

〈論 文〉

# 단상조직을 갖는 Cu-Zn합금의 고온강도에 미치는 변형속도와 온도의 영향

권용환\* · 유연철\*

## Effects of Strain Rate and Temperature on the Hot Strength for Single Phase Cu-Zn Alloy

Yong-Hwan Kwon and Yeon-Chul Yoo

### Abstract

The torsion tests in the range of 550~800°C,  $5.0 \times 10^{-3} \sim 5.0 \times 10^0$ /sec were performed to study the effects of strain rate( $\dot{\epsilon}$ ) and temperature(T) on the hot strength of Cu-Zn alloy. High temperature flow stresses of this alloy increased with increasing  $\dot{\epsilon}$  and/or decreasing T, and then the more grain refinement could be obtained. The flow curves exhibited a peak followed by a steady state regime as a result of dynamic recrystallization. The hot strength dependence of  $\dot{\epsilon}$  and T was described by a hyperbolic sine law,  $\dot{\epsilon} = A(\sinh 0.017\sigma)^{4.81} \exp(-216 \text{ KJ/mol})$ . Hot strength could be reduced at the arbitrary condition,  $\dot{\epsilon}$  and T, by constitutive parameter Z(Zenner-Hollomon parameter),  $Z = A(\sinh \alpha\sigma)^n = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT)$ .

**Key Words :** Torsion Test, Strain Rate( $\dot{\epsilon}$ ), High Temperature Flow Stress, Dynamic Recrystallization, Hyperbolic Sine Law, Zenner-Hollomon Parameter

### 1. 서 론

금속재료는 동일한 조성의 합금이라도 변형온도나 변형량등의 제조조건에 따라 기계적 특성이 달라지게 되고, 적절한 가공공정을 거친다면 더이상의 후처리를 생략하고도 우수한 기계적 특성을 얻을 수 있다.<sup>(1~3)</sup> 특히 전신용 Cu-Zn합금은 열간단조 압연 압출 등과 같은 소성가공법에 의해 제조되고 있

다. 이 Cu-Zn합금은 38%Zn 이하의 조성에서  $\alpha$ 의 단상조직을 가지며 Zn함량이 이보다 많아지면  $\alpha + \beta$  2상의 조직을 나타낸다. 이러한 황동의 가공시  $\alpha + \beta$  황동은 600~800°C의 고온가공이 가능하나  $\alpha$  단상의 황동은 인장강도와 연신률이 500°C 이상에서 급격히 감소하여 고온가공이 부적당하므로 상온가공과 중간소둔을 조합하여 제품을 제조하여야 하는 단점을 갖고 있고 이로 인해 제조단가가 증가하게 된다. 최근들어  $\alpha$  단상의 황동을 이용하여 이 재료의 고온가공성을 향상시키려는 연구의 일환으로 고

\*인하대학교 금속공학과

온가공공정에 대한 정량적인 분석이 시도되고 있다.<sup>(4)</sup> 그러나 고온연화기구 및 고온가공조건에 따른 미세조직변화 등은 분명하게 정립되어 있지는 않다.

따라서 본 연구에서는 단상의 Cu-Zn합금을 이용하여 변형속도 변형온도 및 유동응력의 관계를 정량화하고 이들 변형조건과 조직과의 상관관계를 정립하여 종합적인 분석을 하고자 하였다.

## 2. 실험방법

시료는  $\alpha$  단상인 Cu-Zn합금(83.2Cu-16.7Zn)이었으며 8 mm $\phi$ ×12 mm/인 고체형 비틀림 시험편으로 절삭가공하였다. 고온강도의 변형속도 및 온도의 의존성을 밝히기 위해 변형속도  $5.0 \times 10^{-3}/\text{sec} \sim 5.0 \times 10^0/\text{sec}$ , 온도 550~800 $^{\circ}\text{C}$ 를 조합하여 비틀림시험을 수행하였다. 실험은 가열속도를 1 $^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ 로 하여 목적온도에 도달한후 열적안정화를 위해 10분간 유지한 다음 파괴가 될때까지 연속변형하였다. 고온강도는 토오크셀에서 얻어지고 토오크값을 유효응력으로 환산하여 구하였다. 고온강도의 변형속도, 온도의 관계는 구성식으로 정량화 하였으며 고온강도의 영향을 주는 조직변화는 변형후 일정조건에서 급냉하여 (NH<sub>4</sub>OH+H<sub>2</sub>O)+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 용액으로 부식한후 광학현미경과 TEM(Hitachi, H-900NAR, 300 kV)으로 관찰하였다.

## 3. 실험결과

### 3.1 고온유동곡선

Fig. 1은 일정 변형속도  $5.0 \times 10^{-1}/\text{sec}$ 에서 온도를 550 $^{\circ}\text{C} \sim 800^{\circ}\text{C}$ 로 변화시켜 얻은 유동곡선을 나타낸 것이다. 유동곡선은 변형초기에 고온강도가 급격히 증가하여 최대값( $\sigma_p$ , peak stress)에 이르고 변형이 증가함에 따라 점차 낮아져 일정한 값인 정상상태

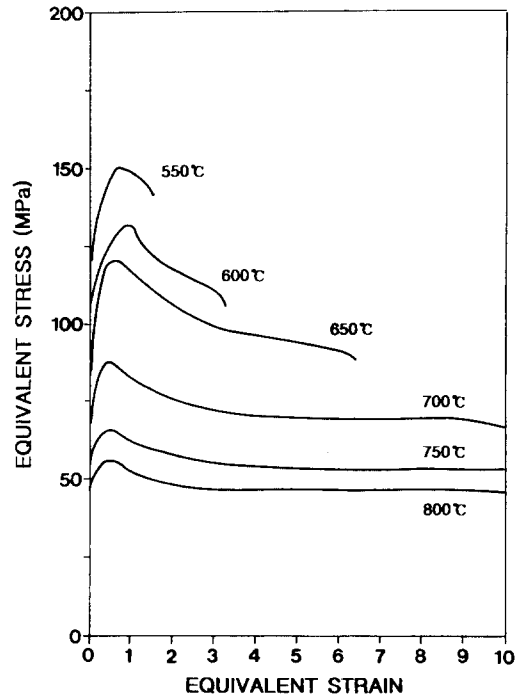


Fig. 1 Representative flow curves for Cu-Zn alloy from hot torsion tests showing the effects of change in temperature at  $5.0 \times 10^{-1}/\text{sec}$

( $\sigma_s$ , steady state stress)를 유지하였다. 고온강도는 변형온도가 800 $^{\circ}\text{C}$ 에서 550 $^{\circ}\text{C}$ 로 낮아짐에 따라 그 증가폭이 커지는 것으로 온도의존성이 큰 것을 알 수 있었다. Fig. 2의 (a), (b)는 변형온도가 각각 650 $^{\circ}\text{C}$ , 750 $^{\circ}\text{C}$ 에서 변형속도를  $5.0 \times 10^{-3}/\text{sec} \sim 5.0 \times 10^0/\text{sec}$ 로 변화하여 얻은 유동곡선을 나타낸 것이다. 유동곡선의 형태는 Fig. 1과 동일하였으며 고온강도는 변형속도가  $5.0 \times 10^{-3}/\text{sec}$ 에서  $5.0 \times 10^0/\text{sec}$ 로 빨라짐에 따라 높은 값을 보였다.

Fig. 1에서 파괴 변형량을 조사해보면 일정변형속도에서 온도가 높을수록 파괴변형량이 증가하였다. 반면에 Fig. 2(a)는 650 $^{\circ}\text{C}$ 에서 변형속도가 빨라짐에 따라 중간 정도의 변형속도  $5.0 \times 10^{-1}/\text{sec}$  조건에서 큰 값을 나타내었고 변형속도가 느려짐에도 불구하고 파괴변형량은 오히려 감소하는 경향을

단상조직을 갖는 Cu-Zn합금의 고온강도에 미치는 변형속도와 온도의 영향

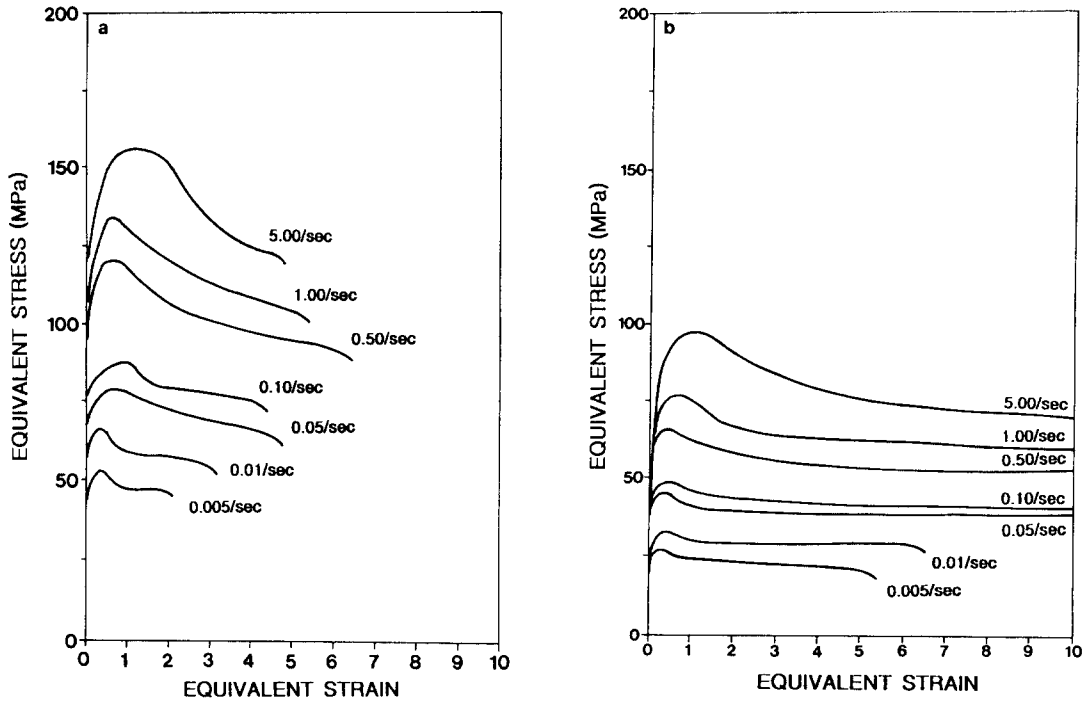


Fig. 2 Representative flow curves for Cu-Zn alloy from hot torsion tests showing the effects of change in strain rate at (a) 650°C and (b) 750°C

나타내고 있었다. 이는 고온에서 변형이 진행됨에 있어 파괴의 양상이 변형속도에 따라 달라짐을 나타내고 있다고 할 수 있다. 같은 변형량이라도 변형속도에 따라 변형시

간이 달라지게 되는데 Cu-Zn합금의 경우, 변형속도가 빨라짐에 따라 균열의 전파가 파괴의 주된 기구가 되고 변형속도가 대단히 느린 경우 균열이 전파하기에는 많은 시

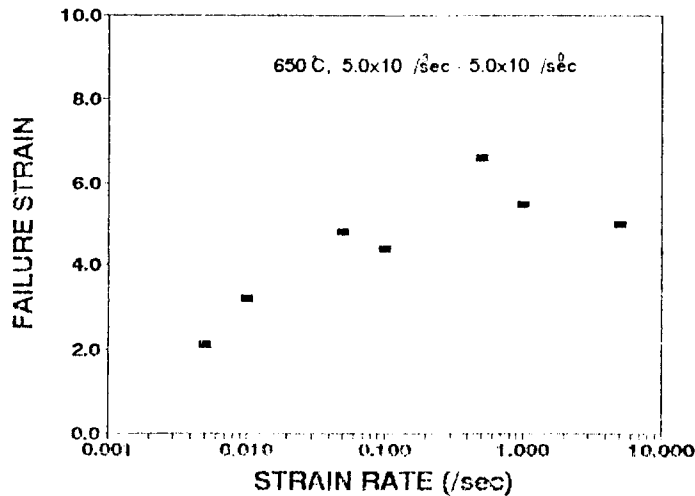


Fig. 3 Variation of torsional ductilities for Cu-Zn alloy

간이 소요되나 이러한 균열들이 고온에서 빨리 성장하게 되어 본 실험에서는  $5.0 \times 10^{-1}/\text{sec}$ 의 중간정도 변형속도에서 가장 큰 파괴변형량을 나타내게 되는 것으로 사료된다. 또한 Fig. 2(b)는 변형온도가 (a)보다 고온인  $750^\circ\text{C}$ 에서의 경우로 변형속도가  $10^{-2}/\text{sec}$  이상일때는 파괴변형량이 10 이상이지만 변형속도가  $10^{-2}/\text{sec}$  이하로 낮은 경우 오히려 연성이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이 경우 변형온도가  $750^\circ\text{C}$ 로 대단히 높기 때문에 변형속도가 빠르다 하더라도 균열의 전파를 억제할 수 있지만 변형속도가 느리게 되면 균열의 성장이 유리하게 되어 파괴에 이르는 변형량이 작아지게 된다고 판단된다. 이러한 파괴변형량과 변형속도와의 관계를  $650^\circ\text{C}$  변형온도 조건에서 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 9는 변형속도가  $5.0 \times 10^{-1}/\text{sec}$ 로 일정하고 변형온도를  $550^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$  사이로 변화시켰을때의 조직을 파괴직전에 급냉하여 얻은 조직을 나타낸 것이다. 변형온도에 따른 조직변화는 변형온도가  $550^\circ\text{C}$ 에서  $800^\circ\text{C}$ 로 증가함에 따라 동적재결정립크기는 각각  $10 \mu\text{m}$ 에서  $150 \mu\text{m}$ 로 증가하였으며, 변형후 급냉한 미세조직은 모두 등축정을 나타내고 있다.

**Table 1** Data of peak stress( $\sigma_p$ , MPa) for Cu-Zn alloy

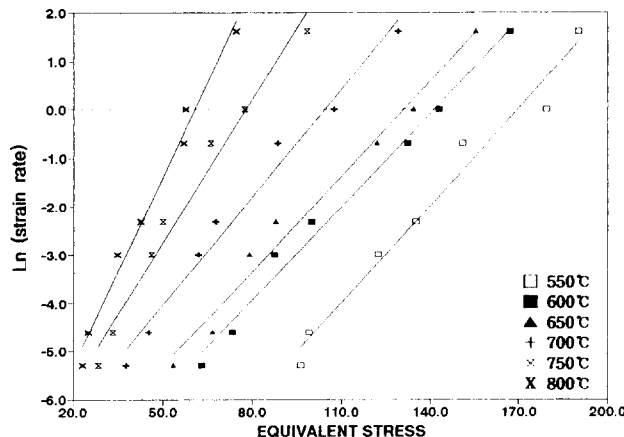
$^\circ\text{C}$ (/sec)	$550^\circ\text{C}$	$600^\circ\text{C}$	$650^\circ\text{C}$	$700^\circ\text{C}$	$750^\circ\text{C}$	$800^\circ\text{C}$
5.00	190.39	167.05	155.43	129.11	98.44	74.47
1.00	179.42	143.00	134.38	107.51	77.45	57.63
0.50	150.98	132.32	122.09	88.67	66.08	56.92
0.10	135.30	100.12	87.98	67.68	50.13	42.73
0.05	127.47	87.45	79.06	62.03	46.13	35.02
0.01	99.13	73.25	66.47	45.25	33.35	25.18
0.005	96.45	62.87	53.42	38.69	25.53	23.35

**Table 2** Constitutive parameters for Cu-Zn alloy

	550	600	650	700	750	800
Power Law(n)	9.23	6.84	6.32	5.56	5.59	5.64
Exponential Law( $\beta$ )	0.067	0.064	0.065	0.079	0.098	0.131
Hyperbolic Sine Law(n')	5.27	4.61	4.50	4.44	4.87	5.19

**3.2 고온강도와 변형속도 및 조직변화**

Fig. 1, 2의 결과로 고온강도가 변형속도와 온도에 의존하는 것을 관찰할 수 있었는데 그 관계를 정량화하기 위해 각 변형조건에서의 온도, 변형속도에 따른 최대강도값( $\sigma_p$ )을 Table 1에 나타내었다. Table 1의



**Fig. 4** Power law analysis of flow stress on strain rate at various temperature

단상조직을 갖는 Cu-Zn합금의 고온강도에 미치는 변형속도와 온도의 영향

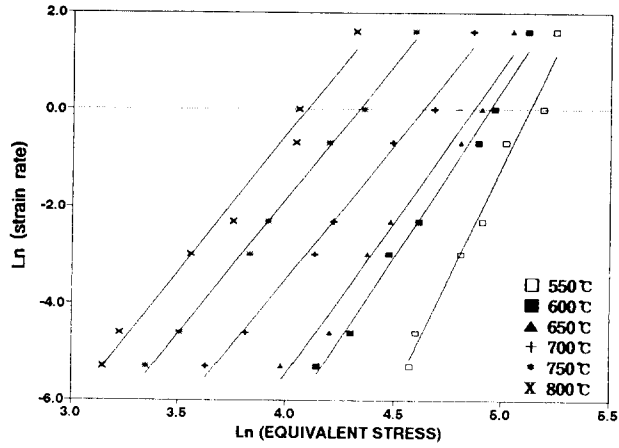


Fig. 5 Exponential law analysis of flow stress on strain rate at various temperature

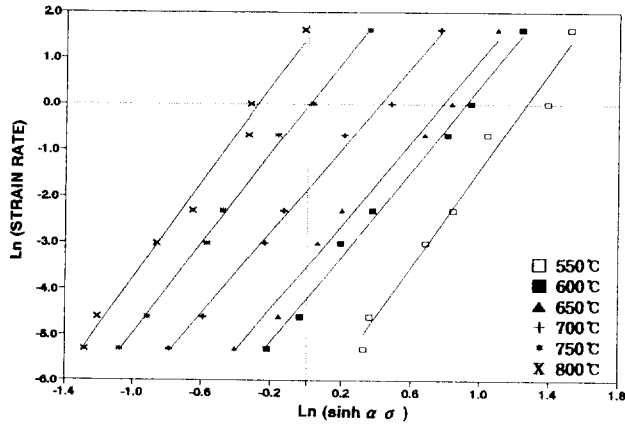


Fig. 6 Hyperbolic sine law analysis of flow stress on strain rate at various temperature

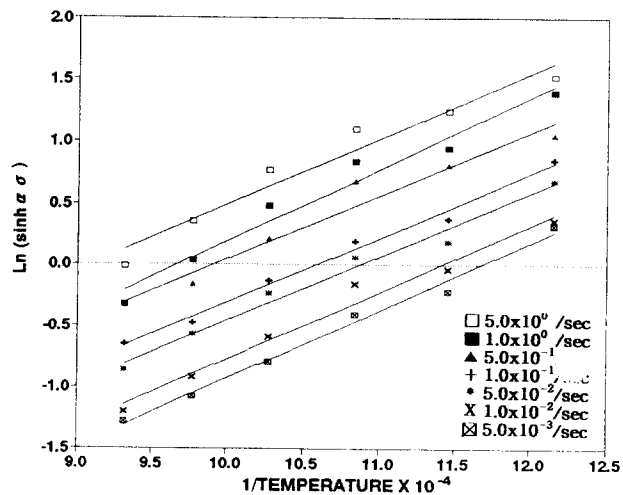


Fig. 7 The plot of  $\text{Ln}(\sinh \alpha \sigma)$  vs.  $1/T$  provides straight and parallel line for each strain rate

각 데이터를 멱수법칙, 지수법칙, 하이퍼볼릭싸인법칙<sup>(5,6)</sup>에 적용시켜 Fig. 4, 5, 6에 각각 도시하였으며 일정온도에서 중요변수  $n$ ,  $\beta$ ,  $n'$ 값을 Table 2에 종합하였다. Fig. 4는 멱수법칙을 적용시킨 것으로 700°C~800°C 구간에서  $n$ 값이 5.56~5.64로 거의 일정한

값을 보이거나 변형온도가 550°C로 낮아짐에 따라 9.23으로 증가하였다. Fig. 5는 지수법칙을 적용한 결과로 550°C~650°C 구간에서  $\beta$ 값이 0.064~0.067로 비슷하였으나 온도가 높아짐에 따라 커지는 것을 알 수 있다. 또한 하이퍼볼릭싸인식을 적용한 Fig.

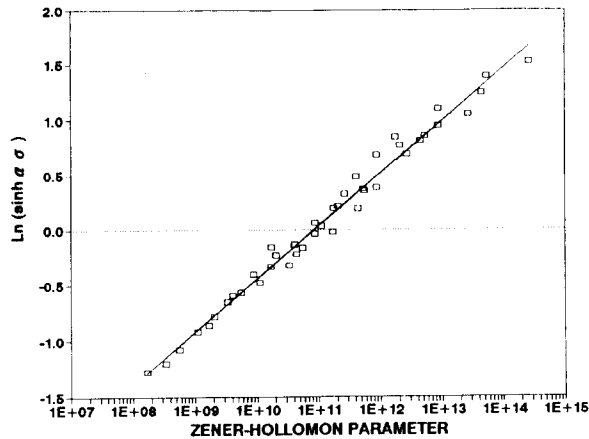


Fig. 8 Dependence of  $\text{Ln}(\sinh \alpha \sigma)$  on Zener-Hollomon parameter

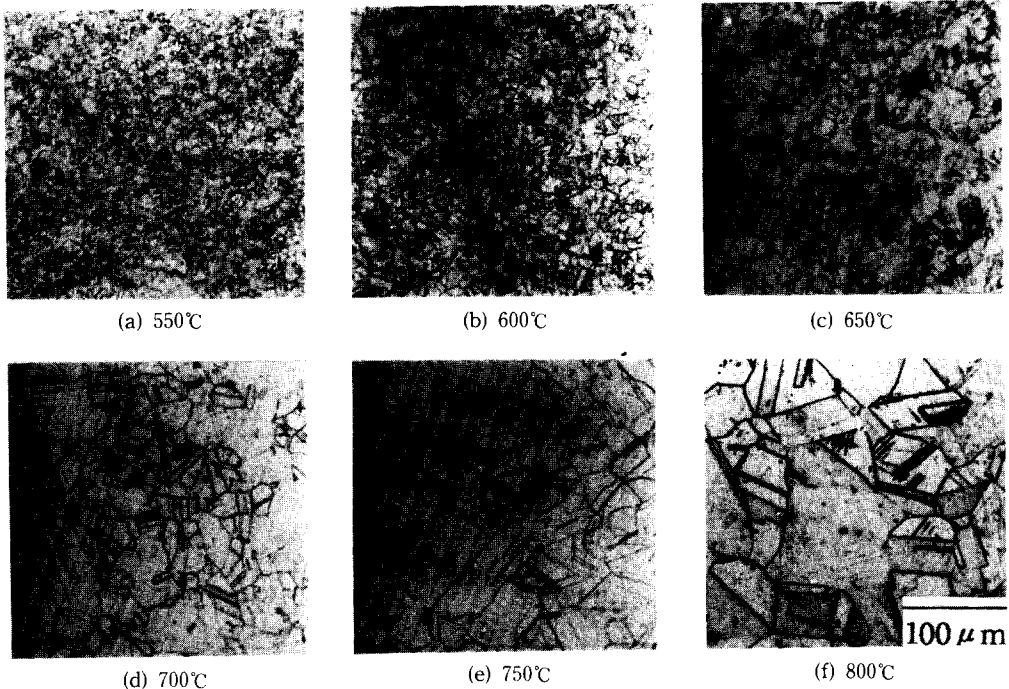


Fig. 9 Optical micrographs of Cu-Zn alloy showing the effects of change in temperature and at  $5.0 \times 10^{-1}/\text{sec}$

6을 보면 다소 편차는 있으나 전 온도구간에서  $n'$ 값이 4.44~5.27로 얻어졌다. 한편 열간변형의 고온강도를 결정하는데 필요한

활성화에너지 값을 구하기 위해  $Q = -R (\partial \ln \dot{\epsilon} / \partial \ln \sinh \alpha \sigma)_T (\partial \ln \sinh \alpha \sigma / \partial dT)_\epsilon$  식을 이용해  $\ln(\sinh \alpha \sigma)$  대  $1/T$ 로 Fig. 7에 변형속

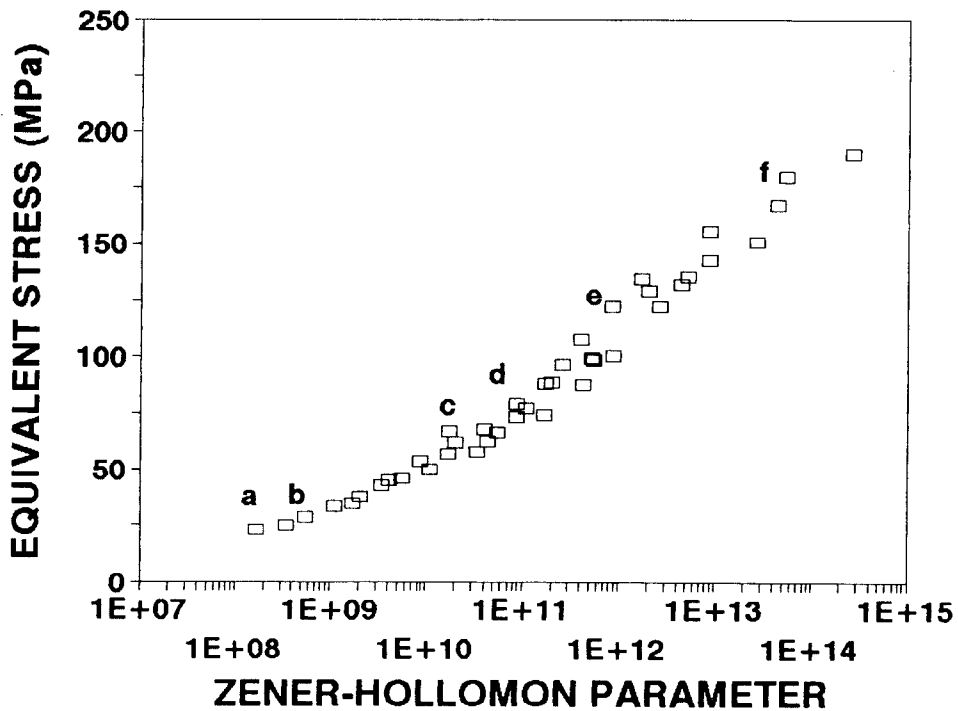
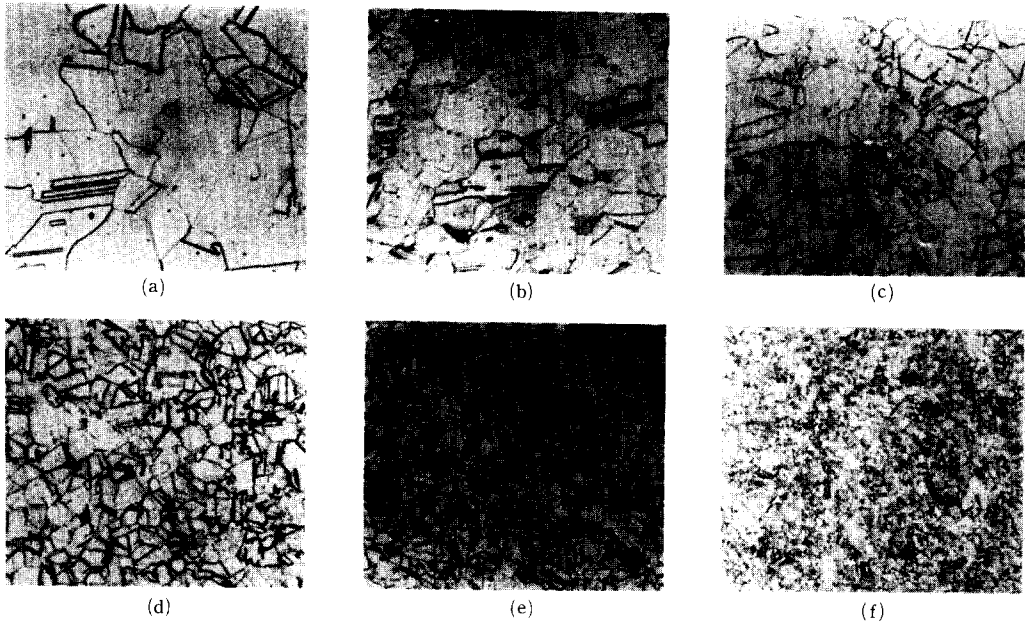


Fig. 10 Relationship between the Zener-Hollomon parameter, the flow stress and microstructures for Cu-Zn alloy

도별로 나타내었다. 변형속도가  $5.0 \times 10^{-3}/\text{sec} \sim 5.0 \times 10^0/\text{sec}$ 의 모든 조건에서 거의 일정한 기울기를 보였으며, 기울기의 평균값에  $n'$ 값과  $R$ 을 곱하여 활성화에너지( $Q=216 \text{ kJ/mol}$ )을 얻을 수 있었다.

고온강도값과  $Z$ 파라메타의 관계를 Fig. 10에 나타내었다.  $Z$ 파라메타( $Z=A(\sinh \alpha\sigma)^n = \exp(Q/RT)$ ,  $\sigma=f(\dot{\epsilon}\exp(Q/RT)=f(Z))$ )는 고온강도와 변형조건(변형온도, 변형속도)의 관계뿐만 아니라 조직과의 연관성까지 정량적으로 설명할 수 있는 값이다.<sup>(7)</sup> 즉 이  $Z$ 파라메타는 변형속도에 온도항을 첨가함으로써 유동응력을 해석하는데 편리하게 되며 변형속도와 온도의 조합이므로 조직학적 변화를 설명하는데 매우 유용하다.

Fig. 10에서 볼 수 있듯이  $Z$ 값이  $10^8$ 에서  $10^{14}$  정도로 증가함에 따라 조직은  $150 \mu\text{m}$ 에서 약  $10 \mu\text{m}$  정도까지 미세해지는 것을 확인할 수 있었고 고온강도 또한 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한  $Z$ 값이 약  $10^{11}$  정도에서 조직은 급격히 미세해지는데 이때 약  $30 \sim 40 \mu\text{m}$ 의 결정립도를 나타내고 있다.

#### 4. 고찰

$\alpha$  단상조직을 갖는 Cu-Zn합금의 고온강

도는 Fig. 1, 2에서 관찰한 바와 같이 온도와 변형속도에 크게 의존하였으며 유동곡선은 동적재결정 형태를 나타내고 있다. 이러한 현상은 Cu,  $\gamma$ -Fe, Ni합금 등의 fcc합금<sup>(8,9)</sup>에서 주로 관찰되는 것이다. 재료의 고온연화기구가 동적재결정임을 나타내는 가장 보편적인 자료가 유동곡선의 형태 및 미세조직인데 Cu-Zn합금의 유동곡선의 형태는 최대응력에 도달한 후 유동응력은 감소하고 일정 변형량 이후에 더 이상의 응력저하없이 정상상태를 나타내는 전형적인 동적재결정이었고 미세조직의 형태 또한 Fig. 11과 12에서 동적재결정을 확인할 수 있었다.

Fig. 11은 Cu-Zn합금을  $650^\circ\text{C}$ ,  $0.1/\text{sec}$  변형조건에서 임계변형 이전까지 변형한 후 급냉하여 TEM으로 관찰한 것으로 결정립 내에 많은 전위들이 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 일반적으로 동적재결정을 일으키는 재료는 적층결함에너지(stacking fault energy)가 작기 때문에 전위의 상승(dislocation climbing)이나 교차슬립(cross slip)이 어렵다. 이러한 전위들이 집적(tangle)되어 아결정립을 형성하게 되고, 특히 동적재결정을 일으키는 재료에서는 전위들이 완전히 소멸되지 못하고 아결정립 내에 많이 존재하는 것으로 알려져 있다.<sup>(10)</sup> Fig. 11의 (a)는 변형초기 전위의 합체에 의해 아결정

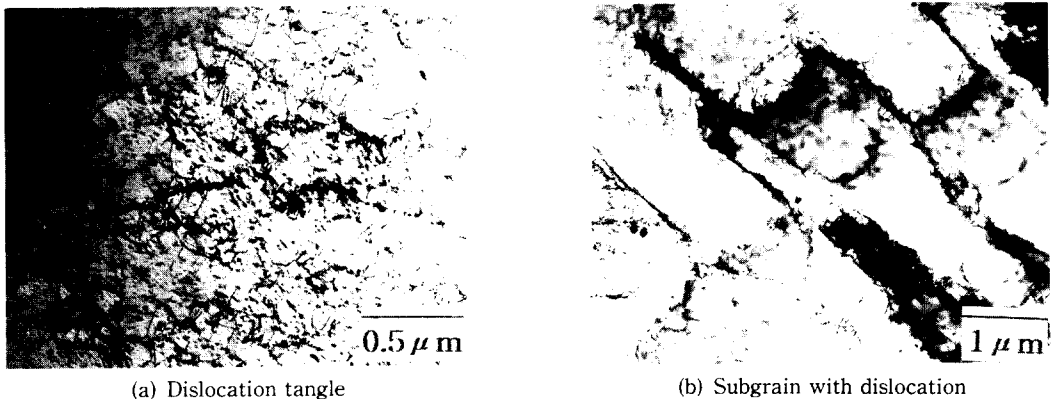


Fig. 11 TEM micrographs of Cu-Zn alloy illustrating dynamic recrystallization



립(subgrain)이 형성되고 (b)에서는 아결정립이 형성된후에도 전위들이 집적되어 있음을 나타내고 있다.

Fig. 12는 고온강도와 조직변화를 650°C, 0.5/sec에서 변형량에 따라 나타낸 것이다. Fig. 12의 (a)는 약 200 μm의 변형직전 조직이며 강도가 증가하여 (b)에 도달하면 기존입계가 불안해지고 일부 결정립에 변형이 집중되는 현상을 관찰할 수 있었다. (c)에서는 결정립이 변형방향으로 길게 늘어져 있고 변형이 집중되어 동적 재결정이 발생하며 정상상태 (d)에서는 변형중임에도 불구하고 결정립은 등축정이고 (e)에서는 동적재결정 조직을 확인할 수 있었다. 또한 (f)는 동적재결정 단계의 결정립을 나타낸 것으로 결정립계는 불안정하고 이동하는 입계가 톱니 형태를 보여주고 있다. 이러한 동적재결

정립은 직선적인 결정입계와 어닐링 쌍정으로 특징지워지는 정적재결정과 달리 열간 변형중 발생하므로 결정립이 미세해지고 입계가 톱니바퀴형태를 나타내는등 불안정한 상태를 나타내고 있었다. 이와 같이 유동곡선과 조직관찰로부터 Cu-Zn 합금의 고온강도는 이상의 동적재결정 현상에 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있었다.

임의의 변형속도와 온도에서 고온강도의 변화는 다음과 같은 하이퍼볼릭싸인법칙으로 정량화할 수 있었다. 구성식  $\dot{\epsilon} = A(\sinh 0.017\sigma)^{4.81} \exp(-216 \text{ kJ/mol})$ 은 일부 Al합금<sup>(11)</sup> 및 Cu합금에서 관찰되는 것이며 활성화에너지 216 kJ/mol은 일부 가공용 Al합금의 230~280 kJ/mol보다는 작은 값이며 Cu보다는 큰 값이 된다.

지금까지의 결과로 Cu-Zn합금의 고온강

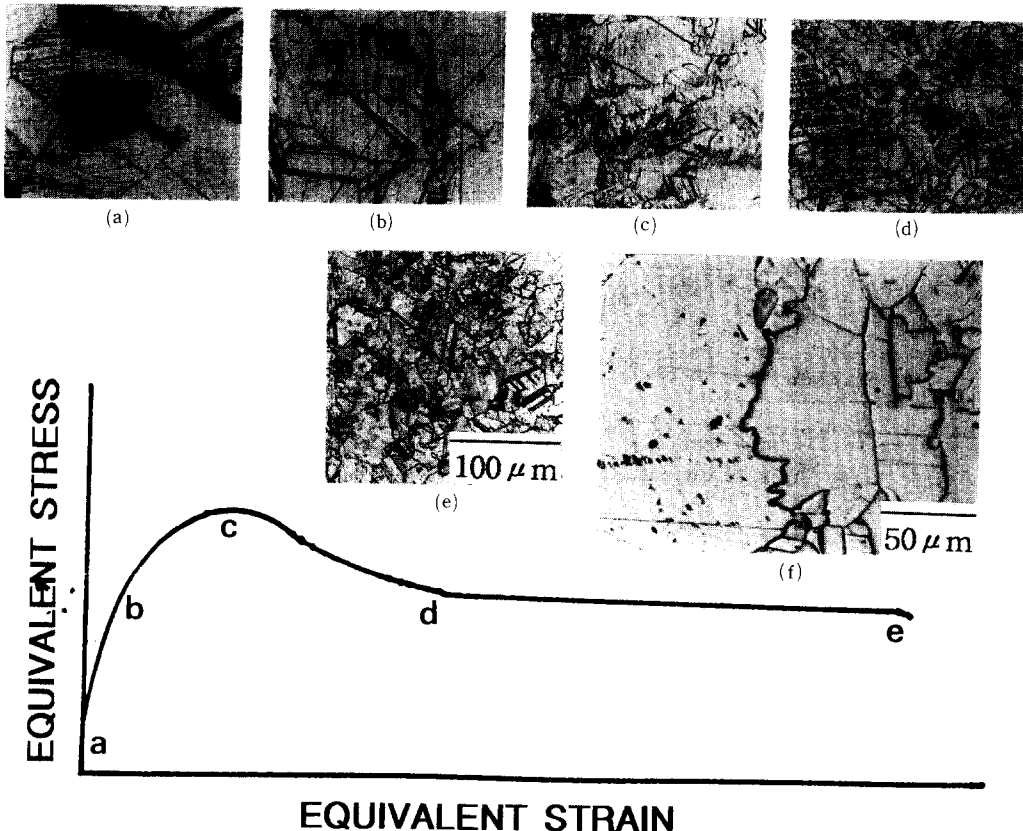


Fig. 12 Optical micrographs showing the microstructure development with strain change

도는 변형속도와 온도에 의존하였으며 이를 종합하여 나타내면 Fig. 8과 같다. 고온강도( $\sinh a\sigma$ )는  $Z$ 파라메타가 증가함에 따라 데이터가 회귀분석한 직선에 잘 수렴하는 것을 관찰할 수 있었다. 또한 그 기울기값은 4.79로 하이퍼볼릭싸인법칙으로 구한  $n$  값과 거의 일치하는 값이다. 따라서 Cu-Zn 합금의 고온강도는 변형속도와 온도에 의존하며 이를 정량화하는데는 하이퍼볼릭싸인법칙이 가장 적절하였다.

### 5. 결 론

$\alpha$  단상을 나타내는 Cu-Zn 합금의 고온강도에 미치는 변형속도와 온도의 영향을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 변형중 고온강도의 변화를 보이는 유동곡선은 전형적인 동적재결정 형태였는데 변형초기에는 응력이 증가하여 최대응력에 이른후 점차 감소하여 일정 변형량에서 응력값의 변화가 적은 정상상태를 나타내고 있었다.

(2) 열간가공변수인 변형온도 및 변형속도는 Cu-Zn 합금의 연성에 영향을 미침을 확인할 수 있었는데 특히 본 실험에서는 변형속도가  $10^{-1}/\text{sec}$ 에서 파괴변형률이 10 수준이었다.

(3) 변형속도, 변형온도, 유동응력과의 상관관계는 다음과 같은 hyperbolic sine법칙으로 정량화할 수 있었다.

$$\dot{\epsilon} = A(\sinh 0.017\sigma)^{4.81} \exp(-216/RT)$$

(4) 고온강도와 조직의 관계는  $Z$ 파라메타와 연관시켜 설명할 수 있었는데  $Z$ 값이  $10^{14}$  정도에서 결정입도는 약  $10 \mu\text{m}$ 였다.

### 참고문헌

(1) Duesbery, M. S., Louat, N. P. and

Sadananda, K., 1992, "The Mechanics and Energetics of Cross-Slip," Acta Metall., Vol. 40, p. 149.

(2) Estrin, Y. and McCormick, P. G., 1991, "Modelling the Transient Flow Behaviour of Dynamic Strain Ageing Materials," Acta Metall., Vol. 39, p. 2977.

(3) Rollett, A. D., Luton, M. J. and Srolovitz, D. J., 1992, "Microstructural Simulation of Dynamic Recrystallization," Acta Metall., Vol. 40, p. 43.

(4) Padmavardhani, D. and Prasad, Y. V. R. K., 1991, "Characterization of Hot Deformation Behavior of Brasses Using Processing Maps: Part I  $\alpha$  Brass," Met. Trans. 22A (1991) pp. 2985~2992.

(5) McQueen, H. J., 1968, "Deformation Mechanisms in Hot Working," J. Met., pp. 31~38.

(6) Garofalo, F., 1965, "Fundamentals of Creep and Creep Rupture in Metals," Macmillan, New York.

(7) H. J. McQueen, W. A. and Jonas, J. J., 1967, "Deformation of Aluminium at High Temperatures and Strain Rates:," Canad. J. Phys., Vol. 45, pp. 1225~1234.

(8) McQueen, H. J. and Bourell, D. L., 1987, "Hot Workability of Metals and Alloys," J. Met., pp. 28~36.

(9) 장병록, 오병문, 유연철, 1987, "Nb첨가강의 감온단속변형에 관한 연구," 재료강도 Proc., 대한금속학회, Vol. 6, pp. 33~41.

(10) Ryan, N. D. and McQueen, H. J., 1990, "Comparison of Dynamic Softening in 301, 304, 316 and 317 Stainless Steels," High Temp. Tech., Vol. 8, pp. 185~200.

(11) 전정식, 유연철, 1994, "Al 합금기 복합재료의 고온가공성," 대한금속학회 회보, Vol. 6, pp. 97~108.