

해양 환경 하에서 16.7Cr-10Ni-2Mo 스테인리스강의 표면 손상에 미치는 캐비테이션의 영향

정 상 옥 · 한 민 수 · 김 성 종[†]

목포해양대학교 기관시스템공학부

(2015년 6월 16일 접수, 2015년 10월 14일 수정, 2015년 10월 16일 채택)

Effect of Cavitation on Surface Damage of 16.7Cr-10Ni-2Mo Stainless Steel in Marine Environment

Sang-Ok Chong, Min-Su Han, and Seong-Jong Kim[†]

Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, Haeyangdaehak-ro 91, Mokpo-si, Jeonnam, Korea, 58628

(Received June 16, 2015; Revised October 14, 2015; Accepted October 16, 2015)

Stainless steel is generally known to have characteristics of excellent corrosion resistance and durability, but in a marine environment it can suffer from localized corrosion due to the breakdown of passivity film due to chloride ion in seawater. Furthermore, the damage behaviors are sped up under a cavitation environment because of complex damage from electrochemical corrosion and cavitation-erosion. In this study the characteristics of electrochemical corrosion and cavitation erosion behavior were evaluated on 16.7Cr-10Ni-2Mo stainless steel under a cavitation environment in natural seawater. The electrochemical experiments have been conducted at both static conditions and dynamic conditions inducing cavitation with different current density parameters. The surface morphology and damage behaviors were compared after the experiment. After the cavitation test with time variables morphological examinations on damaged specimens were analyzed by using a scanning electron microscope and a 3D microscope. the galvanostatic experiment gave a cleaner surface morphology presented with less damage depth at high current density regions. It is due to the effect of water cavitation peening under the cavitation condition. In the cavitation experiment, with amplitude of 30 μm and seawater temperature of 25 $^{\circ}\text{C}$, weight loss and cavitation-erosion damage depth were dramatically increased after 5 hours inducing cavitation

Keywords : stainless steel, cavitation, corrosion, galvanostatic experiment, seawater

1. 서 론

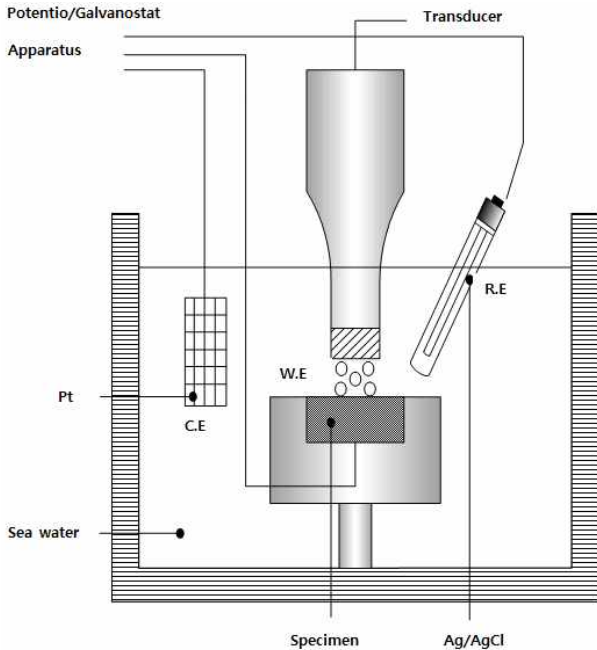
해양 산업 분야에서 선박용 기계, 장비, 배관 등에 강도가 높고 내식성 및 내구성이 우수한 오스테나이트계 스테인리스강이 많이 사용되고 있으며, 이에 따라 오스테나이트계 스테인리스강 개발이 지속적으로 연구되고 있다¹⁾. 그러나 스테인리스강은 해양 환경 하에서 염소 이온에 의한 산화피막의 파괴로 극심한 공식 부식, 틈부식과 같은 국부부식이 발생하는 단점을 가지고 있다²⁾. 특히, 해양환경 하에서 캐비테이션 환경에 노출될 경우 캐비테이션-침식 손상이 발

생하게 된다. 캐비테이션이란 해양 환경 하에서 유체가 고속으로 회전할 때 입·출구의 속도 차에 의해 압력이 액체의 증기압 이하로 감소하게 되면 국부적 비등현상이 발생하여 기포가 형성되는 현상이다. 기포가 붕괴되면서 물리적 충격압이 발생하게 되고, 이로 인해 해수 펌프의 임펠러, 프로펠러 또는 밸브 등에서 캐비테이션에 의한 침식 손상이 발생하게 된다. 캐비티의 충격압으로 기형성된 부동태 피막이 지속적으로 제거되고 유체의 강제순환으로 인한 산소 공급과 염소 이온에 의한 전기화학적 부식과 캐비테이션 침식이 증첩되어³⁻⁶⁾ 구성 재료의 손상이 매우 심각하게 나타난다^{7,8)}. 그러므로 스테인리스강의 해수 환경 하에서 캐비테이션 침식에 대한 연구뿐만 아니라 전기화학적 부식을 고려한

[†] Corresponding author: ksj@mmu.ac.kr

Table 1. Chemical compositions of 16.7Cr-10Ni-2Mo stainless steel

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Fe
(wt. %)	0.019	0.58	1.07	0.028	0.004	16.76	10.02	0.3	2.03	Bal.

**Fig. 1.** Schematic diagram of electrochemical experiment with cavitation condition for 16.7Cr-10Ni-2Mo stainless steel in seawater.

손상 기구를 규명하는 것이 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 캐비테이션 환경 하에서 전기화학 실험까지 동시에 실시하는 하이브리드 실험을 통해 시편 손상에 미치는 상관관계를 파악하여 명확한 손상 거동을 규명하고자 한다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 16.7Cr-10Ni-2Mo 스테인리스강에 대해 천연해수용액에서 캐비테이션의 영향이 없는 정적인 조건과 캐비테이션 환경에 노출된 캐비테이션 조건에서의 정전류 실험 및 다양한 시간 변수에서 캐비테이션 실험을 실시하여 상호 비교·분석 하였다. Table 1은 본 연구에 사용된 스테인리스강의 화학적 조성을 나타낸 것이다. 또한 마이크로 비커스 경도기를 이용하여 인가하중 9.807 N, 유지시간 10초로 하여 구한 평균 경도 값은 159 Hv를 나타냈다. 하이브리드 실험은 Fig. 1과 같이 전기화학 셀을 구성하여 실시하였다. 정전류 실험은 $1 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2 - 1 \times 10^{-1} \text{ A/cm}^2$ 범위에서 3,600초 동안 캐비테이션 유무에 따라 진행하였다. 캐비테이션 실험은 0.5시간에서 10시간 동안 시편 표면

에 물리적 충격에 의한 침식 손상을 가하여 시간 경과에 따른 시편 손상 경향을 분석하였다. 캐비테이션 실험은 ASTM G32-92 규정에 의거하여 60 Hz, 220 V의 전력을 이용하여 20 kHz의 정격 출력을 발생시켜 진동자에 공급하는 대향형 진동법을 실시하였다⁹⁾. 본 실험에서는 정진폭 자동제어방식을 사용하여 진폭을 30 μm 로 일정하게 유지하였다. 또한 자동온도제어장비를 사용하여 해수 온도 25 $^{\circ}\text{C}$ 로 설정하였으며, 시편 표면과 혼 팁과의 거리는 1 mm를 유지하여 실험을 실시하였다. 모든 실험 후 초음파 세척기를 이용하여 이물질을 제거하고 드라이로 건조하였으며, 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)과 3D 현미경을 사용하여 시편 표면 형상과 손상 깊이를 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 16.7Cr-10Ni-2Mo 스테인리스강의 캐비테이션 조건에서 정전류 실험 후 SEM을 통해 시편 형상을 관찰한 것이다. 정적인 조건에서 $1 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2 - 5 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ 범위에서는 작은 손상이 생성되어 성장하였다. 또한 $1 \times 10^{-2} \text{ A/cm}^2$ 에서는 시편 연마 시 발생한 스크래치 부분에서 활성화 반응의 영향으로 손상이 관찰되었으며, 이 후 $5 \times 10^{-2} \text{ A/cm}^2 - 1 \times 10^{-1} \text{ A/cm}^2$ 의 범위에서는 전류밀도가 높아지면서 공식 손상부가 넓게 그리고 깊이 방향으로 진전되는 형상을 나타냈다. 반면, 캐비테이션 조건에서는 전체적으로 캐비티의 물리적 충격압으로 재료 표면의 소성 변형이 관찰되었으며, 전류밀도가 높아짐에 따라 피트가 깊이 방향으로 성장하면서 깊고, 큰 피트가 형성되었다. 결과적으로 정적인 조건에서는 전류밀도가 높아지면서 손상이 증대된 반면, 캐비테이션 조건의 경우, 초기 낮은 전류밀도에서는 캐비티에 의한 가공경화와 소성변형이 발생하였으며 전류밀도가 높아지면서 캐비테이션 침식과 전기화학적 부식 손상이 중첩되는 형상이 관찰되었다.

Fig. 3은 16.7Cr-10Ni-2Mo 스테인리스강에 대해 캐비테이션 조건에서 정전류 실험 후 3D 현미경으로 분석한 것이다. Fig. 3(a)는 시편 손상을 촬영한 것이며, 정적인 조건의 경우, $1 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2 - 5 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ 에서는 손상이 거의 나타나지 않았으며, $1 \times 10^{-2} \text{ A/cm}^2$ 에서는 작은 공식이 관찰되었다. 그리고 $5 \times 10^{-2} \text{ A/cm}^2$ 에서는 손상이 급격하게 진전되었으며 이 후 전류밀도가 높아질수록

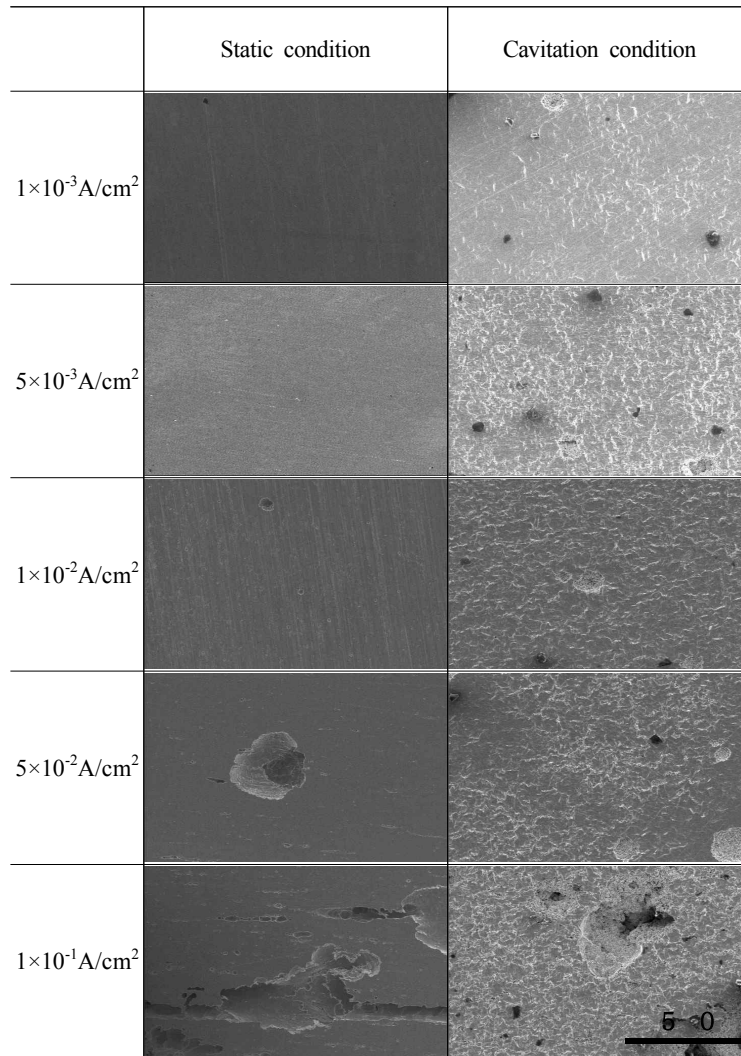
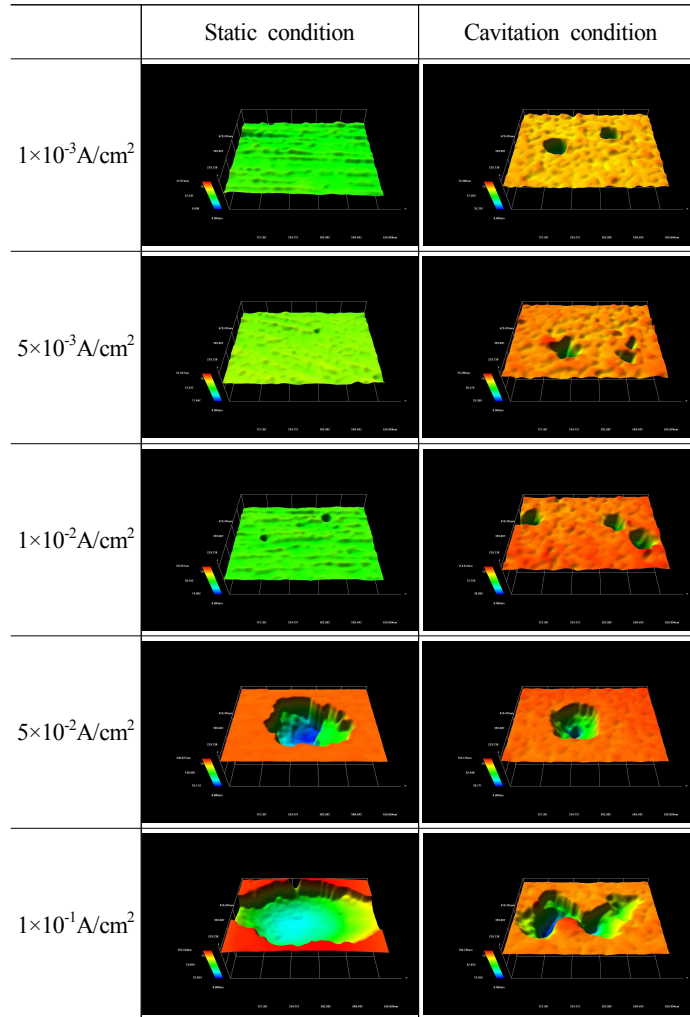


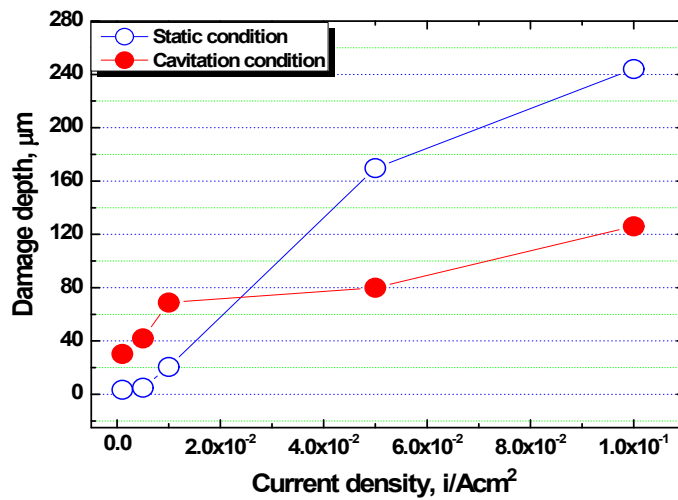
Fig. 2. SEM photomicrographs after galvanostatic experiment with cavitation condition for 16.7Cr-10Ni-2Mo stainless steel in seawater.

공식의 크기와 면적이 증대되었다. 캐비테이션 조건에서는 $1 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ 에서 생성된 공식이 전류밀도가 증가할수록 기공의 수와 크기가 증대되었다. 특히 $5 \times 10^{-2} \text{ A/cm}^2$ 에서는 공식의 크기가 현저하게 진전되었으며, 이 후 전류밀도가 증가하면서 크고 넓은 공식이 관찰되었다. 반면, 높은 전류밀도의 캐비테이션 조건에서는 금속 표면이 과도하게 활성화 분극되어 수소이온이 급격히 환원되면서 수소 기체가 발생한다. 이 때 발생한 수소기체는 캐비티와 충돌하여 충격압을 상쇄 또는 완화시킨다. 또한 캐비티의 충격압으로 노출된 소지금속 표면에 균일한 압축잔류응력을 형성시켜 캐비테이션 영향이 없는 정적인 조건에 비해 비교적 적은 손상이 관찰되었다. 따라서 해수 내에 포함된 염소이온에 의해 국부 부식이 발생하지만 캐비테이션 환경 하에서는 압축잔류응력을 형성시켜 캐비테이션 저항성을 향상시킨

다. 또한 발생된 수소와 캐비티 충돌에 기인한 완충효과(cushioning effect)로 시편 표면에 직접적인 손상을 감소시켜 캐비테이션 환경에서 비교적 적은 손상이 나타난 것으로 판단된다¹⁰⁻¹³. 워터캐비테이션 피닝은 재료 표면에 마이크로 제트 생성으로 압축잔류응력을 형성시켜 경도를 향상시키고 캐비테이션-침식 손상을 감소시키는 표면가공 기술이다¹⁴. 이와 유사한 방법으로 쇼트피닝과 레이저 피닝 방법이 있으며, 특히 Peyre, Masaki 등은 316L 스테인리스강에 대해 각각 쇼트피닝과 레이저 피닝을 적용하여 재료의 피로강도를 향상시키는 연구를 하였다^{15,16}. 그러나 이러한 표면가공 기술은 열에 의해 재료 표면 조직에 영향을 주는 단점이 있으나, 이와 달리 워터 캐비테이션 피닝 기술은 유체 중에 캐비티 붕괴 시 발생하는 마이크로 제트를 재료표면에 가하여 압축잔류응력을 형성하는 방법으로 열



(a) 3D photomicrographs



(b) Damage depth

Fig. 3. 3D photomicrographs and damage depth of 16.7Cr-10Ni-2Mo stainless steel after galvanostatic experiment with cavitation condition in seawater.

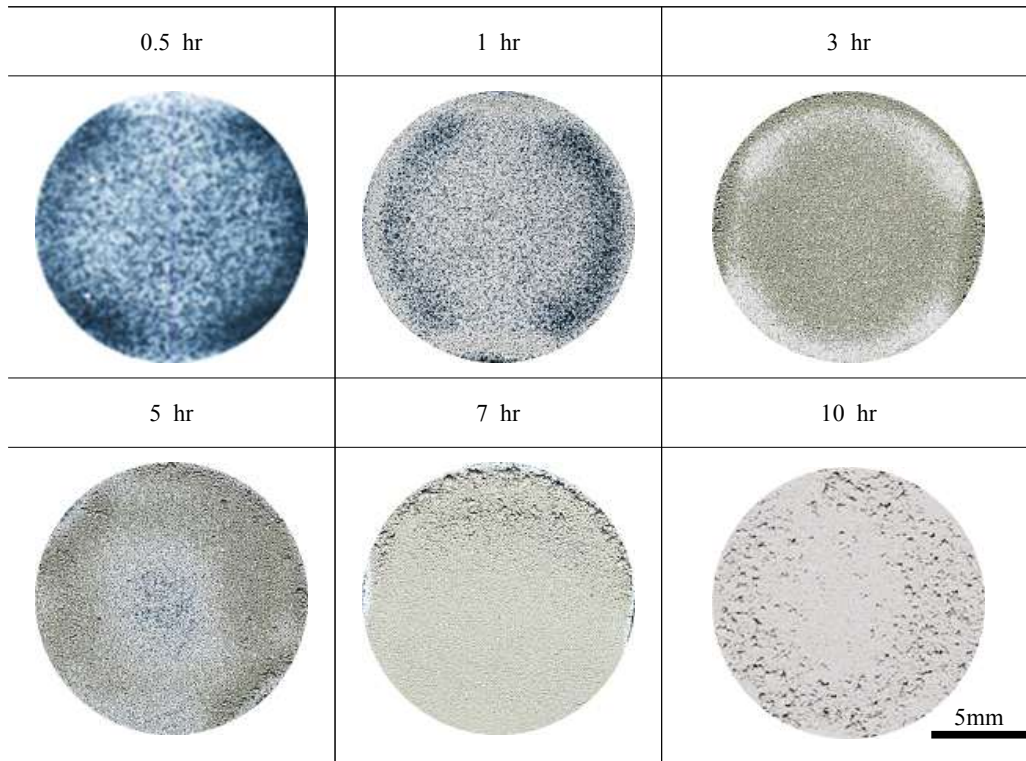


Fig. 4. Optical microphotographs of 16.7Cr-10Ni-2Mo stainless steel after cavitation test in seawater.

영향을 받지 않는 장점이 있다.

Fig. 3(b)는 캐비테이션 유무에 따른 정전류 실험 후 손상 깊이를 비교한 그래프이다. 정적인 조건에서 5×10^{-3} A/cm² 까지의 낮은 전류밀도 구간에서 4.94 μm 로 비교적 적은 손상이 나타났으며, 1×10^{-2} A/cm²에서는 20.53 μm 로 손상 깊이가 완만하게 증가하였다. 또한 5×10^{-2} A/cm²에서는 169.7 μm 의 큰 손상 깊이를 나타냈으며, 이 후 1×10^{-1} A/cm²에서는 활성화 반응이 촉진되면서 244 μm 로 손상 깊이가 꾸준히 증가하였다. 반면 캐비테이션 조건에서는 5×10^{-3} A/cm²까지 41.92 μm 의 손상 깊이가 측정되었으며, 이 후 전류밀도 증가에 따라 완만하게 손상 깊이가 증가하는 경향을 나타냈다.

또한 가장 높은 전류밀도 1×10^{-1} A/cm²에서는 126 μm 의 손상 깊이를 나타냈다. 결과적으로 3D 분석 결과, 1×10^{-2} A/cm²까지의 낮은 전류밀도 구간에서는 캐비테이션 조건에서 캐비테이션에 의한 물리적 충격압이 부식에 의한 영향보다 더 큰 영향을 받아 정적인 조건에 비해 큰 손상 깊이를 나타냈다. 반면, 5×10^{-2} A/cm² - 1×10^{-1} A/cm²의 높은 전류밀도 구간에서는 캐비테이션 조건에서 정적인 조건에 비해 손상 깊이가 현저히 적게 관찰되었다. 이는 정적인 상태에서는 활성화해반응이 촉진되어 손상이 급격하게 진행되었지만 캐비테이션 조건에서는 워터 캐비테이션

피닝의 효과로 압축잔류응력을 형성시켜 정적인 조건보다 비교적 적은 손상이 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 4는 16.7Cr-10Ni-2Mo 스테인리스강에 대해 캐비테이션 실험 후 시편 표면을 관찰한 것이다. 0.5시간에서 3시간에는 비교적 양호한 시편 형상이 관찰되었으며, 5시간에는 가장자리 주위로 침식이 관찰되었다. 7시간에는 침식이 급격하게 진전되었으며 10시간에는 손상이 시편 전체로 증대되었다. 결과적으로 0.5시간에서 3시간까지는 캐비테이션에 의한 압축잔류응력의 형성으로 비교적 적은 시편 손상이 관찰되었다. 따라서 캐비테이션 초기에 시편 손상이 관찰되지 않는 잠복기 구간은 5시간 이전으로 판단된다¹⁷⁾. 이전 연구에서 304 스테인리스강에 대해 캐비테이션 실험 결과, 잠복기 구간이 7시간 이내로 나타났다¹⁸⁾. 이는 Mochizuki 등이 경도가 높을수록 캐비테이션-침식에 대한 저항성이 높다는 것을 이전 연구에서 규명하였으며, 따라서 304 스테인리스강의 경도(177 Hv)가 16.7Cr-10Ni-2Mo 스테인리스강(159 Hv)에 비해 상대적으로 높기 때문에 나온 결과와 상응한다¹⁹⁾.

Fig. 5는 16.7Cr-10Ni-2Mo 스테인리스강에 대해 캐비테이션 실험 후 SEM으로 촬영한 것이다. 0.5시간에서 1시간에는 캐비테이션에 의해 다소 거친 손상이 관찰되었으며, 캐비테이션 시간이 경과하면서 입계 탈리 현상이 나타났다.

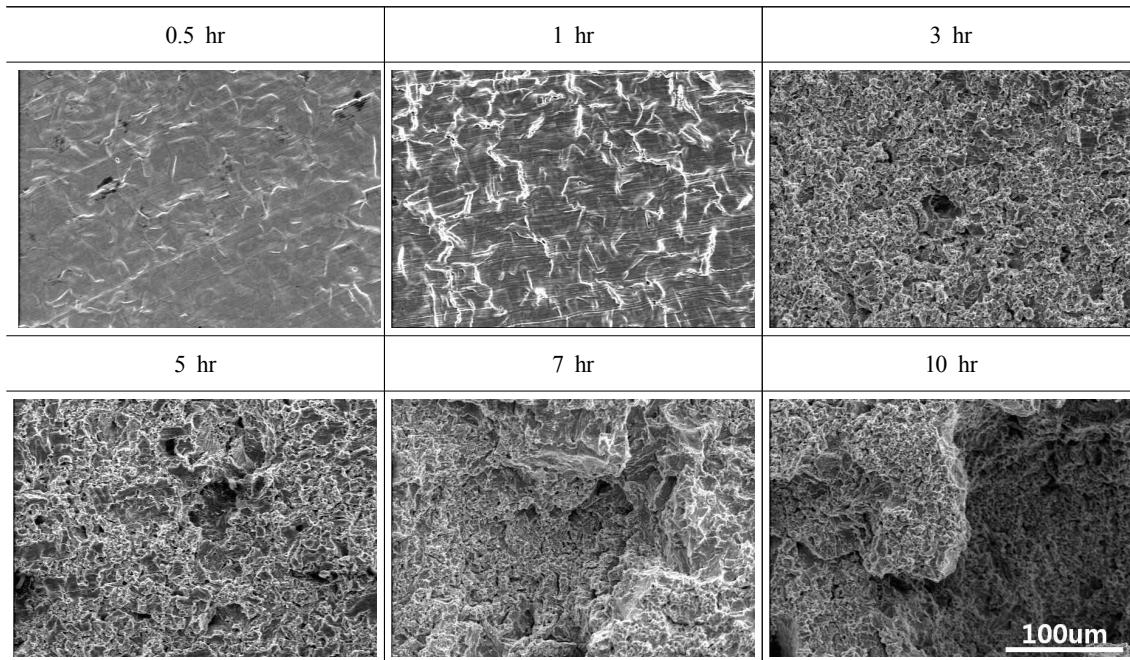


Fig. 5. SEM photomicrographs of 16.7Cr-10Ni-2Mo stainless steel after cavitation test in seawater.

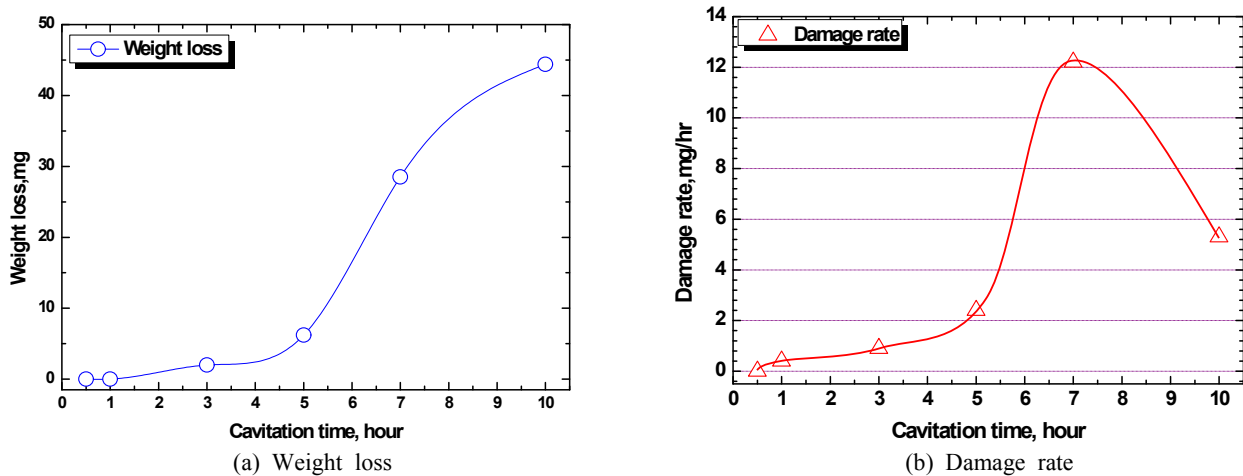
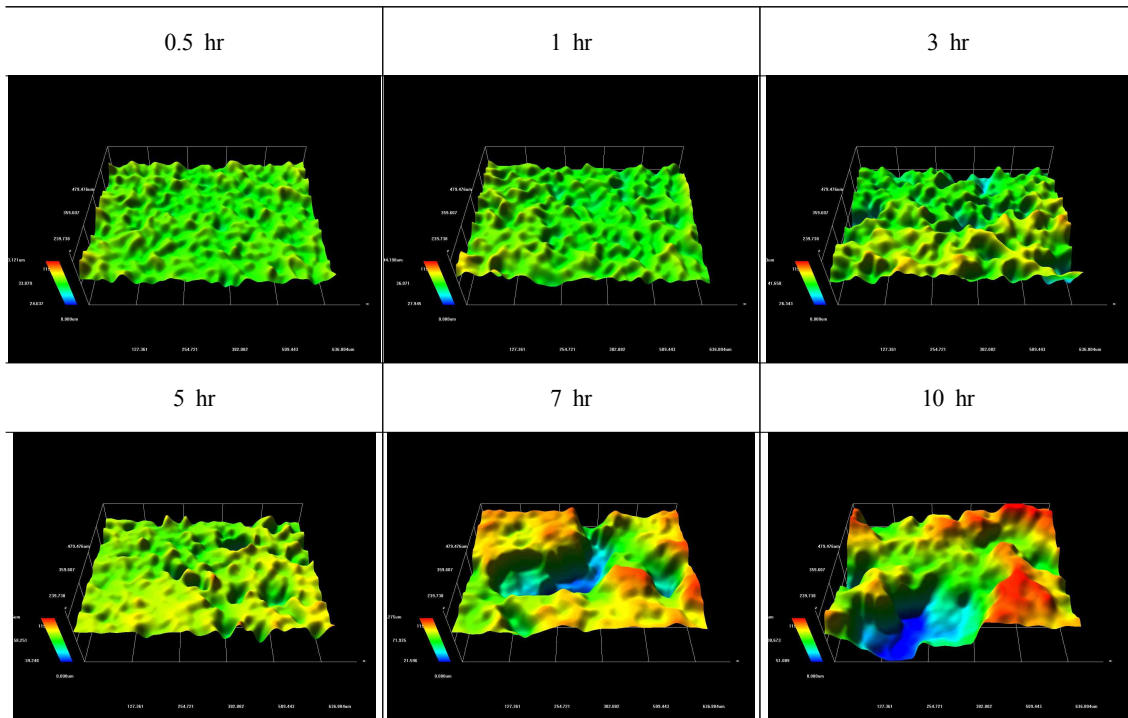


Fig. 6. Weight loss-vs.-time plot and damage rate of 16.7Cr-10Ni-2Mo stainless steel after cavitation test in seawater.

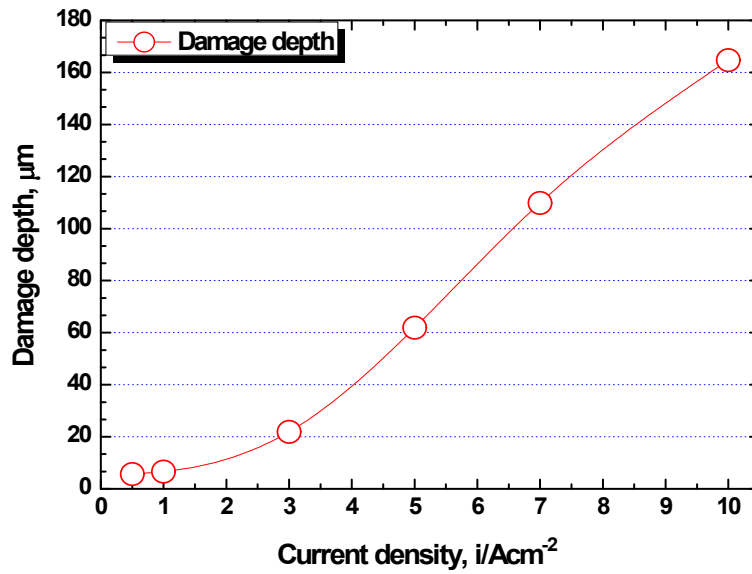
또한 3시간에서 5시간에는 시편 전체에 침식이 발생하여 손상이 진전되었으며, 특히 7시간에는 금속 표면에 다수의 침식이 발생하여 결정이 세분화된 뒤 탈리되어 깊이 방향으로 증대되었다. 그리고 10시간에는 캐비티의 충격압으로 공식들이 합체되어 손상이 중첩되는 크레이터 형태의 손상이 관찰되었다²⁰⁾.

Fig. 6은 16.7Cr-10Ni-2Mo 스테인리스강의 해수 환경 하에서 캐비테이션 실험 후 무게감소량과 손상율 (Δ mg/ Δ hr)을 나타낸 것이다. Fig. 6(a)의 무게감소량 그래프에서 3시간까지 2.0 mg으로 비교적 적은 손상이 관찰되

었다. 이는 워터 캐비테이션 피닝 효과로 재료 표면의 압축 잔류응력이 형성되어 소성변형에 의한 가공 경화현상으로 무게 감소량이 크게 증가하지 않은 것으로 판단된다. 5시간 까지 무게감소량이 6.8 mg으로 소폭 증가하였으며, 특히 7시간에는 28.9 mg으로 현저히 상승하는 경향을 나타냈다. 실험 종료 10시간에는 캐비티의 충격량이 누적되어 침식이 증대하여 44.8 mg을 나타냈다. Fig. 6(b)는 캐비테이션 손상율을 나타낸 것이며, 5시간까지 2.4 mg/hr의 손상율이 완만하게 증가하였으며, 이 후 7시간에는 12.2 mg/hr로 급격한 증가율을 나타냈다. 이는 잠복기 구간을 지나 무게 감



(a) 3D photomicrograph



(b) Damage depth

Fig. 7. 3D photomicrograph and damage depth of 16.7Cr-10Ni-2Mo stainless steel after cavitation test in seawater.

소홀과 손상율이 급격히 증가하는 증가기 구간으로 판단된다. 전체적으로 캐비티에 의한 소성변형으로 무게 감소량과 손상율이 큰 변화가 나타나지 않았던 5시간 이내가 잠복기, 그리고 이 후 급격한 증가율을 보인 7시간이 증가기로 판단된다. Fig. 7은 16.7Cr-10Ni-2Mo 스테인리스강의 해수 환경 하에서 캐비테이션 실험 후 3D 현미경으로 시편 손상

을 분석한 것이다. Fig. 7(a)의 표면 형상 결과 0.5시간에서 3시간에는 캐비티의 물리적 침식에 의한 영향으로 거친 표면이 나타났으며, 실험 시간이 경과함에 따라 거칠기가 증가하였다. 또한 5시간에는 기공과 같은 손상이 생성되었으며, 7시간에는 손상의 크기와 면적이 급격히 증대되었으며 10시간에는 손상부 면적이 증가하고 깊이 방향으로 성장하

었다. Fig. 7(b)는 손상 깊이를 나타낸 것이며, 1시간까지 6.61 μm 로 손상 깊이가 소폭 증가하였으며 이후 5시간 경과 시에 61.95 μm 를 나타냈으며 7시간과 10시간에는 각각 109.9 μm 와 164.71 μm 를 나타냈다. 따라서 실험 초기에는 워터 캐비테이션 피닝의 효과로 재료 표면에 압축잔류응력이 형성되어 적은 손상이 관찰되었으나 5시간 이후부터 실험 초기 입계 주위에 생성된 손상부에 응력이 집중되어 침식이 현저하게 증대되는 경향을 나타냈다.

4. 결론

해양 환경 하에서 16.7Cr-10Ni-2Mo 스테인리스강에 대해 캐비테이션 조건에서 실시한 정전류 실험과 30 μm 의 진폭에서 시간 변수에 따른 캐비테이션 실험 후 다음과 같은 결과를 얻었다.

정전류 실험 결과, 캐비테이션 조건에서 $1 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ - $1 \times 10^{-2} \text{ A/cm}^2$ 의 전류밀도 구간에서는 캐비티의 충격압에 의한 영향으로 정적인 조건에 비해 큰 손상 깊이가 관찰되었다. 반면, $5 \times 10^{-2} \text{ A/cm}^2$ - $1 \times 10^{-1} \text{ A/cm}^2$ 의 높은 전류밀도 구간에서는 캐비테이션 조건에서 캐비티 붕괴 시 마이크로 체크가 발생되어 압축 잔류응력을 형성시키는 워터 캐비테이션 피닝 효과와 수소과전압 시 발생하는 수소기체가 캐비티 충격압을 상쇄 또는 반사시켜 캐비테이션 영향이 없는 정적인 조건에 비해 현저히 적은 손상 깊이가 관찰되었다. 또한 캐비테이션 실험 결과, 실험 5시간까지 물리적 충격압의 영향으로 압축잔류응력을 형성시켜 표면이 가공경화 되어 적은 손상이 관찰되었으며, 이후 캐비티 충격압의 지속적인 누적으로 현저한 시편 손상과 무게 감소량이 관찰되었다.

References

1. T. Oshima, Y. Habara, and K. Kuroda, *ISIJ Inter.*, **47**, 359 (2007).
2. G. Okamoto, *Corros. Sci.*, **13**, 471 (1973).
3. T. Momma and A. Lichtarowicz, *Wear*, **186**, 425 (1995).
4. A. J. Sedriks, *Corrosion of stainless steels*, 2nd ed. p. 115, John Wiley & Sons, New York (1996).
5. D. A. Jones, *Principles and prevention of corrosion*, 2nd ed. p. 415, Prentice Hall, New Jersey (1996).
6. I. R. Jones, and D. H. Edward, *J. Fluid Mech.*, **7**, 596 (1960).
7. C. MaCaul, *Proceedings of the Corrosion 96 Research Topical Symposia*, p. 24, NACE, Houston (1996).
8. M. H. Im, *Corros. Sci. Tech.*, **10**, 218 (2011).
9. ASTM Standard G32-92, Standard Method of Vibratory Cavitation Erosion Test, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia (1992).
10. M. Qin, D. Y. Ju, and R. Oba, *Surf. Coat. Technol.*, **201**, 1409 (2006).
11. J. C. Park and S. J. Kim, *J. Kor. Inst. Surf. Eng.*, **45**, 25 (2011).
12. S. J. Kim, M. S. Han, and M. S. Kim, *Corros. Sci. Tech.*, **11**, 84 (2012).
13. S. J. Kim and K. Y. Hyun, *Corros. Sci. Tech.*, **11**, 151 (2012).
14. K. Sato, H. Soyama, Y. Yamuchi, T. Ikehagi, R. Oba, and R. Oshima, *Proceedings of 11th International Conference on Jet Cutting Technology*, p. 436, St. Andrews, Scotland (1992).
15. P. Peyre, X. Scherpereel, L. Berthe, C. Carboni, R. Fabbro, G. Beranger, et al. *Mater. Sci. Eng.*, **A208**, 294 (2000).
16. K. Masaki, Y. Ochi, and A. Ishii, *Mater. Sci. Res. Int.*, **4**, 200 (1998).
17. S. J. Kim, K. Y. Hyun, and S. K. Jang, *Curr. Appl. Phys.*, **12**, S24 (2012).
18. S. K. Jang, S. O. Chong, M. S. Han, and S. J. Kim, *J. Kor. Inst. Surf. Eng.*, **45**, 278 (2012).
19. H. Mochizuki, M. Yokota, and S. Hattori, *Wear*, **262**, 522 (2007).
20. G. Bregliozzi, A. Di Schino, S. I. U. Ahmed, J. M. Kenny, and H. Haefke, *Wear*, **258**, 503 (2005).