

# 송전철탑의 내풍안전성 평가를 위한 1/2축소부분구조 실험

## Half-Scaled Substructure Test for the Performance Evaluation of a Transmission Tower subjected to Wind Load

문 병 옥\*      민 경 원†

Moon, Byoung-Wook      Min, Kyung-Won

(논문접수일 : 2007년 6월 29일 ; 심사종료일 : 2007년 8월 6일)

### 요 지

본 논문에서는 풍하중에 대한 기존 송전철탑의 좌굴 및 구조적 안전성을 평가하기 위해서 축소부분구조 실험을 수행하였다. 원 송전철탑에 작용하는 중력 및 풍하중을 재현하기 위해서 1/2크기의 상사법칙을 적용한 축소모델의 상부에 설치된 삼각형태의 지그를 이용하여 가력하는 방법을 고안하였다. 설계하중에 대한 실험체의 안정성을 평가하기 위해서 예비수치 해석을 수행한 결과, 계산된 주주재의 축력은 허용좌굴하중의 80~90% 사이에 분포하고 있음을 확인하였다. 최대허용좌굴하중의 270%까지 가력한 결과, 주주재의 변위거동을 구속하는데 취약한 절점에서 발생한 국부좌굴로 인하여 송전철탑이 파괴되었다. 하중-변위 곡선, 변위, 부재별 변형률을 검토한 결과, 이러한 국부좌굴의 발생은 동일한 단면내에서도 휨모멘트로 인해 항복응력에 도달하는 시간이 위치별로 다르기 때문에 변형의 불균형에 의해서 발생한 추가적인 편심에 기인한 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 송전철탑, 부분구조실험, 풍하중, 국부좌굴

### Abstract

In this paper, a half-scaled substructure test was performed to evaluate the buckling and structural safety of an existing transmission tower subjected to wind load. A loading scheme was devised to reproduce the dead and wind loads of a prototype transmission tower, which uses a triangular jig that is mounted on the reduced model to which the similarity law of a half length was applied. As a result of the preliminary numerical analysis carried out to evaluate the stability of a specimen for the design load, it was confirmed that the calculated axial forces of tower leg members were distributed to 80~90% of an admissible buckling load. When the substructured transmission tower was loaded by 270% of its maximum admissible buckling load, it was failed due to the local buckling that is occurred in joints with weak constraints for out-of-plane behavior of leg members. By inspection of load-displacement curves, displacements and strains of members, it is considered that this local buckling was due to additional eccentric force by unbalanced deformation because the time that is reached to yielding stress due to the bending moment is different at each point of a same section.

**Keywords** : transmission tower, substructure test, wind load, local buckling

### 1. 서 론

2003년 9월 12일 순간최대풍속 60m/s를 기록한 태풍 '매미'가 제주도에 상륙하여 익일까지 한반도를 휩쓸고 지나가 130여명의 인명피해와 약 5조원에 육박하는 재산피해를 입혔다. 특히, 전력계통의 피해가 막심하여 전국적으로 약 15

만호의 정전피해가 발생하였으며, 10기의 송전철탑이 파손되었다(국립방재연구소, 2003). 최근 중심부근 최대풍속이 67m/s이상인 슈퍼태풍이 한반도를 강타할 가능성이 각종 언론보도를 통해 조심스럽게 제기되는 가운데 기존의 송전철탑의 내풍안전성을 평가하기 위한 연구의 중요성이 날로 증가하고 있다. 또한, 전력수요의 증가에 따라 원활한 전력을 공

\* 책임저자, 정희원 · 단국대학교 건축대학 건축공학과 교수

Tel: 031-8005-3734 ; Fax: 031-8005-3741

E-mail: kwmin@dankook.ac.kr

† 단국대학교 건축대학 건축공학과 박사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2007년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2008년 2월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

급하기 위해서 송전철탐이 대용량화 되고 있고, 송전철탐의 하중기준의 강화에 따른 기존 송전철탐의 보수보강을 위한 보강량의 결정을 위해서도 기존 송전철탐의 내풍성능 및 구조적 안전성의 평가 및 검증에 관한 연구가 필요하다고 사료된다.

송전철탐의 풍응답, 구조적 안전성 평가 및 실험적 검증에 관한 기존의 연구는 다음과 같다. Alam 등은 약 34m 높이의 실규모 220kV급 송전철탐에 대한 가력시험을 수행하여 주주재(leg member)와 철탐 암의 하현재(corss-arm bottom member)의 좌굴에 의해 전체 철탐가 파괴에 이른다는데 것을 확인하고, 기존의 규준들(ASCE Manual 52, 1988, IS:802, 1992)에 규정된 150의 세장비를 각각 110과 115로 수정할 것을 제안하였다(Alam 등, 1996). Momomura 등은 산악지형에 위치한 송전철탐의 풍응답과 풍특성을 조사하기 위해서 약 3년의 기간동안에 25m/s이하의 풍속에서 측정한 송전철탐의 실측데이터를 바탕으로 하여 풍향과 풍특성의 관련성 및 애자의 유무에 따른 송전철탐의 동적거동 특성을 확인하였다(Momomura 등, 1997; Okamura 등, 2003). 김우범 등은 국내의 송전방식의 격상에 따른 대용량 송전철탐의 건설에 대비하기 위해서 78m 높이의 765kV급 송전철탐에 관한 가력시험을 수행하여 기존의 L형 강과는 달리 원형강관을 사용한 철탐의 구조성능을 파악하고 검증하였다(김우범 등, 1998).

본 논문에서는 송전철탐의 축소부분구조를 실험체로 제작하고 상부구조물에 의한 모멘트와 전단력을 전달하는 가력방식을 개발하여 이를 통해 송전철탐의 풍응답 안전성을 평가하고자 한다. 예비해석을 통하여 가력방법의 타당성과 설계 하중에 대한 실험체의 안정성을 평가하였고, 실험 결과로 변형형상, 하중-변위, 변위, 부재별 변형률을 검토하여 주주재의 국부좌굴에 의한 파괴현상을 확인하였다.

## 2. 실험계획

### 2.1 실험체 제한

실험체로 선정한 철탐은 154kV급 B2-Type으로 철탐의 높이는 38.1m, 전선의 수평각도는 20°이고 300m의 전선이 양쪽에 연결되어 있다. 송전철탐하중시험은 일반적으로 실물 크기로 제작한 송전철탐의 가력 지점에 와이어를 연결하여 수평하중과 수직하중을 재하하는 방식으로 진행된다(김우범 등, 1998). 그러나 본 연구에서는 제한된 공간의 실험실 내에서 유압식 가력기를 이용하기위해 상사법칙에 따라 송전철탐 일부분의 축소모형을 제작하여 실험을 수행하였으며, 실

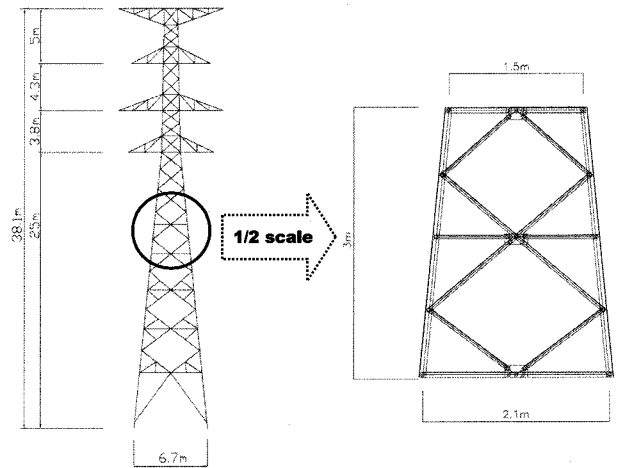


그림 1 원 송전철탐과 1/2 부분 축소 실험체

물규모 실험에 비해 국부적인 파괴 양상을 보다 정밀하게 파악할 수 있다는 장점이 있다.

철탐의 붕괴를 유발하는 주된 파괴모드로는 철탐암 하부의 주주재와 복재에서의 좌굴과 철탐의 기초와 주주재사이에서 전단 혹은 전도 파괴가 있다. 따라서 본 연구에서는 철탐암 하부의 주주재와 복재의 좌굴에 의한 파괴모드를 실험을 통하여 살펴 보기위하여 그림 1과 같이 전체철탐의 중앙부분을 실험체로 제작하였다. 실험체의 축소비율은 실험실의 규모와 조건을 반영하여 원 송전철탐의 1/2로 제작하였다. 실험체는 주주재의 접합부에 따라서 수직방향으로 4개의 절간으로 나눌 수 있다. 이 가운데 최상부 및 최하부의 절간은 구속조건을 실제 송전철탐에서와 같이 만들어 주기 힘들기 때문에 지구와 연결되는 더미 부분으로 보아야 하며 중앙의 두 절간에

표 1 원 철탐의 실험 부분 형강

형강 사이즈	단면적 [cm <sup>2</sup> ]	최소 단면 2차모멘트 [cm <sup>2</sup> ]	최소 단면 2차반경 [cm <sup>2</sup> ]
HL 150×12	34.77	304.00	2.96
L 65×6	7.537	12.20	1.27
L 60×4	4.64	6.62	1.19
L 50×4	3.84	3.76	0.983

표 2 1/4 축소 형강 및 제작 가능 형강

형강 사이즈	단면적 [cm <sup>2</sup> ]	최소 단면 2차모멘트 [cm <sup>2</sup> ]	최소 단면 2차반경 [cm <sup>2</sup> ]
L 75×6 → L 75×6	8.727	19.00	1.48
L 40×3 → L 60×4	4.692	6.62	1.19
L 30×3 → L 45×4	3.492	2.69	0.88
L 35×3 → L 45×4	3.492	2.69	0.88

서 일어나는 거동이 송전철탑의 파괴모드를 알아보기 위한 주된 실험대상이 된다. 따라서 상부와 하부에서 파괴가 일어나지 않도록 접합부에 플레이트로 보강을 하고 실험체 설치를 위해 사용된 상부, 하부의 집합용 플레이트와 충분한 용접을 통해 강접합 상태로 연결하였다.

실험체의 크기는 높이 3m, 하부 평면 크기 2m×2m, 상부 평면 크기 1.5m×1.5m이다. 원 송전철탑의 사용 부재의 길이는 1/2, 단면적은 1/4이 되는 부재를 사용하려 했으나 해당 사이즈의 규격제품이 생산되지 않아 근사한 규격을 갖는 형강으로 제작하였다(표 1,2). 축소부재 선택 시 부재의 경우에는 규격제품 중 가장 작은 사이즈로 선택하여 사용하였으며, 예비해석에서 발생하는 응력이 좌굴응력에 비해 매우 작기 때문에 상사비율의 부정확성이 미치는 영향은 미미하다고 판단하였다. 원 송전철탑에 사용된 볼트는 M20 철탑용 아연도금 볼트로서 1/2 축소한 사이즈의 볼트는 규격품이 생산되지 않아 M16 철탑용 아연도금 볼트를 사용하였다.

2.2 하중계획

송전철탑에 작용하는 하중으로는 크게 수직하중, 수평횡하중, 수평종하중, 염력으로 구분할 수 있다. 수직하중은 주로 구조물의 무게에 의한 자중으로서 가공지선, 전력선, 애지등의 무게로 분류할 수 있다. 수평횡하중은 전선이 지나가는 방향의 직각 방향의 하중으로서 풍하중, 각도하중 등이 있다.

표 3 원 송전철탑의 실험부분에 작용하는 풍직각방향 설계하중

암의 투영면적	1.41 [m <sup>2</sup> ]
본체의 투영면적	9.29 [m <sup>2</sup> ]
암에 의한 전단력	0.488 [tonf]
본체에 의한 전단력	3.494 [tonf]
각도하중에 의한 전단력	16.862 [tonf]
상부 전단력 합	20.290 [tonf]
상부 모멘트 합	225.449 [tonf·m]

표 4 원 송전철탑 실험부분에 작용하는 상부 중량

가설선 중량	1.488 [tonf]
전선 중량	8.724 [tonf]
상부 철탑 중량	3.522 [tonf]
상부구조 중량합	13.764 [tonf]

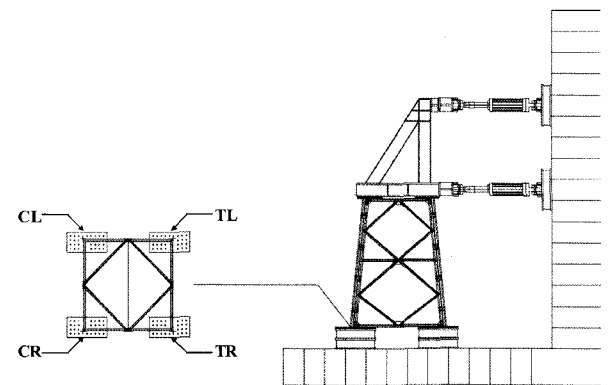
표 5 설계하중에 의한 실험체 가력 하중 산정

상부가력하중	14.00 [tonf]
하부가력하중	-9.00 [tonf]
상부중력하중	1.72 [tonf]

수평종하중은 전선이나 가공지선의 장력을 말한다. 그리고 염력은 가설선의 절단으로 인하여 생기는 비틀림 하중을 말한다. 이러한 여러 가지 하중을 여러 케이스로 조합하여 최대 응력이 발생하는 케이스로 부재를 설계한다(김우범 등, 1997). 실험에 채택된 원 송전철탑의 경우에 전선 직각 방향의 각도하중이 가장 큰 수평하중으로 작용한다는 점과 소수의 가력기를 가지고 실험실 내에서 실험을 수행해야 한다는 점을 고려하여 전선직각방향으로 재하방향을 정하였다.

실험체에 작용하는 하중은 원 송전철탑의 실험부분에 작용하는 하중을 축소하여 산정하였다. 하중산정에 적용한 상사성 원칙은 다음과 같다. 풍하중의 경우에는 수평면적에 비례하므로 실험체의 축소율을 제공하여 원 송전철탑의 실험부분에 작용하는 하중의 1/4배를 적용하였다. 자중의 경우에는 체적에 비례하므로 원 송전철탑의 실험부분에 작용하는 하중의 1/8배를 적용하였으며 상부 지그의 자중과 유사하여 이로 대체하였다.

실험은 최대변위 ±200mm의 50tonf급 유압식 가력기 2개를 이용하여 실험체에 모멘트 및 전단력을 가해주도록 계획하였다. 가력기는 실험실 바닥에서 부터 5m, 3m 높이에 하나씩 총 2개를 설치하였고 설계하중에 의한 실험체 가력하중으로 상부에는 14 tonf, 하부에는 -9 tonf를 가력 하였다. 실험을 수행한 현대건설기술연구소 구조실험실에서 설치 가능한 가력기의 최대 높이는 5m정도이다. 실험체의 높이는 3m로서 모멘트를 발생시키기 위한 모멘트 팔길이는 최대 2m이다. 그러나 상사성 원리에 의해서 소요되는 모멘트 팔길이는 대략 8m정도가 된다. 제한된 모멘트 팔길이 때문에 설계하중에 의한 상부 모멘트를 가해주기 위해서 수평하중을 크게 증가시켜야 한다. 따라서 필요이상의 전단력이 발생하므로 실험체가 상부구조물로 부터 전달되는 설계전단력만을 받을 수 있도록 전단력의 크기를 줄여야 한다. 이를 위해 실험체 최상부와 같은 3m 높이에 가력기를 설치하고 최상부



(a) 실험체 하부 평면도 (b) 실험체 설치 입면도  
그림 2 실험체 및 가력기 구성도

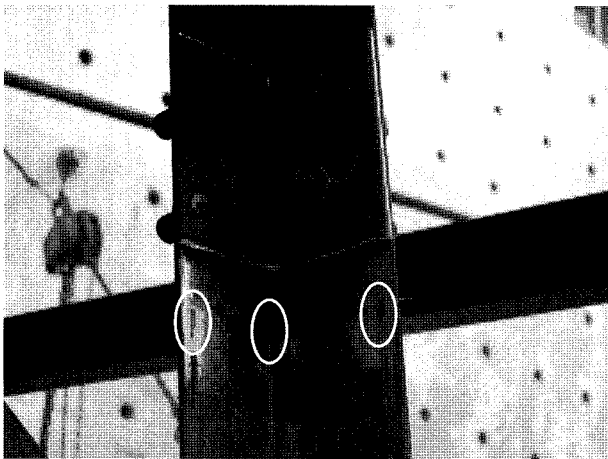


그림 3 주주재 변형률의 3점 측정

가력과 반대 방향의 하중을 재하하여 실험체에는 설계하중에 의한 수평력만 전달되도록 가력방법을 계획을 하였다. 실제 가력에 있어서는 변위제어를 수행하였기 때문에 예비해석을 통해 축소 실험체 가력하중 재하시 상하부 가력지점의 변위를 계산하였으며 두 가력기 변위 비율을 유지하면서 파괴시점까지 증가시켰다. 최종적인 실험체와 가력기의 구성도는 그림 2와 같다.

### 2.3 스트레인 게이지 및 변위계 설치계획

스트레인 게이지 및 변위계는 데이터로거의 채널 수가 60개로 제한되어 있는데 반해 부재의 수가 매우 많기 때문에 제한된 위치에만 설치하였다. 송전철탄에 전도모멘트가 가해지는 경우에 미리 예상할 수 있는 전형적인 파괴는 압축을 받는 부재에서의 좌굴이다. 예비해석 결과 복재에 작용하는 압축력은 좌굴하중에 비해 크지 않으므로 주주재에서의 좌굴에 의한 파괴를 예상하고 압축을 받는 주주재에 집중적으로 스트레인 게이지를 설치하였다. 압축측 주주재의 절간에는 하중이 작용하지 않으므로 되도록 절점에 가까운 위치에 부착하였다. 반면에 인장측 주주재는 절간의 중앙에 1개씩 설치하였다. 압축측 주주재에는 하나의 단면상에서 모서리와 각 각부의 끝부분에 하나씩 부착함으로써 개소별로 3개씩의 스트레인게이지를 부착하였으며, 이는 결과분석 시 휨모멘트와 축력을 환산하기 위함이다(그림 3). 반면에, 인장측 주주재는 회전반경이 상대적으로 커서 응력이 크게 작용할 것으로 예상되는 가력기 쪽에 면한 각부 중앙에만 부착하였다. 복재는 인장측 주주재와 마찬가지로 연결 절점 사이의 중앙에 위치한 단면의 각부 가운데 볼트 접합이 실시된 쪽의 중앙에 스트레인 게이지를 부착하였다. 스트레인 게이지의 배치도는 그림 5와 같다. 부재 및 절점의 넘버링 규칙은 그림

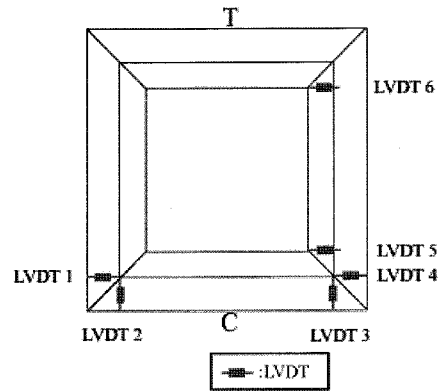


그림 4 변위계 배치도

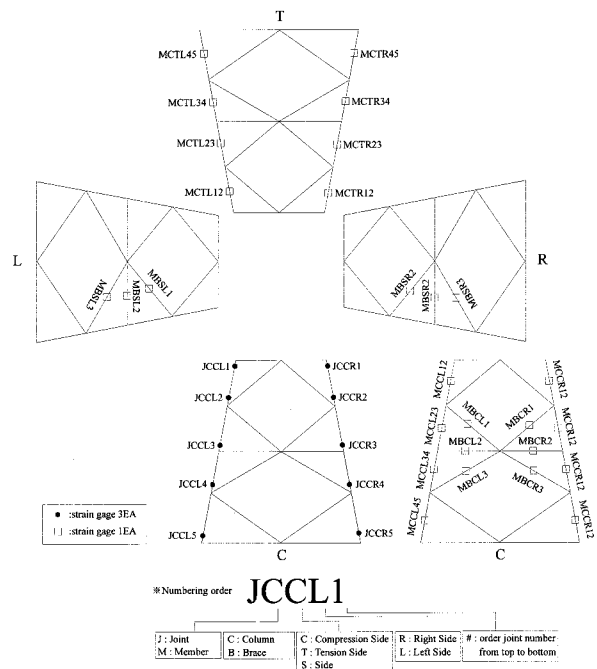


그림 5 스트레인 게이지 배치도

5에 나타낸바와 같으며 스트레인 게이지의 위치와 관련해서 부재 중간에 부착된 경우에는 M으로 시작하며, 절점 부근에 부착된 경우에는 J로 시작하는 기호를 사용한다. 변위계는 최상부의 가력방향 변위가 가력기에서 측정되기 때문에 최상부에는 비틀림을 측정하기 위해 가력직각방향으로 두 개의 변위계를 설치하였다. 반면에 중간 높이에서는 지그에 의한 격막효과가 없으므로 압축측 모서리 2개소에 각각 2개씩의 변위계를 설치하였다(그림 4).

### 3.예비 해석

실험체는 보요소를 사용하여 모델링하였으며 접합부는 강 접합된 것으로 가정하였다. 지그는 상부의 삼각형 캔틸레버는 보요소로 모델링하고 나머지 부분은 셸요소를 사용해서

모델링하였으며 접합용 플레이트가 부착되는 부분은 이를 반영하여 두께를 증가시켜 주었다. 보요소와 셸요소는 강체링 크를 사용해서 연결하였으며 가력기를 연결하기 위한 지그 역시 강체링 크를 사용해서 모델링하였다. 모델링 및 해석에 사용된 소프트웨어는 MIDAS Civil이며, 전체 모델은 그림 6과 같다. 하중은 원 송전철탐의 설계하중으로부터 산정된 재하시험용 하중을 사용하였다.

설계하중을 대상으로 한 수치해석 결과에 의한 실험체 상부 변위는 3.217mm로서 실험체 높이가 3m임을 고려하면 0.1072%의 층간변위비를 가진다. 그러나 송전철탐의 캔틸레버 거동을 고려하면 이와 같은 변위가 누적되어 상부에서는 상당한 변위가 발생할 수 있을 것으로 보인다. 다음으로는 좌굴안정성 검토를 위해 수치해석 결과와 한국전력 송전철탐 설계기준(2004)에서 제시하고 있는 계산식에 의거한 허용좌굴응력을 비교하였다. 실험에서 사용된 L형강은 SS400의 재질이며, 이에 따라 기준에서 제시하고 있는 허용좌굴응력 계산식은 다음과 같다.

- 편심이 비교적 작은 구조재 (주주재, 철탐암 주재)

$t \leq 16$ 이고,  $0 < \lambda_k < 105$  일 때

$$\sigma_{ka} = 1550 - 23(\lambda_k/100) - 602(\lambda_k/100)^2 \quad (1)$$

$t \leq 16$ 이고,  $\lambda_k \geq 105$  일 때

$$\sigma_{ka} = 950(\lambda_k/100)^2 \quad (2)$$

표 6 압축축 부재의 허용좌굴응력

번호	길이 [cm]	유효 세장비	허용좌굴응력 [kgf/cm <sup>2</sup> ]	허용좌굴하중 [kgf]	수치해석 [kgf]
MCCL12 MCCR12	72.7	28.4	-1,494	-12,998	-10,379 (79.9)
MCCL23 MCCR23	69.4	27.2	-1,499	-13,041	-10,855 (83.2)
MCCL34 MCCR34	81.9	32.0	-1,480	-12,876	-10,836 (84.2)
MCCL45 MCCR45	72.7	28.4	-1,494	-12,998	-11,440 (88.0)
MBSL1 MBSR1	107.7	71.8	-1,002	-3,507	327 (-9.3)
MBCL1 MBCR1					-190 (5.4)
MBSL2 MBSR2	79.50	53.0	-1,146	-4,011	87 (-2.2)
MBCL2 MBCR2					160 (-3.9)
MBSL3 MBSR3	118.1	78.7	-950.0	-3,325	-438 (13.2)
MBCL3 MBCR3					-222 (6.7)

- 편심이 비교적 많은 구조재 (복재)

$t \leq 16$ 이고,  $0 < \lambda_k < 135$  일 때

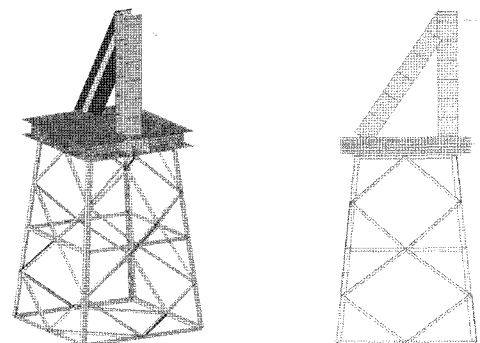
$$\sigma_{ka} = 1550 - 762(\lambda_k/100) \quad (3)$$

$t \leq 16$ 이고,  $\lambda_k \geq 135$  일 때

$$\sigma_{ka} = 950(\lambda_k/100)^2 \quad (4)$$

여기서,  $\lambda_k$ 는 부재의 유효 세장비이고  $l_e/\gamma$ 로 나타내어진다.  $l_e$ 는 기둥의 유효길이이고,  $\gamma$ 는 부재 단면의 단면2차 반경이다. 일반적인 송전선로에 사용하는 철탐의 경우에는 부재의 유효좌굴길이  $l_e$ 를 주주재 및 완금주재는  $l_e = 0.9 l$ , 복재, 완금조제, 완금대각재 등은  $l_e = 0.8 l$ 을 사용한다. 위식을 이용하여 실험체의 압축축에 위치한 주주재 및 복재의 허용좌굴응력을 구하여 각각 표 6에 나타내었으며 괄호안의 값은 해석결과와 허용좌굴하중의 백분율이다.

표 6에서 볼 수 있듯이 해석에 의해 계산된 주주재의 축력은 허용좌굴하중의 80%에서 90%사이에 분포하고 있다. 따라서 실험체는 설계하중에 대하여 충분한 안전성을 확보하고 있는 것으로 나타났다. 그러나 설계하중보다 큰 하중이 작용하는 경우에는 최하부 절간의 주주재가 가장 취약한 것으로 나타났다. 반면에 복재는 허용좌굴하중의 13%이하로 나타나서 상대적으로 훨씬 안전한 것으로 나타났으며, 주주재와 비교하면 상대적으로 축력이 훨씬 작게 나타나고 있다. 이는 실험체가 주로 휨거동을 하기 때문이며, 이로부터 실질적으로 가새 부재를 보강해서는 송전철탐의 강도 또는 강성 증가 효과가 크지 않을 것임을 예측할 수 있다. 복재의 경우에 규격단면이 존재하지 않아서 상사성 원리에 의한 단면보다 큰 단면을 사용하였으나 상사성 원리를 맞춘다고 하여도 복재의 강성이 줄어들어 축력이 감소할 것으로 예상되며 따라서 단면적의 감소에 의한 좌굴위험성 증가는 크지 않을 것으로 보인다.



(a) 입체도 (b) 측면도  
그림 6 송전철탐 축소모형과 지그의 수치해석 모델 (MIDAS Civil)

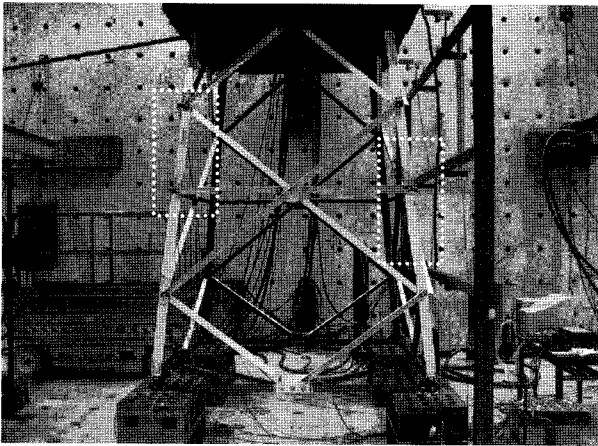
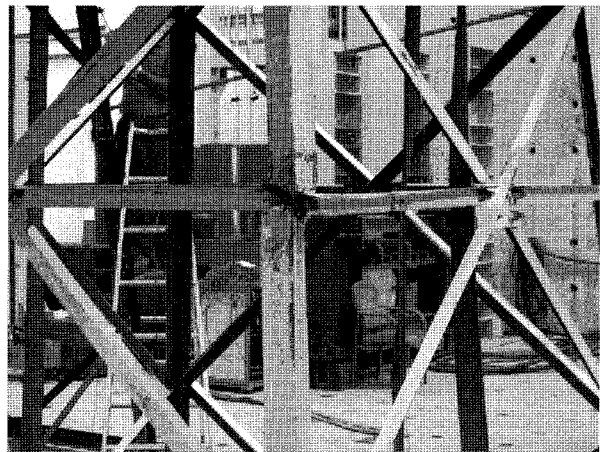


그림 7 실험 종료 후의 실험체 전경



(a) 압축측 주주재 외부모서리

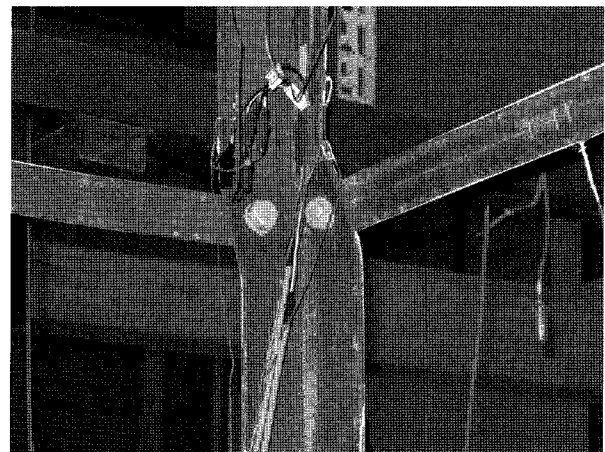
#### 4. 실험 결과

##### 4.1 변형 형상

하중은 변위제어 형식으로 재하하였다. 실험 과정에서 초기에는 육안으로 식별할만한 변화가 없었으며, 가력기의 변위가 37mm정도 발생한 시점에서 최소 폭두께비를 만족함에도 불구하고 우측 주주재에 국부좌굴이 발생하는 것이 관찰되었다. 하중이 이 시점의 값을 최대로 하여 급격히 감소하기 시작하였고, 상부 가력기의 하중이 최대치의 약 70%정도로 감소하였을 때 가력을 중지하였다. 하부지그에 발생한 변위는 약 0.01mm로 무시할 수 있는 수준으로 판단되었다.

그림 7은 실험 종료후 실험체의 압축측 입면을 촬영한 것이다. 전체사진에서 볼 수 있듯이 구조물 전체의 관점에서 볼 때 면외좌굴이 발생하지는 않았다. 반면에 정면사진에서는 잘 나타나지 않았으나 모서리에서 촬영한 그림 8에는 주주재의 국부좌굴로 인한 비틀림 변형이 뚜렷하게 나타나 있음을 관찰할 수 있다. 국부좌굴은 좌측과 우측에 각각 발생하였고 그 부분을 그림 7에 표시하였다.

이 중 압축측 우측 주주재의 변형 형상을 살펴보면 그림 8과 같다. 최상부의 MCCR12 및 최하부의 MCCR45에서는 육안으로 식별가능한 큰 변형은 발생하지 않았다. 가장 큰 변형이 발생한 것은 중간의 MCCR23 및 MCCR34 부재로서 절점 JCCR3에서 국부좌굴에 비틀림 변형이 크게 발생하였다. 반면에 전체좌굴은 복재에 의해 억제된 것으로 보인다. 평면상으로 볼 때 절점 JCCR3에서 MCCR23은 시계방향으로, MCCR34는 반시계방향으로 비틀림이 발생하였다. 비틀림 변형이 JCCR3에서 가장크게 발생한 것은 이 절점에서는 L형강의 각각의 각부에 연결된 복재가 한 개씩이며, 반면에 JCCR2나 JCCR4에서는 각부당 두 개의 복재가 각부의 앞



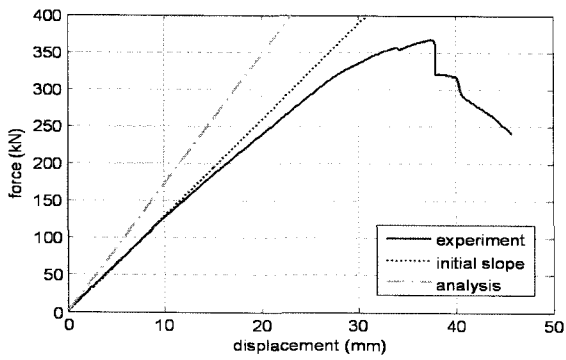
(b) 압축측 주주재 내부모서리

그림 8 주주재의 변형(압축측 우측) JCCR3

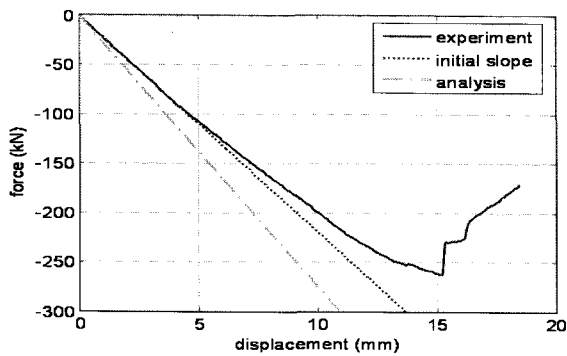
뒷면으로 연결되어 국부좌굴에 의한 각부의 이동의 억제에 유리하기 때문인 것으로 보인다. 특히 수평복재는 예비해석에서도 볼 수 있듯이 경사복재에 비해 부재력이 크게 발생하지 않으며 이는 역으로 이 부분의 지지점으로서의 역할이 적은 것으로 해석할 수 있다.

복재의 변형은 비틀림 변형이 가장 크게 발생한 JCCR3에 연결된 복재에서만 발생하였다. 변형의 양상을 살펴보면 JCCR3의 회전에 의해 복재에 비틀림 변형이 발생하였으며 자체의 축력으로 인해 좌굴이 발생하지는 않은 것으로 보인다. 도색의 탈락이 거의 없는 것으로 보아 주주재에 비해 상대적으로 세장하여 비틀림 강성이 작기 때문에 과도한 소성 변형이 일어나지는 않은 것으로 보인다.

결론적으로 송전철탄의 붕괴는 주주재를 구성하는 L형강 각부의 면외거동을 구속하는데 취약한 절점에서 주주재의 국부좌굴로 인해 발생한다고 할 수 있다. 따라서 효과적인 송전철탄의 보강을 위해서는 이와 같은 절점에서 주주재 각부의 면외거동을 억제할 수 있는 보강을 실시하는 것이 효과적

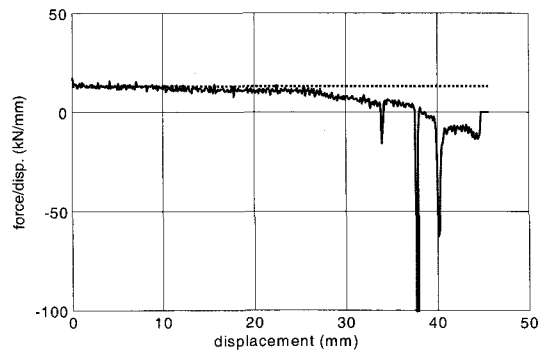


(a) 상부

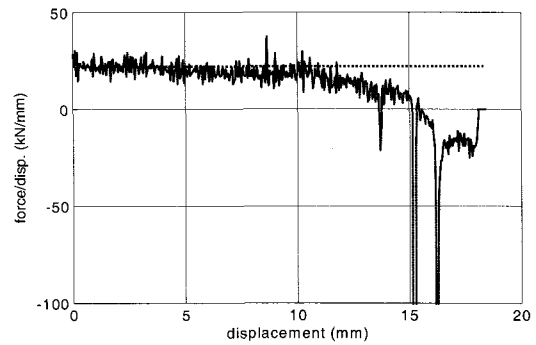


(b) 하부

그림 9 가력기 하중-변위 곡선



(a) 상부



(b) 하부

그림 10 가력기 하중-변위 곡선의 기울기

표 7 가력기 하중 및 변위 비교

	하중(kN)		변위(mm)	
	상부	하부	상부	하부
해석	188.1	-120.0	10.84	4.375
실험	188.1	-130.2	15.36	6.201
실험/해석	1.0	1.085	1.417	1.417

이며 이를 향후 연구에 적극 반영할 필요가 있을 것으로 사료된다.

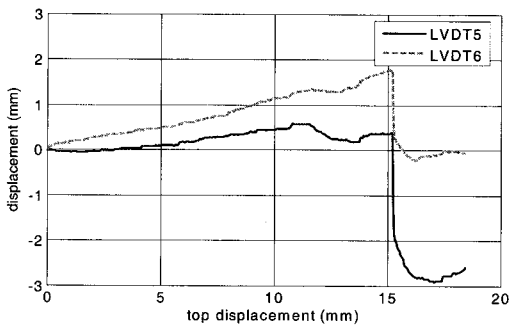
#### 4.2 하중-변위 곡선

가력기의 하중-변위 곡선으로부터 실험에서 발생한 수평변위는 수치해석으로부터 얻어진 수평변위보다 상당히 더 큰 값을 가지는 것으로 확인되었다. 상부 및 하부 가력기의 하중-변위 곡선은 그림 9과 같다. 수치해석에서 얻어진 주주재의 설계좌굴응력 발생 시의 상부 가력기 하중 188.1kN를 기준으로 하여 하부가력기의 하중 및 상하부 가력기의 변위를 비교하면 표 7과 같다. 하부 가력기에 발생한 하중은 서로 유사하나, 반면에 실험에서 발생한 변위가 수치해석에서 발생한 변위에 비해 약 40%의 증가가 있음을 알 수 있다. 이와 같은 하중-변위의 차이는 재하 초기의 기울기부터 수치

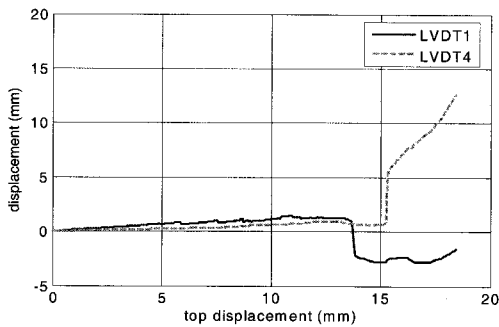
해석과 실험이 큰 차이를 갖는 것으로 보아 보트접합부의 슬립 및 수치해석에서 강제된 것으로 가정한 지그와 실험체의 접합부분이 갖는 유연도 및 기타 모델링에 포함된 가정에서 기인한 것으로 보인다.

부재의 항복 또는 파단은 힘-변위 관계 곡선의 기울기 감소로부터 파악할 수 있다. 하중-변위곡선의 기울기는 기울기가 하부 가력기의 변위가 약 6mm를 넘어서면서 서서히 감소하는 것을 관찰할 수 있으며, 이는 부재의 변형률이 항복 변형률에 도달하기 이전부터 발생하는 것으로 보아 볼트 구멍의 공차에 의해 발생하는 볼트 접합부의 슬립에서 기인한 것으로 보인다. 즉 접합부의 슬립으로 인해 복재의 하중 저항능력이 감소하는데서 기인한 것으로 볼 수 있다.

하중-변위 곡선을 육안으로 관찰하는 것으로는 부재의 항복, 좌굴 또는 파단 시점을 정확하게 파악할 수 없기 때문에 매 측정 시점에서의 하중-변위 관계 곡선의 기울기 변화를 계산하여 초기의 기울기와 비교하였으며 이를 그림 10에 나타내었다. 기울기의 급격한 변화는 하부가력기 변위가 약 13.5mm 인 시점에 1차로 발생하였고 15.2mm 및 16mm에서 추가적인 기울기의 급격한 변화를 확인할 수 있다. 이들 기울기 변화는 급격한 감소 및 연이은 회복 및 추가적인 완만한 감소로 구성되어 있으며 특정 부재가 좌굴한 뒤 곧바로 응력 재분배 현상이 뒤따르는 것으로 이해할 수 있다. 또한



(a) 상부



(b) 중간부

그림 11 가력 직교방향 수평변위

이들 기울기 급감 시점은 이후에 기울기 변형률 및 부재력 등의 급격한 변화시점과 일치함을 확인할 수 있다. 또한 기울기의 급격한 변화가 발생하기 전에 이미 완만한 기울기 감소를 관찰할 수 있으며 상하부 가력기 변위가 각각 26mm 및 11mm를 넘어서면서 매우 뚜렷해지는 것을 관찰할 수 있다. 이는 볼트의 슬립보다는 재료의 항복에서 기인하는 것으로 추측되며 변형률에 관한 분석에서 확인하도록 한다.

### 4.3 변위

수평하중의 재하방향과 직교하는 방향으로 측정된 실험체의 변위는 그림 11과 같으며 횡축은 실험체 상부의 수평변위를 나타낸다. 그림 11(a)에서 실험체 상부레벨에 설치된 두 변위계의 변위차가 상대적으로 큰 것은 실험체에 비틀림 변형이 발생한 것으로 볼 수 있다. 따라서 비틀림 변형의 영향을 조사하기 위해 두 변위의 차를 실험체 상부의 비틀림 회전각으로 변환하면 그림 12과 같다. 비틀림 회전각의 증가율이 커지기 시작하는 시점은 실험체 상부의 가력방향 변위가 10mm를 넘어서면서 이며 이는 대략적으로 그림 10의 하중-변위 곡선 기울기가 뚜렷한 감소를 보이는 시점과 일치한다. 또한 가력방향 상부변위가 15.1mm인 시점에 급격한 변화를 보이고 있으며 이는 그림 10에서 하중이 급격히 저감하

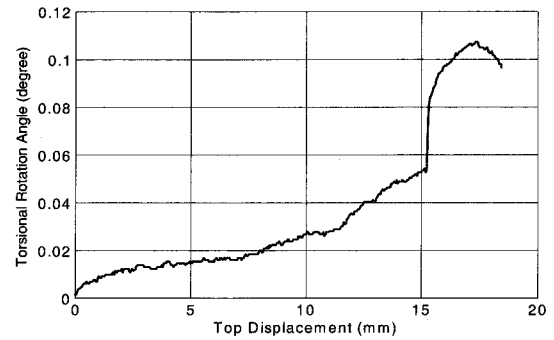


그림 12 실험체 상부 비틀림 회전각

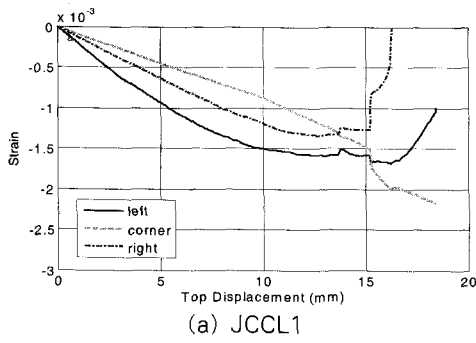
는 시점에 해당된다. 그러나 최대 비틀림 회전각이 약 0.11°로서 비틀림 변형의 영향은 크지 않다고 판단된다.

육안으로 좌굴이 식별된 압축측 주주재에 설치된 변위계의 측정결과를 나타낸 그림 11(b)에서 좌측 주주재 MCCL23 하단에 설치된 LVDT1의 변위는 가력방향 상부변위 13.5mm 이후에 급격히 변화하고 있다. 이로부터 그림 9의 하중-변위곡선에 나타난 최초의 급격한 기울기 변화는 좌측 주주재 MCCL23의 좌굴에서 기인한 것임을 알 수 있다. 반면에 우측 주주재 MCCR23 하단에 설치된 LVDT1의 변위는 가력방향 상부변위 15.1mm 이후에 급격히 증가하고 있으며 이로부터 그림 9의 하중-변위곡선에 나타난 두 번째 급격한 기울기 변화는 우측 주주재 MCCR23의 좌굴에 기인한 것임을 알 수 있다.

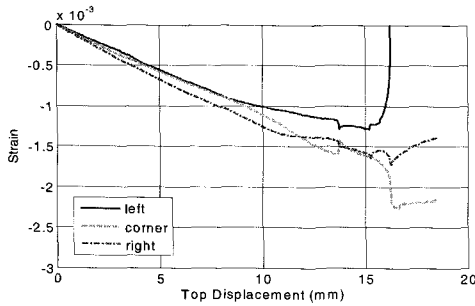
### 4.4 부재별 변형률

압축측 좌측 주주재의 변형률 변화는 그림 13과 같다. 그림 4와 같이 1개소당 3개의 스트레인게이지를 설치하였으며, left, corner, right는 실험체 중앙에서 바라본 순서를 나타낸다. 재하 초기에는 변형률 사이의 상대적인 비율이 거의 변화가 없고 변형률이 선형으로 증가하고 있다. 이와 같은 상태는 JCCL1, JCCL2, JCCL3에서는 대략 최상부 변위 10 mm까지 지속되다가 이후 응력이 교란되면서 좌굴과 함께 급격한 변화를 보이고 있다. 반면에 JCCL4, JCCL5에서는 이와 같은 현상이 보다 일찍 발생하여 최상부 변위 5mm를 전후해서 응력의 상호 비율이 변화하기 시작한다. 이는 하부에서 먼저 볼트 접합부의 슬립 및 볼트구멍 주위의 항복에 기인한 것으로 추측되나 볼트구멍 주위에 근접해서 스트레인 게이지를 부착할 수 없어서 직접적으로 변형률을 측정하지는 못하였다. 변위계 측정 결과에 의하면 최상부 변위가 약 13.5mm일 때 압축측 좌측 주주재에서 먼저 좌굴이 발생하는 것을 알 수 있다. 그러나 변형률의 측정 결과에서는 이 때 변형률이 갑작스럽게 변하지만 그 변화량은 크지

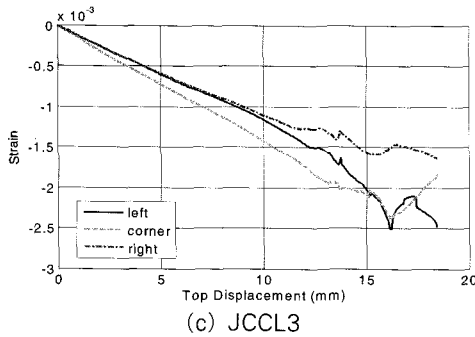




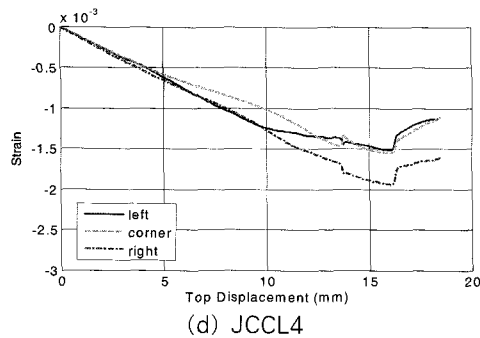
(a) JCCL1



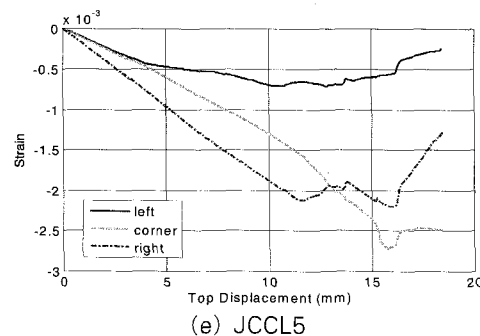
(b) JCCL2



(c) JCCL3



(d) JCCL4



(e) JCCL5

그림 13 압축측 좌측 주주재 변형률

않은 것으로 나타났다. 이는 스트레인 게이지가 부착된 곳과 국부좌굴이 발생한 곳이 차이 있기 때문인 것으로 추측된다. 이후로는 최상부 변위가 15.1mm를 초과하면서 우측 주주재 좌굴로 인해 압축측 좌측 주주재 상부(JCCL11, JCC-L12)에서 휨모멘트가 크게 발생하여 변형률의 부호가 바뀐 것을 관찰할 수 있다.

압축측 우측 주주재의 변형률 변화는 그림 14와 같다. 재하 초기에는 좌측 주주재와 마찬가지로 변형률 사이의 상대적인 비율이 거의 변화가 없고 변형률이 선형으로 증가하고 있다. 이와 같은 상태는 대략 최상부 변위 7mm까지 지속되다가 이후 응력이 교란되면서 좌굴과 함께 급격히 변화하고 있다. 응력의 교란은 1차 좌굴 발생 이전에는 주로 볼트 접합부의 슬립 및 볼트 구멍 주위의 항복에 의한 것으로 추측된다.

국부좌굴에 의한 변형이 크게 발생한 JCCR3 및 JCCR4에서는 변형률이 크게 증가함을 볼 수 있다. 반면에 JCCR1, JCCR2, JCCR5에서는 MCCR34의 좌굴로 인해 하중전달 능력이 저감되면서 변형률이 더이상 증가하지 못하는 것을 관찰할 수 있다. 보다 자세히 분석해 보면 JCCR3의 left 및 corner 게이지에서는 재료의 항복으로 인해 압축변형률이 크게 증가하였고, right 게이지에서는 휨 변형으로 인해 변형률의 부호가 인장으로 바뀌는 것을 볼 수 있다. 반면에 JCCR4에서는 right 게이지의 압축변형률이 크게 증가하고 있으며 left 및 corner 게이지에서는 압축변형률이 크게 감소하거나 인장변형률로 전환되고 있다. 압축변형률이 발생한 게이지가 바뀌는 점에서 비틀림 변형이 크게 발생했으며 동일 단면에서 큰 인장 및 압축 변형률이 모두 발생하므로 휨모멘트도 크게 작용하고 있음을 알 수 있다. 또한 변형률이 압축에서 인장으로 전환하는 현상이 압축변형률의 급증보다 시간적으로 뒤에 발생하는 것에서 과도한 휨변형은 국부좌굴에 의한 비틀림 변형의 부차적인 효과인 것으로 사료된다. 그림 11(b)에서 변위계 측정 결과에 따르면 1차 좌굴 발생은 좌측 주주재에서 발생하나 그 직전에(최상부 변위가 약 12mm일 때) 우측 주주재 JCCR3의 corner게이지에서 이미 급격한 변형률의 증가를 볼 수 있다. 아직 우측 주주재 중간에 설치된 LVDT4에서 급격한 변위의 변화가 없는 것으로 보아 이는 단순한 압축 항복인 것으로 추측되며, 그로인한 하중의 전이가 JCCR3의 left 게이지의 추가적인 항복 및 좌측 주주재의 좌굴을 유발한 것으로 사료된다.

인장측 주주재의 변형률 변화는 그림 15와 같다. 인장측 주주재의 경우 SS400의 항복 변형률인 0.001190을 크게 초과하였으나 변형률의 급격한 증가가 나타나지 않으므로 측정지점에서 재료의 항복은 발생하지 않은 것으로 보인다. 스트레인 게이지가 설치되지 않은 복재와의 볼트 접합부 부근

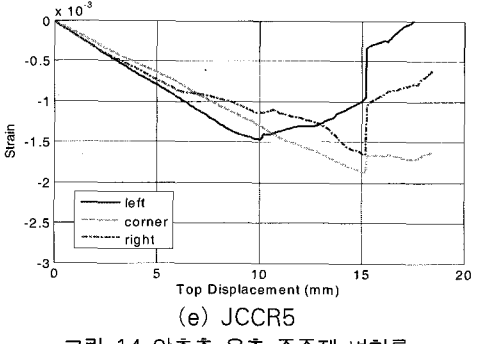
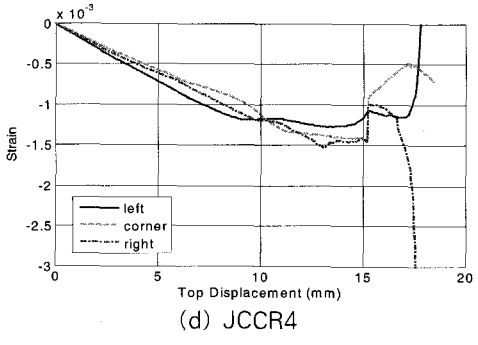
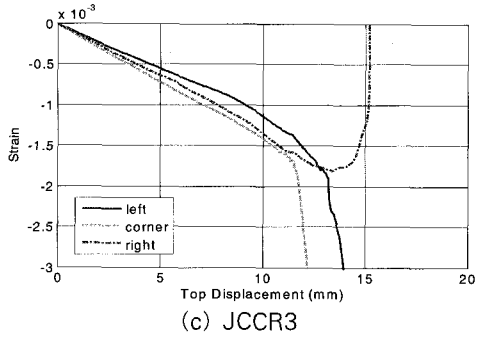
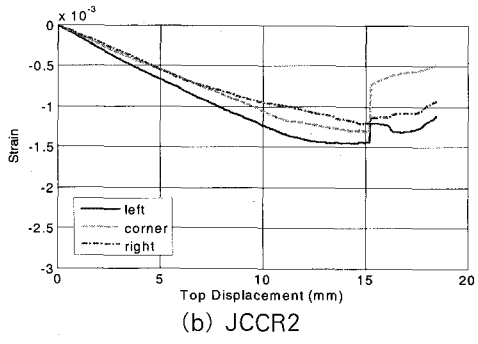
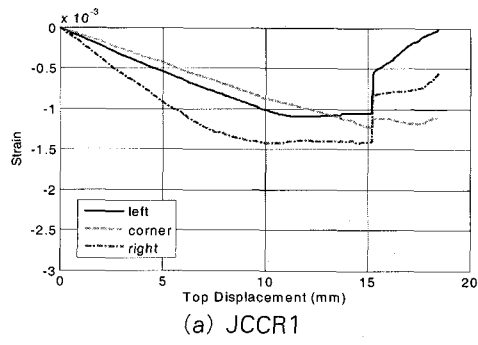


그림 14 압축측 우측 주주재 변형률

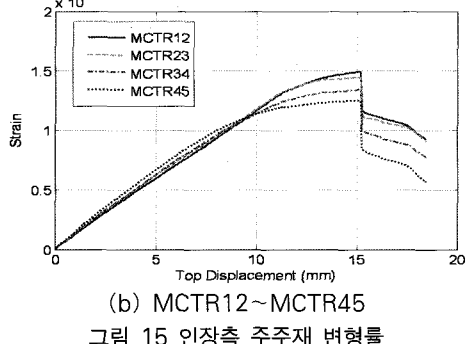
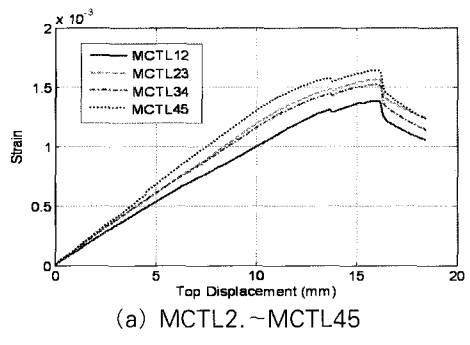


그림 15 인장측 주주재 변형률

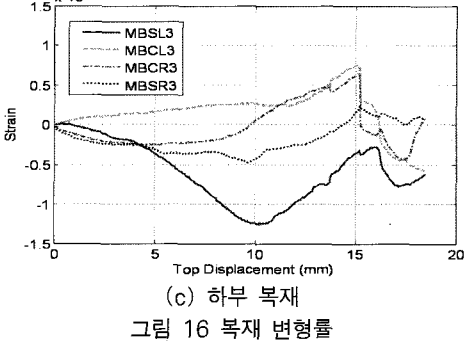
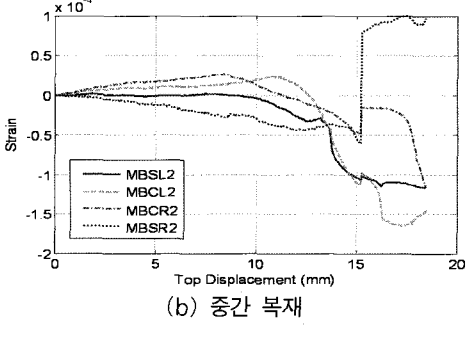
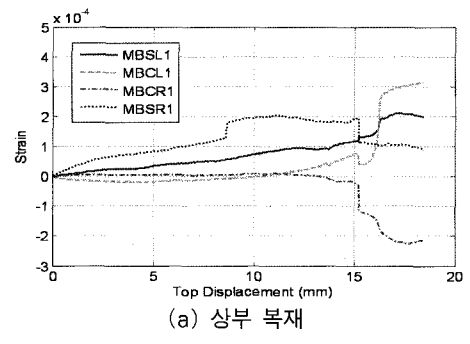


그림 16 복재 변형률

표 8 예비해석과 실험에 의한 복재의 변형률 비교

넘버링	실험 (10 <sup>-6</sup> )	수치해석 (10 <sup>-6</sup> )	실험/수치해석
MBSL1	28.56	41.62	0.69
MBSR1	77.11	41.62	1.85
MBCL1	-19.04	-24.17	0.79
MBCR1	4.76	-24.21	-0.20
MBSL2	-2.86	8.87	-0.32
MBSR2	-10.47	8.87	-1.18
MBCL2	8.57	16.14	0.53
MBCR2	15.23	16.14	0.94
MBSL3	-28.56	-55.50	-0.51
MBSR3	-27.61	-55.50	-0.50
MBCL3	13.32	-28.08	-0.47
MBCR3	-24.75	-28.08	0.88

에서 항복이 발생할 수도 있으나 자중이 응력을 저감시키는 방향으로 작용하기 때문에 재료의 항복이 압축측보다 인장측에서 발생할 가능성은 적을 것으로 보인다. 그림 15(a)에서 좌측 주주재의 경우에는 변형률의 상호 비율이 크게 변화하지 않는 것으로 보이나 그림 15(b)에서 우측 주주재의 경우에는 최상부 변위가 9mm를 초과하면서 상호 비율이 역전되는 현상을 보여주고 있으며, 이는 아직 압축측에서 항복이 발생하기 이전이기 때문에 볼트접합부의 슬립이 주로 송전철탑 우측에서 발생했기 때문인 것으로 추측된다.

복재의 변형률을 그림 16에 나타내었으며, 실험과 수치해석으로 부터 얻어진 복재의 변형률을 표 8에서 비교하였다. 그림 16에서 복재의 변형률이 초기에 직선으로 계속 증가하지 못하고 기울기의 감소가 보이는 것이 있으며, 이는 접합부에서 볼트의 슬립이 발생한 것으로 추정된다. 특히 그림 16에서 복재의 인장, 압축이 바뀌거나 복재들 사이의 변형률의 비가 처음부터 예비해석과 다르거나 또는 도중에 크게 변화하는 것을 볼 수 있다.

또한, 표 8에서 아직 탄성거동을 하고 있는 재하 초기부터 변형률의 부호가 해석결과와 틀리다는 것은 시공상 복재의 가운데에 가설 플레이트가 들어 간 점과 여기서 슬립이 일어나 플레이트에 면내 회전 또는 면외 휨 변형이 발생할 수도 있다는 점 및 볼트접합부의 슬립이 원인으로 추측된다. 특히 최상부 수평변위 8.5mm 쯤에서 갑작스런 우측 상부 복재 MBSL1의 변형률이 증가하였으며, 이와 같은 현상은 볼트 슬립과 관련된 것으로 추측된다. 그밖에 1, 2차 좌굴을 전후해서 부재력의 재분배에 의해 복재의 변형률 비 및 부호가 크게 변화함을 관찰할 수 있다.

각 부재별로 스트레인 게이지에서 항복변형률이 발생한 시

표 9 주주재의 항복변형률 도달 시 최상부 수평변위

(단위: mm)

위치	JCCL			JCCR			MCTL	MCTR
	left	corner	right	left	corner	right		
1	6.721	12.77	9.990	18.44	14.70	6.864	12.02	10.27
2	16.66	10.69	9.514	9.608	11.55	14.61	10.04	10.18
3	10.27	8.521	10.93	10.31	8.569	15.26	10.31	10.65
4	9.423	11.45	9.514	18.13	10.37	16.70	9.085	11.22
5	18.44	9.276	6.155	7.528	9.185	11.78		

점의 최상부 변위는 표 9와 같으며 작은 값을 가질 수록 먼저 항복이 발생한 것이다. 복재의 변형률은 항복변형률에 크게 미달되어 표에서 제외하였다. 압축측 주주재 최상부 및 최하부에서 가장 먼저 항복 변형이 발생하였음을 알 수 있다. 그러나 이 곳은 실험체를 견고하게 상부 지그에 접합하기 위해 용접을 한 부분이어서 주주재에 비해 상대적으로 강성이 커져서 응력 집중으로 인해 빨리 항복한 것으로 파악된다. 그럼에도 불구하고 이곳에서 좌굴이 발생하지 않은 것은 이 부분이 상부 지그에 강접합으로 연결되어 있어 좌굴길이가 짧아지고 국부좌굴에 대해서도 스티프너를 부착한 것과 같은 효과가 발생하여 좌굴이 발생하지 않은 것으로 사료된다. 주주재의 중간부분의 경우에는 최상부 수평변위가 9mm인 시점을 전후로 항복변형률에 도달하였으나 이 시점은 아직 좌굴이 발생하기 이전 시점이다. 따라서 국부좌굴의 발생은 하나의 단면상에서도 휨모멘트로 인해 항복응력에 도달하는 시간이 위치별로 다르므로 변형의 불균형에 의해서 발생한 부가적인 편심에 기인한 것으로 보인다. 결과적으로 국부좌굴의 발생을 막기 위해서는 변형의 불균형 상태를 피하기 위해 단면을 증가시켜줄 필요가 있으며, 이것이 불가능한 경우에는 국부좌굴을 억제할 수 있는 스티프너 형식의 보강이 필요할 것으로 사료된다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 철탑의 내풍안정성 평가를 위한 축소부분구조 실험을 수행하였고 그 결과는 다음과 같다. 수치해석을 통해 계산된 주주재의 축력은 허용좌굴하중의 80%에서 90% 사이에 분포한다. 따라서 실험체는 설계하중에 대하여 충분한 안전성을 확보하고 있는 것으로 나타났다. 반면에 복재의 축력은 허용좌굴하중의 13%이하로 나타나서 상대적으로 훨씬 안전한 것으로 나타났다. 이로부터 실질적으로 가새 부재를 보강을 통한 송전철탑의 강도 또는 강성증가 효과는 크게 향상되지 않을 것으로 예측된다.

축소부분구조 실험을 위해 상사법칙을 이용한 축소모델을

제작하였고 원 송전철탑에 작용하는 하중을 재현할 수 있는 가력방법을 개발하였다. 실험결과 실험체는 압축측의 좌측과 우측의 주주재에서 국부좌굴이 발생하여 항복하였다. 하중변위 곡선, 변위, 부재별 변형률을 검토한 결과 국부좌굴의 발생은 하나의 단면상에서도 휨모멘트로 인해 항복응력에 도달하는 시간이 위치별로 다르므로 변형의 불균형에 의해서 발생한 부가적인 편심에 기인한 것으로 보인다. 결과적으로 국부좌굴의 발생을 막기 위해서는 변형의 불균형 상태를 피하기 위한 방안으로 단면증대, 스티프너형식의 보강이 필요할 것으로 사료된다.

### 감사의 글

이 연구는 2006학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었습니다.

### 참 고 문 헌

- 국립방재연구소 (2003) 태풍 매미 피해 현장조사 보고서, pp.255~290.
- 김우범, 이경진 (1998) 765kV 송전철탑 실규모 하중시험, 한국강구조학회지 기술기사, 10(2), pp.134~141.
- 김우범, 이경진 (1997) 철탑구조의 설계하중 및 응력산정, 한

국강구조학회지 학술기사, 9(2), pp.47~55.

한국전력공사 (2004) 가공송전용 철탑설계기준.

Alam M.J., Santhakumar A.R. (1996) Reliability Analysis and Full-Scale Testing of Transmission Tower, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 122(3), pp.338~344.

ASCE manuals and reports on engineering practice No. 52: guide for design of steel transmission towers (1988) 2nd Ed., ASCE, New York, N.Y.

Indian standard code of practice for use of structural steel in overhead transmission line towers (1992) IS:802, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.

Momomura Y., Marukawa H., Okamura T., Hongo E., Ohkuma T. (1997) Full-scale measurements of wind-induced vibration of a transmission line system in a mountainous area, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 72, pp.241~252.

Okamura T., Ohkuma T., Hongo E., Okada H. (2003) Wind response analysis of a transmission tower in a mountainous area, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91, pp. 241~252.