

## 5052-O 알루미늄 합금의 워터 캐비테이션 피닝 시간에 따른 표면 경화와 부식 특성에 관한 연구

김성종<sup>†</sup> · 현광룡

목포해양대학교 기관시스템공학부  
(2012년 8월 3일 접수, 2012년 8월 29일 수정, 2012년 8월 29일 채택)

### Investigation on surface hardening and corrosion characteristic by water cavitation peening with time for Al 5052-O alloy

Seong-Jong Kim<sup>†</sup> and Koang-Yong Hyun

Division of Marine Engineering, Mokpo Maritime University Mokpo City, Jeonnam, 530-729, South Korea  
(Received August 3, 2012; Revised August 29, 2012; Accepted August 29, 2012)

The cavity formed by the ultrasonic generation in the fluid with the application of water cavitation peening collides into the metal surface. At this time, the surface modification effect such as the work hardening presents by the compressive residual stress formed due to the localized plastic deformation. In this investigation, the water cavitation peening technology in the distilled water with the lapse of time was applied to 5052-O aluminum alloy for aluminum ship of a high value. So, the optimum water cavitation peening time on the effect for surface hardening and anti-corrosion property was investigated. Consequently, the water cavitation peening time on excellent hardness and corrosion resistance characteristic presented 3.5 min. and 5.0 min, respectively. The surface hardness in the optimum water cavitation peening time was improved approximately 45% compared to the non-WCPed condition. In addition, corrosion current density was decreased.

**Keywords** : aluminium alloy, water cavitation peening, surface hardening, corrosion resistance, micro-droplet cell

#### 1. Introduction

최근 문화 레저 산업이 육성되면서 해양 레저 분야에도 발전을 거듭해오고 있다. 또한 개인 요트를 소유하거나 이용하는 인구가 증가하고 있어 추후 고부가가치 요트 시장이 크게 성장할 것으로 기대된다.<sup>1)-2)</sup>

기존 FRP선의 경우, 친환경적인 폐선 방법이 없는 반면, 친환경적이며 경량화로 연료절감에 적합한 알루미늄 합금 요트를 건조하는 추세이다.<sup>3)-4)</sup> 그래서 알루미늄 선박 생산에 따른 기술과 재료에 대한 연구 및 개발이 요구되고 있다.

그러나 알루미늄 선박이 고속의 해수 환경에서 도장이 박리되어 선체가 노출된 경우 염소이온의 영향으로 부동태 피막이 파괴되어 부식된 사례가 많이 발생하고 있다. 또한 고속화로 금속과 액체 간 상대 운동으로 유속 및 회전속도가 상승하여 기포 운 캐비테이션이 발생된다.<sup>5),6)</sup> 기포 운 캐비테이션의 기포가 붕괴될 때 수 GPa에 이르는 큰 국소적인 충격압력 발생으로 캐비테이션-에로전 현상을 발생시켜 선

체 손상을 가속화 시키게 된다.<sup>7)</sup>

한편, 재료의 내식성 향상, 고강도화 및 경량화와 함께 높은 피로강도를 충족시키기 위한 방법으로 여러 가지 열처리 및 표면 개질 방법이 제시되고 있다.<sup>8)-11)</sup>

최근, 표면층에 압축잔류응력을 형성시켜 피로강도 및 피로수명을 향상시키는 워터 캐비테이션 피닝(water cavitation peening, 이하 WCP) 기술이 주목 받고 있다. 인위적으로 유체 내에서 초음파 발생기로 캐비티를 발생시키고, 이것이 붕괴되어 기존 쇼트피닝(Shot peening)과 같이 시편 표면에 충격을 주어 압축잔류응력형성으로 표면을 경화시키는 방법이다. 이 방법은 기존 쇼트피닝의 쇼트 볼(shot ball)이 표면 충돌 시 발생할 수 있는 스파크가 발생하지 않으며, 열의 영향을 받지 않는다. 또한 표면가공 시 미세한 먼지도 생성하지 않기 때문에 환경 친화적이다.<sup>12)</sup>

본 연구에서는 ASTM-G32에서 제시한 초음파 압전효과와 캐비테이션 효과를 응용하여 선박용 5052-O 알루미늄 합금에 대하여 WCP를 증류수 내에서 실시하여 우수 환경도와 부식특성을 나타내는 최적 워터 캐비테이션 피닝 적용 시간을 규명하였다. 본 연구결과는 고속환경에서 사용되는 알루미늄 합금에 적용 가능한 기술로 사료된다.

<sup>†</sup> Corresponding author: ksj@mmu.ac.kr

## 2. Experimental procedure

본 연구에서 사용된 Al 합금은 5052-O이며 화학 조성을 Table 1에 나타냈다. 이 5052-O 알루미늄 합금은 Al-Mg계 알루미늄 합금으로서 Mg이 3.74% 포함된 합금이다. 시편은 2 cm x 2 cm이고 두께는 0.5 cm로 제작하였으며, 에머리 페이퍼 2000번까지 연마 후 아세톤과 증류수로 세척하여 드라이기로 건조하였다.

Fig. 1은 WCP에 사용된 장비를 나타낸 것이다. 워터 캐비테이션 피닝은 ASTM G-32에 따라 규정한 초음파 압전효과(Piezo electric)와 캐비테이션(cavitation) 효과를 응용

Table 1. Chemical composition of test specimen.

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

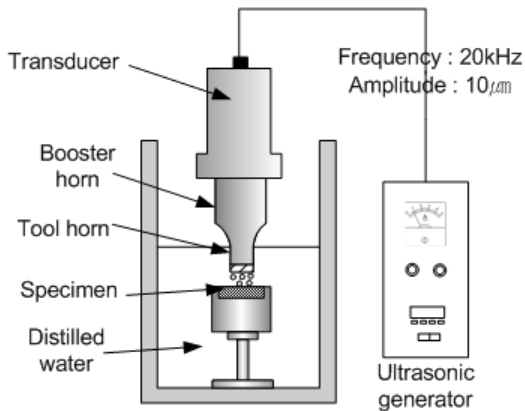


Fig. 1. Schematic diagrams of apparatus for water cavitation peening.

한 기술이다. 초음파 발생기에서 60 kHz, AC-220V, 1 φ 전력의 입력으로 소정의 전자회로를 거쳐 20 kHz내외의 정격 출력을 발생시켜 진동자에 넣어 주는 역할을 하며, Transducer가 발생기로부터 소정의 입력을 받아 전기적 에너지를 적절한 진폭을 확대시켜서 부스터 혼(Booster horn)으로 전달한다. 부스터 혼은 진동 에너지를 적절한 진폭으로 확대시켜서 툴 혼(Tool horn)에 전달하게 된다. 이때의 툴 혼의 시편이 물과 마찰하여 부스터 혼에서 받은 진동 에너지를 최종적으로 집중 조사하는 역할을 하게 된다. 진동 주파수와 진폭은 각각 20 kHz와 10 μm이며, 혼과 시편과의 스탠드 오프거리를 1 mm로 하여 증류수에서 WCP를 실시하였다. 시간변수에 따라 WCP된 시편에 대하여 마이크로 비커스 경도기로 인가하중 9.807 N, 유지시간은 10초로하여 경도를 측정하였다. 그리고 WCP된 부위에 대하여 주사전자현미경과 3D 전자현미경으로 표면을 관찰하였다.

Fig. 2는 마이크로 전기화학 시험을 위한 마이크로 드롭플릿 셀 실험장치의 개요도와 실물사진을 나타내고 있다. 다양한 시간 동안 WCP된 5052-O Al 합금의 미세부위에 대한 전기 화학적 부식특성을 알아보기 위하여 마이크로 드로플릿 셀 기법을 이용하여 측정하였다. 캐필러리(capillary)는 직경 1.0-1.1 mm의 유리관을 직경 400 μm로 가공하였다. 그리고 미세 연마 장비를 이용하여 팁 부분을 매끈하게 가공 후 실리콘으로 실링을 하여 용액의 누수를 방지하였다. 드로플릿 셀의 기준전극은 SCE이며, 대극은 백금전극을 사용하여 2 mV의 주사속도로 천연해수 용액 조건에서 실시하였다.

## 3. Results and Discussion

Fig. 3은 WCP된 5052-O 시험편의 경도 측정 결과를 나타낸 그래프이다. 5052-O 모재 경도는 54.2 Hv이었으

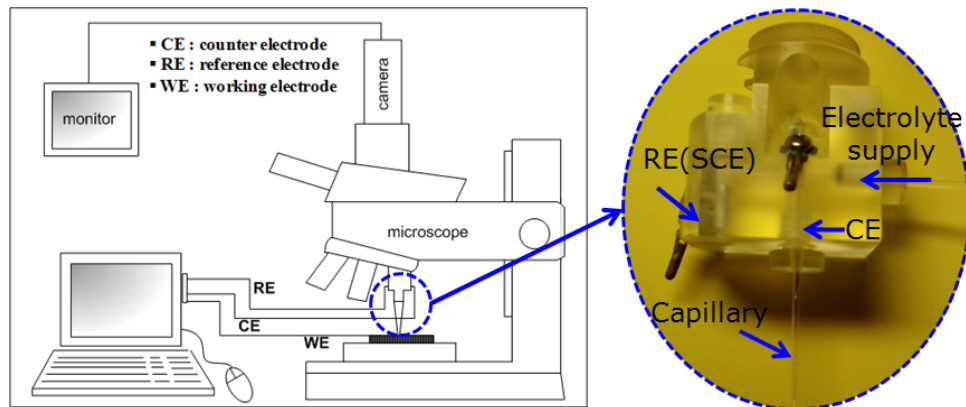


Fig. 2. Schematic diagrams of a micro-droplet cell with an optical microscope and electrochemical experimental set-up.

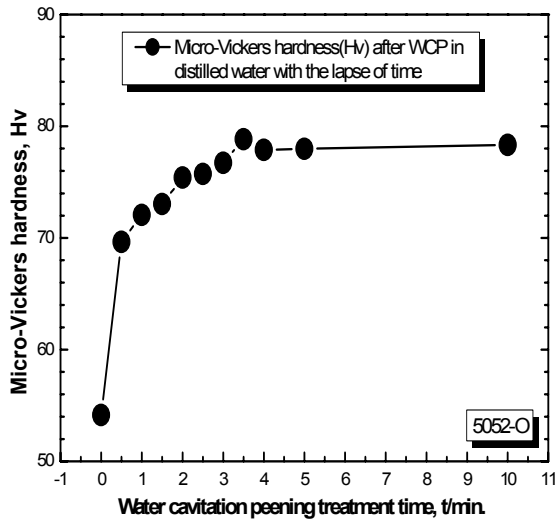


Fig. 3. The hardness effect of water cavitation peening with time for Al 5052-O alloy in distilled water.

며, 표면에 0.5 분 동안 WCP 처리한 정도 값은 69.7 Hv를 나타내어 크게 개선되었다. 그리고 그 이후 처리시간 증가에 따라 표면 경도도 점차적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 이후 3.5 분에서 78.85 Hv로서 가장 큰 값을 나타냈으며. 이후 처리시간 증가에 따라 표면 경도는 거의 일정한 값을 나타냈다. 워터 캐비테이션 피닝 시 기포의 진동에 따른 미세 교반(micro agitation)과 기포의 파괴로 인한 화학적 열적 작용을 수반하게 된다. 이러한 작용이 복합 반복으로 액중에서 화학반응이 이루어지며 캐비테이션이 계속 발생 소멸하면서 강력한 에너지를 방출하게 된다. 특히 소멸 시 기포의 파괴로 화학적 열작용이 수반되어 액의 화학반응 촉진은 물론 분산작용이 증가되어 수 GPa의 국소적인 충격압력이 표면에 압축잔류응력을 생성시킨다. 그 결과 냉간 가공법과 같은 효과를 나타내 경도의 증가를 나타낸 것으로 사료된다.<sup>13),14)</sup> WCP 실시로 최대 45.48%의 경도상승을 나타냈다.

Fig. 4는 5052-O Al 합금에 대하여 WCP 후 표면 형상을 관찰한 것이다. 1.5분 ~ 2.5분까지는 캐비티(cavity)의 터짐에 의한 손상이 부분적으로 나타났으며, 3.0 ~ 5.0분의 경우 평평하게 거의 일정한 형상을 나타냈다. 그러나 3.0 ~ 5.0분의 시간에서는 현미경 사진으로 거칠기나 손상 정도의 차이는 구별되지 않았다. WCP 처리시간이 가장 긴 10분의 경우 거친 표면을 나타냈으며, 이는 과도한 에너지로 인하여 over peening이 된 것으로 여겨진다. 이와 같이 표면에 긴 시간동안 WCP를 시행한다고 해서 표면개질의 향상도가 비례하여 개선되는 것이 아니고 어느 한도 이상에서는 심각한 표면 손상을 유발할 수 있으므로 적절한 WCP 조건으로 가공해야만 좋은 결과를 얻을 수 있다.<sup>15),16)</sup> 따라서 적절한 WCP 시간 결정은 대단히 중요한 것으로 판단된다.

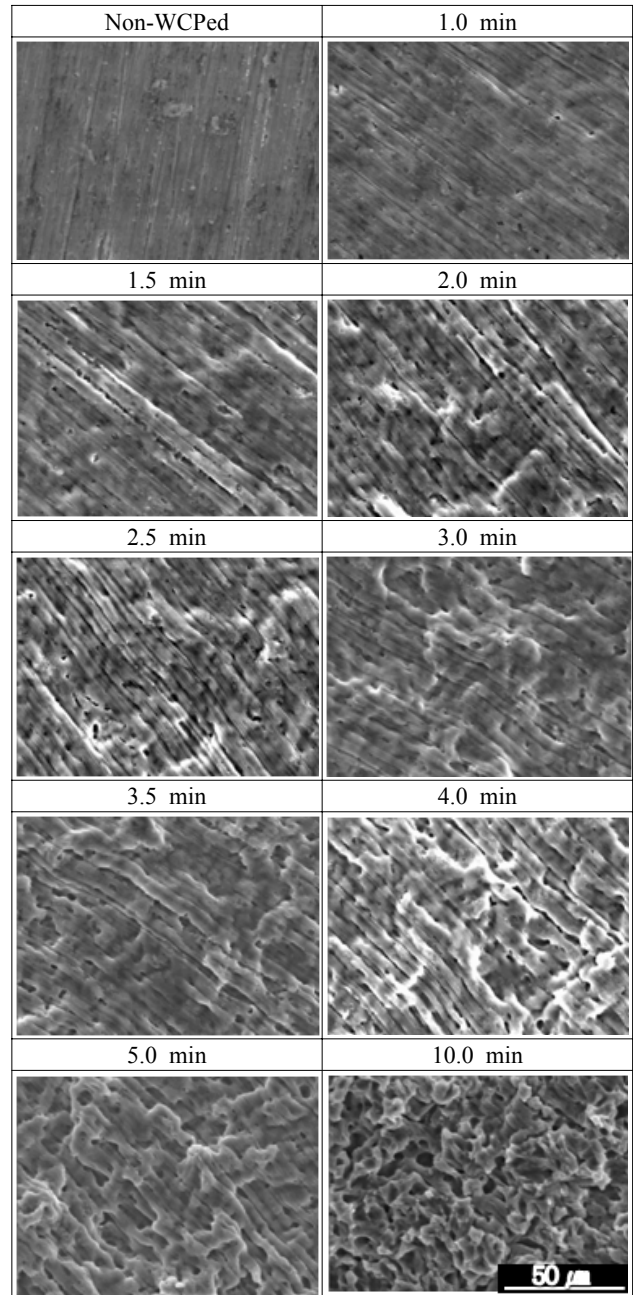


Fig. 4. Surface morphology by optical microscope with WCP time for Al 5052-O alloy.

Fig. 5는 WCP된 5052-O Al 합금 표면을 3D 현미경으로 분석한 것이다. 1.5분 동안 WCP를 실시한 경우, WCP를 실시하지 않은 시편 보다 약간 거친 표면을 나타냈으며, 이후 4.0분까지 거의 유사한 경향을 나타냈다. 이는 캐비티에 의한 기포 붕괴 시 발생하는 국부적인 큰 힘에 의해 소성변형된 것으로 판단되며, 손상 깊이가 얇은 시간이 경과 할수록 증가하는 경향을 나타냈다. 한편 5.0분 동안 WCP를 실시한 경우, 4.0분까지에 비해 WCP에 의해 손상 깊이가 2배정도

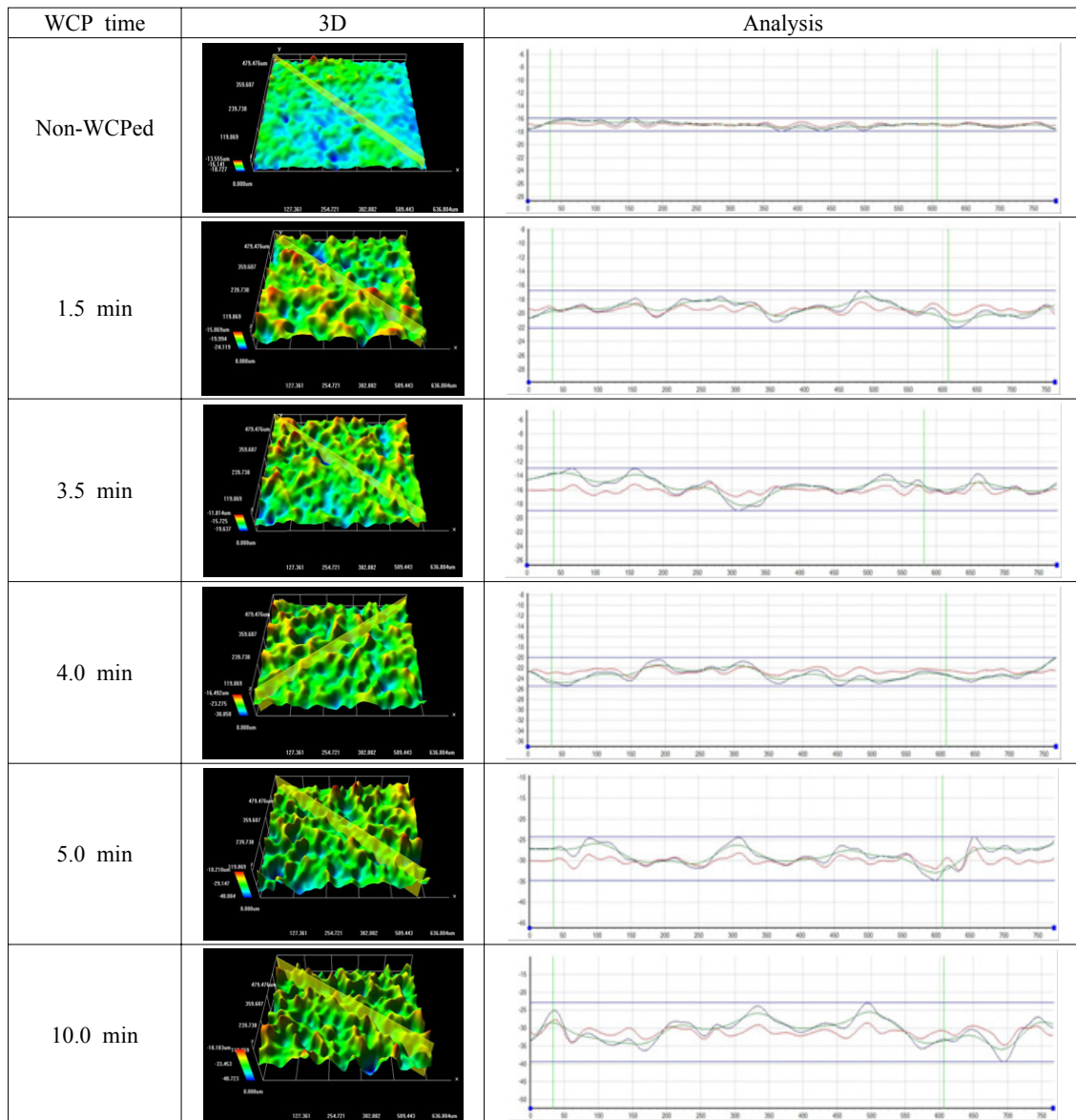


Fig. 5. 3-D analysis of WCPed specimen for Al 5052-O alloy.

증가하였다. 또한 10.0분 동안 WCP를 실시한 경우도 마찬가지로 전체적인 손상이 증가하였으며, 3D 분석 결과에서 볼 수 있듯이 WCP된 부위의 깊이가 증가된 것을 관찰할 수 있었다. 전반적으로 WCP 시간이 증가할수록 평탄했던 표면의 거칠기가 WCP에 의한 캐비티의 붕괴로 인한 충격이 시편 표면에 영향을 미쳐 거친 표면을 형성하여 표면 손상에 의한 깊이를 손상 깊이(damage depth)로 정의하여, 그 값을 Fig. 6에 종합 비교하였다. 전반적인 경향은 WCP의 처리 시간 증가에 따라 표면의 손상깊이가 5.23  $\mu\text{m}$ 에서 16.76  $\mu\text{m}$ 까지 증가하는 경향을 나타냈으며, 5분의 경우 급격히 상승하는 경향을 나타냈다. 이와 같은 WCP로 인하여 결정 조직이나 잔류응력이 변화하여 부식특성에도 영향을 미칠

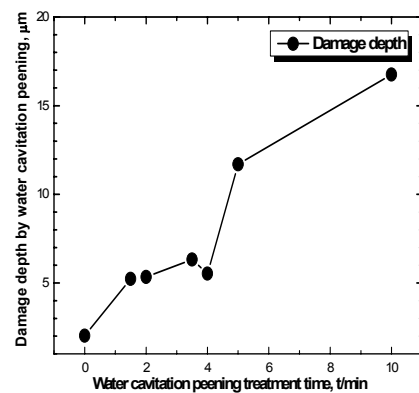


Fig. 6. Damage depth with time for WCPed specimen of Al 5052-O alloy.

것으로 사료된다.

Fig. 7은 5052-O Al 합금에 대하여 다양한 시간에서 WCP를 실시한 후 해수 용액에서 마이크로 드랍플릿 셀 (micro droplet cell)을 이용하여 분극 시험결과를 나타낸 것이다. 각 WCP 시간조건에 대하여 3회 실험을 실시하였다. Non-WCPed 시편의 경우 거의 유사한 경향을 나타낸 반면 2.0분 동안 WCP를 실시한 경우 부식전위의 차이가 발생하였는데, 이는 캐비티에 의한 표면의 국부적인 충격이

짧은 시간에 전반적으로 균일하게 충격을 받지 못하여 응력적으로 불균일한 상태이므로 미세응력이 작용하는 부위와 상대적으로 적은 부분에 기인한 것으로 사료된다.<sup>17)</sup> 즉 마이크로 드랍플릿셀의 특성상 측정 면적이 좁기 때문에 측정 부위에 따른 전위차이가 크게 나타난 것으로 판단된다. Non-WCPed 시편편과 WCP를 3.5분 ~ 10분 동안 실시한 경우 음분극 곡선에서 용존산소환원반응에 의한 농도분극의 경향을 나타냈다. 한편 양분극 곡선에서는 부동태 경향 없이 모든 조

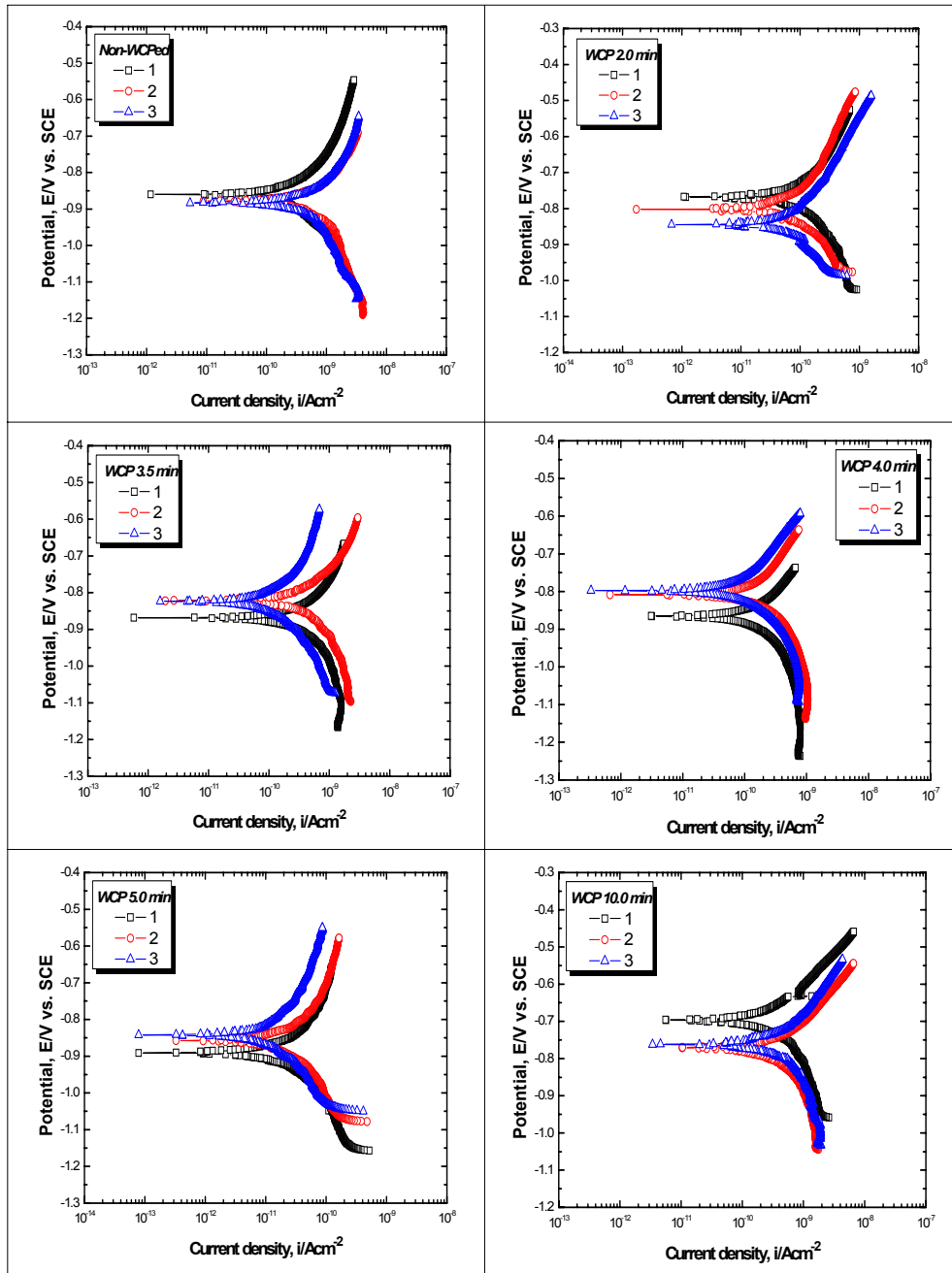


Fig. 7. Polarization curves of WCPed Al 5052-O alloy with various time by micro-droplet cell.

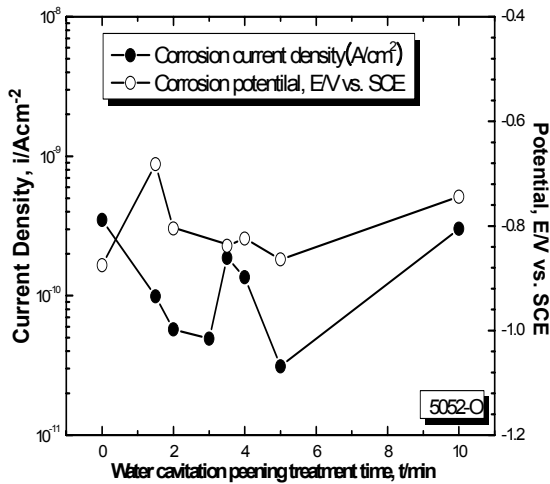


Fig. 8. Comparison of corrosion current density and corrosion potential of WCPed 5052-O Al alloy by Tafel extrapolation method.

건에서 전위 상승에 따라 꾸준한 전류밀도의 상승이 관찰되었다. 이와 같은 여러 WCP 시간에 대한 시험결과에 대하여 부식전위 및 부식전류밀도를 Tafel 외삽법으로 구하여 그 평균값을 Fig. 8에서 비교하였다. 부식전위의 변화 양상에서 5052-O는 WCP 적용시간에 따른 부식전위는 Non-WCPed 시편보다 귀한 전위를 나타냈으나 일정한 경향은 관찰되지 않았다. 한편 부식전류밀도는 Non-WCPed인 경우에 비해 WCP으로 인하여 모두 개선되었다. WCP 시간이 5.0분인 경우 가장 낮은 부식전류밀도를 나타낸 후 다시 증가하는 경향을 보여주었다. Non-WCPed에서  $3.488 \times 10^{-10} \text{ A/cm}^2$ 의 가장 큰 전류밀도를 나타낸 반면, 5.0분에서  $3.115 \times 10^{-11} \text{ A/cm}^2$ 으로서 가장 낮은 전류밀도를 나타내어 현저히 개선된 결과를 나타냈다. 이것은 워터 캐비테이션 피닝 시 5052-O Al 합금 표면에 형성된 압축잔류응력이 해수 환경에서 부식이 진행될 때 생성된 성장응력과의 상호작용에 의해 보호피막의 형성시간이 길어져 외부 염소이온의 부식환경에 대한 저항성이 높아진 것으로 판단된다.<sup>18)</sup> 피닝시간에 따라 부식전류밀도의 증감현상이 나타났는데 이는 WCP의 영향을 받은 표면이 박리되면서 Non-WCPed 부분이 노출되면서 부식전류밀도가 증가하는 경향을 나타낸 것으로 사료된다.

#### 4. Conclusion

5052-O 알루미늄 합금의 WCP 시간에 따른 표면경화와 부식 특성에 관한 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) WCP 시간 증가 따라 표면 경도는 비례하여 증가하지 않았으나 모두 개선되었으며, 최고의 표면처리 정도 값은 WCP 처리시간 3.5분에서 최고를 나타냈다.
- 2) 주사전자현미경과 3D 현미경으로 표면관찰 결과, WCP 시간이 증가함에 따라 소성 변형되어 거칠기가 증가하는 경향을 나타냈다.
- 3) WCP 시간의 증가 따라 부식저항성은 개선되었으나 적용시간과는 일정한 경향을 나타내지 않았으며, 부식전류 밀도는 WCP 처리시간 5.0분인 경우 가장 낮은 값을 나타냈다.

#### 참고 문헌

1. Min-Jin Kang, Master's Thesis, p. 9, Hongik University (2011).
2. S. H. Park, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, **11**, 42 (2005).
3. S. J. Kim, J. I. Kim, and J. S. Kim, *J. Kor. Inst. Surf. Eng.*, **40**, 262 (2007).
4. L. Wanger, Mechanical Surface treatments on titanium, Aluminium and Magnesium alloys, Mater. Sci. Eng., **263**, p. 210 (1999).
5. T. Momma and A. Lichtarowicz, *Wear*, **186**, 425 (1995).
6. H. Soyama, A. Lichtarowicz, and Momma, Proc. of Fluid Eng. Division Summer Meeting, ASME FED, **236**, 415 (1996).
7. ASTM Designation G134-95, Standard test method for erosion of solid materials by a cavitating liquid jet, ASTM, p. 1 (1996).
8. Kyeong-Dong Park, Yung-Jin Sin, and Dong-Ug Kim, *The Korea society of marine engineering*, **30**, 731 (2006).
9. Hitoshi Soyama, Tsutomu Kikuchi, Masaaki nishikawa, Osamu Takakuwa, *Surf. Coating Tech.*, p. 3167 (2005).
10. Y. Hua, C. Gong, Z. Yao, and J. Hu, *Surf. Coating Tech.*, **203**, 3503 (2009).
11. K. J. Kirkhopea, R. Bellb, L. Caronc, R. I. Basud, and K.-T. Ma, *Mar. Struct.*, **12**, 477 (1999).
12. N Rajesh and N Ramesh Babu, IE(I) Jornal-PR, p 22 (2005).
13. T. Burakowski, A. Nakonlecrny, Proc. of the 1st international conference on shot peening, p. 139 (1981).
14. J. S. Eckersley ed., shot peening theory and application, IITT international, (1988).
15. S. K. Cheong, S. H. Lee, and S. C. Chung, *Trans. of the KSME A*, **25**, 1590 (2001).
16. H. Aoki, E. Nagashima and T. Miura, Proc. of the 4th international conference on shot peening, p. 513, Tokyo (1990).
17. Seong-Kyun Cheong, Shot peening processing, p. 63, Sehwa pub. (2001).
18. Keyungdong Park, Jaepil An, The Korean Society of Automotive Engineers, p. 950 (2004).