마찰열기계적 공정을 이용한 AC4A 합금의 표면개질

윤태욱^a, 고영봉^b, 고병천^c, 박경채^{c*}

^a평화오일씰공업(주), ^b한국화학융합시험연구원, ^c경북대학교 금속신소재공학과

Surface Modification of AC4A Aluminum Alloy Castings Using Friction Thermomechanical Process

Tae-Wook Yoon^a, Young-Bong Ko^b, Byung-Chun Ko^c, Kyeong Chae Park^{c*}

^aPyung Hwa Oil-seal Industry Co., Ltd.

^bKorea Testing & Research Institute

^cMaterials Science and Metallurgical Engineering of Kyungpook National University

(Received October 4, 2010 ; revised October 26, 2010 ; accepted October 30, 2010)

Abstract

FTMP(friction thermo-mechanical process) is an adaptation of friction stir welding, and can be used as a generic process to modify the microstructure at selective locations. In this study, in order to analyze characteristics of surface modification of ACA4 castings by FTMP, change of rotating speed(R/S) and traveling speed(T/S) of tool were applied as conditional parameter. Analysis of microstructure, hardness, surface roughness and depth of modified zone(MZ) were searched. The best condition were obtained at R/S 600 rpm and T/S 100 mm/min. At this time, hardness was 82 HV, the surface roughness was 0.07 mm and the depth at MZ was 1.72 mm. Free defects microstructure and fine Si particles formation and strong forging effects were analyzed at MZ.

Keywords: Friction Thermo-mechanical Process(FTMP), Surface modification, AC4A aluminum alloy castings, Modified zone, Si particle size, Hardness distribution

1. 서 론

최근 들어 친환경 기술개발이 확대됨에 따라 자동차분야 등에서 금속 경량화를 위한 기술연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 알루미늄 합금은 전기자동차, 수소자동차 등의 친환경 소재로 많이 이용되고¹⁾, 주조 및 다이캐스팅용 알루미늄 소재에 대한 다양한 가공 기술 개발이 자동차 산업 성장에 중요한 역할을 하고 있다. 이러한 가공 기술 중 알루미늄을 국부적 혹은 전체적으로 강화시키는 기술이 보고되었다. 이중 마찰열기계적 공정(Friction Thermo-Mechanical Process : FTMP)은 ECAP(Equal Channel Angular Pressing), HPT(High Pressure

Torsion), ARB(Accumulative Roll Bonding) 등 전체의 미세조직을 제어하는 기술과는 달리 재료 표면부의 미세조직의 제어에 의한 표면 특성을 개선시킬 수 있다^{2,3)}. FTMP는 마찰교반접합(Friction Stir Welding : FSW)의 특성을 응용한 금속표면개질 기술이며 영국, 일본과 미국 등에서는 이에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다⁴⁾.

마찰열기계적 공정은 피가공재를 고정시켜 놓고 고속으로 회전하는 툴(tool)을 피가공재 표면부에 마찰열의 발생과 동시에 소성유동을 일으킴으로서 결정립 미세화로 기계적 성질을 향상시킨다⁵⁾.

기존의 마찰열기계적 공정은 알루미늄합금 압연재 및 다공질 알루미늄합금을 이용한 표면개질의 원리와 특성이 주로 연구되었다⁶⁻⁸⁾. 그러나 기존의 소재와는 달리 주물용 알루미늄 합금의 표면개질

*Corresponding author. E-mail : kcpark@knu.ac.kr

특성에 대한 연구는 제한적으로 이루어지고 있는 실정이며, 특히 마찰열기계적 공정을 이용한 주물용 알루미늄합금의 표면개질에 대한 연구결과는 현재까지 보고된 바가 거의 없다. 본 연구는 현재 주물용 알루미늄 합금 중에서 비교적 강도가 높고 주조성이 우수하며 합금의 적응성도 뛰어난 AC4A 합금에 대해 마찰열기계적 공정을 이용하여 표면개질부의 조직과 기계적 성질의 변화를 분석하고자 한다.

2. 실험

2.1 사용재료

본 실험에서는 Al-Si-Mg계 AC4A합금을 사용하였으며, 합금의 조성은 표 1, 기계적 성질은 표 2에 나타내었다. 시편 제작은 AC4A합금 주괴(ingot)를 두께 10 mm로 절단한 후, 아세톤으로 초음파 세척하여 이물질을 제거하였다.

2.2 실험방법

마찰열기계적 공정 장비는 자체 제작하였으며, 회전속도가 최대 4,500 rpm, 이송속도는 최대 2,000 mm/min, 하중은 최대 15 kN까지 제어가 가능하다. 실험 공정에 사용된 툴의 재질은 내마모성이 우수한 SKD11을 열처리한 후 지름 Ø10 mm의 원통형으로 제작하였다.

Fig. 1. Schematic illustration of friction thermomechanical process.

그림 1은 마찰열기계적 공정의 개략도이고, 공정 조건은 표 3에 나타내었다. 모재를 클램핑(clamping)한 후 툴을 시계방향으로 회전하는 상태에서 이송시켰다. 이때 마찰열기계적 공정의 실험 조건은 재하하중을 9.8 kN으로 고정시켰으며, 이송속도(Traveling Speed : T/S), 회전속도(Rotating Speed : R/S)를 변수로 적용하였다.

실험 후 제작된 시편을 3차원 비접촉식 측정기(Three coordinate measuring machine)를 이용하여 표면개질부(Modified Zone : MZ)에서 미공정부(Unprocessed Zone : UZ)까지의 깊이를 측정하였다. Si 석출물의 크기를 관찰하기 위해 경면 연마된 시편을 광학현미경을 이용하여 관찰하였으며, 조도측정기(surface roughness tester)를 이용하여 표면개질부의 외관의 조도를 측정하였다.

Table 1. Chemical compositions of AC4A (wt %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Ti	Pb	Sn	Cr	Al
8.89	0.42	0.18	0.35	0.78	0.13	0.01	0.03	0.02	0.01	0.01	bal.

Table 2. Mechanical properties of AC4A by metallic mold casting

Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HB)
322	4	71

Table 3. Conditions of friction thermomechanical process

Rotating speed (R/S) (rpm)	Traveling speed (T/S) (mm/min)	Force (ton)
300, 600, 900, 1200	100, 400	1

Fig. 2. Measuring points for vickers hardness at 900 rpm-100 mm/min.

마이크로 비커스 경도기(Micro-Vickers hardness tester)를 이용하여 표면개질부의 위치에 따른 경도의 차이점을 측정하였고 하중 200 g, 압입시간 10초의 조건으로 톨의 중심에서 좌우 방향으로 1 mm 간격, 깊이 방향으로 표면에서 0.4 mm 간격으로 측정하였다. 그림 2는 경도측정 위치를 나타내었다.

3. 결과 및 검토

3.1 표면개질부의 형상

그림 3은 각 공정조건에 따른 표면개질부의 형상을 나타낸 사진이다. 표면개질부 형상은 미공정부와 확연한 경계(점선)를 이루었으며 반타원 형상으로 형성되었으며 공정조건과 상관없이 기공결함이 사라지는 기공소실역을 형성했다.

그림 4는 조도측정기를 이용하여 각 공정변수에 따른 표면개질부의 표면부의 조도(최대 거칠기: R_{max})를 나타내었다. 표면개질부의 표면조도는 R/S 300 rpm-T/S 100 mm/min일 때 0.62 mm이었고, R/S 300 rpm-T/S 400 mm/min일 때는 0.78 mm로서 마찰열기계적 공정이 불가능한 정도로 매우 거칠어졌다. T/S 100 mm/min로 일정하게 한 경우, R/S가 600 rpm과 900 rpm일 때 0.07 mm이었고, 1200 rpm일 때는 0.02 mm로서 높은 회전속도일수록 표면조도는 향상되었다. 그리고 T/S 400 mm/min일 때는

Fig. 4. Surface roughness of modified zone at FTMP conditions.

R/S 600 rpm에서 1200 rpm까지 모두 0.1 mm 정도로 양호한 수준이었다. 따라서 표면조도는 회전속도가 낮을수록 거칠어졌으며, 같은 회전속도에서도 이송속도가 증가함에 따라 다소 거칠어졌으나 비슷한 수준이었다. 이는 회전속도가 감소할수록 이송속도가 증가할수록 톨의 입열량과 열기계적 소성유동이 감소하여 표면개질부의 표면부이 거칠어진 것으로 사료된다⁹⁾.

Fig. 3. Appearances of modified zone at FTMP conditions.

Fig. 5. A typical macrograph showing microstructural zones (MZ, UZ) of FTMPed cross section at R/S 600 rpm-T/S 400 mm/min.

Fig. 6. Depth of modified zone at FTMP conditions.

3.2 표면개질부의 관찰

그림 5는 표면개질부의 깊이를 나타낸 사진이다. 그림 6은 각 공정 조건에 따른 표면개질부의 깊이를 비교한 그래프이다.

회전속도가 높을수록 표면개질부의 깊이는 얇아졌고, 동일한 회전속도에서도 이송속도가 높을수록 표면개질부의 깊이는 얇아졌다. 그러나 표면개질부의 폭은 톨의 회전 시 모재가 소성유동을 일으키는 부분이며, 모든 공정 조건에서 표면개질부의 폭은 톨의 외경과 비슷한 수준으로 형성되었다. 표면개질부의 깊이는 T/S 100 mm/min의 조건에서 R/S 600 rpm의 경우 1.72 mm이고, R/S 1200 rpm의 경우는 1.05 mm이었다. 그리고 T/S 400 mm/min의 조건에서 R/S 600 rpm의 경우 1.41 mm이고, 1200 rpm의 경우 0.95 mm이었다. 표면개질부의 깊이는

Fig. 7. Vickers hardness distribution of FTMPed cross section at R/S 600 rpm-T/S 100 mm/min on MZ depth.

Fig. 8. Vickers hardness distribution of FTMPed cross section at R/S 1200 rpm-T/S 400 mm/min on MZ depth.

R/S 600 rpm-T/S 100 mm/min의 조건에서 가장 깊이는 1.72 mm가 형성되었다.

그림 7, 8은 표면개질부가 가장 깊게 형성된 조건인 R/S 600 rpm-T/S 100 mm/min과 가장 얇게 형성된 R/S 1200 rpm-T/S 400 mm/min에서의 표면개질부의 경도를 나타내었다. R/S 600 rpm-T/S 100 mm/min의 표면 0.1 mm 지점의 경도가 가장 높

왔고, 깊이 내려갈수록 경도는 낮아졌다. 그림 9는 개질부 표면 0.1 mm 지점의 경도를 각 공정조건에 따라서 나타내었다. T/S 100 mm/min의 조건에서 R/S

600 rpm일 때의 경도는 82 HV이었고, 900 rpm에서는 65 HV, 1200 rpm에서는 64 HV로써 회전속도가 증가할수록 경도는 감소했다. R/S 600 rpm인 경우

Fig. 9. Vickers hardness distribution of modified zone of FTMPed cross section at 0.1 mm below the MZ surface according to rotating speed and traveling speed: T/S (a) 100 mm/min, (b) 400 mm/min.

Fig. 10. Macrograph(a) of modified zone of FTMPed cross section at R/S 600 rpm-T/S 100 mm/min showing various microstructural zones at (b), (c) and (d) : (a) macrograph, (b) AS, (c) center, (d) RS.

T/S 100 mm/min일 때의 경도와 400 mm/min에서의 경도를 비교해보면 82 HV와 80.2 HV로 비슷한 수준이었으므로, 이송속도에 의한 경도 변화는 회전 속도에 의한 경도 변화보다 작았다. 모든 개질부의 경도는 모재의 경도(60 Hv)보다 커졌다. 최적의 마찰열기계적 공정 조건은 경도가 높고, 표면개질부의 깊이가 깊게 형성될 수록, 표면조도가 우수할수록 최적의 조건이라 할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 R/S 600 rpm-T/S 100 mm/min의 조건이 최적의 마찰열기계적 공정 조건인 것으로 사료된다.

3.3 표면개질부의 Si 분포

일반적으로 마찰열기계적 공정을 통해 주조형

AC4A합금의 Si 입자는 열기계적 마찰과 소성유동으로 인하여 미세하게 파쇄되고 재배열된 조직이 나타난다. 그림 10은 최적의 마찰열기계적 공정 조건인 R/S 600 rpm-T/S 100 mm/min의 조건에서, 그림 11은 1200 rpm-400 mm/min의 조건에서 개질부 표면 0.1 mm 부근의 Si 입자의 분포를 나타내었다. 여기서 표면개질부의 중심부(center), 앞부분(Advancing Side : AS), 뒷부분(Retreating Side : RS)으로 구분 표시하였다.

그림 12, 13은 그림 10, 11을 화상분석(image analyser)을 실시하여 Si 입자를 분석하였다. 이 때 분석한 화상의 면적은 가로 150 μm ×세로 50 μm (7,500 μm^2)로 했다.

Fig. 11. Macrograph(a) of modified zone of FTMPed cross section at R/S 1200 rpm-T/S 400 mm/min showing various microstructural zones at (b), (c) and (d) : (a) macrograph, (b) AS, (c) center, (d) RS.

Fig. 12. Number of Si particles according to distance from center at 0.1 mm MZ depth: (a) Si particles size $\leq 1 \mu\text{m}$, (b) Si particles size $> 5 \mu\text{m}$.

Fig. 13. Number of Si particles according to distance from surface at bead center: (a) Si particles size $\leq 5 \mu\text{m}$, (b) Si particles size $> 5 \mu\text{m}$.

그림 12는 개질부 표면의 AS, 중심부, RS의 Si 입자의 수를 나타내었다. 여기서 Si 입자의 크기를 $1 \mu\text{m}$ 이하, $5 \mu\text{m}$ 초과로 구분하여 분석하였다.

$1 \mu\text{m}$ 이하 Si 입자가 RS보다 AS에 파쇄가 집중적으로 이루어져서, 미세화된 Si 입자가 집중분포 되었다. RS로 갈수록 Si 입자는 크고 수는 감소했다. 그리고 회전속도가 증가할수록 미세한 Si 입자의 수는 감소되며 크기는 증가했다. 그림 7의 경도분포의 결과와 비교하면, AS의 경도가 다소 높은 이유는 미세한 결정립이 중심부나 RS보다 많기 때문인 것으로 사료된다.

틀의 회전속도가 감소할수록 Si 입자가 더 미세화된 원인은 회전속도가 높을수록 마찰열에 의한 입열량이 커져 기지(matrix)의 연화가 크게되어 Si의 파쇄가 낮아지는 것으로 사료된다.

그림 13은 중심부의 깊이 변화에 따른 Si 입자의 크기를 $5 \mu\text{m}$ 이하, $5 \mu\text{m}$ 초과로 구분하여 Si 입자의 수를 나타내었다.

표면개질부의 깊이 깊을수록 미세한 Si 입자는 감소되며 조대하였다. 이는 열기계적 소성유동이 깊

이가 깊을수록 약해지므로 파쇄력이 감소하여 미파쇄된 조대한 Si 입자들이 많은 것으로 판단된다. 이것으로 인해 표면개질부의 깊이가 깊어질수록 경도는 미세화 효과와 forging 효과의 감소로 인해서 감소하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 주물용 알루미늄 합금인 AC4A를 회전속도, 이송속도를 변수로 하여 마찰열기계적 공정 후 표면개질부의 특성을 조사하여 다음의 결론을 얻었다.

1) 표면개질부의 경도, 표면조도, 깊이를 분석한 결과, R/S 600 rpm-T/S 100 mm/min인 공정 조건이 가장 우수한 조건이며 표면에서 가까운 지점에서 경도가 가장 높았다.

2) 표면조도는 회전속도가 증가수록, 이송속도가 감소할수록 향상되었으며, 표면개질부의 깊이는 회전속도와 이송속도가 감소할수록 깊어졌다. 표면개질부의 경도는 회전속도가 감소할수록 급격히 증가

하였으나, 이송속도에 따른 영향은 작았다.

3) 각 공정 조건별 Si 입자의 분포특성은 AS에서 Si 입자의 파쇄가 집중적으로 발생되어, 미세화된 Si 입자가 집중 분포했다. Si 입자의 크기는 AS로 갈수록 회전속도가 낮을수록, 표면개질부의 표면에 가까울수록 더 미세화 되었다.

참고문헌

1. 장웅성, 김홍주, RIST 연구논문, 18(1) (2004) 30.
2. 박재철, 김성중, 한국표면공학회지, 42(1) (2009) 13.
3. 박재철, 김성중, 한국표면공학회 2009년도 춘계학술대회 논문집, (2009) 242.
4. 권용재, 대한용접 접합학회지, 25(3) (2007) 6.
5. 篠田 剛, 摩擦攪拌接合 FSWのすべて, 日本:社団法人溶接, (2003) 189.
6. 권용재, 대한용접 접합학회지, 26(6) (2008) 18.
7. Y. J. Kwon, I. Shigematsu, N. Saito, J. Japan Inst. METALS, 66 (2002) 1325.
8. Y. J. Kwon, I. Shigematsu, N. Saito, Mater. Lett., 62 (2008) 4458.
9. 고영봉, 이중헌, 박경채, 대한용접 접합학회지, 27(6) (2009) 595.