

## 다양한 하중경로에서의 DP980 강판의 파단변형을 예측에 관한 연구

박남수<sup>1</sup> · 허 훈<sup>#</sup>

### Prediction of Fracture Strains for DP980 Steel Sheets for a Wide Range of Loading Paths

N. Park, H. Huh

(Received December 17, 2014 / Revised January 15, 2015 / Accepted January 19, 2015)

#### Abstract

The current study is concerned with the prediction of fracture strains for DP980 steel sheets over a wide range of loading paths. The use of DP980 steel is increasing significantly in automotive industries for enhanced safety and higher fuel efficiency. The material behavior of advanced high-strength steels (AHSSs) sheets sometimes show unpredictable and sudden fracture during sheet metal forming. A modified Lou-Huh ductile fracture criterion is utilized to predict the formability of AHSSs because the conventional forming limit diagram (FLD) constructed based on necking is unable to evaluate the formability of AHSSs sheets. Fracture loci were extracted from three dimensional fracture envelopes by assuming the plane-stress condition to evaluate equivalent plastic strains at the onset of fracture for a wide range of loading paths. Three different types of specimens -- pure shear, dog-bone and plane strain grooved -- were utilized for tensile testing to calibrate the fracture model of DP980 steel sheets. Fracture strains of each loading path were evaluated such that there shows little deviation between fracture strains predicted from the fracture model and the experimental measurements. From the comparison, it is clearly shown that the three dimensional fracture envelopes can accurately predict the onset of the fracture of DP980 steel sheets for complicated loading conditions from compressive loading to shear loading and to equibiaxial tensile loading.

**Key Words** : DP980 Steel Sheets, Fracture Envelopes, Fracture Locus, Fracture Strain

## 1. 서론

자동차 산업 분야에서는 차체의 충돌성능과 안전성 향상을 위하여 고강도강(advanced high-strength steels, AHSSs)의 사용을 점차적으로 확대하고 있다. 고강도강의 일종인 dual phase(DP)강은 기계적 강도가 증가된 대신 재료의 연성이 저하되어 부재의 성형공정 중 적은 량의 소성변형이 수반되는 경우에

도 파단이 발생하였다. 이러한 파단은 네킹 기반의 성형한계도(forming limit diagram, FLD)로 예측할 수 없으며, 기존의 성형한계도가 다루는 단축 인장부터 등이축 인장의 영역뿐만 아니라 단축 압축과 단축 인장 사이의 전단지배영역에서도 발생하였다. 많은 연구자들은 이러한 고강도강의 파단을 예측하기 위하여 다양한 현상학적 모델을 제안하고 평가하였다.

박판재료는 압연공정의 특성으로 인하여 일반적

1. 한국과학기술원 기계항공공학부

# Corresponding Author : Korea Advanced Institute of Science and Technology, Department of Mechanical Engineering.  
E-mail: hhuh@kaist.ac.kr

으로 두께방향 및 평면 상의 이방성을 가지며 이는 재료의 파단거동에 영향을 미친다. 따라서, 성형공정 중 판재의 파단 거동을 보다 정확하게 예측하기 위해서는 고강도강의 기계적 거동에 대한 정확한 이해와 더불어 판재의 이방성이 파단에 미치는 영향을 고려하여야 한다.

본 논문에서는 Lou-Huh[5] 연성파단모델에 Hill's 48 이방성 항복함수를 적용하여 이방성이 미치는 영향을 고려하였으며, 수정된 연성파단모델을 바탕으로 판재의 각 방향 별(RD, DD, TD) 파단기반의 파단곡선(fracture locus)를 구성하였다. 구성된 파단곡선의 방향 별 비교를 통하여 DP980 판재의 이방성이 파단변형률에 미치는 영향을 변형률 경로에 따라 살펴보았다.

## 2. Lou-Huh 연성파단모델의 수정

### 2.1 Hill's 48 이방성 항복함수의 적용

Lou-Huh 연성파단모델은 공극의 생성과 성장, 병합을 물리적인 기반을 바탕으로 제안되었으며, 재료의 파단이 발생하지 않는 영역(cut-off region)이 고려된 현상학적 모델이다.

$$\left(\frac{2\tau_{\max}}{\bar{\sigma}_v}\right)^{C_1} \left(\frac{1}{1+C} \left\langle \eta + \frac{3-L}{3\sqrt{L^2+3}} + C \right\rangle\right)^{C_2} \bar{\epsilon}_f^p = C_3 \quad (1)$$

여기서  $\tau_{\max}$ 와  $L, \eta$ 는 각각 최대전단응력과 로데파라미터 및 응력삼축성을 나타내며,  $C$ 는 재료의 미세구조에 대한 응력삼축성의 민감도를  $\bar{\epsilon}_f^p$ 는 재료의 파단 시 파단개시부의 국부적인 등가변형률을 의미한다. 식 (1)에서 유효응력 항을 Hill's 48 이방성 항복함수로 치환하고 cut-off region에 대한 이론적인 배경을 바탕으로 다음의 식을 유도할 수 있다.

$$\left(\frac{2\tau_{\max}}{\bar{\sigma}_H}\right)^{C_1} \left(\frac{1}{1+C} \left\langle \eta_H + \frac{3-L}{3\sqrt{L^2+3}} \frac{\bar{\sigma}_v}{\bar{\sigma}_H} + C \right\rangle\right)^{C_2} \bar{\epsilon}_f^p = C_3$$

where

$$\begin{cases} \frac{2\tau_{\max}}{\bar{\sigma}_H} = \left[ F \left(\frac{1+L}{2}\right)^2 + G + H \left(\frac{1-L}{2}\right)^2 \right]^{-1/2} \\ \frac{\bar{\sigma}_v}{\bar{\sigma}_H} = \frac{\sqrt{L^2+3}}{2\sqrt{F \left(\frac{1+L}{2}\right)^2 + G + H \left(\frac{1-L}{2}\right)^2}} \end{cases} \quad (2)$$

위 식에서  $\bar{\sigma}_v$ 와  $\bar{\sigma}_H$ 는 각각 폰-미세스 항복함수의 등가응력, Hill's 48 항복함수의 등가응력을 나타내며,  $\eta_H$ 는 Hill's 48 항복함수를 기반으로 정의된 응력삼축성을 나타낸다. 수정된 Lou-Huh 연성파단모델은 로데 파라미터와 Hill's 48 이방성 항복함수 기반의 응력삼축성으로 정의되며, 이 파라미터들의 조합을 통해 재료점이 겪는 다양한 하중경로를 나타낼 수 있다.

## 3. DP980 강판의 3차원 파단곡면 구성

### 3.1 수정된 Lou-Huh 연성파단모델의 계수 결정

파단모델 구성을 위한 여러 하중경로에 대한 인장시험 진행 시 시편의 네킹이 발생하게 되면 국부적으로 변형이 집중되고 주어진 하중경로가 변화하게 된다. 이러한 하중경로의 변화를 고려하여 파단모델의 계수를 획득하기 위해서는 수정된 Lou-Huh 연성파단모델을 적분형태로 손상모델로 변환하여야 한다.

$$D(\bar{\epsilon}) = \frac{1}{C_3} \int_0^{\bar{\epsilon}_f^p} \left\{ \left[ F \left(\frac{1+L}{2}\right)^2 + G + H \left(\frac{1-L}{2}\right)^2 \right]^{-1/2} \right\}^{C_1} \left( \frac{1}{1+C} \left\langle \eta_H + \frac{3-L}{3\sqrt{L^2+3}} \frac{\bar{\sigma}_v}{\bar{\sigma}_H} + C \right\rangle \right)^{C_2} d\bar{\epsilon} \quad (3)$$

위 식에서  $F, G, H$ 는 Hill's 48 항복함수의 계수이며 그 값은 Table 1에 제시하였다. 시험을 통해 획득한 다양한 하중 경로에 대한 데이터를 기반으로 임의로 설정된 초기 모델상수와 함께 축적된 손상을 계산하도록 하고, 이와 관련한 파단모델의 상수결정 알고리즘은 식 (4)와 같다. 계산된 손상 값이 시편의 파단 시 1에 도달하도록 모델상수를 결정하도록 한다.

$$\begin{aligned} [C_1, C_2, C_3] &= \arg \min_{C_1, C_2, C_3} |1 - D_j(\eta_H, L, \bar{\epsilon}_f^p)| \\ \text{s.t. } \delta_j &= 0, \quad j = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (4)$$

**Table 1** The coefficients of the Hill's 48 anisotropic yield criterion

Coefficient	$F$	$G$	$H$
Value	0.4731	0.5450	0.4550

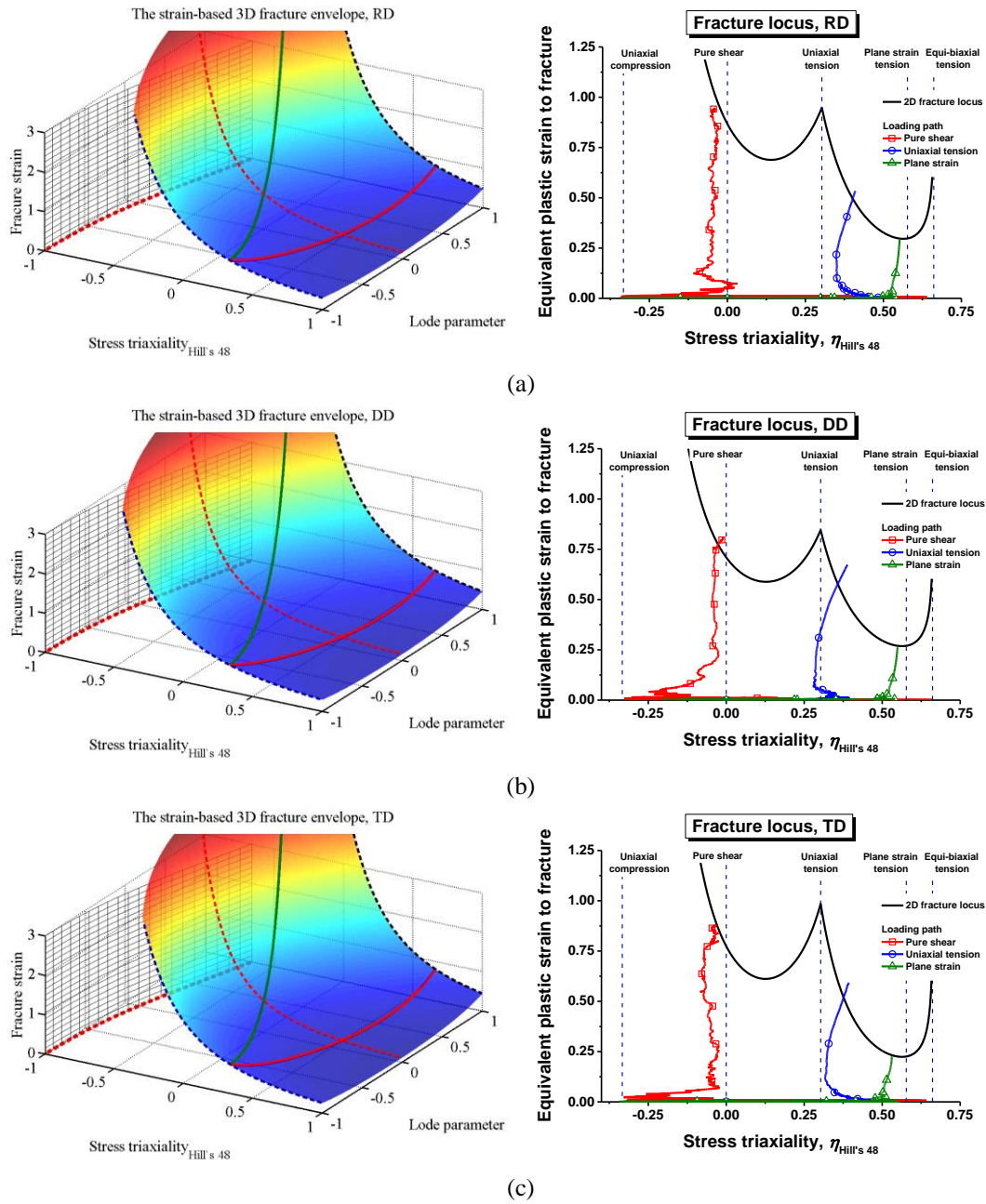


Fig. 1 Three dimensional fracture envelopes and the corresponding fracture loci: (a) RD; (b) DD; (c) TD.

여기서  $j$ 는 파단시험에서 구현한 다양한 하중경로를 나타내고,  $N$ 은 구현한 하중경로의 총 수이다.

### 3.2 DP980 박판에 대한 3차원 파단곡면 구성

수정된 Lou-Huh 연성파단모델은 DP980 박판의 각 방향 별(RD, DD, TD)로 구성하였고, Fig. 1에 나타

Table 2 The coefficients of the modified Lou-Huh ductile fracture criterion

Orientation	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C$
RD	5.6423	2.2125	0.7580	0.3333
DD	7.4114	2.0069	0.8332	0.3333
TD	7.8727	2.5503	0.7830	0.3333

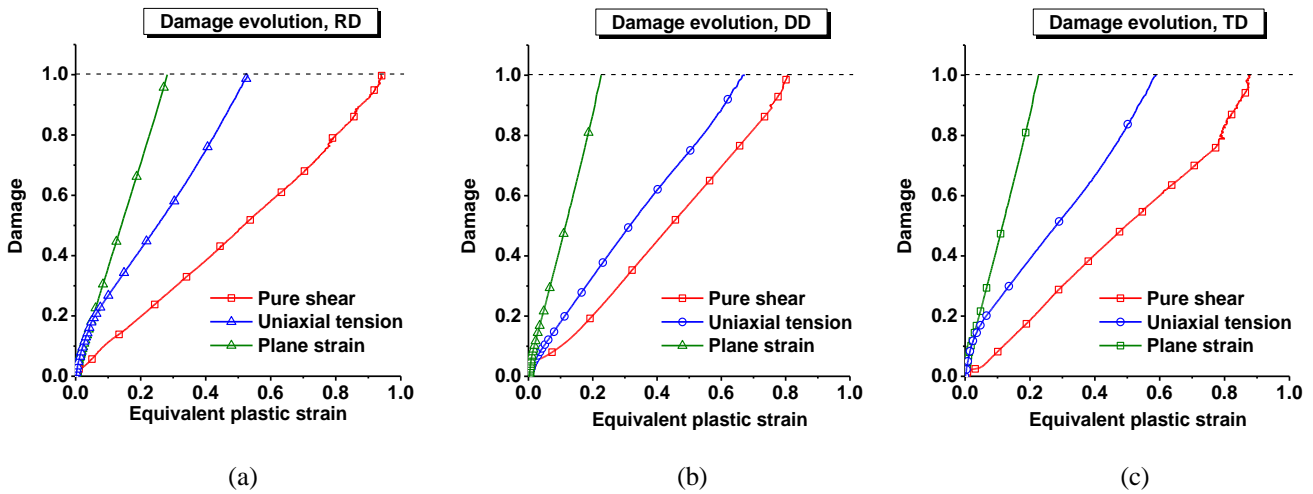


Fig. 2 Damage evolution of each loading path: (a) RD; (b) DD; (c) TD

내었다. 파단곡면상에 실선은 하중상태가 평면응력인 경우를 나타내며, 격자평면은 파단이 발생하지 않는 영역의 경계를 의미한다. 박판성형공정 시 재료의 파단성형한계를 나타내기 위하여 평면응력상태의 3차원 파단곡선을 응력삼축성 공간에 정사영하였고, Fig. 1에 제시하였다. 획득한 파단모델의 계수는 Table 2에 나타내었으며, 이 계수값들을 바탕으로 누적된 손상을 재계산한 결과 파단 시 1에 도달함을 확인하였다. 재료의 소성변형진행 시 누적된 손상값은 Fig. 2에 나타내었다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 고강도강의 파단을 예측할 수 있는 von Mises 등방성 항복함수 기반의 Lou-Huh 연성파단모델에 Hill's 48 이방성 항복함수를 적용하여 박판의 이방성을 고려하였다. 또한, 고강도강의 일종인 DP980 박판에 대하여 다양한 하중경로에서 파단을 예측할 수 있는 3 차원 파단곡면 및 2 차원 파단곡선을 구성하였고, 박판의 각 방향 별(RD, DD, TD)로 파단변형률을 정량화하였다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 2 차원 파단곡면은 박판의 각 방향에 따라 변화하였으며, 기존 성형한계도 영역인 단축인장부터 등이축인장 사이에서는 TD 에 대한 파단변형률 예측 값이 가장 아래에 위치하였고, 전단지배영역인 단축압축부터 등이축인장 사이에서는 DD 에 대한 파단변형률 예측 값이 가장 아래에 위치하였다.

(2) 각 방향 별 2 차원 파단곡선의 비교 시, 임의의 하중경로에 대한 파단변형률 예측 값은 일정한 경향을 보이지 않고, 불규칙적인 양상을 보였다. 따라서, 고강도강의 박판성형공정 시 발생하는 파단을 정확하게 예측하기 위해서는 재료의 방향과 재료점이 겪는 다양한 하중경로에 따라 파단변형률을 비교하여야 하며, 가장 낮게 예측된 값을 바탕으로 재료의 성형도 평가가 이루어져야 한다.

#### 후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다 (No. 2010-0028680).

#### REFERENCES

- [1] M. G. Cockcroft, D. J. Latham, 1963, Ductility and the Workability of Metals, J. Inst. Met., Vol. 96, pp.33~39.
- [2] P. Brozzo, B. Deluca, R. Rendina, 1972, A New Method for the Prediction of Formability in Metal Sheets. In: Proc. 7th Biennial Conf. Int. Deep Drawing Res. Group, Amsterdam.
- [3] M. Oyane, T. Sato, L. Okimoto, S. Shima, 1980, Criteria for Ductile Fracture and Their Applications, J. Mech. Work. Tech., Vol. 4, pp. 65~81.
- [4] Y. Bai, T. Wierzbicki, 2010, Application of Extended

Mohr–Coulomb Criterion to Ductile Fracture, Int. J. Fract., Vol. 161, pp. 1~20.

[5] Y. Lou, J. H. Yoon, H. Huh, 2014, Modeling of Shear

Ductile Fracture Considering a Changeable Cut-off Value for Stress Triaxiality, Int. J. plast., Vol. 54, pp. 56~80.