

## 동적 재결정에 의한 연화를 고려한 열간성형공정 해석

방원규\* · 이종수\* · 장영원\*

(2000년 12월 4일 접수)

### **Analysis of Hot Forming Process with Flow Softening by Dynamic Recrystallization**

**W. Bang, C. S. Lee and Y. W. Chang**

#### **Abstract**

The change of flow stress due to dynamic recrystallization during hot forming process is investigated. A series of mechanical tests has been conducted at various temperatures, and constitutive relations and recrystallization kinetics were formulated from the test results. The effect of dynamic recrystallization to the flow stress was implemented to a commercial FEM code by conditioned remapping of state variables. The datum strain of stress compensation was optimized to minimize the overestimation of forming loads. Suggested datum was formulated as an exclusive function of critical strain for recrystallization and validated by mechanical tests and microstructural observations.

**Key Words :** Hot Forming, Flow Softening, Dynamic Recrystallization, FEM, Critical Strain

#### **1. 서 론**

단조 등으로 대표되는 고변형률, 동적 성형에서는 특히 고온에서 미세조직의 변화를 수반한 속도론적 현상이 많이 발생하게 된다. 금형, 다이 등의 구속형상에 따라 변형이 집중된 영역에서는 이러한 현상이 더욱 심화되어 동적 재결정이나 동적 회복과 같은 동적 연화현상이 나타나 유동응력을 감소시키고 성형성에 큰 영향을 준다. 이중 동적 재결정은 변형량 분포에 따른 전위밀도차가 구동력이 되어 일어나는 결정핵생성이 유동응력의 국부적 소멸을 가져오는 것으로, 철강 및 Al 계 합금 등 대부분의 구조용 재료의 열간성형에서 주도적인 연화기구로 알려져 있다<sup>(1)</sup>. 따라서 고온성형에 대한 보다 정확한

이해를 위해서는 이러한 금속학적 현상을 반영한 공정모사가 필수적이라 할 수 있다.

지금까지 진행되어 온 관련 연구결과를 살펴보면 주로 동적 재결정 모델을 유한요소해석 코드 혹은 그 결과에 적용하여 성형체의 결정립 크기와 같은 미세조직 분포를 예측하고, 이를 통해 보다 나은 최종 물성을 얻기 위한 최적화의 지표를 제시하는 데 중점이 두어져 최근 많은 성과를 얻고 있다<sup>(2)(3)</sup>. 그러나 이러한 과정 중에 발생하는 응력소멸이 성형하중에 미치는 영향에 대해서는 상대적으로 정량적인 해석이 부족한 실정이다.

또한, 유한요소해석 등의 전산모사기술은 근래에 들어 보다 최적화된 비선형 solver의 개발 및 PC나 workstation의 비약적인 연산능력의 향상으로 매우 복

\* 포항공과대학교 항공재료연구센터

잡한 형상 및 조건에 대해 능률적인 계산이 가능해진 데 반해서 전처리 단계에서 입력되는 물성값, 즉 Materials Database (이하 MDB) 측면에서의 신뢰도 개선을 위한 실험기법 및 해석방법은 크게 달라지지 않고 있다.

위와 같은 점을 고려하여 본 연구에서는 MDB 구축을 위한 개선된 기계적 시험법 및 구성방정식을 제시하고, 제시된 구성방정식과 재결정 모델을 적용한 유한요소해석으로 고온성형의 하중예측을 최적화하기 위한 기준을 마련하고자 하였다. 이를 위하여 이전의 연구결과에서 착안한 디자인으로 압축시험 및 압축응력이완실험을 행하였으며, 그 결과를 비탄성 변형이론과 재결정 모델식으로 정량화하였다. 얻어진 기초 데이터를 반영한 유한요소해석의 결과와 실제 성형체의 스트로크-하중곡선을 비교하여 보고 어떠한 해석조건이 오차를 최소화 시키는지를 아울러 평가하였다.

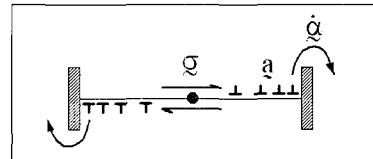
## 2. 비탄성 변형이론

지금까지의 강소성 유한요소해석을 위한 구성방정식은 대부분 다음과 식(1)과 같은 형태에 열적 활성화항을 추가한 경험식을 사용하였다.

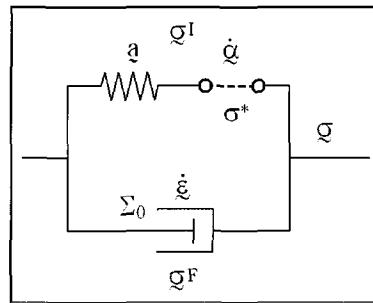
$$\begin{aligned}\dot{\epsilon} &= A\sigma'' \\ \dot{\epsilon} &= A'\exp[B\sigma] \\ \dot{\epsilon} &= A''(\sinh B'\sigma)''\end{aligned}\quad (1)$$

그러나 이러한 구성방정식들은 모두  $\dot{\epsilon}$ ,  $\sigma$  등의 거시적으로 관측되는 외부변수(external variable)로 표현된 것으로, 재료의 물성이나 변형기구의 특성과 구성인자간의 물리적인 연관성이 부족하다는 단점을 가지고 있다. Chang 등에 의해 제시된 비탄성변형모델<sup>(4)</sup>은 소성변형의 기본단위인 전위운동에 기초한 모델로서, 각각의 변수들이 재료 내부의 변형상태에 대응하는 상태변수이기 때문에 보다 물리적 근거가 충실하다는 장점을 가지고 있으며, 이전의 연구를 통하여 구조적 초소성변형거동의 해석에 성공적으로 적용된 바 있다<sup>(5)</sup>.

Fig. 1(a)의 모식도에 보인 바와 같이, 재료의 비탄성 변형이란 장애물(결정립계, 개재물 등)을 포함하고 있는 재료 내에서 경쟁적으로 일어나는 전위의 축적(accumulation)과 이의 유출(leakage)과정의 결과로 나누어 생각할 수 있으며, 이것이 비탄성변형이론의 근본적인 변형기구가 된다.



(a)



(b)

**Fig. 1 Models for inelastic deformation:**  
**(a) dislocation model, (b) rheological model**

이때 소성변형을 일으키는 전위활주에 대한 저항은 전위와 결정격자의 상호작용에 의해 국부적으로 작용하는 마찰저항을 극복하는데 사용되는 마찰응력( $\sigma^F$ )과 장애물에 집적된 전위간의 상호작용에 의해 발생하는 내부응력( $\sigma^I$ )의 합으로 나눌 수 있으며, 전술한 전위모델에 물리적 보존법칙을 통해 유도한 관계와 연관지어 Fig. 1(b)와 같은 유연학적 모델로 표현할 수 있다.

이때 집적된 전위들 중 선단전위가 장애물을 극복하고 방출되어 소성변형으로 나타나는 과정은 물리적으로 내부응력에 대한 기계적 활성화(mechanical activation)의 과정으로 볼 수 있으며, 전위가 결정격자 내부를 통과하는 과정은 동적인 마찰력에 의한 점성저항(viscous drag)을 받는 과정으로 설명할 수 있으며, 열적 활성화를 고려하여 다음 식(2), (3)과 같은 관계식으로 각각 나타낼 수 있다<sup>(4,5)</sup>.

$$\begin{aligned}(\sigma^*/\sigma') &= \exp(\dot{\alpha}'/\dot{\alpha})^p \\ \dot{\alpha}' &= v' (\sigma^*/G)^{v'} \exp(-Q'/RT)\end{aligned}\quad (2)$$

$$\begin{aligned}(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0) &= (\sigma^F/\Sigma_0 - 1)^{\frac{1}{M}} \\ \dot{\epsilon}_0 &= v^F (\Sigma_0/G)^{v^F} \exp(-Q^F/RT)\end{aligned}\quad (3)$$

### 3. 실험 및 유한요소해석

단조, 압연 등의 소재를 구속하는 형재를 사용하는 소성가공의 해석에 사용될 유동곡선을 얻기 위해서는 성형시 받는 응력상태와 유사하다는 장점 때문에 보통 압축시험에 인장시험에 비해 선호된다. 그러나, 압축시험은 이러한 장점과 더불어 시편과 압축 jig 표면 사이에 필연적으로 존재하는 마찰 때문에 barreling 현상이 발생하게 되어 시험의 정밀도를 떨어뜨리는 근본적인 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 이전의 고온 초소성 관련 연구에서 도입한 Fig. 2와 같은 Seibel-type compression test를 사용하였다<sup>(6)</sup>.

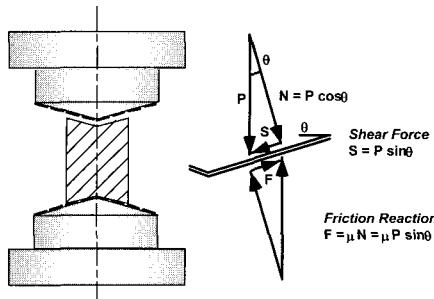


Fig. 2 Design of Seibel-type compression test

Jig 및 시편의 형태는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 서로 일치하는 각도의 cup & cone 형태로 가공되어 있으며, 우측에 도시한 모식도에서 간단한 columb friction 조건을 적용하면 전단력과 마찰력이 서로 상쇄되는 최적 조건은  $\tan\theta = m$  임을 알 수 있다. Fig. 3은 보상각(compensation angle)의 변화에 따른 압축시편의 형태를 해석한 결과이다.

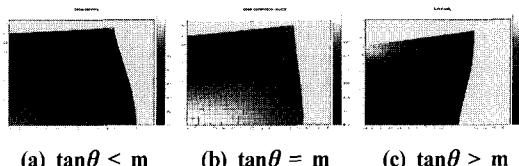


Fig. 3 Shapes of specimen after 50% compression

이러한 시험형태에서 압축응력이 완시험 및 압축시험을 수행하였다. 본 연구에서는 Al 7075 합금 및 AISI 1015 강을 대상으로 각각 100~400°C, 750~900°C의 범위에서 기계적 시험을 수행하였으며, 그 결과를 비탄성 변형이

론 및 재결정 모델에 적용하여 정량화하였다.

재결정에 의한 응력소멸을 유한요소해석과정에 도입하는 방법은 크게 구성방정식 자체에 재결정인자를 도입하여 코드에 적용하는 방법과 각 절점에서의 상태변수값으로 재결정 분율을 계산하여 그만큼 유동응력을 소거해주는 두 가지 방법으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 후자의 방법을 채택하였다.

우선, 압축시험을 통해 얻어진 응력-변형률 관계에 Yada 등에 의하여 제안된 형태와 유사한 재결정 모델식을 적용하여 해석한 후 다음과 같이 동적재결정의 임계변형률 및 분율을 식(4)로 나타내었다<sup>(7)</sup>.

$$\begin{aligned} \varepsilon_c &= A \exp(Q/RT) \\ 1 - X &= \exp[-\ln kZ^n(\varepsilon - \varepsilon_c)^2] \end{aligned} \quad (4)$$

유한요소해석에는 상용코드인 DEFORM-2D를 사용하였으며, 실험결과를 토대로 한 해석의 전체적인 흐름은 다음의 Fig.4와 같다.

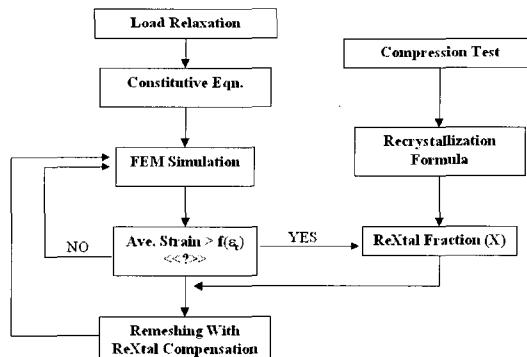


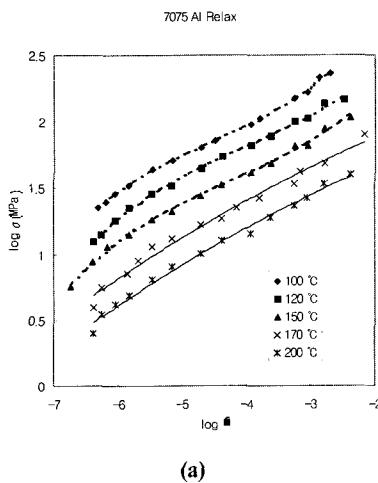
Fig. 4 Schematic Overview of FEA procedure

즉, 응력이 완실험을 통해 구해진 구성방정식을 기반으로 유한요소해석을 수행하되, 다이의 스트로크가 어느정도 진행하여 국부변형량이 특정수치 이상에 도달하면(이후 기준변형률이라 칭함) 각 절점의 온도 및 변형량을 가지고 재결정 분율(X)을 계산하게 된다. 전술한 바와 같이 동적재결정 현상은 변형집중구역에서 새로운 결정핵의 생성으로 응력이 소멸되는 현상이므로, 동적재결정 발생 후의 유동응력은  $\sigma_{new} = \sigma_{old}(1-X)$ 라고 보는 것이 타당할 것이다. DEFORM-2D에 이를 적용하기 위해서는 기준변형률을 도달을 조건으로 격자망재구성을 수행시키고, 이때 각 절점의 유동응력을 외부 서브루틴으로 가로

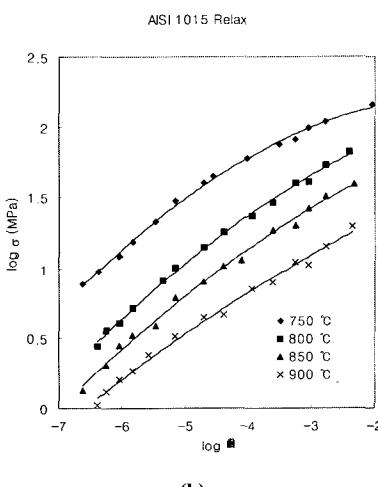
체어 (1-X) 의 재결정 가중치를 곱한 후 다시 반환하는 기법을 사용하였다. 유한요소해석의 결과는 스트로크-하중곡선을 중심으로 실제 성형의 결과와 비교하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

각각의 합금에 대한 응력이완시험의 결과는 Fig.5의 응력-변형률속도의 그래프로 나타낼 수 있으며, 이 유동 곡선의 데이터를 사용하여 구성방정식을 결정하였다.



(a)



(b)

Fig. 5 Flow Curves from the load relaxation test results

두 재료 다 전형적인 내부응력에 의한 입내변형거동에 따르는 위로 볼록한 곡선을 보이나, 상대적으로 낮은 온도에서 변형된 Al 7075 합금의 경우 점선에 나타낸 것

과 같이 일부 마찰응력의 영향을 받는 구간이 나타났다. 각각에 대하여 비탄성변형모델을 적용, 구성방정식의 각 상수들을 다음과 같이 결정하였다. 대부분의 구간에서 내부응력이 마찰응력에 비해 월등히 크게 작용하므로, 구성방정식에는 식(3)에 나타난 마찰응력에 의한 변형률의 열적 활성화항은 고려하지 않았다.

$$\sigma(7075) = \frac{525.76 \text{ MPa}}{\exp\left(9.7882 \times 10^{15} \exp(-24700/T)\right)^{0.15134}} + 33.725 \text{ MPa} \left[ \left( \frac{\dot{\epsilon}}{1.7864 \times 10^{-2}} \right)^{0.083212} + 1 \right]$$

$$\sigma(1015) = \frac{2537.1 \text{ MPa}}{\exp\left(2.3762 \cdot 10^{15} \exp(-31020/T)\right)^{0.14932}} \quad (5)$$

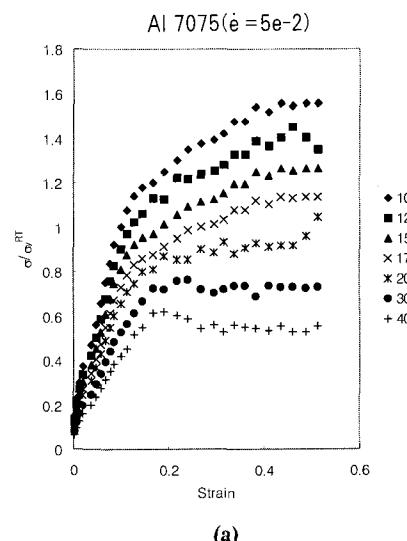
압축시험의 결과는 Fig.6.에 예시하였다. 실험범위의 변형조건에서는 AISI 1015 강이 보다 현저한 동적재결정에 의한 응력감쇠를 보였다. 변형률 속도의 변화에 따른 데이터들을 종합하여 식 (6)의 동적재결정식을 얻을 수 있었다.

$$Al\ 7075: \varepsilon_c = 3.7615 \times 10^{-4} \exp\left(\frac{14810}{T}\right)$$

$$1 - X = \exp\left[-\ln 1.76 \times 10^{-4} Z^{-0.711} (\varepsilon - \varepsilon_c)^2\right]$$

$$AISI\ 1015: \varepsilon_c = 1.7643 \times 10^{-4} \exp\left(\frac{23120}{T}\right)$$

$$1 - X = \exp\left[-\ln 1.37 \times 10^{-5} Z^{-0.631} (\varepsilon - \varepsilon_c)^2\right] \quad (6)$$



(a)

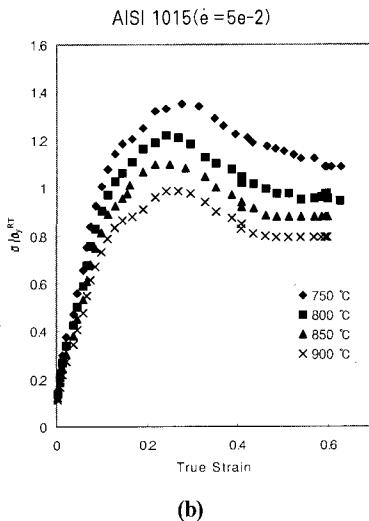


Fig. 6 Results of compression tests

위의 기초 데이터를 유한요소해석에 앞서 설명한 소거법을 도입하여 해석한 결과는 다음과 같다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 기준변형률에 도달하여 격자망재구성 및 재결정분율을 보상이 이루어지게 되면, 변형이 집중된 영역일수록 응력소멸이 두드러지는 것을 확인할 수 있었다.

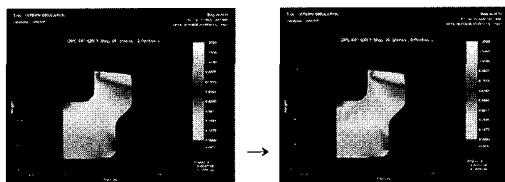


Fig. 7 Compensation of flow softening due to dynamic recrystallization

보다 구체적으로 동적 재결정인자를 반영한 효과를 확인하기 위하여 Fig. 8과 같은 실제 reverse idle 형태를 해석과 같은 조건에서 성형한 결과와 식(5)에서 구한 구성방정식을 동일하게 적용하여 동적재결정 분율의 보상 과정을 제거한 유한요소해석의 결과를 비교하였다. 사진에 나타난 성형체는 Fig. 7의 유한요소해석에 해당하는 성형 이후 피어싱(piercing) 및 열처리를 추가로 거치게 되면 얻어지는 형상으로, 본 연구에서는 기본적인 형태를 성형하는 주 단조공정만을 평가의 대상으로 하였다.

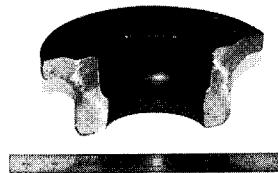


Fig. 8 Cross section of hot forged sample

위의 세가지 경우에 대한 스트로크-하중 및 총 수행한 일(total work)의 결과는 Fig. 9 과 같다.

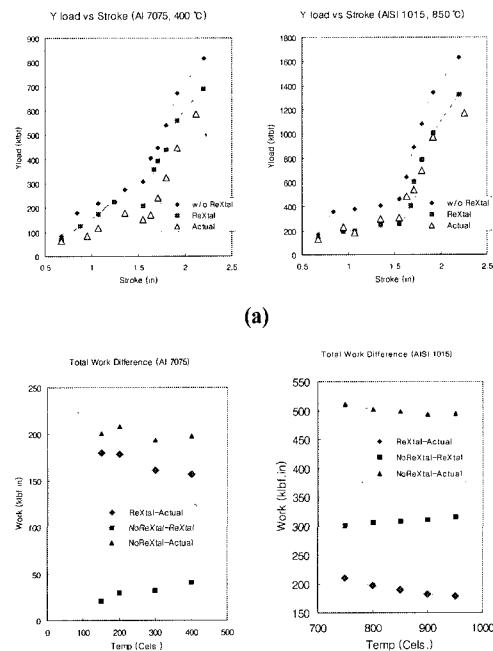


Fig. 9 Result of forming load estimation:  
(a)Stroke-load, (b)Total work through forging

전반적으로 재결정분율의 소거법을 도입한 실선으로 표시된 경우가 낮게 나타나는, 즉 예측된 바와 같이 재결정에 의한 응력소멸이 고려되어 성형하중을 과다계상(over-estimation)하는 경향이 현저히 감소함을 확인할 수 있다. 성형하중의 과다계상은 비단 해석해의 정확도 만의 문제가 아니라, 과다한 성형하중이 가해질 경우 금속유동이 원활히 일어나지 못해 생기는 채움불량이나 접힘 등의 성형결함을 유발하는 원인이 된다는 것을 감안하면 공업적으로도 중요한 문제라 하겠다.

최종적으로, 제시된 해석기법에서 동적재결정분율을 소거하는 빈도를 결정하는 기준변형률의 변화에 따라 해석해의 정확도가 어떻게 변하는가를 살펴보았다.

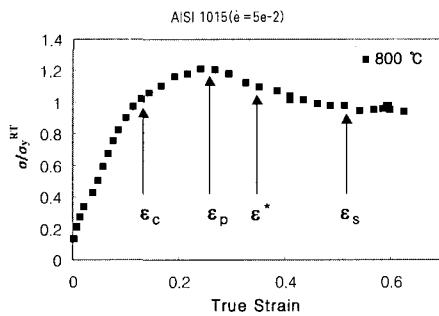


Fig. 10 Strain constants corresponding to important recrystallization states

Fig. 10에 예시된 유동곡선에서 동적 재결정의 단계에 따라 임계변형률( $\epsilon_c$ ), 최대응력변형률( $\epsilon_p$ ), 최대연화속도변형률( $\epsilon^*$ ), 정상상태변형률( $\epsilon_s$ ) 등을 결정할 수 있다. 동적재결정에 의한 연화가 일어나는 구간은 임계변형률에서 정상상태변형률까지로 볼 수 있으므로, 유한요소해석에서 사용될 기준변형률을 이 범위에서 0.02 간격으로 변화시키며 실측치와의 오차 추이를 살펴본 결과 Fig. 11에 나타난 바와 같이 특정한 값에서 최적화된 하중에 측을 보이는 것으로 나타났다.

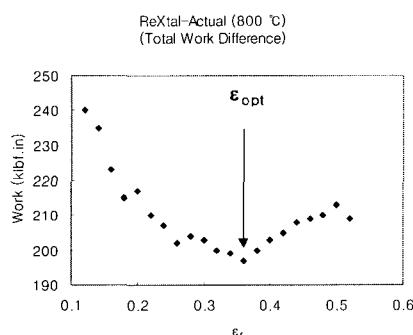


Fig. 11 Optimization of forming load estimation

즉, 재결정분율의 소거빈도에 대한 최적치가 존재하는데 이를 AISI 1015 강의 경우에 대하여 성형온도에 따라 구하여본 결과, 최적의 기준변형률이 최대연화속도변형률과 유사한 값을 나타냄을 확인하였다.

최대연화속도변형률은 Fig. 12에서와 같이 가공경화지수가 최소로 되는 점으로 구해진다. 기준변형률이 이 값

과 일치한다는 것은 유동응력측면에서 이 이후에는 정상상태에 진입하기 시작하므로, 대부분의 유효응력소멸이 종료된다는 거시적 특성에 의해 뒷받침될 수 있다.

Table 1 Optimal datum strains at various temperatures

	$\epsilon_{opt}$	$\epsilon^*$	$\epsilon_c$
750 °C	0.44	0.41	0.23
800 °C	0.30	0.35	0.18
850 °C	0.28	0.31	0.15
900 °C	0.24	0.27	0.11

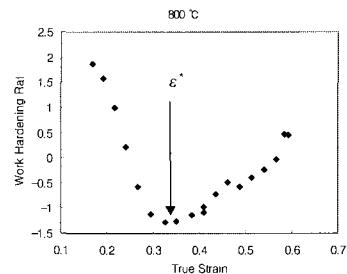


Fig. 12 Strain at maximum softening rate

이러한 최적기준이 밝혀졌다 하더라도, 실제 공정해석에서 유효하게 사용되려면, 기계적 시험결과의 해석으로 정량화된 인자들에 의해 결정될 수 있어야 한다. 재결정모델식에서 구해지는 임계변형률과 앞서 언급한 최대연화속도변형률을 logarithmic scale로 도시해 보면 (Fig. 13) 흥미있는 결과를 발견할 수 있는데, 두 값이 온도에는 무관하게 하나의 master line으로 interpolation 된다는 것이다.

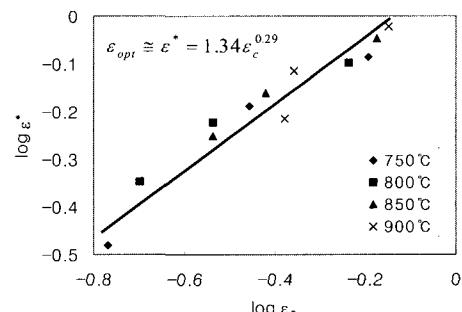


Fig. 13 Correlation between  $\epsilon^*$  and  $\epsilon_c$

즉 그림에 표시한 것과 같이 최적기준변형률, 혹은

최대연화속도변형률은 임계변형률만의 함수로 나타낼 수 있으며, 그 형태는 간단한 지수함수의 형태가 된다. 이와 같은 결과는 동적재결정에 의한 응력소멸이 작용하는 구간에 걸쳐 재결정에 대한 열적 활성화에는 큰 변화가 없다는 것을 나타낸다고 볼 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 Al 합금 및 강재를 대상으로 한 열간 성형공정해석에 동적재결정에 의한 하중감쇄를 반영하는 새로운 기법을 제시하고 이를 실험적으로 평가하였으며, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 마찰효과를 상쇄하기 위한 압축시편을 디자인하여 응력이완시험 및 압축시험에 적용할 수 있었다.
- (2) 재결정 분율 소거법을 도입한 열간성형의 해석으로 성형하중의 예측이 현저히 개선되었다.
- (3) 제시된 해석기법을 적용한 경우 고온으로 갈수록 오차가 감소하는데, 이는 사용된 재결정 모델식의 특성에 기인하는 것으로 생각된다.
- (4) 응력소멸 보상시점의 기준변형률은 연화속도가 최대가 되는 시점의 변형률과 일치하며, 재결정에 필요한 임계변형률만의 함수로 나타낼 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단지정(ERC) 항공재료연구센터(CAAM)의 연구비 지원을 받아 수행된 결과의 일부이며 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) H.J. McQueen and J.J. Jonas, 1975, "Recovery and Recrystallization during High Temperature Deformation", Tretise on Mater. Sci. Eng. R.J. Arsenault (ed.), Academic Press, New York, pp. 394~490.
- (2) 곽우진, 이경종, 권오준, 황상무, 1996, "열간단조공정 중 강의 재결정거동 유한요소해석", 한국소성가공학회지, vol. 7, pp. 305~319.
- (3) 이상곤, 고대철, 류경희, 이선봉, 김병민, 1999, "열간 압출품의 미세조직 균일화를 위한 최적 금형설계", 한국소성가공학회지, vol. 8, pp. 471~481.
- (4) Y.W. Chang and E.C. Aifantis, 1987, "Constitutive Laws for Engineering Materials", C.S. Desai et al. (ed.), Elsevier Science Pub., pp. 293~310.
- (5) T.K. Ha and Y.W. Chang, 1998, "An Internal Variable Theory of Structural Superplasticity", Acta Mater., vol. 46, pp. 2741~2749.
- (6) M. Yoshizawa and H. Ohsawa, 1994, "Estimation of Strain Rates in Superplastic Compression Test", Superplasticity: 60 Years after Pearson, N. Ridley (ed.), Institute of Materials, London UK, pp. 260~272.
- (7) H. Yada, 1996, "Strain-rate and temperature dependence of flow stress in IF and other steels (Deformation resistance formula of steels for high-speed large deformation-1)", vol.9, Current Advances in Materials and Processes, pp. 1390~1402.