

초고압 송전철탑 구조성능시험에 관한 연구

A Study on the Full Scale Structural Test of High Voltage Electric Transmission Tower

김 우 범*
Kim Woo-Bum

ABSTRACT

Full scale structural test of 765kv electric transmission tower was performed to measure the stresses and displacement of towers under the design loadings, and the results were compared with analytical results based on three dimensional frame analysis. Also, the actual ultimate strength of the tower was measured through destructive test. Especially, to predict the behavior and failure of the connection of tubular member, finite element analysis was performed and compression test for the segments of tubular member were carried out. Valuable information for the overall and local behavior of the tower was obtained and reliability of current analytical method was confirmed.

1. 서론

최근 전력수요의 증대와 더불어 송전방식의 765kv 격상이 예상되고 지지물의 대형화로 지금까지 송전철탑에 적용되어온 7형강(산형강) 철탑구조에 대한 개선이 요청되고 있다. 이에따라 시공성과 경제성이 우수한 강관철탑과 종래의 7형강 철탑에 대한 비교연구가 수행되었으며 강관철탑의 제조기술에 관한 연구도 수행된 바 있다. 강관철탑은 7형강 철탑과 비교할 때 부재단면이 원형으로 풍압력이 적고 합리적인 단면이기 때문에 철탑의 중량이 감소되는 잇점이 있을 뿐 아니라 부재의 수가 상대적

* 한국전력공사 기술연구원 선임연구원, 공학박사

으로 현저히 적어지므로 설치, 유지, 보수가 용이하여 진다. 특히 최근에는 용접기술의 발전과 자동절단기, 자동용접기 등을 이용한 정확한 제작기술의 발전으로 강관구조의 적용이 더욱 용이하여 졌다. 그러나 이러한 제작기술 발전과 더불어 병행 발전되어야 할 것은 제작된 철탑의 성능을 파악하는 기술이라 하겠다. 지금까지의 철탑 성능시험은 철탑의 안전성이 주 목적으로, 설계하중 및 내하하중(설계하중의 150%)을 가려하여 육안에 의한 구조재의 손상 및 파괴로부터 철탑의 안전도 여부를 판별하여 왔다. 765kv 송전 강관철탑과 같이 새로운 구조로 도입되는 초고압 대형 철탑의 경우 위와 같은 시험을 통하여 안전성이 판명되었다 할지라도 신뢰성과 경제성 제고의 측면에서는 철탑의 역학적 거동에 대한 좀 더 깊은 이해와 세부적인 조사기법의 개발을 필요로 한다. 본 연구에서는 강관철탑 성능 향상을 위한 1단계 작업으로서 이론적 전산해석의 검증에 위하여 실규모 철탑 시험시 철탑의 각 주요부재 및 접합부에 응력 및 변위를 계측, 분석하여 구조체 성능에 대하여 정밀 평가를 하였고 국부해석을 통한 구조적 취약부위의 예측 기술을 제시, 철탑의 성능을 보다 구체적으로 파악함으로써 향후 초고압 강관 철탑설계의 최적화를 위한 기초자료를 제공하였다.

2. 시험 철탑의 제원

본 연구에서 수행한 시험 철탑은 현재 한국전력 기술연구원에서 생산기술개발과제로 위탁 수행중인 "765kv급 송변전용 철탑설계 및 제조기술개발에 관한 연구"과제로부터 제작된 현수형 및 내장형 철탑 중 현수형 철탑을 대상으로 하였다. 시험철탑의 제원은 아래와 같다.

- 1) 철탑형 : 현수형
- 2) 전선 : a. 가공지선 - ACSC 120mm²
b. 전력선 - ACSR 480mm² x 6도체
- 3) 설계적용기준 : 한국전력 송변전 설계기준
- 4) 설계 경간 : 수평경간 - 400m
수직경간 - 800m
- 5) 원설계높이 : 82m
시험철탑높이 : 57m
- 6) 구성부재
 - a. Pipe : KSD3566 SPS51 $\phi 42.7 \times 2.3$ - $\phi 114.3 \times 4.5$
SPS55 $\phi 139.8 \times 4.5$ - $\phi 267.4 \times 8.0$
 - b. Plate : KSD3503 SS41 5t-28t
 - c. Bolt : M16 GR5.8, M20-M30 GR8.8

3. 부재선정 및 응력계산

철탑부재의 설계응력은 대부분 구조해석으로 부터 얻은 결과치를 설계응력으로 취하였으나 부재과골 보강을 위한 보조재, 진동방지를 위하여 삽입하는 결구, 최하절간(Legpart)에 해당되는 주주재, 사재, 보조재등은 주요 부재에 미치는 영향이 적으므로 입력 과정에서 제외하였다. 사용부재는 KS D3566 일반구조용 탄소강관 SPS51 및 넨

SPS-55로 선택하였으며 부재의 최소 두께는 주주재 및 압주재는 5mm, 기타의 부재는 3mm, 강관 사용시 주주재는 2.4mm, 기타의 부재는 1.6mm이며 압축재의 세장비는 주주재는 200, 주주재 이외의 압축재는 250, 보조재는 250이하로 제한하였다. 지금까지 구조해석 방법으로 응력전달을 역선도로 표시할 수 있는 Cremona도해법이 주로 사용되어 왔으나 평면도해법이 난해하고 복잡한 결구를 사용할 경우에는 3차원 입체해석을 필요로 한다. 그림1.은 2차원 트러스, 2차원프레임, 3차원프레임, Cremona해석법에 의한 주주재 응력을 나타낸 것으로 각 해석방법에 따른 해석 결과의 차이는 크지 않음을 알 수 있으며 Cremona 도해법은 타 해석법에 비하여 약 10% 상회하는 값을 보임으로써 안전측에 접근함을 알 수 있다. 그러나 강관철탑에 있어서는 모멘트와 축력에 의한 국부좌굴이 중요한 요소가 되므로 이를 위하여는 frame 해석에 의한 단부 모멘트의 산출이 필요할 것으로 판단되어 본 연구에서는 3차원 프레임 해석을 수행하였다. 그림2.는 시험철탑의 형상 및 각 절점의 모멘트 분포를 나타내고 있다.

4. 접합부 해석 및 설계

접합부에서는 국부응력에 의한 응력집중 현상이 문제가 되므로 이를 평가하기 위하여 유한요소 해석을 수행하였다. 유한요소해석에는 그림3과 같이 4 node shell element를 사용하고 강관 둘레를 따라 20개의 요소로 분할, 총 640개의 element를 사용하였다. 접합부의 해석모형은 원 철탑 구조체에서 절취한 것이므로 절취부의 Boundary Condition은 강체요소 (rigid bar element)를 사용, 변형후 평면을 유지하도록 하여 절취에 따른 단부 영향을 제거하였다. gusset plate의 부착이 없는 완전 원형 강관의 경우에는 폭-두께비의 영향에 따른 국부좌굴이 문제가 되나 gusset부착시에는 응력집중에 의한 국부파괴가 접합부의 강도에 심각한 영향을 미친다. 그림4.는 부재의 축방향선을 따라 축응력을 나타낸 것으로 gusset plate 시작점에서 응력의 급격한 증가를 보이며 gusset plate의 용법이음선상에서는 오히려 감소하는 양상을 나타내고 있다. 이는 gusse plate도 축응력을 부담함에 따라 plate인근의 강관단면의 응력이 낮아지게되나 plate 반대측의 응력은 이의 영향이 적을뿐만 아니라 Plate 부착으로 인한 편심이 발생하여 오히려 증가하게 되므로 gusset접합부에 대하여는 별도의 국부해석을 통한 검증을 필요로 한다.

5. 하중 및 파괴 시험

5.1 시험 절차

국내, 외 송전 철탑 기준에는 필요에 따라 철탑시험을 시행토록 되어 있으며 시험은 실규모 시험을 원칙으로 하고 있다. 철탑시험은 하중시험, 내하시험, 파괴시험으로 구분할 수 있으며 하중시험은 상시상정하중까지, 내하하중은 상시상정 하중의 1.5 배까지, 파괴시험은 파괴시 까지 수행하며 하중을 가하는 시간은 1분이상으로 하고 있다. 위의 시험은 철탑의 안전도 확인을 주 목적으로 하고 있으므로 철탑의 구조적 성능을 파악하기 위하여는 각 부재별 응력 및 변위, 접합부 변형등의 세부 계측시험을 필요로한다. 그림5.는 지난 93.9월에 실시한 강관 철탑시험의 시험체 및 가력장치로

총 25개소에 Load Cell을 장착, 가력하였으며 구조해석상에서는 총 22개 하중 case를 설정하여 각 경우에 대한 최대응력을 산출하였으나 실규모 시험시에서는 그림6. 과 같이 발생빈도와 중요도가 높은 4개의 하중 case를 선정, 시험을 수행하였다. 하중 case 4, 8, 22에 대하여는 하중 및 내하시험만을 수행하였으며 재하는 50%, 75%, 90%, 100%의 순으로 하였다. 하중 case 1에 대하여는 하중 및 내하시험을 거쳐서 파괴시까지 가력하였으며 하중재하는 50%, 75%, 90%, 100%, 105%, 115%, 120%, 125%, 130%의 순으로 하였다.

5.2 시험결과

Load Case 4, 8, 22에 대한 하중 및 내하시험 결과 철탑의 외부 결함이 없음을 따라 구조적으로 안전한 것으로 판명되었으며 파괴시험을 실시한 Load Case 1의 경우 내하하중의 115%(설계하중의 173%)에서 철탑하단 주주재(Post)와 사재(Bracing)의 접합부에서 응력집중으로 인한 국부좌굴로 파괴되었다. 이는 한전 시험기준인 내하100%를 상회하므로 구조적으로 안전하다 할 수 있으나 파괴의 형태 및 위치 예측에 관하여는 당초 설계시 이에 대한 고려가 없었음을 감안할 때 향후 철탑의 최적화 및 신뢰도의 제고를 위하여는 좀 더 면밀한 검토와 연구를 수행하여야 할 것으로 판단된다. 또한 본 시험 철탑은 내하하중의 103%에서 하단 주주재의 전좌굴(Overall Buckling)에 의하여 파괴되도록 설계되었으나 실제 파괴는 다른 형태로 발생하였음도 주목할만 하다.

6. 계속시험 및 결과분석

6.1 철탑의 변위

4개 시험하중에 대한 철탑의 변위는 전선과 동일한 방향(종방향)과 전선과 수직인 방향(횡방향)에 대하여 각 4개소에 대하여 측정하였으며 결과는 표1. 과 같다. 종방향의 변위는 Load Case 8, 22, 1의 경우에는 거의 발생치 않으며 Load Case 4(편측단선시)의 경우, 하중100%에서 최상단 변위(L2)가 22cm로 이는 전산해석에 의한 결과 35cm보다 16%상회하는 값을 나타내었다. 상시상정 하중인 Load Case1의 경우에

표1. 시험하중에 대한 철탑의 변위

	%	LOAD CASE 4					LOAD CASE 28					LOAD CASE 22					LOAD CASE 1						
		0	50	75	90	100	0	50	75	90	100	0	50	75	90	100	0	50	75	90	100	105	110
TRANS	T1	0	6	12	21	26	7	15	15	22	26	7	-1	-3	-3	-4	1	16	28	36	39	44	47
	T2	0	5	10	19	23	5	13	14	21	24	5	-1	-2	-2	-1	0	14	25	32	34	39	42
	T4	0	3	6	11	12	3	7	9	13	15	4	1	1	1	1	1	8	14	18	20	22	24
	T6	0	1	2	5	6	1	3	4	6	7	2	1	2	2	2	0	3	6	8	8	10	10
LOADING	A	0	2	7	18	24	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5
	L2	0	2	6	16	22	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4
	L3	0	1	4	8	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	L4	0	0	1	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

39cm로 가장 크게 발생하며 전 하중에 걸쳐서 비선형성을 보였는데(그림7) 이것은 수행된 전산해석이 선형 탄성해석으로 하중의 증가시 누적되는 기학적 비선형성이 고려되지 않았기 때문이다. 그러므로 좀 더 실제 거동에 가까운 결과를 얻기 위하여는 전산해석시 p8효과를 고려한 비선형 대변형 해석을 필요로 한다.

6.2 주주재 및 사재의 응력

시험하중에 대한 응력측정을 위하여 strain gage를 주주재에 16개소, 사재에 10개소 설치하였다. 특히 모멘트에 의한 편심이 예상되는 하단부의 접합부 3개소에 대하여는 강관 외측면을 따라 동서남북 4방향으로 gage를 부착하였다. 상기 주주재 및 사재에 대한 전산해석결과는 표2,3과 같으며 여기서 산출된 응력은 Load Case 1에 대한 내하하중의 50%에 대한 값이다. 본 표에서 나타난 바와 같이 상시 상정하중 (Load Case 1)하에서는 주주재의 경우 12번 부재가 안전계수 1.06으로 가장 낮으며 사재의 경우 최하단 부재인 103번 부재가 안전계수 1.15로 가장 취약함을 알 수 있다. 그러나 파괴시험 결과 최하단 접합부의 주주재에서 응력집중으로 인한 국부좌굴

표 2. 사재의 응력

부재 번호	gage no.	stress	strain	area	force	허용압축 응력	안전율	항복강도
55		137.6	65.5	4.21	579.2	3077.0	3.98	3600.0
59		118.9	56.6	7.59	902.8	11437.0	9.50	3600.0
63		634.3	302.1	7.59	4815.0	8519.0	1.33	3600.0
67		520.8	248.1	7.59	3953.0	7989.0	1.52	3600.0
71	27	535.1	254.8	7.59	4062.0	7663.0	1.41	3600.0
75	26	443.2	211.1	9.87	4375.1	14680.0	2.52	3600.0
79	25	810.4	385.9	9.87	7998.7	12413.0	1.16	3600.0
83	24	733.1	349.1	9.87	7235.3	11599.0	1.20	3600.0
87	23	656.4	312.6	9.87	6478.8	10863.0	1.26	3600.0
91	22	365.8	174.2	15.17	5549.9	14704.0	1.99	3600.0
95	21	814.9	388.1	19.13	15589.9	24572.0	1.18	3600.0
99	20	393.3	186.9	11.17	4383.0	7129.0	1.22	3600.0
99	18	275.5	131.2	15.52	4276.1	6552.0	1.15	3600.0

표 3. 주주재의 응력

	gage no.	stress	strain	area	force	허용압축 응력	안전율	항복강도
1		80.7	38.4	11.17	901.8	19200.0	15.97	3600.0
2		386.8	184.2	11.17	4321.0	19200.0	3.33	3600.0
3		447.8	213.2	19.13	8566.9	33270.0	2.91	4000.0
4		836.4	398.2	19.13	15999.9	32790.0	1.54	4000.0
5	17	947.6	451.2	22.72	21529.9	44800.0	1.56	4000.0
6	16	1246.9	593.7	22.72	28330.0	50100.0	1.33	4000.0
7	15	1003.0	477.6	39.61	39730.0	76190.0	1.44	4000.0
8	14	1160.3	552.5	39.61	45959.8	74930.0	1.22	4000.0
9	13	1213.3	577.7	46.03	55850.0	104580.0	1.40	4000.0
10	12	1284.9	611.8	46.03	59143.9	108770.0	1.38	4000.0
11	7-11	1274.8	607.1	57.27	73010.0	142950.0	1.47	4000.0
12	2-6	1646.5	784.1	58.91	97000.0	137620.0	1.06	4000.0
13		1430.3	681.1	73.06	104499.9	169436.0	1.22	4000.0
14	1	1428.9	680.5	73.06	104399.8	169436.0	1.22	4000.0

에 의하여 파괴되었으므로 3차원 전산해석으로 부터 예상되었던 12번 주주재의 전 좌굴에 의한 파괴와는 다른결과를 나타내었다. 일반적으로 국부좌굴은 Bulge type, Knife edge type, Diamond type 등으로 대별하며 본 시험철탐 부재의 직경-두께비의 값이 30-40의 범위에 있으므로 Diamond type 좌굴의 발생 가능성은 희박한 것으로

로 판단된다. 또한 Bulge type의 좌굴은 순수 압축력에 의하여 발생하게 되므로 본 시험철탑의 접합부에서와 같이 사재에 의한 횡력 및 접합부에서 절점의 모멘트가 존재할 경우에는 Knife edge type의 좌굴 가능성이 높아진다. 전 절에서 조사된 바와 같이 gusset 접착 부위의 압축응력은 70%증가하며 이때 부재 축의 수직방향의 횡력이 부가되면 이로인한 국부 모멘트가 발생, 좌굴을 더욱 가속시켜 좌굴강도는 접합부의 Gusset의 형상, 크기에 따라 응력분포가 달라지게 되므로 접합부의 내력을 향상시키기 위하여는 접합부 영향요소의 parametric study를 통한 최적화 연구가 필요하다. 그림8은 시험철탑의 3차원 프레임 해석 결과와 실증시험의 계측결과를 비교한 것으로 철탑 전 부재에 걸쳐 평균 17%이하의 차이를 나타냄으로써 전산해석의 신뢰도성을 보이고 있다. 그림 9,10은 Load Case 4, 22의 계측결과를 나타낸 것으로 하중의 증가에 따른 응력분포의 경향은 일관성을 보임에 따라 하중이 비례적으로 적정하게 가력되었음을 알 수 있으나 내하하중의 90%이상 가력시 모든 부재에 걸쳐서 비선형성을 나타내고 있으므로 이에 대하여는 좀 더 면밀한 검토를 필요로 한다. 일반적으로 계측된 strain의 비선형성은 부재의 재료적 비선형성과 P-Delta effect에 의한 기하학적 비선형에 의하여 유발되는데 본 시험철탑에서 사용된 부재는 재질특성시험에서도 고찰된 바와 같이 항복강도 이전에서의 응력-변형을 관계는 선형을 나타내며 부재의 파괴는 좌굴강도에 지배되므로 재료적 비선형성에 의한 가능성은 배제된다. 주목할 만한 사실은 상단부재는 파괴강도 부근에서 상당한 비선형성을 나타내는 반면 하단부재는 전구간에 걸쳐 선형거동을 보였으며 이는 상단부 세장한 부재를 사용함에 따른 응력의 증가에 따른 것으로 판단된다. 특히 90%-100%의 구간에서는 오히려 강도 경화 현상을 나타내었는데(그림.11,12) 이러한 비정상적 거동의 근본 원인을 파악하기 위하여는 현장 시험과정에서 발생할 수 있는 오류에 대한 재조사가 요구된다.

6.3 접합부의 변위

시험철탑 접합부의 접합방식은 Gusset Plate-Bolt 접합을 택하였으므로 Plate와 모재간의 접합부 Slip 이 예상된다. 접합부 slip의 여부 및 크기를 측정하기 위하여 별도의 ohm type의 gage를 제작하였으며 계측결과는 그림13과 같다. 사전 gage slip test로 부터 gage의 중앙부 응력 1 micro strain은 1/300cm의 수평변형에 해당됨을 확인하였으므로 본 실험의 Load Case 1의 내하하중 110%에서 변형율은 290 micro strain으로 약 0.98cm의 변형이 발생하였음을 알 수 있다. 또한 국부좌굴 이후의 변형율은 800 micro strain으로 2.7cm의 slip이 발생하였다. slip은 내하하중의 75%도 달시 까지는 미소하나 이후에는 상당히 증가함을 보이는데 이것은 75%이후에 철탑의 기하학적 비선형 거동에 의한 하단부의 모멘트 증가에 의한 것으로 판단된다. 이러한 slip의 발생은 장기적인 진동을 받는 경우 피로파괴를 유발케 하므로 강관철탑에 대한 slip의 한계치를 설정하는 기준이 필요함과 동시에 slip을 최소화할 수 있는 bolt 체결방법이 제시되어야 할 것이다.

6.4 주주재의 편심응력

지금까지 철탑설계는 절점의 모멘트 영향을 무시한 트러스 해석법으로 수행되어 왔으므로 주주재 및 사재의 설계시 압축력만이 고려되었다. 본 연구에서는 절점모멘트의 영향을 고려한 3차원 프레임 해석을 수행하였다. 전산해석의 결과에 의하면 절점

에서 발생한 모멘트에 의한 압축응력은 압축력에 의한 압축응력에 비하여 10%이내이므로 무시할 수 있는 정도이나 실제 계측한 결과에 의하면 40-50%발생함에 따라 주주재의 편심응력을 상당히 신중하게 고려되어야 함을 알 수 있다. 이것은 일본의 1000kv 송전강관 철탑의(참고문헌8) 압축응력이 평균 30%의 증가된 결과와도 유사한 경향을 나타내고 있다.

7. 결론

본 연구는 초고압(765kv) 강관철탑의 상용화를 앞두고 구조적 안전성 검증과 성능을 파악하기 위한 일환으로 수행되었다. 연구는 철탑해석, 접합부해석, 재질특성 시험, 실증계측 시험으로 구분하여 단계적으로 수행하였다. 철탑의 해석은 다양한 해석방법의 비교로부터 해석의 적정성을 확인하였다. 또한 현재 한전 송변전 철탑 기준에는 강관철탑에 관한 기준이 미비된 상태에 있으므로 국내 및 해외의 관련 기준을 조사하였다. 철탑의 구조체 해석만으로는 판단할 수 없는 접합부의 안전성 검토를 위하여 유한요소 해석을 수행하여 접합부의 취약 원인 및 취약 부위를 조사하였다. 이론적 해석치의 검증을 위하여 실규모 철탑의 주주재, 사재, 접합부등 총35개소에 계측 sensor를 설치하여 변형율을 측정, 이로부터 응력을 산출하여 이론치와 비교 검토하였다. 본 연구의 주 목적은 철탑 응력의 계측을 통한 구조적 성능의 확인에 있었으며 연구 수행중 도출된 문제점에 대하여는 추가적인 연구를 통한 개선을 기대하고자 한다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 실제 철탑에 있어서 상단 부재는 비선형 거동을 나타내므로 이를 구현하기 위하여는 3차원 프레임 방법에 의한 비선형 대변형 해석이 요구된다.
- 2) 기존 국내의 송전 철탑기준에는 강관에 관한 기준이 반영되어 있지 않으므로 경제적인 강관부재의 적합한 선정이 곤란하며 기준 제시를 위한 기초 연구를 필요로 한다.
- 3) 접합부는 철탑 전체의 강도에 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었으며 접합부의 성능 개선을 위하여 이에 관한 세부적 연구를 필요로 한다.
- 4) 철탑의 파괴는 응력집중으로 인한 국부좌굴의 형태로 발생하였으며 이는 사전 국부해석 및 실내시험에서 나타난 파괴형태와 일치함으로써 철탑파괴 거동의 사전 예측이 가능하였다.
- 5) 이론치와 계측치의 비교에 있어서 평균 17%이하의 차이를 보임으로써 전산해석의 신뢰도를 확인하였다.
- 6) 철탑의 주주재는 접합부에서 상당한 편심 및 모멘트가 발생하므로 설계에 이를 반영하여 철탑의 취약요소를 제거해야 한다.
- 7) 응력 계측 결과 철탑의 거동은 하중가력의 전 경로에 걸쳐 부분적으로 일관성이 없으므로 이에 대한 원인규명을 위하여 하중 가력 장치, 시공성 등에 대한 재점검이 요구된다.

참고 문헌

1. "架空送電用 鐵塔設計標準", 한국전력공사, 1991
2. "鋼管構造設計指針同解説", 日本建築學會, 1990
3. "JEC-127 送電用支持物設計標準", 日本電氣學會, 1979
4. "Guide for Design of Steel Transmission Tower", ASCE, 1971
5. "Manual of Steel Construction, Allowable Stress Design", AISC 9th edition
6. "765KV급 송변전용 철탑설계 및 제조기술개발에 관한 연구" 한국전력공사, 1992
7. "765kv 송전용 강관철탑 설계에 관한 연구", 현대철탑산업 주식회사 1990
8. "Mechanical Test Results of Full Scale 1000kv Transmission Towers" H, Yamagishi, CIGRE, Paris, 1990, Sept.

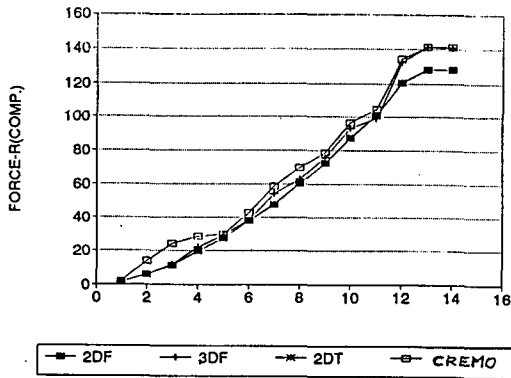


그림 1. 해석방법에 따른 비교

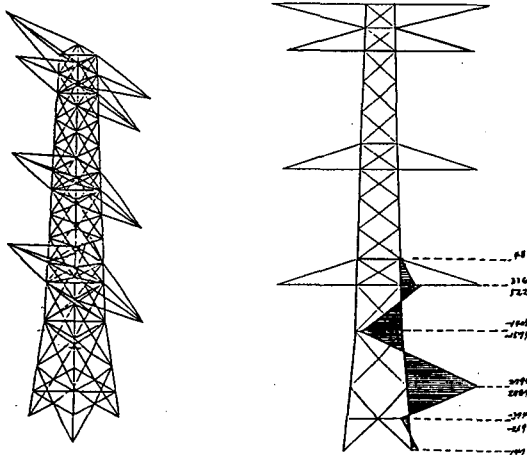


그림 2. 시험철탑의 형상 및 모멘트 분포

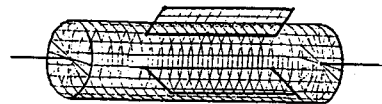
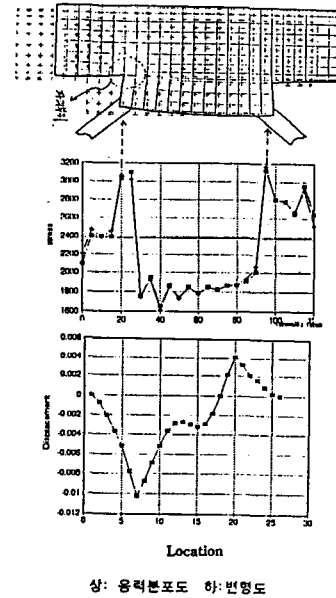


그림 3. 강관접합부의 유한요소 모형



상: 응력분포도 하: 변형도

그림 4. 접합부의 응력분포 및 변위

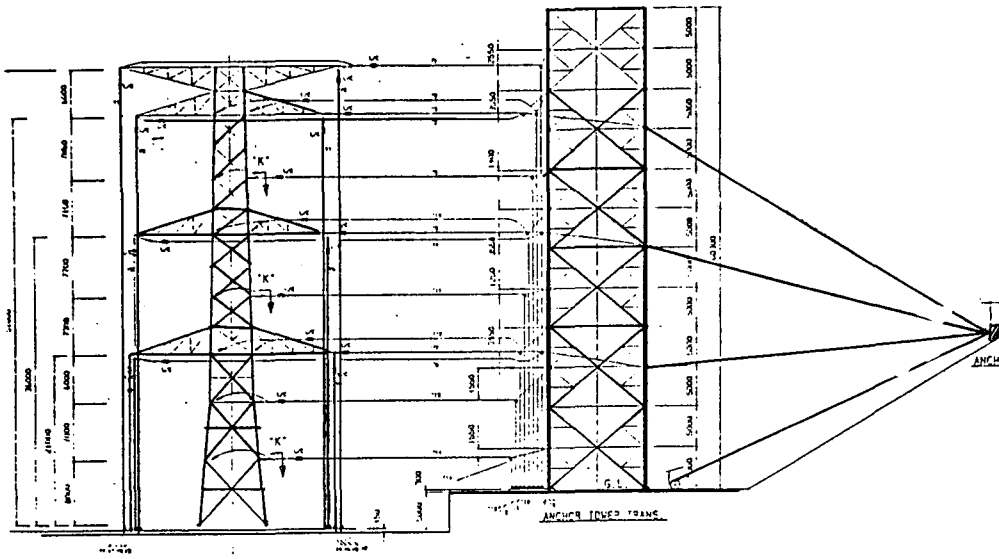


그림 5. 시험철탑의 가력장치

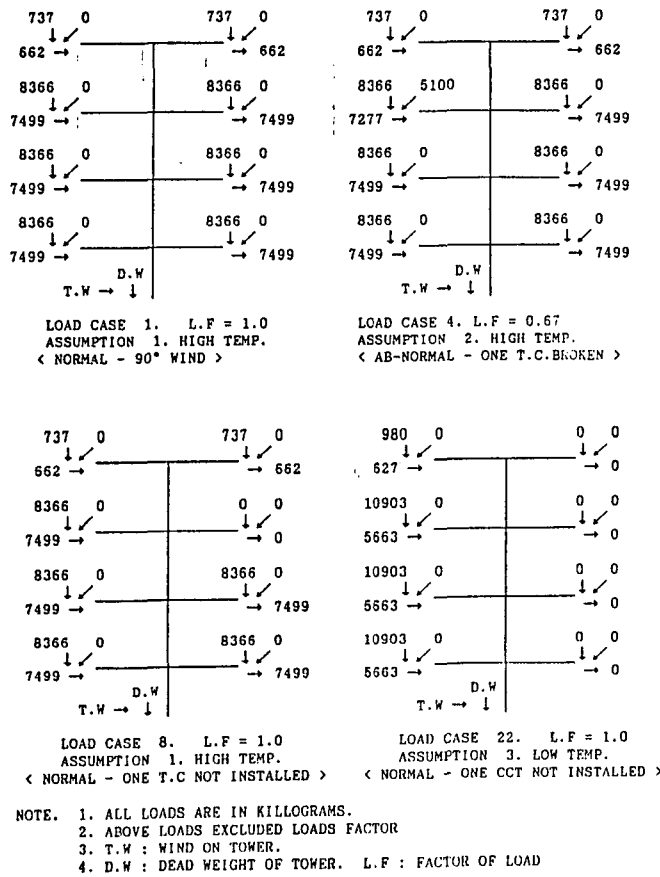


그림 6. 시험철탑의 하중종류

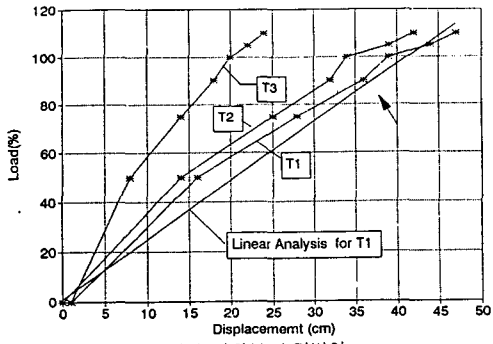


그림 7. 철탑 상단부 수평변위

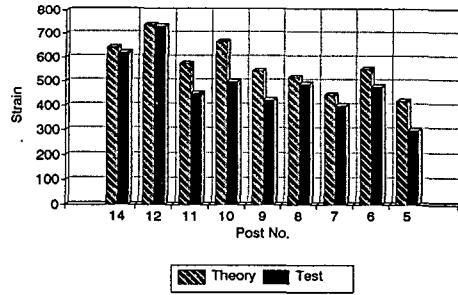


그림 8. 이론치와 실험치의 비교

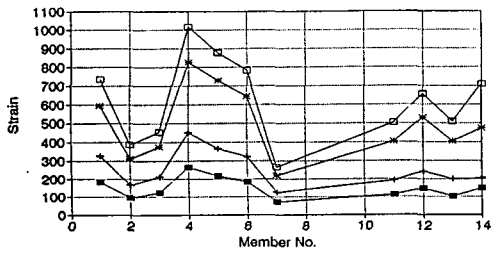


그림 9. 가력하중에 대한 계측결과 (Load Case 4)

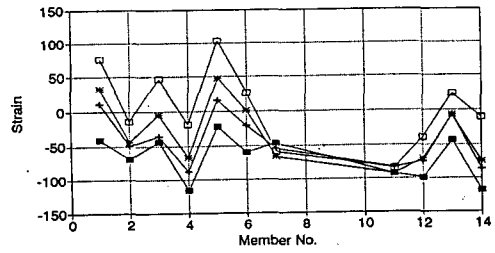


그림 10. 가력하중에 대한 계측결과 (Load Case 22)

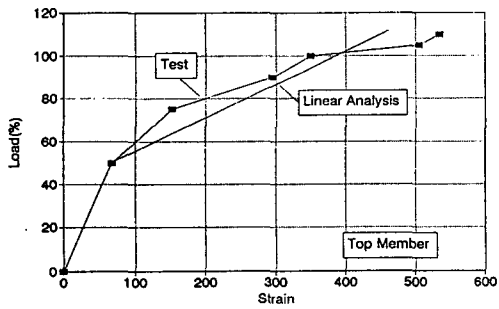


그림 11. 하중증가에 따른 응력 경로 (상단부재)

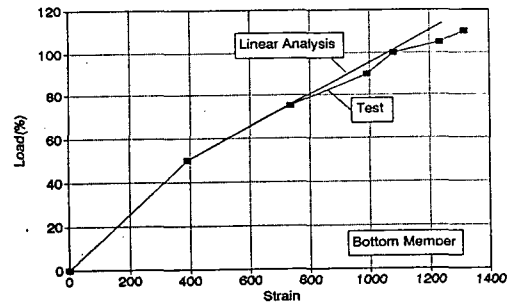


그림 12. 하중증가에 따른 응력 경로 (하단부재)

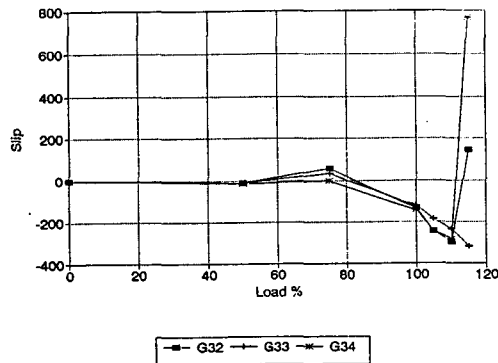


그림 13. 점합부의 Slip