

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2008.32.12.1055

몬테카를로 시뮬레이션에 의한 선박용 프로펠러재의 피로수명 확률분포 평가

윤한용* · 장건위*

(2008년 3월 19일 접수, 2008년 8월 20일 수정, 2008년 10월 27일 심사완료)

Evaluation for Probabilistic Distributions of Fatigue Life of Marine Propeller Materials by using a Monte Carlo Simulation

Han-Yong Yoon and Jianwei Zhang

Key Words: Marine Propeller(선박용 프로펠러), Parametric Sensitivity(파라미터의 민감도), Probabilistic Distribution(확률 분포), Monte Carlo Simulation(몬테카를로 시뮬레이션)

Abstract

Engineering materials have been studied and developed remarkably for a long time. But, few reports about marine propeller materials are presented. Recently, some researchers have studied the material strength of marine propellers. However, studies on parametric sensitivity and probabilistic distribution of fatigue life of propeller materials have not been made yet. In this study, a method to predict the probabilistic distributions of fatigue life of propeller materials is presented, and the influence of several parameters on the life distribution is discussed.

1. 서론

프로펠러는 선박의 핵심요소 중의 하나이다. 선박용 프로펠러 사고의 대부분은 크게 變形, 切損, 浸蝕, 및 腐蝕 등으로 인해 일어나고 있다. 이들 사고는 주로 선박 운항 중에 발생하기 때문에 선박 종사자들의 특별한 주의가 필요하고 프로펠러를 제작하고 수리하는 관계자들의 끊임없는 연구와 기술개발이 요구된다. 그러나 선박용 프로펠러에 대한 연구는 대단히 적다. 특히 선박용 프로펠러의 피로수명에 관한 연구는 거의 없다.

선박용 프로펠러와 관련된 연구로는, 선박용 프로펠러재료로 사용되는 HBsC1과 AIBC3의 피

로강도평가 및 개선에 관한연구,⁽¹⁾ 선박용 프로펠러의 구조 파손에 대한 분석⁽²⁾ 등이 있다.

근래에 와서 재료강도에 신뢰성공학을 접목한 연구가 많이 진행되어 왔다. 확률파괴역학이라 일컬어지는 연구영역으로, 확률론적 접근법에 관한 논문,^(3,4) 비파괴검사수법에 따른 초기균열의 분포를 논한 논문,⁽⁵⁾ 파괴확률이나 피로수명의 분포에 대한 제반 파라미터의 영향을 평가한 논문,⁽⁶⁻¹⁰⁾ 피로균열 진전과정의 확률특성을 논한 논문⁽¹¹⁻¹³⁾들을 볼 수가 있다.

Assakkaf⁽¹⁴⁾는 피로수명의 모델로서 많이 이용되는 S-N선도를 기반으로 하여, 선박의 갑판 설계를 위한 제반 파라미터에 확률 모델을 적용하여 partial safety factor를 구하는 방법을 제시하였다. 그러나 피로수명 확률분포의 예측이라던가 파라미터가 피로수명의 확률분포에 미치는 영향을 평가한 연구는 아직 없는 것으로 생각된다. 본 연구에서는 이와 같은 관점으로부터 출발하여

* 책임저자, 회원, 목포대학교 기계공학과
E-mail : hyoon@mokpo.ac.kr
TEL : (061)450-2412 FAX : (061)452-6376
* 목포대학교 대학원 기계공학과

Table 1 Fatigue test results for AIBC3 and HBsC1

NO	Alternating stress [MPa]	Fractured cycles N_f	
		AIBC3	HBsC1
1	176.4	14832	1461
2	163.4	35583	12534
3	130.7	96609	26388
4	104.6	97139	92142
5	85.0	545213	171153
6	65.4	1311585	480136
7	45.8	10^7	4999041
8	19.6	10^7	10^7

선박용 프로펠러재료의 피로수명 확률분포 평가 프로그램을 개발하고, 또한, 제반 파라미터가 피로수명의 분포에 미치는 영향에 대해서 논하고자 한다.

2. 프로펠러 재료

HBsC(고강도황동주물) 과 AIBC(알루미늄 청동주물)는 현재 선박용 프로펠러 재료로 가장 많이 사용되고 있다.⁽¹⁵⁾ 본 연구에서는 이들 두 종류 재질을 연구재료로 이용하고자 하였으며 본 연구그룹의 앞선 연구결과⁽¹⁾를 이용하였다. Table 1은 이 두 재료의 피로시험결과이다. 시험결과 이들 선박용 프로펠러재의 비강도(피로강도/인장강도)는 다른 금속재료에 비해 상당히 낮다. 따라서 피로강도를 향상시키는 방안이 강구되어야 하나, 비철금속의 특수성으로 인하여 숏피닝을 비롯한 일련의 표면강화 처리수법으로는 강화효과를 얻을 수가 없다.

에어 켈치즐(air jet chisel)은 금속표면의 녹이나 불순물을 제거하기 위하여 사용되는 도구이다. 본 연구 그룹에서는 에어 켈치즐에 의한 피닝으로 피로수명을 향상시켰으며, 그 결과가 Table 2 이다.

3. 피로수명 분포에 대한 S-N 어프로치

양대수 그래프에서 S-N 데이터가 직선적인 관

Table 2 Fatigue test results for peened AIBC3 and HBsC1

No	Alternating stress [MPa]	Fractured cycles N_f	
		AIBC3	HBsC1
1	183.6	33219	---
2	160.6	69921	9833
3	137.7	105121	75611
4	114.7	536218	159647
5	91.8	3853640	761665
6	73.4	5016276	902417
7	64.3	8921154	---
8	57.3	10^7	---
9	55.1	---	4106621
10	45.9	---	8911268
11	41.3	---	10^7

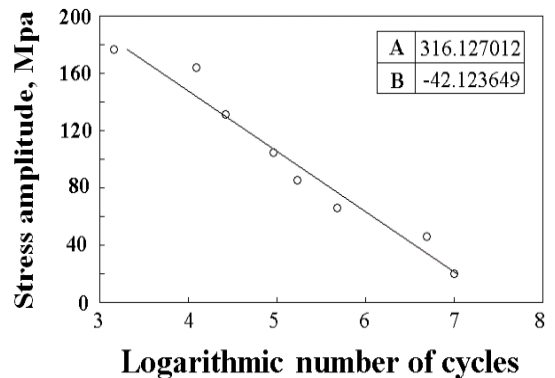


Fig. 1 ΔS -log N curve for HBsC1

계일 경우에는 S-N 관계를 다음과 같은 하나의 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$N = \frac{A}{\Delta S^m} \tag{1}$$

여기서, N : 피로파손의 사이클 수, ΔS : 응력 진폭, A : ΔS 가 1 일 때 $S-N$ 선상의 절편, m : $S-N$ 선의 기울기이다.

Fig. 1은 Table 1의 HBsC1의 실험결과를 S-N선도로 나타낸 것이다. 종축은 응력진폭이며, 횡축

Table 3 The values of A and B

	A	B
HBsC1	316.12	-42.12
Peened HBsC1	329.21	-41.17
AIBC3	367.92	-48.05
Peened AIBC3	378.57	-45.30

은 수명 N 에 \log 를 취한 값이다. 여기서 \log 는 밑이 10인 자연대수이다.

Fig. 1에 나타내는 바와 같이, 편대수, 즉, 사이클수 축만 대수인 그래프에서 직선적인 성격을 나타낸 경우에는 식 (1)을 변형하여 식 (2)와 같이 나타낼 수가 있다.

$$\Delta S = A + B \log N \quad (2)$$

여기서, N : 피로파손 사이클 수, A : $S-N$ 곡선의 절편, ΔS : 응력, B : $S-N$ 선의 기울기이다.

식 (2)에 Assakkaf⁽¹⁴⁾와 같이 설계를 위한 계수를 추가하여 다음과 같이 나타낸다.

$$\log N = \frac{f^d}{B} (f^s \Delta S - A) \quad (3)$$

여기서, f^d : 손상비율인자, f^s : 응력불확실성인자이다.

4. 시뮬레이션 프로그램의 개발 및 수행

4.1 절편 A 와 기울기 B 을 위한 회귀분석

식 (2)의 계산을 수행하기 위해서 Table 1과 2에 나타낸 응력 S 와 N 의 값이 사용되었다. 선형회귀 분석을 통하여 얻어진 결과를 Table 3에 나타낸다.

4.2 피로수명 분포 시뮬레이션

시뮬레이션을 위하여 다음과 같은 조건을 설정하였다.

(1) 프로펠러 재료의 $\Delta S-N$ 의 관계가 모두 편대수상에서 선형적 성격을 나타내므로 식 (3)을 적용하였다.

(2) 확률 통계적 시뮬레이션 수법으로 많이 이용되는 몬테카를로 방법을 본 연구에서도 사용하였다.

(3) 각 랜덤 변수당 랜덤 개수는 10000으로 하

Table 4 Input data for simulation

Random Variables	Mean	COV	Distribution Type
ΔS	30MPa/ 120MPa	0.1~0.3	Log-normal
f^d	1.0	0.1~0.3	Log-normal
f^s	1.0	0.1~0.3	Normal
A	316.12	0.1~0.4	Normal
B	-42.12	0	Constant

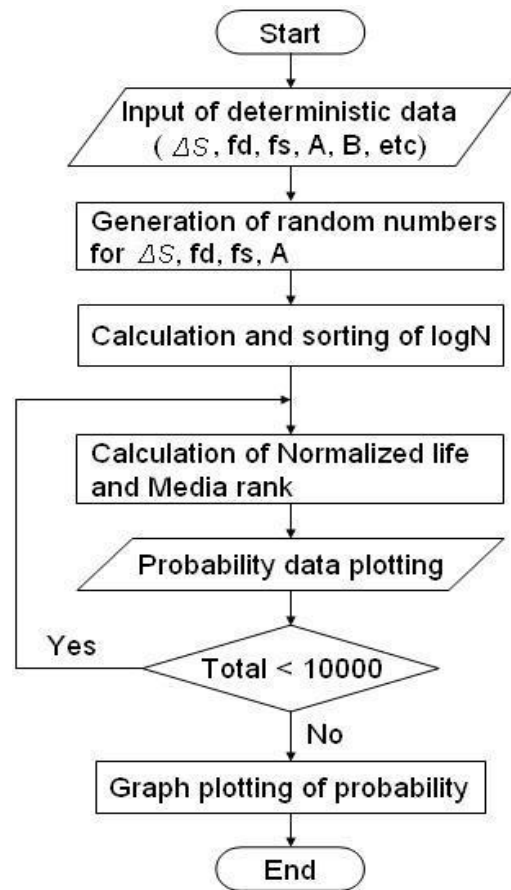


Fig. 2 Flowchart of simulation program

였다.

(4) 시뮬레이션에 적용된 랜덤 변수, 입력데이터와 분포유형 등은 Table 4에 나타낸다. 분포 타입은 Assakkaf⁽¹⁴⁾가 시도하였던 것과 동일하게 $\Delta S, f^d$ 는 log-normal분포를, f^s, A 는 normal분포를 따르는 것으로 가정하였다. 여기서 COV는 변

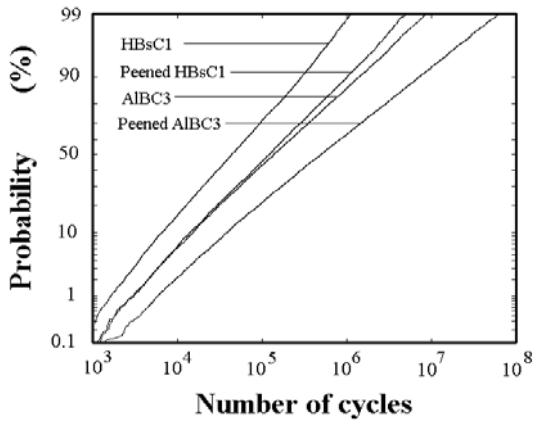


Fig. 3 Difference in life distribution for different materials

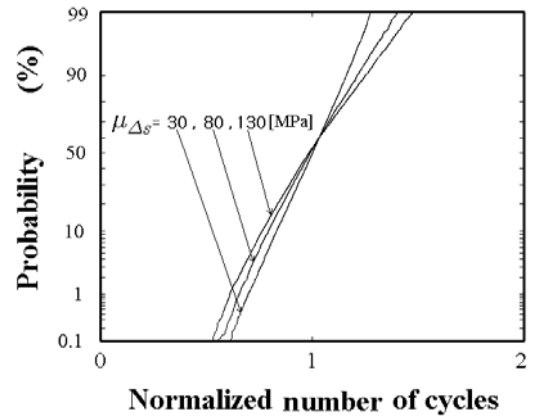


Fig. 4 Effect of alternating stress $\mu_{\Delta S}$

동계수(Coefficient of variance)이다.

(5) 개발된 시뮬레이션 프로그램의 순서도는 Fig. 2와 같다.

4.3 결과 및 토론

(1) 식 (3)의 여러 설계 변수에 확률변수로 하여 Table 4의 값을 대입하고 몬테카를로 시뮬레이션으로부터 구한 사이클 수의 확률분포, 즉, 피로수명의 확률분포가 Fig. 3이다. 여기서, 종축은 누적확률(cumulative probability)로 간단히 확률(probability)로 나타낸다. 횡축은 사이클 수이다. 응력진폭 ΔS 의 평균($\mu_{\Delta S}$)은 120MPa이고, 확률변수($\Delta S, fd, fs, A$)의 COV ($COV_{\Delta S, fd, fs, A}$)는 다 0.1이며, A와 B의 값은 Table 3에 나타난 값을 적용하였다. B의 분포유형이 상수이므로 COV는 0이다.

그래프에서 알 수 있는 것처럼, 치즐에 의한 피닝을 실시한 재료는 모두 우측으로 이동하여 수명의 절대 값이 증가하였음을 알 수 있다. 그러나 분포선의 기울기에는 유의한 변화를 나타내지 않으므로 분포의 크기는 별 영향을 미치지 못함을 알 수가 있다.

(2) Fig. 4는 응력진폭 평균치의 수명분포에 대한 영향을 나타낸다. 여기서 응력진폭의 COV는 0.1로 고정하였다. 응력진폭의 크기가 증가함에 따라 수명분포곡선의 기울어짐이 약간 증가된다. 확률그래프에서 데이터 값이 세워지면 분포가 작은 것이고 기울어짐이 커지면 분포가 커지는 것

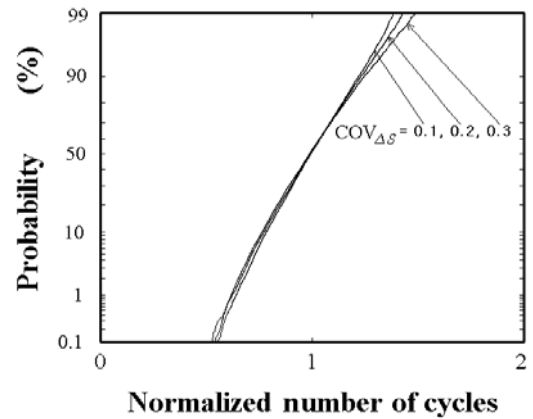


Fig. 5 Effect of the COV of $\mu_{\Delta S}$ ($\mu_{\Delta S} = 30\text{MPa}$)

이 되므로, 수명의 분포가 약간 커짐을 알 수 있다. 여기서 횡축은 표준화(Normalized) 수명을 나타낸다. 표준화 수명은 피로수명을 피로수명의 평균치로 나눈 값으로 이것은 데이터 값을 평균치 주변으로 모아 곡선의 기울기만을 평가하고자 하는 시도로 수명의 절대치가 아니라 수명분포의 기울어짐, 즉, 분포의 크기만을 평가하기 위한 것이다.

다음 응력진폭의 변동계수의 영향을 파악하자. Fig. 5는 응력진폭의 평균치가 30MPa 일 때 응력의 변동계수를 변화시킨 것이고, Fig. 6은 응력의 평균치를 120MPa로 하여 응력의 변동계수를 변화시킨 것이다.

Fig. 5로부터 알 수 있는 것처럼 변동계수에 따른 곡선의 변화는 매우 작다. 즉, 응력의 평균치

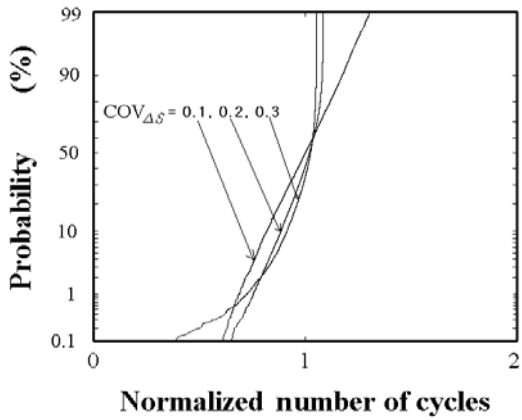


Fig. 6 Effect of alternating stress ($\mu_{\Delta S} = 120$ MPa)

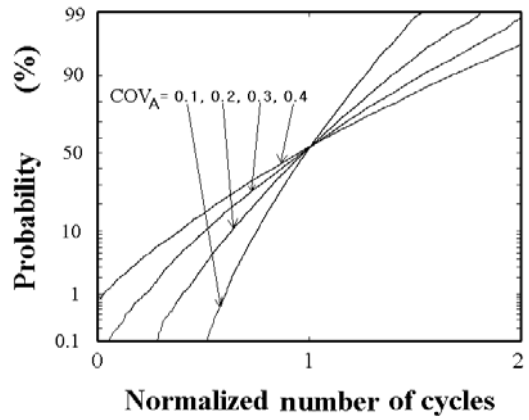


Fig. 8 Effect of the COV of intercept A

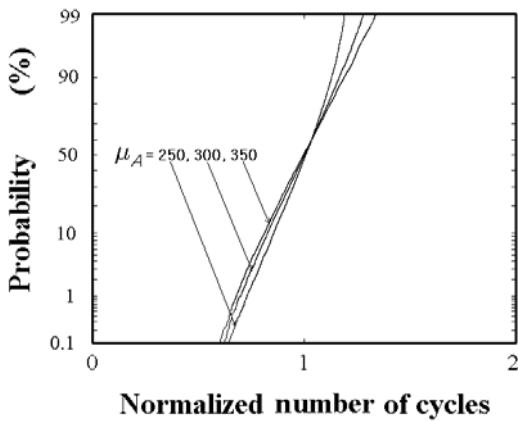


Fig. 7 Effect of the intercept A

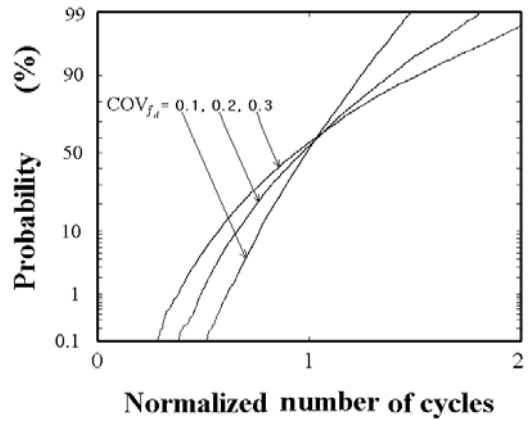


Fig. 9 Effect of damage ratio factor f_d ($\mu_{\Delta S} = 30$ MPa)

가 작을 경우 응력의 변동계수의 영향은 극히 미약하다.

Fig. 6에서 알 수 있는 것처럼 응력의 변동계수의 변화에 따라 곡선의 변화가 크다. 즉, ΔS 의 변동계수가 증가 될 때 낮은 확률 영역에서는 수명분포가 증가되고 반면에 높은 확률 영역에서는 수명분포가 감소하는 양상을 나타낸다. 본 그래프는 일종의 정규확률지에 해당하므로 선의 형태가 직선에 가까우면 정규분포를 따르는 것이 되며, Fig. 6처럼 확률이 높은 부분에서 분포의 폭이 좁아지면(선이 세워지면) 분포의 형태가 보다 대수정규의 분포에 가까워지는 것으로 생각할 수 있으므로 응력진폭의 평균치가 증가함에 따라 수명분포의 형태는 대수정규분포에 가까워지는 것으로 생각된다.

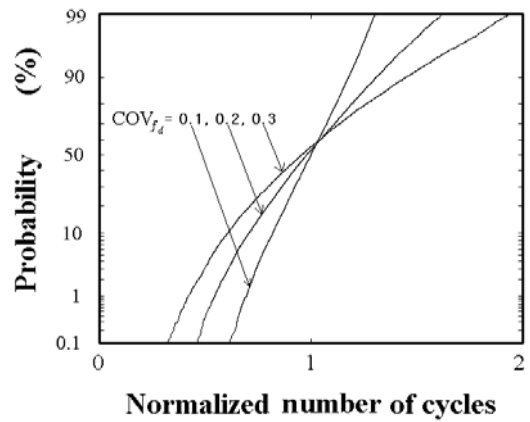


Fig. 10 Effect of damage ratio factor f_d ($\mu_{\Delta S} = 120$ MPa)

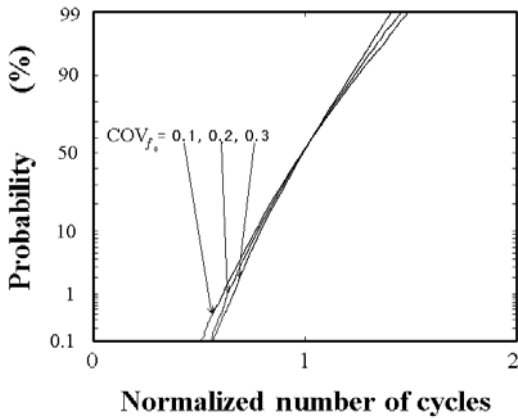


Fig. 11 Effect of stress uncertainty factor f^s ($\mu_{\Delta S} = 30\text{MPa}$)

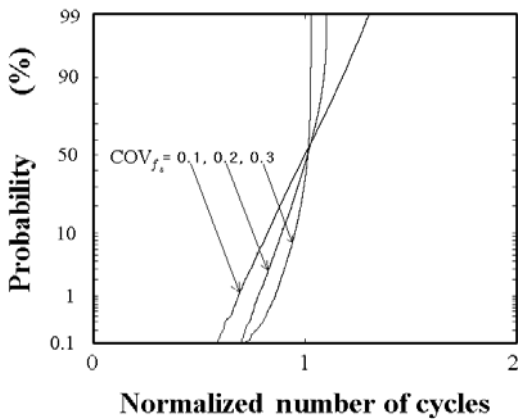


Fig. 12 Effect of stress uncertainty factor f^s ($\mu_{\Delta S} = 120\text{MPa}$)

(3) Fig. 7은 절편 A 의 평균치가 수명분포에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 여기서, 절편의 변동계수는 0.1로 고정하였다. 그림으로부터 알 수 있는 것처럼 절편의 평균치의 영향은 그리 크지 않은 것으로 나타났다.

Fig. 8은 절편의 변동계수가 수명분포에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 절편의 평균치는 316.12로 고정하였다. 그림으로부터 알 수 있는 것처럼 절편의 변동계수의 영향은 상당히 크게 나타났다.

(4) Fig. 9와 10은 손상비율인자 f^d 의 변동계수가 수명분포에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 여기서 손상비율인자의 평균치는 1로 고정하였다.

손상비율인자의 변동계수가 증가될 때 피로수

명분포도 증가됨을 알 수 있다. 손상비율인자의 변동계수가 피로수명의 분포에 미치는 영향은 응력진폭의 크기에 따라 달라질 수 있다. 후술하는 응력불확실성인자의 경우 그 차가 뚜렷하다. Fig. 9와 10은 각각 응력진폭의 평균값을 30MPa, 120MPa로 한 것이다. 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 수명분포 형태는 큰 차이가 없다. 따라서 응력진폭의 변화에 따른 손상비율인자의 변동의 영향은 극히 미미하다고 말할 수 있다.

(5) Fig. 11과 12는 응력불확실성인자 f^s 의 변동계수가 수명분포에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 여기서 응력불확실성인자의 평균값은 1로 고정하였다.

Fig. 11은 응력진폭의 평균값을 30MPa로 한 것으로 ΔS 가 작을 때 응력 불확실성인자의 변동계수의 수명분포에 미치는 영향은 대단히 작은 것으로 나타났다. 그러나 Fig. 12에 나타내는 것처럼 응력진폭이 120MPa로 충분히 클 때, f^s 의 변동계수의 영향이 커짐을 알 수가 있다. 또한, 응력진폭의 영향을 논한 Fig. 6과 같이 낮은 확률 영역에서는 f^s 의 변동계수의 증가에 따라 수명분포가 증가되나, 높은 확률 영역에서는 감소하는 현상을 보여준다.

5. 결 론

본 연구에서는 몬테카를로 시뮬레이션에 의한 선박용 프로펠러재의 피로수명 확률분포 평가 프로그램을 개발하였으며, 또한, 제반 파라미터가 피로수명의 분포에 미치는 영향을 논하였다. 본 연구로부터 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 선박용 프로펠러재료가 사용되는 HBsC1과 AIBC3 두 재료는 모두 젓치줄에 의한 피닝으로 피로수명이 증가됨을 알 수가 있다. 그러나 수명의 분포현상에는 큰 변화가 없었다.

(2) 응력진폭의 평균치의 증가함에 따라 수명분포는 증가한다. 응력진폭의 평균치가 작을 때 응력진폭의 변동계수의 영향은 작으나, 응력진폭의 평균치가 클 때 응력진폭의 변동계수의 수명분포에 미치는 영향은 커진다. 또한, 낮은 확률 영역에서는 응력진폭의 변동계수가 증가함에 따라 수명분포가 증가되나, 반면에 높은 확률 영역에

서는 분포가 감소한다. 정규확률지에서 선의 형태가 직선적이며 정규분포를 따르는 것이 되며, 확률이 높은 부분에서 분포의 폭이 좁아지면(선이 세워지면) 분포의 형태가 보다 대수정규의 분포에 가까워지는 것으로 생각할 수 있으므로 응력진폭의 평균치가 증가함에 따라 수명분포의 형태는 대수정규분포에 가까워지는 것으로 생각된다.

(3) 수명분포에 미치는 절편 A의 평균치의 영향은 작다. 그러나 변동계수의 영향은 크게 나타났다.

(4) 손상비율인자 f^d 의 변동계수가 증가될 때 피로수명분포가 증가된다. 그러나 이 조건에서 응력진폭의 값은 수명분포의 형태에 대해서 거의 영향을 미치지 못한다.

(5) 응력진폭이 작을 때 응력불확실성인자 f^s 의 변동계수의 수명분포에 미치는 영향은 작다. 그러나 응력진폭이 충분히 클 때 f^s 의 변동계수의 수명분포에 미치는 영향은 커진다. 또한, 낮은 확률 영역에서는 응력불확실성인자의 변동계수가 증가함에 따라 수명분포가 증가되나, 반면에 높은 확률 영역에서는 감소하는 양상을 나타낸다.

후 기

본 연구는 2004년도 동아교육신문사의 지원을 받아서 완성되었다.

참고문헌

(1) Myung-Hwan Lim, Han-Yong Yoon and Ui-Jung Jung, 2004, "A Study on the Fatigue Strength Evaluation and Improvement of Marine Propeller Materials," *KSME(A)(in Korean)*, Vol.29, No.3, pp.477~483.

(2) Chang-Sup Lee, Yong-Jik Kim, Gun-Do Kim and In-Sik Nho, 2002, "Analysis of the structural failure of marine propeller blades," *SOTECH*, Vol.6, No.3, pp.37-45.

(3) Besuner, P. M. and Tetelman, A. S., 1977, "Probabilistic Fracture Mechanics," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 43, pp. 99~107.

(4) Bloom, J. M., 1984, "Probabilistic Fracture Mechanics-A State of the Art Review," *Advances in Probabilistic Fracture Mechanics*, ASME PVP-Vol. 92, pp. 1~19.

(5) Haris, D. O., 1977, "A Means of Assessing the Effects of NDE on the Reliability of Cyclically Loaded Structures," *Materials Evaluation*, pp. 57~65. Publishers, pp. 1~45.

(6) Okamura, H. and Itadaki, H., 1983, *Statistical Treatment of Strength*, Baihukan (in Japanese), p. 105.

(7) Okamura, H., Watanabe, K. and Naito, Y., 1975, *Reliability Approach in Structural Engineering*, Maruzen, pp. 244~257.

(8) Yoon, H. and Okamura, H., 1989, "Probabilistic Prediction of the Fatigue Crack Propagation Life of a Semielliptical Surface Crack," *J. JSME (in Japanese)*, Ver. 55, No. 513, pp. 1095~1100.

(9) Han-Yong Yoon and Sang-Chan Lee, 2003, "Probabilistic Distribution of Fatigue Crack Growth Life Considering Effect of Crack Coalescence," *JSME International Journal*, Series A, Vol. 46, No. 4.

(10) Provan, J. W., 1987, "Probability Approaches to the Material-Related Reliability of Fracture-Sensitive Structures," *Probabilistic Fracture Mechanics and Reliability*, Martinus Nijhoff

(11) Kitagawa, H., Kwon, J., Nakasone, Y. and Shimazaki, T., 1986, "Fatigue Crack Growth Properties in a Long-Service-Degraded Material," *J. JSME (in Japanese)*, Ver. 52, No. 480, pp. 1749~1756.

(12) Virkler, D. A., Hillbery, B. M. and Goel, P. K., 1979, "The Statistical Nature of Fatigue Crack Propagation," *Trans. ASME*, Vol. 101, pp. 148~152.

(13) Yoon, H., 1990, "A Study on the Probabilistic Nature of Fatigue Crack Propagation Life (2) - The Distribution of Crack Propagation Rate-," *J. KSME (in Korean)*, Ver. 14, No. 6, pp. 1561~1567.

(14) Assakkaf, I. A., ASCE, G. and Ayyub, B. M., ASCE, F., 2000, "Load and Resistance Factor

Design Approach for Fatigue of Marine Structures," *8th ASCE Speciality Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability*, PMC2000-169, pp. 1~6.

(15) Korea Ship's Classification., 2002, *Ship's classification and Steel vessel rules(in Korean)*, the second edition, chapter 1, section 7, materials and weld.