

## 설계개선에 의한 원유운반선 송유관 지지구조물의 진동 저감

김희원<sup>†\*</sup>, 박진화<sup>\*</sup>

현대중공업 선박해양연구소<sup>\*</sup>

### Improvement of the Vibration Characteristics for the Oil Pipe Support Structure of the Crude Oil Carrier

Heui-Won Kim<sup>†\*</sup> and Jin-Hwa Park<sup>\*</sup>

Hyundai Maritime Research Institute, Hyundai Heavy Industry Co., Ltd.<sup>\*</sup>

#### Abstract

Recently it was reported that the vibration problems on the oil pipe support structure of the crude oil carrier were occurred. In order to investigate the vibration characteristics and the causes of the vibration occasionally, the vibration measurements and impact tests for the oil pipe structure were carried out. From the measurement results severe vibration was caused by the resonance between the transversal natural frequency of the structure and 6<sup>th</sup> order excitation force of the main engine. Providing the proper countermeasures a series of the vibration analyses were carried out based on the measurement results. From the analysis results, it was concluded that the vibration characteristics of the oil pipe structure were affected by the oil pipes, support structure itself, upper deck structure and the installation spaces and the standard design was established for the crude oil carriers.

※Keywords : Resonance(공진), Oil pipe support structure (송유관 지지구조물), Impact test(충격 가진 시험), Vibration analysis (진동해석), Standard design(설계표준)

#### 1. 개요

최근 초대형 유조선에 포함된 일부 원유운반선에서 송유관을 지지하는 구조물에 과도한 진동과 이로 인한 균열 발생 사례가 보고 되었다.

본 논문에서는 초대형 유조선과 165k 원유운반선 등에서 발생한 지지구조물의 진동현상을 조사하고 진동발생의 정확한 원인을 파악하기 위하여 운항 중 진동계측을 수행하였다. 진동계측 결과를 바탕으로 송유관 지지구조물의 방진 대책을 수립하기 위하여 일련의 진동해석을 수행하였으며 진동계측 결과와 해석 결과를 바탕으로 발생 가능한 진동문제를 사전에 방지하기 위해 설계 표준안을

<sup>†</sup>주저자, E-mail : khw@hhi.co.kr

Tel : 052-230-5557

도출하였다.

## 2. 지지구조물의 진동 현상

원유운반선의 송유관을 지지하는 송유관 지지구조물(oil pipe support structure)은 비교적 단순한 구조형상을 가지고 있다. 초대형 유조선(VLCC)의 상갑판에 설치되는 송유관 배치 및 송유관 지지구조물의 단면도를 Fig. 1에 나타내었는데, C.L.(Center Line)에 대하여 대칭으로 설치되는 경우와 우현에 설치되는 경우가 있다.

그림에서 보는 바와 같이 초대형 유조선(VLCC)의 송유관 지지구조물에서 발생한 균열은 대부분 거주구의 전방 부분이며 선수부 쪽으로 갈수록 균열의 빈도와 진동수준이 감소하고 있는 양상을 보이고 있었다. 지지구조물이 C.L.에 대하여 대칭으로 설치된 초대형 유조선에 대하여 지지구조물

의 진동양상을 정확하게 파악하기 위하여 지지구조물에 대한 충격가진시험(impact test)을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 충격가진시험 결과에서 보는 바와 같이 7.1 Hz와 8.1 Hz에서 뚜렷한 피크를 나타내고 있으며 6.6 Hz에서도 작은 피크를 확인할 수 있다. 지지구조물의 고유진동수는 지지구조물의 설치 장소에 따라 조금씩 차이를 보이고 있는데, 지지구조물 사이의 간격이 보다 넓게 설치된 선수부 쪽의 지지구조물에서는 6.6 Hz의 피크가 좀 더 크게 나타나고 있다. 충격가진시험 결과와 주기관의 MCR이 76 RPM인 것을 고려하면 주기관의 상용회전수 내에서 공진의 가능성을 예측할 수 있다.

운항 중 지지구조물의 진동수준을 파악하기 위하여 시운전 중에 진동계측을 수행하였으며 주기관의 회전수에 대한 지지구조물의 횡방향 진동 수준을 Fig. 3에 도시하였다.

계측 결과에서 나타난 바와 같이 주기관의 NCR 부근에서 횡방향으로 과도한 진동이 발생하

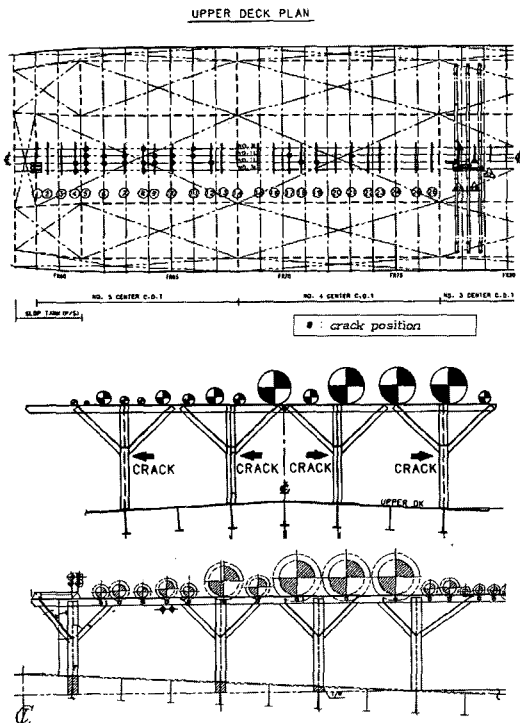


Fig. 1 Arrangement and typical section of the oil pipe support structure

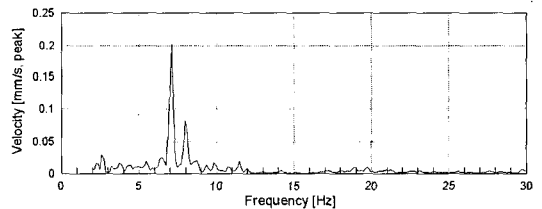


Fig. 2 Impact test result of the pipe support structure installed symmetrically for the VLCC (transverse direction)

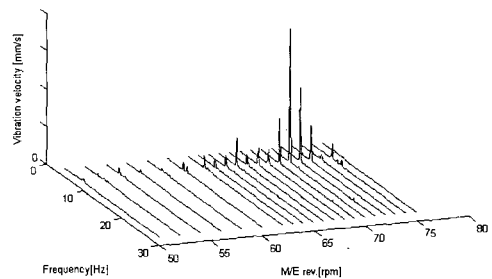


Fig. 3 Vibration measurement result of the pipe support structure installed symmetrically for the VLCC (transverse direction)

고 있으며 진동 성분은 주기관의 6 차기진력 성분이다. 지지구조물에서 발생한 진동이 주기관의 기진력과의 공진에 의한 것인지를 조사하기 위하여 지지구조물에 대한 ODS (Operating Deflection Shape)를 계측하였으며 그 결과를 Fig. 4 에 나타내었는데, 7.1 Hz 와 8.1 Hz 에서 횡방향의 변형 모습을 확인할 수 있었다. 이상의 계측 결과로부터 지지구조물의 고유진동수가 구조물의 설치간격에 따른 강성의 차이로 발생하고 있으며 이로 인하여 진동수준도 함께 변화하고 있음을 확인하였다. 그리고 지지구조물에서 발생한 과도한 진동은 지지구조물의 고유진동수와 주기관의 6 차기진력이 공진되어 발생된 것으로 판단하였다.

선박의 우현에 비대칭적으로 설치된 송유관 지지구조물의 진동 특성을 파악하기 위하여 충격가진시험을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 5 에 나타내었다. 충격가진시험 결과에서 보는 바와 같이 7.8 Hz 에서 아주 뚜렷한 피크를 관찰할 수 있으며 주기관의 운전영역을 고려하면 공진 가능성은 없는 것으로 판단된다. 운항 중 지지구조물의 진동계측을 수행하여 계측 결과를 Fig. 6 에 나타내었는데, 주기관의 상용회전수 영역 밖에서 큰 진동 응답을 나타내고 있으며 MCR 이하에서는 양호한 진동 수준을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이상의 계측 결과로부터 비대칭적으로 설치된 송유관 지지구조물의 고유진동수가 주기관 상용회전수 밖에 존재하고 있기 때문에 주기관 기진력과의 공진에 의한 진동 문제는 발생하지 않을 것으로 판단하였다.

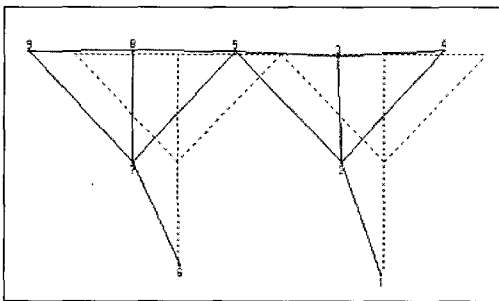


Fig. 4 Operating deflection shape(ODS) of the pipe support structure(7.1 Hz)

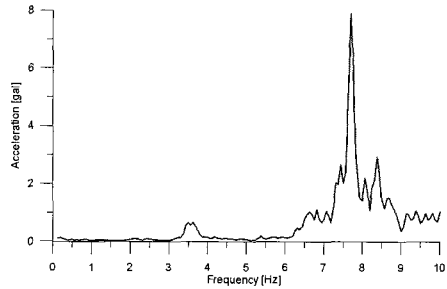


Fig. 5 Impact test result of the pipe support structure installed asymmetrically for the VLCC (transverse direction)

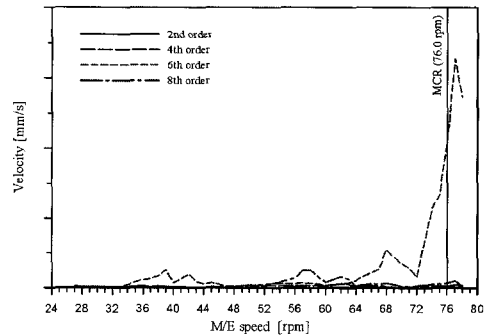


Fig. 6 Vibration measurement result of the pipe support structure installed symmetrically for the VLCC (transverse direction)

165k 원유운반선의 지지구조물에서 발생한 균열현상도 충격가진시험 및 운항 중 진동계측 결과를 바탕으로 주기관 기진력과의 공진현상으로 발생한 진동에 의한 것으로 판단하였으며, 초대형 유조선의 지지구조물과 유사한 진동양상을 나타내고 있었다. Fig. 7 에 나타낸 충격가진 시험 결과에서 보는 바와 같이 8.6 Hz 에서 뚜렷한 피크를 확인할 수 있으며 주기관의 MCR 이 91RPM 인 것을 고려하면 주기관 상용회전수 내에서 주기관 기진력과의 공진현상을 예측할 수 있다. 그리고 운항 중에 계측된 진동수준을 Fig. 8 에 나타내었는데, 86rpm 에서 주기관의 6 차 성분이 크게 나타나고 있음을 알 수 있으며 이상의 결과로부터 165k 원유운반선의 지지구조물도 주기관 기진력과의 공진현상에 의한 것으로 판단하였다.

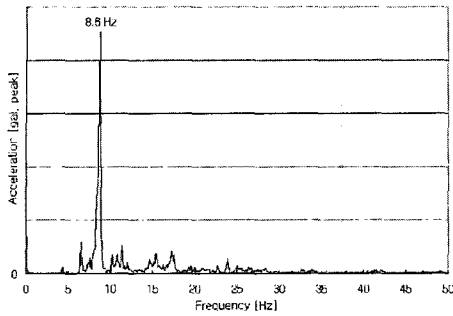


Fig. 7 Impact test result of the pipe support structure for 165k C.O.T. (transverse direction)

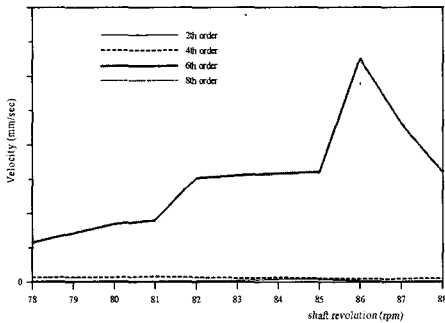


Fig. 8 Vibration response level of the pipe support structure for 165k C.O.T. (transverse direction)

### 3. 지지구조물의 진동해석

공진현상에 의해 발생한 165k 원유운반선의 지지구조물의 진동 수준을 낮추기 위해 진동해석을 수행하여 방진대책을 제시하기로 하였다. 먼저 Fig. 9 와 같이 여러 개의 지지구조물 중 1 개만을 모델링하고 지지구조물 상부의 송유관을 집중질량으로 처리하였다. 지지구조물 하단은 단순지지의 경계조건을 부여하였으며 부재의 물성치를 조정하여 예측된 지지구조물의 고유진동수인 8.6 Hz 와 튜닝하였다.

진동계측치에 튜닝된 모델에 방진대책으로서 횡방향의 강성을 증가시키기 위해 Fig. 10 과 같은 보강안을 모델링하여 진동해석을 수행하였다. 진동해석 결과 보강 후 모델의 고유진동수가 8.6 Hz 에서 11.1 Hz 로 증가하였으며, 보강 후의 지지구

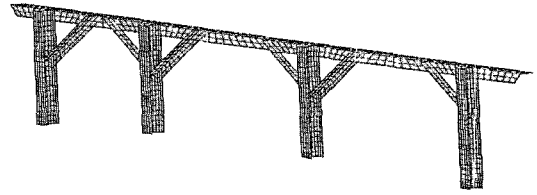


Fig. 9 Finite element model of the pipe support structure for 165k C.O.T

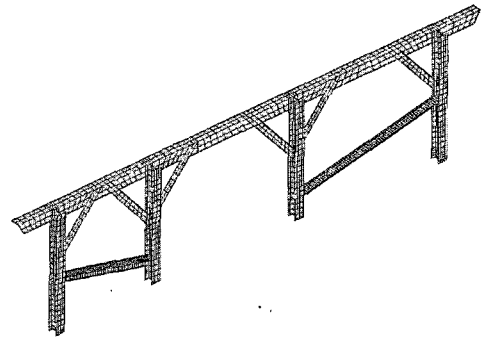


Fig. 10 Countermeasure design verified by vibration analyses

조물의 고유진동수가 주기관의 최대회전수인 91rpm 보다 높아 공진영역에서 벗어난 것으로 판단하여 최종 보강안으로 결정하였다.

### 4. 지지구조물의 설계표준화

165k 원유운반선 지지구조물의 진동 수준을 감소시키기 위한 방진대책을 제시하기 위해서 수행하였던 진동해석 방법의 제고와 진동 발생을 사전에 방지하기 위한 지지구조물의 설계 표준안을 도출하기 위해서 일련의 진동해석을 수행하였다. 송유관 지지구조물의 구조 특성상 지지구조물의 고유진동수 등의 진동특성은 지지구조물의 구조뿐만 아니라 상단에 설치되는 송유관과 하단의 경계조건에 크게 영향을 받고 있다. 따라서 정확한 진동해석을 위해서는 1 개의 지지구조물 보다 많은 지지구조물을 모델링에 포함하여야 하며 정확한 경계조건의 묘사를 위해서는 상감판도 해석 모델링에 포함되어야 한다. 이와 같이 송유관과 상감판

을 포함한 해석 모델을 Fig. 11 과 같이 구축하였다.

3 개의 지지구조물과 종통격벽 부분까지를 포함한 상갑판을 모델링하였고 정확한 송유관의 치수를 물성치에 반영하였으며 송유관내의 원유는 고려하지 않았다. 종통격벽 하단부와 송유관 끝단의 병진변위를 모두 구속하였으며 주기관의 회전수를 고려하여 20 Hz 까지 진동해석을 수행하였다. 진동해석 결과 모델링에 어떠한 튜닝없이 진동계측 결과와 유사한 8.78 Hz 에서 횡방향의 진동모드를 확인할 수 있었으며 그 때의 진동 모드를 Fig. 12 에 나타내었다. 진동모드에서 보는 바와 같이 지지구조물의 횡방향 진동 모드는 상갑판의 진동모드와 송유관의 진동 모드와 연성된 모드임을 알 수 있다.

165k 원유운반선 송유관 지지구조물의 방진대책으로서 Fig. 10 에서 제시한 보강안을 고려한 해석 모델을 대상으로 고유진동해석을 수행하였다.

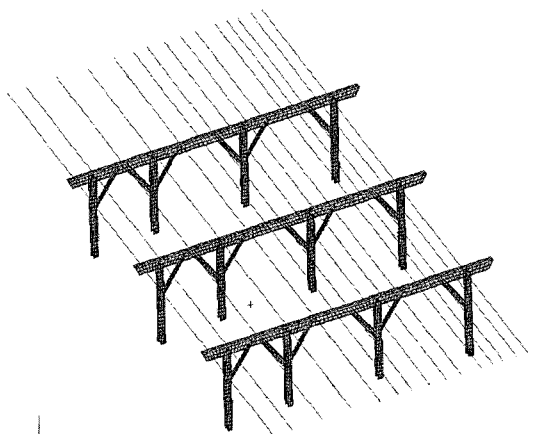
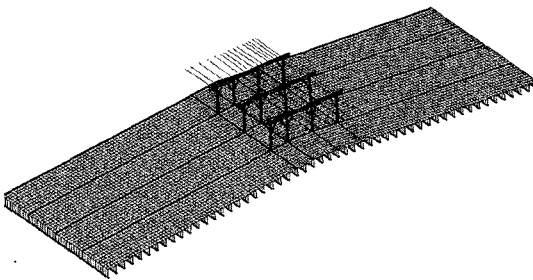


Fig. 11 Finite element model of the pipe support structure including upper deck and oil pipes

해석 결과 8.78 Hz 의 고유진동수가 9.48 Hz 로 증가하였고 진동모드를 Fig. 13 에 나타내었는데, 이 해석 결과는 앞 절에서 계산된 11.1 Hz 보다 낮은 고유진동수이지만 주기관의 회전수내에서의 공진 가능성은 없으며 이로 인한 진동문제는 발생되지 않을 것으로 판단된다.

이와 같이 보다 타당한 진동해석 방법을 이용하여 165k 원유운반선의 송유관 지지구조물의 설계 표준안을 도출하기 위하여 설계에 적용 가능한 몇 가지의 표준안에 대하여 일련의 고유진동해석을 수행하였다. 최초 기존 설계안(Origin)에서 상단의 앵글을 지지하는 대각선 방향의 앵글(diagonal angle)의 설치 높이를 상단에서 1000 mm 로 변경하는 경우(Rev-A), 지지구조물의 메인 포스트인 H 빔을 90 도 회전하여 설치하는 경우(Rev-B),

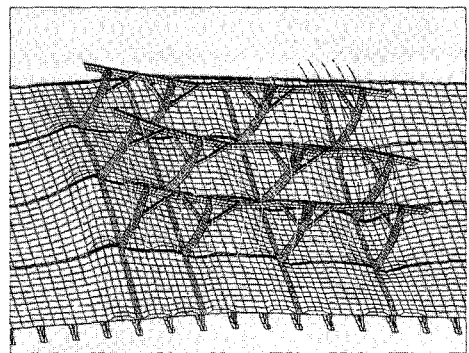


Fig. 12 Transverse vibration mode of the pipe support structure(8.78 Hz)

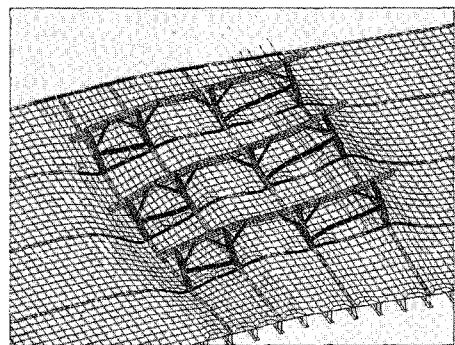
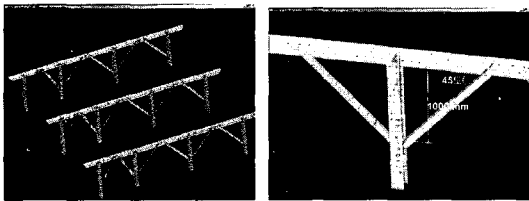


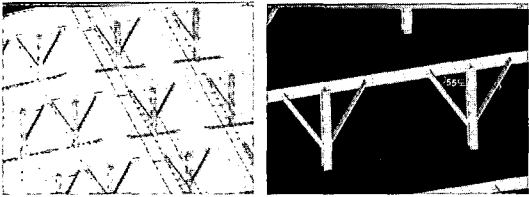
Fig. 13 Transverse vibration mode of the reinforced pipe support structure(9.48 Hz)

Rev-B 안에서 diagonal angle 의 높이를 1000 mm 로 변경하는 경우(Rev-C), 최초모델에서 H 빔 을 150×150×15 에서 200×200×8/12 로 변경하는 경우(Rev-D), diagonal angle 설치높이를 상단에서 1100 mm 로 변경하고 설치 각도를 55 도로 변경하는 경우(Rev-E) 등에 대한 진동해석을 수행 하였다.

일부 설계 표준안 해석 모델의 모습을 Fig. 14 에 나타내었고 각 설계 표준안의 고유진동해석 결과를 Table 1 에 정리하여 나타내었다. 고유진동해석 결과에서 보는 바와 같이 제안된 각 설계 표준안 모두 공진 영역에서 벗어나 있음을 알 수 있으나 제작의 편의성, 비용 및 선원의 접근성을 고려하여 Rev-E 안을 최종적인 설계 표준안으로 선택



(a) Rev-A Model



(b) Rev-E Model

Fig. 14 The reserved standard pipe support structures for 165k C.O.T

Table 1 Vibration analysis results for standard models

진동모드 모델	1st Mode (횡방향모드)	2nd Mode (연성모드)
Origin	8.78 Hz	9.62 Hz
Rev-A	9.48 Hz	9.73 Hz
Rev-B	9.09 Hz	9.6 Hz
Rev-C	9.56 Hz	9.69 Hz
Rev-D	9.57 Hz	9.81 Hz
Rev-E	9.4 Hz	9.7 Hz

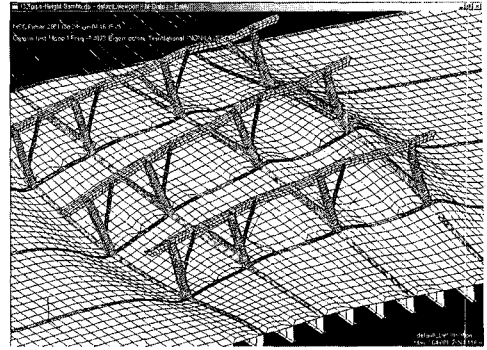


Fig. 15 Transverse vibration mode of the standard pipe support structure for 165k C.O.T (9.4 Hz)

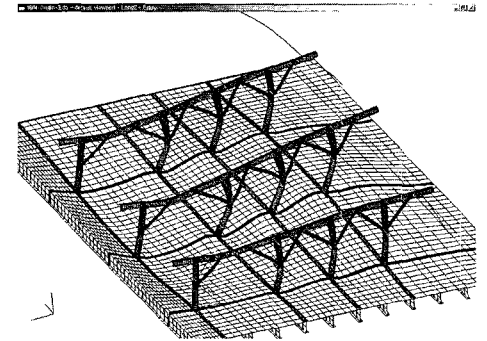


Fig. 16 Transverse vibration mode of the VLCC (8.0 Hz)

하였다. 최종 설계 표준안의 횡방향 진동 모드를 Fig. 15 에 나타내었다.

초대형 유조선의 경우 C.L.에 대칭으로 설치된 지지구조물은 Fig. 10 에서 제시한 보강안을 사용하기로 하였다.

그리고 우현에 설치된 지지구조물에 대해서는 모델링을 구축하여 고유진동해석을 수행하였으며 해석 결과 진동모드가 8.0Hz 에서 나타났으며 이는 계측 결과와 매우 유사하다. 이상의 결과로부터 우현에 설치된 지지구조물은 기존의 설계를 사양을 표준안으로 채택하였다.

### 5. 결론

초대형 유조선과 165k 원유운반선의 송유관 지

지구조물에서 발생된 진동의 정확한 원인을 조사하고 방진대책을 조사하기 위해 진동계측 및 일련의 진동해석을 수행하였다. 진동계측 및 해석 결과 지지구조물의 진동은 주기관 기진력과의 공진에 의한 것임을 밝혀내었다. 그리고 송유관과 상갑판을 포함하는 진동해석 모델링을 이용하여 진동 수준을 감소시키는 방진대책을 제시하였고 진동문제를 사전에 방지하기 위한 설계 표준안을 도출하였다.

- 김희원, 박진화, 임도형, 2004, “ VLCC 송유관 지지대 균열 원인 조사를 위한 진동계측,” 추계대한조선학회
- 임도형, 2003, “ VLCC 송유관 지지대 균열 원인 조사를 위한 진동계측,” 현대중공업(주) 선박해양연구소.
- 박진화, 라기웅, 2003, “ 165k 원유운반선 국부 진동계측,” 현대중공업(주) 선박해양연구소.

참 고 문 헌

- 김희원, 박진화, 2004, “ 원유운반선 송유관 지지구조물의 진동특성 연구,” 대한조선학회 2004 추계학술대회 논문집, 대한조선학회, pp 629-633



< 김 희 원 >