

주기관 고차 관성기진력에 의한 컨테이너선 선루진동의 제어

이 수 목 · 김 원 현* · 정 균 양*

Control of Deckhouse Vibration of a Container Ship due to Higher Order Inertial Excitation of Main Engine

Soo-Mok Lee, Won-Hyun Kim and Kyoonyang Chung

ABSTRACT

Vibration problem of deckhouse structure in a container vessel was investigated through the analysis and measurement. The natural frequency of deckhouse structure was found to be resonant with main engine 4th order excitations in the operating range, major sources of which were main engine inertial moment and axial thrust of the propulsion shafting system. To investigate and solve the problem, exciter test was performed to identify the vibration characteristics of the ship structure and mechanical balancer was installed to compensate the 4th order inertial moment. Measurement results under the conditions with and without balancer operating were compared and analyzed to confirm the balancer effect. Good coincidence was found between the measurement and analysis results, which made it possible to predict the vibration problem in the earlier design stage.

1. 서론

선박의 진동은 엔진, 프로펠러등 주요 기진원의 기진력이 전체 구조 혹은 각 부구조(substructure)의 고유진동수와 공진하여 발생하는 것이 일반적인 형태이다. 이러한 부구조중에서 특히 선실(deckhouse) 구조는 선원들의 작업 및 수면, 휴식을 위한 상시 거주공간으로서 그 진동이 엄격하게 통제되는데 이의 평가에 적용되는 ISO 6954 표준은 현재 개정작업이 마무리 단계에 있다⁽¹⁾. 본 논문은 4800 TEU급 컨테이너선의 선루진동의 예측 및 그 해결에 관한 내용으로서 엔진의 관성 기진력과의 공진에 의해 주 운전구역에서 허용치를 초과하는 진동 수준이 예측되었고 이를 해결하기 위해 발란서 설치와 방진대책이 적용되었다.

설계 단계에서의 정도높은 예측을 위해 전선체에 대한 FEM 진동해석이 수행되었으며 기진기 시험을 통해 정수중의 선박에 대해 실험적인 진동특성을 파악하였고 시운전시 항주상태에서 실제 진동을 계측하였다. 또 고차 발란서 가동시의 진동을 계측하여 그 효과를 비교 분석하였다.

2. 진동 해석

2.1 모델

진동해석을 위한 3차원 유한요소 진동해석 모델은 선루 및 주기관 구조를 포함한 전선체를 대상으로 하였고 좌우현을 모두 고려하였다. 모델의 크기는 절점수는 5476개, 보 및 판을 포함한 요소수는 14332개로 집계되었다. Fig. 2.1에 해석 모델의 개요를 보였고 Table 2.1에 대상선의 주요 제원을 제시하였다.

* 현대중공업(주) 선박해양연구소

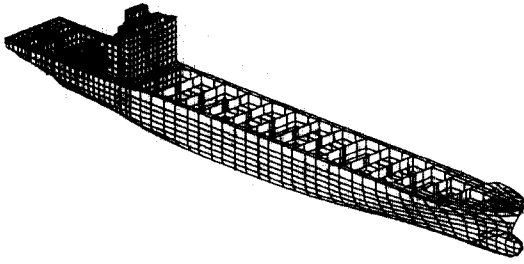


Fig. 2.1 Model for vibration analysis

2.2 기진력

선박의 기진력은 주기관(main engine)과 추진기(propeller)에서 주로 발생한다. 주기관의 경우 엔진 회전수의 정수배 성분이 발현되는데 주로 엔진 기동수 성분의 기진력이 크다. 추진기에서 발생하는 성분은 프로펠러의 날개수 성분으로서 그 1차 및 2차 성분이 지배적이다.

본 연구에서 관심이 되었던 기진력은 엔진에서 발생하는 것으로서 Fig. 2.2의 M_V 와 같은 모멘트이다. 이러한 기진력은 피스톤 및 콘로드 등 왕복동 기구의 크랭크 운동에 기인하며 1차 및 2차 성분이 지배적이다. 1차 성분은 평형추로 제어가 되나 2차 성분의 제어는 별도의 역가진 기구가 필요하다.

대상 선박 주기관의 경우에서는 특이하게 4차 관성 기진력 성분(M_{4V})이 크게 발생하는 것이 문제였는데⁽²⁾대구경(large bore), 장행정(long stroke)의 특징에 7기통 엔진의 특성이 복합적으로 겹쳐 나타난 결과로 보인다. 특히 이 기진력 성분은 선실 구조의 전후 방향 고유진동수와 공진하여 과도한 선루진동을 일으킬 가능성이 큰 것이 해석단계에서 예측된 우려였다.

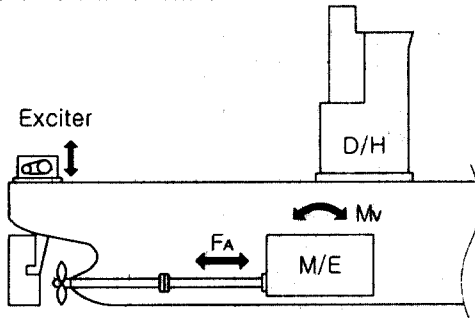


Fig. 2.2 Locations and directions of relevant excitations

Table 2.1 Main particulars of the ship

Ship type	4,800 TEU container carrier
L.O.A.	294.1 m
L.B.P.	283.2 m
Bmld	32.2 m
Dmld	21.8 m
design draft	12.0 m
Main Engine	HYUNDAI-B&W 7K98MC
MCR	54,460 BHP x 94.0 RPM
NCR	47,000 BHP x 89.5 RPM
Propeller	F.P.P
No. of blade	5
Diameter	8.4 m

2.3 고유진동해석

고유치 해석을 통하여 고유진동수 및 모드를 구하였다. 저차 모드는 보형태의 전선 진동 모드를 나타내며 고유진동수가 상승할수록 부구조(sub structure) 모드, 국부(local) 모드 등이 발현된다. 참고로 선박의 최저차 모드인 2절 상하굽힘모드는 Fig. 2.3과 같다. 관심이 된 선실구조는 Fig. 2.4와 같은 진동모드를 보인다. 고유치 해석 algorithm은 MSC/NASTRAN의 Lanczos method를 이용하였고 물과의 접촉에 의한 부가질량(added mass) 효과는 역시 MSC/NASTRAN이 제공하는 일종의 경계요소법(BEM)인 Virtual Mass Method에 의하였다⁽³⁾.



Fig. 2.3 Hull-girder 2-node bending mode

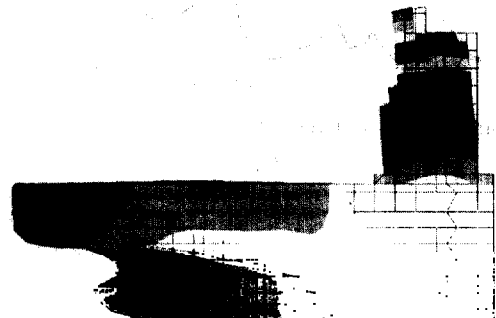


Fig. 2.4 Deckhouse vibration mode

2.4 강제진동해석

가정된 기진력을 FEM 모델에 작용하여 진동 응답을 예측하였다. 응답은 고유진동해석의 결과를 사용한 모드 중첩법에 의해 구하였다. 해석 결과 문제의 엔진 4차 기진력이 선루 고유진동수와 공진하여 허용치를 초과하는 진동이 예측되었고 또한 축계 진동으로부터 오는 4차 기진력(F_{4A})에 의한 응답도 상당한 수준일 것임이 예측되었다. Fig. 2.5에 선실구조 자체 가진시 계산된 주파수 응답함수(FRF)를, Fig. 2.6에 주기관 4차 불평형 모멘트 및 축력에 의한 선루 응답을 각각 나타내었다. FRF상 선실구조는 공진점에서 뚜렷한 응답특성을 나타냄을 볼 수 있고 M_{4V} 와 F_{4A} 가 비슷한 크기의 진동을 유발함을 알 수 있다.

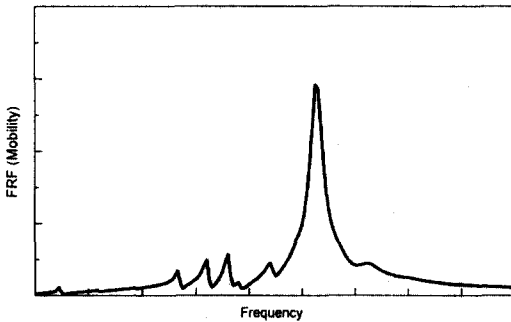


Fig. 2.5 Calculated point FRF of deckhouse

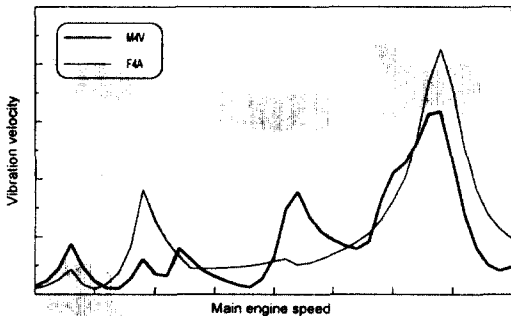


Fig. 2.6 Calculated deckhouse response by M_{4V} and F_{4A}

3. 진동 계측

3.1 기진기 시험

진동 모드 및 고유진동수를 실험적으로 확인하

기 위하여 안벽 및 해상에서 기진기 시험(exciter test)을 수행하였다. 15톤 맞회전형 기계식 기진기를 선미에 설치하여 상하 방향의 기진력을 발생하도록 하고 이때 선미부, 선루구조, 엔진 등 선체 각부의 진동을 동시 계측하였다. 계측 결과의 분석으로부터 각부 구조의 응답 특성, 즉 공진 영역, 응답도, 진동 모드, 위상 정보 등을 파악하였다.

3.2 실선 시운전

시운전시 해상에서 항주중의 진동을 계측하여 실제 응답을 파악하였다. 엔진 속도를 전 운전범위에 대하여 1~2 rpm step으로 증가시키며 진동값의 변화를 관찰하였다. Fig. 3.1에 선루 전후방향 진동의 차수별 응답을 제시하였다. 여기서 5차는 주로 프로펠러에 의한 진동, 7차는 엔진 기통수 성분에 의한 진동에 해당한다. 문제되는 4차 성분의 진동이 지배적임을 볼 수 있다.

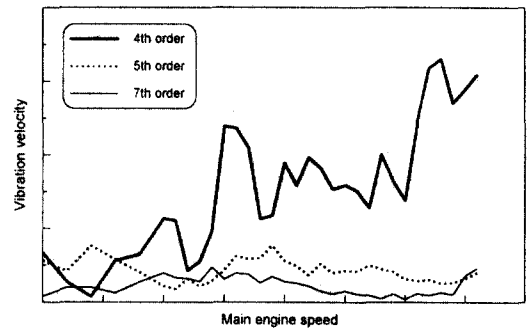


Fig. 3.1 Measured deckhouse vibration (order based response)

3.3 발란서 구동

문제의 선루 4차 성분 진동을 감소시키기 위하여 주기관의 전후단에 발란서를 설치하였다. 이 경우 엄밀히 말하면 축 기진력 4차 성분이 작용하고 있는 상태라고 볼 수 있는데 응답의 크기와 위상 분석을 통하여 발란서 설치의 효과를 관찰하고 최적 발란서 위상을 유도하였다. Fig. 3.2에 4차 기계식 발란서를 설치하고 구동하는 개념도를 보였다. 주기관 전후단에 각각 두 개의 맞회전하는 편심추를 엔진회전속도의 4배속으로 구동한다. 이때 엔진관성 기진력(모멘트)을 정확히 상쇄하도록 편심추의 크기와 위상을 결정한다.

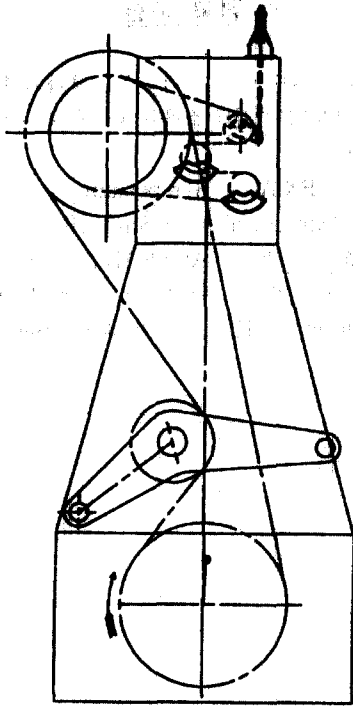


Fig. 3.2 Driving mechanism of 4th order moment compensator (balancer)

4. 비교 및 평가

4.1 해석과 계측 결과와의 비교

해석결과와 계측결과와의 비교에서 대체로 양자의 결과가 잘 부합됨을 확인하였다. Fig. 4.1의 상호교차 주파수 응답함수의 경우, 저주파 영역의 선체(hull girder, beam 모드) 고유진동수 모드는 상당히 높은 정확도로 일치하였고 고주파 영역의 비공진역의 특성도 매우 높은 정도로 일치하였다. 다만, 그 사이의 공진역에서 계측된 주파수응답함수의 크기는 해석 결과만큼 뚜렷하지 않은데 가진점인 선미구조와 응답점인 선실구조간의 연성(coupling)이 충분하지 못한 결과로서 실제 상태를 완벽하게 반영하지 못하는 모델링의 한계와 아울러 해석상의 방법(모드중첩법 등)에도 그 이유가 있는 것으로 평가된다. 또, Fig. 4.2와 같이 주로 엔진에 의해 가진되는 실제 응답에서도 다소의 피크의 이동이나 소멸의 차이는 있지만 그 크기와 경향에 있어서 매우 유사한 결과를 보여준다.

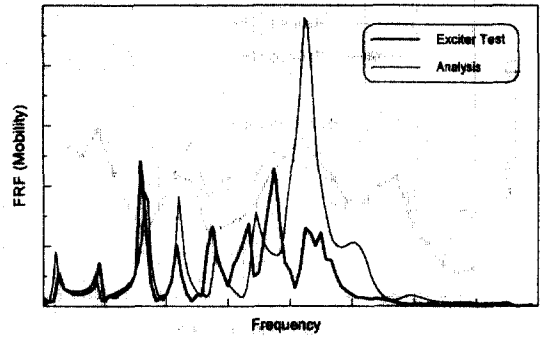


Fig. 4.1 Comparison of transfer FRF between deckhouse and aft end

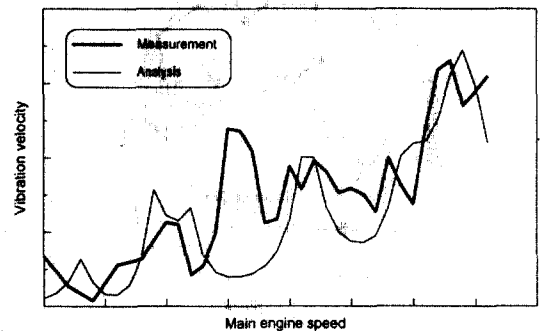


Fig. 4.2 Comparison of deckhouse vibration (4th order component)

4.2 발란서의 작동 효과

발란서 설치하여 작동 전후의 진동을 비교 조사하였다. Fig. 4.3에 선루에서와 응답을 비교하여 엔진속도별 응답과 함께 위상을 고려한 복소평면에서의 응답도 제시하였다. 주 운전구역에서는 발란서가 감쇄 효과를 나타내나 그 이하의 구역에서는 크게 진동저감의 효과를 나타내지 못함을 알 수 있다. 이를 복소평면에서 보면 발란서 작동 전후 경우 모두 두세개의 작은 공진역을 거치며 복잡한 양상의 진동 변화를 보임을 확인할 수 있다. 발란서 작동후 전체적으로 진동이 ISO 허용기준 이내에 들어오는 것을 확인할 수 있다. 전술한 바와 같이 발란서가 M_{41} 를 완전히 상쇄하였다고 보면 이때의 응답은 F_{44} 를 포함한 기타 4차 성분 기진력에 의한 응답이라고 볼 수 있는데 Fig. 2.6의 해석결과와는 다소의 오차를 보인다.

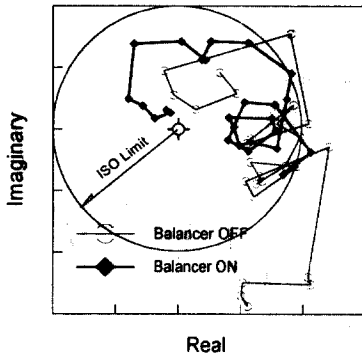
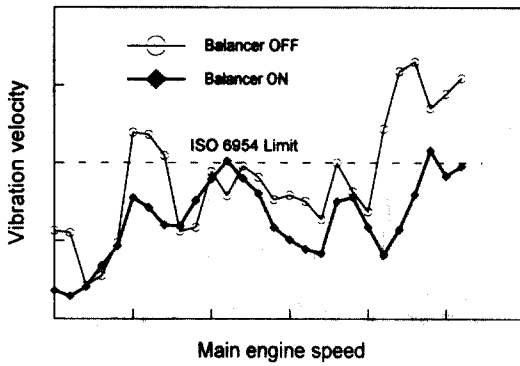


Fig. 4.3 Deckhouse vibration under balancer OFF/ON conditions (top w.r.t. engine speed ; bottom in complex plane)

5. 결론

대형 컨테이너선의 선루진동 특성을 고찰하고 이에 의한 문제점 파악 및 해결 방법을 연구하였다. 선실구조의 고유진동수와 공진되는 주기관의 4차 기진력이 주된 원인으로 분석되었다. FEM 해석에 의한 예측 결과와 기진기 시험 및 실선 시험을 통한 계측 결과는 주파수 응답함수와 실제 응답에 있어서 비교적 일치된 결과를 보여주었다. 이러한 해석과 계측을 통한 진동 특성의 규명은 설계단계에서의 예측정확도 향상 및 문제발생시의 해결능력을 증대시킬 것으로 전망한다.

참고 문헌

- (1) 정균양, 이수목, "선박진동 평가기준에 관한 ISO의 개정동향", 한국소음진동공학회 추계연구발표회, 1999
- (2) MAN-B&W, Symposium of Engine Dynamics "Structural vibration", 1998
- (3) 조대승, 이수목 "NASTRAN을 이용한 수학적 형상을 갖는 강체 및 탄성체에 대한 부가질량 계산", 제 4회 한국 MSC 사용자 회의, 1993