

## 혼합 등방-이동 경화규칙에 기초한 자동차용 알루미늄합금 및 Dual-Phase 강 판재의 스프링백 예측

이명규\* · 김대용\* · 정관수\* · Chongmin Kim\*\* · Michael L. Wenner\*\*\*

(2003년 10월 9일 접수)

### Spring-back Evaluation of Automotive Sheets Based on Combined Isotropic-Kinematic Hardening Rule

M. G. Lee, D. Kim, K. Chung, C. Kim and Michael L. Wenner

#### Abstract

In order to evaluate spring-back behavior in automotive sheet forming processes, a panel shape idealized as a double S-rail has been investigated. After spring-back has been predicted for double S-rails using the finite element analysis, results has been compared with experimental measurements for three automotive sheets. To account for hardening behavior such as the Bauschinger and transient effects in addition to anisotropic behavior, the combined isotropic-kinematic hardening law based on the Chaboche type model and a recently developed non-quadratic anisotropic yield function have been utilized, respectively.

**Key Words** : Spring-Back, Bauschinger Effect, Isotropic-Kinematic Hardening, Anisotropic Yield Function

#### 1. 서론

최근 자동차 산업에서 일반적인 고강도 판재를 더 가볍고, 에너지 효율성이 뛰어난 알루미늄 합금이나 2 상 강 판재(DP-Steel)로 대체하려는 노력이 많이 시도 되고 있다.<sup>(1-3)</sup> 하지만 이러한 장점에도 불구하고, 이 두 재료는 기존의 재료에 비하여 큰 스프링백을 가지는 단점 또한 가진다. 이러한 단점을 극복하려는 노력으로 유한요소해석에 기초한 수치적인 방법이 성형해석을 위한 디자인 단계에서 매우 유용한 방법으로 알려져 있다.<sup>(4)</sup> 본 연구에서는, 스프링백을 정확히 예측하기 위하여, 제하시 관찰되는 Bauschinger 및 transient 효과를 설명할 수 있는 Chaboche 형의 단표면(single-

surface) 모델에 기초한 구성방정식을 도입하였다.<sup>(5-6)</sup> 또한 판재의 비등방성을 고려하기 위하여 최근에 개발된 Barlat 의 Yld2000-2d 함수도<sup>(7)</sup> 함께 이용하였다. 판재에 대한 이방성을 측정하기 위한 실험으로 일축 신장과 등축 신장 실험이, 제하시 발생하는 Bauschinger 효과와 transient 거동을 측정하기 위해서는 일축 인장/압축 및 압축/인장 실험이 수행되었다. 이 때, 압축시 발생하는 좌굴(buckling)을 방지하기 위한 도구가 개발되었으며 그 결과 약 10%의 압축 변형을 얻을 수 있었다. 새로운 구성방정식을 검증하기 위하여 실제 자동차용 부품을 부분변형 시킨 double S-rail 이 제작되었다. 두 가지의 알루미늄 합금(AA5754-O, AA6111-T4)과 2 상 고강도 판재에 대한 스프링백과 비

\* 서울대학교 재료공학부

\*\* Materials and Processes Lab., General Motors (U.S.A)

\*\*\* Manufacturing Systems Research Lab., General Motors (U.S.A)

틀림에 대한 수치모사 결과가 실험과 비교되었으며, 그 결과 새로운 조성방정식을 적용한 수치해석의 결과가 실험값과 잘 일치함이 확인 되었다.

## 2. 이론

### 2.1 경화규칙

항복함수는 다음 식 (1)과 같다.

$$f(\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\alpha}) - \bar{\sigma}_{iso}^m = 0 \quad (1)$$

이 식에서  $\boldsymbol{\sigma}$  는 Cauchy 응력,  $\boldsymbol{\alpha}$  는 이동응력 (back stress),  $\bar{\sigma}_{iso}$  는 항복함수의 크기를 결정하는 유효응력이며  $f$  는 항복함수를 나타낸다.

유효 값들(effective quantities)은 다음의 수정된 소성일 등가 원리(modified plastic work equivalence principle)를 고려하여 정의된다.

$$dw_{iso} = (\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\alpha}) \cdot d\boldsymbol{\varepsilon}^p = \bar{\sigma}_{iso} d\bar{\varepsilon} \quad (2)$$

이 식에서  $d\boldsymbol{\varepsilon}^p$  와  $d\bar{\varepsilon}$  는 각각 소성변형율과 유효 소성변형율 증가량을 나타낸다. 또한 위의 식에서 정의된  $\bar{\sigma}_{iso}$  는 초기 유효응력의  $\boldsymbol{\sigma}$  를  $\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\alpha}$  로 대체한 값으로부터 구해진다. 식 (2)에 의하여 이동경화규칙에서의 유효 소성변형율 증분량은 초기 유효 변형율 증분량과 동등하게(equivalent) 된다.

Bauschinger 효과 및 transient 거동을 나타내기 위하여 Chaboche 형의 단표면 모델에 기초한 혼합 isotropic-kinematic 경화 규칙을 이용하였다. 이동응력의 증분량은 다음 과 같이 두 부분으로 나누어진다.

$$d\boldsymbol{\alpha} = d\boldsymbol{\alpha}_1 - d\boldsymbol{\alpha}_2 = \frac{1}{\bar{\sigma}_{iso}} h_1 d\bar{\varepsilon} (\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\alpha}) - h_2 d\bar{\varepsilon} \boldsymbol{\alpha} \quad (3)$$

여기서,  $h_1$  과  $h_2$  는 각각  $\frac{d\bar{\alpha}_1}{d\bar{\varepsilon}}$  와  $\frac{d\alpha_2}{d\bar{\varepsilon}}$  를 나타낸

다. 이 때,  $d\bar{\alpha}_1 = f(d\boldsymbol{\alpha}_1)^{\frac{1}{m}}$  이고,  $d\alpha_2$  는 유효변형율  $\bar{\varepsilon}$  의 함수이다. 구성방정식을 완성하기 위하여서는, 항복함수의 크기와 위치이동을 묘사하는 경화규칙을 측정해야만 하는데, 이는 단순 인장/압축 또는 압축/인장 실험에 의하여 효과적으로 구할 수 있다.

### 2.2 비이차 비등방성 항복함수

항복함수의 초기 이방성을 설명하기 위하여, Barlat등에 의해서 최근 개발된 Yld2000-2d가 평면 응력 가정하에서 이용되었다. 새로운 직교이방 항복함수는 아래의 식과 같이 두개의 비이차 등방성 항복함수의 합으로 구성되어 있으며, 알루미늄 합금등의 이방성을 잘 묘사할 수 있다고 알려져 있으며, 8개의 이방성 계수를 지닌다.

$$f = \frac{\phi' + \phi''}{2} \quad (4)$$

여기서,  $\phi' = |X'_1 - X'_2|^m$ ,  $\phi'' = |2X''_1 + X''_2|^m + |2X''_2 + X''_1|^m$ . 위의 식 (4)에서  $X'_{1,2}$ ,  $X''_{1,2}$  는 각각  $\mathbf{X}'$  와  $\mathbf{X}''$  의 고유값이며 이는 다음과 같은 코시응력( $\boldsymbol{\sigma}$ )과 편차(deviatoric) 코시응력( $\boldsymbol{\sigma}'$ )의 선형조합으로 정의된다.

$$\mathbf{X}' = \mathbf{C}' \boldsymbol{\sigma}' = \mathbf{L}' \boldsymbol{\sigma}, \quad \mathbf{X}'' = \mathbf{C}'' \boldsymbol{\sigma}' = \mathbf{L}'' \boldsymbol{\sigma} \quad (5)$$

이 때,  $\mathbf{L}'$  과  $\mathbf{L}''$  는 아래와 같이 정의되었다.

$$\begin{bmatrix} L'_{11} \\ L'_{12} \\ L'_{21} \\ L'_{22} \\ L'_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma & 0 & 0 \\ \gamma & 0 & 0 \\ 0 & \gamma & 0 \\ 0 & \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_7 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} L''_{11} \\ L''_{12} \\ L''_{21} \\ L''_{22} \\ L''_{66} \end{bmatrix} = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} -2 & 2 & 8 & -2 & 0 \\ 1 & -4 & -4 & 4 & 0 \\ 4 & -4 & -4 & 1 & 0 \\ -2 & 8 & 2 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \\ \alpha_6 \\ \alpha_8 \end{bmatrix} \quad (6)$$

위의 식에서 7개의 실험값에 의한 7개의 이방성 상수가 필요할 경우에는 Balart 등이 제안한 방법과 같이  $\alpha_3 = \alpha_6$  (또는,  $L''_{12} = L''_{21}$ ) 또는  $\alpha_4 = \alpha_5$  (또는  $L''_{11} = L''_{22}$ ) 와 같이 가정할 수 있다. 그러므로 이방성 계수는 세 방향으로의 단순 인장 실험과 등이축 인장 실험을 통하여 얻어 질 수 있다. Yld2000-2d에 대한 자세한 내용은 다음의 참고문헌에 잘 설명되어있다.<sup>(6)</sup>

### 2.3 변형증분에 의한 수식화

개발된 조성방정식을 유한요소법에 응용하기 위하여서는 주어진 시간증분 동안 요소의 변형경로를 가정하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 흐름이론(flow theory)으로부터 이러한 특별한 경로를 따르는 구성방정식의 적분은 변형증분이론(incremental deformation theory<sup>(8)</sup>)에 기초하였다. 변형증분 이론에 따라 주어진 변형증분  $\Delta \epsilon$  에 대하여, 경화규칙 및 주어진 항복함수를 이용하여 응력의 증분을 구할 수 있다. 즉 미지수가  $\Delta \bar{\epsilon}$  인 아래의 비선형 방정식이 얻어지게 된다.

$$f^m(\sigma_0 - \alpha_0 + \Delta\sigma - \Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2) = \bar{\sigma}_{iso}(\bar{\epsilon}_0 + \Delta\bar{\epsilon}) \quad (7)$$

이 식에서 첨자 "0" 은 초기상태를 의미하며, 오른쪽 항의 값은 측정된 경화 곡선으로부터 얻어질 수 있다. 위의 식에서 새로운 radial 응력  $\sigma - \alpha$  는 경화곡선  $\bar{\sigma}_{iso}(\bar{\epsilon})$  위에 있어야 하며 이러한 응력 적분과정을 Fig. 1 에 나타내었다.

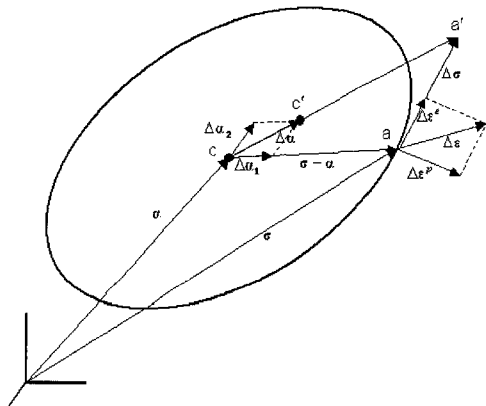


Fig. 1 A schematic view of the stress update

### 3. 실험결과

본 연구에서는 두 종류의 자동차용 알루미늄합금판재(1.5mm AA5754-O, 1.25mm AA6111-T4) 와 2상 강판재 (1.2mm Dual-phase Steel)가 사용되었다. 세 가지 판재의 경화 거동을 측정하기 위한 인장 실험과 Bauschinger 및 transient 거동을 얻기 위한

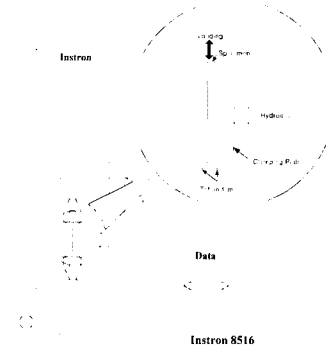
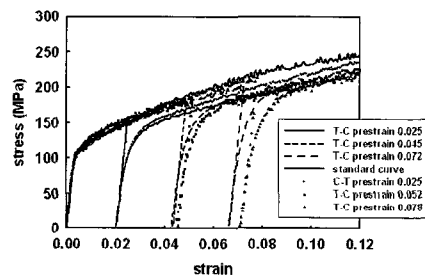
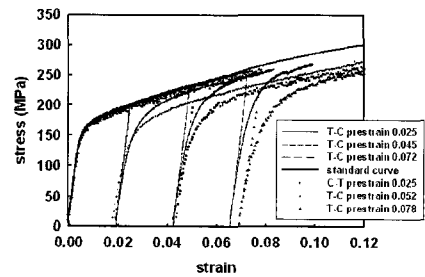


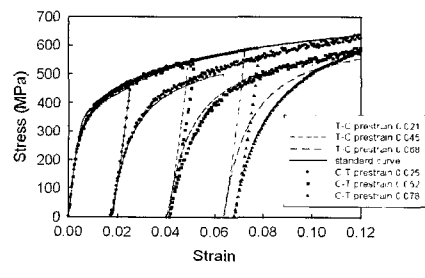
Fig. 2 A schematic view of clamping system for the loading/unloading test



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 Tension/compression and compression/tension curves for (a) AA5754-O (b) AA6111-T4 (c) DP-Steel

일축 인장/압축과 압축/인장 실험이 수행되었다. 이 때 압축 실험시 발생하는 판재의 좌굴을 방지하기 위하여 기존의 방법(9) 응용하여 판재의 옆면에서 클램핑 힘을 가할 수 있는 특별히 제작된 도구를 제작하였다.(Fig. 2) 이와 같은 방법에 의하여 얻어진 인장/압축 곡선은 마찰 및 이축 응력 상태에 의한 오차가 존재하기 때문에 이론적인 방법에 의하여 두 오차를 보정하였다. Fig. 3은 실험에 의하여 얻어진 인장/압축 및 압축/인장 실험 결과이다. 이 그림에서 압축/인장 곡선은 원점에 대하여 180° 회전 후 아래부분을 위로 이동시킨 그림이다. 이 그림에서 보듯이 reverse 곡선은 항복이 더 빨리 일어났으며(Bauschinger effect) 빠른 경화속도 변화율을(transient 거동) 나타냄을 알 수 있었다.

위의 실험 곡선으로부터 수정된 Chaboche 조성 방정식을 위한 등방 및 이동 경화 인자들이 계산되었다.(Table 1)

$$\bar{\alpha} = b_1(1 - e^{-c_1 \bar{\epsilon}})$$

$$\bar{\sigma}_{iso} = a_2 + b_2(1 - e^{-c_2 \bar{\epsilon}}) \text{ or } K(\bar{\epsilon}_0 + \bar{\epsilon})^n - b_1(1 - e^{-c_1 \bar{\epsilon}})$$

$$\bar{\alpha}_1 = a_3 \bar{\epsilon} + \frac{b_3}{c_3}(1 - e^{-c_3 \bar{\epsilon}}), \quad \alpha_2 = a_4 + b_4 \bar{\epsilon}^{c_4} \quad (7)$$

세 판재에 대한 비등방성을 고려하기 위하여 최근에 개발된 Yld2000-2d가 이용되었는데, 이를 위하여 세 방향 (압연방향으로부터 0°, 45°, 90°)의 인장 실험을 통하여 각 방향의 항복응력과 r 값을 구하였으며, 액압 벌지 실험을 통하여 등이축 항복응력을 구하였다. 이 들로부터 7개의 연립 비선형 방정식을 풀어 Yld2000-2d의 계수들을 구하였으며, 이때 항복함수의 지수(m)는 알루미늄합금은 m=8, 2상 강판은 m=6으로 가정하였다.(Table 2)

유한요소해석에 의한 스프링백 거동의 실험적 검증을 위하여 실제 산업용 부품을 변형시킨 double S-rail 이 새로이 디자인 되었으며 사용된 펀치를 Fig. 4 에 나타내었다. 윤활제는 MP-404 가 사용되었다. 서로 다른 블랭크 홀더력(BHF) 과 마찰조건에서 성형된 성형품의 스프링백 양은 광학 좌표 측정 장치(CMM)에 의하여 측정되었으며, 얻어진 결과는 유한요소해석의 결과와 비교되었다. 성형 후 급형으로부터 분리된 성형품은 sidewall curl, wall opening 을 포함하는 스프링백 뿐만 아니라 double S-rail 의 형태적 특성에 의한 비틀림 현상도 함께 나타났다.

Table 1 Hardening parameters

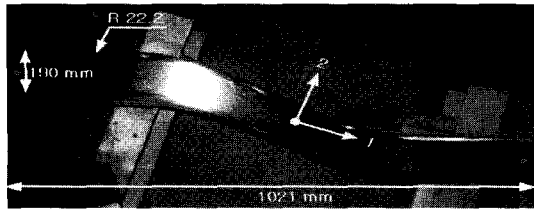
		AA5754-O	AA6111-T4	DP-Steel
$\bar{\alpha}$	b <sub>1</sub>	22.54	58.07	210.5
	c <sub>1</sub>	102.1	61.09	40.25
$\bar{\sigma}_{iso}$	K	-	-	960.4
	$\bar{\epsilon}_0$	-	-	0.0018
	n	-	-	0.184
	a <sub>2</sub>	99.08	138.3	323.1
	b <sub>2</sub>	214.6	230.9	266.9
	c <sub>2</sub>	7.63	5.25	4.69
$\bar{\alpha}_1$	a <sub>3</sub>	300.4	7956	11586
	b <sub>3</sub>	3659	6336	11542
	c <sub>3</sub>	10.1	58.8	83.5
$\alpha_2$	a <sub>4</sub>	1.79	6.95	2.40
	b <sub>4</sub>	52.92	59.7	23.40
	c <sub>4</sub>	0.58	0.37	0.26

Table 2 Anisotropic parameters

	AA5754-O	AA6111-T4	DP-Steel
m	8.0	8.0	6.0
$\alpha_1$	0.879	0.975	0.962
$\alpha_2$	1.136	0.981	0.993
$\alpha_3$	0.952	1.022	0.970
$\alpha_4$	1.048	1.037	0.976
$\alpha_5$	1.009	1.020	1.011
$\alpha_6$	0.952	1.022	0.970
$\alpha_7$	1.034	0.984	0.990
$\alpha_8$	1.237	1.096	0.983

#### 4. 결과 및 고찰

본 연구에서 개발된 경화 규칙 및 비이차 비등방성 항복 함수의 검증을 위하여 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS가 사용되었다. 스탬핑 공정은 외연적 코드인 ABAQUS/ explicit와 사용자 서브루틴 VUMAT이, 스프링백 해석은 내연적 코드인 ABAQUS/standard와 사용자 서브루틴 UMAT이 사용되었다. 유한요소해석을 위한 요소는 판재의 경우 4 절점 shell요소(S4R)를 틀은 4 절점 강체 요소(R3D4)를 사용하였다. Fig. 5에 스프링백이 가장 큰 값을 나타내는 의해 예측된 스프링백양과 실험값을 비교하였다.



(a)



(b)

Fig. 4 Fabricated tools (a) top-view of the punch (b) side-view of the punch

이 때, 블랭크힘과 마찰계수는 알루미늄 AA5754-O합금은 25kN, 0.1 이고 AA6111-T4 와 DP-steel은 42kN, 0.1이었다. 그림에서 세 판재 모두 sidewall curl과 플랜지 스프링백을 나타내었으며, 등방-이동 경화규칙을 적용한 수치해석과 실험결과가 서로 잘 일치하는 것을 알 수 있었다.

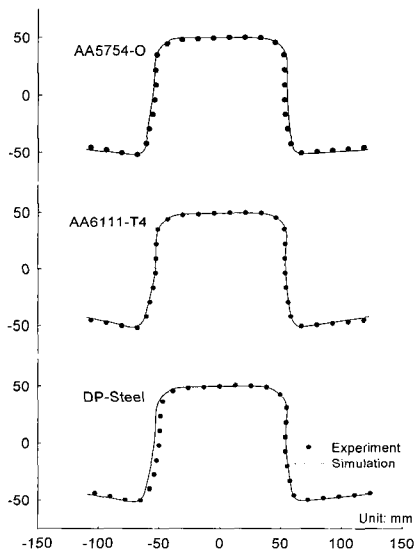


Fig. 5 Spring-back profiles

Fig. 6은 수치해석과 실험에서 측정된 비틀림을 보여주고 있다. 비틀림은 double S-rail의 왼쪽과 오른쪽 끝부분의 상대적인 비틀림 각 차이로 정의되었다. 그림에서 실험과 수치해석 모두 AA6111-T4가 다른 두 재료에 비하여 상대적으로 큰 비틀림 값을 나타내었으며 유한요소해석에 의한 비틀림 값은 실험값과 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

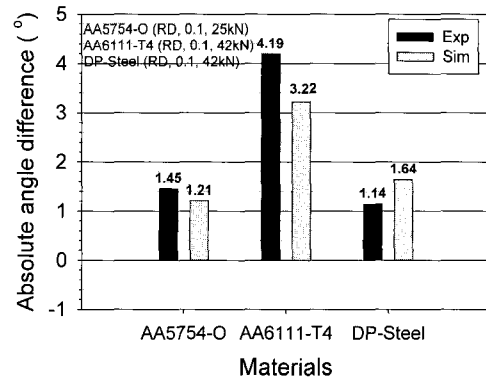


Fig. 6 Comparison of twist angles

## 5. 요약

본 연구에서는 자동차용 판재 성형시 발생하는 스프링백을 정확히 예측하기 위하여, 수정된 Chaboche형에 기초한 혼합형 등방-이동경화규칙이 개발되었다. 또한 판재의 이방성을 위하여 최근 개발된 Barlat의 Yld2000-2d 비이차 비이방성 항복 함수가 이용되었다. 단순인장실험과 인장/압축(압축/인장) 실험에 의하여 Bauschinger 및 transient 거동과 비이방성이 측정되었으며, 유한요소해석에 의한 구성방정식의 검증에 위해 실제 자동차 부품을 부분 변형시킨 double S-rail이 제작되었다. 수정된 Chaboche 형 조성방정식과 비등방 항복함수를 적용한 유한요소해석에 의한 수치해석의 결과는 굽힘에 의한 스프링백과 비틀림에 있어서 실험과 잘 일치함을 알 수 있었다.

## 후기

This work has been performed under the joint project between GM and SNU, while ALCAN and US steel supplied materials. ALCAN also provided bulge

tests. The authors greatly appreciate their support.

### 참 고 문 헌

- (1) W. S. Miller, L. Zhuang, J. Bottema, A. Wittebrood, P. Smet, A. Hauzler and A. Vieregge, 2000, "Recent Development in Aluminum Alloys for the Automotive Industry", Material Science and Engineering A, Vol. 280, p. 37.
- (2) M. Jain, J. Allin and M. Bull, 1998, "Deep Drawing Characteristic of Automotive Aluminum Alloys", Material Science and Engineering A, Vol. 256, p. 69.
- (3) A. Konieczny and M. Shi, 2001, "An Experimental Study of Springback for Dual Phase Steel and Conventional High Strength Steel, SAE Technical Paper, No. 2001-01-3106.
- (4) 양동열, 이상욱, 윤정환, 유동진, 1999, "박판 성형에서의 스프링백 해석과 산업적 응용", 한국소성가공학회지, 제8권 제1호, pp. 22~28.
- (5) J. L. Chaboche, 1986, "Time independent constitutive theories for cyclic plasticity", Int. J. Plasticity., Vol. 2, p. 149.
- (6) B. K. Chun, J. T. Jinn and J. K. Lee, 2002, "Modeling the Bauschinger Effect for Sheet Metals, Part I: Theory", Int. J. Plasticity, Vol. 18, p. 571.
- (7) F. Barlat, J. C. Brem, J. W. Yoon, K. Chung, R.E. Dick, S.-H. Chol, F. Pourboghrat, E. Chu, and D. J. Lege, 2003, "Plane stress yield function for aluminum alloy sheets-Part I: Theory," Int. J. Plasticity, Vol. 19, pp. 1297~1319.
- (8) K. Chung, and O. Richmond, 1993, "A deformation theory of plasticity based on minimum work paths", Int. J. Plasticity., Vol. 9, p. 907.
- (9) V. Balakrishnan, 1999, "Measurement of in-plane Bauschinger effect in metal sheets", Master's thesis, The Ohio State University.