

## 편심하중이 작용하는 수평 곡선 I 형 거더의 휨·비틀림 상호작용

임정현<sup>1</sup>, 이기세<sup>1</sup>, 김희수<sup>1</sup>, 최준호<sup>2</sup>, 강영종<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>고려대학교 건축사회환경, <sup>2</sup>초대형 구조기술연구소

### Interaction of Flexure-Torsional by eccentric load in horizontal curved 'T' shape girder.

Jeong-Hyeon Lim<sup>1</sup>, Kee-Sei Lee<sup>1</sup>, Hee-Soo Kim<sup>1</sup>, Jun-Ho Choi<sup>2</sup>, Young-Joung Kang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea Univ.

<sup>2</sup>Research Institute for Mega Structures, Korea Univ.

**요약** 수평 곡선 I-형 거더에는 초기곡률이라는 기하학적 특성으로 인해 휨 모멘트와 더불어 비틀림 모멘트가 작용하게 된다. 이러한 휨·비틀림 거동은 서로 상호 작용을 일으켜 약축방향으로 2차 휨거동을 유발하게 된다. 휨과 비틀림 간의 상호 작용은 곡선 거더를 조기에 비선형 상태 및 소성 상태로 유도하여 내하력의 저하를 야기하게 되고, 차량의 이동 위치에 따른 편심 하중은 비틀림을 더욱 증대시킬 수 있다. 그러나 기존에 연구되어왔던 직선 거더에 대한 휨·비틀림 상호관계식은 곡선 거더가 가지고 있는 거동 특성이 고려되지 않았기 때문에 수직하중을 받는 수평 곡선 I-형 거더의 극한 강도가 과대평가 될 수 있다. 따라서 이에 대한 보다 명확하고 합리적인 제안식의 적용이 곡선 거더의 설계 시에 필요하다. 본 연구에서는 유한요소해석을 통하여 편심하중이 작용하는 수평 곡선 I형 거더의 휨·비틀림 상호작용 특성을 파악하고 거동분석을 수행하였다.

**Abstract** With bending moment, torsional moment due to geometric properties as “Initial curvature” acts in horizontally curved I-girder. These behavior causes the secondary effect of bending in minor-axis because of interaction between bending and torsion. The bending and torsion interaction cause a loss of load bearing capacity by induced the early inelastic or plasticity condition in curved girder. Also eccentric load by movements of traffic can increase torsion. However, Equation of interaction between bending and torsion for straight girder, not deal with characteristics of curved girder behavior in previous studies, can be overestimated for ultimate strength in horizontally curved I-girder acting vertical force. Therefore, using more rational, obvious suggestion is required when design curved girder. In this study, we identified the bending-torsional moment interaction for the horizontally curved I-girder of the eccentric load acting by FEM analysis.

**Keywords** : Bridge, Design Specification, Eccentric Load, Curved Girder, T-M interaction

## 1. 서론

### 1.1 곡선교량

최근 들어 Fig. 1과 같이 고속도로나 도심지의 입체 교차로에 곡선 교량의 사용이 증가하고 있다. 곡선 교량

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(12기술혁신 B01-곡선 강교량의 합리적인 LFRD 설계기술 개발)에 의해 수행됨

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

Tel: +82-2-927-7715 email: yjkang@korea.ac.kr

Received August 18, 2015

Accepted September 11, 2015

Revised September 4, 2015

Published September 30, 2015

은 산업화된 도심지에서의 경제적, 환경적인 측면을 고려하여 교통량을 완만히 분산하고 교통 흐름을 조절하는데 큰 역할을 한다. 또한 이러한 곡선 교량의 사용은 자연환경과 도심지에 미적인 아름다움을 제공할 수 있다.

곡선교량의 경우 직선형 거더를 서로 연결하여 곡선

형을 이루는 형태가 많이 사용되었다. 그러나 이러한 직선 교량의 사용은 곡선 교량에 비해 여러 가지 단점을 내포하고 있으며 전체적인 공사비의 증가를 초래한다는 연구 결과가 발표되었다. [1]

곡선상부구조에서 직선거더를 사용하고 바닥판만을 곡선으로 제작/시공할 경우, 슬라브 캔틸레버 부분의 길이가 제한되어 지간이 상대적으로 짧아지므로 많은 수의 하부구조 건설이 불가피해 진다. 또한 이러한 형식의 교량은 상부구조 전체가 단순보의 조합 형태가 되어 부반력에 취약한 형태를 띄게 된다. 다시 말해, 상대적으로 넓은 면적을 차지하게 되는 하부구조는 도심지에서의 공간 활용면에서 많은 제한 조건을 유발하게 된다.

1990년대 이후 이러한 형식의 교량이 줄어들고 현재에는 곡선거더를 사용하고 있으나, 수평 곡선 거더에 대한 통일된 설계 지침이 부족하여 설계/해석/시공 분야에 많은 어려움이 있는 실정이다.



Fig. 1. Nanpu bridge in Shanghai

### 1.2 곡선교량의 거동특성

초기 곡률을 갖는 곡선 교량의 경우 직선 교량과 달리 기하학적 특성으로 인해 사하중(Dead load) 하에서도 휨(bending) 뿐만 아니라 비틀(torsion)이 작용하게 된다. [2,3]

이러한 휨-비틀의 상호작용(T-M interaction)력은 구조물의 상태를 조기 비선형상태 및 소성 상태로 유도하여, 구조물의 내하력을 저하시키게 된다.

또한 차량의 위치나 윈심력에 따른 편심 하중은 비틀림을 증가시켜 거더는 소성모멘트에 도달하기 전에 파괴에 이르게 된다.

그러나 기존의 직선거더의 휨·비틀 상호관계에 대한 연구는 위와 같은 현상을 고려하지 않기 때문에 극한 강도를 과대 평가 할 수 있다.

본 연구에서는 수평곡선 I 형 거더에 작용하는 편심하중에 대한 휨·비틀림에 의한 극한 강도 저하양상을 유한요소해석을 통해 분석하였다.

### 1.3 곡선교량에 대한 연구 현황

수평곡선 교량의 극한거동을 밝히기 위한 해석 및 실험 연구가 1970년대 이후로 다양하게 수행되어왔다. 그러나 대부분의 연구가 휨 거동에 초점이 맞춰져 있었으며, 휨·비틀에 관한 연구는 직선교량에 한정되어 있었다. 1990년 이후에 이루어진 연구들은 곡선교량에 관한 Torsion and Moment interaction에 관한 상호 관계식이 제안되었지만 어디까지나 내하력의 상한치를 제시하는데 그치고 있어, 정확한 소성 한계 해석 및 이에 따른 구조물 내하력 산정에는 어려운 것이 사실이다. [2,3,4,5]

## 2. 곡선 I형 거더의 극한 강도에 관한 유한요소해석 연구

### 2.1 유한요소해석 모델 및 매개변수

수평 곡선 I 형 거더에 작용하는 휨·비틀림의 영향을 규명하기 위하여 범용프로그램 (ABAQUS 6.13)을 통해 유한요소해석을 수행하였다. 해석 모델은 4절점 Shell 요소를 사용 하였으며, 적용된 경계조건과 하중상태는 Fig. 2와 같고 상세조건은 Table 1과 같다.

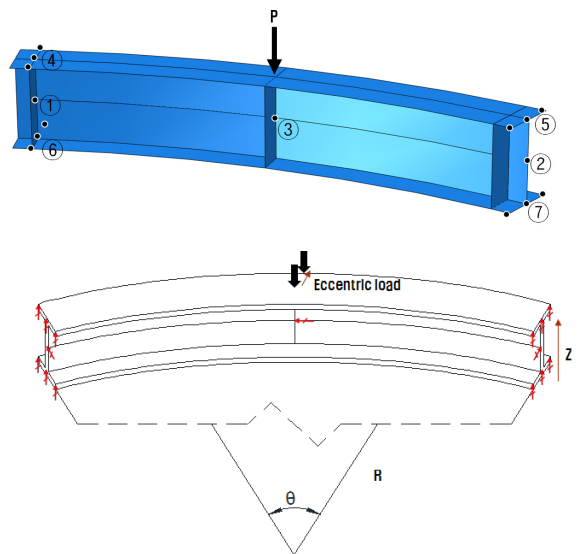


Fig. 2. Boundary Condition and Loading point

Table 1. boundary Condition

boundary condition ( Free : ○, Fix : ● )						
	Displacement			Rotation		
	U <sub>R</sub>	U <sub>θ</sub>	U <sub>z</sub>	R <sub>R</sub>	R <sub>θ</sub>	R <sub>z</sub>
①②	●	○	○	○	○	○
③	○	●	○	○	○	○
④⑤⑥⑦	○	○	●	○	○	○

완전 소성 모멘트와 완전 소성 비틀림의 상호작용에 대한 검토를 위해 국부좌굴을 방지할 수 있는 단면을 선정하였다. 이에 따라 플랜지 두께는 AASHTO LRFD 2014에서 규정하는 직선거더의 조밀단면 세장비로 선정하였다.

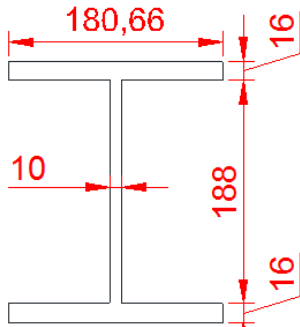


Fig. 3. 'I' Type Section

Table 2. Section Properties

Properties	Value
Thickness of the flange, <i>t<sub>f</sub></i> (mm)	16
Width of the flange, <i>b<sub>f</sub></i> (mm)	180.66
Thickness of the web, <i>t<sub>w</sub></i> (mm)	10
Height of the beam (overall) (mm)	220
Moment of inertia about y-axis, <i>I<sub>y</sub></i> (mm <sup>4</sup> )	7.7151E+07
Warping constant, <i>C<sub>w</sub></i> (mm <sup>6</sup> )	1.6360E+11
Torsional constant, <i>J</i> (mm <sup>4</sup> )	5.6133E+05

Compact Flange	$0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.38 \times \sqrt{\frac{206000}{315}}$ $= 9.718 > \frac{b_{fc}}{2t_{fc}} = \frac{188}{2 \times 16} = 5.64573$	ok
Compact Web	$1.12 \sqrt{\frac{Ek}{F_{yw}}} = 1.12 \times \sqrt{\frac{206000 \times 5}{315}}$ $= 64.044 \geq \frac{D}{t_w} = \frac{220}{10} = 27.58$	ok

곡선거더의 경우 중력방향 수직하중에도 비틀림 모멘트가 작용하기 때문에 복부판의 조기 파괴를 방지하기 위해 직선 거더의 기준에서 복부판의 두께를 안전 측으로 선정하였다. 강재는 100mm 이하의 판 두께에서 315MPa의 항복응력을 갖는 SM490을 사용하였으며, 완전 탄소성 상태(Perfect Elasto Plastic)를 가정하였다.

● 비지지길이 산정식

$$L_p = 1.0r_t \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}}$$

$$= 1.0 \times 46.92485 \times \sqrt{\frac{206000}{315}} = 1200.00mm$$

$$r_t = \frac{b_{fc}}{\sqrt{12(1 + \frac{1}{3} \frac{D_c t_w}{b_{fc} t_{fc}})}}$$

$$F_{yr} = 0.7F_y$$

L<sub>p</sub> = compact unbraced length  
=1200mm

편심위치에 따라 플랜지의 국부좌굴 파괴가 우려되므로 Fig. 2와 같이 편심하중이 작용하는 위치에 보강재를 추가하였다.

매개변수 선정에 있어서 AASHTO Guide Specifications(2014)의 I형 거더 설계제한이 반영되었으며, 곡선거더 설계에 관한 일반사항까지 고려하였다.

본 연구에서는 곡선거더의 곡률 중심각과 Fig. 2에 나타난 좌와 같이 편심하중위치를 지간의 중앙부에 플랜지 상단의 원 외측방향으로 이동 시켜 해석을 수행 하였다.

- 곡률 중심각 : 직선, 2.77°, 4.62°, 9.23°, 13.85°, 18.46°, 23.08°, 27.69°

- 편심의 위치 : 0, 11.52mm, 23.03mm, 34.55mm, 46.07mm, 67.1mm

2.2 해석결과

2.2.1 곡률과 편심 따른 파괴 형상

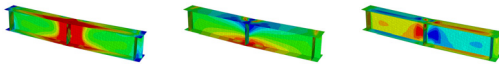
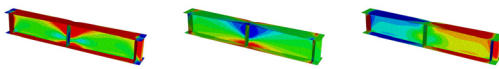
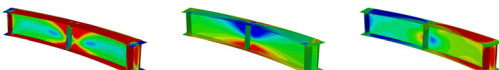
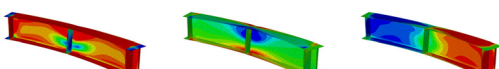
Table 3은 항복상태의 파괴 형상을 von Mises, Principal(length), Shear의 응력상태로 나타난 것이다.

편심하중이 작용하지 않는 직선 거더의 경우 극한강도가 가장 크게 나왔고 곡률 중심각 27.69°, 편심 67mm

일 때 극한강도가 가장 작았다. 이는 단면에 휨 모멘트 뿐만 아니라 비틀림에 의한 전단력까지 발생하여 극한강도가 저하 된 것으로 판단된다. 편심하중이 작용하지 않는 직선 거더의 경우에는 하중이 작용하고 있는 위치의 상하부 플랜지와 복부판 상하단에서 길이방향 응력이 가장 크게 나타났다. 편심하중이 67mm에서 작용하는 직선거더의 경우 다른 모델에 비해 전반적으로 큰 응력이 발생하였으며, 편심하중이 없는 모델과 달리 플랜지 상하부의 전단응력이 크게 발생한 것을 볼 수 있다.

편심하중이 작용하지 않는 곡률중심각 27.69° 모델은 곡률에 의한 자체 편심 때문에 비틀림으로 인한 전단응력이 상하부 플랜지에 전체적으로 발생하였다. 동일 곡률중심각에 편심하중의 위치가 67.1mm인 모델의 경우 다른 모델에 비해 전단력이 크게 작용했다.

Table 3. fracturing characteristics

von Mises	Principial	Shear
 <p>Straight-Eccentric load 0mm Moment = 202,050.63 kN·mm, Torsion = 0.00 kN·mm</p>		
 <p>Straight-Eccentric load 67.1mm Moment = 202,050.63 kN·mm, Torsion = 14,116.28 kN·mm</p>		
 <p>Central angle 27.69°-Eccentric load 0mm Moment = 202,050.63 kN·mm, Torsion = 16,256.61 kN·mm</p>		
 <p>Central angle 27.69°-Eccentric load 67.1mm Moment = 202,050.63 kN·mm, Torsion = 19,678.20 kN·mm</p>		

2.2.1 곡률반경의 영향

수평곡선 I형 거더에서 곡률반경에 따른 극한강도 변화를 검토하기 위해 곡률중심각을 0°(직선)~27.69°로 변화하여 유한요소해석을 수행하였다.

Fig. 4는 곡률에 따른 극한 모멘트를 나타낸 것이다.

극한모멘트는 지간 중앙부에 작용하는 수직하중에 의해 발생하는 모멘트이다. 곡률 중심각이 커질수록 최대 모멘트는 감소하는 경향을 보인다. Fig. 5는 곡률에 따른 극한 비틀림 모멘트 증가 양상을 나타낸 것이다. 이러한 결과를 통하여 단면에 작용하는 비틀림 모멘트의 증가는 휨모멘트의 감소를 야기 시킬 수 있다고 결론지을 수 있으며, 이는 곡률이 커질수록 비틀림에 의해 파괴 모드가 지배 될 수 있다는 점을 시사한다. 이러한 거동 양상을 반영하기 위해서는 설계 및 해석 시 휨-비틀림 상호작용이 반드시 고려되어야 할 것이다.

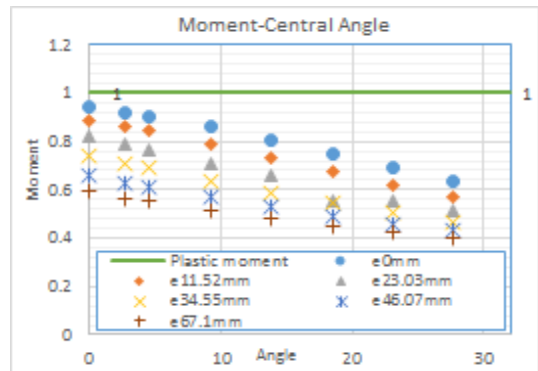


Fig. 4. Moment-Central Angle

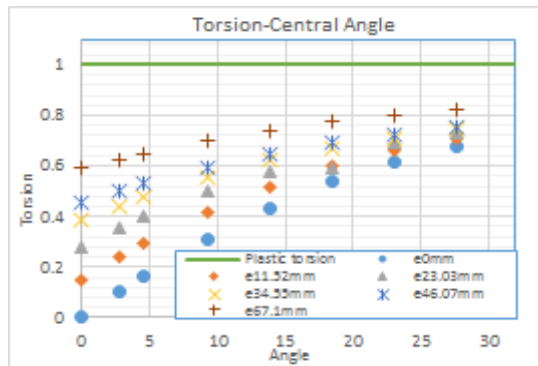


Fig. 5. Torsion-Central Angle

2.2.2 편심 위치의 영향

Fig. 4에서 편심하중에 의한 휨·비틀림 상호작용을 검토하기 위해 편심위치를 0~67.1mm로 변화하여 수치해석을 수행하였다.

수치해석 결과, 편심거리가 커질수록 거더의 최대 모멘트는 감소하는 반면 비틀림 모멘트는 증가하는 경향이

있다.

Fig. 5에서 직선거더에서는 편심에 대한 영향력이 컸지만 곡률 중심각이 커짐에 따라 편심으로 인한 비틀림 영향은 줄어드는 경향을 보인다. 이는 곡선거더에 기하학적인 조건 때문에 발생하는 하중의 편심이 비교적 작기 때문으로 판단된다.

### 2.2.3 휨- 비틀림의 상호작용 영향

단면에 비틀림모멘트와 휨모멘트가 동시에 작용할 경우, 각 요소는 복잡한 응력상태를 나타내며, 전단과 범선 응력의 상호 영향으로 직선과는 다른 양상의 극한 거동 보이게 된다. 기존의 연구는 휨-비틀림 상호작용에 대한 연구를 직선 거더에 한해서 수행 하여왔기 때문에, 곡률 효과를 반영하지 못했고, 이로 인해 과대평가된 상호작용식이 제안 되었다. 본 연구에서는 곡률효과와 편심에 의한 효과를 종합적으로 분석하여 Fig. 6과 같은 휨-비틀림 상호작용 그래프를 나타내었다. 이에 따르면 곡률 및 편심에 의하여 증가된 비틀림 모멘트는 극한 모멘트를 감소시킬 수 있으며, 다양한 매개변수와 광범위한 해석을 통하여 정확하고 효율적인 설계 및 해석이 이루어 질 수 있을 것이라 판단된다.

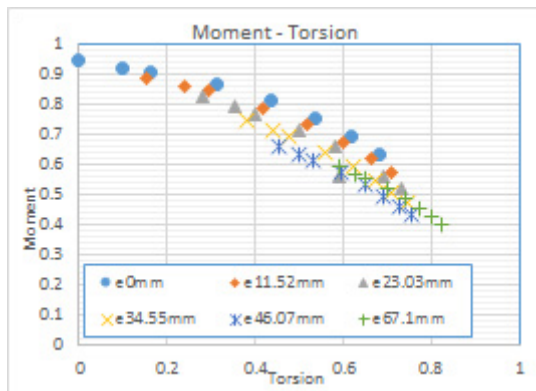


Fig. 6. Moment-Torsion interaction

## 3. 결론

항시 휨모멘트와 비틀림 모멘트를 저항하는 곡선 거더는 휨-비틀림 상호작용이 설계 및 해석에 반영될 필요가 있다. 그러나 현재까지의 연구는 직선거더에만 국한되어 곡선 거더의 극한 모멘트 강도를 과대평가 할 수

있는 여지가 있었다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 개선시키기 위하여 수평곡선 I형 거더를 현행 설계기준[6]에 따라 직선 거더교 기준으로 설계하고, 수치해석을 통해 초기곡률과 편심하중의 영향을 분석하였다.

해석결과에 따르면 곡률과 편심에 따라 각각 5~40% 정도의 극한 모멘트 감소가 나타났으며, 곡률과 편심이 모두 최대인 경우, 동일 단면을 가진 직선 거더 대비 약 60% 정도의 극한 모멘트 감소가 야기 되었다. 이는 곡선교량에서 편심이 작용 하였을 때 구조적으로 내하력을 저하를 증가시키며 이는 기존 설계의 반영에 필요할 것으로 보인다. 이러한 양상을 최종적으로 휨-비틀 상호작용 곡선에 나타 냈으며, 이를 통하여 보다 정확하고 효율적인 설계 및 해석을 유도 할 수 있을것이라 전망 된다. 이를 토대로 향후에는 보다 많은 모델에 대한 해석과 실험적 연구가 병행 되어져야 할 것으로 보인다.

## References

- [1] Nakai, H., and Yoo, C. H. Analysis and design of curved steel bridges, McGraw-Hill, New York. (1988).
- [2] Pi, Y.-L., and Trahair, N. S. "Inelastic bending and torsion of steel I-beams." J. Struct. Engrg., ASCE, 120(12), 3397-3417. Pi, Y.-L., and Trahair, N. S. (1995). "Inelastic torsion of steel I-beams." (1994). DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1995\)121:4\(609\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1995)121:4(609))
- [3] Fukumoto, Y., and Nishida, S. "Ultimate load behavior of curved I-beams." J. Engrg. Mech. Div., ASCE, 107(2), 367-385. (1981).
- [4] Pi, Y.-L., and Bradford, M. A. "Strength design of steel I-section beams curved in plan." J. Struct. Eng., 127, 639-646. (2001). DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:6\(639\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:6(639))
- [5] Pi, Y.-L., Bradford, M. A., and Trahair, N. S. "Inelastic analysis and behavior of steel I-beams curved in plan." J. Struct. Engrg., ASCE, 126(7), 772-779. (2000). DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2000\)126:7\(772\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:7(772))
- [6] AASHTO. (2014). AASHTO LRFD bridge design specifications, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C. (2014)

**임 정 현**(Jeong-Hyeon Lim)

[준회원]



- 2007년 3월 : 순천대학교 토목공학과 (공학사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 건축사회환경 (석박사 통합과정)

<관심분야>  
구조공학, 구조해석

**최 준 호**(Jun-Ho Choi)

[정회원]



- 2007년 8월 : 고려대학교 토목환경 공학과(공학사)
- 2013년 8월 : 고려대학교 건축사회 환경공학과(공학박사)
- 2013년 9월 ~ 현재 : 고려대학교 초대형구조기술연구소 연구교수

<관심분야>  
비선형해석, 구조물건전도모니터링, 해양공학

**이 기 세**(Kee-Sei Lee)

[정회원]



- 2009년 8월 : 고려대학교 토목환경 공학과(공학석사)
- 2015년 2월 : 고려대학교 건축사회 환경공학과(공학박사)
- 2015년 2월 ~ 현재 : 고려대학교 건축사회환경공학과 연구 교수

<관심분야>  
구조공학, 구조해석

**강 영 종**(Young-Joung Kang)

[정회원]



- 1979년 3월 : 고려대학교 토목환경 공학과(공학사)
- 1983년 3월 : 고려대학교 대학원 토목공학과(공학석사)
- 1987년 9월 : Auburn univ(공학박사)
- 1983년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 건축사회환경 정교수

<관심분야>  
비선형해석, 구조물건전도모니터링, 구조공학

**김 희 수**(Hee-Soo Kim)

[정회원]



- 2009년 2월 : 경희대학교 토목건축 학부(공학사)
- 2013년 2월 : 고려대학교 사회환경 시스템공학과(공학석사)
- 2015년 2월 ~ 현재 : 고려대학교 건축사회환경공학과(박사과정)

<관심분야>  
구조공학, 구조해석