감소하는 경향을 나타내었다고 판단된다.

하지만 강연선 손상 위치의 비대칭성으로 인한 성능 저하는 항복응력에서 상대적으로 더욱 크게 나타나며, 이는 손상 위치의 비대칭성으로 인한 응력집중으로 특정 소선이 항복하기 시작하지만 다른 소선이 하중을 분담하기 때문에 최대 인장강도는 손상 위치의 비대칭성 보다는 손상량의 영향을 더 받는다고 판단된다.

그 결과 강연선의 성능수준 평가를 위한 변수로 손상량 이외에 손상의 형태가 고려되어야 함을 실험적 및 해석적으로 도출하였다. 향후 본 연구에서 구축하고자 하는 해석모델을 활용하여 사장교 케이블의 안전성 평가 및 잔존수명 예측에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

References

- [1] Korea Infrastructure of Safety & Technology Corporation. Report for of Facility Operator Safety and Maintenance/Management Factual Survey, 2010.
- [2] 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.
- [3] Korea Infrastructure of Safety & Technology Corporation. Detailed Guideline for Safety Inspection and Precision Safety Diagnosis. Ministry of Land, Infrastructure and Transportation. 2017.
- [4] N. E. Dowling, "Mean Stress Effects in Stress-life and Strain Life Fatigue," American Society of Automotive Engineers, 2004.
DOI: <https://doi.org/10.4271/2004-01-2227>
- [5] J. M. Kim, "Fatigue Fracture and Clean Steel," Steel Story, POSCO Research Institute, 2010.
- [6] A. P. Boresi, R. J. Schmidt. Advanced Mechanics of Materials, 6th edition. John Wiley & Sons Inc. 2003.
- [7] American Society for Metals (ASM). Metals Handbook. 8th edition Vol. 10. 1975.
- [8] ANSYS, Inc. ANSYS Workbench 11 User's Guide. 2009.
- [9] R. L. Browell, A. Hancq, "Predicting Fatigue Life with ANSYS Workbench," 2006 International ANSYS Conference, 2006.

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

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

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 : 삼성 전자 책임연구원
- 2014년 9월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 전임연구원

<관심분야>

구조물 건전성 모니터링, 드론 기반 비파괴검사, A.I.

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)