

선상가열법에 의한 강판의 변형 예측식 개발

이주성* · 이정호*

*울산대학교 조선해양공학부

Development of Formulas to Predict Deformations in Plate by Line Heating Method

JOO-SUNG LEE* AND JOUNG-HO LEE*

*School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan, Ulsan, Korea

KEYWORDS: Line Heating 선상 가열 Concentration coefficient 집중 계수 Equivalent heat transfer rate 등가열전달율 Transverse shrinkage 횡수축량

ABSTRACT: Although a great deal of research has been carried out to solve the plate forming problem and to improve the effectiveness and productivity of the plate forming process, no practical way of automating the plate forming process has been proposed yet. Since characteristics of heating machines may vary, it is necessary to investigate the thermal deformation characteristics of the heating machine that will be used in the automation system its characteristics may be modified as new information about thermal deformation by heating becomes available. In this paper, experiments for line heating have been carried out to calculate the formula of predicting thermal deformation due to line heating with varying affecting parameters, and numerical study has been carried out to produce data beyond the range where a line heating test is impractical. Formulas of predicting transverse distortion and shrinkage have been proposed and derived, based on the present experimental and numerical works. This paper also illustrates how the formula has been modified as new experimental data are added.

1. 서 론

잘 인식되어 있는 바와 같이, 선박의 외판이나 해양구조물의 외판을 이루는 곡가공 공정은 선박의 건조 공정에서 상당히 중요한 위치를 차지하고 있다. 현재 조선소에서는 선박 외판의 상당 부분을 선상가열이나 삼각가열 등 열가공으로 가공하고 있다. 곡가공 공정의 기계화 내지는 자동화에 대한 필요성에 대해서는 여러 논문에서 언급하고 있다(우중훈과 신중계, 2002; 이주성, 1997; 장창두 등, 2002). 곡가공 공정에서의 여러 가지 문제점 해결과 성형공정의 생산성을 효율적으로 향상시키기 위한 방법으로 지금까지 곡가공 공정의 기계화나 자동화 시스템 구축을 위한 많은 연구가 진행되어져 왔지만 아직까지 실용화 단계에 이르지 못하고 있는 실정이다.

곡가공 자동화 시스템은 가열작업을 자동으로 수행하는 가열장치와 변위 및 온도 등을 계측하는 Hardware, 가열장치에 가열에 대한 정보를 제공해 주는 Software 그리고 가열장치의 구동을 제어하고 계측된 자료를 수집하는 Software 등으로 구성된다. 현장에서 곡가공 공정에 대한 작업지침서가 각 조선소마다 마련되어 있으나, 가열의 결과에 주는 영향인자들이 많기 때문에 이러한 영향인자들에 대한 상세한 정보를 제공하는 것은 실질적으로 적지 않은 어려움이 있다. 그래서 현장에서 곡가공

공정을 실제로 수행하는 작업자들은 각자의 작업 특성에 따라 곡면성형 작업을 하고 있다. 이와 마찬가지로 제작된 자동가열장치가 자동화 시스템에 활용되기 위해서는 그것의 열변형 특성을 파악해서 수식화 또는 Data Base화 해서 활용되어야 한다. 한편, 단 한차례의 실험을 통해 해당 가열장치의 특성을 완전하게 정의 될 수 없으므로, 가열장치를 사용하면서 축적되는 계측 자료를 토대로 변형특성을 다시 정의 해주어야 할 필요가 있다.

본 연구에서는 전술한 바와 같이 가열장치의 열변형 특성을 정의하기 위해 판의 두께와 가열속도를 변화시킨 다수의 강판에 대한 선상가열실험을 수행하였다. 한편, 선상가열실험이 실제적으로 불가능한 영역에 대해서는 상용 패키지인 ANSYS를 사용하여 열탄소성 해석을 수행하였고, 그 결과와 실험결과를 토대로 회귀분석법을 통해 횡각변형과 횡수축에 대한 변형예측식을 도출하였다. 이 연구에서는 가열장치 사용에 따라 축적되는 Data에 따른 변형특성의 변화를 보일 목적으로 추가의 실험을 수행하여 이에 대한 결과를 포함시켰을 때 변형예측식을 도출하여 그 변화에 대해 기술하였다.

2. 선상가열에 대한 실험 및 해석

2.1 실험 방법

본 연구의 실험에 사용한 강판은 공칭항복응력이 235MPa인 선박용 연강재로서, 크기는 Fig. 1에 표시한 것처럼 가로×세로=600mm×1000mm이다. 각 Grid points에서 Fig. 2에서 표

교신저자 이주성: 울산광역시 남구 대학로 102
052-259-2162 jslee2@ulsan.ac.kr

시한 것과 같이 z방향으로의 가열 전 초기 변위를 측정하고 시험편이 냉각된 후 변위를 재측하여 그 차이를 가열로 인한 변형량으로 정의하였다(Fig. 2 참고). 변위는 계측오차가 ±0.2mm 인 레이저 센서를 사용하여 측정하였고, 강판 표면에서의 온도는 적외선 온도측정기를 사용하여 계측하였다(이주성, 2003; 이주성과 임동용, 2005). 계측한 변위와 온도는 가열시 설정된 여러 조건들과 함께 Data base를 구축하여 변형 예측식 도출에 활용하였다.

선상가열로 인한 변형에 영향을 줄 수 있는 영향인자로는 가열 온도, 가열 속도, 가스와 산소 압력, 토치와 강판사이의 거리, 토치 팁 사이즈, 냉각방법, 강판의 두께 등을 들 수 있는데, 가스와 산소의 압력 그리고 토치와 강판사이의 거리를 일정하게 유지하고, 동일한 토치 팁을 사용하면 가열 온도는 일정하게 유지될 수 있다(이주성, 1997). 따라서 가열의 결과에 영향을 주는 주된 인자는 강판의 두께에 따른 가열속도가 되어, 본 연구에서는 세 가지 두께의 강판에 대해 가열속도를 변화시켜서 실험을 수행하였다. 냉각방법은 공냉을 택하였고, 실험조건들을 Table 1에 열거하였다. 선상가열실험이 수행되는 장면을 Fig. 3에 예시하였다.

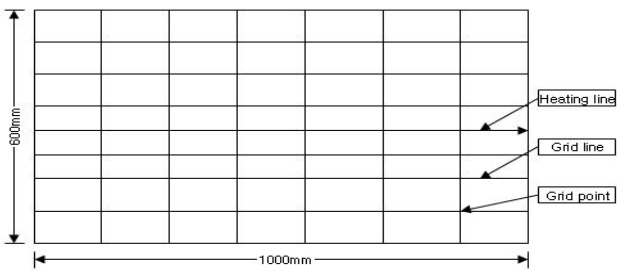


Fig. 1 Grid lines, grid points and heating line

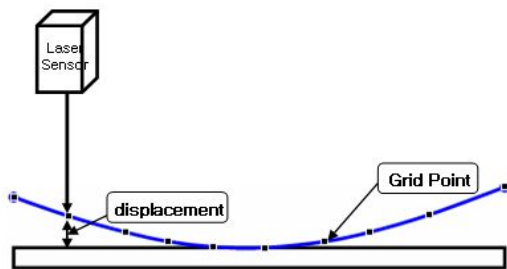


Fig. 2 Displacement measuring

Table 1 Condition of experiment

Heat source	LPG
LPG pressure	1.7 kgf/cm ²
Oxygen pressure	4 kgf/cm ²
Distance between torch tip and plate surface	50 mm
Torch tip number	1000
Cooling method	Air cooling

2.2 열탄소성 해석

전술한 바와 같이, 선상가열 실험이 불가능한 가열조건 범위에서의 변형 특성을 고려하기 위하여 상용 패키지를 이용한 열탄소성해석을 수행하였다. 본 연구에서는 상용 패키지인 ANSYS를 이용하여 2차원 비선형 해석을 수행하였다. 열속 (Heat flux)은 토치 중심 주위에서 Gauss 정규 분포 형태로 작용하는 것으로 가정하였으며 아래의 식 (1)을 사용하였다.

$$q(r) = q_{max} \exp(-\gamma r^2) \tag{1}$$

여기에서

$$q_{max} = q_{eff} \gamma / \pi$$

γ = 토치의 집중계수(Concentration coefficient of torch)

q_{eff} = 유효입열량 (Effective heat input)

해석에 사용된 온도에 따른 재료적 물성치는 Fig. 4에 나타난 자료를 이용하였으며 강판을 열원으로부터 좌우 대칭으로 가정하고 대칭된 한쪽 면에 대해서 해석을 수행하였다. 본 연구에서 사용된 실험장치의 유효입열량과 집중계수는 Table 1의 조건 하에서 각각 $q_{eff} = 2790 \text{ cal/sec}$ 와 $\gamma = 0.00198 \text{ mm}^{-2}$ 이다. 본 해석에는 해석 시간이 오래 요구 되는 3차원 해석대신 2차원 열전달 해석을 수행하였는데, 가열 속도에 대한 고려를 위해서 Fig. 5에서와 같이 Ramp time percentage를 100%로 고려하여 열속 시간을 적용하였다.

3. 실험 및 해석 결과

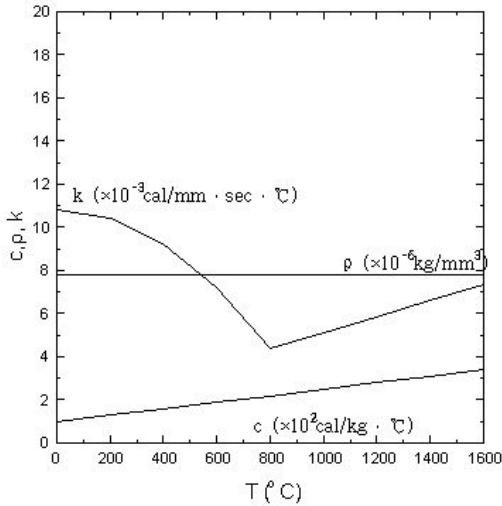
본 연구에서 수행한 실험 모델의 두께와 가열속도 그리고 시험편의 수를 Table 2에 정리하였다. 1차 실험(EXP-1)에서는 27개 모델, 2차 실험(EXP-2)에서는 8개의 모델로서 총 35개 모델에 대한 실험을 수행하였다.

전술한 바와 같이 본 연구에서 도출할 변형예측식의 합리성을 위해 현실적인 실험이 불가능한 가열조건 범위에서의 변형량에 대한 정보가 필요하기 때문에, 이 가열조건의 범위에 대한 결과는 열탄소성 해석 결과의 것을 사용하려고 계획하였다. 2절에서 기술한 열탄소성 해석 과정의 타당성을 보이기 위해 두께가 각각 9, 12와 15mm인 강판에 대해 가열속도가 400, 500 및 600mm/min인 모델에 대한 실험결과와 같은 가열조건에 대해 열탄소성해석을 수행한 결과로서 가열선에 수직 방향

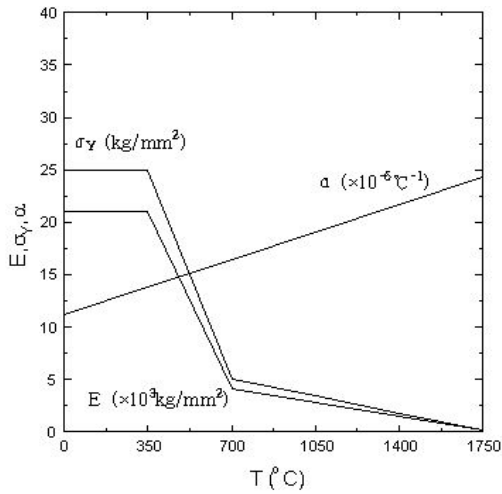


Fig. 3 Photograph of line heating

으로의 변형형상을 Fig. 6에 비교하였다. 실험결과는 가열선에서 동일한 거리 떨어진 위치에서 가열선 방향으로 8개의 격자점에서 측정한 변위의 평균값이다. 보는 바와 같이 열탄소성 해석 결과가 실험결과와 좋은 일치를 보이고 있으며, 따라서 실험으로 구현하지 못하는 가열조건외의 범위에서의 열변형에 대한 정보는 열탄소성 해석결과를 사용할 수 있다고 판단된다.



(a) Temperature dependent physical properties



(b) Temperature dependent material properties

Fig. 4 Material properties

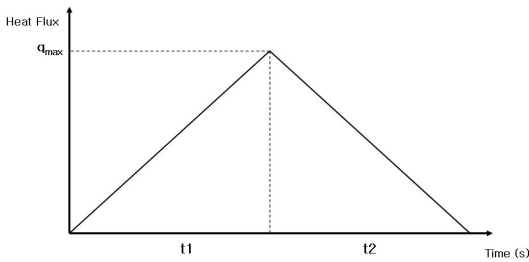
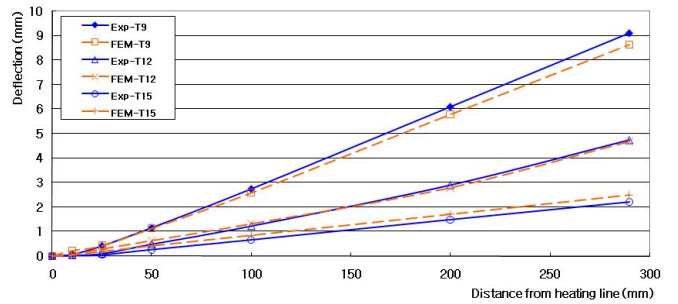


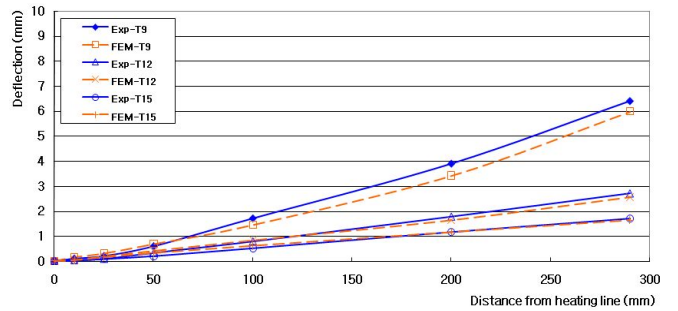
Fig. 5 Ramp Time

Table 2 Test models and conditions

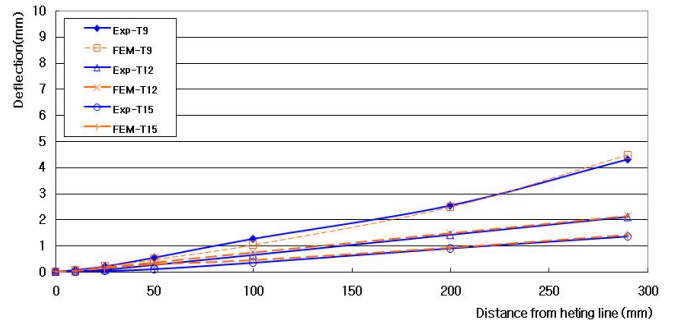
Case	Model number	Thickness (mm)	Velocity (mm/min)	No. of specimens
EXP-1	T9-1	9	400	3
	T9-2	9	500	3
	T9-3	9	600	3
	T12-1	12	400	3
	T12-2	12	500	3
	T12-3	12	600	3
	T15-1	15	400	3
	T15-2	15	500	3
	T15-3	15	600	3
EXP-2	T9-4	9	300	1
	T9-5	9	350	1
	T9-6	9	440	1
	T12-4	12	300	1
	T12-5	12	350	1
	T12-6	12	430	1
	T15-1	15	350	1
	T15-2	15	800	1



(a) $v = 400$ mm/min



(b) $v = 500$ mm/min



(b) $v = 600$ mm/min

Fig. 6 Comparison of angular distortion between experimental and numerical analysis results

4. 변형량에 대한 간이 예측식

선상가열로 인한 변형은 가열선에 수직방향인 횡방향으로의 굽힘과 수축변형인 횡각변형(Φ_x)과 횡수축(S_x) 그리고 가열선 방향인 종방향으로의 굽힘과 수축변형인 종각변형(Φ_y)과 종수축변형(S_y)으로 나눌 수 있다. 이 중에서 횡각변형과 횡수축이 주된 변형 형태이므로 여기에서는 이들에 대한 변형예측식의 도출에 관심을 두었다. 지금까지 제안된 선상가열 또는 용접으로 인한 변형 예측식들을 검토해 보면, 횡수축(S_x)과 횡각변형(Φ_x)은 입열량, 강판의 두께(t) 및 가열속도(v)에 대한 함수로 표현되고 있다(박중구 등, 2005; 배강열 등, 2007). 여기에서는 횡수축(S_x)과 횡각변형량(Φ_x)에 대한 식을 용접으로 인한 변형 예측을 위해 기 제안된 예측식을 참고해서 식 (2)와 (3)의 형태로 설정하였다(이주성, 2004).

$$S_x/t = c_1 q^{a_1} \quad (2)$$

$$\Phi_x = c_2 q^{a_2} \cdot e^{-a_3 q} \quad (3)$$

여기에서

$$q = \frac{q_{eff}}{t\sqrt{vt}} \quad : \text{입열량 계수(Heat input parameter)}$$

$$v = \text{가열속도(mm/min)}$$

$$t = \text{판의 두께(mm)}$$

$$S_x = \text{횡수축(Transverse shrinkage in mm)}$$

$$\Phi_x = \text{횡각변형(Transverse angular distortion in rad.)}$$

Table 2에 열거한 첫 번째 실험(EXP-1)의 결과와 열탄소 해석 결과를 이용하여 식 (2)와 (3)에 포함되는 계수와 지수들의 값을 회귀분석법으로 구한 결과가 다음과 같다.

$$c_1 = 0.514 \times 10^{-3}, a_1 = 1.174$$

$$c_2 = 0.984 \times 10^{-3}, a_2 = 2.5, a_3 = 0.0316$$

지수 a_1 , a_2 와 a_3 는 적절한 범위를 설정하여 여러 경우에 대한 회귀분석결과로부터, 주어진 Data와 비교했을 때 비율의 평균값이 1.0에 가깝고 COV(Coefficient of variation)이 가능한 작은 값을 갖는 것을 자동적으로 결정하는 프로그램을 사용하여 구한 결과이다.

따라서 횡수축과 횡각변형에 대한 식은 다음과 같다.

$$S_x/t = 0.514 \times 10^{-3} q^{1.174} \quad (4)$$

$$\Phi_x = 0.984 \times 10^{-5} q^{2.5} e^{-0.0316q} \quad (5)$$

변형 예측식 (4)와 (5)를 실험(EXP-1) 및 수치해석 결과와 비교한 것이 각각 Fig. 7과 Fig. 8이다.

식 (4)와 (5)를 유도한 이후에 Data 축적에 따른 변형 예측식

의 변화를 보기 위해 Table 2에 'EXP-2'로 표시한 2차 실험을 수행하여 그 결과를 식 (4)와 (5)를 유도할 때 사용된 결과에 추가하여 변형 예측식을 다시 유도하였다. 회귀분석법을 수행한 결과로부터 식 (2)와 (3)의 계수와 지수들은

$$c_1 = 0.531 \times 10^{-3}, a_1 = 1.168$$

$$c_2 = 0.749 \times 10^{-3}, a_2 = 2.5, a_3 = 0.0332$$

와 같이 구해졌고, 따라서 횡수축과 횡각변형에 대한 식은 다음과 같다.

$$S_x/t = 0.531 \times 10^{-3} q^{1.168} \quad (6)$$

$$\Phi_x = 0.749 \times 10^{-5} q^{2.5} e^{-0.0332q} \quad (7)$$

변형 예측식 (6)와 (7)를 실험(EXP-1, EXP-2) 및 수치해석 결과와 비교한 것을 각각 Fig. 9와 Fig. 10에 실선으로 표시하였고, 식 (4)와 (7)는 비교 목적으로 점선으로 표시하였다. Fig. 9에서 보듯이 식 (4)와 (6) 사이에는 큰 차이를 보이고 있지 않으나, 식 (4)와 (6)의 계수와 지수가 다른 만큼 어느 정도의 변화는 있는 것으로 일어났다. 한편, 횡각변형 예측식인 (5)와 (7)에는 두드러진 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서 특정 장치의 변형특성을 나타내는 이러한 변형 예측식들이 Data의 누적에 따른 결과가 반영될 수 있도록 다시 정의되어 활용되어야 할 것이다.

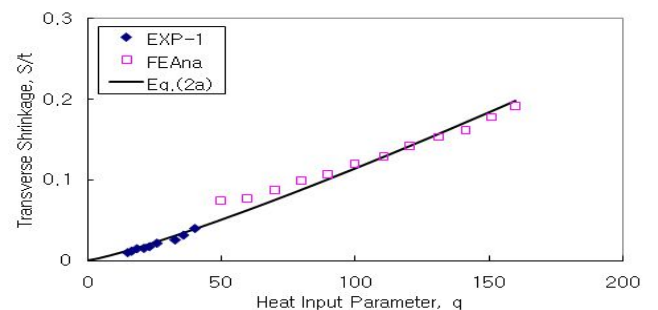


Fig. 7 Comparison of transverse shrinkage derived based on the results of EXP-1 and numerical analysis

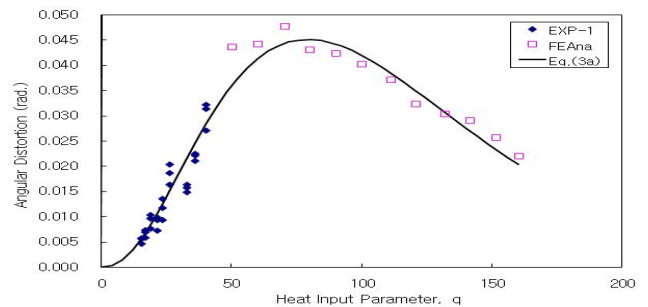


Fig. 8 Comparison of angular distortion derived based on the results of EXP-1 and numerical analysis

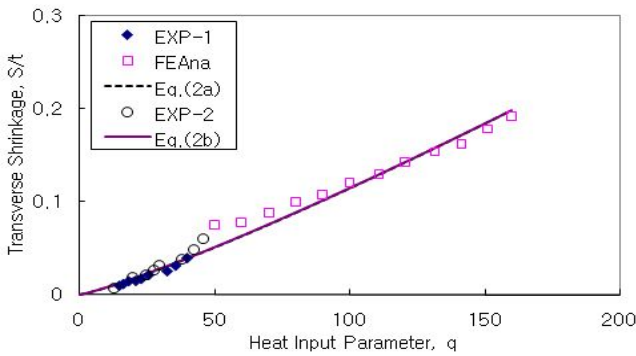


Fig. 9 Comparison of transverse shrinkage derived based on the results of EXP-1, EXP-2 and numerical analysis

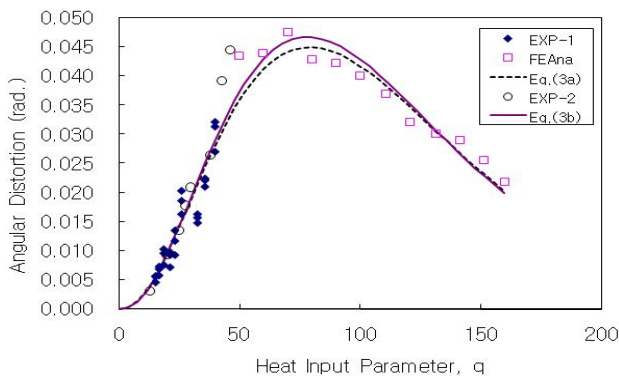


Fig. 10 Comparison of angular distortion derived based on the results of EXP-1, EXP-2 and numerical analysis

5. 결 론

본 연구에서는 가열장치의 열변형 특성으로서 횡수축과 횡각 변형 예측식을 도출하기 위해 판의 두께와 가열속도를 변화시킨 강판 모델들에 대해 2회에 걸쳐 선상가열실험을 수행하였다. 또한, 선상가열실험이 실제적으로 불가능한 범위에 대해서는 상용 패키지를 사용하여 열탄소성 해석을 수행하였고, 그 결과와 실험결과를 토대로 횡각변형과 횡수축에 대한 변형 예측식을 도출하였다. 본 연구에서는 선상가열의 결과로서 변형 Data의 축적에 따른 변형특성의 변화를 보기 위해 1차 실험결과와 수치해석

결과만 사용하여 도출된 변형 예측식과 추가로 수행한 2차 실험 결과를 포함하여 도출한 변형 예측식을 비교하였다.

본 연구의 결과에 따르면 Data의 추가에 따라 횡각변형에는 두드러진 변화를 보였으나, 횡수축에는 횡각변형 만큼 두드러진 변화를 보이고 있지는 않았다. 그러나 미미한 횡수축이 판 전체의 변형에 적지 않은 영향을 줄 수 있다는 점에서 Data의 축적에 따라 변형 예측식을 다시 정의하여 활용하는 것이 보다 합리적인 변형 예측을 꾀하는 방향이라고 판단된다.

후 기

이 논문은 2007년 울산대학교 연구비에 의하여 연구된 결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다

참 고 문 헌

박중구, 장경복, 조시훈, 장태원 (2005). "박판 곡직을 위한 선가열시 변형 특성에 관한 연구", KWS, pp 282-284.
 배강열, 양영수, 현충민, 조시훈 (2007). "산소-프로판 가스 곡가공 공정에서 강판의 변형 예측을 위한 계산식 개발", 대한용접접합학회, 제25권, 제2호, pp 172-177.
 우중훈, 신중계 (2002). "선상 가열을 위한 가스 토치와 강판 사이의 열유동 해석", 대한조선학회논문집, 제39권, 제2호, pp 52-60.
 이주성 (1997). "선상가열법에 의한 강판의 곡가공 자동화 시스템(III)", 대한조선학회논문집, 제34권, 제2호, pp 85-89.
 이주성 (2003). "강판의 곡가공 자동화를 위한 수치제어 시스템 개발", 한국해양공학회지, 제17권, 제1호, pp 72-79.
 이주성(2004). "평블록의 용접변형제어에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제18권, 제1호, pp 35-40.
 이주성, 임동용 (2005). "선상가열법에 의한 곡판의 열변형", 한국해양공학회지, 제19권, 제1호, pp 33-38.
 장창두, 하윤석, 고대은, 문성춘 (2002). "선상가열 판변형 해석을 위한 고유변형도 영역의 결정법", 대한조선학회논문집, 제39권, 제1호, pp 82-89.

2008년 10월 9일 원고 접수

2008년 12월 4일 최종 수정본 채택