

AC8A 알루미늄합금 주조재의 열처리에 의한 특성 평가

이 성 열¹·박 동 현¹·원 종 필¹·김 윤 해¹
이 명 훈²·문 경 만¹·정 재 현^{3,*}

¹한국해양대학교 조선기자재 공학부, ²한국해양대학교 기관시스템 공학부

³한국해양대학교 기계, 에너지시스템 공학부

(2012년 11월 06일 접수, 2012년 12월 28일 수정, 2012년 12월 28일 채택)

Evaluation of the Characteristics of the Aluminum Alloy Casting Material by Heat Treatment

Syung Yul Lee¹, Dong Hyun Park¹, Jong Pil Won¹, Yun Hae Kim¹
Myung Hoon Lee², Kyung Man Moon¹, and Jae Hyun Jeong^{3,*}

¹Dept. of Marine Equipment Engineering, Korea Maritime Univ. Dong Sam-2Dong Young Do-Gu, Busan, 606-791, Korea

²Dept. of Marine System Engineering, Korea Maritime Univ. Dong Sam-2Dong Young Do-Gu, Busan, 606-791, Korea

³Dept. of Mechanical & Energy Systems Engineering, Korea Maritime University, Dong Sam-Dong, Yong Do-ku, Busan, Korea

(Received November 06, 2012; Revised December 28, 2012; Accepted December 28, 2012)

Aluminum is on active metal, but it is well known that its oxide film plays a role as protective barrier which is comparatively stable in air and neutral aqueous solution. Thus, aluminum alloys have been widely applied in architectural trim, cold & hot-water storage vessels and piping etc., furthermore, the aluminum alloy of AC8A have been widely used in mold casting material of engine piston because of its properties of temperature and wear resistance. In recent years, the oil price is getting higher and higher, thus the using of low quality oil has been significantly increased in engines of ship and vehicle. Therefore it is considered that evaluation of corrosion resistance as well as wear resistance of AC8A material is also important to improve its property and prolong its lifetime. In this study, the effect of solution and tempering heat treatment to corrosion and wear resistance is investigated with electrochemical method and measurement of hardness. The hardness decreased with solution heat treatment compared to mold casting condition, but its value increased with tempering heat treatment and exhibited the highest value of hardness with tempering heat treatment temperature at 190 °C for 24hrs. Furthermore, corrosion resistance increased with decreasing of the hardness, and decreased with increasing of the hardness reversely. As a result, it is suggested that the optimum heat treatment to improve both corrosion and wear resistance is tempering heat treatment temperature at 190 °C for 16hrs.

Keywords : aluminum alloy, mold casting, corrosion resistance, wear resistance, solution heat treatment, tempering heat treatment

1. 서 론

Al은 지구상에서 Si 다음으로 많이 존재하며 Cu와 더불어 산업용재료의 활용도 측면에서 비철금속재료의 으뜸을 이루고 있다.¹⁾ 그리고 Al은 비중이 2.7정도의 경금속이며 Mg 다음으로 가벼운 금속으로 주조가 용이하고 다른 금속과의 합금이 잘 된다. 뿐만 아니라 상온 및 고온에서 가공이 용이하고 중성 및 산성 용액에서 산화 피막의 형성에 의해서 내식성이 비교적 좋으며 열 및 전기의 전도도가 우수한 편이다.

그러나 Al은 결정구조가 면심입방격자이기 때문에 고순

도의 Al은 기계적 성질의 저하로 인해 실용적인 측면에서 문제점이 많다.²⁾ 따라서 기계적 성질의 개선 즉 경도와 강도 및 내식성을 향상시키기 위하여 소량의 Mn, Mg, Si 및 Cr 등을 첨가하여 합금으로 만들기도 하며 적절한 열처리를 하기도 한다. 더욱이 상기한 Al 합금은 다양한 산업현장에서 폭 넓게 이용되고 있으며 또한 가혹한 부식환경 하에서 때로는 응력부식, 갈바닉부식, 공식, 입계부식 등을 유발시키기도 하며 이를 억제하기 위해 첨가성분의 종류와 첨가량의 조절 및 다양한 열처리 등의 방법을 이용하기도 한다.^{3)~11)}

뿐만 아니라 최근 들어 유가의 상승에 의한 저질유의 사용 증가에 따라 선박의 엔진은 가혹한 부식환경에 노출되어 부식과 마모에 의한 내구성이 급격히 저하되어 이를 보완하기 위하여 육상과 해상에서 보수용접을 하고 있으며 여기에 대

* Corresponding author: jhjeong@hhu.ac.kr

한 연구결과도 있다.¹²⁾ 그리고 자동차와 선박의 엔진고유의 성능을 유지하면서 경량화는 물론 장기 수명을 위한 내식성, 내마모성 향상을 위한 재료의 연구개발에도 주력하고 있다. 그 중에서 엔진의 피스톤을 경량화 하기 위해 알루미늄의 합금에 의한 금형주조를 많이 이용하고 있다. 최근 잘 알려진 AC8A 알루미늄 합금은 내열성, 내마모성 및 고온강도의 특성이 있으므로 피스톤금형 주조재로 널리 이용되고 있다. 특히 AC8A 합금은 열팽창계수의 감소와 경량화를 위해 다량의 규소를 함유하고 있으며 고온강도를 유지하기 위해 구리, 니켈 및 망간 등을 함유하고 있다. 그리고 인공시효에 의한 내마모성을 증가시키기 위해 마그네슘 및 구리 등을 첨가하기도 한다. 따라서 본 연구에서는 AC8A 알루미늄합금의 경도특성과 내식특성에 미치는 열처리효과에 대하여 비교 고찰 하고자 한다. 본 연구는 열처리에 의해서 내마모 특성에 영향을 미칠 수 있는 경도의 변화고찰 및 내식특성의 개선을 위한 유익한 참고자료가 되리라 기대된다.

2. 시험편제작 및 실험방법

2.1 실험방법 및 시험편제작

실험에 사용한 시험편은 Table 1에서 보여주는 합금성분을 가진 금형 주조한 AC8A 알루미늄 합금을 사용하였다. 그리고 이 시험편을 510 °C에서 4시간 유지한 후 급냉에 의한 용체화 처리를 실시한 후에 190 °C에서 16, 24, 및 36시간씩 각각 유지한 후에 수냉에 의한 뜨임을 실시 하였다. 그리고 이들 시험편을 에칭에 의한 조직관찰과 경도를 측정 하였다.

그리고 시험편을 샌드페이퍼 100번에서 2000번까지 연마한 후 노출면적 1 cm²만을 남기고 나머지는 실리콘 수지로 절연 시켰으며 가장자리에 구멍을 뚫고 동선을 연결하여 시험편을 제작하였다. 시험용액은 천연 해수용액을 사용하였으며 3 cm/s (PIV: Particle Image Velocimetry 로 측정)의 속도로 용액을 유동시키면서 측정하였다. 측정 방법은 부식전위 변화와 양극 및 음극분극곡선의 측정과 부식 전류밀도를 측정하였다. 그리고 임피던스와 사이클릭 선도 변화를 측정하고 양극 및 음극분극곡선을 측정한 후의 부식된 표면을 영상현미경으로 관찰하였다. 실험에 사용된 측정장치는 CMS-100 프로그램이며 기준전극은 SCE전극, 대극은 백금을 사용하였고 주사속도는 1 mV/s, 그리고 delay

Table 1. Chemical composition of AC8A test specimen (wt%)

Element	Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn
Wt(%)	1.2	12.3	1.0	0.15	0.8	0.15
Element	Ni	Ti	Pb	Sn	Cr	
Wt(%)	1.1	0.2	0.05	0.05	0.1	

time은 1800초로 하였다. 단 사이클릭 선도변화 측정은 +1.5 V ~ -0.5 V 영역에서 30 mV/s의 주사속도로 하였으며 부식된 표면사진은 멀티미디어 영상현미경(Sometech 사, Model: SV35)으로 150배 배율로 관찰하였다. 그리고 시험편의 표면을 2000번까지 연마한 후 각각의 시험편을 에칭(etching)하여 시험편의 중심부에서 좌우로 1 mm 간격으로 경도를 각각 3회 측정하여 평균값을 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 1은 열처리 유무에 따른 경도 변화를 나타내고 있다. 주조한 그대로의 경도보다 용체화처리 후의 경도가 가장 낮은 값을 보여주고 있음을 알 수 있다. 그리고 190 °C에서 뜨임처리를 함에 따라 경도는 다시 상승하는 경향을 알 수 있었다. 그림에서 알 수 있듯이 24시간 뜨임 처리한 경우 가장 높은 경도값을 나타 내었으며 36시간 뜨임 처리한 경우 다시 경도는 감소하는 결과를 얻을 수 있었다. 이처럼 뜨임처리에 의해서 경도가 상승하는 것은 용체화 처리에 의해서 미처 석출하지 못한 합금성분들이 뜨임처리에 의해서 석출함으로써 즉 석출경화에 의해 경도가 상승하는 것으로 생각된다. 그리고 24시간 뜨임처리에서 경도가 가장 높은 것은 Cu, Ni 및 Mg 등의 석출에 기인하며 36시간 뜨임처리에서 다시 경도가 하강하는 것은 Si의 석출에 의한 것으로 생각된다.

Fig. 2는 열처리한 시험편의 조직변화를 보여주고 있다. 열처리를 하지 않은 경우 수지상정의 α 고용체가 덴드라이트 조직을 나타내고 있다. 그러나 용체화 처리에 의해서 수지상정의 형태는 사라지고 흰 바탕의 둥근 α 고용체가 관찰되었다. 그리고 뜨임처리에 의해서 긴 타원 모양의 결정입자가 관찰되고 있으며, 특히 24시간 뜨임처리한 경우 비교적 더 많은 타원 모양의 결정입자의 형태가 관찰되었다. 그리고

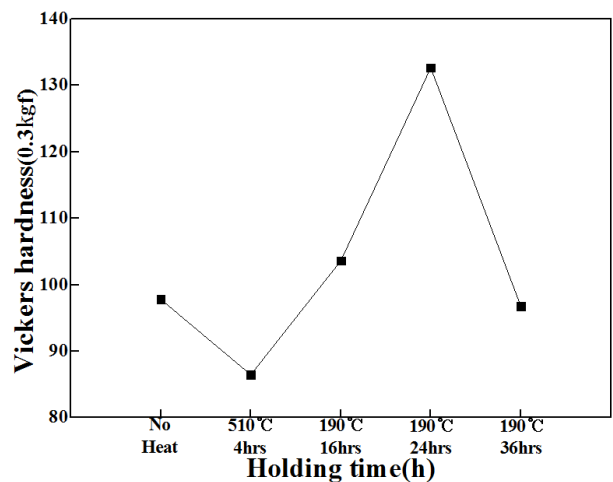


Fig. 1. Variation of vickers hardness with heat treatment condition.

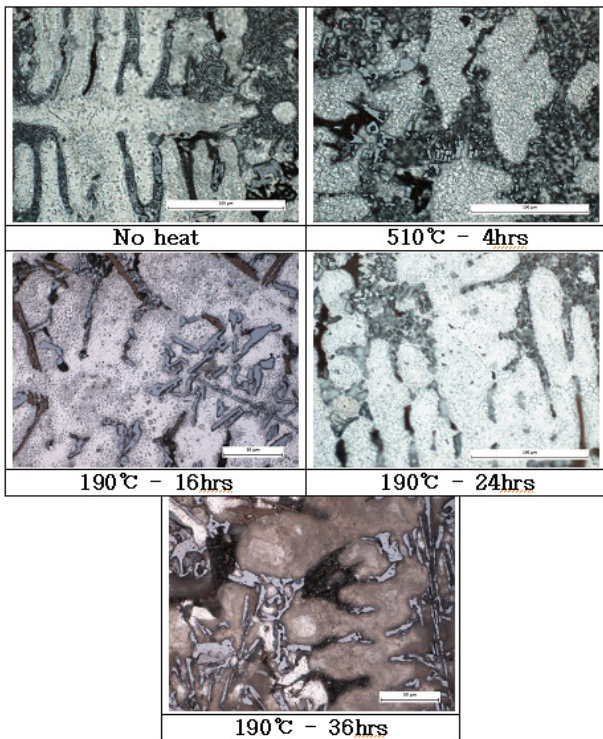


Fig. 2. Comparison of microstructures with heat treatment condition(x500).

36시간 뜨임처리한 경우 미세하고 짧은 침상모양의 Si의 석출이 관찰되고 있음을 알 수 있다. Fig. 1의 경도변화와 비교할 때 결정입자가 둥글고 클수록 경도는 감소하고 결정입자가 긴 모양의 타원으로 변화 될 수록 경도는 증가하는 실험결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 3은 열처리 유무에 따른 시험편의 부식전위변화를 나타내고 있다. 510 °C에서 4시간 용체화 처리를 한 경우 부식전위는 가장 귀한 값을 보여주고 있으며, 190 °C에서 36시간 뜨임처리를 한 경우 1800초 후 비교적 가장 낮은 부식전위의 변화를 나타내는 경향을 알 수 있다. 일반적으로 갈바닉계열상 해수용액에서 부식전위가 귀한 값을 나타낼수록 내식성은 상대적으로 좋은 경향을 나타내는 경우가 많은 것으로 알려져 있다. 따라서 용체화처리한 경우가 내식성이 좋으며 190 °C에서 36시간 뜨임처리를 한 경우가 내식성이 좋지 않음을 정성적으로 알 수 있다. 그러나 부식전위의 근소한 차이로 금속의 내식성을 획일적으로 비교 평가하는 것은 다소의 문제가 있다고 생각된다. 따라서 다른 방법의 전기화학적 평가를 실시하여 종합적으로 분석 평가하는 것이 바람직하다고 생각된다.

Fig. 4는 주조상태 및 510 °C에서 4시간 용체화 처리를 한 경우의 분극곡선변화를 나타내고 있다. 양극 및 음극분극곡선의 형태는 유사한 경향을 보여주고 있으나, 그림의 화살표가 표시하는 양극과 음극곡선의 변곡점에 대응하는 전류

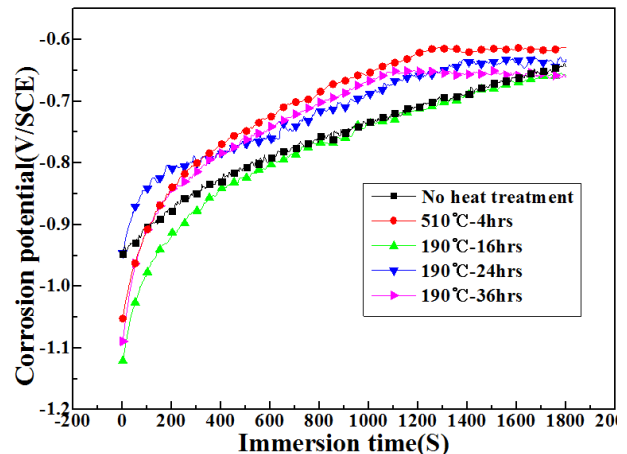


Fig. 3. Time dependence of corrosion potentials in seawater with heat treatment condition.

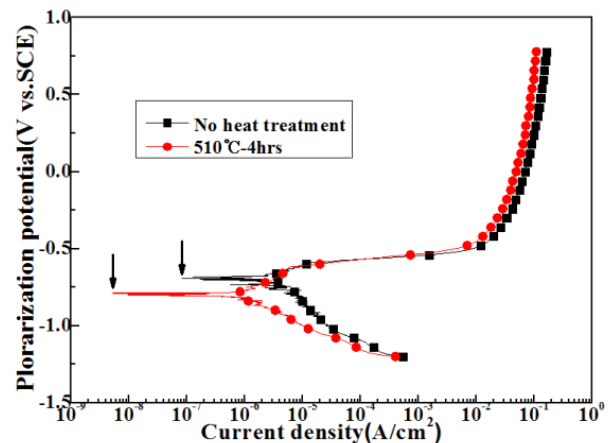


Fig. 4. Variation of cathodic and anodic polarization curves with(510 °C:4hrs) heat treatment condition.

밀도는 용체화 처리한 경우가 훨씬 적은 값을 보여 주고 있다. 통상 부식전류밀도는 양극과 음극분극곡선을 이용하여 타펠외삽법에 의해서 근사적인 부식전류밀도를 구하여 내식성의 상대적인 비교평가를 하는 것이 일반적인 방법이다. 그런데 본 실험의 결과 전술한 변곡점에 대응하는 전류밀도 값의 측정으로 내식성의 상대적 비교평가는 가능하다고 생각된다. 왜냐하면 변곡점에 대응하는 전류밀도는 분극곡선 측정시에 부식전위에 대응하는 전류밀도로서 즉 부식전류 밀도의 근사값으로 간주할 수 있다고 생각된다. 따라서 용체화 처리한 경우가 주조상태보다 내식성이 좋은 것으로 판단 된다.

Fig. 5는 용체화 처리한 경우와 190 °C에서 24시간 뜨임 처리를 한 경우의 분극곡선변화를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 190 °C에서 24시간 뜨임처리를 한 경우 화살표가 나타내는 전류밀도가 용체화 처리를 한 경우보다 높은

전류밀도를 보여주고 있다. 따라서 190 °C에서 24시간 뜨임 처리를 함에 따라 내식성이 떨어지는 경향을 확실히 알 수 있다.

Fig. 6은 190 °C에서 각각의 시간을 유지한 후의 뜨임 처리한 경우의 분극곡선변화를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 190 °C에서 36시간 유지한 뜨임처리가 가장 부식 전류밀도가 적은 즉 내식성이 좋은 것으로 생각된다.

Fig. 7은 열처리 유무에 관계없이 모든 시험편의 분극곡선을 비교하고 있다. 화살표가 표시하는 부식전류밀도의 근사값을 비교할 때 즉 510 °C에서 4시간 용체화 처리를 한 경우와 190 °C에서 36시간 뜨임처리한 경우의 부식전류밀도가 가장 적은 경향을 알 수 있으며 그리고 190 °C에서 24시간 뜨임처리한 경우가 가장 부식전류밀도가 큰 경향을 알 수 있다.

Table 2는 Fig. 7의 분극곡선에서 타펠외삽법에서 구한

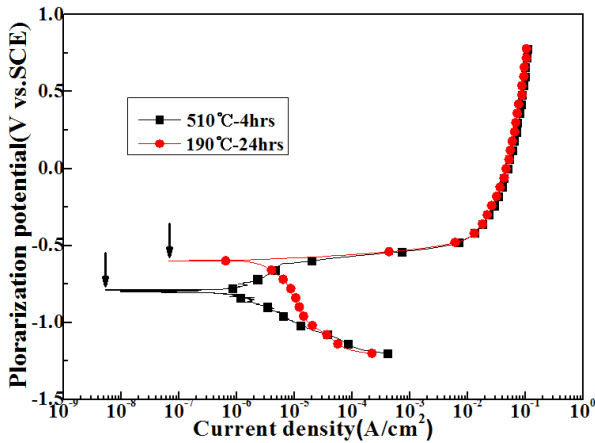


Fig. 5. Comparison of cathodic and anodic polarization curves with solution(510°C:4hrs) and tempering(190°C:24hrs) heat treatment.

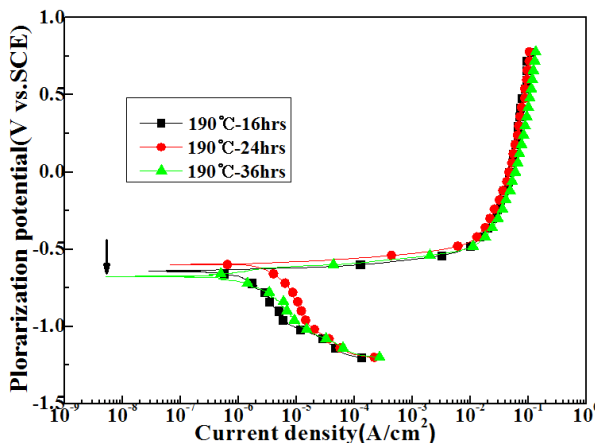


Fig. 6. Variation of cathodic and anodic polarization curves as a function of tempering time (hrs).

부식전류밀도와 열처리에 의한 경도값의 변화를 나타내고 있으며 Fig. 8은 이들 값의 관계를 비교하고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 용체화처리한 경우 부식전류밀도값이 가장 낮았으며 경도값 역시 가장 낮은 값을 보여주고 있음을 알 수 있다. 그리고 190 °C에서 24시간 유지한 뜨임처리의 경우 부식전류밀도가 가장 높고 경도값 역시 가장 높았다. 따라서 전체적으로 경도와 부식전류밀도는 좋은 상관관계를 보여주고 있음을 알 수 있었다. 즉 경도가 높으면 부식전류밀도

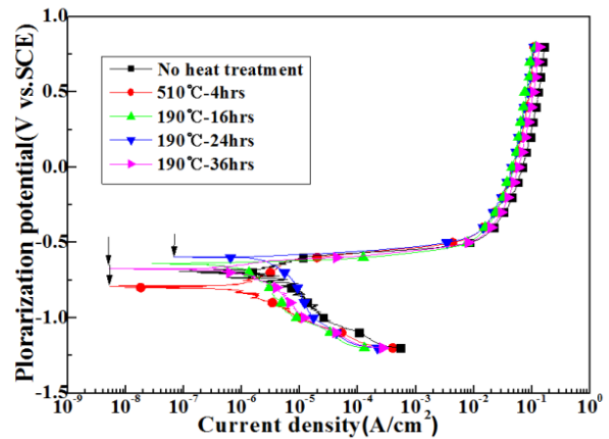


Fig. 7. Comparison of cathodic and anodic polarization curves with heat treatment condition.

Table 2. The relationship between corrosion current density and Vickers hardness

H.T. condition	$i_{cor}(A/cm^2)$	H _v
No Heat	2.9×10^{-6}	98
510 °C - 4hrs	1.1×10^{-6}	86
190 °C - 16hrs	3.1×10^{-6}	104
190 °C - 24hrs	4.2×10^{-6}	133
190 °C - 36hrs	2.8×10^{-6}	97

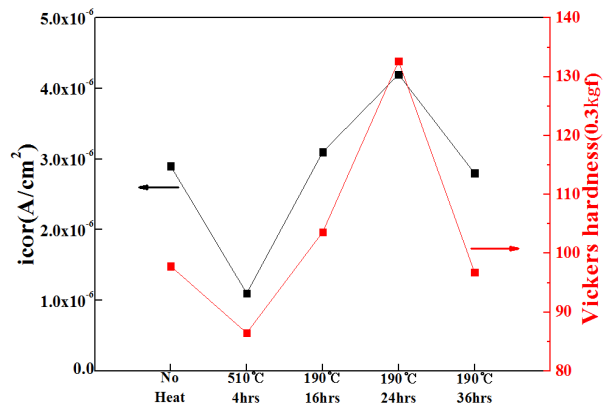


Fig. 8. Relationship between corrosion current density and Vickers hardness with heat treatment condition.

는 높은 즉 내식성은 좋지 않은 경향을 알 수 있었다. 그런데 190 °C에서 16시간 유지한 뜨임처리의 경우 부식전류밀도의 증가에 비해 경도의 상승폭은 현저하게 큰 경향을 알 수 있다. 따라서 경도를 높이면서 내식성을 유지하기 위한 열처리는 190 °C에서 16시간 유지한 뜨임처리가 바람직하다고 생각된다.

Fig. 9는 열처리 유무에 따른 시험편의 AC 임피던스값의 변화를 나타내고 있다. 0.1 Hz에서 190 °C에서 36시간 뜨임처리한 경우 가장 높은 임피던스 값을 그리고 190 °C에서 24시간 뜨임처리한 경우가 가장 낮은 값을 보여 주고 있음을 알 수 있다.

그리고 Fig. 7에서 용체화 처리한 경우 내식성이 가장 좋은 결과와 Fig. 9에서 임피던스값이 가장 높은 결과는 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 열처리 유무에 따른 각 시험편의 사이클릭 볼타 모그램 변화를 보여주고 있다. 36시간 뜨임처리한 경우 가장 오른쪽에 위치하고 있으며 16시간 뜨임처리한 경우 다음의 오른쪽에 위치하고 있음을 알 수 있다. 그리고 190 °C에

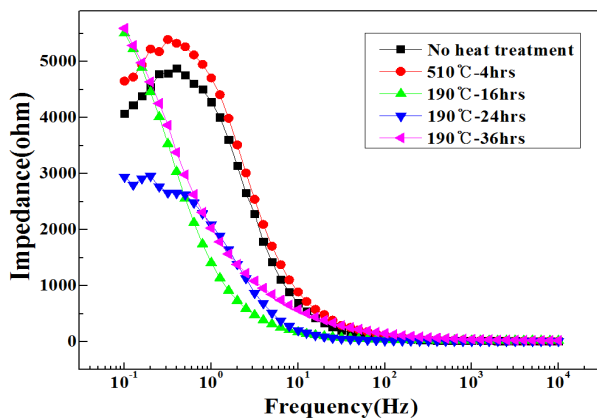


Fig. 9. Comparison of AC impedance with heat treatment condition.

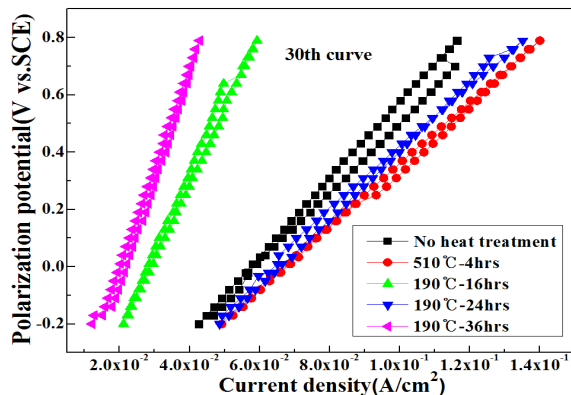


Fig. 10. Variation cyclic voltammogram with heat treatment condition.

서 24시간 뜨임처리한 경우 왼쪽에 위치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 190 °C에서 36시간 뜨임처리한 경우 내식성이 좋은 경향을 그리고 24시간 뜨임처리한 경우가 내식성이 좋지 않은 경향을 알 수 있다. 지금까지의 실험결과에서 부식전위, 분극곡선, 임피던스 및 사이클릭변화의 실험결과는 거의 일치하는 경향을 나타내었다.

한편 Fig. 11은 각각의 시험편에 대해서 양극 및 음극 분극곡선을 측정한 후에 부식된 표면을 영상현미경으로 관찰한 결과를 보여주고 있다. 열처리를 하지 않은 경우와 용체화처리 및 16시간 뜨임처리한 경우 뚜렷한 국부부식의 흔적은 발견되지 않았으나 24시간 뜨임처리한 경우 국부부식의 흔적 즉 많은 양의 공식이 발견되었다. 그러나 36시간 뜨임처리한 경우 공식의 흔적은 발견되지 않았다. Fig. 8에서 24시간 뜨임처리한 경우 경도가 가장 높고 동시에 부식전류밀도는 가장 큰 값을 나타내었다. 따라서 경도와 부식전류밀도가 높은 경우 Fig. 11에서 알 수 있듯이 공식이 발생하는 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 즉 경도가 상승하고 내식성이 감소할수록 공식이 발생하는 실험결과를 얻을 수 있었다. 그리고 36시간 뜨임처리한 경우 공식의 흔적이 많이 사라졌음을 알 수 있는데 이것은 Fig. 8에서 부식전류밀도와 경도가 24시간 뜨임처리에 비해서 현저하게 감소한 결과와 관련이 있는 것으로 생각된다. 따라서 본 실험의 결과 경도가 낮을수록 내식성이 좋아지며 경도가 높으면 내

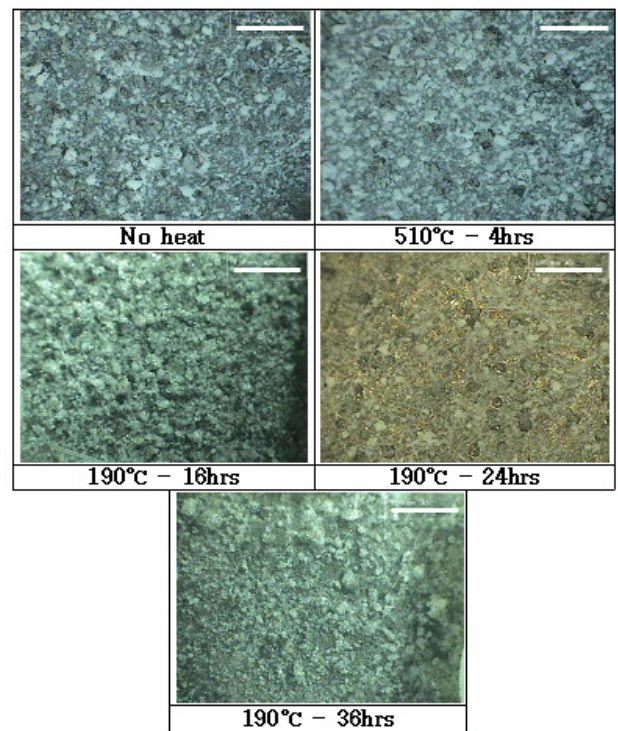


Fig. 11. Morphologies of corroded surfaces after polarization curves with heat treatment condition(x150).

식성이 감소하고 공식이 발생하는 상관관계를 알 수 있었다. 이것은 Fig. 1에서 석출경화에 의해 경도가 상승하며 이 경우 석출된 금속 중 일부가 양극이 되어 선택적으로 부식되어 공식의 원인이 되는 것으로 생각된다. 그리고 용체화처리는 경도를 감소시키나 내식성을 개선시키는 효과가 있음을 알 수 있으며 한편 뜨임처리는 190 °C에서 유지시간의 변수에 의해 경도를 상승 및 감소시키는 효과가 있으며 동시에 내식성의 감소 및 개선시키는 실험결과를 얻을 수 있었다.

4. 결 론

지금까지 AC8A 알루미늄 합금의 경도 및 내식특성에 미치는 용체화처리 및 뜨임 등의 열처리효과에 대해서 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 주조상태보다 용체화처리에 의해서 경도는 낮아지는 경향을 알 수 있었으며 그리고 190 °C에서 뜨임처리를 함에 따라 경도는 다시 상승하였고 24시간 뜨임처리에서 최고값을 나타내었으나 36시간 뜨임처리에서 다시 경도가 감소하는 경향을 알 수 있었다.
- 2) 열처리를 하지 않은 경우 수지상정의 덴드라이트 조직을 나타내었으나 용체화 처리에 의해서 수지상정은 사라지고 흰 바탕의 등근 결정입자가 나타났으며 그리고 뜨임처리에 의해서 침상의 미세한 결정입자가 관찰되었다.
- 3) 본 실험의 결과 경도가 낮을수록 내식성이 좋아지며 경도가 높을수록 내식성이 감소하고 공식이 발생하는 상관관계를 알 수 있었다.
- 4) 190 °C에서 16시간 유지한 뜨임처리의 경우 부식전류

밀도의 증가에 비해 경도의 상승폭은 현저하게 큰 경향을 알 수 있었다. 따라서 본 실험의 결과 경도를 높이면서 내식성을 유지하기 위한 열처리는 190 °C에서 16시간 유지한 뜨임처리가 바람직하다고 생각된다.

참 고 문 헌

1. H. Y. Lee, *Metal Corrosion Engineering*, Yeon Kyung Culture Co. Ltd., p. 262 (1991).
2. M. Y. Doshi, *Nonferrous Metal Material Engineering* KoRoNa Co. Ltd., p. 144 (1975).
3. Mars. G. Fontana, *Corrosion Engineering McGraw Hill Book company*, p. 236 (1986).
4. Deny A. Jones, *Principles and Prevention of CORROSION*, Prentice Hall International, Inc. p. 262, p. 307, p. 522 (1996).
5. A. Muhleンドbruch and J. Seemam, *Z. Metallkde*, **31**, 239 (1989).
6. H. Borchers, H. Nipper and E. Tenckhoff, *Metall*, **21**, 1215 (1967).
7. Y. M. Bashi, *J. Met. Soc. of Japan*, **36**, 341 (1972).
8. Y. D. Kmura and D. N. Mats, *J. Lig. Met. Soc. of Japan*, **22**, 403 (1972).
9. S. N. Thuri and D. K. Hari., *J. Met. Soc. of Japan*, **37**, 110 (1973).
10. R. H. Brown, D. O. Sprowls, and M. B. Shumaker, *The Resistance of Wrought High Strength aluminum alloys to Stress Corrosion Cracking*, ASTM. STP 518, 87 (1972).
11. R. E. Stoltz and R. M. Pelloux, *Metall. Trans.*, **3**, 2433 (1972).
12. J. H. Shin and K. M. Moon, *Corros. Sci. Tech.*, **9**, 310 (2010).