
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 31 卷第 3 號 1994年 8月
 Transactions of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 31, No. 3, August 1994

86,000톤 원유운반선 프로펠러 날개의 singing(명음) 발생위치 조사

김동해*, 정균양**

A Study on the Propeller Blade Singing Place of an 86,000 Ton Deadweight Crude Oil Tanker

by

Dong Hae Kim* and Kyoonyang Chung**

요 약

본 연구에서는 86,000톤 원유운반선의 프로펠러 날개에서 발생한 singing 현상에 대하여 발생 가능 위치를 조사함으로써 차후 유사문제 발생시 효과적인 방음대책 수립이 가능케 하였다.

조사과정에서는 진동해석과 가진시험으로부터 얻은 프로펠러의 공기중 진동특성을 비교한 후 해석에 의한 접수진동 특성에서 실제 문제 발생가능 모드를 추출하여 실선 계측결과와 비교하였다.

해석결과에 의하면 반경의 95%(0.95R)이상의 날개 끝 뒷날 부분에서 singing이 발생되었을 가능성이 높았으며 방음대책으로 적용된 날개 끝 연삭가공량에 따른 날개의 고유진동수 변화는 거의 없었다.

Abstract

A study was conducted to investigate the propeller singing place of an 86,000 ton Deadweight Crude Oil Tanker.

In preliminary study, proper use of finite element analysis was verified by comparing with the result of hammering test in the air. Then the finite element analysis was carried out for the blade in the water and compared with the noise measurement during sea trial, which enabled to confirm the local resonances of blade structure.

Result of the study showed that the singing occurred most probably at trailing edges on the blade tip over 95% of propeller diameter. Owing to edge cutting of a successful

발표일자 : 1993년도 대한조선학회 추계연구발표회('93. 11. 13)

접수일자 : 1993년 11월 29일, 재접수일자 : 1994년 6월 8일

* 현대중공업(주) 선박해양연구소

** 정회원, 현대중공업(주) 선박해양연구소

remdial action, the singing excitation forces seemed to be reduced whereas the vibration characteristics of the blade was not changed.

1. 서 언

86,000톤 DWT 원유운반선의 프로펠러에서 발생된 소음은 프로펠러 singing 현상으로 판명되었으며 여러 차례 소음/진동 계측이 수행되고 방음대책이 적용된 결과 Fig. 1과 같이 singing 현상은 완전히 제거되었다[1][2].

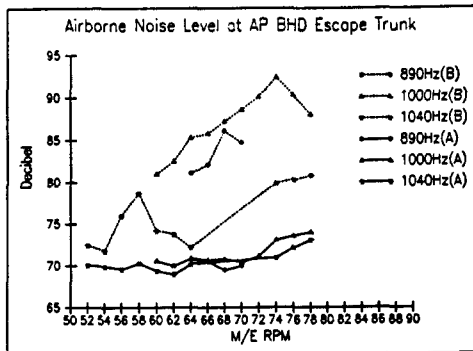


Fig. 1 Airborne noise levels before and after the anti-singing countermeasure was applied

프로펠러 singing 현상의 일례로 프로펠러 날개의 뒷날(trailing edge)에 와류(vortex)가 형성되고 이 와류의 이탈 주파수(shedding frequency)가 날개 뒷날 구조의 고유진동수와 공진되면 강한 명음이 발생하는 경우가 있다. 대개는 날개 하나가 한 회전중 일부 대역에서 공진하나 간혹 두 날개가 서로 다른 주파수로 공진하는 수도 있다[3]. 방음대책으로는 날개 뒷날의 형상을 변경하여 와류이탈을 방지함으로써 기진력을 감소시키는 방법이 가장 효과적인 것으로 알려져 있다[3][4]. 그러나 이러한 singing은 수중에서 회전하는 프로펠러의 국부구조물 공진 현상이므로 구체적으로 어느 부위가 공진하는가에 대한 정보는 획득하기 어렵고 따라서 시행 착오적인 뒷날 가공 방음대책은 비 경제적인 수 밖에 없다.

따라서 본 연구에서는 Table 1과 같은 특성을 가지고 있는 대상선 프로펠러의 접수 진동특성을 유한요소법을 이용하여 분석함으로써 문제의 singing 발생부위 확인법을 정립하고 차후 유사문제 발생시 경제적인 방음대책 수립이 가능토록 하였다.

Table 1 Main particulars of the propeller

| | | | |
|---------------------|-------------------------|----------|------------------|
| Diameter | 8.0m | Rake | 0.0 degree |
| Number of blade | 4 | Skew | 20.0 degree |
| Petch ratio | 0.7317 | Material | Type 4(Ni.Al.Bc) |
| Expanded area ratio | 0.5647 | RPM | 88 rpm(MCR) |
| Blade section | Aerofoil section (NACA) | Power | 20,940 PS(MCR) |

2. 프로펠러 날개의 진동특성

프로펠러 날개의 수중 진동특성을 계측에 의해 찾아내는 것이 대단히 어려운 일이기 때문에 유한요소해석 프로그램인 MSC/NASTRAN을 이용하여 공기중 및 수중에서의 진동특성을 계산하였다. 공기중 프로펠러 날개의 진동특성은 해석에 의한 결과와 충격 가진시험(impulse test)으로부터 얻어진 결과를 비교 검토하였으며 해석에 의한 수중 프로펠러 날개의 진동특성으로부터 실제 문제 발생가능 모드를 추출하여 시운전시의 계측결과와 비교하였다.

2.1 진동해석 모델링

2.1.1 해석모델

유한요소법에 의한 프로펠러 날개의 진동특성 해석은 날개상의 각 위치에 대한 공간좌표상 좌표값, 날개의 두께, 재질 특성등의 자료를 입력하여 모델링하고 고유 진동수와 진동모드를 해석 프로그램에 의해 구한 후 특정점에 대한 주파수 응답함수(frequency response function)를 계산하는 과정이다. 이를 위하여 프로펠러의 offset data를 입력하면 진동해석용 모델을 자동 생성해주는 자체 개발 프로그램과 범용 구조해석 프로그램인 MSC/NASTRAN을 사용하여 고유진동해석을 하였으며 프로펠러 날개 뒷날에 대한 주파수 응답함수를 계산하였다.

모델링 방법으로는 프로펠러 날개를 각 절점마다 각기 다른 판 두께가 입력 가능한 판요소를 사용하였으며 요소분할선은 반경방향으로 0.15~0.7R 구간에서는 0.025R 간격으로, 0.7~1.0R 구간은 0.0125R 간격으로 정하였다. 또한 해석모델은 실제 충격 가진

시험을 했던 위치들을 포함시키면서 코드방향의 절점을 임의로 선택하여 코드 및 반경방향으로 22×46개의 요소를 Fig.2와 같이 구성하여 진동해석을 수행하였다. 프로펠러의 재질은 Ni-Al-Bc로서 영률계수(Young's modulus)는 12,000kgf/mm² 이고 밀도는 7,600kg/m³, 푸아송 계수(Poisson's ratio)는 0.33으로 계산하였다.

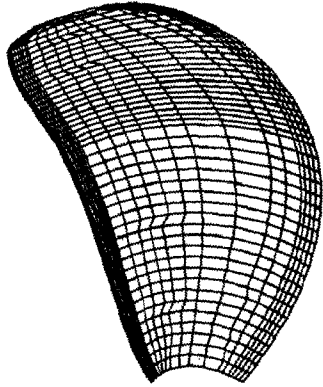


Fig. 2 Finite element model of a propeller blade

2.1.2 경계조건

프로펠러 날개의 강성은 프로펠러 축의 강성과 비교해 볼 때 상대적으로 약하기 때문에 프로펠러 날개가 축에 고정되어 있는 것으로 가정하여 하나의 날개만 모델링하였다. 판요소의 수직방향 회전변위는 필요에 따라 자동으로 구속시켜 주는 MSC/NASTRAN의 AUTOSPC 기능을 이용하여 처리하였다.

2.1.3 부가수 질량

수중에서의 프로펠러의 진동특성은 부가수 질량효과로 인하여 고유진동수가 변화하게 된다. 이를 고려하기 위하여 경계요소 적분방법을 도입한 MSC/NASTRAN의 virtual mass method를 이용하여 부가수 질량을 포함한 고유진동계산을 수행하였다. 배의 하중 조건에 따라 선미의 흘수가 바뀌게 되므로 이에 따른 프로펠러의 진동특성 변화도 고려하였다.

2.2 공기중 진동특성

2.2.1 진동해석 결과

해석에 의한 공기중의 프로펠러 진동특성 분석 방법으로서 시운전시 주로 문제가 되었던 900 Hz 및 1,000 Hz 성분과 직접 비교하기는 곤란하지만, 부가수 질량 효과가 고유진동수를 대략 반으로 낮추는 효과가

있으므로 1,400~2,400 Hz 대역에서 날개뒷날에 대한 각 반경 위치의 진동모드를 구하였다.

Fig.3에 프로펠러 날개가 진동하는 모드를 보여주고 있으며, 특히 뒷날 부분에서는 굽부 진동 모드가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

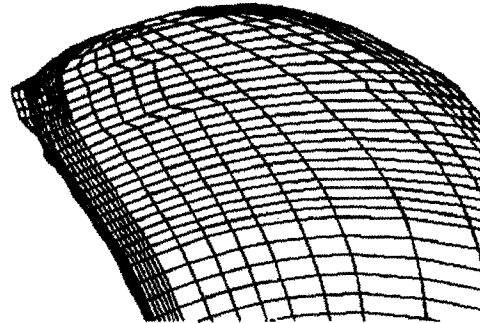


Fig. 3 Vibration mode shape of blade tip in the air at 1897 Hz obtained from finite element analysis

2.2.2 가진시험 결과

실험에 의한 공기중의 프로펠러 진동특성은 여러가지 가진방법중에서도 비교적 쉽게 수행할 수 있는 충격 가진시험에 의해 계속되었다. 실제 프로펠러는 축에 부착되어 안벽이나 도크내에 있으므로 실험하기가 곤란하지만, 관심 주파수대가 500 Hz 이상의 고주파이므로 날개와 축의 고정상태에 대한 영향이 적을 것으로 판단되어 공장내에 반목으로 지지되어 있는 상태에서 시험을 실시하였다(Fig.4참조).

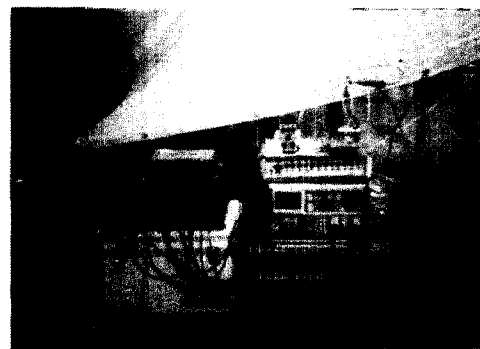


Fig. 4 Measuring setup for hammering test

주파수 응답함수를 구하기 위하여 0.7, 0.8, 0.9, 0.95, 1.0R 위치의 날개의 앞날, 뒷날과 같은 중앙에 12개의 가속도계를 설치하였고, 0.70R부터 1.0R까지 0.025R씩 증가해가면서 각 반경에 대하여 코드방향으로

로 날개 뒷날부분에 12점을 적절히 분포하여 총 156 점에서 충격 가진시험을 실시한 후 모드 실험 해석용 프로그램을 이용하여 진동수와 진동모드를 구하였다.

Fig.5에 프로펠러 날개 뒷날 0.95R 부근에서 1,962 Hz로 진동하고 있는 모드를 나타내었다.

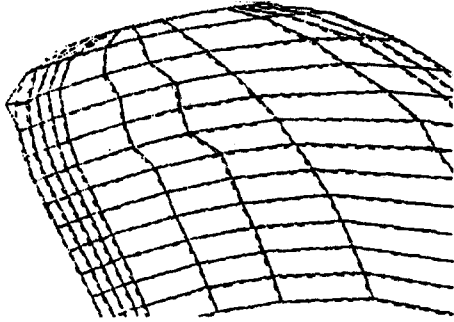


Fig. 5 Vibration mode shape of blade tip in the air at 1962 Hz obtained from the hammering test

2.2.3 진동해석과 가진시험 결과 비교

Fig.3과 Fig.5의 진동모드를 비교해 가면서 각각 관련있는 모드들을 찾아 대응시켜 Table 2와 같이 정리하였다.

Table 2 Comparison of blade natural frequencies in air obtained by FEM analysis and excitation test (Unit :Hz)

| Mode | FEM analysis | Excitation test |
|------|--------------|-----------------|
| 1 | 1,599 | 1,663 |
| 2 | 1,785 | - |
| 3 | 1,897 | 1,866 |
| 4 | 1,977 | 1,962 |
| 5 | 2,103 | 2,096 |
| 6 | 2,334 | - |

해석결과와 실험결과는 비교적 잘 일치하지만 대응되는 모드가 없거나 차이가 나는 경우도 보인다. 오차 발생 이유로서는 대상 주파수대가 높고 복잡한 프로펠러의 형상을 단순평판으로 모델링하여 발생한 오차와 충격 가진시험시 발생할 수 있는 계측오차에 기인한 것으로 보여진다.

2.3 수중 진동특성

2.3.1 진동해석 결과

문제가 되었던 900 Hz 및 1,000 Hz 성분과 비교 검토하기 위하여 700~1,200 Hz 사이의 주파수에 대하여 고유진동수와 주파수 응답함수를 구하여 프로펠러의 수중에서의 동적특성을 구하였다(Fig.6과 Fig.7 참조).

Fig.6에 프로펠러 날개가 진동하는 모드를 보여주고 있으며 공기중 프로펠러의 진동해석결과와 마찬가지로 뒷날의 국부 진동 모드가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

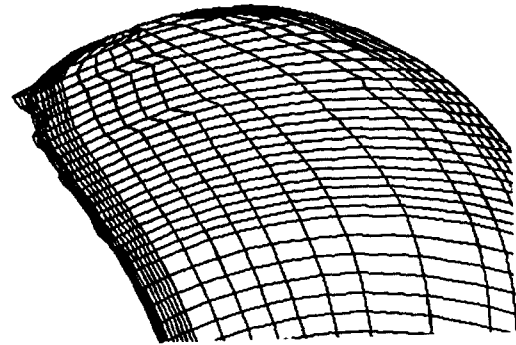
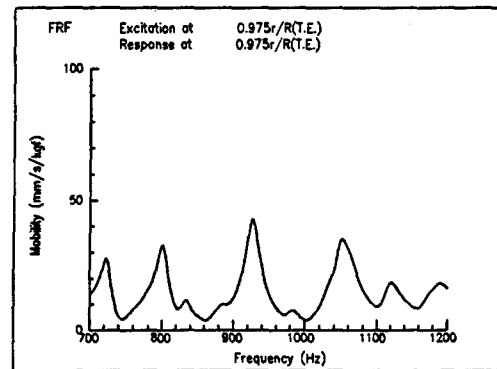


Fig. 6 Vibration mode shape of blade tip in water at 983 Hz obtained from finite element analysis

Fig.7(a)~Fig.7(c)에서 보는 바와 같이 0.9625R 위치에서의 주파수 응답함수 결과가 768 Hz, 856 Hz, 985 Hz, 및 1,119 Hz 부근에서 다른 위치보다 큰 값이 나타나고 있다. 반면 0.95R 위치에서는 1,187 Hz 에서 비교적 큰 값이 나타나고 있다.

2.3.2 선미수심에 따른 진동특성 변화

만재상태와 발라스트상태에서의 선미수심을 고려하



(a) 0.975R

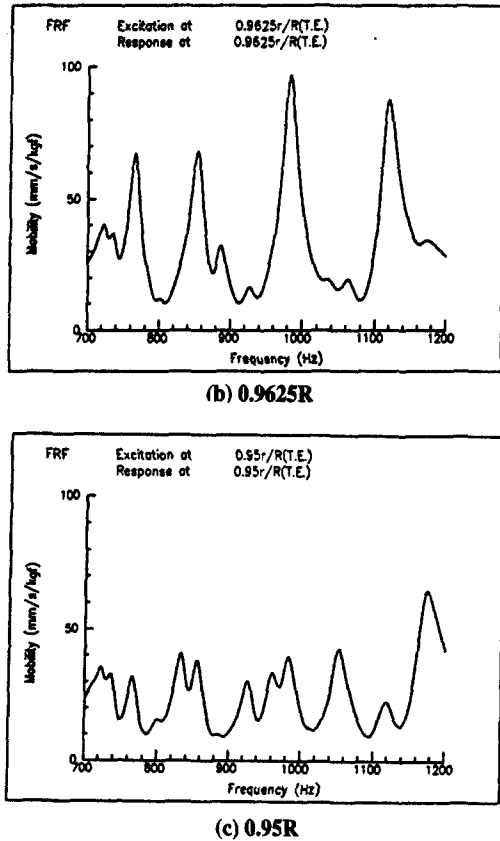


Fig. 7 Frequency response function of the trailing edge of a blade tip in water before modification

기 위하여 프로펠러 날개 끝이 간신히 잠긴 경우(선미 흘수 8m)와 4m 아래에 프로펠러가 잠겨 있는 경우(선미 흘수 12m에 대하여 MSC/NASTRAN을 사용하여 해석을 수행하였다.

선미 흘수가 12m인 경우와 8m인 경우의 위치를 주파수 응답함수를 보면 계산결과가 Fig.7과 같이 거의 일치하고 있으며 진동모드와 고유진동수도 변화가 없어서 선미수심 변화에 따른 프로펠러 날개 뒷날의 진동특성 변화는 거의 없다는 것을 알 수 있다[2].

2.3.3 진동해석과 실선계측 결과비교

실선 계측결과 (Fig.1)와 Fig.6~Fig.7의 결과를 아래 Table 3에 정리하였으며 비교적 잘 일치하고 있다.

3. 날개끝의 연삭가공 효과

Table 3 Comparison of blade natural frequencies in water obtained by FEM analysis and onboard measurement

(Unit : Hz)

| Mode | FEM analysis | Onboard measurement |
|------|--------------|---------------------|
| 1 | 768 | 775 |
| 2 | 856 | 900 |
| 3 | 983 | 1,000 |
| 4 | 1,119 | 1,145 |

여러차례 수행된 프로펠러 날개 뒷날의 연삭가공과 프로펠러축의 5mm spacer 삽입작업, 프로펠러의 교체등 여러가지 방음대책중에서 뒷날의 연삭가공이 효과적인 방음대책이었던 것으로 밝혀졌다[1]. 본질에서는 프로펠러 뒷날가공에 의한 진동특성 및 기진력의 변화에 대하여 검토하였다.

3.1 프로펠러 날개구조의 진동특성 변화

실제 연삭가공의 치수와는 조금 차이가 나지만 프로펠러 뒷날의 10mm 길이를 곡률 2mm로 연삭한 경우와 35mm 길이를 1mm 곡률로 연삭한 두가지 경우에 대하여 계산을 수행하였다.

연삭가공전·후의 해석결과를 비교해 보면 주파수 응답함수의 양상(프로펠러 뒷날위치와 고유진동수)이 거의 일치하고 있으나 주파수 응답값은 약간 차이가 난다. 10mm 연삭가공한 경우와 35mm 연삭가공한 경우, 프로펠러 뒷날에서의 주파수 응답함수결과를 보면 두경우의 진동특성이 거의 유사하다. 이로부터 프로펠러 날개의 뒷날을 연삭가공 하더라도 날개의 진동특성이 거의 바뀌지 않았음을 알 수 있다[2].

3.2 와류이탈 기진력의 변화

프로펠러 날개 단면에서는 유속한 뒷날 두께의 변화 때문에 단면마다 각기 다른 와류이탈 주파수가 생성된다. 각 날개 또한 수많은 곡부구조 고유진동수가 존재하며 적어도 0.75R 이상 미세부위에서 와류이탈 주파수와 공진되어 singing이 시작된다 일단 singing이 시작되면 주위 와류들 마저 이 주파수에서 이탈되어 기진력과 진동량이 증가하는데 이 현상으로 날개 뒷날의 일정부위가 공진하게 된다[3].

따라서 프로펠러의 날개끝 부위중 뒷날에서 singing이 시작되는 곳을 집중적으로 연삭가공하여 anti-singing edge 형태로 변경하는 것이 singing 방지에 가장 효과적이다. 즉 날개끝의 뒷날 형상이 후류

에서 와류강도와 주파수에 영향을 미치므로 대상선의 경우 edge의 경사각에 따라 기진력 크기가 변화된 것으로 유추된다[4]. 이로부터 연삭가공에 의한 날개끝의 고유진동수 및 주파수 응답함수 변화는 없었으나 기진력 감소에 의해 singing 현상은 제거되었음을 알 수 있다. 다만 와류 기진력 크기나 지진 주파수 변화량 규명에는 별도의 연구가 필요하다.

4. 결 론

- 1) 가진시험과 해석에 의한 공기중 프로펠러 날개의 진동특성은 몇개의 모드를 제외하고 비교적 잘 일치하고 있다.
- 2) 해석에서 얻은 수중 프로펠러 날개의 고유진동수가 실선계측 주파수와 비교적 잘 일치하고 있다.
- 3) 주파수 응답함수결과를 보면 0.95~0.975R 날개 끝부위의 뒷날이 공진하였을 가능성이 높다.
- 4) 선미 수심면화에 따른 날개끝의 고유진동수 변화는 거의 없다.

- 5) 프로펠러 날개끝 부위중 뒷날의 연삭가공에 의한 고유진동수 및 주파수 응답함수 변화는 거의 없었던 반면 와류이탈 기진력의 감소로 인하여 singing 현상이 제거된 것으로 유추된다.

참 고 문 헌

- [1] 최균일, 정균양, "프로펠러 끝단소음 (Singing of Propeller Trailing Edge)", 현대선박해양연구소 내부보고서, 1993.
- [2] 김동해, 정균양, "86,000 DWT 원유운반선 프로펠러의 singing 발생부위 확인에 대한 연구", 현대선박해양연구소 보고서 HMRI-93-08-R116, 1993.
- [3] Donald Ross *Mechanics of Underwater Noise*, Pergamon Press, 1976.
- [4] NKK, *Guide to Ship Vibration* (선박진동 설계지침), 1981.