

냉간 성형용 열연 고강도 강판의 교정 중 잔류응력 변화와 절단 후 camber 발생 거동 연구

박기철[#], 류재화¹

Residual Stress Evolution during Leveling of Hot Rolled Cold Forming Purpose High Strength Coils and Camber Prediction

K. C. Park, J. H. Ryu

Abstract

In order to investigate the residual stress evolution during the leveling process of hot rolled high strength coils for cold forming, the in-plane residual stress of plate sampled at SPM, rough leveler and finish leveler were measured by cutting method. Residual stress was localized near the edge of plate. As the thickness of plate was increased, the region with residual stress was expanded. The gradient of residual stress within plate was reduced during the leveling process. But the residual stress itself was not removed at the ranges of tested conditions. From the measured residual stress distribution within the plate, camber of plate cut to small width was predicted exactly within error range of experiment.

Key Words: Leveling, Residual Stress, Camber, Hot Rolled Coil, Plate, Cutting

1. 서론

냉간 성형용의 열연 고강도강재는 Fig.1에 나타난 특장차용 크레인의 sliding boom이나 truck의 frame 등 큰 하중을 받는 구조 부재로 사용된다. 따라서 강재에 요구되는 특성은 고강도이면서 가공성이 우수하여야 하고 용접성 및 사용환경에서 충분한 인성을 확보하여야 한다. 그리고 두께 3~10mm, 길이 5~14m 정도로 작은 폭으로 절단 후 가공 및 용접하여 사용하므로 내부에 충분하게 양호한 잔류응력 상태가 아니면 작은 폭으로 절단 후에 camber나 만곡이 발생할 수 있다.



Fig.1 Application example of high strength plate.

열연강재의 잔류응력은 열연강판 제조 공정에 서부터 코일센터 교정설비 (cut-to-length line)의 레벨러 조건 등의 영향을 모두 받아 나타나는 현상이다.

본 연구에서는 열연코일과 판재 가공 각 단계의 시편을 입수하여 각 단계별 잔류응력 변화를 측정하고 판재가공 공정에 있는 레벨러의 특성을 분석하여 응력 개선 방안을 검토하였다. 그리고 측정된 잔류응력을 이용하여 절단 후에 발생하는 camber의 크기를 예측하는 방법을 연구하고 그 결과를 실제 전단 결과와 비교하였다.

2. 공정단계별 잔류응력 변화 측정

2.1 잔류응력 측정 방법

잔류응력 평가에 사용한 strain gage는 일반 steel 용으로 gage length가 5mm인 제품이다.

¹ POSCO 기술연구소 박판연구그룹
[#] 교신저자: POSCO 박판연구그룹, parkkc@posco.co.kr

측정대상 판재는 edge 부분을 포함한 전폭에 길이는 500mm 이상으로 채취하였으며, strain gage는 Fig.2에 나타낸 위치의 상면 및 하면에 부착하였다. 먼저 각 strain gage의 기준값을 읽고 기록한 후 water_jet 절단한 강판의 값을 다시 읽었다. 측정 작업 순서는 다음과 같다.

(1) 측정하려는 대상에서 gage 부착부의 표면에 있는 녹을 #100~#320 sand paper로 완전히 제거한다. 그리고 아세톤으로 먼지와 기름때를 제거한다.

(2) 선정된 위치(Fig.2)에 strain gage 부착한다.

(3) 실험실 온도 측정 기록한다. 기준시편의 게이지 값을 같이 측정해둔다. 그리고 각 gage의 초기값을 측정하고 선을 잘 묶어 둔다.

(4) 계획된 절단선을 따라서 water_jet 절단 후 각 gage의 strain 값을 측정한다. 이때 기준 시편의 게이지 값과 실험실 온도도 같이 측정한다.

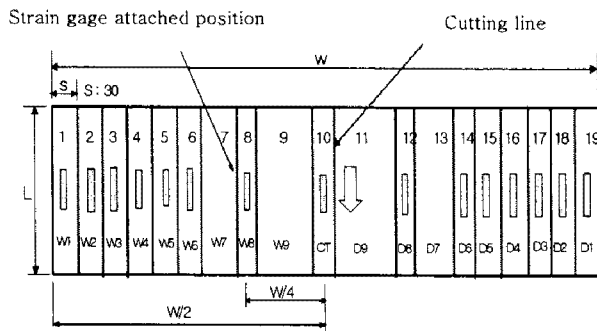


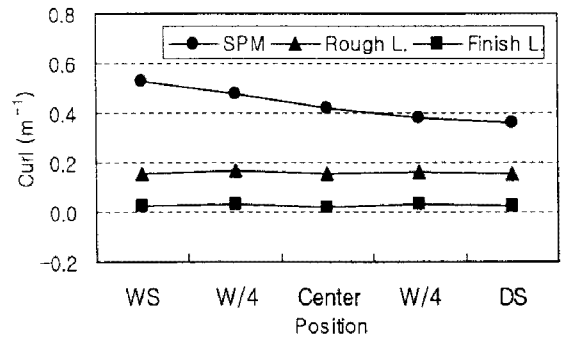
Fig.2 Strain gage attached positions and cutting lines.

2.2 공정별 잔류응력 변화 측정 결과

(1) 3.2t 강판의 잔류응력 변화

시험강판은 두께 3.2mm에 폭은 1231mm이다. 시편 채취 공정은 SPM, rough 및 finish leveler 이후이다. Rough leveler에서는 소성변형면적비가 58% 그리고 Finish leveler에서는 소성변형면적비가 72% 조건에서 교정되었다.

각 채취 시편의 강판 형상(만곡)을 정리하여 Fig.3에 나타내었다. SPM 이후에는 불균일한 만곡이 존재하나 교정 이후에는 거의 만곡이 없는 정도로 평탄해 짐을 알 수 있다. 그러나 Fig.4에 나타낸 것과 같이 잔류응력 측정을 위하여 절단한 후에 측정된 각 절단 시편 curvature 분포에서



는 교정 후에도 edge의 일부분에서는 만곡을 가지고 있음을 알 수 있다.

Fig.3 Curvature distributions in 3.2t plate.

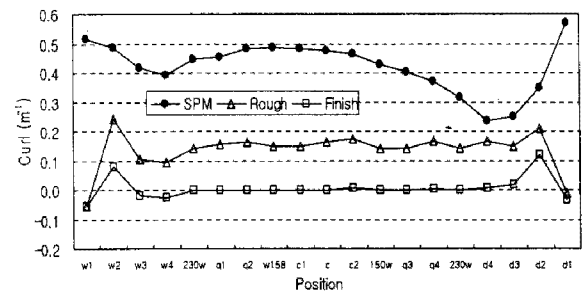


Fig.4 Curvatures of cut sheet in 3.2t plate.

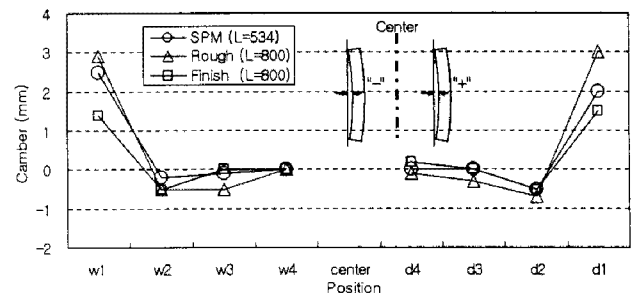


Fig.5 Camber of cut sheet in 3.2t plate.

Fig.5는 비록 작은 길이의 시편이어서 오차가 개재되기가 용이하지만 경향을 보기 위하여 camber를 측정하였다. 강판 길이는 SPM 채취 시편의 경우는 534mm이고 Leveling된 시편의 경우 800mm이다. 면내 잔류응력은 대강 edge에서 90mm까지는 존재할 수 있음을 알 수 있다. 그리고 90mm 이상의 안쪽에는 잔류응력이 없을 것으로 예상된다.

Fig.6은 잔류응력 측정 결과이다. SPM 조건에서는 가장 edge는 압축응력 상태이나, edge에서 60mm 위치에서는 인장응력이 작용하고 있다. 그리고 edge에서 90mm까지 응력이 작용하고 있고 그 이상 내부에서는 길이 방향의 면내 응력이 작

용하지 않음을 알 수 있다. 이 결과는 Fig.5 에 정리한 camber 분포와도 같은 결과이다. 그리고 edge 에서의 camber 방향과 응력 구배와도 일치하는 결과를 나타내고 있다.

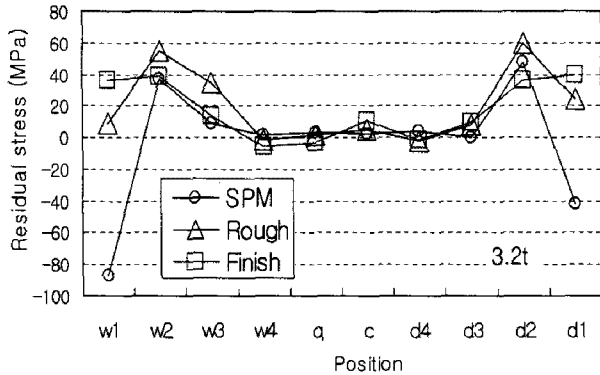


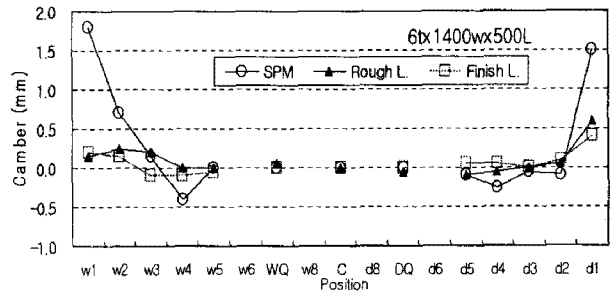
Fig.6 Residual stress distribution in 3.2t sheets at SPM and leveled conditions.

교정이 진행될수록 열연강판 내부의 잔류응력은 Fig.5 및 Fig.6 에서 알 수 있듯이 응력 구배가 작아지는 방향으로 변화함을 알 수 있다. 즉 추가적인 소성변형에 의하여 내부의 불균일이 작아지는 방향으로 교정이 되는 일반적인 교정의 원리를 따르고 있다[1].

(2) 6.0t 강판의 잔류응력 변화

500mm 길이의 6t 강판에 대하여 시험한 결과를 Fig.7~9 에 나타내었다. 절단 시편의 만곡 분포는 Fig.7 에서 알 수 있듯이 교정에 의하여 상당히 개선은 되고 있으나, edge 에서 120mm 정도 까지 불균일한 만곡이 교정 후에도 여전히 나타남을 알 수 있다. 그리고 불균일한 만곡이 나타나는 폭이 두꺼운 강판일수록 커지고 있다. 시편의 길이 500mm 에 대하여 측정한 camber 는 Fig.8 과 같다. Edge 쪽 두 개의 시편은 edge 쪽이 블록해지는 양의 camber 를 나타내고 있다. 그리고 대강 세번 째 시편은 거의 zero 수준 camber 를 가지는 경향이 있다. SPM 시편의 경우는 네 번째 정도에서 edge 가 오목해지는 음의 camber 를 가지나 leveling 된 강판의 경우는 그 경향이 뚜렷하지 않다. 이러한 camber 경향은 Fig.9 에 정리한 잔류응력 분포에서 원인을 알 수 있다. Edge 부터 세개의 skelp 정도에서는 같은 방향의 응력 구배를 가지고 이보다 안쪽에서는 반대방향의 구배를 가지고 있다. 대강 edge 부분의 camber 경향이 잔류응력 분포로

부터 설명되고 있다. 그리고 Edge 에서 180mm 정도까지 잔류응력이 존재하고 있고 두꺼운 강판일



수록 더 안쪽까지 잔류응력이 존재하고 있다.

Fig.7 Curvatures of cut sheet in 6.0t plate.

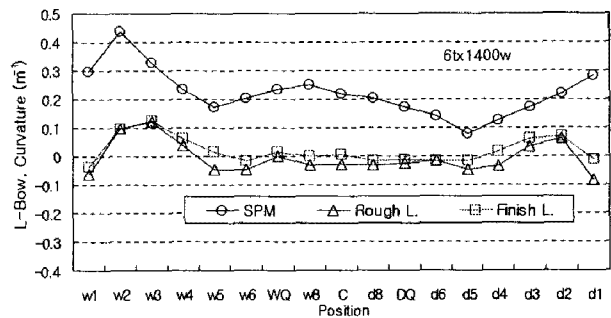


Fig.8 Camber of cut sheet in 6.0t plate.

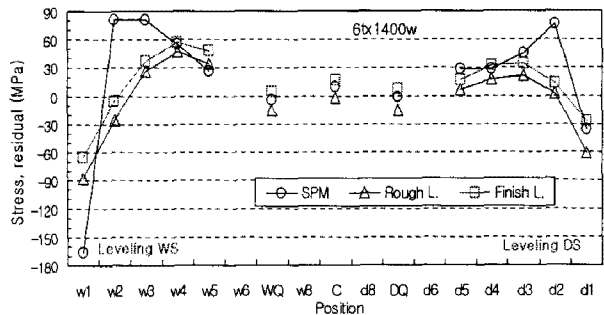


Fig.9 Residual stress distribution in 6.0t sheets at SPM and leveled conditions.

3. 잔류응력과 절단 후 camber 의 관계

3.1 잔류응력을 이용한 camber 계산

잔류응력 수준과 작은 폭으로 절단한 강판의 캠버와의 관계를 알아보기 위하여, 강판내의 잔류응력 분포를 이차식으로 가정할 수 있는 경우에는 절단 폭과 길이 및 잔류응력에 따른 camber 발

생 크기를 해석적으로 구할 수 있다[1]. 그러나 Fig.6 이나 Fig.9 와 같이 잔류응력 분포가 2차 곡선 형태를 가지지 않는 경우는 평가가 곤란하다.

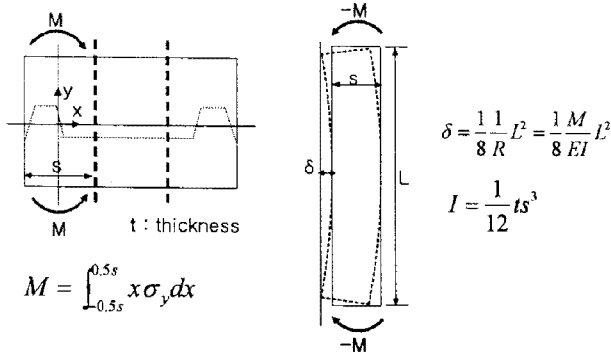


Fig.10 Residual stress distribution in a plate and equation for computing camber after cutting.

이렇게 간단한 식으로 분포를 가정할 수 없는 잔류응력 분포에 대하여는, 실제 측정된 잔류응력 분포를 수치적으로 고려하여, 절단한 후의 camber 를 절단부재 내의 응력에 의한 moment 분포로 구할 수 있다. 부재내 moment 와 굽힘 곡률반경의 관계를 이용하였다. Fig.10 에 나타낸 식에서 알 수 있듯이 잔류응력에 의한 camber 는 slitting 한 부분에 작용한 모멘트와 절단 길이의 제곱에 비례하고, 절단 폭의 세제곱 (moment 계산에 소요된 단면을 고려하면 제곱)에는 반비례한다. 따라서 절단길이가 커질수록 엄격한 잔류응력 관리가 필요한 것을 알 수 있다.

3.2 잔류응력 계산 및 측정 결과

Fig.11 은 적절한 조건에서 교정된 판재의 잔류응력 분포와 길이 12m 를 작은 폭(468mm)으로 절단 시의 camber 예측 결과이다. 실제 시험에서 측정한 결과는 WS 와 DS 에서 모두 -2mm 내의 였고 중앙은 camber 가 발생하지 않았다.

Fig.12 는 적절하지 않은 조건으로 교정된 판재 내부의 잔류응력과 468mm 폭으로 절단시의 camber 예측값 및 시험결과이다. 8.5mm 수준의 camber 가 예측되는 경우 실제 시험에서는 10mm 수준이었다. 비교적 정확한 예측이 가능함을 알 수 있다.

4. 결론

냉간 성형용 열연 고강도 강판 교정 과정에서

의 잔류응력 변화 과정을 시험하고 측정된 잔류응력으로부터 절단 후의 camber 를 예측하는 연구를 수행하였다. 얇은 강판에 비하여 두꺼운 강판의 경우 edge 부에 잔류응력이 존재하는 영역이 넓어지며 교정 과정에서의 응력 변화도 얇은 강판에 비하여 크지 않았다. 모든 시험 결과에서 교정 과정에서는 판 내부의 응력 구배가 작아지는 방향으로 응력이 재 분포되어 짐을 알 수 있었다. 그리고 잔류응력 분포에서 예측한 camber 는 실제 절단 후 판의 camber 와 오차수준 이내에서 잘 일치하였다. 따라서 절단 후 강판의 camber 를 본 연구에서 제안한 방법으로 잔류응력을 측정하여 평가할 수 있을 것으로 생각된다.

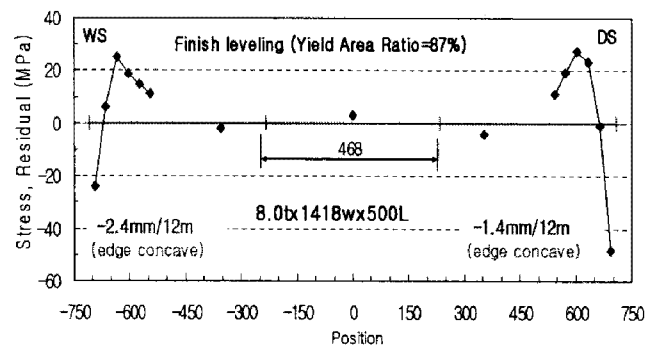


Fig.11 Residual stress distribution in a plate and computed camber for properly leveled plate.

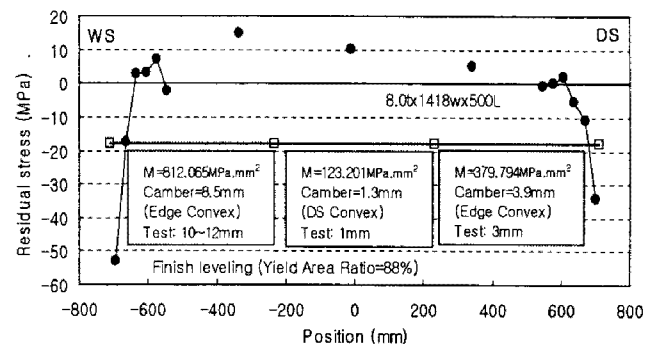


Fig.12 Residual stress distribution in a plate and computed camber for improperly leveled plate.

참 고 문 헌

- [1] 박기철, 김홍준, 김교성, 2006, 잔류응력이 낮은 평탄한 판재 제조를 위한 열연코일 교정 조건 도출, 한국소성가공학회지, 제15권, 제4호, pp. 311~318.