

< 기술논문 >

공리설계와 반응표면모델에 의한 형상제어 압연기의 추력모델 개발

이태희† · 유정훈* · 강영훈*

(2005년 2월 17일 접수, 2005년 7월 18일 심사완료)

Approximate Model of Thrust of Pair-Cross Mill using Axiomatic Design and Response Surface Model

Tae Hee Lee, Jung Hun Yoo and Yeong Hun Kang

Key Words : Pair-Cross Mill(형상제어압연기), Crossed Angle(교차각), Thrust(추력), Response Surface Model(반응표면모델), Axiomatic Design(공리설계)

Abstract

Rolling process to fabricate a strip with even thickness is significant to enhance the quality of the strip. The thickness of a strip can be effectively controlled by pair-cross mills. However, pair-cross mill generates thrust in the axial direction of roller and causes skewness, deflection, twist and even accidental roll chock failure. Therefore, accurate estimation of the thrust of the pair-cross mill during rolling process is necessary to monitor the failure of roll and the quality of products. An empirical equation given by Mitsubishi Heavy Industry (MHI) is hitherto employed, where the thrust is expressed in terms of rolling force, reduction ratio and crossed angle. However it turns out that the MHI empirical equation provides somehow inaccurate and unsuitable thrust in practical rolling processes. Moreover, we learn that three parameters involved in MHI equation are coupled each other. In this paper, axiomatic design principle is employed to select appropriate parameters involved in approximate equation in order to make parameters uncoupled. A quadratic equation using response surface method with new parameters is suggested. The accuracy of the approximate model is examined by comparing with real experimental data.

기호설명

1. 서론

- X : 설계변수
- y : 반응값
- \hat{y} : 추정치
- e : 잔차
- θ : 롤 교차각
- r : 압하율
- P : 압하력
- t_0 : 초기두께
- t : 압연두께

일반적으로 열간압연 과정에서 판의 두께를 균일하게 하는 일은 중요하다. 이 목적을 위해서 이전까지는 롤에 크라운(crown)을 주어서 판의 두께를 균일하게 만들어 왔다. 그러나 롤에 교차각을 주는 것이 판 두께를 균일하게 하는 것에 더 효과적이라는 것이 판명된 후 압연 롤에 교차각을 주어 압연 과정을 수행하는 것이 일반화 되었다. 그러나 압연 롤에 교차각을 주면 압연 과정에서 축방향으로 추력이 발생한다. 추력은 압연제품의 품질과 밀접한 관계를 가지고 있다. 압연기에서 롤 추력이 비대칭적으로 발생하면 판의 사행, 쓸림, 꼬임 등의 원인이 되고 또한 돌발적인 롤 초크 소손의 발생 원인이 되어 실수율 감소와 생산성 저하를 야기한다. 따라서 정확한 추력 및 압

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부
E-mail: thlee@hanyang.ac.kr
TEL : (02) 2220-0449, FAX : (02) 2298-4634

* 한양대학교 대학원 기계설계학과

연 과정의 제어인자들과의 관계를 예측하는 것은 압연기에 발생할 수 있는 문제를 사전에 예방하고 압연판의 생산효율 및 품질개선을 위해 중요하다.

지금까지 형상제어 압연기에 대한 연구는 활발하지 않았다. 1980년대 중반 Tsukamoto 등은 형상제어 시스템에서의 형상과 크라운 제어에 대한 연구 논문을 통해 형상제어 시스템이 기존의 단순 4 단 가역 압연기의 특징을 가지고 있으면서도 형상제어에 더 효율적임을 발표하였다.⁽¹⁾ Nakajima 등은 형상제어 압연기의 기본적인 특징들에 대한 연구 논문을 통하여 형상제어 압연기의 기본적인 특징과 구조, 그리고 미쯔비중공업(MHI) 상관관계식을 발표하였다.⁽²⁾ 하지만 실제적으로 현장에서는 실험을 통한 제어를 하고 있을 뿐, 이론적으로나 해석적으로 필요한 정보들을 찾아내지 못하고 있다. 또한 본 논문에서 수행하고자 하는 형상제어 압연기의 교차각으로 인한 추력 발생을 예측하는 연구는 거의 이루어지지 않고 있다.

일본 미쯔비중공업에서는 롤의 추력을 예측하기 위하여 지수함수를 통한 상관관계식을 개발하였다. 하지만 실제 추력은 각 형상제어 압연 과정에 따라 다르게 나타난다. 따라서 MHI 상관관계식을 현 연구대상인 제철소 형상제어 압연기의 추력 상관관계식으로 사용하기는 부적절하며, 실제 압연 과정의 실험정보와 비교하여 오차가 존재하고 있음을 확인하였다. 결국 현재 제철소의 추력을 예측하기 위해서는 새로운 상관관계식의 개발이 필요하게 되었다. 본 연구에서는 제철소 현장의 압연 과정을 통해 추출한 실험정보를 분석하고, 이 정보를 이용하여 추력에 대한 반응표면모델을 구축하였다. 여기서 반응표면모델의 변수는 기존 MHI 상관관계식의 변수인 교차각, 압하율, 압하력으로 선정하였다. 그러나 이 변수를 통한 반응표면모델은 기존의 MHI 상관관계식보다 정확한 추력 정보를 제공하지만 변수간의 독립성이 유지되지 않는 문제를 가지고 있어 실제 압연 과정에서 추력을 예측하는데 사용하기 어렵다. 그리고 해석을 통한 전산실험계획을 수행하기에도 기존 변수는 해석의 설계변수로서 적용하기 적합하지 않다.

본 논문에서는 공리설계의 개념을 적용하여 새로운 변수를 선정하고 이를 통하여 반응표면모델을 재 구축하고 기존의 MHI 상관관계식 및 반응표면모델과 효율성, 정확성을 비교하여 개선된 상관관계식을 제안하려고 한다.

2. 형상제어 압연기

형상제어 압연기는 위 아래 롤 축을 교차함으로써 생기는 롤 사이의 간격이 롤 중심으로부터 거리가 증가할수록 포물선의 형태가 증가하고, 그것이 작업 롤의 크라운에 의한 불룩함과 등가를 이룬다는 원리에서 작동한다. 그러므로 롤 축의 교차각 조절로서 크라운효과를 제어할 수 있다. 또한 형상제어 압연기는 작업 롤 축의 강제적 처짐을 발생시키지 않고도 롤 사이의 간격을 조절할 수 있고 이에 따라 작업롤의 강도에 제한 없이 크라운 제어의 광범위한 범위를 제공한다.

형상제어 압연기는 롤을 교차시키는 방법에 따라 Fig. 1 과 같이 상하 백업롤만 교차시키는 방법 [Fig. 1(a)], 상하 작업롤만 교차시키는 방법 [Fig. 1(b)] 그리고 상하 백업롤과 작업롤을 동시에 교차시키는 방법 [Fig. 1 (c)]이 있다. 그러나 Fig. 1(a)와 (b)의 경우는 롤 간의 상대적 미끄럼에 의한 에너지 손실, 마모 그리고 추력이 크게 작용하기 때문에 실용적이지 못하다.⁽³⁾

이러한 형상제어 압연 시스템은 기하학적 관계에 의해 롤의 교차각을 보통 $0 \sim 1^\circ$ 정도 조절함으로써 판의 평탄도를 정밀하게 조절할 수 있다. 또한 형상제어 압연기의 롤 하중 및 토크는 판의 압하율에는 영향을 받으나 롤의 교차각에는 큰 영향이 없다. 판의 압하율에 대한 하중 및 토크의 변화는 마찰계수 $\mu=0.3$ 을 사용한 Orowan 이론에 의해 잘 예측된다고 알려져 있다.⁽³⁾

형상제어 압연기의 구조는 전동기에서 발생된 동력을 감속하는 감속기와 동력전달축, 상하 백업롤 및 작업롤, 롤 교차장치로 이루어져 있다. 특히 롤 교차장치는 크로스 헤드의 이송에 의해 작업롤의 교차각을 원하는 각도만큼 뒹기어로 조절할 수 있다. 따라서 작업롤을 교차시킬 때 작업롤과 연결된 기어 커플링의 틀어짐을 발생시켜 기어 면의 비정상 구동 및 스펀들 축으로의 추력을 발생시킨다.

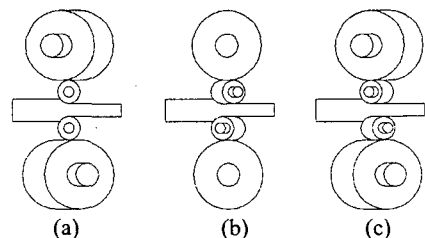


Fig. 1 Crossed roll systems : (a)crossed back up roll, (b)crossed work roll, (c)pair crossed roll

현재 제철소 열간압연공정의 전체 라인은 가열로, 조압연, 사상압연, 냉각과정 그리고 권취과정으로 이루어져 있다. 형상제어 압연 시스템은 이 전체 압연 공정중 사상압연 공정에서 사용된다. 사상압연 공정은 7 개의 사상압연기(F1~F3, R4~R7)를 통하며, F1~F3는 축이 나란한 압연기를 표현하고 R4~R7은 위 아래 롤 축을 교차시키는 형상제어 압연기를 나타낸다.

3. 반응표면법

본 연구에서는 추력과 변수로 사용되는 제어인자 사이의 상관관계식을 반응표면법에 의하여 구현하려고 한다. 본 장에서는 반응표면법에 대하여 간단히 알아보겠다.

반응표면모델의 생성은 회귀분석을 통해서 이루어진다. 회귀분석이란 변수들간의 관련성을 규명하기 위하여 어떤 수학적 모형을 가정하고, 이 모형을 측정된 변수들의 데이터로부터 추정하는 통계적 분석방법을 의미한다. 가정한 수학적 모델의 계수를 결정하기 위해서는 최소 자승법을 일반적으로 사용하고 있다.

설계변수와 반응값을 다음과 같이 식 (1)을 이용하여 관련시킬 수 있다.

$$y_j = \sum_{i=1}^k \beta_i \xi_i(\mathbf{x}) + \varepsilon_j, \quad \mathbf{x} \in R^n$$

$$j = 1, 2, \dots, n \text{ (number of design variables)} \quad (1)$$

$\xi_i(\mathbf{x})$: shape function

여기서 ε_j 는 오차 항으로써 $i = 1, 2, \dots, n$ 에 대해서 모두 평균 $E(\varepsilon_i) = 0$ 이고 분산 $\text{var}(\varepsilon_i) = \sigma^2$ 이며 오차 항들 사이에는 상관관계 (correlation)가 없다고 가정한다. 이 때 식 (1)을 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (2)$$

이러한 실험 정보에 대한 가장 적합한 모델을 구하기 위해서는 오차항 ε 이 최소가 되어야 하고 이 때 사용되는 방법이 최소자승법이다. 최소자승법이란 오차의 놈(norm)의 제곱을 최소화하는 근사모델의 계수 $\boldsymbol{\beta}$ 를 구하는 방법으로 이렇게 구해진 $\boldsymbol{\beta}$ 를 계수로 갖는 식 (2)의 근사모델은 주어진 실험의 설계변수와 반응값의 관계를 가장 잘 근사화하여 표현하고 있다고 볼 수 있다. 이 때

계수 $\boldsymbol{\beta}$ 를 \mathbf{b} 로 표시하기로 한다.

따라서 근사모델을 통한 반응값의 추정치를 $\hat{\mathbf{y}}$ 이라고 표시할 때 최적 반응표면모델은 식 (3)과 같이 표시된다.

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{X}\mathbf{b} \quad (3)$$

한편 여기서 실제 값 \mathbf{y} 와 추정 값 $\hat{\mathbf{y}}$ 의 차를 식 (4)와 같이 잔차 \mathbf{e} 로 나타낸다.

$$\mathbf{e} = \mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}} \quad (4)$$

4. 반응표면법에 의한 상관관계식 개발

제철소에서 실제 압연 공정과 실험을 통하여 추력과 제어인자들의 정보를 얻었다. 현재 실험 정보는 형상제어 압연기 R4~R7 중에서 R5~R7 압연기를 통하여 추출하였다. 각 압연기에서 415 개씩 1245 개의 실험 정보를 받아 튀는 값(outlier)을 제거하고 R5에서 386 개, R6에서 388 개 그리고 R7에서 246 개 총 1020 개의 실험정보를 이용하여 상용 통계프로그램인 JMP⁽⁵⁾를 이용하여 반응표면법으로 추력에 대한 상관관계식을 구현하였다. 상관관계식의 변수는 식 (5)와 같은 MHI 상관관계식과 동일한 교차각, 압하율, 압하력으로 하였다.

$$F_r = 0.2 \times \left\{ 1 - \exp\left(-3 \frac{\theta^{0.9}}{r^{1.1}}\right) \right\} P \quad (5)$$

본 연구에서 개발한 반응표면법 결과는 Table 1과 같다. 추력은 식 (6)과 같이 나타낸다.

$$T = \sum_{i=1}^n \beta_i \text{term}_i \quad (6)$$

Table 1 Response surface model for thrust

	Term _i	Coefficient (β _i)
1	1	-27.5989
2	θ	-47.7618
3	r	1.8157
4	p	-0.0260
5	(p-a)(r-b)	0.0014
6	(θ-c)(r-b)	1.8884
7	(θ-c)(p-a)	-0.0422
8	(θ-c)(p-a)(r-b)	0.0026

a=951.829, b=21.1735, c=0.5172

이와 같이 개발된 수식의 정확성을 검증하기 위하여 실제 실험 정보에 대한 오차 평가를 통하여 기존의 MHI 상관관계식과 비교해 보도록 하겠다.

압연과정의 추력 실험 정보는 압연공정에 따라 달라질 수 있으며 MHI 상관관계식을 구현한 실험 정보와 현재 제철소의 실험정보는 상이하다. 따라서 본 연구의 반응표면모델과 MHI 상관관계식을 비교하기 위하여 MHI 상관관계식을 구성하는 지수함수의 계수를 최적화하여 현재 제철소의 실험정보를 표현 할 수 있는 새로운 MHI 상관관계식을 식 (7)과 같이 구현하였다.

$$F_T = 0.2 \times \left\{ 1 - \exp \left(-0.841 \frac{\theta^{0.6993}}{r^{1.2217}} \right) \right\} P \quad (7)$$

오차 평가는 평균오차 (E_{avg}), 평균제곱근오차 (E_{rms}), 최대오차 (E_{max}) 3 가지 오차를 이용하였다.

$$E_{avg} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (8)$$

$$E_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (9)$$

$$E_{max} = \text{Max} \{ |y_i - \hat{y}_i| \} \quad (10)$$

Table 2 는 MHI 상관관계식과 반응표면법으로 구성된 상관관계식을 실제 실험 정보와 비교한 오차 평가이다. 지수함수로 구성된 MHI 상관관계식과 비교하여 세 가지 경우의 오차평가에서 모두 개선된 결과를 보임을 알 수 있다.

5. 공리설계에 의한 상관관계식 개발

반응표면법에 의한 추력 상관관계식은 기존의 지수함수에 의한 MHI 상관관계식에 비하여 정확한 추력을 계산할 수 있지만 관계식을 구성하고 있는 변수 사이에 독립성의 문제가 있다. 본 연

구에서는 상관관계식을 구성하는 변수의 선정에 공리설계의 독립공리 개념을 응용 및 적용하여 기존 변수의 문제점을 밝히고 새로운 변수를 도입하여 상관관계식을 개발하였다.

5.1 독립공리

독립공리란 설계에서 기능요구사항(FR)과 그 기능요구사항을 수행하는 설계파라미터(DP)가 독립성을 가져야 한다는 원리이다. 이러한 독립공리가 설계에서 만족되기 위해서는 설계행렬이 식 (11) 또는 식 (12)와 같이 표현되어야 한다.⁽⁴⁾

$$\begin{pmatrix} \times & 0 & 0 \\ 0 & \times & 0 \\ 0 & 0 & \times \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{pmatrix} \times & \times & \times \\ 0 & \times & \times \\ 0 & 0 & \times \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} \quad (12)$$

식 (11)과 같은 설계를 비연성설계(uncoupled design)라고 한다. 이러한 비연성된 상태가 가장 이상적인 설계이지만 실제 설계문제에서 구현하기 어렵기 때문에 일반적으로 식 (12)와 같은 비연성화 설계(decoupled design)를 수행하려고 한다. 식 (12)는 설계변수 사이의 연성이 존재하지만 연성도가 높은 설계변수를 먼저 결정해 가면서 설계파라미터와 기능요구사항의 독립성을 유지할 수 있다.

5.2 기존 설계변수의 문제점

상관관계식 개발의 목적은 압연과정에서 형상제어 압연기의 제어인자와 축 방향 추력사이의 관계를 예측할 수 있는 수식을 도출하는 것이다. 기존의 상관관계식 개발에서는 실제 압연과정의 실험 정보인 초기두께, 최종두께, 압연율, 압하력 그리고 교차각 중에서 압하율, 압하력 그리고 교차각을 상관관계식의 변수로서 선정하였다. 하지만 이 변수들 중 압하력은 실제 압연과정에서 독립적으로 조절이 가능한 제어인자가 아니기 때문에 실제적으로 추력을 예측하기 위한 상관관계식의 변수로 사용이 어렵다. 압하력은 압연과정의 목표 압연율을 위하여 압연기가 작용하는 하중이기 때문에 압연과정의 수행 후에 알 수 있는 실험정보이다. 반면에 교차각과 압하율은 압연과정에서 각각 압연조건과 압연목표로서 독립적으로 조절이 가능한 제어인자이다. 결국 상관관계식 사용자가 추력을 예측하기 위해서 교차각과 압하율은 결정

Table 2 Estimation of errors of RSM and MHI approximate equations for thrust

	E_{avg}	E_{rms}	E_{max}
MHI	5.5776	7.2187	34.0685
RSM	4.0183	5.3265	31.2610

할 수 있지만 압하력은 예측할 수 없기 때문에 위 세 변수는 추력의 예측을 위한 상관관계식의 변수로서 부적합하다. 기존 상관관계식의 변수와 압연 과정을 설계행렬을 통해서 나타내면 식 (13)과 같다. 기능요구사항은 각 변수의 개별적인 조정으로 나타나는 실제 압연과정의 변화를 표현하는 임의의 함수로 정의하였으며 설계파라미터는 상관관계식의 변수로 정의하였다.

$$\begin{pmatrix} \times & 0 & 0 \\ 0 & \times & \times \\ 0 & \times & \times \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta \\ r \\ P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1(\theta) \\ f_2(r, P(r)) \\ f_3(P, r(P)) \end{pmatrix} \quad (13)$$

식 (13)은 연성 설계(coupled design)를 보여주며 설계변수와 요구사항의 독립성이 보장되지 않는다.

현재 추력의 계산을 위한 정보는 실험에 의존하여 구하고 있다. 하지만 실험을 통해서만 정보를 얻을 경우 압연조건 및 형상제어 압연기의 변화가 발생할 경우 매년 반복적인 실험을 수행하여야만 한다. 그리고 실제 압연과정의 실험은 실제 제품을 생산하는 국한된 범위에서 수행되기 때문에 정확한 상관관계식 개발을 위한 충분한 정보를 얻기 힘들다. 최근 이러한 단점을 극복하기 위해서 전산실험을 위한 유한요소해석 모델의 개발에 대한 연구가 진행되고 있다. 하지만 기존의 변수는 유한요소해석을 위한 설계변수로서도 적합하지 않다. 해석과정에서 설계변수는 독립적으로 조정이 가능하여야만 실험계획된 정확한 해석점에서 해석결과를 얻어낼 수 있다. 압연과정 해석에서 추력은 해석 응답이 되며 교차각과 초기두께는 유한요소 모델의 기하학적인 치수로 나타낼 수 있다. 그리고 압연두께는 롤 사이의 간격을 나타내는 유한요소 모델의 경계조건으로 조정이 가능하다. 하지만 압하력은 유한요소해석에서 조정할 수 있는 설계변수가 아니고 해석을 통하여 구해낼 수 있는 해석결과가 된다. 압하력을 압연두께 결정을 위한 설계변수로 이용하지 않는 이유는 목표 압하율을 만족시키는 정확한 압하력을 예측하는 것은 불가능하기 때문이다. 결국 기존의 변수는 독립적으로 압연 과정을 대표할 수 없으며 실제 상관관계식 이용이나 해석에 적합하지 않다.

본 논문은 실험 정보 중에서 상관관계식의 구현 및 사용과 해석과정에서도 독립적으로 조정할 수 있는 변수로서 초기두께, 압하율 그리고 교차각을 제안하였다. 위 세 변수는 실제 압연과정에서 독립적으로 조정될 수 있는 제어인자이다. 새로 선정된 변수로 앞서와 같이 압연 과정을 설계행렬

로 표현하면 식 (14)와 같다.

$$\begin{pmatrix} \times & 0 & 0 \\ 0 & \times & 0 \\ 0 & 0 & \times \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta \\ r \\ t_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f(\theta) \\ f(r) \\ f(t_0) \end{pmatrix} \quad (14)$$

식 (14)는 변수사이의 관계가 비연성설계이며 기능요구사항의 독립성도 보장되어 있다. 위 변수를 이용하면 상관관계식 이용과 해석을 통한 전산실험이 용이해진다. 실제 압연과정에서 위 세 가지 변수는 독립적으로 결정될 수 있기 때문에 상관관계식을 통한 추력 예측에서 독립적으로 각 변수를 대입하여 응답을 도출할 수 있다. 그리고 해석과정에서도 압연조건이 정해지면 해석모델의 설계변수에 독립적으로 변수 값을 적용할 수 있기 때문에 해석자가 원하는 해석점에서의 해석을 가능하게 한다.

본 연구에서는 독립공리를 적용하여 선정된 교차각, 압하율 그리고 초기두께를 변수로하여 추력의 예측을 위한 상관관계식을 반응표면법에 의하여 근사적으로 유도하였다.

5.3 반응표면법에 의한 상관관계식 결과

새로운 변수를 이용한 반응표면법 결과는 Table 3 과 같다.

Table 3 Response surface model for thrust with new variables

	Term _i	Coefficient(β _i)
1	1	-15.6968
2	θ	-22.9486
3	r	0.38595
4	t	0.18290
5	(t-a)(r-b)	-0.02902
6	(θ-c)(r-b)	0.05270
7	(θ-c)(t-a)	0.57261
8	(θ-c)(t-a)(r-b)	0.15519

a=5.64511, b=20.7251, c=0.52484

Table 4 Estimation of errors of RSM and MHI approximate equations for thrust

	E _{avg}	E _{rms}	E _{max}
MHI	5.5776	7.2187	34.0685
Prior-RSM	4.0183	5.3265	31.2610
RSM	3.0741	4.0783	17.9735

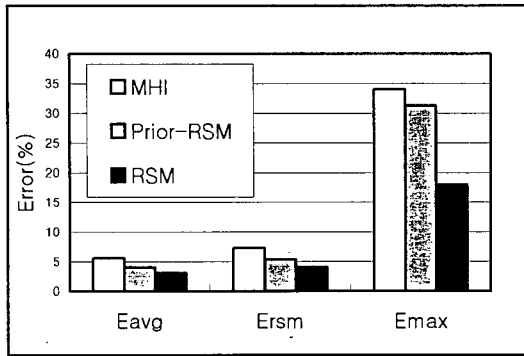


Fig. 2 Estimation of errors of RSM and MHI approximate equations for thrust

Table 4 와 Fig. 2 의 오차 평가를 통해서 공리설계를 적용한 변수로 구성된 반응표면모델이 기존의 반응표면모델 및 MHI 상관관계식에 비하여 정확성면에서도 개선되었음을 알 수 있다.

6. 결론

실험 정보를 기반으로 반응표면법을 이용하여 현재 제철소에서 사용하는 형상제어 압연기의 추력에 대한 상관관계식을 유도하였다. 그리고 오차 평가를 통해서 반응표면모델이 지수함수로 이루어진 기존의 MHI 상관관계식에 비하여 정확한 추력을 예측함을 알 수 있었다. 하지만 기존 MHI 상관관계식의 변수인 교차각, 압하율, 압하력으로 이루어진 반응표면모델은 변수사이의 연성 때문에 실질적인 추력의 예측이 어려웠다. 그리고 이러한 연성 때문에 기존의 변수는 해석을 통한 전산실험의 설계변수로서도 적합하지 않았다.

본 연구에서 공리설계의 독립공리를 적용하여 제안한 교차각, 압하율, 초기두께 변수는 실제 압연 과정에서 독립적으로 조정되는 압연 공정의 제어인자이다. 이 변수를 사용함으로써 실질적으로 추력을 예측할 수 있는 반응표면모델을 구현할 수 있었다. 그리고 새로 선정된 변수는 해석과정에서도 독립성이 보장되는 설계변수로서 적합하다. 새로운 변수로 도출된 상관관계식의 정확성 또한 기존의 변수로 생성한 MHI 상관관계식 및 반응표면모델에 비하여 개선되었음을 알 수 있다. 이와 같은 결과로부터 반응표면법과 같은 근사화과정에서 변수사이의 독립성이 알맞은 변수 선정의 기준의 될 수 있음을 보여주었다.

후기

이 연구는 한국과학재단 지정 최적설계신기술 연구센터의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Tsukamoto, H., 1984, "Shape and Crown Control Mill-Crossed roll system," *Iron and Steel Engineer*, pp. 26~33.
- (2) Nakajima, K., Omori, S., Kawamoto, T., Tsukamoto, H., Hatae, S., Hino, H. and Aratani, H., 1985, "Basic Characteristics of Pair-Cross Mill," *Technical Review*, pp. 143~148.
- (3) Yang, H.C., Choi, Y. and Kim, K.T., 2001, "Analysis for Fatigue Behavior of Spindle of Pair-Cross Mill in the Hot Rolling," *The 4th Rolling Symposium*, pp. 208~217.
- (4) Suh, Nam P., 1990, *The Principles of Design*, New York Oxford.
- (5) *JMP User's Guide*, Ver. 4, SAS Institute Inc.