

열간프레스성형에서의 변형 측정장치 개발 및 기계적 거동의 물성화

유동훈¹, 석동윤¹, 김돈건¹, 안강환¹, 손현성², 김교성², 정관수^{1#}

Develop of Strain Measurement and Characterization of Mechanical Behavior for Hot Press Forming

Donghoon Yoo, Dong-Yoon Seok, Dongun Kim, Kanghwan Ahn, Hyun-Sung Son, Gyo-Sung Kim, Kwansoo Chung

Abstract

As a way to improve the safety of automobiles, and to reduce the weight of vehicles, new forming technologies and advanced materials are in high demand in the automotive industry. However, the advanced strength steel has inferior formability and large springback. In order to overcome such drawbacks, the hot press forming process (HPF) has been applied for forming of automotive sheet parts. In this work, new equipment was suggested to measure unlimited displacement range compared to previous one which was able to measure only up to 10mm displacement range. The external extensometer connected with grips by wire was applied to equipment so that total strain range was measured up to failure also in high temperature. And the finite element analysis was conducted to characterize the mechanical properties of the HPF steel. Finally, the flow curves were represented by utilizing the Johnson-Cook type equation both in uniform and post-uniform deformation regions.

Key Words : Hot press forming, tensile test, flow curve, temperature history, strain rate

1. 서론

최근 자동차 경량화를 위해 많이 사용되는 고강도강은 낮은 성형성과 고강도에 따른 탄성회복의 문제가 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 활발히 연구되고 있는 것이 열간프레스성형(Hot Press Forming) 기술이다. 고온에서는 철의 성형성은 향상되고 기계적 강도는 낮아져 적합한 성형조건이 형성된다. 또한 HPF 공정을 통해 만들어진 최종 제품은 충돌 성능에 적합한 높은 강도와 미세구조를 지니며 탄성회복을 거의 보이지 않는다.

기존 연구에서는 신율장치의 측정범위가 10mm

로 제한적이기 때문에 재료의 물성을 얻는데 어려움이 있었다.[1] 본 연구에서는 고온에서 우수한 성형성을 갖는 HPF 강의 변위량을 충분히 측정할 수 있는 신율장치를 개발하였고, 다양한 온도 이력과 변형률 속도 하에서 인장시험을 수행하였다. 또한 보다 정확한 경화곡선을 얻기 위해 유한요소법을 활용하여 균일 및 비균일 연신 구간에서 인장시험 데이터를 보정하였다. HPF 강의 경화곡선을 표현하기 위해 온도와 변형률속도의 함수인 Johnson-Cook 식을 도입하였다.

2. 실험과정

2.1 실험장비

1. 서울대학교 재료공학부

2. POSCO 기술연구소

교신저자:지능형텍스타일연구센터 E-mail:kchung@snu.ac.kr

고온에서 HPF 강 of 경화곡선을 고온로가 장착된 인장시험 기계에서 측정하였다. 고온에서 측정을 고려하여 그립과 시편을 Fig. 1과 같이 설계하였다. 시편치수는 Fig. 2(a)와 같다. 실험시편은 그립 사이에 장착되고, 상대 변위량을 측정하는 신울계는 고온로 밖에 위치하며 금속와이어와 연결봉을 이용하여 Fig. 3과 같이 그립까지 연결된다. 금속와이어는 도르래를 통하여 그립의 변위를 신울계로 전달한다. 신울장치의 최대 측정가능한 변위량은 500mm이다. 시험 시편은 ASTM E8M sub-size 시편을 수정하여 만들었다. 위 아래 그립과 시편은 고온로 내에서 같은 온도에 도달하므로 그립과 시편 사이에 열전달이 발생하지 않는다. 고온로의 내부에 균일한 온도분포를 위하여 고온로의 수직방향의 등간격으로 3개의 온도조절기를 설치하였으며, 고온로의 최대 가열온도는 1100℃이다.

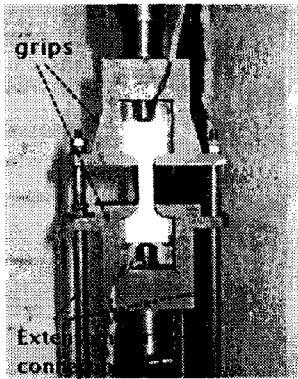


Fig. 1 Experimental devices of the high temperature

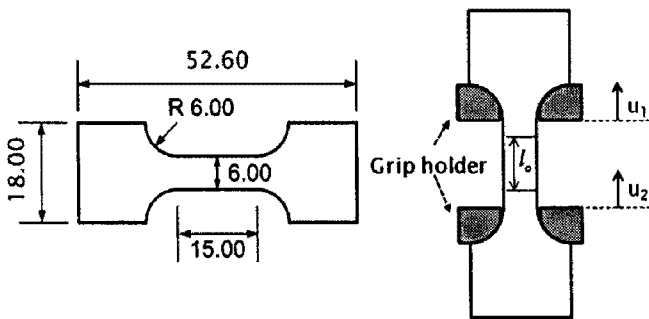


Fig. 2 (a) Dimensions of the specimen and (b) schematic view of the test specimen

2.2 변형률 측정

시편의 변형률은 위, 아래 그립의 상대적인 변위량으로 측정한다. 10mm를 게이지 길이(L_0)로 하는 시편에서 측정된 변형률 ϵ_M 은

$$\epsilon_M = \frac{u_1 - u_2}{L_0} \quad (1)$$

이다. 여기서 u_1 , u_2 는 Fig. 2 와 같이 위, 아래 그립의 변위량을 나타낸다. 변형이 시편의 균일연신 구간 내에서 일정하고 나머지 부분에서는 변형이 없다고 가정한 경우에만, Eq. 1은 정확하다고 할 수 있다. 그러나 실제 실험에서는 균일연신 구간 외에서도 변형이 발생하므로 Eq. 1으로 측정된 변형률은 초기 가정값이 된다. 이 값은 유한요소해석을 도입하여 iteration을 통해 재료의 실제 변형률로 수정된다.

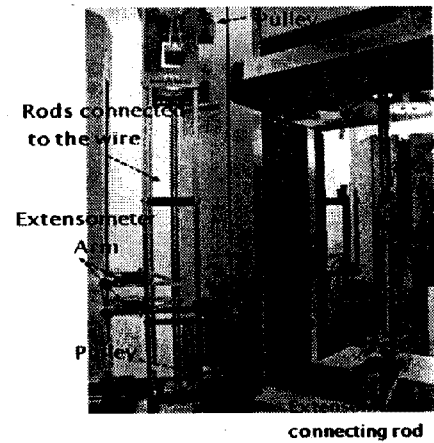


Fig. 3 Strain measurement at high temperature

2.3 실험조건

고온 인장시험 조건은 실제 HPF공정을 참고하여 Fig. 4와 같은 온도이력을 따르도록 하였다. 이를 위해 시험 시편을 우선 900℃도로 유지된 챔버 속에서 5분 동안 유지한 후, 시험온도(780, 730, 680, 630℃)로 유지되고 있는 고온로 내의 그립에 장착한다. 시편과 그립 사이의 열평형에 이르도록 기다린 뒤 인장시험을 실시한다. 변형률 속도에 따른 경화곡선을 얻기 위해 세 가지의 인장속도 조건 15, 1.5, 0.15mm/s에서 인장시험을 수행하였다.

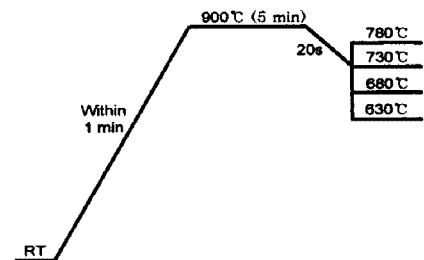


Fig. 4 Thermal histories of the tensile test

3. 결과와 해석

3.1 HPF 강 of 경화곡선

780℃에서 측정된 변형률 속도에 따른 경화곡선은 Fig. 5와 같다. 이 곡선은 재료의 실제 경화곡선이 아닌 초기가정 값이므로 실제곡선으로 변환할 필요가 있다. 이를 위해 상용유한요소해석프로그램인 ABAQUS/Standard와 user-subroutine UMAT[2]을 사용하였다. 데이터 보정과정은 Fig. 6에 간단히 나타내었다. 데이터 보정을 위한 전산모사를 위해 Fig. 7과 같은 시편과 핀의 3차원 유한요소 모델이 적용되었다. 3회 이내의 iteration으로 재료의 실제 경화곡선을 얻을 수 있었다. 780℃ 인장시험에서 데이터 보정 후의 최종경화곡선을 초기 경화곡선과 함께 Fig. 8에 나타내었다. 보정 전 후의 두 곡선에는 큰 차이가 있음을 볼 수 있다.

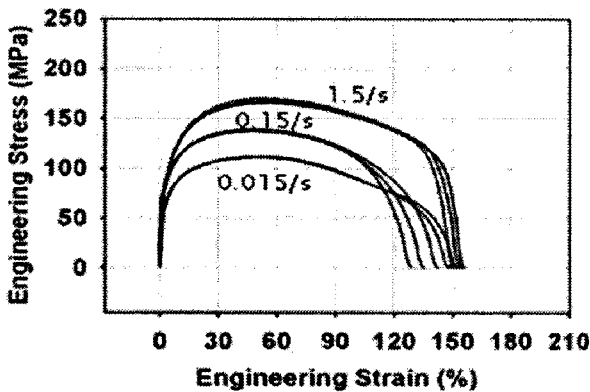


Fig. 5 Flow curves of the HPF steel at 780℃

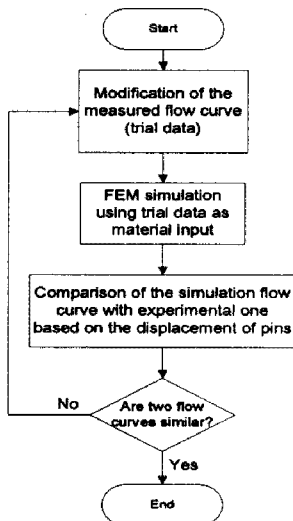


Fig. 6 Illustration of the data correction procedure

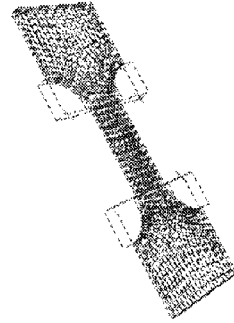


Fig. 7 Finite element model used for simulation

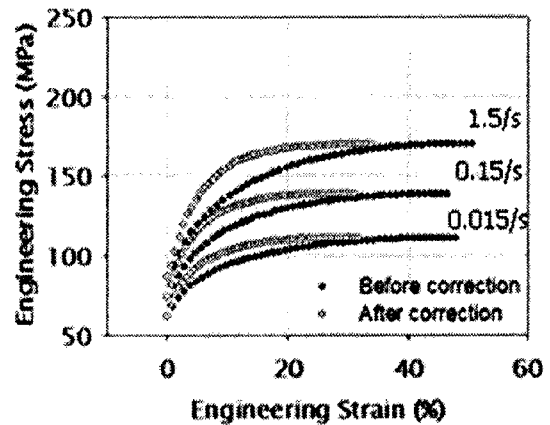


Fig. 8 Flow curves of the HPF steel before and after data correction at 780℃

3.2 modified Johnson - Cook 식에 기초한 데이터 보정

데이터 보정 후 얻어진 경화곡선은 온도 및 변형률 속도의 함수인 Johnson and Cook[3, 4]식을 사용하여 다음과 같이 나타내었다.

$$\bar{\sigma} = 370(0.01 + \bar{\epsilon})^{0.3} \left(1 + C(\bar{\epsilon}) \ln \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0}\right) \times \quad (2)$$

$$\left[1 - \text{sign} \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right) \left| \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right|^{m(\ln \bar{\epsilon})} \right]$$

여기서 $\dot{\bar{\epsilon}}_0$, T_m , T_r 은 기준 변형률속도(1.5/s), 재료의 녹는점, 기준 측정온도를 각각 나타내며 변형률 속도 및 온도 상수 값인 $C(\bar{\epsilon})$ 와 $m(\ln \bar{\epsilon})$ 은 각각 유효변형률과 진변형률속도에 대한 함수로 나타내었다. 780℃에서 재료의 최종 경화곡선과 Eq. 2에 기초한 경화곡선을 Fig. 9에 나타내었다.

3.3 비균일 연신 구간을 포함하는 데이터

보정

전 단계에서 나타낸 Eq. 2는 최대강도(Ultimate Tensile Strength)점 이전까지의 데이터만 사용하여 구한 값이다. Eq. 2를 물성으로 입력하여 전산해석을 통해 구한 경화곡선을 얻었다. 전산해석으로 구한 경화곡선은 실험경화곡선과 최대강도점까지는 잘 일치하나, 비균일 연신구간에서는 일치하지 않는다. 비균일 연신구간에서의 곡선을 fitting하기 위해 다음과 같이 보정인자 $\beta(\bar{\epsilon})$ 을 도입하였다.

$$\bar{\sigma} = 370(0.01 + \bar{\epsilon})^{0.3} \left(1 + C(\bar{\epsilon}) \ln \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0}\right) \times \left[1 - \text{sign}\left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right) \left|\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right|^{m(\alpha \bar{\epsilon})}\right] \times \beta(\bar{\epsilon}) \quad (3)$$

여기서 $\beta(\bar{\epsilon})$ 는 $\bar{\epsilon} \geq \bar{\epsilon}_{UTS}$ 에서 $\cos(\alpha(\bar{\epsilon} - \bar{\epsilon}_{UTS}))$ 이다. α 는 실험값과 전산모사결과의 비교를 통해 결정된다. Eq. 3으로 시행한 전산해석 결과를 Fig. 10에 나타내었고, 실험 경화곡선과 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 Eq. 3은 HPF 강의 균일 및 비균일 연신구간 전체를 포괄하는 경화곡선을 나타내는 식임을 알 수 있다.

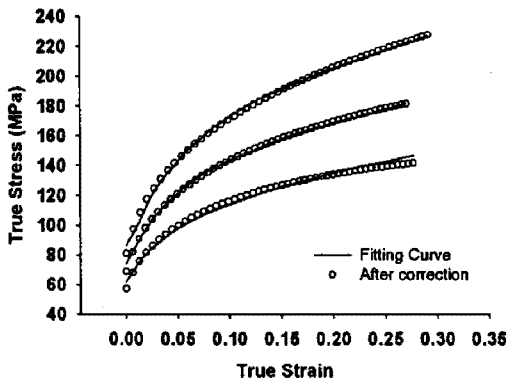


Fig. 9 Flow curves at 780°C fitted by the Johnson and Cook equation

4. 결론

HPF 강의 고온에서의 온도 및 변형률 속도에 따른 경화곡선을 측정하기 위해 측정장비와 시편

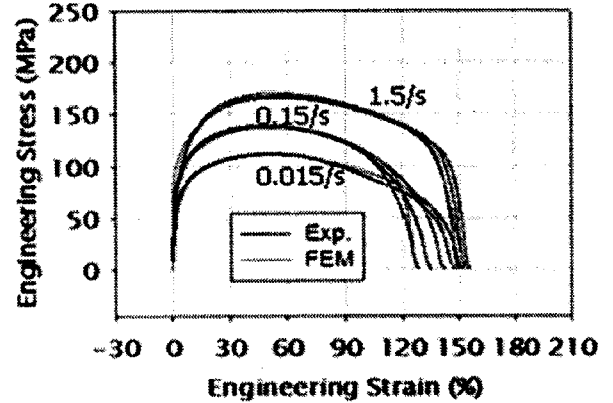


Fig. 10 Flow curves obtained from simulation using Eq.3 and measured curves at 780°C

을 제작하였다. 유한요소모델을 이용한 데이터 보정 과정을 통해 재료의 실제 경화곡선을 구하였다. 데이터 보정 후에 얻어진 경화곡선에 대한 Johnson-Cook 식을 구하였다. 보정인자를 도입함으로써 균일 및 비균일 연신 구간 전체에 대한 경화곡선 식을 얻을 수 있었다.

후 기

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(R11-2005-065).

참 고 문 헌

- [1] 안강환, 유동훈, 석동윤, 김홍기, 박성호, 정관수, 2009, 열간프레스성형에서의 기계적 물성 측정, 한국소성가공학회 춘계학술대회논문집, pp. 450~453
- [2] ABAQUS User's manual (version 6.7) (2007), Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc., USA.
- [3] G.R. Johnson and W.H. Cook (1983), Proc. 7th Intern. Symp. Ballistics, Am. Def. Prep. Org. (ADPA), Netherlands.
- [4] G.R. Johnson, J.M. Hoegfeldt, U.S. Lindholm and A. Nagy (1983), J. Eng. Mater. Tech., Vol. 105, p. 42.