

초미세 결정립 Cu-3%Ag 합금의 기계적 물성과 전기 전도도

고영건¹ · 이철원² · 남궁승² · 신동혁^{2#}

Mechanical and electrical responses of submicrocrystalline Cu-3%Ag alloy

Y.G. Ko, C.W. Lee, S. Namgung, and D.H. Shin

Abstract

The paper deals with the mechanical and electrical responses of submicrocrystalline Cu-3%Ag alloy as a function of strain imposed by equal-channel angular pressing. When inducing the effective strain of 12, the initial grain size of ~ 50 μm is evidently reduced within the range of 0.2 -0.3 μm in size, having a reasonably equiaxed shape. The results of tension tests at room temperature exhibit that the tensile strength of the present alloy increases with increasing the amount of strain whereas losing electrical conductivity slightly. This phenomenon can be explained based on fine grained structure together with the non-equilibrium state of grain boundaries.

Key Words: Cu-Ag alloy, Equal-channel angular pressing, microstructure, mechanical property

1. 서론

최근 전기·전자 분야의 급속한 발전과 더불어 휴대폰, 노트북등과 같은 전자 기기의 사용이 증가함에 따라 제품의 소형화, 우수한 기계적 혹은 전기적 물성을 갖는 소재에 대한 관심이 증가하고 있다. 이에 따라 고강도 및 고전도도 특성을 동시에 만족하는 소재에 대한 연구가 진행되고 있다. 순-Ag 다음으로 전기 전도도가 우수한 순-Cu 는 소재 내의 뚜렷한 강화기구가 부재하기 때문에 기계적 신뢰성을 만족하기 위해서 인장 강도의 향상이 필요하다. 이를 위해 Ag 함량에 따라 다양한 Cu-Ag 합금을 제어한 바 있으며 대개 중량비 6 % 이상의 Ag 가 첨가된 Cu 합금에 대해서 연구가 진행되고 있다[1]. 하지만 기존의 상온 인장 실험결과에 의하면[2], Cu-6%Ag 합금의 인장 강도는 350 MPa 정도로 산업적인 적용을 위해서는 부차적인 강화기

구의 도입이 필요하다. 한편 가격 경쟁력 측면을 고려한다면 6 % 이상의 Ag 원소 첨가는 바람직하지 않다. 본 연구에서는, Cu-3%Ag 합금을 제조하였으며 높은 강도를 얻기 위하여 ECAP (equal-channel angular pressing) 가공을 통해 결정립 미세화를 이루고자 하였다. ECAP 가공은 연속동적 재결정 (continuous dynamic recrystallization) 과정으로, 소재에 반복적인 전단변형을 부과함으로써 초미세 결정립을 제어할 수 있으며 현재까지 다양한 소재에서 성공적인 결과들이 보고되었다[3]. 하지만 Valiev 와 Langdon[4]는 ECAP 가공을 통하여 초미세 결정립으로 제어된 입계 주변에는 전위밀도가 매우 높기 때문에 입계 특성이 마이크로 수준의 소재와 상이하다고 보고하였다. 현재까지 Cu-3%Ag 소재에 있어서 이러한 입계 특성이 강도 및 전기적 전도도에 미치는 영향에 대해서 잘 알려져 지 않았다.

1. 영남대학교

2. 한양대학교

한양대학교, E-mail: dhshin@hanyang.ac.kr

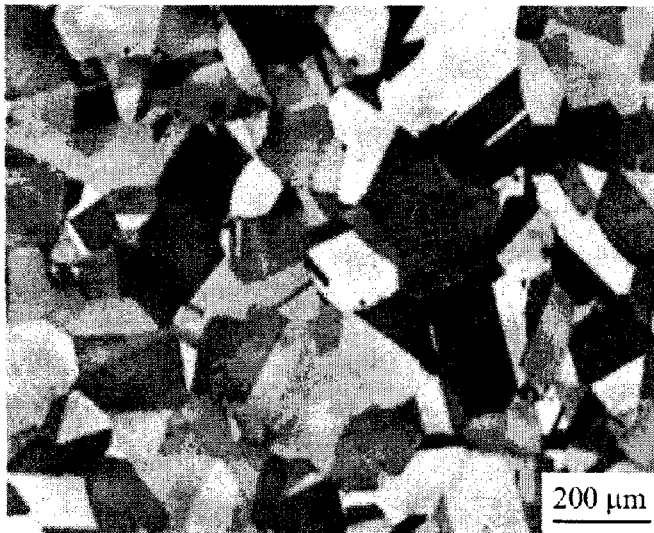


Fig. 1 Optical image of initial microstructure

따라서 시효 경화형 Cu-3%Ag 합금에 ECAP 가공을 적용하여 결정립 미세화에 따른 강도 그리고 전기 전도도의 상관관계에 대하여 고찰하였다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 재료는 Cu-3%Ag 합금으로 진공 유도로를 이용하여 제조한 주조재이다. 이러한 Cu-3%Ag 합금을 1023 K 의 온도에서 균질화 처리를 실행하여 소재 내부의 잔류응력을 제거한 후 658 K 조건에서 시효경화 처리를 실행하였다. 초기 미세조직을 그림 1 에 나타내었으며, 이때 평균 결정립 크기는 $\sim 50 \mu\text{m}$ 였다. ECAP 가공은 343 K 온도에서 시편을 90° 회전하는(route B) 방법으로 12 회 까지 가공을 진행하였으며, 금형은 1 회 가공을 통하여 ~ 1 의 변형량을 갖도록 내각과 외각이 각각 90° 및 40° 로 설계하였다[3]. 이때 가공 속도는 $\sim 0.3 \text{ s}^{-1}$ 이다.

광학 현미경 관찰을 위하여 증류수 37.5 ml, 과산화수소 2.5 ml 그리고 암모니아 20 ml 의 용액으로

에칭하였다. 자세한 변형조직을 관찰하기 위해서 투과 전자현미경을 사용하여 관찰하였다. 상온 인장시험은 인장방향이 ECAP 금형 방향에 평행하도록 하여 표점 거리 10 mm, 폭 6 mm 그리고 두께 2 mm 인 판상으로 가공한 후, INSTRON 만능 시험기를 이용하여 $1.33 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 의 변형속도로 실험하였다. 전기 전도도는 교류 4 단자 법으로 측정하였다. 전류의 방향을 정방향과 역방향으로 변화시켜 15 초 동안 0.3 초 간격으로 비저항을 측정하였으며 절대값의 평균치로부터 전기 전도도를 산출하였다. 각 시편은 10 회 이상 전도도를 측정하여 평균값을 정하였다.

3. 실험결과

3.1 미세조직의 변화

그림 2 는 ECAP 가공 회수에 따른 Cu-3%Ag 합금의 명시야상 전자 현미경 조직으로 관찰 방향은 전단변형 특성이 비교적 잘 나타나는 가공방향에 대한 옆면이다. 4 회 가공된 Cu-3%Ag 합금의 미세조직은 전단방향으로 연신된 매우 미세한 라멜라(lamellar) 밴드로 구성되어 있으며(그림 2a), 밴드 내부에는 전단방향에 수직인 방향으로 전위 벽(dislocation wall)이 관찰되었다. 하지만 전반적인 전위밀도는 8 혹은 12 회 가공한 시편보다 상대적으로 낮았다. 이는 가공량의 차이 때문인 것으로 생각된다. 8 회 가공한 시편의 경우, 그림 2b 에서 보이는 바와 같이 aspect ratio 가 다소 크지만 거의 등축의 결정립이 형성되었다. 이때 평균 결정립의 크기는 $\sim 0.4 \mu\text{m}$ 이다. 그림 2c 는 12 회 ECAP 가공된 시편의 미세조직으로 8 회 가공한 조직에 비해서 등축 결정립으로 이루어졌다. 평균 결정립 크기는 0.2 - 0.3 μm 정도로 더 미세하게 제어되었다. 입계 특성에 관련되어서는 입계 부근에 높은 전위밀도가 관찰되었으며 이로써 높은 에너지를 지니고 있는 비평형 결정립계로 판단된다.

Table 1 Mechanical properties and electrical conductivity of Cu-3%Ag alloys with increasing ECAP strain

Sample	Yield strength (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Yield ratio (σ_{YS}/σ_{UTS})	Micro-hardness (H_v)	Electrical conductivity (%IACS)
Initial	190	257	51	0.74	75.5	97.1
4-pass	476	505	5	0.94	171.7	92.6
8-pass	617	647	8	0.95	191.2	88.5
12-pass	731	741	11	0.96	215.4	85.2

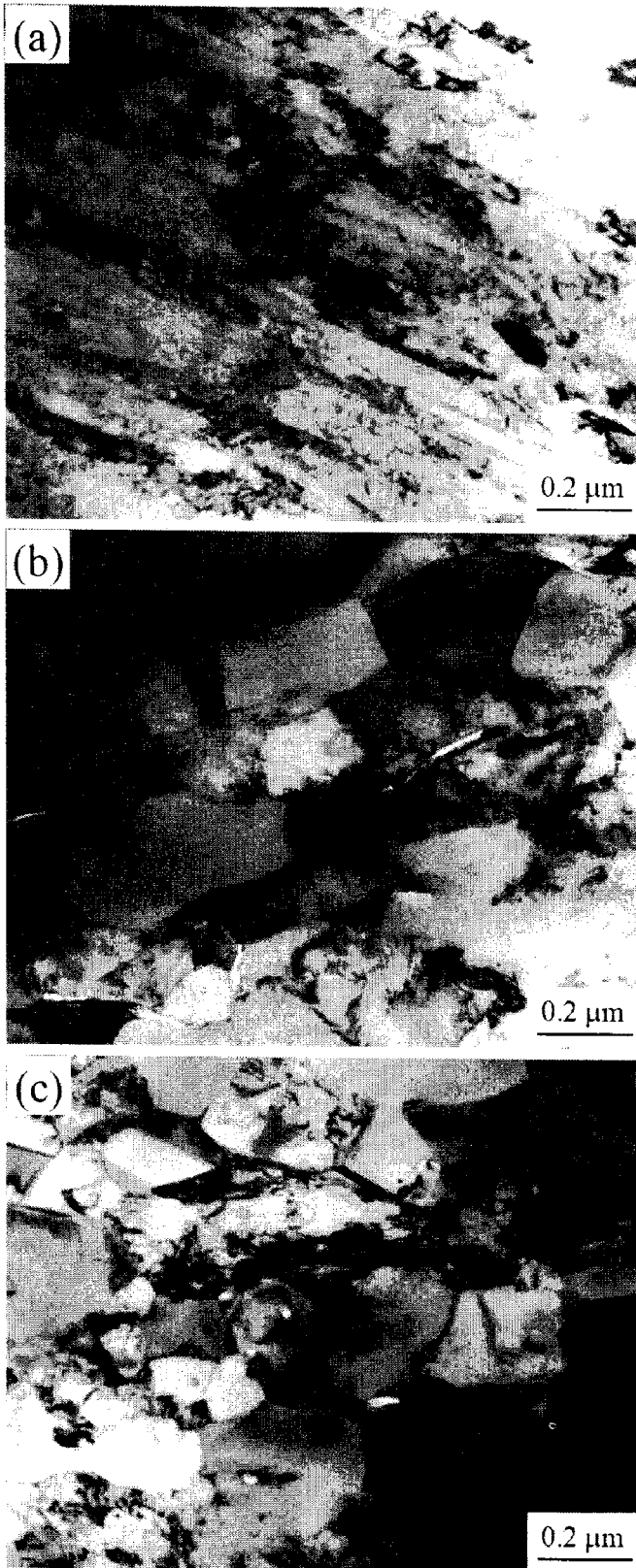


Fig. 2 TEM images of Cu-3%Ag alloys subjected to ECAP for (a) 4-pass, (b) 8-pass, and (c) 12-pass

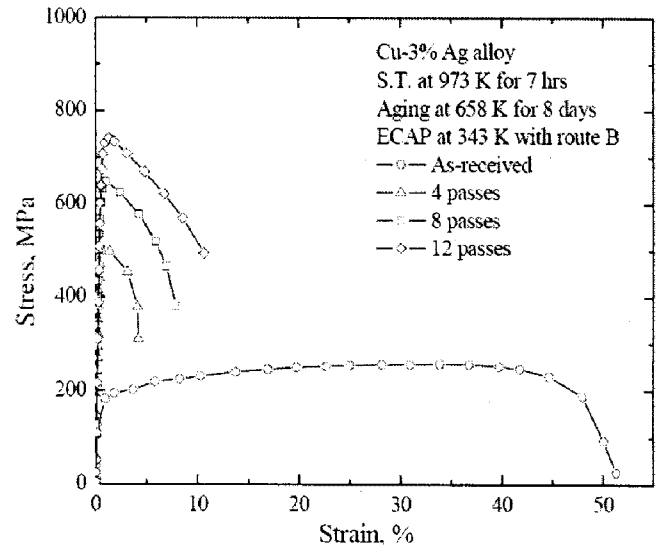


Fig. 3 Stress-strain curves of Cu-3%Ag alloys with increasing ECAP strain at ambient temperature

3.2 기계적 물성

상은 인장시험에 의한 응력-변형률 곡선을 그림 3에 나타내었으며, 기계적 성질을 표 1에 정리하였다. ECAP 가공을 하기 전 초기조직의 경우 최대 인장강도는 250 MPa 인데 비해 4회 ECAP 가공한 시편은 505 MPa로 두 배 이상의 강도가 급격히 증가하였으나, 이후 부차적인 가공에서는 8회 가공 시 645 MPa 그리고 12회 가공 시 741 MPa로 강도 증가율은 점차 둔화되었다. 이는 ECAP 가공에 의해 초기에 전위밀도가 급격히 증가하며, 가공에 따라 형성된 미세한 라멜라 밴드에 의해 강도가 증가하지만, 가공이 진행됨에 따라 가공경화와 동적회복이 균형을 이루기 때문에 강도의 증가율은 4회 가공 시 가장 크고 그 이후 감소하게 된다[4]. 가공량에 관계없이 ECAP 가공된 Cu-3%Ag 합금은 균일 연신을 구간없이 최대 인장강도에 도달하자마자 네킹(necking)이 발생하였다. 따라서 초기 소재의 연신율 결과와 비교하면 연신율이 큰 폭으로 감소하였다. 그러나 4회 가공 이후에 가공 횟수가 증가할수록 연신율이 다시 증가하여 8회 가공 시 8% 그리고 12회 가공 시 11%까지 증가하였다. 가공량이 증가할수록 연신율이 증가하는 경향은 Cu-Cr 합금에서도 유사하게 관찰된 바 있다[5]. 이러한 현상은 소재가 가진 적층결함 에너지 값에 따라 4회 가공 후의 라멜라 밴드 형성하였으며 12회 가공 후에는 대부분의 밴드 구조가 등축의 결정립으로 변화하였기 때문이다.

후기

3.3 전기적 물성

전기 전도도의 단위인 %IACS (international annealedcopper standard)은 어닐링한 순-Cu의 293 K에서의 전기 전도도인 $5.81 \times 10^7 \text{ Sm}^{-1}$ 의 백분율로, 다양한 소재의 전기 전도도를 상대적으로 표현하는 단위이다. 초기조직 상태에서는 97.1 %IACS에 가까운 값을 보이지만 가공량이 증가할수록 전기 전도도는 점진적으로 감소한다. 최대 인장강도는 초기 시편은 257 MPa 이고, 12 회 가공 시 745 MPa 로 3 배 이상의 큰 증가를 보이는데 비해, 전기 전도도는 불과 10 %IACS 정도 감소하였다. 일반적으로 ECAP 가공 전 균질화 처리에 의하여 Cu 기지 내에 용해된 Ag 원자는 시효경화를 함으로써 기지 내 Ag 가 석출된다. 이로 인하여 전기 전도도는 감소하게 된다. 그 후 ECAP 가공에 의한 경화에 의하여 Cu-3%Ag 합금 내에 전위의 밀도가 증가함에 따라 이동 전자의 분산이 발생하여 전자의 평균자유이동거리(mean free path)가 짧아지기 때문이다. 하지만 본 Cu-3%Ag 합금을 냉간 압연 혹은 인발 가공법을 사용하여 변형한 경우에서 보다 상대적으로 우수한 전기 전도도를 얻을 수 있었다 [6,7].

4. 결론

본 연구에서는 ECAP 가공을 실행하여 가공량에 따른 Cu-3%Ag 합금의 기계적 물성 및 전기 전도도의 변화에 대해서 살펴보았다. 12 회 ECAP 가공 후 평균 결정립 크기가 0.2 - 0.3 μm 인 등축의 결정립을 얻을 수 있었다. 상온 인장시험 결과, 초기 상태에 비해서 12 회 가공 후에는 2 배 이상 강도가 증가하였으며, 연신율은 4 회 가공 후 5 %에서 가공량이 증가함에 따라 11 %까지 증가하였다. 이는 소재의 적층결함 에너지에 따라 4 회 가공 후의 라멜라 밴드가 형성 후 12 회 가공에서는 이들이 등축의 결정립으로 발달하였기 때문이다. 이때 전기 전도도는 ~ 85.2 % IACS 로 Cu-3%Ag 합금을 결정립 미세화를 통해 우수한 강도 및 전기 전도도 특성을 제어하였다.

본 연구는 부분적으로 2007년 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2007-357-D00136)으로 이루어졌으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] J. Lin and L. Meng, 2008, Effect of aging treatment on microstructure and mechanical properties of Cu-Ag alloys, *J. Alloys Comp.*, Vol. 454, pp. 150~155.
- [2] J.B. Liu, L.Zhang, and L. Meng, 2007, Relationships between mechanical strength and electrical conductivity for Cu-Ag filamentary microcomposites, *Appl. Phys. A*, Vol. 86, pp. 529~532.
- [3] K.T. Park, Y.S. Kim, J.G. Lee, and D.H. Shin, 2000, Thermal stability and mechanical properties of ultra fine grained low carbon steel, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 293, pp. 165~172.
- [4] R.Z. Valiev and T.G. Langdon, 2006, Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement, *Prog. Mater. Sci.*, Vol. 51, pp. 881~981.
- [5] C.Z. Xu, Q.J. Wang Zheng, J.W. Zhu, J.D. Li, M.Q. Huang, Q.M. Jia, and Z.Z. Du, 2007, Microstructure and properties of ultra-fine grain Cu-Cr alloy prepared by equal-channel angular pressing, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 459, pp. 303~308.
- [6] Y. Sakai, K. Inoue, and H. Maeda, 1995, New high strength, high-conductivity Cu-Ag alloy sheets, *Acta Mater.*, Vol. 43, pp. 1517~1522.
- [7] J.B. Liu, L. Meng, and Y.W. Zeng, 2006, Microstructure evolution and properties of Cu-Ag microcomposites with different Ag content, *Mater. Sci. Eng. A*, Vols. 435~436, pp. 237~244.