

유한요소법 기반의 무차원화를 이용한 판 유효 변형률 분포 예측 온라인 모델 개발

김성훈*, 이종형**, 황상무***
포항공과대학교 기계공학과 대학원*
포항공과대학교 기계공학과 연구원**
포항공과대학교 기계공학과 교수***

The development of On-line Model for the Prediction of Effective Strain Distribution by Non-dimensionalization on FEM Basis

S. H. Kim*, J. H. Lee* and S. M. Hwang*
Mechanical Engineering Department, POSTECH*

Abstract

In this research on-line model for the prediction of the effective strain distribution in strip on finishing mill process is presented. To describe the effective strain distribution in strip, three guide points and a distribution fitting variable are used. On-line models to get these points and fitting variable non-dimensionalization method and least square method were used with FEM simulation results. The model is developed using strip only FEM simulation as reference sets and compared with roll coupled FEM simulation results as perturbed sets. The on-line model to describe effective strain distribution shows good agreement with coupled FEM analysis results

Key words : Finishing mill process, Effective strain distribution, Non-dimensionalization, On-line model

1. 서론

사상 압연에서 판의 형상 제어를 위한 수식 모델이 유한요소해석 기법을 바탕으로 제시되었다. 수식 모델의 개발은 경비 및 시간의 절약 뿐만 아니라 정밀성을 고려해 볼 때 유한요소해석 기법을 통한 유도가 하나의 해결책이 될 수 있다. 하지만 유한요소해석 기법의 특성상 보다 정밀한 예측을 위하여 대상을 세밀히 나누어 계산할수록 계산시간의 증가를 동반하게 된다. 따라서 유한요소해석의 정확성을 기반으로 한 온라인 모델식의 개발이 필요하게 되었다. 이러한 연구로서 유한요소해석 기법을 기반으로 롤 갭에서의 판 온도 예측 온라인 모델 개발 및 열간 압연 중 판 온도 예측 온라인 모델, 압하력, 압연동력 그리고 선진률 정밀 예측 온라인 모델들이 개발되었다. 본 연구에서는 이러한 여러 모델들과 유한요소해석 결과를 기반으로 하여 열간 사상 압연에서 판 내부의 유효 변형률 분포 예측 온라인 모델을 제시하였다. 분포 모델은 판 내부의 유효 변형률을 정밀하게 예측하게 함으로써 기존 모델식들이 제시한 평균적인 값들(압연하중, 압연동력 및 판 변형 에너지등)과는 달리 해석하고자 하는 위치에서 원하는 값을 정밀하게 얻을 수 있게 되었다. 모델식을 유도하기 위한 기준 세트(reference sets)로는 롤과 분리된 판만을 따로 유한요소해석한 결과로 잡았고, 비교 대상 세트(perturbed sets)로는 롤과 판의 연계 해석한 유한요소해석 결과로 잡아서 모델식을 검증하도록 하였다. 분포 모델을 얻기 위하여 판 내부의 유효 변형률 해석 결과에서 판 표면과 판 중앙의 대칭면, 그리고 최대 유효 변형률이 일어나는 세 점을 택하여 분포 곡선을 유한요소해석 결과에 근사하도록 하였다. 또한 이 세 점 이외에도 부드러운 곡선 연결을 위한 곡선 근사 변수(curve fitting

variable)을 도입하였다. 모델식에서 얻어진 유효 변형률 분포 모델은 연계 해석된 유한요소해석 결과와 함께 유효성을 제시하였다.

2. 온라인 모델식 구성을 위한 유한요소해석 경계 조건

온라인 모델식 구성을 위한 수식의 유도는 참고 문헌에서 제시한 바로 대신하고 본 연구에서 기준 세트(reference sets)와 비교 대상 세트(perturbed sets)로 연계 해석에 사용될 판과 롤의 경계조건은 그림 2.1 에서 표시하였다.

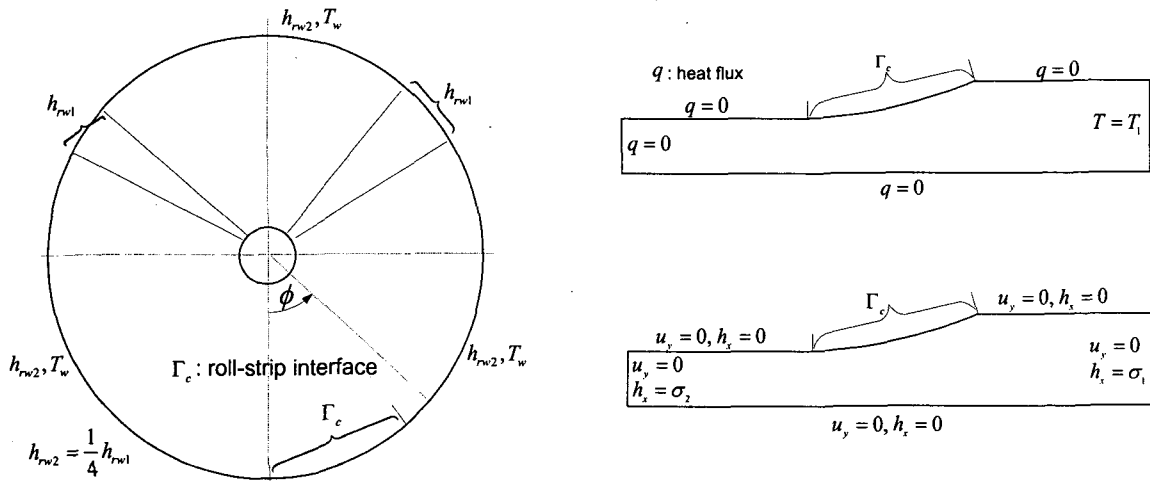


Fig.2.1 Roll and strip boundary conditions for FEM simulations

기준 세트(reference sets)는 롤을 제외한 판만을 가지고 해석하였고, 실제 롤과 판 사이에서 발생하는 열전달량(q_s)를 입력 값으로 하여 해석하였다. 롤과 연계 해석할 경우에는 롤로의 열전달량(q_s) 대신에 접촉 열전달 계수(H_{lub})를 사용하였다. 나중에 결과에서 제시되겠지만 판만의 해석으로도 열전달량을 평균값으로 고려되기만 하면 연계해석 결과와 비교하여 잘 일치하기 때문에 모델식을 만들 때 연계 해석으로 인한 시간을 줄일 수 있다.

3. 무차원 변수와 유한요소해석 공정 조건들

유효 변형률 분포를 나타내기 위한 변수 중에서 파이 이론에 의해 변수 조정을 통해 다음의 변수를 찾아내었고, 경향성 테스트를 통해 필요한 시뮬레이션 공정 조건의 개수를 정하고 유한요소해석을 시행하였다. 기준 세트의 경우 열간 사상 압연 공정 조건을 모두 다룰 수 있도록 하였고, 비교 대상 세트의 경우 공정 조건의 범위를 좀 더 실제치에 가까운 경우로 제한하였다. 무차원 변수 중 형상계수(s), 압하율(r), 마찰계수(Γ)를 제외한 변수들은 다음과 같다.

$$C_1 = \frac{\rho C_p \cdot V_r \cdot H_1}{k}, \quad C_2 = \frac{P^*}{k \cdot T_1}, \quad C_3 = \frac{Q}{P^* + \rho C_p \cdot V_r \cdot H_1 \cdot T_1}$$

여기서, Q 는 판에서 롤로의 총 열전달량을 나타내고 P* 는 롤의 가설모드에서의 이론적 압연하중을 나타낸다.

각 변수에 대한 기준 세트와 비교 대상 세트에 관한 시뮬레이션 공정조건은 표 3.1 과 표 3.2 에서 표시하였다.

Table 3.1 Reference sets (Strip only)

Simulation sets			The range of C_i	
$\bar{\sigma}$	kN/mm^2	0.1% carbon steel	C_1	147.7~1834667.7
R	mm	400	C_2	0.046 ~132.87
V_r	mm/sec	1000,4000,8000,12000	C_3	-0.2477~0.024
s		1,2,3,4,5,6,7	$C_4(\omega)$	2.5~37.5
r		0.05,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6	$C_5(T)$	800~1200
μ		0.2,0.3,0.4		
T_1	$^{\circ}C$	800,900,1000,1200		
q_s	W/mm^2	-100,-50,-20,10		
k_s	$W/mm^{\circ}C$	0.02		
ρC_p	$J/mm^3^{\circ}C$	0.0068		
Total number of sets = 6827				

Table 3.2 Perturbed sets (Coupled analysis)

Simulation sets			The range of C_i	
$\bar{\sigma}$	kN/mm^2	0.155% carbon steel	C_1	948.14~187500
R	mm	400	C_2	4.48 ~1863.26
V_r	mm/sec	3000,6000,9000	C_3	-0.35~0.007
s		2,3,4,5	$C_4(\omega)$	2.5~37.5
r		0.2,0.3,0.4	$C_5(T)$	800~1100
μ		0.2,0.3,0.4		
T_1	$^{\circ}C$	800,900,1000,1100		
H_{lub}	$W/mm^2^{\circ}C$	0.04,0.06,0.1		
k_s	$W/mm^{\circ}C$	0.03,0.05		
ρC_p	$J/mm^3^{\circ}C$	0.04,0.06,0.1		
Total number of sets = 5785				

4. 유효 변형률 분포 모델식을 위한 변수들과 분포 곡선

열간 압연 해석 결과 유효 변형률 분포는 그림 4.1 과 그림 4.2 와 같은 두 개의 대표적인 형태를 띠게 됨을 알 수 있다. 그림 4.1 과 같은 형태를 타입 2 라고 하고 이와 같은 분포는 공정 조건 중 롤 속도가 상대적으로 느리고 접촉 열전달 계수가 크고, 롤과 판 사이의 온도차가 높고 결과적으로 판에서 롤로의 열 전달량이 많은 경우에 발생하는 것을 알 수 있었다. 롤로의 열전달량이 높으면 표면보다는 표면에서 약간 밑에서 온도가 더욱 높아져서 변형이 더 쉽게 되므로 이와 같은 현상이 발생한다고 생각되어 진다. 이와는 반대로 타입 1 의 경우는 열전달량이 비교적 적으므로 최대 유효 변형률은 롤과 판의 접촉 표면에서 발생하는 것을 보여주고 있다.

각 그림에서는 유효 변형률 분포 곡선을 그리기 위한 세가지 점을 나타내고 있는데 타입 1의 경우는 최대 유효 변형률이 표면에서 발생하게 되므로 표면에서의 유효 변형률 값($\bar{\epsilon}_s$)과 판 중앙의 대칭점에서의 유효 변형률($\bar{\epsilon}_c$)값만 표시되어 있다.

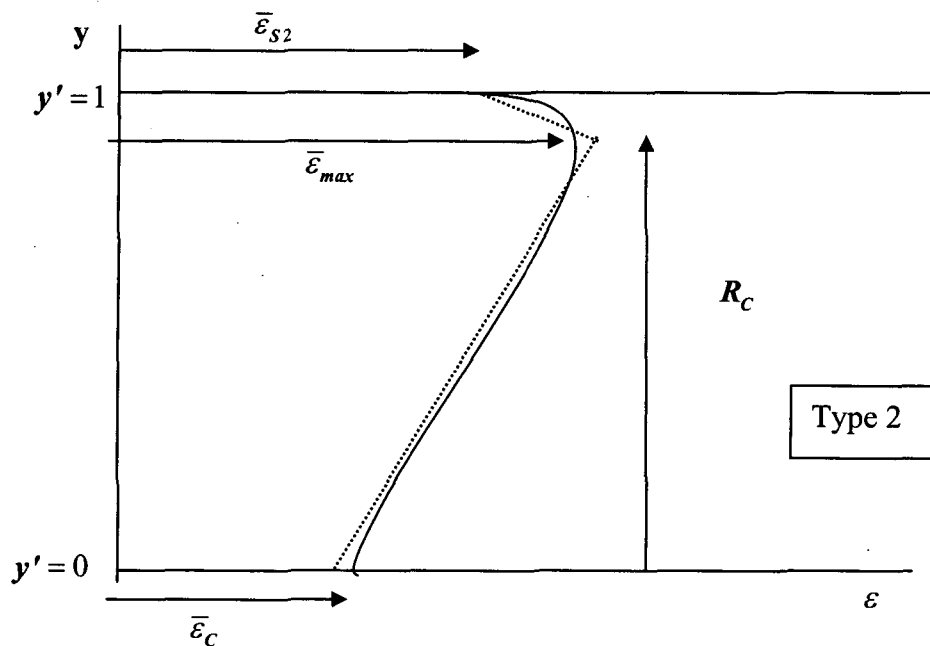


Fig.4.1 Effective strain distribution (type 2)

$$\bar{\epsilon}_{max} = f_1(s, r, \mu, C_1, C_2, C_3), \text{ where } f_1 = \sum_{i,j,k,l,m,n} (a_{ijklmn}) s^i r^j \mu^k C_1^l C_2^m C_3^n$$

$$\bar{\epsilon}_{S2} = f_2(s, r, \mu, C_3) \text{ where } f_2 = \sum_{i,j,k,l} (b_{ijkl}) s^i r^j \mu^k C_3^l$$

$$R_c = f_3(s, C_2, C_3, T) \text{ where } f_3 = \sum_{i,j,k,l} (c_{ijkl}) s^i C_2^j C_3^k T^l$$

$$\bar{\epsilon}_c = f_5(r), \text{ where } f_5 = \sum_i (e_i) r^i$$

형상 계수 (fitting variable)은 위의 세 점을 유한요소 해석 결과 그림과 근사하도록 잇는 탄젠트 곡선을 사용하는 데 있어서 필요한 변수로서 아래의 공식으로 표현되면 이것은 유한 요소 해석 결과와 최소자승법을 이용하여 구한다.

a (fitting variable)

$$\epsilon = \bar{\epsilon}_{max} - (\bar{\epsilon}_{max} - \bar{\epsilon}_c) \cdot \frac{\frac{2}{\pi} \tan^{-1}(a(\delta - y'))}{\frac{2}{\pi} \tan^{-1}(a\delta)}$$

where $\delta = \frac{y_{max}}{H_2/2} = R_c$, $y' = \frac{y}{H_2/2}$ (normalized height)

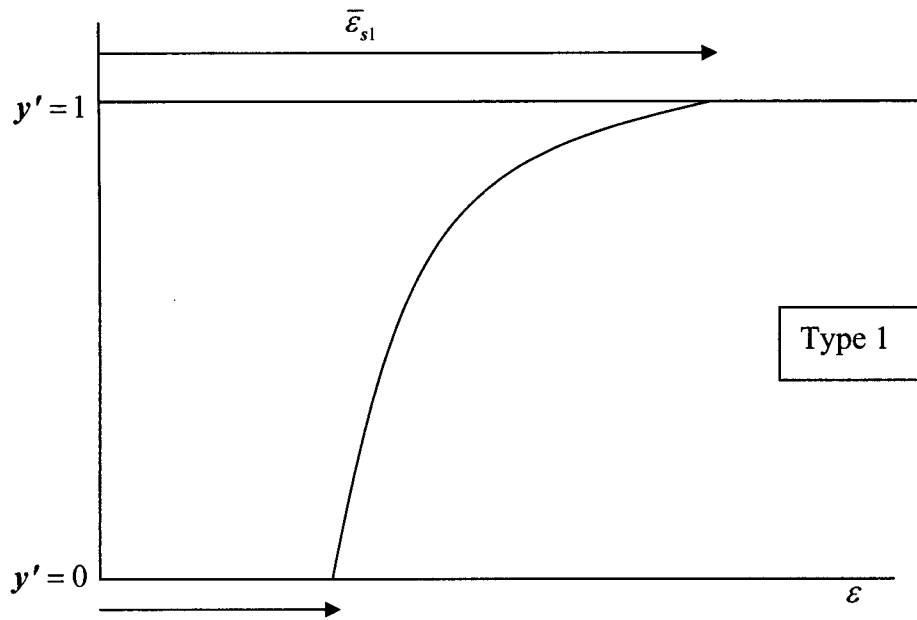


Fig.4.2 Effective strain distribution (type 1)

$$\bar{\epsilon}_{s1} = f_6(s, r, \mu, C_1, C_3) \text{ where } f_6 = \sum_{i,j,k,l,m} (g_{ijklmn}) s^i r^j \mu^k C_1^l C_3^m$$

$$\bar{\epsilon}_C = f_5(r), \text{ where } f_5 = \sum_i (e_i) r^i$$

각 모델식에서 무차원 변수의 설정과 다항식의 차수는 각 변수와 구하고자 하는 함수값과의 경향성 테스트를 통하여 결정하였다. 그림 4.3 과 그림 4.4 는 경향성 테스트를 시행한 결과를 보여주고 있다.

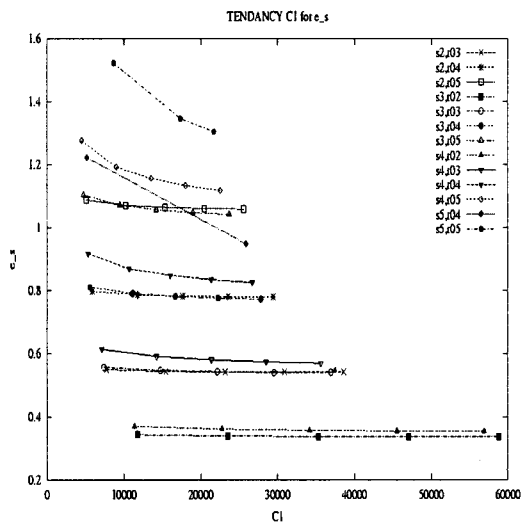


Fig.4.3 tendency test (e_s and CI)

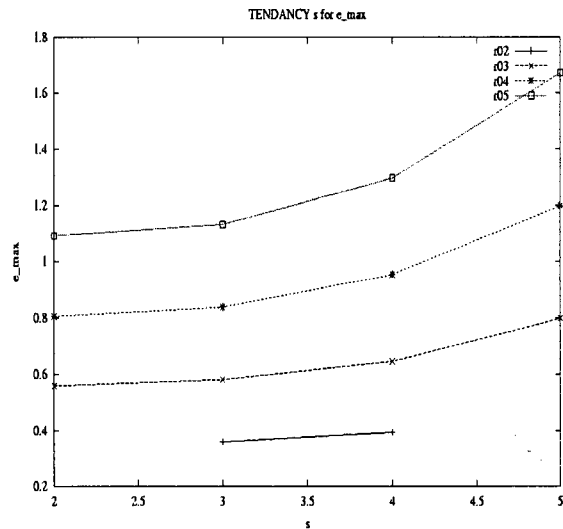


Fig4.4 tendency test(e_max and s)

5. 모델식의 유도과 연계 해석 결과와의 비교

위에서 제시된 무차원변수와 경향성 테스트를 통한 정렬을 통해 모델식을 기준 세트로부터 유도하였다. 설명한 것처럼 타입 2의 경우 표면과 판의 중앙 그리고 최대 유효 변형률의 위치와 값의 네 가지 모델식과 함께 형상 계수의 다섯 가지 모델식이 유도되고, 타입 1의 경우는 최대 유효 변형률이 판 표면에서 발생하므로 세 가지 모델식만 필요하다.

다음의 그림들은 대표적인 몇 가지 경우에 대하여 모델식의 유도와 연계 해석과의 비교한 것들이다. 가로축은 유한요소 해석결과를 나타내고, 세로축은 모델식에서 얻은 값을 표시하고 있으므로 대각선상에서 정렬될 경우 모델식이 잘 일치한다고 말할 수 있다.

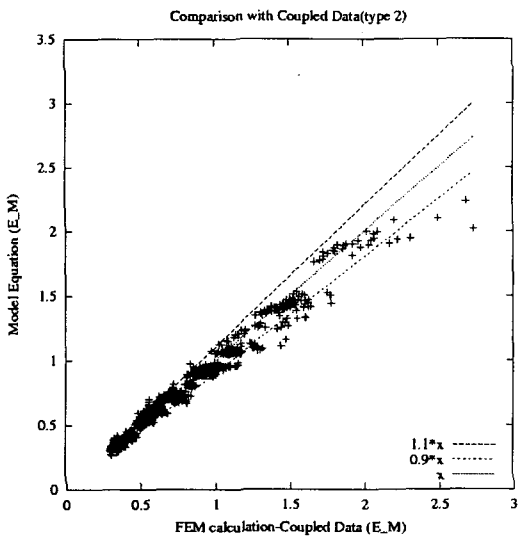


Fig.5.1 model for e_{max} (strip only)

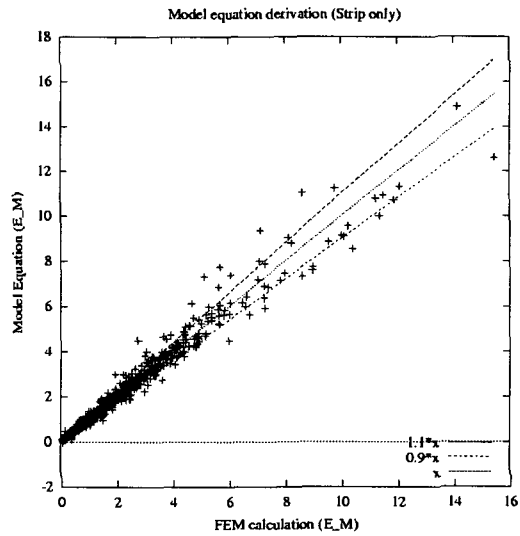


Fig.5.2 model for e_{max} (coupled case)

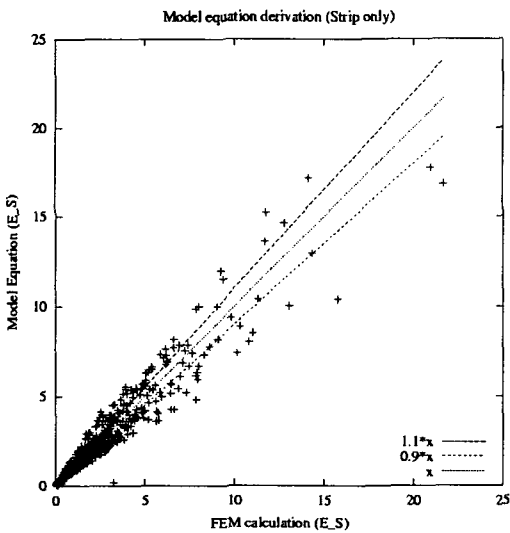


Fig.5.3 model for e_s (strip only)

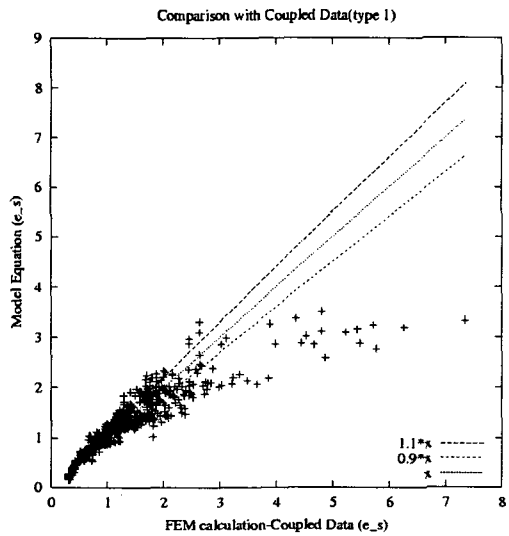


Fig.5.4 model for e_s (coupled case)

6. 유효 변형률 분포 모델 곡선과 연계 해석 결과와의 비교

분포 모델의 그림을 그려서 실제 유한요소 해석 결과와 비교하기 위해서는 먼저 해석에 사용된 입력 값으로부터 타입 1 혹은 타입 2 인가의 분류가 되어야 하고 분류된 것에 대해 각각 모델식을 적용하여 분포 곡선을 그리게 된다. 타입 1 과 타입 2 의 분류는 최대 유효 변형률이 나타나는 위치를 기준으로 하여 분류되는데 유한요소해석에서는 격자가 유한하게 되므로 이 유한개의 점으로부터 연속적인 위치 데이터를 추출하는 작업이 필요하다. 다음 식은 유한한 격자 값에서부터 연속적인 데이터를 갖게 하는 유도식이다.

$$C < A < B$$

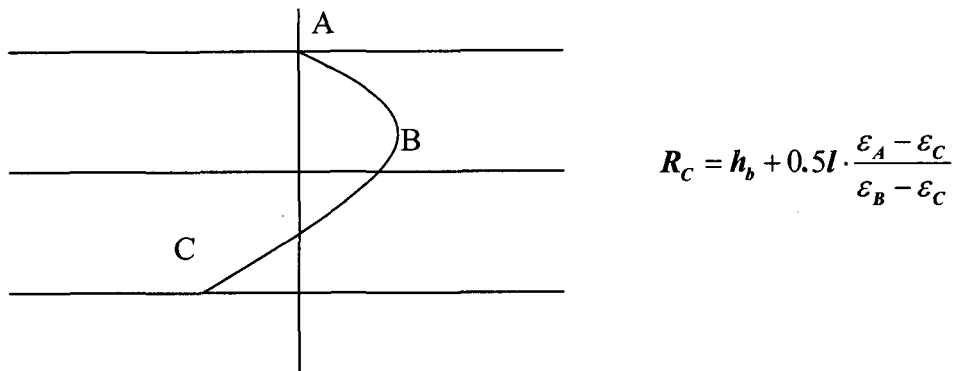
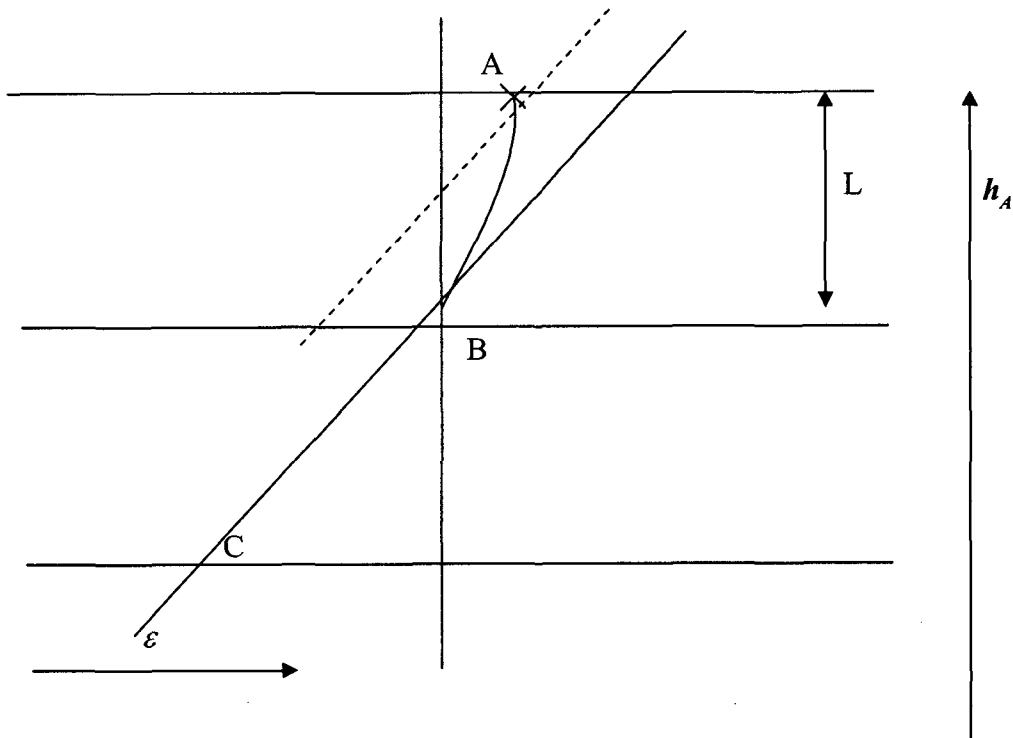


Fig.6.1 maximum point deriving equation (max point is at mid nodes)



$$R_c = h_A - 0.5L + (0.5L) \cdot \frac{\epsilon_A - \epsilon_B}{0.5(\epsilon_B - \epsilon_C)}$$

Fig.6.2 maximum point deriving equation (max point is at surface node)

다음의 그림들은 몇 가지 경우에 대해 위에서 유도된 모델식과 형상 계수를 적용시켜 유효 변형률 분포 그림을 연계해석된 결과와 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 타입 1 과 타입 2 모두 유효요소 해석 결과와 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

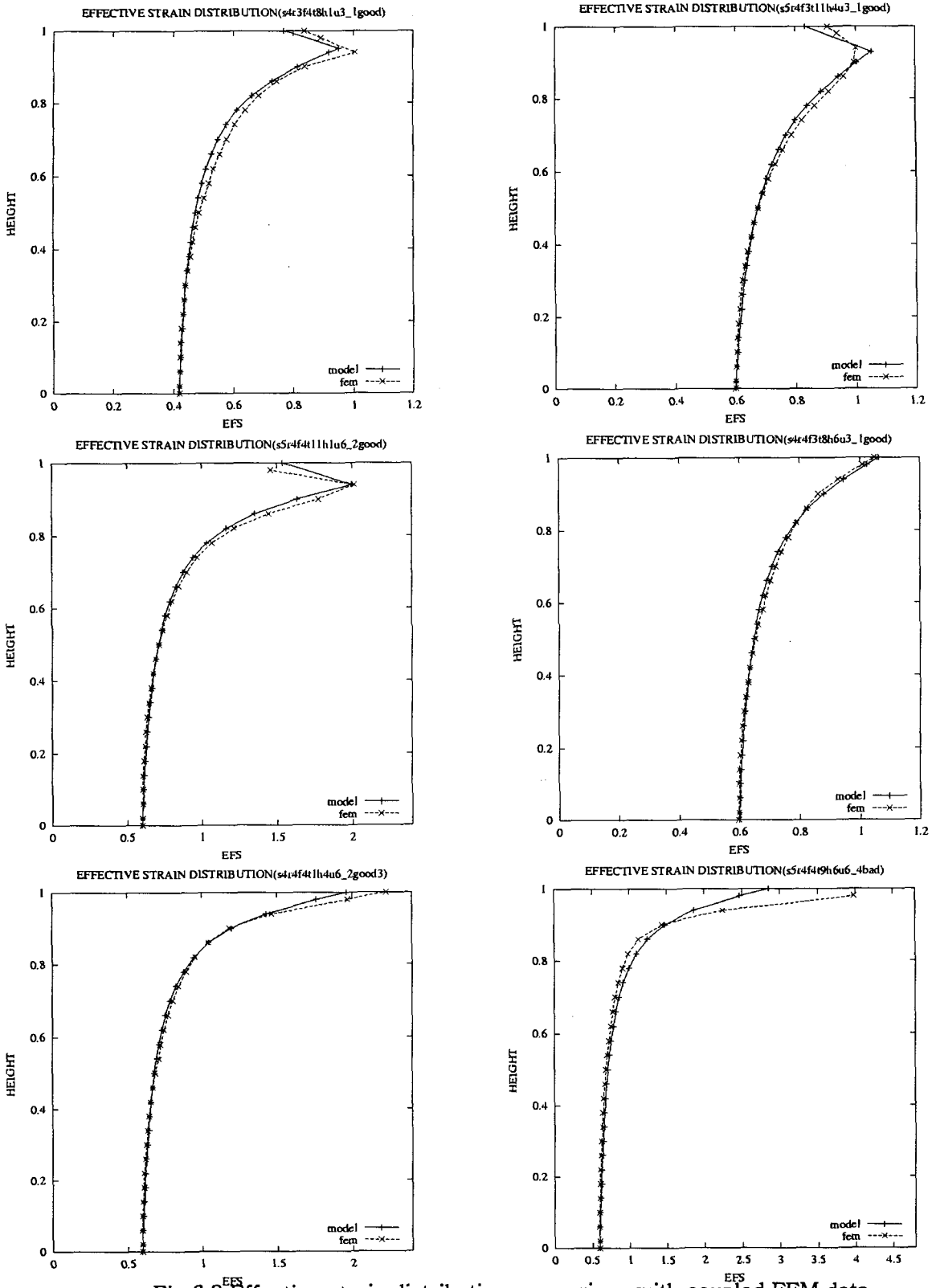


Fig.6.3 Effective strain distribution comparison with coupled FEM data

7. 결론

본 연구에서는 유한요소해석 결과를 기반으로 파이 이론을 도입한 무차원 변수를 통해 열간 사상 압연에서의 유효 변형률 분포 예측 온라인 모델식을 유도 하였다. 유도된 각 특정 위치에서의 모델식을 바탕으로 판 전 영역에서 유효 변형률을 연계 해석된 유한요소해석 결과와 근접한 값을 유도할 수 있었다. 따라서 유도된 식은 유한 요소 해석 결과의 정확성을 확보하면서 간단한 다항식으로 표시됨으로써 온라인 모델식으로도 활용될 수 있는 본래의 목적에 부합한다고 할 수 있을 것이다.

그리고 유도 과정에서 경험한 바에 의해 판 자체의 해석 만으로도 연계 해석 결과를 도출 할 수 있었다는 점을 고려해 볼 때 앞으로의 시뮬레이션도 판 만의 해석에 집중시킨다면 모델식 도출에 걸리는 시간도 매우 단축할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. E. Orowan, Proc. Instn. Mech. Engrs. , 1943, Vol.150. p140
2. R. B. Sims, Proc. Instn. Mech. Engrs., 1954, Vol.168, p191
3. C. S. Sun, C. S. Yun, J. S. Chung and S. M. Hwang : Metall. Mater. Trans. A, 29A, 1998, p2885
4. W. J. Kwak, Y. H. Kim, H. D. Park, J. H. Lee and S.M. Hwang, ISIJ Int, 2000, Vol.40,p1013-1018
5. 이중형,2004, " 유한요소법을 이용한 열간 압연중 판 온도 예측 모델 개발" , 포항공대 기계공학과 박사학위 논문.
6. 광우진,2001, " 유한요소법에 기초한 열연시 압하력,압연동력 그리고 선진율 정밀 예측 온라인 모델 개발" ,포항공대 기계공학과 박사학위 논문