

초기 형상 불안정성 기반 성형한계선도의 이론적 변수에 따른 성형 한계영역 평가

노학곤¹ · 이병언¹ · 김 정¹ · 강범수¹ · 송우진[#]

Evaluation of Analytical Parameters on Forming Limit Diagram based on Initial Geometrical Instability

H. G. Noh, B. E. Lee, J. Kim, B. S. Kang, W. J. Song

(Received January 8, 2014 / Revised April 21, 2014 / Accepted April 22, 2014)

Abstract

The current study examines the effect of the analytical parameter values on the theoretical forming limit diagram (FLD) based on the Marciniak-Kuczynski model (M-K model). Tensile tests were performed to obtain stress-strain curves and determine the anisotropic properties in the rolling, transverse and diagonal direction of SPCC sheet materials. The experimental forming limit curve for SPCC sheet material was obtained by limiting dome stretching tests. To predict the theoretical FLD based on the M-K model, the Hosford 79 yield function was employed. The effects of three analytical parameters – the exponent of the yield function, the initial imperfection parameter and the fracture criterion parameter – on the M-K model, were examined and the results of the theoretical FLD were compared to the experimentally measured FLD. It was found that the various analytical parameters should be carefully considered to reasonably predict the theoretical FLD. The comparison of the acceptable forming limit area between the theoretical and experimental FLD is used to compare the two diagrams.

Key Words : Forming Limit Diagram, Marciniak-Kuczynski Model, Hosford 79 Yield Function, Initial Imperfection Parameter, Fracture Criterion Parameter

1. 서론

판재 성형공정에서의 성형성 평가는 가공 공정 중 혹은 최종 성형제품에 찢어짐(Fracture, Tearing)이나 국부적인 네킹(Necking) 현상이 발생하느냐 여부에 따라 판단 가능하다.

일반적으로 판재 성형공정에서 초기 소재의 성형한계를 예측하는 방법으로는 성형 중 발생하는 과도한 두께 감소율을 이용하여 찢어짐이나 국부적인 네킹현상을 예측하거나, 판재의 면내 최대 변형률(주변형률, Major strain)과 최소 변형률(부변형률,

Minor strain)로 구성된 성형한계선도(Forming limit diagram, FLD)를 이용하여 최종 제품에 성형결함이 없게 성형 가능한지를 판단할 수 있다.

이 때, 성형 결함을 예측하기 위하여 적용되는 성형한계선도는 적용 판재재료에 대한 일련의 성형성 시험과 이론적인 과정을 통하여 도출 가능하며[1-3], 성형된 판재의 주변형률과 부변형률이 성형한계선도의 성형 한계곡선 아래에 위치할 경우, 안전하게 성형이 가능하다고 판단한다.

이와 같은 성형한계선도를 이용하여 성형공정의 성형 결함여부를 판단할 경우에는, 실제 성형공정

1. 부산대학교 항공우주공학과

Corresponding Author : Industrial Liaison Innovation Center, Pusan National University, E-mail: woodysong@pusan.ac.kr

중에 발생하는 비선형 하중경로를 비례하중 상태라고 가정하여야 한다[3]. 하지만, 이러한 제한적인 한계점에도 불구하고 실제 판재소재를 이용하는 현장에서는 측정이 다소 용이한 변형률 기반 성형한계선도를 주로 사용하고 있다.

이러한 성형한계선도에는 판재 성형공정에 적용되는 판재 소재의 기본 물성을 이용하여 이론적으로 예측 가능한 성형한계모델이 다수 이용된다. 이론적 성형한계 모델에는 Swift가 제안한 확산네킹이론을 기반으로 하는 모델[4], Hill이 제안한 국부네킹이론을 기반으로 하는 모델[5], 그리고 Marciniak과 Kuczynski가 제안한 초기 판재 결함을 가정하여 성형한계를 예측하는 초기 형상 불안정성 이론을 기반으로 하는 모델(M-K 모델)[6] 등이 주로 적용된다. 특히, 확산네킹이론 및 국부네킹이론을 기반으로 하는 성형한계 모델에서는 평면변형률 하중모드에서의 성형한계는 재료 유동응력식에서의 가공경화지수와 동일하게 예측하는 이론적 한계로 인하여, 다양한 성형환경에서의 각종 합금 판재소재의 이론적 성형한계 예측에 제한이 있다[7]. 이러한 이유로, 초기 판재의 결함을 가정하여 성형한계를 이론적으로 예측 가능한 M-K 모델이 널리 적용되고 있으며, 이론적인 성형한계선도 예측에 있어서 M-K 모델 적용에 대한 연구도 다양한 측면에서 진행되고 있다 [8~12]. 하지만, 실험적인 성형한계선도를 기준으로 M-K 모델 기반의 이론적 성형한계선도를 예측하는 체계적인 절차를 제시하는 부분에서는 아직 미비한 실정이다. 본 연구에서는, 자동차용 부품 성형에 일반적으로 적용되고 있는 SPCC 강판 소재의 실험적 성형한계곡선을 기반으로 M-K 모델을 이용한 이론적인 성형한계선도 예측에 있어서 고려하여야 할 이론적 변수에 대하여 고찰하였다. 먼저, 한계 돔실험을 통하여 선정된 SPCC 강판소재의 성형한계 기준영역을 측정하였다. 아울러, 등방성 재료와 대표적인 금속 결정학적 구조에 따른 항복곡선을 표현 가능한 Hosford 79 항복조건식[13]을 이용하여, 항복함수에서의 항복함수 지수와 M-K 모델에서의 초기 결함도 및 판재 소재 파단 기준변수에 대한 이론적으로 예측 가능한 성형한계영역을 분석하였다.

2. 판재소재 기본 물성치

M-K 모델을 기반으로 이론적 성형한계영역을

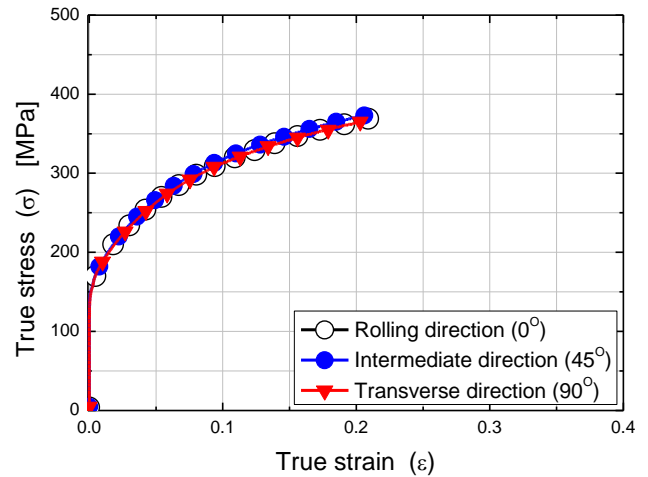


Fig. 1 Stress-strain curves with respect to the tensile test direction of SPCC sheet material

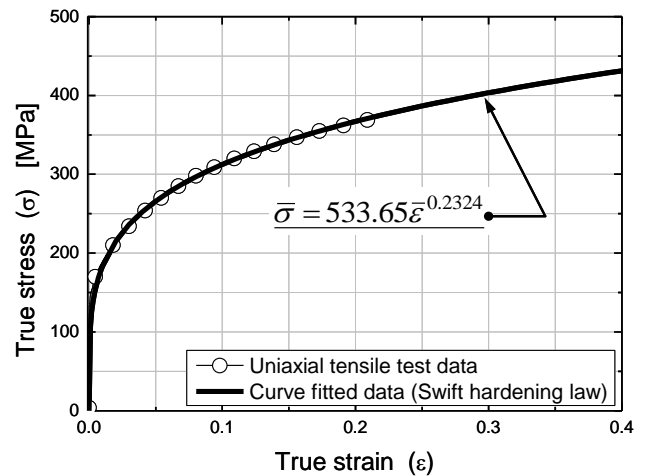


Fig. 2 Fitted flow stress model of SPCC sheet material based on Swift hardening law

Table 1 Anisotropy properties of SPCC sheet material

Parameter	<i>r</i> value
r_0	1.18
r_{45}	0.90
r_{90}	0.88
r	$0.97 \left(r = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \right)$

분석하기 위하여, 본 연구에서는 다양한 자동차용 판재부품 성형에 적용되는 일반 강판 소재인 SPCC 재료를 적용하였다.

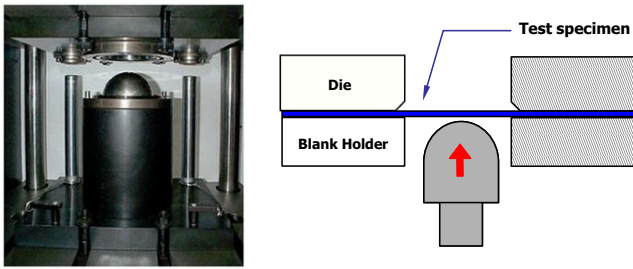


Fig. 3 Formability test equipment

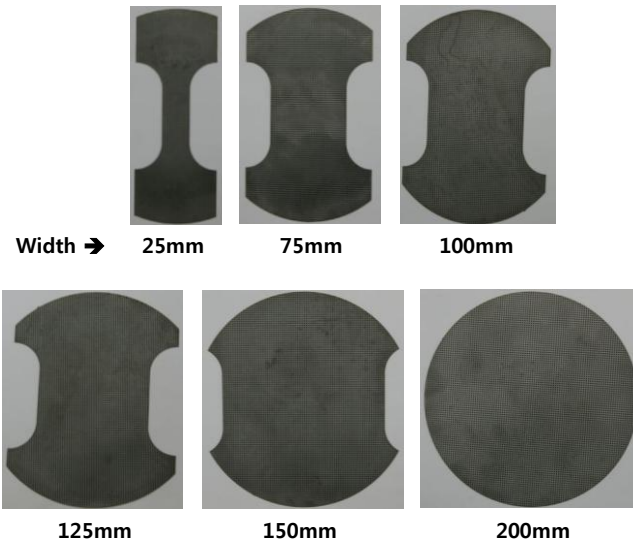


Fig. 4 Formability test specimens

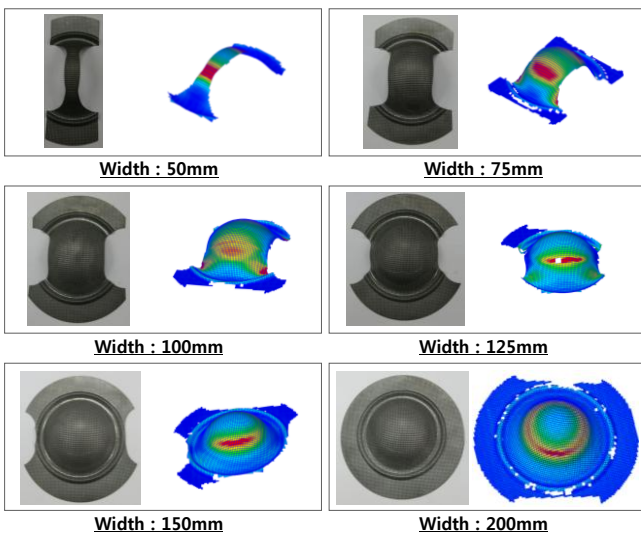


Fig. 5 Specimens after limit dome test: (left) tested configuration, (right) measured image by ARGUS software

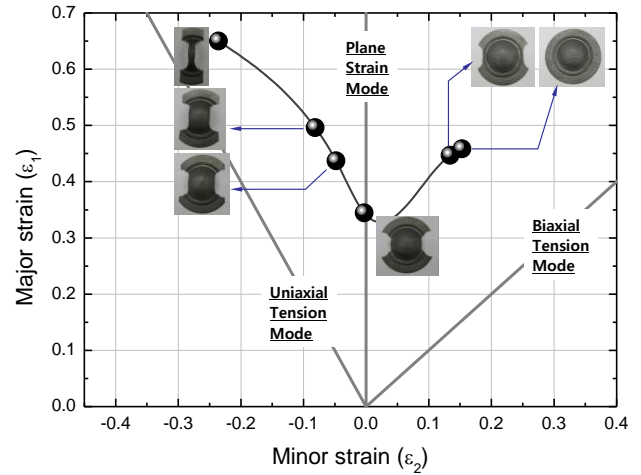


Fig. 6 Experimental forming limit curve

SPCC 강판소재의 유동응력식과 판재 이방성 특성을 확인하기 위하여 판재의 압연방향, 압연 직교방향 및 압연방향에 45도 기울어진 방향으로 단축 인장시험을 수행하였다. 각 방향별 단축 인장시험을 수행한 결과를 Fig. 1에 도시하였다. 본 연구에서 적용한 SPCC 강판 재료는 시험결과에서 알 수 있듯이 판재 면내에서의 이방성 효과는 무시 가능할 정도로 작음을 알 수 있다. Fig. 2에서는 유동응력모델 중 Swift 경화모델을 적용하여 비선형 곡선적합을 수행한 결과를 보여 주고 있다. 단축 인장시험 결과를 바탕으로 Swift 경화모델을 적용하여 SPCC 강판소재의 강도계수는 533.65MPa, 가공경화지수는 0.2324로 도출하였다. 아울러, 판재의 수직이방성 계수를 확인하기 위하여 ASTM E517 규격[14]에 준하여 추가적인 인장시험을 수행하였다. 판재 압연방향, 압연 직교방향 및 압연방향에 45도 기울어진 방향별 이방성 계수 및 이를 이용하여 계산된 수직이방성 계수는 Table 1에 정리하였다.

3. 한계 돔실험을 통한 성형한계선도

본 연구에서는 이론적으로 예측된 M-K 모델 기반 성형한계선도의 검증을 위하여 SPCC 강판소재를 이용하여 한계 돔실험을 수행하였다. Fig. 3에 도시한 장비는 TTM사에서 제작된 최대용량이 50Ton인 한계 돔실험 장비로서, 판재 소재에 반구형 펀치로 변형을 가하는 동안 소재 외곽에 적절한 블랭크 홀더력을 가하여, 돔 성형 시 판재 시편의 시험공간으로 유입을 효과적으로 방지할 수 있다.

반구형 편지를 이용한 Nakajima 한계 돛실험을 위하여 Fig. 4 에서와 같이, ISO/DIS 12004-2 규격[14]에서 제안하는 대로 길이 200mm 를 가지고, 폭이 각각 25mm, 75mm, 100mm, 125mm, 150mm 및 200mm 인 6 종류의 시험시편을 제작하였으며, 성형 시험 후 변형률 측정을 위하여 직경 0.9mm 원형격자를 2mm 간격 정방향으로 인쇄하였다.

한계 돛실험을 완료한 시편은 160031200 픽셀 해상도의 카메라 2 대로 구성된 3 차원 측정시스템 과 상용 프로그램인 ARGUS 를 이용하여 주변형률과 부변형률을 측정하였다. 각 시편에서 ISO/DIS 12004-2 규격에서 제시하는 바와 같이, 파단면 주변에서 측정된 값 중 가장 낮은 값을 갖는 변형률을 기준으로 한계 변형률을 정의하였다.

Fig. 5 는 6 종류의 시험시편의 한계 돛실험이 완료된 형상과 Argus 프로그램에서 측정된 변형률 분포 이미지를 확인할 수 있으며, 본 연구에서 선정된 SPCC 강판소재의 실험적 성형한계 영역은 Fig. 6 에 도시하였다.

4. 초기 형상불안정 기반 성형한계선도

이론적 성형한계선도를 예측하기 위한 M-K 모델에서는 판재 일부에 초기결함(Initial imperfection)을 가지는 선단영역을 가정하여 재료의 균일영역(Homogeneous region, A)와 결함영역(Imperfection region, B)으로 구분하고, 두 영역에서의 변형률 증분 값이 일정기준에 도달하였을 때 파단을 예측한다[6]. 먼저, 초기결함도 f_0 는 판재 재료의 초기 균일영역과 결함영역의 두께비로 식(1)과 같이 정의한다.

$$f_0 = t_0^B / t_0^A \quad (1)$$

여기서, t_0^A 과 t_0^B 는 각각 균일영역과 결함영역의 초기두께를 의미한다.

판재의 결함영역과 균일영역에서의 결함 선단에 수직한 방향을 주응력 방향으로 가정하고, 이 방향으로의 힘 평형관계로부터 식(2)를 유도할 수 있다.

$$\sigma_1^A t_0^A \exp(\epsilon_3^A) = \sigma_1^B t_0^B \exp(\epsilon_3^B) \quad (2)$$

여기서, σ_1^A, σ_1^B 과 $\epsilon_3^A, \epsilon_3^B$ 는 각각 균일영역과 결함영역의 주응력 방향의 응력과 두께방향 변형률을 의

미한다. 마지막으로 두 영역으로 구분된 초기 판재의 결함 선단 길이방향으로는 식(3)과 같은 판재의 형상 적합조건(Compatibility condition)을 만족하여야 한다.

$$\epsilon_2^A = \epsilon_2^B (\equiv \Delta\epsilon_2^A = \Delta\epsilon_2^B) \quad (3)$$

여기서, $\epsilon_2^A, \epsilon_2^B$ 과 $\Delta\epsilon_2^A, \Delta\epsilon_2^B$ 는 각각 균일영역과 결함영역의 결함 선단 길이방향의 변형률과 변형률 증분을 의미한다. 여기에 재료의 유동응력식과 다음 절에서 설명될 재료의 항복조건식 및 등가소성일정의를 추가로 적용하여, 초기 균일영역 주변형률 방향의 변형률 증분을 가정하고 반복계산을 통하여 식(1)에서 (3)까지를 만족하는 값들을 구할 수 있다.

M-K 모델 기반의 이론적 성형한계선도 예측에서 파단 기준은 다수의 정의가 적용되고 있으나[8~12], 본 연구에서는 상기 식(1)에서 (3)을 만족하는 값 중에서, 판재의 균일영역과 결함영역의 두께 변형률 값을 비교하여 결함영역의 두께 변형률이 초기 결함의 영향으로 균일영역보다는 더 작은 변형률 수준에서 판재가 파단된다는 보다 물리적인 재료의 변형 현상학적 가정을 토대로, 균일영역과 결함영역의 두께방향 변형률비($\delta = \epsilon_3^A / \epsilon_3^B$)를 파단기준 변수로 정의하고, 파단기준 변수가 특정 기준값에 도달할 때, 파단이 발생하고 그 때의 균일영역 방향별 주변형률 값을 한계변형률로 정의하였다[12].

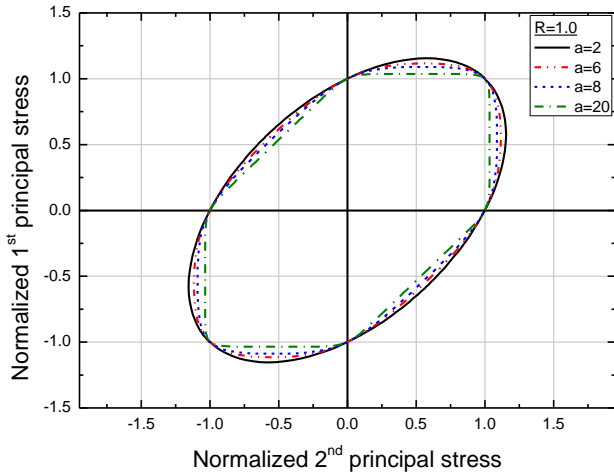
4.1 항복함수에 의한 영향

본 연구에서는 M-K 모델을 기반으로 이론적 성형한계선도를 예측하기 위하여, Hosford 79 비이차 이방성 항복함수(Non-quadratic anisotropic yield function)를 적용하였다. 일반적인 형태의 Hosford 79 항복함수는 다음과 같다.

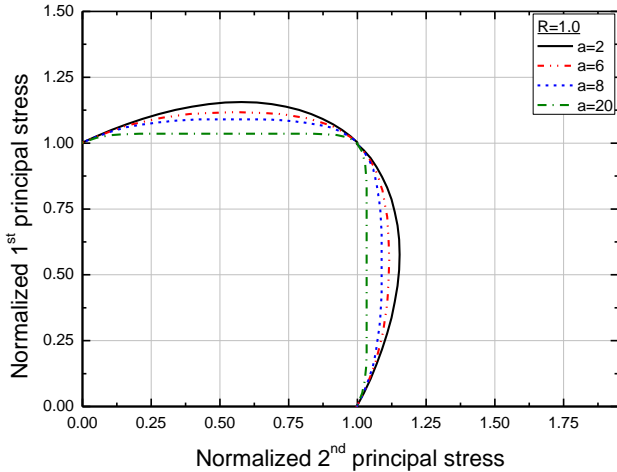
$$f(\sigma_{ij}) = F|\sigma_2 - \sigma_3|^a + G|\sigma_3 - \sigma_1|^a + H|\sigma_1 - \sigma_2|^a = 1 \quad (4)$$

여기서, F, G, H 는 주응력 방향별 항복강도의 조합들로 표현 가능한 상수들을 의미하며, a 는 항복함수 지수를 의미한다. Hosford 79 항복함수에서 항복함수 지수는 금속의 결정학적 구조를 고려하여 결정할 수 있다.

판재의 수직이방성(Normal anisotropy) 만을 고려하고, 두께가 얇은 판재에 대한 평면응력 상태로 가정



(a) Yield curve for plane stress condition



(b) 1st quadrant of yield curve on (a)

Fig. 7 Yield locus based on Hosford 79 yield function with respect to the yield function exponent, a

하게 되면, 식(4)는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\bar{\sigma} = \left[\frac{1}{1+r} \left(1 + |\alpha|^a + r|1-\alpha|^a \right) \right]^{1/a} |\sigma_1| \quad (5)$$

where, $\alpha = \sigma_2 / \sigma_1$

여기서, r 은 수직이방성 계수(Normal anisotropy parameter)를 의미한다.

본 연구에서 적용된 Hosford 79 항복함수에서 항복함수 지수 a 가 2로 정의되는 경우에는 등방성 재료를 의미하며, 체심입방격자(BCC) 금속에서는 6, 면심입방격자(FCC) 금속에서는 8을 적용한다[13].

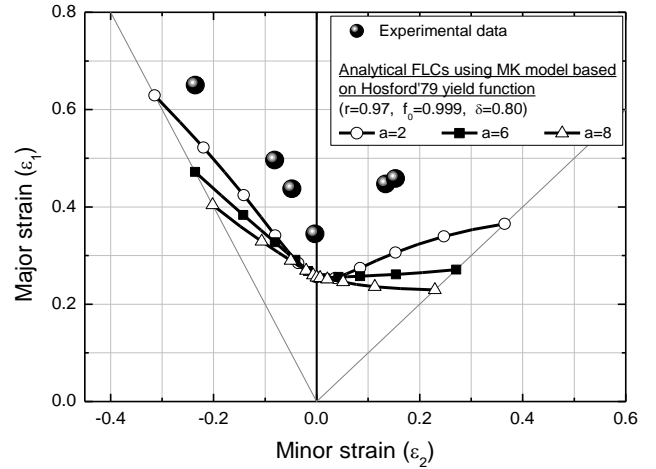


Fig. 8 Analytical forming limit curves with respect to yield function exponent in Hosford 79 yield function

각각의 경우에 대한 평면응력 조건에서의 항복곡선은 Fig. 7에 나타내었다. 항복함수 지수 a 가 커질수록, 재료의 탄성영역이 좁아짐을 알 수 있다.

M-K 모델 기반의 이론적 성형한계선도 예측에 있어서, 선정된 SPCC 강판소재의 방향별 인장시험 결과를 기반으로 수직 이방성계수로 0.97 을 적용하고, 초기 결함도를 0.999, 파단 기준변수를 0.8 로 고정한 상태에서 항복함수 지수 a 가 2, 6 및 8 로 변하는 경우에 대하여 예측된 성형한계선도를 Fig. 8 에 도시하였다. 금속의 결정학적 구조에 따른 슬립계의 증가에 따라, 즉, 항복함수 지수 a 가 증가함에 따라, 성형한계 영역이 다소 증가함을 알 수 있다. 그러나, SPCC 강판소재에 대한 실제 한계 돌출시험에서 도출된 성형한계곡선보다는 성형한계 영역을 다소 낮은 수준으로 예측함을 알 수 있으며, 이것은 앞서 언급한 특정값으로 고정된 나머지 변수가 이론적 성형한계선도 예측에 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다.

4.2 초기결함도 인자의 영향

일반적으로 M-K 모델 기반 이론적 성형한계선도 예측에는 초기결함도 f_0 는 0.98 이상의 값이 적용된다[6, 8~12]. 초기결함도는 판재 재료의 초기 균일영역과 결함영역의 두께비로 정의되었기 때문에, 1 에 가까울수록 판재가 균질하므로 한계성형영역이 높다고 판단할 수 있다.

본 연구에서는 초기결함도 값을 0.98, 0.99 및 0.999 로 증가시키면서 이론적 성형한계선도를 예측

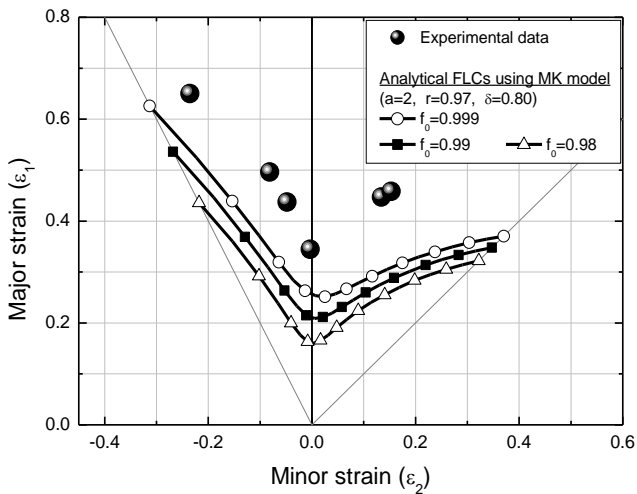


Fig. 9 Analytical forming limit curves with respect to initial imperfection parameter in M-K model

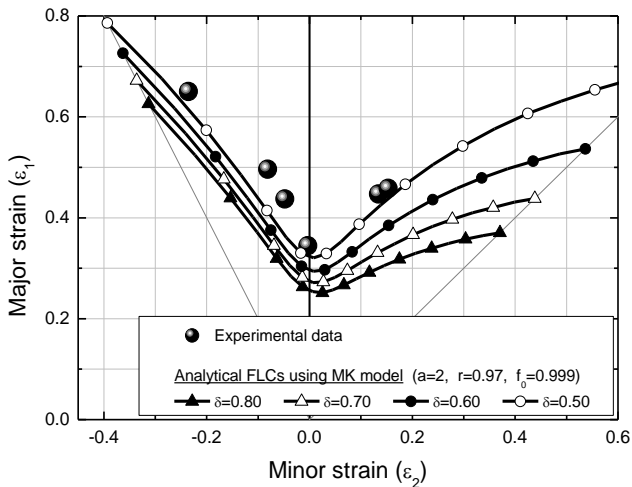


Fig. 10 Analytical forming limit curves with respect to fracture instability criteria in M-K model

하고 분석하였다. Fig. 9 에는 판재의 수직이방성 계수를 0.97 로, 항복함수에서의 항복함수 지수를 2 로 적용하고, 판재 파단 기준변수를 0.8 로 고정한 상태에서 초기결함도 값에 따른 이론적 성형한계도 예측결과를 도시하였다. M-K 모델의 초기결함도 정의에서 직관적으로 알 수 있었듯이, 초기결함도 값이 커질수록 한계성형영역이 더 넓어짐을 알 수 있다. 초기 결함도 변화에 따른 이론적 성형한계선도 예측을 통하여, 본 연구에 적용된 SPCC 강판소재의 초기 결함 분포가 아주 낮은 수준임을 알 수 있으며, 일반적으로 판재소재 시편 표면상태가 육안으로 확인하였을 때 결함분포가 확인되지 않을 경우에는 초기결함도

값은 최대한 1 에 가까운 값을 할당하는 것이 통상적임을 알 수 있다[8~12]. 그러나, 여전히 실제 실험에서 도출된 성형한계곡선보다는 이론적으로 성형한계영역을 다소 낮은 수준으로 예측함을 알 수 있으며, 이것은 또 다른 인자가 이론적 성형한계 영역 예측에 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다.

4.3 파단 기준인자의 영향

M-K 모델 기반의 이론적 성형한계선도 예측에는 힘 평형 지배방정식을 만족하는 변형률 값들 중에서 한계 변형률로 간주할 수 있는 파단 기준정의가 다수 적용되고 있으나, 본 연구에서는 보다 물리적인 재료의 변형 현상학적 가정을 토대로 판재의 균일영역과 결함영역의 두께 변형률 값을 비교하여 균일영역의 두께 변형률이 초기 결함의 영향으로 결함영역보다는 더 작은 변형률 수준에서 판재가 파단된다는 기준을 적용하였다. 이 때, 파단 기준변수로는 균일영역과 결함영역의 두께방향 변형률비 ($\delta = \epsilon_3^A / \epsilon_3^B$)를 정의하여, 균일영역 두께방향 변형률이 결함영역 두께방향 변형률의 특정수준에 도달할 때, 파단이 발생하고 그 때의 균일영역 방향별 주변형률 값을 한계변형률로 정의하였다.

본 연구에서는 파단 기준변수로서의 두께방향 변형률비 δ 값을 0.5, 0.6, 0.7 및 0.8 수준에서 이론적 성형한계선도를 예측하여 Fig. 10에 비교하였다. 파단기준 변수값이 작아질수록 이론적 성형한계영역이 더 넓어짐을 알 수 있다. 본 연구에서 적용한 두께방향 변형률비 값이 작아질수록 초기 가정된 판재의 균일영역과 결함영역의 변형률 차이가 커짐을 의미하며, 균일영역과 결함영역에서의 과도한 변형률 차이 상황에서도 파단되지 않고 견딜 수 있음을 의미한다. Fig. 10에서 알 수 있듯이, 파단기준 변수값이 약 0.5 수준일 경우 실제 실험으로 측정된 성형한계곡선에 아주 근접하게 예측함을 알 수 있다. 본 연구에서 선정된 SPCC 강판 소재의 경우, 결함영역 두께방향 변형률이 균일영역 두께방향 변형률의 2배 수준까지 파단되지 않고 견딜 수 있음을 상기 예측결과를 통하여 판단 가능하다.

5. 결론

본 연구에서는 자동차용 부품 성형에 일반적으로 적용되고 있는 SPCC 강판 소재를 이용하여, 한계 돔

실험 및 M-K 모델 기반의 이론적인 성형한계선도 예측 결과를 고찰하였다. 성형성에 있어서 다양한 특성을 가지는 합금 판재소재에 대한 이론적 성형한계선도 예측에 있어서는 소재의 특성을 적절히 표현할 수 있는 이론적 모델 및 적용하는 성형한계모델에서의 이론적 변수들이 적용소재의 특성을 효과적으로 묘사 가능한지에 대한 면밀한 검토가 요구됨을 확인하였다.

먼저, 이론적 성형한계선도 예측에 있어서 재료의 항복특성을 결정할 수 있는 항복함수 선정이 한계 성형영역 결정에 영향을 끼침을 확인하였다. 본 연구에서는 제한된 Hosford 79 항복함수를 적용하여, 항복함수 지수에 따른 결과를 비교하였지만, 적용된 항복함수 이외의 다양한 항복조건식에 따라서도 예측결과가 차이가 있을 것이라 판단해 볼 수 있다. 아울러, M-K 모델 기반의 이론적 성형한계선도 예측을 위한 초기 결함도 값은 판재소재 표면의 특성을 고려하여 일반적인 소재에 대해서는 가능한 1에 가까운 값으로 지정해야 함을 알 수 있었다. 마지막으로, M-K 모델 기반으로 이론적 성형한계선도를 실제 실험으로 도출된 성형한계선도에 부합되게 예측하기 위해서는 실제 성형공정에 적용되는 판재 소재의 특성을 효과적으로 표현할 수 있도록 성형한계모델에 적용되는 변수 값을 적절히 조정할 필요성을 확인하였다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었으며, 교신저자는 이에 감사 드립니다.

REFERENCES

- [1] M. Gensamer, 1946, Strength and Ductility, Trans. Am. Soc. Metal., Vol. 36, pp. 30~60.
- [2] S. P. Keeler, W. A. Backofen, 1963, Plastic Instability and Fracture in Sheets Stretched over Rigid Punches, Trans. Am. Soc. Metal., Vol. 56, pp. 25~48.
- [3] G. M. Goodwin, 1968, Application of Strain Analysis to Sheet Metal Problems in the Press Shop, SAE Technical paper 680093.
- [4] H.W. Swift, 1952, Plastic Instability under Plane Stress, J. Mech. Phys. Solids., Vol. 1, No. 1, pp. 1~18.
- [5] R. Hill, 1952, On Discontinuous Plastic State with Special Reference to Localized Necking in Thin Sheets, J. Mech. Phys. Solids., Vol. 1, No. 1, pp. 19~30.
- [6] Z. Marchiniak, K. Kuczynski, 1967, Limits Strains in the Processes of Stretch Forming Sheet Metal, Int. J. Mech. Sci., Vol. 9, No. 9, pp. 609~620.
- [7] W. J. Song, Y. S. Byun, S. C. Heo, S. W. Kim, Y. S. Lee, T. W. Ku, B. S. Kang, J. Kim, 2011, Prediction and Confirmation of Analytical Forming Limit Curves of Magnesium Alloy Sheet Based on Flow Stress Modelling and Experiments Considering Temperature and Strain Rate Effects, Steel Res. Int., Special Vol. pp. 871~876.
- [8] D. Banabic, E. Dannenmann, 2001, Prediction of the Influence of Yield Locus on the Limit Strains in Sheet Metals, J. Mater. Process. Technol., Vol. 109, No. 1, pp. 9~12.
- [9] S. Ahmadi, A. R. Eivani, A. Akbarzadeh, 2009, An Experimental and Theoretical Study on the Prediction of Forming Limit Diagrams using New BBC Yield Criteria and M-K Analysis, Comp. Mater. Sci., Vol. 44, No. 4, pp. 1272~1280.
- [10] Y. Lou, S.B. Kim, H. Huh, 2010, Analytical Study of the Effect of Material Properties on the Formability of Sheet Metals Based on the M-K Model, Tans. Mater. Process., Vol. 19, No. 7, pp. 393~398.
- [11] A. R. Bazzaz, H. Noori, R. Mahmudi, 2011, Calculation of Forming Limit Diagrams using Hill's 1993 Yield Criterion, Int. J. Mech. Sci., Vol. 53, No. 4, pp. 262~270.
- [12] H. Aretz, 2007, Numerical Analysis of Diffuse and Localized Necking in Orthotropic Sheet Metals, Int. J. Plast., Vol. 23, No. 5, pp. 798~840.
- [13] W. F. Hosford, 1979, Proc. 7th North American Metalworking Research Conference.(eds. J. T. Black, B. Chern, M. Devries, W. R. Devries, et al.), Society of Manufacturing Engineers, Michigan, USA, pp. 191~196.
- [14] ASTM Standards, 2010, Standard Test Method for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal, ASTM E517.
- [15] ISO Copyright Office, 2006, Metallic Materials: Sheet and Strip – Determination of Forming Limit Curves, ISO/DIS 12004-2.