 논문

듀오캐스트 Al-Mg-Si/Al 하이브리드 합금의 미세조직과 기계적 변형 특성

한지민 · 김중호 * · 박준표 * · 장시영 †

한국항공대학교 항공재료공학과, *포항산업과학연구원

Microstructure and Mechanical Behavior of Al-Mg-Si/Al Hybrid Alloy by Duo-casting

Ji-Min Han, Chong-Ho Kim*, Jun-Pyo Park* and Si Young Chang†

Department of Materials Engineering, Korea Aerospace University, Goyang 412-791, Korea

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

Abstract

Al-Mg-Si/Al hybrid alloy was prepared by Duo-casting and the mechanical behavior was evaluated based on their microstructure and mechanical properties. The hybrid aluminum alloy included the Al-Mg-Si alloy with fine eutectic structure, pure Al with the columnar and equiaxed crystals, and the macro-interface existing between Al-Mg-Si alloy and pure Al. The growth of columnar grains in pure Al occurred from the macro-interface. The tensile strength, 0.2% proof stress and bending strength of the hybrid aluminum alloy were almost similar to those of pure Al, and the elongation was much higher than the Al-Mg-Si alloy. The fracture of the hybrid alloy took place in pure Al side, indicating that the macro-interface was well bonded and the mechanical behavior strongly depends on the limited deformation in pure Al side.

Key words: Duo-casting, Al-Mg-Si/Al Hybrid Alloy, Macro-interface, Tensile Properties, Bending strength

1. 서 론

최근 에너지 문제 및 환경오염과 지구 온난화가 심각한 문제로 제기되어, 선진국을 중심으로 인간과 자연 및 환경 문제에 관한 오염물질의 총량 규제가 강화되고 있다. 이에 따라 재료분야에서는 사용 소재의 극소화와 자원 활용의 극대화를 위하여, 부품 소재의 단소화와 고효율화를 위한 부품 소재 연구와 제조 공정 기술 개발 연구가 선진 각국을 중심으로 활발히 진행되고 있다.

현재까지 대부분의 부품은 사용용도에 따라 한 종류의 소재로 제조된 상태로 사용되어 왔다. 그러나, 용도에 따라 하나의 부품에 다른 성질을 요구하는 부품에의 적용을 위하여 이중 소재가 요구되기도 한다. 지금까지는 대부분 roll bonding [1],

diffusion bonding [2], explosive welding [3], extrusion cladding [4], spray deposition technique [5] 등을 이용한 소재간의 접합 또는 용접으로 이중 소재 부품을 제조하여 왔으나, 주조의 단계에서부터 고상 액상 계면을 조절하여 이중 소재가 결합된 하이브리드 소재를 만들 수 있다면 그 용도는 물론 소재 발전에도 혁신적인 일이 될 것이다. 그러나, 이러한 하이브리드 소재는 제조 공정시에 이중 소재간의 경계가 존재하게 된다. 이러한 계면은 물리적으로나 조직적으로 매우 민감한 영역으로서, 부분적 또는 선택적으로 사용시에 하이브리드 소재의 기계적 성질에 큰 영향을 미치게 된다.

한편, 최근에 연속주조를 응용한 전자기 듀오캐스팅 기술은 하이브리드 소재를 주조하는 기술로서 근본적으로 액상/액상 또는 고상/액상의 계면을 자유롭게 조절하여 계면영역의 넓이와

Received: September 17, 2012 ; Accepted: November 14, 2012

†Corresponding author: Si Young Chang

Tel: +82-2-300-0168, Fax: +82-2-3158-3770

E-mail: sychang@kau.ac.kr

Journal of Korea Foundry Society

2012. Vol. 32 No. 6, pp. 269~275

<http://dx.doi.org/10.7777/jkfs.2012.32.6.269>

ISSN 1598-706X

© The Korea Foundry Society. 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.

구배를 자유롭게 제어함으로써 적용 분야에 따른 맞춤형 소재 제조가 가능한 주조기술이다[6].

따라서, 본 연구에서는 경량, 고효율소재로서 크게 주목을 받는 알루미늄합금(Al-Mg-Si) 및 순 Al을 이용하여 하이브리드 소재를 듀오캐스팅으로 제조한 후 미세조직과 기계적 특성을 조사하였다. 또한, 인장 및 굽힘 시험 후의 변형 조직으로부터 Al-Mg-Si/Al 하이브리드 합금 소재의 파괴 변형거동을 조사·분석하였다.

2. 실험 방법

상용 알루미늄 6061 합금(0.8~1.2 wt%Mg, 0.4~0.8 wt%Si) 및 순Al (99.5%)을 사용하여 연속주조 시스템을 이용한 듀오캐스팅으로 Al-Mg-Si/Al 하이브리드 합금을 제조하였다. 합금 제조를 위한 용해 및 주조는 1013 K로 가열, 유지한 순Al 용탕을 먼저 금형에 주입하기 시작한 다음에 1023 K로 가열한 Al-Mg-Si 합금 용탕을 주입한 후, 60 mm/min의 주조속도로 주조하였다. Fig. 1에 본 실험에서 사용한 듀오캐스팅 장치의 모식도를 나타내었다.

광학현미경(OM)과 전계방사주사전자현미경(FE-SEM)을 이용하여 제조한 하이브리드 알루미늄 합금의 미세조직을 관찰하였다. 미세조직 관찰의 경우 제조한 하이브리드 알루미늄 합금의 중앙부에서 채취한 각 시편부를 연마한 후, 2% NaOH 용액에 1분 30초간 에칭하여 관찰하였으며, 계면 근방에서의 성분 분석은 에너지분산 분광기(EDS)를 이용하여 실시하였다. 미세조직의 평가를 위하여 결정립의 형상인자를 사용하였다. 형상인자(F)는 $F = 4\pi A/L^2$ 로 정의되며, A 는 결정립의 면적, L 은 결정립의 원주이다.

인장 및 굽힘시험편은 Al-Mg-Si 합금부, 순Al 합금부 및 계면이 시편의 중앙에 위치한 Al-Mg-Si/Al 하이브리드 합금부에서 방전가공을 이용하여 제조하였으며, 시험편 채취부는 Fig. 2에 나타내었다. 인장시험편은 표점거리 15 mm, 평행부 폭

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

Fig. 2. The appearances of samples in the obtained Al-Mg-Si/Al hybrid alloy.

7.5 mm, 두께 1.5 mm인 판상형으로 제조하였고, 굽힘시험편은 길이 50 mm, 너비 10 mm, 두께 5 mm가 되도록 가공하였다. 인장 및 굽힘시험은 5×10^{-2} /sec의 변형속도로 실시하였으며, 인장 및 굽힘시험 후, 하이브리드 알루미늄합금의 파괴 거동을 조사하기 위하여 변형조직 및 파면을 광학현미경과 FE-SEM을 이용하여 관찰하였다. 그리고 계면을 포함한 하이브리드 알루미늄합금의 파괴거동을 조사하기 위하여 파단한 시료의 양쪽 파면을 모두 관찰하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 미세조직 특성

듀오캐스팅한 Al-Mg-Si/Al 하이브리드 합금의 미세조직 관찰 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)에서 A영역은 Al-Mg-Si 합금부이고, C영역은 순Al영역이며, B로 표시한 영역이 두 합금의 계면을 포함한 영역이다. 순 Al영역에서는 Al-Mg-Si 합금부와 순 Al의 계면으로부터 응고가 시작되어 생긴 주상정 영역과 등축정으로 이루어진 매크로 조직을 나타내고, 이것은 주조시에 Al-Mg-Si 합금보다 응고온도가 높은 순 Al영역에서의 온도구배가 낮아 액상/액상계면에서부터 순 Al 방향으로 열이 방출됨에 따라 응고가 진행되기 때문이라고 생각된다. Fig. 3(a)의 A, B, C로 표시한 부분의 확대 미세조직(Fig. 3(b))을 보면 Al-Mg-Si 합금부인 A영역은 미세한 초정과 공정조직을 보이고 있고, 순 Al영역(C)은 Fig. 3(a)에서와 같이 큰 결정립의 미세조직을 나타낸다. 한편, 두 합금의 경계부인 B에서는 계면에서 두 합금의 접합이 잘 이루어진 것으로 판단되며, 계면으로부터 응고가 시작되어 성장하는 수지상정(왼쪽, Al-Mg-Si 합금) 및 조대 결정립(오른 쪽, 순Al) 조직을 관찰할 수 있었다. Fig. 4는 Fig. 3(b)로부터 얻어진 결정립 크기와 형상 인자를 나타낸다. 순Al에서는 계면부근의 결정립이 내부의 결정립보다 크고 작은 형상 인자를 나타내었다. 그러나 Al-Mg-Si 합금의 경우는 계면 부근 및 내부영역에서 결정립 크기는 약 $50 \mu\text{m}$ 정도로 거의 일정하였고, 형상의 변화도 거의 없었다. 상대적으로 낮은 주조온도와 높은 응고온도의 순 Al은 Fig. 3(a)에서 볼 수 있듯이 우선적으로 계면에서 응고가 시작하여 내부 쪽으로 결정이 성장하지만, Al-Mg-Si 합금은 높은

Fig. 3. (a) Macrostructure and (b) microstructures of Al-Mg-Si/Al hybrid aluminum alloy ; A: Al-Mg-Si, B: Al-Mg-Si/Al, C: Pure Al.

Fig. 4. Grain size and shape factor of Al-Mg-Si alloy, pure Al and Al-Mg-Si/Al hybrid aluminum alloy.

주조온도, 낮은 응고온도와 높은 온도의 계면으로 인하여 오랜 시간 동안 액상선보다 높은 온도로 유지 되기 때문이라고 생각된다.

Fig. 5는 Fig. 3(b)의 B 영역을 EDS 분석한 결과이다. Al-Mg-Si 합금 성분인 Mg과 Si, 불순물로 함유된 Cu는 Al-Mg-

Si 합금뿐만 아니라, 계면 및 순 Al영역에서도 검출되었다. 이 결과로부터 Al-Mg-Si 합금과 순 Al의 응고시에 계면을 통한 확산이 일어났음을 알 수 있고, 그 결과 하이브리드 알루미늄 합금의 계면은 잘 접합되었음을 알 수 있다.

3.2 기계적 특성

Fig. 6에 Al-Mg-Si 합금, 순 Al 및 하이브리드 알루미늄합금의 인장 응력-변형곡선을 나타내었다. 큰 가공경화 후 작은 변형에서 급격히 파단하는 Al-Mg-Si 합금과 달리, 하이브리드 알루미늄합금의 응력-변형곡선은 순 Al의 곡선과 유사하나 약간 작은 변형량을 보인다. Fig. 6으로부터 구한 Al-Mg-Si 합금, 순 Al 및 하이브리드 알루미늄합금의 인장강도, 항복강도 및 연신률을 Fig. 7에 나타내었다.

순 Al의 인장강도와 항복강도는 각각 약 60, 35 MPa정도였으나, Al-Mg-Si 합금은 140 MPa정도의 인장강도와 95 MPa정도의 항복강도를 나타내었다. 그리고 각 합금의 연신률은 순 Al은 30%이상, Al-Mg-Si 합금은 약 5%정도를 나타내었다. 하이브리드 알루미늄 합금은 순 Al과 거의 유사한 인장강도와 약간 높은 항복강도를 나타내었으나, 순 Al보다는 낮고 Al-

Fig. 5. EDS analysis of as duo-casted Al-Mg-Si/Al hybrid alloy.

Fig. 6. Engineering stress-strain curves of Al-Mg-Si alloy, pure Al and Al-Mg-Si/Al hybrid alloy.

Mg-Si 합금보다는 높은 20%이상의 연신률을 나타냈다.

Fig. 8은 Al-Mg-Si 합금, 순 Al 및 하이브리드 알루미늄 합금의 굽힘시험 결과를 나타낸다. Al-Mg-Si 합금의 굽힘강도가 가장 높았으며, 하이브리드 알루미늄 합금의 굽힘 강도는 순 Al과 거의 같았으나, Al-Mg-Si 합금에 비하여 매우 낮아 인장강도와 유사한 특성을 나타내었다. 이것은 Fig. 11에서와 같이 하이브리드 알루미늄 합금의 굽힘 변형이 순 Al의 변형에 의존하기 때문이라고 생각된다.

3.3 파괴 및 변형 특성

Fig. 9는 인장시험후의 Al-Mg-Si 합금 및 순 Al의 파괴 및 변형 특성을 조사하기 위해 관찰한 파면 조직(a) 및 파면 근방의 변형 조직(b) 사진이다. 순 Al은 전형적인 덩플 파면 조직을 나타내어 연성 파괴에 의해 큰 연신률이 얻어졌음을 알 수 있으나, Al-Mg-Si 합금의 경우는 취성적인 파면형상을 나타낸다. 그리고 파면 근방의 변형 조직에서는 30%이상의 연신률을 나타낸 순 Al은 인장 시험 중의 단면적 감소에 의한 변형 조직을 나타낸다. 그러나, Al-Mg-Si 합금의 경우는, 초정 α 상이

Fig. 8. Bending strength of Al-Mg-Si/Al hybrid alloy compared to Al-Mg-Si alloy and pure Al.

크게 변형되지 않은 조직을 나타내고, 크랙이 공정조직을 통하여 전파하여 결과적으로 낮은 연신률을 보였다고 생각된다.

Fig. 10은 하이브리드 알루미늄 합금의 파면 조직(a) 및 파면 근방의 변형 조직(b)을 나타낸다. 인장시험 후의 시편 형상으로부터 계면을 갖는 하이브리드 알루미늄합금의 파괴는 순 Al영역에서 일어난 것을 알 수 있다. 순 Al과 유사한 인장특성을 보이고, 순 Al영역에서 파괴가 일어난 하이브리드 알루미늄합금의 경우는 순 Al의 파면과 같이 양 측면 모두 같은 형상의 덩플조직을 보인다. 또한, 파단면 근방 조직 사진을 보면 인장 변형된 순 Al에서와 같은 조직을 나타낸다. 한편, Fig. 11에 굽힘 시험후 시편의 형상 변화와 변형 및 파괴조직을 관찰한 미세 조직을 나타내었다. 본 굽힘 시험 조건에서 순 Al은 파괴되지 않았고, 굽힘 방향에 따라 늘어난 변형 조직을 보였으나, Al-Mg-Si 합금은 인장 시험과 마찬가지로 취성적인 공정조직을 통한 파괴가 일어났다. 그러나, 계면이 존재하는 하이브리드 알루미늄합금은 순 Al영역에서의 변형만이 관찰되었고, 파괴 또한 발생하지 않았다.

이상의 결과로부터 듀오캐스팅으로 제조한 Al-Mg-Si/Al 하이브리드 합금에서의 계면은 본 실험조건에서의 인장 및 굽힘

Fig. 7. Tensile properties of Al-Mg-Si/Al hybrid alloy compared to Al-Mg-Si alloy and pure Al ; (a) Tensile strength, yield strength and (b) elongation.

Fig. 9. (a) Fracture surfaces and (b) microstructures in the vicinity of fracture surface in Al-Mg-Si alloy and pure Al.

Fig. 10. (a) Fracture surfaces and (b) microstructures in the vicinity of fracture surface in Al-Mg-Si/Al hybrid alloy after tensile test.

Fig. 11. Deformed Microstructures of Al-Mg-Si/Al hybrid alloy compared to Al-Mg-Si alloy and pure Al after bending test.

변형에 견딜 정도로 잘 접합되어 있음을 알 수 있다. 또한, 본 연구에서의 Al-Mg-Si/Al 하이브리드 합금의 인장, 굽힘 변형 및 파괴 특성은 금속과 금속의 복합재료로 이루어진 계면을 갖는 이종재료[7-9] 및 최근에 보고된 Al-Mn/Al-Si 하이브리드 합금[10]에서의 결과와도 유사하다. 즉, 잘 접합된 계면을 갖는 이종재료의 인장특성 및 파괴는 상대적으로 강도가 약한 재료의 한정된 영역에서의 우선적인 변형에 의해 영향을 받는다. 따라서, Al-Mg-Si/Al 하이브리드 합금의 경우도 순 Al과 거의 같은 인장강도, 항복강도 및 굽힘강도를 보이나, 한정된 순 Al에서의 우선적 변형으로 인하여 순 Al보다는 낮은 연신률을 나타내었다고 생각된다.

4. 결 론

Al-Mg-Si 합금과 순 Al으로 이루어진 하이브리드 알루미늄 합금을 듀오캐스팅으로 제조한 후, 미세조직 관찰과 인장 및 굽힘시험을 통하여 변형, 파괴 특성을 조사하였다. Al-Mg-Si/Al 하이브리드 합금은 주상정 및 등축정 조직의 순 Al영역, 미세한 초정 및 공정 조직을 보이는 Al-Mg-Si 합금영역 및 두 합금의 계면으로 이루어졌다. 하이브리드 알루미늄 합금은 순 Al과 거의 유사한 인장강도, 항복강도 및 굽힘 강도를 나타내었으며, 연신률은 순 Al보다는 낮고 Al-Mg-Si 합금 보다

는 높았다. 또한, 하이브리드 알루미늄 합금의 변형 및 파괴는 계면 부근의 순 Al영역에서 발생하였다. 결과적으로, Al-Mg-Si/Al 하이브리드 합금내의 계면은 잘 접합 되었으며, 기계적 변형 및 파괴는 한정된 순 Al영역에서의 국부적인 변형에 크게 의존하였다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 소재원천기술개발사업의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Lee SH and Lee GJ, Kor. J. Mater. Res., "Annealing characteristics of ultrafine grained AA1050/AA5052 complex aluminum alloy sheet fabricated by accumulative roll-bonding", **21** (2011) 655-659.
- [2] O. Yilmaz and H. Cerik, J. Mater. Process Technol., "Electrical and thermal properties of the interface at diffusion-bonded and soldered 304 stainless steel and copper bimetal", **141** (2003) 67-76.
- [3] Kacar R, and Acarer M, J. Mater. Process Technol., "An investigation on the explosive classing of 316L stainless steel-din-P355GH steel", **152** (2004) 91-96.

- [4] Kazanowski P, Epler ME and Misiolek WZ, Mater. Sci. Eng., A, "Bi-metal rod extrusion-process and product optimization", **369** (2004) 170-180.
- [5] Chesney P, Proc. of SDMA 2003 and ICSF V, "A new spray coating process for manufacture of stainless steel clad construction steel with resistance to corrosion by de-icing salts & seawater", (2003) ch.5, 3-9.
- [6] Jianbo S, Jun L, Zhiming Y, Zhiqiang C and Tingju L, Proc. of the 6th international conference on electromagnetic processing of materials, "study on preparation of clad aluminum alloy slab by electromagnetic continuous casting", (2009) 595-598.
- [7] Chang SY, Cho SJ, Hong SK and Shin DH, J. Alloys Compd., "Microstructure and tensile properties of Bi-materials with macro-interface between unreinforced magnesium and composite", **316** (2001) 275-279.
- [8] Chang SY, Kim YK, Hong SK and Shin DH, Mater. Trans., "Effect of heat treatment on tensile properties of component with macro-interface between unreinforced magnesium and composite", **42** (2001) 1035-1041.
- [9] Chang SY, Cho HG and Kim YD, J. Kor. Powder Metall. Inst., "Bi-materials of Al-Mg alloy reinforced with/without SiC and Al₂O₃ particles; processing and mechanical properties", **14** (2007) 354-361.
- [10] Park SJ, Li T, Kim CH, Park JP and Chang SY, Kor. J. Mater. Res., "Microstructure and tensile properties of Al-Mn/Al-Si hybrid aluminum alloy prepared by electromagnetic duocasting", **22** (2012) 97-102.