

성형하중예측을 위한 재결정분율 보상의 최적조건 도출

방원규, 장영원

포항공과대학교 항공재료연구센터

A Study on the Optimal Stress Compensation to Dynamic Recrystallization for the Estimation of Forming Loads

W. K. Bang, Y. W. Chang

Center for Advanced Aerospace Materials (CAAM), POSTECH, Pohang, 790-784

Abstract :

The effect of dynamic recrystallization during hot forming processes was implemented to a commercial FEM code by conditioned remeshing and remapping of state variables. A datum strain for stress compensation was determined as a strain for maximum softening rate and was able to be formulated as a function of critical strain, $f(\epsilon_c)$. The validity of remapping criterion was examined by a series of mechanical tests and microstructural observations. The application of suggested datum resulted in better estimation of load-stroke during forging processes.

Keyword : Hot forming, Dynamic recrystallization, FEM, Critical strain, Forging

1. 서론

고온변형에서 발생하는 동적연화현상은 성형 중의 상태변수분포 및 최종제품의 물성의 예측에 있어서 반드시 고려되어야 하는 금속학적 현상이다. 특히 동적재결정현상은 변형집중에 의한 전위밀도차가 구동력이 되어 일어나는 현상으로 많은 연구를 통하여 재결정 분율 및 결정립도 예측을 위한 많은 모델이 제시된 바 있으며, 본 연구실에서는 이러한 모델 및 Chang 등이 제시한 비탄성변형이론을 상용 FEM 코드에 연계하여 동적재결정으로 인한 하중감소 계산에 적용한 바 있다.[1] 본 연구에서는 재결정분율을 유동응력에 보상하는 기법에 있어 보다 구체적인 최적기준을

제시하여 성형하중을 효과적으로 예측하기 위한 방법을 제시하고자 하였다.

2. 실험과정

앞선 연구에서 7075 Al 합금 및 AISI 1015 강에 대하여 동적재결정을 반영한 유한요소해석을 수행한 바 있다. 본 연구에서는 특히 동적재결정에 의한 효과를 두드러지게 관찰할 수 있는 AISI 1015 강의 결과를 바탕으로 공정해석, 모사 및 실험을 수행하였다.

우선 750~900℃ 에서 압축응력이완시험 및 압축시험을 수행하여 공정조건범위에서의 유동곡선을 얻었으며, 각각의 해석을 통하여 구성방정식

및 재결정 모델식을 구하였다. 구해진 식을 상용 코드인 DEFORM-2D 에 적용하되, 다음과 같이 다이의 스트로크가 일정 수치에 도달하였을 때 인위적으로 격자망을 재구성하도록 하였다. 이때, 각 절점에 재결정에 의한 응력소멸을 감안하여 새로운 유동응력값 $\sigma(1-X)$ 를 매핑시켜 성형해석 과정에서 그 효과를 반영하도록 하였다. (fig.1)

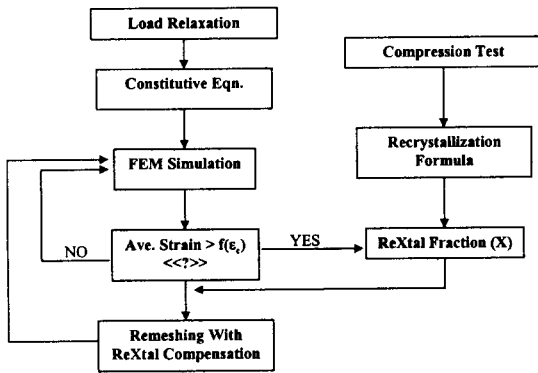


Fig.1. Schematic Overview of FEA procedure

이때, 재결정 분율을 보상하는 기준변형율을 ϵ_c 부터 정상상태의 응력에 도달하는 ϵ_s 까지 변화시켜가며 형단조품의 유한요소해석을 수행하였으며, 이러한 Datum strain 의 변화에 따른 하중에 측을 total work 를 대상으로 실제 단조품의 경우와 비교하여 봄으로써 최적의 기준변형율을 결정하였다.

최종적으로 결정된 기준변형율의 의미 및 타당성을 검증하기 위해서 압축시험시 변형량에 따른 평균결정립도의 변화를 광학현미경을 통하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

기계적 시험의 결과는 다음 fig.2 에 나타난 바와 같다. 응력이완시험에서 나온 응력-변형율 속도의 관계식은 내부변형변수이론을 적용하여 eq.1 과 같이 적용할 수 있으며[2], 동적재결정식은 변형된 Yada group 의 식을 사용하여 eq.2 와 같이 해석할 수 있다. [3]

$$\sigma = \sigma^I = \frac{\sigma^*}{\exp(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)} \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon} = v^I (\sigma^*/G)^{n^I} \exp(-Q^I/RT)$$

$$\epsilon_c = A \exp(Q/RT) \quad (2)$$

$$X = 1 - \exp[-\ln k Z^n (\epsilon - \epsilon_c)^2]$$

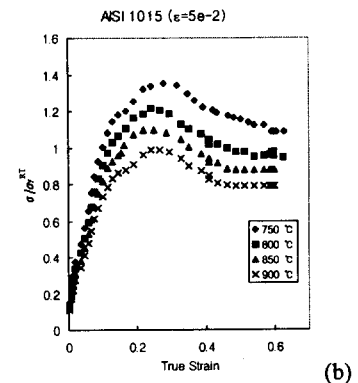
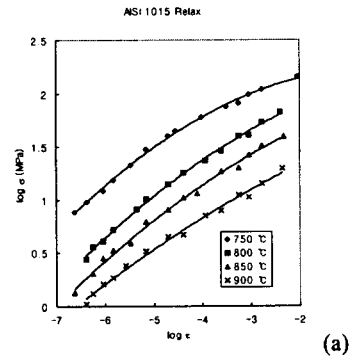


Fig.3. Mechanical Test Results:

(a) Load Relaxation, (b) Compression Tests.

변형중에 동적재결정을 수반하는 재료의 응력-변형률 곡선에서 동적연화현상의 단계를 결정짓는 ϵ_c , ϵ_p , ϵ^* , ϵ_s 는 다음 fig.4 에 나타난 바와 같이 결정할 수 있다.[4]

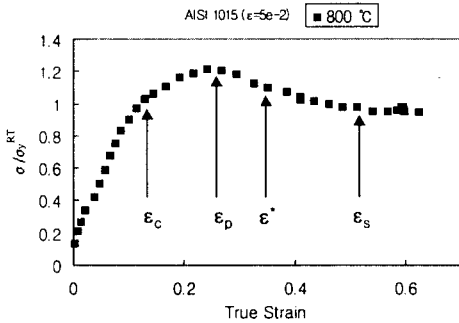


Fig.4. Strain Constants of Recrystallization State

ϵ_c 는 동적재결정이 일어나기 시작하는 변형률로서, 가공경화곡선에서 처음으로 응력이 낮아지기 시작하게 된다. 재결정 분율이 높아져서 가공경화를 극복하게 되면 (ϵ_p) true stress 가 감소하기 시작한다. 이러한 동적연화속도는 일정 변형률 (ϵ^*) 까지 증가후 다시 감소하여 결국 정상상태에 도달하게 된다 (ϵ_s). 특히 는 가공경화능을 기준으로 보면 다음 fig. 5 와 같이 결정됨을 알 수 있다.

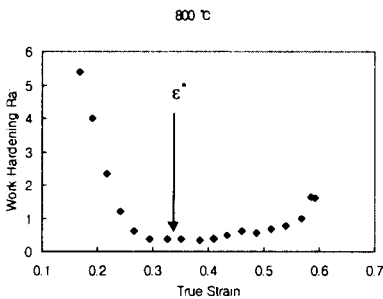


Fig.5. Softening rate with increasing strain

전술한 유한요소해석에서 $\sigma \rightarrow \sigma(1-X)$ 로 재결정분율을 보상하는 기준변형률 ϵ_r 을 동적연화가 주도적으로 나타나는 구간인 $\epsilon_c < \epsilon_r < \epsilon_s$ 내에서 변화시키면서 수행해 보면 ϵ_r 을 낮출수록, 즉 보상빈도가 높아질수록 fig.6 과 같이 total work 의 오차가 감소하다가 다시 증가하는 것을 볼 수 있다. 이렇게 실측치와 비교하여 오차를 최소화하는 최적조건을 ϵ_{opt} 로 정량화하였다.

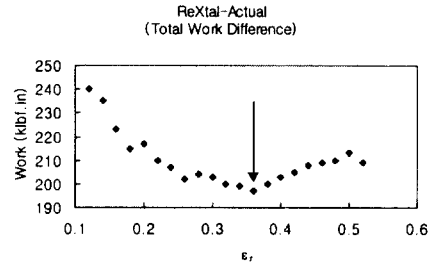


Fig.5. Optimal Compensation Criterion

이렇게 구해진 최적 datum strain 을 다양한 공정조건에서 fig.4 와 같은 해석결과와 비교해 보면 대부분이 최대연화율을 나타내는 ϵ^* 전후의 값으로 일치하고 있음을 확인할 수 있었다.

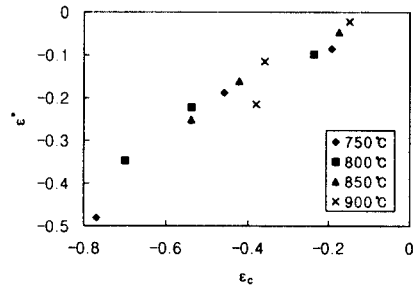


Fig.6. Formulation of $f(\epsilon_c)$

결국 최적 기준변형율은 ϵ^* 로 결정할 수 있는데, 재결정 모델과 실험결과를 연관지어보면 fig.6 과 같이 온도에 무관한 master curve 를 지수함수 형태로 정량화할 수 있다.

이렇게 기계적 시험 및 이론적 해석을 통하여 구할 수 있는 최적조건의 의미는 다음 압축시편의 변형량에 따른 평균결정립도에서 알 수 있다.

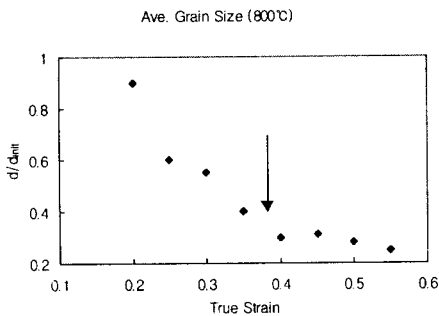


Fig.7. Grain size reduction with increasing strain

위의 그림을 보면 동적재결정에 의한 결정립의 미세화가 화살표로 표시한 ϵ^* 이후에 급격히 둔화되는 것을 알 수 있다. 이러한 미세조직의 변화와 연관지어볼 때 동적재결정에 의한 응력감쇄효과가 주도적으로 작용하는 기준변형율을 ϵ^* 로 생각할 수 있으며, 이를 유한요소해석에서 재결정분율 보상을 위한 최적의 기준으로 삼는데 대한 물리적 타당성으로 볼 수 있다.

4. 결론 및 향후과제

동적재결정에 의한 하중감쇄를 가장 효과적으로 예측하기 위한 정량적인 기준을 마련할 수 있

었으며, 그 기준은 재결정 모델에서 결정되는 임계변형율의 함수로 표시할 수 있었다. 나아가 앞으로 해석해의 신뢰도 제고를 위해서는 동적재결정으로 인한 온도분포의 변화를 유한요소해석 과정에서 피드백할수 있는 기법의 개발이 필수적이라고 생각된다.

5. 참고문헌

1. 방원규, 장영원: 한국소성가공학회 '99 춘계학술대회 논문집, (1999), p203
2. Y. W. Chang & E. C. Aifantis: Constitutive laws for engineering materials, Ed. C. S. Desai, (1987), p293
3. C. M. Cellas: Metal Science, March-April, (1979), p187
4. D. R. Barraclough & C. M. Cellas: Mat. Sci. Tech., 13, (1979), p257