

방진고무를 이용한 충격 마운트 설계

The Design of Shock Mounts Using Rubber Materials for Vibration-Isolation

* 유환화* 권형오* 이상엽* 이규섭*
 (Chun-hwa Ryu, Hyeong-oh Kwon, Sang-yub Lee, Gyu-seop Lee)

1. 서론

충격에 민감한 용기나 기계들은 운반이나 보관중에 받을 수 있는 진동충격을 완화시키기 위해 충격 마운트를 이용하게 되며, 충격마운트는 용기나 기계들이 허용하는 최대가속도와 이들이 취급되는 환경에 의해 적절히 선정 되어야 한다. 그러므로 내충격 설계는 최대 허용 가속도나 취급환경에 대한 사양과 이 사양에 의한 충격 마운트의 선정, 그리고 선정된 내충격 시스템의 충격시험에 의한 검증의 과정을 거치는 것이 일반적이다. 충격마운트는 상당량의 감쇠를 요구하기 때문에 스프링과 오일 덤퍼의 결합용이 사용되기도 하지만 구조가 복잡하고 가격이 비싸서 대용량의 경우에만 극한되어 사용되고 있으며, 가장 경제적인 것은 방진고무를 사용한 것이다.

내충격 시스템은 일반적으로 큰 변형률을 요구하고 있으며, 방진고무의 경우 큰 변형에서는 hardening 스프링의 비선형성을 가지고, 형상계수와 고무비탈율에 따라 정적 스프링상수와 동적 스프링상수가 큰 차이를 보이는 등, 설계상의 여러 제한이 있다. 그러나 방진고무는 형상변화가 자유로우며 제작이 용이하기 때문에 이러한 장점을 이용하면 저렴하고 다양한 용도의 충격마운트 제작에 효과적으로 사용될 수 있다.

본 논문에서는 원통형 콘테이너의 내충격 설계를 위해 충격사양에 의한 충격마운트의 설계, 설계된 내충격 시스템의 충격시험에 의한 검증을 순차적으로 실시하여, 방진고무를 이용한 충격마운트 설계기술을 제시함으로써, 이후 방진고무제품의 설계를 위한 자료 및 과정의 제정에 도움을 주고자 한다.

2. 콘테이너 내충격 시스템의 해석

콘테이너 내충격 시스템의 개략적인 형태는 Fig.1과 같다.

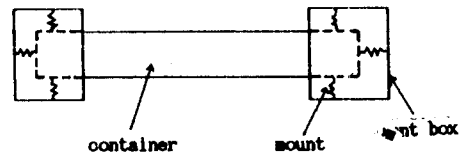


Fig. 1 콘테이너 내충격 시스템

충격 마운트 설계에서 중요한 사항은 콘테이너에 내장되는 장비의 fragility 계수(허용 충격 가속도), 콘테이너 형상 및 무게, 낙하높이이다. 콘테이너의 충격 시험은 일반적으로 낙하시켜 지면에 충돌하는 상태에 따라 Corner, Edge, Pendulum 방향으로 한다. 3 가지 경우에 대하여 다음과 같이 1자유도계와 2자유도계로 모델링을 하였다.

2.1 1자유도 모델링(Pendulum)

장비와 마운트를 Fig.2와 같이 질량 m 과 스프링상수 k 로 구성된 1자유도계로 모델링하였다.

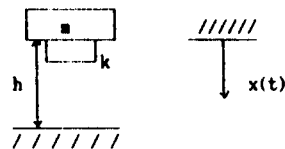


Fig. 2 1자유도 모델

여기서 m : 장비의 질량(장비질량의 1/2)

k : 충격 마운트의 스프링상수이다.

위 모델의 운동방정식은 다음 식(1)과 같다.

$$m\ddot{x} + kx = 0 \text{ ----- (1)}$$

* 유니슨산업주식회사 부설 유니슨기술연구소

초기조건은 $\dot{x}(0) = v_0 = \sqrt{2gh}$ 이며,

구속조건은 $x \geq 0, \ddot{x} \leq 35g$ 이다.

여기서 g : 중력 가속도

h : 바닥에서 장비까지의 높이이다.

2.2 2자유도 모델링(Corner 와 Edge)

2.2.1 $k_1=k_2=k$ 인 경우의 이븐 모델링

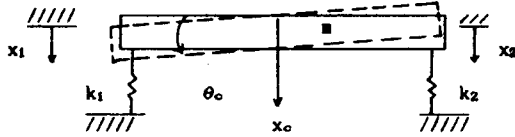


Fig.3 2자유도 모델($k=k_1=k_2$)

여기서 m : 장비의 질량

k : 충격 마운트의 스프링상수이다.

위 모델의 운동방정식은 다음 식(2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_0 \\ \ddot{\theta}_0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 2k & 0 \\ 0 & \frac{12}{2}k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_0 \\ \theta_0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$\text{초기조건 : } \dot{x}_1(0) = \dot{x}_0 + \frac{1}{2} \dot{\theta}_0 = \sqrt{3gh}$$

$$\dot{x}_2(0) = \dot{x}_0 - \frac{1}{2} \dot{\theta}_0 = 0$$

$$\text{구속조건 : } x_1 \geq 0, \ddot{x}_1 \leq 35g$$

여기서 h : 바닥에서 장비의 한쪽끝단까지의 높이

$$I_0 : 2차 관성모멘트 $\left(\frac{ml^2}{12} \right)$$$

x_0 : 장비중심의 수직방향 변위

θ_0 : 장비중심의 회전변위

$$x_1 = x_0 + \frac{1}{2} \theta_0, \quad x_2 = x_0 - \frac{1}{2} \theta_0$$

: 장비끝단의 변위

2.2.2 $k_1=k, k_2=0$ 인 경우의 이븐 모델링

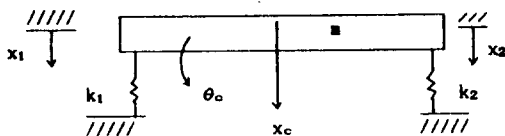


Fig.4 2자유도 모델($k_1=k, k_2=0$)

위 모델의 운동방정식은 다음 식(3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_0 \\ \ddot{\theta}_0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & \frac{1}{2}k_1 \\ \frac{1}{2}k_1 & \frac{12}{2}k_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_0 \\ \theta_0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{초기조건 : } \dot{x}_1(0) = \dot{x}_0 + \frac{1}{2} \dot{\theta}_0 = \sqrt{3gh}$$

$$\dot{x}_2(0) = \dot{x}_0 - \frac{1}{2} \dot{\theta}_0 = 0$$

$$\text{구속조건 : } x_1 \geq 0, \ddot{x}_1 \leq 35g$$

2.3 충격마운트 설계 절차

2.3.1 설계사양의 검토

충격사양(낙하높이 및 장비가 받을 수 있는 최대 허용 충격력)으로부터 충격시험시 충격마운트의 설계방법은 다음과 같다.

(1) 낙하높이로부터 장비가 바닥에 충돌 직전의 속도 v_0 를 구한다.

(2) 충돌직전의 속도 v_0 와 최대허용 충격가속도 A_{max} (장비의 내충격력)로부터 다음과 같이 최대 충격 변위와 고유진동수를 구한다.

$$\left. \begin{array}{l} \text{고유진동수 } \omega_n \leq A_{max}/v_0 \\ \text{최대 충격 변위 } x_{max} = v_0/\omega_n \end{array} \right\} \quad (4)$$

(3) 식(4)로부터 계산된 ω_n 과 충격변위 x_{max} 를 이용하여 충격 마운트의 설계치를 결정한다. 즉, x_{max} 는 마운트의 탄성변형 범위를 결정하며, $\omega_n = \sqrt{k/m}$ 의 관계식으로부터 마운트 소재의 스프링상수가 결정된다.

(4) 위의 (3)항으로부터 계산된 스프링상수 k 를 질량 m 을 지지하는 마운트의 갯수로 나누면 마운트 1개의 스프링상수가 결정된다.

(5) 마운트의 스프링상수, 탄성변형내 변위 및 주변 설치환경에 알맞는 마운트를 선정한다.

(6) 실제설계 및 제작된 내충격 마운트의 충격사양은

Table 1과 같다.

Table 1 내충격 마운트의 충격사양

| 방향 | 높이(mm) | 최대가속도(g) |
|----------|--------|----------|
| Corner | 559 | 35 |
| Edge | 508 | 35 |
| Pendulum | 275 | 18 |

2.3.2 설계사양에 의한 설계치

(1) 1자유도 모델링에 의한 설계치

이론 모델링과 충격시 장비가 받는 최대가속도 조건으로부터 고유진동수, 충격마운트의 스프링상수, 최대변위 및 속도가 0으로 될 때까지의 충격지속시간을 산정한다.

Table 2 1자유도 이론 모델링에 의한 설계치

| 방향 | 충돌시 초기속도 (m/s) | 최가속도 (g) | 고유진동수 (Hz) | 스프링상수 (kgf/mm) | 마운트의 최대변위 (mm) | 충격지속시간 (sec) |
|----------|----------------|----------|------------|----------------|----------------|--------------|
| Corner | 3.3 | 35 | ≤ 16.7 | 66.1 | 31 | 0.030 |
| Edge | 3.2 | 35 | ≤ 17.4 | 71.8 | 29 | 0.028 |
| Pendulum | 2.3 | 18 | ≤ 24.2 | 13.9 | 15 | 0.020 |

(2) 2자유도 모델링에 의한 설계치

장비가 콘크리트 바닥에 충돌시 이론모델링은 2가지 방법에 의해 수행한다.

a) 충돌시 장비의 양쪽단이 완충체에 의해 고정되었다고 가정한다. 식(2)의 운동방정식에 대한 해석결과를 Table 3에 나타내었다.

Table 3 $k_1=k_2=k$ 의 이론 모델링에 의한 설계치

| 방향 | 충돌시 초기속도 (m/sec) | 최대가속도 (g) | 고유진동수(Hz) | | 한쪽끝단의 스프링상수 (kgf/mm) | 마운트의 최대변위 (mm) | 충격지속시간 (sec) |
|--------|------------------|-----------|-----------|-------|----------------------|----------------|--------------|
| | | | 1st | 2nd | | | |
| Corner | 4.1 | 35 | ≤10.7 | ≤18.5 | 27.1 | 44 | 0.023 |
| Edge | 3.9 | 35 | ≤11.2 | ≤19.4 | 29.7 | 40 | 0.022 |

b) 충돌시 장비의 한쪽끝단(버팀목 지지부)의 완충체는 바닥에 충돌시 작용하지 않는다고 가정한다. 식(3)의 운동방정식에 대한 해석결과를 Table 4에 나타내었다.

Table 4 $k_1=k, k_2=0$ 의 이론 모델링에 의한 설계치

| 방향 | 충돌시 초기속도 (m/sec) | 최대가속도 (g) | 고유진동수(Hz) | | 한쪽끝단의 스프링상수 (kgf/mm) | 마운트의 최대변위 (mm) | 충격지속시간 (sec) |
|--------|------------------|-----------|-----------|-------|----------------------|----------------|--------------|
| | | | 1st | 2nd | | | |
| Corner | 4.1 | 35 | ≤4.4 | ≤15.9 | 18.3 | 47 | 0.023 |
| Edge | 3.9 | 35 | ≤4.6 | ≤16.3 | 20.0 | 43 | 0.022 |

3. 설계 사양에 의한 충격 마운트의 제작

고무완충체를 이용한 충격마운트의 제작에 있어서 특히 고려되어야 할 사항은 다음과 같다.

3.1 고무의 탄성계수

고무는 복소탄성계수를 가지는 재료로서 고무로 제작된 완충체의 스프링상수를 결정하기 위해서는 고무의 동배율 및 형상계수의 영향을 정확히 알고 있어야 한다. Table 5는 단순한 원통형태의 고무시편에 대해 정도에 따른 고무재료의 물성치를 나타내고 있다.

설계하고자하는 충격마운트는 최대변위가 50mm에 가까우므로 단순한 형태로서는 그 선형성을 유지하기가 어렵다. 그러나 복잡한 형태의 마운트 구조에 대해서는 수치해석(ANSYS)을 하여 마운트의 정적 스프링상수와 형상을 결정하였다.

Table 5 시편의 물성치

| Duro | 시편 Size (mm) | 동적 Spring 상수 K_0 (kgf/mm) | 정적 Spring 상수 K_s (kgf/mm) | 동배율 α | 형상 계수 |
|------|--------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------|--------|
| 40 | 40 | 3.413 | 3.667 | 0.93 | 0.1563 |
| | 30 | 4.752 | 4.89 | 0.97 | 0.2083 |
| | 25 | 5.946 | 5.47 | 1.09 | 0.2500 |
| | 20 | 7.884 | 7.33 | 1.08 | 0.3125 |
| 50 | 40 | | 4.42 | | 0.1563 |
| | 30 | | 5.58 | | 0.2083 |
| | 25 | | 6.67 | | 0.2500 |
| | 20 | | 9.00 | | 0.3125 |
| 60 | 40 | 11.806 | 8.33 | 1.42 | 0.1563 |
| | 30 | 16.516 | 11.56 | 1.43 | 0.2083 |
| | 25 | 21.328 | 12.93 | 1.65 | 0.2500 |
| | 20 | 29.096 | 15.33 | 1.9 | 0.3125 |

3.2 마운트의 설치장소 및 환경조건에 따른 재질선정

| 사용 및 보관장소 | 고무 재질 특성 |
|-----------|-------------------------------|
| 일반장소 | 노화시험, 오픈 균열시험, 압축영구 변화율 시험 |

- 1 : 제품
- 2 : 압축 시험기
- 3 : Load Cell
- 4 : 변위 측정기
- 5 : Control Box
- 6 : Computer
- 7 : Printer

Fig. 7 압축시험기 구성도

3.3 원형 장비의 완충을 위한 충격마운트

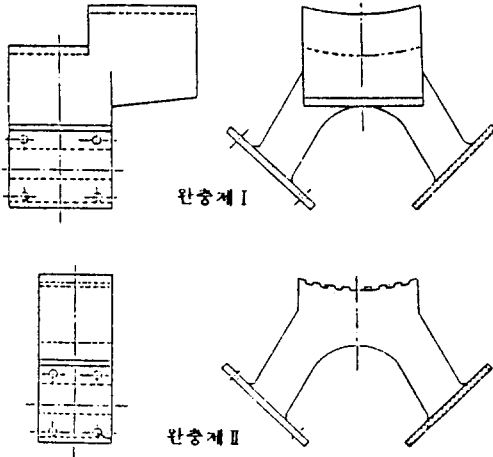


Fig. 5 설계된 고무 충격 마운트

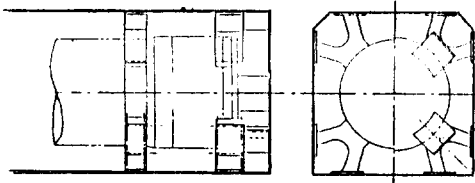
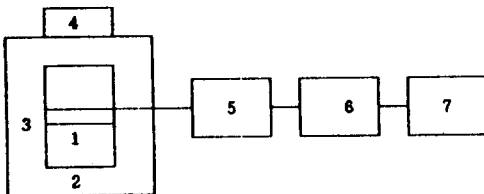


Fig. 6 콘베이어에 설치된 충격마운트

4. 시험

4.1 정적 시험

설계제작된 제품에 대한 정적 시험은 Corner 방향과 Edge 방향에 대하여 압축시험기로 변위를 0.5mm씩 증가시켜 가며 40mm까지 압축하여 변위와 하중을 측정하였다. 압축시험기 구성도 (Fig. 7)는 다음과 같다.



4.2 충격 시험 (Drop Shock Test)

Fig. 8 과 같이 충격 시험용 Jig를 제작하고 높이 20, 40, 50cm 에서 Point 1, 2에 가속도센서를 부착하고, 충격시험을 수행하여 충격에 따른 가속도를 측정하였다.

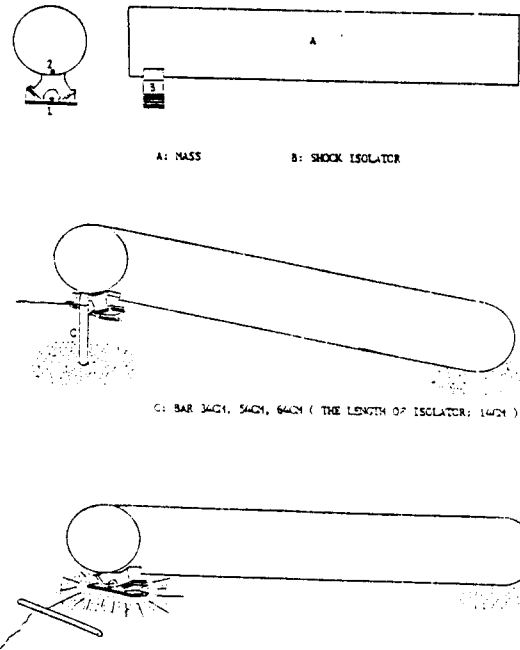


Fig. 8 간이 충격 시험

5. 결과

5.1 정적 시험 결과

고무충격 마운트 2종류의 제품은 Fig. 5 이고, 고무 충격마운트의 정적 시험 결과는 Corner 방향 (Fig. 9, Fig. 11) 이고 Edge 방향 (Fig. 10, Fig. 12) 이다.

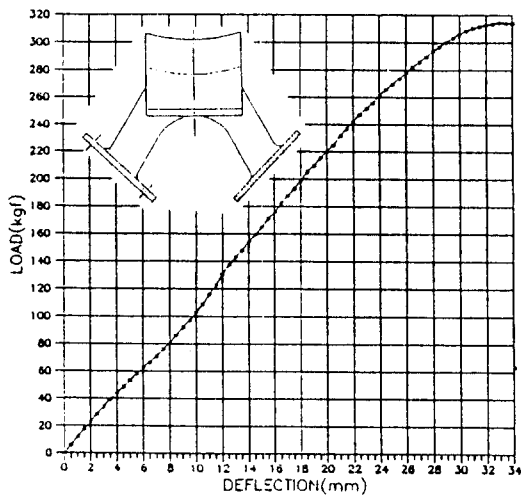


Fig. 9 The Stiffness of Shock Mount 1 (Corner)

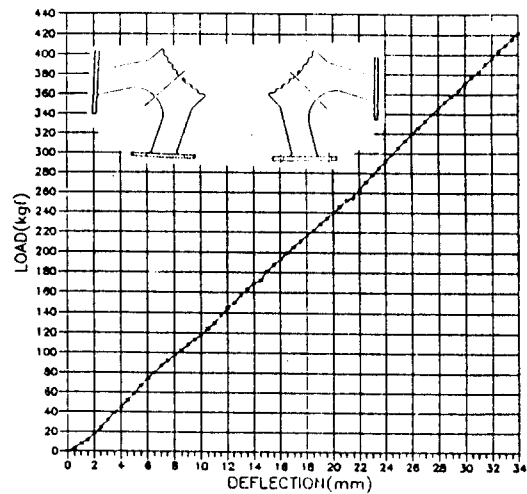


Fig. 12 The Stiffness of Shock Mount 2 (Edge)

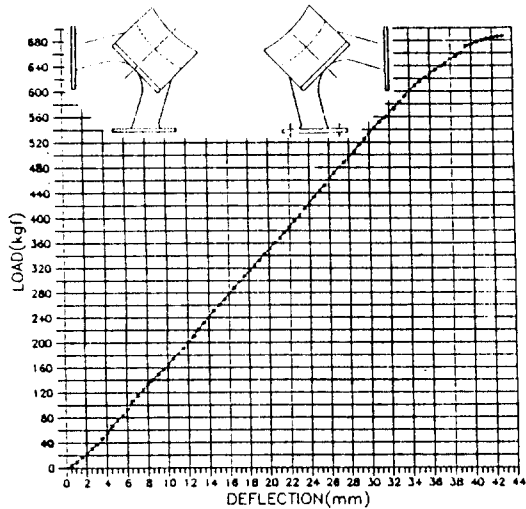


Fig. 10 The Stiffness of Shock Mount 1 (Edge)

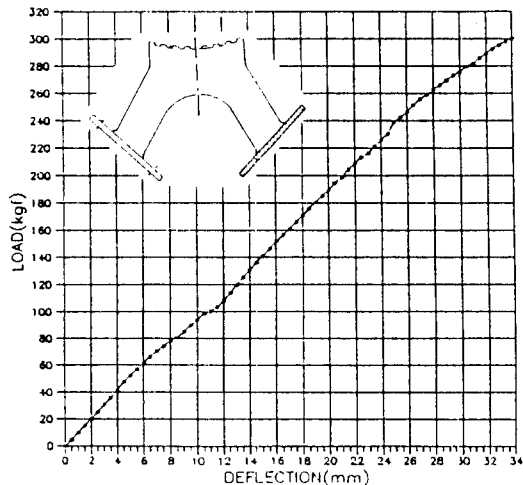


Fig. 11 The Stiffness of Shock Mount 2 (Corner)

Table 6 고무 충격 마운트의 정적 시험 결과

| 방향 | | 정적 스프링상수 | |
|--------|-----------------------|--------------------|---------------------|
| | | 실험값 Ks (kgf/mm) | 설계치 Kcs (kgf/mm) |
| Corner | 충격 마운트 I (Single) | 10.83 | (20.17) 18.3-27.1 |
| | 충격 마운트 II (Single) | 9.34 | |
| Edge | 충격 마운트 I (Double) | 18.39 | (31.54) 20.0-29.7 |
| | 충격 마운트 II (Double) | 13.15 | |

(1) Corner 방향의 경우에 충격 마운트 I 은 30mm 처짐 이후에, 충격 마운트 II 은 32mm 이후에 Softening 현상이 일어났다. 이는 제품형상에 따른 것이다.

(2) Edge 방향의 경우에 충격 마운트 I 은 40mm 처짐 이후, 충격 마운트 II 은 42mm 이후에 Softening 현상이 일어났다.

(3) 선형성은 Corner(Single)일 경우 30mm까지 나타났으며, Edge(Double)일 경우 40mm까지 나타났다.

5.2 충격시험 결과

개발된 고무 마운트의 충격시험결과 (Table 7) 200mm, 400mm, 500mm 낙하 충격시 최대 가속도는

각각 77.42%, 77.78%, 81.25%의 높은 완충율을 얻을 수 있었다. 고무의 감쇠를 고려하지 않았으므로 실제의 경우 완충효율이 더 커질 것으로 예상된다.

Table 7 충격시험 결과 ($k_1 = k, k_2 = 0$)

| Drop Shock Test (mm) | Peak Acceleration | | 완충율 (%) | Time (sec) | |
|----------------------|-------------------|---------------|---------|------------|-------|
| | NON-Isolation (g) | Isolation (g) | | N-I | I |
| 200 | 62 | 14 | 77.42 | | |
| | | | | N-I | |
| | | | | I | 0.017 |
| 400 | 90 | 20 | 77.78 | | |
| | | | | N-I | |
| | | | | I | 0.017 |
| 500 | 120 | 22.5 | 81.25 | | |
| | | | | N-I | |
| | | | | I | 0.017 |

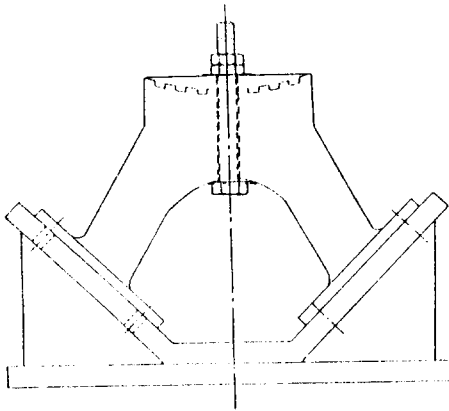


Fig. 13 개발된 고무 충격마운트

6. 결론

이론 해석과 설계 및 제작하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다. 개발된 고무 충격 마운트는

(1) 방진용고무를 이용하여 충격에 대한 이론적인 예측으로 설계사양을 결정하여, 충격마운트를 제작한 결과, 이 마운트는 운반용 콘테이너의 충격진동을 효율적으로 완충시킬 수 있다.

(2) 엄밀한 설계사양을 적용하면 고무충격 마운트로 충격완충율을 최대 90%까지 얻을 수 있다.

(3) 정적 처짐이 30mm까지 선형성을 유지하고 있어 방진효율 예측이 가능하며, 저주파 진동에 대한 방진재

로로서 좋은 장점을 갖고 있어, 3Hz - 10Hz의 고유진동수로 방진하고자 하는 계의 방진 마운트로 사용할 수 있다.

(4) Shear쪽의 Buckling 현상이 발생하지 않아 수직과 수평 방진이 동시에 가능하며, 고무재료의 경도를 조절하여 강성을 쉽게 조절할 수 있어 단일 형상 계층의 다양화할 수 있다.

(5) 이론 계산치와 계층 실험치의 오차가 적어 신제품 개발에 좋은 설계절차가 되었다.

참 고 문 헌

1. KS M 6604-1985, "방진고무 시험방법"
2. KS M 6518-1986, "가황고무 풀리시험 방법"
3. KS M 3016-1985, "플라스틱의 밀도 및 비중시험 방법"
4. Mechanical Vibrations - Francis s. Tse외 2인 pp. 151 - 153
5. 이규섭, 이상업, 유순화, 방진고무의 진동특성 해석 및 실험(I), 사단법인 한국소음진동공학회, pp. 27 - 32, 1990.
6. H. Tohara, et al, 방진고무, 사단법인 일본 철도 차량 공학회, 1975.
7. 고무시험법, 중소기업진흥공단, 고무-13
8. MIL-STD-810D, Environmental Test methods and Engineering Guidelines, 1983.
9. IEC (ISO) 68-2-6, Basic Environmental testing Procedures (Shock), 1970.
10. BV 043, Vibration and Shock.
11. FED-STD-101, Federal Test Method Standard, 1989.
12. JIS Z0202, Method of Drop Test for Packages and Shipping containers, 1976.
13. ISO 2017, Vibration and Shock-Isolators-Procedure for Specifying Characteristics, 1982.