

저온용 스테인레스강의 통합 구성방정식

Unified Constitutive Modeling for Low Temperature Austenitic Stainless Steel

유성원*·박웅섭**·이제명***

Yoo, Seong-Won · Park, Woong-Sup · Lee, Jae-Myung

요약

본 논문에서는 저온용 오스테나이트계 스테인리스강(ASS)의 온도 및 변형률 속도의 영향을 고려한 통합 구성 방정식 및 손상 모델을 제안하였다. 저온 영역에서, 304L ASS의 온도 및 변형률 속도별 인장 실험을 시행하였다. 그 결과, 변형 유기 마르텐사이트 상변태에 의해 상변태 유기 소성(TRIP)이 저온에서 현저히 나타났으며 온도 및 변형률 속도의 영향이 지대하였다. 실험 결과를 바탕으로 ASS의 저온 거동 및 특성을 규명하여 수치 모델에 반영하였다. 저온에서 일어나는 2차 경화 현상을 표현하기 위해, Bodner/Partom 점소성 구성 방정식을 수정하고 Tomita/Iwamoto 변형 유기 상변태 모델을 구성 방정식에 적용시켰다. 저온 연성 파단 현상을 표현하기 위해, Bodner/Chan 손상모델을 수정하여 적용시켰다. 제안된 모델을 유한요소 프로그램에 탑재시키고, 온도 및 변형률 속도 의존 재료 정수를 결정하였다. 저온 영역에서, 온도 및 변형률 속도별 재료 거동을 시뮬레이션하고 이를 실험 결과와 비교 및 검증하였다.

keywords : 오스테나이트계 스테인리스강, 변형 유기 마르텐사이트 상변태, 점소성 구성 방정식, 손상

1. 서론

오스테나이트계 스테인레스강(ASS)은 대표적인 변태유기소성(TRIP)강이다. 마르텐사이트 상변태로 인한 소성 거동을 조절하여, 기계적인 성질이 향상된다. 역학적 관점에서, 이러한 재료 거동에 대한 온도 및 변형률 속도의 영향은 비선형 구조 해석 문제에서 더욱 중요하다. Tomita와 Iwamoto(2001)는 온도 및 변형률 속도에 따른 마르텐사이트의 체적률을 예상하는 변형 유기 상변태 모델을 제안하였다. Lee. et al.(2009)은 저온용 스테인리스강의 온도 의존 구성 방정식을 제안하였으며, Park. et al.(2010)은 저온용 스테인리스강의 온도 및 변형률 속도별 재료 특성을 측정 및 고찰하였다. 본 연구에서는 LNG선의 극저온 멤브레인 구조의 주재료로 사용되는 304L ASS에 대해 온도 및 변형률 속도별 저온 인장 실험을 시행하고, 마르텐사이트 상변태 이론인 Tomita/Iwamoto 모델(Tomita와 Iwamoto, 2001)과 통합된 점소성 구성 방정식인 Bodner/Partom 모델(Bodner, 2002)을 일체화시켜 온도 및 변형률 속도 의존 구성 방정식을 제안하였다. 또한 Bodner/Chan의 손상 모델(Bodner, 2002)을 수정하여 연성 파단 현상을 모사하였다. 제안된 모델을 유한 요소 프로그램에 탑재하여, 제안된 모델의 온도 및 변형률 속도 의존 재료 정수를 결정하고, 저온 영역에서, 온도 및 변형률 속도별 ASS 재료 거동을 시뮬레이션하였다. 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하여 유효성을 검토하였다.

* 부산대학교 조선해양공학과 석사과정 yoosw@pusan.ac.kr

** 부산대학교 조선해양공학과 석사과정 park_ws@pusan.ac.kr

*** 정희원 · 부산대학교 조선해양공학과 교수 jaemlee@pusan.ac.kr

2. ASS 저온 거동

304L ASS의 온도 및 변형률 속도별 저온 인장 실험 결과는 시뮬레이션 결과와 함께 그림 2에 나타내었다. 본 실험에서 나타난 주요 특징은 다음과 같다. 1)110K~223K 실험의 응력-변형률 곡선에서, 변형 유기 마르텐사이트 상변태에 의해 경화 속도가 감소하다가 다시 증가하는 2차 경화가 나타났다. 이 현상은 온도가 증가할수록 감소하여 S자 모양에서 포물선으로 변하고 상온에서 미소하였다. 2)온도 감소에 따라 항복/인장 강도가 증가하고, 인장강도의 변화가 크다. 3)상온에서, 변형률 속도 증가에 따라 항복/인장강도가 증가한다. 4)저온에서는 변형률 속도 증가에 따라 항복강도는 증가하지만, 2차 경화 현상이 감소하고 인장강도도 감소했다. 변형률 속도 민감도는 2차 경화와 함께 양적에서 음적으로 바뀐다. 단일 효과가 마르텐사이트 상변태 속도를 감소시키기 때문이다(Talonen et al., 2005). 이러한 거동을 보이는 온도 범위에서는 주요 원인인 변형 유기 마르텐사이트 상변태와 함께 온도 및 변형률 속도는 그 영향이 크므로 반드시 고려해야 한다.

3. 해석 모델

Tomita/Iwamoto 상변태 모델(Tomita와 Iwamoto, 2001)은 온도 및 변형률 속도에 따라 변형 유기 마르텐사이트 상변태량을 정량화하였다. 반면, 각 상의 온도 및 변형률 속도 의존 재료 거동 측정이 어렵고 상변태보다 2차 경화가 늦게 일어나므로 혼합 법칙을 이용하기 어렵다. 따라서 언급한 복잡한 거동을 표현하기 위해 표준 재료 실험으로부터 규명되는 구성 관계식에 해당하는 스케일의 접근이 이루어졌다. Tomita/Iwamoto 상변태 모델로 마르텐사이트 체적률을 예상하고, 이것을 점소성 Bodner/Partom 모델(Bodner, 2002)의 내부 변수에 적용하였다. Bodner/Partom 모델은 통합된 점소성 이론으로 소성 변형률 속도($\dot{\epsilon}_{ij}^p$) 한 개 성분으로 소성, 크리프를 포함한 시간 의존 비탄성 거동을 표현하므로 (1)식과 같이 단순한 변형률 분리를 사용한다.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^p \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = D_0 \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{Z(1-w)}{\sigma_{eff}}\right)^{2N}\right\} \frac{\sqrt{3}s_{ij}}{\sigma_{eff}} \quad (2)$$

(2)식이 Bodner/Partom 점소성 구성 방정식이다. σ_{eff} 는 유효응력, s_{ij} 는 편차응력, w 는 손상 변수, D_0 는 최대 변형률 속도 제한하는 변수, N 은 변형률 속도 민감도를 제어하는 변수, Z 는 경화 속도를 제어하는 내부 변수이다. 등방경화의 경우, Z 는 (3)식과 같이 사용된다(Bodner, 2002).

$$Z = Z_1 + (Z_0 - Z_1)\exp(-mW_p) \quad (3)$$

$$Z_1 = Z_{aus} + (Z_{mar} - Z_{aus})f^{a'} \quad (4)$$

(3)식에서 Z_0 는 항복응력, Z_1 은 포화응력, m 은 소성일이 기여하는 양을 조절하는 변수이다. W_p 는 축적된 소성일이다(Bodner, 2002). Z_1 은 (4)식과 같이 최대 포화응력(Z_{mar})과 최소 포화 응력(Z_{aus})사이에서 수정된 마르텐사이트 상변태량($f^{a'}$)으로 보간한다. $f^{a'}$ 은 다음과 같이 마르텐사이트 상변태 속도로 계산된다.

$$f^{a'} = (1 - f^a)(A\dot{\epsilon}^p + B\dot{g})H(\dot{\epsilon}^p - \dot{\epsilon}^{mit}) \quad (5)$$

$$A = \alpha\eta pn(f^{sb})^{n-1}(1 - f^{sb}) \quad (6)$$

$$B = \eta \frac{dp}{dg}(f^{sb})^n H(\dot{g}) \quad (7)$$

$$g = -T + g_1(\sigma_{ii}/3\sigma_{eff}) \quad (8)$$

$$\frac{\dot{f}^{sb}}{(1-f^{sb})} = \alpha \dot{\varepsilon}^p \quad (9)$$

$$p = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_g} \int_{-\infty}^g \exp\left\{-\frac{(g'-g_0)^2}{2\sigma_g^2}\right\} dg' \quad (10)$$

(5)식은 Tomita/Iwamoto 모델을 수정하여, 유효 소성 변형률 속도($\dot{\varepsilon}^p$)로 표현하고 Heaviside 함수(H)를 추가하여 2차 경화 시작점(ε^{mit})을 지정하였다. A , B 는 각각 (6), (7)식과 같다. g 는 가정된 유도력으로 (8)식과 같으며 T 는 절대 온도, g_1 은 상수이다. f^{sb} 는 오스테나이트 전단미 체적률로 (9)식으로 가정된다. α 는 f^{sb} 의 생성속도를 결정하는 변수로서 온도 및 변형률 속도에 의존한다. p 는 마르텐사이트 엠브리오가 생성될 확률이고 n , η 은 상수이다. p 는 유도력에 대한 가우스 정규 분포로 (10)식으로 표현되고, 여기서 σ_g 는 g 의 표준 편차, g_0 는 g 의 평균이다(Tomita와 Iwamoto, 2001).

저온 연성 파단 현상을 모사하기 위해 Bodner/Chan 손상 모델(Bodner, 2002)을 다음과 같이 수정하였다.

$$\dot{\omega} = \frac{b}{h} \left[\ln\left(\frac{1}{\omega}\right)^{(b+1)/b} \right] \omega (C_1 \sigma_{\max}^+ + C_2 \sigma_{eff} + C_3 I_1^+) \dot{\varepsilon}^p \quad (11)$$

$$\tilde{E} = E(1 - \omega) \quad (12)$$

$$\omega = D_{cr} \rightarrow \text{crack initiation} \quad (13)$$

식(11)은 Bodner/Chan의 등방 손상 모델에 소성변형률 속도를 추가한 것이다. 이 식은 유효응력 개념으로 식(2)에 입력된다. b , h 는 손상 진전을 제어하는 변수, σ_{\max}^+ , σ_{eff} , I_1^+ 는 각각 최대 인장 주응력, 유효응력, 1차 불변량으로 C_1 , C_2 , C_3 (상수)를 통해 다축 응력 상태를 고려한다(Bodner, 2002). (12)식에 E 는 탄성계수, \tilde{E} 는 손상된 탄성계수이다. (13)식에서, D_{cr} 는 임계 손상 변수로 파단점을 결정한다(Lemaitre, 1992).

상기 통합 구성 방정식과 손상 모델은 그림 1과 같이 유한 요소 프로그램에 탑재된다.

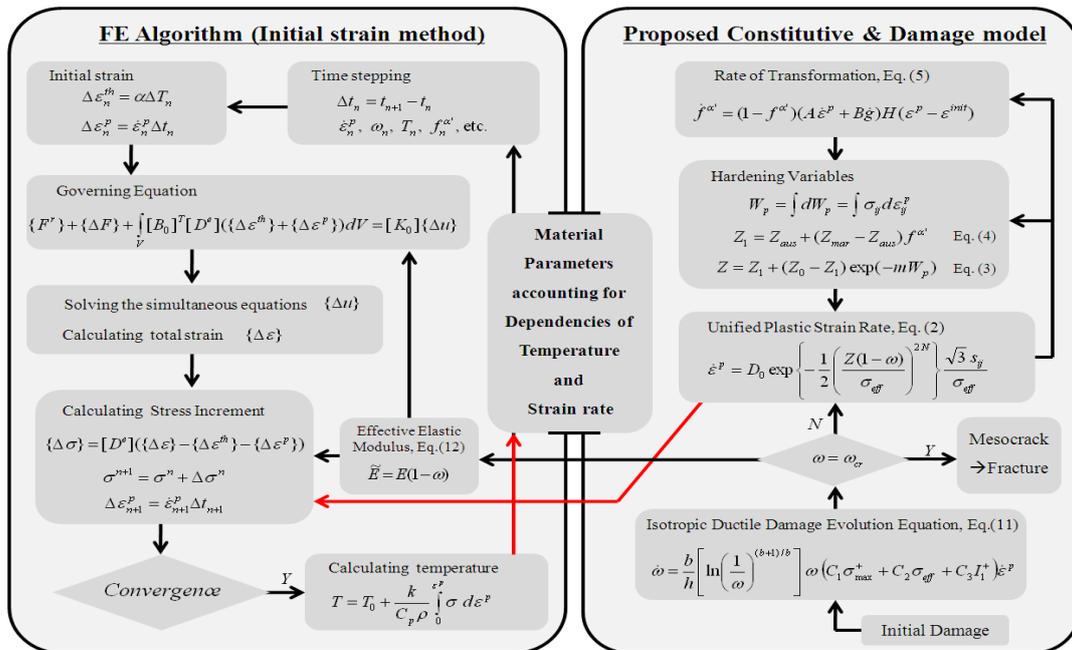


Fig. 1 Flowchart of the process of the proposed model and FE algorithm

3. 해석결과의 분석

제안된 모델은 유한요소 프로그램에 탑재되어 재료 정수 결정 및 시뮬레이션이 수행되었다. 저온영역에서의 온도 및 변형률 속도별 인장 실험을 시뮬레이션한 결과를 실험 결과와 비교하여 그림 2에 나타내었다.

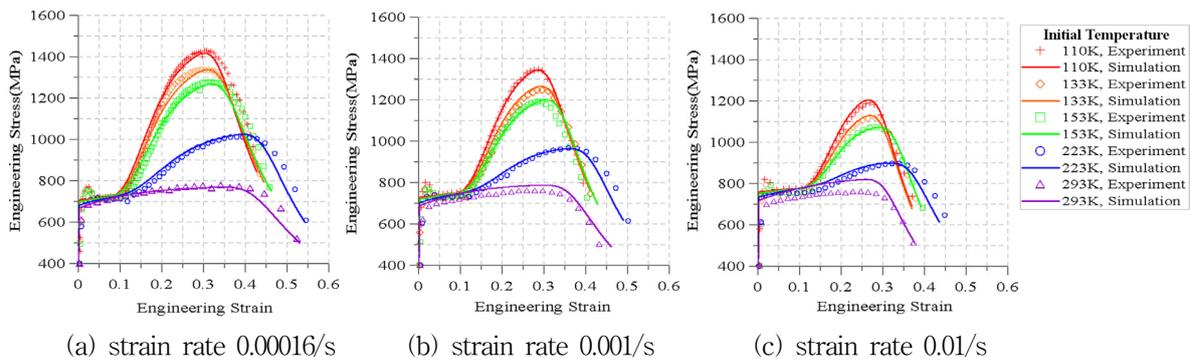


Fig. 2 Comparison of stress-strain relations between numerical simulation and experimental results

3. 결론

온도 및 변형률 속도에 따른 ASS의 저온 거동을 측정하고 그 특성을 재료 모델에 반영하였다. 상변태 모델, 점소성 구성방정식, 손상 모델을 통합하여 ASS의 비선형 저온 거동을 전체적으로 모사할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 첨단조선공학연구센터(Advanced Ship Engineering Research Center)의 지원에 의해 수행되었으며 위 기관의 후원에 감사드립니다.

참고문헌

- Tomita, Y., Iwamoto, T. (2001) Computational prediction of deformation behavior of TRIP steels under cyclic loading, International Journal of Mechanical Science 43, 2017 - 2034
- Lee, K. J., Chun, M.S., Kim, M.H., Lee, J.M. (2009) A new constitutive model of austenitic stainless steel for cryogenic applications, Computational Materials Science 46, 1152 - 1162
- Park, W.S., Yoo, S.W., Kim, M.H., Lee, J.M. (2010) Strain-rate effects on the mechanical behavior of the AISI 300 series of austenitic stainless steel under cryogenic environments, Journal of Material & Design, DOI: 10.1016/j.matdes.2010.02.041
- Bodner, S.R. (2002) Unified Plasticity for Engineering Applications, New York, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York
- Talonen, J., Nenonen, P., Pape, G., Hanninen, H. (2005) Effect of strain rate on the strain-induced $\gamma \rightarrow \alpha'$ martensite transformation and mechanical properties of austenitic stainless steels, Metallurgical and Materials Transactions A 36, 2 421-32
- Lemaitre, J. (1992) A course on damage mechanics, 2nd edition Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York