

해수와 청수환경에서 선박용 원심펌프 임펠러 재료의 캐비테이션 특성

임명환

목포해양대학교 실습선 기관장
(2011년 12월 9일 접수, 2011년 12월 27일 수정, 2011년 12월 27일 채택)

Cavitation Characteristics on Impeller Materials of Centrifugal Pump for Ship in Sea Water and Fresh Water

IM Myeong-Hwan

Chief engineer, Training Ship, Mokpo Maritime University
(Received December 9, 2011; Revised December 27, 2011; Accepted December 27, 2011)

The fresh water and sea water in present ships is used as cooling water for marine engine. Therefore, corrosion damage in seawater system is frequently occurred. In particular, in the impeller of pump, the performance and material span due to the corrosion and cavitation erosion has adverse effects. Most of the pump impellers in vessels are used Cu-Al alloy. Cu-Al alloy which having the excellent mechanical properties and corrosion resistance is widely used in marine environments. However, despite the excellent characteristics, the periodic replacement parts due to the cavitation damage in seawater is vulnerable to economic viewpoint. In this study, Cu-Al alloy used with impeller for centrifugal pump were conducted various experiments to evaluate its characteristics in seawater and fresh water solutions. As an electrochemical result, the dynamic conditions that exposed to the cavitation environment presented high corrosion current density with collapse of the cavity compared with the static conditions. Cavitation test results, the weightloss and weightloss rate in fresh water are observed more than those of seawater.

Keywords : sea water, fresh water, cavitation, corrosion, Cu-Al alloy

1. 서 론

현재 선박 내 기기의 냉각수로 해수(sea water, S.W.)와 청수(fresh water, F.W.)가 사용되고 있다. 기존에는 선박에 사용되는 대부분 기기의 냉각수는 해수였으나 청수에 비해 훨씬 빠른 부식속도로 인하여 배관 및 펌프 등의 부식이 빈번하게 발생하여 많은 경제적 손실을 초래하였다. 그래서 현재는 청수로 대부분의 기기를 냉각하고, 사용된 청수를 해수로 냉각하는 방법이 널리 사용되고 있으나 여전히 해수계통 내에 부식 손상은 빈번히 발생하고 있다. 특히 펌프 내 임펠러의 경우, 부식과 캐비테이션에 의한 침식으로 성능저하 및 재료의 수명에 악영향을 끼치고 있다. 일반적으로 캐비테이션 손상은 반복적인 기포 붕괴 압력에 따른 충격하중에 의해 재료가 손상되는 피로 파괴(fatigue fracture)현상으로 알려져 있다.^{1)~5)} 국토해양부의 통계⁶⁾에 따르면 지난 5년간 어선에서 기관 고장으로 인한 사고가 전체 해양사고의 32%~36%였으며, 그 중 해수펌프로 인한 사고가 가장 큰 비중을 차지하였다. 이는 여객선이나 화물선에 비해 주기

적인 점검이나 유지/보수가 어려운 소형선박의 경우가 가장 높은 비율을 차지하였다. 2005년 4월에 거제시와 2008년 3월에 삼척시에서 조업 중 기관고장으로 표류중인 선박이 해양경찰에 의해 구조되었다. 두 사고 모두 기관고장 원인이 해수펌프 임펠러의 손상으로 밝혀졌다. 선박에서 사용되는 펌프 임펠러의 대부분이 동합금이며 그 중 알루미늄 청동은 다른 동합금에 비해 기계적 성질 및 내식성이 우수하고 강도와 경도가 높아 해양환경에서 폭넓게 사용되고 있다. 그러나 우수한 특성에도 불구하고 해수상태에서는 캐비테이션에 의한 손상으로 인한 주기적인 부품 교체로 수명 및 경제성에 취약한 단점을 가지고 있다.^{7)~10)} 또한 청수와 해수의 경우, 기계적 특성과 캐비테이션 특성 등이 크게 다르므로 유체의 종류에 따라 펌프 임펠러 수명에 크게 영향을 미친다. 기존 연구에서는 유체변수에 따른 기계적 특성과 캐비테이션 특성에 관한 비교 연구는 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 선박용 냉각수펌프의 임펠러 재료로 사용되는 알루미늄 청동에 대해 해수 및 청수에 따른 다양한 실험을 실시하여 그 특성을 비교 평가하였다. 본 연구 결과는 선박용 냉각수펌프 임펠러뿐만 아니라 실제 산업 현장에서 사용되는 펌프 임펠러 재료의 수명예측에 도움이 될

* Corresponding author: imhys@mmu.ac.kr

Table 1. Chemical compositions of Cu-Al alloy (wt%)

Cu	Al	Mn	Zn	Fe	Sn	Ni	Pb
81.56	9.30	0.55	0.34	3.66	0.01	4.39	0.013

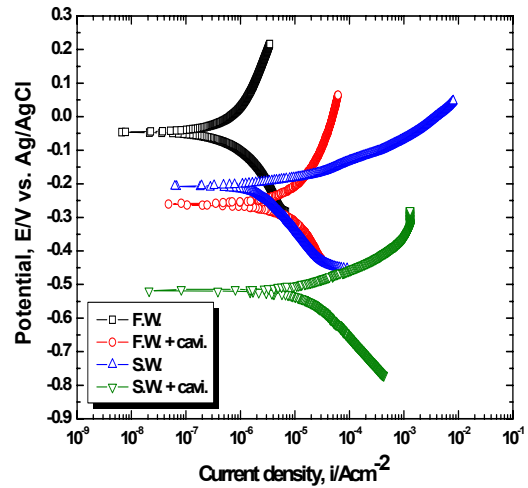
것으로 기대된다.

2. 실험 재료 및 방법

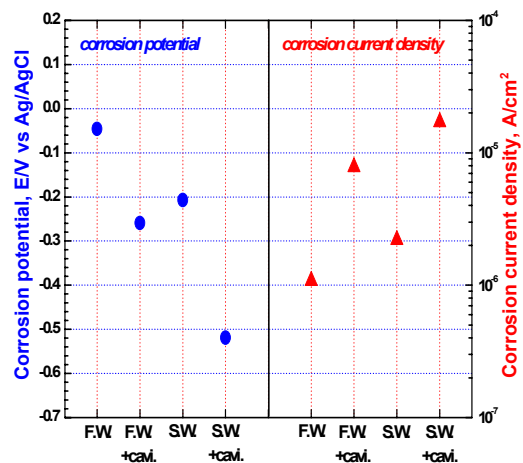
본 연구에 사용된 재료는 9.3 wt%의 알루미늄을 포함하고 있는 Cu-Al 합금을 사용하였다. 이는 한국선급 규정에 부합하도록 사형주조를 통해 직접 제작하였으며, 성분분석 결과는 Table 1에 나타났다. 알루미늄 청동은 강도가 우수하고 연성이 풍부하며, 산화피막 형성으로 인해 부식에 대한 저항성이 우수한 특징이 있다. 또한 가공성이 우수하고, 가공을 실시한 후 열처리나 표면처리를 실시하여 특성 개선이 용이한 장점이 있다. 캐비테이션 실험은 압전(Piezoelectric) 효과를 이용한 진동발생 장치를 사용하여 대향형 진동법으로 실시하였다. 정진폭 자동제어 방식으로 진폭은 50 μm 로 일정하게 유지하였으며, 시편은 거치대에 고정시키고 혼과 1 mm의 거리를 유지하였다. 용액으로는 해수와 청수를 사용하였으며, 25 $^{\circ}\text{C}$ 의 일정 온도를 유지하면서 0.5~12시간 동안 실시하였다. 캐비테이션에 의한 손상 정도를 관찰하기 위해 실험시작 전과 종료 후에 전자저울을 사용하여 무게 감소량과 감소율을 측정하였다. 또한 주사전자현미경(SEM) 및 3D 광학 현미경을 사용하여 표면 손상 정도를 관찰하였으며, 마이크로 비커스 경도기를 사용하여 손상부의 경도를 측정하였다. 또한 부식환경 하에 노출된 재료의 동적 손상을 관찰하기 위해 해수 및 청수 용액에서 개로전위로부터 $\pm 250\text{ mV}$ 를 인가하여 캐비테이션 유무에 따른 타펠 분석을 위한 분극실험을 하였으며 타펠 외삽법을 이용하여 부식 전위와 부식전류밀도를 측정하였다. 분극실험에서 기준전극은 은/염화은 전극을, 대극은 백금전극을 사용하여 2 mV/s의 주사속도로 실시하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 1은 Cu-Al 합금에 대하여 해수와 청수에서 캐비테이션 유무에 따른 타펠 분석을 위한 분극 곡선(a)과 분석 결과(b)를 나타낸 것이다. 캐비테이션 환경인 청수(fresh water, F.W.)의 경우, 부식전위와 부식전류밀도는 -0.259 V , $7.808 \times 10^{-6}\text{ A/cm}^2$ 로 측정되었으며, 정적상태(-0.046 V , $1.081 \times 10^{-6}\text{ A/cm}^2$)와 비교하여 약 7.2배 이상 높은 부식전류밀도 값을 나타냈다. 또한 해수(sea water, S.W.)에서도 정적인 조건에 비해 캐비테이션 환경인 동적 조건에서 7.7배 높은 부식전류밀도 값을 나타냈다. 이와 같이 캐비



(a) Polarization curves for Tafel analysis



(b) analysis results

Fig. 1. Polarization curves for Tafel analysis(a) and analysis results(b) of Cu-Al alloy in sea water and fresh water.

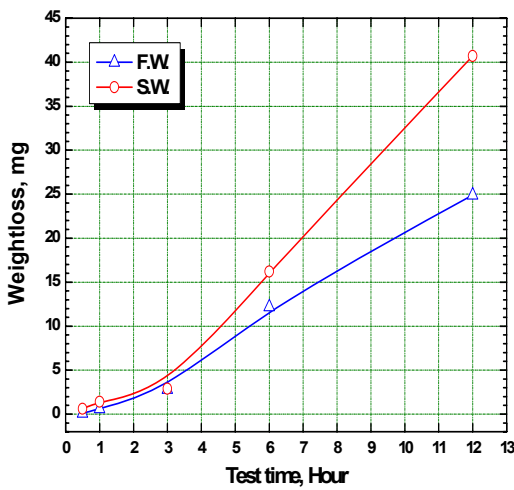
테이션 유무에 따라 부식속도의 차이가 크게 나타난 이유는 전기화학적 부식과 더불어 캐비테에 의해 발생된 충격압으로 인한 염소이온의 확산계수 증가로 부식에 대한 저항성이 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 정적인 해수에서의 부식전류밀도는 캐비테이션 환경에 노출된 청수보다 낮은 값을 나타냈다. 이는 유체에 의한 영향보다 캐비테이션에 의한 영향이 현저히 크다는 사실을 알 수 있었다. 또한 수용액 내에서 동합금의 부식에 영향을 미치는 인자는 pH, 알칼리도, 염소이온의 농도 등 여러 가지가 있으나, 본 실험에서 부식 속도에 영향을 준 인자는 염소이온의 농도로 판단된다. 청수와 해수의 pH는 평균적으로 각각 $7.5 \pm 1\text{ ppm}$ 과 $7.9 \pm 0.5\text{ ppm}$ 으로 오차 범위 내에서 거의 유사하다. 이에 반해 청수의 염소이온 농도는 해수의 1/5에 해당되며, 이러한 염소 이온은 동합금에 대해 균일 부식이나 피팅을 증가시키는

인자로 알려져 있고, 그 농도가 높을수록 부식속도는 증가한다.¹¹⁾ 결과적으로 정적인 조건보다 동적인 조건에서 부식속도가 현저히 빠르고, 청수에 노출될 경우 표면에 안정된 구리 화합물이 형성되어, 염소이온의 농도가 높은 해수보다 상대적으로 낮은 부식속도를 나타내는 것으로 판단된다.

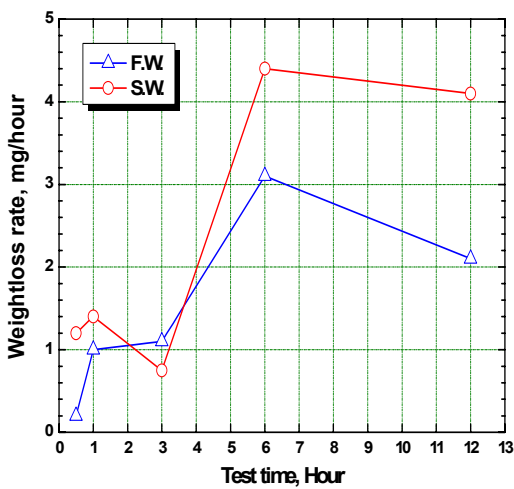
Fig. 2는 Cu-Al 합금에 대하여 청수와 해수에서 시간변화에 따른 캐비테이션 실험 후 무게감소량과 무게감소율의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 2(a)의 무게감소량 측정 결과, 두 경우 모두 시간 경과에 따라 지속적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 0.5~3시간까지는 무게감소량이 크게 증가하지 않는 잠복기의 거동을 보였으며,¹²⁾ 이후에 무게감소량이 급격히 증가하는 경향을 나타냈다. 또한 청수보다 해수에서의 무게감소량이 크게 나타났는데, 이는 해수 환경하에서의 손상이 캐비티 붕괴에 따른 충격압 뿐만 아니라, 해수에 포함

되어 있는 염소이온에 의한 부식이 복합적으로 작용했기 때문인 것으로 판단된다. 이와 같이 해수에서의 캐비테이션 손상은 금속표면에 다수의 균열을 발생시키면서 결정이 세분화 되어 탈락하고, 이에 부식 현상이 동시에 발생하므로 상승효과를 나타내게 된다. Fig. 2(b)의 시간에 따른 무게감소율($\Delta g/\Delta hour$)을 측정한 결과, 금속표면의 소성변형으로 인해 피트가 생성되기 시작하는 잠복기(0.5~3시간)를 지나 실험시간 6시간일 때 최대의 무게감소율을 나타낸 후 12시간에 감소하는 경향을 나타냈다. 전체적으로 청수보다 해수에서의 무게감소량과 무게감소율이 높게 나타났으며, 이는 청수보다 해수가 더 강한 부식성 환경이기 때문으로 판단된다.¹³⁾

Fig. 3은 Cu-Al 합금에 대하여 청수와 해수용액에서 시간변화에 따른 캐비테이션 실험 후 손상면을 관찰한 것이다.



(a) weightloss



(b) weightloss rate

Fig. 2. The weightloss(a) and weightloss rate(b) of Cu-Al alloy after cavitation test in sea water and fresh water.

	Fresh water	Sea water
0.5hr		
1hr		
3hr		
6hr		
12hr		

Fig. 3. Appearance with cavitation experiment time.

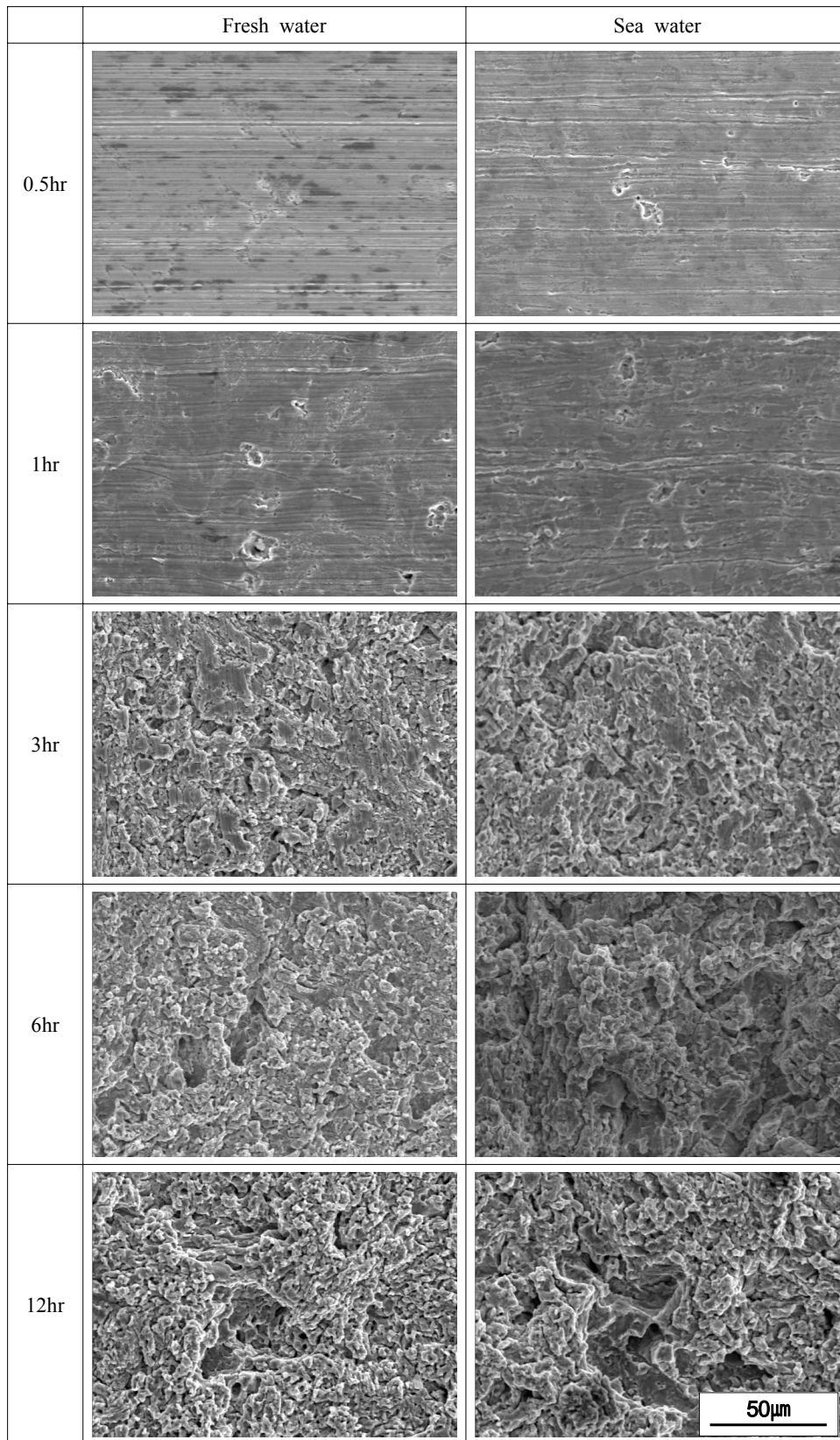


Fig. 4. SEM analysis of Cu-Al alloy with after cavitation experiment time.

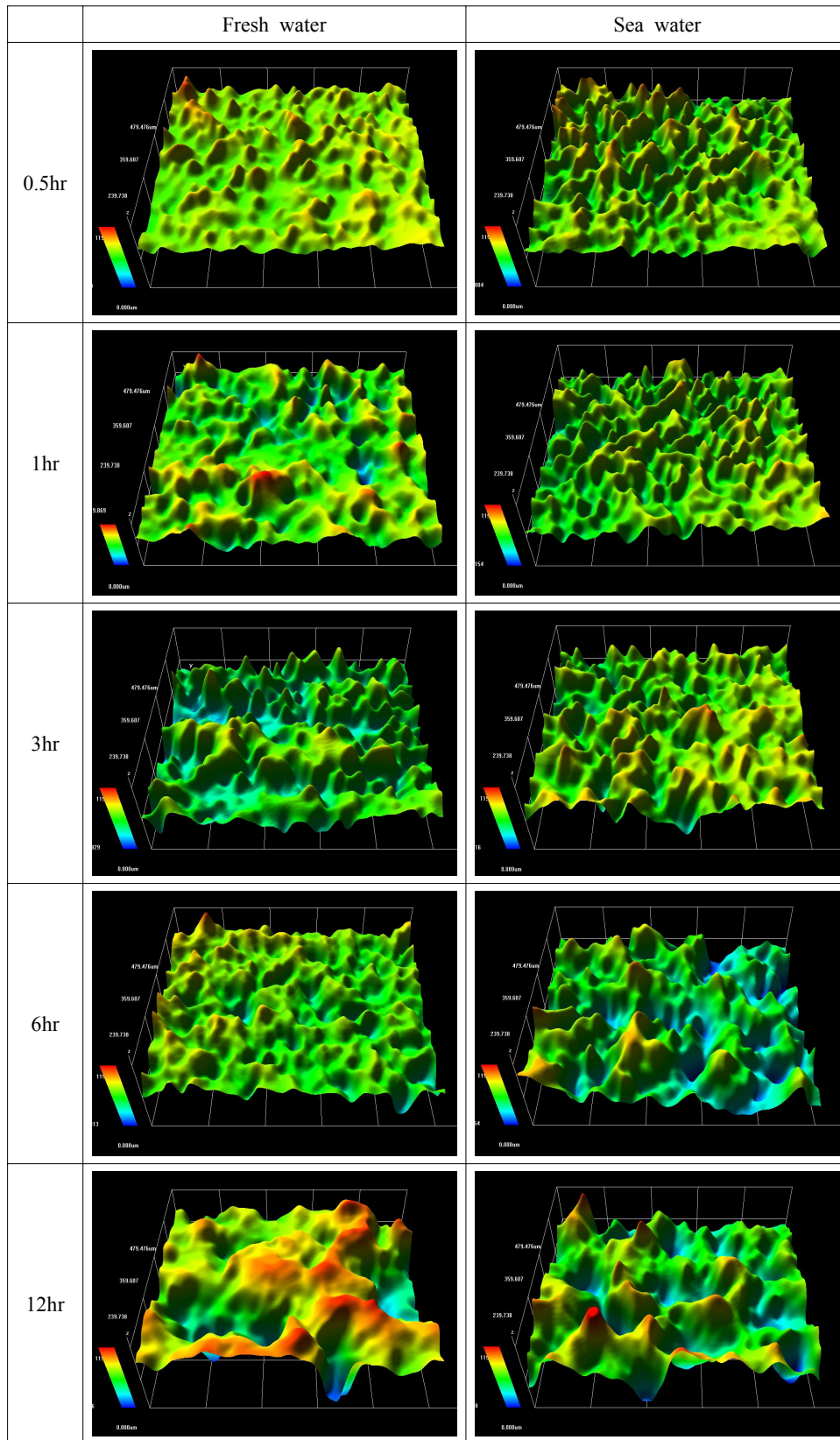


Fig. 5. 3D analysis of AIBC3 after cavitation test with experiment time.

두 조건 모두 0.5~3시간에는 육안으로 관찰될 정도의 손상은 나타나지 않았으나 소성변형 된 영역을 관찰할 수 있었다. 이는 잠복기에 해당되는 구간으로, 무게감소량과 무게감소율 측정 시 작은 값을 나타낸 것과 일치하는 결과를 나타냈다. 반면 실험 시간 12시간에서는 캐비테이션에 의한 손상이 명확하게 관찰되었는데, 청수에 비해 해수에서 현저히 큰 손상을 확인할 수 있다. 이는 캐비테이션에 의한 표면 손상으로 부동태 피막이 파괴되어 염소이온의 침투가 수월하여 부식이 쉽게 발생한 것으로 판단된다. 결과적으로 초기 잠복기에 소성변형에 의한 표면 경화현상으로 캐비테이션 손상은 크지 않으나, 염소이온에 따른 부식 손상으로 취약해진 조직은 캐비테이션 손상이 상대적으로 쉽게 발생한 것으로 사료된다.¹⁴⁾

Fig. 4는 Cu-Al 합금에 대한 캐비테이션 실험 후 표면 손상을 주사전자현미경으로 관찰한 것이다. 캐비테이션 손상은 시간에 비례하여 지속적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 실험시간 1시간까지는 캐비테이션에 의해 금속표면에 소성변형이 생기면서 피트가 형성되는 구간으로 판단되며, 일부 조직에서 5~10 μm 크기의 작은 조직이 탈리되었다. 이는 캐비테이션의 영향으로 조직과 화학조성에 따라 기계적 특성의 차이를 보이면서 일부 조직이 우선적으로 손상된 것으로 여겨진다. 일반적으로 캐비테이션 손상은 가장 취약한 부분인 기지상과 단단한 석출물간의 경계에서 먼저 크랙이 발생하여 손상이 시작되는 것으로 알려져 있다.¹⁵⁾ 청수 3시간에서는 입계부근에서 손상이 많이 된 것으로 사료되며, 6시간부터는 피트와 피트가 합쳐지면서 손상이 커졌으며, 12시간에는 손상이 확대되어 깊이방향으로 진전한 것을 알 수 있다. 전체적으로 해수의 경우가 많이 손상되었음을 알 수 있다.

Fig. 5는 Cu-Al 합금에 대한 캐비테이션 실험 후 표면 손상을 3D 현미경(×200)으로 관찰한 것이다. 실험시간 0.5~3시간까지는 기포로 인해 작은 압입자국이 생기면서 거친 표면 형상이 나타났으며, 이는 잠복기에 해당되는 단계로 표면의 가공경화가 진행되면서 손상이 많이 되지 않은 것으로 판단된다. 6시간의 경우 생성된 피트가 깊이 방향으로 성장하면서 깊고, 큰 피트가 형성되었다. 이는 무게감소율이 급격히 증가하는 증가기에 해당되는 단계로 금속표면에 다수의 균열이 발생해서 결정이 세분화된 뒤 탈리된 것으로 사료된다. 12시간의 경우는 가장 큰 무게감소량을 나타낸 구간으로, 6시간에 비해 피트가 커지고 깊어지는 것을 알 수 있다. 전체적으로 해수의 경우가 청수에 비해 큰 손상이 나타났음을 알 수 있었다.

Fig. 6은 다양한 시간에서 캐비테이션 실험 실시 후, 3D 현미경을 이용한 표면 손상 분석 후 손상깊이를 나타낸 것이다.

실험시간 0.5~6시간의 경우, 해수에서의 손상깊이가 청

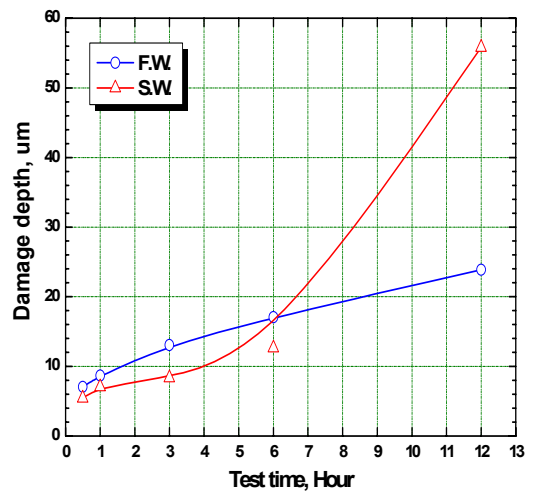


Fig. 6. Damage depth after cavitation test with experiment time.

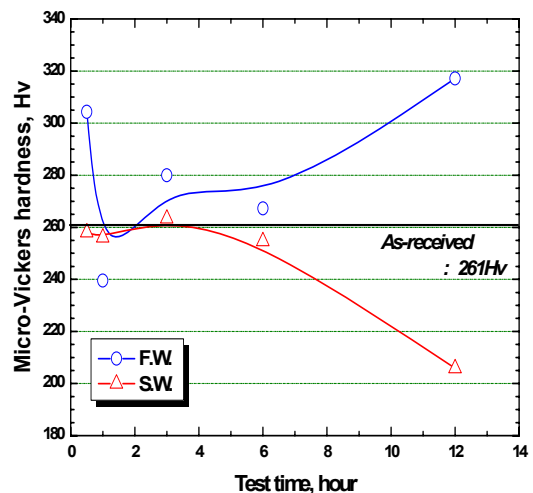


Fig. 7. Comparison of Micro-Vickers hardness for Cu-Al alloy after cavitation test time.

수에서보다 낮게 나타나 무게감소량 데이터와 상반된 결과를 나타냈다. 이는 캐비테이션으로 인한 침식과 해수로 인한 부식이 동시에 일어나면서 손상량이 상대적으로 많아 평탄화 되었기 때문으로 판단된다. 그러나 해수에서 12시간 캐비테이션 시험을 실시한 경우, 국부적인 침식이 크게 나타나면서 청수에 비해 손상깊이가 월등히 높게 나타났다. 6시간에 비해 낮은 무게감소율을 나타냈으나 3배 이상 큰 손상깊이를 나타낸 것은, 전반적인 침식보다는 시험 중앙부에 손상이 집중되면서 56 μm의 큰 피트를 나타낸 것으로 판단된다.

Fig. 7은 Cu-Al 합금에 대하여 청수와 해수에서 캐비테이션 실험 후 손상면의 경도를 측정된 것이다. 모재의 평균 경도는 261 Hv를 나타냈으며, 청수에서 캐비테이션을 실시

한 경우는 실험시간 1시간을 제외하고 모두 모재보다 높은 경도를 나타냈다. 이처럼 모재보다 큰 경도값을 나타낸 것은 워터 캐비테이션 피닝(water cavitation peening) 효과에 의해 압축잔류응력이 축적되면서 표면 경도가 향상되었기 때문으로 여겨진다.¹⁶⁾ 이러한 캐비테이션의 붕괴 충격압을 이용한 피닝 효과로 재료의 표면에 압축잔류응력 형성으로 표면강도가 개선되고, 그로 인한 재료의 내구성이나 수명 연장에 응용하려는 연구가 진행되고 있다.¹⁷⁻¹⁹⁾ 청수의 경우, 실험시간 12시간에서 가장 높은 경도값을 나타내기는 했으나, 이 조건에서 가장 큰 무게감소량을 나타내면서 캐비테이션에 의한 표면 손상이 발생하는 조건이므로 워터 캐비테이션 피닝에 의한 압축잔류응력 형성에 따른 표면경화 현상은 거의 상실하면서 손상이 증대된 후 다시 재 경화된 것으로 사료된다. 반면 해수의 경우는 6시간까지 모재와 거의 유사한 경도값을 나타낸 후 12시간에는 급격히 저하되는 현상을 나타냈다. 이는 워터 캐비테이션 피닝에 의해 전달된 충격에너지가 표면의 압축잔류응력이 부여된 층과 결정립이 미세화 된 영역이 시간이 경과하면서 손상 및 탈리되어 상대적으로 낮은 경도를 가지는 하부 조직이 노출되었기 때문으로 판단된다.²⁰⁻²¹⁾

4. 결 론

선박용 냉각수 펌프의 임펠러 재료로 사용되는 Cu-Al 합금의 해수와 청수 조건에서 캐비테이션 손상거동과 기계적 특성에 대해 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

정적인 조건보다 캐비테이션 환경에 노출된 동적 조건에서 캐비티로 인한 손상으로 높은 부식전류밀도를 나타냈다. 캐비테이션 실험 결과, 청수보다 해수에서의 무게감소량과 무게감소율이 높게 나타났으며, 이는 염소이온이 포함된 해수가 더 강한 부식 환경이기 때문으로 사료된다. 경도 측정 결과, 일정 구간에서 워터 캐비테이션 피닝 효과로 표면경도 개선 효과가 나타났다. 결과적으로 정적 상태보다 캐비테이션 환경에 노출된 동적상태에서, 그리고 청수보다 해수 내에서 큰 손상이 관찰되었다.

참 고 문 헌

1. T. Okada, Y. Iwai, and K. Awazu, *Wear*, **133**, 219 (1989).
2. Y. Iwai, T. Okada, and S. Tanaka, *Wear*, **133**, 233 (1989).
3. Iwai, T. Okada, and H. Mori, *Wear*, **150**, 367 (1991).
4. T. Okada, Y. Iwai, S. Hattori, and N. Tanimura, *Wear*, **184**, 231 (1995).
5. S. Hattori, H. Mori, and T. Okada, *Trans. ASME J. Fluids. Eng.*, **120**, 179 (1998).
6. http://www.kmst.go.kr/statistics/statisticslast_list.asp
7. H. M. Shalaby, A. Al-Hashem, H. Al-Mazeedi, and A. Abdullah, *Brit. Corr. J.*, **30**, 63 (1995).
8. A. Al-Hashem and W. Riad, *Mater. Charact.*, **48**, 37 (2002).
9. C. H. Tang, F. T. Cheng, and H. C. Man, *Surf. Coat. Tech.*, **182**, 300 (2004).
10. J. L. Heuze and A. Karimi, *Proceeding Cavitation 91 Symposium*, **116**, 113 (1991).
11. Y. S. Park and S. G. Hong, *J. Corr. Sci. Soc. Kor.*, **11**, 7 (1982).
12. S. M. Ahmed, K. Hokkirigawa, Y. Ito, and R. Oba, *Wear*, **142**, 303 (1991).
13. J. H. Hwang and U. J. Lim, *J. Corr. Sci. Soc. Kor.*, **25**, 317 (1996).
14. A. Thiruvengadam and *ASTM*, **STP 567**, 219 (1982).
15. H. G. Feller and Y. Kharrazi, *Wear*, **93**, 249 (1984).
16. S. S. Hwang, S. H. Park, W. J. Park, S. C. Huh, and K. Y. Lee, *J. KSME spring conference*, 11 (2006).
17. Y. Yamauchi, H. Soyama, Y. Adachi, K. Sato, T. Shindo, R. Oba, R. Oshima, and M. Yanabe, *J. JSME*, **59**, 19 (1993).
18. H. Hirano, K. Enomoto, E. Hayashi, and K. Kurosawa, *J. JSME*, **45**, 740 (1996).
19. H. Soyama, Y. Yamauchi, T. Ikohagi, R. Oba, K. Sato, T. Shindo, and R. Oshima, *J. Jet Flow Eng.*, **13**, 25 (1996).
20. K. D. Park, W. T. Ki, Y. J. Shin, and H. J. Ryu, *Int. J. Automot. Tech.*, **8**, 343 (2007).
21. W. B. Lee, K. T. Cho, K. H. Kim, K. I. Moon, and Y. Lee, *Mater. Sci. Eng.(A)*, **527**, 5852 (2010).