

Shadow Mask용 냉간 압연박판의 잔류응력과 변형 해석

정호승* · 조종래** · 문영훈*** · 김교성****

(2002년 10월 8일 접수)

Analysis of Residual Stress and Etching Curl of Cold Rolled Sheet in Shadow Mask

H. S. Jeong, J. R. Cho, Y. H. Myun and K. S. Kim

Abstract

The cold rolling conditions for the ultra thin steel strip for tension mask are very important because the residual stress that affects the flatness of strip is generated during the cold rolling. The residual stress in the sheet causes etching curls when it suffers perforation process. The residual stress through the thickness direction in the sheet is a function of friction coefficient, total reduction, roll size and initial sheet thickness. To estimate the residual stress and deformation due to etching curl, FEM analysis is performed. Numerical simulations employ a ANSYS 5.6 and an elastic plastic constitutive equation. The simulation results indicate the distribution of residual stresses in the rolled sheet can be controlled by selecting the rolling conditions properly.

Key Words : Shadow Mask, Residual Stress, Elastic-Plastic, Cold Rolling, Ultra-Thin Strip

1. 서론

고급 모니터에서 고화질을 요구하는 추세에 따라 CDT (Color Display Tube)의 사용과 함께 전자빔 오차 및 내부 온도 상승에 의해 새도우 마스크에서는 열변형이 일어난다. 이러한 열변형 또한 화면에서의 전자빔 오차의 한 원인이 되어 고해상도 실현을 저해하는 요인으로 작용한다. 따라서 설계상의 요구조건을 정확하게 만족시킬 수 있는 양질의 새도우 마스크의 제작을 위해서는 원 소재부터 엄밀한 품질관리가 필요하다.⁽¹⁻²⁾

새도우 마스크는 아주 얇은 박판에 Fig. 1과 같이 에칭에 의해 두께방향으로 비대칭인 구멍이 만들어진다. 냉간 박판 압연시 두께 방향의 잔류응력(residual stress)이 발생하며, 비대칭적으로 형성된 구멍은 박판 자체의 잔류응력에 의해 변형이 생긴다.⁽³⁾ 이 변형이 클 경우에 후속공정인 절단과 프레임용접에 문제를 일으키기 때문에 압연 잔류응력을 최소화하여 에칭 변형(etching curl)을 억제해야 한다.

압연강판에서 발생하는 잔류응력의 전형적인 응력분포는 Baldwin⁽⁴⁾에 의하면 2가지의 형태가 있다. 두꺼운 강

* 한국해양대학교 대학원 기계공학과

** 한국해양대학교 기계정보공학부

*** 부산대학교 정민정형 및 급형선계 센터

**** 포스코(주) 기술연구소

판을 상대적으로 작은 롤을 이용하여 압연비가 적을 경우 변형은 주로 표면 근처에서 집중된다. 표면의 큰 변형은 내부의 적은 변형영역에 의해 구속되기 때문에 표면 근처에 압축, 내부에는 인장응력이 발생한다.

반면에 그 반대의 경우 큰 롤로 얇은 강판에 변형을 크게 가할 경우에는 두께 방향의 변형은 더 균일해진다. 이 때 롤에 접하는 급속은 중심부에서 빠르게 유동이 일어나고 표면은 마찰에 의해 구속되기 때문에 표면에 인장, 내부에 압축이 작용한다. 그러나 이 두 가지 경우는 일반적인 관점이고, 다만 압연과 극박(ultra-thin strip) 냉간압연(cold rolling)의 경우에 잔류응력의 분포는 압연조건에 크게 좌우된다.¹⁵⁻¹⁶⁾ 아주 얇은 박판(0.5mm 이하)과 상대적으로 아주 큰 롤(직경 500mm 정도)을 가지고 냉간압연공정을 해석한 경우와 잔류응력의 양상에 따라 제품의 일부분을 제거한 후 제품 변형에 대해 예측한 연구는 거의 없다.

이 연구의 목적은 압연 공정 중 강판의 잔류응력에 영향을 미치는 인자들에 대해서 즉, 롤 패스 및 각 단의 압연비, 롤과 강판사이의 마찰, 롤 직경 크기, 초기 강판 두께에 따른 영향을 분석하고, 잔류응력분포를 해석하여 에칭된 새도우마스크의 변형을 최소화하는 압연 조건을 설정하는데 있다. 또한 비대칭적으로 재료가 제거되었을 때 잔류응력에 의한 변형이 발생하는데, 해석에 의해 잔류응력에 따른 변형 양상을 예측하는데 있다.

2. 냉간압연공정의 모델링 및 해석조건

2.1 냉간압연공정의 모델링

압연이란 롤 사이에 재료를 통과시켜 소성변형 시키는 가공법을 말한다. 냉간 압연 강판은 두께에 비하여 폭이 상대적으로 길고 롤과 재료사이의 마찰력 때문에 재료가 롤 사이로 끌려 들어가고, 압축력에 의해서 변형된다.

압연 해석 모델링은 Fig. 2와 같이 2차원 평면변형으로 가정하고, 상하대칭을 고려하여 1/2 모델링하였고, 장력을 고려하기 위해 항복응력의 20%(113.6 MPa)를 입구와 출구측에 인장력을 주었다. 수치해석을 위해 유한요소 프로그램인 ANSYS와 탄소성(elastic-plastic) 구성방정식을 이용하였고, 사용된 요소는 PLANE 182(4 node)를 사용하였고, 접촉 요소는 CONTACT 171(2D), 롤은 TARGET 169(2D)을 사용하였다. 실험 결과로 구한 응력-변형률 곡선은 Fig. 3과 같다.

2.2 냉간압연공정의 해석조건

박판 압연시 롤 직경, 마찰계수, 압연비, 초기 두께에 따른 잔류응력의 영향을 분석하기 위해 Table 1과 같은 해석조건으로 수행하였다. 롤 직경은 260, 500mm, 마찰계수는 0.08~0.16, 입구측 두께는 0.236mm와 0.5mm이고, 압하율은 15, 30%의 범위에서 해석하였다.

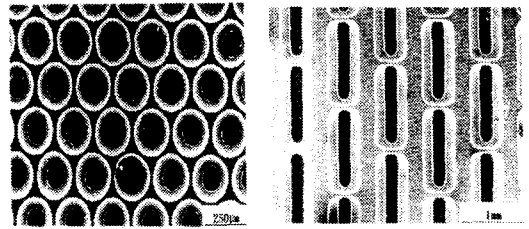


Fig. 1 Etching shapes of shadow mask

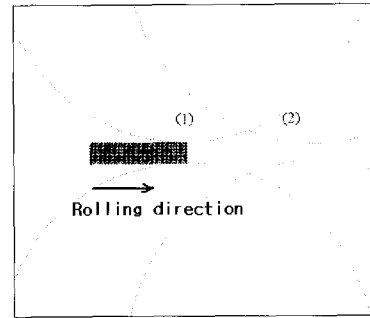


Fig. 2 Cold rolling modeling by FEM analysis

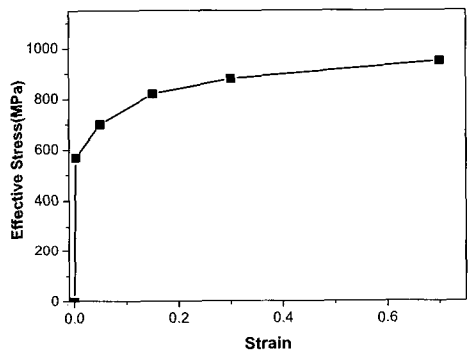


Fig. 3 Schematic of stress-strain curve

Table 1 Rolling schedule

Roll diameter (mm)	260(=D1)	500(=D2)
Initial thickness (mm)	0.5, 0.236	
Number of rolling pass	1	
Friction coefficient	0.08, 0.12, 0.16	
Total reduction (%)	15, 30	

3. 크박 냉간압연공정 해석 및 결과 고찰

3.1 압연 해석 결과 및 고찰

Fig. 4는 롤 직경 260mm, 마찰 계수 0.1, 압연비 15%, 초기 두께 0.236 mm 일 때 압연해석 결과이며, 압연방향의 응력 분포를 나타낸 것이다. Fig. 5는 롤과 강판사이의 마찰응력을 나타내며 Neutral Zone(D 위치)에서 마찰력 방향이 바뀌며, 이러한 현상은 소재의 변형속도와 롤 회전속도가 같음을 알 수 있다.

Fig. 6과 7은 단면 B~G에서의 강판 단면의 압연방향 변형량과 응력을 나타낸 것이다. Fig. 6에서 나타나듯이 롤과 접하는 단면 B에서 F까지 변형량은 증가한다. 그러나, 롤을 벗어나는 단면 G에서는 탄성회복에 의해 변형량이 감소함을 알 수 있다. 반면에 Fig. 7은 입구측(B 위치)에서 중립지역(D 위치)까지는 압축응력이 증가하고, 출구측(F 위치)까지 압축응력이 감소하며, 롤을 벗어나면서(단면 G) 표면에는 인장잔류응력, 중심에는 압축잔류응력이 발생함을 알 수 있다.

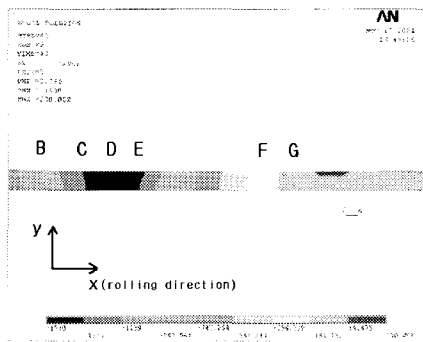


Fig. 4 Distribution of stress to rolling direction through the sheet thickness

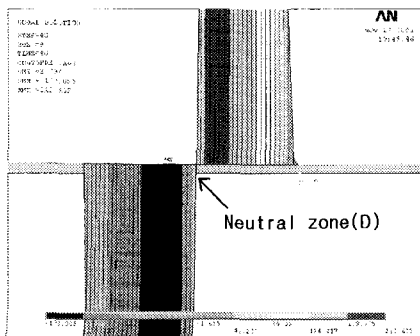


Fig. 5 Distribution of friction stress between roll and sheet

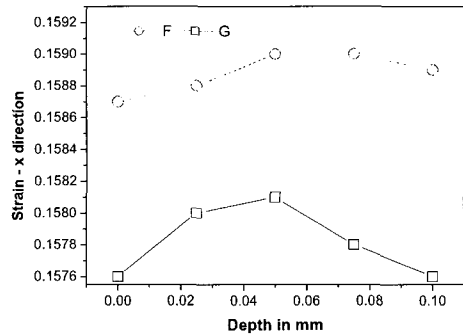
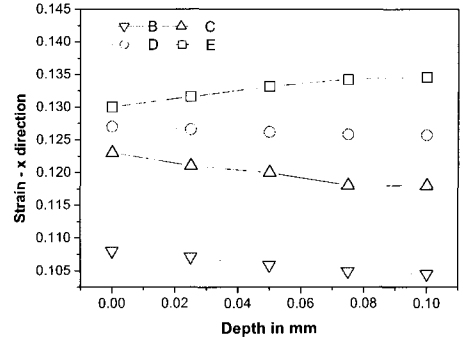


Fig. 6 Distribution of strain to rolling direction through the sheet thickness at each position

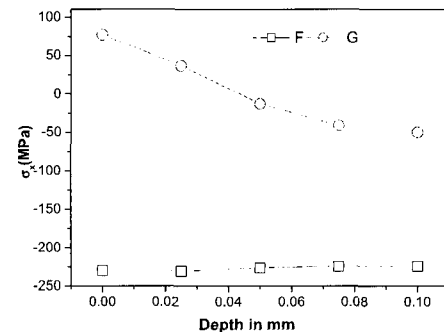
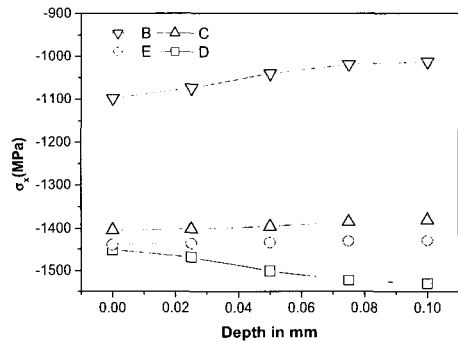


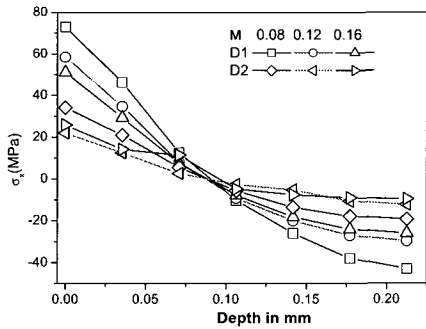
Fig. 7 Distribution of stress to rolling direction through the sheet thickness at each position

3.2 잔류응력 해석 결과 및 고찰

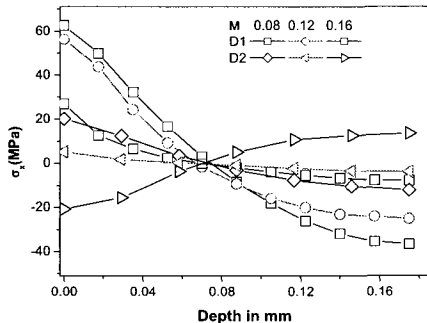
Fig. 8-(a)~(d)는 압연방향의 잔류응력을 도시하였다. Fig. 8-(a)는 초기 두께가 0.5mm, 압연비 15%일 때, 마찰계수와 롤 직경이 작을수록 표면에서 인장값이 커짐을 알 수 있다. 8-(b)는 압연비가 30%일 때, 마찰계수와 롤 직경이 증가함에 따라 표면 잔류응력이 압축이 됨을 알 수 있고, 8-(d)는 압연비가 총 60%이며, 마찰계수 증가함에 따라 표면 잔류응력이 압축이 됨을 알 수 있다. 그러므로, Fig. 8 (a), (b), (d)에서와 같이 초기 두께가 같을 때, 압하율, 롤 직경과 마찰력이 커질수록, 표면에서는 인장에서 압축응력으로 바뀌며, 내부 응력은 복잡한 형태로 바뀌는 것을 알 수 있다.

Fig. 8-(c)는 초기 두께가 0.236mm, 압연비가 30%이며, Fig. 8-(b)과 (c)에서와 같이 압연비는 같으나, 초기 두께는 작고, 롤 직경이 크고, 마찰계수가 클수록 표면에서는 압축, 내부에서 인장잔류응력이 발생한다.

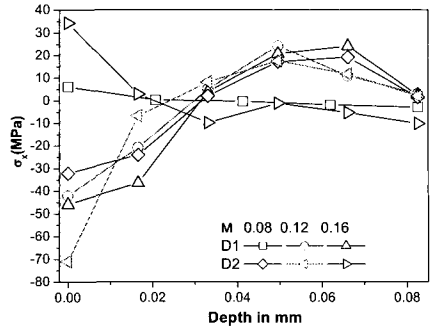
아주 얇은 박판에 동일한 압연비에서 초기 두께가 얇을수록 표면 인장잔류응력의 절대값은 낮아지고 압축잔류응력이 쉽게 발생한다. 롤 직경이 큰 경우는 변형이 상대적으로 균일하나 표면에 압축잔류응력을 발생시키기 쉽다는 사실을 확인하였다.



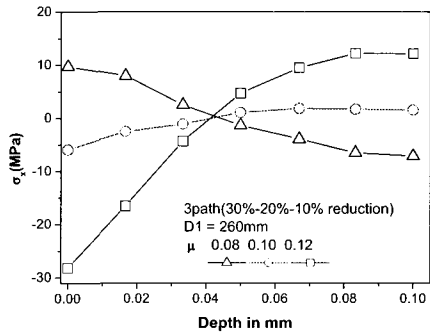
(a) 15% reduction, Initial thickness(0.5mm)



(b) 30% reduction, Initial thickness(0.5mm)



(c) 30% reduction, Initial thickness(0.236mm)



(d) 60% reduction, Initial thickness(0.5mm)

Fig. 8 Distribution of residual stress to rolling direction

Fig. 8-(b)의 경우 롤 직경이 500mm(D2)이고 마찰계수가 0.12인 경우 압연방향의 잔류응력은 거의 존재하지 않음을 알 수 있다. 잔류응력을 최소화하기 위해선 초기 두께에 따른 롤 직경, 압하율을 잘 고려해야 한다.

3.3 잔류응력에 의한 변형 해석

잔류응력을 받고 있는 강판이 에칭에 의해 재료가 부분적으로 없어진다면 국부적으로 강성이 달라지고 잔류응력의 회복에 의해 변형이 발생한다. 이러한 현상을 보기 위해 ANSYS의 요소 생성과 소멸(birth and death) 기능을 사용하였고 Fig. 9와 같은 인위적인 조건으로 해석하여 변형 경향을 구하였다.

두께 0.8mm 강판의 경우 표면에 압축응력, 내부에 인장응력일 경우와 반대일 경우의 2가지와, 비대칭적으로 제거되었을 경우의 2가지에 대해 해석을 하였다. 표면에 압축, 내부에 인장이 있을 때 재료가 많이 제거된 부분으로 힘을 알 수 있고, 응력 양상이 다르면 변형 양상이 달라짐을 보여준다.

Fig. 10과 11은 길이 150mm, 두께 각각 0.5mm, 0.2mm를 가지고 표면에 압축(-250MPa), 내부에 인장잔

류응력(250MPa)를 주고 case 1과 같은 형상으로 해석을 수행하였다. 윗면의 일부가 제거된 방향으로 변형이 발생하고, 두께가 얇을수록 변형값이 더 커짐을 알 수 있다.

Thickness : 8mm	Case 1	Case 2

Fig. 9 Deformation shape in a several case

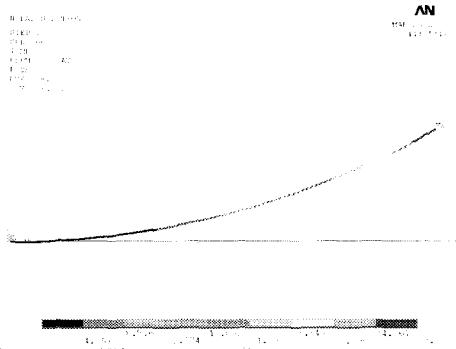


Fig. 10 Deformation shape due to residual stress (thickness=0.5mm, length=150mm)

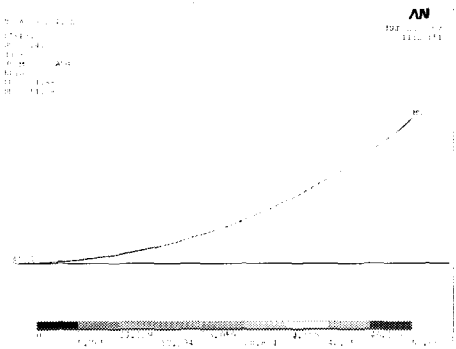


Fig. 11 Deformation shape due to residual stress (thickness=0.2mm, length=150mm)

4. 결론

(1) ANSYS로 각박강판의 냉간압연과정과 압연 후의 잔류응력을 해석하는 것이 가능함을 확인하였다. 압연비가 작을 경우(30%이하) 압연방향 변형량이 강판의 표면보다 중심에서 더 많기 때문에 중심에서는 압축, 표면에서는 인장 잔류응력이 발생한다. 그러나 압연비가 큰 경우에는 중심보다 표면에서 변형량이 많기 때문에 반대 현상이 발생한다.

(2) 롤 직경이 큰 경우(직경 500mm)와 마찰계수가 클수록 표면에 압축응력이 발생하기 쉽다. 또한 롤 직경이 작을수록 인장응력의 절대값도 증가한다. 그러므로 압연 방향의 응력이 최소화되는 압연조건을 예측할 수 있으며, 이 경우 예칭 후 변형도 가장 작아진다.

(3) 총 압연비가 일정할 때, 잔류응력의 관점에서 패스의 횟수와 각 패스당의 압연비의 비율에 따른 영향은 적을 것으로 판단된다.

(4) 강판에 남아있는 잔류응력의 유형을 분류하여 FEM 해석한 결과, 표면에 압축이 작용할 경우 예칭단면이 많은 쪽으로 굽힘변형이 발생하고, 반대로 표면에 인장응력이 존재하면 반대방향으로 굽힘변형이 발생한다.

참고 문헌

- (1) 차서욱, 1990, "칼라테레비전의 기초", 가남사.
- (2) 김의선, 1998, "Shadow mask의 열변형 해석", 한양대학교 산업대학원 석사학위 논문.
- (3) 백승철, 1995, "인바 새도마스크 원판의 집합조직과 새도마스크용 친공판재의 성형해석", 서울대학교 박사학위 논문.
- (4) W. M. Baldwin, "Proceedings of the ASTM", 49, pp. 539~583.
- (5) T. Wu, C.S. Haltley, X.M. Wang, C.T. Tsai, 1994, "Residual stress distribution in cold rolled brass sheet", J. Mater. Process. Technol., Vol. 45, pp. 111~116.
- (6) S. Yonetani, K. Imai and H. Notoya, 1990, "Residual stress in cold rolled sheet", J. Japan Inst. Metal, Vol. 54, No. 10, pp. 1120~1130.
- (7) ANSYS 5.6 user's manual.