

트러스 형태에 따른 스테거드트러스 골조시스템의 내진성능 평가

홍윤수¹ · 유은종¹ · 나창순^{2*}

¹한양대학교 건축공학과, ²국민대학교 건축학과

Seismic Performance Evaluation of Staggered Truss System by the Shape of Truss

Yoon-Soo Hong¹, Eun-Jong Yu¹ and Chang-Soon Rha^{2*}

¹Dept. of Architectural Engineering, Hanyang Univ., Seoul, Korea

²Dept. of Architecture, Kookmin Univ., Seoul, Korea

Abstract

The purpose of this study is to evaluate the seismic performance of Staggered Truss Frame(STF) system while changing a shape of truss. The model of this project is a office building of ten floors with Pratt, Howe, Warren, K and Vierendeel truss system applied on each model. Next step is to select the section of elements which satisfy the highest demand capacity ratio by structure design considering gravity load, earthquake load and wind load and then calculate natural period, base shear and story drifts. On the basis of these values, Capacity Spectrum Method(CSM) shows the plastic behavior of STF system such as performance point of Design Earthquake(DE) and Maximum Considered Earthquake(MCE), yield state, plastic hinge etc. to be compared with other truss systems. As a result, Vierendeel STF system especially was found to have the highest strength and stiffness to the corresponding earthquake and all the models for each truss shape fulfilled the target performance level.

Keywords : staggered truss, capacity spectrum method, performance point, plastic hinge, performance level

1. 서 론

스테거드트러스 골조시스템(staggered truss framing system, 이하 STF 시스템)은 한 층의 높이를 춤으로 하는 대형 트러스를 층별로 엇갈리게 배치하여 횡력을 저항하는 구조 방식이다(Fig. 1). 이 구조방식은 호텔, 기숙사, 병원 등 동일한 유닛이 반복되는 건물에 적합하며, 장스팬 무주공간을 구현할 수 있어서 내부 공간의 건축계획에 유리하다.

기둥열을 기준으로 트러스는 매 층 엇갈리게(staggered) 배치되지만 슬래브의 다이아프램(강막) 작용에 의해 횡하중이 좌우 기둥열로 전달되기 때문에 전체적으로는 트러스가 연속된 단일 골조로 거동하게 된다(Scalzi, 1971). 이 구조방식의 기본 원리는 지상으로 솟은 캔틸레버 보와 같다. 외부 기둥 열은 보의 플랜지와 같은 역할을 하며 기둥 열을 따라 엇갈리게 배치된

트러스는 보의 웨브의 역할을 한다. 따라서 횡력이 트러스를 통해 전달되는 구조물의 3차원 거동에 의해, 기둥에 발생하는 모멘트는 상쇄되고 캔틸레버 보의 플랜지와 같이 주로 인장과 압축이 발생하게 된다(Fig. 2).

STF 시스템은 시공성과 경제성이 우수한 방식임에도 불구하고 관련된 연구가 부족하여 2000년대에 들어서야 비로소 본격적으로 적용되었다. STF 시스템의 설계지침으로 AISC에서는 Design Guide 14(AISC, 2002)를 제시하고 있다. STF 시스템으로 설계된 건물로는 Aladdin Hotel(McNamara, 1999), Embassy Suites Hotel(Brazil, 2000), OSU South High Rise Residence Halls(Metz, 2012) 등이 있으며 엘리베이터 코어를 보강하여 내력을 확보한 38층의 Aladdin Hotel을 제외하면 시공된 사례는 대부분 약진 지역의 10층 내외의 건물들이다.

* Corresponding author:

Tel: +82-2-910-4592; E-mail: csrha@kookmin.ac.kr

Received July 26 2017; Revised October 10 2017;

Accepted October 16 2017

©2017 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

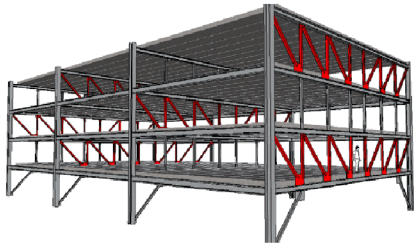


Fig. 1 Geometry of staggered truss framing system

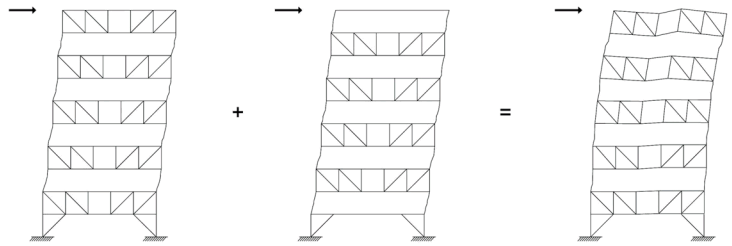
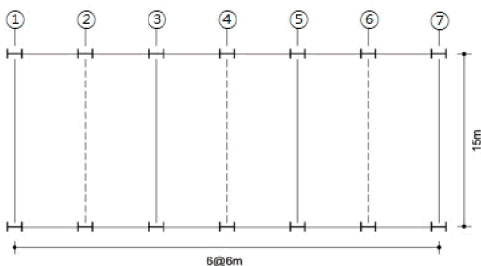
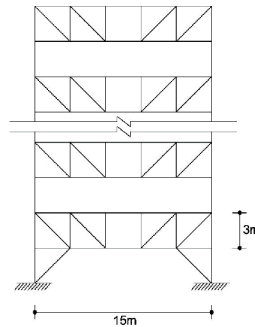


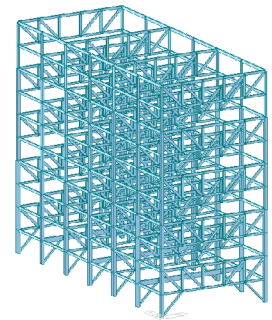
Fig. 2 Structural behaviour of staggered truss framing system for the lateral loads



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 Model building; (a) plan, (b) y-direction section, (c) 3-dimensional model

일부 연구(Kim *et al.*, 2006a,b)에 의하면 STF 시스템의 내진성능은 모멘트골조(MRF) 또는 가새골조(OCBF)에 비해 효율적인 것으로 나타났으나 STF 시스템의 내진성능평가를 위한 비탄성 거동에 관한 연구는 여전히 미흡한 실정이다. 따라서 대부분의 설계기준에서는 STF 시스템을 기본 내진구조로서 규정하고 있지 않으며, 다만 FEMA-450(2003)에서 충분한 실험과 해석을 통해 횡력에 대한 저항력과 에너지 소산 능력을 갖춘 것으로 입증할 수 있는 경우에 한하여 내진구조로서 인정하고 있다. 기존 사례에 적용된 STF 시스템은 시공성, 경제성뿐만 아니라 횡력에 대한 저항능력이 효율적인 방식으로, 보다 활발한 적용을 위해서는 내진성능에 대한 광범위한 연구가 필요하다고 할 수 있다(Rha, 2017).

본 연구에서는 선행연구(Rha *et al.*, 2017)에서 중력하중, 풍하중 및 등가정적 지진하중을 적용하여 설계한 예제 모델 중 10층 구조물을 대상으로 하며, 정적비탄성 해석을 수행하여 STF 시스템의 동적거동을 분석한 후 트러스 형태별로 내진성능을 비교하고자 한다.

2. STF 시스템의 설계

기존의 연구에서 수행한 중력하중 및 횡방향의 풍하중, 지진하중에 저항하는 STF 시스템에 대한 부재설계 및 효율성 분석에

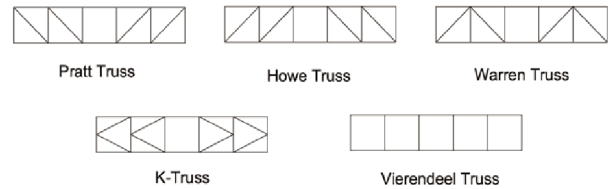


Fig. 4 Truss types used in the models

적용된 해석모델은 Fig. 3에 나타내었다(Rha *et al.*, 2017). 모델은 폭 36m, 길이 15m의 장방형 평면을 가지며, 층고 3m의 10개 층 오피스텔 건물이다. 장변방향에 대해 기둥은 6m 간격으로 총 7줄이 배열되며, 단변 방향은 무주공간으로써 15m의 경간을 갖는다. 트러스는 건물의 단변방향(y축 방향)으로 배치하였으며, 모멘트 저항골조(MRF)는 장변방향(x축 방향)에 계획하였다. 연구의 목적은 트러스 형태에 따른 구조물의 거동을 비교하는 것이기 때문에 트러스가 놓인 단변방향으로 횡력이 작용하는 것으로 하였다. 이 때, 트러스 부재의 단면은 강축이 단변방향의 횡력에 저항하도록 배치되었으며, 기둥부재는 장변방향의 모멘트 저항골조를 구성하여 약축이 횡력에 저항하도록 배치되었다.

기둥과 맞닿는 보의 양단은 힌지로 집합시켜 기둥으로부터 직접 모멘트를 전달받지 않게 하였으며, 지반에 대한 구조물의 지지조건은 모든 방향의 힘에 대해 구속효과를 갖도록 고정단

으로 가정하였다. 트러스의 형태는 Fig. 4에 정리된 바와 같이 일반적으로 사용되는 프랫(pratt), 하우(howe), 와렌(warren), K형(K) 및 비렌덜(vierendeel) 트러스의 형태를 고려하였으며 트러스의 중앙 배이는 통로로 활용하기 위해 예외적으로 경사재를 제거하였다. 트러스 부재 간 절점은 트러스가 축하중만을 부담하도록 핀접합되는 것이 보통이지만, 경사재 없이 현재 및 수직재로만 구성된 비렌덜트러스의 경우 구조적 안정을 위해 모든 절점은 강절점으로 처리하였다. 모든 예제 모델은 일괄적으로 H형 단면을 갖는 SM490 강재로 설계되었다.

건축구조기준 KBC 2016에 따라 구조해석에 필요한 설계 하중에 대해서는 중력하중과 풍하중, 지진하중을 고려하였다. 바닥에 작용하는 중력하중은 재료의 자중을 포함하며, 일반층의 경우 6.0kN/m²의 고정하중과 2.5kN/m²의 활하중을, 옥상층의 경우 6.5kN/m²의 고정하중과 1.0kN/m²의 활하중을 적용하였다. 풍하중 및 지진하중에 대한 세부조건은 Table 1에 명시되어 있으며, 특히 5층 이상의 오피스텔 건물은 중요도 1에 해당하므로 중요도계수는 1.2가 되고, STF 시스템은 여러 지진력 저항시스템 중 ‘강구조기준의 일반 규정만을 만족하는 철골구조시스템’으로 분류되어 반응수정계수는 3이 되었다.

만약 구조물을 구성하는 여러 부재에 획일화된 단면을 부여하면 응력이 상대적으로 작은 부재가 과대한 단면을 사용하게 되어 비경제적이고 비효율적인 설계가 된다. 따라서 구성부재에 적합한 단면을 산정하기 위해 부재들을 그룹화할 필요가 있으며, 그룹화의 기준은 해석의 객관성을 갖추기 위해 모든 예제 모델에 동등하게 적용된다. 본 연구에서는 부재들을 크게 기둥, 보, 트러스의 범주로 나누고, Table 2에서와 같이 더욱 세분화된 기준으로 관련부재들을 그룹 지었다. 기둥부재는 높이에 따라 4·4·2개 층 씩 3개의 그룹으로 지정하였고, 트러스 부재는 수직재와 사재, 1층부의 가새로 분류하였다. 보는 모델트지항 골조를 이루는 장변방향의 보와 STF 골조를 이루는 단변방향의 보로 나뉘며, 단변방향 보는 다시 트러스의 상·하현재와 순수

Table 1 Design lateral loads for the model buildings

Seismic loads	Wind loads
Seismic zone 1 Zone coefficient 0.22 Soil profile type S_B Response modification Factor(R) 3.0 Importance factor(I_E) 1.2	Basic wind speed(V_0) 30m/s Ground surface roughness B Gust effect factor(G_f) 2.2 Importance factor(I_w) 1.0

Table 2 Group name and the descriptions

Group	Member description
Column 1	9-10F Column
Column 2	5-8F Column
Column 3	1-4F Column
Girder 1	Truss top chord beam
Girder 2	Truss bottom chord beam
Girder 3	Longitudinal girder
Girder 4	1-9F Transverse girder
Girder 5	10F Transverse girder
Truss 1	Truss vertical member
Truss 2	Truss diagonal member
Truss 3	1F Diagonal brace

보로 나뉜다.

그룹화 작업 후에 한계상태설계법(AISC-LRFD)에 따라 고정하중(D), 활하중(L), 풍하중(W) 및 등가정적지진하중(E)이 조합된 하중을 이용하여 구조해석을 수행하였다. 해석에 반영된 하중조합은 1.4D, 1.2D+1.6L, 1.2D±0.65W, 1.2D±1.3W+L, 1.2D±E+L, 0.9D±1.3W, 0.9D±E이다. 해석결과에 기반하여, 보유강도에 대한 요구강도비(demand capacity ratio, 이하 DCR)가 1에 가장 근접한 단면을 선정하여 해당 그룹 내에 동일하게 적용하였다. Table 3은 구조설계가 완료된 각 모델에서 그룹별 산정된 단면의 형태와 규격 그리고 해당 시스템에서 모든 부재의 평균 DCR값을 나타낸다. 이를 통해 PR10과 VR10 모델은 가장 높은 DCR값(0.549)을 기록하여 가장 효율적인 시스템으로 나타났다.

Table 3 The section for each group and the total average DCR

	PR10	HW10	WR10	K10	VR10
Column1	H 350×175×7/11	I 200×150×9/16	I 200×150×9/16	I 200×150×9/16	LH 400×200×6/9
Column2	H 434×299×10/15	H 434×299×10/15	H 434×299×10/15	H 434×299×10/15	H 434×299×10/15
Column3	H 400×408×21/21	H 400×408×21/21	H 406×403×16/24	H 406×403×16/24	H 350×357×19/19
Girder1	H 298×201×9/14	H 248×249×8/13	H 300×150×6.5/9	H 354×176×8/13	I 600×190×16/35
Girder2	I 250×125×10/19	H 244×252×11/11	I 300×150×11.5/22	LH 400×200×6/9	H 594×302×14/23
Girder3	H 588×300×12/20	H 588×300×12/20	H 792×300×14/22	H 440×300×11/18	H 390×300×10/16
Girder4	LH 350×175×4.5/9	LH 300×175×4.5/9	LH 300×175×4.5/9	LH 400×200×4.5/6	I 300×150×8/13
Girder5	H 350×175×7/11	H 350×175×7/11	I 350×150×9/15	H 350×175×7/11	I 250×125×10/19
Truss1	LH 300×175×4.5/9	H 148×100×6/9	LH 200×150×3.2/6	H 248×124×5/8	H 428×407×20/35
Truss2	LH 300×175×4.5/9	H 446×199×8/12	H 200×204×12/12	I 200×150×9/16	-
Truss3	H 294×200×8/12	I 350×150×12/24	H 294×200×8/12	LH 400×200×6/12	H 244×252×11/11
Avg. DCR	0.549	0.537	0.525	0.443	0.549

앞으로 본 논문에서 다룰 해석 모델은 설명 상 번거로움을 피하기 위해 다음과 같이 축약하여 부르기로 한다.

- PR10 : Pratt Truss Type 10 story Building
- HW10 : Howe Truss Type 10 story Building
- WR10 : Warren Truss Type 10 story Building
- K10 : K-Truss Type 10 story Building
- VR10 : Vierendeel Truss Type 10 story Building

3. 시스템의 동적 특성

3.1 동적특성 및 지진 하중

Table 4는 탄성해석을 수행하여 각 해석모델에 대한 동적 특성 중 구조물들의 고유주기와 설계밀면전단력을 나타낸 것이다. 트러스 형태에 따라 동일한 높이를 가진 모델들의 1차 모드 고유주기를 살펴보면, VR10을 제외하고 PR10, HW10, WR10 및 K10 모델이 등가정적 지진하중에 대해 약 1.2~1.4초 범위의 비슷한 주기를 갖는 것으로 나타났다. 반면, 대각선 부재가 없고 각 부재의 절점이 강절점으로 설계된 VR10은 다른 트러스 방식에 비해 고유주기가 가장 짧은 것으로 나타났다.

Table 4 Dynamic characteristic for each model

Model	Natural period (sec)	Weight (kN)	Base shear (kN)
PR10	1.43	1,791	3509.7
HW10	1.40	1,961	3524.8
WR10	1.31	1,824	3512.8
K10	1.21	1,885	3518.5
VR10	1.08	3,618	3681.0

건축물의 중요도, 반응수정계수 및 설계스펙트럼가속도를 결정하는 지역계수 및 지반종류가 모든 모델에 대해 동일하게 적용되었으므로 밀면전단력은 건축물의 주기와 유효중량에 의해 영향을 받는다. 산출된 구조물량을 시스템별로 비교한 결과, PR10 모델이 가장 작은 물량을 요구하므로 경제적이었던 반면, VR10은 현저히 높은 물량을 기록하였다. 등가정적해석법에 의한 밀면전단력은 모델별 골조물량의 크기와 동일한 순서로 커지는 것으로 나타났으며, 서로 유사한 지진력을 받는 다른 모델에 비해 특히 VR10이 가장 큰 밀면전단력에 저항함을 알 수 있다.

3.2 층간 변위각

Table 5와 Fig. 5는 각각 트러스 형식별로 탄성해석으로

구한 층간변위 및 층간변위각을 나타낸 것이다. 특히 여기서 언급된 층간변위는 등가정적 지진하중에 대해 계산된 기존의 층간변위에 변위증폭계수(C_d), 중요도 계수(I_E)의 효과를 추가로 고려한 것이며 층간변위각의 계산을 위해 직접 활용된다.

PR10과 HW10 모델은 다른 시스템에 비해 큰 층간변위를 보이면서 층별로 유사한 패턴을 나타내고 있다. WR10의 경우, 층간변위에 있어 중간 정도의 크기를 보이며, 그 뒤를 이어 K10과 VR10 시스템이 유사한 패턴으로 가장 낮은 층간변위를 기록하였다. 다만, 층간변위가 저층부에서 증가와 감소를 반복하는 VR10과는 달리 K10은 1~4층까지 꾸준히 감소하는 경향을 보였다.

Table 5 Story drifts(m) for each model

Floor	Story drifts($\times 10^{-3}$ m)				
	PR10	HW10	WR10	K10	VR10
10F	7.3	6.6	6.1	5.2	5.4
9F	14.7	13.7	12.5	10.2	10.4
8F	15.2	14.4	13.1	10.3	10.3
7F	23	22.1	19.9	15.6	15.8
6F	21.1	20.2	18.2	13.9	13.8
5F	28.8	27.7	25.0	19.2	19.2
4F	25	24.2	21.8	16.3	15.9
3F	31.5	30.6	27.1	21.1	20.5
2F	33.1	32.0	25.8	24.2	12.6
1F	30.8	28.8	25.4	26.7	12.9

모든 예제 구조물의 층수를 통틀어 최대층간변위는 0.0331m이며, PR10 모델의 2층에서 발생하였다. 이 값들은 중요도계수($I_E=1.2$)를 고려한 허용층간변위($\Delta=0.015h_x=0.045$ m) 기준보다 작기 때문에 모든 구조물의 층간변위는 당해 규정을 만족한다고 볼 수 있다. Fig. 5의 그래프를 통해 구조물들의 층간변위각은 층별로 지그재그 형태로 변화하는 양상을 보여 주는데 STF 시스템의 특성상 흡수층과 짝수층에서 트러스의 위치가 어긋나기 때문이다. 최대 층간변위각은 대체적으로 저층부에서 발생하며 상부로 갈수록 감소하는 양상을 띠지만, VR10만 예외적으로 중간층에 걸쳐 나타난다. 이러한 현상은

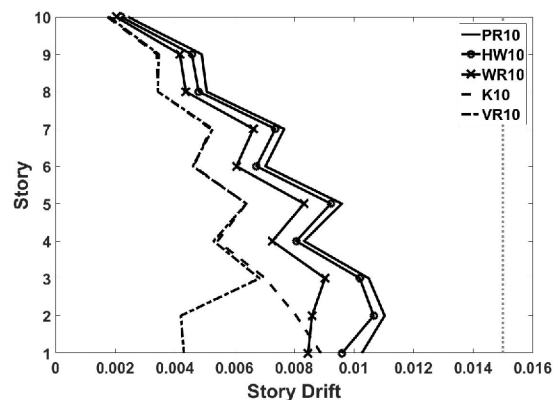


Fig. 5 Story drifts for each model

각 절점이 핀접합으로 이루어진 일반 트러스와는 달리, 사재가 없어 트러스 내 부재들이 강접합으로 연결된 비렌달트러스 만의 특성 때문이라 사료된다.

3.3 응답스펙트럼 해석

STF 시스템의 설계 시 앞서 반영되었던 지진하중의 조건 (Table 1 참고)에 따라 KBC2016에서 제시하는 지진응답스펙트럼 함수를 정의한 후, 그에 따른 구조물의 모드별 밀면전단력을 계산하였다. 10층의 STF 시스템은 해당 지진하중에 대해 1차와 4차모드가 관여하며, 해석에 사용될 두 모드의 질량참여율 합은 90% 이상으로 나타났다. ASCE41-13 기준에 따라, 고차모드를 고려한 밀면전단력에 대한 1차모드 밀면전단력의 비는 130%를 넘지 않으므로 해석모델을 대상으로 푸시오버해석을 통한 내진성능평가가 가능한 것으로 나타났다 (Table 6).

Table 6 Base shear(kN) at the participation modes

Mode	PR10	HW10	WR10	K10	VR10
1	1706.7	1749.1	1848.7	2068.4	2246.7
1 & 4	1801.8	1842.7	1958.6	2155.5	2406.2
Ratio(%)	105.6	105.4	106.0	104.2	107.1

4. 내진성능평가

4.1 푸시오버해석

구조물의 모델링 및 내진성능의 비선형 구조해석은 Midas Gen(Midas IT, 2016) 프로그램을 활용하였다. 예제 구조물의 내진성능평가는 푸시오버(pushover) 해석을 기반으로 역량스펙트럼법(capacity spectrum method, 이하 CSM)을 통해 이루어졌으며, 푸시오버해석에 필요한 비선형 하중-변위 선도는 ASCE 41-13에서 제시된 모델링 파라메타 값을 활용하였다. 성능점 산정 시, 감쇠 파라메타로써 5%의 감쇠비와 B에 해당하는 구조적 거동유형을 고려하였고, 각 성능점에서 트러스 형태에 따라 어떠한 내진성능의 차이를 보이는지 비교하였다.

본 연구에서는 푸시오버해석에 사용된 횡하중의 형태로 등가정적지진하중을 사용하였으며, 총 200번의 step수로 최상층의 최대 횡변위를 구조물 전체높이에 대해 약 0.8%~1.3%의 범위로 제한하는 변위제어 해석법을 진행하였다.

그리고 P-M 상관도의 FEMA 타입을 이용하여 기둥 혹은 비렌달트러스의 수직부재의 경우 '축힌지'와 '모멘트힌지', 보 부재의 경우 '모멘트힌지'만을 고려하였다. 트러스 부재는 양단이 핀접합되어 휨모멘트를 받지 않으므로 P-M의 상관관계 없이 '축힌지'만을 고려하여야 한다.

4.2 성능점

본 연구에서는 구조물에 가해지는 지진하중을 설계지진하중(DE)의 1.2배와 최대고려지진(MCE)의 경우로 나누어 각 성능점에서 구조물의 거동을 살펴보았다. ASCE41-13 규정에 기초하여 구조물 내 각 부재들은 소성힌지 특성을 입력받아 푸시오버 해석을 수행한 후, 역량스펙트럼법에 따라 산정된 성능점에서 부재별 소성힌지의 발생 여부 및 내진성능을 검토하였다. 그 결과, 1.2×DE 수준에서는 VR10을 제외한 모든 STF 시스템에서 항복부재가 발생했으며, 지진하중이 MCE 수준까지 진행되자 VR10에서도 항복이 일어났다.

트러스 형태별 예제 구조물에 대해 푸시오버해석을 수행하여 얻은 step별 응답스펙트럼 가속도(S_d)와 변위(S_a)값들을 하나씩 이어 Demand 선도를 완성하면 Fig. 6과 같다. 구조물에 국부적인 붕괴가 발생하는 첫 시점까지 진한 선으로 유지되다가 구분을 위해 이후의 파괴거동은 흐린 색으로 표시하였다. 이 중 1.2×DE 및 MCE 성능점에 해당되는 위치는 각각 '○'와 '◁'의 기호로 표현하였다.

여기서 VR10만 예외적으로 타 구조물들에 비해 월등히 높은 강성(기울기)과 강도를 가지고 선형에 가까운 소성 거동을

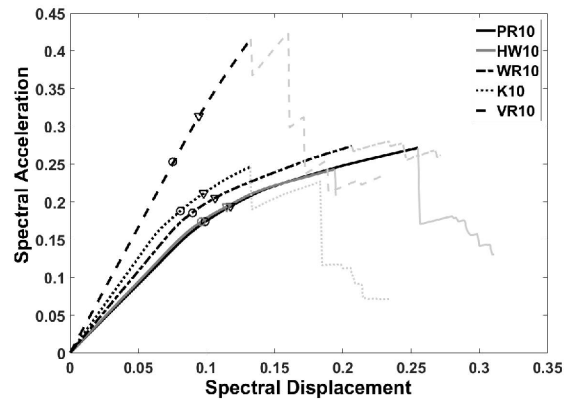


Fig. 6 Performance points on S_d vs S_a curve

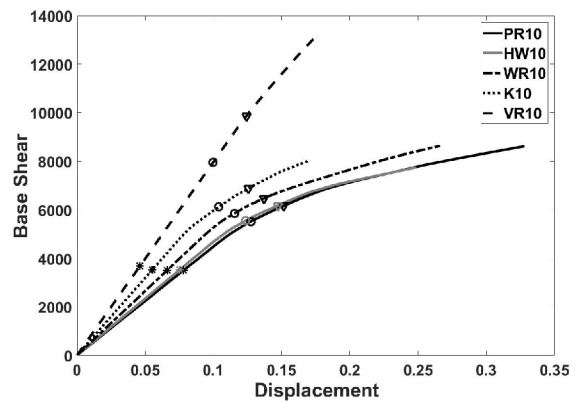


Fig. 7 Performance points and design base shear V_b on Roof displacement vs Base shear curve

Table 7 Pushover analysis for performance point

Level	Model	Roof displ. (m)	Base shear(kN)
1.2×DE	PR10	0.1274	5515
	HW10	0.1235	5541
	WR10	0.1156	5852
	K10	0.1039	6117
	VR10	0.0998	7953
MCE	PR10	0.1516	6163
	HW10	0.1472	6170
	WR10	0.1371	6471
	K10	0.1258	6879
	VR10	0.1242	9863

보이지만, 일정시점부터 국부적인 취성파괴가 단계적으로 나타났다. 이것은 성능점에서 탄성거동을 하던 부재가 더 큰 저항력을 발휘하는 동안 파괴되거나 잔류강도로 저감된 다른 부재들로 인해 구조물 전체의 강도가 단계적으로 감소하는 것이다. K10도 여느 시스템보다 높은 강성으로 거동하며 VR10 과 유사한 횡변위에서 첫 붕괴가 발생하였다. 특히 PR10과 HW10 모델은 스펙트럼 가속도가 커짐에 따라 가장 유사한 거동을 보였지만, PR10의 경우 가장 우수한 변형능력을 보유하여 최대 횡변위에서 국부적인 붕괴를 일으켰다. WR10 모델의 경우, K10에 이어 상대적으로 큰 강성을 보였으며, 첫 붕괴 시점 이후에 강도가 급격히 감소하는 다른 시스템과는 달리 구조물 전체의 강도 변화폭이 가장 작은 것으로 나타났다.

푸시오버해석 결과로 얻어진 $S_d - S_o$ 에 관한 Demand 선도를 일정 관계식을 통해 구조물의 최상층변위(D)와 밀면전단력(V)의 관계로 표현할 수 있다(Fig. 7). 이 때, 1.2×DE 및 MCE 성능점에서 최상층변위(D)와 밀면전단력(V)에 대한 상세 값은 Table 7에 명시되어 있다. 앞서 등가정적해석법으로 구한 설계밀면전단력(V_b , Table 4 참고)을 D-V 관계의 Demand 선도 위에 표시한 후 1.2×DE 및 MCE 성능점에서의 전단력과 비교해 보았다. 해당 곡선에서 성능점 1.2×DE와 MCE의 위치는 $S_o - S_d$ 에 관한 Demand 선도에서처럼 각각 '○'와 '◁'에 해당되고, 여기에 추가적으로 설계밀면전단력의 위치는 '●'로 표시하였다.

1.2×DE와 MCE의 지진강도를 넘어 구조물의 첫 붕괴가 발생하는 시점에서 S_d 및 S_o 는 Table 8과 같다. VR10은 중력 가속도의 0.416(S_o)배에 해당하는 지진가속도에서 붕괴가 일어나는 것으로 보아, 구조적으로 높은 강도를 통해 지진에 견디는 반면, PR10은 붕괴 시 응답스펙트럼 변위(S_d) 0.255m 를 기록하여, 해당지진에 대해 높은 연성능력을 발휘함을 알 수 있다. 두 시스템은 공통적으로 사재에 소성축힌지가 발생하였기 때문에 첫 붕괴 이후 구조물에 급격하면서도 단계적인 강도저감을 일으켰다.

이어서, 붕괴시점에서 구조물이 받는 밀면전단력(V), 즉,

Table 8 Pushover analysis for initial collapse point

	PR10	HW10	WR10	K10	VR10
S_d (m)	0.255	0.194	0.206	0.132	0.132
S_o (m/sec ²)	0.272	0.243	0.274	0.246	0.416
V(kN)	8617.8	7748.0	8630.4	8021.1	13077
V_d (kN)	3509.7	3524.8	3512.8	3518.5	3681.0
Ω_0	2.46	2.20	2.46	2.28	3.55

구조물의 전단강도를 산출하고, 이 값을 설계밀면전단력(V_d)의 값으로 나누어 시스템 초과강도 계수(Ω_0)를 계산하였다. 건축구조기준에서는 해석모델이 해당되는 지진력 저항시스템에 대해 시스템 초과강도 계수를 3으로 제시하고 있으나, 분석결과 VR10을 제외한 나머지 시스템에서 2~3 범위의 값을 보이고 있다.

4.3 부재별 성능수준

내진성능목표에 관한 KBC2016 규정상, 내진등급 I 구조물에 대해 설계스펙트럼가속도의 1.2배(1.2×DE)에 해당하는 지진위험도에서는 인명안전(LS), 설계스펙트럼가속도의 1.5배(MCE)에 해당하는 지진위험도에서는 붕괴방지(CP)를 만족하여야 한다.

CSM으로 얻은 각 성능점에서 소성힌지의 분포를 살펴본 결과, 기둥 및 트러스부재에 소성 축힌지는 어느 곳에서도 발생하지 않았다. 대신, 모든 구조물에서 공통적으로 강축(Local y축)에 대한 소성휨힌지가 지배적이며, 그 위치는 대부분 중저층의 보 중앙부에서 관찰되었다. 이로써, 예제에 활용된 STF 시스템은 강기둥-약보조건을 충족시키므로 주어진 지진력에 대해 전체 붕괴로 이어지지 않고 유연하게 대처할 수 있음을 알 수 있다. 약축방향에 대한 소성휨힌지가 발생한 모델은 MCE 수준에서 K10 모델뿐이었으며, IO단계에 해당하는 2개의 소성힌지가 1층부 기둥의 하단에서 발생하였다. 기둥은 주어진 횡력에 대해 약축방향으로 배치되어 있으며, 구조물을 하나의 서있는 캔틸레버보로 간주한다면, 그러한 보 경간

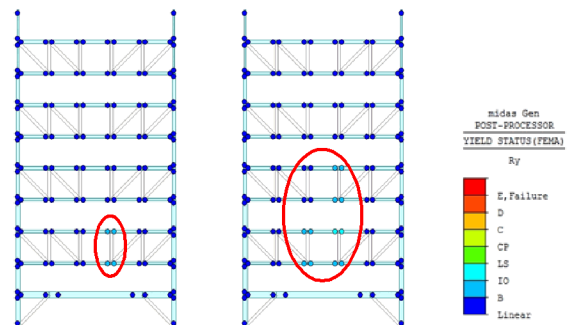


Fig. 8 Plastic hinges for PR10 model at 1.2×DE level(left) and MCE level(right)

Table 9 The number of plastic flexural hinges

Level		PR10	HW10	WR10	K10	VR10
1.2×DE	IO	44	14	44	24	0
	LS	0	30	10	20	0
MCE	IO	42	12	54	20	9
	LS	26	56	32	44	0

내에 작용하는 하중들이 반력으로써 고정단 지지점에 최대 모멘트를 만들어내기 때문이다.

Fig. 8은 성능점 1.2×DE와 MCE에서 강축방향으로 모멘트 힌지가 발생한 구조물의 입면을 보여주며, 각 시스템에서 발생한 소성힌지의 총 개수는 Table 9를 통해 알 수 있다. 다음으로, 1.2×DE level과 MCE level에서 소성힌지의 분포, 개수 및 성능을 트러스 시스템별로 비교 정리해 보았다.

4.3.1 1.2배의 DE level

공통적으로 PR10과 HW10, K10 모델은 2, 3층에 위치한 중앙부의 상·하현재(보)에서 총 44개의 소성힌지를 발생시켰다. 이 중, PR10에서는 IO단계에 해당하는 소성힌지만 관찰되며, HW10은 IO 대비 LS단계의 소성힌지 비율이 높게 나왔다. WR10은 54개에 달하는 가장 많은 소성힌지를 발생시켰고, 위치는 5층 중앙부의 상·하현재까지 확장되었다. 상대적으로 강도가 높았던 VR10이 유일하게 해당 지진에서 모든 부재가 소성힌지의 발생없이 탄성거동을 하였다. 구조물에 발생한 소성힌지를 토대로, 소성화가 가장 많이 진행된 모델은 WR10 > HW10 > K10 > PR10 > VR10 순으로 나타났다.

결과적으로 PR10과 VR10은 즉시거주(IO), 그 외의 시스템은 인명안전(LS)의 성능수준에 해당되었다. KBC2016에 의하면, 내진등급 I에 해당하는 구조물은 1.2배의 설계지진(DE)에 대해 인명안전(LS)의 목표성능수준을 만족해야 하므로 모든 시스템은 트러스의 형태와 상관없이 이 기준을 만족하였다.

4.3.2 MCE level

지진하중이 MCE level까지 증가할 때, PR10과 HW10은 소성힌지가 5층의 트러스 상·하현재(K10의 경우 하현재)까지 확장되어 총 68개를 기록하였다. 특히 PR10은 2층부 상하현재에서 기존에 IO였던 소성힌지가 LS단계로 진행되었으며, HW10은 LS단계의 소성힌지에 있어 여전히 높은 비율을 보이고 있다. K10 모델도 MCE level에 들어서 LS단계의 소성힌지 수가 IO단계의 소성힌지를 능가하게 되었다. WR10은 입면 1,3,5,7열에서 4층부 상·하현재에 새로운 소성힌지가 생성되어, 다른 모델보다 월등히 많은 총 86개의 소성힌지를 기록하였다. 이전 level에서 탄성거동하던 VR10은 3층부 트러스의 수직재 및 하현재에 IO단계에 해당하는 소성힌지가

발생하였으며 특히, 입면 중심에서 오른쪽으로 치우쳐 나타났다. VR10을 제외하고, 소성힌지는 트러스 골조에서 사재로 보강되지 않은 중앙부 통로를 중점으로 상층부로 점차 확장되어 가는 양상을 띠었다. 1.2×DE의 경우와 마찬가지로 소성화가 가장 많이 진행된 모델은 WR10 > HW10 > K10 > PR10 > VR10 순으로 나타났다.

KBC2016에 의하면, 내진등급 I에 해당하는 구조물은 최대 고려지진(MCE)에 대해 붕괴방지(CP) 수준을 만족해야 한다. 따라서 IO를 기록한 VR10과 LS를 기록한 그 외의 시스템들은 모두 내진성능 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 플랫폼트러스, 하우트트러스, 와렌트러스, K-형 트러스 및 비렌틸트러스를 적용한 STF 시스템의 내진성능을 검토하기 위해 역량스펙트럼법(CSM)을 활용하여 성능점 1.2×DE 및 MCE에서 구조물의 거동을 살펴보았다.

등가정적 지진하중으로 구조해석을 수행한 결과, 고유주기는 같은 높이의 모델에 대해 PR10이 가장 길고, VR10이 현저히 짧았다. 밀면전단력은 다른 조건이 동일한 관계로 구조물량에 비례하여 PR10 > WR10 > K10 > HW10 > VR10 순으로 나타났다. 모든 모델의 층간변위각은 중요도계수 1.2에 해당하는 허용값 0.015를 넘지 않았으며, 최대 및 최소의 층간변위각은 각각 PR10과 VR10에서 나타났다.

푸시오버해석으로 지진력에 대한 Demand 선도를 얻어 구조물의 거동을 비교한 결과, VR10은 취성파괴의 여지가 있지만 높은 강도 및 강성을 통해 지진에 견디는 반면, PR10은 비록 강성이 약하더라도 높은 연성능력을 발휘함을 알 수 있었다. 다음으로 CSM을 통해 1.2×DE와 MCE 수준에서의 성능점을 찾고 구조물에 발생한 소성힌지를 검토해 보았다. 예제에서 다른 STF 시스템의 소성힌지는 붕괴시점까지 지진력이 증가할수록 트러스 골조 내 사재로 보강되지 않은 중앙부 통로를 기준으로 상층부로 점차 확장되는 양상을 보였다. 1.2×DE 수준에서 VR10은 유일하게 탄성상태를 유지하였으며, PR10과 그 외 시스템은 각각 IO, LS의 내진성능을 보유하므로 구조기준에서 제시한 성능수준 LS를 모두 만족하였다. MCE 수준으로 올라가면, VR10은 IO, 그 외 시스템은 LS에 해당되어 목표성능수준인 CP를 만족하였다. 소성힌지의 분포를 토대로, 해당 지진력에 대해 소성화가 가장 많이 진행된 모델은 WR10이었으며, 그 뒤를 이어 HW10 > K10 > PR10 > VR10 순으로 나타났다. 모든 트러스 형태의 STF 시스템은 1.2×DE와 MCE 수준에서 목표내진성능을 만족하는 것으로 나타나므로, 물량이 적은 플랫폼트러스를 도입하여 경제적인 시스템을 이끌어

내거나 최대 DCR을 보이며, 사재가 없어 건축계획적으로 유리한 비렌달트러스를 도입하는 것이 바람직할 것이다.

References

- Brazil, A.** (2000) *Staggered Truss System Proves Economical For Hotels*, Modern Steel Construction, AISC.
- Design Guide 14** (2000) *Staggered Truss Framing Systems*, AISC.
- FEMA 450** (2003) *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures*, Building Seismic Safety Council.
- KBC 2016** (2016) *Korean Building Code - Structural*, AIK.
- Kim, J., Lee, J.** (2006) Seismic Behaviour of Staggered Truss Systems, Paper No.164, 1st ECEES, Geneva, Switzerland.
- Kim, J., Lee, J.** (2006) Seismic Improvement of Staggered Truss Systems using Buckling Restrained Braces, *J. Earthq. Eng. Soc. Korea*, 10(2), pp.11~19.
- McNamara, R.J.** (1999) *Aladdin Hotel*, Modern Steel Construction, AISC.
- Midas IT** (2016) Midas, Gen Analysis Manual.
- Metz, S.** (2012) *Staggered Home*, Modern Steel Construction, AISC.
- Rha, C.** (2017) A Case Study on Structural Feature of Staggered Truss Frame System, *J. Inst. Archi. & Urban Studies*, KMU.
- Rha, C., Hong, Y., Yu, E.** (2017) A Study on the Structural Behaviour of Staggered Truss System by the Shape of Truss, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 30(3), pp.199~206.
- Scalzi, J.B.** (1971) The Staggered Truss System - Structural Considerations, *Eng. J., AISC*, pp.138~143.

요 지

본 연구의 목적은 트러스의 형태를 바꿔가며 엇갈린 트러스(STF) 시스템의 내진성능을 평가하는 것이다. 예제 구조물은 10층의 철골조 사무실 건물이며, 시스템별로 각각 플랫폼트러스, 하우스트러스, 와렌트러스, 케이트트러스와 비렌달트러스를 적용하였다. 중력하중, 풍하중, 지진하중을 고려한 구조해석을 실시하여 부재에 높은 DCR을 만족하는 단면을 산정한 후 고유주기, 밀면전단력과 층간변위를 산출하였다. 그 후, 역량스펙트럼법을 통해 1.2배의 설계지진(DE)과 최대고려지진(MCE)에 대한 성능점을 산정하고, STF 시스템의 항복여부 및 소성현지의 분포를 파악하여 구조기준에서 제시한 목표성능수준을 만족하는지 살펴보았다. 평가 결과, 모든 시스템이 해당 목표성능수준을 만족하였으며, 시스템의 경제성 및 효율성을 따져보았을 때, PR10이나 VR10이 가장 적합한 것으로 나타났다.

핵심용어 : 스테거드트러스, 역량스펙트럼법, 성능점, 소성현지, 내진성능수준