고속변형률 속도에서의 SA516 강의 GTN 상수

GTN Parameter of SA516 Carbon Steel at High Strain Rate

*장윤찬 [1], 김성일 [2], 홍재근 [3], #이영석 [1]
*Y. C. Jang[1], S. I. Kim[2] , J. K. Hong[3], #Y. Lee(ysl@cau.ac.kr)[1]
[1] 중앙대학교 기계공학부, [2] 포스코 기술연구소, [3] 한국기계연구원 융합공정연구부

Key words : Gurson parmeter, Intermediate strain rate, Finite element analysis,

1. 서론

일반적으로 금속 파괴는 크게 연성파괴와 취성파괴로 나뉜다. 연성파괴의 경우 대개 기공의 생성, 성장 및 합체의 과정을 거쳐 파괴에 이른다. 연성파괴에 대한 모델은 많은 연구자들에 의해 개발 되었다. 그 중 Guroson[1]이 제안한 모델이 많이 사용되고 있다. Gurson 은 재료가 연속체처럼 거동한다고 가정하고, 다공성 재료의 소성 유동을 해석하였다. 재료의 연성파괴를 기공체적비율을 사용하여 제안하였다. Tvergaard 와 Needleman[2]은 기공체적비율을 유효기공체적비율로 대처함으로 Gurson 모델을 수정하였다. 이 모델을 Gurson-Tvergaard-Needleman(GTN) 모델이라고 한다. 이 모델은 균열성장 및 샤르피 실험의 유한요소해석에 많이 적용되었다 [3,4].

Gurson 상수는 응력-변형률 관계를 바탕으로 수치해석 방법으로 결정된다. 일반적으로 변형률속도에 따라서 재료의 유동응력이 변한다. 정적 하중에서 응력-변형률 관계와 동적 하중에서 응력-변형률 관계는 다르다. 그렇기 때문에 정적 하중의 Gurson 상수는 동적 하중에 적용될 수 없다.

본 연구에서는 변형률 속도 1~100 s-1 에서 인장실험을 수행하였다. 이 실험데이터를 바탕으로 변형률에 따른 Gurson 상수를 3 차원 유한요소해석을 통해서 산출 하였고, 실험과 비교 분석 하였다. 시편의 재료는 SA-516 Gr.70 탄소강 이다.

2. GTN 모델

Gurson 은 von mises 항복이론에 정수압 응력의 영향을 고려하여 항복이론을 제안하였다. 모델은 식 (1)과 같다.

$$\Phi = \frac{3}{2}\frac{S_{ij}S_{ij}}{\sigma_Y^{\ 2}} + 2f\cosh\left(\frac{3}{2}\frac{\sigma_m}{\sigma_Y}\right) - (1+f^2) = 0 \quad (1)$$

여기서, f 는 기공체적비율, σ_m 은 정수압응력, S_{ij} 는 편차응력으로써 $S_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_m \delta_{ij}$ (i, j = 1, 2, 3)로 표현된다. 한편 Tvergaard[5,6]는 규칙적으로 배열된 기공을 함유한 연속체에 대한 유한요소해석을 통해 해석결과와 실험결과가 잘 일치하도록 매개변수 q_1 과 q_2 를 추가한 식 (2)를 제안하였다.

$$\Phi = \frac{3}{2}\frac{S_{ij}S_{ij}}{\sigma_Y^{\ 2}} + 2q_1 f\cosh\left(\frac{3}{2}\frac{q_2\sigma_m}{\sigma_Y}\right) - (1+q_1 f^2) \quad (2)$$

그러나 위 식은 기공 합체시의 하중 지지능력과 기공 확대에 따른 균열성장을 실제와 유사하게 모사하지 못한다는 것이 단점으로 지적되었다.

Tvergaard 와 Needleman[2]은 기공의 합체 및 파단 과정을 모의할 수 있도록 f 대신유효 기공체적비율(effective void volume fraction, f*)의 사용을 제안하였다. 여기서, f_c 는 기공의 합체가 일어나는 임계 기공체적비율이고, f_u*(=1/q1)는 기공에 의해서 더 이상 하중을 지지하지 못하는 순간의 기공체적비율이며, f_f 는 균열이 진전하는 순간의 f 값을 의미한다. f 가 f_c 보다 클 때 정수압의 효과가 증대되며, 소성 불안정의 개시를 촉진시킨다.

$$f^* = f \qquad f \le f_C$$

$$f_C + \frac{f_u^* - f_C}{f_f - f_C}(f - f_C) \qquad f > f_C \quad (3)$$

식(3)에서 우변의 $[(f_u^* - f_c)/(f_f - f_f)]$ 항은 기공이 성장할 때의 기울기를 나타내며, f* = 0 일 때 항복조건은 von Mises 의 소성 이론과 같아지게 된다.

3. 중변형률 인장 실험

철강재료는 변형률속도에 따라 재료의 특성(항복강도,연신률)이 변화 된다. 변형률 속도가 증가하면 재료의 전위이동 (dislocation)이 저항을 받기 때문에 항복응력이 증가된다. 고속파괴 실험을 모사하기 위해서는 고속변형에서의 특성이 요구된다. 본 연구에서는 변형률 속도 1 ~ 100 [s^{-1}]에서 인장실험을 실시하였다. 인장실험은 각 변형률 속도마다 2 번씩 실험 되었다. 실험기는 Instron VHS 8800 이다. 실험기의 최대속도는 20m/s 이고, 최대하중은 60kN 이다. 동적 특성이 좋은 로드셀 (Piezo-Electric load cell - kistler 9071A)을 사용되었다. 그림 1 은 동적인장실험에 사용된 시편의 형상 및 치수이다. 그림 2 는 변형률속별 유동응력을 나타낸 것이다. 일반적으로 변형률 속도가 증가하면 유동응력은 증가되고, 연신률은 감소되는 경향을 보인다. 하지만 본 연구의 실험에서는 변형률 속도가 증가하면 유동응력과 연신률이 증가되는 경향을 보인다.

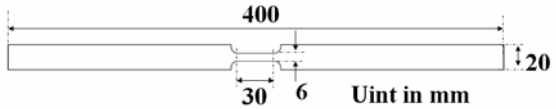

Fig. 1 Dimension of tensile test specimen

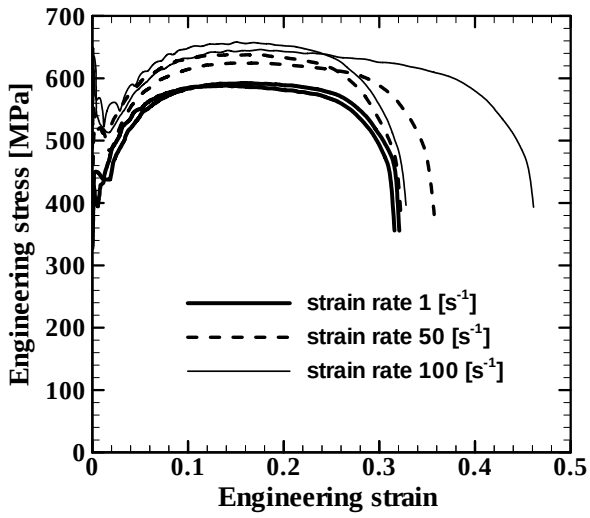

Fig. 2 Stress-strain curve at the various strain rate

변형률속도가 증가할수록 유동응력의 편차가 증가하는 경향을 보인다. 변형률속도가 증가함에 따라 항복응력의 데이터 편차가 커진다. 반면 변형률속도가 증가할수록 극한응력은 일정하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 실험결과를 기준으로 그림 3 의 경험식을 사용하여 변형률 속도에 따른 유동응력 관계를 계산하였다. σ_0 는 정적 극한응력이고, $\dot{\bar{\varepsilon}}^p, \dot{\bar{\varepsilon}}_0^p$ 는 각각 동적등가소성변형률속도와 정적 등가소성변형률속도이다. n 은 재료 상수이다. 그림 3 에서 사각형은 실험데이터이고, 점선은 식(1)을 사용하여 예측한 데이터이다. σo = 540 [MPa], n= 0.019 를 사용하였다.

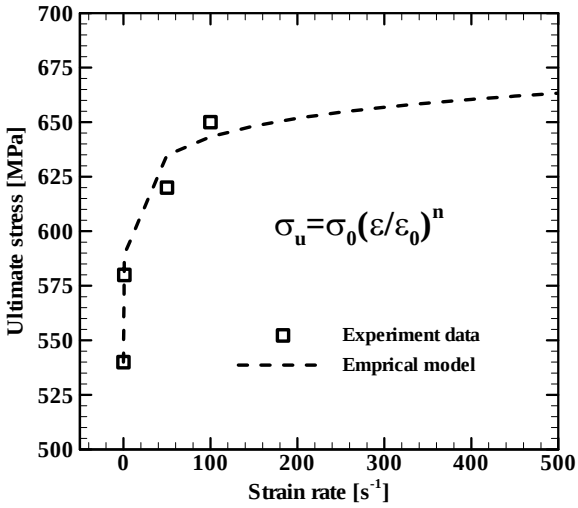

Fig. 3 Dependence of yield stress on strain rate

4. 유한요소해석

본 연구에서는 중변형률 인장실험과정을 상용유한요소 프로그램 ABAQUS 6.6 를 사용하여 모사를 하였다. 하중 조건 및 시편의 형상을 고려하여 대칭조건을 적용하였다. 그림 4 는 시편의 3 차원 요소를 나타낸다. 인장실험에 사용된 최소요소크기는 500 μm 이고 최대요소크기는 1700 μm 이다. 총 소요된 요소개수는 1700 개이다. 요소종류는 3 차원 8 절점 저감적분요소이다. 외연적 시간 적분법(Explicit)으로 중변형률 인장해석을 모사하였다. 각 변형률 속도에 맞는 하중속도를 계산하여 모사에 적용하였다.

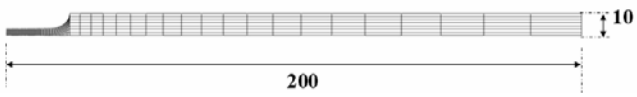

Fig. 4 finite element mesh of the tensile test specimen

5. 결과

중변형률 인장실험결과(그림 2)를 보면 변형률 속도가 증가하면 유동응력의 편차가 증가된다. 그렇기 때문에 본 연구에서는 각각의 변형률 속도에서 연신률이 작은 실험을 기준으로 Gurson 상수를 산출하였다. 표 1 은 변형률 속도에 따른 Gurson 상수를 나타낸 것이다. 그림 5 는 산출된 Gurson 상수를 적용하여 중변형률 인장실험 모사 결과를 타낸 것이다. 항복응력 근처의 유동응력은 실험데이터와 차이를 보인다. 하지만 전체적인 응력-변형률을 비교하면 실험 결과와 유한요소해석 결과가 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

Table 1 Comparison of measured roughness data

Strain rate [1 s^{-1}]	f_c	f_f
1	0.006	0.35
50	0.0071	0.355
100	0.0095	0.4

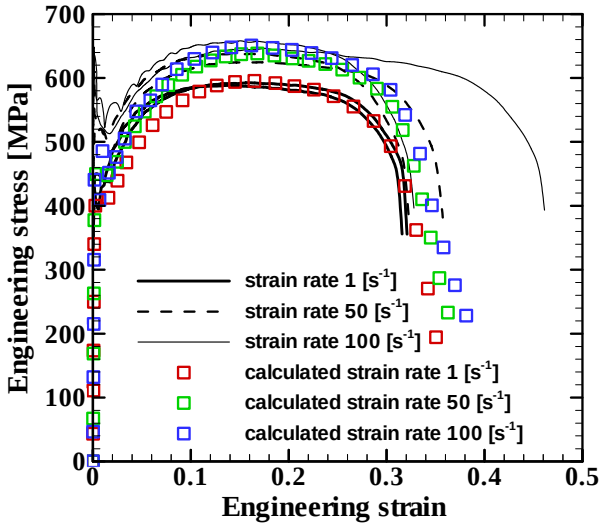

Fig. 5 Comparison of experimental results with calculated results

6. 결론

(1) SA-516 Gr.70 재료는 변형률 100 s-1 까지 변형률속도의 증가에 따라 유동응력과 연신률이 같이 증가하는 경향을 보인다.

(2) 본 연구에서 산출한 Gurson 상수는 중변형률 속도에서 잘 일치하는 것을 확인 하였다.

후기

본 연구는 2 단계 두뇌한국사업의 지원으로 수행되었고, 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Gurson, A.L., “Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part 1 –Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media,” *Journal of Engineering Material and Technology*, **99**, 2-15, 1977.
2. Tvergaard, V. and Needleman, A., “Analysis of the Cup-Cone Fracture in a Round Tensile Bar,” Acta Metallurgica, **32**, 1, 157-169, 1984
3. 장윤석, 이태린, 최재붕, 석창성, 김영진, “손상역학에 근거한 파괴시편의 균열길이와 두께 영향 평가,” 한국정밀공학회지, **23**, 4,116-123, 2006.
4. Tvergaard, V., and Needleman, A., " Analysis of the Charpy V-notch test for welds," *Engineering Fracture Mechnics*, **65**, 6, 627-643, 1988.
5. Tvergaard, V., “On Localization in Ductile Materials Containing Spherical Voids,” *International Journal of Fracture*, **18**, 4, 237-251, 1982
6. Tvergaard, V., “Influence of Voids on Shear Band Instabilities Under Plane Strain Conditions,” *International Journal of Fracture*, **17**, 389-407, 1981.