

3. 해설기사

선박진동 기술의 현황과 전망

Current Status and Prospect of Ship Vibration Technology



공 영 모

Young-Mo Kong

- (주)대우조선해양 진동소음 R&D 팀
- E-mail : ymkong@dsme.co.kr



최 수 현

Su-Hyun Choi

- (주)대우조선해양 진동소음 R&D 팀
- E-mail : shchoi@dsme.co.kr

1. 머리말

글로벌 시대를 살아가는 엔지니어들은 한번쯤은 세계에서 자기분야의 위치를 생각하고, 평가해 보았을 것이다. 그리고 자기가 속한 분야가 세계적으로 선두 주자에 있을 때 느끼는 자부심은 대단할 것이다. 조선산업은 그림 1과 같이 2000년도에 접어들면서 조선시장 점유율이 세계 1위인 일본을 훨씬 앞지르면서, 현재 수주량 세계 1위, 세계 조선소 1-7위까지 석권하는 등 유래없는 활황이 이어지고 있다. 이러한 조선산업의 활황 속에서 최근들어 선박의 품질을 결정짓는 중요한 요소로 평가되는 진동소음 분야도 지속적인 발전을 하고 있으며 이제는 대형조선소를 중심으로 체계화되어가고 있다.

선박에서의 진동은 구조물 진동과 기계(장비)류 진동 등으로 대별된다. 조선소에서 주로 다루어지는 진동은 구조물 진동이지만, 제작사(maker)에서 만든 장비가 선박에 설치된 후에 발생하는 진동문제도 조선소에서 주도적으로 해결하여야 하므로 최근에는 장비의 공장시험(shop test) 등에

적극적으로 참석하여 저진동 장비를 입고하기 위한 노력을 하고 있다. 본 기사에서는 구조물 진동(선체진동)을 중심으로 기술하고자 한다.

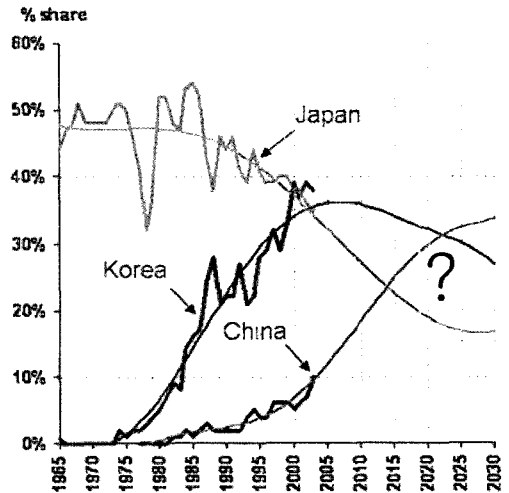


그림 1 주요 3개국 세계 조선시장 점유율 전망 (2005, 출처 : Clarksons, DSME)

선체진동에 관한 최초의 체계적 연구는 1884년

Otto Schlick 연구로부터 시작하여 현재까지 약 100 여년 이상 추진되어 왔다. 우리나라는 1960 년대에 접어들어 시행된 정부의 중화학공업 육성 정책에 힘입어 조선산업이 발전할 수 있는 터전을 마련하였고, 그 터전 위에 1970년대에는 대형 조선소의 설립과 함께 약 30년 가까이 선박진동 관련 연구가 질적 양적으로 성장하였는데, 이 과정에서 학회지가 선도적인 역할을 하였다. 이와 같은 장기간의 방대한 연구에도 불구하고 아직까지도 많은 미해결 과제들을 안고있는 것은 본질적으로 대형 복합시스템인 선박의 진동 문제가 복잡 난해하고, 선박의 발달에 따라 계속 새로운 문제들이 나타나기 때문이다.

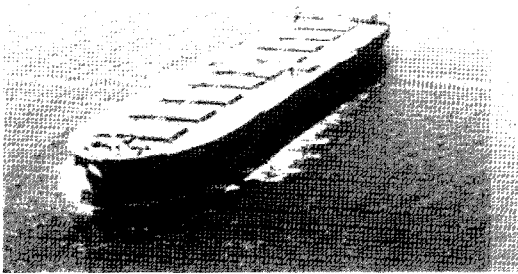


그림 2 초대형 유조선(VLCC) 사진

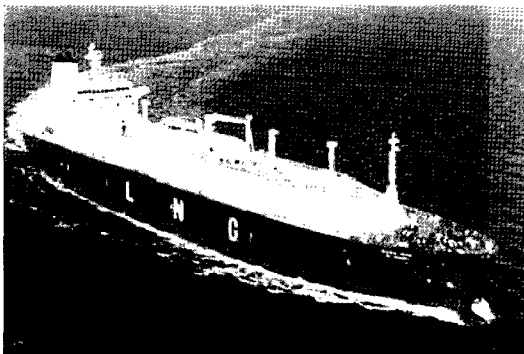


그림 3 액화천연가스운반선 (LNG Carrier) 사진

선박의 주요 기진원은 주 추진 기관(main engine)의 불평형 관성력 및 불평형 모멘트와 프로펠러(Propeller) 회전에 의한 표면전달력에 의한 것으로 이와 같은 주요 기진원과의 공진현상과

강제 응답에 의하여 선체 및 장비에 과대진동이 발생하게 된다. 본 기사에서는 신규선박이 수주되어 진동관점에서 이루어지는 주요 업무인 진동해석, 각종 시험(test) 및 시운전 결과 등을 기초로 하여 선박진동특성 및 대책에 관하여 기술하고자 한다. 특히, 진동특성 파악 및 대책수립에 필요한 전선진동, 선루익(bridge wing) 진동 및 국부구조물 진동으로 구분하여 세부적으로 설명하고자 한다. 그리고 실제 운항상태에서 측정된 진동값의 적절함 유무를 평가하기 위하여 조선소에서 사용하고 있는 각 구조물 및 장비에 대한 진동허용치(혹은 권고치)를 서술하려한다. 마지막으로 앞으로 선진 조선국으로서의 위치를 유지하기 위해 풀어야 할 선박진동 과제를 제시하고자 한다. 그림 2-5는 조선소에서 건조되고 있는 대표적인 선종인, 초대형 유조선(VLCC), 액화천연가스운반선(LNGC, Liquefied Natural Gas Carrier), 대형컨테이너선(Large Containership) 및 살물선(Bulk Carrier)을 나타내고 있다.

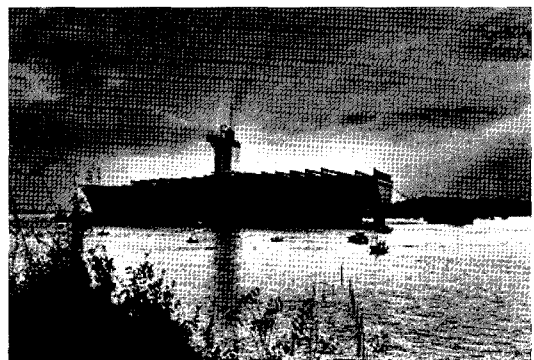


그림 4 대형컨테이너선(Large Containership) 사진

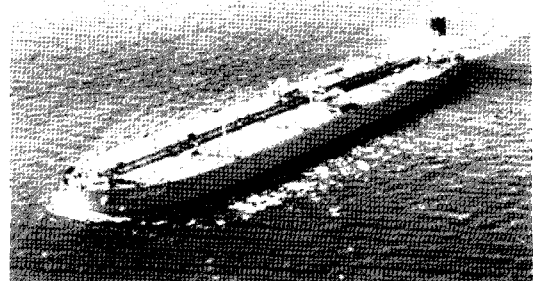


그림 5 살물선 (Bulk Carrier) 사진

2. 진동 특성 및 방진대책

최근 선박의 대형화 및 고속화에 따라 주 추진 기관 및 프로펠러의 기진력이 커지는데 반해 구조 강도계산 기술의 발달로 선체구조 경량화가 심화되고, 쾌적한 승선감 확보를 위해 건조계약서에 엄격한 진동 기준과 평가가 적용되고 있으므로 소음문제와 함께 선박진동이 더욱 중요한 관심의 대상이 되고 있다. 따라서 진동관점에서 선박구조를 재평가할 필요성이 대두된다. 먼저 진동관점에서 선종에 따른 선박의 특성을 고려해 보면 다음과 같다.

일반적으로 초대형 유조선은 출력이 34,000 마력 이상이고 배의 길이가 330m를 초과하는 대형 구조물로서, 타 선종에 비하여 각 조선소에서의 실적 경험 및 자료가 풍부한 편이다. 구조강도상 타 선종에 비하여 진동측면에서 유리하지만, 선박의 항해시야 확보로 인한 거주구 높이의 증가와 진동허용기준의 강화로 인한 거주구 중/횡진동 문제, 선박의 전폭까지 뻗어있는 선루익 진동문제 그리고 기관실의 각종 탱크(Tank) 및 대형장비 하부의 진동문제 등을 상세하게 검토할 필요가 있다. 대형 컨테이너선의 경우, 가능한 많은 컨테이너를 적재하기 위한 넓은 상갑판 구조로 되어 있다. 그리고 일반 상선에 비해서 보다 빠른 화물수송을 위하여 중양부가 거의 없는 날씬한 선형이 채택되므로 선미 하부구조가 좁아져 대형엔진(약 10,000 마력에 가까운 12기통 엔진 탑재)을 앞쪽으로 이동하여 설치할 수밖에 없고, 이에 따라 추진축계의 길이도 상당히 길다. 또한 최대한도의 컨테이너를 적재하기 위하여 거주구 뒷부분에도 화물창이 있고, 시계확보를 위해 7-8층 정도의 높이가 요구되므로, 상대적으로 좁고 높은 거주구 구조로 인하여 진동에 노출되기 쉬운 특성을 가지고 있다. 최근에는 10,000 TEU (길이 20ft인 컨테이너를 10,000개 적재할 수 있는 선박) 이상의 대형선이 건조되고 있다. 이와 같이 컨테이너선은 구조적인 특성과 고속화에 따른 마력 증대 및 선형 특성에 기인한 진동이 발생되기 쉬운 반면, 선원들의 거주성 향상을 위하여 더 엄격한 진동허용

치를 요구하는 추세이므로 조선소 및 관련 연구기관에서 컨테이너선에 대한 진동특성 예측의 정확도 향상 및 진동저감 방안 등에 대하여 많은 연구가 수행되고 있다. 그리고 선박의 시야 확보를 위하여 조타실이 선박의 중앙에 설치됨에 따라, 거주구가 슬립화되어 거주구 전후 방향에 매우 취약함이 발생하게 되거나, 기관실위벽(engine casing)이 함께 선박 중앙으로 이동될 경우는, 프로펠러와 엔진 사이의 장축으로 인하여 축계 진동의 우려가 대두된다. 대형 LNG선의 경우에는 천연가스 상태로 소비지까지 수송하기에는 부피가 너무 크므로 -163°C 까지 얼리면 기체상태의 천연가스가 액체 상태로 변환, 즉 액화천연가스 상태로 이송하게 된다. 그러므로 타 선종의 선박과 달리 진동 등에 의한 균열(crack) 발생 등으로 액화천연가스(LNG)의 누설 등에 의하여 위험한 사항을 초래할 수 있으므로 저 진동 설계가 각별히 요구된다. 특히, 최근에는 화물창(cargo hold) 내부에 설치되어 있는 펌프타워(pump tower)의 경우, 선주들의 경험에 의한 균열 발생 등의 위험성을 강조하고 있어 설계단계에서 특별한 방진설계가 요구된다. 살물선의 경우, 최근 대형화 되고, 특히 거주구가 7층으로 요구되어짐에 따라 주 추진 기관에 의한 거주구 횡진동의 우려가 있으므로 초기설계단계에서 주의를 기울일 필요가 있다. 본 기사에서는 선박이 수주되어 조선소에서 진동과 관련하여 수행하는 업무 절차를 계략적으로 설명하고 그 중 주요 부분 (전선진동, 선루익 진동, 국부구조물진동)에 대하여 상세히 설명을 할 예정이다.

2.1 전선진동

선박의 저진동을 구현하기 위하여 우선 주요 기진력으로 작용하는 주 추진 기관 및 프로펠러의 기진력을 감소시키는 방법이 있다. 주 추진 기관의 경우 선박이 계약되면 이미 결정되어 조선소에서는 다루기 힘든 부분이지만, 2차 불평형 모멘트 보상기 및 추진축의 종진동 감쇠기(Axial Damper)를 추가 설치할 수 있다. 프로펠러 기진력을 감소시키기 위하여는 선형, 스큐(skew)

및 날개 수 등을 조절하여 최적의 방법을 각 조선소마다 강구하고 있다. 특히 프로펠러 날개 수는 거주구의 고유진동수를 고려하여 결정하며 초대형 유조선 및 살물선의 경우 보통 4개, 컨테이너선의 경우 5-6개, 액화천연가스운반선의 경우 4-5개의 날개 수를 가진 프로펠러를 사용한다. 특히, 액화천연가스운반선의 경우, 프로펠러 설정시 거주구 뿐만 아니라 화물창에 설치된 펌프타워와의 공진 여부를 판단하여 결정하여야 한다. 마지막으로, 저진동 선박을 구현하기 위하여 구조변경(혹은 보강)을 추구한다. 이를 위하여 전선진동해석을 수행하고 계산된 결과를 검증하기 위한 각종 시험을 실시한다. 본 기사에서는 재화중량 30 만톤(300K DWT) 초대형 유조선을 중심으로 조선소에서 건조되고 있는 선박의 진동문제 및 특성을 소개하고자 하며, 재화중량 30만톤 초대형 유조선 주요 제원은 표 1과 같다.

표 1 초대형 유조선의 주요 제원

	항목	주요 제원
선체	Length over all	332.0 m
	L.B.P	320.0 m
	Breadth	58.0 m
	Depth	31.0 m
주 추진 기관	Type	B&W 7S80MC
	Power (PS)	34.650
프로펠러	Number of blades	4 EA

상기 호선의 경우 거주구가 6층으로 이루어진 범용형 거주구형이며, 기관실 연돌구조와 거주구 사이에 연결구조를 갖고 있지 않다. 그러나 최근에는 운항시야 확보를 위하여 거주구가 7층으로 바뀌는 추세에 있으며, 각 회사에서 이에 대한 방진대책을 강구하고 있는 실정이다. 초대형 유조선의 거주구형상은 그림 6과 같이 크게 범용형(Conventional) Type과 탑형(Tower Type)으로 구분한다. 범용형 거주구는 과거에 주로 채택했던 기존형태로서 거주구 측면벽이 상갑판(upper deck)에서 항해갑판(navigation deck)까지 연속되어 있어 거주구의 강성이 최근에

채택되고 있는 탑형거주구보다 크다. 따라서 종/횡방향 고유진동수가 높아 거주구의 공진우려가 적다. 반면 탑형 거주구는 상부구조의 폭이 B 또는 C-deck 부터 줄어든 형태로서 거주구의 강성, 특히 횡방향 강성이 대폭 감소되어 횡방향 고유진동수가 낮아져 운항 회전수 범위 내에서 주요기진원과 거주구와의 공진현상이 발생할 가능성이 크다.

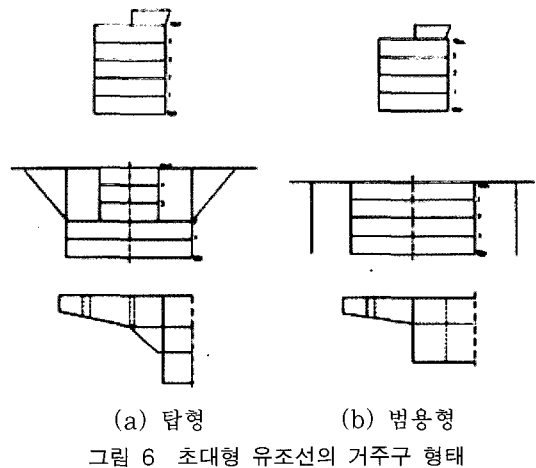


그림 6 초대형 유조선의 거주구 형태

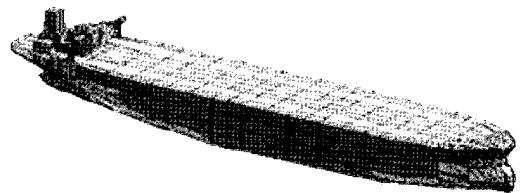


그림 7 초대형 유조선의 유한요소 모델

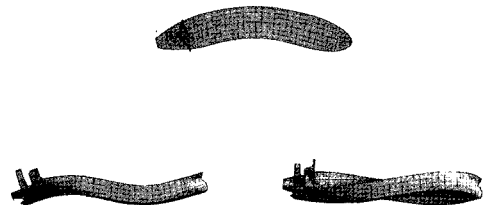


그림 8 선체주요 진동모드

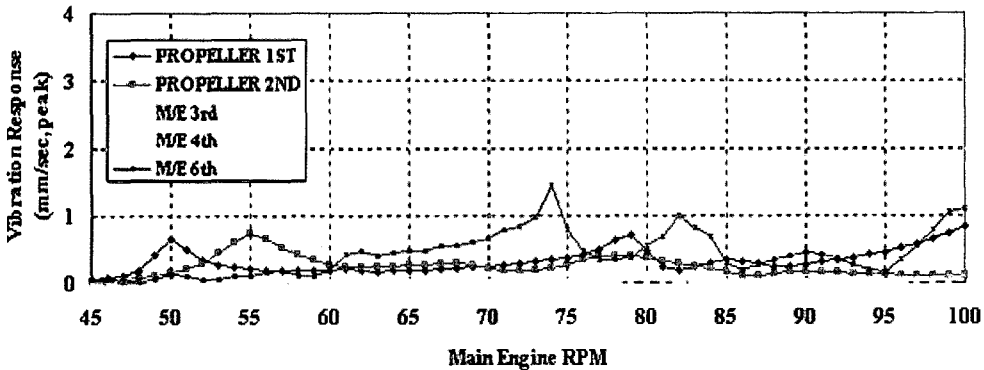
그림 7은 초대형 유조선에 대한 유한요소 모델 이고, 그림 8은 전선 고유진동해석결과로, 선체의 주요 진동모드를 나타낸다. 이러한 전선 고유진동 해석이 완료되면 강제진동해석이 수행되는데 그림 9는 주 추진 기관과 프로펠러 기진력에 의한 강제 진동응답 해석을 수행한 결과이다. 그림 9(a)는 ISO 6954 1984 (E)을 기준으로 각각의 기진원에 대하여 주 추진 기관 회전수에 따라서 주요위 치의 진동값을 각각 나타내고 있다. 그림 9(b)는 ISO 6954 2000 (E)을 근간으로 표현된 그래프 로, 계측된 값은 인간의 방향별 진동 민감도 중으 에서 가장 나쁜(worst) 경우만 선택한 기초곡선 (base curve)으로 작성한 주파수가중치곡선 (combined frequency weighted curve)을 적용하여 특정 주파수(1 Hz-80 Hz)에 나타나는 모 든 진동신호를 합쳐서 주 추진 기관의 회전수에

따라 하나의 진동값을 나타내는 전역 주파수가중 된 실효치 값(overall frequency-weighted RMS value) 이다.

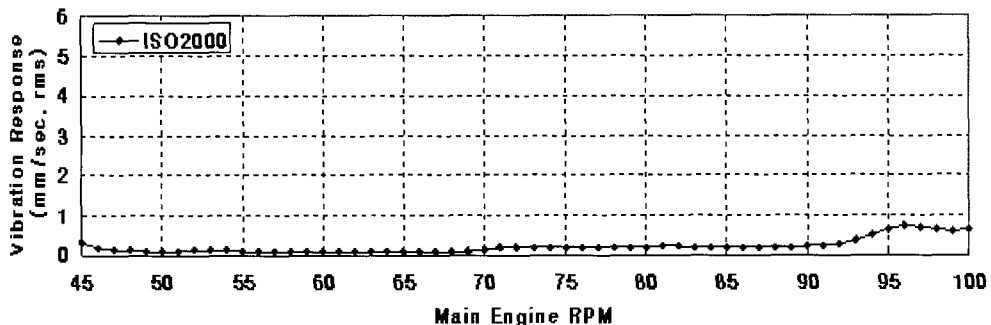
방진설계로는 그림 10에서와 같이 주요 거주구 진동 모드에 상응하는 보강작업이 필요하며, 거주 구 및 기관실 기관실위벽의 기부강성 증가를 고려 한 설계가 필요하고, 선미부와 연결된 진동모드를 줄이기 위해서는 선미부의 강성을 증대시킬 필요 가 있다.

전선진동 문제가 발생할 경우 보강을 위한 많은 시수(M/H) 및 고난이도의 작업이 요구되므로, 설 계단계에서 충분한 방진검토작업이 필수 적이다.

이를 위하여 건조후 시운전 전에 안벽상태에서 가진시험을 통하여 해석결과를 검증할 필요가 있 다. 그림 11는 안벽상태에서의 가진시험을 위하 여 선미측에 설치한 가진시험 장치를 나타낸다.



(a) ISO 6954 1984(E)



(b) ISO 6954 2000 (E)

그림 9 강제진동해석 응답결과

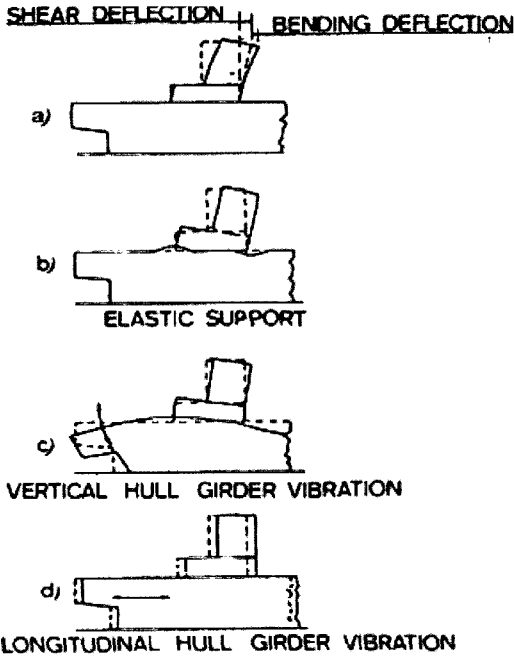


그림 10 전형적인 거주구 진동모드



그림 11 가진기 시험 장치

2.2 선루익(Bridge Wing) 진동

선루익은 선박접안 시 최대한 부두에 가까운 곳에서 선박을 통제할 때 사용하는 대형 국부구조물로서, 일반적으로 가장 높은 곳에 위치하고 조타실과 가까워야 하며, 선체중앙단면의 폭까지 횡방향으로 돌출되게 설계되어야 한다. 이러한 이유로 선루익은 초대형 유조선 선박진동에서 가장 중요

한 개소가 되며, 자주 진동문제가 발생하는 곳이다. 특히, 초대형 유조선의 선루익의 경우, 좁은 항해감판에서 선체중앙단면 폭까지 횡방향으로 돌출되어야 하므로 상당히 길어지고 대형화 할 수밖에 없는데 반하여 선루익 구조를 지지하는 거주구 상부구조가 상대적으로 취약하다.



Mode 1 : D/H Longitudinal Mode



Mode 2 : B/W Mode Coupled with D/H Torsional Mode

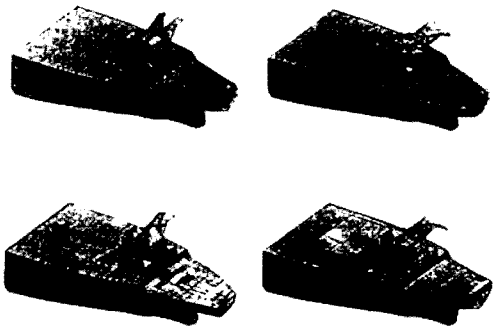


Mode 3 : B/W Mode Coupled with D/H Longitudinal Mode (in phase)



Mode 4 : B/W Mode Coupled with D/H Longitudinal Mode (out of phase)

(a) Plan view



(b) 3-D view

그림 12 탑형 거주구 및 선루익의 대표적인 모드

이러한 선루익은 취약한 상부구조 좌우에 큰 질량으로 작용하므로써 선루익을 포함한 거주구의 전체 고유진동수가 낮아져 선내 주요 기진원과 공

진하기 쉽고 거주구의 작은 진동에도 큰 영향을 받아 선루익 끝단에서 진동치가 크게 나타날 수 있어 진동 측면에서 매우 불리하며 실제로 여러가지 진동문제 사례가 보고되고 있다. 선루익의 주요 진동모드는 그림 12와 같이 선루익 고유의 모드 및 거주구와 연성되는 모드로 나타난다.

이에 대한 방진대책으로는 선루익 고유진동수를 프로펠러 2차 이상으로 올려야 한다. 이를 위하여 선루익 끝단의 질량을 최대한 감소시키기 위하여 형상을 줄여서 고유진동수를 상승시키는 방향으로 설계할 필요가 있다. 거주구와 연성되는 모드의 경우에는 강제진동응답이 필수적이며, 선루익의 진동값을 거주구 진동값과 비교하여 보강여부를 판정하여야 한다. 일부 선주의 경우, 선루익의 진동수준을 거주구에 준하여 맞추어 줄 것을 요구하는 경우도 있으므로 각 조선소에서 적절하게 대처할 필요가 있다. 한편, 그림 13과 같이 선루익 끝단에 동흡진기를 설치하여 진동을 저감시키는 방법도 있다.



그림 13 동흡진기(Dynamic absorber)

2.3 국부구조물 진동

국부구조물의 진동을 방지하기 위하여 국부구조물과 선박의 주요 기진원인 주 추진 기관과 프로펠러와의 공진회피 방법이 주로 사용된다. 국부구조물의 설계주파수(공진회피를 위한 구조물의 고유진동수, 목표치)는 구역에 따라 약간 달리 적용

할 수 있으나, 일반적으로 설계주파수를 프로펠러 2차 성분 이상이 되도록 하고 선급에서도 이 기준을 추천하고 있다. 또한, 선미부 및 기관실 등은 기진력의 전달경로를 고려하여 특별 기준을 설정하는 경우도 있다. 특히 청수탱크 및 기관실의 각종 기름탱크의 경우 부가수 질량효과에 의하여 공기 속에서의 고유진동수보다 낮아진다. 그리고 건조 후 시운전 혹은 운항 중에 진동문제가 발생할 경우, 특수도장작업 및 가스 프리(gas free) 등 보강작업의 어려움이 많기 때문에 설계과정에서의 세심한 방진설계가 요구된다. 그외 진동문제가 자주 발생하는 구역은 대형장비 하부 및 주변 갑판, 레이더 마스트(Radar Mast) 및 기관실 내부의 직립형(수직형)펌프 등이다.

대형장비 주변 갑판의 경우, 보조기관(auxiliary engine) 및 공기압축기(air compressor) 등은 자체 기진체로서, 주 추진 기관 및 프로펠러의 기진원뿐만 아니라 장비 자체의 기진원과의 공진회피설계가 필요하다. 보일러의 경우는 약 60톤 이상의 대형구조물로서 진동관점의 하부구조 검토가 필요하다. 일반적으로 끝단이 엔진 개구부이어서 상대적으로 취약한 위치에 배치되어 있다. 이를 보강하기 위하여 필요 시 하부에 기둥(pillar) 추가도 고려할 필요가 있다. 또한 보일러(boiler)의 경우 높이가 약 4m 이상되므로, 상부에 탑브레싱(top bracing)을 설치하여 보일러의 선체중요 및 하부의 미미한 진동에 의한 보일러의 거동을 제한할 수 있다. 이때 브레싱(bracing)의 선체부 위치는 갑판 등 강성이 큰 위치에 설치를 하여야 하고, 필요시 후면 브라켓트(bracket)보강 및 보강재 크기를 증가시켜 선체부에 작용하는 모멘트(moment)에 견딜 수 있도록 충분한 강성을 갖도록 하여야 한다.

레이더 마스트의 경우, 상부에 중간 갑판(platform deck)위에 전장장비가 설치된 전형적인 외팔보로서 진동에 매우 취약한 구조이다. 일반적으로 레이더 마스트의 진동은 본 구조물이 탑재되는 컴퍼스 갑판(compass deck)과 연성되어 나타나는데, 고유진동수가 매우 낮아 프로펠러 2차 이상의 구조강성을 갖는 것은 매우 어렵기 때문에 선박의 상용운항영역 (Commonly used

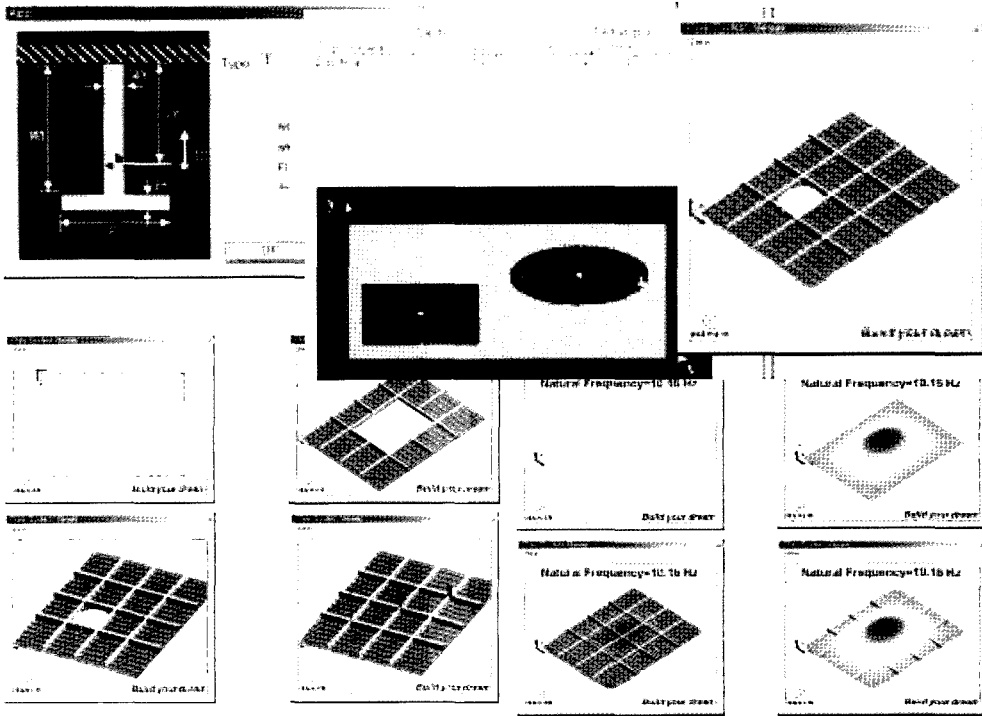


그림 14 선박 국부보강판 진동해석 결과

rpm)에서 공진을 회피하는 설계가 필요하다. 한편, 기관실 내의 직립형 펌프의 경우 하부구조강성 점검과 아울러 필요시 상부에 탑브레싱(top bracing) 설치 등을 고려한 방진조치가 필요하다. 또한 장비자체 기진력에 의한 진동을 방지하기 위하여 설치 전후의 축렬(shaft alignment) 교정 및 평형잡이(balancing)작업이 병행되어야 한다. 국부진동해석은 개소가 너무 많아 전체를 유한요소법으로 수행하는 것은 많은 시간과 노력이 수반되므로 간단한 사각판의 경우 간이식 프로그램을 이용하여 계산하고, 복합구조, 대형장비하부 Deck등의 경우는 유한요소법을 이용하여 수행한다.

국부구조의 진동해석에서 모델링은 선체 전체에서 국부구조만 분리하여 나타내기 때문에 주변경계조건을 고려하는데 매우 어려운 점이 많다. 그러므로 선급에서 추천하는 단순양단지지로 간주하여 해석결과에 여유를 가져간다. 그림 14는 당사에서 개발한 선박 국부보강판 진동해석프로그램을

이용한 계산 결과를 나타내고, 그림 15는 유한요소법을 이용한 국부구조 고유진동수 해석결과를 보여준다. 또한 해석결과에 대한 정도를 확인하기 위하여 그림 16와 같이 충격시험(Impact Test)등을 실시한다.

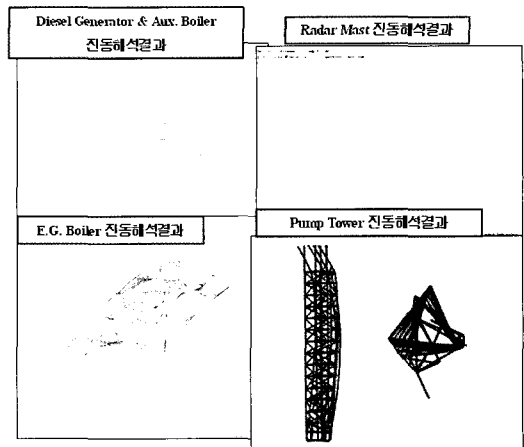


그림 15 유한요소법을 이용한 국부진동계산결과

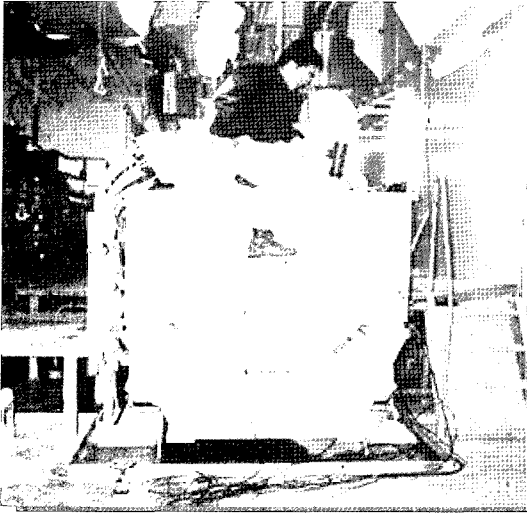


그림 16 충격시험 (Impact Test) 모습

3. 허용기준

선박건조가 완료되면, 시운전을 통하여 선박의 속도(speed) 및 각종 성능시험을 실시하고 진동계측도 선주 입회 하에 수행하게 된다. 진동계측결과를 평가하기 위하여 선주와 조선소 사이에 약속이 필요하며 이는 일반적으로 초기에 작성하는 건조사양서에 명시 된다. 그러나 선박은 다양한 구조물로 구성되고 많은 장비들이 탑재되기 때문에, 구조물 및 장비 등의 객관적인 진동평가를 위해 국제적으로 공인된 국제표준기구인 ISO(International Standardization Organization)에서 여러 개의 지침을 발행하였으나, 선박의 모든 부분을 평가하는 데는 많은 논란이 따른다. 또한, 각 선급, 장비 Maker등에서도 독자적인 기준치를 제시하고 있어, 일부분을 제외하고는 명확하고 통일된

기준치를 찾아보기 힘들다. 따라서, 선주와의 논쟁을 피하기 위해서는 건조 사양서에 보다 상세하게 허용치를 명기하는 것이 바람직하다. 본 기사에서는 선박진동의 평가를 위하여 사용되고 있는 일반적인 자료를 간략하게 서술한다.

선박진동평가는 크게 구조물(거주구, 작업영역, 그외 일반구조물)와 장비 진동으로 구분된다. 구조물 진동평가중 거주구에 대한 평가기준은 상선(길이 100m 이상 적용)에 대한 평가 기준인 ISO 6954를 적용하고 있다. 초기에는 1984 (Edition)를 적용하였으나, 이 기준은 평가물리량으로 MRV (maximum repetitive velocity)를 취하고 단일 진동수 성분만을 고려하였고, 평가 물리량인 MRV의 정의가 애매하고 선박진동에 대한 진동기준 ISO 2631과의 정합성을 고려하여 ISO 6954 2000(E)이 2002년에 개정, 발행되었다. 새로운 기준에서는 평가물리량으로 1Hz - 80Hz사이의 주파수 가중된 실효치(frequency-weighted rms value)을 택하고 있으며, 거주구역을 허용기준의 엄격함에 따라 표 2와 같이 Classification A, B 그리고 C로 구분하고 있다. 여기서 Classification A는 여객실 (Passenger cabins), B는 선원거주영역(crew accommodation areas) 그리고 C는 작업영역 (working areas)를 나타낸다. ISO개정시부터 논란이 많았던 작업영역은 경계가 모호하여 선주와 혼선을 유발할 수 있으므로 초기 건조명세서에 작업영역을 정확히 구분하여 정의할 필요가 있다.

선박갑판이나, 탱크 격벽등 일반 구조물의 경우는 진동에 의한 피로파괴 관점에서 고려하고, 그림 17과 같이 약 30 mm/s 이내의 기준을 적용

표 2 ISO 6954:200(E) 진동허용치 (Overall frequency weighted r.m.s values from 1Hz 80Hz)

	Area classification					
	A (passenger cabin)		B (crew accommodation)		C (working area)	
	mm/s ²	mm/s	mm/s ²	mm/s	mm/s ²	mm/s
Values above which adverse comments are probable	143	4	214	6	286	8
Values below which adverse comments are not probable	71.5	2	107	3	143	4

하고 있다. 장비 진동의 경우, 구조물 진동과 달리 승무원의 안락성 및 피로파괴의 관점이 아닌 장비의 기능에 직접적으로 관계된다. 일반적으로 장비 진동의 크기는 기계의 사양, 종류, 형식 및 사용 목적에 따라 각각 다르며, 또한 동일 도면, 동일 가공기계를 이용하여 제작하여도 각각 다르게 된다. 그러므로 규격의 진동한계치 또는 기준치를 참조하여, 각 기계에 대한 정상, 이상의 판별기준을 설정할 필요가 있다. 선박에 설치되는 기계류에서는 각종 선급에서 제시하는 지침, ISO, 장비 Maker 권고값(recommended value) 을 주로 이용한다. 그림 18은 Maker에서 권고하는 선박의 가장 주요 장비인 주 추진 기관의 진동허용치를 나타낸다. 대표적인 선급 추천 지침은 DNV 지침 (진동평가를 위한 DNV 지침)으로서, 통상 국제규격과 실제 측정 경험을 이용하고 있으며, 선박진동의 평가를 위한 중요한 3가지를 다음과 같이 설명하고 있다.

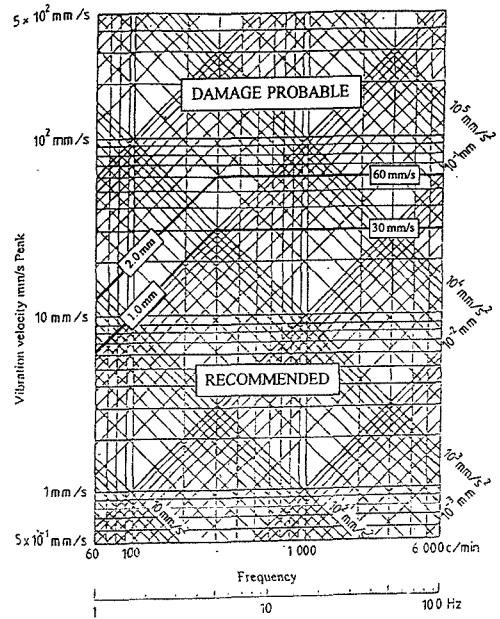


그림 17 DNV's guideline for steel structure vibration

표 3 선박 주요 장비의 진동레벨 (DNV)

장비명	진동레벨 (단위 : mm/s, Peak Value)		비고
	권고레벨	손상레벨	
디젤기관 구동 발전기	10 (3.2-100 Hz)	20 (3.2-79.6 Hz)	외부 및 내부가진 진동
터빈구동 발전기	5 (2.0-100 Hz)	10 (2.0-100 Hz)	고정지지 내부가진진동
	10 (3.2-79.6 Hz)	15(2.4-100 Hz)	탄성지지 내부가진진동
터빈	5 (5-100 Hz)	10 (5-100 Hz)	고정, 탄성지지 외부 및 내부가진 진동
전동기, 펌프, 분리기 및 헨	5 (2.0-100 Hz)	10 (2.0-100 Hz)	내부가진진동
	8 (2.4-100 Hz)	15 (2.4-100 Hz)	외부 및 내부가진 진동
스크류 압축기	5 (2.0-100 Hz)	10 (2.0-100 Hz)	고정지지 외부 및 내부가진 진동
	10 (3.2-100 Hz)	20 (3.2-79.6 Hz)	탄성지지 외부 및 내부가진 진동
왕복동 압축기	15 (3.2-100 Hz)	30 (4.8-53.1 Hz)	고정, 탄성지지
보일러	30 (4.8-100 Hz)	60 (4.8-100 Hz)	단단한 부분 계측
소각로	10 (3.2-100 Hz)	20 (3.2-79.6 Hz)	
격벽에 설치된 전장장비 및 기구	10 (3.2-100 Hz)	20 (3.2-100 Hz)	
기계류에 설치된 전장장비 및 기구	15 (4.8-100 Hz)	30 (4.8-100 Hz)	
마스트에 설치된 전장장비 및 기구	20 (3.2-100 Hz)	40 (3.2-100 Hz)	

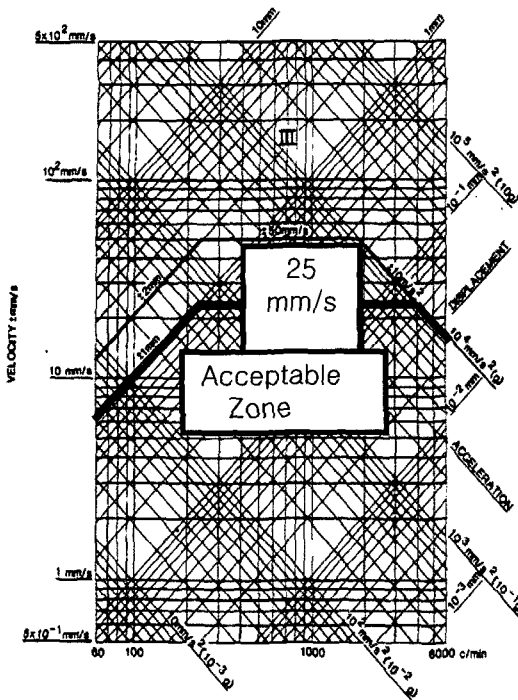


그림 18 MBD's guideline for main engine

- 진동이 선원과 승객에게 피로움과 불편함을 줄 수 있다.
- 진동은 선박 내의 중요 구조요소에 피로손상의 원인이 될 수 있다.
- 진동은 중요 기계와 장비의 적절한 기능을 심각하게 약화시킬 수 있다.

여기에 제시하는 권장기준은 기계진동 뿐만 아니라 인간의 안락함을 위한 진동지침으로 제정한 것이다. 표 3은 DNV에서 제시하는 선박에 탑재되어 있는 주요 장비에 대한 진동레벨을 정리한 것이다. 또한 본 지침의 특징은, 일반 지침이 공장 (shop)에서의 진동허용값인것에 비하여 선박항해 (on board)상의 진동값을 제시함으로써 조선소에서 선주와 협의하기에 합리적인 지침 (guideline)이라고 할 수 있다. 그리고 주요 장비를 세분하여 일반인도 쉽게 적용할 수 있는 것이 장점이다.

그리고 국제적으로 공인된 ISO 규격의 경우, ISO 10816 시리즈 (기계적 진동 -비회전부의 측정에 의한 기계진동의 평가)를 적용하는 것이 관

례이다. 이는 장비의 베어링진동의 평가 규격으로서 이 규격은 다음과 같이 6편으로 구성되어 있다.

- 제 1편 : 일반적인 지침
- 제 2편 : 50 MW를 초과하는 대형육상 증기터빈 발전기 세트
- 제 3편 : 현장 측정시의 15kW이상의 정격출력과 120 rpm에서 15,000 rpm 사이의 정격속도를 가지는 산업용 기계류
- 제 4편 : 항공기 추진을 제외한 가스터빈 구동 세트
- 제 5편 : 수력발전 및 양수플랜트의 기계세트
- 제 6편 : 100kW이상의 정격출력을 가지는 왕복동기계

그러나 본 표준은 제 1편 일반적인 지침에서 “본 표준의 평가기준은 장비 자체에서 발생하는 진동에만 관련되고 외부로부터 전달되는 진동은 관련되지 않는다”의 언급처럼 실제 선박의 운항조건에서의 진동기준 보다는 공장시험 등 육상 계측에 적절한 기준으로 여겨진다. 그러나 선박의 경우, 주 추진 기관, 프로펠러 및 보조기관 등으로부터 전달되는 외부 기진력을 고려할 경우, 조선소 입장에서 매우 불리한 기준이 될 수 있다. 그러므로 공장시험 (shop test) 기준시 본 표준을 적용하고 실제 운항조건하에서는 DNV 지침을 적용하는 것이 바람직하다고 사료된다. 그러나 진동은 특히, 느낌을 중요시하기 때문에 선주에 따라 진동허용치와 달리 요구하는 경우가 빈번히 발생하기 때문에 각 조선소에서 적절히 대비/조치 할 필요가 있다.

4. 국내기술현황 및 과제

국내선박진동의 기술수준은 선진국과 비교하여 대등할 정도로 매우 높은 편이다. 각 조선소에서 매년 유한요소법을 이용한 전선진동해석, 국부진동해석을 수행하는 경험이 많고, 현장에서 건조 및 시운전 중에 발생하는 진동문제해결 (troubleshooting)등을 통하여 얻어지는 실제 경험 등이 많이 축적되어 있어 다양한 종류의 선

박 주문에 신속하게 대응할 수 있는 설계 유연성 및 현장 고경력자의 확보 등으로 인하여 세계 조선소에서 가장 유리한 입장에 있다. 특히, 그 동안에 건조한 실적선에 대한 자료가 풍부하여 앞으로 유사선박을 건조할 때의 방진설계에 크게 도움이 될 것이다. 그리고 일본이 조선업체들의 고기능 설계 인력 부족 등의 이유로 고기능, 고부가가치선 보다는 표준화된 일반선으로 생산성을 높이는 데 주력한 반면, 우리나라는 설계 전문 인력 양성에 지속적인 투자를 해왔으며, 이에 선박진동 측면에서도 다양한 선박의 진동문제에 대한 노하우(know-how)를 많이 축적하였고, 이를 바탕으로 대형액화천연가스운반선(Large LNGC) 및 대형컨테이너선등의 세계시장에서 주도적인 역할을 할 수 있는 기반을 만들어 주고 있다.

선박진동 관점에서의 기술발전은 처음 외국 연구기관에서 발표된 논문과 경험식을 토대로 한 선박의 진동 특성을 예측하는 프로그램의 개발에서부터, 선체를 단면에 따른 강성과 질량을 갖는 빔(beam)으로 치환하여 진동특성을 예측하는 프로그램 등을 개발하였고, 90년대 초 ANSYS와 PATRAN/NASTRAN등 범용 유한요소 해석 프로그램과 해석 전용 슈퍼컴퓨터의 도입은 해석의 정도와 시간을 획기적으로 개선하였으며, 이에 따라 다양한 해석을 신속하게 수행할 수 있게 되면서 진동 해석 기술이 발전하는 계기가 되었다. 그 결과로 모델링 방법, 감쇠(damping) 및 기진력의 산정 방법 등에 대한 연구 결과를 종합하여 선체진동 종합해석 시스템을 구축할 수 있게 되었다. 해석 정도 고도화의 연구활동을 통해 엔진의 기진력 계산을 위한 자체 프로그램 개발 등을 수행하고 있으며 최근에는 민감도와 최적화 기법을 이용한 저진동 개발, 저진동 구조설계를 위한 진동 인텐시티 해석 및 응용 기술 개발 등 산학 연구를 활발히 진행하고 있다. 그리고 진동 실험/계측/제어 분야에서도 PC를 이용하여 진동신호의 취득과 저장 그리고 처리에 이르기까지 모든 계측 업무를 일괄적으로 수행할 수 있는 소프트웨어 개발, 가진기 개발로 시운전 전에 선박 거주구의 진동특성을 사전에 평가하여 과도 진동 발생 여부를 예견

할 수 있게 되었으며, 소형 동흡진기를 개발하여 국부 구조물의 진동문제를 해결하는데 적용하고 있다.

그러나 추격하는 중국조선과의 기술적 차이를 벌리고, 선박설계 및 건조기술의 집합체로 볼 수 있는 초호화여객선을 독점하고 있는 유럽 조선소에 대응하기 위해, 그리고 조선 선진국을 지속시키기 위해 선박 저진동은 필수적이며 이를 위하여 아직까지 해결해야 될 분야가 많이 남아 있다.

첫째, 자유진동해석을 통한 구조물의 고유진동수를 파악하는 것은 현재 많은 경험 등을 통하여 거의 오차 없이 수행하고 있으나, 강제응답측면 즉 진동응답 예측기술의 정확도 측면에서는 각 조선소 마다 약간의 차이가 발생하여, 어려움이 많은 것으로 알려져 있다. 이를 위하여는 주요기진원인 주 추진 기관과 프로펠러 기진력 계산의 정도향상 및 감쇠특성 파악이 매우 중요하다. 그에 따른 이론적 연구와 함께 실선 계측을 통한 자료의 축적이 함께 병행되어야 한다. 이는 조선소 진동업무 수행자 뿐만 아니라, 장비 제작자(maker)와 선형, 유체 관련 담당자의 협조가 필요한 부분이기도 하다.

둘째로, 일부 조선소에서 수행하고 있지만, 진동에 의한 구조물의 피로파괴에 대한 연구가 좀더 집중적으로 이루어질 필요가 있다. 구조물 진동이 인체에 미치는 영향은 충분히 평가되어 왔지만, 구조물 진동이 피로파괴에 미치는 영향 등에 대해서는 체계적인 연구도 부족하고 이를 방진설계에 적용하려는 노력도 부족한 편이다. 따라서, 이에 대한 상세한 연구를 집중적으로 수행하여 고품질 선박건조에 기여할 필요가 있다.

셋째, 장비의 방진기술 선진화가 필요하다. 저진동/저소음을 절대적으로 필요로 하는 호화여객선 등의 고부가가치 선박이 앞으로 우리의 과제임은 명확하다. 이 분야에 많은 실전 경험을 보유한 유럽과 대등한 관계를 유지하기 위해 진동/소음과 선실의 중요성이 매우 크다. 호화여객선은 바다에

며 있는 초특급 호텔을 건조하는 것이기 때문에 수많은 선내 기진원에 의한 여러 진동 수준을 기진원이 없는 육상 건물에서의 진동수준과 동일하게 맞추어야 하고, 이러한 진동수준을 맞추기 위하여 구조적으로 처리할 수 있는 부분이 한계가 있기 때문에 무엇보다도 진동을 발생시키는 장비 및 이를 절연하는 방진 마운트(mount) 등 제진장치 개발이 절실하게 요구된다.

마지막으로 인적자원의 확보이다. 이것은 단순히 해결될 문제는 아닌 것 같다. 국가와 산학의 공존 하에 이루어져야 할 부분이지만, 각 분야에서 공학도의 올바른 역할과 자부심을 배양하기 위한 대책이 시급하다. 또한 산학에서도 최근 분야의 다양화/체계화에 발맞추어 연관 전공에 함께 일할 수 있는 분위기를 만들 필요성이 있다. 일례로, 선박 진동의 경우 조선뿐만 아니라 기계, 설계, 전기/전자 등 여러 가지 분야에서 서로가 협력하여 선박진동을 이끌어갈 필요가 있다. 아직까지 나아가야 할 분야가 많지만 조금씩 서로 준비하여 갈 때 저진동/저소음 선박의 미래도 밝아질 것으로 확신한다.