

## 복합 연속체-파괴 역학에 기초한 초고강도강의 충격 특성 평가

마닝<sup>1</sup>· 박태준<sup>1</sup>· 김돈건<sup>1</sup>· 석동윤<sup>1</sup>· Chongmin Kim<sup>2</sup>· 정관수<sup>#</sup>

### Impact Performance Evaluation of Advanced High-strength Steel Sheets Based on Combined Continuum-Fracture Mechanics

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

#### Abstract

Based on combined continuum-fracture mechanics, fracture criterion was utilized to predict impact performance of advanced high-strength steel sheets: 340R and TWIP940. The macro-crack propagation behavior at high stress triaxiality was characterized by V-notch tests while deformation behavior at high strain rate was characterized by simple tension tests with various cross head speeds. The characterized mechanical properties were incorporated into the FE program ABAQUS/Explicit to simulate the Charpy impact tests, which showed good agreement with experiments.

**Key Words** : AHSS, Charpy Impact Tests, Damage Model, Stress Triaxiality Fracture Criterion, Rate-dependent hardening, 340R, TWIP940

#### 1. 서론

초고강도강은 기존의 상용 강재에 비하여 크게 향상된 인장 강도 및 연성을 가져 자동차용 구조재로 주목 받고 있다. 그러나 초고강도강이 기존의 상용 강재를 대체하기 위해선 충돌 안정성과 같은 구조재로서 필요한 물성에 대한 면밀한 검토가 필요하다.

본 연구에서는 TWIP940 강 판재와 340R 강 판재에 대한 샤르피 충격 시험(Charpy impact test)을 수행하여 초고강도강의 충격 특성을 평가하였다. 일축 인장 시험 및 V-노치 시험의 결과를 이용하여 미시적 손상이 진행되어 거시적 손상에 이르는 임계 등가 변형률의 삼축 응력에 대한 의존도를 살폈으며, 충격 거동의 예측에 있어서 매우 중요한 역할을 하는 거시적 손상의 진행 거동을 V-

노치 시험을 통해 물성화 하였다. 정적인 변형 거동의 특성뿐 아니라 높은 변형 속도 하에서의 거동 특성을 측정하기 위해서 높은 변형률 속도를 갖는 일축 인장 시험을 추가적으로 수행하였다.

#### 2. 이론

##### 2.1 항복 함수

판재의 비등방성 항복 거동을 구현하기 위하여 식 1과 같은 직교등방성 이차 항복함수인 Hill48을 평면 응력 조건을 가정하여 사용하였다[1]. 식에서  $F$ ,  $G$ ,  $H$ ,  $L$ ,  $M$ ,  $N$ 은 비등방성 계수이며,  $x$ ,  $y$ ,  $z$ 는 직교 비등방성 주축 방향이다.

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

1. 서울대학교 재료공학부

2. General Motors R&D Center

# 교신저자: 서울대학교 재료공학부, kchung@snu.ac.kr

## 2.2 손상 거동

변형을 겪을 때 개략적인 등가 변형률에 대한 등가 유효 응력 곡선은 Fig. 1과 같다. 등가 변형률이 임계치에 이르면 거시적인 손상이 형성된다.

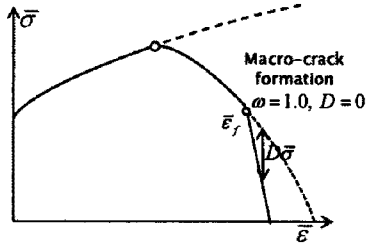


Fig. 1 Schematic view of the damage model

손상 변수  $w$ 가 다음 식 (1)와 같은 조건을 만족할 때 거시적인 손상이 형성된다고 가정하였다.

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

여기서  $\bar{\epsilon}_F$ 는 삼축 응력이 일정한 조건에서 거시적 손상이 일어나는 임계 누적 등가 변형률이며, 삼축 응력  $\eta (= \sigma_M / \bar{\sigma}, 3\sigma_M = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ 과 변형 이력에 따라 식 (2)와 같은 형태를 갖는다.

$$\bar{\epsilon}_F^*(\eta) = \int d\bar{\epsilon} + \bar{\epsilon}_F(\eta)(1 - \omega) \quad (2)$$

## 3. 물성 측정

본 연구에서는 초고강도강으로 두께 1.47mm의 TWIP940 강 판재를 사용하였으며, 비교 대상으로 두께 1.2mm의 340R 강 판재를 사용하였다. 일축 인장 시험으로 측정된 두 재료의 소성 변형 거동은 동학회지에 자세히 발표하였다[2~3].

### 3.1 고속 인장 시험

340R 강은 강화 거동이 변형률 속도에 비교적 큰 영향을 받으므로 Fig. 2의 형태의 시편을 압연 방향에 평행하게 추출하여 고속 인장 시험을 실시하였다. TWIP940 강은 소성 변형이 변형률 속도에 대해 크게 영향을 받지 않는다고 가정하였다 [3]. 변형률 속도가 0.001인 인장 시험시의 경화

거동을 식 (3)과 같은 거듭제곱(power law)의 꼴로 변환한 후, 변형률 속도 10, 100, 200, 500의 고속 인장 시험 결과를 토대로 식 (4)의 변형률 민감도  $m$ 의 평균을 구하였다. 평균값은 0.021이며 시험 결과는 Fig. 3과 같다.

$$\bar{\sigma} = K(\bar{\epsilon}_0 + \bar{\epsilon})^n \left( \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right)^m \quad (3)$$

$$m_i = \frac{\ln(\bar{\sigma}_i / \bar{\sigma}_0)}{\ln(\dot{\bar{\epsilon}}_i / \dot{\bar{\epsilon}}_0)} \quad (4)$$

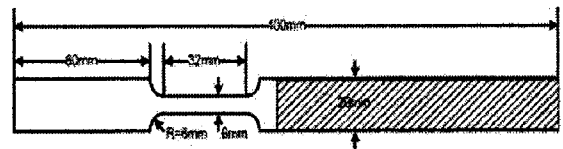


Fig. 2 The tensile specimen for the high speed strain rate sensitivity test

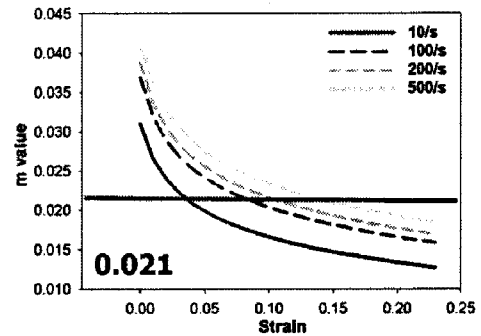


Fig. 3 High speed strain rate sensitivity for 340R

### 3.2 V-노치 시험

V-노치 시험은 변형 초기부터 노치에 응력이 집중되므로 재료의 거시적 손상에 대한 저항성 및 손상의 진행 거동을 살필 수 있다. 판재의 압연 방향으로 Fig. 4와 같은 형태의 ASTM E338-03 규격의 시편을 절삭(milling) 가공으로 추출하였다[4].

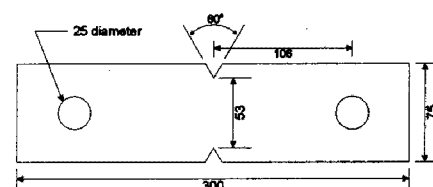


Fig. 4 Dimensions of V-notch specimen (unit: mm)

실험 결과를 토대로 손상 모델을 적용한 유한 요소 해석을 수행하여 일축 인장 시험을 통해 구한 손상 거동 물성을 보정하였다. V-노치 시험으로 일축 인장 시험보다 높은 삼축 응력을 갖는 임계 누적 등가 변형률을 구할 수 있었다. 실험 및 전산모사의 결과와 이를 통해 구한 물성을 Fig. 5와 Fig. 6에 정리하였다.

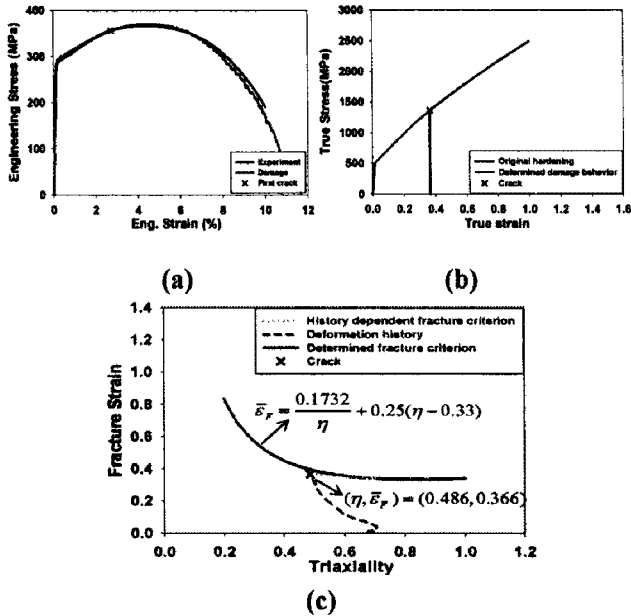


Fig. 5 V-notch simulation results for TWIP940: (a) macro-crack propagation behavior, (b) used constitutive law, (c) deformation path change of the critical integration point

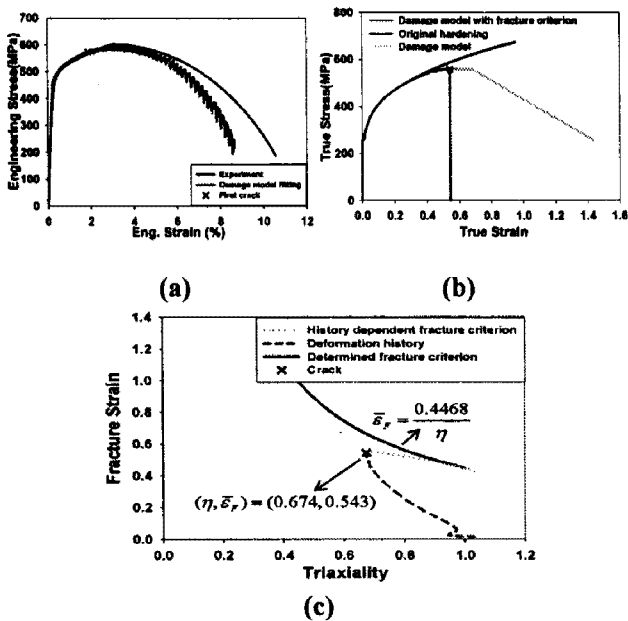


Fig. 6 V-notch simulation results for TWIP940: (a) macro-crack propagation behavior, (b) used constitutive law, (c) deformation path change of the critical integration point

#### 4. 샤르피 충격 시험

초고강도 강의 충격 특성을 살피기 위해 샤르피 충격 시험(Charpy impact test)을 수행하였다. Fig. 7 (a)와 같은 형상의 시편을 판재의 압연 방향에 길이가 평행하도록 추출하였다. 실험에서는 두 개의 모루가 받치고 있는 시편을 최고 속도 5.4m/sec를 갖는 날카로운 추로 충격을 가해 총 465J의 운동 에너지를 주었다.

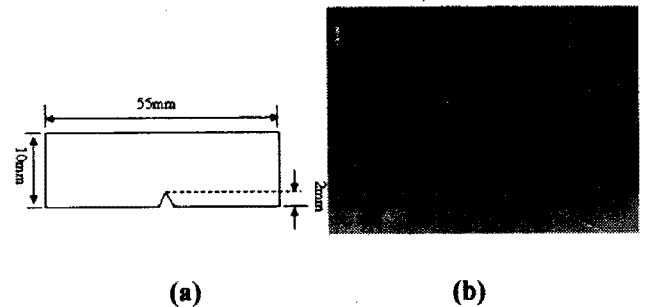
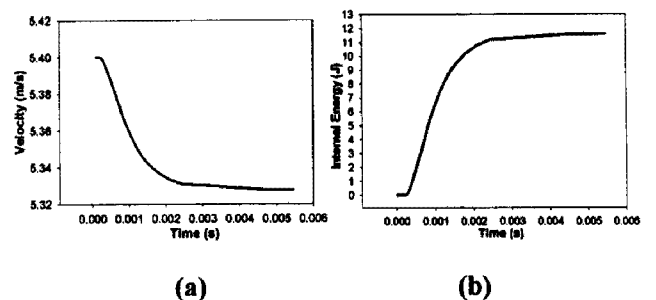


Fig. 7 (a) Dimensions of the specimen and (b) schematic view of the modeling for Charpy impact test

유한요소 해석은 ABAQUS/Explicit을 이용하였으며, 정확성을 위해 0.025mm x 0.12mm x 0.2mm 크기의 매우 작은 3차원 연속체 요소를 사용하였다. 전산모사에 사용된 개괄적인 모델의 형상은 Fig. 7 (b)와 같다. TWIP940 강과 340R 강의 전산모사에서 얻은 추의 속도 변화, 시편의 에너지 흡수량, 파괴가 가장 먼저 일어나는 지점의 변형 이력을 각각 Fig. 8과 Fig. 9에 정리하였다.



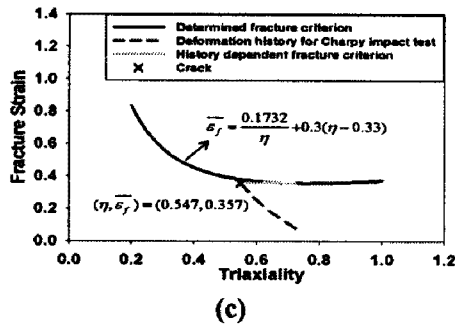


Fig. 8 Charpy impact simulation results for TWIP940: (a) velocity of the striker, (b) internal energy of the specimen and (c) the deformation path change of the critical integration point

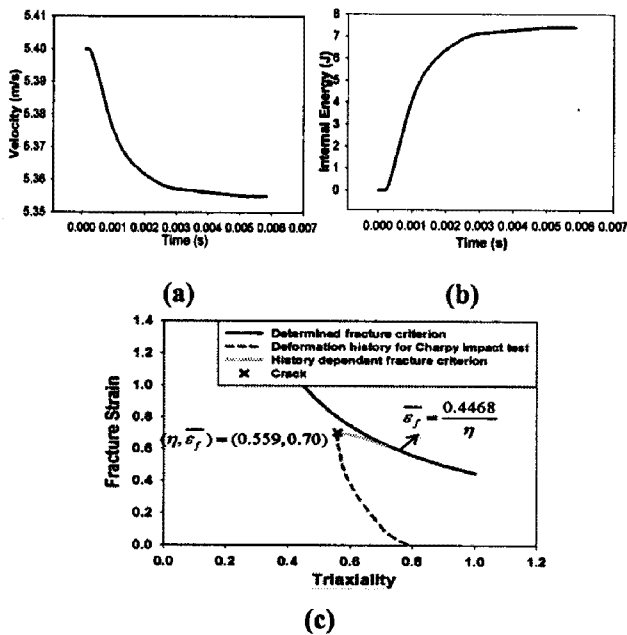


Fig. 9 Charpy impact simulation results for 340R: (a) velocity of the striker, (b) internal energy of the specimen and (c) the deformation path change of the critical integration point

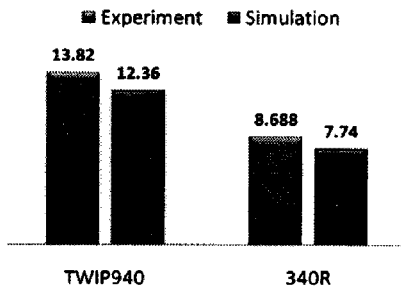


Fig. 10 The simulated and measured impact energy in

### the Charpy impact test

Fig. 10은 시편이 흡수한 에너지를 실험 결과와 비교한 것으로, 잘 일치함을 확인할 수 있다.

### 4. 결론

본 연구에서는 TWIP940 강 판재와 340R 강 판재에 대한 샤르피 충격 시험을 수행하여 초고강도강의 충격 특성을 일반 강재와 비교 평가하였다. 일축 인장 시험에서 구한 두 판재의 손상 거동을 V-노치 시험을 통해 보정하였으며, 임계 누적 등가 변형률을 넘어선 이후의 거동은 유효응력이 수직으로 떨어질 정도의 급격한 연화 거동으로 가정하였다. TWIP940 강은 변화율 속도 민감도를 무시하였으며, 340R 강은 고속 인장 시험을 통해 변화율 속도 민감도를 구하였다. 측정된 손상 모델의 물성을 ABAQUS/Explicit에 적용하여 충격 시험의 결과를 전산모사 하였으며, 실험 결과와 유사한 결과를 얻었다. TWIP940 강 판재가 더 두꺼운 두께와 매우 높은 인장 강도를 가지고 있음에도 340R 강 판재에 비하여 손상에 대한 저항성이 낮기 때문에 충격 흡수 에너지의 크기는 예상보다 큰 차이가 나지 않았다.

### 후기

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

### 참고 문헌

- [1] R. Hill, 1950, The mathematical theory of plasticity, Oxford University Press, Oxford, pp. 318~321.
- [2] 마닝, 박태준, 김돈건, 유동훈, Chongmin Kim, 정관수, 2009, 복합 연속체 파괴 역학에 기초한 초고강도강 판재의 구멍 넓힘 시험 성형성 평가, 추계학술대회 논문집, 한국소성가공학회, pp. 237~230
- [3] 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.
- [4] ASTM international, 2003, Standard test method of sharp-notch tension testing of high-strength sheet materials, ASTM E 338-03