

대형 고속 선박용 프로펠러의 해수 중 피로강도에 관한 연구

김종호[†] · 안재형* · 강낙훈*

A Study on the Fatigue Strength of Propellers for High Speed and Large Ships in Sea Water

Jong-Ho Kim, J.H. Ahn and N.H. Kwang

Key Words : Propeller(프로펠러), High skew(고 스큐), Fatigue strength(피로강도), Stress ratio(응력비), Endurance diagram(내구선도), Constant life strength(시간강도)

Abstract

Recently there has been a remarkable increase in the number of high speed and large ships, and the high power involved for propulsion of above ships have brought high pitch ratio and high skew propeller. The recent tendency toward highly skewed propeller has increased the load on propeller blades and the fatigue strength of propeller blades has become the critical point in design of propellers for above ships.

In this paper fatigue tests in sea water were carried out on propeller material of Ni-Al bronze. The stress and environmental conditions of the test were selected to be close to those of full size propellers in use. The effect of stress ratio, stress frequency, revolution number of propeller for above ships numbers and so on were discussed.

1. 서 론

오늘날 컨테이너선박, 자동차 운반선과 같은 대형 고속선박은 화물수송의 경제성과 신속성 및 안전성을 극대화한 해상 수송 수단의 하나로써 주목을 받고 있다.

상기 선박용 프로펠러는 그 사용 목적상 기존 프로펠러의 피치비(≤ 0.7)보다 높은 0.99 ~ 1.12 정도의 피치비를 가지고 있으며, 또한 피치비의 증대에 따라 발생하는 프로펠러의 캐비테이션 및 기진력에 의한 선체진동을 해결하기 위하여 하이 스큐드(Highly skewed) 프로펠러를 채택하고 있

다¹⁾²⁾³⁾

피치비 0.7이하의 기존 프로펠러의 강도에 대한 기본적인 설계개념은 사용 재료의 인장강도에 적절한 안전계수를 고려하여 산출한 허용응력⁴⁾을 사용하는 것으로 피로강도, 스큐각의 변화 등은 중요하게 취급하지 않는다. 왜냐하면 상기 허용응력을 기준으로 설계된 기존 프로펠러는 지난 수 십년간 별다른 손상사고 없이 사용된 실적이 있고, 이 실적은 기존 프로펠러에 적용되는 설계개념의 타당성을 간접적으로 증명하고 있기 때문이다.

그러나 하이 스큐드 프로펠러의 경우 지난 몇 년간 적지 않은 손상사고가 보고⁵⁾되고 있으며, 그 원인은 스큐각 증가에 따라 프로펠러 블레이드에 발생하는 응력집중을 고려한 프로펠러 블레이드의 두께 증가 및 피로강도 확보 등의 조치를 설계단계에서 고려하지 않는 데에 있는 것으로 평가되고 있다. 즉, 기존 프로펠러의 경우 최대응력은 블레이드 두께가 가장 두꺼운 루트 또는

[†] 한국해양대학교 기관시스템공학부

E-mail : kjh@mail.hhu.ac.kr

TEL : (051)410-4251 FAX : (051)404-3985

* 한국해양대학교 대학원

0.25R에 상당하는 위치에서 발생하였으나 하이 스쿠드 프로펠러의 경우 최대응력의 발생점은 상대적으로 두께가 작아지는 0.5R ~ 0.6R로 이동하게 되는 것을 설계단계에서 고려하지 않았다.

또한 스쿠각의 증가에 따라 블레이드면에는 짝모멘트에 의해서 응력집중이 발생하게 되는 것도 설계단계에서 고려하지 않는 데에 있는 것으로 평가되고 있다.

한편 선박용 프로펠러 재료의 피로강도에 대한 자료(67)는 공기 중에서 평균응력, $\sigma_m=0$ 의 조건으로 10^6 내지 10^7 회 정도의 피로시험을 통하여 구한 것이 대부분이다. 따라서 하이 스쿠드 프로펠러와 같이 사용 기간 동안 해수분위기에서 평균응력 $\sigma_m=40$ MPa 정도의 조건으로 10^8 회 이상의 반복 회전수를 받는 프로펠러의 피로강도에 대한 자료가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 하이 스쿠드 프로펠러의 스쿠각, 평균응력 및 해수분위기가 프로펠러의 피로강도에 미치는 영향을 검토하여 그 결과를 상기 프로펠러의 설계 및 손상방지 대책에 반영하고자 한다.

2. 대형 고속선박용 프로펠러의 회전수

기계부품이나 구조물의 설계단계에 있어서 피로균열의 발생수명을 예측하는 것은 설계수명의 확보, 생산공정의 경제성 확보, 정기적인 검사 또는 점검 주기의 결정 등의 측면에서 중요하다. 이를 위하여 설계단계에서는 예상 설계수명 동안 부가되는 하중에 의한 누적손상을 선형적으로 합산하여 선형누적손상계수($C_w = \sum n_i / N_i$)를 계산하고 이 값에 일정한 안전율을 고려하는 기법 또는 내구선도(Endurance curve)를 이용하는 기법 등을 사용할 수 있다.

상기 선형누적손상계수를 이용하여 선박용 프로펠러의 피로균열 발생수명을 예측하기 위해서는 예상 설계수명동안의 응력스펙트럼과 반복사이클 수를 정확하게 파악할 필요가 있다. 그러나 선박용 프로펠러의 응력스펙트럼은 선박의 항행구역, 운항 형태, 입출항에 따른 전후진, 해상상태 등의 영향을 받게 되므로 이를 고려하는 것은 현실적으로 쉽지 않고 또 이에 대한 연구도 거의 없는 실정이다.

따라서 선박용 프로펠러에 대한 설계단계에서는 예상 설계수명 동안 프로펠러에 부가되는 평균응력, 변동응력 및 반복 사이클 수를 구하고 이 값들을 이용하여 내구선도를 작성하여 피로균열의 발생수명을 평가하는 기법이 오래 전부터 널리 이용되고 있다.

실제 오늘날 선박용 프로펠러의 설계단계에서 상기 내구선도의 작성에 필요한 평균응력, 변동응력의 경우 상용화된 컴퓨터 프로그램을 이용하여 거나 실측을 통하여 프로펠러의 실제 조건에 가까운 응력을 구할 수 있고 이에 대한 다수의 연구 결과가 발표되고 있다.

그러나 내구선도를 이용한 프로펠러 설계에서 중요한 인자인 반복 사이클 수에 대해서는 별다른 연구 결과가 발표되지 않고 있다. 특히 오늘날 대형 고속선박과 같이 선박의 운항시간이 과거에 비하여 급속하게 증가된 선박에 사용되는 프로펠러의 경우 선박의 예상 설계수명 동안 프로펠러에 부가되는 반복 사이클 수를 적절하게 산정하여 내구선도를 작성할 필요가 있다.

Fig. 1은 국내 해운회사가 소유하고 있는 대형 고속선박인 26척 컨테이너 선박의 7년간의 운항일정에 대한 자료를 수집하고 이를 표본으로 하여 모집단인 대형 고속선박용 프로펠러의 20년 동안의 운항일수와 회전수를 추정한 결과를 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 상기 선박의 프로펠러는 20년 동안의 평균회전수는 $8.14E+08$ 회 정도인 것을 알 수 있고, 이를 표본으로 모집단인 대형 고속선박의 20년 동안의 회전수를 90% 신뢰한계로 평가하면 $7.94E+08$ 회 이상 $8.34E+08$ 회 이하의 회전수로 운전되는 것을 추정할 수 있다.

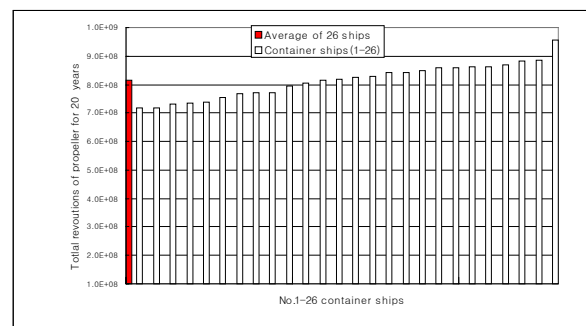


Fig. 1 Propeller revolutions of 26 container ships

3. 대형 고속선박용 프로펠러 재료의 피로시험

3.1 시험재료 및 시험편

현재 선박용 프로펠러 재료로써 주로 사용되는 것은 고강도 황동주물 제1종, 알루미늄 청동주물 제2종 및 제3종 등이 있으나, 본 연구에서는 대형고속선박용 프로펠러 재료로 널리 사용되는 알루미늄 청동주물 제 3종 ($AIBC_3$)을 시험재료로 선택하였다.

대형 주물은 주조 시 냉각속도 또는 두께의 차이에 따라 인장강도의 차이가 크게 나타나며, 대형 프로펠러 주물의 경우 흑피에 가까울수록 주물로서의 품질 및 기계적 성질도 양호하며 내부로 갈수록 양호하지 않게 된다. 따라서 실험실에서 프로펠러 주물의 피로강도를 시험하기 위하여 제작하는 시험편은 실제 프로펠러와 가까운 조건으로 주조한 시험재의 내부에서 채취하는 것이 바람직하다. 선박용 프로펠러 주물에 대한 선급규칙에서도 피로시험용 시험재는 실제 프로펠러의 블레이드 1개를 주조하여 0.2 ~ 0.3R 부근에서 채취하도록 규정하고 있는 것은 이러한 측면을 고려한 것으로 평가된다.

일본의 경우 1980년을 전후하여 프로펠러 제작자의 협조로 실제 프로펠러 주물에서 시험재를 채취하여 피로시험을 수행한 적이 있으나 국내의 경우 이러한 연구 실적은 보고되지 않고 있다.

본 연구에서는 일본의 연구결과⁶⁾⁻⁷⁾, 국내 프로펠러 제작자의 경험 및 실적 등을 참고하여 대형선박용 프로펠러의 실제 인장강도(500 MPa)에 상당하는 인장강도를 가진 시험재를 여러 차례의 시행착오를 거쳐 최종적으로 Fig. 2와 같이 4개를 주조하였다.

Table 1은 상기 시험재에서 가장 냉각속도가 느릴 것으로 추정되는 부위에서 KS B 0801에 규정된 14B형 인장시험편을 각각 5개씩 채취하여 구한 기계적 성질을 나타낸 것이다. 이 표에서 보면 인장강도의 평균치는 512.75 MPa로써 이 값을 이를 표본으로 모집단인 대형 고속선박용 프로펠러 주물의 실제 인장강도를 90%신뢰도로 평가하면 501 MPa이상 524 MPa이하로 된다는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 제작한 시험재의 인장강도는 대형선박용 실제 프로펠러 주물의

실제 인장강도(500 MPa)와 유사하다고 할 수 있다. 시험재의 화학성분은 지면관계상 생략한다.

Table 1 Mechanical properties of test pieces

Test specimen	Tensile strength(MPa)	Test specimen	Tensile strength(MPa)
T-A-01	444	T-C-01	528
T-A-02	489	T-C-02	516
T-A-03	548	T-C-03	549
T-A-04	515	T-C-04	491
T-A-05	529	T-C-05	446
T-B-01	531	T-D-01	529
T-B-02	492	T-D-02	510
T-B-03	535	T-D-03	537
T-B-04	509	T-D-04	496
T-B-05	528	T-D-05	533

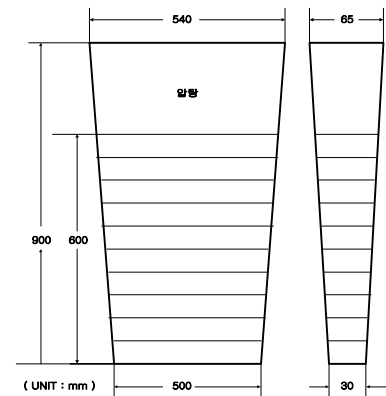


Fig. 2 Test piece for fatigue test

본 연구에서 사용한 피로시험편은 상기와 같이 제작된 4개의 시험재의 내부에 가까운 위치에서 각각 5개를 채취하여 Fig. 3과 같이 ASTM E466-96 규정에 적합하게 가공하였다. 시험편의 표면은 기계가공 후 #1200의 사포를 사용하여 폭 방향으로 연마하였으며, R부는 산화크롬으로 버핑연마(buffing polishing)을 하였다.

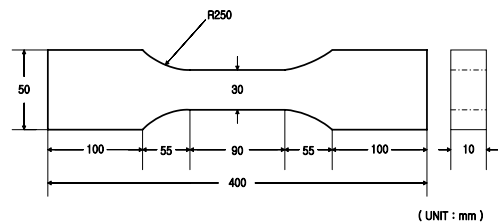


Fig. 3 Fatigue test specimen for $AIBC_3$

3.2 시험방법

시험조건은 대형 고속선박용 프로펠러의 피로강도에 영향을 미치는 해수분위기, 평균응력, 부하형식 및 속도 등을 충분히 고려하여 시험조건을 결정하였다.

일반적으로 피로강도는 하중이 추가되는 형식(축방향, 회전굽힘, 평면굽힘)에 따라서 차이가 나게 된다. 회전 중 프로펠러 블레이드의 응력상태는 기본적으로 평면굽힘응력 상태이지만 블레이드의 두께가 두꺼운 경우 두께방향은 응력 구배는 매우 완만하므로 실제적으로 피로균열이 발생하는 표면 부근은 축방향 응력상태에 가깝게 된다. 따라서 본 연구에서는 축방향으로 응력을 추가하였다.

하중부가 속도는 현재 대형 고속선용 프로펠러의 회전속도가 대략 100 R.P.M 전후인 것을 고려할 때 2 Hz정도가 바람직하다고 할 수 있다. 그러나 상기와 같은 속도로서 10^8 이상의 사이클수에 해당하는 피로시험은 수행하기 위해서는 피로시험편 1개당 580일 정도 된다는 것을 현실적으로 고려하지 않을 수 없다. 또 알루미늄 청동주물의 프로펠러는 황동주물 프로펠러와는 다르게 10^6 이상의 사이클에서도 부하속도가 피로균열의 발생수명에 미치는 영향이 거의 미미하다고 보고된 것을 고려하여 본 연구에서는 피로시험편이 해수통을 통과하는 부분에서 누수가 발생하지 않을 정도인 하중 부가속도인 20 Hz를 채택하였다.

해수 중에서 운전되는 프로펠러의 피로강도는 공기 중에 비해서 응력비의 영향을 크게 받는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 대형 고속 프로펠러의 1회전 중 응력분포를 해석한 결과 및 실측한 결과로부터 실적선 프로펠러의 응력비 R은 0~0.4 정도인 것을 확인하고 본 연구에서는 응력비 R=0 및 R=0.4의 조건으로 피로시험을 수행하였다.

4. 피로시험 결과 및 고찰

4.1 알루미늄 청동주물의 피로특성

Fig. 4는 알루미늄청동주물 제3종($AIBC_3$)로 제작된 피로시험편을 응력비 R=0 및 R=0.4의 조

건으로 해수 중에서 피로시험을 실시하고 그 결과를 나타낸 것이다.

그림에서 횡축은 피로시험편이 파단될 때까지 추가된 반복 사이클 수를 나타내며 종축은 추가된 응력진폭을 나타낸다. 또 그림에서 “○”과 “■”으로 표시된 것은 본 연구에서 구한 R=0 및 R=0.4에서의 시험값을 각각 나타내며, 점선과 실선은 R=0 및 R=0.4에서의 시험값을 파손확률 10%로 통계처리한 것을 나타낸 것이다.

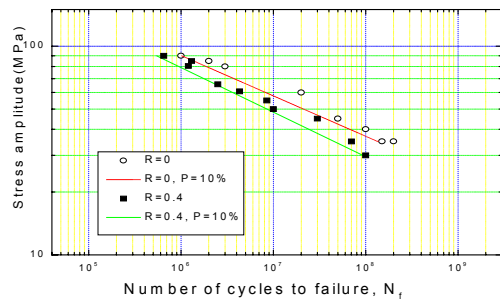


Fig. 4 S-N curve of $AIBC_3$ in sea water

이 그림을 통하여 해수 분위기에서 알루미늄 청동주물의 피로강도는 반복 사이클 수가 증가됨에 따라 비철금속제의 일반적인 피로특성과 마찬가지로 거의 직선적으로 감소된다는 것을 알 수 있다.

따라서 해수분위기에서 알루미늄 청동주물의 피로강도를 평가하는 경우 일반 철강재료와 같이 2×10^6 회 또는 그 이상의 영역에서 S-N곡선의 기울기를 수정하여 선형누적손상계수를 계산하거나 내구선도(Endurance curve)를 이용하는 기법은 바람직하지 않다는 것을 알 수 있다.

4.2 평균응력의 영향

Fig. 5는 해수분위기에서 평균응력이 알루미늄 청동주물의 피로강도에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 반복사이클 수 10^7 회, 10^8 회 및 10^9 회에 해당하는 시간강도를 나타낸 곡선이다.

그림에서 반복사이클 수 10^7 회, 10^8 회에 해당하는 시간강도곡선은 본 연구에서 구한 피로시험 결과를 사용하여 작성한 것이고, 반복사이클 수 10^9 회에 해당하는 시간강도 곡선은 본 연구에서 구한 피로시험 결과를 직선으로 연장하여 반복사

이클 수 10^9 회의 시간강도를 나타낸 것이다

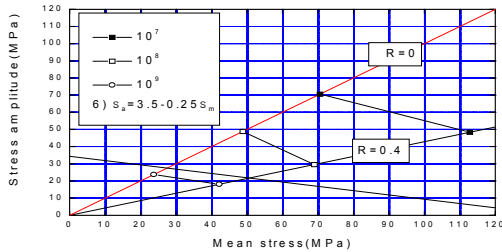


Fig. 5 Constant life fatigue diagram of $AIBC_3$ in sea water

통상 금속재료의 피로강도는 평균응력에 의한 영향을 받게 되지만 부식의 영향을 무시할 수 있는 분위기에서 10^7 회 이상의 고사이클영역에서는 평균응력이 피로강도에 미치는 영향은 거의 미비한 것으로 알려져 있다. 즉 시간강도곡선의 기울기는 횡축과 평행하게 나타나게 된다.

그러나 본 연구에서 얻어진 Fig. 5의 시간강도곡선은 횡축에 대하여 상당한 기울기를 가지고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 부식성 분위기인 해수 중에서 알루미늄 청동주물의 피로강도는 10^7 회 이상의 고사이클영역에서도 평균응력에 의한 영향을 받는다는 것을 의미한다.

그림에서 10^8 회에 상당하는 시간강도곡선을 횡축까지 연장하면 그 교점은 100 MPa정도이고 이 값은 알루미늄 청동주물의 항복강도에도 미치지 못한다는 것을 알 수 있다.

또 전술한 바와 같이 알루미늄 청동주물을 주로 사용하는 하이 스쿠드 프로펠러의 20년 동안 평균회전수가 8×10^8 회 정도인 것을 감안할 때 알루미늄 청동주물의 프로펠러를 설계할 때에는 10^7 회 이상의 고사이클영역에서 평균응력이 피로강도에 미치는 영향을 충분히 고려하여야 한다는 것을 알 수 있다.

4.3 반복사이클수의 영향

Fig. 6은 해수 분위기에서 반복사이클 수가 알루미늄 청동주물의 피로강도에 미치는 영향을 조사하기 위하여 본 연구에서 구한 반복사이클 수 10^8 회의 피로시험결과를 이용하여 여러 반복사이클 수에서의 시간강도를 작성한 곡선이다.

그림에서 “■-■”으로 표시된 것은 10^8 회의 시간강도를 나타낸다.

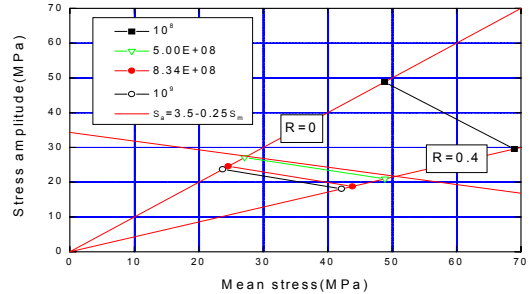


Fig. 6 Constant life fatigue diagram of $AIBC_3$ in sea water at varying cycles

그림에서 실선으로 표시된 것은 일본해사협회가 선박용 프로펠러의 피로강도를 평가하는 데에 사용하는 식, $S_a = 3.5 - 0.25 S_m$ 을 도식화한 것으로 이 식은 프로펠러에 추가되는 반복사이클 수는 20년 동안 10^9 회, 변동응력에 대한 안전율은 2.6, 프로펠러 제작시 적용하는 비파괴검사는 액체침투탐상검사인 경우를 전제로 하고 있다.

그림에서 “▽-▽”으로 표시된 것은 5×10^8 회에서의 시간강도를 나타낸 것으로 본 연구에서 구한 피로시험 결과를 직선으로 연장하여 구하였다. 여기서 5×10^8 회의 반복사이클 수는 국내 프로펠러 제작자가 설계에 사용하는 값이다.

그림에서 “●-●”으로 표시된 것은 본 연구에서 구한 피로시험 결과를 직선으로 연장하여 8.34×10^8 회에서의 시간강도를 나타낸 것이다. 여기서 8.34×10^8 회는 전술한 국내 대형 고속선박이 20년 동안 연간 280일 정도 운항하는 경우의 반복사이클 수에 해당된다.

그림에서 “○-○”으로 표시된 것은 본 연구에서 구한 10^9 회의 시간강도곡선을 나타낸 것으로 R=0.4 직선과 만나는 점에서 평균응력은 42 MPa, 응력진폭은 18 MPa이다.

그림에서 보면 본 연구에서 구한 10^9 회의 시간강도곡선은 전술한 일본해사협회의 시간강도 곡선보다 낮은 쪽에 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 얻어진 피로시험 결과를 이용하여 프로펠러의 피로강도를 평가하게 되면 일본해사협회의 식을 사용하는 경우보다 보수적인 결과를 얻게 된다. 즉 본 연구에서 구한 시간강도곡선이

R=0.4인 직선과 만나는 교점에서 평균응력은 42 MPa, 응력진폭은 18 MPa이고, 일본해사협회의 시간강도곡선이 R=0.4인 직선과 만나는 교점에서 평균응력은 52 MPa, 응력진폭은 22 MPa이므로 응력비 R=0.4인 경우 본 연구에서 구한 시간강도곡선을 사용하는 경우 프로펠러의 두께는 일본해사협회의 시간강도곡선을 사용하는 경우보다 $1.1 = (\sqrt{22}/\sqrt{18})$ 배 만큼 증가시켜야 한다.

또 전술한 바와 같이 대형 고속 프로펠러의 1회전 중 응력분포를 해석한 결과 및 실측한 결과로부터 실적선 프로펠러의 응력비 R은 0.35 ~ 0.4정도인 것을 전제로 본 연구에서 구한 시간강도곡선을 설계기준으로 채택하는 경우 프로펠러 설계 시 증가시켜야 할 두께를 검토하였다.

그림에서 응력비 R=0.4에 위치한 “▽”, “●”에서의 평균응력은 49 MPa, 44 MPa이 되며 응력진폭은 21 MPa, 19MPa이 된다.

따라서 국내 프로펠러 제작자가 본 연구에서 얻어진 피로시험 결과를 이용하여 10^9 회에서의 시간강도를 만족시키기 위해서는 국내 프로펠러 제작자는 $1.08 = (\sqrt{21}/\sqrt{18})$ 배만큼 프로펠러 블레이드의 두께를 증가시킬 필요가 있음을 알 수 있다. 또 전술한 국내 대형 고속선박이 20년 동안 연간 280일 정도 운항하는 경우에 해당되는 반복사이클 수인 8.34×10^8 회에서의 시간강도를 만족시키기 위해서는 $1.05 = (\sqrt{21}/\sqrt{19})$ 배만큼 프로펠러 블레이드의 두께를 증가시킬 필요가 있음을 알 수 있다.

4.5 스큐각과 피로강도

Fig. 7은 스큐각과 피로강도의 관계를 평가하기 위하여 작성한 내구선도로써 그림에서 “■”, “▲”으로 표시된 것은 스큐각 40° 및 60°의 대형 고속선박용 프로펠러 블레이드²⁾에 작용하는 평균응력과 응력진폭을 각각 나타내고 있다.

그림에서 스큐각이 40°인 경우에는 응력점은 시간강도곡선 ①, ②, ③ 및 ④보다 아래 쪽에 있으므로 프로펠러 블레이드는 각각의 반복사이클 수에 해당하는 수명동안에는 피로균열이 발생하지 않는 것을 예상할 수 있다. 그러나 스큐각이 60°인 경우의 응력점은 상기 시간강도곡선보다 위쪽에 위치하므로 프로펠러 블레이드에는 각각의 반복사이클 수에 해당하는 수명동안에 피

로균열이 발생하게 된다는 것을 예상할 수 있다. 따라서 스큐각을 60°로 하는 경우에는 프로펠러 블레이드의 두께를 증가시킴으로 블레이드에 발생하는 응력값을 낮추는 것이 필요하다는 것을 알 수 있다.

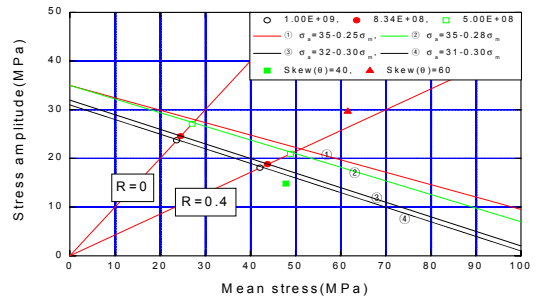


Fig. 7 Constant life fatigue diagram of AIBC₃ in sea water at varying skew angle of propeller

5. 결론

- 1) 대형 고속선박용 프로펠러의 20년 동안 회전수를 90% 신뢰한계로 평가하면 7.94E+08회 이상 8.34E+08회 이하인 것으로 추정할 수 있다.
- 2) 해수 중에서 알루미늄 청동주물의 피로강도는 10^7 회 이상의 고사이클영역에서도 평균응력에 의한 영향을 받는다.

참고문헌

- 1) Research and Development Center, 1994, "A Review on Rules for Propeller Blade Thickness", Classification, Vol. 28, p.5.
- 2) Bal-Young Kim and Joo-Sung Lee, 1998, "Fatigue Strength Analysis of Marine Propeller Blade to Change in Skew Angle", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 35, No.1, pp.80-81, 1998
- 3) J.T.Kim, 1990, "Marine Propeller Blade Strength Analysis by Finite Element Method", Tech. Hyundai, Vol. 10, No.3, pp.8-15
- 4) Korean Register of Shipping, 2000, Rules for Classifications-Part 5 Machinery, Korean Register of Shipping, Korea, pp.21-23
- 5) Juno Minakata, 1999, "Propeller Damaged and Repair Techniques at Present", Journal of the M.E.S.J., Vol.33, No.9, pp.653-661
- 6) The Society of Materials Science, 1996, Data book on Fatigue Strength on Metallic Materials, Elsevier Science, Japan, Vol. 2, pp.1568-1570
- 7) Ichiji Nakano, 1975, "Materials for High Power Marine Propeller", Journal of the M.E.S.J., Vol.10, No.6, pp.37-46