

풍력터빈타워의 모델링에 따른 고유진동수 특성에 관한 연구

이윤우¹, 장민서¹, 강성용¹, 김평화¹, 강영종^{1*}
¹고려대학교 건축사회환경공학과

A Study on the Natural Frequency of Wind Turbine Tower Regarding to Modeling Method

Yun-Woo Lee¹, Min-Seo Jang¹, Soung-Yong Kang¹, Pyoung-Hwa Kim¹, Young-Jong Kang^{1*}
¹Department of Civil & Environmental Engineering Korea University

요약 최근 지구 환경문제에 대한 국제적 관심이 높아지고 있는 가운데 신재생 에너지의 도입에 대한 중요성이 더욱 부각되고 있다. 풍력발전은 신재생 에너지의 한 분야로써 미래의 대체에너지 자원으로 주목받고 있으며 이에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 풍력발전시스템 가운데 타워구조물은 지속적이고 안정된 발전을 위해 중요한 역할을 하고 있으며 다양한 해석모델을 활용하여 연구개발이 이뤄지고 있다. 본 연구에서는 다양한 풍력터빈타워의 해석모델이 고유진동수 해석결과에 미치는 영향에 대해 분석해 보았다. 해석결과 타워의 세부적 부분을 타워 강재 단위중량으로 치환한 모델은 1차 고유진동수와 0.14%의 차이를 보여 모델링의 간소화가 가능 할 것으로 판단하였으며, 경계조건의 따라 고유진동수가 10%이상의 차이가 발생하는 것을 보아 단순 고정단 해석은 실제 거동을 나타내지 못하는 것으로 판단된다. 본 연구 결과는 적합한 해석모델링 기준을 확립하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract Recently the importance of renewable energy is stood out regarding to the international concern about global environmental issues. Wind power is beginning to receive attention as one of renewable energy, and world-wide researches about wind power are being carried out. In the wind power system, tower structure plays an important roles for continuous and stable generation of electricity. Researchers use various analytical models to research and develop about tower structures. In this study, the effects of natural frequencies of various wind turbine tower models have been analyzed. It is possible to simplify the detailed parts of models by using modified tower unit weight since the results of 1st natural frequency show that the difference is only 0.14%. Since the difference in natural frequency is greater than 10%, according to the boundary condition, the simple fix end support is not appropriate to represent the real structure of the tower. It is expected that the result of this study may be utilized to establish the criterion about appropriate modelling method.

Key Words : Modelling, Natural Frequency, Stepped Beam, Tapered Shell, Wind Turbine Tower

1. 서론

풍력발전은 신재생에너지자원 분야의 하나로써, 최근 전 세계적으로 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 특히 대형 풍력발전시스템의 경우, 미래 에너지 자원으로 주목받고 있다. 풍력발전시스템 가운데 타워 구조물은 전

력생산을 위한 상단의 터빈구조물을 지지하며 효율적인 에너지 자원을 획득할 수 있도록 할 뿐만 아니라 터빈 구조물의 유지관리를 위한 리프트 공간과 전력설비 시설물의 보관을 위한 공간을 제공하는 등 다수의 역할을 수행한다.

풍력발전타워의 경우 단순한 기둥 구조물과는 달리

본 연구는 국토해양부 건설교통기술촉진연구사업의 연구비지원(과제번호 12기술혁신E09)에 의해 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Young-Jong Kang(Korea Univ.)

Tel: +82-2-3290-3317 email: yjkang@korea.ac.kr

Received February 17, 2015

Revised March 4, 2015

Accepted March 12, 2015

Published March 31, 2015

터빈 구조물의 발전 중 운용하중이 지속적으로 작용하여 주기적인 하중에 대한 공진 회피 방안을 GL Guideline[1]에서 제시하고 있다. 제작된 터빈의 정격 RPM(Revolutions per Minute)을 기준으로 로터가 한 바퀴 회전하는 주파수를 1p, 3개 블레이드의 통과 주파수를 3p라고 하며 풍력타워의 고유진동수는 1p와 3p영역을 회피하여 설계되어야 한다. 풍력터빈이 점차 대형화 되면서, 공진 회피를 위한 목표 고유진동수 대역이 점차 좁아지고 있다. 따라서 풍력 발전타워의 목표 진동수 대역을 확보하기 위해 정밀한 고유진동수 해석은 반드시 수행되어야 한다.

풍력발전타워의 해석에는 다양한 형태의 모델이 사용된다. 플랜지 접합부와 기타 세부적인 부분들을 고려하기 위해 타워의 단위중량을 증가시킨 간소화 모델이 활용될 수 있으며[2], 고정단의 경계조건을 사용하는 대신 하부 기초 구조물의 특성을 고려하기 위해서는 스프링계수를 이용한 경계조건이 활용될 수 있다[3]. 또한, Tapered 형태의 타워를 모사하기 위해 몇 개의 구간으로 나누어진 Stepped Beam요소를 통해 타워를 모델링할 수도 있다[4].

본 연구에서는 대형화되는 풍력발전타워의 모델 형태에 따른 합리적인 공진회피 설계를 위해, 타워의 플랜지 접합부, 경계조건, 요소형태에 따른 고유진동수 특성에 대한 분석을 수행하였다.

2. Analytical Models

2.1 NREL-5MW Wind Turbine Tower

미국의 Renewable Energy 연구소 NREL (National Renewable Energy Laboratory)은 연구의 목적으로 활용할 수 있도록 풍력터빈 및 타워에 대한 정보를 공개하고 있다[5]. 본 연구에서는 기본모델로 NREL-5MW Wind Turbine Tower 모델을 선정하였으며 해당 모델에 대한 제원은 Table 1, 2와 같다.

[Table 1] NREL-5MW Wind Turbine Properties

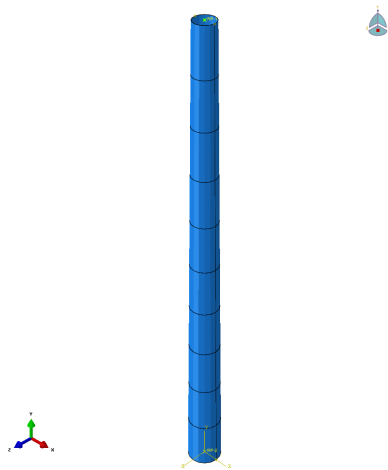
Blade Mass	17,740 kg
Hub Mass	56,780 kg
Nacelle Mass	240,000 kg
RNA Total Mass	350,000 kg

[Table 2] NREL-5MW Wind Tower Properties

Elevation (m)	TMassDen (kg/m)	TWGJStif (Nm ²)	TWEASStif (N)
0	5590.87	4.7275x10 ¹¹	1.3813x10 ¹¹
8.76	5232.43	4.1156x10 ¹¹	1.2927x10 ¹¹
17.52	4885.76	3.5650x10 ¹¹	1.2071x10 ¹¹
26.28	4550.87	3.0714x10 ¹¹	1.1243x10 ¹¹
35.04	4227.75	2.6309x10 ¹¹	1.0445x10 ¹¹
43.8	3916.41	2.2394x10 ¹¹	9.6760x10 ¹⁰
52.56	3616.83	1.8932x10 ¹¹	8.9360x10 ¹⁰
61.32	3329.03	1.5887x10 ¹¹	8.2250x10 ¹⁰
70.08	3053.01	1.3224x10 ¹¹	7.5430x10 ¹⁰
78.84	2788.75	1.0910x10 ¹¹	6.8900x10 ¹⁰
87.6	2536.27	8.9130x10 ¹⁰	6.2660x10 ¹⁰

NREL 5MW급 Wind Turbine의 상부구조물의 총 중량은 350톤이며, Blade와 Hub, Nacelle로 이루어져 있다. 이를 지지하는 Tower구조물은 총 길이 87.6m이며, 해석에 사용되는 모델은 Tapered Shell형태로 가정한다.

고유진동수해석의 비교검토를 위해, 상부 구조물은 타워 상단에 집중질량의 형태로 치환하였으며, 타워 구조물은 10개의 구간으로 나누어진 Tapered Shell로 모델링하였다. 타워 하단 지점부의 모델링은 고정단 경계조건을 적용하였으며 전체적인 모델은 Fig.1과 같다.



[Fig. 1] FEM Analysis Target Model

2.2 Comparing Models

2.2.1 Flange Separation Model

NREL에서는 제공하는 강제 풍력터빈타워모델의 활용에 있어 일반적인 강제 단위중량인 7,850kg/m³대신

8,500kg/m³의 단위중량을 사용하기를 권고하고 있다. 타워부의 페인트나 볼트, 용접, 플랜지에 대해 세밀하게 모델링하지 않기 때문에 세부적인 부분들에 대한 무게를 강재의 단위중량에 일괄적으로 추가하여 고려하기 위함이다.

풍력터빈타워의 모델링에 있어 위와 같은 타워부의 세부적인 요소들에 대한 무게를 타워의 단위중량에 일괄적으로 포함시켜 해석하는 것이 그렇지 않은 모델에 비해 어떠한 차이를 보이는지 분석해 보기로 한다. 페인트나 용접부는 플랜지와 볼트의 무게에 비해 무시할 수 있을 정도로 적다고 가정하였고 타워 1/3부근에 두 개의 플랜지를 모사하여 기존의 증가된 강재 단위중량으로 인해 타워부에 포함된 무게를 분리시킨 모델을 활용하여 해석을 수행하였다.

2.2.2 Spring Boundary Condition Model

일반적으로 풍력터빈타워의 구조해석에 사용되는 지점부 경계조건은 기초구조물을 고려하지 않은 고정단의 경계조건이 많이 사용되곤 한다. 고정단의 경계조건은 구조물의 강도해석에 큰 영향을 미치지 않을 수 있지만 기초 구조물의 강성을 고려한 해석은 구조물의 진동특성에 상당한 영향을 미칠 수 있다. 풍력터빈타워는 강도해석 뿐만 아니라 진동특성에 대한 분석이 주요한 구조물으로써 고정단 경계조건을 활용한 해석이 아닌 기초 구조물의 강성을 고려한 해석이 요구된다. 기초 구조물의 강성을 고려하는 경우 고정단 경계조건을 이용한 경우에 비해 구조물의 고유진동수가 낮아지는 결과를 나타내기 때문에 풍력터빈타워의 설계 시 기초 구조물과의 합성으로 인해 구조물의 고유진동수가 낮아지는 효과를 고려하여야 한다. 일반적으로 풍력터빈타워 기초구조물의 설계 시 최소 1x10⁶kN/m의 수평강성과 5x10⁷kN·m/rad의 회전강성을 확보하도록 제한하고 있으며[6], 지점부 강성의 효과가 타워 구조물의 고유진동수에 미치는 영향을 알아보기 위해 지점부의 스프링 강성을 이용한 경계조건을 활용하여 해석을 수행하였다. 수직 방향에 대한 강성은 구조물의 진동 특성에 미치는 영향이 수평 방향에 비해 미미하다고 간주하여 타워 하단 수직 방향과 비틀림 방향에 대해 고정 상태로 각각 2개의 수평 방향 강성과 회전방향 강성을 적용하였다.




2.2.3 Substitutive Beam Model

타워 구조물 해석에 있어서 해석의 편의를 위해 Shell

요소에 비해 간단한 모델인 Beam요소를 이용한 모델을 활용하기도 한다. FEM을 이용한 Shell모델의 고유진동수 해석의 경우 적절한 Element 크기가 아니면 정확한 결과를 얻을 수 없으며 Element의 크기가 작아질수록 더 많은 해석시간을 요구한다. Beam모델의 경우 Shell모델에 비해 충분히 작은 Element의 크기를 요구하지 않으며 요소의 특성 상 요구되는 해석시간을 훨씬 줄일 수 있는 장점이 있다. Tapered형태인 풍력터빈타워의 Shell모델을 모사하기 위해서는 여러 개의 Stepped Beam모델을 이용할 수 있으며 충분히 세밀하게 나누어진 Beam모델일수록 Tapered Shell모델을 잘 모사할 수 있다.

10개의 구간으로 나누어진 Tapered Shell모델로 구성된 기본모델을 모사하기 위하여 동일하게 10개의 구간으로 나누어진 Stepped Beam모델을 활용하였으며, 추가적으로 Tapered Shell모델에 상응하는 1차 고유진동수와 무게를 가지는 Uniform Beam모델을 이용하여 Stepped Beam모델의 세분화에 따른 영향을 분석하였다.

[Table 3] Result of Base Model

Mode	Mode Shape	Natural Frequency
1 st Mode		0.33704
2 nd Mode		2.9871
3 rd Mode		8.5446

3. Analysis of Natural Frequency

3.1 Result of Base Model

고정단 경계조건을 이용하여 단위중량 $8,500\text{kg/m}^3$ 의 Tapered Shell모델의 상단에 350ton의 집중질량을 적용한 기본모델의 고유진동수 해석결과는 Table 3과 같다.

3.2 Result of Flange Separation Model

모델링에 따른 고유진동수 해석결과의 비교검토를 위한 첫 번째 비교모델은 기본모델에서 강재의 단위중량을 $7,850\text{kg/m}^3$ 으로 적용하고 나머지의 무게를 각각 2개의 플랜지를 모델링 하여 적용시킨 Flange Separation Model이며 해석결과는 Table 4와 같다.

[Table 4] Result of Flange Separation Model

Mode	1 st Mode	2 nd Mode	3 rd Mode
Natural Frequency	0.33751	2.9117	8.3342
Error	0.14%	-2.52%	-2.46%

Flange Separation Model의 해석 결과, 1차 고유진동수의 경우 기본모델과 0.14%의 차이로 무시할 수 있을 정도의 오차를 나타내었으며 2, 3차 고유진동수의 경우에도 2.5%내외의 근소한 차이를 나타내었다. 1차 모드와 상이하게 2, 3차 모드에서는 음의 오차를 나타내었는데, 이는 플랜지의 모델링으로 인해 플랜지모델의 집중된 질량의 위치가 2, 3차 모드형상을 나타내는데 1차 모드와 다른 영향을 미치기 때문에 발생한 것으로 간주된다.

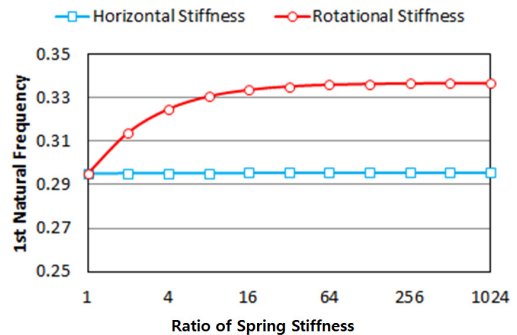
3.3 Result of Spring Boundary Condition Model

두 번째 비교모델은 기초 구조물의 강성을 고려하여 기본모델 하단 지점부에 스프링 강성계수 경계조건을 적용한 모델 해석결과는 Table 5와 같다.

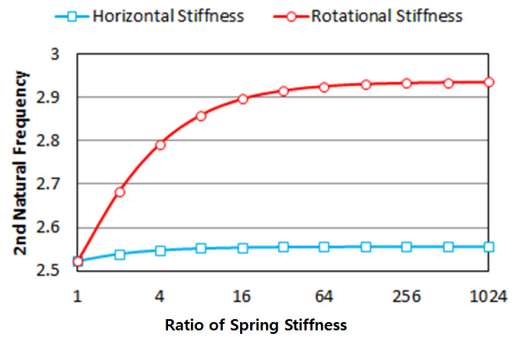
[Table 5] Result of Spring Boundary Condition Model

Mode	1 st Mode	2 nd Mode	3 rd Mode
Natural Frequency	0.29511	2.523	7.3277
Error	-12.44%	-15.54%	-14.24%

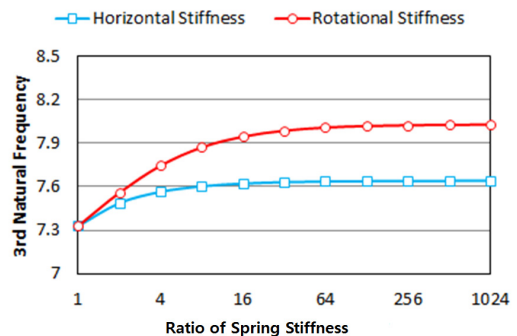
기본모델과 비교하여 각 모드에서의 고유진동수는 모두 10%가 넘는 오차가 발생하며 이전의 비교모델에 비해 상당히 큰 오차가 발생함을 알 수 있었다. 해당 비교모델의 경우 일반적으로 요구되는 기초 구조물의 최소 강성 값을 적용하여 큰 오차가 발생한 것으로 판단하여 스프링 강성계수를 증가시켜 추가적인 분석을 수행하였다.



(a)



(b)



(c)

[Fig. 2] Natural Frequency about Spring Stiffness Increasing

- (a) 1st Natural Frequency
- (b) 2nd Natural Frequency
- (c) 3rd Natural Frequency

해석에 사용된 스프링 강성계수인 $1 \times 10^6 \text{ kN/m}$ 의 수평 강성과 $5 \times 10^7 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$ 의 회전강성에 각각 2배수씩 가중치를 적용하여 스프링 강성계수의 증가에 따른 고유진동수의 변화를 살펴봄으로써 각각의 강성이 구조물의 고유진동수에 미치는 영향을 확인하였다. 스프링 강성계수의 증가에 따른 고유진동수의 결과는 Fig.2와 같다.

스프링 강성계수의 증가에 따라 고유진동수가 증가하는 것으로 보아 Spring Boundary Condition Model의 해석에서 나타난 큰 오차의 원인은 낮은 스프링 강성계수에서 비롯된 것임을 알 수 있다. 또한 수평방향 강성계수의 증가에 비해 회전방향 강성계수의 증가가 고유진동수에 더 큰 영향을 미치는 결과를 통해 기초 구조물의 수평방향 강성은 최소 요구치를 통해 충분히 확보된 것으로 판단할 수 있으며 회전방향에 대한 기초 강성의 최소 요구치가 구조물의 동적 특성을 고려하는데 있어 충분히 확보되지 못한 것으로 판단할 수 있다.

3.4 Result of Substitutive Beam Model

마지막 비교모델은 Beam모델로써 10개의 구간으로 나누어진 Tapered Shell모델을 동일한 10개의 구간으로 나누어진 Stepped Beam모델로 모사한 것으로 해석결과는 Table 6과 같다.

[Table 6] Result of Beam Model

Mode	1 st Mode	2 nd Mode	3 rd Mode
Natural Frequency	0.34321	3.0499	8.8496
Error	1.83%	2.1%	3.57%

10개의 구간으로 나누어진 Stepped Beam모델을 이용한 고유진동수는 3차 고유진동수까지 4% 미만의 오차를 보이며 비교적 합리적인 결과를 보인 것을 알 수 있다. 충분히 세밀하게 나누지 않은 Stepped Beam을 활용하여 완전한 Tapered형태를 모사하지 못하는에서 발생한 모델링의 오차가 이와 같은 결과를 나타낸 것이라 판단되며 더욱 세분하여 모델링 할수록 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 단적인 비교를 위해 Tapered Shell모델과 유사한 1차 고유진동수와 질량을 가지는 Uniform Beam모델의 경우 Table 7과 같이 1차 고유진동수에서는 적은 오차가 발생하지만 고차모드로 갈수록 더욱 큰 오차가 발생하는 것을 알 수 있다.

[Table 7] Result of Uniform Beam Model

Mode	1 st Mode	2 nd Mode	3 rd Mode
Natural Frequency	0.33086	2.0552	5.6751
Error	-1.83%	-31.2%	-33.58%

4. Conclusions

풍력발전타워는 상단의 터빈 구조물에 의해 주기적인 운용하중을 지속적으로 받는 구조물로서 설계 시 강도해석 뿐만 아니라 진동특성에 대한 고려가 반드시 필요하다. 현재 풍력발전타워에 대한 연구가 활발히 진행되고 있지만 여타의 구조물에 비해 비교적 단순한 구조임에도 불구하고 구조물의 모델링 방법에 대한 제약조건이 명확히 정의되지 않고 다양한 형태로 해석에 이용되고 있다.

본 연구에서는 풍력발전타워의 모델링에 따른 고유진동수의 특성에 대해 분석해 보았으며 모델링 방법의 차이가 해석결과에 다양한 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

- 1) 플랜지와 볼트 등 세부적인 부분들에 대해 따로 고려하지 않고 타워의 단위중량에 일괄적으로 추가하여 모델링한 경우, 1차 고유진동수에서 0.14%의 차이를 나타내며 2, 3차 고유진동수에서 2.5%내외의 차이로 모델링의 간소화가 비교적 합리적으로 이뤄진 것으로 판단할 수 있다.
- 2) 타워 하단부의 경계조건을 고정단으로 취급한 경우, 일반적인 기초 강성의 최소 요구치를 적용한 경우와 10%이상의 큰 차이를 나타내었으며 이는 FEM모델링 시 기초의 강성을 고려하지 않고 고정단의 경계조건을 사용할 경우 실제 거동과 상이한 결과를 나타낼 수 있음을 의미한다.
- 3) Tapered 형태의 Shell모델을 Stepped Beam모델을 이용하여 모델링한 경우, 4%미만의 근소한 차이를 나타내었지만 더욱 세밀하게 Tapered 형태를 모사할수록 그 차이는 더 줄어들 것으로 판단된다.

해석결과를 바탕으로 유한요소 해석 프로그램을 이용한 타워 구조물의 해석모델을 구축하는데 있어 효율적인 해석을 위한 모델링 방법에 대해 권고사항과 제약조건을 확립할 수 있다면 추후 풍력발전타워에 대한 연구개발에

많은 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 실제 풍력터빈 모델의 계측 자료 및 실험을 통하여 각각의 모델링 방법에 따른 비교검증을 통한 신뢰성 확보 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

- [1] GL Guideline, Germanischer Lloyd, "Guideline for the Certification of Wind Turbines", 2010.
- [2] S. G. Lee, D. H. Kim, G. L. Yoon, "Seismic Fragility for 5MW Offshore Wind Turbine using Pushover Analysis", Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol.27, No.4, pp.98-106, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5574/KSOE.2013.27.4.098>
- [3] C. H. Choi, J. T. Han, S. D. Cho, Y. E. Jang, "The Effect of Flexibility for the Offshore Wind Turbine System", Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol.14, No.4, pp.59-66, 2013.
- [4] H. S. Kim, H. S. J. Y. M. K, "Cracking Evaluation of Concrete Substructure for Offshore Wind Turbine", Spring Conference on Korea Concrete Institute, pp. 81-82, 2014.
- [5] J. Jonkman, S.Butterfield, W. Musial, G. Scott, "Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development", Technical Report NREL/TP-500-38060, 2009.
- [6] J. C. Nicholson, "Design of wind turbine tower and foundation systems: optimization approach", Master's thesis, University of Iowa, 2011.

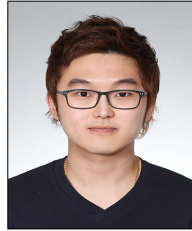
이윤우(Yun-Woo Lee) [준회원]



- 2013년 2월 : 고려대학교 건축사회 환경공학부 (공학사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 대학원 건축사회환경공학과 (석박사통합과정)

<관심분야>
토목구조공학, 구조해석

장민서(Min-Seo Jang) [정회원]



- 2011년 2월 : 고려대학교 건축사회 환경공학부 (공학사)
- 2014년 2월 : 고려대학교 대학원 건축사회환경공학과 (박사수료)

<관심분야>
토목구조공학, 구조해석

강성용(Kil-Seo Hong) [정회원]



- 2011년 8월 : 상명대학교 건설시스템공학과 (공학사)
- 2013년 8월 : 상명대학교 건설시스템공학과 (공학석사)
- 2013년 9월 ~ 현재 : 고려대학교 일반대학원 건축사회환경공학과 박사과정

<관심분야>
구조공학, 교량공학, 구조해석

김평화(Pyoung-Hwa Kim) [준회원]



- 2014년 2월 : 고려대학교 건축사회 환경공학부 (공학사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 일반대학원 건축사회환경공학과 석박통합과정

<관심분야>
구조공학, 교량공학, 구조해석

강 영 종(Young-Jong Kang)

[정회원]



- 1987년 3월 ~ 1987년 8월 : 한국 전력기술(주) (기술원보)
- 1987년 9월 ~ 1989년 6월 : AUBURN University (Graduate T.A. & R.A.)
- 1993년 3월 ~ 1994년 2월 : 공주 대학교 토목공학과 (전임강사, 학과장)

- 1994년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 사회환경시스템공학과 교수

<관심분야>

토목구조역학공학, 곡선교량, 강구조좌굴, 유지보수