

# VLCC 축계 시스템의 유연성 확보 방안에 관한 연구

신상훈<sup>1</sup>, 고대은<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>경운대학교 항공기계공학과, <sup>2</sup>동의대학교 조선해양공학과

## A Study on Flexibility Acquisition Method for VLCC Shaft System

Sang-Hoon Shin<sup>1</sup>, Dae-Eun Ko<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Aero Mechanical Engineering, Kyungwoon University

<sup>2</sup>Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dong-Eui University

**요약** VLCC 추진축계의 선미관 후부 베어링에서 주로 발생하는 발열 사고는 프로펠러 하중이 추진축을 처지게 하여 후방부에 과도한 국부압착압력이 작용하는 것이 주된 원인이다. 최근 VLCC는 엔진 출력이 크고 축 직경이 증가하는 반면 선미관 전부 베어링과 후부 베어링 사이의 간격이 상대적으로 짧아져 축계 시스템의 유연성이 저하되는 경향이 있으며, 이로 인해 발열 사고 가능성에 대한 우려가 커지고 있다. 본 연구에서는 선체의 변형에 대한 축계의 유연성을 확보하기 위한 방안으로 선미관 전부 베어링을 삭제하고 선미관 후부 베어링만을 설치한 새로운 축계 시스템의 적용 가능성을 검토하였다. 국부압착압력의 계산에 있어서는 접촉 너비를 따라 반 타원 형상의 압력 분포를 가정한 Hertzian 접촉 조건을 도입하였으며, 엔진 가동 상태의 프로펠러 하중, 열 효과 및 선체 변형을 고려하였다. 제안된 축계 시스템에 대한 해석을 통해 선미관 후부 베어링의 축 접촉면 재료인 화이트 메탈에 부분 경사를 추가 시공함으로써 설계 요구 조건이 만족됨을 확인하였다. 제안된 축계 시스템의 적용을 통해 발열 사고 예방을 위한 축계 유연성 확보 뿐 만 아니라 시스템의 단순화를 통한 설치비용의 감소 등 부가적인 효과도 기대할 수 있다.

**Abstract** The main reason for heat accidents occurring at the after stern tube bearing (STB) is excessive local pressure caused by the deflection of the propulsion shaft due to propeller loads. The probability of a heat accident is increased by the low flexibility of the shaft system in very large crude oil carriers (VLCCs) as the engine power and shaft diameter increase and the distance decreases between the forward and after STBs. This study proposed shaft system with only an after STB and no forward STB for a flexibility acquisition method for a VLCC shaft system under hull deformation. A Hertzian contact condition was applied, which assumes a half-elliptical pressure distribution along the contact width for the calculation of the local squeeze pressure. The propeller loads, heat effect, and hull deflection under engine operating conditions are also considered. The results show that the required design criteria were satisfied by building a partial slope at the white metal, which is the material at the axial contact side in the after STB. This system could reduce building cost by simplification of the shaft system.

**Keywords** : Heat accident, Hertzian contact condition, Partial slope, Shaft system, Stern tube bearing

### 1. 서론

선미관(stern tube)은 프로펠러 축이 선체를 관통하는 곳에 장착되는 장비로서 선내로 해수가 침입하는 것을

막는 동시에 프로펠러 축을 지지하는 역할을 한다. 일반적으로 선미관 베어링(stern tube bearing, STB)은 선미관의 전방과 후방에 설치되며[1], 선미관의 전방에 설치되는 베어링을 선미관 전부 베어링(fwd. STB)이라 하고,

\*Corresponding Author : Dae-Eun Ko(Dong-Eui Univ.)

Tel: +82-51-890-2594 email: deko@deu.ac.kr

Received September 4, 2017

Revised October 10, 2017

Accepted December 8, 2017

Published December 31, 2017

선미관의 후방에 설치되는 베어링을 선미관 후부 베어링 (aft. STB)이라 한다.

최근 VLCC 설계는 엔진 마력이 증가하고 엔진 위치가 선미로 이동함에 따라 축 길이는 짧아진데 반해 축 직경이 증가하는 경향으로 선체 변형에 따른 축계의 유연성이 떨어지는 문제가 있다. 또한, VLCC 선미관 내에서 전부 베어링과 후부 베어링 사이가 짧아져 축계의 유연성을 나타내는 척도인 베어링 영향계수(bearing influence number)가 증가하는 경향이 있다. 영향계수는 그 값이 커질수록 선체변형에 유연하지 못함을 의미한다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 선미관 전부 베어링을 삭제하고, 선미관 후부 베어링만을 설치한 축계 시스템의 적용 가능성을 검토하였다. 선미관 전부 베어링의 삭제가 가능하다면 작업 시간이 많이 소요되는 복잡한 선미관 시공을 간소화 하는 부가적인 효과도 기대할 수 있다.

선박 탑재 기계류 관련 가장 흔한 손상 사례가 프로펠러 축 베어링과 주기관 베어링의 손상이며, 그 중에서도 선미관 후부 베어링에서의 발생 빈도가 가장 크다[2]. 길이가 긴 선미관 후부 베어링의 발열사고는 프로펠러 하중이 추진축을 처지게 하고 이에 따라 후방부에 과도한 국부압착압력이 작용하여 일어나게 되는데, 선미관 전부 베어링을 삭제하면 후부 베어링에 하중 부담이 증가하여 국부압착압력이 더욱 증가할 우려가 있으므로 이에 대한 대책과 검증이 중요하다.

본 연구에서는 실적선인 318K VLCC를 검토 대상 선박으로 하였으며, 축계 해석 시 베어링 오프셋 및 선체 변형은 실제적인 실적선의 해석 자료를 적용하였다. 또한, 베어링의 접촉 모사(simulation) 및 반력 계산에는 Shin 등[3]의 연구에서도 적용한 바 있는 갭 요소(NASTRAN의 접촉 요소)를 도입하여 수행하였다.

## 2. 축계 배치

선미관 전부 베어링을 삭제한 318K VLCC 축계 시스템의 배치를 Fig. 1에 보였다. 선미관 전부 베어링 삭제로 인한 후부 베어링의 하중 부담을 줄여주기 위해 중간 축 베어링(intermediate shaft bearing)을 실적선에 비해 선미쪽으로 이동시켰으며, 후부 베어링의 길이는 2000

mm로 실적선에 비해 약 11% 늘려 주었다.

과거에는 선미관 전부 베어링과 후부 베어링의 레이크(rake)가 없도록 설치하였으나, 베어링 후방부에 과도한 국부압력이 발생하는 것을 막기 위해 최근에는 후부 베어링의 전방부를 높여주고 후방부를 낮추어 설치하고 있다. 제안된 축계 시스템의 선미관 후부 베어링 길이와 오프셋 및 레이크를 Table 1에 정리하였다.

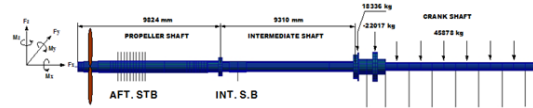


Fig. 1. Proposed shaft system for 318K VLCC

Table 1. Length and rake of after stern tube bearing

Bearing length (mm)	Aft. offset (mm)	Fwd. offset (mm)	Rake ( $10^{-4}$ rad)
2000	-0.23	0.29	2.60

## 3. 축계 해석

축계의 발열문제는 엔진 가동 상태에서 발생하므로 엔진 가동 상태의 프로펠러 하중, 열 효과 및 선체 변형을 고려하였다. 가장 대표적인 하중조건인 밸러스트 조건(ballast condition)과 만재적하 조건(full load condition)에 더하여 6m 파랑 상태에서의 만재적하 조건(full load + 6m wave condition)을 추가로 선정하였다. 각 하중조건에서의 선미 흡수와 배수량을 Table 2에 정리하였다.

Table 2. Loading cases

Case	Draft (m)	Displacement (ton)
Ballast	11.96	143,751
Full load	22.72	362,795
Full load + 6m wave		

### 3.1 하중조건에 대한 선체 변형

유한요소해석 결과를 활용하여 선체 변형을 고려한 연구[4], 선체 변형 데이터베이스를 구축하여 적용한 연구[5], 선체 변형에 대한 근사곡선을 이용한 연구[6] 등 축계 해석에 선체 변형을 고려하기 위한 연구가 활발히 진행되어 왔으며 최근에는 선박의 축계 해석 시 대부분 선체 변형을 고려하고 있다. 본 연구에서는 실적선의 유한요소해석 모델에 변경 사항을 반영하여 선체 변형을

고려한 축계 해석을 수행하였다.

유한요소해석을 통해 계산한 선체 변형의 상대 변위를 Fig. 2에 보였다. 선미관 후부 베어링의 후방부 끝 위치와 주기관 엔진 거더 위치를 기준값으로 고정시켜 나타낸 상대 변위이다.

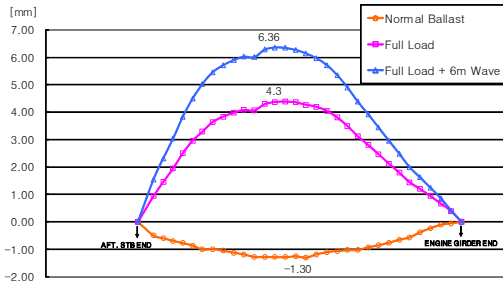


Fig. 2. Relative hull deflection

### 3.2 베어링 접촉 모델 및 오프셋

선미관 후부 베어링의 압착압력을 계산하기 위해 집요소(NASTRAN의 접촉 요소)를 적용하였다. Fig. 3에 보인 바와 같이 축의 상하 방향 및 좌우 방향으로 10개씩 총 40 개의 요소를 배치하였다. 선미쪽의 요소 위치를 1번으로 하여 차례로 번호를 부여함으로써 각 요소를 구분하였다.

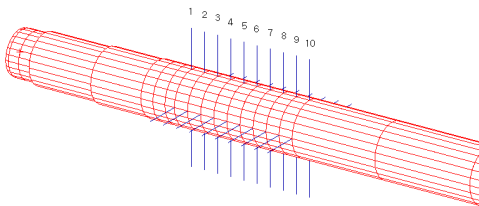


Fig. 3. Gap element for simulation of after STB

본 연구에서는 실제적인 해석 결과의 도출을 위해 실제 선의 축계 해석 시 사용된 오프셋을 가능한 적용하였다. 이는 엔진 가동 상태에서의 오프셋을 의미하며 그 값들을 Table 2에 정리하여 보였다.

Table 3. Bearing offsets

Aft. STB (mm)		Int. shaft Bearing (mm)	Main engine Bearing (mm)
Aft.	Fwd.		
-0.23	0.29	-2.37	-3.50

### 3.3 압착압력 계산

본 연구에서는 국부압력 계산을 위해 접촉 너비를 따

라 반 타원 형상의 압력 분포를 가정한 Hertzian 접촉 조건을 적용하였다[4]. 단위 길이당 반력( $Q$ )은 식 (1)과 같이 접촉 너비( $b$ )와 재료 물성치의 관계로 나타낼 수 있으며,  $E^*$ 와  $R$ 은 식 (2)와 (3)에 각각 나타내었다.

$$Q = \frac{\pi b^2 E^*}{2R} \quad (1)$$

$$E^* = \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \quad (2)$$

$$R = \frac{D_1 D_2}{D_1 - D_2} \quad (3)$$

식 (2)에서  $\nu_1$ 과  $\nu_2$ 는 각각 베어링 재료의 프아송 비(Poisson's ratio)와 축 재료의 프아송 비를 의미하며,  $E_1$ 과  $E_2$ 는 각각 베어링 재료의 영률(Young's modulus)과 축 재료의 영률을 의미한다. 또한, 식 (3)에서  $D_1$ 과  $D_2$ 는 각각 베어링의 내경과 축의 직경을 의미한다.

접촉에 의한 압력분포를 반 타원 형상으로 정의하였으므로 최대압력은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있으며, 여기에 식 (1)을 대입하면 식 (5)가 구해진다.

$$P_{\max} = \frac{bE^*}{R} \quad (4)$$

$$P_{\max} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sqrt{\frac{QE^*}{R}} \quad (5)$$

축계 해석에서 구한 반력을 식 (5)에 대입하여 최대국부압착압력을 구하고, 그 값이 재료의 허용치인 100 bar를 넘지 않아야 선미관 후부 베어링만을 설치한 축계 시스템의 적용이 가능하다고 할 수 있다.

## 4. 해석 결과

각 하중조건에서 선미관 후부 베어링에 발생하는 압착압력 분포를 Table 4에 정리하였다.

**Table 4.** Pressure distribution of after STB

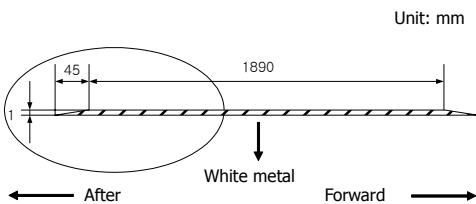
Station	Maximum local pressure (bar)		
	Ballast	Full load	Full load + 6m wave
1	119.6	116.8	112.9
2	94.3	91.1	80.2
3	69.6	51.5	55.9
4	45.6	0	0
5	0	0	0
6	0	0	0
7	0	0	0
8	12.2	27.4	23.5
9	28.7	64.0	71.9
10	64.0	84.9	98.7

축계 해석에 의한 결과를 보면, 모든 하중조건에서 선미관 후부 베어링의 후방부에 발생한 최대 압착압력 값이 100 bar를 넘어가고 있고, 6m 파랑 상태에서의 만재 적하 조건의 경우에는 베어링의 전방부에서도 허용치에 근접하고 있다.

Table 3의 오프셋 이외에도 많은 경우에 대해서 축계 해석을 수행해본 결과 6m 파랑 상태에서의 만재적하 조건의 경우에는 허용치를 만족하지 못하였다. 중간축 베어링을 선미쪽으로 이동시켜 선미관 후부 베어링의 하중 부담을 덜어준 것은 효과가 있었으나, 선미관 후부 베어링의 길이를 키운 것은 그 기대효과를 얻지 못하였으며 이는 선미관 후부 베어링의 중앙부와 축의 접촉이 제대로 이루어지지 않기 때문인 것으로 판단되었다.

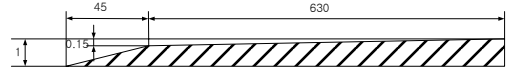
축과 베어링의 접촉을 개선하기 위해 Shin and Choe[4]와 Chong and Choe[7]의 연구에서 제시된 바 있는 부분 경사(partial slope) 시공 방안을 적용하였다. 이것은 베어링 재료인 화이트 메탈을 부분적으로 경사지도록 가공함으로써 축과의 접촉을 고르게 분포시켜 국부 압착압력을 저감시키고자하는 방법이다.

축과 접촉 표면을 형성하는 선미관 후부 베어링의 일반적인 화이트 메탈 형상을 Fig. 4에 보였다. 길이 2000 mm인 베어링의 일부 구간이 1980 mm의 화이트 메탈로 둘러 쌓여있는데, 화이트 메탈 양단의 45 mm는 그림과 같은 경사로 시공하는 것이 일반적이다.



**Fig. 4.** White metal shape of after STB

본 연구에서는 Fig. 4에서 타원으로 표시한 베어링 후방부에 Fig. 5와 같은 부분 경사를 추가 시공한 것으로 가정하고 축계 해석을 수행하였다. 현재 국내 조선소에서는 0.01 mm 단위의 가공이 가능하여 0.15 mm의 부분 경사 높이를 가정하였다.



**Fig. 5.** Partial slope of White metal shape

0.15 mm의 부분 경사를 추가로 가공한 경우에 대하여, 각 하중조건에서 선미관 후부 베어링에 발생하는 압착압력 분포를 Table 5에 정리하였다.

계산 결과를 보면, 벨리스트 조건에서 94.5 bar의 크기로 최대압착압력이 나타났으며, 모든 하중조건에 대해 선미관 후부 베어링의 모든 위치에서 압력의 허용치인 100 bar를 넘지 않고 있다. 전체적으로는 4번 위치에서 큰 압력이 발생하고 있는데, 이는 부분 경사의 높이가 다소 높아 베어링의 중앙부에 하중 부담이 크게 작용했기 때문으로 판단된다.

**Table 5.** Pressure distribution of after STB with partial slope height of 0.15 mm

Station	Maximum local pressure (bar)		
	Ballast	Full load	Full load + 6m wave
1	68.6	63.2	56.1
2	68.7	64.8	48.7
3	77.9	63.0	67.3
4	94.5	83.2	80.5
5	57.2	55.0	57.9
6	27.8	26.9	14.1
7	0	0	18.7
8	0	24.5	20.0
9	0	52.4	61.8
10	35.4	68.9	85.4

상기의 검토를 통해, 선미관 전부 베어링 삭제를 포함한 적절한 축계 배치와 부분 경사 시공법을 통해 유연성이 좋은 축계 시스템을 구축하는 것이 가능함을 확인할 수 있다. 또한, 선미관 후부 베어링의 길이를 실제선 대비 11% 키우고, 중간축 베어링을 선미쪽으로 이동시켜 선미관 후부 베어링의 하중 부담을 덜어준 것도 선미관 전부 베어링 제거 가능성에 일조한 것으로 사료된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 318K VLCC를 대상으로 축계의 유연성 확보를 위해 선미관 전부 베어링을 삭제하고 선미관 후부 베어링만을 설치한 축계 시스템의 적용 가능성을 검토하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 선미관 전부 베어링 삭제를 포함한 적절한 축계 배치와 부분 경사 시공법을 통해 유연성이 좋은 축계 시스템을 구축하는 것이 가능하며 축계의 손상 원인이 되는 발열 문제를 방지할 수 있다.
- 2) 선미관 전부 베어링의 삭제에 따른 선미관 후부 베어링의 추가 하중 부담은 중간축 베어링을 선미쪽으로 적절히 이동시켜 줌으로써 줄어든다.
- 3) 단순히 선미관 후부 베어링의 길이를 키우는 것만으로는 압착압력 경감 효과가 미미하지만, 축과 접촉 부분의 화이트 메탈에 부분 경사를 추가 시공함으로써 큰 효과를 기대할 수 있다.
- 4) 화이트 메탈에 부분 경사 시공 시 부분 경사의 높이에 따라 압착압력의 분포가 변화하므로 최적의 시공 조건을 결정하기 위한 추가 연구가 필요하다고 사료된다.
- 5) 선미관 전부 베어링을 삭제한 축계 시스템의 적용으로 시스템의 단순화를 통한 제작 및 설치비용의 감소 등 부가적인 효과가 기대된다.

## References

- [1] K. H. Cho, J. H. Lee and Y. G. Kim, "A Study on the Forced Fitting Method of Stern Tube Bearing for Propulsion Shafting in Ships", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 34, no. 5, pp. 653-660, 2010.  
DOI: <https://doi.org/10.5916/jkosme.2010.34.5.653>
- [2] B. J. Vartdal, T. Gjestland and T. I. Arvidsen, "Lateral Propeller Forces and their Effects on Shaft Bearings", First International Symposium on Marine Propulsors, Trondheim Norway, pp. 475-481, 22-24 June 2009.
- [3] S. H. Shin, Y. J. Sung, J. Y. Park and B. W. Han, "A Feasibility Study on the Application of Stern Tube Unit for the Twin Skeg LNG Carrier", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, vol. 53, no. 4, pp. 282-289, 2016.  
DOI: <https://doi.org/10.3744/SNAK.2016.53.4.282>
- [4] S. H. Shin and I. H. Choe, "Pressure Distribution Analysis for After Bush Bearing of Ship Propulsion Shaft", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, vol. 41, no. 3, pp. 35-40, 2004.  
DOI: <https://doi.org/10.3744/SNAK.2004.41.3.035>
- [5] J. M. Choung and I. H. Choe, "Development of Elastic Shaft Alignment Design Program", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, vol. 43, no. 4, pp. 512-520, 2006.  
DOI: <https://doi.org/10.3744/SNAK.2006.43.4.512>
- [6] J. S. Sun, Y. J. Lee and U. K. Kim, "The Flexibility Estimation of Alignment for Propulsion Shaft System using the Approximated Hull Deflection Curve", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 33, no. 1, pp. 28-36, 2009.  
DOI: <https://doi.org/10.5916/jkosme.2009.33.1.28>
- [7] J. M. Choung and I. H. Choe, "Pressure Analysis of Sterntube after Bush Bearing Considering Elastic Deflection of Misaligned Journal and Partial Slope of Bearing Bush", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, vol. 44, no. 6, pp. 666-674, 2007.  
DOI: <https://doi.org/10.3744/SNAK.2007.44.6.666>

### 신 상 훈(Sang-Hoon Shin)

[정회원]



- 1993년 2월 : 서울대학교 공과대학 조선해양공학과(공학석사)
- 2000년 2월 : 서울대학교 공과대학 조선해양공학과(공학박사)
- 1999년 3월 ~ 2017년 2월 : 현대중공업(주) 선박연구소
- 2017년 3월 ~ 현재 : 경운대학교 항공기계공학과 교수

<관심분야>

구조물의 설계/강도평가, 최적화기법 연구 및 최적설계

### 고 대 은(Dae-Eun Ko)

[정회원]



- 1993년 2월 : 서울대학교 공과대학 조선해양공학과(공학석사)
- 1998년 8월 : 서울대학교 공과대학 조선해양공학과(공학박사)
- 2002년 10월 ~ 2008년 2월 : 삼성중공업(주) 구조설계팀
- 2008년 3월 ~ 현재 : 동의대학교 조선해양공학과 교수

<관심분야>

선박 및 해양구조물 구조설계, 용접변형 및 용접설계