

선상가열한 TMCP 및 Normalizing 강재의 열변형에 관한 연구

A study on the Thermal Deformation of Line Heated TMCP and Normalizing Steel

김정태* · 이광성***† · 정효민*** · 정한식***

Jeong-Tae Kim*, Kwang-Sung Lee***†, Hyo-Min Jeong*** and Han-Shik Chung***

(Received 16 June 2016, Revision received 26 August 2016, Accepted 30 August 2016)

Abstract: The TMCP steel has expanded in the marine structure during manufacturing process because of its excellent weld-ability and impact toughness. In the case of merchant ships, coverage of TMCP steel has been used widely on over DH36 Classifications material. The line heating process is applied to the outer surface of the steel plate for the shipbuilding. In this study, We compared between TMCP and normalizing steel for shipbuilding by analyzing some basic data through performing the natural cooling after the line heating. The experimental results show the angular misalignment changes in line heating. Heated surface of normalizing steel material expanded to -0.3° and reduced to $+0.2^\circ$ after cooling. And during cooling at 194°C for 1,500 seconds, Angular Misalignment began from - direction to + direction, passed the critical point to the default at 2,200 seconds and did not take place any more at 103°C after the 2,700 seconds. Angular Misalignment results of TMCP steels and Normalizing steel material show same angular misalignment lasted 1,200 seconds, TMCP steel has given more expansion and contraction angle which is 0.2° than that of the Normalizing steel. Length difference between expansion and contraction is about 0.3 mm.

Key Words : Line Heating, Thermo-Mechanical Control Process, Normalizing, Thermal Deformation

- 기호 설명 -

E : 재료의 탄성계수

I : 보 단면 2차 모멘트

M_0 : 단위길이 당 굽힘 모멘트

T : 열원의 온도

t : 관의 두께

v : 열원의 속도

*** 이광성(교신저자) : 경상대학교 에너지기계공학과

E-mail : lks815@naver.com, Tel : 055-772-9110

*김정태 : 대우조선해양(주)

***정효민, 정한식 : 경상대학교 에너지기계공학과, 해양 산업연구소

***† Kwang-Sung Lee(corresponding author) : Department of Energy and Mechanical Engineering, Gyeongsang National University.

E-mail : lks815@naver.com, Tel : 055-772-9119

*Jeong-Tae Kim : DAEWOO Shipbuilding & Marine Engineering Corporation.

***Hyo-Min Jeong and Han-Shik Chung : Department of Energy and Mechanical Engineering, Gyeongsang National University, Institute of Marine Industry.

그리스 문자

θ : 각 변형량

1. 서 론

선박설계 및 건조공정에서 곡 외판의 가공 방법에는 냉간 가공과 열간 가공이 있다. 냉간 가공은 주로 프레스 장비를 이용하여 설계 단계에서 추출된 곡률에 맞추어 강판에 물리적으로 외력을 가하여 소성 변형을 일으켜 곡면을 가공하는 방법이다. 선박에서는 주로 중앙부의 벌지부 외판 가공에 냉간 가공 작업방법이 많이 사용된다. 선박의 선수, 선미 부위의 곡 외판은 구역에 따라 내곡과 외곡 형태의 곡면이 형성되고 선박의 선종과 선형의 특성에 따라 그 차이가 많이 달라진다. 이러한 부위의 곡 가공에는 1차적으로 기계적 냉간 가공을 통하여 곡면 가공을 실시하고 이어서 2차 선상가열 작업방법의 열간 가공 단계를 거치며 부드러운 곡선을 가지는 형태로 가공되는데 조선소에서는 이를 선상가열이라고 하며 큰 범위에서 곡 가공작업이라고 한다.^{1,2)}

현대의 선박건조공정 중에서 판재의 절단, 용접 및 파이프 굽힘 등의 작업은 대부분이 자동화 공정으로 이루어져 있다. 그러나 선상가열법에 의한 곡면 가공은 가열속도, 열원의 특성, 초기형상, 냉각방법, 냉각속도 등 많은 작업변수에 의해 가공형상이 달라지는 복잡성 때문에 작업이 어렵고 복잡하며 이로 인하여 자동화가 미흡하다.³⁻⁶⁾

본 연구는 선박 곡 외판구조에 사용되는 TMCP (Thermo Mechanical Controlled Process)⁷⁾ 및 Normalizing 제조공법의 DH36 Grade 선급강재를 선상가열한 후 열적 특성을 비교함으로써 선박설계에 필요한 열변형과 굽힘 변형도에 관한 기초 자료를 도출하고자 한다.

2. 선상가열 기본 이론

이주성의 ‘선상가열에 의한 강판의 곡가공 자동화 시스템 (Ⅱ)’ 실험⁸⁾과 해석결과를 토대로

Fig. 1과 같은 선상가열 현상을 합리적으로 대변할 수 있는 역학 모델링의 합당성을 확인하였다. 선상가열에 의한 굽힘 변형은 균일 분포하는 굽힘 모멘트에 의한 결과로 단위길이 당 굽힘 모멘트 M_0 로 표시한다. M_0 는 전술한 선상가열의 시스템 인자들의 함축적인 함수로 표시되며, 열원의 종류와 냉각방법이 정해져 있다는 조건하에서 굽힘 모멘트는 열원의 온도와 속도 그리고 판의 두께 함수로 표현될 수 있다.

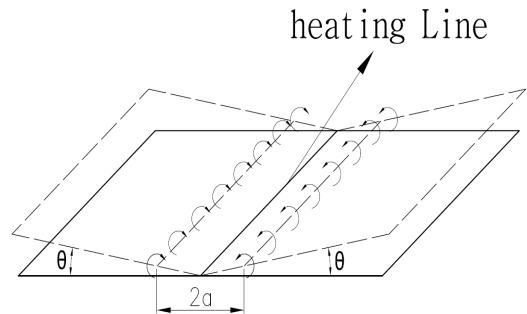


Fig. 1 Bending moment along heating line

$$M_0 = F(T, v, t) \quad (1)$$

Fig. 1과 같이 가열선 주위에 작용하는 굽힘 모멘트 M_0 와 각 변형량 θ 의 관계는 다음과 같다.

$$\theta = \frac{M_0 a}{EI} \quad (2)$$

따라서 단위길이 당 굽힘 모멘트는

$$M_0 = \frac{EI\theta}{a} \quad (3)$$

로 표현될 수 있다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험 장치

본 연구의 시편은 DH36 재질의 고장력강이며 TMCP 및 Normalizing 제조공법으로 생산된 선급강재를 사용하였다.

Table 1 Chemical compositions of DH36 steel used

Chemical composition	DH 36 Grade	Higher tensile strength steels
C		0.18 max
Mn		0.9-1.6
Si		0.5 max
S		0.035 max
P		0.035 max
Cr		0.2
Mo		0.08
V		0.05-0.1
Ni		0.40
Cu		0.35
Grain refining elements (Al, Nb, Ti)		○
Addition elements (N)		○

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (4)$$

Table 1에서는 시편의 화학성분을 나타내고 있으며, 금속재료 속에 들어 있는 탄소 및 탄소와 같은 역할을 하는 합금 원소의 상대적인 분율을 계산식으로 만든 것이 식 (4)와 같은 탄소당량 C_{eq} 이다.

Fig. 2는 선상가열 모델 시편의 가열과 냉각 후 발생한 각 변형 현상을 예측한 개략도를 나타내고 있다. 시편의 크기는 280×100×20 mm이고 (a)와 같이 선상가열 중 가열면에서 팽창으로 인해 중앙부분이 볼록하게 변형하고 시편 양단에서는 (-)방향으로 각 변형이 발생한다. (b)는 냉각 후 가열면이 수축하여 중앙부분에 오목하게 변형하고 시편 양단에서는 (+)방향으로 각 변형이 일어나는 현상을 예측한 개략도이다.⁹⁻¹²⁾

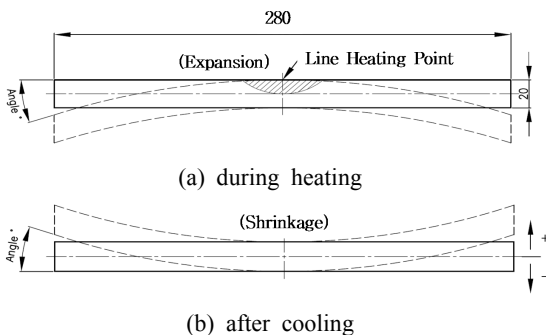


Fig. 2 Basic physical phenomena of line heating



Fig. 3 Photo of line heating process by heating torch

3.2 실험 방법

Fig. 3은 가열토치에 의한 선상가열 실험 작업을 나타내고 있다. 본 연구에서는 선상가열에 의한 잔류변형 시점을 추정하기 위하여 300초마다 가열부분의 온도 및 X방향의 길이변위와 처짐 각도만을 측정하였다. 길이와 각도 측정은 시편의 고온으로 인하여 냉각 시작부터 600초 후 측정을 실시하였다.

Fig. 4는 산소-프로판가스의 불꽃을 구성하고 있다. 가스의 종류에 따라 최고 불꽃온도는 다르다. 본 연구에 이용한 프로판가스의 최고 불꽃온도는 2820℃이며 곁불꽃온도는 약 1,200~2,500℃로 다른 가스와 비슷하다.¹³⁾ 본 실험에 사용한 가열불꽃은 산화불꽃에 곁불꽃으로 가열하였고 가열온도는 약 1,000℃ 이상의 온도로 5분간 극한가열을 하였다. 냉각방식은 5,400초 동안 자연대류 방식으로 냉각하였으며, 실험에 이용한 조건은 Table 2와 같이 가열토치의 산소 저압력은 421.7 kPa, 산소 용기의 고압력은 912.0 kPa, 토치의 프로판 가스 저압력은 58.8 kPa, 고압력은 147.0 kPa로 하였다. 토치와 강재판 거리는 90 mm로 하고 0.5 cm/s 가열속도로 왕복가열하였다.

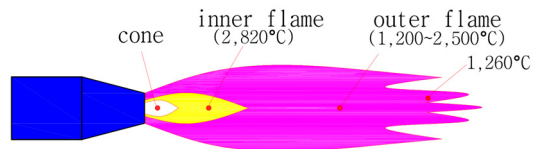


Fig. 4 Oxidizing flame of experiments

Table 2 Heating Condition of experiments

Heat source	Oxygen-Propane gas
Oxygen pressure of torch	421.7 kPa
Pressure of oxygen cylinder	912.0 kPa
Propane gas pressure of torch	58.8 kPa
Pressure of propane gas cylinder	147.0 kPa
Space of torch and plate	90 mm
Cooling method	Natural convection

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 5는 Normalizing 강재와 TMCP 강재의 냉각 곡선을 비교하였다. 그 결과 거의 동일한 냉각 곡선을 보였지만 900~2,100초 사이에는 미세한 조직구조를 가진 TMCP 강재가 다소 빠르게 냉각하였다. Fig. 6에서와 같이 시편이 팽창하고 급격히 수축 변형하는 시점과 비슷하다.

Fig. 6 (a)는 Normalizing 강재의 냉각온도분포와 팽창과 수축 현상을 통한 각 변형 값을 나타내었다. 여기서 가열로 인해 강재가 팽창하고 각 변형이 (-)방향으로 0.3°까지 변형하였다. 냉각하면서 시편은 수축하고 최종 각 변형은 (+)방향으로 0.2°만큼 각 변형이 발생하였다. 온도분포는 1,500초 동안 약 200°C까지 급격히 냉각하다가 그 이후부터는 서서히 냉각하는 곡선을 보였다. 온도에 따라 강재의 각 변형은 1,500초부터, 온도는 194°C일 때 시편이 수축하여 각 변형이 (+)방향으로 급

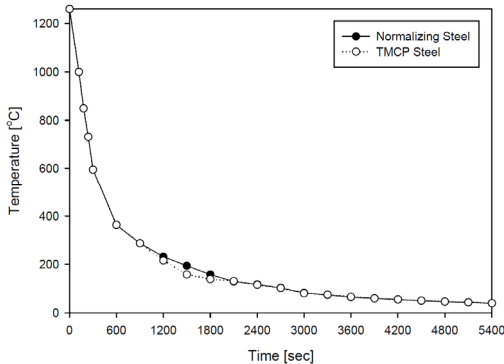
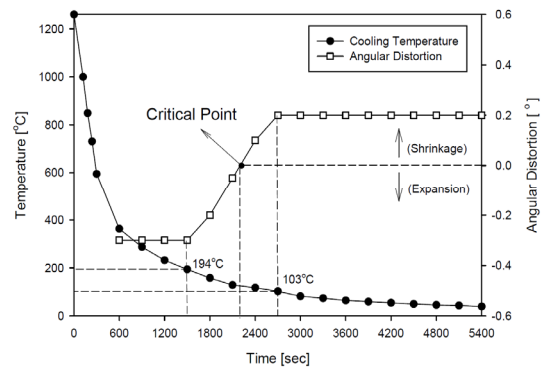


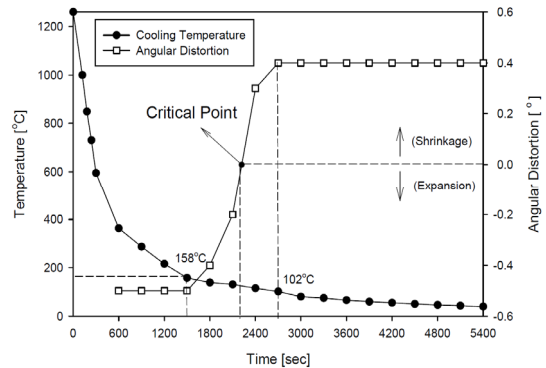
Fig. 5 Cooling temperature of TMCP and Normalizing steel

격히 진행하고 2,200초일 때 강재가 완전히 복원하는 임계점을 지나 2,700초일 때 0.4°만큼 각 변형을 하였다. 이때 온도 값은 103°C이다.

Fig. 6 (b)는 TMCP 강재의 냉각온도분포와 팽창과 수축 현상을 통한 각 변형 값을 나타내고 있다. (a)에서 발생하는 현상과 같이 가열로 인해 강재가 팽창하고 각 변형이 (-)방향으로 0.5°까지 변형하였다. 냉각하면서 시편은 수축하고 최종 각 변형은 (+)방향으로 0.4°만큼 변형하였다. 온도분포는 1,200초 동안 약 200°C까지 급격히 냉각하다가 그 이후부터는 서냉하였다. 온도에 따라 강재의 각 변형은 1,500초부터, 온도는 158°C일 때 시편이 수축하여 각 변형이 (+)방향으로 급격히 진행하고 2,200초일 때 강재가 완전히 복원하는 임계점을 지나 2,700초일 때 0.4°만큼 각 변형이



(a) Normalizing steel



(b) TMCP steel

Fig. 6 Cooling temperature distribution and angular distortion of TMCP and Normalizing steel

일어났다. 이때 온도 값은 102℃이다. 따라서 Normalizing 강재와 TMCP 강재 모두 일정시간동안 냉각하다가 약 100~200℃ 사이에서 급격히 각 변형이 진행됨을 파악하였다.

Fig. 7은 냉각 시간에 따라 Normalizing 강재와 TMCP 강재의 각 변형 곡선을 비교하여 나타내었다. Normalizing 강재와 TMCP 강재 모두 1,500초 동안 각 변형이 나타나지 않는 Time-lag 현상을 보였으며, 시편 모두 팽창과 수축 현상이 동시에 발생하고, 1,200초 동안 급격히 수축 작용함을 파악하였다. Normalizing 강재는 팽창과 수축했을 때 각 변형 차이가 0.5°이며, TMCP 강재는 0.9°로서 Normalizing 강재보다 각 변형 차이 값이 0.4° 만큼 더 크게 나왔다. 그리고 Normalizing 강재와 TMCP 강재 모두 각 변형이 수축했을 때보다 팽창했을 때 0.1°가 더 크게 변하였다. 또 각 변형이 시작되는 시간이 1,500초이고 끝나는 시간이 2,700초이며 임계점 시간도 2,200초로 동일한 시점을 나타내고 있다. 그러므로 현장 작업 시 원하는 곡률의 소성변형 형태를 얻기 위하여 자연냉각 방법에서는 Time-lag 시점을 잘 파악하는 것이 매우 중요하다.

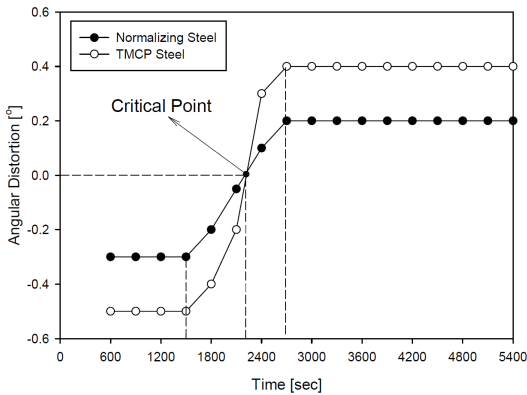


Fig. 7 Angular distortion of TMCP and Normalizing steel

Fig. 8은 Normalizing 강재와 TMCP 강재를 X 방향에 대한 길이변형을 나타내고 있다. 선상가열 후 최대길이 변형을 측정해야 하지만, 시편의 고온으로 인해 측정이 어려워 600초 동안 냉각 후

측정하였다. 큰 차이는 없지만 900초에서 2,700초까지는 TMCP 강재가 약간 높았다가 감소하였다. 5,400초 동안 냉각하면서 길이변형이 0.1 mm로 거의 원래상태로 복원하였다.

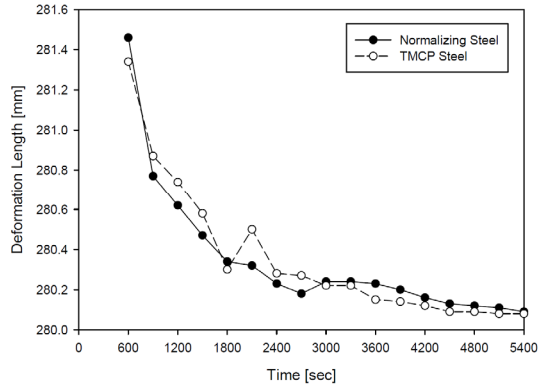


Fig. 8 Deformation length of TMCP and Normalizing steel

5. 결 론

본 연구는 선박 곡 외관구조에 사용되는 TMCP 및 Normalizing DH36 선급강재를 사용하여 선상가열 후 자연냉각 방식을 통해 열 이력을 경험한 강재에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. TMCP 및 Normalizing DH36 선급강재 모두에서 동일하게 선상가열 후 1500 초 동안 Time-lag 현상과 1,200초 동안 동일하게 수축하는 자료를 얻을 수 있었다. 따라서 선상가열 시 Time-lag 시점에서 정확하게 설계 값과 일치하는 소성변형 형태를 완성해야 하고 작업 내용에 따라 필요 시 수냉을 병행 실시하여 각 변형의 각도를 조절하거나 차단해야 한다.

2. TMCP 및 Normalizing 강재 모두 선상가열로 팽창했다가 수축하면서 원형상태로 복원하는 임계시점이 2,200초에서 발생함을 알 수 있다.

3. TMCP 강재는 Normalizing 강재보다 팽창과 수축 방향으로 각 변형이 0.2° 만큼 더 크고 탄소당량의 감소와 미세한 조직화로 인해 TMCP 강재가 수축 시간동안 조금 낮은 냉각온도가 나왔다.

4. 선상가열 후 TMCP 강재와 Normalizing 강재

모두 길이방향으로 팽창했다가 다시 원형상태로 0.1 mm까지 수축 복원함을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2015R1D1A1A01058030).

References

1. C. D. Jang, D. E. Ko, B. I. Kim, and J. U. Park, 2001, "An Experimental Study of Characteristics of Plate Deformation by Heating Process", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 38, No. 2, pp. 62-70.
2. T. G. Kwon, S. H. Lee, and J. M. Han, 1999, "A Study Material Characteristic of Low Temperature Steel(FH-hrande) by Line heating Method", Journal of Welding and Joining, Welded Society 1999 Fall Academic announcement, pp. 160-162.
3. J. S. Park, J. Kim, J. G. Shin, C. M. Hyun, Y. C. Doh and K. H. Ko, 2008, "Plate Flattening Analysis in Line Heating Process using Bending Strains", Journal of The Society of Naval Architects of Korea, Vol. 45, No. 4, pp. 417-425.
4. Y. H. Choi, Y. W. Lee and K. Choi, 2010, "Study on Temperature Distribution for Various Conditions of Moving Heating Source During Line Heating, Process", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 34, No. 5, pp. 617-624.
5. Y. K. Kim, Y. W. Kim and J. H. Kim, 2014, "Welding Residual Stress and Strength of Thick 9% Nickel Steel Plate", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 18, No. 4, pp. 85-90.
6. P. Biswas, N. R. Mandal and O. P. Sha, 2007, "Three-dimensional finite element prediction of transient thermal history and residual deformation duo to line heating", Proc. IMECHE, Vol. 221, pp. 17-30.
7. C. B. Lim, Y. G. Kweon, R. W. Chang and G. W. Um, 1990, "Fatigue Properties of welded Joints for TMCP Steels", Journal of the Korean Welding Society, Vol. 8, No. 2, pp. 40-52.
8. J. S. Lee, 1996, "Plate Forming Automation System of Steel Plates by Line Heating Method(II)", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 33, No. 3, pp. 81-93.
9. W. N. Yun, H. K. Park, M. S. Kang and J. S. Kim, 2009, "Investigation of the Coil Deformation of the Gas Turbine Generator Rotor Using Finite Element Analysis", Journal of the Korea society for power system engineering Vol. 13, No. 6, pp. 95-101.
10. C. D. Jang, S. I. Seo and D. E. Ko, 1997, "A Study on the Prediction of Deformations of Plates due to Line Heating Using a Simplified Thermal Elasto-Plastic Analysis Method", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 34, No. 3, pp. 104-112.
11. H. K. Kim and C. D. Jang, 2003, "Simulation of Line Heating by High Frequency Induction Heating", Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 17, No. 1, pp. 80-85.
12. S. G. Park, W. D. Kim and J. G. Shin, 1997, "A Mechanical Information Model of Line heating Process using Artificial Neural Network", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 34, No. 1, pp. 122-129.
13. B. D. Oh, 2007, "General Welding", Human Resources Development Service of Korea, pp. 72-83.