

## 추진축계 정렬시 선미관 베어링 유효지지점 설정에 관한 연구

이재웅\* · 김연원\*\* · 김정렬\*\*\*†

\*, \*\* 목포해양대학교 해양메카트로닉스학부, \*\*\* 한국해양대학교 기관시스템공학부

## A Study on Designing an Effective Support Point for After-Stern Tube Bearings Concerning Shaft Alignment

Jae-ung Lee\* · Yeonwon Kim\*\* · Jung-Ryul Kim\*\*\*†

\*, \*\* Division of Marine Mechatronics, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

\*\*\* Department of Marine System Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

**요 약** : 갭색법(gap & sag method)은 선박 건조과정에서 축을 조립하기 전 최종적으로 축이 축계정렬 설계치와 동일한 위치에 거치되었는지의 여부를 확인하기 위해 사용되고 있는 방법이며, 조립 전 프로펠러축을 기준축으로 하여 양 축의 플랜지에서 축 자중에 의해 발생하는 갭색값을 통해 나머지 축계의 위치를 순차적으로 확정해 나간다. 만일 설계치와 다르게 기준축이 거치되는 경우 연쇄적으로 나머지 축의 거치에 영향을 주게 된다. 또한, 축 조립 후 검증과정에서 측정된 베어링 반력이 설령 설계치를 만족하더라도 선미관 후부축에서의 프로펠러축과 베어링간 상대적경사각을 추정할 수 없게 됨으로써 결과적으로 축계의 안정성에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 실제 선미관 베어링 발열 및 개방검사 사례를 통해 선미관 베어링 유효지지점에 관한 이론계산 및 실측치분석 연구를 수행하고 이를 바탕으로 축계 정렬오차를 최소화하기 위한 축계 시공방법을 제안하였다.

**핵심용어** : 축계정렬, 갭색법, 상대적경사각, 정렬오차, 베어링 유효지지점

**Abstract** : Generally, the gap-and-sag method is used in the shipbuilding stage before coupling the shafts to check whether they are installed at the same position as designed and derived from shaft alignment calculation. The primary installed propeller shaft becomes a reference point, the position of the remaining shafts are sequentially determined through the gap-and-sag value derived from the deflection and deflection angle at each shaft flange by own weight. If the reference point varies against the design value, it would have a series of effects on the installation of the remaining shafts. Moreover, after coupling the shafts, even if the bearing reaction forces derived from measurement are satisfied by the allowable limit range, consequently it might have an adverse effect on the stability of the shafting system by not being able to estimate the relative slope angle between the propeller shaft and the after-stern tube bearing. In this paper, to deal with above-mentioned phenomenon, the theoretical calculations related to designing an effective support point of the aft stern tube bearing and analysis by measurement is conducted through a case of open-up inspections. Based on this, a shaft installation guideline is proposed to minimize the misalignment related to preventing wiping damage of the after-stern tube bearing.

**Key Words** : Shaft alignment, Gap & sag method, Relative slope, Mis-alignment, Effective support point

## 1. 서 론

선박 건조단계에서 추진축계정렬 작업은 축계를 지지하고 있는 베어링의 적절한 하중 배분을 통해 축계의 안정성을 확보하는 차원에서 중요한 의의를 가진다(Jeon, 1986). 이러한 작업에 이상이 발생하는 경우 베어링 지지하중에 부정적

인 변화를 초래하여 특정 베어링의 이상마모, 과부하, 무부하 상태, 또는 과열, 감속기어의 마모, 파손 등의 문제가 발생할 수 있다. 추진축계 배치에 관한 연구는 1950년대 후반 미국 해군 함정에서 그 중요성이 인식된 이후 1960년대 후반부터 1970년대 초반에 걸친 연구결과를 통해 개개의 베어링에 대한 최적의 위치를 결정하는 주요 이론이 정립되었다(Rudolph, 1959; Anderson and Zrodowski, 1959; Lehr and Parker, 1961; Mann, 1965). 또한, 선박이 고출력화, 초대형화 됨에 따

\* First Author : julee.shafting@mmu.ac.kr, 061-240-7242

† Corresponding Author : jrkim@kmou.ac.kr, 051-410-4247

라 이전의 선체보다 훨씬 더 쉽게 변형되는 실정이다. 이는 기존의 선박보다 더욱 정교한 축계배치가 요구됨을 의미한다. 따라서 추진축계 배치의 최적치를 설계 단계에서 얻기 위해서는 축계 정렬 해석<sup>1)</sup> 시 선박의 적하 하중에 따른 베어링 반력의 변화, 운항에 따른 메인 엔진의 변형 및 프로펠러 추력에 의해 발생하는 굽힘모멘트, 하중에 대해 연직방향으로 작용하는 베어링의 탄성변형 등을 함께 고려하여야 한다(American Bureau of Shipping, 2006; Kim and Kim, 2005; Seo, 2010; Lee, 2011; Lee, 2006; Lee, 2016a). 갭색법(gap & sag method)은 주로 선박의 신조과정에서 축을 조립하기 전에 최종적으로 축이 축계정렬 설계치와 동일한 위치에 거치되었는지의 여부를 확인하기 위해 사용되고 있는 방법이다. 조립 전 처음에 거치된 프로펠러 축이 기준축이 되며 나머지 축의 거치위치는 접속되는 커플링의 총 수를 N개라고 하면 Fig. 1 및 식(1), (2)와 같이 양 축의 플랜지에서 축 자중에 의해 발생하는 처짐량과 처짐각으로부터 유도되는 갭색값을 통해 순차적으로 결정된다.

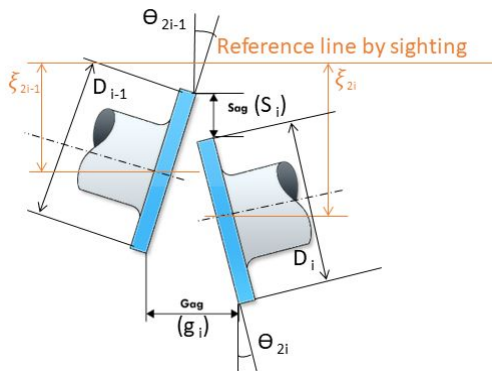


Fig. 1. Definition of gap and sag.

$$\left. \begin{aligned} s_1 &= \xi_2 - \xi_1 \\ s_2 &= \xi_4 - \xi_3 \\ &\dots\dots \\ s_N &= \xi_{2N} - \xi_{2N-1} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} g_1 &= (\theta_2 - \theta_1) D_1 \\ g_2 &= (\theta_4 - \theta_3) D_2 \\ &\dots\dots \\ g_N &= (\theta_{2N} - \theta_{2N-1}) D_N \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

1) 축계정렬해석이란 축계 지지베어링 간의 하중을 계산하고 각 지지 베어링의 높이가 단위 길이만큼 변할 때의 각 베어링의 하중변화량을 계산하여 축계 지지베어링이 최적의 하중 분배상태가 되도록 하는 일련의 과정을 말하며, 선박의 생애 중 발생할 수 있는 다양한 홀수상태, 운동 상태에서 지지베어링의 안정성을 확보하기 위해 사용되는 방법이다.

여기서,

- $s_i$ : sag [mm]
- $g_i$ : gap [mm]
- $\xi_i$ : 플랜지 끝의 휘임 [mm]
- $\theta_i$ : 플랜지 끝의 경사각 [rad]
- $D_i$ : 플랜지의 직경 [mm]  $i = 1, \dots, N$

이때, 갭색값은 양 플랜지간 상대값으로써 만일 다른 높이로 기준축이 거치될 경우 나머지 축의 거치가 연쇄적으로 영향을 받게 됨을 의미한다. 설령 축 조립 완료 후 잭업법을 통한 검증과정에서 측정된 베어링의 반력이 설계치를 만족하더라도 선미관 후부측에서의 축과 베어링간의 상대적 경사각의 변화를 추정할 수 없게 됨으로써 결과적으로 축계의 안정성에 부정적인 영향을 미치게 된다. 상기 배경을 바탕으로 본 연구에서는 실제 선미관 베어링 발열현상에 따른 개방검사 사례를 통해 이론검토 단계에서의 선미관 베어링 유효지지점에 관한 계산 및 설치작업 단계에서의 실측치 분석을 수행하였고 이를 통해 축계정렬 오차를 최소화하기 위한 축계 시공방법을 제안하였다.

## 2. 사례검토

Table 1 및 Table 2는 본 연구 대상 선박 및 축계의 주요 사양이며 Fig. 2 및 Fig. 3에 일반배치도 및 축계 배치도를 나타내었다.

Table 1. Principle dimension of the ship

Length O.A [m]	183.1
Length B.P [m]	174.0
Breadth MLD [m]	32.2
Depth MLD [m]	19.1
Draft design MLD [m]	11.0
Draft scantling MLD [m]	13.2

O.A: overall  
B.P: between perpendiculars  
MLD: molded

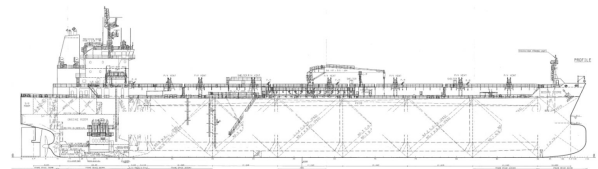


Fig. 2. General arrangement of the ship.

2) 잭업법이란 추진축계 정렬의 건전성을 확인하기 위한 대표적인 방법으로 유압잭을 이용하여 축계의 반력을 측정하는 방법이다. 다른 계측법에 의해 단순한 장비와 작업의 용이성 때문에 실제 조선소에서 가장 많이 사용하는 방법이다

추진축계 정렬시 선미관 베어링 유효지지점 설정에 관한 연구

Table 2. Specification of shafting system

Vessel type	50k DWT oil/chemical tanker
Main engine	Type: MDT 6G50ME-B
	MCR: 7,700 kW × 93.4 rpm
	NCR: 5,344 kW × 82.7 rpm
Propeller	4 blade fixed pitch
	Diameter: 6,600 mm
	Material: Ni-Al-Bronze
	Mass: 18,200 kg
Flywheel	Mass: 11,207 kg

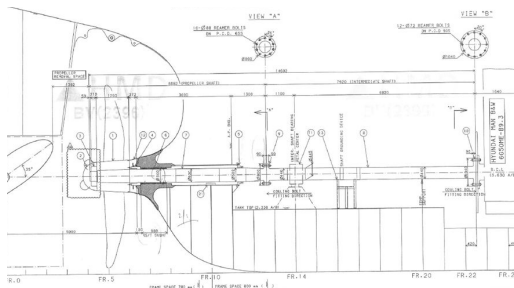


Fig. 3. Shafting arrangement of the ship.

대상선박은 인도 후 1년이 경과하기 전에 Fig. 4에서와 같이 선미관 베어링 발열현상이 나타났다. 뿐만 아니라, 대상 선박의 동형선에도 인도 후 1년이 경과하기 이전에 대상선박과 동일한 유형의 선미관 베어링 발열현상이 나타나고 있었으므로 이의 원인분석을 위하여 설계상, 설치상 적합성 검토를 수행하였다.



Fig. 4. After stern tube bearing damage.

먼저, 설계상 적합성 검토를 위해 Fig. 5와 같이 조선소와 별도의 축계정렬 프로그램(Korean Register, 2013)을 사용하여 베어링반력 계산을 수행하고 그 결과를 Table 3에서와 같이 나타내었다.

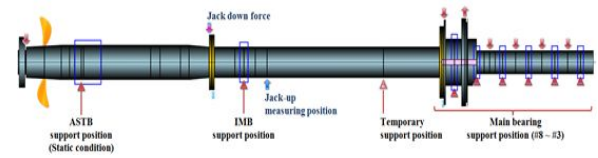


Fig. 5. Shaft alignment calculation model.

계산모델생성, 재료의 물성치, 경계조건, 하중조건은 선박 도면을 참고하고, 계산알고리즘은 보(beam)에 대한 강성매트릭스(stiffness matrix) 구조해석법(Jeon, 1986)을 적용하였다.

Table 3. Comparisons the result of bearing load\_Hot static (100% propeller immersed)

Bearing	Load [kN]		Max. Permissible Load [kN]
	Reference	Independent calculation	
ASTB	248.23	256.94	368
IB	76.27	72.07	160.2
MB8	77.29	82.32	336
MB7	69.48	65.47	336
MB6	128.22	128.32	336

여기서 ASTB는 선미관 베어링, IB는 중간축 베어링, MB는 주기관 베어링을 의미한다. 일반적으로 베어링 발열현상은 베어링의 반력이 허용치를 초과하는 경우에 나타나는 일반적인 현상이다. 검토결과, 축계 지지베어링들의 반력은 동일한 수준으로 나타나 계산상 특이점은 발견할 수 없었다.

다음으로 설치상의 적합성 검토를 위하여 축 개방 후 Fig. 6과 같이 축계를 지지하고 있던 베어링의 높이(offset)를 측정하여 설치당시의 축선(shaft line deflection curve)상태로 역산하여 설계치 축선과 함께 나타내었다.

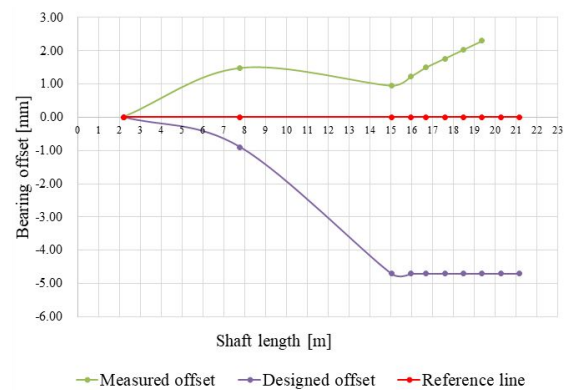


Fig. 6. Deviation between measured and designed shaft deflection curve.

여기서 기준선(reference line)은 축 설치의 기준이 되는 선이며 선미관 후단 중심을 기준으로 기관실 축으로 평행하게 그은 가상의 선을 의미한다. 검토결과 기준선 대비 중간축 베어링은 기준선(reference line) 하방에 위치하여야 하지만 실제로는 상방에 위치하였고, 주기관 베어링들은 기준선 대비 4.7 mm 하방에 일직선으로 위치하여야 하지만 0.95 mm 하방을 시작으로 선수단 베어링까지 우상향으로 경사지게(tilt) 배치되어 있었다. 필요에 따라 주기관 베어링은 통상 설계치 대비 다음과 같은 기술적인 이유로 주기관 베어링간 안정적인 부하분담을 위해 약간의 경사(tilt)를 두어 거치시킬 수 있다 (Lee, 2016b).

- 1) 축계정렬에 사용하는 등가축 모델과 실제 형상의 차이에 따른 오차
- 2) 진수 전 선체 변형량을 감안한 엔진 프리삭(pre-sag)
- 3) 진수 후 흘수차에 의한 선체변형

그러나 이를 감안하더라도 대상 선박의 축선은 그 배치상태가 다소 이례적인 것으로 판단되었다. 뿐만 아니라 축선의 변화는 연쇄적으로 축계 지지베어링 반력에 영향을 주게 되므로 이의 검토를 위하여 설계당시 축선과 계측된 축선 정보로 베어링 반력을 재계산하여 Table 4와 같이 나타내었다.

Table 4. Bearing load designed and measured

Bearing	Load [kN]		
	Designed	Measured	Permissible
ASTB	257.47	259.02	368
IB	68.07	62.44	160.2
MB8	64.84	56.06	336
MB7	77.94	134.22	336

먼저 선미관 및 중간축 베어링에서는 축선의 변화가 베어링 반력에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 그러나 주기관 베어링에서는 축선의 변화가 베어링 반력에 미치는 영향이 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 그럼에도 불구하고 설치된 축선에 따른 베어링 반력은 주기관 제조사에서 제시하는 기준(MAN Diesel & Turbo, 2012)에 만족하고 있으므로 이를 선미관 손상의 직접적인 원인이라고 단정 지을 수는 없었다. 현재 조선소 및 선급에서 통상 사용되고 있는 고전적 축계정렬 설계과정의 가장 큰 난제는 축이 선미관 베어링과 같이 긴 저어널 베어링에서 한점 또는 3점까지의 무한 강체(rigid body)에 의하여 지지된다고 가정한다는 점이다. 이와 같은 지지점을 통상 유효지지점(Effective support point)라 한다. 그러나 실제 베어링 지지점은 정적상태에서의 축 자중, 축과 베어링의 탄성과 동적상태에서의 프로펠러

편심추력, 축과 베어링 사이의 유막 분포 변화 등에 의해 변화하므로 이를 예측하는 것은 매우 어려운 작업이다. 또한 베어링이 받는 압력은 투영면적법을 이용하여 베어링의 유효지지점에서 발생한 반력을 베어링 길이에 대한 투영면적으로 나누어 산출하는데 투영면적법을 적용할 경우 베어링의 강성을 과대 추정하는 경향이 있다(Chung et al., 2005). 뿐만 아니라 투영면적법은 실제 축과 베어링이 접촉하는 면적을 정확히 추정할 수 없어 과대한 국부하중으로 인한 베어링 손상위험 여부를 판단하기가 어렵다. 이러한 배경 하에 Lloyd 선급에서는 광범위한 데이터를 바탕으로 선박의 정적, 동적인 상태에서의 유효지지점을 제시(Kozousek and Davies, 2000)하였고, 각 조선소 역시 그간 축적된 경험치를 바탕으로 선종별, 크기별로 유효지지점을 설정하고 있다. 각 선급 역시 동일한 목적으로 Fig. 7과 같이 프로펠러축과 선미관 후부 베어링 사이의 상대 경사각이 0.3 mrad을 초과하지 않아야 한다는 기준을 제시하여 프로펠러 축과 베어링의 접촉면적을 확보하기 위한 안전요건으로서 이를 규칙에 반영하고 있다.

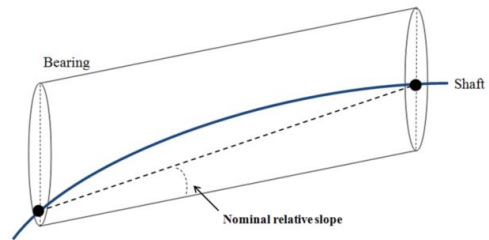


Fig. 7. Definition of relative slope.

대상 선박의 경우 베어링 반력과 투영면적에 따른 면압은 큰 차이가 없었지만 선급 규칙을 기준으로 볼 때 선미관 베어링 유효지지점에서의 상대적 경사각이 0.637 mrad으로 기준치인 0.3 mrad을 크게 상회하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 특별한 해상 조건에 놓였을 때 선미관 베어링 후부에 하중이 집중됨으로서 손상이 발생할 수 있는 경우의 수가 크게 됨을 의미한다.

### 3. 결과 및 고찰

따라서 상기와 같은 검토결과에 따라 설계 및 시공시 축계 정렬 오차를 최소화하기 위한 방안을 모색하기 위하여 LS-DYNA 971 프로그램을 사용, Fig. 8과 같이 축과 베어링을 모델링 후 프로펠러축 거치 과정에서 발생하는 축과 베어링의 접촉 해석을 수행하였다. 물성치는 Table 5와 같으며, 본 해석에서는 implicit 해석방법을 적용하였다.

추진축계 정렬시 선미관 베어링 유효지지점 설정에 관한 연구

Table 5. Elastic mechanical properties of steels

Items	Nominal grade of steel			
	235	315	355	390
Mass density, $\rho$ [ton/mm <sup>3</sup> ]	7.85E-09	7.85E-09	7.85E-09	7.85E-09
Elastic modulus, E [MPa]	206000	206000	206000	206000
Poisson ratio, $\nu$	0.3	0.3	0.3	0.3

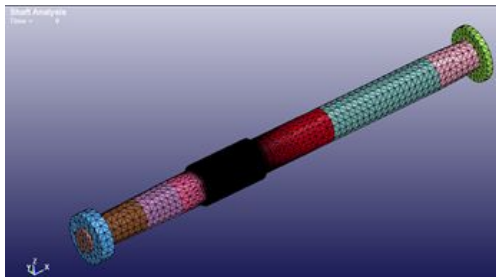


Fig. 8. Contact analysis model.

선미관 베어링의 모델은 Fig. 9와 같이 선미관 베어링 내부가 0.3 mrad의 단일경사로 가공된 도면을 반영한 경우(C1)와 초기 조선소 계산과 같이 경사가 없는 경우(C2)의 양 조건으로 작성하였다.

축 거치과정은 정적상태로 보아 축과 베어링간 유막의 영향은 고려하지 않았다.

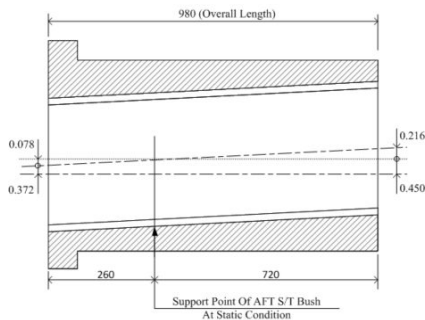


Fig. 9. Single sloped aft stern tube bearing.

상기와 같은 조건으로 축 거치 상황과 동일하게 프로펠러와 프로펠러축의 자중만 고려된 상태에서 편심을 보상하기 위한 잭다운(jack down) 힘을 프로펠러축 플랜지에 점진적으로 49 kN까지 가하는 것으로 설정하여 접촉해석을 수행하였다. 잭다운 힘이란, 깎색법으로 축을 설치하기 전 프로펠러축이 선미관 선수 베어링 하부(선미관 선수베어링이 없는

경우 이와 동등한 가상의 위치에 접촉하도록 아랫방향으로 프로펠러에 가하는 힘을 말한다. 이에 따른 결과는 Fig. 10, Fig. 11 및 Fig. 12와 같다.

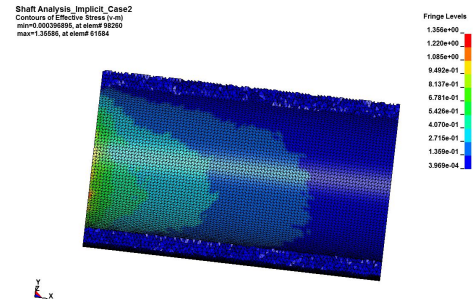


Fig. 10. Contact analysis result of start condition; jack down of 0 kN.

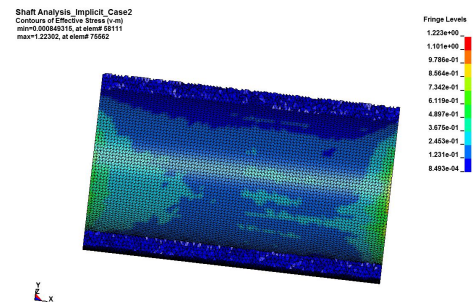


Fig. 11. Contact analysis result of optimum condition; jack down forcing.

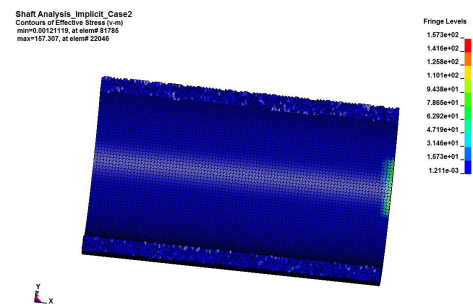


Fig. 12. Contact analysis result of finished condition; jack down of 49 kN.

해석결과 C1 및 C2 조건 모두에서 잭다운을 시작하기 전에는 프로펠러 자중으로 인하여 베어링 선미단에 하중이 집중된 상태가 되며 잭다운 힘이 점차 가해짐에 따라 베어링 양단으로 하중이 분산되다가 49 kN까지 모두 가했을 경우 베어링 선수단으로 하중이 완전히 이동한 것을 볼 수 있다.

따라서 베어링의 건전성 확보 측면에서는 Fig. 11과 같이 축과 베어링의 접촉 면적이 최대가 되면서 베어링 양단에 하중이 분산되는 형태를 구현하는 것이 이상적이라고 판단된다. 본 접촉해석은 대상선박에 대하여 수행한 결과이므로 모든 선박으로의 적용을 위해서는 추가의 데이터 확보가 필요하지만 전반적인 해석결과의 경향을 볼 때 고전적 축계정렬 시에는 베어링 양단을 유효지지점으로 보고 지지점 양단에서 균일한 하중을 분담하는 위치까지 축을 이동시키는데 소요되는 최적의 잭다운 힘을 산출하는 것이 합리적 접근방법이 될 것이라 판단된다. 또한 C1 조건에서 초기 조선소 계산과 동일하게 49kN의 잭다운 힘을 가했을 때 거치되는 프로펠러축을 기준으로 하여 검색법으로 나머지 축을 거치한 상태의 축선을 추정(predict)하고 이를 설치당시의 축선(measured) 및 설계치 축선(designed)과 함께 Fig. 13에 나타내었다.

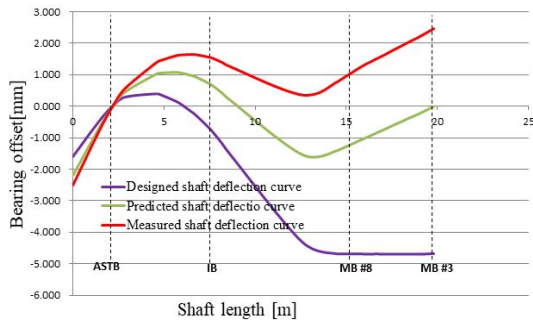


Fig. 13. Predicted shaft deflection curve against shipyard design and measured.

Fig. 13에서와 같이 추정된 축선은 선미관 발열현상이 나타난 선박의 설치당시 축선의 배치현황과 그 경향이 유사하였다. 이는 선미관 베어링 가공경사의 반영여부가 축선 변화에 직접적으로 관련된 것임을 알 수 있다. 0.3 mrad의 단일 경사값은 1 m당 0.3 mm의 경사가 있음을 의미하며 이를 대상선박의 프로펠러축 길이(6682 mm)로 단순 비례환산 시 그 값은 약 2 mm로서 베어링 경사가 없는 경우에 비해 프로펠러축 플랜지가 상방에 놓여지게 되는 상황이 됨을 알 수 있다. 따라서 프로펠러축을 정위치에 거치하기 위해서는 C1 조건에서 C2 조건보다 더 큰 힘의 잭다운 힘을 가해야 함을 의미한다. 여기서, 추가의 잭다운 힘이 가해진 경우 프로펠러축 플랜지의 처짐량과 처짐각이 잭다운 힘에 비례하여 증가하므로 설계치 검색값을 수정없이 이용할 경우 축선은 오히려 설계치 축선 대비 우하향 배치 될 수 있음을 유의하여야 한다. 또한 축선 간의 편차 발생 원인을 조사한 결과 이는 선미관 베어링이 선미관에 압입된 후 베어링 가공경사각이 압입 전보다 0.06 mrad 증가됨에 따라 프로펠러축이 추정치

보다 상방에 거치됨에 따른 것으로 판단된다.

이를 미루어 볼 때 유효지지점 설정시 적절한 하중분담을 위한 잭다운 힘을 계산하는 것 이외에도 선미관 베어링 경사를 계산에 반영하는 것이 중요한 인자로 판단된다. 또한 설계와 설치간 오차가 발생 할 수 있으므로 축계 시공시 이의 상호 보완을 위해 프로펠러축 FWD seal box 위치 등에서 프로펠러축의 거치위치를 확인하는 절차를 수립한다면 축계의 정렬오차를 최소화 할 수 있을 것이라 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 실제 선미관 베어링 발열현상의 원인을 고찰하기 위하여 선미관 베어링 가공경사 및 유효지지점 설정에 따른 상세접촉해석 및 실측치 분석을 수행하였고 이를 바탕으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 축 조립 후 베어링 반력 계측을 통한 기존의 검증과정은 축선의 변화를 정확히 추정할 수 없는 한계가 있음을 확인하였다. 또한, 프로펠러 축이 잭다운 힘으로 정위치에 놓이지 않은 상태에서 검색값을 이용하여 나머지 축을 거치하게 되면 중간축/주기관 베어링 위치가 연쇄적으로 상승배치될 수 있음을 확인하였다.

(2) 유한요소법에 의한 상세접촉 수행 결과 고전적 축계정렬 시에는 양끝단 균일한 하중분포가 되도록 양단을 유효지지점으로 설정하는 것이 축계의 안정성 확보를 위한 합리적 접근방법이 될 수 있음을 확인하였다.

(3) 축선 추정결과를 바탕으로 잭다운 힘을 주었을 때 프로펠러축이 설계치보다 우상향 배치된 원인은 베어링 가공경사 및 베어링 압입후 변경되는 가공경사를 반영하지 않은 데서 기인한 것으로 판단되었다.

(4) 설계/생산의 상호보완을 통해 추후 프로펠러축가 중간축의 정위치를 확보하기 위한 설계/시공방법의 개선이 필요해 보이며 이를 위하여 축계시공시 프로펠러축 FWD seal box 위치 등에서 프로펠러축의 상하/좌우 정위치 여부를 확인한다면 축계정렬 오차발생을 저감 할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 도출된 결과를 바탕으로 베어링 유효지지점이 추진축계 안정성에 미치는 영향과 그에 따른 실용적 지침을 마련하는 것은 향후의 연구과제로 남는다.

#### 후 기

이 논문은 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2017R1C1B5017114).

## References

- [1] American Bureau of Shipping(2006), Guidance Notes on Propulsion Shafting Alignment, Houston, USA: American Bureau of Shipping.
- [2] Anderson, H. C. and J. J. Zrodowski(1959), Co-ordinated alignment of line shaft, propulsion gear, and turbines, Annual meeting of Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), pp. 449-523.
- [3] Chung, J. M., I. H. Choe and S. S. Shin(2005), 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.
- [4] Jeon, H. J.(1986), Ship Propulsion Transmission Equipment, Busan, Korea, Taehwa Publishing Company.
- [5] Kim, K. C. and J. G. Kim(2005), A study on optimum shaft alignment analysis for VLCC, Proceedings of the special transactions of the Society of Naval Architects of Korea, p. 134-137.
- [6] Korean Register(2013), SeaTrust-Machinery User Manual ver.1.0, Busan, Korea: Korean Register.
- [7] Kozousek, V. M. and P. G. Davies(2000), Analysis and Survey Procedures of Propulsion Systems: Shaft Alignment, LR Technical Association, Vol. 5, pp. 1-24.
- [8] Lee, J. U.(2011), A study on the Optimal Shafting Alignment Concerning Bearing Stiffness for Extra Large Container Carrier, M.S. Thesis, Department of Marine System Engineering Graduate School, Korea Maritime University, Korea.
- [9] Lee, J. U.(2016a), A Study on the Analysis Shaft Alignment Considering Hull Deflections for 50,000 DWT Oil/Chemical Tanker,” Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 40, No. 3, pp. 191-197.
- [10] Lee, J. U.(2016b), A study on the analysis of bearing reaction forces and hull deflections affecting shaft alignment using strain gauges for a 50,000 DWT oil/chemical tanker, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 40, No. 4, pp. 288-294.
- [11] Lee, Y. J.(2006), A Study on Hull Deflections Effecting the Ship's Propulsion Shafting Alignment, Ph.D. Dissertation, Department of Mechanical Engineering Graduate School, Korea Maritime University, Korea.
- [12] Lehr, W. E. and E. L. Parker(1961), Considerations in the design of marine propulsion shaft systems, The International Journal of Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), Vol. 69, pp. 555-601.
- [13] MAN Diesel & Turbo(2012), Bearing Load Measurement by Jacking Up, Rev.8. Denmark: MDT.
- [14] Mann, G.(1965), Shipyard Alignment of Propulsion Shafting Using Fair Curve Alignment Theory, The American Society of Naval Engineers Journal, Vol. 77, No. 4, pp. 651-659.
- [15] Rudolph, M.(1959), A quarter century of propulsion shafting design practice and operating experience in the U.S. navy, The Journal of the American Society of Naval Engineers(NEJ), Vol. 71, No. 1, pp. 153-164.
- [16] Seo, C. O.(2010), A Study on the Optimal Shafting Alignment for Chemical Tanker of Medium Size, M.Sc., Department of Marine System Engineering Graduate School, Korea Maritime University, Korea.

---

Received : 2018. 08. 17.

Revised : 2018. 10. 18.

Accepted : 2018. 10. 26.