논문

A356 합금을 이용한 정밀주조 Turbo Charger Wheel의 기계적 특성에 미치는 열처리의 영향

김상미 · 우기도[†] · 김지영 · 김상혁 · 박상훈 · 강황진 * · 박찬성 *

전북대학교 공과대학 신소재공학부 · 공업기술연구센터, *(주)NIB

Effect of Heat Treatment on the Mechanical Properties of Investment Casting Turbo Charger Wheel using A356 Alloy

Sang-Mi Kim, Kee-Do Woo[†], Ji-Young Kim, Sang-Hyuk Kim, Sang-Hoon Park,

Hwang-Jin Kang*, and Chan-Sung Park*

Division of Advanced Material Engineering & RCIT, Chonbuk National University, Jeonbuk 561-756, Korea

*NiB Materials Co., Jeonbuk 561-330, Korea

Abstract

The aim of this study is to investigate aging behavior of A356 alloy for turbo charger part. The specimen was fabricated by investment casting. Solution heat treatment was performed at 525°C for 8h and followed by aging treated at 160°C, 170°C for 0.5~20h. And their microstructures and mechanical properties of the aged specimens were analyzed by scanning electron microscope and hardness tester, respectively. All the cast A356 alloy included eutectic Si particles. In the cast A356 alloy, eutectic Si phase mainly was formed along Chinese script phase. Vickers hardness of the cast was improved by aging treatment due to formation of β'' phase and β' phase.

Key words : A356 alloy, Turbo charger wheel, Aging treatment, Differential scanning calorimetry.

(Received August 3, 2011 ; Accepted September 20, 2011)

1. 서 론

최근 지구온난화의 원인으로 대두되고 있는 CO₂가스 배출량을 줄이려는 움직임이 대대적으로 일어나고 있으며 각종 환경규제도 엄격해 지고 있다. 자동차에서 배출되는 배기가스에 의한 환경오염 및 지구온난화에 의한 각종 규제에 대응하기 위하여 자동차부품의 경량화를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 자동차용 경량 소재로 알루미늄, 플라스틱, 마그네슘 합금 등이 주목 받고 있으나, 그 중에서도 알루미늄 합금이 기계적 성질, 성형성, 내구한도, 리사이클링성 등이 우수하여 자동차부품에 많은 부분에서 사용량이 증가하고 있다[1-2]. 특히 Al-Si계 합금은 초정 및 공정 Si의 생성에 의한 기계적 성질의 향상과 미량의 마그네슘 첨가에 의한 β (Mg₂Si) 상의 안정상이 석출되는 시효 경화형 합금으로 항공기나 자동차의 경량 재료로 널리 사용되고 있다[1]. 시효석출상인 β 상의 석출과정은 과포화 고용체 → G.P.I zone → 침상 β'' → 봉상 β' → 판상 β 의 단계로 알려져 있다.

자동차용 터보차저 부품은 저온에서는 경량인 알루미늄 부품과 고온부인 내열합금의 컴프레서 휠이 적용되고 있다. 경량 휠 부품으로 A356(AC4C) 합금을 이용하여 건전한 주조조직의

휠을 제작하여야 하며 기계적 특성을 개선하기 위한 시효처리에 대한 특성을 조사하여야 한다.

본 연구에서는 알루미늄 합금 휠의 제조를 위한 응고해석, 왁스 형을 제조하기 위한 금형 틀의 설계, 용해 및 주조조건의 확립과 주조재의 기계적 성질 및 시효거동의 현상을 기초로 A356 합금의 시효 거동을 열분석 및 조직 관찰을 조사하고자 하였다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 소재는 상용 A356합금으로 화학 조성과 형상은 Table 1과 Fig. 1에 각각 나타내었다. 먼저 완벽한 주조방안을 하기 위하여 응고 시뮬레이션을 이용한 가상의 조건(재질: A356, 주입시간: 2sec, 주입온도: 700°C, 주형 온도: 500°C)으로 응고해석을 진행하였으며 온도에 따른 유동도나 시간

Table 1. Chemical compositions of A356 ingots (wt%).

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Al
A356	7.0	0.55	0.25	0.35	0.25	0.2	Bal.

[†]E-mail : kdwoo@jbnu.ac.kr

Fig. 1. Turbo charge (a) and wheel of A356 alloy (b).

Fig. 2. Casting design of turbo charger wheel.

에 따른 응고 거동 등의 간단한 응고해석의 결과는 Fig. 2에 나타내었다. 주조방안 설계에 있어서 탕구 위치를 블레이드측으로 함으로써 한번에 많은 수량을 얻기 위해서 이다.

Wheel의 정밀주조를 위하여 먼저 Wax 패턴을 만들었다. 정

밀주조를 위한 주형을 만들기 위해 주형틀에 Wax 패턴을 조립한 후 코팅은 1차와 2차 코팅으로 구별하였다. 1차 코팅은 Zircon의 내화재와 colloidal silica를 일정 비율로 혼합하여 코팅을 하였고 2차 코팅의 경우 alumina-silica계열의 Chamotto를 사용하여 코팅을 하였다. 충분한 건조시간을 거친 후에 내부의 Wax를 녹여 내어 주입 전의 주형으로 제작된다. De-waxing이 끝난 주형은 건조시간을 거친 후 내부에 잔류하고 있는 왁스 이물질 제거와 주형의 주형강도를 부여하기 위해 소성공정을 진행하였다. 그 후 용탕 주입 전 700°C에서 90분간 주형을 예열한 후 용탕을 주입하였다. 열처리는 용체화처리 (Solution Heat Treatment, SHT), 급랭(Quenching), 시효처리 (Aging)을 따르는 T6열처리를 행하였다. 본 연구에서의 열처리 과정을 Fig. 3에 나타내었다. 용체화 처리는 각각 525°C, 500°C, 475°C에서 8h, 시효처리는 140°C에서 6시간 실시하는 조건(a)와, 525°C에서 8h 용체화처리한 시편을 시효처리 온도는 160°C와 170°C로 시효시간은 0.5~20h까지 2~4h간격으로 변화를 주는 조건(b)으로 실험하였다. 준비된 시편을 상자형 노(box furnace)에 넣고 해당 온도와 시간 동안 대기분위기에서 용체화처리를 하고 과포화용체를 형성시키기 위해 시편을 수냉시켰다. 그 후 각각의 온도와 시간 동안 시효처리한 다음 대기 중에서 냉각시켰다. 시편의 미세조직은 광학현미경(OM)과 주사전 자현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였다. 또 시효처리 조건에 따른 기계적 성질을 평가하기 위해 마이크로 비커스 경도계 (Vickers hardness tester)를 이용하여 500 gf의 하중 하에서 경도를 측정하였다. 시차주사열량계(DSC) 열분석은 Al합금에서 석출과정과 재용융의 동역학(dissolution kinetics)의 정보를 얻기 위해 널리 사용되고 있다[3]. 본 실험에서 시효시간에 따른 석출거동을 알아보기 위해 DSC 열분석을 하였다. 열분석은 DSC(TA Instrument Q20)를 사용해 5°C/min 승온속도와 건조된 질소가스를 50 ml/min로 주입하에 0~500°C까지 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 각 열처리 조건(Fig. 3참조)에 따른 A356 주조합금의 광학현미경 사진이다. 주조 상태의 A합금은 수직상 조직을 나타내었으며, 시효처리한 합금들은 조정 α 상과 공정 Si 입자들이 판상형태로 존재하였다. 공정 Si의 크기 및 형상은 합금의 기계적 성질에 큰 영향을 미친다. T6처리후의 현미경조직을 주

Fig. 3. Schematic diagram of heat treatment cycles: (a) different SHT temperatures, (b) different aging conditions.

Fig. 4. Optical micrographs as-cast (a) and aged A356 alloy (b-d). (a) A, (b) B, (c) C and (d) D specimen.

Fig. 5. Optical micrographs of eutectic phase in casting. (a) A, (b) B, (c) C and (d) D specimen.

방상태와 비교하면 공정Si입자가 작아짐과 동시에 형상은 다소 모서리가 둥근 형상으로 변화한 것을 알 수 있었다. 또한 용체화처리 온도가 증가함에 따라 공정 Si상이 미세하게 분포되어 있음을 볼 수 있다. Fig. 5는 공정Si 상을 고배율로 관찰한 사진이다. 판상의 공정Si 입자가 보이며 Fig. 5(b)에서 비경화성 합금의 Mg_2Si 는 특징적인 Chinese script phase 조직도 관찰되었다[4].

Fig. 6은 525°C에서 8시간 용체화 처리 한 후 140°C에서 6시간 시효 처리한 합금의 SEM사진으로써 공정 Si상이다. 공정 Si의 크기 및 형상은 합금의 기계적 성질이나 파괴거동에 큰 영

향을 미친다. 이 상의 성분을 분석하기 위해 X점을 EDS분석을 하였다. 공정 Si상에 Al, Si, Fe, 등의 여러 원소들이 존재함을 확인할 수 있었다.

Fig. 7은 시효처리재의 비커스 경도를 나타낸 그래프이다. Fig. 7(a)는 주조상태와 용체화 처리온도를 다르게 한 열처리 조건의 경도 그래프로써 용체화 처리 온도가 증가할수록 경도가 증가되었다. 이것은 용질원자가 고용이 되기위하여 확산되어야 하며, 따라서 고온에서 완전히 고용되어 시효처리시 석출량이 증가되기 때문으로 사료된다. Fig. 7(b)는 525°C 용체화 처리 후 160°C와 170°C시효처리시 조건에 따른 경도 그래프이다. Fig.

Element	Al	Si	Fe	Ni	O	Total
wt%	64.13	24.44	1.82	3.86	5.75	100.0
at%	64.16	23.49	0.88	1.78	9.69	100.0

Fig. 6. SEM image with EDS analysis of A356 alloy solution heat treated at 525°C for 8h followed by aged at 140°C for 6h.

7(a)에서 주조상태의 합금보다 시효처리한 합금의 경도값이 증가 하였는데, 이는 시효를 함으로써 미세하고 조밀한 침상의 $Mg_2Si(\beta'')$ 상이 석출되었기 때문에 사료된다. Fig. 7(b)는 170°C에서 160°C보다 먼저 최고 경도값을 나타내지만, 최고 경도는 비슷한 값인 Hv 115과 117정도에서 나타나고 이후 석출상의 조대화에 의해 경도가 감소하였다. 또한 미세 조밀하게 형성된 β'' 및 β' 상에 의해 경도가 상승하였다.

Fig. 8은 Fig. 7(b)에서의 아시효와 피크시효 그리고 as-quenching(AQ)상태의 시편에 대한 열분석 그래프를 나타내었다. 이 연구결과는 이전 연구자[5]의 Al-Si-Mg합금의 열분석 피크와 유사하였다. 즉 A와 B는 각각 β'' 과 β' 상의 석출에 기인되는 피크이다. 宮內등의 보고에 의하면 Al-0.6Mg2Si-0.14Mg 합금의 열분석 결과에서 침상 β'' 상과 봉상 β' 상은 거의 같은 온도 영역에서 석출이 된다고 하였다[6]. 피크 A와 B가 시효 온도와 시간이 증가함에 따라 현저하게 감소한 것으로 보아 β'' 상 및 β' 상의 석출이 진행됨을 알 수 있었다. 170°C에서 12시간 시효처리시는 피크가 보이지 않은 것으로 보아 12시간 시효처리 이후에 석출이 완료되어 이들 석출된 β'' 상 및 β' 상에 의해 12h이후 최고의 경도값을 갖는다고 사료된다.

Fig. 9는 525°C에서 8시간 용체화처리 후 AQ상태의 시편으

Fig. 8. DSC curves of aged A356 alloy (SHT : 525°C, heating rate: 5°C/min). (a) AQ, (b) 160°C for 0.5h, (c) 170°C for 0.5h, (d) 160°C for 16h, (e) 170°C for 12h.

Fig. 9. DSC curves of as-quenched A356 alloy (SHT at 525°C for 8h). Heating rate (a) : 20°C/min, (b) 10°C/min, (c) 5°C/min, (d) 2°C/min.

로 승온속도를 2, 5, 10 및 20°C/min으로 하여 나타낸 열분석 곡선이다. 피크가 승온속도의 증가에 따라 높은 온도로 이동되는 것으로 나타난다. 이것으로 석출 피크가 승온속도에 의존한

Fig. 7. Hardness change with various SHT temperatures and aging conditions: (a) as-cast (A) and SHT at 475, 500, 525°C (B, C, D) for 8h and aging at 140°C for 6h, (b) SHT at 525°C for 8h followed by aged at 160 and 170°C for 0.5~20h.

Fig. 10. Calculated activation energy (ΔE) for β'' phase precipitation.

다는 것을 알 수 있었다. 따라서 이 결과를 이용하여 β'' 의 석출에 대한 활성화 에너지를 계산 할 수 있다.

Fig. 10은 Fig. 8의 열분석 곡선으로부터 β'' 상의 활성화 에너지를 구하기 위하여 절대온도의 역수와 승은 속도의 대수 값으로 나타내어 이들의 평균 직선을 구한 것이다. 활성화 에너지 값은 Ozawa[7]가 제안한 $\log\Phi = -0.4567 \cdot E/RT + \text{const}$ (여기서 Φ 는 승은 속도, E 는 활성화 에너지, R 는 기체상수, T 는 절대온도) 식을 이용하여 절대온도의 역수와 승은 속도의 대수(log) 값으로부터 얻어진 기울기로부터 계산하였다. 이 기울기로부터 얻어진 A356합금의 활성화 에너지는 78.019 kJ/mol이었다. 대표적인 알루미늄 합금인 A6061의 β'' 상의 석출을 위한 활성화 에너지는 119.65 kJ/mol이었는데[8] 이와 비교하였을 때 A356합금이 A6061합금에서 보다 β'' 상의 석출이 촉진되어지는 것으로 사료된다[6].

4. 결 론

1) 응고 시뮬레이션을 이용하여 A356 합금 컴프레서 휠 주조방안을 수립 후 lost-wax법을 이용한 정밀 주조를 통해 정밀

한 치수의 컴프레서 휠을 제조할 수 있었다.

2) 주조상태의 A356합금은 수지상 조직을 나타내었으며, 시효 처리한 합금은 초정 α 와 공정 Si 입자들이 판상으로 존재하였다.

3) A356 합금의 시효 처리시간에 따른 경도 값은 160°C/16h와 170°C/12h에서 최대 약120 Hv를 얻을 수 있었다. 시효 처리를 함으로써 경도가 증가한 이유는 β'' 상의 석출이 일어났기 때문으로 사료된다.

4) DSC열분석 결과 β'' 상의 석출에 해당하는 발열 peak(약 300°C)를 확인할 수 있었고, 170°C에서 12시간 시효처리시 이후에 시효가 완료되어 이들 석출된 β'' 상 및 β' 상에 의해 경도가 증가하는 것으로 사료된다.

5) 본 합금에서 β'' 상의 석출을 위한 활성화 에너지가 78.019 kJ/mol로 Al-Mg-Si합금의 활성화에너지인 119.65kJ/mol 보다 적은 것으로 보아 β'' 상의 석출이 촉진되었다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 “2009년 지방기술혁신사업”(No.R11080601)의 연구비로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] J. Y. Song, J. C. Park, Y. S. Ahn : “Effect of cast microstructure on fatigue behaviors of A356 aluminum alloy for automotive wheel”, J. Kor. Foundrymen's Soc.,30 (2010) 46-51
- [2] K. H. Lee, Y. N Kwon, S. H. Lee : “Effects of eutectic Si particles on mechanical properties and fracture toughness of cast A356 aluminum alloys”, J, Kor. Inst. Met. & Mater., 45 (2005) 18-29
- [3] E. P. Kwon, K. D. Woo, M. S. Moon, D. S. Kang, G. C. Nam, G. H. Yoo : “The effect of solution heat treatment and aging treatment on the mechanical properties of backward extruded A6061 alloy for pressure vessels”, J, Kor. Inst. Met. & Mater., 47 (2009) 175-181
- [4] Hermann and Schumann : Metallographie, Hak Mun Publishing Co. Korea (1993) 544-547
- [5] D. Y. Song : Master thesis, Chonbuk National University, (2009)
- [6] J. S. Lee : Ph. D thesis, Chonbuk National University, (1999)
- [7] Sotak: Bull. Jpn. Inst. Met. 24, (1985) 797
- [8] E. P. Kwon : Master thesis, Chonbuk National University, (2009)