

# 초기결합과 잔류응력을 고려한 345kV 송전철탑의 비선형해석

## Nonlinear Analysis of 345kV Transmission Tower Considering Initial Imperfection and Residual Stress

장진원\* · 김승준\*\* · 박종섭\*\*\* · 강영종\*\*\*\*

Chang, Jin Won · Kim, Seung Jun · Park, Jong Sup · Kang, Young Jong

### Abstract

There were two transmission tower collapses due to Typhoon 'Maemi' in 2003. The reason that a collapse was happened was excessive wind load. One was buckled in the leg part and the other was buckled in the middle bracing part. To investigate a steel transmission tower failure mechanism, 2nd order nonlinear analysis should be performed. Considering the effect of initial imperfection and the residual stress of angle section during nonlinear analysis, this study can estimate the ultimate strength and the ultimate behavior of the transmission tower.

**key words** : Steel transmission tower, Nonlinear analysis, Initial imperfection, Residual stress

### 1. 서 론

지난 2002년 태풍 '매미'에 의해 경남 통영 지방에서 154kV급 송전철탑 2기가 도괴된 피해 사례가 있었는데, 도괴 원인을 조사해본 결과 한 기는 최하단부 주주재 좌굴에 의한 도괴[그림 1-1(a) 참고]로 보여지고, 다른 한 기는 중간부 주주재의 절손에 의한 파괴[그림 1-1(b) 참고]로 나타났다.



(a) 최하단부 주주재 좌굴파괴



(b) 중간부 주주재 절손파괴

그림 1. 송전철탑 피해사례

이러한 송전철탑의 피해사례 분석은 현행의 탄성해석을 전제로 한 허용응력 설계기법으로는 명확하게 원인을 규명할 수가 없다. 철탑 도괴는 철탑 자체의 재료·기하비선형 거동뿐만 아니라 인접철탑과의 가접선 상호 인발에 의한 추가적인 변형이 발생하므로 2차 변형효과를 고려하지 않는 현행 설계기법으로는 도괴 원인을 규명하기란 불가능하다. 도괴 원인을 명확히 규명해야만 철탑의 피해를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 현행 설계기준의 보완, 개선이 가능할 수 있음을 인지할 때 철탑의 극한내력을 평가하는 기술의 중요성은 더욱 크다고 할 수 있다. 국내·외 송전철탑 설계기준(ASCE(2000), BSI(1989), JEC(1979), KEPCO(2004))에서는 아직 송전철탑의 극한거동 및 파괴모드, 그리고 비선형인자인 초기결합과 잔류응력에 대한 고려가 부족한 실정이

\* 비회원 · 고려대학교 건축·사회환경공학과·석사 · E-mail : bestleader@korea.ac.kr  
\*\* 비회원 · 고려대학교 건축·사회환경공학과·박사과정  
\*\*\* 정회원 · 상명대학교 토목환경공학부·교수  
\*\*\*\* 정회원 · 고려대학교 건축·사회환경공학과·교수

며, 국내에서는 송전철탐의 극한거동에 관한 연구가 미진하고, 국외의 연구에서도(Albermani, Kitipornchai(1993, 2003), Rao et. al(2001)) 비선형인자에 관한 연구는 심도 있게 진행되지 못했다.

본 연구는 송전철탐 전체모델에 대해 초기결함과 잔류응력을 고려한 기하·비선형해석을 수행하고 비선형인자에 대한 영향성을 살펴보았다. 본 연구를 통해 송전철탐 단독모델의 보다 정밀하고 실제 파괴모드에 가까운 해석 결과를 얻을 수 있고, 초기결함 및 잔류응력의 영향성을 제시하여 향후 설계 및 해석에서도 반영될 수 있을 것이다.

## 2. 해석 연구 개요

### 2.1 대상철탐의 모델링 개요

본 연구는 현행 설계·가용되는 345kV 양양-동해 T/L 건설공사용 'B2'형 송전철탐를 기준으로 하였다. 해석 모델의 요소는 실제 접합과 합리적인 요소 선택에 관한 논문(장진원, 2007)에 의거하여 보와 트러스를 혼용하였다. 주주재와 수평재, 1차 사재는 보(beam)요소로, 2차 사재 및 보조재는 트러스(truss)요소로 모델링하여 해석을 수행하였다. 철탐의 하부 지점은 고정단으로 고려하여 경계조건을 모사하였다. 모델에 대한 전체의 형상은 그림 2와 같다.

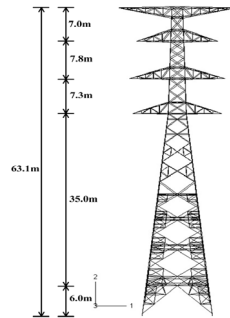


그림 2. 해석 모델의 형상

### 2.2 하중산정 및 하중조합

하중조합은 국내 송전철탐 설계기준에 명시된 상시와 이상시, 고온계와 저온계, 직풍과 사풍인 경우로 나누어 총 6가지로 구분된 하중 중에서 가장 지배적인 하중조합Ⅱ(고온계, 사풍작용시)을 적용하였다.

표 1. 하중조합

하중조합			하중 종류											
			직풍				사풍			H <sub>a</sub>	P	Q	W <sub>t</sub>	W <sub>c</sub>
H <sub>t</sub>	H <sub>ta</sub>	H <sub>ta'</sub>	H <sub>c</sub>	1.6H <sub>t</sub>	0.5H <sub>ta</sub>	0.75H <sub>c</sub>								
고온계	상시	I 직풍90°	√		√	√				√			√	√
		Ⅱ사풍60°					√	√	√	√			√	√
저온계	이상시	Ⅲ직풍	√		√	√				√	√		√	√
		Ⅳ직풍	√		√	√				√			√	√
저온계	이상시	V사풍					√	√	√	√			√	√
		Ⅵ직풍	√		√	√				√	√		√	√

## 3. 해석 결과 및 분석

범용구조해석 프로그램 ABAQUS(2004)를 이용하여 유한요소해석을 수행하였다.

### 3.1 초기결함, 잔류응력의 고려 방법 및 해석 범위

본 연구에서 ABAQUS를 이용하여 구조물에 초기결함을 주는 방법은 IMPERFECTION 옵션을 사용하여 1차적으로 선형해석을 통해 송전철탐 주주재들의 변위를 구하고 이 변위를 바탕으로 초기결함을 L/1000~L/125의 범위에 대해 증폭계수(scale factor)값을 주어 2차적으로 기하·재료비선형해석을 수행하는 방법으로

고려한다. 잔류응력은 USER SUBROUTINE에서 제공하는 단면 내 9개 절점에 선형적인 잔류응력 패턴을 입력하는 방식으로 고려한다.

이 때, 초기결함은 ASCE(2006)의 'Bracing Cold-formed Steel Structures : A Design Guide'에서 제공하고 있는 기준은  $L/384 \sim L/1500$ 이고, 국내 현대제철에서 제공하고 있는 앵글단면을 가지는 부재의 제작오차는  $L/333$ 이다. 이를 바탕으로 본 연구의 해석 범위를 설정하였다. 잔류응력의 패턴은 ECCS(1989)에서 발행한 "Recommendations for angles in lattice transmission towers(1985)"에서 제공된 형태를 참고하여 해석을 수행하였다.

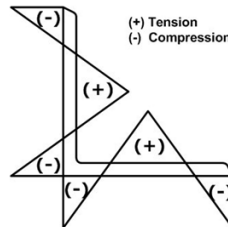


그림 3. 잔류응력 분포패턴

### 3.2 초기결함과 잔류응력을 고려한 비선형해석

3.1절의 해석 범위에 따라 초기결함이  $L/1000 \sim L/125$ 이고 잔류응력은 140MPa일 경우에 대해 비선형해석을 수행하였다. 부재의 파괴가 가장 먼저 발생한 각재부 상세의 변형 형상을 나타내면 그림 4~7과 같다.

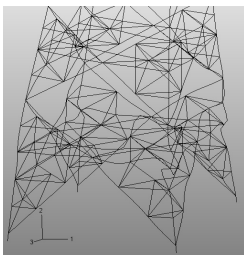


그림 4. L/1000, 140MPa

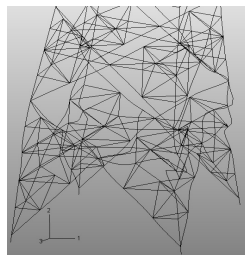


그림 5. L/500, 140MPa

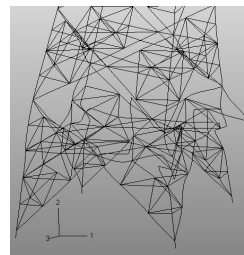


그림 6. L/250, 140MPa

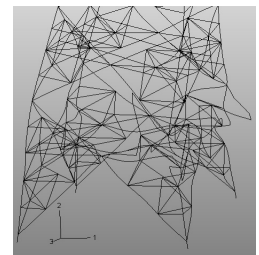


그림 7. L/125, 140MPa

응력분포는 잔류응력의 영향으로 각재부에서 시작해서 압부분이 시작되는 절간에 이르기까지 풍하중을 받는 뒤쪽 주주재가 대부분 항복응력에 도달했으며, 일부 각재부 및 각재부 윗절간의 사재 및 수평재도 항복응력에 도달한 것으로 나타나고 있다. 파괴모드는 각재부 제1윗절간의 주주재에서 가장 먼저 파괴가 발생한 후 인접한 1차사재 및 수평재로 그 파괴모드가 전이되는 양상을 보여주고 있으며, 초기결함의 크기에 따라 점차 그 변형 정도가 크게 진행되는 모습을 나타낸다. 하중변위곡선을 나타내면 그림 8, 9와 같다.

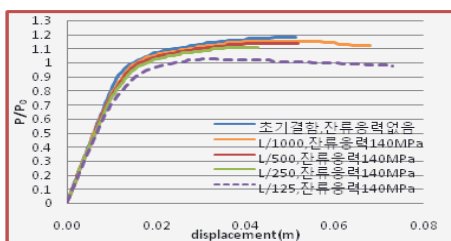


그림 8. 하중변위곡선(각재부 제1윗절간 주주재)

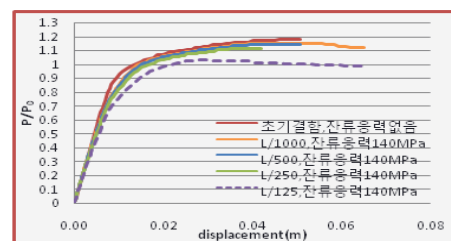


그림 9. 하중변위곡선(각재부 상단 수평재)

두 하중변위곡선에서 공통적으로 초기결함이  $L/500$ 인 경우까지는 초기결함과 잔류응력을 고려하지 않은 경우에 비해 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나 초기결함이  $L/250$ 인 경우부터 하중변위곡선의 양상이 차이를 보이기 시작하고, 특히 초기결함이  $L/125$ 인 경우에는 하중변위곡선의 차이가 다른 경우에 비해 두드러지게 나타나는 것을 확인했다. 초기결함과 잔류응력을 모두 고려했을 때, 송진철탑의 극한하중계수가 어느 정도의 비율로 감소하는지 표로 정리해보면 초기결함이  $L/500$ 까지는 초기결함과 잔류응력을 고려하지 않은 경우에 대해 극한하중계수가 약 4% 정도 감소하는 것으로 나타나 극한하중계수의 차이가 크게 나타나지 않

지만 초기결함치 L/250인 경우에는 6.7%로 그 차이가 나타나고 있으며, 초기결함치 L/125인 경우에는 13.45%로 그 차이가 더욱 두드러지게 나타난다. 이를 통해 초기결함치 L/125인 경우에는 구조물의 안정성에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.

**표 2. 극한하중계수의 비교(잔류응력 140MPa)**

하중조합	극한하중계수					
	초기결함 미고려		초기결함 L/1000		초기결함 L/500	
LC2	1.19		1.15		1.14	
	차이(%)	—	차이(%)	3.36	차이(%)	4.20
	초기결함 L/250		초기결함 L/125			
	1.11		1.03			
	차이(%)	6.72	차이(%)	13.45		

#### 4. 결 론

본 논문은 강원도 양양-동해구간에 건설된 345kV급 송전철탑을 기본 대상 송전철탑으로 하여, 설계 풍하중을 국내 ‘가공송전용 철탑설계기준-1111’(한국전력공사, 2004)에 따라 계산하여 재하하고 ABAQUS(2004)를 이용하여 초기결함과 잔류응력을 고려한 비선형해석을 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다. 초기결함과 잔류응력을 동시에 고려하는 경우, 잔류응력의 영향으로 인해 항복응력에 도달한 부재의 수와 변형이 크게 발생한 부재의 수가 현저하게 증가하는 양상을 보여줬다. 초기결함치 L/125이고 잔류응력이 140MPa일 때 13.45%의 비율로 극한하중계수의 감소효과를 나타냈다. 이는 초기결함과 잔류응력을 동시에 고려할 때 구조물의 안전성에 더 큰 위험성을 초래할 수 있음을 의미한다. 현재 국내·외 송전철탑 설계기준에서는 아직 초기결함과 잔류응력에 대한 언급이 없고, 이로 인해 비탄성해석 또는 비선형해석에 대한 고려도 미흡한 실정이다. 앞으로 보다 정밀하고 실제에 접근하는 설계 및 해석을 위해 본 연구의 내용과 같은 부분을 고려해야 할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원부가 출연하고 전력기반조성사업센터에서 위탁 시행한 2005년 전력산업연구개발사업 “송전철탑의 선진화된 해석 및 설계기술 개발(R-2005-0-059)”으로 수행된 것으로 연구 지원에 깊은 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

1. 일본전기학회(1979), 송전용지지물 설계기준, JEC-127, Tokyo
2. 장진원, 김승준, 박종섭, 강영종(2007), 송전철탑 설계기준을 반영한 345kV급 송전철탑의 합리적인 구조해석 모델 제안, 한국강구조학회논문집 제 19권 4호, 통권 89호 pp. 367-382
3. 한국전력공사(2004), 가공송전용 철탑설계기준 설계기준-1111
4. ABAQUS Standard User's Manual,(2004), Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc., Vols 1,2 and 3. Version 6.5
5. F.G.A. Al-Bermani, S. Kitipornchai(1993), Nonlinear finite element analysis of latticed transmission towers, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 15, pp.259-269
6. F.G.A. Al-Bermani, S. Kitipornchai(2003), "Numerical Simulation of Structural Behaviour of Transmission Towers", *Journal of Thin-walled Structures*, Vol. 41 pp.167~177
7. American Society of Civil Engineers(ASCE) (2000), *Design of Latticed Steel Transmission Structures*, Virginia
8. American Society of Civil Engineers(ASCE) (2006), *Bracing Cold-formed Steel Structures : A Design Guide*, Virginia
9. British Standards Institution(BSI) (1989), *Lattice Towers and Masts*, London
10. European Convention for Constructional Steelwork(ECCS) (1985), *Recommendations for Angles in Lattice Transmission Towers*, ECCS-Technical Committee 8-Structural Stability, 1st edn., No. 39, Brussels, Belgium
11. N. Prasad Rao, V. Kalyanaraman(2001), Non-linear behaviour of lattice panel of angle towers, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 57, pp.1337-1357