

전달함수 합성법을 이용한 선박구조변경

김극수^{†*}, 최수현^{*}

대우조선해양(주) 선박해양 기술연구소^{*}

A Study on Structural Dynamic Modification of Ship Structure by Using FRF
Synthesis Method

Kuk-Su Kim^{†*} and Su-Hyun Choi^{*}

Ship & Ocean R&D Institute, Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd.^{*}

Abstract

When the vibration troubles occur on the ship structure during the sea trial, the rectification work is very restricted because of in-situ limitation. Usually, the finite element method is used to improve vibration characteristics of the structure, but it takes lots of time and effort in modeling the structure and adjusting the finite element model in order to consider appropriate boundary conditions of a complex ship structure. Therefore, experimental methods have been in general suggested to obtain proper countermeasures without time-consuming in modeling. In this paper, FRF(frequency response function) synthesis method is applied to estimate natural frequency of the modified ship structure, which is obtained from experimental and numerical methods.

※Keywords: Vibration characteristic(진동특성), Modal force equation(모드힘방정식), Baseline structure(기본 구조물), Frequency Response Function(주파수 응답함수), FRF synthesis method(전달함수합성법)

1. 서론

선박에서 진동문제를 해결하는 경우에는, 이미 구조물이 존재하고 보강할 방법이 제한되어 있으며, 보강후 구조물의 진동특성을 추정하여 공진여부를 판단해야하는 경우가 많다. 이 경우 유한요소 모델을 이용하여 진동특성을 추정하는 해석적

인 방법과 주파수 응답함수를 이용하여 추정하는 실험적 방법이 있다. 해석적 방법의 경우, 복잡한 실제 구조물을 모델링하는 데 많은 시간이 걸리며, 경계조건이나 모델링 오차 등의 영향으로 정확히 평가하기가 어려울 경우가 많다. 실험적 방법의 경우에는 물론 계측 오차가 포함되어 있으나, 기본구조물의 경계조건 및 고차모드의 영향이 이미 반영되어 있고 구조물의 수치 모델이 필요없다는

[†]교신저자: kuku@dsme.co.kr, 055- 680-5548

장점이 있다.

본 연구에서는, 실험적 방법의 장점과 해석적 방법의 장점을 결합하여 변경구조물의 동특성을 추정하는 방법을 선박 구조물에 적용하고자 하였다. 선박 구조물에 대한 실험을 하기 이전에, 구조물의 유한 요소 모델을 이용한 모의 실험을 수행하였다. 본 방법은 실험적 방법을 이용하여 기본 구조물의 모델을 구성하고, 보강하고자하는 부분은 유한요소모델로 구성한 후 합성하여, 보강후 모델의 진동특성을 예측하는 기술이므로, 실제 실험을 이용하여 기본구조물의 모델을 구성할 경우에는 유한요소 모델을 이용하여 계산한 주파수 응답함수를 실험을 통해 계측한 주파수 응답함수로 치환하면 된다.

2. 기본이론

본 절에서는 전달함수합성법을 이용한 변경구조물의 동특성을 추정하는 방법중 하나인 모드형 합성법의 이론을 살펴 보기로 한다.^(1,2) 변경된 구조물은 기본 구조물과 기본 구조물의 진동특성을 바꾸기 위한 여러 개의 부가구조물로 구성되어 있고, 기본구조물과 부가구조물은 Fig. 1과 같이 A,B,C 점에서 연결되어 있다. 자유진동에 대한 운동방정식은 외력이 없고 연결부에서 내력만 존재하므로, 전달함수를 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$H_p(w)f_p = x_p \quad (1)$$

여기서 $H_p(w)$ 는 연결점에서 내력에 의한 기본구조물과 부가구조물의 주파수응답함수 이고, f_p 는 연결점에서 내력 벡터이고, x_p 는 연결점에서의 응답벡터로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_p = \begin{bmatrix} H_{AA}^b & H_{AB}^b & H_{AC}^b & 0 & 0 & 0 & 0 \\ H_{BA}^b & H_{BB}^b & H_{BC}^b & 0 & 0 & 0 & 0 \\ H_{CA}^b & H_{CB}^b & H_{CC}^b & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & H_{AA}^m & H_{AB}^m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & H_{BA}^m & H_{BB}^m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{BB}^2 & H_{BC}^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{BC}^2 & H_{CC}^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$x_p = [x_A^{bT}, x_B^{bT}, x_C^{bT}, x_A^{m1T}, x_B^{m1T}, x_B^{m2T}, x_C^{m2T}]^T \quad (3)$$

$$f_p = [f_A^{bT}, f_B^{bT}, f_C^{bT}, f_A^{m1T}, f_B^{m1T}, f_B^{m2T}, f_C^{m2T}]^T \quad (4)$$

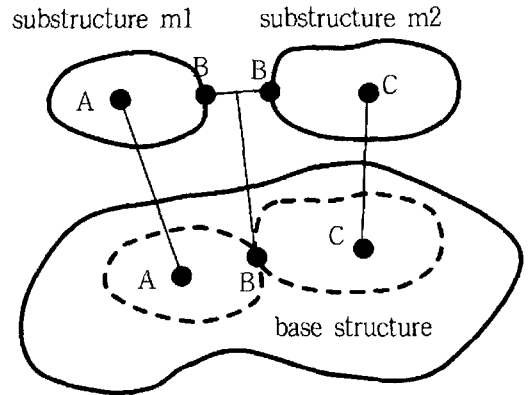


Fig. 1 Schematic diagram of structural dynamic modification

여기서 상첨자 b, m1 과 m2 는 기본 구조물과 2 개의 부가구조물을 나타내며 A,B,C 는 연결점을 나타낸다. 각 점에 여러자유도가 존재하며, 각 구조물들이 서로 연결되므로 연결점에서 기하학적인 변위 접합조건과 힘의 평형에 대한 구속조건으로 각 구조물의 변위와 힘들 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$x_A^b = x_A^{m1}, x_B^b = x_B^{m1} = x_B^{m2}, x_C^b = x_C^{m2} \quad (5)$$

$$f_A^b + f_A^{m1} = 0, f_B^b + f_B^{m1} + f_B^{m2} = 0, f_C^b + f_C^{m2} = 0 \quad (6)$$

이러한 조건을(식 5, 6) 적용하면 변위와 힘벡터인 x_p, f_p 의 요소들은 더 이상 서로 독립이 아니다. 따라서 독립적인 요소만의 변위와 힘벡터인 x_s, f_s 를 이용하여 각 구조물의 변위와 힘을 나타내는 식 3 과 식 4 를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$x_p = Ux_s, \quad f_p = Qf_s \quad (7)$$

여기서 U 와 Q 는 독립좌표계와 기본 좌표계 사이의 변환 행렬이고, 독립좌표계는 부가구조물의 변위와 힘벡터로 나타낼 수 있다.

$$x_p = [x_B^{m1T}, x_B^{m2T}, x_C^{m2T}]^T \quad (8)$$

$$f_p = [f_A^{m1T}, f_B^{m1T}, f_B^{m2T}, f_C^{m2T}]^T \quad (9)$$

독립좌표계에 의한 식 (7)을 운동방정식에 대입하고 Q^T 를 곱하면

$$H_p(w)f_p = x_p \quad (10)$$

$$Q^T H_p(w) Q f_s = Q^T U x_s = 0 \quad (11)$$

또는

$$H(w)f = 0 \quad (12)$$

여기서

$$f = f_s$$

$$H(w) = Q^T H_p(w) Q \quad (13)$$

식 (14)를 풀어 쓰면

$$H(w) = \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} H_{AA}^b & H_{AB}^b & H_{AB}^b & H_{AC}^b \\ H_{BA}^b & H_{BB}^b & H_{BB}^b & H_{BC}^b \\ H_{BA}^b & H_{BB}^b & H_{BB}^b & H_{BC}^b \\ H_{CA}^b & H_{CB}^b & H_{CB}^b & H_{CC}^b \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} H_{AA}^{m1} & H_{AB}^{m1} & 0 & 0 \\ H_{BA}^{m1} & H_{BB}^{m1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_{AA}^{m2} & H_{AB}^{m2} \\ 0 & 0 & H_{BA}^{m2} & H_{BB}^{m2} \end{bmatrix} \end{pmatrix} \\ = (H^b(w) + H^m(w)) \quad (14)$$

식 (14)를 모드힘 방정식(modal force equation)이라고 한다.

모드힘 벡터 f 는 기본구조물과 부가구조물이 결합할 때 연결점에서 작용하는 내력 벡터이고, 모드힘 방정식은 기본구조물의 전달함수 행렬 $H^b(w)$ 와 부가구조물의 전달함수 행렬 $H^m(w)$ 의 합으로 표현된다.⁽²⁾ 실험으로 측정한 전달함수는 식(14)를 적용하면 모드힘 방정식에 사용될 수 있고 이 방정식을 이용하여 변경구조물의 고유진동수를 계산할 수 있다.

변경된 구조물의 고유진동수는 모드힘 방정식인 식 (12)의 해이다. 따라서 변경된 구조물의 고유진동수는 다음식으로 계산할 수 있다.

$$Det(H(w)) = 0 \quad (15)$$

이 식을 다음과 같이 변환하였다.

$$\log_{10} \left(\left| \frac{1}{Det(H(w))} \right| \right) = Peak \quad (16)$$

이 행렬식을 이용하면 행렬식의 스케일 차이가 커서 그래프상에서 찾기 어려운 고유진동수의 값을 그래프상에서 Peak 값으로 고유진동수를 찾을 수 있는 장점이 있다.

3. 구조변경이론의 선박 모델 적용

본 장에서는 선박 구조물에 구조변경이론을 적용하고자 한다. 먼저 Fig. 2와 같이 선박 거주구의 횡방향 고유진동수를 변경하기 위하여 횡방향으로 보강재를 설치하였을 경우의 구조변경 효과를 보고자 한다. 기본구조물을 거주구로 하고 부가 구조물은 횡방향 보강재로 하여 구조 변경을 수행하였다. 구조변경은 다음과 같은 순서로 이루어진다

1. 구조 변경전 거주구의 주파수 응답함수 계산
2. 구조 변경전 횡방향 보강재의 주파수 응답함수 계산
3. 주파수 응답함수 결합법을 이용한 구조 변경후 고유진동수 추정

3.1 거주구의 주파수 응답함수와 모드

먼저 거주구(기본구조물)와 횡방향 보강재(부가구조물)의 연결점에서의 전달함수를 각각 계산하였다. 거주구의 연결점에서의 y 방향 가진에 대한 y 방향의 주파수 응답함수는 Fig. 3과 같다.

거주구의 구조변경전 유한 요소 모델을 이용하여 고유진동해석을 수행한 결과 고유진동수는

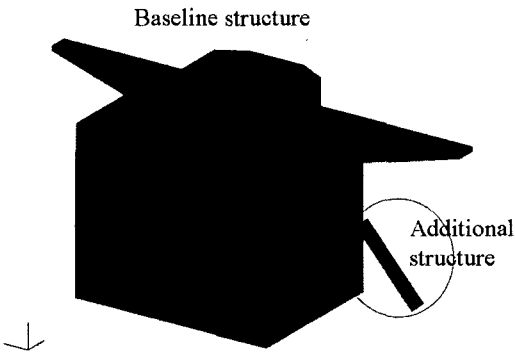


Fig. 2 Deckhouse model for structural dynamic modification

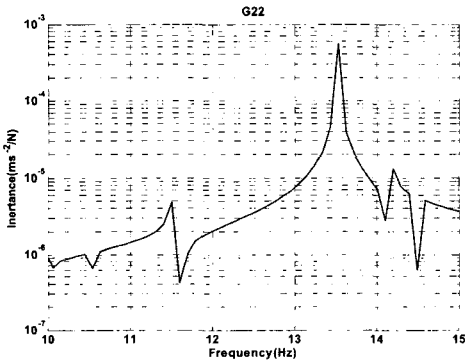


Fig. 3 Frequency response function of deckhouse (baseline structure)

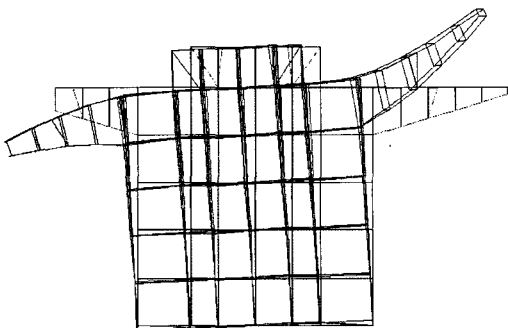


Fig. 4 Mode shape of deckhouse (Baseline structure) (13.5 Hz)

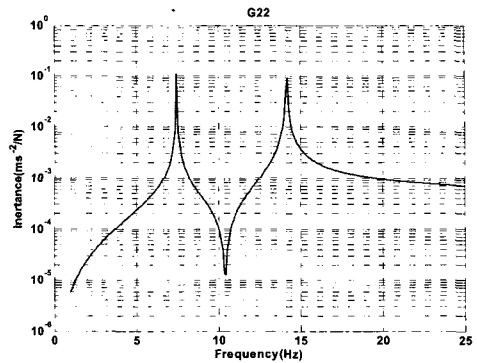


Fig. 5 Frequency response function of support (additional structure)

13.5Hz 이며, 이에 대응하는 모드는 Fig. 4이다. 이 모드는 거주구의 횡방향 모드로 여기에 횡방향 보강재를 설치하였을 경우 고유진동수가 어떻게 변화되는 지를 추정하고자 한다.

3.2 횡방향 보강구조의 주파수 응답함수 계산

다음은 Fig. 2의 그림과 같이 거주구의 보강을 위해 사용된 횡방향 보강구조의 전달함수를 계산하였다. 거주구와의 연결점에서 보강구조의 각 방향별 전달함수가 계산되며, y 방향의 가진에 의한 y 방향의 응답은 Fig. 5 와 같다. 보강 구조물의 고유진동수는 7.5Hz, 14.3Hz 이다.

3.3 보강된 거주구의 고유진동수 추정

거주구가 횡방향 보강구조로 연결된 경우 보강된 거주구의 고유진동수를 예측하였다. 상기 계산한 거주구와 보강구조의 연결점에서 전달함수를 이용하여 보강후 거주구의 고유진동수를 추정할 수 있다. 보강후 거주구의 고유진동수는 횡모드 방정식의 행렬식이 0 이 되는 주파수이며, 이 행렬식의 역수를 취하여 피크(Peak)가 되는 주파수가 고유진동수이다. 따라서 보강된 거주구의 고유진동수는 Fig. 6과 같고, 횡방향 고유진동수는 14.1Hz 이다. 여기서 피크가 많은 이유는 거주구의 횡방향 모드 뿐아니라 다른 모드에 의한 고유진동수 또한 계산되기 때문이다. 보강된 거주구를

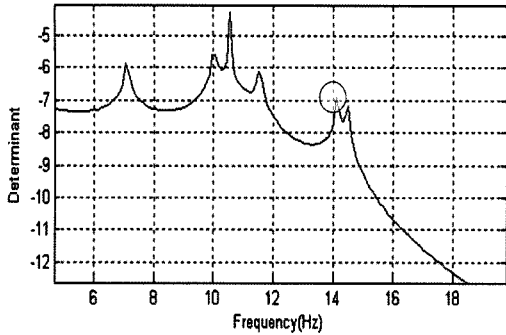


Fig. 6 Determinant of modal force matrix

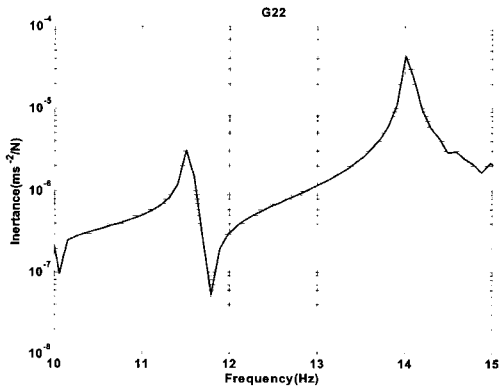


Fig. 7 Frequency response function of supported deckhouse

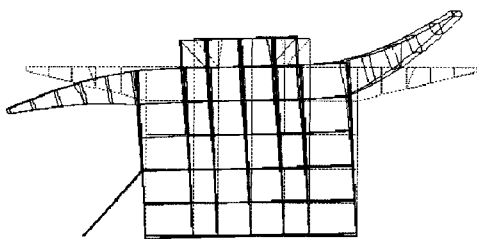


Fig. 8 Transverse mode shape of modified deckhouse (14.05Hz)

고유진동 및 강제진동해석하여 고유진동수를 확인하였다. 보강된 거주구의 y 방향 전달함수는 Fig.7 과 같고, 횡방향의 모드는 Fig. 8과 같으며 이에 상응하는 고유진동수는 14.05Hz 이다.

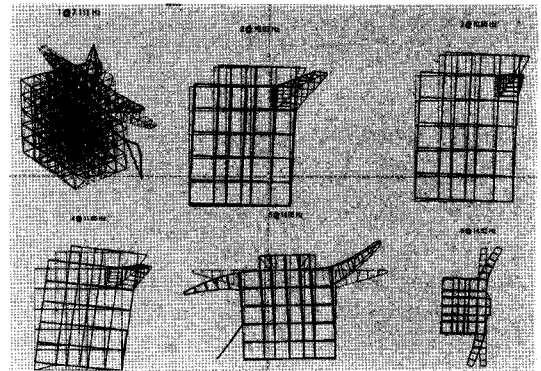


Fig. 9 Mode shapes of modified deckhouse

행렬식으로 계산된 피크에서의 고유진동수 및 모드는 Fig. 9와 같다.

4. 결론

본 연구에서는 전달함수 합성법을 이용한 구조 변경방법을 선박 거주구의 횡방향고유진동수 예측에 적용하였다.

본 연구의 모의 실험을 통해 보강전 선박 거주구의 전달함수와 횡방향 보강구조의 전달함수를 이용하여 보강후 거주구의 횡방향 고유진동수를 추정하였다. 추정된 결과를 확인하기 위하여, 횡방향 보강 구조와 결합한 선박 거주구의 고유진동해석을 수행하였다. 본 방법으로 추정한 고유진동수는 보강된 거주구의 고유진동해석을 통해 계산한 고유진동수와 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

따라서 본 방법은 현장 사정으로 보강방법이 제약되어 있고, 복잡한 경계조건의 영향으로 해석적으로 접근하기 어려운 선박 건조 현장에서 진동문제를 해결하는 유용한 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

향후 진동문제가 발생한 선박구조의 보강에, 실험으로 측정된 전달함수를 사용하여 본 방법을 적용할 예정이다.

참 고 문 헌

- 박윤식, 구조물 동특성 연구 분야 및 동향,

한국 소음진동공학회지, 제 9 권 3 호, pp457-460, 1999

• 박용화, 1999, 주파수 응답 함수 결합을 이용한 최적 구조 변경법 및 응용, 한국과학기술원 박사 학위논문, 1999

• 변성준, 주파수 응답함수 결합법을 이용한 승용차 핸들지지 T 빔의 진동 저감 재설계, 한국 소음진동공학회 논문집, 11 권 5 호, pp123-130, 2001

• 김극수, 최수현, 조성재, 진봉만, 전달함수 합성법에서 연결자유도 변화에 따른 구조물 진동 특성변화에 대한 연구, 한국 소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp.684~691, 2005

• 정재훈, 다중전달함수 합성법을 이용한 구조물의 동특성해석, 한국 소음진동공학회지 제 8 권 1 호, pp. 139-145, 1998.

• Pater Avitabile, Twenty years of structural dynamic modification, Sound and vibration, January, 2003



< 김 극 수 >

< 최 수 현 >