

## 5만톤급 석유화학제품 운반선의 선박 가속 시 엔진 부하에 따른 프로펠러 힘이 추진축계에 미치는 영향 연구

이재웅<sup>†</sup>

(Received June 12, 2017 ; Revised July 4, 2017 ; Accepted September 26, 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

Jae-Ung Lee<sup>†</sup>

**요약:** 선박의 추진축계 안정성확보를 위해 수행된 일련의 축계정렬 연구는 주로 준정적상태(quasi-static)에서 수행되어왔다. 선박의 축계는 축 끝단 프로펠러 하중의 영향으로 프로펠러축을 지지하고 있는 선미관 베어링에 국부하중 증가가 두드러지게 나타난다. 이러한 국부하중의 크기와 분포는 축과 베어링간의 상대적 경사각에 의해 결정되는데 수력학적 동적 과도상태에서 프로펠러 힘에 의한 추력편심이 하방으로 작용하여 축이 아래로 처지게 되는 경우 하중은 선미관 후 부베어링 끝단으로 더 크게 치우쳐질 수 있다. 본 연구에서는 축계 안정성 평가를 위한 축 동적 거동 분석을 5만톤급 중형화학제품운반선을 대상으로 수행하였다. 분석결과, 엔진부하의 증가에 따른 프로펠러 힘에 의해 축의 거동이 영향을 받는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 프로펠러 근방에서 직접계측을 수행한 선행연구결과와 일관성을 가지고 있으며 직접계측의 대체방법으로 유의미함을 확인하였다.

**주제어:** 프로펠러 힘, 축 거동, 축계 안정성

**Abstract:** The fact that the stability of the propulsion shaft system is crucial when designing a ship has led to many studies on the proper alignment of the shaft, in particular under quasi-static conditions. The propeller weight contributes significantly to increase the local loads of the stern tube bearings supporting the propeller shaft. The relative inclination angle between the shaft and the bearing, in general, determines the degree and distribution of the local loads. When the propeller force in the hydrodynamic transient state that leads the shaft descends, thereby causing the eccentric thrust to act downwards, the local load can be significantly deflected toward the after-end of the after-stern tube bearing. This paper investigates the dynamic behavior of the propeller shafts and evaluates its stability, using a 50,000 dead weight tonnage (DWT) oil/chemical carrier. The results revealed that the behavior of the shaft was influenced by the hydraulic propeller force with increasing engine load. The proposed method proved to be meaningful and practical as it shows similar results to previous studies where direct measuring at the adjacent of the propeller was carried out

**Keywords:** Propeller forces, Shaft behavior, Shaft stability

## 1. 서론

선박의 동적상태 시의 축 거동 분석에 관한 사항은 정적 상태만 고려하였던 축계정렬 설계방식으로는 운전 시 프로펠러에서 발생하는 힘에 기인한 선미관 베어링 및 선미관 밀봉장치(seal ring)의 심각한 손상을 방지할 수 없다는 것이 Saitoh에 의해 본격적으로 연구[1]되기 시작한 것으로 보인다. 또한 1990년대부터 선체 유연성 증가에 따른 선체변형량이 커지면서 선미관 베어링의 손상사고가 크게 증가됨에 따라 그 관심이 점차 높아지고 있는 추세이다. 외국의

사례를 보면 R. Kuroiwa, *et al.*에 의해 선박의 선회시 발생하는 프로펠러 편심 추력을 고려한 선미관 베어링의 건전성평가[2]가 수행되었으며 S. Takahashi, *et al.*에 의해 수행된 유막 및 축 궤적 분석 연구결과[3]는 프로펠러 동적 하중을 고려하는 것의 중요성을 보여주고 있다. 같은 해 이와 유사하게 수행된 연구결과[4] 역시 반류분포에 의한 횡방향 프로펠러 하중(lateral propeller forces)이 선미관 베어링에 영향을 미치므로 이를 설계 과정에서 고려하여야 축계정렬을 성공적으로 이끌어 낼 수 있다는 것을 보여준다. 한

<sup>†</sup> Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6937-4295>): Division of Marine Mechatronics, Mokpo National Maritime University, Haeyangdaehak-ro 91, Mokpo-si, Jeollanam-do, 568278, Korea, E-mail: [julee.shafting@mmu.ac.kr](mailto:julee.shafting@mmu.ac.kr), Tel: 061-240-7242

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.

국에서는 최근 CFD 및 모형시험결과를 통한 선박의 직진, 선회시의 프로펠러 하중이 베어링에 미치는 영향에 관한 연구[5]가 수행되었다. 그러나 아직까지는 선박의 프로펠러 하중(hydrodynamic propeller forces)이 선미관 베어링에 미치는 영향을 모든 선종에 일괄적으로 적용할 수는 없고, 사례 별로 별도로 다룰 수 밖에 없는 한계가 있다.

본 연구에서는 최근 친환경 고효율 선박으로 등장한 5만 톤급 중형화학제품 운반선을 대상으로 선박 운항시 프로펠러로부터 발생하는 수력학적 힘이 추진축계에 미치는 영향을 검토하고자 한다.

## 2. 계측 및 해석방법

### 2.1 측정 설비의 구성

Table 1은 본 연구 대상인 선박의 측계 주요 사양이며 Figure 1 및 Table 2에서는 측계 배치도, 측정 및 해석을 위한 스트레인 게이지 및 레이저 센서 부착위치를 나타내었다.

스트레인 게이지는 기관실 내에 설치되었으므로 습기와 기계적 충격으로부터의 보호조치는 별도로 수행하지 않았다. 측정설비 구성을 위한 신호선, 배터리 및 텔레메트리 송신장치는 Figure 2와 같이 테이프프로 축에 고정하였다.

또한, 선미관 선수 밀봉장치(seal)쪽에 Pepperl+Fuchs 사의 레이저 센서(VDM18-300)를 Figure 3과 같이 부착하였고, 축 표면에는 No.1 실린더 TDC 위치에 5 mm 두께의 고무 패드를 부착하여 프로펠러축 변위 및 축의 회전속도를 동시에 측정할 수 있도록 하였다.

Table 1: Specification of the test ship

Vessel type	50K DWT oil/chemical tanker
Main engine	Type: MAN B&W 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	Cap & nut mass: 1,538 kg
	Mass: 11,207 kg

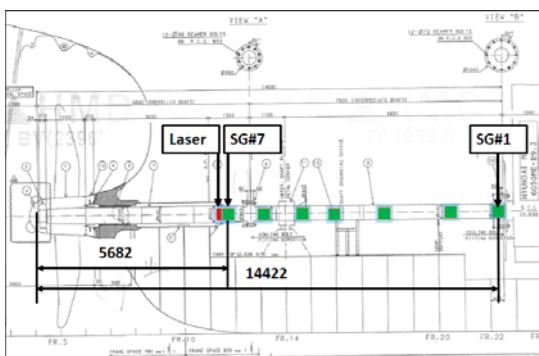


Figure 1: Shafting arrangement and sensor allocation

Table 2: Sensor arrangement

Channel #	Trans-ducer type	Transducer name (mounted position)
1	Laser sensor	L1 (right after forward S/T seal)
2	Strain gage	SG7 (forward propeller shaft)
3	Strain gage	SG6 (Aft intermediate shaft)
4	Strain gage	SG5 (right after intermediate bearing)
5	Strain gage	SG4 (middle intermediate shaft)
6	Strain gage	SG3 (middle intermediate shaft)
7	Strain gage	SG2 (forward intermediate shaft)
8	Strain gage	SG1 (forward intermediate shaft)



Figure 2: Measurement of shaft force with telemetry system

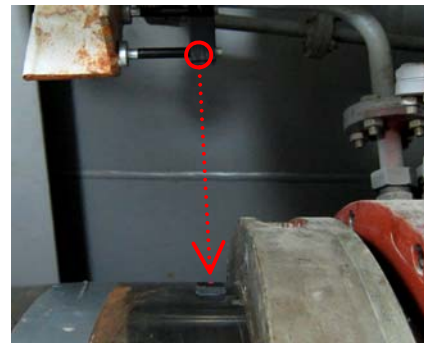


Figure 3: Arrangement of laser sensor

### 2.2 계측 절차

계측은 Table 3에서와 같이 만재 흡수상태에서의 APT(after peak tank) 적재상태(full laden APT full (FLF)) 조건에서 수행되었다.

Table 3: Test procedures under the FLF condition

Test#	Test program	Load	rpm
1	Static	0	0
2	Acceleration	0 to 25%	0 ~ 57.3
3	Steady state	25%	57.3
4	Acceleration	25% to NCR	57.3 ~ 78.3
5	Steady state	NCR(69.5%)	78.3
6	Steady state	NCR	81
7	Steady state	NCR	83.8
8	Acceleration	NCR to 85%	78.3 ~ 90.2
9	Steady state	85%	90.3
10	Steady state	85%	90.2
11	Acceleration	85 to MCR	89.5 ~ 95
12	Steady state	MCR	95

2.3 원신호의 처리

선박 직진시 축 거동에 미치는 영향을 분석하기 위한 방법으로 시간영역 기반 선도 및 회전각 기반 선도 이외에 진동해석 및 거동분석에 유용한 궤도선도(orbit plot)가 있다. 이를 얻기 위해서는 원칙적으로는 Figure 4에서와 같이 계측 위치에 두개의 비접촉 변위센서를 축 중심에서 서로 90° 간격을 두고 설치하고 회전속도를 기록할 수 있는 또 하나의 변위센서를 설치해야 한다.

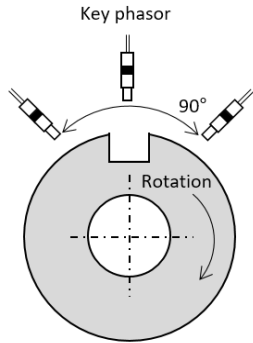


Figure 4: Diagram of a typical displacement measurement

이 경우에 한 센서로부터 발생하는 신호는 선도의 수평 축 입력이 되고 다른 센서로부터 발생하는 신호는 수직축 입력이 된다.

이 두 직교 방향의 신호들은 각각의 시간과형으로 동시에 표시할 수 있거나 또는 두 신호를 결합하여 하나의 정보로 나타낼 수 있다. 또한 정확한 변위 및 축의 궤도를 측정하기 위해서는 수력학적 프로펠러힘의 영향이 직접적으로 미칠 것으로 예상되는 선미관 후부 실(seal) 근방에 비접촉 변위센서를 설치하고 각각의 순간에 수집된 X, Y 축 좌표값으로 축 중심의 좌표를 구해야 하나[6], 이는 게이지 설치를 위한 별도의 브라켓(bracket) 제작, 센서 및 안테나 트랜스미터 등의 방수, 방유조치 등의 추가공정이 수반될 뿐만 아니라 아직까지 국내기술로 시행된 연구결과가 없기 때문에 해외기술용역 의뢰에 따른 고비용문제가 발생하므로 모든 선박에 대해 수행하기는 현실적으로 어렵다. 따라서 이에 대한 대체방법으로 기관실 내에 설치된 스트레인 게이지 정보로부터 계산한 모멘트 성분을 수직과 수평성분으로 분리하여 궤도선도로 나타낼 수 있는데 이 방법은 비록 프로펠러 근방에서의 직접계측과 같이 축 중심의 정확한 변위성분은 알 수 없지만 이를 통해 운전 시 엔진 부하에 따른 축의 이동방향의 양상을 간접적으로 알 수 있어 실용적이라 할 수 있다.

스트레인 게이지로부터 수신된 계측데이터는 게이지가 설치된 위치의 축 단면에서 엔진 부하에 따라 변화하는 굽힘 모멘트를 얻기 위한 기초정보로 사용되었다. 굽힘 모멘트 값을 취득하는 방법은 다음과 같다. 먼저 축 표면에 부

착된 스트레인 게이지의 저항값은 축 회전시 발생하는 축의 수직 변형률(strain)에 비례하여 변동하는데 이러한 저항값의 변화로 입력 전압 대비 변동된 출력 전압을 얻을 수 있다. 이를 통해 식 (1)과 같은 하프 윗스톤 브릿지 결선 방식에서의 변형률  $\epsilon$ 을 얻을 수 있다.

$$\epsilon = \frac{V_o}{V_{ek}} \cdot \frac{2}{k} \tag{1}$$

여기에서  $V_o$ 는 윗스톤 브릿지에서 측정된 출력전압 값이고  $V_{ek}$ 는 입력전압이다.  $k$ 는 스트레인 게이지 상수이다. 따라서 스트레인 게이지로부터 수신된 변형율과 축 재료의 종탄성계수  $E$ 를 이용하면 식 (2)와 같이 축의 굽힘응력  $\sigma_b$ 를 구할 수 있다.

$$\sigma_b = \epsilon E \tag{2}$$

따라서, 축의 굽힘 모멘트  $M_b$ 는 식 (3)과 같이 보의 관계식을 적용함으로써 구할 수 있다.

$$M_b = \sigma_b \frac{\pi(D_o^4 - D_i^4)}{32D_o} \tag{3}$$

여기서  $D_o$ 는 축의 외경,  $D_i$ 는 축의 내경을 의미한다.

산출된 굽힘 모멘트는 Figure 5와 같이 프로펠러 및 스트레인 게이지 설치위치의 축 단면에 대해 회전좌표계(a rotating coordinate system)로 도시할 수 있다.

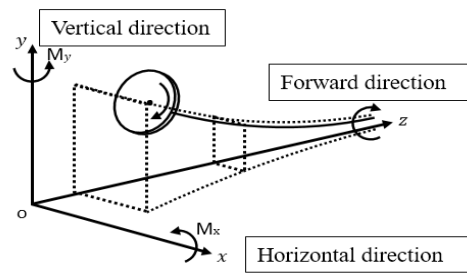


Figure 5: Direction of moment

또한 굽힘 모멘트를 궤도선도로 나타내기 위해서는 스트레인 게이지의 신호(원 신호)를 1/4회전(=90°)지연시켜 수평성분신호(지연신호)를 예측하는 것이 필요하다. 이를 위해서는 프로펠러 날개(4매)는 모두 대칭이라는 가정이 필요하며 시간기반 신호를 축 회전각 기반신호로 변환하는 작업 또한 필요하다. 시간기반신호(time domain signals)는 Figure 6 과 같이 측정된 레이저(laser) 변위 신호를 통해 다음 레이저 변위 신호 수신 시 까지의 시간을 식 (4)에서와 같이 축의 회전수로 환산하여 No.1 cylinder TDC 기준의 회전각 기반 신호로 변환할 수 있다.

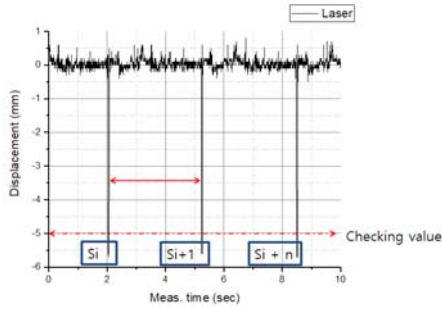


Figure 6: Laser signal converted to shaft rpm

$$N_i = \frac{60}{(S_{i+1} - S_i)} \quad (\text{rpm}) \quad (4)$$

여기서  $S_i$ 는 변위신호의  $i$ 번째 수신시점을 의미한다. 또한 보다 명확한 선도를 나타내기 위하여 원 신호에서 나타나는 noise를 FFT 처리를 통해 평활화(smooth) 하였다. 따라서 상기와 같이 회전각 기반으로 변환된 원 신호와 지연신호를 조합하면 선박의 가속 및 직진시 전체 구간에서 발생하는 축의 굽힘 모멘트 궤도선도를 얻을 수 있다.

### 3. 결과 및 고찰

본 절에서는 상기와 같은 동적 상태(Dynamic state)에서의 계측방법으로 얻은 주요 결과를 정리한다.

먼저 Figure 7 ~ Figure 9에서는 만재율수 조건에서 엔진 부하별 스트레인 게이지(SG) 5번부터 7번까지의 회전각 기준으로 전방향(synthesized) 파형신호를 나타내었다.

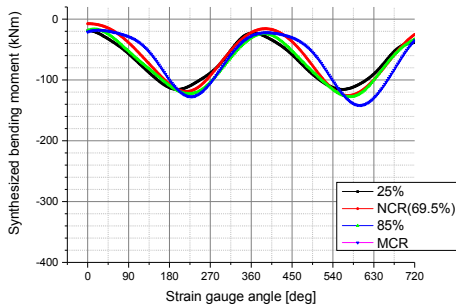


Figure 7: Converted signal measured at No. 5 SG under FLF condition

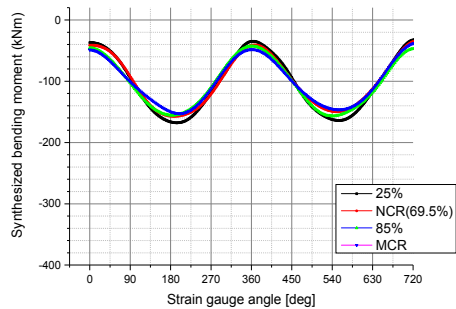


Figure 8: Converted signal measured at No. 6 SG under FLF condition

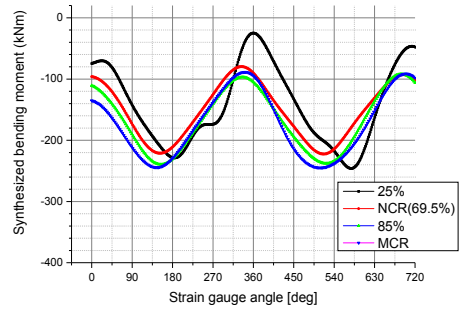


Figure 9: Converted signal measured at No. 7 SG under FLF condition

다음으로 Figure 10 ~ Figure 12에서는 엔진 부하별로 스트레인 게이지 5번부터 7번까지의 원 신호와 지연신호를 x축을 수평, y축을 수직성분으로 하여 궤도선도로 나타내었다.

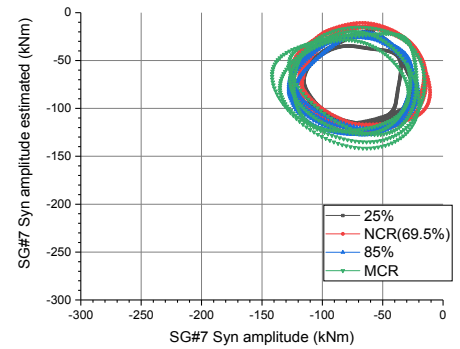


Figure 10: Trajectory of SG No. 5 at FLF condition

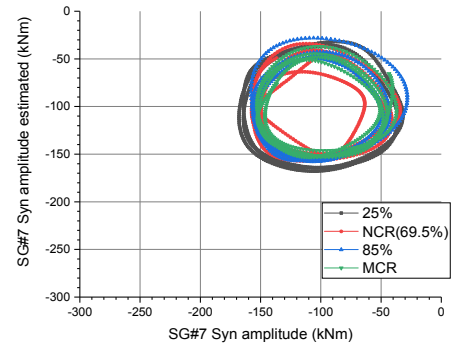


Figure 11: Trajectory of No. 6 SG under FLF condition

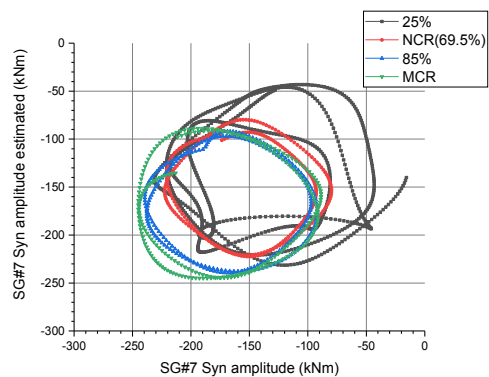


Figure 12: Trajectory of No. 7 SG under FLF condition

게이지별 궤도선도를 검토한 결과, 스트레인 게이지 모두에서 엔진부하변동에 큰 영향을 받지 않으면서 비교적 진원형태에 가까운 궤적을 나타내고 있음을 확인하였다.

또한 프로펠러와 가장 가까운 위치의 스트레인 게이지 7번 위치에서는 엔진부하 변동에 따른 회전수 증가로 인한 프로펠러 힘의 영향에 보다 민감함을 알 수 있었다. 스트레인 게이지 7번의 경우, 엔진부하 25% 지점(57 rpm)에서의 궤도의 형상으로 볼때 불평형 또는 축과 베어링의 작은 마찰[7-9]이 발생하는 것으로 판단되므로 대상선박의 경우 FLF 조건에서는 가능한 한 25% 상태에서의 장시간 운전을 피하는 것이 축의 안정성 향상에 필요하다. 이러한 현상의 원인은 다음과 같이 추정 가능하다.

(1) 길들임 운전(bearing bed in operation)

길들임 운전이란 프로펠러 축과 베어링 사이의 과도한 마찰로 인한 선미관 베어링의 손상을 방지하기 위해 저부하에서 고부하로 서서히 rpm을 증가시키면서 베어링이 축의 기공기에 맞게 어느 정도 깎여 나가 축이 베어링에 안착될 수 있도록 수행하는 일련의 절차를 말한다. 본 계측의 시점은 시운전 시였으며 따라서 충분한 운항시간이 확보되지 않은 상태로 계측이 수행되었기 때문에 이러한 현상이 나타날 수 있다고 판단되며 이후 베어링이 새로운 부분 경사를 형성하며 자리를 잡은 후에는 축계가 안정될 수 있을 것으로 판단된다.

(2) 수력학적 프로펠러힘의 불평형

선박의 운전중 불균일한 반류에 의해 발생하는 베어링 포스의 불균일함[10]이 축계에 힘과 모멘트로 작용하는 과도 상태로 나타날 수 있다고 판단된다. 그러나 이러한 가정의 검증은 위해서는 불균일한 반류와 이에 따라 프로펠러에 가해지는 수력학적 힘을 보다 정확히 추정할 수 있는 평가방법에 관한 후속 연구가 필요하다고 판단된다.

축의 거동과 관련하여, Figure 12에서와 같이 프로펠러와 가장 가까운 스트레인 게이지 7번 위치의 축 방향이 엔진 부하 증가에 따라 좌측 하방으로 이동하는 것을 알 수 있다.

기본적으로 프로펠러와 게이지 사이가 변형이 없는 직선 보라고 가정했을 때 스트레인 게이지 7번 위치에서의 운동 방향은 프로펠러 위치에서의 운동방향과 반대라고 생각할 수 있다. 즉 스트레인 게이지 7번에서 보의 운동방향이 수직상방으로 이동할 때 프로펠러위치에서 보의 운동 방향은 수직하방으로, 스트레인 게이지 7번 위치에서 보의 방향이 좌측으로 이동할 때 프로펠러위치에서 보의 운동방향은 우측으로 이동할 것으로 예상된다. 이러한 가정에 의해 스트레인 게이지 7번에서의 결과를 검토한 결과 프로펠러의 위치는 스트레인 게이지 7번 설치위치의 이동방향과 반대인 우측 상방으로 이동하는 것으로 판단된다.

축 거동과 관련한 이러한 가정의 유효성은 Vartdal에 의해 수행된 실제 프로펠러 근방에서의 굽힘 모멘트 계산 결과[4]와 경향이 일치하는 것에서 확인할 수 있었다. 아울러 본 연구방법의 정확도를 높이기 위해서는 스트레인게이지

를 가능한 한 프로펠러와의 거리가 가장 근접하는 위치에 설치해야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 스트레인 게이지정보로 계산한 굽힘 모멘트를 궤도선도로 분석하였다. 만재출수 조건에서 계측을 수행하고 선박의 가속 및 직진시 발생하는 프로펠러의 수력학적 힘이 축계의 거동에 미치는 영향을 엔진 부하별로 고찰하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 궤도선도 검토 결과 궤적은 스트레인 게이지 모두에서 엔진부하변동에 큰 영향을 받지 않으면서 비교적 진원 형태를 나타내고 있음을 확인하였다. 다만, 스트레인 게이지 7번의 경우 엔진부하 25% 상태에서 경미하게 부분마찰 현상이 나타났지만 길들임 운전 후에 점차 안정화 될 것으로 판단된다.
- (2) 축의 거동과 관련하여 프로펠러와 가장 가까운 스트레인 게이지 7번 위치의 축 방향이 엔진 부하 증가에 따라 좌측 하방으로 이동하는 것을 알 수 있다. 기본적으로 프로펠러와 게이지 사이가 변형이 없는 직선보라고 가정했을 때 프로펠러의 위치는 스트레인 게이지 7번 설치위치의 이동방향과 반대인 우측 상방으로 이동하는 것으로 판단되며 이의 유효성은 프로펠러 근방에서 계측을 수행한 선행연구결과를 바탕으로 확인할 수 있었다.
- (3) 본 연구에서 제시된 해석 방법을 통하여 선박 운전시 엔진 부하에 따른 프로펠러의 유체 힘이 추진축계에 영향을 미치고 있음을 확인하였으며 프로펠러축의 이동방향의 양상을 알 수 있어 프로펠러 근방에서 수행하는 계측 방법의 대체방법으로 의미가 있음을 확인하였다.

References

- [1] T. Saitoh, "Dynamic alignment taking account of propeller forces and stern tube bearing performances" Journal of the Marine Engineering Society in Japan, vol. 18, no. 2, pp. 142-153, 1983 (in Japanese).
- [2] R. Kuroiwa, A. Oshima, T. Nishioka, T. Tateishi, K. Ohyama, and T. Ishijima, "Reliability improvement of stern tube bearing considering propeller shaft forces during ship turning," Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review, vol. 44, no. 3, pp. 1-3, 2007.
- [3] S. Takahashi, S. Matsumoto, T. Tateishi, K. Ohyama, R. Kuroiwa, and S. Morohoshi, "Study on oil film analysis of the stern tube bearing under the conditions of dynamic propeller shaft forces," The Japan Society of Mechanical Engineers, Trans.C75(759), pp. 3054-3061, 2009 (in Japanese).
- [4] B. J. Vartdal, T. Gjestland, and T. I. Arvidsen, "Lateral propeller forces and their effects on shaft bearings," First International Symposium on Marine

- Propulsors, pp. 475-481, 2009.
- [5] S. H. Shin, "Effects of propeller forces on the propeller shaft bearing during going straight and turning ship," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, vol. 52, no. 1, pp. 61-69, 2015 (in Korean).
- [6] B. S. Yang, *Condition Monitoring & Diagnostics*, Korea: Interscience, 2006 (in Korean).
- [7] Incosys, *Vibration and Equipment handbook*, <http://www.incosys.co.kr/index.php/book/book-table?id=945>, Accessed March 25, 2017.
- [8] J. U. Lee, *A Study on the Stability of Propulsion Shafting for Medium Size Oil Chemical Tanker*, Ph.D. Dissertation, Department of Marine System Engineering Graduate School, Korea Maritime and Ocean University, Korea, 2016 (in Korean).
- [9] N. Bachschmid, P. Pennacchi, and A. Vania, "Diagnostic significance of orbit shape analysis and its application to improve machine fault detection," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 26, no. 2, pp. 200-208, 2004.
- [10] Korean Register, *Control of Ship Vibration and Noise Ch. 4*, 3rd ed., Paju city, Korea: Textbooks, 2014 (in Korean).