

TRIP강의 비대칭 거동과 스프링백

전성욱¹ · 정재봉¹ · 이현석² · 김병민¹ · 김지훈[#]

Asymmetric Behavior and Springback of Transformation-Induced Plasticity (TRIP) Steels

S. Jun, J. Jung, H. S. Lee, B. M. Kim, J. H. Kim

(Received June 21, 2017 / Revised November 27, 2017 / Accepted November 29, 2017)

Abstract

The cyclic hardening behavior of transformation-induced plasticity (TRIP) steels shows tension-compression asymmetry known to be attributed to transformation of retained austenite into martensite during deformation. In this work, Yoshida-Uemori hardening model was used to represent the asymmetric hardening behavior of TRIP1180 steel. Yoshida-Uemori hardening model parameters were obtained from three sets of data: tension-compression, compression-tension, and a combination of the two. Material models were validated for U-bending and springback.

Keywords : Martensite Transformation, TRIP Steel, Advanced High Strength Steel, Bauschinger Effect, Tension-compression Asymmetry

1. 서론

자동차 산업에서 연비 효율 개선과 배기가스 규제 등의 문제로 초고장력 강판(AHSS, Advanced High Strength Steel)에 대한 연구와 적용이 늘고 있다 [1]. 그 중에서 TRIP(Transformation Induced Plasticity) 강은 변형중에 잔류 오스테나이트가 마르텐사이트로 변태하면서 동일한 강도를 갖는 다른 초고장력 강판에 비해 높은 연신율을 갖는다[2]. 높은 연신율은 네킹과 균열을 지연시켜 복잡한 형상을 성형하는데 도움이 된다. 위와 같은 이유로 TRIP강은 차체에 적용되기에 장점이 많지만 높은 강도로 인해 스프링백의 크기가 증가하는 단점이 있다. TRIP강을 적용한 제품의 치수 품질을 얻기 위해서는 정밀한 스프링백 예측이 필수적이다.

본 연구에서는 인장강도 1,180MPa급 TRIP강

(TRIP1180) 소재의 거동 모사를 위해 재료 모델의 재료 상수를 결정하기 위해 단축 및 이축 인장시험, 단축 인장-재중 시험, 인장-압축 시험으로 물성 측정 시험을 수행하였다.

인장과 압축 거동이 대칭인 소재를 대상으로 하는 기존의 연구에서는 단축 인장-압축 또는 단축 압축-인장 시험을 수행하여 경화모델 상수를 도출한다[3]. 하지만, TRIP강은 인장 강도와 압축 강도가 다른 비대칭성을 갖기 때문에 기존의 방법으로 경화모델 상수를 결정할 경우 인장 또는 압축에서 큰 오차가 발생할 수 있다.

본 연구에서는 비대칭 거동을 보이는 소재에 대한 경화모델 상수를 결정하기 위해 인장-압축과 압축-인장 시험을 모두 수행하여 경화모델 상수를 결정하는 방법에 대해서 연구하였다. 측정된 물성을 표현할 수 있는 여러 재료 모델을 비교해보고

1. 부산대학교 기계공학부

2. 나라엠엔디 프레스금형연구팀

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

Table 1 Uniaxial properties of TRIP1180

Test Direction	E_0 (GPa)	YS (MPa)	UTS (MPa)	Elongation (%)	r-value
0°	200.5	866.6	1178	17.2	0.795
45°	200.7	869.2	1174	16.0	0.958
90°	206.3	878.5	1182	14.9	0.967

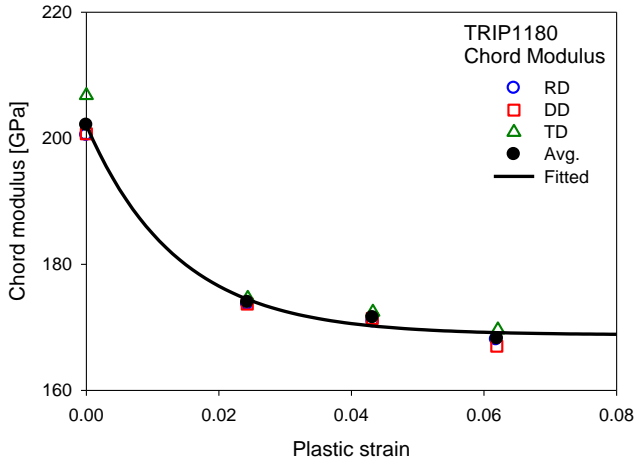


Fig. 1 Chord modulus of TRIP1180

U-bending 해석을 통해 스프링백 예측 정밀도를 검증하였다.

2. 실험

2.1 소재 및 단축인장 시험

TRIP1180을 이용하여 실험 및 해석을 수행하였다. 판재의 두께는 1mm이다. 인장시험기를 이용하여 ASTM E8 standard 규격의 시편을 0°, 45°, 90° 세가지 방향으로 단축인장 시험을 실시하였다. 단축인장 시험 결과데이터는 Table 1에 정리하였다.

2.2 단축 인장-제중 시험

일반적으로 TRIP강을 포함한 금속재료는 소성변형률이 증가할수록 제중시 탄성계수가 감소한다. 이를 측정하기 위해 단축 인장-제중시험을 수행하였다. ASTM E8 subsize 규격의 시편을 단축인장시험과 동일한 방법으로 3%, 5%, 7%의 변형률 만큼 인장한 후 하중을 제거하며 변형률을 측정하였다. 측정된 응력-변형률 곡선에서 제중 시작점과 제중이 완료된 점을 잇는 직선의 기울기를 Chord modulus로 정의된다[3]. Chord modulus는 Fig. 1과 같다.

Table 2 Chord modulus parameters of TRIP1180

E_0 (GPa)	E_a (GPa)	ξ
202.1	168.7	72.868

Table 3 Biaxial properties of TRIP1180

σ_b (MPa)	r_b
868.6	0.865

Chord modulus의 변화를 표현하기 위해 아래 식을 이용하였다.

$$E = E_0 - (E_0 - E_a)[1 - \exp(-\xi \bar{\epsilon}_p)] \quad (1)$$

근사를 통해 결정된 상수는 Table 2에 정리하였다.

2.3 이축인장 시험

TRIP1180의 항복 이방성을 측정하기 위해 이축인장 시험을 실시하였다[4]. RD방향과 TD방향에 대해서 1:1의 비율로 힘을 가하는 조건으로 등이축 항복강도 σ_b 와 등이축시 소성변형비 r_b 데이터를 얻을 수 있었으며 결과는 Table 3에 정리하였다.

2.4 인장-압축 시험

TRIP1180의 인장-압축 거동을 측정하기 위해 RD방향에 대해 인장-압축 및 압축-인장 시험을 실시하였다. 압축 시험 시 발생할 수 있는 판재의 좌굴을 방지하기 위해 포크 형태의 좌굴방지판을 이용하여 두께방향으로 압력을 가하였다[5]. 좌굴방지판을 이용하면 시편의 두께 방향으로 압력이 작용하기 때문에 시편과 좌굴방지판의 마찰로 인한 마찰력이 발생한다. 따라서 일축 응력상태의 데이터를 얻기 위해서 마찰력을 보정해주어야 한다[6]. 본 연구에서는 3%, 5%, 7% 인장 변형 후 -7% 압축 변형을 가하는 인장-압축 시험과, 이와 반대로 -3%, -5%, -7% 압축 변형 후 7% 인장 변형을 가하는 압축-인장 시험을 수행하였다. 마찰 효과를 보정한 인장-압축 및 압축-인장에 대한 진응력-진변형률 곡선은 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. 또한 측정된 변형률에 따른 인장 및 압축 시험 데이터를 Fig. 4와 같이 나타내었으며 이를 통해 TRIP1180 비대칭 거동을 알 수 있다.

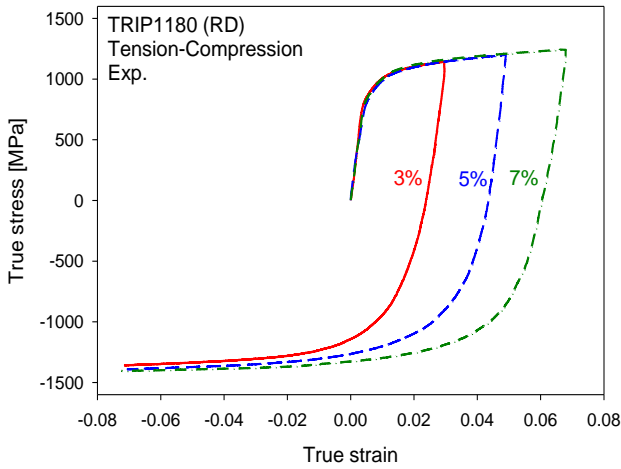


Fig. 2 Tension-compression curves of TRIP118

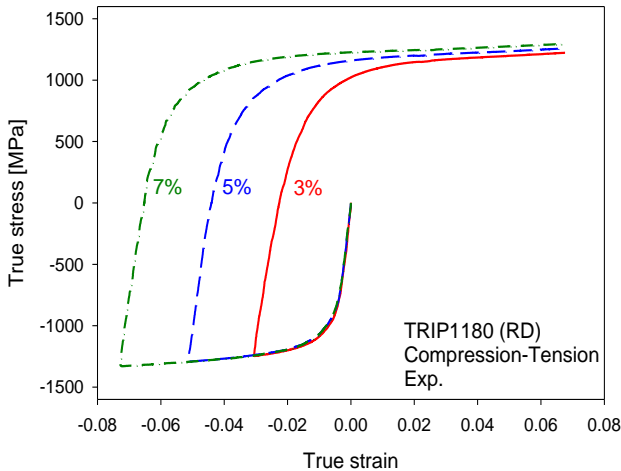


Fig. 3 Compression-tension curves of TRIP118

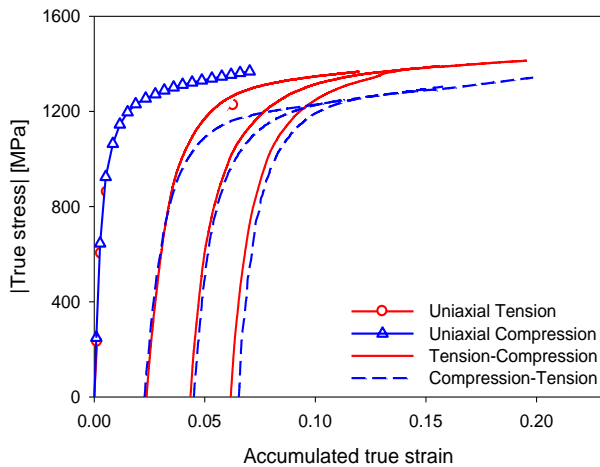


Fig. 4 Absolute true stress-accumulated true strain curves of TRIP118

Table 4 Yld2000-2d yield function parameters of TRIP1180

α_1	α_2	α_3	α_4
0.9648	0.9957	0.9904	0.9878
α_5	α_6	α_7	α_8
1.0145	0.9917	0.9929	1.0043

3. 재료 모델

3.1 항복 모델

본 연구에서 TRIP1180의 이방성 항복거동을 나타내기 위해 Yld2000-2d 모델을 이용하였다[7]. Yld2000-2d 항복 모델의 재료 상수들은 단축인장 및 이축인장 시험을 통해 얻은 방향별 항복응력($\sigma_0, \sigma_{45}, \sigma_{90}, \sigma_b$)과 이방성계수(r_0, r_{45}, r_{90}, r_b)를 이용하여 결정할 수 있다. Yld2000-2d의 재료상수들은 Table 4에 정리되어 있다.

3.2 경화모델

실험을 통해 측정된 TRIP1180에서의 인장-압축 및 압축-인장 거동을 나타내기 위해 Yoshida-Uemori(Y-U) 경화모델을 이용하였다[8]. Y-U 경화모델은 비선형 이동경화법칙을 따르는 항복곡면과 등방경화법칙을 따르는 경계곡면을 가정한다. 항복곡면의 중심을 α 로, 경계곡면의 중심을 β 로 나타낼 때, 경계곡면에 대한 항복곡면의 상대적인 이동 α_* 는 아래와 같이 표현된다.

$$\alpha_* = \alpha - \beta = C \left[a \left(\frac{\sigma - \alpha}{Y} \right) - \sqrt{\frac{a}{\bar{\alpha}_*}} \alpha_* \right] \dot{\epsilon} \quad (3)$$

$$a = B + R - Y \quad (4)$$

여기서, $\dot{\epsilon}$ 는 유효소성변형률 속도이며 Y 는 항복곡면의 크기, B 는 경계곡면의 초기 크기, R 과 C 는 경계곡면의 등방경화와 후방응력의 이동속도를 결정하는 계수, $\bar{\alpha}_*$ 는 α_* 의 유효크기이다. 경계곡면의 등방경화 및 이동경화거동은 각각 다음과 같다.

$$dR = m(R_{sat} - R)dp \quad (5)$$

$$d\beta = m \left(\frac{2}{3} b D^p - \beta dp \right) \quad (6)$$

여기서, R_{sat} 은 경계곡면의 등방경화 수렴값, b 는

Table 5 Material constants of the Yoshida-Uemori model(Y-U(TC)) for TRIP1180

T1:C1	σ_0 (MPa)	b (MPa)	B (MPa)	R_{sat} (MPa)
	793.5	88.3	1154.3	2040.0
	C	m	$\epsilon_{p,ref}$	
	163.8	1.0508	0.005	

T10:C1	σ_0 (MPa)	b (MPa)	B (MPa)	R_{sat} (MPa)
	824.8	179.7	1157.4	2065.1
	C	m	$\epsilon_{p,ref}$	
	209.7	0.8858	0.005	

T1:C10	σ_0 (MPa)	b (MPa)	B (MPa)	R_{sat} (MPa)
	822.7	228.4	1304.9	783.3
	C	m	$\epsilon_{p,ref}$	
	110.7	1.0541	0.005	

Table 6 Material constants of the Yoshida-Uemori model(Y-U(CT)) for TRIP1180

T1:C1	σ_0 (MPa)	b (MPa)	B (MPa)	R_{sat} (MPa)
	833.0	14076.9	1228.2	9.35e-4
	C	m	$\epsilon_{p,ref}$	
	188.8	0.1408	0.005	

T10:C1	σ_0 (MPa)	b (MPa)	B (MPa)	R_{sat} (MPa)
	792.0	51313.4	1190.4	80519.5
	C	m	$\epsilon_{p,ref}$	
	143.7	0.0090	0.005	

T1:C10	σ_0 (MPa)	b (MPa)	B (MPa)	R_{sat} (MPa)
	824.2	304.7	1199.3	9.98e-8
	C	m	$\epsilon_{p,ref}$	
	319.5	12.903	0.005	

Table 7 Material constants of the Yoshida-Uemori model(Y-U(All)) for TRIP1180

All	σ_0 (MPa)	b (MPa)	B (MPa)	R_{sat} (MPa)
	813.3	5514.2	1228.8	10029.3
	C	m	$\epsilon_{p,ref}$	
	121.5	0.0801	0.005	

경계곡면의 이동경화의 수렴값, m 은 경계곡면의 등방경화속도를 나타내는 계수, D^p 는 소성 변형률 증가량을 나타낸다.

Matlab의 비선형 최소자승법함수를 이용하여 앞서

수행한 인장-압축과 압축-인장 시험 데이터를 재현할 수 있는 Y-U 경화모델의 모델 상수를 도출하였다. TRIP1180의 경우 인장 강도와 압축 강도가 다른 비대칭성을 갖기 때문에 인장-압축 곡선(TC) 또는 압축-인장 곡선만으로(CT) 재료 상수를 결정할 수 있다. 또한 인장-압축과 압축-인장 곡선을 모두 이용하여 (All) 재료 상수를 결정할 수 있다. 한편 인장 부분과 압축 부분에 적용되는 가중치를 1:1 (T1:C1), 10:1 (T10:C1), 1:10 (T1:C10) 등의 비율로 다르게 적용하여 모델상수를 구하고 비교하였다. 이렇게 결정한 모델상수들을 Table 5, 6, 7에 정리하였다.

인장-압축 시험데이터를 이용하여 도출한 경우(Y-U(TC))와 인장-압축과 압축-인장 시험데이터를 모두 이용하여 도출한 경우(Y-U(All))의 Y-U 경화모델상수를 이용하여 계산한 인장-압축 및 압축-인장 곡선을 실험결과와 비교하여 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었고 실험값에 대한 표준오차를 Fig. 7에 나타내었다. 인장-압축 시험데이터를 이용하여 도출한 경우(Y-U(TC))에서는 인장과 압축에 가중치를 1:10으로 적용한 경우가 실험값과 가장 일치하였고, 시험데이터를 모두 이용하여 도출한 경우(Y-U(All))가 실험값과의 오차가 더 작았다.

압축-인장 시험데이터를 이용하여 도출한 경우(Y-U(CT))와 인장-압축과 압축-인장 시험데이터를 모두 이용하여 도출한 경우(Y-U(All))의 Y-U 경화모델상수를 이용하여 계산한 인장-압축 및 압축-인장 곡선을 실험결과와 비교하여 Fig. 8와 Fig. 9에 나타내었고 실험값에 대한 표준오차를 Fig. 10에 나타내었다. 압축-인장 시험데이터를 이용하여 도출한 경우(Y-U(CT))에서는 인장과 압축에 비중을 1:1으로 적용한 경우가 실험값과 가장 일치하였고 이보다 시험데이터를 모두 이용하여 도출한 경우(Y-U(All))가 실험값과의 오차가 더 작았다.

도출한 Y-U 경화모델의 모델상수 중 인장-압축과 압축-인장 시험데이터를 모두 이용하여 도출한 경우(Y-U(All)) 경우가 실험값과 가장 일치하였다.

4. U-bending 스프링백 해석

TRIP1180의 재료모델을 검증하기 위해 U-bending 시험을 수행하였다. 사용된 시편의 크기는 300mm×30mm이며 두께는 1mm이다. 금형의 형상은 Fig. 11(a)에 나타내었다. 펀치는 1.0mm/sec의 속도로 60mm까지

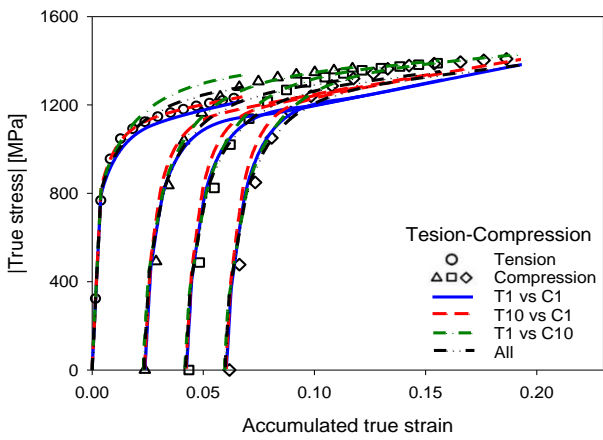


Fig. 5 Comparison of tension-compression curves calculated by Y-U(TC) and Y-U(All) for TRIP1180

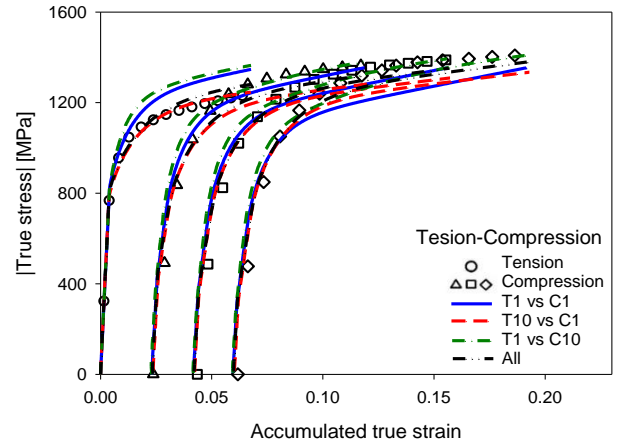


Fig. 8 Comparison of tension-compression curves calculated by Y-U(CT) and Y-U(All) for TRIP1180

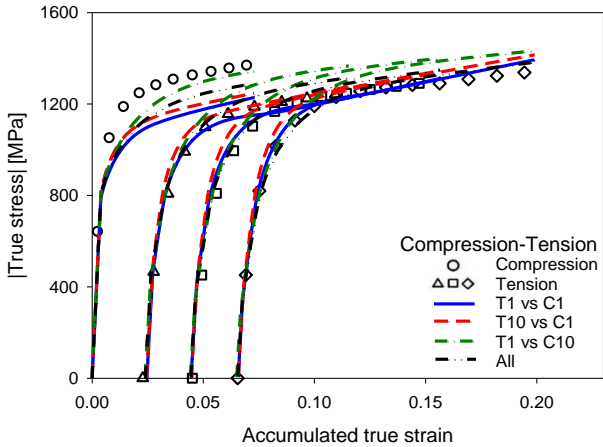


Fig. 6 Comparison of compression-tension curves calculated by Y-U(TC) and Y-U(All) for TRIP1180

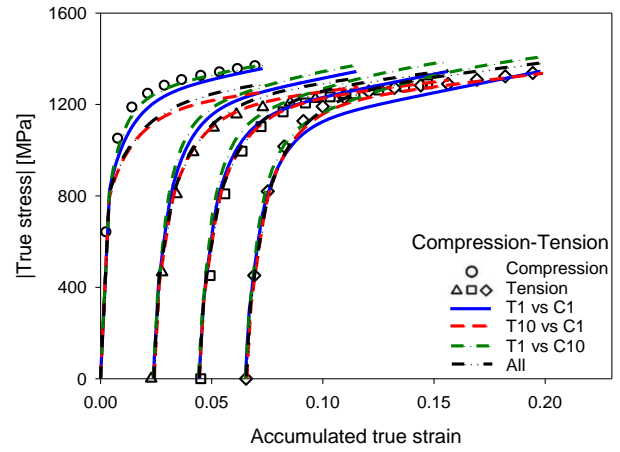


Fig. 9 Comparison of compression-tension curves calculated by Y-U(CT) and Y-U(All) for TRIP1180

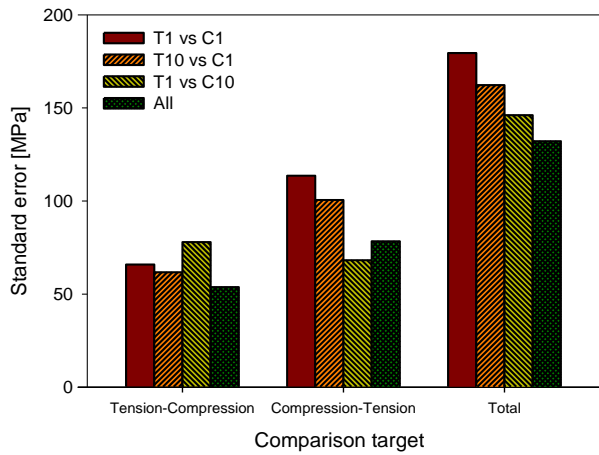


Fig. 7 Standard error of Y-U(TC) and Y-U(All) hardening models for TRIP1180

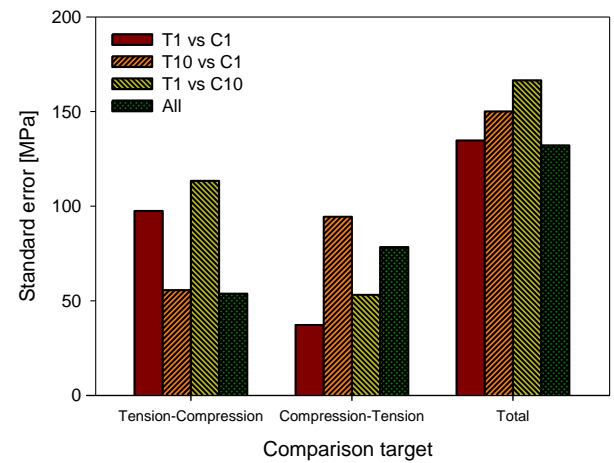


Fig. 10 Standard error of Y-U(CT) and Y-U(All) hardening models for TRIP1180

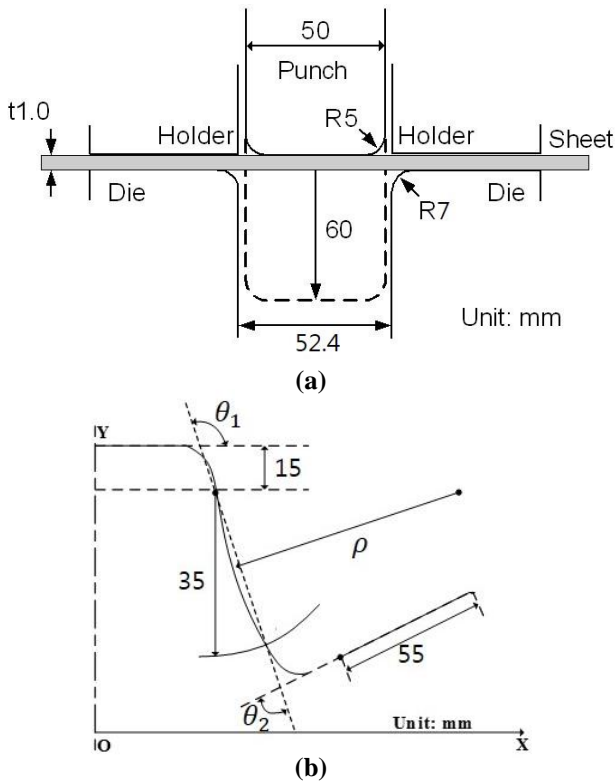


Fig.11 (a) A schematic view of tools and dimensions for the U-bending test and (b) definition of springback parameters

내려간다. 시험 시 가스스프링을 이용하여 시편에 홀딩력을 작용하였으며, 펀치 스트로크에 따라서 최초 14kN에서 20kN까지 증가하였다. 해석에서 홀딩력은 시험과 동일하게 적용하기 위해 14kN에서 20kN까지 선형적으로 적용하였다. 성형 후 스프링백을 정량화 하기 위해 Fig. 11(b)와 같이 정의된 세 가지 파라미터(θ_1 , θ_2 , ρ)를 측정하였다.

스프링백 해석은 상용프로그램 PAM-STAMP를 사용하였다. Y-U 경화모델의 스프링백 해석 정밀도를 확인하기 위해 스프링백 해석결과와 실험결과를 비교하여 Fig. 12, 13에 나타내었다. 세 가지 파라미터(θ_1 , θ_2 , ρ)에 대해 실험값과 여러 경화 모델로 계산된 예측값을 비교하였다 (Fig. 14, 15). Fig. 14에서 θ_1 과 ρ 의 경우 T10:C1과 Y-U(All)의 경우가 가장 잘 일치하였으며 T1:C1과 T1:C10의 경우는 가장 차이가 크게 나타났다. 한편 θ_2 의 경우 T10:C1 조건에서 가장 차이가 큰 것으로 측정되었으며 Y-U(All)과 T1:C10의 경우 차이가 작았다. Fig. 15에서는 θ_1 의 경우 T1:C1과 T1:C10에서 가장 차이가 컸으며, T10:C1 과 Y-U(All)에서 차이가 작

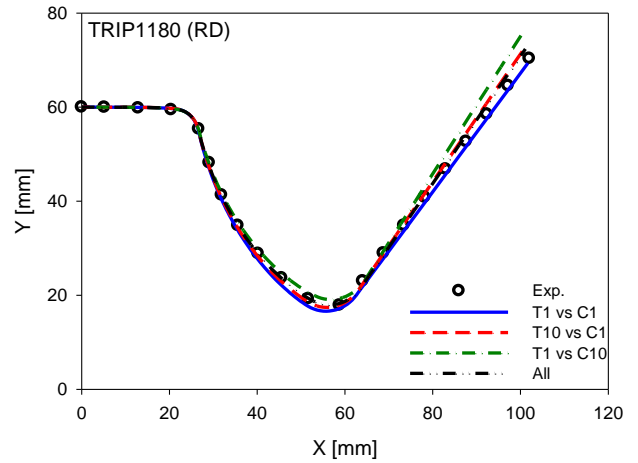


Fig.12 Springback prediction of Y-U(TC) and Y-U(All) hardening models for TRIP1180

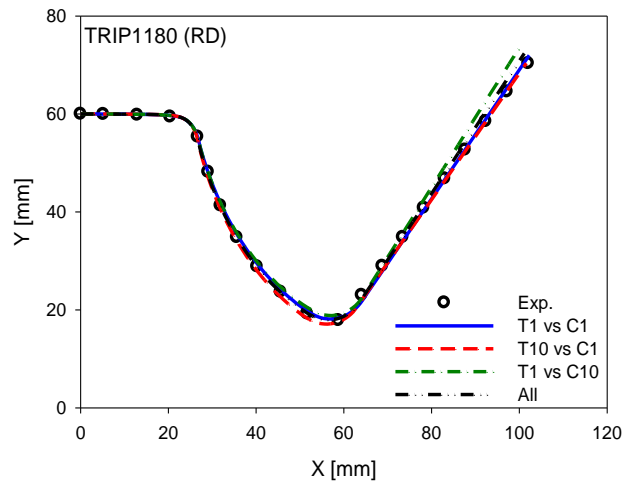
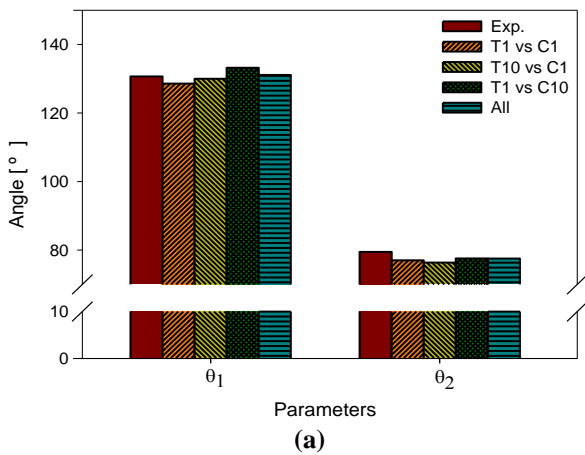
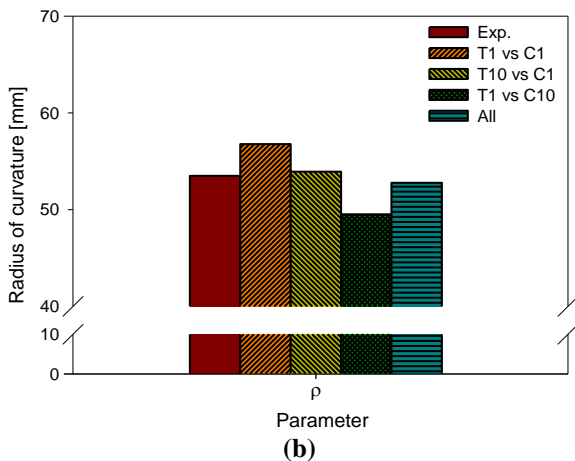


Fig.13 Springback prediction of Y-U(CT) and Y-U(All) hardening models for TRIP1180

았다. θ_2 와 ρ 의 경우 T10:C1 조건에서 가장 차이가 컸으며 T1:C1과 Y-U(All) 순서로 차이가 작았다. 여러 경화 모델로 계산된 예측값 중에서 인장-압축과 압축-인장 시험데이터를 모두 이용하여 도출한 경우(Y-U(All))가 차이가 가장 큰 경우가 발생하지 않았으며 모든 경우 첫번째 또는 두번째로 실험결과와 잘 일치하였다. 반면 그 외의 조건(T1:C1, T10:C1, T1:C10)에서는 한 경우 이상 차이가 가장 큰 경우가 발생하였다. 따라서 인장-압축과 압축-인장 시험데이터를 모두 이용하여 경화모델 상수를 도출한 경우(Y-U(All))에 실험결과와 종합적으로 잘 일치하는 것으로 판단된다.



(a)

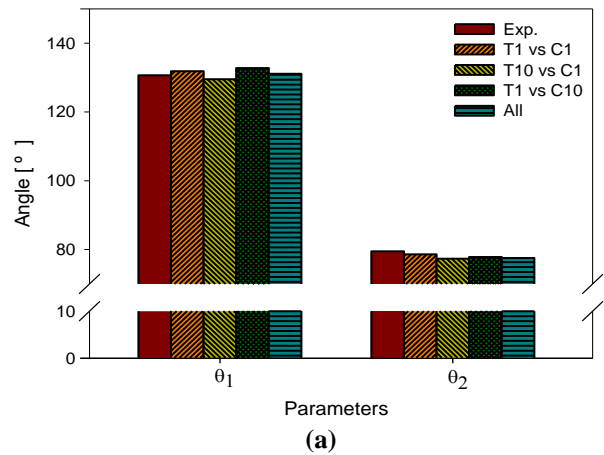


(b)

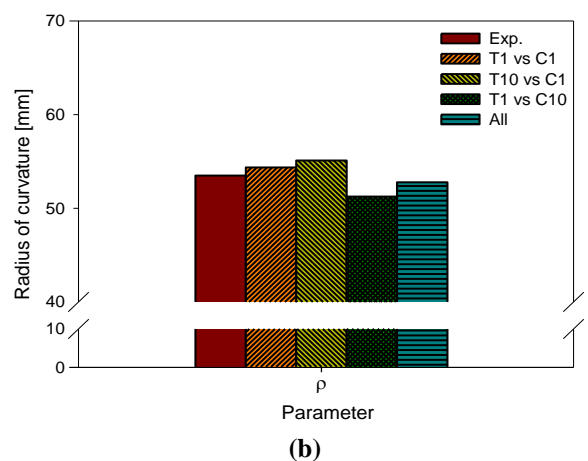
Fig.14 Springback angle and the radius of curvature predicted by Y-U(TC) and Y-U(All) hardening models for TRIP1180: (a) angle (b) radius of curvature

5. 결론

본 연구에서는 인장-압축 비대칭 거동을 보이는 초고강도 강판 TRIP 1,180 MPa급에 대하여 Yoshida-Uemori 경화모델을 적용하여 스프링백을 예측하였다. TRIP1180의 재료모델 상수를 결정하기 위하여 단축 및 이축인장 시험, 단축 인장-계중시험, 인장-압축 반복거동 시험을 수행하였다. 반복거동 시험데이터 중 인장-압축과 압축-인장 데이터를 모두 이용하여 재료 상수를 결정하는 방법과 인장과 압축에 비중을 다르게 적용하여 Yoshida-Uemori 경화모델 상수를 결정하는 방법을 비교하였다. TRIP1180의 재료모델에 대한 스프링백 예측을 검증하기 위해 U-bending 시험을 수행하였으며, 경화모델 간 해석결과



(a)



(b)

Fig.15 Springback angle and the radius of curvature predicted by Y-U(CT) and Y-U(All) hardening models for TRIP1180: (a) angle (b) radius of curvature

와 실험결과를 비교하였다. 인장과 압축에 비중을 다르게 적용한 경우보다 인장-압축과 압축-인장 데이터를 모두 이용하여 재료 상수를 결정한 Yoshida-Uemori 경화모델(Y-U(All))이 실험결과와 가장 일치 하였다. TRIP1180과 같이 인장-압축 거동에서 비대칭성을 보이는 재료의 경우 인장-압축과 압축-인장 데이터를 모두 이용해야 스프링백을 정확하게 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 중소기업청(No. S2315965)과 한국연구재단(No. 2012R1A5A1048294)의 지원으로 연구되었음.

REFERENCES

- [1] J. Jung, S. Jun, H. S. Lee, B. M. Kim, M. G. Lee, J. H. Kim, 2017, Anisotropic Hardening Behaviour and Springback of Advanced High-Strength Steels, *Metals*, Vol. 7, No. 11, p. 480.
- [2] J. Van Slycken, P. Verleysen, J. Degrieck, J. Bouquerel, B. C. De Cooman, 2007, The Effect of Silicon, Aluminium and Phosphor on the Dynamic Behaviour and Phenomenological Modelling of Multiphase TRIP Steels, *Met. Mater. Int.*, Vol. 13, No. 2, pp. 93~101.
- [3] F. Yoshida, T. Uemori, K. Fujiwara, 2002, Elastic-plastic Behavior of Steel Sheets Under In-plane Cyclic Tension-compression at Large Strain, *Int. J. Plast.*, Vol. 18, No. 5, pp. 633~659.
- [4] Y. Hanabusaa, H. Takizawa, T. Kuwabara, 2013, Numerical Verification of a Biaxial Tensile Test Method using a Cruciform Specimen, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 213, No. 6, pp. 961~970.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] F. Barlat, J. C. Brem, J. W. Yoon, K. Chung, R. E. Dick, D. J. Lege, F. Pourboghra, S.-H. Choi, E. Chu, 2003, Plane Stress Yield Function for Aluminum Alloy Sheets-part 1: Theory, 2003, *Int. J. Plast.*, Vol. 19, No. 9, pp. 1297~1319.
- [8] F. Yoshida, T. Uemori, 2003, A Model of Large-strain Cyclic Plasticity and Its Application to Springback Simulation, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 45, No. 10, pp. 1687~1702.