

비선형 거동을 하는 비좌굴가새의 유한요소모델 검증

Finite Element Model Verification of Buckling Restrained Brace With Nonlinear Behavior

김 대 흥*
Kim, Dae-Hong

유 정 한**
Yoo, Jung-Han

Abstract

In this paper, nonlinear finite element analysis was conducted based on the experimental results on buckling restrained brace. The reliability of the analytical model was verified by comparing the results of experimental studies with hysteresis loop, bi-linear curve, cumulative energy dissipation capacity, and equivalent viscous damping. A valid finite element model has been secured and will be used as basic data for finite element analysis of buckling restrained braces in the future.

Keywords : Finite element analysis, Buckling restrained brace, Hysteresis loop, Energy dissipation capacity, Equivalent viscous damping

1. 서론

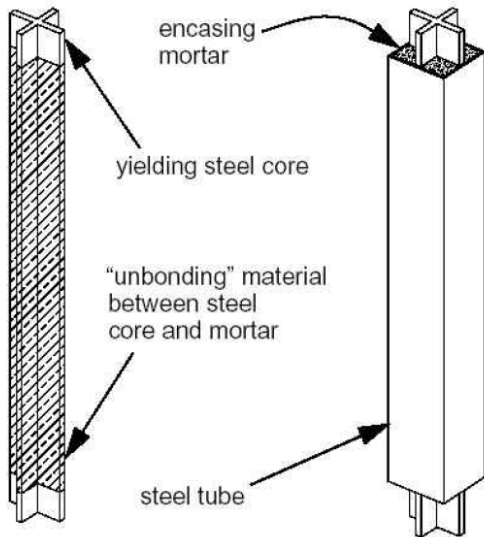
최근 15년 동안 기상청에서 발표한 국내 지진 발생 횟수를 살펴보면 2015년 이후 지속적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다¹⁾. 추가적으로 서울시 지진안전포털에서 발표한 2021년 1월 건축물 통계 현황에서 전체 건축물 대비 내진율은 17.7%, 내진설계 대상 대비 내진율은 21.8%로 아직까지 내진설계가 미비한 실정이다²⁾. 내진 보강에 사용되는 철골 가새골조는 지진과 같은 수평하중 저항 및 층변위 제어에 효과적인 시스템으로 알려져 있다³⁾. 그러나 지진과 같은 반복하중에서 철골가새골조는 압축력에 의해 항복응력에 도달하기 전 좌굴이 발생하여 <Fig. 2>의 점선과 같은 이력거동을 보인다. 이를 보완하기 위하여 <Fig. 1>과 같이 강재(Steel core) 주변

에 보강재(Concrete filled steel tube)로 보강하여 좌굴을 방지하는 비좌굴가새(Buckling Restrained Brace, BRB)가 개발되었으며, 국내외에서 많은 실험연구 및 해석연구가 진행되고 있다.

최근 연구 동향을 살펴보면 시공성을 확보하기 위해 콘크리트 충전재를 사용하지 않고 강재로만 이루어진 BRB를 제안하고 있다. Hoveidae & Rafezy(2012)는 강재 주변에 여러 가지 형상의 플레이트를 조립하여 좌굴을 방지하는 BRB를 제안하였고, 강재와 보강재 사이의 간격을 변수로 BRB의 전체좌굴과 국부좌굴을 분석하였다⁴⁾. Shen et al.(2016)은 강관형태의 가새 주변에 강관을 설치하여 좌굴을 방지하는 BRB를 제시하였고, 시험체를 제작하여 실험을 진행하였다. 실험 결과를 바탕으로 유한요소해석을 이용하여 강관의 형태, 강관 사이의 간격, 마찰계수를 변수로 설정하여 BRB의 성능을 평가하였다⁵⁾.

선행 연구 결과를 살펴보면 부재의 길이가 2m 이내로 제작되었으며, 조립식 보강재의 형태가 너무 다양하기 때문에 실제 건축물에 적용하기에는 현재로서는 한계가 있다. 그리고 비좌굴가새의 특수성에 의해 지진 이후에 파괴된 비좌굴가새 전체를 교체해야 하기 때문에

* 학생회원, 서울과학기술대학교 건축과, 석사과정
Dept. of Architecture, Seoul National University of Science and Technology
** 교신저자, 정회원, 서울과학기술대학교 건축학부 교수, 공학박사
School of Architecture, Seoul National University of Science and Technology
Tel: 02-970-9015 Fax: 02-974-1480
E-mail: happyjh@seoultech.ac.kr



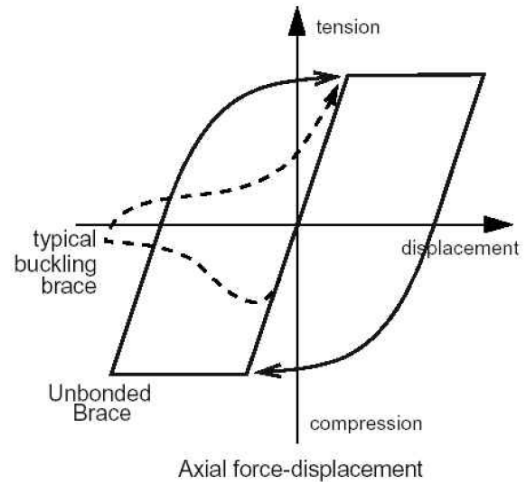
〈Fig. 1〉 The concept of Buckling Restrained Brace

천문학적인 금액이 발생하게 된다. 이를 해결하기 위해서 가새 부재의 일부분만 교체 가능한 현행 AISC 설계 기준에 부합하는 강재로만 제작된 비좌굴가새를 제안하고자 기초연구로서 본 연구를 진행하였다.

본 논문은 기존에 상용화된 비좌굴가새의 실험 결과를 바탕으로 유한요소모델을 제작하고, 해석모델의 신뢰성을 검증하기 위하여 실험 결과와 비교 및 분석하였다.

2. 비좌굴가새 개요

비좌굴가새는 〈Fig. 1〉과 같이 십자 형태의 강재(Steel core), 충전 모르타르, 강관 및 비부착 물질(Unbonded material)로 구성되어 있다³⁾. 강재는 지진과 같은 수평하중에 저항하고, 강관과 충전 모르타르는 강재의 좌굴을 방지한다. 이로 인해 〈Fig. 2〉의 실선과 같은 이력거동을 보인다³⁾. 강재는 항복구간(Yielding segment)과 비항복구간으로 구성되어 있다. 항복구간 및 비항복구간의 단면적 길이는 가새의 강성을 결정하고, 항복구간의 길이와 가새의 기울기는 설계충간변위에 해당하는 변형률을 결정한다. 강재의 항복구간 단면적은 기준안에서 계산된 소요강도에 근접하도록 산정한다. 소요강도에 가까운 가새를 설계하면 건물 내 여러 층에 걸쳐 균등하게 하중이 분배된다. 반대로 일부 가새를 다른 가새보다 과하게 설계하면 일부 층에서 바람직하지 않은 비탄성 변형이 발생한다⁶⁾.



〈Fig. 2〉 The hysteresis loop of Buckling Restrained Brace

비좌굴가새의 핵심 요소인 비부착 물질은 강재와 모르타르 사이의 부착력을 최소화시켜 강재만 하중을 전달하게 한다. 따라서 강재와 콘크리트 사이는 전단 및 푸아송 효과에 의한 상대적인 움직임이 일어날 수 있도록 설계해야 한다³⁾.

비좌굴가새 설계에서 골조와 연결되는 접합부의 좌굴은 바람직하지 않은 파괴 모드이므로 피해야 된다. 일반적으로 실무에서는 설계자가 강재 플레이트 치수뿐만 아니라 강재 재료 및 등급도 지정할 수 있다. 강재의 응력-변형률은 강재에 따라 큰 변화가 발생할 수 있으며, 이는 가새의 초과강도로 이어질 수 있다. 이러한 초과강도는 보와 기둥뿐만 아니라 접합부의 설계에서도 다루어져야 한다. 설계자는 가새의 소요 강도를 더 보수적으로 설계하기 위해 항복강도의 범위를 지정할 수 있으며, 강재 플레이트 또한 위와 같이 정의할 수 있다. 그 후 소요강도를 충족하기 위해서 가새 공급업체에서 제공하는 쿠편 테스트 결과를 사용하여 최종적으로 강재 플레이트 치수를 선정할 수 있다. 설계자는 위의 방법으로 계산된 값과 가새의 축강성 결과값의 편차가 발생한다는 것을 인지하여야 한다. 편차의 최대 크기는 항복강도의 범위에 따라 달라진다. 앞선 방법에 의해 가새를 설계할 경우 설계자는 건물주기와 예상 층변형을 조절하기 위해 해석 과정에서 가능한 강성 범위를 고려해야 한다.

좌굴 방지 시스템은 가새의 전체 좌굴에 대한 안정성

을 제공하는 요소이다. 여기에는 케이스와 코어를 연결하는 요소가 포함되고, 좌굴 방지 시스템의 적합성은 실험을 통해 입증되어야 한다.

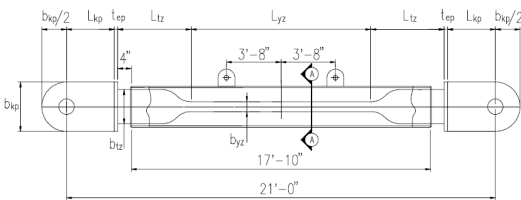
3. 비좌굴가새 실험

3.1 실험 개요

Merritt, Uang & Benzoni(2003)는 University of California, San Diego에서 Star Seismic, LLC가 개발한 8개의 시험체의 실물대 실험을 진행하였다⁷⁾. 본 실험은 AISC 기준안의 허용기준을 기초로 각 시험체의 주기적인 하중에서의 성능을 평가하기 위해 진행되었다. <Fig. 3>은 비좌굴가새의 단면을 나타낸다⁷⁾. 8개의 시험체 중 4번 시험체의 상세치수를 <Table 1>에 정리하였다.

3.2 실험 방법

각 시험체들은 실험 장치(Seismic Response Modification Device, SRMD)를 이용하여 표준하중프로



<Fig. 3> Section Drawing of BRB

<Table 1> Specimen dimensions

(a) Member core geometry

No. of plates	$t_{cp}(mm)$	Transition zone		Yielding zone	
		$b_{tz}(mm)$	$L_{tz}(mm)$	$b_{yz}(mm)$	$L_{yz}(mm)$
2	25.4	254	468.376	160.782	4701.54

(b) HSS and collar configurations

HSS configuration			Collar plate size		
$b_h(mm)$	$h_h(mm)$	$t_h(mm)$	$b_c(mm)$	$h_c(mm)$	$t_c(mm)$
254	304.8	9.525	298.45	349.25	12.7

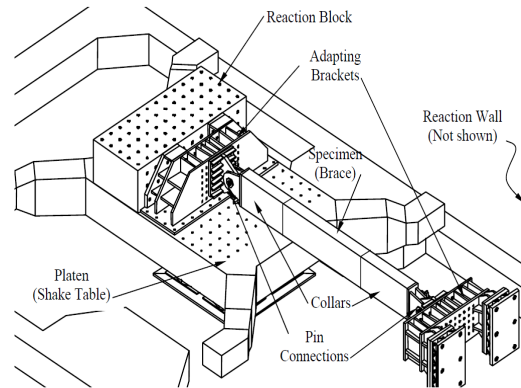
(c) Member end geometry

Knife plate			End plate
$t_{kp}(mm)$	$b_{kp}(mm)$	$L_{kp}(mm)$	$t_{ep}(mm)$
38.1	368.3	330.2	50.8

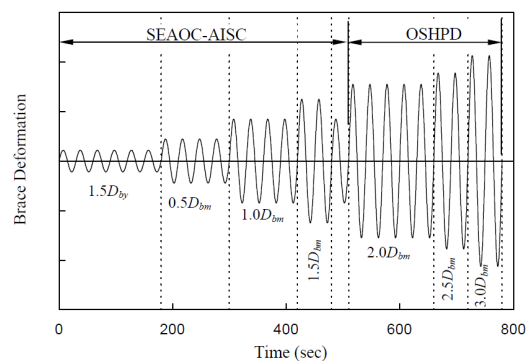
토콜(Standard loading protocol)에 따라 가력하였다. <Fig. 4>는 전반적인 시험체의 배치를 나타낸다. 시험체의 양단은 핀 접합으로 연결되어 있다⁷⁾.

표준하중프로토콜(Standard loading protocol)은 <Fig. 5>와 같으며, SEAOC-AISC(2001)에 따라서 다음과 같이 정의하였다^{7),8)}.

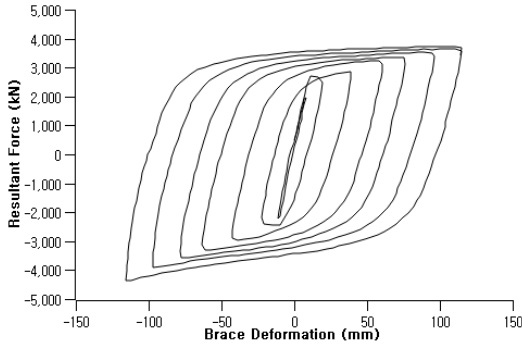
- (1) D_{by} 에 해당하는 변형으로 6주기 하중
 - (2) $0.5D_{bm}$ 에 해당하는 변형으로 4주기 하중
 - (3) $1.0D_{bm}$ 에 해당하는 변형으로 4주기 하중
 - (4) $1.5D_{bm}$ 에 해당하는 변형으로 2주기 하중
 - (5) 항복변형의 최소 140배의 누적축소성변형을 만족하기 위한 시험체에 필요한 $1.0D_{bm}$ 에 해당하는 1주기 하중
- OSHPD(Office of Statewide Health Planning and Development)에서 요구하는 항복변형의 최소 350배 누적축소성변형을 만족하기 위해서 다음과 같이 정의하였다.
- (1) $2.0D_{bm}$ 에 해당하는 변형으로 5주기 하중
 - (2) $2.5D_{bm}$ 에 해당하는 변형으로 2주기 하중
 - (3) $3.0D_{bm}$ 에 해당하는 변형으로 2주기 하중



<Fig. 4> SRMD facility



<Fig. 5> Standard loading protocol



〈Fig. 6〉 Hysteresis loop (Experiment)

여기서 D_{by} 는 강재가 처음으로 항복하였을 때의 변형, D_{bm} 는 설계 층간변위에서의 변형을 나타낸다.

3.3 실험 결과

3.3.1 하중-이력곡선

〈Fig. 6〉은 4번 시험체의 하중-변위 결과를 나타낸다. 모든 사이클에서 부재의 파괴 없이 안정적인 이력곡선이 발생한 것을 알 수 있다.

3.3.2 강도조정계수

SEAOC-AISC에서는 하중-이력곡선을 바탕으로 이선형곡선(Bi-linear curve)을 그려 접합부 설계에 활용하기 위해서 강도조정계수를 각각 식 (1) 및 식 (3)과 같이 정의하고 있다.

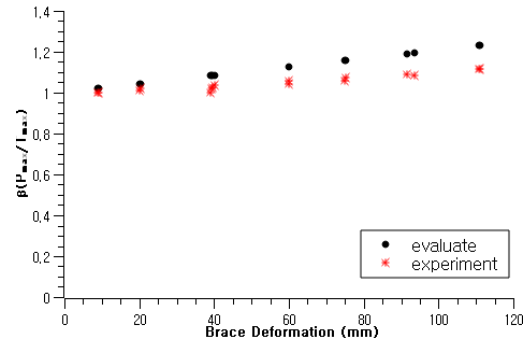
(1) 인장강도조정계수 ω

$$\omega = \frac{T_{max}}{P_{yn}} = \frac{T_{max}}{F_{yn}A_{yz}} \quad (1)$$

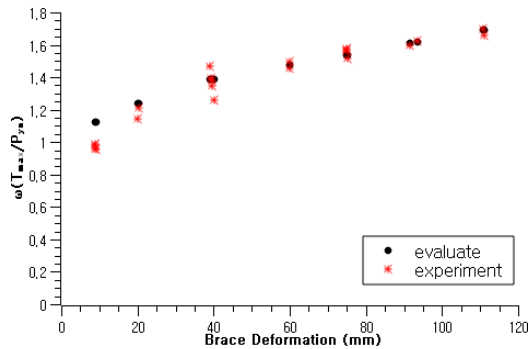
여기서, T_{max} 는 $1.5D_{bm}$ 에 해당하는 가새 변형에서 최대인장력, F_{yn} 는 공칭강도, A_{yz} 는 강재의 항복구간의 면적을 의미한다. 인장강도조정계수의 평가식은 식 (2)와 같이 정의된다.

$$\omega = 71.0 \times 10^{-3} \left(\frac{\Delta}{D_{by}} \right) + 1.03 \quad \Delta < 5D_{by} \quad (2)$$

$$\omega = 31.6 \times 10^{-3} \left(\frac{\Delta}{D_{by}} \right) + 1.22 \quad \Delta > 5D_{by}$$



〈Fig. 7〉 Compression strength adjustment factor β



〈Fig. 8〉 Tension strength adjustment factor ω

(2) 압축강도조정계수 β

$$\beta = \frac{P_{max}}{T_{max}} \quad (3)$$

여기서, P_{max} 는 최대압축력을 의미한다.

압축강도조정계수의 평가식은 식 (4)와 같이 정의된다.

$$\beta = 15.6 \times 10^{-3} \left(\frac{\Delta}{D_{by}} \right) + 1.0 \quad (4)$$

〈Fig. 7〉과 〈Fig. 8〉은 식 (2) 및 식 (4)에 의해 계산된 평가식을 실험 결과와 비교한 그래프이다. 압축강도계수 β 는 이력곡선에 대칭성을 확보하기 위해서 AISC에서 제안하는 $1.0 \leq \beta \leq 1.3$ 기준을 만족함을 확인하였다. 인장강도계수 ω 는 초기에는 차이를 보이나 사이클이 진행됨에 따라 평가식과 일치하는 것을 확인하였다.

4. 유한요소모델의 검증

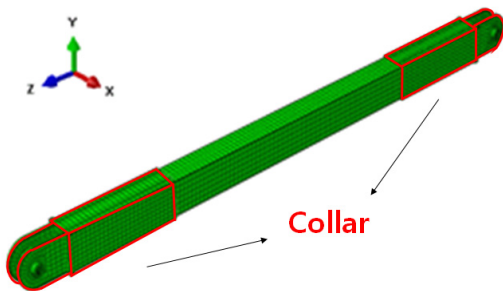
4.1 유한요소모델

비좌굴가새의 유한요소모델은 앞선 8개의 시험체 중 4번을 선정하여 ABAQUS를 이용하여 시험체 전체를 제작하였다. <Fig. 9>는 강재, 콘크리트, 강관(Hollow Steel Section, HSS), 칼라(Collar)로 구성되어 있는 유한요소모델을 보여주고 있다. 해석 시간을 줄이기 위해 각 물체의 밀도값을 입력하여 반복계산을 하는 내연적 시간적분법(Dynamic implicit)으로 비선형해석을 진행하였다. 유한요소모델은 3차원 8절점 솔리드 요소(C3D8R)를 이용하였다. 강재는 쿠폰 테스트에서 얻은 항복강도 273MPa인 A36 강재를 사용하였고, HSS는 항복강도가 315MPa인 A500 grade B 강재를 사용하였다. 콘크리트는 인장, 압축을 받는 CDP(Concrete Damage Plasticity) 모델을 사용하여 구현하였다.

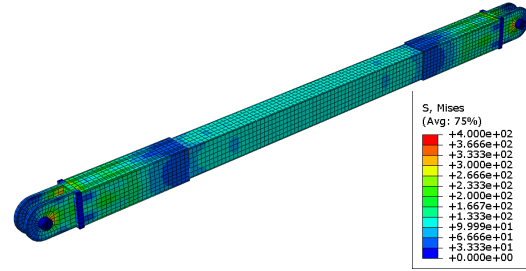
비좌굴가새의 핵심인 비부착물질을 구현하기 위해서 강재와 콘크리트 접촉면은 지대지(Surface to surface)를 이용하여 강재의 좌굴 발생 시 콘크리트 면으로의 침투를 방지하였고, 강재와 콘크리트 사이의 마찰을 최소화하기 위해 간극을 두어 좌굴을 일부 허용하였다. 경계 조건으로 시험체의 끝단은 모든 방향으로 자유도를 제한하였고, 반대편 끝단은 X, Y축 방향으로 자유도를 제한하였다. <Fig. 5>와 같이 표준하중프로토콜(Standard loading protocol)에 따라 Z축 방향으로 한쪽 끝단에 반복하중을 적용시켰다.

4.2 해석 결과

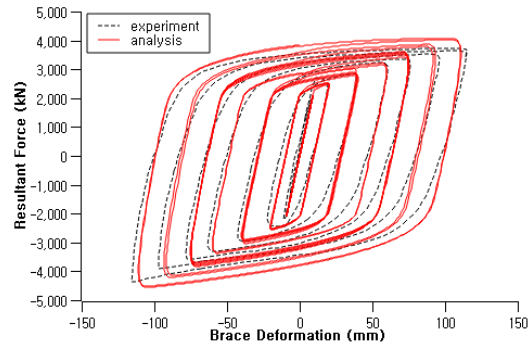
<Fig. 10>은 비좌굴가새의 응력분포도를 나타내고 있다. 해석 모델의 전체적인 거동의 정확성을 파악하기 위



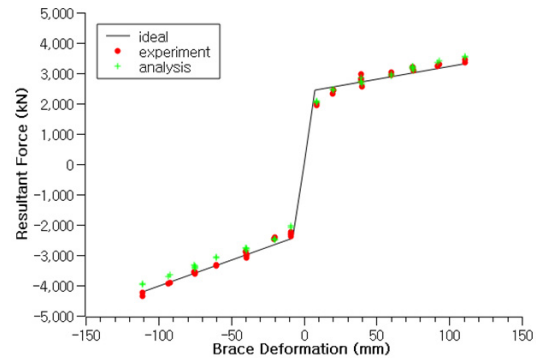
<Fig. 9> FEA model



<Fig. 10> FEA Von-Mises stress result



<Fig. 11> Hysteresis loop



<Fig. 12> Bi-linear curve

해서 하중-이력곡선, 누적에너지소산능력, 점성감쇠비를 Merritt, Uang & Benzoni(2003)의 실험 결과⁷⁾와 비교하였다.

4.2.1 하중-이력곡선

<Fig. 11>은 실험 결과와 해석 결과를 비교한 그래프이다. 바우싱거 효과(Bauschinger effect)에 의해서 인장측보다 압축측이 더 낮은 응력상태에서 항복하는 것을 확인할 수 있다. 해석 결과도 실험 결과와 유사하게 부재의 파괴 없이 안정적인 이력곡선이 생성되었다.

<Fig. 12>는 하중-이력곡선에서 포락선을 따서 Ideal

curve와 비교한 그래프이다. 각 사이클마다 최대 내력을 비교해 보면 평균오차율이 인장측에서 3.8%, 압축측에서 6.9%로 나타났다.

4.2.2 누적에너지소산능력

식 (5)는 이력곡선에서 $P \cdot \Delta$ 에 의해 둘러싸인 면적이 가새에 의해 소산된 에너지를 나타낸다.

$$E_h = \int P \cdot \Delta \quad (5)$$

여기서, P 는 하중, Δ 는 변위이다.

(Fig. 13)에서 i 번째 누적소성축변형(Δ_{pi})은 식 (6)과 같이 정의된다.

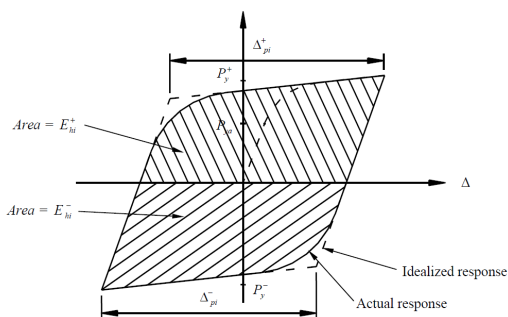
$$\Delta_{pi} = \Delta_{pi}^+ + \Delta_{pi}^- = \frac{E_{hi}^+}{P_y^+} + \frac{E_{hi}^-}{P_y^-} \approx \frac{E_{hi}}{P_y^*} \quad (6)$$

여기서, P_y^+, P_y^- 는 가새의 인장과 압축에서의 유효 항복하중, P_y^* 는 P_y^+, P_y^- 의 평균값이다. 유효항복하중은 식 (7)과 같다.

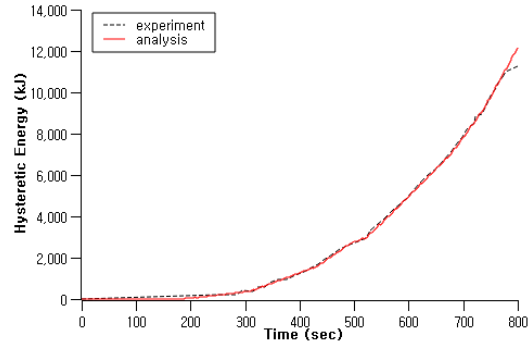
$$P_y^* = w^* P_{yn} \quad (7)$$

여기서, w^* 는 D_{bm} 에 대한 기본값인 $5D_{bm}$ 변형 단계에서의 인장강도 조정계수이다. 따라서 전체 누적소성변형을 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

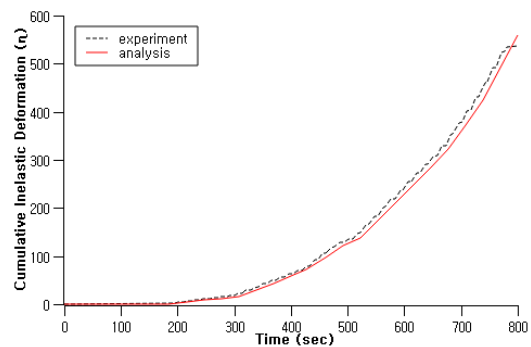
$$\Delta_p = \sum \Delta_{pi} = \sum \frac{E_{hi}}{P_y^*} = \frac{E_h}{P_y^*} \quad (8)$$



(Fig. 13) Hysteresis loop in the i -th cycle



(Fig. 14) Hysteretic energy time history



(Fig. 15) Cumulative inelastic axial deformation capacity

(Fig. 14)는 이력곡선을 바탕으로 누적소산에너지를 식 (8)을 이용하여 산정하였다. 전반적으로 큰 오차 없이 실험값과 해석값이 일치하는 것을 확인할 수 있다.

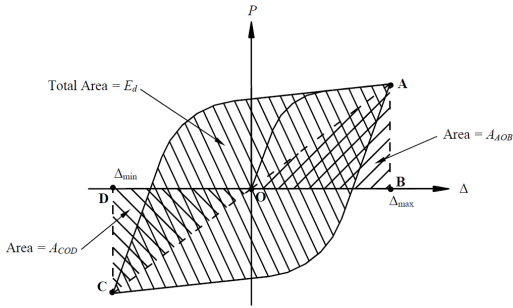
가새가 가지는 누적소성변형능력은 Δ_p 에 대한 가새의 항복변형 D_{by} 에 의해 식 (9)와 같이 정의된다.

$$\eta = \frac{\Delta_p}{D_{by}} = \frac{E_h}{P_y^* D_{by}} \quad (9)$$

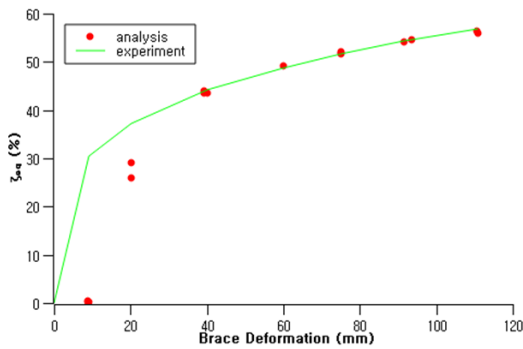
(Fig. 15)는 식 (9)를 이용하여 누적소성변형능력을 산정하였다. 전반적으로 해석 결과가 실험 결과를 잘 묘사한 것을 확인할 수 있다.

4.2.3 등가점성감쇠비

등가점성감쇠비를 정의하는 가장 통상적인 방법은 실제 구조물과 이론적인 등가점성감쇠 시스템에 있어서 한 사이클 동안 소산된 에너지가 같다고 두는 것이다. 실제 구조물에서는 변위진폭을 가하는 반복하중 실험에 의해서 하중-변위 관계를 결정하는데, 임의의 형상을 갖는



〈Fig. 16〉 Model for the calculation of effective viscous damping



〈Fig. 17〉 Equivalent viscous damping

하중-변위 관계가 〈Fig. 16〉에 개략적으로 제시되어 있다. 이력곡선에서 소산에너지를 토대로 식 (10)에 의해서 계산이 가능하다.

$$\zeta_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_d}{E_{so}} = \frac{E_d}{4\pi(A_{AOB} + A_{COD})/2} \quad (10)$$

여기서 E_d 는 각 사이클에서의 소산된 에너지, E_{so} 는 최대변형에너지에 해당한다. E_{so} 는 A_{AOB} 와 A_{COD} 의 삼각형 넓이의 평균을 이용하여 산정하였다.

〈Fig. 17〉에서 회귀분석을 통해 제안된 식 (11)과 해석값을 비교해 보면 초기에는 제안된 식을 잘 따라가지 못하지만 40mm 이후부터는 제안된 식과 유사한 경향을 보여주고 있다. 사이클이 진행됨에 따라 BRB 부재는 효율적으로 에너지를 감쇠시킨다고 판단할 수 있다.

$$\zeta_{eq} = 29 \left(\frac{\Delta}{D_{by}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (11)$$

5. 결론

본 연구는 AISC 설계기준에 부합하는 실험 결과를 바탕으로 실제 건축물에 적용할 수 있는 강재로만 제작된 BRB를 제안하기 위한 기초연구로서 비좌굴가새의 유한요소 해석을 진행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 비좌굴가새의 실험 결과에서 추출한 하중-변위 그래프와 Bi-linear 그래프를 이용하여 전반적인 응답을 비교하였으며, 유한요소해석모델의 타당성을 검증하였다.
- 2) 하중-변위 그래프를 바탕으로 누적소산에너지와 누적소산변형능력을 계산하여 비교하였다. 오차율은 크지 않고 실제 시험체와 유사한 누적소산에너지능력을 보여주고 있다.
- 3) 누적소산에너지능력의 결과값을 바탕으로 등가점성감쇠비를 계산하여 비교하였다. 초기에는 제안된 식과 잘 맞지 않았지만 사이클이 진행됨에 따라 일치함을 확인하였다.

복잡한 거동을 하는 비좌굴가새의 유한요소모델을 구축한 본 연구는 추후 강재로만 제작된 BRB를 제안하기 위한 기초연구로서 활용될 수 있을 것이다. 제안된 BRB 유한요소모델을 바탕으로 추가적으로 실물 실험이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. Korea Meteorological Administration, Past earthquake statistics, Retrieved from <http://weather.go.kr/w/eqk-vol/archive/stat/trend.do>
2. Earthquake Safety Portal, Building seismic resistance statistics, Retrieved from <http://goodhousing.eseoul.go.kr/SeoulEqk/community/buildingList.do>
3. Kim, S. D., Kim, J. K., & Oh, M. H., "Introduction and Application of

- Buckling-Restrained Brace”, Architectural Institute of Korea, Vol.49, No.8, pp.124~126, 2005
4. Hoveidae, N., & Rafezy, B., “Overall buckling behavior of all-steel buckling restrained braces”, Journal of Constructional Steel Research, Vol.79, pp.151~158, 2012, doi: 10.1016/j.jcsr.2012.07.022
 5. Shen, J., Seker, O., Sutchiewcharn, N., & Akbas, B., “Cyclic behavior of buckling-controlled braces”, Journal of Constructional Steel Research, Vol.121, pp.110~125, 2016, doi: 10.1016/j.jcsr.2016.01.018
 6. AISC, “Seismic Provisions for Structural Steel Buildings”, ANSI/AISC 341-16, 2016.
 7. Merritt, S., Uang, C. M., & Benzoni, G. (2003). Subassemblage Testing of Star Seismic Buckling Restrained Braces (Report No. TR-2003/04). University of California: Star Seismic, LLC. Retrieved from [http://admin.starseismic.net-solutions.hu/downloads/Star%20Seismic%20PowerCat%20test%201%20\(TR-2003_04,%20Star%20Seismic%20Final%20Report\).pdf](http://admin.starseismic.net-solutions.hu/downloads/Star%20Seismic%20PowerCat%20test%201%20(TR-2003_04,%20Star%20Seismic%20Final%20Report).pdf)
 8. AISC/SEAOC, “Recommended Provisions for Buckling-Restrained Braced Frames”, American Institute of Steel Construction/Structural Engineers Association of California, 2001.

- Received : May 12, 2021
- Revised : June 02, 2021
- Accepted : June 02, 2021