

라이닝 재료에 따른 저널 베어링의 압력 분포 특성

신상훈¹, 임채환¹, 고대은^{2*}

¹경운대학교 항공기계공학과, ²동의대학교 조선해양공학과

Characteristics of Pressure Distribution of Journal Bearing according to Lining Material

Sang-Hoon Shin¹, Chae Whan Rim¹, Dae-Eun Ko^{2*}

¹Department of Aero Mechanical Engineering, Kyungwoon University

²Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dong-Eui University

요약 저널 베어링인 선미관 후부 베어링의 후방부에 발생하는 발열 사고는 프로펠러 하중이 추진축을 처지게 하여 후방부에 과도한 국부압착압력이 작용하는 것이 주된 원인이다. 선미관 베어링의 라이닝 재료로 사용되는 화이트 메탈보다 영률이 훨씬 작은 재료를 사용한다면 축과의 접촉 면적을 크게 함으로써 발열 사고의 원인이 되는 국부압착압력의 저감이 가능할 것이다. 본 연구의 목적은 영률이 작은 재료로 만들어진 베어링 제품의 적용에 앞서, 축계 해석을 통해 새로운 제품 적용시의 압착압력 분포특성을 파악하고 허용 압력을 결정하는데 있다. 국부압착압력의 계산에 있어서는 접촉 너비를 따라 반 타원형상의 압력 분포를 가정한 Hertzian 접촉 조건을 도입하였으며, 엔진 가동 상태의 프로펠러 하중, 열 효과 및 선체 변형을 고려하였다. 해석 결과를 통해 영률이 작은 제품은 기존 제품을 적용한 실적선에 비해 국부압착압력의 상당한 저감이 가능함을 확인하였고, 또한 하중 조건이 바뀌더라도 압력 분포의 변화가 작아 강건 설계가 가능한 장점이 있음을 알 수 있었다. 본 연구를 통해 제시되는 제품의 성능 사양을 제조사가 보장한다면 영률이 작은 제품의 적용이 가능하리라 판단된다.

Abstract The main reason for the heat induced accidents occurring at the after stern tube journal bearing is the excessive local pressure caused by the deflection of the propulsion shaft due to the propeller loads. It is expected that the contact area could be enlarged and the local pressure reduced accordingly by using a lining material having a low Young's modulus instead of the existing white metal. The purpose of this work is to investigate the characteristics of the pressure distribution and determine the allowable pressure value in the case where bearing products made of materials having a low Young's modulus are used. In this study, the propeller loads, heat effect, and hull deflection are considered in the evaluation of the local pressure of the ship propulsion shaft. Also, the Hertzian contact condition was applied. From the analysis results in the case where a lining material with a low Young's modulus was used, it was found that a robust design could be achieved and the local pressure could be reduced effectively independent of the load conditions. It will be possible to produce new products made of materials having a low Young's modulus if the manufacturer confirms the performance specifications drawn by this study.

Keywords : Hertzian contact condition, Journal bearing, Local pressure, Robust design, White metal

1. 서론

원통 모양의 회전축이 원활하게 회전할 수 있도록 지

지해주며 회전축에 수직으로 하중을 받는 베어링을 저널 베어링(journal bearing)이라 한다. 저널 베어링은 하중이 크게 걸리는 부분을 지지하기 위해 원통 모양의 긴

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

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

Received June 19, 2017

Revised August 7, 2017

Accepted September 15, 2017

Published September 30, 2017

형상을 하고 있으며 베어링에 끌고루 하중이 전달되지 않으면 쉽게 발열사고가 발생한다. 큰 하중을 지지하는 저널 베어링의 예로 본 연구에서는 선미관(stern tube) 저널 베어링을 선정하였다.

선미관은 프로펠러 축이 선체를 관통하는 곳에 장착되는 장비로서 선내로의 해수침입 방지와 프로펠러 축을 지지하는 역할을 수행한다. 프로펠러로 회전력을 전달하면서 축을 지지하는 역할을 동시에 수행할 목적으로 선미관 베어링(stern tube bearing, STB)이 선미관의 전방과 후방에 각각 설치되는 것이 일반적이며[1], 선미관의 전방에 설치되는 베어링을 선미관 전부 베어링(forward stern tube bearing), 선미관의 후방에 설치되는 베어링을 선미관 후부 베어링(after stern tube bearing)이라 하며 모두 긴 원통 모양의 저널 베어링이다.

선박 탑재 기계류 관련하여 가장 흔한 손상 사례가 프로펠러 축 베어링과 주기관 베어링의 손상이며, 그 중에서도 가장 많은 손상이 선미관 베어링에서 발생하고 있다[2]. 대부분의 발열사고는 길이가 긴 선미관 후부 베어링에서 발생하는데, 이는 프로펠러 하중이 추진축을 차지게 하여 후방부에 과도한 국부압착압력이 작용하는 것이 주된 원인이다.

최근에는 후방부에 작용하는 하중 부담을 전방부에 나누어 주기 위해 전방부를 약간 높여주는 레이크(rake)를 고려하여 선미관 후부 베어링을 설치하고 있다. 레이크에 의한 하중 분배에는 한계가 있는데, 선미관 베어링의 라이닝 재료로 사용되는 화이트 메탈(white metal)과 축과의 접촉이 만족할 수 있을 만큼 고르게 분포되지 않기 때문이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 화이트 메탈의 영률(Young's modulus)보다 훨씬 작은 값을 갖는 라이닝 재료의 선미관 후부 베어링 제품이 등장하고 있으나, 아직까지 대부분의 조선소에서는 화이트 메탈로 구성된 선미관 베어링을 사용하고 있다.

본 연구의 목적은 영률이 작은 재료로 만들어진 베어링 제품의 적용에 앞서, 축계 해석을 통해 새로운 제품 적용시의 압착압력 분포특성을 파악하고 허용 압력을 결정하는데 있다. 또한, 연구 결과는 제조사로부터 제품 성능 보장을 위한 성능 테스트의 요구 기준으로 활용된다.

본 연구에서는 국부압착압력 계산을 위해 접촉 너비를 따라 반 타원 형상의 압력 분포를 가정한 Hertzian 접촉 조건을 도입하였다[3]. 해석 대상 선박은 실적선인 구형 LNG 운반선으로 선정하였으며, 축계의 베어링 오프

셋 및 선체변형은 실적선 해석 자료를 이용하였다. 베어링의 경사 모사 및 반력 계산은 Shin 등[4]의 연구에서 적용한 갭 요소(NASTRAN의 접촉 요소)를 도입하여 수행하였다.

2. 평균 압력과 국부 압력

축계 정렬 설계는 축계를 지지하는 베어링의 간격, 베어링의 길이, 베어링의 오프셋 등을 적절히 조정하여 베어링의 반력을 원하는 수준이 되도록 배치하는 설계 프로세스이다[5]. 축계 정렬 시 과거에는 선미관 베어링에 걸리는 하중이 평균 압력 8 bar가 되도록 설계하였다. 평균 압력은 선미관 베어링에 작용하는 하중을 베어링 내경 기준의 투영 면적으로 나눈 값이다. 하지만, 이러한 기준으로 설계된 많은 선박에서 선미관 후부 베어링의 발열 사고가 종종 보고되어왔다.

발열 사고의 방지를 위해 평균 압력의 설계 기준이외에도 국부 압력에 대한 설계 기준이 마련되어야 한다는 연구들이 활발히 진행되어 왔고[6], 현재는 많은 조선소들이 국부 압력이 100 bar가 넘지 않도록 하는 설계 기준을 적용하고 있다.

본 연구에서는 국부압력 계산을 위해 Shin 등[6]의 연구에서 사용한 방법과 같이 접촉 너비를 따라 반 타원 형상의 압력 분포를 가정한 Hertzian 접촉 조건을 적용하였다. 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 ν_1 과 ν_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.

$$P_{max} = \frac{bE^*}{R} \tag{4}$$

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

축계 해석에서 구한 반력을 식 (5)에 대입하여 최대 국부압착압력을 구할 수 있으며, 그 값이 재료의 허용치를 넘지 않도록 해야 한다.

과거에는 선미관 전부 베어링과 후부 베어링을 레이 크가 “0”이 되도록 설치하였는데, 최근에는 선미관 후부 베어링의 후방부에 작용하는 하중 부담을 전방부에 나누어 주기 위해 전방부를 약간 높여주고, 후방부를 낮추는 레이 크를 고려하여 선미관 후부 베어링을 설치하고 있다. 이는 국부 압력을 줄이기 위한 방안이며, 평균 압력과는 무관하다. Fig. 1은 레이 크를 주어 선미관 후부 베어링을 설치하는 방식을 간략하게 설명하고 있다.

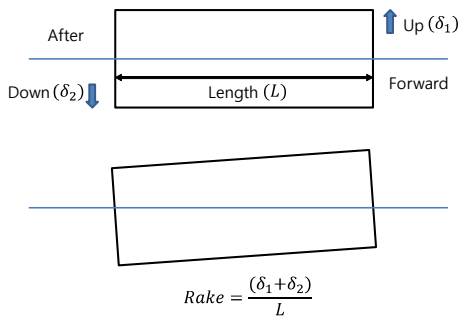


Fig. 1. Rake of after stern tube bearing

Table 1. Material property

Material	Young's modulus (N/mm ²)	Poisson's ratio
Shaft	206,900	0.3
White metal	53,000	0.3
New product	490	0.45

본 연구에서는 베어링의 재료 물성치에 대한 국부 압

력 계산을 수행하고 새로운 제품 적용 시 허용 할 수 있는 압력을 결정하고자 하였다. Table 1은 본 연구에서 적용한 주요 재료의 물성치를 나타낸다.

3. 축계 해석

축계의 발열문제는 엔진 가동 중에 발생하므로 엔진 가동 상태의 프로펠러 하중, 열 효과 및 선체 변형을 고려하였으며, 가장 대표적인 선체하중 조건인 밸러스트 조건(ballast condition), 만재적하 조건(full load condition)과 과량하중 상태에서의 만재적하 조건(full load + wave condition)을 선정하였다. Fig. 2는 실적선의 축계 해석에 적용한 해석 모델로, 본 연구에서도 이를 그대로 적용하였다.

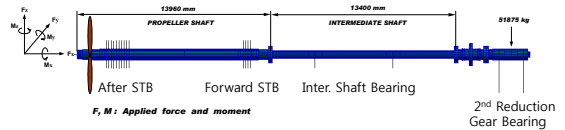


Fig. 2. FE model for shaft analysis

3.1 하중조건에 대한 선체 변형

유한요소해석 결과를 활용하여 선체 변형을 고려한 연구[6], 선체 변형 데이터베이스를 구축하여 적용한 연구[7], 선체 변형 근사곡선을 이용한 연구[8] 등 선체 변형 및 축계 해석에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔으며, 최근에는 축계 해석 시 대부분 선체 변형에 의한 영향도 함께 고려하고 있다.

본 연구에서는 Fig. 3과 같은 유한요소해석 모델을 이용하여 선체 변형을 고려한 축계 해석을 수행하였으며, 계산된 선체 상대 변위를 Fig. 4에 나타내었다. 상대 변위는 축이 지나가는 선미부분의 처음과 끝의 변위를“0”로 고정시켜 구한 값을 의미한다.

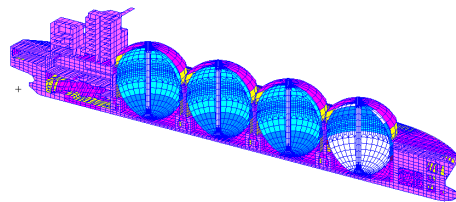


Fig. 3. FE model for considering hull deflection

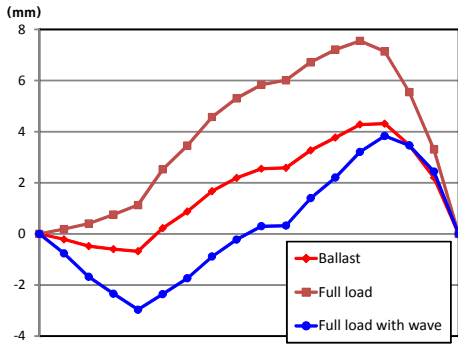


Fig. 4. Relative hull deflection

3.2 베어링 접촉 모델 및 오프셋

선미관 후부 베어링의 압착압력을 계산하기 위해 겹 요소(NASTRAN의 접촉 요소)를 적용하였다. Fig. 5에서와 같이 선박의 상하 방향 및 폭의 좌우 방향으로 10개씩 총 40개의 요소를 배치하였다. 선미쪽의 요소 위치를 1번으로 하여 차례로 번호를 부여해 줌으로써 각 요소를 구분하였다.

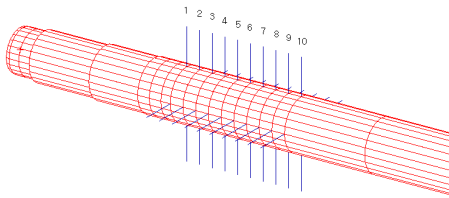


Fig. 5. Gap element for simulation of after STB

본 연구에서는 실적선 축계 해석 시 사용한 오프셋을 그대로 적용하였고, 상세한 내용을 Table 2에 나타내었는데, 이는 엔진 가동 상태에서의 오프셋을 의미한다. 또한 Table 3은 실적선에 적용한 레이크 값들을 나타낸다. 선미관 전부 베어링은 레이크를 두지 않았고, 선미관 후부 베어링에만 레이크를 고려하였다. 참고로 대부분의 경우 선미관 전부 베어링에는 레이크를 두지 않고 설치한다.

Table 2. Bearing offsets

Aft. STB (mm)	Fwd. STB (mm)	Int. Shaft Bearing (mm)		2 nd Reduction Gear Bearing (mm)	
		Aft.	Fwd.	Aft.	Fwd.
0	0	-0.35	-2.70	-5.40	-5.40

Table 3. Rake of stern tube bearings

Bearing	Aft. offset (mm)	Fwd. offset (mm)	Rake (10 ⁻⁴ rad)
After STB	-0.12	0.13	1.42
Forward STB	0	0	0

4. 해석 결과

영률이 작은 새로운 제품에 대해 축계 해석을 통해 구한 선미관 후부 베어링과 전부 베어링에 작용하는 총 반력을 Table 4에 나타내었다. 실적선에 대한 축계 해석 결과(Table 5)와 비교해 거의 유사한 결과를 보여주고 있으며, 새로운 제품에 대한 평균 압력은 선미관 후부 베어링 및 전부 베어링에서 각각 6.0 bar와 1.4 bar로 계산되었다.

Table 4. Bearing reaction at STB (new product)

Position	Bearing reaction force (ton)		
	Ballast	Full load	Full load + wave
After STB	77.0	76.9	77.4
Forward STB	5.8	5.8	3.9

Table 5. Bearing reaction at STB (existing ship)

Position	Bearing reaction force (ton)		
	Ballast	Full load	Full load + wave
After STB	77.4	77.3	78.2
Forward STB	5.2	5.2	3.8

국부압력에 있어서는 베어링 재료의 영률이 작으면 접촉 면적이 상당히 넓게 될 것으로 예상되어 기존 제품의 경우와는 상당히 다른 양상을 보일 것으로 예상되었다. 국부압력의 계산은 접촉 너비를 따라 반 타원 형상의 압력 분포를 가정한 Hertzian 접촉 조건을 적용하였고, 그 계산 결과를 Table 6에 보였다.

새로운 제품을 적용한 계산 결과는 기존 제품을 적용한 실적선에 대한 축계 해석 결과(Table 7)와 상당히 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 가장 큰 차이는 모든 하중조

건에서 최대 국부압력 값이 실적선의 1/10 수준으로 작게 나타나는 것이다. 그 이유는 각 위치에서의 접촉 너비가 상당히 커졌기 때문으로 판단된다. 또한 하중조건에 대한 민감성이 적다는 특징이 있다. 이는 하중 조건이 바뀌더라도 압력 분포의 변화가 매우 작다는 것을 의미하며 강건 설계(robust design)의 장점이 될 수 있다.

Fig. 6은 과량하중 상태에서의 만재적하 조건에서 선미관 후부 베어링의 전체적인 압력분포를 보여준다. 축과 베어링이 고르게 접촉하고 있음을 알 수 있다.

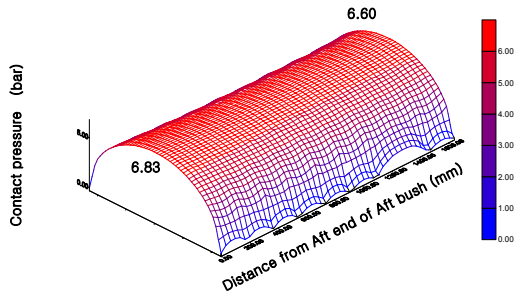


Fig. 6. Pressure distribution under full load + wave condition

실적선의 경우 최대 국부압력은 과량하중 상태에서의 만재적하 조건에서 발생하고, 그 값은 87.9 bar로 허용압력에 대해 약 14%의 여유를 갖고 있다. 따라서 새로운 제품을 적용하기 위해선 6.8 bar보다 14% 증가시킨 7.8 bar 이상의 국부압착압력에도 견딜 수 있음을 제조사가 보장하고, 신뢰성 있는 실험 데이터를 제공해주어야 할 것이다. 만약 새로운 제품이 7.8 bar 이상의 국부압착압력에도 견딜 수 없다면 재료 물성치가 검증된 기존 제품을 사용하는 것이 바람직하다.

Table 6. Maximum pressure distribution (new product)

Station	Maximum local pressure (bar)		
	Ballast	Full load	Full load + wave
1	6.8	6.8	6.8
2	6.7	6.7	6.8
3	6.6	6.6	6.7
4	6.5	6.5	6.6
5	6.5	6.5	6.5
6	6.5	6.5	6.5
7	6.5	6.5	6.5
8	6.5	6.5	6.5
9	6.5	6.5	6.5
10	6.6	6.6	6.6

Table 7. Maximum pressure distribution (existing ship)

Station	Maximum local pressure (bar)		
	Ballast	Full load	Full load + wave
1	79.9	80.9	76.3
2	66.2	67.4	70.6
3	52.3	54.0	55.0
4	38.8	41.2	38.5
5	47.2	30.5	43.4
6	44.3	46.3	35.8
7	47.6	49.2	52.2
8	56.2	57.3	57.1
9	68.4	69.2	66.5
10	82.8	83.3	87.9

5. 결론

본 연구에서는 선미관에서 축과 베어링의 접촉 면적을 높일 수 있는 영률이 작은 저널 베어링의 라이닝 제품에 대해 축계 해석 및 국부압착압력 계산을 수행하였으며, 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 영률이 작은 재료의 베어링 제품은 축과의 접촉 너비가 상당히 커져 국부압착압력이 상당히 낮아짐을 확인하였다.
- 2) 영률이 작은 제품은 하중조건에 대한 민감성이 적어 하중 조건이 바뀌더라도 압력 분포의 변화가 작으므로 강건 설계가 가능한 장점을 갖는다.
- 3) 충분히 높은 허용 압력을 제조사가 보장한다면 영률이 작은 제품의 적용이 가능하리라 판단된다.
- 4) 새로운 제품의 적용을 위해서는 축계 해석 및 국부압착압력 계산을 반드시 수행하여 제조사가 보장해야 하는 제품의 성능 사양을 제시해 주어야 할 것이다.

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] K. L. Johnson, Contact Mechanics, Cambridge University Press, 1989.
- [4] 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>
- [5] J. M. Choung, I. H. Choe and S. H. Shin, "A Study on Elastic Shaft Alignment Using Nonlinear Bearing Elements", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, vol. 42, no. 3, pp. 259-267, 2005.
DOI: <https://doi.org/10.3744/SNAK.2005.42.3.259>
- [6] 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>
- [7] 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>
- [8] 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>

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

임 채 환(Chae Whan Rim)

[정회원]



- 1982년 2월 : 서울대학교 공과대학 조선해양공학과(공학석사)
- 1993년 5월 : U. of Michigan(공학박사)
- 1994년 3월 ~ 2016년 8월 : 한국기계연구원
- 2016년 9월 ~ 현재 : 경운대학교 항공기계공학과 교수

<관심분야>

대형구조물 시험 평가, 풍력발전기 성능평가, 항공역학

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