

고온에서 압축 과정 시 미소 공동의 발생과 성장 Nucleation and Growth of Micro-voids under Compression Process at High Temperature

*정찬서¹, #김범준²

*C. S. Jeong¹, #B. J. Kim(kultra@dongyang.ac.kr)²

¹영진전문대학교 컴퓨터응용기계과, ²동양미래대학교 기계과

Key words : Modified Gurson model, Micro-voids,

1. 서론

압축에 의해 발생하는 전단력에 따른 재료 유동의 stringer들은 보이드 생성과 성장이 잘 발생하는 장소이다. 보이드는 성장하여 합체되며, stringers 주변에서의 이러한 합체 메커니즘은 변형 집중의 결과이다[1,2]. 구조물의 형상과 작용 하중 모드는 파괴 인성에 영향을 미치며, 이러한 파괴 인성에 영향을 미치는 구속 효과를 정량화하기 위한 보다 더 근본적인 방법이 마이크로 역학적 모델에 기초하여 수행된다[3]. 구조물의 파괴 인성에 영향을 미치는 보이드의 생성, 성장, 합체의 과정을 고려한 마이크로 역학적으로 모델링한 Modified-Gurson model이 널리 이용되고 있다[4]. 본 연구에서는 압축 과정에서 발생하는 보이드에 의한 응력, 변형의 집중에 따른 재료의 연화 과정을 Modified-Gurson model을 이용하여 평가하였다. 그 결과를 보이드 생성을 고려하지 않은 일반적인 해석 방법과 실험결과와 비교하여 분석하였다.

2. 실험과정

실험재료는 AISI304 스테인리스스틸과 SM211을 사용하였다. 원통형 시험편은 지름 12mm, 높이 8mm로 만들어졌으며, 일축 압축 실험으로 진행되었다. 압축시험은 재료 유동 특성을 확인하기 위하여 온도 800℃, 압축률 30, 50, 70, 90%, 1/s의 변형율 속도에서 수행되었다. 시험 후 시편의 미세구조를 확인하였고, 시편의 압축중의 응력과 변형을 분포는 Modified Gurson model을 적용하여 유한요소해석으로 예측하였고 실험 결과와 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

고온에서 연성이 증가한 재료에 대하여 압축의 기계적 거동을 미세조직에 대한 현미경 검사와 유한요소해석에 의해서 확인하였다. Fig. 1 (a)는 각기 다른 압축률로 압축한 후의 시편의 형태를 보여주고, (b)는 압축된 시편의 내부에 발생된 재료 유동을 볼 수 있다.



Fig. 1 Configuration of a specimen deformed by compression and internal material flow, (a) The change of the specimen by compression rate 0, 30, 50, 70, 90%, (b) the section that is cut in the compression direction of a 70% compressed specimen

이상의 유한요소 해석에 의해 얻어진 σ_e/σ_M 의 결과로부터 식(1)과 식(7)에 따른 유효 응력을 확인하여 Fig. 2에 나타내었다. Fig.7 (a)에서 보듯이 식(7)의 경우는 특정값을 지나면 유효 응력 증가속도가 실험결과에 비하여 높아지는 결과를 보이며, $f_0=0.0125$ 에서는 급격한 증가를 보여준다. 그러나 식(1)의 경우는 특정값을 지나면 유효응력 증가율이 감소하는 특성을 보이며, 후반에는 급격히 감소한다. 모든 경우에서 $q_1=4.66$, $q_2=0.45$ 인 경우가 유효 변형률에 대한 유효 응력이 약간 더 큰 민감한 반응을 보여준다. (b)는 식(1)과 식(7)을 모두 고려한 결과를 나타내며, 특히 해석 결과의 초기값 $f_0=0.0125$ 은 실험 결과 곡선과 잘 일치하였으나,

$f_0=0.000125$ 의 경우에 비하여 낮은 변형률에서 인장에서의와 같은 파괴가 발생하는 것처럼 예측한다. 실험재료의 f_0 는 '0'으로 가정되므로 $f_0=0.000125$ 인 경우와 유사할 것으로 예상되며, 이 경우가 실험결과와 높은 변형률까지 유사한 곡선의 형태를 보여준다. 해석 파라미터들의 수정에 의해 더욱 일치하는 예측이 가능할 것으로 기대된다.

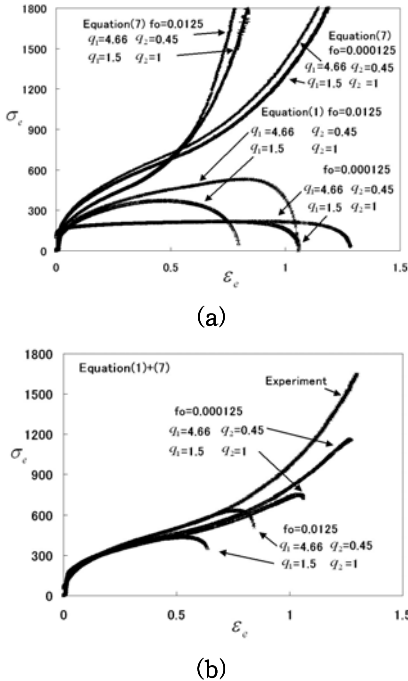


Fig. 2 Effective stress-strain which used F.E.analysis by an Equation (1) and (7) and an experiment result, (a) the analyzed results by Equation (1) and Equation (7) respectively, (b) the analyzed results considered both equation and an experiment result

Tvergaard[5]는 보이드 체적율을 유효 응력과 변형율을 이용하여 유효 보이드 체적율로 대체함으로써 초기의 Gurson model을 식(1)과 같이 수정하였다.

$$\Phi = \left(\frac{\sigma_e^2}{\sigma_M^2} \right) + 2q_1 f^* \cosh \left(\frac{3q_2}{2} \frac{\sigma_m}{\sigma_M} \right) - (1 + q_1 f^{*2}) \quad (1)$$

여기서, q_1, q_2 는 재료 상수, 유효 Mises 응력 $\sigma_e^2 = 3s_{ij}s_{ij}/2$, matrix의 항복 응력 σ_M , 평균 응력 $\sigma_m = \sigma_{kk}/3$, f^* 는

유효 보이드 체적율, 보이드 체적율, $q_3 = q_4^2$. 또한 E. Parteder et al.[6] 은 다공질 금속의 압축에 Gurson model을 적용하여 다음과 같이 제안하였다.

$$\Phi = \left(\frac{\sigma_e^2}{\sigma_M^2} \right) + 2q_1 \cosh \left(\frac{3q_2}{2} \frac{\sigma_m}{\sigma_M} \right) - \{1 + q_1(1-D)^2\} \quad (2)$$

여기서, D는 비중 ρ/ρ_M , ρ 는 다공질 금속의 밀도, 그리고 ρ_M 은 matrix 재료의 밀도이다.

4. 결론

압축과정에서 생기는 보이드를 확인하였으며, 재료 내부에 재료 유동이 발생하고 그것을 따라 보이드 시트가 생성됨을 확인하였다. 유효 응력은 초기에는 두 경우 모두 비슷한 값을 가지나 변형률이 증가하면 크게 달라지며 응력 증가방향이 반대가 되었다. 또한 보이드 생성에 대한 모델의 경우는 낮은 변형률에서 인장에서의와 같은 파괴가 발생하는 것처럼 해석하였으며, 보이드 닫힘에 대한 모델의 경우는 실제보다 낮은 변형률에서 응력이 급격히 증가하는 결과를 보였다. 두 경우를 모두 고려한 경우는 실험결과와 매우 유사하였으며, f_0 가 낮은 경우는 실험결과와 같은 경향의 곡선을 나타냈다.

후기

This research was supported by Basic Science Research Program (No. 2011-0014946) through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology.

참고문헌

1. R. Lapovok, L. S. Toth, A. Molinari, and Y. Estrin, J. Mech. Phys. Solids, **57**, 122-136, 2009.
2. J. P. Bandstra, D. A. Koss, A. Geltmacher, P. Matic, and R. K. Everett, Mat. Sci. and Eng. A., **366**, 269-281, 2004.
3. Z. Z. Du and J. W. Hancock, J. Mech. Phys. Solids, **39**, No. 4, 555-567, 1991.
4. J. W. Hutchinson and V. Tvergaard, Int. J. Solids Structures, **17**, 451-470, 1981.
5. V. Tvergaard, J. Mech. Phys. Solids, **30**, No. 6, 399-425, 1982.
6. E. Parteder, H. Riedel, and D. Z. Sun, Int. J. Refractory Met. Hard Mat., **20**, 287-293, 2002.