전자기 듀오캐스팅으로 제조한 Al-Mn/Al-Si 하이브리드 알루미늄합금의 미세조직과 인장 특성

박성진 · Tingju Li* · 김종호** · 박준표** · 장시영†

한국항공대학교 항공재료공학과, *중국대련이공대, **포항산업과학연구원

Microstructure and Tensile Properties of Al-Mn/Al-Si Hybrid Aluminum Alloy Prepared by Electromagnetic Duo-Casting

Sung-Jin Park, Tingju Li*, Chong-Ho Kim**, Jun-Pyo Park** and Si Young Chang†

Dept. of Materials Engineering, Korea Aerospace University, Gyeonggi-do 412-791, Korea

*School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116089, China

**New Materials Research Department, RIST, Pohang 790-600, Korea

(2012년 1월 25일 접수 : 2012년 2월 10일 최종수정 : 2012년 2월 13일 채택)

Abstract The microstructure and tensile properties of Al-Mn/Al-Si hybrid aluminum alloys prepared by electromagnetic duo-casting were investigated. Only the Al-Mn alloy showed the typical cast microstructure of columnar and equiaxed crystals. The primary dendrites and eutectic structure were clearly observed in the Al-Si alloy. There existed a macro-interface of Al-Mn/Al-Si alloys in the hybrid aluminum alloys. The macro-interface was well bonded, and the growth of primary dendrites in Al-Si alloy occurred from the macro-interface. The Al-Mn/Al-Si hybrid aluminum alloys with a well-bonded macro-interface showed excellent tensile strength and 0.2% proof stress, both of which are comparable to those values for binary Al-Mn alloy, indicating that the strength is preferentially dominated by the deformation of the Al-Mn alloy side. However, the degree of elongation was between that of binary Al-Mn and Al-Si alloys. The Al-Mn/Al-Si hybrid aluminum alloys were fractured on the Al-Mn alloy side. This was considered to have resulted from the limited deformation in the Al-Mn alloy side, which led to relatively low elongation compared to the binary Al-Mn alloy.

Key words electromagnetic duo-casting, Al-Mn/Al-Si hybrid aluminum alloy, macro-interface, tensile properties.

1. 서 론

최근 연료 에너지원의 고갈과 원료 재료 자원의 부족에 따른 경제적 부담이 전 산업 분야에 걸쳐 심각한 문제로 제기되게 되었다. 특히 화석 연료인 석유자원의 가치는 하루가 달리 치솟고 있으며, 매장 에너지원의 확보와 재생 자원 개발 연구는 주요 국가적 과제가 되었다. 더욱이 환경오염과 지구 온난화 문제 또한 심각한 문제로 제기되어, 선진국을 중심으로 인간과 자연 및 환경 문제에 관한 오염물질의 총량 규제가 강화되어, 재료의 고효율화가 주요 연구의 대상으로 부각하게 되었다. 이에 따라 사용 소재의 극소화와 자원 활용의 극대화를 위하여, 부품 소재의 단소화와 고효율화를 위한 부품 소재 연구와 제조 공정 기술 개발 연구가 선진 각국을 중심

으로 활발히 진행되고 있다.

부품소재의 단소화 및 고효율화를 위한 효과적인 방법으로 하이브리드 소재의 개발은 아주 흥미롭고 중요하다. 현재까지 대부분의 부품은 사용용도에 따라 한 종류의 소재로 제조된 상태로 사용되어 왔고, 주조 방법으로 제조 되어 왔다. 그러나, 용도에 따라 하나의 부품에 다른 성질을 요구하는 부품에의 적용을 위하여 이종 소재가 요구되기도 한다. 지금까지는 대부분 roll bonding,¹⁾ diffusion bonding,²⁾ explosive welding,³⁾ extrusion cladding,⁴⁾ spray deposition technique⁵⁾ 등을 이용한 소재간의 접합 또는 용접으로 이종 소재 부품을 제조하여 왔으나, 주조의 단계에서부터 고상 액상 계면을 조절하여 이종 소재를 만들 수 있다면 매우 그 용도는 물론 소재 발전에도 혁신적인 일이 될 것이다. 그러나, 이러한 하이브리드 소재는 제조 공정시에 이종소재간의 경계가 존재하게 된다. 이 경계를 마크로 계면(macro-interface)이라 하며, 물리적으로는 이종소재간의 경계를 의미한다. 이

†Corresponding author

E-Mail : sychang@kau.ac.kr (S. Y. Chang)

러한 마크로 계면은 물리적으로나 조직적으로 매우 민감한 영역으로서, 부분적 또는 선택적으로 사용시에 하이브리드 소재의 기계적 성질에 큰 영향을 미치게 된다.

한편, 최근에 전자기 연속주조를 응용한 전자기 듀오캐스팅 기술⁶⁾은 하이브리드 소재를 주조하는 기술로서 근본적으로 액상/액상 또는 고상/액상의 계면을 자유롭게 조절하여 계면영역의 넓이와 구배를 자유롭게 제어함으로써 적용 분야에 따른 맞춤형 소재 제조가 가능한 주조 기술이다.

본 연구에서는, 내부식성은 좋으나 강도가 낮은 3003 Al-Mn합금과 높은 강도와 낮은 내부식성을 갖는 4004 Al-Si합금으로 이루어진 Al-Mn/Al-Si 하이브리드 소재를 전자기 듀오캐스팅으로 제조한 후 미세조직, 인장특성 및 파괴 변형거동을 조사·분석하였다.

2. 실험 방법

상용 알루미늄 3003 Al-Mn 합금(1.0~1.5wt%Mn, 0.05~0.2wt%Cu) 및 4004 Al-Si 합금(9.0~10.5wt%Si, 1.0~2.0 wt%Mg)을 사용하여 전자기 연속주조 시스템을 이용한 전자기 듀오캐스팅으로 하이브리드 알루미늄합금을 제조하였다. 각각 993 K와 943 K로 가열, 유지한 3003 Al-Mn

Fig. 1. Schematic illustration of the equipment for fabrication of hybrid aluminum alloys.

Fig. 3. Shape and size of tensile specimen used in this study.

Fig. 2. Definition of distance between primary α phases in this study ; D_1 : distance between centers of primary α phases, D_2 : distance between edges of primary α phases.

합금 및 4004 Al-Si 합금 용탕을 금형에 주입한 후, 전류 120A 및 자속밀도 0.25T의 조건에서 130 mm/s의 주조속도로 주조하여 442 mm × 128 mm × 2000 mm의 슬래브를 얻었다. Fig. 1에 본 실험에서 하이브리드 알루미늄합금을 제조하기 위해 사용한 전자기 듀오캐스팅 장치의 모식도를 나타내었다.⁶⁾

광학현미경(OM)과 전계 방사 주사전자현미경(FE-SEM)을 이용하여 얻어진 Al-Mn/Al-Si하이브리드 알루미늄합금의 미세조직을 관찰하였다. 미세조직 관찰의 경우 각 시편부를 연마한 후, 2% NaOH 용액에 1분 30초간 에칭한 후 OM을 이용하여 실시하였다. 한편, 계면 부근의 조성 및 공정 화합물은 에너지분산 분광기(EDS)를 이용하여 분석하였다. 미세조직의 특성 평가를 위하여 Fig. 2에서 정의된 것과 같이 조성(수지상점)간 거리로서 조성 중심 사이의 거리(D_1)와 조성 가장자리 사이의 거리(D_2)를 측정하여 평가하였다.

인장시편은 Al-Mn합금부, Al-Si합금부, Al-Si-/Al-Mn하이브리드 알루미늄 합금부에서 Wire cutting기를 이용

하여 표점거리(L)가 15 mm, 평행부 폭이 7.5 mm, 두께 1.5 mm가 되도록 가공하였다. Fig. 3에 인장시편의 형상, 크기 및 실제 가공한 형상을 나타내었다. Al-Si/Al-Mn 하이브리드 알루미늄 합금 인장시편은 계면이 표점거리 중간에 오도록 가공하였다. 인장시험에는 Shimadze사의 만능시험기를 사용하였으며, $1 \times 10^{-2}/\text{sec}$ 의 변형속도로 인장시험을 실시하였다. 또한, 인장시험 후, 하이브리드 알루미늄합금의 파괴 거동을 조사하기 위하여 파면 근방의 미세조직 및 파면을 광학현미경과 FE-SEM을 이용하여 관찰하였다. 특히 계면을 포함한 하이브리드 알루미늄합금의 파괴거동을 조사하기 위하여 파단한 시료의 양쪽 파면을 모두 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 미세조직 특성

전자기 듀오캐스팅한 Al-Mn/Al-Si 하이브리드 알루미늄합금의 마크로 사진을 Fig. 4에 나타낸다. 왼쪽은 Al-Mn합금 영역이고, 오른쪽은 Al-Si합금 영역이며, B로 표시한 영역이 두 합금의 계면을 포함한 영역이다. 같은 예

Fig. 4. Macrostructure of Al-Mn/Al-Si hybrid aluminum alloys.

칭조건에서 Al-Si 합금부에서는 주상정 및 등축정의 마크로 조직이 보이지 않으나, Al-Mn 합금부에서는 금형 및 계면으로부터 응고가 시작되어 생긴 주상정영역과 내부의 등축정으로 이루어진 전형적인 주조 마크로 조직을 볼 수 있다. 다만, 미세 등축정의 영역이 Al-Mn합금부의 중앙이 아니라 계면쪽에 치우쳐져 있음을 알 수 있다. 이것은 왼쪽의 금형부에 비해 계면부는 Al-Si 합금 용탕과의 접합시 고온으로부터 응고가 시작되기 때문에 Al-Mn합금부의 오른쪽영역이 상대적으로 높은 온도상태로 지속되어 최종 응고부가 계면쪽으로 이동하였다고 생각된다. Fig. 4에서 화살표는 응고방향을 나타내며, A, B, C로 표시한 부분의 미세조직을 광학현미경 및 SEM으로 관찰한 사진을 Fig. 5에 보였다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 Al-Mn합금부인 A영역은 수지상 조직과 공정조직($\alpha + \text{Al}_6\text{Mn}$)으로 이루어졌다. 일반적으로 3003 Al-Mn합금에서는 Mn이 1~1.5wt% 정도 소량 함유 되어 있어 초정의 부피 체적율이 큰 것을 알 수 있다. 한편, 공정 조성 정도의 Si를 함유하고 있는 Al-Si 합금부(C)는 수지상의 초정과 공정Si를 포함한 공정조직이 관찰된다. 한편, 두 합금의 경계부인 B사진을 보면, 계면에서 두 합금이 잘 접합되어 있는 것을 알 수 있으며 잘 접합된 계면으로부터 응고가 시작되어 수지상정이 성장하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 4에서 표시된 A, B, C 부분을 EDS 분석한 결과이다. Al-Mn합금영역에서 수지상의 초정(Fig. 6a)의 오른쪽 Fig)에서는 Al만이 검출되었고, 수지상간의 화합물(Fig. 6a)의 왼쪽 Fig)에서 Mn이 검출된 결과로부터 위에서 언급한 바와 같이 Al_6Mn 공정 화합물로 생각된다. 한편, Al-Si합금 영역의 공정조직(Fig. 6c)의 원

Fig. 5. Microstructure of Al-Mn/Al-Si hybrid aluminum alloys ; (a) Al-Mn, (b) Al-Mn/Al-Si and (c) Al-Si.

Fig. 6. EDS analyses of Al-Mn/Al-Si hybrid aluminum alloys ; (a) A: Al-Mn, (b) B: Al-Mn/Al-Si and (c) C: Al-Si.

Fig. 7. (a) Distance between primary α phases, D_1 , D_2 and (b) size of primary α phases in hybrid aluminum alloys.

쪽 Fig)에서는 공정 Al과 공정 Si이 확인되었으며 초정 (Fig. 6c)의 오른쪽 Fig)에서는 Al과 미량의 Si이 검출되었다. 한편, 잘 접합된 계면 부근에서는 두 합금에서의 공정Si 및 공정Al₆Mn화합물로 인하여 Si 및 Mn이 검출되었다.

Fig. 5의 미세조직으로부터 측정된 초정 중심(D_1)과 가장자리(D_2) 사이의 거리로 나타낸 초정간 거리 및 초정 크기를 Fig. 7(a)와 (b)에 도시하였다. Al-Si 합금영역의 경우 공정 조직의 분율이 높으나 초정으로만 평가하였

고, 초정간 거리는 초정의 2차 수지상을 기준으로 측정하였다. Al-Mn합금의 초정간 거리는 Al-Si합금보다 크고, 특히 계면 부근의 Al-Mn합금 및 Al-Si합금의 초정간 거리는 계면에서 먼 부분의 거리보다 약간 컸다. 초정 크기 또한 수지상간 거리와 같은 경향을 나타냈다. 이와 같은 결과는 두 용탕의 접합에 의해 응고시 계면 부근의 온도가, 상대적으로 온도가 낮은 금형으로부터 응고되는 내부보다 높기 때문이라고 생각된다.

Fig. 8. Engineering stress-strain curves of Al-Mn, Al-Si and Al-Mn/Al-Si hybrid aluminum alloys.

3.2 인장 거동

Fig. 8에 Al-Mn합금, Al-Si합금 및 Al-Mn/Al-Si 하이브리드 알루미늄합금의 인장 응력-변형곡선을 나타내었다. 큰 가공경화 후 작은 변형에서 급격히 파단하는 Al-Si합금과 달리, 하이브리드 알루미늄합금의 응력-변형곡선은 Al-Mn합금의 곡선과 유사하나 약간 작은 변형량을 보인다. Fig. 8로부터 구한 Al-Mn합금, Al-Si합금 및 Al-Mn/Al-Si 하이브리드 알루미늄합금의 인장강도, 0.2%내력 및 연신율을 Fig. 9에 나타내었다.

Al-Mn 합금의 인장강도와 0.2%내력은 각각 약 100, 50MPa정도였으나, Al-Si합금은 250MPa정도의 높은 인장강도와 130MPa정도의 0.2%내력을 보였다. 또한 연신율을 보면 Al-Mn합금은 25%이상, Al-Si합금은 8%정도를 나타내었다. 한편 Al-Mn/Al-Si 하이브리드 알루미늄합금은 Al-Mn합금과 거의 유사한 인장강도와 약간 높은 0.2%내력을 나타내었으나, Al-Mn합금보다는 낮고 Al-Si합금보다는 높은 약 17%정도의 연신율을 보였다.

Fig. 10은 인장시험후의 Al-Mn합금 및 Al-Si합금의 파

Fig. 10. (a) Fracture surface and (b) microstructures in the vicinity of fracture surface in Al-Mn and Al-Si alloys after tensile test.

괴 특성을 조사하기 위해 관찰한 파면 조직(a) 및 파면 근방의 변형 조직(b) 사진이다. Al-Mn합금은 전형적인 덩플 파면 조직을 나타내어 연성 파괴에 의해 큰 연신율이 얻어졌음을 알 수 있으나, Al-Si합금의 경우는 공정조직을 통한 파괴가 일어난 brittle한 파면형상을 나타낸다. 파면 근방의 변형 조직을 보면 25%이상의 연신율을 나타낸 Al-Mn합금은 변형 중의 단면적 감소에 의한 변형 조직을 나타낸다. 그러나, Al-Si합금의 경우는, Al-Mn합금과 비교하여 초정 α 상이 크게 변형되지 않은 조직을 보이고, 크랙이 공정조직을 통하여 전파하여 결과적으로 낮은 연신율을 보였다고 생각된다.

Fig. 11은 Al-Mn/Al-Si 하이브리드 알루미늄합금의 파면 조직(a) 및 파면 근방의 변형 조직(b)을 나타낸다. 인장시험 후의 시편 형상으로부터 Al-Mn/Al-Si하이브리드 알루미늄합금의 파괴는 Al-Mn합금 영역에서 일어난 것을 알 수 있다. Al-Mn합금과 유사한 인장거동을 보이고, Al-Mn합금영역에서 파괴가 일어난 하이브리드 알루미늄합금의

Fig. 9. Tensile properties of Al-Mn/Al-Si hybrid aluminum alloys compared to Al-Mn and Al-Si alloys ; a) Tensile strength, 0.2% proof stress and b) elongation.

Fig. 11. (a) Fracture surface and (b) microstructures in the vicinity of fracture surface in Al-Mn/Al-Si hybrid aluminum alloys after tensile test.

경우는 Al-Mn합금의 파면과 같이 양 측면 모두 같은 형상의 딥플조직을 보인다. 또한, 파단면 근방 조직 사진을 보면 인장 변형된 Al-Mn합금에서와 같은 조직을 나타낸다. 이 결과로부터 전자기 듀오캐스팅으로 제조한 Al-Mn/Al-Si하이브리드 알루미늄합금에서의 계면은 인장변형에 견딜 정도로 잘 접합되어 있음을 알 수 있다. 이와 같은 Al-Mn/Al-Si하이브리드 알루미늄합금의 인장특성 및 파괴 변형 특성은 최근에 보고된 금속과 금속기 복합재료로 이루어진 계면을 갖는 이종재료⁷⁻⁹⁾와 유사하다. 즉, 잘 접합된 계면을 갖는 이종재료의 인장특성 및 파괴는 상대적으로 강도가 약한 재료의 한정된 영역에서의 우선적인 변형에 의해 영향을 받는다. 따라서, Al-Mn/Al-Si 하이브리드 알루미늄합금의 경우도 Al-Mn합금과 거의 같은 인장강도, 0.2%내력을 보이거나, 한정된 변형부의 영향으로 인하여 Al-Mn합금 시편보다는 낮은 연신율을 보인다고 생각된다.

4. 결 론

Al-Mn합금과Al-Si합금으로 이루어진 하이브리드 알루미늄합금을 전자기 듀오캐스팅으로 제조한 후, 미세조직과 인장특성을 조사하였다. Al-Mn/Al-Si하이브리드 알루미늄합금은 주상정 및 등축정 조직의 Al-Mn 합금영역,

수지상 α 상과 미세한 공정상의 조직을 보이는 Al-Si 합금영역 및 잘 결합된 두 합금의 계면을 포함한다. 계면 부근의 Al-Mn합금 및 Al-Si합금의 초정간 거리와 초정 크기는 계면에서 먼 부분보다 약간 컸다. Al-Mn/Al-Si 하이브리드 알루미늄합금은 Al-Mn합금과 거의 유사한 인장강도와 0.2%항복강도를 나타내었으며, 연신율은 Al-Mn 합금보다는 낮고 Al-Si합금 보다는 높았다. 또한, 파면 및 파면 근방의 변형 조직 관찰 결과, Al-Mn/Al-Si 하이브리드 알루미늄합금은 계면 부근의 제한된Al-Mn합금영역에서의 국부적 변형을 통하여 파괴가 발생하였다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 소재원천기술개발사업의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. S. H. Lee and G. J. Lee, Kor. J. Mater. Res., **21**(12), 655 (2011) (in Korean).
2. O. Yilmaz and H. Celik, J. Mater. Process. Tech., **141**, 67 (2003).
3. R. Kacar, and M. Acarer, J. Mater. Process. Tech., **152**, 91 (2004).
4. P. Kazanowshi, M. E. Epler and W. Z. Misiolek, Mater. Sci. Eng., **369**, 170 (2004).
5. F. Dingfa, N. Honglong and C. Zenhua, Ordnance Mater. Sci. Eng., **24**, 65 (2001) (in Chinese).
6. S. Jianbo, L. Jun, Y. Zhiming, C. Zhiquiang and L. Tingju, in Proceedings of the 6th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials (Dresden, Germany, October 2009), p595.
7. S. Y. Chang, S. J. Cho, S. K. Hong and D. H. Shin, J. Alloy. Comp., **316**, 275 (2001).
8. S. Y. Chang, Y. K. Kim, S. K. Hong and D. H. Shin, Mater. Trans., **42**, 1035 (2001).
9. S. Y. Chang, H. G. Cho and Y. D. Kim, J. Kor. Powd. Metal. Inst., **14**, 354 (2007).