

변형경로를 고려한 이방성 박판의 성형한계 예측

손현성* · 정승호** · 김영석***

Prediction of Forming Limits for Anisotropic Sheet Metals with Considering the Effect of Strain-Path Changes

H. S. Son, S. H. Jung, and Y. S. Kim

Abstract

This paper presents an analytical study that can predict the path-dependent forming limits for bilinear strain paths. To predict the forming limit diagrams(FLD), the analytical procedure was performed within the framework of Marciniak and Kuczynski approach by introducing the effect of the existence of strain gradient over the stretching punch. The predicted path-dependent forming limits of an anisotropic sheet were compared with the published experimental results. It was found that the predicted path-dependent forming limits were in good agreement with the experimental data.

Key Words : Forming Limit Diagrams, Marciniak and Kuczynski approach

1. 서 론

판재의 가공 공정에서 판재를 원하는 형상으로 온전하게 성형하기 위해서는 과도한 면내 압축응력에 의한 주름이나 재료의 성형한계(forming limit)를 나타내는 국부 넥킹과 같은 소성불안정(plastic instability) 현상의 발생을 피해야 한다. 이 중에서도 프레스 가공조건의 최적화를 위해 우선 재료의 파단과 관련하여 재료 고유의 인장특성과 함께 프레스 가공 중에 재료가 파단되지 않으면서 최대 변형될 수 있는 한계를 나타내는 성형한계에 대한 데이터는 확보해야 하는 중요한 정보이다.

Keeler와 Goodwin이 주 변형률 좌표축 $\epsilon_1 - \epsilon_2$ 상에

다양한 이축 인장상태하에 있는 판재의 변형률을 표시하고 온전한 변형과 넥-파단 변형의 경계로 재료의 변형한계를 표시한 성형한계도(forming limit diagrams, FLD)의 개념을 도입한 이래, 이 성형한계도는 프레스 가공에서 판재의 가공불량의 원인 분석을 위한 유일한 도구로 널리 이용되고 있다.

이 다양한 판재들에 대해서 성형한계에 대한 DB를 구축하기 위한 많은 실험적 연구⁽¹⁾와 함께 성형한계에 영향을 미치는 다양한 인자들의 영향을 규명하고 정확히 성형한계를 예측하기 위한 많은 이론적 연구^(2,3)들이 활발히 행해지고 있다. 판재의 성형한계를 해석적으로 구하기 위한 연구로 대표적인 것으로는 Marciniak와

* 경북대학교 대학원

** 경북대학교 대학원

*** 경북대학교 기계공학부

Kuczynski의 재료결함모델, Stören과 Rice의 국부분지모델, Bressan과 Williams의 전단불안정모델 그리고 Zhao, Sowerby와 Sklad의 성형한계응력모델 등이 있다.

본 연구에서는 변형경로 변화에 따른 성형한계를 예측하기 위한 해석모델을 제안하였고, 2단 변형경로(bilinear strain path)에 대한 해석결과를 실험결과와 비교하여 그 타당성을 고찰하였다. 해석에는 Barlat와 Lian의 평면이방성 항복조건식⁽⁴⁾과 M-K 모델을 이용하였으며, 장출성형에 의한 재료의 변형률 구배효과도 도입하였다.

2. 이론적 고찰

본 연구에서는 장출편치의 곡률에 의한 재료 두께방향의 변형률 구배를 고려하기 위해 Shi와 Gerdeen이 제안한 다음과 같은 구성 방정식을 이용하였다.⁽⁵⁾

$$\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n \bar{\epsilon}^m - g Q_A K [t/(a+t/2)]^{2n} \quad (1)$$

항복조건식으로 다음과 같은 Barlat과 Lian의 평면이방성 항복조건식⁽⁴⁾을 사용하였다.

$$ff = \frac{2}{2-c} \bar{\sigma}^M \quad (2)$$

$$= |k_1 + k_2|^M + |k_1 - k_2|^M + \frac{c}{2-c} |2k_2|^M$$

$k_1 = (\sigma_x + h_1\sigma_y)/2$, $k_2 = \sqrt{[(\sigma_x - h_1\sigma_y)/2]^2 + (h_2\tau_{xy})^2}$ 이고 c, h_1, h_2 는 압연방향에 $0^\circ, 90^\circ$ 방향의 소성이방성계수와 압연방향의 인장항복응력 σ_y , 전단항복응력 τ_y 값으로부터 결정되는 값이다.

현 모델에서 초기 재료결함은 양의 변형률 비인 경우는 주축과 수직으로 놓여있고, 음의 변형률 비인 경우는 평면변형조건을 만족시키는 Hill의 영 신장방향(zero-extended direction)으로 놓인다고 가정하였다.

결함영역(b)과 결함이 없는 영역(a) 사이에 힘의 평형방정식

$$\sigma_n^a e^a = \sigma_n^b e^b, \quad \sigma_{nt}^a e^a = \sigma_{nt}^b e^b \quad (3)$$

과 적합조건식

$$d\epsilon_t^a = d\epsilon_t^b \quad (4)$$

을 조합하면 다음과 같은 두 개의 구간에 대한 식이 유도된다.

● 양의 변형률 비 구간

$$B_1 (\bar{\epsilon}^a)^n (\bar{\epsilon}^a)^m - f A_1 (\bar{\epsilon}^b)^n (\bar{\epsilon}^b)^m - g Q_A^a B_1 \quad (5)$$

$$([t^a/(a+t^a/2)]^{2n} - f [t^b/(a+t^b/2)]^{2n}) = 0$$

● 음의 변형률 비 구간

$$(\bar{\epsilon}^a)^n (\bar{\epsilon}^a)^m - f (\bar{\epsilon}^b)^n (\bar{\epsilon}^b)^m - g Q_A^a \quad (6)$$

$$([t^a/(a+t^a/2)]^{2n} - f [t^b/(a+t^b/2)]^{2n}) = 0$$

$$\text{여기서 } A_1 = \left[1 + |h_1 a|^M + \frac{c}{2-c} |1 - a h_1|^M \right]^{1/M}$$

, α 는 결함이 없는 영역(a)의 응력비

$$B_1 = \left[1 + |h_1 a^b|^M + \frac{c}{2-c} |1 - h_1 a^b|^M \right]^{1/M}$$

, α^b 는 결함영역(b)의 응력비

$$f = f_0 \exp(\epsilon_3^b - \epsilon_3^a), \quad Q_A^a = \bar{\sigma}^a / \sigma_x^a$$

$$\alpha = \sigma_2^a / \sigma_1^a = \sigma_y^a / \sigma_x^a, \quad \alpha^b = \sigma_2^b / \sigma_1^b$$

위의 기초식들을 이용하여 선형변형경로 $\epsilon_2 = S(\epsilon_1) = \rho \epsilon_1$ (여기서 ρ 는 변형률 비)에 대해서 성형한계를 구하는 방법은 다음과 같다. 즉 윗식들을 이용하여 주어진 변형률 경로에 대해서 초기 변형률 증분값 $\Delta \epsilon_1^a, \Delta \epsilon_1^b$ 을 취하고 변형률 비 ρ 에 상응하는 응력비 α 를 구한 후 $\Delta \bar{\epsilon}^a$ 를 계산하고, Newton-Raphson 방법을 사용하여 양의 변형률비 구간에서는 α^b 를 구한 다음 $\Delta \bar{\epsilon}^b$ 를 계산하고, 음의 변형률비 구간에서는 $\Delta \bar{\epsilon}^b$ 를 바로 계산한다. 이 증분값 만큼을 현재의 유효변형률 $\bar{\epsilon}^a, \bar{\epsilon}^b$ 에 더하고 앞의 계산을 반복 수행하면서 최종적으로 판재가 국부적으로 안정성을 잃어버리는 판별조건 $d\bar{\epsilon}^a/d\bar{\epsilon}^b \leq 0.1$ 에 도달하는지 확인하여 성형한계를 구한다. 물론 현 모델에서 편치의 반경이 무한대가 되면 해석결과는 종래의 M-K 모델에서와 같이 면내변형에 대한 해석결과와 일치한다.

한편 실제 프레스 공정에서 재료는 복잡한 변형경로를 경험하는데 이런 변형경로는 복수의 선형경로의 조합으로 생각할 수 있다. 실험에서 얻을 수 있는 성형한계에 대한 결과와 비교하기 위해서 간단히 판재가 2단 변형경로에 따라 변형되는 경우를 생각하면 이 때의 변형경로는 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$\epsilon_2 = S(\epsilon_1) = \begin{cases} \rho_1 \epsilon_1 & , (\epsilon_1 \leq \epsilon_{1s}) \\ \rho_1 \epsilon_{1s} + \rho_2 (\epsilon_1 - \epsilon_{1s}) & , (\epsilon_1 \geq \epsilon_{1s}) \end{cases} \quad (7)$$

여기서 ρ_1, ρ_2 는 각각 첫 번째 공정과 두 번째 공정에서의 변형률 비이고, ϵ_{1s} 는 첫 번째 공정의 최종 주 변형률 값이다. 따라서 세 개의 파라메타 ($\rho_1, \rho_2, \epsilon_{1s}$)를 이용하면 이론적 해석에서 임의의 2단 변형경로를 자유롭게 부여할 수 있다. 물론 이런 방법은 다단 변형경로에도 적용할 수 있다.

3. 해석결과

본 연구에서 도입한 모델의 타당성을 확인하기 위해 펀치반경 $a=50.8mm$ 를 갖는 Hecker의 장출실험을 통해 구한 두 종류의 자동차용 강판(CHSP35E 0.75t, DDQ 0.8t)의 성형한계와 선형 변형경로에 대한 이론 해석으로부터 구한 성형한계를 Fig.1과 Fig.2에 비교하였다.

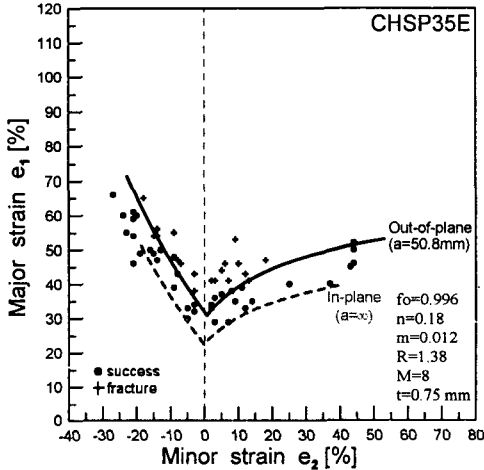


Fig. 1 Forming limit diagram for CHSP35E 0.8t

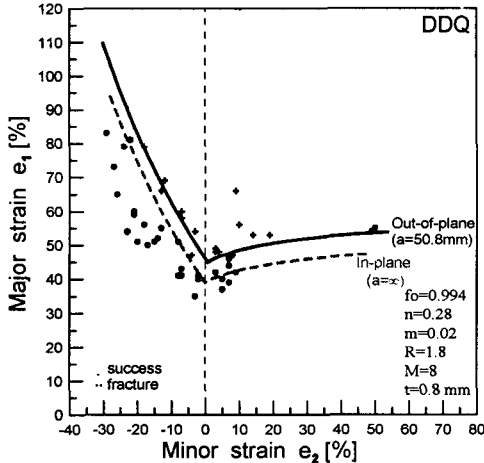


Fig. 2 Forming limit diagram for DDQ 0.8t

Fig.1과 Fig.2로부터 장출펀치의 곡률에 의한 재료 두께방향 변형을 구배의 영향을 고려한 현 모델은 실험결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

한편 면내변형을 가정한 M-K 모델의 경우는 실제 실험결과보다 약 10% 정도 낮게 성형한계를 평가하고 있음을 알 수 있다. 이는 Charpentier^[6]의 실험결과와 같이

펀치의 곡률반경이 작아질수록 동일 두께 판재에 대한 변형을 구배가 커져 성형한계 변형률이 증가한다는 사실을 잘 설명해 주고 있다.

Fig.3과 Fig.4에 DDQ 0.8t 판재가 대표적으로 2단계 변형경로로 바뀌는 경우에 대한 성형한계의 해석결과를 나타내었고 비교를 위해 남재복^[7]등의 실험결과를 함께 나타내었다. 해석에서 재료가 겪는 상당변형률은

$$\bar{\epsilon} = \sum_{i=1}^N \Delta \bar{\epsilon}_i + \bar{\epsilon}_0 \quad (\bar{\epsilon}_0: \text{초기 상당변형률}, N: \text{소성 불안정 발생 수})$$

로 하여 식 (1)에 대입하는 것으로 예변형의 효과를 고려하였다.

Fig.3은 등이축 인장의 예변형을 받은 판재에 대한 성형한계를 나타내고, Fig.4는 단축인장의 예변형을 받은 판재에 대한 성형한계를 나타낸다. Fig.3의 해석결과로부터 등이축 인장의 예변형은 전체적으로 후속하는 모든 변형을 비에 대해서 판재의 성형한계를 상당히 떨어뜨리는 것을 알 수 있고, 실험결과를 대체로 잘 표현해주고 있음을 알 수 있다. 등이축 인장의 예변형이 재료의 성형한계를 떨어뜨리는 것은 등이축 인장 하에서 재료 내부에 보이드 발생과 같은 손상이 많아지기 때문으로 생각된다. 이에 대한 보다 엄밀한 해석을 위해서는 Gurson의 항복조건식과 같은 보이드 존재에 의한 재료 내부 손상을 다룰 수 있는 구성방정식의 도입이 필요할 것으로 생각된다.

단축 인장변형 영역에서 해석결과와 실험결과에 차이가 보이거나 이는 장출실험에서 단축 인장변형을 재현하기 위한 좁은 폭($w=25mm, 50mm$)의 시편을 사용할 때 시편 파단부에서 변형률에 대한 충분한 데이터가 확보되지 않았기 때문으로 사료된다.

단축인장의 예변형을 받은 판재에 대한 Fig.4의 결과로부터, 단축인장 예변형은 후속하는 단축인장 변형경로에 가까운 변형경로에 대해서는 성형한계의 변화는 미미하나 등이축 인장 변형경로에 대해서는 성형한계가 크게 향상되는 것을 알 수 있다. 또한 해석결과는 실험결과와의 상관성도 우수한 것으로 판단된다.

2단계 변형경로로 바뀌는 마지막 모드로서, Fig.5에 평면변형 하에서의 예변형량이 성형한계에 미치는 영향을 나타내었다. 즉 성형한계도 상에서 주변형률 값이 가장 낮은 FLD_0 점이 예변형량과 상관없이 모두 일치하지만, 성형한계도 양쪽의 기울기가 예변형이 클수록 증가하는 경향을 띤다. 또한 왼쪽편의 성형한계도의 경우 변형경로가 바뀌지 않는 초기 성형한계도와 비교하여 거의 일치하고, 그 반대편의 성형한계도의 경우에는 예변형량이 클수록 성형한계가 증가함을 나타내었다.

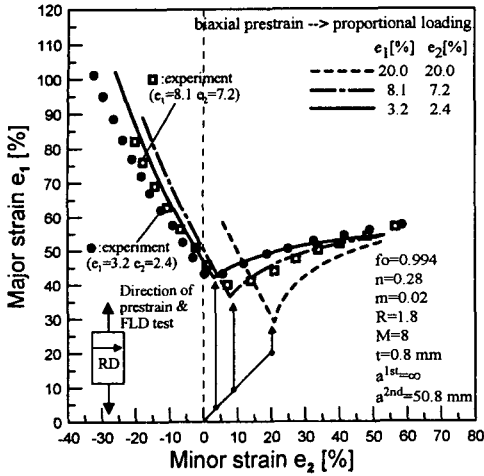


Fig. 3 Effects on FLD after prestraining in biaxial stretching

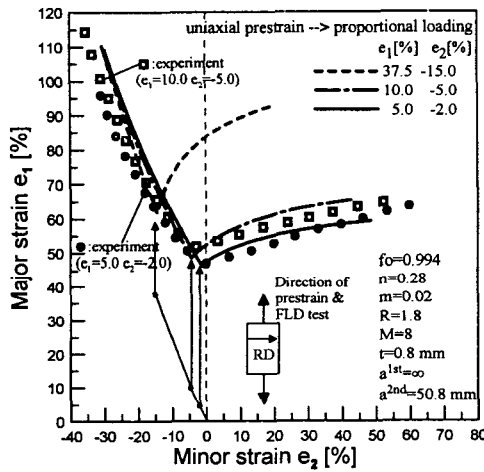


Fig. 4 Effects on FLD after prestraining in uniaxial stretching

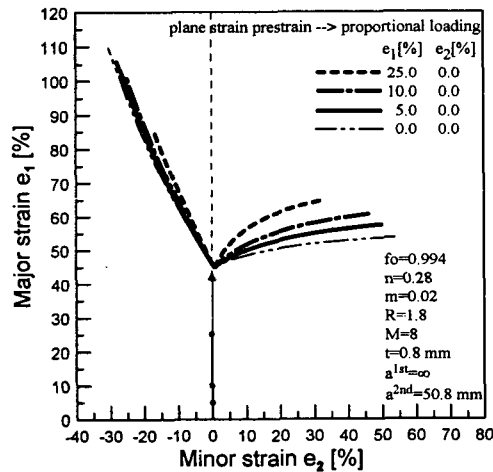


Fig. 5 Effects on FLD after prestraining in plane strain

4. 결론

본 연구에서는 프레스 가공을 받는 판재의 성형한계에 관한 변형경로 의존성을 예측하기 위해 M-K 모델을 도입하여 대표적인 예변형-등이축 인장과 단축인장-을 받는 판재의 성형한계를 도출하였고, 그 결과를 실험결과와 비교하였다.

연구결과로부터 판재의 프레스 가공과정에서 재료가 겪는 변형률 경로변화는 재료의 성형한계에 큰 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었다. 특히 등이축 인장의 예변형은 재료의 성형한계를 전체적으로 크게 떨어뜨리는 반면 재료가 단축인장 예변형 후 등이축 인장을 받는 경우는 성형한계가 크게 향상된다는 것을 알 수 있다.

후기

본 연구는 포항제철주식회사의 연구비 일부 지원과 2000년도 두뇌한국 21사업의 연구비 지원에 의해 행해졌으며 이에 관계자 제위께 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) 포항제철소, 1994, 성형한계도 메뉴얼
- (2) Marciniak, Z. and Kuczynski, K., 1967, "Limit strains in the process of stretch-forming sheet metal", Int. J. Mech. Sci., Vol. 9, p. 609
- (3) Barata, A., Barlat, F. and Jalinier, J., 1984, "Prediction of forming limit diagrams of anisotropic sheets in linear and non-linear loading", Mater. Sci. Engng., Vol. 68, p. 151
- (4) Barlat, F. and Lian, J., 1989, "Plastic behavior and stretchability of sheet metals, Part I : A yield function for orthotropic sheets under plane stress conditions", Int. J. of Plasticity, Vol. 5, p. 51
- (5) Shi, M. and Gerdeen, J., 1991, "Effect of strain gradient and curvature on forming limit diagrams for anisotropic sheets", J. Mater. Shaping Technol. Vol. 9, p. 253
- (6) Chapentier, P., 1975, "Influence of punch stretching curvature on the stretching limits of sheet steel", Met. Trans., Vol. 6A, p. 1665
- (7) 남재복, 박기철, 정기조, 1997, "변형경로를 고려한 박강판의 성형한계곡선 도출", 한국소성가공학회지, Vol. 6, p. 36