

ALBC3 합금의 쇼트피닝 분사거리에 따른 해수 내 캐비테이션 손상 평가

한 민 수¹ · 장 석 기¹ · 김 종 신² · 김 성 종^{1,†}

¹목포해양대학교 기관시스템공학부, ²한국선급
(2013년 9월 25일 접수, 2013년 10월 25일 수정, 2013년 10월 28일 채택)

Evaluation on cavitation damage in sea water with shot peening stand-off distance for ALBC3 alloy

Min-Su Han¹, Seok-Ki Jang¹, Jong-Sin Kim², and Seong-Jong Kim^{1,†}

¹Division of Marine System Engineering, Mokpo Maritime University, Haeyangdaehak-ro 91, Mokpo-si, Jeonnam, Korea.

²Korean Register of Shipping, 36, Myeongji ocean city 9-ro Gangseo, Busan, Korea.

(Received September 25, 2013; Revised October 25, 2013; Accepted October 28, 2013)

Marine equipment exposed to harsh environments requires not only excellent corrosion resistance but also improvement of physical characteristics against natural material degradation. With growing interests in ocean energy resources, the higher reliability for marine equipment has become more important in terms of material characteristics. ALBC3 alloy represents excellent corrosion resistance and is widely used in corrosive environments. However, cavitation damage occurs frequently due to its poor durability in high flow rate of marine environment. In this research, shot peening technology was employed as a surface modification with shot peening stand-off distance to mitigate cavitation damage. The effects of shot peening on extent of cavitation damage and weight loss were evaluated for both shot peened and non-peened specimens. The results revealed that the application of shot peening decreased cavitation damage for all experimental conditions in comparison with the non-peened specimens. The optimum stand-off distance was determined to be 10 cm, since more than 35 % of cavitation damage reduction was observed.

Keywords : corrosion resistance, cavitation damage, shot-peening, surface modification, stand-off distance

1. 서 론

해양에너지에 대한 관심이 고조되는 요즘 해양기자재 산업은 가혹한 부식 환경에서도 높은 내구성으로 제품 수명을 연장할 수 있는 표면 개질 방안을 모색하고 있다. 이러한 제품은 내구성 향상뿐만 아니라 생산 원가를 절감하고 공정을 최소화 할 수 있어야 경쟁력을 갖게 된다. 작업 공정이 환경 친화적이고 설치비가 적은 쇼트피닝 가공기술은 경도가 강한 쇼트볼을 금속 가공물 표면에 직접 분사하여 표면 경화조직과 압축잔류응력을 형성함으로써 표면강도와 피로 수명을 향상시키는 가공방법이다. 특히 사용 중이거나 결함이 있는 제품에도 쇼트피닝을 별도의 공정 없이 적용하여 피로 수명을 연장할 수 있는 장점이 있어 기계, 항공, 자동차 분야 등에서 폭넓게 연구되고 있다¹⁾. 쇼트피닝 효과를 극대

화하기 위해서는 압축잔류응력이 재료 표면에서 최대를 나타내면서 균일한 분포를 나타내야 한다. 이를 달성하기 위해서는 쇼트볼의 분사거리와 밀도는 쇼트피닝 가공 조건 등이 대단히 중요한 변수가 된다^{2,3)}. Ebenau 등의 연구에 의하면, 쇼트피닝 기술은 연질 재료가 경질 재료보다 약 3배 정도 가공효과가 향상된다고 평가하였다⁴⁾. 즉 가공 전후의 표면 강도 변화가 클수록 내구성이 크게 향상 된다는 의미이다. 본 연구에서는 해양환경에서 사용빈도가 높고 연질재료인 동합금(ALBC3 합금)에 쇼트피닝 기술을 적용하였다. ALBC3 합금은 우수한 내식성에도 불구하고 고유속의 해양환경에서 캐비테이션 손상이 자주 발생한다^{5,6)}.

본 연구에서는 연질 주조재인 ALBC3 합금에 쇼트피닝 거리를 변수로 표면 개질을 실시하여 천연 해수 환경에서 캐비테이션 실험을 통한 표면 손상정도를 평가하였다.

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

2. 실험재료 및 실험 방법

본 연구에 사용된 재료는 ALBC3 합금이며, 화학조성을 Table1에 나타냈다. ALBC3 합금에 쇼트피닝 실험을 위해 시험편을 2 cm X 2 cm 제작하여 표면을 에머리 페이퍼로 2000번까지 연마 후 쇼트피닝을 실시하였다.

쇼트피닝장비는 고압의 압축공기를 내부 직경 7.9 mm인 노즐로 분사하는 공기식 투사장치를 사용하였다. 사용된 쇼트볼(conditioned stainless steel cut wire shot, STS 304, SCCW16)의 직경은 0.4 mm이고 경도는 50.6~54.5

H_{RC}이다. 쇼트피닝은 쇼트볼 분사압력 4 bar와 분사시간 3.5분을 일정하게 유지하고, 분사거리 5, 10, 15 그리고 20 cm을 변수로 하여 실시하였다. 그리고 시험편 단면은 증류수(120 ml) + 염산(30 ml, 32%) + 염화철Ⅲ(10 g)으로 만든 마이크로 에칭액에 5~10초 동안 침지시킨 뒤 세척 및 건조하여 단면 조직을 관찰하였다. 또한 쇼트피닝에 의한 내구성을 평가하기 위하여 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편과 쇼트피닝된 시험편에 대하여 해수 내에서 캐비테이션 실험을 실시하였다. 캐비테이션 발생장치는 ASTM G32-92에 의거하여 주파수 20 kHz의 초음파 진동 장치(ultrasonic vibratory device)를 사용하였다. 캐비테이션 실험은 약 2000 cm³ 크기 수조안에서 천연해수를 30 °C로 유지하고 진동 혼(horn) 진폭은 30 μm로 제어하여 캐비테이션 발생에 의한 충격을 가하도록 설치하였다. 그리고 시편 표면과 발진 혼에 부착된 팁(tip)과의 거리는 1 mm로 일정하게 유지시

Table 1. Chemical composition of ALBC3 alloy

Component	Cu	Al	Fe	Ni	Zn	Si	Mn
wt(%)	Balance	9.30	3.66	4.39	0.34	0.17	0.55

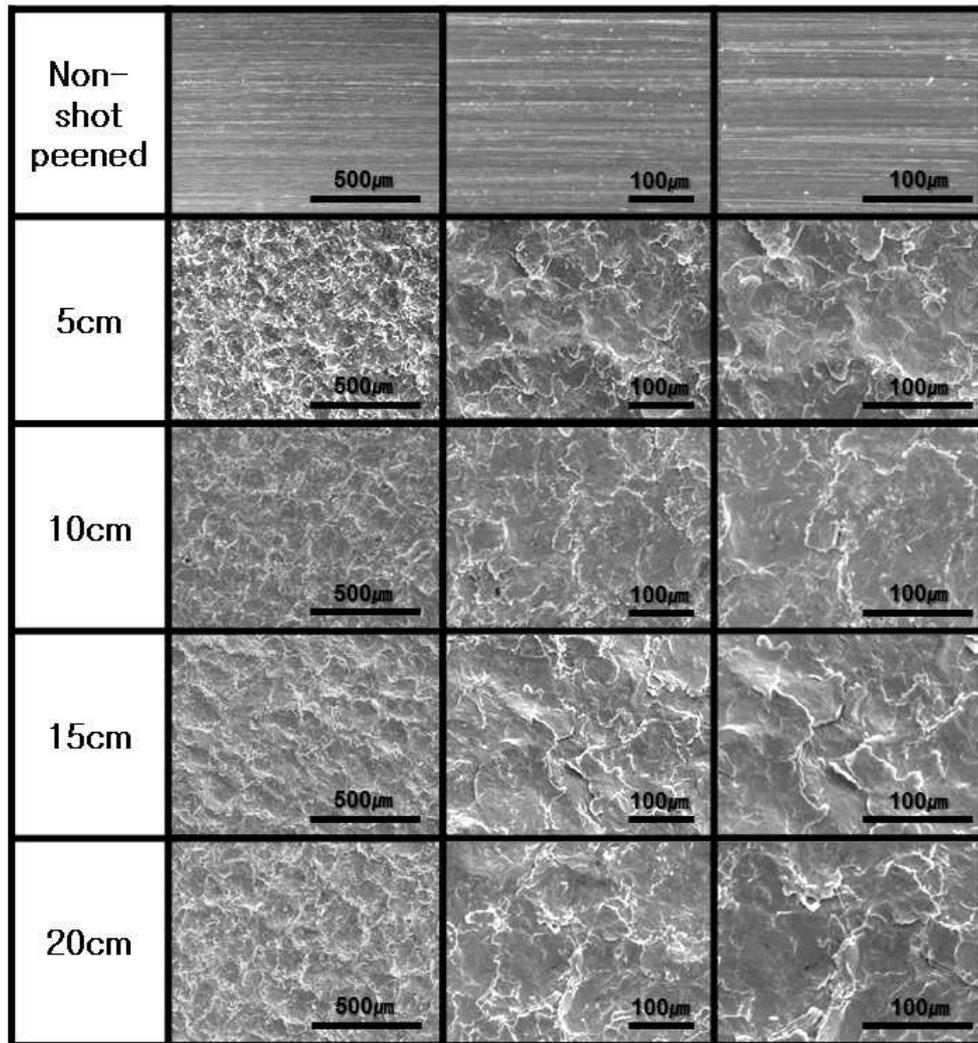


Fig. 1. Surface morphologies after shot peening with stand-off distance for ALBC3 alloy.

켜 10시간 동안 캐비테이션 실험을 실시하였다. 캐비테이션 실험 전후의 무게를 10^{-4} g까지 측정하여 무게 감소량을 상호 비교하였다. 또한 손상면의 표면과 측면은 각각 주사전자현미경과 광학현미경으로 관찰하였으며, 시편 손상깊이는 3D 현미경으로 비교·분석하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 1은 ALBC3 합금에 대하여 쇼트피닝 이후 표면을 관찰한 것이다. 쇼트피닝 기술 적용 시 쇼트볼의 충돌로 인해 표면이 변형되어 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편과 큰 차이를 나타냈다. 분사거리 5 cm인 경우, 짧은 분사거리에 의한 높은 충돌에너지로 시험편 표면에 가장 심한 요철을 형성하였다. 분사거리가 짧아 공기압이 높고 쇼트볼이 분산되는 양이 적으므로 시험편에 집중되어 깊은 요철을 만든 것으로 사료된다. 또한 거칠고 깊은 요철 형상으로 보아 오버피닝에 의하여 소성변형 층이 탈리됨으로써 소성변형 영역이 깊지 않을 것으로 판단된다. 분사거리 10 cm인 경우, 쇼트피닝된 시험편 중 가장 평활한 표면 형상을 관찰할 수 있었다. 요철의 경계에서 탈리로 인한 용기나 찢김 형상이

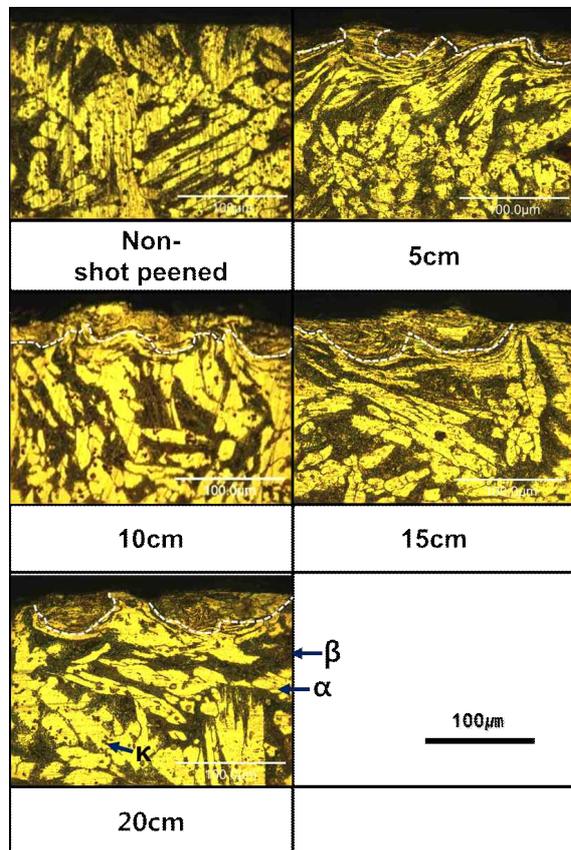


Fig. 2. Cross section morphologies with stand-off distance after shot peening for ALBC3 alloy.

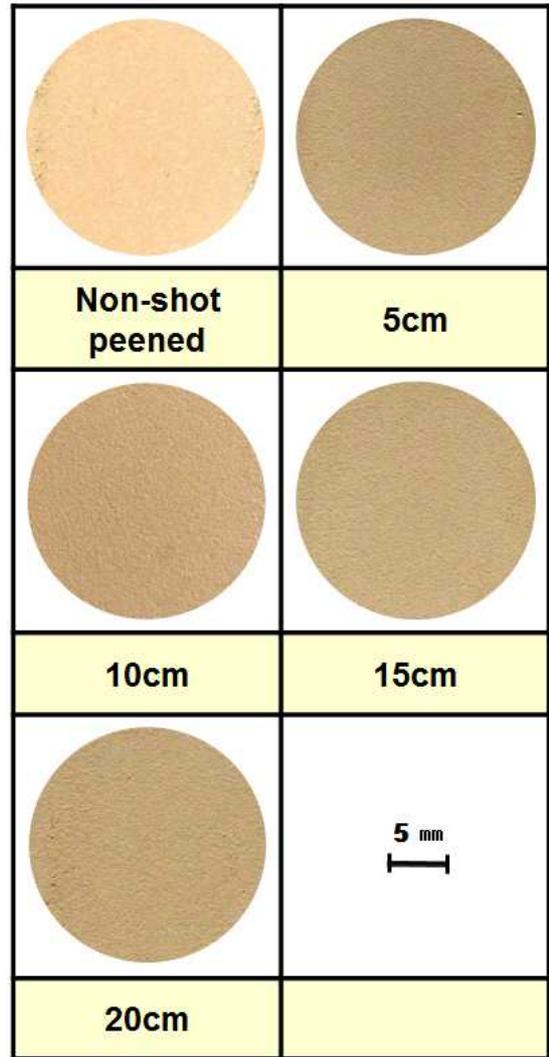


Fig. 3. Surface micrographs with stand-off distance after cavitation experiment in sea water for shot peened ALBC3 alloy.

상대적으로 적게 관찰되었다. 이러한 표면 균질화 현상은 특히 구조물에 대해 큰 효과를 나타낼 수 있으며 표면의 공공(void)과 같은 결함조직은 단조가공과 같은 역할에 의해 주변영역과 겹쳐짐으로써 제거되며 조직학적으로도 수많은 전위를 형성시킴으로써 경도 향상 효과를 나타낸다⁷⁾. 이후 분사거리가 증가할수록 요철 형성 정도가 심해지고 요철의 경계에서 표면 탈리로 인해 재료의 용기와 찢김 형상이 관찰되고 있다. 이는 압축된 공기가 분사되면서 분사거리가 증가할수록 압력 변화와 대기와의 마찰저항의 증가로 비등속류유동을 하게 되어 압축공기에 의한 에너지는 감소하고 쇼트볼의 집중도가 낮아진 것으로 사료된다. 그러나 분사거리가 증가할수록 비등속류에 의한 에너지 손실보다 낙하하는 쇼트볼의 위치에너지는 크게 증가하게 되며 쇼트볼의 높은 충돌 에너지에 의해 요철과 탈리를 가속화시킨 것으로 판단된다.

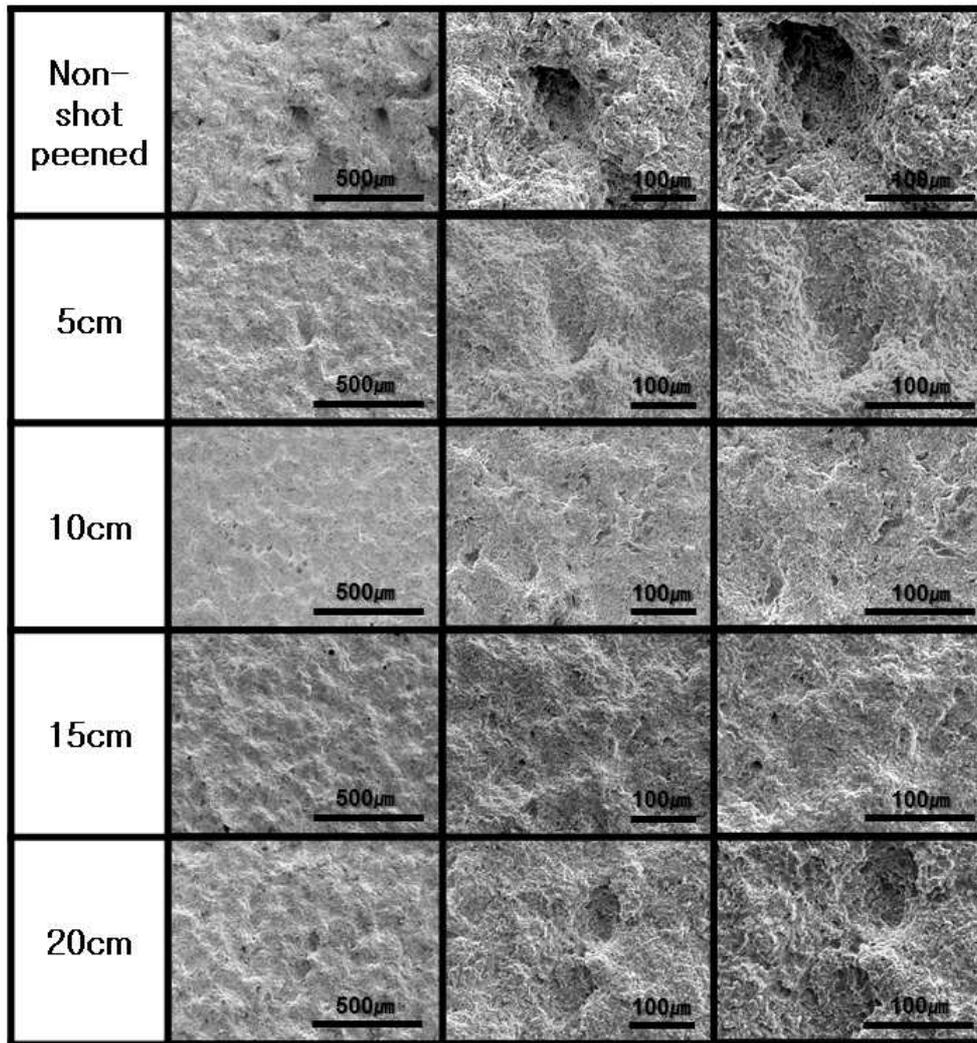


Fig. 4. Surface morphologies with stand-off distance after cavitation experiments in sea water during 10Hrs for shot peened ALBC3 alloy.

Fig. 2는 ALBC3 합금에 대하여 쇼트피닝 이후 3D 현미경으로 단면 관찰 결과를 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편과 비교한 것이다. 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편의 경우, 밝은 영역 α 상(phase), 어두운 영역 β 상 그리고 구상조직을 갖는 κ 상이 부분적으로 함께 관찰되었다⁸⁾. 분사거리 5 cm의 경우, 경화층의 깊이가 얇고 표면이 불연속적인 경향을 나타냈다. Fig. 1의 표면관찰에서 가장 평활한 면이 관찰되었던 분사거리 10 cm일 때 경화층이 가장 균일하고 깊게 형성되었다. 또한 분사거리 15 cm와 20 cm의 경우, 경화층이 상대적으로 깊게 관찰되었으나 표면에서 연속적으로 분포하지 않았다. 이러한 균질조직은 나노 두께의 얇은 층만으로도 기계적 강도와 피로수명을 크게 증가시킬 수 있다.⁹⁾ 이와 같이 쇼트피닝에 의한 ALBC3 합금 표면은 경화층과 압축잔류응력 형성으로 인해 내구성이 향상되어 캐비테이션 손상을 경감시킬 것으로 사료된다.

Fig. 3은 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편과 쇼트피닝된 ALBC3 합금에 대하여 10시간 동안 캐비테이션 실험 후 시험편 표면을 나타낸 것이다. 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편과 비교하면 모든 조건하에서 쇼트피닝을 실시한 경우가 캐비테이션 손상이 적게 발생하였다. 쇼트피닝 적용에 따른 미세하고 조밀한 결정립을 갖는 경화층과 압축잔류응력 형성으로 인해 캐비테이션 충격압에 대한 저항성이 향상되었기 때문에 사료된다. 또한 ‘편(Pyoun)’ 등은 304 스테인리스강의 피닝 연구에서 조직이 미세화되고 결정입계가 증가해도 부식저항성의 영향은 거의 없는 것으로 평가⁹⁾하였으며, 본 연구 또한 해수 중 캐비테이션 실험 과정에서 전기화학적 부식손상의 영향이 거의 없을 것으로 판단된다.

Fig. 4는 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편과 쇼트피닝된 ALBC3 합금에 대하여 10시간 동안 캐비테이션 실험 후 주사전자현미경(SEM)으로 시험편 표면을 관찰한 것이다.

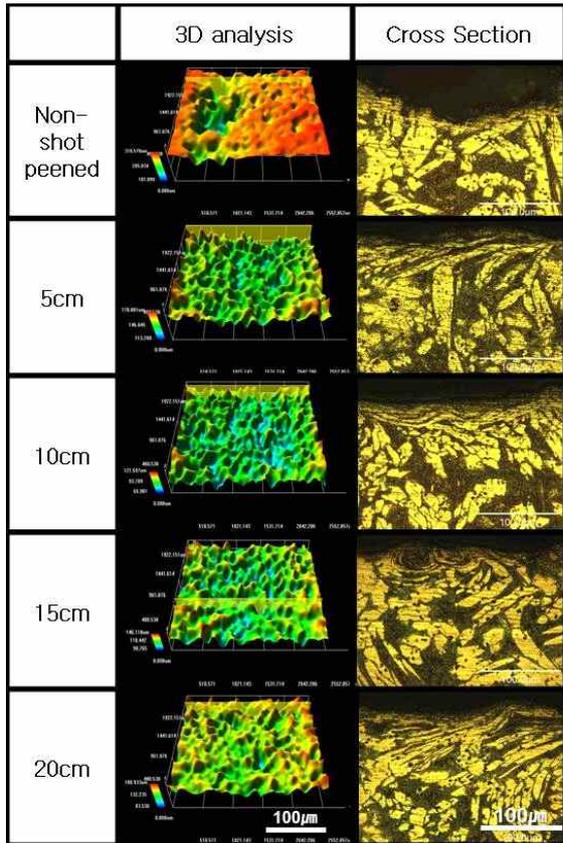


Fig. 5. 3D analysis and cross section morphologies with stand-off distance after cavitation experiments in sea water during 10Hrs for shot peened ALBC3 alloy.

캐비테이션 손상은 모든 시험편에서 관찰되며 특히 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편에서 가장 큰 손상이 관찰되었다. 그리고 쇼트피닝된 시험편에 대하여 Fig. 1의 표면 관찰 사진들과 비교해 보면, 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편은 캐비티 충격압에 의한 탈리 현상으로 넓고 깊은 홈이 전면에 걸쳐 가장 크게 관찰되었다. 짧은 분사거리에 의한 높은 충돌에너지로 오버피닝이 관찰된 분사거리 5 cm의 경우, 쇼트피닝과정에서 생긴 심한 요철이 강한 캐비티의 충격압으로 완만하지만 깊고 넓은 표면 탈리 현상이 관찰되었다. 이것은 캐비티 붕괴 특성상 표면이 거칠고 캐비티의 이탈을 방해할수록 캐비티의 집적이 쉬워지고, 집적과 붕괴가 반복되어 캐비티 충격압을 전달하여 재료표면을 더욱 손상시킨 것으로 사료된다. 상대적으로 요철이 적고 평탄했던 분사거리 10 cm 시험편이 캐비테이션 손상이 가장 적게 나타남을 알 수 있다. 이는 분사거리 10 cm에서 가장 넓게 분포된 경화층의 형성에 기인한 결과로 사료된다. 분사거리 15 cm의 경우는 분사거리 10 cm인 경우보다 캐비테이션 손상이 더 크게 관찰되었으나 표면 형상은 유사하였다. 또한 분사거리 20 cm인 경우는 강한 캐비티의 충격압에 의해 전체적으로 탈리현상이 관찰되었고 공식(pitting)과 유사한 홈이 일

부 관찰되었다. 이러한 현상은 미세하고 조밀한 결정립이 깊게 형성되었을지라도 표면에 고르게 분포하지 않으면 캐비티의 충격압에 의해 국부적인 손상이 가속화 되는 것으로 사료된다.

Fig. 5는 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편과 쇼트피닝된 ALBC3 합금에 대하여 10시간 동안 캐비테이션 실험 후 3D현미경과 광학현미경으로 각각 시험편 표면과 단면을 관찰한 것이다. 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편의 경우는 표면과 단면 관찰 모두 캐비테이션 충격압에 의한 탈리로 인해 대단히 크고 깊은 손상이 관찰되었다. 쇼트피닝 분사거리 10 cm에서는 표면 손상 및 거칠기가 가장 작게 나타났으며, 단면 관찰 결과 역시 소성변형에 의한 경화층이 가장 균일하면서도 깊게 표면 전반에 걸쳐 분포하였다. 반면 다른 분사거리 조건에서는 표면 손상정도가 분사거리 10 cm에 비해 상대적으로 크고 거칠게 나타났으나 상호 비교 시 거의 유사한 경향이 관찰되었다. 단면 관찰에서는 앞선 Fig. 2와 비교해 보면 캐비테이션 전후의 손상정도를 쇼트피닝 분사거리 조건에 따라 쉽게 그 변화를 알 수 있다. 분사거리 5와 20 cm의 경우 경화층이 거의 사라지거나 없어졌으며, 분사거리 15 cm의 경우에는 경화층이 표면에 부분적으로만 국한되어 관찰되었다. 따라서 쇼트피닝 분사거리 10 cm가 전체적으로 표면에 가장 큰 압축잔류응력이 형성되었을 것으로 판단되며, 그 결과 캐비테이션 저항성이 가장 우수하게 나타난 것으로 사료된다.

Fig. 6은 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편과 쇼트피닝된 ALBC3 합금에 대하여 10시간 동안 캐비테이션 실험 후 3D현미경으로 평균 손상깊이를 측정된 결과이다. 모든 캐비테이션 실험 조건에서 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편이 110 µm로 가장 큰 손상깊이를 나타냈다. 쇼트피닝 분사거리 5 cm인 경우 대략 50 µm의 손상 깊이가 관찰되었으며, 분사거리 10 cm인 경우는 대략 40 µm로 가장 작은 손상깊이가

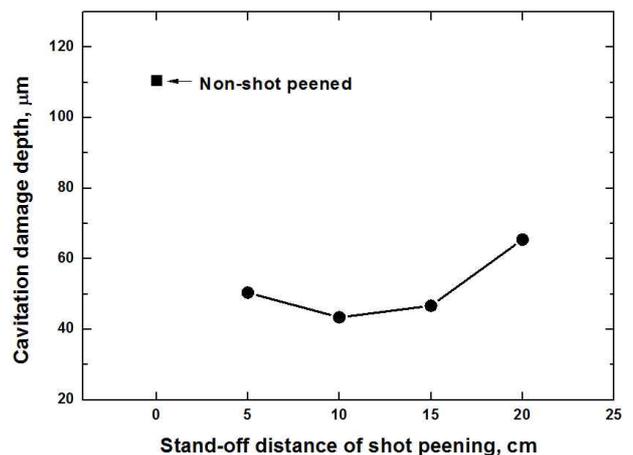


Fig. 6. Damage depth with stand-off distance after cavitation experiment in sea water for shot peened ALBC3 alloy.

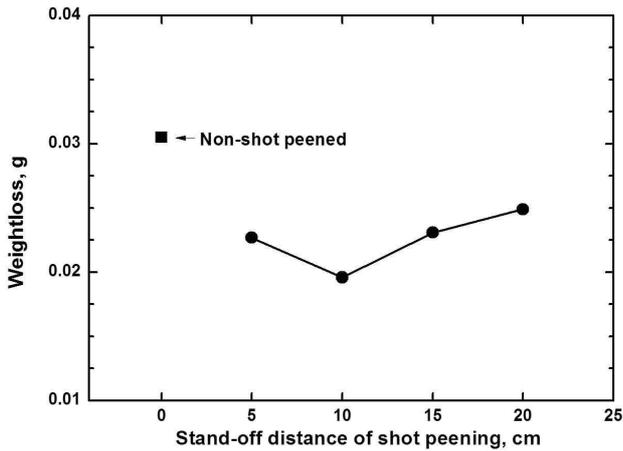


Fig. 7. Weight loss after cavitation experiment in sea water for shot peened ALBC3 alloy.

관찰되었다. 이는 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편과 비교하여 쇼트피닝된 시험편의 표면 경도 상승과 소성변형에 의한 경화층 형성이 표면 거칠기 경감에도 영향을 미친 것으로 사료된다. 분사거리 15 와 20 cm에서는 각각 45와 65 μm 의 손상 깊이를 나타냈다.

Fig. 7은 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편과 쇼트피닝된 ALBC3 합금에 대하여 10시간 동안 캐비테이션 실험 후 무게 감소량을 측정된 결과이다. 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편의 무게감소량은 0.0305 g이었으며, 상대적으로 쇼트피닝된 시험편은 무게감소량이 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편보다 낮게 나타났다. 분사거리 10 cm의 경우 무게감소량이 0.0196 g으로 가장 작은 값을 나타냈으며 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편 대비 대략 35 %의 개선효과를 나타냈다. 이는 쇼트피닝에 의한 가공경화로 인해 표면의 경도가 증가하여 내마모성 또는 내캐비테이션 특성이 향상된 것으로 판단된다. 또한 앞선 Fig. 2의 단면 관찰 결과에서 형성된 소성변형 층의 깊이가 일정하고 균일하게 분포할수록 내구성이 향상된 것으로 여겨진다. 그리고 분사거리 20 cm에서는 무게감소량이 0.0249 g으로 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편 대비 18 %의 개선도를 나타냈으나 쇼트피닝된 시험편 중 가장 큰 무게손실을 나타냈다. 천연 해수환경에서 캐비테이션 실험 결과, 분사거리 10 cm인 경우가 가장 낮은 무게감소량을 나타냈으므로 캐비테이션 저항성이 가

장 우수한 조건으로 판단된다.

4. 결론

ALBC3 합금에 대하여 다양한 쇼트피닝 분사거리에 따른 캐비테이션 저항성을 평가한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다. 단면 관찰 결과, 분사거리 10 cm의 경우 다른 조건과 비교하여 쇼트피닝에 의한 변형된 조직이 균일하고 연속적으로 분포하였으며, 표면개질효과가 높게 평가되었다.

해수환경에서 캐비테이션 실험 결과, 표면 손상정도는 쇼트피닝을 실시하지 않은 경우가 가장 심한 손상을 나타냈다. 쇼트피닝 분사거리 10 cm에서 표면손상이 적고 가장 적은 무게감소량을 나타냈으므로 캐비테이션 저항성이 가장 우수한 쇼트피닝 분사거리로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 교육부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임 (No. 2011-09-대-01-039)

참고 문헌

1. D. W. Hammand and S. A. Meguid, *Eng. Fract. Mech.*, **17**, 373 (1990).
2. H. Aoki, E. Nagashima and T. Miura, *Proceedings of the 4th International Conference on Shot Peening*, p. 513 (1990).
3. S. G. Jeong, S. H. Lee and S. J. Jeong, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, **25**, 1590 (2001).
4. A. Ebenau, D. Lohe, O. Vohringer and E. Macherauch, *Proceedings of the 4th International Conference on Shot Peening*, **1**, 389 (1990).
5. M. H. IM, *Corros. Sci. Tech.*, **10**, 218 (2011).
6. S. K. Min, K. T. Kim, and W. S. Hwang, *Corros. Sci. Tech.*, **10**, 125 (2011).
7. A. Cherif, Y. Pyoun and B. Scholtes, *J. Mater. Eng. Perform.*, **19**, 282 (2010).
8. S. M. Hong, M. K. Lee, G. H. Kim, K. H. Kim, W. W. Kim and S. I. Hong, *J. Kor. Inst. Surf. Eng.*, **37**, 234 (2004).
9. I. H. Cho, G. H. Song, C. S. Kim, A. Nobuhide, A. Combs, J. Park, C. M. Suh, J. H. Park and Y. S. Pyoun, *J. Mech. Sci. Tech.*, **19**, 2151 (2005).