

압축과 휨을 동시에 받는 강관 T조인트 극한강도 상호작용

김경식*

¹청주대학교 토목공학과

Ultimate Strength Interaction of Steel Tubular T-Joint Subjected to Concurrent Action of Compression and Bending

Kyung-Sik Kim^{1*}

¹Department of Civil Engineering, Cheongju University

요약 수직 및 수평의 원형단면 강관으로 구성된 공간프레임 타워는 강재량을 줄이면서도 풍하중의 영향을 완화시킬 수 있는 장점으로 다양한 목적으로 널리 적용되고 있다. 이러한 공간프레임 타워를 하나의 타워구조로 거동하게 하기 위해서는 수직 강관과 수평 강관의 연결부인 강관조인트의 강도 확보가 중요하다. 본 연구에서는 압축과 휨이 동시에 작용하는 강관 T조인트의 강도평가를 수행하였다. AISC, Eurocode3, ISO 19902의 3가지 강관조인트 설계기준을 검토하고, 주강관과 지강관의 세장비를 주요 매개변수로 한 비선형 유한요소해석을 통하여 축력과 모멘트에 대한 극한강도 상호작용을 설계식으로 제안하였다.

Abstract Owing to the advantages of reduced weight and wind effect, the space-framed towers that consist of vertical and horizontal members of circular hollow tubular sections have been adopted widely for various purposes. It is critical to guarantee the strengths of tubular joints where vertical and horizontal members are connected structurally to make the entire space-framed system behave as a single tower structure. In this study, a strength evaluation was conducted for T-type tubular joints subjected to the concurrent action of compression and bending. Three of the available design codes, i.e., AISC, Eurocode 3, ISO 19902 were investigated and a design equation was suggested for an ultimate strength interaction between the axial force and bending moment based on nonlinear finite element analyses by selecting the slenderness ratios at the joints as major parameters.

Keywords : spaced-framed tower, hollow tubular section, T-joint, design code, ultimate strength

1. 서론

다양한 구조물에 적용되는 단일 실린더형 타워구조는 상부하중의 증가와 더불어 직경이 대형화될 수 밖에 없다. 이러한 직경 대형화는 강관의 좌굴 내하력 감소로 이어져 강관의 두께 증가가 불가피하고, 바람에 의한 투영면적이 넓어지므로 타워 자체가 받는 풍하중의 크기가 증가하는 등의 문제점이 발생할 수 있다. 이러한 대단면 타워구조의 대안으로 소구경 강관의 조합으로 구성되는

공간프레임(space frame) 타워시스템이 제안될 수 있다. 이러한 구조시스템은 상대적으로 작은 단면을 가지는 다수의 원형강관을 배치하고 각각의 강관이 수평재로 연결된 구조시스템을 의미한다. 멀티기둥 타워구조는 기존의 대단면 실린더형 강관보다 강재량을 줄이면서도 풍하중의 영향을 완화시킬 수 있는 장점이 있다[1~6].

멀티기둥 시스템이 하나의 타워구조로 거동하는데 있어서 수직 강관을 서로 연결하여 강성을 유지해 주는 수평재의 설치 필수적이다. 각각의 강관기둥과 수평재의

이 논문은 2014-2015학년도에 청주대학교 산업과학연구소가 지원한 학술연구구조성비(특별연구과제)에 의해 연구되었음.

*Corresponding Author: Kyungsik Kim (Cheongju Univ.)

Tel: +82-43-229-8472 email: kkim@cju.ac.kr

Received December 11, 2015

Revised January 4, 2016

Accepted January 5, 2016

Published January 31, 2016

연결부분을 조인트(joint)라고 하는데 멀티기둥 구조시 스템에서 있어서 중요하게 강도검토가 이루어져야 할 구조요소이다. 조인트에서 강관기둥 부재를 주강관(chord)라 하고 수평재는 지강관(brace)라 하는데, 연결 형태에 따라 T 또는 Y 조인트, K 조인트, X 조인트로 분류되고 있다. Fig. 1에 전형적인 T 조인트의 형상과 기호표기를 보였다.

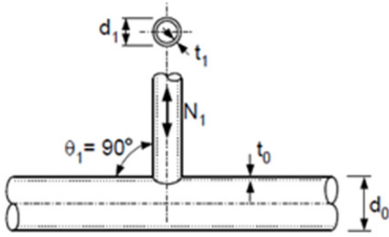


Fig. 1. T joint of circular section tubular members

2. 강관조인트 설계기준

강관조인트의 설계기준은 그 기하학적 조인트종류와 파괴형상모드, 작용하중의 조합종류에 따라 분류되고 있다. T 조인트의 지강관에 축방향 하중 및 모멘트하중이 작용할 때, 주강관 펀칭전단(chord punching shear) 파괴모드가 아닌 주강관 소성화(chord plastification) 파괴모드에 의해 강도가 결정되는 경우의 설계강도를 AISC[7], Eurocode 3[8], ISO 19902[9]의 순으로 살펴보고자 한다. 먼저 AISC는 조인트에서 지강관의 축방향 공칭강도 P_n 및 면내(in-plane) 휨모멘트 공칭강도 M_n 을 식 (1)과 (2)에 보인 바와 같이 제안하고 있다.

$$P_n = \frac{f_{y0}t_0^2}{\sin\theta_i} (3.1 + 15.6\beta^2)\gamma^{0.2}Q_f \dots\dots\dots (1)$$

$$M_n = \frac{f_{y0}t_0^2}{\sin\theta_i} (5.39\beta d_i)\gamma^{0.5}Q_f \dots\dots\dots (2)$$

여기서, f_{y0} 는 주강관 항복응력, t_0 는 주강관 두께, θ_i 는 주강관과 지강관이 이루는 각도를 각각 나타내고, 계수 β 와 γ 는 $\beta = d_i/d_o$, $\gamma = d_o/2t_0$ 로 각각 정의된다. d_o 와 d_i 는 주강관 및 지강관의 외부직경을 각각 의미한다. 식 (1)과 식(2)에서 Q_f 는 주강관의 응력 상호작용계수로 압

축력 또는 인장력이 작용하는 경우 각각 식 (3a), (3b)와 같이 주어진다.

압축;

$$Q_f = 1 - 0.3U(1 + U) \dots\dots\dots (3a)$$

인장;

$$Q_f = 1 \dots\dots\dots (3b)$$

여기서,

$$U = \left| \frac{P_{ro}}{F_c A_0} + \frac{M_{ro}}{F_c S} \right| \dots\dots\dots (3c)$$

식 (3c)에서 P_{ro} 및 M_{ro} 는 주강관에 작용하는 축방향 하중 및 모멘트하중을 각각 나타낸다. A_0 는 주강관 단면적, S 는 탄성단면계수를 각각 의미한다. F_c 는 항복응력으로 LRFD 설계시 항복응력의 100%를, ASD 설계시에는 60%를 취한다. 동일한 조건에서 Eurocode 3의 1-8 Design of Joints에서는 지강관의 축방향 공칭강도 및 면내 휨모멘트 공칭강도는 식(4) 및 식(5)와 같이 제안하고 있다.

$$P_n = \frac{f_{y0}t_0^2}{\sin\theta_i} (2.8 + 14.2\beta^2)\gamma^{0.2}k_p/\gamma_{M5} \dots\dots\dots (4)$$

$$M_n = 4.85 \frac{f_{y0}t_0^2 d_i}{\sin\theta_i} \sqrt{\gamma} \beta k_p / \gamma_{M5} \dots\dots\dots (5)$$

식 (4)와 식(5)에서 계수 β 와 γ 는 식 (1)과 식(2)와 동일하게 정의된다. γ_{M5} 는 재료계수로서 1로 주어지고, 계수 k_p 는 주강관에 압축력 또는 인장력이 작용하는 경우를 분리하여 각각 식 (4a), (4b)와 같다.

압축;

$$k_p = 1 - 0.3n_p(1 + n_p), k_p \leq 1 \dots\dots\dots (6a)$$

인장;

$$k_p = 1 \dots\dots\dots (6b)$$

여기서, $n_p = (\sigma_{p,El}/f_{y0})/\gamma_{M5}$, 이고 $\sigma_{p,El}$ 는 다시 식 (7)로 정의된다.

$$\sigma_{p,El} = \frac{N_{p,El}}{A_0} + \frac{M_{0,El}}{S} \dots\dots\dots (7)$$

여기서, $N_{p,El}$ 및 $M_{0,El}$ 는 AISC의 계수 U 에서 정의된 것과 유사하게 주강관에 작용하는 축방향하중 및 모멘트

하중을 각각 나타낸다.

한편 ISO 19902에서도 조인트에서 지강관 축방향 공칭강도를 식(8), 면내 휨모멘트 공칭강도를 식(9)와 같이 제시하고 있다.

$$P_n = \frac{f_{y0}t_0^2}{\sin\theta_i} Q_u Q_f \dots\dots\dots (8)$$

$$M_n = \frac{f_{y0}t_0^2 d_i}{\sin\theta_i} Q_u Q_f \dots\dots\dots (9)$$

식 (8)과 식(9)에서 Q_u 는 지강관의 강도계수로서 지강관의 압축 또는 인장 상태에 따라 각각 식 (10a), (10b)와 같이 주어진다.

압축;

$$Q_u = (1.9 + 19\beta) Q_\beta^{0.5} \dots\dots\dots (10a)$$

인장;

$$Q_u = 30\beta \dots\dots\dots (10b)$$

여기서,

$\beta > 0.6$ 일 때,

$$Q_\beta = \frac{0.3}{\beta(1 - 0.833\beta)} \dots\dots\dots (10c)$$

$\beta \leq 0.6$ 일 때,

$$Q_\beta = 1 \dots\dots\dots (10d)$$

또한 식 (8)과 식(9)에서 Q_f 는 주강관의 하중계수(force factor)로서 식 (11)와 같다.

$$Q_f = 1 - 0.03q_A^2 \dots\dots\dots (11)$$

여기서,

$$q_A^2 = \left[C_1 \left(\frac{P_c}{P_y} \right)^2 + C_2 \left(\frac{M_c}{M_p} \right)_{ipb}^2 + C_2 \left(\frac{M_c}{M_p} \right)_{opb}^2 \right]^{0.5} \gamma_{R,q} \dots\dots\dots (12)$$

식 (12)에서 P_c 및 M_c 는 주강관에 작용하는 압축력 및 모멘트, P_y 는 주강관의 소성단면력($=f_{y0}A_0$), M_p 는 주강관의 소성모멘트를 의미하고 $\gamma_{R,q}$ 는 부분저항계수

로서 1.05로 주어진다. 아래첨자 ipb 는 면내 휨(in-plane bending), opb 는 면외 휨(out-of-plane bending)을 각각 나타낸다. 계수 C_1 , C_2 는 T 조인트인 경우 각각 25, 11의 값을 갖는다.

분석된 세 가지 설계기준 모두 조인트 강도는 주강관에 작용하는 축력 및 모멘트의 영향을 받는 식으로 표현됨을 알 수 있다. ISO 19920의 경우 지강관이 인장 또는 압축 상태를 구분하여 강도산정식을 제공하고 있다.

3. 예제 해석

앞서 서술된 T 조인트에 대한 각각의 설계강도제한식으로 산정된 공칭강도를 ABAQUS[10]를 이용한 비선형 해석을 통해 비교·검토한다. 위 3가지 설계기준 모두 지강관의 압축력 및 모멘트와 함께 주강관에 축방향 하중이 작용하는 경우까지 고려된 것을 알 수 있는데, 본 연구에서는 주강관의 축력은 고려되지 않았다. 본 연구에서 대상으로 하는 멀티기둥 풍력타워 시스템에서 개별 수직강관(주강관) 부재는 그 개수에 상관없이 직경 2 m 급, 수평강관(지강관) 부재는 1 m 급으로 가정하였다. 주강관 및 지강관 모두 지름의 5배만큼 길이를 조인트모델에 포함시켰다. Table 2에는 수치예제에 사용되는 부재의 치수와 재료상수를 보여준다.

강관부재는 지름-두께비로 표현되는 세장비에 따라 조밀단면, 비조밀단면, 세장단면으로 분류된다. Eurocode 3의 경우 각각 Class 1, 2, 3에 해당되는데 Table 2에 정리되었듯이 항복응력의 크기에 따라 결정된다. 본 연구에서는 세 범주에 속하는 각 대표단면을 설정하여 예제해석을 수행하였다. 대표단면으로 설정된 세장비 33, 46.2, 59.4의 명칭을 Type A, B, C로 하였고 Table 3에는 그 때의 주강관 및 지강관의 지름과 두께의 수치를 보였다.

Table 1. Dimension and material property of model

Elastic modulus E	200 GPa
Chord length L_0	10,000 mm
Brace length L_1	5,000 mm
Chord diameter d_0	2,000 mm
Chord thickness t_0	33.67 ~ 60.61 mm
Brace diameter d_1	1,000 mm
Brace thickness t_1	16.84 ~ 30.30 mm
Yield stress f_y	355 MPa
Poisson's ratio ν	0.3

Table 2. Class category for circular hollow sections

Yield stress	Class 1	Class 2	Class 3
$f_y = 235MPa$	$d/t \leq 50$	$d/t \leq 70$	$d/t \leq 90$
$f_y = 315MPa$	$d/t \leq 37.5$	$d/t \leq 52.5$	$d/t \leq 67.5$
$f_y = 355MPa$	$d/t \leq 33$	$d/t \leq 46.2$	$d/t \leq 59.4$

Table 3. Three different joint dimensions

TYPE		Chord $d_0=2000mm$	Brace $d_1=1000mm$
A	$d/t = 33.0$	$t_0 = 60.61 mm$	$t_1 = 30.30 mm$
B	$d/t = 46.2$	$t_0 = 43.29 mm$	$t_1 = 21.64 mm$
C	$d/t = 59.4$	$t_0 = 33.67 mm$	$t_1 = 16.84 mm$

Table 4. Notation for joint combination

	Chord (d_0/t_0)	Brace (d_1/t_1)
Type AA	33.0	33.0
Type BA	46.2	33.0
Type BB	46.2	46.2
Type CA	59.4	33.0
Type CB	59.4	46.2
Type CC	59.4	59.4

설계기준의 조인트강도는 주강관 두께 t_0 에 영향을 받고, 지강관 두께 t_1 에는 영향을 받지 않는다. 즉, 앞서 설계식에서 확인할 수 있듯이 주강관 세장비에 따라 결정될 뿐 지강관 세장비는 고려되지 않는다. 본 연구에서는 지강관이 먼저 국부좌굴이 발생하지 않도록 지강관의 세장비를 주강관의 세장비보다 크기 않게 설정하였다. 극한강도해석을 위한 6개의 조인트 모델의 각 세장비는 Table 4에 표시되었는데, 지강관은 주강관보다 먼저 파괴되지 않는다는 가정을 구현하기 위한 조합이다. Type 뒤 첫째, 둘째 알파벳은 주강관 및 지강관의 세장비를 각각 나타낸다.

Table 4. Material properties for multi-linear model

F_y (MPa)	F_u (MPa)	E (GPa)	ϵ_y	E_{sh} (GPa)	ϵ_{sh}
355	520	200	0.00178	6.667	0.0178

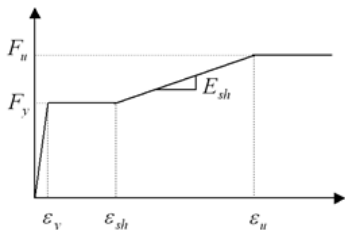


Fig. 2. Multi-linear constitutive relationship

Kim et al. (2014)의 연구에 의하면 본 예제 수준의 강관조인트는 펀칭전단보다는 소성화에 의한 파괴가 지배한다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 AISC와 Eurocode 3에서 제공되는 강도산정식에도 마찬가지로 확인되었다. ISO 19902에서는 펀칭전단에 대한 별도의 강도산정식을 제공하고 있지 않다. 소성화에 의한 극한강도 해석을 위해 사용된 비선형 재료모델은 Table 4와 Figure 2에 제시되었다. 재료의 항복응력은 극한강도해석에 지배적인 변수이므로, 우선적으로 본 연구에서는 고평부(plateau)를 통해 뚜렷한 항복점을 가지는 도로교 설계기준[10]상의 SM520 수준의 강종을 선정하였다. 상업용 유한요소 프로그램 ABAQUS[11]를 이용하여 실린더 형태의 주강관에 곡물이 고려되어 절단면을 확보한 지강관을 접합하여 조인트를 모델링하였다. 대변형(large deformation)을 고려하기 위하여 유한 변형도 요소(finite strain element)인 S4R을 사용하였다.

기하학적 형상을 보여주기 위한 대표모델로서 Figure 3에 Type BB 모델에 면내 모멘트를 가했을 때 극한상태에서의 von Mises 응력분포 및 변형형상을 보였다.

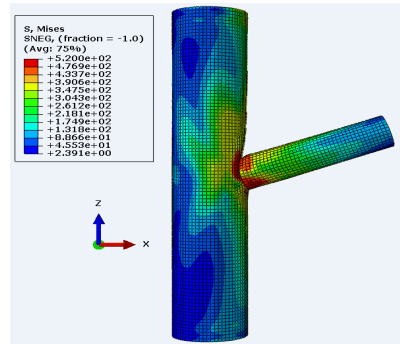


Fig 3. Deformed shape and von Mises stress distribution of Type BB model

Figure 4에는 T조인트의 지강관에 압축력을 재하하였을 때 각 모델에 대한 힘과 변위의 관계를 보여준다. 최초 정점을 넘어서 저항강성이 다시 증가하여 최종 강도에 도달하는 경향을 볼 수 있다. 이러한 거동은 크라운에 수직하중을 받는 아치구조에서 나타나는 snap-through buckling과 유사한 것으로 주강관 벽체가 원주 내부로 변형이 발생하는 순간에 발생된다[3]. 사용성 등의 평가를 근거로 본 연구에서는 최초의 정점, 즉 주강관의 snap-through buckling 강도를 극한강도로 평가한다.

Figure 5는 면내 휨모멘트를 가했을 경우 모멘트와

회전변위의 상관관계를 보여준다. 압축력을 가했을 때 처럼 snap-through 현상은 발생하지 않지만 최종 선형구간의 종점을 항복발생시점과 유사하다고 보았을 때, 변형도경화 효과가 극한강도에 미치는 영향이 상당함을 확인할 수 있다.

Figure 6은 압축력과 모멘트가 동시에 작용할 때 극한강도의 상호작용을 보여준다. 극한강도의 평가에서 압축력의 출현은 모멘트 강도의 저하를 초래하고, 마찬가지로 모멘트의 출현은 압축강도의 저하를 초래하게 된다. Figure 6는 이러한 극한강도에 대한 상호작용효과를 정량적으로 보여준다. 이들의 관계는 선형(Linear)도 원형(Circular)도 아닌 관계로 회귀분석(regression analysis)을 통해 다음과 같이 제안될 수 있다.

$$\left(\frac{M}{M_u}\right)^\alpha + \left(\frac{P}{P_u}\right)^\alpha = 1 \dots\dots\dots (13)$$

여기서 M_u 와 P_u 는 극한 모멘트 및 압축강도를 의미한다. Figure 6에서 확인할 수 있듯이 식 (13)에서 α 의 값은 1.22를 가질 경우 해석으로부터 결정된 극한강도 상호작용 효과를 잘 구현할 수 있는 것으로 파악되었다.

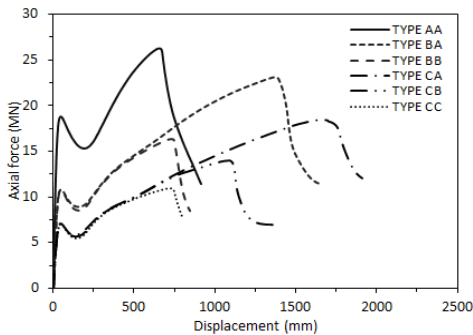


Fig. 4. Axial force versus displacement curve

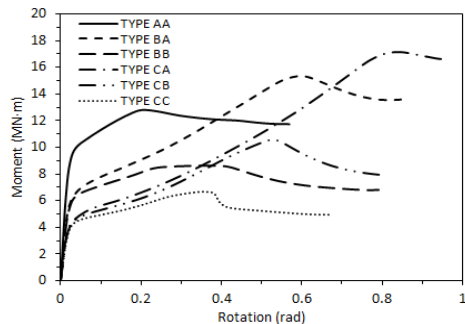


Fig. 5. In-plane moment versus rotation curve

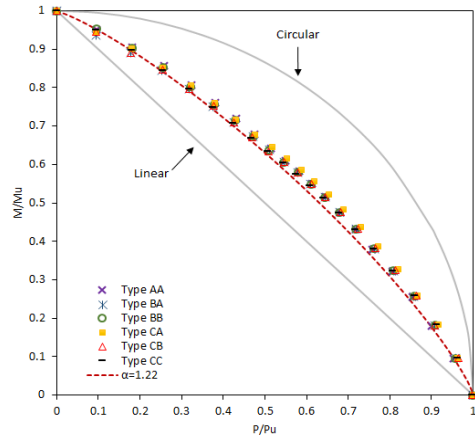


Fig. 6. Ultimate strength interaction curve

5. 결론

수직 및 수평의 원형단면 강관으로 구성된 공간프레임 타워 구조를 대상으로 조인트 부위에서의 축방향강도와 휨강도의 산정방식을 AISC, Eurocode3, ISO 19902의 3가지 강관조인트 설계기준을 통해 검토하였다. 기존 설계기준에서는 축력에 대한 강도와 휨에 대한 강도를 별도로 규정하고 있지만, 축력과 휨모멘트가 동시에 작용할 경우 서로의 강도에 영향을 주고 받게 된다. 본 연구에서는 압축과 휨이 동시에 작용하는 강관 T조인트의 강도평가를 수행하였다. 주강관과 지강관의 세장비를 주요 매개변수로 한 비선형 유한요소해석을 통하여 축력과 모멘트에 대한 극한강도 상호작용을 설계식으로 제안하였다. 극한강도대비 작용하중의 상대크기를 각각 기준으로 축력과 휨모멘트의 상호작용효과는 지수 1.0로 표현되는 선형 관계와 지수 2.0으로 표현되는 원형 관계의 사이에 있는 지수 1.22로 제안되었다.

References

- [1] Kim, J., Hwang, M.O., Choi, B.H., and Kim, K. (2013) Concept design of the new-type 10MW steel wind towers, Proc. of 39th KSCE conference, pp. 2340-2343.
- [2] Kim, J., Park, H.Y., Kim, K. (2014) Performance evaluation of junctions between multi-tubular and cylindrical sections for steel wind tower, Journal of Korea Academia-Industrial Cooperation Society, KAIS, Vol.15, No.3, pp.1764-1769.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.3.1764>

- [3] Kim, K., Park, H.Y., Seo, D. H. (2015) Strength evaluation of T-type tubular joints for circular section multi-column wind towers, Journal of Korean Society of Steel Construction, KSSC, Vol. 27. No. 1, pp. 119-129
DOI: <http://dx.doi.org/10.7781/kjoss.2015.27.1.119>
- [4] S.P. Chiew, and C.K. Soh (2000) Strain concentrations at intersection regions of a multiplanar tubular DX-joint, Journal of constructional steel research, Vol.53, pp.225-244.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0143-974X\(99\)00068-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0143-974X(99)00068-1)
- [5] Shao Y.B., Lie S.T., Chiew S.P., and Cai Y.Q. (2011) Hysteretic performance of circular hollow section tubular joints with collar-plate reinforcement, Journal of constructional steel research, Vol.67, pp.1936-1947.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.06.010>
- [6] Lee, H.D., Lee, J.M., Lee, S.H., and Shin, K.J. (2011) Investigation of the tube-gusset connection in 600 MPa circular hollow section, Procedia Engineering Vol.14, pp.2124-2132.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.267>
- [7] AISC (2011) Steel construction manual, 14th Ed, American Institute of Steel Construction, USA.
- [8] CEN (2005) Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-8: Design of joints, European Committee for Standardization.
- [9] ISO 19902 (2007) Petroleum and natural gas industries-Fixed steel offshore structure, International standard, 1st Ed., Switzerland.
- [10] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2013). Korea roadway bridge design code: limit state design
- [11] Abaqus Inc.(2008), ABAQUS standard user's manual. Version 6.8.-2.

김 경 식(Kyung-Sik Kim)

[정회원]



- 1992년 2월 : 서울대학교 공과대학 토목공학과 (공학사)
- 1994년 2월 : 서울대학교 공과대학 토목공학과 (공학석사)
- 2004년 8월 : Auburn University 토목공학과 (공학박사)
- 1992년 1월 ~ 1999년 8월 : 포항 산업과학연구원 선임연구원
- 2005년 10월 ~ 2009년 8월 : GS건설 책임연구원
- 2009년 9월 ~ 현재 : 청주대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

토목공학, 강구조공학, 강합성구조공학