

# 부가질량 효과에 따른 고효율 방진마운트의 진동저감 성능평가

## Evaluation of high performance isolation spring mount by attached masses

호경찬†·이병철\*·이용현\*·이영제\*·김민배\*

Kyoung-Chan Ho, Byoung-Chul Lee, Yong-Hyun Lee, Young-Je Lee and Min-Bae Kim

**Key Words** : Isolation(절연), Spring Mount(스프링 마운트), Performance(성능), Attached mass(부가질량)

### ABSTRACT

The machine equipment of the building inside occurs the vibration. In order to reduce this vibration spring, rubber pad is used. But efficiency of this classical mount is restricted at specific frequency. Also maximum efficiency design is complicated. This paper proposes and examines a attached mass isolation system that is used to reduce transmitted vibrations from machines onto their floor support. With attached mass the low frequency performance is improved overall. The performance is showed in 2 degree of freedom model test. And the proposed isolator has been validated by dynamic test and good agreement between theoretical and experimental results has been obtained.

## 1. 서 론

작업현장(공장, 설비)이나 건축물내의 설비들이 소형화, 경량화, 정밀화되는 추세에 따라 관련 허용진동기준도 엄격해지고 있다. 또한 현장작업자와 건물 내 거주자의 진동에 대한 민감도는 점점 증가하고 있다.

예를 들어 송풍기의 경우 일정한 주파수 대역에서 지속적인 진동을 유발하고 이 진동은 진동 또는 소음으로 변환되어 근접한 다른 장비나 다른 공간의 작업자에게 악영향을 끼친다. 이것은 건물 내 환기, 냉방 및 송풍과 관련된 설비들도 마찬가지이다. 이러한 진동은 사람, 기계설비 또는 건물에 악영향을 주게 마련이고 대안으로는 여러 종류의 진동절연기법이 현재 적용되고 있다.

진동절연이란 진동을 유발하는 기계류를 고무패드, 스프링 등으로 탄성지지함으로써, 기계 작동시 발생하는 가진력이 바닥으로 전달되는 것을 차단하거나 반대로 주변에서 장비(정밀장비)로 유입되는 진동을 차단하는 것을 의미한다.

진동절연기법으로는 방진스프링, 방진패드, 플로팅플로어

등 많은 방법이 있다.

본 논문에서는 방진스프링마운트에 의한 진동절연 성능에 대해 알아보고, 일반적인 방진스프링의 문제점 및 그 해결방안으로 부가질량 효과를 적용한 고효율 방진마운트에 대해 성능을 평가하였다. 또한 2자유도계 단순모델의 이론 및 해석을 통해 최적설계의 기초를 마련하고, 모형시험을 통해 부가질량의 효과를 각 가진주파수별 피크 진동가속도 레벨을 비교하여 성능을 검증하였다.

## 2. 이론적 분석

### 2.1 1자유도계 모델

그림 1은 부가질량 효과를 적용한 1자유도계 모델이다. 여기서 질량  $m$ 은 기계장비이며 기초에 스프링( $k$ )과 댐퍼( $c$ )로 지지되어 있다. 또한  $w(t)$ 는 기초가진이며,  $p(t)$ 는 가진력을 의미한다. 이때 스프링, 댐퍼의 질량은 무시하고, 스프링상수와 감쇠계수는 전체 주파수 대역에서 일정하다고 가정하였다. 또한 부가질량( $m_0$ )은 회전점을 기준하여 양쪽으로 길이  $L_1$ ,  $L_2$ 의 암(arm)에 의해 기계장비와 기초에 연결되어 있다.

† 교신저자:(주)에이브이티부설 기술연구소

E-mail : kcho@avt.co.kr

Tel : (02) 3665-9685, Fax : (02) 3665-9686

\* (주)에이브이티

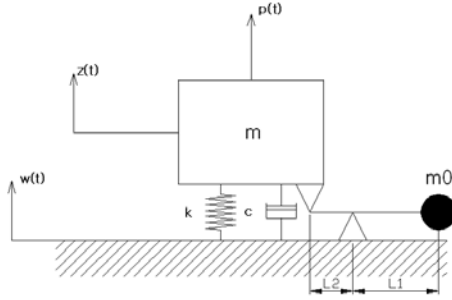


그림 1. 부가질량구조를 적용한 1자유도계 모델

기초를  $w(t) = w_0 e^{i\omega t}$ 의 조화함수로 가진하는 경우 그림 1과 같은 1자유도계 시스템의 운동방정식은 다음과 같다.

$$M\ddot{z}(t) + c\dot{z}(t) + kz(t) = M_0\ddot{w}(t) + c\dot{w}(t) + kw(t) \quad (1)$$

여기서 기계장비등가질량  $M = m + m_0(L_1/L_2)^2$ 이고, 부가등가질량은  $M_0 = m_0(1 + L_1/L_2)L_1/L_2$ 이다.

전달률(transmissibility, TR)은 steady-state 조화가진 경우 가진력과 기초로 전달된 힘의 비로 정의할 수 있고, 시스템이 선형일 경우 기초가진 진동레벨과 기계장비 진동레벨의 비와 동일하다.

그러므로 그림 1의 전달률은 다음과 같다.

$$TR = \frac{a}{w_0} = \sqrt{\frac{[\beta^2 - v(1 + \beta)r^2]^2 + (2r\zeta\beta^2)^2}{[\beta^2 - (v + \beta^2)r^2]^2 + (2r\zeta\beta^2)^2}} \quad (2)$$

여기서  $\beta = L_2/L_1$ ,  $v = m_0/m$ ,  $r$ 은 응답진동수와 가진진동수의 비이다.

식(2)의  $m_0$ 를 0(zero)으로 하면, 일반적인 스프링마운트의 TR이 된다. 그림 2에서 일반적인 방진마운트와 부가질량적용 마운트의 전달률을 비교하였다. 이때 감쇠비( $\zeta$ )는 0, 0.05이고, 질량비( $v$ )는 0.05이며 부가질량의 거리비( $\beta$ )는 0.5로 가정하였다.

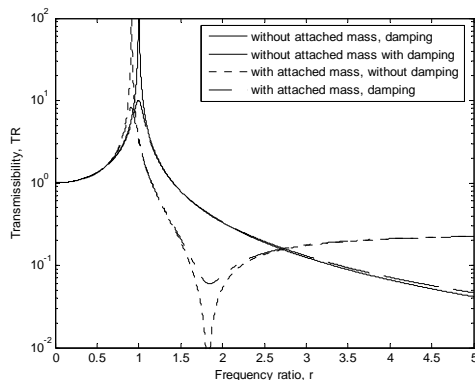


그림 2. 1자유도계 전달률(TR)의 비교

### (1) 일반적인 진동절연

그림 2에서의 같이 진동수비( $r$ )가  $r \geq \sqrt{2}$ 인 경우, 즉  $\omega > \sqrt{2}\omega_n$ 인 경우 전달률은 1보다 작다. 진동수비( $r$ )가 1.85인 경우 전달률은 감쇠비( $\zeta$ )가 0, 0.05일 때 각각 0.4122, 0.4143이 된다. 이론적으로 진동절연에서 최대성능은 감쇠가 0이고, 진동수비( $r$ )가  $\infty$ 인 경우이다. 하지만 실제로는 최적 조건에서도 감쇠는 존재하며 진동수비( $r$ )가 무한대가 될 수 없으므로, 가능한 한 감쇠를 작게 하고, 진동수비( $r$ )를 크게하여 전달률을 줄일 수 있다.

### (2) 부가질량 효과에 의한 진동절연

그림 2의  $m_0$ 가 0이 아닌 경우 즉, 부가질량구조가 적용된 경우 감쇠가 0일 때 전달률은  $r_0 = \sqrt{\beta^2/(v + v\beta)}$ 에서 0이 된다. 만약 감쇠가 있는 경우 비공진점( $r_0$ )에서 전달률은 0이 아닌 매우 작은 값을 갖는다. 여기서  $\beta$ 는 부가질량의 거리비이고,  $v$ 는 시스템과 부가질량의 질량비이다. 위의 관계로부터 비공진 주파수비를 설계할 수 있다.

그림 2에서 부가질량이 있는 경우 진동수비( $r$ )가 2이고, 감쇠비( $\zeta$ )가 0, 0.05일 때 전달률(TR)은 각각 0.009, 0.0368이다. 여기서 일반적인 방진마운트의 전달률과 비교하여 약 11배의 성능개선을 확인할 수 있다. 만약 감쇠가 작아질 경우 더 큰 효과를 기대할 수 있다.

또한 그림 4와 같이 시스템과 부가질량의 질량비에 따라서 최대 진동절연 주파수와 절연성능을 설계할 수 있다. 그림 4에서  $v=0.03$ ,  $\beta=0.5$ 로 하였다.

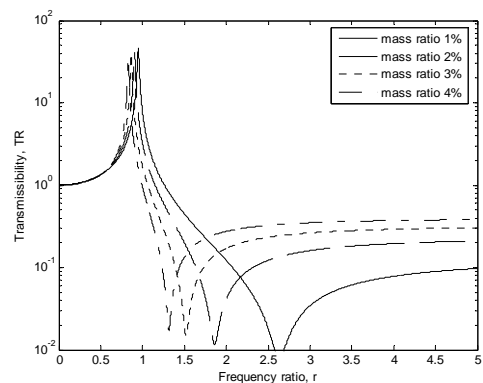


그림 3. 질량비 변화에 의한 전달률

### 2.2 2자유도계 모델

2자유도계 모델은 그림 4와 같이 두 개의 질량을 스프링과 댐퍼로 연결함으로써 간단히 모델링 할 수 있다. 여기서

1의 변수들은 건물의 바닥으로 간주할 수 있고, 2의 변수들은 장비 및 방진마운트로 간주할 수 있다. 그림 4의 모델을 Lagrange 방정식을 이용하여 운동방정식을 구하면

$$\begin{aligned} M_1 \ddot{z}_1(t) + c_1 \dot{z}_1(t) + k_1 z_1(t) + k_2 z_1(t) \\ - M_0 \ddot{z}_2(t) - c_2 \dot{z}_2(t) - k_2 z_2(t) = 0 \\ - M_0 \ddot{z}_2(t) - c_2 \dot{z}_1(t) - k_2 z_1(t) + M_2 \ddot{z}_2(t) \\ + c_2 \dot{z}_2(t) + k_2 z_2(t) = p(t) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $M_1 = m_1 + m_0(1 + L_1/L_2)^2$ ,  $M_2 = m_2 + m_0(L_1/L_2)^2$  이다.

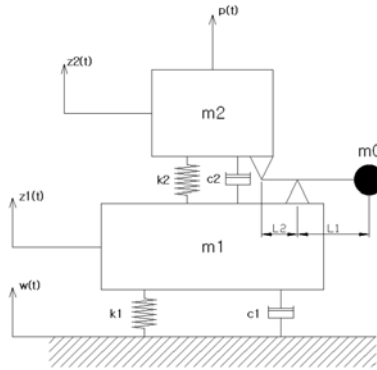


그림 4. 부가질량구조를 포함한 2자유도계 모델

위 식(3)을 Laplace 변환을 이용해 풀고 정리하면 다음과 같다.

$$TR = \frac{p_T}{p_m} = \sqrt{\frac{\left(\frac{\omega_s^2}{\omega_m^2} - \frac{\omega_s^2 M_0}{\omega_m^2 M} r^2\right)^2 + \left(\frac{\omega_s^{2c_2}}{M_2 \omega_m^3} r\right)^2}{E(\omega)^2 + F(\omega)^2}} \quad (4)$$

여기서,

$$E(\omega) = (1 - \alpha)r^4 - r^2 \left( \frac{M_2}{M_1} + \frac{\omega_s^2}{\omega_m^2} + 1 - \frac{2M_0}{M_1} + \frac{c_1 c_2}{M_1 M_2 \omega_m^2} \right) + \frac{\omega_s^2}{\omega_m^2}$$

$$F(\omega) = r \left[ \left( \frac{2M_0}{M_1 M_2 \omega_m} r^2 - \frac{r^2}{M_2 \omega_m} - \frac{r^2}{M_1 \omega_m} - \frac{\omega_s^2}{M_2 \omega_m^3} \right) c_2 \right. \\ \left. - \frac{c_1}{\omega_m} \left( \frac{r^2}{M_1} - \frac{1}{M_1} \right) \right]$$

$$c_1 = 2M_1 \zeta_m \omega_m, c_2 = 2M_2 \zeta_s \omega_s, \omega_m = \sqrt{k_2/M_2} \\ \omega_s = \sqrt{k_1/M_1}, \alpha = M_0^2/M_1 M_2, r = \omega/\omega_m$$

예를들어 산업용 팬의 경우 480rpm으로 회전하고 수직방향으로 5000N의 가진력을 발생시킨다. Table 1에 진동절연설계에 필요한 물성을 정리하였다.

이때 건물바닥과 진동절연기의 비감쇠 고유진동수는  $f_s = 1/2\pi \sqrt{k_1/M_1}$ ,  $f_m = 1/2\pi \sqrt{k_2/M_2}$  이다.

Table 1의 변수로부터  $f_s = 2.011Hz$ ,  $f_m = 9.147Hz$  이다. 부가질량의 거리비( $L_1/L_2$ )는 2이다.

표 1. 2자유도계 모델 물성치

Floor mass	$m_1 = 8000 \text{ kg}$
Machine mass	$m_2 = 4800 \text{ kg}$
Corrector mass	$m_0 = 53 \text{ kg}$
Floor stiffness	$k_1 = 28000 \text{ kN/m}$
Isolation stiffness	$k_2 = 800 \text{ kN/m}$
Floor damping coefficient	$c_1 = 53.7 \text{ kNs/m}$
Isolation damping coefficient	$c_2 = 2.5 \text{ kNs/m}$

그림 5는 건물바닥의 강성이 다른 경우 일반적인 방진스프링마운트의 주파수비에 따른 전달률이다.

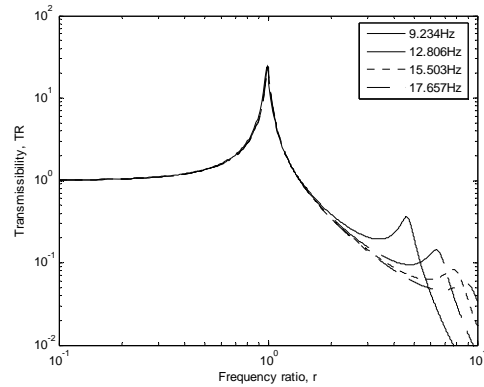


그림 5. 2자유도계 모델의 진동전달률

그림 5에서 비공진점(anti-resonance)의 전달률을 살펴보면 건물바닥강성에 따라 0.194, 0.095, 0.063, 0.047이다. 이때 방진효율은 80.6%, 90.5%, 93.7%, 95.3%이며, 방진효율 80.6%는 방진성능으로 부족하다.

그림 6은 부가질량효과에 의한 진동전달률이다. 이때 비공진점은 부가질량에 의해  $\omega_0 = \sqrt{k_2/M_0} = 50.24 \text{ rad/s}$ 에서 나타나며 전달률은 바닥강성에 따라 각각 0.035, 0.016, 0.014, 0.013이다.

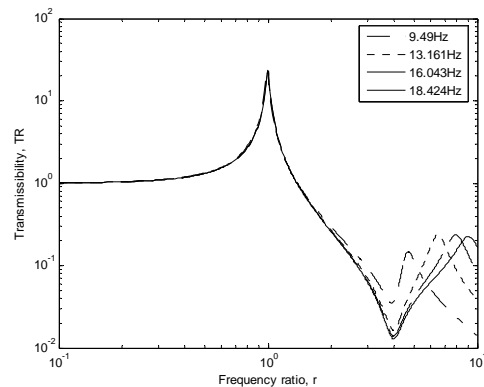


그림 6. 부가질량을 고려한 2자유도계 모델의 전달률

이때 방진효율은 96.5%, 98.4%, 98.6%, 98.7%이다. 설계된 96.5%의 방진효율은 방진성능으로 적절하다.

그림 7은 질량비의 변화에 따른 전달률의 비교이다. 질량비에 따라 비공진점(anti-resonance)의 주파수와 크기가 변함을 알 수 있고, 이를 이용해 설계목적에 따라 주파수 조절이 가능하다.

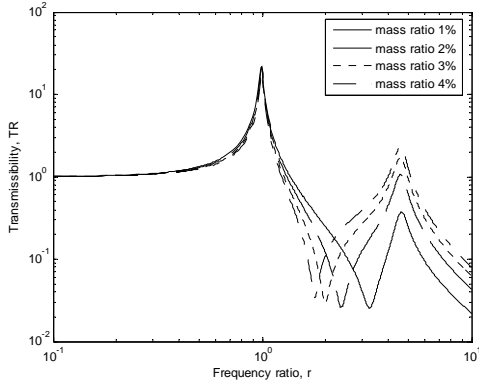


그림 7. 질량비에 따른 전달률 비교

### 3. 2자유도계 모델의 해석적 접근

#### 3.1 해석 모델

그림 4의 2자유도계 모델을 UMLab의 Universal Mechanism Program(UM)을 이용하여 동역학적 거동을 해석하였다. 이때 2자유도계 모델 중 스프링과 댐퍼, 레버의 질량은 무시하였다. 또 세부적인 물성은 표 1과 동일하다.

그림 8은 해석에 적용한 부가질량 구조가 없는 2자유도계 구조이다.

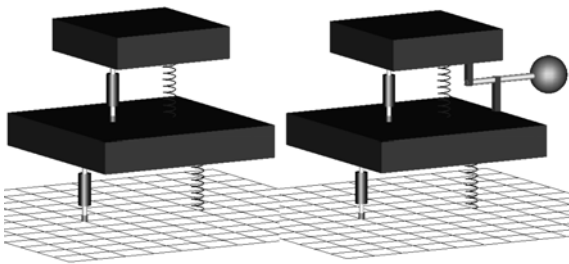


그림 8. 2자유도계 동역학 모델

#### 3.2 강제진동

##### (1) Case 1(부가질량 2.3kg)

부가질량구조가 없는 경우와 부가질량구조를 포함하는 경우를 비교하였다. 이때 강제진동주파수는 최대의 진동저감이 예상되는 8Hz로 하였으며, 변위진폭을 3mm로 하였다. 또한 부가질량은 2.3kg으로 하였다.

그림 9는 부가질량의 유, 무에 따른 해석결과이다. 그림에서 보는 것과 같이 부가질량이 없는 일반적인 스프링방진마운트의 경우 피크-피크의 크기가 약  $0.46\text{m/s}^2$ 이고, 부가질량구조가 적용된 경우 피크-피크의 크기가 약  $0.098\text{m/s}^2$ 으로 약 78%의 진동감소가 나타났다.

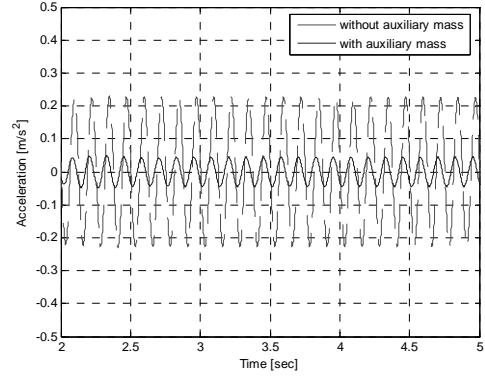


그림 9. 강제진동에 의한 진동가속도 비교(1)

##### (2) Case 2(부가질량 3.45kg)

Case 2는 부가질량의 변화에 의한 진동절연성능을 알아보기 위해 부가질량을 3.45kg으로 case 1보다 늘려 해석하였다. 이때 가진주파수는 최대의 진동절연성능이 예상되는 7Hz로 하였다. 그림 10은 강제진동에 의한 부가질량의 유, 무에 따른 진동가속도 비교이다. 그림 9의 결과와 비교하여 부가질량이 없는 경우 진폭이 작아진 이유는 시스템의 공진(약 9Hz)에서 약간 떨어졌기 때문이다. Case 1에서와 같이 부가질량이 없는 경우 피크-피크의 크기가 약  $0.228\text{m/s}^2$ 이고, 부가질량구조가 적용된 경우 약  $0.039\text{m/s}^2$ 으로 약 82.9%의 진동감소가 나타났다. Case 1과 비교하여 부가질량을 늘리면 진동절연주파수는 변하지만 진동감소는 큰 편차를 갖지 않는다.

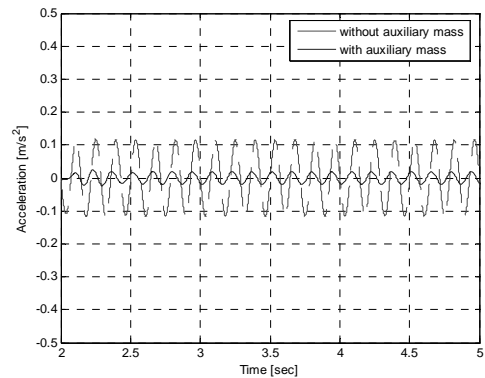


그림 10. 강제진동에 의한 진동가속도 비교(2)

#### 4. 고유진동수 및 방진효율 실험

##### 4.1 실험세팅

2자유도계 모델을 만들기 위해 그림 11과 같이 콘크리트 슬래브를 steel 앵글로 조립하여 방진마운트 위에 얹고 건물바닥에 올려놓았다. 또한 주파수별 가진을 위해 편심질량을 부착한 DC모터를 콘크리트 슬래브의 중앙에 위치시켰다. 가진은 모터의 rpm을 조절하여 특정주파수를 조화가진하였다.

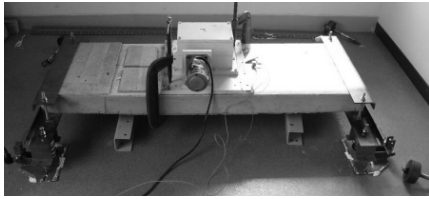


그림 11. 2자유도계 모델 실험 세팅

그림 12의 왼쪽은 부가질량구조를 갖는 마운트의 제작도이며, 오른쪽은 부가질량과 마운트의 형상 사진(부가질량 부착시험 전)이다. 그림 13은 상부와 바닥의 가속도계 설치도이다. 가속도계는 그림 13과 같이 콘크리트 슬래브의 중앙과 방진마운트 바로 옆 건물바닥에 각각 1개씩 설치하였다. 설치한 가속도계로부터 진동가속도를 RION社의 SA-78에 연결하여 수직방향 진동가속도를 레코딩 한 후 PC로 옮겨 분석하였다.

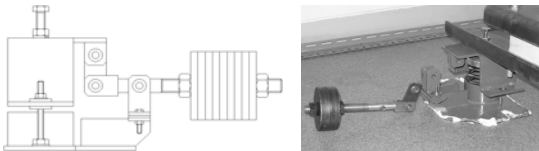


그림 12. 마운트 제작도 및 형상

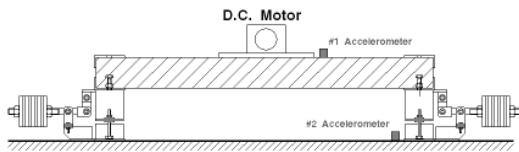


그림 13. 계측장비 및 시험세팅

##### 4.2 자유진동 실험결과

자유진동 시험은 시험구조물의 특성을 알아보기 위해 부가질량구조를 설치하지 않고 실시하였다. 그림 14는 그림 11의 모델을 20Hz로 가진한 후 모터를 정지시켜 자유진동을 유도하여 건물바닥의 진동가속도 측정값과 그림 11의 모델을 그림 8과 같이 2자유도계로 모델링하여 UM 프로그램

을 이용해 해석한 결과값의 비교이다. 이때 시험구조물의 1차 고유진동수는 약 3.625Hz이다. 또한 자유진동 실험결과 감쇠가 거의 없어 진동이 약 200초 이상 지속됨을 알 수 있다.

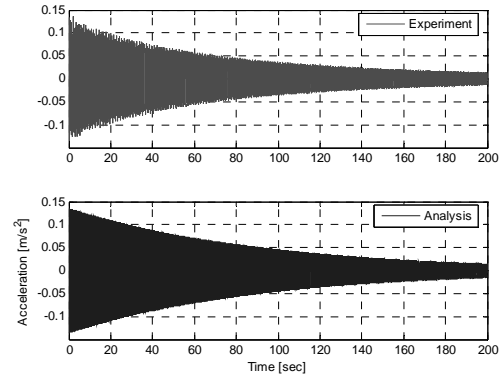


그림 14. 자유진동 실험 및 해석 비교

##### 4.3 강제진동 실험결과

강제진동 시험의 경우 부가질량의 진동절연 주파수에 따라 7, 8Hz로 가진하여 시험하였다. 그림 15는 모터를 8Hz(480rpm)으로 회전시키고 건물바닥에서 측정한 진동가속도값과 UM으로 해석한 결과값의 비교이다. 실험결과에서는 해석과는 달리 고주파수의 noise가 많이 유입되어 있지만 주기적인 형상은 해석과 거의 일치한다.

마찬가지로 그림 16은 7Hz(420rpm)로 가진하여 실험한 결과와 UM 해석 결과의 비교이다. 해석의 경우 진동가속도가 실험보다 약간 크게 나타났는데 이는 실험의 경우 제작한 마운트의 부가질량 구조의 회전부위에서 마찰 발생으로 인한 오차라 판단된다. 실험결과 상판과 하판의 진동가속도의 차가 약 각 가진주파수별로 약  $0.0063\text{m/s}^2$ 와  $0.0059\text{m/s}^2$ 로 나타났다. 해석 역시  $0.00543\text{m/s}^2$ 와  $0.005\text{m/s}^2$ 로 나타났다.

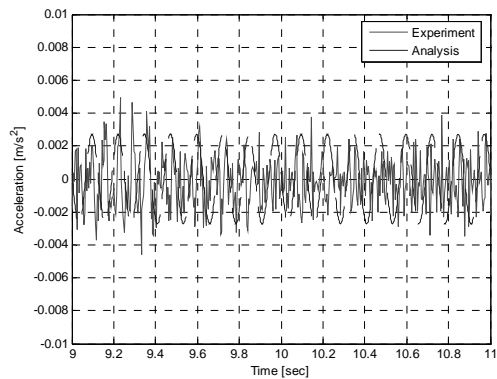


그림 15. 강제진동 실험 및 해석 비교(8Hz)

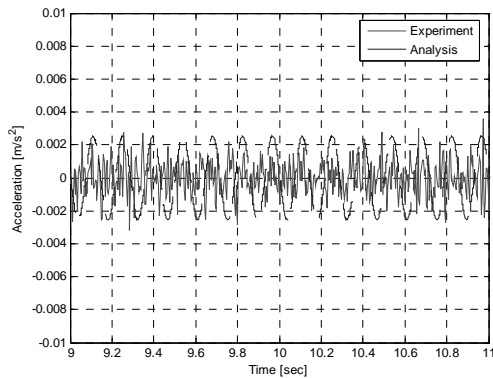


그림 16. 강제진동 실험 및 해석 비교(7Hz)

#### 4.4 가진주파수별 피크레벨 비교

특정주파수의 해석 결과로는 방진마운트의 성능을 검증함에 있어서 한계가 있기 때문에 모터를 3~15Hz까지 1Hz 간격으로 가진한 후 그 응답을 진동가속도값으로 계측하였다. 그림 17은 콘크리트 슬래브와 건물바닥에서 측정된 진동가속도의 결과이다. 4Hz에서는 공진에 의한 시스템의 과도진동으로 측정이 불가능하여 제외하였다. 전체적으로 주파수가 커질수록 가진력이 증가하여 진동가속도가 커짐을 알 수 있다. 이때 건물바닥의 진동가속도도 마찬가지로 주파수가 증가할수록 진동가속도 역시 증가하는 경향을 보인다. 이때 바닥의 공진의 영향으로 진동가속도의 크기가 크게 증가함을 알 수 있다. 실험은 부가질량을 각각 2.3kg, 3.45kg으로 한 경우 그 영향을 알아보았다. 실험결과 부가질량의 증가에 따라 가장 작은 진동가속도의 주파수가 8Hz에서 7Hz로 감소하였다. 그러므로 부가질량의 크기를 제어하여 원하는 주파수 대역의 방진설계가 가능함을 확인하였다.

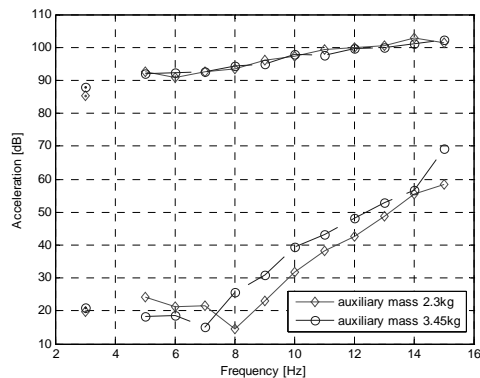


그림 17. 가진주파수별 피크 레벨 비교

## 5. 결론

본 논문에서는 부가질량을 이용한 방진마운트의 성능에 대한 이론과 해석, 모형실험을 통해 기존 방진마운트와 부가질량 구조를 갖는 방진마운트의 성능을 비교, 분석하였다.

1, 2자유도계의 이론적인 전달률을 예측하여 주파수별 부가질량 효과의 성능과 부가질량의 변화에 따른 성능을 확인하였으며, 건물바닥의 강성에 따라 전달률의 변화를 분석하였다.

또한 동역학 해석 프로그램을 통해 부가질량의 효과에 의해 약 80%의 진동가속도의 감소를 확인하였다.

마지막으로 모형실험으로 자유진동 및 강제진동을 실시하여 부가질량의 크기에 따라 진동감소를 확인하였으며, 각 주파수별 가진에 의한 피크 레벨을 비교하여 진동가속도 크기 감소와 부가질량 크기에 따라 진동저감 주파수의 변화를 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- (1) KUBOTA M., ISHIMARY S., TAKAHITO N. and IPPEI H. Dynamic response controlled structures with lever mechanisms. Proceedings of the Smart Structures and Materials Conference, San Diego, 1998, 3325, 35-44.
- (2) SCIULI D. and INMAN D. Comparison of single and two degree-of-freedom models for passive and active vibration isolation design. Proceedings of the Smart Structures and Material Conference, San Diego, 1996, 2720, 293-304.
- (3) Ivovich V.A., Savovich M.K., Isolation of Floor Machines by Lever-Type Inertial Vibration Corrector. Proc. Instn Civ. Engrs Structs & Bldgs, London, 2001, Vol 146, Issue 4, November, 391-402.
- (4) Ivovich V.A., Savovich M.K., Passive Isolation of Machinery Vibration From Flexible Structures, Vestnik Mashinostroeniya, 2001, No 6, 18-21, Moscow.