

## 980MPa급 열연 후판재 버링 공정의 변수 최적화 연구

김상훈<sup>1,2</sup> · 도두이통<sup>2</sup>, 박종규<sup>2</sup> · 김영석<sup>3,#</sup>

### Study on the Optimization of Parameters for Burring Process Using 980MPa Hot-rolled Thick Sheet Metal

S. H. Kim, D. T. Do, J. K. Park, Y. S. Kim

(Received September 13, 2021 / Revised December 1, 2021 / Accepted December 1, 2021)

#### Abstract

Currently, starting with electric vehicles, the application of ultra-high-strength steel sheets and light metals has expanded to improve mileage by reducing vehicle weight. At a time when internal combustion engine vehicles are rapidly changing to electric vehicles, the application of ultra-high-strength steel is expanding to satisfy both weight reductions and the performance safety of the chassis parts. There is an urgent need to improve the quality of parts without defects. It is particularly difficult to estimate the part formability through the finite element method (FEM) in the burring operation, so product design has been based on the hole expansion ratio (HER) and experience. In this study, design of experiment (DOE), analysis of variance (ANOVA), and regression analysis were combined to optimize the formability by adjusting the process variables affecting the burring formability of ultra-high-strength steel parts. The optimal variables were derived by analyzing the influence of variables and the correlation between the variables through FE analysis. Finally, the optimized process parameters were verified by comparing experiment with simulation. As for the main influence of each process variable, the initial hole diameter of the piercing process and the shape height of the preforming process had the greatest effects on burring formability, while the effect of a lower round of punching in the burring process was the least. Moreover, as the diameter of the initial hole increased, the thickness reduction rate in the burring part decreased, and the final burring height increased as the shape height during preforming increased.

**Keywords** : Ultra High Strength Steel, Chassis, Burring, Process Parameter, Finite Element Analysis, Taguchi, ANOVA

## 1. 서 론

차량 경량화 및 성능 확보를 위한 자동차용 새시(chassis) 부품의 고강도화에 대한 요구는 지속적으로 증가하고 있다. 그러나 차체 부품에 비해 비교적 두꺼운 소재를 사용하는 새시 부품의 경우, 소재 강도가 높을수록 낮은 연신율에 의해 성형이 어려울 뿐만 아니라, 타발 공정 후 절단면에서의 기공이나 미세 파단 등의 결함이 발생할 가능성이 높으며, 이

로 인해 성형해석을 통한 성형성 예측이 어려워질 수 있다[1-6]. 최근 780MPa급 이상의 열연 강판이 새시 부품에 확대 적용되면서 이러한 문제점들을 해결하기 위해 많은 연구들이 수행되고 있으며, 특히 Fig. 1과 같이 주행 중 타이어를 통하여 들어오는 힘을 지지하고, 타이어의 이상 거동을 방지하는 새시 부품인 프론트 로어 암(front lower arm)의 경우, 'A'점 부시가 체결되는 부위의 신장플랜지(stretch flange) 성형 구간과 'G'점 부시가 체결되는 버링(burring) 성형 구간을 모두 가지는 부품으로서 절단면에서의 미세 파단이 제품 내구 성능 및 내부식성의 취약부

1. 경북대학교 기계공학과, 대학원생

2. ㈜화신 기술연구소 제품연구팀 책임연구원, 선임연구원, 책임연구원

3. 경북대학교 기계공학과, 교수

# Corresponding Author : School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, E-mail: caekim@knu.ac.kr

ORCID: 0000-0001-7525-5428

로 작용할 가능성이 크기 때문에 신장플랜지 모드의 성형성 연구 대상 부품으로 꾸준히 적용되어 오고 있다. Park 등은 SAPH440, FB540, FB590 및 DP590 고강도 열연 강판에 대하여 펀칭 공정에서의 금형 클리어런스(clearance)가 버링 공정 시 재료 파단에 미치는 영향을 연구한 바 있으며[7], Kwak 등은 SPFH780 소재의 프론트 로어 암에 대해 성형해석 시 연속체 요소와 손상이론을 적용하여 변형기구의 예측 정확도를 셀요소의 결과와 비교하고 그 유효성을 검증하였지만, 제안된 방법의 해석 소요 시간이 매우 길어 추가 연구가 필요하다고 했다[8].

또한 Rho 등은 프론트 로어 암의 ‘G’점 버링 부위에 대해 예비 성형(prefforming) 시 금형 곡률과 성형 깊이, 버링 성형 시 펀치의 경사각 등을 공정 변수로 하여 모사 금형을 제작하고, SPFH780-P 및 SPFH980-P 소재를 적용하여 공정 변수에 대한 영향도를 해석과 시험을 통해 검증하였지만, 제한된 공정 변수로 인해 SPFH980-P 소재에 대해서는 치수 정밀도 측면에서 해석 신뢰성이 낮다고 하였다[9].

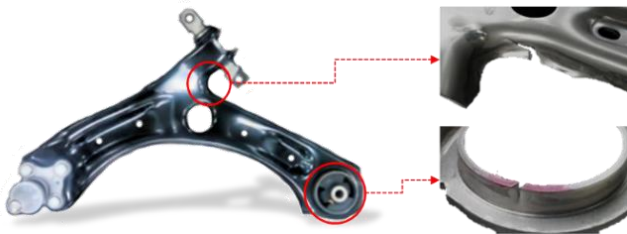


Fig. 1 Quality problems of Front Lower Arm

이러한 문제를 해결하기 위해서 기존 선행 연구들의 분석으로부터 버링 성형에 영향을 미치는 4개의 제어 인자 변수에서, 예비 성형 전 피어싱 홀 사이즈 및 버링 성형시 버링 펀치 형상을 포함한 4개의 공정 변수를 추가하였고, 시험 평가를 위한 표준 모델 제작을 위해 프론트 로어 암의 ‘G’점 버링부 형상을 기반으로 하여 초기 모사시편을 설계하였다. 많은 공정 변수를 적은 수의 해석으로도 비교적 최적에 근사한 가공조건을 찾아내기 위해 다구찌(Taguchi) 실험계획법으로 성형해석을 실시하였으며 [10-12], 이후 성형해석 결과에 대한 각 변수의 영향도를 검토하였고, 분산분석(ANOVA) 및 회귀분석을 통해 반응에 대한 공정 변수 최적화를 진행하였다.

마지막으로, 최적화된 공정 변수를 적용하여 제작된 시험 금형으로부터의 시편을 3D 스캐닝을 하였

고, 해석 결과와 비교함으로써 제안된 방법에 대한 신뢰성을 검증하고 실제 양산 공정의 적용 가능성을 파악하고자 하였다.

## 2. 실험계획법 및 성형해석

### 2.1 초기 모사 시편 설계

초기 모사 시편은 Fig. 2와 같이 표준 모델 제작과 시험 평가를 위해 프론트 로어 암의 ‘G’점 버링부 형상을 기반으로 하였으며, 시험금형 제작 비용 최소화 및 버링 형상에 대한 성형성 평가에 초점을 맞추어 단순화하여 설계하였다.

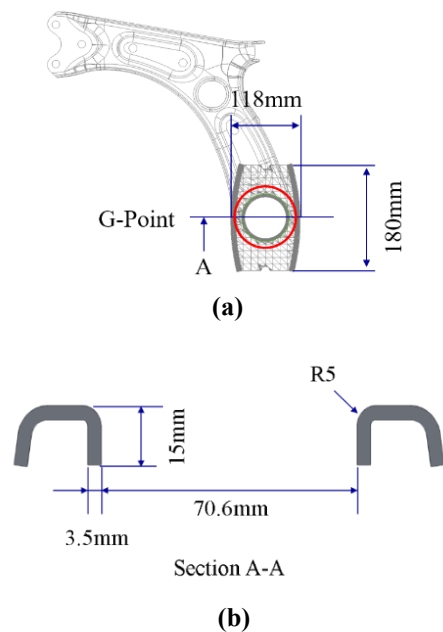


Fig. 2 Model of finite element method for burring

### 2.2 공정 변수 및 반응 선정

본 연구의 버링 성형성 검증을 위한 시험 금형은 블랭킹(blanking), 예비 성형을 유리하게 하기 위한 피어싱(piercing), 예비 성형, 버링 후 최종 시편의 직경 및 높이에 대한 치수 확보를 위한 피어싱, 버링 공정의 순으로 제작하였으며, Table 1에 공정번호 및 공정명을 나타내었다.

Table 1 Stamping process for burring

No.	OP05	OP10	OP20	OP30	OP40
Process	Blanking	Piercing	Prefforming	Piercing	Burring

OP05는 블랭킹 공정, OP10은 예비 성형 피어싱 공정, OP20은 예비 성형 공정, OP30은 피어싱 공정, OP40은 버링 공정을 나타낸다.

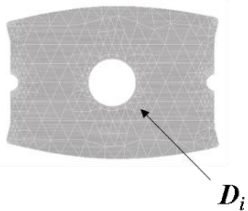
**Table 2 Process parameters and their levels**

OP	Parameter	Level 1	Level 2	Level 3
10	Initial Hole, $D_i$ (mm)	0	21	42
	Preform Height, $h$ (mm)	5	8	10
20	Punch Round, $R_1$ (mm)	5	6	7
	Die Round, $R_2$ (mm)	5	6	7
40	Punch Angle, $\alpha$ (deg.)	5	10	15
	Upper Round, $R_3$ (mm)	2	3	4
	Lower Round, $R_4$ (mm)	2	3	4
	Die Clearance, $\delta$ (mm)	2.7	2.8	-

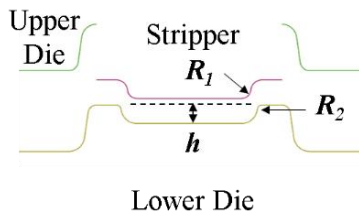
**Table 3 Taguchi L18( $3^7 \times 2^1$ ) Orthogonal Array**

No	Parameters							
	$\delta$	$D_i$	$h$	$R_1$	$R_2$	$\alpha$	$R_3$	$R_4$
1	2.7	0	5	5	5	5	2	2
2	2.7	0	8	6	6	10	3	3
3	2.7	0	10	7	7	15	4	4
4	2.7	21	5	5	6	10	4	4
5	2.7	21	8	6	7	15	2	2
6	2.7	21	10	7	5	5	3	3
7	2.7	42	5	6	5	15	3	4
8	2.7	42	8	7	6	5	4	2
9	2.7	42	10	5	7	10	2	3
10	2.8	0	5	7	7	10	3	2
11	2.8	0	8	5	5	15	4	3
12	2.8	0	10	6	6	5	2	4
13	2.8	21	5	6	7	5	4	3
14	2.8	21	8	7	5	10	2	4
15	2.8	21	10	5	6	15	3	2
16	2.8	42	5	7	6	15	2	3
17	2.8	42	8	5	7	5	3	4
18	2.8	42	10	6	5	10	4	2

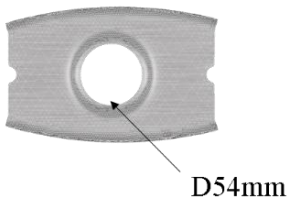
OP10 Piercing



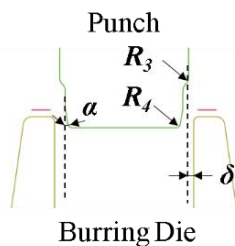
OP20 Preforming



OP30 Piercing



OP40 Burring



**Fig. 3 Parameters of burring process**

최종 버링 높이를 결정하는 OP30 피어싱 공정의 구멍 직경을 54mm로 고정하고 각 공정에서 최종 형상에 영향을 미칠 수 있는 금형의 형상적 요소들을 8개의 공정 변수로 선정하였으며, 버링부의 두께 감소율 및 버링 높이를 성형성 결과에 대한 반응으로 선정하였다. Fig. 3 및 Table 2에 선정된 공정 변수와 그 수준을 나타내었다.

공정 변수 중 OP20 예비 성형 공정의 두께감소율에 영향이 있는 OP10 예비 성형 피어싱 공정의 홀 사이즈를 0, 21mm 및 42mm로 설정했고, OP40 버링 공정에서 버링 펀치와 하형 사이의 금형 클리어런스(die clearance,  $\delta$ )는 'G'점 부시의 압입 체결시 필요한 버링면의 직진도와 조도 확보를 위하여 시편 원소재 두께(3.5mm)보다 작은 2.7mm, 2.8mm로 그 수준을 설정하였다. 또한 버링 펀치의 형상 곡률에 따른 성형성을 평가하고자 초기 진입 곡률( $R_4$ )과 2차 진입 형상 곡률( $R_3$ )을 추가하였다. 3개 수준의 7개 공정 변수와 2개 수준의 1개 공정 변수에 대하여 전계승설계(full factorial design) 기준으로 4374회( $3^7 \times 2^1$ )의 성형해석을 실시하여야 하지만, 본 연구에서는 Table 3과 같이 다구찌 실험계획법을 통해 전체 18회의 성형해석을 실시하였다.

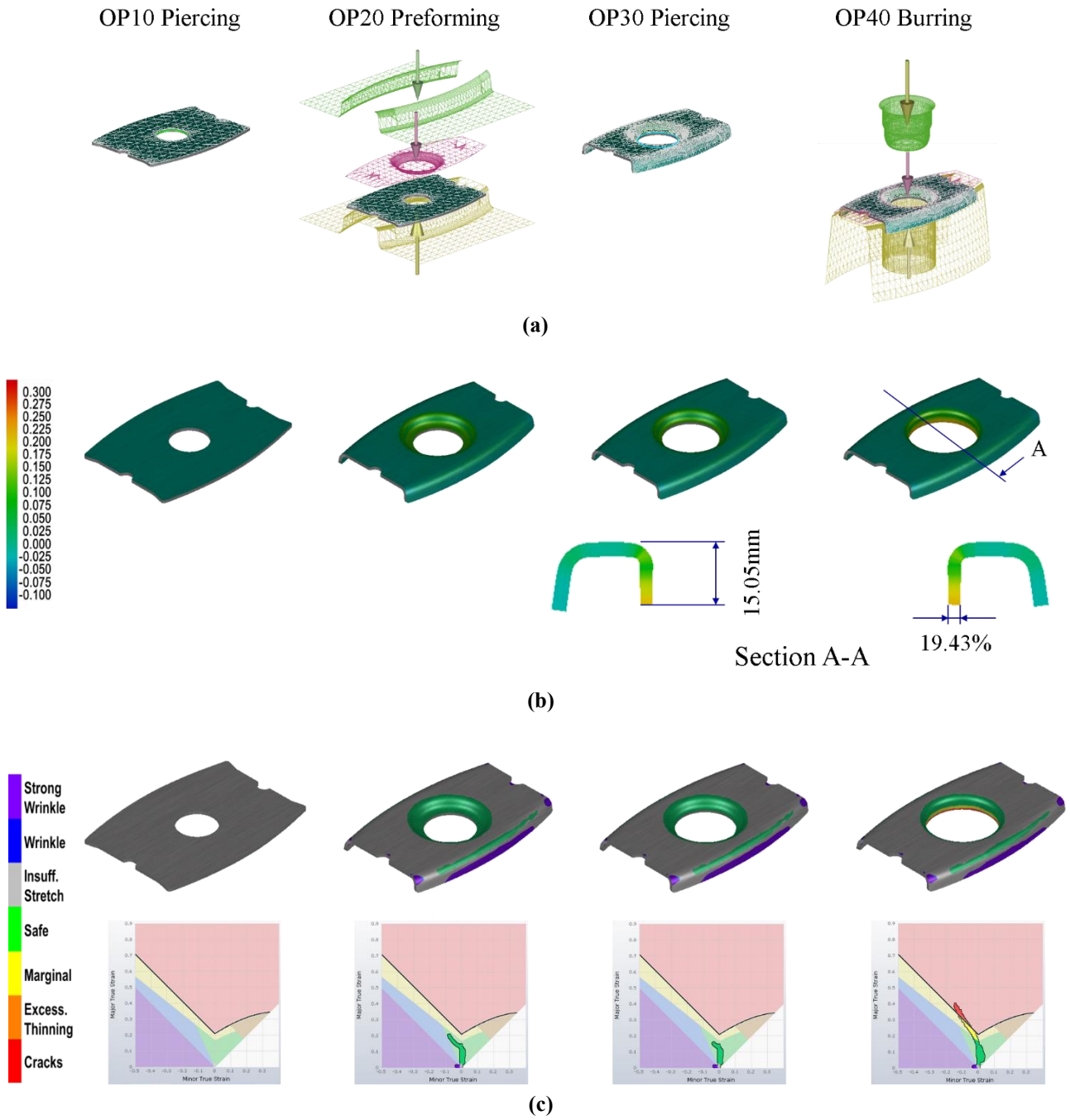


Fig. 4 Tool set up and result of forming simulation:  
 (a) Tool set up; (b) Result of thickness reduction; (c) Result of forming limit diagram

### 2.3 성형해석

두께 3.5mm의 열연강판 SPFH980-P 소재의 버링 공정 성형해석을 위해 식(1)의 Kim-Tuan[13] 등방경화식과 식(2)의 Hill48 항복조건식을 사용하였으며, Kim-Tuan식의 재료 상수 및 단축 인장시험을 통한 기계적 물성을 각각 Table 4와 Table 5에 나타내었다.

$$\sigma = \sigma_0 + T(1 - \exp^{-c\varepsilon})(\varepsilon + \varepsilon_0)^m \quad (1)$$

$$f = \sqrt{G\sigma_{xx}^2 + F\sigma_{yy}^2 + H(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 2N\sigma_{xy}^2} \quad (2)$$

Table 4 Parameters of Kim-Tuan model

$\sigma_0$ (MPa)	T (MPa)	c	M
862.44	686.59	237.14	0.3662

Table 5 Material properties of SPFH980-P 3.5t

Direction	0°	45°	90°
Tensile strength (MPa)	1117.5	1078.3	1102.7
Yield strength (MPa)	862.4	868.7	953.1
R-value	1.05	0.84	0.78
Elongation (%)	13.0	12.9	11.3

상용 유한요소해석 프로그램인 AutoForm R8을 이용하여 성형해석을 진행하였다[14-16]. 결과의 정확도를 고려하여 최종 제품 형상에 대한 셸(shell)의 최소 요소 크기는 0.1mm로 조밀하게 설정하였으며, 요소 개수는 11530개이고, 마찰계수는 0.15를 적용하였다. Fig. 4에 공정별 유한요소 모델링 및 최적화 공정 변수를 적용한 성형해석 결과를 나타내었다.

초고장력강 열연 후판재 적용으로 성형한계도(Forming limit diagram, FLD)를 도출하기 위한 시험장비 용량의 한계 때문에 돔장출 시험 진행이 어려운 관계로, 돔장출 성형 중에 재료의 소성변형 거동을 파악하기 위하여 간단하게 적용이 가능한 킬러의 식(Keeler equation) (3)을 적용하였다.

OP10, OP20, OP30 공정에서는 변형률이 성형한계선 아래 위치하여 안전하게 성형되고 있다. OP40 공정에서는 버링시 플랜지부에서 단축인장 변형 모드로 변형률 분포가 성형한계도 위에 위치하여 파단 발생이 예상되었는데 실제 시험에서는 파단이 발생하지 않았다. 이는 OP20 Preforming 공정에서 예변형을 받은 영향을 고려하지 않았기 때문으로 판단된다. 기존 연구[17-18]에서 알 수 있듯이 예변형을 고려한 성형한계선도를 적용할 필요가 있다. 따라서 초고장력강 열연 후판재의 성형한계도에 대한 신뢰성이 부족한 관계로 향후 추가적인 연구를 토대로 신뢰성 확보가 필요하다.

$$FLC_0 = \frac{n}{0.21} (23.3 + 14.13t) \quad (3)$$

소재의 이방성은 실제 프론트 로어 암의 수율을 고려하여 R0 방향과 동일하게 적용하였고, 성형해석시 이방성에 따른 두께감소율은 약 1.3%로 미미한 차이를 보였다.

### 3. 공정 변수 최적화

#### 3.1 공정 변수의 영향 분석

Minitab 17 프로그램 내 다구찌 설계를 사용하여 반응인 두께감소율 및 버링 높이에 대한 변수들의 영향도를 분석하였다. 두께감소율은 수치가 작을수록 좋은 특성을 나타내므로 식(4)의 망소특성 손실함수를 적용하고, 반대로 버링 높이는 클수록 좋으므로 식(5)의 망대특성 손실함수를 적용하여 S/N비(Signal to Noise ratio)를 산출하였다.

$$S/N = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 \right) \quad (4)$$

$$S/N = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i^2} \right) \quad (5)$$

Fig. 5에 두께감소율 및 버링 높이의 S/N비 분석결과를 정리하였다. S/N비 수치의 차이가 클수록 변수에 더 큰 영향을 미친다. 두께감소율에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 OP10 피어싱 공정의 초기 홀 사이즈( $D_i$ )이고, 버링 높이에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 OP20 예비성형 공정의 형상 높이( $h$ )로 확인되었다. 망소특성으로 두께감소율이 최소가 되는 공정 변수별 조건은  $\delta = 2.7\text{mm}$ ,  $D_i = 42\text{mm}$ ,  $h = 5\text{mm}$ ,  $R_1 = 7\text{mm}$ ,  $R_2 = 6\text{mm}$ ,  $\alpha = 10^\circ$ ,  $R_3 = 3\text{mm}$ ,  $R_4 = 2\text{mm}$ 일 경우로 나타났으며, 망대특성으로 버링 높이가 최대가 되는 공정 변수별 조건은  $\delta = 2.8\text{mm}$ ,  $D_i = 21\text{mm}$ ,  $h = 10\text{mm}$ ,  $R_1 = 6\text{mm}$ ,  $R_2 = 6\text{mm}$ ,  $\alpha = 10^\circ$ ,  $R_3 = 3\text{mm}$ ,  $R_4 = 4\text{mm}$ 일 경우로 나타났다. 각 변수별 잡음 요인의 평균값을 계산하면 최적의 변수 조건을 도출할 수 있으며, 앞서 Table 6에 각 조건별 해석결과와 함께 S/N비 결과를 나타내었다.

Table 6 FE Analysis result of Taguchi orthogonal array

No	Thinning (%)	S/N ratio (LB)	Burring Height (mm)	S/N ratio (HB)
1	21.833	-26.782	14.813	23.413
2	22.100	-26.888	15.210	23.643
3	23.100	-27.272	15.073	23.564
4	21.233	-26.540	15.020	23.533
5	23.700	-27.495	15.083	23.570

6	23.400	-27.384	15.077	23.566
7	20.733	-26.333	14.943	23.489
8	20.400	-26.193	15.017	23.531
9	21.233	-26.540	15.057	23.555
10	23.300	-27.347	15.073	23.564
11	26.233	-28.377	15.120	23.591
12	24.433	-27.760	15.223	23.650
13	20.233	-26.121	14.960	23.499
14	21.767	-26.756	15.130	23.597
15	21.533	-26.662	15.283	23.684
16	19.833	-25.948	14.960	23.499
17	21.100	-26.486	15.127	23.595
18	21.433	-26.622	15.157	23.612

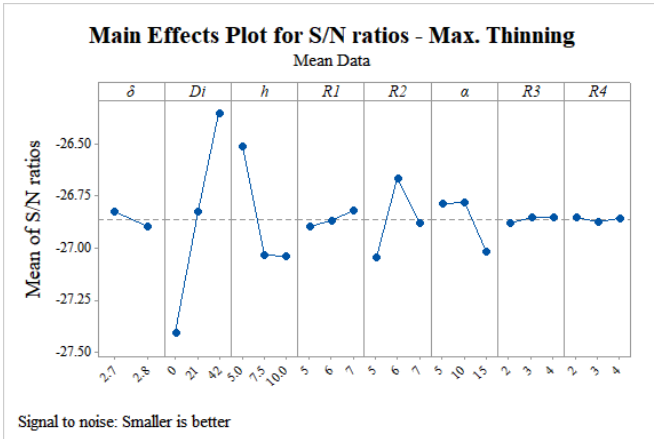
### 3.2 분산분석(ANOVA) 및 회귀분석

두께감소율을 줄이고 버링 높이의 증가를 위하여 각 공정 변수들을 적절히 조절하는 것이 바람직하다. 따라서 각 변수가 미치는 영향의 유의수준을 알아보기 위하여 S/N비에 의한 이원분산분석(two-way analysis of variance)을 수행하였다[19].

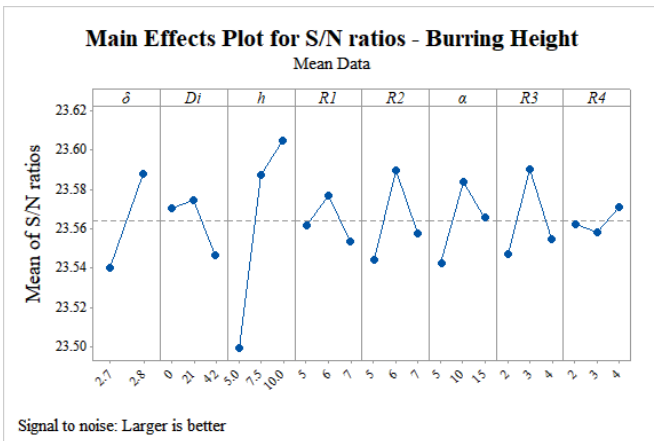
해석 결과를 기반으로 공정 변수와 각 반응의 회귀분석을 사용하여 최대 두께감소율에 대한 최적화 방정식 및 버링 높이에 대한 최적화 방정식을 각각 식(6)과 식(7)에 나타내었으며, 회귀모형에 대한 분산분석 결과를 Table 7과 Table 8에 나타내었다.

통계적 신뢰성 검증을 위해 결정계수(R<sup>2</sup>)를 사용하였다. R<sup>2</sup>은 0%와 100% 사이의 값을 가지며, 상관관계가 클수록 100%에 가까워진다. 하지만 R<sup>2</sup>은 공정변수 증가에 따라 값이 커지는 단점이 있어, 조정 결정계수(Adjust R<sup>2</sup>)를 사용하여 회귀모형을 결정하고 Table 9와 Table 10에 두께감소율 및 버링 높이에 표기하였다.

본 연구에서는 유의수준을 95%로 설정하여 P값이 0.05보다 작아야 공정 변수에 영향력이 있다고 판단한다. 따라서 두께감소율 모델의 P값 및 독립변수 δ, D<sub>i</sub>, R<sub>3</sub>의 P값이 0.05보다 작으므로 유의한 것으로 나타났으며, 버링 높이 모델 및 독립변수 D<sub>i</sub>, h, α, R<sub>3</sub>의 P값이 0.05보다 작으므로 유의한 것으로 나타났다.



(a)



(b)

Fig. 5 Main effects plot for Signal to Noise ratios: (a) Max. Thinning; (b) Burring Height

$$\begin{aligned}
 \text{Thinning} = & -183.1 + 69.30\delta + 2.835D_i - 4.619h \\
 & + 14.72R_1 + 8.503R_2 + 0.841\alpha + 5.318R_3 \\
 & - 1.0436\delta * D_i - 5.44\delta * R_1 - 0.301\delta * \alpha \\
 & - 0.01515D_i * R_3 + 0.5635h * R_1 + 0.4139h * R_3 \\
 & - 0.67R_1 * R_2 - 1.4065R_2 * R_3 \quad (6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Burring height} = & 14.835 - 0.578\delta - 0.002104D_i \\
 & + 0.01567h + 0.0794\alpha + 0.3129R_3 + 0.520R_4 \\
 & - 0.02355\alpha * R_4 - 0.0923R_3 * R_4 \quad (7)
 \end{aligned}$$

Table 7 ANOVA analysis for thinning

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
Model	15	46.0237	3.06825	267.22	0.004
Linear	7	24.626	3.51801	306.4	0.003
δ	1	2.5346	2.53461	220.75	0.004
D <sub>i</sub>	1	5.4196	5.4196	472.01	0.002
h	1	0.0004	0.0004	0.03	0.869

$R_1$	1	0.0022	0.00217	0.19	0.706
$R_2$	1	0.1719	0.17192	14.97	0.061
$\alpha$	1	0.0106	0.01057	0.92	0.439
$R_3$	1	0.3494	0.34944	30.43	0.031
Interactions	8	16.4895	2.06118	179.52	0.006
$\delta * D_i$	1	2.1922	2.19224	190.93	0.005
$\delta * R_1$	1	0.3384	0.33839	29.47	0.032
$\delta * \alpha$	1	0.0274	0.02738	2.38	0.263
$D_i * R_3$	1	0.2625	0.26249	22.86	0.041
$h * R_1$	1	2.7255	2.72551	237.37	0.004
$h * R_3$	1	0.6938	0.69381	60.43	0.016
$R_1 * R_2$	1	0.2723	0.27231	23.72	0.04
$R_2 * R_3$	1	7.6634	7.66337	667.43	0.001
Error	2	0.023	0.01148	-	-
Total	17	46.0467	-	-	-

Table 8 ANOVA analysis for burring height

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
Model	8	0.199168	0.024896	12.5	0.000
Linear	6	0.081303	0.013551	6.81	0.006
$\delta$	1	0.005563	0.005563	2.79	0.129
$D_i$	1	0.018824	0.018824	9.45	0.013
$h$	1	0.011236	0.011236	5.64	0.042
$\alpha$	1	0.018353	0.018353	9.22	0.014
$R_3$	1	0.012994	0.012994	6.53	0.031
$R_4$	1	0.000675	0.000675	0.34	0.575
Interactions	2	0.056286	0.028143	14.14	0.002
$\alpha * R_3$	1	0.051059	0.051059	25.65	0.001
$R_3 * R_4$	1	0.026137	0.026137	13.13	0.006
Error	9	0.017918	0.001991	-	-
Total	17	0.217086	-	-	-

Table 9 Model summary for thinning

Std. Dev	R <sup>2</sup>	Adjust R <sup>2</sup>	Press	Predict R <sup>2</sup>
0.107154	99.95%	99.58%	4.24824	90.77%

Table 10 Model summary for burring height

Std. Dev	R <sup>2</sup>	Adjust R <sup>2</sup>	Press	Predict R <sup>2</sup>
0.04462	91.75%	84.41%	0.070672	67.45%

### 3.3 반응 최적화

반응인 최소 두께감소율 및 최대 버링 높이에 대한 각 공정 변수의 최적화 값을 Table 11에 나타내었으며, 식(6)와 식(7)의 최적화 방정식에 의해 최소 두께감소율은 20.03%, 최대 버링 높이는 15.18mm로 각각 예측되었다.

Table 11 Optimized process parameters

$D_i$	$h$	$R_1$	$R_2$	$\alpha$	$R_3$	$R_4$	$\delta$
42mm	5mm	7mm	7mm	10°	4mm	2mm	2.8mm

아울러, 최적화 공정 변수를 적용하여 실시한 성형해석에서의 결과는 최소 두께감소율이 19.43%, 최대 버링 높이는 15.05mm로 각각 확인되었다. 최적화 방정식과 성형해석을 통한 결과 값의 차이는 두께감소율이 0.60%(두께 0.02mm), 버링 높이는 0.13mm 차이로, 성형해석에서의 오차 수준 및 현장에서의 허용치 등을 감안하면 거의 유사하게 나타난 것으로 판단된다.

## 4. 시험금형 및 시편 제작

### 4.1 금형제작 및 시험

시험 금형은 반응 최적화 공정 변수를 기준으로 성형해석 조건과 동일하게 코일 스프링 압력과 작동 거리(stroke) 등을 고려하여 설계하였으며, 실제 양산 조건과 동일한 사양의 금형 재질 적용 및 열처리, 표면처리를 거쳐 제작하였으며, 각 조건에 대해 Table 12 및 Fig. 6에 각 공정별 금형 및 시편 사진을 나타내었다.

Table 12 Experiment condition

Div.	Forming operation	Piercing operation
Tonnage	250 Ton	200 Ton
Insert steel	SKD11	S45C
Heat treatment	VHT + PVD	FHT

\*FHT: Frame heat treatment, VHT: Vacuum heat treatment



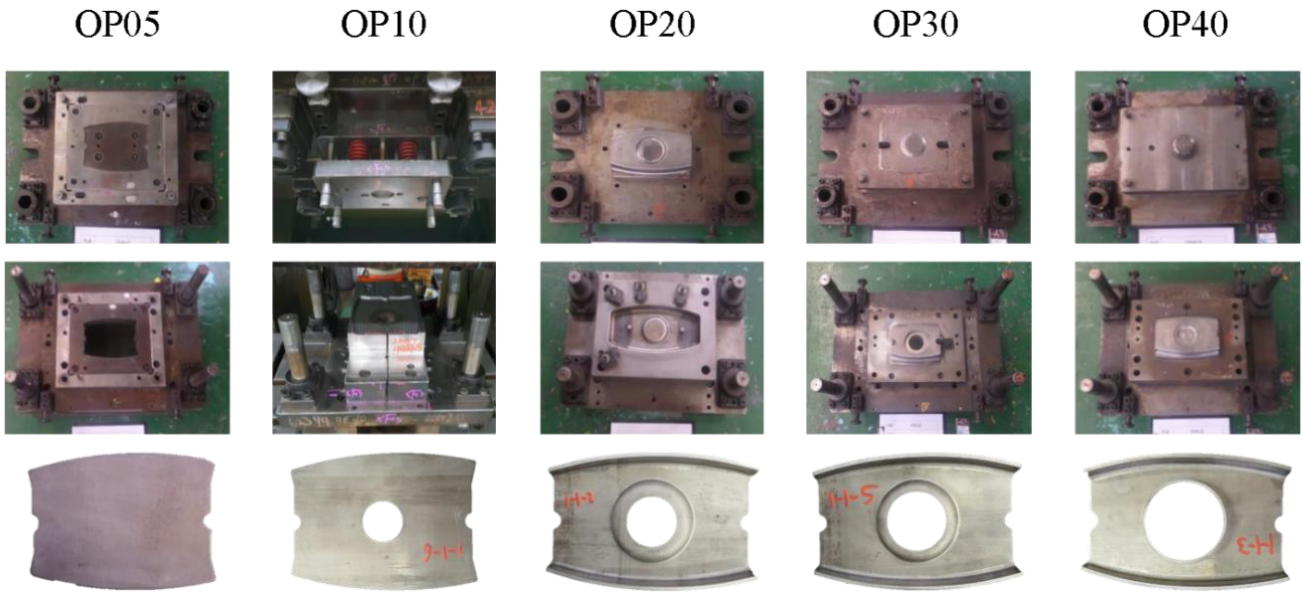


Fig. 6 Molds and try-out panels each forming operation

4.2 시편 측정 및 결과 분석

버링부의 두께감소율 및 높이를 정량적으로 분석하기 위하여 광학식 LED 3D 스캐너인 ATOS Q 12M 장비를 이용하여 시편을 3D 스캔하였다. Fig. 7에 측정 장비와 ATOS Professional 2020 프로그램을 사용하여 시험 시편에 대한 측정된 결과를 나타내었으며, 버링부 형상을 기준 부분 형상 최적화 맞춤(Local Best fit)으로 3D 스캔과 3D 캐드 데이터를 얼라인먼트(alignment) 하였다[20].

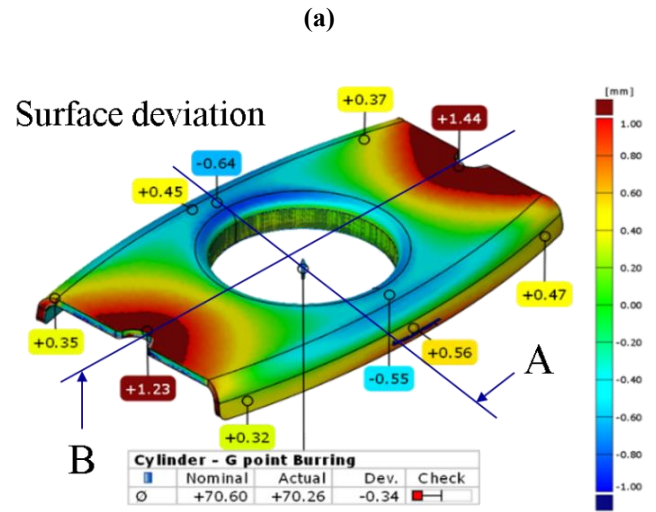
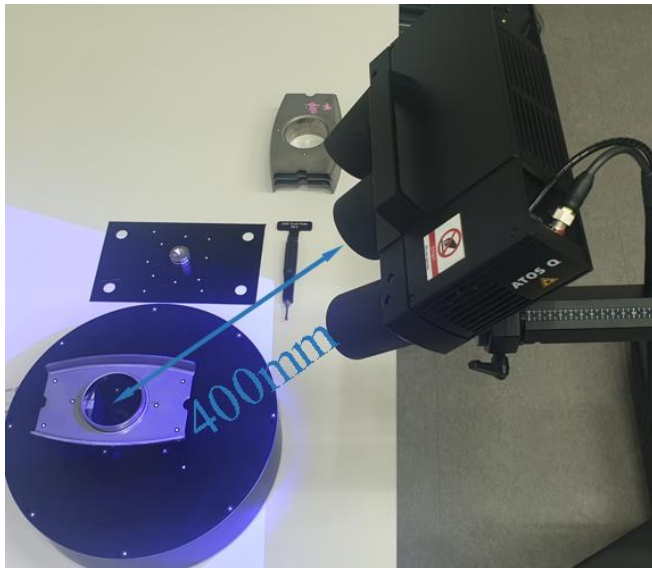


Fig. 7 Measuring dimension by using 3D Scanner: (a) 3D scanner; (b) Result of 3D scanning

최종 형상에 대한 성형해석 및 시험 결과를 비교하기 위해 버링 중심부 단면 형상(Section A-A)을 추출하여 3개의 측정 평균값을 Fig. 8에 표시하였다. 반대편 단면 형상(Fig. 7 Section B-B)의 두께는 0.07mm 감소, 버링 높이는 0.28mm 정도 감소로 미미한 차이가 발생되었다.

두께 측정 부위는 버링부 끝단의 최대 두께감소율 부위를 기준으로 측정하였으며, 버링 높이는 'G' 점 부시가 압입되는 버링면 내측을 기준으로 측정



하였다. Fig. 9에 두께감소율과 버링 높이에 대한 반응 최적화 방정식 (5) 및 (6) 그리고 성형해석과 시험 금형에 의한 시험 결과 측정값을 나타내었다. 각 경우에서의 두께감소율 및 버링 높이에 대한 결과값들은 거의 유사한 수준으로 나타났다.

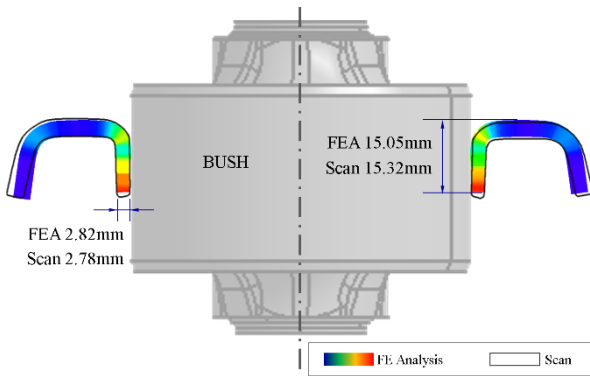


Fig. 8 Comparison of the cross section thickness between FE Analysis and 3D scan result

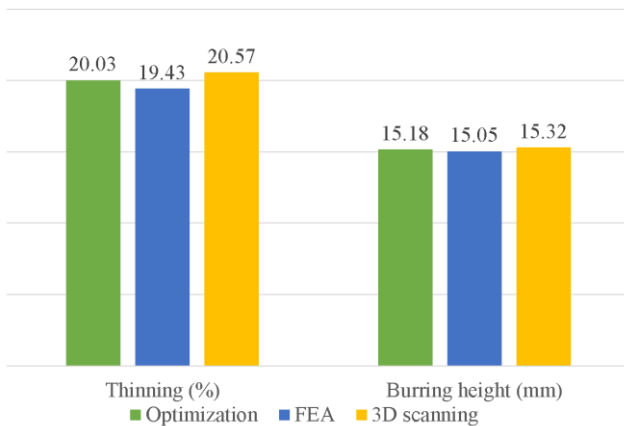


Fig. 9 Comparison of thinning and burring height

## 5. 결론

본 연구에서는 두께 3.5mm의 열연강판 SPFH980-P 소재를 적용하여 자동차 새시 부품인 프론트 로어암의 'G'점 버링부 성형을 위한 공정 변수 최적화를 진행하였으며, 성형해석 및 시험을 통해 공정 변수 최적화에 대한 신뢰성 검증을 하였다. 본 논문에서 수행하고 검토된 연구내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 8개의 공정 변수와 2개의 반응에 대한 다구찌 직교배열표를 기준으로 18회의 성형해석을 수행하였고, 분산분석 및 회귀분석을 통해 두께감소율과 버링 높이에 모두 적합함을 알 수 있었다.

(2) 각 공정 변수에 대한 주영향도는 OP10 피어싱 공정의 초기 홀 직경( $D_i$ )과 OP20 예비 성형 공정의 형상 높이( $h$ )가 버링 성형성에 가장 큰 영향을 주었으며, OP40 버링 공정의  $R_4$ 의 영향이 가장 작았다. 초기 홀의 직경이 커질수록 버링부의 두께감소율은 낮아졌으며, 예비성형 시 형상 높이가 클수록 최종 버링 높이가 높아지는 것으로 나타났다.

(3) 회귀분석을 통한 두께감소율 및 버링 높이에 대한 공정 변수 최적화를 실시하고, 최적화된 공정 변수를 기준으로 성형해석 및 모사 시험을 진행하여 그 결과를 비교하였으며, 각 조건에서의 두께감소율 및 버링 높이가 거의 유사한 수준임을 확인하였다.

(4) 버링 성형을 위해 본 연구에서 제안하는 공정 변수 최적화 방법을 실제 제품과 현장에서의 조건등을 적절히 고려하여 적용한다면 보다 우수한 품질의 제품 생산 및 금형 제작에 대한 소요 시간과 비용을 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

(5) 그러나 판재의 성형한계를 예측하기 위해서는 예변형을 고려한 성형한계선도를 고려할 필요가 있다.

## REFERENCES

- [1] D. Y. Kim, S. T. Oh, C. S. Yoon, D. S. Han, 2007, 1-Piece Typed Lower Control Arm Using High Strength Hot Rolled Steel Sheet, Proc. Kor. Soc. Technol. Plast. Conf., pp. 228~229.
- [2] M. Tisza, Z. P. Kovács, 2012, New methods for predicting the formability of sheet metals, Production Processes and Systems 2012, Vol. 6, No. 1, pp. 45~54.
- [3] X. Chen, H. Jiang, Z. Cui, C. Lian, C. Lu, 2014, Hole expansion characteristics of ultra high strength steels, Procedia Eng., Vol. 81, pp. 718~723.  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.066>
- [4] M. S. Buang, S. A. Abdullah, J. Saedon, H. Abdullah, 2015, Springback Effect of Automotive Lower Arm Component Prepared via Burring Processing, J. Technol., Vol. 75, No. 8, pp. 25~29.

- <https://doi.org/10.11113/jt.v75.5205>
- [5] S. H. Jang, C. I. Kim, S. H. Yang, Y. S. Kim, 2013, Development of Hole Expansion Test for Sheet Materials Using Pattern-Recognition Technique, *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A.*, Vol. 37, No. 2, pp. 161~168. <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2013.37.2.161>
- [6] S. H. Choi, K. Y. kim, J. H. Lee, S. H. Park, H. J. Lee, J. H. Yoon, 2019, Image Processing Algorithm for Real-Time Crack Inspection in Hole Expansion Test, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 20, pp. 1139~1148. <https://doi.org/10.1007/s12541-019-00101-4>
- [7] B. C. Park, K. U. Bae, S. M. Gu, S. H. Jang, S. H. Hong, Y. S. Kim, 2010, A Study of Automobile Product Design using Hole Expansion Testing of High Strength Steels, *Trans. Mat. Process.*, Vol. 19, No. 6, pp. 337~343. <https://doi.org/10.5228/KSTP.2010.19.6.337>
- [8] J. H. Kwak, S. J. Yoon, S. H. Kim, J. K. Park, H. G. Han, 2017, Prediction of Deformation Mechanism and Fracture for an Auto-Part with Advanced High Strength Steel using Solid Element and Damage Theory, *Trans. Mat. Process.*, Vol. 26, No. 5, pp. 293~299. <http://doi.org/10.5228/KSTP.2017.26.5.293>
- [9] J. D. Rho, J. K. Park, 2018, Optimization of Process Variable to Improve Burring Formability of Automotive Parts, *Proc. Kor. Soc. Technol. Plast. Conf.*, pp. 191.
- [10] K. M. Kim, 2016, Optimization of Sheet Metal Forming Process Using Mahalanobis Taguchi System, *J. Kor. Soc. Manuf. Process. Eng.*, Vol. 15, No. 1, pp. 95~102. <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2016.15.1.095>
- [11] B. R. Billade, S. K. Dahake, 2018, Optimization of Forming Process Parameters in Sheet Metal Forming of Reinf-Rr End Upr-Lh/Rh for Safe Thinning, *J. Eng. Res. Appl.*, ISSN 2248~9622, Vol. 8, Issue 8 (Part -I), pp. 01~07. <http://doi.org/10.9790/9622-0808010107>
- [12] S. T. Oh, D. H. Lee, D. S. Han, Y. M. Jang, D. Y. Kim, 2008, Development of One-Piece Lower Control Arm Based on Taguchi Optimization Method, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 17, No. 8, pp. 613~618. <https://doi.org/10.5228/KSPP.2008.17.8.613>
- [13] Y. S. Kim, Q. T. Pham, and C. I. Kim, 2017, New Stress-Strain Model for Identifying Plastic Deformation Behavior of Sheet Materials, *J. Kor. Soc. Precis. Eng.*, Vol. 34, No. 4, pp. 273~279. <https://doi.org/10.7736/KSPE.2017.34.4.273>
- [14] G. H. Bae, 2021, Spring-back Improvement According to the Shape Bead Arrangement of Cabin Sunroof in Construction Equipment, *Trans. Mat. Process.*, Vol. 30, No. 2, pp. 69~73. <http://dx.doi.org/10.5228/KSTP.2021.30.2.69>
- [15] J. H. Cho, C. H. Lee, H. I. Shin, Y. S. Kim, 2016, Study on manufacture of car body in advanced Ultra High Strength Cold-rolled Steel Sheets of 1.5GPa UTS-grade, *Proc. Kor. Soc. Technol. Plast. Conf.*, pp. 41~42
- [16] G. B. Bang, H. S. Seong, H. S. Kwak, C. Kim, 2017, A Study on Stamping of the Center Pillar (High-Strength steel-780MPa) Using Finite Element Analysis, *Trans. Mater. Process*, Vol. 26, No. 2, pp. 87~94 <https://doi.org/10.5228/KSTP.2017.26.2.87>
- [17] H. S. Son, Y. S. Kim, 2001, Strain Path Dependence of Forming Limits Predicted by Barlat and Lian. *KSME international journal*, 15(2), 210-216.
- [18] T. B. Stoughton, 2000, A general forming limit criterion for sheet metal forming, *Int. J. Mech. Sci.*, 42(1), pp. 1~27.
- [19] M. T. Nasri, F. Slimani, M. Ayadi, A. Cherouat, M. Rezgui, A. Zghal, 2012, Performance Evaluation of Multiple Regression Method for Identification Models: Application to the Sheet Metal Forming Formability, *Adv. Mater. Res.*, Vol. 423, pp. 177~186. <http://doi.org/10.4028/AMR.423.177>
- [20] S. H. Kwon, H. S. Lee, Y. S. Lee, S. W. Kim, C. Y. Jung, S. M. Hong, 2016, Design Compensation to Reduce Springback of Sheet Metal Forming using 1.2GPa Ultra High Strength Steel, *Proc. Kor. Soc. Technol. Plast. Conf.*, pp. 110~111.