

Al-2Zn-1Cu-0.3Mg합금의 Sc첨가에 따른 미세조직, 전기전도도, 열전도도 및 기계적 특성 변화

나상수^{1,2} · 김용호¹ · 손현택^{1†} · 이성희^{2‡}
¹한국생산기술연구원, ²국립목포대학교 신소재공학과

Effect of Sc Addition on Microstructure, Electrical Conductivity, Thermal Conductivity and Mechanical Properties of Al-2Zn-1Cu-0.3Mg Based Alloy

Sang-Su Na^{1,2}, Yong-Ho Kim¹, Hyeon-Taek Son^{1,†} and Seong-Hee Lee^{2,‡}

¹Korea Institute of Industrial Technology(KITECH), Gwangju 61012, Republic of Korea
²Department of Advanced Materials Science and Engineering, Mokpo National University, Muan, Jeonnam 58554, Republic of Korea

(Received September 15, 2020 : Revised September 24, 2020 : Accepted September 24, 2020)

Abstract Effects of Sc addition on microstructure, electrical conductivity, thermal conductivity and mechanical properties of the as-cast and as-extruded Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-xSc (x = 0, 0.25, 0.5 wt%) alloys are investigated. The average grain size of the as-cast Al-2Zn-1Cu-0.3Mg alloy is 2,334 μm ; however, this value drops to 914 and 529 μm with addition of Sc element at 0.25 wt% and 0.5 wt%, respectively. This grain refinement is due to primary Al_3Sc phase forming during solidification. The as-extruded Al-2Zn-1Cu-0.3Mg alloy has a recrystallization structure consisting of almost equiaxed grains. However, the as-extruded Sc-containing alloys consist of grains that are extremely elongated in the extrusion direction. In addition, it is found that the proportion of low-angle grain boundaries below 15 degree is dominant. This is because the addition of Sc results in the formation of coherent and nano-scale Al_3Sc phases during hot extrusion, inhibiting the process of recrystallization and improving the strength by pinning of dislocations and the formation of subgrain boundaries. The maximum values of the yield and tensile strength are 126 MPa and 215 MPa for the as-extruded Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-0.25Sc alloy, respectively. The increase in strength is probably due to the existence of nano-scale Al_3Sc precipitates and dense Al_2Cu phases. Thermal conductivity of the as-cast Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-xSc alloy is reduced to 204, 187 and 183 W/MK by additions of elemental Sc of 0, 0.25 and 0.5 wt%, respectively. On the other hand, the thermal conductivity of the as-extruded Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-xSc alloy is about 200 W/Mk regardless of the content of Sc. This is because of the formation of coherent Al_3Sc phase, which decreases Sc content and causes extremely high electrical resistivity.

Key words aluminum alloys, casting, extrusion, thermal conductivity, mechanical properties.

1. 서 론

알루미늄 합금은 높은 비강도, 우수한 연성 및 저렴한 비용으로 인해 항공 우주, 자동차 및 건축 자재에서 점점 더 중요한 구조 재료가 되고 있다.¹⁻⁴⁾ 자동차 산업 분

야를 중심으로 알루미늄 합금 압출재 개발에 대한 요구가 증가하고 있으며, 자동차 및 항공기에 적용되는 알루미늄 압출 부품에 요구되는 높은 강도 특성을 얻기 위해 오랫동안 연구되어 왔다.⁵⁾ 7xxx계 합금은 알루미늄 합금 중에서도 가장 우수한 비강도 특성으로 수송기기

[†]Corresponding author

E-Mail : sht50@kitech.re.kr (H.-T. Son, KITECH)

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.

의 구조재 특히 항공기, 방위산업 구조재로서 적용되고 있으며, 그 특성 향상을 위한 연구는 현재까지 이루어지고 있다.^{6,7)} 하지만 7xxx계 합금은 압출가공용 알루미늄 합금으로써 알루미늄 합금 중 가장 강도가 우수하지만 압출과정에서 압출 온도에 의해 발생하는 재결정 및 결정립 성장으로 인한 압출 부품 결함이 발생한다. 이와 같은 문제점으로 7xxx계 합금은 압출온도가 낮아 5xxx계 및 6xxx계 합금보다 압출속도를 크게 낮추어야 하기 때문에 생산성에 문제가 된다. 또한 용접이 어렵고, 성형성이 나빠지며, 열전도성, 내식성 및 응력부식균열(SSC) 특성이 좋지 않다는 단점을 갖고 있다.

알루미늄 합금을 개량화 하는 방법 중에서 원소를 첨가하는 것은 합금의 주된 특성의 변화 없이 특정 기능을 향상시키는 가장 효과적인 방법이다. 그 중 희토류계 원소 Sc는 소량 첨가로 기존 알루미늄 합금의 강도, 용접성, 응고조직, 가공성 등 많은 특성을 향상시킬수 있다고 보고되고 있다.⁸⁾

Sc첨가 알루미늄 합금은 Al의 격자 파라미터(4.04 Å)와 1.6%의 격자 불일치를 갖는 L1₂ 구조의 Al₃Sc석출상을 생성하는 것으로 보고되고 있다.^{9,10)} 이 Al₃Sc석출상은 열적 안정성이 우수하여 최대 300 °C까지 조대화에 대해 안정적이며,¹¹⁾ 결정립 및 결정립계에 분포하여 pinning효과로 인해 전위의 이동을 방해하고 강도 및 재결정 온도를 향상시키는 것으로 입증되었다.^{12,13)}

현재까지 7xxx계 합금에 Sc를 첨가하여 미세조직 제어 통한 기계적 특성을 향상시키려는 연구들이 활발히 진행되어 왔다. 그러나 Sc가 고가이므로 Sc를 첨가한 Al계 합금에 대한 연구가 제한적으로 이루어져 왔다고 판단된다. 차세대 자동차 및 전자기기에 사용되는 부품은 다기능화 및 고직접화 하고 있어 에너지 효율 및 신뢰성 향상을 위해서 방열부품의 역할이 중요시되면서 방열 소재의 경우 고열전도도 뿐만 아니라 우수한 강도 및 성형성을 갖는 새로운 알루미늄 합금 개발이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 7xxx계 알루미늄 합금의 기반에 첨가 원소 함량을 제어하여 Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-xSc (x = 0, 0.25, 0.5 wt%) 합금을 설계하였으며, Sc첨가 및 압출 공정에 따른 미세조직 변화를 관찰하고, 전기전도도, 열전도도 및 기계적 특성 변화를 분석하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-xSc (x = 0, 0.25, 0.5 wt%)합금을 제조하였으며, 합금의 조성은 Table 1에 나타내었다. Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-xSc (x = 0, 0.25, 0.5 wt%) 합금은 고주파 유도로를 이용하여 용탕 750 °C에서 용해한 후 약 200 °C로 예열한 75 × 280 mm 크기의 금형

Table 1. Chemical composition of the Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-xSc alloys used in the experiment (wt%)

Alloy	Element (wt%)				
	Al	Zn	Cu	Mg	Sc
Al-2Zn-1Cu-0.3Mg	Bal.	2	1	0.3	-
Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-0.25Sc	Bal.	2	1	0.3	0.25
Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-0.5Sc	Bal.	2	1	0.3	0.5

에 출탕하여 빌렛을 주조하였다. 압출 빌렛은 선반 가공하여 압출에 적합한 70 × 85 mm로 일정하게 가공 후 550 °C에서 4시간 동안 균질화 처리하였으며, 500 °C에서 1시간 동안 열처리 후 압출비 37:1로 압출하여, 직경 12 mm의 봉상 압출재를 제조하였다. Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-xSc (x = 0, 0.25, 0.5 wt%)합금은 열역학적 프로그램인 Panda 8.0을 이용하여 상태도를 분석하였으며, 주조재 및 압출재 시편은 샌드페이퍼를 사용하여 #800까지 기계적 연마 후 전기전도도를 측정하였다. 측정된 전기전도도 값은 전기전도도-열전도도 관계식인 Wiedemann-Franz식을 이용하여 열전도도 값으로 환산하였다.¹⁴⁾ 미세조직 관찰은 전해 연마하여 주사전자현미경(field emission scanning electron microscopy, FE-SEM), 전자 후방 산란 회절분석기(electron backscatter diffraction, EBSD), 투과전자현미경(transmission electron microscopy, TEM)을 이용하였다. 상 변화, 석출상의 존재 등을 조사하기 위하여 에너지분산형 분광분석법(energy dispersive spectrometry, EDS)을 이용하였다. 기계적 특성 평가를 위해 압출재를 이용하여 30 mm의 표점거리와 6 mm의 폭을 가지는 봉상 시편을 제작하였으며, 만능인장시험기(Shimadzu AG-IS)를 사용하여 상온에서 실험하였으며, 변형속도는 10⁻³/sec로 파단이 일어날 때까지 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1(a)에 열역학적 프로그램인 Panda 8.0을 이용하여 Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-xSc합금의 상태도를 나타내었다. Fig. 1(b) 및 Fig. 1(c)는 Sc가 첨가된 합금의 응고 거동을 나타내며, 응고시 Liquid → Liquid + FCC(Al) → Liquid + FCC(Al) + Al₃Sc → FCC(Al) + Al₃Sc로 Al₃Sc이 Al과 공정 반응을 나타낸다. Al₃Sc상은 고온에서 핵생성하며, Al의 핵생성을 촉진시켜 결정립을 미세화 하는 것으로 알려져 있다. 또한 Sc가 0.25 wt% 및 0.5 wt% 첨가되어진 합금의 응고 거동은 동일하지만 Sc첨가량이 증가함에 따라 Al₃Sc상이 9.44 °C 더 높은 온도에서 핵생성하는 것을 알 수 있으며, 이는 더 많은 Al의 핵생성을 촉진시킬수 있을 것으로 사료된다.

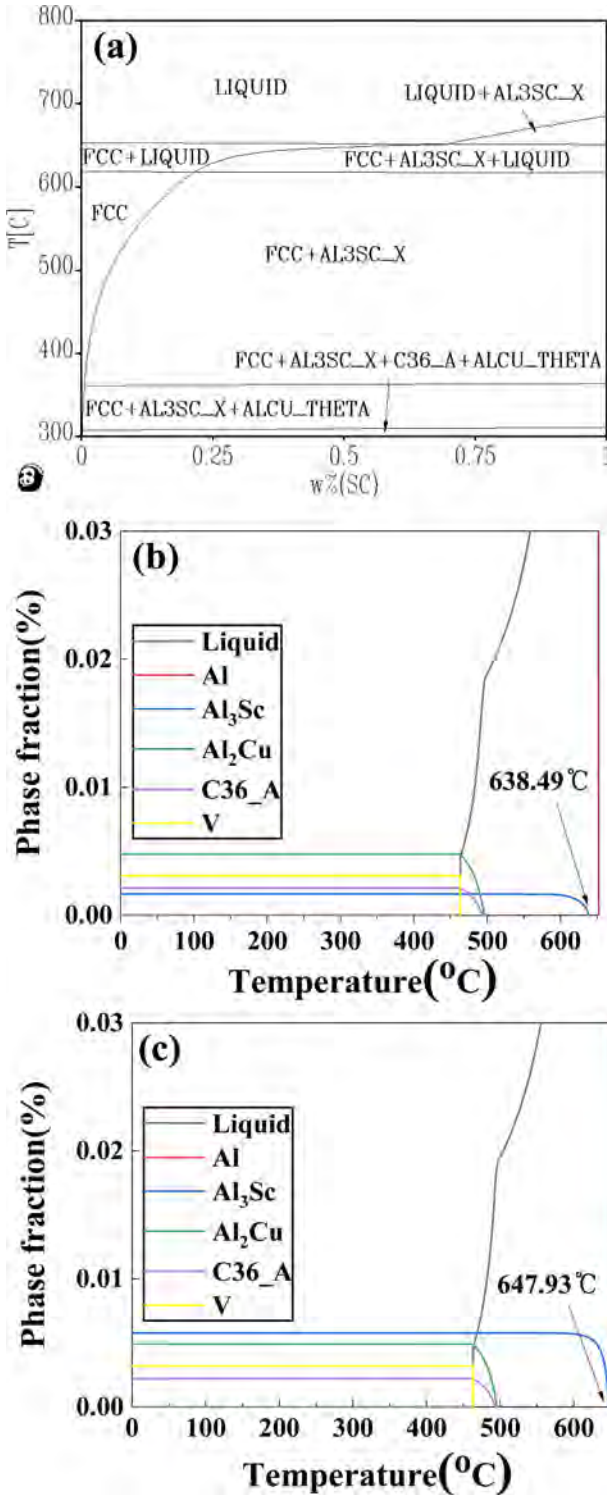


Fig. 1. Phase diagram of the Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-xSc alloy (a) and phase fraction of the Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-0.25Sc (b), and Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-0.5Sc (c).

Fig. 2는 EBSD를 이용한 Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-xSc (x = 0, 0.25, 0.5 wt%) 합금 주조재의 미세조직 관찰 결과를 나타내고 있다. Image quality map 및 inverse pole

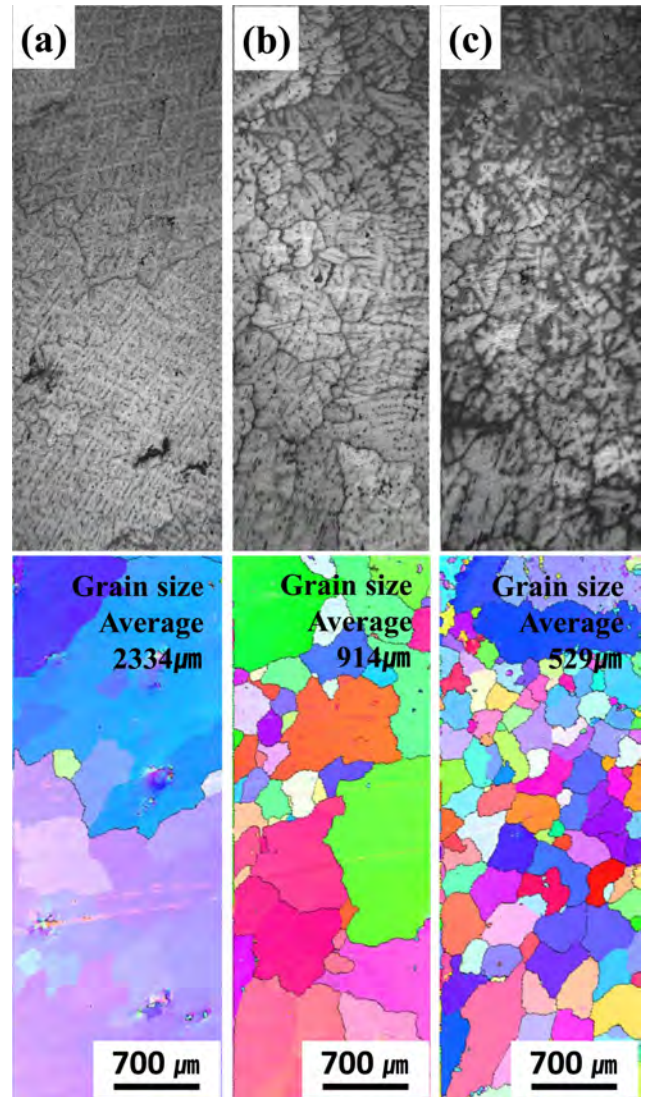


Fig. 2. Image quality map and Inverse pole figure map of the as-cast Al-2Zn-1Cu-0.3Mg (a), Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-0.25Sc (b), and Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-0.5Sc (c) alloys obtained from the EBSD analysis.

figure map에서 나타낸 것과 같이 Sc가 첨가되지 않은 합금은 2,334µm로 조대한 결정립 크기를 나타내며, Sc가 0.25 wt% 및 0.5 wt% 첨가되어짐에 따라 결정립 크기가 914 µm, 529 µm로 미세해지는 것을 확인하였다. 열역학적 프로그램을 이용한 상태도 분석에서 언급하였듯이(Fig. 1), 알루미늄 합금에서 Sc원소의 첨가는 Al₃Sc 금속간 화합물을 형성시키며, 주조시 고온에서 정출된다. 이러한 정출물이 Al의 핵생성을 촉진시켜 결정립을 미세화 시키는데 기여하는 것으로 판단된다.

Fig. 3은 Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-xSc (x = 0, 0.25, 0.5 wt%) 합금 주조재의 SEM분석이다. 미세조직 분석 결과 모든 합금에서 Al₂Cu상이 나타났으며, Sc가 0.25 wt% 및 0.5 wt% 첨가된 합금 Fig. 3(b) 및 Fig. 3(c)에서는 Al₃Sc

상이 형성되어진 것을 알 수 있다. Fig. 3(d)는 Sc가 0.5 wt% 첨가된 합금의 EDS분석을 위한 미세조직 사진을 나타내며, 분석 결과는 Fig. 3(e) 및 Fig. 3(f)에 나타내었다. 이와 같이 Al_3Sc 상은 Al_2Cu 상과 동시 석출되는 것으로 판단된다.

Fig. 4는 Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-xSc ($x=0, 0.25, 0.5$ wt%) 합금 압출재의 상변화 거동을 SEM 분석 결과이다. Fig. 3의 주조재에서 Al_3Sc 상은 Al_2Cu 상과 동시 석출되어 근처에 형성하지만, Fig. 4(d), (e), (f)에 나타낸

것과 같이 Sc가 첨가된 합금 압출재에서는 미세한 크기의 Al_3Sc 상이 Al_2Cu 상과 분리되어 기지내에 분포한 것으로 관찰되었다. 이는 열간 압출 공정시 고온에서 기지인 Al과 석출상인 형성함으로써 나타난 결과이다.

Fig. 5는 Sc가 0.5 wt% 첨가된 Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-0.5Sc합금 압출재의 TEM분석 결과이다. Bright field image에 나타난 것과 같이 약 100 nm이하의 크기를 갖는 구형의 Al_3Sc 석출상이 확인되었다[Fig. 5(d)].

Fig. 6은 Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-xSc합금 압출재 ND면의

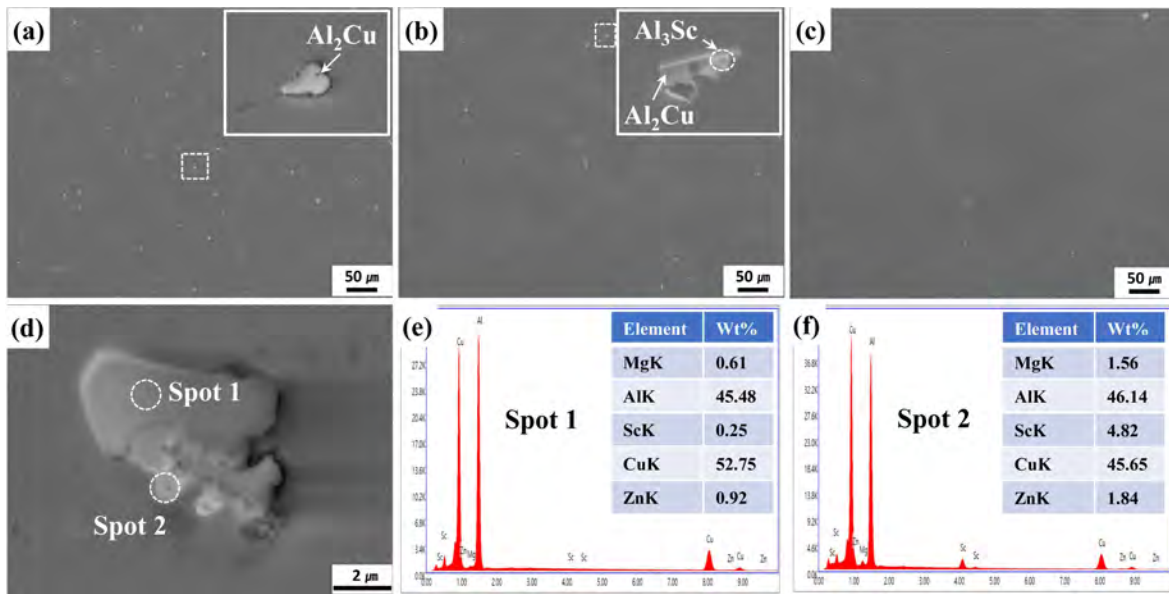


Fig. 3. SEM images of the as-cast Al-2Zn-1Cu-0.3Mg (a), Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-0.25Sc (b), Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-0.5Sc ((c) and (d)) and EDS measuring points spot 1 (e) and spot 2(f) of the as-cast Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-0.5Sc alloy.

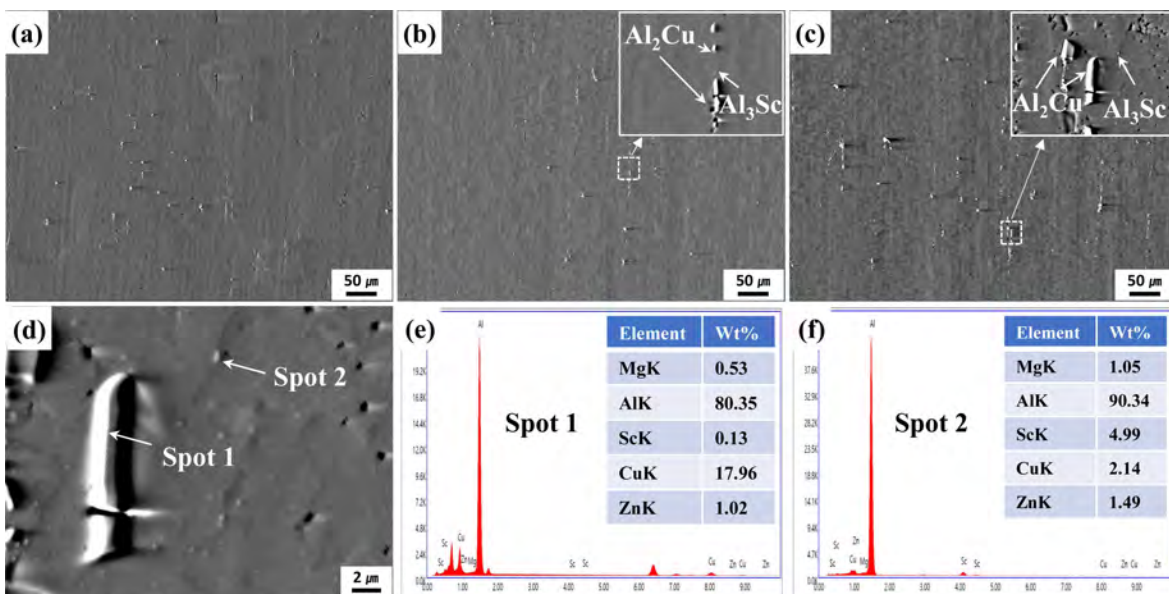


Fig. 4. SEM images of the as-extruded Al-2Zn-1Cu-0.3Mg (a), Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-0.25Sc (b), Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-0.5Sc ((c) and (d)) and EDS measuring points spot 1 (e) and spot 2(f) of the as-cast Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-0.5Sc alloy.

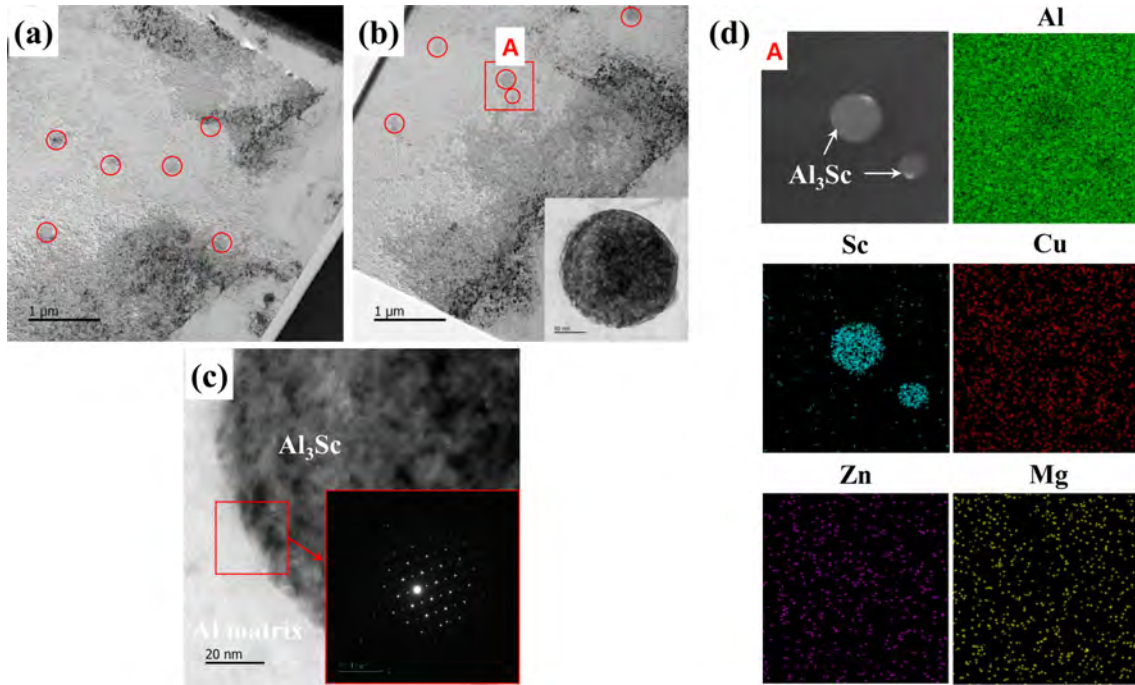


Fig. 5. TEM images of the as-casted Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-0.5Sc alloy : Bright field images ((a) and (b)), SAED pattern (c) and element mapping (d).

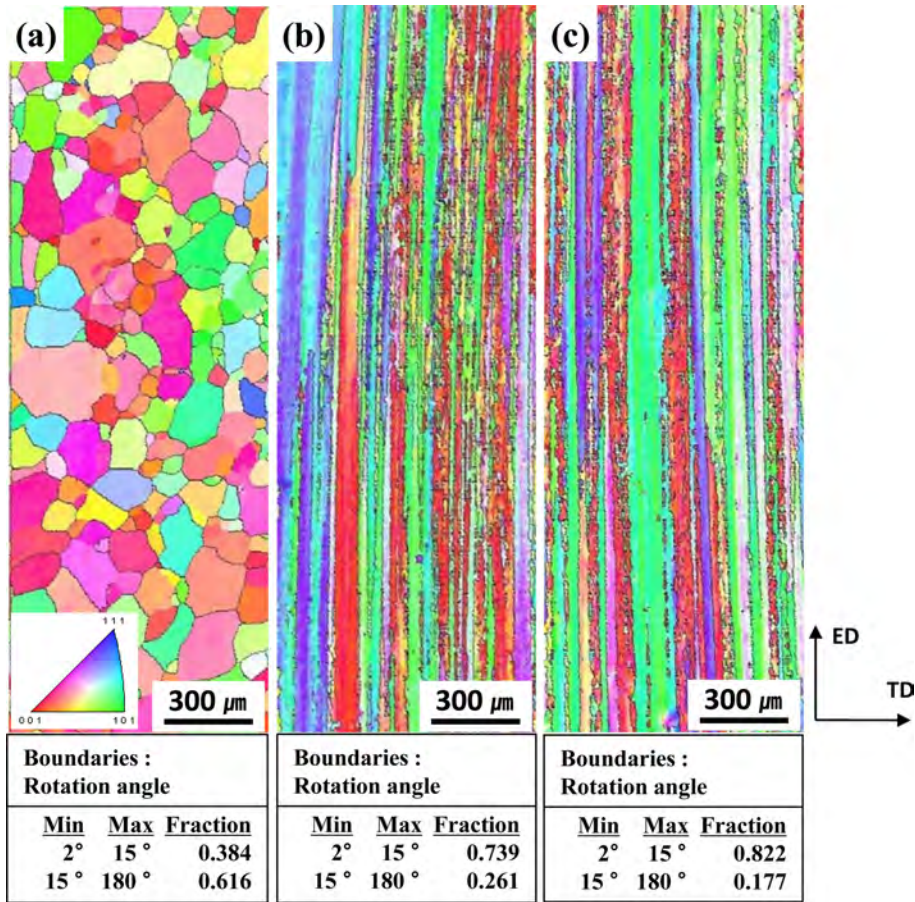


Fig. 6. Inverse pole figure maps of the as-extruded Al-2Zn-1Cu-0.3Mg (a), Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-0.25Sc (b), and Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-0.5Sc (c) alloys obtained from the EBSD analysis.

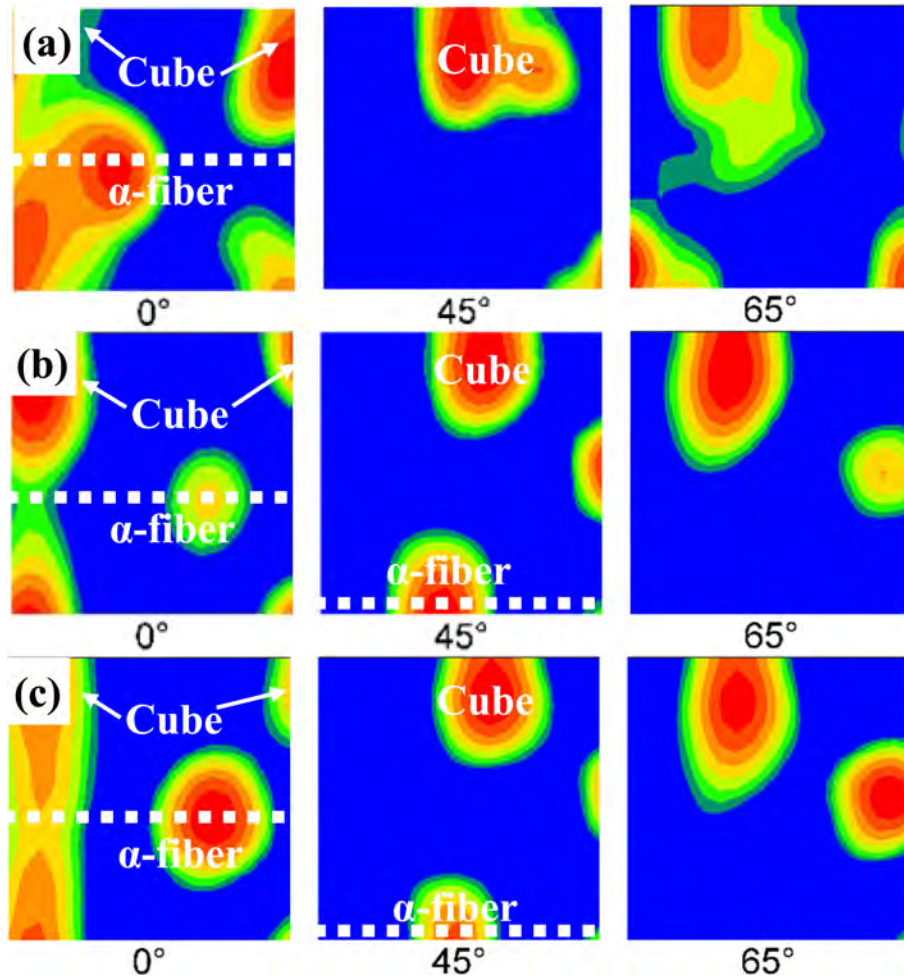


Fig. 7. ODF maps of the as-extruded Al-2Zn-1Cu-0.3Mg (a), Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-0.25Sc (b) and Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-0.5Sc (c) alloys.

EBSD분석 결과이다. Inverse pole figure map에 나타난 것과 같이 Sc가 첨가되지 않은 합금은 동적 재결정 발생으로 인하여 다수의 등축의 재결정 조직을 나타내고 있으며, 15° 이상의 고경각 입계의 분율이 약 62%로 저경각 입계 분율 약 38%보다 높은 비율을 나타내고 있다. 그러나 Sc가 첨가된 합금에서는 결정립이 압출방향으로 길게 연신된 가공조직을 나타내고 있다. 또한 고경각 입계 분율이 저경각 입계 분율에 비해 크게 낮았으며, 그 정도는 Sc첨가량이 증가함에 따라 증가하였다. Fig. 7은 방향분포함수(ODF)를 나타낸 것으로 모든 합금에서 cube texture((001)[100])와 α -fiber texture((011)[1-11])가 같이 발달하였으나, Sc함량이 높을수록 Cube texture는 약하게 α -fiber texture는 강하게 발달해 있는 것을 확인할 수 있었다. 이는 Sc첨가에 의해 형성된 구형의 Al_3Sc 상이 재결정 형성에 의해 발달하는 cube texture에 강화를 약화시켰기 때문으로 판명된다.

Fig. 8은 Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-xSc합금 압출재의 인장시험 결과이다. 그림에서와 같이 Al-2Zn-1Cu-0.3Mg합금의

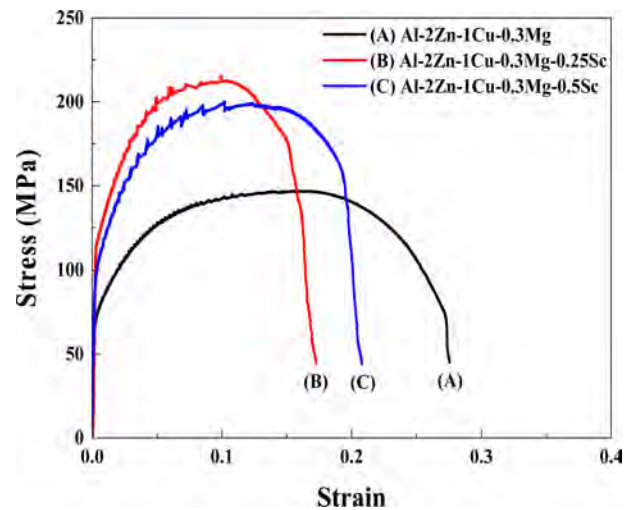


Fig. 8. Mechanical properties of the as-extruded Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-xSc ($x = 0, 0.25, 0.5$ wt%) alloys.

인장강도는 146 MPa로 가장 낮은 값을, 연신율은 27%로 가장 높은 값을 나타내었다. Sc가 0.25 wt% 첨가된

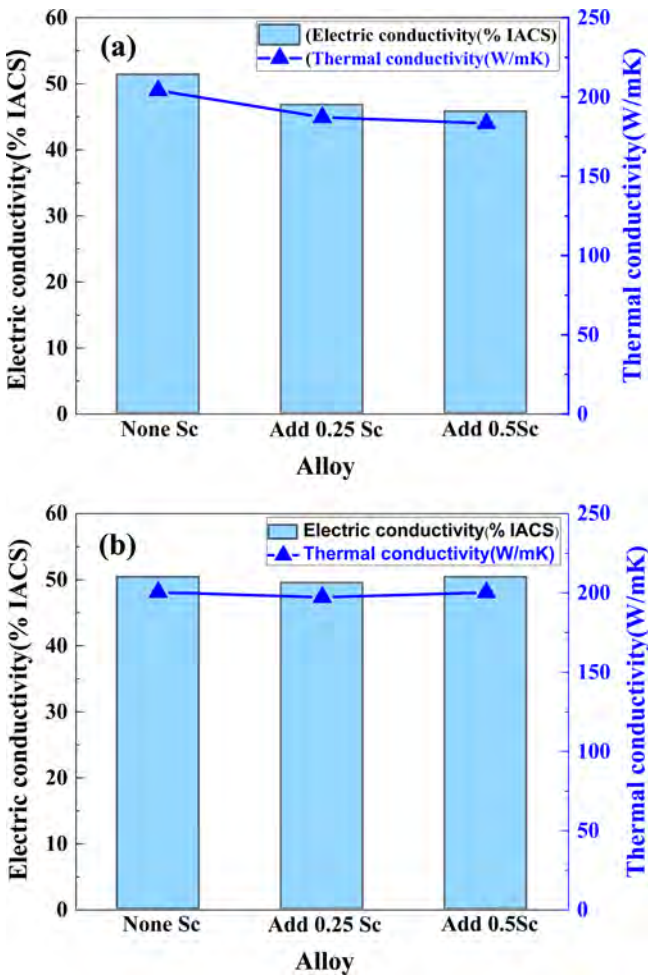


Fig. 9. Electric conductivity and thermal conductivity of the as-cast (a) and as-extruded (b) Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-xSc ($x = 0, 0.25, 0.5$ wt%) alloys.

합금에서는 인장강도가 215 MPa로 증가하였으며, 연신율은 17%로 감소하였다. 이것은 Al_3Sc 석출물의 형성에 기인한 것이다. 그러나 Sc첨가량이 0.5 wt%로 증가한 합금의 경우 인장강도는 201 MPa로 다소 감소하고, 연신율은 20%로 증가하였다. 이것은 과도한 Sc첨가로 인해 또 다른 강화에 기여하는 석출상인 Al_2Cu 석출상의 크기를 증가시키고, 분포도를 감소시키는 결과를 초래하기 때문으로 보고되고 있다.¹⁵⁾

Fig. 9는 Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-xSc 합금의 주조재 및 압출재의 Sc첨가량에 따른 전기전도도 및 열전도도 변화 그래프이며, 그 상세한 값은 Table 2에 나타나 있다. 그림에서와 같이 주조재의 열전도도 값은 Sc가 첨가되지 않은 합금에서 204 W/Mk로 가장 높았으며, Sc첨가량이 0.25 wt% 및 0.5 wt%로 증가함에 따라 187 W/Mk, 183 W/Mk으로 다소 감소하였다. 반면에 Fig. 9(b)에 압출재의 열전도도 값은 모든 합금에서 거의 약 200 W/Mk이며, Sc첨가로 인한 변화는 나타나지 않았다.

Table 2. Electric conductivity and thermal conductivity of the as-cast (a) and as-extruded (b) Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-xSc ($x = 0, 0.25, 0.5$ wt%) alloys

Alloy		Electric conductivity (%IACS)	Thermal conductivity (W/mk)
Al-2Zn-1Cu-0.3Mg	As-cast	51	204
Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-0.25Sc		46	187
Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-0.5Sc		45	183
Al-2Zn-1Cu-0.3Mg	As-extruded	50	200
Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-0.25Sc		49	197
Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-0.5Sc		50	200

여기에서 주목할 부분은 주조재에 비해 압출재의 전기전도도 및 열전도도가 증가하였다는 것이다. 그 원인은 주조재에서 기지내 고용되어 있던 Sc가 열간 압출시 Al_3Sc 상을 형성하는데 소비되어 Sc고용에 의한 전기전도도 및 열전도도의 감소가 약화되었기 때문으로 판단된다.

4. 결 론

Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-xSc ($x = 0, 0.25, 0.5$ wt%) 합금의 Sc첨가에 따른 미세조직, 전기전도도, 열전도도 및 기계적 특성에 관해 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-xSc ($x = 0, 0.25, 0.5$ wt%) 합금 주조재의 경우 모든 합금에서 Al_2Cu 상이 나타났으며, Sc가 첨가되어짐에 따라 Al_3Sc 금속간 화합물이 형성되었다. Al_3Sc 상은 결정립 미세화에 기인하며, Al_2Cu 상과 동시에 석출되는 것으로 판단된다.

2) Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-xSc 합금 압출재에서 Sc가 첨가되지 않은 합금은 동적 재결정으로 인해 등축의 재결정 조직을 형성하였으나, Sc가 첨가된 합금은 결정립이 압출 방향으로 연신된 가공조직을 형성하였다. 이것은 구형의 Al_3Sc 상이 재결정의 형성을 억제하였기 때문이다.

3) 인장 강도는 Sc첨가에 의한 Al_3Sc 상의 형성으로 인해 증가하였으나, 과도한 Sc첨가는 강화에 기여하는 또 다른 석출상인 Al_2Cu 상의 분산도를 낮추어 강도 증가의 효과를 감소시키는 결과를 초래하였다.

4) Al-2Zn-1Cu-0.3Mg-xSc 합금 주조재의 전기전도도 및 열전도도는 Sc첨가량이 증가함에 따라 다소 감소하였으나, 압출재의 열전도도 값은 모든 합금에서 거의 약 200 W/Mk로 Sc첨가로 인한 변화는 나타나지 않았다. 이것은 주조재에서 기지내 고용되어 있던 Sc가 열간 압출시 Al_3Sc 상을 형성하는데 대부분 소비되어 Sc고용에 의한 전

기전도도 및 열전도도의 감소를 약화되었기 때문으로 판단된다.

Acknowledgment

This work was supported by ‘Energy Efficiency & Resources Core Technology Program’ of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) granted financial resource from the Ministry of Trade, Industry & Energy, Republic of Korea (No. 2018201010633B).

References

1. K. B. Hyde, A. F. Norman and P. B. Prangnell, *Acta Mater.*, **49**, 1327 (2001).
2. J. Y. Hwang and S. H. Lee, *Korean J. Mater. Res.*, **29**, 392 (2019).
3. S. J. Oh and S. H. Lee, *Korean J. Mater. Res.*, **28**, 534 (2018).
4. S. H. Jo and S. H. Lee, *Korean J. Mater. Res.*, **30**, 246 (2020).
5. J. Hirsch, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, **24**, 1995 (2014).
6. L. K. Berg, J. Gjonnes, V. Hansen, X. Z. Li, M. Knutson-Weld, G. Waterloo, D. Schryvers and L. R. Wallenberg, *Acta Mater.*, **49**, 3443 (2001).
7. J. C. Werenskiold, A. Deschamps and Y. Brechet, *Mater. Sci. Eng., A*, **293**, 267 (2000).
8. D. N. Seidman, E. A. Marquis and D. C. Dunand, *Acta Mater.*, **50**, 4021 (2000).
9. B. A. Chen, G. Liu, R. H. Wang, J. Y. Zhang, L. Jiang, J. J. Song, and J. Sun, *Acta Mater.*, **61**, 1676 (2013).
10. M. E. V. Dalen, D. N. Seidman and D. C. Dunand, *Acta Mater.*, **56**, 4369 (2008).
11. C. Yang, P. Zhang, D. Shao, R. H. Wang, L. F. Cao, J. Y. Zhang, G. Liu, B. A. Chen and J. Sun, *Acta Mater.*, **119**, 68 (2016).
12. P. C. Bai, X. H. Hou, X. Y. Zhang, C. W. Zhao and Y. M. Xing, *Mater. Sci. Eng., A*, **508**, 23 (2009).
13. D. Tsivoulas, J. D. Robson, C. Sigli and P. B. Prangnell, *Acta Mater.*, **60**, 5245 (2012).
14. V. N. Glazkov, L. Ginzburg and A. Orlov, *Am. J. Physiol.*, **85**, 473 (2017).
15. C. Yang, L. Cao, Y. Gao, P. Cheng, P. Zhang, J. Kuang, J. Zhang, G. Liu and J. Sun, *Mater. Des.*, **186**, 108309 (2020).

<저자소개>

나상수

한국생산기술연구원 스마트모빌리티소재부품연구그룹 연구원
국립목포대학교 학생

김용호

한국생산기술연구원 스마트모빌리티소재부품연구그룹 연구원

손현택

한국생산기술연구원 스마트모빌리티소재부품연구그룹 수석연구원

이성희

국립목포대학교 교수