

항복함수 및 경화모델에 따른 DP980 강판의 스프링백 예측

김재홍¹ · 강길석² · 이현석³ · 김지훈⁴ · 김병민[#]

Spring-back Prediction of DP980 Steel Sheet Using a Yield Function with a Hardening Model

J. H. Kim, G. S. Kang, H. S. Lee, J. H. Kim, B. M. Kim

(Received March 3, 2016 / Revised May 4, 2016 / Accepted May 10, 2016)

Abstract

In the current study, spring-back of DP980 steel sheet was numerically evaluated for U-bending using a yield function with a hardening model. For spring-back prediction, two types of yield functions - Hill'48 and Yld2000-2d - were considered. Additionally, isotropic hardening and the Yoshida-Uemori model were used to investigate the spring-back behavior. The parameters for each model were obtained from uniaxial tension, uniaxial tension-compression, uniaxial tension-unloading and hydraulic bulging tests. The numerical simulations were performed using the commercial software, PAM-STAMP 2G. The results were compared with experimental data from a U-bending process.

Key Words : Spring-back, Hardening Model, Yield Function, U-bending, Advanced High Strength Steel

1. 서 론

최근 자동차 연비 규제 및 배기가스 규제가 강화되면서 차체 경량화가 주요 이슈로 대두되고 있다. 차체 경량화를 위한 방안으로 초고강도강을 적용하는 사례가 점점 증가하고 있다. 초고강도강을 차체에 적용할 경우, 탄성회복량의 증가로 인하여 과도한 스프링백이 발생하기 때문에 치수정밀도를 확보하는데 어려움이 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 유한요소해석을 이용하여 스프링백을 사전에 예측하고 이를 생산공정에 반영하고 있다. 하지만 기존의 구성방정식은 바우싱거(bauschinger) 효과, 전이(transient) 거동, 소재의 변형에 따른 탄성계수의 변화 및 이방성 거동

등을 고려하기 어렵고 높은 예측정밀도를 얻는데 한계가 있다. 따라서, 유한요소해석에 사용된 구성방정식이 소재의 거동을 보다 정밀하게 묘사할 필요가 있다.

이에 따라 정밀하게 스프링백을 예측하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. Park 등[1]은 이동경화 모델에 기반하여 MS1470 강판의 스프링백을 예측하였다. 그 결과, 기존의 등방경화모델을 사용한 경우에 비해 실험 결과와 보다 유사한 형상을 보이는 것을 확인하였다. 또한, Kim 등[2]은 등방-운동성경화 조합모델을 활용하여 zircaloy-4 판재의 경화 거동을 예측하였고 Ha 등[3]은 항복함수의 찌그러짐에 기반한 경화모델을 사용하여 EDDQ 강판의 이방성 경화 거동에 대해 조사하였다.

1. 부산대학교 정밀가공시스템전공

2. 부산대학교 융합학부

3. 나라엠앤디(주) PD연구팀

4. 부산대학교 기계공학부

Corresponding Author : School of Mechanical Engineering, Pusan National University, E-mail: bmkim@pusan.ac.kr

본 연구에서는 DP980 강판의 U-Bending 공정에서 항복합수 및 경화모델의 적용에 따른 스프링백을 예측하였다. 항복합수는 Hill'48모델과 Yld2000-2d 모델을 사용하였으며 경화모델은 등방경화모델 및 이 동경화모델인 Yoshida-Uemori 모델을 적용하였다. 항복합수 및 경화모델의 계수는 다양한 기초 실험과 수학적 최적화를 수행하여 결정하였으며, 이를 유한요소해석에 적용하였다. 또한 스프링백 예측 정밀도를 검증하기 위해 실험 결과와 유한요소해석 결과를 비교하였다.

2. 구성방정식

2.1 항복합수

DP980 강판의 이방성 거동을 고려하기 위하여 Hill'48 항복합수[4]와 Yld2000-2d 항복합수[5]를 적용하였다. 항복합수의 계수를 결정하기 위해 압연 방향에 대한 방향별(0°, 45°, 90°) 인장 시험 및 액압 별지 시험을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 1에 나타내었다.

2.1.1 Hill'48 항복합수

Hill'48 항복합수는 이방성 계수를 적용하여 이방성 거동을 모사할 수 있으며 식(1)과 같이 정의된다.

$$\bar{\sigma} = [(G+H)\sigma_x^2 - 2H\sigma_x\sigma_y + (H+F)\sigma_y^2 + 2N\sigma_{xy}]^{1/2} \quad (1)$$

여기서, $\bar{\sigma}$ 는 유효응력을 나타내며 G, H, F, N 은 수직 이방성계수에 의해 결정되는 재료상수이다. 결정된 DP980 강판의 Hill'48 상수는 Table 1에 나타내었다.

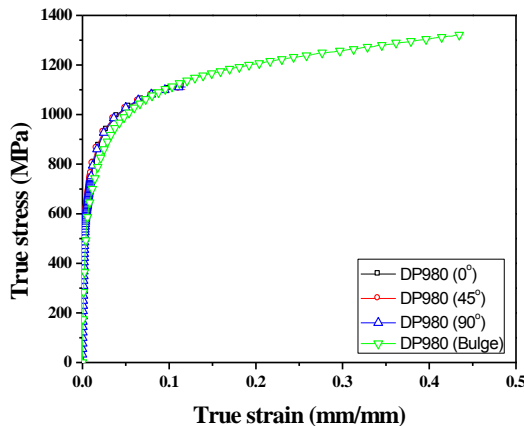


Fig. 1 Measured strain-stress curve

Table 1 Coefficient of Hill'48

F	G	H	N
0.503	0.569	0.431	1.449

Table 2 Coefficient of Yld2000-2d

α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8
0.961	0.980	0.878	0.977	0.989	0.876	0.973	1.074

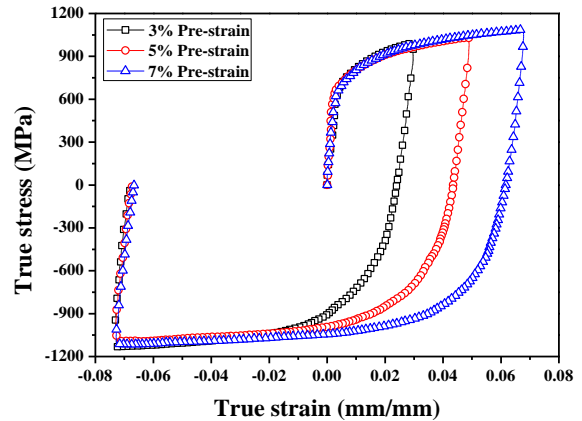


Fig. 2 Measured tension-compression curve

2.1.2 Yld2000-2d 항복합수

Yld2000-2d 항복합수는 다양한 변형모드에서의 기계적 거동을 고려하기 때문에 우수한 정밀도를 보이는 것으로 알려져 있다.

$$\phi = |X'_1 - X'_2|^a + |2X'_2 + X''_1|^a + |2X'_1 + X''_2|^a = 2\bar{\sigma} \quad (2)$$

여기서, $\bar{\sigma}$ 는 유효응력을 나타내며 a 는 재료의 결정 구조와 관련된 상수이다. X' 과 X'' 은 대칭 응력의 주 응력 값으로 식(3)과 같은 관계식에 의해 선형 변형된다.

$$X' = L' \cdot \sigma, X'' = L'' \cdot \sigma \quad (3)$$

0°, 45°, 90° 방향에 대한 항복응력과 이방성 계수, 이축항복응력을 이용하면 L' 과 L'' 텐서에 포함된 8개의 이방성 계수를 결정할 수 있으며, 이를 Table 2에 나타내었다.

2.2 경화 모델

DP980 강판의 경화 거동을 고려하기 위하여 등방

경화모델과 Yoshida-Uemori 모델[6]을 적용하였다. Yoshida-Uemori 모델의 계수를 결정하기 위해 인장-압축 시험을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

또한, 유효 변형률의 증가에 따른 탄성계수의 감소를 측정하기 위해 인장-재중 시험을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 이러한 현상을 모사하기 위해 식 (4)와 같이 수식화하였다.

$$E = E_0 - (E_0 - E_a)[1 - \exp(-\xi \epsilon_p)] \quad (4)$$

여기서 E_0 는 초기 탄성계수, E_a 는 포화 탄성계수, ξ 는 연화관련 지수이며 결정된 상수는 Table 3에 나타내었다.

2.2.1 등방경화모델

본 연구에서는 등방경화모델로 Swift 법칙을 사용하였으며 이는 식(5)와 같이 정의된다.

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 + K(\epsilon_p)^n \quad (5)$$

여기서, $\bar{\sigma}$ 는 유효응력, σ_0 는 항복응력 K 는 강도계수, n 은 가공경화지수를 나타내며, 결정된 상수는 Table 4에 나타내었다.

2.2.2 Yoshida-Uemori 모델

Yoshida-Uemori 모델은 이동경화 거동을 하는 경계면을 도입하여 항복면의 등방-이동경화를 모사하도록 하였으며 경계면에서 항복면의 상대이동은 다음과 같이 정의한다.

$$\alpha_* = \alpha - \beta \quad (6)$$

여기서 α_* 는 항복곡면의 중심, α 는 경계면의 중심, β 는 두 면의 상대위치를 나타낸다. 이는 항복곡면과 경계면의 상대적인 움직임을 결정하며 그 거동은 식(7)과 같이 정의하였다.

$$\alpha_* = C \left[\left(\frac{a}{Y} \right) (\sigma - \alpha) - \sqrt{\frac{a}{\alpha_*}} \alpha_* \right] \dot{\epsilon} \quad (7)$$

여기서 a 는 경계면의 초기 유효크기 B 와 유효크기

증가량 R 의 합과 항복면의 유효크기 Y 의 차이를 나타내며, C 는 이동 경화 속도를 제어하는 계수이다.

또한, 경계면의 등방 및 이동경화 거동은 각각 다음과 같이 정의한다.

$$dR = m(R_{sat} - R)\dot{\epsilon} \quad (8)$$

$$d\beta = m \left(\frac{2}{3} b D^p - \beta \right) \dot{\epsilon} \quad (9)$$

여기서 dR 과 $d\beta$ 는 각각 경계면의 유효크기 증가량 R 과 후방응력 β 의 증가량을 의미하며, D^p 는 소성 변형률의 증가량이고, m , R_{sat} , b 는 경화계수이다. 결정된 DP980 강판의 Yoshida-Uemori 모델 상수를 Table 5에 나타내었다.

Table 3 Measured elastic coefficient

E_0	E_a	ξ
211.9 GPa	169.84 GPa	140.7

Table 4 Coefficient of isotropic hardening model

σ_0	K	n
613.5 MPa	1482.97 MPa	0.1159

Table 5 Coefficient of isotropic hardening model

Y	B	R_{sat}	b
613.5 MPa	998.1 MPa	122.9 MPa	176.6 MPa
m	C_1	C_2	$\epsilon_{p,ref}$
16.05	237.8	237.8	0.005

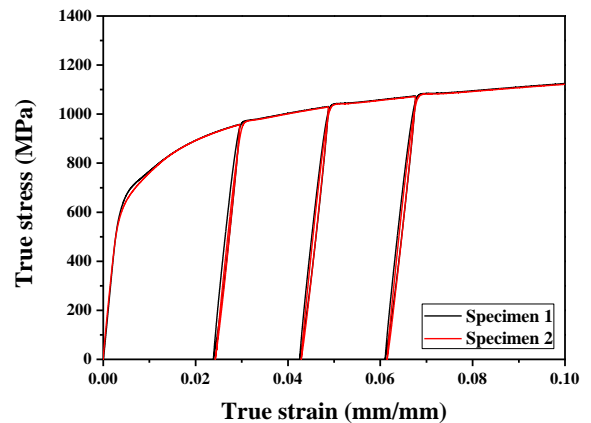


Fig. 3 Measured tension-unloading curve

3. U-bending 성형실험 및 유한요소해석

3.1 성형실험

DP980 강판의 스프링백 거동을 조사하기 위해 Fig. 4와 같은 NUMISHEET'93 벤치마크 문제에서 제안된 U-bending 금형과 50ton 급의 유압프레스를 사용하여 성형실험을 수행하였다. 시편으로 사용된 DP980 강판은 폭 30mm, 길이 300mm, 두께 1.1mm이며, 시편의 유입방향은 압연 방향과 0°, 45°, 90° 방향에 대하여 실험을 실시하였다. 펀치의 성형속도는 1mm/s로 설정하였고 홀더에 10kN의 하중을 추가하여 시편을 가압하였다.

성형이 완료된 시편은 2D 좌표측정기를 이용하여 형상을 측정하였다. 또한, 스프링백 거동을 정량적으로 비교하기 위해 Fig. 5와 같이 NUMISHEET'93 벤치마크 문제에서 정의한 스프링백 인자[7]를 이용하였다.

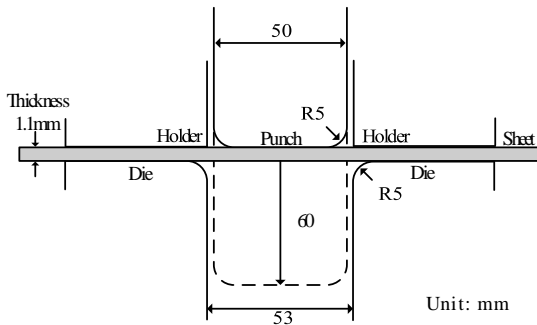


Fig. 4 Schematic view of tool and specimen for U-bending

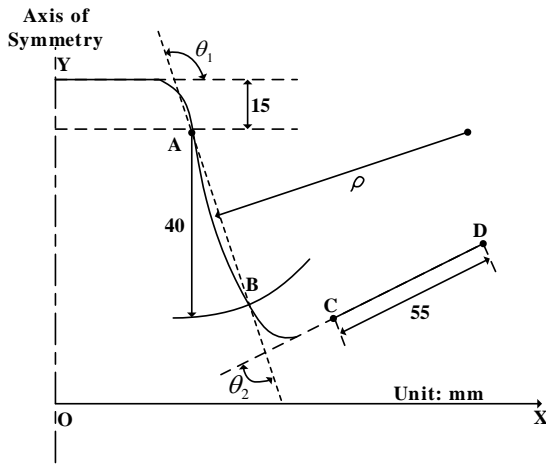


Fig. 5 Measurement parameter for springback

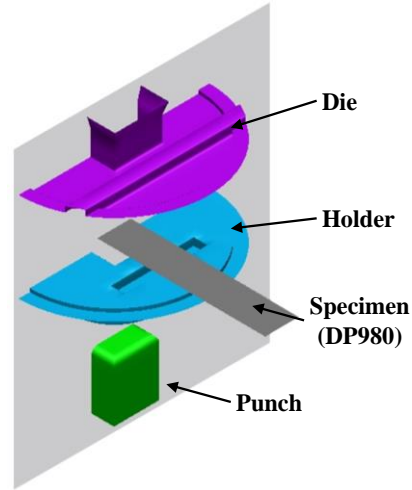
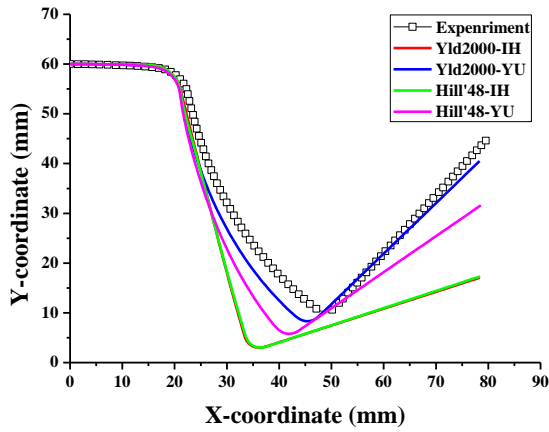


Fig. 6 FE-model for U-bending

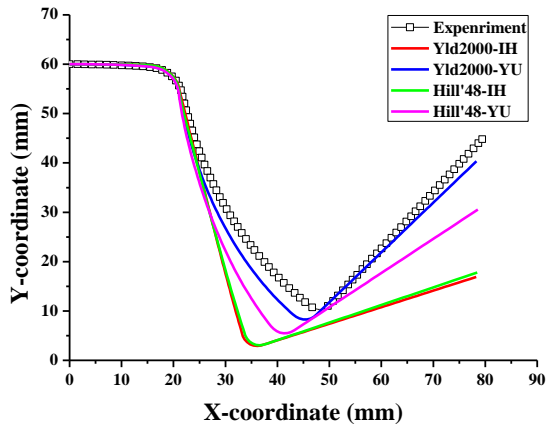
3.2 유한요소해석

항복함수 및 경화모델에 따른 DP980 강판의 스프링백 거동을 모사하기 위해 상용 유한요소해석 프로그램인 PamStamp 2G를 사용하였다. 항복함수 및 경화모델의 계수는 제 2장에서 결정된 값을 활용하여 성형해석 및 스프링백 해석을 수행하였다. 해석 모델은 실험과 동일하게 적용하였으며, 이를 Fig. 6에 나타내었다. 유한요소해석 시, 시편은 두께 방향으로 7개의 적분점을 갖는 BLT(belytschko-lin-tsay) 쉘요소[8]를 1.0mm×1.0mm의 균일한 크기로 사용하였으며, 금형은 강체로 가정하였다. 펀치의 속도는 실험과 동일하게 1mm/s로 설정하였고, 홀더의 가압력은 10kN으로 적용하였으며, 해석의 효율성을 위해 매스 스킴링 기법을 사용하였다. 또한, 금형과 시편 간의 쿨롱 마찰계수는 무윤활 조건으로 가정하여 0.125를 추가하였다[9].

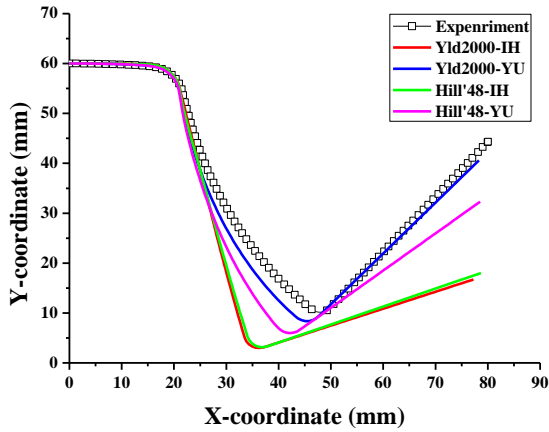
항복함수와 경화모델에 따른 스프링백 예측결과를 평가하기 위해 성형 실험 결과와 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. Hill'48 항복함수나 등방경화모델을 사용한 경우에는 실험과 차이를 보이지만, Yld2000-2d 항복함수와 Yoshida-Uemori 모델을 사용한 경우에는 실험과 유사한 형상을 보이는 것을 확인할 수 있다. Hill'48 항복함수는 소재의 이방성 계수만을 고려하기 때문에 방향에 따른 항복응력을 모사하기 어렵다. 하지만 Yld2000-2d 항복함수는 계수를 결정할 때 방향별 항복응력이 고려되었기 때문에 이방성 거동을 정확하게 모사할 수 있다. 또한, Yoshida-Uemori 모델은 소재의 변형에 따른 탄성계수의



(a) 0°



(b) 45°

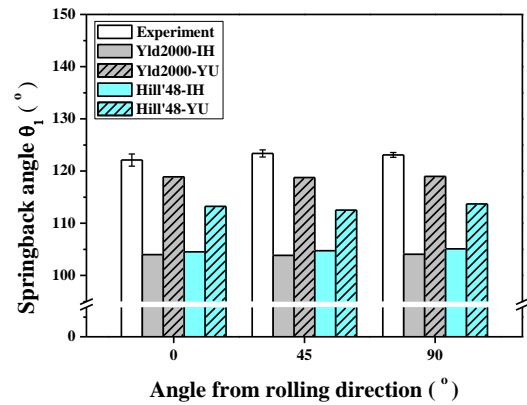


(c) 90°

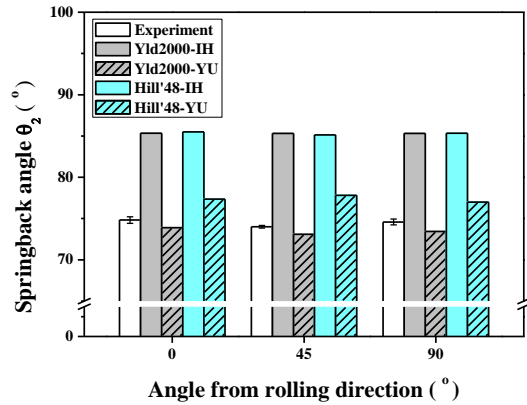
Fig. 7 Specimen profile after U-bending process

감소, 바우싱거 효과 및 전이 거동 등을 효과적으로 구현할 수 있기 때문에 예측 정밀도가 우수한 것으로 판단된다.

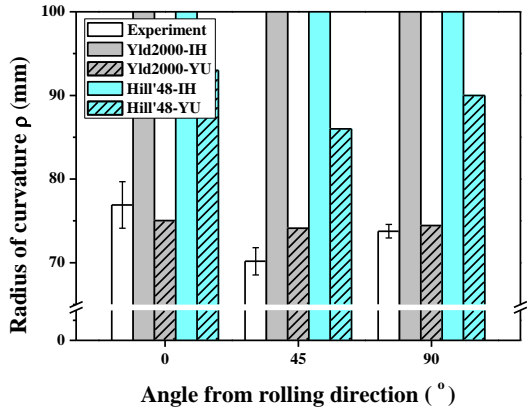
스프링백 양을 정량적으로 비교하기 위해 해석결과와 실험결과의 스프링백 인자를 측정하여 Fig. 8에



(a) Springback angle θ_1



(b) Springback angle θ_2



(c) Radius of curvature ρ

Fig. 8 Springback parameters after U-bending process

도시하였다. 스프링백 양은 스프링백 각 θ_1 이 클수록, 스프링백 각 θ_2 와 벽면부의 곡률이 작을수록 커진다. 따라서, 스프링백 양은 시편의 유입방향과 압연방향과의 각이 45°, 90°, 0° 순으로 커진다. 이러한 경향은 해석 및 실험결과에서 동일하게 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 DP980 강판의 U-Bending 공정에서 항복함수 및 경화모델의 적용에 따른 스프링백을 예측하여 다음과 같은 결론은 도출하였다.

(1) DP980 강판의 물성을 측정하기 위해 인장 실험, 인장-재중 실험, 인장-압축 실험 및 액압 별지 시험을 수행하였으며, 수학적 최적화 기법을 사용하여 항복함수 및 경화모델의 계수를 결정하였다.

(2) 항복함수 및 경화모델의 적용에 따른 예측정밀도를 검증하기 위해 U-Bending 공정에 대한 실험과 유한요소해석을 수행하였다. 실험 결과와 예측 결과의 비교 시, Yld2000-2d 항복함수와 Yoshida-Uemori 모델을 적용한 경우에 실험과 유사한 현상을 나타내었다.

(3) 스프링백 양을 정량적으로 비교하기 위해 스프링백 인자를 이용하였으며, 스프링백 양은 시편의 유입방향과 압연방향과의 각이 45°, 90°, 0° 순으로 커지는 것으로 나타났다.

(4) DP980 강판의 성형 공정에서 변형에 따른 탄성계수의 감소, 바우싱거 효과, 이방성 거동 및 전이 거동 등을 고려하여야 유한요소해석의 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 중소기업청의 지원(No.S2315965)으로 수행된 연구 결과임.

REFERENCES

- [1] S. C. Park, T. Park, Y. Koh, D. Y. Seok, T. Kuwabara, N. Noma, K. Chung, 2013, Spring-back Prediction of MS1470 Steel Sheets Based on a Non-linear Kinematic Hardening Model, *Trans. Mater. Process*, Vol. 22, No. 6, pp. 303~309.
- [2] D. W. Kim, S. S. Bang, M. S. Kim, H. Y. Lee, N. S. Kim, 2013, Development of Test Method for Simple Shear and Prediction of Hardening Behavior Considering the Bauschinger Effect, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No. 10, pp. 1239~1249.
- [3] J. Ha, M. G. Lee, F. Barlat, 2012, Evaluation of Anisotropic Hardening Models using Two-Step Tension Tests, *Trans. Mater. Process*, Vol. 21, No. 6, pp. 372~377.
- [4] R. Hill, 1948, A Theory of the Yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals, *Proc. R. Soc. Lond. A*, Vol. 193, No. 1033, pp. 281~297.
- [5] 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, *Int. J. Plast.*, Vol. 19, No. 9, pp. 1297~1319.
- [6] F. Yoshida, T. Uemori, 2002, A Model of Large-strain Cyclic Plasticity Describing the Bauschinger Effect and Workhardening Stagnation, *Int. J. Plast.*, Vol. 18, No. 5-6, pp. 661~686.
- [7] C. Gomes, O. Onipede, M. Lovell, 2005, Investigation of Springback in High Strength Anisotropic Steels, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 159, No. 1, pp. 91~98.
- [8] T. Belytschko, J. I. Lin, C. Tsay, 1984, Explicit Algorithms for the Nonlinear Dynamics of Shells, *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.*, Vol. 42, No. 2, pp. 225~251.
- [9] A. Aryanpour, D. E. Green, 2012, Evaluation of LS-Dyna user's Conference, 12th Int. LS-Dyna Conf., Dynamore GmbH, Detroit, USA.