

감쇠기능을 갖는 에어마운트 개발에 관한 연구

A Study of the Development of Air Spring Mount with High Damping Characteristic

엄영환* · 맹주원* · 권태철* · 이성춘*

Young-Hwan Uhm, Ju-Won Maeng, Tae-Chul Kwon, Seong-Choon Lee

Key Words : Air Spring Mount(공기마운트), Transmissibility(진동전달율), Damping Ratio(감쇠비), Natural Frequency(고유진동수)

ABSTRACT

The purpose of this study is to develop an air spring mount that has high damping characteristic. The new type air spring mount has a polyurethane core in the center. By adding the core, the air spring mount shows excellent damping effect and good resistance to lateral force. This study includes both the analytical study and the experimental study of the new type air spring mount.

1. 서론

방진 마운트는 가진력을 유발하는 장비 또는 주변 진동 환경으로부터 보호하고자 하는 장비를 탄성 지지하여 진동 환경을 주변과 분리하기 위한 것으로 이는 진동계의 고유 진동수를 낮게 할수록, 즉 지지 장치가 Flexible 할수록 효과가 높다. 따라서 탄성 물질은 모두 방진 재료가 될 수 있으나 실제로는 금속 스프링, 고무, 공기 스프링 등이 주로 쓰이고 코르크, Felt, 발포 고무 등도 보조적으로 사용된다.

공기 스프링 마운트(이하 에어 마운트)는 극히 낮은 고유 진동수를 갖는 진동계를 구성할 수 있어 방진 효율을 크게 높일 수 있다. 그리고 내부 공기 압력 변화로 높이를 조정할 수 있어 레벨링(Leveling)이 아주 용이하다. 공기 스프링은 그 자체로도 얼마간의 감쇠를 가지지만 고무 마운트에 비하면 미비한 수준이다. 또한 가격이 비싸고 항상 일정한 공기 압력을 유지해야 하므로 유지 관리가 어렵다. 그리고 횡하중에 대한 저항이 충분치 못하여 안정성이 다소 떨어진다.

본 연구의 목적은 기존 에어 마운트가 갖는 단점인 감쇠력 부족과 횡하중에 대한 저항력 부족을 보완한 새로운 형태의 마운트(이하 세미 에어 마운트)를 개발하는데 있다.

2. 감쇠기능을 갖는 에어마운트의 특징

2.1 감쇠기능을 갖는 에어마운트의 구조

기존 에어 마운트의 감쇠 성능 부족을 보완하기 위해 새로 개발한 에어 마운트는 그 내부 중앙에 폴리우레탄 소재의 댐퍼(Damper)를 갖고 있다. 탄성체인 댐퍼는 고무처럼 감쇠력을 갖고 있어 기존 에어 마운트의 단점인 감쇠력 부족을 효과적으로 보완해 줄 수 있다. 본 연구에서는 사용중에 따른 세가지 급의 세미 에어 마운트를 개발했으며 그 각각에 대한 세부 설명은 다음과 같다.

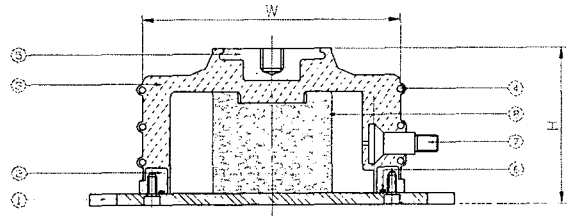


그림 1. 세미 에어 마운트의 단면도

세미 에어 마운트는 그림 1과 같이 상부 Plate와 CR계 합성 고무로 구성된 Body, Reinforcing Ring, 하부 Retainer, 하부 Plate, O-Ring, Air Inlet, 폴리우레탄 소재의 댐퍼로 구성된다. CR계 합성 고무의 경도는 70°이며 Reinforcing Ring의 재질은 Coil Spring에 사용되는 HSW3 재질을 사용하였고, 상부 Plate 및 하부 Retainer와 하부 Plate는 AL7075 재질을 사용하였다. 댐퍼로 사용된 폴리우

* 엔에스브이 기술연구소
E-mail : nsvrd4@nsv.co.kr
Tel : (032) 816-7992, Fax : (032) 816-7993

레탄의 밀도는 사용 하중에 따라 150kg/m³ ~ 220kg/m³을 사용하였으며 외형 치수 및 물성은 표 1, 2와 같다

표 1. 세미 에어 마운트의 규격

| Model | W (mm) | H (mm) | Pressure (kg/cm ²) | Load (kg) |
|-------|--------|--------|--------------------------------|-----------|
| VAM-B | 113 | 70 | 1~3.5 | 75~150 |
| VAM-C | 130 | 90 | 1~5.5 | 100~300 |
| VAM-D | 172 | 90 | 1~5.5 | 200~600 |

표 2. 폴리우레탄 댐퍼의 규격

| Model | Material Property | | | | Dimension | | 댐퍼 갯수 |
|-------|-------------------|---------|-----------------------------|-------|-----------|--------|-------|
| | E (MPa) | G (MPa) | ρ (kg/m ³) | ν | D (mm) | H (mm) | |
| VAM-B | 0.11E6 | 0.03E6 | 150 | 0.3 | φ 60 | 46 | 1 |
| VAM-C | 0.11E6 | 0.03E6 | 150 | 0.3 | φ 60 | 62 | 1 |
| VAM-D | 0.45E6 | 0.1E6 | 220 | 0.3 | φ 52 | 62 | 3 |

2.2 감쇠기능을 갖는 에어마운트의 장단점

기존 에어 마운트와 세미 에어 마운트를 비교하면 표 3과 같다.

표 3. 에어 마운트와 세미 에어 마운트 비교

| | 개념도(단면도) | 장단점 |
|---------------------|----------|--|
| 기 존 에어 마운트 | | -내부에 공기만 충전 -감쇠 성능 부족 -낮은 고유 진동수 |
| 세 미 에어 마운트 | | -내부에 댐퍼 삽입 -감쇠 성능 우수 -횡하중에 잘 견딤 |

3. 진동 해석

구조해석 프로그램인 ANSYS를 이용해 진동 해석을 수행하여 세미 에어 마운트와 기존 에어 마운트의 진동 특성 및 방진 성능을 예측·비교하고자 한다. 실제 연구에서는 사용 하중에 따른 세가지 급의 에어 마운트 각각을 해석했으나 본 논문에서는 제일 작은 급인 VAM-B에 대한 결과만을 소개한다.

3.1 모델링

에어 마운트를 2차원 단면으로 구성한 후, 하부 Plate는 모든 자유도를 구속하고 중심축은 X축 자유도를 구속하였다. 에어 마운트의 내압은 1.6kgf/cm², 정하중은 100kgf, 동하중은 10kgf를 주었다. 유한요소해석에 사용된 요소는

PLANE2 (Body, Reinforcing Ring)와 PLANE42 (상하부 Plate, 하부 Retainer, 댐퍼) 이다.

표 4. 유한요소해석을 위한 물성표

| Material | E(GPa) | ρ (kg/m ³) | ν | ζ (%) |
|----------|---------|-----------------------------|-------|-------------|
| Rubber | 0.00105 | 1300 | 0.35 | 0.1 |
| Aluminum | 70 | 2700 | 0.33 | 0.02 |
| Steel | 200 | 7850 | 0.3 | 0.02 |

3.2 고유 진동수

에어 마운트 해석 모델에 충격력을 가할 때 발생하는 진동 응답 곡선을 구한 후 이를 FFT 변환시켜 에어 마운트로 구성된 진동계의 고유 진동수를 구했다.

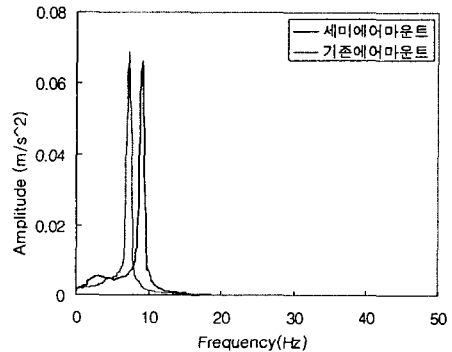


그림 2. 진동 응답 곡선 비교 (주파수 영역 표시)

해석 결과, 세미 에어 마운트(9Hz)로 구성된 진동계가 기존 에어 마운트(7.3Hz)로 구성된 진동계보다 고유 진동수가 높았는데 이는 세미 에어 마운트에 폴리우레탄 댐퍼를 삽입하여 마운트의 강성(Stiffness)이 높아졌기 때문이다. 이런 강성의 증가는 세미 에어 마운트의 횡하중에 대한 저항성을 높여 결국 마운트에 얹혀진 기계의 흔들림(Shaking)을 크게 줄여주는 효과를 준다.

3.3 감쇠비

3.2절에서 구한 진동 응답 곡선으로부터 식3을 이용하여 감쇠비(ζ)를 구할 수 있다. 식1에서 δ 는 대수감쇠율이다.

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{(2\pi)^2 + \delta^2}} \quad [식1]$$

계산 결과, 세미 에어 마운트의 감쇠비는 0.053이고 기존 에어 마운트의 감쇠비는 0.031인 것으로 나타났다. 세미 에어 마운트가 기존 에어 마운트보다 감쇠비가 1.7배 정도 더 컸는데, 그 이유는 폴리우레탄 댐퍼의 감쇠 효과 때문이다.

그림 3은 감쇠 효과를 비교하기 위한 진동 응답 곡선이다.

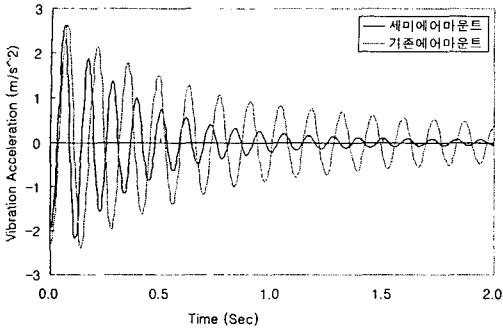


그림 3. 진동 응답 곡선 비교 (시간 영역 표시)

3.4 진동 전달율

에어 마운트로 구성된 진동계의 진동 전달율(TR)은 식 2로부터 구할 수 있다.

$$TR = \frac{\sqrt{1 + (2\xi r)^2}}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\xi r)^2}} \quad [식2]$$

여기서 $r=f/f_n$, f_n 은 고유 진동수, f 는 가진 진동수이다. 진동 전달율은 그림 4와 같다.

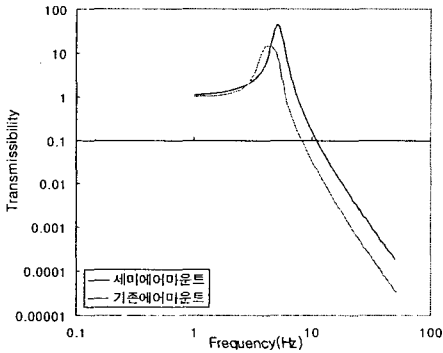


그림 4. 진동 전달율 비교

그림 4로부터 세미 에어 마운트로 구성된 진동계가 기존 에어 마운트로 구성된 진동계보다 진동 전달율이 더 크음을 알 수 있다. 이는 댐퍼 삽입으로 인해 에어 마운트로 구성된 진동계의 고유 진동수가 올라갔기 때문이다. 그러나 세미 에어 마운트로 구성된 진동계 또한 20Hz 이상의 구간에서 0.1 이하의 진동 전달율을 보임으로써 우수한 방진 성능을 나타내고 있다.

3.5 응력 해석

에어 마운트가 어느 부위에서 최대 응력을 받는지 확인하기 위하여 응력 해석을 하였다. 그 결과는 그림 5, 6과 같다.

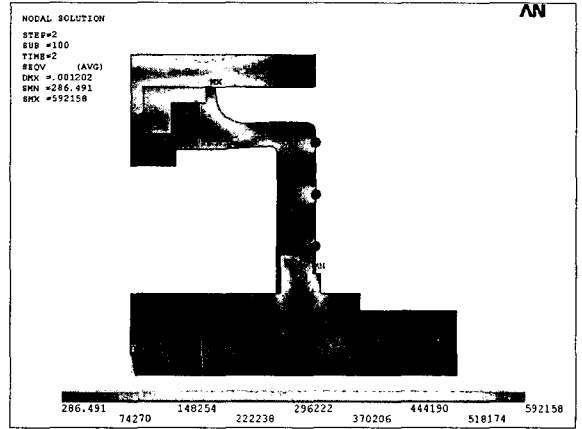


그림 5. 기존 에어 마운트의 응력 분포도

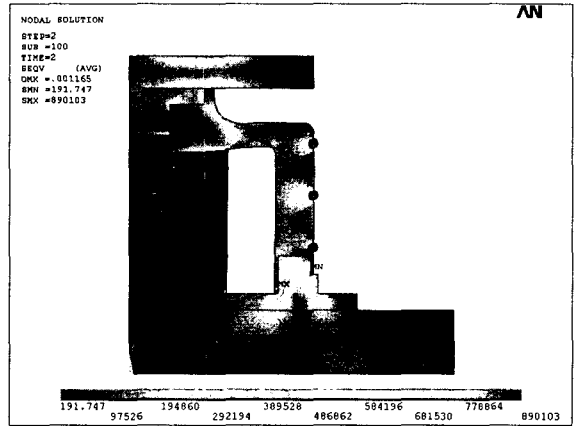


그림 6. 세미 에어 마운트의 응력 분포도

응력은 주로 고무와 금속이 접촉하는 부분에서 큰 값을 보였다. 세미 에어 마운트에 걸리는 응력이 기존 에어 마운트에 비해 작아지는 것으로 나타났다. 이는 폴리우레탄 댐퍼의 삽입으로 에어 마운트에 걸리는 응력이 고무 분산되었기 때문에, 결국 반복 하중을 받는 에어 마운트의 내구성 향상에 기여할 것으로 생각한다.

3.6 변위 해석

에어 마운트의 어느 부위가 주로 진동하는지 확인하기 위해 변위 분포를 그려보았다. 그 결과는 그림 7, 8과 같다.

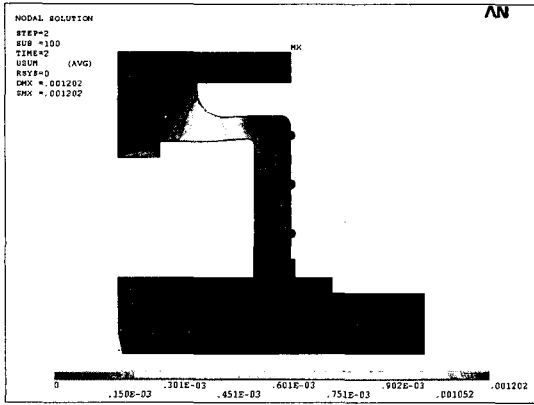


그림 7. 기존 에어 마운트의 변위 분포도

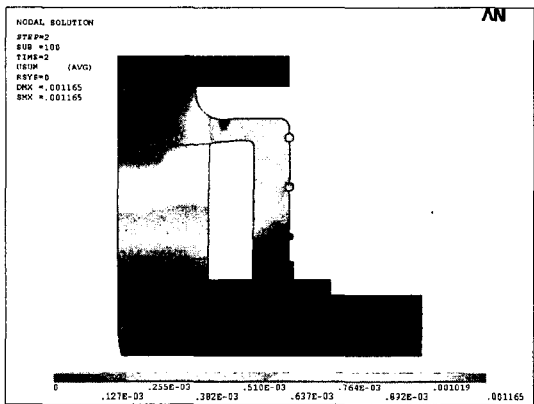


그림 8. 세미 에어 마운트의 변위 분포도

변위 분포도로부터 에어 마운트는 상부가 주로 진동함을 알 수 있다.

4. 진동 실험

세미 에어 마운트를 제작하여 그 실제 성능을 확인해 보자 여러 실험들을 수행하였다. 실험을 통해 기존 에어 마운트와 세미 에어 마운트간의 성능 차이를 알아보고 해석 결과의 타당성도 검증하고자 한다. 실험은 VAM-B로 하였다.

4.1 실험 장치 구성

실험 장치는 그림 9와 같이 구성하였다.

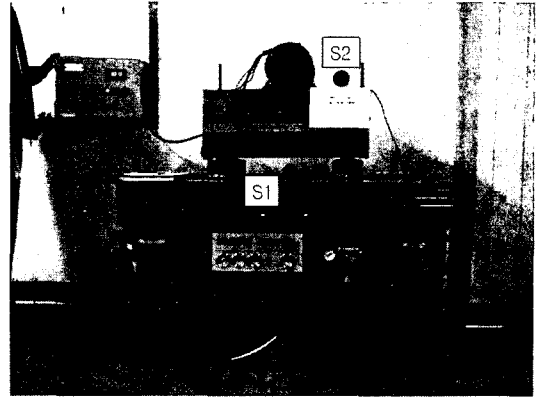


그림 9. 실험 장치 구성도

하부 제진대 위에 에어 마운트를 4개 놓고 그 위에 다시 400kg의 철판과 모터를 올려 놓았다. 철판 무게는 에어 마운트의 사용 하중에 맞춘 것이다. 모터는 3000rpm 즉 50Hz 까지 변화하며 진동계를 가진할 수 있도록 제작하였다. S1 과 S2는 진동 센서이다.

4.2 진동 전달율

실험은 모터 진동이 진동계 외부로 전달되는 것을 막는 상황 즉 능동 방진이므로, 진동 전달율은 실험 장치에서 에어 마운트를 넣었을 때와 빼었을 때 각각에 대하여 센서 S1 에서 측정된 가속도의 비로부터 구할 수 있다.

표 5. 진동 전달율

| 진 동 수 (Hz) | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
|---------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 기 존 에어 마운트 | 48 | 54 | 22 | 15 | 10 | 8 | 5 | 4 | 3 | 3 |
| 세 미 에어 마운트 | 48 | 53 | 20 | 12 | 9 | 7 | 6 | 5 | 3 | 2 |

기존 에어 마운트로 구성된 진동계와 세미 에어 마운트로 구성된 진동계의 고유 진동수가 5~10Hz 범위 내에 있으므로 공진 영역인 5Hz와 10Hz에서 진동 전달율이 높게 나타났다. 그러나 공진 영역을 벗어나면서부터 진동 전달율이 낮아지기 시작해 35Hz 이상에서는 6% 이하로 줄어들었다. 실험 결과는 세미 에어 마운트로 구성된 진동계와 기존 에어 마운트로 구성된 진동계의 진동 전달율이 비슷한 것으로 나타났다.

4.3 고유 진동수

모터로 진동계를 가진시킬 때 모터의 특정 진동수에서 에어 마운트 위에 얹혀진 철판은 공진에 의해 큰 폭의 진동을 하게 되는데, 이 때의 모터 진동수가 에어 마운트로 구성된 진동계의 고유 진동수이다. 철판의 진동 변위량은 센서 S2

에서 측정하였으며 그 결과는 표 6과 같다.

표 6. 고유 진동수

| 진 동 수 (Hz) | | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---------------------------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 진 동 변위량 (μm) | 기 존 에어마운트 | 437 | 520 | 674 | 533 | 503 | 335 | 253 |
| | 세 미 에어마운트 | 300 | 332 | 297 | 267 | 366 | 181 | 171 |

모터 회전 진동수를 6~12Hz 까지 변화시켜가며 진동 변위량을 측정된 결과, 기존 에어 마운트로 구성된 진동계의 고유 진동수는 8Hz이고 세미 에어 마운트로 구성된 진동계의 고유 진동수는 10Hz임을 확인하였다. 에어 마운트로 구성된 진동계의 고유 진동수가 보통 5Hz 이하임을 감안하면 8Hz나 10Hz는 상당히 높은 고유 진동수라 할 수 있는데, 이는 실험을 한 에어 마운트가 100kg 정도의 사용 하중에 적용되는 소형 에어 마운트이기 때문에 고유 진동수가 높게 나온 것이다.

진동계 질량이 공기에 의해 지지되는 기존 에어 마운트와는 다르게 세미 에어 마운트는 공기와 댐퍼에 의해 지지되므로 진동계의 흔들림(Shaking)이 크게 줄어드는데, 이를 변위량 실험 결과로부터 확인할 수 있었다.

4.4 감쇠비

기존 에어 마운트와 세미 에어 마운트의 감쇠 성능을 비교하기 위해 충격 실험을 수행하였다. 실험은 쇠파치로 모터 윗 부분을 가격하여 충격을 줄 때 발생하는 진동 응답을 센서 S2에서 측정하는 방법으로 이루어 졌다. 감쇠비는 진동 응답 곡선에서 대수 감쇠율을 구한 후 식3을 적용하여 구했다.

$$\delta = \ln \frac{X_1}{X_2} = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad [\text{식3}]$$

여기서 δ 는 대수 감쇠율, ζ 는 감쇠비, X_1, X_2 는 한 주기 간격의 진동 가속도값이다. 측정과 계산을 한 결과, 기존 에어 마운트의 감쇠비는 0.033이고 세미 에어 마운트의 감쇠비는 0.052인 것으로 나타났다.

4.5 기밀 실험

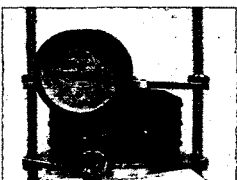


그림 10. 실험 장치 구성

기밀 실험은 KSR4001-1995에 의거해 수행하였다. 에어 마운트를 규정된 높이로 유지하고 상용 최고 내압의 공기를 봉입하여 24시간 방치한 후 압력 강하를 측정하였다. 시험 결과 24시간이 경과한 후에도

공기 누설은 전혀 없는 것으로 나타났다. KS 규격에 따른 상기의 표준 시험 외에도 장기적인 공기 누설 여부를 확인하기 위해 2개월간 기밀 실험을 하였는데 공기 누설은 없는 것으로 나타났다.

5. 해석과 실험의 비교

세미 에어 마운트에 대한 해석과 실험 결과를 표 7에 정리하였다.

표 7. 해석과 실험 결과 비교

| | 해석 | 실험 |
|-------|------------------|------------------|
| 고유진동수 | 9Hz | 10Hz |
| 감쇠비 | 0.053 | 0.052 |
| 방진 효율 | 95% 이상 (30Hz 이상) | 93% 이상 (30Hz 이상) |

해석 결과와 실험 결과가 비교적 잘 일치했으며 이는 해석이 타당하게 수행되었음을 의미한다. 이로부터 향후 세미 에어 마운트를 추가 개발할 때에는 해석만으로도 어느 정도 그 성능을 예측할 수 있을 것이라 생각한다.

6. 결론

세미 에어 마운트로 구성된 진동계는 기존 에어 마운트로 구성된 진동계에 비해 고유 진동수가 높아 방진 성능은 약간 떨어지지만 감쇠 성능이 크게 개선되는 것으로 나타났다. 또한 세미 에어 마운트는 내부의 댐퍼로 인해 횡하중에 대한 저항성이 커지고, 과도응답 동안에 발생하는 진동계의 흔들림(Shaking)을 크게 줄여주는 것으로 나타났다.

세미 에어 마운트는 높은 방진 효율과 높은 감쇠 성능을 함께 필요로 하는 기계 방진에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 생각한다.

후 기

본 논문은 중소기업청에서 시행하는 중소기업기술헌신개발사업의 연구 결과를 바탕으로 작성되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) 박철희, 1988, 기계진동학, 반도출판사.
- (2) 전성택, 소음진동편람, 동화기술.
- (3) 박형진, 2001, Ansys를 이용한 유한요소해석, 광문각.
- (4) 이성춘, 2000, 소음진동기술 기초, 엔에스비연구소.