

열간압연 공정에서 롤 프로파일 예측모델 향상

정제숙[#]· 유종우¹· 박해두¹

Improvement of Roll Profile Prediction Model in Hot Strip Rolling

J. S. Chung, J. You, H. D. Park

(Received May 10, 2007)

Abstract

In hot strip rolling, the work roll profile is one of the main factors in predicting and correcting the strip profile. Various studies concerning the wear profile and the thermal crown of work roll have been performed, and the results of these studies have shown that the work roll profile must be predicted accurately so as to efficiently control the strip qualities such as thickness, crown, flatness, and camber. Therefore, a precise prediction model of roll profile is called for in a perfect shape control system. In this paper, a genetic algorithm was applied to improve on the roll profile prediction model in hot strip rolling. In this approach, the optimal design problem is formulated on the basis of a numerical model so as to cover the diverse design variables and objective functions. A genetic algorithm was adopted for conducting design iteration for optimization to determine the coefficient of the numerical model for minimization of errors in the result of the calculated value and the measured data. A comparative analysis showed a satisfactory conformity between them.

Key Words: Work Roll Profile, Wear, Thermal Crown, Genetic Algorithm

1. 서 론

열간 압연공정에서 제품의 품질은 제품과 직접 접촉하는 작업 롤의 표면형상에 크게 영향을 받는다. 일반적으로 작업 롤의 표면형상은 초기 가공된 표면형상과 압연이 진행되면서 변하는 마모 프로파일, 열 팽창등에 의해 결정된다. 압연 시간에 따라 변하는 작업 롤 형상은 제품의 두께, 형상등에 크게 영향을 미치므로 공정을 설계하는 엔지니어는 작업 롤 형상을 정확히 예측할 수 있어야 한다. 마무리 압연기에서 대부분의 공정조건은 시간의 영향을 받지 않지만 작업 롤의 마모와 열 팽창은 압연이 진행됨에 따라 계속 증가한다. 작업롤의 마모 프로파일과 열 팽창량을 예측하는 기술은 매우 중

요하며 이와 관련하여 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나 대부분의 이론적 모델에서 제시하는 방법을 실제 적용하기 위해서는 수많은 계수들을 조건에 맞도록 결정해야 하는데, 공정조건에 따라 결정해야 하는 이 작업은 매우 시간 소모적인 일이다.

본 논문에서는 작업 롤의 마모 프로파일과 열 팽창을 계산하기 위해 사용되는 수식모델의 여러 계수들을 유전 알고리즘을 이용한 최적설계 방법을 이용하여 손쉽고 정확하게 결정하는 방법을 제시하였다. 수식모델에 사용되는 계수들은 이론적 모델에 의한 계산결과와 실제 측정값을 비교하여 결정된다. 그러나 오차를 최소화 하기 위한 계수값을 찾기 위해서는 여러번의 반복계산을 통한 시행착오를 거쳐야 한다. 따라서 이런 종류의

1. 포스코 기술연구소 공정제어연구그룹

교신저자: 포스코 기술연구소 공정제어연구그룹,

E-mail: jschung2@posco.co.kr

문제를 효율적으로 해결하기 위한 연구가 많은 연구자들에 의해 진행되어 왔다. 이러한 작업을 효율적으로 처리하기 위한 방법으로는 최적설계 기법을 이용하는 것이다. 금속성형 공정에서 최적설계 기법을 이용한 몇몇 예로는 “classical optimization method[1]”, “backward tracing method[2]”, “forward tracing method[3]”, “optimization by design sensitivity analysis[4]”, “genetic algorithm[5~9]” 등이 있다. 본 논문에서는 유전 알고리즘을 이용한 최적설계 기법을 이용하여 작업 롤의 마모 및 열팽창을 계산하기 위한 수식모델의 계수를 효율적으로 찾는 방법을 제시하였으며, 실제 공정에 적용한 후 제시된 방법에 의해 예측된 작업 롤 표면형상과 측정된 결과를 비교하여 방법의 타당성을 검증하였다.

2. 유전 알고리즘

일반적인 최적설계 기법은 함수값의 미분값을 이용한다. 그러나 목적함수의 특성에 따라 미분값을 구하기 어려운 경우나 여러 개의 지역적인 극대 또는 극소값을 가지는 경우에는 미분값을 이용한 최적설계 기법을 적용하기 어렵다. 이러한 경우 함수값만을 이용하여 최적값을 찾는 방법이 효율적이며, 유전 알고리즘도 이러한 방법중 하나이다. 유전 알고리즘은 John Holland[8]에 의해 제안되었다. 이 방법은 자연현상에서 일어나는 적자생존의 법칙을 모방하여 각각의 개체가 목적으로 하는 함수값을 극대화시킬 수 있는 조건으로 설계변수를 진화시키는 방법이다. 유전 알고리즘에서는 재생산, 교배, 돌연변이등의 단계를 거친다. 이 방법은 목적함수를 도출하기 위하여 많은 반복 계산이 필요하므로 알고리즘의 효율성은 최적값에 도달하기까지 얼마나 적은 반복계산이 필요하느냐에 달려 있다.

본 연구에서는 유전 알고리즘 중 “Modified Micro Genetic Algorithm[10]”을 이용하여 공정을 최적설계하였다. 초기에 발표된 유전 알고리즘은 한 세대를 구성하는 개체의 수가 매우 많았다. 실제로 알고리즘을 적용하기 위해서는 한 개의 개체는 한 번의 시뮬레이션에 해당하므로 많은 계산을 수행하여야 했다. 본 연구에서 사용된 방법은 한 조건의 결과를 얻는데 많은 시간이 소요되는 소성가공 공정해석의 특성을 고려하여 한 세대를 구성하는 개체수를 4 개로 하고, 재생산(reproduction), 교

배(crossover), 돌연변이(mutation)으로 이루어지는 유전알고리즘의 진화방법을 새롭게 구성하여 최적값에 도달하기 위해 필요한 총 반복 계산수가 최소화 될 수 있도록 개발된 방법이다[10].

3. 적용결과

3.1 마모 프로파일 예측

작업 롤의 마모는 압연이 진행됨에 따라 계속 증가한다. 작업 롤의 표면형상은 제품의 두께, 형상에 큰 영향을 미치므로 작업 롤의 마모가 많이 진행된 경우에는 롤을 교체해야만 한다. 이 때문에 작업 롤의 마모량과 마모 프로파일을 정확히 예측하는 것이 매우 중요하다. 마모 프로파일은 다음과 같은 방법으로 계산된다.

$$\Delta W(i) = \{a * D_w + b\} * A(i)^\alpha * B^\beta * C \quad (1)$$

$$A(i) = \frac{P(i) * 10^3}{B * ld * H_R} \quad B = \left(\frac{H_{IN}}{H_{OUT}} - 1 \right) * ld \quad C = \frac{L}{\pi * D_w * \{1 + f\}}$$

D_w : work roll diameter, B : strip width

ld : contact length, H_R : work roll hardness

H_{IN} : entry thickness, H_{OUT} : delivery thickness

L : slab length, f : forward slip ratio

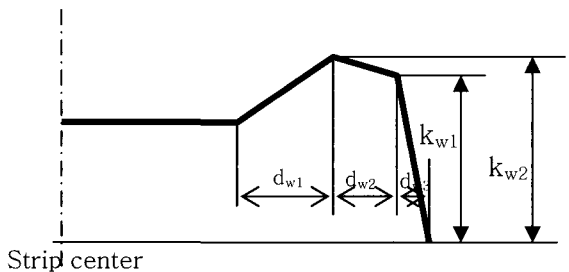


Fig. 1 Assumed wear profile

식(1)의 계수들은 작업 롤 재질, 공정조건, 압연 스케줄등을 바탕으로 결정되며 계산 결과에 매우 큰 영향을 미친다. 본 연구에서는 유전 알고리즘을 이용한 최적설계 기법을 이용하여 계수를 결정하였으며 최적설계 문제는 다음과 같이 정의된다.

- 목적함수: $\text{Min} \left(\sum |W_{measured}(i) - W_{predicted}(i)| \right)$,
 i = 계산에 사용된 폭방향 절점 개수
 j = 계산에 사용된 롤단위 수
- 설계변수: $a, b, \alpha, \beta, dw1, dw2, dw3, kw1, kw2$

상기 목적함수와 설계변수를 이용한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 5개의 압연 스케줄(약 500코일)에 대하여 최적설계를 수행하였고, 그 결과를 10개의 압연 스케줄(약 1000코일)에 적용하여 결과를 검증하였다. Fig. 3에는 계산된 결과가 측정된 작업 롤 마모 프로파일과 잘 일치함을 비교하여 도시하였다.

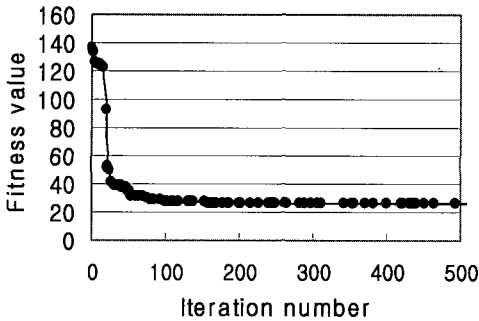


Fig. 2 Convergency of fitness value

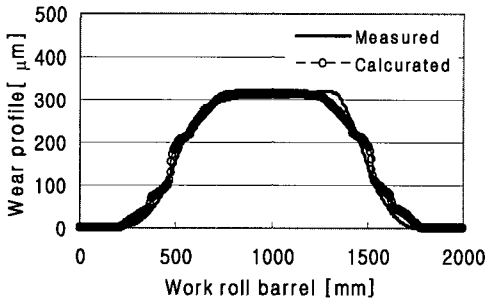


Fig. 3 Work roll wear profile

3.2 열 팽창 예측 모델

열간 압연 공정에서 고온의 소재와 접촉하는 작업 롤의 온도 변화는 롤 길이 방향으로 열유속을 발생시키고 이로 인해 롤 팽창량이 달라진다. 롤의 중앙부와 에지부의 롤 팽창량 차이는 롤 thermal crown으로 불리우고 다음과 같이 계산된다.

$$u(R) = \frac{2\beta}{R} \int_0^R (T - T_0) r dr \quad (2)$$

여기서 R은 작업 롤 반경, β 는 작업 롤의 열 팽창 계수, T_0 는 작업 롤 기준 온도이다.

롤 thermal crown 값을 계산하기 위해 여러가지 경계 조건을 바탕으로 비정상 온도장이 계산되어

야 한다. 주된 열 입력은 롤 바이트 영역에서 발생한다. 이 영역에서 소재와 작업 롤의 접촉 전열과 미끄러짐에 의한 마찰 발열이 존재한다. 한편 스프레이 냉각 영역에서 열 방출은 열전달 계수와 냉각수와 작업 롤의 온도차에 의해 결정된다. 두 영역에서 열 경계 조건은 다음과 같다.

i) at roll bite: $-k \frac{\partial T}{\partial r} = h_c (T - T_{strip}) - q''_{friction}$ (3)

ii) at spray cooling: $-k \frac{\partial T}{\partial r} = h_{spray} (T - T_{water})$ (4)

본 연구의 설계 변수는 접촉 열전달과 냉각 열전달 계수와 관련된다. 접촉 열전달 계수와 관련하여 Chen *et al* [11]의 결과를 따라 이 항이 각 스탠드에서 압하력과 선형적인 관계를 적용하였다.

$$h_c = aP + b \quad (5)$$

또한 스프레이 냉각은 boiling 영역에서 일어나므로 다음과 같은 식을 적용하였다.

$$h_{spray} = (cT_{strip} + d) \dot{w}^n \quad (6)$$

여기서 \dot{w} 는 냉각 수량이다.

본 연구에서 목적 함수는 계산된 값과 측정된 값이다. 설계 변수들은 접촉 열전달 계수와 관련된 a, b 그리고 스프레이 냉각과 관련된 c, d, n 이다. 각 스탠드(F1-F7)당 10~15개의 압연 단위를 설계 변수를 결정하기 위해 사용하였고, 각 압연 단위는 80~100개의 압연 코일로 구성되어 있다.

롤의 마모 프로파일은 온도가 완전히 식은 후 측정해야하는 것과는 달리, 열 크라운을 측정하기 위해서는 압연 종료 후 롤을 인출함과 동시에 측정하여야 한다. 이를 위하여 휴대용 롤 프로파일 측정장치를 이용하였다. Fig. 4는 최적화된 설계 변수를 사용하였을 때 계산된 값과 측정된 값을 비교한 결과 상당히 양호한 일치성을 나타내고 있다.

4. 결론

본 논문에는 열간 압연공정의 작업 롤 표면형상을 예측하기 위해 사용되는 마모 및 열 팽창량 예측 수식모델의 계수를 유전 알고리즘을 이용한

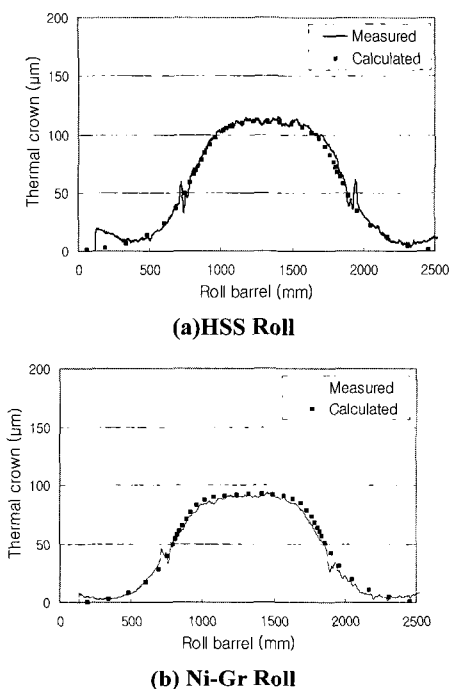


Fig. 4 Profile of the work roll thermal crown

최적설계 기법을 이용하여 결정하는 방법을 제시하였다. 실제 측정된 롤 표면형상과 예측된 롤 표면형상을 비교하여 제시된 방법의 신뢰도를 검증하였다. 향후 유전 알고리즘을 이용한 최적설계 방법은 열간 압연공정의 다양한 분야에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

[1] Y. Tomita, 1983, Optimization of Plastic Deformation Processes-Determination of the Die Profile using the Minimum Energy Principle, J. Japn. Soc. Tech. Plast., Vol. 24, pp. 1147~1150.

[2] J. J. Park, N. Rebelo, S. Kobayashi, 1983, A New Approach to Preform Design in Metal Forming with the Finite Element Method, Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 23, pp. 71~79.

[3] R. V. Grandhi, A. Kumar, A. Chaudhary, J. Malas, 1993, State-Space Representation of Optimal Control of Non-Linear Material Deformation Using the Finite Element Method, Int. J. Numer. Meth. Engng., Vol. 36, pp. 1967~1986.

[4] J. Kusiak, E. G. Thompson, 1989, Optimization Techniques for Extrusion Die Shape Design, Proc. 3rd Int. Conf. on Numer. Methods in Ind. Forming Processes, Fort Collins, Colorado, pp. 569~574.

[5] S. Roy, S. Ghosh, R. Shivpuri, 1996, Optimal Design of Process Variables in Multi-Pass Wire Drawing by Genetic Algorithms, J. of Manuf. Sci. Engng., Trans. ASME, Vol. 118, pp. 244~251.

[6] 정제숙, 황상무, 1996, 압출공정중 금형 형상 최적화 문제에 대한 유전알고리즘의 적용, 한국소성가공학회지, 제 5 권, 제 4 호, pp. 269-280.

[7] J. S. Chung, S. M. Hwang, 1997, Application of a Genetic Algorithm to the Optimal Design of the Die Shape in Extrusion, J. of Mat. Proc. Tech., Vol. 72, pp. 69~77.

[8] J. S. Chung, W. K. Yeo, J. K. Kim, S. M. Hwang, H. Mastumoto, 44th MWSP, 3-13 (2002).

[9] J. H. Holland, 1975, Adaptation in Natural and Artificial Systems, University of Michigan Press, Ann Arbor.

[10] J. S. Chung, and S. M. Hwang, 1998, Application of a Genetic Algorithm to Process Optimal Design in Non-isothermal Metal Forming, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 80, 1998, pp. 136~143.

[11] W. C. Chen, I. V. Samarasekera, E. B. Hawbolt, 1993, Met. Trans. A, Vol. 23, pp. 1307~1320.