

# 선상 가열시 수냉 효과를 고려한 강판의 변형 추정에 관한 연구

황보혁 · 양박달치  
울산대학교 조선해양공학부

## The Estimation of Curvature Deformation of Steel Plates in Water Cooling Process after Line Heating

HYEOK HWANGBO, PARK-DAL-CHI YANG  
School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Univ. of Ulsan, Ulsan, Korea

**KEY WORDS:** Line heating 선상가열, Water cooling 수냉, Heat transfer 열전달, Curvature deformation 곡률변형, Thermo elastic-plastic analysis 열탄소성 해석

**ABSTRACT:** Line heating with water cooling is generally adopted process in the shipyards for the forming hull surface. The purpose of this paper is to develop a model of thermal deformation in water cooling process after the line heating. In order to simulate the cooling process, heat transfer analysis was performed by assuming the effects of water cooling as a negative heat-source. Experiment for the line heating with water cooling was performed for 9 models of plates in order to verify the cooling model. By using the suggested model for the water cooling process, it could be observed that the present method predict the plate deformations in the line heating more accurately.

### 1. 서 론

선박의 건조과정에 있어서 선상가열은 생산성과 직결되는 공정으로 대부분 숙련공의 경험에 의한 작업으로 이루어진다. 최근 숙련공의 감소와 더불어 고령화 문제, 전체건조공정에서 차지하는 중요도 등의 이유로 선상가열 자동화는 시급한 과제가 되었다. 이를 위해서는 가열과 냉각시 판 변형의 정확한 예측이 필요하고 지난 10여간에 걸쳐 이에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다.

선상 가열시 강판의 변형량을 예측할 수 있는 모델들은 다수 개발되어 있으나 실제 현장에서 부분 실시하는 수냉을 고려한 변형에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 현장에서의 선상가열은 생산성을 위하여 가열부위에 물을 이용하여 급속히 냉각시킨다. 판 전체가 냉각을 위한 물이 끼여진 상태로 가열부위만 토치를 이용한 열원이 가열선을 따라 이동하게 된다.

선상가열시 수냉을 포함한 판의 변형에 관한 연구를 살펴보면 김정수 등(2004)은 수냉 후 강판의 상변태와 변형의 관계를 이용하여 변형 예측을 수행하였다. 또한 하윤석 등 (2005)은 수냉시 충돌제트로 인한 막비등의 영역과 각 영역의 열특성에 대한 연구를 하였다. 조원익 (2005)은 유량을 변화시켜 고온 금속 표면에 일정 속도로 분사하는 열전달실험을 수행하였다.

본 논문에서는 수냉을 포함한 선상가열시 강판의 변형에 대

해 해석적인 방법에 의한 추정 방법을 제안하고 실험을 통하여 그 타당성을 검증하였다. 해석도구로는 상용 구조해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하였다. 가열에 뒤따르는 수냉을 열원과 물분사, 2개의 열원으로 모델링하여 열전달 해석과 열탄소성 해석을 단계적으로 수행하였다. 수냉을 포함한 실험결과를 통하여 판의 온도와 변형량을 비교하여 본 연구의 모델링 방법이 만족스러움을 확인하였다.

### 2. 선상가열의 해석 모델

#### 2.1 열전달 방정식

Fig. 1은 수냉을 포함한 선상가열을 도식화한 그림이다. 강판 위에 가스토치가 지나가고 뒤를 이어 일정한 거리를 유지하는 노즐이 물을 분사하면서 뒤따른다. 이런 수냉을 포함한 가열 냉각과정에 의해 강판의 변형은 결정된다.

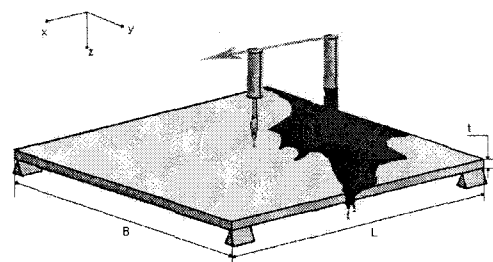


Fig. 1 Schematic diagram of lineheating with watercooling

황보혁: 울산광역시 남구 무거2동 울산대학교

052-259-1641 a2zzang@empal.com

Fig. 1에서 보인 것과 같이 강판 표면 위의 열원과 물의 냉각에 따른 판의 온도 변화는 다음과 같이 3차원 비정상 열전달 방정식과 경계조건으로 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

$$\text{경계조건으로 } k \frac{\partial T}{\partial n} = q_n^s \quad \text{on } S_1 \quad (2)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_\infty) \quad \text{on } S_2 \quad (3)$$

여기서,  $h$ 는 열대류계수,  $k$ 는 열전도율,  $\rho$ 는 밀도,  $c$ 는 비열이다.  $S_1$ 은 가열과 물로 냉각되는 표면을 나타내고  $S_2$ 는 자연대류에 의해 냉각되는 표면이다. 또한 (3)식의  $T$ 는 가열 표면에서의 온도이고  $T_\infty$ 는 주위에 노출된 경계 온도이다. 단위 면적당 입력되는 열량의 크기는 열속함수로 가열되는 표면에서의 위치와 시간에 대한 함수이다.

$$q_n^s = q_n^s(x, y, t) \quad (4)$$

## 2.2 열속 함수(Heat flux)의 모델

Fig. 2에 보이는 것과 같이 토치에 의한 열원과 물이 노즐에서 떨어져 퍼져나가는 것을 가열선을 중심으로 형상화했다.

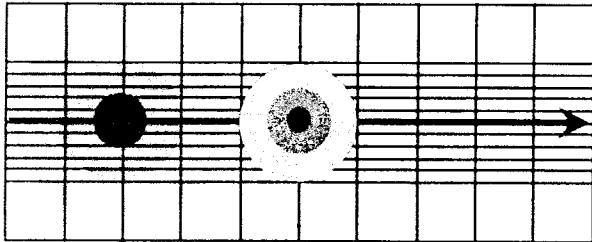


Fig. 2 Assumption of the distribution of the heatflux

토치의 의한 열원의 열속함수는 Gauss분포 형상으로 가정하였다. 물분사에 의한 모델은 또 하나의 마이너스 열원을 가지는 열속함수로 가정하였다. 이는 토치의 열속 함수와 수냉 모델에 대한 열속함수에 대해 Fig. 2에서 나타낸 것과 같이 이중극을 가진 분포로 Fig. 3에 나타내었다.

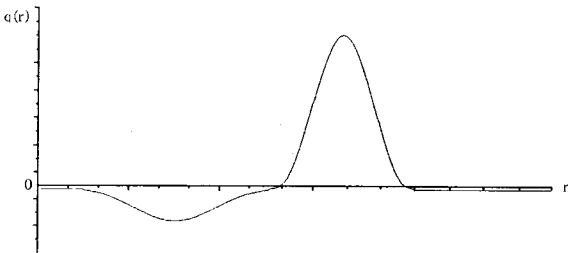


Fig. 3 Gaussian distributions of heat flux and watercooling in plate surface

## 2.3 열전달 - 열탄소성 해석

선상가열시 열전달 해석과 열탄소성 해석은 분리하여 단계적으로 해석하였다. 열전달 해석의 결과로 열원의 이동에 따른 각 시간대별로의 온도분포를 구한 다음 이를 열 하중으로 입력하여 변형을 계산하는 과정을 수행하였다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 강판의 대칭성을 고려하여 전체 판의 1/2만을 해석 대상으로 선택하였으며 8절점의 Solid 요소를 사용하였다.

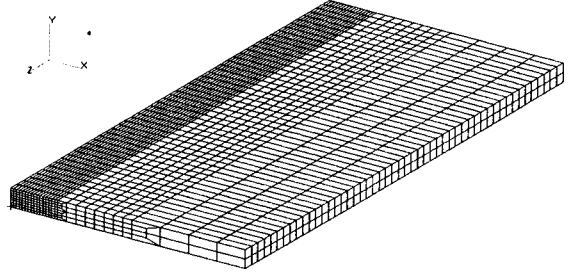


Fig. 4 FEM model for thermo elasto-plastic analysis

## 3. 선상 가열 실험

본 연구에서 사용한 모델은 연강판으로 가열선과 수냉에 대한 위치는 Fig. 1에서 보인 바와 같이 모두 시편의 중앙부이다. 총 9개의 모델에 대하여 유량과 가스 압력을 일정하게 유지하면서 토치의 이동속도를 변화시켜 선상가열 실험을 수행하였다. Fig. 5는 수냉을 포함한 선상가열 실험으로 판 전체가 물로 덮힌 가운데 토치로 가열되는 것을 보여주는 사진이다.

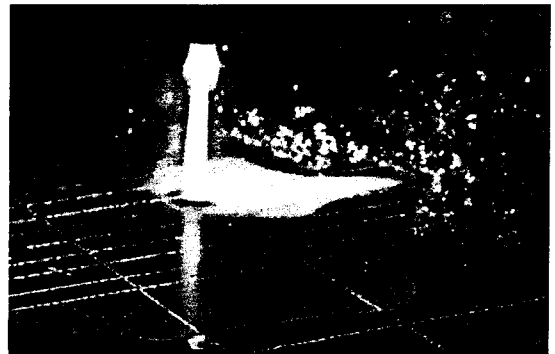


Fig. 5 Actual photo of lineheating with watercooling

각 모델에 대한 치수 및 실험 조건은 Table. 1에 보였다. 모델은 두께가 12mm, 18mm, 20mm의 LxB=500x500mm인 것으로 초기 변형이 없는 평판이고 전체 모델에 대해 평판과 토치 사이의 간격은 50mm로 하였다. 가스토치의 지름은 3.8mm로 동일하고 산소와 프로판 가스압을 각각 0.3MPa, 0.025MPa로 일정하게 유지했다. 수냉을 위해 토치에서 150mm 뒤에 지름 15mm의 노즐에서 일정량의 유량이 나오게 했다.

실험에 대하여 가열선 주위의 온도 변화를 측정하기 위해 판의 중앙부를 적외선 온도 측정기로 토치가 이동하는 동안 연속적으로 측정하였다. Fig. 6에서는 각 두께별로 속도 2.5mm/s

일 때, 실험 모델의 중앙부에서 온도 변화를 시간에 따라 나타낸 것이다. Fig. 6를 보면 두께가 두꺼울수록 측정된 최고온도가 낮은 경향을 보이고 토치가 온도 측정 지점을 지나가는 순간 가파르게 온도가 급상승하는 것을 볼 수 있다.

Table 1 Experiment model data

Model	t [mm]	Speed [mm/s]	Flow rate [l/min]
CF01	12	2.5	9.0
CF02	12	1.667	9.2
CF03	18	2.5	9.1
CF04	18	1.667	8.97
CF05	18	1.667	9.0
CF06	20	2.5	9.2
CF07	20	2.5	9.1
CF08	20	1.667	9.1
CF09	20	1.667	9.0

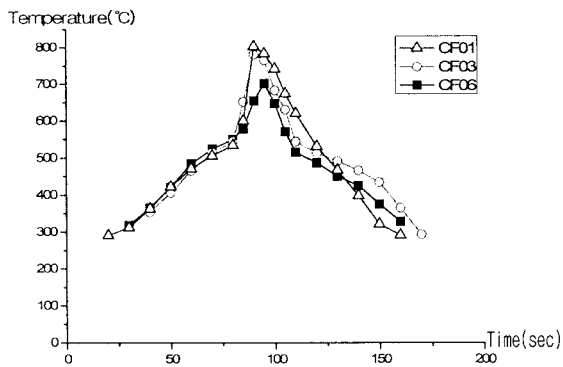


Fig. 6 Comparison of temperature at the mid-point of models with different thickness

Table 1에 보인 실험모델의 초기변위와 실험 후 변위는 x, y축 방향으로 중앙부는 10mm, 나머지는 50mm 간격으로 각각 19개 총 209개의 격자점을 두어 측정하였다.

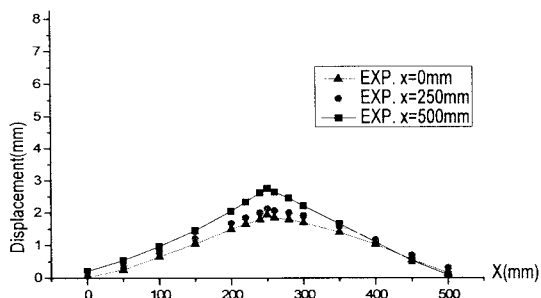


Fig. 7 experimental results of plate deformation in z-direction of CF01 Model

각 실험 모델들의 변위는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 가열선 부위를 최대로 하여 포물선 형태로 변위가 나타났으며 y축 방향의 양끝단부에는 변위가 거의 발생하지 않은 것을 알 수 있다. 또한 전체적으로 가열의 단부효과로 인하여 가열선의 시작점이나 중앙부(x=250mm)에 비해 끝단부(x=500mm)의 변형량이 큰 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 실험 및 해석 결과 비교

Table 2에서 각 모델에 대한 최고 온도와 변형량에 대하여 실험결과와 수치해석 결과를 보여주고 있다. 온도는 판의 중심점에서 측정한 값과 같은 지점의 해석값을 비교했으며 변형값에 대해서도 변형이 심한 끝단부보다 판의 중앙부에서 측정한 값을 비교하였다. 실험결과와 수치해석 결과의 온도의 비는 평균 1.02로 실험과 수치해석의 최고 온도값은 잘 일치하지만 변위는 모델에 따라 다른 분포를 보인다. 판의 모델 CF02-CF05는 변형값이 잘 일치하는 반면에 모델 CF01, CF06-CF09는 실험값과 수치 해석값에 차이가 있음을 알 수 있다.

Table 2 Analytic and experimental results of deformation and maximum temperature at the midpoint of the model

Model	Temperature[°C]			Deformation[mm] at 250mm		
	Exp.	Num.	ratio [exp/num]	Exp.	Num.	ratio [exp/num]
CF01	809	786	1.029	2.066	1.682	1.228
CF02	871	851	1.023	2.347	2.420	0.969
CF03	781	787	0.992	1.451	1.503	0.965
CF04	779	787	0.989	1.579	1.503	1.05
CF05	842	848	0.992	1.787	1.753	1.019
CF06	702	704	0.997	1.177	0.872	1.34
CF07	710	704	1.008	1.071	0.872	1.34
CF08	755	759	0.994	1.601	1.358	1.178
CF09	756	759	0.996	1.554	1.358	1.144
avg.			1.02			1.137

Fig. 8은 수냉을 포함한 CF06 모델의 온도 변화를 수치해석 결과와 비교한 것이다. 또한, 같은 열원의 속도를 갖는 공랭일 때의 결과값과 비교했다. 최고온도는 다소 큰 차이를 보이지 않았지만 공랭의 경우는 온도 변화가 수냉에 비해 완만한 기울기를 보이지만 수냉을 포함한 경우, 판의 온도는 급한 기울기로 최고온도까지 오르고 급랭이 되었다. 공랭의 실험값은 전병재 등(2006)의 강판의 선상가열시 이동열원에 대한 온도 분포 실험결과를 사용하였다. 수치해석 결과값은 Fig. 8에 보는 바와 같이 수냉실험 결과값의 온도분포와 잘 일치함을 보인다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 선상가열시 수냉 효과에 대한 강판의 변형을 실험 결과와 수치해석 결과의 비교를 통하여 고찰해 보았다. 강판위에 가열과 수냉이 동시에 진행되는 실험에 대해 입열량이 다른 두 열원으로 모델링하여 해석을 수행하였다. 수치해석 결과인 온도와 변형값은 실험값과 비교하여 잘 일치함을 보였다. 열전달 해석은 수냉시, 열속의 이동에 따라 온도 변화가 뚜렷이 차이가 났다. 특히, 최고온도 지점에서 온도의 변화는 실험값과 거의 일치함을 보였다. 수냉을 포함한 실험에 대한 판의 변형량은 공랭시 선상가열과 같이 단부효과로 인하여 끝단부의 변형량이 시작부나 중앙부보다 더 큰 것을 확인하였다. 이를 열탄소성해석 결과와 비교하여 볼 때, 판의 시작부와 중앙부에서의 변형은 잘 일치함을 보였으나 끝단부에서는 단부효과로 인하여 큰 차이를 보였다. 단부효과에 대한 고찰을 위해서 보다 다양한 경우의 해석과 많은 실험의 추가적인 연구가 필요하다.

## 참 고 문 헌

- 김정수, 하윤석, 장창두 (2004). "선상가열시 수냉 현상에 따른 상변태를 고려한 판의 변형 예측", Proc. of the Annual Autumn Meeting, SNAK, Sancheong, pp 148-153
- 전병재, 김현준, 양박달치 (2006). "인공신경망을 적용한 선상가열시 강판의 곡률변형 추정", 한국해양공학회지, 제20권, 제4호, pp 24-30.
- 조원익 (2005). "고온 금속 표면에서 물분사에 의한 열전달 실험", 부산대학교 공학석사 학위논문.
- 하윤석, 김정수, 장창두 (2005). "선상가열시 수냉이 유발하는 막비등 현상을 고려한 판의 변형 예측", 대한조선학회논문집, 제42권, 제5호, pp 462-469.

2006년 10월 16일 원고 접수  
2006년 00월 00일 최종 수정본 채택

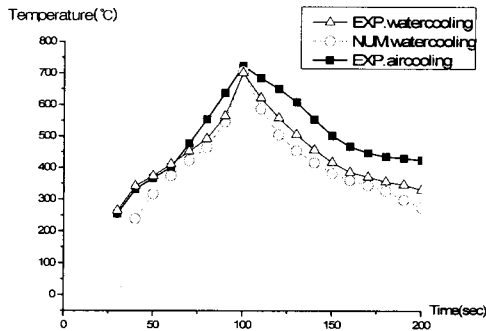


Fig. 8 Comparison of temperature variation at the mid-point of CF06 Model

Fig.9와 Fig.10은 각 두께별로 동일 속도일 때의 판의 변형에 대해  $x=0, 250, 500\text{mm}$  일때의 변형량과 수치해석 결과값을 비교해놓은 것이다. Fig. 9는 판의 두께가 12mm인 CF02 모델로 각 위치별로 변형이 크게 일어났으며 끝단부인 500mm에서 단부효과의 영향으로 결과값의 차이를 보인다. Fig. 10는 판두께가 20mm인 CF03모델의 실험결과와 수치해석의 결과로 변형이 크지 않지만 각 위치에서의 변형량이 수치 해석값과 일치함을 보인다.

위의 결과로부터 수치해석 결과는 실험결과와 비교하여 좋은 일치를 보였다. 따라서 본 연구에서 수냉에 대한 모델링 방법에 충분한 타당성이 있다고 볼 수 있다.

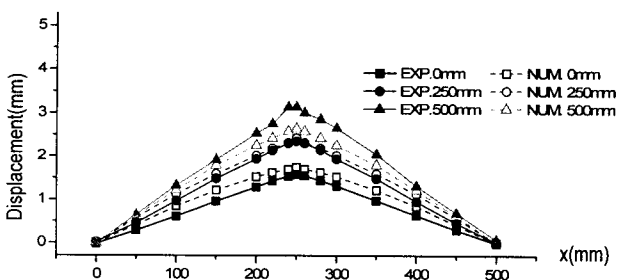


Fig. 9 Comparison of deformation of experimental result and Numerical result at different points of CF02 Model

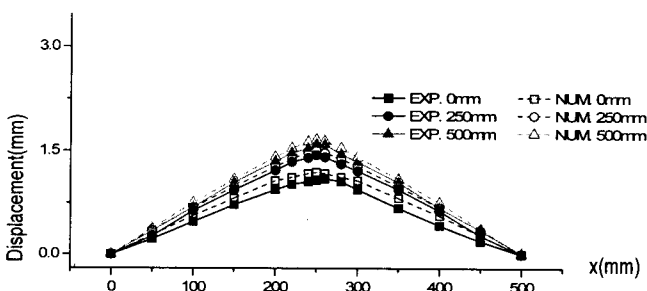


Fig. 10 Comparison of deformation of experimental result and Numerical result at different points of CF03 Model