

판재의 이방성을 고려한 연성파단모델 개발

박남수<sup>1</sup>, 허 훈<sup>#</sup>

## Modeling of a Ductile Fracture Criterion for Sheet Metal Considering Anisotropy

N. Park, H. Huh

(Received December 9, 2015 / Revised January 15, 2016 / Accepted January 19, 2016)

### Abstract

This paper is concerned with modeling of a ductile fracture criterion for sheet metal considering anisotropy to predict the sudden fracture of advanced high strength steel (AHSS) sheets during complicated forming processes. The Lou-Huh ductile fracture criterion is modified using the Hill's 48 anisotropic plastic potential instead of the von Mises isotropic plastic potential to take account of the influence of anisotropy on the equivalent plastic strain at the onset of fracture. To determine the coefficients of the model proposed, a two dimensional digital image correlation (2D-DIC) method is utilized to measure the strain histories on the surface of three different types of specimens during deformation. For the derivation of an anisotropic ductile fracture model, principal stresses ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ) are expressed in terms of the stress triaxiality, the Lode parameter, and the equivalent stress ( $\eta_H, L, \bar{\sigma}_H$ ) based on the Hill's 48 anisotropic plastic potential. The proposed anisotropic ductile fracture criterion was quantitatively evaluated according to various directions of the maximum principal stress. Fracture forming limit diagrams were also constructed to evaluate the forming limit in sheet metal forming of AHSS sheets over a wide range of loading conditions.

**Key Words** : Anisotropy, Fracture Envelope, Fracture Locus, Fracture Strain

### 1. 서론

최근 자동차 산업 분야에서 차체의 충돌성능과 안전성을 위하여 차체에 사용되고 있는 재료 중 고강도강의 비율을 점차적으로 확대하고 있다. 그러나 고강도강(advanced high strength steels, AHSSs)은 기계적 강도가 높은 반면 연성이 작기 때문에 성형공정에서 적은 량의 소성변형이 수반되는 경우에도 재료의 파단이 발생하는 현상이 관찰되었다. 네킹을 거의 동반하지 않고 파단이 발생하므로 기존의 네킹 기반의 성형한계도(conventional forming limit

diagram, FLD)[1]는 파단을 예측하기에는 한계가 있다. 파단이 발생하는 하중경로/loading path) 역시 기존 성형한계도가 다루지 않는 단축 압축에서 단축 인장 사이의 하중경로에서 파단이 발생하기 때문에 [2~6] 다양한 하중경로에 대한 파단기반의 성형성 평가가 요구되고 있는 실정이다. 이에 파단예측을 위한 많은 연구들이 진행되었고 다양한 현상학적 모델이 제안되었다[7~11].

판재는 압연공정으로 인하여 일반적으로 두께방향 및 평면 상의 이방성(anisotropy)을 가지며 이는 하중 방향/loading direction) 및 하중경로와 더불어 재료의

1. 한국과학기술원 기계항공시스템학부

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

파단에 영향을 미친다. 따라서, 고강도강을 이용한

차체 성형 시 재료 성형성의 정량적 평가를 위해서는 판재의 이방성이 파단물성에 미치는 영향을 필수적으로 고려하여야 한다. 본 논문에서는 Lou-Huh[8~9] 연성파단모델 및 Park등[10]의 연구를 기반으로 Hill's 48 이방성 항복함수를 적용하여 판재의 파단에 영향을 미치는 이방성을 고려하였고, 코시 응력 텐서(Cauchy stress tensor)의 좌표 변환(coordinate transformation)을 통해 주응력 및 최대주응력 방향에 의존적인 이방성 파단모델을 제안하였다. 제안된 파단모델을 평가하기 위하여 DP980 1.2t 판재 내 다양한 하중 방향(RD, DD, TD)에서 획득한 파단물성을 바탕으로 파단모델계수를 결정하였고, 구성된 파단모델을 통하여 각 방향 별 파단물성을 정량화하여 이방성이 파단물성에 미치는 영향을 평가하였다.

## 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 로테 파라미터 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 주응력의 좌표 변환과 cut-off region에 대한 이론적인 배경을 바탕으로 다음의 식을 유도할 수 있다.

$$\left(\frac{1}{\sqrt{T}}\right)^{C_1} \left(\frac{\eta_H + \frac{3-L}{6\sqrt{T}} + C}{1+C}\right)^{C_2} \bar{\epsilon}_f^p = C_3$$

where

$$T = F \left( \frac{L+1}{2} \cos^2 \theta_s + \sin^2 \theta_s \right)^2 + G \left( \cos^2 \theta_s + \frac{L+1}{2} \sin^2 \theta_s \right)^2 + \left( H \cos^2 2\theta_s + \frac{N}{2} \sin^2 2\theta_s \right) \left( \frac{1-L}{2} \right)^2 \quad (2)$$

위 식에서  $F$ ,  $G$ ,  $H$ ,  $N$ 은 Hill's 48 항복함수의 계수

이며  $\bar{\sigma}_H$ 와  $\eta_H (\equiv \sigma_m / \bar{\sigma}_H)$ 은 각각 Hill's 48 항복함수의 등가응력과 Hill's 48 항복함수를 기반으로 정의된 응력삼축성을 나타낸다.  $C_1, C_2, C_3$ 는 파단모델의 모델상수로 재료의 파단시험을 통해 결정되는 값이며,  $\theta_s$ 는 압연방향에 대한 판재의 평면 내 최대 주응력 방향을 의미한다. 제안된 이방성 연성파단모델은 로테 파라미터와 Hill's 48 이방성 항복함수 기반의 응력삼축성 및 최대 주응력 방향으로 정의되며, 이 파라미터들의 조합을 통해 재료점이 겪는 다양한 하중경로를 고려할 수 있다. 또한, 판재의 평면 내 이방성이 특정 하중경로와 더불어 파단물성에 미치는 복합적인 효과가 최대 주응력 방향으로 연관되어 판재의 평면 내 이방성을 고려한 특정하중경로에서의 파단변형률을 정량적으로 평가할 수 있다.

## 3. DP980 강판의 3차원 파단곡면 구성

### 3.1 제안된 이방성 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 제안된 이방성 연성파단모델을 적분형태로 손상모델로 변환하여야 한다.

$$D(\bar{\epsilon}) = \frac{1}{C_3} \int_0^{\bar{\epsilon}_f^p} \left(\frac{1}{\sqrt{T}}\right)^{C_1} \left(\frac{\eta_H + \frac{3-L}{6\sqrt{T}} + C}{1+C}\right)^{C_2} d\bar{\epsilon}^p \quad (3)$$

위 식에서 DP980 1.2t에 대한 Hill's 48 항복함수의 재료상수는 Table 1에 제시하였다. 제안된 파단모델의 모델상수를 결정하기 위해 시험을 통해 획득한 다양한 하중경로에 대한 데이터를 기반으로 임의로 설정된 초기 모델상수와 함께 축적된 손상을 계산

**Table 1** Material constants of the Hill's 48 anisotropic yield criterion for DP980 1.2t

Coefficient	$F$	$G$	$H$	$N$
Value	0.4731	0.5450	0.4550	1.6298

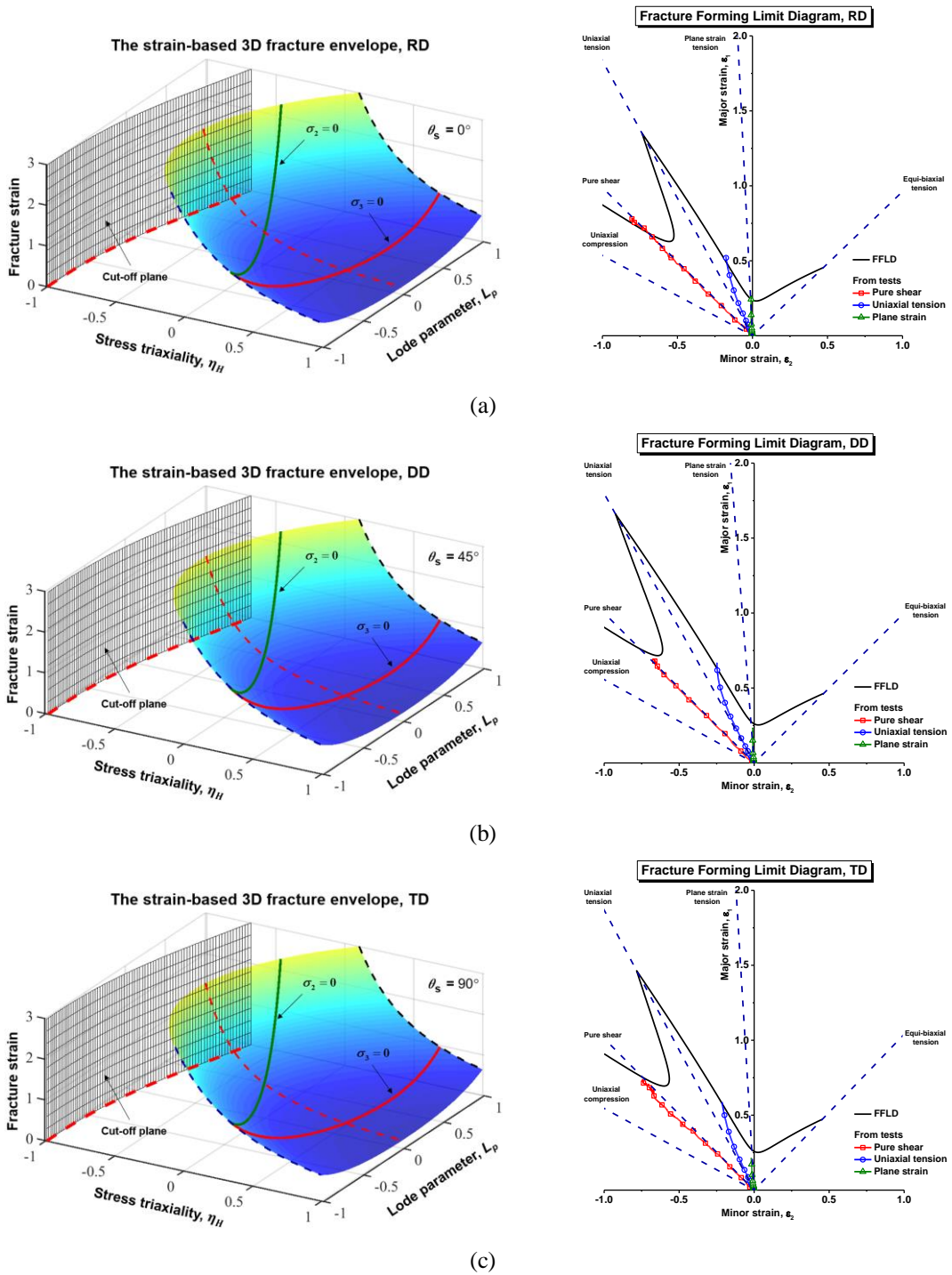


Fig. 1 Three dimensional fracture envelopes and the corresponding fracture loci: (a) RD; (b) DD; (c) TD

하도록 하였다. 재료의 파단 시점에서의 손상 값이 1에 도달하도록 모델상수를 변화시켜 가며 계수 값을 도출하였고, 파단모델의 상수를 결정하기 위한 알고리즘은 식 (5)에 제시하였다.

$$\min_{C_i} \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \delta_j^k \quad (5)$$

where  $\delta_j^k = |1 - D_j^k(\eta_H, L, \theta_s)|$

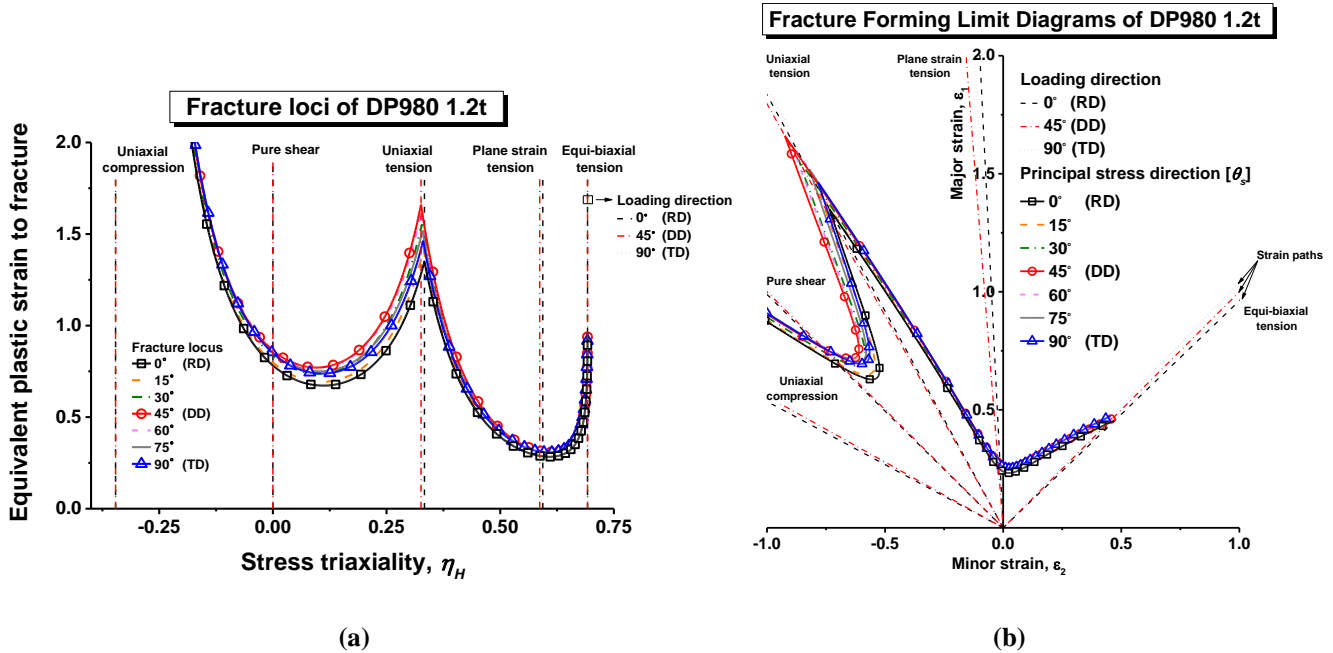


Fig. 2 Fracture-based forming limits according to various directions of the maximum principal stress: (a) Fracture loci; (b) Fracture forming limit diagrams

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

$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C$
7.4981	2.0351	1.3504	0.3333

위 식에서  $j$ 와  $k$ 는 각각 파단시험에서 구현한 다양한 하중경로 및 시편을 채취한 방향을 나타내고,  $J$ 와  $K$ 는 하중경로와 시편방향의 총 개수를 나타낸다.

### 3.2 DP980 박판에 대한 3차원 파단곡면 구성

제안된 이방성 연성파단모델은 DP980 박판의 각각의 최대 주응력 방향 별(RD, DD, TD)로 구성하였고, Fig. 1에 나타내었다. 파단곡면상에 실선은 하중상태가 평면응력인 경우를 나타내며, 격자평면은 파단이 발생하지 않는 영역의 경계를 의미한다. 박판 성형공정 시 재료의 파단성형한계를 나타내기 위하여 평면응력을 전제로 한 파단성형한계도로 전환하여 Fig. 1에 제시하였고, 획득한 파단모델의 계수는 Table 2에 나타내었다. 이방성이 파단변형한계에 미치는 영향을 평가하기 위하여 임의의 최대 주응력 방향에 따른 2차원 파단곡선 및 파단성형한계도를 Fig. 2에 제시하였다. 획득한 한계도 간의 평가를

통해 최대 주응력 방향이 압연방향과 동일할 때 파단변형률 값이 가장 낮게 평가됨을 확인하였으며, 이를 통해 압연방향의 파단성형한계도를 DP980 판재의 성형가공을 위한 대표성형한계도로 제시할 수 있다.

## 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 3차원 파단곡면 및 2차원 파단곡선과 파단성형한계도를 구성하였고, 판재의 평면 내 각 최대 주응력 방향에 따라 파단변형률을 정량화하였다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 2차원 파단곡면 및 파단성형한계도는 판재의 평면 내 최대 주응력 방향에 따라 변화하였으며, 기존 성형한계도 영역인 단축인장부터 등축인장 사이와 전단지배영역인 단축압축부터 단축인장 사이의 영역에 대해 RD에서 평가된 파단변형률 값이 가장 낮게 예측되었다.

(2) 최대 주응력 방향 별 3차원 파단곡면, 파단곡

선 및 파단성형한계도는 임의의 하중경로에 대하여 예측된 파단변형률 값이 일정한 경향을 보이지 않고 불규칙적인 분포를 이루었다. 따라서, 고강도강의 판재성형공정 시 발생하는 파단을 정확하게 예측하기 위해서는 재료의 방향과 재료점이 겪는 다양한 하중경로에 따라 파단변형률을 비교하여야 한다. 또한, 판재의 파단 시 파단면은 평면 내 임의의 방향으로 발생할 수 있으므로 획득한 파단성형한계도를 통해 가장 낮게 예측된 파단변형률을 대표 파단물성으로 제시하여 판재의 이방성을 고려한 대표 파단성형한계도를 제시하여야 한다.

## 후 기

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

## REFERENCES

- [1] S. P. Keeler, W. A. Backofen, 1963, Plastic Instability and Fracture in Sheets Stretched over Rigid Punches, *ASM Trans. Q.*, Vol. 56, No. 1, pp.25~48.
- [2] Y. Li, M. Luo, J. Gerlach, T. Wierzbicki, 2010, Prediction of Shear-induced Fracture in Sheet Metal Forming, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 210, No. 14, pp. 1858~1869.
- [3] T. Børvik, O. S. Hopperstad, K. O. Pedersen, 2010, Quasi-brittle Fracture during Structural Impact of AA7075-T651 Aluminium Plates, *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 37, No. 5, 537~551.
- [4] A. S. Khan, H. Liu, 2012, A New Approach for Ductile Fracture Prediction on Al2024-T351 Alloy, *Int. J. Plast.*, Vol. 35, pp. 1~12.
- [5] A. S. Khan, H. Liu, 2012, Strain Rate and Temperature Dependent Fracture Criteria for Isotropic and Anisotropic Metals, *Int. J. Plast.*, Vol. 37, pp. 1~15.
- [6] M. G. Cockcroft, D. J. Latham, 1963, Ductility and the Workability of Metals, *J. Inst. Met.*, Vol. 96, pp. 33~39.
- [7] Y. Bai, T. Wierzbicki, 2010, Application of Extended Mohr-Coulomb Criterion to Ductile Fracture, *Int. J. Fract.*, Vol. 161, No. 1, pp. 1~20.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] N. Park, H. Huh, J. B. Nam, C. G. Jung, 2015, Anisotropy Effect on the Fracture Model of DP980 Sheets Considering the Loading Path, *Int. J. Automot. Technol.*, Vol. 16, No. 1, pp. 73~81.
- [11] Y. Lou, S. J. Lim, H. Huh, 2013, Prediction of Fracture Forming Limit for DP780 Steel Sheet, *Met. Mater. Int.*, Vol. 19, No. 4, pp. 697~705.