

ENTAI력댐퍼의 실험과 유한 요소 해석을 통한 내진 성능 검증

Experiment of ENTA Hysteretic Damper and Verification of Seismic Performance Through Finite Element Analysis

이 흥 석*
Lee, Hong-Seok

황 정 현**
Hwang, Jung-Hyun

이 기 학***
Lee, Kihak

Abstract

The performance enhancement of various damping systems from natural hazards has become an highly important issue in engineering field. In this paper, ENTA hysteretic dampers were tested under cyclic loadings to evaluate their performance in terms of ductility and energy dissipation. The test results showed that the hysteretic dampers are effective damping systems to enhance the buildings performance for remodeling and retrofit of buildings. Also, the hysteretic dampers were modeled in FEM(Finite Element Method) structural analysis program. As comparing the computer modeling and the experiment, this study model reflects the nonlinear behavior of steel and derives the hysteresis loop.

Keywords : Seismic performance, Hysteretic damper, Finite element analysis

1. 서론

최근 중국 및 일본 등 한반도 주변에서 대규모 지진이 연속적으로 발생하여 막대한 인명 피해 및 재산 피해가 유발되었다. 우리나라는 지진 재해에 대한 안전지대로 인식되어 왔으나 근래 경주 지진과 포항 지진 등이 지속적으로 발생함에 따라 국내에서도 지진 위험이 증가하고 있다. 이와 같은 배경으로 지진에 대한 경각심과 내진 설계의 필요성에 대한 인식이 확산되고 있다.

기존의 전통적인 내진 설계는 지진 발생 시 내진 설계의 목표인 인명 보호가 달성되었다 할지라도 건물의 손상과 더불어 지진 후의 보수·보강 측면에서 경제적 손실이 매우 크다는 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결할 수 있는 대안 중 하나가 감쇠 시스템을 적용한 구조물이다. 감쇠 시스템의 장점은 지진 발생 시 손상으로부터 구조물을 보호할 뿐만 아니라 전통적인 내진 설계에 의

해 계획된 구조 시스템에 비해 보수·보강 비용을 절감할 수 있다는데 있다. 일본의 일반적 제진 설계 경향을 살펴보면 감쇠 시스템이 적용된 철골 구조 시스템의 물량이 기존의 내진 설계에 비해 약 10~20% 절감된다고 보고된 바 있다¹⁾. 더욱이 감쇠 시스템에서 가장 중요한 사실은 지진 발생 후 손상된 에너지 소산 장치를 손쉽게 제거하고 빠르게 보강할 수 있다는 것이다.

본 연구에서 고려된 감쇠 장치는 강재 댐퍼로서 다수의 오프닝이 있는 강판의 면내 전단 변형 메커니즘에 의해 작동되고, 오프닝 사이의 스트럿 휨 변형에 의해 에너지를 흡수한다. 본 감쇠 장치 시스템은 동적 하중 가력 시 구조물의 진동에 의해 스트립들의 휨 거동을 통한 변형 에너지 소산이 발생되며 이를 통해 구조의 동적 응답을 감소시킬 수 있다. 따라서 강도 및 강성을 보강하고 지진 에너지를 저감시키는 ENTA이력댐퍼는 내진 보강 공법으로 적합하다고 판단된다.

본 연구에서는 Entasis에서 착안된 최적 변단면 스트립 형상을 가지는 ENTA이력댐퍼에 대한 실험적 성능 평가를 진행하여 이력 특성을 파악하고 유한 요소 해석 모델링을 제안하였다. 기존 국내 연구의 경우 점진 가력 실험을 통해 실시간으로 목표 변위를 설정하여 탄력적인 이력 댐퍼의 성능을 검증한 실험 사례가 많지 않다. 또한 최적 변단면 스트립 형상을 가지는 강재의 동적 특

* 학생회원, 세종대학교 건축공학과, 석사과정
College of Architecture, Sejong University
** 정회원, 서울과학기술대학교 건축공학과, 박사과정
College of Architecture, Seoul National University of Science and Technology
*** 교신저자, 정회원, 세종대학교 건축공학과 교수, 공학박사
College of Architecture, Sejong University
Tel: 02-3408-3286 Fax: 02-3408-4331
E-mail: kihaklee@sejong.ac.kr

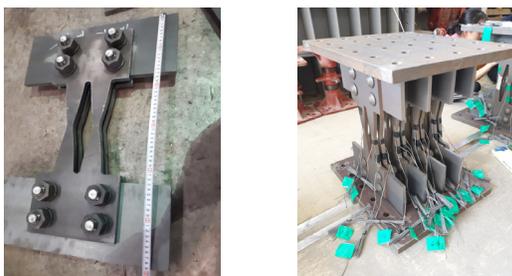
성 및 반복 가력 하중을 적용한 유한 요소 해석 모델에 대한 실험적 검증이 부족한 실정이다. 따라서 본 논문은 실험적 해석 결과와 유한 요소 해석 모델링의 해석 결과를 비교하여 모델링의 신뢰성을 확보하고, 향후 강재 이력 댐퍼 실험에 대한 예측 시뮬레이션 방법론을 제안하고자 한다.

2. ENTA이력댐퍼 가력 실험

2.1 실험체 제원 및 형상

실험체의 제원 및 형상은 <Fig. 1>과 <Table 1>에 나타나있다. ENTA이력댐퍼의 기본 형상은 강재 스트립 댐퍼이며, 강관 내 수평 및 직각 방향으로 인위적인 슬릿을 설치하여 상대적으로 낮은 강도에서 휨 변형이 빠르게 시작될 수 있도록 설계되어 있다. 이는 스트럿의 복곡률 형상을 고려하여 모멘트 구배에 맞도록 최적화된 변단면 스트립 형상으로 반복 및 피로 성능 향상을 기대한 것이다²⁾. 또한 댐퍼 제작 시 일반 강도의 강재를 이용하기 때문에 자재 공급 및 제작이 유리하며, 환경 변수에 대한 큰 영향 없이 안정적인 이력 거동을 나타내기 때문에 장기적 신뢰성이 높다.

ENTAI력댐퍼 실험체는 8개의 감쇠 장치 요소와 충분한 강성을 가진 결합용 T형 지그 2개를 감쇠 장치 요소의 상하부로 연결한 병렬식 변단면 스트립 강재댐퍼 형태이며, 기존 구조체의 기둥 사이 보 중간부에 위치해 접합시키는 상태를 기본 구조로 하고 있다. 감쇠 장치 요소 스트립의 형상은 휨 지배적인 형상을 가지도록 하여 전단력의 영향을 적게 받도록 하였다.



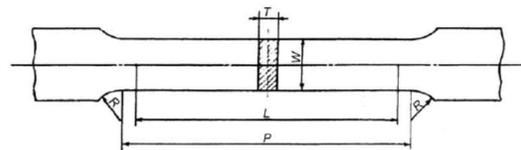
<Fig. 1> ENTA Hysteretic Damper

<Table 1> Damper specification

No.	Component	Size (mm)	Material
①	Strut (8EA)	14X200X515	SS 275
②	Connector (8EA)	14X400X162.5	SS 275
③	Base (2EA)	30X600X500	SS 275
④	High strength steel bolt	-	F10T M24

2.2 재료 시험

감쇠 장치 요소에 들어가는 강종은 SS275 강재를 사용하였으며, KS B 0801 1호 1A 시험편 규격에 따라 <Fig. 2>와 같은 시편으로 제작하여 인장 시험을 수행하였다³⁾.



<Fig. 2> KS B 0801 Tensile test specimen No. 1

<Table 2> Tensile specimen specification (Unit : mm)

Width	Length	Path	Radian	Thickness
40	200	220	25	14

KS B 0801 규격에 따른 본 시편의 인장 실험 결과는 <Table 3>에 나타나 있다. 시편들의 평균 연신율은 37.5%이며, 이로부터 적용된 강재가 조기에 항복하고 충분한 변형 능력을 보유해야 하는 강재 댐퍼의 요구 조건에 매우 적합한 성질임을 확인할 수 있다.

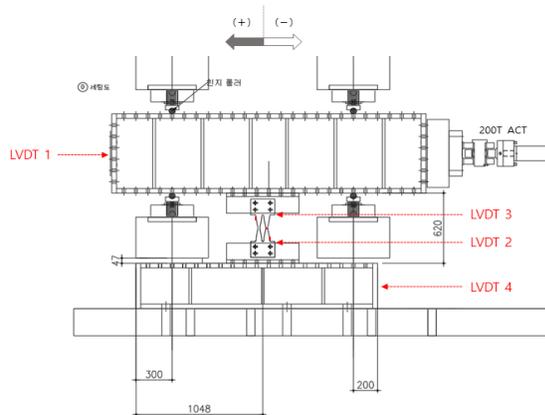
2.3 실험체 설치 및 계측

<Fig. 3>에 실험 셋업(Test setup)의 개념을 도시하였다. 실험체 설치에 ENTA이력댐퍼의 감쇠 장치 요소를 T형 지그에 용접 후 상·하부 프레임에 볼트 고정하였다. 200T 가력 액추에이터는 상부 프레임에 연결되었으며, 상부 프레임은 힌지 롤러로 상하 부위에 고정되어 수평적으로만 미끄럼을 발생시키고 들뜸 현상이 발생하지 않도록 좌우측에 고정된 롤러를 통해 억제하였다. 가

〈Table 3〉 Tensile test result

No.	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Yield ratio	Length (mm)	Elongated length (mm)	Elongation (%)
Specimen 1	341.1	375.0	0.91	100	137	37.0
Specimen 2	333.1	344.4	0.97	100	138	38.0
Specimen 3	323.3	374.0	0.86	100	137	37.0
Specimen 4	320.2	337.9	0.95	100	138	38.0

력은 액추에이터와 연결된 변위 계측 장치를 통해 변위 제어(Displacement control) 방식으로 수행하였다. 〈Fig. 3〉과 같이 액추에이터에서 실험체 쪽으로 미는 방향을 양(+)으로 설정하였다.



〈Fig. 3〉 Test set-up

2.4 목표 변위 설정

본 실험은 ENTA이력댐퍼의 감쇠 장치 요소가 KDS 41 17 00을 만족시키는 변형 능력이 40mm 이상임을 확인하기 위해 계획되었다⁴⁾. 초기 성능 검증을 바탕으로 실험 결과를 실시간으로 모니터링 하여 탄력적으로 보완 계획을 수립하고 시행하는 방향으로 추진되었다.

감쇠 장치 요소의 초기 성능 검증을 위하여 30mm를 목표 변위로 한 동변위 가력 시험을 수행하였다. 〈Fig. 4〉에서 목표 변위 30mm에 대한 감쇠 장치 요소의 변위를 확인해보면 목표 변위 30mm 실험으로는 검증하고자 하는 변형 수준에서 소성 거동에 따른 감쇠 장치 요소의 안정성 보유 여부를 확인할 수 없다고 판단된다. 따라서 최대 변위 120mm인 점진 가력 시험을 수행하여 에너지 소산 능력 소실 시점의 변위를 관측하고, 결과를 목표

변위에 실시간 반영하도록 하여 실험의 목표 변위를 60mm 및 70mm로 설정하였다.

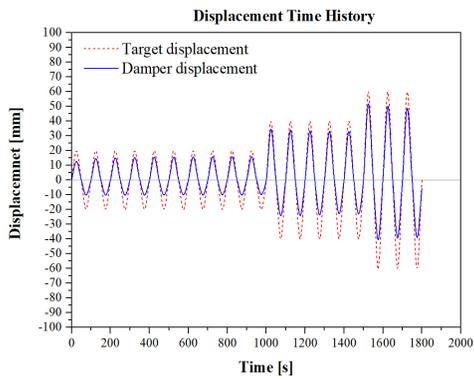
〈Fig. 4〉의 점진 가력 하중에 대한 실험체의 변위를 살펴보면 변위 60mm인 시점에서 감쇠 장치 요소의 목표 변위와 차이가 큰 것을 확인하였다. 이는 60mm 이상의 시점부터 목표 변위보다 큰 소성 거동이 발생하는 것으로 판단된다. 이에 따라 다음 동변위 실험의 목표 변위를 60mm로 상향시켜 실험을 수행하였다. 〈Fig. 4〉의 감쇠 장치 요소 변위를 살펴보면 목표 변위가 60mm인 동변위 가력 시험을 수행한 뒤에도 감쇠 장치 요소의 변형 능력이 임계치에 도달하지 않았다고 판단된다. 따라서 목표 변위 60mm 실험의 결과를 바탕으로 최대 목표 변위를 70mm로 상향 조정하여 최종 검증을 마무리 하였다.

3. 실험 결과 및 분석

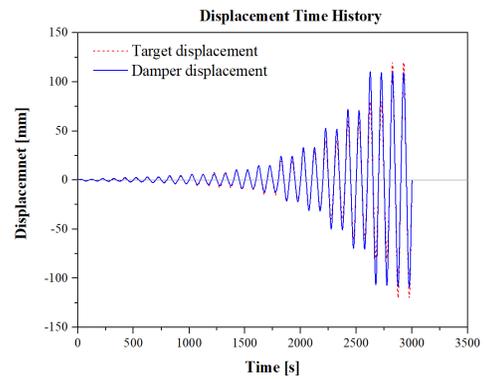
3.1 하중-변위 관계

본 ENTA이력댐퍼의 최종 목표 변위인 70mm 가력 시험에 대한 하중-변위 이력 곡선을 〈Fig. 5〉에 나타냈다. 가력 단계별 사이클 내에서 거동이 일정하게 발생하고, 각각의 목표 변위 증가에 따른 강성 저하가 일정한 비율로 일어나며 안정적인 거동을 확인하였다. 최대 변위 70mm의 가력 사이클에서도 급격한 강도나 강성의 저감 없이 안정적인 연성 거동을 통해 입력된 지진 에너지를 소산하는 것을 증명하였다.

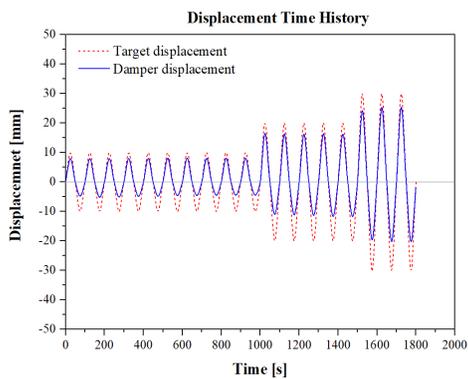
해당 가력 시험의 이력 곡선을 통해 최종 목표 변위인 70mm 가력 시험에 대해 ENTA이력댐퍼가 KDS 41 17 00을 만족시키는 변형 능력을 보유하고 있음을 검증 하였다.



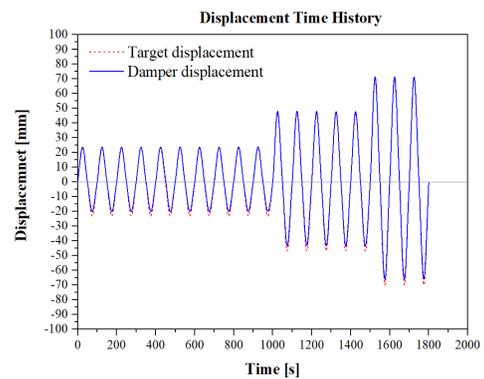
(a) Target displacement 30mm loading



(b) Incremental loading

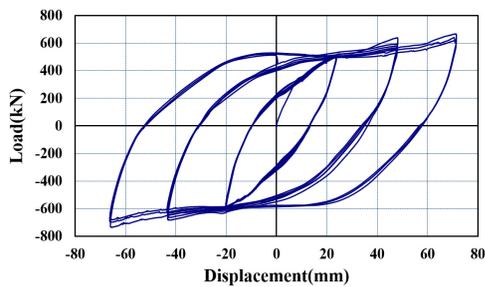


(c) Target displacement 60mm loading



(d) Target displacement 70mm loading

〈Fig. 4〉 Loading protocol and displacement of ENTA Hysteretic Dampers



〈Fig. 5〉 Load-Displacement hysteresis loop

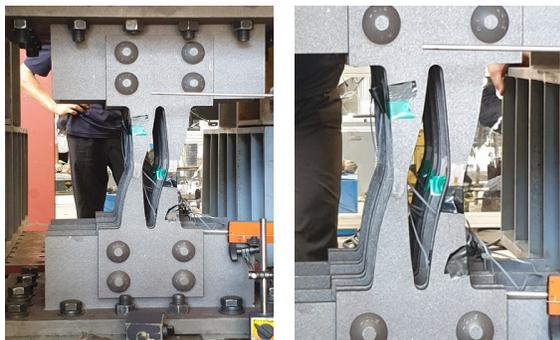
ENTAI력댐퍼의 안정성을 판단하기 위해 식 (1)을 통하여 감쇠 장치 요소에 대한 이론 소성 강도 $P_{p,cal}$ 을 구하고 가력 하중에 대해 나누어 정규화 하였다⁵⁾.

$$P_{p,cal} = 2nF_y t_1 b_1^2 / 4h \quad (1)$$

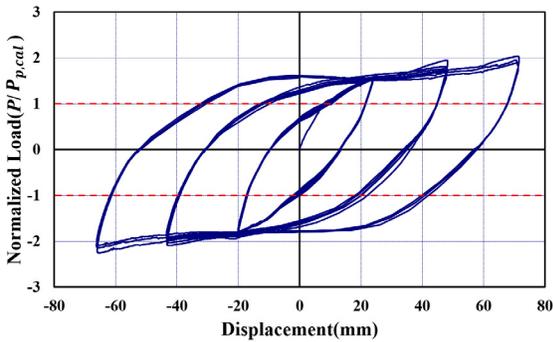
$$P_{p,cal} \times 4set = 81.57 \times 4 = 326.27 kN \quad (2)$$

〈Table 4〉 Strut dimension

Value	Measurement
Number of struts in 1 set (n)	4
Thickness (t_1 , mm)	14
Width (b_1 , mm)	50
Height (h , mm)	236
Yield strength (F_y , MPa)	275



〈Fig. 6〉 Damper deformation



〈Fig. 7〉 Normalized hysteresis loop

〈Fig. 7〉에서 감쇠 장치 요소는 이론 소성 강도를 넘어 항복함을 확인할 수 있으며, 급격한 내력의 저하 없이 안정적인 이력을 형성하였다.

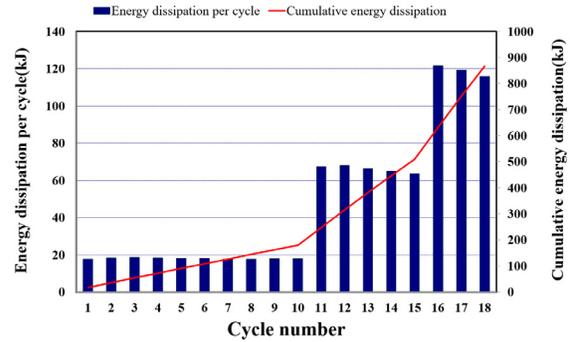
3.2 에너지 소산

ENTAI력댐퍼가 목표 변위 70mm 가력에 대해 최종적으로 소산한 에너지의 양은 〈Table 5〉에 제시되어 있다. 전체 소산 에너지(E_d)는 가력 종료까지 하중-변위 곡선의 루프 면적을 합산하여 산정하였다. 가력 변위가 증가함에 따라 소산한 에너지양이 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 이를 통해 ENTA이력댐퍼의 에너지 소산 능력을 증명하였다.

〈Table 5〉 Energy dissipation per cycle

Loading cycle	Energy dissipation per cycle (kJ)
Target displacement 1/3 ($\pm 23.1\text{mm}$)	179.9
Target displacement 2/3 ($\pm 46.9\text{mm}$)	330.0
Target displacement 3/3 ($\pm 70.0\text{mm}$)	356.2
Total	866.1

가력 단계에 따른 동변위 가력 실험체의 소산 에너지의 변화는 〈Fig. 8〉에 나타나 있다. 소산 에너지는 소성 변형이 작은 초기 가력 구간에서는 미소한 변화를 보이다가 가력 변위가 큰 후반부에서는 증가하였다.

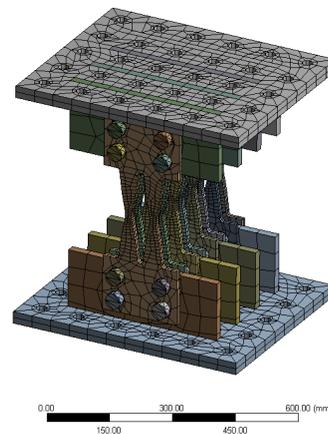


〈Fig. 8〉 Energy dissipation

4. 유한 요소 해석

4.1 유한 요소 해석 모델링

본 연구에서는 유한 요소 해석 프로그램인 Ansys(Ver 19.2)를 통해 ENTA이력댐퍼의 CAD file을 3D Solid elements로 변환하여 3차원 해석을 실시하였다. 세부 요소들을 각각의 Solid elements로 구성하였으며, 각 Solid elements에 대하여 50mm 크기의 13,916개 Mesh로 Nodes 77,960개, Elements 13,916개로 분할하여 진행하였다. 〈Fig. 9〉에 모델링 형상을 나타내었다.



〈Fig. 9〉 FEM model meshing

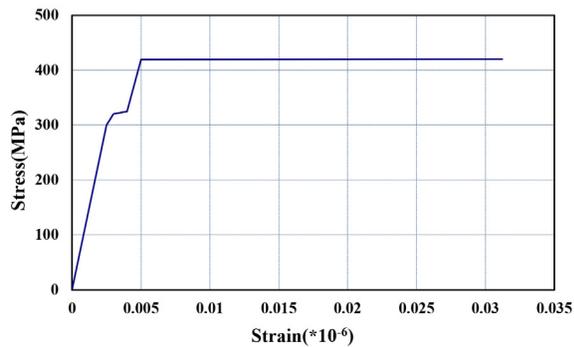
4.2 모델링 경계 조건

유한 요소 해석에 따른 경계 조건 입력은 실험과 동일한 조건을 갖추기 위하여 U_x 방향을 제외한 U_y , U_z 방향에 대하여 모델의 상단부 구속을 실시하였다⁶⁾. 모델의 하단부는 고정단 설정을 통해 슬릿 현상을 배제하였으며 U_x , U_y , U_z 에 대한 전방향 구속을 실시하였다.

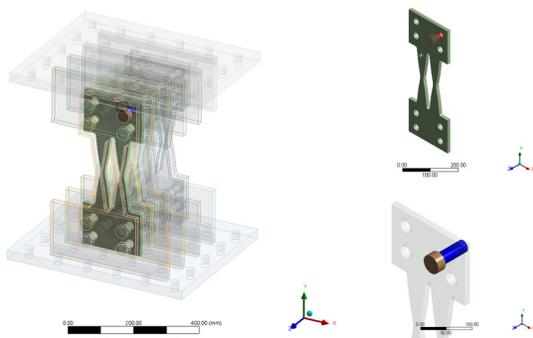
Solid elements에 대한 기본적인 물성치는 <Table 6>에 명시되어 있다. 비선형 동적 해석을 위한 Stress-Strain 곡선은 Necking 등의 단면적 변형을 고려하지 않는 Engineering Stress-Strain의 데이터를 바탕으로 True Stress-Logarithmic으로 치환하여 재료 물성치를 추출하여 적용하였다⁶⁾. 이에 대한 Stress-Strain 곡선은 <Fig. 10>에 나타나 있다.

<Table 6> Material properties

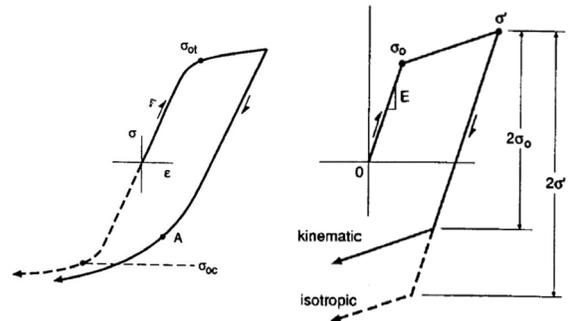
Property	SS275	F10T M24
Density (kg/m ³)	7,850	7,850
Young's modulus (MPa)	20,500	20,500
Poisson's ratio	0.3	0.3
Tensile yield strength	275	900



<Fig. 10> FEM model Stress-Strain curve



<Fig. 11> FEM modeling connections



<Fig. 12> Multi-linear kinematic hardening⁸⁾

가력 하중은 실험과 동일한 가력 범위인 23.1mm, 46.9mm, 70.0mm를 가력하였고, 해석의 편의성 향상을 위해 목표 변위당 2 Cycle씩 가력하였다. 고력 볼트와 감쇠 장치 요소의 접촉면 마찰 계수는 KCS 14 31 25 기준 토크 계수 값의 평균값인 0.11로 설정하였다⁷⁾.

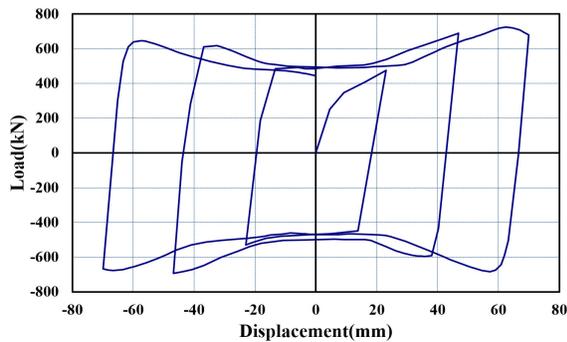
본 연구에서 사용된 Ansys(Ver 19.2)는 비선형 해석을 위한 강재의 이력 특성에 대해 Isotropic hardening rule과 Kinematic hardening rule을 제시하고 있다. Isotropic hardening은 항복이 발생하는 응력이 부호만 바뀔 뿐 동일하며, Kinematic hardening은 가력 Cycle이 진행될 때마다 항복 응력의 절대값이 줄어드는 이력 특성으로 Bauschinger 효과가 반영된다. 따라서 실험과 유사한 강재의 거동 시뮬레이션을 나타내기 위해 이력 특성은 Multi-linear kinematic hardening으로 고려하였다⁸⁾. 강재의 해당 이력 특성은 ENTA이력댐퍼의 Loading, Unloading, Reloading 구간에 반영된다.

4.3 유한 요소 해석 결과

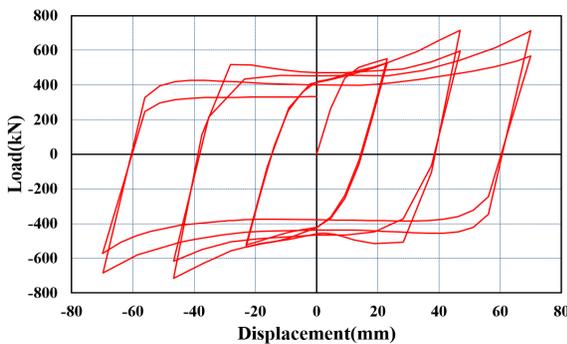
유한 요소 해석 모델의 하중-변위 이력 곡선을 통해 Isotropic hardening rule을 적용한 모델과 Kinematic hardening rule을 적용한 모델을 비교하였다. <Fig. 14>에서 Kinematic hardening rule을 적용한 모델의 Unloading 구간 항복 응력이 Loading 구간에 비해 감소한 것을 확인할 수 있다.

실험체와 유한 요소 해석 모델의 하중-변위 이력 곡선 비교를 통해 해석 모델의 신뢰성을 검증하였다. 최대 강도 및 최대 변위에서 매우 근접한 예측 값을 보이며, 강재의 항복 하중 또한 실험 값과 예측 값이 근접함을 알 수 있다. 좌측 상부와 우측 하부의 하중 감소 구간에

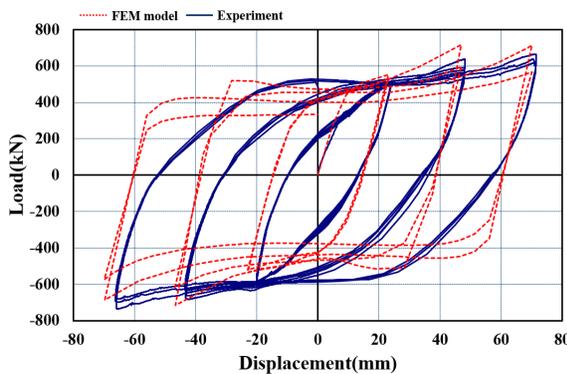
서 이력 곡선의 차이를 보이며 Unloading 구간에서 강재의 거동을 완전히 반영하지 못함을 알 수 있다. 전체적으로 최대 변위 및 최대 하중이 평균 95% 이상의 일치율을 보이므로 유한 요소 해석 모델의 신뢰도를 확보하였다.



〈Fig. 13〉 Isotropic hardening model



〈Fig. 14〉 Kinematic hardening model

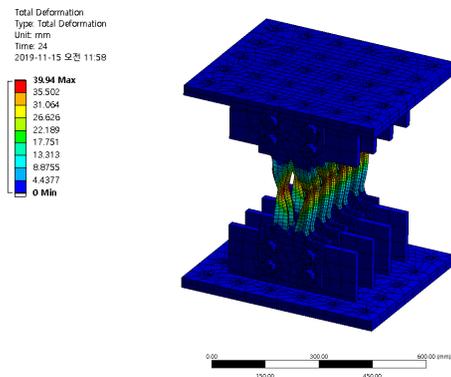


〈Fig. 15〉 Experiment vs. FEM model hysteresis loop

유한 요소 해석 모델의 감쇠 요소 중심부에서 최대 0.002의 잔류 변형률과 최대 419MPa의 잔류 응력을 확인하였다. 가력 종료 후 유한 요소 해석 모델의 잔류 변형을 통해 면의 방향으로의 변형을 확인하였으며, 이는

〈Table 7〉 Experiment vs. FEM model

No.	Experiment	FEM model	Accuracy (%)
(+)			
Max. Displ.	71.5mm	70.0mm	97.9
(-)			
Max. Displ.	66.2mm	69.8mm	94.8
(+)			
Max. load	665.0kN	715.8kN	92.9
(-)			
Max. load	735.2kN	716.3kN	97.4



〈Fig. 16〉 FEM model total deformation

〈Fig. 16〉에 나타나 있다. 해당 변형을 통해 좌굴 파괴 모드를 예측하였다.

5. 결론

본 연구에서는 ENTA이력댐퍼의 성능 실험 평가를 진행하였으며, Ansys 유한 요소 해석 프로그램을 통해 ENTA이력댐퍼에 대한 3차원 해석을 수행하여 예측 시물레이션 방법론을 연구하였다. 본 연구로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) KDS 41 17 00에 의거한 ENTA이력댐퍼 실험 분석을 통해 감쇠 장치의 거동 및 에너지 소산 능력을 해석하여 안정적인 거동 및 소산 능력을 확인하였다.
- 2) Kinematic hardening rule을 적용한 모델링 방법을 통해 강재의 비선형 거동을 반영하였다. 하중-변위 이력 곡선의 Unloading 구간에서의 거동을 완벽히 표현

하지 못한다는 한계를 보이지만 유한 요소 해석 모델과 실험체의 최대 변위 및 하중에 대하여 평균 95% 이상의 일치율을 나타냄으로써 신뢰성을 확보하였다. 이에 대해서는 향후 추가적인 연구 및 보강이 필요할 것으로 판단된다.

3) 유한 요소 해석을 통해 최대 0.002의 변형률 및 419MPa의 최대 응력으로 ENTA이력댐퍼에 대해 합리적 예측을 수행하였으며, 최종 가력 후 변형을 통해 면외 방향으로의 좌굴 파괴 모드를 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통과학 기술진흥원 기술촉진 연구사업의 연구비지원 (20CTAP-C143093-03)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사를 드립니다.

References

1. Lee, W. H., Oh, S. H., & Kim, Y. J., "Design Method of Earthquake Resistant Structure and Case of Application in Korea", Korea Society of Seismic Isolation and Vibration Control, pp.11~16, 2015.
2. Kim, Y. J., Park, J. H., Hwang, J. H., & Ahn, T. S. (2017). Experimental Study of Hysteretic Steel Damper for Deformation Capacity. Proceedings of the Architectural Institute of Korea, Republic of Korea, Vol.37, No.1, pp.733~734
3. KOREAN INDUSTRIAL STANDARDS, KC B 0801 : 2007 The Pieces for Tension Test for Metallic Materials, pp.4, Korean Agency for Technology and Standards, 2007.
4. Architectural Institute of Korea, Seismic Building Design Code and Commentary (Korean Building Code), Kimoondang, 2019.
5. Lee, C. H. (2015). Structural Performance of SAFE Dampers Combining Shear-Type Friction Damper and Non-Uniform Steel Strip Damper (Doctoral dissertation). Korea

University, Republic of Korea.

6. Youn, I., Kim, C. H., Do, C. G., & Jang, W., "A Study on the Structural Performance of Steel Plate Damper", Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol.29, No.2, pp.159~167, 2017
7. Korea Construction Standards Center, KCS 14 31 25 : 2016 Bolt connection and pin connection, Ministry of Land Infrastructure and Transport, 2016.
8. Basan, R., & Marohnić, T. (2016). Constitutive Modeling and Material Behavior. (Scientific Project No. IP-2014-09-4982). Croatia: University of Rijieka.

- Received : December 24, 2019
- Revised : January 29, 2020
- Accepted : February 03, 2020