[논문] 한국소성가공학회지, 제 26 권 제 6 호, 2017
Transactions of Materials Processing, Vol.26, No.6, 2017
https://doi.org/10.5228/KSTP.2017.26.6.341

실험적 연구를 통한 비정형롤판재성형 예측 모델 개발

박지우[1] · 길민규[1] · 윤준석[1] · 강범수[1] · 이경훈[#]

Development of Prediction Model for Flexibly-reconfigurable Roll Forming based on Experimental Study

J. W. Park, M. G. Kil, J. S. Yoon, B. S. Kang, K. Lee
(Received August 1, 2017 / Revised November 24, 2017 / Accepted November 27, 2017)

Abstract

Flexibly-reconfigurable roll forming (FRRF) is a novel sheet metal forming technology conducive to produce multi-curvature surfaces by controlling strain distribution along longitudinal direction. Reconfigurable rollers could be arranged to implement a kind of punch die set. By utilizing these reconfigurable rollers, desired curved surface can be formed. In FRRF process, three-dimensional surface is formed from two-dimensional curve. Thus, it is difficult to predict the forming result. In this study, a regression analysis was suggested to construct a predictive model for a longitudinal curvature of FRRF process. To facilitate investigation, input parameters affecting the longitudinal curvature of FRRF were determined as maximum compression value, curvature radius in the transverse direction, and initial blank width. Three-factor three-level full factorial experimental design was utilized and 27 experiments using FRRF apparatus were performed to obtain sample data of the regression model. Regression analysis was carried out using experimental results as sample data. The model used for regression analysis was a quadratic nonlinear regression model. Determination factor and root mean square root error were calculated to confirm the conformity of this model. Through goodness of fit test, this regression predictive model was verified.

Key Words : Flexibly-reconfigurable Roll Forming, Regression Analysis, Experimental Study

1. 서 론

최근 급격히 발달하고 있는 항공 및 자동차 산업은 다품종소량생산체계가 적합한 산업이다. 이러한 산업의 발달에 힘입어, 판재성형공정에서도 다양한 형상의 비정형 곡면을 성형하는 기술에 대한 연구가 진행중이다. 일반적인 판재 성형은 목적 형상에 맞는 금형을 일일이 가공하여 성형을 수행하는데, 목적 형상이 많아지면 금형제작비용이 증가한다. 금형제작비용을 줄이기 위해 가변성형기술에 대한 연구가 꾸준히 진행되어 왔다[1~3].

가변성형기술의 대표적인 기술 중 하나인 다점성형공정은 다수의 성형펀치들을 이용하여 일종의 금형을 구성할 수 있다. 이 기술의 최고 장점은 수많은 형태의 금형을 단 하나의 장비를 활용하여 구현할 수 있기 때문에, 일반적인 프레스 성형과는 달리 생산성과 경제성이 뛰어나다. 이러한 다점성형공정에 대한 연구들이 다양하게 진행되고 있지만[4,5], 불연속적인 금형 곡면에 의해 압흔(dimple)이나 주름(wrinkle)과 같은 성형 불량이 발생하는 단점을 가지

1. 부산대학교 항공우주공학과
Corresponding Author : Dept. of Aerospace Engineering, Pusan National University, E-mail: aeronova@pusan.ac.kr

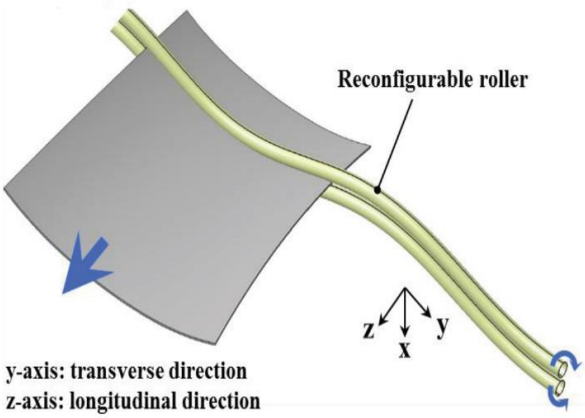

Fig. 1 Schematic illustration of FRRF

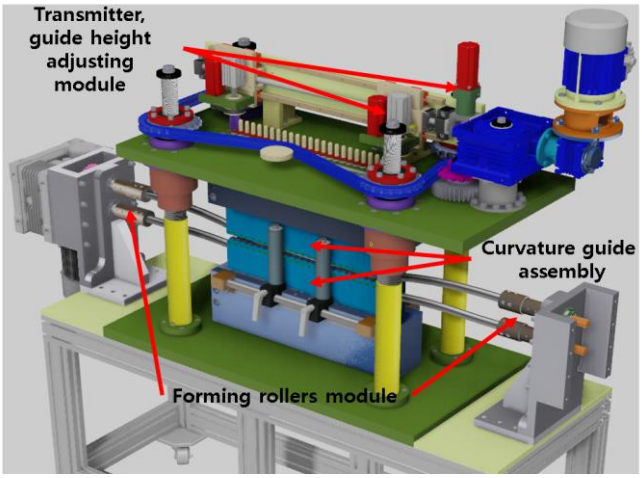

Fig. 2 Configuration of FRRF apparatus

고 있다. 또한, 다점성형기술은 제품의 치수가 성형장비의 크기에 제한을 받기 때문에 성형장비보다 더 큰 크기의 제품을 성형할 수 없다. 이러한 단점들을 개선하기 위해, 최근 비정형롤판재성형(flexibly-reconfigurable roll forming)이라는 새로운 기술이 제안되었다[6].

비정형롤판재성형 기술은 유연하게 휘어지는 롤러(flexible roller)와 다수의 곡률 조정 펀치(curvature adjustment punch)를 활용해 곡면을 만들어 내는 기술이다. 본 기술은 롤러를 활용해 연속적인 곡률을 가지기 때문에, 다점 성형 공정에서의 압흔과 주름이 발생하지 않는다. 또한, 롤링 방향(rolling direction)으로 성형품의 크기 제한이 없다는 장점이 있다. 이러한 장점에 힘입어, 비정형롤판재성형 기술에 대한 다양한 연구가 진행중에 있다[7~10].

하지만 목적 곡면의 형상이 직관적으로 확인되는 다점성형기술과는 달리 비정형롤판재성형 기술은 1차원인 곡선으로 부터 2차원의 곡면을 성형하는 기술이다. Fig. 1에 비정형롤판재성형 기술의 개략도를 나타내었는데, 여기서도 볼 수 있듯이 목적 곡면을 유추하는 것이 매우 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 비정형롤판재성형 기술의 성형 결과를 예측하는 한가지 방안으로 회귀분석을 활용한 통계적 예측모델을 제안했다. 이전에 시뮬레이션을 활용한 통계 모델에 대한 연구를 수행하였고, 높은 적합도를 보이는 것을 확인한 바 있다. 이번에는 실제 실험을 통해 표본데이터를 확보하고, 확보한 데이터를 사용해 실제 결과물의 종 방향 곡률 반경을 예측하는 통계 모델을 만들었다. 해당 예측 모델의 신뢰성을 확보하기 위해 적합도 검정을 수행하였다. 표본 데이터로 사용한 실험 결과는 자체적으로 제작한 비정형롤판재성형 장비를 활용해 획득하였으며, 볼록형(convex type)의 형태가 성형이 되도록 하였다. 실험결과를 이용하여 2차 비선형회귀분석을 진행하였다. 회귀분석을 통해 획득한 회귀계수값을 토대로 비정형롤판재성형 공정의 성형 실험 결과에 대한 예측 방정식을 정리하였으며, 회귀분석 결과에 대한 검증을 위해 결정 계수와 평균 제곱근 오차를 계산하여 회귀예측모델의 적합성을 검증하였다.

2. FRRF 실험

2.1 FRRF 장비

비정형롤판재성형 기술은 판재의 변형률을 조절하여 곡면을 성형하는 기술이다. 다시 말해 판재의 두께 방향의 변형률 차이를 임의로 조절하여 곡률을 형성한다. 이를 위해 2개의 롤러를 이용하며, 이 롤러를 기초로 하여 FRRF 장비가 구성된다. FRRF 장비는 크게 성형롤러모듈(forming rollers module), 곡률가이드어셈블리(curvature guide assembly) 그리고 이송장치 및 가이드높이조절모듈(transmitter, guide height adjusting module) 구성되어있으며, Fig. 2 에 전체 장비 구성을 3차원 캐드로 도시하였다. 곡률가이드어셈블리는 위아래 롤러의 곡률을 조절하는 장치로 서보 모터를 활용하여 높이를 제어한다. 성형롤러모듈은 롤러에 회전을 가하기 위한 장치로 판재를 롤러 사이에 끼운상태에서 모터로 롤러를 회전시킨다. 이송장치 및 가이드높이조절모듈은 비용적인 문제로 인하여, 상하에 각각 하나의 서보 모터만

을 활용하여 모든 롤러가이드의 높이를 조절하였다. 이를 위해, 리니어 가이드(linear guide)를 사용하여 각 롤러가이드의 위치에 맞게 이송한 후, 서보 모터를 이용해 롤러가이드의 위치를 제어한다. 사용자가 입력하는 입력값에 따른 곡률가이드의 위치를 계산하여, 각각의 서보 모터가 산출된 곡률가이드의 높이에 맞게 제어한다. Fig. 3에 제작된 실제 FRRF 장비 사진을 나타내었다.

2.2 FRRF 실험 조건

회귀분석을 위해서 필요한 표본(sample)들을 획득하기 위해 종속 변수와 독립 변수를 선정하였다 본 연구의 종속변수는 FRRF 실험 결과물의 종방향 곡률 반경이다. 종속변수인 FRRF 실험 결과의 종방향 곡률반경은 실질적으로 롤러의 배치에 의해서 결정된다. 이러한 롤러의 위치를 결정하는 변수는 첫째 각 위치에서의 압축량, 둘째 판재의 횡방향 곡률반경, 마지막으로 판재의 너비이다. 이러한 3가지 변수들을 통해 롤러의 배치가 결정되므로, 롤러의 x-좌표값(좌우 위치)에 따른 y-좌표값(높이)을 계산할 수 있다[11]. 따라서 본 회귀 분석의 독립 변수를 최대 압축률, 횡방향 곡률 반경 그리고 초기 판재 너비로 결정하였다. 적절한 수의 표본을 얻기 위해, 3가지의 인자가 3개의 수준을 가지는 3수준 3인자 완전요인배치법을 활용해 실험 계획을 완성하였다.

본 연구에서는 볼록형(convex type)의 2차 곡면 형상을 목적곡면으로 결정하였다. FRRF 기술에서 볼록형 곡면을 성형하기 위해서는, 판재의 중심 부분의 압축량이 끝부분보다 더 많아야 한다. 따라서 본 연구에서는 판재의 중심부분에서 최대의 압축량이 걸리도록 압축률을 결정하였으며 판재의 끝부분에서는 압축이 들어가지 않는 조건으로 선형적으로 각 위치에서의 압축량이 결정되도록 하였다. 판재의 두께를 고려할 때 최대 압축률은 판재 두께의 10퍼센트 이내가 되도록 가정하여, 압축량의 수준을 2%, 6%, 10%로 선정하였다. 나머지 2개의 인자들도 각각 100mm, 125mm, 150mm와 1,000mm, 1,500mm, 2,000mm로 수준을 선정하였다. Table 1에 선정된 독립변수의 수준을 정리하였다. FRRF 실험에 사용된 판재는 1mm의 초기 두께를 가지는 Al 5052-H32이며, 이 소재는 탄성계수 70.3GPa, 포아송비(poisson's ratio) 0.33, 밀도 2.68g/cm3의 물성치를 가진다. 해당 판재의 소성 영역 물성치를 확인하기 위해 Instron社의

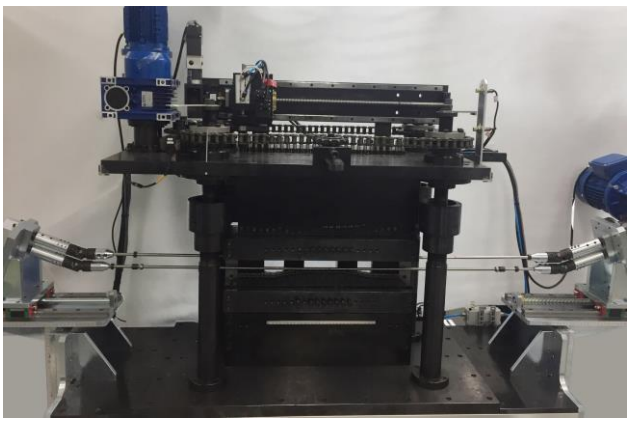

Fig. 3 FRRF apparatus

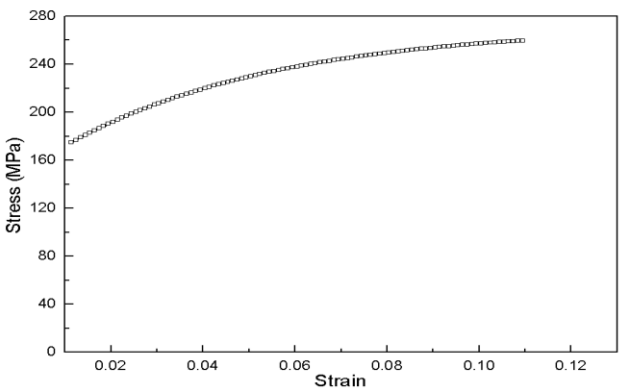

Fig. 4 Stress-strain curve of Al 5052

Table 1 Variables and levels

Variables	level
Maximum compression value	2 %
	6 %
	10 %
Width of blank	100 mm
	125 mm
	150 mm
Curvature radius of transvers direction	1000 mm
	1500 mm
	2000 mm

동적인장시험기를 사용하여 응력-변형률 선도(stress-strain curve)를 획득하였다. 획득한 응력-변형률 선도는 Fig. 4에 나타내었으며, 해당 선도를 통해서 판재의 항복 강도 및 인장 강도를 확인하였다. 판재의 항복 강도(yield strength)는 176MPa이고, 인장강도(ultimate strength)는 260MPa이다. Table 2 에 해당 재료의 물리적 특성들을 정리하였다.

Table 2 Material properties of Al 5052-H32

Material property	Value
Young's modulus (GPa)	70.30
Poisson's ratio	0.33
Yield strength (MPa)	176.00
Ultimate strength (MPa)	260.00
Density (g/cm^3)	2.68

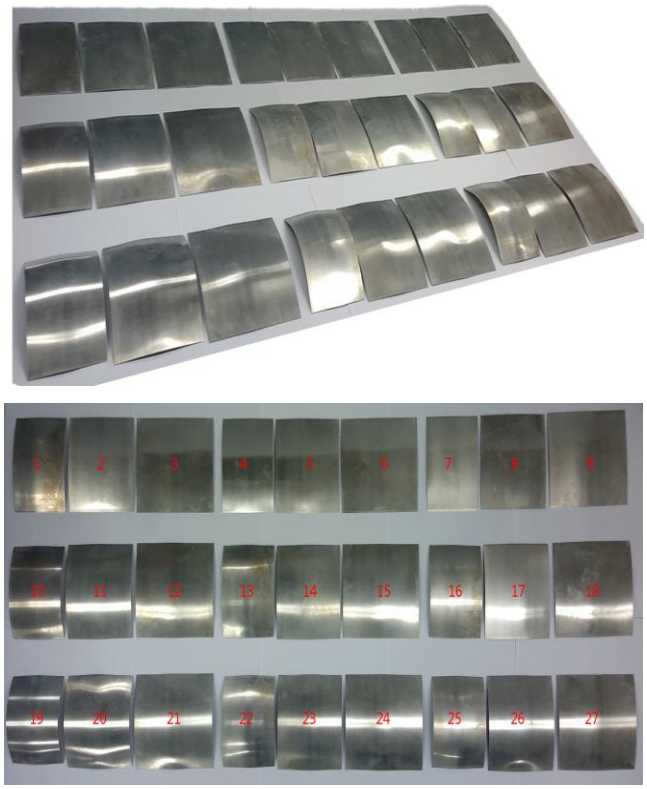

Fig. 5 Experimental results for sample data

Table 3 Sample data of dependent variable

Number of case	Curvature radius (mm)
1	262.81
2	339.04
3	435.07
4	325.97
5	357.79
6	457.79
7	611.39
8	639.67
9	698.90
10	146.37
11	158.81
12	169.08
13	216.95
14	260.07
15	335.01
16	336.33
17	321.55
18	340.01
19	101.90
20	117.28
21	121.52
22	141.15
23	192.30
24	212.39
25	213.60
26	234.67
27	255.13

2.3 FRRF 실험 결과

앞장에서 설명한 조건을 토대로 FRRF 실험을 수행하였다. 목적 곡면은 다양한 곡률을 가지는 볼록(convex)형태의 곡면이며, 각각의 매개변수들을 고려하여 총 27가지 경우의 실험을 수행하였다. Fig. 5는 FRRF 장비를 통해 성형한 실험결과물을 정리한 사진이다. 실제 본 연구에서 표본으로 활용할 데이터는 실험결과물의 종방향 곡률 반경이므로, 3차원 측정기를 활용해 실험결과의 곡면데이터를 추출하였다. 그중 중심 부분의 곡선 프로파일을 추출하여, 시작 부분과 중심 부분 그리고 끝부분의 3점을 기준으로 곡률 반경을 측정하여 결과를 획득하였다.

결과들을 정리하여 각 매개변수들의 경향성을 파악하였다. 우선 최대 압축률의 경우 판재의 2% 의 최대 압축률에서 가장 큰 곡률 반경이 나타났으며, 10% 의 최대압축률에서 가장 작은 곡률반경이 나타났다. 이와는 반대로 횡방향 곡률 반경과 판재 너비의 경우, 해당 매개변수 값이 커지면 커질수록 곡률 반경이 커지는 결과를 확인하였다. 다시 말해서 압축률이 커지면 판재의 종방향 곡률이 급해지고, 횡방향 곡률 반경과 판재 너비가 커지면 판재의 종방

향 곡률이 완만해지는 경향을 보였다. 측정된 각 표본의 곡률 반경은 Table 3에 정리하여 나타내었으며, 해당 결과들은 회귀 분석을 표본 데이터로 활용하였다.

3. 회귀분석

3.1 회귀모델선정

앞선 연구를 통해 비선형 형태의 회귀 모델이 본 연구에 적합함을 확인한 바 있기 때문에[8], 이번에도 비선형 회귀 모델을 사용하였다. 사용된 회귀 모델은 아래 식 1에 정리하였다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_1^{\,2} + \beta_3 X_2 + \beta_4 X_2^{\,2} + \beta_5 X_3 + \beta_6 X_3^{\,2} + \beta_7 X_1 X_2 + \beta_8 X_2 X_3 + \beta_9 X_3 X_1 + \varepsilon \quad (1)$$

여기서, y 는 종방향 곡률 반경(종속변수), β_i 는 회귀계수, X_1 은 최대 압축률(독립변수 1), X_2 는 판재 너비(독립변수 2), X_3 는 횡방향 곡률 반경(독립변수 3) 그리고 ε 은 오차를 의미한다.

회귀 분석은 회귀 모델식에서 오차(ε)를 최소화시키는 적합한 회귀 계수들의 값을 최소 자승법(least square method)를 활용해 구하는 분석 방법이다. 본 연구에서는 MATLAB을 활용하여 적절한 회귀계수값을 찾아내었다. 본 회귀 모델에서는 총 10개의 회귀 계수값이 존재하며, 획득한 회귀 계수값은 Table 4에 정리하였다.

3.2 적합도 검정

앞장에서 획득한 회귀 계수를 이용한 회귀 모델이 표본데이터를 얼마나 잘 나타내는지를 확인하기 위해 적합도 검정(goodness-of-fit test)을 수행하였다. 본 회귀 모델의 표본과의 적합도를 알아보기 위해서, 결정 계수(r-squared value, R^2)와 평균 제곱근 오차(root mean square error, RMSE)를 확인하였다.

결정 계수는 완성된 회귀 모델이 표본값들을 얼마나 잘 나타내는지에 관한 값으로 0에서 1사이의 값을 가진다. 1에 가까울수록 회귀 모델이 표본을 잘 나타낸다는 것을 의미한다. 평균 제곱근 오차의 경우, 매우 간단하고 직관적으로 적합도를 평가하는 방법으로, 표본데이터와 회귀 모델의 오차의 제곱을 산술 평균한 값의 제곱근으로 계산한 값이다. 결정 계수와는 반대로 0에 가까울수록 오차가 작아진다. 결정 계수와 평균 제곱근 오차를 구하는 방법은 아래 식 2, 3에 정리하였다.

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

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

여기서, y_i 는 표본 데이터, $\hat{y}_i$ 는 추정 데이터, $\bar{y}$ 는 표본데이터의 평균, n은 표본의 개수, $y_{\max}$ 는 최대 표본값, $y_{\min}$ 은 최소 표본값을 의미한다. 계산된 결정계수값은 약 0.9482로 이 수치는 약 95 퍼센트의 적합도를 의미한다. RMSE 값은 약 0.0595로 0에 매우 가까운 값을 나타낸다. 표본이 실험을 통해 획득한 것을 고려하면 본 적합도는 매우 높은 값이다. 보다 직관적인 비교를 위해 표본 값과 회귀 모델의 추정 값을 Fig. 6에 그래프로 도시하였다. 그래프 상의 파란색 빈 원이 실제 표본 값을 나타내었고, 초록색 원이 회귀 모델을 통해 계산된 추정 값이다. 해당 그래프에서 표본 값과 추정 값 사이에 비슷한 경향성을 띄고 있음을 확인할 수 있다. 오차의 수준을 확인하기 위해 백분율 오차를 확인하였다. 최대

Table 4 Regression coefficient

β_0	229.9704	β_5	37.1352
β_1	-141.0269	β_6	7.7223
β_2	63.8893	β_7	-45.8627
β_3	99.9664	β_8	-6.8228
β_4	28.0174	β_9	-21.5999

Table 5 Summary of goodness-of-fit results

R-squared value (R^2)	0.9482
Root mean square error (RMSE)	0.0595
Maximum percent error	29.0500
Minimum percent error	0.1993
Mean percent error	10.7003

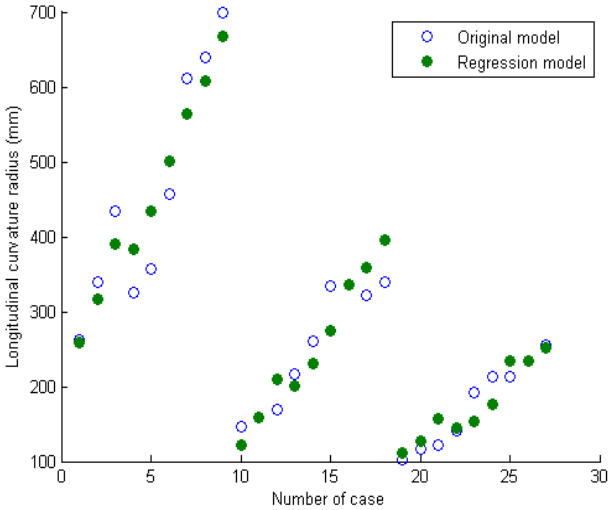

Fig. 6 Graphical validation about regression data

오차는 약 29.0500, 최소 오차는 약 0.1193 그리고 평균 오차는 약 10.7003으로 크게 높지 않음을 확인할 수 있다. 적합도 검정의 결과를 Table 5에 정리하였으며, 결정 계수, RMSE 그리고 표본들의 경향성 등을 통해 회귀예측모델의 유효성을 검증하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 새로운 성형 기술인 비정형롤판재성형 공정의 결과를 예측하기 위해 회귀분석을 활용한 예측 모델을 개발하였다. 회귀분석에 사용되는 표본데이터를 획득하기 위해서, FRRF 장비를 이용해 27가지의 실제 실험을 수행하였다. 표본데이터를 활용하여 비정형롤판재성형 공정의 종방향곡률반경을 예측할 수 있는 회귀분석모델을 제시하였으며, 그 결과를 다음과 같이 정리하였다.

(1) FRRF장비를 활용해 비정형롤판재성형 실험을 수행하였으며, 실험의 결과를 회귀분석의 표본데이터로 활용하기 위해 3수준 3인자 완전요인배치법을 사용하여 총 27가지의 실험 계획을 세웠다. 우리가 조절 가능한 입력값으로는 최대 압축률, 횡방향 곡률 반경, 판재 너비를 선정하였고, 이러한 값들에 종속되는 종속변수로는 FRRF 성형 결과의 종방향 곡률 반경을 선정하였다. 3차원 스캐너를 활용해 실험결과물로부터 판재의 종방향 곡률 반경을 획득하였다.

(2) 획득한 판재 종방향 곡률 반경을 종속변수로 하는 회귀분석모델을 가정하여 회귀분석을 수행하였다. 회귀분석에 사용된 모델은 2차 비선형 회귀모델이며, 해당 모델의 적합성을 확인하기 위해 결정 계수와 평균제곱근오차를 계산하였다. 여기서 결정 계수는 약 0.9482의 결과를 보였고, RMSE는 약 0.0595으로 계산되었다. 보다 직관적인 비교를 위해 실제 표본값과 회귀 모델의 추정값을 그래프로 나타낸 결과, 비슷한 경향성을 나타내는 것으로 판단되었다.

(3) 완성된 비선형회귀분석 모델을 활용하여, 비정형롤판재성형 공정에서 성형 후의 2차 곡면의 형상을 예측할 수 있을 것으로 판단되며, 추후에는 다른 판재에의 적용을 통해 물리적 특성이 비정형롤판재성형 공정에 미치는 영향성 평가에 관한 연구를 수행할 계획이다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 선도연구센터지원사업(No. 2012R1A5A1048294)과 중견연구자지원사업(No. 2014R1A2A1A11054473)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, No. 1-3, pp. 333~338.

[2] 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.

[3] M. Abebe, J. W. Park, B. S. Kang, 2017, Reliability-based Robust Process Optimization of Multi-point Dieless Forming for Product Defect Reduction, Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 89, No. 1-4, pp. 1223~1234.

[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, No. 9-12, pp. 1273~1280.

[5] S. C. Heo, Y. H. Seo, H. G. Noh, T. W. Ku, B. S. Kang, 2010, Numerical Study on Effect of using Elastic Pads in Flexible Forming Process, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng., Vol. 34, No. 5, pp. 549~556.

[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] J. W. Park, J. S. Yoon, J. Kim, B. S. Kang, 2016, Shape Prediction of Flexibly-reconfigurable Roll Forming using Regression Analysis, Trans. Mater. Process., Vol. 25, No. 3, pp. 182~188.

[9] J. S. Yoon, J. Kim, B. S. Kang, 2016, Deformation Analysis and Shape Prediction for Sheet Forming using Flexibly Reconfigurable Roll Forming, J. Mater. Proc. Technol., Vol. 233, pp. 192~205.

[10] M. G. Kil, J. S. Yoon, J. W. Park, B. S. Kang, 2017, Comparative Study of Applicability of Aluminum, Magnesium and Copper Alloy Sheets using Flexibly-reconfigurable Roll Forming, Trans. Mater. Process., Vol. 26, No. 3, pp. 169~173.

[11] J. S. Yoon, 2016, Design and Implementation of Flexibly-reconfigurable Roll Forming, Ph. D Thesis, Department of Aerospace Engineering, Pusan National University, Busan, Korea.