



10MW급 풍력발전용 원형강관 멀티기둥타워의 부재유용도 개념설계

김경식^{1*} · 김미진²

¹교수, 청주대학교 토목공학과, ²석사과정, 청주대학교 토목공학과

Member Utilization Concept Design for Hollow Circular Section Multi-column Tower Subjected to 10MW Level Wind Turbines

Kim, Kyungsik^{1*}, Kim, Mi Jin²

¹Professor, Department of Civil Engineering, Cheongju University, Cheongju, 28503, Korea

²Master's Course Graduate Student, Department of Civil Engineering, Cheongju University, Cheongju, 28503, Korea

Abstract - This study presents an example of conceptual design for hollow circular section multi-column tower system subjected to 10MW level wind load by introducing a method based on member utilization that examine both structural stability and economical efficiency. The basic assumptions for the proto type of a multi-column tower that can replace a single-cylinder tower were suggested and structural models were constructed following the assumptions and analyzed for identifying member forces. Based on the calculated member strengths and acting loads, the member utilization of the proposed multi-column tower structures were calculated for axial force, shear, bending and torsion and evaluated for suitability as a wind tower. Design parameters such as steel tube dimensions, slenderness ratio, and number of floors for braces was proposed in the acceptable range of member utilization for conceptual design of multi-column wind towers.

Keywords - Wind tower, Hollow circular section, Design code, Conceptual design, Member utilization, Strength evaluation

1. 서론

풍력발전은 바람의 힘을 회전력으로 전환시켜 발생하는 유도전기를 전력계통이나 수요자에게 공급하는 기술로서 신재생 에너지의 한 분야로 구분된다. 풍력발전은 풍속이 높고 블레이드가 클수록 더 많은 풍력에너지를 생산할 수 있기 때문에 풍력 발전량은 바람의 세기와 구조물의 규모에 의존한다. 이로 인해 풍력 에너지 시장의 주요 경향은 과거에서부터 최근까지 발전기가 대용량화 되고 있으며 이에 따라 구조물 또한 대형화되고 있다. 현재 우리나라의 풍력발전은 2MW, 3MW급의 중소형 풍력발전에서 최근 7MW급의 실증

이 완료되어 상용화단계에 있으며 10MW급의 풍력발전이 기술개발단계에 있다^[1]. 기존의 풍력타워는 단일 원통 쉘의 구조를 주로 채택하였는데 이는 제작 및 시공의 간편성에서 우수함을 보였기 때문이다. 주로 단일 강관 형태로 제작되고 있는 풍력타워는 10MW급 풍력발전기에 적용될 경우 강관의 최대 직경이 7m를 초과할 것으로 예측된다^[2]. 이러한 직경의 대형화는 제작 및 운반이 불리할 뿐만 아니라 강관의 좌굴내하력 확보를 위해 강관 두께의 증가가 불가피하다. 또한 바람의 투영면적이 넓어지므로 타워 자체가 받는 풍하중의 부담이 증가하는 등의 문제점이 발생될 수 있다. 따라서 최근 풍력발전 시스템의 대형화에 대응하는 강관 단면 보강 기술이 개발되는 추세에 있고, 또 다른 한편으로는 투명면적 감소에 의한 수평하중 저감과 관련한 현장조립을 목적으로 복수의 중소형 강관을 주요압축부재로 배치하는 원형강관 멀티기둥타워의 적용성이 검토되고 있다^{[3],[4]}. Fig. 1에 멀티강관 타워시스템에서 강관기둥이 4개인 경우의 부분 모델을 보여준다. 멀티기둥 타워시스템(multi-column tower

Note.-Discussion open until December 31, 2017. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on February 28, 2017; revised March 24, 2017; approved on March 24, 2017.

Copyright © 2017 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-43-229-8472 Fax. +82-43-229-8466

E-mail. kkim@cju.ac.kr

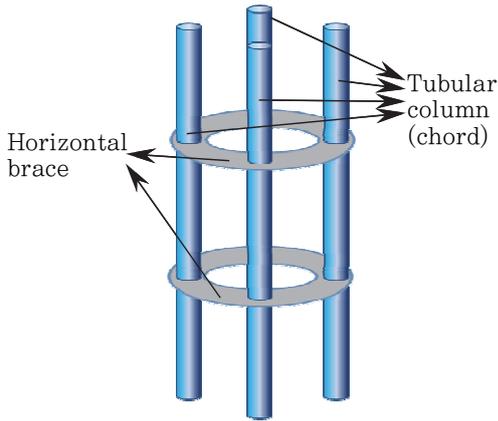


Fig. 1. Partial model of multi-column steel tubular tower

system)에서 외부의 하중에 압축과 휨 거동으로 직접 저항하는 주부재인 복수의 중소형 강관을 주강관(chord), 이들 주강관을 수평으로 연결하는 수평부재를 브레이스(brace)로 각각 붙인다. 주강관과 브레이스로 구성된 전체 구조체는 3차원 공간프레임(space frame)으로서 하나의 단일 실린더 형식의 타워시스템과 같은 거동을 하게 된다. 멀티강관 타워 구조로 풍력타워를 설계 할 경우 바람이 강관과 강관 사이로 지나가기 때문에 단일 실린더 형식 대비 타워에 미치는 풍하중 영향을 절감 할 수 있다. 또한 주강관부재와 조인트부에 대한 적절히 분리가 가능하여 시공성 및 운반성 측면에서 대형 실린더 형식 단일타워 대비 우수한 면이 있다.

본 연구에서는 10MW급 풍력하중을 받는 멀티기둥 타워 시스템에 적용되는 강관 부재에 대하여 구조적 성능검토뿐만 아니라, 부재의 선정 및 배치가 경제성에 미치는 영향을 함께 파악할 수 있는 부재유용도(member utilization)를 활용한 개념설계(concept design)의 예를 보인다. 여기서 개념설계란 예비타당성 조사 및 기본계획의 단계에서 구조물의 규모, 배치, 형태, 개략 공사비, 공사 기간 등을 수립하는 설계의 과정을 의미한다.

먼저 각 부재의 거동에 따라 정의되는 유용도에 대한 설계 기준을 검토한다. 멀티기둥타워 구조의 구성에 관한 기본적인 가정에 따라 1차로 제안된 구조물의 해석을 통해 부재력을 확인하고, 부재력에 따라 결정되는 부재강도를 산정한다. 산정된 부재강도와 작용하중을 근간으로 구조물의 각 부재에 대한 유용도를 산정한다. 이러한 정량적인 유용도 값은 경제성이 고려된 최적의 단면 및 구조계(structural system) 도출에 기초 자료로 활용될 수 있다.

2. 원형단면 강관부재의 설계기준

원형단면 강관구조물의 설계에는 전체 구조계에 대한 해석을 통한 구조안정성을 확보하여야 할 뿐 만 아니라 각 부재별, 조인트별 강도검토 또한 적절하게 수행되어야 한다. 강관구조물의 설계강도 검토단계에서 적용될 수 있는 기준으로 AISC^[5], Eurocode 3^[6], CIDECT^[7], ISO 19902^[8] 등이 활용될 수 있다. 이 네 가지 설계기준에 의해 제시되는 부재 및 조인트 강도에 대한 검토는 T형 조인트를 중심으로 최근 수행된 바 있다^{[4],[9],[10]}. 이들의 연구에 의하면 언급된 네 가지 설계기준은 주강관과 브레이스의 세장비가 일정 한도 이하일 경우에는 모두 안전 측으로 강도를 예측하고 있으나 설계기준별로 공칭강도 예측의 차이는 존재한다. 특히 주강관(chord)에 작용하는 축력이 항복강도 대비 0.5가 넘을 경우 ISO 19902^[8]가 조인트 강도평가에서 가장 경제적인 설계를 유도할 수 있는 기준임을 확인되었다.

설계기준 ISO 19902 Fixed Steel Offshore Structures 편에서는 고정식 해양 강구조물을 위한 특화된 설계기준으로서 강관구조물의 설계 및 시공에 대해 자세히 기술되어 있다. 또한, ISO 19902에서는 여타 설계기준에서 제시되지 않은 각 부재의 거동별 유용도 개념을 정의하고 있다. 유용도 개념에 근거한 구조안정성과 효율성을 확보한 최적단면을 도출하기 위해 본 연구에서는 대상 설계기준을 ISO 19902^[8]로 선정하였다. 풍력과 자중 등 하중을 받는 원형강관 멀티기둥타워시스템에서 각 부재별로 압축, 휨 또는 전단에 대한 각각의 강도 검토를 수행할 때, 설계강도 대비 작용하중으로 정의되는 유용도의 정량적인 값을 활용하면 설계의 효율성을 평가할 수 있다. 본 장에서는 ISO 19902에서 제시하는 부재의 거동별 유용도에 대한 정의를 살펴본다.

축방향 압축력이 작용하는 강관부재에서는 다음 식 (1.a)에 보인 바와 같이 계수가 고려된 압축강도대비 작용하중이 커서는 안 된다. 이러한 축방향 압축 부재의 강도검토 과정에서 유용도는 식 (1.b)로 정의한다.

$$\sigma_c = \frac{P_c}{A} \leq \frac{f_c}{\gamma_{R,c}} \tag{1.a}$$

$$U_m = \frac{\sigma_c}{f_c/\gamma_{R,c}} = \frac{P_c/A}{f_c/\gamma_{R,c}} \leq 1.0 \tag{1.b}$$

여기서, σ_c 는 계수하중에 의한 축방향 압축응력이고, 하중단

위로 적용하면 강관 부재의 단면적 A 에 대한 축방향 작용하중 P_c 의 비로 나타낼 수 있다. $\gamma_{R,c}$ 는 축방향 압축강도에 대한 부분저항 계수로써 1.18의 값을 가지며 f_c 는 응력단위의 축방향 압축강도로 기동좌굴과 국부좌굴검토를 수행하여 결정된다.

정수압이 작용하지 않을 때, 식 (1.a) 및 (1.b)에 나타난 강관부재의 압축강도는 기동좌굴 검토과정인 식 (2.a)와 (2.b)에 보인 바와 같이 기둥의 세장비 λ 의 함수로 표현된다.

$$\lambda \leq 1.34 \text{인 경우: } f_c = (1.0 - 0.278\lambda^2)f_{yc} \quad (2.a)$$

$$\lambda > 1.34 \text{인 경우: } f_c = \frac{0.9}{\lambda^2}f_{yc} \quad (2.b)$$

기둥의 세장비는 $\lambda = (KL\sqrt{f_{yc}/E})/\pi r$ 로 정의하며 여기서, KL 은 기둥의 유효길이이다. E 는 강관의 탄성계수, r 는 회전반경, I 는 강관 부재의 단면2차모멘트이다. 또한 f_{yc} 는 응력단위의 국부좌굴강도로 다음 국부좌굴검토과정에 따라 결정된다.

$$\frac{f_y}{f_{xe}} \leq 0.170 \text{인 경우:}$$

$$f_{yc} = f_y \quad (3.a)$$

$$0.170 < \frac{f_y}{f_{xe}} \text{인 경우:}$$

$$f_{yc} = \left(1.047 - 0.274 \frac{f_y}{f_{xe}}\right)f_y \quad (3.b)$$

여기서, f_y 는 강관의 응력단위 항복강도이며 f_{xe} 는 응력단위 탄성 국부좌굴강도로 다음과 같이 정의된다.

$$f_{xe} = 2C_x Et/D \quad (3.c)$$

여기서, t 와 D 는 각각 강관 부재의 두께와 외측 지름을 의미한다. 이상적인 강관에 대한 이론적인 탄성좌굴계수 C_x 값은 0.6이다. 그러나 초기 기하학적 결함 효과를 고려하기 위해 0.3으로 감소시켜 적용한다.

휨모멘트를 받는 강관부재는 식 (4.a)와 같은 조건을 만족해야 하며 휨모멘트를 받는 부재의 설계효율성 평가를 위한

유용도는 식 (4.b)에서 정의된다.

$$\sigma_b = \frac{M}{Z_e} \leq \frac{f_b}{\gamma_{R,b}} \quad (4.a)$$

$$U_m = \frac{\sigma_b}{f_b/\gamma_{R,b}} = \frac{M/Z_e}{f_b/\gamma_{R,b}} \leq 1.0 \quad (4.b)$$

여기서, σ_b 는 계수하중에 의한 휨응력으로 계수하중에 의한 휨모멘트 M 이 항복모멘트 M_y 보다 작을 때는 등가탄성휨응력인 $\sigma_b = M/Z_e$ 으로 간주한다. 여기서 Z_e 는 탄성단면계수(elastic section modulus)이다. 휨강도에 대한 부분저항계수 $\gamma_{R,b}$ 는 1.05의 값이며 강관부재의 휨강도 f_b 는 다음의 식 (5.a), (5.b) 및 (5.c)로 결정한다.

$$\frac{f_y D}{Et} \leq 0.0517 \text{인 경우:}$$

$$f_b = \left(\frac{Z_p}{Z_e}\right)f_y \quad (5.a)$$

$$0.0517 < \frac{f_y D}{Et} \leq 0.1034 \text{인 경우:}$$

$$f_b = \left[1.13 - 2.58 \left(\frac{f_y D}{Et}\right)\right] \left(\frac{Z_p}{Z_e}\right)f_y \quad (5.b)$$

$$0.1034 < \frac{f_y D}{Et} \leq 120 \frac{f_y}{E} \text{인 경우:}$$

$$f_b = \left[0.94 - 0.76 \left(\frac{f_y D}{Et}\right)\right] \left(\frac{Z_p}{Z_e}\right)f_y \quad (5.c)$$

여기서 Z_e 와 Z_p 는 각각 탄성단면계수(elastic section modulus)와 소성단면계수(plastic section modulus)로 원형단면 강관의 경우 다음과 같이 산정된다.

$$Z_e = (\pi/64)(D^4 - (D-2t)^4)/(D/2), \quad (5.d)$$

$$Z_p = (1/6)[D^3 - (D-2t)^3] \quad (5.e)$$

휨 전단력 V 를 받는 강관부재가 만족해야 하는 강도의 요구 조건과 유용도를 식 (6.a)와 (6.b)에 각각 제시하였고, 비틀림 전단력을 받는 강관부재의 강도 요구 조건과 유용도를 식

(7.a)와 (7.b)에 각각 나타내었다.

$$\tau_b = \frac{2V}{A} \leq \frac{f_v}{\gamma_{R,v}} \tag{6.a}$$

$$U_m = \frac{\tau_b}{f_v/\gamma_{R,v}} = \frac{2V/A}{f_v/\gamma_{R,v}} \leq 1.0 \tag{6.b}$$

$$\tau_t = \frac{M_{v,t}D}{2I_p} \leq \frac{f_v}{\gamma_{R,v}} \tag{7.a}$$

$$U_m = \frac{\tau_t}{f_v/\gamma_{R,v}} = \frac{M_{v,t}D/2I_p}{f_v/\gamma_{R,v}} \leq 1.0 \tag{7.b}$$

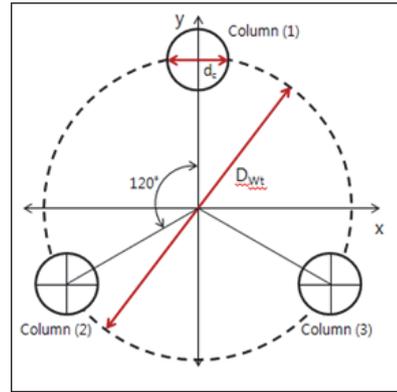
여기서, τ_b 와 τ_t 는 각각 계수하중에 의한 최대전단응력과 비틀전단응력이며, V 와 $M_{v,t}$ 는 각각 계수하중에 의한 전단력과 비틀모멘트이다. 또한, f_v 는 응력단위의 전단강도로서 $f_v = f_y/\sqrt{3}$ 로 정의되며 $\gamma_{R,v}$ 는 전단강도에 대한 부분저항계수로 1.05의 값을 갖는다. 전단강도 f_v 와 전단강도에 대한 부분저항계수 $\gamma_{R,v}$ 는 휨 전단과 비틀 전단에 대해 동일한 값을 갖는다. 비틀전단을 받는 부재의 식 (7)에 제시된 I_p 는 극관성모멘트로 원형단면강관의 경우 다음 식으로 표현된다.

$$I_p = (\pi/32) [D^4 - (D-2t)^4] \tag{7.c}$$

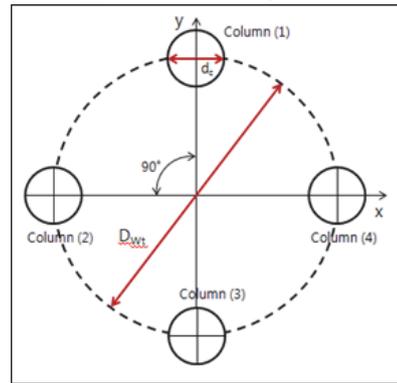
3. 멀티기둥타워의 기본 모델

본 장에서는 10MW급 단일 실린더형식 강재 풍력타워에 대응하는 멀티기둥타워 최적공간프레임 개발을 위한 기본 모델을 가정하고 유용도를 산정하는 과정을 보인다. 본 연구에서 원형강관 멀티기둥타워의 기본 모델을 제시함에 있어 주강관(chord)과 브레이스(brace) 배치에 대한 기본 가정은 다음과 같다.

- (1) 주강관은 멀티기둥타워 전체 단면의 중심을 기준으로 원주방향으로 등간격 배치한다.
- (2) 주강관을 연결하는 브레이스는 주강관보다 크지 않은 직경과 세장비를 가지는 강관부재를 적용한다.
- (3) 하나의 주강관은 좌우로 이웃하는 두 개의 주강관과 수평브레이스로 연결되며, 연결부는 T형 조인트를



(a) 3-column arrangement



(b) 4-column arrangement

Fig. 2. Multi-column tower cross-sectional arrangement

구성한다.

- (4) 브레이스는 멀티기둥타워의 축방향으로 등간격 배치된다.

가정 (1)과 관련해서, Fig. 2에 보였듯이, 외측 직경 d_c 의 주강관 m 개를 원주방향으로 등간격 배치하는 것을 기본으로 하고 있으며 각 강관의 중심선을 연결한 원의 지름을 D_{wt} 로 표시하고 멀티기둥 풍력타워지름으로 지칭한다. 원형강관 멀티기둥타워가 필요로 하는 원형부지의 최소 직경은 $D_{wt} + d_c$ 가 된다. 가정 (2)는 I형 단면 등 여러 타입의 단면을 가지는 부재가 브레이스로 적용될 수 있으나 본 연구에서는 주강관과 같은 원형단면 강관을 브레이스로 채택한다는 의미이다. 이 경우 주요 외력에 대응하는 주강관의 역할에 비해 전단저항이 주요 역할인 브레이스는 주강관보다 작은 직경의 부재를 사용하도록 한다. 또한 주강관과 브레이스의 단면이 다양한 조합을 가지질 수 있으나 주강관에 앞서 브레이스에서의 국부좌굴 발생을 방지하기 위해 브레이스의 세장비는 주강관의 세장비보다 크지 않도록 한다. 가정 (3)은 브레이스의 배치방식에 관한 사항인데 주강관과 주강관을 연결하여 하

나의 단일 타워 거동을 유도하기 위한 브레이스의 배치방식은 매우 다양할 수 있지만 본 연구에서는 조인트의 구성 및 제작성을 고려하여 대각 부재(diagonal member)는 고려하지 않는다는 의미이다. 가정 (4)는 멀티기둥 풍력타워의 축방향 지름으로 풍력타워직경(D_{wt})의 값을 변화시켜 전체적인 변단면을 고려해 볼 수 있으나 이 경우라도 브레이스의 배치간격은 동일하다는 조건을 의미한다. 본 연구에서 기본 모델로는 Fig. 2(a)와 (b)에 보인 바와 같이 3주 및 4주 형식으로 제안된다.

멀티기둥타워구조의 설계를 위해서는 각 부재의 강도 검토뿐만 아니라 주강관과 브레이스의 연결부인 조인트에 대한 강도도 함께 검토되어야 한다. 각 조인트의 설계강도는 각 부재 및 조인트에 작용하고 있는 부재력에 의존적으로 달라진다^{[9],[10]}. 즉, 각각의 설계강도는 작용중인 부재력의 함수로서, 작용하중과 강도의 상관관계에 의해 결정된다는 의미이며 적절한 설계가 이루어지기 위해서 반복 계산 과정이 필요할 수 있다. 유용도의 산정은 부재와 조인트의 강도평가가 모두 만족된 이후에 진행된다. 이러한 설계의 과정을 Fig. 3에 흐름도로 나타내었다.

멀티기둥타워를 구성하는 강관부재는 두께에 대한 외경의 비(D/t)로 표현되는 세장비에 따라 조밀단면, 비조밀단면, 세장단면으로 분류된다. 강구조물 설계의 포괄적인 지

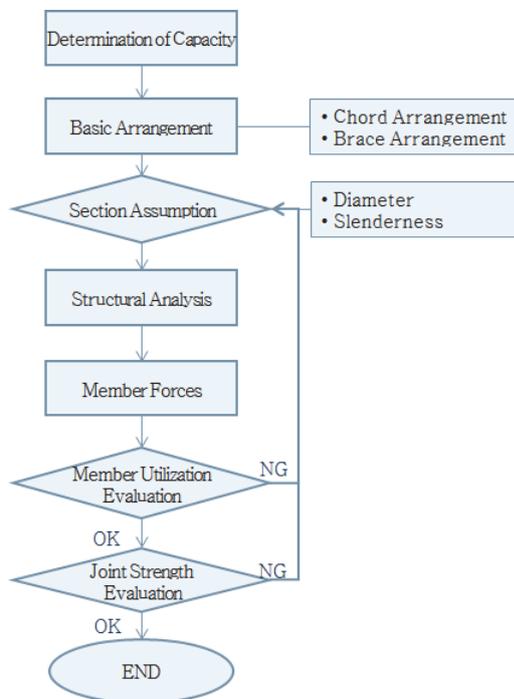


Fig. 3. Flowchart for design of multi-column wind tower

Table 1. Slenderness class category for circular hollow section^[11]

Class	Slenderness limit		
	1	$d/t \leq 50\epsilon^2$	
2	$d/t \leq 70\epsilon^2$		
3	$d/t \leq 90\epsilon^2$		
	Class 1	Class 2	Class 3
$f_y = 355MPa$	$d/t \leq 33.0$	$d/t \leq 46.2$	$d/t \leq 59.4$

침을 포함하고 있는 Eurocode 3^[11]에서는 이러한 세장비 조건을 원형 강관 단면에 대해서는 압축과 휨을 구분하지 않고 Table 1에 보인 바와 같이 각각 Class 1, 2, 3 단면으로 정의한다. Table 1에서 확인할 수 있듯이 원형 강관 단면(tubular section)의 세장비 기준은 사용되는 강재의 항복응력의 크기에 따라 그 Class가 결정된다. 본 연구에서는 기본적으로 널리 사용되는 SM520 강재를 적용하여 항복응력 f_y 을 355 MPa로 가정하였고, 고려되는 세장비는 각 Class의 최대값을 기준으로 Class 1 단면의 경우 33, Class 2 단면은 46.2, Class 3 단면은 59.4을 각 Class의 대표단면으로 설정하였다. Eurocode 3^[11]에서 Class 3 단면을 넘어서는 세장한 단면의 원형강관인 경우 별도의 셀구조의 규정을 적용할 것을 권고하고 있다.

본 연구에서는 부재력의 확인을 위해 범용 구조해석 프로그램 ABAQUS^[12]에서 제공되는 6자유도 보요소로 이용하여 멀티기둥타워를 모델링하여 선형탄성을 해석을 우선 수행하였다. 앞서 언급한 3주 및 4주 형식의 멀티기둥타워구조에 대한 모델링의 예를 Figs. 4와 5에 보였다. 각 모델에서는 주강관 및 브레이스가 3차원 보요소로 공간프레임을 구성하였다. 이때, 주강관 하부의 각 절점은 핀지지로 경계조건을 설정하였고, 상부는 타워중심에 추가의 절점을 설정하여 주변의 자유도를 그 절점에서 공유하게 하는 MPC(Multi-Point Constraint)기능을 활용하여 축방향하중 및 모멘트하중을 재하하였다. 풍력타워 구조물의 경우 용량별로 타워 높이 및 작용하중이 다를 수 있다. 본 연구에서는 용량 10MW급을 상정

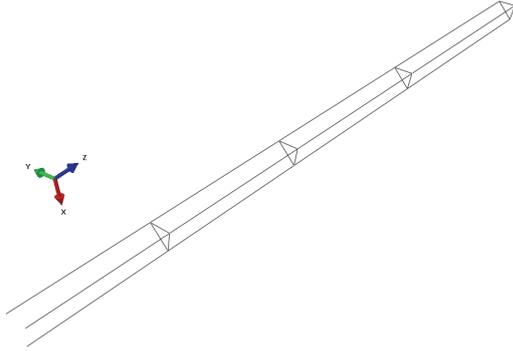


Fig. 4. Framed model for three-column tower structure

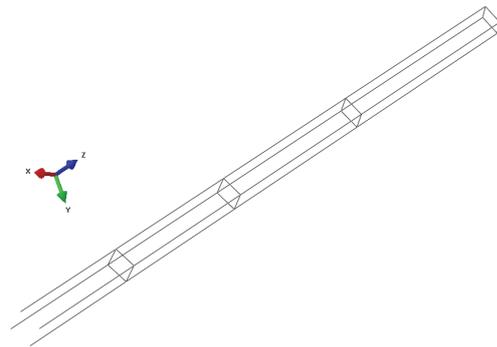


Fig. 5. Framed model for four-column tower structure

하여 타워의 높이를 120m로 가정하였고, 최근의 연구경향^[13]을 참조하여 블레이드활동에 의해 타워 상단에 전달되는 모멘트와 나셀 중량을 각각 모멘트 하중 79,800kN·m, 축방향 하중 2,660kN으로 모사하여 재하하였다. 이 수치는 타당성조사 수준에서 기본 단면 설정을 목적으로 가정된 값으로 실제 설계에는 더욱 정교한 하중효과를 고려해야 할 것이다. 여기에 추가로 강관부재의 자중과 풍속 9.84m/s를 고려한 등가의 항력을 재하하였다. 부재력산정을 위한 해석에 사용된 하중조건을 Table 2에 보였다. 10MW급 단일 원형실린더타워에 대응하는 멀티기둥타워 형식의 제원, 부재의 치수 및 재료상수는 Table 3에 제시하였으며 하나의 멀티기둥타워 시스템에서 채택된 주강관은 모두 동일한 사이즈이며, 브레이스 부재의 경우도 동일하게 가정하였다. 3주 및 4주의 멀티기둥 타워에서 주강관의 단면 크기는 제작 및 유지관리 인력과 장비의 통과 등을 고려하여 1.8~2.4m 수준으로, 브레이스는 그에 적합하게 1.0~1.6m 수준으로 설정하였다. 해석에서는 주강관과 브레이스의 지름과 세장비를 매개변수로 하여 그 결과를 분석하였다. 제시된 주강관과 브레이스의 단면 범위내에서 최적의 설계 단면을 선정하기 위해 앞 장에서

Table 2. Multi-column wind tower loading condition

Nacelle/blades capacity	10MW
Design wind speed	9.84m/s
Specific weight of steel	78kN/m ³
Moment at top	79,800kN·m
Axial force at top	2,660kN

Table 3. Dimension and properties for multi-column wind tower

Tower height	120m
Center-to-center column distance, D _{wt}	5.0m (Top)
	7.5m (Bottom)
Elastic modulus	205GPa
Yield strength	355MPa
Brace spacing	3~5 Equal spans
Chord diameter	1.8~2.4m
Brace diameter	1.0~1.6m
Slenderness ratio, D/t	33.0~59.4

제시한 ISO 19902^[8]의 설계기준으로부터 유용도를 산정하고 그 결과를 검토, 분석한다.

설계 효율성 평가를 위한 유용도는 설계강도에 대한 작용하중의 비로서, 모든 부재 및 조인트가 1이하의 값을 가질 때 설계가 가능한 것으로 평가된다. 모든 부재 및 조인트의 유용도가 1을 넘지 않으면서 1에 가까울수록 설계에 유리하지만 이는 이상적인 경우로 실구조물에서는 기대하기 어렵다. 그 이유로는 실구조물에서는 위치와 역할에 따라 부재별로 유용도 분포에 큰 편차가 있기 때문이다. 본 연구에서는 앞서 제시한 기본가정에 근거한 멀티기둥타워시스템에서 모든 부재 및 조인트의 유용도를 산정하여 1에 대한 초과 여부를 검토하고, 만약 이 조건을 만족하는 경우 유용도 값 중에서 최대값을 그 타워시스템의 유용도로 정의한다.

4. 강관부재의 강도검토를 위한 유용도 평가

강관부재의 강도검토에 앞서 먼저 부재에 가장 큰 영향을 주는 부재 작용력을 파악하기 위하여 축력, 전단, 휨모멘트, 비틀림모멘트 등 부재력별로 유용도 분포 수준을 파악해 보도록 한다. 하중을 직접적으로 받는 주강관(Chord)의 직경을 1.8~2.4m 범위 내의 매개변수로 하고 그에 적합한 브레이스의 직경을 1.2m로 가정하여 주강관부재와 브레이스부재

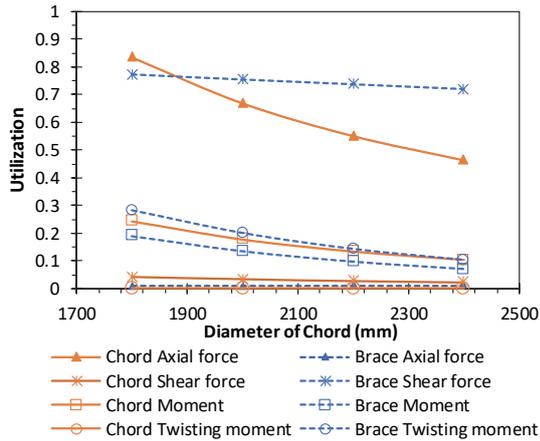


Fig. 6. Utilization distribution of 3-column tower with Class 1 sections

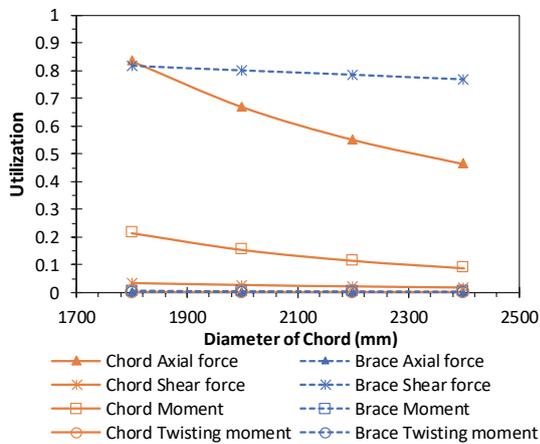


Fig. 7. Utilization distribution of 4-column tower with Class 2 sections

의 부재력별 유용도 평가를 3주 형식 및 4주 형식에 대해 수행하였다. 동일 하중 조건에 따라 3주 형식은 4주 형식 대비 더 높은 수준의 부재력 발생이 예상되므로 더 두꺼운 강관을 적용하였다. Fig. 6은 Eurocode 3^[11]의 강관 단면 분류에 따른 Class 1단면(D/t=33.0)에 대한 3주 3단 멀티기둥타워에서 부재력별 유용도 분포를 주강관(Chord) 직경의 변화에 따라 보여준다. 또한 Fig. 7에서는 Class 2 단면(D/t=46.2)인 4주 3단 멀티기둥타워의 경우를 나타내고 있다. 여기서 ‘m주 n단’은 m개의 주강관을 채택하여 n층의 브레이스를 수평배열한다는 의미이다. 멀티기둥타워에서 3주의 브레이스는 4주의 브레이스보다 휨모멘트와 비틀림모멘트에 대하여 더 많은 하중을 받고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 3주와 4주 멀티기둥타워 모두 주강관 부재의 경우 축방향 하중 유용

도가 다른 부재력에 따른 유용도 대비 가장 큰 것으로 나타났으며 주강관의 지름이 커질수록 유용도는 감소하는 현상을 보이고 있다.

수평재를 이루는 브레이스 부재의 경우에는 전단력에 따른 유용도가 가장 크게 나타나는 현상을 보인다. 이는 멀티기둥타워 구조에서 주강관은 축력에 의해 강도지배를 받고, 브레이스는 전단력에 의해 강도지배를 받고 있다는 것을 알 수 있다. Figs. 6과 7에서 확인할 수 있듯이 부재력별로 유용도의 차이는 상당하다 할 수 있다. 설계 개념상 주강관과 브레이스의 각 부재별로 검토된 축력, 전단력, 휨모멘트, 및 비틀림모멘트 모두에 대해 유용도를 검토하여 그 최대값이 고려되는 멀티기둥타워구조의 대표 유용도 값이 된다.

4.1 주강관 매개변수에 따른 유용도 평가

본 절에서는 수평 브레이스 3단의 3주 및 4주 멀티기둥타워구조에서 주강관의 직경과 Class별 단면세장비를 매개변수로 유용도 평가를 수행한다. 앞서 3장의 기본 가정 (2)에 언급하였듯이 브레이스의 세장비는 주강관의 세장비보다 크지 않다는 조건하에 주강관과 브레이스의 단면 조합이 고려되었다. 예를 들어, 주강관이 Class 2 단면이라면 브레이스는 Class 1과 2 단면이 각각 다른 조합으로 고려되지만, 주강관이 Class 1 단면일 경우 브레이스는 Class 1 단면만 고려된다는 의미이다. 주강관이 Class 3인 경우 브레이스는 Class 1, 2, 3 단면 모두가 검토된다. 본 예제에서는 브레이스의 직경은 1.2 m로 고정하였다.

Figs. 8과 9에 주강관 직경의 변화에 따른 주강관과 브레이스의 부재별 유용도를 각각 나타내었고, Fig. 10에는 이들의 평균값을 나타내었다. 설계상 강도 검토를 만족하기 위해서는 부재에 상관없이 유용도의 최대값이 1을 넘어서는 안 된다. Figs. 8과 9에서 확인할 수 있듯이 3주 멀티기둥타워의 경우, 가장 얇은 두께인 Class 3 단면을 채택하면 주강관 및 브레이스의 유용도가 모두 1을 초과하여 강도검토 불만족이 된다. 또한, Class 2인 단면을 채택하더라도 주강관은 강도만족이지만 브레이스의 유용도가 1을 초과하므로 3주 멀티기둥타워의 설계에는 Class 1의 단면만이 채택될 수 있다는 것을 의미한다. 4주 멀티기둥타워의 경우, 우선 Class 3 단면을 채택하면 주강관은 직경 2m 이상이면 강도만족이지만 브레이스의 유용도가 모두 1을 넘어서는 경향을 보이므로 Class 3을 설계에 채택하려면 적용된 직경 1.2m의 브레이스 부재보다는 직경을 키워야 한다는 것을 알 수 있다. 또한, 두

계가 가장 두꺼운 Class 1 단면을 채택하면 4주 멀티기둥타워의 주강관 및 브레이스 부재 모두 유용도가 0.6에도 미치지

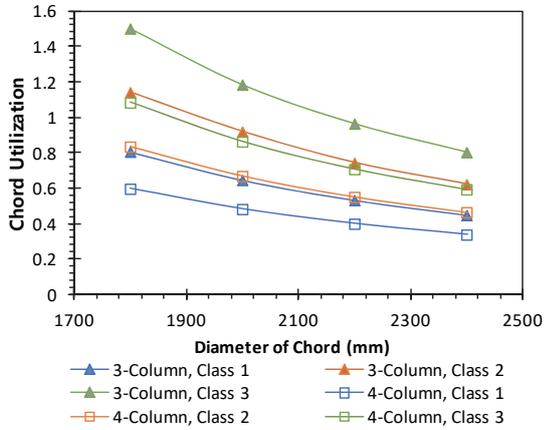


Fig. 8. Chord utilization vs. chord diameter

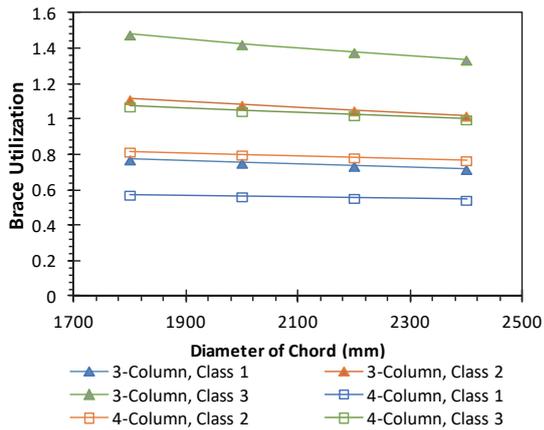


Fig. 9. Brace utilization vs. chord diameter

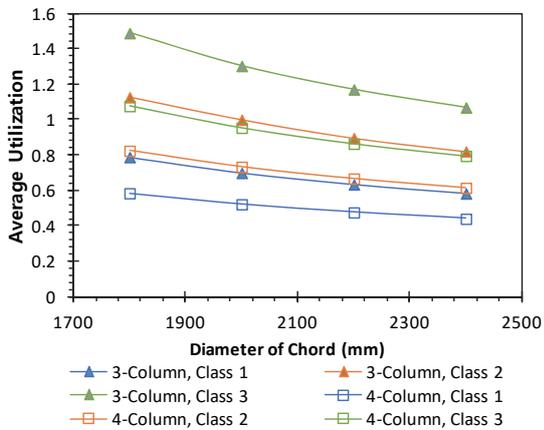


Fig. 10. Average utilization vs. chord diameter

지 못하므로 경제적 설계로 보기 어렵게 된다. 3주 및 4주 멀티기둥에 대해서 그 평균을 Fig. 10에 보였는데, 같은 세장비(D/t) 조건에서 3주 멀티기둥타워 부재의 유용도가 4주 멀티기둥타워의 부재의 유용도보다 더 크게 나타나는 현상을 확인할 수 있다. 유용도는 설계강도에 대한 작용하중의 비이므로 유용도가 더 낮게 나타나는 4주 멀티기둥타워의 경우가 더 안전측으로 설계된다는 것을 의미한다.

본 연구에서의 멀티기둥타워 설정의 기본가정에 의한 모델이 직경 1.2m의 3단 브레이스이고, 주강관을 직경 1.8~2.4m 범위내에서 채택한다면 3주 멀티기둥타워에 대해서는 Class 1 단면, 4주 멀티기둥타워에 대해서는 Class 2 단면을 적용하는 것이 최적설계로 보여진다.

4.2 브레이스 매개변수에 따른 유용도 평가

본 절에서는 3단의 브레이스가 설치된 3주 및 4주 멀티기둥타워에서 브레이스의 Class 및 직경 변화에 따른 유용도의 반응 민감도를 살펴본다. 주강관 직경을 2.0m로 고정하고, 브레이스 직경을 1.0~1.6m로 변화할 때 유용도의 변화를 평가한다. 브레이스 직경에 따른 주강관 및 브레이스 부재의 유용도를 Figs. 11과 12에 나타내었다. Fig. 11에서 확인할 수 있듯이 브레이스의 단면 변화에 대한 주강관의 유용도는 크게 반응하지 않는다. 이는 브레이스가 일정 수준의 전단강도만 제공할 수 있다면 주강관의 축방향 강도평가에는 크게 영향을 주지 않는다는 사실을 확인시켜준다.

직경 2m의 주강관으로 구성된 3주 멀티기둥타워에서 Class 3 단면을 채택할 경우 유용도가 모두 1을 초과하여 강도검토 불만족 상태가 된다. 4주 멀티기둥타워에서는 Class 1 단면의 유용도가 0.6수준에도 미치지 못하므로 경제성이 떨어져 최적설계로 보기 어렵다. 주강관의 유용도를 보여주는 Fig. 11에서 3주 Class 3 단면만 제외한다면 강도검토는 만족됨을 알 수 있다. 그러나 브레이스의 유용도를 보여주는 Fig. 12에서는 브레이스 직경의 변화에 따라 브레이스의 유용도는 민감하게 반응한다는 것을 확인할 수 있다. 주강관의 개수 및 브레이스의 직경에 따라 OK(강도검토 만족)와 NG(강도검토 불만족)가 나뉘게 되며, 4주 Class 1 단면만이 구간에서 OK가 된다는 것을 확인할 수 있다.

본 예제에서 보인 주강관의 직경이 2m인 경우에는 안전율과 경제성을 고려한 유용도 0.6~0.8 수준인 Class 1 단면의 3주 멀티기둥타워, Class 2 단면의 4주 멀티기둥타워가 최적설계로 이어질 것으로 보인다. 또한 이 때의 브레이스

직경은 1.2~1.4m 수준이 적합하다는 것을 알 수 있다. Fig. 13은 브레이스의 지름에 따른 주강관과 브레이스 유용도의 평

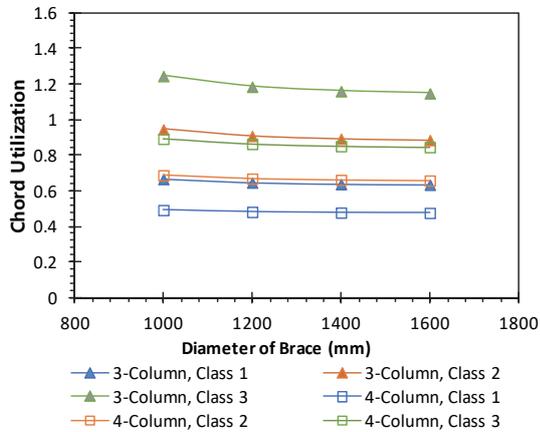


Fig. 11. Chord utilization vs. brace diameter

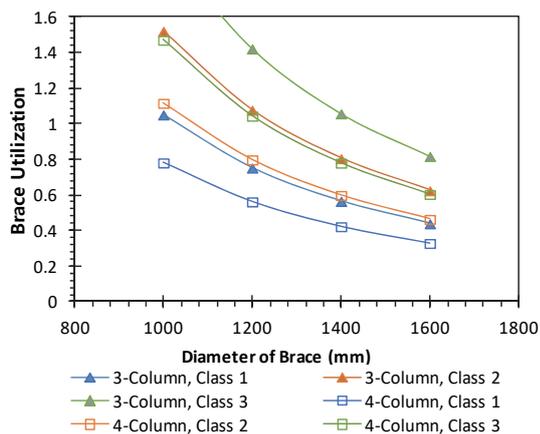


Fig. 12. Brace utilization vs. brace diameter

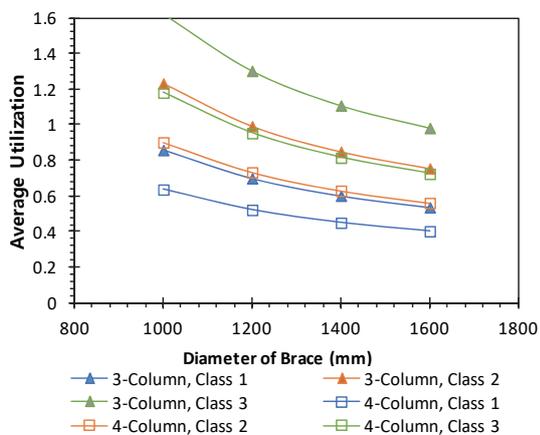


Fig. 13. Average utilization vs. brace diameter

균값을 나타낸 그래프이다. 주강관 매개변수에 따른 유용도 평가와 마찬가지로 코드의 지름 2m, 브레이스의 지름 1.2~1.6m 범위내에서, 3주 멀티기둥타워에 대해서는 Class 1 또는 2 단면, 4주 멀티기둥타워에 대해서는 Class 3 단면이 추천된다.

4.3 브레이스의 수평배열 단수에 따른 유용도 평가

앞서 보인 예제에서 브레이스 3단 배열의 멀티기둥타워 구조형식의 유용도를 살펴 본 결과, Class 2 단면과 Class 3 단면을 채택할 경우 부재 최대 유용도가 1을 초과하는 경향이 있음을 확인하였다. 이에 본 절에서는 브레이스의 등간격 수평배열 단수를 변화시키면서 각 세장비별로 부재의 유용도를 살펴보도록 한다. 앞서의 예제와 동일하게 Class 1, 2, 3 단면을 D/t가 33.0, 46.2, 59.4로 각각 설정하였다. 또한, 주강관과 브레이스의 직경은 2m와 1.2m로 각각 설정하고 브레이스를 3~5단(spacing)으로 타워 종방향 등간격 배열하여 모델링하였다.

세장비(D/t)에 따른 3주 및 4주 멀티기둥타워의 수평재 3단, 4단, 5단에 대하여 주강관 및 브레이스 유용도를 Fig. 14 및 15에 각각 보였다. 주강관의 개수와 수평재의 단수에 상관없이 세장비(D/t)가 증가함에 따라 즉, 부재의 두께가 얇아질수록 유용도는 증가한다는 것은 확인할 수 있다. Fig. 14에서 확인할 수 있듯이 단수에 따른 주강관의 유용도는 큰 변화를 보이지는 않는데, 이는 수평재 단수의 변화에 따라 설계강도는 약간 증가하지만 하중에 의해 발생하는 축력은 수평재의 단수에 상관없이 거의 일정한 값을 가지기 때문인 것으로 설명된다. 그러나 주강관의 경우와는 달리 브레이스의 유용도는 수평재 단수의 변화에 따라 민감하게 반응한다는 것을 Fig. 15에서 확인할 수 있다. 수평재 단수가 증가함에 따라 수평재를 구성하는 브레이스의 유용도는 감소하게 된다. 이는 단수의 증가에 따라 하나의 브레이스가 감당하는 전단력의 크기는 작아지기 때문으로 이해될 수 있다. 즉, 멀티기둥타워에서 수평재의 단수를 증가시키면 주강관은 크게 영향을 받지 않지만 브레이스는 더 안전 측으로 설계된다는 것을 의미한다.

Fig. 16에는 3주 및 4주 타워의 단수별로 주강관과 브레이스의 각 유용도에 대한 평균값을 보여준다. 3주 타워는 강관의 두께가 얇은 Class 3 단면을 사용할 때에 수평재를 5단 이상으로 설치해야 설계상 강도검토 만족이 될 것으로 보인다. Class 1 단면의 4주 타워는 유용도가 0.6수준에 미치지

못하므로 3단을 초과하는 경우 경제성이 떨어진다고 볼 수 있다. 유용도 평가에서 Class 2 단면은 3주의 4, 5단, 4주의

3, 4단이 최적설계로 추천될 수 있다. 또한 Class 3 단면의 경우에는 4주의 4단 및 5단을 적용하는 것이 실시 설계 검토의 출발점으로 추천될 수 있다.

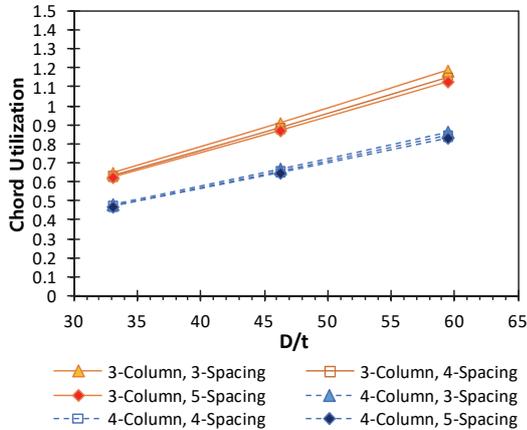


Fig. 14. Chord utilization vs. member slenderness (D/t)

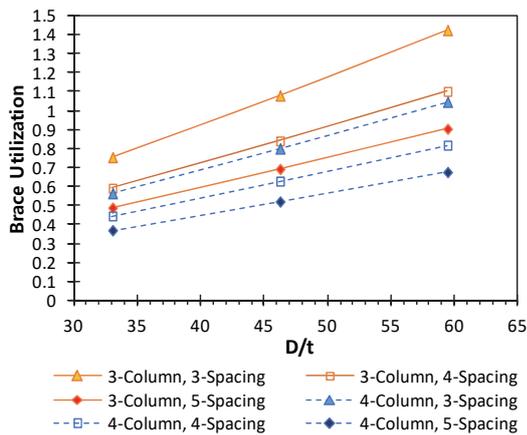


Fig. 15. Brace utilization vs. member slenderness (D/t)

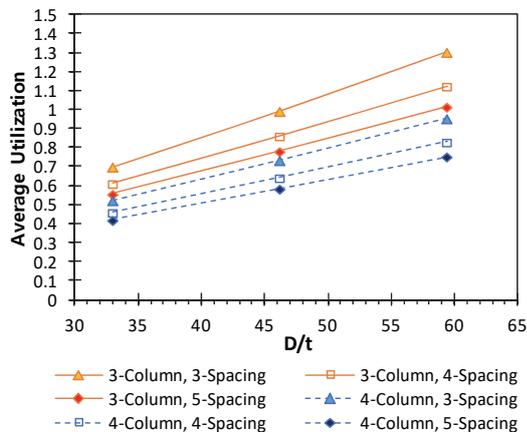


Fig. 16. Average utilization vs. member slenderness (D/t)

5. 결론

본 연구에서는 10MW급 풍력하중을 받는 멀티기둥 타워 시스템에 적용되는 강관 부재에 대하여 구조적 적합성과 더불어 경제성을 함께 검토하는 방식으로 부재의 유용도를 활용한 개념설계의 예를 보였다. 먼저 각 부재의 거동에 따라 정의되는 유용도와 강도를 ISO 19902에 근거하여 검토하였다. 멀티기둥타워 구조의 구성에 관한 기본적인 가정에 따라 1차로 제안된 구조물의 해석을 통해 부재력을 확인하고, 작용하고 있는 부재력의 함수로 표현되는 조인트강도를 검토하였다. 산정된 부재강도와 작용하중을 근간으로 제안된 멀티기둥타워 구조물의 각 부재별로 축력, 전단, 휨, 비틀에 대한 유용도를 계산하여 발생하는 최대값을 해당 구조물의 유용도로 평가하였다.

단일 실린더형 타워를 대체할 수 있는 규모의 멀티기둥타워 방식에 대한 기본가정을 적용하여 개념설계에 채택될 수 있는 수준의 유용도 범위에서 강관 치수, 세장비 및 수평재 단수 등의 설계 매개변수를 제안하였다. 주강관의 직경 1.8~2.4m, 브레이스의 직경 1.2~1.6m 범위 내에서 수평재 3단의 3주 멀티기둥타워에서 Class 1 단면이, 4주 멀티기둥타워에서 Class 2 단면이 유용도 평가에서 최적단면으로 제안되었다. 수평재의 단수가 고려된다면 Class 1 단면으로 3단과 4단의 3주 타워, Class 2 단면으로 5단 3주와 3단 및 4단의 4주 타워, Class 3 단면으로는 5단 4주 타워가 본 연구에서 검토한 개념설계 단계의 최적단면 후보로 제안되었다.

유용도는 1.0 이하의 값을 가질 때 강도검토시 만족(OK)이 되고 1.0에 가까울수록 경제적인 설계로 볼 수 있지만 본 연구에서는 안전율과 경제성을 고려하여 유용도 0.6~0.8 수준에서 제안되었다. 이러한 정량적인 유용도 값은 경제성이 고려된 최적의 단면 및 구조계 도출에 기초 자료로 활용될 수 있다. 합리적 수준의 유용도의 정량적인 값은 추후 많은 연구와 논의가 필요할 것으로 예상된다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 청주대학교 연구장학 지원을 받아 수

행된 연구임.

참고문헌(References)

- [1] 김종민, 황민오, 최병호, 김경식(2013) 10MW급 신형식 강재 풍력타워 최적단면 평가, 2013년 대한토목학회 정기학술발표대회, 대한토목학회, pp.2340-2343.
Kim, J., Hwang, M.O., Choi, B.-H., and Kim, K. (2013) Concept Design of the New-Type 10MW Steel wind Towers, *Proceedings of 39th Annual Conference of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, pp.2340-2343 (in Korean).
- [2] 안준태, 신동구(2015) 풍력발전 타워용 원형단면 강재 셸의 극한휨강도, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제27권, 제1호, pp.109-118.
Ahn, J.T., and Shin, D.K. (2015) Ultimate Flexural Strength of Cylindrical Steel Shell for Wind Tower, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.27, No. 1, pp.109-118 (in Korean).
- [3] 김종민, 박현용, 김경식(2014) 멀티기둥-강관 풍력타워 연결부 성능평가, 한국산학기술학회논문지, 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).
- [4] 김경식, 박현용, 서동혁(2015) 원형단면 멀티기둥 풍력타워 적용 T형 강관조인트 강도 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제27권, 제1호, pp.119-129.
Kim, K.S., Park, H.Y., and 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 (in Korean).
- [5] American Institute of Steel Construction (2011) *Steel Construction Manual* (14th Ed.), AISC, USA.
- [6] European Committee for Standardization (2005) *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1.8: Design of Joints* (EN 1993-1-8: 2005), Belgium.
- [7] 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.
- [8] International Organization for Standardization (2007) *Petroleum and Natural Gas Industries - Fixed Steel Offshore Structure* (ISO 19902: 2007), Switzerland.
- [9] 김경식(2016) 압축과 휨을 동시에 받는 강관 T조인트 극한강도 상호작용, 한국산학기술학회논문지, 한국산학기술학회, 제17권, 제1호, pp.298-303.
Kim, K.-S. (2016) Ultimate Strength Interaction of Steel Tubular T-Joint Subjected to Concurrent Action of Compression and Bending, *Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society*, KAIS, Vol.17, No.1, pp. 298-303 (in Korean).
- [10] 김경식, 김미진(2016) 원형단면 멀티기둥 풍력타워 적용 강관 부재의 유용도 평가, 한국강구조학회 학술발표대회 논문집, 한국강구조학회, pp.135-136.
Kim, K.-S., and Kim, M.J. (2016) Evaluation of Members Utilization for Circular Section Multi-Column Wind Towers, *Proceedings of Annual Conference of Korean Society of Steel Construction Conference*, KSSC, pp.135-136 (in Korean).
- [11] European Committee for Standardization (2005) *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings* (EN 1993-1-1: 2005), Belgium.
- [12] Dassault Systèmes Simulia Corp. (2018) *Abaqus/Standard User's Manual, Version 6.8.-2*, DSS, USA.
- [13] 한나, 박종섭, 강성용, 강영종(2015) 설계하중조건에 따른 해상풍력 강재타워 출입구에 발생하는 응력집중에 대한 해석적 연구, 한국산학기술학회논문지, 한국산학기술학회, 제16권, 제2호, pp.1516-1523.
Reyno, H., Park, J.-S., Kang, S.-Y., and Kang, K.-J. (2015) A Numerical Analysis for Stress Concentration of Openings in Offshore Tubular Steel Tower Under Design Loading Condition, *Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society*, KAIS, Vol.16, No.2, pp.1516-1523 (in Korean).

요약 : 본 연구에서는 10MW급 풍력하중을 받는 멀티기둥 타워시스템에 원형강관 부재의 구조안전성 및 경제성을 함께 검토하는 방식으로 부재 유용도에 근거한 개념설계의 예를 보였다. 단일 실린더형 타워를 대체할 수 있는 멀티기둥타워 구조의 구성에 관한 기본적인 가정을 정립하였고, 그에 따라 제안된 구조물을 모델링하고 해석하여 부재력을 확인하였다. 산정된 부재강도와 작용하중을 근간으로 제안된 멀티기둥타워의 각 부재별로 축력, 전단, 휨, 비틀에 대한 유용도가 산정되었고, 풍력타워로서의 적합성이 평가하였다. 멀티기둥 풍력타워의 개념설계에 채택될 수 있는 수준의 유용도 범위에서 강관 치수, 세장비 및 수평재 단수 등의 설계 매개변수를 제안하였다.

핵심용어 : 풍력타워, 원형강관, 설계기준, 개념설계, 부재유용도, 강도평가