

〈論 文〉

## 고온단속변형량이 단상Cu-Zn합금의 정적연화에 미치는 영향

권용환\* · 조상현\* · 유연철\*

### Effect of Hot Interrupted Strain on Static Softening of Single Phase Cu-Zn Alloy

Yong-Hwan Kwon, Sang-Hyun Cho and Yeon-Chul Yoo

#### Abstract

Static restoration mechanism during hot interrupted deformation of Cu-Zn alloy was studied in the temperature range from 550°C to 750°C and at a constant strain rate of 0.1/sec. At a given temperature, the hot interrupted deformations were performed with variation of interrupted time  $t_i$  from 1 to 50 sec and of interrupted strain  $\epsilon_i$  from 0.15 to 0.90. From the analysis of the values of the critical strain of  $\epsilon_c$  for the initiation of dynamic recrystallization and the peak strain of  $\epsilon_p$ , the relationship  $\epsilon_c \approx 0.7\epsilon_p$  was obtained. It was clarified that the softening of the interrupted deformation was mainly the static recrystallization and the fractional softening(FS) which was over 30% mostly confirmed this result. The fractional softening of the interrupted deformation was depending on strain rate  $\dot{\epsilon}$ , temperature T, interrupted time  $t_i$  especially pre-strain. The FS increased with increasing strain rate, interrupted time and pre-strain. The change of microstructures after hot deformation could be predicted by the FS. When the FS was 30~100%, static recrystallization was happened and grain growth was observed at the condition which was 750°C deformation temperature, 0.45 pre-strain and this condition's FS value was over 100%.

**Key Words :** Static Restoration Mechanism, Hot Interrupted Deformation, Critical Strain( $\epsilon_c$ ), Fractional Softening, Interrupted Time( $t_i$ ), Interrupted Strain( $\epsilon_i$ )

#### 1. 서 론

고온변형이 끝난후에 금속재료에서 일어

나는 정적연화(static restoration)정도를 밝히는 것은 재료의 기계적 특성치 결정에 크게 영향을 미치므로 이에 관한 연구는 금속 재료 특성향상을 변형공정면과 결부시켜 생각할때 매우 주요하게 평가되고 있다.<sup>(1~6)</sup> 따라서 순금속(pure metal)이 아닌 실용합

\*인하대학교 금속공학과

금중 단상조직(single phase)을 갖는 Cu-Zn 시스템을 선정하면 금속재료의 정적연화 현상을 정량적으로 분석할 수 있는 잇점이 있어서 최근에 이에 관한 분석이 시도되고 있다.<sup>(7,8)</sup> 뿐만 아니라, 금속재료의 기계적특성을 결정하는데 고온소성가공의 여러 패스 중 한 패스에서 다음 패스로 넘어갈때의 유지시간(holding time)동안에 발생하는 정적 또는 준동적(meta-dynamic)연화현상은 중첩되거나 반복되므로 단상합금이라도 조직적 해석에는 많은 이점이 있다. 따라서 본 연구에서는 실용적으로 산업에 많이 쓰이면서 이론적으로도 정적연화를 구명할 수 있는 단상 Cu-Zn 합금을 이용하여 단속변형(interrupted deformation)시 연화비율(fractional softening)에 중점을 두어 연화정도를 분석하고자 하였다.

## 2. 실험방법

시료는 단상의 Cu-Zn합금(83.2Cu-16.7Zn)을 사용하였으며 8 mmφ×12 mm/인 고체형 비틀림 시험편으로 절삭가공한 후 730°C에서 3시간 안정화처리하였다. 단속변형은 변형속도 0.1/sec의 일정변형속도하에서 온도는 550°C, 650°C, 750°C에서 행하였는데 단속변형량은 동적재결정에 필요한 임계변형량  $\epsilon_c$ 를 전후로 변화시켰으며,<sup>(9,10)</sup> 단속시

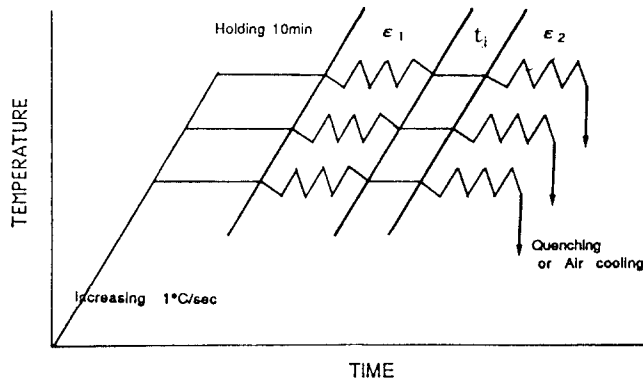
**Table 1** The condition of single interrupted deformation

strain rate	temp.	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$
0.1/sec	550°C	0.15	1.35
		0.75	0.75
	650°C	0.15	1.35
		0.75	0.75
750°C	0.15	1.35	
	0.45	1.05	
1.0/sec	750°C	0.45	1.05
		0.90	0.60

간은 1초에서 50초였다. 본 연구에서의 연속변형시험조건을 Table 1에 정리하였다. 실험은 Fig. 1에 도식적으로 나타낸 바와 같이 가열속도를 1°C/sec로 하여 목적온도에 도달한 후 열적안정화를 위해 10분간 유지한 다음 정해진 단속변형량을 준 다음 일정시간 유지한후 동일한 변형속도로 변형하였다. 연화비율(fractional softening)은 아래식을 이용하여 초기변형시의 항복응력과 단속직전의 응력 및 다음 변형의 항복응력의 관계로 구하였다.<sup>(11)</sup>

$$FS_i = \frac{\sigma_{mi} - \sigma_{y(i+1)}}{\sigma_{mi} - \sigma_{y0}} \quad (1)$$

여기서,



**Fig. 1** Thermo-mechanical history of specimens

- $\sigma_{y0}$  : 초기항복응력
- $\sigma_{mi}$  :  $i$ 번째의 유동응력
- $\sigma_{y(i+1)}$  : 재변형시 항복응력

을 나타낸다.

조직변화는 임의의 단계에서 급냉한후 (NH<sub>4</sub>OH + H<sub>2</sub>O) + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 용액으로 부식하여 관찰하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 동적재결정핵 생성에 필요한 임계변형량

Cu-Zn합금의 고온유동곡선은 동적재결정 형태를 나타내었는데 동적재결정핵 생성에 필요한 임계변형량(critical strain,  $\epsilon_c$ )을 결정하기 위하여 Fig. 2에  $\theta$ - $\sigma$ 의 관계를 나타내었다. Fig. 2는 변형속도 1/sec, 변형온도 550~800°C 범위에서 가공경화속도( $\theta = d\sigma/d\epsilon$ )와 유동응력( $\sigma$ )과의 관계를 나타내고 있는데 그림에서 알 수 있듯이 각 곡선은 크게 3단계로 나뉘어진다. 첫째는 유동응력이 0( $\sigma=0$ )가 되는  $\theta_0$ 에서 아결정립(sub-grain)이 생성되는 단계로 직선적으로 감소하는 구간이고 둘째는 아결정립의 생성에서 완성되는 단계로 이 구간 또한 거의 선형적으로 감소한다. 마지막으로 동적재결정핵이 생성되는 구간으로 최대응력( $\sigma_p$ , peak

stress)에서 그 값은 0가 얻어지는데  $\sigma_p$  이전에 기울기변화가 불연속적으로 변화하는 점이 존재하게 된다. 기울기의 불연속적 변화는 가공경화단계에서 동적재결정핵이 생성되고 동적재결정이 유동곡선에 영향을 준다는 것을 의미하는 것인데 이것으로  $\epsilon_c$ 를 측정하게 되는 것으로 매우 중요한 것이다.<sup>(12)</sup>

550°C, 0.1/sec에서  $\epsilon_c$ 는 0.38, 650°C, 0.1/sec에서 0.29이었고 750°C, 0.1/sec 조건에서 0.23임을 알 수 있었는데 이처럼  $\epsilon_c$ 는 변형온도가 낮아질수록, 변형속도가 빨라질수록 증가하였다. 한편 임계변형량과 최대변형량의 관계( $\epsilon_c$ , critical strain/ $\epsilon_p$ , peak strain)는 동적재결정 발생시점을 평가하는데 중요한 지표가 된다고<sup>(10)</sup> 할 수 있는데  $\epsilon_c/\epsilon_p$ 의 관계는 어떤 금속재료에서 고온변형의 고유한 특성으로도 해석할 수 있으며, 변형온도와 변형속도에 따라서 크게 변하지 않고 대체로 일정한 값을 갖는다.<sup>(10)</sup>  $\theta$ - $\sigma$ 곡선에서 구한  $\epsilon_c$ 와  $\epsilon_p$ 의 관계는  $\epsilon_c \approx 0.7\epsilon_p$ 로 나타났고 이를 단속변형조건별로 Table 2에 정리하였다. 따라서 이러한 관계를 이용하면 임의의 변형조건에서 최대변형량  $\epsilon_p$ 는 쉽게 확인될 수 있어서 임계변형량  $\epsilon_c$ 는 용이하게 결정된다. Table 2에서  $\epsilon_c$ 와  $\epsilon_p$ 값은 온도가 낮고 변형속도가 빠르

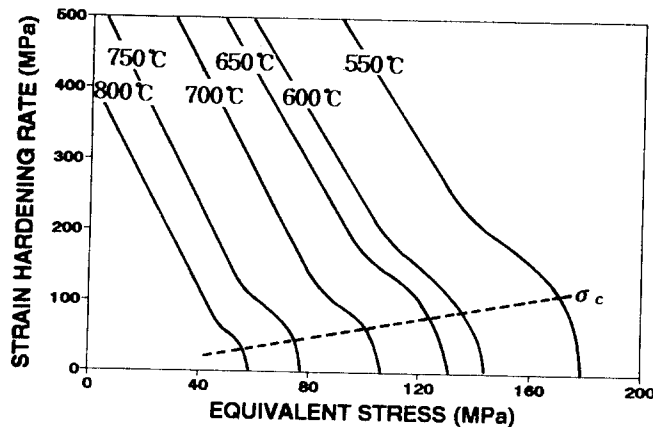


Fig. 2  $\theta$ - $\sigma$  curves to determine the critical strain( $\epsilon_c$ ) for Cu-Zn alloy

**Table 2** The  $\epsilon_p$  and  $\epsilon_c$  at various condition

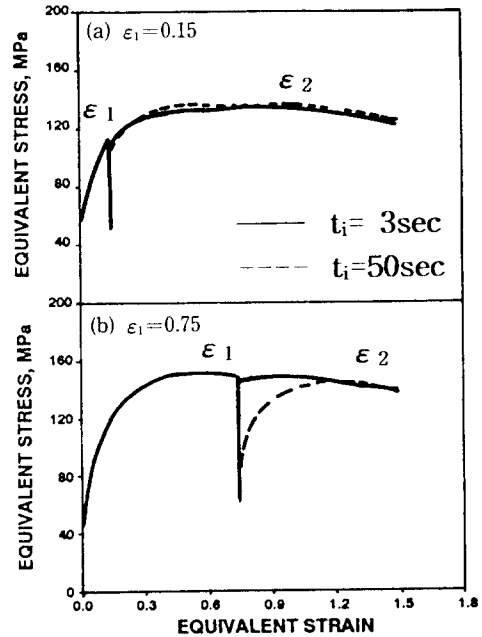
조 건	$\epsilon_p$	$\epsilon_c$
550°C, 0.1/sec	0.55	0.38
650°C, 0.1/sec	0.43	0.29
750°C, 0.1/sec	0.34	0.23
750°C, 1.0/sec	0.44	0.33

면 크게 나타났는데 이는 고온변형특성이 열적활성화 과정임을 나타내는 것이라 하겠다. 즉 동일온도에서 변형속도가 빠르면 가공경화속도가 고온연화속도보다 우세하여 동적연화가 상대적으로 지연되어  $\epsilon_c$  및  $\epsilon_p$ 는 큰 값을 나타내게 된다. 그리고 동일변형속도하에서는 온도가 낮을 경우 변형속도에 따른 가공경화가 빨라서 낮은 온도에서의 이러한 가공경화를 보합할만한 변형량이 필요하여  $\epsilon_c$  및  $\epsilon_p$ 의 값은 높게 나타나게 된다.<sup>(13)</sup> 여기서,  $\epsilon_c$  및  $\epsilon_p$  값을 논하는 것은 동적재결정을 일으키거나 완료되는 변형량을 알 수 있기 때문이다.

즉, 동적재결정을 이용해서 다단계 변형시 재료의 기계적 특성치를 향상시키려면 각각의 변형조건에서 동적재결정이 발생하는 변형량을 결정하는 것이 무엇보다도 중요하다. 특히 임계변형량은 가공경화단계에서 동적연화가 발생하는 현상을 의미하는 것이므로 본 실험에서도 확인할 수 있었듯이 변형속도와 변형온도 등 열간가공 공정 변수들과 밀접한 관계를 갖게 된다. 또한 다단계변형에서 전(前) 단계의 단속변형량이 임계변형량을 초과한 경우 다음 단계의 유동곡선의 형태, 연화비율 등에 많은 영향을 미치게 되는데<sup>(14)</sup> 이는 단속시간이 작더라도 단속변형량이 크게 되면 정적연화를 일으키는 구동력이 작은 것을 보상할 수 있기 때문이라고 판단된다.

### 3.2 단속유동곡선

Fig. 3은 550°C, 0.1/sec의 변형조건에서



**Fig. 3** Single interrupted and continuous flow curves of Cu-Zn alloy at 550°C, 0.1/sec and varying  $t_i = 3 \sim 50$  sec

초기변형량  $\epsilon_1$ 을 0.15(a)와 0.75(b)로 시험한 결과를 나타낸 것이다. (a)는 초기변형량  $\epsilon_1$ 을 임계변형량  $\epsilon_c$  0.38보다 작은 0.15(a)로 한 경우인데 단속시간  $t_i$ 가 짧거나 길던간에 유동곡선은 거의 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 초기변형량을 0.75(b)로 주어서 임계변형량  $\epsilon_c$ 를 지나게 하면 단속시간의 장단에 관계없이  $\epsilon_2$  유동곡선이  $\epsilon_1$  유동곡선보다 낮아지고 있었다. 뿐만 아니라 단속시간이 길어지면 짧은 경우와 비교할 때  $\epsilon_2$  유동곡선의 낮아지는 정도가 크게 나타났다. 이와 같은 현상은 일단 초기변형을 임계변형량 이상으로 하면 동적재결정이 이루어져서 결정립이 미세해지고 고온 입계이동이 쉬워지므로 따라서 유동곡선 수준이 낮아졌다고 판단된다. 이와 같은 생각은 기존의 스테인레스 강<sup>(14)</sup> 등을 통해서도 확인되고 있다. 650°C, 0.1/sec의 변형조건에서 초기변형량  $\epsilon_1$ 을 0.15(a)와 0.75(b)로 시험한 결과를 Fig. 4에 도시하였다. 여기서 (a)

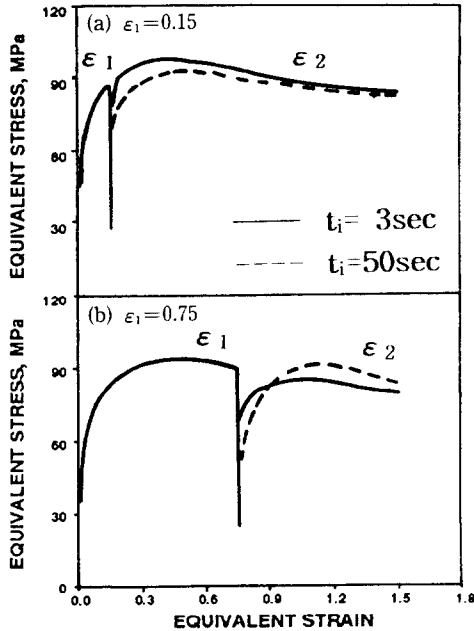


Fig. 4 Single interrupted and continuous flow curves of Cu-Zn alloy at 650°C, 0.1/sec and varying  $t_i = 3 \sim 50$  sec

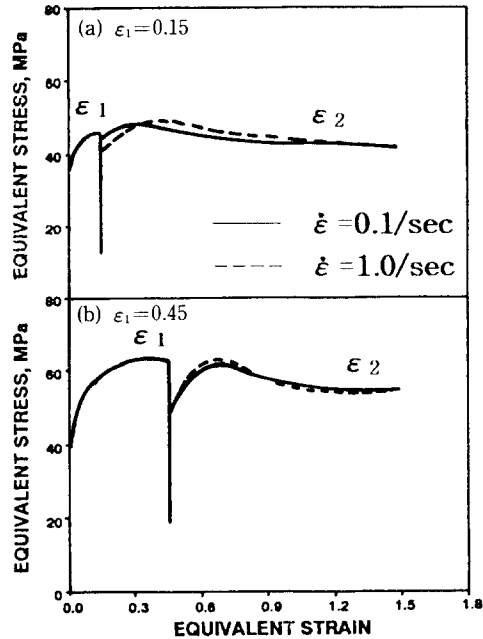


Fig. 5 Single interrupted and continuous flow curves of Cu-Zn alloy at 750°C and varying  $\dot{\epsilon} = 0.1$  /sec  $\sim$  1.0 /sec

의 경우는 초기변형량  $\epsilon_1$ 을 임계변형량보다 작은 0.15로 했기 때문에 재결정은 대부분 일어나지 않았지만 변형온도가 650°C로 다소 높기 때문에 연화현상이 일부 나타나게 되어 Fig. 3(a)와는 달리 단속시간이 길어지면 유동곡선이 낮아지게 된다. (b)에서는  $\epsilon_1$ 이 0.75이므로 재결정이 충분히 이루어져서  $\epsilon_2$  유동곡선이  $\epsilon_1$  유동곡선보다 낮은 수준으로 나타나고 있다. 그러나 유지시간이 길어지면 재결정 후 결정립 성장이 이루어져서 유동응력이 다시 증가하는 경향을 나타내었다고 판단된다. 따라서 이와 같은 변형조건에서 다단계변형시 단속시간을 길게 하고자 할때는 충분한 검토가 있어야 할 것이다.

Fig. 5는 같은 단속시간 5초에서 변형속도에 따른 단속유동곡선의 변화를 나타내고자 변형온도 750°C에서 초기변형량  $\epsilon_1$ 을 각각 0.15와 0.45로 일정하게 하고 변형속도를 0.1/sec에서 1.0/sec로 변화시킬때 얻은 유동응력곡선이다. 초기변형량이  $\epsilon_1 = 0.15$

로 작은 경우에는(a) 변형속도가 빨라짐에 따라 2차 패스시  $\epsilon_2$  유동곡선상의 최대응력에 도달하는 변형량(peak strain,  $\epsilon_p$ )이 커짐을 알 수 있었으나  $\epsilon_1 = 0.45$ 로 초기변형량이 커질경우  $\epsilon_2$ 의 유동곡선에 변화가 거의 없었다. 이는 초기 변형량이 임계변형량을 넘게 되면 재결정 효과가 나타나게 되고 특히, 변형온도가 높고 단속시간이 짧기 때문에 다음 패스의 변형에 변형속도의 영향이 그리 크지 못함을 나타낸다 하겠다. 따라서 Fig. 3~5를 비교해 보면 초기변형량  $\epsilon_1$  단속시간  $t_i$  및 변형속도  $\dot{\epsilon}$ 가 다음 단계의 유동응력곡선  $\epsilon_2$ 에 미치는 영향을 유추할 수 있게 된다.

### 3.3 연화비율

온도 변형속도 및 변형량 등의 변형조건을 변화시켜 얻어지는 단속유동곡선으로부터 구한 연화비율을 단속시간  $t_i$ 별로 식 (1)로부터 구하여 Fig. 6~8에 나타내었다.

Fig. 6은 Fig. 3~5의  $\epsilon_1 < \epsilon_c$  조건, 즉 첫 번째 단속변형량이 15% ( $\epsilon = 0.15$ )로서 동적재결정(dynamic recrystallization)에 필요한 임계변형량  $\epsilon_c$ 보다 작을 때의 연화비율을 나타낸 것이다. 연화비율은 단속시간이 길어짐에 따라 변형온도가 높아짐에 따라 증가함을 알 수 있는데, 특히 750°C의 고온에서는  $\epsilon_1 < \epsilon_c$  조건에서도 연화비율이 100% 이상이 되는 것을 확인할 수 있었고 550°C의 저온에서는 단속시간과는 무관하게 연화비율이 거의 증가하지 않았다.

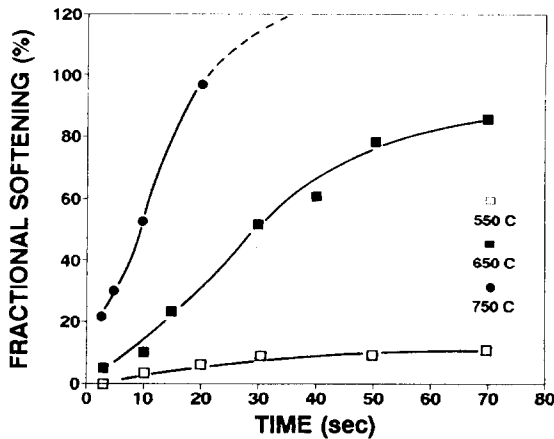


Fig. 6 Fractional softening plotted formation of pass number shown the effect of increasing interrupted time

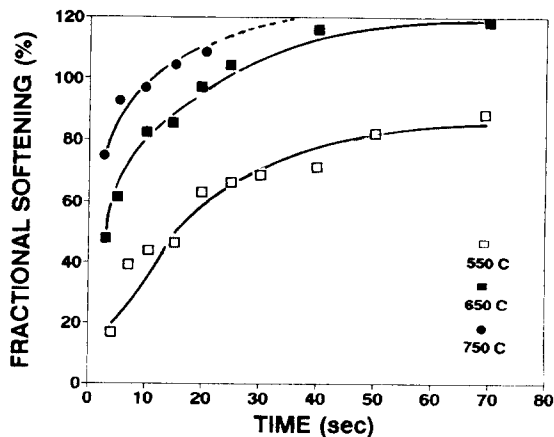


Fig. 7 Fractional softening plotted formation of pass number shown the effect of increasing interrupted time

따라서 단속중에 일어나는 정적연화(static restoration) 정도는 초기변형량이 임계변형량  $\epsilon_c$ 보다 작은 조건에서 단속시간 보다는 변형온도에 더 큰 영향을 받음을 확인할 수 있었다. Fig. 7은  $\epsilon_1 > \epsilon_c$  조건, 즉 초기변형량을 임계변형량 이상인 조건에서의 연화비율을 나타낸 것으로 Fig. 6과는 상당한 차이가 있다. 단속시간이 5초 정도의 매우 짧은 시간에서도 550~750°C 모든 실험온도구간에서 연화비율은 40% 이상을 나타내고 있는데 이는 초기변형량이 임계변형량  $\epsilon_c$ 를 지남에 따라서 이러한 변형량이 단속중에 발생하는 정적연화에 많은 영향을 끼친다고 할 수 있을 것이다. 특히 550°C의 낮은 변형온도임에도 단속시간이 길어짐에 따라 연화비율이 직선적으로 증가하였는데 이는 동적재결정을 일으키기 위한 임계변형량 이상의 변형에서 생성된 동적재결정립이 성장하고 정적재결정도 동시에 발생하는 것이라 판단된다. 이처럼 고온단속변형에서 단속시간중에 발생하는 정적연화는 일반 정적복구과정과는 근본적인 차이가 있는데, 즉 고온단속변형중에서는 정적회복과 정적재결정 뿐만아니라 준동적재결정(meta-dynamic)이 추가된다. 이러한 준동적재결정은 고온가공중에 변형량이 동적재결정 핵생성에 필요한 변형량  $\epsilon_c$ 를 초과한 후 단속변형을 하면 다음 단계의 변형에서 이미 발생된 동적재결정핵 때문에 잠복기(incubation time)가 없이 정적재결정이 일어나는 현상<sup>(15)</sup>으로 잘 알려진 사실이다. 따라서 변형량이 작은 경우( $\epsilon < \epsilon_c$ )에 일어나는 전형적인 정적재결정(static recrystallization)형태와는 구분되며 이 준동적재결정의 효과로는 동적재결정을 일으킨 다음 짧은 유지시간 동안 미세구조의 개선에 중요한 역할을 하게된다.

Fig. 6과 7을 비교해보면 초기 변형에서 동적재결정이 발생하였는가에 따라 정적연화를 정량적으로 나타내는 연화비율에 미치

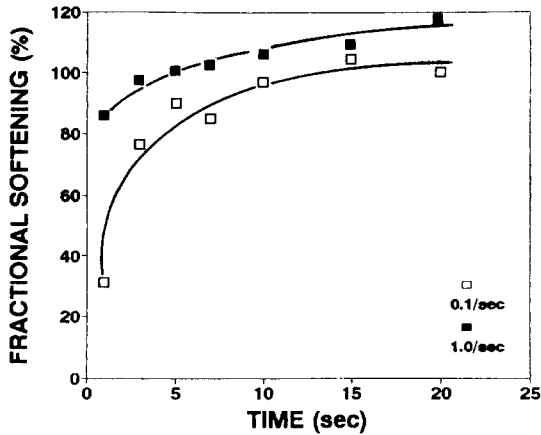


Fig. 8 Fractional softening plotted formation of pass number shown the effect of increasing strain rate

는 영향을 알 수 있었다. Fig. 8은 변형속도에 따른 연화비율의 변화를 750°C의 변형 온도에서 초기 변형량이 0.45로 임계변형량  $\epsilon_c$  이상인 조건에서의 결과이다. 변형속도가 1.0/sec로 증가함에 따라 이로 인한 변형에너지의 축적이 커지므로 3초의 짧은 단속시간에서도 100% 이상의 높은 연화비율을 보였다. 또한 임계변형량  $\epsilon_c$  이상의 초기변형량과 750°C의 높은 변형온도 및 빠른 변형속도로 인해 짧은 시간안에 정적재결정이 발생함을 알 수 있었다. 따라서 Fig. 6~8과 같이 정적인 상태의 연화정도를 정량적으로 나타낼 수 있다면 다음 변형의 조직변화 및 유동응력을 예측하는데 매우 유익한 자료가 될 것이다. 일반적으로 연화비율이 30% 미만인 경우는 정적회복이 일어나고 30~100% 정도에서 정적재결정이 일어나며 100% 이상일때는 결정립성장이 일어난다고 보고되고 있다.<sup>(13)</sup> Fig. 6~8을 보면 변형조건에 따라서 약간씩 달라지지만 단속시간이 증가함에 따라서 연화비율은 증가함을 알 수 있었다. 이러한 단속변형으로 인한 정적연화는 유동응력과 조직변화를 수반하는데 이것을 정량화한 것이 연화비율이다. 연화비율은 가공의 난이도를 의미하며

실제적인 공정에 전반적으로 필요한 정보를 제공해 준다.<sup>(1,4)</sup>

### 3.4 조직변화

단속변형의 유지시간동안에 발생하는 Cu-Zn합금의 조직변화를 관찰하기 위하여 550°C, 0.1/sec의 변형조건으로 임계변형량 ( $\epsilon_c=0.4$ ) 이상인 0.75의 변형을 가한후 단속시간증가에 따른 조직변화를 Fig. 9에 나타내었다. (a)는 단속변형직전의 조직으로 단상의 조직이 관찰되는데 변형을 가한후 멈춘 정점(b)에서는 변형된 결정립계에서 임계변형량 이상의 변형량으로 인하여 동적재결정의 핵이 형성되는 것이 관찰되었다. 이와 같은 동적재결정핵은 단속시간이 증가함에 따라 성장하며 축적된 변형에너지에 따른 정적재결정립도 결정립계에서 함께 발생되어 성장하는 것으로 예측된다. 단속시간이 50초로 증가하면 거의 모두 등축정으로 나타나며 변형직전의 조직과 비교하면 결정립의 크기가 상당히 감소된 것을 알 수 있었다. Fig. 10은 750°C, 0.1/sec,  $\epsilon_1=0.45$ 인 조건에서  $t_i$ 에 따른 미세조직변화를 나타낸 것이다.  $\epsilon_1=0.45$ 가 최대변형량( $\epsilon_p=0.34$ )을 넘어선 것으로 단속직전(b)에 동적재결정핵생성은 물론 동적재결정이 거의 완료된 상태라는 것을 나타내고 있다. Fig. 9의 조건에 비해서 변형온도가 높고 따라서  $t_i$ 가 길어짐에 따라 급격히 정적재결정이 완료되어  $t_i=10$ 초 이상에서는 결정립성장이 관찰되었다. Fig. 6~8에 나타낸 연화비율을 살펴보다라도 750°C, 10초에서 연화비율이 100% 이상으로 결정립 성장이 일어나는 시점을 알 수 있었는데 Fig. 9와 10의 조직은 연화비율로써 패스와 패스 사이에 발생하는 정적연화정도를 예측하는 것이 비교적 정확하다는 것을 다시 한번 나타내는 것이라 하겠다. 따라서 Fig. 9와 10에서 알 수 있듯이 동적재결정을 일으키는 재료는 각 패스에서 단속변형량 온도 및 단속시간

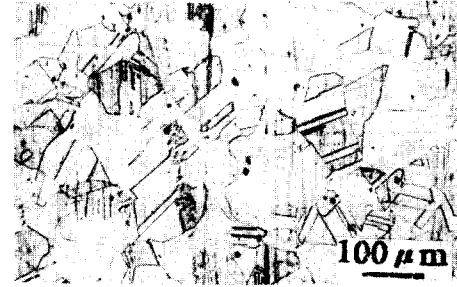
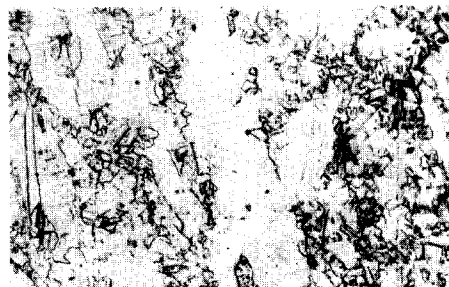
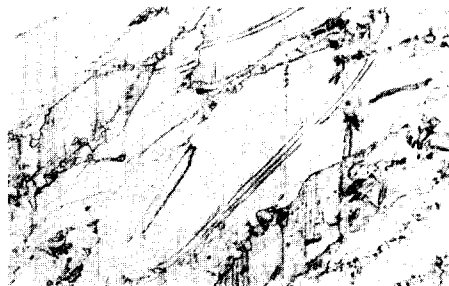
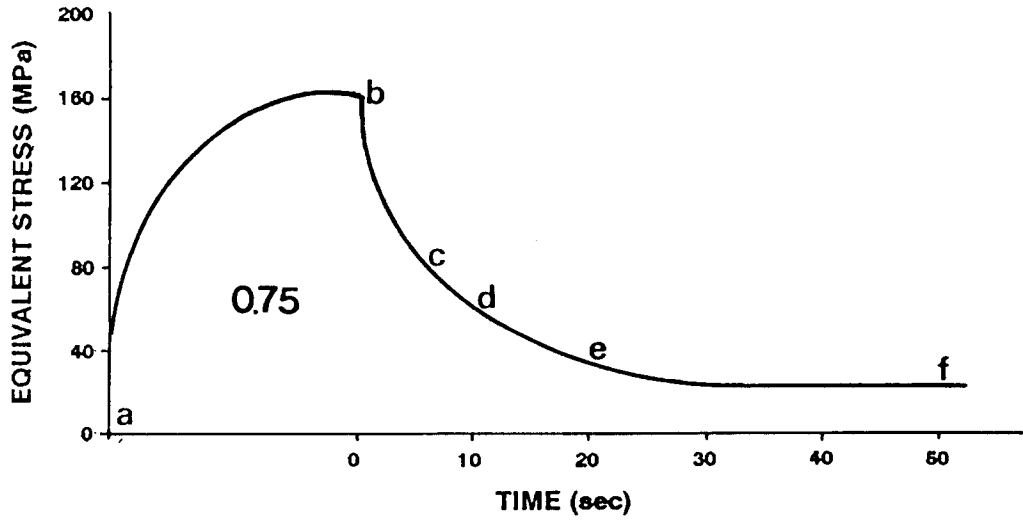
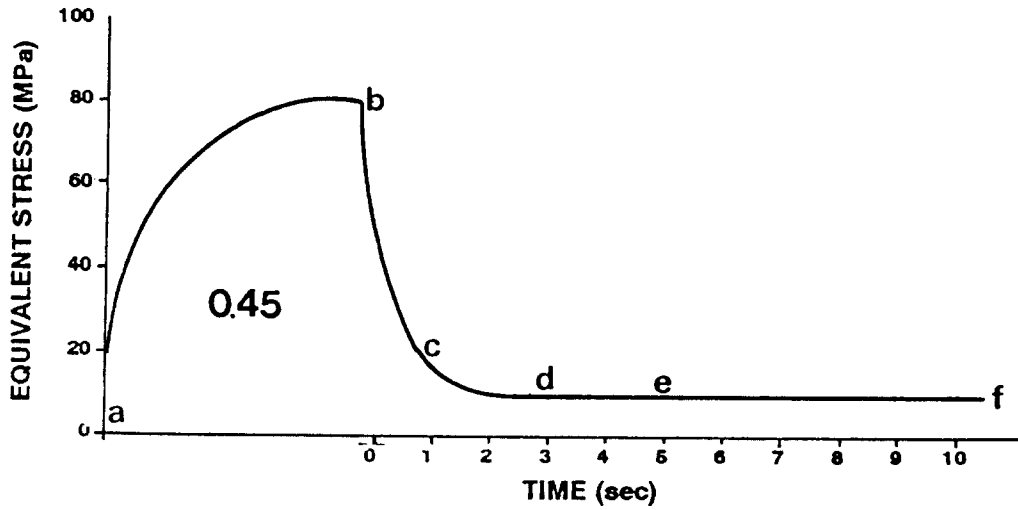


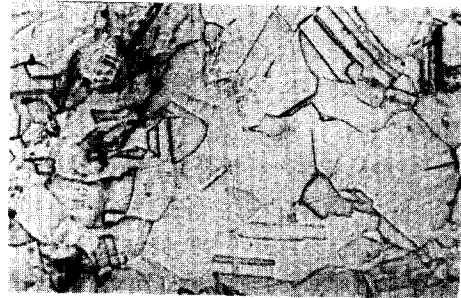
Fig. 9 Optical micrographs of Cu-Zn alloy showing the effects of change in delay time and at 550°C, 0.1/sec,  $\epsilon_1=0.75$



고온단속변형량이 단상Cu-Zn합금의 정적연화에 미치는 영향



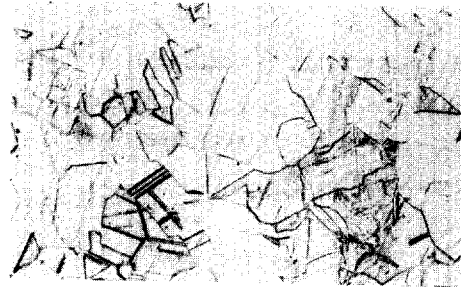
(a) No deformation



(d) 3 sec



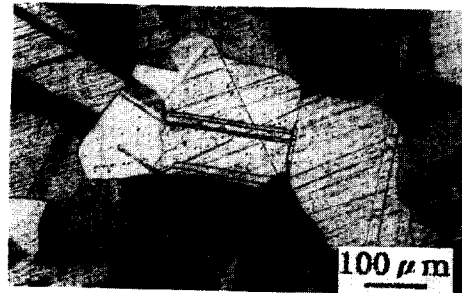
(b) 0 sec



(e) 5 sec



(c) 1 sec



(f) 20 sec

Fig. 10 Optical micrographs of Cu-Zn alloy showing the effects of change in delay time and at 750°C, 0.1/sec,  $\epsilon_1 = 0.45$

등을 적절히 조절하면 결정립 미세화 또는 원하는 조직을 얻을 수 있다.

#### 4. 결 론

고온단속변형량이 Cu-Zn합금의 고온변형 후 정적연화에 미치는 영향을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 동적재결정이 발생하는 임계변형량 ( $\epsilon_c$ )은 변형속도가 빠르고 온도가 낮아짐에 따라 그 값은 증가하였으며  $\epsilon_c$ 와  $\epsilon_p$ (최대변형량)의 관계는  $\epsilon_c \approx 0.7\epsilon_p$ 으로 정량화할 수 있었다.

(2) 고온단속변형의 정적연화는 초기단속 변형량  $\epsilon_1$ 에 크게 의존하였으며  $\epsilon_1$ 이 임계 변형량  $\epsilon_c$ 보다 큰 경우 동적재결정 형성이 촉진되었다.

(3) 연화비율은 변형속도 단속변형량 온도 및 유지시간이 증가함에 따라 증가하였으며 주 연화기구인 임계변형량  $\epsilon_c$ 보다 작은 변형량에서는 정적회복이 주였으며 임계 변형량  $\epsilon_c$  이상의 조건에서는 정적재결정이 주도하고 있다.

(4) 고온변형후 정적복구에서의 조직변화는 변형입계에서 생성되는 정적재결정립의 생성과 임계변형율이상의 변형으로 생성된 동적재결정립의 성장으로 나타났다.

#### 참고문헌

- (1) Roberts, W., 1984, "Deformation, Processing and Structure," ASM, 109.
- (2) Ryan, N. D. and McQueen, H. J., 1990, "Dynamic Softening Mechanisms in 304 Austenitic Stainless Steel," Can. Metal. Quat., Vol. 29, No. 2, pp. 147~162.
- (3) Ryan, N. D. and McQueen, H. J., 1990, "Comparison of Static Softening in 304 Austenitic Stainless Steels in Constant and Declining Temperature," Materials Forum, Vol. 14, pp. 283~295.
- (4) McQueen, H. J. and Jonas, J. J., 1985, "Role of Dynamic and Static Softening-Mechanisms in Multistage Hot Working," ASM, pp. 410~419.
- (5) 장병록, 오병문, 유연철, 1988, "금속 재료의 고온변형특성," 소성변형 및 가공 Proc., 대한금속학회, pp. 311~322.
- (6) Raghunathan, N., Zaidi, M. A. and Sheppard, T., 1986, "Recrystallization Kinetics of Al-Mg alloys AA5056 and AA5083 After Hot Deformation," Mat. Sci. and Tech. Vol. 9, pp. 938~945.
- (7) 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.
- (8) Padmavardhani, D. and Prasad, Y. V. R. K., 1991, "Characterization of Hot Deformation Behavior of Brasses Using Processing Maps: Part II  $\alpha$ - $\beta$  Brass," Met. Trans. 22A (1991) pp. 2993~3001.
- (9) 장병록, 유연철, 1994, V-첨가 구조용강의 동적재결정 제어압연에 의한 결정립 미세화 연구," 대한금속학회지, Vol. 4, pp. 418~424.
- (10) Ryan, N. D. and McQueen, H. J., 1991, "Bar Mill Torsional Simulation of 304 Stainless Steel," Can. Metall. Q., Vol. 30, p. 113.
- (11) 이윤수, 최병익, 오병문, 유연철, 1992, "AA8091 합금의 재결정속도론에 관한 연구," 대한금속학회지, No. 1, pp. 59~67.
- (12) Ryan, N. D. and McQueen, H. J., 1990, "Work Hardening, Strength and Ductility in the Hot Working of 304 Austenitic Stainless Steel," High Temperature Tech., Vol. 8, p. 27.

- (13) Evangelista, E., McQueen, H. J. and Ryan, N. D., 1987, "Hot Strength, Dynamic Recovery and Dynamic Recrystallization of 317 Type Stainless Steel," *Met. Sci. and Tech.*, Vol. 5, pp. 50~58.
- (14) Luton, M. J. and Petkovic, R. A., 1980, "Kinetics of Recovery and Recrystallization in Polycrystalline Copper" *Acta Met.*, Vol. 38, pp. 729~743.
- (15) Samuel, F. H., Yue, S., Jonas, J. J. and Barnes, K. R., 1990, "Effect of Dynamic Recrystallization on Microstructural Evaluation During Strip Rolling," *ISIJ* 30, p. 216.