반복접침접합 압연공정에 의해 제조한 초미세립 AA1050/AA5052 복합알루미늄합금판재의 어닐링 특성

이성희[†] · 이광진*

국립목포대학교 신소재공학과, *한국생산기술연구원

Annealing Characteristics of Ultrafine Grained AA1050/AA5052 Complex Aluminum Alloy Sheet Fabricated by Accumulative Roll-Bonding

Seong-Hee Lee[†] and Gwang-Jin Lee*

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

*Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Automotive Components R&D Group, Gwangju 500-480, Korea

(2011년 10월 14일 접수 : 2011년 10월 29일 최종수정 : 2011년 11월 3일 채택)

Abstract An ultrafine grained complex aluminum alloy was fabricated by an accumulative roll-bonding (ARB) process using dissimilar aluminum alloys of AA1050 and AA5052 and subsequently annealed. A two-layer stack ARB process was performed up to six cycles without lubricant at an ambient temperature. In the ARB process, the dissimilar aluminum alloys, AA1050 and AA5052, with the same dimensions were stacked on each other after surface treatment, rolled to the thickness reduction of 50%, and then cut in half length by a shearing machine. The same procedure was repeated up to six cycles. A sound complex aluminum alloy sheet was fabricated by the ARB process, and then subsequently annealed for 0.5h at various temperatures ranging from 100 to 350°C. The tensile strength decreased largely with an increasing annealing temperature, especially at temperatures of 150 to 250°C. However, above 250°C it hardly decreased even when the annealing temperature was increased. On the other hand, the total elongation increased greatly above 250°C. The hardness exhibited inhomogeneous distribution in the thickness direction of the specimens annealed at relatively low temperatures, however it had a homogeneous distribution in specimens annealed at high temperatures.

Key words accumulative roll-bonding(ARB), aluminum alloy, annealing, recrystallization, mechanical property.

1. 서 론

결정립 크기를 1 μm 이하로 초미세화시켜 금속재료의 기계적 특성을 향상시키는 강소성가공법 중의 하나인 반복 접침접합압연(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 ARB법의 원리를 생각하면 목적에 따라서는 접침수를 반드시 2층으로만 할

필요가 없으며 또한 동일한 재료를 사용하지 않아도 가능하다. 그러므로 최근에 종래의 ARB법을 응용한 다층 접침 ARB법¹¹⁾, 이종금속 ARB법¹²⁾ 등에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 여기서 이종금속ARB법은 초미세결정립 조직을 가진 층상복합재료의 제조가 가능하며 그로 인해 다양한 특성을 발현시킬 수 있다는 장점이 있다. 그러나 압연시 이종 금속재료간의 변형 특성의 차이로 인하여 건전한 복합재료를 만들기가 어려운 점과 접합성에 있어서도 동종 합금에 비해 불리하다.

본 연구그룹은 지난 연구를 통해 동종 금속이지만 합금종류가 다른 재료, 즉 AA1050과 AA5052의 이종 알루미늄합금에 ARB법을 적용하여 초미세결정립을 가진 층상복합알루미늄합금의 제조가 가능함을 보고한 바 있다.¹³⁾ 그런데 이종 알루미늄합금의 ARB에 의해 제조한 복합 알루미늄합금은 이종의 알루미늄합금이 교대로 층상

[†]Corresponding author
E-mail : shlee@mokpo.ac.kr (S. -H. Lee)

Table 1. Chemical compositions of AA1050 and AA5052 studied (unit: wt.%).

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
AA1050	0.030	0.29	0.02	0.01	0.01	0.01	0.009	0.03	BAL
AA5052	0.21	0.273	0.028	0.069	2.26	0.162	0.028	0.05	BAL

조직을 이루고 있으므로 어닐링 조건에 따라 더욱 다양한 복합조직과 기계적 특성을 발현시킬 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 ARB법에 의해 제조한 초미세결정립의 AA1050/AA5052 층상복합알루미늄합금판재의 어닐링특성을 조사하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서 ARB공정을 위해 사용된 알루미늄합금(출발 재료)은 두께 1 mm, 폭 30 mm, 길이 300 mm의 AA1050의 순알루미늄과 AA5052 (Al-Mg합금)판재이다. 두 알루미늄합금의 화학조성을 Table 1에 나타내었다. 또한 두 합금 모두 냉간압연 후에 400°C에서 0.5h 어닐링되어 재결정조직을 나타내었으며 평균결정립경이 AA1050의 경우 56 μm , AA5052의 경우 34 μm 이었다. ARB는 실온, 무윤활 조건에서 롤의 직경 210 mm의 압연기에 의해 롤의 주속 15.9 m/s로 6c(c: cycle)까지 행하였으며, 절단, 표면처리, 겹침, 접합압연 등의 일련의 공정은 종래의 방법들¹⁻¹⁰⁾과 동일하게 진행하였다. 6c 압연된 AA1050/AA5052 층상복합 알루미늄 합금을 100~350°C의 소정의 온도에서 30분간 가열한 후 공냉하였다.

6c-ARB 가공한 시편과 그 후 어닐링한 복합알루미늄판재에 대하여 광학현미경(Optical Microscopy)에 의한 조직관찰을 실시하였으며, 6c-ARB 시편의 경우에는 EBSD (Electron Back Scattering Diffraction)측정을 통한 미세조직 관찰도 실시하였다. EBSD 측정의 경우, 판재의 폭 중 양부에서 Transverse Direction(TD)면에 평행하게 압연방향으로 시편을 얇게 잘라서, 30vol%HNO₃ + 70vol%CH₃OH 용액속에서 액체온도 -15°C, 전압 20V의 조건에서, twin jet 전해연마에 의해 경면으로 한 다음 EBSD 측정을 실시하였다.

ARB 가공된 재료 및 어닐링한 재료에 대하여 실온에서 인장시험을 실시하였다. 시험편은 KS 5호 시험편의 1/5 크기(평행부 폭 5 mm, 표점간 거리 10 mm)로, 인장축이 압연방향과 일치하도록 방전가공기로 잘라 준비하였다. 인장시험은 Instron형 재료시험기를 사용하여 실온에서 초기변형속도 $8.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 의 조건에서 행하였다. 또한, 전(全)연신율(파단연신율)은 인장시험 전과 후의 표점간 거리의 차이로부터 산출하였다.

ARB 가공된 재료 및 어닐링한 재료에 대하여 경도시험을 실시하였다. 경도시험은 마이크로 비커스 경도계를

Fig. 1. Optical microstructure (a) and EBSD color map (b) of ultrafine grained AA1050/AA5052 complex aluminum alloy fabricated by ARB process using dissimilar aluminum alloys of AA1050 and AA5052.

사용하여 300 g의 하중에서 10초간의 압입시간으로 행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 미세조직

Fig. 1에 6c에 의해 ARB가공된 알루미늄층상복합판재의 광학현미경 조직사진(Fig. 1a)과 EBSD Normal Direction (ND) map (Fig. 1b)을 나타내었다. 6c-ARB 가공재료는 Fig. 1(a)에서와 같이 물결모양의 얇은 선형의 AA1050과 길이방향으로 두께의 편차가 크고 소시지 형상을 한 AA5052 합금이 층상을 이루고 있는 구조를 하고 있다. AA1050의 경우 화살표로 표시한 바와 같이 서로 거리가 가까워져 합체하는 경우도 발생한다. Fig. 1(b)는 Fig. 1(a)의 직사각형으로 표시된 부분에 대하여 EBSD측정에 의해 얻은 Color Map인데, 그림에서와 같이 두 합금 모두 약 1 μm 이하의 초미세 결정립들로 구성되어 있음을 알

Fig. 2. Optical microstructures of AA1050/AA5052 complex aluminum alloys annealed for 0.5h at (a) 100°C, (b) 150°C, (c) 200°C, (d) 250°C and (e) 300°C respectively.

Fig. 3. The variation of hardness distribution in thickness direction (a) and the average hardness of the samples with annealing temperature.

수 있다. 또한 동일재료의 ARB에 의해 얻은 결정립들에 비해 Aspect ratio가 작고 결정립크기 및 형상 차이가 부위에 따라 뚜렷이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 2에 어닐링 온도 증가에 따른 광학현미경 조직사진의 변화를 나타내었다. 그림에서와 같이 100~200°C의 어닐링재료에서는 AA1050 및 AA5052합금 모두 여전히 가공조직(deformation structure)을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나 250°C 어닐링재료의 경우(Fig. 2d), AA5052 영역에서는 여전히 가공조직을 나타내지만, AA1050에서는 재결정이 발생하여 등축정의 재결정조직(recrystallization structure)을 나타내었다. 또한, 300°C 어닐링재료(Fig. 2e)에서는 AA1050 영역 뿐 아니라 AA5052에서도 재결정이 발생하여 거의 전 영역이 등축정의 재결정조직을 나타내었다.

3.2 기계적 성질

Fig. 3에 어닐링 온도 증가에 따른 복합알루미늄합금판재의 두께방향으로의 경도분포(Fig. 3a) 및 평균경도(Fig. 3b)를 나타내었다. Fig. 3(a)에서와 같이 6c-ARB재료(어닐링전 재료)의 경우, AA6061에 해당하는 표면부위는 120Hv의 비교적 큰 경도값을 나타내지만 다른 부위는 약 80Hv의 비교적 균일한 경도값을 나타내었다. 100°C 어닐링재료의 경우도 표면부위에서 100 Hv이상의 비교적 높은 경도값을 나타내고 그 이외의 부위는 어닐링전 재료와 거의 같은 경도값을 나타내었다. 또한 150°C, 200°C 어닐링 재료의 경우도 100°C의 경우와 유사한 경도분포를 나타내었다. 그러나 250°C 어닐링재료의 경우는 부분 재결정의 발생으로 인하여 전체적으로 경도가 크게 감소하였으며, 재결정이 발생하지 않은 부위에서는 여전히 큰 경도값을 나타내었다. 그러나 300°C 어닐링재료의 경우는

완전재결정이 발생하여 전반적으로 낮고 두께방향으로 비교적 균일한 경도분포를 나타내었다. 평균경도값은 Fig. 3(b)에서 나타낸바와 같이 어닐링온도가 증가함에 따라 점진적으로 감소하다가 250°C에서 크게 감소한다. 이것은 앞에서 언급한 바와 같이 AA1050에서 재결정이 발생했기 때문이다.

Fig. 4에 6c-ARB재료 및 어닐링된 복합알루미늄합금의 공칭응력-공칭변형량(Nominal stress-Nominal strain) 곡선의 변화(Fig. 4a) 및 기계적 특성 변화(Fig. 4b)를 나타내었다. ARB재료는 Fig. 4(a)에서와 같이 높은 강도와 낮은 연신율의 ARB가공재의 전형적인 공칭응력-공칭변형량 곡선을 나타낸다. 이와 같은 s-s 곡선 형태는 100°C 어닐링 후에도 거의 동일하게 나타난다. 또한 150°C, 200°C 어닐링재의 경우도 강도만 감소하였을 뿐 여전히 낮은 파단 연신율(total elongation)을 나타낸다. 그러나 250°C 이상의 어닐링재의 경우는 강도가 크게 감소하고 파단 연신율이 크게 증가함을 알 수 있다. 특히, 300°C 이상의 어닐링재의 경우 파단 연신율이 70% 정도의 거대 연신율을 나타내었다. 일반적으로 AA1050-O재료의 연신율이 약 40%, AA5052-O재료의 연신율이 약 30%정도인 점을 감안하면 실로 거대 연신율이 아닐 수 없다. 가공경화지수인 n 값 또한 300°C 어닐링 재료에서 0.34(5052-O

재의 경우 0.13)의 큰 수치를 나타내었다. 이것은 인장시 소성불안정성에 의해 네킹(necking)이 발생하기까지 상당히 큰 균일연신을 한다는 것을 의미한다. 일반적으로 인장시험시 소성불안정성의 조건, 즉 네킹의 생성 및 전파의 조건은 다음 식¹⁴⁾에 의해 표현된다.

$$\sigma \geq \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (1)$$

여기서 σ 는 유동응력, ε 는 진변형량, $d\sigma/d\varepsilon$ 는 가공경화율이다. 일반적으로 식(1)과 같은 조건을 만족하게 되면 네킹이 발생하게 되고 단면적 감소율이 증가하게 되어 그 결과 가공경화를 보다 유동응력 σ 이 더욱 증가하여 네킹 전파를 가속화시키게 되고 결국은 파단에 이르게 된다. 그런데 어닐링된 복합알루미늄합금의 경우 가공경화율이 큰 AA5052부분에서 (1)식과 같은 소성불안정성의 조건이 만족되기 직전에 AA1050에서 변형(연신)이 일어나 네킹의 생성 및 전파를 차단하게 되어 더 큰 균일연신을 초래하였다고 판단된다. 그러나 이와 같은 거대 연신의 상세한 발생 메카니즘은 추가적인 연구가 요구된다 할 수 있다.

Fig. 4(b)는 어닐링에 따른 인장강도와 연신율의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 인장강도는 150°C까지 온도가 증가함에 따라 점진적으로 감소하지만 여전히 200 MPa이상의 높은 강도값을 유지한다. 그러나 150~250°C 영역에서 큰 강도 감소를 나타내고 250°C 이상에서는 다시 점진적으로 감소하는 전형적인 연화 곡선을 나타낸다. 연신율은 200°C까지는 온도가 증가함에도 불구하고 오히려 다소 감소하다가 200°C 이상에서 크게 증가하는 경향을 나타낸다. 이와 같은 연화곡선은 동일한 재료의 ARB재의 연화곡선과 매우 유사하다.

4. 결 론

ARB법에 의해 제조한 초미세 결정립을 가진 AA1050/AA5052 층상복합알루미늄합금의 어닐링 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 초미세립 복합알루미늄합금은 200°C 까지 AA1050과 AA5052 모두 여전히 가공조직을 나타내었지만, 250°C에서는 AA1050에서만 재결정이 발생하였고, 300°C 이상에서는 AA1050과 AA5052 모두에서 재결정이 발생하여 시편 전체가 등축정의 재결정조직을 나타내었다.

2) 250°C 이하의 어닐링 재료는 두께방향으로 불균일한 경도분포를 나타내지만 300°C 이상의 고온에서의 어닐링 재료는 비교적 균일한 경도 분포를 나타내었다.

3) 복합알루미늄합금의 인장강도는 어닐링온도가 증가함에 따라 감소하였으며, 특히 150~250°C 온도영역에서

Fig. 4. The variation of nominal stress-nominal strain curves (a) and the mechanical properties (b) of the samples with annealing temperature.

크게 감소하였고, 파단연신율은 250°C 어닐링 후에 크게 증가하였다. 특히, 300°C 어닐링재료의 경우는 70%이상의 거대한 파단연신율을 나타내었다.

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, *Scripta 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, *Scripta Mater.*, **46**, 281 (2002).
5. S. H. Lee, Y. Saito, T. Sakai and H. Utsunomiya, *Mater. Sci. Eng.*, **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. Mat. Mater.*, **49**(11), 893 (2011) (in Korean).
14. N. Tsuji, Y. Ito, Y. Saito and Y. Minamino, *Scripta Mater.*, **47**, 893 (2002).