

선박용 프로펠러축 방식처리용 복합재료의 제조와 그 정적 및 피로특성 평가에 관한 연구

김 윤 해* · 왕 지 석* · 배 창 원**

(97년 8월 4일 접수)

A Study on the Processing of Anti-Corrosive Composites for Propeller Shaft of the Ship and the Evaluation of Its Static and Fatigue Properties

Yun-Hae, Kim* · Jee-Seok, Wang* · Chang-Won, Bae**

Key Words : FRP Coating(섬유강화플라스틱 코팅), Kind 1 Propeller Shaft(제1종프로펠러축), Linear Notch Mechanics(선형노치역학), Notch Root Radius(노치저반경), Epoxy Resin(에폭시 수지), Fatigue(피로), Anti-Corrosive Composite(방식용 복합재료).

Abstract

Kind 1 propeller shaft in ships is the shaft which is provided with effective measures against corrosion by sea water, or the shaft which is made of approved corrosion resistance materials. The propeller shaft other than specified above is Kind 2.

Thus, this study is mainly concerned with the resistance to fatigue damage in sea water against stress concentrations due to the notches. The results obtained can be summarized as follows;

- (1) The stress increases with curing time, however, when the curing time reaches at 96 hours the stress becomes a constant value. The elongation decreases with curing time, however, when the curing time reaches at 48 hours the elongation becomes a constant value. Thus, in case of FRP coating on propeller shaft, it is necessary to cure for 48 hours at least.
- (2) The relation of σ_n - K_t is to be classified into two parts, which is a part where fracture nominal stress, σ_n , decreases with increasing K_t , and a part where σ_n is nearly constant independent of K_t .
- (3) According to a linear notch mechanics, the measure of severity controlling the fracture in notched FRP body is the notch root radius, ρ . The notched static

* 종신회원, 한국해양대 이공대

** 한국해양대 대학원

strength of an arbitrary specimen will be estimated from $\sigma_{max} - 1/\rho$ curve.

- (4) Through the observation of cross section after fatigue test, the part of interface was kept good condition irrespective of loading conditions.

1. 서론

섬유강화복합재료는 그 특성이 우수하여 여러 분야에 많이 활용되고 있는 고성능, 고기능성 복합 소재이다. 이러한 섬유강화복합재료는 용도에 따라 금속, 비금속 등에 코팅하여 내구성을 높이는 한편, 과소 설계된 부위 보강, 결합·손상부위의 보강, 응력집중분산 및 수명증가 등의 여러 가지 효과를 가져다 준다.

한편, 선박용 제1종 프로펠러축의 승인된 방식조치¹⁾ 중에서 슬리브 일체형은 슬리브의 구조가 어려울 뿐만 아니라 제작비용이 고가이며, 고무코팅은 시공시 많은 시간이 소요되고 각종 특수기계와 공구가 필요하므로 이송, 작업환경, 장소 등의 제한이 있으나, 합성수지 코팅은 경화시간을 포함하여 2~3일 정도의 시공기간 동안에 방식 작업을 완료할 수 있다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 많이 사용되지 않는 것은 합성수지 코팅은 강화재와 기지재료가 매우 다양하여 배합비율에 따라 특성의 변화가 심하기 때문이다.

본 연구는 선박의 제1종축에 대한 방식처리를 목적으로 강화재로 많이 사용되는 유리섬유와 에폭시 수지를 함침시키는 핸드레이업(hand lay-up) 방법으로 실제 선박의 추진기축에 시공하여 부식을 방지하기 위한 기초적인 실험이다. 이러한 목적을 위해서 우선적으로 수지와 강화재의 배합조성을 검토하였으며, 이에 대한 각종 특성 평가 및 실제 조건과 동일한 해수 분위기에서의 피로특성을 평

가하였다.

2. 실험재료 제조 및 실험방법

2.1 실험재료

강화재는 강도가 우수하고 가격이 저렴하여 많이 사용되고 있는 유리섬유를 사용하였다²⁾. 본 연구에 사용된 유리섬유 테이프는 한국화이버에서 제조한 평직(plain)상의 유리 테이프(glass tape)이며 Table 1 에 그 특성을 나타내었다³⁾. 기지재료로서는 에폭시 수지(epoxy resin)를 사용하였으며 Table 2와 Table 3에 그 성분을 나타내었다.

Table 1 Properties of glass fiber

Properties		Result of test
construction		plain
yarn type	warp	H 37 1/0
	fill	G 75 1/0 × 2
density (count/inch)	wrap	18
	fill	14
thickness (mm)		0.180
coating agent		crome
weight (g/cm ²)		175.7
width (mm)		100
roll length (m)		50
roll weight (g)		866.32

Table 2 Compositions of epoxy resin

kinds	epoxy equivalent	content %	characteristics
novaloc epoxy & hard type, ER	170~215	34~44	thermal endurance, chemical-resistance
NBR modified epoxy	280~320	23~33	rubber property
high EEQ epoxy	400~500	7~17	plasticity, chemical-resistance
polyglycol di-epoxide	305~335	8~18	plasticity, anti-impact
pigment and inorganic matters		13~23	tensile strength
silan coupling and anti-forming agents		0.2~1.9	flexural strength

Table 3 Compositions of hardeners

kinds	amine base	content %	characteristics
polyamine	280~340	29~39	plasticity, adhesive strength
modified aliphatic amine	310~370	32~42	chemical-resistance
pigments and inorganic matters		33~43	tensile strength
anti-forming agents		0.1~1.1	

인장 및 노치인장시험편을 만들기 위한 적층판은 강화재를 한장씩 형위에 올려놓고 기지재료를 함침시키면서 적층 성형하는 핸드레이업으로 제조하였다.

피로시험편은 전처리 된 모재를 선반에 물려서 최저속으로 회전하면서 에폭시수지를 1회 도포하여 강화섬유 테이프를 감은 후 다시 수지를 1회 도포하여 함침시키는 방법으로 4회를 반복하였고, 감는 과정에서 유리섬유 테이프를 약간 잡아당겨 함침이 잘 되도록 하였으며 수지가 흘러내리지 않도록 선반을 서서히 회전시키면서 실온(25℃)에서 경화시켰다.

2.2 실험방법

(1) 인장시험

인장강도 및 연신율 평가를 위해 플라스틱의 인장특성 평가를 위한 표준 시험규정⁴⁾에 의해 인장 시험편을 제작하였다. 시험편의 형상은 Fig. 1과 같으며, 인장시험에 사용된 시험기는 인스트롱4469 모델로서 시험기 용량은 5ton이며 크로스헤드 속도(crosshead speed)는 1 mm/min인 상태로 시험하였고 그림(grip)과의 거리는 135mm로 하였다.

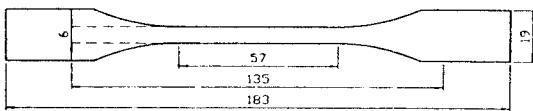


Fig. 1 Configuration of tension specimen (dimension : mm)

(2) 노치 인장시험

코팅부에 기포 또는 결함 등으로 인한 강도 및 노치를 가진 코팅재의 파괴 거동에 대한 특성을 파악하기 위하여 선형노치역학(linear notch mechanics)⁵⁾의 개념을 적용하여 Fig. 2와 같이 시험편에 서로 다른 노치저반경(notch root radius) $\rho = 0.1, 0.3, 0.5, 1.0\text{mm}$ 로 가공하여 노치인장 시험을 행하였다.

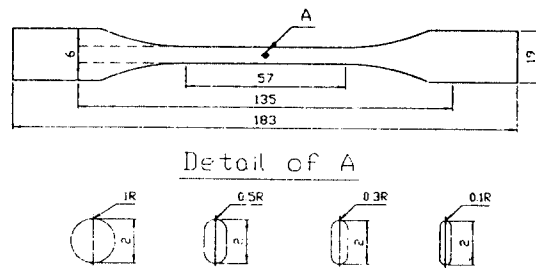


Fig. 2 Configuration of notched tension specimen (dimension : mm)

(3) 피로시험

코팅시공한 선박의 프로펠러축의 피로특성 파악을 위해서 실제 선박 프로펠러축과 상사한 파이프 외부에 Fig. 3과 같이 FRP 코팅을 시공하여 실제 사용분위기와 같은 조건인 해수분위기하에서 피로 시험을 행하였다. 피로시험에 사용한 시험기는 인스트롱사의 만능재료시험기로, 용량은 정적인 경우 250KN, 동적인 경우 $\pm 125\text{KN}$ 이다. 실험조건은 Table 4와 같이 1,500kg, 1,200kg, 1,000kg, 700kg

Table 4 Test parameters of fatigue test

max. load	cont. method	stress ratio	wave form	amplitude	mean level	frequency	gain (0-70)	time const. (0-15)
1,500 kg	load cont.	R=0	Sine	1,500 kg	865 kg	32.4	23	14
1,200 kg	load cont.	R=0	Sine	1,200 kg	690 kg	34.0	23	10
1,000 kg	load cont.	R=0	Sine	1,000 kg	580 kg	34.6	23.4	10
700 kg	load cont.	R=0	Sine	700 kg	420 kg	36.2	23.5	10

의 하중 상태에서 응력비 $R=0$ 으로 10^7 사이클까지 피로하중을 반복하는 방법으로 피로시험을 행하였다. Fig. 4는 피로시험을 행하기 위하여 만든 지그와 해수 순환장치를 조립한 것이다.

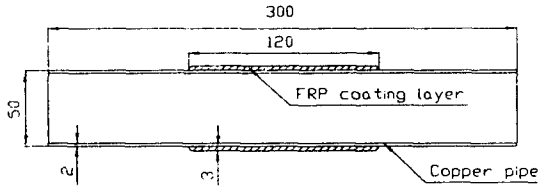


Fig. 3 Specimen configuration for fatigue test (dimension : mm)

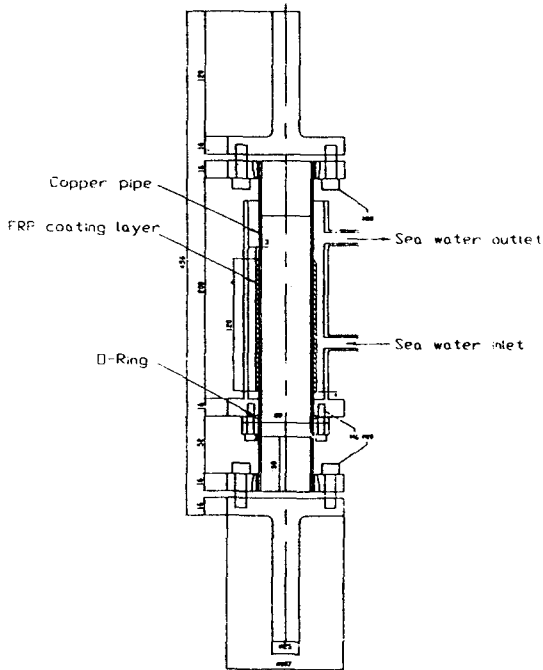


Fig. 4 Configuration of assembled fatigue testing zig(dimension : mm)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인장시험

(1) 인장강도평가

시험편의 제작후 경화시간별 인장강도의 변화를 측정 한 결과는 Table 5와 같으며 경화후 96시간까지는 인장강도가 경화시간이 경과함에 따라 증가 하였으나 경화후 96시간 이후부터는 거의 일정한 값을 나타남에 따라 본 소재의 특성상 경화후 96시간 이후에는 안정화됨을 알 수 있었다. 이를 도식화 한 것이 Fig. 5이다.

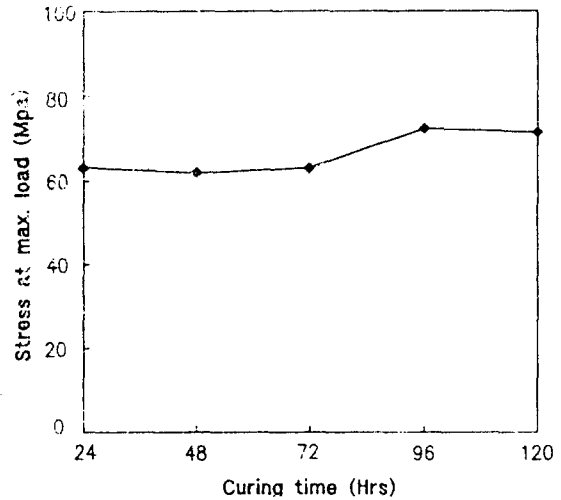


Fig. 5 Effect of curing time on stress at max. load

(2) 연신율 평가

경화시간에 따른 연신율의 변화는 Table 6과 같으며 경화후 48시간 이후에는 연신율이 거의 일정한 값을 나타내었으며 따라서 본 소재의 특성상 경화후 48시간 이후에는 연신율이 거의 안정화됨을

Table 5 Results of tensile test(strain at max. load)

curing time (hrs)	count	mean (%)	standard deviation (%)	standard error (%)	95pct. conf. for mean(%)
24	12	13.6	1.06	0.38	12.7 to 14.5
48	12	10.8	0.94	0.27	10.2 to 11.4
72	12	10.7	0.82	0.26	10.1 to 11.3
96	12	10.3	0.95	0.30	9.6 to 11.0
120	12	10.1	0.78	0.26	9.5 to 10.7
total	60	11.0	1.48	0.21	10.6 to 11.4

Table 6 Results of tensile test(strain at max. load)

curing time (hrs)	count	mean (%)	standard deviation (%)	standard error (%)	95pct conf for mean(%)
24	12	13.6	1.06	0.38	12.7 to 14.5
48	12	10.8	0.94	0.27	10.2 to 11.4
72	12	10.7	0.82	0.26	10.1 to 11.3
96	12	10.3	0.95	0.30	9.6 to 11.0
120	12	10.1	0.78	0.26	9.5 to 10.7
total	60	11.0	1.48	0.21	10.6 to 11.4

알 수 있었다. 이를 도식화 한 것이 Fig. 6이다.

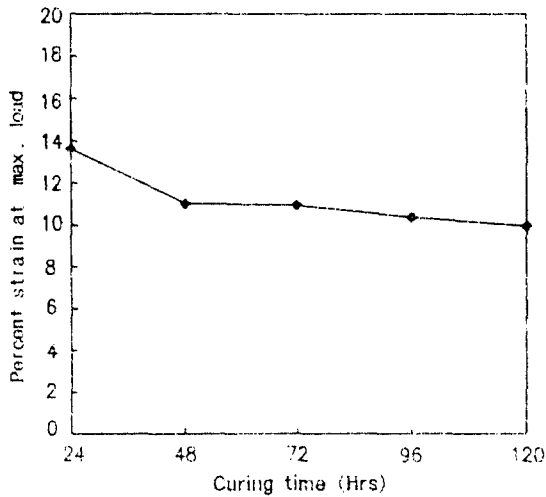


Fig. 6 Effect of curing time on percent strain at max. load

3.2 코팅재 노치강도 평가

노치재의 인장시험을 행하여 노치민감도를 평가 하였다. Table 7은 그 결과를 나타낸 것으로 노치 감도비(notch sensitivity rate)를 보면 노치저반경이 커질수록 둔감하게 되는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 2번 적층한 시험편(2 wrapping)과 4번 적층한 시험편(4 wrapping) 사이의 공칭응력과 응력집중계수의 관계를 나타낸 것이다. 응력집중 계수가 증가함에 따라 즉 노치저반경이 적어짐에 따라 공칭응력이 떨어짐을 알 수 있었으며, 응력집중 계수가 커질수록 공칭응력의 감소폭이 적게 되어 4번 적층한 시험편의 경우는 노치저반경이 1mm이하, 2번 적층한 시험편의 경우는 노치저반경이 0.3mm이하로 되면 공칭응력의 변화가 거의 없으므로 실시공후 허용노치의 치수를 알 수 있을 것이다.

Table 7 Results obtained from tensile tests for notched specimen(2a=2mm)

T	ρ	a	b	W	a/b	a/W	K_t	σ_n (MPa)	σ_{max} (MPa)	NSR
2 wrapping	0.1	1.15	0.339	3.00	3.392	0.383	5.45	37	202	0.43
	0.3	1.20	0.600	3.10	2.000	0.387	3.60	40	144	0.46
	0.5	1.15	0.758	3.07	1.517	0.375	2.90	46	133	0.53
	1.0	1.00	1.000	3.08	1.000	0.325	2.35	53	125	0.61
	∞							87	87	1.00
4 wrapping	0.1	1.10	0.332	2.94	3.313	0.374	5.43	75	407	0.86
	0.3	1.10	0.574	3.02	1.916	0.364	3.57	77	276	0.86
	0.5	1.15	0.758	3.12	1.517	0.369	2.90	80	232	0.90
	1.0	1.00	1.000	3.17	1.000	0.315	2.35	78	183	0.92
	∞							87	87	1.00

ρ : notch root radius (mm)
 K_t : stress concentration factor
 σ_n : fracture nominal stress (MPa)

σ_{max} : elastic maximum stress (MPa)
 NSR : notch sensitivity ratio

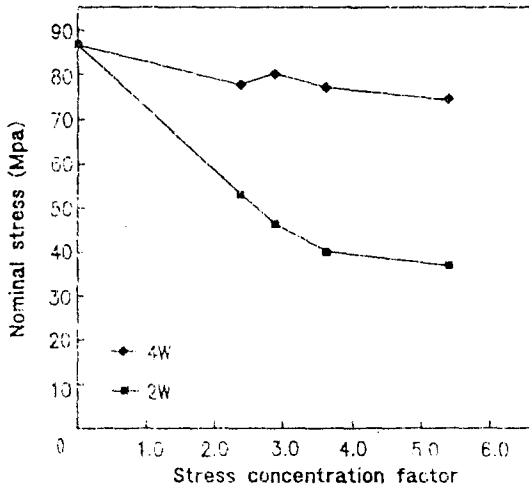


Fig. 7 Effect of stress concentration factor on fracture nominal stress

Fig. 8은 2번 적층한 시험편과 4번 적층한 시험편의 최대응력과 $1/\rho$ 의 관계를 나타낸 것이며 파단지의 노치저에 있어서의 최대탄성응력 σ_{max} 와 ρ 의 전 범위에 걸쳐 σ_{max} 는 거의 하나의 곡선으로 나타내어진다. 따라서 노치저 반경을 알면 최대 파단응력을 알 수 있으므로 안전성 평가에 이용할 수 있는 하나의 표준선도(master curve)로 이용할 수 있을 것이다.

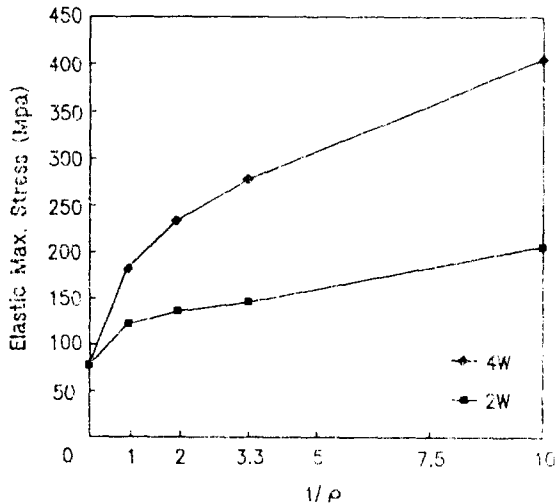


Fig. 8 Effect of notch root radius on elastic max. stress

3.3 프로펠러축에 발생가능한 최대인장 스트레인

프로펠러축을 코팅 처리하여 방식을 도모할 경우 코팅재도 프로펠러축의 표면과 똑같은 스트레인을 받는다. 그러므로 피로시험을 통하여 코팅재의 성능을 확인하고자 할 때에 피로시험편에 주는 피로시험 하중의 크기는 프로펠러축에 발생 가능한 최대스트레인 이상의 스트레인이 시험편에 생기도록 하여야 한다. 따라서 여기서는 프로펠러축에 발생 가능한 최대 인장 스트레인을 구하여 제시한다.

프로펠러축의 동력전달에 의하여 발생하는 전단응력 τ' 는 39.5 N/mm^2 이다^{1), 6)}. 여기에 비틀림 진동에 의하여 발생 가능한 최대응력을 합산하여야 하는 데 이 전단응력은 $\tau_2 = 157.6 C_d \text{ (N/mm}^2\text{)}$ 이다. 그러므로 프로펠러축에 발생 가능한 최대 전단응력은

$$\tau' + \tau_2 = 39.5 + 157.6 C_d \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (1)$$

이고 여러 가지 축직경 d에 대하여 계산하면 Table 8과 같다.

Table 8 Diameter d of shaft and maximum possible shear stress $\tau' + \tau_2$

d(mm)	50	100	150	200	250	300	350	400	450
$\tau' + \tau_2 \text{ (N/mm}^2\text{)}$	161.7	153.0	148.5	145.5	143.2	141.5	140.1	138.9	137.9

식(1) 또는 Table 8에 의하여 표시되는 프로펠러축의 전단응력에 의하여 추진에 발생하는 인장 스트레인 ϵ 은 다음과 같다⁷⁾.

$$\epsilon = \frac{1+\nu}{E} (\tau' + \tau_2) \quad (2)$$

여기서 ν 는 프로펠러축 재료의 포아송 비이고 E는 탄성계수이다.

식 (1)을 식(2)에 대입하면 ϵ 은 다음 식으로 표시된다.

$$\epsilon = \frac{1+\nu}{E} (40.0 + 157.6 C_d) \quad (3)$$

단조강의 포아송비 $\nu = 0.3$ 과 횡탄성계수 $E =$

200 GPa을 식(3)에 대입하면

$$\epsilon = 260.0 + 1024.4C_d \quad (\mu s) \quad (4)$$

을 얻을 수 있고 이것이 프로펠러축에 발생 가능한 최대 인장스트레인이다. 여러 가지 축 직경d에 대하여 이 값을 계산하면 Table 9와 같다.

Table 9 Diameter d of shaft and maximum tension strain ϵ

d(mm)	50	100	150	200	250	300	350	400	450
$\epsilon(\mu s)$	1054.3	997.8	968.5	949.0	934.1	923.0	913.9	906.1	899.6

Table 9에서 보는 바와 같이 프로펠러축 직경 d가 클수록 발생 가능한 최대인장스트레인은 감소하는 데, 그 감소량은 그다지 크지 않음을 알 수 있다. 즉, 직경 d가 50mm에서 450mm로 9배 증가하는 데 대하여 발생 가능한 최대인장스트레인은 1054.3 μs 에서 899.6 μs 로 약 15%정도 감소하는데 그쳤다.

3.4 피로시험

만능재료시험기를 이용하여 서로 다른 하중(700kg,

1,000kg, 1,200kg, 1,500kg)에서 응력비 R=0인 상태로 해수를 순환시키면서 피로시험을 10⁷사이클 행한 후 실험지그장치를 분해하여 피로시험편의 동파이프와 코팅층의 계면부위에 대한 육안검사를 행한 결과 수밀 상태가 양호함을 알 수 있었다. 그리고 피로시험편을 부분 절단하여 계면부위 및 각 부위를 현미경으로 조직사진을 촬영하여 관찰하였다. Photo 1 ~ Photo 3은 시험편의 길이방향으로 촬영한 현미경사진이며, 서로 다른 하중하에서 단면, 길이방향, 내부 및 외측을 현미경 관찰한 결과 동파이프 조직이 조대해졌다든가 혹은 더욱 치밀해졌다든가 하는 변화가 없이 시험전과 동일하며 외측 수지의 경우도 실험전후를 비교해 볼 때 유리 섬유 파단이나 변화가 없었으며 각 부위의 상태가 탈락, 신장 등으로 인한 결함없이 상태가 양호함을 알 수 있었다.

따라서 본 소재를 1,500kg까지의 피로하중이 걸리는 해수분위기중의 선박용 제1종 프로펠러축 코팅재료로 사용이 가능하리라 보여진다. 향후 더 이상의 하중하에서의 연구를 진행할 예정이다.

5. 결 론

본 연구는 선박의 제1종프로펠러축을 위한 합성



(a) Unloading



(b) 700kg



(c) 1,200kg

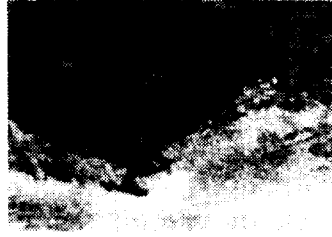


(d) 1,500kg

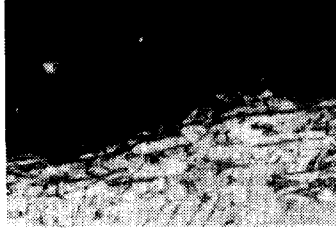
Photo 1 Microstructures of copper at transverse direction($\times 200$)



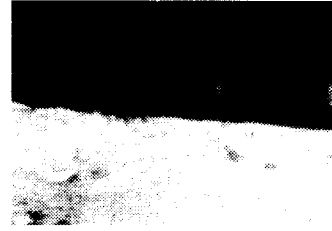
(a) Unloading



(b) 700kg

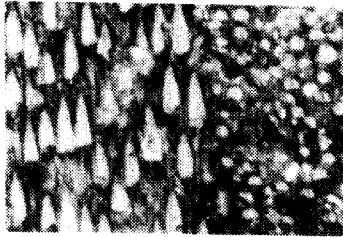


(c) 1,200kg

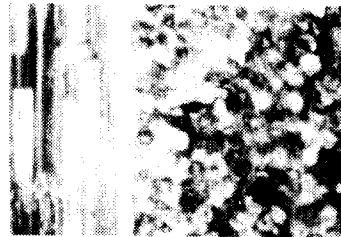


(d) 1,500kg

Photo 2 Microstructures of boundary at transverse direction between copper and FRP coating layer ($\times 200$)



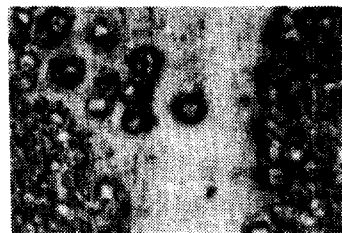
(a) Unloading



(b) 700kg



(c) 1,200kg



(d) 1,500kg

Photo 3 Microstructures of FRP coating layer at transverse direction($\times 200$)

수지 코팅에 대한 기초적인 실험으로서 유리섬유에 에폭시수지를 함침시키는 핸드레이업방식으로 실제 선박의 프로펠러축에 시공하기 위한 적정 복합재료를 제조하고, 그 특성을 평가한 후 실제 선박에서의 적용성을 검토하였다. 얻어진 결과는 다

음과 같다.

(1) 경화시간별 인장강도는 경화후 96시간까지는 경화시간이 경과함에 따라 증가하였으나 경화후 96시간 이후부터는 거의 일정한 값을 나타내었고, 연신율은 경화후 48시간 이후에는 연

신율이 거의 일정한 값을 나타내었다. 따라서 본 소재는 특성상 시공후 96시간이 경과하여야 인장강도 및 연신율이 안정화 됨을 알 수 있었다.

- (2) 노치인장시험 결과 노치감도비는 노치저반경 (ρ)이 커질수록 둔감하게 된다. 4번 적층한 시험편은 노치저반경이 1mm 이하, 2번 적층한 시험편은 노치저반경이 0.3mm이하로 되면 공칭응력이 거의 일정하게 됨을 알 수 있었다.
- (3) 파단시의 노치저에 있어서의 최대탄성응력 σ_{max} 와 ρ 의 전 범위에 걸쳐 σ_{max} 는 시험편의 치수차에 관계없이 거의 하나의 곡선으로 나타내어진다. 이 선도는 노치저반경을 알면 최대 파단응력을 알 수 있으므로 안전성 평가에 이용할 수 있는 하나의 표준선도(master curve)로 이용할 수 있을 것이다.
- (4) 프로펠러축에 FRP를 코팅하여 사용할 때와 유사한 조건의 시험을 실시하기 위한 중요한 인자로는 해수분위기와 스트레인(strain)이다. 프로펠러축의 방식을 위하여 코팅처리 하였을 때 이 코팅재에 대한 부식피로시험을 행해야 하는데, 그 때의 기준으로는 프로펠러축에 발생가

능한 최대인장 스트레인(1054 μ s) 이상의 인장 스트레인이 시험편에 발생하도록 하여야 하며, 따라서 본 소재를 1,500kg까지의 피로하중이 걸리는 해수분위기중의 선박용 제1종 프로펠러축 코팅재료로 사용이 가능하리라 사료된다.

참고 문헌

- 1) 한국선급, "선급 및 강선규칙", 제5편 기관장치, 1995.
- 2) 전의진, 이우일, 윤관준, 김태욱, "최신복합재료", (주) 교학사, pp 6~9, 1995.
- 3) Quality certificate, Hankuk Fiber Glass Co., LTD.
- 4) ASTM, "1993 Annual book of ASTM standards", Vol. 08.01, D 638-91 "Standard test method for tensile properties of plastics", 1993.
- 5) 金允海, "선형파괴역학과 선형노치역학", 大韓機械學會誌, 第35卷 第3號. pp 242~251, 1995.
- 6) 全孝重, "船舶動力傳達裝置", 太和出版社, 1986
- 7) Gere & Timoshenko, "Mechanics of Materials", 3rd edition, PWS-KENT, 1990