

5083-O 알루미늄 합금의 진폭에 따른 캐비테이션 침식 특성 평가

이 승 준[†] · 김 성 종

목포해양대학교 기관시스템공학부
(2012년 9월 27일 접수, 2012년 10월 29일 수정, 2012년 10월 29일 채택)

Evaluation of Cavitation Characteristics of 5083-O Al Alloy with Amplitude

Seung Jun Lee[†] and Seong Jong Kim

Mokpo Maritime University, Haeyangdaehak-ro 91, Mokpo-Si, 530-729, Korea
(Received September 27, 2012; Revised October 29, 2012; Accepted October 29, 2012)

With recent advances in engineering and technology, a damage on industrial machineries performing high-speed and high-power requirements has become a problem. There is an increasing possibility of cavitation damage, especially in pumps, propellers and high-speed vessels in a flowing liquid accordingly. There are several factors affecting cavitation damage on materials, including viscosity, pressure, temperature, amplitude applied. In this study, effects of cavity pressure in seawater on the damage for 5083-O aluminium alloy were evaluated by modulating amplitude. Trend of the damage with respect to time and amplitude was analyzed comparatively, and surface degradation of specimens was investigated by using Scanning Electron Microscope(SEM) and 3D microscope. The result reveals that the amount of the damage increased consistently with the increase in time and amplitude while the plastic deformation zone where no appreciable damage occurred was in less than 30 minutes.

Keywords : cavitation, Al alloy, amplitude, 3D analysis, seawater environment

1. 서 론

급속한 산업발전에 기인하여 가혹한 부식환경과 캐비테이션 침식에 의한 손상이 문제시 되고 있다. 이러한 손상문제를 해결하기 위하여 설계변경, 부식억제제(corrosion inhibitor) 첨가, 재질 개선, 음극방식법 적용 등 다양한 연구가 진행 중이다.¹⁾⁻⁴⁾ 공동(cavity) 붕괴에 따른 충격압을 이용한 캐비테이션 침식 실험⁵⁾이나 세정은 보편화 되어 있다. 또한 공동의 국부적인 붕괴 충격압을 이용한 워터캐비테이션 피닝기술과 같이 재료의 압축잔류응력이나 표면강도 개선에 응용하려는 시도가 증가하고 있다.⁶⁾⁻¹⁵⁾ 이와 같이 캐비테이션 현상을 재료의 성능 개선에 이용 가능한 순기능이 있는 반면, 붕괴압이 과도한 경우 재료를 손상시키는 문제점을 야기하기도 한다.

캐비테이션 현상은 1894년 영국의 구축함 Daring호에서 "공동의 형성으로 인한 효율의 저하현상"으로 발견되어 최초로 캐비테이션이라 명명된 이후 현재에 이르기까지 유체 기계의 성능을 저해하는 큰 요인이 되고 있다.¹⁶⁾

관련 연구에서, '황' 등은 유속 및 환경용액에 따른 캐비테

이션 침식-부식 손상에 관하여 연구하였다. 그 결과 유속이 빠를수록 소성변형 파문의 길이가 짧고 폭이 좁아지면서 캐비테이션 침식 잠복기가 지연되는 현상을 규명하였다.¹⁷⁾ 또한 '원' 등은 캐비테이션 장비를 이용하여 5083 알루미늄의 침식 부식거동을 관찰하였다. 진폭이 증가함에 따라 시편 가장자리에 방사선 형태의 손상부가 외곽쪽으로 이동하며, 그 폭은 감소하지만 강도가 더욱 증가하는 거동을 규명하였다.¹⁸⁾ 또한 '한' 등은 선박용 타에 열용사 코팅기술 적용 후 캐비테이션 침식-부식 거동을 관찰하여 기포의 붕괴가 재료의 손상을 야기한다고 보고하였다.¹⁹⁾ 이와 같이 공동이 손상을 일으키는 과정이나 캐비테이션 침식 손상에 미치는 외부 환경과 손상거동에 관한 연구 결과는 있으나, 이를 정량적으로 분석한 결과는 없다. 따라서 본 연구에서는 해수에서 5083-O 합금에 대한 캐비테이션 진폭 변화에 따른 특성을 비교, 분석하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 가공성이 좋은 친환경 재료로써 내식성이 우수한 5083-O 알루미늄 합금을 사용하였다. 이는 재활용이 가능하고 비철금속 중 가벼운 경금속이므로 기기의 경량

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

Table 1 Chemical compositions of 5083-O Al alloy

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.19	0.30	0.06	0.74	4.06	0.11	0.05	0.01	Bal.

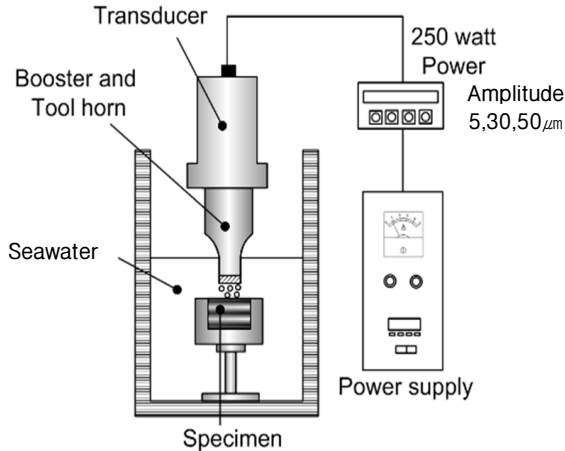


Fig. 1. Schematic of cavitation experiment.

화 및 소형화가 가능하여 각광받고 있는 재료이다. Table 1은 5083-O 알루미늄 합금의 화학적 조성을 나타낸 것이다.

천연 해수 환경하에서 5083-O 알루미늄 합금의 캐비테이션 실험은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 압전 효과를 이용한 진동발생 장치를 사용하여 대향형 진동법으로 실시하였다. 60 Hz, 220 V의 전력이 전자회로를 거쳐 20 KHz의 정격 출력을 발생시켜 진동자에 공급하는 역할을 한다. 또한 정진폭 자동제어 방식으로 진폭은 5 μm , 30 μm 및 50 μm 로 일정하게 유지하였다. 압전소자에 의한 진동발생은 원추형 혼에 전기적인 교류를 가함으로써 축 방향으로 진동을 일으키는 현상을 이용한 장비이다. 시편은 진동자의 혼에 대향하도록 거치대에 고정하고 1 mm의 거리를 일정하게 유지하도록 하였다. 뿐만 아니라 무게감량의 경우 실험 전과 후에 초음파 세척기로 시험편을 세척하여 건조기에 24시간 동안 건조시킨 후 전자저울을 사용하여 측정하였다. 캐비테이션 실험 후 시험편의 표면 손상 정도를 주사전자 현미경 및 3D 분석 광학 현미경을 이용하여 관찰하였으며, 시간 및 진폭변수에 따른 경향을 비교·분석 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 진폭변화에 따른 5083-O 알루미늄 합금의 캐비테이션 실험 후 표면 손상 정도를 비교한 사진이다.

5 μm 의 경우, 실험시간 2시간까지는 극히 적은 손상이 관

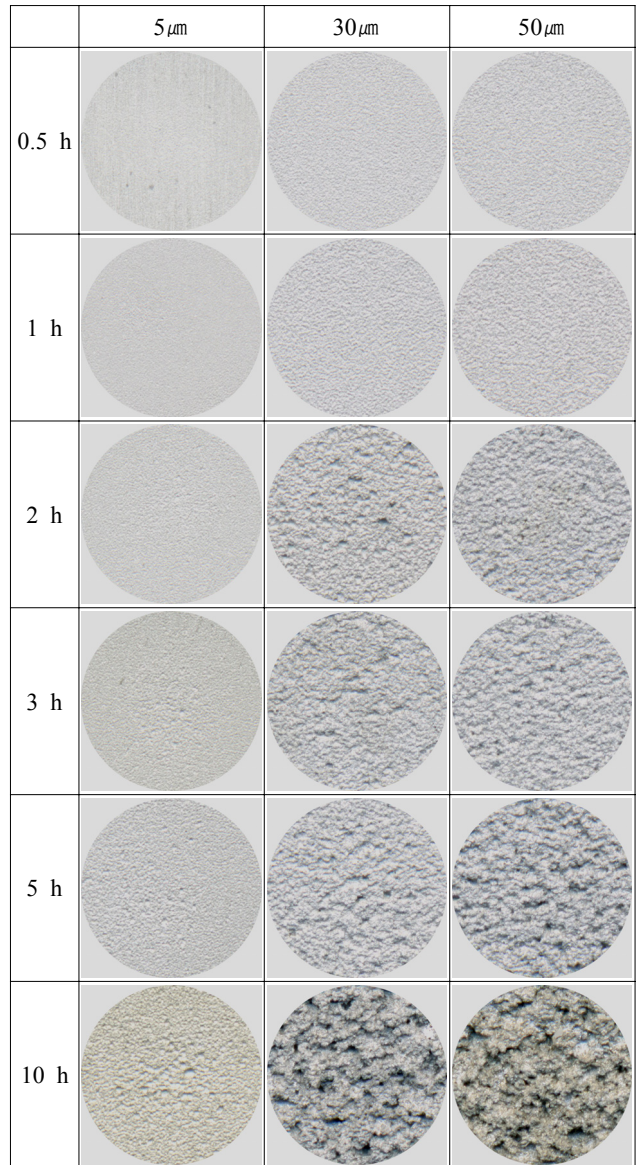


Fig. 2. Comparison of surface for 5083-O Al alloy after cavitation experiment with amplitude.

찰되었다. 3시간에는 손상경향이 육안으로도 피트가 관찰되었으며, 5시간~10시간에는 전체적으로 현저한 손상이 관찰되었다.

30 μm 진폭의 경우, 0.5시간~1시간에 공동으로 인한 손상으로 다소 거친 표면을 나타냈다. 2시간부터 손상부위가 뚜렷해지고 넓어지면서 육안으로도 현저한 피트가 관찰되었다. 3시간에는 이러한 피트들이 더욱 확대되면서 깊어졌으며, 5시간에는 피트의 수와 크기가 증가하면서 시험편 전체에 걸쳐 손상되었다. 결국 10시간 경과 후에는 전체적으로 매우 거친 표면을 나타냈다.

50 μm 에서는 0.5시간에 공동의 영향으로 미세하게 거친

표면이 관찰되었으며, 1시간 경과 후 전체적으로 손상부위가 뚜렷해져서 육안으로 피트가 관찰되었다. 공동이란 유체의 압력 강하가 정압보다 클 때 발생하는 기포이며, 이 기포가 붕괴하면서 발생하는 충격파와 마이크로 제트에 의해 침

식이 발생한다. 2~3시간에는 이러한 피트들이 더욱 확대되면서 깊은 손상이 관찰되었다. 30 μm 인 경우와 거의 유사한 것처럼 보이나, 보다 넓은 범위에 분포함을 알 수 있다. 5시간 이후에는 피트의 크기와 깊이가 현저히 증가하여 큰 손상

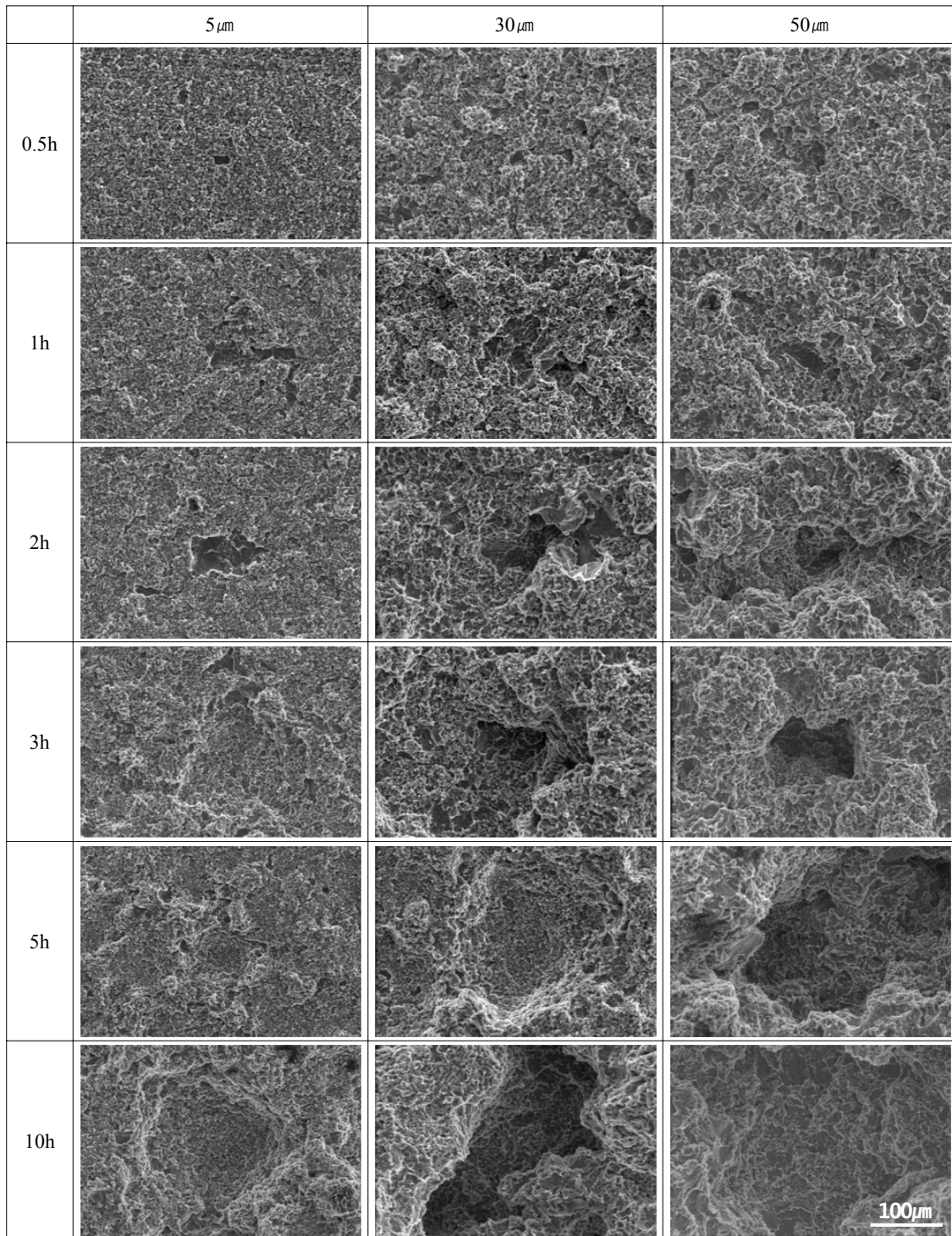


Fig. 3. Comparison of SEM morphologies for 5083-O Al alloy after cavitation experiment with amplitude.

이 관찰되었다.

종합적으로, 5 μm 의 경우 2시간까지 육안으로 관찰될만한 큰 손상은 나타나지 않았으나, 30와 50 μm 에서는 1시간부터 공동으로 인한 손상으로 표면이 거칠어진 것을 확인할 수 있다. 이후 시간이 경과할수록 서서히 손상이 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 임 등이 연구한 캐비테이션 기포군의 거동에서 알 수 있듯이, 이 기포군이 나팔모양의 분무형을 이루면서 시험편 표면에 캐비테이션 침식을 일으킨다.²⁰⁾ 따라서 짧은 시간에는 중앙부의 손상이 더 큰 것으로 판단된다. 또한 동일 시간에서는 진폭이 증가함에 따라 손상이 증가하였다. 이는 진폭이 커지면서 공동의 충격압이 상대적으로 크게 작용하여 손상이 급격히 증대되었기 때문으로 사료된다.

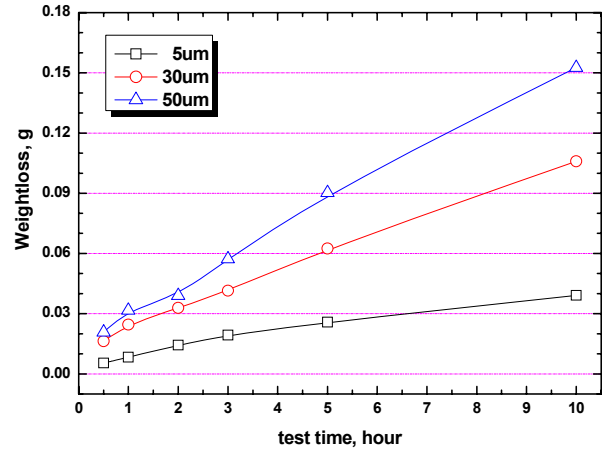
Fig. 3은 진폭변화에 따른 5083-O 알루미늄 합금의 캐비테이션 실험 후 표면형상을 SEM으로 관찰한 것이다.

전체적으로 진폭의 크기와 실험시간이 증가하면서 표면의 손상이 증대되는 경향을 나타냈다. 이는 진폭이 커지면서 충격에너지가 증가하였고, 실험시간이 경과하면서 시편에 전달되는 에너지의 총량이 증가함에 따라 손상이 증가한 것으로 판단된다. 전체적으로 0.5시간에 미세 피트상으로 중앙에 탈리가 발생하였으며, 시간이 경과하면서 손상이 커지는 것을 알 수 있다. 캐비테이션 침식에 의한 손상의 발생원인은 기포 붕괴에 따른 충격파와 기포 붕괴 시 발생하는 마이크로 제트가 동시에 작용하기 때문으로 알려져 있다. 따라서 이러한 충격파나 마이크로 제트가 시편 표면에 충돌하면서 내부응력이 발생하고, 이 응력이 어느 한계치를 초과하면 손상이 발생한다.

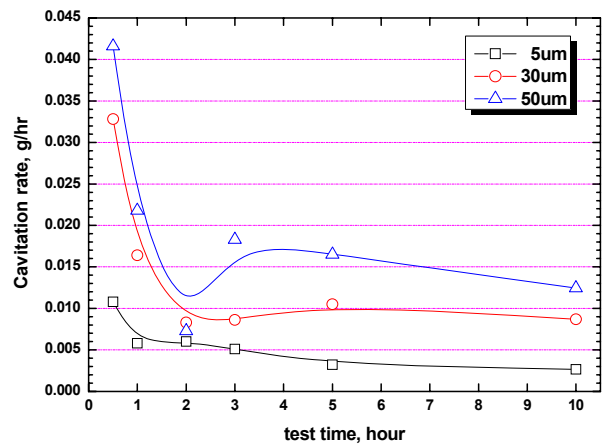
전체적인 손상 과정은, 초기에 생성된 공동이 모재 표면에 충돌하여 압축잔류응력을 형성시켜 표면을 경화시킨다. 이는 워터 캐비테이션 피닝 원리와 동일하나, 이후 가혹한 해수에서 부식이 쉽게 진행되므로 경화된 표면을 손상시켜 피팅이 발생한다. 발생한 피팅이 진전되면서 크레이터형의 큰 피트가 형성된 후 주변부로 급격히 확대되고, 합체되면서 표면이 거칠어지고, 깊은 손상이 시편 전체에서 관찰된다.²¹⁾ 이와 같이 캐비테이션 침식 손상형태는 입내에 다수의 균열을 발생시켜 결정이 세분화되어 탈락하면서 손상이 급격하게 증가하는 것으로 판단된다. 결과적으로 진폭과 시간변화에 따른 손상정도는 큰 차이를 보이며, 높은 진폭일수록 가혹한 환경이므로 손상의 진행 단계는 초기에 관찰된다.

Fig. 4는 진폭변화에 따른 5083-O 알루미늄 합금의 캐비테이션 실험 후 무게감소량과 손상율을 비교한 그래프이다.

무게감소량은 시간이 경과함에 따라 시편에 전해지는 누적 충격량의 증가로 값이 증가하는 경향을 나타냈으며, 진폭이 증가함에 따라 충격압 또한 비례적으로 상승하여 무게감소량이 증가하는 경향을 나타냈다. 손상율($\Delta\text{g}/\Delta\text{T}$)은 3가



(a) weightloss



(b) cavitation rate

Fig. 4. Comparison of weightloss and cavitation rate for 5083-O Al alloy after cavitation experiment with amplitude.

지 조건 모두 0.5시간에 가장 큰 값을 나타낸 후 급격히 감소하는 경향을 나타냈다. 일반적으로 캐비테이션 침식의 손상 과정은 초반에 소성변형과 함께 가공경화가 진행되기 때문에 침식이 정체되는 잠복기 구간이 나타나나, 본 실험에서는 0.5시간 이전으로 여겨진다.²²⁾ 이후 30 μm 와 50 μm 의 진폭 조건에서는 가혹한 조건으로 인해 경화된 표면에서 다시 침식이 발생하면서 손상율이 증가하는 경향을 나타냈다. 또한 전체적으로 시간 증가에 따라 손상율이 감소하는 이유는, 이전에 발생한 손상으로 인해 표면에 피트가 발생하여 흡착된 공동으로 인하여 이후 발생한 공동이 모재와의 접촉을 차단함으로써 침식량이 감소한 것으로 판단된다. 또한 손상이 증가함에 따라 혼과 시편과의 거리가 멀어지면서 표면에 도착하는 기포수가 감소하고, 이에 따른 충격파의 누적량이 감소하기 때문으로 판단된다. 결과적으로 실험시간과 진폭의 크기가 증가함에 따라 손상이 지속적으로 증가하는 경향을 나타냈으며, 손상은 발생하지 않고 소성변형만 발생하는

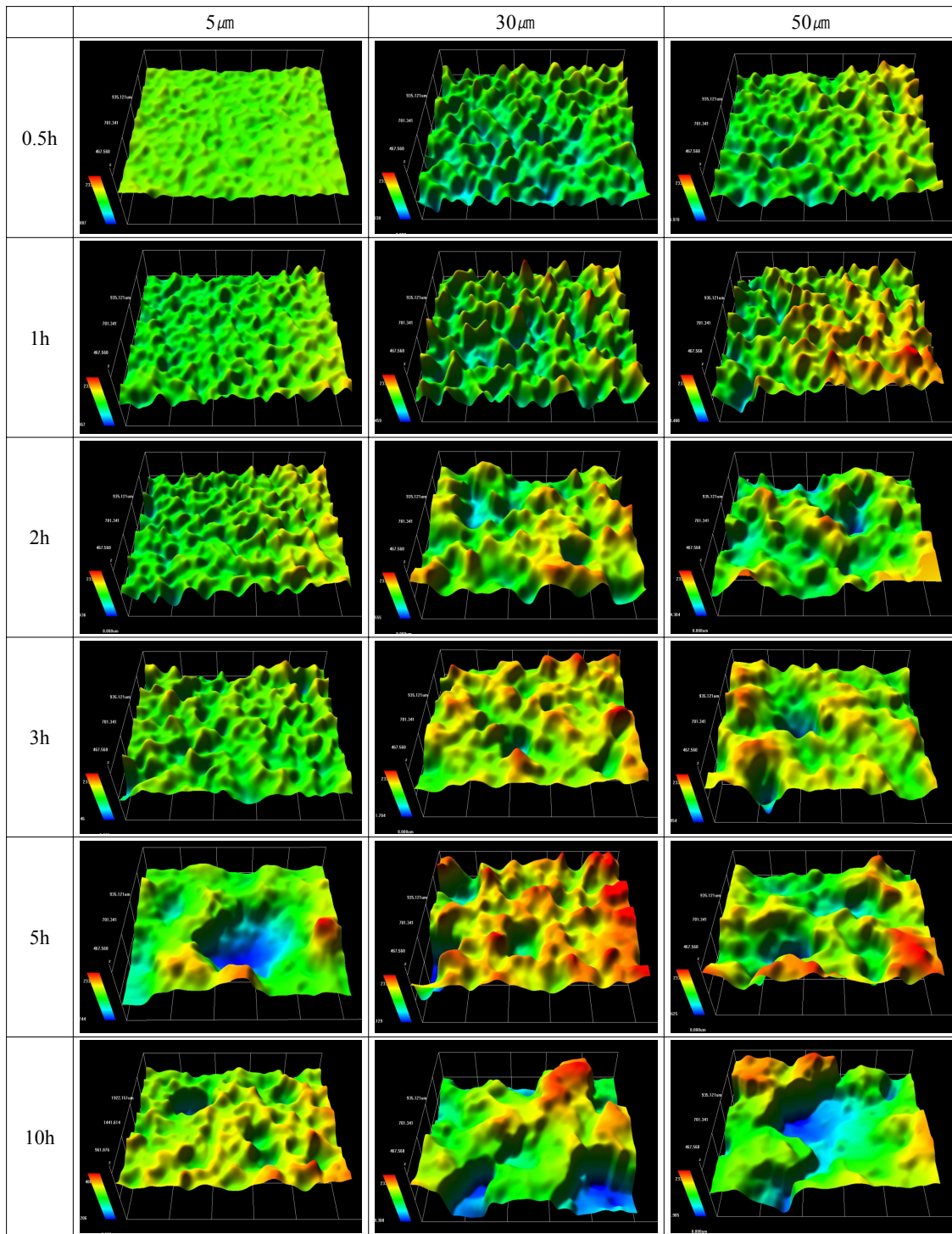
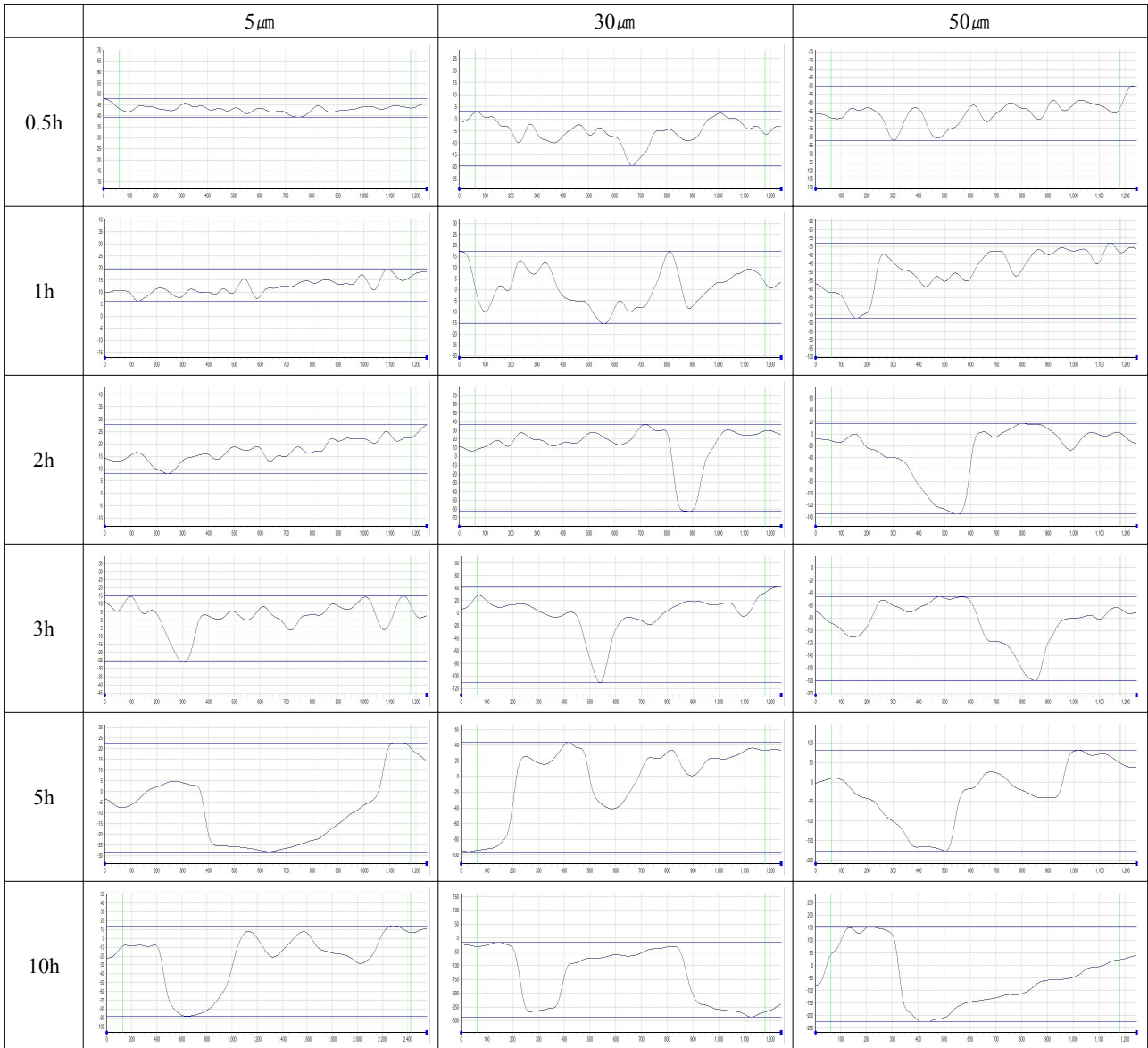


Fig. 5. 3D analysis of 5083-O Al alloy after cavitation experiment with amplitude.

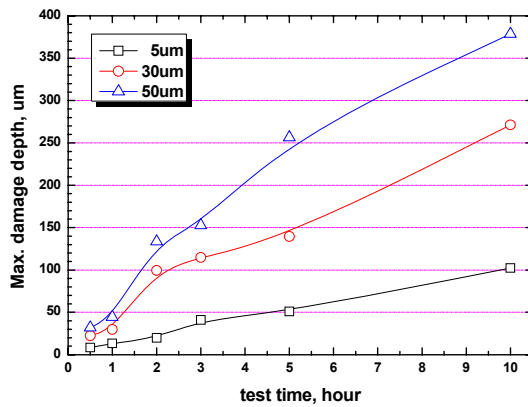
잠복기 구간은 30분 이내인 것으로 판단된다.

Fig. 5는 진폭변화에 따른 5083-O 알루미늄 합금의 캐비테이션 실험 후 손상면을 3D 현미경으로 분석한 결과이다.

진폭 5 μm 의 0.5시간에는 공동에 의해 손상되지 않은 양호한 표면이 관찰되었다. 1시간의 경우 공동의 충격으로 인해 약간 거친 표면을 나타냈으며, 2시간에는 이러한 손상이 진전되어 보다 거친 표면형상을 나타냈다. 3시간에는 피트들



(a) Line profile



(b) Max. damage depth

Fig. 6. Comparison of line profile(a) and max. damage depth(b) for 5083-O Al alloy after cavitation experiment with amplitude.

이 커지면서 이전보다 큰 손상이 관찰되었으며, 5시간 이후 전체적으로 평탄화가 이루어진 부분에 다시 큰 손상이 발생하였고, 큰 피트가 깊이 방향으로 더욱 성장하였다.

30 μm 에서는 5 μm 에 비해 공동의 충격압이 상대적으로 크게 작용함으로써 실험초기인 0.5시간에서부터 약간 거친 표면 형상을 나타냈다. 1시간에는 피트와 피트가 합쳐짐과 동시에 깊이방향으로 성장하기 시작하면서 0.5시간에 비해 더욱 거친 표면을 나타냈다. 그리고 2시간에는 이러한 손상이 합쳐지면서 성장하기 시작하였고, 3시간에는 날카롭고 거친 면보다 크고 깊은 피트들이 관찰되면서 2시간보다 손상이 덜 나타난 것처럼 보이나, 이는 주변부가 평탄화되었기 때문으로 판단된다. 또한 5시간에는 피트가 더욱 성장하면서 면적뿐만 아니라 깊이 방향으로도 손상이 진전되었으며, 10시간에는 5시간에서 발생한 손상들이 합쳐지면서 271.3 μm 깊이의 크고 넓은 손상이 관찰되었다.

가장 가혹한 50 μm 의 진폭에서는 5 μm 와 30 μm 진폭에 비해 공동의 충격압이 상대적으로 크게 작용함으로써 실험초기인 0.5시간에서부터 거친 표면 형상을 나타냈다. 1시간 만에 피트와 피트가 합쳐짐과 동시에 깊이방향으로 성장하기 시작하면서 0.5시간에 비해 더욱 거친 표면을 나타냈다. 2시간~3시간에는 피트와 피트가 합쳐지면서 깊이방향으로 성장하여 전체적으로 큰 굴곡이 나타났다. 또한 5시간에는 중앙의 큰 피트 주변에 다른 피트들이 생성되기 시작하였으며, 10시간에는 계속된 공동의 충격으로 인해 피트와 피트의 경계가 없어지면서 378.6 μm 깊이의 큰 손상이 관찰되었다.

Fig. 6은 진폭변화에 따른 5083-O 알루미늄 합금의 캐비테이션 실험 후 손상면에 대한 단면 분석(a)과 최대 손상깊이(b)를 나타낸 그래프이다.

5 μm 의 경우, 0.5시간~2시간은 손상깊이가 완만하게 증가한 반면 3시간에는 다소 급격히 증가하여 41 μm 의 손상깊이를 나타냈는데, 이는 피트와 수가 증가함과 동시에 깊이방향으로 진전되었기 때문으로 판단된다. 5시간에 피트와 피트들의 평탄화로 인해 주변이 낮아지면서 상대적으로 최대 손상깊이와의 차이가 일시적으로 감소하여 50.9 μm 의 값을 나타냈다. 이후에도 손상깊이는 계속 증가하였으며, 실험 종료 시 102.2 μm 깊이의 손상이 관찰되었다.

30 μm 진폭에서는 0.5시간~1시간에는 최대손상깊이가 크게 증가하지 않았다. 반면 2시간에 99.5 μm 를 나타내면서 급격히 증가하였는데, 이는 피트 수 증가와 동시에 깊이방향으로의 성장이 급진전되었기 때문으로 판단된다. 이후 큰 피트를 중심으로 주변부에서 평탄화가 이루어지면서 3시간에 114.7 μm 와 5시간에 139.5 μm 로 손상깊이 증가폭이 감소하였다. 반면 10시간 경과 후에는 271.3 μm 의 손상깊이를 나타내면서 깊이방향으로의 손상이 꾸준히 진행됨을 알 수 있다.

50 μm 는 0.5시간~1시간에는 최대손상깊이가 완만하게 증가하였다. 반면 2시간에 133.7 μm 를 나타내면서 급격히 증가하였는데, 이는 1시간까지 피트 수 증가와 동시에 성장하는 단계이나 2시간에는 피트와 피트가 합쳐지면서 깊이방향으로의 성장이 급진전되었기 때문으로 판단된다. 이후 피트를 중심으로 주변부에서 평탄화가 이루어지면서 손상깊이 증가폭은 상대적으로 감소하여 3시간에 152.7 μm 를 나타냈다. 5시간~10시간에도 이와 같은 경향은 반복되었으나, 공동의 충격파에 노출된 시간이 길어지면서 10시간에는 가장 크고 깊은 378.6 μm 의 피트가 관찰되었다.

종합적으로, 진폭이 커지고 시간이 경과함에 따라 공동에 의한 손상으로 최대손상깊이가 증가하는 것을 알 수 있다. 다만 피트와 피트가 합쳐지는 평탄화 과정의 영향으로 최대 손상깊이의 증가율에 영향을 준 것으로 판단된다. 그리고 진폭이 증가할수록 최대손상깊이가 증가하는 비율이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 전체적으로 보아 1시간까지는 크게 손상되지 않고, 2시간에 급격히 상승하는 경향을 나타냈다. 이후 평탄화와 손상이 복합적으로 작용하여 다소 완만한 증가를 보인 것으로 사료된다.

4. 결 론

해수환경에서 공동의 충격압에 따른 캐비테이션 침식 손상 거동을 파악하기 위하여 다양한 진폭 조건에서 실험을 실시하였다. 해수 환경 하에서 진폭 및 시간에 따른 캐비테이션 실험 결과, 시간이 경과할수록 손상이 증가하는 경향을 나타냈다. 또한 동일 시간에서는 진폭이 커짐에 따라 손상이 증가하였는데, 이는 진폭이 커지면서 공동의 충격압이 상대적으로 크게 작용함으로써 손상이 급격히 증대되었기 때문이다.

결과적으로 캐비테이션 침식에 의한 손상은 노출 시간과 충격압 증가에 따라 증가하며, 이를 감소시키기 위해서는 캐비테이션 침식 저항성이 우수한 재료의 선택이 필요하며, 또한 근본적으로 공동의 발생을 줄이거나 회피할 수 있는 설계도 필요할 것으로 여겨진다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 전남과학기술진흥센터에서 지원하는 "전남 과학연구단지 기초·원천 연구개발지원사업"에 의해 이루어졌으며, 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. T. Yonezawa and H. Kanda, *J. JSME*, **19**, 384 (1984).

2. J. A. Joyner, SAE transactions, **65**, 337 (1956).
3. M. Matsumura, A. Yabuki, and S. Sanui, Zairyo-to-Kankyo, **40**, 814 (1991).
4. A. Sakamoto, Y. Isomoto, and M. Matsumura, Zairyo-to-Kankyo, **43**, 76 (1994).
5. ASTM Designation G134-95, p. 1, ASTM, (1996).
6. Y. Yamauchi, H. Soyama, Y. Adachi, K. Sato, T. Shindo, R. Oba, R. Oshima, and M. Yanabe, *J. JSME*, **59**, 16 (1993).
7. K. Hirano, K. Enomoto, E. Hayashi, and K. Kurosawa, *J. JSMS*, **45**, 740 (1996).
8. H. Soyama, Y. Yamauchi, T. Ikohagi, R. Oba, K. Sato, T. Shindo, and R. Oshima, *J. Jet Flow Eng.*, **13**, 25 (1996).
9. I. R. Jones and D. H. Edward, *J. Fluid Mech.*, **7**, 596 (1960).
10. J. Kirejczyk, *Proceedings of the 6th International Conference on Fluid Machinery*, p. 555, Scientific Society of Mechanical Engineers, (1979).
11. T. Momma and A. Lichtarowicz, *Wear*, **186**, 425 (1995).
12. A. Thiruvengadam and H. S. Preiser, *J. Ship Res.*, **18**, 39 (1964).
13. Y. W. Seo, J. R. Cho, I. S. Lim, and M. H. Yeo, *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers*, p. 29 (2007).
14. M. H. Lee, B. H. Seo, S. H. Na, S. K. Cheong, and M. H. Lee, *Proceedings of the Korean Society for Railway*, p. 2295 (2009).
15. Y. W. Seo, *Proceedings of the Inje University*, p. 385 (2010).
16. K. R. Tretheway, J. Chamberlain, *Corrosion for students of science and engineering*, 2nd ed. p. 153, Longman Scientific & Technical (1988)
17. J. H. Hwang and W. J. Lim, *J. Corrs Sci. Soc. of Korea*, **25**, 317 (1996).
18. D. S. Won, K. S. Jeon, Y. T. Kho, and J. H. Lee, *J. Corrs Sci. Soc. of Korea*, **23**, 215 (1994).
19. M. S. Han, S. J. Lee, S. K. Jang, and S. J. Kim, *Corros. Sci. Tech.*, **9**, 317 (2010).
20. U. J. Lim and J. H. Hwang, *Proceedings of the Pukyong University*, p. 193 (1996)
21. D. S. Won, K. S. Jeon, Y. T. Kho, and J. H. Lee, *J. Corrs Sci. Soc. of Korea*, **23**, 215 (1994).
22. ASTM Special Technical Publication 567, p. 30 (1982).