

5000계열 Al 합금의 캐비테이션 특성에 관한 워터 캐비테이션 피닝의 영향

김성종*† · 현광용**

* 목포해양대학교 기관시스템공학부, ** 나고야 대학교 재료공학과 대학원

Effects of Water Cavitation Peening on Cavitation Characteristics of 5000 Series Al Alloys

Seong-Jong Kim*† · Koang-Yong Hyun**

* Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

** Department of Materials, Physics and Energy Engineering, Graduate School of Engineering, Nagoya University, 464-8601, Japan

요 약 : 최근 FRP 선박의 폐선 처리문제, 환경 규제 강화, 자원 재활용 등의 관점에서 소형 알루미늄 합금 선박의 건조가 증가하는 추세이다. 그러나 알루미늄은 가볍기 때문에 해양에서 고속으로 운행 가능한 알루미늄 선박은 캐비테이션이 발생되어 기포붕괴에 따른 큰 충격압력에 의해 캐비테이션 침식이 일어남으로서 재료의 수명에 있어 문제점을 드러내고 있다. 따라서 본 연구에서는 캐비테이션에 의한 손상을 방지하여 내구 수명을 연장시키기 위한 방법으로 워터 캐비테이션 피닝 기술을 선박용 알루미늄 합금에 적용하였다. 이를 위하여 워터 캐비테이션 피닝을 실시하여 내캐비테이션 특성이 가장 우수한 적용 시간을 규명하였다. 선박용 알루미늄 합금 5456-H116, 5083-H321 그리고 5052-O는 워터캐비테이션 피닝을 실시함으로써 내캐비테이션 특성이 워터 캐비테이션 피닝을 하지 않은 시편보다 무게감소량이 각각 42.11%, 50.0% 그리고 25.7% 개선되었다.

핵심용어 : 알루미늄 선박, 워터 캐비테이션 피닝, 캐비테이션, 무게감소량, 5000 계열 알루미늄 합금

Abstract : Recently, the construction of the small Al alloy ships is an increasing trend in viewpoint such as the disposal issue of a retired ship, the enhancement of environmental regulation and resources recycling etc. for FRP ships. However, Al alloy ship which can achieve high speed by light weight in marine environment is exposed to a problem on materials damage by cavitation-erosion which is generated by large impact pressure with the collapse of air bubbles due to cavitation. Consequently, in this study, water cavitation peening technology was applied in Al alloy for ship to enhance durability life by preventing cavitation damage. So, the water cavitation peening application time that presented the excellent cavitation characteristic investigated. The weight-loss of 5456-H116, 5083-H321 and 5052-O Al alloy at the optimum water cavitation peening time were improved to 42.11%, 50.0% and 25.7%, respectively.

Key Words : Al ship, Water cavitation peening, Cavitation, Weightloss, 5000 series Al alloy

1. 서 론

해상에서 최근 고유가 시대를 대비하여 연료소비율을 낮추고, 보다 효율적으로 경제성을 높일 수 있는 고강도, 경량화 및 설계기술이 요구되고 있다(Park et al., 2008a). 그러나 새로운 재료 개발은 긴 시간과 경제적인 부담이 크기 때문에 기존 재료에 효과적이고 손쉽게 원하는 성능과 수명을

유지하는 기술을 개발하는 것은 대단히 중요하다.

표면 처리는 산업현장에서 다양한 분야의 기계적 부품들에 대해 피로 수명을 연장시키기 위한 방법으로 많이 사용되고 있다. 그 일례로 쇼트 피닝은 쇼트 볼을 이용하여 고속으로 표면에 충격을 가하여 소성 변형시켜서 압축잔류응력을 형성시킨다. 이러한 압축잔류응력은 주기적인 하중을 받는 피로 및 응력부식균열 발생을 지연시키는데 매우 효과적이다(Maawad et al., 2011; Wangner, 1999; Cheong, 2001;

† 교신저자 : 종신회원, ksja@mmu.ac.kr, 061-240-7226

Askeland and Phule, 2009).

이와 같이 기존 재료의 특성을 개선시키기 위해 표면에 압축 잔류응력을 형성시켜 금속재료 표면에 다양한 기계적인 표면처리 기술이 적용되고 있다(Kanou et al., 2012; Gao, 2011; Liu et al., 2000; Park, 1998). 최근 여러 표면 처리 증소트 피닝의 분진 및 불량 쇼트볼에 의한 표면 손상 발생 가능성 등의 문제점을 보완한 워터 캐비테이션 피닝(Water cavitation peening, 이하 WCP)에 관한 다양한 연구가 진행 중에 있다(Han et al., 2007; Takakuwa and Soyama, 2012; Qin et al., 2006; Ju and Han, 2009). WCP는 유체내에서 금속 표면에 캐비티의 붕괴 시 발생하는 마이크로 젯(Micro jet)이 표면에 큰 압력을 가하여 압축잔류응력을 생성시키는 표면처리기술로서 냉간 가공법이다(Takakuwa et al., 2012). 이러한 WCP를 실시함으로써 피가공체 표면의 경도 증가는 물론 피로 특성이 향상되게 된다(Han et al., 2007). 또한 WCP의 주된 목적도 피로특성 향상에 두는 경우가 많으나 부가적인 효과도 기대할 수 있다. 또한 표면이 가공경화 되어 항복강도를 상승시켜 재료가 더욱 강화 됨으로써 캐비테이션에 의한 저항성이 향상된다(Grossman, 1952).

선행 연구에서는 WCP를 실시하여 표면의 형상 관찰과 부식특성을 연구한 바 있으나 WCP에 따른 캐비테이션 특성에 대한 연구는 드물다(Kim et al., 2012).

따라서 본 연구에서는 다양한 적용시간에 따른 5000계열 알루미늄 합금에 대하여 WCP를 증류수에서 실시하여 해수 상태에서 5시간 동안 캐비테이션 실험을 실시하였다. 본 연구 결과는 해수의 캐비테이션 환경에 노출된 알루미늄 합금의 내구 수명 예측에 도움이 될 것으로 기대된다.

2. 시험편 및 실험방법

본 연구에서 사용된 선박용 Al 합금은 5456-H116, 5083-H321과 5052-O이며, 각각의 화학 조성을 Table 1에 나타냈다. 이와 같은 5000계열은 Al-Mg계 알루미늄 합금으로서 Mg 함유량이 각각 5.2%, 3.69% 그리고 3.74%를 나타냈다. 시편의 크기는 20×20×5 mm로 제작하였으며, 에머리 페이퍼 2000번까지 연마를 실시한 후 아세톤으로 탈지하고 증류수로 세척하여 드라이기로 건조하였다.

Table 1. Chemical composition of test specimen. wt(%)

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
5456-H116	0.35	0.27	0.41	0.18	5.2	0.12	0.14	0.011	Bal
5083-H321	0.29	0.09	0.09	0.96	3.69	0.097	0.12	0.01	Bal
5052-O	0.18	0.33	0.07	0.03	3.74	0.18	0.04	0.02	Bal

Fig. 1은 WCP와 캐비테이션 실험을 위한 장비와 그 모식도를 나타냈다. ASTM G-32 규정에 의거하여 압전효과를 이용한 진동발생장치(Cavitation erosion tester)이며, 60 Hz, 220 V의 전력을 전자회로에 거쳐 20 kHz의 정격 출력을 발생시켜 진동자에 공급하는 역할을 하며 진폭은 정진폭 자동제어 방식으로 10 μm로 일정하게 하였다. 압전소자에 의한 진동발생은 원주 혼에 전기적인 교류를 가함으로써 축방향으로 진동을 일으키는 현상을 이용하였다. 시편은 진동자의 혼에 대향하도록 거치대에 고정하고 시편과의 스탠드 오프거리를 1 mm로 일정하게 유지하도록 하였다. WCP 시간은 0.5 min~ 10.0 min의 범위로 증류수에서 모든 시편에 대하여 실시하였다. 또한 캐비테이션 실험은 동일 장비로 시편과 혼의 거리를 1 mm로 하여 5시간 동안 천연해수에서 캐비테이션 실험을 실시하였다. 그리고 다양한 시간 동안 WCP한 후 시편 표면과 캐비테이션 실험 후 손상된 부위를 주사전자현미경으로 표면을 관찰하고 3D 현미경으로 손상 깊이를 측정 하였다. 또한 시간변수에 따라 WCP된 시편에 대하여 마이크로 비커스 경도기를 사용하여 인가하중 9.807 N, 유지시간은 10초로 하여 경도를 측정하였다.



Fig. 1. Schematic diagram and apparatus for water cavitation peening in the distilled water and cavitation test in sea water.

3. 실험 결과

Fig. 2는 WCP를 실시하지 않은 경우와 WCP 후 내캐비테이션 특성이 우수했던 WCP 시간에서 각각의 5456-H116, 5083-H321 그리고 5052-O Al 합금에 대한 표면 측정 결과를 나타낸 그래프이다. WCP를 실시하지 않은 경우, 5456-H116이 97.95 Hv로서 가장 높은 값을 나타냈으며, 그 다음으로는 5083-H321이 91.13 Hv, 5052-O가 54.15 Hv로서 가장 낮은 값을 나타냈다. 이는 화학성분의 조성에 기인한 것으로, 이러

5000계열 Al 합금의 캐비테이션 특성에 관한 워터 캐비테이션 피닝의 영향

한 조성차이에 기인하여 경도가 달라지며 그 결과 캐비테이션 손상정도에도 영향을 미칠 것으로 사료된다. 각각 최적의 시간동안 WCP 후 모두 향상된 경도 값을 나타냈다. 이는 WCP 처리 시 표면이 나노화되어 Hall-Petch식에 따라 증가한 것으로 사료되며(Park et al., 2008b), 그 결과 각각의 최적의 WCP 시간에서 우수한 내캐비테이션 특성을 나타낸 것으로 사료된다.

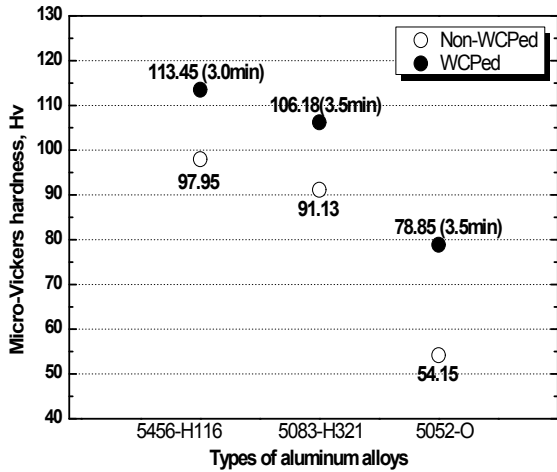


Fig. 2. Comparison of hardness of non-WCPed and WCPed 5456-H116, 5083-H321, 5052-O with the optimum time for anti-cavitation characteristic.

Fig. 3은 WCP된 5456-H116, 5083-H321 그리고 5052-O Al 합금에 대하여 표면형상을 관찰한 사진이다. WCP를 하지 않은 시편과 WCP된 시편은 큰 차이를 나타냈으며, 5456-H116과 5083-H321은 10분, 5052-O는 5.0분 동안 WCP를 한 경우가 전체적으로 소성 변형된 형상을 나타냈다. 가장 높은 경도를 나타낸 5456-H116 시편에서 가장 적게 손상되었으며, 가장 낮은 경도인 5052-O가 가장 큰 손상이 관찰되었다. 전반적으로 WCP 시간이 경과함에 따라 표면의 소성변형이 증가하여 WCP 10분의 경우 가장 거친 표면을 나타냈으며 WCP 시 캐비티가 붕괴되어 발생한 힘에 의해 부분적으로 박리된 부분도 관찰되었다. 이와 같은 Over-peening은 표면에 미소균열을 발생시켜 재료의 피로 수명에 악영향을 미친다. 즉, WCP시간을 증가시켜 재료에 가하는 에너지가 높은 것이 반드시 좋은 것이 아니므로 적절한 시간을 규명하는 것은 대단히 중요하다(Verpoort and Gerdes, 1989).

Fig. 4는 WCP된 5456-H116, 5083-H321 그리고 5052-O Al 합금을 천연 해수에서 5시간 동안 캐비테이션 실험 후 손상된 표면 사진이다. 전반적으로 모든 Al 합금에서, WCP를 실시하지 않은 시편의 경우 WCP를 실시한 것 보다 현저히 많은 손상이 관찰되었다. 그리고 표면 손상정도는 5456-H116

이 가장 적은 손상을 나타냈으며, 5052-O가 가장 큰 표면 손상을 나타냈다. 이는 Fig. 3에서 언급한 경도와도 상관관계가 있음을 알 수 있었다.

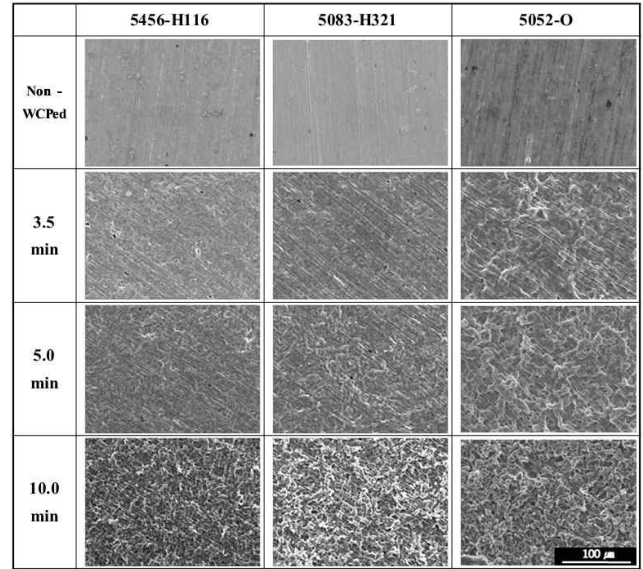


Fig. 3. Comparison of surface morphology with WCP time for 5456-H116, 5083-H321 and 5052-O Al alloys.

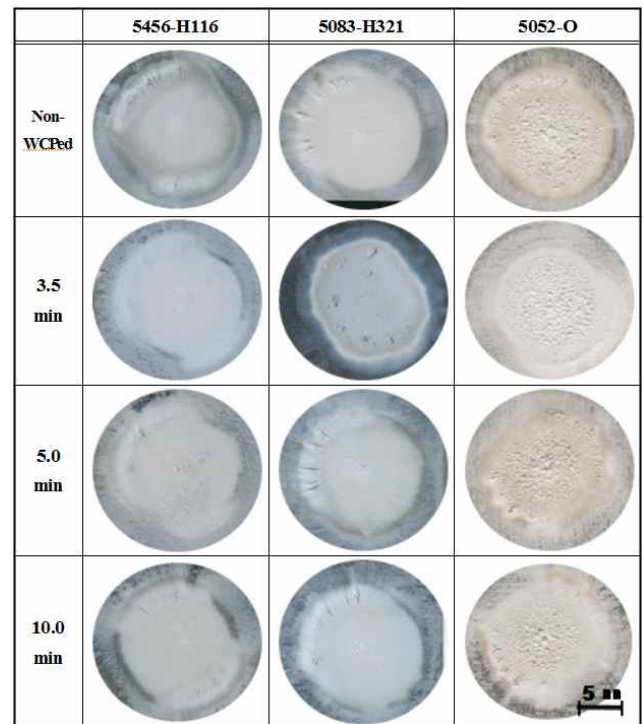


Fig. 4. Photos of surface observation after 5 Hr cavitation test in seawater for WCPed 5456-H116, 5083-H321 and 5052-O Al alloys.

Fig. 5는 다양한 시간동안 WCP된 5456-H116, 5083-H321 그리고 5052-O AI 합금에 대하여 천연 해수에서 5시간 동안 캐비테이션 시험 후 무게감소량을 비교한 그래프이다.

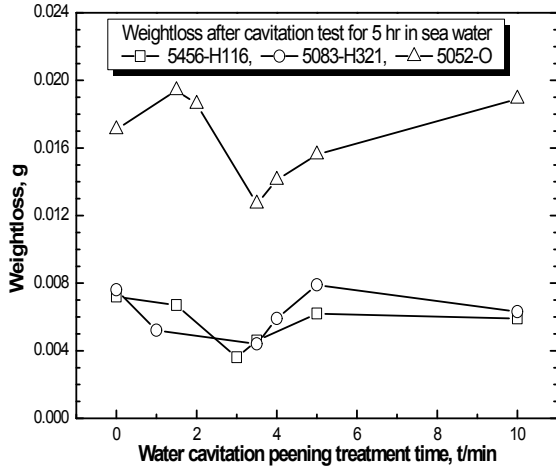


Fig. 5. The effect of WCP time on cavitation test after water cavitation peening in distilled water for 5456-H116, 5083-H321 and 5052-O Al alloy.

WCP를 실시하지 않은 5456-H116 AI 합금 경우, 캐비테이션에 의한 무게감소량이 0.0072 g을 나타낸 후 점차 감소하여 3.0분의 경우 0.0036 g으로서 가장 낮은 값을 나타내어 WCP를 실시하지 않은 경우에 비해 무게감소량이 50.0% 정도로 상당히 개선된 결과를 나타냈다. 이후부터는 무게감소량이 증가하는 경향을 나타냈다. 5083-H321 AI 합금은 WCP를 실시하지 않은 경우 손상이 가장 큰 0.0076 g을 나타냈다. WCP를 실시함으로써 무게 감소량이 감소하여 3.5분에는 0.0044 g으로 가장 낮은 값으로 42.11% 개선되었다. 그리고 5052-O AI 합금의 경우, 초기 1.5분과 2분의 경우 모재보다 오히려 높은 값을 나타낸 후 3.5분에는 가장 낮은 0.0127 g을 나타내어 25.7% 개선되었다. 본 연구에서 사용된 모든 AI 합금에서 3.0~3.5분에서 최소의 무게감소량을 나타냈다. 따라서 WCP에 의해 압축잔류응력이 형성된 표면의 경화 정도는 3.0분~3.5분이 가장 적절한 것으로 사료된다. 그리고 모든 재료에서 최소의 무게감소량을 나타냈던 WCP 시간 이후 무게감소량이 증가한 이유는 WCP 시간 증가로 Over-peening에 의해 미소 크랙이 발생하고 캐비테이션에 의해 쉽게 박리되었기 때문으로 사료된다. 5456-H116과 5083-H321은 10분의 경우 무게감소량이 다소 낮은 값을 나타냈는데 이는 과도한 WCP 때문에 깊이방향으로 증가된 국부적인 손상이 증가함에 따라 캐비테이션 시험 시 버블 쿠션(Bubble cushion) 효과에 의해 지연되어 같은 시간 조건에서 다소 낮은 무게감소량을 나타낸 것으로 사료된다. 그

러나 5052-O는 이런 현상이 나타나지 않은 이유는 가장 낮은 정도값을 나타내므로 Over peening에 의해 표면이 약화되어 캐비테이션의 충돌에 견디지 못하기 때문이며, 그 결과 가장 큰 무게 감소량을 나타냈다. 결국 캐비테이션 실험 결과, 무게감소량은 Non-WCPed 시편의 정도와 상관관계가 있음을 확인할 수 있었다. WCP에 의한 개선도는 5456-H116이 50.0%로 가장 큰 향상을 나타냈으며, 그 다음으로는 5083-H321은 42.11% 그리고 5052-O가 25.7%로서 가장 낮은 개선 효과를 나타냈다. 결국 높은 정도를 나타낼수록 WCP에 의한 캐비테이션 특성 개선 효과도 큼을 알 수 있었다.

Fig. 6은 WCP된 5456-H116, 5083-H321과 5052-O AI 합금 시험편에 대하여 천연 해수 용액에서 5시간 동안 캐비테이션 실험 후 표면형상을 관찰한 사진이다. 5456-H116과 5083-H321 AI 합금을 3.5분 동안 WCP를 실시한 경우, 표면 손상이 가장 작게 나타났다. 그리고 5052-O AI 합금은 전체적으로 다른 시편에 비해 크게 손상되었으며, 10.0분 동안 WCP를 실시한 경우, 덩굴모양으로 박리된 표면 손상이 가장 크게 나타났다. 전반적으로 각 재료의 Non-WCPed와 같은 WCP시간에서 5052-O가 가장 큰 손상을 나타냈으며, 5456-H116이 가장 작은 손상을 나타내 재료간의 손상 차이를 나타낸 경향은 Fig. 2에서 나타났던 Non-WCPed 시편의 정도와 상관관계를 갖는 것으로 판단된다(Lee et al., 2009). 따라서 가장 작은 정도값을 나타낸 5052-O의 경우가 가장 큰 손상을, 가장 큰 정도값을 나타낸 5456-H116이 가장 작은 손상을 나타냈다.

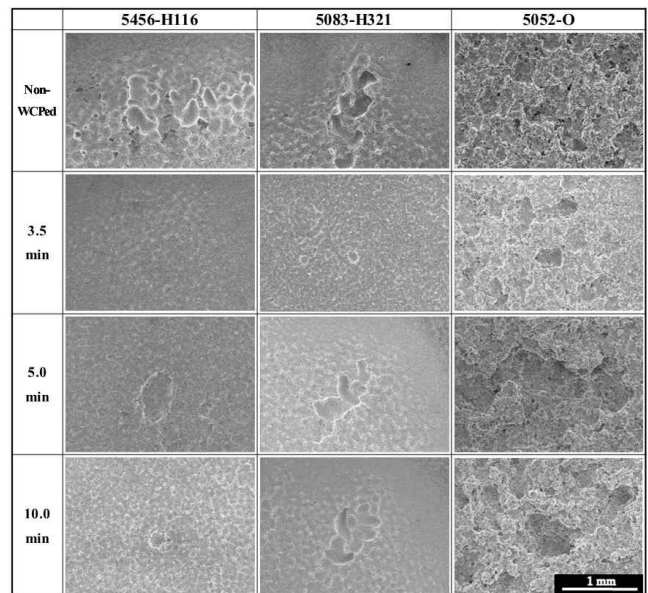
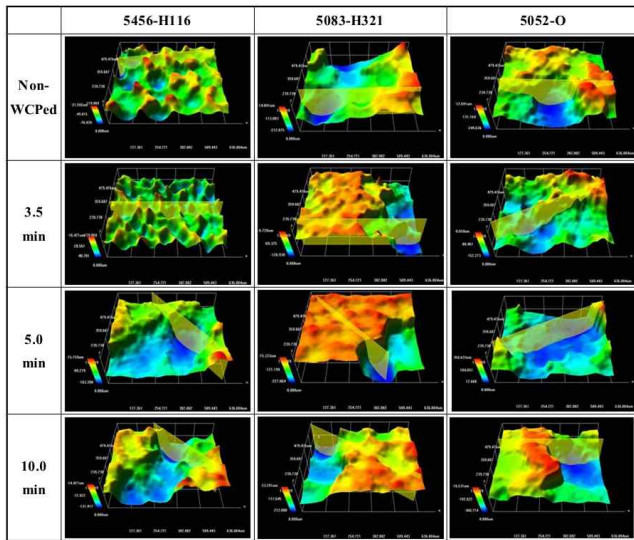


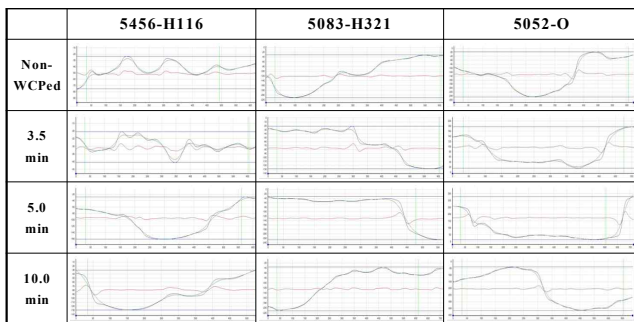
Fig. 6. Surface morphology after cavitation test for 5 hrs for water cavitation peened 5456-H116, 5083-H321 and 5052-O Al alloy with the lapse of time.

5000계열 Al 합금의 캐비테이션 특성에 관한 워터 캐비테이션 피닝의 영향

Fig. 7은 WCP된 5456-H116, 5083-H321과 5052-O Al 합금 시험편에 대하여 천연 해수 용액에서 5시간동안 캐비테이션 실험 후 표면형상을 3D 현미경으로 분석한 것이다. Fig. 7(a)는 3D 분석 시 표면의 형상을 입체적으로 나타낸 것이며, Fig. 7(b)는 표면의 손상을 선형 그래프로 나타냈다. 입체적인 표면 형상과 선형 그래프 모두 5083-H321의 경우가 5456-H116 보다 큰 손상으로 현저한 차이를 나타냈다. 5456-H116의 경우, Fig. 7(b)에서 나타냈듯이 최적의 WCP 시간에서 가장 적은 손상을 나타냈다. 그 외의 시간에서는 불균일한 압축잔류응력 형성으로 국부적으로 표면 경도가 다소 약한 부분부터 탈리되면서 깊이 방향으로 손상이 크기가 성장되며, 표면의 폭 방향으로 손상이 확대되는 것으로 사료된다. 전반적으로 각각의 WCP 시간에서 5456-H116 이 가장 작은 손상을 나타냈으며, 5052-O Al 합금이 가장 큰 손상을 나타냈다.



(a)



(b)

Fig. 7. The behaviors of damage depth by 3D analysis after cavitation test in sea water for WCPed 5456-H116, 5083-H321 and 5052-O Al alloys with the lapse of time.

WCP된 5456-H116, 5083-H321과 5052-O Al 합금 시험편에 대하여 천연 해수 용액에서 5시간동안 캐비테이션 실험 후 표면형상을 3D 현미경으로 분석한 손상깊이를 Fig. 8에 나타냈다. 5456-H116의 경우, Non-WCPed 시편의 손상 깊이는 51.95 μm 을 나타냈다. 이는 무게감소량이 가장 컸던 Non-WCPed 시험편으로서 시편 전체적으로 손상되어 상대적인 손상 정도의 차이가 작아서 손상깊이가 작게 나타났다. 그 후 1.5 min에서 130.50 μm 의 값으로 증가하는 경향을 나타냈으나 3.5 min에서 26.23 μm 최저의 손상 깊이를 나타냈다. 5083-H321의 경우, Non-WCPed 시편의 손상 깊이는 182.45 μm 을 나타낸 후 1.0 min에서 133.57 μm 로 감소하였으며, 3.5 min에서 118.56 μm 최저의 손상 깊이를 나타낸 후 증가하는 경향을 나타냈다. 5052-O의 경우, Non-WCPed 시편의 손상 깊이는 249.47 μm 을 나타냈으며, 1.5 min에서 275.45 μm 로 오히려 높은 값을 나타냈다. 3.5 min에서 148.06 μm 최저의 손상 깊이를 나타낸 후 다시 손상 깊이가 증가하는 경향을 나타냈다. 5456-H116과 5083-H321은 3.5분에서 최소의 손상 깊이를 나타낸 후, 손상 깊이가 증가하는 경향을 나타냈으나 10.0분에서는 오히려 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 버블 쿠션 효과로 인해 손상 부위에서 캐비티들 간의 상쇄작용으로 손상이 감소하는 경향을 나타낸 것으로 사료된다(Hwang and Hwang, 1998). 전반적으로 그래프의 경향은 무게감소량과 비슷한 그래프의 경향을 나타냈다. 그리고 전반적으로 Non-WCPed 시편의 경도 값이 가장 낮았던 5052-O가 가장 큰 손상 깊이를 나타냈고, 가장 큰 경도 값을 나타냈던 5456-H116이 가장 낮은 값을 나타내어 경도와의 상관관계를 나타냈다. 그리고 다른 알루미늄합금에 비해 WCP된 5052-O는 Non-WCPed 시편과 최소 무게감소량을 나타냈던 WCP 시간의 손상 깊이가 가장 많이 차이를 나타내 3D분석 측면에서는 가장 크게 개선되었다.

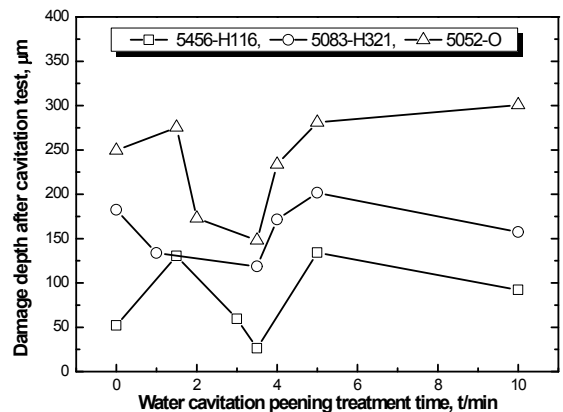


Fig. 8. Comparison of the behaviors of damage depth by 3D analysis after cavitation test in sea water for WCPed 5456-H116, 5083-H321 and 5052-O Al alloys with the lapse of time.

4. 결 론

WCP 시간에 따른 Al 합금 5456-H116, 5083-H321 그리고 5052-O의 캐비테이션 특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 캐비테이션 실험결과, 무게감소량 측면에서 5456-H116은 3.0분, 5083-H321과 5052-O는 3.5분에서 가장 우수한 내캐비테이션 특성을 나타냈다. WCP된 후 시편에 대하여 캐비테이션 실험 후 3D 분석결과는 5456-H116, 5083-H321 그리고 5052-O 모두 손상 깊이가 가장 작은 것은 3.5분으로 나타났다. 전반적으로 가장 작은 경도값을 나타낸 5052-O의 경우가 가장 큰 손상을 나타냈으며 가장 큰 경도값을 나타낸 5456-H116이 가장 작은 손상을 나타내어 재료간의 손상 차이를 나타낸 경향은 Non-WCPed 시편의 경도와 상관관계가 있음을 알 수 있었다. 또한 알루미늄 합금 시편 종류와 무관하게 최적 WCP시간 결정은 대단히 중요하다는 사실을 확인 할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Askeland, D. R. and P. P. Phule(2009), The science and engineering of materials, Scitech, p. 277.
- [2] Cheong, S. K.(2001), Shot peening processing, pp. 309.
- [3] Gao, Y. K.(2011), Improvement of fatigue property in 7050-T7451 aluminum alloy by laser peeing and shot peening, Materials Science and Engineering A528, pp. 3823-3828.
- [4] Grossman, N.(1952), The Effect of shot peening on damage caused by cavitation, ASTM, No. 183, TP 107, pp. 61-66
- [5] Han, B., D. Y. Ju and W. P. Jia(2007), Influence of water cavitation peening with aeration on fatigue behaviour of SAE1045 steel, Applied Surface Science, Vol. 253, Issue 24, pp. 9342-9346.
- [6] Hwang, J. H. and T. H. Hwang(1998), A Study on the characteristics of vibratory cavitation erosion - corrosion for austenitic stainless steel, Research report of Kangwon Province College., Vol. 1, pp. 1-7.
- [7] Ju, D. Y. and B. Han(2009), Investigation of water cavitation peening-induced microstructures in the near-surface layer of pure titanium, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, Issue 10, pp. 4789-4794.
- [8] Kanou, S., O. Takakuwa, S. R. Mannava, D. Qian, V. K. vasudevan and H. Soyama(2012), Effect of the impact energy of various peening techniques on the induced plastic deformation region, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 212, pp. 1998-2006.
- [9] Kim, S. J., K. Y. Hyun and S. K. Jang(2012), Effects of water cavitation peening on electrochemical characteristic by using micro - droplet cell of Al-Mg alloy, Current Applied Physics, Vol. 12, pp. 24-30.
- [10] Lee, M. H., S. H. Na, S. K. Cheong and M. H. Lee(2009), A Study on the hardness of SUS 304 by water jet peening, The Korean society for railway, Vol. 2009, pp. 2295-2299.
- [11] Liu, G., J. Lu and K. Lu(2000), Surface nanocrystallization of 316L stainless steel induced by ultrasonic shot peening, Materials Science and Engineering A286, pp. 91-95.
- [12] Maawad, E., H. G. Brokmeier, L. Wanger, Y. Sano and C. Genzel(2011), Investigation on the surface and near-surface characteristics of Ti-2.5Cu after various mechanical surface treatments, Surface & Coatings Technology, Vol. 205, pp. 3644-3650.
- [13] Park, J. D.(1998), Improvement of residual stress of SUS 316 by using cavitating jet, The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 22, No. 11. pp. 1956-1963.
- [14] Park, S. M., K. S. Moon and K. D. Park(2008a), The effect of compress residual stress on corrosion of the shot peened spring steel, Transztions of KSAE, Vol. 16, No. 2, pp. 35-42.
- [15] Park, W. K., W. S. Hwang, O. Y. Kwon, T. S. Oh and W. J. Kim(2008b), The science and design of engineering materials(second edition), McGraw-Hilll Korea, pp. 226-232.
- [16] Qin, M., D. Y. Ju and R. Oba(2006), Investigation of the influence of incidence angle on the process capability of water cavitation peening, Surface and Coating Technology, Vol. 201, Issues 3-4, pp. 1409-1413.
- [17] Takakuwa, O., M. Nishikawa and H. Soyama(2012), Estimation of the depth of surface modification layer induced by cavitaion peening, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 212, Issue 8, pp. 1716-1722.
- [18] Takakuwa, O. and H. Soyama(2012), Suppression of hydrogen-assisted fatigue crack growth in austenitic stainless steel by cavitation peening, International journal of hydrogen energy, Vol. 37, pp. 5268-5276.
- [19] Verpoort, C. M. and C. Gerdes(1989), Influence of shot

5000계열 Al 합금의 캐비테이션 특성에 관한 워터 캐비테이션 피닝의 영향

peening on material properties of turbine blades, shot peening theory and application, Institute for Industrial Technology Transfer International, Vol. 1, pp. 11-70.

- [20] Wangner, L.(1999), Mechanical surface treatments on titanium, aluminum and magnesium alloys, Materials Science and Engineering A263, pp. 210-216.

원고접수일 : 2012년 08월 07일

원고수정일 : 2012년 09월 19일

게재확정일 : 2012년 10월 26일