

전변형과 굽힘을 이용한 초고강도 철강 판재의 반복 거동 측정

채준열¹ · 정재봉¹ · Shun-lai Zang² · 김지훈[#]

Measurement of Cyclic Behavior of Advanced High Strength Steel Sheets Based on Pre-straining and Bending

J. Y. Chae, J. Jung, S. L. Zang, J. H. Kim

(Received November 14, 2016 / Revised January 12, 2017 / Accepted January 12, 2017)

Abstract

Cyclic behavior of advanced high strength steel sheets was measured using an inverse-optimization approach with pre-straining and bending. First, tensile specimens were pre-strained, and three-point bending was conducted for the pre-strained specimens. By using the inverse finite element optimization, the combined isotropic-kinematic hardening parameters that minimize the error between the measured and predicted bending force-displacement curves. The measured cyclic behavior agreed well with the cyclic behavior measured by sheet tension-compression test, which confirms the validity of the measuring procedure based on inverse optimization.

Keywords : Bauschinger Effect, Inverse Optimization, Elastoplastic Behavior, Kinematic Hardening, Three-point Bending

1. 서 론

금속 판재의 드로잉(drawing) 공정에서는 두께 방향 위치에 따라 평면 방향으로 압축 뒤 인장이나 인장 뒤 압축 등 반복 변형이 일어난다. 이러한 과정에서 발생하는 재료 내부의 응력 분포는 성형력과 스프링백에 큰 영향을 미친다[1]. 따라서 드로잉이 포함된 판재 성형 공정 해석의 정밀도를 높이기 위해서는 판재의 반복 거동을 측정하고, 반복 거동을 표현할 수 있는 재료 모델을 사용하여 유한 요소 해석을 수행하여야 한다.

판재의 반복 거동을 측정하기 위해서는 평면 방향으로 압축 변형을 가해야 한다. 판재는 평면 방향으로 압축하면 쉽게 좌굴이 발생하여 압축 거동을 측정하기에 어려움이 있다. 판재의 압축 시험을 위해서 판으로 시편을 뒀고 압력을 가해서 좌굴을 방

지하는 방법으로 반복 거동을 측정할 수 있다. 좌굴 방지판으로는 시편 전체를 덮는 평판 형태[2, 3], 또는 포크 형태의 판이 사용된다[4, 5]. 좌굴 방지판은 볼트 등으로 두께 방향으로 변형하지 못하도록 고정하거나 중력, 공압, 유압 등을 이용하여 압력을 가하기도 한다. 좌굴 방지판을 이용하는 방식은 판재의 두께 방향으로 압력이 작용하기 때문에 시편이 이축 응력을 받게 되며, 시편과 좌굴 방지판의 마찰에 의해 마찰력이 발생한다. 따라서 일축 응력 상태의 인장-압축 거동을 얻기 위해서는 이축 응력 효과와 마찰력을 보정해주어야 한다[3].

좌굴 방지판을 이용한 인장-압축 시험은 경우에 따라 복잡한 장치가 필요하고 결과를 보정해 주어야 하는 등의 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Zang 등은 일축 인장된 시편을 이용한 굽힘 시험을 수행하고 굽힘 시험 결과를 재현하는 재료

1. 부산대학교 기계공학부

2. Department of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University

Corresponding Author: School of Mechanical Engineering, Pusan National University, kimjih@pusan.ac.kr

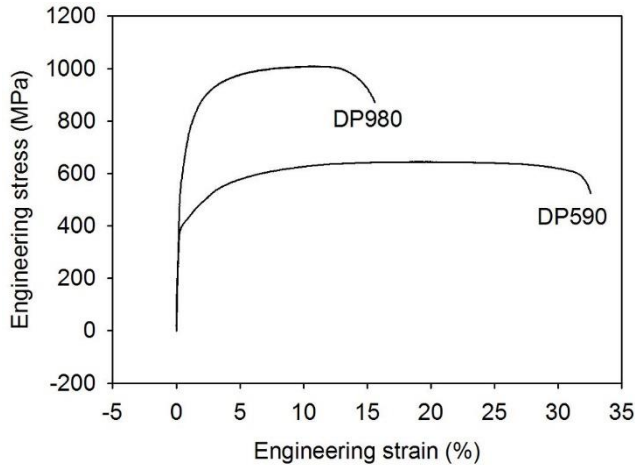


Fig. 1 Engineering stress-strain curves of DP590 and DP980 sheets

상수를 유한 요소 해석 역최적화를 통해서 구하는 방법을 제안하고 전단 반복 시험을 수행하여 측정된 결과를 검증하였다[6]. 이러한 방법은 만능 시험기와 3점 굽힘 금형으로 간단히 수행할 수 있으며, 이축 응력이나 마찰 효과를 보정해 줄 필요가 없기 때문에 인장-압축 시험을 수행하기 어려운 경우 판재의 반복 거동을 측정할 수 있는 유용한 방법이다. 특히, 얇은 판재의 경우 기존의 방법으로는 좌굴을 방지하기 어렵지만, 인장 뒤 굽힘 방법을 이용하면 반복 거동을 측정할 수 있다.

본 연구에서는 초고강도강 판재의 반복 거동을 측정하기 위해서 판재를 일정한 변형을 만큼 인장한 후에 3점 굽힘을 해서 얻은 굽힘 하중에 대하여 유한 요소 역최적화를 수행하였다. 이렇게 얻은 반복 거동을 좌굴 방지판을 이용해서 실험적으로 얻은 반복 거동과 비교하여 검증하였다.

2. 실험

2.1 소재 및 인장 시험

본 연구에서는 두 종류의 초고강도강(DP980, DP590)을 이용하여 분석을 진행하였다. DP980과 DP590 판재의 두께는 각각 1.1mm, 1.2mm 이다. 인장 시험기를 이용하여 얻은 두 소재의 RD 방향 인장 시험 결과는 Fig. 1과 같다.

2.2 전변형 후 굽힘 시험

역최적화를 위한 소재의 거동을 측정하기 위하여

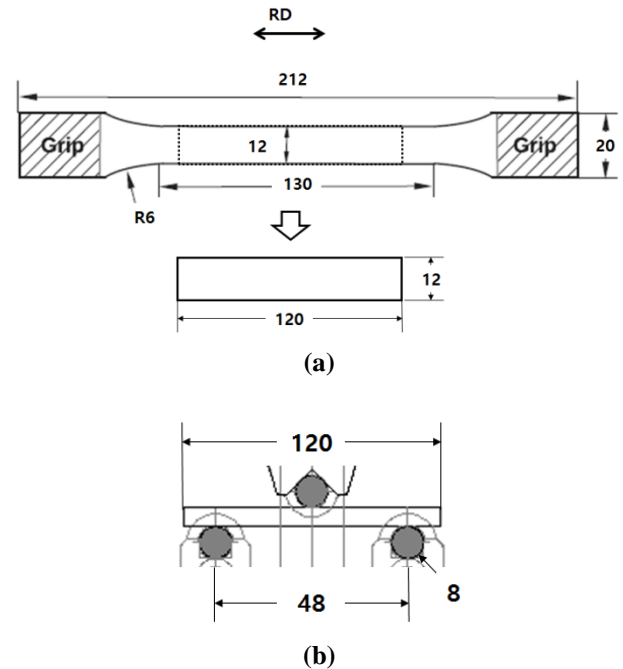


Fig. 2 Bending of pre-strained specimens (a) tensile and bending specimens (b) three-point bending fixture

두 가지 소재에 대해서 전변형 후 굽힘 시험을 수행하였다. 전변형은 소재의 연성을 고려하여 DP980 소재의 경우 0%, 3%, 6%, DP590 소재는 0%, 4%, 8%, 12% 인장하였으며 인장 방향은 RD 방향이다. 인장에 사용한 시편의 형상은 Fig. 2(a)와 같다.

인장한 시편의 게이지 부분에서 굽힘 시편을 제작하고 (Fig. 2(a)), Fig. 2(b)의 금형을 이용하여 3점 굽힘 시험을 수행하였다. 굽힘 시험에서 지지대 사이의 간격은 48mm이며, 지지대의 지름은 8mm이다.

두 소재에 대한 굽힘 시험 결과는 Fig. 3과 같다. 전변형 뒤 굽힘에서 인장 변형이 일어나는 시편의 아래쪽 부분은 경화가 계속되지만 압축 변형이 일어나는 시편의 위쪽 부분은 바우싱거 효과에 의해서 연화가 일어난다. 따라서 전변형이 있는 경우 굽힘 초반에 굽힘 하중이 전변형이 없는 경우보다 작아진다. 하지만 굽힘이 계속 진행되면 시편의 위쪽 부분에서도 경화가 일어나서 DP590의 경우 최대 하중의 크기가 전변형이 없는 경우보다 커진다.

2.3 인장-압축 실험

비교를 위해서 좌굴 방지판을 이용한 인장-압축 시험을 수행하였다. 3%, 5%, 또는 7% 인장 후 압축

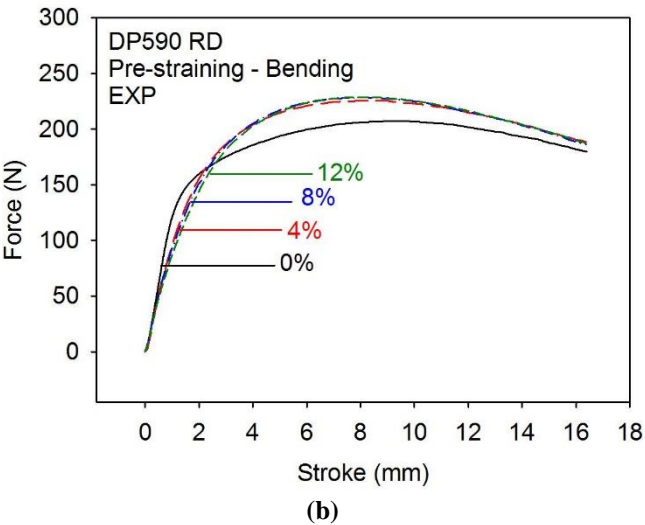
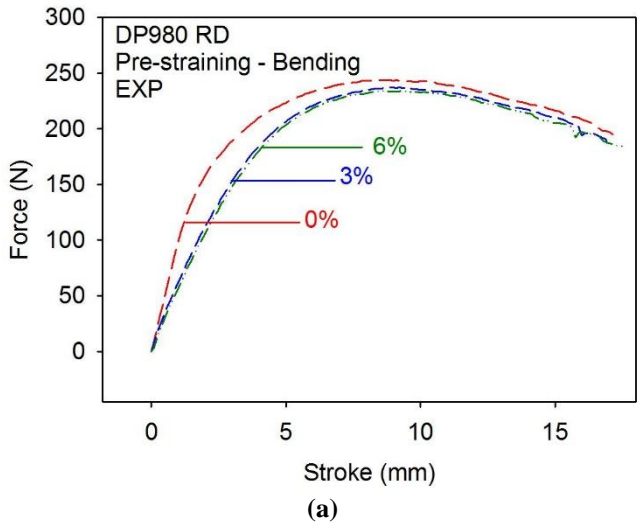


Fig. 3 Bending force-displacement curves of (a) DP980 and (b) DP590

변형을 부여하였으며, 마찰 효과를 보정한 인장-압축 곡선은 Fig. 4와 같다.

3. 해석 방법

3.1 경화 법칙

판재의 반복 거동을 표현하는 방법으로 등방 경화와 이동 경화가 결합된 형태의 혼합 등방-이동 경화 규칙이 많이 사용되고 있다. 본 연구에 사용된 비선형 경화 규칙은 Eq. (1-2)와 같다.

$$\dot{\alpha} = C \frac{(\sigma - \alpha)}{\bar{\sigma}} \dot{\bar{\epsilon}} - \gamma \alpha \dot{\bar{\epsilon}} \quad (1)$$

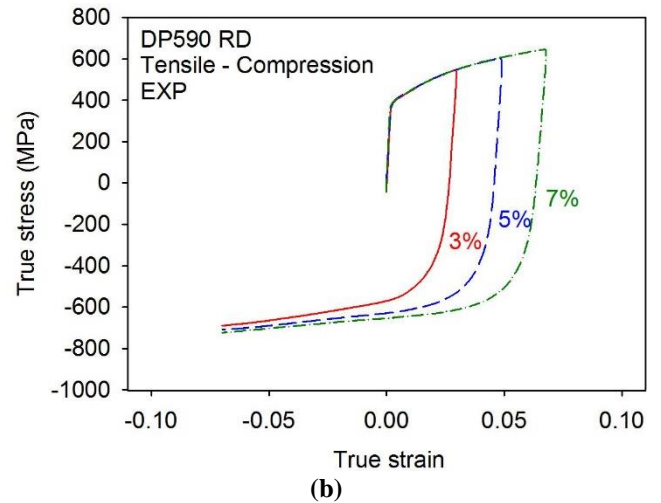
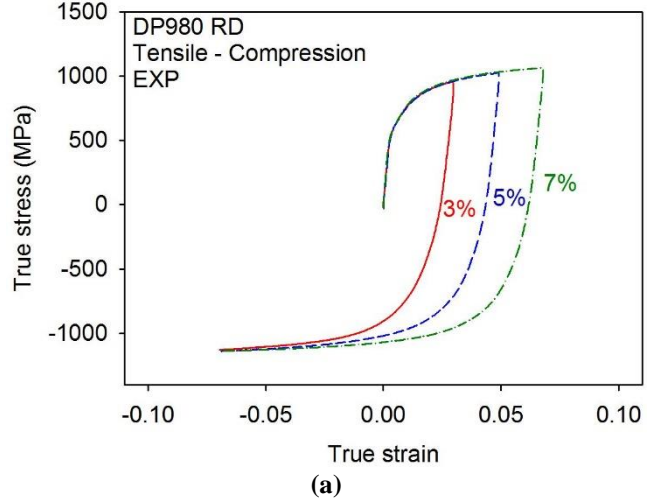


Fig. 4 True stress-strain curves under tension-compression loading: (a) DP980, (b) DP590

$$\bar{\sigma}_{iso} = \sigma_0 + Q(1 - e^{-b\bar{\epsilon}}) \quad (2)$$

여기서 α 는 역응력, σ 는 응력, $\bar{\sigma}$ 는 유효 응력, $\bar{\epsilon}$ 는 유효 소성 변형률, $\bar{\sigma}_{iso}$ 는 등방 경화량을 나타내는 변수이며, $C, \gamma, \sigma_0, Q, b$ 는 재료 상수이다. Eq. (1)의 우변 첫번째 항은 Ziegler 형태의 이동 경화를 나타내며, 두번째 항은 역응력의 비선형성을 부여한다.

3.2 유한요소 모델

상용 유한 요소 프로그램 Abaqus/Standard V6.12를 이용하여 3점 굽힘 시험의 3차원 유한 요소 모델(요소: C3D8R)을 제작하고 유한 요소 해석을 수행하였다 (Fig. 5). 마찰 계수는 전변형이 없는 경우 굽힘 하중

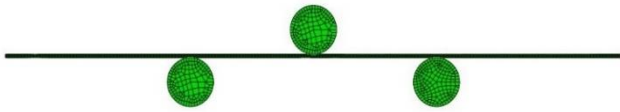


Fig. 5 Finite element model of the three-point bending test

Table 1 Hardening parameters obtained by inverse optimization and tension-compression curve

		σ_0	Q	b	C	γ
		(MPa)	(MPa)		(MPa)	
DP980	Opt.	552.7	304.5	4.01	41559	98.4
	TC	556.9	172.9	5.85	35437	77.4
DP590	Opt.	370.2	209.7	11.8	7317	40.8
	TC	351.2	231.0	9.35	13300	79.2

의 유한 요소 예측값이 실험값과 일치하도록 DP980 과 DP590에 대해서 각각 0.05와 0.07을 선정하여 이용하였다. 소재의 탄성 계수는 206 GPa, 포아송비는 0.3이다. Von Mises 항복 함수와 Eq. (1-2)의 혼합 등방-이동 경화 규칙을 이용하였다. 비교를 위하여 등방 경화 규칙도 이용하여 해석을 수행하였다.

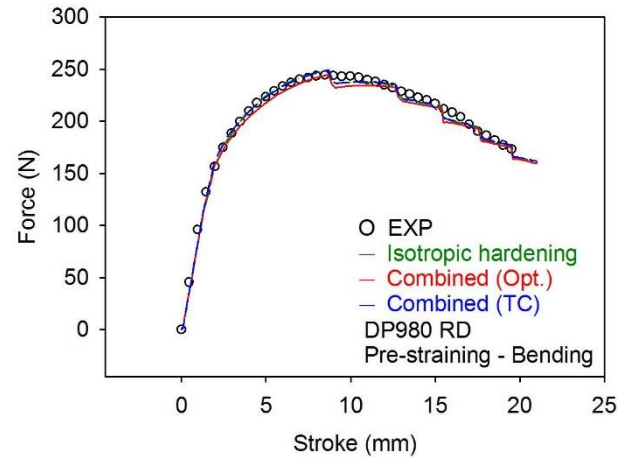
3.3 역최적화

실험으로 구한 인장과 굽힘 거동을 유한 요소 해석으로 가장 잘 재현해 낼 수 있는 경화 법칙 상수를 역최적화를 통해서 구하였다. 역최적화를 위한 잔차(R)는 Eq. (3)과 같이 정의된다.

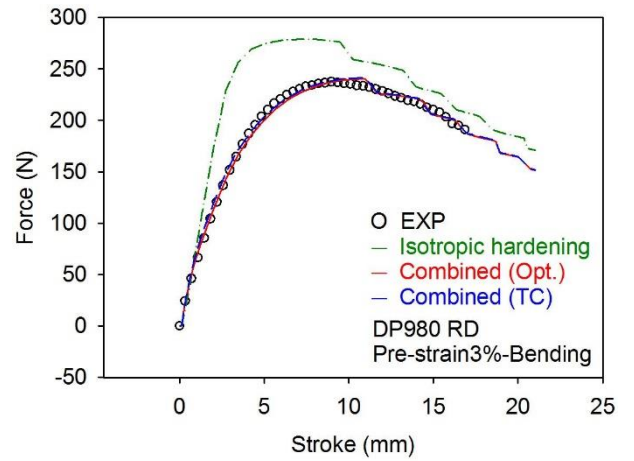
$$R = w_b \sum (f_{EXP} - f_{FEM})^2 + w_t \sum (\sigma_{EXP} - \sigma_{FEM})^2 \quad (3)$$

여기서 f 는 굽힘 힘, σ 는 인장 응력이며 w_b 와 w_t 는 각각 굽힘과 인장에 대한 가중치이다. 첨자 EXP와 FEM은 각각 실험과 유한 요소 해석으로 구한 값을 의미한다.

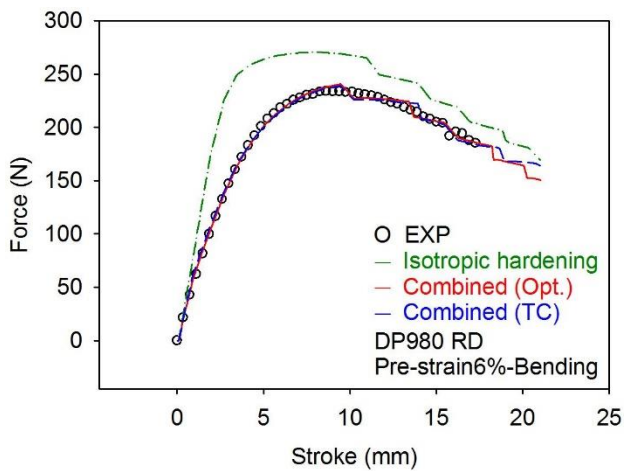
역최적화는 Matlab의 fminsearch 함수를 이용하여 수행하였다. 이 Matlab 함수는 Nelder-Mead 방법[8]에 의해서 오차 함수값을 최소화시키는 상수값을 찾아낸다. 먼저 추정치를 이용한 유한 요소 해석을 수행하여 잔차를 계산하면, fminsearch 함수는 갱신된 상수값을 계산하여 다시 유한 요소 해석을 수행한다. 더 이상 잔차가 작아지지 않을 때까지 이 과정을 반복하여 경화 법칙 상수를 찾는다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 6 Comparison of bending force-displacement curves for DP980 with (a) 0%, (b) 3%, and (c) 6% pre-straining

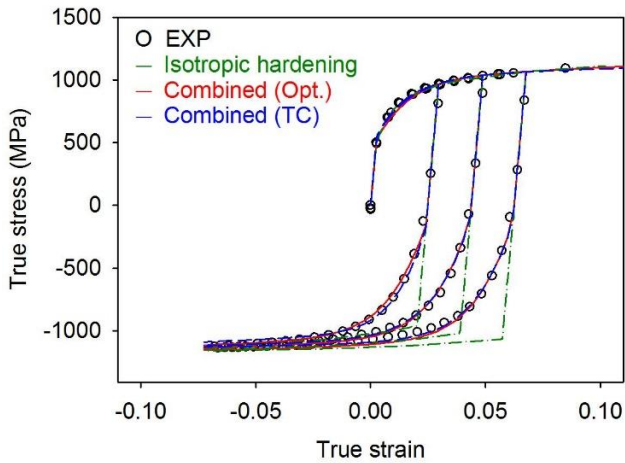


Fig. 7 Comparison of tension-compression curves for DP980

4. 결과

전변형과 굽힘을 이용한 역최적화 방법으로 구한 경화 법칙 상수들(Opt.)은 Table 1에 나와있다. 인장-압축 시험을 통해 얻은 응력-변형률 곡선으로부터 구한 경화 법칙 상수들(TC)도 비교하였다.

DP980 소재에 대해서 역최적화를 이용해서 얻은 경화 법칙 상수로 계산한 굽힘 하중-변위 곡선은 Fig. 6과 같다. 역최적화를 이용해서 계산한 하중은 실험 값과 잘 일치하였다. 등방 경화 법칙만 사용한 경우는 복합 등방-이동 경화 법칙을 사용한 경우에 비해서 전변형이 있는 시편의 굽힘 거동을 과도하게 예측하였다. 인장-압축 곡선으로부터 얻은 경화 법칙 상수로 계산한 하중도 실험 결과와 잘 일치하였다.

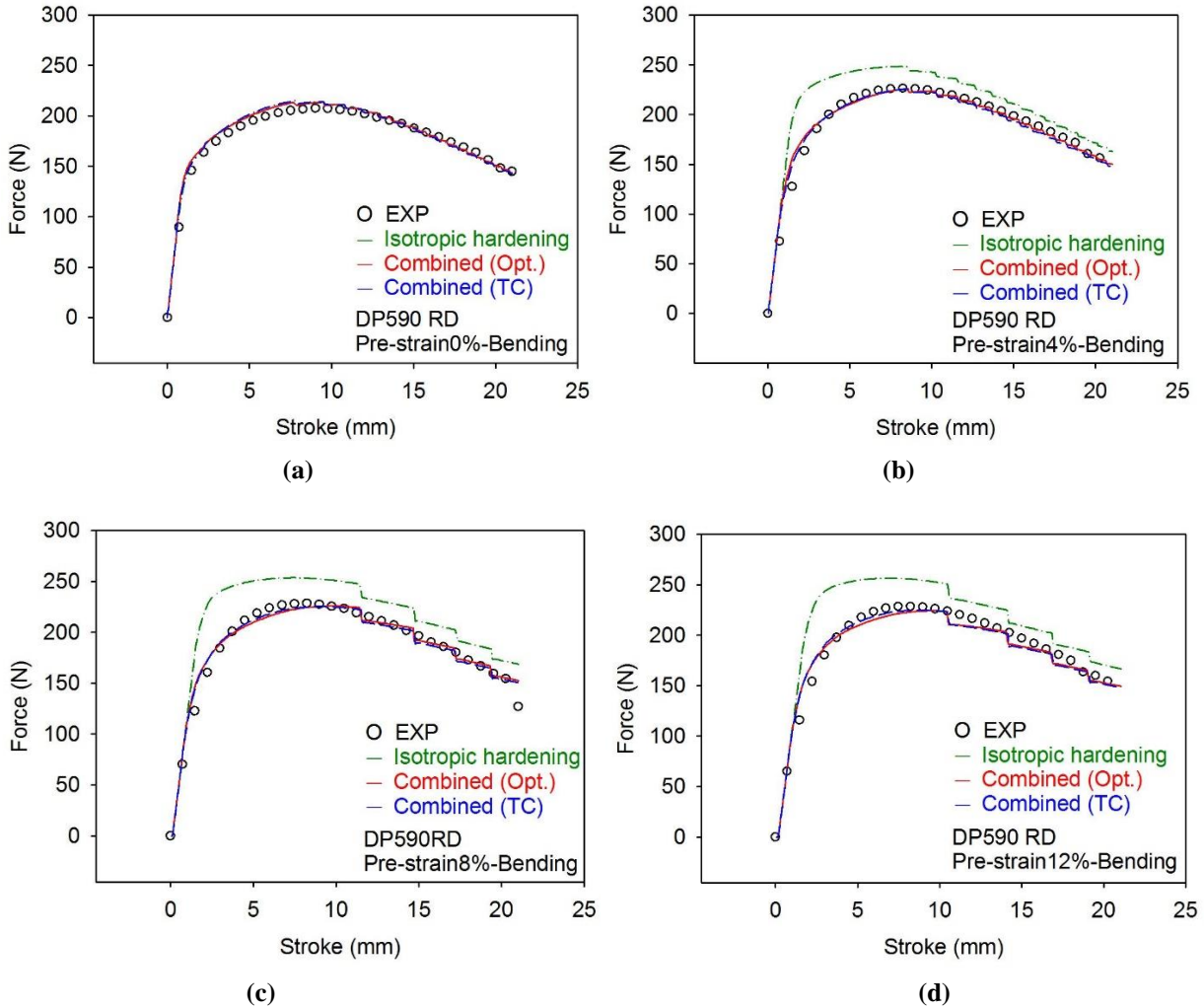


Fig. 8 Comparison of bending force-displacement curves for DP590 with (a) 0%, (b) 4%, (c) 8%, and (d) 12% pre-straining

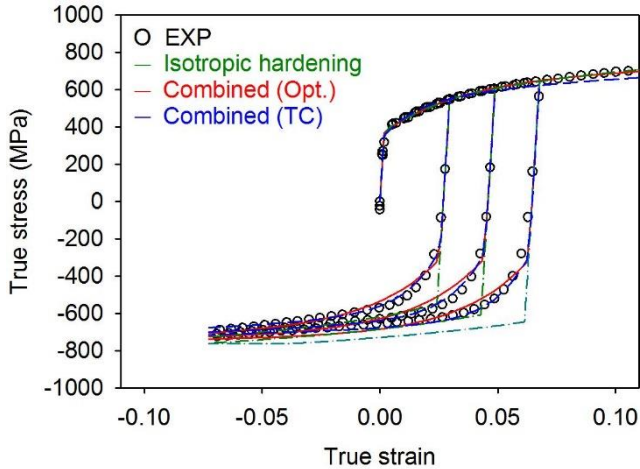


Fig. 9 Comparison of tension-compression curves for DP590

DP980 소재에 대해서 역최적화를 이용해서 얻은 경화 법칙 상수로 계산한 인장-압축 곡선은 측정값과 비교적 잘 일치하였다(Fig. 7).

DP590 소재에 대해서 역최적화를 이용해서 얻은 경화 법칙 상수로 계산한 굽힘 하중-변위 곡선은 Fig. 8과 같다. 역최적화를 이용해서 계산한 하중은 실험값과 전체적으로 잘 일치하였으나 전변형량이 커질수록 최대 하중이 작게 예측되었다. 인장-압축 곡선으로부터 얻은 경화 법칙 상수로 계산한 하중도 실험 결과와 잘 일치하였다.

DP590 소재에 대해서 역최적화를 이용해서 얻은 경화 법칙 상수로 계산한 인장-압축 곡선은 Fig. 9와 같다. 역최적화를 통해서 얻은 인장-압축 곡선(Opt.)의 경우 압축 구간 초기에 실험값보다 응력의 크기가 작게 예측되었으며, 압축이 진행되면서 차이가 줄어들었다. 이와 같은 경향은 Eq. (1)의 형태가 비교적 단순해서 표현할 수 있는 경화 곡선이 제한되기 때문으로 판단된다. 본 연구에서 상수로 가정한 C 와 γ 등의 경화 법칙 상수가 유효 소성 변형률의 함수로 주어질 경우 좀 더 다양한 반복 거동 현상을 나타낼 수 있을 것으로 예상된다[8].

5. 결론

본 연구에서는 판재를 일정한 변형률만큼 인장하여 전변형을 가한 후에 3점 굽힘을 해서 얻은 굽힘 하중에 대하여 유한 요소 역최적화를 수행하여 초고강도강 판재의 반복 거동을 측정하였다. 기

존의 전단이나 스프링백 등 간접적인 방법으로 검증한 것과 달리 직접 인장-압축 시험을 수행하여 반복 거동을 측정하고 비교하여 검증하였다. 역최적화를 통해 얻은 반복 거동은 좌굴 방지판을 이용한 인장-압축 시험을 얻은 반복 거동과 잘 일치하였다. 인장-압축 시험이 어려운 경우 전변형과 굽힘 시험으로 반복 거동을 측정할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- [1] R. H. Wagoner, H. Lim, M. G. Lee, 2013, Advanced Issues in Springback, *Int. J. Plast.*, Vol. 45, pp. 3~20.
- [2] J. H. Kim, D. Kim, Y. S. Lee, M. G. Lee, K. Chung, H. Y. Kim, R. H. Wagoner, 2013, A Temperature-Dependent Elasto-plastic Constitutive Model for Magnesium Alloy AZ31 Sheets, *Int. J. Plast.*, Vol. 50, pp. 66~93.
- [3] R. K. Boger, R. H. Wagoner, F. Barlat, M. G. Lee, K. Chung, 2005, Continuous, Large Strain, Tension /compression Testing of Sheet Material, *Int. J. Plast.*, Vol. 21, No. 12, pp. 2319~2343.
- [4] T. Kuwabara, 2007, Advances in Experiments on Metal Sheets and Tubes in Support of Constitutive Modeling and Forming Simulations, *Int. J. Plast.*, Vol. 23, No. 3, pp. 385~419.
- [5] M. G. Lee, J. H. Kim, D. Kim, O. S. Seo, N. T. Nguyen, H. Y. Kim, 2013, Anisotropic Hardening of Sheet Metals at Elevated Temperature: Tension-Compressions Test Development and Validation, *Exp. Mech.*, Vol. 53, No. 6, pp. 1039~1055.
- [6] S. L. Zang, M. G. Lee, L. Sun, J. H. Kim, 2014, Measurement of the Bauschinger Behavior of Sheet Metals by Three-point Bending Springback Test with Pre-strained Strips, *Int. J. Plast.*, Vol. 59, pp. 84~107.
- [7] J. A. Nelder, R. Mead, 1965, A Simplex Method for Function Minimization, *Comput. J.*, Vol. 7, No. 4, pp. 308~313.

- [8] K. Chung, M. G. Lee, D. Kim, C. Kim, M. L. Wenner, F. Barlat, 2005, Spring-back Evaluation of Automotive Sheets Based on Isotropic-kinematic Hardening Laws and Non-quadratic Anisotropic Yield Functions Part I: Theory and Formulation, Int. J. Plast., Vol. 21, No. 5, pp. 861~882.