

VLCC의 최적 축계정렬해석 연구

김규창^{†*}, 김준기^{*}

현대중공업 의장설계3부^{*}

A Study on Optimum Shaft Alignment Analysis for VLCC

Kyu Chang Kim^{†*} and Jun Gi Kim^{*}

Ship Outfitting Design Department No. 3, Hyundai Heavy Industry^{*}

Abstract

Recently, in VLCC, shafting system is stiffer due to large engine power whereas hull structure is more flexible due to scantling optimization, which can be suffered from alignment damage by incompatibility between shafting and hull. In this study, shafting system without stern tube forward bush was adapted for less sensitive system against external factors. Also, shaft alignment analysis was considered with hull deflection at various ship loading conditions and stern tube after bush of long journal bearing was evaluated by static squeezing pressure and dynamic oil film pressure with sloping control. Whirling vibration was also reviewed to avoid resonance with propeller blade order. So, reliable shafting design for VLCC could be achieved through optimized alignment analysis for the system without stern tube forward bush.

※Keywords: Stern tube after bush(선미관 후부베어링), Stern tube forward bush(선미관 전부베어링), Influence No.(베어링 영향계수), Partial slope(부분 기울기), Squeezing pressure(압착압력)

1. 서론

최근 선박의 대형화로 선미관 후부베어링(Stern tube after bush)에서 발열사고가 다수 발생되었다. 특히 VLCC는 엔진 출력이 크고 축 직경이 증가하는데 반해 선미관 전부베어링(Stern tube

forward bush)과 후부베어링간의 간격이 상대적으로 짧아져, 선체변형에 대해 축계가 따라가지 못하고 베어링부에서 과도한 국부하중이 걸려 발열 현상으로 이어지고 있다. 따라서 출수가 큰 VLCC에서 선체변형에 유연한 축계배치가 필요하며, 기존의 축계만 고려하는 정렬 해석으로는 해결할 수 없고 선체와 축계를 동시에 고려하는 축계정렬 해석이 필요하게 되었다. 또한 길이가 긴 후부베어링은 축 하중을 투영면적으로 나눈 기존의 평균압력보다는 국부압착압력을 계산하여 이를

† 주저자, E-mail: shaft@hhi.co.kr
Tel: 052-230-3783

낮출 수 있는 정렬해석이 필요하게 되었다.

따라서 본 연구에서는 전부베어링을 없애고 중간베어링을 뒤로 약간 이동시켜 선미관내의 베어링 간격을 넓혀 축계배치를 좀더 유연하게 하였으며, 선박의 하중조건에 따른 선체변형을 고려하여 베어링 하중 계산을 수행하였다. 또한 후부베어링에는 후방부의 국부압착압력과 유막압력해석을 수행하였으며, 횡진동 해석으로 공진유무를 점검하였다.

따라서 VLCC에서 후부베어링의 발열문제를 사전에 차단하고, 최적의 축계배치 및 정렬해석 방안을 마련해 보았다.

2. 축계 배치 와 베어링 영향계수

축계 배치에 있어서 축계의 유연성을 나타내는 척도로 베어링 영향계수 (Influence Number) 가 사용되는데, 이는 각 베어링의 지지점 위치가 동일 수평면 상에 있고 그중 한 개의 지지점 만이 단위높이(통상 0.1mm) 만큼 상승 혹은 하강 하였을 때 다른 베어링의 반력변화량을 나타낸다. 주로 축의 강성 및 베어링 거리에 의해서 결정되는데 베어링 영향계수가 낮을수록 선체변형에 더 유연하다고 할 수 있다

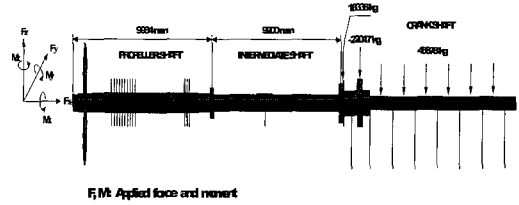
최근 GL 선급에서는 축계 베어링의 최대간격을 $L \leq 450 \times \sqrt{\text{축직경}}$ 로 허용하며 적정 간격을 약 70 ~ 90 % 로 추천하고 있다.

따라서 VLCC에서 선미관내 후부베어링과 전부베어링간의 간격이 매우 짧으므로 Fig. 1의 (b)처럼 전부베어링을 없애고 중간베어링을 약간 뒤로 이동시켜 각 베어링간 적절한 간격을 유지한 후

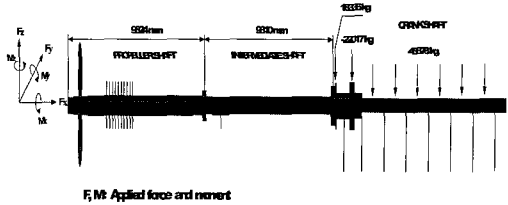
Table 1 Bearing influence no. (Full load)

전부 베어링	베어링	후부 베어링	전부 베어링	중간 베어링	엔진 베어링1	엔진 베어링2
있는 경우	전부 베어링	-1.6	5.5	-4.4	0.8	0
	중간 베어링	1	-4.5	4	-1.7	0.3
없는 경우	중간 베어링	-0.85	---	1.32	-1.22	0.2

Unit : tons/0.1 mm up



(a) Shafting arrangement with s/t forward bush



(b) Shafting arrangement without s/t forward bush

Fig. 1 Shafting arrangement for VLCC

베어링 영향계수를 비교해보았다. 아래 Table 1에서 보는바와 같이, 전부베어링이 있는 경우보다 없는 경우의 축계 베어링 영향계수가 훨씬 적게 계산되므로 더 유연함을 알 수 있었다.

3. 축계 정렬해석 방법

3.1 축계 정렬해석 시 고려사항

VLCC 축계모델 해석 시 다음사항을 고려하였다.

- 하중조건에 의한 선체변형 영향
- 축계 시스템의 보 요소 모델링
- 엔진가동에 의한 열팽창효과
- 프로펠러 편심 추력 및 하중
- 해수와 오일의 부력
- 화이트메탈 후부베어링의 압착압력분포
- 화이트메탈 후부베어링의 유막압력분포

3.2 베어링 압력계산

길이가 긴 선미관 후부베어링의 발열사고는 프로펠러하중이 추진축(Propeller shaft)을 차지하게 하여 후방부에 지나친 국부압착압력이 작용하여 주로 일어난다. 추진축과 후부베어링 사이의 압력을

계산하기 위해서 Hertzian 접촉조건과 유한요소해석의 Gap 요소를 사용하여 단위 길이 당 반력 및 최대압력을 계산하였다. 그러나 길이가 그다지 길지 않는 중간베어링과 엔진베어링은 평균압력으로 충분하므로, 베어링하중을 투영면적으로 나눈 평균압력을 적용하였다.

3.3 선체의 하중조건 및 변형량

선체변형을 고려하는 선박의 하중조건으로 엔진 작동상태에서 Ballast 조건, Full Load 조건, Full Load + 6m Wave 조건을 각각 적용하였다. 아울러 각 조건에 대하여 열 효과도 동시에 고려하였다.

다음 Fig. 2는 VLCC의 엔진 룸과 선체 선미부를 유한요소해석을 통하여, 각 하중 조건에서 축의 후부베어링 끝단 과 엔진거더 끝단위치를 변형량 0로 하여 선체 상대 변형량을 나타낸 것으로, 축계베어링의 변위에 적용하였다

4. 베어링 하중 및 압력분포

4.1 베어링의 하중 및 평균압력

선미관 전부베어링이 없는 경우, 베어링높이 등 조정요소를 이용하여 선정한 최적 축계정렬해석에서 각 베어링들의 하중 및 평균압력은 다음 Table 2와 같이 계산되었으며, 각 베어링들은 허용하중과 압력한계를 벗어나지 않았다.

4.2 선미관 후부베어링의 압착압력 분포

기존의 전부베어링이 있는 축계의 경우, 선체변형을 고려하지 않고 축계 단독 및 평균 압력만으로 계산한 기존의 축계정렬 해석을 압착압력분포로 계산하니 후부베어링 후방부에 최대압력이 140 bar 까지 올라갔다[BV 100bar 허용].

그러나 전부베어링이 없는 축계에서, 선체변형을 고려하고 후부베어링의 후방부에 부분 기울기(Partial slope)를 1.9×10^{-4} radian 정도 주어 조정하니, Fig. 3에서 보논바와 같이 가장 엄한 조건인 Full Load + 6 m Wave 상태에서 후부베어링 후방부에서 72 bar 와 전방부에서 89 bar 까지 최대압착압력을 낮출 수 있었다.

4.3 선미관 후부베어링의 최대 압착압력 제어
기존의 선미관 전부베어링이 있는 축계에서는 후부베어링의 후방부에 최대압착압력이 발생하므로 후부베어링의 전체기울기(Total slope)와 후방부에 부분기울기(Partial slope)를 동시에 주어 최대압력을 낮추는 것이 효과적이었다.

그러나 전부베어링이 없는 축계에서는 후부베어링의 길이에 대한 효과, 중간베어링과 엔진베어링의 높이에 대한 효과 그리고 후부베어링 화이트메탈의 기울기에 대한 효과를 검토해본 결과, 최대압력을 낮추는 가장 큰 인자는 화이트메탈의 기울기를 주는 것으로 파악되었다.

아울러 후부베어링의 길이를 약간 늘여 평균압력을 낮춘 후 후방부에 부분기울기를 주어 최대압력을 낮추는 것이 더 효과적인 것으로 나타났다.

5. 선미관 후부베어링의 유막압력 해석

지널베어링의 유막해석은 몇 가지 가정을 통해 3차원 연속방정식과 평행방정식으로부터 유도되는 2차원 레이놀즈 방정식을 유한요소법으로 풀어 유막의 압력을 구한다.

베어링에 작용하는 하중의 크기는 앞에서 정적 하중분포계산 결과를 이용하여 후부베어링의 동적 상태에서 압력분포를 구하였으며, 베어링의 기울기와 오일 그루부 효과는 반영되었으나 베어링 내에서 축의 변형은 고려되지 않았다.

Full Load + 6 m Wave 조건에서 후부베어링의 최대압력은 정적에서 약 72 bar 였으나, Fig. 5에서 보논바와 같이 동적에서는 약 15 bar 로 떨어짐을 알 수 있었다. 아울러 전부베어링이 있는 축계와 없는 축계의 Full Load + 6 m Wave 상태에서 최적치를 선정한 후 후부베어링의 압력을 비교해 보니, 전부베어링이 없는 경우, 후부베어링의 최대압력이 정적상태에서는 더 높았으나 동적상태에서는 상대적으로 낮아지는 것을 알 수 있었다.

6. 횡진동 계산

선급에서 주로 횡진동을 문제 삼는 것은 횡진동

1차 모드가 프로펠러 1차 (즉 날개 4개인 경우 4차 = 76rpm/60 X 4 = 5.07 Hz) 와 만나는 경우이다. 전부베어링이 없는 축계의 Gyro 효과를 고려한 횡진동의 고유진동수를 계산하면 다음 Table 3 과 같이 공진의 우려는 없는 것으로 나타났다.

아울러 각 베어링의 강성을 자체 프로그램으로 계산하고 후부베어링의 강성변화를 0.2 ~ 2 배까지 고려해 보았으나 공진의 가능성이 없는 것으로 나타났으며, 감쇄를 고려하여 해석한 결과 복소 고유진동수가 20% 정도 더 증가하는 경향을 보였으므로 전반적으로 공진의 가능성은 더욱 희박해진다.

Table 3 Natural frequency of whirling vibration

	Transverse	Vertical	Remark
Mode 1	7.28(B) Hz	8.43(F) Hz	>> 프로펠러 5.07Hz
Mode 2	13.79(B) Hz	16.28(F) Hz	
Mode 3	19.48(B) Hz	22.64(F) Hz	

(B: Backward whirling, F: Forward whirling)

7. 결론

VLCC에서, 선미관 전부베어링이 없는 축계가 전부베어링이 있는 축계보다 선체변형에 유연하여 상대적으로 적응력이 우수하였으며, 선체변형에 따른 각 베어링의 하중 및 후부베어링의 최대압착 압력 등도 모두 양호한 결과를 얻었다.

아울러 본 해석과정을 통해서, 선박의 하중조건 별 베어링 하중 경향을 파악 할 수 있었으며, 후부베어링에는 압착압력기준 설계가 발열 방지에 더 효과적이었다. 그리고 후부베어링의 후방부 부분기울기를 주어 최대압력을 낮추는데 효과가 가장 크며, 횡진동의 공진 가능성은 없었다.

따라서 본 축계해석은 계측을 통해 확인이 필요하며, 향후 초대형 유조선이나 선미 구조가 짧은 호선에도 적용 할 수 있을 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

• 김희원, 박진화, 임도형, 2004, "VLCC 송유관 지

시대 균열 원인 조사를 위한 진동계측," 추계대한조선학회

- 정준모, 최익흥, 신상훈, 2004 "선체변형을 고려한 탄성 추진축계정렬 설계 및 해석", 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp.870 -877
- 신장룡, 허기선, 허주호, 2002, "추진축계에 대한 VLCC 선체변형의 영향평가", 대한조선학회 선박설계연구회 논문집, pp.177-182
- 신장룡, 허주호, 2002, "선체변형이 추진축계에 미치는 영향", 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp.428-431
- 신상훈, 최익흥, 2003, "선박 추진축 선미베어링 압력분포해석", 대한조선학회 추계학술대회논문집, pp. 492-495
- 임도형, 주원호, 배종국, 2002, "선미관 베어링의 윤활특성을 고려한 축계정렬해석", 대한조선학회 논문집
- 정준모, 최익흥, "309K DWT VLCC 의 선미구조 연성 및 축계정렬", HMRI-2000-11- R222, 2001
- 전효중, 1986, 선박동력 전달장치, 태화출판사
- ABS,2004, Guidance Notes on Propulsion Shafting Alignment
- DNV, 2004, Nauticus Machinery Machinery Calculation Package Manual
- GL, Rules & Guidance, Part 1 Chapter2, Section4, 2005
- Kozousek, V.M. et al., 2000, "Analysis and Survey Procedures of Propulsion Systems : Shaft Alignment", LR Technical Association Paper No. 5



< 김 규 창 >



< 김 준 기 >