

선수미 곡 주판 및 소절재용 TMCP강의 허용 잔류 응력에 관한 연구

A study on the allowable residual stress of TMCP steel for the curved plate and stiffeners of the hull structure

김하근*, 신상범**, 윤중근*, 김경규*

* 현대중공업(주) 기술개발본부 산업기술연구소

** 현대중공업(주) 기술개발본부 산업기술연구소/울산대학교

1. 서 론

선박의 대형화에 따른 고 강도강 및 후판의 사용 증가와 더불어 강제 제조 업체의 열처리 부하의 저감 정책에 따라 TMCP(thermo mechanical control process) 강이 사용이 지속적으로 증가하고 있다. 그러나, TMCP 강재의 경우 용접 생산성과 관련된 여러 장점에도 불구하고, TMCP 강재의 제조 공정시 발생하는 잔류 응력에 의하여 절단 및 곡 성형을 위한 국부 가열 및 용접 공정에 있어 선미와 선수의 곡 주판 및 소절재용으로는 매우 제한적으로 적용되고 있다.

따라서 본 연구에서는 선체 제작시 TMCP강의 적용을 확대하고자 선수미 곡 주판 및 소절재용 TMCP 강재의 허용 잔류 응력에 대한 기준을 정립하고자 하였다. 이를 위하여 TMCP 강재의 제조 공정에 따른 잔류 응력 거동을 평가하고, 선상 가열에 의한 곡 성형성을 비교 검토하였다.

2. 실험 및 해석 방법

본 연구에 사용된 TMCP 강재는 Table 1과 같이 각 제조 공정이 상이한 선급용 20mm 두께의 EH36이며, 판 폭 및 길이는 각각 3500과 15000mm이다. 여기서, 열간 교정시 교정기의 (+) 캠버는 중앙부와 TMCP 강재의 판 폭의 중앙부가 접촉하는 것을 나타낸다. TMCP 강재의 각 제조 방법에 따른 잔류 응력의 분포는 X선 회절법(XRD)을 이용하여 국부 표면과 화염을 이용한 절단법을 이용하여 두께 방향에 평균적으

로 작용하는 잔류 응력을 평가하였다[1]. 여기서, 절단법에 의한 잔류 응력은 절단시 발생하는 굽힘 변형량으로부터 측정된 절단 부재내의 최대 및 최소 잔류 응력의 차이이다. 그리고, 열간 가공성은 동일 가열선에 대하여 잔류 응력이 존재하지 않는 주판에 대한 예측 결과[2]와 TMCP 강재의 곡 형상에 대한 측정 결과를 비교하여 검토하였다.

Table 1 Types of TMCP steel plates employed in the study

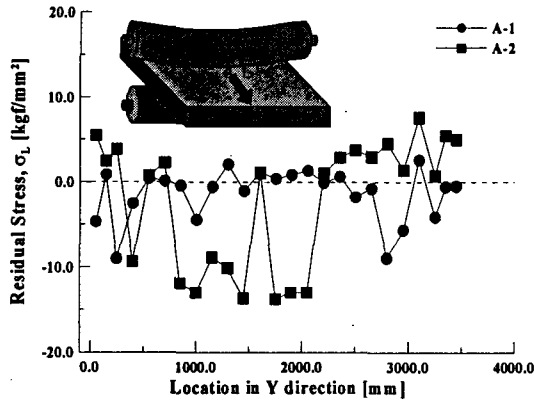
TMCP 강재	Hot Leveling	Cold Leveling
A-1	(+) Camber	×
A-2		○
B-1	(-) Camber	×
B-2		○

3. 결과 및 토론

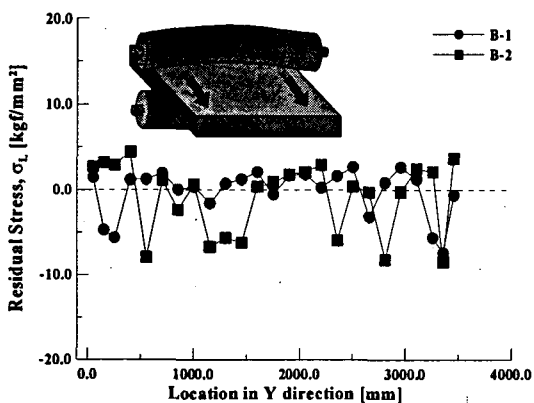
3.1 제조 공정에 따른 잔류 응력 거동

Fig. 1은 Table 1과 같이 가속 냉각 직후 열간 교정의 캠버와 냉간 교정의 적용 유무에 따라 X선 회절법을 이용하여 압연 방향으로 표면에 작용하는 잔류 응력의 분포를 도시한 것이다. Fig. 1과 같이 (-) 캠버를 가진 열간 교정기를 이용하여 교정된 주판의 경우 (+) 캠버의 교정기에 의하여 제작된 주판에 비하여 표면에 작용하는 국부 잔류 응력이 작을 뿐 아니라 보다 균질하게 분포하고 있음을 알 수 있다. 그리고, 냉간 교정의 적용 후 최대 잔류 응력 및 불균일성은 오히려 더 증가함을 알 수 있다. 그러나, 이러한 교정 방안에 따른 잔류 응력 특성은 Fig. 2와 같이 절단법을 이용하여 측정된 두께 방향의 평균 잔류 응력의 결과와는 매우 상이함

을 알 수 있다. 즉, 절단법을 이용하여 측정된 잔류 응력의 경우 (+) 캠버를 이용하여 열간 교정을 수행하고, 냉간 교정을 적용한 경우 더 효과적으로 잔류 응력이 제어됨을 알 수 있다.



(a) Hot leveller with (+) camber



(b) Hot leveller with (-) camber

Fig. 1 Longi. residual stress distribution measured by X-ray diffraction method

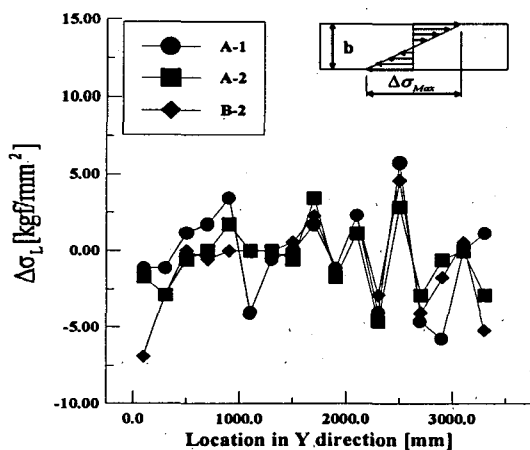


Fig. 2 Distribution of residual stress by cutting method

이러한 계측 방안에 따른 잔류 응력의 거동 차이는 TMCP의 제조 공정의 특성이 잘 반영된 결과이다. 즉, 표면의 경우 열간 및 냉간 교정기와의 접촉시 발생한 압축 응력이 주를 이루는 반면에 두께 방향의 평균 잔류 응력은 가속 냉각시 온도 분포의 불균일성과 함께 교정 작업에 의한 효과가 함께 반영되었기 때문이다.

3.2 TMCP 강재의 열간 성형성

Fig. 3과 4는 각각 동일 가열선을 이용한 선상 가열시 잔류 응력이 존재하지 않는 주판에 대하여 가열선의 중앙부에서 가열선 폭 방향의 곡 profile에 대한 예측 결과와 냉간 교정이 적용된 TMCP강에서 계측 결과를 상호 비교하여 도시한 것이다.

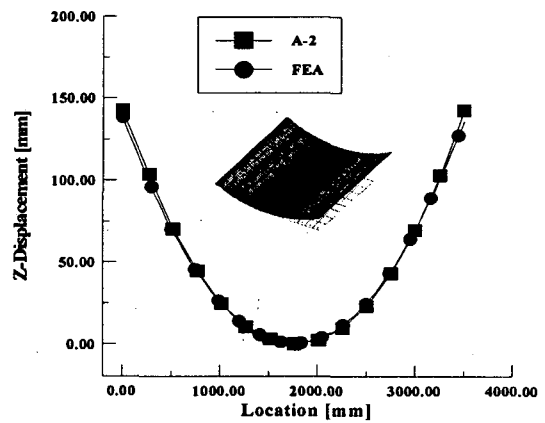


Fig. 3 Curved profile of "A-2" plate by line heating

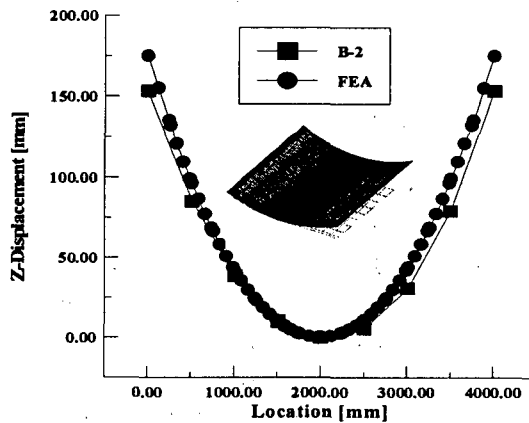


Fig. 4 Curved profile of "B-2" plate by line heating

Fig.3과 같이 (+) 캠버를 가진 열간 교정후 냉간 교정이 적용된 "A-2"의 경우 계측 및 해석 결과가 최대 5mm의 오차 범위내에서 비교적 유사한 반면, Fig. 4에 도시한 (-) 캠버를 이용한 열간 교정 작업 후 냉간 교정 작업을 거친 "B-2"의 경우 해석 및 실험 결과간의 차이는 약 25mm로 다소 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 기존의 연구 결과[2]에서 보고하고 있는 열간 성형 simulator의 오차 범위가 최대 변형량의 5%인 8.5mm의 약 3배 수준임을 고려하면 매우 큰 차이라고 할 수 있다. 즉, "B-2"의 선상 가열시 발생한 곡 profile의 차이는 잔류 응력의 차이에 의한 것이라고 할 수 있다. Fig. 2에 도시한 바와 같이 "A-2"의 경우 절단법에 의한 최대 잔류 응력의 차가 $\pm 5\text{kgf/mm}^2$ 인 반면에 "B-2"의 경우 $\pm 7.55\text{kgf/mm}^2$ 로 매우 크기 때문이다. 이상의 결과를 토대로 본 고에서는 선상 가열을 이용한 곡 주판의 성형시 성형 정도를 확보하기 위한 허용 잔류 응력 기준을 $\pm 5\text{kgf/mm}^2$ 로 정의하였다. 여기서 허용 잔류 응력은 표면에서의 잔류 응력이 아니라, 200mm의 폭에 주판의 두께 방향에 평균적으로 작용하는 압연 방향의 최대 잔류 응력의 차이이다.

3.3 소절재용 TMCP 강재

선급용 소절재를 위한 절단시 발생하는 과다 굽힘 변형은 후 공정인 용접 공정에서 과다 갭(gap)에 의한 용접 입열량을 증가시킴으로써 과다 변형의 원인으로 작용하기 때문에 이를 효율적으로 제어하는 것이 매우 중요하다. 또한 선체의 소절재의 허용 변형에 대한 기준은 후 공정과 작업 방법에 대한 의존성이 매우 크다. 특히, container 운반선의 해치 코밍 deck에 용접되는 소절재의 경우 최종 굽힘 변형량은 일차 flat bar 형태로 절단한 후 용접 개선면에 대한 절단에 의한 굽힘 변형과 자중에 의한 처짐에 의한 효과가 상호 복합적으로 발생한다. 따라서, 본 고에서는 TMCP 강재의 초기 절단시 발생하는 잔류 응력과 개선 절단에 의한 잔류 응력의 재분포 특성에 기인한 굽힘 변형 거동[3]과 처짐과 자중에 의한 탄성 복원을 고려한 허용 잔류 응력 기준을 보 이론을 이용하여 식(1)과 같이 정의하였다.

$$\Delta\sigma_L = \frac{2 \times (\delta_a + \delta_w + \delta_g) \times h_s \times E}{L_s^2} \quad (1)$$

여기서, δ_a , δ_w 그리고 δ_g 는 각각 허용 변형량, 자중, 개선 절단시 발생하는 최대 변형량, h_s 와 L_s 는 보강재이 높이와 길이 그리고, E '는 탄성계수이다.

4. 결 론

선수미 곡 주판 및 소절재용 TMCP 강재의 허용 잔류 응력에 대한 기준을 정립하기 위하여 잔류 응력 및 열간 성형성을 유한 요소 해석 및 실험을 이용하여 평가하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) TMCP 강재의 열간 성형성은 주판의 두께 방향에 평균적으로 작용하는 잔류 응력 수준에 의존한다.
- 2) 소절재용 TMCP 강재의 허용 잔류 응력을 초기 절단시 발생하는 잔류 응력과 개선 절단에 의한 잔류 응력의 재 분포 특성에 기인한 굽힘 변형 거동과 처짐과 자중에 의한 탄성 복원을 고려하여 정식화하였다.
- 3) 잔류 응력 수준에 따른 선상 가열시 곡 성형성 평가 결과로부터 곡 주판용 TMCP 강재의 최대 허용 응력은 $\pm 5\text{kgf/mm}^2$ 이다.

참고문헌

1. ASTM E937-95 : Standard Test Method for Determining the Effective Elastic Parameter for X-ray Diffraction Measurement of Residual Stress (2003)
2. 신상범, 이동주, 김경규, 윤종근 : 곡 가공을 위한 선상 가열 특성에 따른 변형 거동에 관한 연구, 대한용접학회 춘계학술발표대회 논문집, 291-293 (2005)
3. Hee Tae Lee, Sang Beom Shin : Distortion and Residual Stress Caused by Groove Cutting with Flame, Proceeding of AWS. (2003)