Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection
Vol. 21, No. 1, January 2017, pp.059-066
https://doi.org/10.11112/jksmi.2017.21.1.059
pISSN 2234-6937
eISSN 2287-6979

수직력의 변화를 고려한 마찰댐퍼의 거동 분석

조성국[1], 박웅기[2], 이성태[3]*

Performance Analysis of Friction Damper Considering the Change of the Vertical Force

Sung Gook Cho[1], Woong Ki Park[2], Seong-Tae Yi[3]*

Abstract: In this paper, to protect the piping in nuclear power plants and various plant facilities, we have developed a damper using the friction method and carried out a study to analyze the performance. Friction typed damper means a device for attenuating vibration by generating a frictional force to the bearing and the shaft by applying a compressive force to the MER-Spring. In order to analyze the performance of the damper, the properties of MER-Spring and friction materials were analyzed, a study on the effects of friction was carried out, and the behavior of this equation was established. And, to determine whether deformation of the material and to examine the reliability of the behavior equation established, prototypes was produced and, through a performance test and finite element analysis of a damper made of specimens, they were analyzed. As a result, it is noted that the reliability of the material was confirmed, the coefficient of friction have to be adjusted according to the velocity, cyclic loading test and finite element analysis results show exhibits excellent results. In addition, a review of the dynamic loads in the future shall be performed for the usage in more broad fields.

Keywords: Damper, MER-spring, Friction coefficient, Finite element analysis

1. 서 론

원자력발전소나 각종 플랜트 시설물에서 배관의 파괴는 주로 관내의 유체압력, 고정하중, 온도팽창 그리고 지진하중으로 인한 진동에 의하여 발생한다. 진동에 의한 반복응력은 주로 응력이 집중되는 배관 접합부위에 국부적인 피로파괴를 일으켜 구조물의 안전성을 저해하는 요인이 된다. 따라서 진동이 빈번히 발생하는 배관에는 진동문제를 해결하기 위한 장치들을 설치하여 진동에 대한 문제를 해결하고 있다. 일반적으로 고진동이 발생하는 배관계에는 강체 지지대(Rigid Support)를 설치하여 진동을 억제한다. 이 경우, 강체 지지대는 강성을 크게 하여 배관의 변위를 구속하게 되지만, 온도가 높은 배관은 큰 유연성을 필요로 하게 되므로 열응력의 문제가 추가적으로 발생하게 된다.

이러한 배관의 진동문제를 해결하기 위하여 여러 연구가 진행 중에 있다. Sinha (1996)는 배관시스템에 에너지 흡수 지지대를 설계하기 위하여 비 상호작용 세그먼트의 진동제어를 독립적으로 적용하는 방법을 시도하였고, Wen's 모델을 통한 지지대의 최적 매개변수를 구하였다. Iwatsubo et al. (1999)은 원자력발전소 배관의 PWR 스팀 발전기를 대상으로 방진기를 적용하여 진동문제를 해결하고자 하였으며 Bakre et al. (2004)은 미끄럼 마찰댐퍼(Sliding Friction Damper)를 이용하여 배관시스템의 지진 제어효과를 수치로 입증하였다. 한편, Nila (2009)는 항공분야에서 사용 중인 저 진동수 댐퍼(Low Frequency Damper)를 원자력발전소의 배관분야에 적용하기 위한 연구를 수행하였다. Jinsuo et al. (2010)은 원전 배관시스템에 적용되는 감쇠가 다수의 요소에 의하여 영향을 받는 것을 확인하고, 정확한 감쇠값을 연구하였다. 그리고 Cheung et al. (2013)은 배관시스템의 내진성능을 평가하기 위하여 실제 원전에서 사용되는 배관요소 중 일부를 모사하고 지지대를 설치하여 진동대 실험을 수행하였다.

한편, 원자력발전소의 배관시스템에 제공되는 방진기나 댐퍼는 요구 조건에 충족되는 성능을 지속적으로 발휘하여야 한다. 이에 따라 방진기의 경우 노화에 따른 안전문제를 해결하고자 Northwest 연구소와 미국 원자력 규제위원회(IAEA : International Atomic Energy Agency)에서 원자력 발전소 노화 연구 프로그램을 진행하여 방진기의 기술적 배경과 주요

[1]정회원, 이노스기술(주) CEO
[2]정회원, 이노스기술(주) 과장
[3]정회원, 인하공업전문대학 토목환경과 교수, 교신저자
***Corresponding author:** yist@inhatc.ac.kr
Department of Civil and Environmental Engineering, Inha Technical College, Incheon 22212, Korea
•본 논문에 대한 토의를 2017년 2월 1일까지 학회로 보내주시면 2017년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Copyright Ⓒ 2017 by The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection. 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.

고장모드 및 안전, 기술, 작업규제 등에 대한 실용성에 대하여 논의하였다(Brown et al., 1990). 일본에서는 원자력발전소의 배관 시스템에 사용되는 방진기를 대상으로 극한강도 실험을 수행하여 이론에 기초한 극한강도와의 차이에 대한 연구를 수행하였다(Yamazaki and Kojima, 2007). 이러한 다양한 배관지지 기술은 산업구조물에서 많이 사용하고 있으나, 현재까지도 전량 수입에 의존하고 있는 실정으로 오래 전부터 국산화 및 새로운 형태의 기술개발의 필요성이 시급히 요구되고 있는 실정이다.

이 연구에서는 배관에서 발생하는 동적하중을 마찰진자 원리를 이용하여 감쇠시키는 댐퍼를 개발하고 거동 방정식을 제안하였으며, 실험과 유한요소해석을 통하여 결과에 대한 검증을 수행하였다.

2. 곡률 마찰댐퍼

2.1 기본 구조

국내의 E사에서 개발된 마찰진자 댐퍼(FCD : Friction Concave Damper)의 구조는 베어링과 샤프트 사이의 곡면마찰을 이용하는 방식이다. 샤프트는 배관의 진동에 의하여 왕복운동을 하게 되는데 이때 베어링과의 마찰로 인하여 에너지를 흡수·소산시킨다. 마찰력은 수직방향의 하중에 의해서 결정되므로 마찰을 발생시키기 위해서는 스프링의 압축을 통하여 압축력을 발생시켜야 한다. 스프링에서는 압축된 변위만큼 압축력이 발생하며 이때 발생한 압축력이 곡선면에 대하여 마찰력으로 작용한다. FCD는 인위적으로 스프링을 추가하여 복원력을 유도하는 기존의 마찰진자 받침과는 달리 Fig. 1과 같이 중력복원의 원리를 이용하여 복원되기 때문에 별도의 복원스프링을 설치할 필요가 없다. 또한 Fig. 2와 같이 스프링을 통한 베어링의 압축력 조절이 자유로우므로 필요한 압축력과 스프링의 강성을 통하여 변위 조절이 간단하다는 장점이 있다.

2.2 거동 특성

Fig. 3은 마찰진자받침(FPS : Friction Pendulum bearing System)의 거동원리 개념도이며 거동방정식은 식 (1) 및 식 (2)와 같다. 배관의 진동에 의하여 변위가 발생하게 되고, 이때 샤프트의 곡률반경만큼 베어링에 수직변위가 발생하며 이를 통하여 수평방향 압축력을 구할 수 있다.

식 (1)에서와 같이 진자원리는 곡률 θ를 기본으로 거동이 발휘된다. 진동발생시 배관의 진동에 의하여 샤프트의 곡률반경만큼 베어링의 수직변위(단차) $\triangle_h$가 발생하며 이를 통하여 수평방향 압축력을 구할 수 있다. 배관과 FCD의 양끝단이 서포트로 연결되어 설치가 되면 설치한 방향에 대하여 진동발생 시 설계된 마찰계수만큼 수평력이 작용하고 진동이

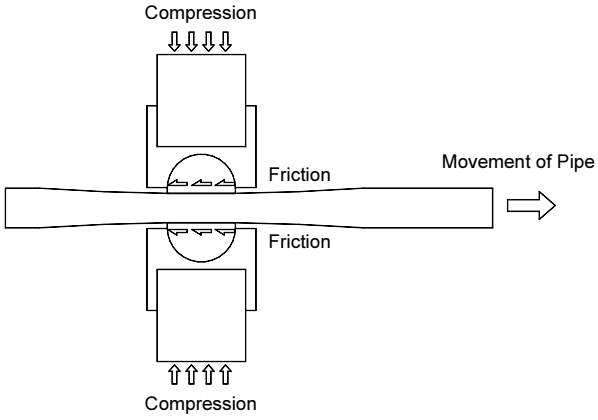


Fig. 2 Basic structures of curvature friction damper

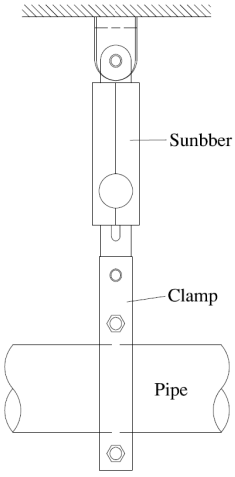


Fig. 1 Pipe supporting shape of curvature friction damper

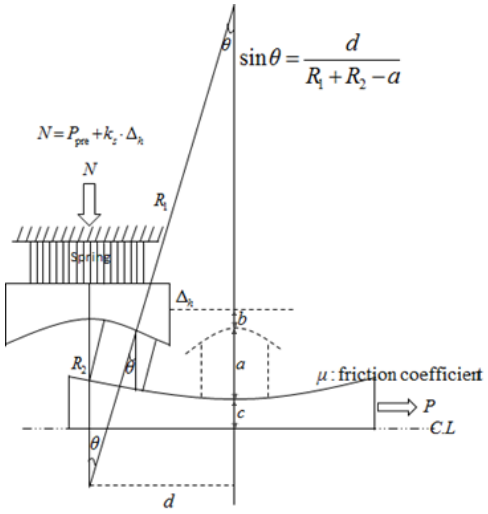


Fig. 3 Behavior of FPS

감쇠되는 원리이다.

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{d}{R_1 + R_2 - a}\right) \quad (1)$$

$$\Delta_h = (R_1 + R_2 - a)(1 - \cos\theta) \quad (2)$$

$$N = P_{pre} + k_s \cdot \Delta_h \quad (3)$$

$$k_1 = \frac{N}{R_1},\ k_2 = \frac{N}{R_2} \quad (4)$$

$$P = (N \times \mu + k_1 \times d) \times 2 \quad (5)$$

여기서, P : 수평하중, R_1 : 상부곡률, R_2 : 하부곡률, N : 수직하중, k_1 : 상부강성, k_2 : 하부강성, P_{pre} : 수직선행압축하중, k_s : 스프링의 강성

3. 댐퍼의 재료 특성 및 거동 실험

3.1 Spring의 재료 특성

마찰력을 결정하게 되는 압축 스프링은 에너지소산에 의한 장치의 성능을 결정하는 중요한 요소이므로 신뢰성을 확보해야 한다. 이를 위하여 FCD에 삽입되는 매스 에너지 조절장치(Mass Energy Regulator, MER)인 Spring의 재료특성을 분석하였다. 즉, Fig. 4와 같이 우레탄 재질의 원통형 MER-Spring 시편을 제작하여 UTM 장치를 이용하여 10~50%까지 압축실험을 수행하였다(Fig. 5). 시편의 제원은 외경 67 mm, 내경 18 mm, 그리고 길이 168 mm이다. Fig. 6은 시편의 하중-변위 곡선을, Table 1은 시편별 응력값을 나타낸다. 10% 압축을 받았을 경우, 표준편차는 10.32%로 응력들 사이에 차이를 나타내지만 20~50%의 압축시에는 약 1% 내외의 표준편차를 나타내므로

Fig. 4 MER-Spring specimens

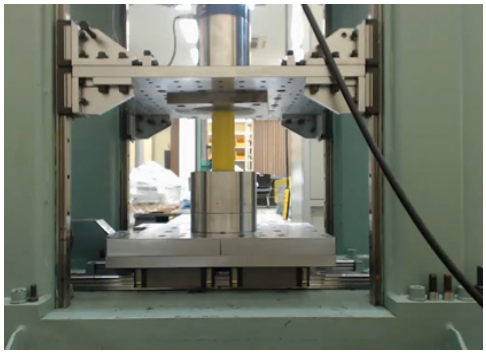


Fig. 5 MER-Spring load testing set-up

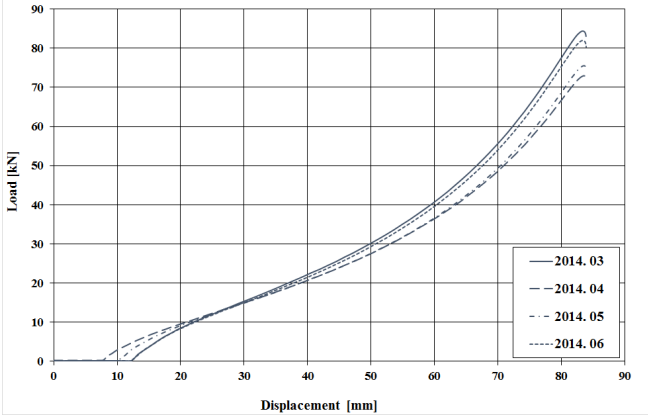


Fig. 6 Load-displacement curves with specimen

Table 1 Stress with test specimen

Specimen \ Comp. Load	Stress(MPa)				
	10% Comp.	20% Comp.	30% Comp.	40% Comp.	50% Comp.
1	16.7	27.5	31.5	39.3	52.8
2	23.2	26.9	29.3	35.5	40.9
3	25.1	27.5	29.7	35.8	41.3
4	20.4	26.8	29.3	35.6	41.4
5	20.4	26.8	29.3	35.6	41.4
Standard Dev.	10.32%	1.25%	0.68%	0.35%	0.58%

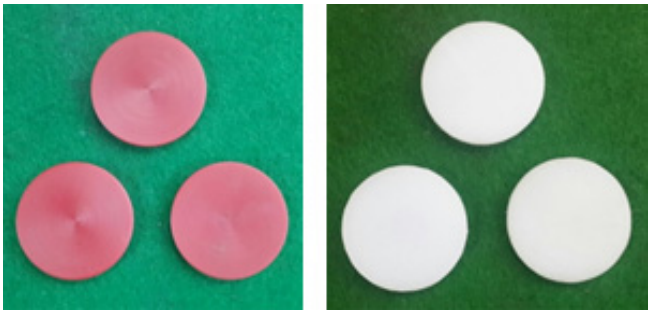


Fig. 7 Friction specimens

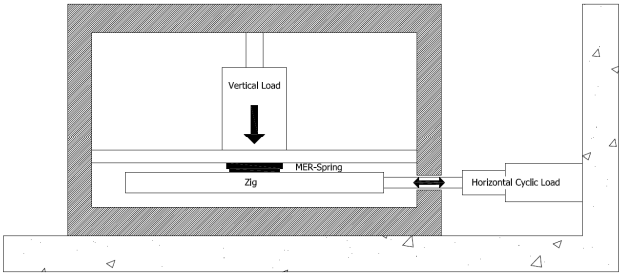
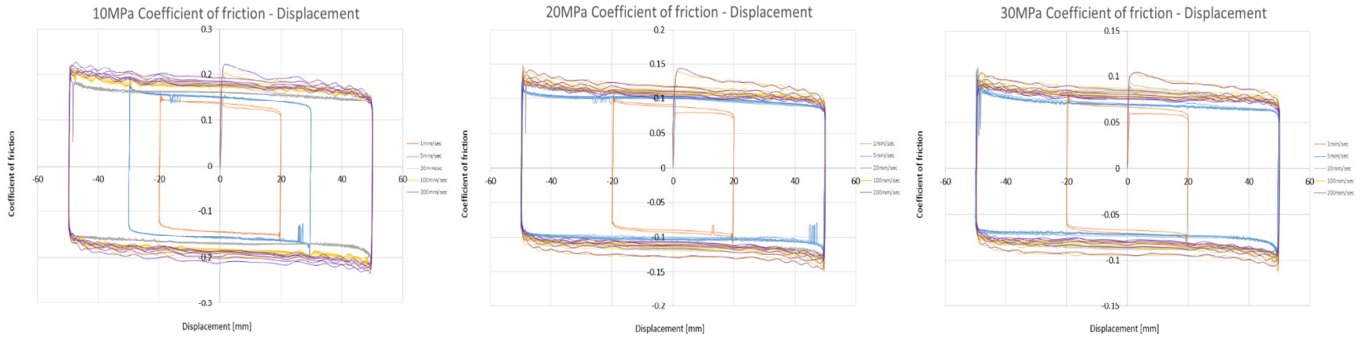
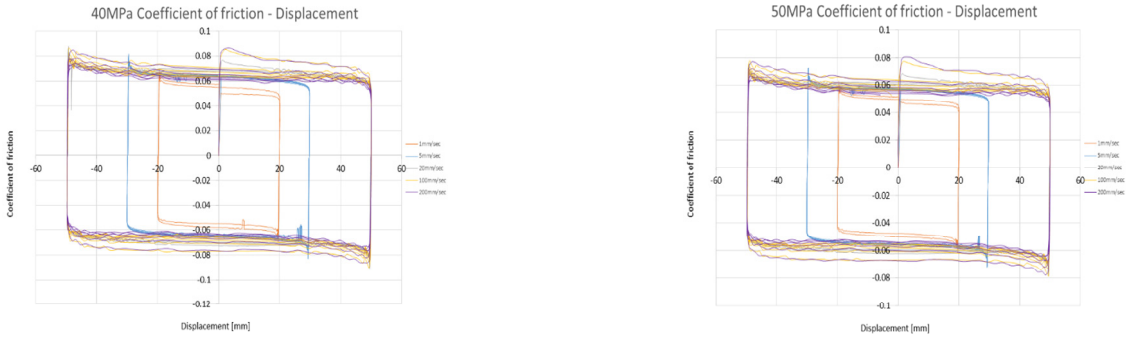


Fig. 8 Friction coefficient testing set-up



(a) 10 MPa (b) 20 MPa (c) 30 MPa



(d) 40 MPa (e) 50 MPa

Fig. 9 Friction coefficient-displacement curves

신뢰성을 확보한 것으로 판단된다.

3.2 마찰재의 마찰계수 특성

마찰방식을 이용하는 댐퍼는 마찰계수가 댐퍼의 성능을 좌우하게 된다. 따라서 특성실험을 통하여 마찰계수를 분석하는 과정이 필요하다. 일반적으로 마찰계수는 하중과 속도가 지배적인 요소로 작용한다. 따라서 마찰재의 마찰계수 특성 실험에서는 하중과 속도를 변수로 하여 실험을 수행하였다. 실험 시편은 Fig. 7과 같이 직경 50 mm의 원형 마찰재를 사용하여 Fig. 8에서와 같이 UTM으로 수직하중을 가력한 상태에서 수평방향으로 일정한 속도로 지그를 움직여 마찰계수를 얻었다. 실험에서 시편이 받는 응력은 10~50 MPa으로 10 MPa씩 증가시켰으며, 응력별로 1, 5, 20, 100, 200 mm/sec의 속도로 지그를 움직여 마찰계수를 측정하였다.

Fig. 9는 시편에 작용한 응력에 대하여 속도별로 얻은 응력-변위곡선이다. 이로부터 마찰계수는 속도에 따라 증가하는 것을 확인할 수 있다. 응력과 속도에 대한 영향을 더 자세히 알아보기 위하여 Fig. 10과 11에 응력과 속도에 따른 평균 마찰계수로 정리하여 나타내었다(Table 2). 분석 결과, 시편에 작용하는 응력이 증가하면 마찰계수는 감소하고, 속도가 증가하면 마찰계수가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 저속에서 고속으로 갈수록 마찰계수가 증가함에 따라 항복값이 증가하고 감쇠면적이 커지는 것으로 마찰재의 재료적 특성이 잘 반영된 것으로 판단된다.

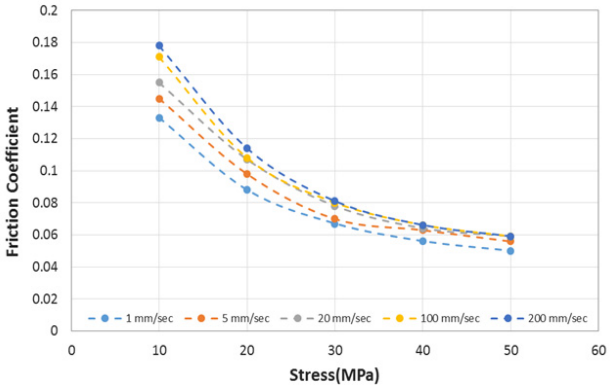


Fig. 10 Friction curves with stress

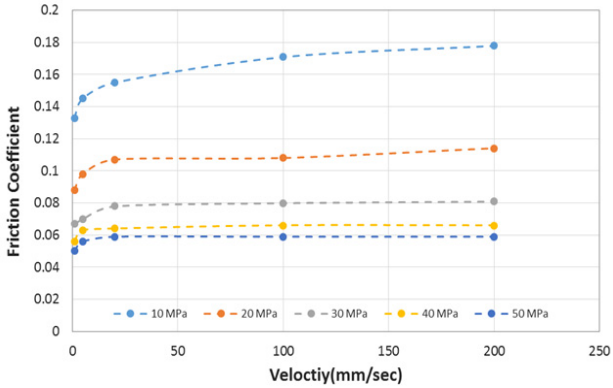


Fig. 11 Friction curves with velocity

Table 2 Friction coefficient with velocity and stress

Velocity (mm/sec) \ Stress	Friction Coefficient				
	10 MPa	20 MPa	30 MPa	40 MPa	50 MPa
1	0.133	0.088	0.067	0.056	0.050
5	0.145	0.098	0.070	0.063	0.056
20	0.155	0.107	0.078	0.067	0.059
100	0.171	0.108	0.080	0.066	0.059
200	0.178	0.107	0.078	0.064	0.057

실험결과에 대한 분석을 위하여 10 MPa와 50 MPa 응력에 속도가 미치는 영향을 검토하였다. 10 MPa에서 1 mm/sec와 200 mm/sec는 각각 0.133과 0.178로 마찰계수가 0.045가 증가하였고, 50 MPa에서는 1 mm/sec와 200 mm/sec의 경우 각각 0.050과 0.057로 마찰계수가 0.007이 증가하였다. 이로부터 마찰면의 응력이 증가할수록 속도의 영향이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 속도에 따른 영향을 분석하면 1 mm/sec에서는 10 MPa에서 50 MPa로 변화할 때 0.083의 마찰계수가 감소하는 반면, 200 mm/sec에서는 10 MPa에서 50 MPa로 변화할 때 0.121의 마찰계수가 감소하였다. 이로부터 마찰계수는 작은 속도보다 큰 속도에서 응력의 변화에 더 민감하다는 것을 보여준다.

3.3 댐퍼의 거동 실험

마찰과 MER-Spring의 특성에 대한 실험을 바탕으로 FCD를 제작하였다. FCD의 성능을 파악하기 위하여 Fig. 12와 같이 설치한 후 반복하중을 가력하여 하중과 변위에 대한 결과를 측정하였다. 실험시 가력속도는 1, 20, 100, 200 mm/sec로 하였으며 ±40 mm의 변위를 3회 반복하여 실험을 수행하였다.

하중의 가력속도에 따른 실험결과를 Fig. 13에 나타내었다. 실험결과를 나타내는 거동곡선은 제작된 시작품의 예측 설계값(Target value)과 비슷한 결과를 나타낸다. 그러나 가력속도

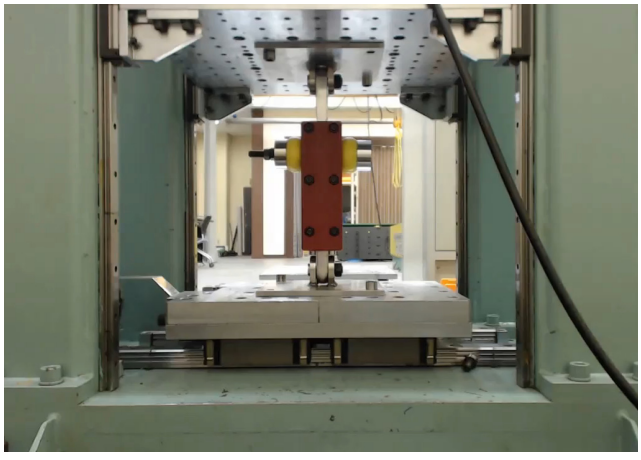
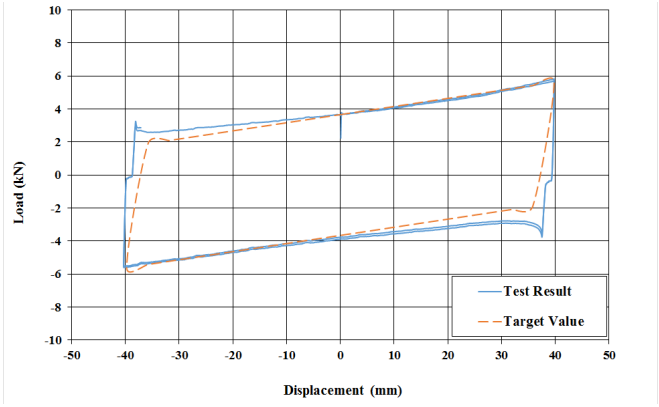
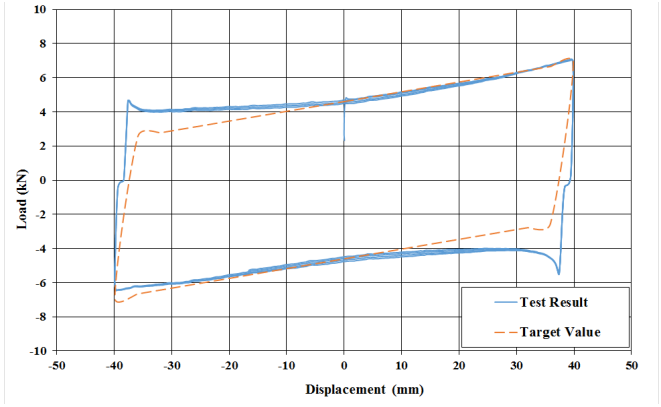


Fig. 12 Performance test of the damper

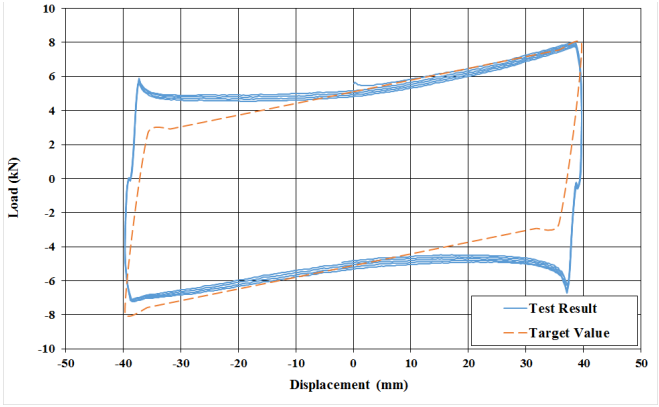
가 증가함에 따라 항복하중은 증가하였으며 이를 Table 3에 나타내었다. 항복하중은 100 mm/sec까지는 증가하나 200 mm/sec에서는 증가하는 경향이 없어졌다. 한 Cycle당 소산된 에너지량인 EDC (Energy Dissipated per Cycle)와 이차강성 및 유효강성은 모두 증가하는 결과가 나타났으며, 감쇠비는 42.8~43.8%의 수준으로 약 1% 차이를 두고 비슷하게 나타나는 것을 확인하였다. 저속에서와는 달리 고속인 경우 이력곡선 상에서의 떨림과 약간의 튐 현상이 발생한다. 이는 실험 시 장치에 발생하는 가속도에 의한 관성력의 영향으로 판단된다.



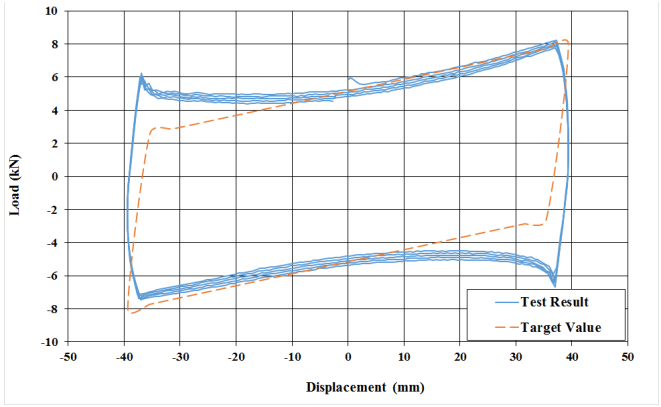
(a) 1 mm/sec



(b) 20 mm/s



(c) 100 mm/s



(d) 200 mm/s

Fig. 13 Load-displacement curves with velocity

Table 3 Results with velocity

Content	1 mm/sec	20 mm/sec	100 mm/sec	200 mm/sec
yielding load, F_y(kN)	3.7	4.6	5.1	5.1
EDC(kN·mm)	600.524	748.879	855.564	862.273
secondary stiffness(kN/mm)	0.049	0.057	0.069	0.073
effective stiffness, K_{eff}(kN/mm)	0.141	0.173	0.197	0.203
damping ratio(%)	42.8	43.4	43.8	43.6

4. 유한요소해석

댐퍼의 성능을 분석하기 위하여 특성실험과 더불어 ABAQUS를 이용한 유한요소해석을 수행하였다. 해석에서는 Fig. 14와 같이 샤프트, 베어링, 베어링 플레이트, 및 스프링으로 모델링하였다. 재료의 물성치로는 탄성재료를 적용하였고, 접촉면 조건은 Concave Shaft와 Bearing 및 Bearing과 Bearing Plate 각각의 접촉면에 대하여 0.12의 일정한 마찰계수를 적용하였다(Fig. 15). 하중조건은 선행하중으로 스프링에 11.1 mm의 선행압축력을 주었으며, 압축력이 가해진 상태에서 Concave Shaft의 길이방향으로 40 mm의 변위를 주어 얻어지는 하중-

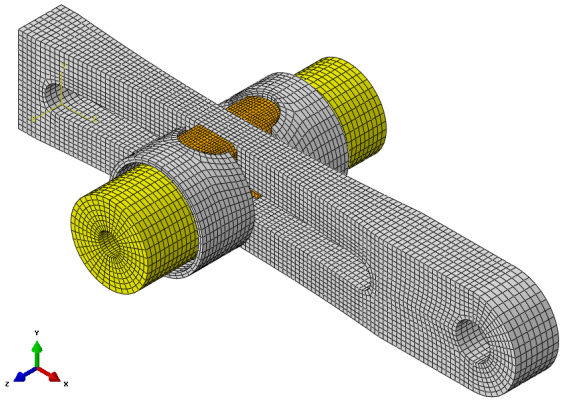


Fig. 14 Modelling shape

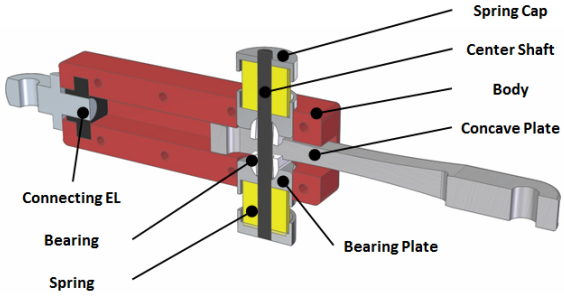


Fig. 15 Configure of the friction concave damper

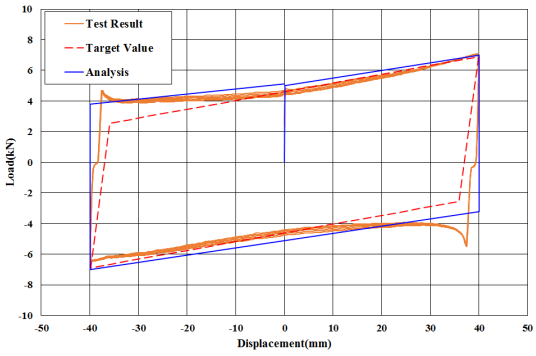
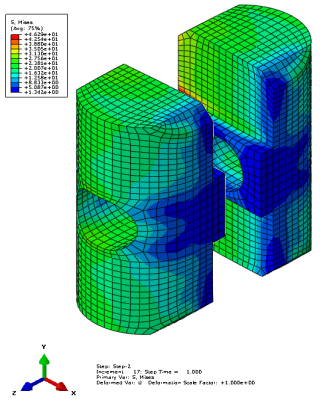
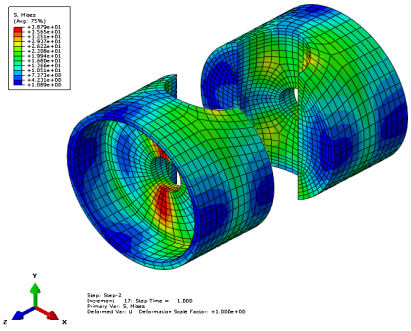


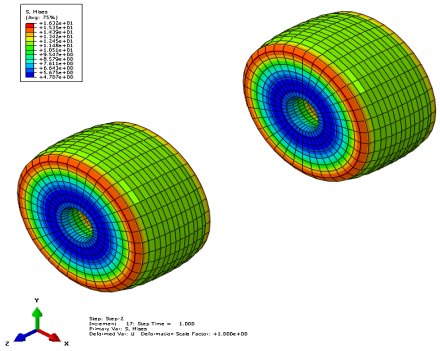
Fig. 16 Finite element analysis results



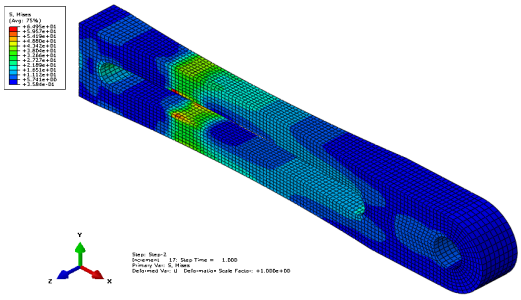
(a) Bearing



(b) Bearing Plate



(c) MER-Spring



(d) Concave Shaft

Fig. 17 Stress distributions of components

Table 4 Evaluation of analytical results

	F_y(kN)	K_{eff}(kN/mm)	EDC(kN·mm)
Experimental	4.6	0.173	748.9
Analytical	4.9	0.169	808.0
Error(%)	6.5	2.3	7.9

Table 5 Maximum stresses of components

Component	Stress(MPa)
Bearing	46.29
Bearing Plate	38.79
MER-Spring	16.32
Concave Plate	64.95

변위곡선을 통하여 성능을 분석하였다. Table 4는 항복하중, 유효강성, 및 EDC에 대한 실험결과와 해석결과의 비교를 설명하고 있다. 이 표로부터 이들 사이의 오차는 크지 않으며 해석결과가 실험결과를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 추가적으로 각 요소별로 최대응력(Table 5)을 구하였다.

댐퍼의 실험값, 예측 설계값 및 유한요소해석에서 구한 하

중-변위관계를 Fig. 16에 나타내었다. 해석으로부터 구한 이곡선은 20 mm/sec의 속도로 반복하중을 실험한 데이터와 비슷하며 2차 강성의 기울기도 거의 유사함을 확인하였다.

각각 요소별 부재의 상태를 파악하기 위하여 Fig. 17에 응력분포도를 나타내었다. 댐퍼에 40 mm의 수평변위가 발생하였을 때의 응력분포로 Concave Plate에서는 최대 64.95 MPa의 응력이 발생함을 확인할 수 있었다(Table 5).

5. 결 론

본 연구에서는 배관에 적용 가능한 마찰방식의 댐퍼를 개발하여 거동방정식을 수립하고 실험과 해석을 통하여 신뢰성을 검증하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) MER-Spring은 20% 이상 압축 시, 시편별 응력값이 표준편차 약 1% 이내로 나타나고 있으므로 재료의 신뢰성이 확인되었다.
2) 마찰재는 응력이 커질수록 마찰계수가 감소하고, 속도가 증가할수록 마찰계수는 일정구간 증가하다가 평행하게 진행되는 것을 알 수 있다. 따라서 마찰계수는 속도에 따른 보정이 필요하며 다양한 매개변수를 적용한 실험이 필요한 것으로 보인다.
3) 시편의 반복하중 재하에 대한 실험결과는 수계산으로 판단한 이력곡선과 약 8% 이내의 오차를 갖는 것으로 나타났으므로 기대성능을 만족한 것으로 판단된다. 따라서 시편의 품질에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

이 연구에서의 해석 및 실험은 정적하중에 의한 내용이므로 추후 동적하중에 대한 해석적 및 실험적 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 원자력융합원천기술개발사업의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 20131520400080).

References

Bakre, S. V., Jangid, R. S., and Reddy, G. R. (2004), Seismic Response of Piping Systems with Isolation Devices, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, BC, Canada, 2676-2688.

Brown, D. P., Palmer, G. R., Werry, E. V., and Blahnik (1990), Basis for Snubber Aging Research: Nuclear Plant Aging Research Program, US Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-5386, PNL-6911, Washington DC, 119.

Cheung, J. H., Gae, M. S., Seo, Y. D., Choi, H. S., and Kim, M. K. (2013), Seismic Capacity Test of Nuclear Piping System using Multi-Platform Shake Table, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 17(1), 21-31.

Iwatsubo, T., Sasaki, Y., Abe, H., Kuroda, K., Saito, Y., Tai, K., and Sumiya, H. (1999), NUPEC Project: Seismic Proving Test of Heavy Component with Energy Absorbing Supports, 7th International Conference on Nuclear Engineering, JSME, Tokyo, Japan, 4252-4259.

Jinsuo, N., Richard, J. M., Charles, H. H., and Syed, A. A. (2010), Assessing Equivalent Viscous Damping Using Piping System Test Results, ASME Proceedings of Pressure Vessel & Piping 2010 Conference, 9.

Nila, I., Ilinoiu, V., Ababei, D., Dobrescu, B., and Bogateanu, R. (2009), Low Frequency Damper, INCAS-Bulletin No. 1, 5.

Sinha, R. (1996), Effectiveness of Seismic Support in Piping, 11th World Conference on Earthquake Engineering, 1782-1788.

Yamazaki, E., and Kojima, N. (2007), Investigation on Ultimate Strength Evaluation of Snubber in Piping System of Japanese NPP. International Association for Structural Mechanics in Reactor Technology, SMiRT 19, Toronto, 8.

Received : 09/12/2016
Revised : 09/26/2016
Accepted : 09/28/2016

요 지 : 이 논문에서는 원자력발전소나 각종 플랜트 시설물에서 배관을 보호하기 위하여 마찰방식을 이용한 댐퍼를 개발하여 성능을 분석하는 연구를 수행하였다. 마찰방식댐퍼는 MER-Spring에 압축력을 가하여 베어링과 샤프트에 마찰력을 발생시켜 진동을 감쇠시키는 장치이다. 댐퍼의 성능을 분석하기 위하여 MER-Spring과 마찰재의 재료특성을 분석하고, 마찰의 영향에 대한 연구를 수행하였으며, 이에 대한 거동방정식을 수립하였다. 또한 재료의 변형 여부를 판단 및 수립된 거동방정식의 신뢰성 검토를 위하여 시작품을 제작하였고 시편으로 제작된 댐퍼의 성능 시험과 유한요소 해석을 통하여 이를 분석하였다. 그 결과, 재료의 신뢰성이 확인되었고 마찰계수는 속도에 따른 보정이 필요하며, 반복재하 실험 및 유한요소해석 결과 우수한 결과를 나타냄을 확인하였다. 또한, 추후에 동적하중에 대한 검토가 수행되어 이 연구의 성과가 더 넓은 범위에 적용되었으면 한다.

핵심용어 : 댐퍼, MER-Spring, 마찰계수, 유한요소해석