

고온성형중 동적재결정에 의한 하중감소의 정량적 해석

Quantitative Analysis of Hot Forming with Stress Compensation to Dynamic Recrystallization

방원규*, 장영원

포항공과대학교 항공재료연구소 (CAAM)

Abstract

The shift of flow behavior due to dynamic recrystallization during hot forming process is investigated. A series of load relaxation and compression tests has been conducted at various temperatures. Constitutive relations and recrystallization behaviors were formulated from the mechanical test results. The consideration of dynamic recrystallization during a specific forming process was implemented to commercial FEM package by conditioned remeshing and remapping of state variables. Improvement of Load-Stroke prediction was validated by comparison with experimental results.

1. 서론

단조 등의 고온성형에서 발생하는 동적 재결정은 변형이 집중된 영역에서 Stress-Free 결정립을 생성시켜 유동응력을 감소시키고 성형성에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 고온성형에 대한 보다 정확한 이해를 위해서는 이러한 금속학적 현상을 반영한 공정모사가 필수적이라 할 수 있다. 지금까지 진행되어 온 동적 재결정 관련 해석에서는 주로 유한요소법 기반의 공정해석결과를 재결정식과 연계하여 재결정분율과 결정립도 분포를 예측하는 연구가 수행되어 왔다. 최종 성형체의 특성 예측과 달리 성형과정에서 실제로 받게 되는 하중 등의 변화를 반영하기 위해서는 응력 등의 상태변수에 재결정 인자를 정량적으로 반영해 줄 필요가 있게 된다. 이에 본 연구에서는 7075 Al 합금 및 AISI 1015 강을 대상으로 동적재결정 인자의 정량화와 이를 바탕으로 한 유한요소해석을 실제 성형의 결과와 비교해 봄으로써 공정모사의 신뢰성을 평가하고자 하였다.

2. 실험과정

본 연구에서 사용된 FEM package 는 상용코드인 DEFORM-2D 를 사용하였다. 해석에 필요한 성형 재료의 flow curve 는 내장된 MDB (Materials Database) 를 사용할 수도 있으나, 실제로 사용하는 재료의 변형거동을 보다 정확하게 반영하기 위해서는 직접 기계적 시험과 결과분석을 통하여 구성방정식을 결정하는 것이 바람직하다. 우선 구성방정식의 결정을 위해서 압축 응력이완시험을 행하였다. 단조 등의 대부분의 고온성형의 특성상 압축시험이 더 바람직하지만, 마찰에 의한 시편의 barreling 현상이 나타나게 되는 문제가 있으므로 cone 형 punch 와 동일한 응각의 시편을 사용하여 마찰력을 상쇄하기 위한 Seibel type compression 법[1]을 사용하였으며, 이때 계산에 의한 optimum compensation angle 은 $\theta = \tan \mu$ 이 된다 (fig.1)

그림과 같은 Design 에 의해 7075 Al 합금은 100~200 , AISI 1015 강은 750~900 에서 응력이완 시험을 행하였다. 얻어진 응력-변형률속도간의 관계는 내부변형변수에 입각한 비탄성변형식을 사용하여 해석하였다. 유사한 온도구간에서 압축시험을 행하였으며, 그 결과는 이후에 기술한 재결정거동식에 적용하여 관련 상수를 결정하였다.

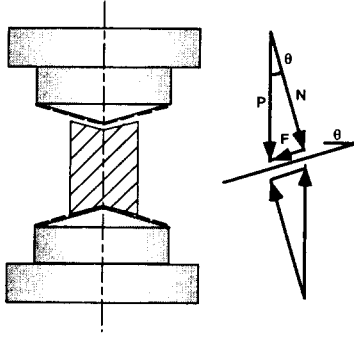


Fig.1. Schematic design of Seibel type compression test

기계적 시험을 통해 얻은 물성을 FEM 해석에 적용하기 위하여 응력이완시험을 통해 얻어진 결과를 flow curve 로 입력하고, 성형중에 발생하는 동적재결정이 응력을 감소시키는 것을 feed-back 하기 위하여 전체 billet 의 크기에 비한 stroke 와 동적재결정의 임계변형량 ϵ_c 를 비교하여 일정 배수에 도달하였을 때 remeshing 을 실시하도록 하였다. Remeshing 시에 각 절점에 재결정 분율 X 에 의한 응력소멸을 감안하여 새로운 값인 $\sigma(1-X)$ 를 mapping 시켜 주어 재결정 현상을 진행과정에 자동적으로 반영할 수 있도록 하였다. 이러한 해석해의 평가를 위하여 실제 단조품의 Load-Stroke 곡선을 얻어서 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

응력이완시험의 결과는 Fig.3 에 주어진 바와 같다. 응력-변형율과의 관계는 내부변형변수이론에 의하여 다음과 같이 해석할 수 있다. 우선 Al 합금의 경우 150 이하의 비교적 낮은 온도에서는 내부응력과 마찰응력의 영향을 동시에 고려하여 eq.1 과 같이 나타낼 수 있으며 Al 과 강재의 그 이상의 온도에서는 마찰응력이 매우 낮아져 상대적으로 무시할 수 있게 되므로 eq.1 에서 σ^F 에 해당하는 항을 제외하고 기술하게 된다. 소성변형의 열적활성화는 소성변형율의 기준속도 $\dot{\alpha}^*$ 에 대하여 eq.2 로 나타낼 수 있다.[2]

$$\sigma = \sigma^I + \sigma^F = \frac{\sigma^*}{\exp(\dot{\alpha}^* / \dot{\alpha})^p} + \Sigma_0 \left[\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^M + 1 \right] \quad (1)$$

$$\dot{\alpha}^* = v^I (\sigma^* / G)^{n^I} \exp(-Q^I / RT) \quad (2)$$

동적재결정거동을 정량적으로 평가하기 위해서 지금까지 많은 모델이 제시되었으나 기본적으로는 유사한 유형의 식을 사용하고 있다.[3] 본 연구에서는 고온, 동적성형에서 좋은 결과를 보이는 것으로 알려진 Yada Group 의 식을 계산의 편의를 위해 변형한 eq.3 과 같은 식을 사용하였으며, 제시된 재결정식을 fig.4 에 도시한 압축시험의 결과에 적용하여 각 상수를 결정하였다.

$$\begin{aligned} \epsilon_c &= A \exp(Q/RT) \\ X &= 1 - \exp \left[- \ln k Z^n (\epsilon - \epsilon_c)^2 \right] \quad (3) \end{aligned}$$

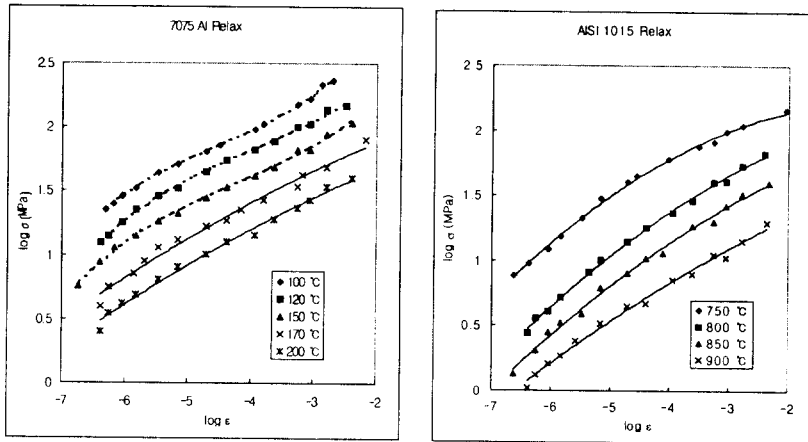


Fig.3. Load Relaxation Test Results

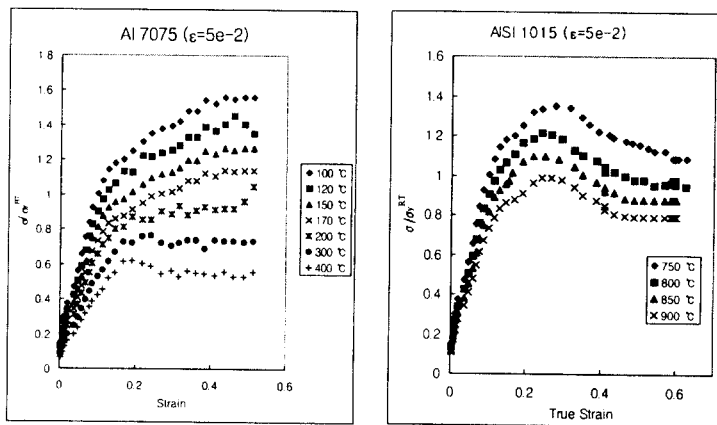


Fig.4. Compression Test Results

이렇게 얻어진 구성방정식과 재결정식을 기초로 하여 geometry 및 boundary condition 을 pre-processor 에서 정의한 후 simulation 을 수행하였다. 동적재결정은 전술한 바와 같이 billet 의 높이에 대한 stroke 를 ϵ_{ave} 로 정의할 때, ϵ_{ave} $f(\epsilon_c)$ 를 만족할 때 remeshing 을 수행하도록 하고, 이때 mapping 되는 응력에 재결정이 이루어지지 않은 분율을 가중치를 주도록 하였다. 동적재결정에 의하여 변화되는 상태변수는 응력만이 아니라 특히 온도도 중요하지만 해석시에는 재결정에 의한 재료 내부의 온도변화는 고려하지 않고 가공열만을 고려하였다. 여기서 remeshing 빈도를 결정짓는 함수 f 는 임계변형율에 비례하는 1 차함수로 간략화하였다. 비례상수의 값을 작게 하면 그만큼 동적재결정에 의한 응력감소를 자주 반영해주게 되지만, 반대로 remeshing 과정의 반복에 의한 수치적 오차의 누적도 발생하게 되므로 적절한 값을 사용하여야 하며, 이 부분의 최적조건은 앞으로 더 많은 모사 및 실험을 통해서 얻어져야 할 것으로 생각된다. 동적재결정에 의한 유동응력 변화를 모사하는 방법으로는 이와 같은 체적분율을 고려한 방법과 실험적으로 결정된 인자들을 가지고 flow curve 자체에 재결정에 의한 응력감소를 포함하여 계산하는 방법이 있다.

다음 fig.5 는 이와 같이 동적재결정을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우의 유한요소해석결과를 실

제 하중-스트로크와 비교한 것이다. 동적재결정에 의한 유동응력 감쇄가 전체적인 하중에도 영향을 주어 좀더 낮은 하중에서 성형되는 것을 새로운 해석방법이 보다 잘 묘사하고 있음을 알 수 있다. 특히 AI 합금보다는 강재의 경우가 동적재결정 현상이 뚜렷이 나타나므로 두가지 해석방법에 의한 차이가 큰 것을 알 수 있다. 또한 실측치와의 오차가 고온 영역으로 갈수록 감소하는 경향을 보이는데, 이는 사용된 재결정모델의 특성에 기인하는 것으로 생각된다.

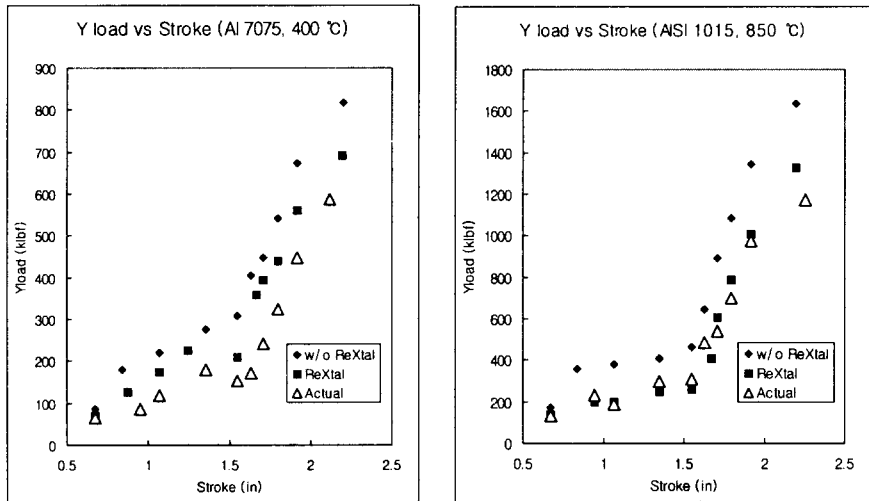


Fig.5. Comparison of Load-Stroke curves

4. 결론

동적 재결정 현상에 의한 응력집중의 해소를 FEM 해석과정에 반영하여 줌으로서 성형시 필요한 하중의 예측을 개선할 수 있으며, 보다 확장하여 특히 Ti 계 합금의 고온성형에서 중시되는 또다른 금속학적 현상인 동적회복을 고려하는 데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 보인다. 단, 이러한 remeshing 과 상태변수의 remapping 에 의존한 방법은 계산시간이 길어지게 된다는 단점이 있으므로 실제 적용을 위해서는 많은 개선이 필요하다. 그리고 해석해의 신뢰도에 대한 보다 정확한 검증을 위해서는 잔류응력이나 경도에 대한 map 을 작성하여 해석결과에서의 응력분포와 정량적으로 비교하여야 할 것이다.[4]

5. 참고문헌

1. M Yoshizawa & H Ohsawa: "Estimation of Strain Rates in Superplastic Compression Test", Superplasticity: 60 Years after Pearson, Ed. N.Ridley, Institute of Materials, London UK
2. Y.W. Chang & E.C. Aifantis: "Constitutive Law's for Engineering Materials", Ed. C.S. Desai, p293, 1987
3. C.M. Cellars, "Recrystallization and Grain Growth in Hot Rolling", Metal Science, p187, March-April, 1979
4. W.J. Kwak, "Prediction of Recrystallization of Steel using Finite Element Method during Hot Forging", M.S. Thesis, POSTECH, 1995
4. E. Doege et al.: "Measurement and Calculation of Residual-Stresses After Die Forging", Steel Research, p52, 67, 1996