

유한요소법을 이용한 열간 사상 압연에서의 판 변형률 분포 예측 온라인 모델 개발

김성훈* · 이중형** · 황상무***

The Development of On-Line Model for the Prediction of Strain Distribution in Finishing Mill by FEM

S.H.Kim, J.H.Lee and S.M.Hwang

Abstract

In this research, on-line model for prediction of effective strain distribution in strip on finishing mill process is prescribed. It has been developed using several selected non-dimensional parameters and previously made average effective strain model via series of finite element process simulations. $\Delta\epsilon$ was introduced to describe the effective strain distribution in strip. To confirm adequate non-dimensional variables uniqueness test was done. And to decide the order of polynomial in on-line model equation tendency test for each variables was done. The prediction accuracy of the proposed model is examined through comparison with finite element calculation results

Key Words : Finishing Mill Process, Effective Strain Distribution, On-Line Model, Non dimensional Variables

1. 서론

사상 압연에서 판의 형상 제어를 위한 수식 모델의 개발은 경비 및 시간의 절약, 그리고 정밀성을 고려해 볼 때 유한요소해석을 통한 유도가 하나의 해결책이 될 수 있다. 이전의 연구에서는 판

의 유효변형률 분포를 예측하기 위한 모델식을 유한요소법과 무차원 해석 기법을 이용하여 개발하였다. 본 연구에서는 이전의 연구결과를 이어받아 열간 사상 압연에서 판 내부의 유효변형률의 분포를 예측하기 위한 모델을 제시하였다. 판의 유효변형률 분포 예측에는 평균치 예측에 사용된 이외의 추가적인 변수의 도입이 필요하였으며 각 무차

* 포항공과 대학교 대학원
** 포항공과 대학교 대학원
*** 포항공과 대학교

원 변수들에 대한 해의 유일성 테스트와 온라인 다항식 모델의 계수 결정을 위한 경향성 테스트를 수행하였다. 본 논문에서는 각 변수들의 도입 배경 및 타당성을 밝히기 위한 테스트 결과를 제시하였으며, 판의 유효변형률 분포 예측을 위한 모델식을 개발하고, 제안된 온라인 모델식과 유한요소 해석 결과와의 비교를 통해 유효성을 검증하였다.

2. $\Delta\epsilon$ 의 도입

기존의 연구의 결과로 평균유효변형률이 무차원 변수인 형상계수, 압하율, 그리고 마찰계수의 함수임을 알 수 있었고, 이것을 이용한 온라인 모델식이 구성되었다. 하지만 이것은 판의 전체적인 성질을 표시할 뿐 판 내부의 두께 방향의 유효변형률의 분포를 예측하지는 못한다. 따라서 이를 위해서 $\Delta\epsilon$ 이라는 새로운 개념의 변수를 도입하였고 다음과 같이 정의한다.

$$\Delta\epsilon = \sum_i |\epsilon_i - \epsilon_{avg}| \Delta h_i \quad (1)$$

위의 변수 설명은 그림 1에서 설명된다. $\Delta\epsilon$ 은 판의 두께 방향으로 각 지점에서의 평균 유효변형률과 유효 변형률과의 차의 절대치를 합산한 것으로 편차의 개념을 가지며 따라서 동일한 평균 유효변형률을 가지는 판의 조건을 가지고도 다른 분포를 보이는 등의 차이를 표시할 수 있다. 실제 시뮬레이션 결과에 있어서도 평균 유효변형률이 같은 두 개의 조건에 대해 결과의 접촉을 통한 커플 해서 결과와 판의 단독 해석 결과와는 다른 분포를 나타내는 것을 확인할 수 있다. (그림 2.1, 그림 2.2) 이외의 필요한 변수들은 여러 시행착오를 거쳐 다음과 같은 변수들로 구성된 식을 찾아내었다.

$$\Delta\epsilon = f(\mu, R, H_1, H_2, \omega, T_1, P', Q, \rho C_p, K^s) \quad (2)$$

변수들의 내용은 순서대로 마찰계수, 롤반경, 입측두께, 출측두께, 롤속도, 입측온도, 가설모드의 변형에너지, 롤로의 열전달량, 열용량, 그리고 열전도도이다. 여기에 파이(π)이론을 적용하면 위의 변수들이 다음 여섯가지 무차원 변수들로 구성된 함수를 얻을 수 있다.

$$\Delta\epsilon = g(s, r, \mu, A, B, C) \quad (3)$$

여기서 각 변수들은 순서대로 형상계수, 압하율, 마찰계수이고 무차원변수 A, B, C는 다음과 같다.

$$A = \frac{Q}{K^s \cdot T_1} \quad (3.1)$$

$$B = \frac{\rho C_p \cdot R \cdot \omega \cdot H_1}{K^s} \quad (3.2)$$

$$C = \frac{P'}{K^s \cdot T_1} \quad (3.3)$$

위의 변수들의 정당성을 위해서는 Uniqueness test의 과정을 거쳐야 한다. Uniqueness test란 위의 식(3)이 제시된 변수들의 함수임을 시험하는 것으로 하나의 고정된 변수에 대해 두개이상의 값을 가지지 않는가를 따져보는 것이다. 시험조건은 표 1과 같고, 통과한 시험결과는 그림 3에서 제시하였다.

3. 온라인 모델의 구성

온라인 모델식을 구성하기 위해서는 다항식을 구성할 각 변수들의 차수를 정하기 위해 경향성 테스트를 수행하여야 한다. 수행 후 상수항의 경향을 보이는 경우 변수의 구성에서 제외시킬 수 있으므로 이때에는 모델식을 단순화할 수 있다. 경향성 테스트의 결과는 그림 4와 같고 그 결과 각 변수들의 차수는 다음과 같다. S 2차, r 1차, μ 2차, A 2차, B 0차, 그리고 C 1차이다. 온라인 모델식의 구성을 위한 공정 조건은 표 2와 같고 전부 1728개의 시뮬레이션을 수행하였다. 결과식은 다음의 다항식으로 표시할 수 있다.

$$\Delta\epsilon = \sum_{i,j,k,l,m} (a_{ijklm}) s^i r^j \mu^k A^l C^m \quad (4)$$

결과식의 계수들은 표 3과 같다.

4. 결론 및 향후 계획

유도된 온라인 모델식과 유한요소 해석 결과와의 비교를 그림 5에서 나타내었다. 그림 4에서 x 축은 모델식을 나타내고 y 축은 유한요소 해석결과를 나타내고 있으므로 데이터 포인트가 대각선상에 위치하면 정확히 일치하는 것을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 모델식과 유한요소 해석 결과는 10% 오차 범위 내에서 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 따라서 제시된 변수들과 그것들의 무차원화가 제대로 이루어졌음을 알 수 있다. 하지만 본 연구에서 도출한 결과 역시 판 내부에서 변형률의 편차만을 알 수 있을 뿐 정확한 변형률의 분포 커브는 그려내

지 못하고 있다. 따라서 연구가 진행됨에 따라 판 내부의 유효 변형률의 정확한 분포를 예측할 수 있는 모델식을 개발하는 것이 연구의 방향이라 생각된다.

참 고 문 헌

- (1) E. Orowan, 1943, Proc. Instn. Mech. Engrs.,vol.150, p140
- (2) R. B. Sims, 1954, Proc, Instn. Mech. Engrs.,vol168,p191
- (3) C. S. Sun, C. S. Yun, J. S. Chung and S. M. Hwang: Metall. Mater. Trans. A, 29A(1998), 2885
- (4) W. J. Kwak, Y. H. Kim, H. D. Park, J. H. Lee and S. M. Hwang, 2000, "FE-based On-Line Model for the Prediction of Roll Force and Roll Power in Hot Strip Rolling ISIJ Int., vol. 40, p1013-1018
- (5) 권우진, 김영환, 박해두, 이중형, 황상무, 2000, "실시간 압연하중 및 압연동력 예측 모델의 개선", 한국소성가공학회 2000년도 춘계학술대회 논문집,p52
- (6) 고규현, 2002, "유한 요소법에 기초한 사상압연시 롤 갭에서의 판 온도 예측 On-Line 모델 개발", 포항공대 대학원 기계공학과 석사학위논문

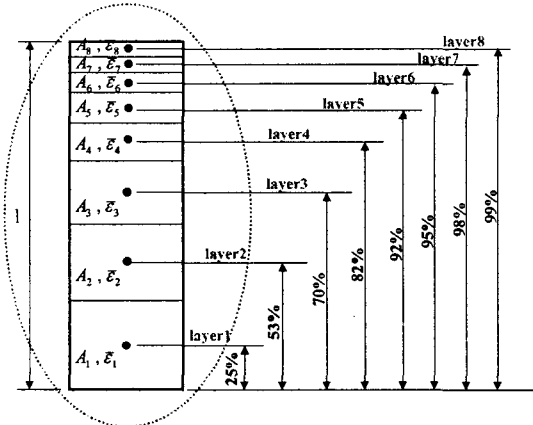


Fig. 1 Data captured points in the strip

Table 1 Comparison of measured roughness data

s	r	μ	R	carbon	h	T1	ω
3-	0.2-	0.3	400	0.155	0.05-	800-	15
7	0.4		mm	%	0.35	1300	rad/s

h (w/mm²°C), T1 (°C),

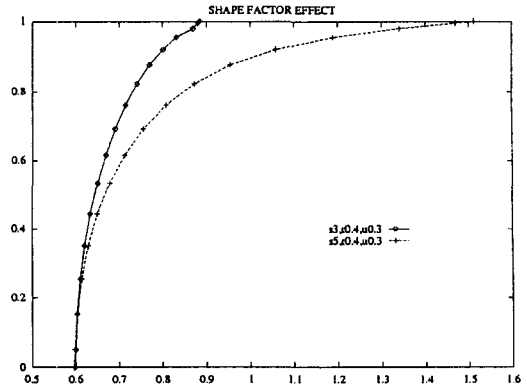


Fig. 2.1 Uncoupled analysis

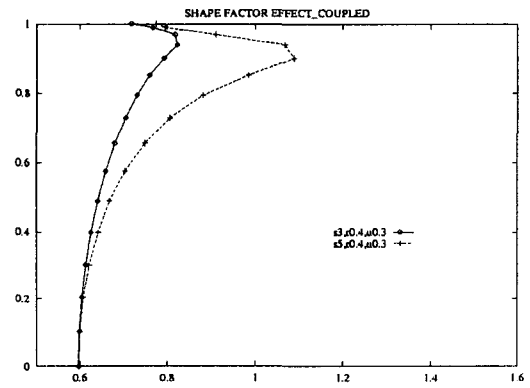


Fig. 2.2 Coupled analysis

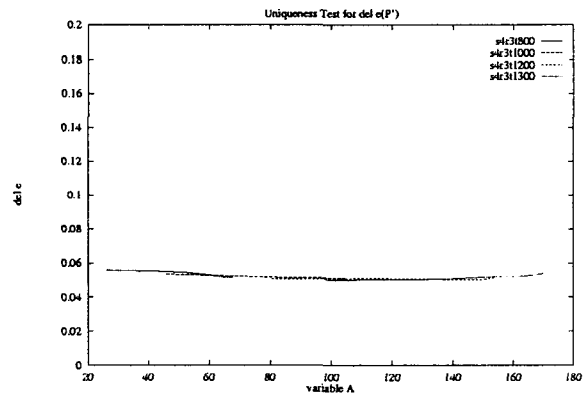


Fig. 3 Uniqueness Test (s:4,r:0.3,B:14305,C:53)

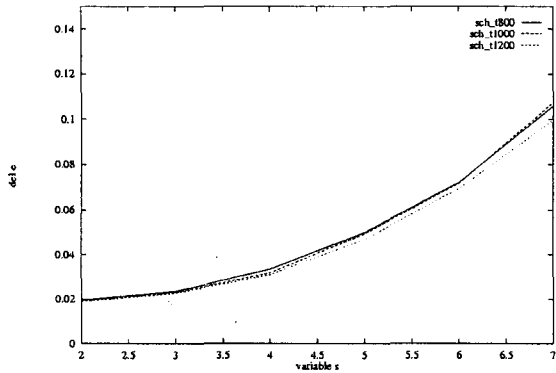


Fig. 4.1 Tendency Test for variable S

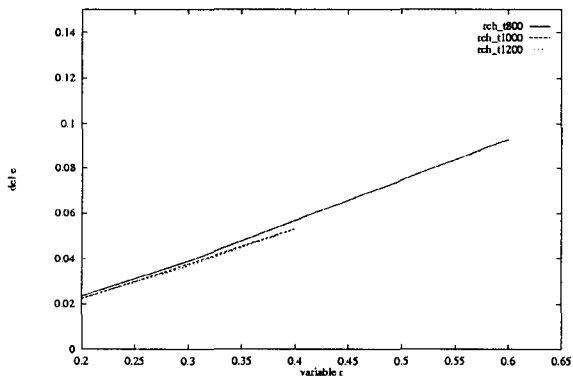


Fig. 4.2 Tendency Test for variable r

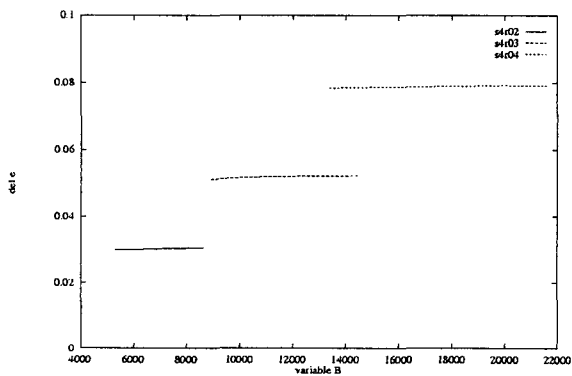


Fig. 4.3 Tendency Test for variable B

Table 2 Simulation conditions (total :1728 cases)

s	2,4,6,7
r	0.2,0.3,0.4,0.6
μ	0.25,0.3,0.4
H_{lub}	0.05,0.15,0.3
k^s	0.025,0.030
ρC_p	0.004,0.006
T_j	800,1000,1200

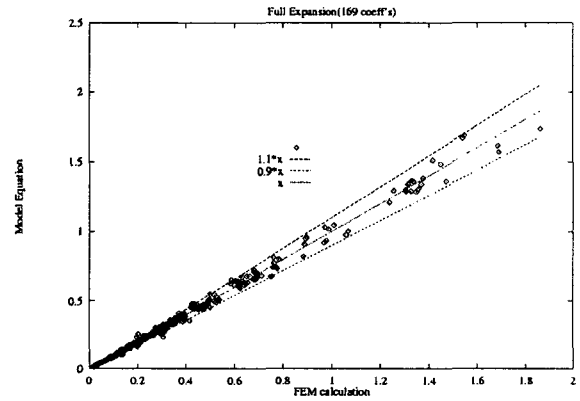


Fig. 5 Comparison between model and FEM

Table 3 On-line model coefficients

f00000	.14238E+02	f00001	-.43877E-01	f00010	-.99180E-01
f00100	-.80104E+02	f01000	-.76102E+02	f10000	-.72471E+01
f00002	.32231E-03	f00011	-.47529E-03	f00020	.28654E-03
f00101	.28065E+00	f00110	.46260E+00	f00200	.10976E+03
f01001	.53109E+00	f01010	.74376E+00	f01100	.42874E+03
f10001	-.17573E-01	f10010	.15182E-01	f10100	.38550E+02
f11000	.43754E+02	f20000	.12582E+01	f00012	.29954E-05
f20211	-.33692E-03	f20220	.21403E-04	f21012	-.28336E-06
f21021	.22310E-06	f21102	.35388E-03	f21111	.14247E-03
f21120	.29497E-04	f21201	-.15147E-01	f21210	.18748E+00
f30012	-.30542E-07	f30021	.21629E-07	f30102	.92658E-05
f30111	-.60425E-04	f30120	.22208E-04	f30201	-.64966E-02
f30210	-.93850E-02	f31002	-.11067E-05	f31011	27094E-05
f31020	.47464E-06	f31101	.71808E-02	f31110	.44784E-02
f31200	.33410E+01	f00000		f00000	