

철탑구조의 트러스형상 변화에 따른 구조거동 분석

문미영¹ · 김우범^{2*}

¹박사과정, 공주대학교, 건축학부, ²교수, 공주대학교, 건축학부

Investigations of Structural Behaviors of Steel Tower Structures by Frame Shape Variation

Moon, Mi Young¹, Kim, Woo Bum^{2*}

¹Ph.D. Student, Architectural Engineering, Kongju National University, Cheonan, 31080, Korea

²Professor, School of Architecture, Kongju National University, Cheonan, 31080, Korea

Abstract - The purpose of this study is to analyze the ultimate strength and behavior of triangular and rectangular frames in steel towers. Investigations of collapse mechanism including local and global failures of partial frame are carried out through finite element analysis and small scaled experiments. Ultimate strength and deformation are investigated in case of shape variations with change of the interior and exterior frames. The efficiency of rectangular frame saving sub-brace members are verified with comparisons of the ultimate strength of triangular frames.

Keywords - Steel tower, Triangular truss, Rectangular truss, Ultimate load capacity, Shape, Nonlinear analysis, Finite element

1. 서론

강관철탑 구조에서 트러스 형상(이하 “결구”)은 안전성이 나 경제성에 있어서 매우 큰 비중을 차지하고 있으나, 결구 거동 확인의 번거로움으로 인하여 과거 보수적인 설계방식^[1]을 답습하고 있으며 이는 필요 이상의 결구 물량을 발생시키고 시공성을 상당히 저해하고 있다. 결구의 개선이 이루어지지 않고 있는 주된 이유로 철탑구조를 트러스 구조로 가정하여 모든 절점을 핀으로 가정하고 부재에는 모멘트가 발생하지 않는 해석법을 따르고 있기 때문이다. 트러스 구조는 기본적으로 삼각 형상을 취하며 사각형상을 취하는 경우에는 불안정성을 유발하게 되므로 사각형상의 결구는 사용하지 않는 것이 지금까지의 설계 방식이다. 따라서 삼각결구를 만

들기 위한 필요 이상의 보조재가 설치되고 있다. 그러나 강관철탑구조에서 주부재인 주주재(post)는 연속부재로 시공되며 사재(brace)는 주주재에 플레이트 용접을 통한 강접합으로 시공되므로 철탑결구는 트러스 구조가 아닌 모멘트를 저항하는 프레임구조에 가까운 거동을 한다. 따라서 강관철탑구조는 3차원 프레임 비선형해석을 수행함으로써 명확한 결구의 거동뿐만 아니라 철탑의 최대내력의 예측이 가능하다^{[2],[3],[4]}.

강관철탑 구조를 구성하고 있는 결구의 내력은 단위 부재의 특성에 따라 내력이 결정될 뿐만 아니라 부재들에 의하여 구성된 결구의 형태에 따라 달라진다^[5]. 그러나 결구단위에서 발생하는 변형 특성에 대해서 고찰된 바가 거의 없는데 그 이유는 결구의 기하학적 복잡성 때문이다. 결구의 형태적 특성상, 이차원적, 삼차원적 거동 특성이 달라질 뿐만 아니라 절점의 이동으로 인한 좌굴 내력 및 좌굴모드의 변화, 소성변형 및 응력의 재분배 등, 일반적인 해석기법으로는 결구의 정밀한 거동 파악이 어렵다 할 수 있다. 결구의 이러한 특성을 반영할 수 있는 해석 모델의 제시가 필요하며 이에 대한 검증도 필요하다.

따라서 본 논문에서는 강관철탑의 3차원 비선형해석 및

Note.-Discussion open until February 28, 2018. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on March 20, 2017; revised May 16, 2017; approved on May 17, 2017.

Copyright © 2017 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-41-521-9330 Fax. +82-41-562-0310

E-mail. wbk@kongju.ac.kr

비교 검증 실험을 통하여 보조재의 역할 및 결구거동 특성을 파악하고 규명하여 보조재의 사용을 최소화 할 수 있는 근거를 마련하고 궁극적으로는 철탑의 시공성 및 경제성을 극대화하고자 한다.

2. 구조 해석

이론적 해석에 의한 좌굴하중 산출 방법은 절점의 구속에 대한 영향은 고려할 수 있으나 절점의 이동은 없는 것으로 가정하고 산출된 값이므로 실제 3차원 구조에서 절점의 이동이 발생할 경우에는 적용할 수 없는 한계를 가지고 있다. 그리고 단부에서 발생하는 접합부의 소성변형을 고려한 비탄성좌굴내력은 이론적 접근 방법으로는 산출이 불가능하다. 따라서 이러한 한계를 고려할 수 있는 유한요소모델을 작성하고 비선형해석을 수행하였다. 본 연구에서는 강관철탑 하부 다리부(Leg)를 삼각결구와 사각결구로 구성한 경우에 대해 거동 및 내력을 비교하고 해석의 신뢰성을 비교, 검증하기 위하여 같은 크기의 실물 모형을 제작하여 가력실험을 수행하였다.

2.1 유한요소해석

강관 철탑 Leg부의 내력은 접합부의 국부적인 응력 변화에 따라 많은 영향을 받기 때문에 이론적인 방법만으로는 내력을 평가하기는 어렵다. 따라서 강관 철탑 Leg부분의 내력을 추정하기 위하여 Leg부분에 대한 유한요소해석모델을 작성하고 이의 결과를 실험결과와 비교 검증하였다. Leg 부분의 해석 모델은 765kV 송전 강관철탑 Leg부분의 형상을 기본으로 하였다. 유한요소 해석은 ABAQUS 6.12^[6]를 사용하여 수행하였으며, 부재 및 접합부의 국부적인 응력분포와 소성변형을 고려하기 위하여 S4R5 셸(Shell) 요소를 선택하였다. 이 요소는 각 절점 마다 5개의 자유도를 갖는 4변형 셸요소이다. 지금까지의 트리스해석은 선형해석으로 응력의 재분배를 정확히 반영하기 어려울 뿐만 아니라 접합부를 핀으로 가정하여 해석을 수행하기 때문에 부재의 정확한 좌굴거동을 파악하기에는 많은 문제점이 있는 해석법이다. 따라서 본 연구에서는 구조체의 재료적 및 기하학적 비선형거동을 최대한 반영하기 위하여 요소의 분할은 20mm 간격으로 분할하였다. 본 유한요소해석에서는 첫째, 극한상태에서의 부재의 정확한 좌굴내력과 좌굴모드를 실물 구조실험결과와

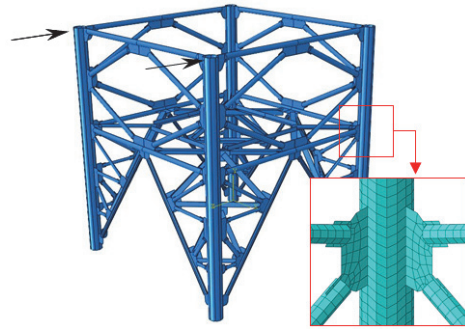
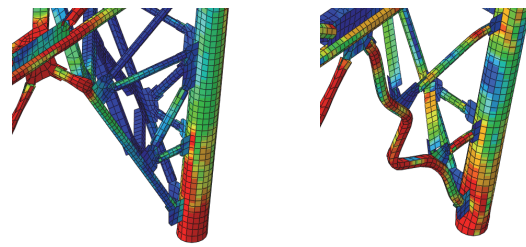


Fig. 1. Finite element model and applied loading

비교하고, 둘째, 다리부(Leg) 결구를 단순화하기 위하여 도입된 사각결구의 좌굴거동 특성을 삼각결구와 비교하였다. 따라서 삼각 및 사각결구를 갖는 다리부(Leg)의 유한요소해석모델을 작성하였으며 Fig. 1과 같이, 횡방향 하중을 가력하여 다리부(Leg)의 내력 및 결구의 변형형상, 부재의 파괴형상을 파악하고 이 결과를 실험 결과와 비교하였다.

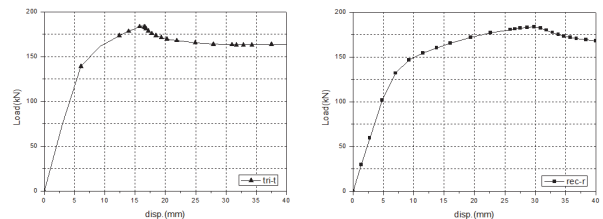
2.1.1 결구의 변형 형상

좌굴내력은 좌굴모드에 영향을 받으므로 결구의 좌굴 변형 형상으로부터 좌굴내력의 비교가 가능하다. Fig. 3은 삼각결구와 사각결구에 대하여 유한요소해석에 의한 좌굴 변형 형상이다. 삼각결구는 기존 철탑에 적용된 결구이며, 사



(a) Triangular frame (b) Rectangular frame

Fig. 2. Deformation of triangular and rectangular frame



(c) Triangular frame (d) Rectangular frame

Fig. 3. Analytical result

각결구는 본 연구에서 제안한 결구이다. Fig. 2에 나타난 바와 같이, 삼각결구와 사각결구의 좌굴 형상은 차이를 나타내고 있다.

삼각결구의 경우 Fig. 3(a)에 나타난 바와 같이 사재의 상부 첫째 절간에서 면외좌굴 발생 후 극한내력에 도달하였다. 이는 일반적인 트러스 부재의 개재 좌굴 형태이며 부재 양단부의 구속정도에 따라 발생하는 전형적인 파괴 양상이다. 또한 좌굴은 면내 방향이 아닌 면외 방향 좌굴이 발생하였는데 이것은 강관 양단에 플레이트의 면외 방향의 강성이 면내 방향의 강성보다 작기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 실제 설계에 있어서 면외 방향의 좌굴내력을 높이기 위해서는 면내방향과 동등한 강성을 가진 십자형 플레이트의 형상을 취한다면 면내 좌굴이 발생할 것으로 추정된다.

사각결구의 경우, 삼각결구와 달리 사재 전 구간에서 부재 전 좌굴형태로 좌굴이 발생하였다. 이것은 부재 양단부에서의 응력분배가 달라졌기 때문이며, 본 해석에서는 Fig. 3(b)에 나타난 바와 같이 사각결구 형상으로 인하여 사재보다는 수평재에 축력이 많이 부담됨으로써 수평재의 항복이 선행된 후 사재의 전좌굴이 진행된 것으로 판단된다. 사재가 삼각결구에서와 같이 부재의 부분 좌굴이 진행되지 않고 전 좌굴이 발생한 이유는 사각결구의 경우 보조재를 제거함에 따라 부재의 횡변위 및 회전 변위의 구속이 적어짐에 절점의 이동이 용이해짐에 따른 것으로 판단된다.

2.1.2 결구의 거동특성

Fig. 3과 같이 사각결구가 삼각결구에 비해서 강성이 낮은 것으로 나타나는데 이는 보조재의 제거로 전체 구조체의 강성이 낮아졌기 때문이다. Table 1에서 보는 바와 같이 탄성영역에서 초기강성은 삼각결구가 사각결구보다 14%정도 높으며, 항복내력은 5%정도 높다는 것을 알 수 있다. 또한 극한내력은 삼각결구가 사각결구보다 0.4%정도 높다. 사각결구는 삼각결구보다 소성변형으로 인한 변위가 크게 발생하며 극한내력시 변위가 84%정도 차이를 보이고 있다. 따라서 보조재의 설치여부에 따라서 초기강성, 항복점, 내력 및

Table 1. Analytical results

Type	Initial stiffness (N/mm)	Yield load (kN)	Ultimate load (kN)	Displacement at ultimate load (mm)
Tri angular	24798	139	184	16.1
Rect angular	21686	131	183	29.8

좌굴형상에 영향을 미치는 것으로 나타났으며 사각결구가 삼각결구에 비하여 최대내력의 차이는 미미한 반면 변형량이 크게 나타나 변형량의 수용 여부에 대하여 좀 더 추가적인 고려가 필요한 것으로 판단된다. 그러나 현행설계에 있어서와 같이 허용응력설계의 개념을 사용한다면 삼각결구와 사각결구의 변형량 차이는 미미함을 알 수 있다.

2.2 결구의 축소모델 실증실험

유한요소해석모델과 동일한 크기의 Leg를 제작하였으며 삼각결구와 사각결구 두 개의 실험체에 대하여 극한내력과 변위, 파괴형상 등을 해석모델과 비교하였다. 앞서 제시한 유한요소모형을 검증하고자 실험을 통한 삼각결구와 사각결구의 내력 및 좌굴특성을 파악하였다. Leg부분에서 보조재의 유무에 따라서 Fig. 4와 같이 삼각결구와 사각결구에 대하여 실험하였다. Leg부분의 내력 및 결구의 변형형상, 부재의 파괴형상을 파악하고 이 결과를 앞서 수행한 해석 결과와 비교하였다.

실험은 공주대학교 천안캠퍼스에서 실시하였으며, 실험체의 설치 상황은 Fig. 5와 같다. 50t 용량 엑추에이터를 사용하여 실험체 상부에 횡방향으로 가력하였으며, 실험체에 편심이 가해지지 않도록 중앙부분에 가력프레임을 설치하였

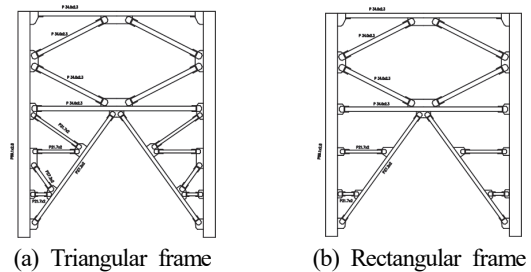


Fig. 4. Experimental models

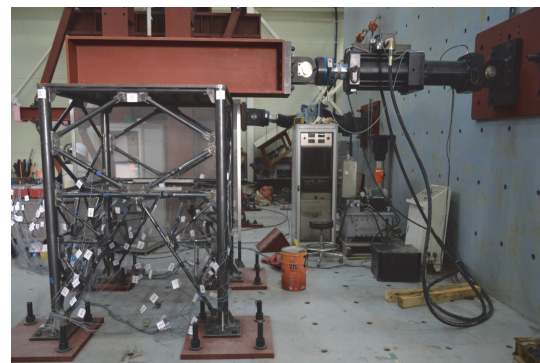


Fig. 5. Set-up of small scale specimen

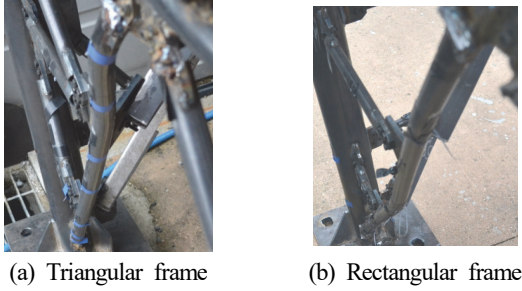


Fig. 6. Buckling shape of frame

다. 모멘트에 의한 회전을 억제하고 상단부재의 파괴를 방지하기 위하여 상부를 플레이트 및 H형강으로 보강하였다.

2.2.1 결구의 변형 형상

실험수행 결과 해석결과와 유사한 내력 및 파괴 형상을 나타내었다. Fig. 6(a)에서 삼각결구는 사재의 3등분 중 상단부에서 좌굴이 발생하였으며, Fig. 6(b)에서 사각결구는 사재 전 구간에서 좌굴이 발생하고 중간부에서 좌굴이 크게 발생하였음을 확인하였다. 예측했던 바와 같이 수평하중으로 인한 전단력이 지배인자가 되어 압축축 사재가 실험체 내력을 결정하는 부재로 나타났으며 접합부의 형상에 따라 면외좌굴이 발생함을 확인하였다.

2.2.2 결구의 거동특성

Fig. 7과 같이, 탄성영역에서 초기강성은 삼각결구가 사각결구보다 작지만 그 차이는 미미하였으며 이는 유한요소 해석결과와 다른 경향이 나타남을 알 수 있다. Tabel 2에서 보는 바와 같이 탄성영역에서 초기강성은 삼각결구가 사각결구보다 5%정도 낮으며, 항복내력은 3%정도 낮다는 것을 알 수 있다. 또한 최대내력은 사각결구가 삼각결구보다 2%정도 높게 나타났지만 그 차이는 미미하였다.

그러나 최대내력에서의 변형량에 있어서는 유한요소해석 결과와는 다르게 삼각결구와 사각결구가 유사하게 나타나

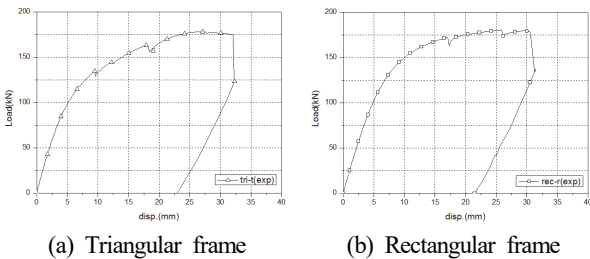


Fig. 7. Experimental results of frame

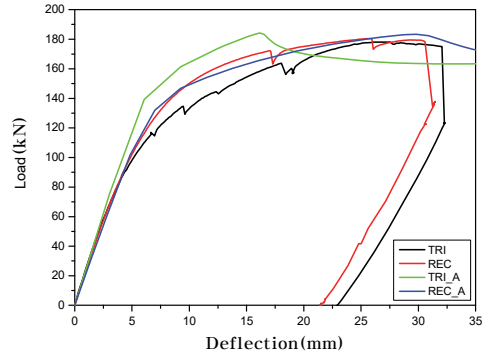


Fig. 8. Comparisons between analytical results and experimental results

전반적으로 사각결구의 거동이 삼각결구의 거동과 크게 다르지 않음을 알 수 있었다.

따라서 사각결구가 삼각결구에 비하여 최대내력과 변형량의 차이는 나타나지만, 이는 현행설계에 있어서와 같이 허용응력설계의 개념을 사용한다면 삼각결구와 사각결구의 변형량 차이는 미미함을 알 수 있다.

Fig. 8에서는 이상에서 살펴본 삼각결구와 사각결구의 해석 및 실험결과를 하나의 그림에 나타내었다. 여기서 TRI, RECT는 삼각결구와 사각결구의 실험결과이며, TRI_A, RECT_A는 삼각결구와 사각결구의 해석결과이다. 그림에 나타난 바와 같이 최대내력에 있어서 사각결구는 실험결과와 해석결과가 거의 일치하는 것으로 나타났으나 삼각결구는 해석결과가 실험결과에 비하여 약간 높게 나타났다. 단 삼각결구에 있어서 해석에서는 변형능력이 적은 것으로 나타났으나 실험에서는 사각결구와 비슷한 정도의 변형능력을 나타내었다. 실험결과 최대내력에서의 파괴 형상은 해석에서 나타났던 사재 좌굴로 인한 파괴와 유사하게 나타났다. 즉 삼각결구는 부재의 부분좌굴로 파괴형상이 나타났으며 사각결구는 부재 전좌굴로 파괴형상이 나타났다. 전반적으로 삼각결구와 사각결구의 최대내력과 변형량, 파괴형상은 실험결과 크게 다르지 않음을 알 수 있었다.

3. LEG결구의 3차원 거동 분석

Leg결구의 형상이 결구의 내력에 미치는 영향을 파악하였다. 3차원 형상인 Leg결구는 정면결구, 내측결구로 나뉘지며, 이를 정면결구와 내측결구를 형태를 다르게 조합하였을 때 나타나는 내력의 변화를 파악하였다. 그리고 그 결과

를 통하여 보조재의 제거 가능성을 살펴보았다.

3.1 해석모델의 종류 및 결구명칭

결구의 형태별 조합은 Table 2와 같다. 기존 철탑 삼각 결구와 부재수를 줄인 사각 결구, 삼각결구에서 절간을 길게 한 삼각 긴 결구, 사각결구에서 절간을 길게 한 사각 긴 결구의 형태를 모델 변수로 설정하였다. Leg 부분의 결구는 외측









Table 2. Experimental results

Type	Initial stiffness (N/mm)	Yield load (kN)	Ultimate load (kN)	Displacement at ultimate (mm)
Tri angular	22964	79	176	30.1
Rect angular	24116	81	180	25.8

Table 3. Type of analytical model

Out	In	Tri	Rec	Tri_long	Rec_long
	Tri	Tri-t	Tri-r	Tri-tl	Tri-rl
Rec	Rec-t	Rec-r	Rec-tl	Rec-rl	
Tri_long	Tri_long-t	Tri_long-r	Tri_long-tl	Tri_long-rl	
Rec_long	Rec_long-t	Rec_long-r	Rec_long-tl	Rec_long-rl	

Table 4. Name of frame

Outside frame (tri, rec)	Triangular (tri)		
		Tri	Tri_long
	Rect angular (rec)		
		Rec	Rec_long
Inside frame (t, r)	Triangular (t)		
		T	Tl
	Rect angular (r)		
		R	Rl

결구와 내측 결구로 나뉘게 된다. 아래 Tables 3 및 4와 같이 결구의 명칭 및 형상을 삼각과 사각으로 나누었다.

3.2 결구해석

유한요소의 해석은 앞절에서 사용한 동일한 유한요소해석 모형을 사용하여 수행하였다. 해석은 정면결구 4가지와 내측결구 4가지를 조합한 16가지 모델에 대하여 수행하였다.

3.2.1 결구의 변형 형상

Fig. 9(a)와 같이 정면 및 내측결구가 tri인 경우 좌굴은 압축력을 받는 사재의 상부에서 좌굴이 발생하였다. 이는 유효좌굴길이가 사재 전체 길이가 아닌 상부의 길이인 것으로 추정된다. 또한, 좌굴은 면내 방향이 아닌 면외 방향 좌굴이 발생하였다. 이는 강관 양단에 플레이트의 면외 방향으로 단면 2차모멘트 저항이 작기 때문으로 판단된다.

Fig. 9(b)와 같이, 정면 및 내측결구가 rec인 경우 사재 전 반부에 걸쳐 좌굴이 발생하였다. 이는 보조재의 제거로 인한 절점의 구속도가 달라짐에 따라 변형 형상이 다른 것으로 판단된다.

Fig. 9(c)와 (d)를 보면, 정면 및 내측결구가 tri-long과 rec-long인 경우는 좌굴장의 증가로 인한 변형을 보이고 있다.

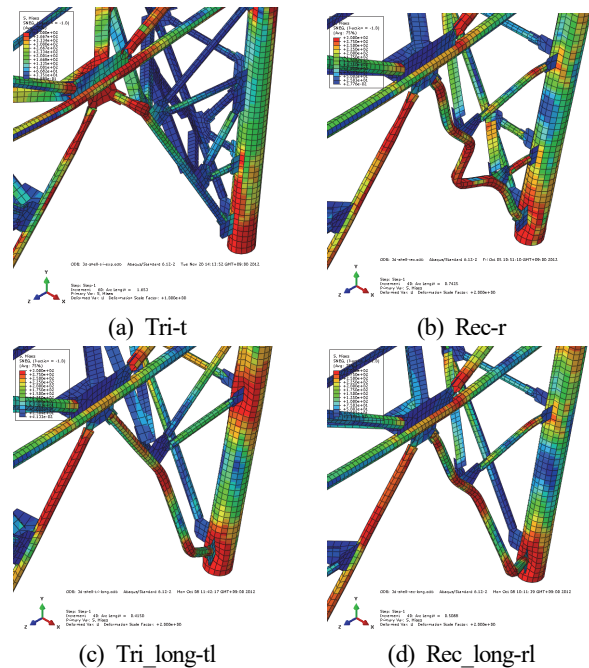


Fig. 9. Deformation of typical models

3.2.2 결구의 거동특성

정면결구 tri, rec, tri-long, rec-long로 4가지, 내측결구 t, r, tl, rl 구분하여 정면결구와 내측결구의 조합에 따라 거동 특성을 비교 검토하였다. 다음은 정면결구의 분류를 기준으로 내측결구를 변화시켰을 때의 하중-변위 거동 특성에 대한 비교 결과이다.

① 외측 삼각결구

Fig. 10은 외측결구는 tri결구이며 내측결구는 t, r, tl, rl 4가지로 구분하여 하중-변형 곡선을 비교한 그래프이다. 그래프에 나타난 바와 같이, 4개의 결구는 초기 강성에서는 차이를 나타내지 않았으나 최대내력에서는 차이를 나타낼 수 있다.

내측결구가 삼각결구(tri-t)인 경우와 사각결구(tri-r)인 경우 하중-변형 곡선의 차이는 나타나지 않았으며 이는 내측결구의 수평보조재만으로도 절점의 이동을 구속하는 효과를 지니고 있음을 알 수 있다. 그러나 내측 결구가 긴 삼각결

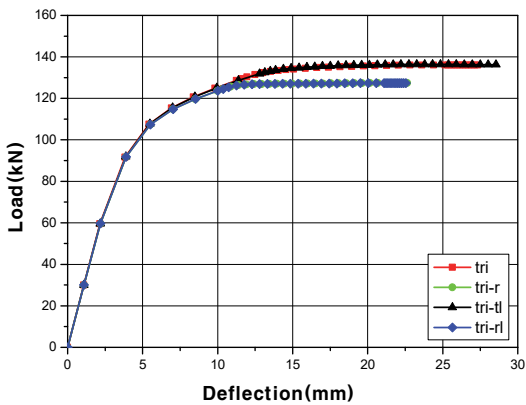


Fig. 10. Load-deflection curve of front tri model

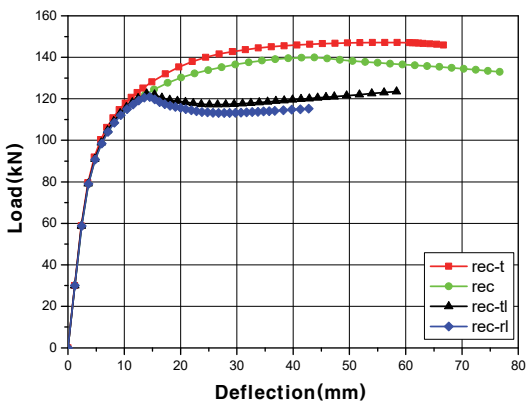


Fig. 11. Load-deflection curve of front rec model

구(tri-tl, tri-rl)에서는 삼각결구(tri-t, tri-r)에 비하여 약 6%의 최대내력의 저하가 있었으며 이는 사재의 좌굴장의 증가로 인하여 좌굴내력이 저하되었기 때문이다.

② 외측 사각결구

Fig. 11은 정면결구는 사각결구(rec)이며 내측결구는 t, r, tl, rl 4가지로 구분하여 하중-변형 곡선을 비교한 그래프이다. 그래프에 나타난 바와 같이, 4개의 결구는 초기 강성에서는 차이를 나타내지 않았으나 내측결구가 긴삼각결구(tri-tl, tri-rl)에서는 최대내력이 낮게 나타났다.

내측결구가 삼각결구(rec-t)인 경우와 사각결구(rec-r)인 경우 하중-변형 곡선이 유사하게 나타났으나 삼각결구의 최대내력값이 사각결구의 최대내력값에 비하여 2% 높게 나타났다. 내측결구가 간삼각결구(rec-tl) 또는 긴 사각결구(rec-rl)일 경우에는 급격한 좌굴로 인하여 15%정도의 최대내력이 낮게 나타났으며 그 이유는 외측결구가 사각결구의 형태를 취하게 되면 절점의 구속력은 오직 외측결구 수평보조재에 의해서만 구속되므로 좌굴 후 급격한 내력의 저하가 나타난 것으로 판단된다.

③ 외측 긴 삼각결구

Fig. 12는 외측결구는 긴 삼각결구(tri-long)이며 내측결구는 tri, rec, tri-long, rec-long 4가지로 구분하여 하중-변형 곡선을 비교한 그래프이다. 그래프에 나타난 바와 같이 4개의 결구는 초기 강성에서는 차이를 나타내지 않았으나 내측결구가 긴삼각결구(tri-tl, tri-rl)에서는 최대내력이 낮게 나타났다.

내측결구가 삼각결구(tri-long-t)인 경우와 사각결구(tri-long-r)인 경우 하중-변형 곡선이 유사하게 나타났는

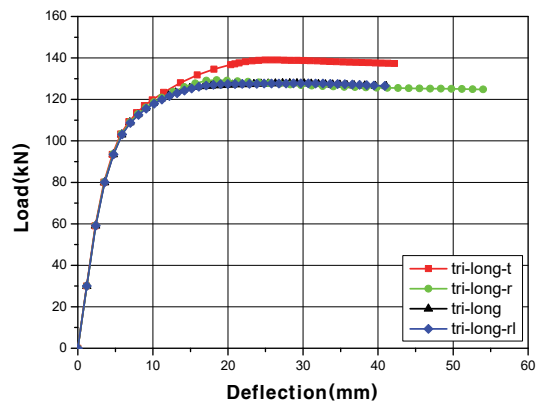


Fig. 12. Load-deflection curve of front tri-long model

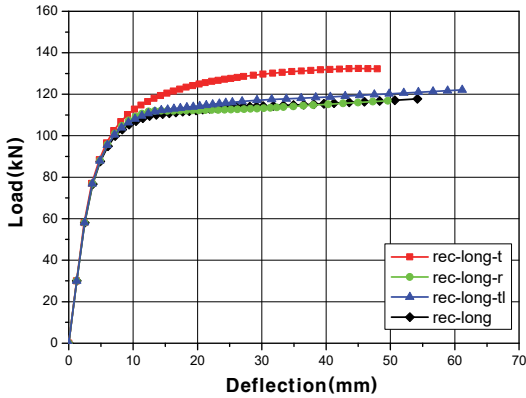


Fig. 13. Load-deflection curve of front rec-long model

데, 이는 내측결구의 형태와 상관없이 외측 긴 결구에서 면내 좌굴이 발생되었기 때문인 것으로 판단된다. 내측결구가 간 삼각결구(tri-long-tl) 또는 긴 사각결구(rec-long-rl) 일 경우에는 최대내력이 10%정도 낮게 나타났는데, 그 이유는 외측결구에면외좌굴이 좌굴하였으며 이때의 내력은 면내 좌굴내력보다 적기 때문인 것으로 판단된다.

④ 외측 긴 사각결구

Fig. 13에서 외측결구는 긴 사각 결구(rec-long)이며 내측결구는 tri, rec, tri-long, rec-long 4가지로 구분하여 비교한 그래프이다. 그래프에 나타난 바와 같이 4개의 결구는 초기 강성의 차이를 나타내지 않았으나 최대내력은 내측결구가 삼각결구인 경우에서만 높게 나타났다.

위 4가지 모든 경우에 동일하게 면외좌굴이 발생하였으며 내측결구가 삼각결구(rec-long-t)인 경우가 나머지 세 경우와 달리 나타난 이유는 내측결구의 수평보조재에 축력이 유발되어 절점의 면외 방향으로 이동이 상대적으로 구속이 되었기 때문이다.

3.2.3 결구별 최대내력 비교

이상에서 살펴본 바와 같이 외측결구와 내측결구의 형태를 달리하고 조합하여 최대내력과 변위를 요약한 결과를 Fig. 14 및 Table 5에 나타내었다. 전체적으로 최대내력은 116kN에서 147kN을 나타내었으며 최대내력에서의 변위는 13.9mm에서 61.1mm를 나타내었다. 결구의 내력은 외측 결구의 형태보다는 내측 결구의 형태에 영향을 상대적으로 많이 받았으며 내측결구가 삼각결구일 경우에는 면내 좌굴이 발생하였으나 내측결구가 사각결구일 경우에는 절점의 이동을 허

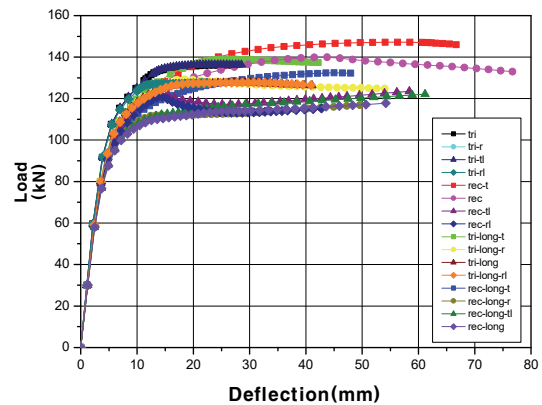


Fig. 14. Load-deflection curve of all models

Table 5. Comparisons of ultimate load and deflection

Type	Ultimate load (kN)	Deflection at ultimate (mm)
Tri-t	136	25.9
Tri-r	136	23.2
Tri-tl	127	22.6
Tri-rl	127	22.5
Rec-t	147	56.2
Rec-r	139	43.7
Rec-tl	122	13.9
Rec-rl	120	14.5
Tri-long-t	139	25.8
Tri-long-r	129	18.5
Tri-long-tl	127	28.2
Tri-long-rl	127	29.7
Rec-long-t	132	45.0
Rec-long-r	116	49.5
Rec-long-tl	122	61.1
Rec-long-rl	117	54.2

용하는 면외 좌굴이 발생함에 따라 좌굴내력이 감소됨을 알 수 있었다. 따라서 Leg부 결구 내력은 외측결구보다는 내측결구의 형태에 따라 영향을 크게 받으며 외측결구는 사각결구일 경우에도 내력의 변화가 없음을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 강관철탑의 3차원 비선형해석 및 비교 검증 실험을 통하여 보조재의 역할 및 결구 거동 특성을 파악하

고 규명함으로써 보조재의 사용을 최소화 할 수 있는 근거를 마련하였으며, 기존 철탑 결구를 단순화하기 위한 기초 자료를 제공하였다. 보조재의 유무에 따라 외측결구와 내측결구의 형상을 달리하고 각 결구의 다양한 조합을 통하여 보조재가 철탑의 내력에 미치는 영향을 살펴보았으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 현행 철탑 설계에서는 면외 좌굴에 대해서는 고려되지 않는 2차원 해석을 수행하고 있으나, 유한 요소 해석과 내력 실험을 수행한 결과 면외 방향으로 좌굴이 발생함으로써 3차원 좌굴 거동에 대한 검토가 필요한 것으로 판단된다.
- (2) 유한요소해석과 내력 실험을 통하여, 현행 설계에서 채택하고 있는 삼각결구와 보조재 수를 줄인 사각결구에 대하여 구조적 거동을 비교, 분석한 결과, 삼각결구는 부재의 부분좌굴로 파괴되었으며, 사각결구는 부재 전 좌굴로 파괴되어 파괴 시 좌굴모드는 다르게 나타났으나 결구의 최대내력과 변형량은 크게 다르지 않음이 확인되었다.
- (3) 해석분석 결과 LEG부를 구성하는 외측결구 및 내측결구의 조합 형태에 따라 각각의 최대내력을 비교, 검토한 결과 사각결구의 유용성을 확인하였으며, 모든 경우에 있어서 r(내측 삼각결구)형상이 바람직함을 나타내었다.
- (4) 보조재는 좌굴장을 감소할 수 있어 좌굴내력을 증가시킬 수 있지만, 불필요한 보조재를 사용할 경우에는 철탑 내력의 증진 효과를 얻을 수 없으며 오히려 부재의 중량이 증가하게 되어 경제성 및 시공성을 저하시킬 수 있음을 확인 하였다. 따라서 결구의 면내 및 면외 좌굴 거동의 엄밀한 파악을 통하여 보조재의 설치 여부를 결정함이 타당한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 2016년 선정 기초연구개발과제 연구비에 의해 지원되었음(과제번호: R17XA05-24).

참고문헌(References)

- [1] 한국전력공사(1997) 가공송전용 철탑설계기준, 송전편, 설계기준 1111, 한국전력공사.
Korea Electric Power Company (1997) *Design Standard of Tower for Overhead Transmission Line* (Design Standard 1111), KEPCO, Korea (in Korean).
- [2] Al-Bermani, F.G.A., and Kitipornchai, S. (1992) Nonlinear Analysis of Transmission Towers, *Engineering Structure*, Elsevier, Vol.14, No.3, pp.139-151.
- [3] 김우범, 최병정, 안진규(2008) 송전철탑의 극한하중 도출을 위한 비선형해석 기법, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제20권, 제2호, pp.389-398.
Kim, W.B., Choi, B.J., and Ahn, J.K. (2008) Development of Nonlinear Analysis Technic to Determine the Ultimate Load in Electric Transmission Tower, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.20, No. 2, pp.389-398 (in Korean).
- [4] Chan, S.L., and Kitipornchai, S. (1998) Inelastic Post-Buckling Behavior of Tubular Struts, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.114, No.5, pp.1091-1105.
- [5] Roy, S., Fang S.-J., and Rossow, E.C. (1984) Secondary Stresses on Transmission Tower Structures, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.110, No.2, pp.157-172.
- [6] Dassault Systèmes Simulia Corp. (2012) *Abaqus User's Manual, Ver. 6.12*, DSS, USA.
- [7] Ellinas, C.P., Supple, W.J., and Walker, A.C. (1984) *Buckling of Offshore Structures*, Granada, UK.
- [8] Bleich, F. (1952) *Buckling Strength of Metal Structures*, McGraw-Hill, USA, pp.20-30.
- [9] Alberman, F., Mahendran, M., and Kitipornchai, S. (2004) Upgrading of Transmission Towers Using a Diaphragm Bracing System, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.26, No.6, pp.735-744.

요약 : 본 논문에서는 강관철탑의 3차원 비선형해석 및 비교 검증 실험을 통하여 보조재의 역할 및 결구 거동 특성을 파악하였다. 특히 기존 철탑의 삼각결구를 단순화한 사각결구의 거동특성을 살펴보기 위하여 외측결구와 내측결구의 형상을 달리하고 각 결구의 다양한 조합을 통하여 보조재가 철탑의 내력에 미치는 영향을 살펴보았다.

핵심용어 : 철탑구조, 트러스형상, 삼각결구, 사각결구, 비선형해석, 좌굴형상, 좌굴강도
