

회귀분석을 활용한 비정형롤판재성형 공정의 형상 예측

박지우¹ · 윤준석¹ · 김 정¹ · 강범수[#]

Shape Prediction of Flexibly-reconfigurable Roll Forming Using Regression Analysis

J. W. Park, J. S. Yoon, J. Kim, B. S. Kang

(Received February 15, 2016 / Revised March 29, 2016 / Accepted May 2, 2016)

Abstract

Flexibly-reconfigurable roll forming (FRRF) is a novel sheet metal forming technology conducive to producing multi-curvature surfaces by controlling the strain distribution along longitudinal direction. In FRRF, a sheet metal is shaped into the desired curvature by using reconfigurable rollers and gaps between the rollers. As FRRF technology and equipment are under development, a simulation model corresponding to the physical FRRF would aid in investigating how the shape of a sheet varies with input parameters. To facilitate the investigation, the current study exploits regression analysis to construct a predictive model for the longitudinal curvature of the sheet. Variables considered as input parameters are sheet compression ratio, radius of curvature in the transverse direction, and initial blank width. Samples were generated by a three-level, three-factor full factorial design, and both convex and saddle curvatures are represented by a quadratic regression model with two-factor interactions. The fitted quadratic equations were verified numerically with R-squared values and root mean square errors.

Key Words : Flexibly-reconfigurable Roll Forming, Regression Analysis, Numerical Simulations

1. 서론

판재성형공정은 제조업이 주를 이루는 우리나라 산업에서 매우 중요한 공정이다. 일반적인 판재성형은 목적곡면의 형상에 부합하는 상하부 금형을 제작하여 프레스로 찍어낸다. 일반적인 프레스성형공정은 금형과 프레스만 있으면 간단히 판재를 성형할 수 있지만, 목적과 형태에 맞게 금형을 따로 제작을 해야 하는 단점을 가진다. 최근에는 개성을 중요시 여기는 현대적 경향에 맞게 다양한 형태의 결과물을 쉽게 제작하기 위하여 가변성형기술에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있다.

가변성형기술의 대표적인 기술중 하나인 다점성형공정은 다수의 펀치들을 배치하여 연속적인 금형을 구현할 수 있는데, 이 기술은 단 하나의 성형장치만으로도 수많은 형태의 곡면 금형을 구현할 수 있기 때문에 경제적으로 매우 우수한 기술이며 이에 대한 다양한 연구가 진행중이다[1~5]. 하지만 다점성형공정은 결과물의 크기가 성형장치의 크기에 제한을 받으며, 다수의 펀치들을 이용하기 때문에 불연속적 배치에 의한 압흔과 주름과 같은 성형 불량 발생한다는 단점이 존재한다. 앞서 설명한 단점들을 보완하기 위하여, 최근 비정형롤판재성형 (flexibly-reconfigurable roll forming)이라는 새로운 공

1. 부산대학교 항공우주공학과

Corresponding Author : Dept. of Aerospace Engineering, Pusan National University, E-mail: bskang@pusan.ac.kr

정이 Yoon과 Kang[6, 7] 등에 의해 제안되었다. 제안된 기술은 휘어지는 성형 롤러(flexible roller)와 다수의 곡률 조정 펀치(curvature adjusting punch)와 휘어지는 성형 롤러 등을 이용하여 판재를 성형하는 기술이다[7]. 본 기술은 다점성형공정에서 발생하는 단점들을 보완할 수 있으며, 길이방향으로는 성형 크기의 제한이 없다는 장점을 가진다.

이러한 비정형롤판재성형 공정은 2차원 곡선으로부터 3차원 곡면을 성형하는 기술이다. 따라서 그 형태와 결과를 직관적으로 예측하는 것이 매우 어렵기 때문에, 비정형롤판재성형 공정의 결과를 예측하기 위한 한가지 방법으로 유한요소해석을 사용한다. 유한요소해석을 이용한 결과 예측은 실제 성형 공정과 동일한 경계조건을 이용하기 때문에 높은 정밀성을 확보할 수 있는 장점이 있다. 하지만 유한요소해석을 수행하기 위해서는 모델링 및 경계조건 등을 정확히 입력하기 위한 시간적 비용이 많이 발생한다. 또한, 해석시간까지 고려해볼 때 한가지 경우의 결과를 예측하기 위해서 요구되는 시간이 짧지않다. 이러한 시간적 비용문제를 해결하기 위한 방안으로 회귀분석을 활용할 수 있다. 회귀분석이란 어떠한 독립변수들에 대한 종속변수를 선정하여 각 독립변수들의 영향성에 대해 평가하고, 종속변수값을 추정하는 통계기법이다[8]. 회귀분석을 사용하면 일정한 구간 내에서 특정 모델에 대한 결과들을 정리하여 하나의 방정식으로 표현이 가능하다. 추정된 방정식의 적합도가 높다고 가정할 수 있으면, 해당 방정식을 통해 설정된 구간 내의 모든 지점에서의 종속변수를 예측할 수 있다.

본 연구에서는 회귀분석을 수행하기 위하여 비정형롤판재성형 공정 결과물의 곡률 반경을 종속변수로 하는 3개의 독립변수를 선정하였다. 각 독립변수별로 3수준의 조건을 가정하여, 3수준-3인자 완전요인배치법을 이용하였다. 표본데이터로 사용되는 결과 곡률은 유한요소해석을 통해 획득하였으며, 2차 곡면의 가장 기본적인 형태인 안장(saddle)형과 볼록(convex)형의 경우를 각각 따로 수행하였다. 해석결과를 이용하여 기본적인 선형회귀분석을 진행하였다. 선형회귀분석 결과를 토대로 적절한 회귀분석 모델을 선정하였으며, 회귀분석모델의 회귀계수값을 획득하여 종속변수인 비정형롤판재성형 공정의 곡률 반경에 대한 예측방정식을 정리하였다.

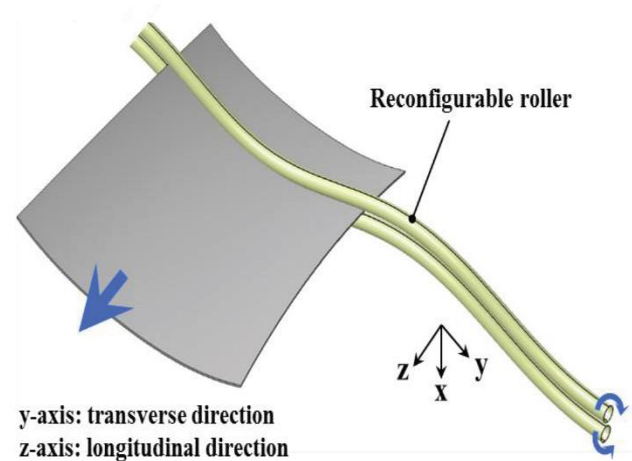


Fig. 1 Schematic illustration of FRRF

Table 1 Variables and levels

	Saddle type	Convex type
Compression ratio (tip/center)	5/1	1/5
	7/1	1/7
	10/1	1/10
Curvature radius of transvers direction	500	500
	700	700
	1000	1000
Width of blank	100	100
	125	125
	150	150

2. 유한요소해석

2.1 3수준 3인자 완전요인배치법

비정형롤판재성형 공정은 기존의 롤성형공법과 가변성형기술을 결합하여 만들어진 새로운 판재 성형 공정이다. 다점성형장비의 개별 높이 조절 장치와 유연한 롤러를 활용하여 롤러의 위치를 조절함으로써 다양한 형태의 롤러 곡률을 형성할 수 있다. 휘어지는 유연한 롤러를 아래위로 배치하고, 그 사이에 판재를 끼운 후, 회전시켜 성형을 수행한다[6]. Fig. 1에 비정형롤판재성형 공정의 개략도를 도시하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이 휘어지는 롤러 2개를 일렬로 배치한 후 판재를 집어넣고 회전시켜 성형을 수행한다. 본 공정의 기본 개념은 변형률차이에 의한 길이 차를 이용한 곡률의 형성이다. 판재

의 중심부분과 끝부분의 압축 비를 각각 다르게 주어 횡방향(y-axis) 곡률 결정하고, 결정된 횡방향 곡률에 의해 성형품의 종방향(z-axis) 곡률이 형성된다. 회귀분석을 위해 우선적으로 표본데이터가 필요하다. 표본데이터는 종속변수와 독립변수로 결정되는 값으로, 독립변수는 공정 내에서 제어할 수 있는 입력 매개변수이며, 종속변수는 독립변수에 의해 영향을 받는 값이다. 본 연구에서는 초기 판재의 횡방향 곡률반경, 판재너비, 롤러 중심과 끝부분의 압축비(끝부분압축량/중심부분압축량), 이 3가지요인을 독립변수로 선정하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 3개의 요인을 3개의 수준으로 나누어 3수준 3인자 완전요인배치법을 이용하여 표본데이터를 획득하였다. 각 형상별 독립변수 인자들의 수준은 표 1에 정리하였다.

2.2 유한요소해석 조건 및 결과

유한요소해석에 사용된 판재 소재는 1mm의 초기 두께를 가지는 Al 2024-T4이며, 이 소재는 탄성계수 73.1GPa, 포아송비(poisson's ratio) 0.33, 밀도 2.78g/cm³의 물성치를 가진다. 판재의 항복응력(yield strength)은 275MPa이고, 최대인장응력(ultimate strength)은 430MPa이다. 소성 영역은 Hollomon의 가공 경화 모델($\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n$)을 사용하였으며, 표 2에 해당 재료의 물리적 특성을 정리하였다.

해석시물레이션은 상용해석프로그램인 ABAQUS를 사용하였다. 본 공정의 경우, 크게 2개의 단계(step)로 나뉜다. 첫번째 단계는 판재의 위쪽 롤러가 아래쪽 롤러를 누르는 프레스(press) 단계이고, 두번째 단계는 롤러를 회전시켜 판재를 뽑아내는 회전(rotation) 단계이다. 롤러의 경우, 얇은 고리(ring)들을 연속적으로 배치하여 구현하였다. 모델링된 고리는 지름 10mm, 폭 2mm이며 강체(rigid body)로 가정하였다. 판재는 100×150×1mm³의 크기로 모델링하였으며, 8절점 육면체요소(8-node brick element)로 정의하였다. 롤러와 판재사이의 마찰계수는 0.1로 가정하여 해석을 수행하였으며, 이해를 돕기 위해 모델링이 완료된 공정의 사진은 Fig. 2에 도시하였다. 본 해석의 목적곡면은 2차 곡면의 형태인 안장형과 볼록형의 판재이다. 2가지 형태의 곡면은 롤러의 압축비(끝부분/중심부분)를 어떻게 선정하느냐에 따라 달라지게 되는데, 이 압축비가 1보다 큰 경우에는 안장형태의 곡면이 형성되고, 반대로 압축비가 1보

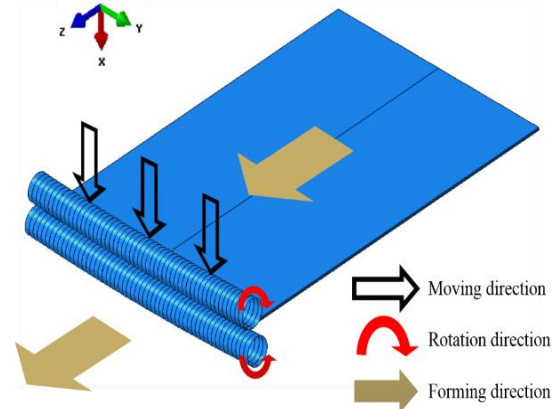


Fig. 2 Simulation modeling of FRRF process

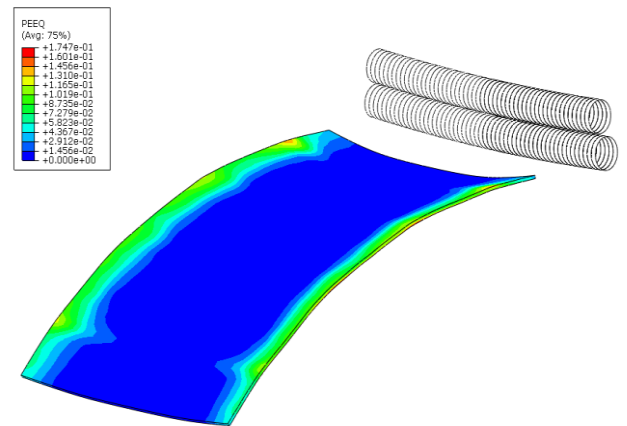


Fig. 3 Strain distribution of saddle type simulation

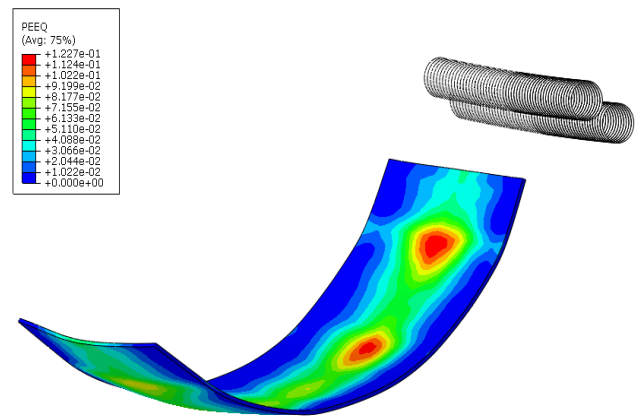


Fig. 4 Strain distribution of convex type simulation

다 작은 경우에는 볼록형태의 곡면이 형성된다. 3수준 3인자 완전요인배치법의 경우 표본데이터 개수가 27가지이고, 형태별 표본데이터가 따로 필요로 하기 때문에 총 54개의 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 3에 안장형태의 곡면을 가지는 유한요소해석 결

Table 2 Material properties of Al 2024-T4

Material property	Value	
Young's modulus (GPa)	73.10	
Poisson's ratio	0.33	
Yield strength (MPa)	275.00	
Ultimate strength (MPa)	430.00	
Density (g/cm ³)	2.78	
$\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n$	Strength coefficient, K (MPa)	690.00
	Work-hardening exponent, n	0.16

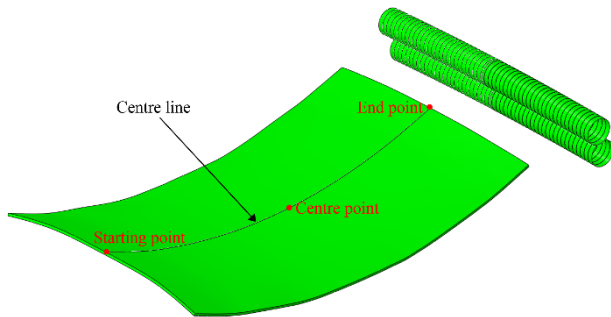


Fig. 5 Simulation modeling of FRRF process

과 중 하나의 결과를 도시하였으며, Fig. 4에는 볼록 형태의 곡면을 가지는 유한요소해석 결과를 나타내었다. Fig. 3의 경우 판재 중심부분보다 끝부분에서의 변형률분포가 훨씬 높게 나타남을 확인할 수 있는데, 이는 판재 끝부분의 압축량이 중심부분보다 더 크게 나타나기 때문이다.

이와는 반대로 Fig. 4의 경우 판재 끝부분에서의 변형률이 더 높게 분포하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 변형률 분포로 볼 때, 롤러의 압축량이 설정한대로 잘 적용되고 있음을 알 수 있다. 본 연구의 목적은 회귀분석을 통한 비정형롤판재성형공정의 종방향 곡률예측이므로, 해석결과에서 종방향의 곡률반경을 측정하였다. Fig. 5와 같이 판재의 중심라인에서 시작점, 중심점, 끝점 세 부분의 절점좌표를 추출하여 3점호 방식을 이용하여 곡률반경을 측정하였다. 측정된 곡률반경은 표 3에 정리하여 나타내었으며, 이를 회귀분석의 표본데이터로 활용하였다.

3. 회귀분석

3.1 선형회귀분석

회귀분석을 수행하기 위해서는 우선 회귀분석모

Table 3 Sample data of dependent variable

Saddle		Convex	
Number of case	Curvature radius	Number of case	Curvature radius
1	270.76	28	178.44
2	223.96	29	194.48
3	211.78	30	195.37
4	375.63	31	253.92
5	323.55	32	204.60
6	288.91	33	231.71
7	485.15	34	266.86
8	428.00	35	316.58
9	401.70	36	302.14
10	189.12	37	77.78
11	166.97	38	88.17
12	166.72	39	118.19
13	222.39	40	88.75
14	212.92	41	98.45
15	205.82	42	104.29
16	258.33	43	103.26
17	241.08	44	126.55
18	249.00	45	120.50
19	130.18	46	43.67
20	118.09	47	50.99
21	110.93	48	51.07
22	158.67	49	46.75
23	152.11	50	51.73
24	140.39	51	56.97
25	183.67	52	49.91
26	168.12	53	55.56
27	184.05	54	64.11

델을 선정해야 한다. 가장 기본적인 형태의 회귀모델은 선형회귀모델이다. 종속변수에 대한 독립변수들의 일차적인 영향력만을 평가하는 모델이며, 간단하고 쉽게 사용할 수 있는 모델이다. 선형회귀분석 모델식은 다음과 같다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \varepsilon \quad (1)$$

여기서,

y = 종방향곡률반경 (종속변수)

X_1 = 압축비 (독립변수1)

X_2 = 초기판재 횡방향곡률반경 (독립변수2)

X_3 = 판재너비 (독립변수3)

β = 회귀계수

ε = 오차

를 의미한다. 회귀분석은 식 1과 같은 회귀모델에서 오차값을 최소화시키는 적절한 회귀계수값을 최소자승법(least square method)를 이용하여 찾는 방법이다. MATLAB을 이용하여 회귀계수들을 획득하였으며, 이러한 회귀계수값들이 얼마나 적합한지를 알아보기 위해 적합도검정을 수행하였다.

최소자승법을 이용해서 획득한 회귀계수값은 표 4에 정리하였으며, 회귀계수값들의 적합성을 알아보기 위해 결정계수(r-squared value, R^2) 및 평균제곱근오차(root mean square error, RMSE)를 확인하였다. 결정계수란 획득한 회귀계수를 통해 완성된 회귀분석 모델이 얼마만큼 표본데이터들을 잘 나타낼 수 있는지를 확인하는 값으로 0에서 1사이의 값을 가지며, 1에 가까울수록 높은 적합도를 의미한다. RMSE는 가장 간단하면서도 직관적인 근사 모델 적합도 평가 방법이다. 표본데이터와 회귀분석모델간의 불일치도를 나타내기 위한 RMSE 값은 오차의 제곱을 산술 평균한 값의 제곱근으로 계산되며 0에 가까울수록 오차가 작음을 의미한다. 결정계수와 RMSE는 아래 식을 통해서 계산된다[8].

$$R^2 = \frac{\sum(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \cdot \frac{1}{(y_{max} - y_{min})} \quad (3)$$

여기서, y_i 는 표본데이터, \hat{y}_i 는 추정데이터, \bar{y} 는 표본데이터의 평균, n 은 표본의 개수, y_{max} 는 최대표본값, y_{min} 은 최소표본값을 의미한다. 결정계수의 경우 0.8450(안장형), 0.9109(블록형)의 값을 나타내며 약 87% 정도의 적합도를 가진다. 표본이 수치적 해석으로 결정된 값을 고려해볼 때, 본 적합도는 크게 높은 값이 아니다. RMSE역시 약 0.1002(안장형), 0.0914(블록형) 정도로 크게 낮지 않은 값을 보이고 있다. 이러한 적합도 검증을 통해, 해당 선형회귀분석모델은 적절하지 않다고 판단하여 회귀분석모델을 수정하여 회귀분석을 진행하였다.

Table 4 Regression coefficient (linear model)

Saddle		Convex	
β_0	229.8987	β_0	137.1534
β_1	-89.2452	β_1	-94.3400
β_2	55.5032	β_2	22.8031
β_3	-17.4778	β_3	7.5006

Table 5 Regression coefficient (non-linear model)

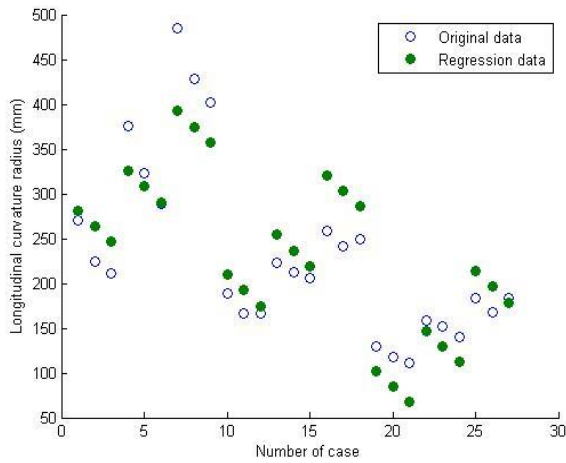
Saddle		Convex	
β_0	196.4367	β_0	116.0229
β_1	-94.6344	β_1	-94.6400
β_2	49.9766	β_2	29.7137
β_3	53.9111	β_3	23.8259
β_4	-10.1440	β_4	2.7678
β_5	-16.4237	β_5	7.5338
β_6	9.0889	β_6	-1.1406
β_7	-33.4917	β_7	-25.1499
β_8	0.9515	β_8	0.8446
β_9	14.8591	β_9	0.4839

3.2 비선형회귀분석

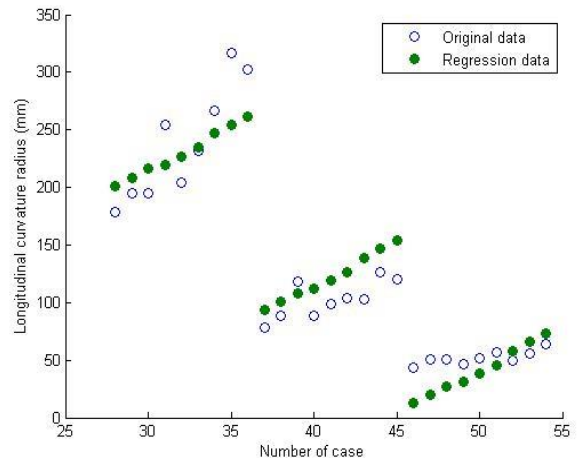
앞서 수행한 선형회귀분석모델은 간단하고 기본적인 모델이기 때문에 회귀분석을 쉽게 수행할 수 있는 장점이 있지만, 적합도에서 적지 않은 문제가 있음을 확인하였다. 따라서 세밀하고 정확한 회귀분석 모델을 선정하여 비선형회귀분석을 수행하였다. 우선 각 독립변수들과 종속변수들간의 관계를 1차 선형에서 2차 비선형형태로 설정하였고, 각 독립변수들 간의 교호작용이 존재할 수 있으므로 교호작용 효과까지 추가로 고려하여 회귀분석모델을 수정하였다. 개선된 회귀분석모델은 다음과 같다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_1^2 + \beta_3 X_2 + \beta_4 X_2^2 + \beta_5 X_3 + \beta_6 X_3^2 + \beta_7 X_1 X_2 + \beta_8 X_2 X_3 + \beta_9 X_3 X_1 + \varepsilon \quad (4)$$

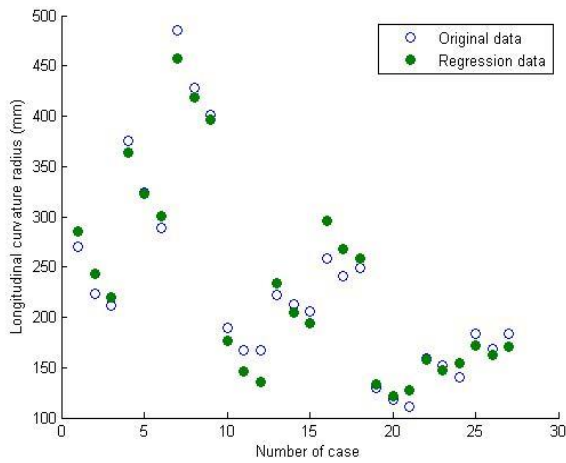
각 변수들은 앞에서 설명한 것과 동일하며, 회귀계수의 개수만 다르다. 본 회귀분석 역시 MATLAB을 이용하여 회귀계수획득 및 적합도검정을 수행하였다. 표 5에 획득한 회귀계수를 정리하였고, 적합도검정을 위한 결정계수 및 평균제곱근오차를 계산하였다. 결정계수의 경우 0.9724(안장형), 0.9791(블록형)로 1에 매우 가까운 값을 보이고 있으며, 이는



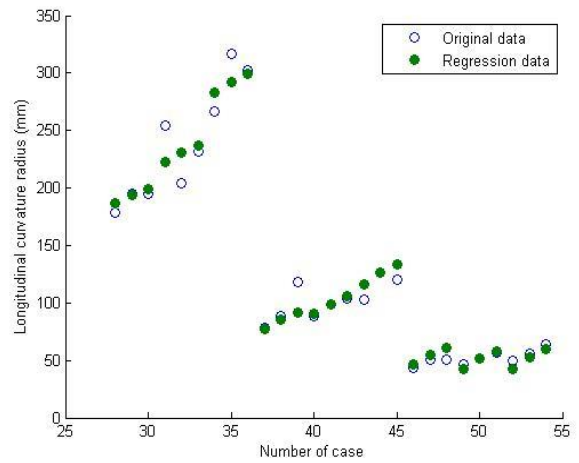
(a) Saddle type of linear model



(b) Convex type of linear model



(c) Saddle type of non-linear model



(d) Convex type of non-linear model

Fig. 6 Graphical validation about original sample data with regression estimation data

97% 이상의 적합도를 의미한다. 게다가 $RMSE$ 값 역시 0.0423(안장형), 0.0443(볼록형)의 값을 나타내며 선형회귀분석모델에 비해 절반 이하의 값을 확인할 수 있다. 수정된 회귀모델의 높은 적합성을 확인하기 위해 적합도 검정을 통해 획득한 결정계수와 평균제곱근오차를 표 6에 비교하여 나타내었으며, 명확한 비교를 위해 실제 표본데이터와 회귀모델의 추정데이터를 그래프로 정리하였다. Fig. 6에 선형회귀모델과 수정된 비선형회귀모델의 표본데이터와의 비교 그래프를 도시하였다. 선형회귀모델의 추정데이터와 표본데이터의 비교 그래프를 도시한 Fig. 6 (a), (b)의 경우, 추정데이터와 표본데이터가 어느정도 일치하는 경향성을 확인할 수 있지만, 그 오차가 상대적으로 크게 나타난다. 반면 비선형회귀모델의

Table 6 Summary of goodness of fit

		Linear model	Non-linear Model
Saddle	R^2	0.8450	0.9724
	$RMSE$	0.1002	0.0423
Convex	R^2	0.9109	0.9791
	$RMSE$	0.0914	0.0443

추정데이터와 표본데이터의 비교 그래프를 도시한 Fig. 6 (c), (d)의 경우, 오차도 낮고 경향성도 확연하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그래프를 통해 확인한 경향성과 97% 이상의 적합도 및 0.05 이하의 $RMSE$ 수준을 볼 때, 수정된 비선형회귀모델의 유효성을 확인할 수 있으며 비정형롤판재성형 공정 결과의 종방

향곡률예측에 활용할 수 있을 것으로 예상된다.

4. 결론

본 연구에서는 새로운 성형기술인 비정형롤판재 성형공정의 결과를 예측하기 위해 통계적모델인 회귀분석을 수행하였다. 회귀분석에 사용되는 표본데이터를 획득하기 위해서, ABAQUS를 이용해 비정형롤판재성형공정을 수치적으로 구현하였다. 표본데이터를 활용하여 비정형롤판재성형공정의 종방향곡률반경을 예측할 수 있는 회귀분석모델을 제시하였으며, 그 결과를 다음과 같이 정리하였다.

(1) 유한요소해석을 통해서 비정형롤판재성형공정을 구현하였으며, 구현된 해석의 결과를 회귀분석의 표본데이터로 활용하기 위해 3수준 3인자 완전요인 배치법을 사용하여 총 54개(안장형27개+볼록형27개)의 유한요소해석을 수행하였다. 54개의 해석결과로부터 판재의 종방향 곡률반경을 획득하였다.

(2) 획득한 판재 종방향 곡률반경을 종속변수로 하는 회귀분석모델을 가정하여 회귀분석을 수행하였다. 기본적인 선형회귀모델을 이용하여 회귀분석을 수행하였고, 해당 모델의 적합성을 확인하기 위해 결정계수와 평균제곱근오차를 계산하였다. 여기서 결정계수는 약 0.8450(안장형), 0.9109(볼록형)의 결과를 보였고, RMSE는 약 0.1002(안장형), 0.0914(볼록형)으로 계산되었다. 이를 토대로 본 선형회귀모델의 표본에 대한 적합도가 낮다고 판단하여, 회귀모델을 개선하였다.

(3) 각 독립변수들이 종속변수와 비선형관계를 가진다고 가정하여 2차식의 형태로 변환하였고, 독립변수들간의 교호작용의 효과도 고려하여 모델에 추가하였다. 수정된 모델에 대해 결정계수와 RMSE를 계산해본 결과, 약 0.9724(안장형), 0.9791(볼록형), 0.0423(안장형), 0.0443(볼록형)의 값을 나타내었다. 보다 직관적인 경향성을 파악하기 위해 실제 표본데이터와 회귀모델의 추정데이터를 시각적으로 비교해본 결과, 이전모델에 비해 수정모델이 더욱 높은 적합성을 가지는 것으로 판단하였다.

(4) 완성된 비선형회귀분석 모델을 활용하여 2차곡면의 형태를 형성하기 위한 비정형롤판재성형 공정의 형상을 예측할 수 있을 것으로 판단되며, 추후에는 아직 개발중인 비정형롤판재성형 장비를 활용한 실험 예측모델에 대한 연구에 도움이 될 것으로 예상된다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 선도연구센터지원사업(No. 2012R1A5A1048294)과 중견연구자지원사업(No. 2015R1A2A2A01005494)의 지원을 받아 수행된 연구임. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] M. Z. Lee, Z. Y. Cai, Z. Sui, Q. G. Yan, 2002, Multi Point Forming Technology for Sheet Metal, J. Mater. Proc. Technol., Vol. 129, pp. 333~338.
- [2] B. Davoodi, B. Zareh-Desari, 2014, Assessment of Forming Parameters Influencing Spring-back in Multi-point Forming Process: A Comprehensive Experimental and Numerical Study, Mater. Design., Vol. 59, pp. 103~114.
- [3] J. W. Park, Y. B. Kim, J. Kim, K. H. Kim, B.S. Kang, 2013, Manufacture of Architectural Skin-structure with a Double Curved Surface using Flexible Stretch Forming, Trans. Mater. Process, Vol. 22, No. 4, pp. 196~203.
- [4] J. W. Park, J. Kim, K. H. Kim, B. S. Kang, 2014, Numerical and Experimental Study of Stretching Effect on Flexible Forming Technology, Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 73, pp. 1273~1280.
- [5] Y. H. Seo, J. W. Park, W. J. Song, B. S. Kang, J. Kim, 2014, Flexible Die Design and Springback Compensation Based on Modified Displacement Adjustment Method, Adv. Mech. Eng., Vol. 6, Article ID 131253.
- [6] B. S. Kang, J. S. Yoon, 2014, Dieless Sheet Metal Forming Apparatus with Flexible Rollers, US Patent Pending: 14/361674.
- [7] J. S. Yoon, S. E. Son, W. J. Song, J. Kim, B. S. Kang, 2014, Study on Flexibly-Reconfigurable Roll Forming Process for Multi-Curved Surface of Sheet Metal, Int. J. Precis. Eng. Manuf., Vol. 15, No. 6, pp. 1069~1074.
- [8] R. H. Myers, 2009, Response Surface Methodology-Process and Product Optimization using Designed Experiments, Third Ed., John Wiley & Sons, New Jersey, pp. 13~62.