

초미세립 Cu의 소성변형거동에 미치는 결정립 형상의 영향

박이주¹, 김형원¹, 이종수², 박경태[#]

Effects of Grain Morphology on Plastic Flow of Ultrafine Grained OFHC Cu

L. J. Park, H. W. Kim, C. S. Lee, K. -T Park

Abstract

In this study, ultrafine grained (UFG) oxygen free high conductivity copper (OFHC Cu) having two different grain morphologies, one the severely elongated and the other the equiaxed, was prepared by equal channel angular pressing (ECAP) with routes A and B_c, respectively. The results of quasi-static tensile tests at 10^{-3} s^{-1} and 1 s^{-1} and dynamic compression tests at 10^3 s^{-1} order revealed that the equiaxed UFG Cu exhibited higher strength and less ductility compared to the elongated one. The difference of the plastic flow characteristics between the two were rationalized by considering their dislocation mean free length based on the orientation relationship between the possible slip planes and the loading direction.

Key Words : OFHC Cu, ultrafine grain, ECAP, plastic deformation, strain rate

1. 서론

100~500 nm 결정립 크기를 갖는 초미세립 결정립 재료는 조대립 재료에 비해 매우 높은 강도를 나타내어 최근 이의 제조공정, 기계적 특성, 적용 분야에 대해 많은 연구가 이루어지고 있다. 초미세 결정립 재료는 대부분 top-down 공정인 강소성 가공에 의해 제조되고 있다. 그러나 강소성 가공시 비록 유사 수준의 유효 변형량이 재료에 가해지더라도, 재료의 매크로·메조·마이크로 조직은 가공 경로에 (strain path) 따라 상이하게 나타나며, 이에 따라 기계적 성질도 많은 차이를 나타낸다 [1,2]. 본 연구에서는 강소성 가공의 대표적 공정인 equal channel angular pressing (ECAP)의 다른 경로를 Oxygen Free High Conductivity Copper (OFHC Cu)에 적용하여 서로 다른 형상의 초미세립 구조를 제조한 후, 광범위한 변형속도에서 인장 및 압축 실험을 행하여 결정립 형상이 초미세 결정립

재료의 소성 거동에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 실험 방법

900 C에서 1 시간 annealing 처리를 거친 OFHC Cu에 대해 상온에서 route A 및 B_c의 ECAP을 8 pass (유효 변형량 $\approx 1/\text{pass}$) 행하였다. Route A의 경우 다음 pass시 시편을 회전하지 않고 가공을 행하므로 매 짝수 혹은 홀수 pass 시 동일한 slip면 상에 동일 방향의 변형이 가해져, pass 수 증가에 따라 시편 축 방향으로 연신된 결정립을 얻게 된다 [3]. Route B_c의 경우 연속되는 pass시 시편을 동일한 방향으로 90° 회전하여 가공을 행하므로 매 짝수 혹은 홀수 pass 시 동일한 slip면 상에 반대 방향의 변형이 가해져, pass 수 증가에 따라 등축의 결정립을 얻게 된다 [3]. 이러한 연신된 초미세립 Cu와 등축의 초미세립 Cu에 대해 준정적 인장 실험 (10^{-3} s^{-1} 및 1 s^{-1}) 및 split Hopkins pressure bar tester를 이용한 동적 압축 실험을 ($\sim 4300 \text{ s}^{-1}$) 행하였다.

1. 국방과학연구소

2. 포항공과대학교 신소재공학과

교신저자: 한밭대학교 신소재공학부 (ktpark@hanbat.ac.kr)

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 1에 보인 바와 같이 ECAP 전 약 1 mm 정도의 결정립을 갖는 OFHC Cu는 8 pass-route A의 ECAP에 의해 시편 축 방향으로 평행하게 연신된 초미세립 구조 (결정립 두께 ≈ 300 nm) 를 나타내었으며, 8 pass-route B_c의 ECAP에 의해서는 결정립 크기 300~500 nm 정도의 등축 초미세립을 나타내었다. 준정적 인장실험 및 동적 압축실험은 응력 방향이 시편 축과 평행이 되도록 시편을 가공하여 행하였다.

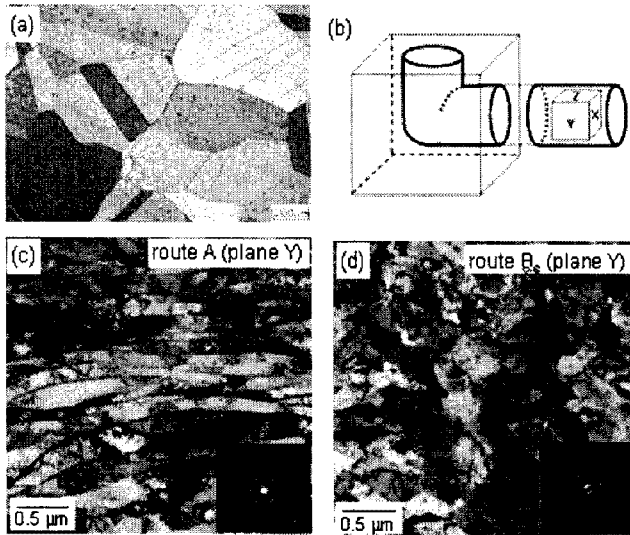


Fig.1 (a) optical micrograph of OFHC Cu before ECAP, (b) the sample passage through a ECAP die, (c) TEM micrograph of the sample processed by 8 pass-route A (viewed on the Y plane), (d) TEM micrograph of the sample processed by 8 pass-route B_c (viewed on the Y plane)

Fig. 2에 준정적 인장 및 동적 압축 실험에서 얻어진 진응력-진변형 곡선을 나타내었다. 초미세립 Cu는 모든 실험 조건에서 조대립 Cu에 비해 매우 높은 항복강도 및 유동응력을 나타내었다. 준정적 인장의 경우 초미세립 Cu에서 가공경화 현상이 거의 나타나지 않았으며, 이로 인해 연신율은 매우 감소하였다. 동적 압축의 경우 역시 초미세립 Cu는 가공경화가 거의 없는 유사완전소성거동을 나타내었다. 이러한 초미세립 Cu의 소성변형거동은 초미세립 결정립 내부의 전위 상호작용이 매우 제한적이기 때문이며, 여타 다른 초세립 결정

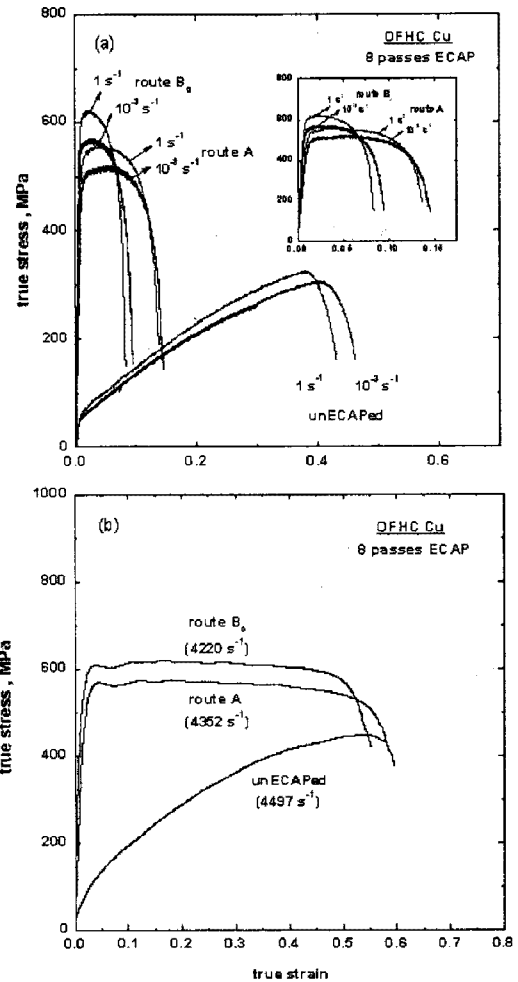


Fig. 2 (a) tensile true stress-strain curves of ECAPed and unECAPed OFHC Cu at 10^{-3} s^{-1} and 1 s^{-1} , (b) compressive true stress-strain curves of ECAPed and unECAPed OFHC Cu at $\sim 4300 \text{ s}^{-1}$.

재료에 나타나는 일반적 현상이다.

모든 실험 조건에서 route B_c에 의해 제조된 등축 초미세립 Cu는 route A에 의해 제조된 연신된 초미세립 Cu에 비해 높은 강도와 낮은 연신율을 나타내었다. 따라서 강소성 가공에 의해 제조된 초미세립 결정재료의 기계적 특성은 가공경로에 의해 결정되는 결정립 형상에 크게 영향을 받는다는 사실을 확인할 수 있다.

이전 발표된 연구들은 OFHC Cu의 경우 route A의 ECAP에 의해 연신된 결정립의 두께 방향 (즉, Fig. 1b의 면 Z에 수직 방향)이 [313] 방향으로 우선적 배열되는 집합조직이 형성되는 것으로 보고하고 있다 [4,5]. Fig. 3에 이러한 연구 결과에 기초

하여, 연신된 초미세립 Cu의 경우에 있어서 (111) slip 면과 응력 방향과의 관계를 도시하였다. Fig. 3에 따르면 연신된 초미세립 Cu의 (111) 면 상의 전위자유이동거리는 결정립 두께의 약 2.7배 정도이다. 반면, 등축의 초미세립 Cu의 경우 등축 결정립을 정사각형 형상으로 가정했을 경우 전위자유이동거리는 어떠한 방향의 경우라도 정사각형의 대각선에 해당하는 최대 1.4배 정도이다. 따라서 route B_c의 ECAP에 의한 등축 초미세립 Cu는 보다 짧은 전위자유이동거리에 의해 route A의 ECAP에 의한 연신된 초미세립 Cu의 경우에 비해 높은 강도와 낮은 연신율을 나타내는 것으로 판단된다.

또한, route A의 경우 ECAP 가공 중 동일 slip 면상에 동일한 방향의 변형이 반복적으로 가해지므로 더 긴 전위자유이동거리를 갖는 slip 면상에 보다 많은 전위가 집적된다. 이는 높은 역응력(back stress)을 유발하며, 이에 의해 반대 방향의 응력이(즉, 압축) 가해질 경우 연신된 초미세립 Cu가 등축 초미세립 Cu에 비해 보다 낮은 응력에서 항복이 일어난다.

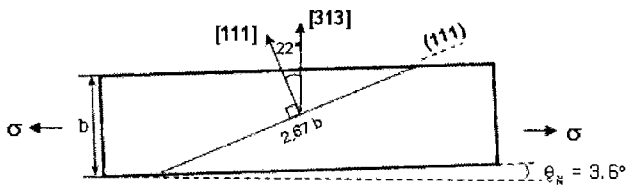


Fig. 3 Orientation relationship between the (111) slip plane and the stress axis for the severely elongated UFG processed by ECAP of route A.

4. 결론

(1) ECAP의 route A와 B_c를 적용하여 각각 연신된 결정립 형상의 초미세립 OFHC Cu와 등축의 결정립 형상을 갖는 초미세립 OFHC Cu를 제조하였다. 이러한 서로 다른 결정립 형상의 초미세립 Cu에 대해 광범위한 변형속도에서 인장 및 압축 실험을 행하였다.

(2) 등축의 초미세립 Cu는 모든 실험 조건에서 연신된 초미세립 Cu에 비해 높은 강도 및 낮은 연신율을 나타내었다. 이러한 소성변형거동의 차이는 결정립 형상에 따라 slip 면과 응력 방향 관계에 의존하는 전위자유이동거리의 차이로 설명할 수 있다.

후기

본 연구는 국방과학연구소 기초연구지원사업(UD070037AD)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] R. Z. Valiev, R. K. Islamgaliev and I. V. Alexandrov, Prog. Mater. Sci., vol. 45 (2000) 103-189.
- [2] R. Z. Valiev and T. G. Langdon, Prog. Mater. Sci., vol. 51 (2006) 881-981.
- [3] S. Lee and T. G. Langdon, Proc. of Mater. Res. Soc. Sym., vol. 601 (2000) 359-364.
- [4] M. Haouaoui, K. T. Hartwig and E. A. Payzant, Acta Mater., vol. 53 (2005) 801-810.
- [5] M. Haouaoui, I. Karaman and H. J. Maier, Acta Mater., vol. 54 (2006) 5477-5488.