유한요소법을 이용한 드로우비드 저항력 예측모델 개발 및 성형공정에의 적용

배기현[1]· 송정한[1]· 허 훈#· 김세호[2]· 박성호[3]

Simulation-based Prediction Model of Draw-bead Restraining Force and Its Application to Sheet Metal Forming Process

G. H. Bae, J. H. Song, H. Huh, S. H. Kim, S. H. Park

Abstract

Draw-bead is applied to control the material flow in a stamping process and improve the product quality by controlling the draw-bead restraining force (DBRF). Actual die design depends mostly on the trial-and-error method without calculating the optimum DBRF. Die design with the predicted value of DBRF can be utilized at the tryout stage effectively reducing the cost of the product development. For the prediction of DBRF, a simulation-based prediction model of the circular draw-bead is developed using the Box-Behnken design with selected shape parameters such as the bead height, the shoulder radius and the sheet thickness. The value of DBRF obtained from each design case by analysis is approximated by a second order regression equation. This equation can be utilized to the calculation of the restraining force and the determination of the draw-bead shape as a prediction model. For the evaluation of the prediction model, the optimum design of DBRF in sheet metal forming is carried out using response surface methodology. The suitable type of the draw-bead is suggested based on the optimum values of DBRF. The prediction model of the circular draw-bead proposes the design method of the draw-bead shape. The present procedure provides a guideline in the tool design stage for sheet metal forming to reduce the cost of the product development.

Key Words : Prediction model(예측모델), Draw-bead restraining force(드로우비드 저항력), Box-Behnken design(박스-벤켄 설계), Die design(금형설계)

1. 서 론

드로우비드는 성형공정 시에 판재에 적절한 인장력을 부가하여 재료의 흐름을 제어한다. 드로우비드에 의하여 발생하는 저항력은 제품의 품질을 향상시키기 위한 주요 설계변수이다. 자동차사에서는 드로우비드의 형상에 대한 자체적인 규격을 정하여 성형공정에 적용하고 있으나 금형제작 과정에서 숙련자의 경험과 시행착오에 의하여 수정되는 것이 일반적이다. 따라서 비드의 형상과 공정변수에 따른 정확한 저항력의 예측을 통한 금형설계는 초기설계 단계에서 시행착오에 의하여 발생하는 시간과 비용의 손실을 절감할 수 있다.

자동차 박판부재의 성형공정을 중심으로 드로우비드의 적용이 증가함에 따라 드로우비드 저항력의 메커니즘을 구현하고 이론 및 실험적 방법을 통한 저항력의 예측에 관한 많은 연구들이 수행되어 왔다.[1-4] 최근에는 금형설계 공정을 위한

1. 한국과학기술원 기계공학과
2. 대구대학교 자동차 산업 기계공학부
3. POSCO 기술연구소
교신저자: 한국과학기술원 기계공학과
E-mail: hhuh@kaist.ac.kr

드로우비드 저항력의 최적화와 비드 형상 설계를 연계한 연구가 활발히 수행되고 있다. Liu[5] 등은 개선된 하이브리드 최적화 알고리즘을 적용하여 자동차 패널의 성형공정 시에 사용되는 드로우비드 저항력의 최적화를 수행하였으며 이방성을 고려한 이론적 예측모델을 사용하여 형상을 결정하였다. Jansson[6] 등은 반응표면법과 공간사상기법을 사용하여 자동차 박판부재의 유입량을 제어하고 드로우비드 저항력을 최적화하였다. 또한 최적값에 따른 드로우비드 형상을 이론적 예측모델을 사용하여 결정하고 유한요소해석을 통하여 확인하였다. Naceur [7] 등은 수학적 프로그래밍 알고리즘과 역해석적 접근법을 결합하여 드로우비드 저항력의 최적화를 수행하였다. Song [8] 등은 자동차 프런트사이드 멤버의 성형공정에서 스프링백의 저감을 위하여 드로우비드 저항력의 최적화를 수행하였다.

본 논문에서는 실험계획법의 대표적인 설계방법 중 하나인 Box-Behnken 설계를 도입하여 유한요소해석에 근거한 원형 드로우비드의 저항력 예측모델을 구성하였다. 이를 자동차 박판부재의 금형설계에 적용하여 적합한 비드 종류를 결정하고 형상설계 방법을 제시하였다. 원형 드로우비드의 저항력 예측모델을 구성하기 위하여 비드 높이, 어깨부 반경, 판재 두께를 설계변수로 선정하였으며 설계변수의 조합에 따라 비드 형상을 모델링하여 유한요소해석을 수행하고 저항력을 측정하였다. 측정된 저항력을 2 차의 회귀식으로 근사하여 예측모델을 구성하였다. 드로우비드 형상설계 과정에 예측모델을 적용하기 위하여 자동차 박판부재 성형공정의 드로우비드 저항력 최적화를 수행하였다. 최적화는 반응표면법을 사용하여 수행하였으며 축차을 통하여 수렴된 해를 도출하였다. 드로우비드 저항력의 최적값을 바탕으로 예측모델을 적용하여 적절한 드로우비드의 종류를 결정하였으며 원형 드로우비드의 형상을 결정하기 위한 방법을 제시하였다.

2. 원형 드로우비드의 저항력 예측모델 구성

드로우비드 저항력은 제품의 성형성을 결정하는 주요 설계인자이다. 판재가 금형 내부를 통과하면서 굽힘력과 마찰력이 발생하며 두 힘의 합

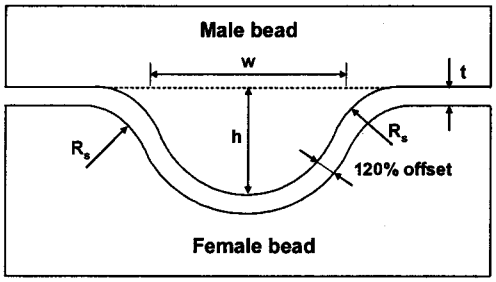

Fig. 1 Cross-section of circular draw-bead

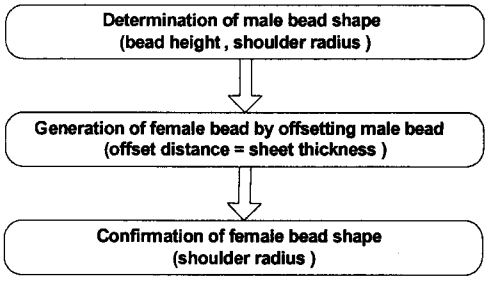

Fig. 2 Flow chart of design procedure of circular draw-bead

으로 드로우비드 저항력이 나타난다. 두 힘은 비드 높이, 어깨부 반경, 판재 두께에 의하여 민감하게 변화하므로 이를 예측모델 개발을 위한 설계변수로 선정하였다. 예측모델을 구성하기 위하여 실험계획법의 대표적인 방법인 Box-Behnken 설계를 도입하였으며 유한요소해석을 통하여 측정된 저항력을 2 차의 회귀식으로 근사하였다. 구성된 예측모델은 박판성형공정에 적용되어 비드의 종류 결정 및 원형 드로우비드의 형상 결정에 유용하게 활용할 수 있다.

2.1 설계변수 선정

원형 드로우비드는 적절한 인장력과 큰 재료의 흐름이 동시에 요구되는 자동차 박판부재의 성형공정에 가장 일반적으로 사용된다. 따라서 원형 드로우비드를 예측모델을 구성하기 위한 대상으로 선정하였다. 원형 드로우비드는 일반적으로 고정된 비드폭을 가지며 Fig. 1 과 같이 비드 높이, 어깨부 반경, 판재 두께에 따라 형상이 결정되며 형상의 변화에 따라 저항력이 민감하게 변화하므로 이를 예측모델을 구성하기 위한 설계변수로 선정하였다. 원형 드로우비드의 형상 설계 과정을 Fig. 2 에 도시하였으며 암비드 생성을 위한 오프셋량은 판재 두께의 120 %로 선정하였다.

Table 1 Range of design variables

Design parameter	Bead height (h)	Shoulder radius (Rs)	Sheet thickness (t)
Range (mm)	2 ~ 6	3 ~ 5	0.6 ~ 1.2

Table 2 Mechanical properties of the sheet metal

Material name	Hardening curve	Lankford value (r)	Friction coefficient (μ)
SAPH38	$\bar{\sigma} = 765.8(0.0232 + \bar{\varepsilon})^{0.283}$	1.78	0.15

Table 3 Results of DBRF with respect to design variables using Box-Behnken design

Design	h (mm)	R_s (mm)	t (mm)	DBRF (N/mm)	Design	h (mm)	R_s (mm)	t (mm)	DBRF (N/mm)
1	4.0	3.0	0.6	103.81	8	6.0	4.0	1.2	281.64
2	4.0	5.0	0.6	75.28	9	2.0	3.0	0.9	155.61
3	4.0	3.0	1.2	303.92	10	6.0	3.0	0.9	208.13
4	4.0	5.0	1.2	239.53	11	2.0	5.0	0.9	126.62
5	2.0	4.0	0.6	76.16	12	6.0	5.0	0.9	154.00
6	6.0	4.0	0.6	88.21	13	4.0	4.0	0.9	168.72
7	2.0	4.0	1.2	212.58					

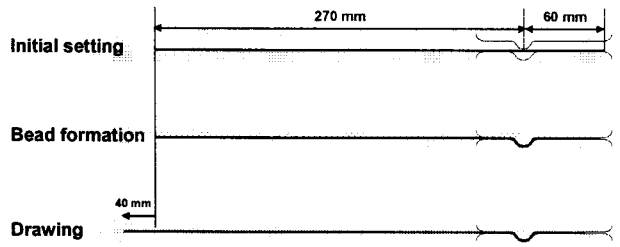

Fig. 3 Schematics of equivalent draw-bead analysis

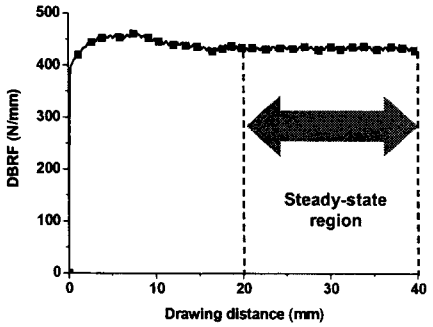

Fig. 4 Variation of the restraining force during the drawing process

2.2 예측모델의 구성

예측모델을 구성하기 위하여 실험계획법의 대표적인 방법인 중 하나인 Box-Behnken 설계를 도입하였다. 자동차 박판부재의 성형공정에 사용되는 비드 형상을 고려하여 설계변수의 범위를 Table 1 과 같이 선정하였으며 Box-Behnken 설계를 구성하기 위하여 모든 설계변수는 3 수준을 가진다. 설계 변수의 조합을 통하여 비드 형상을 설계하였으며 이를 모델링하여 저항력 측정을 위한 등가 드로우비드의 유한요소해석을 수행하였다. 판재는 평면변형률 요소를 사용하여 분할하였으며 두께 방향으로 5 개의 요소를 부가하였다. 해석에 사용된 판재는 SAPH38 이며 Table 2 에 재료의 기계적 물성을 도시하였다. 해석은 내연적 유한요소해석 프로그램 ABAQUS/Standard 를 사용하여 수행하였다. 등가 드로우비드 해석은 Fig. 3 에 도시된 바와 같이 가압공정과 인출공정으로 구분되며 인출공정 시에 시간에 따른 드로우비드 저항력의 변화를 Fig. 4 에 도시하였다. 드로우비드 저항력을 측정하기 위하여 20 mm 와 40 mm 의 구간을 안정화된 영역으로 선정하였으며 구간 내에서의 평균값으로 저항력을 측정하였다. 모든 설계에 대하여 측정된 저항력의 값을 Table 3 에 도시하였으며 이를 근사하여 예측모델을 구성하였다.

$$\begin{aligned} DBRF\,(N/mm) = & -26.93 + 24.87h - 15.98R_s \\ & + 159.09t - 3.14hR_s + 23.75ht \\ & - 29.89R_s t - 2.95h^2 + 4.18R_s^{\,2} \\ & + 85.95t^2 \end{aligned} \quad (1)$$

예측모델은 측정된 저항력의 값을 정밀하게 근사하며($R^2 = 0.998$) 박판부재의 성형공정에 드로우비드의 설계 과정에 효과적으로 활용할 수 있다.

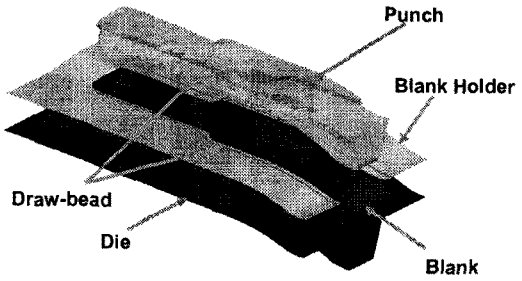

Fig. 5 Initial tooling system

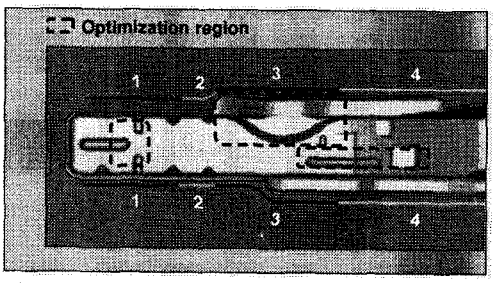

Fig. 6 Configuration of draw-beads and optimization region

3. 드로우비드 저항력의 최적화 및 예측모델 적용

드로우비드 저항력 예측모델의 적용성을 검증하기 위하여 자동차 프런트사이드 멤버에 사용되는 보강부재의 성형공정에서 드로우비드 저항력의 최적화를 수행하였다. 초기 금형장치와 드로우비드의 배치를 Fig. 5 와 Fig. 6 에 도시하였다. 펀치를 중심으로 상하로 위치한 드로우비드는 서로 같은 형상을 가지므로 최적화를 위한 설계변수는 4 개가 된다. 성형해석은 외연적 유한요소해석 프로그램 LS-DYNA3D 을 사용하여 수행하였다. 해석에 사용된 박판부재는 SAPH38 이며 두께는 0.9 mm 이다. 펀치 속도는 2 m/s 이며 판재가압력은 200 kN 이다. 드로우비드 저항력의 초기 추측치는 200 N/mm 로 선정하였다. 초기 추측치를 사용하여 성형해석을 수행하였을 때의 두께 분포를 Fig. 7 에 도시하였다. 국부적으로 파단과 주름이 발생하는 것을 관찰할 수 있으며 성형성 개선을 위하여 문제가 발생하는 부분을 최적화 대상 영역으로 선정하였다. 성형한계도 상의 주변형률 분포를 사용하여 최적화 조건식을 구성하여 드로우비드 저항력의 최적화를 수행하였다. 예측모델을 사용하여 최적값에 따른 비드 종류를 결정하고 원형 드로우비드의 형상 결정방법을 제시하였다.

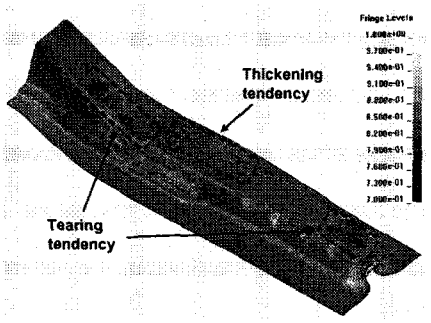

Fig. 7 Thickness distribution with the initial design

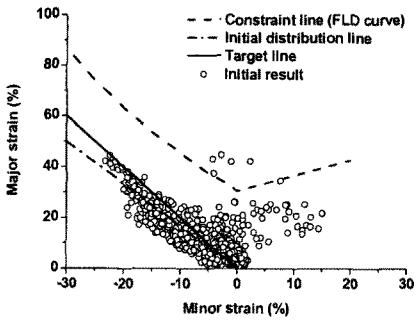

Fig. 8 Principal strain distribution on the forming limit diagram (initial design)

3.1 최적화 조건식 구성

성형한계도 상에 도시되는 주변형률의 분포를 조절함으로써 파단과 주름을 방지하고 성형성을 향상시키기 위하여 최적화 조건식을 구성하였다. 최적화 대상 영역의 주변형률 분포를 Fig. 8 에 도시하였으며 주름 발생의 경향을 보이는 주변형률 분포를 선형 근사하였다. 최대주변형률의 값을 증가시켜 주름 발생을 방지하기 위하여 선형 근사된 선도의 기울기를 20% 증가시켜 목적선도를 설정하였다. 목적함수를 구성하기 위하여 성형한계도 상에서 주변형률 분포와 목적선도 간의 차이를 최소자승법으로 계산하였다. 파단의 방지를 위하여 성형한계도 상에 도시된 주변형률의 분포가 성형한계곡선을 넘지 않도록 제한조건을 설정하였다. 이를 통하여 다음과 같이 최적화 조건식을 구성하였다.

$$Minimize \quad \Phi = \frac{\int_{\Omega_{opt}} \left(E_1 - \tilde{E}_1\right)^2 d\Omega}{N} \tag{2}$$

$$subject\ to \quad E_1 < \tilde{E}_C \tag{3}$$

$E_1, \tilde{E}_1, \tilde{E}_C$ 는 각각 최대주변형률, 목적선도 상의 최

대주변형률, 성형한계곡선 상의 최대주변형률을 의미한다. N은 최적화 대상 영역에서 목적선도 아래에 있는 요소의 수이며 축차수행 시에 목적함수의 값을 표준화한다. 구성된 최적화 조건식은 반응표면법을 도입하여 드로우비드 저항력의 최적화에 사용된다.

3.2 드로우비드 저항력의 최적화

성형공정 시에 파단과 주름의 방지를 통한 제품의 성형성 향상을 위하여 반응표면법을 사용한

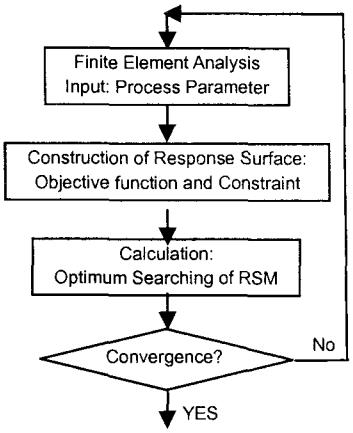

Fig. 9 Optimization procedure with RSM

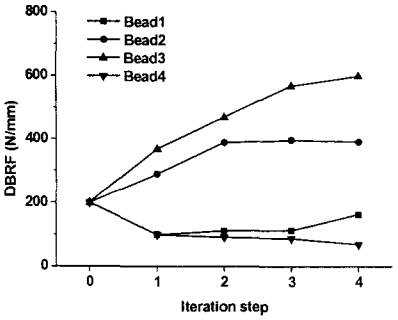

Fig. 10(a) Variation of design variables during the optimization procedure

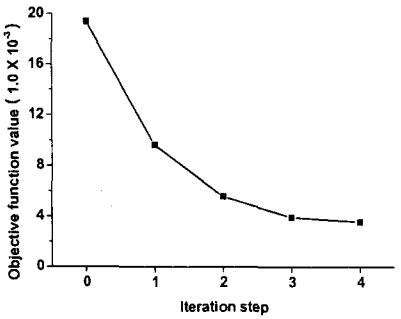

Fig. 10(b) Variation of objective function value during the optimization procedure

드로우비드 저항력의 최적화를 수행하였다. 최적화 수행을 위하여 Box-Behnken 설계를 도입하였으며 2 차의 회귀식으로 반응표면을 근사하였다. 축차 수행에 위한 초기 섭동량은 초기 추측치의 100%로 설정하였으며 최적점을 도출하기 위하여 2 회의 축차 후에는 섭동량을 50%의 비로 줄여가며 최적화를 수행하였다. 과도한 저항력 예측을 방지하기 위하여 드로우비드 저항력의 상한을 600 N/mm 로 제한하였다. 드로우비드 저항력의 최적화 과정을 Fig. 9 에 요약하였다. 반응표면의 근사와 최적값의 도출을 위하여 최적화 프로그램 HyperStudy 를 사용하였다. 최적화 수행에 따른 목적함수 및 설계변수의 변화를 Fig. 10(a)와 Fig. 10(b)에 도시하였다. 최적화가 진행됨에 따라 설계변수와 목적함수의 값이 수렴되는 경향을 보이며 4 회의 축차수행 후에 수렴된 최적값을 도출하였다. 최적값을 사용하여 성형해석을 수행하였을 때 Fig. 11 과 같이 두께 분포가 개선되었으며 Fig. 12 과 같이 제한조건인 성형한계곡선을 만족하면서 주변형률의 분포가 목적선도를 따라 재배치 됨을 성형한계도 상에서 확인할 수 있다. 따라서 드로우비드 저항력의 최적화를 통하여 파단과 주름을 방지함으로써 제품의 성형성을 개선하였다.

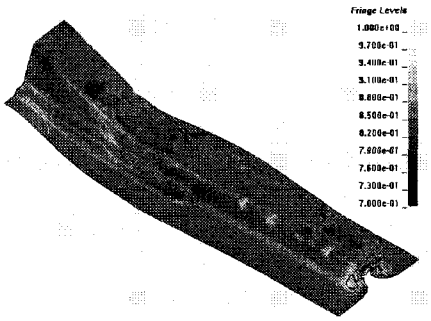

Fig. 11 Thickness distribution with the optimum design

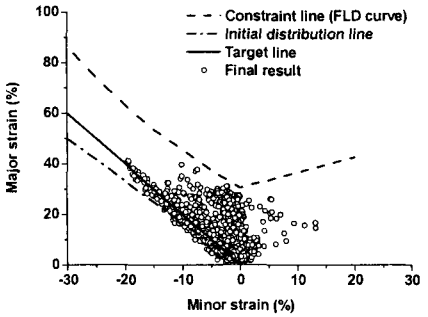

Fig. 12 Principal strain distribution on the forming limit diagram (optimum design)

Table 4 Optimum values of DBRF

Design variable	DBRF (N/mm)
Bead1	163.67
Bead2	391.96
Bead3	600.00
Bead4	69.77

3.3 예측모델을 적용한 드로우비드 설계

드로우비드 저항력의 최적화를 통하여 도출한 최적값을 바탕으로 예측모델을 적용하여 드로우비드의 형상을 설계하였다. 판재의 두께가 0.9 mm 인 경우 예측모델의 설계공간 내에서 원형 드로우비드 저항력의 범위는 128 N/mm 에서 212 N/mm 이다. 따라서 원형 드로우비드는 Bead1 에만 적용 가능하다. 자동차 박판부재의 성형공정에 많이 사용되는 다른 두 종류의 드로우비드에는 사각비드와 계단비드가 있다. 사각비드는 원형비드에 비해 큰 저항력을 발생하지만 재료 내부의 연신에 의하여 성형공정이 수행되므로 재료의 유입이 거의 없는 경우에 적합하다. 계단비드는 원형비드에 비해 작은 저항력을 발생한다. 따라서 Bead4 에는 계단비드가 적합하며 Bead2 와 Bead3 에는 사각비드가 적합하다. Bead1 의 형상을 결정하기 위하여 원형 드로우비드의 저항력 예측모델을 적용할 수 있으며 판재 두께와 드로우비드 저항력이 제시되어 있으므로 비드 높이와 어깨부 반경을 다양하게 결정할 수 있다. 이와 같이 드로우비드 저항력의 예측모델은 성형공정에 적용되어 초기 금형설계 단계에서 드로우비드의 종류와 형상의 결정에 효과적으로 활용할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 원형 드로우비드의 예측모델을 제안하였으며 자동차 박판부재의 성형공정에 적용하여 드로우비드의 종류 및 형상을 결정하였다. 드로우비드 저항력의 예측모델을 구성하기 위하여 비드 높이, 어깨부 반경, 판재 두께를 설계변수로 선정하였으며 Box-Behnken 설계를 도입하여 설계조합을 구성하였다. 설계조합에 따라 결정된 각각의 드로우비드 형상에 대하여 등가 드로우비드 해석을 수행하여 저항력을 측정하였다. 측정된 저항력은 2 차의 회귀식을 사용하여 근사하여 원형 드로우비드의 저항력 예측모델을 구성하였다. 예측모델을 적용하기 위하여 박판성형공정 시에 성형성 향상을 목적으로 드로우비드 저항력의 최적화를 수행하였다. 최적화된 드로우비드 저항력에 근거하여 적합한 비드 종류를 결정하였으며 원형 드로우비드의 경우 형상설계를 위한 예측모델의 활용 방안을 제시하였다. 이와 같이 드로우비드의 예측모델은 박판성형공정 시에 금형설계의 초기 단계에서 효과적으로 활용될 수 있다.

참 고 문 헌

[1] H. D. Nine, 1978, Drawbead Forces in Sheet Metal Forming, Mechanics of Sheet Metal Forming, pp. 179~211.

[2] T. B. Stoughton, 1988, Model of Drawbead Forces in Sheet Metal Forming, Proceedings of the 15th Biennial Congress IDDRG, Dearborn, MI, USA, pp. 205~215.

[3] T. H. Choi, H. Huh, B. K. Chun, J. H. Lee, 1997, Draw-bead Simulation by an Elasto-plastic Finite Element Method with Directional Reduced Integration, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 63, pp.666~671.

[4] Y. T. Keum, J. H. Kim, B. Y. Ghoo, 2001, Expert Drawbead Models for Finite Element Analysis of Sheet Metal Forming Processes, Int. J. Solids Struct., Vol. 38, pp. 5335~5353.

[5] G. Liu, Z. Lin, Y. Bao, 2002, Optimization Design of Drawbead in Drawing Tools of Autobody Cover Panel, Trans. ASME, J. Eng. Mater. Technol., Vol. 124, pp. 278~285.

[6] T. Jansson, A. Andersson, L. Nilsson, 2005, Optimization of Draw-in for an Automotive Sheet Metal Part: An Evaluation Using Surrogate Models and Response Surfaces, J. Mat. Process. Technol., Vol. 159, pp. 426~434.

[7] H. Naceur, Y. Q. Guo, J. L. Batoz, C. Knopf-Lenoir, 2001, Optimization of Drawbead Restraining Forces and Drawbead Design in Sheet Metal Forming Process, Int. J. Mech. Sci., Vol. 43, pp. 2407~2434.

[8] J. H. Song, H. Huh, S. H. Kim, S. H. Park, 2005, Springback Reduction in Stamping of Front Side Member with a Response Surface Method, Proceeding of NUMISHEET 2005, Detroit, MI, USA, pp. 303~308.