

# 비좌굴 가새가 설치된 튜브 시스템의 내진성능 평가

## Seismic Performance Evaluation of Tube Systems with Buckling Restrained Braces

양 정 호\*                      이 준 호 \*\*                      김 진 구\*\*\*  
Yang, Jungho                  Lee, Joonho                      Kim, Jinkoo

### ABSTRACT

In this paper 36- and 72-story tube system and trussed tube system were designed and their seismic performances were evaluated by nonlinear static analysis. According to the analysis results, the tube system structures retained high stiffness and strength; however they showed brittle failure mode due to the yielding of columns. In the case of trussed tube system, columns in the web-side buckled first followed by the buckling of the braces. When buckling-restrained braces were applied, plastic hinges formed in the lower stories gradually spreads to the higher stories, resulting in ductile behavior.

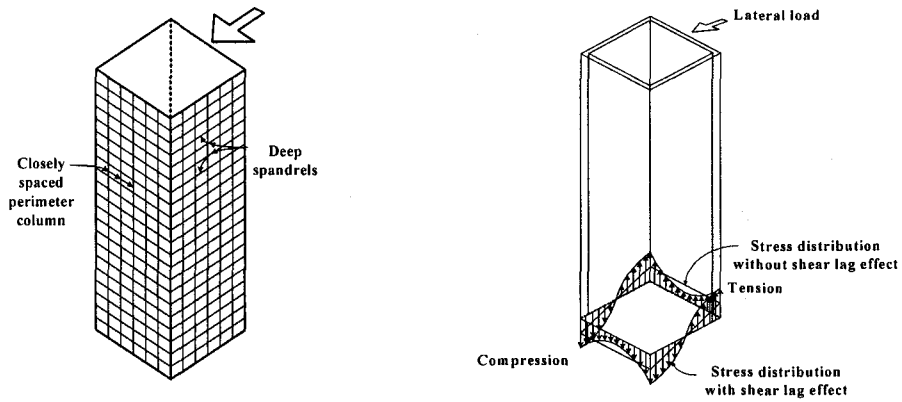
### 1. 서 론

구조물이 고층화 될수록 수직하중보다는 풍하중과 같은 수평하중의 영향이 크다. 따라서 횡력에 대한 구조시스템의 선정은 초고층 구조물의 설계에 있어서 핵심적인 부분이다. 1960년대 Fazlur Khan<sup>(1-2)</sup>은 구조물의 높이가 증가함에 따라서 약 60층 이상부터는 기존의 구조시스템들이 막대한 크기의 횡력을 지지하기에는 적합하지 않음을 발견하고, 3차원 횡력 지지 시스템인 튜브 시스템(tube system, 이하 TS)을 제안하였다. 튜브 시스템은 횡하중을 받는 폭을 코어에서 건물외부의 폭으로 확장 시킨 개념으로써 외주부의 기둥을 3m~6m 정도로 촘촘히 배치하고 춤이 깊은 스펀드럴 거더(spandrel girder)로 접합하는 방식이며, 구조물이 속이 빈 튜브와 같이 거동함으로써 구조물의 휨 강성을 최대화하는 구조시스템이다(그림 1). 그러나 튜브시스템은 층수가 많아지고 고층화 될수록 전단지연(shear lag)현상<sup>(1-2)</sup>이 크게 발생한다. 이러한 전단지연 현상을 방지하거나 감소시키기 위해 많은 연구가 진행되었으나 대부분 풍하중만을 고려하여 설계되었고, 튜브 시스템의 지진하중을 고려한 내진 성능에 대한 연구가 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 기존의 튜브 시스템과 트러스 튜브 시스템(trussed tube system, 이하 TTS)을 각각 36층 72층으로 설계하고 비선형 정적해석을 통하여 내진성능을 평가해 보았다. 비좌굴 가새<sup>(3)</sup>를 이용한 트러스 튜브 시스템의 내진성능을 평가하고 기존의 시스템과 비교하였다.

\* 성균관대학교 건축공학과, 석사과정

\*\* 정회원. 성균관대학교 건축공학과, 석사과정

\*\*\* 정회원. 성균관대학교 건축공학과, 부교수



(a) 튜브 시스템

(b) 튜브 시스템의 전단지연현상

그림 1. 튜브 시스템의 개념도

## 2. 예제구조물의 설계

본 연구에서 그림 2와 같이 층고 3m, 장변 및 단변의 길이가 각각 21m인 정방향 평면을 갖는 튜브 시스템과 트러스 튜브 시스템을 MIDAS Genw<sup>(7)</sup>을 이용하여 설계하였다. 그림 2(c), (d)와 같이 튜브 시스템의 외부기둥은 3m씩 12경간으로 설계하였으며, 트러스 튜브 시스템은 외부기둥을 6m씩 6경간으로 설계하였다. 내부보와 외부기둥은 편접합으로 설계하여 중력하중에 대해 저항하고 외부보와 외부기둥은 강접으로 횡력에 저항하도록 설계하였다.

예제구조물의 설계 하중은 IBC-2003<sup>(4)</sup>의 내진설계 기준을 적용하였으며, 고정하중의 경우 5 kN/m<sup>2</sup> (510kgf/m<sup>2</sup>), 활하중은 2.5 kN/m<sup>2</sup> (255 kgf/m<sup>2</sup>)을 적용하였다. 지진 하중과 풍하중에 대한 설계 계수는 표1과 표2에 정리하였다. 튜브 시스템의 경우 반응 수정계수는 모멘트 저항골조로 3.5를 적용하였고, 트러스 튜브 시스템의 경우 건물 골조 시스템의 중심 가새골조로 5를 적용하였다. 전체 예제 구조물에 대하여 기둥은 SM490강재를, 가새와 보는 SS400강재를 사용하였다. 예제 구조물의 부재 설계는 AISC LRFD 2000<sup>(5)</sup>에 따라 설계하였고, 2개층 단위로 나누어 설계하였다.

비좌굴 가새(buckling-restrained brace)는 일반적인 가새에 항복 응력이 낮고, 파괴 전까지 변형 능력이 큰 철골 부재를 사용하여 감쇠기와 같은 역할을 할 수 있도록 한 에너지 소산 장치이다. 일반 가새의 불안정한 에너지 소산은 구조물의 불안정한 요소로 작용하기 때문에 효율적인 에너지 소산을 위해서 비좌굴 가새를 설치함으로써 안정적인 이력거동을 유도할 수 있다.

본 연구에서는 구조물의 연성능력을 증가시키기 위해 튜브 시스템을 비좌굴 가새를 이용하여 재설계하였고 해석 결과를 비교하였다. AISC/SEAOC에 의하면 BRB가 받는 전체 횡력을 BRB의 내부코어가 저항해야 된다. 따라서 내부코어에서 요구되는 강도는 다음과 같이 정의하고 있다.

$$P_{nsc} = \phi P_{ysc} \quad \phi = 0.9 \quad (1)$$

$$P_{ysc} = F_y \times A_{sc} \quad (2)$$

여기서,  $P_{nsc}$ 는 코어의 설계강도,  $F_y$ 는 코어의 최소항복강도,  $A_{sc}$ 는 내부코어의 전단면적이다.

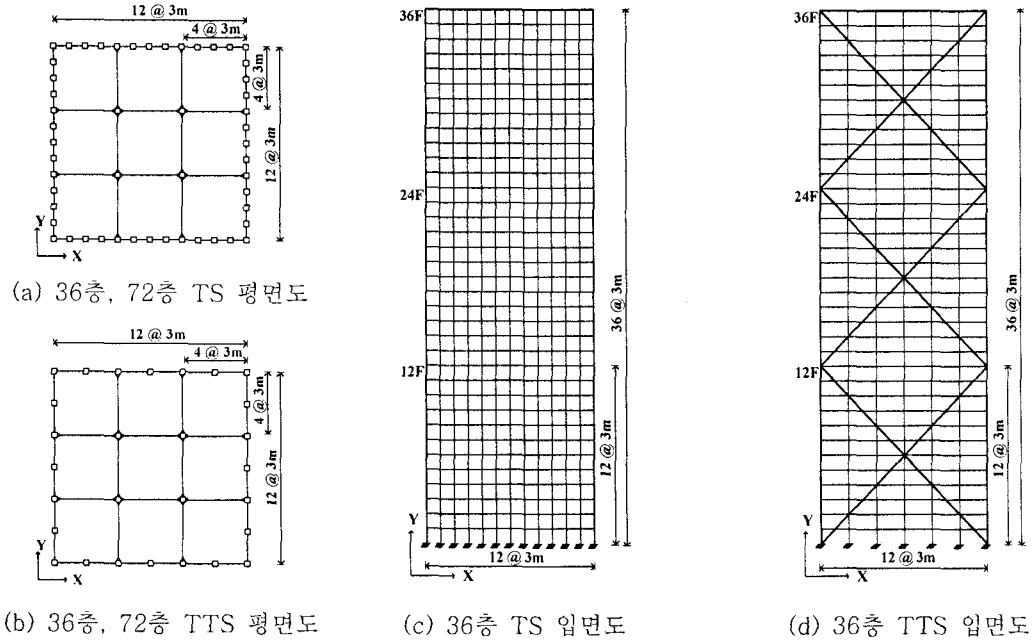


그림 2. 예제 구조물의 평면도 및 입면도

표 1. 설계 지진하중 산정을 위한 계수

지역계수	0.11	
지반종류	$S_D$	
내진등급	특	36층, 72층
중요도계수	1.5	36층, 72층
내진설계범주	$D$	
반응수정계수	3.5	튜브 시스템
	5	트러스 튜브 시스템

표 2. 설계 풍하중 산정을 위한 계수

노풍도구분	A
기본풍속	30 m/sec
중요도계수	1.1
가스트영향계수	2.5

### 3. 비선형 정적 해석에 의한 내진 성능 평가

#### 3.1 횡하중 분배 방법

비탄성 정적해석법을 이용하여 구조물의 비탄성 거동을 반영할 수 있는 능력곡선을 얻기 위해서는 횡하중 분배방법(lateral load distribution method)을 결정하여야 하며, 본 연구에서는 고차 모드를 고려할 수 있는 1988년에 Freeman<sup>(6)</sup> 등이 제안한 식을 사용 하였다. 구조물의 모드해석을 수행한 후 각 모드별 층 하중을 산정한 다음 이를 조합하여 고차모드의 영향을 고려한 횡하중 분배방법을 사용 하였다. 식(3)은 Freeman 등(1998)이 제안한 방법으로 각 모드별 하중을 SRSS 형태로 조합하였다. 본 연구에서는 고층 구조물에 적용되는 튜브 시스템의 비선형 정적해석을 수행하기 위하여 고차모드를 고려한 식 (3)을 이용하여 횡하중을 산정하였다.

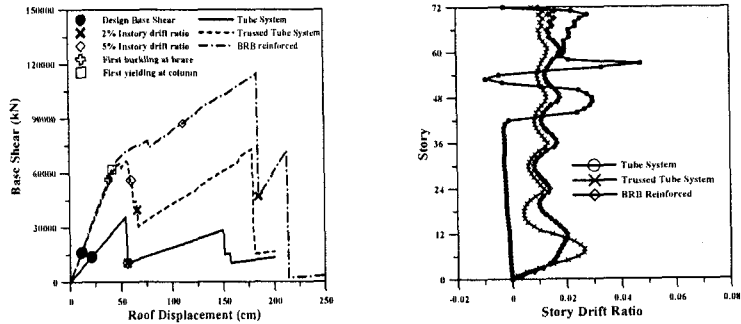
$$F_i = \sqrt{\sum_{j=1}^N \left\{ \frac{\left( \sum_{k=1}^N m_k \phi_{kj} \right)}{\left( \sum_{k=1}^N m_k \phi_{kj}^2 \right)} \phi_{ij} S_{aj} m_i \right\}^2} \quad (3)$$

여기서,  $F_i$ 와  $m_i$ 는 각각  $i$ 층의 층지진하중과 층질량이고,  $N$ 은 구조물의 층수이다.  $\phi_{ij}$ 는  $j$ 번째 모드에서  $i$ 층의 모드 형상계수이고,  $S_{aj}$ 는  $j$ 번째 모드에 대한 탄성 스펙트럼의 응답가속도이다.

#### 3.2 36층 모델의 비선형 정적해석 결과

튜브 시스템 및 트러스 튜브 시스템의 비선형 정적해석을 수행하고 각 구조물의 하중-변위 관계, 한계 상태에서의 층간변위 및 소성힌지 분포상태 등을 구하였다. 그림 3(a)는 동일한 조건으로 설계된 36층 튜브 시스템과 트러스 튜브 시스템의 비선형 정적해석 결과이며 외부에 가새를 설치한 트러스 튜브 시스템은 횡력 작용 시 기존의 튜브 시스템에 비해 강성과 강도가 크지만 연성능력이 부족하여 취성적인 거동을 보이고 있다. 그림 3(b)에서 알 수 있듯이 두 예제 구조물의 층간변위가 저층부에 집중되었으며, 튜브 시스템은 트러스 튜브 시스템에 비해 취성적으로 거동하여 층간변위가 순간적으로 크게 발생한다. 이는 여유도가 부족한 튜브 시스템의 기둥이 횡력에 대해 저항하며 웹면의 압축축 기둥이 항복함에 따라 구조물의 내력이 급감하기 때문이다. 그림 4는 이상화된 하중-변위 관계 그래프에 FEMA-450<sup>(8)</sup>에 규정된 부재별 성능수준에 해당하는 위치를 표시한 것이다. 튜브 시스템과 트러스 튜브 시스템의 층간변위비가 각각 2%에 도달했을 때의 소성힌지 분포를 그림 4의 상태별 표기에 따라 그림5에 도식화하였다. 36층의 경우 풍하중보다 지진하중이 크며 하부 층에서 층간변위가 크게 발생하는 전단 변형 모드(shear mode)로 거동하였다. 그러므로 그림 5(a)와 같이 36층 튜브 시스템은 하부층 기둥의 좌굴로 인한 취성적인 거동을 보인다. 트러스 튜브 시스템은 외부에 설치된 가새로 인해 휨 변형 모드(bending mode)로 거동하며 웹면의 압축축 기둥에서 좌굴이 먼저 발생하여 점차적으로 가새와 인근 기둥으로 전이된다. 또한 압축가새의 소성힌지가 한계상태에 도달함에 따라 구조물의 힘-변위 관계 그래프 상에서 내력이 급감하며 상부층으로 소성힌지가 전이되지 못하고 취성적으로 거동하게 된다 (그림

5(b)). 그러므로 튜브 시스템과 트러스 튜브 시스템의 연성적인 거동을 유도하기 위해서는 압축가새의 좌굴을 방지하여 기둥의 소성힌지를 상부 층으로 고르게 전이시켜야 할 필요가 있다. 그림 5(c)에서 알 수 있듯이 일반가새를 대신하여 BRB를 적용한 경우 소성힌지가 상부층에 비교적 고르게 전이됨을 알 수 있다.



(a) 구조물의 힘-변위 관계 (b) 층간변위비

그림 3. 36층 해석 모델의 비선형 정적해석 결과

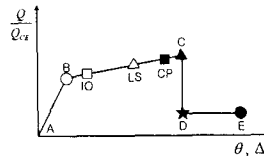
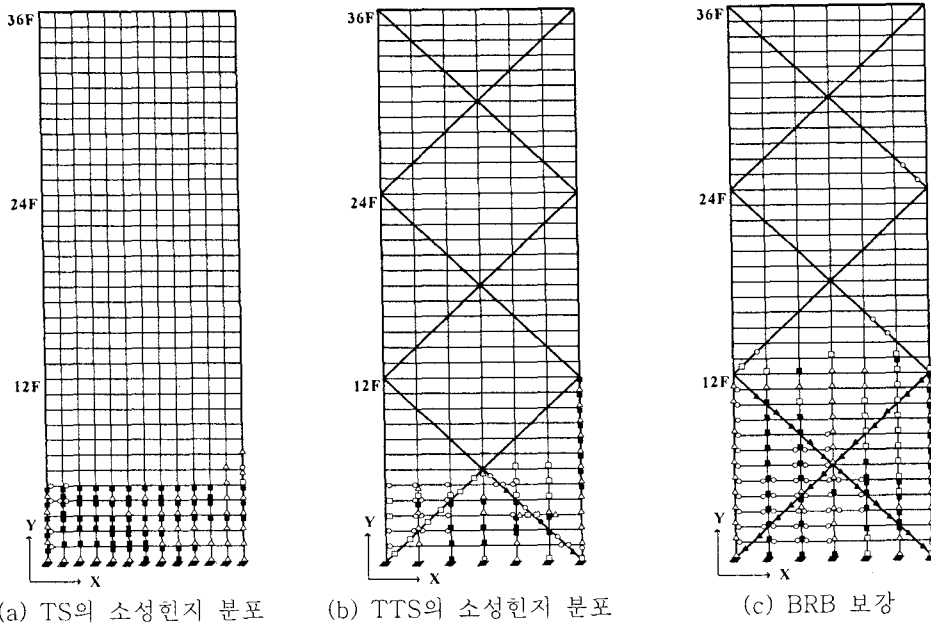


그림 4. 소성힌지의 상태별 표기

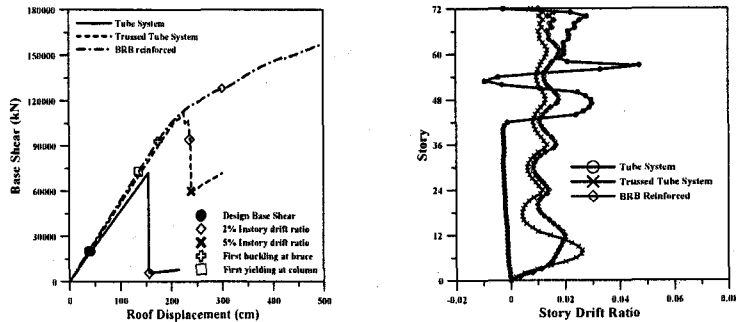


(a) TS의 소성힌지 분포 (b) TTS의 소성힌지 분포 (c) BRB 보강

그림 5. 층간변위비 2%에서 36층 구조물의 소성힌지분포

### 3.3 72층 모델의 비선형 정적해석 결과

그림 6은 72층 예제 구조물의 비선형 정적해석 결과를 나타낸다. 그림 6(a)는 구조물의 힘-변위 관계이며 72층 튜브 시스템의 경우 36층과 같이 취성적으로 거동하여 구조물의 층간변위비가 트러스 튜브 시스템에 비해 상대적으로 크게 발생하였다. 그러나 72층 튜브 시스템은 지진하중에 비해 풍하중이 크고 세장하므로 휨 변형 모드로 거동하며 웨브면 압축측 기둥에 소성힌지 발생 후, 상부 층을 중심으로 전 층에 소성힌지가 분포하였다. 트러스 튜브 시스템은 일반 튜브 시스템에 비해 강도와 강성이 증가하며 가새의 소성힌지가 한계상태에 도달함에 따라 구조물의 내력이 급감하였다. 압축측 기둥과 하부층 외부보를 중심으로 소성힌지가 발생하였고 이는 36층과는 달리 6m의 경간으로 설계되어 보에 휨모멘트가 발생하기 때문이다. 외부에 설치된 가새의 영향으로 외부 기둥의 축력이 감소하였으므로 전단지연계수가 크게 감소한다. 비좌굴 가새를 이용하여 재설계하여 비선형 정적해석을 수행한 결과, 기존의 구조 시스템에 비해 연성능력이 크게 증가하였음을 알 수 있다. 72층 예제 구조물도 압축가새가 항복하지 않으므로 하부층에서 발생한 웨브면 압축기둥의 소성힌지와 외부보의 소성힌지가 상부층으로 전이되어 골고루 분포되었다. 그러므로 횡력에 대해 취성적으로 거동하는 트러스 튜브 시스템의 연성능력을 향상시키기 위한 방법으로써 비좌굴 가새를 적용할 수 있다.



(a) 구조물의 힘-변위 관계

(b) 층간변위비

그림 6. 72층 해석 모델의 비선형 정적해석 결과

### 4. 철골 물량 산출

해석모델의 효율성을 검토하기 위해 철골물량을 표 3에서 비교 하였다. 36층 튜브 시스템의 경우 트러스 튜브 시스템에 비해 기둥이 촘촘히 배치되어 있고 트러스 튜브 시스템은 가새에 의해 다른 요소의 횡력저항 부담률이 적어지므로 전자보다 20.8%의 물량을 줄일 수 있다. 또한 압축력에 강한 BRB를 적용한 구조물의 경우 트러스 튜브 시스템보다 5.6%의 물량감소 효과가 있는 것으로 나타났다. 풍하중의 영향이 큰 72층 예제 구조물은 트러스 튜브 시스템이 기존의 튜브 시스템에 비해 14.1%의 물량이 감소하고, BRB를 적용하였을 경우 트러스 튜브 시스템에 비해 4.8%의 물량감소 효과가 있음을 알 수 있다.

표 3. 해석모델의 소요 철골물량의 비교 (kN)

Story	36F			72F		
	TS	TTS	BRB	TS	TTS	BRB
Beam	23870	17205	17205	48810	34065	34065
Column	17050	9086	9086	57540	40140	40140
Brace	0	6115	4346	0	17245	12844
Total	40920	32410	30640	106400	91440	87040

## 5. 결론

본 연구에서는 횡력 지지 시스템으로서 고층 구조물인 36층과 72층의 트러스 튜브 시스템에 비좌굴 가새(buckling restrained brace)를 이용하여 전단지연과 비선형 정적 해석을 통하여 내진 성능을 평가하고 철골 요구 물량을 연구하였다. 해석 결과에 따르면 튜브시스템은 하부층 기둥에 소성힌지가 발생 하는 취성적인 거동을 보인다. 또한 트러스 튜브 시스템은 외부가새로 인해 휨 변형 모드로 거동하지만 압축가새의 소성힌지가 한계 상태에 도달함에 따라 소성힌지가 상부층까지 전이 되지 못해 취성적으로 거동한다. 또한 비좌굴 가새를 적용함으로써 압축가새의 좌굴을 방지하여 소성힌지가 상부층까지 전이되어 구조물의 연성능력을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설핵심 기술연구개발사업(03산C04-01)에 의한 것임

## 참고문헌

1. A. K. H. Koran, "Shear lag in Shear/Core Wall", ACE, Vol.122, NO.9, 1994
2. A. K. H. Koran, "Simple Method for Approximate Analysis of Framed Tube Structures", ACE, Journal of Structural Engineering, Vol. 120, No 4, pp. 1221~1239, 1994
3. AISC, "Seismic Provisions for Structural Steel Buildings," AISC, Chicago, IL, 2005.
4. ICC, International Building Code, 2003.
5. AISC, Load and resistance factor design specification for structural steel buildings. American Institute of Steel Construction, Chicago, 2000
6. Freeman, S., Sasaki, K., and Paret, T., "Multi-Mode Push-over Procedure(MMP) - A method to identify the effects of higher modes in a pushover analysis," Proceedings of the 6th National Conference on Earthquake Engineering, EERI, Seattle, Washington, 1998.
7. MIDAS Genw, "General Structure Design System for Windows", 2005.
8. Building Seismic Safety Council, NEHRP Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures (FEMA450) Part 1, 2.