

코일형 탄소성 감쇠기에 대한 실험 및 수치해석적 연구

Experiments and Numerical Studies on Coil Shaped Elastoplastic Dampers

조근희* 하동호** 倉林浩*** 石丸辰治****
Cho, Keunhee Ha, Dong-Ho Kurabayashi, Hiroshi Ishimaru, Shinji

ABSTRACT

Behavior characteristics of coil shaped elastoplastic dampers, a sort of hysteretic damper, are studied on through experiments and numerical analyses. The coil shaped elastoplastic damper shows bilinear force-deformation relationship, and no stress concentration is occurred in the device. Numerical model, which is constructed through calibration with experimental results, shows good agreement with experiment. The coil shaped elastoplastic damper has lower yielding strength and stiffness under transversal loading compared to axial loading. Additional studies are required on behavior characteristics according to configuration variation of coil shaped elastoplastic dampers.

1. 서론

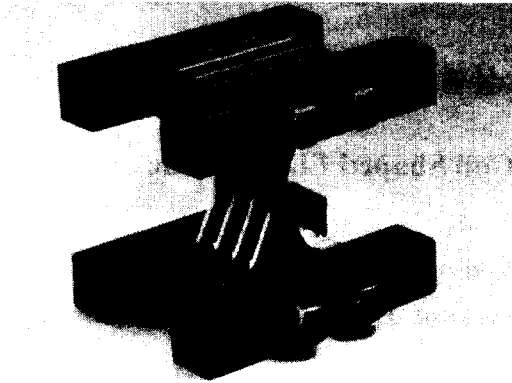
감쇠기는 지진격리 또는 제진의 목적으로 널리 사용되며, 일반적으로 사용되는 감쇠기는 에너지 소산 방법에 따라 점성 감쇠기(Viscous Damper), 점탄성 감쇠기(Viscoelastic Damper), 이력 감쇠기(Hysteretic Damper), 마찰 감쇠기(Friction Damper) 등으로 분류할 수 있다. 이 중 이력 감쇠기는 강재의 탄소성 변형에 의해 에너지를 소산하는 장치로서 ADAS(Added Damping and Stiffness), TADAS(Triangular ADAS), 비부착 브레이싱(Unbonded Bracing), 루프형 댐퍼, U형 납댐퍼 등이 많이 사용되고 있다(그림 1). 하지만 이들 장치들은 응력의 국부적인 집중으로 인한 피로 파괴(ADAS, TADAS), 복잡한 장치구성이나 체결부(비부착 브레이싱, 루프형 댐퍼), 어려운 용접(U형 납댐퍼) 등의 문제점을 안고 있다.

* 유니슨기술연구소 선임연구원

** 유니슨기술연구소 부소장

*** Vibro-System 사장

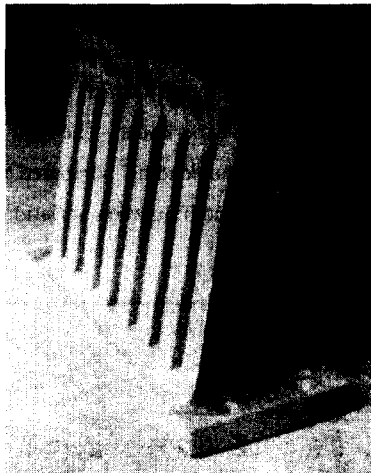
**** 일본대학교 이공학부 건축학과 교수



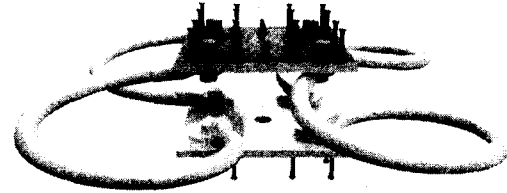
(a) ADAS



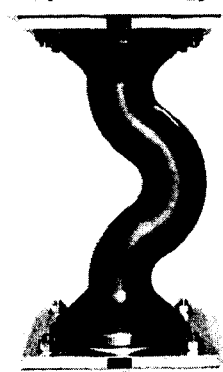
(c) 비부착 브레이싱



(b) TADAS



(d) 루프형 댐퍼



(e) U형 납댐퍼

그림 1. 기존 이력 감쇠기 종류

이러한 기존 이력 감쇠기에 비해 Kurabayashi 등(2000)에 의해 개발된 코일형 탄소성 감쇠기(Coil Shaped Elastoplastic Damper)는 균등한 응력분포 양상을 보이므로 코일부 전체가 에너지 소산부로 이용되며, 저렴한 SS400 강재를 사용하므로 경제적이다 할 수 있다. 그리고 체결의 자유도가 높아 기존 장치와의 결합을 통한 제진 및 지진격리 장치로의 응용성 또한 뛰어나다. 이 연구는 이러한 코일형 탄소성 감쇠기에 대해 실험 및 해석적 연구를 통해 해석 모델을 구성하고 거동 특성을 파악하는 것을 목적으로 한다.

2. 코일형 탄소성 감쇠기의 실험

Kurabayashi 등의 연구에 대한 검증을 위하여 표 1의 시험체에 대한 실험을 수행하였다. 시험체

는 양단 1.75회전까지를 고정장치에 용접하여 붙이고, 200ton 피로시험기에 그림 2와 같이 장착하였다. 3mm/sec의 속도로 가진하였고, ± 15 mm, ± 30 mm, ± 50 mm, ± 70 mm의 변위 크기에 대해 실험을 수행하였다.

그림 3은 각각의 변위 크기에 대한 힘-변위 관계를 도시한 것으로서 이중선형 형태를 보인다. 1차강성 및 2차강성은 각각 621N/mm, 38N/mm이며, 1차강성에 대한 2차강성의 비는 0.0612이다. 그리고, 항복 변위는 20mm이고, 항복강도는 12kN이다. 또한 이력과정 중에 에너지 소산에 의하여 감쇠기의 상당한 온도 상승이 관찰되었다.

그리고, 안정적인 이력 거동을 보이는 10배의 δ_r 구간에 대한 감쇠기 자체의 등가점성감쇠비는 0.3~0.4를 나타내어 감쇠효율이 좋은 이력 거동을 보인다.

3. 코일형 탄소성 감쇠기의 수치해석적 연구

3.1 해석 모델 구성

적절한 재료특성 및 경계조건을 파악하고자 실험과 동일한 코일형 탄소성 감쇠기에 대한 수치해석적 연구를 수행하였다. 해석에는 ABAQUS®를 사용하였으며, 재료 및 기하비선형성을 고려하였다. 코일을 단면중심방향으로는 4분할, 단면원주방향으로는 16분할, 그리고 1회전당 24분할한 요

표 1. 코일형 탄소성 감쇠기의 재원

재질	SS400 (SS41)
선 직경 (d)	28 mm
코일 중심 직경 (D)	132 mm
유효 회전 수 (R_e)	4
총 회전 수 (R)	7.5
무하중 시 높이 (H)	385 mm
코일 중심 직경 / 선 직경	4.7



그림 2. 시험체 형상 및 장착형태

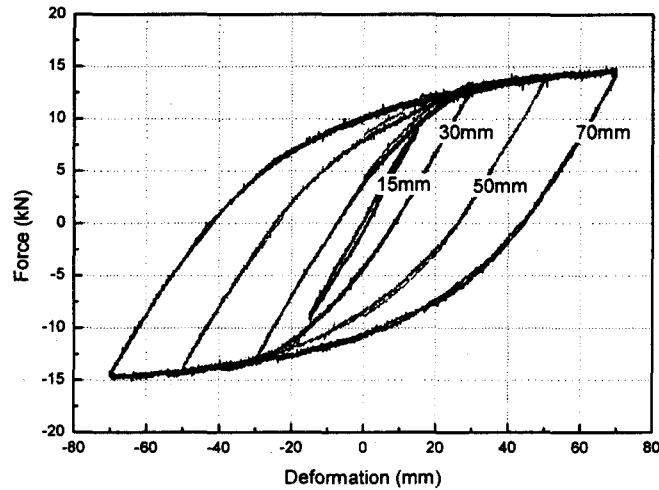
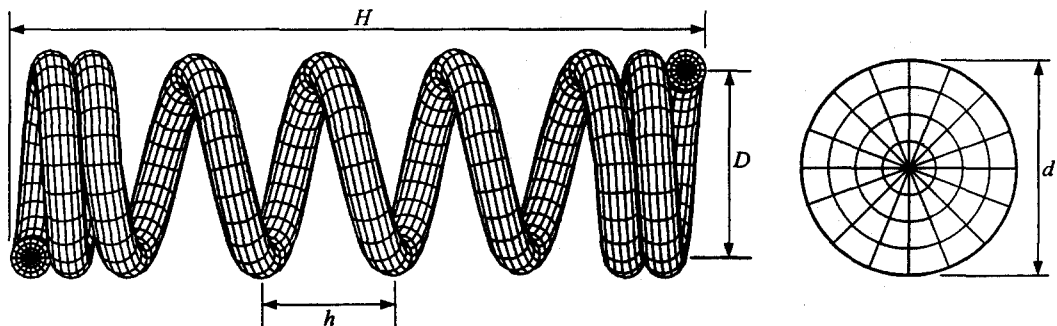


그림 3. 코일형 탄소성 감쇠기의 이력 특성

소를 사용하였으며(그림 4), 3차원 6절점 연속체 요소 2880개, 3차원 8절점 연속체 요소 8640개를 사용하였다.

적절한 경계조건을 찾기 위하여 양단 1.75회전에 해당하는 모든 단면의 절점을 구속한 경우와 단면의 외곽 절점만을 구속한 경우에 대한 해석 결과를 비교한 결과 이력 곡선에서의 큰 차이점을 발견할 수 없었으며, 이 후 모든 해석에서는 단면의 외곽 절점만을 구속하여 해석을 수행하였다. 하지만 이러한 경계조건은 양단 구속 단면에 응력 집중을 야기하므로 추후 실제 장치의 구속 방법에 따라 적절히 변경되어야 한다.

코일형 탄소성 감쇠기의 에너지 소산부 재료인 SS400(KS D 3503, JIS H 3101)에 대한 재료특성을 파악하고자 항복변형률 ϵ_{sy} , 항복강도 f_{sy} , 1차강성 E_{s1} , 2차강성 E_{s2} 를 달리 하면서 해석을 수행하였으며, MISES 항복 기준에 의해 항복여부를 판정하였다. 해석에 의해 실험과 가장 일치하는 결과를 산출하는 SS400의 재료특성은 그림 5와 같다.



(a) 코일 전체 형상 및 요소 분할

(b) 코일 단면의 요소 분할

그림 4. 코일형 탄소성 감쇠기의 형상 및 요소 분할

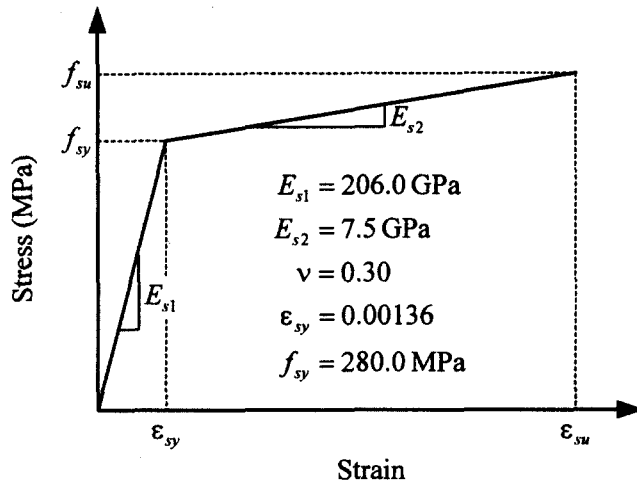


그림 5. SS400의 재료 특성

3.2 축방향 거동 특성

표 2는 코일형 탄소성 감쇠기의 축방향 거동에 대한 실험 및 해석 결과를 비교한 것이다. 항복 변형 및 항복강도는 이 연구에서의 해석 결과가 실험 결과와 대체로 잘 일치함을 알 수 있으며, 1차강성 및 2차강성의 경우에 있어서는 기존 결과와 약간 다른 값을 나타내나, 실험 결과를 예측하는 데 있어서는 충분한 정확도를 가진다고 볼 수 있다. 이러한 사실은 그림 6을 통해 확인할 수 있다.

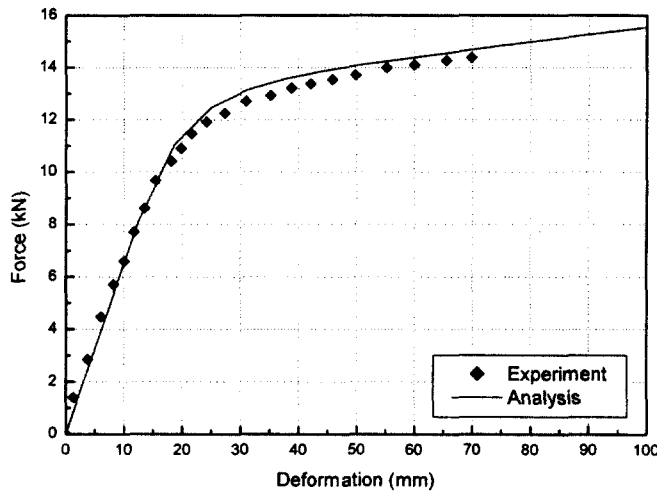


그림 6. 코일형 탄소성 감쇠기의 힘-변형 관계에 대한 실험과 해석 결과의 비교

표 2. 코일형 탄소성 감쇠기의 축방향 거동에 대한 실험 및 해석 결과 비교

	실험 결과	해석 결과	
		Kurabayashi 등	이 연구
항복변형, mm	20	15	20
항복강도, kN	12	10	13
1차강성, N/mm	621	559	644
2차강성, N/mm	38	20	30

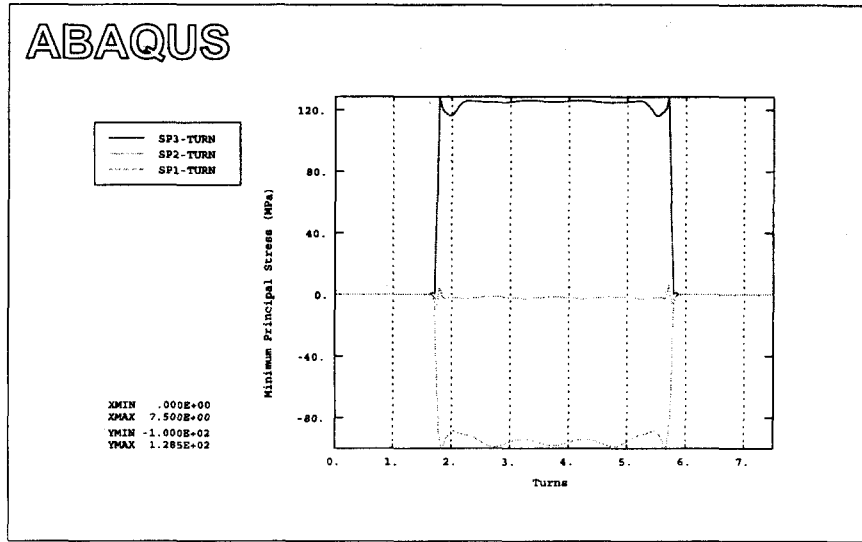


그림 7. 코일형 탄소성 감쇠기의 회전수에 대한 주응력 분포

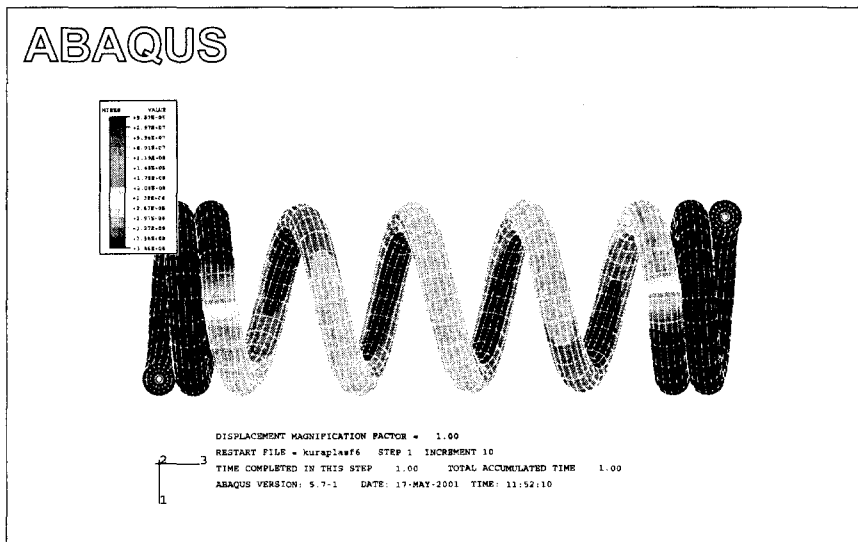


그림 8. 코일형 탄소성 감쇠기의 응력(MISES) 분포

그림 7은 코일의 중심축을 따른 주응력 분포를 나타낸 것이고, 그림 8은 응력(MISES) 분포 양상을 나타낸 것으로 양단 고정 단면을 제외하면 거의 균일한 응력 분포를 가짐을 알 수 있다. 이는 코일형 탄소성 감쇠기가 응력이 집중됨이 없이 장치 전체를 에너지 소산부로 이용하는 것을 나타낸다.

3.3 전단방향 거동 특성

코일형 탄소성 감쇠기의 전단방향 거동 특성을 파악하기 위하여 양단 고정단면에 대해 수직인 방향(X방향)과 평행한 방향(Y방향)의 하중에 대한 이력 거동을 추적하였다. 그림 9와 표 3은 축방향과 전단방향에 대한 거동 특성의 비교로서 축방향에 비해 상당히 작은 항복강도 및 1차강성을 가짐을 알 수 있다. 이는 전단방향 거동이 축방향 거동에 비해 전단응력 저항 구조 성향이 높기 때문이다. 이 연구에서 해석한 2가지 전단방향은 다른 전단방향에 대해 상한 및 하한에 해당하므로 그 밖의 다른 방향에 대한 전단 거동은 2개의 곡선 사이에 위치하게 된다.

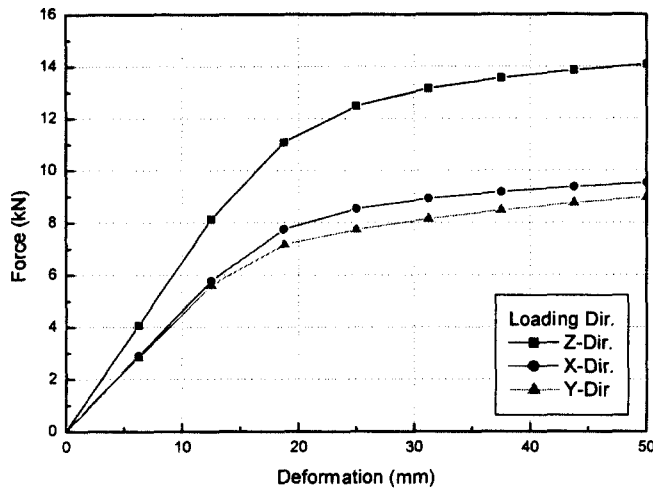


그림 9. 코일형 탄소성 감쇠기의 하중 방향에 따른 힘-변형 관계

표 3. 코일형 탄소성 감쇠기의 하중 방향에 따른 거동 특성 비교

	축방향 거동 (Z-Dir.)	전단방향 거동 (X-Dir.)	전단방향 거동 (Y-Dir.)
항복변형, mm	20	19	17
항복강도, kN	13	8.7	7.8
1차강성, N/mm	644	464	452
2차강성, N/mm	30	25	37

4. 결론

기존의 이력 감쇠기가 갖는 문제점을 개량하기 위하여 개발된 코일형 탄소성 감쇠기에 대해 실험 및 수치해석을 통하여 거동 특성을 파악하였다. 코일형 탄소성 감쇠기는 등가점성감쇠비가 0.3~0.4를 나타내어 감쇠효율이 좋은 이력 거동을 보인다. 그리고 실험에 의해 얻어진 자료를 토대로 해석모델을 구성하였으며, 이의 타당성을 실험과의 비교를 통해 입증하였다. 축방향 거동에 비해 전단방향 거동은 응력저항구조의 변화에 의해 낮은 항복강도와 1차강성을 보인다. 코일형 탄소성 감쇠기는 양단 고정부를 제외하면 고른 응력분포를 보이며, 양단 고정부의 응력집중은 적절한 고정방법에 의해 개선할 필요성이 있다. 그리고, 항복변형, 항복강도, 1차강성, 2차강성 등의 거동 특성은 코일형 탄소성 감쇠기의 형상(회전수, 선직경, 코일직경, 피치 등)을 변경함으로써 조절할 수 있으며, 이에 대한 연구가 요구된다.

참고문헌

1. H. Kurabayashi, S. Ishimaru and H. Fujinuma (2000), "A Study on Coil Shaped Elastoplastic Damper," Proceedings of the Second Japan National Symposium on Structural Control, pp. 337-341 (in Japanese).
2. G.W. Housner, L.A. Bergman, T.K. Caughey, A.G. Chassiakos, R.O. Claus, S.R. Masri, R.E. Skelton, T.T. Soong, B.F. Spencer and J.T.P. Yao (1997), "Structural Control: Past, Present and Future," Journal of Engineering Mechanics, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 123, No. 9, pp. 897-908.
3. 日本免震構造協會 (1995) "免震構造入門," Ohmsha, 187 pp. (in Japanese).