

마운트 형상에 따른 선박용 해수 이송 배관의 진동 전달률 감소

한형석*, 정의봉**†, 차영주*

국방기술품질원 함정센터*
부산대학교 기계공학부**

Reduction of the Vibration Transmissibility for the Sea-Water Conveying Pipe in
a Ship According to its Mount Shape

Hyung Suk Han*, Weui Bong Jeong**† and Young Ju Cha*

Naval Sea System Center, Defense Agency for Technology and Quality*
Department of Mechanical Engineering, Pusan National University**

Abstract

The reduction of the structure-borne noise is very important in order to reduce the noise of a ship. The noise at the high frequency range usually comes from the fluid flowing. The noise from the sea-water conveying pipe is one of the main source on these high frequency range. Therefore, the transmissibility variations are evaluated according to the shape of the rubber mount. The evaluations are performed with the frequency response function numerically and experimentally.

※Keywords: Sea-water conveying pipe(해수이송배관), Rubber mount(고무 마운트), Frequency response function(주파수 응답 함수), Transmissibility(전달률)

1. 서론

최근 선박 산업의 발전과 더불어 수중 방사 소음을 포함한 선박의 저소음화와 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 해수를 이송하는 소화 및 냉각 계통 배관의 경우 소음, 진동의 주요 소스(Source)로, 이를 줄이기 위해서 형상을 단순화하고 유량을 줄이는 등의 대책이 수행되고 있다.

하지만 선박의 복잡한 구조 때문에 배관을 단순화하기가 쉽지 않고, 장비에서 필요로 하는 소화수량과 냉각수량은 설계 단계에서 미리 정해지기 때문에 현장에서 이들을 조정하기가 쉽지 않은 상황이다. 이러한 문제점들에 대한 대책을 마련하기 위해서는 우선적으로 배관의 구조기인 소음(Structure borne noise)을 규제해야만 한다. 실제로 미 해군에서는 MIL-Std-740-2(DoD 1986)를 가지고 배관을 포함한 밸브류의 구조기인 소음을 관리하고 있다.

구조 진동에 의한 소음을 줄이는 방법으로는 진동

원(Source) 자체를 저감하는 방법이 가장 좋지만, 진동의 전달경로를 제어하는 방법도 매우 효과적이다. 이 때문에 장비의 진동을 효과적으로 절연하는 연구들이 계속적으로 진행되고 있으며 (Chung et al. 2004, Lee et al. 1990, Moon et al. 2008). 특히 진동 절연체로서 매우 탁월한 성능을 가지는 고무 재료에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다(Kim and Kim 2003, Nho et al. 2008).

본 논문에서는 배관의 구조기인 소음을 줄이기 위한 하나의 방법인 진동 절연과 관련하여 보다 효과적인 진동 절연을 위한 마운트의 형상에 대해서 분석하고자 한다.

본 논문은 우선 선박 내 해수 이송 배관의 진동 실측을 통해 마운트의 진동 절연에 대한 필요성을 언급하고, 여러 가지 마운트 형상에 따른 진동 전달률을 해석적으로 검토하였다. 배관 소음의 경우 주로 고주파 대역에서 문제가 되기 때문에 마운트의 고주파 특성에 따라 달라진다. 따라서 이러한 마운트의 고주파 특성에 대한 평가를 위해 주파수 응답함수를 가지고 배관 마운트 평가 지표를 이용하여 고무 마운트 형상에 따른 배관의 진동 절연 성능을 실험적으로 분석하였다.

2. 해수 이송 배관 진동의 실선 계측

본 연구에서 계측한 해수이송 배관은 소화용 배관으로 1대의 원심 펌프로 구동되며 이때의 유량은 227m³/h, 압력은 8.0bar이다. 소화 배관은 선박 전체에 설치되어 운용되기 때문에 다른 배관보다 큰 소음과 진동을 유발시킨다. 본 절에서는 이러한 소화 배관의 진동 문제를 파악하기 위해서 소화펌프를 동작 시켰을 때 배관 라인 및 격벽의 진동을 계측하였다. 계측은 Dytran사의 Type 2977 가속도계와 B&K사의 Pulse 3560C 주파수 분석기를 가지고 소화 펌프실 및 함외 토출구에서 수행하였다. 이때 주파수 범위는 수중 방사 소음이 문제가 되는 주파수를 포함하여 20~10kHz 까지 1/3 옥타브(Octave)로 측정하였다.

Fig. 1은 선박 내에 설치되어 있는 소화펌프

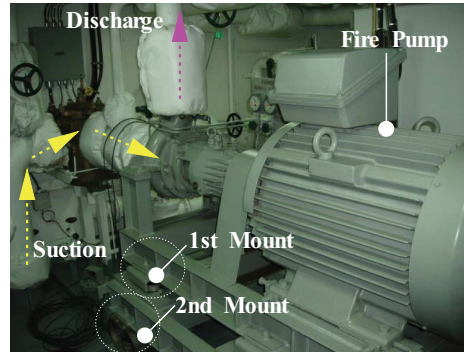


Fig. 1 Picture of the fire pump

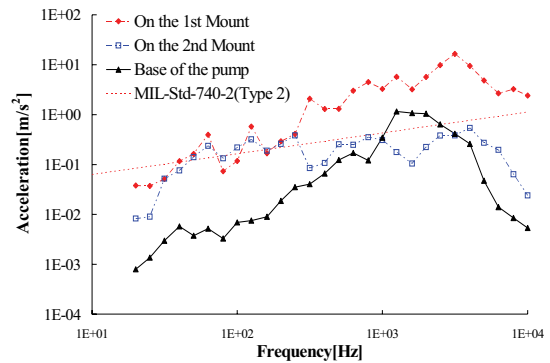


Fig. 2 1/3 octave spectrum of the acceleration on the mount and its base

이며, 진동 계측은 우선 펌프의 마운트 상단 및 바닥에 대해서 수행하였다. Fig. 2는 측정 결과 1/3 옥타브 스펙트럼이다. Fig. 2에서 2중 마운트 사용으로 펌프 진동이 마운트를 통과한 후 많이 감소됨을 볼 수 있으나, 바닥 진동의 경우 1~3.15kHz에서 오히려 증가됨을 알 수 있었다. 이는 바닥 진동이 다른 소스에 의해 가진되었거나, 또는 바닥 강성이 약해서 이 주파수 대역에서 진동이 증가했음을 예측할 수 있다.

Fig. 3은 펌프의 흡입 배관, 클램프 및 바닥에서의 진동 측정 결과이다. 측정 결과로부터 흡입관 진동이 800Hz~4kHz에서 매우 큼을 알 수 있었다. 특히 흡입 배관의 경우 격실 하부로부터 배관이

연결되어 있고, 격실 통과부는 진동 절연 없이 바닥과 직접 용접되어 있기 때문에 흡입관 진동이 그대로 바닥을 가진시킨다. 따라서 Fig. 2의 바닥 진동이 1~3.15kHz에서 큰 이유가 흡입관 진동이 그대로 바닥으로 전달되고 있기 때문임을 실험을 통해 예측할 수 있었다. Fig. 4는 토출 배관, 클램프 및 클램프 바닥에서의 진동 측정 결과이다. Figs. 3, 4에서와 같이 배관 진동의 경우 MIL-Std-740-2에서 제시하는 밸브 규격을 크게 초과함을 알 수 있었으며, 클램프에서의 진동 레벨도 이 규격을 초과함을 알 수 있었다. 실험 결과로부터 펌프 단품 시험 시 펌프 등의 구조 진동 레벨을 규제하고 이를 줄이기 위해 많은 비용과 시간이 투입되고 있지만, 배관 진동에 대한 효과적인 진동 절연 대책을 수립하지 않는 한 이들이

그 효과를 발휘하기는 힘들 것으로 판단된다. 따라서 본 논문에서는 배관의 효과적인 진동 절연을 위하여 마운트 형상에 대한 분석을 수행하고자 한다.

3. 마운트 형상에 따른 진동 전달률

일반적으로 선박 내 배관의 진동 절연을 위해서 고무 마운트가 많이 사용되고 있다. 고무는 탄성과 점성을 모두 가지고 있는 재료로 진동 절연에 널리 사용되고 있다. 하지만 고무의 경우 환경적인 영향에 따라 비선형적인 특성을 가지기 때문에 고무 마운트의 재질은 설치조건을 고려하여 선정되어야 한다. 이러한 재질 특성 중 진동절연과 관련하여 가장 중요한 특성은 고무의 강성이다. 고무의 강성에 영향을 주는 인자는 환경적인 요소에 의한 경화, 압축에 의한 변형, 제조 시 배합에 따른 경도, 형상에 따른 형상인자 등이 있다. 본 논문에서 다루고자 하는 고무 마운트의 경화, 압축 및 경도에 대한 효과는 본 연구 이전에 다루었던 파라미터 연구(Han et al. 2008)를 통해 이미 다루어졌다. 본 논문에서는 추가적으로 마운트의 형상에 대한 경도를 통해 고무마운트의 진동 절연 성능을 추가적으로 향상시키고자 한다.

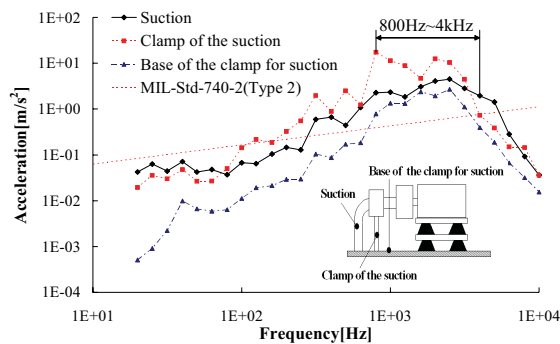


Fig. 3 1/3 octave-band spectrum of the acceleration for the suction pipe and its base

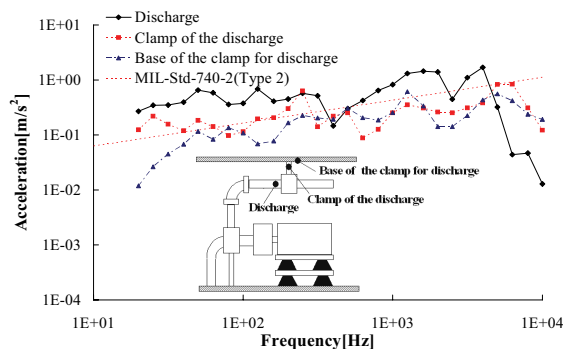


Fig. 4 1/3 octave spectrum of the acceleration on the discharge pipe and its base

3.1 고무 마운트 형상 변경

고무가 압축력을 받을 때 형상에 따라 강성이 변한다. 일반적으로 압축을 받을 때 고무의 부피가 허용되는 면적이 클수록 강성은 줄어들며 이는 식(1)~(2)로써 설명된다(Andrew 1999, KS 2006). 식(1)은 원통 형상의 고무 블록에 대한 겉보기 탄성률(Apparent modulus of elasticity)이며 고무 마운트의 탄성률은 식(2)와 같이 힘을 받는 면적과 변형할 수 있는 면적의 비인 형상 인자(Shape factor)에 따라 달라짐을 알 수 있다.

$$\bar{E} = E(1 + \beta s^2) \quad (1)$$

$$s = \left(\frac{\pi d^2}{4}\right) / (\pi d l) = \frac{d}{4l} \quad (2)$$

여기서 E 는 시료의 겉보기 탄성률, E 는 고무 재료의 탄성률, β 는 고무의 압축계수, s 는 형상인자 (Shape factor), d 는 시료의 직경, l 은 시료의 길이이다.

Fig. 5는 본 논문에서 다루고자 하는 해수배관 마운트 및 클램프이며 Fig. 6(a)는 기존에 사용하고 있는 배관의 고무 마운트 형상이다.

기존 마운트의 경우 원통의 내경 면이 파이프와 접촉되고 외경 면이 클램프와 접촉되기 때문에 마운트의 부품이 허용되는 면적은 두께 방향 면적으로 매우 적으며, 식(2)의 형상인자가 커져 겉보기 탄성계수는 실제 재료의 탄성률에 비해 매우 커진다. 따라서 마운트의 겉보기 탄성률을 작게 하기 위해서는 힘을 받는 면적은 줄이고 부품이 허용되는 면적을 키울 필요가 있다. 이를 위해 고무 마운트에 슬롯 형상을 추가하여 Fig. 6(b)~(e)와 같이 배관 마운트를 여러 가지 형상으로 모델링 하였다.

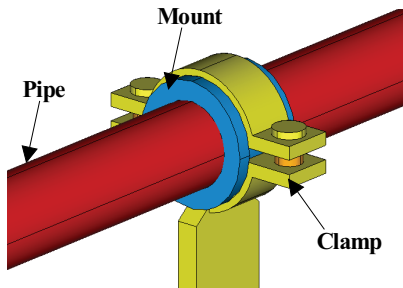


Fig. 5 The mount and clamp of the sea-water conveying pipe

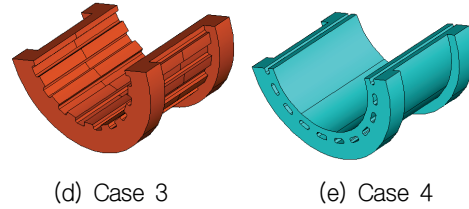
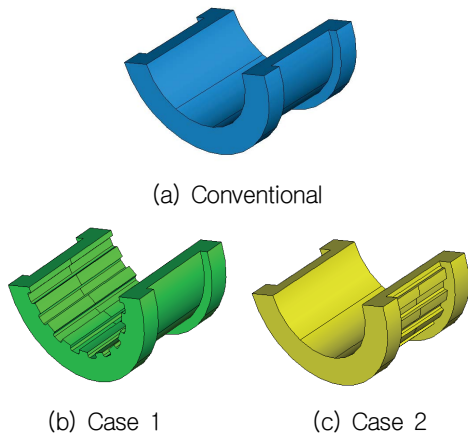


Fig. 6 Modification of the shape for the rubber mount

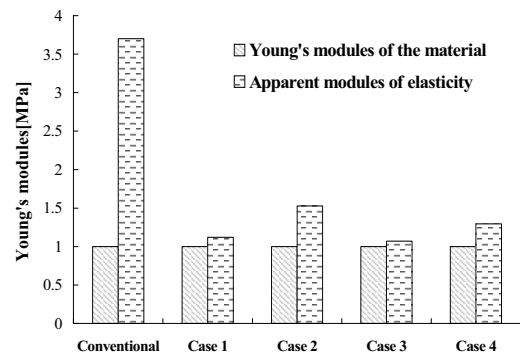


Fig. 7 Young's modulus of the material and its apparent modulus of the elasticity

Fig. 7은 각 형상에 대한 형상인자와 이에 따른 겉보기 탄성률을 식(1)~(2)를 통하여 계산한 결과이다. 계산을 통해 마운트에 슬롯을 추가하여 힘을 받는 면적은 줄이고 부품이 허용되는 면적을 늘렸을 경우 동일한 고무 재질에 대해 겉보기 탄성률이 기존 대비 약 2.5~3.5배 작아짐을 알 수 있었다. 따라서 이러한 슬롯 추가로 인해 마운트의 강성 저감 및 진동 전달을 저감이 가능할 것으로 보고 이에 대한 분석을 해석적, 실험적으로 수행하였다.

3.2 수치해석

마운트 형상에 따른 동적 강성 변화를 보기 위해서 Fig. 8과 같이 유한요소 모델을 만들고 단위 입력 하중에 대한 변위 및 가속도의 주파수 응답 함수를 마운트 형상별로 해석하였다. 일반적으로 고무는 비선형 요소이지만 작은 변형 내에서는 이를 선형으로 볼 수 있다. 따라서 본 절에서의 수치해석은 고무를 선형으로 가정하여 수행하였다.

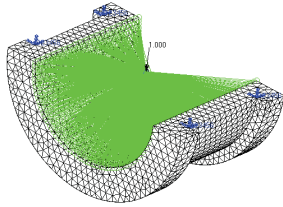


Fig. 8 FEM model for the rubber mount

Table 1 Material properties of the rubber mount

Items	Value
Material	CR(Neoprene) 45
Young's modulus[Mpa]	1.0
Poisson ratio	0.4
Damping ratio	0.1

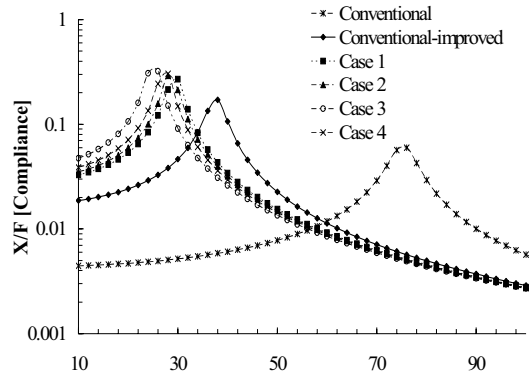
해석은 부산대학교에서 보유하고 있는 MSC.Nastran을 가지고 수행하였다. 단위하중은 배관과 접촉되는 면의 노드를 배관 중심점 노드에 MPC(Multi-point constraint) 요소를 사용하여 연결한 후 배관 중심점에 수직방향으로 가하였으며 배관 클램프(Clamp)와 접촉되는 면은 완전 구속시켰다. 또한 배관 중심점에는 집중질량(Lumped mass) 요소를 만들고 10kg 질량을 주었으며 고무 재료에 대한 물성치는 Table 1과 같다.

Fig. 9는 해석 결과 마운트 형상별 주파수 응답 특성이다. Fig. 9에서 Conventional은 클램핑(Clamping)에 의한 압축 변형을 고려하고 CR(Neoprene) 65의 고무재질을 적용하였을 때 최초 기존 마운트 형상에 대한 변위 및 가속도의 전달 함수이며, Conventional-improved는 기존 마운트 형상에 대해 클램핑에 의한 변형을 제거하고 CR 45의 고무 재질을 적용하였을 때에 대한 변위 및 가속도의 전달함수이다. Fig. 9와 같이 해석 결과 슬롯을 추가하여 자유 변형 면적을 증가시키고 힘을 받는 면적을 줄였을 경우 강성 저감으로 인해 주파수 응답 함수가 저주파 쪽으로 이동함을 알 수 있었다. 일반적으로 진동 전달률은 1 자유도 모델에 대해 식(3)과 같이 나타낼 수 있으며, 이를 통해 해석 결과 마운트 형상 변경으로 인한 고유 주파수 저감이 진동 전달률을 작게 할 수 있음을 예측할 수 있다.

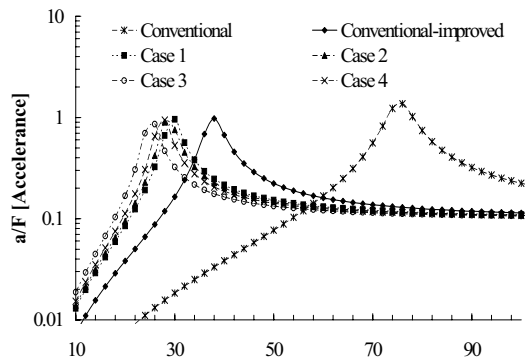
$$T = \frac{F_T}{F_0} = \frac{\sqrt{1 + [2\zeta(\omega/\omega_n)]^2}}{[1 - (\omega/\omega_n)^2] + [2\zeta(\omega/\omega_n)]^2} \quad (3)$$

여기서 T 는 진동 전달률(Transmissibility), F_T 는 전달력, F_0 는 가진력, ω 는 주파수(radian), ω_n 은 고유주파수, ζ 는 감쇠계수이다.

특히 Case 3의 경우가 가장 효과적임을 알 수 있었는데, 이는 앞서 Fig. 7에서도 예측하였듯이 Case 3의 형상이 힘을 받는 면적이 가장 작고 변형할 수 있는 면적이 가장 크기 때문에, 즉 형상 계수가 가장 작기 때문이다.



(a) Receptance



(b) Accelerance

Fig. 9 Frequency response function of the mount according to the various shape of the mount

4. 실험적 검증

3절의 결과로부터 가장 효과적이라고 예상되는 Case 3의 마운트 형상에 대해서 샘플을 제작하고 이를 배관에 적용하여 진동절연 효과를 기존 마운트 형상과 같이 비교해 보았다.

4.1 실험셋업(Setup)

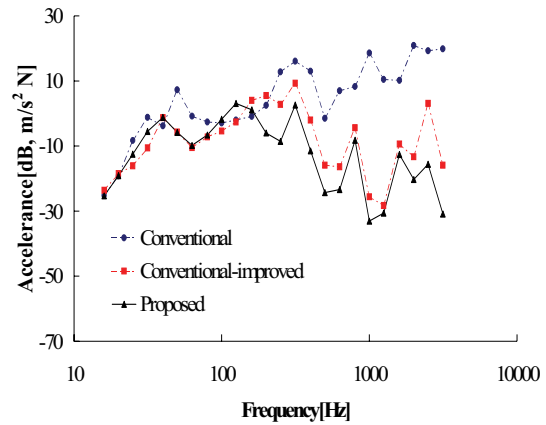
3절의 해석 결과를 검증하기 위해서 배관 마운트 평가 지그(Jig)를 만들고 모달(Modal) 시험을 수행하였다. 시험은 Fig. 10과 같이 배관 지그의 총 8점에 임팩트 해머(Impact Hammer)를 사용하여 가진하고 클램프 상단 및 하단에서 가속도를 측정하는 방식으로 수행하였다. 여기서 임팩트 해머는 PCB Type 6200S를 사용하였고, 가속도계는 Dytran Type 3148D를 사용하였으며 B&K사의 Pulse 3560C를 통하여 데이터를 수집하였다. 시험에서의 주파수 범위는 10Hz~3.15kHz까지로 설정하였다.

4.2 실험결과

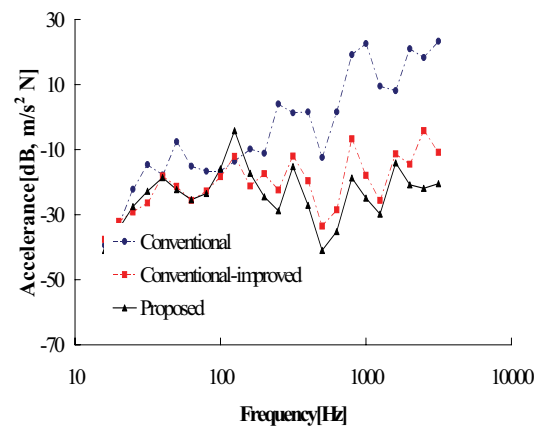
Fig. 11은 실험 결과 8점 가진에 대한 주파수 응답 함수들의 로그 평균이다. 여기서 Conventional은 클램핑에 의한 압축 변형을 고려하고 CR 65의 고무재질을 적용했을 때 최초 기존 마운트 형상에 대한 가속도의 주파수 응답 함수

(Accelerance)이고, Conventional-improved는 기존 마운트 형상에 대해 클램핑에 의한 변형을 제거하고 CR 45의 고무재질을 적용한 경우 가속도의 주파수 응답 함수이며, Proposed는 3절의 Case 3 형상에 클램핑에 의한 변형을 제거하고 CR 45의 고무재질을 적용한 경우 가속도의 주파수 응답 함수이다.

Fig. 11로부터 마운트의 형상 변경으로 인한 전 주파수 영역에서 주파수 응답 함수의 레벨이 작아짐을 확인할 수 있었으며 실험 결과를 통해 마운트 형상 변경에 대한 진동 전달률 감소의 해석적 예측을 검증할 수 있었다.



(a) Upper side of the clamp



(b) Bottom side of the clamp

Fig. 11 1/3 octave spectrum of the accelerance measured by the experiment

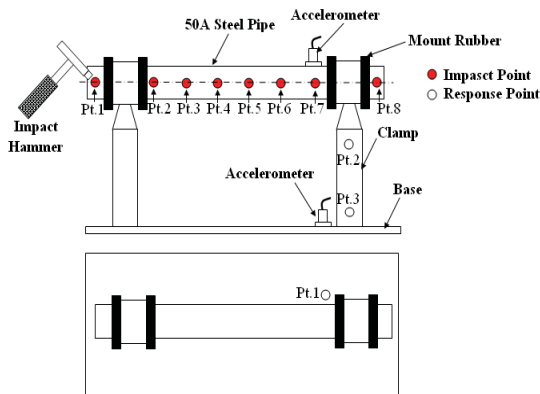


Fig. 10 Schematic diagram of the test setup

여기서 실험 및 해석 결과는 임팩트 가진력을 가지고 해수 배관의 진동 전달률을 평가한 것이다. 이 평가 방법은 실제로 해수가 흐르는 조건에서의 평가 방법과 입력 조건 및 경계조건이 다르다. 하지만, 해수 배관의 고주파 진동의 경우 주로 공동현상(Cavitation)에 의해 발생하며 그 주파수 범위가 광대역(Broadband)으로 백색 잡음과 같은 특성을 가지기 때문에 임팩트 가진에 의해 배관의 진동 절연 성능을 평가하는데 큰 무리가 없다고 판단된다. 또한 배관 내에 해수가 흐를 경우 해수에 의한 부가질량의 영향과 배관 내부 압력에 의한 강성 저하에 의해 배관의 고유 진동수가 달라지긴 하지만, 본 논문의 요점은 배관이 아니라 마운트이기 때문에 이러한 영향을 무시하더라도 큰 무리가 없다고 판단된다.

5. 결 론

해수 배관 마운트의 형상 변경에 대해서 주파수 응답 함수를 가지고 배관용 고무 마운트의 진동 전달률 평가를 해석적으로 수행한 결과, 고무마운트 표면에 슬롯을 추가하여 형상인자를 줄임으로써 고무 마운트의 진동 절연 능력이 추가적으로 향상됨을 예측할 수 있었다. 또한 배관 지그를 제작하고 모달 시험을 통해 주파수 응답함수를 측정 한 결과, 해석에서 예측한바와 같이 마운트의 형상 변경을 통해 고무 마운트의 진동 절연 특성이 추가적으로 향상됨을 예측할 수 있었다. 본 연구에서는 실제 선박에 적용한 상태에서의 진동 절연 능력을 평가해 보지 않았기 때문에 추후 선박 적용 후 이에 대한 재검증이 필요할 것으로 사료된다. 본 논문의 결과로부터 해수 배관 마운트의 진동 전달률 향상으로 인해 배관에 의한 소음 저감이 기대된다.

참 고 문 헌

- Andrew C., 1999, An Introduction to Rubber Technology, Rapra Technology LTD.
- Chung, J.H., Kim, B.H., Kwak, J.S., Jeong, J.A.

and Lee, H.Y., 2004, "An Experimental Study on the Characteristics of Rubber Mounts for Naval Shipboard Application," Proceeding of the Annual Spring Meeting, SNAK, pp. 402-409.

- Department of Defense, 1986, MIL-S-70-2: Structure Borne Vibratory Acceleration Measurements and Acceptance Criteria of Shipboard Equipment, USA.
- Han, H.S., Jeong, W.B., Park, K.H. and Hong, C.S., 2008, "Analysis for Reducing Vibration Transmitted from the Sea-water Conveying Pipe to the Hull," KSNVE, Vol. 18, No. 11, pp. 1177-1184.
- Kim, W.D. and Kim, W.S., 2003, "Estimation and Evaluation of the Mechanical Property for Vibration Isolating Rubber Material," KSNVE, Vol. 13, No. 5, pp. 319-325.
- Korean Standards Association, 2006, KS-M-6604: Testing Method for Rubber Vibration Isolator, Korea.
- Lee, G.S., Lee, S.Y. and Ryu, C.H., 1990, "Test and Analysis for Dynamic Properties of Rubber Materials for Vibration Isolation (1)," KSNVE Autumn Conference, pp. 27-32.
- Moon, S.J., Ji, Y.J., Yoon, J.S., Choi, S.B., Lee, H.Y., Kim, J.H. and Jung, W.J., 2008, "A Study on Development of an Active Hybrid Mount for Naval Ships," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 45, No. 3, pp. 288-295.
- Nho, I.S., Kim, J.M. and Kwak, J.S., 2008, "Non-linear Large Deformation Analysis of Elastic Rubber Mount," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 45, No. 2, pp. 186-191.



< 한 형 석 > < 정 의 봉 > < 차 영 주 >