

경도-전기전도도 상관관계를 이용한 Al-Si 알루미늄합금 열간 단조품의 열처리상태 평가

이석원* · 전만수** · 이준현***

(2001년 7월 2일 접수)

Evaluation of Heat Treatment of an Al-Si Alloy Forging by Using Its Relationship between Electrical Conductivity and Hardness

S. W. Lee, M. S. Joun and J. H. Lee

Abstract

In this study, a relationship between hardness and electrical conductivity for an Al-Si aluminum alloy, forged after extruded, is investigated. Microvickers hardness is measured and compared with its corresponding electrical conductivity obtained by the eddy current test. It is found that a distinct relationship between the hardness and the electrical conductivity exists for the material. Using the relationship, the hardness of forging is predicted from the electrical conductivity obtained by eddy current test and the result is used to evaluate the condition of heat treatment.

Key Words : Hardness, Electrical conductivity, Eddy Current, Forging, Heat Treatment

1. 서론

일반적으로 알루미늄의 경도와 강도는 서로 상관관계⁽¹⁾를 나타내고 있으며, 경도가 증가하면 인장강도가 증가하는 경향이 있다. 경도시험은 가격이 저렴하고, 검사시간이 상대적으로 짧으며 별도 시험편을 제작하지 않고 실제품에 직접적용이 가능한 방법이므로 산업현장에서 널리 이용되고 있다. 단조공업에서는 주로 로크웰(Rock

well), 브리넬(Brinell), 비커스(Vickers) 경도시험 등이 이용되고 있다. 그러나 기하학적 형태에 따라 제품에 직접 경도시험의 적용이 불가능한 경우가 있으며, 표면에 자국이 발생되므로 직접 경도시험을 할 수 없는 경우도 있다.

경도 시험법은 주로 대량으로 생산되는 단조품의 샘플링 기법에 의한 기계적 특성 평가 목적으로 사용되고 있다. 이 방법은 시간과 비용 측면에서 전수 검사 목적에

* 한국항공우주산업(주)
** 경상대학교 수송기계공학부(corresponding author)
*** 부산대학교 기계공학부

는 부적합하다. 그러나 특성상 전수 검사를 해야 하는 경우가 있으며, 불량품을 선별할 때도 전수검사는 불가피하다.

재료의 전기전도도는 재료의 화학성분, 조직, 열처리상태, 소성가공, 온도, 시효경화 등에 따라 다르게 나타난다^(2,3). 전기전도도 시험은 경도시험에 비해 검사비용이 저렴하며 검사시간이 매우 짧고 경도시험이 곤란한 기하학적 형상의 재료에도 적용할 수 있다.

Al 2024, Al 7075 등의 일부 알루미늄 재료에 대해 전기전도도 시험을 이용한 재료 평가방법이 항공기 회사에서 이용되고 있다^(4,5). 전기전도도 시험은 전기전도도와 경도의 상관관계가 뚜렷하게 나타나는 재료에 한해 적용이 가능하다. 국내 알루미늄 단조업체는 생산하고 있는 재료의 경도와 전기전도도의 관계를 정확히 파악하지 못해 이 방법이 제대로 적용되지 못하고 있는 실정이다.

재료의 전기전도도 평가 기법은 그 특성상 검사시간이 짧고 자동화가 가능하며 컴퓨터를 이용한 통계적 데이터 처리가 가능하다. 따라서 전기전도도의 평가에 의한 경도시험법은 전수검사 목적으로 사용되기에 적합하다.

본 연구에서는 Al-Si 알루미늄합금 압출 봉재 및 열간 단조품의 경도와 전기전도도의 상관관계를 실험적으로 규명하고, 측정된 전기전도도로부터 재료의 경도를 평가하고 그 결과를 재료의 열처리 상태를 평가하는데 활용하고자 한다.

2. 와전류를 이용한 전기전도도의 측정

재료의 전기전도도(σ)와 전기저항도(ρ)의 관계는 아래의 식과 같다.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (1)$$

풀림처리한 20°C의 동(copper)의 전기저항도 172.41 $\mu\Omega \cdot m$ 를 100% IACS(International Annealed Copper Standards)⁽⁶⁾ 전기전도도로 정하고, 이에 대한 전기저항의 비율을 재료의 전기전도도로 표현하는 %IACS단위가 널리 사용되고 있다. 재료의 전기적 저항은 재료의 합금상태, 열처리 상태, 소성가공, 시효경화 등에 따라 변화한다.

재료의 낮은 전기적 저항을 측정하는 방법에는 휘스톤 브릿지(Wheatstone bridge) 등의 방법이 있다⁽⁷⁾. 그러나 이러한 방법은 측정기술의 숙달을 요하며 생산현장에서 사용하기에는 적절하지 못하다. 따라서 본 연구에서는 산업현장에서 쉽게 적용이 가능한 와전류(eddy current)를 이용한 전기전도도 측정기법을 이용하였다.

와전류를 이용한 재료의 전기전도도 측정기법의 원리는 Fig. 1과 같다. 전기전도체 위에 교류전류가 흐르는 코일을 가까이 하면 Lenz의 법칙에 의하여 코일 근처에 발생한 자장이 전도체에 유도자장을 형성하고, 이 유도자장은 전도체내에 와전류를 형성한다. 시험편에 형성된 와전류는 코일의 임피던스를 변화시켜 시험장치에 포함된 브릿지 회로의 전기적 균형을 변화시킨다. 이 전기적 균형의 변화량을 표준 전기전도도 시험편과 비교하여 재료의 전기전도도 값을 얻게 된다.

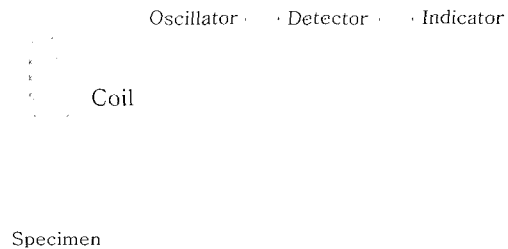


Fig. 1 Schematic diagram of electrical conductivity testing

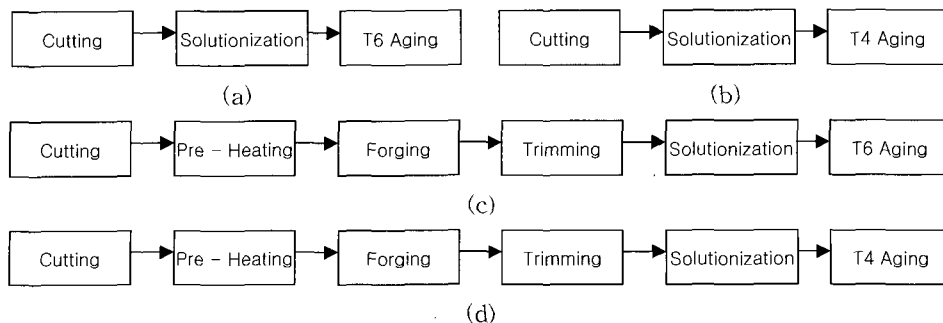


Fig. 2 Specimen preparation process

전도체내에 형성되는 와전류는 시험편의 전기전도도, 코일과 시험편의 간격, 시험 주파수, 재료의 두께, 코일의 크기, 시험편의 균열, 자기적 투자율, 온도 등에 영향을 받는다. 그러므로 정확한 전기전도도를 측정하기 위해서는 다른 인자에 의한 변화를 억제해야 한다. 코일과 시험편을 최대한 밀착시켜야 하고, 시험편의 두께에 맞는 주파수를 사용하여 시험편의 두께를 초과하는 전기장이 형성되지 않도록 해야 한다. 특히 재료의 온도가 증가하면 격자이온의 열 진동이 활발하여 전기저항이 증가하므로 온도 변화에 주의해야 한다. 측정장치를 사용하기 전에 측정하고자 하는 전기전도도 구간에 대해 최소 2개 이상의 표준 전기전도도 시험편을 이용하여 교정해야 한다.

3. 실험

3.1 시험조건 및 시험편

Al-Si 알루미늄합금 압출봉재와 이를 사용한 자동차 에어콘용 단조품에 대해 실험하였다. Table 1은 이 재료의 화학조성을 나타내고 있다.

Table. 1 Chemical composition of an Al-Si material

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
11.28	0.43	4.21	0.006	0.68	0.03	0.02	bal

압출 봉재에 대해 Fig. 2의 (a), (b)와 같이 용체화 처리(solutionization treatment)와 각각 인공시효 열처리(T6) 및 자연시효 열처리(T4)를 실시하였다. T6 열처리 시험편은 440°C~530°C로 15°C 간격으로 변화시켜 2시간 동안 용체화 처리하여 수냉시킨 후 170°C온도에서 10시간 동안 인공시효 열처리를 하였다. T4 열처리 시험편은 485°C, 500°C, 515°C에서 2시간동안 유지한 후 수냉하여 상온에서 자연시효처리를 하였다. 단조품은 소재 절단 후 400°C에서 열간 단조하고 Fig. 2의 (c), (d)와 같이 용체화 처리와 T6, T4열처리를 실시하였으며, 열처리 조건은 압출 봉재와 동일하다.

압출 봉재와 단조품의 열처리 온도별 조직, 경도, 전기전도도 등의 관계를 분석하였다. 단조 후 485°C~515°C의 용체화 처리 후 자연시효처리 하여 온도와 조직, 경도, 전기전도도의 관계를 분석하였다. 압출 봉재를 풀림 처리한 후 조직, 경도, 전기전도도의 관계를 분석하였다.

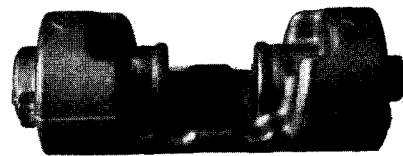
Fig. 3은 Al-Si 압출 봉재와 단조품을 나타내고 있다.

3.2 시험장치 및 시험

시험장치로 10~130% IACS 측정구간에서 0.1% IACS의 분해능을 갖는 사용주파수 90kHz의 Centurion사 FM-140 전기전도도 측정기를 사용하였다. 지름 9mm의 표면코일을 사용하였으며, 검사 시스템을 사용하기 전에 27.6%, 39.9%, 57.5% IACS의 표준시험편으로 검사시스템을 교정하였다. 경도시험은 Future Tech사의 FM-7 모델의 마이크로 비커스(HV)경도계를 사용하였다. 적용 하중은 100g이다.



(a) extruded



(b) forged

Fig. 3 An extruded Al-Si raw material and a forged specimen

시험편의 두께가 유효침투깊이(표준침투깊이의 3배) 이상일 때 두께변화에 의한 와전류의 변화 인자를 제거할 수 있다. 실험에 사용된 장치의 와전류 표준침투깊이(standard depth of penetration)⁽⁶⁾를 다음 식으로부터 계산하여 0.37 mm를 구하였다.

$$\delta = 50\sqrt{\frac{\rho}{f\mu}} \quad (2)$$

여기서 δ , ρ , f , μ 는 각각 표준침투깊이(mm), 저항도($\mu\Omega cm$), 시험주파수(Hz), 자기투자율(1.0)이다. Al-Si의 비저항은 $5\mu\Omega cm$ ⁽⁸⁾를 사용하였다. 시험편의 두께 10mm는 유효침투깊이보다 매우 크므로 재료의 두께에 따른 와전류의 변화가 없음을 확인하였다.

시험편의 온도에 따라 전기저항이 변화할 수 있으므로 온도가 일정한 상태에서 시험을 해야한다. 측정장치를

표준시험편으로 교정한 온도에서 시험편의 전기전도도를 시험해야 온도 변화에 따른 오차를 예방할 수 있다.

4. 실험 결과

Fig. 4는 단조작업 전 400°C에서 1시간 풀림처리한 소재의 조직을 나타내고 있다. 회색 부분은 초정 Si 상이고 검은색은 기공이다. 풀림처리 소재의 마이크로 비커스경도는 70.3이며, 전기전도도는 40 %IACS를 나타내었다.

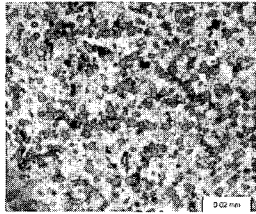


Fig. 4 Microstructure of an annealed Al-Si aluminum

Al-Si 알루미늄합금 압출 봉재의 용체화 처리 온도별 경도와 전기전도도의 상관관계를 Fig. 5에 나타내었다. 각 시험편은 그림에 명시된 각 용체화 처리 온도에서 2시간을 유지한 후 수냉하여 상온에서 1300시간 동안 자연시효 처리 한 것이다. 용체화 처리한 시험편은 고용체가 형성되기 때문에 풀림처리한 시험편보다 경도는 높고

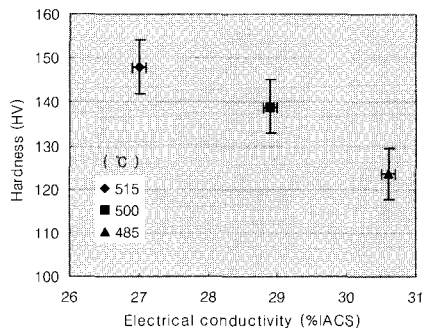


Fig. 5 Relationship between electrical conductivity and hardness for an extruded Al-Si material after solutionization and T4 aging

전기전도도는 낮게 나타났다. 용체화 처리 온도가 높으면 경도가 높아지고 이에 반비례하여 전기전도도가 감소함을 알 수 있다. Fig. 6은 각 용체화 처리 온도별 조직을 나타내고 있다.

485°C와 500°C에서 Si 상은 큰 차이가 없으나 515°C에서 Si 조대화 현상이 발생했음을 알 수 있다. 용체화 처

리 온도가 올라 갈수록 초정 Si 상이 균집되어 경도가 높아지는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 용체화 처리 및 인공시효 열처리가 실시된 Al-Si 압출 봉재의 경도와 전기전도도의 상관관계를 나타내고 있다. Fig. 7에 표시된 온도는 각 시험편의 용체화 처리 온도를 나타내며 유지시간은 각각 2시간이다. 인공시효 열처리온도는 170°C로 하였으며 10시간 유지한 후 노냉하였다. 압출 소재를 인공시효 처리한 시험편의 경도는 자연시효 처리한 시험편보다 20% 정도 높게 나타났다. 경도는 용체화 처리 온도 530°C에서 가장 높게 나타났으며 이때 전기전도도는 가장 낮게 나타났다. Fig. 8은 용체화 처리 온도별 재료의 조직을 나타내고 있다.

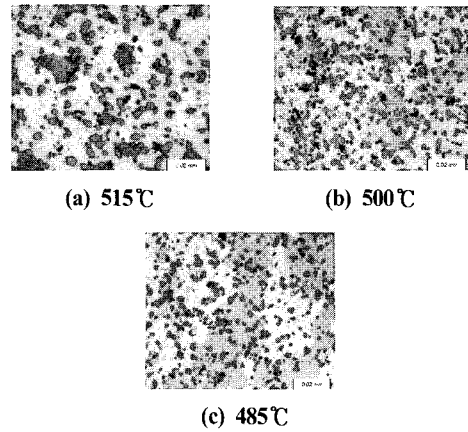


Fig. 6 Microstructure of the extruded Al-Si material after solutionization and T4 aging

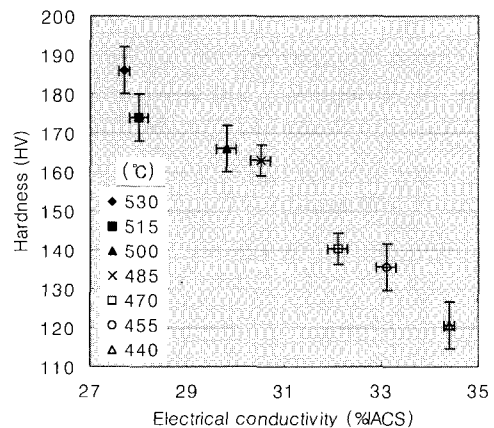


Fig. 7 Relationship between electrical conductivity and hardness of the extruded Al-Si material after solutionization and T6 aging

용체화 처리 온도가 530℃일 때 계면에 용융이 발생되었다. 이는 재료의 연성을 저하시키는 원인이 된다. 용체화 처리 온도가 515℃를 초과하면서 Si 조직이 조대화 되는 것을 보여주고 있다.

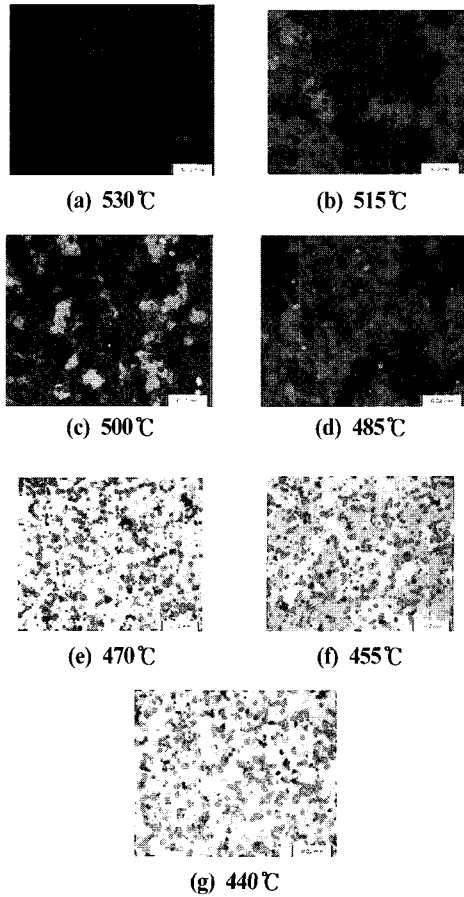


Fig. 8 Microstructure of the extruded Al-Si material after solutionization and T6 aging

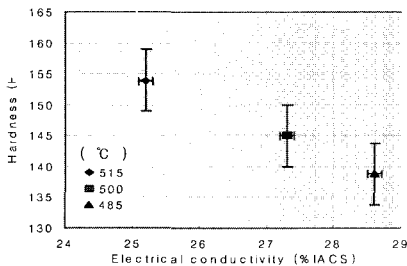


Fig. 9 Relationship between electrical conductivity and hardness of the forged Al-Si material after solutionization and T4 aging

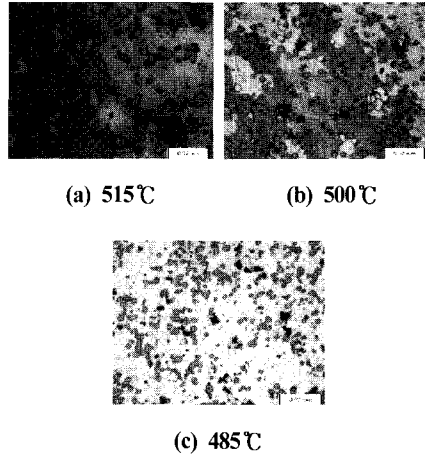


Fig. 10 Microstructure of the forged Al-Si material after solutionization and T4 aging

Fig. 9는 Al-Si 단조품의 용체화 처리 및 1270시간의 자연시효 후 전기전도도와 경도의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 5의 압출 봉재보다 경도가 2~12% 정도 증가하였다. 압출 봉재의 경우 용체화처리 온도 485~515℃ 구간에서 HV 24 정도의 경도 차이를 보이고 있으나 단조품은 동일 용체화 처리 온도 구간에서 HV 15 정도의 차이를 나타내었다. 압출 봉재가 단조품보다 용체화 처리 온도에 따른 경도의 변화가 크다는 것을 알 수 있다. 단조품의 용체화 열처리 후 자연시효 상태의 재료 조직은 Fig. 10과 같이 나타났다. 용체화 처리 온도가 증가할수록 초정 Si가 뭉쳐서 나타나는 것을 볼 수 있다.

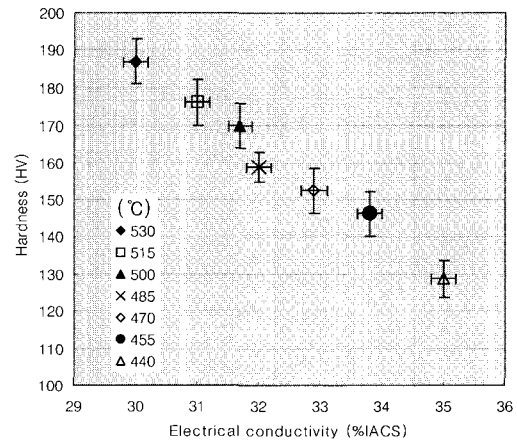


Fig. 11 Relationship between electrical conductivity and hardness of the forged Al-Si material after solutionization and T6 aging

Fig. 11은 용체화 처리 및 T6 열처리 한 Al-Si 단조품의 전기전도도와 경도의 관계를 나타낸다. 압출 봉재는 열처리 온도 440~530°C 구간에서 Fig. 7과 같이 경도 HV 65 정도의 차이를 나타내었으며, 단조품에서는 Fig. 11과 같이 동일 온도 구간에서 HV 59 정도의 차이를 보였다. 인공시효된 재료에서도 단조품보다 압출 봉재에서 용체화 처리 온도에 따른 경도의 변화가 크다는 것을 알 수 있다. 또한 전기전도도의 변화도 압출 봉재에서는 27.6~34.4 %IACS로 약 7 %IACS의 변화를 나타내었으며 단조품에서는 30~35 %IACS로 5 %IACS의 변화를 나타내었다. 단조품의 용체화 처리 온도별 재료의 조직은 Fig. 12와 같다.

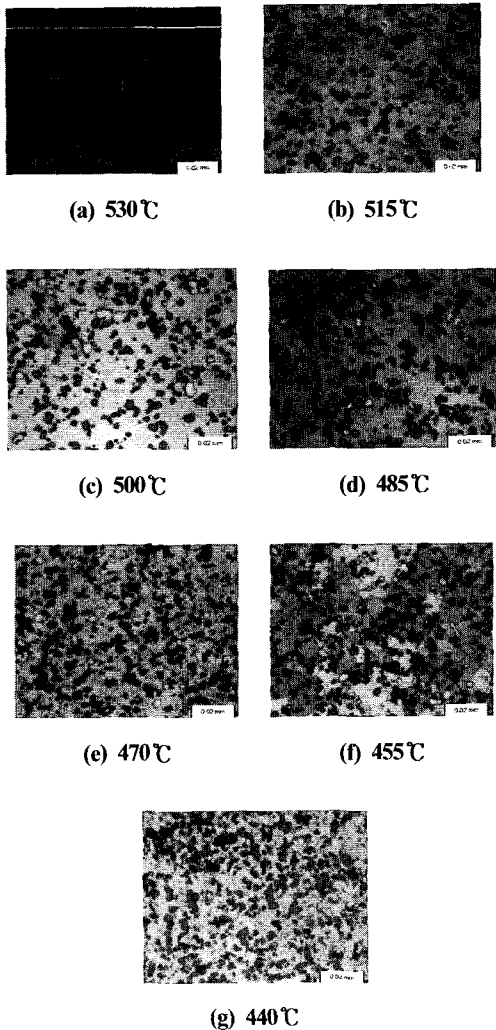


Fig. 12 Microstructure of the forged Al-Si material after solutionization and T4 aging

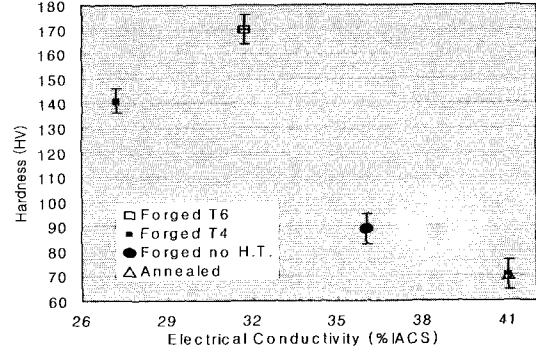


Fig. 13 Summary of relationship between %IACS and hardness for the Al-Si material

압출 원소재를 풀림열처리한 시험편, 단조 후 열처리 하지 않은 시험편, 단조품을 500°C에서 용체화 처리하여 인공시효 및 자연시효 처리한 시험편의 경도와 전기전도도 값이 Fig. 13과 같이 나타났다. 각 열처리 조건과 가공상태에 따라 뚜렷한 경도와 전기전도도 차이를 나타내고 있다.

5. 고찰

Al-Si 알루미늄합금 압출 봉재와 단조품의 용체화 열처리조건에 따라 경도와 전도도의 상관관계가 뚜렷하게 나타났다. 압출 봉재와 단조품 모두 온도 440°C~530°C 범위에서 용체화 온도가 증가되면 경도가 높아지고 전기전도도가 낮아졌다. 용체화 처리 온도가 올라 갈수록 초정 Si 상의 분율이 커지므로 경도가 높아지는 것으로 판단된다.

Al-Si 단조품의 경도는 용체화 처리 온도 530°C에서 가장 높게 나타났으며 이 때 전기전도도는 가장 낮게 나타났다. 용체화 처리 온도가 515°C 이상으로 올라가면 Si 조직이 조대화되고, 용체화 처리 온도가 530°C일 때 계면의 용융이 발생되었다. 인공시효 처리한 재료는 자연시효 처리한 것보다 경도가 15%~20% 정도 높게 나타났다.

용체화 처리 후 자연시효 처리한 경우 용체화 처리 온도 485°C~515°C 구간에서 압출 봉재는 HV 24 정도, 단조품은 동일 조건에서 HV 15 정도의 경도차이를 나타내었다. 용체화 처리 후 인공시효 처리한 경우 용체화 열처리 온도 440°C~530°C 구간에서 압출 봉재는 HV 65 정도, 단조품은 HV 59 정도의 차이를 보였다. 이 때 용체화처리 온도변화에 따라 압출 봉재는 약 7% IACS, 단조품에서는 약 5% IACS의 전기전도도 차이를 나타내었다. 즉, 용체화 처리 온도변화에 따른 경도와 전기전도

도의 차이는 단조품보다 압출 봉재에서 더 크게 나타났다.

압출 봉재를 풀림열처리한 시험편, 단조 후 열처리하지 않은 시험편, 500℃에서 단조품을 용체화 처리한 후 각각 인공시효 및 자연시효 처리한 시험편은 뚜렷한 경도와 전기전도도 값의 차이를 나타내었다. 500℃의 용체화 처리온도에서 T6 처리한 단조품은 31.7% IACS, HV 170이었으며 T4 처리한 것은 27.3% IACS, HV 145로서 약 4.4% IACS의 전기전도도 차이를 나타내었다. 이를 이용하여 T6와 T4 처리상태를 전기전도도검사 기법으로 확인할 수 있다. 그리고 T4, T6 처리한 단조품의 전기전도도를 측정함으로써 용체화처리 온도를 판단할 수 있다.

6. 결 론

본 연구를 통해 나타난 Al-Si 알루미늄합금 열간 단조품의 경도와 전기전도도의 상관관계를 이용하여

(1) 와전류를 이용한 전기전도도 평가 기법으로 Al-Si 알루미늄 봉재 및 단조품의 자연시효 열처리 재료, 인공시효 열처리 재료, 열처리하지 않은 재료의 선별이 가능하다.

(2) 열처리 후 전기전도도 측정을 통하여 경도예측과 용체화처리 온도 판단이 가능하며, 전기전도도와 경도 평가기법으로 용체화 처리과정에서 과열된 재료의 검출이 가능하다.

(3) 전기전도도 검사의 빠른 검사속도를 이용하여 검사 비용을 크게 증가시키지 않고 단조품의 품질보증능력

과 생산성을 크게 향상시킬 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) ASM, 1991, "Heat Treating of Aluminum Alloys", pp. 841~879.
- (2) Richard A. Flinn, Paul K. Trojan, 1997, "Engineering Materials and Their Applications", John Wiley and Sons, pp. 794~802.
- (3) Zwickler, 1954, "Physical Properties of Solid Materials", Pergamon, pp. 247~249.
- (4) BCAG, "Heat Treatment of Aluminum Alloys", 1999, BAC 5602.
- (5) Bell Helicopter Textron, "Heat Treatment of Aluminum Alloys", 1988, BPS 4139.
- (6) C. V. Dodd, L. M. Whitetaker, W. E. Deeds, 1988, "An Accurate Laboratory Test Systems Using Commercial Equipment for Eddy Current Measurements", Materials Evaluation, Vol. 46, No. 11, pp. 1569~1575.
- (7) Richard S. Figliola, Donald E. Beasley, 1995, "Theory and Design for Mechanical Measurement", John Wiley & Sons, pp. 229~237.
- (8) ASM, 1996, "Aluminum and Aluminum Alloys", pp. 60~87.
- (9) 이준현, 제영수, 1999, "증기발생기 튜브의 와전류 비파괴 평가를 위한 유한요소해석", 대한기계학회논문집 A권, 제23권, 제3호, pp 512~519.