

# 초고강도 1470 MPa급 판재의 파단 이방성 실험 결과에 관한 연구

이진우<sup>1,\*</sup>, 봉혁종<sup>2</sup>, 김대용<sup>3</sup>

## Investigation on the Experimental Results of Anisotropic Fracture Behavior for UHSS 1470 MPa Grade Sheets

J. Lee, H. J. Bong, D. Kim

(Received March 17, 2023 / Revised March 19, 2023 / Accepted March 24, 2023)

### Abstract

In the present work, the ductile fracture behaviors of ultra-high strength steel sheets along the different loading directions are investigated under various loading paths. Three loading paths, i.e., in-plane shear, uniaxial tension, plane strain tension deformations, are considered, and the corresponding specimens are described. The experiments are conducted using the digital image correlation (DIC) system to analyze the strain at the onset of the fracture. The experimental results show that the loading path for each specimen sample is linear, and different values of the fracture strains for the loading direction from the plane strain tension are observed. The ductile fracture model of the modified Mohr-Coulomb (MMC) is constructed based on the experimental data and evaluated along the rolling direction and transverse direction under various loading paths.

**Keywords:** UHSS, Anisotropic fracture, Sheet metal

### 1. 서론

최근 자동차 산업에서는 차체의 충돌 성능 향상 및 자동차 연비 개선을 위한 경량화의 목적으로 초고강도강 (ultra-high strength steel, UHSS) 판재 적용이 확산되고 있다 [1]. 하지만, 높은 인장 강도 (1.5 GPa 이상) 및 낮은 연신율로 인해 적은 양의 소성 변형에서도 판재의 파단 현상이 나타난다. 초고강도강 판재의 파단 특성 또한 고강도강 (advanced high strength steel, AHSS) 과 유사하게 네킹 (Necking) 현상이 거의 보이지 않고 파단이 발생하고 있어 기존의 판재 안전변형영역 판단에 활용되는 성형한계도 (forming limit curve, FLC) 로는 초고강도강 판재의 파단 예측하기에는 어려움이 있다 [2]. 기존의 성형한계도의 경우 일축 인장에서 이축 인장 사이의 하중

경로 (loading path)에서 성형성 평가를 진행하지만, 판재의 파단이 발생하는 하중 경로는 단축 압축 - 전단 변형 - 일축 인장 경로 또한 포함하고 있다 [3~6]. 이와 같은 이유로 다양한 하중 경로를 포함한 파단 특성 평가가 필요하다.

박판 소재의 주된 생산 공정은 압연 공정이며, 압연 방향 (rolling direction, RD)에 따른 판재 이방성 (향복 및 가공 경화)에 대한 연구는 많이 수행되었으며 [7], 이러한 이방성 (anisotropy)은 하중 경로와 더불어 판재의 파단 특성에 영향을 미친다. 따라서 초고강도강의 자동차 부품 성형 전산모사해석 진행 과정에서 파단특성 분석을 위해서는 하중 방향 및 하중 조건에 따른 파단 물성 분석이 필요하다.

본 논문은 초고강도강 판재 파단 특성을 다양한 방향 (RD, TD)과 하중 조건 (일축 인장, 평면변형률 인장, 전단 변형)에서 획득한 파단 물성을 바탕으로 파단 이방성을 확인하고, 파단재료모델 상수를 결정하였다.

1. 울산대학교 기계공학부, 조교수  
2. 한국재료연구원, 선임연구원  
3. 전남대학교 지능형미래모빌리티융합학과, 교수  
\* Corresponding Author: University of Ulsan  
E-mail: jinwoolee@ulsan.ac.kr  
ORCID: 0000-0003-4722-3079

## 2. 실험 방법

### 2.1 실험 조건

준정적 (quasi-static) 조건에서의 파단 특성 평가 실험을 수행하기 위해서 Fig.1 의 만능시험기 (universal testing machine) 과 실시간 변형률 측정을 위한 ARAMIS 3D DIC 시스템을 활용하였다. 본 연구에서는 1.2mm 두께의 초고강도 1470 MPa 급 판재를 사용하여 판재의 압연 방향 및 압연 방향의 수직 방향 (transverse direction, TD)에서 파단 물성을 얻을 수 있는 시편을 제작하였다. 판재의 기초 기계적 물성을 얻기 위해서 추가적으로 대각선 방향의 일축 인장도 같이 수행하였다.

다양한 하중 조건에서의 판재 파단 물성을 얻기 위해서 일축 인장, 평면 변형률 인장, 전단 변형 하중 조건에서 실험을 수행하였다. 일축 인장 시험은 ASTM-E8 규격 형상의 시편을 사용하였으며, 평면 변형률 및 전단 변형 시편은 Fig.2 의 시편 형상을 사용하였다. 준정적 하중 조건 유지를 위해서 일축 인장 시험 수행 속도는 0.05mm/sec, 그리고 평면 변형률과 전단 변형 시험 수행 속도는 0.025mm/sec 로



Fig. 1 Experimental set-up using the universal testing machine with ARAMIS 3D DIC system

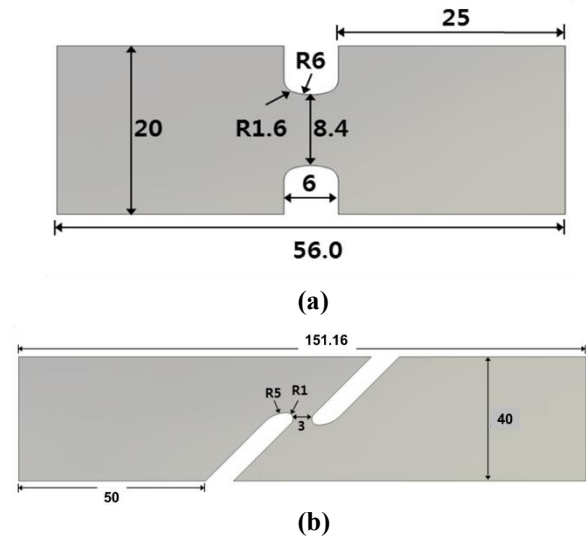


Fig. 2 Specimen dimensions for (a) plane strain tension, and (b) in-plane shear deformation (unit: mm)

진행하였다. 변형률 측정을 위한 DIC 시스템은 1초에 8프레임을 저장하였다.

$$T = \frac{\sigma_m}{\sigma_e} \quad (1)$$

다양한 하중 조건인 일축 인장, 평면 변형률, 전단 변형은 식 (1)을 이용하여 삼축 응력 (Stress triaxiality) 의 값으로 계산되어진다. Eq. (1) 에서  $\sigma_m$  은 평균 응력 값을,  $\sigma_e$  는 von-Mises 유효 응력 값을 나타낸다. 이상적으로는 일축 인장의 하중은 삼축 응력이 1/3, 평면 변형률은 0.577, 전단 변형의 경우 0.0 의 삼축 응력값으로 계산되어야 한다.

방향별 일축 인장 시험을 통하여 얻은 초고강도 소재의 기초 기계적 물성을 Table 1 과 같이 정리하였다.

Table 1 Basic mechanical property of 1470 MPa grade steel sheets

E (GPa)	$\nu$	$\sigma_{RD}$ (MPa)	$\sigma_{DD}$ (MPa)
205	0.33	1330	1334
$\sigma_{TD}$ (MPa)	r-value (RD)	r-value (DD)	r-value (TD)
1327	0.94	1.03	1.04

\* E: Young' modulus,  $\nu$ : Poisson's ratio,  $\sigma$ : Yield stress, r-value: Lankford coefficient

### 3. 파단 모델링 및 결과

#### 3.1 파단 모델링

실험 측정된 초고강도 1470 급 판재의 파단 특성결과를 대표적 현상학적 파단 모델인 Mohr-Coulomb (MC) 모델을 기반으로 파단 특성을 구성하였다. MC 모델의 경우 삼축 응력 ( $T$ )을 기반으로 하여 파단 특성을 모사하였고, 최근 삼축 응력 이외에 Lode angle 의 영향도를 추가한 Modified Mohr-Coulomb (MMC) 모델이 개발되었고, 본 연구에서는 MMC 모델을 활용하였다 [8]. 식 (2)는 MMC 모델을 Swift 등방 경화 (isotropic hardening) 과 함께 활용하여 나타낸 것으로 재료 상수는  $K$ ,  $n$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  이다. 모델 계수  $K$  와  $n$  의 값은 일축 인장 시험 결과에서 결정되며  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  의 값은 판재의 파단 시험을 통해서 결정된다. 그리고 식 (2)에 표현된 Lode angle parameter ( $\bar{\theta}$ )는 식 (3)에 적혀 있는 Lode angle  $\theta$ 의 함수이고  $\theta$ 는 편차응력의 불변양인  $J_2$ ,  $J_3$ 의 함수로 표현된다. 참고로, Lode angle parameter 값의 범위는 -1에서 1이며 Lode angle 값의 범위는 0에서  $\pi/3$ 이다. 박판 소재의 경우 평면 응력 (plane stress) 조건을 가정하기 때문에 삼축 응력 ( $T$ )과 Lode angle parameter의 관계를 식 (3)으로부터 얻을 수 있다.

$$\varepsilon_f = \left\{ \frac{K}{c_2} \left[ c_3 + \frac{\sqrt{3}}{2-\sqrt{3}}(1-c_3) \left( \sec\left(\frac{\pi\bar{\theta}}{6}\right) - 1 \right) \right] \right\}^{\frac{1}{n}} \times \left[ \sqrt{\frac{1+c_1^2}{3}} \cos\left(\frac{\pi\bar{\theta}}{6}\right) + c_1 \left( T + \sin\left(\frac{\pi\bar{\theta}}{6}\right) \right) \right] \quad (2)$$

$$-\frac{27}{2}T\left(T^2 - \frac{1}{3}\right) = \sin\left(\frac{\pi\bar{\theta}}{2}\right)$$

$$\bar{\theta} = 1 - \frac{6\theta}{\pi} \quad (3)$$

$$\cos(3\theta) = \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{(J_2)^{3/2}}$$

파단 모델의 각 재료 상수는 최소 자승법 (least square method)를 활용하여 실험과 모델의 오차 값이 최소가 되는 값으로 결정하였다.

#### 3.2 결과

다양한 하중 조건 (일축 인장, 평면 변형률, 전단 변형)에서 수행된 시험 결과를 von-Mises 변형률과 삼축 응력을 이용하여 파단 곡면을 구성하였다. DIC 측정 결과로부터 파단 곡면 구성하는 과정은 Appendix 1에 나열하였다. 동일한 면적 분석을 위해 모든 결과에서는  $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 의 영역을 선택하였다. 그림 3은 압연 방향 (RD) 과 압연 수직 방향 (TD)에 따른 연성 파단 시험 결과를 나타낸 것이다. 앞서 언급하였듯이 실험은 3회 이상 수행한 뒤 평균 값을 나타냈다. 그림 1의 시험에 따른 하중 경로는 살펴보면 매우 적은 변형률 (<0.05)에서는 비선형을 보이나, 대체적으로 선형의 경로를 보였다. 방향에 따라 파단 변형률은 전단 변형과 일축 인장의 경우 5% 이내의 차이가 나타났지만 평면 변형률의 경우 상당한 차이를 보였다. 실험 결과를 바탕으로 획득한 3.1장의 연성 파단 모델 MMC의 재료 모델 상수를 테이블 2에 나타내었다.

테이블 2의 모델 상수를 바탕으로 압연 방향과 압연 수직 방향에서의 2차원 파단 곡면을 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 평면 변형률과 이축 인장 변형 사이에서는 압연 방향의 파단 변형률이 압연 수직 방향의 파단 변형률보다 높은 값을 예측하고

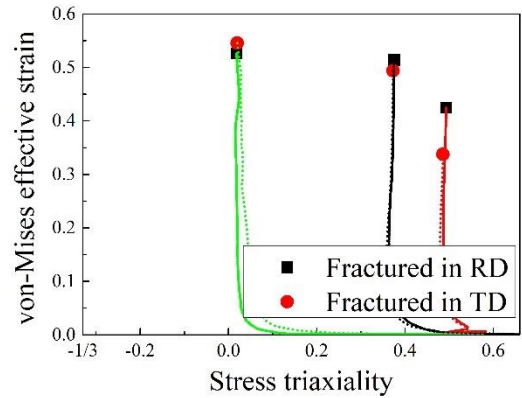


Fig. 3 Experimental results of the fracture limit under different loading paths along RD and TD

Table 2 Material constants of the ductile fracture model

Direction	$K$ (MPa)	$n$	$c_1$	$c_2$	$c_3$
RD	2003.1	0.0548	0.0157	985.7	0.882
TD	1962.2	0.0544	0.0357	987.7	0.899

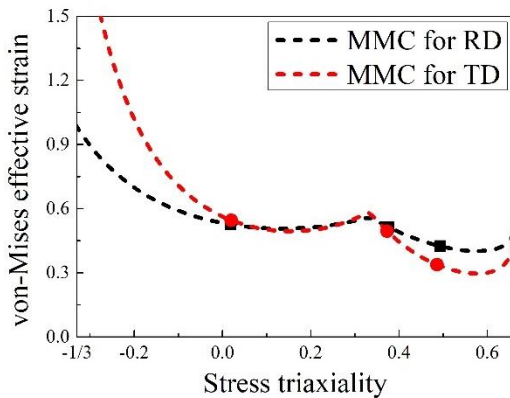


Fig. 4 Fracture-based forming limit along RD and TD

있다. 그리고 전단 변형부터 일축 압축 변형 사이에서는 압연 수직 방향의 파단 변형률이 압연 방향의 파단 변형률보다 높은 값이 예측됨을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 초고강도강의 파단 특성을 다양한 하중 조건 및 하중 방향을 고려하여 시편 형상을 설계하고 DIC 기법을 활용하여 실험 결과를 분석하였다. 실험 결과를 바탕으로 연성 파괴 모델인 Modified Mohr-Coulomb (MMC) 재료 상수를 획득하고 하중 방향에 따른 파단 곡면을 구성하였다. 이를 통해 얻은 결론은 아래와 같다.

(1) 본 연구의 초고강도강의 파단 특성은 전단 변형 및 일축 인장 거동에서는 유사한 파단 변형률 값을 보이지만, 평면 변형률 하중 조건에서는 압연 방향 (RD)의 파단 변형률이 압연 수직 방향 (TD)보다 높게 평가되었다.

(2) 본 연구에서 구성된 연성 파단 모델에서 압연 방향에서는 일축 인장 거동부터 이축 인장 거동까지의 파단 변형률이 높게 예측되고, 압연 수직 방향은 전단 변형부터 일축 압축 거동까지 파단 변형률이 높게 예측되었다. 초고강도강의 이방성이 파단 변형률 예측에 영향을 미침을 알 수 있고, 추후 이를 고려한 파단 연성 모델을 제시하여야 한다.

#### 후 기

본 연구는 한국재료연구원 주요 사업 (PNK9460)에 의해서 수행되었다.

## APPENDIX

### 1. Flow chart of stress-triaxiality from the DIC measurement system [9]

#### 1) Initialize

$k = 1$  frame from the DIC measurement

#### 2) The principal strain increment: $d\varepsilon_1, d\varepsilon_2$

#### 3) The von-Mises effective strain

$$d\varepsilon_e = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{(d\varepsilon_1)^2 + (d\varepsilon_1 d\varepsilon_2) + (d\varepsilon_2)^2}$$

#### 4) The accumulated effective strain $\varepsilon_e = \int d\varepsilon_e$

#### 5) The equivalent stress of the strain hardening law $\bar{\sigma}(\bar{\varepsilon})$

#### 6) The ratio of the principal stresses using the associated flow rule

$$\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{2\rho+1}{\rho+2}, \quad \rho = \frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_1}$$

#### 7) The stress triaxiality

$$T = \frac{(1+\alpha)}{3\sqrt{1-\alpha+\alpha^2}}$$

#### 8) If the material is not fractured, then $k \rightarrow (k+1)$ and go to 2

## REFERENCES

- [1] S. E. Park, B. H. Park, M. H. Oh, B. S. Kang, T. W. Ku, 2021, Effect of Local Softening for Spring-back Reduction of Ultra High Strength Steel on Microstructure and Mechanical Properties, Trans. Mater. Process., Vol. 30, No. 3, pp. 134~141. <http://dx.doi.org/10.5228/KSTP.2021.30.3.134>
- [2] N. Park, H. Huh, 2016, Modeling of a Ductile Fracture Criterion for Sheet Metal Considering Anisotropy, Trans. Mater. Process., Vol. 25, No. 2, pp. 91~95. <http://dx.doi.org/10.5228/KSTP.25.2.91>
- [3] Y. Bai, T. Wierzbicki, 2010, Application of Extended Mohr Coulomb Criterion to Ductile Fracture, Int. J. Fract. Fract., Vol 161 No. 1, pp. 1~20. <https://doi.org/10.1007/s10704-009-9422-8>
- [4] Y. Lou, H. Huh, S. Lim, K. Pack, 2012, New Ductile Fracture Criterion for Prediction of Fracture Forming Limit Diagrams of Sheet Metals, Int. J. Solids Struct., Vol. 49, No. 25, pp. 3605~3615. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2012.02.016>
- [5] Y. Li, M. Luo, J. Gerlach, T. Wierzbicki, 2010,

- Prediction of Shear-induced Fracture in Sheet Metal Forming, *J. Mater. Process. Technol. Technol.*, Vol. No.14, pp. 1858~1869.  
<http://dx.doi:10.1016/j.jmatprotec.2010.06.021>
- [6] I. Jang, G. Bae, J. Song, H. Kim, N. Park, 2020, Fracture envelopes on the 3D-DIC and hybrid inverse methods considering loading history, *Mat. & Des.*, Vol. 194, 108934. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108934>
- [7] J. Ha, M.G. Lee, F. Barlat, 2012, Evaluation of Anisotropic Hardening Models using Two-Step Tension Tests, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 21, No. 6, pp. 372~377. <https://doi.org/10.5228/KSTP.2012.21.6.372>
- [8] Y. Bai, T. Wierzbicki, 2008, A new model of metal plasticity and fracture with pressure and Lode dependence, *Int. J. Plast.*, Vol 24, No. 6, pp.1071~1096. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2007.09.004>.
- [9] J. Lee, H. J. Bong, H. Park, D. Kim, 2022, Micromechanics-based modeling of plastic and ductile fracture of aluminum alloy 2024-O, *Eng. Fract. Mech.*, Vol 261, pp.108213. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2021.108213>