

## 수치해석을 위한 방진 마운트의 동적 특성 결정 및 검증

한형석<sup>1</sup>, 박미유<sup>1\*</sup>, 조흥기<sup>1</sup>, 김종길<sup>1</sup>, 임동빈<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>국방기술품질원

### Definition and Verification of the Dynamic Characteristics of the Anti-Vibration Mount for the Numerical Analysis

Hyung-Suk Han<sup>1</sup>, Mi-Yoo Park<sup>1\*</sup>, Heung-Gi Cho<sup>1</sup>, Joong-Gil Kim<sup>1</sup> and Dong-Been Im<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Defense Agency of Technology and Quality

**요 약** 고무재료의 비선형적인 특성으로 인해 고무재질 방진 마운트의 탄성계수와 감쇠계수는 주파수에 따라 달라진다. 따라서 고무재질의 방진 마운트 설계 시 마운트의 동적 특성을 반드시 고려해야만 한다. 특히, 수치해석을 수행하는데 있어 해석결과는 마운트의 동적 강성 고려 여부에 따라 크게 달라진다. 본 논문에서는 한국 해군에서 승인되어 사용되고 있는 특정 표준 마운트에 대해 실험적으로 동적 특성을 정의하였으며, 이러한 동적 특성을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우에 대해 수행한 수치해석 결과와 실험 결과를 비교하였다.

**Abstract** Because the non-linear property of the rubber, the elastic modulus and damping factor of the rubber mount are dependent on the frequency. Therefore, the dynamic properties of the rubber mount should be considered when the anti-vibration mount is designed. Especially, when the numerical analysis is performed, the results can have much errors not considering the dynamic characteristics of the rubber mount. In this paper, the dynamic properties of typical standard rubber mount approved by ROK navy are defined experimentally and the results from the numerical analysis and experiment are compared for considering and non-considering the dynamic properties of the rubber mount respectively.

**Key Words** : Dynamic stiffness, Loss factor, Mechanical impedance, Rubber mount

### 1. 서론

합정에 적용되는 방진마운트는 장비에서 발생하는 진동이 선체로 전달되는 것을 억제함으로써 함 내부의 구조기인 소음뿐만 아니라 함외로 전달되는 수중방사소음을 저감하기 위해서 사용되어진다. 고무로 만들어진 방진 마운트의 경우 고무의 비선형적 특성으로 인해 주파수에 따라 탄성계수 및 손실계수가 달라지며 이러한 특성은 많은 문헌 및 연구에서 다루어지고 있다[1-5]. 따라서 수치해석 시 이러한 동적 특성을 고려하지 않을 경우 실제 시스템의 응답과 수치해석간의 오차가 커지게 되므로 수치해석의 신뢰성을 떨어뜨리는 결과를 초래하게 된다.

또한 합정에 적용되는 장비 받침대의 경우 받침대 상부의 장비를 지지하는 방진마운트의 임피던스에 비해 충

분히 큰 임피던스를 가지지 못하면 오히려 바닥 받침대의 진동을 야기하여 선체를 가진 시키게 되어 수중방사소음 증가라는 결과를 초래하게 된다. 따라서 합정 설계 시 이러한 장비 받침대의 임피던스에 대한 해석이 활발히 진행하고 있지만 방진 마운트의 동적 특성까지는 고려하지 못하고 있는 실정이다.

이와 같이 보다 정확한 해석 및 평가를 위해서는 방진 마운트의 동적강성 및 손실계수를 실험을 통해 정확히 파악해야하며 이러한 근거를 가지고 수치해석을 수행해야만 한다. 실제로 미 해군의 경우 합정에 적용되는 마운트에 대해 이러한 동적 특성을 평가할 수 있는 장치를 구성하여 평가하고 있다[6].

본 논문에서는 합정에 사용되는 표준마운트에 대해 실험을 통해 측정된 동적강성과 손실계수[7]를 수치해석에

\*교신저자 : 박미유(lostmu@naver.com)

접수일 10년 07월 13일

수정일 10년 08월 31일

게재확정일 10년 09월 08일

반영하여 전달진동 해석을 수행하였다. 진동해석에서 마운트의 동적 강성을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 진동값에 대해 실험 결과와의 오차를 비교함으로써 마운트의 동적 특성변영의 중요성을 확인하고자 한다. 또한 실험 결과와 수치해석 결과의 진동값 비교를 통해 실험으로 결정된 방진 마운트의 동적 특성을 해석적으로 재검증 하고자 한다.

## 2. 마운트의 동적특성

일반적으로 합정용 장비에서 많이 사용되고 있는 단일 탄성 지지 구조에 대해 그림 1과 같이 단순 질량-스프링 계로 가정하면 가진력과 변위는 식 (1)의 관계를 가짐을 알 수 있다.

$$\begin{bmatrix} k - m\omega^2 & -k \\ -k & k + Z_f j\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ X_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

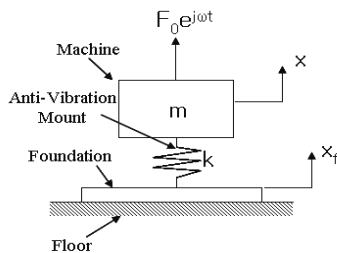
여기서  $Z_f$ 는 장비 받침대의 임피던스,  $\omega$ 는 주파수,  $X_f$ 는 받침대의 변위,  $m$ 은 장비의 무게,  $k$ 는 적용된 탄성 마운트의 총 등가 강성,  $X$ 는 장비의 변위,  $F_0$ 은 장비의 가진력이다.

식 (1)로부터 바닥 전달 진동 및 탄성 마운트 상, 하부의 변위 전달률은 식 (2)~(3)과 같다.

$$X_f = \frac{1}{A + B\left(\frac{Z_f j\omega}{k}\right)} \quad (2)$$

$$A = -\frac{m\omega^2}{F_0}, \quad B = \frac{k - m\omega^2}{F_0} \quad (3)$$

$$\frac{X_f}{X} = \frac{1}{1 + \frac{Z_f j\omega}{k}} \quad (3)$$



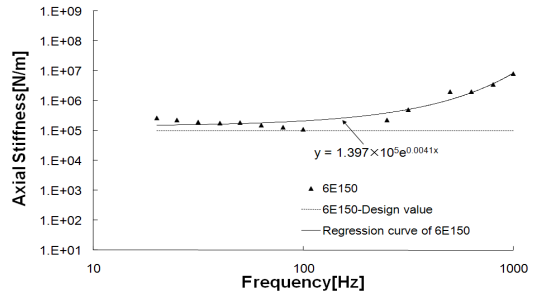
[그림 1] 단일 탄성지지 장비의 질량-스프링 계 개념도

식 (2)~(3)으로부터 바닥으로 전달되는 진동 및 변위 전달률은 받침대의 임피던스와 탄성 마운트의 강성과의 비에 의해 영향을 받음을 알 수 있으며 탄성마운트의 강성에 따라 진동 전달률이 다르게 계산될 수 있음을 알 수 있다.

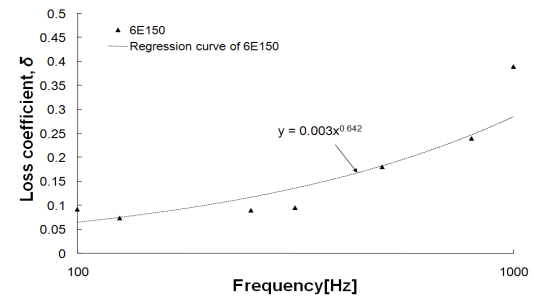
합정에 사용되고 있는 표준 마운트인 Bary Controls사에서 제작한 6E150에 대해 KS M 6604[8]의 비공진법에 따라 동적강성과 손실계수를 구한 결과 동적 강성과 손실계수는 그림 2와 같으며 회귀분석 결과 강성 및 손실계수와 주파수간의 관계를 식(4)~(5)와 같이 구할 수 있었다[7].

$$|k^*(f)|_{6E150} = 1.397 \times 10^5 e^{0.0041f} \quad [N/m] \quad (4)$$

$$\delta(f)_{6E150} = 0.0034 f^{0.6928} \quad (5)$$



(a) 동적강성



(b) 손실계수

[그림 2] 실험에 의해 측정된 표준마운트(6E150)의 주파수에 따른 동적강성 및 손실계수

[표 1] 합정용 표준마운트 6E150의 재료 물성

| 종류           | 6E150        |
|--------------|--------------|
| 고무의 종류       | CR(Neoprene) |
| 경도, Shore"A" | 45           |
| 하중 용량(N)     | 445~667      |
| 정적 강성(N/m)   | 96,699       |

여기서 6E150 마운트의 사양은 표 1과 같다.

이와 같이 실제 방진 마운트의 경우 고무의 비선형적 특성으로 인해 주파수에 따라 강성 및 손실계수가 증가하는 경향을 나타내므로 수치해석 수행 시 이러한 마운트의 동적 특성을 고려해야함을 알 수 있다.

### 3. 실험 및 수치해석

본 절에서는 6E150 마운트에 대해 제작사에서 제시하는 정적강성을 반영한 경우와 실험으로부터 구한 식 (4)의 동적강성 및 식 (5)의 손실계수를 반영한 경우 마운트 상, 하단 진동에 대해 각각 수치해석을 수행하고 수치해석 결과를 실제 실험 결과와 비교하고자 한다.

#### 3.1 실험

그림 3은 실험장치 구성을 보여준다. 그림 3과 같이 방진 마운트를 시험지그에 고정시켜 놓은 상태에서 가진기(LING, LMT-100)로 마운트 상단을 20Hz~1000Hz 주파수 범위내에서 1/3 옥타브 밴드 중심 주파수로 사인 가진 하였다. 이때 가진력은 2N이며 마운트 상부 및 마운트 하부 시험 지그에 가속도 센서(Endevco model 27AM1-10)를 부착하여 가속도를 구하고 적분기를 이용하여 변위를 구하였다.

#### 3.2 수치해석

수치해석은 마운트의 강성 및 손실계수를 마운트 제작사에서 제시하는 값을 기준으로 주파수에 독립적으로 주어졌던 경우와 앞서 실험을 통해 얻어진 마운트의 동적 강성 및 손실계수를 적용하였을 때에 대해 수행하였다. 여기서 수치해석은 상용 소프트웨어인 MSC. NASTRAN을 사용하였다.

##### 3.2.1 해석모델

그림 4는 전절의 실험 장치에 대한 유한요소모델이다. 여기서 마운트의 경우 1-D 스프링요소로 모델링하고 마운트의 강성 및 손실계수를 마운트 제작사에서 제시하는 주파수에 독립적인 값을 적용했을 때와 2절의 실험결과를 반영하여 마운트의 동적특성을 고려했을 때에 대해 별도로 해석을 수행하였다.

시험 지그의 경우 10개 노드를 가지는 사면체(Tetrahedra) 솔리드 요소를 사용하여 모델링 하였다. 실험 진행 시 시험 지그는 별다른 구속 장치 없이 바닥에 설치하였다.

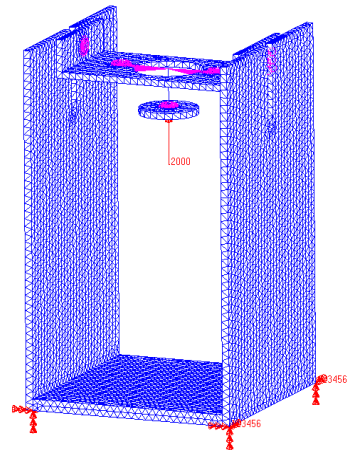
이와 같은 경우 바닥조건에 따라 진동 특성이 달라지기 때문에 시험 지그와 바닥과의 접촉상태에 따른 접촉

강성을 정의하여 수치해석에 반영해야한다. 하지만 본 논문에서는 시험 지그가 충분히 무거운 바닥 구속 조건을 완전구속조건으로 근사화 할 수 있다고 가정하였다.

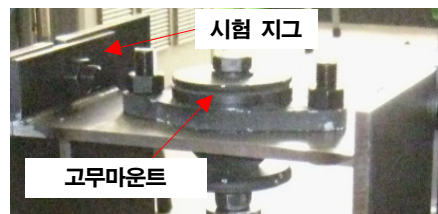
해석모델에서 가진기는 제외하였으며 실험과 동일하게 마운트의 한쪽 노드에 20Hz~1kHz 사이의 1/3 옥타브 밴드 중심주파수 성분으로 2N의 하중을 가하여 강제진동 해석을 수행하였다.



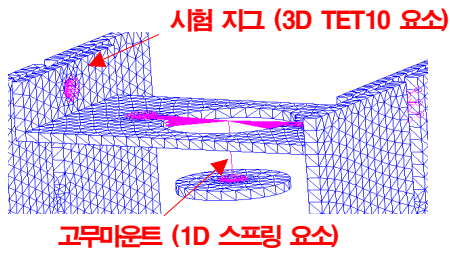
[그림 3] 시험 지그 및 셋업



(a) 시험지그의 FEM 모델



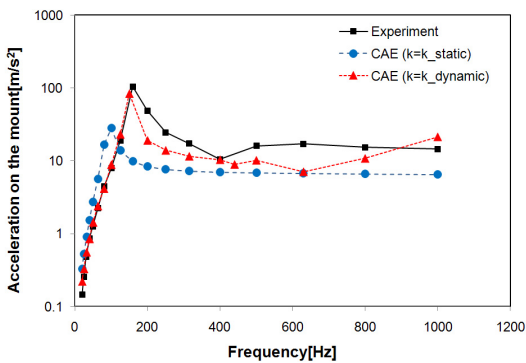
(b) 시험 지그 상단의 방진마운트 사진



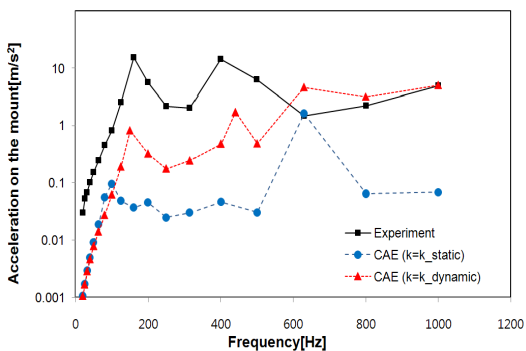
(c) 시험 지그 상단의 방진마운트에 대한 FEM 모델  
[그림 4] 시험 지그의 FEM 모델

### 3.2.2 해석결과

그림 5는 가진기와 연결된 마운트 상부에서의 해석 결과 및 측정 결과 가속도이다. 그림 5에서 마운트의 강성을 원제작사가 제시한 값을 사용하고 강성이 주파수에 대해 일정하다고 가정한 경우 실험결과에 비해 가속도 레벨이 전 주파수 범위 내에서 낮게 평가됨을 알 수 있었다. 하지만 실험을 통해 얻어진 강성과 손실계수를 적용한 경우 마운트의 원제작사에서 제시하는 정적강성을 사용한 경우에 비해 큰 가속도레벨을 얻을 수 있었으며, 실제 실험 결과와도 유사함을 알 수 있었다.

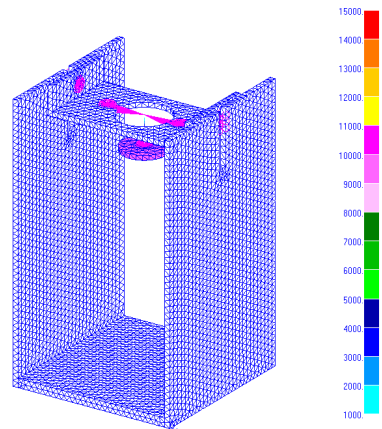


[그림 5] 마운트 상단의 가속도

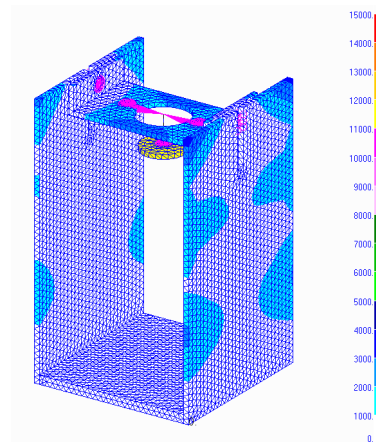


[그림 6] 마운트 하단의 가속도

그림 6은 시험 지그와 연결된 마운트 하부에서의 진동 측정 결과이다. 그림 6에서 전달 진동의 수치해석 결과가 실험결과에 비해 저주파 대역에서 대체적으로 작게 평가됨을 알 수 있었다. 이는 수치해석 모델 근사화 단계에서 바닥 구속 조건을 완전 구속으로 한 가정 때문에 바닥 임피던스가 실제 실험조건에 비해 크기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 가정에 의한 오차를 고려하여 마운트의 강성을 원제작사가 제시한 정적강성을 적용한 경우와 실험을 통해 얻어진 동적 강성을 적용한 경우를 비교해 보면 마운트의 동적특성을 고려하지 않을 경우 전달 진동 또한 낮게 평가됨을 알 수 있었다. 그림 7은 20Hz~1kHz 가진에 대한 가속도의 평균 등고선(Contour)이다. 그림 7을 통해 마운트를 통한 시험지그로의 전달진동 특성은 마운트 강성의 동적 특성의 고려 여부에 따라 크게 달라짐을 알 수 있었다.



(a) 정적 강성 적용



(b) 동적 강성 적용

[그림 7] 20Hz~1kHz 주파수 성분의 하중에 대한 가속도 레벨의 평균 등고선

이와 같이 수치해석 결과와 실험 결과 비교로부터 수치 해석 시 마운트의 강성 및 손실 계수는 실험을 통해 이들의 동적특성을 충분히 파악하여 반영해야함을 알 수 있다.

#### 4. 결론

방진마운트의 동적특성을 고려하지 않고 마운트 강성 및 손실계수를 단일 값으로 적용하여 수치해석을 수행할 경우 실제 측정값과 해석 결과는 큰 오차를 가지게 된다.

본 논문에서는 KS M 6604 비공진법에 따라 측정된 방진마운트의 동적 강성 및 손실 계수를 수치해석에 적용하여 마운트 시험 지그에 대한 강제 진동해석을 수행하였다. 수치해석과 실험결과를 비교한 결과 마운트의 동적특성을 고려하지 않고 해석한 경우 실험결과와 큰 오차를 가짐을 알 수 있었으며, 동적 특성을 고려할 경우 이들 오차가 줄어들음을 확인할 수 있었다.

본 논문 결과를 시작으로 향후 함정에 적용되는 표준 마운트뿐만 아니라 장비 제작사에서 제시하는 모든 마운트의 동적 특성을 실험을 통해 데이터베이스화 하여 선체 및 장비 받침대 설계에 있어 기준을 제시하는 기본적인 자료로 활용할 계획이다.

#### 참고문헌

[1] J. C. Snowdon, "Vibration Isolation; Use and Characterization", U.S Government Printing Office, Washington, USA, 1979.

[2] 김국원, 임종락, 손희기, 안태길, "압축된 고무재료의 정적변형 해석과 동특성 예측", 한국소음진동공학회 논문집, 제9권, 제3호, pp. 472-476, 1999.

[3] D. Cambiaghi, A. Magalini, G. Ramorino, T. Ricco and D. Vetturi, "High Frequency Dynamic Testing of Rubbers and Rubber to Metal Devices", Journal of Testing and Evaluation, Vol.34, No.3, pp. 211-217, 2006.

[4] 이규섭, 이상엽, 유춘화, "방진고무의 진동 특성 해석 및 실험 (1)", 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, pp. 27-32, 1990.

[5] 김완두, 김완수, "방진고무의 기계적 특성 예측 및 평가", 한국소음진동공학회지, 제13권, 제5호, pp. 319-325, 2003.

[6] J. D. Dickens, "Investigation of Asymmetrical Vibration Isolators for Maritime Machinery Application", Technical Report DSTO-RR-0168, DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, 1999.

[7] 한형석, 손윤준, "방진 마운트의 동적 강성을 고려한

선체 바닥 및 받침대의 강성과 임피던스 규제에 대한 고찰", 한국소음진동공학회 논문집, 제19권, 제3호, pp. 320-326, 2009.

[8] KS M 6604, "방진고무 시험 방법", 2006.

#### 한 형 석(Hyung-Suk Han)

[정회원]



- 1998년 2월 : 부산대학교 일반대학원 생산기계공학과(공학석사)
- 2007년 2월 : 부산대학교 일반대학원 기계설계공학과(공학박사)
- 2003년 6월 ~ 2007년 6월 : 삼성전자(주) 책임연구원
- 2007년 7월 ~ 현재 : 국방기술품질원 선임연구원

<관심분야>

소음, 진동, 조선, 기계공학

#### 박 미 유(Mi-Yoo Park)

[정회원]



- 2000년 2월 : KAIST 기계공학과(공학석사)
- 2006년 2월 : KAIST 기계공학과(공학박사)
- 2006년 3월 ~ 2007년 6월 : 삼성SDI(주) 책임연구원
- 2007년 7월 ~ 현재 : 국방기술품질원 선임연구원

<관심분야>

소음/진동제어, 조선

#### 조 흥 기(Heung-Gi Cho)

[정회원]



- 1990년 8월 : 숭실대학교 전기공학과(공학석사)
- 2003년 8월 : 숭실대학교 전기공학과(공학박사)
- 1990년 9월 ~ 현재 : 국방기술품질원 책임연구원

<관심분야>

소음, 전기, 전투체계, 조선

---

**김 중 길(Joong-Gil Kim)**

[정회원]



- 1978년 2월 : 울산대학교 기계공학과(공학사)
- 1990년 2월 : 경남대학교 일반대학원 기계공학과(공학석사)
- 1978년 3월 ~ 현재 : 국방기술품질원 책임연구원

<관심분야>  
기계공학, 조선

---

**임 동 빈(Dong-Been Im)**

[정회원]



- 1985년 2월 : 한양대학교 금속공학과(공학사)
- 1994년 2월 : 부산대학교 산업대학원 금속공학과(공학석사)
- 2002년 2월 : 부산대학교 일반대학원 금속공학과(공학박사)
- 1985년 5월 ~ 현재 : 국방기술품질원 책임연구원

<관심분야>  
기계공학, 금속공학