

초대형 유조선 및 일반 화물선의 진동 특성 및 방진대책

최 수 연*

(대우조선공업(주) 선박해양기술연구소)

1. 머리말

선박은 사람 또는 화물을 적재하고 물에서 항해하는 구조물로 정의되며 부양성, 적재성 및 이동성의 특성을 갖고 있다. 또한 배의 사용목적에 따라 상선, 군함, 어선, 특수 업무선으로 구분되며 본 글에서 논할 초대형 유조선과 일반 화물선인 살롱선은 상선에 포함된다. 최근의 조선시황, 특히 탱커선의 시황은 주변 정세에 따라 약간 유통적이지만, 장기적으로는 MARPOL Annex I/제13G⁽¹⁾ 규칙 개정으로 인하여 단일 선체구조 유조선의 조기폐선 채택으로 2007년까지 2만톤 이상의 전 단일 선체구조 유조선이 폐선 되어야 하므로, 이로 인한 신규발주가 기대된다. 특히 당사를 포함한 국내 조선소의 탱커선에 대한 공정자동화, 표준화 및 오랜 경험 등으로 공정시수를 최대한 줄일 수 있는 단계로 수익성이 매우 큰 선종이다.

그러나 최근 전 산업분야에서 경쟁하고 있는 중국을 극복하기 위하여는 한층 더 생산자동화, 표준화와 더불어 국내 조선소 간

의 정보교환 등을 통한 기술력 향상이 필요하다.

일반적으로 초대형 유조선의 경우 주기관 축력이 30,000 마력 이상이고 배의 길이가 300 m를 초과하는 대형 구조물로서, 타 선종에 비하여 각 조선소에서의 실적경험 및 자료가 풍부한 편이다. 그러나 최근 안전을 고려한 선박의 항해시야 확보를 위해 거주구(deck house)높이가 증가되어 거주구 및 선투익(bridge wing) 등에 과도한 진동이 발생하기 용이하여 진동검토 및 평가가 새롭게 요구되어진다. 또한 최근 진동 허용 수준에 대한 규제 및 관심이 날로 증대함에 따라 진동에 대한 정확한 사전검토와 방진 대책 수립이 더욱 중요시되고 있다.

본 글에서는 저자 회사에서 수행하였던 초대형 유조선 및 화물선의 진동계산결과, 각종 테스트 및 시운전 결과 등을 기초로 하여 진동특성 및 대책에 관하여 기술하고자 한다. 특히, 진동특성 파악 및 대책수립에 필요한 전선진동, 선투익진동 및 국부구조물진동으로 구분하여 세부적으로 설명하고자 한다. 그림 1~2는 저자 회사에서 건조한 초대형 유조선과 화물선을 나타낸다.

* E-mail : shchoi@dwship.com

〔 특 집 〕 선박진동

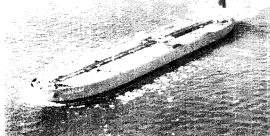


그림 1 초대형 유조선(VLCC) 사진

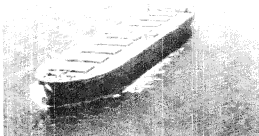


그림 2 살물선(bulk carrier) 사진

2. 진동 특성 및 방진대책

최근 선박의 대형화 및 고속화에 따라 주 기관 및 프로펠러의 기진력이 커지는데 반해 구조 강도계산 기술의 발달로 선체구조 경량화가 심화되어 진동관점에서 선박구조를 재 평가할 필요성이 대두된다.

초대형 유조선의 경우 구조강도상 타 선종에 비하여 진동측면에서 유리하지만, 선박의 항해시야 확보로 인한 거주구 높이의 증가와 진동허용기준의 강화로 인한 거주구 종/횡진동 문제, 선박의 전폭까지 뻗어있는 선루의 진동문제 그리고 기관실의 각종 탱크 및 대형장비 하부의 진동문제 등을 상세하게 검토할 필요가 있다.

2.1 전체 선박진동

선박의 저진동을 구현하기 위하여 우선 주요 기진력으로 작용하는 주기관 및 프로펠러의 기진력을 감소시키는 방법이 있다. 주기관의 경우 선박이 계약되면 이미 결정되어 조선소에서는 다루기 힘든 부분이지만, 2차 불평형 모멘트 보상이 및 추진축의 종진동 감쇠기(axial damper)를 추가 설치할

수 있다. 프로펠러 기진력을 감소시키기 위하여는 선형, 스류(skew) 및 날개수 등을 조절하여 최적의 방법을 각 조선소 마다 강구하고 있다. 특히 프로펠러 날개수는 거주구 고유진동수를 고려하여 결정하며 초대형 유조선 및 살물선 경우 보통 4개의 날개수를 가진 프로펠러를 사용한다. 마지막으로, 저진동 선박을 구현하기 위하여 구조변경(혹은 보강)을 추구한다. 이를 위하여 전선진동 해석을 수행하고 계산된 결과를 검증하기 위한 각종 시험을 실시한다.

본 글에서는 최근 당사에서 건조한 30만 DWT 초대형 유조선 및 7만 5천 DWT 살물선에 대한 진동문제 및 특성을 소개하고자 하며, 주요 제원은 표 1과 같다.

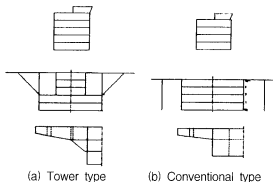
표 1 선박의 주요제원

	Item	Ship A	Ship B
Dimension	Length over all	332.0	225.0
	L.B.P	320.0	217.0
	Breadth	58.0	32.25
	Depth	31.0	19.4
Engine	Type	B&W 7580MC	B&W 6S60MC
	Power (PS)	34,650	14,900
Propeller	Number of blades	4 EA	4 EA

저자 회사에서 건조한 A선의 경우 30만톤 유조선으로서 거주구가 6층으로 이루어진 범용형 거주구형이며, 기관실 연돌 구조와 거주구 사이에 연결구조를 갖고 있지 않다. B선의 경우 저자 회사에서 건조한 7만 5천톤 살물선으로서 거주구가 6층으로 구성된 일반적인 화물선이다 초대형 유조선의 거주구 형상은 그림 3과 같이 크게 두 가지로 대별된다.

범용형(conventional type) 거주구는 과거에 주로 채택했던 기존형태로서 거주구 측면벽이 상갑판(upper deck)에서 항해갑판(navigation deck)까지 연속되어 있어 거주구의 강성이 최근에 채택되고 있는 탑형(tower type) 거주구보다 크다. 따라서 종/횡방향 고유진동수가 높아 거주구의 공진우려가 적다. 반면 탑형 거주구는 상부구조의 폭이 B 또는 C 갑판부터 줄어든 형태로서 거주구의 강성, 특히 횡방향 강성이 대폭 감소되어 횡방향 고유진동수가 낮아져 운항회전수 범위내에서 거주구/선미의 공진이 발생할 가능성이 크다.

그림 4와 5는 각각 초대형 유조선(A선) 및 살물선(B선)에 대한 유한요소 모델이고, 그림 6은 전체선박 고유진동해석에 대한 결



(a) Tower type (b) Conventional type
그림 3 초대형 유조선의 거주구 형태

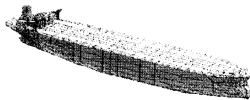


그림 4 초대형 유조선의 유한요소 모델

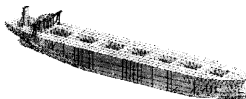


그림 5 살물선의 유한요소 모델



그림 6 전체주요 진동모드

특 집 선박진동

과이다. 이러한 고유진동해석이 완료되면 강제진동해석이 수행되는데 그림 7은 주기관과 프로펠러 기진력에 의한 강제진동응답 해석을 수행한 결과이다.

방진설계로는 그림 8에서와 같이 주요 거주구 진동 모드에 상응하는 보강작업이 필요하며, 거주구 및 기관실 연동구조의 기부 강성 증가를 고려한 설계가 필요하고, 선미부와 연성된 진동모드를 줄이기 위해서는 선미부의 강성을 증대시킬 필요가 있다.

전체선박진동 문제가 발생할 경우 보강을

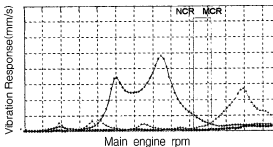


그림 7 강제진동해석 응답결과

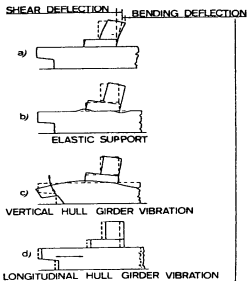


그림 8 전형적인 거주구 진동모드

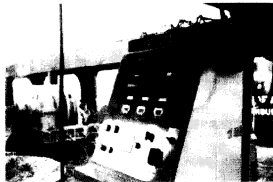


그림 9 가진기 시험 장치

위한 많은 시수(M/H) 및 고 난이도의 작업이 요구되므로, 설계단계에서 충분한 방진검토작업이 필수적이다.

이를 위하여 건조후 시운전전에 안벽상태에서 가진시험을 통하여 해석결과를 검증할 필요가 있다. 그림 9는 안벽상태에서 가진시험 장치를 보여주고 있다

2.2 선루익(bridge wing) 진동

선루익은 선박접안시 최대한 부두에 가까운 곳에서 선박을 통제할 때 사용하는 대형 국부구조물로서, 일반적으로 가장 높은 곳에 위치하고 조타실과 가까워야 하며, 선체중량 단면의 폭까지 횡방향으로 돌출되게 설계되어야 한다. 이러한 이유로 선루익은 초대형 유조선 및 살물선의 선박진동에서 가장 중요한 개소가 되며, 자주 진동문제가 발생하는 곳이다. 특히, 초대형 유조선의 선루익의 경우, 좁은 항해갑판에서 선체중량단면 폭까지 횡방향으로 돌출되어야 하므로 상당히 길어지고 대형화 할 수 밖에 없는데 반하여 선루익 구조를 지지하는 거주구 상부구조가 상대적으로 취약하다.

이러한 선루익은 취약한 상부구조 좌우에 큰 질량으로 작용하므로써 선루익을 포함한

거주구의 전체 고유진동수가 낮아져 선내 주요 기진원과 공진하기 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 10과 같이 선루익 고유의 모드 및 거주구와 연성되는 모드로 나타난다.

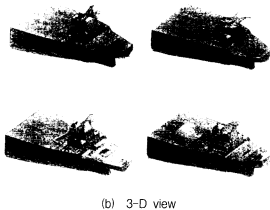
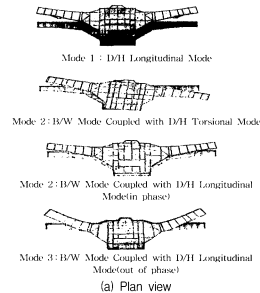


그림 10 탈형 거주구 및 선루익의 대표적인 모드



그림 11 동흡진기(dynamic absorber)

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 11과 같이 선루익 끝단에 동흡진기를 설치하여 진동을 저감시키는 방법도 있다.

2.3 국부구조물 진동

국부구조물의 진동을 방지하기 위하여 국부구조물과 선박의 주요 기진원인 주기관과 프로펠러와의 공진회피 방법이 주로 사용된다. 국부구조물의 설계주파수(공진회피를 위한 구조물의 고유진동수, 목표치)는 구역에 따라 약간 달리 적용할 수 있으나, 일반적으로 설계주파수를 프로펠러 2차 성분 이상이

특 집 선박진동

되도록 하고 선급에서도 이 기준을 추천하고 있다. 또한, 선미부 및 기관실등은 기진력의 전달경로를 고려하여 특별 기준을 설정하는 경우도 있다. 특히 청수탱크 및 기관실의 각종 기름 탱크의 경우 부가수 질량효과에 의하여 공기속에서의 고유진동수보다 낮아진다. 그리고 건조후 시운전 혹은 운항 중에 진동문제가 발생한 경우, 특수도장작업 및 용접 후 잔유응력 제거 등 보강작업의 어려움이 많기 때문에 설계과정에서의 세심한 방진설계가 요구된다. 그 외 진동문제가 자주 발생하는 구역은 대형장비하부 및 주변 갑판, 레이더 마스트(radar mast) 및 기관실 내부의 직립형(수직형) 펌프 등이다.

대형장비의 경우, 보조기관(auxiliary engine) 및 공기압축기(air compressor)등은 자체 기진체로서 주기관 및 프로펠러의 기진원본

만 아니라 장비 자체의 기진원과의 공진회피설계가 필요하다.

보일러의 경우는 약 60톤의 대형구조물로서 진동관점의 하부구조 검토가 필요하다. 일반적으로 끝단이 엔진 개구부이어서 상대적으로 취약한 위치에 배치되어 있다. 이를 보강하기 위하여 필요시 하부에 필러(pillar) 추가도 고려할 필요가 있다. 또한 보일러의 경우 높이가 약 4 m 이상 되므로, 상부에 톱 브레이싱(top bracing)을 설치하여 보일러의 선체통요 및 하부의 미미한 진동에 의한 보일러의 거동을 제한할 수 있다. 이때 브레이싱의 선체부 위치는 갑판 등 강성이 큰 위치에 설치를 하여야 하고, 필요시 후면 브래킷 보강 및 보강재 크기를 증가시켜 선체부에 작용하는 모멘트에 견딜 수 있도록 충분한 강성을 갖도록 하여야 한다.

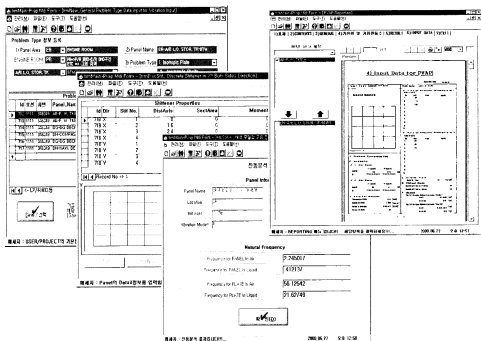


그림 12 간이방법을 이용한 국부진동해석 결과

레이더 마스트의 경우, 상부에 플랫폼 및 전장장비가 설치된 전형적인 외팔보로서 진동에 매우 취약한 구조이다. 일반적으로 레이더 마스트의 진동은 본 구조물이 탑재되는 조타실 상부 갑판과 연성되어 나타나는데, 고유진동수가 매우 낮아 프로펠러 2차이상의 구조를 갖기는 힘드므로 선박의 상용

운항영역(commonly used rpm)에서 공진을 회피하는 설계가 필요하다.

한편, 기관실 내의 직립형 펌프의 경우 하부구조강성 점검과 아울러 필요시 상부에 볼 브레이싱 설치 등을 고려한 방진조치가 필요하다. 또한 장비자체 기진력에 의한 진동을 방지하기 위하여 설치전후의 축렬(alignment)교정 및 평형잡이(balancing)작업이 병행 되어야 한다.

국부진동해석은 개소가 너무 많아 전체를 유한요소법으로 수행하는 것은 많은 시간과 노력이 수반되므로 간단한 사각관의 경우 간이식 프로그램을 이용하여 계산하고, 복잡 구조, 대형장비하부 갑판 등의 경우는 유한요소법을 이용하여 수행한다.

국부구조의 진동해석에서 모델링은 선체 전체에서 국부구조만 분리하여 나타내기 때문에 주변경계조건을 고려하는데 매우 어려운 점이 많다. 그러므로 선급에서 추천하는 단순입단지지로 간주하여 해석결과에 여유를 가져간다. 그림 12는 저자회사에서 개발한 간이식 프로그램 결과를 나타내고, 그림

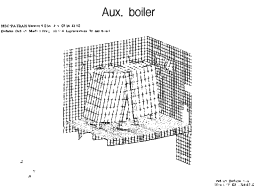
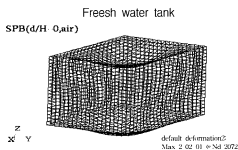


그림 13 유한요소법을 이용한 국부진동계산결과

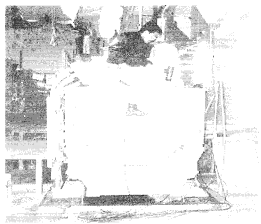


그림 14 발전기 충격 가진 실험 모습

특 집 선박진동

13은 유효요소법을 이용한 국부구조 고유진동수 해석결과를 보여준다. 또한 해석결과에 대한 정도를 확인하기 위하여 그림 14와 같이 충격 가진시험 등을 실시한다.

3. 맺음말

초대형 유조선 및 화물선을 포함한 일반 상선의 거주구역에서의 진동허용수준의 규정으로서 건조 사양서에 많이 명시되는 ISO 6954 규정이 사용되고 있는데, 최근 ISO/TC108/SC2에서 인간의 진동주파수별/방향별 민감도를 충분히 반영하여 개정 확장한 ISO 6954(2000)가 새로운 진동허용 기준으로 적용될 것이다. 그런데 선원들의 쾌적한 환경조성을 위해 허용기준은 계속적으로 낮아지는 추세이므로 각 조선소에서는 미리 저진동 선박 건조를 위한 최적방진설계가 필요할 것이다. 그리고 선박 기진력의 증가에 따라 주기권 및 프로펠러 주변 구조물의 진동에 의한 피로현상이 종종 발생하고 있으므로 이에 대한 관심도 가질 필요가 있다. 마지막으로 저진동 특성을 갖는 초대형 유조선 및 일반 화물선 건조를 위하여 초기설계단계에서부터 고려해야 될 사항을 간략히 기술하면 다음과 같다.

(1) 운항 선원수 감소 및 항해시야 확보를 위해 거주구의 길이와 폭은 감소되고 높이는 증가되므로, 거주구 중/횡진동의 고유진동수가 감소하여 선내 주요 기진원과의 공진에 의한 과도진동 발생 가능성이 더욱 증대되고 있으므로 이에 대한 적절한 방진설계가 요구된다.

(2) 선내 주요 기진력의 증가로 인하여 진동에 의한 피로파괴가 종종 발생하고 있

으므로 진동관점에서 상세한 분석 및 적절한 대책이 마련되어야 한다.

(3) 강제진동해석의 정도를 높이기 위하여 프로펠러 기진력 계산의 정도향상 및 감쇠 특성 파악이 매우 중요하다. 이를 위하여 이론적 연구와 함께 실선 계측을 통한 자료의 축적이 함께 병행 되어야 한다.

(4) 프로펠러 기진력 전달률을 최소화 하기 위하여 선미부 구조의 최적배치 및 최적 구조설계가 필요하다.

참 고 문 헌

- (1) 한국선급, 2001, 개정된 MARPOL Annex I, 제13G 규칙.
- (2) 최수현, 백일국, 손성완, 1996, 초대형 유조선의 거주구 및 선루익 진동양상에 관하여, 선박해양구조연구회 동계발표회, 서울대학교.
- (3) 손성완, 최수현, 강동영, 제종준, 1999, 사각형 탱크 구조의 집수 진동 특성에 관한 연구, 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집.
- (4) 이호섭, 1996, 선박진동제어기술에 관한 소고, 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집.
- (5) 진동 종합해석 SYSTEM의 개발, 대우조선 선박해양기술연구소.
- (6) 선체 국부구조 진동해석 연구, 대우조선 선박해양기술연구소.
- (7) Technical Report "Vibration Analysis of 300K VLCC", 대우조선.
- (8) Technical Report "Vibration Analysis of 75K Bulk Carrier", 대우조선.
- (9) Vibration control in ships by A. S. Veritec. Dnv, 1985.