플레이트 거더교 지점부의 좌굴발생 원인분석 및 보강방안 수립

옥재호, 임성순^{*} 서울시립대학교 토목공학과

Analysis of Buckling Causes and Establishment of Reinforcement Method for Support of Plate Girder Bridge

Jae-Ho Ok, Sung-Soon Yhim^{*} Department of Civil Engineering, University of Seoul

요 약 플레이트 거더교에서 I형은 매우 경제적인 단면으로 넓게 적용되고 있으며 지금까지 복합적층의 패널, 폐단면 리브로 보강된 곡판, 새로운 형태의 리브, 새로운 형식의 강박스거더 압축플랜지 개발 등의 좌굴거동에 대한 연구가 활발 히 진행되었다. 하지만 이는 I형 거더의 복부판에서 발생한 국부좌굴의 원인을 정확하게 분석하는데 한계가 있었다. 따라 서 본 논문에서는 실제 적용된 I형 거더의 복부판이 도로교설계기준에서 제시하는 최소두께 기준의 만족여부와 보강 전과 후에 대하여 유한요소해석 프로그램 LUSAS 17.0을 사용하여 모델링하고 고정하중과 활하중에 대한 선형탄성 좌굴 해석을 수행 후 좌굴발생의 원인을 분석하였다. 보강 전은 1mode의 고유치(λ₁) 값이 0.7025로 임계좌굴하중이 작용하 중보다 작아 좌굴이 발생하였지만 보강 후는 거더 지점부의 복부판에 수직 및 수평보강재를 추가함에 따라 여기에 Nodal line이 형성되고 좌굴에 대한 저항강도가 증가하여 1mode의 고유치(λ₁) 값이 1.5272로 좌굴하중에 대한 안정 성을 확보한 것으로 분석되었다. 또한 지점부의 좌굴 흔적을 개선하기 위해 복부판의 일부에 덧댐판을 추가한 보강방안 에 대한 좌굴해석 결과 1mode의 좌굴이 복부판의 지점부가 아닌 중앙부에서 발생하였고 고유치(λ₁)값이 3.5299로 보 강 후보다 2배 이상 커서 향후 지점부의 복부판 보강방안으로는 효과적일 것으로 기대된다.

Abstract I-type girders are widely applied as very economical sections in plate girder bridges. There has been research on developing composite laminated panels, curved plates reinforced with closed-end ribs, and new forms of ribs and compression flanges for steel box girders. However, there is a limitation in analyzing the exact cause of local buckling caused by an I-type girder's webs. Therefore, an I-type girder's web was modeled using the finite element analysis program LUSAS 17.0 before and after reinforcement. We checked for the minimum thickness criteria presented in the Korea highway bridge design code, and the cause of buckling after performing a linear elastic buckling analysis of dead and live loads was analyzed. Before reinforcement, an eigenvalue (λ_1) at the 1st mode was 0.7025, the critical buckling load was smaller than the applied load, and there is a buckling. After reinforcement, when applying vertical and horizontal stiffeners to the web part of the girder at support, a Nodal line was formed, the eigenvalue was 1.5272, and buckling stability was secured. To improve buckling trace of the girder at the support, an additional plate was applied to the web at the support to ensure visual and structural safety, but buckling occurs at center of web. The eigenvalue (λ_1) was 3.5299, and this method is efficient for reinforcing the web of the support.

Keywords : I-Type, Plate Girder Bridge, Local Buckling, Vertical and Horizontal Stiffeners, Critical Buckling Load, Eigenvalue, Additional Plate

1. 서론

플레이트 거더교에 주로 적용되는 I형은 매우 경제적 인 거더의 단면형상으로 넓은 범위에 적용되고 있다. I형 단면에서 플랜지는 주로 휨모멘트에 저항하고 복부판은 전단력에 저항한다. I형의 복부판에 설치되는 수직보강재 는 중앙부에 설치되는 중간보강재와 거더의 받침 부위에 설치되는 단부지점보강재로 각각 구분되며 이는 복부판 에 발생하는 전단좌굴을 방지하기 위해서 설치된다. 도로 교설계기준에서는 복부판이 휨모멘트에 의해 압축응력 상태에 있는 경우에는 반드시 국부좌굴이 발생할 우려가 있으므로 필요에 따라서는 복부판의 최소두께 기준을 만 족하도록 두께를 늘리거나 복부판에 Nodal line을 형성 하는 수직 및 수평보강재를 설치하여 하여 좌굴강도를 증대시켜야 한다는 기준을 제시하고 있다[1].

하지만 본 논문의 플레이트 거더교에 적용된 I형 단면 은 도로교설계기준에서 제시하는 수평보강재 설치에 따 른 복부판의 최소두께 기준을 만족하도록 설계하고 시공 하였으나 준공 후 얼마 지나지 않아 Fig.1에 나타난바와 같이 G9, G11의 복부판에 국부적으로 좌굴변형이 발생 하였다.



Fig. 1. Bucking shape of web plate in plate girder bridge

본 구조물에 발생한 국부좌굴은 지점부의 반력에 대한 복부판의 두께부족, 수직 및 수평보강재의 보강범위 부 족, 플레이트 거더의 수평이동에 의한 지점부 반력의 작 용위치 변경 등에 의해 발생한 것으로 판단된다. 실제 공 용 중인 플레이트 거더교나 강박스교에서는 이러한 원인 으로 인해 지점부의 좌굴현상이 종종 발생하고 있는 실 정이다.

기존에 수행된 복합적층 패널이나 강재의 구조적 좌굴 거동에 관한 주요 연구내용을 살펴보면 다음과 같다.

허성필 등(1999)는 유한요소법을 이용하여 적층메카 니즘과 섬유배향각, 적층순서 등이 복합적층판과 보강된 복합적층 패널의 좌굴 및 좌굴 후 거동에 미치는 영향을 체계적으로 해석하고 거동특성을 분석하였다[2].

주석범 등(2015~2018)는 역T형, ㄷ형, 파형, ㄹ형,

벌집, 미형의 여러 가지 형태의 리브를 갖는 보강판에 대 하여 좌굴해석을 수행한 뒤 좌굴모드와 좌굴하중을 비교 분석한 결과 미형태가 가장 효과적이었으며, 이 형태를 실제 교량에 적용하여 분석한 결과 기존 폐단면 리브의 좌굴하중 이상을 확보 할 수 있는 가장 경제적인 미형 단 면을 제안하였다[3-4].

곽재영 등(2018)는 폐단면리브로 보강된 곡판이 단면 회전강성의 구속효과로 인한 좌굴강도 증가효과와 곡판 의 곡률에 따른 좌굴강도 계수를 고려하여 좌굴강도를 추정하는 방법론을 이론적으로 제안하였다[5].

김도형 등(2018)는 강박스 거더를 종방향 보강재로 보강하는 대신에 보강재 위치를 따라 종방향으로 판을 절곡하는 새로운 형식의 강박스거더 압축플랜지를 개발 하여 2번, 4번 절곡한 플랜지에 대하여 좌굴해석 결과 절 곡각도의 증가에 따라 좌굴강도가 증가함을 분석하였다. 또한 좌굴해석을 통해 절곡 플랜지의 좌굴강도를 결정하 는 설계곡선식을 제안하였다[6].

하지만 기 수행된 연구결과는 본 거더교의 실제 형상 과 경계조건 등이 서로 상이므로 지점부의 복부판에 발 생한 국부좌굴의 원인을 정확하게 분석하기에는 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 플레이트 거더교의 보강 전과 후에 대한 실제 형상을 유한요소법으로 해석하고 분석하 여 지점부의 복부판에서 발생한 국부좌굴의 원인분석 및 기 보강방안의 적정성을 분석 후 추가 보강방안을 제시 하고자 한다.

2. 복부판의 국부좌굴 및 전단좌굴

플레이트 거더교의 지점부는 받침부의 반력에 의하여 복부판이 압축응력 상태에 있으므로 국부좌굴을 검토해 야 한다. Fig.2 중 (a)는 복부판의 두께나 수평보강재의 설치 개수가 부족하여 복부판이 휩응력에 의한 국부좌굴 이 발생한 형상이며, (b)는 복부판에 전단좌굴이 발생할 때 여기에 단순지지 조건을 만족하기 위해 필요한 소요 휨 강성을 확보한 중간수직보강재를 설치할 경우 Nodal Line이 형성되어 복부판의 전단 좌굴강도가 증가되는 모 습을 보여주고 있다.

플랜지가 항복응력이나 국부좌굴응력에 도달하기 이 전에 복부판에 국부좌굴이 발생하는 경우에는 복부판이 분담해야 하는 휨모멘트를 플랜지가 대신 받을 수도 있 으므로 복부판에 국부좌굴이 발생한 이후에도 플레이트 거더교는 추가적으로 휨모멘트를 받을 수 있다. 이와 같 은 영향을 고려하여 도로교설계기준에서는 복부판의 휨 응력에 의한 국부좌굴을 허용하지 않는 대신 국부좌굴에 대한 안전계수를 낮추는 방법을 사용하여 이 같은 후 좌 굴강도를 간접적으로 고려하였다.





(a) Local buckling of web plate by bending stress(b) Shear bucking of web plate with vertical stiffness

복부판에 순수 휩응력이 가해질 경우의 단순지지 직사 각형 판의 탄성좌굴응력 f_{cr} 은 Eq.(1)과 같고, 수평보강 재가 없는 경우에 대하여 b/t의 관계식으로 다시 수정하 여 나타내면 다음 Eq.(2)-(3)와 같다[1].

$$f_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(\frac{b}{t})^2}$$
(1)

$$\frac{f_{cr}}{n} = \frac{k}{n} \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(\frac{b}{t})^2} \le f_a \tag{2}$$

$$\sqrt{\frac{k}{nf_a}\frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)}} \le \frac{b}{t} \tag{3}$$

Where, f_{α} denotes elastic buckling stress, E denotes elastic factor, μ denotes Poisson's ratio, t denotes plate thickness, b denotes flange width , n denotes safety factor, f_a denotes allowable tensile stress.

본 연구에서는 상기와 같이 플레이트 거더의 복부판에 서 발생하는 국부좌굴을 방지하기 위해서 도로교설계기 준에서 제시하는 최소두께 기준의 만족여부와 실제 교량 의 세부적인 유한요소해석을 해석을 수행하여 지점부의 복부판에서 발생한 국부좌굴의 원인을 분석하였다.

3. 플레이트 거더교의 좌굴거동 분석

3.1 플레이트 거더교의 최소두께 분석

도로교설계기준에서는 플레이트 거더교의 플랜지와 복부판에서 발생할 수 있는 국부좌굴을 방지하기 위해서 최소두께 기준을 제시하고 있으며 플레이트 거더교에 적 용된 단면의 상부플랜지의 두께는 t_{fu} =14mm, 복부판 두께는 t_w =12mm, 하부플랜지 두께는 t_{fl} =19mm, 상부 플랜지폭은 b_{fu} =300mm, 하부 플랜지폭은 b_{fl} =400mm 이고 높이가 h_w =1,268mm인 I형으로 상세 제원은 Table.1에 세부적으로 나타내었다.

Table 1. Dimension of section I

Steel	b_{fu}	$b_{fu}{}^{\prime}$	b_{fl}	$b_{fl}^{\ \prime}$	h_w	t_{fu}	t_w	t_{fl}	
SM49	300mm	144m	400m	194m	1,268m	1/mm	12mm	10mm	
0	J0011111	m	m	m	m	1411111	1211111	1 /11111	

지점부 플레이트 거더에 적용된 플랜지와 복부판의 최 소두께를 분석하기 위하여 도로교설계기준에 제시된 기 준인 수평보강재가 없을 때의 강재 SM490 복부판의 최 소두께 기준인 $t_w \ge b/129 = h_w/129$ 과 자유돌출폭 (b_{fu}', b_{fl}') 에 대한 최소두께 기준인 $t_{fu} \ge b_{fu}'/16$ 과 $t_{fl} \ge b_{fl}'/16$ 에 대하여 각각 분석한 결과는 Table.2에 서와 같이 만족하는 것으로 나타났다.



Fig. 3. Modeling of 3D analysis of plate girder bridge

Web thickness			Up t	per flaı hicknes	nge s	Lower flange thickness		
treq'd	tuse d	Revie w	treq'd	tused	Revie w	treq'd	tused	Revie w
h _w /129 =9.8mm	12m m	O.K	b _{fu} '/16 =9.0m m	14mm	O.K	b _{fl} '/16 =12m m	19mm	O.K

Table 2. Review of the minimum thickness for each part in section I

3.2 유한요소모델 및 경계조건

상기의 분석결과와 같이 플랜지와 복부판의 최소두께 는 설계기준에서 제시하는 기준을 만족하는 것으로 분석 되었으나 복부판에서 실제로 좌굴이 발생한 원인을 제대 로 분석하기 위해서는 유한요소법을 사용하여 플레이트 거더교의 형상과 상하부 플랜지와 수직 및 수평보강재 등을 상세하게 모델링하고 선형탄성 좌굴해석을 수행하 여 보강 전과 후에 대한 좌굴하증의 산정과 좌굴안정성 분석이 필요하다.

본 연구의 플레이트 거더교는 3D 범용유한요소해석 프로그램인 LUSAS 17.0을 사용하여 상세 구조해석을 수행하였다[7].



Fig. 4. Drawing and modeling of before and after reinforcement

(a) Drawing and modeling before reinforcement(b) Drawing and modeling of after reinforcement

플레이트 거더교의 전경간 해석모델은 Fig.3과 같이 4 절점 Thick Shell요소를 사용하여 모델링하였다. 본 해 석모델링은 각 절점마다 6자유도(*d_x*,*d_y*,*d_y*,*θ_y*,*θ_y*)를 가 지고 있으며 교량받침부인 가동단과 고정단은 각각 (1,1,1,0,0,0), (0,1,1,0,0,0)으로 적용하고 가로보 설치부 9개소와 상부플랜지 부분은 연속조건을 고려하여 (0,0,1,1,1,0)의 자유도를 적용하였다.

Fig.4는 지점부의 상세 단면도와 세부 모델링을 나타 내고 있으며 이 중 (b)와 같이 지점부의 복부판에 수평보 강재와 수직보강재를 추가하면 Fig.2 (b)와 같이 복부판 에 Nodal line이 형성되어 좌굴강도가 증가된다. 따라서 Fig.4 (b)의 지점부의 보강 후 단면과 같이 교량받침부 상단에는 t=15mm 2열, 가각부에는 t=20mm 2열을 수 직방향으로 추가 설치하여 복부판의 전단 좌굴강도를 증 가시키고 가각부에는 응력집중현상이 발생할 수 있으므 로 이를 최소화하기 위해서 사다리꼴 단면을 추가 보강 하였다.

또한 복부판에는 휨응력에 의해 발생할 수 있는 국부 좌굴의 영향을 최소화하기 위하여 t=15mm와 t=20mm 의 수평보강재를 추가하였다.

3.3 해석모델의 작용하중

플레이트 거더의 상부플랜지에 작용하는 고정하중은 콘크리트 슬래브 바닥판, 포장, 강재자중을 적용하고 활 하중은 DB24 영향선의 재하조건과 종거값을 고려하여 직접 계산하고 적용하였다. 이에 대한 각각의 하중 재하 도는 Fig.5와 같다.

여기서 상부플랜지에 작용하는 고정하중은 W_{d1}=82.869kN/m², W_{d2}=62.152kN/m², W_{d2}=49.721kN/m² 이고 활하중은 전륜하중(P_f)과 후륜 하중(P_f)으로 구분하여 지점부에 최대 반력이 발생하도록 상부플랜지의 면적당 작용하는 하중인 P_f=488.2kN/m², P_r=1952.8kN/m²으로 변환하여 각각 적용시켰다.



Fig. 5. Figure of load distribute in plate girder bridge (a) Dead load(concrete slab, pavement, self-weight of steel) (b) Live load(DB24)

3.4 좌굴거동 분석

본 연구에서는 플레이트 거더의 임계하중과 자굴형상 을 구하기 위해 좌굴 고유치 해석을 수행하였다. 해석은 보강 전과 보강 후의 모델에 대하여 각각 수행하였으며, 각 모델의 좌굴 모드는 Fig.6과 같으며 그 중 (a)는 보강 전 모델의 1-mode의 고유치(λ)=0.7025는 1.0보다 작 으므로 임계좌굴하중(P_{cr}=λ·P)이 작용하중(P) 보다 작아 면외 좌굴이 발생하여 좌굴안정성에 문제가 있는 것으로 분석되었다. 이는 받침부의 지점보강재와 받침부 중심위 치의 이격거리가 커서 발생한 것으로 판단된다.



Fig. 6. Local bucking of before and after reinforcement (a) First bucking mode of before reinforcement (b) Second buckling mode of before reinforcement (c) First bucking mode of after reinforcement (d) Second buckling mode of after reinforcement

이 형상은 Fig.1의 복부판 좌굴형상과 거의 동일한 형 상을 나타내었다. 또한 (b)의 2-mode에서는 *λ*=1.1838 로 임계좌굴하중이 작용하중보다 큰 것으로 분석되었다. 하지만 보강 후 모델은 앞에서 언급한 바와 같이 받침 부 상단에 2열의 지점보강재와 수직보강재 및 사다리꼴 단면이 추가됨에 따라 (c)와 같이 1-mode에서의 고유치 는 *λ*=1.5272로 이는 보강 전의 고유치 값보다 2배 이 상 증가하여 좌굴발생의 우려가 없으며 좌굴에 대한 안 정성이 확보되어 기 적용된 보강방법은 적정한 것으로 분석되었다.

상기 Table 3은 보강 전과 후의 해석모델의 1-mode~5-mode에 대한 고유치의 결과값을 세부적으 로 나타내었으며, 1-mode~3-mode까지는 보강 후의 모델의 해석결과가 보강 전보다 고유치가 2배 이상 크게 나타나는 경향을 보였다.

Table	3.	Eige	nvalı	ıe	of	per	mode	in	mode	l of	bei	fore
		and	after	re	ein	forc	ement	;				

Model	(λ ₁)1-mode eigenvalue	(λ ₂)2-mode eigenvalue	(λ ₃)3-mode eigenvalue	(λ4)4-mode eigenvalue	(λ ₅)5-mode eigenvalue
Before reinforcement	0.7025	1.1838	1.8069	2.1326	2.9107
After reinforcement	1.5272	2.3111	3.0123	3.4524	3.4632

4. 보강방안

상기 해석결과와 같이 지점부 보강재와 수직보강재를 추가 보강한 결과 좌굴하중이 증가하는 경향을 나타내었



- Fig. 7. Local bucking of plate girder added plate and bolt
 - (a) Reinforcement plan diagram
 - (b) First bucking mode of plate girder
 - (c) Second buckling mode of plate girder

다. 하지만 현재 보강된 상태에서도 지점부 복부판에는 일부 좌굴이 발생한 상태 그대로 존치되어 있는 상태이 다. 이는 시각적이나 구조적 안정성 측면에서 불리한 상 태이므로 이에 대한 추가 보강방안이나 대책이 필요한 실정이다.

따라서 Fig.7 (a)와 같이 복부판에 덧댐판을 추가하고 고장력 볼트로 연결하는 보강방안을 적용하고 이에 대한 재 구조해석을 수행하였다.

재 해석 결과는 Fig.7 (b), (c)의 1~2-mode에서 좌굴 이 지점부에 복부판 좌굴은 발생하지 않고 경간 중앙부 의 복부판에서 좌굴이 발생하였다. 각 모드별 고유치 결 과는 λ₁=3.5299, λ₂=3.6891이다. 이 결과는 Fig.6 (c)에 나타난 보강 후 고유치 값보다 2배 이상 큰 값이다. 이는 복부판에 덧댐판이 추가 설치됨에 따라 복부판의 단면강 성이 커져 국부좌굴강도에 대한 저항력이 크게 증가되는 효과이다.

따라서 이러한 추가 보강방법은 지점부에 발생하는 좌 굴발생 현상을 최소화 시켜 좌굴에 대한 저항강도를 높 이는 방법으로는 최적인 것으로 분석되었다.

5. 결론

본 연구는 플레이트 거뎌교의 지점부에서 지점보강재 와 수직 및 수평보강재의 보강범위 부족과 플레이트 거 더의 수평이동에 의한 지점부 반력의 작용위치 변경 등 에 의해 받침부의 복부판에서 발생하는 국부좌굴거동의 원인 및 보강방안에 대하여 수치해석을 수행하고 분석하 였다. 수치해석은 보강 전과 보강 후 및 추가 보강방안을 수립한 안에 대하여 각각 해석하였으며 그 결과는 다음 과 같다.

첫째, I형 거더에서 설계기준에 제시된 웨브와 플랜지 의 최소두께 기준 및 자유돌출폭 기준을 만족하더라도 받침부의 반력 작용위치가 이동 될 경우나 수직 및 수평 보강재 배치범위가 작으면 복부판에 전단좌굴이나 휩응 력에 의한 국부좌굴이 발생할 수 있으며 이는 보강 전의 좌굴거동에 대한 유한요소해석으로 분석되고 검증되었다.

둘째, I형 거더에 수평 및 수직보강재를 추가 보강함에 따른 좌굴거동의 분석결과 보강 후의 단면이 보강 전 보 다 고유치 해석 결과 값이 2배 이상 증가하므로 전단좌 굴과 휨의 국부좌굴에 대한 저항강도가 훨씬 유리하고, 지점부에 추가된 수직보강재는 Nodal line의 형성과 하 중분산 효과를 발생하게 하여 임계좌굴하중이 더 큰 것 으로 분석되었다.

셋째, 보강 전과 후에는 지점부의 복부판에 수평 및 수 직 보강재를 추가 보강하고도 지점부 일부에 좌굴의 흔 적이 남아 있으므로 이를 개선하기 위한 추가 보강방안 으로 복부판에 덧댐판을 추가하여 단면강성을 증가시킨 결과 국부좌굴에 대한 저항력이 크게 증가하여 1~2-mode의 좌굴이 지점부의 복부판에 발생하지 않고 중앙부의 복부판에서 발생하였다. 따라서 추후 공용중인 플레이트 거티쿄에 이와 유사한 현상이 발생할 경우 이 보강방안은 매우 효과적일 것으로 기대된다.

References

- Korean Institute of Bridge and Structural Engineers, Korea Highway Bridge Design Code, pp.3-37, 3-98~99, 3-105, 2010.
- [2] S. P. Heo, W. H. Yang, K. D. Sung, M. R. Cho, "A Study on the Buckling and Postbuckling Behaviors of Laminated Composite Plate and Stiffened Laminated Composite Panels by Finite Element Method" *Journal* of the Computational Structural Engineering, Vol.12, No.4, pp.599~606, December 1999.
- [3] S. B. Chu, P. N. Lee, "Buckling Behavior Analys of Stiffened Plates Having Various Types of Ribs", *Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol.2015, No.4, pp.229~232, April 2015. <u>http://db.koreascholar.com/article.aspx?code=299669</u>
- [4] S. B. Chu, P. N. Lee, "Buckling Behavior of Plates Stiffened with the New Type Ribs", *Journal of Korea Society of Steel Construction*, Vol.30, No.1, pp.59~66, February 2018. https://doi.org/10.7781/kjoss.2018.30.1.059
- [5] A. N. Andico, J. Y. Kwak, B. H. Choi, "Parametric Study on Buckling Behavior of Longitudinally Stiffened Curved Panels by Closed-section Ribs", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.19, No.1, pp.714~721, January 2018. http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.1.714
- [6] D. Y. Kim, S. C. Lee, "Elastic Buckling and Ultimate Strength Behaviors of Steel Box Girders with Folded Compression Flanges", *Journal of Korea Society of Steel Construction*, Vol.30, No.4, pp.217~224, August 2018.

http://dx.doi.org/10.7781/kjoss.2018.30.4.217

[7] LUSAS. Version 17.0 Manual, FEA Ltd., 2019. <u>http://www.lusas.com</u>

옥 재 호(Jae-Ho Ok)

[정회원]



- 1998년 8월 : 영남대학교 토목공 학과 (공학석사)
- 2019년 3월 : 서울시립대학교 대 학원 토목공학과 (박사과정)
- 2004년 8월 ~ 2015년 9월 : (주) 평화엔지니어링 근무
- 2015년 10월 ~ 현재 : (주)동성엔 지니어링 상무

〈관심분야〉 토목구조, 구조진동

임 성 순(Sung-Sooon Yhim)

[정회원]



- 1987년 8월 : 서울대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 1993년 1월 ~ 1999년 3월 : 서울 시립대학교 토목공학과 조교
- 1999년 4월 ~ 2004년 8월 : 서울 시립대학교 토목공학과 부교수
- 2004년 9월 ~ 현재 : 서울시립대 학교 토목공학과 교수

〈관심분야〉 토목구조, 구조진동