

소형 선박 추진축계의 횡진동 공진 사례 연구

A Case Study for Whirling Vibration of the Propulsion Shafting System on the Small Marine Vessel

김태언* · 김진희** · 이돈출†
Taeun Kim, Jinhee Kim and Donchool Lee

기호 설명

- k_f : 베어링 유막강성계수
 h_{min} : 최소 유막두께(minimum film thickness)
 W : 부하용량(Load capacity)
 η_0 : 절대 점도
 ϵ : 편심율
 c : 베어링 틈새

박검사 시 베어링을 교체하도록 하고 있다.

2.2 베어링 유막강성계수

저널베어링은 건조한 상태나 윤활유가 있는 상태 둘다에서 반경방향 하중을 지지하기 위한 기계적 구성요소로 이 저널 베어링의 유막 강성은 다음과 같이 주어진다.

$$k_f = \frac{dW_r}{dh_{min}} \quad (1)$$

1. 서론

국내 연안 500톤 미만의 소형 강선 및 FRP선의 건조단계에서 선주의 요구사항이 없으면 횡진동(whirling vibration)에 대한 사전 검토가 상당 수 이루어지지 않고 있고 이루어졌다 할지라도 시운전시 발견되지 않으면 선체진동의 원인이 되어 문제가 발생될 수 있다.

추진축의 횡진동은 주로 축계의 횡진동 고유진동수가 프로펠러 날개의 기진주파수와 일치할 때 일어나거나 축 중심선의 부적합한 정렬, 축계의 불평형, 축의 휨 등이 원인으로 알려져 있다.

본 연구에서는 축을 지지하는 베어링 재료인 리그넘 바이트가 선박 운항 중에 마모됨에 따라 베어링 유막강성의 변화를 야기하게 되고 이변화로 횡진동의 고유진동수에 영향을 미친다고 추정하였다.

2. 베어링 유막강성계수의 이론적 검토

2.1 리그넘 바이트(Lignum Vitae)의 특성

국내에서 운항되고 있는 FRP어선들은 리그넘 바이트의 확장 시 필요한 베어링을 다음과 같이 선박 안전기술공단의 내규로 정하고 그 이상이 되면 선

(ㄱ) 긴 베어링 해

긴 베어링 해는 베어링의 폭/지름[b/d(=2r)]이 2보다 클 경우이고 베어링의 단위 폭 당 베어링 부하중 x, z 방향의 합성 값은 다음과 같이 주어진다.

$$w_r = (w_x^2 + w_z^2)^{1/2} \quad (2)$$

$$= \eta_0 wr \left(\frac{r}{c} \right)^2 \frac{6\epsilon[\pi^2 - \epsilon^2(\pi^2 - 4)]^{1/2}}{(2 + \epsilon^2)(1 - \epsilon^2)} \quad (3)$$

$$= \eta_0 wr \left(\frac{r}{c} \right)^2 \overline{W}_r \quad (4)$$

여기서, S는 Sommerfeld number이다. N은 초당 회전수의 각속도이고 P는 $P = W_r/2rb$ 일 때 예상된 베어링 지역 단위당 부하이다.

(ㄴ) 짧은 베어링 해

짧은 베어링 해는 베어링 지름/폭[d(=2r)/b]이 2보다 클 경우 적용할 수 있고 베어링의 단위 폭 당 베어링 부하는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$W_r = \eta_0 wrb \left(\frac{r}{c} \right) \left(\frac{b}{d} \right)^2 \frac{\epsilon}{(1 - \epsilon^2)^2} [16\epsilon^2 + \pi^2(1 - \epsilon^2)]^{1/2} \quad (5)$$

$$= \eta_0 wrb \left(\frac{r}{c} \right)^2 \overline{W}_r$$

3. 실선 사고 및 이론적 해석

본 사례 연구는 국내 90톤급 선박의 축계가 일부

* 선박안전기술공단
 ** 한국조선기자재연구원
 교신저자; 목포해양대학교 기관시스템공학부
 † E-mail: ldcvib@mmu.ac.kr
 Tel: (061) 240-7219, Fax: (061) 240-7201

파손된 것에 대해 실제 계측을 통해 비틀림진동 외 여러 수치를 확인한 결과 축계의 파손은 횡진동에 의한 것으로 추정되었다. 추진축계의 주요 요목은 Table 3과 같다.

Table 1 Specification of the propulsion shaft

Engine	Type	Four-stroke, V-Type
	Cyl.bore×stroke	165mm×190 mm
	Power at MCR	1428PS × 1600 rpm
	Firing order	1-6-3-6-2-4
	No. of cylinder	12 ea
Flexible Coupling	Maker	Geislinger
	Dynamic torsional stiffness	0.124MNm/rad
Gear Box	Maker	ZF
	Model	ZF 4650
	Reduction Ratio	2.03:1
Propeller	Type	Fixed pitch Propeller
	Dia.	about 1250mm
	Moment of inertia	18.420 kg·m ²
	Weight	185 kg
	NO. of Blade	3
	rpm	788.12

3.1 베어링 유막강성계수

본 선박에서 베어링 재질은 리그넘 바이트이고 베어링의 유막강성계수를 추정된 값은 다음과 같으며 틈새가 증가함에 따라 베어링 강성계수가 급격히 떨어지는 것을 알 수 있다.

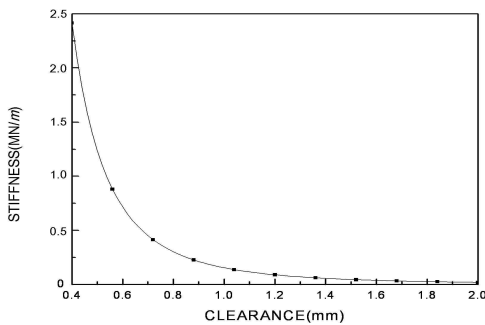


Fig. 1 No.1 Bearing stiffness

3.2 횡진동 이론적 해석 계산 결과

횡진동을 해석한 결과는 Table 4와 같다. 이를 분석하면 베어링의 마모 1mm이상에서 1절 고유진동수는 866cpm(cycles per min)으로 감속기를 통한 프로펠러축의 최대 회전수 788.1rpm에 아주 근접하게(MCR의 약109%)위치 하고 있다. 따라서 선

박을 계속 사용함에 따라 베어링 재질인 리그넘 바이트가 마모되면서 공진점이 주기관의 최대 회전수에 점점 근접 하게 되어 횡진동은 가속화 되고 축의 절손 직전까지 도달한 것으로 사료된다.

Table 2 Natural Frequency of Whirling vibration

틈새(mm)	0.4	1.0	1.5	2
1절 고유진동수 (cpm)	1043.7	866.41	866.74	866.70

4. 사고 해결을 위한 축의 개선

축계 파손 선박의 횡진동 문제를 해결하기 위해서 최종적으로 리그넘 바이트 대신에 포리에스텔 합성수지 베어링으로 재질을 변경하였다. 그리고 프로펠러 축경을 120mm에서 144mm로 증가 시켜 축의 1절 고유진동수를 올렸다. 그 결과 1절 고유진동수는 1160.35cpm으로 증가하여 프로펠러의 회전영역에서 약 147%정도 멀어지게 되었을(통상적으로 120%이상을 추천) 뿐 아니라, 직경대비 굽힘 응력 강도도 기존 축보다 약 82% 증가 되었다.

5. 결 론

이 논문에서는 고속디젤기관 선박에서 횡진동으로 인한 축계절손 사고에 대한 선박을 중심으로 케이스 연구를 수행하였으며 이를 요약 정리하면 다음과 같다.

- 1) 횡진동 계산에 핵심적인 베어링의 강성을 이론적으로 해석하고 이를 통해 횡진동을 해석하였다.
- 2) 해석 결과를 보면 베어링의 마모량 증가에 따라, 베어링 강성계수가 감소하고 횡진동의 고유진동수가 변화하는 것을 확인했으며, 또한 운항 중 횡진동의 고유진동수 변화에 따라 실선에서 횡진동의 공진을 야기할 수 있음을 확인하였다.
- 3) 본 사고에 대한 사례연구는 베어링 제작사에서 유막강성계수를 제공하지 않아 기존에 발표된 수식으로 추정 하였으며 타 베어링과 비교하여 마모치가 큰 리그넘 바이트를 사용할 경우 베어링 마모에 따른 유막강성계수 변화를 고려한 선박추진축계의 설계가 중요함을 확인하였다.