ISSN 1598-4095 (Print)
ISSN 2287-7401 (Online)
http://dx.doi.org/10.9712/KASS.2022.22.1.51

Journal of Korean Association for Spatial Structures
Vol. 22, No. 1 (통권 87호), pp.51~57, March, 2022

강판으로 보강된 비좌굴가새의 성능에 대한 해석적 연구

An Analytical Study on the Performance of Buckling Restrained Brace Reinforced with Steel Plate

김 대 홍* 김 혁 수* 유 정 한**
Kim, Dae-Hong Kim, Hyeok-Soo Yoo, Jung-Han

Abstract

In this paper, based on the finite element analysis model verified in previous studies, a new model of a buckling restrained brace reinforced with a steel plate was proposed. A design formula was proposed for the new model to dissipate energy without buckling the steel core under load protocol, and the performance of the model satisfying the design formula was evaluated by comparing it with the previous model through the results of hysteresis loop, bi-linear curve, cumulative energy dissipation capacity, and equivalent viscous damping.

Keywords : Buckling restrained brace, Hysteresis loop, Non-linear behavior, Energy dissipation, Design formula

1. 서론

비좌굴가새(Buckling Restrained Brace)는 타 가새시스템에 비해 우수한 에너지 소산능력과 연성 능력을 가지고 있어 내진성능이 뛰어나다. 하지만 비좌굴가새를 제작하는 과정에서 콘크리트의 초기 수축으로 인해 가새의 불안정성이 증대된다. 제작 이후에도 콘크리트의 중량으로 인해 운반 및 설치에 있어 비경제적인 문제가 있다. 또한, 지진동안 강재 코어가 에너지를 소산하며 좌굴하는 것을 보강재가 방지하는 역할을 하는데, 기존 보강재 일부가 파괴되어도 콘크리트의 특성으로 인해 비좌굴가새 전체를 교체해야하는 문제가 발생한다.

최근 연구에서는 앞선 문제를 해결하기 위해 보강재인 콘크리트를 강재로 대체한 비좌굴가새를 제안하고 있다. Alemayehu el al.(2020)은 H형강을 코어로 한 비좌굴가새를 제작하여 실험하였고, 코어 H형강의 플랜지 국부 좌굴과 코어 전체 좌굴이 발생하였다.[1] Tong & Guo(2018)는 ㄱ형 앵글 강재에 고강도 볼트와 스페이서로 코어의 좌굴을 방지하는 비좌굴가새를 제작하였고, 좌굴 거동 예측을 위해 구속 비율을 변수로 제시하여 실험을 진행하였다.[2] Seker & Shen(2017)은 강재로만 이루어진 강관 안에 다른 강관을 삽입한 비좌굴가새를 제작하여 실험하였고, 유한요소모델을 제작하여 모델의 정확성을 검증하였으며, 역 V형 가새골조를 제작하여 거동을 확인하였다.[3]

하지만 앞선 연구에서는 기존 콘크리트 보강 비좌굴가새의 성능과 비교가 부족하며, 강재로 이루어진 비좌굴가새의 설계에 대한 기준 역시 제시되지 않았다. 본 연구에서는 선행연구[4]에서 검증한 유한요소 해석모델을 바탕으로 강판으로 보강된 비좌굴가새의 유한요소해석모델을 새롭게 제작하고, 해석결과를 통해 설계식을 제안하고 콘크리트 보강 비좌굴가새와 비교하여 성능 평가를 실시하였다.

* 학생회원, 서울과학기술대학교 건축과, 석사과정
Department 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

2. 현행설계기준을 적용한 해석모델 검증

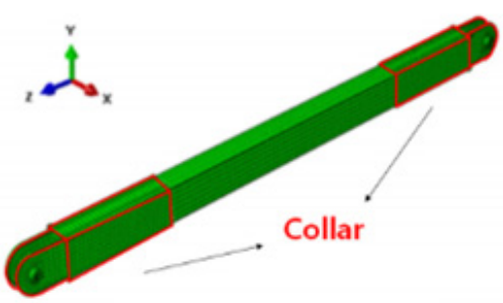
2.1 현행설계기준 적용

선행연구인 '비선형 거동을 하는 비좌굴가새의 유한요소해석모델 검증(2021)'에서는 Merritt, Uang & Benzoni (2003)가 실행한 실험을 바탕으로 비좌굴가새의 유한요소해석모델을 제작하여 검증하였다.[4] 〈Fig. 1〉은 선행연구에서 제시한 비좌굴가새 유한요소해석모델을 나타낸 것이다. 해석모델의 정확성을 검증하기 위해 하중-이력곡선, 강도조정계수, 누적에너지소산능력, 등가점성감쇠비를 이용하여 선행 실험 연구와 비교하였다.

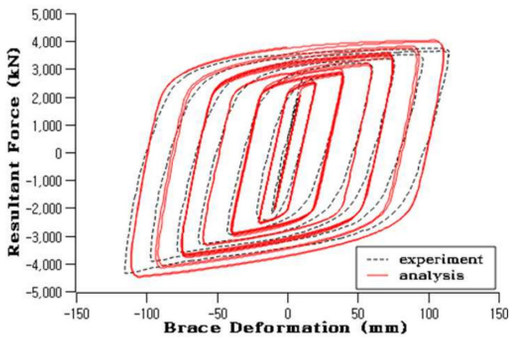
〈Fig. 2〉는 비좌굴가새 유한요소해석모델의 하중-이력곡선을 실험데이터와 비교한 것이다. 해석결과가 선행 실험결과와 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

선행연구에서 제시한 유한요소해석모델은 AISC (2001) 기준의 하중 프로토콜을 적용하여 진행했기 때문에, 현행 설계기준과는 다소 차이가 있다고 사료되어 강구조 설계기준(KDS 41 31 00 : 2019)과 AISC(2016)기준을 토대로 해석을 다시 진행하였다.[5,6]

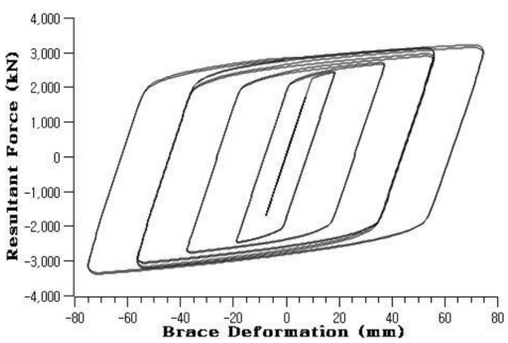
〈Fig. 3〉은 재해석결과 하중-이력곡선을 나타낸 것이며, 비좌굴가새가 하중 가력 동안 안정적으로 거동한 것을 확인할 수 있다. 〈Fig. 4〉는 하중 사이클별 최대 내력을 나타낸 것으로, 해석결과가 변위에 따른 부재의 이상적인 내력 곡선과 거의 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.



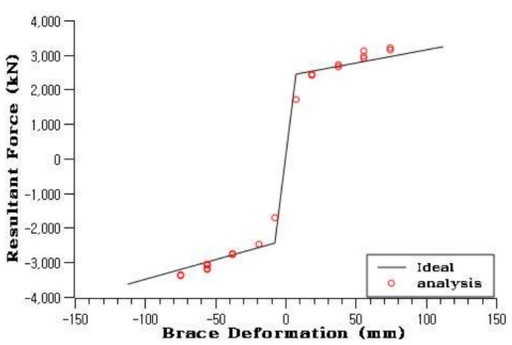
〈Fig. 1〉 FEA model



〈Fig. 2〉 Hysteresis loop (AISC 2001)



〈Fig. 3〉 Hysteresis loop (Current standards)



〈Fig. 4〉 Bi-linear Curve (Current standards)

2.2 강도조정계수

강도조정계수는 해석모델의 정확성을 검증하기 위한 하나의 방법으로서 산정 방법은 선행연구[4]에서 상세히 기술하였고, 이를 바탕으로 해석결과와 평가식을 산정하였다.

1) 압축강도조정계수(β)

$$\beta = 5.3 \times 10^{-3} (\frac{\Delta_b}{\Delta_{by}}) + 1.0 \quad (1)$$

변경된 하중 프로토콜에 따라 압축강도조정계수의 평가식을 식 (1)과 같이 산정하였다. 〈Fig. 5〉는 해석결과와 평가식을 나타낸 것으로 비좌굴가새의 특징인 압축강도와 인장강도의 차이가 작고 대칭성을 나타내며, AISC 기준에서의 $1.0 \le \beta \le 1.3$을 만족하는 것을 확인하였다.[6)]

2) 인장강도조정계수(ω)

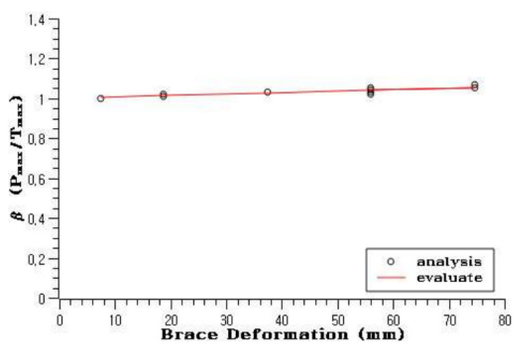
$$\omega = 2.42 \times 10^{-1}\left(\frac{\Delta_b}{\Delta_{by}}\right) + 0.5961 \quad \Delta_b < 5\Delta_{by}$$

$$\omega = 4.93 \times 10^{-2}\left(\frac{\Delta_b}{\Delta_{by}}\right) + 1.0991 \quad \Delta_b \ge 5\Delta_{by} \qquad (2)$$

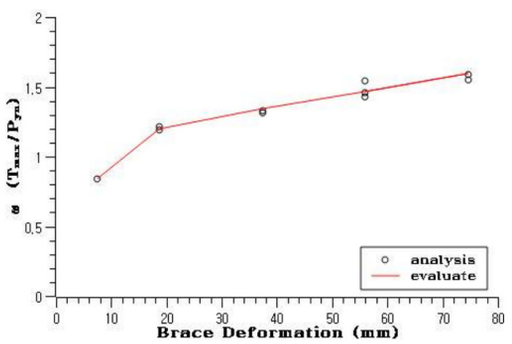
식 (2)는 $5\Delta_{by}$를 기준으로 나누어 인장강도조정계수의 평가식을 산정한 것이며, 〈Fig. 6〉에 나타냈다. 회귀분석한 평가식 그래프와 같이 사이클이 진행될 때마다 점점 경화가 발생하여 값이 커지는 것을 확인할 수 있다.

2.3 누적에너지소산능력

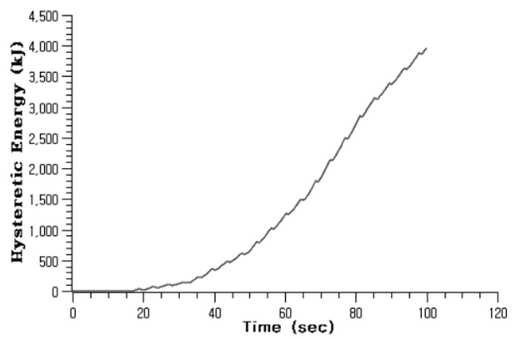
누적에너지소산능력과 누적소성변형능력은 선행연구[4)]에서 서술한 것과 같이 하중-이력곡선을 바탕으로 산정하여 〈Fig. 7〉과 〈Fig. 8〉에 나타냈다. 누적소성변형능력은 AISC 기준에서의 최소항복변형 200배를 만족하는 것을 확인하였다.[6)]



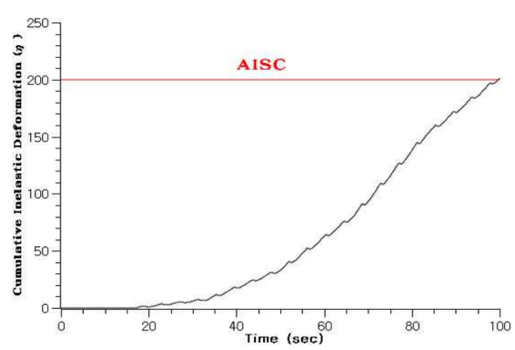
〈Fig. 5〉 Compression strength adjustment coefficient β (Current standards)



〈Fig. 6〉 Tensile strength adjustment coefficient ω (Current standards)



〈Fig. 7〉 Hysteresis energy time history (Current standards)

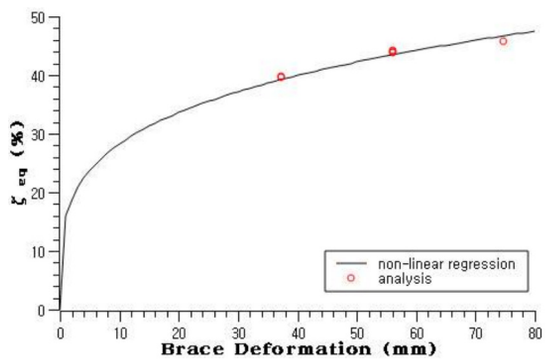


〈Fig. 8〉 Cumulative inelastic axial deformation capacity (Current standards)

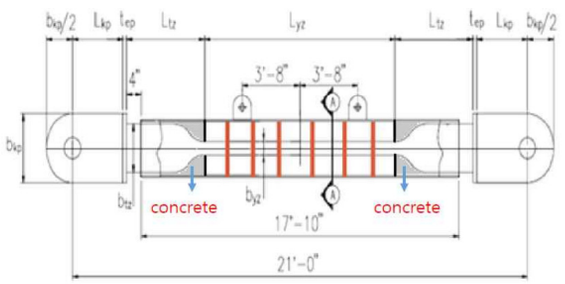
2.4 등가점성감쇠비

하중-이력곡선을 바탕으로 선행연구에 서술한 것과 같이 등가점성감쇠비(ζ_{eq}) 평가식을 식 (3)과 같이 산정하였으며, 〈Fig. 9〉에 나타냈다. 이를 통해 변위가 증가할수록 비좌굴가새가 에너지를 안정적으로 감쇠한다는 것을 확인할 수 있다.

$$\zeta_{eq} = 26.25\left(\frac{\Delta}{\Delta_{by}}\right)^{\frac{1}{4}} \qquad (3)$$



〈Fig. 9〉 Equivalent Viscous Damping (Current standards)



〈Fig. 10〉 Buckling Restrained Brace model reinforced with steel plate

3. 강판보강 비좌굴가새

3.1 강판보강 비좌굴가새 모델

강판보강 비좌굴가새 모델은 선행연구에서 제작한 콘크리트 보강 모델에서 콘크리트 대신 강판을 삽입하여 강재코어를 감싸 좌굴을 방지하도록 〈Fig. 10〉과 같이 설계하였다. 비연속적인 강판의 구속효과를 높이기 위해 기존 강재코어와 보강재의 비접촉조건에서 접촉조건으로 변경하여 해석 모델을 제작하였다.

3.2 설계식제안

기존 콘크리트로 보강된 비좌굴가새에서 강재코어의 좌굴 없이 안정적으로 거동을 하기 위한 설계식은 Watanabe et al.이 다음과 같이 제시하였다.[7)]

$$\frac{P_e}{P_y} \geq 1.0 \tag{4}$$

P_e는 보강재의 오일러좌굴하중, P_y는 강재코어의 강도를 의미한다. 식 (4)는 콘크리트 보강재를 기준으로 제시된 식으로 강판 보강재를 사용할 경우에는 보강재의 접촉 면적이 기존보다 줄어들기 때문에 구속효과가 감소될 것으로 사료된다. 따라서 접촉 면적에 대한 조정계수를 도입하여 보강재의 오일러좌굴하중 P_e에 식 (5)와 같이 추가하였다.

$$P_e = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \times \frac{Nt}{L_r} \tag{5}$$

조정계수는 보강강판의 개수(N)과 보강강판의 두께(t)의 곱을 보강구간의 길이(L_r)로 나누어 산정하였다.

제안된 P_e에 따라 강판으로 보강된 비좌굴가새의 거동을 확인하기 위해 강판의 간격(S), 두께(T)와 개수(N)를 변수로 두고 〈Table 1〉과 같이 유한 요소 모델을 제작하여 간략화한 하중프로토콜을 이용해 해석을 진행하였다.

〈Table 1〉 FEA model reinforced with steel plate

Model	Steel Plate			P_e/P_y
	S(mm)	T(mm)	N	
S470-T15-N9	470	15	9	0.67
S220-T15-N20	220	15	20	1.48
S280-T50-N16	280	50	16	3.96
S250-T50-N18	250	50	18	4.45
S225-T50-N20	225	50	20	4.95

〈Fig. 11〉은 각 유한요소해석모델의 하중-이력곡선을 나타낸 것이다. P_e/P_y가 4.5보다 작은 모델의 경우 압축 측에서 강재코어가 좌굴하여 거동이 불안정해지는 것을 확인하였다. S225-T50-N20 경우 하중 가력동안 강재코어의 좌굴 없이 안정적으로 거동하는 것을 확인할 수 있었다.

〈Fig. 12〉는 각 모델의 사이클별 최대 내력을 비교한 것이다. 모든 모델이 인장 측에서는 이상적인 내력 곡선과 유사하게 나타났지만, P_e/P_y가 4이하인 모델들은 강재코어의 좌굴로 압축 측에서 큰 내력저하가 발생하였다.

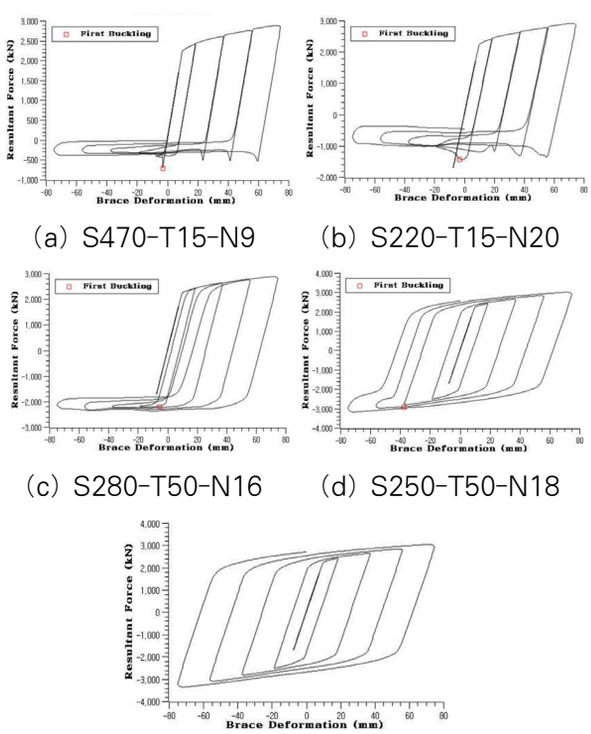
〈Fig. 13〉과 〈Fig. 14〉는 접합부 설계를 위해 강도조정계수가 현행설계 기준에 적합한지 확인고자 각 모델의 압축강도조정계수와 인장강도조정계

수를 비교한 것이다. P_e/P_y가 4이하인 모델들은 좌굴로 인한 내력저하로 압축조정계수가 AISC 기준 1.0이상 1.3이하를 만족하지 못했다. S250-T50-N18과 S225-T50-N20 모델의 경우는 AISC 기준을 만족하는 것을 확인하였다.[6)]

해석결과를 바탕으로 강판보강 비좌굴가새가 강재코어의 좌굴 없이 안정적으로 거동하기 위해서는 P_e/P_y가 약 5.0 이상의 값을 가져야한다는 것을 확인하였다.

3.3 성능평가

하중 프로토콜동안 강재코어의 좌굴 없이 안정적으로 거동한 S225-T50-N20을 이용하여 강판으로 보강된 비좌굴가새의 성능을 콘크리트보강 모델과 비교하여 하중-이력곡선, 누적소성변형능력, 등가점성감쇠비로 평가하였다.

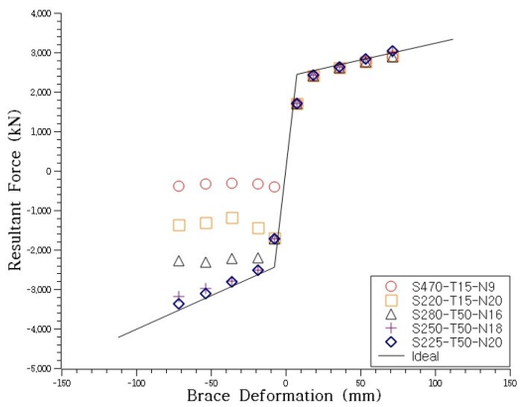


(a) S470-T15-N9 (b) S220-T15-N20

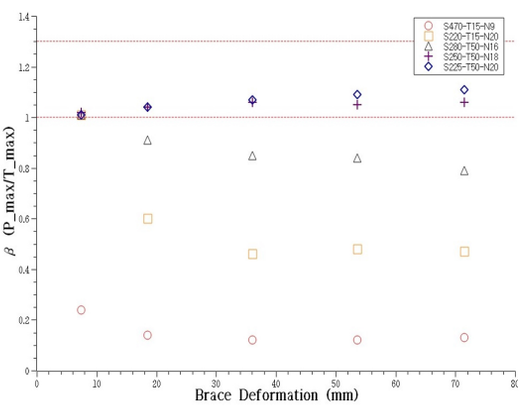
(c) S280-T50-N16 (d) S250-T50-N18

(e) S225-T50-N20

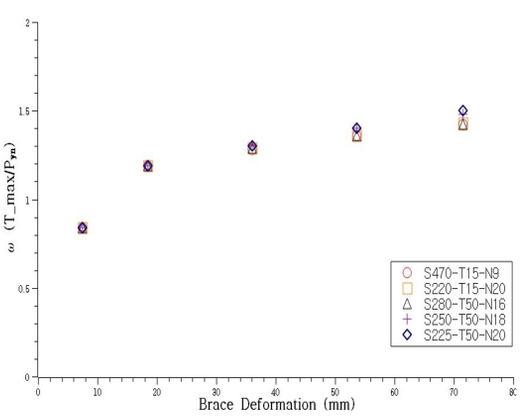
〈Fig. 11〉 Hysteresis loop (Reinforced with steel plate)



〈Fig. 12〉 Bi-linear curve (Reinforced with steel plate)



〈Fig. 13〉 Compression strength adjustment coefficient β (Reinforced with steel plate)



〈Fig. 14〉 Tensile strength adjustment coefficient ω (Reinforced with steel plate)

3.3.1 하중-이력곡선

〈Fig. 15〉는 S225-T50-N20과 기존 콘크리트 보강 모델의 하중-이력곡선을 비교한 것이다. S225-T50-N20은 하중 가력동안 안정적으로 거동하는 것을 확인할 수 있으며, 기존 콘크리트 모델

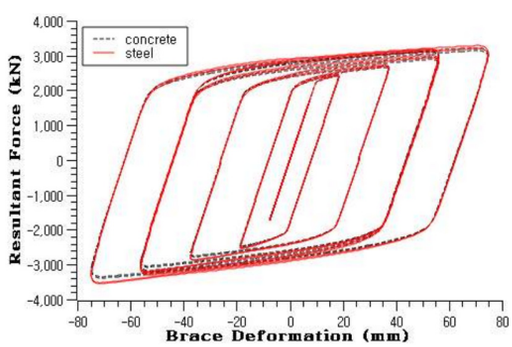
보다 하중이 크게 나타났다. 이는 강판이 기존 콘크리트보다 강도가 크며, 구속력을 높이기 위해 접촉조건을 사용하여 나타난 결과로 사료된다.

3.3.2 누적에너지소산능력

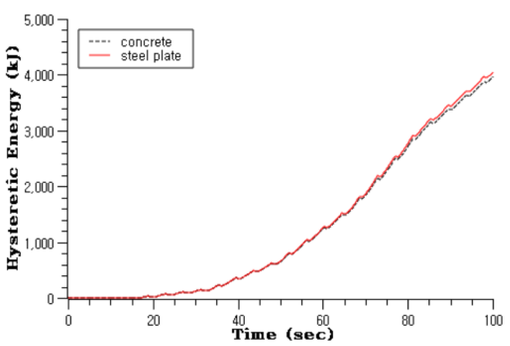
누적에너지소산능력은 〈Fig. 16〉과 같이 나타났으며, 콘크리트 보강 모델에 비해 약 2%정도 더 큰 소산에너지를 가지는 것을 확인하였다. 〈Fig. 17〉은 S225-T50-N20의 누적소성변형배율을 나타낸 것으로 AISC 기준 누적소성변형의 200배를 만족하며, 콘크리트 보강 모델과 비교해 약 1% 정도 더 큰 변형능력을 가지는 것을 확인하였다.[6)]

3.3.3 등가점성감쇠비

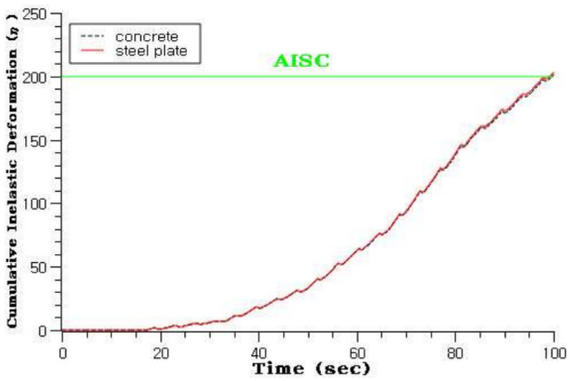
〈Fig. 18〉은 S225-T50-N20의 해석결과 등가점성감쇠비를 나타내며, 강판 보강 비좌굴가새가 콘크리트 보강 모델과 같이 하중가력동안 변위가 증가하면서 안정적으로 에너지를 감쇠하는 것을 확인하였다.



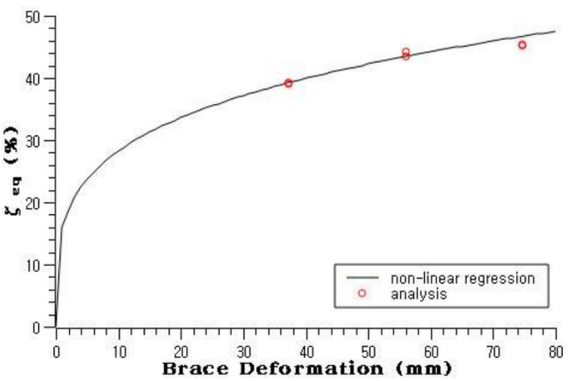
〈Fig. 15〉 Hysteresis loop (S225-T50-N20)



〈Fig. 16〉 Hysteresis energy time history (S225-T50-N20)



〈Fig. 17〉 Cumulative inelastic axial deformation capacity (S225-T50-N20)



〈Fig. 18〉 Equivalent Viscous Damping (S225-T50-N20)

4. 결론

본 연구는 기존 콘크리트 보강 비좌굴가새의 문제점을 해결하기 위해 강판보강 비좌굴가새를 제안하였고, 유한요소해석모델을 제작하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 선행연구에서 검증된 비좌굴가새를 현행 기준에 맞춰 다시 해석을 진행하였으며, 현행 기준에서도 안정적으로 거동하며 기준을 만족하는 것을 확인하였다.

2) 강판보강 비좌굴가새가 안정적으로 거동하는 기준을 제시하기 위해 기존 콘크리트 보강 비좌굴가새의 기준을 참고하여 강판의 간격, 두께, 개수를 변수로 두어 해석을 진행하였다. 강판 보강 비좌굴가새의 경우 P_e/P_y가 약 5이상의 값을 가질 때 강재코어의 좌굴 없이 안정적으로 거동하는 것을 확인하였다.

3) 강판보강 비좌굴가새의 성능을 콘크리트 보강 모델과 비교하여 평가하였다. 해석결과 강판보강 비

좌굴가새 역시 콘크리트 보강 모델과 같이 안정적인 이력곡선을 나타내며, 콘크리트 보강 모델보다 소산 에너지가 약 2%, 변형 능력이 약 1% 정도 크게 나타났다.

강판으로 보강된 비좌굴가새를 제안한 본 연구는 강재로 보강된 비좌굴가새의 설계식을 제안하였지만, 추가적으로 실물 실험을 통하여 설계식에 대한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. Alemayehu, R. W., Kim, Y., Bae, J., & Ju, Y. K., "Cyclic load test and finite element analysis of NOVEL buckling-restrained brace", Materials, Vol.13, No.22, pp.5103, 2020.
2. Tong, J. Z., & Guo, Y. L., "Numerical investigations on elastic buckling and hysteretic behavior of steel angles assembled buckling-restrained braces", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 144, pp. 21~39, 2018.
3. 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.
4. Kim, D. H., & Yoo, J. H., “Finite Element Model Verification of Buckling Restrained Brace With Nonlinear Behavior”, Journal of the Korean Association for and Spatial Structures, Vol. 21, No. 2, pp. 81~88, 2021.
5. KDS 41 31 00, Korean Design Standard, Korea Construction Standard Center, 2019.
6. AISC, “Seismic provisions of structural steel buildings”, ANSI/AISC 341-16, 2016.
7. Fujimoto, M., Wada, A., Saeki, E., Takeuchi, T., & Watanabe, A., "Development of unbonded brace", Quarterly Column, Vol. 155, No. 1, pp. 91~96, 1990.

■ Received : February 28 2022
■ Revised : March 10, 2022
■ Accepted : March 10, 2022