

## 船舶用 프로펠러의 強度 特性에 關한 研究

임 명 환\* · 윤 한 용\*\*

### A Study on Strength Characteristic for Marine Propeller

M. H. Im\* · H. Y. Yoon\*\*

**Key words** : AIBC3(알루미늄 청동주물#3종), HBsC1(고강도황동 주물#1종), Fatigue strength (피로강도), distribution characteristics (분포특성),  $S_A/\sigma_B$ (비강도)

#### Abstract

The strength data on AIBC3 and HBsC1 which are used for materials of marine propeller blade are insufficient as used of material limited, and even rules of KR(Korean Register of Shipping) describe only a point of view that the chemical composition and mean values of mechanical properties have to be certain level.

In this study, distribution characteristics as well as mean values of mechanical properties are investigated through the tensile test, and the characteristics of fatigue strength are investigated through the fatigue test.

#### 1. 서 론

선박용 프로펠러(propeller)는 제작 방법이 여러 가지 있으나 그 중에서도 주물형 프로펠러의 재질로써는 한국선급 (Korean Register of Shipping) 및 각국의 선급에서 규정하고 있는 고강도 황동주물 1종, 2종(HBsC1, HBsC2)과 알루미늄 청동주물 3종, 4종(AIBC3, AIBC4)이 있고, "이들 재료는 선급 및 강선(鋼船) 규격에서 정하는 기준에 합격하여야만 사용할 수가 있다. 선급에서 정하는 검사항목으로는 화학성분 검사, 기계적 성질로는 항복

강도, 인장강도, 연신을 등을 검사한다.

그동안 재료의 강도특성에 대해서는 수많은 연구가 행하여져 왔으며, 정적강도(기계적 성질, 파괴 인성치)뿐만 아니라, 동적강도(충격, 피로, 피로 균열진전) 등에 대한 각종 재료의 실험 데이터가 다량 데이터베이스(data base)화 되어 있는게 현실이다. 그러나, 이들 데이터는 평균치적인 성격의 것이 대부분이고 통계적인 성격의 데이터는 아직도 대단히 미흡하다. 또한, 선박용 프로펠러의 블레이드 재료들은 그 사용 범위가 국한되어 있어서 이들의 기초 데이터 자체가 눈에 띄지 않고, 한국

\* 목포대학교 기계공학과 대학원(석사)(원고접수일 : 98년 10월)

\*\* 목포대학교 기계공학과 부교수

Table 1. Chemical compositions of marine propeller materials<sup>3)</sup>

Material	Composition (%)								
	Cu	Al	Fe	Ni	Mn	Zn	Sn	Impurities	
								Pb	Si
HBsC1	55.0~60.0	0.5~1.5	0.5~1.5	1.0 Below	1.5 Below	Remnant	1.0 Below	0.4 Below	0.1 Below
AlBC3	78.0 Above	8.5~10.5	3.0~6.0	3.0~6.0		-	-	0.5 Below	

Table 2. Mechanical properties of marine propeller materials<sup>3)</sup>

Material	Yield strength (Mpa)	Tensile strength (Mpa)	Elongation(%)
HBsC1	175 above	460 above	20 above
AlBC3	245 above	590 above	16 above

선급(KR)에는 Table 1, 2와 같이 재료의 화학적 성분과 기계적 성질의 평균치가 어느 정도 이상이어야 한다는 점만 명시되어 있는 실정이다.

현재, 선박용 주물형 프로펠러 재료로써 가장 많이 이용되고 있는 것은 고강도 황동주물 1종(HBsC1)과 알루미늄 청동주물 3종(AlBC3)이고 국내에서는 이들의 조성을 맞추기가 어렵기 때문에 대형 업체에서도 대부분을 잉곳(Ingot)형태로 수입해서 만들고 있고, 중소업체(인근 업체는 전부 여기에 해당됨)는古블레이드를 사들여 다시 주조하거나 수입된 잉곳(Ingot)를 이용하고 있다. 그렇기 때문에 이들 재료의 강도특성을 평가하는 것은 선박의 안전성을 확보하는 점 외에 경제적인 면에서도 대단히 중요하다.

현재, 선박용 프로펠러에 관한 연구동향을 살펴보면, "프로펠러에 사용되는 stainless강의 미세구조 및 기계적 성질에 관한 연구"<sup>2)</sup>, "FEM을 이용해서 프로펠러의 강도를 역학적 관점에서 해석한 논문"<sup>3)</sup>, "스큐각변화에 따른 피로강도를 해석한 논문"<sup>4)</sup>, "자동차 운반 전용선의 강도 데이터를 해석한 논문"<sup>5)</sup>, "프로펠러의 피로강도에 대한 허용결함의 크기에 관한 연구"<sup>6)</sup>, "미쓰비시 내식강의 기초특성에 관한 연구"<sup>7)</sup> 등을 볼 수가 있는데 본 연구에서 목표로 하고 있는 프로펠러 재료강도의 통계적성질 등을 체계적으로 연구한 논문은 눈에 띄지 않는다.

따라서, 본 연구에서는 재료강도 특히, 피로강도

와 기계적성질의 제특성(인장강도, 항복강도, 영률)의 분포에 대한 상관성 및 재료에 따른 차이를 파악하기 위해 선박용 주물형 프로펠러의 재료로 가장 많이 사용되고 있는 두 종류의 재료를 사용하여 인장시험편과 피로시험편을 제작하여 실험을 실시하였다.

## 2. 실험 방법

### 2-1. 시험편 및 재료

#### (1) 인장 시험편

본 시험편은 프로펠러를 직접 제작하는 과정 중 일부 시험편 제작을 위한 주형(鑄型)을 제작하여 (500×250×70) 고강도 황동주물 1종(HBsC1)과 알루미늄 청동주물 3종(AlBC3)을 각기 2조씩 제작하여 주물형 프로펠러 제작시와 동일하게 하여 용해온도를 고강도 황동주물 1종은 980℃, 알루미늄 청동주물 3종은 1180℃ 일때 주형틀에 주입하여 약 72시간 자연냉각을 하였고 재료의 화학적 성분은 Table 3에 나타나 있다.

알루미늄 청동주물은 용해주조시 Al의 산화로 유동성이 나빠져 들기부나 모서리 부분에 정확히 주입되기가 어려운 상황이어서 실제로 선박용 프로펠러의 제작에 있어서 어려움이 많은 실정이다. 위의 재료를 밀링 머머신으로 Fig.1과 같이 5호 시험편인 비철금속재 시험용으로 가공을 하고 마지

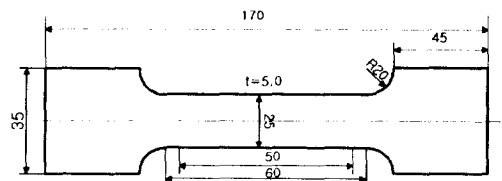


Fig. 1 Specimen of tensile test

막면 가공은 샌드 페이퍼(sand paper) #600과 #1,000으로 가공하였다.

(2) 피로 시험편

주물의 제작은 인장시험편과 동일하게 고강도 황동주물과 알루미늄 청동주물 2종류로 하고 CNC machining center에서 프로그램을 작성하여 Fig. 2와 같이 8개의 볼트 구멍과 R40의 노치 형상으로 제작하였다. 시험편에 큰 반경의 노치를 준 것은 가능한한 피로파괴가 시험편 중앙에서 일어나게 하여 그립부나 기타 부분에서의 파괴를 피하게 하여 데이터의 오차를 줄이기 위함이다. 또한, 본 시험편의 화학성분은 Table 3과 같이 한국 선급에서 규정하고 있는 화학적성분에 합격한 재질이다. 또한, 가공한 시험편의 형상은 Fig. 2와 같다.

2-2. 인장시험

인장 시험에 사용한 시험기는 30Ton 용량의 SHIMADZU-UH 30A(동적 만능 시험기)로서 computer system에 의하여 소정의 데이터를 입력하면 필요한 기계적 성질값이 자동 축적되어 그래픽과 함께 출력된다 X-speed는 5mm/min으로 고강도 황동주물과 알루미늄 청동주물을 각각 10개씩 동일조건에서 실험하여 탄성률(Young's Modulus), 항복강도(Yield Strength) 및 인장응력(Tensile Stress)의 통계 데이터를 획득하였다.

Table 3. Report of Material test(Chemical Composition)

Material	Chemical Composition(%)					
	Cu	Al	Fe	Ni	Mn	Zn
HBsC1	57.95	1.25	0.75	-	1.18	REM.
ALBC3	83.5	8.75	4.25	3.23	0.98	-

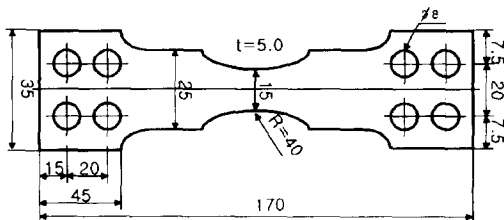


Fig. 2 Specimen of fatigue test

2-3. 피로시험

피로시험은 실온에서 실시하였고 실험에 사용한 시험기는 SIMADZU CO., Electro Hydraulic Fatigue Machine EHF-ED-40L이며, 본 실험에서 지그(Jig)의 형상이 피로시험편과 연결할 때 본래의 지그로는 체결에 어려움이 있어 본래의 지그 위에 SM20C로 특수 제작한 지그로 연결하였고 시험편을 고정하는 것도 SM45C로 제작한 볼트 M10으로 상, 하 4개씩 체결하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 인장시험

통계적 특성을 파악하기 위해 각 10개씩의 실험에서 얻어진 결과를 영율(Young's modulus), 인장강도(tensile strength) 그리고 항복강도(yield strength : 0.2% 내력)로 구분하여 Table 4과 Table 5에 일괄적으로 정리하여 나타내었다.

일반적으로, 인장강도가 높은 재료는 항복강도도 높아 이들 사이에 선형적인 관계가 있다. Table 6은 여러재료의 데이터<sup>6)</sup>로부터 구한 항복강도/인장강도의 값과 본 재료의 항복강도/인장강도의 값을 나타 낸 것으로 강재의 경우 0.6~0.7 정도이고, 알루미늄재의 경우는 0.7~0.8 정도인데 비해 HBsC1은 0.57이고 AIBC3는 0.47로 상당히 낮은 양상을 나타냈다. Table 7은 항복강도와 인장강도의 변동계수(표준편차/평균치 : coefficient of vari-

Table 4. Tensile test results(AIBC3)

Number	Elastic Modulus (Gpa)	Yield Strength (Mpa)	Tensile Strength (Mpa)
NO. 1	7.385	268.107	593.585
NO. 2	7.457	270.908	592.656
NO. 3	7.260	272.624	589.255
NO. 4	7.842	266.495	594.990
NO. 5	5.816	308.909	594.113
NO. 6	5.940	299.102	605.985
NO. 7	5.957	284.147	591.900
NO. 8	6.937	289.051	606.928
NO. 9	6.194	271.644	593.920
NO.10	7.943	264.289	598.005
MEAN	6.273	279.528	596.134

**Table 5 Tensile test results (HBsC1)**

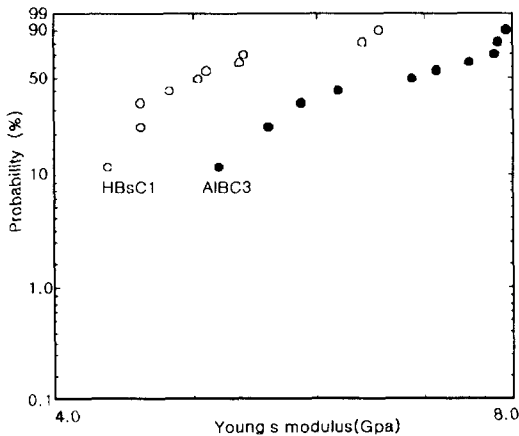
Number	Elastic Modulus (Gpa)	Yield Strength (Mpa)	Tensile Strength (Mpa)
NO. 1	5.095	282.431	489.106
NO. 2	4.449	294.689	483.222
NO. 3	5.062	290.031	474.887
NO. 4	6.565	268.211	485.429
NO. 5	4.647	293.954	525.391
NO. 6	6.373	267.966	529.804
NO. 7	5.497	284.392	476.358
NO. 8	4.859	287.825	527.597
NO. 9	4.651	289.541	518.281
NO.10	5.439	276.792	488.126
MEAN	5.264	283.768	499.821

**Table 6. Yield Strength Vs Tensile Strength<sup>\*)</sup>**

Material	S10C	S45C	SS41	SM50	Al2024	Ac8	HBsC1	AIBC3
$\sigma_y/\sigma_B$	0.67	0.60	0.608	0.60	0.72	0.76	0.57	0.47

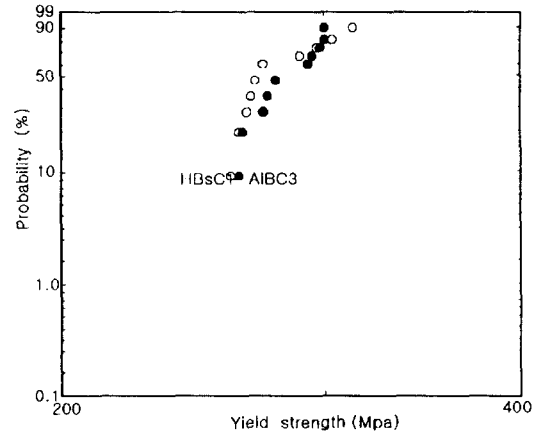
**Table 7. C.O.V. of materials obtained from tensile test (%)**

	AIBC3	HBsC1	SM45C	S10C	Al
Young's Modulus	15.93	13.67	8.54	6.27	4.89
Yield Strength	5.45	3.45	3.66	1.46	3.08
Tensile Strength	7.07	4.53	3.78	5.57	3.35

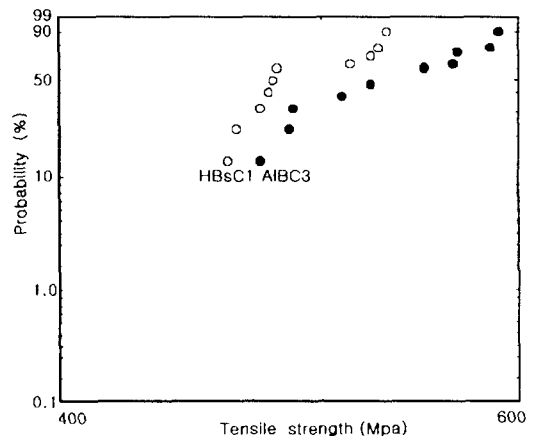


**Fig. 3 Weibull probability plot of young's modulus of AIBC3 and HBsC1 specimens**

ance)<sup>10)</sup>를 나타낸 것이다. 여기서, SM45C, S10C, Al은 다른 연구자의 데이터<sup>9)</sup>로 시험편의 규격 및 치수는 본 연구의 데이터와 동일하다. 표 7로부터 알 수 있는 바와 같이, AIBC3, HBsC1 모두 다른 재료보다 변동계수가 높아 통계적 성질에 있어서 분포가 큼을 알 수가 있다. 또한, 두 재료중 AIBC3가 보다 더 분포가 커 강도는 비교적 높으나 제작 과정 중의 어려움을 포함하여 신뢰성이 떨어짐을 알 수가 있다. Figs. 3~5는 이들 데이터를 Weibull 확률지에 나타낸 것으로 데이터수가 적은 것으로 인해 확률이 낮은 부분의 형태가 명확하지 않은 단점이 있으나 비교적 잘 따르는 것으로 사료된다.



**Fig. 4 Weibull probability plot of yield strength of AIBC3 and HBsC1 specimens**



**Fig. 5 Weibull probability plot of tensile strength of AIBC3 and HBsC1 specimens**

3-2. 피로시험

피로시험은 인장시험과 마찬가지로 동일한 조건으로 시험편을 준비하여 실험을 하였다. 이들 결과를 Table 8과 Figs. 6~7에 나타낸다. 전반적으로 AlBC3, HBsC1 모두 피로한도까지의 응력레벨의 폭이 대단히 넓은 특성을 나타내었다. 한편, 본 실험에서 제작한 시험편은 중앙부의 R40의 대반경의 노치를 부여 한 것으로 노치의 형상 및 크기에 따라서는 피로강도에 많은 영향을 미친다.

본 시험편의 경우 반경이 크기 때문에 그다지 영향을 미치지 않을 것으로 사료되나 정확성을 기하기 위하여 피로노치계수  $K_f^{(10)}$  를 구해 보았으나 두 재질 동시 1.0에 가까운 약 1.043을 나타내었다. 재료의 피로강도는 그 재질에 따라 다양한 값을 나타내고 있어서 하나의 그래프상에 함께 표기하여 비교 평가하기가 쉽지 않다. 재료의 피로강도가 일

반적으로 인장강도등 기계적 성질에 비례하는 특성이 있으며, 비강도(relative stress :  $S_A/\sigma_B$ )<sup>(1)</sup>를 이용하면 재료에 따른 피로강도의 비교평가가 쉬워진다.

Figs. 6~7에서는 AlBC3, HBsC1의 비강도를 나타냈고, Fig. 8은 다른 데이터에서 인용한 3개의 자료<sup>(2)</sup>와 AlBC3, HBsC1을 함께 표시한 것이다. Fig. 8에서, 알 수 있는 바와 같이 다른 재료에 비해 AlBC3, HBsC1 모두 비강도가 대단히 낮다. 이는 인장강도는 높더라도 피로강도가 상당히 낮은 점을 의미하는 것으로 프로펠러 재료에서 무엇보다

Table 8. Fatigue test results (AlBC3 and HBsC1)

NO	Alternating stress(Mpa)	Fractured cycles, N		$S_A/\sigma_B$	
		AlBC3	HBsC1	AlBC3	HBsC1
1	176.4	14832	1461	0.33	0.35
2	163.4	35583	12534	0.30	0.33
3	130.7	96609	26388	0.24	0.26
4	104.6	97139	92142	0.20	0.21
5	85.0	545213	171153	0.16	0.17
6	65.4	1311585	480136	0.12	0.13
7	45.8	10 <sup>7</sup>	4999041	0.09	0.09
8	19.6	10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup>	0.04	0.04

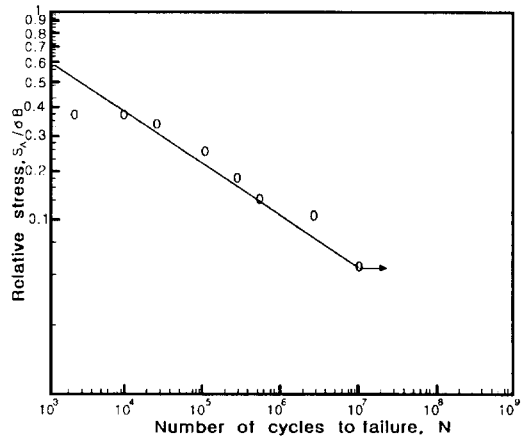


Fig. 7 Relationship between relative stress and number of cycles(HBsC1)

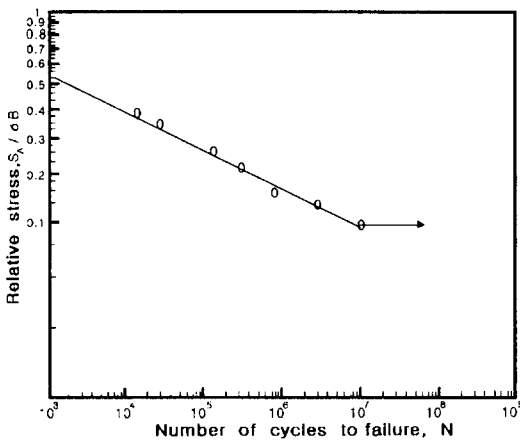


Fig. 6 Relationship between relative stress and number of cycles(AlBC3)

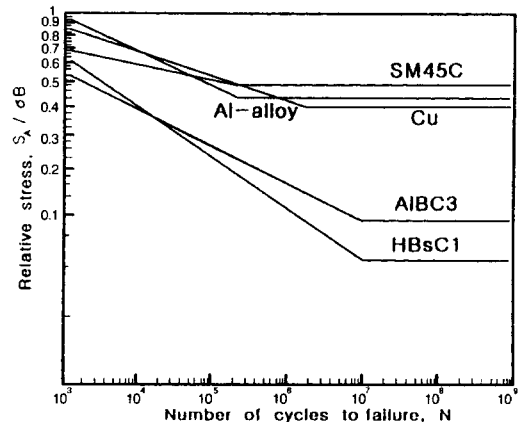


Fig. 8 Relationship between relative stress and number of cycles on 5 classifications of material

다 중요한 피로강도를 향상시킬 수 있는 방법을 강구해야 할 필요성이 대단히 높다.

강(鋼)의 경우 피로강도를 향상시키는 방법에 여러가지(표면경화, Shot peening등)<sup>3)</sup>가 있으나, 동합금의 경우 재질의 특성상 이들 방법의 적용이 수월하지가 않다. 동합금의 피로강도를 향상시키기 위하여 많은 연구가 필요하고, 현재 이에 대한 연구가 진행중이다.

#### 4. 결 론

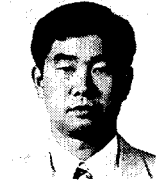
선박용 프로펠러의 블레이드 재료로 이용되고 있는 AIBC3와 HBsC1은 재료의 사용범위가 국한되어 있어서인지 강도특성에 관한 데이터가 불충분하고 선급의 규정에서조차도 재료의 화학적 성분과 기계적 성질의 평균치가 어느 정도 이상이어야 한다는 점만 명시되고 있는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 인장시험을 통하여 기계적 성질의 평균치뿐만 아니라, 분포특성을 알아 보았다. 또한, 피로시험을 통하여 피로특성을 파악하였다. 본 실험으로부터 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 일반적으로 강재의 경우 항복강도/인장강도의 값은 0.6~0.7 정도이고 알루미늄재의 경우는 0.7~0.8 정도인 반면 HBsC1은 0.57이고 AIBC3는 0.47로 상당히 낮은 양상을 나타냈다.
- 2) AIBC3, HBsC1 모두 다른 재료보다 변동계수가 높아 통계적 성질에 있어서 분포가 큼이 나타났다. 또한, 두 재료중 AIBC3가 분포가 큼을 알 수 있었고, 두 재질 모두 영률의 분포가 항복점, 인장강도의 분포보다 크고, 재료간 편차도 상당히 상승함을 알 수 있었다.
- 3) AIBC3, HBsC1 모두 다른 재료에 비해 피로강도에 있어서 피로한도까지 응력레벨의 폭이 비교적 넓은 특성이 있었고, 비강도(피로강도/인장강도)에서도 다른 재료에 비해 상당히 낮아 피로강도를 향상시킬 수 있는 방법을 강구해야 할 필요성을 제기하고자 한다.

#### 참고문헌

1. 한국 선급(Korean Register of Shipping), "선급및 강선규칙, 제2편, 재료 및 용접, 2편, pp.53, 1996.
2. Shuji Ono, Masahiro Saito "Microstructure and mechanical Properties of 18 mass% Cr Cast Stainless Steel for Marine Propeller", J.Japan Inst.Metals,Vol.57,No.7,pp.761 - 766, 1993.
3. 김주태, "유한요소법을 이용한 박용프로펠러 날개 강도해석 연구", 기술현대10, pp. 8 - 15, 1990.
4. 김발영,이주성, "박용프로펠러의 스쿠각 변화에 따른 피로강도 해석", 대한조선학회 논문집 35.1, pp.80 - 87, 1998.
5. Sasaki,Yasuo, "Collective Measurements in Pure Car Carriers at sea: Analyses of measurement results and strength of the propeller blade", Technical Bulletin of Nippon Kaiji Kyokai v2, pp.33 - 47, 1984.
6. Oku,Masamitsu Gotoh,Norihiko Moriya, "Fatigue strength in marine propeller blades : allowable flow size in propeller blades", The Marine Engineering Society in Japan, v.9 - n2, pp.114 - 121, 1981.
7. Saito,Masahiro, "Fundmental characteristics of MCRS(Mitsubishi Corrosion Resistance Steel) for marine propeller", Mitsubishi Juko Giho Tokoy, Mitsubishi Heavy Industries,Ltd., pp.246 - 251, 1991.
8. 田中七道, "金属材料疲勞强度數值 データベースの解析と 耐疲勞信頼性設計資料集", pp.34 - 35, 1986.
9. 김중영, "材料的 靜的强度 分布의 相關性에 關한 研究", pp.29 - 31, 1998.
10. H. Neuber, "Theory of Notch Stresss", J.W. Edwards, Publisher, Incorporated, Ann Arbor Mich., 1946.
11. R.E. Peterson, "Stress - Concentration Design Factors", John Wiley & Sons, Inc., New York, 1974.
12. W.Weibull, J.Appl. Mech., Vol. 18, no.3, pp.293 - 297, 1951 : W.Weibull, "Fatigue testing and the Analysis of Results," New York, 1961.
13. 姜樂遠 外 7人, "金属材料", 螢雪 出版社, P.146~148, 1990.

## 저 자 소 개



### 임명환 (林明煥)

1961년 9월생. 1982년 목포해양전문대학 기관과 졸업. 1991년 전북산업대학원 기계공학과 졸업. 1998년 목포대학교 기계공학과 대학원 (석사), 1988년~현재 목포해양대학교 실습선 (새유달) 기관장. 당학회회원



### 윤한웅 (尹漢鏞)

1955년 2월생. 1981년 단국대학교 기계공학과 졸업. 1985년 일본동경대학교 기계공학과 대학원 (석사). 1988년 동대학원 졸업 (박사). 1989년~현재 목포대학교 기계공학과 교수. 당학회회원.