

고함량의 Mg을 함유한 Al-Mg 합금의 이축교번단조 변형에 따른 미세조직 및 인장특성 변화

신영철^{1,2#} · 하성호¹ · 윤영욱¹ · 김세광¹ · 최호준¹ · 현경환² · 현승균^{2#}

Microstructure Evolution and Tensile Properties of Al-Mg Alloy Containing a High Content of Mg by Biaxial Alternative Forging

Y. C. Shin, S. H. Ha, Y. O. Yoon, S. K. Kim, H. J. Choi, K. H. Hyun, S. K. Hyun

(Received October 29, 2019 / Revised November 19, 2019 / Accepted November 21, 2019)

Abstract

Microstructure evolution and tensile properties of Al-8mass%Mg alloy casting billet by biaxial alternative forging were investigated in this study. An alternative forging system tailored in this study was used to allow continuous strain accumulations on the alloy workpiece. A finite element (FE) simulation results revealed that the strain was mainly concentrated in the core and that the shear bands developed into a form with an X shape in the cross-section of workpiece after the alternative forging using octangular rod shaped dies. With increasing the forging passes, it was observed that the Al-8mass%Mg alloy workpieces were significantly deformed, and cracks began to form and propagate on the both ends of the forged workpieces after five passes at room temperature. In as-forged microstructures taken by microscopes, twins, clustering of dislocations, and fine subgrains were found. Tensile strengths of the forged specimens showed significant increases depending on the number of forging passes, and a trade-off relationship was observed between the elongation and strength. At room temperature and 100 °C, the workpieces showed similar behaviors in microstructural evolution and tensile properties depending on forging passes, while the increase range in strength was reduced at 200 °C.

Key Words : Al-Mg System, Strain Hardening, Multi-Forging, Microstructure, Tensile Property

1. 서 론

온실가스 배출에 의한 지구 온난화와 대기오염 등의 환경 문제에 대한 우려로 친환경 차량의 수요가 갈수록 증가하는 추세이다. 배터리에 저장된 에너지를 통해 구동되는 친환경 자동차는 배터리의 무거운 중량으로 인해 차량의 중량이 기존 내연기관 차량에 비해 오히려 증가하게 된다. 중량

이 늘어날수록 에너지의 효율성과 주행 안정성이 떨어지기 때문에 차체 경량화 기술은 미래 자동차 산업에 있어서 중요한 과제들 중 하나로 떠오르고 있다. 연비규제 강화에 대한 세계 추세에 대응하기 위해서도 차량 경량화는 중요한 과제로, 최근에는 구조 및 제조공법에 의존한 경량화 기술들이 한계에 봉착함에 따라 자동차용 경량 소재 개발에 대한 관심은 더욱 증가하고 있다.

알루미늄 합금은 구조재의 경량화를 위해 가장 광범위하게 사용되는 소재라고 할 수 있다[1]. 다양한 합금계 중에서도 비열처리형 전신재 합금인 Al-Mg 계는 비강도가 높고, 성형성, 용접성, 그리

1. 한국생산기술연구원 뿌리산업기술연구소
2. 인하대학교 금속재료공정공학과
Corresponding Author : Metal Forming R&D Group, KITECH, E-mail: yeshin@kitech.re.kr, ORCID : 0000-0002-9527-9168
Co-corresponding Author : Program in Metals and Materials Process Engineering, Inha University, E-mail: skhyun@inha.ac.kr, ORCID : 0000-0002-3434-8465

고 가공성이 우수하여 자동차, 선박 등의 구조재로 사용되고 있으며, 특히 자동차에서는 새시와 서브시스템의 서스펜션 부품들에 주로 적용되고 있다[2]. 서스펜션 부품을 기존 철계 합금이 아닌 알루미늄 합금으로 대체하게 되면 30% 이상의 경량화 효과를 얻을 수 있다. 차량 서스펜션 부품의 경량화는 연비 개선 효과뿐만 아니라 승차감과 주행성능 향상과도 직결되므로 선진 자동차 메이커들은 보통 경량 서스펜션 부품을 적용하고 있다. 안전과 관계되는 부품의 특성상 신뢰성 높은 소재와 공정이 요구되므로, 많은 자동차 메이커들은 더 높은 제조비용에도 불구하고 다단성형을 통한 고품질의 공법을 적용하여 양산하고 있다.

한편, 최근 탁월한 경량화 효과를 갖는 고 Mg 함량의 Al-Mg 계 합금이 주목받고 있다. 이전부터 여러 연구자들에 의해 Al-Mg 합금의 소성변형특성 및 동적변형거동을 분석하기 위한 기초연구들이 수행되어 왔다[3-8]. 5000 계로 대별되는 전신재용 Al-Mg 계 합금의 최대 Mg 함량은 약 5mass% 수준에 해당된다[9]. 이 합금계의 강화기구는 주로 Mg 첨가에 의한 고용강화와 소성가공에 의한 가공경화 효과로 설명된다. 기존 문헌들에 따르면 [10,11], Mg 함량이 더욱 증가하게 되면 소성가공시 가공경화 효과가 더욱 상승한다고 한다. 뿐만 아니라 알루미늄의 2/3 수준에 해당하는 Mg의 밀도 (1.74 g/cm^3) 때문에 부품의 중량을 한층 더 감소시킬 수 있다.

본 연구에서는 기존의 5000 계 Al-Mg 합금의 최대 Mg 함량을 상회하는 수준의 다량의 Mg를 함유할 경우에 대한 가공경화 효과를 조사하는 것을 목적으로 하였다. 향후 단조공정으로의 적용 가능성 검토를 위해, 단조특성 평가용으로 제작한 이축교번단조금형을 이용하여 단조한계를 평가하고 변형량에 따른 미세조직과 기계적 특성의 변화를 관찰하였다.

2. 실험방법

본 연구에서 조사된 소재는 Al-8mass%Mg의 조성을 갖는 압출용 주조 빌렛으로, 균질화 열처리가 완료된 상태로 제공받았다. 주요원소인 Mg 외에는 미량의 원소들만이 일부 포함되어 있다. 따라서 본 합금의 변형에 따른 미세조직 및 기계적

거동에 미치는 영향은 주 첨가원소인 Mg이 지배적인 것으로 판단하여 미량의 기타원소들의 영향은 무시하였다.

전술한 바와 같이, 단조공정 적용을 검토하기 위해 제작된 이축교번단조금형을 이용하여 소재에 일정량의 변형을 점진적으로 가한 후 이에 따른 미세조직 및 특성 변화를 보고자 하였다. Fig. 1은 이축교번단조금형 구조 및 실험방법을 보여주고 있다. Fig. 1(a)는 상·하부 금형과 단조 시편의 형상을 보여준다. 상술한 합금 빌렛으로부터 $\phi 19 \times 108 \text{ mm}$ 크기의 시편을 기계가공으로 채취하였고, 이를 상·하부 금형을 통해 가압하여 성형실험을 수행하였다. 금형의 내부 cavity의 형상은 Fig. 1(b)와 같다. 본 그림은 cavity 형상에 대한 설명을 위한 것으로 가압 후의 최종 시편을 보여주는 것은 아니다. Fig. 1(c)의 금형과 시편에 대한 실험 절차 모식도를 통해 알 수 있는 바와 같이, 시편 삽입 후 1회 가압이 진행되고 다시 시편을 취출하여 90도 회전 후 재삽입 그리고 가압의 순서를 반복함으로써 시편에 대해 지속적인 변형을 가하는 이축교번단조 실험을 수행하였다. 수차례 단조 후의 시편의 모식도와 같이, 연속적인 변형이 누적된 시편은 cavity 형태를 따라 외부에 리브가 형성되는 것을 알 수 있다. 이와 같은 연속적인 반복 업셋팅 금형을 150톤 유압 프레스에 장착하여 실온, 100°C 그리고 200°C 의 온도조건에 대해 단조 횟수별 시편 가압을 수행하였다. 승온 조건에 대한 실험을 위해 시편은 가압 전 프레스 주변에 비치된 전기로에 장입하여 해당온도로 가열 및 유지시켰고, 금형은 내부에 삽입된 카트리지 히터를 통해 시편과 동일한 온도로 가열 및 유지하였다.

실험을 통해 변형된 단조 시편의 사진을 단조 횟수에 따라 Fig. 2에 나타내었다. 각 시편의 측면에서 관찰된 바와 같이, 단조 횟수가 증가함에 따라 시편 양 끝단에서의 리브 돌출이 점점 뚜렷해지는 것을 확인할 수 있다. 이 시편들은 실온에서 가압된 것으로, 다량의 변형이 연속적으로 누적됨에 따라 5회 단조 후에는 양 끝단 중심부에서 크랙 발생이 관찰되었다. 이러한 크랙 발생시점을 재료의 단조한계로 간주하여 성형성을 나타내는 척도로 활용할 수 있다.

Fig. 3은 단조 횟수에 따른 시편 내부의 변형상태를 확인하기 위해 DEFORM S/W를 사용해 시

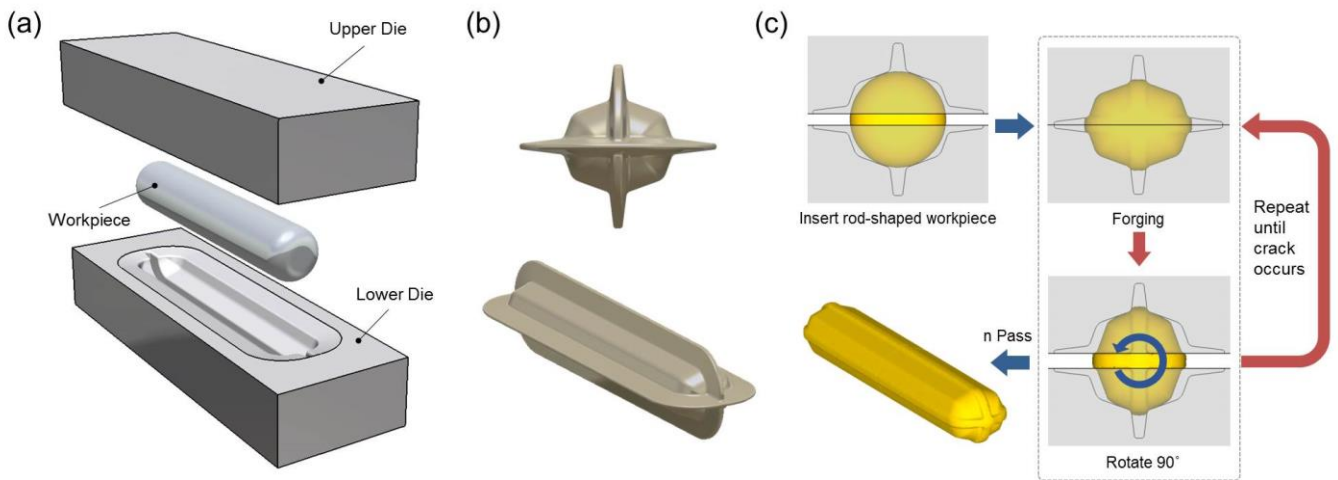


Fig. 1 Schematic 3D views of (a) dies and workpiece for multi-forging, (b) die cavity shape, and (c) biaxial alternative forging process

플레이션을 수행한 결과이다. Fig. 3(a)를 보면 업셋팅이 진행됨에 따라 중심부 축방향 단면의 형태는 거의 일정하게 유지되는 반면 시편의 심부에 점진적으로 변형이 누적됨을 확인할 수 있으며, Fig. 3(b)를 통해 업셋팅 횟수에 따른 중심부의 유효변형률의 증가가 거의 선형적임을 확인할 수 있다.



Fig. 2 Images of workpieces depending on forging passes

참고로, 유효변형률에 해당하는 단조비 (Forging ratio)를 압축시편의 면적비를 통해 대략적으로 계산한 값을 함께 나타내었다. Fig. 3(c)를 보면 중심부에서 인장시편의 평행부 길이에 해당하는 18mm 정도의 구간에서는 유효변형률이 거의 일정한 값으로 유지될 수 있도록 단조금형이 설계되었음을 확인할 수 있다.

각 조건별 미세조직을 관찰하기 위해 시편 심부

의 횡단면을 경면 연마한 후 추가로 Barkers 용액 (1000ml H₂O + 25ml HBF₄) 으로 전해연마를 실시하였고, 광학현미경의 편광장치를 활용하여 조직관찰을 수행하였다. 또한, 소성변형기구에 따라 생성되었을 쌍정 및 전위를 관찰하기 위해 전자현미경을 이용한 분석을 수행하였다. 시료 내 각 결정립들 사이의 결정방위차에 따른 쌍정 관찰을 위해 전계방사형 주사전자현미경 (field emission scanning electron microscope, FE-SEM) 에 장착된 전자후방산란 회절장치 (electron backscatter diffraction, EBSD) 를 이용하여 키쿠치 패턴 (Kikuchi patterns) 과 같은 원리로 얻어진 EBSD 패턴을 분석함으로써 결정립들의 결정방위분포에 대해 IPF (inverse pole figure) map을 나타내었다. 또한, 더욱 미세 영역에서의 조직관찰을 위해 가속전압 200 kV의 전계방사형 투과전자현미경 (field-emission transmission electron microscope) 을 이용하였고, 이 때 시료는 기계적 연마에 의해 3 mm 직경의 얇은 디스크로 제조한 후 이를 이온밀링함으로써 전자 투과가 가능한 정도의 박막으로 제작하였다. 단조 횟수 및 온도별 인장 특성을 평가하기 위해 위의 시편들을 기계가공하여 ASTM: B557M-10에 해당하는 표준 규격의 인장시편편을 제작하였다. 이 때, Fig. 2 에서 관찰된 바와 같이, 5회 단조 후 발생한 크랙이 시편 내부로 전파되었을 가능성을 고려하여 건전한 인장시편편만을 평가대상으로 삼기 위해, 본 연구에서는 4회까지 단조된 시편들만을 대

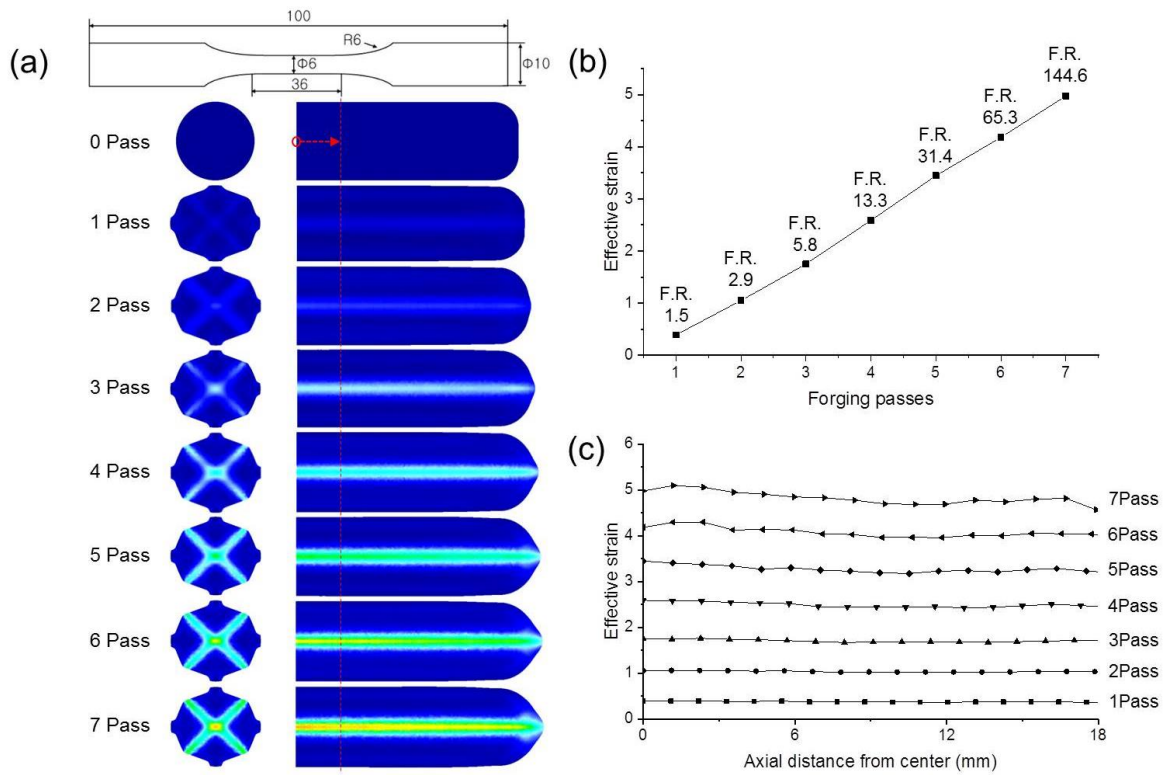


Fig. 3 (a) Effective strain distributions and (b, c) effective strain profiles along core of workpiece depending on the number of forging passes

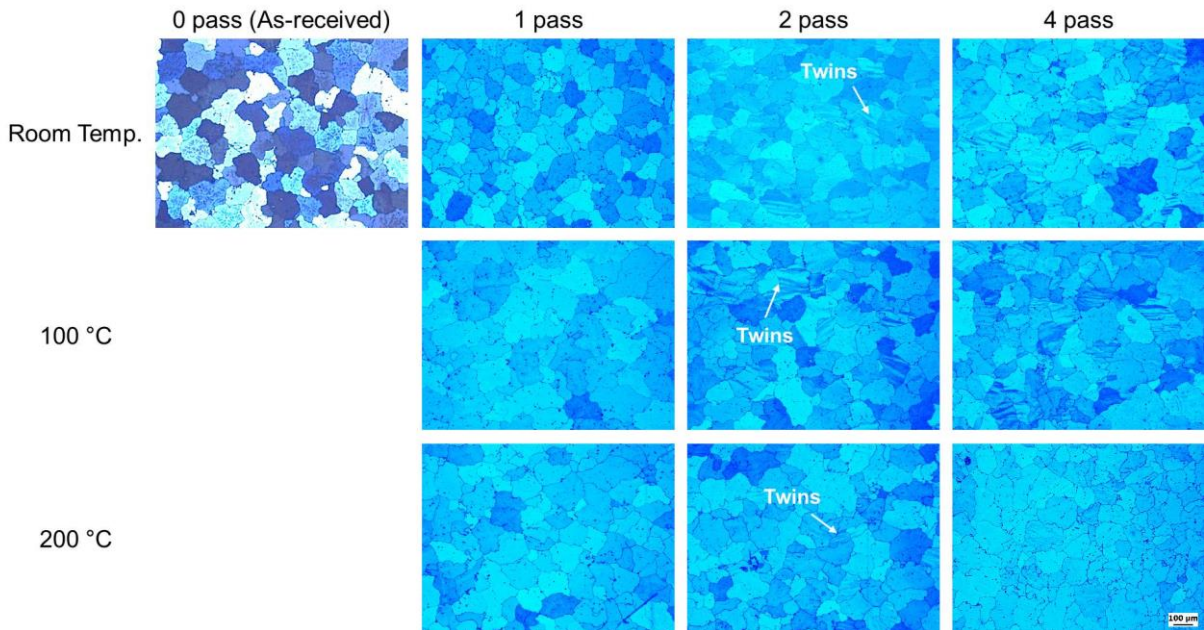


Fig. 4 Optical micrographs of longitudinal surface along core of workpiece depending on temperatures and forging passes

상으로 분석 및 특성평가를 진행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 편광현미경에 의해 촬영된 단조 횡수 및 온도변화에 따른 미세조직 변화를 보여준다. 단조 전의 미세조직은 전체적으로 균일한 결정립들의 분포를 보여주고 있다. 일반적으로 Al-Mg 합금의 응고 조직은 수지상의 α -Al 초정들의 생성 및 성장에 이어 수지상간 영역 (interdendritic region) 에서의 용질 원소 Mg의 편석에 의한 β -Al₃Mg₂ 공정상들의 생성으로 설명될 수 있다[12]. 이러한 수지상간 공정상 입자들의 분포는 Mg 함량이 증가할수록 더욱 두드러지지만, 적정온도에서의 균질화 열처리를 통해서 상당량을 제어할 수 있고, 관찰된 원소재의 미세조직 또한 이와 같은 경향을 보이고 있다. 그러나 본 연구에서 다루고 있는 소재는 8wt%에 달하는 고함량의 Mg을 함유하고 있기 때문에 균질화 후에도 여전히 검은 점과 같이 보이는 공정상 입자들의 분포가 관찰되고 있다. 1회 단조 후 미세조직은 여전히 초기상태에 가까운 것으로 보이며, 그 어떤 두드러진 미세조직의 변화도 관찰되지 않았다. 이는 100℃와 200℃에서도 유사하게 나타났다. 2회 연속 단조가 진행되면 표시한 바와 같이, 쌍정들의 생성이 관찰되기 시작하고 4회 단조 후에는 이러한 쌍정의 분포가 더욱 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 실온과 100℃에서는 유사하게 나타나지만 온도가 200℃로 상승하게 되면 상대적으로 쌍정의 생성이 급격하게 줄어드는 것을 알 수 있다.

편광현미경 조직에서 관찰된 쌍정의 존재는 Fig. 5에 나타낸 바와 같이, EBSD 분석을 활용한 결정학적 정보를 기반으로 얻어진 결정립들의 결정방위차들을 통해서도 명확하게 확인된다. 본 EBSD 결과는 2회 단조 후의 시편에 대한 것으로, Fig. 4의 편광현미경 조직에서 쌍정의 생성이 관찰되기 시작한 조건에 해당된다. 이 결과로부터 방위차에 의해 구분된 쌍정들의 존재를 명확하게 확인할 수 있다. 이와 더불어, 결정립들 사이에서 감소성 조직의 특징 중 하나인 미세한 아결정립들의 존재 또한 부분적으로 확인되었다.

Fig. 6은 시편의 단조변형 후 미세조직에 대한 투과전자현미경 명시야상 이미지를 보여준다. 누적된 변형에 의해 전위가 증식함에 따라 균집된 전위들의

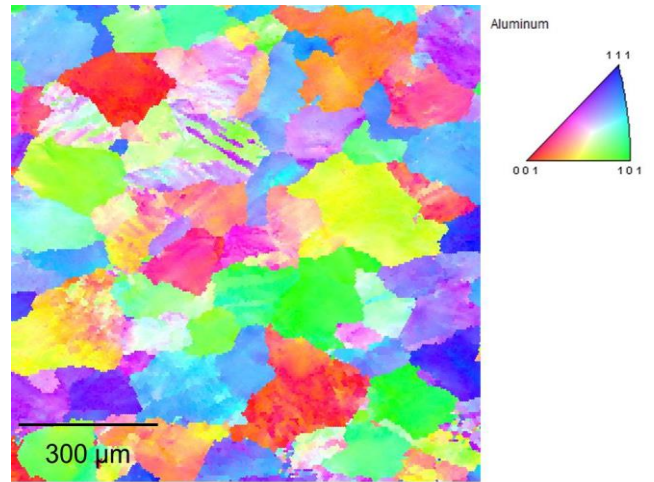


Fig. 5 EBSD results in IPF map of the workpiece after the forging with 2 passes

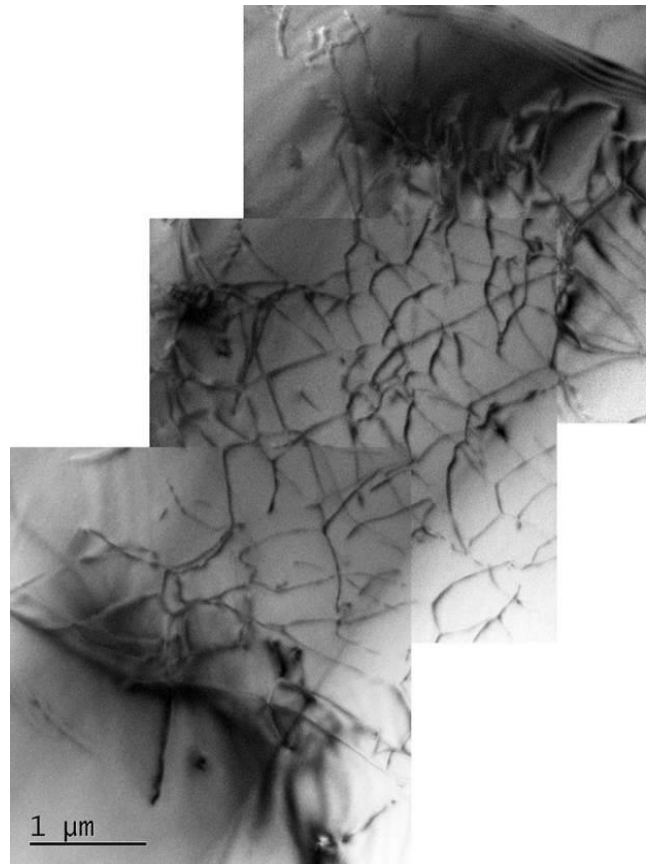


Fig. 6 TEM bright field image of the workpiece after the forging with 5 passes

의 존재가 위와 같이 관찰되었다.

기존의 연구보고에 따르면, Al과 같이 면심입방격자의 결정구조를 갖는 금속들의 소성변형 기구는

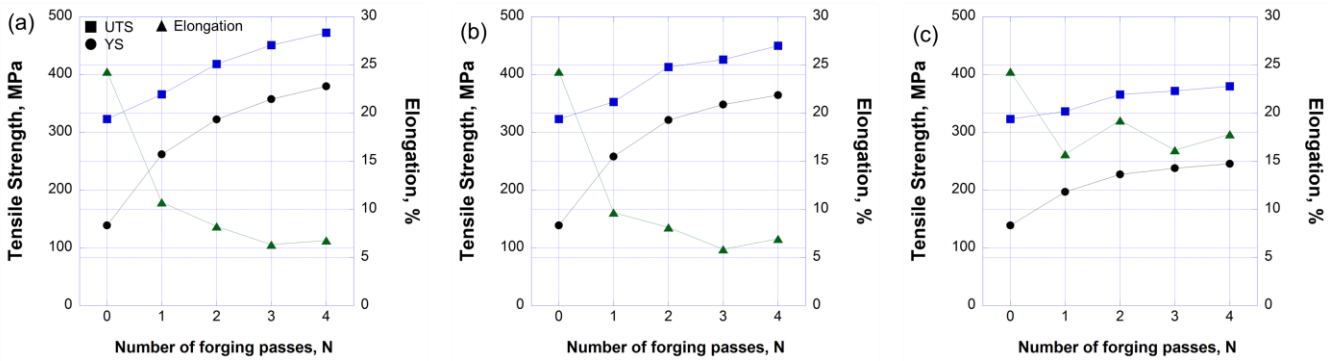


Fig. 7 Tensile properties of workpieces forged at (a) room temperature, (b) 100 °C, and (c) 200 °C depending on forging passes

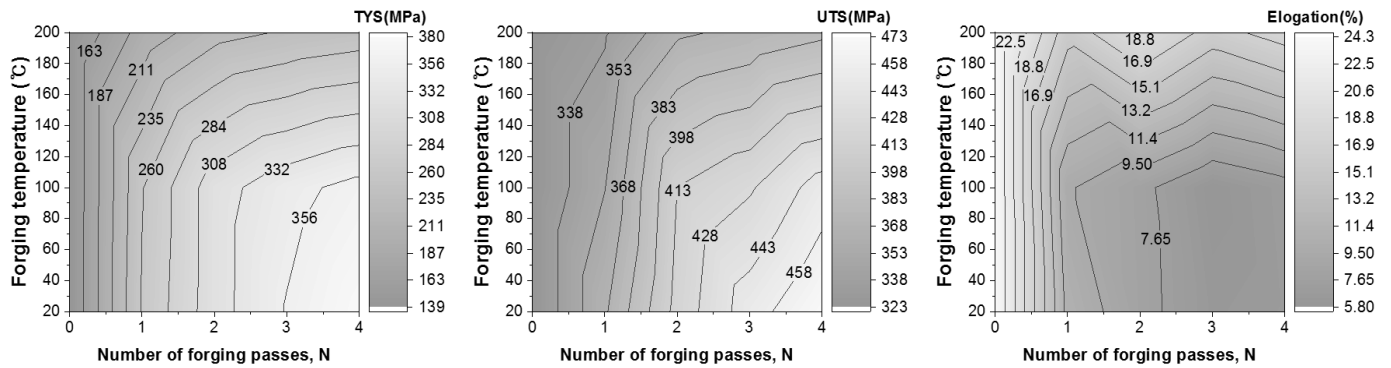


Fig. 8 Tensile property maps of workpieces depending on forging passes and temperatures. (a) yield strength, (b) ultimate tensile strength, and (c) elongation

쌍정, Full slip, 그리고 적층결합 세 가지로 설명된다 [10]. Al은 높은 적층결합 에너지를 갖는 금속으로 알려져 있다. 적층결합은 완전전위가 부분전위로 분리되면서 이 부분전위간 척력에 의해서 발생하는 것으로 설명될 수 있고, 이를 발생시키기 위해 필요한 힘이 바로 적층결합 에너지라고 할 수 있다. Al은 높은 적층결합 에너지를 갖는 금속으로 알려져 있기 때문에 적층결합의 생성이 상대적으로 어렵다고 할 수 있다. 따라서, 이 경우에는 전위의 3차원적 이동과 교차슬립이 용이하고 상대적으로 낮은 가공경화율을 보인다. 반면, 용질원자인 Mg의 존재는 Al의 적층결합 에너지를 감소시킨다[10]. 적층결합 에너지의 감소는 부분전위간의 split-up 거리를 증가시키고 이는 전위의 교차슬립을 더욱 어렵게 하기 때문에 동적 회복을 억제시키고 결과적으로 가공경화율을 향상시킨다. Al은 또한 순금속 상태에서 가장 낮은 쌍정 밀도를 나타내며, Mg 용질원자의 증가는 쌍정 밀도를 상승시키는 것으로 보고되고 있다[10].

단조 pass별 인장특성의 변화는 Fig. 7에 나타내었다. 실온에서 최초 1회 단조성형으로 강도가 급격하게 상승하는 것을 볼 수 있으나 반면에 연신율은 현저히 감소하는 것을 알 수 있다. 단조 횟수가 증가할수록 강도와 연신율에 있어서 각각 지속적인 증가와 감소가 나타났지만 그 폭 또한 줄어드는 것을 볼 수 있다. 100 °C에서도 거의 이와 동일한 경향이 관찰되었다. 반면에, 온도가 200 °C로 상승하면 강도 증가폭은 현저히 줄어들고 연신율의 감소폭 또한 크게 완화되는 것을 확인할 수 있다.

온도 변화는 원자 확산에 영향을 미치는 주요 변수이며 이를 통해 전위상승에도 영향을 미친다. 온도 증가는 전위 운동에 대한 열적 활성화를 일으키며, 이 과정에서 전위의 재배열과 소멸이 발생되어 전위밀도를 감소시켜 결과적으로 가공경화의 효과를 떨어뜨리는 것으로 생각할 수 있다. 본 인장시험 결과를 토대로 생각해볼 때, 100 °C까지는 전위의 열적 활성화에 큰 변화가 없는 것으로 판단되며

200℃부터 열적 활성화가 전위 운동에 영향을 미치기 시작한 것으로 사료된다.

상기의 인장시험결과와 공정변수들을 기반으로 하여 인장특성 map을 Fig. 8과 같이 작성하였다. 본 map을 통해 가공경화에 의한 강도상승의 극대화는 주로 저온에서의 성형을 통해 얻어질 수 있음을 확인할 수 있고, 온도가 상승할수록 단조 변형량에 따른 강도변화는 크지 않음을 파악할 수 있다. 따라서 본 합금의 고강도화를 위해서는 저온성형에 초점을 맞춘 공정 최적화가 바람직한 것으로 생각된다.

4. 결론

상용 5000계 Al-Mg 합금의 최대 Mg 함량을 상회하는 Al-8mass%Mg 합금 주조빌렛 시편에 대해, 이축교번단조 실험을 활용하여 공정조건 및 변형량에 따른 미세조직 및 인장특성의 변화를 관찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 이축교번단조를 통해 성형된 본 합금의 미세조직에서는, 기존 강소성 조직의 특징인 쌍정의 증가, 균집화된 전위의 분포 그리고 미세한 아결정립의 생성이 관찰되었다.

(2) 인장시험결과, 이축단조변형에 따른 가공경화 효과로 강도가 급격하게 증가하였으나 성형온도가 200℃로 상승한 경우에는 강도 증가폭의 감소가 나타났다.

(3) 공정변수들과 인장시험결과를 토대로 작성된 특성 map을 통해, 성형온도 및 소성변형량에 따른 Al-8mass%Mg 합금의 기계적 특성 변화를 파악해본 결과, 저온영역에서 우수한 가공경화 특성을 나타낼 수 있었고, 미래의 고강도 단조부품소재로서 기대를 모을 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 한국생산기술연구원의 뿌리기술연구개발사업(EO190041)의 지원으로 수행되었음

REFERENCES

- [1] J. Hirsch, 2011, Aluminium in Innovative Light-Weight Car Design, Mater. Trans., Vol. 52, No. 5, pp. 818~824
- [2] J. R. Davis, 1993, Aluminum and Aluminum Alloys, ASM International, Materials Park
- [3] X. Li, W. Xia, H. Yan, J. Chen, B. Su, M. Song, Z. Li, Y. Li, 2019, Dynamic Recrystallization Behaviors of High Mg Alloyed Al-Mg Alloy During High Strain Rate Rolling Deformation, Mat. Sci. Eng. A, Vol. 753, pp. 59~69.
- [4] W.J. Kim, H.T. Jeong, 2019, Pronounced Yield Drop Phenomenon at High Temperatures in Al-Mg Alloys with High Contents of Mg (5-13 wt%), Mat. Sci. Eng. A, Vol. 743, pp. 590~596.
- [5] S. Y. Lee, J. H. Lee, 1996, The Effect of Dynamic Strain Aging on the High Temperature Plastic Deformation Behavior of Al-Mg Alloy, Trans. Mater. Process., Vol. 5, No. 4, pp. 327~336.
- [6] Y. G. Kim, Y. G. Ko, D. H. Shin, S. Lee, 2009, High-Strain Rate Deformation of Ultra-Fine Grained Al-Mg Alloys Fabricated by Equal-Channel Angular Pressing, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf. 2009 Spring, pp. 306~309.
- [7] Y. N. Kwon, S. S. Kim, S. W. Kim, Y. S. Lee, 2014, Hydro-Mechanical Forming of Al-Mg Sheet, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf. 2014 Spring, p. 170.
- [8] M. S. Baek, Y. K. Kim, S. K. Kim, B. H. Kim, K. A. Lee, 2018, Microstructures and Tensile Deformation Behaviors of High Strength · Elongation Al-Mg(7, 9wt%) Alloys with ECO Mg (with CaO) Added, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf. 2018 Spring, pp. 169~170.
- [9] S. L. Semiatin, 2005, Metalworking: Bulk Forming, ASM International, Materials Park, pp. 299~312.
- [10] D. D. ZHAO, O. M. LØVVIK, K. MARTHINSEN, Y. J. LI, 2017, Twinability of Al-Mg Alloys: A First-Principles Interpretation, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, Vol. 27.6, pp. 1313~1318.
- [11] D. Zhao, O. M. Løvvik, K. Marthinsen, Y. Li, 2017, Combined Effect of Mg and Vacancy on the Generalized Planar Fault Energy of Al, J. Alloys Compd., Vol. 690, pp. 841~850.
- [12] S. H. Ha, Y. O. Yoon, B. H. Kim, H. K. Lim, T. W. Lee, S. H. Lim, S. K. Kim, 2019, Oxide Scale Behavior and Surface Protection of Al-Mg Alloys Containing a Trace of Ca, Int. J. Metalcast., Vol. 13.1, No. 1, pp. 121~129.