

선상가열 시의 잔류변형에 대한 간이 예측 모델 개발

Development of Simple Prediction Model for Residual Deformation by Line Heating

김상일*

* 로이드선급협회 울산지부

1. 서 론

선체 외판은 대형 선박의 경우 약 40%, 중소형선의 경우 약 60~70%가 3차원 곡면으로 구성되어 있다. 이러한 곡면의 가공은 그 작업 방법에 따라 아래와 같이 분류할 수 있다.

- (1) 굽힘 프레스를 이용한 순수 냉간가공
- (2) 1차 냉간가공 후, 선상가열과 삼각가열을 이용한 열간가공
- (3) 선상가열과 삼각가열을 이용한 순수 열간가공

실제 현장에서 순수 열간가공으로 3차원 곡면을 성형하는 경우는 소수에 불과하지만, 곡률이 길이 방향을 따라 일정하게 변하지 않는 대부분의 성형 작업은 이에 속한다. 곡면 가공 공정은 조선소가 생긴 이래 초창기의 작업 방법을 그대로 사용하고 있는 공정 중의 하나이며, 다른 공정에 비해 변화가 그리 많지 않은 공정이다. 지난 30여년간 선진 조선국들에서는 곡가공 자동화 시스템을 개발하기 위하여 많은 실험적/이론적 연구를 수행해 왔으며, 국내에서도 최근에 이의 필요성이 더욱 강조되면서 이 분야에 대한 이론적 연구가 광범위하게 수행되었다¹⁾. 선상가열법을 이용한 곡가공 자동화 시스템은 용접에 의한 초기 변형을 제거하는 곡직 자동화에도 유용하게 활용될 수 있는 기술이다.

본 논문에서는 선상가열 시의 잔류변형 추정식을 도출하기 위해 다수의 모델에 대해서 가열조

건과 판 두께를 변화시키는 열탄소성해석을 수행하였다. 또한 수치해석법의 타당성을 규명하기 위하여 수치해석 결과와 Tsuji 등²⁾에 의한 실험 결과를 정량적으로 비교하였고, 이로부터 수치해석 결과는 실험 결과와 비교하여 좋은 추정 결과를 준다는 사실을 알 수 있었다. 이러한 결과를 토대로 선상가열 시의 각변형과 횡수축변형을 정도 높게 예측할 수 있는 간이 예측 모델을 회귀 분석을 통해 유도하였다.

본 논문에서는 선상가열 시의 잔류변형을 가능한 한 정밀하게 계산하기 위하여 비선형 열전달 및 열변형해석을 수행하였다. 모든 수치해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하였고, 비정상 열전달문제를 풀어 온도분포의 시간 이력을 계산한 다음, 이 결과를 열하중으로 입력하여 열탄소성해석을 수행하는 2단계 해석법을 적용하였다.

2. 잔류변형에 대한 수치해석

2.1 유한요소 모델링

기하학적 형상과 온도분포의 대칭성을 이용하여, 해석 모델은 전 모델의 1/2 부분에 대해서만 모델링하였다. 대상 모델의 차원은 Fig. 1에 보인 바와 같으며, 선상가열조건은 Table 1에 열거된 바와 같다. 이 때의 가열조건은 12~15mm의 화염폭을 유발하는 가열조건이며, 열원으로는 LPG 가스가 사용되었다. 본 장에서는 Table 1에 있는 Model-C에 대한 열탄소성해석 결과를 선상가열 시의 잔류변형의 전형적인 예로

제시하였으며, 열원의 출발점인 원점에서 판 폭 방향, 모재 두께 방향 및 가열선 방향으로의 좌표는 각각 1, 2, 3(x, y, z)으로 정의하였다.

Fig. 2는 Model-C의 최종적인 변형 형상을 보여 주고 있으며, 최대 변위는 1.365mm로 나타났다. Fig. 3은 Model-C의 최종적인 각변형의 분포를 보여 주고 있다. Fig. 2와 3에서 알 수 있듯이, 최대 각변형이 발생하는 횡단면의 위치는 가열선의 끝단이다. Table 2는 Table 1에 있는 대상 모델의 각변형에 대한 수치해석 결과와 Tsuji 등²⁾에 의한 실험 결과를 정량적으로 비교한 것인데, 열탄소성해석에 의한 수치해석 결과는 실험 결과와 비교해서 매우 잘 일치함을 알 수 있으며, 이로부터 선상가열 시의 잔류변형 해석 절차의 유효성을 확인할 수 있다. 본 수치해석 결과에 의하면, 선상가열 시의 각변형은 가열속도, 판 두께와 반비례 관계에 있다는 사실을 알 수 있으며, 이는 곡직 작업 시의 최적의 가열조건 산정에도 유용하게 이용될 수 있다.

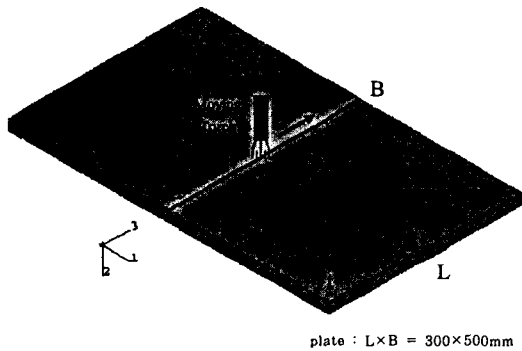


Fig. 1 Dimension of line heating model

Table 1 Heating conditions for line heating models

Model	Plate Thickness t (mm)	H (cal/sec)	v (mm/sec)	Heat Input Q=H/v (cal/mm)	Heat Input Parameter $\lambda = 1/vt^2$ ($\times 10^{-3} \text{sec/mm}^3$)
A	12	2000	7.5	267	0.926
B			5.0	400	1.389
C	16	2000	7.5	267	0.521
D			5.0	400	0.781
E			2.5	800	1.563
F	19	2000	7.5	267	0.369
G			5.0	400	0.554
H			2.5	800	1.108

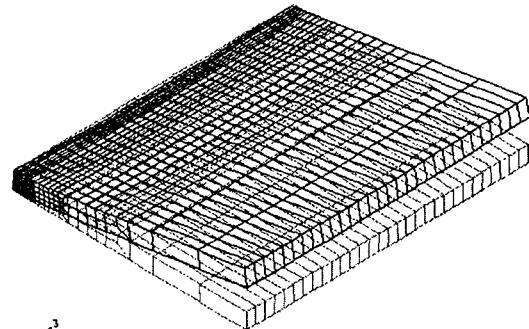


Fig. 2 Deformed shape for Model-C

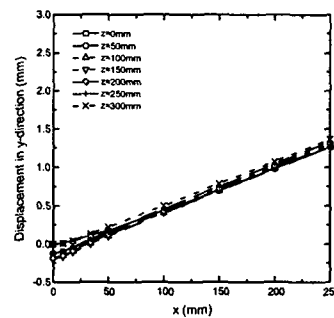


Fig. 3 Angular distortion for Model-C

Table 2 Angular distortions obtained from numerical simulation and experiment by Tsuji et al

Model	Experimental Results ($\times 10^3 \text{rad}$)	Numerical Results ($\times 10^3 \text{rad}$)	Ratio = $\frac{\text{Exp.}}{\text{Num.}}$
A	6.600	7.205	0.916
B	12.50	11.98	1.043
C	5.100	5.198	0.981
D	7.900	8.513	0.928
E	15.80	16.11	0.981
F	4.200	3.731	1.126
G	6.700	5.747	1.166
H	12.40	12.63	0.982

Exp. : 실험 결과, Num. : 수치해석 결과

3. 간이 예측 모델

본 장에서는 2장에서 제시한 정도있는 열탄소성해석법을 토대로 선상가열 시의 대표적인 간이 예측 모델인 각변형과 횡수축변형 추정식을 유도하였다. 또한 수치해석 결과와 간이 예측 모델에 의한 결과를 비교하여 제시된 간이 예측 모델의 정당성을 확인하였다.

본 해석 모델의 크기는 2장의 Fig. 1에 보여진 바와 같으며, 이 때의 가열조건은 Table 1에 열거된 바와 같다. Table 3은 각변형과 횡수축

변형에 대한 수치해석 결과를 보여 주고 있으며, 이를 토대로 선상가열시의 간이 예측 모델인 잔류변형 추정식을 회귀분석을 통해 유도해 보면 아래의 식과 같다.

$$\phi_{f_0} = 9.818\lambda(\text{rad}) \quad (1)$$

$$\frac{s}{t} = 20.90\lambda(\text{mm/mm}) \quad (2)$$

여기서, $\lambda = \frac{1}{vt^2}$: 입열량 계수

v : 가열속도(mm/sec)

t : 판 두께(mm)

횡수축변형 추정식 (2)로부터는 강판의 곡가공 작업과 곡직 작업 시의 횡수축 여유를 정량적으로 결정할 수 있으며, 설계 단계에서의 수축치 관리에도 효과적으로 적용될 수 있을 것이다.

선상가열 시에 가열선을 따라서의 각변형의 변화를 고려하기 위한 간이 예측 모델은 아래의 식을 이용하였다.

$$\phi_f = \phi_{f_0} \cdot F(\lambda, \frac{z}{h_l}) = \phi_{f_0} \cdot (C_0 + C_1 \frac{z}{h_l}) \quad (3)$$

여기서, ϕ_{f_0} : 식 (1)에 의한 평균 각변형

$F(\cdot)$: 가열선을 따라서의 각변형의 변화를 고려하기 위한 보정 계수

z : 가열선의 출발점으로부터의 거리

h_l : 가열선의 길이

Table 3에 있는 대상 모델의 수치해석 결과를 토대로, 계수 C_0 와 C_1 을 회귀분석을 통해 유도해 보면 아래의 식과 같다.

$$C_0 = 0.927 - 1.960\lambda - 12910\lambda^2 \quad (4)$$

$$C_1 = 6.314 \times 10^{-4} + 254.17\lambda - 63440\lambda^2 \quad (5)$$

Fig. 4는 각변형에 대한 간이 예측 모델과 2장의 Table 2에 있는 Tsuji 등²⁾에 의한 실험 결과를 비교한 것인데, 식 (1)에 의한 결과는

실험 결과와 비교해서도 전반적으로 좋은 추정 결과를 준다는 사실을 알 수 있다.

Table 3 Residual deformations by numerical simulation

Model	Angular Distortion ϕ_{f_0} ($\times 10^3$ rad)	Transverse Shrinkage s (mm)
A	7.205	0.238
B	11.98	0.372
C	5.198	0.148
D	8.513	0.244
E	16.11	0.538
F	3.731	0.120
G	5.747	0.196
H	12.63	0.436

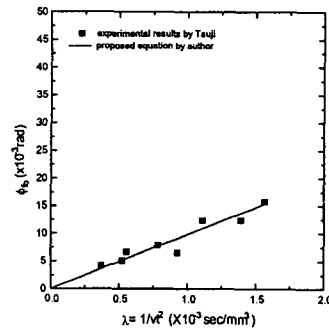


Fig. 4 Comparison of proposed equation with experimental results

4. 결 론

(1) 본 논문에서는 수치해석법의 타당성을 검증하기 위하여 대상 모델의 각변형에 대한 수치해석 결과와 Tsuji 등에 의한 실험 결과를 정량적으로 비교하였고, 이로부터 선상가열 시의 잔류변형해석 절차의 유효성을 확인하였다.

(2) 본 연구에서는 선상가열 시의 대표적인 간이 예측 모델인 각변형과 횡수축변형 추정식을 수치해석 결과를 토대로 회귀분석을 통해 유도하였다.

참고문헌

1. Ueda, Y. et al. : Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 170(1991), 577-586 (in Japanese)
2. Tsuji, J. and Okumura, Y. : Transactions of the West-Japan Society of Naval Architects, 46(1975), 149-160 (in Japanese)