



## 웬지를 이용한 3축 방향 디스크 스프링 댐퍼에 관한 연구

정지원\* · \*최명진

\*경희대학교 대학원 기계공학과, \*경희 대학교 공과대학 기계공학과  
(2009년 11월 12일 접수, 2009년 12월 16일 수정, 2009년 12월 16일 게재)

## A Three Axis Disk Spring Damper Containing Wedge System

Ji Won Jeong\* · \*Myung Jin Choi

*\*Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Kyung Hee University  
\*Dept. of Mechanical Engineering, College of Engineering, Kyung Hee University  
(Received 12. November. 2009, Revised 16. December. 2009, Accepted 16. December. 2009)*

### 요약

본 연구는 웬지 시스템을 이용하여 3축 방향의 진동 및 충격을 완화시킬 수 있는 감쇠기에 관한 것이다. 기존의 수직방향 진동/충격에 대해서만 흡진하는 디스크 스프링 완충기를 개선하여 웬지를 추가함으로써 종 방향은 물론 횡 방향을 모두 포함한 3축에 대해 흡진이 가능한 댐퍼를 제안하였다. 수학적 모델을 수립하여, 댐퍼내의 중요한 요소로 작동하는 디스크 스프링과 웬지의 특성을 고찰하였으며, 실험을 통해 댐퍼의 거동을 고찰하였다. 수치 해석 결과와 실험 결과가 잘 일치함을 알 수 있었고, 소산된 에너지를 구한 후, 수직 · 수평방향에 대한 등가 점성 감쇠를 구하였다.

**Abstract** - This study pertains to damping device to reduce vibrational responses and shocks in multi-directions. To enhance the capability of disk spring damper which works for vertical vibration and shock, a multi-directional damper is proposed, which contains wedge system as well as disk spring stack. Wedge system converts horizontal load into vertical load. A mathematical model is proposed and investigated for the nonlinear behaviors of the disc spring damper containing wedge system. The results accord with the experimental results. Equivalent viscous damping in vertical and horizontal directions are found based upon energy dissipated.

**Key words** : disk spring, nonlinear spring, wedge, spring damper, horizontal damper hysteresis, three axis damper

### 1. 서론

진동은 정밀한 기계요소 및 전자 부품에서 오작동의 원인이 되고, 이에 수반되는 소음은 인체에 불쾌감을 조성하고, 기계의 내구성에 문제를 야기할 수 있다. 또한, 건물이나 교각 등 구조물의 건전성에도 악영향을 미칠 수 있다. 특히, 화학 플랜트, 원자력 발전소, 가스 저장 및 이송 설비와 같은 시설은 지진에는 물론 진동이나 충격에도 구조적 건전성을 잃지 않도록

안전하게 설계되어야 한다.

구조물의 진동 에너지를 동조질량의 운동에너지로 소산시킴으로써 구조물의 진동을 줄여주는 감쇠 장치에 관련한 특허[1]에 의하여 초기개념이 정립된 이후, 많은 연구가 진행되어 왔다. 비선형 스프링을 이용한 동 흡진기에 대한 연구[2]를 통하여 비선형 흡진기는 선형 스프링을 사용한 경우보다 응답 저감 주파수 대역이 넓으며 구조물 진동 제어에 유용하다는 결과를 얻었다. 이 외에도 기계 구조물의 진동 감쇠 또는 완충에 관한 연구[3-5]가 수행되었으나, 디스크 스프링을 이용한 완충 장치는 찾아보기 힘들다. 대부분의 디스크 스프링을 이용한 완충 장치들은 수직방향

\*주저자:mjchoi@khu.ac.kr

즉, 종 방향에 대한 완충 및 흡진에 관한 것이다[6,7]. 따라서 종 방향을 포함하여 횡 방향에 대하여 모두 완충이 가능한 디스크 스프링 감쇠기에 대한 연구의 필요성이 대두되었다.

본 연구에서는 3축 방향에 대한 진동 저감 및 완충을 위해 췌시 시스템을 고려하였고, 이를 비선형 특성을 갖는 디스크 스프링과 결합하여 종 방향 및 횡 방향의 감쇠기를 설계한 후, 이에 대한 연구를 수행하였다.

## II. 디스크 스프링 댐퍼의 췌시 효과

### 2. 1 디스크 스프링의 하중 변위 특성

Fig. 1은 디스크 스프링의 단면을 나타낸다. 디스크 스프링의 하중곡선은 비선형적이며, 기울기가 감소 (degressive)하게 된다. 디스크 스프링의 하중 및 변위 계산은 디스크 스프링의 내외경 비율( $R = D_e/D_i$ )을 기반으로 한  $K_1$ 이라는 상수를 이용하여 구한다[6,7].

$$K_1 = \frac{1}{\pi} \frac{\left(\frac{R-1}{R}\right)^2}{\frac{R+1}{R-1} - \frac{2}{\ln R}} \quad (1)$$

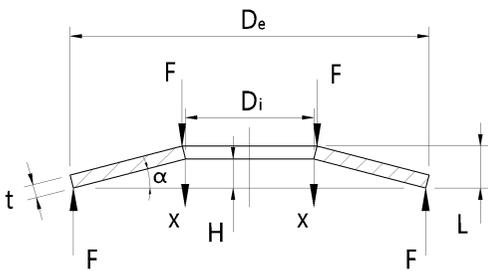


Fig. 1. Disk spring cross section.

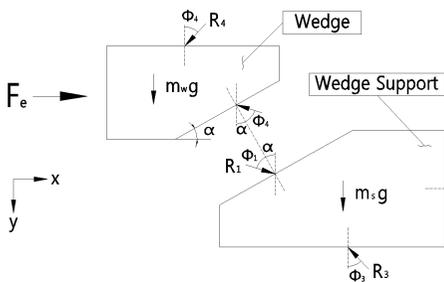


Fig. 2. Free Body Diagram of wedge system at loading stage.

또한 하중-변위 계산식은 다음과 같다[6,7].

$$F = \frac{4E}{1-\mu^2} \frac{x t^3}{K_1 D_e^2} \left[ 1 + \left( \frac{H}{t} - \frac{x}{t} \right) \left( \frac{H}{T} - \frac{x}{2t} \right) \right] \quad (2)$$

디스크 스프링은 다른 스프링에 비해 다양한 하중 특성을 얻을 수 있는 장점이 있다. 이는 디스크 스프링을 조합(stacking)함으로써 얻을 수 있는데 디스크 스프링을 직렬(series)과 병렬(parallel), 혹은 직렬과 병렬을 동시에 병합해서 쓸아 필요로 하는 하중 특성을 얻을 수 있다.

### 2. 2 췌시 효과

본 연구에서 적용될 췌시 시스템의 자유 물체도를 Fig. 2와 Fig. 3에서 나타내었다.

Fig. 2와 Fig. 3의 자유 물체도에 근거하여 각 스테이지별로 다음과 같은 연립방정식을 세울 수 있다. loading시 식 (3)이 적용되고, unloading시 식 (4)가 적용된다. 췌시의 상당 부분이 수직방향으로 구속되었다고 가정했을 때 이식들을 이용하여 횡 방향의 외부 힘  $F_e$ 에 대한 수직방향의 반력  $R_3$ 를 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \sin(\Phi_1 - \alpha) & 0 & 1 & \sin\Phi_4 \\ \cos(\Phi_1 - \alpha) & 0 & 0 & -\cos\Phi_4 \\ \sin(\Phi_1 - \alpha) \cos\Phi_2 & 0 & 0 & 0 \\ \cos(\Phi_1 - \alpha) \sin\Phi_2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ F_e \\ R_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ m_w g \\ \sin\Phi_3 R_3 \\ -m_s g + \cos\Phi_3 R_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ F_e \\ R_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\Phi_1 - \alpha) & 0 & 1 & \sin\Phi_4 \\ \cos(\Phi_1 - \alpha) & 0 & 0 & -\cos\Phi_4 \\ \sin(\Phi_1 - \alpha) \cos\Phi_2 & 0 & 0 & 0 \\ \cos(\Phi_1 - \alpha) \sin\Phi_2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ m_w g \\ \sin\Phi_3 R_3 \\ -m_s g + \cos\Phi_3 R_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

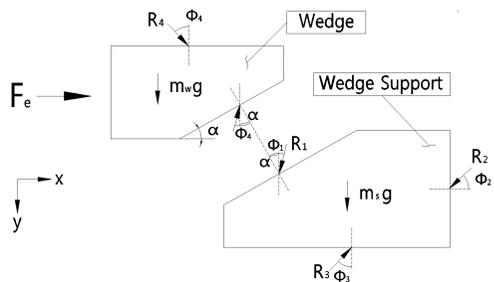


Fig. 3. Free Body Diagram of wedge system at unloading stage.

디스크 스프링 댐퍼가 적용된 1 자유도 진동 모델에 관하여 운동 방정식을 구하면 다음과 같은 비선형 진동 방정식을 얻는다.

$$m\ddot{z} + c_{eq}\dot{z} + F_c \left[ \left( \frac{H}{t^2} + \frac{1}{H} - \frac{3(\delta_s)^2}{t^2} + 3(\delta_s)^2 \right) z - \left( \frac{3}{2t^2} - 3\delta_s \right) z^2 + \left( \frac{1}{2Ht^2} \right) z^3 \right] = m\ddot{y} \quad (5)$$

수평방향 하중을 받는 경우는 식 (3)과 식 (4)를 이용해 수평방향 하중의 입력에 대해 웨지에 의해 감쇠된 수직방향 하중의 출력값을 적용시킬 수 있다.

### 2.3 웨지 효과 실험

앞에서 언급한 댐퍼에 적용될 웨지 시스템의 수학적 모델을 댐퍼의 수평방향 하중에 대한 모델링에 적용함에 있어 타당하지 실험을 통해 비교해 보았다.

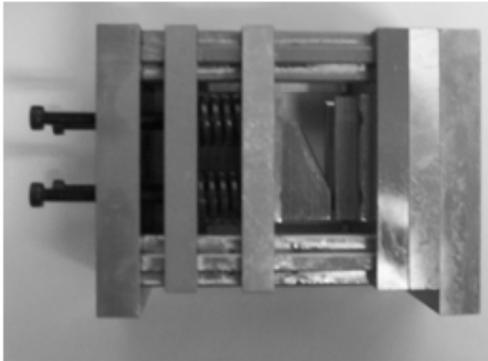
웨지 효과 실험을 위한 시스템은 총 4개의 코일스

프링과 웨지 서포트를 그림 Fig. 4의 (a)와 같이 구성하고 Fig. 4의 (b)에 나타난 웨지들로 실험하였다. 웨지와 웨지 서포트들의 각도는 각각 10°, 15°, 30°이다.

웨지 서포트에 작용하는 힘을 코일스프링의 압축력으로 정하고, 웨지와 웨지 서포트를 같은 각도끼리 장착하여 웨지를 눌러 변위에 따른 힘을 측정하였다.

본 실험에 적용된 코일스프링을 하중 테스트를 이용하여 스프링 계수를 측정된 결과는 Table 1과 같다.

실험에서 측정된 결과와 이론을 통해 계산된 결과를 비교하기 위해 Fig. 5부터 Fig. 7과 같이 웨지의 각도에 따라 그래프로 나타내었으며, 측정된 결과가 계산된 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 수치 계산 시에 마찰계수는 금속간의 마찰로 0.18로 계산하였으며, 각 각도별로 실험값과 거의 흡사한 결과를 볼 수 있다. 또한 웨지의 각도가 10°, 15°일 때 자립 구속 상태 (self-locking)가 되어 하중이 제거되었음에도 불구하고 웨지가 원래 상태로 돌아오지 못하고 맞물린 상태를 유지하여 unloading시 변위-하중 그래프가 변위에 관계없이 하중이 0으로 나타나는 것을 볼 수 있다. 자립 구속상태란 loading에서 unloading상태로 전환되는 시점에서 웨지가 반력  $R_0$ 에 의해 원래 위치로 돌아가지 못하고 고정되는 상태를 의미한다. 이 같은 현상은



(a) Wedge test device



(b) Wedge

Fig. 4. Experiment device.

Table 1. Stiffness coefficients of coil spring.

	Coil spring 1ea	Coil spring 4ea
Stiffness coefficient ( kgf/mm)	17.2	68.8

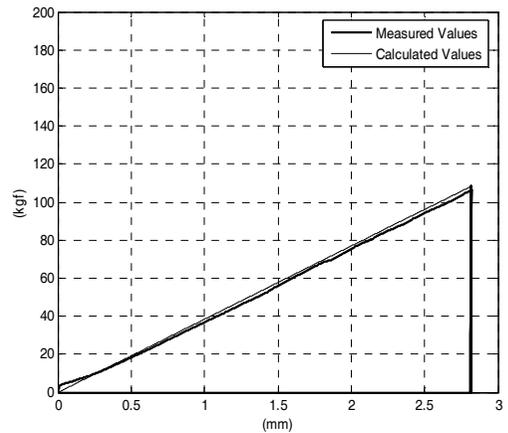


Fig. 5. Test result of wedge 10°.

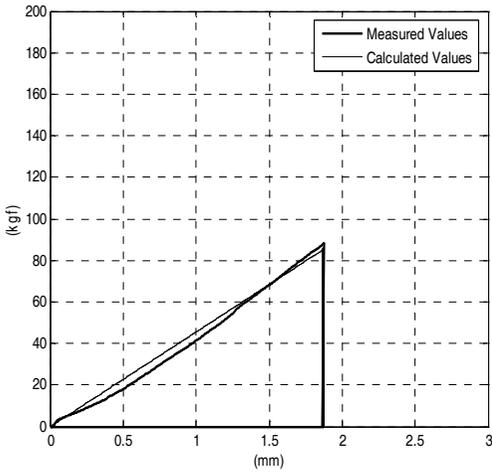


Fig. 6. Test result of wedge 15°.

웨지의 경사면에 가해지는 마찰력과 반력  $R_1$ 의  $x$  방향 힘의 합력이 0보다 크거나 같을 때 발생한다.

### III. 댐퍼의 하중-변위 실험

#### 3. 1 실험 장치 구성

실험 장치는 하중측정기(load tester), 인디게이터 박스(indicator), 컴퓨터 기반 데이터 수집 하드웨어(DAQ), 노트북(laptop)으로 구성하였으며, 하중측정기를 통해 실험을 한 후 최종적으로 노트북에서 Labview프로그램을 통하여 데이터를 얻을 수 있다. 댐퍼에 큰 하중을 가하기 위해 제작된 하중측정기는 출력을 얻기 위해 최대출력이 2200W, 회전수는 1750 RPM, 출력토크는 3HP인 단상모터를 장착했다. 또한 인디게이터 박스에서 모터의 출력 RPM을 조절할 수 있도록 하였다. 그리고 모터의 출력토크를 높이기 위해 두 개의 감속기(감속비 15:1 1EA, 10:1 1EA)를 장착했다. 따라서 감속기들을 거쳐 증가된 토크는 출력샤프트를 통해 전달되고 캠이 회전함에 따라 로드셀이 수직방향 운동을 하고 변위 및 하중을 측정할 수 있다. 인디게이터는 하중측정기를 통해 측정된 하중 및 변위에 대한 수치를 보여주며 데이터 수집 하드웨어로 하중은 1~10V, 변위는 1~5V로 출력한다. 따라서 데이터 수집 하드웨어는 전압으로 들어온 출력을 노이즈 제거, 절연 후에 전산데이터로 변환하여 노트북으로 전송하는 역할을 한다. 이 데이터들을 수집하여 시뮬레이션된 Labview 프로그램으로 최종적인 그래프와 데이터를 얻어 분석가능하다. 하중측정기의 측정 가능한 최대하중은 대략 5,000kgf이고 펄스코더

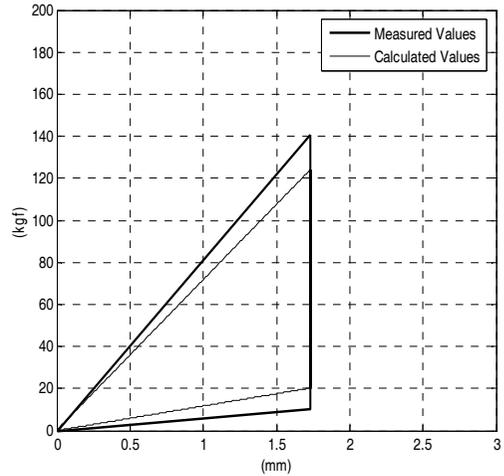


Fig. 7. Test result of wedge 30°.

(Pulse Coder)방식인 비접촉 변위센서를 설치하여 캠의 운동에 따른 최대변위 30mm를 측정할 수 있도록 하였다.

#### 3. 2 댐퍼의 수직방향 하중 실험

스프링 댐퍼의 일반적 특성인 수직방향 하중에 따른 동적거동 실험을 하였다. 수직방향 하중에 대해서는 샤프트가 수직방향으로 직선운동을 하고 댐퍼내 하단 부분에 위치한 직렬 조합된 10개의 디스크스프링들이 하중을 받아내도록 되어있다. 물론 상단부분에 위치한 직렬 조합된 4개의 디스크스프링들은 수직방향하중에 대해서는 관여하지 않는다.

댐퍼에 장착된 디스크스프링들의 피로수명을 높이고 일정한 탄성력을 얻기 위해 하단부의 10개의 디스크스프링들은 스냅링에 의해 15%의 예압이 가해진 상태에서 고정하였다. 예압이 가해진 상태에서 디스크스프링 조합의 최대 허용변위가 38.25mm이고 댐퍼내의 리미터에 의해 35mm까지만 움직일 수 있도록 하였다. 하지만 디스크스프링의 일반적인 최대사용범위는 75%이므로 실험에서는 30mm 변위에 대한 동적 하중을 실험하였다. 또한 댐퍼내에 적당히 그리스를 바르고, 모터를 10RPM으로 고정한 후에 일정하게 동 하중을 가하여 실험하였다. 댐퍼 하단부에 장착된 디스크스프링의 사양은 Table 2에 나타내었고, 실험방법에 관하여 Fig. 8에서 개략적으로 표현하였다.

Fig. 9는 댐퍼의 하단부에 직렬로 적층된 10개의 디스크스프링들의 변위에 대한 하중을 측정된 결과를 이론에 의해 계산된 값과 비교한 그래프이다. 댐퍼는 이미 스냅링에 의해 15%의 프리로드를 받고 있는 상

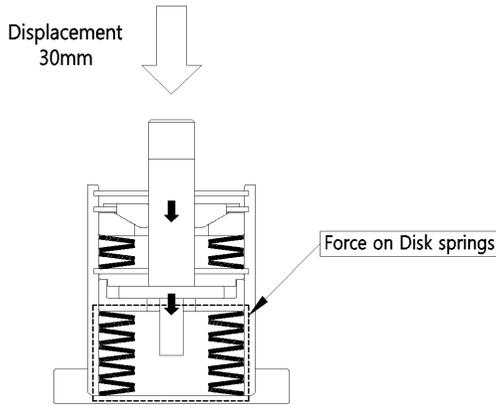


Fig. 8. Procedure of experiment(vertical).

Table 2. Specification of disk spring for vertical direction of damper.

	$D_e$ (mm)	$D_i$ (mm)	$L$ (mm)	$t$ (mm)	$H$ (mm)
Disk spring	125	64	8	3.5	4.5

Table 3. Energy dissipated of damper (vertical).

	Area of hysteresis roof (J)
Vertical load ( disk springs - 10ea)	68.9

Table 4. Equivalent damping coefficient (vertical).

	Equivalent damping coefficient (kg/s)
Vertical load (disk springs - 10ea)	$24368/\omega$

태이기 때문에 대략적으로 7mm의 변위가 가해진 상태로 하중을 받기 시작한다. 따라서 외부 힘에 의해 변위가 생기는 순간 하중이 순간적으로 올라감을 확인할 수 있다. 계산된 값과 실험값을 비교해보면 변위가 생기는 순간부터 대략적으로 10mm 정도 이동하는 동안은 전체적으로 계산 값에 비해 낮은 값으로 측정

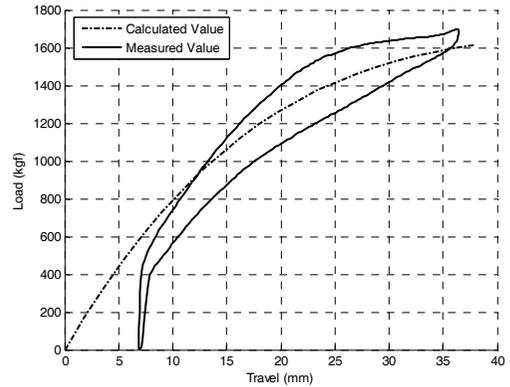


Fig. 9. Load characteristic of Damper(vertical).

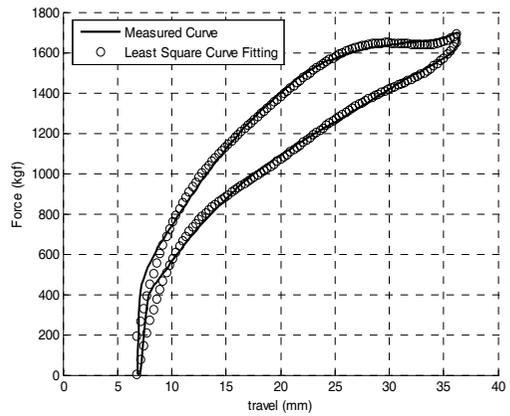


Fig. 10. Curve fitting using least square method(vertical).

되고 그 이후에 하중이 가해지는 동안은 디스크 스프링들 간의 마찰에 의해 계산 값보다 높게 나오고 하중이 제거되는 동안은 계산 값보다 낮게 나오는 것을 알 수 있다. 즉, 디스크 스프링들이 압축될 때 마찰력에 의해 회전중심에 모멘트가 생기고 이 모멘트가 외부 하중이 가해질 때 생기는 모멘트와 반대방향으로 작용하여 하중이 이론에 의해 계산된 값보다 커지고 디스크 스프링들이 이완될 때에는 외부 하중에 의한 모멘트와 마찰력에 의한 모멘트가 같은 방향으로 작용하여 이론값보다 적은 하중이 가해진다. 이와 같은 이력현상(hysteresis)이 발생하는 원인은 디스크 스프링들 간의 마찰 및 디스크 스프링과 가이드 사이의 마찰 때문이다.

Fig. 10에서 댐퍼의 수직방향에 대한 변위-하중 데이터를 최소자승법을 이용하여 5차 다항식을 근사식

으로 가정 한 후, 근사식을 구하고 이동된 변위에 해당 되는 구간을 적분하여 이력현상 시 소산된 에너지의 양을 Table 3에서와 같이 구하였고, 등가 점성 감쇠계수  $c_{eq}$ 를 구한 결과를 Table 4에 나타내었다.  $\omega$ 는 댐퍼에 가해진 가진 주파수이다

### 3. 3 댐퍼의 수평방향 하중 실험

렛지를 이용하여 수평방향 하중을 수직방향 하중으로 전환하여 댐퍼의 상단부에 위치한 직렬조합된 4개의 디스크 스프링들의 하중을 받도록 하는 수평방향 하중에 대한 실험을 하였다. 이 실험에서는 수직방향 하중의 실험과 마찬가지로 디스크 스프링이 하중을 받지만 다른 점은 댐퍼의 샤프트가 수평방향으로 직선운동을 하여 렛지가 움직이고 이에 따라 하중을 수직방향으로 전환하여 상단부의 스프링들이 하중을 받는다. 수직방향 하중과 반대로 수평방향 하중

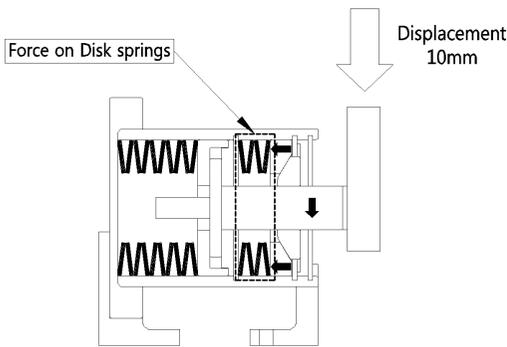


Fig. 11. Procedure of experiment(horizontal).

은 하단부의 10개의 디스크 스프링들에는 하중의 영향이 전혀 없다.

Fig. 11에서와 같이 댐퍼를 높히고 고정한 후에 하중측정기를 이용하여 실험하였다. 수직방향 동하중 측정기와 마찬가지로 상단부의 4개의 디스크 스프링들은 스냅링에 의해 15%의 예압이 가해진 상태이다. 예압이 가해진 상태에서 디스크 스프링 조합의 최대 허용변위가 15.3mm이고 댐퍼내의 리미터에 의해 댐퍼의 중심에서 한쪽 끝까지 10.5mm까지만 움직일 수 있도록 하였다. 하지만 실험에서는 10mm 변위에 대한 동적하중을 실험하였다. 또한 수직방향에 대한 실험과 마찬가지로 댐퍼내에 적당히 그리스를 바르고, 모터를 10RPM으로 고정 후에 일정하게 동하중을 가하여 실험하였다. 댐퍼 상단부의 디스크 스프링은 앞서 언급했던 하단부의 디스크 스프링 사양과 같다.

렛지를 통해 수직방향 하중을 수평방향 하중으로 변환하여 댐퍼의 상단부에 위치한 직렬로 적층된 디스크 스프링 4개에 대한 하중 실험을 하였다. 수평방향 하중은 수직방향 하중과 달리 렛지 효과 및 마찰에 의해 하중이 감소됨을 렛지의 운동방정식 (3)과 식(4)에서 도출할 수 있다.

Fig. 12와 Fig. 13에서 나타난 것과 같이 렛지와 렛

Table 5. Energy dissipated of damper (horizontal).

	Area of hysteresis roof (J)
Vertical load (disk springs - 4ea)	49.1

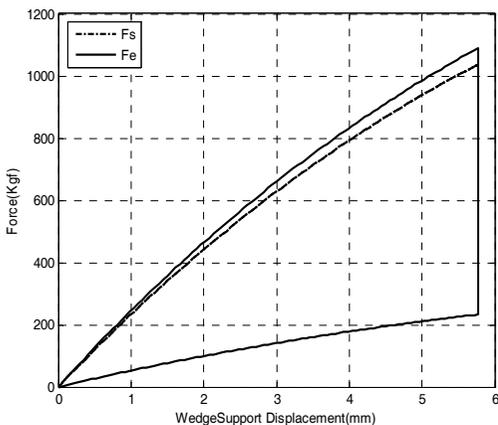


Fig. 12. Load characteristics of wedge support.

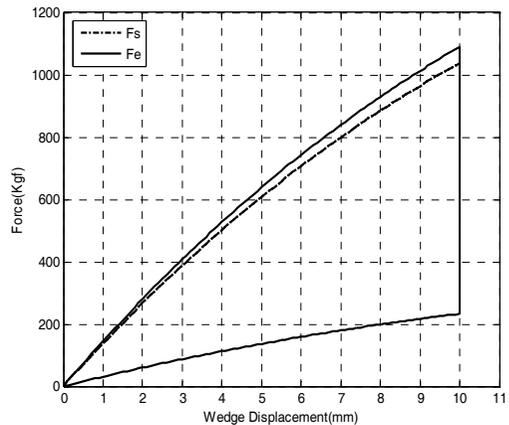


Fig. 13. Load characteristics of wedge.

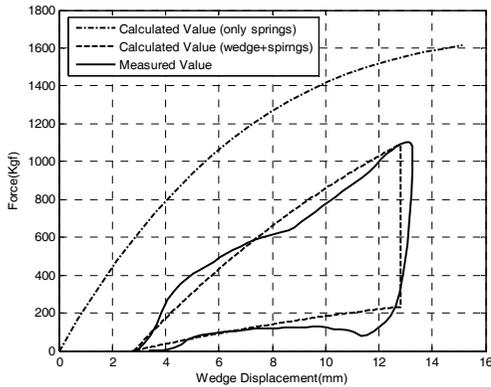


Fig. 14. Load characteristics of Damper (horizontal).

Table 6. Equivalent damping coefficient (horizontal).

	Equivalent damping coefficient (kg/s)
Vertical load (disk springs - 4ea)	$15629/\omega$

지서포트의 변위에 따라 수평방향 하중  $F_e$ 가 웨지를 거쳐 디스크 스프링에 전달되는 하중  $F_s$ 로 변환된다. 따라서 웨지의 변환된 수직방향 하중으로 나타난 결과를 이론에 의해 계산된 결과와 비교하면 Fig. 14와 같이 비슷한 경향이 나타남을 알 수 있다.

수직방향 하중 실험과 마찬가지로 수평방향 하중 실험결과 또한 보간법을 이용하여 Fig. 15와 같이 적합곡선을 찾은 후 5차 다항식을 근사식으로 가정해 이력현상 시 소산된 에너지의 양을 Table 5에서와 같이 구하였다. 또한 Table 6에서 수평방향 하중에 대한 등가 점성 감쇠계수  $c_{eq}$ 를 나타내었다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 웨지를 추가함으로써 종 방향은 물론 횡 방향을 모두 포함한 3축에 대해 흡진이 가능한 댐퍼를 제안하였고, 디스크 스프링과 웨지의 특성을 고찰하였다. 본 연구를 통해 얻어진 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 수평방향 하중을 수직방향 하중으로 변환하기 위해 웨지 시스템을 도입하였다. 웨지 특성 실험을 통

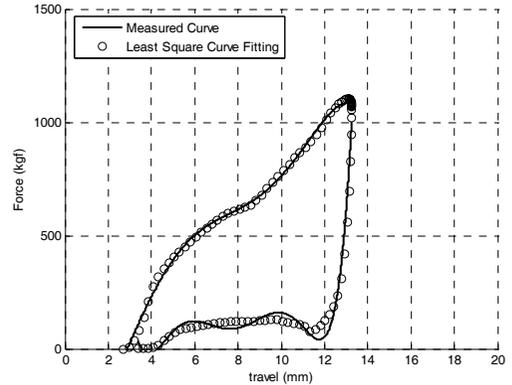


Fig. 15. Curve fitting by using least square method(horizontal).

해 웨지는 웨지 경사각에 따라 마찰력에 대한 영향이 달라지며, 웨지 경사각이 10°, 15°에서 unloading 시 자립 구속 상태(self-locking)가 되어 하중이 제거되었음에도 불구하고 웨지가 원래 상태로 돌아오지 못함을 알 수 있었고, 이에 댐퍼에 적용될 원형 웨지의 경우 웨지 경사각을 30°로 설계하였다.

2. 웨지를 이용한 디스크 스프링 댐퍼에 대해 예압에 의한 정적 처짐 및 디스크 스프링의 비선형 특성을 고려하여 수학적 모델을 제시하고 고찰하였다.

3. 댐퍼의 하중-변위 실험결과를 최소자승법을 이용하여 5차 다항식을 근사식으로 가정 한 후, 이동된 변위에 해당되는 구간을 적분하여 이력현상 시 소산된 에너지를 구하였다. 댐퍼의 감쇠모델을 점성 감쇠로 가정하고 소산된 에너지를 이용하여 수직-수평방향에 대한 등가 점성 감쇠  $C_{eq}$ 를 구하였다.

3축 방향의 진동 및 충격을 완화시키려 할 경우에, 본 연구에서 제안한 바와 같이 웨지를 이용하여 디스크 스프링 댐퍼를 설계할 수 있으며, 본 연구에서 제안한 수학적 모델 및 실험 데이터가 차후 디스크 스프링을 이용한 댐퍼 설계 시 유용하게 적용될 수 있기를 기대한다.

#### 참고문헌

- [1] Frahm, H., "Device for Damped Vibration of Bodies", U.S. Patent No. 989958, Oct.30. (1909).
- [2] Roberson, RE., "Synthesis of a Non-linear Dynamic Vibration Absorber", J. Franklin Inst., 254, pp205-220 (1952).
- [3] G. R. Tomlinson and J. H. Hibbert, "Identification of

- The Dynamic Characteristics of a Structure with Coulomb and Viscous Friction", *Journal of Sound and Vibration* 64, pp233-242 (1979).
- [4] M. S. Hundal, "Response of a Excited System with Coulomb Friction", *Journal of Sound and Vibration* 69, pp213-224 (1979).
- [5] Ko J. B., " The Effect of an Internal Damping on the Stability of Machine Tools Subjected to Dry Friction Forces", *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol.13, No.2, pp. 112-119, (2004).
- [6] 고석훈, 최명진, "디스크 스프링의 적층 배열에 따른 완충장치의 감쇠에 관한 연구", *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 12, No. 4, 46-51, (2008).
- [7] 정지원, 3축 방향의 충격 및 진동 절연을 위한 스프링 댐퍼에 관한 연구, *경희대학교 공학석사 학위논문*, (2009).