ARB공정에 따른 초미세립 AA1050/AA6061 복합알루미늄 합금 판재의 미세조직 발달

이성희[†]

국립목포대학교 신소재공학과

Microstructural Evolution of Ultrafine Grained AA1050/AA6061 Complex Aluminum Alloy Sheet with ARB Process

Seong-Hee Lee[†]

Department of Advanced Materials Science and Engineering, Mokpo National University,
Muan-gun, Chonnam 534-729, Korea

(2012년 11월 17일 접수 : 2012년 12월 6일 최종수정 : 2012년 12월 11일 채택)

Abstract The microstructural evolution of AA1050/AA6061 complex aluminum alloy, which is fabricated using an accumulative roll-bonding (ARB) process, with the proceeding of ARB, was investigated by electron back scatter diffraction (EBSD) analysis. The specimen after one cycle exhibited a deformed structure in which the grains were elongated to the rolling direction for all regions in the thickness direction. With the proceeding of the ARB, the grain became finer; the average grain size of the as received material was 45 μm ; however, it became 6.3 μm after one cycle, 1.5 μm after three cycles, and 0.95 μm after five cycles. The deviation of the grain size distribution of the ARB processed specimens decreased with increasing number of ARB cycles. The volume fraction of the high angle grain boundary also increased with the number of ARB cycles; it was 43.7 % after one cycle, 62.7 % after three cycles, and 65.6 % after five cycles. On the other hand, the texture development was different depending on the regions and the materials. A shear texture component $\{001\}\langle 110 \rangle$ mainly developed in the surface region, while the rolling texture components $\{011\}\langle 211 \rangle$ and $\{112\}\langle 111 \rangle$ developed in the other regions. The difference of the texture between AA1050 and AA6061 was most obvious in the surface region; $\{001\}\langle 110 \rangle$ component mainly developed in AA1050 and $\{111\}\langle 110 \rangle$ component in AA6061.

Key words accumulative roll-bonding(ARB), electron back scatter diffraction(EBSD), complex aluminum alloy, ultrafine grain, texture.

1. 서 론

결정립초미세화를 위한 강소성가공법 중의 하나인 반복겹침접합압연(Accumulative Roll Bonding, ARB)법은 다른 큰 장치 없이 종래의 압연기술을 활용할 수 있으므로 판상의 대형 벌크재료에의 적용에 가장 적합한 프로세스로 알려져 있다.¹⁻¹⁰⁾ 일반적으로 ARB법은 동일한 재료의 판재를 표면처리 후에 2매 적층하여 압하율 50 %의 접합압연을 행하고, 길이를 2등분하여 동일한 공정을

반복하는 방법으로 행해진다. 그러나 최근에는 종래의 ARB법을 응용한 다층겹침 ARB법,¹¹⁾ 이중금속 ARB법,¹²⁾ 동(同)종이(異)합금 ARB^{13,14)} 등에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 여기서 이중금속 ARB법은 다른 종류의 금속을 사용한 ARB법을 말하며, 이 방법은 초미세결정립 조직을 가진 층상복합재료의 제조가 가능하며 그로 인해 다양한 특성을 발현시킬 수 있다는 장점이 있다. 또한, 동(同)종이(異)합금 ARB법이란 같은 금속이지만 합금 종류가 다른 금속들을 ARB법에 적용하여 다양

[†]Corresponding author

E-Mail : shlee@mokpo.ac.kr (S. -H. Lee, Mokpo 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.

한 조직과 기계적 특성을 가진 복합금속을 창제하는 방법을 말한다. 본 연구그룹은 지난 연구들을 통해, AA1050과 AA5052의 조합^{13,14)}의 ARB를 통해 다양한 조직의 층상복합알루미늄합금의 제조가 가능함을 보고한 바 있다. 또한 어닐링을 통하여 더욱 다양한 복합조직과 기계적 특성을 발현시킬 수 있음도 보고한 바 있다.¹⁴⁾ 그런데 ARB법은 압연을 기반으로 한 공정이므로 압연조건에 따라 두께방향의 부위별 미세조직 및 집합조직의 형성이 동일하지 않다. 또한, 동종이합금 ARB의 경우, ARB에 따른 미세조직 및 집합조직의 형성과정이 기존의 경우와 상이할 가능성이 크다. 따라서 본 연구에서는 AA1050과 AA6061를 사용한 ARB공정에서, ARB공정에 따른 부위별 미세조직 및 집합조직의 발달과정을 Electron Back Scattering Diffraction(EBSD)측정을 통하여 비교적 상세히 분석하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서 ARB공정을 위해 사용된 알루미늄합금(출발재료)은 두께 1 mm, 폭 30 mm, 길이 300 mm의 AA1050의 순알루미늄과 두께 2 mm, 폭 30 mm, 길이 300 mm의 AA6061(Al-Mg-Si합금)판재이다. 두 알루미늄합금의 화학조성을 Table 1에 나타내었다. 또한 두 합금 모두 400 °C에서 0.5 h 어닐링된 상태이므로 재결정조직을 나타내었으며 평균결정립경이 AA1050의 경우 56 μm , AA6061의 경우 34 μm 이었다. ARB는 두 재료를 겹쳐 냉간접합압연에 의해 두께를 3 mm에서 2 mm로 한 후에 실시하였다. 즉 AA1050/AA6061의 clad재료를 ARB공정에 사용하였다. Fig. 1에 ARB공정의 모식도를 나타내었다. ARB는 실온, 무윤활 조건에서 롤의 직경 210 mm의 압연기에 의해 롤의 주속 15.9 m/s로 5c(c: cycle)까지 행하였으며, 절단, 표면처리, 겹침, 접합압연 등의 일련의 공정은 종래의 방법들¹⁻¹⁰⁾과 동일하게 진행하였다.

ARB후의 복합알루미늄 판재에 대하여 EBSD측정을 통한 미세조직 분석을 실시하였다. EBSD 측정의 경우, 판재의 폭 중앙부에서 종단면(TD면)에 평행하게 압연방향으로 시편을 얇게 잘라서, 30 vol% HNO_3 + 70 vol% CH_3OH 용액속에서 액체온도 -15°C , 전압 20 V의 조건에서, twin jet 전해연마에 의해 경면으로 한 다음 EBSD 측정을 실시하였다. 판재 두께 방향으로의 EBSD 측정은 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 ARB 시편의 판재 두께 중심부터

Fig. 1. Schematic illustration of accumulative roll bonding process using AA1050 and AA6061 alloys.

Fig. 2. Schematic illustration showing the measurement positions of electron back scatter diffraction for the ARB processed samples.

표면까지 여러 위치에 대해서 실시하였다. 이때 시편의 두께를 t_0 , 판재 두께 중심에서 측정영역 중심까지의 위치를 t 로 하고, 각 측정영역의 판재 두께 위치를 규격화 좌표 t/t_0 를 사용하여 표현하기로 한다. 예를 들면, 판재 두께 중심 및 표면위치는 각각, $t/t_0 = 0$, $t/t_0 = 0.5$ 라고 표현된다. 측정된 EBSD 데이터로부터 ND 방위맵 (misorientation map), RD 방위맵 및 결정립계맵 (grain boundary map)을 얻었다. ND 방위맵 및 RD 방위맵은 EBSD 측정에서 각 측정점의 압연면 법선방향(normal

Table 1. Chemical compositions of AA1050 and AA6061 studied (mass%).

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Each	Al
AA1050	0.03	0.29	0.02	0.01	0.01	-	0.01	0.009	0.03	RE
AA6061	0.6	0.7	0.3	0.15	1.0	0.155	0.25	0.15	0.05	RE

direction; ND) 및 압연방향(rolling direction; RD)에 평행한 결정방향을 표준 스테레오 삼각형으로 나타내었다. 여기서 EBSD 측정에서 정확하게 검출할 수 있는 방위차의 한계를 2° 라고 생각하고 방위차 2° 미만의 결정립계는 해석에서 제외했다. 즉, 본 EBSD 측정에서는 $2^\circ \sim 15^\circ$ 의 방위차를 가지는 결정립계를 저각각입계(low angle grain boundary), 방위차 15° 이상의 결정립계를 고각각입계(high angle grain boundary)라고 한다. 얻어진 EBSD 해석으로부터 평균입경, 대각입계의 비율, 결정립계의 평균방위차 각도 등의 미세조직 인자를 정량적으로 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 1 cycle ARB재료

Fig. 3에 1c-ARB재료의 표면부위($t_0/t = 0.48$), 중간부위($t_0/t = 0.35$), 센터부위($t_0/t = 0$)의 ND map, RD map, GB map을 나타내었다. 그림에서와 같이 부위에 관계없이 결정립 크기가 유사하며 결정립이 압연방향으로 연신된 가공조직을 나타냄을 알 수 있다. 그러나 집합조직에 있

어서는 부위에 따라 다소 다르다. AA1050의 표면부위에서는 전단집합조직 성분의 하나(rotated cube)인 $\{001\} \langle 110 \rangle$ 이 주로 발달한 집합조직을 나타내고 있다. 이것은 압연시 압연롤과 시편사이의 마찰에 의해 표면부위에 도입되는 전단변형에 기인한 것이라 판단된다. 그러나 중간부위의 경우, AA1050부위에서는 $\{011\} \langle 211 \rangle$ (brass orientation)이, AA6061부위에서는 $\{112\} \langle 111 \rangle$ (copper orientation)이 주로 발달하였다. 두 성분 모두 전형적인 압연 집합조직 성분이지만 재료에 따라 다른 집합조직을 나타내는 것이 흥미롭다. 센터부위에서는 AA6061영역에서는 $\{011\} \langle 211 \rangle$ 성분이, AA1050영역에서는 $\{123\} \langle 634 \rangle$ (S-orientation)성분이 발달하여 재료에 따라 다소 다른 집합조직을 나타내었다. 또한 GB map을 통하여 misorientation이 15° 이상인 고각각입계가 45.7 %인 반면, 15° 이하인 저각각입계가 54.3 %임을 알 수 있었다. Fig. 4는 부위별 결정립계의 misorientation angle의 체적분율을 나타낸다. 표면부위와 중간부위는 분포도가 매우 유사하며 고각각입계의 분율이 다소 높지만, 중앙부위에서는 저각각입계의 분율이 다소 높은 경향을 나타내었다. Fig. 5는

Fig. 3. ND maps, RD maps and GB maps obtained by EBSD measurement for the one cycle ARB processed sample.

Fig. 4. Grain boundary misorientation angle distributions obtained by EBSD measurement for surface region($t_0/t = 0.48$) (a), intermediate region($t_0/t = 0.35$) (b) and center region($t_0/t = 0$) (c) of the sample after one cycle.

Fig. 5. Grain size distributions obtained by EBSD measurement for surface region($t_0/t = 0.48$) (a), intermediate region($t_0/t = 0.35$) (b) and center region($t_0/t = 0$) (c) of the sample after one cycle.

부위별 결정립 크기 분포를 나타낸 것이다. 어떤 부위에 서도 미세한(fine) 결정립의 체적분율이 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 평균결정립 크기는 표면부위와 중간부 위에서는 각각 $5.5 \mu\text{m}$, $5.8 \mu\text{m}$ 로 비슷하였으나 중심부 위에서는 $7.5 \mu\text{m}$ 으로 다소 큰 경향을 나타내었다.

3.2 3 cycle ARB재료

Fig. 6에 3c-ARB재료의 표면부위($t_0/t = 0.48$), 중간부위 ($t_0/t = 0.35$), 센터부위($t_0/t = 0$)의 ND map, RD map, GB

map을 나타내었다. 그림에서와 같이 부위에 관계없이 1c-ARB재료(Fig. 3)에 비해 더 미세한 결정립을 나타내고 있으며 여전히 압연방향으로 연신된 가공조직을 나타낸다. 그러나 집합조직에 있어서는 부위에 따라 다소 다르다. 표면의 AA1050부위에서는 전단집합조직 성분의 하나(rotated cube)인 $\{001\}\langle 110 \rangle$ 이, AA6061의 경우에는 $\{111\}\langle 110 \rangle$ 성분이 주로 발달한 집합조직을 나타내고 있다. 그러나 중간부위 의 경우, AA6061부위에서는 $\{001\}\langle 110 \rangle$, AA1050부위에서는 copper orientation인 $\{112\}$

Fig. 6. ND maps, RD maps and GB maps obtained by EBSD measurement for the three cycle ARB processed material.

Fig. 7. Grain boundary misorientation angle distributions obtained by EBSD measurement for surface region($t_0/t = 0.48$) (a), intermediate region($t_0/t = 0.35$) (b) and center region($t_0/t = 0$) (c) of the sample after three cycles.

Fig. 8. Grain size distributions obtained by EBSD measurement for surface region($t_0/t = 0.48$) (a), intermediate region($t_0/t = 0.35$) (b) and center region($t_0/t = 0$) (c) of the sample after three cycles.

$\langle 111 \rangle$ 이 주로 발달하였다. 센터부위에서는 그림에서와 같이 모든 영역에서 $\{112\}\langle 111 \rangle$ 성분이 발달한 집합조직을 나타내었다. Fig. 7에 부위별 misorientation angle의 체적분율을 나타내었다. 표면부위와 중간부위는 분포도가 매우 유사하며 고경각입계의 분율이 약 60 %였으며, 중앙부위에서는 68 %로 다른 부위에 비해 고경각입계 비율이 높은 경향을 나타내었다. 이것은 1c-ARB재료와 다른 결과인데, 그 이유는 1c와 2c의 ARB시에 표면부위에 형성된 고경각입계 결정립들이 3c의 ARB시에 중앙부위로 위치하기 때문인 것으로 해석된다. Fig. 8에 부위별 결정립 크기 분포를 나타내었다. 1c-ARB재료와 마찬가지로 어떤 부위에서도 미세한 결정립의 체적분율이 높은 경향을 나타내었으나, 평균결정립 크기는 부위별로 큰 차이가 존재하지 않았으며 약 $1.5 \mu\text{m}$ 이었다. 즉, 1c-ARB재료에 비해 두께방향으로 균질한 미세조직을 나타내었다.

3.3 5 cycle ARB재료

Fig. 9에 5c-ARB재료의 표면부위($t_0/t = 0.48$), 중간부위($t_0/t = 0.35$), 센터부위($t_0/t = 0$)의 ND map, RD map, GB

map을 나타내었다. 그림에서와 같이 부위에 관계없이 1c와 3c의 ARB재료에 비해 결정립이 더욱 미세화되고 aspect ratio가 작아져 등축(equiaxed)에 근접해 있음을 알 수 있다. 또한, 집합조직의 발달에 있어서도 부위별로 다소 차이를 나타내었다. 표면의 AA1050부위에서는 전단 집합조직 성분의 하나인 $\{001\}\langle 110 \rangle$ 이, AA6061의 경우에는 $\{111\}\langle 110 \rangle$ 성분이 주로 발달한 집합조직을 나타내었다. 그러나 중간부위 및 센터부위의 경우, AA1050에서는 $\{011\}\langle 211 \rangle$, AA6061에서는 $\{112\}\langle 111 \rangle$ 등 압연 집합조직이 주로 발달하였다. Fig. 10에 부위별 misorientation angle의 체적분율을 나타내었다. 그림에서와 같이 모든 부위의 분포도가 매우 유사하며 고경각입계의 분율이 약 65 %였다. 이것은 동종이합금의 ARB에 있어서도 ARB사이클 수가 증가할수록 misorientation angle의 균일화가 촉진된다는 것을 잘 보여주는 결과라 할 수 있다. Fig. 11에 부위별 결정립 크기 분포를 나타내었다. 그림에서와 같이 부위별로 결정립 크기 분포에 다소 차이가 있으나 평균결정립 크기는 약 $0.95 \mu\text{m}$ 으로 거의 차이가 없었다. 이것 역시 ARB사이클 수가 증가할수록 미세조

Fig. 9. ND maps, RD maps and GB maps obtained by EBSD measurement for the five cycle ARB processed material.

Fig. 10. Grain boundary misorientation angle distributions obtained by EBSD measurement for surface region($t_0/t = 0.48$) (a), intermediate region($t_0/t = 0.35$) (b) and center region($t_0/t = 0$) (c) of the sample after five cycles.

Fig. 11. Grain size distributions obtained by EBSD measurement for surface region($t_0/t = 0.48$) (a), intermediate region($t_0/t = 0.35$) (b) and center region($t_0/t = 0$) (c) of the sample after five cycles.

직의 균일화가 촉진된 결과를 할 수 있다.

4. 결 론

ARB법에 따른 AA1050/AA6061 층상복합알루미늄합금의 미세조직 변화를 조사한 결과 다음과 같이 요약할 수 있다. 첫째, ARB사이클 수가 증가함에 따라 두께방향의 미세조직의 불균일성이 사라지고 비교적 균일한 조직을 형성하는 경향이 있다. 둘째, ARB사이클 수가 증가함에 따라 결정립미세화가 촉진되어 초기재료의 평균입경이 $45\mu\text{m}$ 이었던 것이 1c후에 $6.3\mu\text{m}$, 3c후에 $1.5\mu\text{m}$, 5c후에는 $0.95\mu\text{m}$ 이 되었다. 셋째, 집합조직은 ARB사이클 수에 따라 다소 차이는 있으나 표면부위는 전단집합조직, 중앙부위와 센터부위는 압연집합조직이 주로 발달하였다. 다만, AA1050, AA6061 별로 다소 다른 성분의 집합조직이 발달하였다. 넷째, 결정립계의 방위차 각도가 15° 이상인 고경각입계의 체적분율은 1c후에 43.7%, 3c후에 62.7%, 5c후에 65.6%로 점진적으로 증가하였다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 전남과학기술진흥센터에서 지원하는 “전남 과학연구단지 기초·원천연구개발지원사업”에 의해 이루어졌으며, 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Y. Saito, N. Tsuji, H. Utsunomiya, T. Sakai and R. G. Hong, *Scr. Mater.*, **39**, 1221 (1998).
2. Y. Saito, H. Utsunomiya, N. Tsuji and T. Sakai, *Acta Mater.*, **47**, 579 (1999).
3. H. -W. Kim, S. -H. Jin and S. -B. Kang, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, **39**, 546 (2001) (in Korean).
4. S. H. Lee, Y. Saito, N. Tsuji, H. Utsunomiya and T. Sakai, *Scr. Mater.*, **46**, 281 (2002).
5. S. H. Lee, Y. Saito, T. Sakai and H. Utsunomiya, *Mater. Sci. Eng. A*, **325**, 228 (2002).
6. S. H. Lee, J. Cho, S. Z. Han and C. Y. Lim, *Kor. J. Mater. Res.*, **15(4)**, 240 (2005) (in Korean).
7. S. H. Lee, J. Cho, C. H. Lee, S. Z. Han and C. Y. Lim, *Kor. J. Mater. Res.*, **15(9)**, 555 (2005) (in Korean).
8. S. H. Lee, S. Z. Han and C. Y. Lim, *Kor. J. Mater. Res.*, **16(9)**, 592 (2006) (in Korean).
9. C. Y. Lim, S. Z. Han and S. H. Lee, *Met. Mater. Int.*, **12(3)**, 225 (2006).
10. N. Takata, S. H. Lee and N. Tsuji, *Mater. Lett.*, **63**, 1757 (2009).
11. S. H. Lee, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, **43**, 786 (2005) (in Korean).
12. M. Eizadjou, A. K. Talachi, H. D. Manesh, H. S. Shahabi and K. Janghorban, *Compos. Sci. Tech.*, **68**, 2003 (2008).
13. S. H. Lee and C. S. Kang, *Kor. J. Met. Mater.*, **49(11)**, 893 (2011) (in Korean).
14. S. H. Lee and G. J. Lee, *Kor. J. Mater. Res.*, **21(12)**, 655 (2011) (in Korean).