

선체 재료용 Al-Mg 합금과 Al-Mg-Si 합금의 해수 내 캐비테이션 특성

김성종·김규환·이승준[†]

목포해양대학교 기관시스템공학부
(2011년 7월 25일 접수, 2011년 8월 25일 수정, 2011년 8월 25일 채택)

Cavitation Characteristics of Al-Mg and Al-Mg-Si Alloy for Ship in Sea Water

Seong-Jong KIM, Kyu-Hwan KIM, and Seung-Jun LEE[†]

Division of Marine System Engineering, Mokpo Maritime University, Mokpo, Korea
(Received July 25, 2011; Revised August 25, 2011; Accepted August 25, 2011)

Al alloys have been used widely for commercial and military ships in most ocean countries since mid-1950s, and the value as light metal with high mechanical strength has been proven. As the safety and fuel efficiency of Al ships have improved, she can carry more freight, sail faster and travel longer distances. Furthermore, in the shipbuilding industry, Al alloys are applied as structural materials for ships to various areas including the deck of luxurious cruises, battleships and leisure ships. In addition, Al alloys are being spotlighted as environmental-friendly material as they can be recycled even after end of lifespan. However, Al alloys for ships must be carefully selected after considering corrosion resistance, endurance, strength, and weldability in sea water environment. Al alloys to satisfy these conditions are used widely include 5000 series Al-Mg alloy and 6000 series Al-Mg-Si alloy. Thus, this study selected and evaluated the cavitation characteristics of the 5000 series Al alloys that are used in hulls that directly contact seawater and the 6000 Al alloys that are used in the upper structures of ships. Results of cavitation test with time, weightloss and cavitation rate of 5456-H116 showed the smallest damage among 5052-O, 5456-H116 and 6061-T6.

Keywords : ship, Al alloy, sea water, cavitation

1. 서 론

주말 여가의 패러다임이 육상에서 해양으로 변화하면서 해양레저산업이 급속히 활성화되고 있는 추세이다. 이러한 변화와 더불어 레저용 선박의 수요가 급증하고 있으며, 녹색 성장을 바탕으로 한 산업화와 환경 관련 규제의 강화로 자원 재활용에 대한 필요성이 대두되었다. 최근 정부가 발주하는 중소형 선박들은 FRP 재질에서 알루미늄 재질로 바뀌고 있다. 알루미늄은 무게가 가볍고 구조성과 소성가공성이 매우 좋은 재료로 알려져 있을 뿐 아니라 친환경 재료로서 재활용이 용이하고 다양한 표면처리를 통하여 내식성, 내마모성을 부여할 수 있는 구조적 특징을 가지고 있기 때문이다. 또한 해수환경 하에서 알루미늄 합금 부식에 대한 꾸준한 연구를 통해 부식을 억제하여 왔다.^{1)~4)} '황' 등은 유속 및 환경용액에 변화에 따른 캐비테이션 침식-부식 손상에 관한 연구를 통해 유속이 빠를수록 소성변형 파문의 길이가 짧고 폭이 좁아지면서 캐비테이션 침식의 잠복기가 지연되는 것을 알아냈다.⁵⁾ 또한 '원' 등은 캐비테이션 장비를 이용하여 5083

알루미늄의 침식 부식거동을 관찰하였으며, 진폭이 증가함에 따라 시편 가장자리에 방사선 형태의 손상부가 외곽쪽으로 이동하며, 그 폭은 감소하지만 강도가 더욱 증가하는 거동을 보인 것을 알았다.⁶⁾ 또한 '한' 등은 선박용 타에 열용사 코팅 적용 후 캐비테이션 침식-부식 거동을 관찰하여 기포의 붕괴가 재료의 손상을 야기한다고 보고하였다.⁷⁾ 지금까지 연구된 내용 중 알루미늄 선박용 재료에 대한 해수 내 캐비테이션 관련 연구는 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 해수와 직접 접하는 선체에 사용되는 5000계열 Al-Mg 합금인 5052-O, 5456-H116 합금과 상부구조물에 사용되는 6000계열 Al-Mg-Si 합금인 6061-T6 합금을 선정하여 해수 내에서 캐비테이션에 대한 저항성을 평가하였다.

2. 실험방법

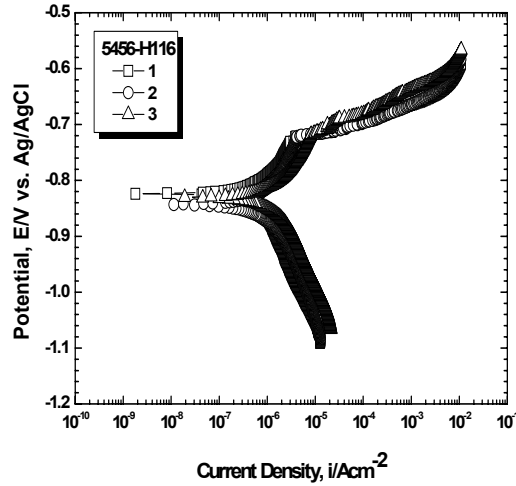
실험 재료로 5052-O, 6061-T6, 5456-H116 알루미늄 합금을 사용하였으며, 그 화학조성을 Table 1에 나타냈다. 캐비테이션 실험은 압전효과를 이용한 진동발생 장치로 60 Hz, 220 V의 전력을 전자회로를 거쳐 20 KHz의 진동

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

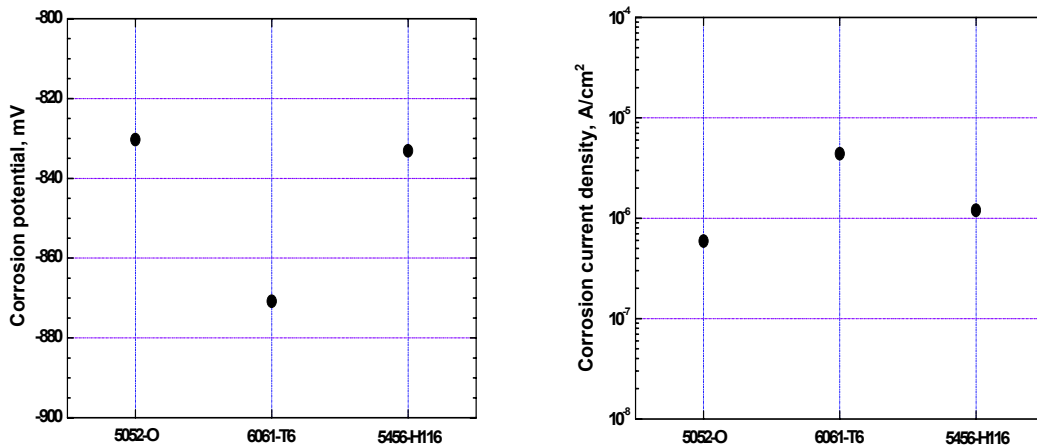
Table 1. Chemical composition for 5052-O, 6061-T6 and 5456-H116 Al alloys

wt (%)

Al alloy \ Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
5052-O	0.18	0.33	0.07	0.03	3.74	0.18	0.04	0.02	Bal.
6061-T6	0.98	0.17	0.51	0.096	1.1	0.3	0.06	0.02	Bal.
5456-H116	0.35	0.27	0.41	0.18	5.2	0.12	0.14	0.011	Bal.



(a)



(b)

Fig. 1. Polarization curves of 5456-H116 alloy(a) and results(b) after Tafel analysis of various Al alloys in sea water.

정격 출력을 발생시켜 진동자에 공급하는 역할을 하며, 정진폭 자동제어 방식으로 진폭은 일정하게 하였다. 압전소자에 의한 진동발생은 원추 horn에 전기적인 교류를 가함으로써 축 방향으로 진동을 일으키는 현상을 이용한 장비이다. 시험편은 2 cm× 2 cm 크기로 절단하여 진동자의 혼에 대향하도록 거치대에 고정하고 1 mm의 거리를 유지하도록 하였다. 수조는 전기화학적 부식의 영향을 없애기 위해 아크릴로 제작하였으며, 용액은 매 실험마다 교체하였다. 또한 무게 측

정을 위해 실험 시작 전과, 종료 후 초음파 세척기로 시험편을 세척하여 건조기에 24시간 동안 건조시킨 후 캐비테이션에 의한 표면 손상 정도를 파악하기 위하여 무게감소량을 측정하였다. 또한 시험편 표면의 캐비테이션 손상 거동을 분석하기 위해 디지털 카메라, 주사전자현미경과 3D 현미경을 사용하였다. 전기화학적 실험은 기준전극으로 은/염화은 전극(Ag/AgCl)을, 대극은 백금전극(Pt)을 사용하여 2 mV/s의 주사속도로 천연해수 용액 조건에서 실시하였다.

타펠분석은 개로전위를 기준으로 ± 0.25 V 분극시켜 부식 전위와 부식전류밀도를 구하였다.

3. 연구결과 및 고찰

Fig. 1은 5456-H116 알루미늄 합금을 해수용액에서 개로전위를 기준으로 ± 0.25 V로 분극시킨 그래프(a)와 다양한 알루미늄 합금에 대한 타펠 분석 후 부식전위와 부식전류 밀도(b)를 상호 비교한 것이다. Fig. 1(a)의 경우, 동일 시편에 대하여 3차례 실시하였으며 양분극 구간에서는 개로전위 이후 전위 상승에 따라 부동태 경향을 나타냈으며, 일정 전

위에서 공식이 발생하여 급격한 전류밀도의 상승이 관찰되었다. 한편 음분극 곡선에서는 용존 산소 환원 반응에 의한 농도 분극 현상이 관찰되었으며, 3차례 실시 후 부식전위와 부식전류밀도의 평균값은 각각 -833.1 mV와 1.2×10^{-6} A/cm²를 나타냈다. Fig. 1(b)의 부식전위 비교에서는 6061-T6 합금이 가장 낮은 값을 나타냈으며, 5052-O와 5456-H116 합금은 거의 비슷한 값을 나타냈다. 그러므로 갈바닉 전지 형성 측면에서는 5052-O와 5456-H116 합금이 전기화학적으로 가장 안정된 합금이라 할 수 있다. 또한 부식전류밀도가 높다고 하는 것은 부식속도가 크다는 것을 의미하므로 그 값이 높을수록 해수 환경에서 부식이 잘

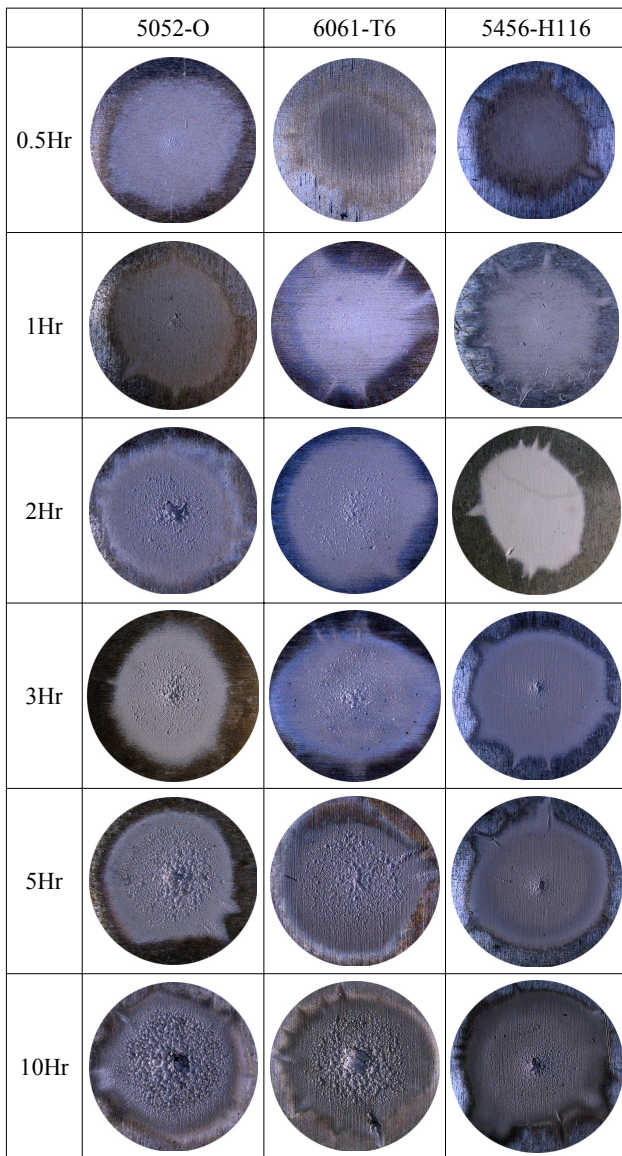


Fig. 2. Surface morphologies for various Al alloys after cavitation test in sea water.

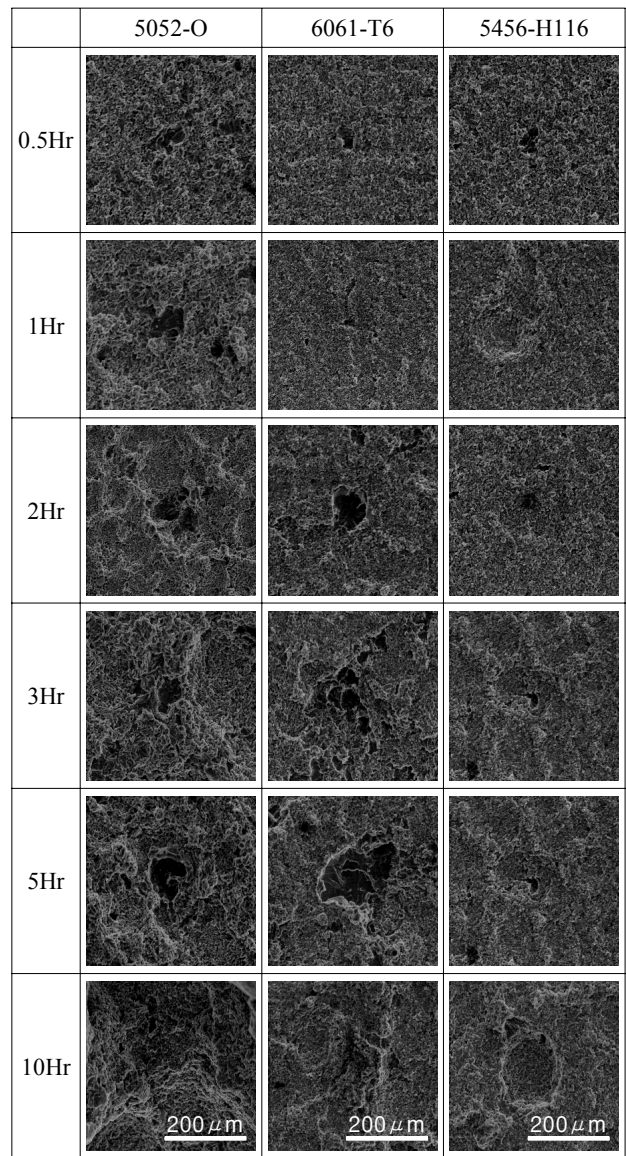


Fig. 3. SEM images on surfaces for various Al alloys after cavitation test in sea water.

된다는 것을 의미한다. 따라서 5052-O 알루미늄 합금이 가장 낮은 부식전류밀도를 나타내어 가장 양호한 특성을 보였고, 6061-T6 합금이 가장 높은 값을 나타내어 해수 내에서 가장 열악할 것으로 판단된다.

Fig. 2는 다양한 알루미늄 합금의 캐비테이션 시간별 표면 형상을 나타낸 것이다. 전체적으로 실험 시간 증가에 따라 초음파에 의해 형성된 캐비티가 증가하여 파괴되면서 시험편에 가해지는 에너지 증가로 손상량이 증가하였다. 알루미늄 합금 종류에 따라 차이는 있으나 실험시간 0.5시간에 시편에 형성된 산화피막이 캐비티에 의해 파괴되고 변색되어 중앙에서 약간의 침식이 관찰되었다. 더욱 시간이 경과하면서 시편 중앙부에 피트가 형성되면서 육안으로 관찰 가능한 손상이 생기기 시작하였다. 최종적으로 피트의 개수도 많아지고 손상 깊이도 깊어지는 것을 알 수 있다. 시편의 중앙에서 가장 큰 손상을 나타냈는데, 이는 I. Hanson과 K. A. Morch 연구팀의 '시편 표면에 반구형의 cavity cluster가 형성되고, 시편의 가장자리는 유체의 흐름이 거의 감지되지 않았으며, 시편 중앙으로 갈수록 유속이 증가한다.'⁸⁾는 연구결과와 일치하는 것으로 시편 중앙부위에서의 재료손상이 이와 같은 빠른 유속과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

Fig. 3은 다양한 알루미늄 합금의 캐비테이션 시간별 주사전자현미경 관찰 결과를 나타낸 것이다. 5052-O 합금의 경우 실험시간 0.5시간에는 육안으로 거의 손상이 없는 것처럼 여겨졌으나, 부분적으로 작은 캐비테이션 침식이 발생하였다. 실험시간 1시간부터 침식이 중앙부를 중심으로 관찰되었으며, 실험 2시간에서는 넓은 범위로 확대되면서 시험편의 입계가 관찰되었다. 실험 3시간의 경우 그 손상정도가 점차 증가해 가는 경향을 보였으며, 10시간 후에는 크고 깊은 캐비테이션 침식이 발생하였음을 알 수 있다. 그리고 6061-T6 합금은 1시간까지 미세하게 손상되었던 것이 2시간 후 보다 크고 깊어진 것을 확인할 수 있었다. 3시간에서는 국부적으로 형성된 캐비테이션 손상이 합체되면서 확장해가는 양상을 나타낸 후 시간경과에 따라 그 경향이 현저하게 향상되는 경향을 나타냈다. 또한 5456-H116 합금은 3시간부터는 중앙부에 침식이 나타남을 알 수 있고, 실험 5시간에서는 넓은 범위에서 캐비테이션 침식이 발생되었음을 알 수 있다. 이후 계속된 침식으로 손상면이 넓어졌으나 깊이방향으로의 손상은 적게 나타나 가장 양호한 경향을 보였다. 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 붕괴 시 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 에너

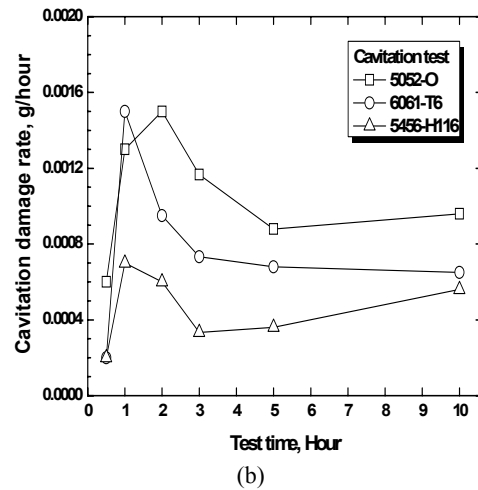
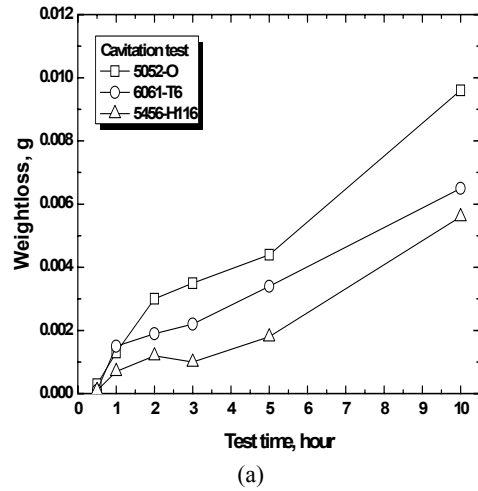


Fig. 4. Weightloss(a) and cavitation damage rate(b) for various Al alloys after cavitation test in sea water.

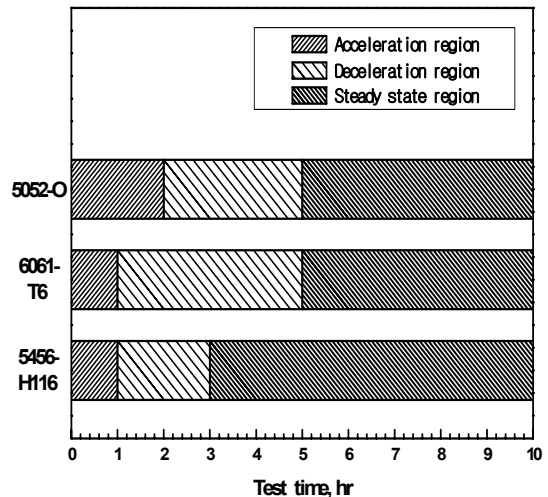


Fig. 5. Damage characteristic of various Al alloys for cavitation test with time in sea water.

지가 순차적으로 반복 작용하여 재료 표면에 캐비테이션 침식은 초기에 소성변형이 축적되고 그 후 표면층 파괴에 의해 보다 진전을 보인 것으로 여겨진다.

Fig. 4는 다양한 알루미늄 합금의 캐비테이션 시간별 무게 감소량과 무게감소율을 나타낸 그래프이다. 단일 재료에서 캐비테이션에 의한 에로전 손상은 첫 번째 단계로 표면에 작은 압입자국이 생기며, 이후 피트와 크랙이 발생되며, 최종적으로 피트들이 합쳐져 성장하는 과정을 거친다. Fig. 4(a)의 무게감소량 측정에서는 알루미늄 종류에 상관없이 실험시간 증가에 따라 손상에 의한 무게감소량이 꾸준히 증가하는 모습을 보이고 있다. 5052-O 합금의 경우 실험시간 2시간까지 큰 무게감소량을 나타낸 후 5시간까지 완만하게 상승하다가 이후 다시 증가하는 경향을 나타냈다. 또한 6061-T6 합금의 경우 실험시간 1시간까지 급격히 증가하였으나, 이후 실험 종료시까지 완만하게 상승하는 경향을 나타냈다. 반면에 5456-H116 합금은 실험 시작부터 종료시까지 가장 낮은 무게감소량을 나타냈으며, 실험종료 시점에서 다른 조건에 비해 약 17~44%정도 적은 무게감소량을 나타냈다. 천연해수는 부식성 용액이므로 캐비테이션 침식과 부식이 금속재료에 중첩되어 발생시 상호 상승작용으로 치명적인 손상을 입힐 수 있다.⁹⁾ Fig. 4(b)의 실험시간에 따른 손상을 측정 결과, 6061-T6와 5456-H116 합금은 실험시간 1시간에서, 5052-O 합금은 실험시간 2시간에서

가장 큰 손상을 나타냈으며, 이후 감소하는 양상을 보였다. 손상이 최고점을 나타낸 이후부터는 이전에 축적된 캐비테이션에 의한 피닝효과로 인한 압축잔류응력 발생으로 경도가 증가하며, 캐비테이션에 대한 저항성이 향상되어 손상이 감소한 것으로 판단된다.¹⁰⁾

Fig. 5는 다양한 알루미늄 합금에 대한 손상특성을 주기별로 정리한 그래프이다. 5052-O가 가장 긴 캐비테이션 손상 증가기를 나타내고 있으며, 5456-H116이 가장 빨리 안정기에 도달하여 캐비테이션 침식에 손실이 가장 적게 나타남을 알 수 있다. 일반적인 금속재료의 경우 손상이 점진적으로 증가하는 증가기, 감소기, 침식이 재료 전체 표면으로 확대되어 질량감소율이 거의 일정하게 되는 안정기를 거쳐서 일어난다.¹¹⁾ 3가지 합금의 경우 실험시간 1~2시간에는 손상이 급격히 증가하는 증가기를 나타내었다. 따라서 잠복기는 대체적으로 1시간 이내에 존재함을 알 수 있으나 정확한 시간은 확인할 수 없었다. 이것은 Ahmed 등이 제안한 "잠복기 동안 무게감소량 없이 상당한 소성변형이 발생한다"는 이론으로 설명할 수 있다.¹²⁾ 이는 실험초기 시편 표면에 가해지는 캐비테이션 손상이 바로 무게감량으로 나타나지 않고, 시편이 소성변형 등의 방법으로 기계적인 에너지를 흡수하기 때문으로 판단된다.

Fig. 6은 다양한 알루미늄 합금의 캐비테이션 실험 후 표면형상을 3D 현미경으로 관찰한 것이다. 5052-O 합금은

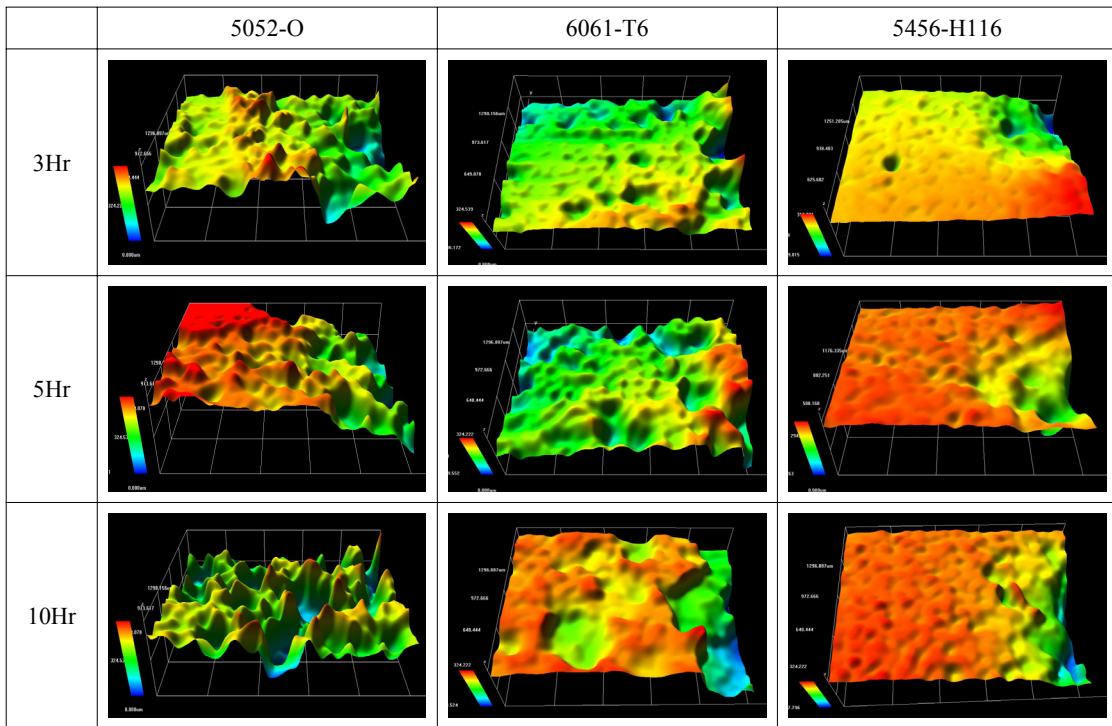
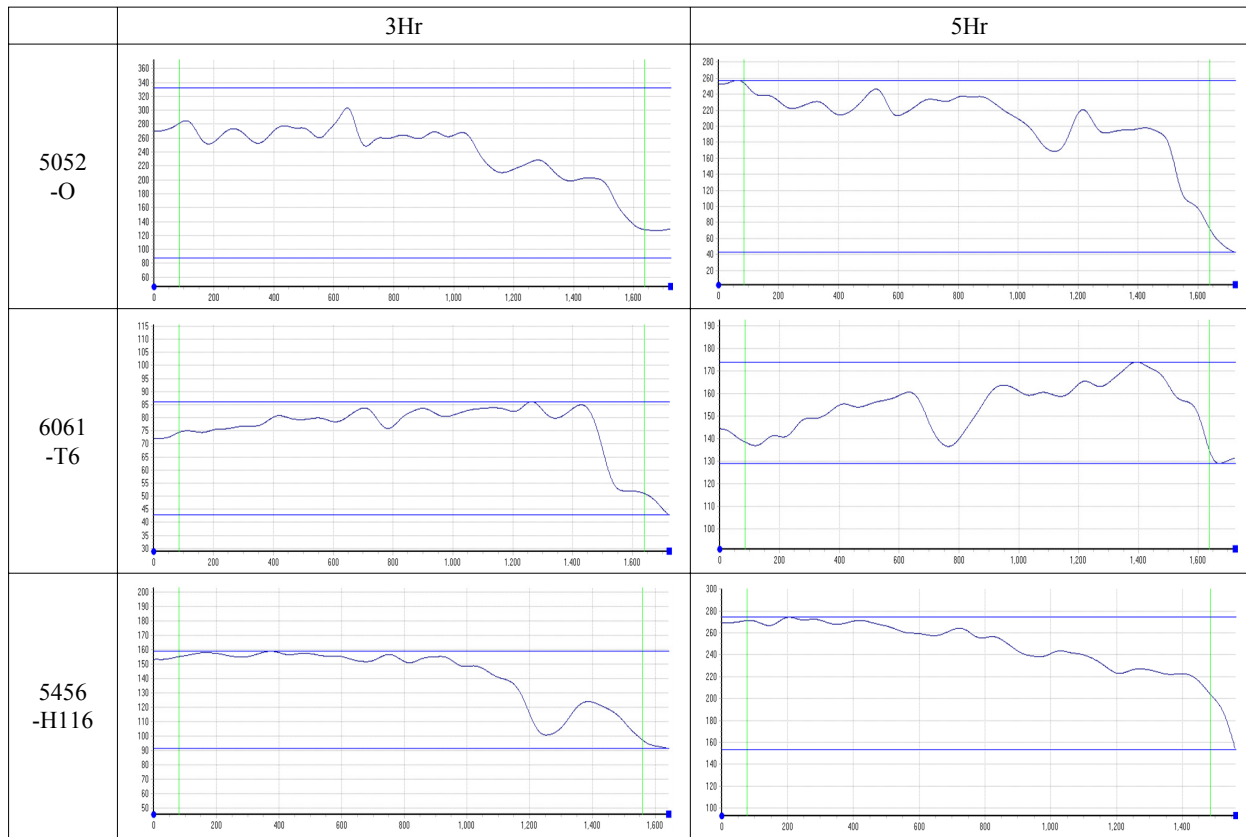


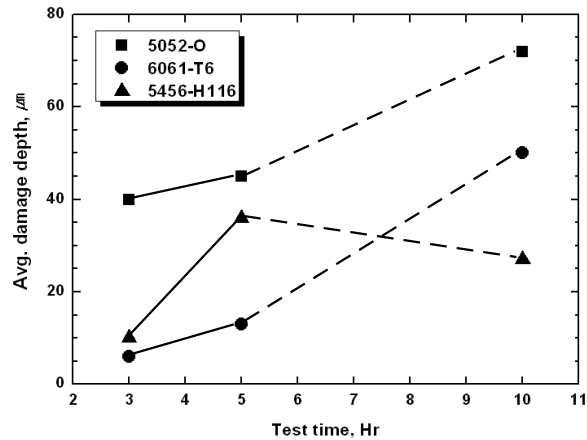
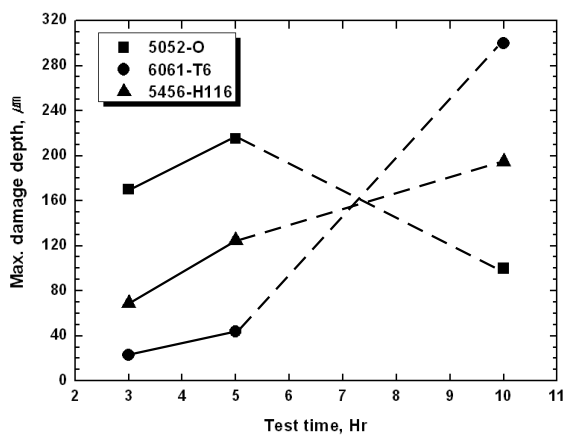
Fig. 6. 3D analysis for various Al alloys after cavitation test in seawater.

3시간 경과 후 기포의 충격으로 인해 피트가 생성되면서 거친 표면형상을 나타냈다. 일반적으로 캐비테이션 손상 시 가장 취약한 부분인 기지상과 단단한 석출물간의 경계에서 먼저 크랙이 발생하여 손상이 시작된다고 알려져 있다.¹³⁾ 5시간과 10시간에는 피트의 깊이방향 성장이 더욱 진전되고 피트와 피트가 합쳐지면서 손상깊이와 손상면적이 증가

하면서 거칠어지는 경향을 나타냈다. 이는 시간이 경과하면서 입내에 다수의 균열이 발생해 결정이 세분화된 뒤 떨어져 나가 표면이 거칠어졌기 때문으로 판단된다. 6061-T6 합금 역시 5시간까지 손상이 커지고 거칠어지는 경향을 나타냈으나, 10시간에는 주변부의 피트와 피트가 합쳐지면서 평탄화된 것을 확인할 수 있다. 5456-H116 합금은 가장 평



(a)



(b)

Fig. 7. Surface profile(a) and damage depth(b) for various Al alloys after cavitation test in seawater.

탄한 표면형상을 나타내면서 3가지 시편 중 가장 적은 손상을 나타냈으며, 이는 가장 적은 무게감소량을 나타낸 결과와 일치한다.

Fig. 7은 다양한 알루미늄 합금의 캐비테이션 실험 후 표면분석(a)과 손상깊이(b)를 나타낸 것이다. 5052-O 합금의 경우 캐비테이션 실험 3시간이후 5시간까지는 캐비테이션에 의한 최대 및 평균손상깊이가 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 5시간이후부터 시편표면 전체 부위에 걸쳐서 손상이 발생한 것이므로 측정 기준면이 되는 시험전 시편표면이 손상되지 않은 부분이 존재하는 3시간에서 5시간의 경우와 같은 방법으로 해석할 수 없어 점선으로 표시하였으며, 이는 최대손상 및 평균손상깊이가 나타난 값보다는 크다는 것을 유추할 수 있다. 또한 6061-T6 합금은 3시간부터 5시간까지는 캐비테이션에 의한 최대손상깊이 및 평균손상깊이는 서서히 증가했으나, 5시간 이후부터 최대손상깊이가 급격히 증가하였고 평균손상깊이도 증가한 것을 알 수 있다. 따라서 중앙부가 집중적으로 손상되었음을 알 수 있다. 5456-H116 합금 역시 5시간까지는 캐비테이션에 의한 최대손상깊이 및 평균손상깊이가 증가하는 경향을 나타냈다. 그러나 5시간 이후의 경우는 최대손상깊이는 지속적인 증가를 나타내었지만 평균손상깊이는 감소한 것으로 보아 시편 전체에 걸쳐서 손상이 발생한 것으로 유추할 수 있으며, 따라서 실제 평균손상깊이는 측정된 값보다 더 클 것으로 판단된다.

4. Conclusion

선체재료용 알루미늄 합금에 대한 해수에서의 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 정적인 해수환경에서 분극곡선에 의한 타펠분석 결과, 부식전류밀도는 5052-O가 가장 낮은 값을 나타냈으므로 부식속도가 늦을 것으로 판단되며, 반면에 6061-T6가 가장 높은 값을 나타내었으므로 부식속도가 가장 클 것으로 사료된다. 해수환경에서 시간에 따른 캐비테이션 실험을 통하여 무게감소량과 무게

감소율 등을 비교한 결과, 시험시간 10시간을 기준으로 5052-O가 가장 큰 손상을, 5456-H116이 가장 낮은 손상을 나타냈다. 또한 대부분 시간 변화에 따라 꾸준한 손실량의 증가를 보여 주었으나 실험 종료 후, 5456-H116이 가장 작은 무게감소량을 나타내어 캐비테이션에 대한 우수한 특성을 나타냈다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. S. J. Kim, *Mater. Sci. Forum*, **510**, 158 (2006).
2. M. S. Han, S. C. Ko, S. H. Kim, S. K. Jang, and S. J. Kim, *Met. Mater. Int.*, **14**, 203 (2008).
3. S. J. Kim, S. K. Kim, and J. C. Park, *Surf. Coat. Technol.*, **205**, s73 (2010).
4. S. J. Kim and S. K. Jang, *Transaction of nonferrous metals society of china*, **19**, 887 (2009).
5. J. H. Hwang and W. J. Lim, *J. Corrs. Sci. Soc. of Kor.*, **25**, 317 (1996).
6. D. S. Won, K. S. Jeon, Y. T. Kho, and J. H. Lee, *J. Corrs. Sci. Soc. of Kor.*, **23**, 215 (1994).
7. M. S. Han, S. J. Lee, S. K. Jang, and S. J. Kim, *Corros. Sci. Tech.*, **9**, 317 (2010).
8. I. Hanson and K. A. Morch, *J. Appl. Phys.*, **51**, 4651 (1980).
9. A. Thiruvengadam, *Erosion Wear Interface with Corrosion*, ASTM, 1982, STP 567, p. 219.
10. J. D. Park and K. Kang, *Jou. of Korean Soc. of Mechanical technology*, **5**, 161 (2003).
11. Annual book of ASTM standards G-32, 1992, p. 115.
12. S. M. Ahmed, K. Hokkirigawa, Y. Ito, R. Oba, *Wear*, **142**, 303 (1991).
13. H. G. Feller and Y. Kharrazi, *Wear*, **93**, 249 (1984).