



# 원형단면 멀티기둥 풍력타워 적용 T형 강관조인트 강도 평가

김경식<sup>1\*</sup> · 박현용<sup>2</sup> · 서동혁<sup>3</sup>

<sup>1</sup>교수, 청주대학교, 토목환경공학과, <sup>2</sup>연구원, 청주대학교, 토목환경공학과, <sup>3</sup>석사과정, 청주대학교, 토목환경공학과

## Strength Evaluation of T-type Tubular Joints for Circular Section Multi-Column Wind Towers

Kim, Kyung Sik<sup>1\*</sup>, Park, Hyun Yong<sup>2</sup>, Seo, Dong Hyuck<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Professor, Dept. of Civil Engineering, Cheongju University, Cheongju, 360-764, Korea

<sup>2</sup>Researcher, Dept. of Civil Engineering, Cheongju University, Cheongju, 360-764, Korea

<sup>3</sup>Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Cheongju University, Cheongju, 360-764, Korea

**Abstract** - Due to reduced self weight and alleviated wind effect, the multi-column wind towers that consist of a number of circular tubes as vertical members interconnected with horizontal brace members can be a substitute for the large-scale single cylinder wind towers. It is critical to guarantee strengths of tubular joints where vertical and horizontal members are structurally connected in order to make the whole multi-column system behave as a single tower structure. In this study, strength evaluation has been conducted for T-type tubular joints that are applicable in multi-column towers. Four of available design codes, i.e., AISC, Eurocode3, ISO 19902, CIDECT have been investigated and predictor equations in the considered design codes were validated and discussed through parametric numerical study on slenderness ratios of chords and braces at joints.

**Keywords** - Multi-column, Wind tower, T-type tubular joint, Ultimate strength, Design code, Slenderness ratio

### 1. 서론

현재 우리나라의 풍력발전은 5~7 MW급을 넘어 10MW급 초대형 풍력발전 시스템을 검토하는 단계에 있다. 주로 단일 무보강 강재 실린더형 형태로 제작되고 있는 풍력타워는 10MW급 풍력발전기에 적용될 경우 최대 직경이 7.75m 내외가 될 것으로 예측된다<sup>[1],[2]</sup>. 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. 이러

한 대단면 풍력타워의 신형식 구조로서 제안되고 있는 것이 멀티기둥 타워시스템이다. 멀티기둥 타워시스템은 Fig. 1에 보인 바와 같이 상대적으로 작은 단면을 가지는 다수의 원형 강관을 배치하고 각각의 강관이 수평재로 연결된 구조시스템을 말한다. 멀티기둥 타워구조는 기존의 대단면 실린더형 강관보다 강재량을 줄이면서도 풍하중의 영향을 완화시킬 수 있는 장점이 있다.

Fig. 1에 보인 바와 같이 멀티기둥 시스템이 하나의 타워 구조로 거동하는데 있어서 수직 강관을 서로 연결하여 강성을 유지해 주는 수평연결재의 설치는 필수적이다. 수평연결재는 원형강관 뿐만 아니라 다양한 단면을 가지는 부재가 이용될 수 있다. 각각의 강관기둥과 수평재의 연결부분을 조인트(joint)라고 하는데 멀티기둥 구조시스템에서 있어서 중요하게 강도검토가 이루어져야 할 구조요소이다. 조인트에서 강관기둥 부재를 주강관(chord)라 하고 수평재는 지강관(brace)라 하는데, 주강관과 지강관의 연결 형태에 따라 강관조인트를 분류한다. 강관조인트의 종류는 Fig. 2에 보인

Note.-Discussion open until August 31, 2015. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on January 9, 2015; revised January 15, 2015; approved on January 23, 2015.

Copyright © 2015 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

Tel. +82-43-229-8472 Fax. +82-43-229-8472

E-mail. [kkim@cju.ac.kr](mailto:kkim@cju.ac.kr)

바와 같이 T 또는 Y 조인트, K 조인트, X 조인트로 분류되고 있다. Fig. 2(a)는 주강관과 지강관이 각각 한 개씩 연결된 것이고 그 각도가 90도를 이루면 T 조인트, 내각을 형성하면 Y 조인트라고 한다. K 조인트(Fig. 2(b))는 두 개의 지강관이 주강관의 같은 쪽에 연결된 것이고, X 조인트(Fig. 2(c))는 두 개의 지강관이 각각 다른 쪽에 연결된 것을 말한다. 여기서, X 조인트의 두 번째 지강관은 첫 번째 지강관에 연속적으로 연결되어야 한다.

강관조인트에 관한 연구는 강관의 단면과 조인트의 종류에 따라 다양하게 진행되었다. Chiew and Soh<sup>[3]</sup>는 다중평면 강관인 이중 X 조인트에 대하여 면내와 면외 지강관에 세 종류의 축방향 하중을 가하는 실험을 통하여 강관조인트 교차지점의 변위를 측정하고 변형률 집중 계수(strain concentration factors)를 제안하고 그 결정방법을 제시했다. Shao *et al.*<sup>[4]</sup>은 용접된 강관조인트가 주강관의 원주방향으로 약한 강성을 보이는 것을 확인하고, 조인트 부분에 원주보강판(collar-plate)의 유무에 따른 실험을 통하여 이력곡선(hysteretic curve)을 구하고 에너지 소산률을 평가했다. Lee *et al.*<sup>[5]</sup>은 고강도강재를 사용하여 원형강관과 플레이트로 연결된 T 조인트를 실험을 통해 다양한 설계기준에서 제공되는 강도와 비교했다.

강관조인트의 강도와 관련하여 국내외 설계기준을 살펴보면 조인트의 종류와 파괴형상, 그리고 지강관의 종류와 하중의 종류에 따라 설계강도식이 분류되고 있다. 강관조인트의 극한강도는 Fig. 3에 보인 바와 같이 극한상태에서 조인트에 발생하는 파괴형상모드에 따라 주강관 소성화(chord plastification)와 주강관 펀칭전단(chord punching shear)

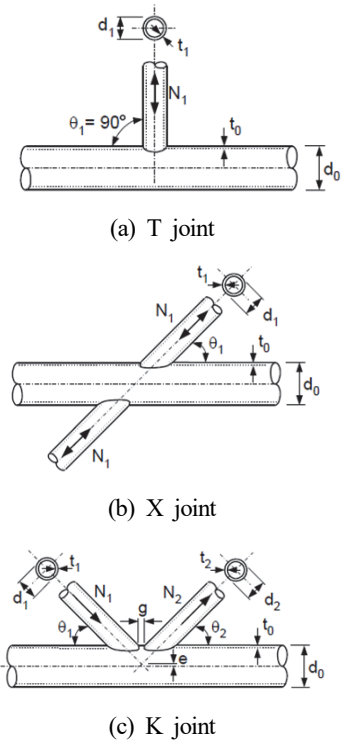


Fig. 2. Possible tubular joints in multi-column wind tower system

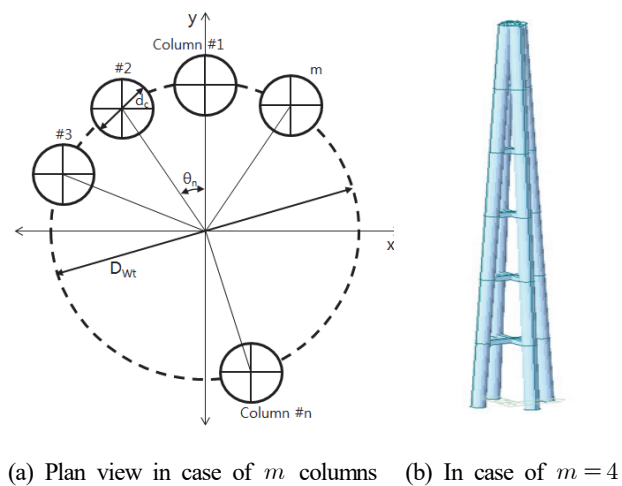
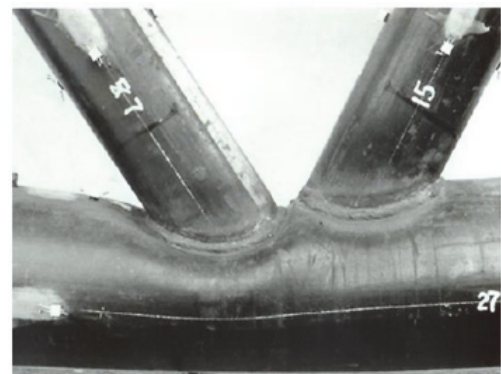


Fig. 1. Multi-column wind tower system



(a) Chord plastification



(b) Chord punching shear

Fig. 3. Failure modes adopted from CIDECT<sup>[6]</sup>

으로 분류된다. 강관조인트의 설계강도를 제공하는 대부분의 설계기준에도 파괴형상모드에 따라 설계강도식을 별도로 분류하고 있다.

멀티기둥 시스템을 구성하더라도 풍력타워로서 장치 및 장비의 운반, 유지관리 등의 목적을 달성하기 위해서는 단일 수직강관의 직경이 일정 이상 되어야 할 것으로 예측된다. 본 연구에서는 수직강관부재 즉, 주강관을 직경 2m 급 강관으로, 수평연결재 즉, 지강관은 직경 1m 급 강관을 적용한 T 조인트를 대상으로 비선형 유한요소해석을 통해 주요 매개변수에 따른 극한강도를 산정하고 비교가능한 각 설계기준으로부터 강도를 비교하여 그 유용성을 비교하고 분석한다. 본 연구에서 비교대상으로 선정한 설계기준은 AISC<sup>[7]</sup>, Eurocode 3<sup>[8]</sup>, ISO 19902<sup>[9]</sup>와 CIDECT<sup>[6]</sup>으로 각 기준에서 제공하는 T 조인트 강도 산정식을 분석한다. 국내기준으로 강구조설계기준<sup>[10]</sup>은 AISC 기준을 준용하고 있다. 나셀(nacelle)로부터 전달되는 축하중에 저항하는 강관 기둥은 압축상태에 있는 것으로 보고 주강관주강관에 압축력이 작용할 때의 조인트 극한강도를 확인한다. 수치예제를 제시하고, 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS<sup>[11]</sup>를 이용하여 비선형 유한요소해석으로 얻은 극한강도를 언급된 네 가지 설계기준과 비교하고, 그 적용성을 검토한다. 또한 강관의 지름과 두께의 비로 표현되는 세장비에 대한 매개변수해석을 통하여 강관조인트의 극한강도 변화를 확인하고, 주강관과 지강관의 상호관계를 검토한다.

## 2. 강관조인트 설계기준

강관조인트의 설계기준은 그 기하학적 조인트종류와 파괴형상모드, 작용하중의 조합종류에 따라 분류되고 있다. T 조인트의 지강관에 축방향 하중이 작용하고 주강관 소성화(chord plastification) 파괴형상모드인 경우의 설계강도를 AISC<sup>[7]</sup>, Eurocode 3<sup>[8]</sup>, ISO 19902<sup>[9]</sup>, CIDECT<sup>[6]</sup>의 순으로 살펴보고자 한다. 먼저 AISC는 식 (1)과 같이 지강관의 축방향 공칭강도  $P_n$ 을 제안하고 있다.

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

여기서,  $f_{y0}$ 는 주강관 항복응력,  $t_0$ 는 주강관 두께,  $\theta_i$ 는 주강관과 지강관이 이루는 각도를 각각 나타내고, 계수  $\beta$ 와  $\gamma$ 는

$\beta = d_i/d_0$ ,  $\gamma = d_0/2t_0$  로 각각 정의된다.  $d_0$ 와  $d_i$ 는 주강관 및 지강관의 외부직경을 각각 의미한다. 식 (1)에서는 주강관의 응력 상호작용계수로 압축력 또는 인장력이 작용하는 경우 각각 식 (2a), (2b)와 같다.

$$\text{압축; } Q_f = 1 - 0.3U(1 + U) \quad (2a)$$

$$\text{인장; } Q_f = 1 \quad (2b)$$

$$\text{여기서, } U = \left| \frac{P_{ro}}{F_c A_0} + \frac{M_{ro}}{F_c S} \right| \quad (2c)$$

식 (2c)에서  $P_{ro}$  및  $M_{ro}$ 는 주강관에 작용하는 축방향하중 및 모멘트하중을 각각 나타낸다.  $A_0$ 는 주강관 단면적,  $S$ 는 탄성단면계수를 각각 의미한다.  $F_c$ 는 항복응력으로 LFRD 설계시 항복응력의 100%, ASD 설계시에는 60%를 취한다.

다음으로 동일한 조건에서 Eurocode 3: 1-8 Design of Joints에서 지강관의 축방향 공칭강도는 식(2)와 같이 제안하고 있다.

$$P_n = \frac{f_{y0}t_0^2}{\sin\theta_i} (2.8 + 14.2\beta^2)\gamma^{0.2}k_p/\gamma_{MB} \quad (3)$$

식 (3)에서 계수  $\beta$ 와  $\gamma$ 는 식 (1)과 동일하게 정의된다.  $\gamma_{MB}$ 는 재료계수로서 1로 주어지고, 계수  $k_p$ 는 주강관에 압축력 또는 인장력이 작용하는 경우를 분리하여 각각 식 (4a), (4b)와 같다.

$$\text{압축; } k_p = 1 - 0.3n_p(1 + n_p), \quad k_p \leq 1 \quad (4a)$$

$$\text{인장; } k_p = 1 \quad (4b)$$

여기서,  $n_p = (\sigma_{p,El}/f_{y0})/\gamma_{MB}$ , 이고  $\sigma_{p,El}$ 는 다시 식 (5)로 정의된다.

$$\sigma_{p,El} = \frac{N_{p,El}}{A_0} + \frac{M_{0,El}}{S} \quad (5)$$

여기서,  $N_{p,El}$  및  $M_{0,El}$ 는 AISC의 계수 U에서 정의된 것과 유사하게 주강관에 작용하는 축방향하중 및 모멘트하중을 각각 나타낸다.

한편 ISO 19902에서도 조인트에서 지강관 축방향 공칭강도를 식 (6)과 같이 제시하고 있다.

$$P_n = \frac{f_{y0}t_0^2}{\sin\theta_i} Q_u Q_f \quad (6)$$

식 (6)에서  $Q_u$ 는 지강관의 강도계수(strength factor)로서 지강관의 압축 또는 인장 상태에 따라 각각 식 (7a), (7b)와 같이 주어진다.

$$\text{압축; } Q_u = (1.9 + 19\beta) Q_\beta^{0.5} \quad (7a)$$

$$\text{인장; } Q_u = 30\beta \quad (7b)$$

여기서,

$$\beta > 0.6 \text{ 일 때, } Q_\beta = \frac{0.3}{\beta(1 - 0.833\beta)} \quad (8a)$$

$$\beta \leq 0.6 \text{ 일 때, } Q_\beta = 1 \quad (8b)$$

또한 식 (6)에서  $Q_f$ 는 주강관의 하중계수(force factor)로서 식 (9)와 같다.

$$Q_f = 1 - 0.03q_A^2 \quad (9)$$

여기서,

$$q_A^2 = \left[ C_1 \left( \frac{P_c}{P_y} \right)^2 + C_2 \left( \frac{M_c}{M_p} \right)_{ipb}^2 + C_2 \left( \frac{M_c}{M_p} \right)_{opb}^2 \right]^{0.5} \gamma_{R,q} \quad (10)$$

식 (10)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 부분저항계수로서 1.05로 주어진다.  $ipb$ 는 면내 휨,  $opb$ 는 면외 휨 방향을 나타낸다. 계수  $C_1$ ,  $C_2$ 는 T 조인트인 경우 각각 25, 11의 값을 갖는다.

마지막으로 CHS(Circular Hollow Section) 조인트 전용 설계기준 CIDECT Design Guide에 제시된 T 조인트의 설계강도식은 식 (11)과 같다.

$$P_n = \frac{f_{y0}t_0^2}{\sin\theta_i} Q_u Q_f \quad (11)$$

여기서,  $Q_u$  및  $Q_f$ 는 식 (6)에 보인 ISO 19920에서의 설계식과 동일한 표기를 사용하지만 식 (11)에서는 각각 설계강도식 함수(design strength equation function) 및 주강관응력 함수(chord stress function)로서 다음과 같이 정의된다.

$$Q_u = 2.6(1 + 6.8\beta^2)\gamma^{0.2} \quad (12a)$$

$$Q_f = (1 - |n|)^{C_1} \quad (12b)$$

식 (12a) 및 (12b)에서  $n$ 은 주강관에서 응력비를 나타내는데 식 (13)과 같이 정의된다.

$$n = \frac{N_0}{N_{pl,0}} + \frac{M_0}{M_{pl,0}} \quad (13)$$

여기서,  $N_0$  및  $M_0$ 는 작용하중,  $N_{pl,0}$  및  $M_{pl,0}$ 은 소성단면력 및 소성모멘트를 나타내고 계수  $C_1$ 는 주강관의 압축 및 인장 상황에 따라 다음과 같이 결정된다.

$$\text{압축; } n < 0, \quad C_1 = 0.45 - 0.25\beta \quad (14a)$$

$$\text{인장; } n \geq 0, \quad C_1 = 0.20 \quad (14b)$$

분석된 네 가지 설계기준 모두 조인트 강도는 주강관에 작용하는 축력 및 모멘트의 영향을 받는 식으로 표현됨을 알 수 있다. ISO 19920의 경우 지강관이 인장상태인지 압축상태인지를 구분하여 강도산정식을 제공하고 있다. 또한 ISO 19920을 제외한 세 가지 설계기준은 주강관의 편칭전단파괴 모드에 대한 강도산정식을 추가로 제공하고 있는데 T 조인트에 대한 공칭강도를 Table 1에 보였다. 강관부재의 압축강

**Table 1.** Chord punching shear failure strengths

Design Guide	T-joint nominal strength
AISC	$P_n = 0.6f_{y0}t_0\pi d_1 \left( \frac{1 + \sin\theta_i}{2\sin^2\theta_i} \right)$
Eurocode 3	$P_n = \frac{1}{\sqrt{3}}f_{y0}t_0\pi d_1 \left( \frac{1 + \sin\theta_i}{2\sin^2\theta_i} \right) \gamma_{M5}$
ISO 19902	N/A
CIDECT	$P_n = 0.58f_{y0}t_0\pi d_1 \left( \frac{1 + \sin\theta_i}{2\sin^2\theta_i} \right)$

도에 대한 최근의 국내 연구는 대부분 콘크리트를 충전하여 진행되었다<sup>[12],[13],[14]</sup>.

### 3. 예제 해석

앞서 서술된 T 조인트에 대한 각각의 설계강도제한식으로 산정된 공칭강도를 ABAQUS<sup>[11]</sup>를 이용한 비선형해석을 통해 비교·검토한다. 위 4가지 설계기준 모두 지강관의 압축력과 함께 주강관에 축방향 하중이 작용하는 경우까지 고려된 것을 알 수 있는데, 본 장에서는 주강관에 축력이 작용하지 않는 경우에 대한 강도검토를 우선 수행한다. 주강관에 압축의 축력이 작용하는 경우는 4장에서 다룬다. 본 연구에서 대상으로 하는 멀티기둥 풍력타워 시스템에서 개별 수직강관(주강관) 부재는 그 개수에 상관없이 직경 2m 급, 수평강관(지강관) 부재는 1m 급으로 가정하였다. 주강관 및 지강관 모두 지름의 5배만큼 길이를 조인트모델에 포함시켰다. Fig. 4의 A 및 B에 보인 주강관의 양단에서 각 절점은 단순

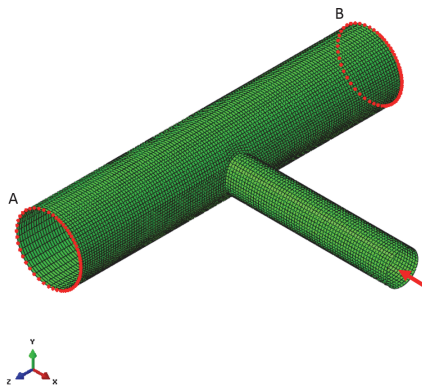


Fig. 4. Hypothetical example model

Table 2. Dimension and material property of model

Elastic modulus $E$	200GPa
Chord length $L_0$	10,000mm
Brace length $L_1$	5,000mm
Chord diameter $d_0$	2,000mm
Chord thickness $t_0$	28.57~66.67mm
Brace diameter $d_1$	1,000mm
Brace thickness $t_1$	14.29~33.33mm
Yield stress $f_y$	355MPa
Poisson's ratio $\nu$	0.3

지지조건으로 모델링하였다. Table 2에는 수치예제에 사용되는 부재의 치수와 재료상수를 보여준다.

Eurocode 3에는 원형강관인 경우 Table 3에 보인 바와 같이 단면을 강관의 세장비에 따라 Class 1~3로 분류하고 있다. 본 연구에서는 단면을 분류하는 기준이 되는  $d/t$ 의 값을 매개변수로 지정하여 강도변화를 확인한다. 먼저 Table 2에 보인 예제 T 조인트에서 주강관 및 지강관의 두께가 각각 60.6mm 및 30.3mm인 경우 공칭강도를 앞서 제시된 각 설계기준의 강도산정식을 이용하여 산정하면 Table 4와 같다. 주강관에 작용하는 하중이 없는 상태에서 Table 2의 수치를 대입하여 나타낸 결과다. 본 예제 강관조인트는 주강관 펀칭전단보다는 주강관 소성화(chord plastification)에 의한 파괴가 지배한다는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 다루는 예제에서  $d/t$ 의 값을 매개변수로 강도검토를 수행한 결과 모두 주강관 소성화가 강도를 지배하였음을 확인하였다.

Fig. 4에 보인 수치예제 모델링에서 S4R Shell 요소를 사용했고, 요소의 전체 개수를 결정하기 위하여 요소 개수에 따른 비선형 비탄성 극한강도 해석을 수행하였다. 재료모델은 탄성-완전소성 모델을 적용하였다. 주강관의 세장비에 따라 극한강도는 다르게 나타나지만 각 모델의 전체 요소 개수가 증가할수록 극한강도는 수렴하는 경향을 Fig. 5에서 확인할 수 있다. 8,000개 이상인 경우 요소 크기에 따른 극한

Table 3. Class category for CHS in Eurocode 3

	Section in bending and/or compression		
Class 1	$d/t \leq 50\epsilon^2$		
Class 2	$d/t \leq 70\epsilon^2$		
Class 3	$d/t \leq 90\epsilon^2$ ( $\epsilon = \sqrt{235/f_y}$ )		
	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 4. Nominal strength of example T joint

Design code	Chord plastification strength (MN)	Diff. (%)	Chord punching shear strength (MN)	Diff. (%)
AISC	15.99	-	40.555	-
Eurocode3	14.505	-9.3	39.024	-3.8
ISO 19902	14.865	-7.0	N/A	N/A
CIDECT	16.036	0.3	39.203	-3.3

강도의 변화는 거의 없다고 볼 수 있어 본 연구에서는 지강관의 원주방향요소는 40개, 주강관의 원주방향요소는 60개로 설정하여 전체 요소 개수는 약 10,000개 수준으로 설정하여 매개변수해석을 수행하였다. 주강관과 지강관의 접합부와 같이 응력이 집중되는 곳은 요소의 크기를 작게 사용함으로써 요소의 크기에 따른 강성의 영향을 최소화하도록 모델링했다. 양단의 절점이 단순지지된 주강관에 축방향 하중은 작용하지 않는 상태에서 지강관에 압축력을 재하하였다.

Fig. 6은 지강관의 세장비  $d_1/t_1$ 가 Class 2 범주내에서 변화할 때 T 조인트에서 압축강도 평가를 위한 힘-변위 그래프를 보여준다. 일부 모델에서 최초 정점을 넘어서 추가적으로 저항강성이 증가하여 최종 강도에 도달하는 경향이 파악되었다. 최초 정점을 지나는 순간의 거동은 크라운에 수직하중을 받는 아치구조에서 나타나는 snap-through buckling과

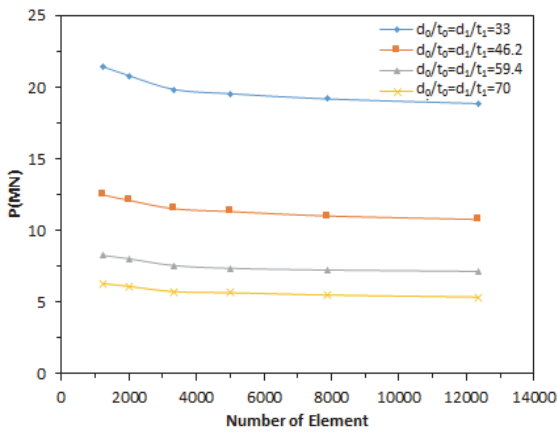


Fig. 5. Joint ultimate strengths vs. number of elements in verification tests

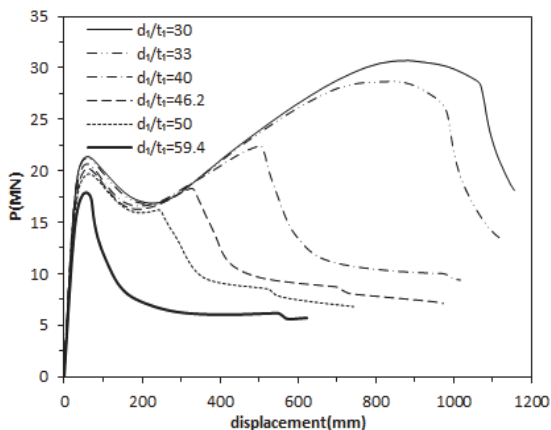


Fig. 6. Force-displacement curves with various brace slenderness ratio

유사한 것으로 판단된다. 본 해석 모델에서 snap-through 현상은 주강관의 벽체가 원주 내부로 변형이 발생하는 순간에 발생된다. snap-through 현상이 발생된 이후 주강관 벽체 측면 일부가 경계조건으로 지지하게 되어 추가적인 저항이 발생하게 된다. Fig. 6에 의하면 snap-through 발생 이후 추가적인 저항강성의 발현이 항상 최종의 극한강도로 결정되는 것은 아님을 알 수 있다. 즉, snap-through 단계에서의 강도가 최종의 극한강도로 결정되는 경우도 있다는 의미이다. Fig. 7은 snap-through 발생단계 및 극한상태에서 변형과 von Mises 응력분포를 보여준다. T 조인트에서 snap-through 발생순간 지강관과 직접 접하는 부근 주강관에서는 항복상태에 도달하였음을 확인할 수 있다. 극한상태에서 세장비가 높은 얇은 주강관의 경우 과도한 변형이 발생하는 것도 확인할 수 있다.

Fig. 8은 주강관 대표단면에 대하여 지강관 세장비  $d_1/t_1$ 가 30에서 70까지 변화할 때 T 조인트의 강도를 보여준다. Fig. 8(a)~(c)에 각각 보인 주강관 세장비  $d_0/t_0$ 의 값 33, 46.2, 59.4는 Eurocode 3에서 분류하는 Class 1, 2, 3에 각각 해당하는 대표단면이다. Fig. 8(a)에 보인 Class 1 범주의 주강관 단면에서 지강관 세장비가 50 이상인 경우 snap-through 좌굴강도와 극한강도가 일치하는 경향을 보이는데, 이는 snap-through 좌굴 발생 이후 추가적인 강도의 증가는 없고 snap-through 좌굴강도가 바로 극한강도로 결정된다는 의미이다. 한편, Class 2와 3에 범주에 속하는 주강관 단면의 경우 snap-through 좌굴강도와 극한강도는 대부분 분리되어 나타나는데 후좌굴 강도(post-buckling strength)의 구현으로 이해된다. 앞서 소개하였듯이 AISC, Eurocode 3, ISO 19902, CIDECT 등의 설계기준에 조인트의 강도는 주강관의 세장비에 따라 결정될 뿐 지강관의 세장비는 고려되지 않는다. 그 이유로는 주강관에 비해 직경이 작은 부재로 적용되는 지강관의 세장비는 고려하지 않고 주강관의 snap-through 좌굴강도를 공칭강도로 제시하고 있는 것으로 추론된다. Fig. 8(a)~(c)로부터 확인 가능하듯이 본 연구에서 검토된 네 개의 설계기준은 Class 1 주강관에 높은 세장비의 지강관이 부착된 조인트를 제외하고는 대체로 강도를 잘 예측하고 있는 것으로 판단된다. Fig. 6에서 보였듯이 snap-through 좌굴발생이후 그 강도를 초과하는 극한강도가 구현될 수 있지만 Fig. 7에서 극한상태 변형형상을 보면 사용성은 인정되기 어려울 것으로 보인다. 본 연구에서는 추가적인 저항을 고려하지 않고 최초에 나타나는 강

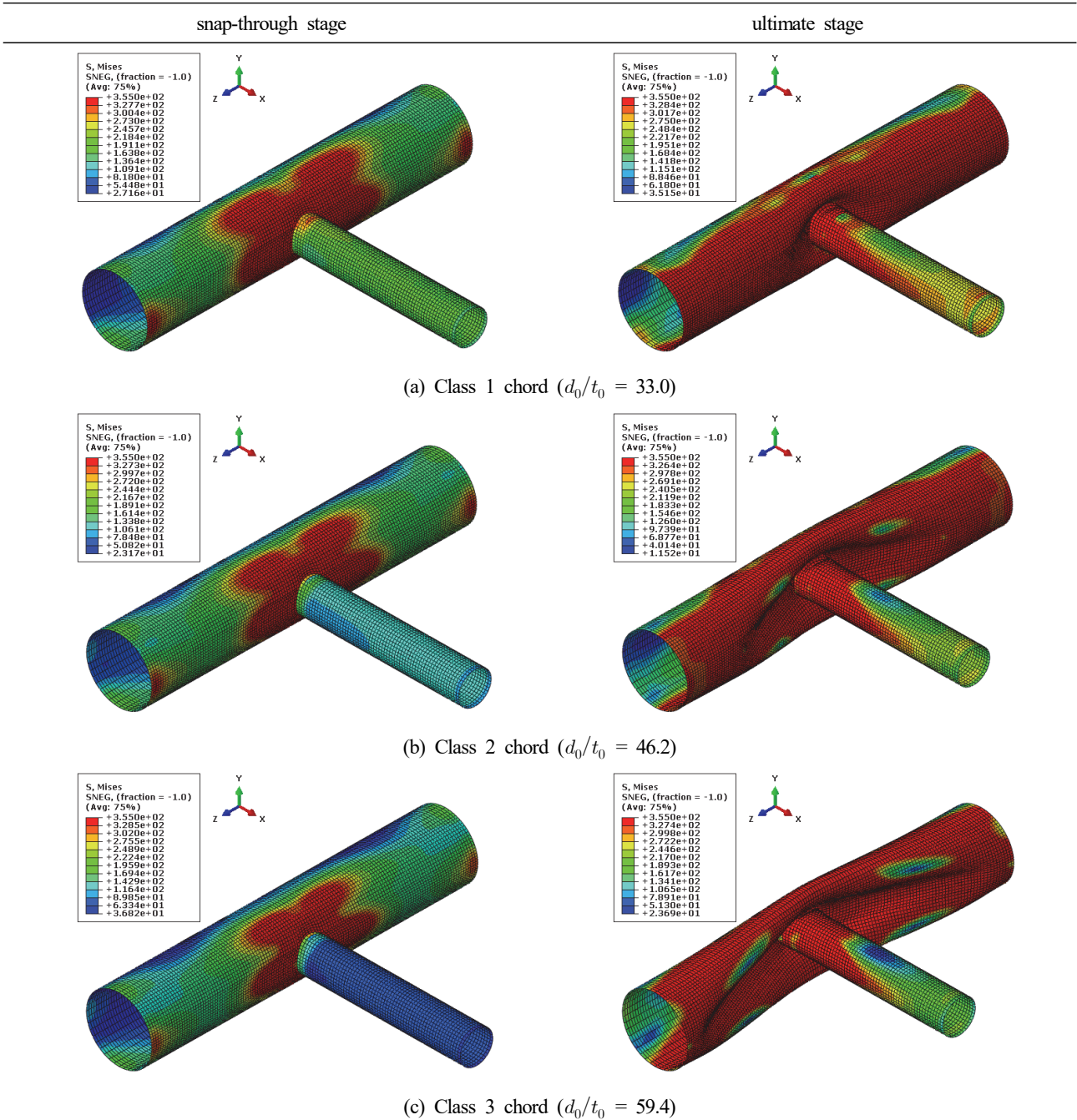


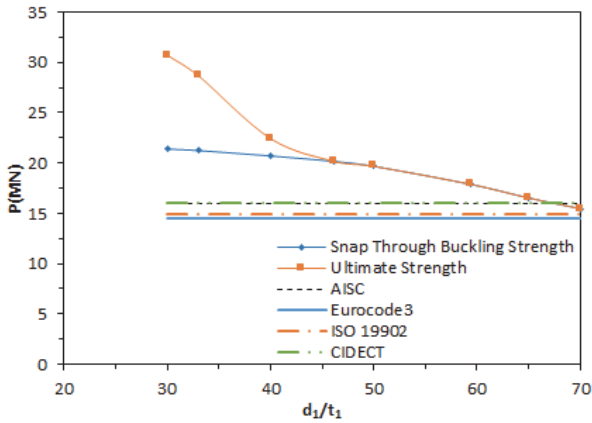
Fig. 7. von Mises stress distribution in deformed shapes

도를 조인트의 공칭강도로 간주한다.

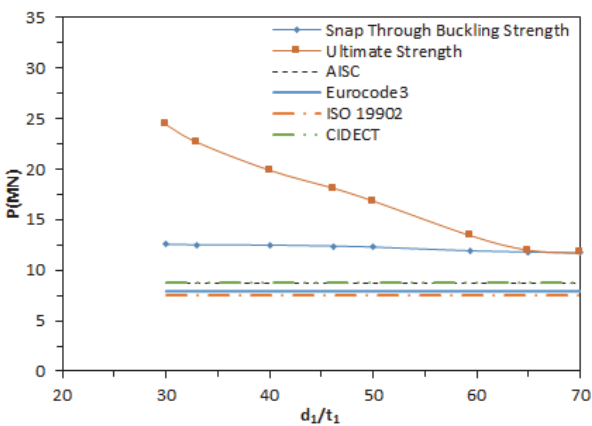
Fig. 9은 주강관과 지강관의 두께비  $t_1/t_0$ 에 따른 T 조인트 강도를 비교한 것이다. 일반적으로 지강관은 주부재인 주강관보다 더 두꺼운 부재로 설계되지 않는다는 점에서 두께비는 1.0까지만 고려하였다. 주강관 세장비  $d_0/t_0$ 가 상대적으로 높은 값을 가지는 경우 두께비  $t_1/t_0$ 에 따른 강도의 변화는 거의 무시할 수준으로 파악되었다. 그러나 주강관 등급이

Class 1 수준으로 두꺼울 경우 지강관이 같이 두꺼워지면 조인트의 강도는 향상될 수 있다는 것을 Fig. 9로부터 확인할 수 있다.

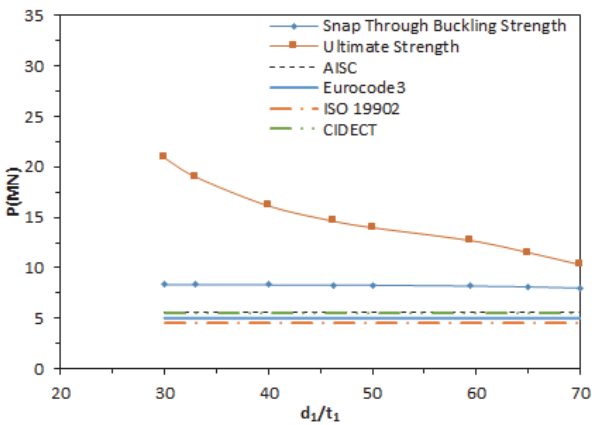
강관조인트의 강도는 주강관 세장비  $d_0/t_0$ 에 의해 지배적으로 결정된다는 것은 Fig. 10에서도 알 수 있다. Fig. 10은 주강관 세장비의 증가에 따른 조인트 강도감소의 전형적인 패턴을 보여준다. 고려된 네 가지 설계기준은 두꺼운 주강관



(a) Class 1 chord ( $d_0/t_0 = 33.0$ )



(b) Class 2 chord ( $d_0/t_0 = 46.2$ )



(c) Class 3 chord ( $d_0/t_0 = 59.4$ )

Fig. 8. Joint strength vs. chord/brace slenderness ratio

과 얇은 지강관으로 구성된 일부 경우를 제외하고는 공칭강도를 보수적으로 예측하고 있다. Class 1 등급의 주강관과 Class 3를 초과하는 등급 외 지강관으로 구성되는 조인트에서 기존의 설계 기준으로 적용할 시 주의를 요한다고 볼 수

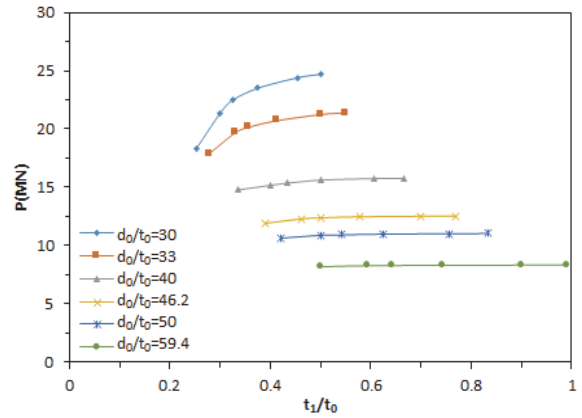


Fig. 9. Joint strength vs. brace-to-chord thickness ratio

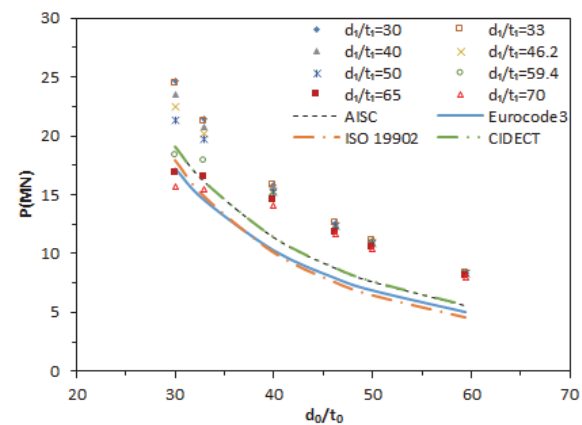


Fig. 10. Joint strength vs. chord slenderness ratio

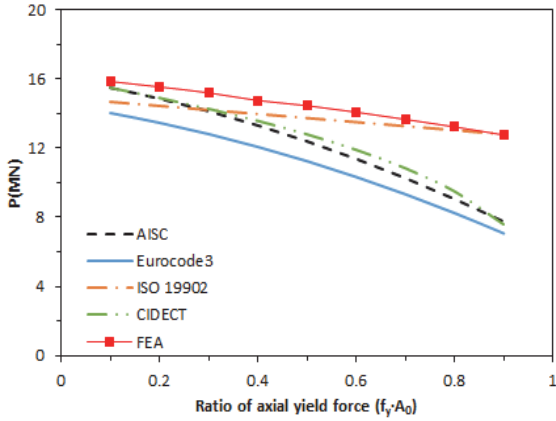
있다. 이 경우 지강관의 국부좌굴에 의한 강도감소를 면밀히 검토해야 할 것으로 보인다. 전반적으로 T 조인트의 강도는 주강관이 Class 3를 초과하지 않는 경우 네 가지 설계기준을 만족한다고 볼 수 있다. 그러나 Eurocode 3와 ISO 19902보다는 AISC와 CIDECT의 설계기준이 공칭강도를 약간 높게 평가하고 있으므로 경제적 설계에 유리할 것으로 추천된다.

#### 4. 주강관에 압축력이 작용하는 조인트

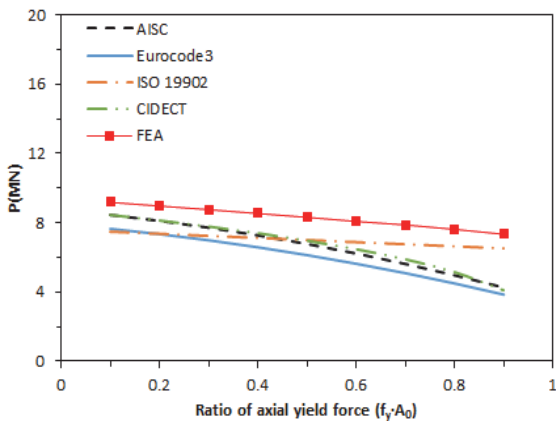
풍력타워에는 수평방향의 풍하중과 더불어 나셀(nacelle), 로터(rotor) 및 블레이드(blades)에 의해 상당 수준의 수직하중이 상시적으로 작용한다. 멀티기동 시스템의 타워에서도 각 수직부재는 압축력 또는 인장력이 작용하고 있는 상태에서의 조인트 강도평가가 필요하다. 횡거동에 의해 인장력이 작용할 수도 있겠지만 수직하중과의 조합에 의하면 수



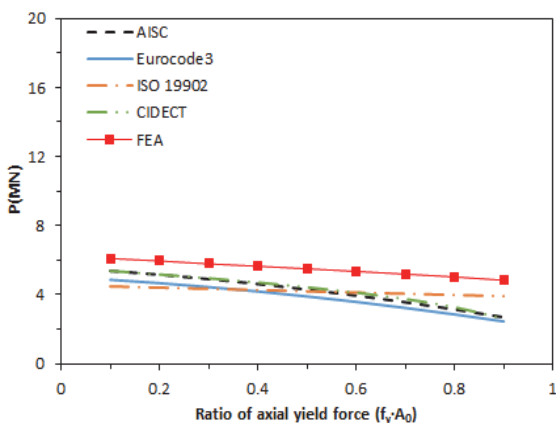
직부재가 인장상태에 있을 가능성은 낮아 보인다. 이에 본 장에서는 압축력을 받고 있는 주강관에 지강관 축력이 작용하는 T 조인트의 강도를 평가한다.



(a) Class 1 chord ( $d_0/t_0 = 33$ )



(b) Class 2 chord ( $d_0/t_0 = 46.2$ )



(c) Class 3 chord ( $d_0/t_0 = 59.4$ )

Fig. 11. Effect of axial force in chord on joint strength

해석에 이용된 T 조인트의 요소는 앞서 서술한 모델과 같으며 주강관의 양 단에 압축력을 항복응력과 단면적의 곱으로 표현되는 축방향 항복력( $f_y A_0$ )의 비율에 따라 미리 가력한 후 조인트의 극한상태까지 지강관에 축력을 재하하였다. 주강관 축력재하는 Fig. 4의 경계 A, B의 x, y 방향은 구속을 유지하고 z 방향으로서는 주강관에 압축이 발생하도록 양측 경계를 이동시키는 방법으로 수행하였다.

Fig. 11(a)~(c)는 주강관에 압축력이 작용하고 있는 상태에서 지강관 축력에 의한 T 조인트 강도는 주강관 압축력의 크기에 따라 감소한다는 것을 확인시켜준다. 또한 비선형 비탄성 유한요소해석에 의한 극한강도 값을 기준으로 고려된 네 가지 설계기준 모두 안전측으로 강도를 제공한다는 것을 확인할 수 있다. 주강관의 축력에 의한 조인트 강도감소 효과는 세장비가 작은 Class 1 등급에서 더욱 민감하게 나타난다. 주강관에 작용하는 항복력의 크기가 상대적으로 클 경우 여타 설계기준 대비 ISO 19920에서 예측하는 조인트 강도가 해석에서 구한 극한강도의 패턴과 가장 유사한 것으로 평가된다. 주강관 축력이 항복력 대비 0.5가 넘을 경우 ISO 19902가 가장 경제적인 설계를 유도할 수 있는 기준으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 원형단면 멀티기둥에 적용될 수 있는 강관 조인트 중 T 조인트 강도평가를 수행하였다. 현행 적용가능한 설계기준인 AISC, Eurocode 3, ISO 19902, 그리고 CIDECT에서 제공된 설계강도식을 검토하여 수치예제의 비선형 비탄성해석을 통해 극한강도를 구하고 설계강도와 비교하였다. 주강관에 축력이 배제된 상태에서 조인트 강도는 주강관의 세장비가 지배인자로 확인되었다. 지강관의 세장비는 Class 3 이내에 들어가는 경우 조인트 강도에 미치는 영향은 무시할 수 있는 수준으로 파악되었다. 전반적으로 T 조인트의 강도는 주강관이 Class 3를 초과하지 않는 경우 고려된 네 가지 설계기준을 만족함을 확인하였다. 그러나 Class 1 등급의 두꺼운 주강관에 상대적으로 얇은 Class 3의 등급의 지강관으로 구성된 조인트에 대해서는 일부 비안전측 설계가 유도될 수 있음도 확인되었다. Eurocode 3와 ISO 19902보다는 AISC와 CIDECT의 설계기준이 공칭강도를 약간 높게 평가하고 있으므로 경제적 설계에 유리할 것으로 판단되었다. T 조인트 주강관에 압축력이 작용하는 경우 주강

관의 축력에 의한 조인트 강도감소 효과는 세장비가 작은 Class 1 등급에서 더욱 민감하게 나타남을 확인하였다. 고려된 네 가지 설계기준 모두 축력에 의한 강도감소 효과가 적절히 구현된 것으로 보이고, 특히 주강관 축력이 항복력 대비 0.5가 넘을 경우 ISO 19902가 가장 경제적인 설계를 유도할 수 있는 기준임을 확인하였다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술혁신연구사업의 연구비지원(과제번호 12기술혁신E09 10MW급 강재 및 3MW급 복합 합성구조 풍력발전타워 설계기술 개발)에 의해 수행되었음.

## 참고문헌(References)

- [1] 김종민, 박현용, 김경식(2014) 멀티기둥-강관 풍력타워 연결부 성능평가, 한국산학기술학회논문집, 한국산학기술학회, 제15권, 제3호, pp.1764-1769.  
Kim, J., Park, H.-Y., and 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 (in Korean).
- [2] 김종민, 황민오, 최병호, 김경식(2013) 10MW급 신형식 강재 풍력타워 개념 설계, 제39회 대한토목학회 정기 학술대회, 대한토목학회, pp.661-664.  
Kim, J., Hwang, M.O., Choi, B.-H., and Kim, K. (2013) Concept Design of the New-Type 10MW Steel wind Towers, *Proceedings of the 39th Conference of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, pp.661-664 (in Korean).
- [3] Chiew, S.P., and Soh, C.K. (2000) Strain Concentrations at Intersection Regions of a Multiplanar Tubular DX-Joint, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.53, No.2, pp.225-244.
- [4] 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*, Elsevier, Vol.67, No.12, pp.1936-1947.
- [5] Lee, H.D., Lee, J.M., Lee, S.H., and Shin, K.J. (2011) Investigation of the Tube-Gusset Connection in 600MPa Circular Hollow Section, *Procedia Engineering*, Elsevier, Vol.14, pp.2124-2132.
- [6] Wardenier, J., Kurobane, Y., Packer, J.A., van der Vegte, G.J., and Zhao, X.-L. (2008) *Design Guide for Circular Hollow Section (CHS) Joints Under Predominantly Static Loading* (2nd Ed.), Comité International Pour le Développement et l'Étude de la Construction Tubulaire, Switzerland.
- [7] American Institute of Steel Construction (2011) *Steel Construction Manual* (14th Ed.), AISC, USA.
- [8] European Committee for Standardization (2005) *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1.8: Design of Joints* (EN 1993-1-8: 2005), Belgium.
- [9] International Organization for Standardization (2007) *Petroleum and Natural Gas Industries - Fixed Steel Offshore Structure* (ISO 19902: 2007), Switzerland.
- [10] 한국강구조학회(2014) 강구조설계기준, 국토교통부. KSSC (2014) *Steel Structure Design Code*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea (in Korean).
- [11] Dassault Systèmes Simulia Corp. (2010) *Abaqus/CAE User's Manual, Ver. 6.10*, DSS, USA.
- [12] 박홍근, 이호준, 박성순, 김성배(2014) 콘크리트피복충전 각형강관 기둥-보 접합부의 주기하중 실험, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제26권, 제1호, pp.55-68.  
Park, H.G., Lee, H.J., Park, S.S., and Kim, S.B. (2014) Cyclic Loading Test for Beam-to-Column Connections of Concrete Encased CFT Column, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.26, No.1, pp.55-68 (in Korean).
- [13] 박재우, 유정환(2014) 탄소섬유시트(CFRP Sheets)로 보강된 폭두께비가 큰 콘크리트 충전 각형강관 기둥의 중심축하중거동, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제26권, 제3호, pp.169-176.  
Park, J.W., and Yoo, J.H. (2014) Axial Loading Behaviors of Square Concrete-Filled Tubular Columns with Large Width-to-Thickness Ratio Retrofitted Using Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets (CFRP Sheets), *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol.26, No.3, pp.169-176 (in Korean).
- [14] 안재권, 이철호(2014) 재하가열시험에 의한 무내화피복 콘크리트충전 각형강관기둥의 내화성능평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제26권, 제4호, pp.323-334.  
Ahn, J.K., and Lee, C.H. (2014) Evaluation of Fire Resistance of Unprotected Concrete-Filled Rectangular Steel Tubular Columns Under Axial Loading, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.26, No.4, pp.323-334 (in Korean).

---

**요 약 :** 강재량을 줄이면서도 풍하중의 영향을 완화시킬 수 있는 장점으로, 수평재로 서로 연결된 다수의 수직 원형강관으로 구성된 멀티기둥 풍력타워 시스템은 기존의 단일 실린더형 타워구조에 대한 대안으로 고려될 수 있다. 멀티기둥 타워를 하나의 타워구조로 거동하게 하기 위해서는 수직 강관과 수평 강관의 연결부인 강관조인트의 강도 확보가 중요하다. 본 연구에서는 멀티기둥에 적용될 수 있는 T 조인트의 강도평가를 수행하였다. AISC, Eurocode3, ISO 19902, CIDECT의 4가지 강관조인트 설계기준을 검토하고, 조인트에서 주강관과 지강관의 세장비에 대한 매개변수해석을 통하여 설계기준에서 제공되는 강도산정식의 타당성을 검토하였다.

**핵심용어 :** 멀티기둥, 풍력타워, T 조인트, 극한강도, 설계기준, 세장비

---