

선체로 전달되는 해수 이송 배관의 진동 저감 분석

Analysis for Reducing Vibration Transmitted from the Sea-Water Conveying Pipe to the Hull

한형석*·박미유*·정의봉†

HyungSuk Han, MiYoo Park and WeuiBong Jeong

Key Words : Transmissibility(전달률), Frequency response function(주파수 응답 함수), Sea-water conveying pipe(해수이송배관)

ABSTRACT

URN(Underwater Radiated Noise) is one of the important performances of the battle ship related to the stealth. The main source of the URN is the structure-borne noise on the hull. And the pipe vibration transmitted to the hull is the main source of the structure-borne noise when the speed of the ship is lower than CIS(Cavitation Inception Speed). In this paper, the vibration isolator(rubber mount) for the pipe system is described in order to reduce the structure-borne noise transmitted to the hull. The vibrations on the sea-water conveying pipes and their supports are measured in order to know how much vibration occurs on those positions. Based on these test results, the improved design of the rubber mount is suggested by the parametric study and is verified numerically with the pipe and hull model.

1. 서 론

함정의 수중방사소음은 함정의 성능과 연관되어 매우 중요한 성능 지표 중 하나이며 이를 저감하기 위해 많은 연구들이 진행되고 있다. 최근 건조된 구축함의 경우 수중방사소음에 대한 주요 소스로 프로펠러에서 발생하는 공동 현상(Cavitation)에 의한 소음이 주 소음원으로 분류되어 있으나 공동 현상이 시작되기 이전의 속도에서는 주추진기, 보조기기 및 배관계 소음이 주 소음원으로 분류된다. 특히 해수를 이송하는 소화 및 냉각 계통 배관은 배관계 소음의 주요 소음원으로 이를 감소시키기 위한 형상 단순화 및 유량 감소 등의 대책이 필요한 실정이다.

하지만 선박의 복잡한 구조 때문에 배관을 단순화하기가 쉽지 않고, 장비에서 필요로 하는 소화수량과 냉각수량은 선계 단계에서 미리 정해지기 때문에 현장에서 이들을 조정하기가 쉽지 않은 상황이다. 이러한 문제점들에 대한 대책을 마련하기 위해서는 우선적으로 배관의 구조기인 소음(Structure-borne noise)에 대한 기준이 필요하다. 실제로 미 해군에서는 Fig. 1과 같이 MIL-Std-740-2[1]를 가지고 벨브류의 구조기인 소음을 Type 2로 펌프류와 동일한 진동레벨로 관리하고 있으나 대한민국 해군의 경우 벨브류를 포함한 배관에 대한 구조 소음 및 진동 규격이 없으므로,

이에 대한 문제가 발생하더라도 이를 규제하기가 쉽지 않은 실정이다.

본 논문에서는 실선에 적용되어 있는 해수 이송 배관의 진동을 계측하여 MIL-Std-740-2 의 규격 만족 여부를 파악하고 현재 사용되고 있는 해수 배관의 진동 레벨을 평가하였다. 이를 통해 현재 사용되고 있는 해수 배관 진동의 문제점을 분석하고 이를 줄이기 위한 대책을 수립하였다. 개선 대책을 현재 건조가 완료된 함정에 적용 평가하기가 쉽지 않기 때문에 수치해석을 통해 개선 사항을 적용했을 경우 전체 진동의 감소를 평가함으로써, 이에 대한 효과성 증진을 수행하였다.

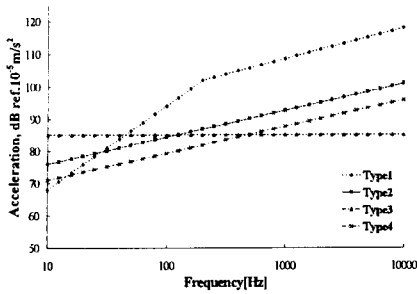
2. 해수 이송 배관 진동 측정

2.1 측정 개요 및 셋업

본 논문에서 다루는 배관은 해수 이송 배관의 소화용 배관으로 상시 1대의 펌프로 구동되며 화재 시 함내 곳곳에 배치된 최대 4대의 펌프가 구동될 수 있다. 해수는 해수펌프를 통하여 함내 바닥에서 끌어올려져 함 가장자리를 돌아가며 설치되어 있는 소화 배관을 통해 함 전체를 순환한 후, 도출배관을 통해 함외로 배출이 되는데, 해수가 함내로 유입되고 배출되는 펌프 근처 배관에서 큰 진동이 유발되어 선체를 가진 시키게 된다. 소화 배관 내의 유량 중 일부는 보조 냉각 계통으로도 사용되고 있으며, 보조 냉각 계통의 유량 및 압력만을 고려해 볼 때 배관 내의 유량 및 압력이 큰 상황이다.

* 국방기술품질원 함정센터

† 부산대학교 기계공학부



(a) Maximum acceleration level



(b) Test position of the acceleration

Fig. 1 Specification of the acceleration for the valve(MIL Std 740-2)[1]

그리고 소화 배관은 합 전체에 설치되기 때문에 소음, 진동의 소스로 자주 지적되어 왔다. 본 논문에서는 이러한 소화 배관의 진동 문제를 파악하기 위해서 각각의 소화 펌프를 동작 시켰을 때 소화 펌프를 중심으로 배관라인을 포함해서 배관 마운트와 연결되어있는 격벽 및 선체부의 진동을 계측하였다.

또한 소화 배관의 함외 토출 배관 및 격벽, 선체부의 진동을 측정하였으며 제2 하부 갑판(2nd Deck) 전체에 걸쳐 설치되어 있는 소화주관 및 격벽, 선체부의 진동을 계측하였다. 총 측정점은 66개소이며 이는 Table 1과 같다. 측정 주파수 범위는 수중 방사 소음이 문제가 되는 주파수를 포함하여 20~10kHz 까지 1/3 Octave를 측정하고, 추가로 0~12.8kHz까지 협대역 주파수 스펙트럼을 측정하였다.

2.2 측정 결과 및 문제점 분석

배관라인 및 격벽 진동 측정 결과, MIL-Std 740-2의 Type 2 규격을 만족하는 측정점은 Table 2와 같이 총 66개소 중 29개소임을 알 수 있었다. 측정을 통해 소화 펌프로부터 비교적 멀리 떨어져 있는 소화 주관 진동의 경우 문제가 거의 없었지만 소화펌프와 가까이 있는 흡입, 토출 배관과 함외로 토출되는 밸브 근처 배관의 경우 그 레벨이 매우 높음을 알 수 있었다. 여기서 측정점 중 31개소는 배관과 고부 마운트를 통해 진동 전달이 되어 있는 곳으로 MIL-Std 740-2의 적용 대상이 아니다. 이러한 바닥 진동의 경우 앞선 연구결과를 토대로[5] 고부 마운트의 진동 감

Table 1 Test positions

No	Position					
	No.1 Fire Pump	No.2 Fire Pump	No.3 Fire Pump	No.4 Fire Pump	함외 토출부	소화주관
1	흡입1	흡입	흡입1	흡입 hose 1	토출1	배관1
2	흡입2	흡입 hose	흡입 hose	흡입 hose 2	토출 hose 1	소화주관1
3	Strainer 1	토출1	토출1	토출 hose 1	토출2	소화주관2
4	Strainer support 1	토출1 hose	토출 hose 1	토출 hose 2	토출 hose 2	소화주관 hose 1
5	Strainer support 2	토출2 hose	토출 2	함외배출밸브 격벽	함외토출부	소화주관 hose 2
6	흡입 hose	토출2	토출 hose 2	토출 hose	함외배출부 hose	배관2
7	Strainer hose	토출3	토출 3	-	격벽1	소화주관3
8	Pump()	토출3 hose	토출 hose 3	-	격벽2	소화주관4
9	(Aurex2) 배관(소화)	Strainer	토출4	-	-	소화주관5
10	(Aurex1) 배관(소화)	Strainer hose	토출5	-	-	소화주관6
11	(Aurex2) 배관(소화)	-	토출6	-	-	-
12	토출1	-	토출 hose 3	-	-	-
13	토출1-1격	-	벽2	-	-	-
14	토출2	-	벽 hose	-	-	-
15	토출2-1격	-	-	-	-	-
16	토출2-3 격	-	-	-	-	-
17	토출3	-	-	-	-	-
18	토출3-1 격	-	-	-	-	-

Table 2 Test results

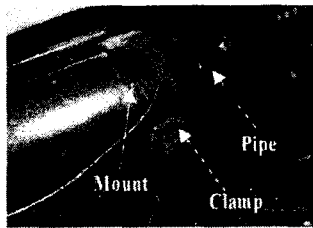
No	MIL-Std-740-2 규정 만족 여부					
	No.1 Fire Pump	No.2 Fire Pump	No.3 Fire Pump	No.4 Fire Pump	함외 토출부	소화주관
1	○	x	x	x	x	○
2	○	○	x	x	x	○
3	○	x	x	x	x	○
4	○	x	x	x	x	○
5	○	x	x	x	x	○
6	○	x	x	○	x	○
7	○	x	x	-	x	○
8	○	x	x	-	x	○
9	x	x	○	-	x	○
10	x	x	○	-	x	-
11	x	-	○	-	-	-
12	○	-	○	-	-	-
13	x	x	x	-	-	-
14	○	-	x	-	-	-
15	○	-	-	-	-	-
16	○	-	-	-	-	-
17	○	-	-	-	-	-
18	○	-	-	-	-	-

쇠가 적어도 10dB 이상 이루어진다고 가정하여 MIL-Std 740-2에서 10dB를 가감한 레벨을 기준으로 두고 기준 만족 여부를 평가하였다. 평가 결과 31개소 중 7개소만이 이 기준을 만족함을 알 수 있었다.

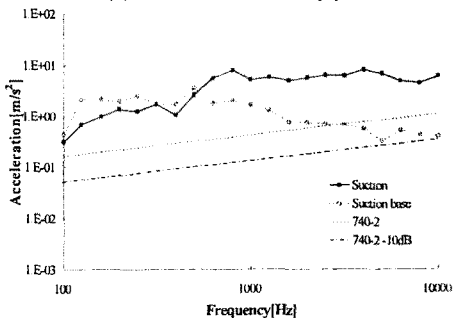
Fig. 2는 제 1 소화 펌프의 흡입, 토출 배관 구조와 배관 및 바닥에서의 진동 측정 결과이다. Fig. 2(b)에서 흡입 배관의 진동이 배관과 바닥 사이의 고부 마운트를 통해 어느 정도 진동 전달이 이루어지고 있음을 알 수 있지만, 흡입 진동 레벨이 MIL-Std 740-2의 Type 2 규격 대비 매우 높은 레벨을 가지고 있기 때문에 바닥에서의 진동조차

MIL-Std 740-2의 Type 2 규격을 만족하지 못하고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 2(a)에서 알 수 있듯이 고무 마운트의 경우 도장이 두껍게 칠해져 있고 마운트의 두께도 얇으며, 과도하게 클램핑되어 있기 때문에 강성 증가로 인한 진동 절연 능력 감소가 크게 발생했을 것으로 예측된다. Fig. 2(c)는 토출 배관 및 배관의 바닥 진동의 가속도 스펙트럼이다. 토출배관의 경우도 흡입 배관과 마찬가지로 진동 레벨이 MIL-Std 740-2의 Type 2 규격 대비 매우 높음을 알 수 있었으며 바닥에서의 진동도 MIL-Std 740-2의 Type 2 규격을 만족하지 못하고 있음을 알 수 있었다. 고무 마운트의 진동 절연도 흡입배관보다 더 좋지 않음을 알 수 있었으며 160~3150Hz 구간에서의 진동 절연은 최대 6dB를 넘지 못하였다. Fig. 3은 함의 토출구 밸브와 배관 및 격벽에서의 진동 측정 결과이다. 함의 토출 밸브의 경우도 제 1 소화 펌프와 마찬가지로 배관 및 밸브에서의 진동이 MIL-Std 740-2의 Type 2 규격에 비해 매우 높았으며 바닥 및 격벽 진동 역시 MIL-Std 740-2의 Type 2 규격을 만족하지 못함을 알 수 있었다. 특히 밸브의 경우 선체에 진동 전연 없이 매우 가까이 설치되어 있고, 진동 특성이 좋지 않은 글로브(Globe) 밸브를 사용하고 있기 때문에 그 진동 레벨이 매우 키웠음을 예측할 수 있었다.

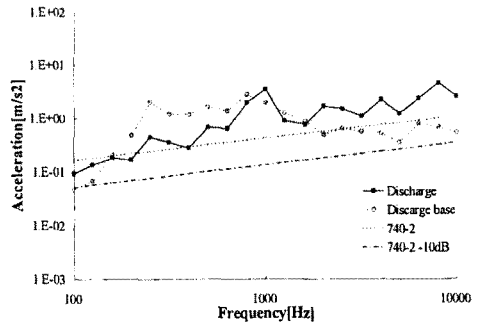
이와 같이 실선에서의 배관 진동 측정 결과 배관 진동 레벨이 소화 펌프 및 함의 토출구 라인에서 매우 크며, 이 구역에서는 배관뿐만 아니라 선체 진동조차 MIL-Std 740-2의 Type 2 규격을 만족하고 있지 못함을 알 수 있었다. 따라서 본 논문에서는 이러한 진동을 저감하기 위해서 개선 대책을 수립하고 이에 대한 개선 효과를 수치 해석을 통해 예측하고자 한다.



(a) Construction of the pipe



(b) Acceleration on the suction pipe

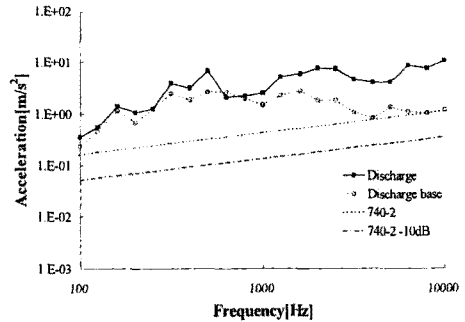


(c) Acceleration on the discharge pipe

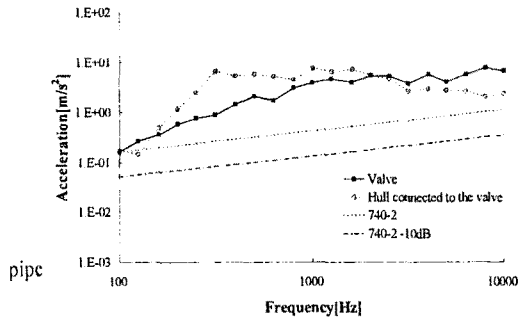
Fig. 2 Construction and Test results of the acceleration for the No.1 Fire pump



(a) Construction of the discharge pipe and valve



(b) Acceleration on the discharge



(c) Acceleration on the valve

Fig. 3 Construction and Test results of the acceleration for the valve and discharge pipe to the oversea

3. 해수 배관의 진동 저감 대책

전 절에서 언급한바와 같이 합정의 배관에 대해 MIL-Std 규격을 만족하기 위해서는 가진원의 진동 저감, 즉 배관 자체의 진동 저감이 필요하고, 배관 마운트의 진동 절연 능력 향상을 통한 배관 마운트의 개선 등 다양한 대책이 필요할 것으로 판단되지만, 본 논문에서는 마운트에 대한 진동 저감 대책에 초점을 두고 마운트의 진동 절연 능력 향상을 통한 진동 저감 대책만을 다루고자 한다.

3.1 고무 마운트의 실험적 분석

일반적으로 고무의 경우 점성과 탄성을 동시에 가진 재료로 진동 절연에 널리 사용되고 있다. 따라서 이러한 고무 마운트의 효과적인 진동 절연을 위해서 많은 연구들 [2]~[5]이 진행되어 왔다.

배관에 적용되어 있는 고무 마운트의 경우 재료 및 조립 상태 등 여러 가지 조건에 따라 진동 절연 능력이 달라진다. 본 논문에서는 마운트 고무 재질의 경도, 압축에 의한 압축 강성 증가, 도장에 의한 경화를 마운트의 진동 절연과 관련된 주요 인자로 보고 이에 대한 파라미터 분석을 수행하였다. 파라미터 분석은 Fig. 4와 같이 배관 지그를 만들고 식 (1)과 같이 배관의 임팩트 가진에 대한 클램프에서의 가속도의 주파수 응답 함수로써 평가하였다.

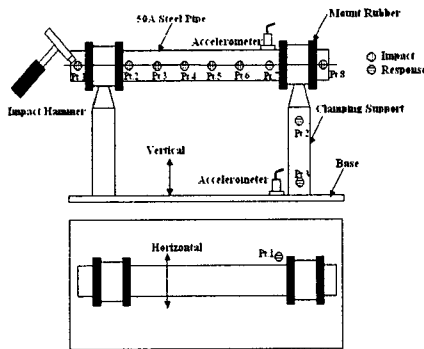
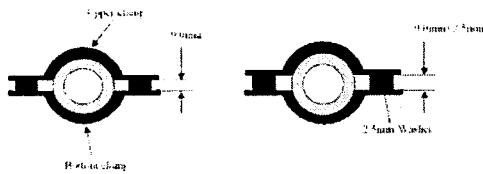


Fig. 4 Schematic diagram of the test setup



(a) Conventional (b) Proposed

Fig. 5 Clearance modification between upper and bottom clamp

$$H_j(f) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{F_i^*(f)}{F_i(f)} \right| \cdot \frac{A_{ij}(f)}{F_i(f)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{G_{FA}}{G_{FF}} \right| \quad (1)$$

여기서 j 는 측정점($j=1,2,3$), i 는 파이프 상의 가진점, N 은 가진점 수($N=8$), $H_j(f)$ 는 주파수 응답함수, $A_{ij}(f)$ 는 측정점 " j "에서의 $F_i(f)$ 에 대한 가속도, $F_i(f)$ 는 " i "에서의 임팩트 힘, $F_i^*(f)$ 는 $F_i(f)$ 의 공액값, G_{FA} 는 $A_{ij}(f)$ 에 대한 $F_i(f)$ 의 크로스 스펙트럼(Cross spectrum), G_{FF} 는 $F_i(f)$ 의 오토 스펙트럼(Auto Spectrum)이다.

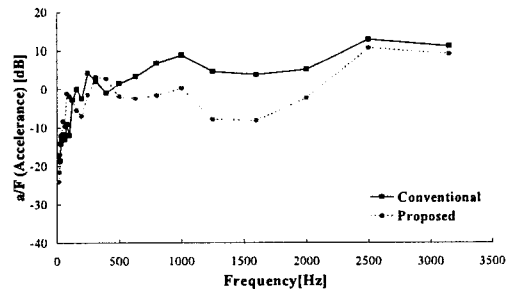
파라미터 분석은 50A 강(Steel) 배관에 대해서 Table 3과 같이 마운트 상의 도장, 배관 클램프의 간격, 고무 마운트의 경도에 대해서 개별적으로 수행하였으며, 분석 결과 Table 4 및 Fig. 5와 같이 개선 사양을 확정하였고 배관 지그를 통해 시험 결과 Fig. 6과 같이 진동 전달률이 향상됨을 검증하였다.

Table 3 Variables of the parametric study

Items	Specification			Painting on the rubber	Clearance between upper and bottom Clamp (mm)	Rubber(CR) hardness (Shore 'A')
Painting on the rubber	○	×	-	-	9	65
Dimension of the clamp washer(mm)	9	11.5	14	×	-	65
Rubber(CR) hardness (Shore 'A')	45	55	65	×	11.5	-

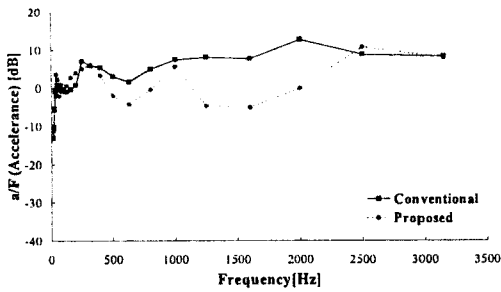
Table 4. Conventional & Proposed specification of the rubber mount from the parametric study

Items	Conventional	Proposed
Hardness(Shore "A")	65	45
Material	CR(Neoprene)	CR(Neoprene)
Dimension of the clamp washer	9.0mm	11.5mm
Painting on the mount	Applied	Not applied

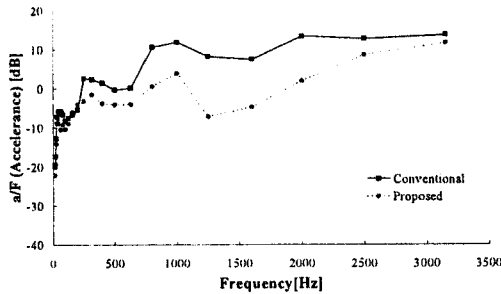


(a) Accelerance on the base related to the impulse input on the pipe for the vertical direction

Fig. 6 1/3 Octave acceleration for the impulse input on the pipe



(b) Accelerance on the clamp(upper-side) related to the impulse input on the pipe for the horizontal direction



(c) Accelerance on the clamp(bottom-side) related to the impulse input on the pipe for the horizontal direction

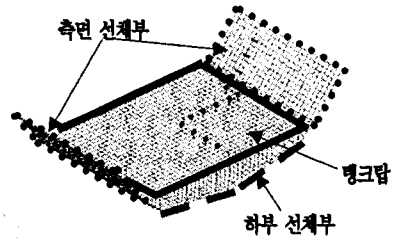
Fig. 6 1/3 Octave accelerance for the impulse input on the pipe(Continued)

3.2 수치해석을 통한 배관의 선체 전달 진동 개선 예측

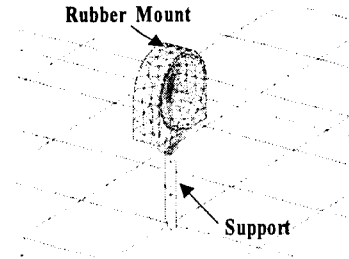
본 절에서는 전결의 파라미터 분석을 통한 진동 전달률 향상이 선체 진동을 얼마만큼 감소시키는지 검증하기 위해서 선체 모델에 대한 유한 요소 해석을 수행하였다. 수치해석은 상용 소프트웨어인 Nastran을 사용하여 수행하였다. 개선 사양 마운트의 강성은 모달 시험에서 얻어진 고유주파수를 가지고 계산해 보았을 때 기존 마운트의 강성 대비 약 4배 정도 감소함을 알 수 있었다. 따라서 개선 마운트의 영향을 기존 마운트의 1/4배로 설정하여 유한 요소 해석을 수행하였다.

Fig. 7은 선체와 배관계에 대한 유한 요소 모델이다. 모델은 선체, 클램프, 마운트로 구성하였다. 선체 모델은 쉘(Shell) 요소(Quadrilateral)를 사용하여 모델링하였고, 클램프는 빔(Beam) 요소, 마운트는 솔리드(Solid) 요소(Tetra)를 사용하여 모델링하였으며, 가진력은 배관과 접촉되는 마운트의 중심점에 단위 가속도를 입력하였다. 일반적으로 유체 가진에 의한 배관진동은 고주파 범위에서 백색잡음(White noise)과 같이 전 주파수에 걸쳐 분포하기 때문에 본 해석에서는 전주파수 범위에서 동일한 단위가속도 레벨을 입력으로 하여 마운트의 사양에 따른 선체부의 주파수 응답을 해석하였다.

Fig. 8은 해석 결과 마운트 사양에 따른 500Hz ~ 3500Hz까지 선체부에서의 평균 가속도 분포이다. Fig. 8에서 탱크 탑(Tank Top)부의 경우 배관의 진동이 하부 선체부까지 크게 전달되지 않음을 알 수 있으나, 측면 선체부의 경우 배관 진동이 상대적으로 선체로 잘 전달되고 있음을 알 수 있었다. 여기서 개선된 사양의 마운트를 적용했을 때 진동 레벨이 기존 사양 마운트를 적용했을 때 보다 약 2.7배 줄어들음을 확인 할 수 있었다. Fig. 9는 해석에서의 입력된 가속도와 해석 결과 최대 진동 노드점에서의 진동이다. Fig.9(a)와 (b) 비교를 통해 개선 사양 마운트 적용으로 측면 선체부 진동이 크게 줄어듦을 확인 할 수 있었다.

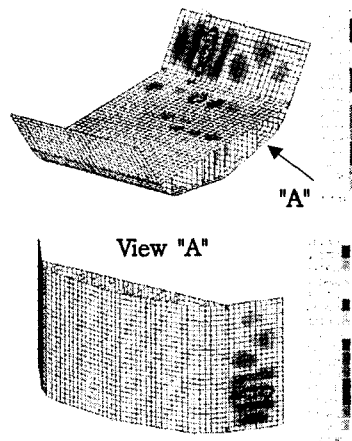


(a) FEM model for a block of the ship including pipe layout

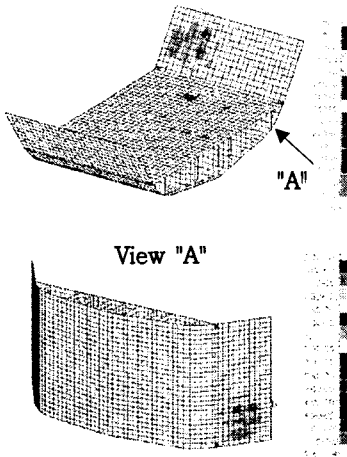


(b) FEM model of the rubber mount and support

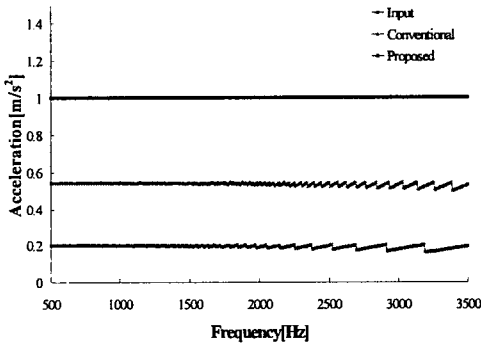
Fig. 7 FEM model



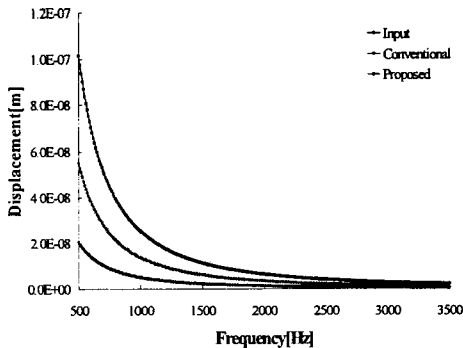
(a) Applying conventional mount (Max acc. = 0.54m/s²)



(b) Applying proposed mount (Max acc. = 0.2m/s²)
 Fig. 8 Distribution of the acceleration averaging from 500 to 3500Hz



(a) Acceleration



(b) Displacement

Fig. 9 Acceleration and displacement on the maximum vibrated node evaluated numerically

수치해석 결과로부터 측면 선체부의 경우 마운트의 진동 절연 성능 향상으로부터 선체 진동이 크게 줄어들 수 있음을 알 수 있었으며, 앞서 수행한 파라미터 분석의 결과를 해석적으로 검증할 수 있었다.

4. 결론

배관에 의해서 선체로 전달되는 진동은 함정의 수중 방사 소음을 증가시키는 가진원 중 하나이다. 본 논문에서는 실선에서의 배관 진동 계측을 통해 배관계 소음의 문제점을 분석하고 배관에 의한 수중 방사 소음 감소를 위해서 배관의 진동 절연과 관련하여 배관 마운트에 대한 분석을 수행하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 실선에서 배관 및 격벽, 바닥 진동 측정 결과 배관에 의한 진동이 바닥 및 격벽으로 크게 전달되고 있음을 알 수 있었으며 배관의 진동에 대한 규격 적용과 이를 만족시키기 위한 일련의 작업이 필요함을 알 수 있었다.

(2) 배관용 고무마운트의 파라미터 분석 결과 마운트의 진동 절연 성능은 도장, 클램핑 시 발생하는 고무의 압축 변형, 고무의 경도에 따라 달라지며 마운트에 도장을 하지 않고, 클램프 사이에 2.5mm 와셔를 삽입하여 압축 변형을 줄이고 고무의 재질을 네오프렌(Neoprene, CR) 65도에서 45도로 변형 시켰을 때 단위 임팩트 하중에 대한 가속도의 주파수 응답함수가 작아짐을 확인하였다.

(3) 선체 모델링에 대하여 배관의 진동 전달 변화를 고무 마운트의 강성에 따라 수치해석을 통해 분석한 결과 고무마운트의 강성 저감에 따라 선체부 진동, 특히 측면 선체부의 진동이 크게 줄어들음을 확인할 수 있었으며, 이를 통해 파라미터 분석 결과 선정된 개선 마운트 적용 시 선체 전달 진동이 크게 저감됨을 예측할 수 있었다.

본 논문의 경우 배관의 진동 절연에 대해서만 다루었지만, 배관 자체의 진동을 저감하는 것이 무엇보다 중요하다. 이를 위해서는 MIL-Std 규격 등 배관에 대한 규격 적용을 통해 목표치를 설정하고 소음기 적용, 밸브 종류 및 위치 최적화, 배관의 형상 최적화 등 다양한 관점에서 이를 저감하기 위한 노력이 필요할 것으로 생각된다.

참고 문헌

- (1) MIL-STD-740-2, 1986, "Structure Borne Vibratory

Acceleration Measurements and Acceptance Criteria of Shipboard Equipment".

(2) 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", Proceedings of the Annual Spring Meeting, SNAK, pp. 402-409.

(3) Lee, G. S., Lee, S. Y., Ryu, C., H., 1990, "Test and Analysis for Dynamic Properties of Rubber Materials for Vibration Isolation (1)". KSNVE Autumn Conference, pp. 27-32.

(4) 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.

(5) Han, H., S., Jeong, W. B., Jeon, S. J. and Jeong, W. W., 2008, "Parametric Study of the Vibration Transmissibility for the Rubber Mount of the Seawater-Conveying Pipe in a Ship". JPEM, E08-135