

선상가열 변형예측식 자동 산출을 위한 지식기반 방법의 개발

이 주 성*†

*울산대학교 조선해양공학부

Development of Knowledge-based Method to Automatically Derive the Deformation Estimation Formula due to Line Heating

Joo-Sung Lee*·†

*School of Naval Architecture & Ocean Engineering, University of Ulsan

†Corresponding author : jslee2@ulsan.ac.kr

(Received November 17, 2009 ; Revised January 11, 2010 ; Accepted January 15, 2010)

Abstract

For the last couple of decades many studies have been carried out to find out solutions to improve the effectiveness and productivity of the plate forming process. The practical way for the automation of the plate forming process has not been, however, developed yet. Since the characteristics of heating machines may be different from each other, it is necessary to investigate the thermal deformation characteristics of the heating machine to be used in the automation system. And their characteristics may be updated as new information about thermal deformation by heating is accumulated. In this paper, data base system has been constructed based on the results of experiments and numerical analyses, which will be used in deriving the deformation estimation formula. The computer code which can automatically derive the deformation estimation formula has been also developed. This paper also illustrates how the formula is updated as experimental data are added. From the present findings, it can be said that the automatic deriving procedure may be important in the automated plate forming system since the heating line information to be generated must be directly influenced by the deformation estimation formula.

Key Words : Angular distortion, Automatic deriving system, DB system, Line heating, Thermo elasto-
lastic analysis, Transverse shrinkage

1. 서 론

잘 인식되어 있는 바와 같이, 선박의 외판이나 해양 구조물의 외판을 이루는 곡가공 공정은 선박의 건조 과정에서 중요한 위치를 차지하고 있는 공정이다. 현재 조선소에서는 선박 외판의 상당 부분을 선상가열이나 삼각가열 등 열가공으로 가공하고 있다. 곡가공 공정의 기계화 내지는 자동화에 대한 필요성에 대해서는 여러 논문에서 언급하고 있다¹⁻³⁾. 곡가공 공정에서 작업 환경 개선의 필요성 등 문제점 해결과 함께 성형공정의 생산성을 향상시키기 위한 방법으로 곡가공 공정의 기계화나 자동화 시스템 구축을 위해 많은 연구가 진행되

어져 왔지만 아직까지 실용화 단계에 이르지 못하고 있는 실정이다.

곡가공 자동화 시스템은 가열작업을 수행하는 가열장치와 변위 및 온도 등을 계측하는 Hardware, 가열장치나 계측 장비의 운용에 필요한 정보를 제공해 주는 Software 그리고 가열장치의 구동을 제어하고 계측된 자료를 수집하는 Software 등으로 구성된다⁴⁾. 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 작업자

들은 각자의 작업 특성에 따라 가열선의 위치와 가열조건을 판단하여 곡가공 작업을 하고 있다. 이와 마찬가지로 제작된 가열장치가 자동화 시스템에 활용되기 위해서는 가열장치의 열변형 특성을 수식화하여 가열선 정보 산출에 활용되어야 한다. 한편, 단 한차례의 실험을 통해 해당 가열장치의 특성을 완전하게 정의될 수 없으므로, 가열장치를 사용하면서 축적되는 계측 자료를 토대로 변형특성을 지속적으로 수정해 주어야 할 필요가 있다.

본 연구에서는 가열선 정보 산출에 직접적으로 이용되는 변형예측식 도출을 위한 Data Base를 구축하는 시스템을 개발하였고, 이를 활용하여 변형예측식을 자동적으로 정의하는 프로그램을 개발하여, DB 시스템에 Data 누적에 따른 변형예측식의 변화를 보였다. DB는 4회에 걸쳐 수행한 선상가열 실험결과를 기반으로 구축하였으며 선상가열 실험이 실제적으로 불가능한 범위에 대한 자료는 열탄소성 해석을 수행한 결과를 포함시켰다.

본 연구의 결과에 따르면 DB 시스템에 Data가 누적됨에 따라 횡각변형에는 두드러진 변화가 있음을 보였다. 한편, 횡수축의 변화는 시각적으로 확인할 수 있을 만큼 뚜렷하지는 않았지만 작은 횡수축이 판 전체의 변형 형상에 주는 영향이 적지 않기 때문에 이 역시 지속적으로 업데이트되어야 한다.

2. 선상가열 실험과 해석

2.1 실험 장치와 방법

본 연구의 Data 수집을 위한 선상가열 실험은 연구팀이 보유한 자동가열장치를 이용하여 수행하였다. Fig. 1에 보인 자동가열장치는 크게

- ① 가열위치와 가열 속도 등 가열선 정보를 제공하는 Software

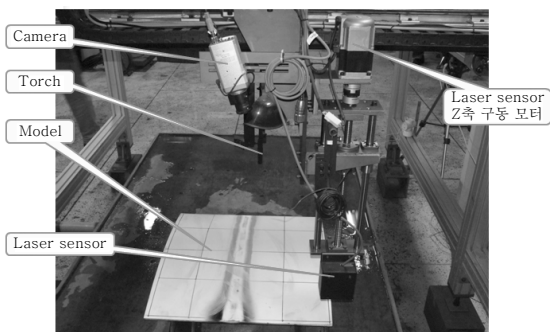


Fig. 1 Present automatic heating apparatus

- ② 가열선 정보를 받아 가열하고 변위, 온도 등을 계측하는 가열 및 계측장치
- ③ 위 ①과 ② 사이의 정보 및 Data를 교환하는 Interface Program

으로 구성되어 있다. 이를 도식적으로 표시하면 Fig. 2와 같다. 변위는 계측오차가 $\pm 0.2\text{mm}$ 인 레이저 센서를 사용하여 측정하였고, 강판 표면에서의 온도는 적외선 온도측정기를 사용하여 계측하였다^{4,5)}. 변위는 Fig. 3에 보인 격자점(grid point)에서 계측하는데, Fig. 4에서 표시한 것과 같이 z방향으로의 가열 전 초기 변위를 측정하고 시편이 냉각된 후 변위를 계측하여 그 차이를 가열로 인한 변형량으로 정의하였다. 계측한 변위와 온도는 선상가열의 결과에 영향을 주는 여러 조건들 즉, 가스와 산소 압력, 토치와 강판 사이의 거리, 토치 팁 사이즈, 냉각방법, 강판의 두께 등과 함께 Data base를 구축하여 변형 예측식 도출에 활용하게 된다. 선상가열실험이 수행되는 장면을 Fig. 5에 예시하였다.

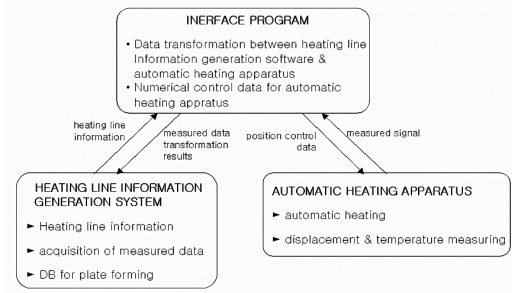


Fig. 2 Data and information interchange between systems

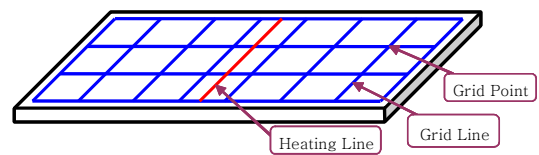


Fig. 3 Grid lines and grid points

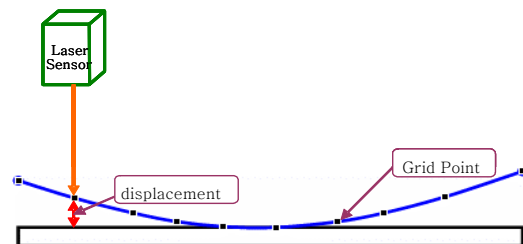


Fig. 4 Displacement measuring

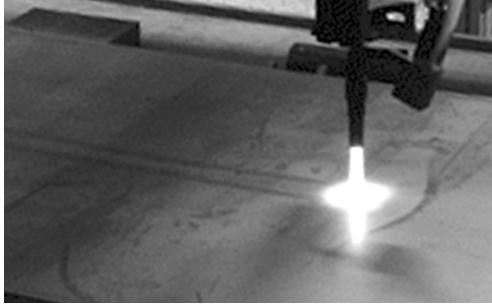


Fig. 5 Photograph of line heating

2.2 실험 및 해석 모델

본 연구의 실험에 사용한 강판은 공칭항복응력이 235MPa인 선박용 연강판으로서, 크기는 가로×세로=600×1000mm이다. 가열선과 변위 계측 위치인 격자점을 Fig. 6에 보였다.

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 있다¹⁾. 따라서 가열의 결과에 영향을 주는 주된 인자는 강판의 두께에 따른 가열속도가 되어, 본 연구에서는 세 가지 두께의 강판에 대해 가열속도를 변화시켜서 실험을 수행하였다. 냉각방법은 공냉이고, 실험조건들을 Table 1에 열거하였다.

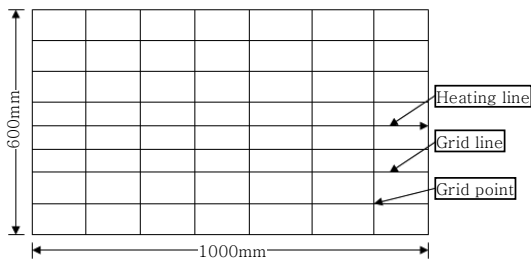


Fig. 6 Grid lines, grid points and heating line

Table 1 Experiment condition

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

Table 2 Test and analysis models

Case	Thickness (mm)	Heating speed (mm/min)
EXP-1A	9	400, 500, 600 each
EXP-1B	12	400, 500, 600 each
EXP-1C	15	400, 500, 600 each
EXP-2	9	300, 350, 440 each
	12	300, 350, 430 each
	15	350, 800 each
FEAna	9	256, 177, 130, 100, 79, 64, 52, 44, 37, 32, 28, 25 each

Table 2는 실험 및 열탄소성 해석을 위한 모델에 대해 판의 두께와 가열속도이다. 실험은 모두 4회에 걸쳐 수행되었으며 각 실험별 결과가 Data base에 축적되는 것으로 간주하였다. ‘EXP-1A, 1B와 1C’는 판두께 t=9, 12, 15mm에 대해 가열속도 400, 5000 및 600 mm/min으로 같은 가열속도 조건으로 실험한 것이지만, 실험한 시기가 다르기에 이를 구분하였다. EXP-1 그룹의 모델 수는 모두 9개이다. ‘EXP-2’는 ‘EXP-1’과 다른 가열속도로 실험한 8개의 모델이다. 따라서 실험 모델의 총 수는 EXP-1 모델 27개와 EXP-2 모델 8개로서 35개이다. Table 2에서 ‘FEAna’에 해당되는 모델은 선상가열 실험이 불가능한 모델이지만 변형 예측 공식 유도를 위해 필요한 입열량 계수 범위에서 변형량에 대한 자료를 얻기 위해 열탄소성 해석을 수행한 모델을 의미한다.

선상가열과 관련된 열탄소성 해석방법에 대해서는 여러 참고문헌에 기술되어 있기 때문에 여기에서는 간략하게 해석과 관련된 주요부분을 정리하였다. 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. 7에 보인 자료를 이용하였으며, 가열선을 중심으로 좌우 대칭을 이용하여 한쪽 면에 대해서만 해석을 수행하였다. 본 연구에서 사용된 실험장치의 유효입열량과 집중

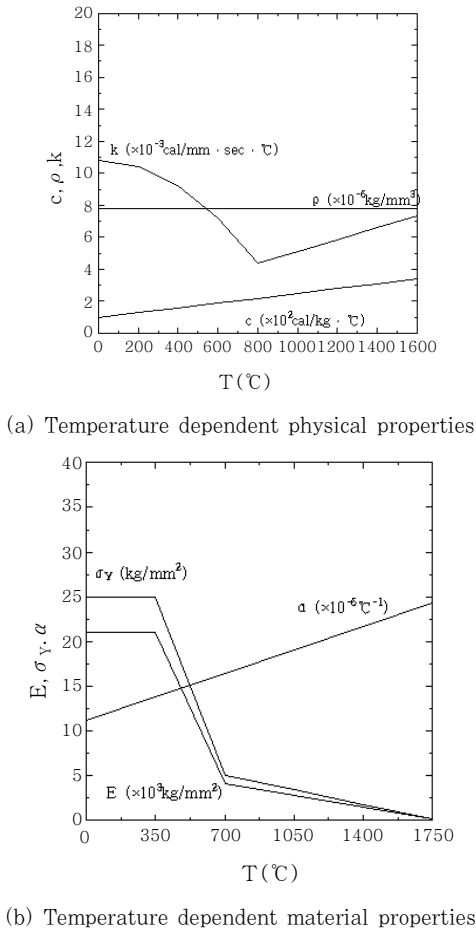


Fig. 7 Material properties

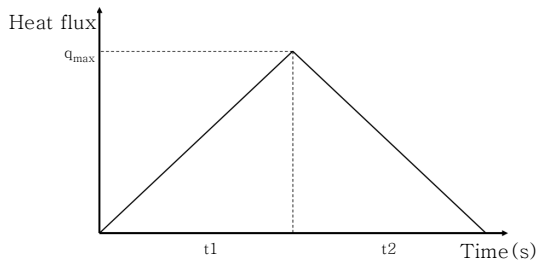


Fig. 8 Ramp Time

계수는 Table 1의 조건 하에서 각각 $q_{eff} = 2790$ cal/sec와 $\gamma = 0.00198$ mm⁻²이다. 본 해석에는 해석 시간이 오래 요구 되는 3차원 해석대신 2차원 열전달 해석을 수행하였는데, 가열 속도에 대한 고려를 위해서 Fig. 8에서와 같이 Ramp time percentage를 100%로 고려하여 열속 시간을 적용하였다.

2.3 실험과 열탄소성 해석 결과의 비교

전술한 바와 같이 본 연구에서 도출할 변형예측식의 합리성을 위해 현실적인 실험이 불가능한 가열조건 범

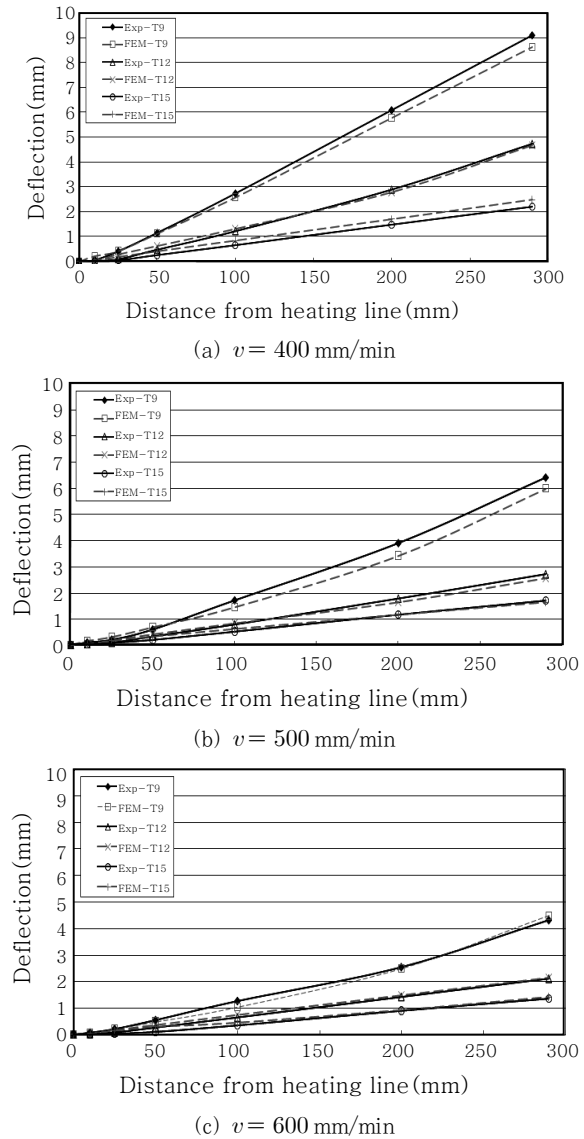


Fig. 9 Comparison of angular distortion between experimental and numerical analysis results

위에서의 변형량에 대한 정보가 필요하기 때문에, 이 가열조건 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 방향으로의 변형형상을 Fig. 9에 비교하였다. 실험결과는 가열선에서 동일한 거리 떨어진 위치에서 가열선 방향으로 8개의 격자점에서 측정된 변위의 평균값이다. 보는 바와 같이 열탄소성 해석 결과가 실험결과와 좋은 일치를 보이고 있으며, 따라서 실험으로 구현하지 못하는 가열조건 범위에 대한 열변형에 대한 정보는 열탄소성 해석결과를 사용할 수 있다고 판단된다.

Table 3 Definition of DB

DB ID	Description of DB	No. of models
DB-1	EXP-1A + FEAna	21
DB-2	EXP-1A & 1B + FEAna	30
DB-3	EXP-1A, 1B & 1C + FEAna	39
DB-4	EXP-1A, 1B & 1C + EXP-2 + FEAna	47

3. 변형예측식의 자동 결정

3.1 Data Base

Table 2에 보인 첫 번째 실험인 EXP-1A와 실험이 불가능한 입열량계수 범위인 FEAna의 결과를 기반으로 'EXP-1B', 'EXP-1C' 그리고 'EXP-2'의 계측 결과가 차례대로 Data base에 누적되는 것으로 간주하여 Data 누적에 따른 변형량 예측식을 자동적으로 결정하는 프로그램에 의한 예측식들을 비교하였다.

3.2 변형예측식 자동결정 과정

선상가열로 인한 변형은 가열선에 수직방향으로의 수축과 굽힘변형인 횡수축(transverse shrinkage) S_x 과 횡각변형(transverse angular distortion) Φ_x 그리고 가열선 방향으로의 수축과 굽힘변형인 종수축변형(longitudinal shrinkage) S_y 과 종굽힘변형(longitudinal bending deformation) Φ_y 으로 구분된다. 이 중에서 가열선에 횡수축(S_x)과 횡각변형(Φ_x)이 최종적인 변형에 지배적이므로 이에 대한 예측식을 DB 자료를 이용하여 컴퓨터 프로그램에서 자동적으로 결정하도록 하였다. 전술한 바와 같이 실험이나 수치해석결과를 토대로 변형 예측식을 도출하는 데에는 어려움이 있는 것은 아니다. 변형예측식은 결국 가열선 정보를 산출하는 데에 활용되는데, 그 형태가 변경되면 프로그램 내의 해당되는 부분을 수정해야 하는 번거로움이 있다. 따라서 변형예측식의 합당한 형태를 지정한 상태에서 가열선 정보 산출 프로그램 내에서 DB 자료를 입력하고 가장 적합한 변형예측식을 선정하는 기준에 의거하여 자동적으로 결정하여 가열선 정보 산출에 직접 이용하고자 하는 것이 본 연구의 목적이다. 이러한 전산시스템을 활용하면 실험이나 실제 곡면에 대한 가열 작업 후 자료가 DB에 누적되고, DB 누적에 따른 변형예측식을 가열선 정보 산출에 즉각적으로 반영할 수 있게 되어 보다 실질적인 예측식이 활용된다는 큰 이점이 있다. 만일 현

재의 프로그램에서 사용한 예측식 보다 더 나은 식의 형태가 개발된다면 그 형태로 교체하는 데에 큰 어려움이 없을 것이다.

선상가열로 인한 변형 예측식들은 지금까지 많은 연구를 통해 여러 연구자들이 제안한 바 있다^{3,4,6-8}. 그러한 예측식들은 실험 및 수치해석 결과를 토대로 잘 유도된 것이므로 어느 형태의 예측식이든 큰 무리 없이 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 제안된 식들 중에서 때로는 입열량이 영(zero)인데 수축량 또는 각 변형량이 영이 아닌 값을 주는 경우도 있다. 물론 그 예측식이 실제 선상가열이 이루어지는 범위 내에서는 합리적인 값을 줄 수는 있지만 이는 물리적으로 모순이 됨에 틀림이 없다. 여기에서는 물리적으로 모순이 없고 설사 선상가열이 실제로 이루어 지는 범위는 아니지만 이론적으로 존재할 수 있는 범위까지 반영할 수 있는 다음의 식(2)와 (3)을 횡수축(S_x)과 횡각변형(Φ_x) 예측식의 형태로 선정하였다.

$$S_x/t = c_1 q^{a_1} \tag{2}$$

$$\Phi_x = c_2 q^{a_2} \cdot e^{-a_3 q} \tag{3}$$

여기에서

$$q = \frac{q_{eff}}{t\sqrt{vt}} : \text{입열량 계수(Heat input parameter)} \tag{4}$$

v = 가열속도(mm/min)

t = 판의 두께(mm)

S_x = 횡수축(Transverse shrinkage in mm)

Φ_x = 횡각변형(Transverse angular distortion in rad.)

식(2)와 (3)은 용접으로 인한 변형 예측을 위해 기 제안된 예측식을 참고해서 설정한 것인데, 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 있는 점과 맥락을 같이 한다⁹.

식(2)와 (3)에 포함된 지수 a_1 , a_2 와 a_3 가 정해지면 미지계수 c_1 과 c_2 는 회귀분석법으로서 최소자승법을 단 한번 적용해서 결정할 수 있다. 그러나 회귀분석법에서 주어진 자료 점들(Data points)의 경향을 가장 잘 표현할 수 있는 지수 a_1 , a_2 와 a_3 의 값을 결정하기 위해서는 여러 번의 시행착오를 거치거나 그들의 적절한 범위를 설정하여 여러 경우에 대한 회귀분석결과를 토대로

$$Ratio = \frac{Measured\ value}{Estimated\ value} \quad (5)$$

로 정의되는 'Ratio'의 평균값이 1.0에 가깝고 COV (Coefficient of variation)가 가능한 작은 값을 갖는 지수 a_1 , a_2 와 a_3 의 값을 결정해야 한다. 식(5)에서 'Measured value'는 주어진 데이터인 계측 또는 수치해석 결과로서의 횡수축 또는 횡각변형이고 'Estimated value'는 현재 유도된 식으로 추정된 값이다. 어쨌든 지수 a_1 , a_2 와 a_3 의 값은 결국 사람의 주관적 판단에 의존해서 결정되므로 그 결과가 반영될 수 있도록 가열선 정보 산출 프로그램의 해당 부분을 수정해야 한다. 여기에서는 이러한 지수들의 결정 과정이 자동적으로 이루어지고 그 결과가 직접적으로 가열선 정보 산출 프로그램에 반영되도록 하기 위해 지수 a_1 , a_2 와 a_3 의 값을 식(5)로 정의되는 Ratio의 평균값이 1.0에 가깝고 COV가 가능한 작은 값을 갖아야 한다는 두 조건을 합리적으로 만족하도록 아래의 식(6)에서 계산된 인자 K의 값이 1.0에 가까운 것으로 결정하는 기준을 적용하였다.

$$K = \alpha W_{mean} + (1 - \alpha) W_{COV} \quad (6)$$

여기에서

$$W_{mean} = \begin{cases} \text{mean of ratio} & \text{for mean of ratio} \leq 1.0 \\ \frac{1}{\text{mean of ratio}} & \text{for mean of ratio} > 1.0 \end{cases} \quad (7)$$

$$W_{COV} = \frac{\min. COV}{COV \text{ of the particular case}}$$

이고, α 는 'Ratio의 mean'과 'Ratio의 COV'에 부여하는 가중치이다. 여기에서는 $\alpha = 0.5$ 으로 하여 Ratio의 평균과 COV에 같은 비중을 부여하였다.

3.3 변형예측식 결정 결과 및 검토

Table 2에 보인 4회의 실험(EXP-1A, 1B, 1C와 EXP-2)과 열탄소성 해석(FEAna)의 결과로서 횡수축과 횡각변형을 식(4)로 정의되는 입열량계수에 대해 보인 것이 각각 Fig. 10과 11과 같다. 횡수축의 경우 무차원화된 횡수축량 S_x/t 은 대체로 입열량 계수 q 에 비례하는 경향을 보이고 있고, 횡각변형 ϕ_x 의 경우 입열량 계수 q 가 약 60이 되는 범위까지 증가하다가 이 이후에는 감소하는 경향을 보이고 있다.

3.2절에서 기술한 변형예측식 자동 결정 과정에 따라 DB 자료의 축적에 따른 회귀분석결과로서 식(2)와

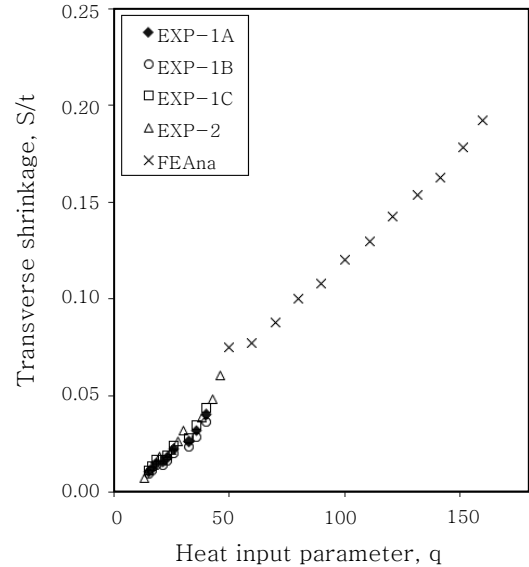


Fig. 10 Results of experiment and numerical analysis : transverse shrinkage

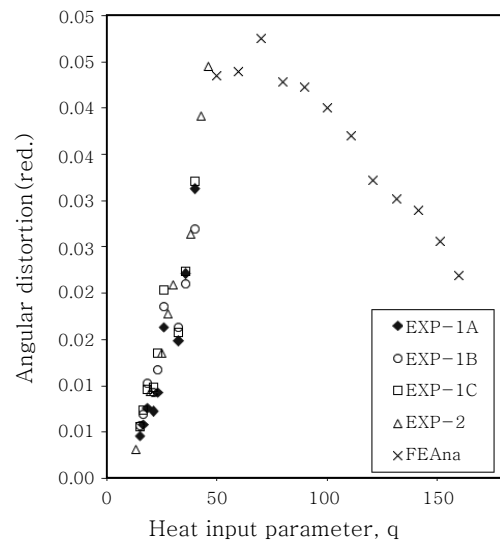


Fig. 11 Results of experiment and numerical analysis : transverse angular distortion

(3)에 포함된 미지계수 c_1 과 c_2 , 그리고 지수 a_1 , a_2 와 a_3 의 값을 Table 4와 5에 정리하였다. 여기에서 'mean'과 'COV'는 식(5)로 정의되는 Ratio의 평균과 COV이다. 또한 DB가 축적되는 각 단계별 횡수축과 횡각변형에 대한 변형예측식을 모든 데이터와 함께 표시한 그래프가 각각 Fig. 12와 13과 같다. Fig. 12에서 보듯이 DB 누적에 따라 횡수축에는 두드러진 차이를 보이고 있지 않으나, 수축량에서의 약간의 차이가 판 전체의 변형 결과에는 적지 않은 영향을 미친다는 점을 간과해서는 안될 것으로 판단된다. 한편, 횡각변형 예측 측면

Table 4 Results of regression analysis for transverse shrinkage when original data are used

	$c_1 (\times 10^{-3})$	a_1	mean	COV
1st DB	0.427895	1.212	1.031	0.145
2nd DB	0.338957	1.260	1.030	0.143
3rd DB	0.377470	1.238	1.021	0.134
4th DB	0.402133	1.226	1.020	0.146

Table 5 Results of regression analysis for angular distortion when original data are used

	$c_2 (\times 10^{-5})$	a_2	a_3	mean	COV
1st DB	0.491756	2.70	0.0336	1.000	0.126
2nd DB	0.920857	2.50	0.0308	0.997	0.149
3rd DB	1.10831	2.45	0.0304	0.997	0.157
4th DB	0.749324	2.60	0.0332	0.998	0.158

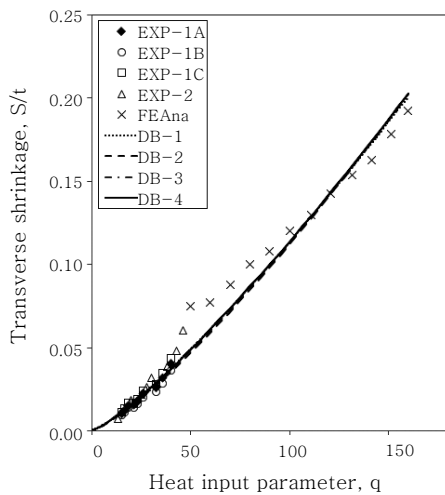


Fig. 12 Comparison of the deformation estimation equations with results of experiment and numerical analysis : transverse shrinkage

에서는 Fig. 13에서 보는 바와 같이 DB-2와 DB-3 사이에는 큰 차이를 보이고 있지 않지만 대체적으로 DB누적에 따라 두드러진 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다.

따라서 선상가열에서의 가열선의 위치 등 정보는 변형 예측식에 영향을 받는다는 점을 감안할 때 특정 장치의 변형특성을 나타내는 이러한 변형예측식들에 Data의 누적에 따른 결과가 반영될 수 있도록 변형예측식들이 자동적으로 정의되어 가열선 정보 산출에 활용되도록 하는 것이 곡가공 자동화 시스템 개발에서 중요한 의미가 있다고 말할 수 있다.

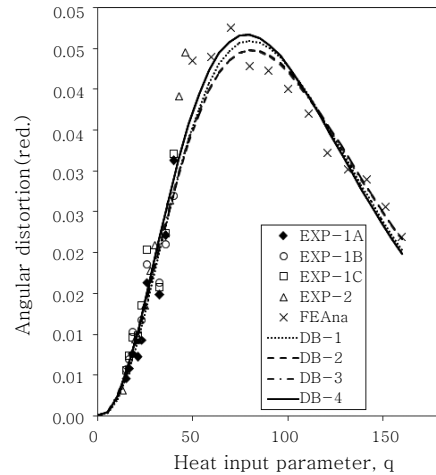


Fig. 13 Comparison of the deformation estimation equations with results of experiment and numerical analysis : transverse shrinkage

4. 결 론

본 연구에서는 곡가공 자동화 시스템의 핵심 과정인 가열선 정보 산출에 활용되는 변형 예측식을 Data 누적에 따라 자동적으로 정의하는 내용을 다루었다. 이를 위해 DB 누적을 위한 시스템을 구축하였고 또한 이를 활용하여 횡수축과 횡각변형 예측식이 자동적으로 결정하는 프로그램을 개발하였다. DB 구축을 위해 4회에 걸쳐서 선상가열 실험을 수행하였고, 선상가열실험이 실제적으로 불가능한 범위에 대해서는 상용 패키지를 사용한 열탄소성 해석을 수행하여 DB에 포함시켰다.

본 연구를 통해 구축한 DB와 이를 단계적으로 활용하여 자동적으로 정의되는 변형예측식들을 비교하였다.

본 연구의 결과에 따르면 DB 시스템에 Data가 누적됨에 따라 횡각변형은 외형상 두드러진 변화를 보였고, 횡수축에는 횡각변형 만큼 두드러진 변화를 보이고 있지는 않았다. 그러나 미미한 횡수축이 판 전체의 변형에 적지 않은 영향을 줄 수 있다는 점에서 Data의 누적에 따라 변형 예측식이 새로이 정의되어 가열선 정보 산출에 이용하도록 하는 것이 곡가공 자동화 시스템에서 중요한 의미가 있기 때문에 여기에서와 같이 변형에 대한 DB를 구축하여 자동적으로 활용하는 것이 보다 합리적인 방향이라고 판단된다.

추후에는 본 연구의 결과를 활용해서 DB 누적에 따른 변형예측식의 업데이트 결과가 가열선 정보 산출에 주는 영향에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로

로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2009-0077135).

참 고 문 헌

1. J.S. Lee : Plate Forming Automation System of Steel Plates by Line Heating Method(III), J. of the Society of Naval Architects of Korea, **34-2**(1997), 85-89 (in Korean)
2. C.D. Jang, Y.S. Ha, D.E. Ko and S.C. Moon : Determination of Inherent Strain Regions to Estimate Plate Deformation by Line Heating, J. of the Society of Naval Architects of Korea, **39-1**(2002), 82-89(in Korean)
3. K.Y. Bae, Y.S. Yang, C.M. Hyun and S.I. Cho : Development of Simplified Formulas to Predict Deformations in Plate Bending Process with Oxy-Propane Gas Flame, Journal of the Korean Welding & Joining Society, **25-2**(2007), 172-177 (in Korean)
4. J.S. Lee and D.Y. Lim : Thermal Deformation of Curved Plates by Line Heating, J. of Ocean Engineering and Technology, **19-1**(2005), 33-38 (in Korean)
5. J.S. Lee : Development of Numerical Control System for Plate Forming Automation, J. of Ocean Engineering and Technology, **17-1**(2003), 72-79 (in Korean)
6. J.Y. Lee and J.G. Shin : Relations between Input Parameters and Residual Deformation in Line Heating Process using Finite Element Analysis and Multi-Variate Analysis, J. of the Society of Naval Architects of Korea, **39-2**(2002), 69-80 (in Korean)
7. K.J. Sona, J.O. Yunb, Y.W. Kimc, Y.-S. Yangb, : Analysis of Angular Distortion in Line-Heating, International J. of Mechanical Sciences, **49**(2007) 1122 - 1129
8. T. Terasaki, K. Yamaguchi, T. Nomoto and T. Kitamura : Study on Transverse Shrinkage and Angular Distortion Generated by Line Heating, J. Society of Naval Architecture of Japan, **193**(2002), 65-74 (in Japanese)
9. J.S. Lee : A Study on the Accuracy Control of Panel Blocks, J. of Ocean Engineering and Technology, **18-1**(2004), 35-40 (in Korean)