

프로펠러축 피복재의 최대 스트레인 계산에 관한 연구

왕지석* 김윤해** 이수종***

A Study on the Calculation of Maximum Strain of Propeller Shaft Coating Materials

J. S. Wang · Y. H. Kim · S. J. Lee

Key words : FRP coating propeller shaft(FRP 피복 추진축), Anti-corrosive effect(방식효과), Bronze-sleeved shaft(청동 슬리브 축), Performance test of coating materials(피복재의 성능시험)

Abstract

Recently, to achieve the anti-corrossive effect in propeller shafts the coating technique with suitable coating materials is available instead of bronze-sleeved shafts. In this case, the coating materials in service must not be delaminated from the shaft and the crack must not be originated. Thus, the various performance and security test for coating materials of propeller shaft must be carried out under the real conditions or more severe circumstance. The most important factors effecting on the funtion of coating materials in propeller shaft are the strain and the environment of sea water.

In this paper, therefore, the maximum possible strain which can be occured in real propeller shaft was calculated based on IACS standard classification rule in order to give the proper level of strain to the test samples in performance test of propeller shaft coating materials.

1. 서 론

프로펠러축에 FRP와 같은 재료를 피복하여 방식을 도모하고자 할 때는 이 프로펠러축의 피복재가 해수중에서 충분히 오랫동안 축재료를 보호할 수 있어야 한다. 즉 소정의 기간동안 피복재에 균

열이나 파열이 없어야 하고 축재료의 표면으로 부터 박리되지 않아서 해수가 프로펠러축 재료에 접촉하는 일이 없어야 한다. 그러므로 코팅재를 프로펠러축에 피복시공하여 사용하려면 이 피복재의 성능을 미리 시험하여 안전성여부를 확인하여야 한다. 피복재의 성능시험으로 제일 확실한 방법은

* 한국해양대학교 이공대학 기계냉동자동차공학부 (원고접수일 : 97년 1월)

** 한국해양대학교 이공대학 재료공학과

*** 부경대학교 공과대학 기계설계학과

실선의 프로펠러축에 피복 시공하고 실제 사용하면서 그 안전성 여부를 판단하는 것이 가장 바람직하지만 이 방법은 경제적으로나 시간적으로 적절치 못할 뿐만 아니라 이 방법에 의한 시험결과는 조건이 상이한 다른 선박에는 적용할 수 없다. 따라서 피복재의 성능 시험방법으로 시편에 의한 시험법을 쓰지 않을 수 없다.

피복재의 성능실험을 시편에 의하여 시험할 때는 선박에서 실제로 사용하는 조건과 되도록 유사하거나 그보다 가혹한 조건에서 시험하여 이상이 없어야 한다. 프로펠러축에 피복재를 피복 시공하여 사용할 때와 되도록 유사한 조건의 시험을 실시하기 위하여 갖추어야 할 중요한 인자는 해수의 순환과 스트레인(strain)이다.

한편, 피복된 프로펠러축이 실선에 사용될 때에 이 프로펠러축은 동력을 전달하기 때문에 비틀림 토오크를 받고 이로 인한 비틀림전단응력이 프로펠러축에 발생한다.

또한 주기관이 왕복동 기관이면 비틀림 진동이 축계에 발생하고 이 진동이 반복하중이 되어 이로 인한 반복 전단응력이 프로펠러축에 추가된다. 이들 전단응력 외에 프로펠러 무게와 축자중에 의한 굽힘모멘트가 프로펠러축에 걸리게 되고 이로 인한 굽힘응력이 발생하게 되며 축계배치불량에 의한 굽힘 및 전단응력, 프로펠러 추력의 중심과 축 중심의 불일치에 의한 굽힘응력, 종진동과 추력에 의한 압축인장응력, 횡진동에 의한 굽힘응력들 때문에 프로펠러축에 스트레인이 발생하는데, 축의 표면에서 가장 큰 스트레인이 생긴다는 것은 잘 알려진 사실이다. 그러므로 프로펠러축의 표면에 피복재를 시공하여 놓았다면 이 피복재에도 당연히 프로펠러축의 표면과 똑같은 스트레인이 발생할 것이며 이 스트레인에 불구하고 피복재가 파열되거나 피복재에 균열이 발생되어서도 안되고, 피복재가 프로펠러축 표면으로부터 박리되어서도 안된다. 따라서 피복재의 성능을 시편에 의하여 시험할 때에는 피로시험이 되어야 할 것이고, 이 때에 실제 프로펠러축의 표면에 발생하는 스트레인과 같거나 그 이상의 스트레인이 시편에 발생하도록 피로시험하중을 걸어야 할 것이다.

여기서는 프로펠러축 피복재의 성능을 시편의

피로시험에 의하여 확인하고자 할 때에 시편에 걸어야 하는 피로시험하중을 가장 합리적으로 결정하기 위하여 실제의 프로펠러 축에 발생하는 반복 스트레인을 계산하는 방법을 제시하고 이 방법에 의하여 계산된 피로시험 스트레인을 제시한다.

2. 동력전달 토오크에 의한 전단응력

프로펠러축이 기관의 동력을 전달함으로써 프로펠러축에 토오크가 걸리게 되는 데, 이로 인한 전단응력을 구하려면 프로펠러축의 직경을 알아야 한다. 프로펠러축의 직경을 계산하는 공식은 IACS통일규정에 의하면 다음과 같다.^{1,2)}

$$d = 100 K_2 \sqrt[3]{\frac{560P}{n(T+160)}} \quad (1)$$

여기서,

d : 프로펠러축의 직경(mm)

K_2 : 프로펠러축 설계특성에 관한 계수로서 [Table 1]과 같다.

P : 기관의 연속최대출력시 프로펠러축의 전달동력(kW)

n : 기관의 연속최대출력시 프로펠러축의 분당 회전수(r.p.m.)

T : 프로펠러축 재료의 규격 최소인장강도로서 400~800N/mm²를 원칙으로 한다. 다만 프로펠러축은 이 값이 600N/mm²를 넘는 경우에는 600N/mm²로 한다.

Table. 1 Coefficient K_2

Kind of shaft	Attaching method of propeller	K_2
Propeller shaft	Key	1.26
	Insert without key	1.22
	Flange	1.22
Stern tube shaft		1.15

식(1)을 사용하기 편리하도록 하기 위하여 전달 동력 P의 단위를 kW로 하지 않고 Nmm/sec로 바꾸면 다음과 같이 된다.

$$d = K_2 \sqrt[3]{\frac{560P'}{n(T+160)}} \quad (2)$$

여기서 P' 는 기관의 연속최대출력시 프로펠러축의 전달동력(Nmm/sec)이고 다른 기호는 식(1)의 그것들과 같다.

한편 프로펠러축이 전달하는 토오크는 다음식으로 계산된다.

$$T_{oq} = \frac{60P'}{2\pi n} \quad (3)$$

여기서 T_{oq} 는 기관의 연속 최대출력시 프로펠러축이 전달하는 토오크(Nmm)이다.

식(2)를 바꾸어 쓰면 다음과 같이 된다.

$$\frac{P'}{n} = \frac{T+160}{560} \frac{d^3}{K_2^3} \quad (4)$$

이식과 식(3)을 비교하여 프로펠러축의 전달토오크 T_{oq} 를 구하면

$$T_{oq} = \frac{60P'}{2\pi n} = \frac{60}{2\pi} \frac{T+160}{560} \frac{d^3}{K_2^3} \quad (4)$$

가 된다. 프로펠러축의 전달 토오크 T_{oq} 에 의하여 발생하는 전단응력 τ_o 는 다음식으로 부터 구할 수 있다.¹¹⁾

$$\tau_o = 16 \frac{T_{oq}}{\pi d^3} \quad (6)$$

여기서 τ_o 는 프로펠러축 표면에 발생하는 전단응력(N/mm²)이다.

식(5)를 식(6)에 대입함으로써 프로펠러축의 전단응력 계산식은 다음과 같이 된다.

$$\tau_o = \frac{0.08685(T+160)}{K_2^3} \quad (7)$$

프로펠러축에 발생 가능한 최대 전단응력을 구하기 위하여, [Table 1]에서 계수 K_2 값들 중 프로펠러축에 해당되는 것들에서 가장 작은 값인 $K_2 = 1.22$ 를 취하고, 재료의 규격 최소인장강도 T 를 프로펠러축의 제한치인 $T=600\text{N/mm}^2$ 로 잡고 이것을 식 (7)에 대입하여 계산하면

$$\tau_o = 36.35\text{N/mm}^2 \quad (8)$$

이 된다. 이 값은 프로펠러축이 전달하고 있는 동

력에 의해서만 발생하는 전단응력이나 프로펠러축은 전술한 바와 같이 프로펠러 무게와 프로펠러축 자중에 의한 굽힘 모멘트를 받으므로 이 굽힘모멘트에 의한 굽힘응력을 계산하고 이것에 의한 스트레인의 증가분을 고려하여야 한다. 그러나 프로펠러축에 걸리는 굽힘모멘트를 계산하기 위하여는 프로펠러의 무게와 배어링의 위치 및 기타 축계의 배치를 알아야 하는데, 이것이 선박마다 다르기 때문에 프로펠러축에 걸리는 굽힘응력이 얼마라고 단정할 수가 없다. 그런데 프로펠러축의 굽힘응력은 실측결과를 토대로 하여 볼 때 황천 항해시나 경 밸리스트와 같은 특수한 항해상태에서 최대 $88.26\text{N/mm}^2(9\text{kg/mm}^2)$ 이라고 알려져 있다.²⁾

그러므로 프로펠러 축에 걸리는 최대 굽힘응력 σ_b 는 다음과 같이 된다.

$$\sigma_b = 88.26 \text{ N/mm}^2 \quad (9)$$

3. 비틀림 진동에 의한 전단응력

선박의 기관으로 디젤기관과 같이 왕복동 기관을 사용하면 회전력의 불균일로 인하여 축계에 비틀림 진동이 발생하게 되고 이 진동에 의하여 프로펠러축에 전단응력이 추가된다. 특히 축계 비틀림 진동의 노드(node)가 프로펠러축에 있으면 이 진동에 의하여 큰 전단응력이 프로펠러축에 생기는데 거의 모든 선박에서 1절 비틀림 진동의 노드는 프로펠러축에 있고, 1절 비틀림 진동에 의한 전단응력이 가장 크다는 사실을 주목할 필요가 있다. 그러므로 한국선급 규정에서 비틀림 진동에 의한 전단응력의 크기를 제한하고 있는데 그 내용은 다음과 같다.¹⁾

디젤기관을 주기관으로 하는 선박의 중간축, 추력축, 프로펠러축, 선미관축에 작용하는 비틀림 진동에 의한 전단응력은 아래 규정에 따른다.

(1) 연속최대회전수 105% 이하에서 기관을 연속사용하는 경우의 비틀림 진동에 의한 전단응력은 다음의 τ_1 값을 초과해서는 안된다.

$$\tau_1 = \frac{T_s + 160}{18} C_k C_d (3 - 2\lambda^2) \quad (10)$$

단, $0 \leq \lambda \leq 0.9$

$$\tau_1 = 1.38 \frac{T_s + 160}{18} C_k C_d \quad (11)$$

단, $0.9 < \lambda < 1.05$

여기서

τ_1 : 기관을 연속사용하는 경우의 비틀림 진동에 의한 전단응력의 허용한도(N/mm²)

λ : 사용회전수와 연속최대회전수와와의 비

T_s : 축 재료의 규격최소인장강도(N/mm²) 다만, 프로펠러축 및 선미관축에 있어서는 590 N/mm²를 초과할 수 없다.

C_k : 축의 종류 및 모양에 관한 계수로서 프로펠러축 및 선미관축에 대해서는 0.55이다.

C_d : 축의 직경에 관한 계수로서 다음식에 따른다.

$$C_d = 0.35 + 0.93d^{-0.2}, \quad d : \text{축의 직경(mm)}$$

(2) 연속최대 회전수 80% 이하에서는 비틀림 진동에 의한 전단응력이 다음의 τ_2 을 초과하지 않는 경우 전호에서 산출된 τ_1 값을 초과하는 회전수 범위를 신속히 통과하는 것을 조건으로 승인 할 수 있다.

$$\tau_2 = \frac{1.7}{\sqrt{C_k}} \tau_1 \quad (\text{N/mm}^2) \quad (12)$$

이상에서 축계의 비틀림 진동에 의한 전단응력의 허용치에 관한 규정을 제시하였는데, 상기조건(2)의 식(12)는 1절 비틀림 진동의 공진 주파수가 사용회전수 이내에 있을 때 회전수를 0에서 부터 증가시키면 필연적으로 임계회전수를 통과하기 때문에 이 회전수를 통과하면서 공진으로 인하여 진폭이 커지고 큰 전단응력이 발생하므로 상기조건(1)의 허용치를 넘게 될 때를 대비한 완화 규정이라고 할 수 있다. 어쨌든 가능한 최대의 비틀림 진동으로 인한 전단응력을 계산하고 이 응력을 전 절의 동력전달에 의한 전단응력에 합산하여 발생 최대주응력을 구하고 이로 부터 발생되는 최대 스트레인을 구하여야 한다.

우선 식(10)과 식(11)가운데 식(10)으로 계산된 값이 크므로 식(10)을 취한다. 여기서 λ 는 0에서 0.9까지 변화되지만, τ_1 값을 되도록 크게 하기 위

하여 $\lambda=0$ 에 가까워야 한다. 다음에 축의 직경에 관한 계수 C_d 로서 직경 d 가 작을수록 이 값이 커지나 실질적으로 축의 직경 d 가 어느값 이하로 작아질 수 없으므로 C_d 값을 여러 가지 크기의 축직경 d 에 대하여 구하여 각각의 축에 대한 τ_1 값을 구하여 제시하고자 한다. 우선 여러 가지의 크기의 축직경 d 에 대한 C_d 값을 구하여 보면 [Table 2]와 같다.

Table 2 Diameter of shaft d and coefficient C_d

$d(\text{mm})$	50	100	150	200	
C_d	0.7753	0.7202	0.6914	0.6723	
$d(\text{mm})$	250	300	350	400	450
C_d	0.6582	0.6472	0.6382	0.6306	0.6241

한편 축재료의 규격 최소인장강도인 T_s 는 590 N/mm²이 가장 크므로 이값과 프로펠러축에 관한 계수 $C_k=0.55$ 를 위의 λ, C_d 값과 함께 식(10)에 대입하여 τ_1 을 계산하면 식(13)과 같이 되고 [Table 2]를 이용하여 여러가지 축의 직경 d 에 대한 계산 결과는 [Table 3]과 같다.

$$\tau_1 = 68.75 C_d \quad (\text{N/mm}^2) \quad (13)$$

Table 3 Diameter of shaft d and maximum possible value of torsional vibration stress τ_1

$d(\text{mm})$	50	100	150	200	
$\tau_1(\text{N/mm}^2)$	53.3	49.5	47.5	46.2	
$d(\text{mm})$	250	300	350	400	450
$\tau_1(\text{N/mm}^2)$	45.3	44.5	43.9	43.4	42.9

나아가서 프로펠러축에 발생하는 비틀림진동으로 인한 최대전단응력을 구하기 위하여 식(13)을 식(12)에 대입하여 τ_2 를 구하면 다음과 같다.

$$\tau_2 = 157.6 C_d \quad (\text{N/mm}^2) \quad (14)$$

상기 식을 이용하여 [Table 2]의 경우와 같이 여러 가지 축의 직경 d 에 대한 비틀림진동에 의한 최대전단응력 τ_2 를 계산하면 [Table 4]와 같다.

Table 4 Diameter of shaft d and maximum possible value of torsional vibration stress τ_2

$d(\text{mm})$	50	100	150	200	
$\tau_2(\text{N/mm}^2)$	122.2	113.5	109.0	106.0	
$d(\text{mm})$	250	300	350	400	450
$\tau_2(\text{N/mm}^2)$	103.7	102.0	100.6	99.4	98.4

4. 프로펠러축에 발생하는 최대 스트레인

프로펠러축을 코팅처리하여 방식을 도모할 경우 코팅재도 프로펠러축의 표면과 똑같은 스트레인을 받는다는 사실은 전술한 바와 같다. 그러므로 피로 시험을 통하여 코팅재의 성능을 확인하고자 할 때에 피로시험편에 가하는 피로시험 하중의 크기는 프로펠러축에 발생 가능한 최대 스트레인 이상의 스트레인이 시험편에 생기도록 하여야 한다. 따라서 여기서는 프로펠러축에 발생 가능한 최대 스트레인을 인장스트레인으로 환산하여 제시한다.

프로펠러축의 동력전달에 의하여 발생하는 전단응력 τ_0 는 식(8)에 보인 바와 같이 36.35 N/mm²이다. 여기에 비틀림 진동에 의하여 발생하는 최대 전단응력을 합산하여야 하는 데 이 전단응력은 식(14) 또는 [Table 4]에서 나타내는 τ_2 이다. 그러므로 프로펠러축에 발생하는 최대 전단응력은

$$\tau = \tau_0 + \tau_2 = 36.35 + 157.6 C_d \quad (\text{N/mm}^2) \quad (15)$$

이고 여러 가지 축직경 d 에 대하여 계산하면 [Table 5]와 같다.

Table 5 Diameter of shaft d and maximum possible shear stress $\tau = \tau_0 + \tau_2$

$d(\text{mm})$	50	100	150	200	
$\tau = \tau_0 + \tau_2$ (N/mm ²)	158.6	149.9	145.4	142.4	
$d(\text{mm})$	250	300	350	400	450
$\tau = \tau_0 + \tau_2$ (N/mm ²)	140.1	138.4	137.0	135.8	134.8

식(15) 또는 [Table 5]에 의하여 표시되는 프로펠러축의 전단응력 τ 와 식(9)로 표시되는 굽힘응력 σ_b 에 의한 제1주응력 σ_1 과 제2주응력 σ_2 는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{\sigma_b}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_b}{2}\right)^2 + \tau} \\ \sigma_2 &= \frac{\sigma_b}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_b}{2}\right)^2 + \tau} \end{aligned} \quad (16)$$

한편 최대 스트레인 ϵ 은

$$\epsilon = \frac{1}{E} \sigma_1 - \frac{\nu}{E} \sigma_2 \quad (17)$$

이다.

여기서 ν 는 프로펠러축 재료의 포아송 비이고 E 는 탄성계수이다.

식(16)을 식(17)에 대입하여 정리하면 최대인장스트레인 ϵ 은

$$\epsilon = \frac{1-\nu}{2E} \sigma_b + \frac{1+\nu}{E} \sqrt{\left(\frac{\sigma_b}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (18)$$

이 되고 단조강의 포아송비 $\nu=0.3$ 과 탄성계수 $E=200\text{GPa}$ 을 $\sigma_b=88.26 \text{ N/mm}^2$ 와 함께 식(18)에 대입하면 발생 최대인장스트레인은 다음과 같이 된다.

$$\epsilon = 154.5 + 6.5 \sqrt{1947.5 + \tau^2} \quad (\mu\text{s}) \quad (19)$$

이것이 프로펠러축에 발생하는 최대인장스트레인이다. Table 5의 τ 값을 식(19)에 대입하여 여러 가지 프로펠러축 직경 d 에 대한 이 값을 계산하면 [Table 6]과 같다.

Table 6 Diameter of shaft d and maximum possible tensile strain ϵ

$d(\text{mm})$	50	100	150	200	
$\epsilon(\mu\text{s})$	1224.6	1170.2	1142.2	1123.5	
$d(\text{mm})$	250	300	350	400	450
$\epsilon(\mu\text{s})$	1109.3	1098.7	1090.1	1082.6	1076.5

[Table 6]에서 보는 바와 같이 프로펠러축의 직경 d 가 클수록 발생가능한 최대인장스트레인은 감소하는데 그 감소량은 그다지 크지 않음을 알 수 있다. 즉, 직경 d 가 50mm에서 450mm로 9배 증가하는 데 대하여 발생하는 최대 인장스트레인은 1224.6 μs 에서 1076.5 μs 으로 약 12%정도 감소하는데 그쳤다.

프로펠러축에 발생가능한 최대 인장스트레인을 알면, 이 축에 시공할 피복재의 성능을 피로시험에 의하여 확인하고자 할 때에 시험편에 가하는 인장스트레인과 이 인장스트레인을 발생시키는 인장하중은 바로 구하여 진다. 즉, 프로펠러축에 발생하는 최대 인장스트레인 이상의 인장스트레인이 시험편에 발생하도록 하중을 가하면 된다.

5. 결 론

프로펠러축을 방식목적으로 피복처리하였을 때 이 피복재의 성능을 확인하고자 시험편을 제작하여 피로시험을 실시할 때에 이 시험편에 걸어야 하는 반복하중은 프로펠러축에 발생 가능한 최대 인장스트레인 이상의 인장스트레인이 시험편에 발생하도록 걸어야 한다. 예를 들면 직경 50mm인 프로펠러축에 시공할 피복재는 [Table 6]에서 나타낸 바와 같이 1224.6 μs 이상의 인장스트레인이 시험편에 반복적으로 생기도록 반복하중을 걸어야 한다. 만약 시험편을 단면적 300mm²인 동관(copper pipe)의 표면에 피복처리하여 이 피복재의 성능을 확인하고자 할 때에 시험편에 가해야 하는 반복하중은 동관의 탄성계수 $E_c = 117,684 \text{ N/mm}^2$ 임을 감안하여 43,235N이 된다.

피복 처리할 프로펠러축의 직경이 클수록 이 프로펠러축에 시공할 피복재의 피로시험시 적용되는 인장스트레인은 [Table 6]에서 보인 바와 같이 조금씩 감소하는 데 그 감소량은 그다지 크지 않고, 또한 시험편에 의하여 피복재의 성능을 시험할 때는 피복처리된 프로펠러축을 실제 사용할 때보다 훨씬 짧은 시간내에 시험이 완료되므로 실제 사

용할 때보다 좀더 가혹한 조건에서 시험할 필요가 있음을 감안할 필요가 있다. 따라서 피복처리할 프로펠러축의 직경에 상관없이 [Table 6]의 프로펠러축에 발생 가능한 최대 인장스트레인 중 가장 큰 값인 1224.6 μs 이 시험편에 발생하도록 피로시험을 실시하여 이상이 없으면 이 피복재는 모든 프로펠러축에 사용할 수 있을 것이다.

한편, 피로시험시 반복 횟수는 통상의 공업시험 재료에서 실시하는 바와 같이 10⁷cycle로 하면 된다.* 즉, 피복처리된 시험편을 10⁷cycle 반복하여 1224.6 μs 의 인장스트레인이 발생하도록 반복인장하중을 부과하고 난 뒤에 정밀검사를 실시하고 이상이 없으면 이 피복재는 모든 프로펠러축에 사용할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- 1) 한국선급, 선급 및 강선규칙 제 5편 기관장치, 1995
- 2) 진효중, 선박동력전달장치, 태화출판사, 1986
- 3) Gere & Timoshenko, Mechanics of Materials, 3rd edition, PWS-KENT, 1990
- 4) 송삼홍, 표준재료역학, 동명사, 1995
- 5) 西谷編, 疲勞強度學, オーム社, 1985