

다이하그리드 구조시스템의 접합부개발과 성능평가

An Structural Design for Cyclone Tower's Connections Using Diagrid System

이 세 정*
Lee, Se-Jung

이 성 희**
Lee, Seong-Hui

김 진 호***
Kim, Jin-Ho

최 성 모****
Choi, Sung-Mo

요 약

최근 초고층 건축물은 비정형적 외관을 갖는 랜드 마크적인 역할과 택지의 효율적인 사용을 위한 수직 도시 기능을 수행한다. 건축물의 외관은 비정형적인 요소로서 3T형태(Twisted, Tilted, Tapered)의 설계안들이 대부분 제안되고 있으며, 세장한 형태의 형상비를 만족하기 위한 새로운 구조시스템의 연구 개발이 활발히 진행 중이다. 다이하그리드 시스템의 하중 전달 메커니즘은 대각 가새(Diagrid)의 삼각형 형상에 기인하여 중력하중 뿐만 아니라 횡하중을 전달하기 때문에 대부분의 기둥이 제거되게 된다. 또한 대각 가새의 축방향 거동(인장/압축)에 의해 전단력을 전달하여 전단 변형이 최소화되기 때문에 기둥이 전단력을 전달하던 기존 방식에 비해 비정형적인 외관에 쉽게 대응할 수 있는 구조시스템이다. 본 연구에서는 싸이클론 타워의 건축 계획안을 바탕으로 접합부 디테일 선정 과정과 접합부의 구조안전성을 유한요소해석을 통해 검증하였다. 이를 통해 응력집중 완화 방안을 제시하여 적절한 캡 플레이트 두께와 캡플레이트 확장 길이를 제시하여 응력집중 현상을 완화하였다.

Abstract

Recently, High-rise building are irregular-shaped to be city landmarks and function as vertical cities to enable the efficient use of land. 3T (Twisted, Tilted & Tapered) designs are being suggested for irregular buildings and studies to develop new structural system have been actively made to satisfy slender shape ratio. In diagrid system, not only gravity load but also lateral load is delivered based on the triangular shape of diagrid, so most of columns are eliminated. Because shearing force is delivered by the axial behavior (tensile/compressive) of diagrid to minimize shearing deformation, the system is more applicable to irregular buildings than existing system where shearing force is delivered by the columns. In this study, the process of selecting connection details and the structural safety of the selected details are verified using the finite element analysis with focus given to the construction overview of the Cyclone Tower. However, the relaxed methods of stress concentration are suggested and the performance of stress concentration relieves that it's suggested for the appropriate cap plate thickness and extended length.

키워드 : 초고층 건축물, 다이하그리드 시스템, 중력하중, 횡하중, 접합부 노드, 구조안전성

Keywords : High-rise Building, Diagrid System, stress concentration, Lateral Forces, Connection Nodes, Structural Stability

* 학생회원, 서울시립대학교 건축공학과, 석사과정
** Engineering of School, university of Western Sydney, Postdoc
*** 포항산업과학 연구원 수석연구원, 공학박사
**** 정희원, 서울시립대학교 건축학부 교수, 공학박사
Tel: 02-2210-2396 Fax:02-2057-8879
E-mail : smc@uos.ac.kr

1. 서 론

거대 도시화와 맞물려 한정된 도시규모 속에서 지가 상승과 택지부족은 가속화되고 있으며, 건축물은 초고층화 되어가고 있다. 최근 초고층 건축물은 비정형성의 외관을 갖는 랜드마크 기능과 택지의 효율적인 사용을 위한 건축물의 기능, 구조, 미를 조합한 수직도시 기능을

수행한다. 건축물의 외관은 비정형적 요소로서 3T(Twisted, Tilted, Tapered) 형상의 설계안들이 대부분 제안되고 있으며, 세장한 형태의 형상비를 만족하기 위한 새로운 구조시스템의 연구 개발이 활발히 진행 중에 있다.

초고층 건축물의 비정형성을 만족하기 위한 최적의 구조시스템으로 아웃리저시스템과 다이아그리드시스템이 최근 들어 각광을 받고 있다. 아웃리저시스템은 아웃리저 하부의 층간변위와 기둥의 모멘트를 감소시키는데 효율적인 구조시스템으로 하중 전달 메커니즘을 볼 때 기둥부재에 의해 중력하중을 전달하고, 내부에 위치한 코어에 의해 전단력을 전달하여 코어내 별도의 전단 보강이 필요하게 된다. 반면에 다이아그리드시스템의 하중 전달 메커니즘은 다이아그리드의 삼각형 형상에 기인하여 중력하중 뿐만 아니라 횡하중을 동시에 전달하기 때문에 대부분의 기둥을 제거할 수 있다. 다이아그리드의 축방향 거동(인장/압축)은 전단에 저항하고, 전단 변형이 최소화되기 때문에 기존 방식에 비해 비정형적인 외관에 쉽게 대응할 수 있는 구조시스템이다.(Kyoung-Sun, Moon., et al, 2007⁹⁾) 하지만 일반화된 접합부 형상과 노드부 디테일에 관한 연구는 미비한 실정이며, 보다 구체적인 현장 적용을 위해서는 접합부의 개발과 구조적인 신뢰성이 뒷받침되어야 한다.

다이아그리드 시스템이 최초로 적용된 건축물은 1963년 피츠버그의 IBM Building(13층, 1963)이다. 이후 Norman Foster에 의해 다이아그리드 시스템을 이용한 많은 설계안이 여러 차례 제안되었으나, 미적인 이유로 채택되지 못하다가 최근 들어 영국 런던의 Swiss Re Building, 미국 뉴욕의 Hearst Tower와 New World Trade Center, 중국 광저우 Twin Tower, 중국 북경 CCTV사옥, 일본 Mode학원 등에 활발히 적용되고 있다. 국내에서도 아산 배방 싸이클론 타워, 잠실 롯데 슈퍼타워, 대전 퓨처엑스 프로젝트 등에서 채택을 고려중에 있다.

본 연구의 목적은 충청남도 아산시에 위치한 아산배방 싸이클론 타워의 다이아그리드시스템 적용을 고려한 접합부 설계안의 진행 과정을 제시하여 많은 연구의 근간

으로 삼고자 한다. 이를 위해 싸이클론 타워의 건축 개요를 바탕으로 접합부 디테일 선정 과정과 시공에 필요한 접합부 문제점 극복을 위한 중점 관리사항을 제시하고, 선정된 접합부의 구조안전성을 유한요소해석을 통해 검증하고자 한다. 또한 계획된 접합부의 검증을 위해 실험적 평가 방법을 제시하여 아산배방 싸이클론 타워 접합부 노드 디테일 계획안의 신뢰성을 확보하고자 한다.

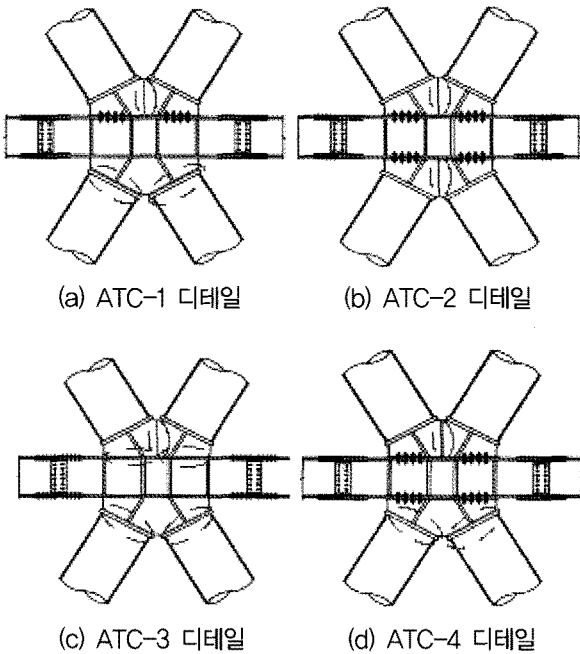
2. 다이아그리드 접합부 노드의 설계

2.1 다이아그리드 접합부 노드의 계획(안)

다이아그리드시스템은 중력하중과 횡하중에 동시에 저항하는 부재로서 접합부 노드에서 큰 응력이 발생하게 된다. 특히 횡하중 작용시 접합부는 상당히 복잡한 응력이 발생하기 때문에 접합부 디테일의 신뢰성 확보는 매우 중요한 요소라 할 수 있다. 또한 전 층에 반복적으로 존재하는 접합부의 시공 효율성은 건축물의 공기단축에 있어 매우 중요한 역할을 하게 되며, 기존 구조시스템들에 비해 경제성이 저하된다. 이를 해결하기 위하여 접합부 계획 단계에서 노드부의 공장제작을 선행 조건으로 고려하였다. 접합형식은 다이아그리드 부재의 삼각형 형상에 기인하여 강접합만을 고려하는 것은 필수적이지 않으며, 볼트접합과 같은 핀접합으로 적절히 처리할 수 있다.(Kyoung-Sun, Moon., et al, 2007⁹⁾) 따라서 초기 접합부 계획시 볼트접합과 용접접합 또는 두 가지를 병행하는 과정들을 통해 그림 1과 같이 여러 가지 디테일을 제시하여, 시공성 및 접합부 경제성을 충분히 고려한 설계를 실시하였다.

싸이클론 타워의 접합부 노드 설계안은 해외 사례 벤치마킹을 통해 원형강관(Circular Tube)과 보(Girder), 플레이트가 일체화된 접합부로서 제작성, 시공성, 경제성을 고려할 때 그림 1과 같이 4개의 안으로 크게 압축되었다. 그림 1의 접합 디테일에서 원형 표시 부분은 운반이 용이하도록 공장에서 제작된 유닛 단위 부재의 현장용접 부분을 표기하였다. 그림 1(c)와 같이 ALT-3은 현장 용접량이 많아 경제성 및 시공성 측면에 단점이 있으며, 그림 1(b), 그림 1(d)의 ALT-2와 ALT-4는 용접량

은 크게 줄어들지만, 큰 하중이 작용하는 접합부 노드의 현장 볼팅수가 증가와 부재 단면의 손실이 우려되고, 전체적인 작업량 또한 증가한다는 단점이 있다. 따라서 그림 1(a)에 제시된 ALT-1와 같이 용접 및 볼트 작업량을 줄일 수 있고, 운반의 용이성과 현장에서 용접 및 볼트 체결을 통한 접합부의 시공오차 및 각도 조절이 가능한 접합부 노드 디테일(안)이 채택되었다.

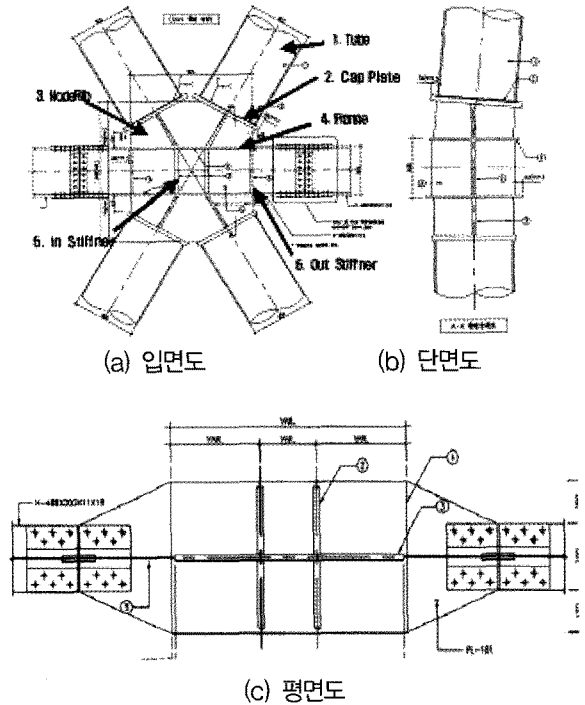


〈그림 1〉 다이아그리드 접합부 계획

2.2 다이아그리드 접합부 노드의 최종 채택(안)

초기설계 과정에서 다이아그리드 접합부 노드 디테일(안)로 선정된 그림 1(a)의 ALT-1은 스티프너(그림 2(a)-3)와 보 플랜지(Girder Flange: 그림 2(a)-4)사이 간격이 120mm정도의 협소한 공간으로 인해 캡 플레이트(Cap Plate: 그림 5(a)-2)의 끝부분이 보(Girder)와 강관 사이의 볼트접합에 방해가 된다는 문제가 제기되었다. 볼트에 대한 렌치시공은 임팩트 유니버설 조인트로 M24의 경우 100mm까지 시공이 가능하다는 기준이 있지만, 새롭게 개발된 용접성이 우수한 고강도강(인장강도: 600MPa급)을 효율적으로 적용하자는 결론과 더불어 볼트접합 디테일을 용접접합으로 전면 교체하게 되었다.

그림 1과 같이 최종안인 ALT-3의 전체적인 디테일 형상은 접합부 노드 디테일(안)에서 채택한 것과 같고 단지 접합방법으로 용접접합이 사용된다. 접합부 최종안은 그림 2(a)와 같이 (1) 원형강관, (2) 캡 플레이트, (3) 노드부 리브, (4)보 플랜지 및 (5) 패널을 형성하는 내부 스티프너와 (6)보 플랜지 외부의 외부 스티프너로 접합부 노드가 구성되게 된다.

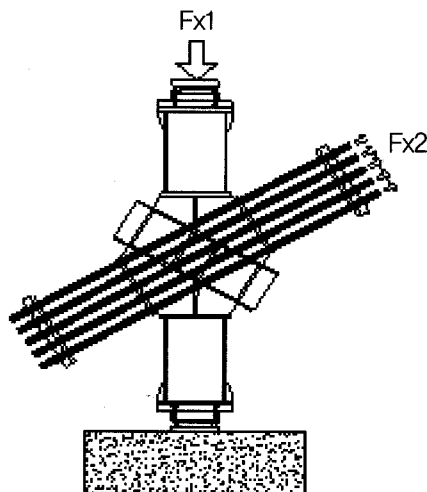


〈그림 2〉 다이아그리드 접합부 노드 디테일

2.3 접합부 노드의 신뢰성 검증 계획

초기 설계단계에서 각 층별 임계하중 조합을 바탕으로 상위 30F~49F층 접합부 노드의 구조부재들을 400MPa급 강재를 적용하여 해석한 결과 제안된 접합부의 설계내력값을 만족하지 못하였다. 이는 접합부 노드를 구성하는 구조부재의 구조내력 향상이 필요하게 되며, 높은 재질의 강종 선택이나 접합부 노드 부재의 두께 증가와 같은 대안이 요구된다. 따라서 접합부 노드의 구조부재들을 600MPa급 강재를 이용하여 재해석한 결과 구조내력은 전 층 모두 접합부 설계내력값을 만족하였다. 하지만 해석적인 결과값만으로 접합부의 신뢰성을 보증하기 어렵기 때문에 실대형 실험체를 제작하여 실험

을 통한 접합부의 신뢰성을 검증하고자하였다. 그림 3과 같이 제안된 다이아그리드 접합부 노드의 하중전달 메커니즘과 접합부 구조내력을 평가하기 위하여 대각 가새의 축방향(Fx1, Fx2 방향)으로 하중 가력을 계획하였다. 싸이클론 타워의 30F~RF층은 Ø600×12T 원형강관을 다이아그리드 구조부재로 채택하였다. 이를 대상으로 접합부에 작용하는 하중조합 결과 Fx1 방향에 최대 압축력이 작용하고, Fx1 방향 최대 압축력의 30% 하중이 Fx2 방향으로 작용할 경우 접합부 노드가 가장 취약하다는 결론을 도출하였다.(Kim Jong-Soo, et al., 김중수 외, 2008) 따라서 그림 3과 같이 실험체의 하중가력은 Fx2 방향의 경우 Fx1 방향 강관의 항복내력 5,320kN을 기준으로 30%에 해당하는 1,773kN의 축력을 열처리된 강봉 10개를 이용하여 압축력을 도입한 후, 주가력 방향인 Fx1 방향으로 10,000kN UTM을 이용하여 실험체 파괴 모드가 발생할 때 까지 축력을 도입하고자 한다. 이를 통해 제안된 접합부 노드의 하중전달 메커니즘 및 구조내력을 평가하여 접합부 노드의 신뢰성을 검증할 계획이다. 하지만 표 1에서 보여주는 것과 같이 600MPa급 강종을 적용하여 실험체를 제작할 경우 사용 원형강관(Ø600×12)의 항복내력이 9,947kN으로 보유가력 장비(10,000kN UTM)의 최대하중에 근접하게 되고, 이에 따른 실험체의 파괴 모드를 확인할 수 없게 된다. 따라서 실험체의 제작은 일반구조용 강재(SS400)를 적용하여 실험체를 제작하고 이를 평가하고자 하였다.



〈그림 3〉 싸이클론 타워 접합부의 하중 가력

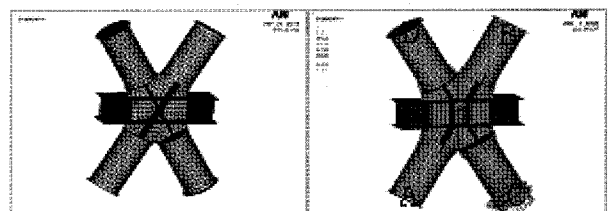
〈표 1〉 원형강관의 항복내력(Py)

층 별	SS400 Tube(kN)	SM570 Tube(kN)
50F~RF	-	-
30F~49F	5,312	9,947
22F~24F, 28F~29F	13,282	24,868
14F~21F, 28F~29F	17,709	33,158
8F~13F	19,923	37,303

3. 접합부 노드의 스틱프너 형상 결정

3.1 해석 모델 및 해석 대상

다이아그리드 접합부 노드의 시공성은 공장 제작시 필요한 접합부의 세부적인 고려사항으로 그림 4(a)와 같이 X형 스틱프너는 원형강관에서 접합부 노드로 축하중의 전달을 원활히 하기 위한 가장 효과적인 형상이다. 하지만 다이아그리드접합부를 구성하는 X형 스틱프너의 용접 시공성은 협소한 작업 공간으로 인하여 다소 어려움이 야기된다. 또한 용접 시공성의 향상은 경제성 창출과 직접적인 상관관계가 있기 때문에 스틱프너 형태 변화의 필요성을 제기하게 되었다.



(a) X형 스틱프너

(b) 수직 스틱프너

〈그림 4〉 내부 스틱프너의 해석 모델

이에 대한 해결방안으로 그림 8(b)에 나타난 것과 같이 내부 스틱프너를 수직 스틱프너로 계획하였다. 수직 스틱프너의 경우 축하중의 전달을 가장 효율적으로 유도하는 X형 스틱프너와 같이 동일한 구조내력의 발휘는 보증하기 어렵게 된다. 또한 제안된 접합부의 경우 새롭게 적용되는 다이아그리드 접합부로서 이와 같은 검증 사례가 없기 때문에 이에 대한 해석적 검증이 필요하게 되었다. 따라서 그림 4(a)의 X형 스틱프너와 그림 4(b)의 수

직 스틱프너를 갖는 실험체를 실험체와 동일한 조건으로 모델링하여, 유한요소해석 프로그램을 이용하여 스틱프너 형상 변화에 따른 구조내력 발휘의 문제점을 규명하고자 하였다.

해석대상은 표 2와 같이 패널존의 내부 스틱프너 형태를 변수로 2개의 실험체를 대상으로 하였으며, 그림 4와 같이 다이아그리드 접합부를 모델링하였다.

〈표 2〉 해석 대상

해석 대상	두께별 위치					스티프너 형태
	1	2	3	4	5	
평형-1	600×12	40	30	25	30	평형
X형-2	600×12	40	30	25	30	X형

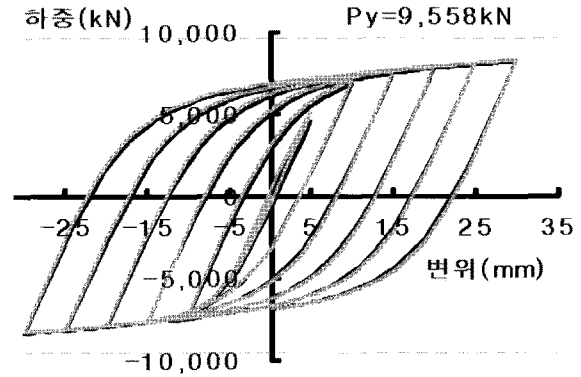
3.2 해석 조건 및 방법

제안된 다이아그리드 접합부 노드의 해석은 범용 해석 프로그램인 ANSYS 10.0을 이용하여 실험체와 동일한 조건으로 모델링 하였고, 항복 후 접합부 노드의 거동을 알아보기 위하여 재료비선형을 고려하여 유한요소해석을 수행하였다. 해석조건으로서 원형강관, 스틱프너, H형강 보의 모델링은 6개의 자유도를 가지는 4개의 절점으로 구성된 Shell 43요소를 사용하고, 강재의 응력-변형 특성은 Bi-linear Kinematic 변형경화 모델을 사용하였다. 강재의 항복강도는 600MPa급 강재의 항복강도인 440MPa를 적용하였으며, 탄성계수는 210GPa, 항복 이후의 탄성계수는 초기 탄성계수의 1/100로 가정하였다. 해석방법으로 그림 4(b)에 나타난 것과 같이 A면의 3방향(X,Y,Z) 자유도를 구속하고 B방향 강관에 0.3의 P_y 압축력을 도입하였다. 이후 A-B 강관의 압축력을 도입한 상태에서 A면의 3방향 자유도를 풀어준 후 C면의 3방향 자유도를 구속하고 D면을 반복(인장 및 압축)가력과 단조(압축)가력 하였다.

3.3 해석 결과

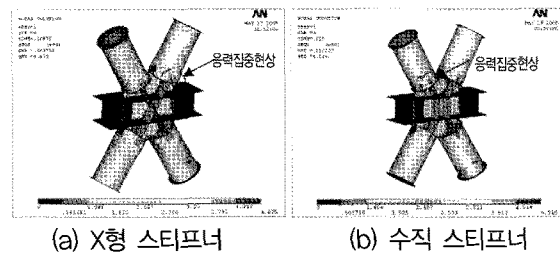
다이아그리드 접합부의 스틱프너 형상에 따른 변수를 적용하여 유한요소해석을 수행한 결과를 그림 5와 같이

하중-변위(P- Δ) 관계로 나타내었다. 그 결과 X형 스틱프너는 D면의 반복가력(인장과 압축)에서 하중-변위 관계가 거의 동일하게 거동한 것으로 나타났으나, 평형 스틱프너는 인장력을 도입한 경우 압축력을 도입했을 때 보다 내력이 낮게 나타났다.



〈그림 5〉 하중-변위 관계

그림 6은 평형 스틱프너와 X형 스틱프너의 해석모델에 인장력을 도입한 경우 응력분포를 나타낸 것이다. 평형 스틱프너의 경우 접합부 노드의 패널부와 강관과 캡 플레이트 접합면에서 응력이 집중되어 나타났다. 그림 6(a)에서 접합부의 전체내력은 강관의 항복내력에 도달하지 못했으며, 그림 6(b)의 응력분포에서 강관의 하중



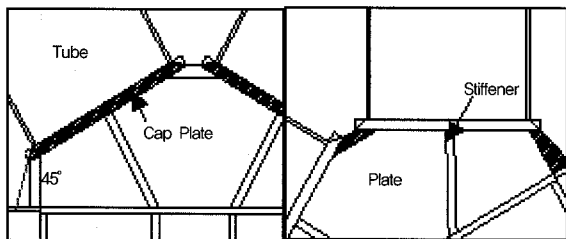
〈그림 6〉 강관의 응력집중 현상

이 스틱프너로 원활히 전달되지 않고, Cap Plate 하부의 스틱프너 플레이트에서도 응력집중 현상이 발생하는 것을 확인하였다.

4. 접합부 노드의 응력집중 현상 완화 방안

4.1 응력집중 현상의 완화 방안 제시

제안된 접합부 노드를 분석한 결과 다이아그리드시스템의 적용을 위해서는 몇 가지 개선해야 할 부분들이 검토되었다. 2장에서 언급되었던 것과 같이 사이클론 타워에 작용하는 하중조합은 접합부 노드의 신뢰성 검증에 있어 가장 중요한 평가 요인으로 대두되었다. 접합부 노드 구성요소들의 접합 방법으로써 항복하중까지 충분한 강성을 발휘하기 위해서는 캡 플레이트와 축방향 X형 스티프너의 용접이 우수해야한다는 기술적인 검토를 하였다. 하지만 시공성 문제를 들어 수직 스티프너 형태를 제안하여 유한요소해석을 수행한 결과 X형과 유사거동을 하였으나, 강관 면과 스티프너 플레이트에서 각각 응력 집중 현상이 발생하였다. 이는 강관의 항복하중을 만족하지 못하는 결과를 야기하며, 접합부 신뢰성을 만족하지 못하게 된다(최성모, 2008). 따라서 접합부의 시공성 향상을 목적으로 내부 스티프너를 수직 스티프너 형태로 결정하고, 응력집중에 관해 다른 해결책을 모색하였다. 접합부 노드의 응력집중 현상을 해결하기 위하여 캡 플레이트와 하부 스티프너 플레이트 사이의 원활한 응력전달이 이루어져야 한다. 그림 7(a)와 같이 원형강관과 캡 플레이트(Cap Plate) 사이의 응력전달은 45° 분포에 이르는 가상응력선을 제안하였고, 그림 7(b)와 같이 캡 플레이트(Cap Plate)의 익스텐디드(Extended) 길이를 스티프너와 플레이트(Stiffener Plate)까지 확장하는 방식의 접합부 형상을 제안하였다.



(a) 45° 가상 응력선 (b) 플레이트와 스티프너의 확장

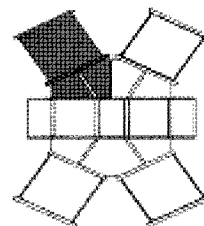
〈그림 7〉 응력집중 현상 완화 방안 제시

4.2 응력집중현상의 완화

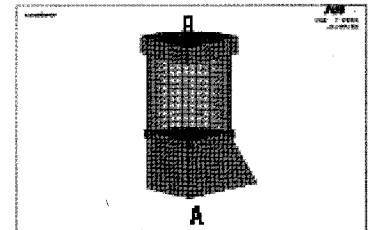
접합부에서 발생하는 응력집중현상을 완화하기 위하여 제시된 가상응력선을 바탕으로 캡 플레이트 두께와 캡 플레이트 익스텐디드 길이 변화에 따른 스티프너와 플레이트의 확장을 변수로 총 4개 해석 대상을 표 3과 같이 계획하였다. 해석모델은 20개의 노드를 갖는 Solid186 요소를 이용하였으며, 그림 8(a)와 같이 1/4 대칭 모델로 하였다. 하중가력은 그림 8(b)의 A면 3방향(X,Y,Z) 자유도를 구속하고, B면에 강관의 P_y 의 단순압축력을 도입하였다.

〈표 3〉 해석 대상

해석대상	강관	Cap Plate 두께	Extended 길이	스티프너 플레이트 확장
C42X	600×12	40	20	X
C46X	600×12	40	60	X
C42O	600×12	40	20	O
C44O	600×12	40	40	O



(a) 접합부 노드



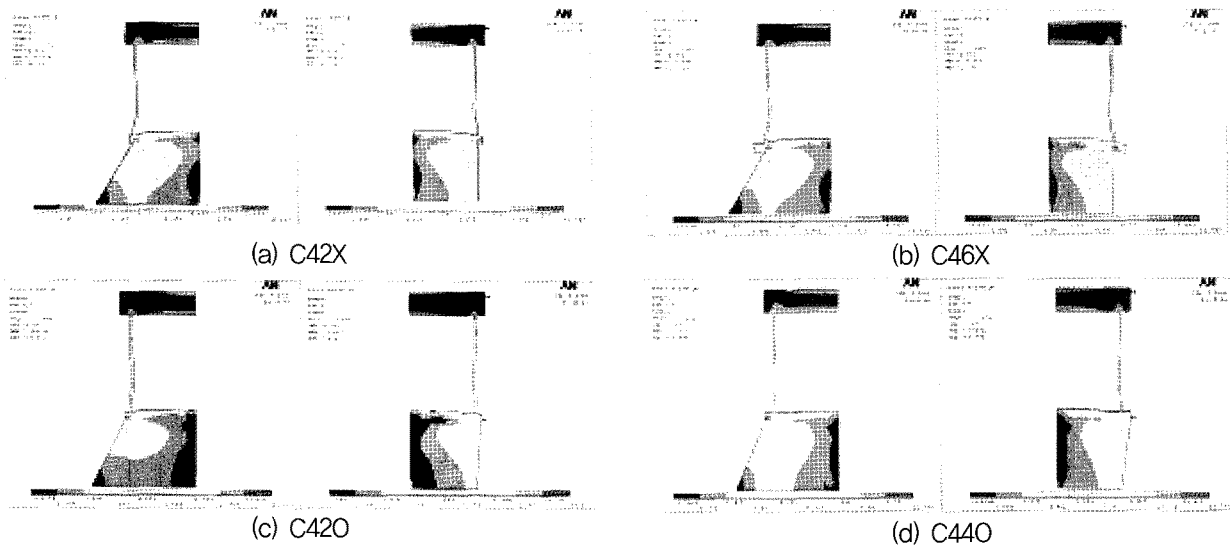
(b) Cap Plate 해석 모델

〈그림 8〉 해석 모델

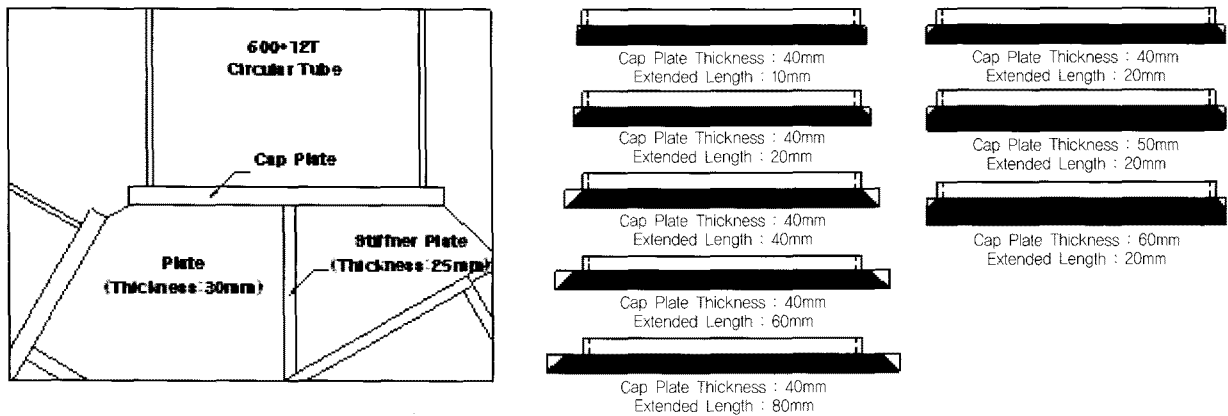
표 3의 해석대상을 유한요소해석으로 수행한 결과 응력집중현상이 완화되는 것을 알 수 있었다. 그림 9의 스티프너와 플레이트를 확장하지 않은 C42X(a)와 C46X(b) 해석모델의 경우 캡 플레이트 하부 스티프너 플레이트에서 응력집중이 발생하였으며, 그림 9의 스티프너와 플레이트를 확장한 C42O(c)와 C44O(d)는 응력집중현상이 완화된 것을 확인하였다.

4.3 캡 플레이트 단면 산정에 따른 항복하중

사이클론 타워 접합부 노드의 응력집중 현상 완화 방



〈그림 9〉 Cap Plate와 Stiffener Plate의 응력분포



(a) 접합부 노드의 구성 요소 (b) 캡 플레이트 익스텐디드 길이 변화에 따른 단면적 (c) 캡 플레이트 두께 변화 따른 단면적

〈그림 10〉 Cap Plate두께와 Extended 길이 변화에 따른 단면 산정

안과 접합부 구성요소의 최적의 디테일 조합을 도출하기 위하여 4.2장에서 제안한 방법으로 접합부 노드의 신뢰성을 평가하고자 하였다. 응력집중 현상의 완화 방안은 45° 가상응력선의 가정에서 비롯되었으며, 접합부 하중 전달 메커니즘의 중요한 요소로서 캡 플레이트 두께 증가에 따른 캡 플레이트 익스텐디드 길이 변화의 상관관계를 갖게 된다. 이를 규명하기 위하여 45° 가상응력선을 바탕으로 캡 플레이트 익스텐디드 길이 변화에 따른 스티프너 플레이트의 확장과 더불어 캡 플레이트가 축방향 압축력에 저항하는 단면적과 밀접한 관련성이 있다고 가정하였다. 따라서 그림 10(b)와 같이 강관의 항복 하중값을 만족하는 캡 플레이트 단면적(음영처리된 부분)을

산정하기 위하여 45° 가상응력선을 근간으로 캡 플레이트 익스텐디드 길이 변화에 따른 단면 가정과 그림 10(c)의 캡 플레이트 두께 증가에 따른 단면을 가정하였다. 가정된 단면을 통하여 표 4에 나타낸 것과 같이 캡 플레이트 두께와 캡 플레이트 익스텐디드 길이 변화의 상관관계를 설정하고, 각 변수별 항복하중을 계산하여 각 조건별 강관의 항복값을 만족하는 값들을 볼드체(Bold Type)로 정리하여 표 4에 나타냈었다. 그 결과 최초 변수로써 캡 플레이트 익스텐디드 길이가 10mm이고, 캡 플레이트 두께가 36mm일 때 강관의 항복 하중값($P_y = 9,754\text{kN}$)을 만족하였다. 하지만 강관의 항복 하중값과 거의 동일한 수준이며, 강관의 응력집중 현상을 완화하

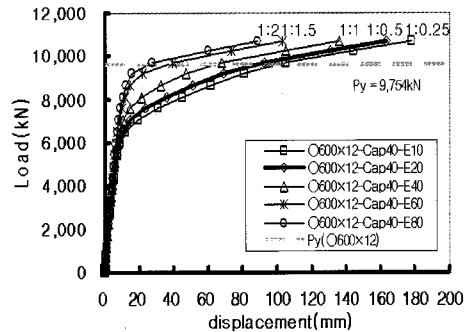
〈표 4〉 Cap Plate 두께 및 Cap Plate Extended 길이변화에 따른 내력 산정

		Cap Plate Extended Length(10mm~80mm) : kN							
		10mm	20mm	30mm	40mm	50mm	60mm	70mm	80mm
Cap Plate thickness (mm)	30	8,140	8,272	8,316	8,272	8,536	8,800	9,064	9,328
	31	8,413	8,554	8,606	8,571	8,844	9,117	9,390	9,662
	32	8,686	8,835	8,897	8,870	9,152	9,434	9,715	9,997
	33	8,958	9,117	9,187	9,170	9,460	9,750	10,041	10,331
	34	9,231	9,398	9,478	9,469	9,768	10,067	10,366	10,666
	35	9,504	9,680	9,768	9,768	10,076	10,384	10,692	11,000
	36	9,777	9,962	10,058	10,067	10,384	10,701	11,018	11,334
	37	10,050	10,243	10,349	10,366	10,692	11,018	11,343	11,669
	38	10,322	10,525	10,639	10,666	11,000	11,334	11,669	12,003
	39	10,595	10,806	10,930	10,965	11,308	11,651	11,994	12,338
	40	10,868	11,088	11,220	11,264	11,616	11,968	12,320	12,672
	50	13,596	13,904	14,124	14,256	14,696	15,136	15,576	16,016
	60	16,324	16,720	17,028	17,248	17,776	18,304	18,832	19,360

기 위해서 캡 플레이트의 두께는 높게 산정될 필요가 있다. 따라서 초기 설계 단계에서 각 부재별 단면적 계산으로 산정된 캡 플레이트 두께 40mm를 기준으로 캡 플레이트 익스텐디드 길이 변화에 따른 거동을 분석하기 위하여 캡 플레이트 두께 대 익스텐디드 길이비를 1:0.25에서 1:2까지의 5가지 조건을 산정하여 유한요소해석을 수행하였다. 또한 캡 플레이트 익스텐디드 길이를 20mm로 고정하고, 캡 플레이트 두께를 40mm, 50mm, 60mm 조건을 산정하여 유한요소해석을 수행하였다.

4.4 캡 플레이트 내민길이에 따른 하중-변위 관계

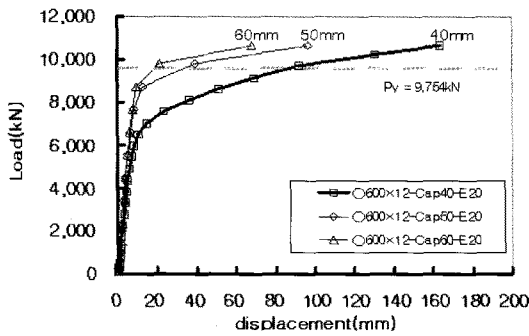
캡 플레이트 두께와 캡 플레이트 익스텐디드 길이 1:0.25(캡 플레이트 두께 40mm일 때 익스텐디드 길이 10mm)에서 1:2(캡 플레이트 두께 40mm일 때 익스텐디드 길이 80mm)까지 산정하여 유한요소해석을 수행하였다. 그림 11은 Ø600×12 원형강관과 접합되는 캡 플레이트의 두께 대 익스텐디드 길이비를 변수로 유한요소해석을 수행한 하중-변위 관계를 나타낸다. 해석결과와 같이 캡 플레이트의 두께에 대한 익스텐디드 길이비는 1:1.5(60mm) 이상을 확보해야 강관의 항복하중을 만족하는 것으로 나타났다.



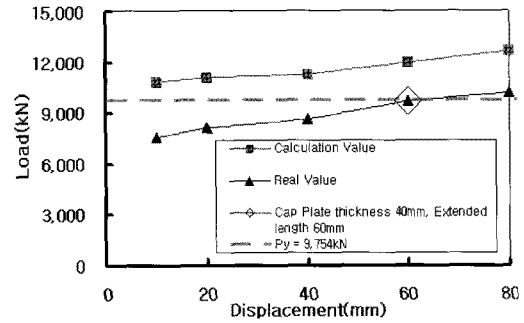
〈그림 11〉 캡 플레이트 두께 대 익스텐디드 길이의 하중-변위 관계

4.5 캡 플레이트 두께 증가에 따른 하중-변위 관계

최적의 캡 플레이트 두께를 산정하기 위하여 캡 플레이트 두께 변화를 40mm에서 60mm까지 범위를 변수로 접합부 내력을 평가하여 접합부 노드의 신뢰성을 검증하고자 하였다. 접합부 노드의 캡 플레이트 익스텐디드 길이(20mm) 증가 없이 캡 플레이트 두께만 증가(40-60mm)시켜 해석한 하중-변위 결과를 그림 12에 나타내었다. 제안된 접합부 노드의 응력집중 현상을 방지하고, 원활한 하중전달을 통한 접합부 신뢰성 확보를 위해서는 캡 플레이트 두께 50mm 이상을 확보해야 하며, 50mm 이상의 캡 플레이트 두께를 적용할 경우의 하중은 크게 증가되지 않았다.



〈그림 12〉 Cap Plate 두께 변화에 따른 하중-변위 관계



〈그림 13〉 계산값과 결과값의 비교

5. 분석 및 고찰

5.1 캡 플레이트 두께 대 익스텐디드 길이비의 최적 조건

다이하그리드 시스템을 이용한 싸이클론 타워 접합부 노드의 강관 또는 스티프너 플레이트의 응력집중 현상은 강관내 국부좌굴을 일으켜 강관의 항복내력을 만족하지 못하게 된다. 접합부 노드의 응력집중 현상 완화 방안으로써 강관과 캡 플레이트 접합면의 응력흐름을 45° 가상 응력선을 이용하여 가정하였다. 이는 접합부 노드를 구성하는 각 요소별 상관관계를 살펴볼 때, 4장에서 논의된 것처럼 캡 플레이트 단면적의 증가가 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. 이를 규명하고자 캡 플레이트 두께를 40mm로 설정하고, 캡 플레이트 익스텐디드 길이를 변수로 캡 플레이트 단면적 증가에 따른 항복하중을 계산하였고, 유한요소해석을 수행하여 얻는 그림 11의 결과 그래프에서 1/3접선법을 이용하여 항복하중을 구하고 이를 표 5에 나타내었다.

〈표 5〉 캡 플레이트 익스텐디드 길이 변화에 따른 비교

Cap Plate thickness (mm)	계산값	Cap Plate Extended Length(kN) (10mm~80mm)					강관의 항복내력 kN
		10mm	20mm	40mm	60mm	80mm	
40	계산값	10,868	11,088	11,264	11,968	12,672	9,754
	해석값	7,569	8,103	8,636	9,704	10,238	

그림 13의 캡 플레이트 익스텐디드 길이 증가는 캡 플레이트 단면적의 증가로 항복하중이 증가하게 된다. 하지만 강관 또는 스티프너 플레이트의 응력집중 현상으로

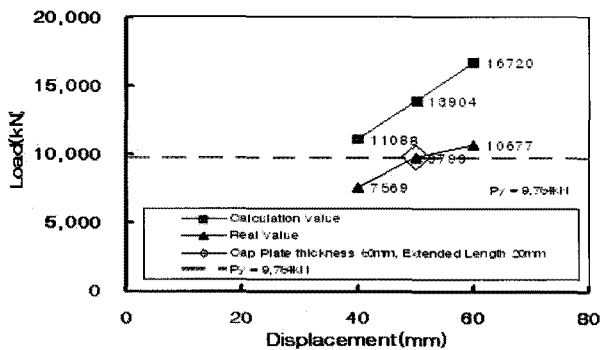
접합부의 항복하중은 30%에서 19%까지 차이를 나타내었으나 동일한 경향성을 보이며 하중은 증가하게 된다. 이러한 항복 하중의 차이는 캡 플레이트 익스텐디드 길이가 10mm일 때 30%로서 가장 크게 나타나며, 60mm 이상으로 확장한 경우 내력은 19% 감소되어 나타났다. 또한 60mm이상으로 캡 플레이트 익스텐디드 길이를 변화하여 단면적을 증가시킨 결과 접합부 노드의 응력집중 현상을 고려하더라도 강관의 항복하중인 9,754kN의 하중을 만족하게 된다. 따라서 접합부 노드의 안정적인 거동과 접합부 노드의 거동 신뢰성 확보를 위해서는 캡 플레이트 두께를 40mm로 산정한 경우 캡 플레이트 익스텐디드 길이 60mm이상을 확보해야 될 것으로 판단된다.

5.2 캡 플레이트 두께 변화에 따른 최적 조건

캡 플레이트 두께 증가에 따른 단면적의 증가는 응력집중 현상을 완화하고, 강관의 항복하중을 만족하게 된다. 하지만 가정에서 비롯된 근거이기 때문에 이를 분석하고자 하였다. 이를 위하여 캡 플레이트 익스텐디드 길이를 20mm로 고정하고, 캡 플레이트 두께를 40mm, 50mm, 60mm의 3가지 경우를 통해 비교하였다. 표 4의 캡 플레이트 단면적 가정에 따른 계산값을 이용하여 접합부의 항복하중을 산정하였다. 그림 12의 결과 그래프의 값을 1/3 접선법을 이용하여 항복하중을 구하고, 단면적 가정에 따른 계산값과 해석값을 비교하여 그림 14에 나타내고 표 6에 정리하였다.

〈표 6〉 캡 플레이트 두께 변화에 따른 비교

		Cap Plate Thickness(kN) (40mm~50mm)			강관의 항복내력 kN
		40mm	50mm	60mm	
Cap Plate Extended Length (mm)	20	계산값 11,088	13,904	16,720	9,754
		해석값 7,569	9,799	10,677	



〈그림 14〉 계산값과 결과값의 비교

단면적 가정에 의해 산정된 항복하중을 고려한 결과 캡 플레이트의 두께 증가는 동일한 비율로 항복하중이 상승하게 된다. 하지만 유한요소해석을 통해 얻은 결과값을 볼 때, 캡 플레이트 두께가 50mm 이상일 경우 강관의 항복하중을 만족하며 응력집중 현상이 완화된다. 그러나 캡 플레이트 두께 50mm까지는 항복하중의 상승률이 계산값과 동일한 경향성을 나타내지만, 캡 플레이트 두께가 50mm 이상일 경우 강관이 먼저 항복하게 되어 항복하중의 증가는 일어나지 않는 것으로 판단된다.

5.3 캡 플레이트 가정 단면적에 따른 상관관계

접합부 노드의 강관과 캡 플레이트 접합면의 응력집중 현상 완화 방안으로써 가상응력선을 가정하여 캡 플레이트 단면적 증가에 따른 접합부 거동을 분석하였다. 이를 통해 강관의 항복하중을 만족하는 캡 플레이트 두께 40mm, 내민길이 60mm인 조건과 캡 플레이트 두께 50mm, 캡 플레이트 내민길이 20mm인 조건을 바탕으로 캡 플레이트 단면적 조건에 따른 항복하중과 유한요소 해석에 의한 항복하중의 상관관계를 분석하였다. 캡 플레이트 두께 40mm, 내민길이 60mm인 경우는 캡 플레이트 두께 50mm, 익스텐디드 길이 20mm인 경우에

비해 단면적은 24%가 감소되며, 항복하중 또한 24%로 동일하게 감소되어 나타난다. 하지만 유한요소해석을 통해 얻은 항복하중의 편차는 1%의 내력차이를 나타내었다. 따라서 캡 플레이트 단면적 가정에 의한 응력집중 완화 방안의 최적 조건은 캡 플레이트 두께 40mm를 기준으로 익스텐디드 길이가 60mm일 때 경제성 측면에서 캡 플레이트 두께 증가에 의한 경우보다 효과적이라 판단된다. 또한 강관의 항복내력을 만족하기 위해서는 캡 플레이트 익스텐디드 길이 60mm를 기준으로 캡 플레이트 두께 40mm에서 50mm 사이의 값을 채택할 경우 응력 집중 현상에 따른 강관의 항복하중을 만족하며, 경제적인 접합부 설계가 가능할 것으로 사료된다.

〈표 7〉 캡 플레이트 두께 변화에 따른 비교

			Area	Calculation value	Real value	강관의 항복내력(kN)
Cap Plate 두께	40	Cap Plate Extended 길이	60	27,200	11,968	
	50		20	31,600	13,904	9,799

6. 결론

본 연구는 다이아그리드 시스템을 적용한 접합부 노드의 접합부 디테일 선정 과정과 선정된 접합부의 구조안 전성을 유한요소해석을 통해 검증하고, 현장 시공에 필요한 접합부 문제점 극복을 위한 디테일 계획안의 신뢰성 검증을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 다이아그리드시스템은 접합부 디테일의 복잡함 때문에 용접 접합에 의한 신뢰성 확보는 공장 제작이 필수 조건이며, 시공성 향상을 위하여 수직 스티프너의 사용을 고려해도 접합부의 내력이 확보될 것으로 판단된다.
- 2) 접합부 노드의 응력집중 현상 완화 방안으로 써 45° 가상응력선에 따른 캡 플레이트 내민길이와 스티프너 플레이트의 확장이 동시에 이루어져야 응력집중 현상이 완화될 것으로 판단된다.
- 3) 강관의 항복 하중을 만족하는 최소값은 캡 플레이트 두께 35mm와 캡 플레이트 익스텐디드 길이 10mm

일 경우 만족하는 값을 갖는다. 하지만 접합부 노드의 응력집중 현상을 완화하기 위하여 캡 플레이트 단면적은 항복하중 단면적의 30%이상을 확보해야할 것으로 판단된다.

4) 캡 플레이트와 스틱프너 플레이트 사이의 응력 집중 현상을 해소하기 위해서는 캡 플레이트 두께 40mm 일 경우 캡 플레이트 익스텐디드 길이 60mm 이상을 확보해야 한다.

5) 캡 플레이트 두께 50mm 이상일 경우 강관에서 항복이 먼저 발생하게 되며, 경제적인 접합부 설계를 위해 50mm 두께가 적당하다고 판단된다.

6) 강관의 항복내력을 만족하고, 응력집중 현상을 완화하기 위해서는 캡 플레이트 익스텐디드 길이 60mm를 기준으로 캡 플레이트 두께 40mm~50mm 범위에서 접합부를 계획할 경우 응력집중 현상의 완화와 강관의 항복하중을 만족할 것이다.

우의 다이하그리드시스템 초고층건물, 한국강구조학회지, v.8, n.2, pp.29-33

4. 최성모(2008), 다이하그리드 시스템의 Cap Plate의 형상에 따른 응력집중에 관한 해석적 연구, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, v28, n.1

5. 김종수, 박형석, 노승희(2008), 다이하그리드 시스템이 적용된 싸이클론 타워의 구조계획, 한국강구조학회지 기술기사, 제 20권, 제 4호, 통권 제77호

▶접수일자 : 2009년 11월 26일

▶심사 완료일자 : 2010년 6월 8일

▶게재 확정일자 : 2010년 6월 10일

-감사의 글-

이 연구는 과학기술부 국가지정 연구실 사업인 "초고층 구조시스템 선정 평가 기술" (Roa-2007-000-10047-0) 3차년도지원에 의해 이루어졌으며, 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임.[KRF-2008-357-D00283] 이에 깊은 감사를 드립니다.

-참고문헌-

1. Kyoung-Sun, Moon, et al.(2007), Diagrid Structural Systems for Tall Buildings: Characteristics and Methodology for Preliminary Design, Struct. Design Tall Spec. Build. 16, 205-230
2. Jong-Soo, Kim, et al.(2008), Structural Schematic Design of a Tall Building in Asan using the Diagrid System, CTBUH 8th World Congress
3. 최성모(2008), 중국 초고층건물의 동향-중국 광저