

실험계획법을 이용한 성형한계곡선 최적화 연구

임희택¹, 이병주¹, 임영목¹, 김병기¹, 김정환[#]

Forming Limit Curve Optimization using Design of Experiments

H. T. Lim, B. J. Lee, Y. M. Rhyim, B. K. Kim and J. H. Kim

Abstract

Forming limit diagram is created by graphical illustration indicating major and minor strain. In order to provide the criterion for forming safety, FLC(forming limit curve) need to be fitted to the diagram. However, the standard method for the strain measurement and FLC plotting are not fixed yet, which results in inconvenience in digitalized analysis. In this study, new construction method for FLC was suggested in order to minimize operator dependency. For this purpose, major and minor strain were measured automatically and analyzed. Then, a second order equation is adopted to fit the FLC. Optimized by response surface method was performed to ensure particular characteristics of the FLC.

Key Words : Forming Limit Diagram, Forming Limit Curve, Optical Grid Analyzer, Design of Experiments, Response Surface Method

1. 서론

성형한계도(forming limit diagram, FLD)는 금속판재의 성형성을 평가하기 위해 네킹(necking)이나 찢어짐(tearing)이 발생한 부위의 변형률 상태를 측정하여 다양한 비례변형경로에 대하여 주변형률-부변형률 평면에 파단(fracture)과 안전(safe)의 경계를 구분하여 표시한 것이다. 현재 판재의 성형성 및 성형난이도를 분석하기 위한 가장 보편적이고 합리적인 방법으로 알려져 있다[1].

특히, 최근 컴퓨터 기술의 발전으로 인해 판재 성형공정을 시뮬레이션으로 예측하는 것이 보편화되어 있으며 관련 연구자들의 폭넓고 다양한 연구를 통해 높은 신뢰성을 보여주고 있다[2]. 그러나 높은 신뢰성의 판재성형해석 결과를 얻기 위해서는 정확한 소재 물성정보와 성형한계 관련 데이터의 확보가 선행되어야 한다. 하지만 성형한계 관련 데이터인 성형한계곡선(forming limit curve, FLC)의 제작에는 고가의 장비와 많은 시간이 소요되기 때문에 대다수의 경우에 인장시험을 통해

얻어진 소재 물성치만을 이용하여 판재성형해석을 수행하고 있다[3].

이와 같은 문제점을 각 연구자 별로 따로 해결하는 것은 현실적으로 한계를 가지고 있다. 따라서 이를 개선하고자 한국기계연구소 부설 재료연구소는 지식경제부의 지원 하에 금속소재정보은행을 설립하였다. 금속소재정보은행은 수요자들이 필요로 하는 다양한 금속소재정보를 수집, 생성 및 가공하여 보급하는 것을 설립 목적으로 하고 있으며 현재 홈페이지(www.metalsbank.com)를 통해 성형한계곡선 및 다양한 물성정보를 제공하고 있다. 그러나 웹사이트를 통해 활용도 높은 물성정보를 제공하기 위해서 모든 데이터를 디지털화해야 하는 어려움을 갖고 있다.

일반적으로 성형한계곡선은 자유곡선의 형태를 가지고 있다. 그러나 성형한계곡선의 활용을 위해 사용자가 직접 점 데이터를 생성해야 하며 사용자에게 따라 편차가 높은 데이터를 생성할 수 있기 때문에 편의성이 떨어지고 표준화가 어렵다. 또한 성형한계곡선의 생성시 작업자의 주관이 많이 반영되기 때문에 동일한 실험에서도 일정한

1. 한국재료연구원 부설 재료연구소
교신저자: 한국재료연구원 부설 재료연구소
E-mail: kjh1754@kims.re.kr

형태의 성형한계곡선을 기대하기 어렵다.

본 연구에서는 금속소재정보은행 홈페이지를 통해서 다양한 사용자가 성형한계곡선을 편리하게 이용할 수 있도록 간단한 방정식 형태의 성형한계곡선을 제안하였다. 또한 작업자에 상관없이 일정한 성형한계곡선을 생성할 수 있도록 실험계획법을 이용한 최적화 방법을 제안하여 디지털화된 성형한계곡선의 활용 가능성에 대하여 살펴보았다.

2. 성형한계시험

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 최적화된 성형한계곡선을 생성하기 위한 순서도이다. 우선 시험하는 소재의 특성과 측정 방법을 고려하여 시편 형상을 결정하였고, 에릭슨 시험기와 광학 그리드 분석기(optical grid analyzer)를 이용하여 성형한계시험을 수행한 후 성형 모드별 데이터를 측정하였다. 마지막으로 측정된 데이터를 이용하여 성형한계곡선의 요구조건에 부합하도록 실험계획법에 의해 성형한계곡선을 최적화하였다.

일반적으로 성형한계 시험용 시편의 변형률을 측정하기 위해 시편 표면에 일정한 형태의 에칭(etching) 그리드 패턴을 만드는 방법을 사용한다. 그러나 본 연구에서는 스프레이를 이용하여 시편 표면에 불규칙적인 패턴을 만들고 2대의 CCD 카메라를 이용하여 3차원 형상으로 변형률을 측정할 수 있는 광학 그리드 분석기를 사용하였다.

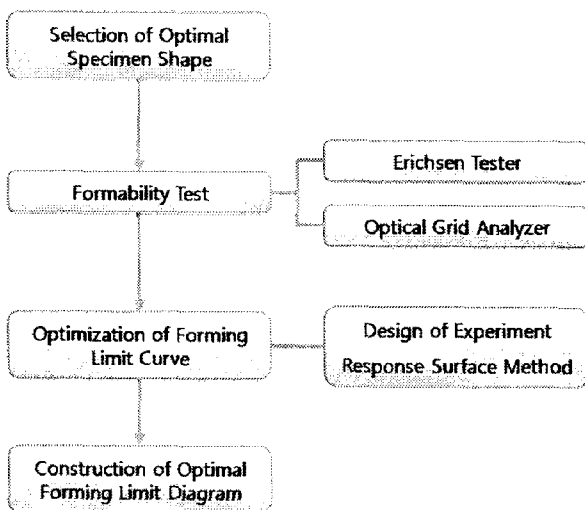
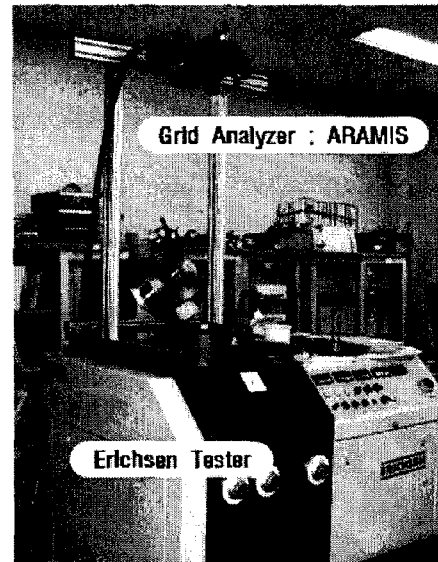
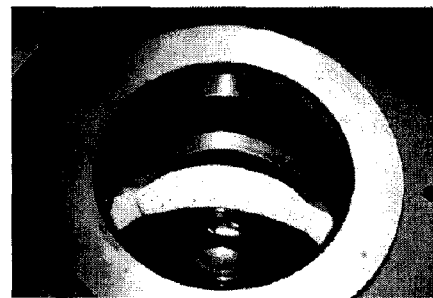


Fig. 1 Optimization process of forming limit curve using design of experiments

Fig. 2의 (a)는 금속소재정보은행에 구성된 성형한계 평가시스템이며 (b)는 반구형 펀치로 성형된 시편의 모습이다. 성형한계시험은 Table 1처럼 준비한 시편을 에릭슨 시험기의 반구형 펀치로 네킹이 발생할 때까지 성형하고 시편 성형 시 변형된 표면의 스프레이 패턴을 측정하여 변형률 분포를 계산한다. Fig. 3은 SPRC440 소재의 성형한계 시험을 통해 측정된 변형률 데이터이다.



(a) Optical grid analyzing system



(b) Formed specimen by punch of dome type

Fig. 2 Optical grid analyzing system for forming limit diagram

Table 1 Specimen dimensions for forming limit test

Test type	Non-lubrication	Lubrication
Horizontal length (mm)	200	200
Vertical length (mm)	200, 150, 130, 110 (Rectangle) 90, 70, 50, 30 (Notch)	200, 150 (Rectangle)

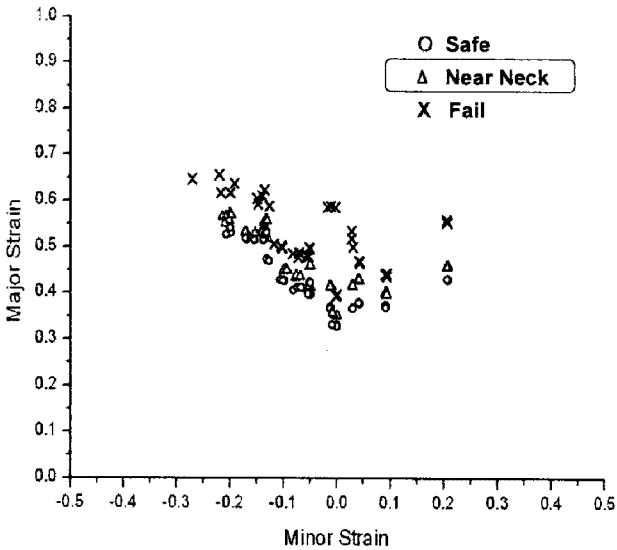


Fig. 3 Strain data of SPRC440 by FLD test

3. 성형한계곡선 최적화

성형한계곡선은 Fig. 3과 같이 성형한계시험으로 측정된 소재의 변형률을 주변형률-부변형률 평면에 점으로 나타내고 안전 데이터 중 가장 높은 데이터 들을 연결하여 생성한다. 그러나 이와 같은 방법은 매우 이상적인 경우에만 적용될 수 있다. 실제 성형한계시험을 통해 구한 변형률 데이터는 파단 임계값이 명확하지 못하고 파단 및 안전 데이터가 혼재되어 분포하기 때문에 성형한계곡선을 생성할 수 있는 명확한 기준이 필요하다. 명확한 기준이 없는 경우, 동일한 변형률 데이터를 이용하더라도 실험자에 따라 다른 형태의 성형한계곡선이 만들어지므로 성형한계곡선의 일관성이 결여될 수 있기 때문에 이를 개선하기 위하여 실험계획법을 이용한 성형한계곡선 최적화 방법을 제안하여 적용하였다. Fig. 4는 실험계획법을 이용하여 성형한계선을 최적화하는 순서를 나타낸 것이다.

3.1 성형한계곡선 방정식 결정

본 연구에서는 금속소재정보은행이 수요자들에게 편리하고 다양한 활용이 가능한 성형한계곡선을 제공할 수 있도록 방정식 형태의 성형한계곡선을 제안하였다. Fig. 5는 다양한 형태의 성형한계곡선을 보여주고 있으며 성형한계곡선은 보편적으로 중심축을 가지고 있고 좌우의 그래프 형태

가 다른 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 식 (1)과 같이 중심축으로 구분되는 2개의 이차방정식을 가지는 성형한계곡선 형태를 최종 제안하였다.

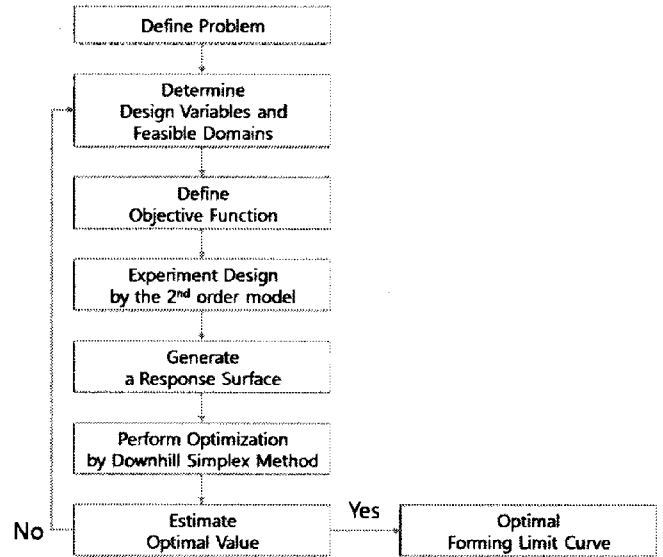


Fig. 4 Optimization process of FLC using design of experiments

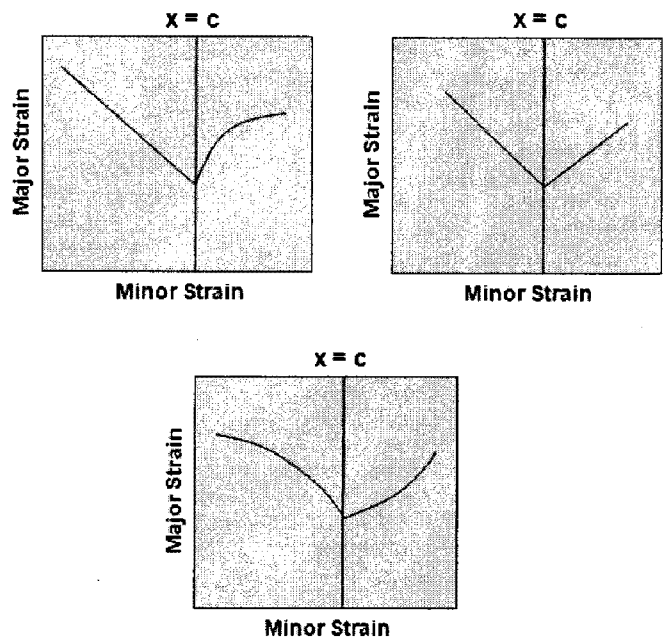


Fig. 5 Forming limit curve of various type

$$\begin{aligned}
 &x = c \text{ (Center Axis)} \\
 &x < c, \quad y_1 = a_1x^2 + b_1x + c_1 \\
 &x > c, \quad y_2 = a_2x^2 + b_2x + c_2
 \end{aligned} \tag{1}$$

1st objective function

$$\text{Minimize } f_1 = \sum_{i=1} (y_i - y_{necking})^2 \quad (2)$$

2nd objective function

$$\text{Maximize } f_2 = \text{countif}(y_{fracture} - y_i > 0) \quad (3)$$

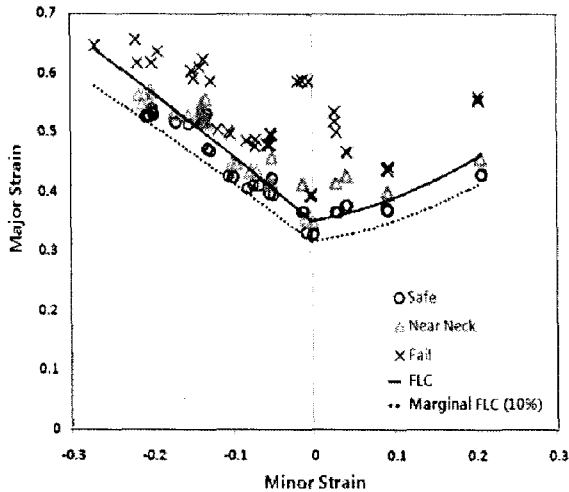


Fig. 6 Optimal forming limit curve of SPRC440 using design of experiments

Table 2 Final equation of optimal forming limit curve (SPRC440)

Area	Equation of optimal forming limit curve
$x < 0$	$y_1 = -0.24x^2 - 1.14x + 0.35137$
$x > 0$	$y_2 = 1.85x^2 + 0.25x + 0.35137$

3.2 실험계획법을 이용한 최적화

실험계획법을 이용한 최적화는 적절한 목적함수를 정의 및 반복적인 계산에 의해서 원하는 조건을 만족하는 최적값에 근접할 수 있도록 도와준다[4]. 본 연구에서는 실험계획법 중 반응표면법을 이용하여 성형한계곡선을 최적화하였다.

본 연구에서 적용된 실험계획법을 이용한 성형한계곡선의 최적화 방법은 다음과 같이 3단계로 구분할 수 있다. 첫 번째, Fig. 3의 변형률 데이터를 기초로 하여 최소자승법(least square method)에 의해 초기 성형한계곡선으로 사용할 이차 회귀방정식을 구한다. 두 번째, 중심축을 결정하고 변형률 데이터를 드로잉(drawing) 및 장출(stretching) 모드 영역으로 나눈 후 성형한계선도가 네킹 데이터의 추세가 되도록 첫 번째 목적함수를 정의하고 최적화를 수행한다. 세 번째, 앞서 생성된 성형한계곡선 위쪽에 위치하는 파단 데이터의 개

수가 최대가 되도록 두 번째 목적함수를 정의하고 최적화를 수행한다. Fig. 6는 식 (2)와 식 (3)의 목적함수에 의해 최적화된 SPRC440 소재의 성형한계곡선이며 Table 2는 드로잉 영역과 장출 영역의 최종 성형한계곡선 방정식이다.

4. 결론

본 연구에서는 높은 편의성과 표준화된 형태의 성형한계곡선을 다양한 수요자들에게 제공하기 위해 성형한계곡선 방정식과 실험계획법을 이용한 최적화 방법을 제안하고 수행하였으며 그 활용가능성에 대하여 확인하였다.

(1) 다양한 형태의 성형한계곡선을 표현할 수 있도록 중심축과 2개의 이차방정식으로 드로잉 및 장출 영역의 성형한계곡선 형태를 정의하였다.

(2) 성형한계곡선의 요구특성을 만족하는 목적함수를 정의하여 실험계획법을 이용한 성형한계곡선의 최적화 프로세스를 제안하였다.

하지만 최적화된 성형한계곡선 방정식의 신뢰성이 확보되지 않았으므로 추후 산업현장 등에 적용하여 물질정보의 신뢰성을 확보하는 연구가 수반되어야 할 것이다.

후기

본 연구는 지식경제부의 소재정보은행 구축사업의 지원으로 이루어 졌으며, 아울러 많은 도움을 주신 관계자 분들께 깊은 감사를 표합니다.

참고 문헌

- [1] 김낙수, 김형중, 소성가공과 해석, 문운당
- [2] Kim, H. J., Jeon, B. H., Kim, H. Y. and Kim, J. J., 1993, Finite Element Analysis Liquid Bulge Forming Process of T-Shaped Pipe by and Explicit Code, Advanced Technology of Plasticity, pp.545~550.
- [3] H. Y. Kim, H. T. Lim, H. Y. Kim and D. J. Lee, 2007, The effect of prebending on the Formability in the tube hydroforming process of an aluminum rear subframe, Metals and materials Int., Vol. 13, No. 2, pp. 87~92.
- [4] R. H. Myers, D. C. Montgomery, 2004, Response Surface Methodology second edition, Wiley co.