



탄성지지를 이용한 선박기관 및 의장시스템 진동 제어

김의간* , 김형진** , 김양곤***

(* 한국해양대학교, ** STX 중공업, *** 한국선급협회)

1. 머리말

선체구조는 보, 판 등 단순한 부재의 용접으로 제작되는 다양한 형태의 국부부재와 부구조물의 조립체이다. 이와 같은 구성요소들은 그것이 특정 기진원에 인접하여 직접 가진되거나 인접한 부구조물을 통해 전달되는 진동에너지에 의해 종종 과도한 진동이 발생한다. 선체구조에 과도한 진동을 예방하기 위해서는 적절한 진동제어 대책이 필요하다.

선박의 대표적인 진동제어는 일반적으로 선내에 탑재되는 모든 기기들, 특히 발전시설, 주보기 배기관, 각종 압축기와 펌프류 및 이들과 연결된 각종 배관계통, 공기조화기와 유압펌프장치, 기타 각종 기계류들에 대해 탄성지지를 적용하여 진동을 절연하는 것이다.

한편 함정용 기기의 경우에는 진동절연 목적뿐만 아니라 기기 진동에 의해 고체음 전달을 통한 피탐 가능성 저감 및 수중폭발 충격하중에 대한 기기의 내충격 안전성 확보를 위해 많은 경우 탄성지지를 채택하고 있다^(1,2).

이 글에서는 저진동 선박을 위한 진동제어 방안으로 주기관의 진동제어 방법 및 의장시스템의 진동 절연 사례를 살펴보고자 한다.

2. 선박 기관의 진동 제어

선박기관의 진동제어는 기진력 및 기진효과 감소, 공진회피, 역기진기의 설치 등으로 이루어지는데, 이는 중·소형기관과 대형기관으로 나누어 적절한 대책을 고려하여야 한다.

중·소형기관의 경우는 탄성지지를 이용하여 진동절연을 도모하고 있으나 대형기관의 경우에는 일반적으로 기관의 최대회전수가 150 rpm 이내에 존재하므로 탄성지지를 이용해 고유진동수를 낮추기에는 현실적인 어려움이 있으므로 일반적으로 기관프레임과 선체 사이에 톱브레이싱을 설치하여 기관본체의 고유진동수를 기관의 상용회전수 밖에 존재하도록 하여 공진을 회피하는 방법을 채택하고 있다.

2.1 탄성지지를 이용한 중·소형기관의 진동절연

선박 및 해양플랜트에서 널리 사용되고 있는 4행정 중·고속 디젤엔진은 저속 2행정 디젤기관과 마찬가지로 불평형력, 불평형모멘트, 안내력(guide force) 모멘트 등에 의한 진동이 발생하고, 이들 중 기관 본체진동을 일으키는 주요 기진력 성분은 안내력 모멘트이다. 발전기 자체의 안내력 모멘트가 기관본체 탄성모드와 공진하여 과도한 진동이 발

* E-mail : nvh@kmou.ac.kr / Tel : (051)410-4361

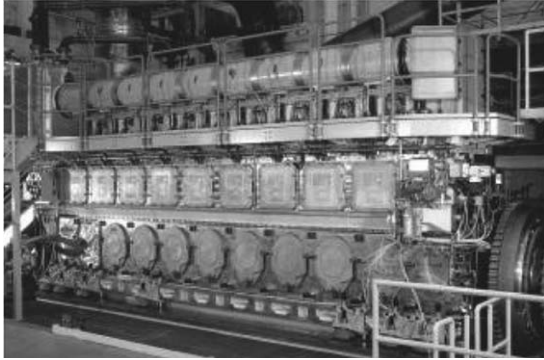


그림 1 탄성지지된 발전용 기관의 사진

표 1 고유진동수 및 진동모드 해석결과

No.	Mode	Frequency [Hz]
1	Lateral	3.8
2	Pitching	5.0
3	Vertical	7.0
4	Yawing	8.0
5	Longitudinal	9.7
6	Rolling	14.5

표 2 자중에 의한 정적처짐 해석결과

Mount No.	Deflection [mm]		
	X	Y	Z
1	0.00	0.00	-11.28
9	0.00	0.00	-11.46
10	0.00	0.00	-10.59
18	0.00	0.00	-10.77
19	0.02	0.21	-10.91
20	0.09	1.10	-10.88

생한 경우에는 본체를 보강하거나 냉각기 등의 상부 구조에 탄성마운트를 설치하여 본체의 고유진동수를 변화시키는 제어 대책을 적용한다.

또한, 디젤 발전기로부터 선체로 전달되는 기진력을 저감하기 위해서 디젤 발전기와 선체 받침대 사이에 탄성마운트를 설치할 경우에 탄성지지된 발전기의 6자유도 강제모드의 고유진동수는 통상 20 Hz이하로 설계한다. 이 경우 발전기의 강제 모드가 엔진 또는 프로펠러 기진력과 공진하여 과도진동이 발생하는 경우가 있으며

표 3 기동/정지 토크 작용시 최대처짐 해석결과

Mount No.	Deflection [mm]		
	X	Y	Z
1	-0.01	-0.04	-0.91
9	-0.01	0.02	-0.83
10	-0.01	-0.04	0.83
18	-0.01	0.02	0.91
19	-0.01	0.46	-0.05
20	-0.03	2.78	0.68

표 4 선체 경사에 따른 정적처짐 해석결과
(경사조건 : rolling \pm 22.5 deg.)

Mount No.	Inclined rolling +22.5 degree			Inclined rolling -22.5 degree		
	Tx	Ty	Tz	Tx	Ty	Tz
1	0.12	-2.20	6.56	-0.12	2.20	-5.09
9	0.12	-2.95	6.26	-0.12	2.95	-4.41
10	-0.12	-2.20	-4.63	0.12	2.20	6.01
18	-0.12	-2.95	-4.94	0.12	2.95	6.69
19	0.03	-5.38	1.01	-0.06	5.36	0.36
20	0.07	-20.79	-3.47	-0.25	20.63	5.28

표 5 선체 경사에 따른 정적처짐 해석결과
(경사조건 : pitching 7.5 deg.)

Mount No.	Inclined pitching 7.5 degree			Inclined pitching 7.5 degree		
	Tx	Ty	Tz	Tx	Ty	Tz
1	0.93	0.02	1.37	-0.93	-0.02	-1.21
9	0.93	-0.02	-1.07	-0.93	0.02	1.28
10	0.92	0.02	1.31	-0.92	-0.02	-1.16
18	0.92	-0.02	-1.31	-0.92	0.02	1.33
19	1.16	0.01	1.72	-1.16	-0.01	-1.57
20	2.15	-0.12	-1.42	-2.17	0.1	1.62

로 발전기 원동기를 탄성지지할 경우에는 기관의 상용회전수 영역에서 외부 기진력과 공진하지 않도록 적절한 강성을 가지는 마운트를 선정하는 것이 매우 중요하다⁽³⁾.

그림 1은 발전용 기관 본체에 탄성마운트를 이용한 방진대책 적용 사례를 보여주고 있으며 일반적으로 집중 질량계와 스프링 요소로 간략화

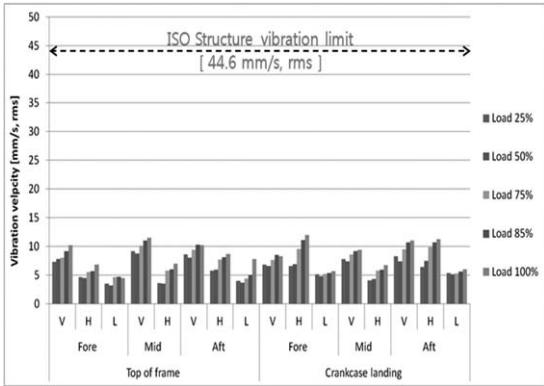


그림 2 기관 부하별 진동계측 결과

시커 상용구조 해석 프로그램으로 해석을 할 수 있다.

발전용 기관의 탄성지지 해석은 고유진동수 및 진동모드 분석 이외에도 자중에 의한 처짐, 기동/정지 시 최대 정적처짐, 선체의 경사에 따른 최대 처짐을 고려하여야 한다. 표 1~5에서는 발전기 원동기에 대한 진동 해석을 수행한 일례를 보여 주고 있으며 이 기관에 대한 진동 측정 결과는 그림 2와 같이 ISO진동 규격(44.6 mm/s, rms)을 만족하고 있으므로 발전용 기관의 탄성지지 설계에 대한 신뢰성을 확인할 수 있다.

2.2 톱브레이싱을 이용한 선박기관의 진동 제어

최근 선박에서는 연료소모량 절감을 위한 노력의 일환으로 연속최대 회전속도를 낮추도록 설계한 초장행정 기관을 적용하는 경향이 늘어나고 있다. 이에 따라 주기관 본체의 강성은 저하하여 H-모드의 공진회전수가 상용회전수 이하에 존재하는 경우가 종종 발생한다. 또한 장 행정 저속 디젤기관은 횡 방향 기진력인 H형, X형 안내 모멘트에 의하여 기관 본체와 이를 지지하는 선체구조에 진동 문제가 유발될 가능성이 높다. 따라서, 기관본체의 고유진동수를 높여 공진 회전을 기관의 사용 회전수 영역에서 벗어나게 하는 방법으로서, 기관본체 또는 기관 이중저의 강성을 증가시키는 방법, 기관 프레임과 선체 사이에 브레이싱을 설치하는 방법 등이 있다. 브레이

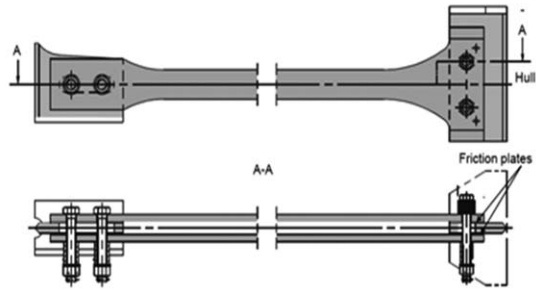


그림 3 마찰식 톱브레이싱

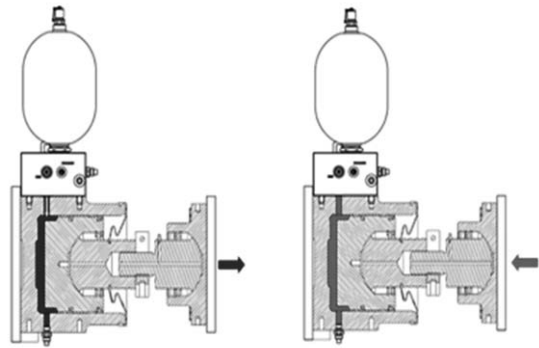


그림 4 유압식 톱브레이싱(한미유압)

싱을 설치하는 방법은 간단하기 때문에 기관 프레임의 횡진동 방지 대책으로 자주 이용된다. 이는 전·후방향의 기관 프레임 진동에도 효과가 있다^{(4,5)}}.

그림 3은 기관 본체 진동 방지용으로 예전부터 사용되고 있는 마찰식 톱브레이싱을 보여주고 있다. 또한 그림 4와 같이 전통적인 브레이싱 대신 유압식 톱브레이싱을 사용하기도 한다.

유압식은 선체가 황천 항해나 적화 상태에 따라 큰 변형을 일으켜도 잘 적응할 수 있다. 이 장치는 유압실린더와 2개의 구형 베어링으로 구성되며, 기름은 캠축 윤활 계통으로부터 공급되는 형식과 질소가스와 함께 충전되는 형식이 있다. 그리고 이들 장치에는 안전밸브가 설치되어 과도한 압력이 형성되는 것을 방지한다. 그림 5는 기관에 톱브레이싱이 설치한 모습을 보여주고 있으며, 그림 6은 톱브레이싱 설치에 따른 기관 본체 진동 제어 결과를 보여준다. 일반적으로 선

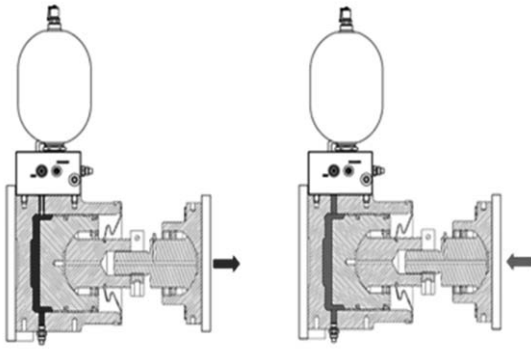


그림 5 기관에 톱브레이싱을 설치한 예

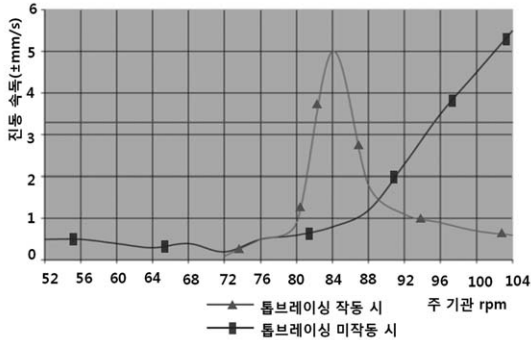


그림 6 톱브레이싱을 설치한 본체 진동 제어에

체와 기관사이에 브레이싱이 설치되면 이를 통해 선체로 기진력이 전달되므로 선체진동, 특히 상부구조 진동에 미치는 영향을 충분히 유의해야 한다.

2.3 역기진력을 이용한 선박기관의 진동 제어

선박 주기관 본체 진동의 대표적인 진동모드인 H형과 X형의 진동모드는 그림 7에 보인 바와 같다. 이러한 선박기관 본체 진동의 제어 대책으로는 역기진기를 이용하여 기진력을 경감하는 방법과 고유진동수를 상승시켜 공진이 일어나지 않도록 하는 방법이 있다. 주로 후자가 널리 이용되고 있으나, H형 및 X형 본체 진동의 기진력이 크면 이를 경감하기 위해 기관 본체에 역위상을 갖는 밸런서를 설치하여 엔진의 상용회전수 전 구간에서 진동특성을 제어하는 방법이 있다. 이는 톱브레이싱을 이용하여 엔진 본체의 고유진

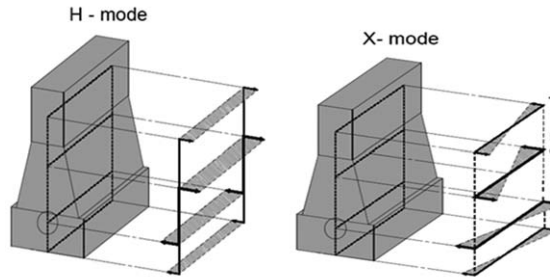


그림 7 선박 주기관 진동모드

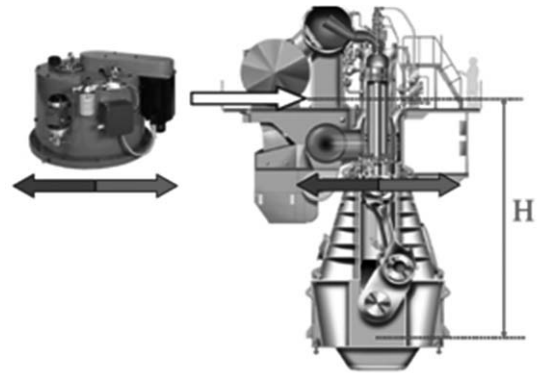


그림 8 H형 진동 제어를 위한 역기진기

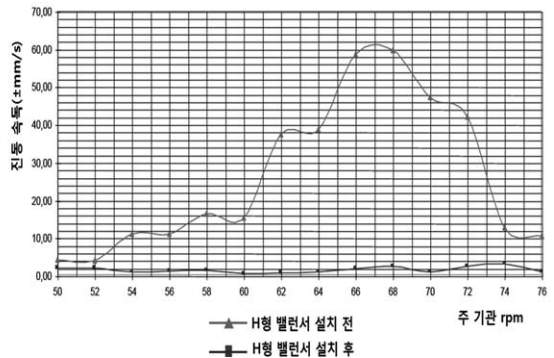


그림 9 기관본체의 H형 진동 제어결과

동수를 증가시키는 방법보다 적극적인 엔진 본체진동 제어 대책으로 볼 수 있다.

H형 진동모드를 제어하기 위해서는 기관 중앙에 역기진기 1대를 설치하며, 일반적으로 기관의 배기가스 리시버 밑 실린더 프레임에 설치된다. H형 역기진기를 그림 8에 보여주고 있으며, 그림 9는 역기진기를 설치에 따른 H형 진동 제어 결과를 보여준다.

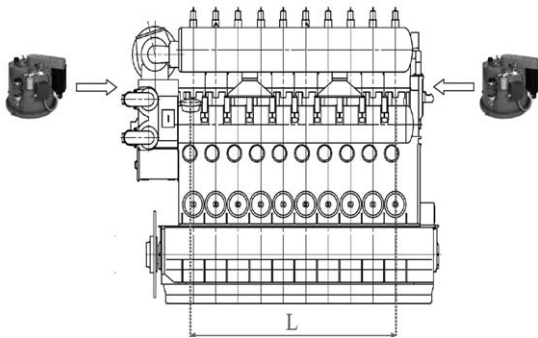


그림 10 X형 진동 제어를 위한 역기진기

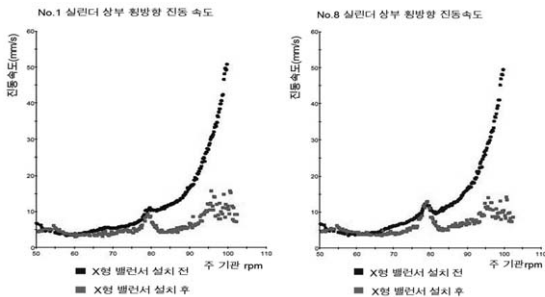


그림 11 기관 선미부의 X형 진동 제어결과

X형 진동모드를 제어하기 위해서는 그림 10과 같이 기관 전·후단에 서로 반대 위상을 갖는 역기진기 2대를 설치하며, 그에 따른 X형 진동 제어 결과는 그림 11와 같다^(6,7).

3. 탄성지지를 이용한 의장시스템 진동 제어

선박의 의장시스템 진동제어는 장비 자체를 보강하여 진동을 억제하는 방법을 주로 사용하고 있다. 그러나 최근 건조되는 고부가선에서는 장비를 지지하는 부재를 통해 인접 구조나 선실로 전달되는 진동을 차단하기 위해 장비와 장비받침대 사이에 탄성마운트를 설치하여 진동을 차단하는 방법을 많이 적용하고 있다.

선박용 기계의 탄성마운트는 육상 기계와 달리 탄성 강구조 상에 설치되므로 장비 받침대의 강성이나 장비와 받침대 사이의 마운트 강성에 의해 장비 진동이 좌우된다. 또한, 장비 자체 기진력으로 인한 진동 문제와 함께 주기관이나 프로

펠러에 의한 외부 기진력과 공진으로 인해 진동문제가 발생하는 경우가 많으므로 방진대책 수립 시 주파수 성분을 확인하여 기진원을 정확하게 규명하여야만 효과적인 방진 대책 수립이 가능하다^(4,9).

선박용 기계에서 발생하는 기진력이나 외부에서 들어오는 진동의 절연성능 평가는 전달률이 주로 사용된다. 일반적으로 탄성지지계를 설계할 때의 전달률은 가능하면 0.3이하가 요구된다.

탄성지지계 해석은 마운트의 질량은 무시하고 탄성계수만을 갖는다고 가정한다. 이 방법은 1단 탄성지지계에는 유용하나, 2단 탄성지지계 이상의 경우에는 상부 탄성지지계를 지지하는 받침대 구조물이 존재하기 때문에 이 받침대를 강체로 고려한 진동모드 이외에도 받침대의 탄성모드를 고려해서 해석해야만 함정용 탄성지지계의 진동 차단성능을 나타내는 주파수 대역 중 중주파수 대역인 400~500 Hz 영역까지 진동레벨 해석의 정확도를 향상시킬 수 있다. 최근에는 각 장비들을 강체로 모델링한 탄성지지계와 받침대의 탄성모드만을 해석한 진동모드 데이터들을 결합시켜서 전체 시스템의 진동을 해석하는 방법이 주로 이용되고 있다. 이 장에서는 이중 탄성지지를 이용한 의장시스템의 진동절연 해석 사례를 소개한다.

3.1 이중 탄성지지를 적용한 선박용 유청정기 진동 제어

그림 12는 선박용 유청정기를 보여주고 있으며, 이 장비는 원심력을 이용하여 기름을 정제하는데 이용된다. 이러한 유청정기는 함정용 탑재 장비로 내 충격성능을 만족하기 위해 이중 탄성지지계로 설계되었다. 여기서 탄성지지에 사용된 마운트의 특성 곡선은 그림 13과 같으며 그중 4300의 특성곡선을 갖는다.

탄성지지 해석을 위해 대상기계 및 탄성마운트는 집중 질량계와 스프링 요소로 간략화시켜 모델링 하였다. 표 6은 이중 탄성지지계의 마운트 개수별 고유진동수 해석 결과를 보여주고 있으

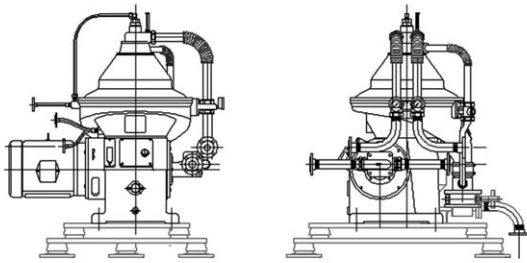


그림 12 이중 탄성지지된 유청정기

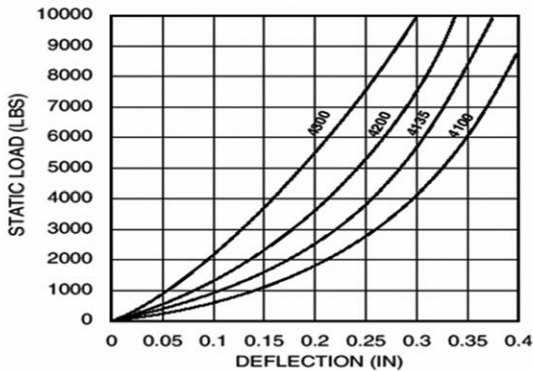


그림 13 탄성 마운트의 하중-변위 곡선

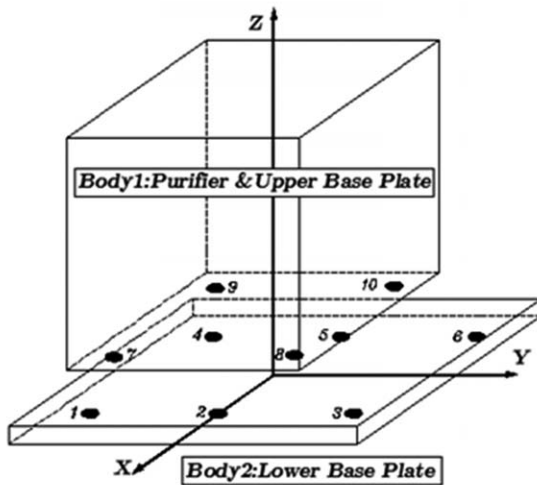


그림 14 유청정기의 이중 탄성지지 좌표계

며, 정적 처짐은 각 지지점에 균일하며 마운트 제작사에서 제시한 허용변위 값 ± 0.4 in(± 10.16 mm)를 만족하였다.

또한 실제 유청정기의 진동을 계측한 결과, 그

표 6 마운트 수별 고유진동수 해석 결과

모드	고유진동수 [Hz]	
	마운트 수 10개	마운트 수 8개
1	6.7	7.1
2	9.5	9.3
3	14.9	14.5
4	28.0	28.2
5	33.1	31.5
6	41.0	38.1
7	62.1	65.7
8	67.8	66.6
9	73.3	73.7
10	76.5	77.9
11	90.3	89.6
12	124.1	118.0

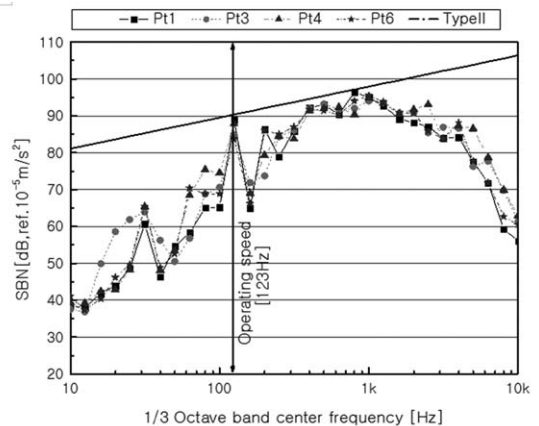


그림 15 유청정기의 고체음 측정 결과

림 15에서 보이는 바와 같이 125 Hz에서 측정된 고체음 가속도 레벨이 MIL-STD-740-2 기준치에 근접함을 확인하였다. 여기서 Pt1, Pt3, Pt4, Pt6은 그림 14에서 마운트가 설치된 1, 3, 4, 6의 위치에서 측정된 것을 말하며, Type II로 표기된 선은 MIL-STD-740-2에서 제시되는 진동 가속도의 허용기준을 나타낸 것이다⁶⁾. 이 125 Hz는 유청정기 회전체의 연속운전회전수(7,400 rpm)에 해당하며, 이중 탄성지지계의 12차 고유진동수와 거의 일치한다. 따라서 125 Hz에서 고체음이 증가

한 것은 이들의 공진에 의한 것으로 추정할 수 있다.

일반적으로 이중 탄성지지계의 고유진동수를 변경하기 위한 방법으로 마운트 개수를 조정하거나, 마운트의 지지점을 이동시키든지, 부진동계 질량을 변경시키는 방법 등이 있으나 여기에서는 자중에 의한 정적처짐량이 0.52~0.66 mm로 허용 처짐량을 충분히 만족하기 때문에 그림 14에서 보이는 바와 같이 하부의 2번과 5번의 마운트를 제거하여 총 8개의 마운트(상부 4개, 하부 4개) 만으로 탄성지지를 하도록 하였으며 표 6은 이에 대한 해석 결과를 보이고 있다.

이를 검토하여 보면 마운트 개수를 2개 줄인 경우 기존의 이중 탄성지지계에 비해 12차 고유진동수가 약 6 Hz정도 낮아졌다. 이는 Bowl의 연속회전수에서 발생했던 고체음은 탄성지지계의 고유진동수 변경으로 기존의 이중 탄성지지계로 설계된 경우에 비해 연속운전영역에서 상당한 진동 감소 효과를 얻을 수 있었다.

3.2 이중 탄성지지를 적용한 선박용 압축기 진동 제어

그림 16은 선박용 왕복동 공기압축기를 보여주고 있으며, 일반적으로 주 기관 및 발전용 기관의 시동 공기인 30 bar정도의 압축공기를 만드는 장비로써 함정의 내충격 성능을 고려하여 이중 탄성지지계로 설계하였다. 왕복동 공기압축기는 일반적으로 기진력이 커서 선체로 전달되는 진동을 차단하기 위하여 본체는 탄성마운트로 지지하고, 배관 등은 유연한 고무재질의 호스로 연결한다. 압축기 진동은 주로 장비 자체의 불평형 질량 및 불평형 모멘트에 의해 발생하며 다른 장비에 비해 상대적으로 진동이 큰 편이다. 특히, 압축기 기진주파수와 압축기 본체의 횡방향 고유진동수가 일치할 경우 공진에 의한 과도한 진동이 발생되기도 한다. 이 경우 탄성마운트를 교체하여 고유진동수를 변경시키거나 밸런싱을 통해 기진력을 감소시키는 방안을 적용한다.

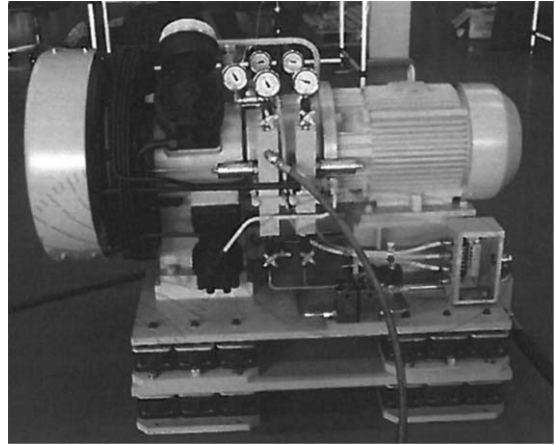


그림 16 이중 탄성지지된 왕복동 공기압축기

표 7 공기압축기 고유진동수 해석 결과

모드	고유진동수 [Hz]
1	2.37
2	2.40
3	4.35
4	4.44
5	5.89
6	7.50
7	10.56
8	11.08
9	12.89
10	14.31
11	18.13
12	19.23

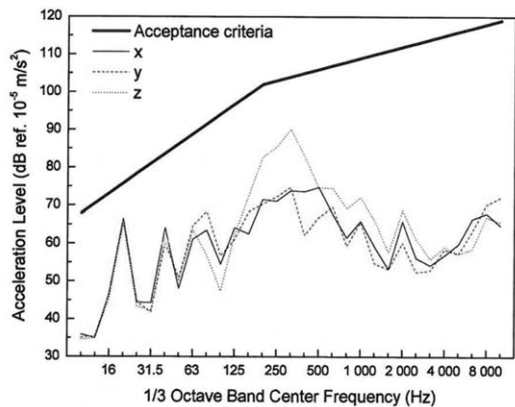


그림 17 왕복동 공기압축기 교체음 측정 결과

이중 탄성지지된 공기 압축기 및 탄성마운트는 집중 질량계와 스프링 요소로 모델링하여 고유진동수 해석을 수행하였다. 이에 대한 고유진동수 해석 결과는 표 7에 보이는 바와 같다. 또한 그림 19는 해당 압축기에 대해 측정된 고체음의 측정 결과를 해당 장비의 진동 규격인 MIL-STD-740-2에서 분류된 Type I의 기준선과 비교한 결과를 보여주고 있다⁸⁾. 그림 19에서 보이는 바와 같이 대상 장비는 중심주파수 10 Hz~10 kHz 구간에서 측정된 1/3 옥타브밴드 가속도레벨이 기준치보다 낮음을 확인할 수 있으며, 해석 및 측정 결과로부터 대상 공기압축기의 이중 탄성지지설계는 모든 기준에 만족함을 알 수 있다.

4. 맺음말

근래 선박에서는 선체 구조강도 및 거주 안락성을 확보한 고품질의 선박진조를 위해서 저진동 선체설계는 필수적인 기술이 되어가고 있다. 이를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 선박용 중·소형기관의 경우 기관 탄성지지를 이용하여 진동절연시 탄성지지계의 고유진동수를 일반적으로 20 Hz 이하로 설계한다.
- (2) 초 장행정 저속 주기관은 톱브레이싱을 설치하고 고유진동수를 높여 공진회전수를 기관의 사용 회전수 영역에서 벗어나게 하는 방법을 적용한다.
- (3) 엔진 본체 진동 제어는 고유진동수를 변경하는 방법 외에도 H 또는 X-모드 기진력에 역위상을 주는 밸런서를 설치하여 상용회전수 전 구간의 진동 저감을 도모한다.
- (4) 최근 건조되는 특수선 및 고부가가치 선박

의 의장시스템은 이중 탄성마운트 설치로 진동을 절연하여 규제규정을 만족하는 경우가 많다. **KSNVE**

참고 문헌

- (1) 한국선급협회 선박진동·소음 제어지침 연구위원회, 2014, 선박진동·소음 제어지침, 텍스트북스.
- (2) 전효중, 김의간, 1999, 기계역학, 효성출판사.
- (3) 이돈출, Brennan, M. J, Mace, B. R, 2006, 선박용 디젤발전기의 진동 절연을 위한 설계 기준, 한국소음진동공학회논문집, 제16권, 제4호, pp. 329~338.
- (4) 정준모, 민덕기, 2011, 메인 엔진 탑-브레이싱의 효과적 배치에 관한 연구, 대한조선학회논문집, 제48권, 제4호, pp. 289~298.
- (5) 김양곤, 문준식, 김정훈, 오주원, 김의간, 2013, 엔진 본체 진동 제어를 위한 유압식 탑브레이싱의 특성 연구, 한국마린엔지니어링학회 춘계학술대회 논문집, p. 314.
- (6) Green & Clean Technology Co., Ltd., 2002, Main Engine Hydraulic Top Bracing, Service Manual.
- (7) Wartsila Switzerland Ltd., 2009, 2-Stroke Vibration Seminar, Seminar Document.
- (8) MIL-STD 740-2, 1986, Structure-borne Vibratory Acceleration Measurements and Acceptance Criteria of Shipboard Equipment.
- (9) Rubber Design b.v., 1989, Vibration Isolation Mountings to Reduce Structure-borne Sound and Vibration on Board Ship.