

## Cu-Fe 합금에서 소성변형과 어닐링 공정조건이 인장강도와 전기전도도에 미치는 영향

우창준 · 박현균<sup>†</sup>

한국산업기술대학교 신소재공학과

### Effect of Plastic Deformation and Annealing Process Parameters on Strength and Electrical Conductivity of Cu-Fe Alloys

Chang-Jun Woo, Hyun Gyoon Park<sup>†</sup>

Department of Advanced Materials Engineering, Korea Polytechnic University, Geonggi-Do 429-793, Korea

**Abstract** In order to investigate the effect of plastic deformation and annealing process parameters on strength and electrical conductivity of Cu-Fe alloys, Cu-10wt%Fe, Cu-15wt%Fe alloys were drawn up to  $\eta=4$  and annealed in the temperature range of 300°C to 700°C, followed by measurements of tensile strength and electric conductivity. As draw strain increases, tensile strength increases while electrical conductivity decreases. These observations result from reduction of dislocation density and decrease in Fe fiber spacing. Raising annealing temperature brought about decrease of tensile strength and increase of electrical conductivity up to 500°C, being followed by decreasing above 500°C. Such results are thought to be caused by decrease of dislocation density below 500°C and rapid solubility increase of Fe in Cu above 500°C. For the purpose of obtaining both high strength and high conductivity, annealing process should be incorporated just prior to reaching to final draw strain. For Cu-10wt%Fe alloy, the tensile strength 706.9 MPa and the electrical conductivity 54.34%IACS were obtained through the processes of drawing up to  $\eta=3$ , annealing at 500°C for 1 hour and additional drawing up to total strain of  $\eta=4$ .

(Received April 23, 2019; Revised May 14, 2019; Accepted May 16, 2019)

**Key words** : Cu-Fe alloys, Drawing strain, Annealing, Tensile strength, Electrical conductivity

### 1. 서 론

산업발전에 따라 최근의 리드프레임, 커넥터, 다이 오드 등의 반도체 부품이나 전선, 스위치 등의 전자 부품 소재는 높은 강도와 전기전도도를 지닌 소재를 요구하고 있다. 따라서 사용되는 소재는 일반적으로 가공성과 전기전도성이 뛰어난 동합금을 사용하여 왔는데, 순 구리는 강도가 낮기 때문에 이를 보완하기 위하여 제 2 또는 제 3의 원소를 합금하여 강도를 올려 사용해 왔다. 이 때 구리에 다른 원소가 들어가면 전기전도도가 감소하므로 이 폐해를 최소화하기 위해 타원소가 고용이 아닌 석출물의 형태로 존재하게 하여 강도는 높이면서 전기 전도도의 저하를 최소화 하는 합금설계를 해왔다[1-3].

이러한 개념에 기반하여 그 동안 베릴륨동, 크롬동 등 여러 가지 동 합금이 개발되어 사용되어 왔는데, 대부분 강도, 전기전도도의 필요특성을 충족시키지 못하였으므로, 필요특성을 개선하기 위해 Cu-Ag, Cu-Nb계 합금을 개발하여 높은 강도와 전기전도도를 얻었다. 하지만 이 합금들에서는 합금원소의 희소성 및 비경제성 때문에 적용분야가 크게 제한되어 용이성 측면에서 첨가원소로 Fe를 이용한 합금의 개발에 대한관심이 고조되고 있다[4-8]. Cu-Fe합금계에서는 준안정 액상 분리영역이 존재하여 실제 응고시 구리와 철의 준안정 액상분리가 일어나면서 새로운 상이 형성되지 않고 구리 기지 내 철 조직이 따로 분리되어 있다. 그리고 상온의 고체상태에서는 서로 고용도가 거의 없기 때문에 전기전도도의 상실없이 강도

<sup>†</sup>Corresponding author. E-mail : hgpark@kpu.ac.kr  
Copyright © The Korean Society for Heat Treatment

를 향상시킬 수 있으며, 가공방법에 따라 높은 전기 전도도 또한 유지시킬 수 있다[9-18]. 또한 이전에는 Fe가 3 wt% 이상이 포함된 Cu-Fe합금의 상용화는 어렵다고 판단되어 왔으나 주조방법과 가공방법을 바꿔 분리되어 있는 구리의 우수한 가공성과 높은 전기전도도, 철의 우수한 기계적, 자기적 특성을 동시에 갖춘 합금으로 인정되고 있다. 크롬동, 베릴륨동의 인체에의 유해함과 환경오염 문제를 해결하기 위한 대체재로도 사용될 수 있어 친환경적인 관점에서도 관심을 끌고 있다[19-20]. 하지만 일반적인 재료의 특성에서 보듯이 철 함량이 증가하면 기계적 특성은 향상되나 전기전도도와 가공성이 떨어지는 반비례 관계에 있기 때문에 적절한 가공과 열처리를 통해 기계적 특성과 전기적 특성을 동시에 증가시키는 것이 중요하다.

본 연구에서는 인발변형율과 어닐링 온도에 따른 인장강도, 전기전도도 변화와 중간 어닐링 공정의 공정상의 위치에 따른 전기적, 기계적 특성 변화를 연구하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 시편제작

Cu-10 wt% Fe, Cu-15 wt% Fe 두 조성의 합금을 고주파 진공유도용해로를 이용하여 주조하였다. 주조된 시편을 30 mm × 120 mm × 10 mm(W × L × T)의 각재로 절단하고 선재압연기를 이용하여 단면이 4 mm × 4 mm(W × L)이 되도록 압연하였다. 압연된 시편은 인발기를 통해  $\phi$ 4 mm의 선재로 인발가공한 후 900°C에서 1시간 동안 용체화처리 하였다.

### 2.2 인발공정

냉간가공에 의한 철 조직의 형태변화와 인장강도, 전기전도도 변화를 보기 위해 인발을 진행하였다. 인발변형율  $\eta = \ln(A_0/A_f)$ 로 나타내고 여기서  $A_0$ 는 Cu-Fe 합금의 초기 단면적,  $A_f$ 는 Cu-Fe 합금의 인발후

단면적을 의미한다. 인발변형율은 Table 1의 조건으로 설정하여 선재인발기를 통해 인발하였다.

### 2.3 어닐링공정

어닐링 온도에 따른 특성변화를 관찰하기 위해  $\eta=4$ 로 인발한 시편을 100°C~700°C 구간에서 100°C 간격으로 어닐링하였다. 그리고 중간 어닐링의 인발공정상의 위치에 따른 특성변화를 알아보기 위해  $\eta=1,2,3$ 으로 인발된 시편을 각각 500°C에서 어닐링 한 뒤 추가적으로 직경  $\phi$ 0.5 mm까지 인발한 후 특성을 평가하였다.

### 2.4 특성평가

인발공정과 어닐링 공정후 시험편의 인장강도를 측정하기 위해 선재인장시험기를 이용하여 최대 인가 하중을 측정하였다. 인가되는 하중(kg)을 시험편의 단면적으로 나눠 인장강도로 환산하였다. 시험편의 전기전도도를 측정하기 위해 선저항 측정기를 사용하였다. Four-Point Probe 방식으로 측정했으며 측정의 신뢰성을 위해 30 cm 이상의 시험편 양 끝에 집게 형태의 전류 송수신기에 물려 저항을 측정하였다. 이때의 저항값을  $R(\text{저항}) = \rho(\text{비저항}) \cdot [L(\text{길이})/S(\text{단면적})]$ 에 대입하여 비저항을 측정후 The International Annealed Copper Standard의 순 구리 비저항인  $0.017241 \Omega \cdot \text{m}$ 를 나누고 100을 곱해 백분율로 환산하였다. Fe 함유간 거리와 Fe 함유 폭측정을 위해 광학현미경으로 관찰된 미세조직 사진을 지나는 수직선을 5개 그어 수직선과 만나는 Fe 함유간 거리와 Fe 함유 폭의 평균길이를 계산하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 냉간가공량에 따른 특성변화

Fig. 1은 인발가공에 따른 인장강도와 전기전도도 변화를 나타낸 그래프이다.

Fig. 1(a)를 보면 변형율이 증가할수록 인장강도가

Table 1. Diameter variation of Cu-Fe wire corresponding to draw strain

$\eta$	0	1	2	3	4
$D_0$ (mm)	4	4	4	4	4
$D_f$ (mm)	4	2.4	1.5	0.9	0.5

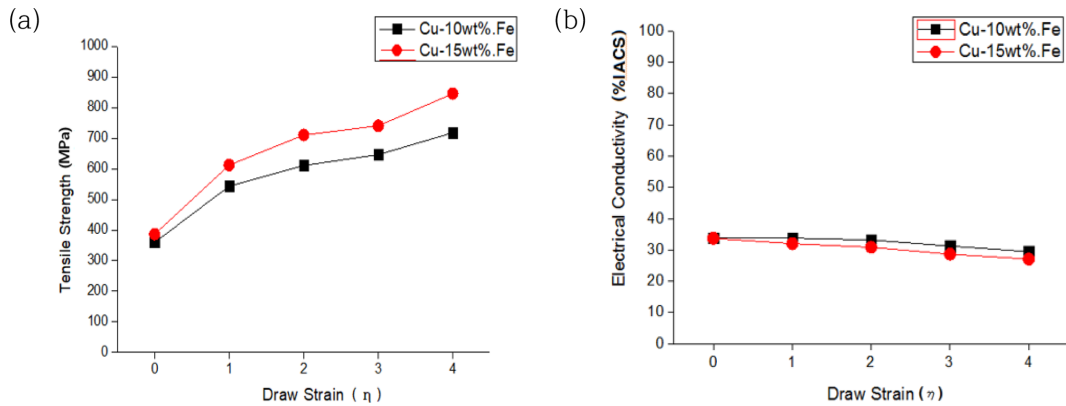


Fig. 1. Property change with draw strain (a) Tensile strength, (b) Electrical Conductivity (%IACS).

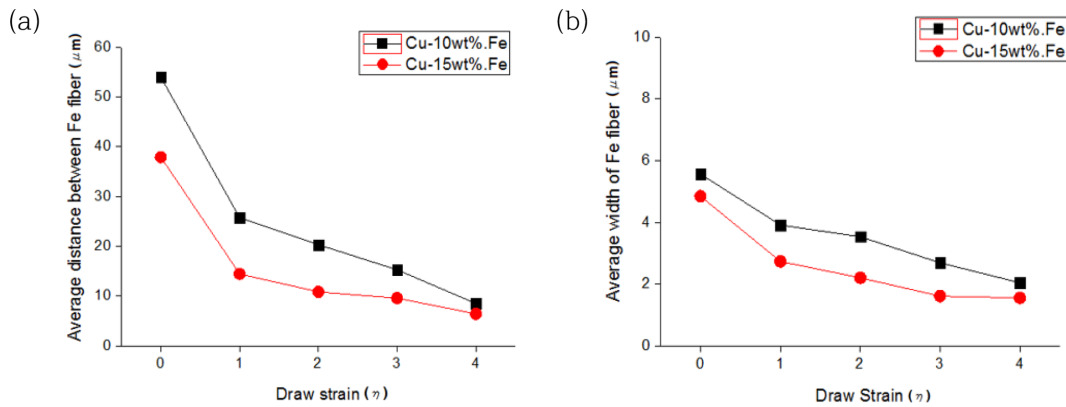


Fig. 2. Property change with draw strain (a) Average distance between Fe fibers, (b) Average width of Fe fiber.

증가하는 것을 알 수 있으며 변형율 0에서 1이 될 때 즉 가공의 초기에 인장강도 증가폭이 가장 크다는 것을 알 수 있다. 한편 Fig. 1(b)에서 보듯이 전기전도도의 변화는 동일 변형율의 변화에서 적은 편이지만 변형량의 증가에 따라 감소한다. 이러한 경향은 두 가지 시편 모두에서 동일하다.

Fig. 2(a) 그래프에서는 인발변형율이 증가함에 따라 Fe섬유간 거리가 급격히 감소함을 볼 수 있다. 따라서 본 합금계에서는 인발변형에 따른 강도증가는 초기 전위밀도증가와 함께 Fe섬유간의 간격이 크게 영향을 미치는 것으로 생각된다. Fig. 1(b)는 변형율이 증가할수록 전기전도도가 감소하는 것을 보여주는 그래프인데 이러한 경향은 우선 변형에 따른 전위밀도의 증가와 더불어 Fe섬유간 거리의 감소가 영향을 미치는 것으로 생각된다. 반면에 Fig. 2(b)의 그래프

에서 보듯이 변형에 따라 섬유폭이 감소하므로 이 사실하나만 보면 변형에 따라 전기전도도가 증가하여야하나 관찰된 결과는 그와 반대이므로 Fe섬유폭의 변화가 전기전도도에 미치는 영향은 미미하다고 볼 수 있다.

### 3.2 어닐링 온도에 따른 특성변화

Fig. 3(a)을 보면 어닐링 온도가 증가함에 따라 인장강도가 감소하는 것을 볼 수 있다.

이는 온도증가에 따라 전위밀도의 감소정도와 Fig. 4(a)와에서 보듯이 Fe섬유간 거리가 증가하여 인장강도의 감소를 초래하는 것을 알 수 있다. 인장강도는 300°C까지는 감소폭이 적으나 이 온도를 초과하면 두 합금 모두에서 감소폭이 커짐을 알 수 있다. 이는 구리와 철의 재결정온도와 연관지어 볼 수 있다.

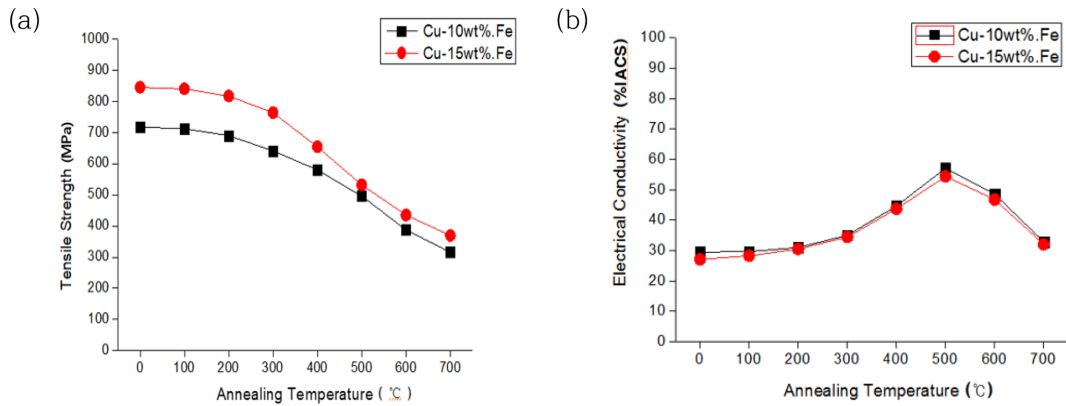


Fig. 3. Property change with annealing temperature (a) Tensile strength, (b) Electrical Conductivity (%IACS).

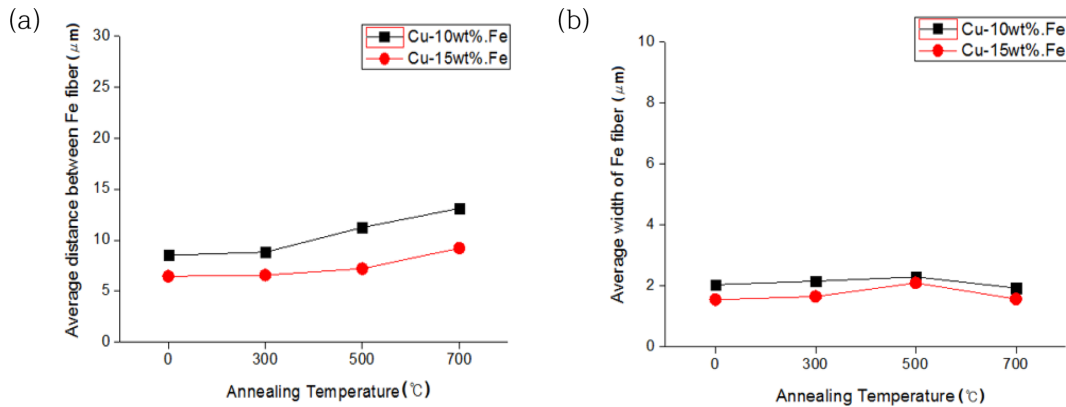


Fig. 4. Property change with annealing temperature (a) Average distance between Fe fibers, (b) Average width of Fe fiber.

구리의 재결정온도인 300°C에서 가공경화되었던 구리조직이 재결정되고 철의 재결정온도인 500°C에 가까워질수록 철이 재결정되면서 인장강도가 감소하는 것으로 보인다. 한편 Fig. 3(b)에서 전기전도도의 변화를 보면 어닐링 온도증가에 따라 서서히 증가하다가 500°C 이후 감소하는 약간 감소하므로 Fe함유폭의 변화는 전기전도도에 미치는 영향이 미미함을 알 수 있다. 반면에 500°C 어닐링에서 전기전도도의 획기적인 변화는 구리기지내 철의 평형용해도와 연관지어 볼 수 있다. 즉 500°C 이하에서는 철의 용해도가 0에 가깝지만 500°C 이상에서는 급격하게 증가한다. 이러한 사실은 500°C 이하까지는 온도증가에 따라 전위밀도감소에 의해 전기전도도가 증가하지만, 500°C 이상에서 철이 구리기지 내로 급격히 고용되면서 Fe함유의 폭이 줄어들게 되고 구리기지내 고용

된 Fe원자가 자유전자의 이동을 크게 방해하여 불순물 산란에 의한 저항이 크게 증가하기 때문에 전기전도도가 크게 감소하는 것으로 판단된다.

### 3.3 냉간인발공정상에서 어닐링공정 삽입위치에 따른 특성변화

Fig. 5(a)는 시험재를 각 draw strain만큼 인발한 후 500°C에서 1시간 어닐링하고 추 가적으로 인발하여 최종 draw strain이 4가되게끔 한 후 인장강도를 측정된 값을 보여주고 있다.  $\eta=3$ 까지는 어닐링후 추가적으로 인발이 행해져 가공경화가 이루어지기 때문에 강도감소가 거의 없지만  $\eta=4$ 에서는 어닐링공정후 추가 인발이 없기 때문에 강도감소가 크다. 한편 Fig. 6(a)를 보면 Fe함유간 거리는 전 strain이 증가함에 따라 미세하게 증가하지만 중간어닐링의

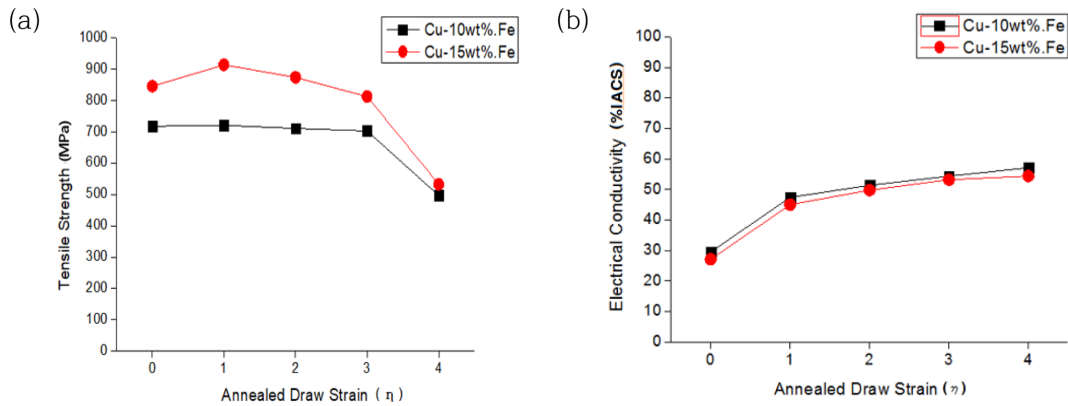


Fig. 5. Property change with annealed draw strain (a) Tensile strength, (b) Electrical Conductivity (%IACS).

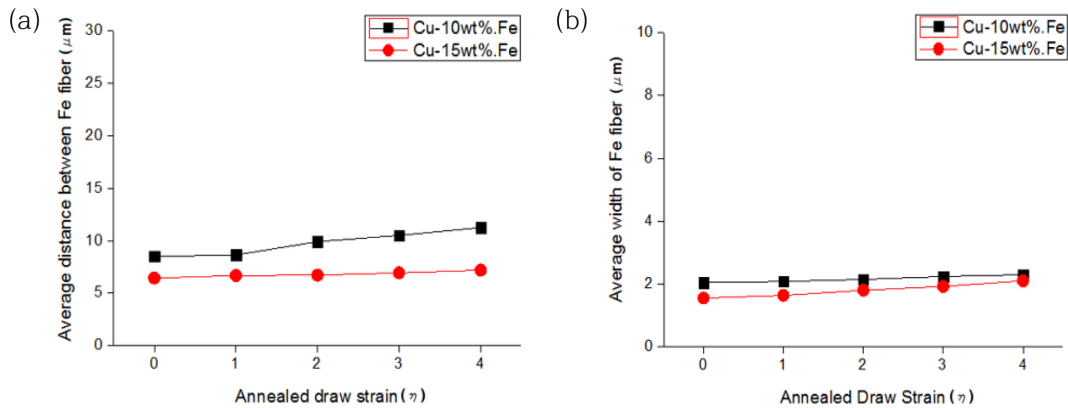


Fig. 6. Property change with annealed draw strain (a) Average distance between Fe fibers, (b) Average width of Fe fiber.

유무에 따라 Fe함량의 폭에는 차이가 없음을 알 수 있다. Fig. 5(b)에서 보면 중간 어닐링의 위치의  $\eta$  값이 커질수록 전기전도도값이 증가하는데 이는  $\eta$  값이 커질수록 어닐링후 추가 strain양이 적어지기 때문이다.  $\eta=0$ 에서 1로 변화할 때 전기전도도가 크게 증가하지만 Fig. 6(b)에서 보듯이 Fe함수폭은 변화폭이 작은 것을 볼 수 있다. 이는 중간어닐링의 유무에 따라 Fe함수폭에는 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 어닐링후 전기전도도는 크게 증가하며 추가 strain이 적을수록 전기전도도의 손실이 적음을 알 수 있다.

이상의 결과들을 종합해볼 때 일정한 draw strain에서 최적의 인장강도와 전기전도도를 얻기 위해서는 목표 draw strain보다 적은 strain까지 인발한 후 500°C에서 어닐링하고 추가 인발을 거쳐 최종 draw

strain에 도달해야함을 알 수 있다. 본 실험조건에서 Cu-10wt%Fe합금의 경우 최적 공정은 draw strain =4에 도달하고자할 때 draw strain=3까지 인발한 후 500°C에서 1시간 어닐링하고 추가 인발을 하여 인장강도 706.9 MPa, 전기전도도 54.34%IACS값을 얻을 수 있었다.

#### 4. 결 론

Cu-10 wt% Fe, Cu-15 wt% Fe 두 조성의 합금에 대하여 인발변형율과 어닐링 온도에 따른 인장강도, 전기전도도 변화와 중간 어닐링 공정의 공정상의 위치에 따른 전기적, 기계적 특성 변화를 연구하였다. 얻어진 주요결과를 요약하면 아래와 같다.

1. 인발에 의한 냉간변형율 증가에 따라 인장강도

가 증가하고 전기전도도는 감소했다. 이러한 결과는 Cu기지내 전위밀도증가와 Fe섬유간 거리가 감소에 기인하는 것으로 생각된다.

2. 어닐링 온도를 증가시킬 때 300°C 이상의 온도에서 인장강도가 급격히 감소하기 시작하여 지속적으로 감소한다. 반면에 전기전도도는 500°C까지는 어닐링온도의 증가에 따라 증가하다가 이 온도를 넘게 되면 감소하기 시작한다. 이러한 결과는 구리의 재결정이 300°C에서부터 일어나 온도가 높아져감에 따라 전위밀도의 감소, Fe섬유간 거리의 증가에 의해 인장강도가 감소한다. 한편 500°C부터는 Cu에 대한 Fe의 용해도가 급격히 증가하기 시작하여 전기전도도는 전위밀도의 감소에도 불구하고 전기전도도가 떨어진다.

3. Cu-Fe합금에서 높은 인장강도와 전기전도도를 얻기 위해서는 최종 목표로하는 인발 변형율에 이르기 바로 전에 어닐링을 하고 소량의 인발변형을 추가하여 최종 인발변형량에 이르는 전략이 필요하다. Cu-10wt%Fe합금의 경우 draw strain=4에 도달하고자 할 때 draw strain=3까지 인발한 후 500°C에서 1시간 어닐링하고 추가 인발을 하여 인장강도 706.9 MPa, 전기전도도 54.34%IACS값을 얻을 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 2016년도 한국산업기술대학교 연구년기간에 수행되었음.

## References

1. P. M. Berge, G. R. Haupt, E. D. Gibson and J. D. Verhoeven : Wire Journal International (1991) 62.
2. 김창주, 이정무, “기계와 재료” 6 (1994) 89.
3. M. J. Tenwick and H. A. Davies : Mater. Sci. Eng, **35** (1988)543.
4. D. G. Morris and M. A. Morris : Acta Metall, Mater, **39** (1991) 1763.
5. M. Holscher, D. Raabe and K. Lucke : Acta Metall. Mater, **42** (1994) 879.
6. D. A. Hardwick, C. G. Rhodes and L. G. Fritzemeier : Metall. Trans., **27A** (1993) 27. *Sci.* **36** (2001) 2711. *B* **51** (1995) 8076.
7. W. A. Spitzig, H. L. Downing, F. C. Laabs, E. D. Gibson, J. D. Verhoeven : Metall, Trans, **24A** (1993) 7.
8. P. D. Funkenbusch, T. H. Courtney : Scripta Metall **15** (1981) 1349.
9. M. J. Dianez, E. Donoso, M. J. Sayagues, A. Perejon, P. E. Sanchez-Jimenez, L. A. Perez-Maqueda and J. M. Criado : J. Alloy Compd. **688** (2016) 288.
10. H. Fernee, J. Nairn and A. Atrens : *J. Mater.*
11. Y. N. Zhang, J. L. Zi, M. S. Zheng and J. W. Zhu : J. Alloy Compd. **462** (2008).
12. J. Eckert, J. C. Holzer, C. E. Krill and W. J. Johnson : J. Appl. Phys. **73** (1993) 2794.
13. E. Ma, M. Atzmon and F. E. Pinkerton : J. Appl. Phys. **74** (1993) 955.
14. P. Bellon and R. S. Averbach : Phys. Rev. Lett. **74** (1995) 1819.
15. Z. J. Zhang, O. Jin and B. X. Liu : Phys. Rev.
16. O. Jin, Z. J. Zhang and B. X. Liu : Appl. Phys. Lett. **67** (1995) pp.1524-7. W. A. Spitzig, H. L. Downing, F. C. Laabs, E. D. Gibson and J. D. Verhoeven : Metall, Trans, **24A** (1993) 7.
17. O. Drbohlav and A. R. Yavari : Acta Metall. Mater **43** (1995) 1799.
18. A. R. Miedema : Philips Tech. Rev. **36** (1976) 217.
19. 김병일, 배차현, 이지환, 이정중, ‘비철금속재료’, 원창출판사 (1993).
20. William F. Smith 저, 김진천, 방재철 역 : “materials science and engineering”, 사이텍 미디어 (2005).