

판재의 편평도 향상을 위한 교차압연에 관한 연구

남경오¹ · 서기석² · 노병래³ · 홍성인[#]

A Study on the Cross Rolling for Improvement of Flatness of Plate

K. O. Nam, K. S. Seo, B. R. Rho, S. I. Hong

(Received October 5, 2004)

Abstract

The production of metal strip with uniform thickness and flatness are two important problems associated thin strip rolling. The thickness and flatness of strip are affected by the flattening of contact surface between strip and roll, the elastic recovery and the bending of roll. Especially, the flatness of the strip is greatly affected by bending deflection of roll. The roll must be designed considered the elastic deformation of roll. This study describes the measurement of thickness and flatness of strip and shows the crown roll for producing flat strip. But it is difficult to produce the crown roller. The cross rolling that is a simple method which can produce the flat strip is introduced and it is found the optimal cross angle for improvement of flatness of plate. These problems are solved by the MARC code on the basis of elastic-plastic material and the updated Lagrangian formulation.

Key Words : Elastic Recovery, Crown Roll, Ccross Rolling, Cross Angle, Updated Lagrangian Formulation

1. 서 론

압연공정은 원자재의 1차 성형에서부터 완제품에 이르기까지 그 응용범위가 매우 넓으며, 주로 대량생산을 목적으로 하는 중요한 소성가공 공정 중에 하나이다. 물론 소성가공의 다른 분야처럼 압연공정에 있어서도 고전적인 방법들 즉, 슬래브법(slab method), 미끄럼선장법(slip line method) 및 상계법(upper bound method) 등이 이론적인 해석방법으로 널리 사용되어 왔다. 그러나 이런 해석 방법들은 소재의 소성변형이나 형상의 복잡성으로 인해 과도한 단순화와 이상화를 통해 해석을 시도하였기 때문에 정밀한 압연공정의 해석에는 적

합하지 않았다. 최근에 들어서 급속한 컴퓨터의 발전과 함께 수치적 해석방법으로 유한요소법이 등장하면서 좀더 정밀하게 압연공정 문제를 해석하려는 시도들이 많이 있었다. 압연공정 해석에 관한 연구동향을 살펴보면 Hill[1]은 Hitchcock가 제안한 탄성 변형된 롤러의 반경에 관한 식을 사용해서 2차원 평면변형(plane strain)상태에서의 압연공정을 해석하였고, Alexander[2]는 압연공정에 관한 해석적 이론들을 체계적으로 정립하였으며, O'Connor[3]는 판재의 성형 결함을 다양한 가공변수들을 적용해 판재의 성형성을 해석하였다. Al-Salehi[4]는 냉간압연 과정 중 롤러에 작용하는 압력의 분포를 실험을 통해 구했고, Mori[5]는 3차원

1. 충남대학교 기계공학과 대학원
2. 한국원자력연구소
3. 국방과학연구소
교신저자 : 충남대학교 기계공학과
E-mail : his@cnu.ac.kr

강소성 유한요소법을 이용해 압연과정 중 판재의 폭퍼짐 현상을 해석하였다. 그러나 이 해석에서는 판재의 탄성변형을 무시하였고, 롤러를 변형이 없는 강체로 가정하였기 때문에 성형 후 소재의 탄성회복량, 잔류응력 그리고 롤러의 탄성변형이 가공된 판재의 치수 정밀도에 미치는 영향을 고려할 수 없었다. 이런 단점을 보완하기 위해 Hartley [6]는 유한요소법을 이용해 판재를 탄소성체로 가정하여 압연공정을 해석하였다. 국내에서도 Park [7], Kim[8]등에 의해 압연공정에 대한 해석이 이루어졌으며, 근래에 들어 Kim[9]등에 의해 판재의 두께 정밀도에 대한 연구가 있었으며, Park[10]등에 의해 복잡한 H형강의 압연공정 해석까지 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 롤러를 탄성체로 설정하고 판재에 대해 탄소성 유한요소해석을 수행함으로써 판재의 탄성변형량이 판재의 두께 정밀도에 미치는 영향과 롤러의 탄성변형이 소재의 편평도(flatness)에 어떤 영향을 주는지 살펴보았다. 특히 판재의 편평도를 향상시키기 위한 방법으로서 롤러의 중양을 측면보다 상대적으로 크게 제작한 크라운(crowned) 롤러를 적용한 압연방식과 롤러의 중심축을 서로 엇갈리게 배치하여 측면부의 압축하중이 상대적으로 중앙부보다 작게 작용할 수 있도록 가공하는 교차압연 해석을 통해 판재의 편평도가 얼마나 향상되는지를 살펴보았다. 아울러 최적의 교차 각도(cross angle)를 해석을 통해 계산하였다. 본 연구를 위해 상용 유한요소 프로그램인 MARC를 사용하여 탄성체인 롤러와 판재의 탄소성 유한요소해석을 통해 3차원 압연공정 해석을 수행하였다.

2. 해석 조건

3차원 탄소성 압연해석을 위해 적용된 재료의 물성치는 Table 1과 같으며, 롤러와 판재의 형상은 Fig. 1과 같고, 치수는 Table 2와 같다. 각각의 해석에 대한 가정들과 교차각도 조건들은 Table 3과 같다. Case 1에서 3까지는 롤러와 판재의 상하좌우 대칭성을 고려하여 1/4모델을 이용하여 해석을 수행하였고, 나머지 경우는 롤러의 중심축이 평행하게 배치되어 있지 않기 때문에 좌우 대칭성만을 고려하여 1/2 모델을 이용하여 해석을 수행하였다. 또한 Case1의 경우에는 롤러를 강체로 가정하였으

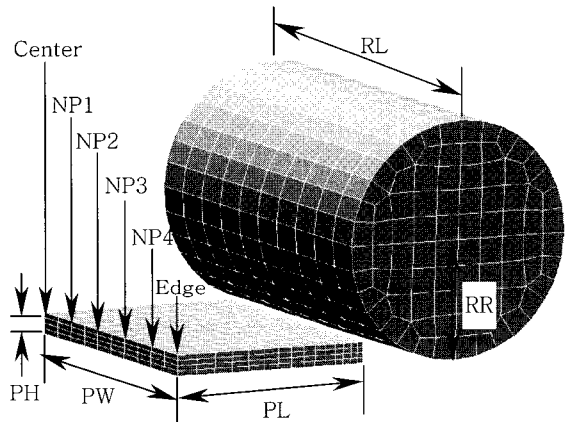
며, 나머지 경우에는 탄성체로 가정하였고, 판재는 탄-완전소성체(elastic-perfectly plastic material)로 가정하여 해석을 수행하였다. 모든 해석 경우에 있어서 판재의 압하율(reduction)은 15%를 적용하였다.

Table 1 Material property of roller and plate

Material	Roller	Plate
Young's Modulus (Mpa)	2139×10^3	207×10^3
Poisson's Ratio	0.28	0.29
Yield Strength (Mpa)	-	417
Friction Coef.	0.1	

Table 2 Shape of roller and plate

Roller		Plate	
Length(mm)	1410	Width(mm)	1000
Radius(mm)	230	Length(mm)	400
		Height(mm)	40



- RL : Roller Length
- RR : Roller Radius
- PW : Plate Width
- PL : Plate Length
- PH : Plate Height

Fig. 1 Configuration of roller and plate

Table 3 Cases for analysis

Case	Roller	Cross Angle(θ)
1	Rigid	-
2	Elastic	-
3	Crowned	-
4	Cross	0.1°
5	Cross	0.5°
6	Cross	2.0°
7	Cross	2.5°
8	Cross	3.0°
9	Cross	4.0°
10	Cross	3.7°

3. 결과 및 고찰

3.1 강체 롤러를 적용한 판재 해석

Fig. 2에서 center는 Fig. 1에서와 같이 좌우 대칭에 의한 판재의 중앙을 나타내고, edge는 판재의 측면부를 의미하며 판재의 중앙부위부터 측면부까지 5등분한 표면 각각의 위치를 NP1에서 NP4로 구분하였고, 이 그래프는 case 1 조건에서의 압연해석 결과로 판재의 두께 방향 변위를 보여주고 있다. 판재는 step 1에서 롤러와 접촉하게 되고 step 5까지 15%의 압하율이 적용되어 6mm의 두께 감소를 보이고 있다. 판재는 step 5를 지나면서 롤러의 중심부를 지나게 되고, step 5와 6사이에서 판재의 탄성회복으로 평균 0.26mm의 두께 방향의 탄성회복량을 보이고 있다. 그리고 step 6을 지나면서 판재는 다시 정상상태가 되었다. 이 결과는 기존의 강소성 유한요소법을 적용한 해석에서는 얻을 수 없었던 탄성회복량을 정략적으로 구할 수 있기 때문에 가공 후 판재의 두께를 좀더 정밀하게 예측하는 것이 가능하였다. 그러나 이 해석에서는 롤러를 강체로 가정하였기 때문에 롤러의 굽힘 변형이 판재의 두께변화에 미치는 영향을 알 수는 없다. Fig. 3은 판재의 폭방향으로의 변위를 보여주는 그래프로, 2차원 압연해석에서 확인할 수 없었던 폭퍼짐현상을 확인할 수 있었으며, 판재의 압연방향의 금속유동은 물론 폭방향 금속유동에 의해 약 8mm 정도의 폭퍼짐량을 확인할 수 있었고 이는 재료의 비압축 성질에 의해 두께 방향의 체적 감소량이 폭방향의 체적증가를 가져온 것이다.

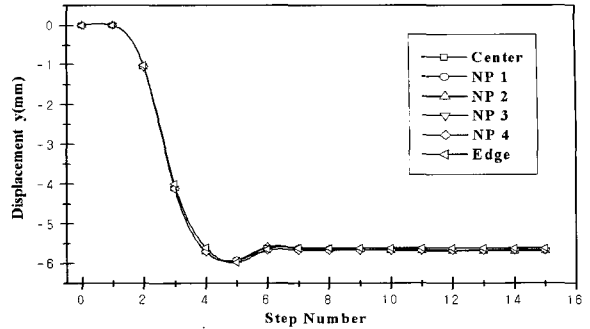


Fig. 2 Change of thickness in case 1

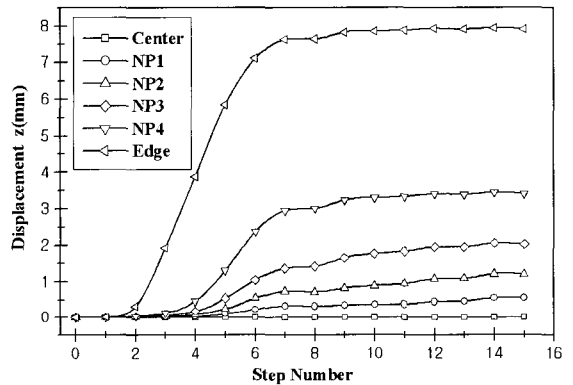


Fig. 3 Change of width in case 1

3.2 탄성 롤러를 적용한 판재 해석

Fig. 4는 롤러를 탄성체로 가정했을 때 판재의 두께변화를 보여주고 있는 그래프이며 Fig. 2에서 보여지는 경향과는 달리 판재 중앙 절점의 변위가 측면 절점의 변위보다 정상상태에서 상대적으로 적은 값을 나타내고 있다. 이것은 롤러의 중앙부 굽힘 변형이 판재의 두께 변화에도 영향을 주어 성형 후 정상상태에서도 판재의 중앙부가 측면부보다 두껍게 성형되었음을 보여주고 있다. Fig. 5는 탄성변형에 의한 롤러의 반경 변화를 보여주는 그래프로 측면부는 구속조건에 의해 변화가 거의 없는 반면 중앙부에서는 약 0.086mm의 반경 변화가 있는 것으로 나타났다. Fig. 6은 case 1과 case 2의 중앙 절점의 변위만을 표시한 그래프로 탄성체 롤러를 적용한 case 2의 해석 결과에서 판재가 더 두껍게 성형되었음을 확인할 수 있었다.

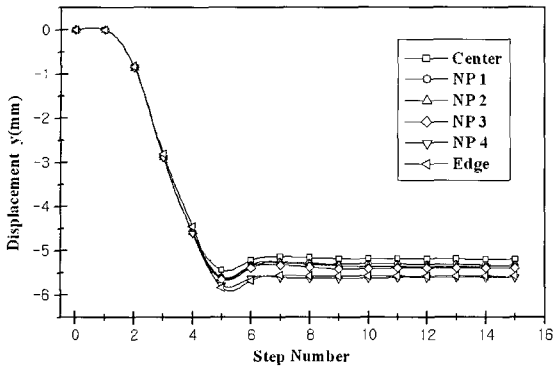


Fig. 4 Change of thickness in case 2

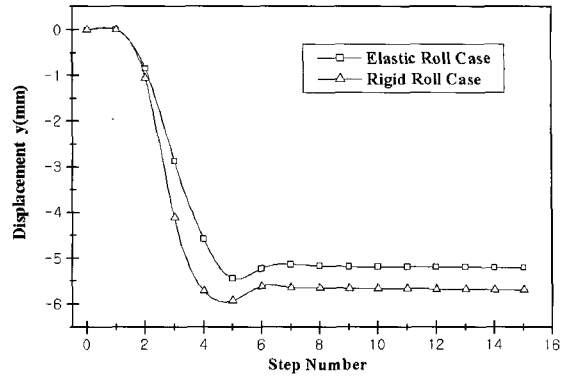


Fig. 6 Comparison of center node displacement

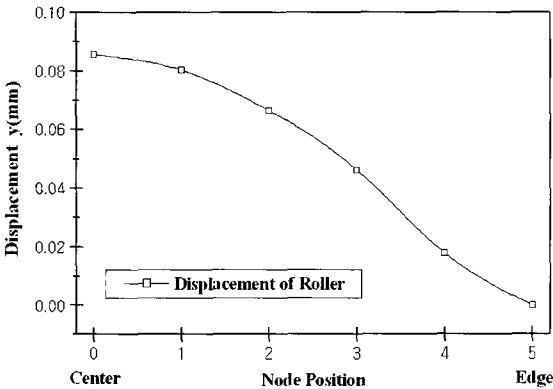


Fig. 5 Deformation of roller due to bending

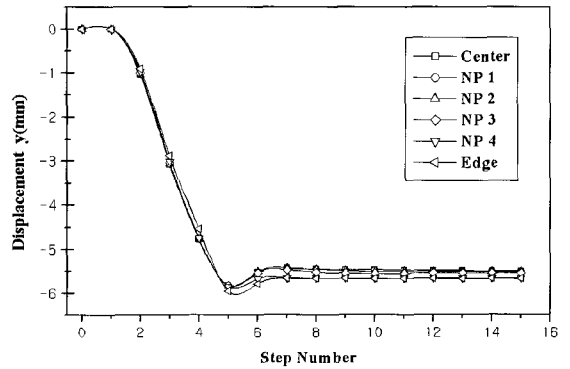


Fig. 7 Change of thickness in case 3

3.3 크라운 롤러를 적용한 판재 해석

Fig. 7은 case 2의 결과를 토대로 판재의 측면부와 중앙부의 두께편차를 롤러에 적용해 설계한 크라운 롤러를 적용한 압연해석 결과로 판재의 두께변화를 나타낸 그래프이다. 이 그래프에서 판재는 case 2에서와 같이 단순한 원통형의 롤러를 적용했을 때 나타난 롤러의 굽힘량을 롤러의 크라운 형상이 일정량 보정할 수 있었기 때문에 Fig. 4와 비교해 볼 때 case 2에서 두께편차가 0.37mm 인 반면 case 3에서는 0.16mm를 보여 편평도 측면에서 좀 더 우수한 결과를 보였다. 그러나 크라운 롤러를 생산하기 위해서는 정밀한 생산공정이 요구되며, 제품의 규격마다 크라운 롤러를 다시 설계해야하는 단점을 가진다. 또한 해석을 통한 롤러의 탄성변형 예측만으로 편평도 향상을 위한 크라운 롤러를 설계한다하더라도 요구되는 편평도를 얻기 위해서는 매우 미흡한 형편이다.

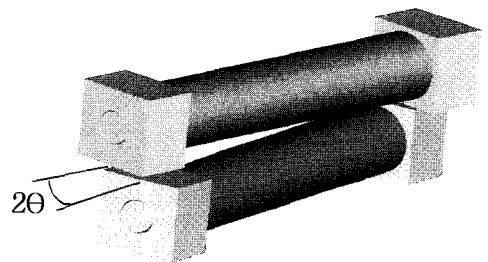


Fig. 8 Cross rolling and angle

3.4 교차압연 해석에서의 판재 거동

교차압연은 롤러를 평행하게 배치하지 않고 Fig. 8 과 같이 교차각 2θ 만큼 엇갈리게 배치함으로써 중앙부는 상향의 롤러에 의해 판재에 균일한 힘이 가해지고 반면 측면부로 오면서 교차각에 의해 판재에 가해지는 힘이 분산되어 그만큼 재료에 가해지는 힘을 감소시킴으로써 중앙부와 측면부의 두께편차를 줄이는 압연방식이다.

Table 4 Comparison of thickness difference

Case	Cross Angle(θ)	Thickness Difference(mm)
4	0.1°	0.12
5	0.5°	0.11
6	2.0°	0.10
7	2.5°	0.08
8	3.0°	0.07
9	4.0°	-0.04

Table 4는 교차각을 변화시키면서 압연공정을 수행하고 그 결과 중에서 판재의 두께변화를 비교한 것으로 두께편차는 중앙부의 두께와 측면부 두께의 차이를 표시한 것이다. 이 결과에서 보면 교차각이 커지면서 판재의 두께편차가 작아지는 경향을 보여주고 있으며 교차각이 4.0°를 넘으면서는 오히려 두께편차 값이 음수를 나타내는데 이것은 일정 교차각 이상에서 압연공정이 이루어질 경우 측면부의 두께가 오히려 중앙부보다 더 두껍게 성형됨을 보여주는 결과로 볼 수 있다.

Fig. 9는 Table 4의 두께변화 결과 값을 이용해 두께편차를 최소화하기 위한 최적의 교차각을 찾기 위해 curve fitting한 그래프로 수치해석을 통해 최적의 교차각 3.7°를 구할 수 있었다. Fig.10은 수치해석을 통해 구한 최적의 교차각 3.7°를 적용한 압연해석 결과로 상단부의 절점과 하단부의 절점 변위폭이 일정한 경향을 보여주고 있다. 이것은 상단부와 하단부의 두께편차가 중앙부와 측면부에서 거의 동일하다는 것을 보여주는 결과다. 이 그래프에서 보면 NP2를 지나면서 절점이 밑에 위치하고 있는데 이것은 압연공정 중 롤러의 중앙부에서는 판재와 롤러가 동일한 위치에서 성형이 이루어지지만 측면부로 가면서 교차각에 의해 롤러의 상하 위치가 동일하지 않아 중앙부와 차이를 보이고 있다. 즉 판재는 두께편차는 줄일 수 있었지만 비틀어진 형상으로 롤러를 빠져나오게 되는 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 롤러의 탄성변형을 3 차원 압연공정의 탄소성 유한요소해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 압연공정의 탄소성 유한요소해석으로 소재

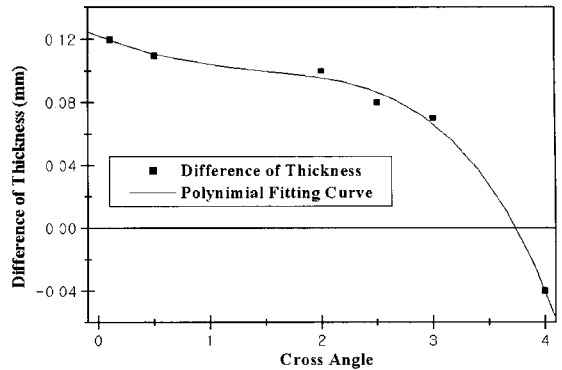


Fig. 9 Difference of thickness and curve fitting

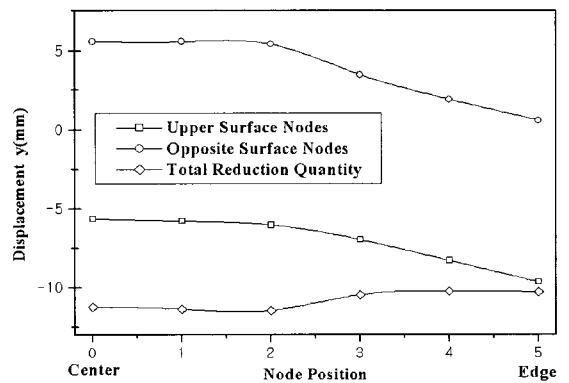


Fig.10 Cross rolling with cross angle 3.7°

의 탄성회복으로 인한 소재의 두께변화와 소재의 폭방향에 대한 편평도를 확인할 수 있었으며 각각의 값을 정량화할 수 있었다.

(2) 롤러의 탄성변형은 소재의 두께변화는 물론 편평도에도 크게 영향을 미치고 있으며 크라운 롤러를 적용한 압연공정해석을 통해 판재의 편평도를 향상시킬 수 있었다.

(3) 교차각 변화에 따라 교차압연을 해석하고 이 결과를 토대로 두께편차를 최소화하기 위한 최적의 교차각을 구할 수 있었으며 이 교차각을 적용한 교차압연을 통해 편평도가 향상되었음을 알 수 있었다. 특히 크라운 롤러의 설계와 제작의 어려움을 고려해 볼 때 해석을 통한 교차각의 예측이나 교차압연의 해석은 더욱 중요한 의미를 가진다고 볼 수 있다.

반면, 교차압연에서 교차각이 증가하면서 그 형상이 뒤틀리는 것을 알 수 있었다. 산업현장에서는 보강롤이나 중간롤을 사용해 교차각을 최소화

하고 판재의 뒤틀림을 최소화하려는 노력을 하고 있다. 따라서 보강롤이나 중간롤을 고려한 압연해석이 필요할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] R. Hill, 1950, The Mathematical Theory of Plasticity, Oxford Univ. Press, pp. 188~206.
- [2] J. M. Alexander, 1972, On the theory of the rolling, Proc. R. Soc. Lond. A. 326, pp. 535~563.
- [3] H. W. O'Connor, A. S. Weinstein, 1972, Shape and flatness in thin strip rolling, Transaction of ASME, November, 1972, pp. 1113~1123.
- [4] F. A. R. Al-Salehi, T. C. Firbank, P. R. Lancaster, 1973, An Experimental Determination for the Roll Pressure Distribution in Cold Rolling, Int. J. Mech. Sci., Vol. 15, pp. 693~710.
- [5] K. Mori, K. Osakada, 1984, Simulation of Three-Dimensional Deformation in Rolling by the Finite Element Method, Int. J. Mech. Sci., Vol. 26, No. 9/10, pp. 515~525.
- [6] C. Liu, P. Hartley, C. E. N. Struggess, G. W. Rowe, 1985, Elastic-Plastic Finite-Element Modeling of Cold Rolling of Strip, Int. J. Mech. Sci., Vol. 27, No. 7/8, pp. 531~541.
- [7] J. J. Park, S. I. Oh, 1990, Application of three dimensional finite element analysis to shape rolling processes, Journal of engineering for Industry, Vol. 112, pp. 36~46.
- [8] Naksoo Kim, Shiro Kobayashi, 1990, Three-dimensional simulation of gap-controlled plate rolling by the finite element method, Int. J. Mach. Tools. Manufact., Vol. 30, No. 2, pp. 269~281.
- [9] 윤상건, 김동원, 1987, 압연판의 두께 정밀도에 관한 연구, 대한기계학회 논문집, Vol. 11, No. 5, pp. 837~845.
- [10] 신형우, 김낙수, 박종진, 1993, 유한요소법에 의한 H 형강 압연공정의 해석, 대한기계학회 논문집, Vol. 17, No. 5, pp. 1095~1105.