

선상가열법에 의한 곡판의 열변형

이주성* · 임동용*
*울산대학교 조선해양공학부

Thermal Deformation of Curved Plates by Line Heating

JOO-SUNG LEE* AND DONG-YONG LIM*
*School of Marine Engineering, University of Ulsan, Ulsan Korea

KEY WORDS: Curvature 곡률, Curved Plate 곡판, Flat Plate 평판, Heating Line 가열선, Plate Forming 곡가공, Thermo Elastic-Plastic Analysis 열탄소성 해석

ABSTRACT: It has been well documented that plate forming is one of the most important processes in shipbuilding. In the most shipyards, the line heating method is primarily used for plate forming. Since the heating process is carried out for the curved plate and not for the flat plate, a curvature effect on the final deformation must be considered in deriving the simplified prediction models for deformation. This paper investigates the effect of curvature along the heating line on the deformation of the plate. First of all, results of numerical analysis are compared with those of a line-heating test, to justify the elasto-plastic analysis procedure for the present study, which shows good agreement. Then, the present numerical procedure is applied to flat and curved plate models, to investigate the curvature effect on the heat transfer characteristics and deformation by line heating.

1. 서 론

선박의 외판을 구성하는 곡면의 가공에 선상가열법이 열가공법으로서 모든 조선소에서 주로 사용되고 있다. 열가공에 의한 곡면의 성형은 가열된 부분의 국부적인 수축작용으로 발생하는 굽힘 변형의 결과로 볼 수 있는데, 이는 열원의 종류, 가열속도와 가열온도 등 여러 인자들의 영향을 받는다. 선상가열에 영향을 주는 인자들과 변형량 사이의 관계를 정량적으로 규명하는 것이 중요한 연구내용 중 하나이다. 과거의 많은 연구에서는 평판에 대한 실험이나 수치해석을 수행하여 선상가열로 인한 변형과 영향인자들 사이의 관계를 규명하였고 또한 이들 결과를 토대로 변형량을 예측할 수 있는 간이모델을 개발하였다 (고대은 등, 1999; 김호경과 장창두, 2003; 이박인 등, 2002; 이장현과 신종계, 2002; Lee, 1996; Moshaiov and Latorre, 1985, Shin and Moshaiov, 1991; Tsuji and Okumura, 1975). 한편 강판의 곡가공은 평면상태에서 가열하기 보다는 곡면상태에서 가열하여 주어진 곡면을 성형하는 것이므로, 평판에 대한 해석이나 실험결과들을 가열선에 따른 곡률의 영향을 고려하지 않고 곡률을 가진 경우에도 그대로 적용하는 것은 실제와는 차이가 있을 수 있다. 따라서 가열선에 따른 곡률이 선상가열로 인한 변형의 크기와 그 분포형상에 영향을 줄 것으로 예상되므로, 가열선에 따른 곡률의 영향을 고려할 수 있는 예측모델로 개발되어야 할 필요가 있다 (이주성, 2003; Ueda et al., 1993).

본 논문에서는 선상가열로 인한 평판과 곡판의 열전달 특성과 변형특성을 비교하는 내용을 주로 다루고 있다. 이 논문에서는 우선 상용 패키지를 이용한 열탄소성 해석 (thermo elastic-plastic analysis)에 대해 개요적인 부분을 기술하였고, 수치해석을 위한 모델링과 그 결과의 타당성을 보이기 위해 몇 가지 강판모델에 대해 수행한 선상가열 실험결과와 비교하였다. 이어서 평판과 곡판에 대한 열전달 해석과 탄소성 해석을 수행한 내용을 기술하였는데, 결과에서 보듯이 평판과 곡판에서 열전달 특성에는 차이를 보이지 않아 가열선에 따른 곡률이 열전달 특성에 주는 영향은 무시할 수 있다고 보인다. 그러나 가열이 진행되면서 최종 변형상태에 이르는 과정이나 가열선 방향으로 변형의 분포에는 차이를 보이고 있다. 따라서 실험결과나 수치해석 결과를 토대로 변형량과 영향인자들 사이의 관계식을 도출할 때 가열선에 따른 곡률의 영향이 반영되어야 할 것으로 보인다.

2. 열탄소성 해석의 개요

선상가열시 열탄소성해석은 이동열원에 의한 열전달 문제와 열변형 문제가 연성된 형태이나 가열 중 변형량이 강판의 치수에 비해 크지 않기 때문에 변형으로 인한 강판의 기하학적 형상의 변화가 열전달 문제에 영향을 주지 않는 것으로 간주할 수 있고, 따라서 열전달 문제와 열변형 문제를 분리하여 독립적으로 해석할 수 있다 (Shin and Moshaiov, 1991). 즉, 열전달해석을 통하여 열원이 통과하는 과정의 온도분포를 각 Time Step에서 계산한 다음, 이를 열 하중으로 입력하여 열탄소성 해석을 수행함으로써 잔류변형을 계산하는 과정을 택할

제1저자 이주성 연락처: 울산시 남구 무거2동 산29

052-259-2162 jslee2@mail.ulsan.ac.kr

수 있다. 열전달 문제는 아래에 주어진 비정상 열전달 방정식의 해를 구하는 것이다.

$$k\nabla^2 T + q_g = \rho c \frac{\partial T}{\partial t_i} \quad (1)$$

여기서, T : 온도(°C)

k : 열전도율(cal/mm · sec · °C)

q_g : 열원에 의해 단위시간당, 단위체적당

생성되는 열량 (cal/sec · mm³)

ρ : 밀도(kg/mm³)

c : 비열(cal/kg · °C)

t_i : 시간(sec)

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} : \text{미분 연산자}$$

이 방정식에 포함된 열전도율 k , 비열 c 등 열전달 해석과 관련된 물성치들은 Fig. 1에 보인 바와 같이 온도 의존성을 갖도록 하였고, 밀도 ρ 는 상수로 가정하였다. 본 연구에서 열하중은 분포열속(distributed heat flux)으로 주었고, 열전달문제는 등속으로 이동하는 열원이 통과하는 과정에서의 온도분포를 각 Time Step에서 계산한다.

열전달 해석에서 유효 입열량 (effective thermal power) Q_{eff} 는 1,200cal/sec를 주었으며, 이때 이용된 표면열속 (surface heat flux) p 의 크기는 아래의 식에 의해 계산한다.

$$p = \frac{Q_{eff}}{A} \quad (2)$$

여기서, p : 표면 열속 (surface heat flux, cal/mm² · sec)

Q_{eff} : 유효 입열량 (effective thermal power, cal/sec)

A : 입열 면적 (unit heat input area, mm²)

경계조건은 자연대류(free convection condition)로 하였다. 여기서 열손실 계수는 6.0×10^{-6} cal/mm² · °C이다. 상변화가 일어나는 동안의 열전달 현상을 구현할 수 있는 잠열(latent heat)은 65,000cal/kg으로 하였다.

열전달 해석결과인 각 Time Step에서의 온도분포가 구해지면 이를 열하중으로 가하여 탄소성해석을 수행한다. 탄소성해석에서도 탄성계수, 항복응력, 열팽창계수 등 재료적 특성치 역시 Fig. 2와 같이 비선형적인 온도 의존성을 고려하였고, Poisson의 비는 상수로 가정하였다. Fig. 2에서 항복응력과 탄성계수는 공칭 값이어서 실제 강판과는 차이가 있을 수 있다. 여기에서는 실험모델에서 채취한 시편에 대한 인장시험 결과를 기준으로 Fig. 2의 그래프를 그 배율만큼 수정하여 수치해석에서 사용하였다.

좌표축은 Fig. 3에서와 같이 가열선 방향을 x축으로 하였고, 폭 방향을 y축, 두께 방향을 z축으로 하였다. 열탄소성 해석에

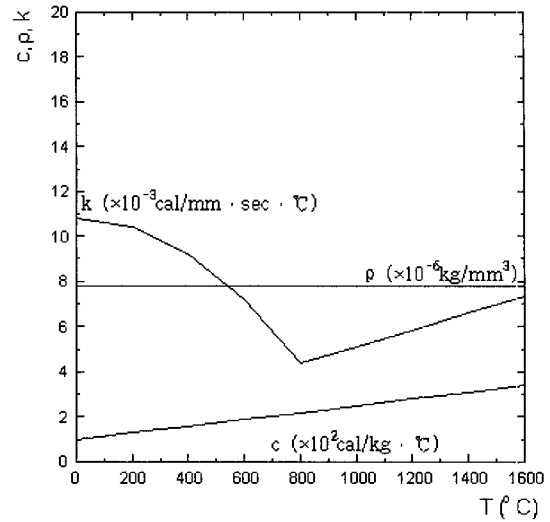


Fig. 1 Temperature dependent physical properties of mild steel

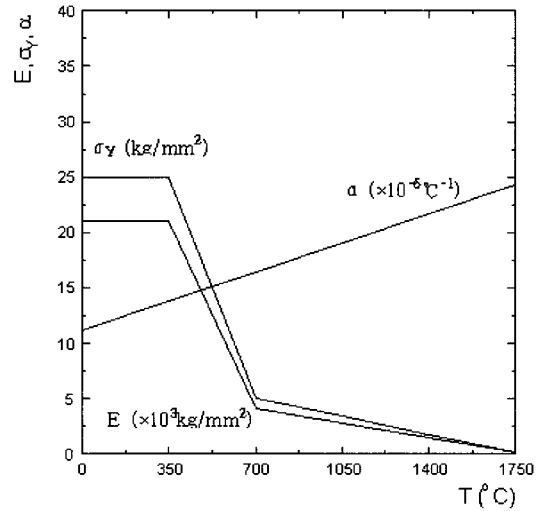


Fig. 2 Temperature dependent material properties of mild steel

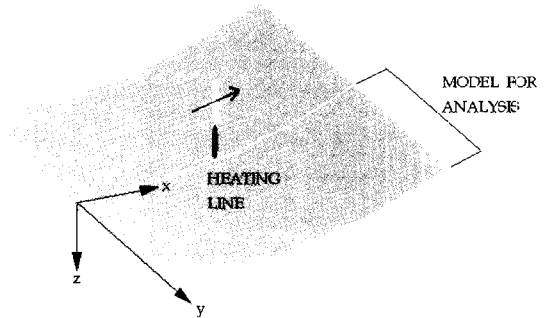


Fig. 3 Definition of coordinate system and the model for numerical analysis

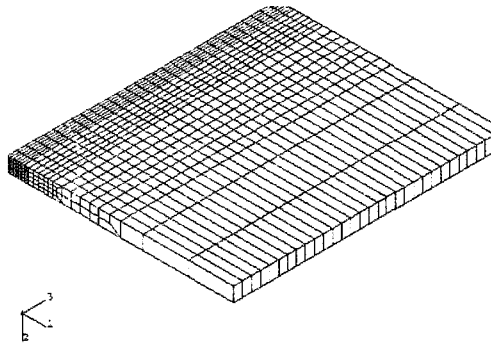


Fig. 4 Overall model (mesh)

는 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하였으며, 대칭성을 고려하여 전체 판의 1/2만을 해석 대상으로 선택하여 Fig. 4와 같이 8절점 3차원 고체 요소로 모델링하였다. 냉각방법은 공냉으로 구현하였다.

3. 열탄소성 해석과 선상가열실험

수치해석을 위한 모델링과 그 결과의 타당성을 검증하기 위하여 곡판에 대한 선상가열 실험을 수행하여 그 결과와 비교하였다. 가열선은 Fig. 3에서 x축 방향으로서 곡률의 영향을 받을 수 있는 방향을 선택하였다. 실험모델은 실험조건과 함께 Table 1에 열거하였는데, 가열선 방향으로 곡률반경이 4,500과 7,000mm이고 곡률반경이 7,000mm인 경우에는 판두께가 각각 15와 18mm인 강판을 선정하였다. 모델의 크기는 모두 폭 × 길이 = 600 × 600mm이다. 모델이름은 곡률반경, 판두께, 그리고 가열속도로서 표시하였다. 예로서 R7000_t18_600은 곡률반경, 두께가 각각 7,000mm와 18mm 이고, 가열속도가 600mm/min인 경우이다.

실험결과와 수치해석결과를 비교한 예로서 R7000_t18_600에 대해 가열선의 중간위치에서 온도분포의 시간이력을 Fig. 5에 보였다. 실험에서의 온도는 초음파 온도측정기 (portable IR)를 이용하였고 변위는 레이저 센서 (LMS200)를 이용하여 계측하였다. 실험과 수치해석 결과에서 최고 온도는 거의 비슷하나, 최고점에 이르기 전에서 온도 차이를 보이는 것은 실험 중 온도계측시 화염의 영향으로 판단된다. Fig. 6은 가열이 종료된 후 가열선의 시작점과 중간점, 끝점에서의 폭 방향 즉, y 방향으로의 변위를 비교한 것이다. Table 2는 Table 1에 열거한 세 모델에 대한 실험결과와 수치해석결과를 비교한 것으로, 실험과 수치해석에 의한 각변형의 비율인 'Exp./Num.'의 평균은 0.972로 수치해석의 방법이 타당함을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 수치해석의 결과는 실험결과와 비교해서 좋은 일치를 보이고 있으며, 따라서 본 연구에서 수치해석을 위한 모델링 방법에 충분한 타당성이 있다고 할 수 있다.

Table 1 Models and conditions for line heating test

MODEL	curvature (mm)	thickness (mm)	heating speed (mm/min)
R7000_t18_600	7,000	18	600
R7000_t15_500	7,000	15	500
R4500_t9_450	4,500	9	450

Test Condition
 - oxygen pressure : 6 kgf/cm²
 - LPG pressure : 1.58 kgf/cm²
 - distance from torch tip to plate surface : 50 mm

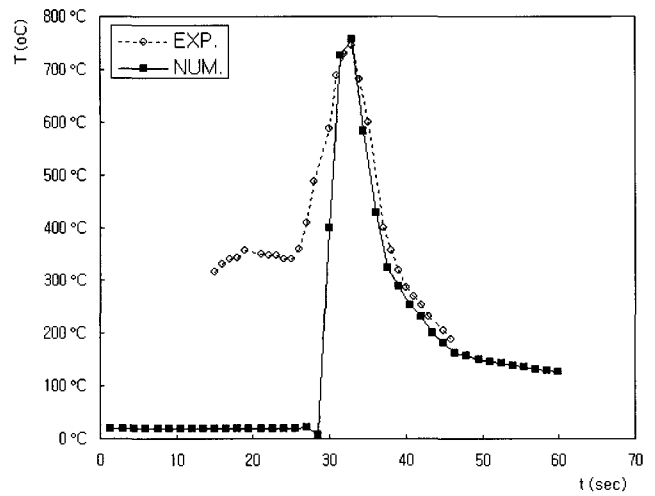


Fig. 5 Comparison of temperature history at mid-point of heating line between experimental and numerical results (R7000_t18_600)

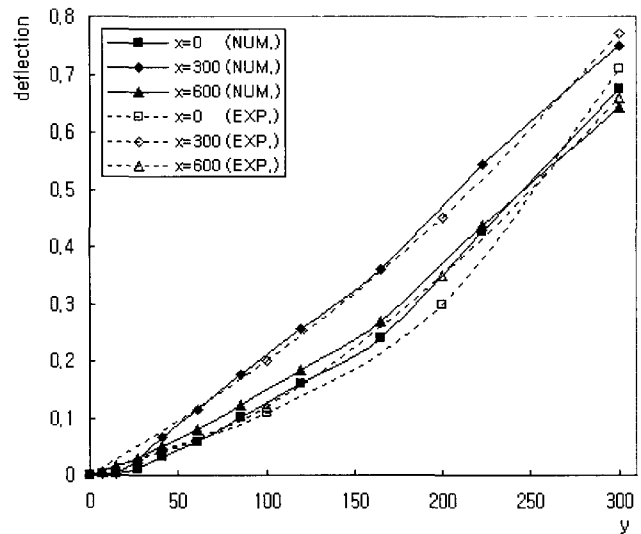


Fig. 6 Comparison of deflection between experimental and numerical results (R7000_t18_600)

Table 2 Angular distortions by numerical analysis and experiment

MODEL	Experimental Results ($\times 10^{-3}$ rad)	Numerical Result ($\times 10^{-3}$ rad)	Exp./Num.
R7000_t18_600	2.378	2.296	1.035
R7000_t15_500	2.911	3.142	0.926
R4500_t9_450	3.638	3.814	0.954

4. 평판과 곡판에 대한 열탄소성 해석

여기에서는 평판과 곡판의 선상가열시 열변형 특성을 비교하고자 2절에서 기술한 열탄소성해석 과정을 평판(곡률반경, $\rho = \infty$)과 곡률반경이 $\rho = 5,000\text{mm}$ 인 곡판에 대한 열탄소성 해석을 수행하여 그 결과를 비교하여 선상가열시 곡률의 영향에 대해 분석하였다.

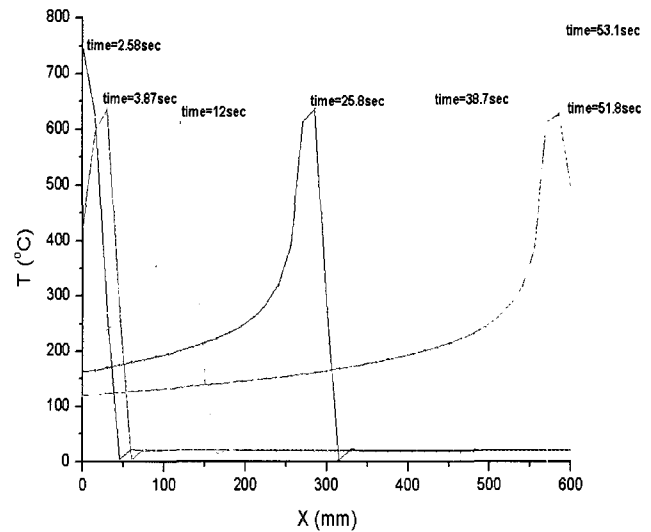
4.1 열전달 해석 결과

평판과 곡판에 대한 열전달 해석의 결과를 Fig. 7과 Fig. 8에 각각 보였다. Fig. 7(a)와 Fig. 8(a)는 몇몇 time step에서 가열선 방향 (x 방향)으로의 온도 분포이다. 보는 바와 같이 평판과 곡판 모두 판의 양끝 단에서는 가열시작과 가열 마지막 단계에서 단부효과로 인해 최고 온도가 약 750°C 에 가까운 과도적인 응답을 보이고 있으나 그 사이에서는 정상상태의 온도 분포를 보인다는 공통점이 있고 온도의 변화 특성에 차이를 발견할 수 없다. 이러한 점은 y 방향으로의 온도 이력을 나타내는 Fig. 7(b)와 Fig. 8(b)에서도 마찬가지이다. 이 열전달 해석 결과의 비교로부터 결국 평판이나 곡판이나 열전달 특성에 차이가 없어 보이는데, 이는 입열된 열량이 제한된 강판 내에서 열전달이 이루어지는 것이므로 열전달 특성이 곡률의 영향을 받지 않는다는 점을 보여준다. 이러한 점은 열전달의 지배 방정식인 식(1)에서도 곡률의 항이 포함되어 있지 않으므로 곡률의 영향이 없을 것이라는 점을 예상할 수도 있겠다.

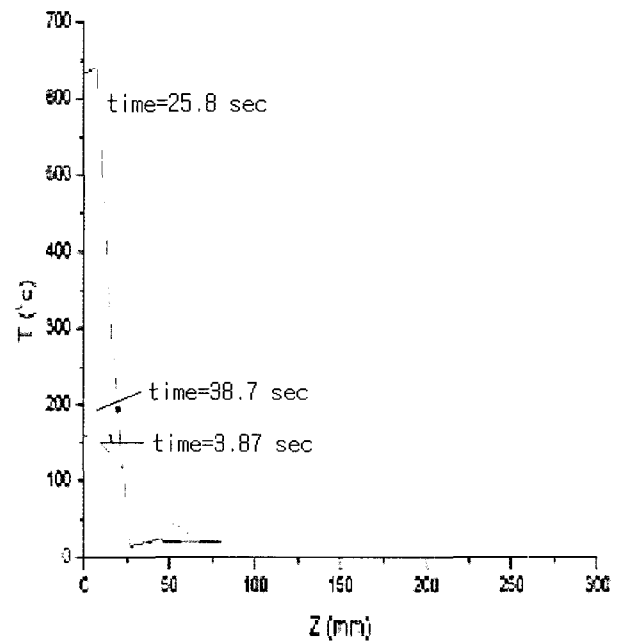
4.2 탄소성 해석 결과

변형의 결과를 얻기 위해 열전달 해석 결과를 열 하중으로 입력하여 구조해석을 수행한다. Fig. 9와 Fig. 10은 두 모델에 대해 가열시간대별 즉, 토치의 위치에 따른 폭방향 (y 방향)으로의 변형형상의 변화를 보여주는 것인데, 가열선 방향으로 시작점($x=0\text{mm}$)과 중간점($x=300\text{mm}$) 그리고 끝점($x=600\text{mm}$)에서 변형형상의 변화이다. Fig. 9와 10을 비교해 보면, 평판의 경우에는 가열이 진행됨에 따라 변형이 꾸준히 증가하는 반면에 곡판의 경우에는 가열이 진행되면서 변형량이 증가하다가 감소하는 경향을 볼 수 있고, 이는 가열이 거의 마무리 단계에

이르러 열원이 가열선의 끝단 근처에 위치하여 이미 가열된 위치에서 냉각이 진행되거나 완료된 $x=0$ 과 300mm 위치에서 발생됨을 볼 수 있다. 최종적인 변형형상인 Fig. 11을 보면 평판의 경우에는 가열선에 연하여 비교적 균일한 변형 형상을 보이고 있으나 곡판의 경우에는 가열선의 시작과 끝 위치에서 더 많은 변형이 발생하는 것 즉, 가열선 방향으로 각변형량에 변화가 있음을 뚜렷이 볼 수 있다. 이는 변형량을 예측하는 모델에서 곡률의 영향이 반영되어야 하고 또한 가열선의 길이방향으로 변형량의 변화가 고려되어야 한다는 점을 의미한다.

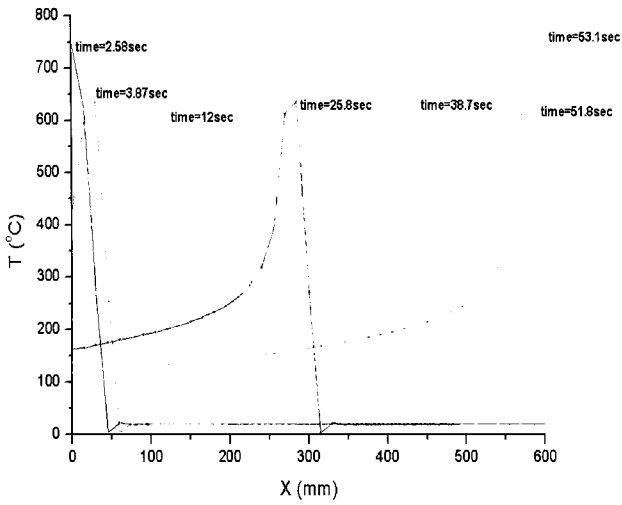


(a) in x-direction

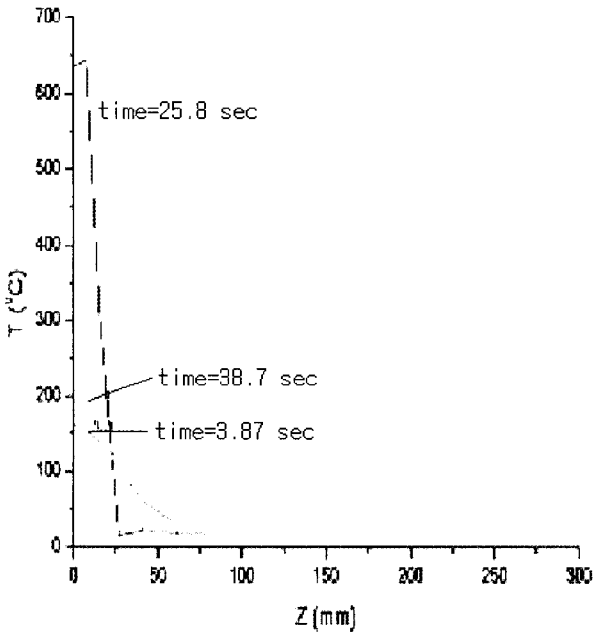


(b) in y-direction

Fig. 7 Transient temperature distribution for flat plate

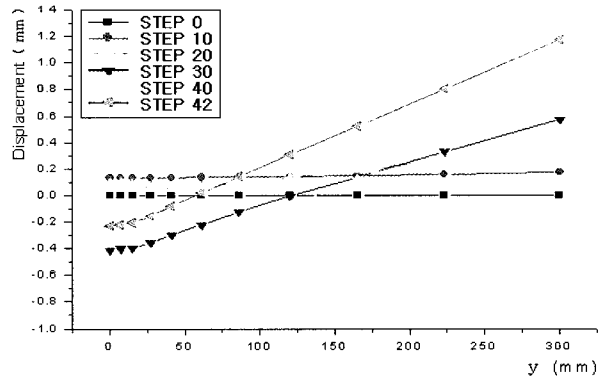


(a) in x-direction

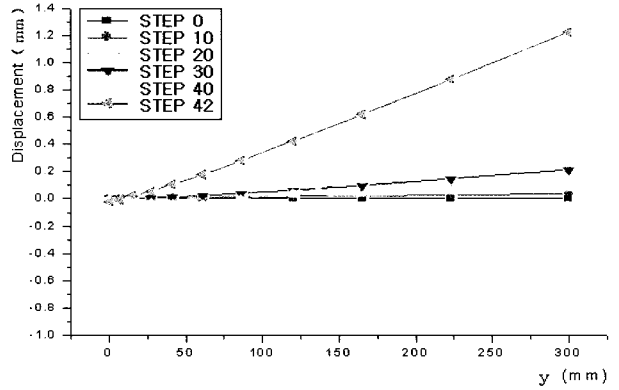


(b) in y-direction

Fig. 8 Transient temperature distribution for curved plate

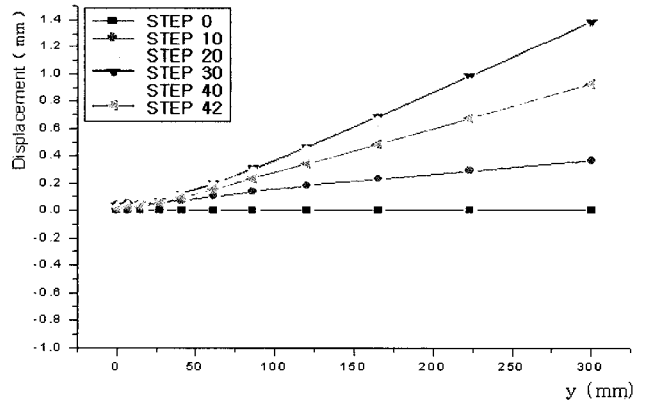


(b) x=300 mm

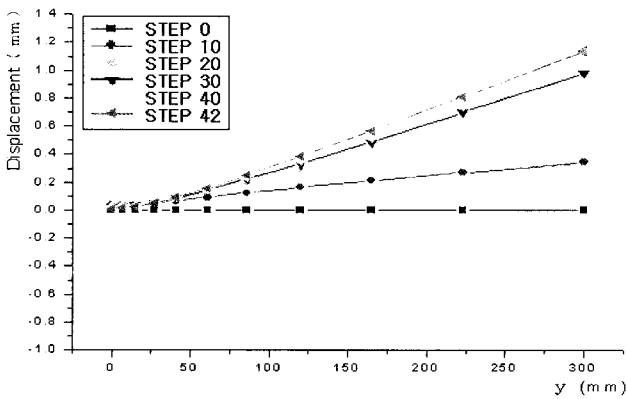


(c) x=600 mm

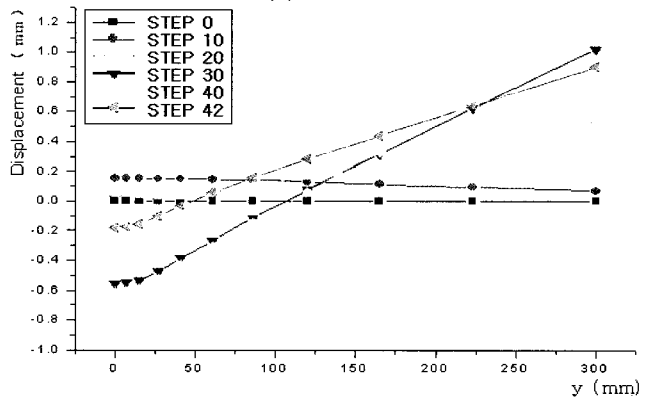
Fig. 9 Deformation in y-direction to time step : flat plate



(a) x=0 mm



(a) x=0 mm



(b) x=300 mm

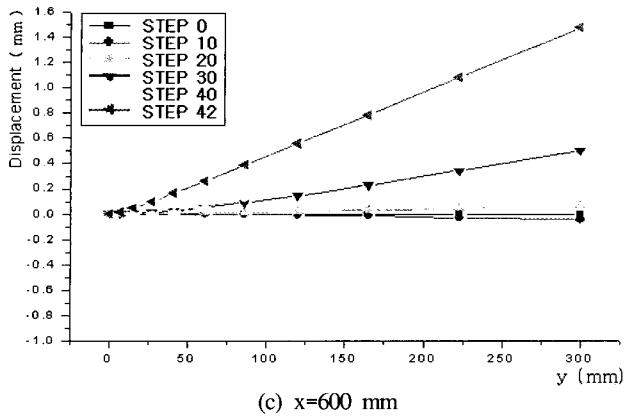


Fig. 10 Deformation in y-direction to time step : curved plate

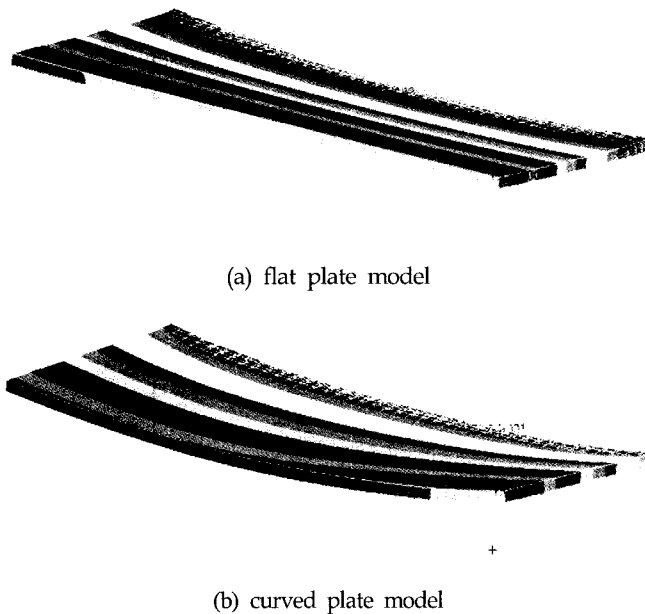


Fig. 11 Deformed shape

5. 결 론

본 논문에서는 선상가열로 인한 변형형상 예측에서 가열선 방향으로 곡률의 영향을 수치해석적으로 다루었다. 우선 수치 해석시 모델링 등의 타당성을 검증하기 위해 몇 가지 모델에 대한 실험결과와 비교하였다. 곡률의 영향을 비교하기 위해 평판과 곡판에 대한 열탄소성 해석을 수행한 결과, 열전달 특성에는 차이를 발견할 수 없었으나, 변형특성에는 가열이 진행되면서 변형량의 변화에 차이가 있으며 특히 가열선 방향으로 평판의 경우에는 비교적 균일한 변형을 보이나 곡판의 경우에는 가열선의 시작과 끝점에서 보다 많은 변형이 발생하는 차이를 보였다. 이러한 비교연구로부터 변형량을 예측하는 모델에서 곡률의 영향이 반영되어야 하고 또한 가열선의 길이방향으로 변형량의 변화가 고려되어야 할 것으로 보인다. 이 논문

에서 평판과 비교한 곡판모델의 곡률반경이 5,000mm인 한 가지 경우이기 때문에 이점에 대해서는 여러 경우에 대한 해석을 수행하여 재검토되어야 하고 또한 다양한 경우에 대한 해석결과를 토대로 가열선 방향으로의 곡률의 영향을 합리적으로 반영할 수 있는 방안이 마련되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 2003년도 울산대학교 교비연구비 지원에 의해 수행된 과제로서 울산대학교의 연구비 지원에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

고대은, 장장두, 서승일, 이해우 (1999). "곡가공 자동화시스템을 위한 선상가열에 의한 변형의 실시간 시뮬레이션", 대한조선학회논문집, 제36권, 제4호, pp 116-127.

김호경, 장장두 (2003). "고주파 유도가열에 의한 선상가열 시뮬레이션", 한국해양공학회지, 제17권, 제1호, pp 80-85

이박인, 류희승, 변구근, 김학곤 (2002). "열간가공에 의한 강판의 곡가공 자동화 시스템", 대한조선학회논문집, 제39권, 제2호, pp 34-43.

이장현, 신종계 (2002). "유한요소해석과 다변수해석에 의한 선상가열 변형관계식", 대한조선학회논문집, 제39권, 제2호, pp 69-80.

이주성 (2003). "강판의 곡가공 자동화를 위한 수치제어 시스템의 개발", 한국해양공학회지, 제17권, 제1호, pp 72-79.

Lee, J.S. (1996). "Development of the Automatic Marking Generation System for the Plate Forming by Line Heating", Journal of Ship Production, SNAME, Vol 12, No 4, pp 247-253.

Moshaiov, A. and Latorre, R. (1985). "Temperature Distribution During Plate Bending by Torch Flame Heating", Journal of Ship Research, SNAME, Vol 29, No 1, pp 1-11.

Shin, J.G. and Moshaiov, A. (1991). "Modified Strip Model for Analyzing the Line Heating Method", Journal of Ship Research, SNAME, Vol 35, No 2, pp 172-182.

Tsuji, I. and Okumura, Y. (1975). "A Study on Line Heating Process for Plate Bending of Ship Steels", Journal of Society of Naval Architecture of Seibu, Vol 76, pp 149-160.

Ueda, Y., Murakawa, H., Rashwan, A.M., Ishiyama, M., Murakawa, H., and Ogawa, J. (1993). "Development of Computer Aided Process Planing System for Plate Bending by Line Heating(4th Report)", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol 173, pp 683-695.

2004년 7월 16일 원고 접수

2005년 2월 1일 수정본 채택