

동적재료모델 및 연화모델을 응용한 SAF 2507 강의 열간단조 유한요소해석

방원규* · 정재영** · 장영원*

(2003년 5월 15일 접수)

Application of Dynamic Materials and Softening Models to the FEM Analysis of Hot Forging in SAF2507 Steel

W. Bang, J. Y. Jung and Y. W. Chang

Abstract

High temperature deformation and softening behavior of SAF 2507 super duplex stainless steel (SDSS) has been investigated in connection with an FEM analysis of hot forging process. Flow curves at various strain rates and temperatures were determined first from compression tests, and the kinetics of dynamic recrystallization were also formulated through the analysis of load relaxation test results. Using the dynamic materials theory proposed by Prasad, the deformation behavior was effectively determined for various conditions. Constitutive relations and recrystallization kinetics formulated from the test results were then implemented in a commercial FEM code. The forming load as well as the distribution of recrystallized volume fraction after forging was successfully predicted by means of the flow stress compensation formulated upon the volume fraction of recrystallization and adiabatic heating.

Key Words : Dynamic Softening, Recrystallization, FEM, Forging, Load Relaxation

1. 서론

Ferrite-austenite 이상 스테인리스강은 매우 높은 강도와 내식성, austenite 계 스테인리스강에 비해 낮은 열팽창계수를 갖지만 열전도도는 높고, ferrite 계에 비해 가공경화능이 높아 석유화학산업, 담수설비 및 화력발전소 등과 같은 내식성과 기계적 특성을 동시에 요구하는 부분의 구조용재에 널리 사용되고 있다. 그중 최근에 개발된 고질소 함유 슈퍼 이상 스테인리스강 (super duplex stainless steel: SDSS) 은 공식저항지수(pitting Resistance equivalent number: PREN) 40 이상의 높은 내

식성과 고강도를 겸비하여 제품성형을 위한 소성가공 특성에 대해 많은 연구가 이루어지고 있다.⁽¹⁾

우수한 화학적 기계적 특성에 비해 고질소 SDSS 의 냉간가공은 고강도에 의한 높은 변형저항 때문에 설비용량이 커지게 되고, 코너부나 굽힘의 곡률과 같은 형상제약도 기존 스테인리스강에 비해 많은 편이다. 또한 강성률이 매우 높기 때문에 사용중의 신뢰도는 높지만 냉간가공시 springback 이 커져서 치수 정밀도가 떨어지거나 높은 수준의 잔류응력 때문에 추가적인 고온 annealing 이 필요하게 되는 등의 문제를 가지고 있

* 포항공과대학교 항공재료연구소

** 포항산업과학연구원 재료공정연구소

어 각 제조사의 spec sheet 에서도 냉간가공은 가공량이 적은 경우에 국한시킬 것을 권장하고 있다. 이에 따라 높은 강성 및 변형저항에 의한 열악한 가공성을 극복하기 위해서는 고온에서의 성형이 필수적이라 할 수 있는데, 중간온도 영역의 온간가공의 경우에는 성형성에는 큰 문제가 없으나 앞서 설명한 바와 같이 성형중에 σ 상과 같은 석출물의 생성에 의해 내충격성이나 파괴인성과 같은 특성이 급격하게 저하되므로 대부분의 성형은 1000°C 이상의 열간가공에 의해 이루어진다.

본 연구에서는 최근 그 적용이 시도되고 있는 선박용 주단조폼제조와 같은 고변형율/변형율속도 공정의 해석을 위하여 상용 SDSS 인 SAF 2507 을 대상으로 일련의 고온압축시험 및 압축응력이완시험을 통하여 유동응력 및 재결정 키네틱스를 정량적으로 결정하였다. 기계적 시험결과의 해석을 통하여 동적연화 속도식 및 구성방정식을 결정하였으며, 동적연화에 따른 응력소멸을 상용 유한요소해석코드에 반영하여 단조공정을 해석하고 그 결과를 실성형품과 비교함으로써 해석방법의 효과 및 타당성을 검증하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 소재 및 기계적 시험

시험을 위한 소재는 Sandvik 사에서 개발된 상용조성의 SAF 2507 으로서, 50kg 급 진공용해로에서 제조하였으며, 1200°C 에서 2.5 시간 열처리후 수행하였다.

모재로부터 직경 10mm, 길이 12mm 의 원통형 시편을 제작하여 Gleeble-3800 Test Machine 에서 고온압축시험을 수행하였으며, 시편의 온도는 시편 표면에 열전대를 부착하여 측정, 제어하였다.

압축시험의 조건은 온도를 900, 1000, 1050, 1100, 1150, 1200, 1250°C, 변형률속도를 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1, 5, 10, 50/sec 로 변화시켜가며 진변형률 0.8 이상까지 유동곡선을 얻었다. 압축시험의 결과는 가공열 발생에 대한 보정을 이후 공정해석을 위한 유동응력데이터로 사용하였다. 가공열에 의한 온도상승에 대한 보다 상세한 이론과 과정은 기 발표된 논문에 기술되어 있다.⁽²⁾

압축응력이완시험에는 기계강성이 높은 Instron 1361 을 사용하였으며, 압축시험의 결과에서 동적 재결정에 의한 유동응력의 요동이 나타나는 조건에 대하여 초기변형률 (prestrain) 을 1.0, 1.5, 2.0% 로 바꾸어 가며 실시하였다. 재결정과 같은 비평

형상태의 미세조직 변화에 의한 구조적 응력이완 (structural relaxation) 의 경우 통상의 응력이완시험과는 완전히 상이한 하중감소거동을 보이게 된다. Fig. 1 에 예시한 응력이완 시험의 결과를 보게 되면 전체 응력이완곡선을 크게 3 구간으로 나눌 수 있다. 영역 1 은 가공경화된 소재의 빠른 정적 회복만이 관찰되는 구간이며, 영역 2 에서는 정적 재결정에 의하여 보다 현저한 연화가 일어나게 된다. 정적재결정이 거의 완료되게 되면 정상상태의 점진적인 응력이완이 주도하는 영역 3 이 나타난다. 즉, 영역 2 에서의 거동은 재결정 분율의 증가에 따른 영역 1 에서 3 으로의 점진적인 천이현상으로 볼 수 있다.

이에 Karjalainen, Mateo, Jonas 등은 영역 1 과 3 의 거동을 log-linear 감쇄현상으로 단순화하고 영역 2 의 유동응력을 전후영역의 linear combination 형태로 기술한 식 1 과 같은 경험식을 제시한 바 있다.⁽³⁾

$$\sigma_2 = (1-X)\sigma_1 + X\sigma_3 \\ = (1-X)(\sigma_{o1} - a_1 \log t) + X(\sigma_{o3} - a_3 \log t) \quad (1)$$

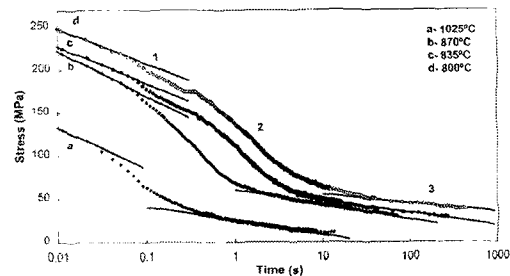


Fig. 1 Stress versus log (time) curves obtained from relaxation tests accompanying recovery and recrystallization⁽³⁾

2.2 열간단조해석

본 연구에서는 Fig. 1 에 모식적으로 보인 것과 같은 디스크 업세팅 (disk upsetting) 공정을 대상으로 하였다. 해석과 실험치의 비교를 용이하게 하기 위하여 비교적 작은 크기라 볼 수 있는 직경 30mm, 높이 40mm 의 원통형 빌렛을 압축하여 중심부와 외주부의 두께변화를 갖는 디스크를 성형하게 된다. 대상공정의 형상은 축대칭(axisymmetric) 이므로 상용 유한요소해석코드인 DEFORM-2D 를 이용한 2 차원 해석을 수행하였다. 동적 연화현상에 의한 응력감소는 유효응력을 계산하

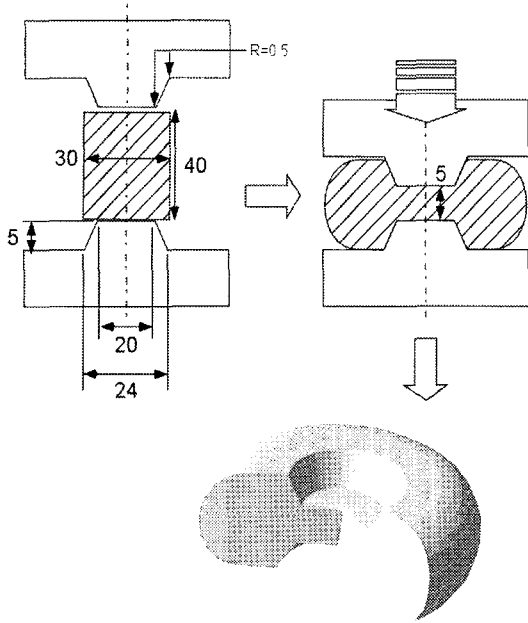


Fig. 2 Schematic representation of disk upsetting process

는데 있어 조건분기와 연화분율에 대한 유동응력 소거법을 도입한 user subroutine 을 적용하였으며, 각 조건 및 절점에서의 연화주도기구의 판정은 Prasad 등의 연구를 통해 제시된 동적 재료모델의 파워분산효율 ζ 및 변형안정도 η 로부터 결정하였다.⁽⁴⁾ 이에 따른 유동응력 계산과정을 요약하면 식 2~4 에 나타낸 바와 같다.

i) $\zeta \geq 0, \eta < 0.35$: 동적회복(DRV) 주도영역

$$\sigma = \sigma_{DRV} = \sigma_0 + B[1 - \exp(-C\varepsilon)]^m \quad (2)$$

ii) $\zeta \geq 0, \eta \geq 0.35$: 동적재결정(DRX) 주도영역

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_{DRV} & \varepsilon < \varepsilon_c \\ \sigma &= \sigma_{DRV} - \Delta\sigma_{DRX} = \sigma_{DRV} - B\sqrt{X} & \varepsilon \geq \varepsilon_c \end{aligned} \quad (3)$$

iii) $\zeta < 0$: 단열가열(Adiabatic Heating) 주도영역

$$\sigma = \sigma_{DRV} \cdot S_{AH} = \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^p \right] \quad (4)$$

유한요소해석결과는 실제 단조품의 실험치와

비교평가하였으며, 주로 성형하중 및 성형후 재결정분율분포 등을 정량적으로 검토하였다. 특히 단조품 내부의 재결정분율분포의 경우 결정립도 측정과 같은 기존 방법의 적용이 용이하지 않은 SDSS 의 재결정거동특성을 감안하여 Barcroix 등이 제안한 SEM-EBSD (Electron Back-Scattered Diffractometer) 의 QI (Quality Index) 편차적분에 의한 측정법을 이용하였다.⁽⁵⁾

3. 결과 및 고찰

3.1 SAF 2507 SDSS 의 고온변형거동

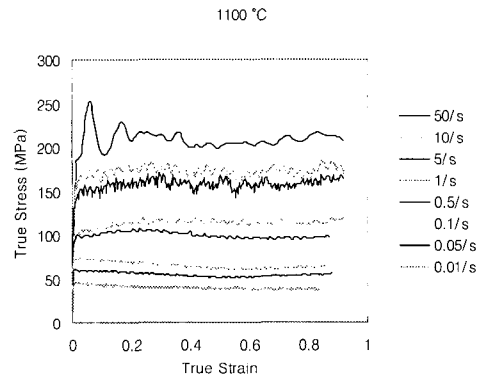


Fig. 3 True stress-strain curves of SAF 2507 stainless steel obtained from high temperature compression tests at 1100°C

고온압축시험 결과를 Fig. 3 에 예시하였다.

Fig. 3 에서 보여지는 것 과 같이 SAF 2507 의 고온변형은 크게 3 가지의 유형으로 나눌 수 있었다; 그것은 1) 중간온도구역, 변형율속도 영역에서의 약한 가공경화 혹은 정상응력상태, 2) 고온구역, 저변형율속도 영역에서의 피크응력후 가공연화, 3) 고변형율속도에서의 유동응력 진동 등이다.

각 해당조건에서의 변형조직을 관찰한 결과, 페라이트 내에서의 아결정립계 형성(Fig. 4a), 상경계면의 serration (Fig. 4b), 이상복합구조의 국부전단에(Fig. 4c) 각각 대응하였으며, 이에 따라 당 SDSS 의 고온연화기구가 페라이트의 동적회복(DRV)과 오스테나이트의 기하학적 동적재결정(GDRX) 이 결합된 구조적 연화(structural softening) 와 불안정변형영역에서의 단열가열에 의한 열적,

혹은 유사연화 (thermal/pseudo softening) 에 의존하는 것을 알 수 있다.

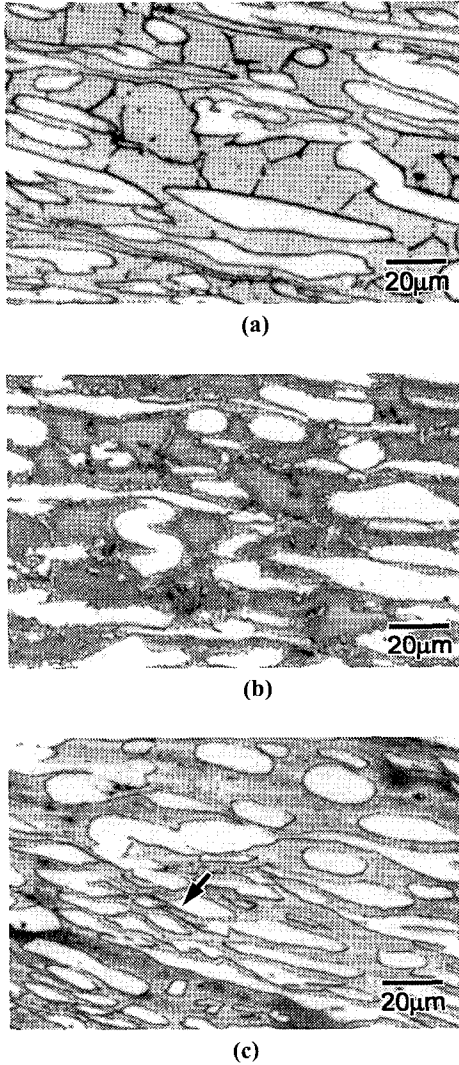


Fig. 4 Optical micrography of typical SDSS microstructures: (a) deformed at 1200°C, 5.0 s⁻¹, (b) 1250°C, 1.0 s⁻¹, (c) 1000°C, 10 s⁻¹

또한 이러한 각각의 특징적인 변형거동은 Fig. 5에 나타낸 것과 같이 유동곡선 데이터에 동적재료모델을 적용하여 구성한 등분산효율분포 (iso-efficiency contour) 와 안정/불안정변형기준에 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

전술한 바와 같이, 재결정 키네틱스는 압축응력 이완시험의 결과를 통해 Fig. 6과 같은 준정적 연화 키네틱스의 Avrami fit을 얻을 수 있다.

Hodgson 등은 시간-변형률관계에 대한 Additivity rule을 적용하여 정적 재결정식으로부터 동적재결정식을 도출하는 방법을 제안한 바 있으며, 본 연구에서도 이를 도입하여 유동응력 계산에 필요한 재결정 모델식을 결정하였다.⁽⁶⁾

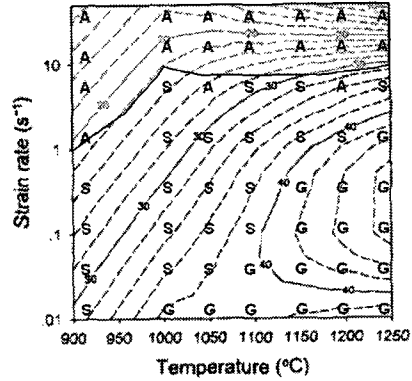


Fig. 5 Power dissipation map of SAF 2507 represented as iso-efficiency contours in strain rate - temperature plane. Each mark of "A", "S" and "G" denotes the formation of shear bands, subgrains in ferrite, serration of grain boundaries, respectively

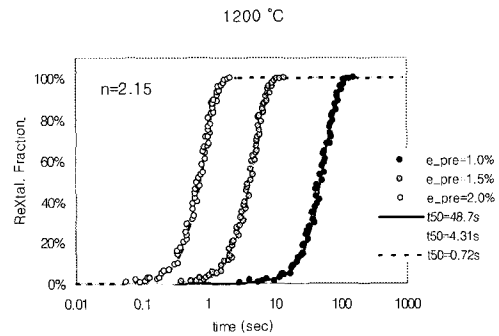


Fig. 6 Softening curves obtained from relaxation tests and corresponding Avrami curves

3.2 열간단조공정 해석결과

동적연화에 의한 응력소멸은 거시적으로는 Fig. 7과 같은 스트로크-하중의 실측치와 해석방법에 따른 예측치를 비교로써 가장 용이하게 평가할 수 있다.

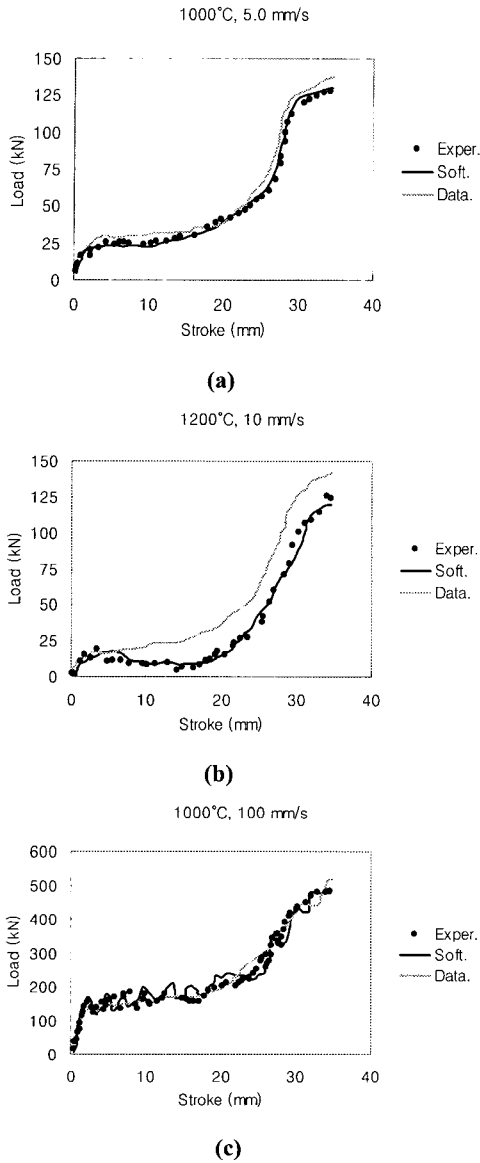


Fig. 7 Stroke vs. forging load: (a) 1000 °C, 5mm/s, (b) 1200 °C, 10mm/s, (c) 1000 °C, 100mm/s

압축시험결과의 수치데이터로 직접 입력한 경우와 본 연구에서 제안한 연화분율에 대한 소거법을 도입한 경우 해석해의 차이를 비교한 결과, 조건분기와 연동된 소거법을 적용한 경우가 대부분의 조건에서 압축시험에 의해 얻어진 유동응력 데이터를 그대로 적용한 경우에 비해 일부 조건에서 하중의 과다예측이 상당히 개선되며, 이러한 경향은 동적재결정이 기대되는 고온 및 중간 정도의 스트로크 속도에서 더욱 뚜렷이 나타났다.

또한 빠른 스트로크속도에서 소재의 불안정 유동에 의한 하중의 요동도 보다 뚜렷하게 예측하는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 구조적 연화의 연속적인 고려가 이루어진다는 점과 변형의 중간 단계에서 인접 데이터의 단순한 내삽(interpolation)에 의한 하중증감의 상쇄간섭이 방지되는 효과로 풀이할 수 있다.

또한 성형품의 재결정분율분포의 측정 및 해석 결과에서도 (Fig. 8) 동적재결정 분율의 소거법을 적용한 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 전반적인 분포경향을 보다 잘 예측하는 것으로 나타났다.

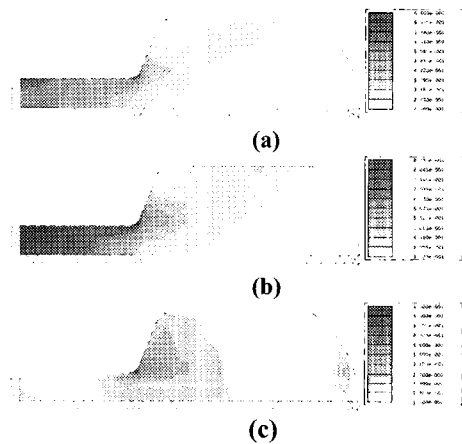


Fig. 8 Distribution of recrystallized volume fraction: (a) measured by EBSD, (b) simulated by softening compensation, (c) simulated with numerical flow data

4. 결론

본 연구에서는 슈퍼 듀플렉스 스테인리스강인 SAF 2507 을 대상으로, 고온변형 및 동적 연화거동에 대하여 살펴보았으며 이러한 변형특성을 비교적 간단한 축대칭 형태의 단조공정에 적용하여 해석, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 압축시험과 응력완시험의 결과에 동적재료모델 및 연화모델을 도입하여 SAF 2507 의 고온변형시 발생하는 구조적/열적 연화를 효과적으로 해석할 수 있다.

(2) 파워분산효율 및 변형안정도에 의한 조건분기와 연동한 소거법을 통하여 동적연화를 수반하는 열간단조공정 FEM 해석의 신뢰도를 제고할 수 있다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지원의 민·군 겸용기술 개발사업의 일환으로 시행된 "선박용 고강도·고내식 특수 주·단조품 개발" 과제 연구결과의 일부로서 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) K. A. Johansson, 1995, " Duplex stainless steels in offshore applications – experiences from projects and operations", Proc. Duplex Stainless Steels '94, Vol. 3, Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, England, Paper KVII.
- (2) 방원규, 정재영, 장영원, 2001, "SAF 2507 스텐레스강의 열간단조해석에서 가공열 보정의 효과", 한국소성가공학회지, 제 10 권, 제 3 호, pp. 206 ~ 213.
- (3) C. García-Mateo, B. López and J. M. Rodríguez - Ibabe, 2001, "Static recrystallization kinetics in warm worked vanadium microalloyed steels", Mat. Sci. Eng. Vol. 303, pp. 216 ~ 225.
- (4) N. Ravichandran and Y.V.R.K. Prasad, 1991, "Dynamic recrystallization during hot deformation of aluminium: a study using processing maps", Met. Trans. Vol. 22A, pp. 2339 ~ 2348.
- (5) J. Tarasiuk, Ph. Gerber and B. Bacroix, 2002, "Estimation of recrystallized volume fraction from EBSD data", Acta Mater. Vol. 50, p. 1467.
- (6) M.R. Barnett, G.L. Kelly and P.D. Hodgson, 2000, "Predicting the critical strain for dynamic recrystallization using the kinetics of static recrystallization", Scripta Mater. Vol. 43, pp. 365 ~ 369.