

# 선박용 프로펠러의 강도에 대한 부식Pit 보수수법의 영향

임명환\*, 윤한용#, 김태식\*\*, 정의정\*\*\*

## The Effect of Corrosion Pit Repairing Method on the Strength of Marine Propeller

Myeong Hwan Im\*, Han Yong Yoon#, Tae Sik Kim\*\* and Ui Chung Chung\*\*\*

### ABSTRACT

It is inevitable that corrosion pits have occurred on the marine propeller. If corrosion pits have occurred on the blades, they have been repaired by simple welding methods. It must be that the strength is degraded in this process. In this paper, we analyzed and compared the strength of AIBC3 and HBsC1 used for marine propeller after repairing the artificial pit by several different methods.

**Key Words** : AIBC3(알루미늄 청동주물 제3종), HBsC1(고력황동주물 제1종), Register of shipping(선급), Marine propeller (선박용 프로펠러), Cavitation(캐비테이션)

### 1. 서론

우리나라는 최근 조선공업의 발달에 힘입어 많은 우수한 선박을 건조하고 있는 실정임에도 불구하고 선박 수리분야에서는 점점 임금이 저렴한 개발도상국가로 넘어가고 있는 현실이다. 이는 선박을 건조 후에 서비스 분야의 문제점으로 대두될 수 있는 소지를 갖고 있다. 특히, 프로펠러의 보수에 있어서는 그 심각성이 날로 더해가고 있는 실정이다. 많은 조선소 및 수리업체에서는 선급 규정(rules for classification)<sup>1</sup>에서 정한 절차에 의해

수리를 하는 것이 매우 어려우므로 통상적으로 행하여 온 방법으로 수리를 하고 있는 실정이다.

프로펠러의 손상은 주로 변형과 절손 사고들이며 이들 사고의 대부분은 프로펠러가 이물질에 의한 피팅현상, 재질불량, 날개두께의 불량, 캐비테이션에 의한 침식(cavitation erosion)<sup>2</sup>, 산화 및 선체와 프로펠러 사이의 전위차에 의한 부식현상 등으로 나타낼 수 있다. 한편 최근의 대형 선박들은 HSP(highly skewed propeller)<sup>3</sup>를 많이 채택하고 있다. 이는 프로펠러가 수중에서 회전하면서 발생하는 주위의 압력변동을 일으키게 될 때 생기는

접수 2003년 7월 12일  
\* 목포해양대학교 실습선  
# 교신저자, 목포대학교 기계해양시스템공학부  
Email hyoon@mokpo.ac.kr Tel. (061) 450-2412  
\*\* 동아인재대학 기계공학과  
\*\*\* 목포대학교 대학원

날개 표면력<sup>4</sup>이라고 불리는 선미진동을 일으키는 원인을 해소하고자 HSP를 채택하고 있다.

또한, 운항중인 선박에서 프로펠러의 교체작업에는 많은 시간과 경비 등 큰 어려움이 뒤따르므로, 프로펠러의 결함의 경우, 대부분의 작업현장에서는 간단하게 할 수 있는 용접 방법과 블레이드의 끝단의 사고는 그라인딩(grinding) 처리로 마무리하여 사용하고 있는 실정이다. 이는 프로펠러의 효율 및 연료소비율을 악화시키는 결과를 초래하며 선미부(poop)의 이상 진동을 일으키는 원인이 되기도 한다. 이들 보수 방법은 대부분 용접에 의해 행하고 있으므로 용접부에는 기포, 슬래그 혼입, 언더컷, 피트, 고온균열 등 여러 형태의 결함이 존재하기 쉽다.<sup>5~7</sup> 용접부의 균열은 제2차 세계대전동안 유럽에서 건조된 선박의 1/3가량이 정박 중에 항구에 접안(接岸)되어 있는 상태에서 선체에 균열이 생겨 파손되었던 경험도 있었고,<sup>8</sup> 이외에 철도, 교량, 항공기, 각종 공장설비 등 시설물의 급작스런 파괴 경험들이 보고되었다.<sup>9~11</sup> 이들 파괴의 대부분은 접합부에서 발생하였고 특히 용접부의 균열에 의한 원인이 주도적으로 밝혀졌다.

한편, 선박용 프로펠러의 수리에 있어서 대부분의 선박수리 보수업체에서는 예전부터 시행해온 경험적인 간단한 방법에 의해 프로펠러를 보수하고 있으며, 미국용접협회(American Welding Society)<sup>12</sup>에서 제시한 용접코드에서조차도 동합금, 특히, 2종류의 재질(AIBC3와 HBsC1)의 용접법에 대해 명확히 제시하지 못하고 있다. IM 등<sup>13</sup>은 선박용 프로펠러의 인장강도 및 피로강도를 실험하여 비강도(피로강도/인장강도)가 다른 강재에 비해 상당히 낮아 피로강도를 향상시키는 방안을 강구하여야 함을 제시한 바 있으나, 프로펠러의 부식피트의 보수방법에 따른 강도의 변화에 대한 연구는 국내외적으로 눈에 띄지 않는다.

따라서, 본 연구에서는 선박에 주로 많이 사용되고 있는 2종류의 프로펠러 주물(AIBC3와 HBsC1)을 이용하여 인공 부식피트를 부여하고, 현장에서 시행하고 있는 동일한 방법에 의해 부식피트를 보수한 다음 제반 강도 실험을 수행하여 선박용 프로펠러 재료의 강도에 미치는 이들 보수수법의 영향을 파악하고자 하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 재료는, 선박용 프로펠러로 주로 사용되고 있는 2종류의 재질로서 AIBC3(알루미늄청동주물 제3종), HBsC1(고강도 황동주물 제1종)이다. 이들의 화학성분 및 인장시험에 의하여 얻어진 기계적 성질을 각각 Table 1, 2에 정리하였다.

Table 1 Chemical composition of specimens

Kind	Composition (wt.%)							
	Cu	Al	Fe	Ni	Mn	Zn	Sn	Pb
HBsC1	57.95	1.25	0.75	-	1.18	Rem	-	-
AIBC3	81.66	9.15	3.80	4.13	0.99	0.12	0.09	0.03

Table 2 Mechanical properties of specimens

Kind	Tensile test		
	Yield strength(MPa) (0.2% proof stress)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)(L=5d)
HBsC1	261.7	524.6	27.6
AIBC3	285.1	732.0	22.8

이들 재료의 시험편을 제작하기에 앞서 염색침투 탐상시험(Dye Penetration Test)을 Fig. 1과 같이 실시하여 기준에 합당한 재료를 선별하여 가공을 하였다. Fig. 1에서 보는바와 같이 시험편의 재료는 주조 시에 용탕 과정에서 탈산을 철저히 제거하여야 유해한 물질의 생성이 적게 일어나고, 동과 동합금의 용접성에 있어서 중요한 요인으로 작용한다는 보고가 있다.<sup>14</sup> 프로펠러주물의 작업과정에서는 탈산을 위하여 질소가스를 이용하여 탈산과 불순물을 용탕 표면으로 부유하게 만들어 불순물을 제거함과 동시에 양호한 주물을 얻을 수가 있다. 시험편은 Fig. 1의 시험이 완료된 것을 특수 엔드밀을 이용하여 Fig. 2와 같이 임의의 부식피트(pit) 모양으로 가공을 하였다. 이어서 이들 부식피트를 현장에서 일반적으로 많이 시행하고 있는 3종류의 형태로 보수하여 표면을 밀링으로 가공을 하였다.

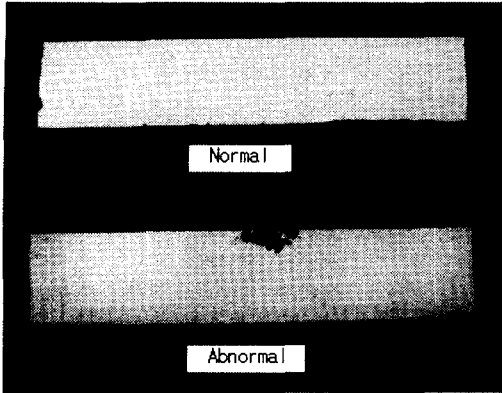


Fig. 1 Dye penetration test of material of specimens

부식피트의 보수방법으로는, 첫번째, 일반적으로 중, 소형 수리업체에서 많이 채택하고 있는 방법인 산소용접을 실시하였다. 용접봉은 원래의 재질과 동일한 것으로 하였고, 두 번째 방법으로는 반

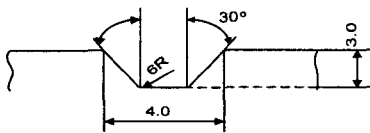


Fig. 2 Size and dimensions of flaw on specimens (mm)

자동 알곤가스 아크용접(GMAW)을 실시하였다. 용접봉으로는 프로펠러 용접수리에 많이 쓰이고 있는 것으로 AWS-A5.7/ERCuAl-A2(wire diameter 1.14mm, volts 26, amps 200, 100% argon: 50-65cfh)를 이용하여 tilt gun 35°방법으로 용접을 실시하였다. 캐비테이션(cavitation)현상이 장시간 발생하면 블레이드 표면에 부식피트가 발생하게 되며 이는 날개 끝 부분에서 주로 발생하는 프로펠러 날개 끝 캐비테이션(cavitation)<sup>15</sup>의 원인이 되기도 한다. 이때 날개의 면을 매끄럽게 하게 하기 위하여 조선 현장에서는 세라믹으로 부식피트를 보수하기도 한다.<sup>16</sup>

세 번째의 방법으로는 이의 영향을 파악하기 위하여 세라믹(BELZONA 1111 super metal)을 이

용하여 부식피트를 보수 처리하였다.

이들 재료를 이용하여 인장시험편과 피로시험편을 가공하였다. 형상과 크기는 Fig. 3 과 Fig. 4 에 나타낸다.

## 2.2 실험방법

### 2.2.1 경도시험

경도시험은 Matsuzawa사의 자동미소 비커스 경도시험기(digital micro hardness tester)를 이용하여 측정하였다. 비커스 경도시험의 압입자국은 크기가 1mm이하(보통, 50~500 $\mu$ m)이므로 시험편

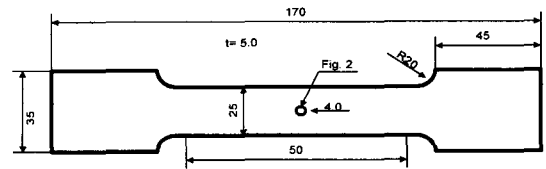


Fig. 3 Size and dimension of tensile test specimen (mm)

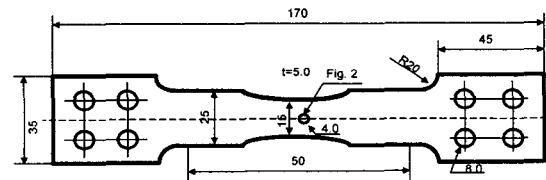


Fig. 4 Size and dimension of fatigue test specimen (mm)

의 압입자국을 정확히 측정하기 위하여 에머리 페이퍼(emery paper) 240번에서 600번용까지 단계적으로 연마한 후 0.5 $\mu$  알루미나 분말을 이용하여 경면처리 후 용선(Fusion line)을 따라서 두께방향 및 길이 방향으로 측정하였다. 비커스 경도시험은 압입자국 주변이 넓은 범위에 걸쳐 소성변형이 발생함에 따라 경도 값의 오차를 줄이기 위하여 이미 만들어진 압입자국의 중심간 길이가 자국의 대각선 길이의 4배 이상 간격을 유지하였으며 압입 하중은 1kgf로 실시하였다.

### 2.2.2 인장시험

인장시험은 AIBC3 및 HBsC1 모두 산소용접을

실시한 것, 알곤용접을 실시 한 것, 임의의 부식피트 면에 세라믹 처리를 한 것과 부식피트만 존재하는 것 모두 4종류의 것을 만능 인장시험기(용량:±15.0ton) Shimadzu사의 model UH-30A로 변위 제어 방식을 이용하여 실시하였고, X축의 속도는 5mm/min으로 AIBC3 및 HBsC1을 각각 10개씩 동일 조건에서 실험하여 영률(young's modulus), 항복강도(yield strength /0.2 proof stress) 및 인장강도(tensile strength)의 통계 데이터를 획득하였다. 이는, 주물데이터의 산포의 큰 점을 고려하여 보다 신뢰성을 높이기 위한 것이다.

### 2.2.3 피로시험

피로시험은 실온에서 실시하였고 본 실험에 사용한 시험기는 Shimadzu 사의 전동유압 피로시험기(electro hydraulic fatigue machine:±10ton) EHF-ED-40L이며, 동합금재질의 특수성에 의한 시험편 체결의 어려움을 고려하여 한쪽에 4개씩의 체결볼트를 사용하는 지그(jig)를 SM20C로 특수 제작을 하여 사용하였다. 응력비는 10%로 하였고, 응력진폭의 주파수는 15Hz로 실시하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 경도시험결과

경도시험의 결과를 Fig. 5에 나타낸다. 데이터는 모두 0.25mm 간격으로 30회 이상 측정하여 평균값을 구한 것이다. 그림에서 A-specimen은 AIBC3재의 산소용접, B-specimen은 AIBC3재의 알곤용접, C-specimen은 HBsC1재의 산소용접, D-specimen은 HBsC1재의 알곤용접 보수재를 나타낸다. 강재의 경우, 일반적으로 모재부보다 HAZ(열영향부), 용착부가 경도가 높아지나, 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이, 2재질 모두 HAZ의 영역에서 경도의 감소가 심하게 나타나는 현상을 볼 수 있으며, HBsC1에서의 감소가 더욱 심한 것을 알 수 있다. 용착부에서는 HAZ보다 경도의 감소가 더 심하나, HBsC1의 알곤가스 용접의 용착부에서는 경도가 다시 증가하여 모재와 비슷해지는 복잡한 양상을 나타냈다. 일반적으로 동합금의 경우 열영향부나 용착부의 경도가 감소하는 경향으로 알려지고 있으나, 본 실험 결과와 같이 복잡한 양상을 보이고 있어, 용접방법, 용접봉의 선

정 등 동합금의 용접에 대한 연구가 더욱 진행되어야 할 것으로 생각된다.

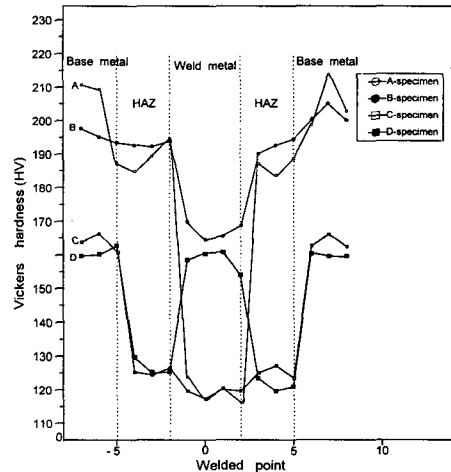


Fig. 5 Diagram of vickers hardness value by welded position

### 3.2 인장시험결과

인장시험의 결과, 파단된 인장시험편의 형상을 Fig. 6에 나타낸다. 그림에서 보는바와 같이 파단은 전부 용접선을 따라 발생하였다. 인장시험에서 얻어진 결과를 Table 3에 나타낸다. AIBC3과 HBsC1의 두재료 모두, 모재, 인공피트 부여재, 세라믹처리재, 산소용접재, 알곤용접재의 5종류 각 10개씩을 실험한 결과이며, 영률(Young's modulus), 항복점(yield strength), 인장강도(Tensile strength)의 평균과 표준편차를 나타냈다. 이들의 평균치를 그래프로 나타낸 것이 Figs. 7~9이다. Fig. 7은 영률의 평균치를 나타 낸 것으로 Pit를 부여하므로 해서 영률이 저하하였다가 보수하므로 해서 다시 증가함을 알 수가 있다. 단, 세라믹처리한 것은 약간의 상승을 보이며, 용접의 경우, AIBC3에서는 알곤용접이 보다 높고, HBsC1에서는 산소용접이 높게 나타내는 특이한 현상을 보이고 있다. Fig. 8은 항복점의 평균치를 나타낸 것으로 영률의 경우와 흡사하다. Fig. 9는 인장강도의 평균치를 나타낸 것으로 변화 양상이 모두 흡사하다. 한편, 각 선급(register of shipping)에서는 프로펠러 블레이드에의 용접절차 인장시험의 인장강도를 Table 4와 같이 규정하고 있다. Fig. 4에서 보는바와 같이

Table 3 Results of tensile test

Material	Young's modulus (GPa)		Yield strength (MPa)		Tensile strength(MPa)	
	Mean	Standard deviation	Mean	Standard deviation	Mean	Standard deviation
Base metal of AIBC3	6.87	0.83	280	15.18	596	5.88
AIBC3 with pit	5.31	0.22	272	7.92	470	10.19
Ceramic coating of AIBC3	5.38	0.21	274	7.96	474	12.52
OX-AC gas welding of AIBC3	6.29	0.32	289	12.59	498	14.67
Argon gas welding of AIBC3	6.40	0.25	290	8.02	502	8.29
Base metal of HBsC1	5.26	0.72	284	9.74	500	2.54
HBsC1 with pit	4.42	0.33	238	12.85	332	8.86
Ceramic coating of HBsC1	4.56	0.30	253	15.76	347	6.81
OX-AC gas welding of HBsC1	5.40	0.29	273	7.79	387	12.35
Argon gas welding of HBsC1	5.31	0.28	265	12.86	365	11.11

AIBC3의 경우, 산소용접의 경우 선급의 규정 기준에 미달하였으나 알곤용접의 경우는 근소한 차이로 기준치를 넘어선 것으로 나타내고 있다. HBsC1의 경우, 산소용접에서는 기준치를 약간 넘는 수치이고, 오히려 알곤용접의 경우 기준치에 약간 미치지 못한다. 그러나 이들 시험편 모두 모재에 비해 많이 떨어지고, 원래의 구조시험편이나 선급에서 규정하는 인장강도에는 상당한 수준이 미달하고 있으므로 대부분의 중·소형 수리업체에서 사용하고 있는 이들의 용접수리방법은 많은 위험성을 내포하고 있다 할 수 있다.

한편, 일반적으로 알곤용접은 산소용접보다 우수하며, 보수에 의한 강도의 향상은 알곤용접이 산소용접보다 우수하여야 하나, HBsC1의 경우는 오히려 산소용접보다 알곤용접이 떨어지는 점으로 비추어볼 때, HBsC1의 경우는 용접방법이나, 용접재가 잘 맞지 않을 가능성이 높다. 이와 관련된 좀더 선행되는 연구가 요구된다.

세라믹 처리의 경우, 강도의 향상이 매우 낮아 캐비테이션의 방지의 효과는 얻을 수 있을지 모르나 강도의 향상은 기대하기 어렵다.

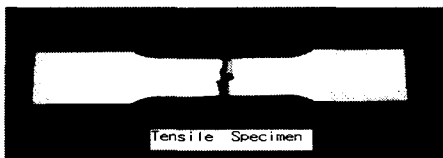


Fig. 6 Fractured specimen from tensile test

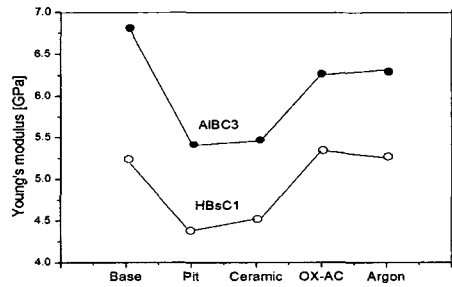


Fig. 7 Changes of Young's modulus by repairing methods

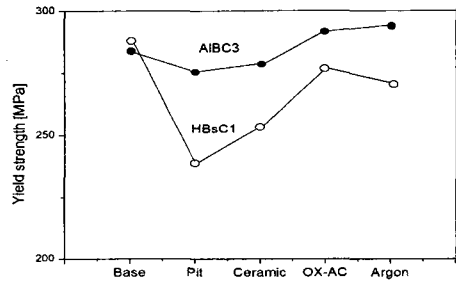


Fig. 8 Changes of yield strength by repairing methods

Table 4 Approval of welding of tensile strength

Material	Tensile strength(MPa)
HBsC1	370 above
AIBC3	500 above

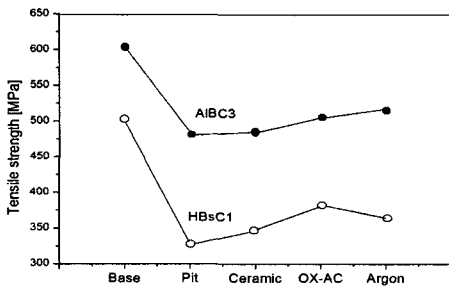


Fig. 9 Changes of tensile strength by repairing methods

### 3.3 피로시험을 통한 강도평가

인장시험에서의 파단양상과 같이 모든 시험편은 용접선을 따라 파단을 하였다. 선박용 프로펠러를 제작하는 강도의 기준은 선급(register of shipping)에서 정하고 있지만 피로강도에 대한 기준은 언급을 하지 않고 있다. IM 등<sup>13</sup>에 의하면, 강재의 경우와 비교하여 인장강도에 비해 피로강도는 상대적으로 낮은 경향이 있어, 부식피트의 보수재의 경우도 특별히 피로강도를 파악할 필요가 있다. 피로시험에서 얻은 결과를 나타낸 것이 Fig. 10 과 Fig. 11이다. Fig. 10은 AIBC3에 대한 피로시험 결과이고, Fig. 11은 HBsC1에 대한 결과이다. 인공피트를 부여한 경우나, 세라믹처리를 한 시험편의 경우는 모재에 비해 피로강도가 현저히 낮고, 극히 낮은 응력레벨에서조차 피로 한도를 찾을 수가 없었다. 용접으로 보수를 한 시험편의 경우는 피로강도가 많이 향상됨을 알 수가 있으나, 이들 또한 모재보다 상당히 낮다. 한편, AIBC3에서는 산소용접으로 행한 것 보다 알곤용

접이 더 높은 피로강도를 보였으나, HBsC1에서는 반대의 현상을 나타내었다. 이러한 양상은 인장시험의 결과와 비슷한 양상을 보이며 HBsC1에 대해서는 용접방법, 용접봉 등에 대해 좀더 선행되는 연구가 필요하다.

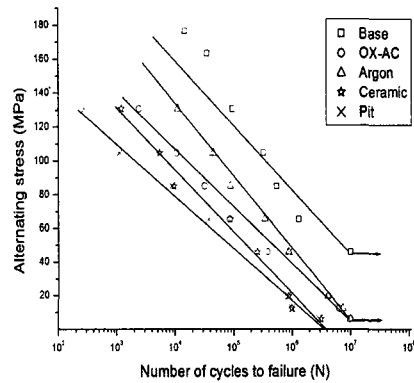


Fig. 10 S-N curve for AIBC3 from fatigue test

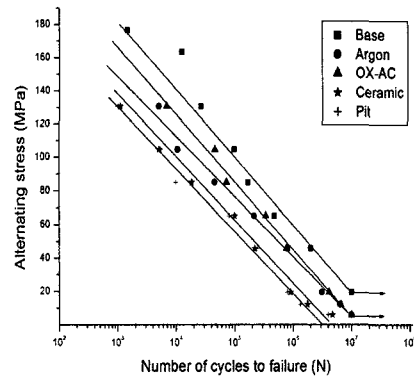


Fig. 11 S-N curve for HBsC1 from fatigue test

## 4. 결론

본 연구에서는 선박에 주로 많이 사용되고 있는 2종류의 프로펠러 주물(AIBC3와 HBsC1)을 이용하여 인공 부식피트를 부여하고, 현장에서 시행하고 있는 동일한 방법에 의해 부식피트를 보수한

다음 제반 강도 실험을 수행하여 선박용 프로펠러 재료의 강도에 미치는 이들 보수수법의 영향을 파악하고자 하였다. 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 강재의 경우, 일반적으로 모재보다 HAZ(열영향부), 용착부가 경도가 높아지나, AIBC3, HBsC1의 2재질 모두 열영향부의 영역에서 경도의 감소가 심하게 나타나는 현상을 나타냈으며, AIBC3에서의 감소가 더욱 심했다. 용착부에서는 HAZ보다 경도의 감소가 더 심하나, HBsC1의 알콘가스 용접의 용착부에서는 경도가 다시 증가하여 모재와 비슷해지는 복잡한 양상을 나타냈다.

2) 2재질(AIBC3와 HBsC1) 모두 용접수리 후에 탄성률과 항복강도는 오히려 증가하거나 약간 감소하는 반면 인장강도는 현저하게 저하해서 선급의 규정치에도 못 미치는 결과를 나타내었다. 일반적으로 알콘용접은 산소용접보다 우수하며, 보수에 의한 강도의 향상은 알콘용접이 산소용접보다 우수하여야 하나, HBsC1의 경우는 오히려 산소용접보다 알콘용접이 떨어지는 양상을 나타냈다.

3) 피로시험의 결과, 인공피트를 부여한 경우나, 세라믹처리를 한 시험편의 경우는 모재에 비해 피로강도가 현저히 낮고, 극히 낮은 응력레벨에서조차 피로 한도를 찾을 수가 없었다. 용접으로 보수를 한 시험편의 경우는 피로강도가 많이 향상됨을 알 수가 있으나, 이들 또한 모재보다 상당히 낮다. 한편, AIBC3에서는 산소용접을 행한 것보다 알콘용접이 더 높은 피로강도를 보였으나, HBsC1에서는 반대의 현상을 나타내었다.

4) 현장에서 부식피트를 세라믹 처리로 보수하는 방법은 인장강도나 피로강도의 강도의 향상이 매우 낮아 캐비테이션의 방지의 효과는 얻을 수 있을지 모르나 강도의 측면에서는 기대하기 어렵다.

5) 일반적으로 알콘용접은 산소용접보다 우수하며, 보수에 의한 강도의 향상은 알콘용접이 산소용접보다 우수하여야 하나, HBsC1의 경우는 경도, 인장강도, 피로강도 모두에서 알콘용접이 오히려 산소용접보다 떨어지는 등 복잡한 양상을 나타내어 이와 관련된 좀더 선행되는 연구가 요구된다.

본 연구는 2002년도 목포대학교 BK21사업단의 연구비지원에 의한 것임을 밝힌다.

## 참고문헌

1. Rules for classification of steel ship, Korean Register of shipping, Materials and Welding, part 2, pp.63~65, 2002.
2. Jeon H. J, "Propeller Shafting and Propeller," Dae Jin Publishing Co., pp.304~307, 2000.
3. Park N. J., Yu Y. W., "The Experiments and Numerical Calculation for Propeller tip Vortex Cavitation Bursting," HANJIN HEAVY INDUSTRIES & CONSTRUCTION CO., LTD.
4. Yamasaki, H. and Ikehata, M.: "Numerical Analysis of Steady Open Characteristics of Marine Propeller by Surface Vortex Lattice Method," Journal of the society of Naval Architects of Japan, Vol. 172, 1992.
5. Masa Iba, "Welding of Copper and Copper Alloys," Welding Technology, pp.111~113, 2001.3.
6. Kazuo Hukusima, Sigeo Inomata, Welding Technology, Sanpo Publishing Co., Vol. 22, pp. 160.
7. Journal of the Japan Welding Society, Handbook of Welding, pp. 1099.
8. Ewalds, H. L. and Wanhil, R. J. H., Fracture Mechanics, Edward Arnold, pp.14, 1986.
9. Shank, M. E., "A Critical Survey of Brittle Fracture in Carbon Steel Structures other than Ships," Weld. Res. Coun. Bull., pp.17, 1965.
10. Parker, E. R., "Brittle Behavior of Engineering Structures", John Wiley & Sons Inc., New York, 1957.
11. Boyd, G. M., "Brittle Fracture in Steel Structures," Butterworths, 1970
12. Structural Welding Code, ANSI/AWSD1.1-94, American Welding Society, pp.34~54, 1994.
13. Im. M. H, Yoon H. Y., "A study on Strength Characteristics for Marine Propeller," Journal of

## 후 기

- Korean Society of Marine Engineers Vol. 23,  
No. 1, pp. 62~67, 1999. 1.
14. Yoo Y. C, "Hot-workability of Copper and Copper Alloys," Journal of Korean Institute of Metals, Vol. 20, No. 12, pp. 1106~1109, 1982.
  15. Akihisa Konno, "Generation Mechanism of Bursting Phenomena of Propeller Tip Vortex Cavitation," Journal of the society of Naval Architects of Japan, Vol. 188, pp. 73~82, 2000.12.
  16. Suh C. M., "Fatigue Crack Growth Properties of Ceramic Coated 1Cr-1Mo-0.25V Steel," KSME S131, pp. 57~62, 1997.