

# 반응표면법을 이용한 Al5052 판재의 점진성형 최적화 연구

오세현<sup>1</sup> · 샤오샤오<sup>1</sup> · 김영석<sup>2,\*</sup>

## Optimization of Incremental Sheet Forming Al5052 Using Response Surface Method

S. H. Oh, X. Xiao, Y. S. Kim

(Received January 11, 2021 / Revised January 27, 2021 / Accepted January 28, 2021)

### Abstract

In this study, response surface method (RSM) was used in modeling and multi-objective optimization of the parameters of AA5052-H32 in incremental sheet forming (ISF). The goals of optimization were the maximum forming angle, minimum thickness reduction, and minimum surface roughness, with varying values in response to changes in production process parameters, such as tool diameter, tool spindle speed, step depth, and tool feed rate. A Box–Behnken experimental design (BBD) was used to develop an RSM model for modeling the variations in the forming angle, thickness reduction, and surface roughness in response to variations in process parameters. Subsequently, the RSM model was used as the fitness function for multi-objective optimization of the ISF process based on experimental design. The results showed that RSM can be effectively used to control the forming angle, thickness reduction, and surface roughness.

**Keywords:** Incremental Sheet Forming, Surface Roughness, Response Surface Method, Multi-objective Optimization

## 1. 서 론

점진성형(Incremental Sheet Forming, ISF)은 간단한 공구를 이용하여 판재를 국부적인 소성변형을 가하여 점차 성형하는 기술이다. Iseki [1]가 처음으로 금형 없는 성형방법을 제시하였고, 기술이 발전하면서 컴퓨터 수치제어를 통한 점진성형 기술을 개발하였다 [2]. 점진성형에서 일반적으로 CNC 머신에 공구를 장착하고 판재의 외각을 고정된 후 입력된 공구 경로를 따라 공구의 이동으로 설계된 형상을 만든다 (Fig. 1). 종래의 프레스 성형을 비해 금속 판재의 성형성을 크게 향상시킬 수 있고 금형이 필요 없어 생산 비용을 크게 줄일 수 있는 장점이 있다 [3]. 또한, 점진성형을 기반으로 미세 점진성형(Micro ISF)

[4], 로봇지원 점진성형(Robot assisted ISF) [5], 고온 점진성형(Heat assisted ISF) [6] 등 하이브리드 점진성형 기술도 개발되었다 [7].

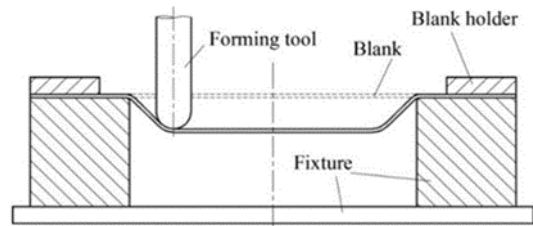


Fig. 1 Single point incremental sheet forming section view

최근에 많은 점진성형 관련한 연구를 활발하게 진행하고 있는 가운데 이론적, 수치적, FEM 등 관련 연구 논문이 많이 발표되고 있다. Jeswiet 등[8]은 현재 최첨단 점진성형기술에 대해 기술하였고, Park 등

1. 경북대학교 기계공학과, 대학원생  
2. 경북대학교 기계공학부, #교수  
\* Corresponding Author : Department of Mechanical Engineering,  
Kyungpook National University  
E-mail: caekim@knu.ac.kr, ORCID: 0000-0001-7525-5428

[9]은 판재 점진성형에 대한 개발 동향 및 메커니즘에 대하여 기술하였다. Minutolo 등[10]이 점진성형에서 금속 판재의 최대 성형각도를 이용한 판재 성형성을 평가하였고, Kang 등[11]이 양각성형과 음각성형에 대한 형상 치수정밀도에 대한 연구하였다. Leon 등[12]과 Kim 등[13]은 점진성형에서 공정변수의 영향에 대해 연구하여 판재 두께, 성형 각도, 공구 직경, 공구 이송속도, 공구 회전 속도, Z-방향 피치, 온도 등이 점진성형에서 중요한 변수라고 하였고, Lee 등[14]은 스텐리스 극박판의 두께에 따른 주름 발생 특성에 대한 분석을 하였다. 또한, McAnulty 등[15]은 점진성형에서 공정변수의 영향을 요약하였고 이에 따라 점진성형에서 판재의 성형성이 공구 회전속도의 증가함에 따라 향상되고 공구 직경이 작을수록 성형성이 향상될 수 있지만 스프링 백 및 표면 거칠기가 증가하여 성형품의 형상 정밀도가 떨어진다. 또한, Z 방향 피치가 줄어들면 성형성이 향상되고 스프링 백도 줄일 수 있지만 성형시간이 크게 증가하는 단점이 있다. 따라서 성형성과 품질을 달성하기 위해 여러가지 공정 변수들에 대한 최적화가 필요하다.

실험을 기반으로 점진성형의 공정변수를 최적화하기 위한 다양한 방법이 사용되고 있다. Do 등[16]은 그레이 관계형 분석(Grey relational analysis, GRA)을 이용하여 AA5052 판재의 점진성형에 대한 공정변수를 최적화하였다. 연구에서 다구찌 방법(Taguchi method)의 직교 배열을 이용하여 실험 계획을 설계하였고 그레이 관계형 분석을 이용해서 최적 변수를 찾아내었다. Hani 등[17]은 반응표면법(Response Surface Method, RSM)을 사용하여 AA1050 판재에 대한 이점 점진성형(Two point ISF)을 최적화하였다. 연구에서 성형각도, 공구 직경, 판재 두께, Z 방향 피치를 공정변수로 하여 두께 감소율과 최대 가공력을 목적함수로 B-B 설계법(Box-Behnken Design, BBD) 통해 실험 계획하고 분산분석(ANOVA)를 사용하여 각 변수의 영향에 대해 해석하였다.

최근 경량화에 대한 관심이 큰 가운데, 특히 알루미늄과 같은 소재에 대한 관심이 크다. 따라서, 본 연구는 AA5052-H32 판재를 B-B 설계법(BBD)을 바탕으로 설계, 반응표면법 (RSM)을 이용하여 각 변수들(공구 직경, 공구 회전속도, Z 방향 피치, 공구 이송속도)의 점진성형에서 목적함수(성형성, 두께감소, 표면 거칠기)에 대한 영향평가와 목적함수들에

대한 다중 목적 최적화(Multi-objective optimization)하여 최적변수 조합을 찾는 것을 목표로 한다.

## 2. 실험 및 측정

### 2.1 실험설계

본 연구에는 두께 1mm 인 AA5052-H32 판재를 실험하였고, Table 1 에 재료 물성을 표기하였다. 실험간 공정변수와 수준을 Table 2 에 나타내었다.

Table 1 Properties of AA5052-H32 material

Direction	0°	45°	90°
Young's modulus (GPa)	69.53	69.39	70.22
Yield strength (MPa)	165.3	154.8	156.2
Tensile strength (MPa)	223.8	215.1	218.3
Elongation (%)	11.2	14.4	12.1

Table 2 Selected parameters and their levels

Parameter	Level -1	Level 0	Level 1
A : Tool size(mm)	6	8	10
B : Spindle speed(rpm)	60	120	180
C : Step depth(mm)	0.2	0.4	0.6
D : Feed rate(mm/min)	400	800	1200

변수들의 영향을 파악하기 위해 B-B 설계법을 이용하여 다양한 변수와 수준의 조합에 대해서 27 개의 실험을 계획하였다. 부록 Table 3 의 실험설계표에 따라 실험을 수행하여 최대 성형각도, 판재의 두께, 표면 거칠기의 측정 결과를 표기하였다.

### 2.2 성형성 평가

본 연구에서 성형성 평가를 위한 Fig. 2(a)의 모델 VWACF(Variable Wall Angle Conical Frustum)[18]을 이용하여 최대 성형각도를 구하였다. 본 모델에서 성형각도는 40°부터 점차 증가하여 90°까지 측정할 수 있고, 파단 할 때까지 성형하여 식(1)과 식(2)를 이용하여 최대 성형각도  $\theta$ 를 도출할 수 있다.

$$H = L - D + r \quad (1)$$

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{H}{r+R}\right) \quad (2)$$

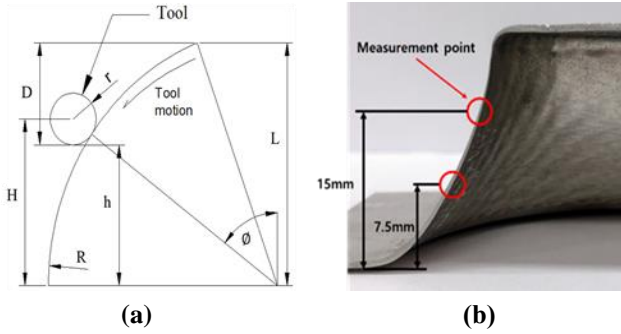


Fig. 2 Wall angle calculation according to tool position  
(a), Measurement of thickness reduction (b)

### 2.3 두께감소 평가

두께는 제품의 강도와 연관되어 제품생산 과정의 중요한 요소에 포함되어 있다. Fig. 2(a)의 VWACF 모델을 파단 할 때까지 성형 후 와이어커팅 한 다음 Fig. 2(b)의 바닥면을 기준으로 15mm 위치에 판재 두께를 Fig. 3 처럼 광학현미경으로 측정하였다.

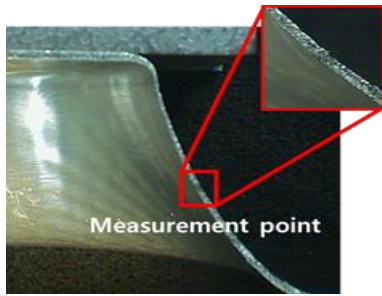


Fig. 3 Measurement using an optical microscope

### 2.4 표면 거칠기 평가

제품을 생산하였을 때, 공구 비접촉면이 표면 거칠기가 더 우수하여 표면 품질 확보에 더 유리하다 [19]. 본 연구에서는 공구 비접촉면의 Fig. 2(b)의 바닥을 기준으로 7.5mm, 15mm 위치의 표면 거칠기를 공초점 레이저 주사 현미경을 이용하여 Fig 4 의 세 점을 측정하여 중심선 평균 거칠기(Ra)값으로 평균 내었고, Fig. 5 는 측정한 시편 한구간의 표면이다.



Fig. 4 Measurement of roughness

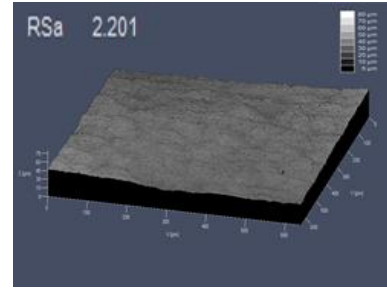


Fig. 5 Measured topographic by Confocal laser scanning microscope

## 3. 최적화

### 3.1 반응표면법

실험계획법의 한 가지로 실험에 반응을 출력 값으로 함수형태의 모델링하는 통계 기술 유형이다. 일반적으로 상호 작용을 포함하는 다항식으로 식(3)과 같이 표현된다.

$$Y = \alpha_0 + \sum_{i=1}^k \alpha_i X_i + \sum_{i \leq j}^k \alpha_{ij} X_i X_j \quad (3)$$

실험 결과를 기반으로 공정변수 A, B, C, D와 각 응답(성형각도  $\phi$ , 두께감소 t, 표면 거칠기 r)의 관계식은 Design Expert 프로그램을 사용하여 계산하였고 식(4)-식(6)로 표기하였다.

$$\begin{aligned} \phi = & 80.63 - 0.72A - 0.014B - 0.47C + 0.017D \\ & - 0.077AB + 0.12AC - 0.035AD + 0.004BC \\ & + 0.018BD - 0.015CD - 0.14A^2 + 0.044B^2 \\ & - 0.063C^2 - 0.024D^2 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} t = & 0.55 + 0.008A - 0.001B + 0.01C - 0.001D \\ & + 0.001AB - 0.01AC - 0.002AD + 0.002BC \\ & + 0.002BD - 0.001CD + 0.005A^2 + 0.002B^2 \\ & - 0.0007C^2 - 0.002D^2 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} r = & 2.18 + 0.11A - 0.042B + 0.12C + 0.042D \\ & - 0.024AB + 0.215AC - 0.14D - 0.016BC \\ & + 0.092BD - 0.01CD + 0.227A^2 - 0.0315B^2 \\ & + 0.045C^2 + 0.087D^2 \end{aligned} \quad (6)$$

**Table 4 Model summary for forming angle response**

Source	Std. Dev	R <sup>2</sup>	Adjust R <sup>2</sup>	Predict R <sup>2</sup>	Suggested
Linear	0.164	0.9429	0.9325	0.9135	
2FI	0.167	0.9567	0.9296	0.8811	
Quadratic	0.149	0.9741	0.9438	0.8818	Suggested
Cubic	0.173	0.9971	0.9249		Aliased

성형각도에 대한 관계식으로 Table 4 에 표기하였다. 통계적 신뢰성을 검증하기 위해서 결정계수(R<sup>2</sup>)을 사용한다. R<sup>2</sup>은 0 과 1 사이의 값을 가지며, 상관관계가 클수록 1 에 가까워진다. 그러나 R<sup>2</sup>은 공정변수증가에 따라 값이 커지는 단점이 있어, 조정 결정계수(Adjust R<sup>2</sup>)를 사용하여 회귀모형을 결정하였다. Table 4 을 기반으로 2 차 회귀모형을 선택하였고, 식(4)는 성형각도를 2 차 회귀방정식으로 표현하였다. 회귀모형에 대한 분산분석을 부록 Table 5 에 표기하였다. 유의수준을 95%로 설정하여 P 값이 0.05 보다 작아야 공정변수에 영향력이 있다고 판단한다. 성형각도 모델의 P 값이 0.0001 이므로 유의하고, 독립변수 A, C 는 0.05 보다 작으므로 유의하다.

**Table 6 Model summary for thickness response**

Source	Std. Dev	R <sup>2</sup>	Adjust R <sup>2</sup>	Predict R <sup>2</sup>	Suggested
Linear	0.004	0.8368	0.8071	0.7534	
2FI	0.004	0.8861	0.8149	0.6885	
Quadratic	0.003	0.9533	0.8987	0.7529	Suggested
Cubic	0.001	0.9994	0.9837		Aliased

두께감소에 대한 관계식을 Table 6에 표기하였고, 2 차 회귀모형으로 결정하였다. 식(5)와 같이 회귀방정식으로 표현하였다. 회귀모형에 대한 분산분석을 부록 Table 7에 표기하였다. 두께감소 모델의 P 값은 유의하고, 독립변수 A, C 가 유의하다.

**Table 8 Model summary for roughness response**

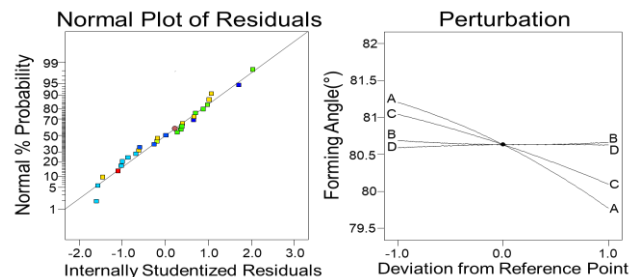
Source	Std. Dev	R <sup>2</sup>	Adjust R <sup>2</sup>	Predict R <sup>2</sup>	Suggested
Linear	0.225	0.3508	0.2327	0.0304	
2FI	0.216	0.5646	0.2924	-0.196	
Quadratic	0.179	0.7775	0.518	0.0384	Suggested
Cubic	0.169	0.9833	0.5659		Aliased

표면 거칠기에 대한 관계식을 Table 8 에 표기하였고, 2 차 회귀모형으로 결정하였다. 식(6)과 같이 회귀방정식으로 표현하였다. 회귀모형의 분산분석을 부록 Table 9 에 표기하였다. 표면거칠기 모델의 P 값은 유의하다. 독립변수 A 는 0.05 에 근사하게 관찰되고, 독립변수 C 는 유의하다.

3.2 공정변수의 영향 분석

Fig. 6(a)는 성형각도 잔차의 정규 확률 그래프이다. 잔차는 회귀모형을 통한 실험 값과 예측 값의 차이를 나타내며, 정규분포라면 값들은 직선에 근사하게 나타난다. 성형각도에 대한 잔차는 정규분포를 따르는 것으로 판단된다. Fig. 6(b)는 성형각도에 영향을 주는 공정변수를 비교하는 그래프이다. 선택한 공정변수는 Level 에 따라 변경하고, 제외한 나머지는 유지한다. 성형각도에 대해 A, C 가 영향을 크게 미치는 것으로 판단된다.

성형각도는 공구 직경이 작으면 접촉하는 구간이 작고 밀집되어 변형률이 높아지고, Z 방향 피치가 작으면 공구가 성형할 때 인장력이 줄어들어 판재를 당기는 힘이 감소한다.



**Fig. 6 Residual normal plot(a) and Perturbation plot(b) of forming angle**

Fig. 7(a)는 두께감소 잔차의 정규 확률 그래프이고, 두께감소에 대한 잔차는 정규분포를 따르는 것으로 판단된다. Fig. 7(b)는 두께감소에 영향을 주는 공정변수를 비교하는 그래프이고, 두께감소는 A, C 가 영향을 크게 미치는 것으로 판단된다.

두께감소는 공구 직경이 크면 공구 이동과 공구 회전속도에 의한 마찰로 인해 접촉구간에 판재의 온도가 증가하여 판재의 연성이 증가하고, Z 방향 피치가 크면 성형 시에 갑작스런 판재의 인장력이 증가하여 두께감소가 더 크게 일어난다.

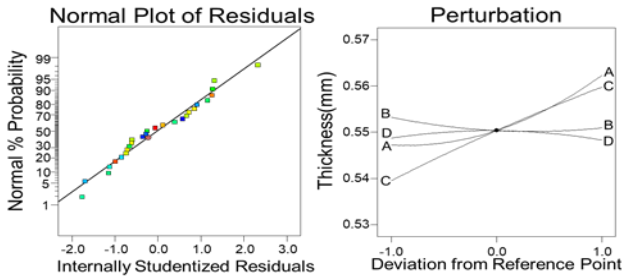


Fig. 7 Residual normal plot(a) and Perturbation plot(b) of thickness

Fig. 8(a)는 표면 거칠기 잔차의 정규 확률 그래프이고, 표면 거칠기에 대한 잔차는 정규분포를 따르는 것으로 판단된다. Fig. 8(b)는 표면 거칠기에 영향을 주는 공정변수를 비교하는 그래프이고, 표면 거칠기는 A, C가 영향을 크게 미치는 것으로 판단된다. 표면 거칠기는 공구 직경이 크면 접촉면적에 따른 소성변형이 더 크게 일어나고, Z 방향 피치가 크면 Z 방향 공구 이동에 따른 공구와 공구 사이가 멀어지고, 성형되지 않는 영역이 증가하여 표면 거칠기가 증가한다.

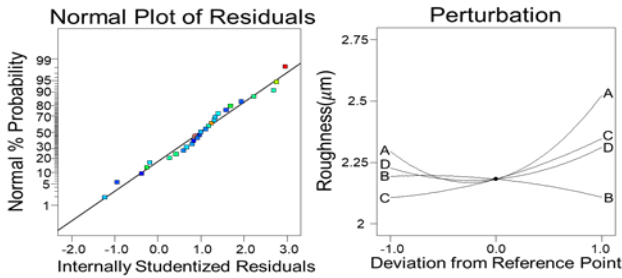


Fig. 8 Residual normal plot(a) and Perturbation plot(b) of roughness

### 3.3 다중 목적 최적화 (Multi-objective optimization)

다중 목적 최적화는 목적 함수가 둘 이상인 경우 최적화하는 방법으로 파레토 최적기법을 이용하여 구하였다. 본 연구에서의 최대 성형각도, 최소 두께 감소, 최소 표면 거칠기 값을 최적화하여 Table 10에 나타내었다. 공구 직경 6mm, 공구 회전속도 180rpm, Z 방향 피치 0.58mm, 공구 이송속도 520mm/min 이고 최적변수를 이용하여 실험을 통해 얻을 수 있는 값은 성형각도 80.705°, 두께 0.559mm, 표면 거칠기 2.119μm으로 예측하였다.

Table 10 Result of multi-objective optimization

Tool size (mm)	Spindle Speed (rpm)	Step depth (mm)	Feed rate (mm/min)
6	180	0.58	180
Forming angle(°)		80.705	
Thickness(mm)		0.559	
Roughness(μm)		2.119	

Table 10 처럼 예측된 값을 통해 검증실험을 실시하였다. 검증실험 결과는 성형각도 80.243°, 두께 0.552mm, 표면거칠기 2.208 μm 이다. 최적화된 예측값과 비교하면 2% 정도의 오차를 보이며 예측 값에 대한 비교적 정확한 검증실험 결과를 보였다.

## 4. 결론

본 연구는 Al5052-H32 소재 1mm 두께의 판재를 이용하여 VWACF 모델 점진성형을 실시하였다. 공구 직경, 공구 회전속도, Z 방향 피치, 공구 이송속도를 공정변수로 하여 목적함수를 성형각도, 두께감소, 표면 거칠기로 설정하였다. 분산분석을 통해 공정변수의 영향을 평가하였고, 다중 목적 최적화하였다.

- (1) 실험결과로부터 2차회귀모형(Quadratic)으로 결정되었고, 분산분석(ANOVA)를 통해 성형각도, 두께감소, 표면 거칠기에 모두 적합한 것을 볼 수 있다.
- (2) 반응표면법 분석결과에 따르면 공구 직경과 Z 방향 피치의 영향이 가장 크고, 공구 이송속도의 영향은 작다. 공구 직경과 Z 방향 피치가 클수록 최대 성형각도 감소, 두께감소 증가, 표면 거칠기가 증가한다.
- (3) 성형각도, 두께감소, 표면 거칠기 분석결과를 다중 목적 최적화를 이용하여 최적해를 구하였다. 그 결과, 공구 직경 6mm, 공구 회전속도 180rpm, 공구 이송속도 180mm/min, Z 방향 피치 0.58mm 일 때, 최적화된 결과를 얻을 수 있다.

## 후 기

이 논문은 2021 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원으로 수행하였다. (NRF-2020R1A2C1011224)

**Table 3 Design of experiment and measured response results**

Exp. no	A	B	C	D	Forming angle (°)	Thick ness (mm)	Rough ness (μm)
1	1	0	0	-1	79.704	0.561	2.551
2	0	0	-1	-1	80.969	0.536	2.137
3	0	-1	1	0	79.974	0.559	2.141
4	1	0	1	0	79.541	0.569	3.122
5	0	0	1	-1	79.974	0.561	2.426
6	1	-1	1	0	79.541	0.567	2.97
7	-1	0	0	-1	81.169	0.542	2.192
8	-1	0	0	1	81.169	0.548	2.769
9	-1	0	1	0	80.769	0.558	2.201
10	-1	-1	0	0	81.169	0.551	2.329
11	0	-1	0	-1	80.704	0.558	2.471
12	1	0	-1	0	79.974	0.557	2.285
13	0	-1	-1	0	81.169	0.541	2.083
14	0	1	1	0	79.974	0.565	2.232
15	-1	0	-1	0	81.624	0.535	2.288
16	0	0	0	0	80.704	0.548	2.197
17	0	0	-1	1	81.169	0.538	2.077
18	0	1	0	-1	80.704	0.545	2.143
19	0	1	0	1	80.704	0.547	2.289
20	-1	1	1	1	80.769	0.56	2.484
21	0	-1	0	1	80.704	0.552	2.27
22	0	1	-1	0	81.169	0.54	2.16
23	1	1	0	-1	79.704	0.563	2.444
24	0	0	1	1	79.974	0.558	2.55
25	1	0	-1	1	79.974	0.55	2.425
26	-1	1	0	0	81.169	0.549	2.246
27	1	0	0	1	79.704	0.56	2.264

**Table 5 ANOVA analysis for forming angle model**

Source	df	Sum of Squares	Mean Square	F-Value	P-value Prob>F
Model	14	10.0953	0.7211	32.179	0.0001
A-A	1	5.8934	5.8934	262.996	0.0001
B-B	1	0.002	0.002	0.09	0.7694
C-C	1	2.9176	2.9176	130.199	0.0001
D-D	1	0.0038	0.0038	0.173	0.6843
AB	1	0.0208	0.0208	0.929	0.3542
AC	1	0.0744	0.0744	3.322	0.0933

AD	1	0.0067	0.0067	0.299	0.5944
BC	1	0.0001	0.0001	0.004	0.9494
BD	1	0.0015	0.0015	0.067	0.8001
CD	1	0.0011	0.0011	0.051	0.8243
A <sup>2</sup>	1	0.1071	0.1071	4.781	0.0493
B <sup>2</sup>	1	0.009	0.009	0.404	0.5367
C <sup>2</sup>	1	0.0164	0.0164	0.734	0.4082
D <sup>2</sup>	1	0.0024	0.0024	0.108	0.748
Residual	12	0.2689	0.0224		
Cor Total	26	10.3642			

**Table 7 ANOVA analysis for thickness reduction model**

Source	df	Sum of Squares	Mean Square	F-Value	P-value Prob>F
Model	14	0.00237	0.00017	17.476	0.0001
A-A	1	0.00065	0.00065	66.9	0.0001
B-B	1	0.00001	0.00001	1.464	0.2495
C-C	1	0.00134	0.00134	137.941	0.0001
D-D	1	0.00001	0.00001	0.057	0.8156
AB	1	0.00006	0.00006	0.615	0.4481
AC	1	0.00004	0.00004	3.83	0.074
AD	1	0.00002	0.00002	2.007	0.1819
BC	1	0.00002	0.00002	1.871	0.1964
BD	1	0.00001	0.00001	1.4	0.2597
CD	1	0.00001	0.00001	0.674	0.4276
A <sup>2</sup>	1	0.0001	0.0001	10.42	0.0072
B <sup>2</sup>	1	0.00014	0.00014	1.43	0.2549
C <sup>2</sup>	1	0.00001	0.00001	0.219	0.6480
D <sup>2</sup>	1	0.00001	0.00001	1.481	0.2469
Residual	12	0.00012	0.00001		
Cor Total	26	0.00249			

**Table 9 ANOVA analysis for roughness model**

Source	df	Sum of Squares	Mean Square	F-Value	P-value Prob>F
Model	14	1.3379	0.0955	2.996	0.032
A-A	1	0.1487	0.1487	4.663	0.0517
B-B	1	0.0198	0.0198	0.622	0.4455
C-C	1	0.1868	0.1868	5.858	0.0323
D-D	1	0.0226	0.0226	0.711	0.4155
AB	1	0.002	0.002	0.064	0.804
AC	1	0.2281	0.2281	7.151	0.0202
AD	1	0.1056	0.1056	3.312	0.0937

BC	1	0.0012	0.0012	0.039	0.8466
BD	1	0.0393	0.0393	1.234	0.2888
CD	1	0.0007	0.0007	0.023	0.8818
$A^2$	1	0.2625	0.2625	8.231	0.0141
$B^2$	1	0.0045	0.0045	0.144	0.7113
$C^2$	1	0.0082	0.0082	0.258	0.6209
$D^2$	1	0.0316	0.0316	0.993	0.3387
Residual	12	0.3828	0.0319		
Cor Total	26	1.7207			

## REFERENCES

- [1] H. Iseki, K. Kato, S. Sakamoto, 1992, Flexible and Incremental Sheet Metal Bulging Using a Path-Controlled Spherical Roller, *Trans. Jpn. Soc. mech. Eng. Ser. C*, Vol. 58, No. 554, pp. 3147~3155, DOI: 10.1299/kikaic.62.1600.
- [2] H. Ham, J. Jeswiet, 2006, Single Point Incremental Forming and the Forming Criteria for AA3003, *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, Vol. 55, No. 1, pp. 241~244, DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60407-7.
- [3] A. Bhattacharya, K. Maneesh, N. Venkata Reddy, J. Cao, 2011, Formability and Surface Finish Studies in Single Point Incremental Forming, *J. Manuf. Sci. Eng.*, Vol. 133, No. 6, pp. 061020, DOI: 10.1115/1.40054.58.
- [4] T. Obikawa, T. Hakuyani, T. Sekine, S. Numajiri, T. Matsumura, M. Yoshino, 2010, Single-Point Incremental Micro-Forming of Thin Shell Products Utilizing High Formability, *J. Adv. Mech. Des. Syst. Manuf.*, Vol. 4, No. 6, pp. 1145~1156, DOI: 10.1299/jamdsm.4.1145
- [5] J. Cao, R. Malhotra, 2015, System and Method for Accumulative Double Sided Incremental Forming, US Patent 13/654,071.
- [6] X. Xiao, C. I. Kim, X. D. Lv, T. S. Hwang, Y. S. Kim, 2019, Formability and forming force in incremental sheet forming of AA7075-T6 at different temperatures, *J. Mech. Sci. Technol.*, Vol. 33, No. 8, pp. 3795~3802, DOI: 10.1007/s12206-019-0722-2
- [7] Y. S. Kim, D. C. An, S. H. Yang, 2015, Hybrid incremental sheet forming apparatus and incremental sheet forming method, KS Patent 10-2014-0138901.
- [8] J. Jeswiet, F. Micari, G. Hirt, A. Bramley, J. Duflou, J. Allwood, 2005, Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal, *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, Vol. 54, No. 2, pp. 88~114, DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60021-3.
- [9] J. G. Park, J. J. Kim, C. D. Park, B. J. Kim, Y. S. Kim, 2019, A Review of Various Incremental Forming Processes and Mechanisms, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 28, No. 5, pp. 294~310.
- [10] F. C. Minutolo, M. Durante, A. Formisan, A. Langella, 2007, Evaluation of the maximum slope angle of simple geometries carried out by incremental forming process, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 194, Nos. 1~3, pp. 145~150, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.04.109.
- [11] J. G. Kang, J. Y. Jung, 2015, Effective Process Parameters on Shape Dimensional Accuracy in Incremental Sheet Metal Forming, *J. Soc. Kor. Ind. Syst. Eng.*, Vol. 38, No. 4, pp. 177~183, DOI: 10.11627/jkise.2015.38.4.177.
- [12] J. Leon, D. Salcedo, C. Ciurriz, C. J. Luis, J. P. Fuertes, I. Puertas, R. Luri, 2013, Analysis of the Influence of Geometrical Parameters on the Mechanical Properties of Incremental Sheet Forming Parts, *Procedia Eng.*, Vol. 63, pp. 445~453, DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.206.
- [13] Y. H. Kim, J. J. Park, 2002, Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal, *J. Mater. Process. Technol.*, Vols. 130~131, pp. 42~46, DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00788-4.
- [14] J. H. Lee, G. I. Lee, M. S. Jeong, K. S. Jung, C. W. Lee, 2019, Analysis of Formability and Wrinkle Formation according to the Thickness of Ultra-thin Stainless Steel in the Incremental Sheet forming Process, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 28, No. 6, pp. 328~334, DOI: 10.5228/KSTP.2019.28.6.328
- [15] T. McAnulty, J. Jeswiet, M. Doolan, 2017, Formability in single point incremental forming: A comparative analysis of the state of the art, *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, Vol. 16, pp. 43~54, DOI:

- 10.1016/j.cirpj.2016.07.003Get.
- [16] V. C. Do, X. Xiao, Y. S. Kim, 2016, Multi Response Optimization to Study Single Point Incremental Forming of Al5052-O Sheet, Trans. Master. Process., pp 103~107
- [17] M. Hani, G. M. Hossein, E. Sanad, M. S. Ehsan, 2018, Optimization of two-point incremental forming process of AA1050 through response surface methodology, Meas., Vol. 127, pp. 21~28, DOI: 10.1016/j.measurement.2018.04.042.
- [18] J. Jeswiet, D. Adams, M. Doolan, T. McAnulty, P. Gupta, 2015, Single point and asymmetric incremental forming, Adv. Manuf., Vol. 3, No. 4, pp. 253~262, DOI: 10.1007/s40436-015-0126-1.
- [19] K. B. Lee, H. M. Oh, J. G. Kang, 2013, Forming Accuracy Comparison Between Positive and Negative Incremental Forming Al 1050, J. Kor. Soc. Manuf. Technol. Eng., Vol. 22, No. 5, pp. 800~805, DOI: 10.7735/ksmte.2013.22.5.800.