

멀티기둥-강관 풍력타워 연결부 성능 평가

김종민¹, 박현용², 김경식^{3*}

¹포항산업과학연구원 강구조연구소, ²한밭대학교 건설환경공학과, ³청주대학교 토목공학과

Performance Evaluation of Junctions between Multi-Tubular and Cylindrical Sections for Steel Wind Tower

Jongmin Kim¹, Hyun-Yong Park² and Kyungsik Kim^{3*}

¹Steel Structure Research Division, RIST

²Department of Civil and Environmental Engineering, Hanbat National University

³Department of Civil Engineering, Cheongju University

요약 본 논문에서는 기존의 단일대형강관 타워의 일부를 복수의 강관으로 대체한 멀티기둥-단일대형강관 하이브리드형식 풍력타워의 적용성을 평가하기 위하여 연결부의 성능을 수치해석적으로 평가하였다. 연결부의 형태는 멀티기둥의 단일대형강관 단부 관통 여부, 멀티기둥 하단부 날개 보강재의 유무 및 단일대형강관 내부 가로보 배치형식으로 구분하였다. 해석은 응력집중을 평가하기 위한 선형탄성해석과 극한강도를 평가하기 위한 재료 및 기하비선형 해석이 수행되었다. 수직력과 수평력에 대한 구조성능 분석 결과, 가로보 배치형식과 날개 보강재는 타워 구조계의 극한강도에 민감하게 영향을 주는 것으로 확인되었다.

Abstract Numerical investigations have been conducted on the junction that connect the multi-tubular section and the single shell section in order to evaluate applicability of hybrid sections in wind turbine towers instead of conventional single shell towers. Major characteristics in structural details include extension of multi-tubular member into shell end section, installation of wing stiffeners, and different layout of floor beams. Elastic and nonlinear incremental analyses were conducted to examine stress concentration patterns and ultimate behaviors, respectively. Based on evaluation of structural performance due to vertical and horizontal forces, it has been confirmed that installation of floor beams and wing stiffeners sensitively affect ultimate strength of global wind tower.

Key Words : Multi-tubular, Shell, Stress concentration, Ultimate strength, Wind turbine tower

1. 서론

현재 풍력발전 시스템은 발전기 용량 5~6MW급의 실증이 완료되었고 7MW급 발전기는 상용화 단계이며, 10MW급 초대형 풍력발전 시스템은 타당성을 검토하는 단계에 있다. 주로 단일 강관 형태로 제작되고 있는 풍력타워는 10MW급 풍력발전기에 적용될 경우 최대 직경이 7.75m 내외가 될 것으로 보고되고 있는데[1], 이러한 직경 대형화는 타워 좌굴 내하력 감소로 이어져 강관의 두

께 증가가 불가피하고, 바람에 의한 투영면적이 넓어지므로 타워 자체가 받는 풍하중의 크기가 증가하는 등의 문제점이 발생한다.

본 연구에서 제시하고 있는 멀티기둥 풍력타워는 하나의 대구경 강관을 소구경 복수의 강관으로 대체함으로써 풍하중의 영향을 완화시킬 수 있는 구조형식이다. 멀티기둥 타워의 구조는 Fig. 1(a)와 같이 다수의 원형강관을 배치하여 하나의 타워로 거동하는 구조와 Fig. 1(b)에 보인 멀티강관과 대형원통강관을 연결한 복합 구조로 나눌 수

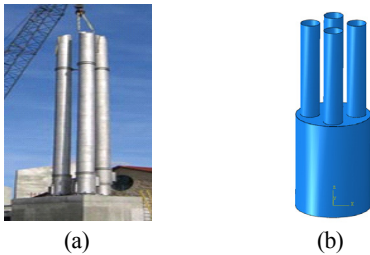
본 논문은 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(과제번호 12기술혁신E09)에 의해 수행되었음.

*Corresponding Author : Kyungsik Kim(Cheongju University)

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

Received February 11, 2014 Revised February 21, 2014 Accepted March 6, 2014

있다. Fig. 1(b)의 경우, 타워 상단으로부터 내려오는 응력흐름이 멀티기둥에서 하부 대형원통의 벽면이 아닌 단부 원형단면에 수직한 방향으로 발생되기 때문에 이를 저항할 수 있는 적절한 보강재의 설치가 필요하다. 이 때 보강재는 응력집중이 발생하지 않도록 신중하게 배치되어야 한다[2,3]. 본 연구에서는 구조해석을 통해 멀티기둥-강관 풍력타워 연결부의 축방향 및 수평력에 대한 거동을 평가하여 적절한 보강형식을 도출하고자 한다.



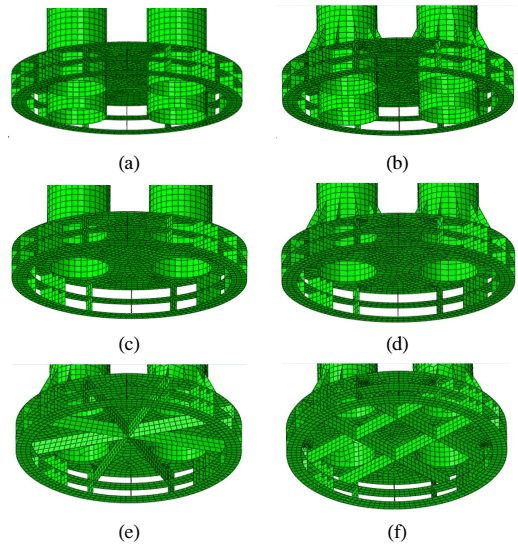
[Fig. 1] Multi-tubular wind tower
 (a) Multi-tubular section
 (b) Hybrid type consisted of multi-tubular and cylindrical sections

2. 연결부 성능평가

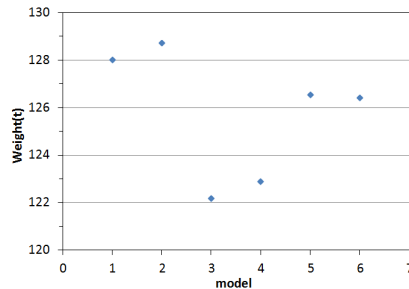
2.1 해석모델 제원

해석에 사용된 모델은 Fig. 1(b)와 같이 대형원통부와 멀티기둥부가 연결된 구조로서 그 길이는 각각 10m로 동일하다. 대형원통의 직경은 7.75m, 4개로 구성된 멀티기둥의 각 강관직경은 2m이다. 강재 탄성계수는 210GPa, 항복강도는 355MPa를 적용하였다. 범용 구조해석 프로그램 램인 ABAQUS[4]를 이용하여 탄성 및 비탄성 해석을 수행하여 연결부의 응력집중을 검토하고 극한강도를 확인하였다. 해석모델의 경계조건으로 대형원통부 하단을 고정시켰으며 멀티기둥부 상단에 집중하중을 재하하였다.

Fig. 2에 본 연구에서 검증하고자 하는 총 6가지 형태의 대형원통내 상부 보강상세를 나타내었다. 기본적인 형태는 Fig. 2(a)의 모델 1과 같이 멀티기둥과 대형원통강관이 만나는 부위에 원형 판을 배치하고, 원형 판 하부에 링 플랜지를 0.5m 간격으로 2단 배치한 뒤, 원형 판과 링 플랜지 사이에 사각형 보강재를 원통셀 벽면을 따라 일정 간격으로 배치시킨 구조이다. 그리고 Fig. 2(b)~(f)의 모델 2~6은 모델 1을 바탕으로 보강상세를 조금씩 변화시킨 형태로서 Table 1에 이들 형식별 특징을 요약하여 나타내었다. Fig. 3은 각 연결부 형식의 강재중량을 도식화 한 것이다.



[Fig. 2] Structural details of transitions
 (a) Model 1 (b) Model 2 (c) Model 3 (d) Model 4
 (e) Model 5 (f) Model 6



[Fig. 3] Weight of hypothetical models

[Table 1] Details of connection types

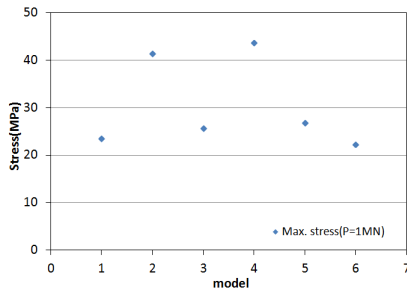
Model No.	Details		
	Plate-through	Wing stiffener	Floor beam
1	○	X	X
2	○	○	X
3	X	X	X
4	X	○	X
5	X	○	radial
6	X	○	cross

Table 1의 ‘Plate-through’는 멀티기둥이 원형 판을 관통하여 하단 링 플랜지까지 길이가 연장된 경우로서 멀티기둥의 총 길이는 11m가 되는 형식이며, 모델 1 및 2가 이에 해당된다. ‘Wing stiffener’는 멀티기둥과 단부 원형 판이

만나는 지점에 직각삼각형 형태의 날개 보강재를 12개 배치한 경우로서 모델 2, 4, 5 및 6에 적용시켰으며, 마지막으로 'Floor beam'은 원형 플레이트 하단에 가로보가 배치된 경우로서, 가로보들이 한 점에서 만나는 모델 5의 방사형과 井자 형태로 배치된 모델 6의 십자형으로 구분하였다. Floor beam은 원형 판에 연속적으로 형성되는 응력흐름을 원통셀 벽면으로 전달하기 위해 고안된 구조상세이다.

2.2 압축력에 의한 최대응력 비교

단위하중 1MN를 압축방향으로 재하시킨 선형탄성해석을 수행한 뒤 각 형식별 연결부에 발생하는 최대응력을 Fig. 4에 나타내었으며, 응력 및 변형형상을 Fig. 5와 같다. 최대응력 크기만을 놓고 보았을 때 가장 유리한 모델은 멀티기둥이 단부 원형 판을 관통하지 않고, 날개 보강재가 부착된, 십자형 가로보가 설치된 모델 6이다. 모델 1에서 발생한 최대응력 크기는 5.5% 가량 증가된 수준으로 모델 6과 미미한 차이를 보였으나, Fig. 3에 나타난 바와 같이 모델 1의 중량이 모델 6에 비해 크기 때문에 최적 연결 형상은 모델 6인 것으로 판단된다.

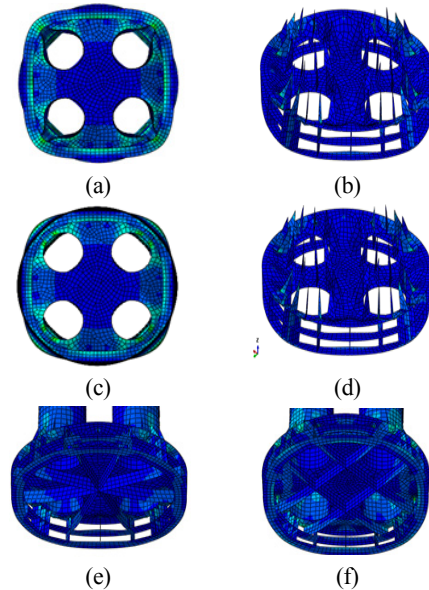


[Fig. 4] Maximum stresses by axial compression

가로보가 설치되지 않은 모델 1~4의 최대응력을 Fig. 4를 통해 비교하면, 날개 보강재가 설치된 모델 2와 4에서 응력 집중이 크게 발생하여 오히려 불리해지는 것을 알 수 있다. 하지만 Fig. 5의 응력분포 형상을 살펴보면 모델 2와 4의 응력분포가 모델 1과 3에 비해 더욱 고르게 형성되며, 날개 보강재 접합부에만 응력 집중이 발생하고 있으므로, 이러한 국부 응력 조절이 가능하다면 날개 보강재 설치가 피로성능에 영향을 주는 응력범위를 줄여줄 수 있을 것으로 판단된다.

날개 보강재와 가로보가 함께 부착된 모델 5와 6의 경우, 모델 2와 4에 비해 최대 응력이 크게 낮아지며 모델 6은 오히려 날개 보강재가 적용되지 않은 모델 1과 3에 비해서도 낮은 응력값을 보였다. 즉, 가로보는 날개 보강재 위치에서의 응력 집중현상을 완화시켜 주는 역할을

하므로 필수적으로 설치되어야 한다고 판단되며, 방사형에 비해 최대 응력이 20.8% 낮게 발생하는 십자형의 가로보가 보다 적절한 것으로 판단된다.



[Fig. 5] Deformed shapes by axial compression (Linear analyses)
 (a) Model 1 (b) Model 2
 (c) Model 3 (d) Model 4
 (e) Model 5 (f) Model 6

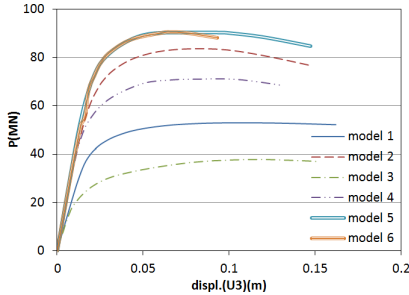
멀티기둥이 단부 원형 판을 관통하는 모델 1, 2는 멀티기둥이 관통하지 않고 원형 판에 부착된 모델 3, 4에 비해 응력은 저감되나 Fig. 3과 같이 부재길이 연장으로 인한 강재중량이 늘어나므로 멀티기둥 관통여부 결정시에는 엄밀한 경제성평가가 필요하다.

2.3 압축력에 의한 극한강도 비교

2.2절의 선형탄성해석 결과는 단순히 응력집중 크기의 상대적 비교는 가능하나, 부재의 일부가 항복 또는 좌굴에 따른 영향을 평가할 수 없으므로 본 절에서는 재료 및 기하 비선형이 고려된 해석을 실시하여 연결부 모델의 극한강도를 비교하였다. 하중 및 경계조건은 선형탄성해석과 동일하다.

Fig. 6은 작용하는 하중과 구조물에 발생하는 변위와의 관계를 나타낸 것으로, 그래프의 최대값이 구조물의 극한강도이며, 그래프의 기울기는 구조물의 강성값이다. Fig. 6에서 극한강도는 모델 5이 가장 높았으나, 모델 6과의 차이는 1% 이내로 미미하며, 다음으로 모델 2-4-1-3

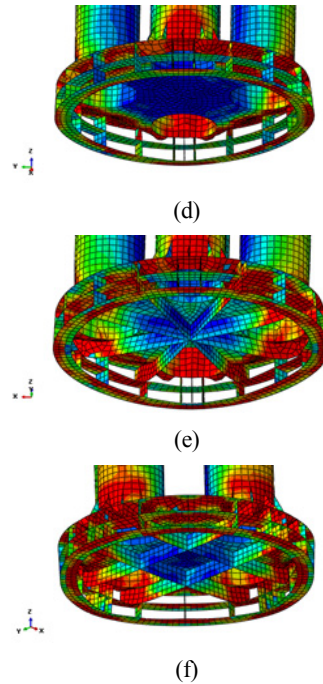
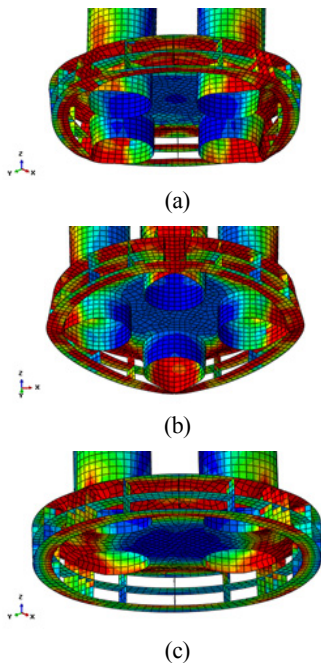
순으로 극한강도가 점점 낮아짐을 알 수 있는데 이는 모델의 강성값 크기 순서와도 동일하다.



[Fig. 6] Load-displacement curves by axial compression

모델 5, 6, 2, 4의 경우 구조물이 극한상태에 다다른 전 그래프의 기울기가 크게 차이 나지 않는데, 이는 날개 보강재 설치가 구조물 강성 증대에 크게 기여함을 알 수 있으며, 가로보 및 멀티기둥의 관통 여부는 구조물의 강성보다는 극한 강도에 더 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다.

Fig. 4와 6을 통하여, 날개 보강재는 응력집중을 발생시키는 단점이 있지만 구조물의 강성 및 강도 증대에는 효율적이며, 날개 보강재 부착에 의한 응력집중을 저감시키고, 극한강도를 높이기 위해서는 가로보 설치가 동반되어야 한다고 판단된다. Fig. 7에서 비선형해석에 의한 각 모델 변형형상 대표도를 보여준다.



[Fig. 7] Deformed shapes by axial compression (Nonlinear analyses)

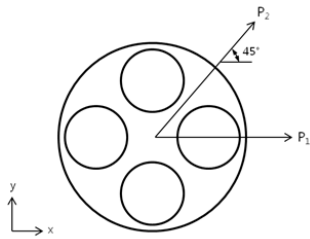
- (a) Model 1 (b) Model 2
- (c) Model 3 (d) Model 4
- (e) Model 5 (f) Model 6

2.4 수평력에 의한 극한강도 비교

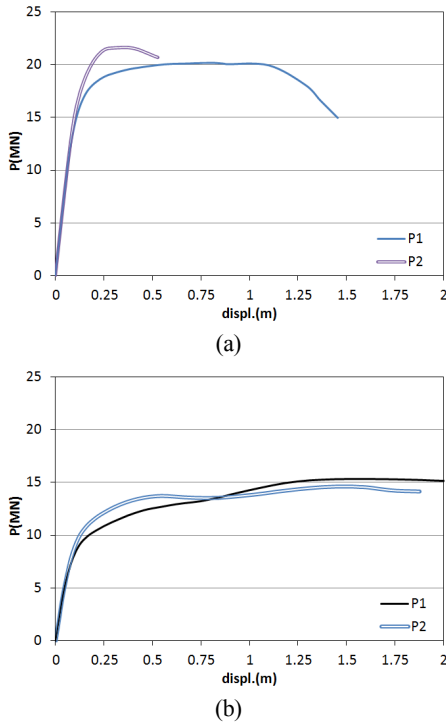
풍력타워에는 압축뿐만 아니라 수평력에 의한 전단 및 휨거동에 대해서도 적절한 저항강도가 요구된다. 이에 본 절에서는 2.2절에서 언급된 압축력의 하중조건을 수평력으로 변환하여 부재에 전단력과 휨 모멘트가 작용하도록 하였으며, 극한거동을 살펴보기 위한 비탄성 극한강도 해석을 실시하였다.

2.2절 및 2.3절을 통해 압축력에 대해 응력 집중을 저감시키고, 극한강도를 증가시키는 역할을 하는 가로보 설치의 필수적이라 판단하였으므로, 본 절에서는 날개 보강재 유무에 따른 극한강도 변화를 검토한다. 이에 앞서 언급된 총 6가지 연결부 모델 중 가장 적합하다고 판단되는 모델 6과, 모델 6에서 날개 보강재가 없는 모델에 대한 해석을 실시하였다.

풍력타워의 경우, 휨 모멘트 방향이 바람의 방향에 따라 수시로 변화하므로 수평력 재하방향은 Fig. 8과 같이 x축 방향의 P1과 x축과 45도 방향인 P2 두 가지의 하중조건을 적용하였다.



[Fig. 8] Load directions for lateral forces, P1 and P2

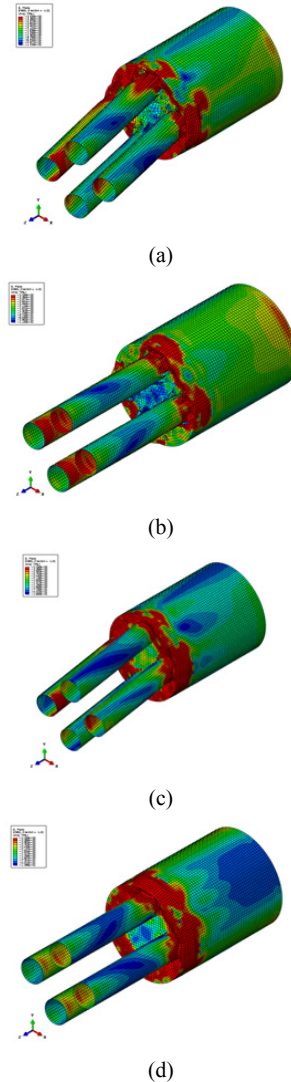


[Fig. 9] Load-displacement curves by lateral force
 (a) Model 6 with wing stiffeners
 (b) Model 6 w/o wing stiffeners

Fig. 9(a)은 모델 6에 대한 하중-변위 곡선이며, Fig. 10(a), (b)는 극한상태에서의 변형형상이다. P1을 가했을 때는 압축부에 놓인 멀티기둥 한 곳에 응력집중이 발생함으로써 국부좌굴이 발생하고 과도한 변위 또한 발생하였으나, P2 하중을 주었을 때는 압축부에 멀티기둥 2개가 존재함으로써 응력집중을 분산시키므로 변위가 작게 발생하였으며, 극한강도는 21.59MN으로 P1의 20.19MN에 비해 6.9%큰 값을 나타내었다. 다른 방향의 수평력을 가하더라도 극한강도 값은 Fig. 9(a)에 나타난 두 값 사이에 존재할 것이라고 판단되며, 설계 관점에서는 최소값을 갖는 P1에 대한 강도가 설계강도로 산정되어야 할 것이다.

모델 6에서 날개 보강재를 제거한 모델에 대한 결과는

Fig. 9(b) 및 10(c), (d)와 같다. 극한강도는 각각 P1의 15.36MN, P2의 14.61MN으로서 모델 6의 최소값과 비교할 경우 27.6% 가량 극한강도가 낮아지는 것을 확인할 수 있었으며, 변위도 모델 6에 비해 과도하게 발생하기 때문에 날개 보강재는 수평방향 강성 및 극한강도 향상에 큰 역할을 하는 것으로 확인되었다.



[Fig. 10] Deformed shapes by lateral force
 (a) Model 6 with wing stiffeners (P1)
 (b) Model 6 with wing stiffeners (P2)
 (c) Model 6 w/o wing stiffeners (P1)
 (d) Model 6 w/o wing stiffeners (P2)

3. 결론

본 연구에서는 멀티기둥 관통 여부, 날개 보강재의 유무 및 가로보의 형태에 따른 멀티기둥-대형단일강관 풍력타워 연결구조의 거동을 살펴보았다. 최적 연결부 형태는 십자형태의 가로보를 통해 대형단일강관 단부면내 응력을 벽면으로 전달시키며, 멀티기둥하단 대형강관 단부 접합부에 날개 보강재가 설치된 구조로 선정되었다. 추후 멀티기둥-대형단일강관 풍력타워 제품화를 위해서는 실험 및 공력거동 평가를 통한 엄밀한 성능평가가 수반되어야 할 것으로 예상된다.

References

- [1] J. Kim, M. O. Hwang, B. H. Choi, K. Kim, "Concept Design of the New-type 10MW Steel Wind Towers", Proc. of 39th KSCE Conference, pp. 2340-2343, October, 2013.
- [2] J. Farkas and K. Jarmai, "Optimum design of steel structures", Springer, 2013
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-36868-4>
- [3] M. Newman, "Structural details for steel construction", McGraw-Hill, 1988.
- [4] Dassault Systemes, ABAQUS Standard User's Manual, Version 6.10, 2010.

박 현 용(Hyun-Yong Park)

[준회원]



- 2011년 2월 : 청주대학교 토목공학과 (공학사)
- 2013년 2월 : 청주대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 한밭대학교 건설환경공학과 연구원

<관심분야>
강구조공학, 풍력구조

김 경 식(Kyungsik Kim)

[정회원]



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

<관심분야>
강구조공학, 강합성구조공학

김 중 민(Jongmin Kim)

[정회원]



- 2005년 2월 : 고려대학교 토목환경공학과 공학사
- 2007년 2월 : 고려대학교 사회환경시스템공학과 석사 (구조공학)
- 2011년 8월 : 고려대학교 건축사회환경공학과 박사 (구조공학)
- 2012년 3월 ~ 현재 : (재)포항산업과학연구원 강구조연구소 에너지인프라연구본부 선임연구원

<관심분야>
강구조, 에너지플랜트구조