

## 1.2GPa 강판의 판재성형에서 주름 및 성형성 향상을 위한 다중 목적함수 최적 설계

이영섭<sup>1</sup> · 권순호<sup>1</sup> · 김홍래<sup>2</sup> · 김승완<sup>3</sup> · 정철영<sup>3</sup> · 홍석무<sup>#</sup>

### Multi-objective Optimization to Reduce Wrinkle & Thinning in Sheet Metal Forming of Ultra High Strength Steel (1.2GPa)

Y. S. Lee, S. H. Kwon, H. L. Kim, S. W. Kim, C. Y. Jung, S. Hong

(Received May 16, 2016 / Revised August 9, 2016 / Accepted August 30, 2016)

#### Abstract

Recently, Ultra High Strength Steel (UHSS) sheet metal has been widely used to improve lightweight structures in the automobile industry. Because UHSS sheets have high strength but low elongation, it is difficult to control wrinkle and thinning for complex shaped products. The draw beads on die surface were introduced in this study to reduce wrinkle and thinning. The positions and strength values of draw beads were selected as design variables and optimized using finite element analysis. The beads positions and strength of a mold for B-pillar part were designed with the proposed optimization method. The accuracy of die design from optimization was verified by comparing with the results from 3-D scanned geometry.

**Key Words** : Optimization, Bead, UHSS(Ultra High Strength Steel), Thinning, Wrinkle

#### 1. 서론

최근 자동차 산업에서 경량화 이슈로 인해 고강도 등이 요구되고 있고, 이러한 기능적 목적을 만족시키기 위해 고강도소재 사용이 급증하고 있다. 연비와 친환경 문제로 경량화 문제를 해결하기 위해 많은 연구가 시도되었고, 초고강력 강판(UHSS : ultra high strength steel)을 사용하여 이러한 문제를 해결해 왔다. 이러한 초고강도 강판의 필요성은 최근 자동차 산업 분야에서 대두되고 있다[1, 2]. 그러나 UHSS의 높은 항복강도와 낮은 연신율로 인해 자동차 부품 산업 현장에 바로 적용하기는 어렵다. 초고강력 강판의 성형방법은 핫프레스 포밍과 냉간 프레스 포밍이 있는데 핫프레스 포밍의 경우 900℃

이상의 고온에서 성형하고 금형 내에서 급속히 냉각 시키는 공정이다. 핫프레스 포밍은 사이클 타임이 길다는 단점이 있다. 냉간 프레스의 경우 성형성 제한으로 단순한 형상을 성형해야 한다는 단점이 있다. 본 연구에서는 냉간 프레스 포밍을 사용하여 복잡한 형상 성형을 위해서는 주름, 찢어짐을 막기 위해 최적 드로우 비드를 설계하여 성형 밸런스 유지가 필요하다. 기존 연구에는 주름 및 성형성 향상을 위해 블랭크 홀딩력을 조절하는 방법을 활용하거나, 공정 변수의 영향을 파악하기 위해 실험적으로 접근하는 경우가 많았다[3, 4]. 전자의 방법은 복잡한 형상 및 정밀 부품의 적용에는 한계가 있고, 후자의 경우는 시간과 노력이 많이 소요된다는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하고 제품의 치수 정

1. 공주대학교 금형설계공학과

2. 한국시물레이션기술㈜ 기술지원팀

3. 대우공업㈜ 기술연구소

# Corresponding Author : Department of MetalMold Design Engineering, Kongju National University, E-mail:smhong@kongju.ac.kr

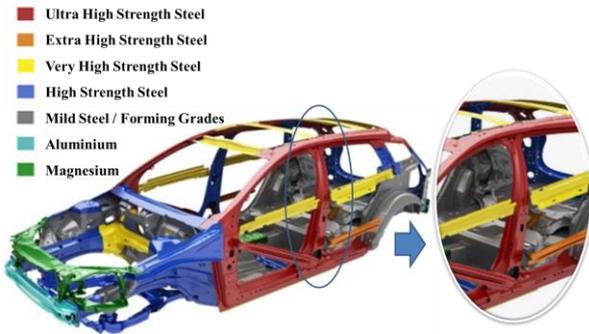


Fig. 1 UHSS usage of the automobile (B-pillar)[8]

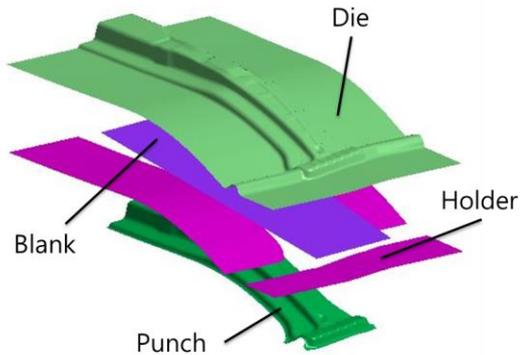


Fig. 2 Finite element modeling for stamping

밀도 향상을 위해 드로우 비드를 사용한 연구가 수행되기도 하였다[5]. 드로우 비드는 성형 시 판재의 스트레칭(stretching)을 통한 인장력을 부여해 판재의 주름 발생을 억제하는 효과가 있는 것으로 나타났다[6]. 판재성형을 위한 드로우 비드는 표준 디자인 사양이 준비되어 있지만, 금형 가공의 어려움으로 인해 실제 산업 현장에 적용하기 어려워 정확한 예측 설계보다는 아직까지 시행 착오법(trial-and-error)으로 성형성을 제어하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 자동차 부품인 B-pillar의 경량화 및 고강도화를 위해 1.2GPa 강판의 주름 및 두께 감소 최소화 시키는 최적화 기술을 개발하여 성형성을 향상 시켰다. 유한요소 해석 프로그램은 DYNAFORM 5.9.2.1을 사용하여 해석 정확도를 높이고, 최적 비드의 위치 결정을 위해 실험계획(DOE, design of experiment)으로 변수 연구를 수행했으며, DOE 결과를 활용한 최적설계 기법으로 주름 및 두께 변형률을 최소화 하는 최적 비드 설계 방법을 제안하고 이를 실제 금형에 반영하였다[7].

## 2. 유한요소 해석

성형해석 하고자 하는 부품은 자동차 사이드 부분의 B-Pillar이다(Fig. 1). 본 연구의 목표는 B-pillar의 두께 감소(thinning)와 주름(wrinkle)을 최소화 하는 비드의 위치와 비드력을 결정하는 것이며, 다중 목적함수를 동시에 만족시키는 설계변수 값을 결정하는 다중 목적함수 최적 설계 기법을 도입하였다. B-Pillar 성형 공정은 스탬핑, 사이드 트리밍 그리고 피어싱 순으로 진행되는데 이 중에서 성형성에 영향을 미치는 스탬핑 공정만 유한 요소 해석을 수행하였다(Fig. 2). 1.2GPa 초고장력 강판은 탄소, 실리콘,

Table 1 Mechanical properties of TRIP

Parameters	TRIP
$K$ (MPa)	1704
$\epsilon_0$	0.016
$n$	0.108
Young's Modulus $E$ (GPa)	210
Poisson's ratio ( $\mu$ )	0.3
Specific weight (MPa/mm)	7.8E-05
Yield Stress (MPa)	1065
Tensile Stress (MPa)	1226

망간을 첨가해 강도와 연신율을 높인 TRIP강(transformation induced plasticity steel)을 사용하였으며 물성 및 유동응력은 Table 1에 나타내었다. 초기 블랭크의 두께는 1.4mm이다. 해석에 사용된 재료의 hardening curve는 deep drawing 식 (1)의 Swift model을 사용하였다. 여기서,  $\bar{\sigma}$ 는 유동응력,  $K$ 는 강도계수,  $\bar{\epsilon}$ 는 유효변형률,  $n$ 은 가공경화지수,  $\epsilon_0$ 는 초기 변형률이다.

$$\bar{\sigma} = K(\epsilon_0 + \bar{\epsilon})^n \tag{1}$$

## 3. 두께 변형률 감소를 위한 최적설계

### 3.1 최적 설계 이론

최적화를 진행하기 위해서는 설계변수(design variables), 목적함수(objective functions), 구속조건(Constraints)이 필수적이다. 설계변수를 줄이는 최적 설계 진행과정을 Fig. 3에 자세히 설명하였다. 우선 기본이 되는 유한 요소 해석 (FEM : finite element

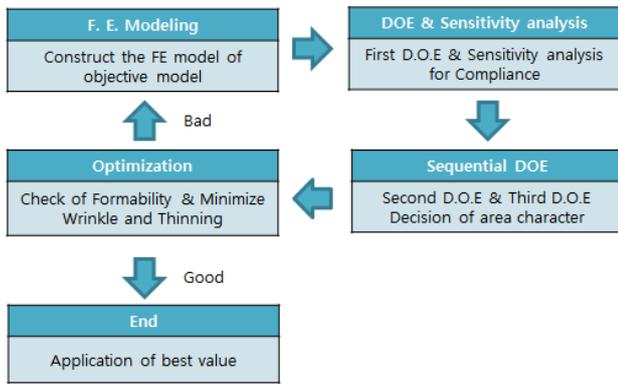


Fig. 3 Optimization process

method) 모델을 준비한다. 그리고, 설계 변수가 너무 많은 경우, 시간과 비용을 줄이기 위해 실험 계획법을 통해 실험 횟수를 감소 시킨다. 또한, 민감도 해석(S/A : sensitivity analysis)을 수행하여, 목적함수(object function)에 민감한 정도를 파악 하여 영향이 미비한 설계변수를 제외시킴으로 해서 실험 횟수를 더욱 줄일 수 있다. 이를 스크리닝(screening)이라 하며, 이를 통해 두번째, 세번째 DOE에서는 줄어든 설계 변수로 인해 좀 더 세밀하게 최적 설계 범위를 설정할 수 있다. 반복 해석을 통해 주름과 두께 변형률을 동시에 만족시키는 해석 결과가 획득되면 반복이 멈추고, 최종적으로 이를 검증하고 최적화는 종료된다.

### 3.2 최적 설계 인자 설정

드로우 비드의 설계 변수 모두를 독립 변수로 설정하면 총 인자 2개(최소, 최대), 7지역의 드로우 비드의 위치를 변수로 설정하면  $2^7$ 으로 총 128회의 실험이 필요하고, 각각 해석마다 드로우 비드 위치와 형상을 변경해야 하기 때문에 계산시간이 과도하게 길어진다. 본 연구에서는 드로우 비드의 최적 위치를 민감도 해석을 통해 먼저 결정하고, 결정된 위치에서 두께 변형률 감소, 주름 억제를 위한 드로우 비드력을 결정하는 분리 진행법을 적용하였다. 최적 설계를 수행하기 위해서는 설계 변수(design variables), 목적함수(objective functions), 구속조건(constraints)이 필요하다. 본 연구에서는 thinning과 wrinkling을 다중 목적함수로 선정하였다. 설계 변수로는 비드 위치가 되고 비드 형상은 형상 최적화가 끝난 원형 비드를 사용한다(Fig. 4). 비드력은 stoughton의 실험식에 의해 restraining force의 %에 따라 uplift force가 계산된

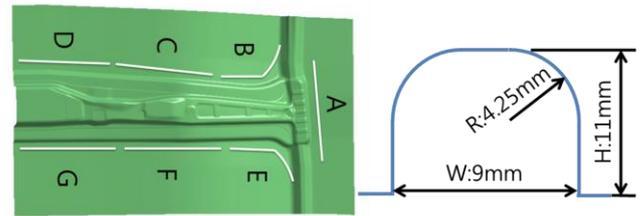


Fig. 4 Design variables: Bead position, Bead shape

Table 2 Design variables, objective functions and constraints

Design variables	Draw bead force A, B, C, D, E, F and G
Objective functions	Minimize $F(x) =$ ABS (wrinkle, thinning)
Constraints	$4.63N < \text{Draw bead force A} < 215.62N$
	$4.63N < \text{Draw bead force B} < 215.62N$
	$4.63N < \text{Draw bead force C} < 215.62N$
	$4.63N < \text{Draw bead force D} < 215.62N$
	$4.63N < \text{Draw bead force E} < 215.62N$
	$4.63N < \text{Draw bead force F} < 215.62N$
	$4.63N < \text{Draw bead force G} < 215.62N$

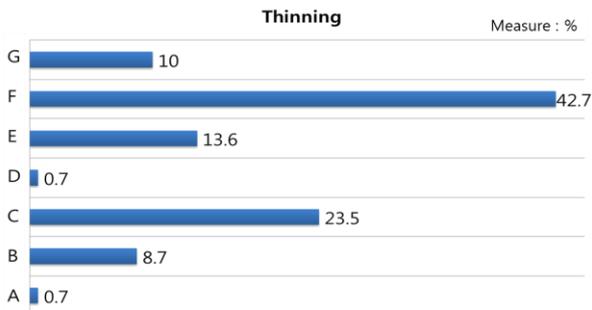
다. 이 uplift force는 parameter study를 끝낸 300N의 50%으로 설정하고 비드의 각 위치 (A, B, C, D, E, F and G)의 percentage를 각각 주름이 생기는 5%, 두께 감소가 큰 80%로 설정하여 4.63N, 최대값은 215.62N으로 결정하였다. binder force는 현장에서 사용하는 200kN으로 진행하였다.

### 3.3 최적설계 방법

상용 최적화 프로그램인 LS-OPT 5.2 Optimization을 이용하여 최적 설계를 수행하였다[9]. 초기 실험 계획(DOE)은 Table 3에 도시되어 있다. 128회의 실험을 실험계획을 통해 13번으로 축소 시킬 수 있다. 민감도 해석 결과 thinning에 끼치는 영향도는 F의 위치에서 최대 42.7%로 민감도가 있는 것으로 판단되지만, wrinkle의 민감도는 거의 0%로 영향도가 미비하였다. 따라서 optimization에서는 wrinkle 값에 대한 가중치를 10%로 낮게 선정하여 최적화 해석을 진행하였고, Thinning 값에 대한 가중치는 90%로 선정하였다. 비드의 위치는 C, E, F가 각각 23.5%, 13.6%, 42.7%로 민감도가 높게 나온 것으로 확인된다(Fig. 5).

**Table 3 1<sup>st</sup> Design of experiment**

	Bead A	Bead B	Bead C	Bead D	Bead E	Bead F	Bead G
Case 1	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
Case 2	5%	5%	5%	80%	42.5%	5%	61.25%
Case 3	80%	61.25%	80%	5%	5%	5%	80%
Case 4	80%	80%	80%	80%	61.25%	5%	5%
Case 5	23.75%	80%	5%	80%	5%	23.75%	23.75%
Case 6	80%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
Case 7	80%	5%	5%	80%	80%	23.75%	80%
Case 8	80%	80%	5%	80%	5%	80%	80%
Case 9	5%	5%	80%	23.75%	5%	5%	80%
Case 10	61.25%	5%	80%	80%	61.25%	80%	61.25%
Case 11	5%	80%	5%	5%	80%	42.5%	5%
Case 12	23.75%	5%	80%	23.75%	23.75%	80%	5%
Case 13	80%	80%	61.25%	5%	80%	23.75%	80%



**Fig. 5 Sensitivity analysis of thinning (1<sup>st</sup> Optimization)**

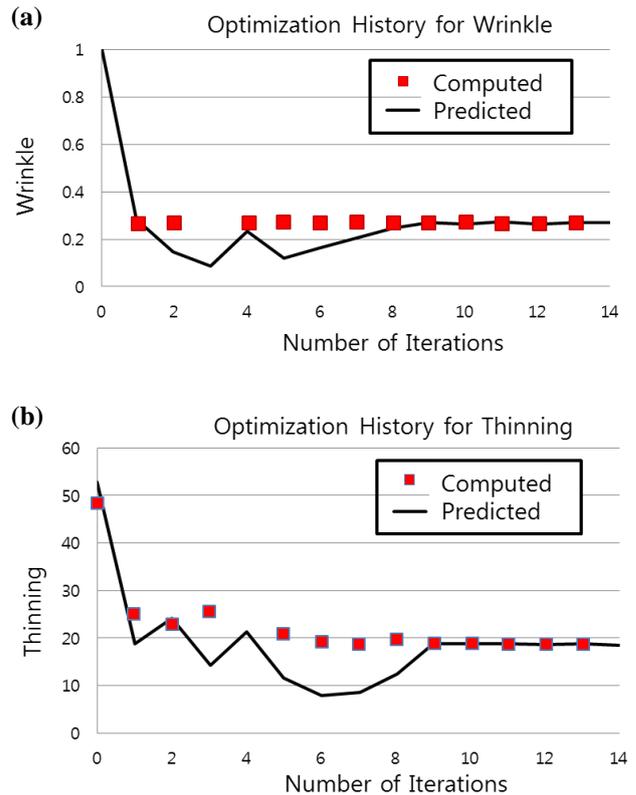
**Table 4 2<sup>nd</sup> Design of experiment**

	Bead C	Bead E	Bead F
Case 1	5%	60%	40%
Case 2	5%	80%	5%
Case 3	5%	5%	80%
Case 4	80%	5%	5%
Case 5	80%	80%	80%
Case 6	80%	5%	80%
Case 7	80%	80%	5%

민감도 10% 이하는 영향도가 없다고 판단하여 A, B, D and G는 스크리닝을 하여 변수에서 제거하여 과도한 실험 횟수를 줄였다. 13번의 해석에서 최종 실험 계획법에 의해 7번으로 감소되었고 이를 Table 4에 실험계획법으로 나타내었다. 민감도 해석 결과 비드 위치 F가 영향도가 81.4%로 지배적으로



**Fig. 6 Sensitivity analysis of thinning (2<sup>nd</sup> optimization)**



**Fig. 7 Optimization history of (a) Wrinkle and (b) Thinning**

영향을 많이 끼치는 것으로 나타났으며(Fig. 6). 실제 양산 금형 반영 시에는 G, F 그리고 C 등 여러 위치에 드로우 비드 설계를 적용하지 않고, 가장 영향력이 큰 F 위치에만 드로우 비드를 적용하고, 드로우 비드력을 조절하였다.

LS-OPT 5.2 로 optimization을 진행한 history를 Fig. 7에 나타냈다. 빨간 네모난 점은 각 iteration의 시작 지점에서 계산된 값이고 검은 선은 모든 종속조건을

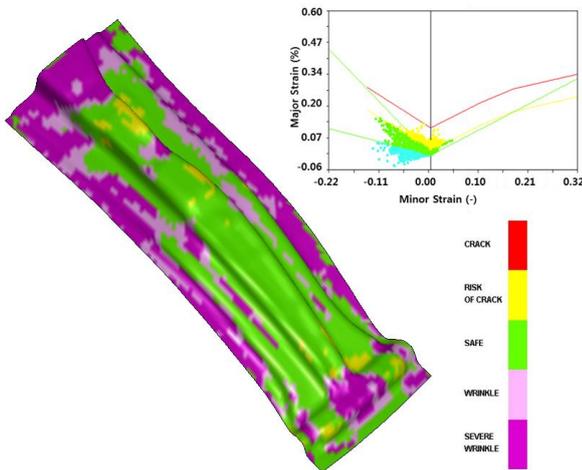


Fig. 8 FLD at final iteration



Fig.10 Production of B-pillar

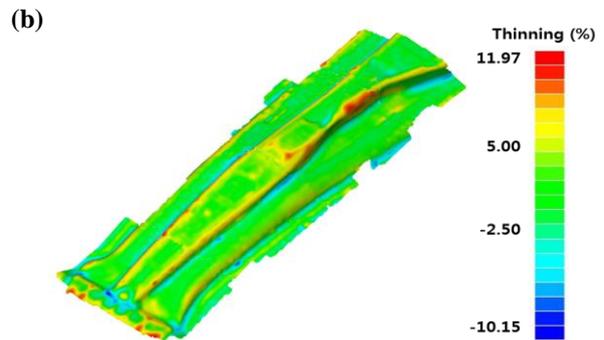
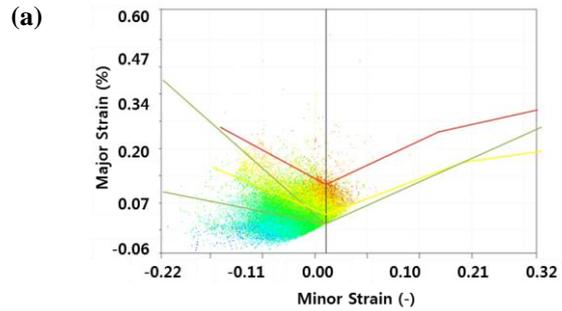


Fig.11 Measurement of thinning from 3D - Scanning

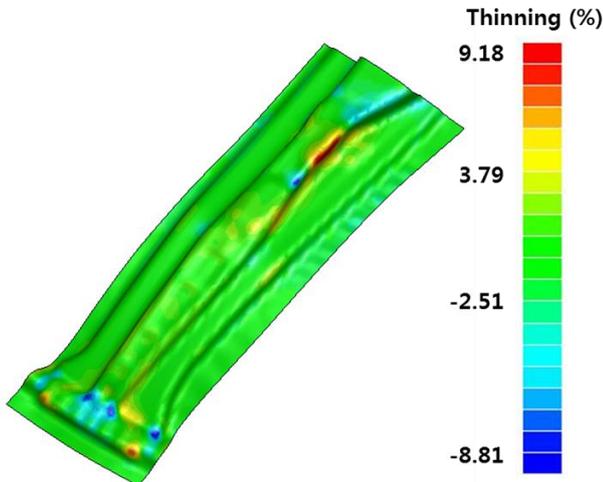


Fig. 9 Result of thinning analysis

고려한 예측 값인데 이 두 값이 서로 수렴해야 iteration이 종료가 된다. (a)는 wrinkle 부의 optimization 값이 0.3에 수렴하고 있다. (b)는 thinning 값이 19에 수렴하는 것을 볼 수 있다. 비드 C의 비드력이 72.4N, 비드 E의 비드력 148.2N, 비드 F의 148.2N에서 최적 비드력이 결정된다.

성형 한계도(FLD : forming limit diagram)는 판재성형에서 성형성을 평가하기 위한 수단이다. 판재 성형시 국부 네킹까지를 유용한 한계 변형률로 잡아 흔히 최대 주변형률을 세로축, 최소 주변형률을 가로축으로 하여 판재에서 나타날 수 있는 가능한 변형 상태를 표현한다. 성형 한계 곡선(FLC : forming limit curve)을 빨간색 곡선으로 표현하였는데 이 곡선 위에 있는 점들은 크랙이 생기고, 보라색 점들은

주름이 생긴다. 최적설계를 적용시키면 크랙이 발생하지 않고 주름도 현저히 줄어들었음을 확인하였다 (Fig. 8). 본 해석에서 사용한 FLD는 TRIP강의 참고 논문을 활용하여 진행했다[10]. 성형해석을 수행한 결과 최고 두께 변형률이 허용 두께 감소율인 15% 이내인 약 9.18%인 것으로 보아 비드로 두께 변형률을 최소로 줄이는 최적 설계를 할 수 있는 것으로 확인 되었다(Fig. 9).

### 3.4 성형 해석 정확도 검증

성형 해석 정확도 검증을 위해서 비드 F 지점에서 비드를 삽입 후 현장 실험을 수행하였다(Fig. 10). 현장 실험을 수행한 제품의 두께 변형률을 3차원 측정장비 (GOM-ARGUS)로 측정했다[11]. Fig. 11 (a)는 측정결과의 FLD를 나타냈다. 전체적으로 FLC곡선 밑부분 안전구간에 위치해 있는 것으로 보아 해

석값과 측정값이 일치함을 볼 수 있다. Fig. 11 (b)는 측정 값의 thinning 값을 나타낸 것인데, 최대 thinning 값도 해석 결과와 유사한 약 12%가 나오는 것을 확인하였다.

#### 4. 결론

UHSS 판재 성형에서 두께 변형률 최소화를 위한 비드 최적 설계에 대한 연구를 수행했다. 최적의 드로우 비드 설계를 통해서 1.2GPa 초고장력 강판의 냉간 프레스 성형 시 찢어짐과 주름을 동시에 제어했다. 초기 128회의 실험을 실험계획법을 통해 13번의 실험으로 축소 시킬 수 있다. 민감도 해석 및 스크리닝을 통해 7개의 설계변수에서 설계 변수 3개로 감소시킨다. 민감도 분석을 통해 드로우 비드의 위치를 먼저 결정했다. 결정된 C, E, F의 위치에서 optimization을 통해 비드의 위치 최적화를 수행했다. 성형 해석 결과 최대 두께 감소(thinning)는 허용 두께 감소 15% 이내인 약 9.18%임을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 활용한 비드 설계 및 최적화 기법은 현업에 유용한 정보를 줄 것으로 기대되며, 아울러 비드의 형상과 위치간의 상관 관계까지 파악한다면 보다 효율적이고 강건한 설계가 가능할 것으로 판단된다.

#### REFERENCE

- [1] S. Han, S. Kim, Y. Seo, E. Yu, J. Kim, 2011, Proc. Trans. Kor. Soc. Automotive Eng. Spring Conf., Kor. Soc. Automot. Eng., Seoul, Korea, pp. 1873~1879.
- [2] S. Park, J. Kang, B. Hwang, S. Kim, J. Kwak, 2011, Proc. Trans. Kor. Soc. Automotive Eng. Spring Conf., Kor. Soc. Automot. Eng., Seoul, Korea, pp. 1869~1872.
- [3] Y. S. Kim, S. E. Lim, H. S. Son, S. S. Han, 1999, Improvement of the Stamping Formability by BHF Control, Trans. Mater. Process., Vol. 8, No. 3, pp. 269~275.
- [4] J. H. Song, J. Lee, H. J. Lee, G. A. Lee, K. D. Park, S. W. Ra, H. W. Lee, 2011, Analysis and Experiments on the Thread Rolling Process for Micro-Sized Screws – Part 1 : Process Parameter Analysis by Finite-Element Simulation, Trans. Mater. Process., Vol. 20, No. 8, pp. 581~587.
- [5] S. Hong, J. Hwang, 2014, Bead Optimization to Reduce Springback of Sheet Metal Forming using High Strength Steel, J. Kor. Soc. Manuf. Technol. Eng., Vol. 23, No. 4, pp. 350~354.
- [6] M. Y. Demeri, 1993, Drawbeads in Sheet Metal Forming, Mater. Eng. Perform., Vol. 2, No. 6, pp. 863~866.
- [7] DYNAFORM-PC User's Manual, Version 1.0, 2011, Engineering Technology Associates Inc.
- [8] Boron Extrication, 2013, 2013 Volvo V60 Airbag Stored Gas Inflator Locations, <http://www.boronextrication.com/2013/08/22/2013-volvo-v60-airbag-stored-gas-inflator-locations/>.
- [9] LS-OPT® User's Manual, 2012, Engineering Technology Associates Inc.
- [10] S. J. Lim, S. B. Kim, H. Huh., 2012, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Spring. Conf., Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, pp. 227~230
- [11] Gom "ARGUS Training guide", 2008, pp. 1~10.