

## 해수환경하에 노출된 선박용 타 재료의 전기화학적 및 캐비테이션 특성 평가

김성종<sup>†</sup>·이승준

목포해양대학교 기관시스템공학부

(2011년 4월 6일 접수, 2011년 6월 27일 수정, 2011년 6월 28일 채택)

### Investigation on electrochemical and cavitation characteristics of rudder materials for ship in sea water

Seong-Jong KIM<sup>†</sup> and Seung-Jun LEE

Division of Marine System Engineering, Mokpo Maritime University, Mokpo, Korea

(Received April 6, 2011; Revised June 27, 2011; Accepted June 28, 2011)

Marine ships have played an important role as a carrier, transporting much more than 80% of all international trading, and marine transportation is an internationally competitive, strategic, and great national important industry. However, those marine ships have the characteristics such as voyage of long distance, large-volume and lower speed than the other carry system. Therefore, it is important to manufacture a larger and faster ship, however, the steel plates which are consisted with most of those ships has brought about many corrosion problems in sea water such as general corrosion, localized corrosion, cavitation and erosion corrosion etc.. Most hulls of the ships have been protected with paintings, sacrificial anode, marine growth prevention system, and impressed current cathodic protection methods against numerous corrosion problems mentioned above. However, these conventional methods are not very effective because the rudder of ships stern are exposed to very severe corrosive environment such as tides, speeds of ships, cavitations and erosion corrosion, etc.. In this study, electrochemical and cavitation characteristics was investigated for the rudder material of ship which is exposed to serious corrosive environment. As a result, it is considered that the optimum cathodic protection potentials of rudder material is the range of  $-0.6\text{ V} \sim -0.8\text{ V(Ag/AgCl)}$  in static seawater

**Keywords** : ship, rudder, corrosion, sea water, cavitation

## 1. 서 론

선박에서 타(rudder)는 추진기 바로 뒤에 위치하여 운항 시에 프로펠러의 회전으로 발생하는 공동현상, 침식부식, 와류 등과 같은 대단히 가혹한 부식 환경에 노출되어 있다.<sup>1)-3)</sup> 타의 손상으로 인해 선박이 조종성을 상실하면 충돌, 좌초는 물론 침몰로 이어져 선적화물과 선박에 의한 2차적인 환경오염 및 인명피해를 유발할 가능성이 높다. 특히 금속의 부식은 유속, 와류 등에 의한 영향을 크게 받기 때문에 유속이 증가하면, 부식속도가 현저히 증가하게 된다.<sup>4)-5)</sup> 선박의 타는 전진 시 해수와 부딪쳐 발생하는 부식과 회류하여 되돌아오는 와류에 의한 부식도 심각한 실정이다.<sup>6)-8)</sup> 이 때 희생양극을 이용한 방식<sup>9)</sup>인 경우 수명이 현저히 저하하며, 외부전원법에 의한 방식<sup>10)</sup> 적용 시 방식전류밀도

가 증가하여, 타의 부식속도를 가속화 시키고 있다. 부식방지 시스템 중 대부분이 희생양극법과 도장에 의한 방법만 사용하고 있으나, 희생양극법의 경우는 수명을 예측할 수 있는 설계 기술이 미비하여, 조기에 수명을 다하여 전체에 걸쳐서 타의 부식이 발생하는 경우가 빈번히 발생하고 있다. 그 후 희생양극에 의한 방식이 달성되지 않으면 도장에 의해 방식이 이루어져야 하나 도장의 결함 부위 등이 존재하면, 그 부위에서 부식이 시작하여 확대되면서 도막의 박리 현상으로 인한 타의 부식이 전체적으로 발생하는 것이 일반적이다.

본 연구에서는 선박용 타 재료의 전기화학적 및 캐비테이션 실험을 통해 해양환경하에서의 부식 및 캐비테이션 특성을 규명하였다.

## 2. 실험방법

본 실험에서는 선박용 타 재료로 사용되는 KR-RA강의

<sup>†</sup> Corresponding author: ks@mmu.ac.kr

**Table 1. Mechanical characteristics and chemical compositions of rudder material for ship**

(a) Mechanical characteristics				
Yield strength	Tensile strength	Elongation		
312 MPa	463 MPa	23 %		

(b) Chemical compositions (wt.%)				
C	Si	Mn	P	S
0.1617%	0.013%	0.659%	0.0146%	0.0076%

기계적 특성과 화학적 특성을 Table 1에 나타냈다. 전기화학 실험은 모두 천연해수 용액에서 실시하였으며, 자연전위 측정 실험은 86,400초 동안 실시하여 시간 경과별 전위를 측정하였다. 분극실험 시 기준전극으로 은/염화은 전극(Ag/AgCl)을, 대극은 백금전극(Pt)을 사용하여 2 mV/s의 주사속도로 천연해수 용액 조건에서 실시하였다. 양분극실험은 개로전위에서 +3.0 V까지, 음분극실험은 개로전위에서 -2.0 V까지 실시하였다. 또한 개로전위를 기준으로  $\pm 0.25$  V 분극시켜 타펠분석을 통하여 부식전위와 부식전류밀도를 구하였다. 정전위 실험은 정적상태의 해수용액에서 양분극과 음분극 시킨 후 일정 전위에서 1,800초 동안의 전류밀도 변화와 실험 종료 후의 전류밀도를 각 조건별로 비교하여 평가하였다. 정전위 시험 후 표면의 부착물을 제거한 후 주사전자현미경을 사용하여 표면의 부식경향을 관찰하였다. 또한 캐비테이션 실험은 ASTM-G32 규정에 의거한 진동형 대향법으로 시편과 혼과의 거리를 1 mm를 유지하면서 5시간~20시간 동안 실시한 후 3D 현미경을 사용하여 시험편 표면의 캐비테이션 손상 거동 및 손상깊이와 거칠기를 분석하였다.

### 3. 연구결과 및 고찰

Fig. 1은 타 재료에 대한 천연해수 용액에서의 양극분극 경향을 나타낸 그래프이다. 개로전위(open circuit potential)는 -0.73 V를 나타냈으며, 개로전위에서 전위 상승에 따라 꾸준한 전류밀도의 상승이 관찰되었다. 해수 환경하에서 알루미늄 합금 등은  $Al_2O_3$ 나  $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ 와 같은 부동태 피막이 형성된 후 해수에 포함된 염소이온( $Cl^-$ )에 의해 파괴되거나 다시 재생성되는 재부동태화 현상이 나타내어 어느 정도의 내식성을 유지하기도 한다.<sup>11)</sup> 그러나 본 시편의 경우 부동태 현상에 의한 전류밀도 저하 특성은 관찰되지 않았다.

Fig. 2는 천연해수에서 타 재료에 대한 음분극 곡선을 나타내고 있다. 탄소강의 경우, 일반적으로 개로전위에서 비방향으로 이행함에 따라 용존산소 환원반응( $O_2 + 2H_2O + 4e^-$

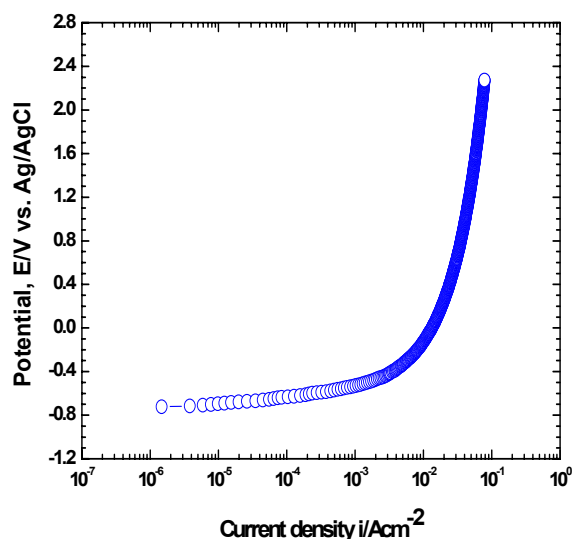


Fig. 1. Anodic polarization curve of rudder material in sea water.

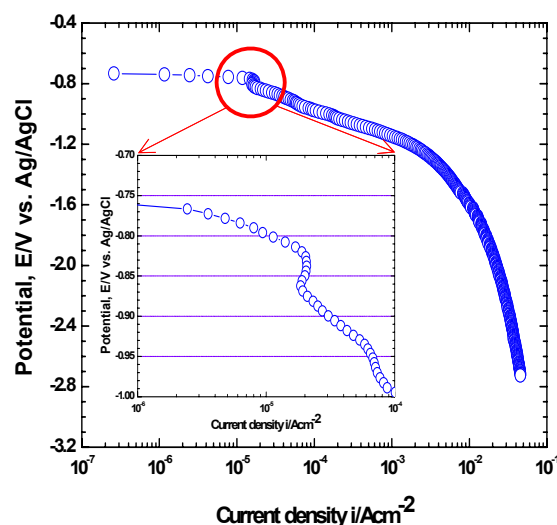


Fig. 2. Cathodic polarization curve of rudder material in sea water.

$\rightarrow 4OH^-$ )에 의한 농도분극과 수소가스발생에 의한 활성화분극( $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$ )의 경향이 관찰되었다. 또한 외부전원법에 의한 음극방식 적용 시 한계전위에 해당되는 농도분극과 활성화 분극의 변곡점은 -0.87 V로 나타났으며, 이후부터 수소가스발생에 따른 활성화분극의 영향으로 전류밀도가 서서히 증가하는 경향을 나타냈다. Fig. 1의 양분극과 음분극 실험결과를 비교하면 양극방식 적용은 전류밀도가 감소하는 부동태 경향을 나타내지 않으므로 방식에 적용할 수 없으나, 음분극 곡선에서는 낮은 전류밀도를 나타내는 농도분극 구간이 존재하므로 그 구간에서 방식이 가능하다고 할 수 있다.

Fig. 3은 타펠 분석을 위해 개로전위에서  $\pm 0.25$  V 분극

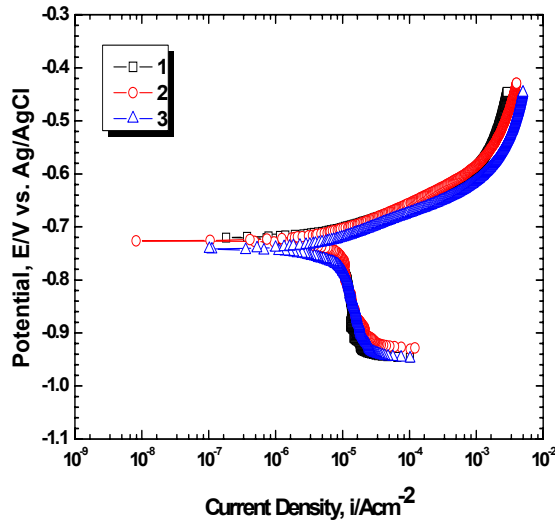


Fig. 3. Polarization curves for Tafel analysis of rudder material in sea water.

Table 2. Results of Tafel analysis for rudder material in sea water

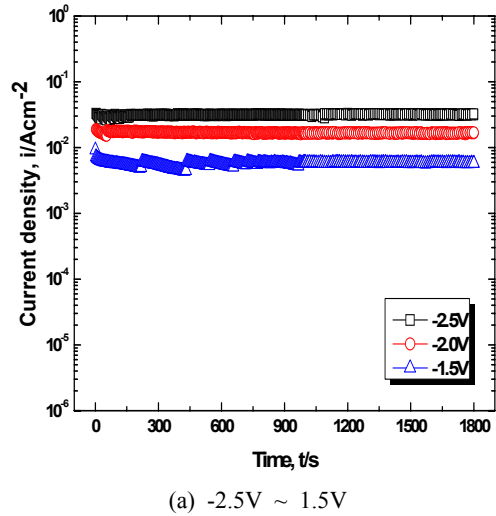
	1	2	3	Average
corrosion current density(A/cm <sup>2</sup> )	9.5×10 <sup>-6</sup>	7.5×10 <sup>-6</sup>	8.0×10 <sup>-6</sup>	8.3×10 <sup>-6</sup>
corrosion potential(V)	-0.720	-0.726	-0.741	-0.729

시킨 그래프이다. 실험은 재현성 확보를 위해 3회 실시하였다. 음분극 곡선에서 용존산소 환원반응에 의한 농도분극이 발생하였고, 활성화 분극으로 이행하면서 전류밀도가 급격히 상승하는 경향을 나타냈다. 양분극 곡선에서는 부동태 경향 없이 전위 상승에 따라 꾸준한 전류밀도의 상승이 관찰되었다. Table 2에 3차례 실험한 내용에 대한 부식전위와 부식전류밀도의 평균은 각각 -0.729 V, 8.3×10<sup>-6</sup> A/cm<sup>2</sup>를 나타냈다.

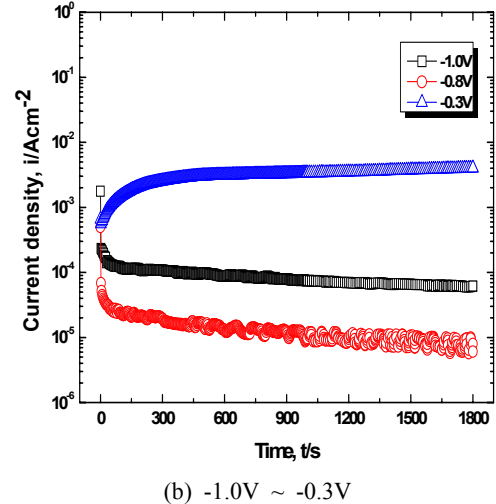
Fig. 4는 미시적인 부식경향을 파악하기 위해 다양한 전위에서 정전위 시험을 실시하여 시간변화에 따른 전류밀도 거동을 나타내고 있다. 다양한 적용전위를 1,800초 동안 인가한 후 시간에 따른 전류밀도의 변화를 비교·관찰하였다.

Fig. 4(a)는 -2.5 V, -2.0 V, -1.5 V의 적용전위에서 정전위 실험을 실시한 시간-전류밀도 거동을 나타낸 그래프이다. 이 적용전위는 음분극 곡선에서 활성화 분극 구간에 해당되는 것으로 침지초기부터 종료시까지 일정한 경향을 나타냈으며, 실험 종료시 전류밀도는 전위가 비방향으로 이행할수록 상승하는 경향을 나타냈다. 이는 저전위 유지를 위한 공급전류밀도의 영향으로 수소가스가 발생하면서, 전류밀도값이 커진 것으로 판단된다.

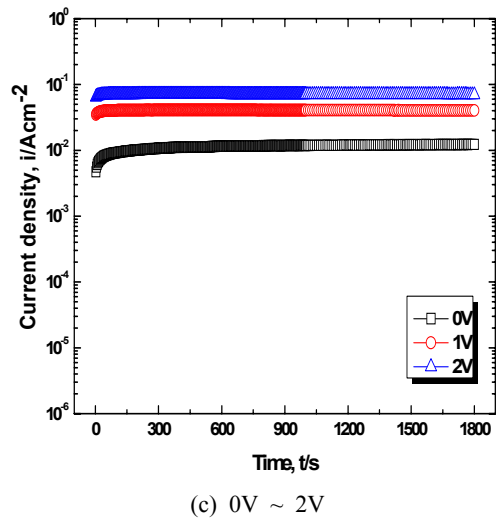
-1.0 V, -0.8 V 및 -0.3 V의 적용 전위의 경우, -1.0



(a) -2.5V ~ 1.5V



(b) -1.0V ~ -0.3V



(c) 0V ~ 2V

Fig. 4. Time-current density curves during potentiostatic experiment of rudder material in sea water.

V와 -0.8 V의 적용전위에서는 다소 높은 전류밀도를 나타낸 후 짧은 시간에 낮은 전류밀도의 안정된 경향을 관찰할 수 있었다. -0.8 V의 적용 전위에서는 대체적으로 낮은 전류밀도를 나타내고 있는데 이는 용존산소 환원반응에 의한 농도분극에 속하는 방식전위 영역이기 때문으로 판단된다. 실험초기에는 -0.8 V의 경우 불안정한 거동이 반복되었으나 그 편차는 대단히 낮은 값이므로 차이가 없는 것으로 판단한다. 그러나 -1.0 V인 경우 단시간에 전류밀도가 하강하여 안정된 후 실험이 진행되면서 조금씩 낮은 값을 나타냈으나, -0.8 V의 경우보다 큰 값을 나타냈으나, 거의 일정한 전류밀도를 나타냈다. 한편 -0.3 V의 적용전위에서는 침지 초기 낮은 전류밀도를 나타낸 후 시간이 경과함에 따라 전류밀도가 높아져 짧은 시간에 안정적인 경향을 보여주었다. 실험종료 시 -1.0 V, -0.8 V의 음극환원 전류밀도는  $6.15 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ ,  $6.05 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 를, 그리고 -0.3 V의 양극산화 전류밀도는  $1.71 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ 를 나타냈다. 다음 Fig. 4(C)는 양분극 곡선에서 개로전위보다 높은 전위 영역인 0 V, 1 V 및 2 V의 조건에서 정전위 실험 결과이다. 침지 후 단시간에 안정된 값을 나타낸 후 실험 종료시까지 안정된 값을 나타냈으며, 실험 종료 후 전류밀도는 대체로 높은 값을 나타냈다.

Fig. 5는 타 재료에 대하여 -2.5 V ~ 2.0 V의 조건에서 정전위 실험을 실시하여 1,800초 후의 전류밀도 평균값을 비교한 그래프이다. 정전위 실험은 3차례 시행하였으며, 그 중 ●는 평균값 거동을 의미한다. 적용전위 -1.0 V~-0.7 V를 기준으로 양분극과 음분극 쪽으로 이행하면 다소 대칭적인 거동을 보여주었다. 적용전위 -0.7 V인 경우에 가장 낮은 전류밀도 값을 나타냈는데 이는 개로전위에 가까워 전위 유지를 위한 공급전류밀도가 낮기 때문으로 판단된다.

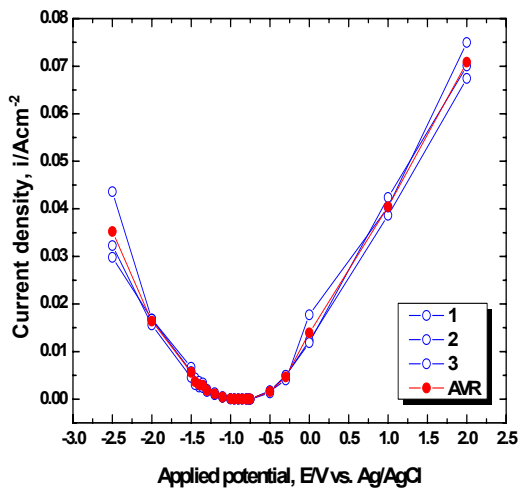


Fig. 5. Comparison of current density after potentiostatic experiment of rudder material in sea water.

-0.5 V의 적용전위에서는 급격한 전류밀도의 상승을 나타낸 후 그 이상의 적용전위에서는 꾸준히 상승하는 경향을 나타냈다. 또한 -2.5 V ~ -1.0 V로 음분극 시켜 정전위 실험을 실시한 경우 수소가스 발생으로 -2.5 V인 경우가 가장 높은 전류밀도를 나타냈다.

Fig. 6은 다양한 적용전위에서 정전위 실험 후 표면형상을 관찰한 것이다. 1.0 V의 경우 시편 표면의 전체에 걸쳐 심한 활성용해반응에 의한 부식이 발생하였다. 0 V의 전위에서도 활성용해반응에 의해 부식된 형상을 관찰할 수 있으나 부식의 깊이와 분포가 적게 형성되었음을 알 수 있다. -0.8 V~-0.6 V는 손상이 없는 깨끗한 상태를 나타냈으며, 이는 개로전위와 용존산소 환원반응에 의한 농도분극 구간으로 정적환경에서의 방식전위에 해당된다. 변곡점보다 낮

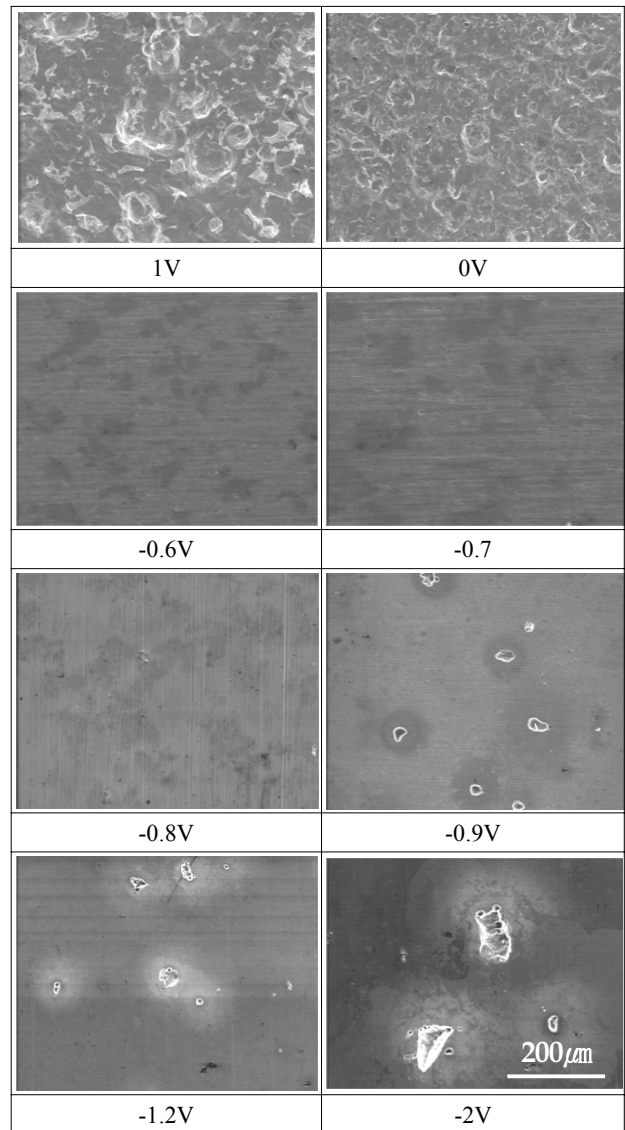


Fig. 6. Surface morphologies after potentiostatic experiment of rudder material in sea water.

은  $-0.9\text{ V}$ 는 과방식 전위영역에 해당되어 수소가스의 영향으로 피팅과 같은 부식이 관찰되었다. 또한 전위가 비한 방향으로 이행할수록 많은 부식이 발생하였음을 알 수 있으며, 이는 일정한 비한 전위를 유지하기 위한, 즉 많은 양의 수소 발생을 유도하기 위해 공급전류밀도가 증가하는 양상을 확인할 수 있었다.

Fig. 7은 캐비테이션 시간별 주사전자현미경 관찰과 3D 분석 결과를 나타낸 것이다. 5시간 경과 후 큰 손상은 관찰되

지 않았으나, 기포의 충격으로 인해 피트가 생성되면서 약간 거친 표면형상을 나타냈다. 일반적으로 캐비테이션 손상은 가장 취약한 부분인 기지상과 단단한 석출물간의 경계에서 먼저 크랙이 발생하여 손상이 시작된다고 알려져 있다.<sup>12)</sup> 10시간에는 중앙에 깊이 방향으로 피팅이 진전되었으며, 15시간 경과 후에는 주변부의 손상이 확대되면서 매우 거친 표면 형상을 나타냈다. 또한 20시간에 최대 손상깊이가 증가한 것은 주변부가 평탄화되고 다시 생성된 피팅에 기인한

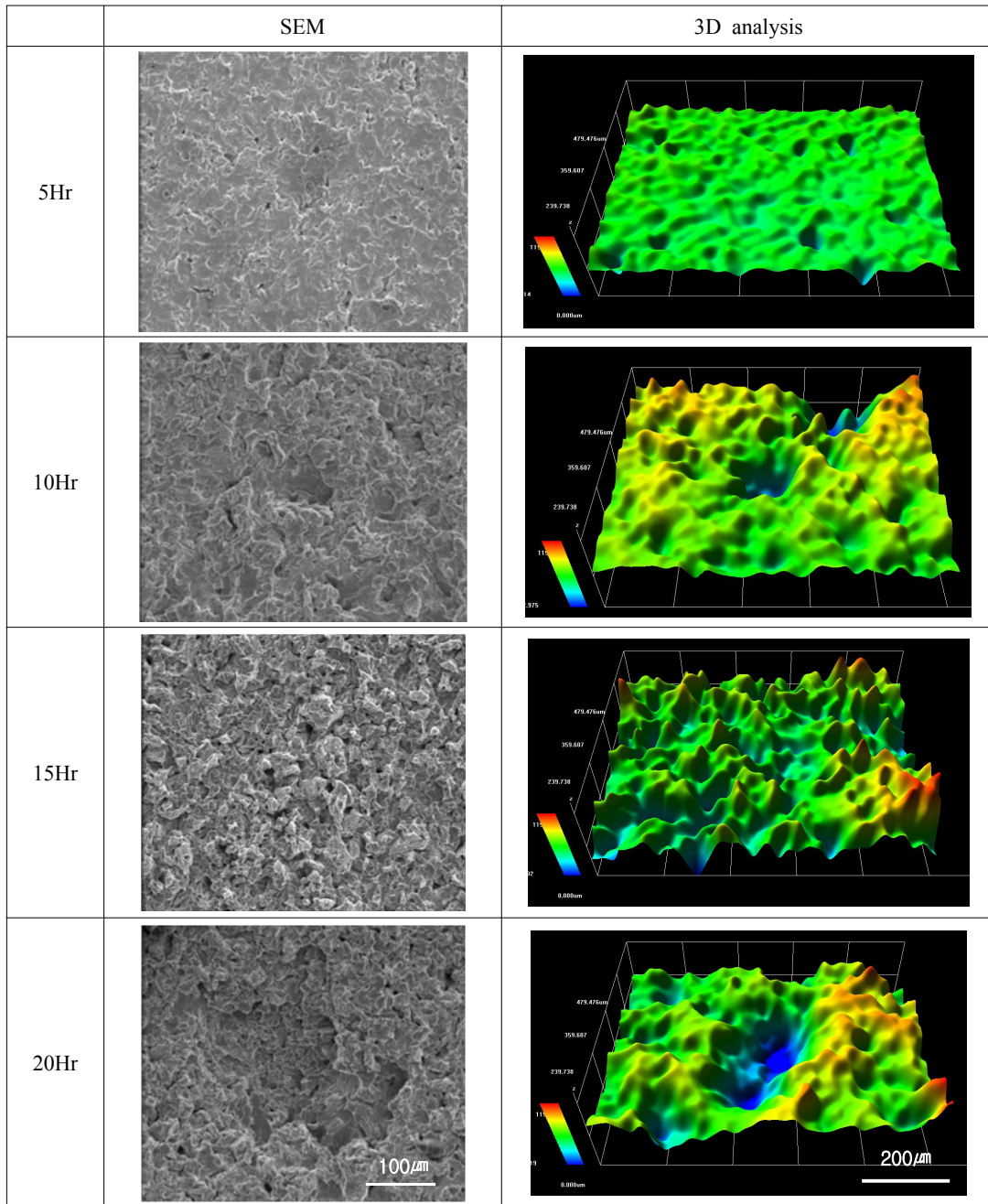


Fig. 7. Comparison of surface morphologies after cavitation test.

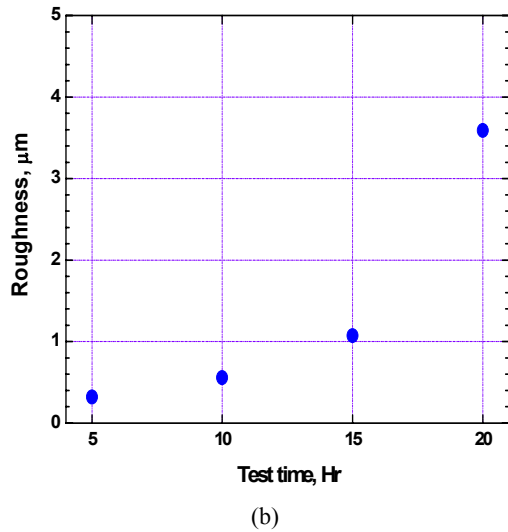
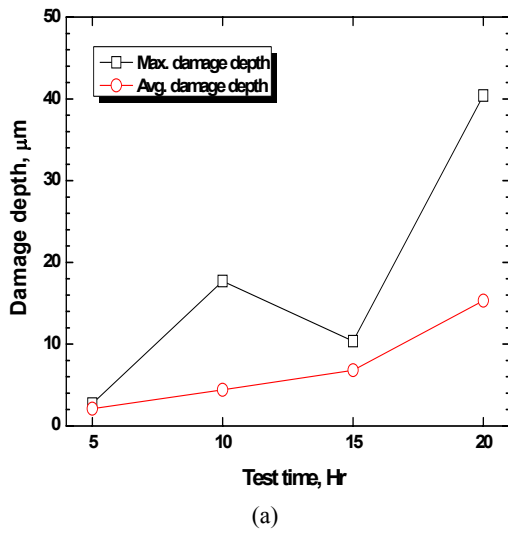


Fig. 8. Comparison of damage depth(a) and roughness(b) after cavitation test.

것으로 판단된다.

전체적으로 캐비테이션 침식은 중앙에서 아주 미세하게 발생된 후 손상 면적이 점점 넓어졌으며, 일정 시간 후에는 크고 깊은 캐비테이션 침식이 발생하였음을 알 수 있다. 캐비테이션에 의한 표면손상의 특징은 기포 붕괴시 발생하는 충격력이 매우 짧은 시간에 미소 면적에 반복 작용한다. 이 충격력에 의해 생기는 표면 파괴는 보통의 충격 파괴나 피로 파괴와는 달리 국소적으로 발생하였다. 또한 충돌 에너지가 순차적으로 반복 작용하여 재료 표면에 캐비테이션 침식은 초기에 소성변형이 축적되고 그 후 표면층 파괴에 의해 보다 진전을 보인 것으로 여겨진다.

Fig. 8은 캐비테이션 실험 후 손상깊이(a)와 조도분석 프로그램을 이용해 거칠기 Ra(b)를 상호 비교한 것이다. 표면

조도를 나타내는 Ra는 높이 변화의 중심선에서 표면의 단면 곡선까지 길이의 절대값에 대한 평균으로 동일한 cutoff 값을 적용하여 측정된 평균 조도를 상호 비교하였다. 손상깊이 관찰 결과, 5시간에는 두드러지는 손상은 나타나지 않았으나, 10시간에는 전반적인 침식과 시편 중앙부의 손상이 동시에 발생하면서 최대 및 평균 손상깊이가 증가하였다. 이후 15시간에는 중앙 피팅의 성장보다 주변부 손상이 진전되면서 최대 손상 깊이는 감소하였으나, 평균손상깊이는 증가하였다. 또한 20시간에는 전체적으로 침식이 동시에 발생하나, 주변부보다 중앙부에서의 침식속도가 더 빨라 최대 손상 깊이는 계속 증가한 것으로 보인다. 즉, 캐비테이션 기포 붕괴에 따라 실험초기에 시편표면이 손상되어 굴곡이 심해지고 손상된 부분에 기포가 유입되어 연속적으로 기포가 붕괴되면서 침식량이 증가하는 것으로 판단된다. 거칠기 측정 결과 역시 실험 시간이 증가할수록 값이 증가하는 경향을 나타냈는데, 이는 평균 손상깊이의 증가와 비례하는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

선박용 타 재료에 대한 해수 환경에서의 전기화학적 캐비테이션 실험에 의한 특성 평가에 관한 연구로 다음과 같은 결론을 얻었다.

개로전위에서 양극분극에 의해서 귀한 방향으로 전위가 이행함에 따라 용해 반응의 활성화에 의한 영향으로 꾸준한 양극분극 전류밀도의 상승이 관찰되었다. 음극분극 곡선에서 농도분극과 수소발생반응에 따른 활성화분극의 변곡점 전위는  $-0.81$  V를 나타냈으며, 이후 비한 방향으로 이행할 수록 즉 많은 양의 수소가스 발생을 위해 공급전류밀도가 계속 상승하는 경향을 나타냈다. 정전위 실험 결과, 개로전위  $-0.7$  V를 기준으로 귀방향으로 이행함에 따라 높은 전류밀도를 나타냈으며, 그 값이 클수록 시편 손상은 증가하였다. 음분극 시킨 상태에서 정전위 실험을 실시한 경우는 용존산소환원반응에 의한 농도분극 구간에서는 낮은 전류밀도를 나타낸 후 활성화분극에서는 높은 전류밀도는 물론 심한 부식손상이 확인되었다. 결과적으로 음분극 실험 후 농도분극 구간과 정전위 실험 후 표면관찰 등을 통하여 방식전위 영역은  $-0.8$  V $\sim$  $-0.6$  V로 나타났다. 또한 캐비테이션 실험 결과, 침식은 중앙에서 미세하게 발생한 후 시간 경과에 따라 손상면이 넓어지고, 손상깊이 또한 깊어지는 것을 알 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

1. J. H. Hwang and U. J. Lim, *J. Corros. Sci. Soc. of Kor.*, **25**, 317 (1996).

2. J. M. Han, D. S. Kong, I. M. Song, and C. S. Lee, Proc. Cavitation 2001, Session B9, 1-8 (2001).
3. H. I. Lee, M. S. Han, K. K. Baek, C. H. Lee, C. S. Shin, and M. K. Chung, *Corros. Sci. Tech.*, **7**, 274 (2008).
4. X. Jiang, Y. G. Zheng, and W. Ke, *Corros. Sci.*, **47**, 2636 (2005).
5. S. Shrestha, T. Hodgkiess, and A. Neville, *Wear*, **259**, 208 (2005).
6. Shuji Hattori, Yuki Goto, and Takaki Fukuyama, *Wear*, **260**, 1212 (2006).
7. Robert J. K. Wood, *Wear*, **261**, 1012 (2006).
8. David Niebuhr, *Wear*, **263**, 295 (2007).
9. S. J. Kim, D. H. Kim, M. H. Lee, K. J. Kim, and K. M. M, *J. Ocean Eng. and Tech.*, **14**, 106 (2000).
10. Y. T. Kho, *J. Corros. Sci. Soc. of Kor.*, **27**, 563 (1998).
11. E. Deltombe and M. Pourbaix, *Rapport Technique*, **42**, (1956).
12. H. G. Feller and Y. Kharrazi, *Wear*, **93**, 249 (1984).