

중형 유조선의 프로펠러 추력변동이 축 거동에 미치는 영향 연구 Propulsion Shaft Movement Affected by Propeller Force Fluctuation on Medium Size Oil Tanker

김정렬* · 이재웅*†
Jeong-Ryul Kim* and Jae-ung Lee*†

(Received 15 October 2021, Revision received 10 December 2021, Accepted 13 December 2021)

Abstract : The movement of the propeller shaft shows different changes in each condition, such as static, dynamic, and transient, mainly based on changes in propeller eccentricity due to changes in engine load. In general, this contributes to changing the bearing load of the shaft at the after stern tube bearing, and in severe cases causes damage to the stern tube bearing. To prevent this, various research regarding pragmatic designing on shafting system has been carried out focusing on optimize the relative inclination and retain the oil film thickness between the shaft and the stern tube bearing. However, in order to secure the integrity of the support bearing from damage, it is necessary to additionally consider dynamic conditions including transient conditions such as sudden alteration in the stern wake-field. In this context, this study cross validated the effect of propeller shaft movement during starboard turning of a medium range oil tanker at full laden draft using the strain gauge and displacement sensor. As a result of the analysis, it was confirmed that the propeller thrust fluctuation temporarily increased the load on the stern tube bearing.

Key Words : Shafting system, Propeller shaft movement, Propeller thrust fluctuation, Strain gauge, Displacement sensor

— 기 호 설 명 —

Z	: 축의 단면계수 [m^3]	
M_b	: 축의 굽힘 모멘트 [kNm]	
I	: 축의 단면 2차 모멘트 [m^4]	
V_{ek}, V_o	: 입력, 출력전압 [volt]	그리스 문자
c	: 축 단면의 반지름 [m]	
D_o, D_i	: 축의 외경, 내경 [m]	ϵ : 변형률

*† 이재웅(ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2839-0448>) :
부교수, 한국해양대학교 기관시스템공학부
E-mail : julee@kmou.ac.kr, Tel : 051-410-4662
*김정렬(ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7501-8892>) :
교수, 한국해양대학교 기관시스템공학부

*† Jae-ung Lee(ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2839-0448>)
: Associate Professor, Division of Marine System Engineering,
Korea Maritime and Ocean University.
E-mail : julee@kmou.ac.kr, Tel : 051-410-4662
*Jeong-Ryul Kim(ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7501-8892>) :
Professor, Division of Marine System Engineering, Korea
Maritime and Ocean University.

ϵ_a : 스트레인 진폭
 σ_b : 축의 굽힘 응력 [N/mm²]

1. 서 론

축계안정성 특히 축계정렬에 관한 연구는 미 해군에서부터 수행되어 1970년대에 주요 이론이 정립 되었다. 이러한 연구결과¹⁻⁶⁾들을 바탕으로 축계 지지베어링의 하중 배분의 중요성이 정립되었으며 이를 통해 무부하 또는 과부하에 기인한 선미관 베어링, 주기관 베어링의 손상사고가 크게 감소되었다. 이후 선박의 대형화와 고장력(high tensile) 강판 적용 확대에 따른 선체 변형(hull deflection) 증대의 영향으로 선미관 베어링의 손상 사고가 증대됨에 따라 이를 방지하기 위한 관련 연구가 진행되었다.⁷⁻⁹⁾ 그러나 상기의 연구들은 대부분 선박이 정적(static)인 상태에서 수행하되 계산조건에 프로펠러 편심 추력 값을 추가로 반영한 형태인 준-정적(quasi-static) 계산방식을 적용해 왔다. 그러나 준-정적 방식은 계산이 간략한 장점이 있는 반면 실 운전 상태에서 발생할 수 있는 잠재적인 위험요소를 식별하기 어렵다는 데에 한계가 있어 왔다. 이와 관련하여 기존의 정적(static)상태만 고려하는 축계설계방식으로는 운전 시 프로펠러에서 발생하는 추력변동에 기인한 선미관 베어링 및 선미관 밀봉장치(seal ring)의 심각한 손상을 방지할 수 없다는 연구결과가 1983년 처음 소개¹⁰⁾된 이래 최근까지의 연구사례를 살펴 보면, 축계안정성 확보를 위해 선박의 직진, 선회 시와 같은 동적상태의 프로펠러 하중변화를 추가로 고려¹¹⁻¹³⁾해야 하는 필요성이 지속적으로 식별되고 있다. 다만 수행된 연구결과들은 특정 선박 및 조건에 한해서 수행된 바 이를 모든 선종에 적용할 수 있는 규칙(rules and standard) 형태로 개발하기 위해서는 선행연구들¹⁴⁻¹⁶⁾에서와 같이 선종별 다양한 분석사례를 확보해 나가는 것이 중요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 중형 유조선을 대상으로 만재 홀수 상태에서 우현 전타(starboard turn)시 프로펠러 추력변동이 프로펠러축 거동에 미치는 영향을 검토하고자 한다.

2. 측정 및 해석방법

2.1 측정장비의 구성

Fig. 1 및 Table 1에서는 대상 선박의 축계배치도, 측정 센서의 위치(스트레인 게이지(녹색), 레이저 변위센서(적색)) 및 측정사양을 나타내었다.

스트레인 게이지는 텔레메트리 장비를 통해 축 모멘트를 측정하도록 하고 변위센서를 통해 축의 회전속도와 거동변위를 측정하도록 구성하였으며, 최종 설치된 계측 시스템의 구성은 Fig. 2와 같다.

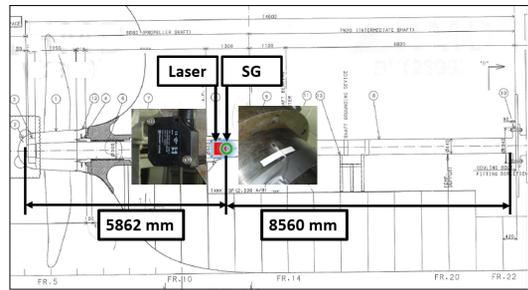


Fig. 1 Shaft arrangement and strain gauge and laser sensor position of the test ship

Table 1 Specification of the test ship

Vessel type	50,000 DWT medium size tanker
Main engine	6G50ME-B(MAN E&S)
	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

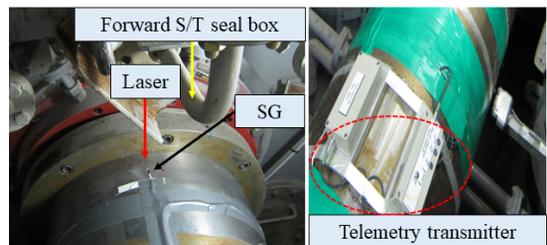


Fig. 2 Telemetry system configuration

Table 2 Test condition of the ship

No.	Rudder angle (Ship's heading)	Engine load	rpm	knot
1	Midship 0° (Straight going)	69.5% (NCR)	84.9	15
2	Starboard 12° (Start turning)		84.9	
	Midship 0° (Heading 90°)			

2.2 시험 절차

선박의 측정조건은 해상인명안전협약(SOLAS) II-1장 제 29규칙(rudder test)의 조건을 준용하면서 Table 2에서와 같이 직진 중(타각 0°) 우현 전타(12°)를 수행하고 선박의 항로가 전타 방향으로 90° 변경될 때의 기간으로 하였다. 또한 시험 당시의 해상상태, 감항성을 고려하여 엔진 출력을 MCR보다 하향된 NCR로 제한하였다.

2.3 신호 처리 및 해석 방법

축 거동 분석을 위해서는 먼저 신호를 주기관 1번 실린더 상사점을 기준으로 회전각 기반 선도로 변환하는 작업이 필요하다. 스트레인 게이지의 저항값은 축이 회전하면서 발생하는 수직 변형률(strain)에 비례하여 변동하므로 입력 전압(Vin) 대비 변동된 출력 전압(Vout)을 얻을 수 있으며, 이를 통해 Fig. 3에서와 같은 휘스톤 브릿지(half wheatstone bridge) 결선방식에서 식 (1)과 같은 변형률 ϵ 을 얻을 수 있다.

$$\epsilon = \frac{V_o}{V_{ek}} \frac{2}{k} \quad (1)$$

변형률은 스트레인 게이지의 회전각 θ 에 따라 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon = \epsilon_a \cos(\theta + \lambda) + \bar{\epsilon} \quad (2)$$

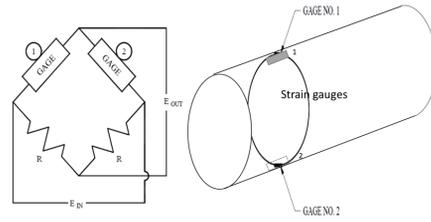


Fig. 3 Half wheatstone bridge configuration

여기서 λ 는 중립축(neutral axis) N-A와 No.1 Cyl TDC 사이의 각을 나타낸다. 또한 θ 는 게이지의 회전각, $\bar{\epsilon}$ 는 평균변형률(average strain)을 나타낸다. 따라서 축 재료의 탄성계수 E 와 변형률 ϵ 를 이용하여 축의 굽힘응력 σ_b 과 굽힘 모멘트 M_b 를 식 (3)과 식 (4)와 같이 구할 수 있으며, 이를 통해 식 (5) 및 식 (6)과 같이 M_b 에 대한 수직과 수평 모멘트 M_v , M_h 를 계산할 수 있다.

$$\sigma_b = \epsilon_a E = \frac{M_b c}{I} \quad (3)$$

$$M_b = \sigma_b \frac{\pi(D_o^4 - D_i^4)}{32D_o} = \sigma Z \quad (4)$$

$$M_v = \sigma Z \cos \lambda \quad (5)$$

$$M_h = \sigma Z \sin \lambda \quad (6)$$

산출된 굽힘모멘트 M_v , M_h 는 Fig. 4에서와 같이 센서 위치의 축 단면에 대해 회전좌표계(a rotating coordinate system)로 도시할 수 있다.

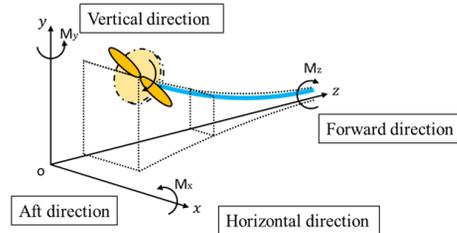


Fig. 4 Definition of a rotating coordinate system (moment direction)

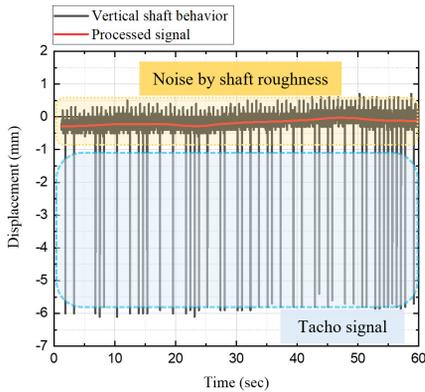


Fig. 5 Processed signal from laser sensor

다음으로 변위센서의 신호(raw data)는 회전수 산정을 위한 tacho 성분과 축 표면의 조도(roughness)에 기인한 noise가 혼합된 신호이므로 이를 분리하기 위하여 Fig. 5와 같이 평활화 작업을 수행하면 축 변위 성분만을 추출할 수 있게 된다.

3. 결과 및 고찰

본 절에서는 상기 방법에 따른 결과를 고찰한다. 먼저 Fig. 6에서는 식 (4)에 따라 NCR 직진, 우현 전타 시 측정된 축 굽힘모멘트를 회전각 θ 기준으로 나타내었다. 검토 결과, 두 조건 모두 위상이 일정한 정현파 형태의 진동패턴을 보였으며, 우현 전타 시 모멘트 진폭이 과도적으로 증가하며 변동되는 현상은 선미 유동장의 변화에 직접적인 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다.

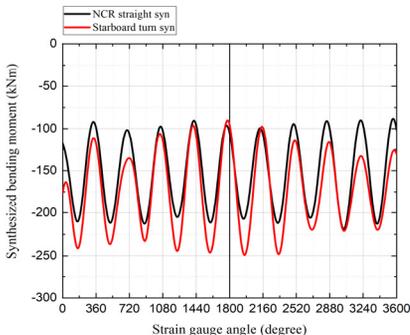


Fig. 6 Angle domain signal at each two conditions

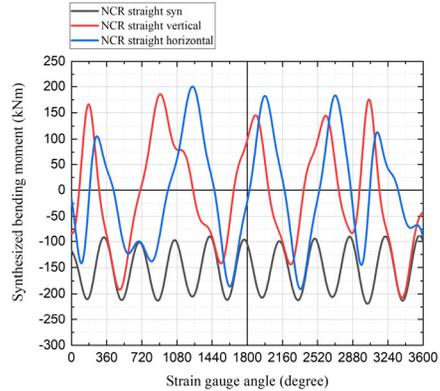


Fig. 7 Separated signal at NCR straight condition

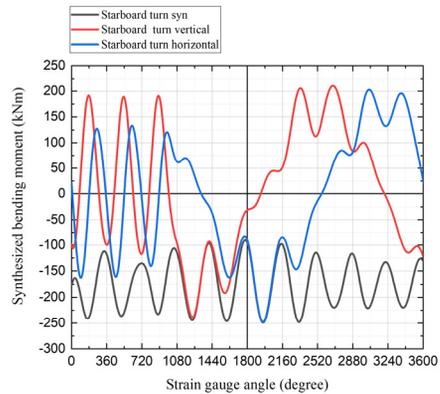


Fig. 8 Separated signal at starboard turn

Fig. 7 및 Fig. 8에서는 각 조건에서의 축 굽힘모멘트를 식 (5), 식 (6)에 따라 각각 수직 수평성분으로 분리하여 회전각 θ 기준으로 도시하였다.

선박이 우현 90°로 완전히 회두하기까지는 약 3분이 소요되었으며, Fig. 7 및 Fig. 8의 수직, 수평 성분을 각각 x 축, y 축으로 하여 Fig. 9와 같이 직진 및 전타 시의 축 모멘트 거동과 거동의 평균값을 도시하였다. 우현전타시 나타나는 궤도는 NCR운전시 대비 진폭이 확대되며 양 궤도형태 모두 자유단에서 나타나는 전형적 운전형태를 보인다. 파형의 평균값을 고찰할 때 프로펠러 편심 추력의 변동패턴은 명확히 식별이 가능하다. 전타시 축은 직진 대비 β 각을 이루며 우상방으로 모멘트 거동이 변화되는데, 이는 타(rudder) 조작에 따른 선미관 후부의 급격한 유동(wakefiled) 변화

로 인한 프로펠러 편심추력 변동이 프로펠러축에 직접적인 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다.

이와 같은 과도현상에 대한 관찰결과는 같은 기간 측정된 축의 변위값으로 교차 검증된다. Fig. 10은 측정 시작시간으로부터 종료시점까지의 축 변위 변동을 계측한 것으로, NCR 직진 시의 축 변위 변동범위와 비교할 때 명백히 축 변위 거동이 상방으로 급격히 변화되며 측정 종료 시(타각 0°) 원위치로 복귀되고 있음을 알 수 있다.

여기서 프로펠러축을 변형이 없는 직선보(rigid beam)로 가정하면, Fig. 1에서의 센서위치를 고려할 때 프로펠러축 끝단은 Fig. 9의 값과 반대인 좌하방으로 모멘트 거동이 변화됨을 연역적으

로 추론할 수 있다. 따라서 우현전타 시에는 편심 추력 변동이 프로펠러축을 내려 누르는(push down) 힘으로 작용하여 일시적으로 선미관 베어링 지지하중이 증가되는 방향으로 작용함을 알 수 있다. 다만, 축 모멘트 거동은 β 각을 이루며 변동되는 반면, 축변위는 변위센서 수량의 문제로 수직변위만 측정이 가능했던 점은 추가 연구를 통해 보완할 필요가 있다.

상기 연구결과는 기존 준-정적 해석방식에서는 적극적으로 고려되지 않던 부분이며, 국내에서 실제 계측을 통해 검증한 사례인 것에 의미가 있다. 특히 대상선박은 베어링 지지하중의 과부하로 인한 손상사고가 발생한 선박의 동형선이며, 이를 통해 사고 당시 상황을 재현한 본 연구결과가 향후 유사 선박의 설계상 지침을 마련하는데 도움이 될 것으로 판단된다. 그러나 서론에 기술한 바와 같이 계속적으로 다양한 선박의 사례 검토를 통해 과도적인 프로펠러 추력변동이 축계에 미치는 영향과 추진축계 안정성을 확보하기 위한 범용 규칙 개발은 금후의 과제로 남는다.

4. 결 론

본 연구에서는 스트레인게이지와 변위센서를 통해 과도적 동적 상태인 전타시의 프로펠러 편심추력변동이 축 거동에 미치는 영향을 교차 검증하였다.

1) 우현 전타 조건에서 선박의 우현 회두 시 프로펠러축 끝단의 거동은 좌하방으로 이동함에 따라 선미관 베어링의 지지하중은 일시적으로 증가된다. 본 논문에서는 이와 같은 현상이 선미관 지지베어링의 안정성에 부정적 영향을 미치는 요인이 됨을 증명하였다.

2) 상기 사항은 그동안 준-정적 상태에서의 축계설계 시 적극적으로 고려되지 않았던 점이며, 본 연구를 통해 검증함으로써 과도상태에서 존재하는 잠재적 위험이 식별된 것에 학문적 의미가 있다.

3) 다만, 본 연구가 본 선박에 국한되어 수행된 점, 축의 모멘트 거동변화 β 각을 교차검증하기 위

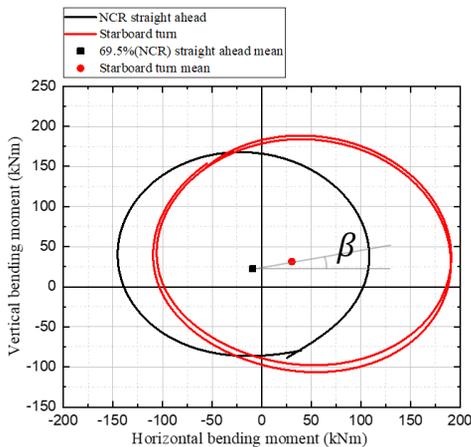


Fig. 9 Trajectory at rapid rudder starboard turn

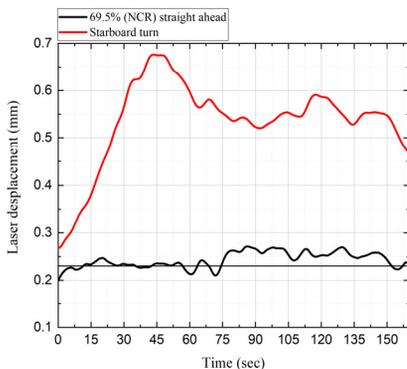


Fig. 10 Variation of shaft displacement at starboard turn

해 변위센서의 추가 설치가 필요한 점은 보완할 필요가 있다. 뿐만 아니라 연구의 통섭성을 갖춘 결과 도출을 위하여 향후 다양한 선택으로 대상을 확대할 필요가 있다.

후 기

본 논문은 부산광역시 및 (재)부산인재평생교육진흥원의 BB21플러스 사업으로 지원된 연구임.

본 논문은 2021년도 해양수산부 및 해양수산과학기술진흥원 연구비 지원으로 수행된 '자율운항선박 기술개발사업(20200615)'의 연구결과입니다. 이에 감사드립니다.

Author contributions

J. U. Lee; Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Resources, Software, Writing-original draft. J. R. Kim; Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Methodology, Resources, Software, Supervision, Validation, Writing-review & editing.

References

1. R. Michel, 1959, "A Quarter Century of Propulsion Shafting Design Practice and Operating Experience in the US Navy", *Journal of the American Society for Naval Engineers*, Vol. 71, No. 1, pp. 153-164. (DOI:10.1111/j.1559-3584.1959.tb05306.x)
2. W. Lehr and E. Parker, 1961, "Considerations in the Design of Marine Propulsion Shaft Systems", *Society of Naval Architects and Marine Engineers*, Vol. 67, pp. 555-601.
3. G. Mann, 1964, "Design of Propulsion Shaft Systems Using Fair Curve Alignment Theory", *Naval Engineers Journal*, Vol. 76, No. 6, pp. 851-862.

- (DOI:10.1111/j.1559-3584.1964.tb04091.x)
4. G. Mann, 1965, "Analysis of Shafting Problems Using Fair Curve Alignment Theory", *Naval Engineers Journal*, Vol. 77, No. 1, pp. 117-133. (DOI:10.1111/j.1559-3584.1965.tb05656.x)
5. G. Mann, 1965, "Shipyard Alignment of Propulsion Shafting Using Fair Curve Alignment Theory", *Naval Engineers Journal*, Vol. 77, No. 4, pp. 651-659. (DOI:10.1111/j.1559-3584.1965.tb04996.x)
6. T. A. Wilkin and W. Strassheim, 1973, "Some Theoretical and Practical Aspects of Shaft Alignment", *IMAS Conference 73 of The Institute of Marine Engineers*.
7. Class NK., 2006, "Guidelines on Shafting Alignment", Japan.
8. J. U. Lee, 2016, "A Study of the Analysis of Shaft Alignment Considering Hull Deflections for 50,000 DWT Oil/Chemical tankers", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 40, No. 3, pp. 191-197. (DOI:10.5916/jkosme.2016.40.3.191)
9. J. U. Lee, 2016, "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. (DOI:10.5916/jkosme.2016.40.4.288)
10. T. Saitoh, 1983, "Dynamic alignment taking account of propeller forces and stern tube bearing performances", *Journal of MESJ*, Vol. 18, No. 2, pp. 142-153. (<https://doi.org/10.5988/jime1966.18.142>)
11. G. Dubbioso, R. Muscari, F. Ortolani et al., 2017, "Analysis of propeller bearing loads by CFD. Part I: straight ahead and steady turning maneuvers", *Ocean Engineering*, Vol. 130, pp. 241-259. (<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.12.004>)

12. R. Muscari, G. Dubbioso, F. Ortolani et al., 2017, "Analysis of propeller bearing loads by CFD. Part II: Transient maneuvers", *Ocean Engineering*, Vol. 146, pp. 217-233. (<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.09.050>)
13. S. H. Shin, 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*, Vol. 52, No. 1, pp. 61-69. (<https://doi.org/10.3744/SNAK.2015.52.1.61>)
14. J. U. Lee, 2016, "Theoretical and Experimental Analysis of the Lateral Vibration of Shafting System Using Strain Gauges in 50,000-DWT Oil/Chemical tankers", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 40, No. 4, pp. 301-306. (DOI:10.5916/jkosme.2016.40.4.301)
15. J. U. Lee, 2017, "Effect of Propeller Forces into Propulsion Shafting System in accordance with Engine load of 50K DWT Class Product Oil/Chemical Tanker During Ship Acceleration", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 41, No. 9, pp. 801-806. (DOI:10.5916/jkosme.2017.41.9.801)
16. J. U. Lee, 2018, "Application of Strain Gauge Method for Investigating Influence of Ship Shaft Movement by Hydrodynamic Propeller Forces on Shaft Alignment", *Measurement*, Vol. 121, pp. 261-275. (DOI:10.1016/j.measurement.2018.02.067)