

# 축 처짐과 선미관 저널 베어링 유막 압력의 상호작용을 고려한 추진축계 정렬 해석

조대승<sup>1,†</sup> · 장흥규<sup>1</sup> · 진병무<sup>2</sup> · 김국현<sup>3</sup> · 김성찬<sup>4</sup> · 김진형<sup>5</sup>  
부산대학교 조선해양공학과<sup>1</sup>  
(주)디섹 구조기본/상세설계부<sup>2</sup>  
동명대학교 조선해양공학과<sup>3</sup>  
인하공업전문대학 조선해양과<sup>4</sup>  
(주)크리에이텍 기술연구소<sup>5</sup>

## Propulsion Shafting Alignment Analysis Considering the Interaction between Shaft Deflection and Oil Film Pressure of Sterntube Journal Bearing

Dae-Seung Cho<sup>1,†</sup> · Heung-Kyu Jang<sup>1</sup> · Byung-Mu Jin<sup>2</sup> · Kookhyun Kim<sup>3</sup> · Sung-Chan Kim<sup>4</sup> · Jin-Hyeong Kim<sup>5</sup>  
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University<sup>1</sup>  
Hull Basic & Structure Design Part, DSEC Co. Ltd.<sup>2</sup>  
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Tongmyong University<sup>3</sup>  
Dept. of Ship and Ocean System, Inha Technical College<sup>4</sup>  
Research & Development Center, Createch Co. Ltd.<sup>5</sup>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Precise propulsion shafting alignment of ships is very important to prevent damage of its support bearings due to excessive reaction forces caused by hull deflection, forces acted on propeller and crankshaft, and so forth. In this paper, a new iterative shafting alignment calculation procedure considering the interaction between shaft deflection and oil film pressure of Sterntube Journal Bearing (SJB) bush with single or multiple slopes is proposed. The procedure is based on a pressure analysis to evaluate distributed equivalent support stiffness of SJB by solving Reynolds equation and a deflection analysis of shafting system by a finite element method based on Timoshenko beam theory. SJB is approximated with multi-point biaxial elastic supports equally distributed to its length. Their initial stiffness values are estimated from dynamic reaction force calculated by assuming SJB as single rigid support. Then, the shaft deflection and the support stiffness of SJB are sequentially and iteratively calculated by applying a criteria on deflection variation between sequential calculation results. To demonstrate validity and applicability of the proposed procedure for optimal slope design of SJB, numerical analysis results for a shafting system are described.

**Keywords** : Propulsion shafting alignment(추진축계 정렬), Oil film analysis(유막해석), Finite element analysis(유한요소해석), Sterntube journal bearing(선미관 저널 베어링), Iterative analysis(반복 해석), Convergence criteria(수렴 기준)

## 1. 서론

선박 추진축계 정렬은 선체 변형 및 프로펠러에 작용하는 편심 추력 등을 고려한 축계 구성요소의 최적 설계와 배치로 축계가 이상적인 베어링 반력으로 지지되어 마찰 또는 과부하로 인한

축 지지 베어링 손상이 발생하지 않도록 하는 것이다. 이를 위해서는 설계 단계에서의 축 지지 베어링의 종류와 배치는 물론 다양한 하중조건별 선체 변형과 베어링 반력을 고려한 지지 베어링의 오프셋(offset) 최적화가 필요하다. 한편, 1990년대 초반부터 선박의 대형화, 구조 설계 최적화 및 고장력강 사용의 증가 등으로 인해 선체 변형은 상대적으로 커진 반면, 추진시스템의 단위

회전수 당 출력 증가로 축계 강성은 증가하고 있다. 이로 인해 하중조건별 선체 변형에 따른 상대적 위치변화로 인해 선미관 저널 베어링(Sterntube Journal Bearing; SJB), 크랭크축 베어링 등의 축계 지지베어링에 과도한 반력 작용으로 인한 발열 현상과 손상사례가 다수 보고되었다 (ClassNK, 2006; Vartdal, et al., 2009).

상기와 같은 추진축계 지지 베어링의 손상사례 원인 분석과 사고 예방을 위해 추진축계 정렬해석의 정확도 향상을 위한 연구로 Shin and Choe (2004)는 SJB 부시의 유막압력 해석을 수행하고, SJB 부시에 부분 경사각을 도입하여 최대 국부 압력을 저감하는 방법을 제안하였으며, Choung and Choe (2007)은 탄성 변형된 축의 편심을 고려하여 부분 경사각이 적용된 후부 SJB 부시에 대한 유막압력 해석을 수행하였다. 또한, Choung, et al. (2005a, b)와 DNV (2012)에서는 종래 단일 지지점으로 고려하던 SJB 지지강성을 다점지지 탄성요소로 고려하는 방법을 적용하였다. 아울러, 축계 정렬에 영향을 미치는 선체 변형의 효율적 추정을 위한 선체 변형 데이터베이스 (Choung & Choe, 2006)와 선체변형 근사 곡선 (Sun, et al., 2009)을 활용하는 연구 등도 수행되었다. 한편, 선급과 일부 조선사에서는 선체 하중 조건 및 주기관 열하중 등으로 인한 선체 변형을 고려한 축정렬 해석 절차를 정립하고, 이를 적용한 축정렬 해석 프로그램 (Shaft Analysis AB, 2001; Choung & Choe, 2006; ClassNK, 2006; DNV, 2012; ABS, 2014)을 개발·활용하고 있다. 또한, Shin (2015)은 선박의 직진과 선회 시에 작용하는 프로펠러 편심 추력이 SJB에 작용하는 반력에 미치는 영향을 고찰한 바 있다.

상기의 선체 변형과 SJB 부시의 유막압력을 고려한 축계 정렬에 관한 기존 연구결과들은 프로펠러가 일정 속도로 운전하는 동적 상태에서의 SJB 부시와 프로펠러 축 사이의 윤활로 인한 유막 압력을 고려하는 유효 지지점들의 선형 또는 비선형 강성이 일정한 것으로 가정하고 축 정렬해석을 수행하고 있다. 그러나, 동적 상태의 유막압력은 프로펠러 축 처짐과 SJB 부시간의 간격에 따라 달라지므로 SJB의 유효지지 강성 평가에 활용된 축 처짐량과 축 정렬 해석 결과의 축 처짐량이 서로 다르다. 이에 본 연구에서는 축 처짐과 SJB 부시 유막 압력과의 상호작용을 고려한 동적 상태의 추진축계 정렬해석을 축 처짐량에 대한 수렴조건을 만족할 때까지 순환반복적으로 수행하는 방법을 제안한다.

제안된 방법은 SJB를 단일 지지점으로 가정한 상태의 축 처짐량을 1차적으로 산정한 후 이를 활용하여 SJB 부시와 프로펠러 축간의 간격을 고려한 유막압력 해석을 통해 SJB의 상하, 수평 및 상하-수평 연성 지지효과를 다점 탄성 지지요소로 고려한다. 한편, 이와 같이 산정된 SJB의 지지강성을 활용하여 계산된 축 처짐량은 SJB 지지강성 산정 시의 축 처짐량과 다르다. 이에 본 연구에서는 유막압력 해석에 의한 SJB 유효지지 강성 평가와 축 처짐량 산정을 순환반복적으로 수행하여 연속적으로 계산된 축 처짐의 변화량이 수렴조건을 만족할 때를 동적 평형상태로 간주하는 축계 정렬 방법을 적용하였다. 제안된 방법의 타당성 검토를 위해 98,000 DWT 산적화물선의 추진축계에 대한 일련의 수치해석을 수행하였다.

## 2. 축 정렬해석 적용 이론

### 2.1 선미관 베어링의 유막압력 해석

Fig. 1은 SJB 부시와 회전하는 프로펠러 축에 대한 개략도를 나타낸 것이다. 여기서,  $R$ 과  $L$ 은 부시의 반경과 길이,  $r$ 은 프로펠러 축의 반경,  $\omega$ 는 프로펠러 축의 회전수 ( $rad/s$ )이다. 부시의 선미관 끝단을 원점으로 하고 이의 중심축을  $x'$ 축으로 하는 직각좌표계  $x'y'z'$ 를 가정하면,  $x'$ 축에  $e(eV, eH)$ 만큼 편심된 프로펠러 축 외부 면과 부시 내부 면 사이에는 윤활유에 의한 유막이 형성되며, 원주 및 길이 방향 유막 두께는 부시의 설치 경사각, 부분 경사각 채용 유무, 프로펠러 축의 길이 방향 처짐 등에 따라 달라진다.

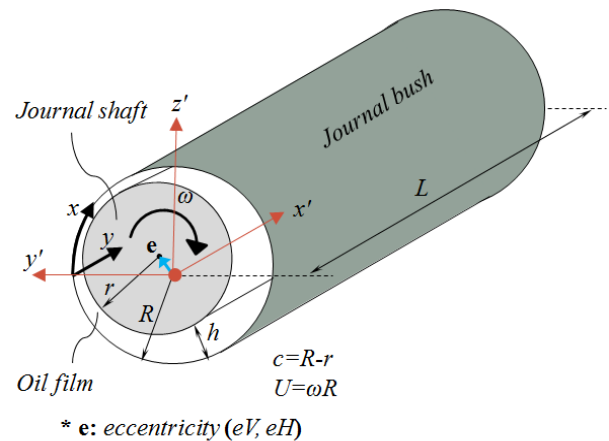


Fig. 1 Schematic diagram of propeller shaft and bush of sterntube journal bearing in dynamic rotating condition

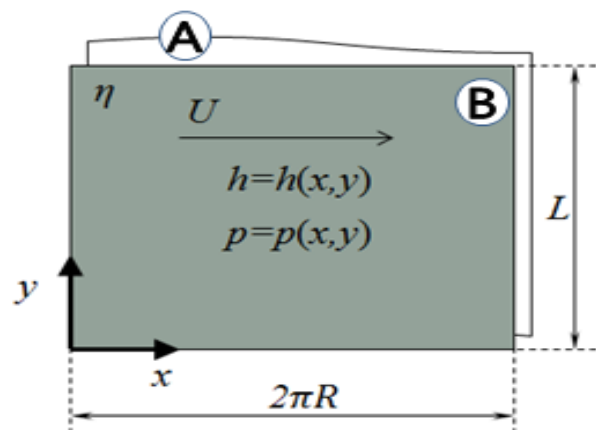


Fig. 2 Equivalent oil film problem

한편,  $y'$ 축과 부시의 내부면이 만나는 점으로부터 부시의 원주 및 길이 방향을 각각  $x$ 축과  $y$ 축으로 정의하고,  $y$ 축을 따라 부시를 절단하여 유막과 함께 펼치면, Fig. 1에 나타낸 문제는

Fig. 2에 보인 바와 같이 프로펠러 축 외부면에 상응하는 ㉠면이 고정되어 있고 부시 내부 면에 상응하는 ㉡면이 일정 속도  $U = \omega R$ 로 미끄러지는 상태에 대한 유막문제가 된다 (Hamrock, 1994). 여기서,  $h = h(x, y)$ 와  $p = p(x, y)$ 는 각각  $(x, y)$  위치에서의 유막 두께와 유막 압력을 나타낸다.

Fig. 2에 나타난 유막문제에 대한 정상상태(steady running condition) 압력분포는 유체에 대한 연속방정식과 Navier-Stoke 방정식으로부터 유도된 식 (1)의 Reynold 방정식으로 해석 가능하다 (Chung & Choe, 2007).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6\eta U \frac{\partial h}{\partial x} \quad (1)$$

여기서,  $\eta$ 는 유체 점성이다. 한편, 식 (1)은 식 (2)에 정의된 무차원 변수들을 이용하면 식 (3)과 같은 무차원화된 Reynold 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} X &= x/R, \quad Y = y/L \\ H &= H(X, Y) = h(x, y)/c \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} p^* &= p^*(X, Y) = \frac{p(x, y)c^2}{6\eta UR} \\ \frac{\partial}{\partial X} \left( H^3 \frac{\partial p^*}{\partial X} \right) + \left( \frac{R}{L} \right)^2 \frac{\partial}{\partial Y} \left( H^3 \frac{\partial p^*}{\partial Y} \right) &= \frac{\partial H}{\partial X} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $X, Y$ 는 무차원 위치좌표,  $c (=R-r)$ 은 부시 반경  $R$ 과 프로펠러 축 반경  $r$ 의 차이이고,  $H$ 는 무차원 유막두께,  $p^*$ 는 무차원 압력이다.

식 (3)은 특수한 경우를 제외하곤 해석해가 존재하지 않으므로 유한요소법, 유한차분법 등의 수치해석 방법으로 근사해를 구할 수 있다. 본 연구에서는 유한차분법을 적용하여 유막 압력해석을 수행하되 압력구배가 커질수록 작은 크기의 유한차분요소 사용으로 인한 연산부담을 완화하기 위하여 식 (4)에 나타난 보겔폴 인자(Vorgelphol parameter)를 도입하였다 (Stachowiak & Batchelor, 2005).

$$M_v = p^* H^{1.5} \quad (4)$$

식 (3)에 보겔폴 인자를 적용하면 유막해석을 위한 지배방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial^2 M_v}{\partial X^2} + \left( \frac{R}{L} \right)^2 \frac{\partial^2 M_v}{\partial Y^2} = f M_v + g \quad (5)$$

여기서,

$$f = \frac{3 \left[ \left( \frac{\partial H}{\partial X} \right)^2 + \left( \frac{R}{L} \right)^2 \left( \frac{\partial H}{\partial Y} \right)^2 \right]}{4H^2} + \frac{3 \left[ \frac{\partial^2 H}{\partial X^2} + \left( \frac{R}{L} \right)^2 \frac{\partial^2 H}{\partial Y^2} \right]}{2H}$$

$$g = \frac{\left( \frac{\partial H}{\partial X} \right)}{H^{1.5}}$$

식 (5)의 수치해석은 Fig. 2에 나타난  $x-y$  평면상에 정의된 유막 문제를  $X-Y$  평면으로 사상(mapping)하고, Fig. 3에 나타난 바와 같이  $X, Y$  방향으로 각각  $M, N$ 개의 분할요소로 나누면, 절점 위치  $(i, j)$ 와 절점 간격  $\Delta X (= 2\pi/M)$ ,  $\Delta Y (= L/N)$ 을 이용하여 보겔폴 인자  $M_v$ 와 무차원 유막두께  $H$  및 이들의 1차 및 2차 도함수에 대한 중앙차분근사식을 식 (5)에 대입하면 다음 식이 도출된다.

$$\begin{aligned} M_v^{i,j} &= \{ c_1 [M_v^{i+1,j} + M_v^{i-1,j}] \\ &\quad + c_2 [M_v^{i,j+1} + M_v^{i,j-1}] \\ &\quad - g^{i,j} \} / [2c_1 + 2c_2 + f^{i,j}] \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,

$$\begin{aligned} f^{i,j} &= \frac{3}{4(H^{i,j})^2} \left[ \left( \frac{H^{i+1,j} - H^{i-1,j}}{2\Delta X} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + \left( \frac{R}{L} \right)^2 \left( \frac{H^{i,j+1} - H^{i,j-1}}{2\Delta Y} \right)^2 \right] \\ &\quad + \frac{3}{2H^{i,j}} \left[ \left( \frac{H^{i+1,j} - 2H^{i,j} + H^{i-1,j}}{(\Delta X)^2} \right) \right. \\ &\quad \left. + \left( \frac{R}{L} \right)^2 \left( \frac{H^{1,j+1} - 2H^{i,j} + H^{i,j-1}}{(\Delta Y)^2} \right) \right] \\ g^{i,j} &= \frac{H^{i+1,j} - H^{i-1,j}}{2\Delta X (H^{i,j})^{1.5}} \end{aligned}$$

$$c_1 = 1/(\Delta X)^2$$

$$c_2 = \left( \frac{R}{L} \right)^2 \frac{1}{(\Delta Y)^2}$$

이고, 상첨자  $i (= 1, \dots, M+1)$ ,  $j (= 1, \dots, N+1)$ 은 요소 분할 절점 위치를 나타낸다.

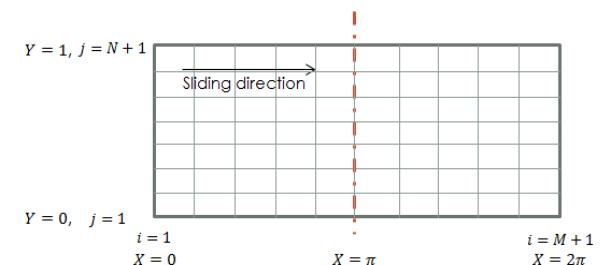


Fig. 3 Subdivision of oil film field

식 (6)의 우변은 절점  $(i-1, j)$ ,  $(i+1, j)$ ,  $(i, j-1)$ ,  $(i, j+1)$ 에서의 보겔폴 인자와 무차원 유막두께 값으로, 좌변은 절점  $(i, j)$ 에서의 보겔폴 인자로 구성되어 있다. 이는 기 입력

또는 이전 단계에서 산정된 우변의 값들을 이용해 새로운 좌변의 값을 구하고 이를 반복해 수렴해를 구하기 위함이다. 본 연구에서는 식 (6)의 수렴해를 구하기 위하여 가우스-자이델 반복법 (Gauss-Seidel iteration method)를 적용하였다 (Press, et al., 1986). 또한, 반복계산 시 초기조건은

$$M_{v,1}^{i,j} = 0 \quad (i = 2, 3, \dots, M; j = 2, 3, \dots, N) \quad (7)$$

와 같이 정의하였으며, 부시 양단 ( $Y = 0, 1$ )에서의 오일 압력 경계조건(pressure release condition)과 Fig. 1에서  $y$ 축을 따라 절단된 선 ( $X = 0, 2\pi$ )에서의 연속조건은 각각 식 (8)과 식 (9)를 적용하였다.

$$M_{v,k}^{i,1} = M_{v,k}^{i,N+1} = 0 \quad (8)$$

$$M_{v,k}^{i,1} = M_{v,k}^{M+1,j} \quad (9)$$

여기서, 하첨자  $k$  ( $= 1, 2, \dots$ )는 반복차수이다.

한편, 상기 계산에 있어서 식 (10)에 나타난 바와 같이 유막 내부에서는 압력 강하로 인한 공동(cavity)이 발생하지 않는다는 조건을 적용하였다.

$$M_v^{(k)}(i, j) \geq M_{v,cav} = 0 \quad (10)$$

## 2.2 축정렬 해석을 위한 보 구조물의 유한요소해석

추진축계의 상하 및 수평 방향에 대한 처짐, 굽힘모멘트, 전단력, 베어링 반력 등의 해석은 Timoshenko 보 이론에 기반한 유한요소해석 프로그램을 자체 개발하여 수행하였다. 개발된 프로그램은 SJB 부시 내부 유막의 상하방향 지지강성만을 고려하던 선행 연구 (Cho, et al., 2015)를 개선한 것으로서 베어링부의 경계조건과 오프셋(offset), 탄성 지지 요소, 축계 지중과 체인력(chain force) 및 추력 모멘트 등의 외력은 물론 SJB 부시에 작용하는 유막압력이 추진축을 지지하는 상하, 수평 및 상하-수평 연성 강성을 고려한 축정렬 해석을 수행할 수 있다.

한편, 전술한 유막압력 해석 방법을 활용하여 SJB의 지지 효과를 고려하기 위한 다점지지 탄성요소의 등가 강성은 다음의 절차로 산정하였다.

- 1) 축 정렬 계산 방향 (상하 또는 수평)으로 축 중심 위치를 미소 크기  $\pm \epsilon$ 만큼 이동한 경우에 대한 유막압력 해석 수행
- 2) 탄성 지지요소의 등가 강성은 식 (11)에 나타난 바와 같이 해당 요소가 위치한 구간의 압력을 길이 및 원주 방향으로 적분하여 구한 힘을 이용하여 유한차분법으로 산정

$$k_i = \frac{\int_{X_i}^{X_{i+1}} \int_0^{2\pi} p_{+\epsilon}(r, x) dr dx - \int_{X_i}^{X_{i+1}} \int_0^{2\pi} p_{-\epsilon}(r, x) dr dx}{2\epsilon} \quad (11)$$

여기서,  $p_{+\epsilon}(r, x)$ 와  $p_{-\epsilon}(r, x)$ 는 각각 축 중심 위치를  $+\epsilon$ 와  $-\epsilon$  이동 시의 원주  $r$  및 길이  $x$  위치에서의 유막 압력이고,  $X_i$ 와  $X_{i+1}$ 는 각각 해당 탄성 지지요소로 모델링하는 SJB의 길이 방향 시점과 종점을 나타낸다.

## 3. 축 처짐과 SJB 유막압력의 상호작용을 고려한 축 정렬 해석

동적 상태에서 SJB 부시 유막의 지지효과를 고려하기 위한 등가 다점지지 탄성요소의 강성 평가는 축 처짐량에 대한 수렴조건을 만족할 때까지 유막압력과 축 처짐을 순환반복적으로 수행하는 방법을 적용하였다. 이때, 등가 다점지지 탄성요소의 초기강성  $k_{i,ref}$ 는 동적상태 SJB를 단일지지 고정점으로 모델링한 경우에 계산된 SJB 반력  $R_{STB}$ 를 이용하여 식 (12)와 같이 산정하였다.

$$k_{i,ref} = \frac{R_{STB}}{C_E N_s}, \quad i = 1, 2, \dots, N_s \quad (12)$$

여기서,  $N_s$ 는 SJB 부시 유막 효과를 고려하기 위한 균일간격 다점지지 탄성요소의 개수이고,  $C_E$ 는 수치해석의 안정성을 도모하기 위해 도입한 초기 강성 평가 경험계수로서 본 연구에서는 5.0을 적용하였다.

한편, SJB 부시 유막 압력과 축 처짐량의 순환해석 과정에서 발생할 수 있는 수치발산 현상 저감을 위해 다음의 절차로 반복 해석을 수행하였다.

### 단계 1

- SJB 선수단으로부터 선수 측에 위치한 축의 최대 처짐량 허용치  $\delta_{max,ref}$  지정

### 단계 2

- 식 (12)로 산정한 다점지지 탄성요소의 초기 강성을 이용한 축 처짐 계산
- SJB 선수단으로부터 선수부에 위치한 축의 최대 처짐량  $\delta_{max,1}$ 이  $\delta_{max,ref}$ 보다 작은 경우  $\delta_{max,1}$ 를  $\delta_{max,ref}$ 로 대체

### 단계 3

- 단계 2에서 계산된 축 처짐량을 이용한 유막해석으로 SJB 지지강성 등가 다점지지 탄성요소 강성  $k_{i,j}$  평가
- SJB 지지강성의 과도한 변화를 방지하기 위해 다음 식으로 강성 변화량을 산정

$$k_{i,j+1} = k_{i,ref} + (k_{i,j} - k_{i,ref})/C_d \quad (13)$$

여기서,  $C_d$ : 강성 증분 조정계수로 1보다 큰 값  
 $j$ : 반복계산 차수

단계 4

- 단계 3에서 계산된  $k_{i,j+1}$  를 이용하여 축 처짐 해석
- 최대 축 처짐량  $\delta_{max,j+1}$  이  $\delta_{max,ref}$  보다 작은 경우  $\delta_{max,j+1}$ ,  $k_{i,j+1}$  를  $\delta_{max,ref}$ ,  $k_{i,ref}$  로 각각 대체

단계 5

- SJB 선수단으로부터 선수 측에 위치한 축 처짐량과 직전 축 처짐량 계산 결과의 최대 차이값  $\Delta\delta_{max}$  계산
- 축 처짐량 수렴 조건  $\Delta\epsilon$  (본 연구에서는 10-3 mm ~ 10-6 mm 적용)보다  $\Delta\delta_{max}$  ( $= |\delta_{max,ref} - \delta_{max,j+1}|$ )가 작은 경우에 계산을 종료하고, 큰 경우 단계 3부터 단계 5까지 반복 계산

상기의 방법에 의한 유막강성과 축 처짐의 순환반복 계산은 SJB가 물리적으로 타당한 위치와 경사각으로 설치되어야만 수치 해석의 안정성을 확보할 수 있다. 또한, SJB 부시의 위치, 단일 또는 이중 경사각의 타당성은 수렴된 축 처짐 해석 결과가 SJB 부시 내부에 실제 위치하는 가로 판단할 수 있다.

전술한 유막해석 및 축 처짐 반복계산 방법에 대한 개략적 계산 순서도는 Fig. 4에 나타내었다.

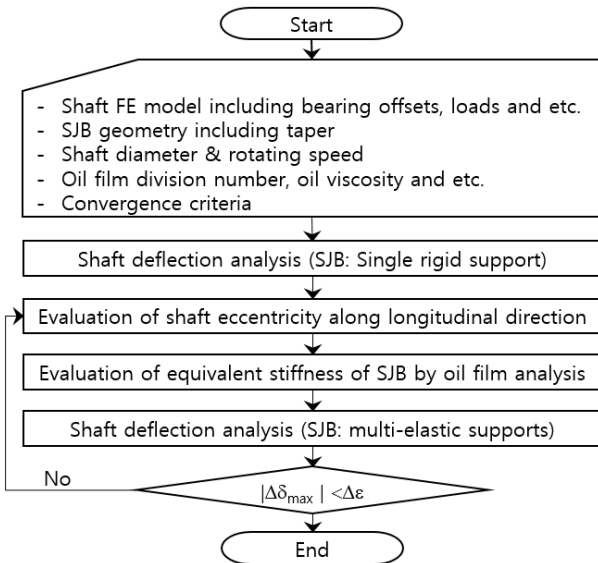


Fig. 4 Procedures of the proposed shaft alignment analysis

## 4. 수치해석 예 및 고찰

### 4.1 유막압력 해석 수치 검증 예

본 연구에서 적용한 유막압력 해석 방법의 정확도 검증을 위하여 Table 1에 나타낸 저널 베어링에 대한 수치해석을 수행하였다. Fig. 5에는 기존 유막해석 프로그램(reference)에 의한 무차원 압력 해석결과 (Stachowiak & Batchelor, 2005)와 본 연구에서 개발한 프로그램(Calculated)에 의한 무차원 압력 계산 결과를 함께 나타내었다. 이로부터 압력 분포에 대한 양자간의 부합

성이 매우 높을 뿐만 아니라 최대 무차원 압력이 각각 1.8407과 1.8641로서 1.3%의 차이를 나타내어 본 연구에서 개발한 유막 압력 해석 방법은 타당하다고 판단한다.

Table 1 Oil film analysis case to verify the adopted method

Bearing length $L$ (mm)		1,000
Shaft speed $\omega$ (rpm)		90
Inner radius of bearing $R$ (mm)		500
Shaft radius $r$ (mm)		499.9
Oil viscosity $\eta$ (Ns/mm <sup>2</sup> )		1.50e-8
Shaft eccentricity $e$ (mm)	$eV$ (vertical)	-0.08 at $Y=0$
		-0.08 at $Y=1$
	$eH$ (horizontal)	0.00 at $Y=0$
		0.00 at $Y=1$

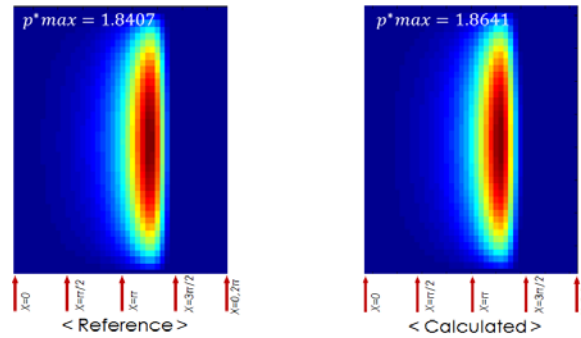


Fig. 5 Non-dimensional oil pressure for the validation problem

### 4.2 동적 상태 축계 정렬 수치해석 예

본 연구에서 정립한 축계정렬 해석 방법의 정확도와 유용성을 검증하기 위해 MAN B&W 6S60MC-C 주기관을 탑재한 98,000DWT 산적화물선에 대한 추진축계에 대한 수치해석을 수행하였다 (Ryu, 2009). 본 연구를 통해 개발한 프로그램을 이용하여 생성한 수치해석용 추진축계 모델은 Fig. 6에 나타내었으며, 이에 대한 축 및 동적 상태 오프셋(offset)을 포함한 베어링 제원은 Table 2와 Table 3에 각각 나타내었다. 또한, 프로펠러부의 100% 침수조건에서 축계 작용하중과 외력은 Table 4에 나타내었으며, 기타 상세 제원은 Ryu (2009)에 제시되어 있다. 한편, 수치해석에 있어서 프로펠러 편심 추력 등에 의해 작용하는 수평 방향 하중은 기존 수치해석 결과 (Ryu, 2009)와의 비교검토를 위해 고려하지 않았다.

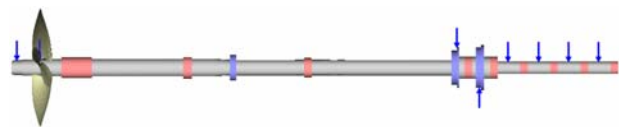


Fig. 6 Numerical model for shafting system

Table 2 Information on shafts

Shaft type	Length (mm)	Typical diameter (mm)
Propeller	7,569	565
Intermediate	7,398	490
Thrust	5,406	720
Equivalent crankshaft		389

Table 3 Bearing sizes and offsets in hot dynamic condition

Bearing		Inner dia. (mm)	Length (mm)	Offset (mm)
ID	Position			
1	Aft. SJB	565.9	1,130	0.0
2	Fwd. SJB	567.0+ $\alpha$	285	0.0
3	Intermed. shaft	495.0+ $\alpha$	240	-1.55
4	Thrust	720.0+ $\alpha$	234	-2.52
5~9	Crankshaft	389.0+ $\alpha$	234	-2.52

$\alpha$ : Clearance for fabrication

Table 4 Loads and forces at 100% submerged condition

Component	Magnitude
Propeller nut & cap weight	904 kg
Propeller weight	23,604 kg
Fly wheel weight	2,947 kg
Chain force	-104,000 N
Moving mass of crank shaft	159,400 N
Thrust moment at MCR (90 rpm)	CW 195,875 Nm

상기 축계의 동적 상태 (55°C, 90 rpm)에 대해 후부 SJB를 포함한 모든 베어링의 길이방향 중앙부를 단일 단순 지지점으로 모델링한 경우에 축계 처짐과 베어링 반력을 본 연구에서 개발한 프로그램으로 계산한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 이에는 Nastran (MSC, 2010)으로 수행한 처짐 및 베어링 반력 해석 결과와 기존 축 정렬 프로그램으로 해석한 베어링 반력 해석 결과 (Ryu, 2009)도 함께 나타내었는데, 서로 다른 프로그램으로 계산한 결과의 부합성이 매우 높음을 확인할 수 있다.

상기 동적 상태에 대해 후부 SJB 저널 부시의 설치 경사각이 수평 기준 하방으로  $0.2 \times 10^{-3}$  rad (=0.2 mm/m)인 경우에 대해 후부 SJB를 상하, 수평 및 상하-수평 연성 강성을 갖는 20개의 등간격 탄성지지 요소로 고려한 유막압력 및 축처짐 해석의 순환반복 계산을 수행하였다. 이때, 유막압력은 후부 SJB를 길이 및 원주 방향으로 각각 40 등분하고, 오일 점성은  $1.5 \times 10^{-8}$  Ns/mm<sup>2</sup>, 최소 유막두께는  $10^{-3}$  mm로 설정하고 수행하였다. 또한, 유막 모사 다점 탄성지지 요소의 최대 강성은  $10^8$  N/mm, 후부 SJB로부터 선수부에 위치한 축의 최대 변형 허용치는 2 mm의 제한조건을 부여하였으며, 유막 모사 탄성 지지

요소의 초기 강성은 후부 SJB를 단일지지로 모델링한 경우의 후부 SJB 반력 정보를 이용하여 식 (12)에 나타낸 방법으로 평가하였다. 아울러, 순환 반복 계산의 수렴조건은 축 최대 처짐량 변화량이  $10^{-5}$  mm보다 작은 경우로 설정하였다.

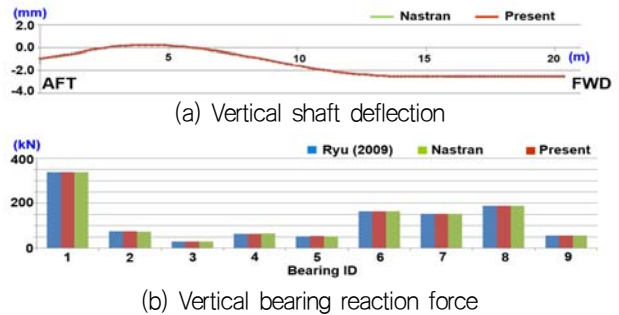


Fig. 7 Shaft deflection and bearing reaction force: Single rigid support model for aft SJB

상기의 조건과 방법으로 4회의 순환반복 계산으로 수렴조건을 만족한 축 처짐, 베어링 반력 해석 결과는 Fig. 8에 나타내었다. 이에는 최종 수렴한 유막 모사 다점 탄성 지지요소의 상하 및 수평 강성만을 반영하여 Nastran으로 해석한 결과도 함께 나타내었는데 상하 방향에 대한 결과는 상호간의 부합성이 매우 높음을 확인할 수 있다. 한편, Nastran을 이용한 수평 방향 축 처짐과 베어링 반력 해석결과가 모두 영의 값을 가지는 것은 SJB 유막의 상하-수평 연성지지 강성이 고려되지 않았기 때문이다. 또한, 순환반복 계산과정에서 축 처짐 변화량은 매우 작으나, SJB 유효 지지강성의 크기 변화는 다소 큼을 확인하였다.

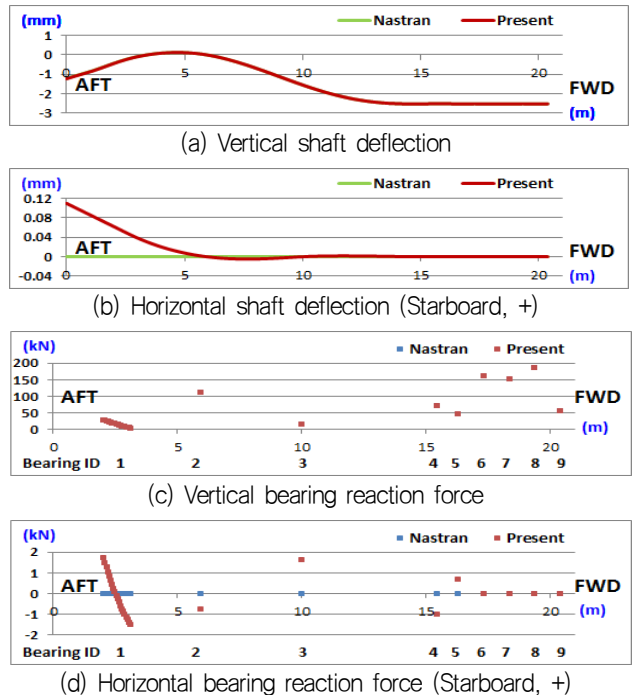


Fig. 8 Shaft deflection and bearing reaction force: Multi elastic spring model for aft SJB with installation slope of  $-0.2 \times 10^{-3}$  rad

후부 SJB의 설치 경사각이 0 rad에서 반시계 방향으로 회전한  $-0.5 \times 10^{-3}$  rad까지  $0.1 \times 10^{-3}$  rad 간격으로 변화할 때 후부 SJB 부시의 유막압력 분포는 Fig. 9에 나타내었다. 또한, 후부 SJB에 작용하는 반력 크기와 최대 유막압력 및 이의 발생 위치에 대한 해석 결과는 Table 5에 나타내었다. 이로부터 유막 해석을 적용하여 후부 SJB 반력을 평가한 결과는 단일지지로 고려한 경우보다 모두 낮게 평가됨을 확인할 수 있다. 또한, 최대 유막압력은 우현 측 하부에서 발생하며, 경사각이 커질수록 최대 압력 발생 위치가 선수부로 이동하며, 그 크기는 경사각이  $-0.3 \times 10^{-3}$  rad인 경우에 가장 작고, 경사각이 없는 경우에 가장 큰 값을 확인할 수 있다.

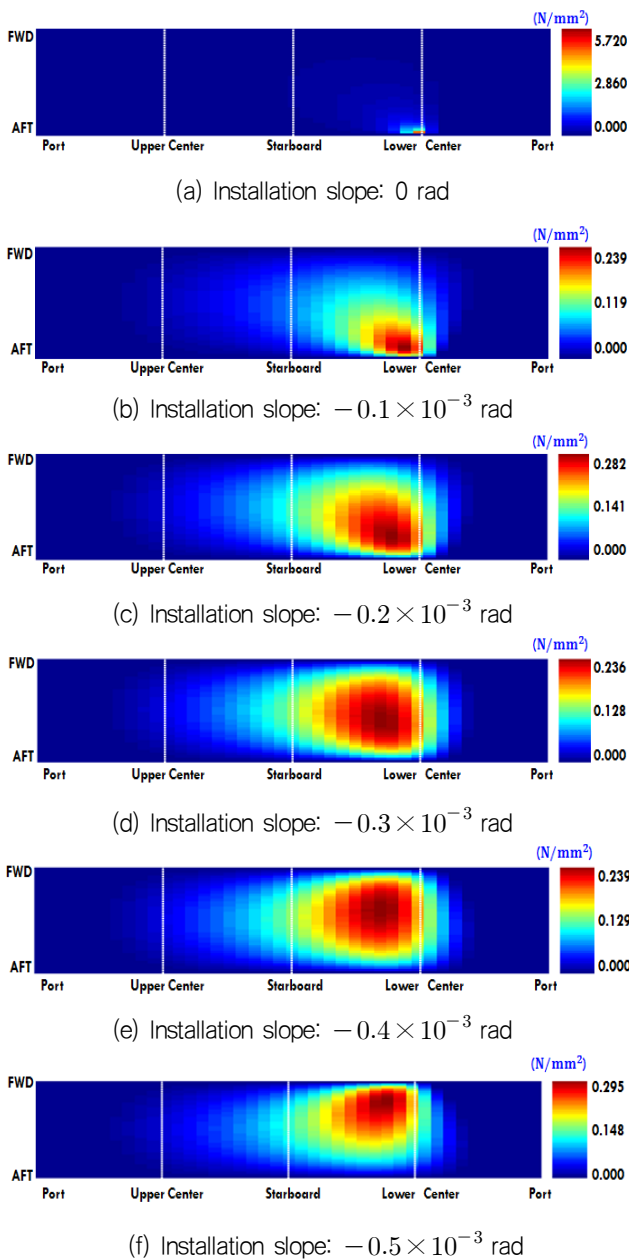


Fig. 9 Oil film pressure distribution on aft SJB according to its installation slope

한편, SJB 부시에 부분 경사각 적용 시 유막압력 변화를 고찰하고자  $-0.3 \times 10^{-3}$  rad의 설치 경사각을 갖는 후부 SJB 부시 선미단에 Fig. 10에 보인 바와 같은 추가적인 부분 경사각을 준 경우의 유막해석 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 이로부터 상기의 추가적 부분 경사각을 도입하면 유막압력 분포 변화와 함께 최대 유막압력이  $0.192 \text{ N/mm}^2$ 가 되어 부분 경사각이 없는 경우와 비교하여 18.6% 낮아짐을 확인할 수 있다. 따라서, 본 연구에서 정립한 방법은 동적 상태 추진축계 정렬의 정밀 해석과 함께 길이 긴 SJB에 작용하는 과도한 반력과 국부 최대 압력을 저감하기 위한 SJB의 설치 각도 설정과 부시 형상 설계에도 유용하게 활용될 수 있다고 판단한다.

Table 5 Calculation results on reaction force and maximum oil pressure acted on aft SJB according to its modelling method and installation slope

Aft SJB model	Slope (mrad)	Reaction force (N)		Max. oil pressure (N/mm <sup>2</sup> ) and location from aft end
		Vertical	Horizontal (STBD, +)	
Single rigid	-	337,258	0	-
Multi-elastic spring through oil film analysis	0.0	311,001	-2859.9	5.720 at 0.05L
	-0.1	311,307	-1646.9	0.239 at 0.13L
	-0.2	311,367	-1439.3	0.282 at 0.25L
	-0.3	311,395	-1345.9	0.236 at 0.40L
	-0.4	311,413	-1291.2	0.239 at 0.60L
	-0.5	311,420	-1285.1	0.295 at 0.83L

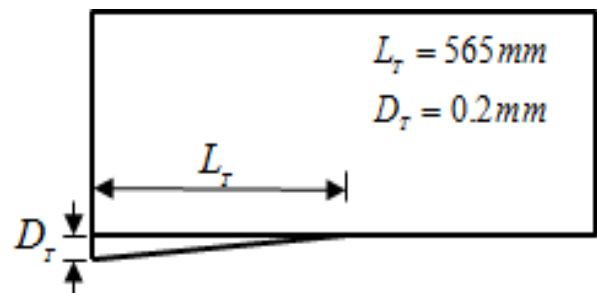


Fig. 10 Additional partial slope for aft SJB bush

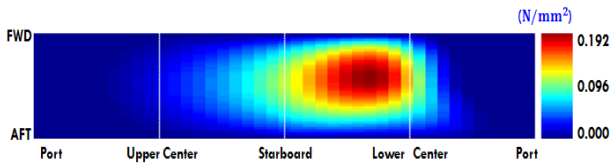


Fig. 11 Oil film pressure distribution adapting additional partial slope of aft SJB bush with installation slope of  $-0.3 \times 10^{-3}$  rad

## 5. 결 언

본 연구에서는 정도 높은 선박 추진축계 정렬을 위해 동적 상태 추진축 처짐과 후부 SJB 부시에 작용하는 유막압력으로 인한 지지강성 간의 상호작용을 고려하여 축 처짐과 유막압력이 축 처짐 변화량에 대한 수렴조건을 만족할 때까지 순환반복하여 계산하는 방법을 제안하였다.

제안된 방법은 추진축의 상하 및 수평 거동을 Timoshenko 보 이론에 기반한 유한요소법, 선미관 저널 베어링의 유막 압력은 Reynold 방정식을 Vogelplol 방정식으로 변형하여 Gauss-Seidel 반복법으로 해석한다. 또한, 후부 SJB 부시의 유막압력을 고려하기 위한 다점지지 탄성요소의 상하, 수평 방향 및 상하-수평 연성 강성은 축의 상하 및 수평방향 미소처짐 변화 시 유막압력 변화를 이용하여 유한차분법으로 평가한다.

실적 선박 추진축계에 대해 후부 SJB 부시의 유막압력으로 인한 상하 및 수평 방향 지지강성만을 고려하여 제안된 방법으로 축정렬 해석을 수행한 결과는 기존 축 정렬해석 프로그램 및 범용 유한요소해석 프로그램을 이용한 해석 결과와 부합성이 매우 높음을 확인하였다. 또한, SJB 부시 유막압력으로 인한 상하-수평 연성강성을 고려하여 제안된 방법을 적용하면 상하는 물론 수평 방향 추진축 처짐과 베어링 반력 평가가 가능하다. 아울러, 후부 SJB의 설치 각도와 부시에 적용된 부분 경사각을 고려한 축 정렬 해석과 SJB 부시에 작용하는 유막압력을 평가할 수 있다. 따라서, 본 연구에서 제안된 방법은 프로펠러에 작용하는 편심하중, SJB의 설치 각도와 부시 형상 및 이에 작용하는 유막 압력을 고려한 정밀한 축계 정렬해석과 이의 최적화에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단한다.

## 후 기

본 연구 수행에 필요한 추진축 정렬 기술자료를 제공해 주신 STX조선해양(주) 관계자에게 감사드립니다. 이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

## References

American Bureau of Shipping (ABS), 2014. *Guidance Notes on Propulsion Shafting Alignment*. ABS: Houston.

Cho, D.S. Kim, S.C. Kim, K.H. Kim, J.H. & Jin, B.M., 2015. *Evaluation of Propeller Shafting Considering Hull Deflection*, Report No. 2015-15-02. Busan: GCRC-SOP.

Choung, J.M. & Choe, I.H., 2006. Development of Elastic Shaft Alignment Design Program. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 43(4), pp.512-520.

Choung, J.M. & Choe, I.H., 2007. Pressure Analysis of Sterntube after Bush Bearing Considering Elastic Deflection of Misaligned Journal and Partial Solpe of Bearing Bush. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 44(6), pp.666-674.

Choung, J.M. Choe, I.H. & Kim, K.C., 2005a. Verification of Effective Support Points of Stern Tube Bearing Using Nonlinear Elastic Multi-Support Bearing Elements. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 42(5), pp.479-486.

Choung, J.M. Choe, I.H. & Shin, S.H., 2005b. A Study on Elastic Shaft Alignment Using Nonlinear Bearing Elements. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 42(3), pp.259-267.

Det Norske Veritas (DNV), 2012. *Nauticus Shaft Alignment - User Manual*. Ver.11, DNV: Hovik.

Hamlock, 1994. *Fundamental of Fluid Film Lubrication*. McGraw-Hill: New York.

MSC, 2010. *MD Nastran 2010 User's Guide*. MSC Software: California .

Nippon Kaiji Kyokai (NK), 2006. *Guidelines on Shafting Alignment*. NK: Tokyo.

Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T. & Flannery, B.P., 1986. *Numerical Recipes - The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press: Cambridge.

Ryu, S.H., 2009. *Calculation of Shaft Alignment*, STX DWG No. T6042000. STX Offshore & Shipbuilding: Changwon.

Shaft Analysis AB, 2001. *Software for Marin Propulsion*. Shaft Analysis AB: Malmö.

Shin, S.H., 2015. Effects of Propeller Forces on the Propeller Shaft Bearing during Going Straight and Turning of Ship. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 52(1), pp.61-69.

Shin, S.H. & Choe, I.H., 2004. Pressure Distribution Analysis for After Bush Bearing of Ship Propulsion Shaft. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 41(3), pp.35-40.



Stachowiak, G. & Batchelor, A.W., 2005. *Engineering Tribology*. 3rd Edition. Butterworth-Heinemann: Oxford.

Sun, J.S., Lee, Y.J. & Kim, U.K., 2009. The Flexibility Estimation of Alignment for Propulsion Shaft System Using the Approximated Hull Deflection Curve. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 33(1), pp.28-36.

Vartdal, B.J., Gjestland, T. & Arvidsen, T.I., 2009. Lateral propeller forces and their effects on shaft bearings. *First International Symposium on Marine Propulsors*, Trondheim, 22-24 June 2009, pp.475-481.

