수치 모델링과 충격 시험을 통한 수직방향 진동절연 완충기의 성능 평가

Performance Evaluation of the Vibration Absorber of Vertical Direction using Numerical Modeling and Shock Test

박상길*·방승우**·권오철*·이정윤***·오재응†

Sang-Gil Park, Seung-Woo Bang, O Cheol Kwon, Jung-Youn Lee and Jae-Eung Oh

Key Words : Disk Spring (접시 스프링), MIL-S-901D/810F(미국군사규격), Runge-Kutta Method(룬지-쿠타), Double-Half Sine

ABSTRACT

Vibration/shock affects biggest taking a train subtraction of vehicle and durability decline. Therefore, absorber is used for vibration/shock isolation and various qualities of the material and design are applied to isolation. This paper proposes vibration/shock absorber that applies 'Disc'spring. Through comparison with 'Disc' spring that has nonlinearity and coil spring that is having linearity, see effect that nonlinearity of isolation gets in vibration/shock isolation. Coil spring and 'Disc' spring are non-linear numerical analysis and simulation through theory for this, get and investigate comparison result through an experiment finally. Expressed and formulated shock through 'Runge-Kutta' method/impact response to nonlinear-vibration-equation of 1 degree of freedom for numerical analysis. Double half sine pulse of excitation used and analyzed result through spectrum response analysis here. Response of disc spring is compared to response of coil spring by changing *ho/t* ratio with computer simulation and the usage of disc spring is increased through analysis of effect of design factors. The purpose of this paper is that the shock response of disc spring is calculated through numerical simulation and to design the optimal absorber under the limited condition. And then, the isolation effect was analyzed through the shock test.

1. 서 론

기계 시스템의 진동/충격 절연은 절연 대상과 목적에 의해 여러 가지 방법이 있다. 즉, 절연 대상의 하중에 따라 요구되는 강성과 감쇠가 틀리며 기계 시스템이 지상에 위치되어 있는가, 동적인 상태를 유지하는가 등의 목적에 의해 요구되는 절연 방식이 틀려지게 된다. 목적이 정해지면 그에 따른 설계 공간, 즉 절연이 되는 공간에 대한 허용치와 응답 허용치에 맞게 설계를 수행한다. 일반적으로 절연을 위해 사용되는 코일 스프링-댐퍼의 경우 수치적으로 선형적인 계산이 가능하여 널리 쓰여지고 있다. 하지만, 현재 다양한 절연 방법과 재료가 생겨나면서 절연 효과가 커지고 있고, 그 만큼 비선형화되어 수치적인 해석이 어려워지고 있다.

스프링에 대한 시편 시험의 경우 많은 회사들이 충격 시험 조건인 MIL-STD 를 기준으로 하고 있으며, MIL-STD 규격은 미국군사규격으로 충격에 의한 시험이며 대상의 하중과 사용 목적에 따라 시험을 선택하고 시험결과에 대한 성능을 평가 받는다.

본 연구에서는 기계 시스템의 진동/충격 절연 설계를 목적으로 한정된 하중과 설계 공간의 제약 조건에 따라, 장시간 충격에 대한 절연이 이루어져야 하기 때문에 접시 스프링을 이용한 절연 설계를 하였다. 접시 스프링은 코일 스프링과는 달리 2, 3 차 강성이 포함되는 비선형 특성이 있다. 따라서 비선형 수치해석이 가능하도록 프로그램을 개발하여 절연 설계를 하였다. 접시 스프링의 경우 적층 방식에 따른 힘-처짐 특성이 달리 나타나므로 그에 따른 설계 인자가 포함되도록 선행 연구[1]를 통해 수치해석을 수행하였다. 수치해석을 위해 사용된 입력은 BV-043 에 의거한 Double-Half Sine 파를 사용했으며[2] 응답 허용치의 경우 변위는 특정 수준으로 정하였다. 응답인 충격 가속도는 MIL-S-810F 수준에 맞도록 설계하였다.[3] 비선형 수치 해석을 통한 기계 시스템 설계에 알맞은 완충기를 설계하여 제작하고, 중간중량시험기를 이용한 충격 시험을 통하여 수치해석과 비교 및 검증하였다. 그리고 충격 시험을 통하여 완충기에 의한 기계 시스템의 진동/충격 절연 효과를 분석하였다.

† 오재응; 한양대학교 기계공학부
E-mail : jeoh@hanyang.ac.kr
Tel : (02) 2294-8294, Fax : (02) 2299-3153
* 한양대학교 대학원 기계공학과
** ㈜Jatco Korea
*** 경기대학교 기계시스템· 디자인공학부

2. 이 론

2.1 접시 스프링 설계

접시 스프링 설계는 바닥 가진에 의한 1 자유도 진동 방정식을 기초 이론으로 한다. 하지만 접시 스프링은 비선형성을 지니게 되므로[4] Fig.1 에서 보는 바와 같이 정적 처짐 또한 비선형성을 나타나게 된다. 따라서 정적 처짐을 고려한 1 자유도 진동 방정식은 식(1)과 같이 정형화 할 수 있으며, 이때 δ_s 는 정적 처짐이다.

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + \left[F_C \cdot \left(\frac{h_0}{t^2} + \frac{1}{h_0} - \frac{1.5}{t^2} \times 2\delta_s + 3{\delta_s}^2 \right) \cdot z - \left(\frac{1.5}{t^2} - 3\delta_s \right) \cdot z^2 + \left(\frac{1}{2h_0 t^2} \right) \cdot z^3 \right] = m\ddot{y} \quad (1)$$

완성된 식(1)에 대해 Runge-Kutta method 를 이용하여 수치적 시뮬레이션을 수행한다. 설계 한도에 따라 적용된 접시 스프링의 제원을 Fig.2 와 Table 1 에 나타내었으며, 시뮬레이션에 적용한 외부 입력은 NATO 충격 조건인 BV043 을 기준으로 하였다. 설계 한도에 따른 접시 스프링의 적층 개수 및 방식 선정은 다음 절에서 설명하도록 한다.

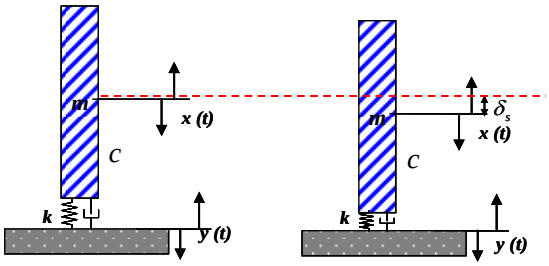


Fig. 1 Free body diagram of consideration of static deflection

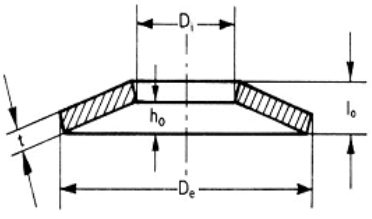


Fig. 2 Conventional shape of a Disc spring

Table 1 Specification of Disc spring

Spec.	*ho* (mm)	*Fc* (N)	*t* (mm)	*Di* (mm)	*De* (mm)	*E* (PSI)	μ
value	1.75	8904	2.50	31	63	30×10^6	0.30

2.2 접시 스프링의 적층 방법 정의

(1) 설계 허용 한도

본 연구에서는 기계 시스템의 수직 방향에 대한 진동/충격 절연 설계를 목적으로 한정된 하중과 설계 공간의 제약에 따라 접시 스프링의 설계가 이루어져야 한다. 완충기 단품에 대한 설계 조건은 높이 500mm, 폭 70mm 하우징 내에 접시 스프링이 설계되어야 하며, 기계 시스템의 진동/충격 절연을 위해는 660kg 의 하중 조건과 상대변위 37mm 이하, 가속도 20 g ($196\,m/s^2$) 이하의 응답 특성을 만족하여야 한다.

(2) 완충기 설계 방안

허용 조건에 맞게 접시 스프링을 설계하기 위해서는 실제 완충기를 제작하기 전에 수치적 해석을 통한 모델링으로 접시 스프링의 적층 가능 개수를 결정해야 한다.

설계 가능 공간 중 폭에 의해 접시 스프링의 외경이 결정되었고, 높이 500mm 에 의해 직렬 적층 개수를 결정 할 수 있다. 단, 접시 스프링의 경우 압축만이 가능하게 되므로 상방향과 하방향으로 압축이 모두 가능하도록 설계해야 한다. 따라서 설계 공간을 1/2 등분(250mm)하고 한 방향의 압축만을 고려하여 적층 개수를 결정한다.

직렬 적층은 접시 스프링 단품에 대한 특성 분석으로 적층 개수에 대한 처짐량만 틀려지게 된다. 따라서 Fig. 2 의 접시 스프링 설계 인자 중 변위 특성을 나타내는 중요 설계 인자로 두께(t)와 병렬 적층 개수 및 처짐 높이(h_0)를 고려할 수 있겠다. 그 중 접시 스프링에 대한 두께와 처짐 높이는 Table 1 과 같이 정해져 있는 고정 인자들이다. 그러므로 목적하는 응답 특성을 얻기 위한 설계 방법으로 적층 방식의 변경 즉, 병렬 적층 개수도 변경해야 한다.

3. 수치적 시뮬레이션

접시 스프링의 병렬 적층 가능 개수와 직렬 적층 가능 개수에 대한 시뮬레이션을 수행하여 상대변위와 충격 가속도가 출력값으로 계산되는데, 이 결과를 통해 다음과 같은 순서로 접시 스프링의 적층 개수를 수정할 수 있다.

① 병렬 적층 개수 선정
② 직렬/병렬 적층 가능 개수
≤ 설계 허용 공간 ÷ (h_0 + (t × 병렬 적층 개수)
③ 직렬/병렬 적층 가능 개수를 적용한 시뮬레이션
④ 최소 직렬/병렬 적층 개수

≥ 시뮬레이션 최대 변위 ÷ h_0

⑤ 최소 직렬/병렬 적층 개수를 적용한 시뮬레이션

⑥ 최소 설계 가능 변위 =최소 직렬 적층 개수× h_0

≥ 시뮬레이션 최대 변위 검증

3.1 적층 가능 개수 결정

(1) 직렬 적층 가능 개수 결정

병렬 적층 개수가 1 개라고 가정하면, 1/2 등분된 설계 허용 공간 250mm 에 만족하는 직렬 적층 가능 개수는 58 개가 된다. 이에 대해 수치적 시뮬레이션을 수행하면 상대 변위는 44.3mm, 충격 가속도는 6.2 m/s^2 으로 가속도는 응답 특성에 만족하지만 변위는 그렇지 않다. 따라서 충격 가속도를 높이고 변위를 감소시키는 설계 변경이 필요하다. 시뮬레이션 최대 변위 44.3mm 에 처짐 높이 1.75mm 를 나누면 최소 직렬 적층 개수는 25.3 개 즉, 25 개의 최소 적층 개수가 결정 되었다.

(2) 병렬 적층 가능 개수 결정

허용 공간에 만족하도록 최소 직렬 적층 개수가 결정됨에 따라 접시 스프링의 설계 인자 중 병렬 적층 개수를 변경하여 응답 특성을 시뮬레이션 하였다. 병렬 적층 개수는 허용 공간의 제약으로 3 개까지 수치적 시뮬레이션을 수행하였고, Table 2 에 응답 특성을 정리하였다.

Table 2 The response characteristics of disk springs according to parallel lamination

The number of parallel lamination	1	2	3
상대변위(mm)	44.3	42.6	41.6
충격 가속도(m/s^2)	13.5	23.7	38.0

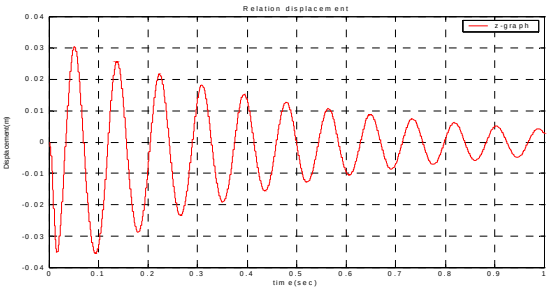
3.2 병렬 연결 가능 개수 결정

직렬 적층 25 개, 병렬 적층 3 개를 완충기 단품으로 정의하고 여러 단품을 병렬 연결한 완충기를 이용하여 수치적 시뮬레이션을 수행하였다. Table 3 은 3 개, 4 개의 병렬 연결 완충기에 대한 응답 특성을 나타낸다.

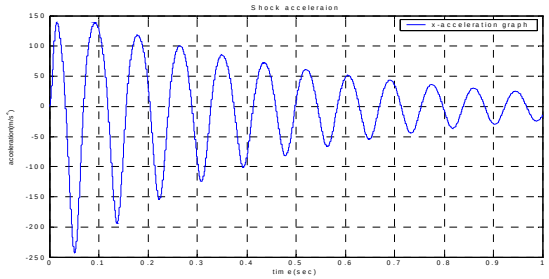
3 개 병렬 연결의 경우 변위와 가속도 모두 만족하는 응답 특성을 나타내었지만, 4 개 병렬의 경우 변위는 만족하나 가속도의 경우 242.8 m/s^2 으로 만족하지 못한다. 그렇지만, 완충기의 충격 실험은 설계 입력 충격 하중에 제시한 것보다 크고 충격 시험의 안전성을 고려하여 4 개 병렬 연결로 제작하여 수행하였다. Fig.3 은 4 개 병렬 연결 시 변위와 가속도의 시뮬레이션 결과를 그래프로 나타낸 것이다.

Table 3 The response characteristics of disk springs according to parallel connection

The number of parallel connection	3	4
상대변위(mm)	36.9	35.2
충격 가속도(m/s^2)	177.0	242.8



(a) Relation-displacement



(b) Shock-acceleration

Fig. 3 The simulation graph of four parallel connections

4. 충격 시험

Fig. 4 는 완충기와 기계 시스템과 같은 하중 및 anvil 을 체결하여 제작한 Jig 의 형태이다. Jig 의 두께는 30mm 이며 상부 Jig 는 74kg 으로 완충기 위에 올려지는 하중을 고려하여 제작하였다.

Fig. 4 The experimental set up to measure the shock-isolation using disc springs

Table 4 The height of hammer drop

Total weight on anvil table (pounds)	Height(feet)
Under – 1,000	0.75
1,000 – 2,000	1.0
⋮	⋮
6,800 – 7,400	4.5

시험 대상의 총 무게는 660kg(하중+Jig)와 75kg(anvil 연결 구조물)을 더하면 735kg 으로 약 1617 lb 가 되며 Table 4 에 의하면 두 번째 시험에 해당된다. 이때 anvil table 의 간격은 3inch 이지만, 본 시험의 목적은 성능평가가 아닌, 데이터 취득에 의한 수치 모델링의 비교 및 검증에 있으므로 이를 위해 해머의 높이를 0.5ft ~ 2.25ft 까지 시험하였다.

5. 결과 및 고찰

하중과 anvil 의 계측 충격 가속도 값에 대한 절연률을 Fig. 5 에 나타내었다. Fig. 5 을 보면 입력값은 증가하는 경향을 보이나 출력값은 약 36 m/s^2 에서 더 이상 증가하지 않는다. 이는 anvil table 의 간격이 3inch 이므로 바닥의 충격 가속도가 충분히 전달되기 전에 충격 시험기의 중간 stopper 에 의해 멈추는 현상이 발생되기 때문으로 판단된다. 또한 1ft 이상의 해머 낙하 높이에서는 충격 후 수직 방향과 더불어 수평 방향의 움직임도 포착되어 정확한 가속도 측정이 불가능 하였다. 따라서 1ft 높이까지 결과를 수치 시뮬레이션에 적용 가능한 데이터로 선정하여 시뮬레이션을 수행하여 그 결과를 Table 5 에 비교하였다. 여기서 알 수 있듯이 시험 결과보다 시뮬레이션 결과가 더 크게 나타났다.

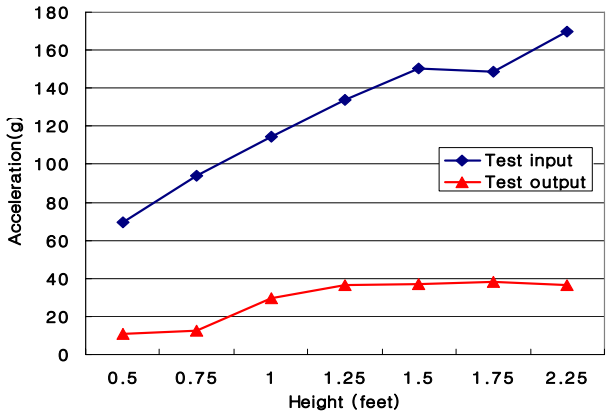


Fig. 5 Maximum acceleration of the test result

Table 5 The height of hammer drop

Hammer drop Height	Test output (g)	Simulation output (g)	Error (%)
0.5 ft	11.0	13.3	21
0.75 ft	12.4	34.0	174
1 ft	29.9	75.2	251

6. 결 론

본 연구에서는 기계 시스템에 대한 진동/충격 절연을 위해 접시 스프링을 사용하여 완충기를 설계하였다. 이에 따른 다양한 적층 개수 및 적층 방식을 통하여 시뮬레이션을 수행하고 완충기를 제작한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 접시 스프링 식이 적용된 1 자유도 바닥 가진 진동 방정식을 정형화 하였으며 이에 대한 수치 프로그래밍을 개발하여 본 연구에 적용하였다.

(2) 수치적 시뮬레이션을 통해 설계 허용 공간에 알맞은 접시 스프링의 개수 및 적층 방식을 도출하였다. 직렬 적층 개수가 증가할수록 변위는 증가하게 되고, 병렬 적층 개수는 증가할수록 변위는 감소하게 된다.

(3) 충격 시험 수행 결과 0.5ft 에서가 오차가 -21%으로 가장 작았다.

결국 수치적인 결과와는 상이하지만 시뮬레이션보다 안정적인 결과가 나왔으며, 결과적으로 0.5ft 에 맞게 설계된 완충기가 2.25ft 까지의 높이까지 파손 없이 시험을 마친 것에 주목할 필요가 있다.

참 고 문 헌

(1) Bang, S. W., Lee, H. J., Sim, H. J., Park, S. G., Lee, J. Y. and Oh, J. E., 2008, “Non-linearity characteristics consideration of the Disc Spring under Shock using Numerical Analysis”, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol.18, No.2, pp.153~159.

(2) BV043, 1973, “Shock Resistance Experimental and Mathematical Proof”

(3) MIL-S-901D(NAVY), 1989, “Shock Tests, H.I.(High Impact) Shipboard Machinery, Equipment and Systems, Requirements for”.

(4) Monica Carfagni, 2002, “A CAD program for the Automated Checkout and Design of Belleville Spring”, ASME, Vol.124, pp.393~369.