

## 열연중 판 및 롤 프로파일 예측 시뮬레이터 개발

류성룡\*, 김태효, 황상무  
포항공과대학교 기계공학과

### AN INTEGRATED FINITE ELEMENT COMPUTER SIMULATOR FOR THE PREDICTION OF ROLL AND STRIP PROFILE IN HOT STRIP ROLLING

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

#### Abstract

A three dimensional finite element-based computer simulator is presented for the analysis of the thermo-mechanical behaviors of rolls and strip during hot strip rolling. The simulator is capable of predicting the strip profiles in a 4 high mill stand, and in particular, can account for the effect of bender forces and pair cross angles. The structure of the simulator as well as various numerical schemes employed are described. The capability of the simulator is demonstrated through applications to some selected set of process conditions.

**Keywords:** hot strip rolling, strip profile, finite element method, four high mill

#### 1. 서론

열간 압연시 생산되는 제품의 품질을 높이기 위한 노력의 결과로 롤 벤더, 롤 슈프트, 롤 교차와 같은 새로운 기술이 개발되어 압연의 고품질화가 이루어져 가고 있다. 그러나 해석상의 어려움을 이유로 새로운 기술에 대한 고찰은 실험에 의존하거나 단순 모델을 사용하는 데 그치고 있다. 이러한 방법들은 직접적인 해석보다는 근사적인 해를 구하는데 치중하기 때문에 조업중인 압연기의 성격이나 공정 조건등에 크게 의존하게 되어, 생산목적에만 적합할 뿐, 압연중 발생하는 문제에 대한 정성적, 정량적인 접근이 어렵다. 한편, 열간 압연 중 판의 프로파일을 해석하기 위하여 유한 요소법에 바탕을 둔 off-line 시뮬레이터의 개발에 대한 노력이 있었는데, 이들은 기존의 해석적 모델이 제시할 수 있는 한계를 넘어서는데 그 초점을 두었으나 더 많은 연구가 추가적으로 이루어져야 할 것으로 보인다.(1-2) Fig. 1 에 보인 바와 같이, 4 단 압연기는 판, 상.하부 워크 롤, 상.하부 백업 롤의 5 개의 물체로 이루어져 있다. 이들은 상호접촉에 의하여 열적, 기계적으로 강하게 상호작용을 하고 있다. 즉, 판으로부터 워크 롤 2로의 열전달은 워크 롤의 변형을 일으키며, 이는 다시 판의 프로파일에 영향을 주게 되므로, 열적, 기계적 거동을 함께 고려하여 해석을 하는 것이 필수적이다. 특히, 판 및 롤 간의 접촉 영역을 정확하게 찾아내는 것은 매우 중요하다. 본 논문에서는, 4 단 압연기를 사용한 열간 압연공정에서 판 및 롤의 프로파일을 예측할 수 있는 3 차원 유한요소 시뮬레이터를 제시하였다.

## 2.3 차원 컴퓨터 시뮬레이터

### 2.1 시뮬레이터의 구조

시뮬레이터의 핵심부는 다음에 보인 6 개의 유한요소 모델로써 이루어져 있다.

- model for the analysis of thermo rigid-viscoplastic flow of the strip material
- model for the analysis of thermal behavior of the strip
- model for the analysis of thermo-elastic deformation of the work roll
- model for the analysis of thermal behavior of the work roll
- model for the analysis of thermo-elastic deformation of the backup roll
- model for the analysis of thermal behavior of the backup roll

위의 모델들은 정상상태 거동을 해석하기 위하여 오일러 관점에서 기술되었으며, 특히, 온도의 절점 간의 진동 현상을 막기 위하여 Petrov-Galerkin 방법을 사용하였다.(3) Fig. 2 에 보인 바와 같이 각각의 모델들은 서로간의 상호작용을 반영하기 위하여 조합되어 있는데 이를 정리하면 다음과 같다.

- 판에서의 열적 거동과 소재의 유동은 서로간에 영향을 주는데, 이는 소재에서의 응력은 온도의 함수이며 소재의 변형은 소성 열을 발생하기 때문이다.
- 워크 롤 및 백업 롤에서 응력-변형률 관계는 온도의 함수이므로, 워크 롤 및 백업 롤에서의 열적 거동은 워크 롤 및 백업 롤의 변형에 영향을 준다.
- 판 및 워크 롤에서의 열적 기계적 거동은 접촉영역의 존재로 인하여 서로 간에 영향을 준다.
- 워크 롤 및 백업 롤에서의 열적, 기계적 거동 역시 상호접촉으로 인하여 서로 간에 영향을 준다.

### 2.2 비정상 상태 거동의 처리

판 프로파일은 롤의 열 크라운에 크게 영향을 받는다. 그런데, 워크 롤의 온도는 작업의 개시 후부터 서서히 증가하는 양상을 보인다. 따라서, 판 프로파일을 구하고자 하는 시점에서의 롤의 열 프로파일을 얻어내기 위해서는 압연 개시 시점부터 계속하여 온도의 거동을 추적해야 하는데, 이는 비정상 상태 시뮬레이션에 의해서 얻어질 수 있다. 그러나, 비정상 상태 시뮬레이터를 사용하여 해석을 한다고 할지라도 압연은 수 시간에 걸쳐서 진행되는 반면, 비정상 상태 시뮬레이터에서 사용할 수 있는 시간 증분의 크기는 1초 이내의 값을 사용할 수 밖에 없으므로, 계산 시간의 측면에서 거의 불가능하다고 할 수 있다. 그러나, 작업 스케줄이 일정하게 결정되어져 있는 경우에, 비정상 상태 시뮬레이션을 대신하여 다음의 방법을 사용할 수 있을 것이다.

1. 롤 및 판에서의 열적 기계적 거동을 얻기 위하여 정상상태 시뮬레이션을 수행하고 예측된 판에서의 온도분포를 저장한다.
2. 예측된 판 표면에서의 온도분포를 입력으로 하여 워크 롤에서 시간에 따른 온도 분포를 얻기 위하여 비정상 상태 시뮬레이션을 수행한다. 시뮬레이션 종료 시점은 판 프로파일을 관찰하고자 하는 시점까지이며, 이때, 백업 롤의 온도는 일정하다고 가정한다.

3. 위에서 얻어진 롤 및 판에서의 온도분포를 이용하여 정상상태 시뮬레이션을 수행함으로써 롤 및 판에서의 기계적 거동을 예측한다. 이 때, 롤의 마모량 등도 고려한다.

위에서 기술한 방법은 비정상 상태 시뮬레이션으로부터 판에서의 온도는 압연이 진행됨에 따라 크게 변하지 않는다는 결과에 그 근거를 두고 있다.

### 2.3 롤 교차 및 등가 롤 프로파일

상부롤과 하부롤이 일정한 각도를 형성하게 되면 판폭방향으로 롤갭이 변화하게 되고 이것은 롤크라운이 변화한 것과 동일한 효과를 낸다. 롤이 교차할 경우 판의 변형은 복잡한 양상을 띄게 되고, 따라서 해석상 많은 어려움이 따르게 된다. 따라서 롤 교차효과 해석시 등가 롤 프로파일이 많이 사용된다. 롤 교차각에 의한 롤갭의 변화는 워크 롤이 등가 프로파일을 가지는 것으로 해석가능하며 등가 롤 프로파일  $C_R$ 은 다음식에 의해 구해진다.

$$C_R = 2(g_{eq} - g) = 2\left[\sqrt{x^2 \tan^2 \theta + (R + g)^2} - (R + g)\right]$$

여기서  $g$ 는 초기 롤갭,  $R$ 은 워크 롤의 반경,  $\theta$ 는 교차각이다.

롤 교차 효과에 대해 등가 롤 프로파일을 사용할 경우 백업 롤과 워크 롤간의 갭에서 문제가 발생한다. 워크 롤에 앞서 정의한 등가 프로파일을 부여할 경우, 워크 롤은 백업 롤과 완전히 접하기 전에 더 많은 변형을 하게 되어 결국 롤갭이 실제보다 더 커지는 효과를 일으킨다. 이러한 문제에 대해 백업 롤이 워크 롤과 같은 프로파일을 가지도록 하여 워크 롤과 백업 롤 사이의 갭이 pair cross mill에서와 유사한 형태로 만들거나 워크 롤이 변형 후 백업 롤과 접하게 될 때 생기는 롤갭이 등가 프로파일과 일치한다는 가정하에 워크 롤에 계산된 등가 롤 프로파일의 절반만을 부여하는 방식이 제시 될 수 있다. 본 연구에서는 여러 공정에 대해 실제 롤을 교차하여 해석한 경우와 결과가 가장 잘 일치하는 경우인, 백업 롤을 워크 롤과 일치시켜서 얻어진 등가 롤 프로파일을 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

아래의 결과들은 판 및 롤에서의 온도 분포는 주어져 있다고 가정한 상태에서 롤과 판에서의 기계적 거동에 대해서만 고찰한 것이다. 해석에 사용된 공정조건을 요약하여 Table 1에 나타내었다. 해석에 사용된 판의 요소 형상을 Fig 3에, 워크 롤과 백업 롤의 요소 형상을 Fig. 4에 나타내었다. 8절점 육면체 요소를 사용하여 해석을 수행하였으며, 판과 워크 롤이 접촉하는 부분, 워크 롤과 백업 롤이 접촉하는 부분에서는 정확한 접촉 영역을 찾아내기 위하여 요소의 밀도를 높였다. 해석 후 워크 롤 및 백업 롤의 변형 형상을 Fig. 5에 나타내었다. 각 롤에서의 변위를 육안으로도 쉽게 관찰할 수 있도록 변위를 과장해서 도시 하였다.

각종 공정 변수의 영향을 알아보기 위하여 먼저, 초기 판 크라운, 롤 교차, 벤더력, 롤의 초기 크라운이 없는 상태에서 시뮬레이션을 실시 하였다. 판 폭만을 변화 시켜 가면서 해석을 수행했을 때 판

폭에 따른 판 프로파일의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 일반적으로, 판 크라운은 판 폭이 증가함에 따라 증가하다가 감소하는 경향을 보이며, 압하율(또는 투영 접촉 길이)이 증가함에 따라 판 크라운도 증가하는 경향을 보임을 알 수 있었다.(Fig. 7) 이상의 시뮬레이션에서 얻어진 판 크라운을  $C_0$ 라고 두고 판의 초기 크라운, 롤 교차, 벤더력, 롤의 초기 크라운 등이 존재하는 경우에 얻어지는 판 크라운과 비교하는 기준으로 삼는다. Fig. 8에는 양 및 음의 벤더력이 존재할 때의 판 프로파일을 벤더력이 존재하지 않을 때의 판 프로파일과 함께 도시하였다. 한편, 벤더력이 존재할 때 얻어지는 판 크라운을  $C$ 라고 두었을 때, 압하율(또는 투영 접촉 길이)이  $C-C_0$ 에 미치는 영향은 그다지 크지 않음을 알 수 있었다.(Fig. 9) 벤더력이 존재할 때 판 폭의 변화에 대해서  $C-C_0$ 의 값은 거의 직선의 형태를 보임을 알 수 있었다.(Fig. 10) 이상의 결과는  $C-C_0$ 의 값은 판 두께, 판 폭, 벤더력 등의 함수로써 표현될 것이라고 유추할 수 있으나, 확정적인 결론을 내리기 위해서는 더 많은 시뮬레이션 및 실험, 고찰이 필요하다고 생각된다. 롤의 초기 크라운이 존재할 때, 판 프로파일의 변화를 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 12에는 투영 접촉 길이 및 판 폭이  $C-C_0$ 에 미치는 영향을 나타내었는데, 판 폭이 증가함에 따라서  $C-C_0$ 의 값은 선형적으로 감소함을 알 수 있었다. 롤 교차각의 영향을 보기 위하여 교차각 0, 0.5, 1°, 압하율 10%, 20%의 각각의 경우에 대해 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 Fig. 13에 도시 하였다. 교차각의 증가에 따라서 판 크라운이 급격하게 변화하는 것을 알 수 있었으며, 이는 롤 교차의 제어가 판 크라운의 제어에 효과적으로 사용될 수 있음을 보여주는 것이다.

#### 4. 맺음말

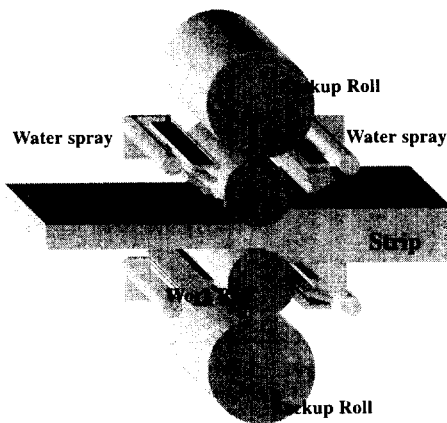
열연 공장에서 생산되는 제품에 대한 경제성 및 품질에 대한 요구가 점차 높아짐에 따라, 롤 및 판에서의 열적, 기계적, 금속학적 측면에서의 정밀 제어 또는 해석의 기술이 절실히 필요하게 되었다. 본 논문에서 제시한 유한 요소법을 기반으로 한 시뮬레이터는 이러한 요구를 충족시키기 위한 계속적인 노력의 결과이며, 본 시뮬레이터의 정확도 특히 예측된 판 프로파일의 정확도를 검증하기 위하여 POSCO와 긴밀한 협조하에 연구가 계속하여 진행되고 있다. 본 논문에서 제시된 시뮬레이터는 현장 문제의 해결 및 공정 최적 설계의 도구로써 효과적으로 사용될 것으로 기대된다. 현재 열연 공정에 대한 전체 시뮬레이션을 수행하는 데는 상당한 시간이 요구되고 있는데, 병렬처리 등의 방법을 사용하여 계산 시간을 획기적으로 줄이는 노력이 추가되어야 할 것이다.

#### 5. 참고 문헌

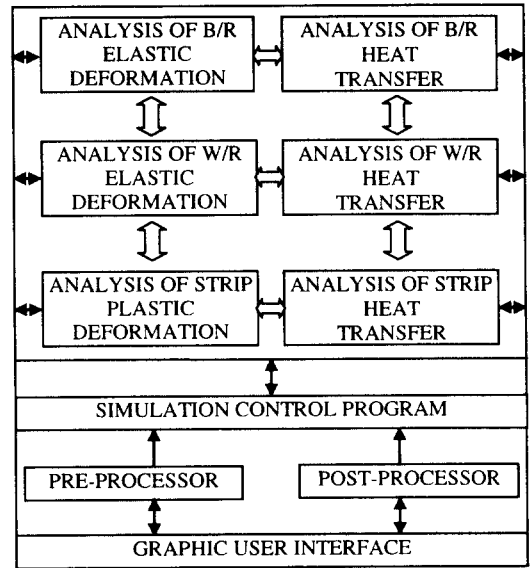
1. Yamada, K.; Ogaya, S.; Ataka, M.: The Proc. of 4<sup>th</sup> Int. Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes (NUMIFORM '92), p755, 1992.
2. Yanagimoto, J.; Kiuchi, M.: The Proc. of 4<sup>th</sup> Int. Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes (NMIFORM '92), p763, 1992.
3. Hwang, S.M.; Joun, M.S.; Kang, Y.H.: ASME J. Eng. Ind., Vol. 115, p290, 1993.

Strip	
Material	Low carbon steel ( $C=0.071W_t\%$ )
inlet thickness	40.51mm
outlet thickness	24.51mm
reduction ratio	39.49%
Width	945mm
Temperature	1056°C
Work roll	
Material	HSS
Diameter	786.9mm 509.75mm(shaft)
Width	2050mm
Speed	74mpm
initial crown	0.0mm
wear crown	0.0mm
Temperature	20°C
reference temperature*	20°C
Backup roll	
Material	Ni-grain
Diameter	1600mm, 990mm (shaft)
Width	2024mm
Temperature	20°C
Reference temperature	20°C
Process condition	
bender force	0, 100ton
pair cross-angle	0, 1°

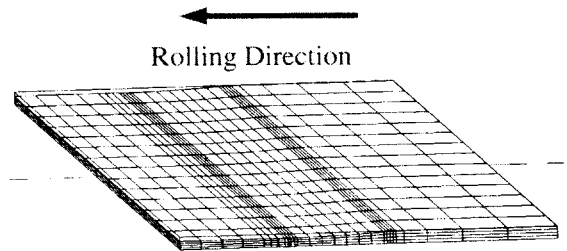
**Table 1:** Material properties and process conditions for the run(\*The temperature at which the dimensions of the work roll were measured)



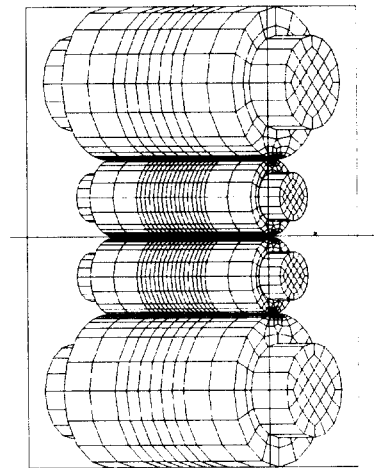
**Fig. 1:** A four high mill stand



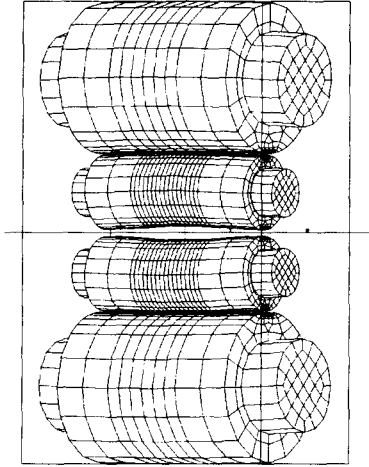
**Fig. 2:** Structure of steady state FE Computer Simulator (POSROLS310)



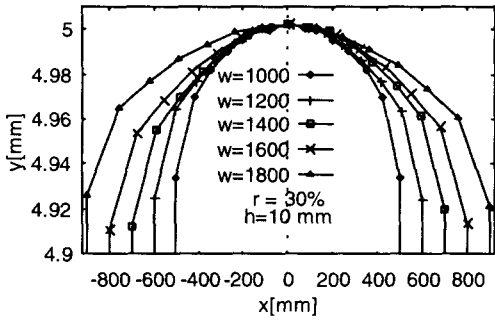
**Fig. 3:** Initial FE mesh for the strip



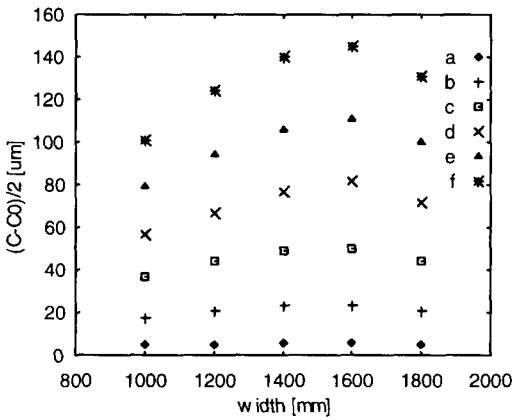
**Fig. 4:** Initial FE mesh for the work rolls and backup rolls



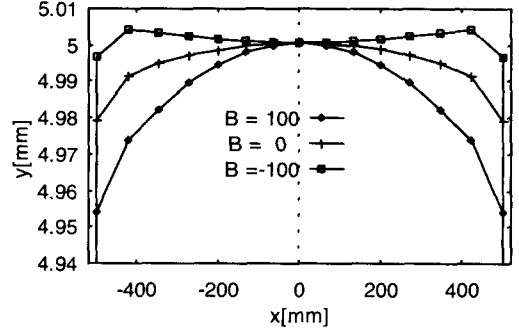
**Fig. 5:** Deformed shapes of work rolls and backup rolls



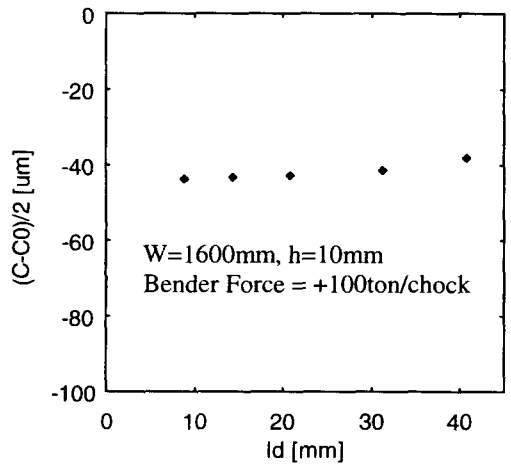
**Fig. 6:** Effect of strip width on strip profile  
 $h$ (exit strip thickness)=10mm;  
 $r$ (reduction)=30%



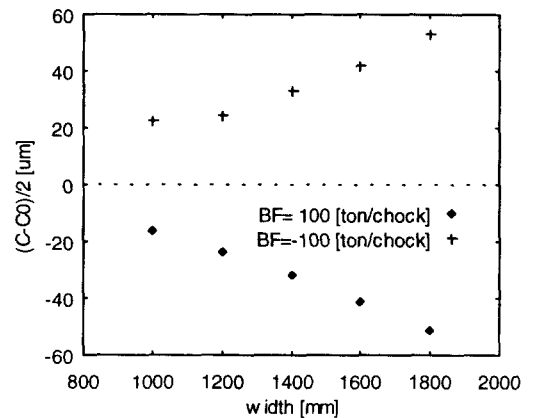
**Fig. 7:** Effect of strip width and projected roll arc length( $ld$ ) on strip crown ( $ld$  : a = 10, b = 20.8, c = 31.1, d = 40.5, e = 50.8, f = 62.3 [mm])



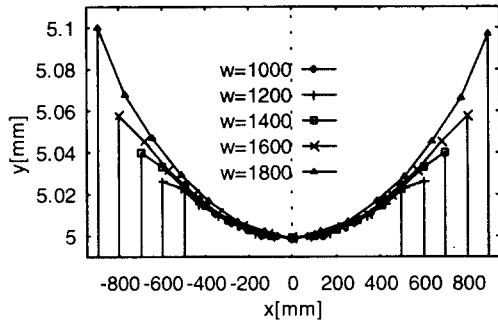
**Fig. 8:** Strip Profiles when bender exists. Bender forces tested were 0, +100, -100 ton/chock (strip width = 1000mm, $r=10\%$ , $h=10$ mm)



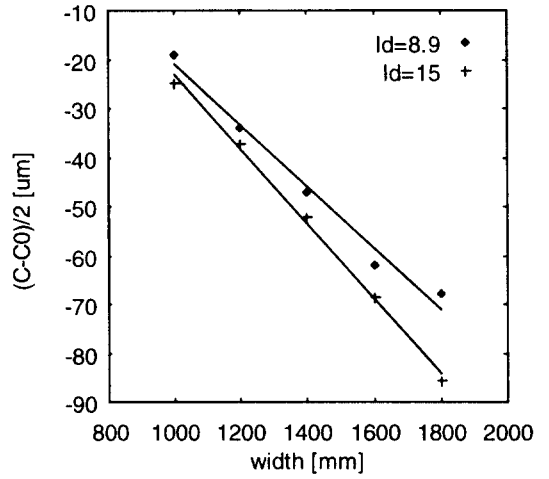
**Fig. 9:** Effect of projected roll arc length on C-C<sub>0</sub>



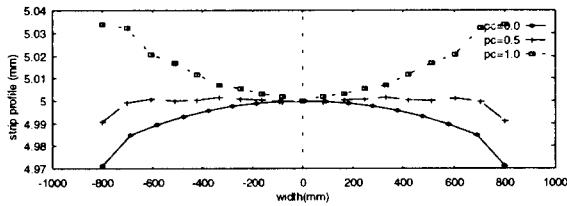
**Fig. 10:** Effect of strip width on C-C<sub>0</sub> ( $h=10$ mm)



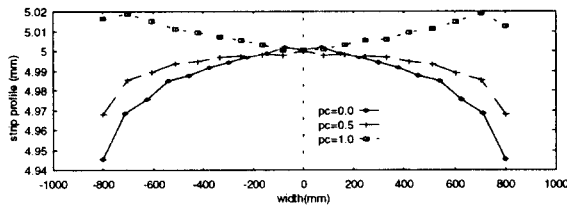
**Fig. 11:** Strip profiles when roll initial crown exists. Roll initial crown tested were  $100\mu\text{m}$ (convex crown), ( $l_d=15\text{mm}$ ,  $h=10\text{mm}$ )



**Fig. 12:** Effect of strip width and projected roll arc length on  $C-C_0$  (initial roll crown= $100\mu\text{m}$ )



(a)reduction 10%



(b)reduction 20%

**Fig. 13** Effect of pair cross angle on strip profile