

간단한 현상학적 구성방정식의 고속 유동응력 기술 능력

신현호¹, 김종봉[#]

Description Capability of a Simple Phenomenological Constitutive Model for High-Strain-Rate Plasticity Data

Hyunho Shin, Jong-Bong Kim

Abstract

A recently reported simple phenomenological constitutive model (SK) demonstrated comparable or better data description capability to/than one of the rigorous and physics-based models, the PTW model. The simple SK model is believed to be an efficient model for practical applications where an extensive computation is needed, and can serve as a rigorous comparison standard for the development of a physics-based model.

Key Words : Plasticity, High-strain-rate, SK model, PTW model

1. 서론

고온, 고속에서 재료의 유동응력을 기술하는 구성방정식은 크게 물리현상기반 모델과 현상학적 모델로 분류된다. 물리기반 모델들이 재료의 소성변형 현상에 관여된 미케니즘을 이해하는데 많은 도움을 줌에도 불구하고, 거의 대부분의 실무문제에서는 현상학적 모델들이 사용되고 있다. 그 이유는 물리기반 구성방정식 모델에 더 많은 변형 미케니즘을 고려할수록 모델은 더 복잡해지고, 따라서 모델에 사용되는 파라미터들을 구하는 노력 및 동 모델을 사용한 전산해석 시간 비용이 기하급수적으로 증가하기 때문이다. 최근 개발된 SK 모델은 간단한 현상학적 모델이면서도, 고속 변형에서 유동응력을 매우 잘 묘사하는 것으로 보고되었다[1]. 여기서는, SK모델의 고속 유동응력 기술능력과, 최근에 개발되었으며 정교한 물리기반 모델로 알려진 PTW모델[2]의 고속 유동응력 기술능력을 주로 비교하여, SK모델의 적용성을 평가하고자 한다.

2. SK 모델

재료의 유동응력은 (1) 가공경화, (2) 변형률속도 경화, 그리고 (3) 온도연화 현상에 영향을 받는데, 이 세 현상은 서로 독립적이지 않고 서로 연관(coupling)되어 있을 수 있다. 어떠한 방식으로 또는 어떠한 수준으로 연관되어 있는지는 아직까지 명확하게 밝혀져 있지 않다. 그럼에도 불구하고, 세 현상을 다음과 같은 방식으로 분리(decoupling)하여 구성방정식을 만들었을 때 재료유동응력을 비교적 잘 기술하는 것으로 알려져 있다[3]. 즉, 기준이 되는 변형률 속도 및 온도에서의 유동응력-유효변형률 관계(가공경화항)에다 변형률 속도의 영향을 고려하는 변형률 속도관련 무차원 수와 온도의 영향을 고려하는 온도관련 무차원 수를 곱하는 방식으로 세 현상을 분리하여 고려하는 것이다. 최근 발표된 SK모델[1]에서도 같은 방법으로 세 현상을 분리하여 각각의 항을 구성하였는데, 그 결과는 다음과 같다.

1. 강릉원주대학교 재료공학과

교신저자: 서울산업대학교 자동차공학과, E-mail: jbkim@snut.ac.kr

$$\sigma = [A + B\{1 - \exp(-C\varepsilon)\}] [D \ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0) + \exp(E \cdot \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)] \left[1 - \frac{T - T_{ref}}{T_m - T_{ref}} \right]^m \quad (1)$$

여기서 σ 는 유동응력, ε 은 유효소성변형률, $\dot{\varepsilon}$ 는 변형률 속도, $\dot{\varepsilon}_0$ 는 기준 변형률 속도, T 는 온도, T_m 은 용융 온도, T_{ref} 는 기준 온도, 그리고 A, B, C, D, E 및 m 은 재료상수이다. 첫 번째 대괄호는 가공경화, 두 번째 대괄호는 변형률 속도경화, 그리고 마지막 대괄호는 온도연화와 관계된다. 모든 항목들이 각기 JC모델의 각 항목들보다 주어진 현상을 기술하는 능력이 뛰어나고 보고되었다[1]. 특히 둘 째 대괄호는 JC모델 [3]과는 달리 high-strain rate에서 유동응력이 갑자기 급격히 증가하는 upturn현상도 잘 기술하며, 셋 째 온도 연화는 JC모델과는 달리 대괄호전체에 걸쳐서 지수 m 이 적용이 되었는데, 기준온도보다 저온에서도 데이터 기술이 가능하며, 온도연화현상을 잘 기술함이 증명되었다 [1].

3. SK모델의 데이터기술 능력

그림 1의 실험데이터(점 데이터)에서 보는 바와 같이, 구리는 로그 변형률 속도가 증가함에 따라 처음에는 유동응력이 직선적으로 증가하다가 변형률 속도 약 10^3 s^{-1} 이상부터는 유동응력이 매우 급격히 증가하는 upturn 현상을 보인다. SK모델(그림 1(a), 실선)과 PTW모델(그림 1(b), 실선) 모두 실험 데이터를 비교적 잘 예측하고 있다. PTW 모델에 필요한 재료상수가 무려 15개나 될 뿐만 아니라 PTW모델에는 계산시간이 긴 복잡한 여러함수가 포함되어 있음을 감안하면, 본 연구에서 제안한 간단한 모델의 성공적인 유동응력 기술은 실로 놀라운 것이다. 고속 소성변형 현상 해석을 위해 가장 많이 사용되는 유한요소법의 경우, 수많은 요소들(3차원 구조물에 대해 통상 수십만 개 이상)에 대해 모든 시간단계별로 구성방정식을 적용해야 하므로, 재료상수 결정 측면뿐만 아니라 막대한 계산을 요하는 소성문제 해석 측면에서 SK와 같은 간결하고도 정확한 모델을 적용하는 것이 매우 중요하다.

그림 2의 실험데이터(점 데이터)에서 보는 바와 같이, 상온에서 탄탈륨은 로그 변형률 속도가 증가함에 따라 항복응력이 지수함수적으로 증가하는 현상을 보인다. 그림 2에서, JC모델[3]은 직선적인 예측만을 하는데 반하여, 본 연구에서 제안한 모델은 유동응력의 지수함수적인 증가를 잘 기술하고 있다.

그림 3에는 573 K에서 다양한 변형률 속도 별로 베릴륨에 대한 유동응력-변형률 관계(점 데이터)를 나타내었다. PTW모델(그림 3(b), 실선)은 변형률속도 750 s^{-1} 일 때의 유동응력을 제외하고는 잘 맞지 않지만, 본 연구에서 제안한 모델(그림 3(a), 실선)은 모든 변형률 속도에서 유동응력-변형률 관계를 비교적 잘 기술하고 있다.

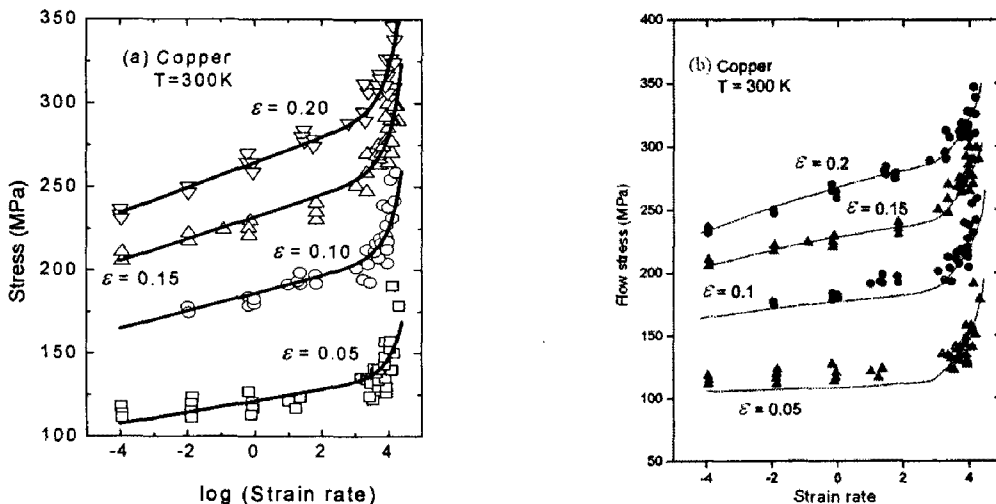


그림 1. 구리의 유동응력-변형률 속도 관계(점 : 실험치 [2], 실선 : 모델의 예측치). (a) SK 모델의 예측결과($A=29.8 \text{ MPa}$, $B=314.8 \text{ MPa}$, $C=6.90$, $D=0.0124$, $E=9.44 \times 10^{-6}$, $m=2.106$, $T_m=1357.8 \text{ K}$), (b) PTW모델의 예측[2].

그림 2(우측 그림). 탄탈륨의 유동응력-변형률속도 관계 (점 : 실험치[2], 실선 : 모델들의 해석결과(A=300 MPa, D=0, E=0.07362)).

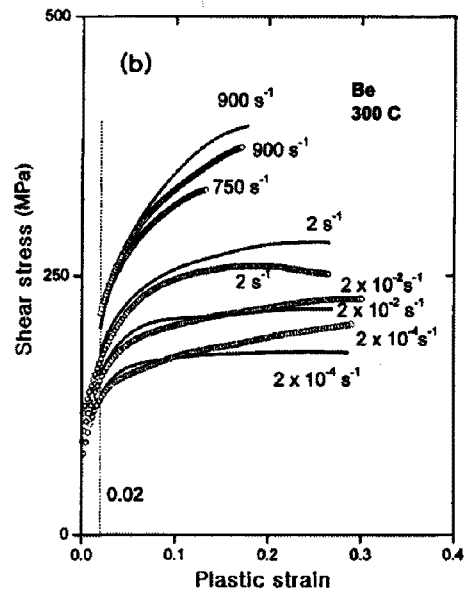
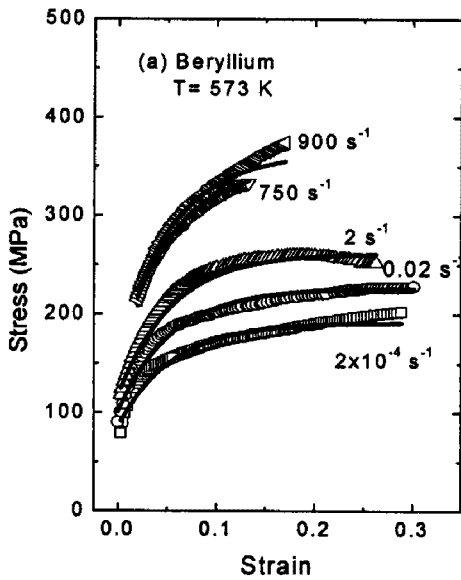
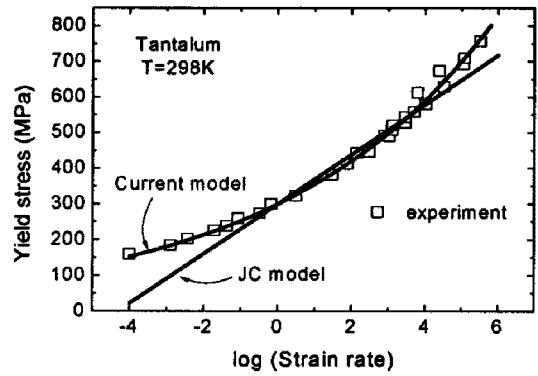


그림 3. 베릴륨의 유동응력-변형률 관계(점 : 실험치 [2], 실선 : 모델의 예측치). (a) SK 모델의 예측결과 (A=116.3 MPa, B=142.1 MPa, C=18.2, D=0.0297, E=2.17×10⁻⁴, m=0.027, T_m=1551 K), (b) PTW모델의 예측[2].

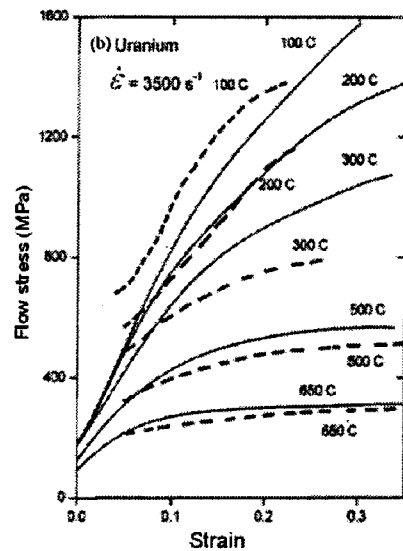
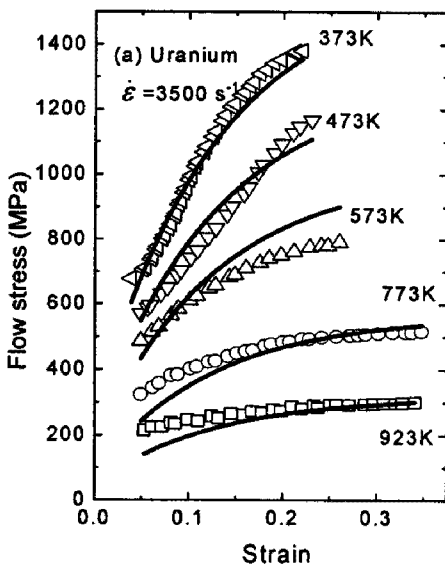


그림 4. 우라늄의 유동응력-변형률 관계(점 데이터 : 실험치[2], 실선 : 모델의 예측치). (a) SK 모델의 예측결과(A=161.6 MPa, B=859.5 MPa, C=7.8899, D=0.0987, E=0, m=2.106, T_m=1405.2 K), (b) PTW모델의 예측[2].

그림 4의 실험 데이터(점 데이터)는 다양한 온도에서 우라늄의 유동응력-변형률 관계를 나타내고 있다. PTW모델(그림4(b), 실선)은 373 K(100°C)와 573 K(300°C)에서의 예측결과가 잘 맞지 않는 반면, 본 연구에서 제안한 모델(그림 4(a), 실선)은 PTW모델에 비해 비교적 예측결과가 우수한 것을 알 수 있다.

그림 5의 실험 데이터(점 데이터)는 다양한 변형률 속도와 온도 조합에서 구리의 유동응력-변형률 관계를 나타낸 것이다. 본 연구에서 제안한 모델(그림 5(a), 실선)과 PTW모델(그림 5(b), 실선)의 예측능력을 비교해 보면, PTW모델은 예측결과가 낮거나 높게 일관성 없이 나타나는 반면, 본 연구에서 제안한 모델은 예측결과가 비교적 잘 맞는 것을 알 수 있다. 또한, SK 구성방정식은 AISI 4340 Steel 및 텅스텐 중합금에 대한 실험데이터도 거의 완벽한 수준으로 기술하였다[1].

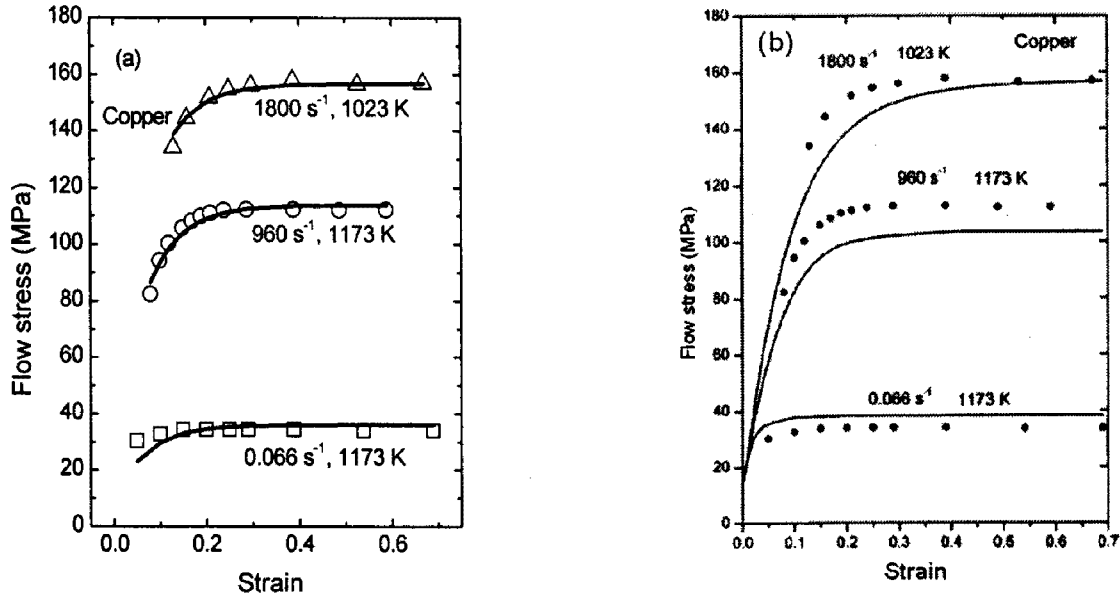


그림 5. 구리의 유동응력-변형률 관계(점 : 실험치 [2], 실선 : 모델의 예측치). (a) SK 모델의 예측결과 (A=33.6 MPa, B=97.2 MPa, C=14.464, D=0.1393, E=0, m=0.464, T_m=1357.8 K), (b) PTW모델의 예측 [2].

4. 결론

간단한 현상학적 모델인 SK 모델은, 정교하지만 매우 복잡한 물리기반 모델인 PTW모델에 상응하거나 그 이상의 정확도로, 다양한 재료에 대해 유동응력을 잘 기술할 수 있음이 입증되었다. SK모델은 막대한 계산량이 필요한 고속 소성현상 실무 해석 문제에서 매우 적합한 모델이며, 복잡한 물리기반 모델들을 개발할 때, SK모델이 비교기준의 역할을 할 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] H. Shin and J.-B. Kim, 2009, A phenomenological constitutive equation to describe various flow stress behaviors of materials in wide strain rate and temperature regimes, In press.
- [2] D.L. Preston, D.L. Tonks, and D.C. Wallace, 2003, Model of plastic deformation for extreme loading conditions, J. Appl. Phys., 93(1), pp. 211-220.
- [3] G.R. Johnson and W.H. Cook, 1983, A constitutive model and data for metals subjected to large strain, high strain rates and high temperature, Proc. 7th International Symposium on Ballistics, Den Haag, Netherlands, pp. 541-543.