

냉간 성형용 열연 고강도 강판의 교정 중 잔류응력 변화와 절단 후 캠버 발생 예측

박기철[#] · 류재화¹

Residual Stress Evolution during Leveling of Hot Rolled High Strength Coils and Camber Prediction by Residual Stress Distribution

K. C. Park, J. H. Ryu

(Received October 11, 2007)

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 size of residual stress region was expanded. The gradient of residual stress within the plate was reduced during the leveling process. But the residual stress itself was not removed completely within the ranges of tested conditions. The exact camber of cut plate was able to be predicted by the measurement of residual stress distribution after leveling of the plate.

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

1. 서론

냉간 성형용의 열연 고강도강재는 Fig. 1 에 나타난 특장차용 크레인의 슬라이딩 붐(sliding boom)이나 대형트럭의 하부 프레임(frame) 등 큰 하중을 받는 구조 부재로 사용된다. 따라서 강재에 요구되는 특성은 고강도이면서 가공성이 우수하여야 하고 용접성 및 사용 환경에서 충분한 인성을 확보하여야 한다. 그리고 두께 3~10mm 이므로 일반적으로 열연강판을 교정한 판재가 사용되며, 길이는 5~14m 의 범위에서 작은 폭으로 절단 후 가공 및 용접하여 사용하므로 내부에 충분하게 양호한 잔류응력 상태가 아니면 작은 폭으로 절단 후에 캠버(camber)나 만곡이 발생할 수 있다[1].

열연강재의 잔류응력은 열연강판 제조 공정과

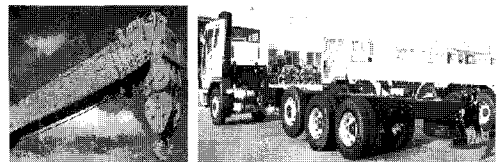


Fig. 1 Application example of high strength plate

코일센터 교정설비 (cut-to-length line)인 레벨러 조건 등의 영향을 받는다[1~6].

본 연구에서는 열연코일과 판재 가공 각 단계의 시편을 입수하여 잔류응력 변화를 측정하고 판재가공 공정에 있는 레벨러의 특성을 분석하여 응력 개선 방안을 검토하였다. 그리고 측정된 잔류응력을 이용하여 절단 후 캠버의 크기를 예측하여 그 결과를 실제 절단 결과와 비교하였다.

1. POSCO 기술개발실

[#] 교신저자: POSCO 기술연구소, E-mail: parkkc@posco.com

2. 공정단계별 잔류응력 변화 측정

2.1 잔류응력 측정 방법

잔류응력 평가에 사용한 스트레인 게이지(strain gage)는 일반 강재용으로 기준길이(gage length)가 5mm 인 제품이다. 측정대상 판재는 전폭에 길이는 500mm 이상으로 채취하였으며, 스트레인 게이지는 Fig. 2 에 나타낸 위치의 윗면 및 아랫면에 부착하였다. 먼저 각 스트레인 게이지의 기준값을 읽고 기록한 후 워터젯(water jet) 절단 후 스트레인 게이지의 값을 다시 기록하였다. 본 연구에서 행한 작업 순서는 다음과 같다.

- (1) 측정하려는 대상에서 gage 부착부의 표면에 있는 녹을 #100~#320 샌드페이퍼(sand paper)로 완전히 제거한다. 그리고 아세톤으로 먼지와 기름때를 제거한다.
- (2) 선정 위치(Fig. 2)에 게이지를 부착한다.
- (3) 온도 변화에 따른 스트레인 값을 보상하기 위하여 실험실 온도와 기준시편의 게이지 값을 모두 측정한다. 그리고 각 게이지의 초기값을 측정한다.
- (4) 계획된 절단선을 따라서 Fig. 3 과 같이 워터젯 절단 후 각 게이지의 스트레인 값을 측정한다. 이때 기준 시편의 게이지 값과 실험실 온도도 같이 측정해둔다.

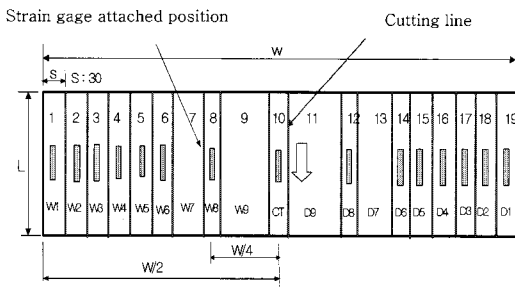


Fig. 2 Strain gage attached positions and cutting lines

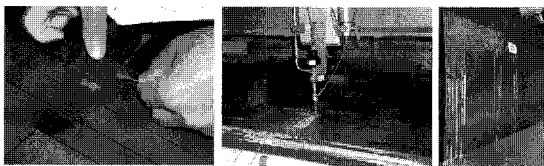


Fig. 3 Strain gage preparation, cutting by water jet and specimen after cutting

(5) 측정된 변형을 변화 및 기준 시편의 온도에 따른 변형 변화값으로 식(1)을 이용하여 잔류응력을 계산한다. (1) 식에서 E 는 탄성계수이며 ϵ_{bfrcut} 는 절단전의 시편 변형률 값을 그리고 ϵ_{cut} 는 절단후의 시편 변형률 값을 나타낸다. 그리고 위첨자 ref 는 측정 시점에서의 기준 시편 변형률 값을 의미한다.

$$\sigma_{res} = E \times \left[\left(\epsilon_{bfrcut} - \epsilon_{bfrcut}^{ref} \right) - \left(\epsilon_{cut} - \epsilon_{cut}^{ref} \right) \right] \quad (1)$$

2.2 공정별 잔류응력 변화 측정 결과

각 공정 단계별 열연 코일의 잔류응력 변화를 측정하고 그 결과를 정리하였다.

2.2.1 3.2t 강판의 잔류응력 변화

시험강판은 두께 3.2mm에 폭은 1231mm 이다. 시편은 스킨패스압연(SPM), 일차(rough) 및 마무리(finish) 레벨러(leveler) 공정 이후에 채취하였다[1]. 일차레벨러에서는 소성변형면적비(plastic fraction)가 58% 그리고 마무리레벨러에서는 소성변형면적비가 72% 조건에서 교정되었다. Fig. 4 에는 교정 설비를 간단하게 나타내었으며, Fig. 5 에는 전체 두께에서 소성변형을 받는 부분의 비인 소성변형면적비를 간단한 굽힘 관계식을 포함하여 나타내었다[7].

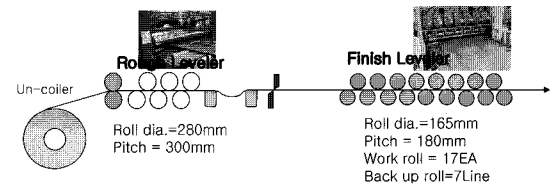


Fig. 4 An example of cut-to-length line for leveling hot rolled coils

Plastic fraction (Yield area ratio)

$$\text{Yield area ratio (Plastic fraction)} = (t - 2y) / t$$

$$y = YS \times R / E$$

$$YS : \text{Yield stress}, E : \text{Elastic Modulus}, R : \text{Bending radius}$$

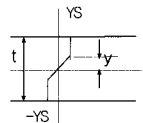


Fig. 5 Definition of plastic fraction or yield area ratio

각 채취 시편의 강판 형상(만곡)을 정리하여 Fig. 6 에 나타내었다. 강판의 윗면이 볼록해지는 경우를 양의 곡률 값으로 하여 측정한 만곡 형상을 표시하였다[8]. 스킨패스압연(SPM) 이후에는

불균일한 만곡이 존재하나 교정 이후에는 거의 만곡이 없는 정도로 평탄해 짐을 알 수 있다. 그러나 Fig. 7에 나타난 것과 같이 잔류응력 측정을 위하여 절단한 후에 측정된 각 절단 시편의 곡률(curvature) 분포에서는 교정 후에도 강판 가장자리에서는 만곡을 가지고 있음을 알 수 있다.

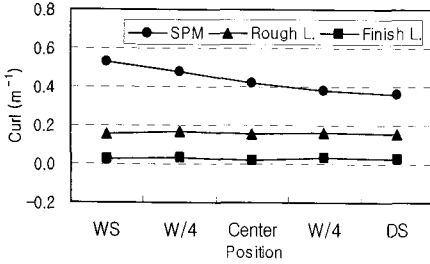


Fig. 6 Curvature distributions in 3.2t plate

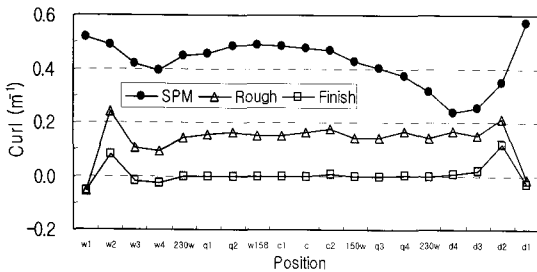


Fig. 7 Curvatures of cut sheet in 3.2t plate

비록 작은 길이의 시편이어서 오차가 개입되기가 용이하지만 경향을 보기 위하여 캠버를 측정하고 Fig. 8에 나타내었다. 강판 길이는 스킨패스압연에서 채취한 시편의 경우는 534mm 이고 교정(leveling)된 시편의 경우 800mm 이다. 면내 잔류응력은 대강 가장자리에서 90mm까지는 존재할 수 있음을 알 수 있다. 그리고 90mm 이상의 안쪽에는 잔류 응력이 없을 것으로 예상된다.

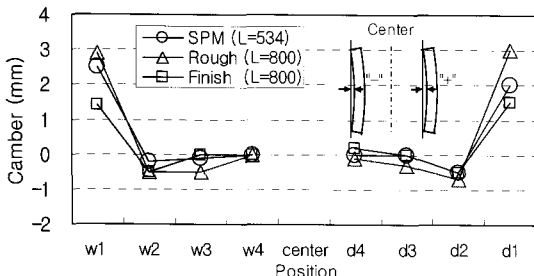


Fig. 8 Camber of cut sheet in 3.2t plate

Fig. 9는 잔류응력 측정 결과이다. 스킨패스압연 조건에서는 최고 가장자리 부는 압축응력 상태이나, 가장자리에서 60mm 위치에서는 인장응력이 작용하고 있다. 그리고 가장자리에서 90mm 까지 응력이 작용하고 있고 그 이상 내부에서는 길이 방향의 면내 응력이 작용하지 않음을 알 수 있다. 이 결과는 Fig. 8에 정리한 캠버 분포와도 같은 결과이다. 그리고 가장자리에서의 캠버 방향과 응력 기울기(gradient)와도 일치하는 결과이다.

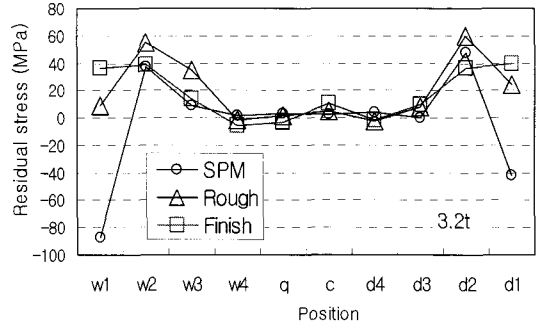


Fig. 9 Residual stress distribution in 3.2t sheets at SPM and leveled conditions

교정이 진행될수록 열연강판 내부의 잔류응력은 Fig. 8 및 Fig. 9에서 알 수 있듯이 응력 기울기가 작아지는 방향으로 변화함을 알 수 있다. 즉 추가적인 소성변형에 의하여 내부의 불균일이 작아지는 방향으로 교정이 되는 일반적인 교정의 원리를 따르고 있다[1,6,9].

2.2.2 6.0t 강판의 잔류응력 변화

500mm 길이의 6t 강판에 대하여 시험한 결과를 Fig. 10~12에 나타내었다. 절단 시편의 만곡 분포는 Fig. 10에서 알 수 있듯이 교정에 의하여 상당히 개선은 되고 있으나, 가장자리에서 120mm 정도 폭에서는 불균일한 만곡이 교정 후에도 여전히 나타남을 알 수 있다. 그리고 만곡이 불균일한 부분의 폭은 두꺼운 강판일수록 커지고 있다. 시편 길이 500mm 에 대하여 측정된 캠버는 Fig. 11 과 같다. 가장자리 쪽 두 개의 시편은 외곽이 볼록해지는 양의 캠버를 나타내고 있다. 그리고 대강 세 번째 시편은 거의 영(zero) 수준 캠버를 가지는 경향이다. 스킨패스압연 된 시편의 경우는 네 번째 절단 판 정도에서 가장자리가 오목해지는 음의 캠버를 가지나 교정된 강판의 경우는 그

경향이 뚜렷하지 않다. 이러한 캠버 발생 경향은 Fig. 12에 정리한 잔류응력 분포에서 원인을 찾을 수 있다. 가장자리부터 세개의 절단판(skelp) 정도에서는 같은 방향의 응력 기울기를 가지고 이보다 안쪽에서는 반대방향의 기울기를 가지고 있다. 대강 가장자리 부분의 캠버 경향이 잔류응력 분포로부터 설명되고 있다. 그리고 가장자리에서 180mm 정도까지 잔류응력이 존재하고 있고 두꺼운 강판일수록 더 안쪽까지 잔류응력이 존재하고 있다.

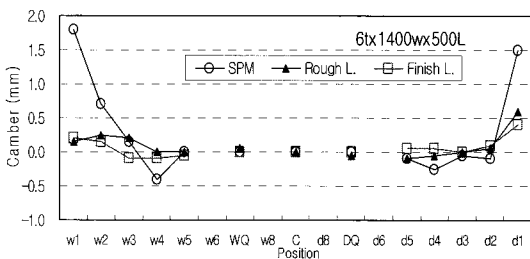


Fig.10 Curvatures of cut sheet in 6.0t plate

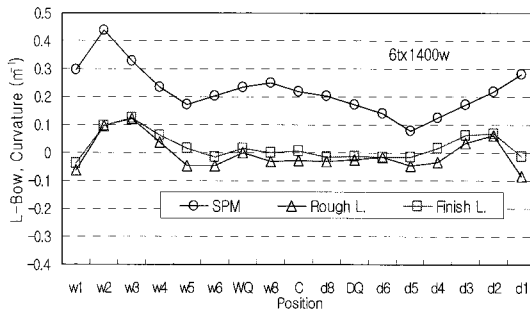


Fig.11 Camber of cut sheet in 6.0t plate

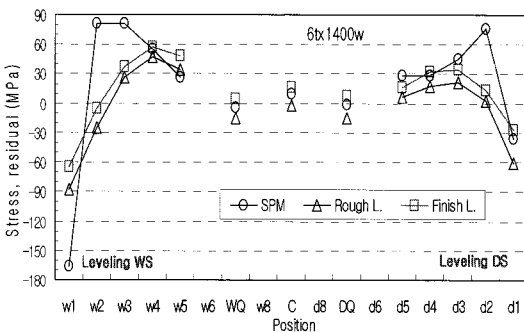


Fig.12 Residual stress distribution in 6.0t sheets at SPM and leveled conditions

3. 잔류응력과 절단 후 캠버의 관계

3.1 잔류응력을 이용한 캠버 계산

측정한 잔류응력을 실용적으로 활용하기 위해서는 열연 강판(코일)과 같은 전체 폭 강판의 잔류응력 수준과 Fig. 13과 같이 작은 폭으로 절단한 강판의 캠버와의 관계를 구하여야 한다. 강판내의 잔류응력 분포를 이차식으로 가정할 수 있는 경우에는 절단 폭과 길이 및 잔류응력에 따른 캠버 발생 크기를 해석적으로 구할 수 있다[1]. 그러나 Fig. 9나 Fig. 12와 같이 잔류응력 분포가 2차 곡선 형태를 가지지 않는 경우는 해석적인 식으로 캠버를 구하는 것이 불가능하다.



Fig.13 Under water plasma cutting and 468w cut plate from 8t x 1418w x 12135L leveled plate

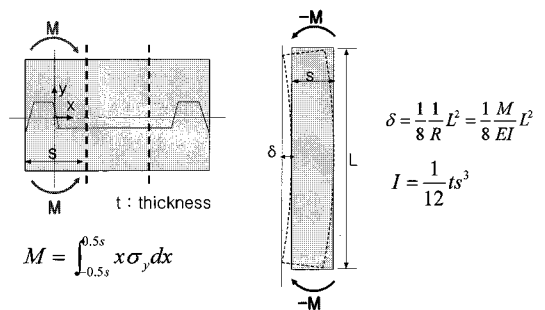


Fig.14 Residual stress distribution in a plate and equation for computing camber after cutting

이렇게 간단한 식으로 분포를 가정할 수 없는 잔류응력 분포에 대하여는, 실제 측정된 잔류응력 분포를 수치적으로 고려하여, 절단한 후의 캠버를 절단부재 내의 응력에 의한 모멘트(moment) 분포로 구할 수 있다[10]. Fig. 14에는 그림으로 그 개념을 나타내었다. 측정된 Fig. 9나 Fig. 12와 같은 잔류응력 분포에서 절단 부재내 모멘트를 구하고 이 모멘트와 굽힘 곡률반경 간의 탄성변형 관계식을 이용한다. Fig. 14에 나타낸 식에서 알 수 있듯이 잔류응력에 의한 캠버는 절단(slitting)한 부분

에 작용한 모멘트와 절단 길이의 제곱에 비례하고, 절단 폭의 제곱(모멘트 계산에 소요된 단면을 고려하면 제곱)에는 반비례한다. 따라서 절단 길이가 커질수록 엄격한 잔류응력 관리가 필요한 것을 알 수 있다.

3.2 잔류응력 계산 및 측정 결과

Fig. 15는 적절한 조건에서 교정된 판재의 잔류응력 분포와 길이 12m로 작은 폭(468mm)으로 절단 시의 캠버(camber) 예측 결과이다. 실제 시험에서 측정된 결과는 강판의 작업측(WS; work side)과 구동측(DS; drive side)에서 모두 -2mm 내외였고 중앙은 캠버가 발생하지 않았다. 예측한 캠버 값은 -2.4mm와 -1.4mm로 실제 측정에서의 측정 오차를 고려하면 거의 정확한 값으로 예측이 되었음을 알 수 있다.

Fig. 16은 적절하지 않은 조건으로 교정되어 내부에 잔류응력이 불균형을 이루고 있는 판재 내부의 잔류응력 분포와 468mm 폭 12m 길이 강판

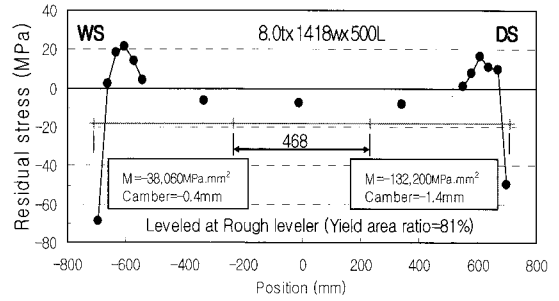


Fig.17 Residual stress distribution of rough leveled plate. It's residual stress after finish leveling was shown in Fig. 16

으로 절단시의 캠버 예측값 및 시험결과이다. 8.5mm 수준의 캠버가 예측되는 경우 실제 시험에서는 10mm 수준이었다. 큰 길이 강판에 발생한 캠버를 측정하는데 개입될 수 있는 측정 오차를 고려하면 비교적 정확한 예측이 되었음을 알 수 있다. 그리고 시험에 사용한 절단제품 활용 용도에서는 12m로 절단하는 경우 캠버 6mm 미만을 허용 수준으로 하고 있어 잔류응력을 통한 예측으로도 충분히 합격 및 불합격 판단도 가능함을 알 수 있다.

Fig. 17은 Fig. 16에 나타낸(마무리 레벨러 통과한) 강판의 잔류응력을 측정된 교정설비에서 일차 레벨러만 통과한 강판의 잔류응력 분포 및 예측한 캠버를 나타낸 것이다. Fig. 16과 달리 잔류응력 분포가 강판 중앙을 기준으로 대칭을 이루고 있음을 알 수 있으며, 잔류응력 분포에서 예측한 캠버 크기도 2mm 이하이다. 따라서 마무리 교정기에서 잔류응력을 감소시키는 것이 아니라 증가시키는 역할을 하고 있었음을 알 수 있다[11]. 즉, 교정 판재의 잔류응력 분포를 각 공정 단계별로 측정을 해 나가면, 그 결과로부터 소재의 캠버 뿐만 아니라 레벨러의 교정 조건 적정성 여부도 판단할 수 있다.

4. 결론

냉간 성형용 열연 고강도 강판 교정 과정에서의 잔류응력 변화 과정을 측정하여 교정단계별 잔류응력 변화를 시험하고 측정된 잔류응력으로부터 절단

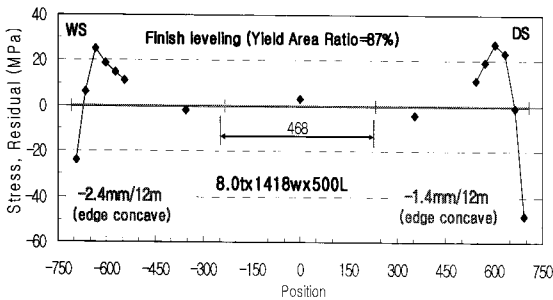


Fig.15 Residual stress distribution in a plate and computed camber for properly leveled plate

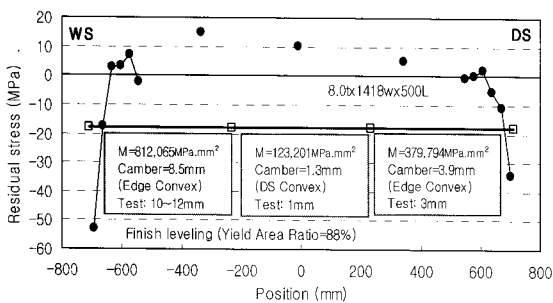


Fig.16 Residual stress distribution in a plate and computed camber for improperly leveled plate

후의 캠버를 예측하는 연구를 수행하였다.

얇은 강판에 비하여 두꺼운 강판의 경우가 강판 가장자리 부분에 불균일 잔류응력이 존재하는 영역이 넓어지거나 교정 과정에서의 응력 변화는, 강판의 최고 가장자리를 제외한 부분에서는, 얇은 강판에 비하여 크게 발생하였다. 모든 시험 결과에서 교정 과정에서는 판 내부의 응력 기울기가 작아지는 방향으로 응력이 재 분포되어 짐을 알 수 있었다.

잔류응력 분포에서 예측한 캠버는 실제 절단 후 판의 캠버와 오차 범위 이내에서 잘 일치하였고, 절단강판의 합격 및 불합격 여부에 대한 판단을 절단 전 강판의 잔류응력으로 예측할 수 있음을 알 수 있었다. 그리고 교정 판재의 잔류응력과 형상 분포로부터 소재를 절단한 후의 캠버 뿐만 아니라 교정설비나 교정 조건의 적정성 여부를 판단할 수 있었다.

강판 가장자리부의 큰 불균일 잔류응력은 교정 과정에서 완전히 없어지지 않는다고. 소재 및 교정 특성을 고려한 가장자리부의 불균일 잔류응력 발생 및 감소 방안에 대한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] K. C. Park, H. J. Kim, K. S. Kim, 2006, Leveling Condition in Cut-To-Length Lines to Produce Low Residual Stress Flat Plate from Hot Rolled Coils, Trans. Mater. Proc., Vol. 15, pp. 311~318.
- [2] Y. Maeda, 2003, Residual Stress Control in Steel Plate by Leveling Process, CAMP-ISIJ, Vol. 16, pp. 392~395.
- [3] Y. S. Yang, J. G. Bae, C. G. Park, 2007, Measurement of the Residual Stress in the Steel Wires by using Focused Ion Beam and Digital Image Correlation Method, Trans. Mater. Proc., pp. 323-328.
- [4] T. W. Kim, S. H. Ham, H. I. Moon, H. Y. Kim, 2007, Prediction of Residual Stress in Straightening Process of SUS304 Wire, Trans. Mater. Proc., pp. 463-466.
- [5] Y. C. Kwon, J. H. Lee, C. M. Lee, Y. S. Lee, 2007, Dimensional Changes and Residual Stress of Spur Gear According to the Manufacturing Processes - Comparison of Cold Forging Part with Machining Part, Trans. Mater. Proc., pp. 575-581.
- [6] J. G. Bae, Y. S. Yang, D. Y. Ban, C. G. Park, 2006, The Effects of Die Design and Die Series on the Surface Residual Stress of Cold Drawn Eutectoid Steel Wire, Trans. Mater. Proc., pp. 153-157.
- [7] S. H. Crandall, C. Dahl, T. J. Lardner, 1978, An Introduction to the Mechanics of Solids, McGraw-Hill International Book Company, pp. 416~432.
- [8] T. Matoba, 1995, Unification of evaluation methods for measuring bow of thin gauge steel sheets, J. JSTP, Vol. 36, pp. 1312~1317.
- [9] T. Matoba, 1995, Calculation method of roller leveling conditions for steel plates, J. JSTP, Vol. 36, pp. 1306~1311.
- [10] S. H. Crandall, C. Dahl, T. J. Lardner, 1978, An Introduction to the Mechanics of Solids, McGraw-Hill International Book Company, pp. 511~515.
- [11] H. E. Thesis, 1985, Corrective Sheet Metal Leveling -Science, Art or Black Magic, SME Technical Paper, MF85-857.