

반응표면법-역전파신경망을 이용한 AA5052 판재 점진성형 공정변수 모델링 및 유전 알고리즘을 이용한 다목적 최적화

오세현¹ · 샤오샤오¹ · 김영석^{2, #}

Modeling of AA5052 Sheet Incremental Sheet Forming Process Using RSM-BPNN and Multi-optimization Using Genetic Algorithms

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

(Received May 3, 2021 / Revised May 27, 2021 / Accepted May 28, 2021)

Abstract

In this study, response surface method (RSM), back propagation neural network (BPNN), and genetic algorithm (GA) were used for modeling and multi-objective optimization of the parameters of AA5052-H32 in incremental sheet forming (ISF). The goal of optimization is to determine the maximum forming angle and minimum surface roughness, while varying the 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 and BPNN model to model the variations in the forming angle and surface roughness based on variations in process parameters. Subsequently, the RSM model was used as the fitness function for multi-objective optimization of the ISF process the GA. The results showed that RSM and BPNN can be effectively used to control the forming angle and surface roughness. The optimized Pareto front produced by the GA can be utilized as a rational design guide for practical applications of AA5052 in the ISF process

Keywords: Incremental Sheet Forming, Response Surface Method, Back Propagation Neural Network, Genetic Algorithm

1. 서론

점진성형(Incremental Sheet Forming, ISF)은 간단한 공구를 이용하여 판재를 국부적인 소성변형을 가하여 금형없이 점차적으로 성형하는 기술로 미국에서 특허를 출원하였고[1], 컴퓨터 수치제어 기술의 발달에 따라 CNC 머신을 이용한 점진성형 기법을 도입하였다 [2]. Fig. 1 에 점진성형에 대해 나타냈다. 공구를 CNC 머신의 척에 장착하고 판재의 외각을 고정 한 후 입력된 G-code 에 따라 공구가 이동하면서 형상을 성형한다. 점진성형은 프레스 성형에 비해 금속 판재의 성형성이 크고 금형없이 생산가능한 부

분에서 비용 및 시간절감의 큰 장점이 있다 [3]. 최근 많은 점진성형 관련된 연구가 활발하게 진행되고 있고, Park 등[4]은 다양한 점진성형 방법과 메커니즘 기술하였고, 점진성형(ISF)의 유한요소해석을 실시하였다.

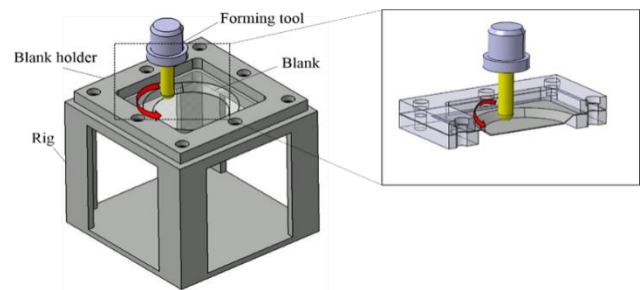


Fig. 1 Single point incremental sheet forming 3D section view

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

유연하고 다품종 소량생산에는 점진적 판재성형 등이 큰 잠재력이 있음을 알 수 있다. 이러한 이유로 점진성형을 기반으로 미세 점진성형(Micro ISF) [5], 고온 점진성형(Heat assisted ISF) [6], 하이브리드 점진성형 [7], 용사 기술(Thermal spraying)을 이용하여 성형 전에 판재에 도포하였고, 성형력 감소와 성형이 증가 되었다 [8]. 이처럼 점진성형에 여러가지 방법을 접목시키고 있다.

점진성형에서 공정변수의 영향에 대한 평가가 이루어졌다. 성형성은 공구 회전속도의 증가함에 따라 향상되고, 공구 직경이 작을수록 성형성이 향상될 수 있지만 스프링백 및 표면 거칠기가 증가하여 성형품의 형상 정밀도가 떨어졌다. 또한, Z 방향 피치가 줄어들면 성형성이 향상되고 스프링백도 줄일 수 있지만 성형시간이 증가하는 단점이 있었다 [9]. 따라서 성형성과 품질을 달성하기 위해 여러가지 공정 변수들에 대한 최적화가 필요하다고 판단하였다.

실험을 기반으로 점진성형의 공정변수를 최적화하기 위한 다양한 방법이 사용되고 있다. Xiao 등[10]은 그레이 관계형 분석(Grey relational analysis, GRA)을 이용하여 CP Ti 판재의 점진성형에 대한 공정변수를 최적화하였다. 다구찌 방법(Taguchi method)의 직교 배열을 이용하여 실험을 계획하였고, 그레이 관계형 분석을 이용해서 공정변수를 최적화하였다. 또한, 역전파신경망(Back Propagation Neural Network, BPNN)-유전알고리즘(Genetic Algorithm, GA)을 이용하여 최대 성형각도에 대한 공정변수를 최적화하였고, 검증율 통해 1% 미만의 오차를 갖는 것으로 확인하였다 [11]. 반응표면법(Response Surface Method, RSM)을 이용하여 공정변수(공구 직경, 공구 회전속도, Z 방향 피치, 공구 이송속도)를 설정하여 목적함수(성형성, 두께 감소, 표면 거칠기)에 대한 다목적 최적화(Multi-objective optimization)을 수행하였고, 최적화된 공정변수를 이용하여 검증하였다 [12].

최근에는 효율적인 면에 있어, 경량 소재에 대한 관심이 크다. 따라서, 본 연구는 B-B 설계법(Box-Behnken Design, BBD)을 바탕으로 설계, 반응표면법(RSM)을 이용하여 각 변수들(공구 직경, 공구 회전속도, Z 방향 피치, 공구 이송속도)의 점진성형에서 목적함수(성형각도, 표면 거칠기)에 대한 영향평가와 역전파신경망을 통해 목적함수들을 예측하고, 반응표면법(RSM)과 유전알고리즘(GA)을 이용하여 공정변수의 다목적 최적화를 목표로 한다.

2. 실험 및 측정

2.1 실험설계

본 연구에는 두께 1mm 인 AA5052-H32 판재를 실험하였고, Table 1 에 재료 물성을 표기하였다.

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

공정변수에 따른 점진성형에서 미치는 영향에 대한 연구가 이루어졌다 [13]. 본 연구에서는 4 개의 공정변수를 선택하였고, Table 2 에 공정변수와 수준을 표기하였다. 부록 Table 3 에 BBD 를 이용한 실험설계와 결과를 표기하였다.

2.2 최대 성형각도 평가

본 연구에서 최대 성형각도 평가를 위하여 Fig. 2 의 원뿔절두체(Variable Wall Angle Conical Frustum, VWACF)[14] 모델을 이용하였다. 본 모델에서 성형각도는 40°부터 90°까지 증가하며, 밀면이 파단 할 때까지 성형하여 식(1)과 식(2)를 통해 최대 성형각도 ϕ 를 계산할 수 있다.

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

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

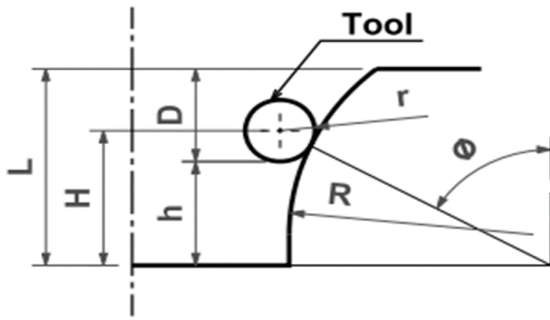


Fig. 2 Wall angle calculation according to tool position

2.3 표면 거칠기 평가

표면 거칠기는 공구 비접촉면이 더 우수하여 표면 품질 확보에 더 유리한 결과를 얻었다 [15]. 따라서, 본 연구에서는 공구 비접촉면의 Fig. 3(a)의 바닥면을 기준으로 7.5mm, 15mm 위치의 표면 거칠기를 공초점 레이저 주사 현미경을 이용하여 측정하였다. 임의의 세 점을 중심선 평균 거칠기(Ra)값으로 측정하여 두 구간의 평균값을 이용하였다. Fig. 3(b)는 측정한 표면이다.

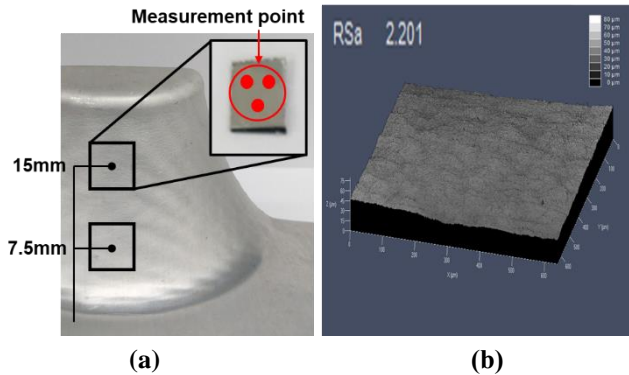


Fig. 3 Measurement section of roughness (a), Measured topographic of specimen No.9 (b)

3. 최적화

3.1 반응표면법

실험계획법의 한 가지로 실험결과를 함수형태의 출력값으로 모델링하는 통계 기술 유형이다. 식(3)처럼 상호 작용을 포함하는 다항식이고, 결과를 통해 공정변수가 목적함수에 미치는 영향을 파악할 수 있는 장점이 있다. X는 공정변수, Y는 목적함수이다.

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

실험 결과를 기반으로 공정변수 A, B, C, D와 목적함수(성형각도 ϕ , 표면 거칠기 r)의 관계식을 식(4), 식(5)로 표기하였고, Design Expert 10을 이용하여 분산분석(ANOVA)을 실시하였다.

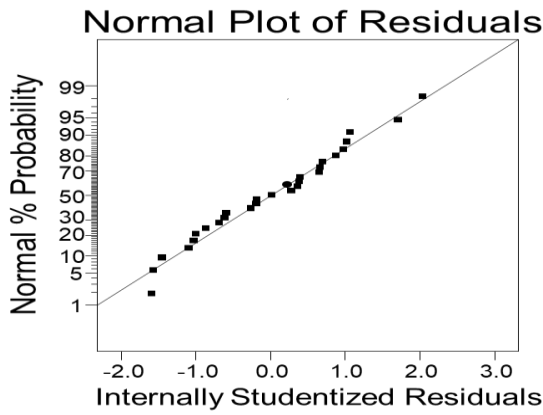
$$\begin{aligned} \phi = & 80.63 - 0.72A - 0.014B - 0.47C + 0.017D \\ & - 0.077AB + 0.12AC - 0.035AD + 0.004BC \\ & + 0.018BD - 0.015CD - 0.14A^2 + 0.044B^2 \\ & - 0.063C^2 - 0.024D^2 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} r = & 2.18 + 0.11A - 0.042B + 0.12C + 0.042D \\ & - 0.024AB + 0.215AC - 0.14AD - 0.016BC \\ & + 0.092BD - 0.01CD + 0.227A^2 - 0.0315B^2 \\ & + 0.045C^2 + 0.087D^2 \end{aligned} \quad (5)$$

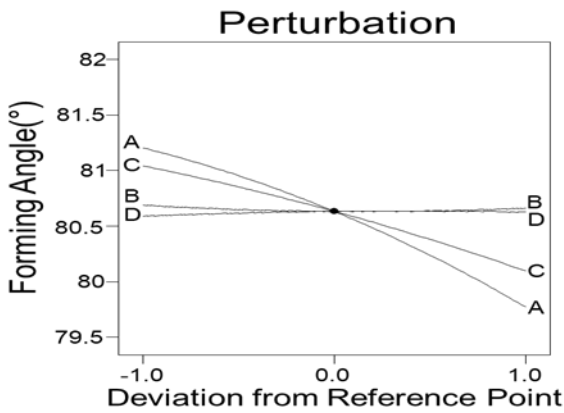
통계적 검증을 위해 결정계수(R^2)를 사용한다. 그러나 R^2 는 공정변수 증가에 따라 값이 커지는 단점이 있어, 조정 결정계수(Adjust R^2)를 사용하여 회귀모형을 결정하였다. 성형각도와 표면 거칠기에 대한 회귀방정식은 2차 회귀방정식(Quadratic)을 선택하였고, 식(4)와 식(5)에 표기하였다. 유의수준을 95%로 설정하여 모델의 P 값이 0.05 보다 작아야 영향력 있음을 판단하였고, 성형각도와 표면 거칠기에 대한 분산분석은 부록 Table 4와 Table 5에 표기하였다. 두 모델의 $P < 0.05$ 이므로 유의하고, 공정변수 A, C가 $P < 0.05$ 또는 근사함으로 유의하다.

3.2 공정변수의 영향 분석

Fig. 4(a)와 Fig 5(a)는 성형각도와 표면 거칠기에 대한 잔차의 정규 확률 그래프이다. 잔차는 회귀모형을 통한 실험값과 예측값의 차이를 나타내고, 정규분포라면 잔차는 직선에 근사하게 나타난다. Fig. 4(b)와 Fig. 5(b)는 성형각도와 표면 거칠기에 영향을 주는 공정변수를 비교하는 그래프이고, 수준에 따른 값의 차이가 클수록 영향이 큰 것을 확인할 수 있다. 성형각도와 표면 거칠기의 잔차들은 직선에 근사한 것을 확인할 수 있고, 공정변수 A와 C의 영향이 큰 것을 확인할 수 있다.



(a)



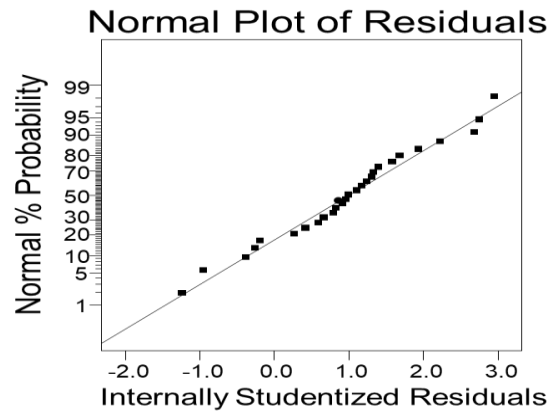
(b)

Fig. 4 Residual normal plot(a) and Perturbation plot(b) of forming angle

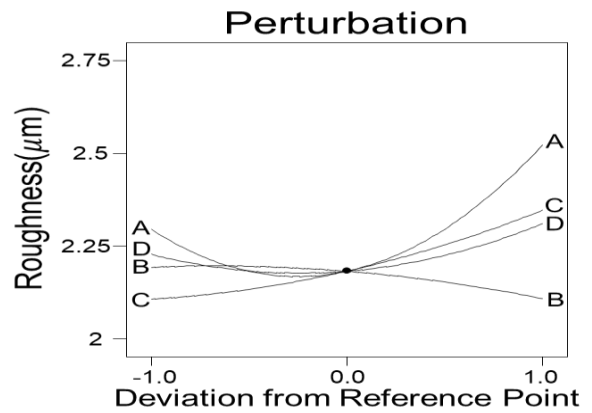
점진성형에서 성형각도는 공구 직경이 작으면 접촉하는 구간이 작아 밀집되어 응력이 집중되고, Z 방향 피치가 작으면 공구가 성형할 때 판재를 당기는 힘이 감소한다. 표면 거칠기는 공구 직경이 크면 접촉면적에 따른 소성변형이 더 발생하고, Z 방향 피치가 크면 Z 방향 공구 이동에 따른 공구와 공구 간 거리가 더 멀어지게 되어 표면 거칠기가 증가한다.

Table 6 Optimization results using RSM

Tool size (mm)	Spindle Speed (rpm)	Step depth (mm)	Feed rate (mm/min)
7	105	0.29	544
Forming angle (°)		81.272	
Roughness (μm)		2.270	



(a)



(b)

Fig. 5 Residual normal plot(a) and Perturbation plot(b) of roughness

Table 6 은 반응표면법을 이용하여 최대 성형각도, 표면 거칠기의 다목적 최적화 결과이다.

3.3 역전파신경망

인공신경망 기법은 Fig. 6 처럼 입력층, 은닉층, 출력층으로 구성되고, 식(6)과 같은 가중합의 형태이다.

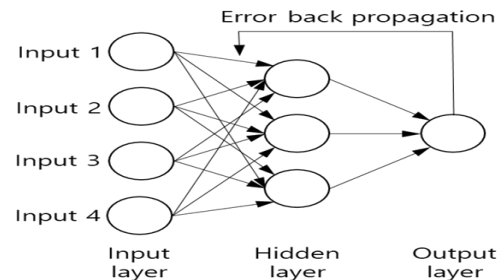


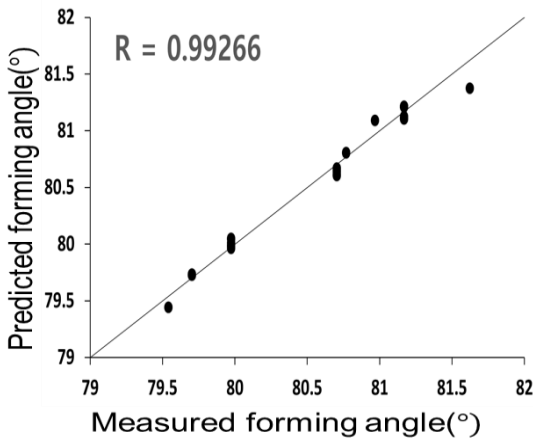
Fig. 6 Process of BPNN algorithm

$$net_k = b + w^T = b_k + \sum w_{kj}x_j \quad (6)$$

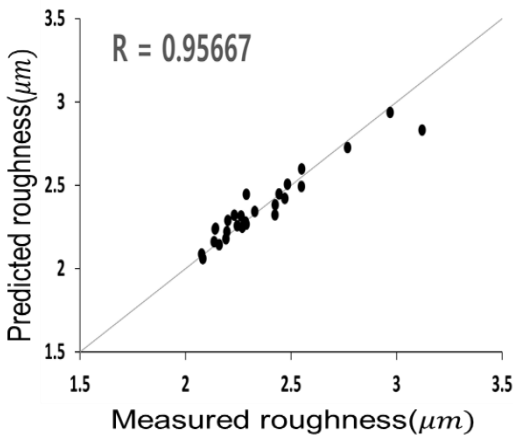
k 와 j 는 은닉층과 입력변수의 개수이며, 활성화 함수는 식(7)과 같이 Sigmoid 함수를 사용하였다.

$$f(net_k) = \frac{1}{1 + e^{-net_k}} \quad (7)$$

$$w_{i+1} = w_i - \{J^T J + \mu_i \text{diag}(J^T J)\}^{-1} J^T n \quad (8)$$



(a)



(b)

Fig. 7 Result of correlation coefficients data : forming angle (a) and roughness (b)

예측된 성형각도, 표면 거칠기를 실제 실험값과 비교하기 위해 평균제곱오차(Mean square error, MSE)를 이용하였다. 식(8)의 Levenberg-Marquardt 기법을 사용하여 예측값과 실제값의 오차를 줄이기 위해 가중치 w 를 지속적으로 업데이트하고, μ 감소지수 (damping factor)에 따라 경사하강법(Gradient descent method)과 가우스-뉴턴법(Gauss-Newton method)에 유사하여 수렴성과 수렴속도가 우수하다 [16]. 식(8)에서 J는 Jacobian 행렬, n 은 잔차를 의미한다.

역전파신경망은 Matlab 프로그램을 이용하여 구성하였다. 은닉층은 10 개로 설정하였고, 실험결과 27개의 70%는 신경망학습, 15%는 검증 데이터, 나머지 15%는 결과 비교 데이터로 설정하여 무작위로 배분하였다.

Fig. 7에 성형각도와 표면 거칠기에 대한 역전파신경망 결과는 상관계수 R을 이용하여 나타냈고, 0.95 이상의 정확도를 확인할 수 있다. 부록 Table 7에 역전파신경망을 통해 얻은 성형각도와 표면 거칠기의 예측값과 실험값을 표기하였다.

3.4 유전알고리즘

서로 다른 두 조건에 대한 최적해를 찾는 것이 다목적 최적화이고, 공정변수 수준의 변화에 따라 목적함수의 결과값이 달라진다. 다목적 최적화에는 파레토 프론티어(Pareto frontier)방법 중 non-dominated solution 을 이용하였고 [17], 유전알고리즘과 연결한 NSGAI(non-dominated sorting genetic algorithm)의 알고리즘을 Fig. 8 에 나타냈다.

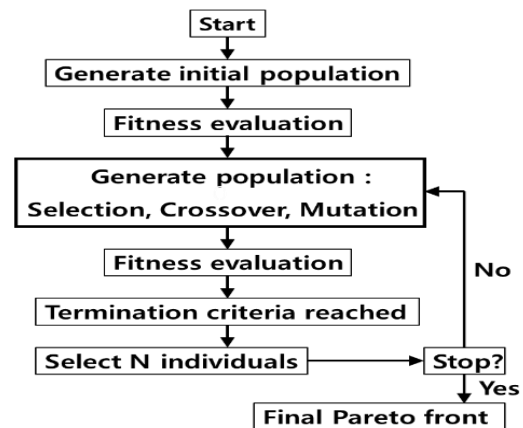


Fig. 8 Process of the NSGA II

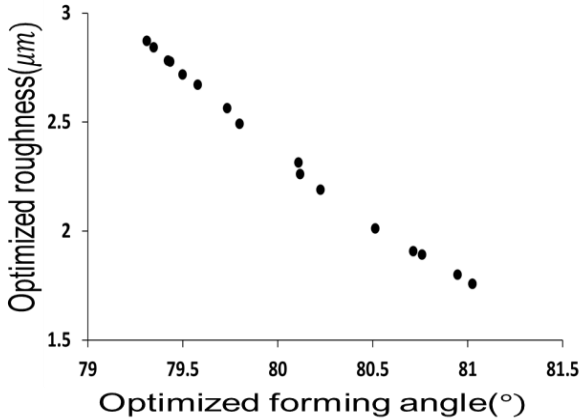


Fig. 9 Pareto front of optimal process outputs

실험은 모집단 100, 변이확률 0.007, 교차율 0.5, 세대 400 로 하여 진행하였고, Fig. 9 에 다목적 최적화된 공정변수를 통해 얻은 최대 성형각도와 표면 거칠기의 관계를 나타냈다. 부록 Table 8 에는 다목적 최적화된 최대 성형각도와 표면 거칠기의 결과값을 표기하였다.

Table 9 Result of multi-objective optimization

Method	RSM	NSGA II
Tool size(mm)	7	8
Spindle speed(rpm)	105	178
Step depth(mm)	0.29	0.23
Feed rate(mm/min)	544	423
Forming angle (°)	81.272	81.024
Roughness (μm)	2.270	1.758

Table 9 에 다목적 최적화된 공정변수를 통해 얻은 최대 성형각도, 표면 거칠기에 대한 예측 결과값들을 표기하였고, 다양한 최적화 기법을 활용하여 최적해를 얻을 수 있음을 확인하였다 [18].

4. 결론

본 연구는 AA5052-H32 소재 1mm 두께의 판재를 이용하여 VWACF 모델 점진성형을 실시하였다. 공구

직경, 공구 회전속도, Z 방향 피치, 공구 이송속도를 공정변수로 하였고, 목적함수는 성형각도, 표면 거칠기로 설정하였다. 반응표면법, 역전파신경망, 유전 알고리즘을 이용하여 최적화하였고, 반응표면법-역전파신경망을 이용하여 최적해를 예측하였고, 이러한 수학적 관계 또는 알고리즘을 통해 메타 모델을 생성하여 시간과 비용이 많이 소모하는 실제 해석 모델에 대체할 수 있다고 판단하였다.

(1) B-B 설계법을 이용하여 반응표면법을 설계하였고, 2 차회귀모형(Quadratic)으로 결정하여 분산분석(ANOVA)를 통해 성형각도와 표면 거칠기의 모델 $P < 0.05$ 것으로 유의하였다. 분석결과에 따르면 성형각도와 표면 거칠기 모두 공구 직경과 Z 방향 피치에 대한 영향이 가장 크고, 공구 이송속도에 대한 영향은 작았다. 따라서 공구 직경이 크고 Z 방향 피치도 크면 성형각도는 감소하고 표면 거칠기는 증가한다. 다목적 최적화 결과 공구 직경 7mm, 공구 회전속도 105rpm, Z 방향 피치 0.29mm, 공구 이송속도 544mm/min 일 때 최대 성형각도 81.0272°, 최소 표면 거칠기 2.270 μm인 결과를 예측할 수 있다.

(2) 역전파신경망을 이용하여 성형각도, 표면 거칠기에 대한 예측을 수행하였다. 그 결과 상관계수가 0.95 이상으로 예측값과 실험값에 대한 높은 정확도를 얻을 수 있었다.

(3) 유전알고리즘을 이용하여 다목적 최적화를 수행하였다. 성형각도와 표면 거칠기에 대한 다목적 최적화된 결과를 파레토 프론티어로 나타냈고, 최적화된 최대 성형각도에 따른 표면 거칠기 값을 알 수 있다. 다목적 최적화 결과 공구 직경 8mm, 공구 회전속도 178rpm, Z 방향 피치 0.23mm, 공구 이송속도 423mm/min 일 때 최대 성형각도 81.024°, 최소 표면 거칠기 1.758 μm인 결과를 예측할 수 있다.

후 기

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

Table 3 B-B design and measured response results

Exp. no	A	B	C	D	Forming angle (°)	Roughness (µm)
	Law material				-	0.671
1	1	0	0	-1	79.704	2.551
2	0	0	-1	-1	80.969	2.137
3	0	-1	1	0	79.974	2.141
4	1	0	1	0	79.541	3.122
5	0	0	1	-1	79.974	2.426
6	1	-1	1	0	79.541	2.97
7	-1	0	0	-1	81.169	2.192
8	-1	0	0	1	81.169	2.769
9	-1	0	1	0	80.769	2.201
10	-1	-1	0	0	81.169	2.329
11	0	-1	0	-1	80.704	2.471
12	1	0	-1	0	79.974	2.285
13	0	-1	-1	0	81.169	2.083
14	0	1	1	0	79.974	2.232
15	-1	0	-1	0	81.624	2.288
16	0	0	0	0	80.704	2.197
17	0	0	-1	1	81.169	2.077
18	0	1	0	-1	80.704	2.143
19	0	1	0	1	80.704	2.289
20	-1	1	1	1	80.769	2.484
21	0	-1	0	1	80.704	2.27
22	0	1	-1	0	81.169	2.16
23	1	1	0	-1	79.704	2.444
24	0	0	1	1	79.974	2.55
25	1	0	-1	1	79.974	2.425
26	-1	1	0	0	81.169	2.246
27	1	0	0	1	79.704	2.264

Table 4 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 ²	1	0.1071	0.1071	4.781	0.0493
B ²	1	0.009	0.009	0.404	0.5367
C ²	1	0.0164	0.0164	0.734	0.4082
D ²	1	0.0024	0.0024	0.108	0.748
Residual	12	0.2689	0.0224		
Cor Total	26	10.3642			

Table 5 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			

Table 7 Result of back propagation neural network

Exp. no	Actual Forming Angle (°)	Predicted Forming Angle (°)	Actual Roughness (µm)	Predicted Roughness (µm)
1	79.704	79.72397	2.551	2.598102
2	80.969	81.08992	2.137	2.160817
3	79.974	79.98118	2.141	2.237523
4	79.541	79.44269	3.122	2.830999
5	79.974	79.96104	2.426	2.381573
6	79.541	79.44255	2.97	2.935623
7	81.169	81.20996	2.192	2.178359

8	81.169	81.21594	2.769	2.724569
9	80.769	80.80368	2.202	2.289375
10	81.169	81.21283	2.329	2.342428
11	80.704	80.60452	2.471	2.421465
12	79.974	80.04441	2.285	2.279002
13	81.169	81.10361	2.083	2.060156
14	79.974	79.99107	2.232	2.319931
15	81.624	81.37463	2.288	2.265734
16	80.704	80.63724	2.197	2.220633
17	81.169	81.12305	2.077	2.086225
18	80.704	80.61443	2.143	2.241998
19	80.704	80.66928	2.289	2.445696
20	80.769	80.8056	2.484	2.50531
21	80.704	80.65973	2.27	2.247458
22	81.169	81.11009	2.16	2.142848
23	79.704	79.72432	2.444	2.446998
24	79.974	80.01159	2.55	2.493436
25	79.974	80.04886	2.425	2.322107
26	81.169	81.21314	2.246	2.256245
27	79.704	79.73329	2.264	2.314509

Table 8 Pareto front of optimal process outputs

Sol. no	A (mm)	B (rpm)	C (mm)	D (mm/min)	Forming angle (°)	Rough ness (μm)
1	9.94	169	0.60	1056	79.312	2.872
2	7.97	178	0.23	423	81.024	1.758
3	8.36	176	0.30	556	80.713	1.907
4	8.95	173	0.41	739	80.225	2.189
5	9.94	169	0.60	1056	79.312	2.872
6	9.07	173	0.44	780	80.118	2.261
7	9.80	169	0.57	1035	79.434	2.777
8	8.32	176	0.29	552	80.760	1.893
9	9.42	167	0.50	891	79.799	2.493
10	9.82	169	0.58	1023	79.422	2.782
11	9.48	169	0.51	982	79.734	2.564
12	8.61	175	0.35	630	80.513	2.012
13	9.05	172	0.44	873	80.110	2.314
14	9.65	169	0.55	1009	79.579	2.671
15	8.08	177	0.25	468	80.946	1.801
16	9.74	170	0.56	994	79.499	2.718
17	9.90	169	0.59	1045	79.347	2.842
18	7.97	178	0.23	423	81.024	1.758

REFERENCES

- [1] N. Kiyoshi, K. Koji, I. Koji, 2012, Incremental forming method, US9522420B2.
- [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] J. G. Park, J. J. Kim, C. D. Park, B. J. Kim, S. H. Kim, Y. S. Kim, 2019, A Review of Various Incremental Forming Processes and Mechanisms, Trans. Mater. Process., Vol. 28, No. 5, pp. 294~310.
- [5] 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
- [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] Y. Liu, Z. Wang, Y. Li, H. Yuan, F. Li, 2021, The effect of thermal spraying on the forming performance of incremental sheet forming, J. Mater. Res. Technol., Vol. 12, pp. 776~787, DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.03.024.
- [9] 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.

- [10] X. Xiao, S. Yang, Y. S. Kim, C. I. Kim, 2019, Taguchi-Grey Relational Analysis for Multi-Response Optimization to Study Incremental Sheet Forming of CP Ti Sheets, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 43, No. 11, pp. 769~774, DOI: 10.3795/KSME-A.2019.43.11.769.
- [11] S. Yang, Y. S. Kim, 2020, Optimization of Process Parameters of Incremental Sheet Forming of Al3004 Sheet Using Genetic Algorithm-BP Neural Network, *Korea Acad. Trans. Ind. Cooperation Soc.*, Vol. 21, No. 1, pp. 560~567, DOI: 10.5762/KAIS.2020.21.1.560.
- [12] S. H. Oh, X. Xiao, Y. S. Kim, 2021, Optimization of Incremental Sheet Forming Al5052 Using Response Surface Method, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 30, No. 1, pp. 27~34, DOI: 10.5228/KSTP.2021.30.1.27.
- [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. 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.
- [15] 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.
- [16] H. P. Gavin, 2019, The Levenberg-Marquardt algorithm for nonlinear least squares curve-fitting problems, *Department Civ. Environ. Eng., Duke University*, pp. 1~15.
- [17] D. Gong, J. Sun, Z. Miao, 2018, A set-based genetic algorithm for interval many-objective optimization problems, *IEEE Trans. Evol. Comput.*, Vol. 22, No. 1, pp. 47~60.
- [18] X. Xiao, J. J. Kim, M. P. Hong, S. Yang, Y. S. Kim, 2020, RSM and BPNN Modeling in Incremental Sheet Forming Process for AA5052 Sheet: Multi-Objective Optimization Using Genetic Algorithm, *Metals*, Vol. 10, No. 8, pp. 1003, DOI: 10.3390/met10081003