

## 인발가공에 의해 제조된 전선용 Al-Fe-Mg-Cu-B계 합금의 기계적 및 전기적 특성

정창기<sup>1</sup> · 宇都宮裕<sup>2</sup> · 손현택<sup>3</sup> · 이성희<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>국립목포대학교 신소재공학과, <sup>2</sup>오사카대학교 재료과학과, <sup>3</sup>한국생산기술연구원

## Mechanical and Electrical Properties of an Al-Fe-Mg-Cu-B System Alloy for Electrical Wire Fabricated by Wire Drawing

Chang-Gi Jung<sup>1</sup>, Utsunomiya Hiroshi<sup>2</sup>, Hyeon-Taek Son<sup>3</sup> and Seong-Hee Lee<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>Department of Advanced Materials Science and Engineering, Mokpo National University, Muan-gun, Jeonnam 58554, Republic of Korea

<sup>2</sup>Department of Materials Science and Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamada-Oka Suita, Osaka 565-0871, Japan

<sup>3</sup>Automotive Components and Materials Group, Korea Institute of Industrial Technology, 1110-9 Oryong-dong, Buk-gu, Gwangju 61012, Republic of Korea

(Received August 2, 2017 : Revised October 13, 2017 : Accepted October 13, 2017)

**Abstract** In this study, an Al-0.7wt%Fe-0.2wt%Mg-0.2wt%Cu-0.02wt%B alloy was designed to fabricate an aluminum alloy for electrical wire having both high strength and high conductivity. The designed Al alloy was processed by casting, extrusion and drawing processes. Especially, the drawing process was done by severe deformation of a rod with an initial diameter of 12 mm into a wire of 2 mm diameter; process was equivalent to an effective strain of 3.58, and the total reduction in area was 97%. The drawn Al alloy wire was then annealed at various temperatures of 200 to 400 °C for 30 minutes. The mechanical properties, microstructural changes and electrical properties of the annealed specimens were investigated. As the annealing temperature increased, the tensile strength decreased and the elongation increased. Recovery or/and recrystallization occurred as annealing temperature increased, and complete recrystallization occurred at annealing temperatures over 300 °C. Electric conductivity increased with increasing temperature up to 250 °C, but no significant change was observed above 300 °C. It is concluded that, from the viewpoint of the mechanical and electrical properties, the specimen annealed at 350 °C is the most suitable for the wire drawn Al alloy electrical wire.

**Key words** aluminum electrical wire, cold drawing, mechanical property, electrical conductivity, microstructure.

### 1. 서 론

환경 오염, 오존층 파괴 등의 주범인 CO<sub>2</sub>가스의 감소를 위한 수송기기의 경량화가 선택이 아닌 필수가 된지 오래되었지만, 자동차의 경우 여전히 경량화를 위한 문제 해결에는 많은 어려움이 있다.<sup>1-6)</sup> 자동차 경량화를 위한 간편한 방법 중에 하나는 기존 소재를 더욱 경량인

소재로 변경하는 것이다. 따라서 최근 비교적 중량인 철, 구리를 대체하여 대표적인 경량 소재인 알루미늄, 탄소 섬유 및 마그네슘 등을 차량부품으로 적용하고자 하는 연구가 많이 진행되고 있다. 특히, 알루미늄(Al)은 경량의 이점 외에도 소성가공성이 우수하고 내부식성이 뛰어난 장점이 있다. 그러나 알루미늄의 전기전도도는 구리의 약 60%에 불과하여 구리의 전기전도도를 구현하

<sup>†</sup>Corresponding author

E-Mail : 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.

기 위해서는 구리 전선보다 약 30% 정도 더 두껍게 설계해야 하지만, 이 경우에도 중량을 40% 이상 줄일 수 있다.<sup>7-9)</sup> 일반적으로 자동차 한 대에 들어가는 전선의 길이는 수km에 달하여 전선 무게만 40kg을 넘기도 하여 Cu전선의 대체재료로서의 새로운 알루미늄 전선에 대한 연구가 많이 요구되고 있다.

현재 사용되고 있는 저압 Al 합금전선의 경우, 인장강도 184 MPa, 연신율 22%의 비교적 우수한 인장 특성을 나타내는 반면, 전기전도도는 약 52%IACS(International Annealed Copper Standard)로 비교적 낮은 편이다. 그러므로 높은 강도를 유지하며 전기전도도가 우수한 새로운 전선용 Al합금의 개발이 시급한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 우수한 기계적 및 전기적 특성을 가진 새로운 Al전선을 개발하고자 합금설계에서부터 주조, 압출, 인발 등과 같은 일련의 공정을 실시하여 직경 2mm의 전선용 Al합금을 제조하여 그 기계적 및 전기적 특성을 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1 합금설계 및 Al-Fe-Mg-Cu-B계 전선 제조

Table 1에 새롭게 합금설계한 조성을 나타내었다. 참고를 위하여 기존의 상용 저압용 Al전선의 조성도 함께 나타내었다. 본 연구에서의 합금설계의 주된 방향은 전기전도도를 크게 감소시키는 원소의 함량을 줄이고 강도향상에 기여하는 원소를 적절히 첨가하는 것이다. Fig. 1에 순알루미늄의 전기전도도에 미치는 불순물 첨가원소의 영향에 관한 그림을 나타내었다.<sup>10)</sup> 그림에서와 같이 V, Ti와 같은 원소들은 미량만 첨가해도 전기전도도를 크게 감소시킨다. 따라서 본 연구에서는 V, Ti와 같은 원소들과 반응성이 뛰어나다고 알려져 있는 B(Boron)를 첨가하여 이런 원소들을 제거하였으며, 대신에 강도 향상에 기여하는 Cu원소를 소량 첨가하였다.<sup>9)</sup> 또한 전기적 특성을 감소시키는 원소의 하나인 Fe원소의 양도 다소 감소시켰다. 이와 같이 설계한 Al-Fe계 합금을 주조, 압출, 인발공정 순으로 실험을 진행하여 Al합금 전선을 제조하였으며, 각 공정의 세부 내용은 다음과 같다. 먼저 주조는 흑연도가니를 사용하였으며, 온도 800°C에서 순알루미늄을 용해한 용탕에 Fe, Cu, Mg, B(AlB모합금)를 장입하여 Al-Fe계 합금 잉곳을 제조하였다. 그 후 이 잉곳을 Ø70로 가공하여, 압출속도 7 cm/sec, 컨테이너 온

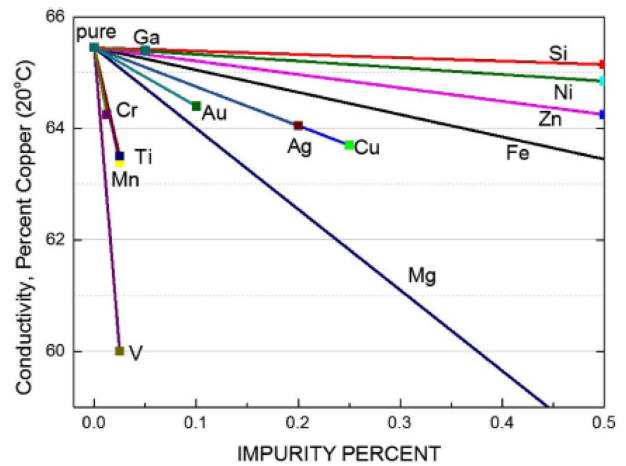


Fig. 1. Influence of various elements on the conductivity of aluminum.<sup>10)</sup>

도 350°C, 다이 온도 300°C, 빌렛 온도 250°C에서 직접압출법을 통하여 직경 12mm의 봉상 형태의 Al-Fe계 합금으로 압출 가공하였다. 이 때, 총 압출단면감소율은 약 97% (Ø70 → Ø12)이다. 그 후 압출된 봉상 합금을 400°C에서 30분간 어닐링하여 내부에 축적된 응력(변형량)을 모두 제거한 후, 753 mm/sec의 속도로 상온에서 총 22패스의 공정으로 인발 공정을 실시하여 최종 직경을 Ø2까지 감소시켰다. 여기서 인발가공에 따른 상당변형량의 크기를 계산해 보자. 상당변형량은 다음 식(1)과 같이 표현된다.

$$\bar{\epsilon} = \sqrt{2/9[(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2]} \quad (1)$$

체적일정의 조건  $\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0$ 와 인발공정에서의  $\epsilon_1 = \epsilon_2$ 를 조합하면  $\epsilon_3 = -2\epsilon_1$ 의 관계가 성립한다. 이 관계식을 식(1)에 대입하면 상당변형량은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{\epsilon} = 2\epsilon_1 \quad (2)$$

여기서  $\epsilon_1 = \ln(L/L_0) = \ln(A_0/A)$ 이므로 인발 전, 후 단면적을 대입하여 상당변형량을 구하면  $\bar{\epsilon} = 3.58$ 이다. 이 값은 압연공정의 경우 압하율 약 97%에 해당되는 상당히 큰 가공량에 해당된다. 이처럼 인발가공에 의해 소성가공된 Al-Fe계 전선을 전기료를 사용하여 각각 200~400°C의 각 온도에서 30분간 어닐링하여 다양한 전기

Table 1. Chemical compositions of commercial and newly designed Al-Fe base alloys(wt%).

Alloys	Al	Fe	Mg	Ti	V	Zn	Cu	B
Commercial Al-Fe base alloy	Bal.	1.12	0.18	0.02	0.01	0.02	-	-
Newly designed Al-Fe base alloy	Bal.	0.7	0.2	-	-	-	0.2	0.02

적, 기계적 특성의 조합을 갖는 전선용 Al합금을 제조하였다.

### 2.2 특성평가

인발가공된 시편의 기계적 특성은 상온에서 경도시험 및 인장시험으로 평가하였다. 경도시험은 마이크로비커스 경도기를 사용하였으며, 0.05 kgf의 하중으로 압입시간 10 초의 조건에서 횡단면에 평행하게 자른 시편을 두께방향으로 0.1 mm씩 이동하며 측정하였다. 인장시험은 Al-Fe 알루미늄 전선 시편을 길이 250 mm로 잘라 150 mm의 표점거리로 각 온도 당 시편 5개씩 Instron type의 인장 시험기를 이용하여  $10^{-3}s^{-1}$ 의 일정한 변형률 속도로 진행하였다.

미세조직은 FE-SEM/EBSD(Electron Back Scattering Diffraction)측정을 통하여 분석하였다. EBSD측정은  $HClO_4 : CH_3CH_2OH = 1 : 9$  용액을  $-5^{\circ}C$ , 전류 26 V 조건 하에서 35초 동안 전해에칭 하였으며, Tex SEM Laboratory (TSL)사의 EBSD 해석프로그램인 TSL OIM Data Collection ver.3.5를 이용하여 분석하였다.

전기적 특성은 전기저항 측정 후 아래의 식(3)를 이용하여 비저항을 구한 후 식(4)과 같이 전기전도도의 단위인 %IACS로 환산하였다. 참고로 %IACS는 국제연동 표준(The International Annealed Copper Standard)의 약칭이며, 전도율의 단위로 풀림한 순동의 전기전도도 5.81

$\times 10(\Omega m)^{-1}$ 를 100%IACS라 하여, 이것과의 비로 나타낸 값이다.

$$\rho = R \times (A/L), \sigma = 1/\rho \tag{3}$$

여기서,  $\rho$ 는 비저항, R은 전기저항, L은 길이, A는 단면적,  $\sigma$ 는 전기전도도(siemens, 시멘스)를 나타낸다.

$$\%IACS = \left( \frac{\sigma}{5.81 \times 10^7} \right) \times 100 \tag{4}$$

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 미세조직

Fig. 2는 인발가공에 의해 제조된 Al 합금 전선의 어닐링 온도에 따른 종단면에서 측정된 SEM/EBSD의 CD (Circumferential Direction) 및 GB map(Grain Boundary Map)을 나타낸 것이다. 여기서 CD map이란 인발재의 원주방향에 수직인 면에서 측정된 결정립들의 결정방위를 표준삼각형에 대응하는 색상으로 나타낸 그림이며, GB map이란 결정립계의 방위각을 크기에 따라 색상 별로 나타낸 그림이다. 그리고 그림에서 DD는 인발 방향(Drawing Direction)을 나타낸다. 그림에서와 같이 어닐링 전과 200, 250  $^{\circ}C$  어닐링재는 결정립이 인발 방향으로 길게 연신된 가공조직을 나타내며, 300  $^{\circ}C$  이상에서는 등축결정립의 재

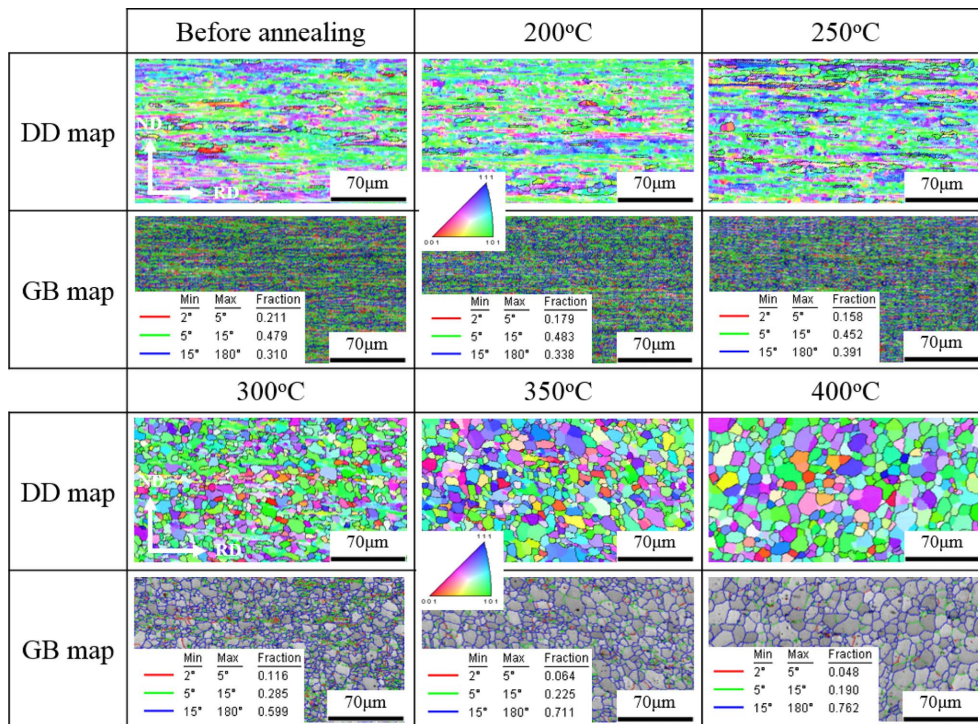


Fig. 2. EBSD images of an Al-Fe base alloys severely deformed by drawing process and annealed.

결정조직을 나타낸다. 300 °C 이상의 어닐링재의 경우, 어닐링 온도 증가에 따른 결정립 성장이 두드러져 300 °C 어닐링재에서는 평균입경이 16 μm 이었던 것이 400 °C 어닐링재에서는 21 μm로 크게 증가하였다. 또한 결정립계 방위각의 경우, 고정각 입계의 분율이 300 °C 어닐링재에서는 약 60%이던 것이 400 °C에서는 약 76%로 크게 증가하였다. 그리고 350 °C 어닐링재에서는 결정립 크기 편차가 커서 큰 결정립과 작은 결정립이 혼재되어 있는 불균일한 미세조직을 형성하고 있었다.

3.2 기계적 성질

3.2.1 인장 특성

Fig. 3(a)에 어닐링 온도에 따른 공칭응력-공칭변형률(s-s) 곡선을 나타내었다. 그림에서와 같이 어닐링 온도가 증가할수록 인장강도가 감소하고, 연신율이 증가하는 전형적인 s-s곡선을 나타낸다. 특히, 250 °C에서 300 °C로 어닐링 온도가 증가함에 따라 인장강도 감소가 크고 연신율의 증가가 두드러진 경향을 보임을 알 수 있다. 이것은 250 °C에서의 가공조직이 300 °C에서 완전재결정 조

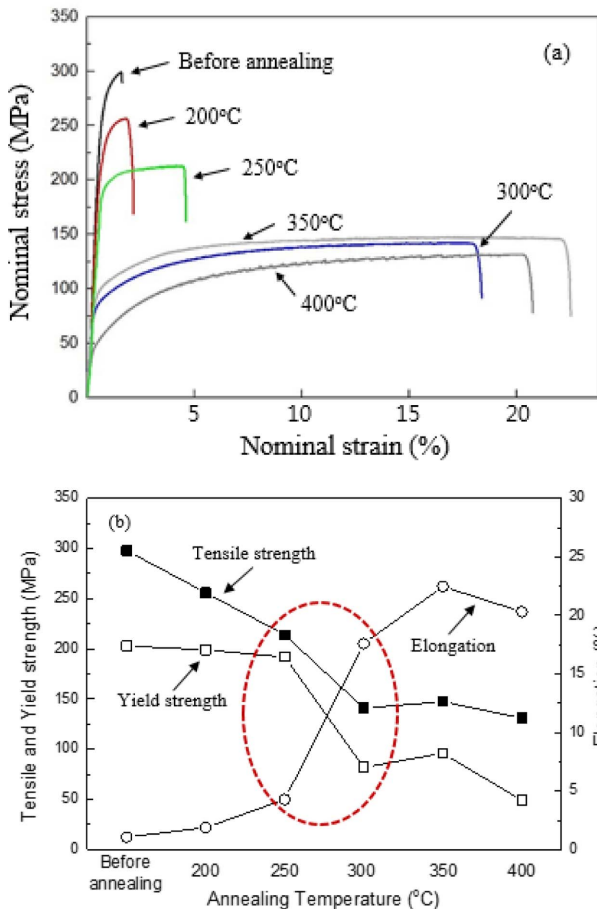


Fig. 3. Changes in nominal stress-strain curves (a) and mechanical properties (b) of Al-Fe base alloy with annealing temperature.

직으로 급격한 미세조직 변화가 일어났기 때문이라 사료된다.

Fig. 3(b)는 어닐링 온도에 따른 인장강도, 항복강도, 연신을 변화를 정리하여 나타낸 그래프이다. 인발가공 후 어닐링 전 AI전선의 경우, 인장강도 298 MPa, 항복강도 200 MPa, 연신율 약 1%로 높은 강도와 매우 낮은 연신율을 나타내었다. 그러나, 어닐링 온도가 증가함에 따라 AI전선의 인장강도가 급격히 감소하여 300 °C 어닐링재에서 142 MPa의 매우 낮은 값을 나타내었다. 항복강도 또한 어닐링 온도 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내었으나 250 °C까지는 감소량이 극히 미미하였으며, 완전재결정이 발생한 300 °C에서의 감소량이 매우 컸다. 이것은 새롭게 개발한 AI전선의 열적 안정성이 250 °C까지는 매우 우수함을 나타내는 것으로 전선재로서의 적용 가능성이 높음을 잘 보여주는 결과라 할 수 있다. 어닐링 온도 증가에 따른 파단 연신율의 변화는 강도와 상반된 경향을 나타내는 것을 그래프에서 확인할 수 있다.

3.2.2 경도

Fig. 4에 제조한 AI 알루미늄 합금 전선의 어닐링 온도에 따른 경도 변화를 나타내었다. 어닐링 전 시편의 경도는 인발가공에 따른 가공경화로 인해 50 Hv의 높은 값을 나타내었으나, 어닐링 온도가 증가함에 따라 크게 감소하여 400 °C 어닐링 후에는 24 Hv의 낮은 값을 나타내었다. 그림에서와 같이 어닐링 온도가 250 °C에서 300 °C로 증가할 때 경도의 감소폭이 가장 컸으며, 이 결과는 300 °C 이상에서는 완전재결정이 발생하여 등축재 결정립이 생성되기 때문이며 앞서 설명한 인장시험 결과와 잘 일치한다.

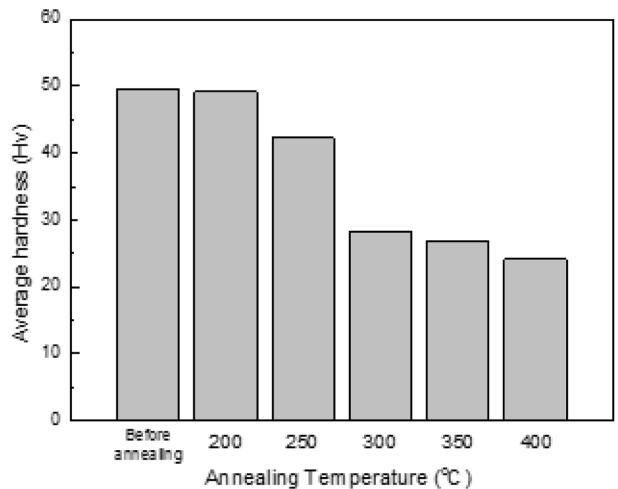


Fig. 4. Change in average hardness of an Al-Fe base alloy with annealing temperature.

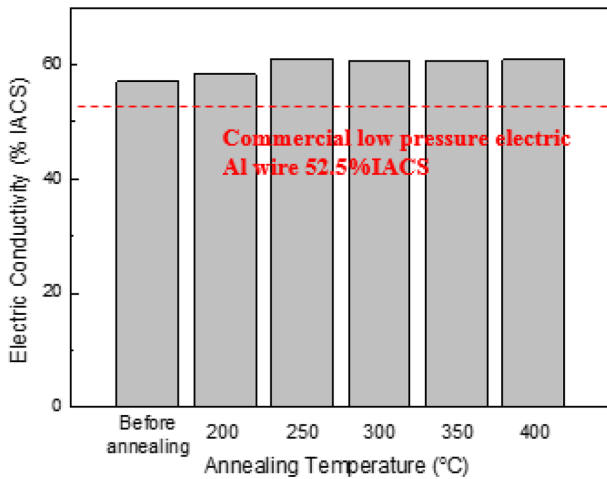


Fig. 5. Change in electric conductivity of an Al-Fe base alloy with annealing temperature.

### 3.3 전기전도도

Fig. 5에 어닐링 온도에 따른 전기전도도 변화를 나타내었다. 그림과 같이 어닐링 전 전기전도도가 56.9%-IACS였던 것이 200 °C, 250 °C로 어닐링 온도가 증가함에 따라 회복의 발생으로 인해 각각 58.3%IACS, 60.9%-IACS로 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 300 °C 이후는 250 °C와 큰 차이를 보이지 않았다. 실제 재결정 후 어닐링 온도와 결정립 크기는 전기전도도에 큰 영향을 주지 않는다고 알려져 있으며,<sup>7)</sup> 본 연구에서도 회복으로 인해 전기전도도가 약간 증가했으나, 재결정 이후는 어닐링 온도가 증가해도 전기전도도에 큰 변화는 나타나지 않았다. 따라서, 본 연구에서 개발된 Al전선이 그림에서와 같이 모든 어닐링 조건에서 상업용 저압 Al전선의 전기전도도에 비해 우수한 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 강도-연성지수와 전기전도도 그래프를 나타낸 것이다. 여기서 강도-연성지수란 강도와 연신율을 곱한 값으로써 편의상 기계적 특성의 평가지표로 삼고자 한다. 현재 상용화된 저압 알루미늄 전선의 강도연성지수는 4.05GPa%로 매우 높은 수치이나, 전기전도도는 52.5%-IACS로 비교적 낮은 값을 나타낸다. 본 연구에서는 어닐링 전과 200 °C 어닐링재의 경우 강도는 비교적 높은 값을 나타내지만, 연신율이 매우 낮아 강도연성지수가 각각 0.32GPa%, 0.48GPa%에 불과하며, 전기전도도 역시 비교적 낮은 값을 나타내었다. 또한 250 °C의 경우, 어닐링 전과 200 °C 어닐링재에 비해 연신율이 증가하였으나, 강도연성지수는 0.92GPa%로 낮은 값을 나타내었다. 그러나, 300 °C, 350 °C 어닐링재는 강도연성지수가 각각 2.5GPa%, 3.32GPa%로 비교적 큰 값을 나타내었으며, 특히 350 °C 어닐링재에서 가장 높은 강도연성지수를 나타내었다. 또한 400 °C 어닐링재의 강도연성지수

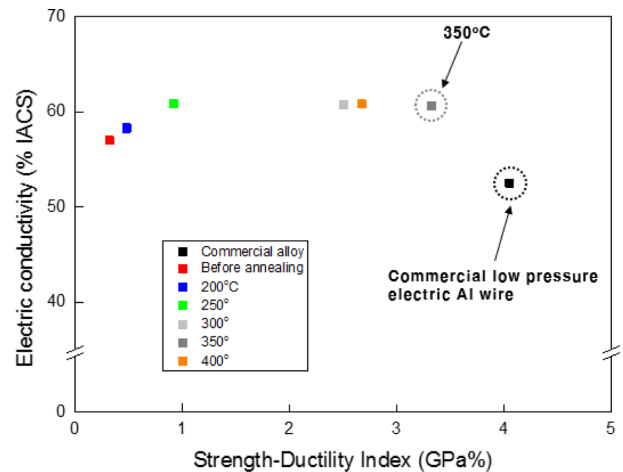


Fig. 6. Relation of strength-ductility index and electric conductivity of Al-Fe developed by drawing and annealing process.

는 2.67GPa%로 350 °C 어닐링재에 비해 오히려 감소하였다. 그러므로 본 연구에서는 350 °C 어닐링재가 기계적 특성, 전기적 특성 모두를 고려해 볼 때 전선재로서 가장 적합하다고 결론 지을 수 있다.

## 4. 결 론

강도 및 전기전도도가 우수한 Al 합금 전선을 개발하기 위하여 새롭게 합금 설계한 Al-0.7wt%Fe-0.2wt%Mg-0.2wt%Cu-0.02wt%B합금을 주조, 압출, 인발 후에 어닐링을 실시한 결과 다음과 같이 결론 내릴 수 있다.

- 1) 어닐링 온도가 증가함에 따라 강도는 감소하고 연성은 증가하는 전형적인 연화곡선을 나타내었다. 다만 250 °C에서 300 °C로 어닐링 온도가 증가함에 따라 완전재결정의 발생으로 인하여 강도의 감소폭이 컸으며, 연성의 증가량 또한 컸다.
- 2) 어닐링 온도가 250 °C까지는 주로 회복이 발생하였으며, 300 °C이상에서는 완전재결정이 발생하여 등축결정립을 가진 재결정조직을 나타내었다.
- 3) 전기전도도는 어닐링 온도가 250 °C까지 증가함에 따라 회복으로 인해 증가하였으며, 300 °C이상에서는 큰 변화가 없었다.
- 4) 본 연구범위 내에서 기계적특성 및 전기전도도를 고려할 때 350 °C 어닐링재료가 알루미늄 전선재로서 가장 우수한 특성을 나타낸다고 결론 지을 수 있다.

## References

1. H. W. Kim, S. B. Kang, H. Kang and K. W. Nam, J. Korean Inst. Met. Mater., **37**, 1041 (1999).

2. K. D. Woo, H. S. Na, H. J. Mun and I. O. Hwang, J. Korean Inst. Met. Mater., **38**, 766 (2000).
3. S. Guo, Y. Xu, Y. Han J. Liu, G. Xue and H. Nagaumi Trans. Nonferrous Met. Soc. China, **24**, 2393 (2014).
4. M. J. Ahn, H. S. You and S. H. Lee, Korean J. Met. Res., **26**, 388 (2016).
5. S. J. Mo Development trend of automobile lightweight materials and the responses of auto part manufacturers, Korean Auto. Res. Inst., p.41 (2013)
6. J. H. Yang and S. H. Lee, Korean J. Met. Res., **26**, 628 (2016).
7. J. J. Hwan, Ph.D. Thesis, Inha University, Incheon (2014).
8. K. T. Kim, Ph.D. Thesis, Yonsei University, Seoul (2001).
9. M. K. Park, J. I. Cho, S. H. Lee and C. W. Kim, J. Korean Fou. Soc., **36**, 147 (2016).
10. Gaston G. Gauthter, J. Inst. Met., **59**, 129 (1936).