

ALBC3 합금의 표면 개질을 위한 쇼트피닝 분사거리가 전기화학적 특성에 미치는 영향

한 민 수¹ · 현 광 용² · 김 성 종^{1,†}

¹목포해양대학교 기관시스템공학부

²일본 나고야대학 물리·에너지공학

(2013년 9월 24일 접수, 2013년 10월 25일 수정, 2013년 10월 28일 채택)

Effects of shot peening stand-off distance on electrochemical properties for surface modification of ALBC3 alloy

Min-Su Han¹, Koang-Yong Hyun², and Seong-Jong Kim^{1,†}

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

²Department of Materials, Physics and Energy Engineering, Graduate School of Engineering Japan, Nagoya University, Furo-cho, Japan

(Received September 24, 2013; Revised October 25, 2013; Accepted October 28, 2013)

In the case of casting materials or ductile materials for marine equipment, it is common to employ a surface modification for achieving cost reduction and improvement in strength. In particular, aluminium bronze ALBC3 exhibits excellent corrosion resistance, and thus widely used for marine application. However, application of the material under high-velocity seawater flow may induce electrochemical corrosion damage and physical damage such as cavitation erosion, leading to shorter service life of equipment.

In this study, surface modification was carried out on ALBC3 alloy for different shot peening stand-off distances, and the physical hardness and electrochemical characteristics before and after modification were investigated. The results in each case showed the hardness increase in comparison with non-peened specimen, and the maximum hardness improvement(50 %) was found in 10 cm of shot-peening stand-off distance. It is observed that the electrochemical characteristics were irrelevant to application of shot peening.

Keywords : cast materials, surface modification, electrochemical experiment, shot peening, stand-off distance

1. 서 론

현대는 산업의 다양화와 공업기술의 발달로 각종 기계 부품이나 기계 구조물 등의 고강도화, 고출력 및 경량화로 발전하는 추세이다. 또한 가혹한 부식 환경조건 등에서의 사용빈도도 점차 증가되는 추세이다^{1,2)}. 쇼트피닝 가공은 피로수명을 증가시키는 기술인 동시에 재료 절감을 위한 고강도화, 경량화 설계를 위한 기술 중 하나이다. 이러한 쇼트피닝 기술을 이용한 고강도화로 고품질의 가공조건을 찾기 위해 많은 연구들이 수행되어 왔다. 'Aoki' 등은 쇼트피닝 조건 중 쇼트볼의 빠른 투사 속도와 높은 밀도 그리고 고경도의 쇼트볼이 표면개질 효과를 향상시키는 것으로

보고하였다.³⁾ 부식 환경에 따른 재료의 쇼트피닝 효과를 평가하기 위해 '박(Park)' 등은 부식용액의 종류 및 쇼트피닝 가공에 있어 열처리 유무가 압축잔류응력 형성과 부식 특성에 미치는 영향을 연구한 사례가 있다^{4,5)}. 이와 같이 쇼트피닝 기술은 재료의 기계적 특성뿐만 아니라 부식특성에 관한 연구도 다양하게 진행되고 있다. 이러한 쇼트피닝 기술은 쇼트볼의 충격압에 의하여 재료 표면에 소성변형 층을 형성하고 표면 직하부에 압축잔류응력을 형성시켜 연질재료나 표면 결함이 있는 재료의 강도 향상에 탁월한 효과가 있다^{6,7)}.

따라서 본 연구에서는 쇼트피닝 분사거리를 변수로 하여 표면 개질한 ALBC3 합금에 대하여 재료의 특성과 전기화학적 특성을 분석하였다.

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

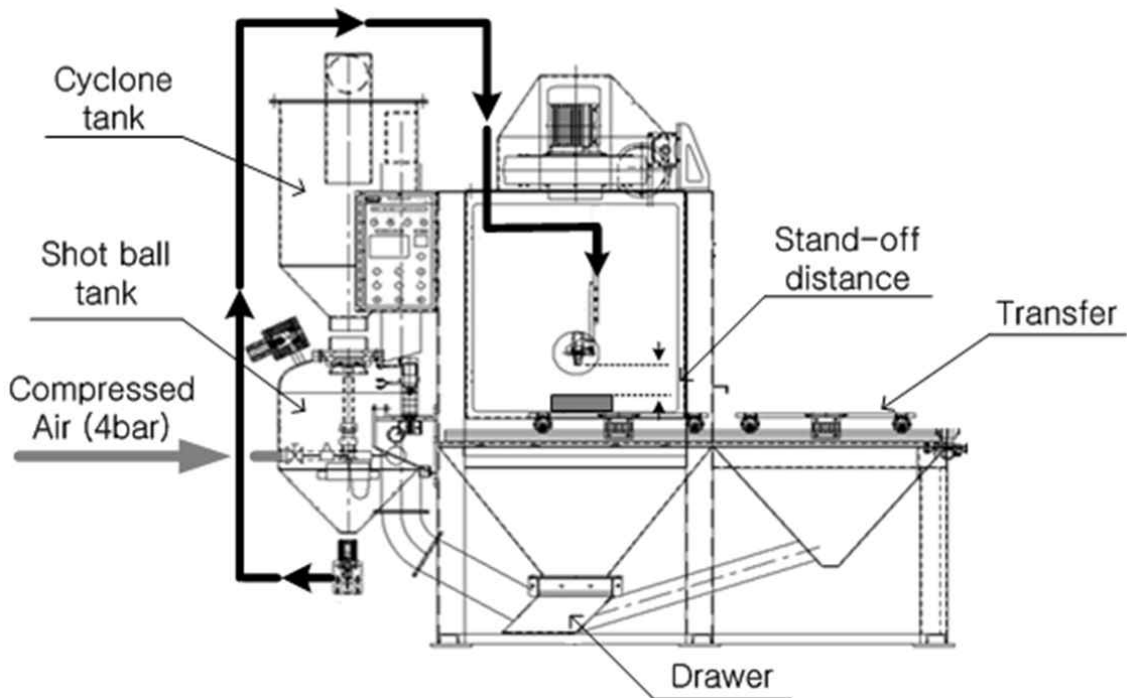


Fig. 1. Schematic diagram of shot peening equipment.

2. 실험 방법

본 연구에 선정된 재료는 ALBC3 합금으로 Cu를 주성분으로 Al 9.3 %, Fe 3.7 %, Ni 4.4 %, Zn 0.3 % 함유된 합금이다. ALBC3 합금에 대한 쇼트피닝 실험을 위해 시험편을 2 cm X 2 cm로 제작하였다. 시험편 표면은 에머리 페이퍼로 2000번까지 연마 후 아세톤과 증류수로 세척하여 건조하였다.

Fig. 1은 쇼트피닝 장비의 모식도이다. 쇼트피닝 장비는 고압의 압축공기를 수직방향으로 설치된 내부 직경 7.9 mm인 분사노즐로 분사하는 공기식 투사장치를 사용하였다. 쇼트볼(conditioned stainless steel cut wire shot, STS304, SCCW16)의 직경은 0.4 mm, 경도는 50.6~54.5 H_{RC}이다. 쇼트피닝은 쇼트볼의 분사압력을 4 bar 그리고 분사시간은 3.5분으로 고정하고, 분사거리 5 cm, 10 cm, 15 cm 그리고 20 cm를 변수로 하여 실시하였다. 이후 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편(non-shot peening)과 쇼트피닝된 시험편에 대하여 마이크로 비커스 경도기로 하중 9.807 N, 유지시간 10초로 경도를 측정하였다. 그리고 전기화학적 실험은 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편과 쇼트피닝된 시험편에 대하여 천연해수 상태에서 표면적 0.332 cm²만 노출시켜 각 조건별 양극분극(anodic polarization) 실험을 실시하였으며, 이때 개로전위를 기준으로 -0.25 V에서 2.0 V까지 2 mV/sec의 주사속도로 실시

하였다. 또한 시험편 표면을 주사전자현미경(SEM) 및 3D 현미경으로 관찰하였다.

3. 실험 내용 및 고찰

Fig. 2는 ALBC3 합금에 대하여 쇼트볼 분사거리에 따른 쇼트피닝 이후 표면 경도 측정 결과를 나타낸 것이다. 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편의 평균 표면경도는 290 Hv였

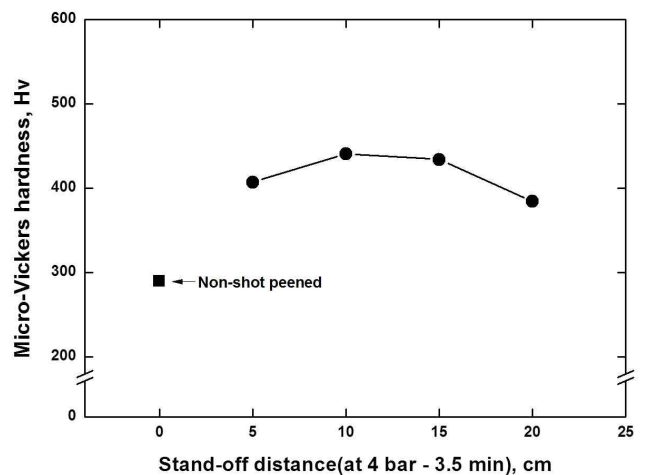


Fig. 2. Effect of shot peening with stand-off distance on hardness for ALBC3 alloy.

으며 쇼트피닝을 실시한 모든 시험편은 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편과 비교하여 높은 경도상승 효과를 나타냈다. 분사거리 5 cm인 경우 407 Hv로 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편 대비 40.3 %의 경도상승을 나타냈으며, 특히 분사거리 10 cm에서 441 Hv로 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편 대비 52.0 %의 가장 높은 경도 상승을 나타냈다. 이후 분사거리 15 cm와 20 cm에서는 각각 434 Hv(49.7 % 상승)와 384 Hv(32.5 % 상승)로 10 cm에 비해 약간 감소하는 경향을 나타냈다. 분사거리 5 cm가 10 cm보다 낮은 경도를 나타냈는데 이는 쇼트볼을 분사하는 공기압이 높았으나, 쇼트볼에 의한 충돌에너지가 너무 높아서 시험편이 오버피닝 되어 경도에 영향을 미친 것으로 사료된다. 또한 분사거리 10 cm에서의 공기압은 분사거리 5 cm 보다 낮을지라도 쇼트볼을 충분히 가속시켜 높은 충돌에너지를 재료 표면에 가한 것으로 판단된다. 이후 분사거리가 증가할수록 쇼트볼의 위치에너지는 증가하였으나 경도는 저하하는 경향을 나타냈다. 이는 쇼트피닝에서 분사압력을 형성하는 압축공기는 압력변화에 의해 공기의 체적, 밀도, 비중량의 변화가 발생하고 분사노즐 끝단에서 대기 중으로 분사

되면서 거리 변화에 따라 속도 변화가 발생하는 비등속류유동(nonuniform flow)을 형성하기 때문이다. 즉 압축공기에 의해 쇼트볼은 대기 중에 분사되어 대기와의 마찰에 의해 전단응력(마찰응력)이 발생하면서 쇼트볼의 집중을 방해하고 산발적인 충격을 재료표면에 전달하기 때문에 균일한 압축잔류응력을 형성하지 못하기 때문으로 사료된다³⁾.

Fig. 3은 ALBC3 합금에 대하여 쇼트피닝 이후 3D 현미경으로 표면 관찰 및 표면 손상깊이를 비교한 것이다. 손상 깊이는 분사거리 5 cm인 경우에 50.4 μm , 10 cm인 경우는 39.8 μm 로 분사거리 증가에 따라 점차 감소하여, 분사거리 15 cm인 경우에 34.2 μm 로 최저 손상깊이를 나타냈다. 이후 분사거리 20 cm인 경우 43.9 μm 로 다시 손상깊이가 증가하는 경향을 나타냈다. 최대 손상깊이를 나타낸 분사거리 5 cm의 경우 시험편 표면에 심한 요철 발생으로 분사거리가 상대적으로 짧아 공기압이 높고 쇼트볼이 집중될 수 있어 깊은 요철을 형성하기 때문으로 사료된다. 이러한 강한 분

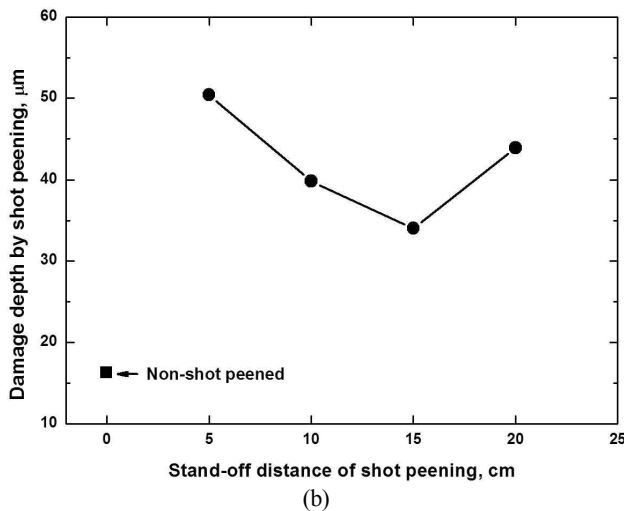
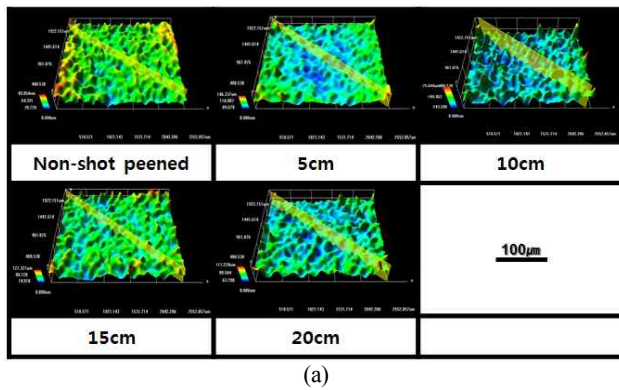


Fig. 3. 3D analysis (a) and damage depth (b) with stand-off distance of shot peening after shot peening for ALBC3 alloy.

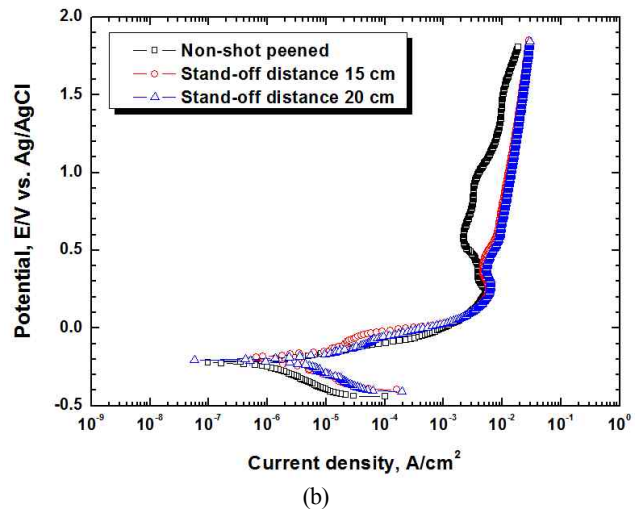
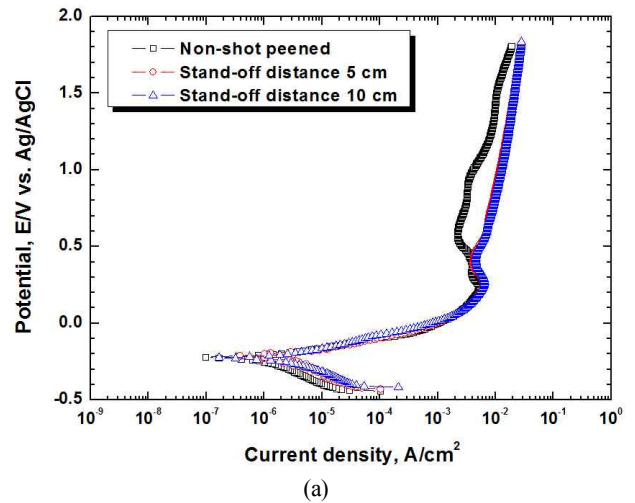


Fig. 4. Comparison of the anodic polarization curves (a) stand-off distance 5 and 10 cm, (b) stand-off distance 15 and 20 cm in seawater after shot peening for ALBC3 alloy.

사압력과 쇼트볼의 집중은 커버리지를 증가시켜 오버피닝 현상이 발생하게 된다. 오버피닝은 소성변형된 표면개질 층을 탈리시켜 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편 두께를 감소시키고 표면 거칠기를 증가시켜 오히려 표면가공 측면에서 악영향을 미치게 된다. 분사거리 15 cm일 때 가장 작은 손상깊이가 나타났으나 다른 분사거리 조건과 비교하여 5 ~ 15 μm 의 차이를 나타냈다. 이것은 동일 입도의 쇼트볼을 사용하여 동일한 시간과 압력으로 표면개질을 실시하였으므로 분사거리에 따른 분사 공기압의 변화와 쇼트볼의 집중 정도에 따라 요철의 미세한 정도의 차이만 있는 것으로 사료된다.

Fig. 4는 ALBC3 합금에 대하여 쇼트피닝 이후 해수용액 내에서 양극분극 거동을 평가한 것이다. 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편은 약 0.2 V의 전위에서 전류밀도가 다소 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 Cu_2O 산화피막에 의해 부동태 피막을 재료표면에 형성하기 때문으로 사료된다^{8,9}. 쇼트피닝된 시험편은 0.2 V 전위 이상에서는 전류밀도의 감소현상이 거의 없이 지속적으로 전류밀도가 증가하여 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편과 전류밀도 차이를 나타냈다. 이것은 쇼트피닝에 의해 형성된 표면 요철이 양극 용해 반응으로 인해 우선 용해되어 전류밀도가 상승하게 된 것으로 사료된다. 그러나 전류밀도의 상승 정도는 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편과 비교하여 차이가 미미하며 특히, 임계전류밀도 이전의 영역에서는 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편과 유사한 양극분극 거동을 나타냈다. 상대적으로 전류밀도가 증가하여 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편 대비 낮은 부식저항성을 나타내지만 표면경도 향상 정도와 전류밀도의 차를 감안할 때 쇼트피닝 적용에 의한 특성 저하는 미미한 것으로 판단된다¹⁰. 또한 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편을 포함하여 모든 쇼트피닝 조건의 양극분극 거동에서 약 0.25 V ~ 0.4 V의 범위 내에 전류밀도가 감소하는

경향을 나타내고 있으며 이러한 경향은 매우 유사하였다. 이후 전위 상승에 따라 양극표면에서의 용해반응은 급격하게 증가하는 형태가 쇼트피닝 한 것과 하지 않은 것이 유사하게 나타나지만, 쇼트피닝 한 것이 전류밀도 값이 낮게 나므로 내식성은 다소 차이가 날 것으로 판단된다.

Fig. 5는 ALBC3 합금에 대하여 쇼트피닝 이후 해수용액 내에서 Tafel 분석 실험 후 부식전위와 부식전류밀도를 비교한 그래프이다. 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편의 부식전위는 -0.215 V로 쇼트피닝된 시험편들과 비교하여 전체적으로 유사한 값을 나타냈다. 그러나 부식전류밀도의 경우 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편이 $7.5 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 로 나타냈으며, 쇼트피닝된 시험편은 분사거리 증가에 따라 미소하게 점진적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 일반적으로 단조효과와 유사한 표면개질을 통해 조직이 조밀해지고 기계적 특성이 상승하면 상대적으로 입계 면적이 증가하여 내식성을 저하시키게 된다. 그러나 ‘편(Pyoun)’ 등은 304 스테인리스강의 피닝에 대한 연구에서 조직이 미세화되고 결정립계가 증가해도 부식저항성에는 영향이 미미한 것으로 보고되고 있다¹⁰. 본 실험에서도 쇼트피닝된 시험편이 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편 대비 전류밀도 변화 폭이 크지 않아 전기화학적 특성에 미치는 영향은 미미할 것으로 사료된다.

Fig. 6은 ALBC3 합금의 쇼트피닝된 시험편에 대하여 양극분극 실험 후 주사전자판미경으로 표면을 관찰한 것이다. 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편은 쇼트피닝된 시험편에 비해 전반적으로 전면부식보다 국부부식에 의한 손상이 지배적인 것으로 관찰되었다. 어둡고 깊게 손상된 부분이 양극 용해반응에 의해 ALBC3 합금이 탈리된 국부부식의 흔적이며, 주위에 부분적으로 나타난 흰색의 작고 둥근 부분이 용해반응에 의해 국부부식이 진행되는 과정으로 판단된다. 한편 분사거리 5 cm인 경우, 전체적으로 활성 용해반응이 발생하였고 전면부식과 함께 국부부식이 넓게 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 특히 ALBC3 합금의 조직성장 중 마르텐사이트 조직을 갖는 β 상에서 활성 용해반응이 활발히 이루어졌고, Cu의 함량이 높아 내식성이 우수하고 면심 입방구조를 갖는 α 상과 β 상의 전위차로 인해 국부부식이 활성화되면서 β 상 내부에 심한 공식의 흔적을 남긴 것으로 판단된다¹¹. 또한 쇼트피닝 과정에서 형성된 심한 요철 형상으로 더 깊은 손상이 관찰된 것으로 사료된다. 분사거리 10 cm의 경우 전면부식이 발생하였으나 그 정도가 분사거리 5 cm에 비하여 크지 않고 국부부식 역시 손상깊이가 깊지 않음을 알 수 있다. 이는 주조재료의 결합이 쇼트피닝으로 조직성상이 미세화 및 균질화되고 소성변형에 의한 압축잔류응력 형성으로 양극 활성 용해반응 과정에서 낮은 손상깊이를 나타낸 것으로 판단된다. 분사거리 15 cm와 20 cm인 경우는 분사거리 5 cm인 경우와 비교하여 표면상 부

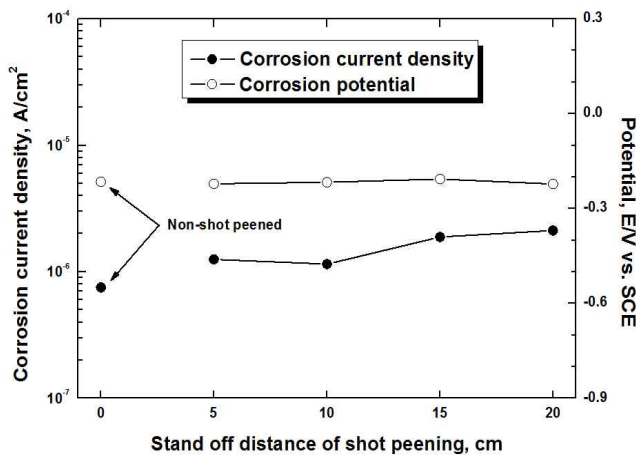


Fig. 5. Corrosion current density and corrosion potential with stand-off distance in seawater after shot peening for ALBC3 alloy.

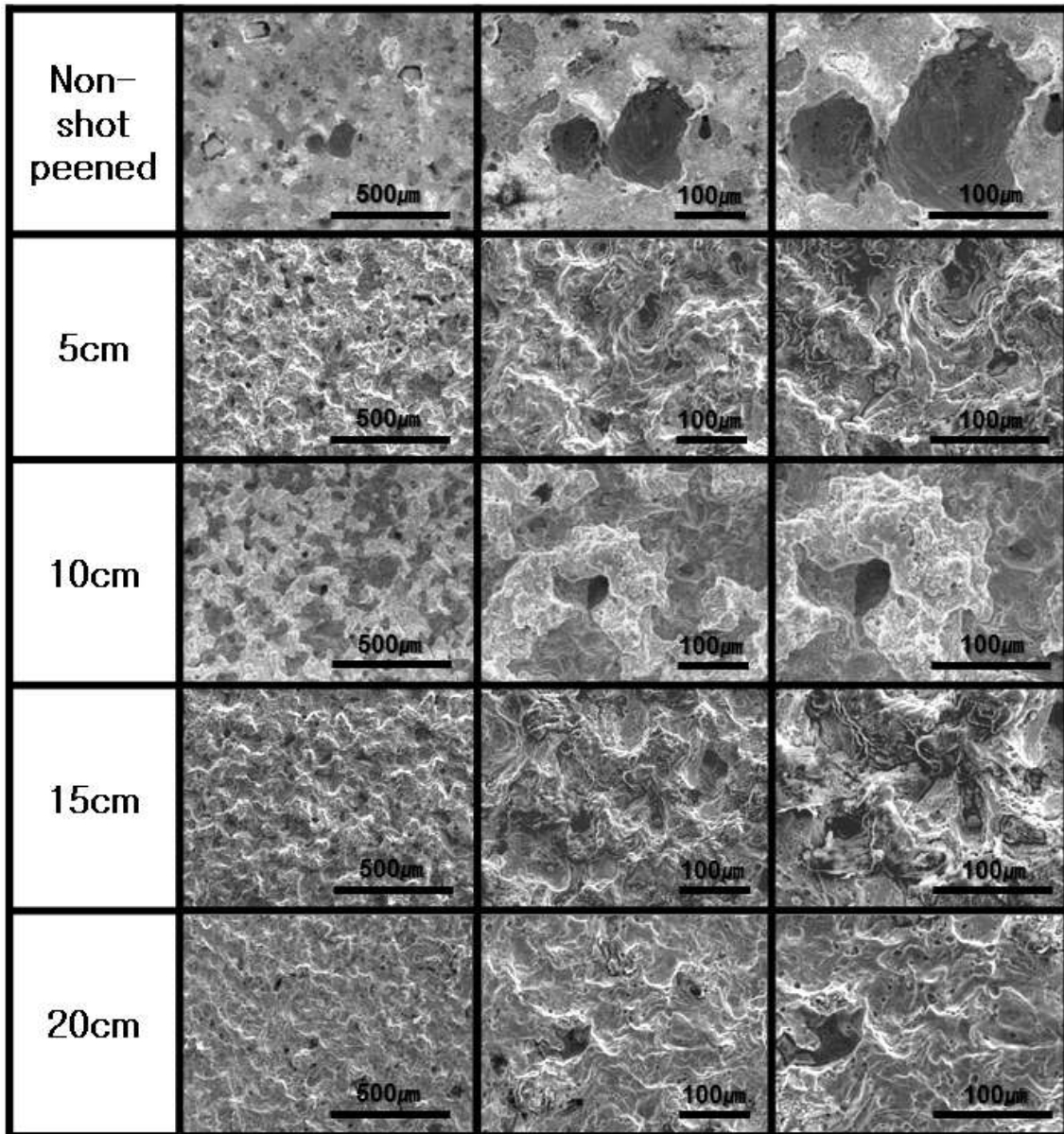
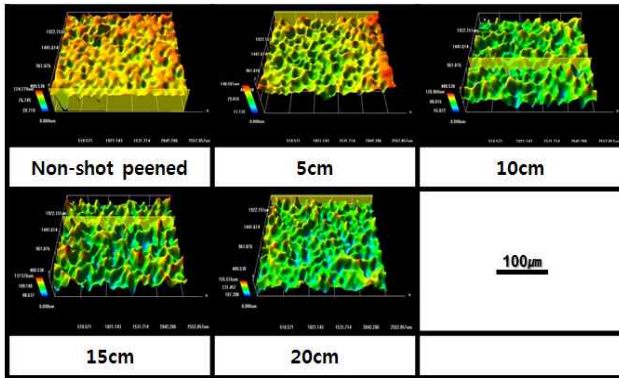


Fig. 6. Surface morphologies after potentiostatic experiment in sea water after shot peening with stand-off distance for ALBC3 alloy.

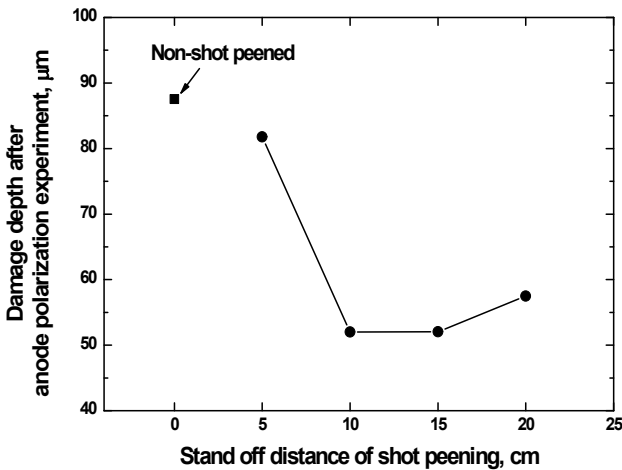
식 정도는 낮게 나타났으나 전면부식과 국부부식 정도의 차이만 있을 뿐 동일한 경향을 나타냈다. 또한 표면에 심한 용해반응의 흔적은 쇼트피닝 과정에서 만들어진 표면 요철 형상과 양극분극 용해반응의 활성화반응에 기인한 것으로 사료된다.

Fig. 7은 ALBC3 합금의 쇼트피닝된 시편에 대하여 양극 분극 실험 후 3D 현미경으로 표면 관찰 및 표면 손상깊이를 관찰한 결과이다. 시험편 표면 관찰에서는 전체적으로 쇼트 피닝 분사거리의 변화에 따라서 표면의 거칠기 변화는 미미한 것으로 관찰되며 전체적으로 활성 용해반응이 발생하여 유사한 경향을 나타냈다. 손상깊이는 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편에서 $87.6 \mu\text{m}$ 로 가장 높게 측정되었으며, 분사

거리 5 cm의 경우 $81.8 \mu\text{m}$ 로 큰 손상깊이를 나타내었다. 이후 분사거리 10 cm와 15 cm에서는 $52.0 \mu\text{m}$ 의 동일한 손상깊이로 감소하였으며, 분사거리 20 cm 인 경우 $57.5 \mu\text{m}$ 로 분사거리 10 cm와 15 cm에 비해 손상이 증가하였으나 큰 차이는 관찰되지 않았다. 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편의 경우, 평탄한 표면에서 양극분극에 따른 용해반응으로 인해 조직 내 내식성이 상대적으로 열악한 영역에서 우선적으로 부식이 진행되고 그로 인해 국부부식 손상의 형태를 야기하였기 때문에 손상깊이는 매우 크게 나타났다. 분사거리 5 cm의 경우 손상깊이가 크게 발생하였는데 이것은 상대적으로 짧은 분사거리로 인해 쇼트피닝 과정에서 강한 분사압력과 쇼트볼이 중앙 부위에 집중적으로 커버리



(a)



(b)

Fig. 7. 3D analysis (a) and damage depth (b) with stand-off distance after potentiostatic experiment in sea water after shot peening for ALBC3 alloy.

지를 증가시키고 오버피닝 현상에 기인한 것으로 사료된다. 오버피닝은 소성변형된 표면개질 층을 탈리시켜 결국 소성 변형 층이 감소하고 내부의 개질되지 않은 조직이 노출되는 현상을 야기시킨다. 이 과정에서 노출된 조직은 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편과 같은 양극분극에 따른 용해반응이 활성화되어 국부부식 손상이 빠르게 진전함으로써 손상깊이가 증가하게 된 것으로 판단된다. 반면, 다른 분사거리에서 시험편은 압축잔류응력 형성에 기인한 가공경화 효과로 표면 조직 및 조직 직하 영역에서 소성변형이 발생하였다. 이로 인해 조직들이 혼합되어 조직의 미세화와 균질화가 모두 발생하였기 때문에 양극분극 용해반응과정에서 낮은 손상깊이를 나타낸 것으로 판단된다. 이러한 균질화는 화학 조성의 균질화로 각 조직별 전위차가 감소하여 미소 갈바닉 부식의 민감성도 감소하였기 때문으로 사료된다.

4. 결 론

ALBC3 합금에 대하여 다양한 쇼트피닝 분사거리에 따른 경도측정, 시험편 표면 관찰 및 전기화학적 특성을 평가하였으며 최적 쇼트피닝 분사거리 결정을 위한 연구 결과는 다음과 같다.

쇼트피닝된 ALBC3 합금의 경도는 모든 조건에서 향상되었으며, 분사거리가 10 cm인 경우 최대 52 % 정도 향상되었다. 표면 관찰에서 쇼트피닝 분사 거리 5 cm인 경우 오버피닝 현상이 발생하였고 분사 거리 10 cm인 경우가 가장 평활한 표면이 관찰되어 최적의 분사거리로 판단된다. 분사거리 10 cm를 초과한 경우 요철과 탈리현상이 관찰되었다.

양극분극과 타펠분극 실험결과, 쇼트피닝된 시험편의 내식성이 다소 저하하나 총체적으로 경도상승에 따른 강도 향상, 균질화 현상 등을 고려할 때 해수환경에 사용되는 ALBC3 합금에 대하여 쇼트피닝 기술 적용은 효과적인 것으로 판단된다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

1. K. D. Park and C. G. Jung, *J. Ocean Eng. and Tech.*, **15**, 93 (2001).
2. W. F. Brown and J. E. Strawley, ASTM STP 410, Philadelphia (1966).
3. H. Aoki, E. Nagashima and T. Miura, *Proceedings of the 4th International Conference on Shot Peening*, p. 513 (1990).
4. K. D. Park, J. P. An and H. J. Ryu, *Proceedings of the KSMPE Conference*, p. 378 (2005).
5. K. D. Park, H. J. Ru and J. P. An, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, **29**, 930 (2005).
6. H. Wohlfahrt, *Proceedings of the 2nd International Conference on Shot Peening*, **1**, 316 (1984).
7. S. J. Kim and K. Y. Hyun, *Corros. Sci. Tech.*, **11**, 151 (2012).
8. K. J. Kim, H. G. Lim, and Y. J. Kim, *Corros. Sci. Tech.*, **23**, 194 (1994).
9. S. K. Min, K. T. Kim, and W. S. Hwang, *Corros. Sci. Tech.*, **10**, 125 (2011).
10. H. S. Lee, D. S. Kim, J. S. Jung, Y. S. Pyoun and K. Shin, *Corros. Sci.*, **51**, 2826 (2009).
11. 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).