

< 기술논문 >

선박용 프로펠러재의 피로강도평가 및 개선에 관한 연구

임명환* · 윤한용* · 정의정**

(2004년 7월 3일 접수, 2005년 1월 31일 심사완료)

A Study on the Fatigue Strength Evaluation and Improvement of Marine Propeller Materials

Myung-Hwan Lim, Han-Yong Yoon and Ui-Jung Jung

Key Words: AIBC3(알루미늄 청동주물 제3종), HBsC1(고강도황동주물 제1종), Register of Shipping (선급), Fatigue(피로), Air Jet Chisel(에어 제트 치즐), Korean Register of Shipping(한국선급, KR)

Abstract

A propeller has been considered as one of the most critical elements in propelling ships. However, only a little research on the marine propeller has been carried out. Furthermore, fractures of the propeller have been frequently caused by fatigue, but only tensile strength, yield strength and elongation are discussed in Register of Shipping. For the above reasons, we have evaluated strength properties of AIBC3 and HBsC1, both which have been used for the marine propeller by using air jet chisel and then, presented a method of improving the strength.

1. 서 론

선박용 프로펠러의 재질로 주로 이용되고 있는 고강도 황동주물과 알루미늄 청동주물을 이용한 프로펠러 제조에 대하여 선급⁽¹⁾에서는 화학성분 및 기계적 성질에 관한 규정만 제시하고 있을 뿐, 피로강도에 대한 규정이나 중요성에 대해서는 언급하고 있지 않으며 이 분야에 대한 연구보고서나 개선책을 제시하는 문헌 또한 찾아보기가 힘들다.

물류비용의 절감 등 경제적 효과를 고려하여 항공기나 선박들은 날로 대형화 되고 있다. 특히 선박의 경우는 대형화와 병행하여 추진효율을 높이고자 하이스쿠각 프로펠러를 채택하는 경향⁽²⁾이 있으므로 선박용 프로펠러는 재료강도의 차원에서 높은 신뢰성이 요구된다. 또한 LR(영국선급), DNV(노르웨이 선급) 및 GL(독일 선급)에서는 설계자에게 날개의 유체역학적 하중 분포와 유한요소해석 결과를 별도로 요구하지만 이 또한 다른 선급과 마찬가지로 피로강도에 대한 평가는 수행하고 있지 않다.⁽³⁻⁶⁾

본 연구에서는 이와 같은 점에 착안하여 프로펠러의 강도특성을 평가하여 프로펠러 재료들의 인장강도 및 피로강도가 다른 강재에 비해 어느 정도 수준인가를 파악하고자 하였으며, 나아가서, 강도가 낮게 평가될 경우는 강도의 개선 방안을 모색하고자 하였다.

† 책임저자, 회원, 목포해양대학교 실습선

E-mail : imhys@mmu.ac.kr

TEL : (061)240-7164 FAX : (061)240-7047

* 회원, 목포대학교 기계공학과

** 목포대학교 대학원 기계공학과

2. 인장 및 피로강도의 평가

2.1 시험편 재료의 주조

시험편 제작을 위한 소재는 프로펠러 제작현장에서 주물형 프로펠러 제작과 동일 조건으로 제작하였다. 시험편 제작을 위한 주형(鑄型:500×250×70)을 먼저 제작하였으며, 용해온도를 고강도 황동주물 1종(HBsC1)은 980℃, 알루미늄 청동주물 3종(AIBC3)은 1,180℃일 때 용탕을 주형에 주입하여 약 72시간 동안 자연냉각을 하였다. 이어서, 냉각된 소재를 밀링머신으로 면을 가공하고 초경 팁이 부착된 원형 날을 이용한 Cutting Machine으로 절삭유를 충분히 공급하면서 Fig. 1과 같은 板狀의 모양으로 제작하였다. 절단된 판상의 시험편 재료를 다시 밀링머신에서 5.0mm의 두께로 가공한 후 염색침투 탐상시험(P.T. liquid penetration test)을 실시하여 편석 등의 결함을 검사하였다. 마지막으로, 이들 재료를 샌드 페이퍼(sand paper) #1,000으로 마무리 가공하였다.

선급에서는 프로펠러 재료의 화학성분과 기계적 성질을 규정하고 있다. Table 1과 2는 본 재료의 화학성분 및 기계적 성질을 시험한 것으로 모두 선급규정⁽¹⁾을 만족하였다.

2.2 인장시험편 및 피로시험편의 제작

프로펠러의 두께는 날개 끝단으로 갈수록 점점 얇아지며 제반 파괴는 이 날개의 끝단에서 이뤄지므로 인장 및 피로시험편의 형상을 판상의 형태로 제작하여 최대한 날개 끝단과 같은 조건을 부여하도록 하였다. 인장시험편은 비철금속용 시험을 위한 제5호의 형상으로 Fig. 2와 같이 가공을 하였다. 시험편의 두께는 5mm로 하였다.

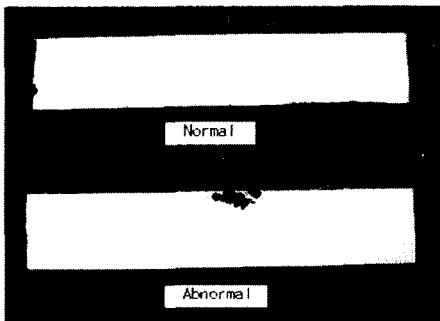


Fig. 1 Liquid penetration test for specimens

Table 1 Chemical composition of specimens

Kind	composition (wt %)								
	Cu	Al	Fe	Ni	Mn	Zn	Sn	Pb	
test result	HBs C1	60	0.8	0.8	0.6	0.7	Rem	0.3	0.4
	AIB C3	82	9.2	3.8	4.1	1.0	0.1	0.1	0.03
KR	HBs C1	52~62	0.5~3.0	0.5~2.5	1.0이하	0.5~4.0	35~40	0.1~1.5	0.5이하
	AIB C3	77~82	7.0~11.0	2.0~6.0	3.0~6.0	0.5~4.0	1.0이하	0.1이하	0.03이하

Table 2 Mechanical properties of specimens

Kind	tensile test			
	yield strength (MPa)	tensile strength (MPa)	elongation (%)	
Test result	HBsC1	284	500	35.6
	AIBC3	280	596	27.4
KR	HBsC1	175이상	440이상	20이상
	AIBC3	245이상	590이상	16이상

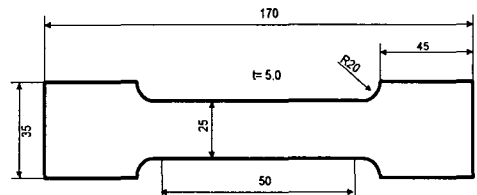


Fig. 2 Dimension of tensile test specimen

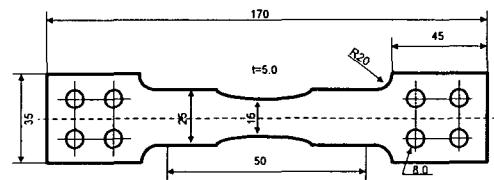


Fig. 3 Dimension of fatigue test specimen

피로시험편은 인장시험편의 형상을 조금 변형하여, Fig. 3과 같이 8개의 볼트 구멍과 R40의 노치형상으로 제작하였다. 시험편에 큰 반경의 노치를 준 것은 가능한 한 피로 파괴가 시험편 중앙에서 일어나게 하여 시험편 그림부나 기타 부분에서의 파괴를 피하여 데이터의 오차를 줄이기 위함이다.

2.3 실험 방법

인장시험은, 30Ton 용량의 동적 만능 시험기를 이용하여 동일조건하에서 각각 10개씩의 시험을 실시하였다. 주조제품의 경우 강도에 존재하는 확률통계적 변동이 크기 때문에 보다 객관성을 유지하기 위하여 10개씩의 시험을 기획하였다. 피로시험은 ±10ton 용량의 전기유압식 피로 시험기를 이용하여 실시하였고 응력비는 0.1로 하였다.

2.4 실험결과 및 고찰

인장시험의 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 인장강도(tensile strength)와 항복강도(yield strength: 0.2% proof stress) 모두 각각 10개씩의 시험결과와 평균치를 나타낸 것이고, 다른 재료와의 비교를 위하여 다른 문헌⁷⁾의 SM45C의 값을 인용하였다. 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 인장강도, 항복점 모두 SM45C와 비슷한 값을 나타냄을 알 수가 있다.

피로시험의 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 4와 마찬가지로 다른 강재와의 비교를 위해 SM45C의 값⁷⁾을 인용하였다. 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 피로강도의 경우, 두 재료 모두 SM45C에 비해 상당히 낮은 값을 나타냄을 알 수가 있다. 일반적으로 피로강도는 기계적 특성치에 비례한다. 각종 선급에서 인장강도만을 만족하도록 규정하고 있다. 그렇지만, 선박용 프로펠러에 이용되는 이들 재료는 인장강도나 항복강도 모두 일반구조용 탄소강이나 기계구조용 탄소강 등과 비슷한 값을 가지고 있으나 피로강도는 상대적으로 상당히 낮은 값을 나타내어 프로펠러의 설계에 있어 피로강도를 확실하게 평가하지 않으면 안 된다. 또한, 피로강도의 개선을 위한 진보적인 방법이 요구 된다.

3. 강도의 개선

금속재료의 피로강도의 개선에는 침탄, 질화, 숏피닝 등의 방법이 이용되고 있으나, 프로펠러재의 특성상 침탄 질화는 불가능하고 숏피닝의 경우는 강구의 크기 및 압력의 세기가 너무 커서 시행이 불가능하고, 설사, 숏피닝에 의해 강도의 개선이 가능하다 하더라도 프로펠러의 크

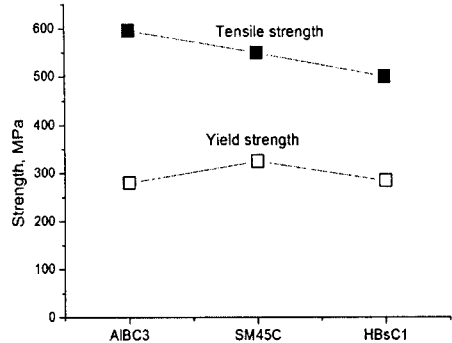


Fig. 4 Results of fatigue test

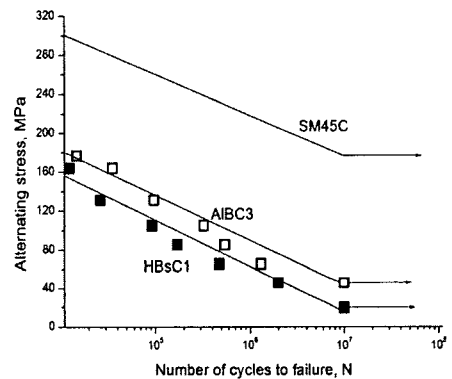


Fig. 5 Results of fatigue test

기가 소형선박을 제외하고는 상당히 크다는 점을 고려하면 현실성이 없다.

따라서 본 연구에서는 새로운 방법을 고려하였다.

3.1 시험편의 Air jet chisel peeing 처리

에어 제트치즐(air jet chisel)은 금속표면의 녹이나 불순물을 제거하기 위하여 사용되는 도구이다. 본 연구에서는 강도의 개선을 위해 선박수리나 파이프류 수리과정에서 녹제거용으로 많이 사용하고 있는 에어 제트 치즐을 이용하였다. Fig. 6은 에어 제트치즐의 형상을, Fig. 7에는 에어 제트치즐의 구성을 나타내었다.

본 연구에서는 강도의 개선을 위해 시험편의 양면을 번갈아 가면서 약 1분 동안 피닝

(peening)을 실시하였다. 강도의 강화는 연신율의 저하를 초래할 수가 있다. 선급에서는 연신율도 규정하고 있으므로 본 연구에서도 피닝 전후의 연신율의 변화를 측정하였다. Table 3에 그 결과를 선급의 규정치와 함께 나타내었다. 피닝에 의해 연신율이 약간 저하되기는 했으나 규정치에는 충분히 만족함을 알 수가 있다.

프로펠러의 제작은 날개표면에 다듬질 이외는 어떠한 처리도 행하질 않고 있다. 그러나 본 연구에서는 Air Jet Chisel을 이용하여 경도, 인장강도 및 피로강도의 증대효과를 얻고자 한다.

3.2 실험결과 및 고찰

먼저, 에어 제트치즐에 의한 시험편 표면의 경도를 측정하였다. 시험편을 에머리 페이퍼(240번~600번)와 알루미늄 분말(0.5 μ)로 연마한 후 마이크로 비커스 경도기(digital micro hardness tester)를 이용하여 1mm 간격으로 9 곳을 측정하였다. 경도의 측정 결과를 Table 4에 나타내었다. AIBC3의 경우, 피닝 처리재가 모재에 비해 약 4% 증가한 반면, HBsC1의 경우는 피닝 처리재가 모재에 비해 약 70%의 커다란 증가를 보였다.

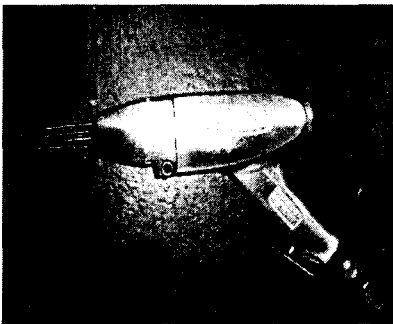


Fig. 6 Air jet chisel for peening

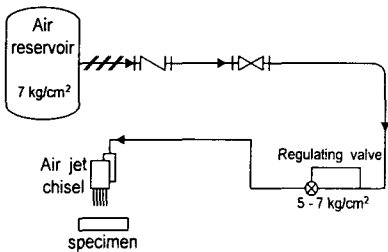


Fig. 7 Sequence of air jet chisel peening

이를 미세 조직적으로 확인하기 위하여 표면부 조직사진을 촬영한 것이 Fig. 8~11이다.

사진에서 하부의 검은 부분과의 경계가 표면이다. Fig. 8은 AIBC3의 모재, Fig. 9는 AIBC3의 피닝 처리재의 조직사진이다. AIBC3의 경우, 피닝 처리재의 표면 부위가 거의 차이가 없다. 이는 모재의 조직이 HBsC1에 비해 치밀한 조직으로 피닝처리 후의 경도 증가는 HBsC1보다 미약함을 알 수 있다. Fig. 10은 HBsC1의 모재, Fig. 11은 HBsC1의 피닝 처리재의 조직사진이다. HBsC1의 경우, 피닝 처리재의 표면부위의 조직이 모재에 비해 치밀해져 있음을 확연히 알 수가 있다.

Table 3 Results of elongation measurement

Grade	standard of rules	virgin material	peened material
AIBC3	16 %	27.4 %	26.1 %
HBsC1	20 %	35.6 %	32.5 %

Table 4 Vickers hardness test results

No	AIBC3		HBsC1	
	virgin specimens	peened specimens	virgin specimens	peened specimens
1	239.1	243.3	121.2	211.1
2	232.7	249.8	119.7	209.8
3	242.4	256.0	129.2	199.8
4	250.0	257.5	126.7	208.5
5	252.0	262.9	120.3	210.7
6	254.8	264.3	119.1	213.3
7	258.4	261.8	116.4	207.1
8	256.2	259.8	123.1	201.3
9	251.9	263.5	120.1	198.6
Mean	248.9	257.7	121.9	206.7

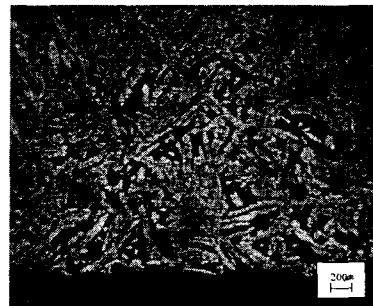


Fig. 8 Micro-structure of subsurface for virgin AIBC3

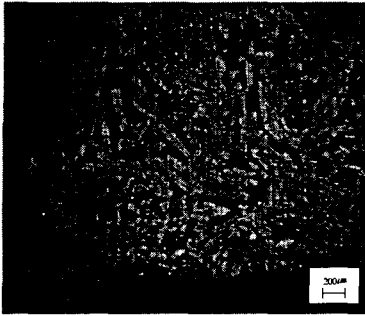


Fig. 9 Micro-structure of subsurface for AIBC3 after peening



Fig. 10 Micro-structure of subsurface for virgin HBsC1

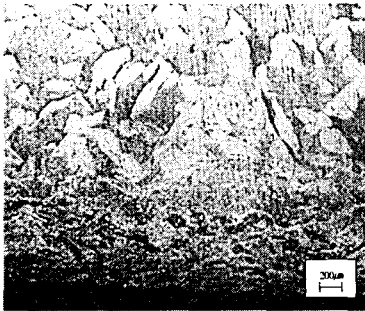


Fig. 11 Micro-structure of subsurface for HBsC1 after peening

Table 5~6은 모재와 피닝처리재의 인장시험 결과를 나타내었다. AIBC3의 경우, 피닝 처리에 의해 영률은 10% 증가, 항복점은 2.5%의 증가를 보였으며 인장강도는 2.7% 증가하였다. HBsC1의 경우는 영률이 3.7% 증가, 항복점은 3.2% 증가했고 인장강도는 10.4% 증가하였다.

Fig. 12~13은 모재와 피닝처리재의 피로시험 결과를 나타내었다. Fig. 12는 AIBC3의 모재와

Table 5 Tensile test results of virgin and peened materials(AIBC3)

NO	Young's modulus (GPa)		yield strength (MPa)		tensile strength (MPa)	
	virgin	peened	virgin	peened	virgin	peened
1	7.4	7.0	268	298	594	617
2	7.5	7.1	271	281	593	613
3	7.3	7.0	233	284	589	610
4	7.8	7.2	267	286	595	612
5	5.8	6.9	309	294	594	600
6	5.9	7.3	299	296	606	596
7	6.0	7.0	284	282	592	622
8	6.9	6.8	289	287	607	603
9	6.2	6.2	272	286	594	639
10	7.9	7.1	264	283	598	612
mean	6.3	7.0	280	287	596	612

Table 6 Tensile test results of virgin and peened materials(HBsC1)

NO	Young's modulus (GPa)		yield strength (MPa)		tensile strength (MPa)	
	virgin	peened	virgin	peened	virgin	peened
1	5.1	5.1	282	28	489	571
2	4.5	5.2	295	298	483	562
3	5.1	5.1	290	295	475	567
4	6.6	6.0	268	287	486	536
5	4.7	5.4	294	292	525	549
6	6.4	6.1	268	298	530	556
7	5.5	5.7	284	284	476	532
8	4.9	5.6	288	293	528	543
9	4.7	5.0	290	299	518	558
10	5.4	5.7	277	294	488	556
Mean	5.3	5.5	284	293	500	552

피닝 처리재의 피로시험결과를 함께 나타낸 것으로 피로한도 값이 약 40%의 증가를 보였다.

Fig. 13은 HBsC1의 피로시험 결과로, 피로한도 (N=10⁷)의 값이 19.6[MPa]에서 41.3[MPa]로 무려 111% 증가했다. 따라서 본 연구를 통하여 알 수 있는 것은 일반적으로 동합금의 경우, 강도의 개선이 상당히 어렵고 특히, 선박용 프로펠러는 크기나 구조적인 측면의 제약으로 인해서 다른 방법이나 슛피닝 등의 방법은 적용하기가

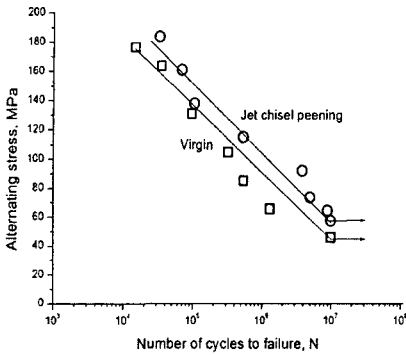


Fig. 12 S-N curve for AIBC3

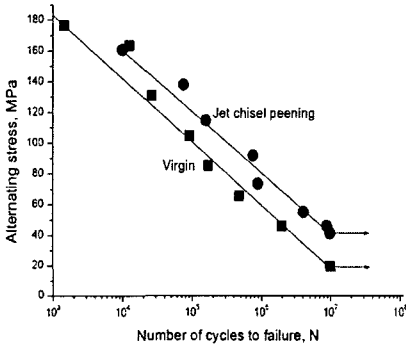


Fig. 13 S-N curve for HBSc1

어렵다. 이처럼 에어 제트치클에 의한 피닝은 프로펠러의 강도개선에 유용한 도구임을 본 실험결과로부터 알 수가 있다.

4. 결론

선박용 프로펠러의 날개 재료로 이용되고 있는 AIBC3와 HBSc1은 그 사용범위가 제한되어 있기 때문에 강도특성에 관한 데이터가 불충분하다. 선급규정에서조차도 재료의 화학적 성분과 기계적 성질의 평균치가 어느 정도 이상이어야 한다는 점만 명시되어 있다. 따라서 인장시험과 피로시험을 통하여 강도특성을 명백히 하였다. 두 재료 모두 인장강도는 일반구조용 탄소강이나 기계구조용 탄소강 등과 비슷한 값을 나타냈으나, 피로강도는 상당히 낮은 경향이

있어 피로강도의 개선이 필요함을 밝혔고, 에어 제트치클을 이용한 피닝을 이들 재료에 실시하여 강도의 개선 가능성을 확인하였다. 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 인장시험 결과, AIBC3, HBSc1 모두 인장강도나 항복강도가 일반구조용 탄소강이나 기계구조용 탄소강 등과 비슷한 정도를 나타내었다.

(2) AIBC3, HBSc1 모두 피로강도가 낮고 피로한도까지의 응력레벨의 폭이 상당히 넓은 특성이 있다. 따라서, 인장강도의 특성이 타 재료와 비슷하다 하더라도 피로강도를 필히 고려하여야 하며, 피로강도의 향상을 위한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

(3) 에어 제트치클에 의한 피닝을 실시한 결과, 경도는 AIBC3에서 4%, HBSc1에서는 70% 증가하였고, 인장강도는 각각 2.7%, 10%씩 증가했으며, 피로강도는 각각 40%, 111%씩 증가하였다.

한편, 에어 제트치클을 이용한 피닝에 대해서는 공기압의 세기나 시행시간 등에 따른 좀더 구체적인 연구가 진행되어야 하고 사용의 간편성까지 고려한다면 에어 제트치클의 이용은 프로펠러재의 강도개선에 유용한 방안을 알 수 있다.

참고문헌

- (1) Guidances Relating to Rules for Classification of Steel Ships, 2002, Materials and Welding, Part 2, Section 1, *Korean Register of Shipping*, p. 12.
- (2) M.H., Im, H.Y., Yoon, T.S., Kim and U.C., Chung, 2004, "The Effect of Corrosion Pit Repairing Method on the Strength of Marine Propeller," *Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 21, No. 3 pp. 124~131.
- (3) MSC, 1994, MSC/NASTRAN Quick Reference Guide and Dynamic Analysis Manual, MSC.
- (4) Guidances Relating to Rules for Classification of Steel Ships, 2002, Machinery Installations, Part 5, Section 3, *Korean Register of Shipping*, p. 12.
- (5) 2001, "Rules for Building and Classing Steel

Vessel, part 4, section 3, Propellers," *American Bureau of shipping*, pp. 209~211.

(6) 1988, "Failure Analysis of Machines and Structures - Case Histories and Techniques,"

part3, section 7, JSME Data Book, pp. 71~73.

(7) 1996 "Databook on Fatigue Strength of Metallic Materials," 1996, *The society of materials science, Japan*, Vol. 3, p. 191.