

## 워터캐비테이션피닝된 동합금의 전기화학적 특성평가

김성종<sup>1</sup> · 한민수<sup>†</sup> · 김민성<sup>2</sup>

(원고접수일 : 2012년 10월 23일, 원고수정일 : 2012년 11월 19일, 심사완료일 : 2012년 11월 19일)

### Electrochemical Characteristics by Water Cavitation Peening of Cu Alloy

Seong-Jong Kim<sup>1</sup> · Min-Su Han<sup>†</sup> · Min-Sung Kim<sup>2</sup>

**요약** : 동합금은 내식성이 우수하기 때문에 선박 프로펠러, 펌프 임펠러등 많은 주물재료로 사용되고 있다. 또한 해양구조물 및 대체에너지 산업의 급성장으로 수요가 증가하는 추세이다. 그러나 해수환경에 장시간 노출되어 고속 회전함에 따라 발생하는 침식 및 캐비테이션 손상 때문에 잦은 수리가 요구된다. 이러한 동합금의 내구성을 향상시키기 위해서 표면개질방법의 하나로 워터캐비테이션피닝 기술이 주목 받고 있다. 이 기술은 열영향이 없고 환경친화적이며 주물재료에 특히 유용한 기술이다. 따라서 본 연구에서는 주물재료인 동합금을 증류수 중에서 워터캐비테이션피닝을 다양한 시간 변수로 실시하였고, 이후 이 재료를 해수중에서 전기화학적 방법을 통해 개질된 표면의 내식성을 평가하였다. 그 결과 재료의 내구성도 향상되며, 내식성도 우수하게 나타난 조건은 2분동안 워터캐비테이션피닝을 실시한 경우였다.

**주제어** : 동합금, 캐비테이션 손상, 표면 개질, 주조물, 워터캐비테이션피닝

**Abstract**: Copper alloys are widely used for casting materials including ship's propellers and pump impellers as they provide high corrosion resistance. In addition, the demand for these alloys is increasing with rapid growth of offshore structures and exploitation of various substitute energy sources. However, they require regular maintenance because of erosion and cavitation damages induced by exposure to marine environment at high speed flows for a long period of time. Water cavitation peening have received attention as one of surface modifications for durability improvement of the copper alloys. This is a environment friendly technology without influence of heat and easily applicable to casting materials. In this research, water cavitation peening was employed in distilled water for copper alloy castings as a function of time and evaluation of corrosion resistance was followed in seawater for the modified surface by using electrochemical methods. The result suggests that the water cavitation peening for 2 minutes was found to be the optimal peening parameter in terms of durability and corrosion resistance.

**Key words**: Copper alloys, Cavitation damages, Surface modifications, Casting materials, Water cavitation peening

### 1. 서론

현대 산업사회는 기계공업의 발전과 무한경쟁 기업구조 속에서 생산 원가절감과 경제성 있는 소재로 내구수명이 길고, 고품질, 고부가가치의 제품을 요구하고 있다. 그래서 기존 칩탄, 질화와 같은

열처리 방법 외에도 다양한 표면 개질방법들이 연구되고 있다. 부품 소재 분야에 있어 기계부품의 파손은 일반적으로 반복적인 인장응력에 의한 피로파괴로 발생하는데 재료표면에 인위적인 압축잔류응력을 형성시켜 피로수명을 증대시키는 방안으

<sup>†</sup> 교신저자(목포해양대학교 기관시스템 공학부, E-mail: mp949@mmu.ac.kr, Tel: 061-240-7230)

1 목포해양대학교 기관시스템 공학부, E-mail: ks@mmu.ac.kr, Tel: 061-240-7226

2 (주)디섹, E-mail: niced2j@nate.com

로 쇼트피닝기술이 사용되고 있다[1-3].

그러나 쇼트피닝은 재료표면의 소성변형 영역이 깊게 나타나고 요철이 발생하여 2차 가공이 요구되며, 쇼트볼의 크기, 형상, 경도 등에 따라 영향이 크다. 그래서 Hirano[4], Kunio[5]는 STS304 재료에 워터피닝을 실시하여 금속재료인 쇼트볼과 달리 워터젯을 가공물에 충돌시켜 발생하는 운동에너지로 압축잔류응력을 발생시켜 분사각과 시간에 따른 압축잔류응력의 크기와 깊이를 평가하였다. 그리고 Rodopoulos[6], Statnikov[7]와 Horsch[8]은 수중에서 초음파를 발생시켜 대단히 작은 마이크로 캐비티를 통해 피닝을 하는 워터캐비테이션피닝(water cavitation peening; 이하 WCP)으로 짧은 시간에 재료표면에 잔류응력의 변화를 관찰하였고 표면 거칠기 또한 개선되었다. 이 기술은 작업공정 중 열영향 혹은 먼지나 이물질이 전혀 발생하지 않은 환경친화적인 공법이다.

본 연구에 사용된 ALBC3 합금은 인성이 풍부하고 대형 주물공정이 수월하여 선박용 기자재, 냉각 펌프 및 해양플랜트등 조선해양 기자재 산업에 사용되고 있다. 그러나 가혹한 해수환경에 장기간 노출되어 사용한 경우, 캐비테이션 부식과 유속에 의한 침식으로 인해 손상된 사례가 많다[9]. 이로 인해 물리적인 손상과 화학적 부식손상이 복합적으로 나타남으로써 제품의 수명이 급격하게 감소시켜 안전을 위협하게 된다. 때문에 구조재료의 공정 특성상 야기되는 수지상정과 P, Mn, Sn 등 합금 첨가원소에 의한 미소 기공이나 내부 수축공 및 불균일한 조직성장과 계재물의 혼재와 같은 결함을 개선하고 내구성과 내식성을 향상시킬 수 있는 대책이 요구된다[10].

본 연구에서는 증류수에서 구조재인 ALBC3 합금에 다양한 시간변수로 WCP를 실시하여 재료표면의 내구성을 향상시키고자 한다. 그리고 표면 개선된 재료에 대하여 해수 중에서 전기화학적 특성 평가를 통해 WCP 후 부식특성 변화를 관찰하였다. 이러한 과정을 통해 ALBC3 합금에 WCP를 실시할 경우 내구성 향상은 물론 내식성의 향상도 동시에 이루어지는 최적의 WCP 조건을 찾고자 하였다[11].

## 2. 실험방법

본 연구에 사용된 ALBC3 합금은 82% Cu에 9.3% Al, 3.7% Fe, 4.4% Ni, 0.6% Mn을 함유한 주조재이며, 내식성이 뛰어나고 강도와 연성이 우수하여 선박 및 해양플랜트 산업에 사용되는 재료이다.

Figure 1은 초음파를 이용한 R&B사에서 제작한 WCP 장비(모델명:RB 111-CE)의 모식도를 나타낸 것이다. WCP 실험은 ASTM G-32에서 준하여 진동자의 진폭과 크기는 각각 20kHz와 30  $\mu$ m이다. 혼과 시편과의 거리를 1mm로 하여 증류수에서 WCP를 실시하였다. 다양한 시간변수로 WCP를 실시하였고, 마이크로 비커스 경도실험을 통해 모재 대비 시험편 표면의 개선정도를 평가하였다. 그리고 내식성을 평가하기 위하여 각 시간별 WCP 실시한 시험편을 일정한 면적(0.38cm<sup>2</sup>) 해수 중에 노출하여 전기화학실험을 실시하였다. 전기화학실험에서 기준전극은 은/염화은(Ag/AgCl)을, 대극은 백금전극을 사용하여 2mV/sec의 주사속도로 천연해수 용액 조건에서 실험을 실시하였다. 타펠 분석 실험은 개로전위를 기준으로  $\pm 0.25V$  분극시켜 평균 부식전위와 평균 부식전류밀도를 관찰하였다. 그리고 양음분극 실험은 천연 해수용액에서 실시하였으며, 실험은 재현성 확보 및 경향을 파악하기 위해 최소 3회 이상 실시하였다. 또한 부식 특성을 세밀히 파악하기 위해 실시한 정전위 실험은 해수 용액에서 양분극과 음분극 시킨 후 3,600초 후의 전류밀도를 전위별로 상호, 비교 평가하였다. 그리고 부식 정도를 상호 비교하기 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)과 3D 현미경을 사용하여 시편 표면 형상을 상호비교 분석하였다.

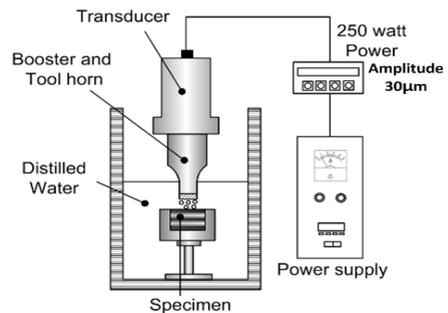


Figure 1: Schematic of the principle on water cavitation peening

### 3. 실험내용 및 고찰

Figure 2는 본 연구에 사용된 ALBC3 합금의 주조조직을 관찰한 것이다. ALBC3 합금의 미세 조직은  $\alpha$ 상과  $\beta$ 상, 뿐만 아니라 Fe 또는 Ni이 Al과 반응하여 형성시킨  $\kappa$ 상으로 이루어진 다상조직이다.  $\beta$ 상을 제외한 영역은 기지조직인  $\alpha$ 상으로 구성되며 국부영역에서 미소 고용체인  $\kappa$ 상이 분포되어 있다.  $\alpha$ 상은 상대적으로 우수한 내식성을 가지나 물리적인 외력에 의한 결정립의 조직 간의 격자결함이 발생하고 외력에 따른 소성변형이 쉽게 발생한다. 그리고  $\beta$ 상과  $\kappa$ 상은 강도 및 경도가 우수한 기계적 특성 갖고 있지만 부식에 취약한 특징을 가진다. 특히 미세 석출물인  $\kappa$ 상은 라멜라 또는 구상의 형태로 조직 내에 분포되어 있으며 이는 타 연구자의 연구결과에 의해 Fe 또는 Ni 원소가 Al 원소와 반응하여 형성된  $Fe_3Al$  또는  $NiAl$  조성의 금속간 화합물로 규명된 바 있다[12,13].

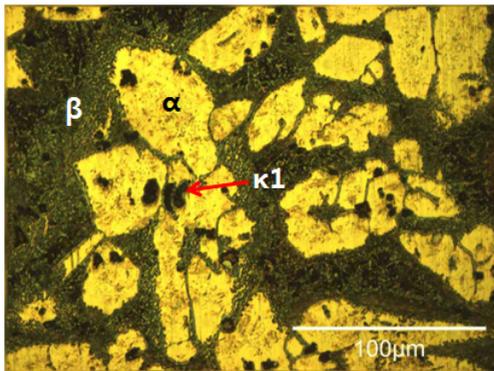


Figure 2: Optical micrographs of ALBC3 alloy

Figure 3은 증류수내에서 ALBC3합금에 대하여 WCP를 시간별로 실시하여 3D 현미경으로 표면 손상을 관찰한 것이다. 3D 현미경을 통하여 표면 손상을 관찰한 결과, WCP 실험전 거칠기  $4.227 \mu m$ 의 거칠기를 나타낸 모재와 비교하여 2분까지는 표면 손상이 관찰되지 않았으나 3분경과부터 손상 깊이가  $12.850 \mu m$ 로 표면의 요철이 발생하고 손상이 깊이 방향으로 증가함을 보였다. 또한 30분 경과 시에는 표면 전체로 손상이 확대되었다. 재료 표면에서 발생하는 이러한 변화는 마이크로 캐비

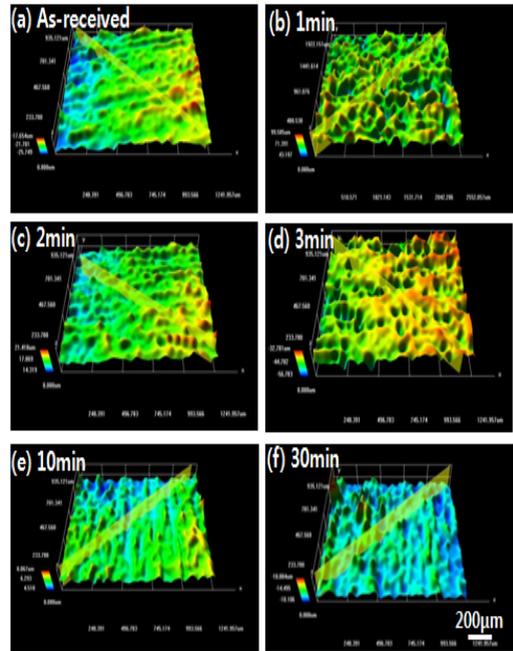


Figure 3: 3D analysis after water cavitation peening for ALBC3 alloy in distilled water

티의 충격압에 의하여 어느 일정 표면 나노화 이후에는 결정립끼리 슬라이딩 효과 때문인 것으로 사료된다[14]. WCP 전의 모재 경도는  $261.0Hv$ 를 나타내었다. WCP 초기 1분은 경도가 모재 대비 2.2% 상승으로 미비 하였으나 2분이 경과한 시점에서는 경도가  $288.4Hv$ 로 10.5%의 급격한 경도 상승을 확인할 수 있었다. 이후 2분에서 30분까지 WCP 시간이 증가하여도 평균  $286Hv$ 로 일정한 경도를 유지하였다. WCP 시간이 30분 이후부터는 경도가 감소하는 경향을 보였으나 모재 보다는 높게 나타났다. 결과적으로 ALBC3 합금에 2분간 WCP를 실시하였을 경우 가장 높은 경도변화를 나타냈다. 이와 같이 WCP를 실시하였을 때 실험 시간에 관계없이 경도는 상승하였으며, 이것은 WCP 공정시 발생하는 마이크로 캐비티가 주조재인 ALBC3 합금 표면에 압축잔류응력을 형성하여 내구성을 향상시킨 것으로 사료된다[15].

Figure 4는 타펠분석을 통해 해수환경 하에서 ALBC3 합금 모재와 각 시간변수별로 WCP된 ALBC3 합금에 대한 부식전류밀도를 비교한 그래

프이다. 모재의 경우 부식전류밀도 값이  $2.6 \times 10^{-6} \text{A/cm}^2$  였으며, 이때 전위는  $-0.22\text{V}$ 를 나타내었다. WCP 후 가장 낮은 부식전류밀도를 나타낸 것은 2분인 경우로 부식전류밀도 값이  $1.8 \times 10^{-6} \text{A/cm}^2$  이였으며, 이때 전위는  $-0.21\text{V}$ 였다. 그러나 전체적으로 부식 전류밀도와 부식 전위의 큰 변화는 관찰되지 않았으며 거의 유사한 값을 나타냈다. 이것은 부식환경인 해수중에서 실험하였음에도 불구하고 표면에 피닝효과로 부식전류밀도에 미소한 변화는 있었지만 구성성분의 변화는 없었으므로 부식속도에는 크게 영향을 미치지 않은 것으로 사료된다.

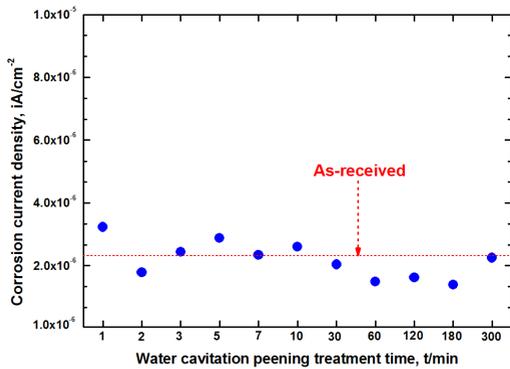


Figure 4: Comparison of the current density for ALBC3 alloy at various WCPed time in sea water

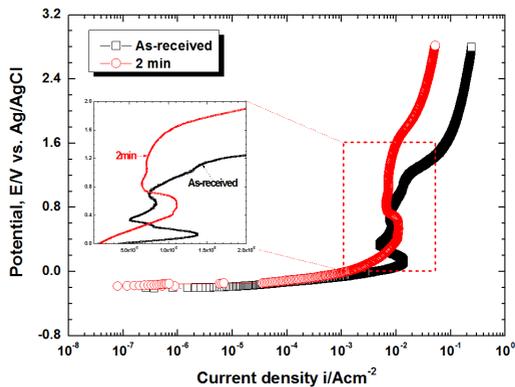


Figure 5: Comparison of the anodic polarization trends for ALBC3 alloy and WCPed ALBC3 alloy during 2min in sea water

Figure 5는 ALBC3 합금과 2분간 WCP를 실시

한 시편에 대하여 해수환경 하에서 양분극 경향을 나타낸 것이다. 모재의 경우 개로전위(OCp ; open circuit potential)에서  $+0.1\text{V}$ 까지 전류밀도가 상승한 후  $1.2\text{V}$ 까지 낮은 전류밀도를 나타냈다. 2분간 WCP한 경우는 개로전위에서  $+0.4\text{V}$ 까지 전류밀도가 상승하였다. 이후  $1.6\text{V}$ 까지 전류밀도가 저하하는 경향이 관찰되었으며 모재에 비해 낮은 전류밀도를 나타냈다. 그래프를 확대하여 관찰하면,  $0.28\text{V} \sim 0.72\text{V}$  전위 구간에서만 모재의 전류밀도가 낮게 측정되었고 그 외 전위구간에서는 2분 동안 WCP한 동합금의 전류밀도 값이 낮게 나타났다. 따라서 WCP를 실시하면 전체적으로 유사하나 전류밀도값이 낮아졌으므로 내식성이 양호할 것으로 사료된다.

Figure 6은 ALBC3 합금과 2분 동안 WCP를 실시한 시편에 대하여 해수 환경 하에서 음분극 경향을 나타낸 것이다. 모재의 경우 초기에  $-0.2\text{V}$  정도의 전위를 나타낸 후 용존산소 환원반응( $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e} \rightarrow 4\text{OH}$ )에 의한 농도분극과 수소가스 발생( $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e} \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}$ )에 의한 활성화 분극구간이 나타났다[15]. 용존산소 환원반응에 의한 농도분극은 약  $-1.0\text{V} \sim -0.4\text{V}$ 의 범위에서 관찰되었다. 이후 활성화 분극의 영향으로 전류밀도가 증가하는 경향을 나타냈다. 또한 외부전원법에 의한 음극방식 적용 시 한계전위에 해당하는 농도분극과 활성화 분극의 변곡점은  $-1.0\text{V}$ 이다. 2분 동안

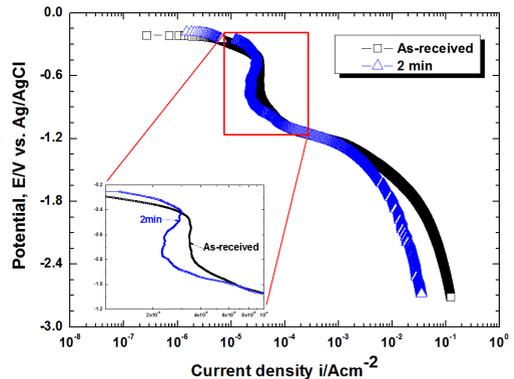


Figure 6: Comparison of the cathodic polarization trends for ALBC3 alloy and WCPed ALBC3 alloy during 2min in sea water

WCP한 경우는 농도분극 구간에서는 모재와 유사한 음분극 양상을 보였다. 그래프를 확대하면, 농도분극 구간에서의 부식전류밀도를 비교해보면 모재가 높게 나타났다. 활성화 분극구간에서는 2분 동안 WCP한 시편의 경우 모재 대비 낮은 전류 밀도는 나타냈으며 이는 균일한 압축잔류응력에 의해 낮은 전류밀도값을 나타낸 것으로 사료된다.

Figure 7은 지금까지 내구성과 내식성이 우수한 특성을 나타낸 2분간 WCP를 실시한 시험편과 모재에 대하여 정전위 실험을 실시하고, 정전위 실험 종료된 3,600초에서의 전류밀도 값을 비교한 것이다. -0.2V를 중심으로 전위가 감소하거나 증가할수록 활성화반응에 의해 전류밀도가 급격하게 증가하는 경향을 나타냈다. 활성화용해반응 구간에서는 두 조건 모두 비슷한 전류밀도값을 나타냈다. 농도분극구간의 전위에서 시간변수에 따라 전류밀도의 차이가 발생하였는데, 모재의 전류밀도 값은  $2.58 \times 10^{-6} \text{A/cm}^2$ 을 나타냈고, 2분 동안 WCP 실시한 경우 모재 대비 낮은 전류밀도인  $2.14 \times 10^{-6} \text{A/cm}^2$ 로 측정되었다. 결과적으로 정전위 실험 분석결과 2분 동안 WCP를 실시한 경우가 모재와 비교하여 미소하게 높은 부식저항성을 나타내었다.

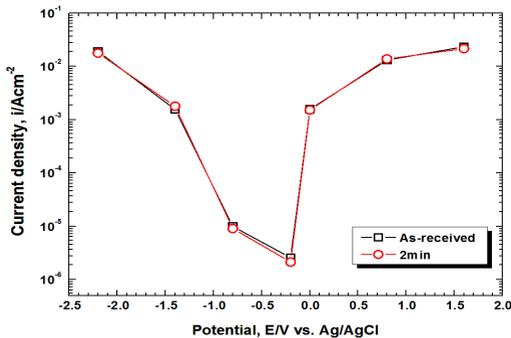


Figure 7: Comparison of current density after potentiostatic experiment during 3,600 sec for ALBC3 alloy and WCPed for 2min in sea water

Figure 8은 ALBC3합금에 대하여 해수환경 하에서 3,600초 동안 정전위 실험을 실시한 후 주사전자현미경과 3D 현미경을 통해 표면을 관찰한 것이다. 1.6V의과도한 활성화용해반응 후 모재의 표면은 전체적으로 용해반응이 과다하게 진행되어 손

상깊이는 308.890 μm로 작은 결정립이 조밀하게 관찰되었다. 0.8V의 전위에서도 용해반응에 따른 영향으로 표면의 Cu와 Al의 산화 보호 피막 파괴로 부식이 진행되어 α, β상의 입계가 명확히 관찰되며, κ상인 기공도 관찰할 수 있었다. 이때 손상깊이는 22.133 μm를 나타냈다. 손상깊이가 20.393 μm를 나타낸 0V의 전위에서는 ALBC3 합금에서 내식성이 약한 알루미늄을 함유하는 쪽이 우선 부식된 표면이 관찰된다. 이 조건에서도 산화

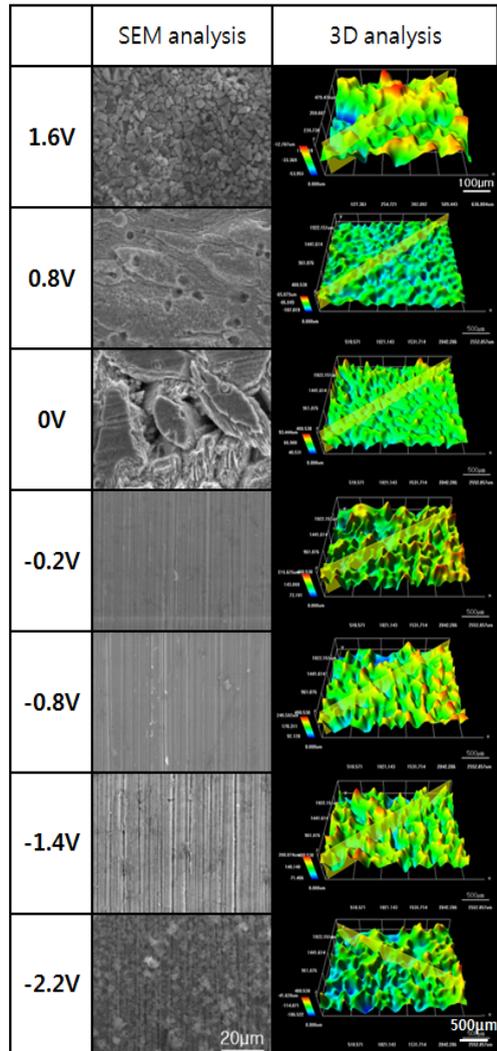
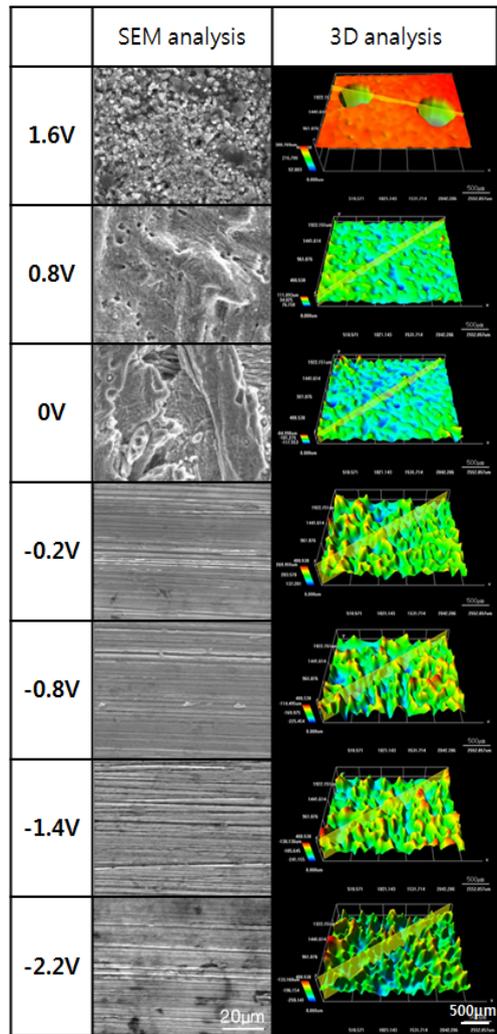


Figure 8: Surface morphologies and 3D analysis after potentiostatic experiment for ALBC3 alloy in sea water

보호피막은 파괴되어 전면적으로 부식 손상이 발생되었다. 활성용해반응에 의한 영향으로 전위 증가에 따라 표면 손상이 증대됨을 알 수 있다. 반면, -0.2V의 전위에서는 개로전위와 가까운 전위로 평형상태를 유지하므로 용해반응에 의한 영향은 거의 없으며, 표면이 깨끗한 상태를 유지하였다. -0.8V, -1.4V, 그리고 -2.2V의 전위에서는 양분극과 비교하여 표면 손상이 상대적으로 적은 경향을 나타냈다. 시편의 표면 상태로 보아 -0.8V의 전위는 -0.2V와 함께 방식전위 구간에 포함됨을 확인할 수 있다. 표면 손상깊이는 각각 108.709 μm와 74.334 μm를 나타냈다. -1.4V의 전위에서는 표면 손상깊이가 86.080 μm로 약간의 손상이 관찰되었으며 수소의 환원반응에 의한 손상이 발생되기 시작한 전위로 사료된다. -2.2V의 전위는 원자성 수소( $H^+ + e \rightarrow H$ ) 및 분자성 수소( $H^+ + e + H \rightarrow H_2$ ,  $H + H \rightarrow H_2$ )의 발생으로 인한 활성화 분극 반응의 영향으로 많은 부식이 관찰되었다[16]. 수소가 발생에 의한 손상은 공식에 의한 손상과 외관상 현저한 차이를 나타냈다. 또한 활성화 분극 구간에서는 시험편 표면에 전착물의 형성을 관찰할 수 있는데 이는 해수에 포함된 마그네슘과 칼슘이온이 화학반응을 통하여 석회질 피막 (calcareous deposit)을 형성한 것으로 판단된다[17].

**Figure 9**는 ALBC3합금을 2분 동안 WCP 후 시편에 대하여 해수환경 하에서 3,600초 동안 정전위 실험을 실시한 후 주사전자현미경과 3D 현미경을 통해 표면을 관찰한 것이다. -0.2V~1.6V까지의 정전위 실험 후 관찰한 사진으로 모재와 비슷한 경향을 나타냈다. 331.193 μm의 표면 손상깊이를 나타낸 1.6V의 전위에서는 활성용해반응에 의한 부식손상 형태를 나타내고 있으며 실험 전 Al, Cu 고용체의 입자들이 용해되고 탈리되어 입자 내부로 급격한 손상이 진행된 것으로 판단된다. 0.8V의 전위에서는 용해반응에 의한 고용체의 입계가 확인될 정도로 용해반응이 진행되었고, 기공이 확인되는 κ상도 관찰할 수 있었다[12,13]. 이때 표면 손상깊이는 손상깊이가 25.776 μm였다. 0V의 전위에서는 22.435 μm의 손상 깊이를 보였으며, 용해반응의 초기로서 내식성이 약한 Al 집중부가 먼

저 탈리되어 부식이 되었으나 2분 동안만 WCP를 실시해도 더 적게 부식이 진행되었음을 알 수 있다. -0.8V 적용전위에서는 방식구간으로 사료되는 전위로서 부식손상이 전혀 관찰되지 않았다. 표면 손상깊이가 85.124 μm인 -2.2V의 전위에서는 활성화 분극 구간이 명확히 나타나는 전위이므로 수소 환원반응으로 손상이 심화되었으며 WCP으로 인한 요철 부근에 κ상으로 사료되는 검은 점들이 확인되었다[12,13].



**Figure 9:** Surface morphologies and 3D analysis after potentiostatic experiment in sea water for WCPed ALBC3 alloy during 2min

Figure 10은 ALBC3 합금에 모재와 2분 동안 WCP 후 해수환경 하에서 3,600초 동안 정전위 실험을 실시한 후 3D현미경을 통해 표면 손상 깊이를 비교한 것이다. 전체적으로 WCP 시간에 따라 비슷한 손상깊이를 나타냈다. 미시적으로 관찰하면, 음분극시킨 전위에서 2분 동안 WCP한 조건에서 모재보다 낮은 손상깊이를 나타냈다. 그러나 양분극시킨 전위에서는 2분 동안 WCP한 조건에서 모재 보다 큰 손상깊이 값을 나타냈다. 이는 음분극 방식 기법을 적용 시 2분 동안 WCP한 조건이 우수한 부식저항성을 나타낼 것으로 여겨진다.

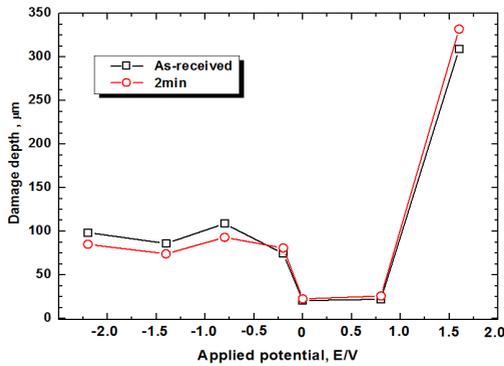


Figure 10: Comparison of damage depth by 3D analysis after potentiostatic experiment for ALBC3 alloy WCPed during 2min in sea water

#### 4. 결 론

ALBC3 합금에 대하여 진폭 30 μm으로 WCP를 다양한 시간변수로 실시한 경우, 2분인 경우가 모재 대비 10.5%의 가장 높은 경도상승률을 나타내었다. 그리고 3분이 경과하면서 캐비티에 의한 표면손상이 관찰되기 시작했고 30분경과 이후부터는 과도한 캐비티 손상으로 표면이 박리되어 경도가 저하하는 현상을 나타냈다. 타펠 분석과 양분극 실험에서는 2분 동안 WCP를 한 경우가 낮은 부식전류밀도값을 나타냈으나 다른 시간변수와 큰 차이는 나타나지 않았다. 양분극과 음분극 실험에서 모재 보다 2분동안 WCP를 한 경우가 다소 낮은 부식전류밀도값을 나타내었다. 또한 모재와 2분동안 WCP를 실시한 후, 정전위 실험 결과 WCP를 실시한 시험편이 모재와 경향은 비슷하였으나 손상정

도가 작은 값을 나타냈다.

본 연구를 통해 ALBC3 합금에 대하여 WCP가 효과적인 기술이며, 제품의 안전성 향상과 수명 연장을 도모할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임

#### 참고문헌

- [1] Kyeong-Dong Park, Yung-Jin Sin, Dong-Ug Kim, "The effect of shot peening on the corrosion and fatigue crack to SAE5155 steel", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 30, no. 6 pp. 731-739, 2006 (in Korean).
- [2] Seong-Jong Kim, Seok-Ki Jang, Koang-Yong Hyun, "Effects of peening time on cavitation characteristics and corrosion resistance by shot peened ALBC3", Proceedings of the 36th Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Spring Conference, p. 254, 2012 (in Korean).
- [3] Chan-Gi Jung, Kyung-Dong Park, "Effect of compressive residual stress on the high temperature fatigue crack propagation behavior of shot-peened spring steel", Journal of Ocean Engineering and Technology, vol. 16, no. 5, pp. 73-79, 2002 (in Korean).
- [4] K. Hirano, K. Enomoto, E. Hayashi, K. Kurosawa, "Effect of water jet peening on corrosion resistance and fatigue strength of type 304 stainless steel", Journal of the Society of Materials Science, vol. 45, no. 7, pp. 740-745, 1996 (in Japanese).
- [5] E. Kunio, H. Katsuhiko, M. Masahito, K. Koichi, S. Hideyo, H. Eisaku, "Improvement of residual stress on material surface by water jet peening", Journal of the Society of Materials Science, vol. 45, no. 7, pp. 734-739,

- 1996 (in Japanese).
- [6] C. A. Rodopoulos, "The effect surface engineering treatments on the fatigue behaviour of 2024-T351 aluminium alloy" *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 16, pp. 30-34, 2007.
- [7] E. Statnikov. "Physics and mechanism of ultrasonic impact", *Ultrasonic*, vol. 44, pp. 533-538, 2006
- [8] C. Horsch, V. Schulze, D. Löhle, "Deburring and surface conditioning of micro milled structures by micro peening and ultrasonic wet peening", *Microsystem Techn.* vol. 12, pp. 691-696. 2006.
- [9] Uh-Joh Lim, Ki-Cheol Jeong and Byoung-Du Yun, "Study on the cavitation damage of cupronickel(70/30) tube for gas absorption refrigeration machine", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 28, no. 2, pp. 332-337, 2004.
- [10] Woon-Jae Jung, Heon-Joo Kim, Dong-Ok Kim and Eui-Park Yoon, "A study on the change of properties of Al-bronze due to alloy elements and cooling rate", *Journal of the Korean Foundrymen's Society*, vol. 8, no. 3, pp. 271-281, 1988 (in Korean).
- [11] Min-Sung Kim, Investigation on Durability Improvement in Seawater Environment by Water Cavitation Peening and High Velocity Oxy-fuel Spray Coating Technology for Cu Alloy, Mater's Thesis, Mok-po National Maritime University, 2012 (in Korean).
- [12] S. M. Hong, M. K. Lee, G. H. Kim, K. H. Kim, W. W. Kim and S. I. Hong. "Improvement of the resistance to cavitation erosion by the formation of  $\beta'$  martensite in flame-quenched Cu-9Al-4.5Ni-4.5Fe alloys", *Journal of the Korean Institute of Surface Engineering*. vol. 37, no. 4, pp. 234-241, 2004 (in Korean).
- [13] Stefanie Hanke, Alfons Fischer, Matthias Beyer and Jorge dos Santos, "Cavitation erosion of NiAl-bronze layers generated by friction surfacing", *Wear*, vol. 273, pp. 32-37, 2011.
- [14] Y. Sekine and H. Soyama, "Evaluation of the surface of alloy tool steel treated by cavitation shotless peening using an eddy current method", *Surface & Coatings Technology*, vol. 203, pp. 2254-2259, 2009.
- [15] H. Soyama and N. Yamada, "Relieving micro-strain by introducing macro-strain in a polycrystalline metal surface by cavitation shotless peening", *Materials Letters*, vol. 62, pp. 3564-3566, 2008.
- [16] Seong-Jong Kim, Jae-Yong, Ko and Min-Su Han, "Evaluation of the characteristics using slow strain rate tests of 5456 Al-Mg alloy for ship construction", *The Korean Journal of Chemical Engineering*, vol. 23, no. 6, pp. 1028-1033, 2006.
- [17] C. Deslouis, D. Festy, O. Gil, G. Ruis, S. Touzain and B. Tribollet, "Characterization of calcareous deposits in artificial sea water by impedance techniques-I. Deposit of  $\text{CaCO}_3$  without  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ", *Electrochimica Acta*, vol. 43, pp. 1891-1901, 1998.