

〈論 文〉

고무를 이용한 완충요소의 설계 및 성능시험

Design and Performance Test of Rubber Mounts for Shock-Isolation

유춘화* · 권형오* · 이신언*

Chun-Hwa Ryu, Hyeong-Oh Kweon and Shin-Eon Lee

(1992년 1월 10일 접수 ; 1992년 2월 28일 심사완료)

ABSTRACT

In order to reduce the shock which may occur during shipping of a drumtype container, rubber mounts were designed using a commercial FEM package and manufactured, and then the performance was checked by static and dynamic test. According to the design specifications, the container system was tested by dropping. The experimental results are compared with the theoretical ones.

1. 서 론

충격에 민감한 용기나 기계들이 운반이나 보관중에 받을 수 있는 진동충격을 완화시키기 위해 완충요소를 이용하게 되며, 완충요소는 용기나 기계들에 허용되는 최대가속도와 이들이 취급되는 기타 환경에 의해 적절히 선정되어야 한다. 그러므로 내충격 설계는 최대허용 가속도나 취급환경에 대한 사양과 이 사양에 의한 완충요소의 설계, 그리고 제작된 내충격 시스템의 충격시험에 의한 검증의 과정을 거치는 것이 일반적이다. 완충요소는 상당량의 감쇠를 요구하기 때문에 스프링과 오일 댐퍼가 결합되어 사용되기도 하지만 구조가 복잡하고 가격이 비싸서 대용량의 경우에만 국한되어 사용되고 있으며, 보다 경제적인 방법으로 방진 고무를 사용하는 것이 일반적이다.

내충격 시스템은 일반적으로 큰 변형량을 요구하고 있는데, 방진고무의 경우 큰 변형에서는 형상계수와 고무배합율에 따라 hardening 또는 softening

스프링의 비선형성을 가지고 있고, 정적 스프링상수와 동적 스프링상수가 큰 차이를 보이는 등의 이유 때문에, 설계상 어느 정도의 어려움이 따르게 된다. 그러나 방진고무는 형상변화가 자유로우며 제작이 용이하기 때문에 이러한 장점을 이용하면 저렴하고 다양한 용도의 완충요소 제작에 효과적으로 사용될 수 있다.

본 논문에서는 긴 원통형 콘테이너의 내충격 설계를 위해 지정된 충격사양에 의한 완충요소의 설계, 설계제작된 완충요소의 정적시험, 동적시험, 충격시험에 의한 검증을 순차적으로 실시하여, 고무를 이용한 완충요소 설계사례를 제시함으로써, 방진고무제품의 조직적 설계를 위한 도움을 주고자 한다.

2. 콘테이너 내충격 시스템의 이론적 해석

콘테이너 내충격 시스템의 개략적인 형태는 Fig. 1과 같다.

완충요소 설계에서 중요한 사항은 콘테이너에 내장되는 장비의 fragility 계수(허용 충격가속도), 콘테이너 형상 및 무게, 낙하높이이다. 콘테이너의 충격시험은 일반적으로 공중으로부터 지면에 낙하시켜

*유니슨산업주식회사 부설 유니슨기술연구소

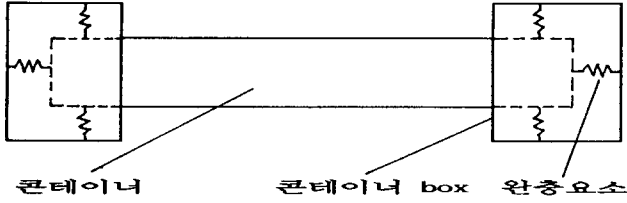


Fig. 1 컨테이너 내충격 시스템

충돌하는 상태에 따라 Fig. 2와 같이 Flat, Corner, Edge방향으로 한다. 3가지 경우에 대하여 다음과 같이 1자유도계와 2자유도계로 모델링을 하였다.

2.1 1자유도 Flat 모델링

장비와 완충요소를 가장 간단하게 해석하기 위해서는 Fig. 3과 같이 질량 m 과 스프링상수 k 로 구성된 1자유도계로 모델링할 수 있다.

여기서

m : 장비의 질량(장비질량의 1/2)

k : 완충요소의 스프링상수이다

h : 낙하전에 바닥에서 장비까지의 높이 이다.

위 모델의 운동방정식은 다음 식 (1)과 같다.

$$m\ddot{x} + kx = 0 \tag{1}$$

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

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

여기서

g : 중력 가속도

2.2 2자유도 모델링

2자유도 모델링으로 Cornerwise Rotational Drop 과 Edgewise Rotational Drop 해석을 하였고, 장비가 콘크리트 바닥에 충돌시 이론모델링은 2가지 방법에 의해 수행하였다.

(1) $k_1 = k_2 = k$ 인 경우의 2자유도 모델링

충돌시 장비의 양쪽단이 완충요소에 의해 고정되어 양쪽 모두 작용한다고 가정한다. (Fig. 4)

여기서

L : 장비의 길이

l : 완충요소의 간격

m : 장비의 질량

k : 완충요소의 스프링상수이다.

위 모델의 운동방정식은 다음 식 (2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_c \\ \ddot{\theta}_c \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 2k & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_c \\ \theta_c \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{2}$$

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

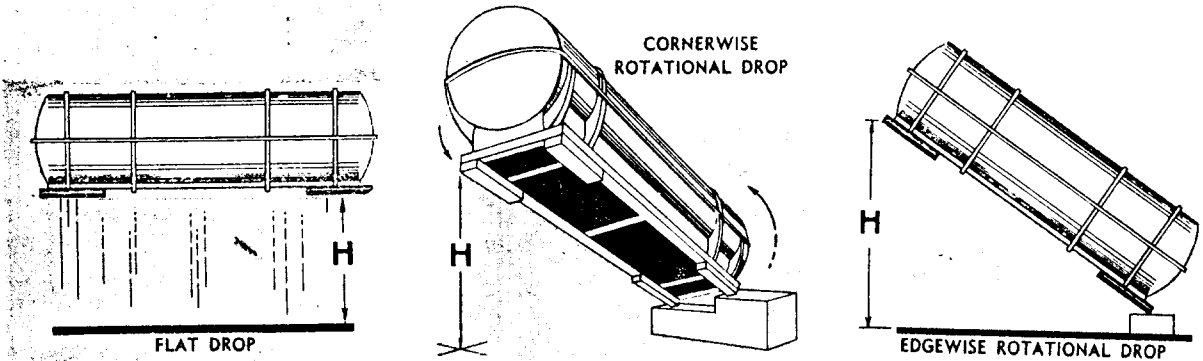


Fig. 2 낙하높이와 방향에 따른 충격 모델

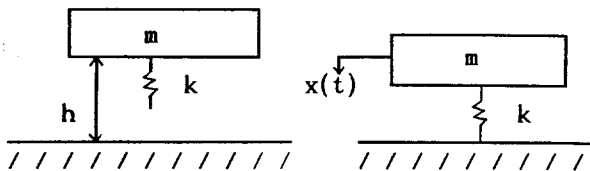


Fig. 3 1자유도 Flat 모델

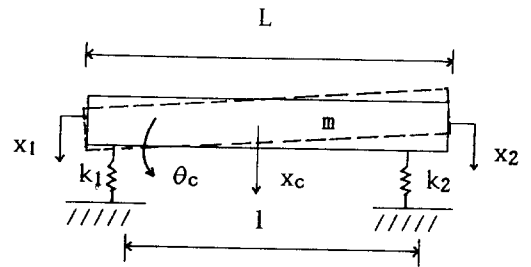


Fig. 4 2자유도 모델 ($k_1 = k_2 = k$)

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

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

여기서

h : 바닥에서 장비의 한쪽끝단까지의 높이

I_c : 2차 관성모멘트 $\left(\frac{m l^2}{12}\right)$

x_c : 장비중심의 수직방향 변위

θ_c : 장비중심의 회전변위

$$x_1 = x_c + \frac{1}{2} \theta_c, \quad x_2 = x_c - \frac{1}{2} \theta_c$$

: 장비끝단의 변위

(2) $k_1 = k, k_2 = 0$ 인 경우의 2자유도 모델링

장비의 한쪽끝단(버팀목 지지부)의 완충요소는 바닥에 충돌시 작용하지 않는다고 가정한다.

운동방정식은 다음 식 (3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_c \\ \ddot{\theta}_c \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & \frac{1}{2} k_1 \\ \frac{1}{2} k_1 & \frac{1}{2} k_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_c \\ \theta_c \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

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

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

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

2.3 완충요소의 설계 절차

(1) 설계사양의 검토

충격사양(낙하높이 및 장비가 받을 수 있는 최대 허용 충격력)으로부터 충격시험시 완충요소의 설계 방법은 다음과 같다.

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

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

$$\text{고유진동수 } \omega_n \leq A_{max} / v_0 \quad (4)$$

$$\text{최대 충격 변위 } x_{max} = v_0 / \omega_n$$

3) 식 (4)로부터 계산된 고유진동수 ω_n 과 충격 변위 x_{max} 를 이용하여 완충요소의 설계치를 결정한다. 즉, x_{max} 는 완충요소의 탄성변형 범위를 결정하며, 고유진동수와 스프링상수의 관계식 $\omega_n = \sqrt{k/m}$ 의 관계식으로부터 완충요소 소재의 스프링상수 k 가 결정된다.

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

개의 스프링상수가 결정된다.

5) 완충요소 스프링상수, 탄성변형내 변위 및 주변 설치환경에 알맞은 완충요소를 선정한다.

6) 실제설계 제작된 완충요소의 충격사양은 Table 1과 같다.

(2) 설계사양에 의한 설계치

1) 1자유도 Flat 모델링에 의한 설계치

이론 모델링과 충격시험 장비가 받는 최대가속도 조건으로부터 고유진동수, 완충요소의 스프링상수, 최대변위 및 속도가 0으로 될 때까지의 충격지속시간을 산정한다. (Table 2)

Table 1 완충요소의 충격사양

방 향	높이(mm)	최대가속도(g)
Corner	559	35
Edge	508	35
Flat	275	16

Table 2 1자유도 Flat 모델링에 의한 설계치

방향	충돌시 초기속도 (m/s)	최 대 가속도 (g)	고 유 진동수 (Hz)	스프링 상수 (kgf/mm)	마운트의 최대변위 (mm)	충격지속 시 간 (sec)
Flat	2.3	16	≤ 24.2	13.9	15	0.020

Table 3 $k_1 = k_2 = k$ 인 경우 2자유도 모델링에 의한 설계치

방 향	충돌시 초기속도 (m/sec)	최 대 가속도 (g)	고유진 동수 (Hz)		한쪽끝단의 스프링상수 (kgf/mm)	마운트 최대변위 (mm)	충격 지 속 시간 (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

Table 4 $k_1 = k, k_2 = 0$ 인 경우 2자유도 모델링에 의한 설계치

방 향	충돌시 초기속도 (m/sec)	최 대 가속도 (g)	고유진동수(Hz)		한쪽끝단의 스프링상수 (kgf/mm)	마운트 최대변위 (mm)	충격 지 속 시간 (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

2) 2자유도 모델링에 의한 설계치식 (2)의 운동방정식에 대한 해석결과를 Table 3에 나타내었다.

식 (3)의 운동방정식에 대한 해석결과를 Table 4에 나타내었다.

3. 설계 사양에 의한 완충요소의 제작

방진고무를 이용한 완충요소의 제작에 있어서 특히 고려되어야 할 사항은 다음과 같다. 설계하고자 하는 완충요소는 최대변위가 50mm에 가까우므로 단순한 형태로서는 그 선형성을 유지하기가 어렵다. 복잡한 형태의 완충요소 구조에 대해서 유한요소법에 의한 정적해석(ANSYS)을 통하여 완충요소의 정적스프링 상수와 형상을 결정하였다.

3.1 완충요소의 설치장소 및 환경조건에 따른 재질선정

사용 및 보관 장소	고무 재질 특성
일반장소	노화시험, 오존 균열시험, 압축 영구 변화율 시험

3.2 원통형 장비의 완충요소(Fig. 5.6)

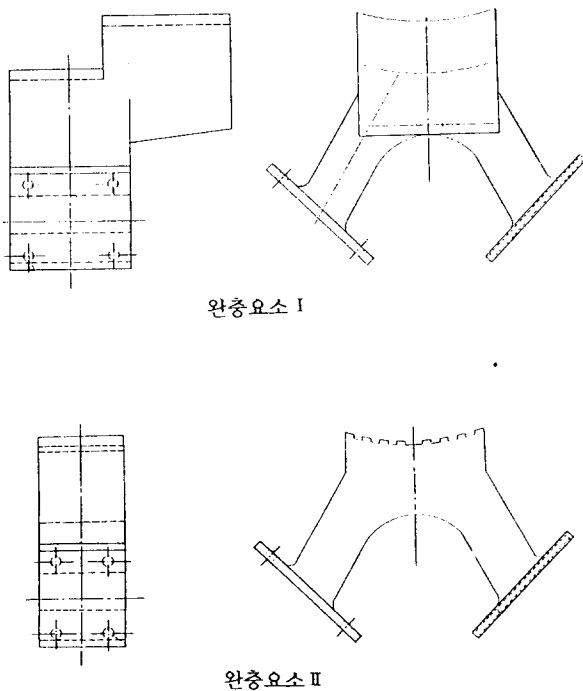


Fig. 5 설제된 고무 완충요소

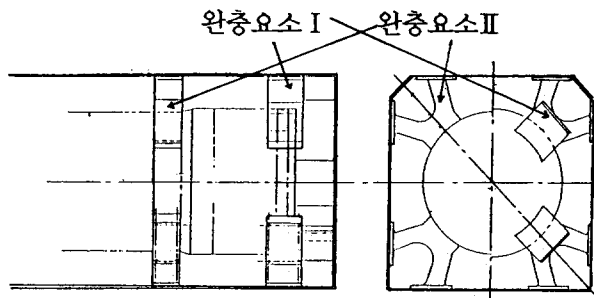


Fig. 6 콘테이너에 설치된 완충요소

4. 시 험

4.1 정적 시험

설계제작된 완충요소에 대한 정적 시험은 Jig를 제작하여 Corner 방향과 Edge 방향에 대하여 압축 시험기로 변위를 0.5mm씩 증가시켜 가며 40mm까지 압축하여 변위와 하중을 측정하였다. (Fig. 7)

4.2 동적시험

시험장치 구성은 Fig. 8과 같다.

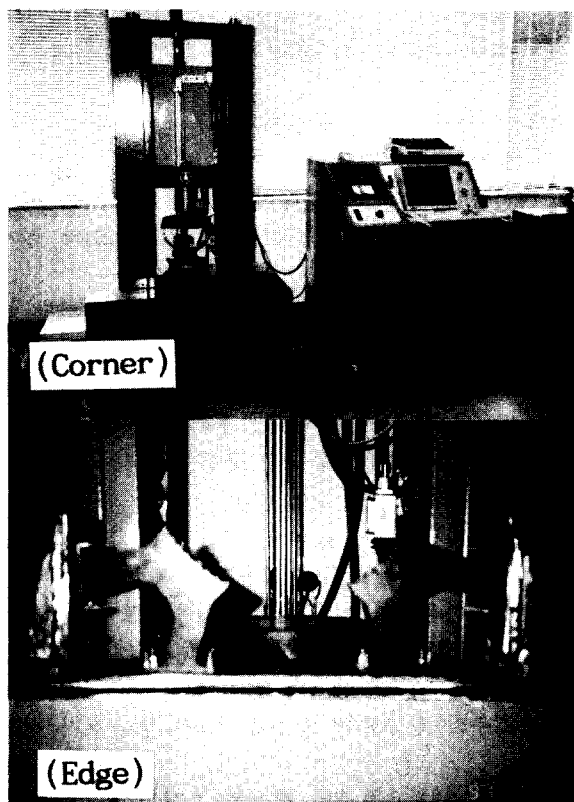
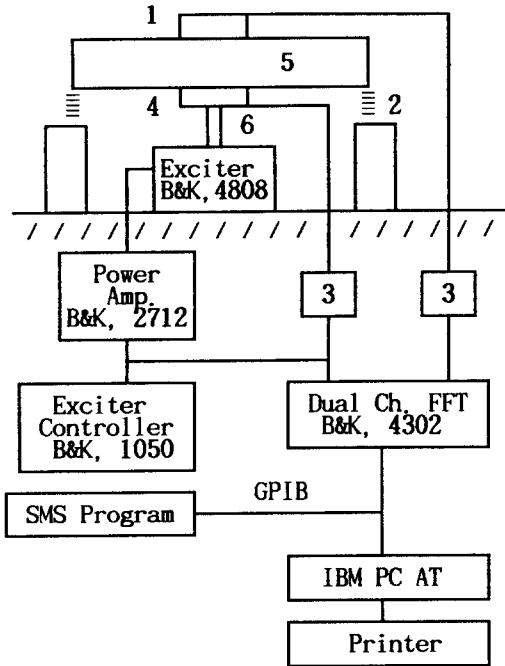
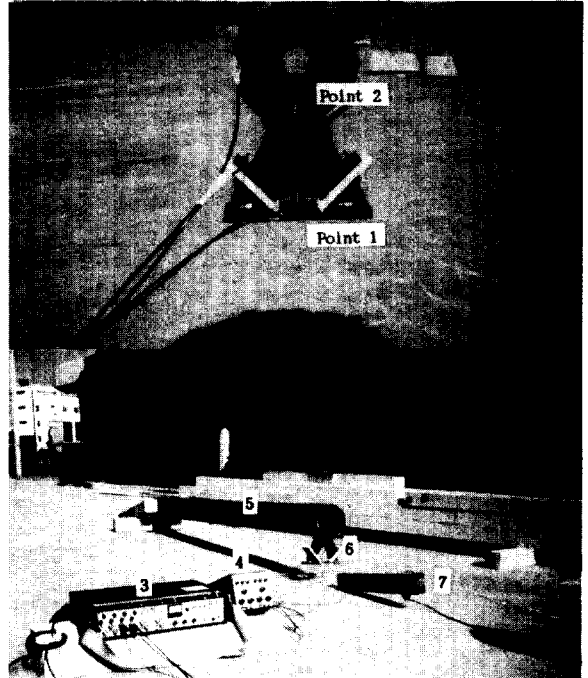


Fig. 7 압축시험기와 Jig



1 : Accelerometer, 2 : 완충요소
3 : Charge Amp. 4 : Force transducer
5 : Mass 6 : Extension joint bar

Fig. 8 완충요소 II의 동특성 시험장치 구성도



1, 2 : Accelerometer, 3 : 테이프레코더
4 : Charge Amp. 5 : Jig
6 : 완충요소 II, m 7 : 버팀목

Fig. 9 완충요소 II의 간이 충격 시험

시험장치는 중량 625kg과 325kg 두 종류의 강판 모서리 4곳에 bracket를 부착하고 완충요소를 설치하여 System을 구성하였으며, Mass 바닥 중앙에 Force Transducer를 부착하고 Exciter와 Extension joint bar로 연결하여 가진력이 전달되도록 하고, Mass 윗면 중앙에 가속도계를 부착하여 가진력에 따른 가속도를 측정하였다.

4.3 충격 시험(Cornerwise rotational drop test)

Fig. 9과 같이 $k_1=k$, $k_2=0$ 인 경우에 간이 충격 시험용 Jig를 제작하여 Point 1,2에 가속도 센서를 부착하고, 높이 20, 40, 50cm에서 충격시험을 수행하여 충격에 따른 가속도를 측정 비교하였다.

5. 시험결과

5.1 정적 시험 결과

완충요소 2종류의 제품은 Fig. 5이고, 완충요소의 정적시험 결과는 Corner방향(Fig. 10, Fig. 12)이고 Edge방향(Fig. 11, Fig. 13)이다.

(1) Corner 방향의 경우에 완충요소 I 은 30mm처 짐 이후에, 완충요소 II는 32mm 이후에 Softening 현상이 일어났다. 이는 제품형상에 따른 것이다.

(2) Edge 방향의 경우에 완충요소 I 은 40mm처 짐 이후, 완충요소 II는 42mm 이후에 Softening 현상이 일어났다.

Table 5 완충요소의 정적 시험 결과

		정적 스프링 상수		
방향	완충요소	실험값 k_s (kgf/mm)	설계치 k_{cs} (kgf/mm)	
Corner	완충요소 I (Single)	12.67	(24.37)	18.3-27.1
	완충요소 II (Single)	11.7		
Edge	완충요소 I (Double)	16.6	(29.1)	20.0-29.7
	완충요소 II (Double)	12.5		

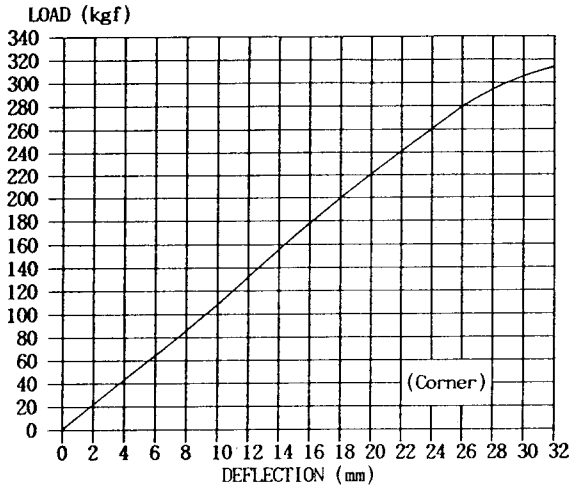


Fig. 10 The stiffness of rubber mount I

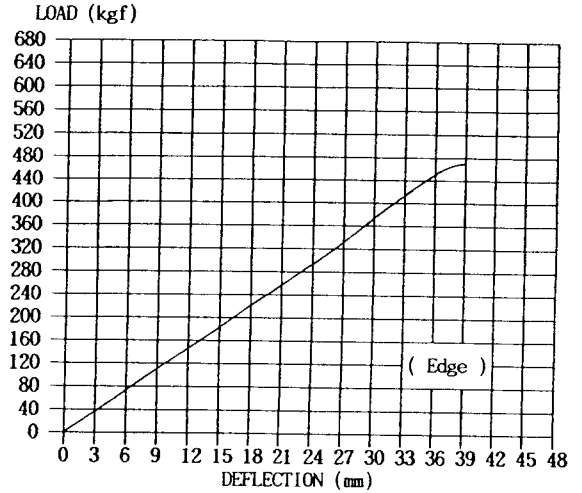


Fig. 13 The stiffness of rubber mount II

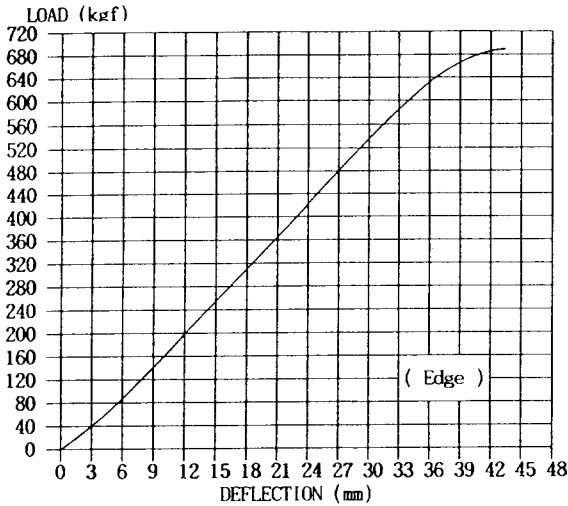


Fig. 11 The stiffness of rubber mount I

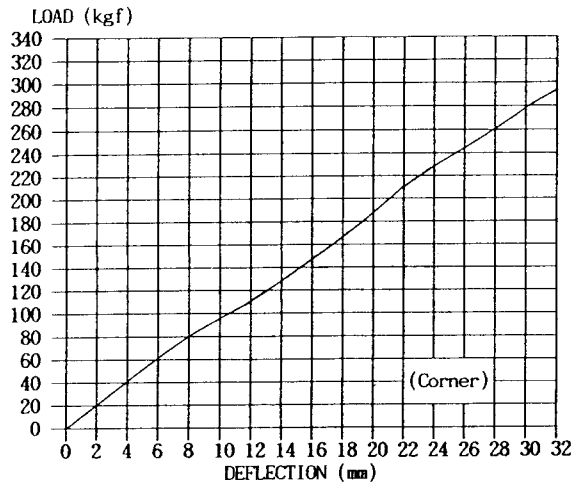


Fig. 12 The stiffness of rubber mount II

(3) 선형성은 Corner일 경우 30mm까지 나타났으며, Edge일 경우 40mm까지 나타났다.

5.2 동적시험 결과

동적시험 결과는 다음과 같다.

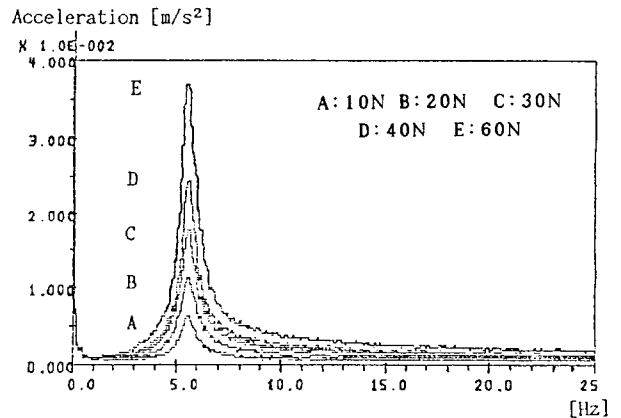


Fig. 14 강판 625kg으로 System 구성시 가진력에 따른 고유진동수

Table 6 강판 625kg으로 System 구성시 완충요소 II 개당 156.25kg의 정격하중을 받을 때 고유진동수

횟 수	가진력 (N)	고유진동수 (Hz)	감쇠비
1	10	5.54	0.0508
2	20	5.53	0.0538
3	30	5.51	0.0535
4	40	5.5	0.0504
5	60	5.48	0.0525

Table 7 강판 325kg으로 System 구성시 완충요소Ⅱ 개당 81.25kg의 정격하중을 받을 때 고유진동수

횟 수	가진력 (N)	고유진동수 (Hz)	감쇠비
1	20	7.15	0.0582
2	40	7.11	0.0603
3	60	7.07	0.062

Table 8 완충요소의 동배율

	정적스프링 상수 (k_s)	동적스프링 상수 (k_d)	동배율
완충요소Ⅱ	11.7kg/mm	19.1kg/mm	1.63

(1) 개발된 완충요소는 정적하중이 156kg에서 5.5 Hz의 고유진동수를 나타내었고, 가진력을 변화시켜도 System의 고유진동수는 변화하지 않음을 알 수 있다.

(2) 동배율은 형상계수나 경도에 따라 값이 달라진다. 일반적으로 합성고무제품은 $\alpha=1.4-2.5$ 이나 $\alpha=1.63$ 의 특성을 가지고 있음을 알 수 있다.

(3) 완충요소를 이용한 System 구성시 동배율과 정적처짐량으로 그 System의 고유진동수를 예측할 수 있다. 완충요소Ⅱ는 개당 81.25kg의 정격하중을 받을 때 계산식에 의한 고유진동수는 7.6Hz이고, 실험에 의한 고유진동수는 Table 7과 같이 7.1Hz이다. 그 오차는 6% 정도이다.

5.3 충격시험 결과

개발된 완충요소의 충격시험결과(Table 9) 200 mm, 400mm, 500mm 낙하 충격시 최대 가속도는

Table 9 완충요소Ⅱ의 충격시험 결과 ($k_1=k$, $k_2=0$)

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

각각 77.42%, 77.78%, 81.25%의 높은 완충율을 얻을 수 있었다.

6. 결 론

이론 해석후 설계 및 제작하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

(1) 방진용고무를 이용하여 충격에 대한 이론해석으로 설계사양과 형상을 결정하여, 완충요소를 제작한 결과, 이 마운트는 원통형 콘테이너의 충격진동을 효율적으로 완충시킬 수 있다.

(2) 엄밀한 설계사양을 적용하면 완충요소로 충격 완충율을 최대 90%까지 얻을 수 있다.

(3) 정적 처짐이 30mm까지 선형성을 유지하고 있어 방진효율 예측이 가능하며, 저주파 진동에 대한 방진재로서 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, duro 50의 경도로 제작된 완충요소는 정격하중 180kg으로 사용할 수 있는데, 고무재료의 경도를 조절하여 강성을 쉽게 조절할 수 있어 단일 형상 제품으로 다양화할 수 있다.

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

참고문헌

1. KS M 6604-1985, "방진고무 시험방법".
2. 이규섭, 이상섭, 유춘화, 방진고무의 진동 특성 해석 및 실험(I), 사단법인 한국 소음진동공학회(추계), pp. 27~32, 1990.
3. 유춘화, 권형오, 이상엽, 이규섭, 방진고무를 이용한 충격마운트 설계, 사단법인 한국 소음진동공학회(춘계), pp. 127~132, 1991.
4. 유춘화, 권형오, 김석홍, 이신언, 방진고무 완충재의 진동특성 해석 및 실험(II), 사단법인 한국 소음진동공학회(추계), pp. 139~144, 1991.
5. MIL-STD-810D, Environmental test methods and Engineering guidelines, 1983.
6. FED-STD-101, Federal test Method Std. 1989.