컨테이너운반선의 진동특성과 저감대책

박 진 학* · 정 균 양
(현대중공업(주) 선박해양연구소)

1. 머리말

선박의 진동문제는 19세기 말엽부터 주요 관심사로 대두된 이래 선박구조 및 추진기관의 변천과 함께 계속적으로 발생되고 있으며, 특히 최근에는 쾌적한 승선감 확보를 위해 건조 계약서에 엄격한 진동 기준과 평가가 적용되고 있으므로 소음 문제와 함께 더욱 중요한 관심의 대상이 되고 있다.

일반 상선의 한 종류인 컨테이너선은 그림 1에 보는 바와 같이 화물창과 상갑판위에 컨테이너를 적재하여 운송하는 선박으로서, 화물창 내에 컨테이너 적재를 신속히 하기 위한 셀 가이드(cell guide)가 설치되고, 컨테이너 하역이 편리하도록 큰 개구창(hatch)을 가지며, 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 대형엔진을 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 특성이 있다.

특히, 최근의 추세는 적재 컨테이너 수가 5,000 TEU (길이 20 ft인 컨테이너를 5,000개 적재할 수 있는 선박) 이상의 대형선이 건조되고 있으며, 10,000 TEU 컨테이너선도 조만간 건조될 것으로 예측된다. 또한 선박의 고속화 및 대형화에 따라 예전의 6, 7 실린더 주기관에서 10 실린더 이상의 주기관이 많이 채택되고 있으며, 최근 100,000 마력의 12 실린더 주기관을 적용하여 25노트 이상의 선속을 갖는 7,000 TEU급 초대형 컨테이너선도 건조된 바 있다. 이와 같이 컨테이너선은 구조적인 특성과 고속화에 따른 마력 증대 및 선형특성에 기인한 진동이 발생되기 쉬운 반면, 선원들의 거주성 향상을 위하여 더 엄격한 진동허용치를 요구하는 추세이므로 조선소 및 관련 연구기관에서 컨테이너선에 대한 진동특성 예측의 정확도 향상 및 진동저감 방안 등에 대하여 많은 연구가 수행되어지고 있다.

* E-mail : pjh@hhi.co.kr

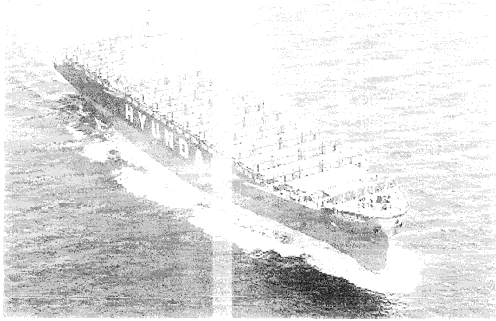


그림 2 컨테이너선 전경(5,500 TEU)

일반적으로 컨테이너선의 진동특성 파악과 진동대책은 설계단계에서의 진동해석과 해상 시운전시의 진동계측을 통해서 이루어지고 있으므로 이에 대해서 간략히 소개하고자 한다.

2. 컨테이너선의 진동

2.1 진동특성

현대중공업의 컨테이너선 건조 실적에 의하면 1990년대에는 운항 속도가 18노트 근방의 2,000 ~ 3,500 TEU 정도를 적재할 수 있는 컨테이너선이 주로 건조되었는데, 이들 선박의 거주구는 7층으로서 주로 선미부에 가깝게 위치하고 있으며 주기관은 25,000 ~ 30,000 마력 정도이다. 그러나 최근에 건조되고 있는 5,000 TEU 이상의 대형 컨테이너선은 거주구 높이가 8층이고 주기관은 약 70,000 마력을 초과하고 있으며 이들의 주요 특성을 표 1에 나타내었다.

이와 같이 컨테이너선의 대형화와 고속화를 위한 고출력 주기관 요구는 실린더 직경과 행정이 증대되고 실린더 폭발압력의 상승과 기통수의 증가를 초래하였으며, 선박진동 관련 기진력 또한 증대되었다. 이로 인한 거주구, 선체 및 선미부 진동의 특성을 요약하면 다음과 같다.

(1) 거주구 진동

컨테이너선의 유연한 선체와의 연성으로 거주구 종진동의 1차 고유진동수는 거주구 형상 및 구조특성에 따라 약 300 ~ 400 cpm(cycle/min) 근처에서 나타나고, 이는 상용운전영역에서 프로펠러 및 주기관 관련 차수의 기진력과 공진되어 항해 감판에서

표 1 컨테이너선 주요 특성

제 원 \ TEU	1,800	3,500	5,500	7,200
수선간장 (m)	172.0	225.2	263.0	304.0
폭 (m)	31.4	32.2	40.0	42.8
깊이 (m)	16.0	19.0	24.2	24.5
추기관 (bhp×rpm)	17,850×102	32,690×93	74,700×100	93,360×94
거주구 층수	7	8	8	8

상당히 높은 진동 응답이 나타나는 경우도 있다. 최근에는 컨테이너선의 대형화(5,000 TEU 이상)와 고속화(최대속도 25 노트 이상)에 따라 65,000 마력에서 100,000 마력에 이르는 대형 디젤기관이 선박의 추진기관으로 설치되고 있다. 그리고 선박의 거주구도 8층으로써 높이가 약 25 m 정도에 이르는 상당히 높은 구조로 되어 있는 반면에, 거주구의 위치는 컨테이너의 효율적인 적재와 항해 시야의 확보를 위해서 선미부에서 선체의 중앙부 방향으로 이동하고 있다. 이러한 거주구의 구조적인 특성으로 인하여 선체와 연성된 거주구의 종진동 고유진동수는 300 cpm에서 450 cpm에 걸쳐서 2~3개의 뚜렷한 공진점이 나타나는 것을 그림 2로부터 알 수 있다. 대형 컨테이너선에서 항해 갑판의 진동계측 결과에 따르면 프로펠러에 의한 진동응답은 예전의 중소형 컨테이너 선에 비해서 그다지 높지 않는데, 이는 거주구 전후 고유진동수가 비교적 낮기 때문에 상용운전영역에서 프로펠러 날개차수 기진력과 공진할 가능성이 거의 없을 뿐만 아니라, 프로펠러 설계시 'high skew' 적용으로 프로펠러 기진력이 많이 감소하였고 또 거주구가 프로펠러로부터 공간적으로 멀리 떨어졌기 때문으로 판단된다.

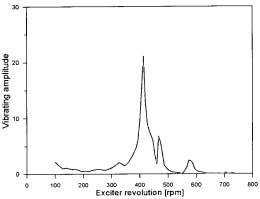


그림 2 기진기시험에 의한 항해갑판 종진동 응답곡선

반면에 주기관으로부터 발생되는 종기진력의 크기는 50 kN에서 170 kN 사이로 상당히 넓게 분포되어 있으며, 거주구 전후방향 고유진동수와 공진시에는 이 기진력에 의해 진동응답이 상당히 높게 나타난다. 그러므로 대형 컨테이너선의 거주구 전후방향 진동을 방지하기 위해서는 프로펠러의 선체 표면력은 물론 주기관에서 발생되는 종기진력 성분을 고려한 방진 설계를 하는 것이 필요하다.

(2) 선체 진동

선체진동은 주선체가 보(beam) 거동을 하는 것으로서 일반 상선과 같이 선체상하진동이 컨테이너선에서도 중요한 역할을 하고 있다. 선체상하진동의 고유진동수 및 진동모

드는 일반적으로 선체를 보 요소로 간단히 모델링하므로써 정도높게 계산할 수 있으나, 최근에는 3차원 유한요소 모델링에 의해 진동수는 물론 진동응답을 보다 정도 높게 계산할 수 있다. 선체 저차진동(상하 2절 ~ 5절 진동)의 경우는 변단면보로서 모델링하여도 충분한 정확도를 갖는 고유진동수의 계산이 가능하나, 300~400 cpm 의 선체 고차진동인 경우 보 거동이 나타나지 않으므로 보유추로 모델링해서는 정확한 고유치를 얻기는 어렵다. 이 선체상하진동은 주기관의 2차 불평형모멘트에 의해 발생되고 있으며 공진시에는 선미부 상하진동 및 거주구 전후진동의 응답도 높게 나타난다. 그러나 컨테이너선에 설치되는 주기관의 2차 불평형 모멘트의 크기는 일반적으로 작으므로 이로 인한 진동문제는 거의 발생되지 않고 있다.

(3) 선미부 진동

컨테이너선의 선미부에는 선박의 추진 및 조종을 위한 프로펠러 및 타(舵)가 설치되어 있으며 컨테이너 적재를 위한 많은 하역장치와 등구류(lighting)의 선박 의장품들이 복잡하게 설치되어 있다. 이들 의장품들은 선박 주요 기진원의 하나인 프로펠러 바로 위에 설치되어 프로펠러로부터 주기적인 힘을 계속적으로 받고 있으므로 진동에 의한 손상 가능성이 매우 높다. 최근에 많이 건조되고 있는 대형 컨테이너선은 선박의 고속화에 따른 주기관의 고출력과 프로펠러의 대형화 및 회전수 증가에 의한 프로펠러 기진력의 증대와 선미부에 넓은 선저 바닥을 갖는 선미구조의 특성으로 인하여 일반 상선에 비해서 프로펠러 기진력(특히 프로펠러 표면전달력)을 많이 받으므로 선미진동의 발생 가능성이 매우 높으며, 가진 주파수 범위도 일반 상선에 비해서 넓게 나타나고 있다. 이 기진력은 선저 외판을 통하여 선체 및 선미에 설치된 각종 의장품에 전달되고 있으며, 의장품 및 구조물의 고유진동수와 공진이 되면 매우 큰 진동을 발생시킬 수 있다. 컨테이너선의 선미진동은 주로 상하진동으로 나타나고 있는데 주요한 진동차수 성분은 프로펠러 날개주파수의 조화성분이며, 이로 인해 선미부에 위치한 각종 의장품의 파손 및 선미구조물에서 부분적인 균열이 발생되는 예도 있다.

2.2 진동해석

컨테이너선은 매우 복잡한 구조이고 다양한 기진원이 존재하기 때문에 복잡한 진동거동을 보여주며 일반적으로 건조 전에 진동해석에 의한 진동평가를 통하여 방진설계를 실시하고 있다. 선박의 진동특성 파악을 위해 각 조선소는 설계단계에서 일반적으로 유한요소법을 사용하여 진동해석을 수행하고 있다. 유한요소법에 의한 선체진동 해석은 선체의 유한요소 모델링, 계 특성치의 산정, 해석 및 해석결과의 평가 순으로 진행된다. 이는 진동평가 대상에 따라 선박을 이상화시킨 보 모델 및 3차원 유한요소모델을 사용하여 수행하고 있는데, 선체 저차진동에 대해서는 선체를 보로 이상화시켜서 진동해석을 수행하고 있으나 거주구 진동을 비롯한 선체고차진동에 대해서는 3차원 유한요소모델을 사용하고 있다. 최근에는 컴퓨터의 발달로 계산 처리속도가 현저히 빨라졌을 뿐만 아니라 다양한 범용의 해석 프로그램 개발로 그림 3과 같이 선체를 3차원 유한요

소 모델로 이상화하여 진동해석을 수행하고 있다. 이와 같은 3차원 모델은 주 선체 진동은 물론 주 선체와 거주구 구조, 이중저 구조 및 선미 구조 등의 연성진동을 상세하게 검토할 수 있으므로 설계단계에서 유용하게 사용하고 있으나, 많은 자유도를 갖는 선박 구조물의 진동해석용 모델링에 많은 시간이 소요된다. 진동해석을 통해서 주 선체 및 거주구의 고유진동특성(고유진동수 및 진동모드)과 선체 주요 부위의 진동응답을 얻을 수 있으며, 이는 선박 건조 사양서에 언급된 진동허용수준의 만족유무를 판단할 수 있는 기준이 되고, 진동문제의 발생이 예상되는 경우에는 적절한 구조보강 및 진동 저감대책의 효과를 선박 건조 전에 파악할 수 있다.

그림 3 및 그림 4에 5,000 TEU 급 컨테이너선의 3차원 진동해석 모델을 각각 나타내었으며, 자유진동 해석결과 얻어진 주요 선체 진동모드 형상을 그림 5에 나타내었다. 또한 강제진동해석 결과로서, 거주구 항해갑판 진동응답수준을 그림 6에 나타내었다. 이로부터 컨테이너선의 진동은 프로펠러 및 주기관의 관련 기진력과 거주구의 전후방향 고유진동수와의 공진으로 인하여 특정 프로

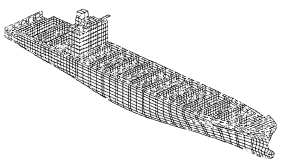


그림 3 3차원 전선 진동해석 모델

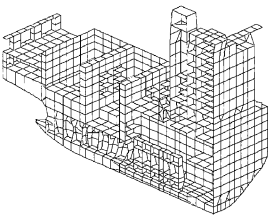
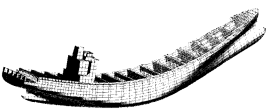
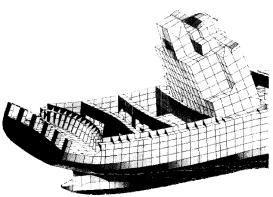


그림 4 선미부 유한요소 모델



(a) 선체상하진동

(b) 선체 수평-비틀림 연성진동



(c) 거주구 전후진동

그림 5 선체 주요 진동모드 형상

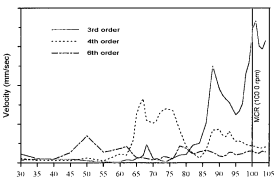


그림 6 거주구 항해갑판의 진동응답수준

퀠러 회전수에서 진동이 약간 높게 나타남을 알 수 있으며, 이 경향은 최근의 대형 컨테이너선에서 자주 발생되고 있다.

2.3 진동해석의 정확도

진동해석에 의한 예측결과는 실제로 운항중의 계측결과와 상당한 차이를 보여주는 경우가 많다. 이는 실제 선박 구조를 유한요소로 이상화하는 모델링 기법보다는 진동해석에 적용되고 있는 기진력 및 감쇠의 크기와 실제 운항중에 발생하는 기진력 및 감쇠와의 차이 때문인 것으로 생각되며 향후 해석의 정확도를 향상시키기 위해서는 이에 대한 체계적인 연구가 필요하다. 진동해석의 정확도 검증을 위해서 일반적으로 사용되는 것은 해상에서의 기진기 시험 결과와 이에 대응하는 해석 결과와의 비교를 수행하는 것이다. 기진기 시험은 그림 7과 같이 선미 상갑판상에 설치된 기진기를 사용하여, 임의의 힘을 주어 각 지점의 진동응답을 구하는 것으로서 프로펠러 및 주기관이 정지된 상태에서 실시된다. 이와 같이 기진기 시험은 선박에서의 프로펠러 및 주기관의 불명확한 기진력을 배제하고 오로지 기진기의 기진력만 적용되므로 진동해석의 정확도 검증에 매우 유용하게 사용할 수 있다.

그림 8은 4,800 TEU 컨테이너선의 진동해석 결과와 기진기 시험 결과를 보여주고 있는데, 대체로 해석 및 계측결과가 잘 일치하고 있다. 3 Hz 이하 저주파 영역의 선체 (hull girder) 고유진동수 모드는 상당히 높은 정확도로 일치하였고, 고주파 영역의 비공진역의 특성도 매우 높은 정도로 일치하였다. 다만, 그 사이의 공진역에서 계측된 주파수응답함수의 크기는 해석결과 만큼 뚜

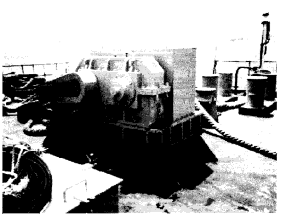


그림 7 기진기 시험

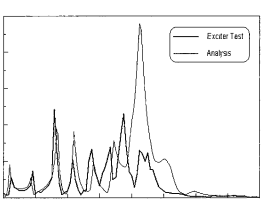


그림 8 해석과 기진기 시험과의 결과 비교

렷하지 않는 데 이는 가진점인 선미구조와 진동응답점인 거주구 구조간의 연성(coupling)이 충분하지 못한 결과로서 실제 상태를 완벽하게 구현하지 못하는 모델링과 해석방법의 한계에도 그 이유가 있는 것으로 평가된다.

2.4 진동계측

일반적으로 선박이 항주할 때는 프로펠러 및 주기관에서 기진력이 발생하고 이로 인해 선체, 거주구 및 국부구조 등에서 진동이 발생한다. 주 선체 진동은 주로 구조물의 손상 파괴와 관련되어 있다고 하면, 거주구 진동은 승무원의 쾌적감과 승선감을 저하시키고 각종 항해 관련 장비의 성능을 저하시키므로, 선체와 거주구의 진동수준으로서 계약서의 진동수준 만족여부를 판정하는 일반적인 기준으로 삼고 있다. 따라서 이를 정확히 계측하고 평가하는 것은 매우 중요하다.

선박의 진동계측은 2가지 목적으로 실시되고 있는 데, 첫번째는 시운전시의 진동계측을 통한 진동수준을 측정하여 계약서에 언급된 내용의 만족 유무를 판별할 목적으로 수행하는 것이며, 두번째는 진동문제의 해결을 위해 진동현상 및 원인을 파악하고 방진대책을 강구하기 위해 실시되는 진동시험 및 진동계측이 있다. 이와 같은 진동 계측은 일반적으로 건조후의 해상 시운전시에 실시되고 있으나 간헐적으로 해상 시운전전에 안벽에서 실시되는 경우도 있다.

선박진동특성은 선박의 재화상태, 수심, 해상조건 및 프로펠러 부하 상태 등에 따라서 변화하므로 시험조건은 물론 시험방법과 계측점의 위치 및 방향, 데이터 취득, 분석방법 등에 대해서 국제적인 계측 코드 ISO 4867, ISO 4868 및 ISO 6954등이 1984년에 제정되어 사용되어 왔으나 2000년에 이를 통합한 ISO 6954 : 2000(E) 로 개정되었다.

각 조선소의 진동계측은 이를 기반으로 회사 실정에 맞게 선박 진동 계측 및 분석 시스템을 구성하여 일반적으로 선체진동 계측, 축계진동 계측 및 국부진동 계측으로 구분하여 실시하고 있다. 선체진동계측은 주 선체 및 거주구의 진동특성을 파악하기 위하여 프로펠러 회전수의 변화에 따른 진동계측을 실시하는 것으로서 주요 계측점은 그림 9에 나타내었으며, 그림 10에 보인 바와 같이 스펙트럼 맵(spectral map)을 통한 분석도 수행된다.

축계진동 계측은 축계의 진동특성을 파악

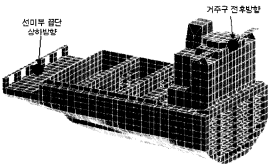


그림 9 진동계측 주요 지점

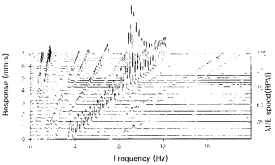


그림 10 스펙트럼 맵

하기 위하여 실시되는 것으로서 축계의 진동양상에 따라 비틀림진동, 종진동 및 횡진동으로 구분되고 있으며, 대부분 비접촉변환기 또는 무선 송수신 계측장비가 사용되고 있다. 일반적으로 비틀림진동에 대하여 각국의 선급에서 축계의 비틀림진동에 의한 허용응력을 규정하고 있는 바, 각 조선소는 이의 만족여부를 규명하기 위하여 해상 시운전시에 비틀림진동 계측을 실시하며, 축계 종진동도 병행하여 계측하고 있다. 또한 최근의 대형 컨테이너선에서는 고출력을 위한 무거운 프로펠러 장착으로 축계 횡진동이 발생할 가능성이 있기 때문에 베어링 위치에서 횡진동 계측이 실시되고 있다.

국부진동계측은 선체진동계측과 별도로 주기관의 순항속도(NCR)에서 진동계측을 실시하는 것으로서 거주구역 및 선체의 주요 국부구조에 대한 진동평가가 주요 목적이다.

3. 진동 저감대책 및 적용사례

컨테이너선에서도 가장 문제가 되는 것은 거주구의 진동응답으로서, 이의 진동저감 대책은 일반 상선과 마찬가지로 공진회피, 관련 기진력의 저감 및 적절한 방진장치의 설치 등이 있다.

공진회피란 거주구의 전후방향 고유진동수와 관련 주기관 및 프로펠러의 기진주파수와의 공진을 피하는 것으로서, 이는 우선적으로 설계단계에서 유한요소법을 이용하여 거주구 고유진동수를 정확히 추정하는 것이 필수적이다. 대형컨테이너선의 경우, 거주구 전후진동은 상용운전영역에서 주기관의 2, 4 차 불평형 모멘트 및 주기관의 폭발력에 의한 3, 4 차 축계 종진동변동력과의 공진이 발생하기 쉬우므로, 거주구 위치 변경 및 하부구조 보강 등을 통해 공진가능성을 줄이려는 노력을 하고 있다.

또한 기진력 감소를 통한 진동저감을 달성하기 위하여, 주요 기진원에 대한 설계개선도 꾸준히 진행되고 있다. 즉, 프로펠러 기진력을 줄이기 위하여 'high skew'를 적용하고, 주기관 기진력을 줄이기 위해서 엔진착화순서 변경, 모멘트 보상기(moment compensator) 설치 및 종진동 댐퍼 조정 등을 적용하고 있다. 한 예로 4,800 TEU 컨테이너선에서 발생한 주기관 4차 불평형모멘트(M4V)에 의한 거주구 진동을 저감시키기 위하여, 주기관에 4차 모멘트 보상기가 설치되었으며, 설치전후의 거주구 진동응답을 그림 11 에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 선박의 상용운전구역에서는 모멘트 보상기가 진동 감소효과를 나타내고 있으며, 그 이하의 구역에서는 진동 저감효과가 크지 않으나 작동 후 거주구 진동이 ISO 허용기준 이내에 들어가는 것을 확인할 수 있었다.

또한 능동진동제어를 적용한 방진장치를

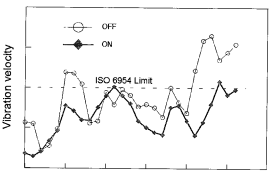


그림 11 4차 모멘트 보상기 설치 전후 진동 응답 비교

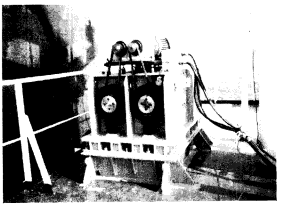


그림 12 방진장치

설치하여, 과대한 진동이 발생하는 부위에 역 위상의 힘을 발생시켜 진동응답을 저감시키기도 한다. 현대중공업에서는 그림 12의 방진장치를 독자 개발하여 2,200 TEU 컨테이너선의 거주구 전후진동을 저감시키기 위하여 설치하였으며, 진동제어 효과를 확인하였다. 방진장치 작동 후의 거주구 진동응답은 작동전에 비해서 거주구 공진영역에서 약 1/5 수준으로 크게 감소되었다.

4. 맺음말

지금까지 최근의 컨테이너선 진동에 대해서 개략적으로 고찰하여 보았다. 컨테이너선의 거주구가 선미부에 가까이 위치하고, 유연한 선체와의 연성으로 거주구 종진동의 1차 고유진동수는 거주구 형상 및 구조특성에 따라 약 300 ~ 400 cpm 근처에서 나타나고 이는 상용운전영역에서 프로펠러 및 주기관의 관련 차수의 기진력과 공진되어 항해 갑판에서 상당히 높은 진동 응답이 나타나는 경우도 있다. 그리고 최근의 대형 컨테이너선은 선박의 고속화에 따른 주기관의 고출력과 프로펠러의 대형화 및 회전수 증가에 의한 프로펠러 기진력의 증대와 선미부에 많은 콘테이너 적재를 위하여 넓은 선저 바닥을 갖는 선미구조의 특성으로 인하여 일반상선에 비해서 프로펠러 기진력을 많이 받으므로 선미진동의 발생 가능성이 매우 높다. 또한 컨테이너선의 대형화와 고출력 및 고효율 기관이 적용됨에 따라 프로펠러보다는 주기관에 의한 거주구 전후진동이 많이 발생되고 있으므로 주기관의 종기진력 저감 및 전달 메카니즘에 대해서 좀더 적극적으로 연구할 필요가 있다. 선박진동은 현재의 추진기관 시스템에서는 피할 수 없는 문제이고 또한 거주성 및 작업성 향상을 위한 저진동 선박에 대한 요구도 점차 높아지고 있으므로 진동 관계자들은 지속적인 관심을 갖는 것이 요구된다.

참 고 문 헌

(1) 이수목, 김원현, 정균양, 2000, "주기관 고차 관성기진력에 의한 콘테이너선 선루진동의 제어", 한국소음진동공학회, 춘계학술대회논문집, pp. 876~880.

(2) 박진화, 1994, "최근 선박진동에 대한 소고", 대한조선학회지, 제 31 권 제 2 호.

(3) 정균양, 박진화, 1992, "4,400 TEU 콘테이너 운반선의 진동특성에 대한 연구", 선박구조연구회 논문집, 대한조선학회.

(4) Lee, S. M., Chung, K. Y. and Cho, D. S., 1995, "Active Vibration Control of Ship Structure Using a Mechanical Actuator", ACTIVE'95.

(5) 한국선급, 1997, 선박 진동·소음 제어지침.