<연구논문>

한국표면공학회지
J. Kor. Inst. Surf. Eng.
Vol. 47, No. 1, 2014.

<http://dx.doi.org/10.5695/JKISE.2014.47.1.025>

ALBC3 합금의 해수 내 전기화학적 특성에 미치는 쇼트피닝 분사압력의 영향

한민수^a, 임명환^b, 김성종^{a*}

^a목포해양대학교 기관시스템공학부, ^b목포해양대학교 실습선

Effects of Shot Peening Projection Pressure on Electrochemical Characteristics of ALBC3 Alloy in Seawater

Min-Su Han^a, Myeong-Hwan Im^b, Seong-Jong Kim^{a*}

^aDivision of Marine System Engineering, Mokpo Maritime University, Mokpo 530-729, Korea

^bTraining Ship, Mokpo Maritime University, Mokpo 530-729, Korea

(Received January 27, 2014 ; revised February 11, 2014 ; accepted February 18, 2014)

Abstract

The effects of shot peening pressure on electrochemical and surface morphological characteristics of ALBC3 alloy were investigated in this work. The surface hardness of ALBC3 alloy was improved by shot peening process under all shot peening pressures between 2 and 5 bar, and the high value of surface hardness was observed to be about 420 Hv at 4 bar of the shot peening pressure. The shot peened surface presented very rough surface due to shot ball collision. The result of anodic potentiodynamic polarization in seawater revealed that there is no significant difference between the shot peened and non-shot peened specimen in terms of corrosion characteristics. Therefore, the optimum projection pressure is determined to be 4 bar.

Keywords : Shot peening, Projection pressure, ALBC3 alloy, Seawater, Corrosion characteristics

1. 서 론

최근 자동차, 항공기, 선박 등은 고출력, 경량화 및 수명 장기화의 필요성이 더욱 증가하는 추세이다. 이러한 산업분야에서 사용되는 각종 기계 설비와 장치들은 경량화 및 고내구성을 실현하기 위해 재료의 고강도화 설계방법이 적용되고 있다. 그 중 표면경화법의 하나로 재료의 표면강도를 향상시키는 동시에 재료 내부의 인성을 유지시켜 피로하중에 대한 저항성을 크게 향상시킬 수 있는 쇼트피닝 가공 기술이 있다¹⁾. 그러나 기계 구조물이 부식 환경 하에서 피로하중을 받게 되면 파괴속도는 더욱 빨라지게 된다. 이때 발생하는 부식피로에 의한 손상정도는 반복하중에 의한 기계적 손상과 부식에

의한 전기화학적 손상을 중첩시킨 것보다 훨씬 크기 때문에 예기치 못한 사고가 산업현장에서 발생할 수 있다²⁾. 따라서 부식 환경 조건에서 기계 구조물 재료의 종류에 따른 쇼트피닝 가공 기술이 전기화학적 거동에 미치는 영향을 규명할 필요가 있다^{3,4)}.

재료 종류에 따른 타 연구자의 관련 연구로 Lee 등은 304SS강에 대하여 쇼트피닝과 초음파 피닝을 실시하여 피닝 방법에 따른 재료의 미세구조와 부식 거동을 비교 분석⁵⁾하였으며, Wang과 Li는 열처리와 샌드 블라스팅에 의해 형성된 표면 나노결정질(nanocrystalline) 층에 대하여 기계적/전기화학적 거동 변화를 연구하였다⁶⁾. 그리고 Park 등은 스프링강의 종류에 따라 쇼트피닝 가공 후 여러 가지 부식 환경에 따른 쇼트피닝의 영향을 연구하였다⁷⁻⁹⁾. 또한, Al 7075-T6에 대하여서는 Cheong 등이 쇼트

*Corresponding author. E-mail : ksj@mmu.ac.kr

피닝 가공 후 부식 시간에 따른 피로수명과의 관계를 연구한 바 있다¹⁰⁾.

본 논문에서는 해양환경 하에서 널리 사용되고 있는 ALBC3 합금에 대하여 분사압력 변수에 따른 쇼트피닝 가공이 재료의 기계적/전기화학적 특성 변화에 미치는 영향을 연구하였다.

2. 실험 방법

본 연구에 선정된 재료는 ALBC3 합금으로 Cu 81.57%를 주성분으로 Al 9.30%, Fe 3.66% 그리고 Ni 4.39% 등이 포함된 합금이다. ALBC3 합금에 대한 쇼트피닝 실험을 위해 시험편을 2 cm×2 cm로 제작하여 표면을 에머리 페이퍼로 2000번까지 연마하였다. 그림 1(a)는 쇼트피닝 장비의 모식도이며, 그림 1(b)는 쇼트피닝 가공 시 사용된 쇼트볼(conditioned stainless steel cut wire shot, STS304, SCCW16)이다. 쇼트피닝 장비는 압축공기를 이용하여 내부 직경이 7.9 mm인 분사노즐을 통해 수직 방향으로 쇼트볼을 분사하는 공기식 투사장치이다. 쇼트볼은 직경이 0.4 mm, 경도가 50.6~54.5 H_{RC}이다. 쇼트피닝 실험은 쇼트볼의 분사거리를 10 cm 그리고 분사시간을 3.5분으로 일정하게 유지하고, 분사압력 2, 3, 4 그리고 5 bar를 변수로 실시하였다. 이후 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편(non-shot

peening)과 쇼트피닝된 시험편에 대하여 마이크로 비커스 경도기를 이용하여 하중 9.807 N, 유지시간은 10초로 적용하여 경도를 측정하였다. 그리고 전기화학적 실험은 천연해수 상태에서 시험편 표면적 0.332 cm²만 노출시켜 양극분극(anodic polarization) 실험을 실시하였다. 이때 기준전극으로 은/염화은 전극(Ag/AgCl)을, 대극은 백금전극(Pt)을 사용하여 개로전위를 기준으로 -0.25 V에서 2.0 V까지 2 mV/sec의 주사속도로 실시하였다. 그리고 타펠분석을 통해 부식전위와 부식전류밀도를 구하였으며, 실험 후 주사전자현미경(SEM) 및 3D 현미경으로 시험편 표면을 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

그림 2는 ALBC3 합금에 대하여 쇼트피닝 시 분사압력에 따른 경도 측정 결과를 나타낸 것이다. 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편의 표면경도는 290 Hv로 측정되었으며, 압력변수에 따른 쇼트피닝된 모든 시험편은 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편과 비교하여 높은 경도 값을 나타냈다. 이는 ALBC3 합금과 같은 연질재료의 경우 경질재료에 비해 쇼트피닝 가공 시 상대적으로 항복강도가 낮아 소성 변형이 쉽게 발생하여 표면에 압축잔류응력을 더 크게 형성하기 때문인 것으로 사료된다¹¹⁾. 쇼트피닝 분사압력 2, 3, 4 그리고 5 bar의 경우 표면경도 상승효과를 나타내어 각각 17%, 34%, 52% 및 44% 향상된 경도 값을 나타냈다. 쇼트피닝 시 분사압력 증가에 따른 표면경도는 거의 비례적으로 증가하여 분사압력 4 bar에서 가장 높은 경도 값을 나타냈다. 결과적으로 ALBC3 합금에 대하여 쇼트피닝 적용 시 최적 분사압력은 4 bar로 나타났다. 분사시간과

Fig. 1. Schematic diagram of shot peening equipment (a) and cut wire shot ball shapes (b).

Fig. 2. Effect of shot peening with projection pressure on hardness for ALBC3 alloy.

(a)

(b)

Fig. 3. 3D analysis (a) and damage depth (b) after shot peening for ALBC3 alloy.

분사거리가 고정된 상태에서 쇼트볼을 수직분사 할 경우, 분사압력이 증가할수록 쇼트볼의 속도에너지가 증가하여 재료표면에 더 큰 소성변형을 형성시켜 표면경도는 증가하는 것으로 판단된다¹²⁾. 이는 쇼트볼에 의하여 재료가 변형되면서 결정립 미세화로 경도가 증가한 것으로 사료된다¹³⁾. 그러나 분사압력 5 bar인 경우 분사압력 4 bar 대비 다소 낮은 정도 상승률이 관찰되어 과도한 분사압력에 의한 오버피닝 손상 가능성을 보여주고 있다.

그림 3은 ALBC3 합금에 대하여 쇼트피닝 이후 3D 현미경으로 표면 관찰 및 평균 표면 손상깊이를 비교한 것이다. 여기서 손상깊이란 미소 표면을 현미경으로 관찰한 요철 깊이를 의미하며, 이는 쇼트피닝에 의한 표면 거칠기를 분석하는 지표에 해당한다. 3D 현미경 관찰 결과, 평균 표면 손상깊이

가 $16.3 \mu\text{m}$ 인 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편과 비교하여 분사압력 2 bar에서는 평균 손상깊이가 $35.2 \mu\text{m}$ 로 상대적으로 크기가 작은 요철들이 표면 전반에 걸쳐 균일하게 형성되었다. 그러나 분사압력 3 bar에서는 부분적으로 쇼트피닝 손상에 의한 침강과 융기된 요철들이 관찰됨으로써 깊이방향의 손상과 거칠기가 증가하여 평균 손상깊이가 $44.2 \mu\text{m}$ 로 가장 크게 관찰되었다. 이후 분사압력 4 bar 그리고 5 bar에서는 3 bar에 비해 표면 형상이 다소 균일해지고 거칠기가 감소하였으며, 평균 손상깊이는 각각 $39.8 \mu\text{m}$ 그리고 $40.0 \mu\text{m}$ 로 나타났다. 이는 쇼트피닝에 의해 요철 가장자리의 융기부들이 쇼트볼 충돌에 의한 충격에너지로 인해 저하하고 평탄화되어 상대적으로 평균 손상깊이가 작게 측정된 것으로 사료된다. 따라서 분사압력 4 bar가 가장 적

Fig. 4. Comparison of the anodic polarization trends in seawater after shot peening for ALBC3 alloy.

정하였던 것으로 판단되며, 쇼트볼의 충돌에너지가 표면 전반에 걸쳐 고르게 소성변형되고 균일한 압축잔류응력을 형성하였을 것으로 사료된다.

그림 4는 ALBC3 합금에 대하여 쇼트피닝 이후 천연해수 용액 내에서 각 조건별 양극분극 거동을 비교한 것이다. 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편은 개로전위가 -0.22 V로 측정되었으며, 이후 양극분극이 진행됨에 따라 활성 양극용해 반응으로 급격한 전류밀도 증가를 나타냈다. 그러나 0.24 V~ 1.08 V 전위 구간에서는 전류밀도가 일시적으로 감소하였으며, 해당 구간에서의 전류밀도는 2.2×10^{-3} ~ 5.4×10^{-3} A/cm²로 계측되었다. 이때의 전류밀도 구간은 매우 높은 값에 해당하므로 양극방식기술 적용 시 방식효과를 기대할 수는 없다. 이와 같이 ALBC3 합금의 양극분극 거동 과정에서 전류밀도 감소구간이 관찰되는 것은 산화막인 Cu₂O가 재료 표면에 형성되어 전하의 이동을 방해하기 때문으로 사료된다^[4,15]. 반면, 쇼트피닝된 시험편들은 대략

0.25 V~ 0.5 V의 전위 구간에서 전류밀도 감소가 관찰되었으며, 대략 4.5×10^{-3} ~ 6.3×10^{-3} A/cm²로 계측되었다. 따라서 쇼트피닝된 시험편이 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편과 비교하여 상대적으로 전류밀도 감소 구간이 작을 뿐만 아니라 그 값도 크게 나타나 부식 저항성이 낮음을 확인할 수 있었다. 타 연구자의 선행연구에 따르면, 쇼트피닝된 시험편 표면에 형성된 요철은 활성 양극용해 반응에 의해 우선적으로 용해되어 부식가속화의 요인으로 작용하였다^[5,16]. 그러나 본 연구에서는 쇼트피닝 실시 유무에 관계없이 대략 0 ~ 0.25 V의 전위구간에서 활성화 반응이 진행되었으나 거의 유사한 전류밀도 거동을 나타냈다. 이는 해당 전위구간에서 부식에 민감한 β 상의 표면 노출 면적이 표면 미세화와 균질화가 발생한 쇼트피닝된 시험편에 비해 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편이 상대적으로 크게 노출되어 표면 거칠기보다 큰 영향을 미친 것으로 사료된다. 그러나 0.25 V 직후의 전위구간에서는 쇼트피닝 실시 유무에 따라 전류밀도의 차이를 나타냈다. 모든 실험조건에서 시험편 표면에 산화막 Cu₂O가 형성되었으나, 쇼트피닝 실시 유무에 따라 형성된 산화막의 견고성 차이 및 가공경화에 따른 내식성 저하로 0.25 V 직후에는 쇼트피닝된 시험편의 전류밀도가 상대적으로 크게 나타난 것으로 사료된다. 이후 적용전위가 증가할수록 양극표면에서의 용해반응이 급격하게 발생함에 따라 쇼트피닝을 실시한 시험편과 실시하지 않은 시험편들의 전류밀도 차이가 점차 감소하는 경향을 나타냈다. 특히, 1.0 V 이상의 전위구간에서는 모든 조건에서 산소발생 반응에 따른 극심한 활성 용해반응이 발생하였고, 이에 따라 쇼트피닝된 시험편의 경우 쇼트피닝 효과가 나타나지 않는 모재가 점차 노출되면서 실험 종료 시에는 거의 유사한 전류밀도 값을 나타낸 것으로 판단된다. 결과적으로 쇼트피닝된 시험편들은 상대적으로 전류밀도가 증가하여 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편 대비 낮은 부식저항성을 나타내지만 표면경도 향상 정도와 미소한 전류밀도의 차를 감안할 때 쇼트피닝 적용에 의한 ALBC3 합금의 특성 저하는 거의 없는 것으로 판단된다^[5].

그림 5는 ALBC3 합금에 대하여 쇼트피닝 후 타펠(tafel) 분석에 의해 구한 부식전위와 부식전류밀도를 비교한 그래프이다. 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편의 부식전위는 -0.215 V이며, 분사압력 2, 3, 4 그리고 5 bar의 경우 각각 -0.246 V, -0.199 V, -0.217 V 그리고 -0.199 V로 쇼트피닝 실시 유무에 관계없이 부식전위는 전체적으로 거의 유사하게 나타났다. 한편, 부식전류밀도는 쇼트피닝을 실시하

Fig. 5. Tafel analysis in seawater after shot peening for ALBC3 alloy.

지 않은 시험편이 $7.5 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 로 나타났으며, 분사압력 3 bar에서는 $3.3 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 로 가장 크게 나타났다. 이는 앞서 언급한 그림 3에서 분사압력 3 bar의 평균 표면 손상깊이와 거칠기 영향에 기인한 것으로 사료된다. 시험편 표면이 쇼트피닝 충격압에 의해 형성된 요철 가장자리 용기부분 및 조직 변형의 노출 표면적이 증가하였기 때문으로 사료된

다. 이후 분사압력 4 bar 그리고 5 bar의 경우, 부식전류밀도가 각각 $1.2 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 와 $2.4 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 로 분사압력 3 bar에 비해 상대적으로 작게 나타났다. 이는 표면 균질화가 진행된 분사압력 4 bar의 경우가 쇼트피닝된 시험편 중 가장 작은 부식전류밀도를 나타냈으며, 그 외의 분사압력 조건하에서는 부식전류밀도가 상대적으로 높게 나타난 것으로 사료된다. 결과적으로 쇼트피닝 적용 유무에 따른 시험편의 전기화학적 거동 변화 차이가 크지 않아 쇼트피닝 가공이 전기화학적 특성 변화에 미치는 영향은 거의 없을 것으로 사료된다.

그림 6은 ALBC3 합금의 쇼트피닝된 시험편에 대하여 양극분극 실험 후 주사전자현미경으로 표면을 관찰한 것이다. ALBC3 합금의 미세조직을 살펴보면 Cu 함량이 높고 FCC 구조의 α 상, 마르텐사이트 조직의 β 상 뿐만 아니라 Fe 또는 Ni 원소가 Al 원소와 반응하여 형성된 Fe_3Al 또는 NiAl 조성의 금속간 화합물인 κ 상으로 이루어진 다상 조직임을 확인할 수 있다^{17,18)}. 따라서 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편에서는 상대적으로 내식성이 낮은 β 상에서 활성 양극용해 반응이 활발하게 발생하여 심

Fig. 6. Surface morphologies after potentiodynamic experiments in seawater after shot peening with projection pressure for ALBC3 alloy.

한 공식손상이 나타남으로써 쇼트피닝된 시험편에 비해 전반적으로 전면부식보다 국부부식에 의한 손상이 지배적으로 관찰되었다. 어둡고 깊게 손상된 부분이 활성 양극용해 반응에 의해 ALBC3 합금이 탈리된 국부부식 손상 부위이며, 주위에 부분적으로 나타난 밝은 영역은 활성 양극용해 반응의 진행 흔적으로 판단된다. 분사압력 2 bar의 경우, 전체적으로 활성 양극용해 반응이 발생하였고 전면부식과 함께 심한 국부부식이 넓게 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 분사압력 3 bar의 경우에는 분사압력 2 bar와 비교하여 전면부식이 활발하게 발생하였으나 공식에 의한 심한 표면 손상은 여전히 관찰된다. 이는 낮은 분사압력으로 인하여 재료 표면에 충분한 쇼트피닝 가공이 이루어지지 않아 불균일한 압축잔류응력 층이 형성됨으로써 전면부식 보다는 국

부부식의 손상이 발생한 것으로 사료된다. 이에 반해 분사압력 4 bar의 경우, 분사압력 3 bar와 비교하여 국부부식의 손상 크기는 더 크게 나타났으나 손상깊이는 오히려 작게 나타났다. 이는 적절한 분사압력의 결과로 판단되며, 주조재료의 결함이 쇼트피닝 가공으로 조직성상이 미세화 및 균질화되고, 소성변형에 의한 압축잔류응력 형성으로 활성 양극용해 반응 과정에서 작은 표면 손상깊이를 나타낸 것으로 판단된다. 이러한 미세화와 균질화는 화학조성의 균질화로 α 상과 β 상의 전위차가 상대적으로 줄어들기 때문에 미소 갈바닉 부식의 민감성도 감소하였을 것으로 사료된다. 이후 분사압력 5 bar의 경우, 활성 용해반응이 진행 중으로 판단되는 흰색의 밝은 영역이 급격하게 감소하였다. 그리고 국부부식에 의한 손상깊이 역시 현저하게 감소하여

(a)

(b)

Fig. 7. 3D analysis (a) and damage depth (b) after potentiodynamic experiments in seawater after shot peening for ALBC3 alloy.

다른 분사압력 변수와 비교하여 고르고 평탄한 표면 형태를 나타냈다. 이처럼 쇼트피닝된 재료에 대한 전기화학적 부식거동에 미치는 요소들은 매우 다양하다. 표면조직의 화학조성의 균일화, 요철형상의 분포, 결정립의 면적 등 매우 다양한 요소에 의해 전기화학적 특성은 미세하게 변화한다.

그림 7은 ALBC3 합금의 쇼트피닝 전후 시험편에 대하여 양극분극 실험 후 3D 현미경으로 표면 관찰 및 평균 표면 손상깊이를 관찰한 결과이다. 그림 7(a)에서 쇼트피닝을 실시하지 않은 경우, 표면 전반에 국부적인 공식이 발생하여 쇼트피닝된 시험편보다 상대적으로 큰 표면 손상을 나타냈다. 쇼트피닝된 시험편들의 경우, 전체적으로 활성 양극용해 반응이 활발하게 발생하여 손상된 형상이 유사하게 나타났다. 그리고 쇼트피닝 분사압력 2, 3, 4 그리고 5 bar로 증가함에 따라 요철 형상의 크기와 분포 규모는 오히려 다소 감소하는 경향을 나타냈다. 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편은 공식에 의한 손상이 뚜렷하여 깊이 방향의 손상이 관찰되었다. 반면 쇼트피닝된 시험편들은 활성 양극용해 반응으로 인하여 쇼트피닝에 의해 용기된 부분이 우선 용해되면서 거칠기가 전반적으로 저하하는 경향을 나타냈다. 평균 표면 손상깊이는 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편이 $87.6\ \mu\text{m}$ 로 가장 높게 측정되었으며, 이후 분사압력이 증가함에 따라 평균 손상깊이는 감소하는 경향을 나타내어 분사압력 5 bar인 경우 $46.0\ \mu\text{m}$ 로 가장 작게 나타났다. 이와 같은 결과는 쇼트피닝 실시 유무에 따른 시험편의 부식거동이 다르기 때문으로 판단된다. 쇼트피닝을 실시하지 않은 경우, 평탄한 표면에서 양극분극에 따른 용해반응으로 인해 조직 내 내식성이 상대적으로 열악한 영역에서 우선적으로 부식이 진행되고 그로 인해 국부부식에 의해 손상되어 손상깊이는 크게 나타났다. 반면, 쇼트피닝된 시험편은 표면조직 및 조직 직하 영역에서 쇼트볼 충돌에 의해 조직이 변형되어 균질화 현상이 발생한 것으로 사료된다⁵⁾. 이러한 균질화는 표면 전반을 균일한 응력상태로 놓이게 하여 국부전지에 의한 부식셀 형성이 감소한 것으로 판단된다. 물론 극심한 활성 용해반응 이후의 조건이므로 표면의 용해반응은 심각하게 발생하였으나 부식형태는 국부부식에 비해 대체적으로 전면부식이 발생한 것으로 사료된다.

4. 결 론

ALBC3 합금에 대하여 다양한 쇼트피닝 분사압력에 따른 경도측정 및 전기화학적 특성을 평가하

였으며, 최적의 쇼트피닝 분사압력 결정을 위한 연구 결과는 다음과 같다.

ALBC3 합금의 경도는 쇼트피닝 처리 후 약 10~40 Hv 정도 향상되었으며, 4 bar의 분사압력에서 가장 높은 경도(420 Hv)를 얻을 수 있었다. 표면 관찰에서는 쇼트피닝 이후 표면에 전체적으로 요철이 발생하였으며, 분사압력 4 bar일 때 가장 평활한 표면이 관찰되었다.

양극분극 실험 결과, 양극분극 곡선에서는 쇼트피닝을 실시하지 않은 시험편과 비교하여 쇼트피닝된 시험편의 내식성이 다소 좋지 않은 것으로 나타났다. 그러나 현미경 분석 결과 쇼트피닝된 시험편이 적게 손상되는 경향을 나타냈다.

결과적으로 ALBC3 합금에 대한 쇼트피닝 적용은 경도상승에 따른 기계적 특성 향상 및 균질화 현상 등 다양한 측면을 고려하면 내구성 향상에 효과가 있을 것으로 판단된다.

후 기

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

References

1. J. K. Xenophon, SAE, 891932 (1989).
2. D. Y. Lee, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, 28 (1988) 313.
3. K. D. Park, C. G. Jung, J. Ocean Eng. Tech., 15 (2001) 93.
4. W. F. Brown, J. E. Strawley, ASTM STP 410 (1996) 92.
5. H. S. Lee, D. S. Kim, J. S. Jung, Y. S. Pyoun, K. Shin, Corros. Sci., 51 (2009) 2826.
6. X. Y. Wang, D. Y. Li, Electrochim. Acta, 47 (2002) 3939.
7. K. D. Park, J. Y. Lee, W. T. Ki, Y. J. Shin, Journal of the Korea Society of Manufacturing Process Engineers, 6 (2007) 62.
8. K. D. Park Y. J. Sin, D. U. Kim, J. Korean Soc. Mar. Eng., 30 (2006) 731.
9. K. J. Ha, K. D. Park, J. Ocean Eng. and Tech., 17 (2003) 39.
10. S. K. Cheong, J. H. Nam, D. L. Kou, S. N. Ro, IJASS, 33 (2005) 60.
11. T. W. Kim, Z. R. Yang, D. H. Na, Y. S. Lee, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, 35 (2011) 1369.
12. Y. F. Al-Obiad, J. Appl. Mech., 57 (1990) 307.
13. V. O. Abramov, O. V. Abramov, F. Sommer, O.

- M. Gradov, O. M. Smirnov, *Ultrasonics*, 36 (1998) 1013.
14. K. J. Kim, H. G. Lim, Y. J. Kim, *Corros. Sci. Tech.*, 23 (1994) 194.
15. S. K. Min, K. T. Kim, W. S. Hwang, *Corros. Sci. Tech.*, 10 (2011) 125.
16. K. D. Park, Y. J. Sin, D. U. Kim, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, 30 (2006) 731.
17. J. A. Wharton, R. C. Barik, G. Kear, R. J. K. Wood, K. R. Stokes, F. C. Walsh, *Corros. Sci.*, 47 (2005) 3336.
18. S. M. Hong, M. K. Lee, G. H. Kim, K. H. Kim, W. W. Kim, S. I. Hong, *J. Kor. Inst. Surf. Eng.*, 37 (2004) 234.