

복합 연속체 파괴 역학에 기초한 초고강도강 판재의 구멍 넓힘 시험 성형성 평가

마닝¹· 박태준¹· 김돈건¹· 유동훈¹· Chongmin Kim²· 정관수[#]

Formability Evaluation of Advanced High-strength Steel Sheets in Hole Expansion Based on Combined Continuum-Fracture Mechanics

N. Ma, T. Park, D. Kim, D. Yoo, C. Kim, K. Chung

Abstract

In order to predict failure behavior of advanced high-strength steel sheets (AHSS) in hole expansion tests, damage model was developed considering surface condition sensitivity (with specimens prepared by milling and punching: 340R, TRIP590, TWIP940). To account for the micro-damage initiation and evolution as well as macro-crack formation, the stress triaxiality dependent fracture criterion and rate-dependent hardening and ultimate softening behavior were characterized by performing numerical simulations and experiments for the simple tension and V-notch tests. The developed damage model and the characterized mechanical property were incorporated into the FE program ABAQUS/Explicit to perform hole expansion simulations, which showed good agreement with experiments.

Key Words : AHSS; Hole Expansion Ratio (HER); Damage Model; Stress Triaxiality Fracture Criterion; Rate-dependent hardening; 340R; TRIP590; TWIP940

1. 서론

자동차의 경량화 및 안전성 향상을 위한 대안으로 주목을 받고 있는 초고강도강은 일축 인장 시 기존의 상용 강재나 경량 합금에 비하여 크게 향상된 인장 강도와 연성을 보인다. 그러나 일부 초고강도강 판재의 경우 구멍 넓힘 시험의 성형성이 일축 인장시의 성형성과 크게 다른 양상을 보이는 경우가 있다.

본 연구에서는 자동차용 초고강도강 판재의 구멍 넓힘 시험에서의 파괴 거동을 예측하기 위하여 시편 가공 방법에 따른 표면 상태의 차이를 고려한 손상 모델을 개발하였다. 340R, TRIP590, TRIP940의 서로 다른 세 가지 강에 대해서 일축

인장 시험과 V-노치 시험을 수행하였으며, 이 결과를 토대로 전산모사를 통한 보정 작업을 거쳐 삼축 응력에 의존적인 파괴 이론과 속도 의존적인 경화 및 연화 거동에 필요한 초고강도강 판재의 물성을 구하였다. 개발된 모델 및 물성을 상용 FEM code인 ABAQUS/Explicit에 적용하여 구멍 넓힘 시험을 전산모사하여 실험 결과와 비교하였다.

2. 이론

2.1 항복 함수

판재의 비등방성 항복 거동을 구현하기 위하여 다음과 같은 형태의 직교등방성 이차 항복함수인 Hill48을 사용하였다[1].

1. 서울대학교 재료공학부

2. General Motors R&D Center

교신저자: 서울대학교 재료공학부, kchung@snu.ac.kr

$$F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\sigma_x^2 + 2M\sigma_y^2 + 2N\sigma_z^2 = (G+H)\bar{\sigma}^2 \quad (1)$$

F, G, H, L, M, N 은 비등방성 계수이며, x, y, z 는 직교 비등방성 주축 방향이다. 이에 대응하는 등가 변형률 증가량은 다음과 같다.

$$(G+H) \left[\frac{Fd\epsilon_x^2 + Gd\epsilon_y^2 + Hd\epsilon_z^2}{FG+GH+HF} + \frac{4d\epsilon_x^2}{3(G+H)} + \frac{4d\epsilon_y^2}{3(G+H)} + \frac{2d\epsilon_z^2}{N} \right] = d\bar{\epsilon}^2 \quad (2)$$

2.2 손상 모델

연속체 역학의 관점에서 거시적인 손상의 형성을 모사하기 위하여 다음과 같은 응력을 기반으로 한 단순한 모델을 사용하였다.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} g(\sigma_y) d\bar{\epsilon} = C \quad (3)$$

여기서 g 는 응력 요소 σ_y 에 대한 가중함수이며, $\bar{\epsilon}_f$ 는 파괴가 일어날 누적 등가 변형률이다. 본 연구에서는 손상 변수 w 가 식 (4)와 같은 조건을 만족할 때 거시적인 손상이 형성된다고 가정하였다. 손상 거동 과정에서 개략적인 등가 변형률에 대한 등가 유효 응력 곡선은 Fig. 1과 같다. 기공과 같은 결함이 생성되고 결합하며 형성되는 미시적 손상은 전위나 트위닝 등에 의한 유효 응력의 상승을 상쇄시키며 경합하게 되며, 미시적 손상이 계속 진행되면 등가 유효 응력이 감소하는 연화 거동으로 이어진다. 이후 등가 변형률이 임계치에 이르면 거시적인 손상이 형성된다.

$$\omega = \int \frac{1}{\bar{\epsilon}_f(\eta)} d\bar{\epsilon} = 1.0 \quad (4)$$

$\bar{\epsilon}_f$ 는 삼축 응력이 일정하게 유지되며 파괴가 일어날 때의 임계 누적 등가 변형률이며, 다음 식 (5)와 같이 정의되는 삼축 응력 η 에 의존적이다.

$$\eta = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / (3\bar{\sigma}) \quad (5)$$

만약 삼축 응력이 변형 중 일정하게 유지되지 않는다면, 변형 이력에 의존적인 임계 누적 등가 변형률 $\bar{\epsilon}_f^*$ 은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\bar{\epsilon}_f^*(\eta) = \int d\bar{\epsilon} + \bar{\epsilon}_f(\eta)(1-\omega) \quad (6)$$

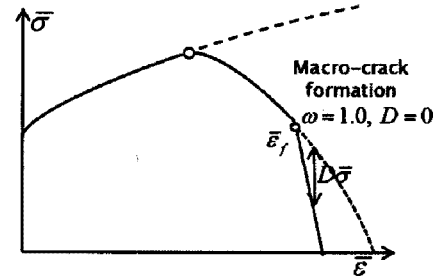


Fig. 1 Schematic view of the damage model

3. 물성 측정

3.1 항복 함수

본 연구에서는 일반 강재로 1.2mm 두께의 340R을, 초고강도강으로 1.2mm 두께의 TRIP590와 1.47mm 두께의 TWIP940을 사용하였다. ASTM-8M 규격의 시편을 절삭(milling) 가공으로 압연 방향에 0, 45, 90도 방향으로 추출하여 일축 인장 시험을 수행하였다. 비등방성 계수는 Table 1과 같다.

Table 1 Comparison of measured roughness data

Material	TWIP940	TRIP590	340R
F	0.4906	0.3914	0.4941
G	0.5507	0.4950	0.5701
H	0.4493	0.5050	0.4299
N	1.4615	1.1347	1.1494

3.2 손상 모델

일축 인장 실험을 통해 얻은 응력 곡선과 전사 모사를 통해 얻은 응력 곡선이 균일 변형 이후에도 일치하도록 하여 미시적 손상에서 거시적 손상에 이르는 재료의 물성을 구하였다. Fig. 2에 위 과정을 통해 구한 세 물질의 속도 의존적인 경화 및 연화 거동의 물성과 이 물성을 사용하여 일축 인장 시험을 전사모사 한 결과를 나타냈다.

손상 모델의 임계 누적 등가 변형률 $\bar{\epsilon}_f$ 가 삼축 응력에 대한 역함수라는 가정 하에, 일축 인장 실험을 통해 얻어진 시편의 파단 발생 지점을 이용해 임계 누적 등가 변형률 곡선을 구하였다[2]. Fig. 3에 일축 인장 시 임계 누적 등가 변형률의 이력을 균일 삼축 응력의 임계값과 비교하였다.

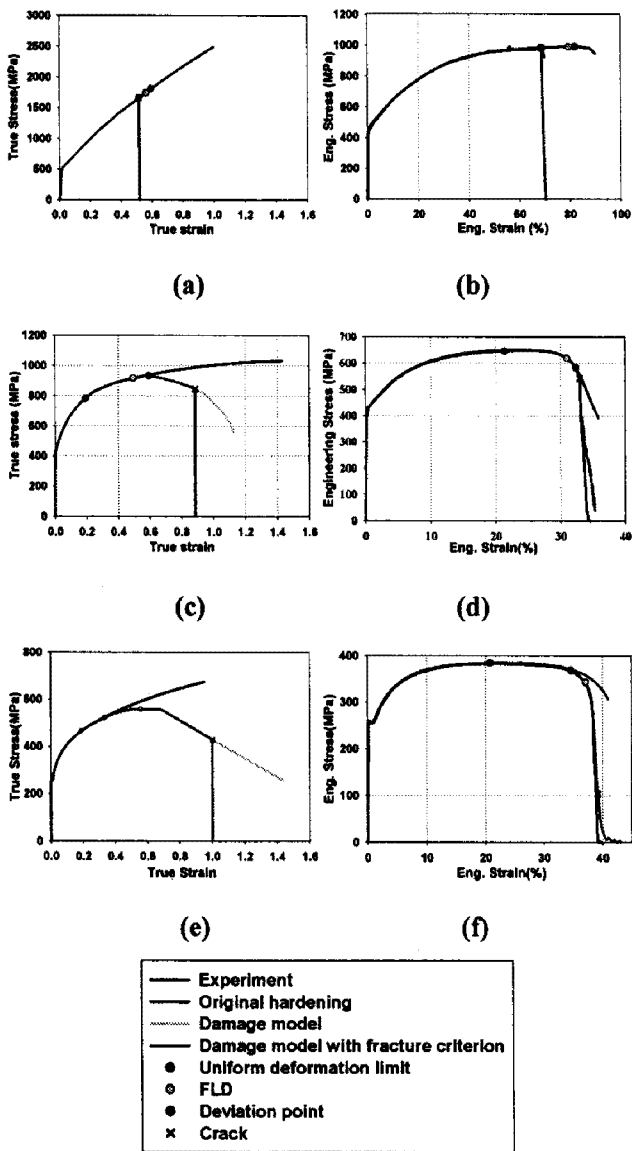
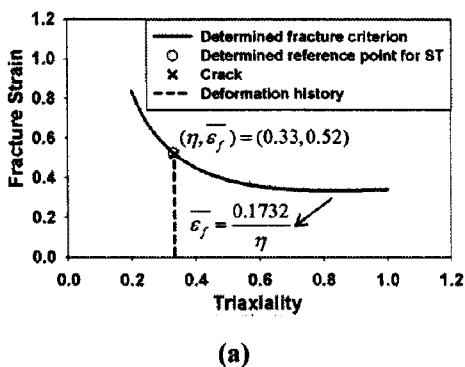
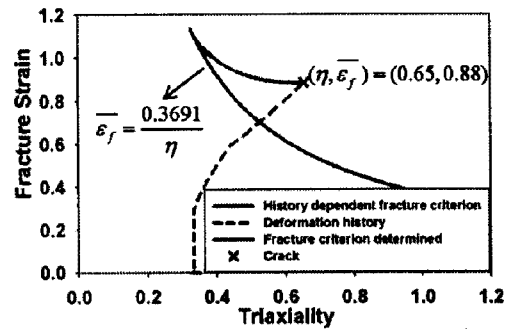


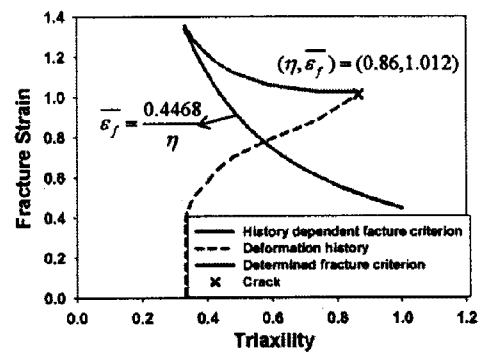
Fig. 2 The macro-crack resistance behavior characterized by uni-axial tensile test results: (a)~(b) TWIP940, (c)~(d) TRIP590, (e)~(f) 340R and (g) legend in use



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 The triaxiality-dependent fracture criteria obtained from uni-axial tensile test simulations considering deformation history dependence: (a) TWIP940 (b) TRIP590 (c) 340R

표면 조건에 대한 손상 거동의 차이를 고려하기 위해 타공(punching)으로 시편을 가공하여 인장 시험을 수행하였다. 음의 삼축 응력 값을 갖는 임계 변형률 $\bar{\epsilon}_f$ 값을 조절하여 타공 가공에서 발생하는 예비 변형률을 조절하였으며, 0.5 이상의 높은 삼축 응력에 대한 임계 변형률은 V-notch 실험을 통해 보정하였다[3]. Fig. 4에 최종적으로 얻은 임계 누적 등가 변형률의 곡선을 나타냈다.

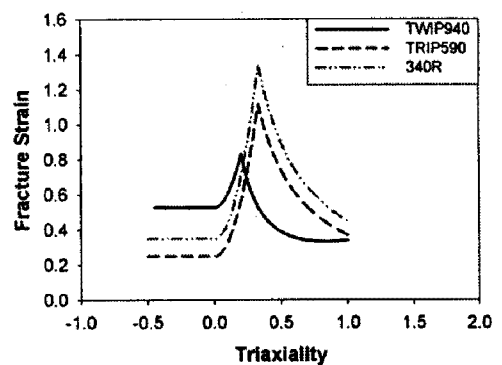


Fig. 4 Comparison of the fracture criteria

4. 구멍 넓힘 시험

구멍 넓힘 시험은 Fig. 5에 묘사된 것과 같이 판재에 지름 10mm의 구멍을 내고 원뿔 형태의 펀치로 구멍을 넓히며 파단이 일어날 때까지의 반지름을 변화를 살펴보는 시험이다. 초기 지름에 대한 최종 지름의 비율인 구멍 넓힘 비율(HER: Hole Expansion Ratio)을 통해 성형성을 판별할 수 있다. 절삭과 타공의 두 가지 방법으로 시편의 구멍을 가공하여 실험을 하였으며, ABAQUS/Explicit을 이용하여 전산모사 하였다. 경화 거동 및 연화 거동을 보다 정확히 모사하기 위해 속도 의존적인 물성을 사용하였고, 절삭 시편을 사용한 경우에는 예비 변형률이 없다는 가정을 하고, 타공 시편을 사용한 경우에는 타공 과정을 미리 전산모사 하여 예비 변형률을 갖게 하였다. 각각의 실험 및 전산모사의 결과는 Fig. 6에 비교하였다.

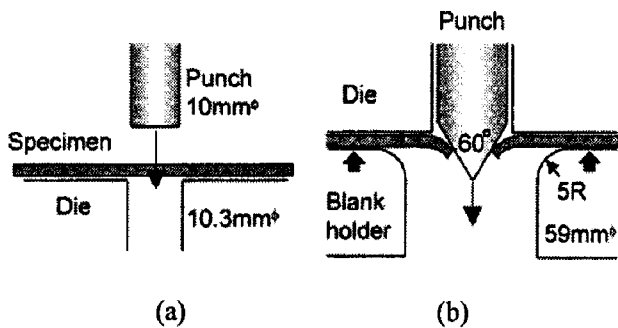
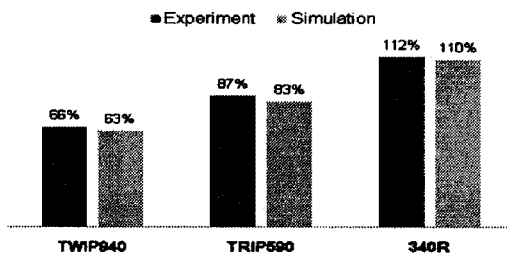
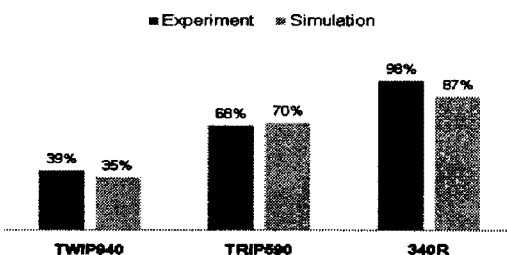


Fig. 5 Schematic view of (a) punching and (b) hole expansion test



(a)



(b)

Fig. 6 Hole expansion test results: (a) hole prepared by milling (b) hole prepared by punching

5. 결론

초고강도강 판재의 구멍 넓힘 시험에서의 파괴 거동을 예측하기 위하여 변형 이력에 의존적인 손상 모델을 개발하였다. 미시적 손상에서 거시적 손상에 이르는 재료의 거동을 정확히 모사하기 위해 일축 인장 시험에 대한 실험과 전산모사의 비교를 통해 속도 의존적인 경화 및 연화 거동의 물성을 측정하였다. 일축 인장 시험과 V-노치 시험을 통해 삼축 응력에 대한 임계 누적 등가 변형률을 구하였으며, 시편 가공 방법에 따른 표면 상태의 차이를 고려하기 위해 절삭 가공 이외에 타공 가공으로 구멍을 뚫은 시편의 일축 인장 시험을 수행해 타공 가공 시 적절한 예비 변형률을 갖도록 하는 음의 삼축 응력에 대한 임계 누적 등가 변형률을 구하였다. 개발된 손상 모델 및 측정된 물성을 ABAQUS/Explicit에 적용하여 구멍 넓힘 시험을 전산모사한 결과 실제 실험과 매우 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. TWIP940 강은 340R 강에 비해 낮은 임계 누적 성형 등가 변형률을 갖지만, 일축 인장시 경화 거동의 특성으로 균일 변형이 비교적 오래 유지되어 340R 강과 비슷한 성형성을 갖는다. 반면 구멍 넓힘 시험에서는 두 강재 모두 균일 변형이 유지되므로 임계 변형률이 높은 340R이 더 높은 성형성을 보인다.

후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(R11-2005-065).

참 고 문 헌

- [1] R. Hill, 1950, The mathematical theory of plasticity, Oxford University Press, Oxford, pp. 318~321.
- [2] Y. Bao, T. Wierzbicki, 2004, On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space, Int. J. Mech. Sci., Vol. 46, pp. 81~98.
- [3] ASTM international, 2003, Standard test method of sharp-notch tension testing of high-strength sheet materials, ASTM E 338-03