극저온 열처리가 7075 알루미늄 합금의 잔류응력과 기계적 특성에 미치는 영향

김희봉 · 정은욱 · 고대훈* · 김병민* · 조영래[†]
부산대학교 재료공학부, *부산대학교 기계공학부

Effects of Cryogenic Treatment Cycles on Residual Stress and Mechanical Properties for 7075 Aluminum Alloy

Hoi-Bong Kim, Eun-Wook Jeong, Dae-Hoon Ko*, Byung-Min Kim* and Young-Rae Cho[†]

Dept. of Materials Science and Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

*Dept. of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

(2012년 10월 19일 접수 : 2012년 11월 12일 최종수정 : 2012년 11월 12일 채택)

Abstract In this study, the effects of cryogenic treatment cycles on the residual stress and mechanical properties of 7075 aluminum alloy (Al7075) samples, in the form of a tube-shaped product with a diameter of 500 nm, were investigated. Samples were first subjected to solution treatment at 470 °C, followed by cryogenic treatment and aging treatment. The residual stress and mechanical properties of the samples were systematically characterized. Residual stress was measured with a cutting method using strain gauges attached on the surface of the samples; in addition, tensile strength and Vickers hardness tests were performed. The detailed microstructure of the samples was investigated by transmission electron microscopy. Results showed that samples with 85 % relief in residual stress and 8 % increase in tensile strength were achieved after undergoing three cycles of cryogenic treatments; this is in contrast to the samples processed by conventional solution treatment and natural aging (T4). The major reasons for the smaller residual stress and relatively high tensile strength for the samples fabricated by cryogenic treatment are the formation of very small-sized precipitates and the relaxation of residual stress during the low temperature process in uphill quenching. In addition, samples subjected to three cycles of cryogenic treatment demonstrated much lower residual stress than, and similar tensile strength compared to, those samples subjected to one cycle of cryogenic treatment or artificial aging treatment.

Key words cryogenic treatment, 7075 aluminum, aging, residual stress, strain gauge.

1. 서 론

제품의 경량화를 통해 에너지 효율의 향상을 위한 방법의 하나로, 밀도가 낮은 알루미늄 합금을 사용한 부품 성형기술과 알루미늄 합금의 조성별 열처리 기술에 대한 관심이 증가하고 있다.¹⁾ 특히, Al-Zn-Mg-Cu계 7075 알루미늄 합금(이하 Al7075)은 열처리를 통해 고강도를 얻을 수 있는 장점이 있기 때문에 구조용 압출재료 또는 항공산업에 사용할 목적으로 많이 연구되어 왔다. Al7075는 석출경화형 합금이기 때문에 반드시 급냉(quenching)

과정을 포함하는 용체화처리(solution treatment) 공정이 필요하다. 급냉하는 단계에서 시편에 수반되는 외부와 내부의 냉각속도 차이는 열응력을 발생시키고, 열응력 때문에 거시적인 잔류응력(macro-residual stress)이 시편에 발생되게 된다. 용체화처리로 인해 발생한 잔류응력은 기계가공시, 재료에 내재하는 응력평형을 붕괴시켜 새로운 응력평형에 도달하면서 제품의 치수 정밀도를 크게 손상시킨다.²⁻⁵⁾ 따라서, 제품의 최종 치수 정밀도를 향상시키기 위해서는, 용체화처리시 발생한 잔류응력을 최종 정밀가공 공정 이전에 제거해야 한다.

[†]Corresponding author

E-Mail : yescho@pusan.ac.kr (Y. -R. Cho, Pusan Nat'l Univ.)

© Materials Research Society of Korea, All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

잔류응력을 제거하는 방법에는 소성가공법, 고온가열법 및 극저온 열처리법(cryogenic treatment) 등이 있다.⁶⁾ 소성가공법은 용체화처리후 시편을 2 % 내외로 인장시키는 방법(T651)으로 용체화처리시 발생한 잔류응력의 상태에 반대되는 부호의 소성가공을 인가하는 원리를 갖지만, 실제 공정의 적용으로 잔류응력을 제거하기는 쉽지 않다. 가장 간단한 방법은 고온가열법으로 잔류응력이 존재하는 시편을 높은 온도에서 일정시간 유지시키는 방법이지만, 시편의 입자 조대화 등의 발생으로 인해 기계적 특성면에서 열화(degradation) 현상이 수반된다. 즉, 고온가열법의 적용은 시편에 존재하는 잔류응력을 효과적으로 제거할 수 있지만, 인장강도와 경도 등의 기계적 특성이 저하되는 문제가 발생한다.

극저온 열처리법은 종래의 T6 열처리법에 추가의 2가지 공정, 즉 액체질소(LN₂)에 시편을 넣어(dipping) 냉각시키는 공정과 급격하게 승온시키는 급열처리(uphill quenching, UHQ)하는 공정을 수반한다. 급열처리 공정은 매우 중요하며, 용체화처리시 생긴 잔류응력과 반대되는 잔류응력을 고의로 시편에 인가시켜 기존에 존재하던 잔류응력을 상쇄시키게 된다. 또한, 극저온 열처리시 공정의 최고온도는 175 °C 정도로 높지 않아, 과시효(over aging)에 의한 기계적 특성의 저하 없이 잔류응력을 제거할 수 있는 장점이 있다.⁷⁾ Kim 등은 열처리형 알루미늄 합금 중에서 2014 알루미늄 합금에 대해 극저온 열처리와 인공시효(T6) 공정을 통하여 잔류응력을 최대 80 %까지 제거하였다.²⁾ 그러나 극저온 열처리 공정이 알루미늄 합금

의 잔류응력과 기계적 특성에 미치는 효과에 대해서는 아직도 이견이 많다.⁸⁾ 특히, A17075에 대해서는 강화 기구나 첨가 원소의 영향에 관한 연구는 많았지만 용체화처리시 생성된 잔류응력의 완화를 위한 극저온 열처리가 잔류응력과 미세조직의 변화에 미치는 영향에 대한 연구는 거의 없다.

본 연구에서는 고강도 알루미늄 합금을 사용해서 최종 제품의 치수 정밀도를 높이기 위한 목적으로, 용체화처리후 극저온 열처리 공정이 A17075의 잔류응력과 기계적 특성에 미치는 영향에 대해 연구를 하였다. 특히, 극저온 열처리시 극저온 열처리의 횟수를 1회와 3회로 변화시켜 실험함으로써, 극저온 열처리의 반복 횟수가 시편의 잔류응력과 기계적 특성에 미치는 영향에 대해 인장강도와 경도 및 미세조직을 종합해서 연구하였다.

2. 실험 방법

2.1 시편 준비와 열처리

본 연구에 사용한 A17075의 화학성분은 Table 1과 같으며, 후방압출 방법으로 원통형의 파이프를 제작하였다. Fig. 1은 A17075에 적용한 열처리 공정의 개략도이며, 4가지의 서로 다른 방법으로 열처리를 하였다. Fig. 1(a)

Table 1. Chemical composition of sample for 7075 Al alloy (wt.%).

Al	Zn	Mg	Cu	Cr	Fe	Si
Bal.	5.26	2.40	1.68	0.22	0.15	0.03

Fig. 1. Types of heat treatments for residual stress relief : (a) solution treatment + natural aging(WQ-T4), (b) solution treatment + artificial aging(WQ-T6), (c) solution treatment + cryogenic treatment(one time) + artificial aging(Cryo-X1) and (d) solution treatment + cryogenic treatment(three times) + artificial aging(Cryo-X3).

는 470 °C에서 120분간 유지시킨후 수냉시켜 용체화처리를 한후, 자연시효(natural aging)하는 공정(WQ-T4)을 나타낸다. Fig. 1(b)는 용체화처리후 인공시효(artificial aging)를 120 °C에서 24시간 실시하는 열처리 공정(WQ-T6)을 나타낸다. 반면, Fig. 1(c)와 (d)는 잔류응력을 최소화하면서 높은 인장강도를 얻기 위해 본 연구에서 수행한 극저온 열처리 공정을 나타낸다. 용체화처리와 인공시효 공정의 중간에 극저온 열처리를 1회[Fig. 1(c), Cryo-X1] 혹은 3회[Fig. 1(d), Cryo-X3] 추가함으로써 극저온 열처리의 횟수가 잔류응력과 기계적 특성에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 이때, 용체화처리와 자연시효는 기존의 방법과 동일하며, 극저온 열처리시 시편의 냉각은 액체질소(LN₂, -196 °C)를 사용하여 실시하였다. 급열 공정은 고압의 수증기(water vapor, 175 °C, 10 bar)를 사용해 실시하였으며, 급열시 직경 500 mm의 시편을 액체질소 온도로부터 100 °C까지 도달시키는데 소요되는 시간은 10초 정도였다.

2.2 특성 평가

용체화처리한 시편에서 극저온 열처리의 횟수가 시편의 잔류응력에 미치는 영향을 알아보기 위해 스트레인 게이지(strain gauge)를 이용하여 시편의 절단시 변형된

양을 측정하고 탄성계산에 의해 잔류응력을 역산하는 방법인 절단법(cutting method)으로 잔류응력을 측정하였다.⁹⁾ Fig. 2(a)는 본 연구에서 절단법으로 잔류응력을 측정할 때 사용한 원통형 시편의 형상(지름 500 mm, 길이 200 mm, 두께 10 mm)을 나타낸다. Fig. 2(b)는 시편에 부착한 스트레인 게이지(strain gauge)의 위치를 나타내며, 스트레인의 측정은 게이지 길이(L)가 짧을수록 유리하기 때문에 길이가 짧은 5 mm의 스트레인 게이지를 사용했다. 스트레인 게이지는 시편의 길이 방향(cutting direction, Z-축)으로 5개(P1~P5)를 절단선과 10 mm 떨어진 위치에 부착하였다. 원통형 시편을 절단하면, 절단되기 전의 응력평형 상태에서 튜브가 절단됨에 따라 새로운 응력평형 상태로 도달하려고 하는 성질 때문에 절단 전과 후에 따라 변화되는 변형을 및 응력 즉, 잔류응력의 측정이 가능하다. 잔류응력은 스트레인 게이지로부터 얻은 결과를 3차원 상태의 응력과 변형율과의 관계를 이용한 후크의 법칙(Hooke's law)을 이용하여, 다음의 식으로부터 구할 수 있다.¹⁰⁾

$$\sigma_r = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}[(1-\nu)\epsilon_r + \nu(\epsilon_\theta + \epsilon_z)] \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}[(1-\nu)\epsilon_\theta + \nu(\epsilon_z + \epsilon_r)] \quad (2)$$

$$\sigma_z = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}[(1-\nu)\epsilon_z + \nu(\epsilon_r + \epsilon_\theta)] \quad (3)$$

여기서, E는 탄성계수, ν 는 포아송비 이다. 또한 ϵ_r , ϵ_θ , ϵ_z 는 각각 반경, 원주, 축 방향의 변형율이며 σ_r , σ_θ , σ_z 는 각각 반경, 원주, 축 방향의 응력이다. 본 연구에서 고려한 원통 형상은 2차원 축대칭 문제로 가정할 수 있기 때문에 $\epsilon_r = 0$ 으로 나타낼 수 있다. 따라서 측정에 사용된 2축 스트레인 게이지로부터 ϵ_θ 와 ϵ_z 를 측정하여 σ_θ , σ_z 방향의 잔류응력을 구했다. 즉, Al7075의 포아송비 ν 는 0.33, 탄성계수 E는 74 GPa을 대입시켜 잔류응력 σ_θ 와 σ_z 를 계산하였다.¹¹⁾

또한 인장강도는 KSB 0801 규격에 따라 봉상의 시편을 제작하여 측정하였으며, 인장시험시 크로스헤드의 속도는 3 mm/min로 고정하였다. 급열처리 방법의 변화에 따른 기계적 특성을 미세조직과 결부시켜 해석하기 위해 투과전자현미경(transmission electron microscope, TEM) 관찰을 하였다. 특히, Al7075는 석출경화형 합금이기 때문에 TEM 이미지 상에서 석출물들의 형상과 분포를 자세히 관찰했다. 사용된 투과전자현미경은 JEOL사의 모델 JEM-2200FS이다. TEM용 시편은 우선 3 mm의 디스크 형태를 가지면서 두께가 100 μ m 이하로 기계적으로 연마한 후, twin jet polishing 방법으로 가공하여 준비하였다. 폴리싱용 에칭용액은 33 %의 질산(H₂SO₄)과 67 %의

Fig. 2. Experimental setup for residual stress measurement : (a) photo of pipe shaped sample and (b) position of attached strain gauges on the sample.

methanol을 혼합하여 제조하였으며, -20°C 이하의 온도에서 20 V의 전압을 인가시켜 twin jet polishing 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 잔류응력 변화

Fig. 3은 Fig. 2(b)에 표시한, 서로 다른 5개의 지점(P1, P2, P3, P4, P5)에서 측정된 잔류응력을 나타낸다. Fig. 3(a)와 (b)는 각각 원통의 길이에 나란한 방향인 Z방향의 잔류응력과 원주 방향인 θ 방향의 잔류응력을 나타낸다. 시편의 중앙부분(P3)에서 최대잔류응력이 나타나며, 마이너스 기호는 시편의 표면에 압축응력이 존재함을 의미한다. 시편의 가장자리 부분에서 낮은 잔류응력을 나타내는 이유는 잔류응력에 의해서 발생한 변형의 구속이 중앙부분에 비해 덜해 시편의 급냉시 변형이 쉽게 발생하기 때문이다. 이런 의미에서 시편이 가진 실제의 잔류응력은 중앙부분(P3)에서 나타난 값으로 볼 수 있다. P3 지점에서 나타나는 최대 잔류응력은 WQ-T4 시편의 경우, Z방향 성분은 84.7 MPa, θ 방향 성분은 73.8 MPa로 나타났다.

Fig. 4는 Fig. 3(b)의 최대 잔류응력이 나타나는 P3 지

Fig. 3. Change of residual stress for different heat treated samples dependence on measured positions using cutting method : (a) Z-direction and (b) θ -direction.

Fig. 4. Change of residual stress in θ -direction for samples measured at position P3 dependence on heat treatment methods. Number plus % on the arrow indicate recovered value of residual stress based on WQ-T4 sample.

점에서 θ 방향의 잔류응력을 나타낸 것이다. WQ-T4 시편과 WQ-T6 시편은 각각 용체화처리후 자연시효(WQ-T4)와 인공시효(WQ-T6)한 시편이다. Fig. 4에서 보듯이, WQ-T4 시편은 표면에 73.8 MPa로 높은 잔류응력을 갖는다. 인공시효 처리한 WQ-T6 시편의 경우, 잔류응력은 57.2 MPa로 자연시효 처리한 WQ-T4 시편에 비해 22.5% 낮은 잔류응력이 나타난다. 이런 연구는 종래에도 수행되었으며, 잔류응력이 낮아진 이유는 120°C 에서 인공시효 처리시 과포화된 합금 원소들이 미세하게 석출되어 더욱 안정된 미세구조를 갖기 때문이다.¹³⁾

본 연구의 결과, 극저온 열처리를 실시하면 용체화처리시 생성된 잔류응력이 크게 감소함을 확인하였고, 잔류응력이 감소한 이유는 다음과 같다. 용체화처리시 급냉하는 단계에서 잔류응력의 발생은 표면부는 압축응력, 중심부는 인장응력이 발생한다. 반면, 극저온 열처리시 발생되는 열이력은 급냉 과정과는 반대로 표면부는 인장응력, 중심부는 압축응력이 발생한다. 따라서, 용체화처리시 발생된 잔류응력과 극저온 열처리시 발생한 잔류응력은 서로 상쇄되기 때문에 극저온 열처리 공정으로 잔류응력이 낮은 시편을 얻을 수 있다.

극저온 열처리를 1회 실시한 Cryo-X1 시편의 경우 16.3 MPa의 낮은 잔류응력이 나타나며, 이는 WQ-T4 시편의 잔류응력을 기준으로 볼 때 잔류응력이 77.9% 제거된 값이다. 극저온 열처리를 3회 실시한 Cryo-X3 시편의 경우 측정된 잔류응력은 11.2 MPa로 나타나 잔류응력 제거율은 84.5%에 해당한다. 이상의 결과로부터, 극저온 열처리는 용체화처리시 발생한 잔류응력을 제거시키는 데 크게 기여함을 알았다. 극저온 열처리를 1회 실시할 때는 77.9%의 많은 잔류응력의 감소가 발생했지

만, 극저온 열처리를 3회 실시한 경우 회복된 잔류응력은 84.5 %였다. 즉, 추가로 2회 더 극저온 열처리한 효과는 6.6 %로 그 효과가 크지 않아 극저온 열처리의 횟수는 3회 정도면 충분하다고 사료된다.

3.2 기계적 특성 변화

Fig. 5는 서로 다른 열처리 방법을 적용시켜 만든 시편에 대한 인장강도와 경도의 변화를 나타낸다. 자연시효 처리한 WQ-T4 시편에서는 인장강도와 경도가 537 MPa와 134.9 Hv로 비교적 낮게 나타나지만, 120 °C에서 인공시효 처리한 WQ-T6 시편에서는 예측한 바와 같이 611 MPa와 179.5 Hv로 높게 나타났다. Al7075 시편에서

Fig. 5. Change of mechanical properties dependence on heat treatment methods. White columns indicate tensile strength and hatched columns indicate Vickers hardness.

인공시효에 따른 기계적 특성의 증가는 과포화 고용상태로 존재하던 Mg과 Zn의 합금 원소가 석출되기 때문이다.¹²⁾ 극저온 열처리를 실시한 시편의 경우, Cryo-X1 시편에서는 인장강도와 미소경도가 590 MPa와 174.5 Hv로 나타났지만, Cryo-X3 시편에서는 인장강도와 경도가 각각 581 MPa와 173.9 Hv로 나타났다. 즉, 인장강도와 경도의 관점에서 볼 때, 극저온 열처리 공정의 적용은 인공시효 처리한 WQ-T6 시편에 비해 5 % 정도 낮은 인장강도를 갖지만, 자연시효 처리한 WQ-T4 시편보다는 8 % 정도 우수한 특성을 나타냈다.

Fig. 6은 Fig. 1의 열처리 방법으로 제작한 시편에 대해 TEM 관찰한 미세조직과 회절패턴(diffraction pattern)을 나타낸다. Fig. 6(a)는 자연시효 처리한 WQ-T4 시편, (b)는 인공시효 처리한 WQ-T6 시편에 대한 명시야상(bright field image)을 나타낸다. Fig. 6(a)에서 보면, 지름이 50~150 nm인 입자들(D)이 다수 관찰되는데, 이들은 합금의 제조시 포함된 개재물로 사료되어지며,¹⁴⁾ Fig. 6(b)의 경우, 입내에서는 수 nm로 아주 미세한 석출물들(G)이 높은 밀도로 관찰되고, 결정립계(grain boundary)에도 석출물들(B)이 관찰된다. 입내에서 발견되는 석출물 G와 입계에서 발견되는 석출물 B는 Al7075에서 전형적으로 나타나는 중간상인 η' 석출물이다. 석출물 G는 균일 핵생성을 통하여 생성되며, 석출물 B는 입계를 기반으로 불균일하게 핵생성 및 성장한 것으로 판단된다. 이들 미세한 η' 석출물은 Fig. 6(b)의 삽입도에서 기지상인 Al의 회절패턴 사이에 링패턴(ring pattern)으로 관찰된다.^{14,15)}

Fig. 6. TEM images and diffraction patterns for samples : (a) WQ-T4, (b) WQ-T6, (c) Cryo-X1 and (d) Cryo-X3. Capital letters (B, G) indicate precipitates.

Fig. 6(c)와 (d)는 용체화처리후 극저온 열처리가 추가된 본 연구의 방법으로 제작한 시편의 TEM 명시야상과 회절패턴을 나타낸다. 극저온 열처리를 1회 실시한 시편(Cryo-X1)의 경우, Fig. 6(b)와 유사하게 입내에는 5-7 nm 크기의 미세한 η' 석출물들(G)이 관찰된다. 극저온 열처리를 3회 실시한 시편(Cryo-X3)인 Fig. 6(d)의 경우, 중간상의 η' 석출물의 크기는 약 12-15 nm로 인공시효 처리한 WQ-T6 시편에 비해 크기가 2배 정도 성장한 것을 알 수 있다. 종래의 연구결과에 의하면, Al7075의 석출 메커니즘은 G.P. zone의 형성후, 준안정 η' 의 석출, 그리고 안정된 η (MgZn₂)의 석출 과정을 따른다. Ghosh 등의 연구에 의하면 G.P. zone은 90-119 °C의 온도에서 형성되고, 준안정 석출물인 η' 는 114-142 °C의 온도범위에서 생성된다고 한다.¹⁶⁾

본 연구에서는 극저온 열처리를 고온(175 °C)의 수증기를 사용하였기 때문에, 비록 5분에서 15분 정도의 짧은 수증기 분위기에서도 G.P. zone과 준안정 η' 석출물이 형성될 것으로 예측한다. 또한, 극저온 열처리를 3회 실시한 Cryo-X3 시편의 경우, 175 °C의 수증기에 노출되는 시간(15분)이 극저온 열처리를 1회 실시한 시편이 수증기에 노출되는 시간(5분)에 비해 상대적으로 길기 때문에 η' 석출물의 성장은 더 많이 진행된다.¹⁷⁾ 즉, 극저온 열처리를 3회 실시한 Cryo-X3 시편은 인공시효 이전 단계에서, η' 석출물은 어느 정도 이미 성장해 있었기 때문에 인공시효 처리가 진행됨에 따라 η' 석출상의 크기는 Fig. 6(d)에서 보듯이 상대적으로 더 조대해진다. 조대한 η' 석출물은 기계적 특성이 떨어지는 원인으로 작용하지만, 그 감소폭은 Fig. 5에서 보듯이 미미하여 종래의 방법인 인공시효 처리한 WQ-T6 시편과 비교하여 큰 차이가 없다. 이상의 결과로부터, 극저온 열처리 공정은 기계적 특성의 감소량을 최소화 하면서 잔류응력의 최소화에 기여하는 최적의 열처리 방법으로 판단한다.

4. 결 론

제품의 최종 가공공정 이전에 7075 알루미늄 합금에 존재하던 잔류응력을 줄임으로써 제품의 최종 치수 안정성을 높이기 위한 방법으로 액체질소를 사용해 극저온 열처리를 적용했다. 용체화처리한 시편에 대해 극저온 열처리의 횟수 변화가 시편의 잔류응력과 기계적 특성에 미치는 영향에 대해 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 용체화처리한 7075 알루미늄 합금에서 인공시효 처리를 하면 자연시효 처리한 시편에 비해 57%까지 잔

류응력을 제거시킬 수 있었다. 추가로, 액체질소를 사용한 극저온 열처리 공정을 처음 1회 실시한 경우와 3회 실시한 경우, 자연시효 처리한 시편에 비해 잔류응력은 각각 80%와 85%까지 제거되었다.

2) 극저온 열처리를 3회까지 실시한 경우, 잔류응력은 자연시효 처리한 시편에 비해 85% 까지 제거되었으며, 시편의 인장강도는 자연시효 처리한 시편에 비해 8% 정도 높게 나타나는 장점을 나타냈다.

3) 극저온 열처리를 3회 실시한 시편의 잔류응력과 기계적 특성의 연구로 잔류응력이 기존의 방법에 비해 상당히 낮으면서, 동시에 기계적 특성의 감소가 거의 없는 7075 알루미늄 합금을 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

1. E. P. Kwon, K. D. Woo, M. S. Moon, D. S. Kang, G. C. Nam and G. H. Yoo, J. Kor. Inst. Met. & Mater., **47**, 175 (2009) (in Korean).
2. H. S. Kim and D. N. Lee, J. Kor. Inst. Met. & Mater., **16**, 233 (1978) (in Korean).
3. P. Juijerm and I. Altenberger, Scr. Mater., **55**, 1111 (2006).
4. G. P. Dolan and J. S. Robinson, J. Mater. Process. Tech., **153-154**, 346 (2004).
5. S. W. Choi, Y. C. Kim, J. I. Cho, C. S. Kang and S. K. Hong, Kor. J. Mater. Res., **22**, 82 (2012) (in Korean).
6. D. H. Ko, K. J. Park, Y. R. Cho, H. J. Lim, J. M. Lee and M. B. Kim, Trans. KSME. A, **35**, 1145 (2011) (in Korean).
7. D. A. Lados, D. Apelian and L. Wang, Mater. Sci. Eng., A, **527**, 3159 (2010).
8. K. E. Lulay, K. Khan and D. Chaaya, J. Mater. Eng. Perform., **11**, 479 (2002).
9. Y. S. Wang, S. L. Qu, Y. X. Gai, S. Dong and Y. C. Liang, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, **19**, s767 (2009).
10. G. E. Dieter, Mechanical Metallurgy, SI ed., p. 50, McGraw-Hill, London, UK (1988).
11. C. Comte and J. von Stebut, Surf. Coat. Technol., **154**, 42 (2002).
12. K. Park, D. H. Ko, B. M. Kim, H. J. Lim, J. M. Lee and Y. R. Cho, Kor. J. Met. Mater., **49**, 9 (2011) (in Korean).
13. G. Sha and A. Cerezo, Acta Mater., **52**, 4503 (2004).
14. A. Deschamps, G. Texier, S. Ringeval and L. Delfaut-Durut, Mater. Sci. Eng. A, **501**, 133 (2009).
15. J. F. Li, Z. W. Peng, C. X. Li, Z. Q. Jia, W. J. Chen and Z. Q. Zheng, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, **18**, 755 (2008).
16. F. Viana, A. M. P. Pinto, H. M. C. Santos and A. B. Lopes, J. Mater. Process. Tech., **92-93**, 54 (1999).
17. H. B. Kim, D. H. Ko, B. M. Kim, H. J. Lim, D. Y. Kim and Y. R. Cho, Kor. J. Met. Mater., **51**(5), in press (2013) (in Korean).