

대형선 프로펠러보스 슬립 손상부에 대한 응력 계산에 관한 연구

백신영*

* 목포해양대학교 기관시스템공학부

The Study for Stress Calculation of Slip Damage between Propeller Boss and Shaft on the Large Vessel

Shin-Young Baik*

* Division of Marine Engineering System, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

요 약 : 프로펠러와 프로펠러축이 슬립(Slip)되는 사고가 발생하면 추진력 상실로 인한 안전과 경제적면에서 막대한 문제가 될 수 있다. 본 연구에서는 대형선박에서 슬립사고(Slip damage) 발생 원인을 사고 선박 승선원 면담, 신조선의 도면검토, 보험사 조사관 사고 보고서 등을 통해 조사하였다. 추가로 프로펠러의 재질에 대한 충격강도를 확인하기 위하여 압축시험을 실시하였다. 본 연구 결과는 키가 없는(Keyless type) 프로펠러의 접촉강도 설계 기준에 적용 할 수 있고, 나아가 프로펠러보스와 축이 슬립하는 사고를 방지하는데 유용한 자료를 제공 할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 프로펠러보스, 프로펠러축, 슬립, 토크, 압축응력

Abstract : *The accident of Slip damage which arose between propeller boss and shaft will be a great problem of safety and economical due to the loss of propulsion power. In this study, the cause of slip damage on the large vessel was surveyed by meeting with officers of troubled ship, checking of drawings on the new built and surveyor report of adjuster company. Additionally, the material of propeller had been compression tested for confirming the impact strength. The result of this studies would be promote the design strength for contact force for keyless propeller, and futhermore reduce the accident of propeller slip between propeller boss and shaft.*

Key Words : *Propeller boss, Propeller shaft, Slip, Torque, Compression stress*

1. 서 론

대형선박에서 추진용 프로펠러는 주로 스크류식(Screw type) 고정피치가 많이 사용된다. 이러한 프로펠러에서 발생하는 손상은 기계적인 날개(Blade)의 다른 물체와 충돌, 물리-화학적인 공동현상(Cavitation), 부식, 및 침식, 변형 및 절손, 보스의 슬립 등이 있다. 프로펠러와 프로펠러축은 키(Key)가 있는 형식과 키가 없는(Keyless) 형식이 있다(이, 2010). 최근에는 기계가공이나 응력집중에 따른 손상을 방지하기 위하여 키가 없는 방식이 주로 사용되고 있다(고, 1993). 키가 없는 프로펠러에서 가끔 발생하는 고장중의 하나가 프로펠러 보스(이하 : 보스)와 프로펠러축(이하 : 축)이 서로 이완(Slip)하는 것이다(현대중공업, 2003).

본 연구에서는 Panama선적 Bulk carrier로서 프랑스 선급(BV)이고 재화중량 145,500 ton, 전장 266.5 m, 형폭 42.97 m, 흘수 23.77 m인 선박이 2011년 1월초에 보스와 축이 이완되어 자력으로서는 가동을 할 수 없어 예인선에 의해 부두에 접안하

고, 고장이 발생한 프로펠러 교환을 위하여 입거하는 사고가 발생하였다. 본 연구에서 프로펠러에 남아있는 사고부위에 가해진 충격력을 압축시험을 통해 보스와 축이 슬립하는 원인을 명확히 규명하고자 한다. 이 연구를 바탕으로 프로펠러와 축이 접촉하는 접촉력을 정확히 계산함으로써 프로펠러 설계의 기초 자료 제공하여 슬립사고를 예방 할 수 있을 것이다.

2. 연구 선박의 프로펠러와 프로펠러축 기본자료

연구의 배경이 된 선박은 주기관(Main engine)이 Mitsui B&W 6L80GFC이며 106 rpm에서 18,400 마력을 발생시키는 저속 Diesel 기관을 탑재하였다. Propeller 직경 7,100 mm, 피치(Pitch) 4,767 mm, 중량은 23,330 kg이며 4 Blades로서 전진 중 회전방향은 선미에서 보면 시계방향(Clockwise direction)이고 프로펠러 재료는 Ni-Al-Br이며 축은 Steel Grade 2이다. 프로펠러 축 테이퍼부의 대단부 직경이 680 mm, 테이퍼 경사 1/20, Taper 부분의 길이는 1,130 mm이다.

* 정회원, baiksy@mmu.ac.kr, 061-240-7209

3. Torque 계산

3.1 토크와 작용력 계산

$$T = r \times F \quad (1)$$

여기에서 T : 토크, r : 반경, F : 힘의 크기

$$1 \text{ HP} = 75 \text{ kgm/sec}, 1 \text{ kW} = 102 \text{ kgm/sec}, 1 \text{ HP} = 0.735 \text{ kW} \quad (2)$$

$$P = T\omega \quad (3)$$

여기에서 P : 출력, T : 토크, ω : 각속도

$$\begin{aligned} \text{kW} &= T(\text{Nm}) \times 2\pi \times \text{rpm}/60,000 \\ \text{rpm} &: \text{revolution per minute(매분회전수)} \end{aligned} \quad (4)$$

연구 대상선박은 마력이 106 rpm에서 18,400 HP이므로 식2)에서

$$\text{kW} = 18,400 \text{ HP} \times 0.735 \text{ kW/HP} = 13,529 \text{ (kW)} \quad (5)$$

식3)에서 $T = \text{kW} \times 60,000 / (2\pi \times \text{rpm})$

$$\begin{aligned} &= 13,529 \times 60,000 / (2 \times 3.14 \times 106) \\ &= 1,219,414 \text{ (Nm)} \end{aligned} \quad (6)$$

Propeller 직경이 7,100 mm이므로

$$\text{반경}(r) = 7,100 \text{ mm}/2 = 3.55 \text{ m} \quad (7)$$

식1)에서 $F = T / r = 1,219,414 \text{ (Nm)} / 3.55 \text{ m}$

$$= 343,497 \text{ N} \quad (8)$$

선급에서 Keyless Propeller의 경우 Propeller shaft와 Boss 사이에 2.8배 이상의 토크에 견디는 접착력을 요구하므로(한국선급협회, 2011) 실제로 걸리는 힘은 $343,497 \text{ N} \times 2.8 = 961,791.6 \text{ N}$ 이상이 되어야 한다.

일본선급협회에서 측정된 후진시 토크는 전진시 1.6배이므로 접착력 여유는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{토크 차이} &= \text{설계토크} - \text{후진토크} \\ &= (2.8 - 1.6) \times \text{주기관 최대토크} \\ &= 1.2 \times \text{주기관 최대토크} \end{aligned} \quad (9)$$

$$(10)$$

선급에서 분류하는 프로펠러 재료(ALBC3)제의 항복강도는 245 N/mm^2 이고 인장강도는 590 N/mm^2 이상이 요구된다.

3.2 열수축에 따른 접착력 강하

상온 25°C 에서 -0°C 로 냉각될 때 수축에 따른 재료의 접착력 감소는 다음과 같다.

$$\text{원둘레} = \text{직경} \times 3.14$$

$$\begin{aligned} &= 651.75 \text{ mm} \times 3.14 = 2,065.3 \text{ mm} \\ \text{수축량} &= \text{길이} \times \text{열팽창계수} \\ &= 2,065.3 \text{ mm} \times 25^\circ\text{C} \times 2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} = 0.103 \text{ mm} \\ 0.103/2,065.3 &= 0.0005 = 0.05\% \end{aligned} \quad (11)$$

한편 보스 재료에 대한 강도 계산을 하면 아래와 같다(오 등, 1998). 보스재료의 비례인장시험편에서

$$L = 5d \quad (12)$$

여기에서 L = 시험편 평행부 길이, d = 평행부 직경, 일반적인 인장시험편에서 d = 10 mm이면 L = $5 \times 10 = 50 \text{ mm}$ 가 된다. 선급에서 요구되는 최소 연신율이 16% 이상이므로 연신 길이 = $50 \times 0.16 = 8 \text{ (mm)}$ 이다. 항복점이 없는 경우 YS는 0.2% Proof Stress를 적용하므로 $8 \text{ mm} \times 0.002 = 0.016 \text{ (mm)}$ 가 된다.

사고가 발생하였을 때 해상에는 부빙이 있었으며 이때 해수 온도는 -2°C 정도로서 축재료의 흡수에너지가 상온에서 $100\text{--}130 \text{ J/mm}^2$, 0°C 에서는 50 J/mm^2 정도이므로 상온에 비하여 절반 이하가 된다. Fig. 1의 응력 연신곡선에서 0.016 mm에서 비례부분에 평형하게 그리면 만나는 값이 대략 245 N이다. 접착력 감소량은 연신 0.2%일 때 응력이 245 N/mm^2 이므로 식11)에서 0.05%일 때 강도는 $0.05\%/0.2\% \times 245 \text{ N/mm}^2 = 61.25 \text{ N/mm}^2$ 가 된다.

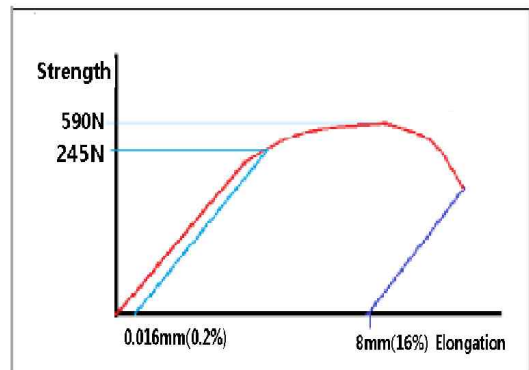


Fig. 1. Stress Strain curve for ALBC3.

3.3 보스내면에 작용하는 힘

Fig. 2는 보스와 축 접촉부를 나타낸다. Fig. 2에서 축 직경이 680 mm이고 Taper가 1/20이며 적은 직경이 623.5 mm, 길이가 1,130 mm이므로 중앙부의 직경은 $623.5 + (680 - 623.5)/2 = 651.75 \text{ mm}$ 가 된다. 축의 Taper된 부분의 표면적은 중앙부 직경 $\times \pi \times$ 길이가 되므로 면적 = $651.75 \times \pi \times 1,130 = 2,312,557.10 \text{ mm}^2$ 이고 단위 면적당 가해지는 힘 = 전체의 힘/단면적은 $961,791.6\text{N}/2,312,557.10 \text{ mm}^2 = 0.416 \text{ N/mm}^2$ 과 같다.

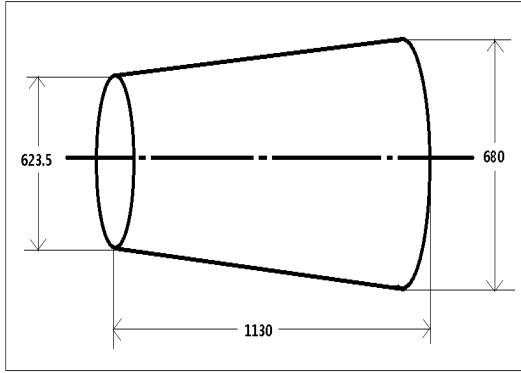


Fig. 2. Propeller Boss Taper Part.

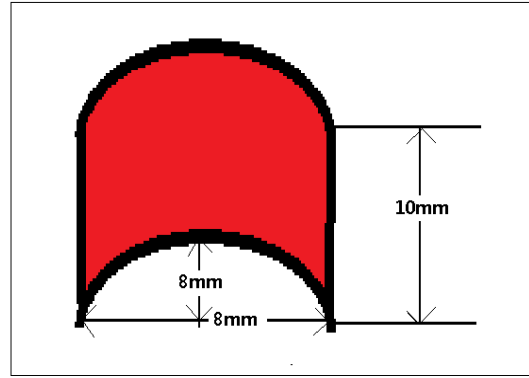


Fig. 4. Damaged Propeller Slot.

3.4 프로펠러 재료의 압축강도 측정 및 계산

Fig. 3은 시편의 크기가 직경 20 mm, 높이 20 mm의 보스와 같은 규격의 ALBC3재를 압축 시험한 결과 연신 및 강도 곡선이며 Table 1은 이 Fig. 3에서 계산된 하중 및 연신값을 나타낸다(Kuwabara et al., 2009).

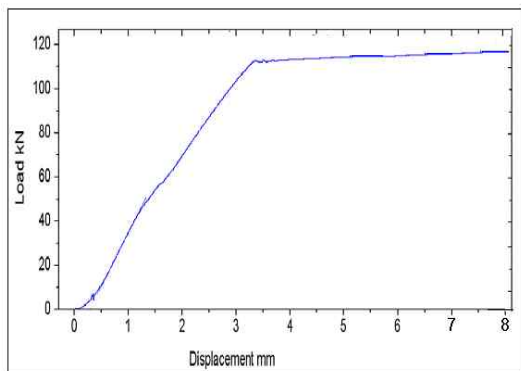


Fig. 3. Compression Result for ALBC3.

Table 1. Compression Result for ALBC3

P(kN)	63	112	112	112
$-\Delta h$ (mm)	2	4	6	8
σ_o (N/mm ²)	201.6	358.4	358.4	358.4
$-\epsilon_o$ (%)	0.10	0.20	0.30	0.40
σ_t (N/mm ²)	221.8	430.1	510.0	539.6
$-\epsilon_t$ (%)	0.105	0.223	0.356	0.511

$$\sigma_o = P/A_o = 37000/(3.14 \times 10 \times 10)$$

$$= 37,000/314 \text{ (mm}^2\text{)} = 118.4$$

$$\epsilon_o = \Delta h/h = -1/20 = -0.05$$

$$\sigma_t = \sigma_o(1 + \epsilon_o), \quad \epsilon_t = \ln(1 + \epsilon_o)$$

8mm깊이로 손상될 경우(깊이 8mm 직경 8mm 높이 10mm)

Fig. 4와 같으며 면적 = 원둘레 \times 높이 = $3.14 \times$ 직경/2 \times 10

$$= 3.14 \times 8/2 \times 10 = 125.6 \text{ mm}^2\text{이다.}$$



Fig. 5. Detail of Damaged Parts.

$$\begin{aligned} P &= A_o \times \sigma_o \\ &= 125.6 \text{ mm}^2 \times 539.6 \text{ N/mm}^2 \\ &= 67,774 \text{ N} \end{aligned}$$

Propeller 선단 속도

$$\begin{aligned} &= \text{직경} \times 3.14 \times \text{rpm}/60 \\ &= 7,100 \times 3.14 \times 106/60 \\ &= 39.4 \text{ m/sec} \end{aligned}$$

$$\Delta P = F \times \Delta t \tag{13}$$

여기에서 P = 힘, F = 충격력, t = 작용시간이다.

예를들면 10 m 거리에서 물체가 프로펠러 날개를 치고 나갈 경우 충격시간은 $10 \text{ m} / 39.4 \text{ m/sec} = 0.25 \text{ sec}$ 이다.

$$\begin{aligned} F &= \Delta P / \Delta t = 67,774 \text{ N} / 0.25 \text{ sec} \\ &= 271,096 \text{ N} \end{aligned}$$

따라서 이러한 손상이 프로펠러축과 보스를 슬립하는데 필요한 개수는 $343,497 \text{ N} / 271,096 \text{ N/ea} = 1.267$ 개가 된다. Fig. 5는 실제 보스의 슬립 손상부이며 적은 원 부분이 Fig. 4의 손상이 발생한 부분이다.

3.5 프로펠러 보스 고정용 너트의 Locking Pin 강도계산

프로펠러 보스와 축이 슬립 할 때 보스를 고정하는 프로펠

러 너트가 30mm 정도 뒤로 밀리면서 너트를 고정시키는 Locking Plate의 직경 24mm의 핀이 절손되었다 이 핀의 절손 원인을 확인하기 위하여 전단강도를 계산하였다. Fig. 6은 Locking Plate와 Pin을 나타낸다.

Locking Plate와 Pin의 재료는 연강(Mild steel)으로서 이 재료의 전단 및 인장 강도는 Table 2와 같다.

$$\phi 24 \text{ mm 연강 일 때 면적은 } D^2/4 \times 3.14 = 24 \times 24 / 4 \times 3.14 = 452.16 \text{ mm}^2$$

Table 2에서 전단강도가 260 N/mm² 이상이므로 이 핀의 전단 강도는 다음과 같다.

$$452.16 \text{ mm}^2 \times 260 \text{ N/mm}^2 = 117,562 \text{ N}$$

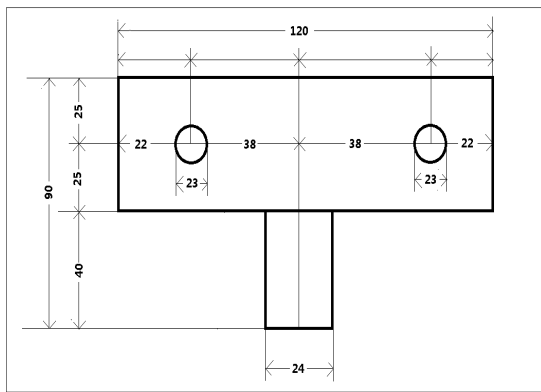


Fig. 6. Details of Locking Plate and Pin.

Table 2. Strength(N/mm²) of Mild Steel

Material	Shear strength		Tensile strength	
	Soft	Hard	Soft	Hard
Hot Roll	260>		280>	
Cold Roll	260>		280>	

후진시 프로펠러에 걸리는 힘은 961,791.6 N(2.8 배 토크)이므로 선급에서 계산하는 마찰계수가 0.3으로 계산하면

$$961,791.6 \text{ N} \times 0.3 = 288,537 \text{ N} >$$

117,562 N으로 Locking Pin은 절손된다.

4. 결론

프로펠러 보스와 프로펠러축이 슬립이 발생하면 자항능력이 상실되어 위험한 상태에 놓일 수 있으며, 수리나 화물을 하역하기 위해서는 예인선에 예인되어야 하므로 경제적인 손실도 대단히 크게 된다. 본 연구에서는 실제 축계의 사고를 배경으로 사고의 원인을 규명하기 위하여 프로펠러보스와 축의 접착력, 보스에 작용한 힘 및 보스에 남아있는 충격의 자국에 대한 작용 응력 등을 계산하였다. 슬립의 원인은 설계한 접착력

보다 과다한 총 응력이 작용하여 발생하였음을 밝혔으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 기관 출력과 회전수 및 프로펠러 직경과 선급에서 요구하는 2.8 배 상수를 적용하여 본선의 프로펠러에 작용하는 힘이 약 962,000 N으로 계산되었다.

2) 항해구역에 얼음이 떠다니는 영하 2 ℃에서 재료의 충격 흡수에너지가 상온에 비하여 1/2이하가 되며, 보스와 축의 열팽창 계수 차이 때문에 축이 0.05 % 더 수축하여 접착력이 낮아졌다.

3) 프로펠러에 작용하는 힘을 감안하여 보스내면에 작용하는 힘은 0.416 N/mm²이었다.

4) 프로펠러재료를 압축시험하고 프로펠러 날개에 존재하는 충돌 후 압흔 크기를 계측하여 압축시험과 비교한 결과 높이 10 mm, 길이 8 mm의 손상부에 걸리는 하중이 약 271,000 N이 됨을 밝혔다.

5) 프로펠러 너트를 고정하는 직경 24 mm Locking Pin의 전단에 필요한 힘은 약 118,000 N으로 계산되었다.

참 고 문 헌

[1] 고봉혁(1993), 「선박추진론」, 해문출판사, p. 60.
 [2] 오세욱, 오환섭, 김상태, 오환교(1998), 「재료시험론」, 원창출판사, pp. 65-78.
 [3] 이운호(2010), 프로펠러 손상사례, 2010년도 한국마린엔지니어링 학회 공동학술대회 논문집, pp. 93-95.
 [4] 한국선급협회(2011), 선급 및 강선규칙 제 2편 재료와 용접, p. 85.
 [5] 현대중공업(2003), Technical Report Propeller Shaft Damage, pp. 1-6.
 [6] Kuwabara, T., Y. Kumano, J. Ziegelheim, I. Kurosaki (2009), International Jr. of Plasticity, 25, pp. 1759-1776.

원고접수일 : 2011년 08월 01일

원고수정일 : 2011년 09월 07일 (1차)

: 2011년 09월 20일 (2차)

게재확정일 : 2011년 09월 22일