

영구 연화 거동을 고려한 마찰교반용접(FSW) 된 DP강 판재의 탄성 복원 예측

박태준¹ · 이원오² · 정경환³ · 김준형⁴ · 김대용² · Chongmin Kim⁵ · Kazutaka Okamoto⁶
R.H. Wagoner⁷ · 정관수[#]

Springback prediction of friction stir welded DP590 steel sheets considering permanent softening behavior

T. Park, W. Lee, K. H. Chung, J. H. Kim, D. Kim, C. Kim, K. Okamoto, R. H. Wagoner, K. Chung

Abstract

In order to evaluate the effect of permanent softening behavior on springback prediction, 2D-draw bending simulations were compared with experiments for friction stir welded DP590 steel sheets. To account for the nonlinear hardening behavior, the combined isotropic-kinematic hardening law was utilized with and without considering the permanent softening behavior during reverse loading. Also, the non-quadratic orthotropic yield function, Yld2000-2d, was used to describe the anisotropic initial-yielding behavior of the base sheet while anisotropic properties of the weld zone were ignored for simplicity.

Key Words : Permanent softening, Springback, Combined isotropic-kinematic hardening, Anisotropic yield function, Dual phase steel, Tailor welded blanks, Friction stir welding, 2-D draw bending tests

1. 서론

본 연구에서는 마찰교반용접 된 자동차용 고강도 DP590 steel 판재의 탄성 복원에 영구 연화 거동이 미치는 영향을 중점적으로 조사하였다. 비등방성 항복 거동을 표현하기 위해 비이차 비등방성 항복 함수인 Yld2000-2d를 사용하였으며[1], 영구 연화 거동[2]을 고려한 복합 등방성 이동 응력 법칙(combined isotropic-kinematic hardening law)을 이용하여 하중의 방향이 뒤바뀌는 역 하중(reverse loading)시의 Bauschinger 효과와 transient 경화 거동을 구현하였다[3]. 이를 위해 일축 인장/압축 실험을 수행하여 DP강의 비등방성 및 경화 거동 시 물성을 측정하였다. 개발된 구성방정식을 바탕으로 사용자 정의 코드(user subroutine)를 구현하여

ABAQUS/implicit 및 ABAQUS/explicit에 적용하여 2-D draw bending 실험[4]을 전산 모사 하였으며, 이를 통해 영구 연화 거동의 유무에 따른 탄성 거동을 예측하여 실제 실험 결과와 비교하였다.

2. 이론

2.1 항복 함수

비등방성 항복 거동을 표현하기 위해 다음 형태의 비이차 비등방성 항복 함수인 Yld2000-2d를 사용했다.

$$f^{\frac{1}{m}} = \left\{ \frac{\Phi}{2} \right\}^{\frac{1}{m}} = \bar{\sigma} \tag{1}$$
$$\Phi = \left| \tilde{S}'_I - \tilde{S}'_{II} \right|^m + \left| 2\tilde{S}''_{II} + \tilde{S}'_I \right|^m + \left| 2\tilde{S}''_I + \tilde{S}'_{II} \right|^m$$

1. 서울대학교 재료공학부
2. 한국기계연구원 부설 재료연구소
3. 포스코 기술연구소
4. 삼성전자 정보통신총괄
5. General Motors R&D Center
6. Hitachi America Ltd.
7. Ohio State University
교신저자: 서울대학교, E-mail: kchung@snu.ac.kr

여기서 $\bar{\sigma}$ 는 항복 함수의 크기를 나타내는 유효 응력(effective stress)이며, \tilde{S}'_k 와 \tilde{S}''_k ($k = I, II$)는 각각 대칭 응력 텐서 \tilde{S}' 과 \tilde{S}'' 의 주 응력 값이다. \tilde{S} 는 다음과 같이 코시(Cauchy) 응력 텐서 σ 의 구면(deviatoric) 응력 텐서 s 를 C' 과 C'' 에 의해 \tilde{S}' 과 \tilde{S}'' 로 선형 변환하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}\tilde{s}' &= C' \cdot s = C' \\ \tilde{s}'' &= C'' \cdot s = C''\end{aligned}\quad (2)$$

2.2 경화 거동

Bauschinger 효과와 transient 거동과 같은 경화 거동을 효과적으로 구현하기 위하여 다음 형태의 복합 등방성 이동 응력 법칙(combined isotropic-kinematic hardening law)을 이용하였다.

$$f(\sigma - \alpha) - \bar{\sigma}_{iso}^m = 0 \quad (3)$$

여기서 α 는 이동 응력(back stress)을 나타내며, 이동 응력의 증가량 $d\alpha$ 는 다음과 같이 두 부분 ($d\alpha = d\alpha_1 - d\alpha_2$)으로 나누어 역 하중(reverse loading)시의 transient 경화 거동을 모사할 수 있다.

$$d\alpha_1 = (h_1 d\bar{\varepsilon}) \frac{(\sigma - \alpha)}{\bar{\sigma}_{iso}}, \quad d\alpha_2 = (h_2 d\bar{\varepsilon}) \alpha \quad (4)$$

여기서 h_1 과 h_2 는 각각 $\frac{d\bar{\alpha}_1}{d\bar{\varepsilon}}$ 와 $\frac{d\alpha_2}{d\bar{\varepsilon}}$ 이다.

2.2.1 영구 연화 거동

소성 변형 이후 역 하중(reverse loading)에 의한 경화 거동에서 나타나는 영구 연화 거동을 구현하기 위하여 다음과 같이 경화 변수 h_1 를 변경하는 연화 거동 변수 ξ 를 도입하였다.

$$h_1^* = h_1 \cdot \{\xi(\bar{\varepsilon}^*)\}^n \quad (5)$$

여기서 $\bar{\varepsilon}^*$ 는 n 번째 하중의 방향이 바뀐 상태의 유효 변형율이다.

3. 물성 측정

본 연구에서는 탄성 복원을 살피기 위해 같은 2.0mm 두께의 DP590 판재를 압연 방향과 평행하게 마찰교반용접한 판재를 사용하였다. 마찰교반용접에 사용된 핀의 지름은 4mm이고, shoulder의 지름은 10mm이다. 공정에 대한 자세한 사항은 표 1과 같다.

Table 1 Tool pin length and tested welding conditions

Pin length (mm)	1.8	Tool velocity (rpm)	1000
Work angle (°)	0.00	Feed rate (mm/min)	80
Travel angle (°)	3.00		

3.1 항복 함수

비등방 항복 계수를 결정하기 위해 2.0mm 두께의 DP590 판재에 대해 압연 방향에 평행, 45도, 수직인 방향으로 ASTM E-8 규격의 시편을 추출하여 일축, 등이축 인장 실험을 수행하였다. 모든 실험은 0.005/sec의 변형율 속도로 진행했으며, 얻어진 Yld2000-2d 계수는 다음 표 2에 나타내었다.

Table 2 Anisotropic coefficients of Yld2000-2d

m	6.0		
c'_{11}	0.9690	c''_{12}	-0.0088
c'_{22}	1.0369	c''_{21}	0.0308
c'_{66}	1.0109	c''_{22}	0.9909
c''_{11}	0.9840	c''_{66}	0.9908

용접 부분은 등방 성질을 갖는 물질로 가정하였고, m 값은 모재(base material)와 같은 6을 사용하였다.

3.2 경화 거동

경화 거동 시 물성을 측정하기 위해 일축 인장/압축 실험을 수행하였다. DP590 판재와 그림 1과 같은 단면을 갖는 마찰교반용접 된 판재에 대해 경화 거동을 측정 후, 다음 형태의 면적에 따른 복합 법칙을 적용하여 용접 부위의 경화 거동 시 물성을 구하였다.

$$\sigma_{WZ} = \frac{F - [(\sigma_{BM})_1 (A'_{BM})_1 + (\sigma_{BM})_2 (A'_{BM})_2]}{(1 + \beta) A_{WZ}} \quad (6)$$

여기서 WZ와 BM은 각각 용접 부위와 모재를 뜻하며, β 는 용접 시 열에 의해 영향을 받은 부분의 용접 넓이에 대한 비율로서, 열에 영향 받은 부위의 물성은 용접 부위와 같다고 가정하였다.

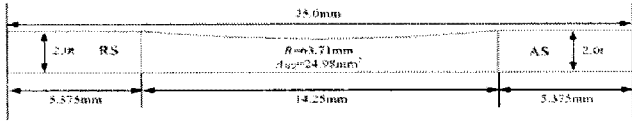


Fig. 1 Dimension of the cross-section for a friction stir welded DP590 specimen

용접 부위와 모재에 대해 각각 Voce 형과 Holloman 형의 경화 곡선을 사용하였다. 사용된 공식과 얻어진 계수를 다음 표 3에 정리하였다.

Table 3 Isotropic-kinematic hardening parameters

	Base	Weld	
$\bar{\sigma}_{iso}^a$ (Mpa)	K	1018.26	-
	ε_p	0.0013	-
	n	0.19	-
	a_1	-	440.80
	b_1 or b_2	283.39	190.06
$\bar{\alpha}_1^b$ (Mpa)	c_1 or c_2	52.46	24.38
	a_3	42821.41	50622.37
α_2^c (Mpa)	b_3	5491.38	34249.96
	c_3	1943.48	374.74
α_2^c (Mpa)	a_4	118.20	188.12
	b_3	130.56	352.32
α_2^c (Mpa)	c_4	19.05	171.76

$$^a \bar{\sigma}_{iso} = \begin{cases} a_1 + b_1(1 - e^{-\alpha_1 \bar{\varepsilon}}) & \text{for weld zone} \\ K(\bar{\varepsilon}_0 + \bar{\varepsilon})^n - b_2(1 - e^{-c_1 \bar{\varepsilon}}) & \text{for base material} \end{cases}$$

$$^b \bar{\alpha}_1(\bar{\varepsilon}) = a_3 \bar{\varepsilon} + b_3/c_3(1 - e^{-c_3 \bar{\varepsilon}}), \quad ^c \alpha_2(\bar{\varepsilon}) = a_4 \bar{\varepsilon} + b_4/c_4(1 - e^{-c_4 \bar{\varepsilon}})$$

3.2.1 영구 연화 거동

하중이 뒤바뀌기 전의 유효 변형율에 대한 함수로 표현되는 다음과 같은 연화 거동 변수를 사용하였으며, 얻어진 계수는 표 4에 정리하였다.

$$\xi = a_5 + b_5 \exp(-c_5 \bar{\varepsilon}^*)$$

$$a_5 = a_5^1 + a_5^2 \exp(-a_5^3 \bar{\varepsilon}_{pre}^*)$$

$$b_5 = b_5^1 (1 - \exp(-b_5^2 \bar{\varepsilon}_{pre}^*))$$

$$c_5 = c_5^1 (1 - \exp(-c_5^2 \bar{\varepsilon}_{pre}^*))$$
(7)

Table 4 Softening parameters

a_5	a_5^1	0.6590	b_5	b_5^1	0.3512
	a_5^2	0.3434		b_5^2	20.3238
	a_5^3	21.5610	c_5	c_5^1	583.1374
		c_5^2		26.2665	

그림 2는 측정된 물성으로 계산한 모재의 일축 인장/압축 거동을 실험 결과와 비교한 것이며 DP590의 모재의 영구 연화 거동을 잘 나타내 주고 있다.

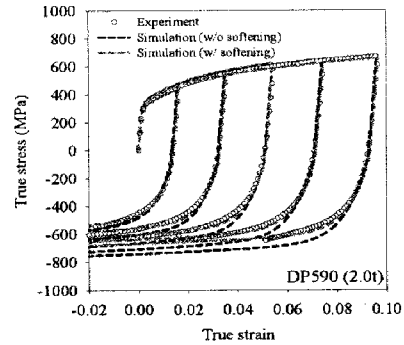


Fig. 2 Calculated and measured hardening behavior of base material

4. 2-D draw bending

마찰교반용접한 DP590 TWB 판재의 2-D draw bending을 전산 모사하여 실제 실험 결과와 탄성 복원의 양을 비교해 보았다. 실험에 사용된 시편과 Die, Holder, Punch의 형태는 그림 3과 같다. 시편의 길이 L은 300mm이며, 너비 W는 35mm이다.

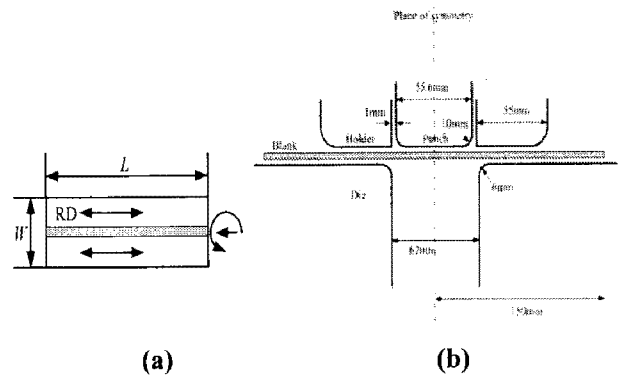


Fig. 3 Schematic view of the (a) TWB specimen and (b) tools and dimensions for the 2-D draw bending test

Die와 Punch의 간격은 3.2mm이며, 50-ton의 유압으로 시편을 고정된 상태에서 1.0mm/sec의 일정한 속도로 70.0mm의 깊이까지 punching을 하였다.

구성방정식을 구현하기 위한 사용자 정의 코드를 개발하여 성형을 ABAQUS/explicit에, 탄성 복원을 ABAQUS/implicit에 적용하여 전산모사 하였다. 성형 도구는 변형하지 않으므로 R3D4 요소를 사용하였으며, 시편은 4-node shell 요소인 S4R을 두께 방향으로 9개의 적분점을 두고 사용하였다. 도구와 시편 사이의 마찰계수는 0.12로 가정했다.

실험 결과와 전산 모사 결과를 비교하기 위해 다음 그림과 같은 세 가지 변수를 사용하였다.

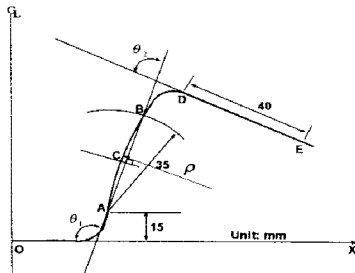


Fig. 4 Parameters for the springback at the punch corner, the die corner and the side wall curl

성형 과정에서 A와 B사이의 side wall 구간에서만 주로 굽힘 방향이 뒤바뀌는 역 굽힘 (혹은 역 하중)이 일어난다. 역 하중 시 영구 연화 거동이 일어나므로 영구 연화 거동 유무에 따른 탄성 복원의 비교는 side wall 구간에서만 비교하였다.

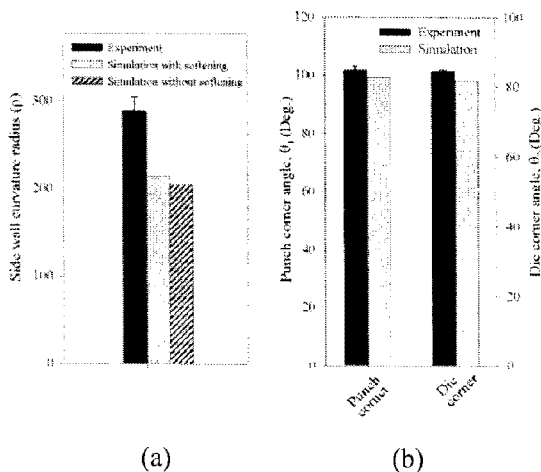


Fig. 5 Measured and simulated springback parameters for (a) side wall curvature radius and (b) corner angles

5. 결론

위의 그림 5에서 확인할 수 있듯이 전산 모사 시 영구 연화 거동을 고려하여 예측한 경우에 영구 연화 거동을 고려하지 않은 경우보다 실험 결과에 가까운 탄성 복원의 양을 얻을 수 있었다. 영구 연화 거동을 고려하지 않은 경우, 굽힘 방향이 뒤바뀐 역 하중 상황에서 실제보다 높은 응력이 걸리는 것으로 계산하므로 탄성 복원의 양을 실제보다 높게 예측하게 된다. Side wall curvature의 반경이 작을수록 탄성 복원의 양이 높은 것을 의미하므로, 그림 5(a)에서 연화 거동을 고려하지 않은 경우에 좀 더 탄성 복원을 높게 예측하는 것을 확인할 수 있다.

후 기

The authors of this paper would like to thank the Korea Science and Engineering Foundation (KOSEF) for sponsoring this research through the SRC/ERC Program of MOST/KOSEF (R11-2005-065).

참 고 문 헌

- [1] Barlat, F., Brem, J.C., Yoon, J.W., Chung, K., Dick, R.E., Choi, S.-H., Pourboghra, F., Chu, E., Lege, D.J., 2003, Plane stress yield function for aluminum alloy sheets – Part I: Theory. *Int. J. Plasticity* 19, 1297-1319.
- [2] Lee, W., Kim, D., Kim, J., Kim, C., Wenner, M.L., Okamoto, K., Wagoner, R.H., Chung, K., 2007, Formability and springback evaluation of friction stir welded automotive TWB sheets, *Friction Stir Welding and Processing IV*, pp.155-164.
- [3] Chung, K., Lee, M.-G., Kim, D., Kim, C., Wenner, M.L., Barlat, F., 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. Plasticity* 21, 861-882.
- [4] NUMISHEET'93 Benchmark Problem, 1993.