

고강도강 Reinforce Center Pillar의 스프링백 해석

김기태¹ · 김승현¹ · 유국호² · 이춘우² · 심현보[#]

Application of Springback Analysis in the Development of a Reinforce Center Pillar Stamping Die

K. T. Kim, S. H. Kim, K. H. Yoo, C. W. Lee, H. B. Shim

(Received April 22, 2014 / Revised June 18, 2014 / Accepted July 1, 2014)

Abstract

The current paper introduces work that was conducted during the development of a stamping die for a reinforce center pillar made from high strength steel. In the current study, the Bauschinger effect on the springback analysis was studied by comparing simulation results with real panels, which are currently in production. For a complicated part shape, quantitative measurements of the deformed shape are not easy in general to obtain. An adjustment procedure of the shape data for some chosen sections has been suggested to improve the accuracy of the quantitative measurements. The results show that the kinematic hardening model provides more accurate results.

Key Words : High Strength Steel, Springback, Bauschinger Effect, Kinematic Hardening

1. 서 론

친환경그린카의 핵심기술인 차체경량화를 위해 마그네슘합금이나 알루미늄합금 등의 경량합금, CFRP 등과 같은 복합재료, 고강도강의 적용을 통한 두께감소 등의 다양한 방법이 채택되고 있다. 고강도강의 경우 일반적으로 연신률이 낮아 성형불량이 발생되기 쉽고 스프링백이 크게 발생하는 문제점이 있으나, 충돌안전성확보와 저렴한 소재비용 등의 이유로 대부분 고강도강을 채택하고 있다.

고강도강 및 초고강도강의 적용이 확대되는 추세와 더불어, 형상정밀도 품질기준이 강화되는 추세에 따라 금형개발에서 스프링백 문제가 차지하는 비중이 점차 증가하고 있다. 스프링백문제의 해결을 위

해 스프링백해석 결과를 금형설계에 반영하면 되지만, 고강도강의 경우 스프링백예측의 정확도는 아직까지 높지 않아, 금형가공후 금형교정 작업이 증가하고, 결과적으로 금형개발 기간이 강도가 낮은 일반강에 비해 길어지고 있다.

고강도강의 스프링백해석의 정확도가 떨어지는 원인으로 지금까지는 주로 해석에 사용되는 쉘요소가 굽힘변형을 적절하게 묘사를 하지 못하기 때문으로 판단하여 주로 쉘요소의 개선이 주로 연구되어 왔으나, 블랭크형상의 조절[1], 시행착오법을 통한 금형형상의 체계적인 보정[2], 변형률속도의 영향고려[3] 등 해석의 정확도를 높이기 위해 다양한 방법이 시도되어 왔다. 최근 바우싱거 효과가 주목을 받으면서, 바우싱거효과(Bauschinger effect)를 고려할

1. ㈜준텍

2. 아진산업㈜

Corresponding Author : Yeungnam University, Gyongsan., E-mail: hbshim@yu.ac.kr

수 있는 이동경화모델을 채택함으로써 스프링백 해석의 정확도가 향상되었다는 결과가 많이 보고되고 있다[4,5].

즉, 스탬핑공정 동안 또는 가공후 발생하는 응력의 역전현상이 발생되는데 이로 인한 바우싱거효과는 고강도강일수록 심화되는 경향을 보인다. 일반강의 경우에는 바우싱거효과의 영향을 심각하게 고려하지 않았고, 또한 발생하는 스프링백도 비교적 크지 않기 때문에 등방성경화모델로 해석을 하더라도 심각한 문제가 되지 않았다.

그렇지만 고강도강의 경우 강도가 증가되면서 두께를 감소시킬 수 있기 때문에, 두께감소와 강도증가의 영향이 복합적으로 작용하기 때문에 최근 고강도강의 채택이 확대되면서 스프링백 예측의 정확도문제가 심화되고 있다.

본 연구에서는 실제로 생산중인 Reinforce Center Pillar 금형을 개발하면서 수행한 바우싱거효과를 고려한 스프링백해석의 결과를 실제 제품의 성형후 형상과 비교를 통해 해석의 정확도를 비교하고, 또 바우싱거효과를 고려하지 않는 해석과 함께 비교함으로써 바우싱거효과가 해석의 정확도에 미치는 영향을 조사하고자 한다. 이동경화모델은 최근 정확도가 높은 것으로 알려진 Yoshida-Uemori 모델[6]을 채택하였다.

2. 스프링백 해석

2.1 소재의 물성치

본 연구에서 사용된 강판 소재는 이중조직강인 두께 1.4mm의 SPFC780DP으로, Fig. 1과 같이 인장압축시험을 실시하였고 이 과정에서 기계적물성치를 도출하여 Table 1에 나타내었다. Yoshida-Uemori 이동경화모델의 계수는 Fig. 1의 인장압축시험결과로부터 Table 2와 같이 도출하였다.

2.2 Reinforce Center Pillar 스프링백 해석

Reinforce Center Pillar는 드로잉공정인 OP10, 리스트라이킹공정인 OP20을 거쳐 가공이 이루어지는데 Fig. 2(a)는 OP10의 금형을, Fig. 2(b)는 OP20의 금형형상을 나타내고 있다. OP10의 공정조건은 홀딩력을 40ton, 금형속도는 5m/sec으로 설정하였고, 블랭크는 별도의 윤활없이 소재가 공급될 때의 조건, 즉 방청유가 가해진 상태 그대로 사용하였다.

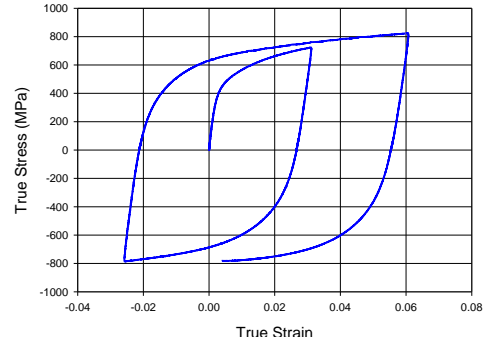


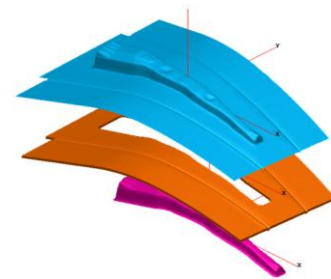
Fig. 1 Stress-strain relation of SPFC780DP from the tension-compression-tension test

Table 1 Mechanical properties of SPFC780DP

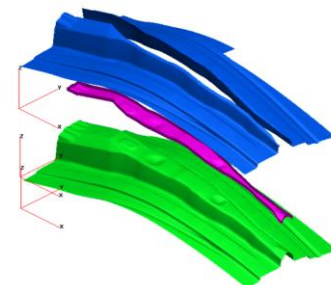
Young's Modulus (GPa)	206
Offset strain	0.266E-2
Workhardening constant K (MPa)	1574
Workhardening exponent n	0.210
Lankford Value R	0.71

Table 2 Yoshida-Uemori parameters of SPFC780DP

α_0	0.41	b	0.25	R_{sat}	0.07
c_1	300	c_2	200	m	9
ξ	258	E_a	160	E	206



(a) OP10 Die



(b) OP20 Die

Fig. 2 Die Geometry for reinforce center pillar

스프링백해석은 성형해석과 연계하여 상용해석프로그램인 Pam Stamp[7] 을 사용하여 적응적요소재구성 (adaptive remeshing)을 5단계까지 설정하여 해석을 수행하였고, 금형과 소재사이의 마찰계수는 Pam Stamp 에서 기본적으로 설정되는 값인 0.12를 사용하였다. 이때 바우싱거효과의 영향을 조사하기 위하여 등방성 경화모델로 해석한 결과와 이동경화모델인 Yoshida-Uemori 모델로 해석결과를 실제로 제품형상의 측정결과와 비교할 예정이다. 또한 리스트라이킹이 스프링백에 미치는 영향을 조사하기 위해 OP10후의 제품형상과 스프링백해석의 결과, 그리고 OP20후의 제품형상과 스프링백해석의 결과도 각각 비교하였다.

2.3 판넬의 형상측정

Fig. 3은 OP10과 OP20후의 성형후 판넬을 각각 보여주고 있다. 성형후 판넬은 Fig. 4와 같이 정반위에 자유롭게 올려놓은 뒤 광학식 3차원 스캐너(GOM, ATOS II)를 통하여 형상을 추출하였다. 판넬의 형상을 측정할 때 외력을 가하지 않고 정반위에 자유롭게 올려두었기 때문에 3차원 스캐너로 측정된 결과를 해석결과와 비교하는데 어려움이 있다. 이 문제를 해결하기 위해 제품의 길이방향으로 미리 선정된 단면에 대하여 각 단면별로 펀치와 접촉되는 부위에 위치한 점을 선정하여 이 점을 기준으로 측정결과를 이동한 뒤 펀치면을 중심으로 회전시켜 줌으로써 스프링백각도를 추출한다.

Fig. 5는 이 과정을 도식적으로 나타내고 있으며 파란색선은 해석 또는 측정을 통해 추출된 형상으로부터 추출한 단면형상이며 검정색선은 금형형상을 나타내고 있는데 이 방법은 제품의 길이방향으로의 비틀림과 벽면의 휘어짐 등은 측정할 수 없으나 벽면각도와 플랜지각도는 비교적 정확하게 추출이 가능하다. 각도와 달리 제품의 휨 정도를 나타내는 상면변위는 각 단면에서의 펀치의 중심에 설정된 기준점에서 제품까지의 수직거리를 구한 뒤 이를 다시 특정한 단면에서 펀치면에 접촉하도록 조작하여 구한다. 이 과정은 Pam-Stamp의 Best-fit 기능으로 쉽게 구현할 수 있다.

Fig. 5에서 제시된 방법을 적용하여 제품의 측방향으로의 스프링백경향을 조사하기 위해 설정한 단면을 Fig. 6와 Fig. 7에 나타내었다. 이 단면들은 제품의 길이방향중심선에 대하여 측방향으로 70mm간격으로 설정하여 이 단면에서의 형상을 도출한다.



(a) After OP10



(b) After OP20

Fig. 3 Deformed shape of reinforce center pillar

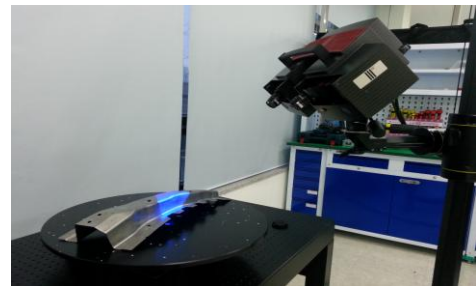


Fig. 4 Measurement of the reinforce center pillar with 3D optical scanner

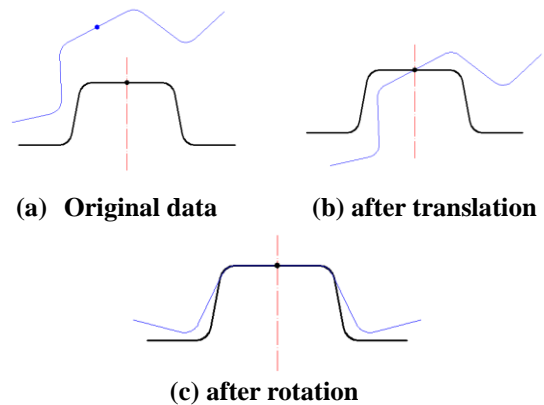


Fig. 5 Manipulation of shape data to get springback angle

2.4 스프링백 결과 분석

Fig. 2에서 나타낸 금형형상정보를 이용하여 OP10 공정과 OP20공정에 대하여 각각 성형해석과 스프링백해석을 수행하였다. 이때 스프링백에 미치는 바우

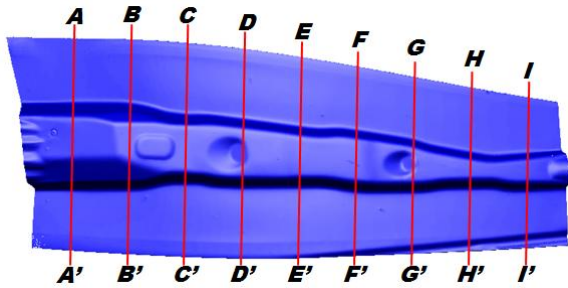


Fig. 6 Measuring section of OP10 panel

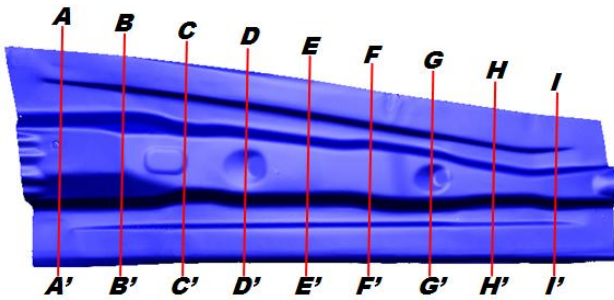
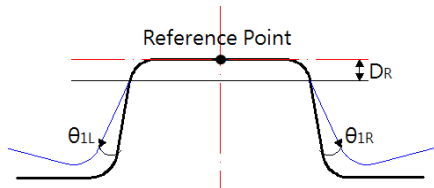
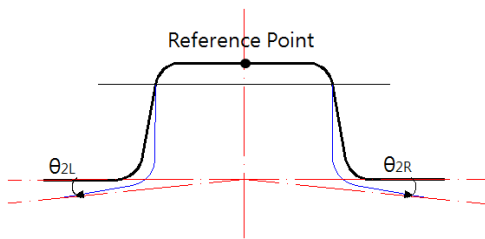


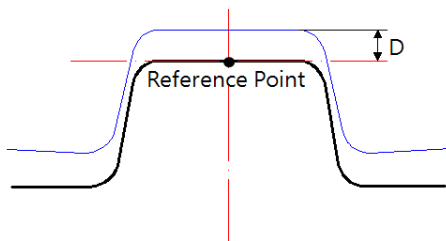
Fig. 7 Measuring section of OP20 panel



(a) Wall angle : θ_{1L}, θ_{1R}



(b) Flange angle : θ_{2L}, θ_{2R}



(c) Upper displacement : D

Fig. 8 Springback mode of reinforce center pillar

싱거효과의 영향을 조사하기 위하여 Yoshida-Uemori의 이동경화모델로 해석한 결과와 등방성경화모델로 해석한 결과와 비교하였다.

3차원적으로 발생하는 스프링백의 거동을 분석하기 위해 Fig. 8과 같이 (a) 벽면각도변화 (b) 플랜지 각도변화 (c) 상부변위의 3가지모드로 분류하고 각 모드에 대하여 정량적인 값을 도출하였다.

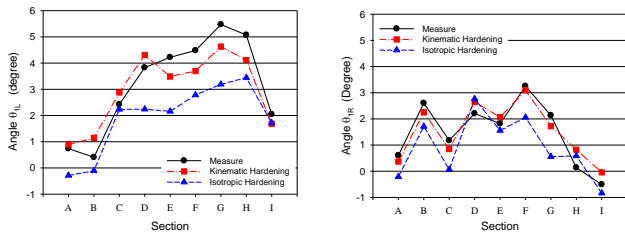
3차원적으로 발생하는 스프링백을 분석하기 위해 Pam-Stamp의 Best Fit 기능을 활용하여 Fig. 5에서 설명된 과정으로 해석후 형상과 측정형상을 조작함으로써 Fig. 6과 Fig. 7에서 선정된 단면에 대하여 Fig. 8의 스프링백각도와 상면변위를 구하였다.

그런데 OP10금형은 설계시의 형상 그대로를 사용하고 있으나, OP20금형은 트리아아웃과정에서 금형에 수정이 가해진 것으로 조사되었다. 즉 OP20 금형은 해석에서 사용한 금형형상과 실제 금형과는 약간의 차이가 있으며 결과를 분석할 때 이 점을 감안할 필요가 있다.

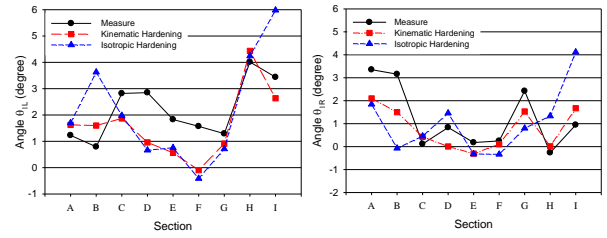
Fig. 9는 이상과 같은 방법으로 도출된 스프링백 해석 결과를 나타낸 것으로 등방성경화모델로 해석한 결과와 이동경화모델로 해석한 결과를 성형후 제품의 형상을 측정된 결과와 비교한 것이다. OP10에서는 해석에서 사용된 금형형상과 실제로 사용된 금형형상이 동일하기 때문에 스프링백 해석결과의 객관적 비교가 가능하다.

Fig. 9(a)는 좌우측 벽면의 스프링백각도로, 측정결과를 등방성경화모델로 해석한결과, 이동경화모델인 Yoshida-Uemori 모델의 해석결과를 각각 비교한 것이다. 스프링백의 경향은 두가지 경화모델 모두 측정결과와 비슷한 경향을 나타내고 있으나, 좌측 벽면에서는 단면 D~H 구간에서는 등방성경화모델의 결과는 실험과의 차이가 2°이상 나타나고 있지만 이동경화모델의 해석결과는 측정결과와의 차이가 1°이내로 나타났다. 전체적으로 이동경화모델의 해석결과가 등방성경화모델의 해석결과에 비해 측정결과와 가깝게 나타났다.

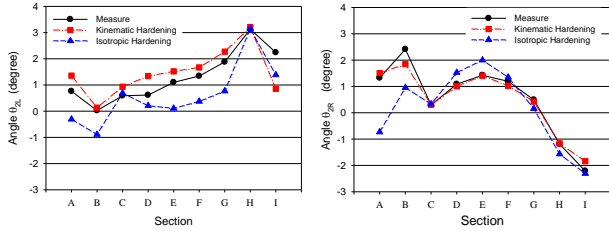
Fig. 9(b)는 좌우측플랜지의 스프링백각도를 나타낸 것이다. 좌측플랜지에서는 등방성경화모델의 해석결과는 단면 A에서는 스프링백해석결과가 OP10 판넬의 측정값과 반대의 경향을 보이고 있고, 측정치와의 차이가 최대 2°정도로 나타나고 있으나 이동경화모델의 해석결과는 전구간에 걸쳐 스프링백의 방향성도 잘 일치하고 있으며, 측정결과와의 오차도



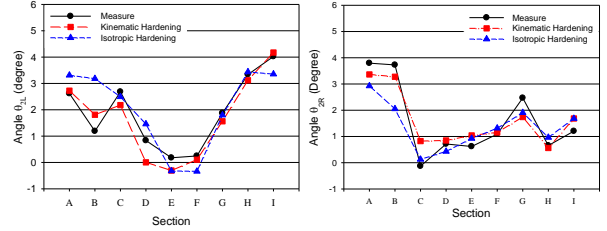
(a) Wall angle



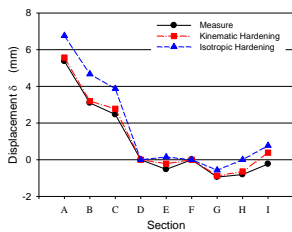
(a) Wall angle



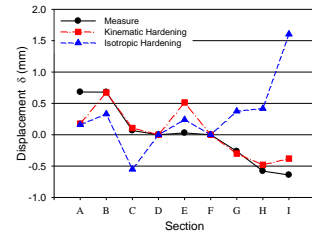
(b) Flange angle



(b) Flange angle



(c) Upper displacement



(c) Upper displacement δ

Fig. 9 Comparison of springback after OP10

Fig.10 Comparison of springback after OP20

최대 0.5°정도로 나타나고 있어 이동경화모델을 적용한 예측이 실험과 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 우측플랜지에서는 이동경화모델의 해석결과는 실제 판넬의 측정값과 비슷하게 나타나고 있으나, 등방성경화모델의 경우 단면 A에서는 해석결과가 반대로 나타나고 있다.

Fig. 9(c)는 상부변위를 나타내었다. 상부변위는 이 제품의 각 단면에서 펀치면에 접촉하는 부분의 중앙점과 펀치면과의 수직거리로, 단면 D와 단면 F의 중앙점을 펀치면에 접촉하도록 강제회전을 시킨 뒤 펀치면과의 거리를 측정한 것이다. 등방성경화모델과 이동경화모델의 모두 측정결과와 경향은 유사하게 나타나고 있으나, 이동경화모델이 등방성경화모델보다 측정값에 가깝게 나타나고 있다.

OP20공정은 OP10 공정에서의 발생된 스프링백을 줄이기 위해 실시하는 리스트라이크공정이다. 결과 분석은 OP10공정과 동일하게 단면을 9구간으로 나누어 결과를 비교하였으며 Fig. 10에 해석 및 측정결

과를 보여주고 있다. 그런데 앞서 언급한 바와 같이 OP20금형은 트리아아웃을 거치면서 금형형상의 보정이 이루어졌고, 금형형상의 보정은 NC 가공으로 보정과정의 엄격하게 관리되어야 하지만, 완성차메이커의 개발일정 단축요구에 따라 최종 미소보정단계에서는 데이터로 관리되지 않는 현장작업자의 사상보정이 이루어지는 실정이다.

Fig. 10(a)에 도시한 좌우측 벽면의 스프링백각도는 두가지 경화모델 모두 해석결과와 측정결과가 방향성은 유사하나 측정결과의 오차량이 드로우공정보다 큰 차이를 보인다. 그렇지만 이동경화모델의 해석결과는 전체적으로 측정결과와 비슷한 경향을 보여주고 있는 반면, 등방성경화모델은 제품의 길이방향 양 끝단에 위치한 단면 A와 I에서는 드로우공정에 비해 오히려 증가된 경향을 보여주고 있다. 특히, 우측벽면에서는 등방성경화모델은 단면 E,F에서는 스프링백의 방향성이 측정결과와 반대로 나타나고 있으며, OP20 판넬을 측정된 결과와 최대 3°이상의

오차를 나타내고 있어 리스트라이킹을 거쳤음에도 불구하고 벽면각도가 증가된 것으로 나타난다.

Fig. 10(b)는 플랜지부위의 스프링백각도를 나타낸 것으로 측정결과와 등방성경화모델, 이동경화모델의 해석결과가 비교적 잘 일치하고 있으며, 이동경화모델이 측정치와 더욱 유사한 경향을 보여주고 있다.

Fig. 10(c)는 상부변위를 나타낸 것으로 OP10과 마찬가지로 단면 D와 F를 기준으로 표현하였으며 이동경화모델은 스프링백의 방향성과 크기가 측정결과와 유사하게 나타났지만, 등방성경화모델은 측정결과와의 최대 2.0mm이상의 오차를 보이고 있으나 이동경화모델의 경우 오차값이 0.5mm정도로 나타났다.

3. 결론

본 논문에서는 드로우공정과 리스트라이크공정을 순차적으로 적용하여 생산되는 고강도강 reinforce center pillar 금형을 개발하면서 수행한 스프링백해석과 성형후 형상을 측정하여 경화모델에 따른 스프링백해석의 정확도를 비교하였다. 각 공정별로 생산된 판넬을 3차원스캔으로 측정한 형상과 등방성경화모델과 이동경화모델을 각각 적용하여 구한 결과와 정량적으로 비교하기 위하여 몇 개의 단면을 설정하고 이 단면에서의 스프링백각도의 크기와 상부변위량을 정량적으로 도출하는 방법도 제시하였다.

드로우공정, 리스트라이크 공정 모두 이동경화모델인 Yoshida-Uemori 모델의 해석결과가 등방성경화모델의 해석방법보다 실제로 생산되는 판넬과 비슷하게 예측하고 있다.

따라서 고강도강제품의 성형공정을 개발할 때는 일반적으로 적용되는 등방성경화모델을 사용하는 대신 예측의 정확도가 높은 이동경화모델을 이용하는 것이 성형공정개발에 도움을 줄 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 중소기업청 대학·연구기관 보유기술 직접사업화 지원사업의 “성형공정의 최적화와 원가 절감을 위한 Stamping 금형기술개발”과제의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] W. Y. Yang, S. Y. Lee, Y. T. Keum, J. Y. Hwang, C. S. Yoon, C. S. Shin, W. S. Shin, W. S. Cho, 2003, Proc. 4th Sheet Metal Symposium(editor: Y. H. Kim), Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, pp. 35~40.
- [2] J. M. Lee, 2005, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Spring Conf.(editor: C. G. Kang), Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea., pp. 312~317.
- [3] M. K. Choi, H. Huh, 2012, Investigation of Springback Behavior of DP780 Steel Sheets after the U-bending Process, Trans. Mater. Process., Vol. 21, No.6, pp. 384~388.
- [4] D. G. Jung, S. H. Kim, M. S. Kim, T. G. Lee, H. K. Kim, 2013, Investigation of Shape Accuracy in the Forming of Thin-Walled S-rail with Classification of Springback Modes, Trans. Mater. Process., Vol. 22, No. 8, pp. 477~485.
- [5] 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.
- [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] Pam Stamp, User Manual, 2012, ESI Group