

## 4 High Mill 열간 압연 공정의 3 차원 정상상태 유한요소해석

류성룡, 김태효, 황상무  
포항공과대학교 기계공학과

### Finite Element Analysis of 3-D Steady State Deformation of Rolls and Strip in 4 High Mill

S.R.Ryoo, T.H. Kim, S.M. Hwang  
Dept. of Mechanical Engineering, POSTECH

#### ABSTRACT

An integrated finite element computer simulator is presented for the prediction of three dimensional heat transfer and metal flow occurring in the strip, and heat transfer and thermo elastic phenomena occurring in the rolls in 4 high mill hot strip rolling. Basic finite element models are described, with emphasis on combining each model to deal rigorously with the coupled aspect of the thermo-mechanical behaviors of the rolls and strip through an iterative solution procedure. A series of process simulation are carried out to investigate the effect of various parameters under the actual process conditions. The results are shown and discussed.

.Key words: 4 High Mill, rolling, elastic deformation

#### 1. 서론

열간 압연 공정에서 고온의 판은 최종 두께를 얻기 위해 롤 사이를 통과하면서 두께를 감소 시켜가는 공정이다. 공정의 설계 및 제어의 목표는 생산자와 사용자의 요구에 따라 변할 수 있으나, 최근의 압연공정에서는 품질의 정밀제어 뿐만 아니라 생산성도 고려하는 새로운 방법이 도입되고 있다. 제품의 질은 압연된 판의 치수 정확성과 미세조직에 의해, 생산성은 판에서의 금속의 유동성과 열전달, 그리고, work roll 및 backup roll 에서의 응력, 변형 및 열전달에 의해 좌우된다. 이와 같이, 공정의 설계와 제어를 위해서는 생산현장에서의 일어나는 판과 롤의 열적, 기계적, 금속학적 거동에 대한 고찰이 필수적이다

스트립 내부의 응력 및 변형 해석은 2 차원의 경우 황[1]에 의한 벌칙 강소성 유한 요소법 등 FEM 을 이용한 해석이 일반적이고 정확도 측면에서도 많은 검증이 이루어졌다. 따라서 3 차원의 경우에도 정확도가 높은 FEM 을 사용하여 판압연을 해석하려는 시도가 있었다. 그러나 손[2]등에 의해 2 차원 해석의 경우 롤의 탄성해석이 판에 미치는 영향이 크지 않은

반면, 3 차원 해석의 경우 롤의 변형이 직접적으로 판의 형상에 영향을 미치고, 따라서 판의 평탄도에도 많은 영향을 미치게 된다. 따라서 3 차원 판압연공정의 해석시 롤탄성 해석은 중요한 요소가 된다.

Shohet[3]은 롤을 1 차원 빔으로 단순화 시켜 롤의 변형을 해석하는 matrix method 를 제안하였다. 이 방법은 계산이 매우 단순하고 각각의 롤 계수들을 사전에 구할 수 있는 까닭에 해석에 소모되는 시간을 상당히 줄일 수 있는 장점이 있으나 indentation 의 해석이 단순하여 edge 부에서 정확도가 떨어진다. yasuda[4]은 이를 확장하여 롤 shift 를 가진 HC mill 을 해석할 수 있는 방법을 제시하였고, 또한, Ogawa[5]은 Nakajima 등[6]이 제시한 롤과 판사이의 변형식을 이용, 12-high mill 을 해석하였다. 그러나 이러한 단순 모델을 이용한 방법은 복잡한 실제 롤의 형상을 반영하기가 어렵고, 그 계수를 구하기가 쉽지 않은 경우가 많아 해석에 한계를 가진다.

Xianlin[7]은 두께가 변하는 2 차원 요소를 도입하여 3 차원 롤 변형을 2 차원화 시켜 풀었고 Yanagimoto[8]는 롤의 축변형은 기존의

matrix method 를 이용하여 롤과 판 사이의 롤 force 분포를 구함으로써 3 차원 롤의 탄성해석을 수행하였다. 또한 Hacquin[9]은 롤에 대해 3 차원 탄성변형을 FEM 으로 해석하여 bossussineq 식의 계수를 구하고 이를 이용하여 판과 연계 해석하였다.

본 논문에서는 4 high mill stand 에서의 판의 유동 및 열전달, work roll 및 backup roll 에서의 열전달과 열탄성 변형을 예측할 수 있는 3 차원 유한요소해석 모델을 제시하였다. 모델은 정상상태를 가정하였으며, work roll 및 backup roll 의 응력 및 변형, 판에서의 유동 그리고 열전달을 연계하여 해석한다. 판의 소성유동을 해석하기 위하여 강소성 유한요소법을 판 및 롤에서의 정상상태 열전달 해석을 위해 Petrov-Galerkin 유한요소법을 사용하였다. Work roll 및 backup roll 의 해석에도 유한요소법을 사용하여 롤의 열탄성 거동을 해석하였다. 즉, 판에서의 소성유동과 열전달의 연계해석, 판과 롤간의 열전달 해석, 판에서의 소성변형과 work roll 및 backup roll 의 변형을 연계하여 해석할 수 있다. 개발된 시뮬레이터를 사용하여 롤 bender force 의 변화에 따른 해석 결과를 제시하였다.

## 2. 판과 work roll 및 backup roll 의 열적, 기계적 거동의 예측을 위한 시뮬레이터

열적, 기계적 거동의 해석을 위한 모델에 근거하여, 네 개의 유한요소 코드를 개발하였다. 이는, 판에서의 유동해석을 위한 코드, 판에서의 열전달 해석을 위한 코드, work roll 및 backup roll 에서의 열탄성 변형을 예측하기 위한 코드, work roll 및 backup roll 에서의 열전달 해석을 위한 코드이다. 4 high mill 에서 판 및 롤의 열적, 기계적 거동을 해석하기 위한 컴퓨터 시뮬레이터는 위의 네 개의 코드를 조합하여 이루어 진다. 판에서의 열전달과 유동은 서로 영향을 미치는데, 유동응력은 온도의 영향을 받음과 동시에, 판의 소성 유동은 열을 발생시키기 때문이다. 또한, work roll 및 backup roll 의 구성방정식은 온도의 함수이므로, 롤에서의 열전달 역시 롤의 변형에 영향을 미치게 된다. 한편, 판과 work roll 은 서로 접촉하고 있으므로, 판의 열적, 기계적 거동은 work roll 의 열적, 기계적 거동과 연계가 되어야 한다. 그림 1 에는 위의 코드들의 유기적인 관계를 도식적으로 나타내었다. 그림 2 에

는 각 코드들의 상호 의존적 관계와 반복해석의 흐름을 나타내었다. 4 high mill 에서 roll force 는 work roll 과 backup roll 의 접촉을 통하여 work roll 로 전달되므로, work roll 에서의 기계적 거동이 backup roll 로 전달이 되고, backup roll 에서의 기계적 변형은 다시 work roll 로 전달된다. 실제의 경우 work roll 과 backup roll 사이에는 마찰이 존재하나, work roll 및 backup roll 간의 마찰을 무시하고 해석하는 것이 roll force, work roll 과 backup roll 의 변형형상 및 응력에 미치는 영향은 적다.

## 3. 4 high Mill 해석을 위한 유한요소격자 구성

판의 입측 형상으로부터 2 차원 유한요소를 구성하고 압연 진행 방향으로 롤과의 접촉을 고려하여 요소 구성을 하였다. 롤은 판 및 롤과 접촉하는 부분을 다른 부분보다 요소의 밀도를 높여 해석의 정확성을 도모하였다. 판의 초기 유한 요소 격자망과 work roll, back up roll 의 유한 요소격자 망을 각각 그림. 3 과 그림. 4 에 보였다.

## 4. 해석 결과.

개발된 유한 요소 해석 프로그램을 사용하여 4-high Mill 정상상태 압연 공정을 해석 하였다. 상·하 대칭성을 이용하여 상부만을 해석하였으며 공정 조건은 다음과 같다.

판의 재료 : 저탄소강 (탄소 함유량 0.07 %)

입측 온도 : 1003 ° C

입측 두께 : 40.49 mm

출측 두께 : 31.26 mm

판 폭 : 862 mm

work roll 재료 : HSS roll

work roll 직경 : 794.4 mm

work roll 속도 : 89 mpm

work roll 온도 : 30 ° C

bender force : 0, 100 ton/chock

backup roll 재료 : Ni-grain roll

backup roll 직경 : 1600 mm

backup roll 속도 : 89 mpm

backup roll 온도 : 30 ° C

위의 조건을 사용하여 유한 요소 해석 후 롤의 변형 형상을 300 배 확대하여 그림. 5 에 보였으며, 각 bender force 에 따른 압연 후 판의 형상을 그림. 6 에, 판의 유효 변형율의 분포를 그림 7 에 롤의 유효응력의 분포를 그림 8 에보였다.

### 5. 향후계획

본 논문에서는 work 롤과 backup 롤의 탄성변형을 고려하여 압연후의 판의 형상을 예측할 수 있음을 보였다. 현재 고려하고 있지 않은 자유표면 예측기법과 롤의 열변형, 롤의 마모량 등을 고려한다면 보다 정밀한 판 변형의 예측이 가능하리라 기대된다.

### 6. 참고 문헌

[1] S.M.Hwang, M.S.Joun and J.S. Park, "A Penalty Rigid-Plastic Finite Element Method for the Determination of Stress Distribution at the Toll-Workpiece Interfaces in Metal Forming" Proc. 18<sup>th</sup> NAMRC, University Park, pennsylvania, 1990, pp.13

[2] C.G..Sun, C.S.Yun,J.S.Chung and S.M.Hwang, "Investigation of Thermo-mechanical Behavior of work roll and Roll life in Hot Strip Rolling.",Metal. Trans. A. , accepted.

[3] K.N. Shohet, N.A. Townsend, "Roll bending methods of crown control in four-high plate mills", J. Iron & Steel Inst., 1968, vol. 206, pp.1088-1098

[4] K.I. Yasuda, S. Shida, "Characteristic of Shape control in HC-Mill", 소성 과 가공, 1991, vol.22, no.244,pp.460-466

[5] S. Ogawa, S. Matsumoto, T. Kawanami, "Prediction of flatness of fine gauge strip rolled by 12-high cluster mill", 1991, ISIJ Int., vol.31, 599-606

[6] K. Nakajima, H. Matsumoto, Proc.24<sup>th</sup> Japanese Joint Conf. For Technology of Plasticity, JSTP, Tokyo, 1973, vol.29

[7] C. Xianlin, Z. Jiayang, "A specialized finite element model for investigating controlling factors affecting behavior of rolls and strip flatness", Proc. 4<sup>th</sup> Int. Steel Rolling Conference, France, 1987, pp4.1-4.7

[8] J. Yanagimoto, M. Kiuchi, "Three-dimensional simulation system for coupled elastic/rigid-plastic deformation of rolls and workpieces in strip rolling processes", NUIFORM92, 1992, pp.763-768

[9] A. Hacquin, P. Montmitonnet, "Coupling of roll and strip deformation in three-dimensional simulation of hot rolling", Simulation of Mat. Proc., 1995, pp.921-927

[10] Chen,C.C., and Kobayashi,S.,1978,"Rigid plastic finite element analysis of ring compression,"ASME,AMD,28,pp163-174.

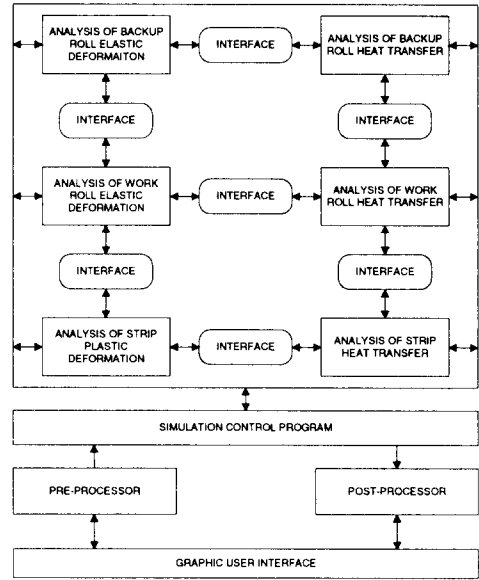


그림 14 High Mill 시뮬레이터의 구조

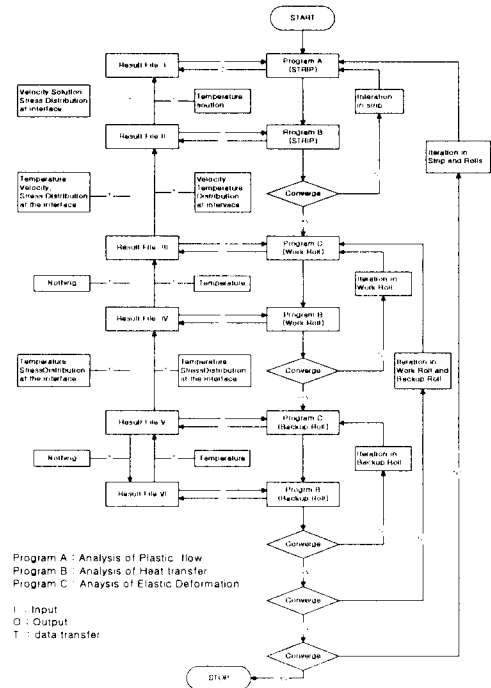


그림 2 판의 유동 및 열전달, work roll 및 backup roll 의 열탄성 및 열전달 해석을 위한 반복 계산

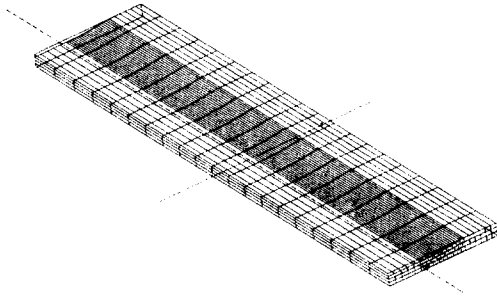


그림 3 초기 판의 유한요소 격자망

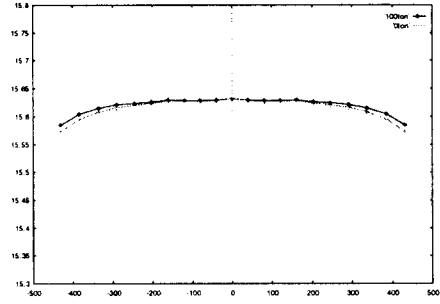


그림 6 압연 후 판의 profile

(bender force=0 ton, 판 crown=95.49 $\mu$ m  
bender force=100 ton, 판 crown=74.12 $\mu$ m)

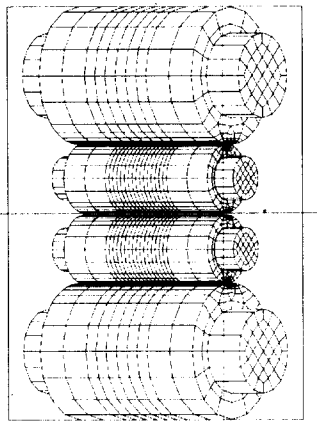


그림 4 Work roll, Backup roll 의 초기 형상 및 유한요소 격자망

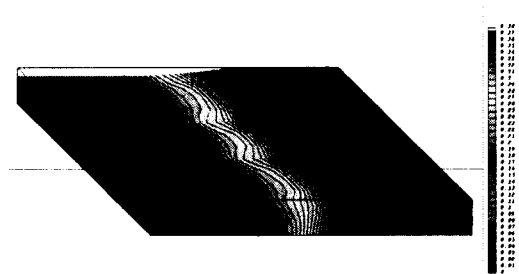


그림 7 압연 후 판의 유효 변형을 분포 (bender force = 100 ton)

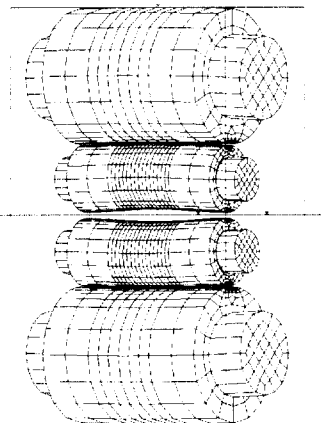


그림 5 탄성변형 후 Work roll, Backup roll 의 형상

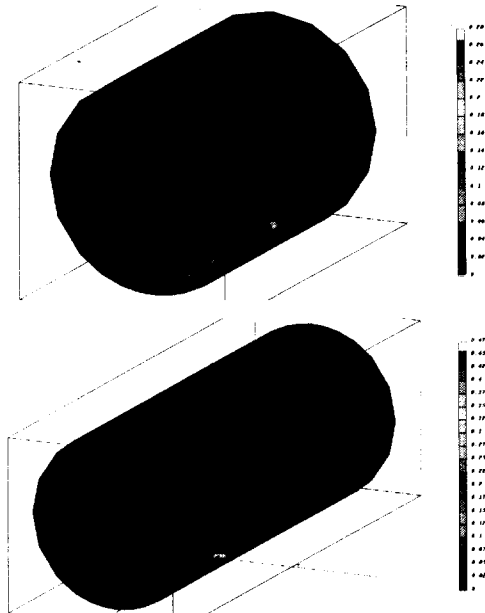


그림 8 탄성변형 후 backup roll 및 work roll 의 유효응력 분포(bender force = 100ton)