

# 강판의 곡가공 자동화를 위한 수치제어 시스템의 개발

이주성\*

\*울산대학교 수송시스템공학부

## Development of Numerical Control System for Plate Forming Automation

JOO-SUNG LEE\*

\*School of Transportation Systems Engineering, Univ. of Ulsan, Ulsan, Korea

**KEY WORDS :** Automatic Heating Apparatus 자동가열장치, Heating Line Information 가열선 정보, Interface Program 인터페이스 프로그램, Multi-motion Controller 다운동제어기, Plate Forming Automation System 곡가공 자동화 시스템, Position Control 위치제어

**ABSTRACT :** This paper deals with the development of an interface program for automatic plate forming, which can exchange information between the heating line information generation program and the automatic heating apparatus. In this paper, the performance of the developed interface program has been verified from the view point of numerical position control. By applying the interface program to the operation of the automatic heating apparatus, an experiment of line heating has been conducted for several steel plate models. Based on the experimental results, a simplified relation to estimate angular distortion has been derived as a natural characteristic of the present automatic heating apparatus. As a result of the present study, the prototype of the automatic plate forming system has been constructed, and its application to the real surface models found in the ship will be presented in the near future.

### 1. 서 론

선박이나 해양구조물의 외판을 구성하는 곡면의 가공은 건조공정에서 상당히 중요한 위치를 차지하고 있다. 현재 토치를 이용해서 곡면을 성형하는 곡가공은 전체 성형가공 공정의 약 60% 이상을 차지하고 있는 만큼 이의 효율성 향상은 성형공정의 생산성과 직접적인 연관이 있다 (이주성, 1996).

곡가공 공정이 전체 건조공정에서 차지하는 비중이 큼에도 불구하고 다른 공정과 비교해 볼 때 그 작업과정은 지난 수십 년 간 크게 변화되지 않았고, 이 공정의 자동화에 국내외 모든 조선소에서 그 필요성을 절실히 인식하고 있으나 현재까지 실용화된 연구결과는 보고되지 않은 실정이다. 강판의 곡가공 자동화 시스템 구축에 있어서 우선적으로 선결되어야 할 중요한 부분은 소프트웨어 측면에서는 가열선 정보 (heating line information)를 자동으로 생성할 수 있는 알고리즘과 이에 의거한 전산시스템의 개발이고, 하드웨어 측면에서는 현재 수작업으로 이루어지는 가열작업을 대체할 수 있는 자동가열장치를 고안하는 것 그리고 또 하나의 소프트웨어로서 가열선 정보의 자동 생성 프로그램의 결과를 자동가열장치에서 구현할 수 있는 제어 프로그램을 개발하는 것이 필요하다.

가열선 정보를 자동적으로 산출하는 소프트웨어에 대해서는 선상가열 시뮬레이터 (신종계, 1992; 이주성, 1999)의 개발을 포함해서 지난 수 년간의 연구를 통해 실제에 적용 가능성이

있는 소프트웨어가 개발된 바 있다 (고대은 등, 1999; 신종계, 1992; 이박인 등, 2002; 이주성, 1996, 1997).

하드웨어인 자동가열장치에 대해서도 물론 고주파 유도가열장치(장창두, 2002)와 같이 가스 토치를 대체할 수 있는 부분에 대한 연구와 함께 몇몇 대학과 연구기관에서 개발하여 가열선 정보 생성시스템과 연계한 시도를 한 바 있으나, 실용화에 이르지 못하는 못하였다. 본 논문에서는 본 연구팀에 의해 지금까지 개발하여 구축된 곡가공 자동화 시스템의 구성 요소들을 기술하였으며, 특히 하드웨어인 자동가열장치를 구동하고, 소프트웨어인 가열선 정보 생성 프로그램과의 정보교환을 위해 본 연구에서 개발한 인터페이스 프로그램 (interface program)과 그 적용에 대해 다루었다. 한편, 하드웨어인 자동가열장치의 고유한 특성으로서 가열선의 법선 방향으로의 각변형, 즉 횡가변형에 대한 간이에측식을 본 연구를 통해 개발한 인터페이스 프로그램을 적용하여 다수의 강판에 대한 실험결과를 토대로 유도하였다.

### 2. 강판의 곡가공 자동화 시스템의 구성요소

강판의 곡가공 자동화 시스템을 구축하기 위해서는 소프트웨어와 하드웨어로서 크게

- 가열선 정보 생성 프로그램
- 변위계측장비를 포함한 자동가열장치
- 가열선정보 생성 프로그램과 자동가열장치 사이의 정보 교환을 위한 인터페이스 프로그램

등으로 구성된다. 본 연구팀에서 개발한 자동화 시스템을 구성하는 위 세 부분 사이의 상관관계를 Fig.1에 표시하였고, 이들

제1저자 이주성 연락처 : 울산광역시 남구 무거동 산 29번지 052-259-2162 jslee2@mail.ulsan.ac.kr

에 대해 간략히 기술하면 아래와 같다.

(1.) 가열선 정보 생성 프로그램

가공할 곡면과 현재까지 성형된 곡면을 비교하여 가열선 정보로서 가열선의 위치와 가열속도를 산출하며 또한 변위계측을 위한 격자 점의 좌표 등 자동가열장치의 구동에 필요한 정보를 인터페이스 프로그램에 전달하는 역할을 하는 부분이다. 또한 변위계측 결과 등 인터페이스 프로그램을 통해 데이터베이스화된 자료를 입력하여 성형공정에 필요한 정보를 산출하는 부분도 포함된다.

(2.) 자동가열장치

이에는 가열장치 뿐만 아니라 변위 및 온도계측장비를 포함하는 부분으로서, 가열선 정보 생성 프로그램에서 제공되고 인터페이스 프로그램을 거쳐서 변환된 위치제어 데이터에 따라 필요한 위치에서의 변위 및 온도를 계측하고 가열장치를 구동하여 성형공정을 시행하는 하드웨어 부분이다. 본 연구진이 자체 설계하여 제작한 자동가열장치를 Fig.2에 보였는데,

- main frame
- control PC system
- model bed
- 가스, 산소 공급장치를 포함한 가열부
- 변위계측장치
- 온도계측장치
- 기타 부수적인 장치

등으로 구성되어 있다. 주 프레임은 3차원 프레임 형태이고, x, y 및 z 방향으로 각각 1개씩 3개의 모터로 구동되며 동력은 볼 스크루 축을 통해 전달된다. Fig.3에 동력전달 부분을 보였다.

구동모터는 인터페이스 프로그램에서 제공된 정보를 받아 MMC (multi-motion controller) board를 통해 제어된다. 온도 지측은 레이저 온도계측장치로 이루어지는데 Table 1에 그 사양을 표시하였고, 변위계측장치는 비접촉식 레이저 센서로서 Table 2에 그 사양을 표시하였다. 본 자동가열장치의 xy 평면에서의 이동범위와 최대 이동속도가 Table 3과 같고, 가공이 가능한 최대

장판의 크기는 가로×세로=2,300×1,200mm 이다.

(3) 인터페이스 프로그램

인터페이스 프로그램은 가열선 정보 생성 프로그램으로부터 전달받은 변위계측점의 좌표와 가열선 정보(가열선의 위치와 가열 속도)를 위치제어를 위한 데이터로 변환하여 변위계측이나 성형공정을 시연하는 등 자동가열장치를 구동하는 역할과, 계측된 변위와 온도를 가열선 정보 생성 프로그램에서 활용할 수 있는 데이터의 형태로 변환하는 역할을 하는 부분이다. 즉, 가열선 정보 생성 프로그램과 자동가열장치 사이의 가교 역할을 하는 부분으로 제3절에서 자세히 기술하였다.

Table 1 Specification of portable IR thermometer

Item	Specification
Accuracy	±0.5% of rdg +1℃/2℉
Thermocouple measuring range	up to 1760℃
Resolution	-0.1℃

Table 2 Specification of displacement measuring apparatus

Item	Specification
Operating temperature	-0 to +40℃
Measure range	200mm
Clearance	160mm
Accuracy	max. ±0.5mm

Table 3 Moving range and maximum moving speed of the present heating apparatus

axis	moving range (mm)	max. speed (mm/sec)
x	2,420	140
y	1,350	120
z	420	90

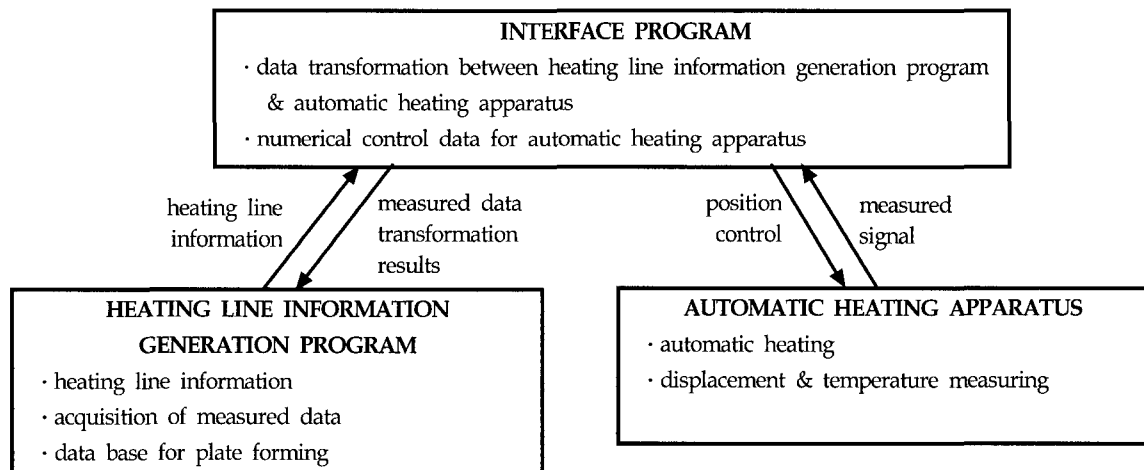


Fig. 1 Correlation between elements of the present automatic plate forming system

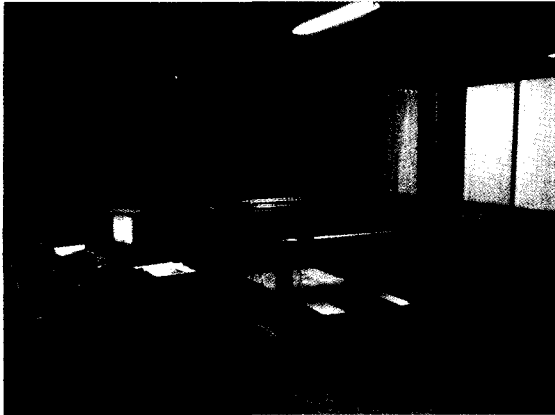


Fig. 2 Automatic heating apparatus



Fig. 3 Power transmission part (x-axis)

### 3. 인터페이스 프로그램

인터페이스 프로그램은 가열선 정보자동생성프로그램에서 생성된 가열위치, 가열속도 등과 같은 가열선 정보를 수치제어를 위한 데이터로 변환 후 이를 자동가열장치를 제어하기 위한 신호로 변환하여 전송해주는 역할과 온도계측장치와 자동가열장치에 부착된 변위계측장치로 계측한 데이터들을 가열선 정보 자동생성프로그램으로 전송해주는 역할을 하는 프로그램 그리고 곡면 모델의 기하학적 특성치, 변형형상, 온도 및 가열선 정보와 가열조건 등에 대한 자료를 모델별로 저장하여 향후 이용할 수 있도록 데이터 베이스화 하는 프로그램 부분으로 구성된다.

#### 3-1 위치제어

인터페이스 프로그램이 갖는 기능 중 하나로 Fig.2에 보인 자동가열장치의 구동과 가열 전후 격자 점에서의 변위 및 가열선에 따른 변위계측을 위한 부분이다. 실제 현장에서의 성형공정을 구현하기 위해서는 Torch tip과 강판의 표면 사이의 일정한 거리와 수직을 유지하도록 해야 하며 이를 구현하기 위해서는 5축 제어가 필요하다. 그러나 이를 위한 기구의 구성이 용이하지 않고, 선수의 Fashion plate처럼 곡률이 큰 곡면이 아니라

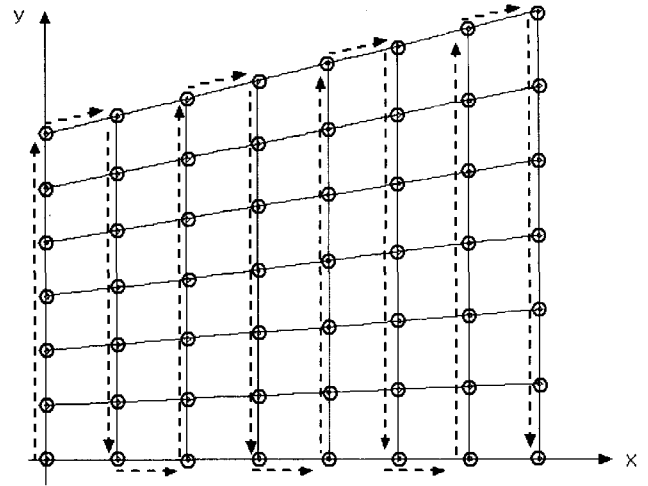


Fig. 4 Moving path for displacement measuring

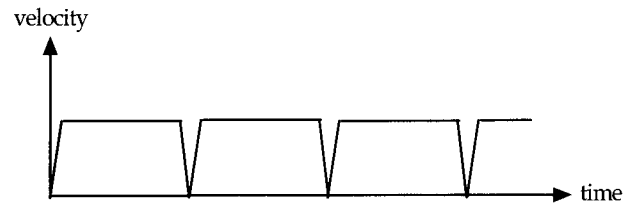


Fig. 5 Trapezoidal shape acceleration mode

비교적 곡률이 크지 않은 곡면을 대상으로 한다면 토치 팁과 강판의 표면사이 일정한 거리를 유지하도록 상하방향으로의 이동만 제어해도 충분할 것으로 판단되어 본 연구에서는 이를 포함한 x와 y축 방향의 이동을 제어하는 3축 제어를 하도록 제어 프로그램을 구성하였다. 제어를 위한 Panel로는 MMC board에 내장된 제어함수를 사용하였고 컴퓨터 언어로는 C++을 이용하여 제어 프로그램을 개발하였다. 가열 전 강판의 형상을 인식하거나 가열 후 변형량을 계측하는 데 효율을 높이기 위해 Fig.4에 보인 것처럼 격자 점들을 Zig-zag로 이동하면서 계측할 수 있도록 하였다. 변위를 계측하는 격자 점에 대한 데이터는 가열선 정보 생성 프로그램에서 제공받는다. 가열선 정보 생성 프로그램에서 제공되는 가열선 위치에 대한 데이터로부터 가열선에 따라 다수의 점에서 변위를 계측하고 이를 이용하여 토치 팁이 강판의 표면과 일정한 거리를 유지하도록 하였다. 어느 점에서 다른 한 점으로 이동시 가·감속은 Fig.5에 보인 대칭형 사다리꼴 형식에 따랐다. 이 경우 변위를 계측할 때에는 문제가 되지 않으나 가열 시에는 강판과 Torch tip 사이의 거리를 일정하게 유지하도록 제어하기 위해 가열선 상의 점을 따라 이동하기 때문에 중간 이동 점에서 순간적으로 정지 후 가속에 따른 부분적인 점가열 (spot heating)이 발생할 수 있다. 그러나 본 연구의 가열장치를 이용한 실험결과에 의하면 그 영향은 무시할 수 있을 정도였다.

#### 3-2 데이터 베이스화

인터페이스 프로그램의 데이터 베이스화 부분 선상가열의

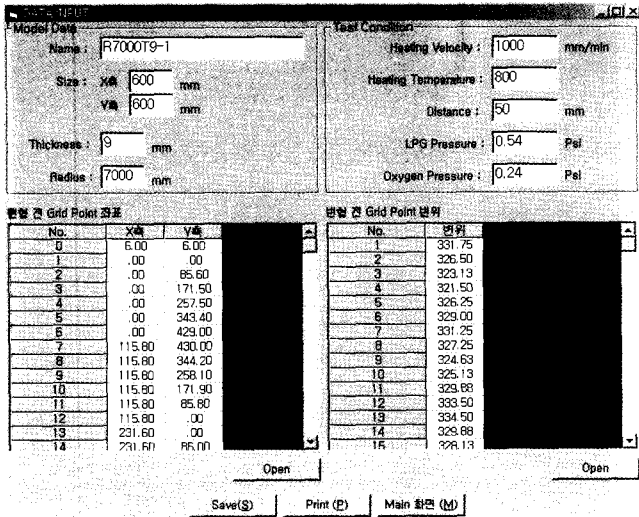


Fig. 6 Window for inputting data of model

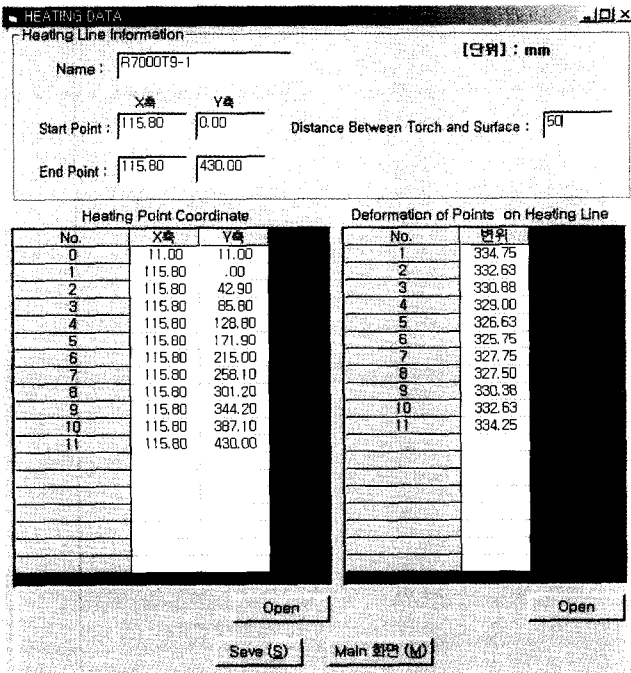


Fig. 7 Window for saving the measured result of model

결과를 저장하는 것으로서 곡면모델의 이름, 두께와 재료적 특성치 등 기본적인 정보와 함께 가열선의 위치와 가열선에 따른 변위계측결과, 가열 전후 격자 점에서 계측된 변위 등을 DB화하여 변형량에 대한 간이에측식의 개선이나 곡률의 분포가 유사한 곡면모델의 경우 가열선 정보를 효과적으로 생성하는 데 등에 활용할 수 있도록 개발한 프로그램 부분이다.

이 과정을 거치면 어느 곡면의 성형과정에 따른 정보가 엑셀 파일의 형식으로 저장되고 이는 가열선 정보 생성 프로그램에서 향후 활용된다. Fig.6과 7에 이에 대한 예를 보였다.

### 3-3 제어 성능 평가

곡가공 자동화 시스템의 구성요소 중 가열선 정보 생성 프

그램과 자동가열장치 사이의 정보를 호환하고 자동가열장치의 구동을 위해 위치제어를 수행하는 인터페이스 프로그램의 개발이 본 연구의 주된 내용 중 하나이다. 이 프로그램의 기능 중 하나인 데이터 베이스화 부분의 합당성은 3.2절에서의 예시를 통해 보인 것으로 생각되어 본 절에서는 여기에서 개발한 프로그램 중 위치제어 부분의 합당성을 보이기 위해 위치제어 정보에 따라 자동가열장치가 계획한 성능을 발휘하는가를 평가하였다. 이를 위해 다양한 이동거리와 속도에 대한 자료를 입력하여 실험을 수행하였고, 그 결과를 Table 4에 정리하였다. 이 표에서의 숫자들은 입력한 값에 대한 실제 구동되었을 때 계측한 값의 비율로서 표시한 것이다. 이동거리에 대한 제어의 오차는 x와 y 방향 모두에 대해서는 거의 오차가 없었다. 한편 속도에 대한 제어는 모든 경우에 대해 입력한 값보다 계측한 값이 작으며 최대 약1.5%까지 오차가 발생하여 이동거리에 대한 제어에 비해 상대적으로 크다. 이는 가·감속에 의한 영향과 함께 본 자동가열장치의 가열부에서 가스, 산소 및 냉각수를 공급하는 호스들의 영향 때문으로 보여지며, 성능평가시 목적 결과의 오차도 영향을 주었을 것으로 판단된다. 그러나 이러한 오차의 원인들을 보완하고 추가의 성능평가를 시행하여 그 결과를 토대로 제어 프로그램에 포함된 속도 제어와 관련된 상수들의 값을 보정해 주면 이러한 오차는 대폭 감소시킬 수 있을 것으로 보인다.

이상의 평가 결과로부터 위치제어에 대한 성능은 만족할만하다고 말할 수 있다.

## 4. 자동가열장치의 각변형 특성

선상가열의 결과로서 발생하는 변형형상은 Fig.8에 보인 것처럼 가열선에 법선 방향으로의 수축과 각변형인 횡수축과 횡각변형 그리고 가열선에 평행한 방향으로의 수축과 각변형인 종수축과 종각변형이다. 강판의 곡가공에 있어서 중요한 사항은 어느 위치를 얼마의 가열속도로 가열했을 때 어느 정도의 변형이 발생하느냐에 관한 자료이다. 이에 관해서는 각 조선소마다 축적된 경험을 토대로 작성된 지침서가 있으나 작업환경이나 작업자의 작업방법과 기술 등에 따라 선상가열의 결과가 달라지기 때문에 작업자의 경험과 감각에 전적으로 의존할 수밖에 없다. 한편, 수작업을 대신할 기계적인 가열장치가 있다 하더라도 장치의 형상, 구동 및 제어방법이 다르고 또한 열원의 종류, 열원이 가스인 경우 가스와 산소의 압력, 토치 팁과 강판 표면사이의 거리, 냉각방법 등 선상가열의 결과에 영향을 주는 인자들이 많고 작업환경과 방법에 따라 동일한 조건 하에서도 입열량이 달라지기 때문에 다른 연구자에 의해 제안된 간이에측식을 가열선 정보 생성 프로그램에서 그대로 사용하는 것은 합당치 않다. 또한, 선상가열 실험이나 수치해석결과를 토대로 유도한 기존의 간이에측식들은 열원의 종류, 냉각방법 등 실험조건에 차이가 있기 때문에 이를 직접적으로 활용하는 것에는 문제가 있다. 따라서 변형량에 대한 간이에측식은 자동가열장치라는 하드웨어의 고유한 특성으로 간주하여 실험결과를 토대로 이를 유도하고 그 결과를 가열선 정보 생성 프로그램에서 활용하는 것이 바람직할 것이다.

**Table 4** Result of position control test for automatic heating apparatus  
(1) x-axis direction

Moving distance (mm)	item	Speed (mm/min)				
		400	600	800	1,000	1,200
600	distance ratio	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	speed ratio	0.991	0.992	0.992	0.992	0.991
800	distance ratio	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	speed ratio	0.991	0.992	0.992	0.992	0.992
1,000	distance ratio	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	speed ratio	0.991	0.992	0.992	0.992	0.991
1,200	distance ratio	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	speed ratio	0.991	0.992	0.992	0.992	0.991
1,600	distance ratio	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	speed ratio	0.991	0.992	0.992	0.992	0.991

(2) y-axis direction

Moving distance (mm)	ratio	Speed (mm/min)				
		400	600	800	1,000	1,200
400	distance ratio	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	speed ratio	0.997	0.987	0.993	0.986	0.986
550	distance ratio	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	speed ratio	0.999	0.999	0.999	0.995	0.987
600	distance ratio	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	speed ratio	0.999	0.998	0.997	0.997	0.999
650	distance ratio	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	speed ratio	0.999	0.998	0.997	0.999	0.999

[note] ratio = (measured value) / (input value)

전술한 바와 같이 선상가열로 인한 변형은 가열선에 법선 및 평행한 방향으로의 수축과 각변형으로 네 종류가 있으나 이 중에서 가열선에 법선 방향으로의 각변형인 횡각변형이 지배적이므로 여기에서는 이 변형형태 만을 다루었다. 이와 같은 배경에서 이 절에서는 본 연구의 자동가열장치를 이용하여 다수의 강판에 대해 실험을 수행하였고 그 결과를 토대로 횡각변형에 대한 간이예측식을 유도하여 가열선 정보 생성 프로그램에서 활용하고자 한다.

#### 4-1 선상가열 실험

실험에 사용한 강판은 가로×세로 = 600×600mm인 연강판으로 두께가  $t = 9, 12, 15, 18\text{mm}$ 이다. 두께별로 각각 2개 강판으로 판의 수는 8개이나 Fig.9에 표시한 것처럼 y축에 평행한 세 위치를 가열하는 실험을 하여 실험모델은 모두 24개이다. 같은 그림에 변위를 계측하는 격자 점의 위치를 표시하였다. 실험모델의 두께, 가열속도와 가열전 가열선의 곡률 반경을 Table 5에 정리하였다. 열원의 종류, 가스와 산소의 압력, 토치 팁과 강판표면 사이의 거리 및 냉각법 등 실험조건을 Table 6에 열거하였으며, 모든 실험모델에 대해 동일한 조건 하에서 실험을 수행하였다.

본 연구팀이 구축한 곡가공 자동화 시스템은 Fig.1에 보인 것처럼 가열선 정보 생성 프로그램에서 산출되는 가열선 정보

인 가열 위치와 가열속도를 인터페이스 프로그램에서 입력하고 이를 위치제어를 위한 신호로 변환하여 자동가열장치에 전달하는 과정을 거치지만, 여기에서는 어떤 곡면을 가공하는 것이 아니므로 가열위치와 가열속도를 인터페이스 프로그램에 직접 입력하여 실험을 수행하였다. 가열 전후의 변위는 Fig.10에 보인 바와 같이 변위계측장치가 설치된 기준평면(reference plane)에서 강판의 표면까지의 거리를 측정하였으며 따라서 그 차이가 선상가열로 인한 변형량이 된다. 전술한 바와 같이 가열선에 따라 계측한 변위는 토치 팁과 강판 표면사이의 거리를 일정하게 유지하도록 제어하는데 사용하는 데, 이는 가열선에 따른 곡률 (또는 곡률 반경)을 구하는 데에도 사용한다. Table 5에 표시된 곡률 반경은 이 결과를 이용하여 구한 가열선에 따른 평균 곡률 반경이다.

본 실험에서는 강판의 마주보는 변에 지지대를 설치하여 실험을 수행함으로써 실제 현장에서의 작업방법을 구현하였다. Fig.11은 실험장면을 보여준다. 실험결과로서 Table 5에 보인 24개의 실험모델 중 판 두께가  $t = 12$ 와  $18\text{mm}$ 이고 중앙부를 가열한 경우 가열선에 법선 방향 (x 방향)과 평행한 방향 (y 방향)으로의 변형량을 각각 Fig.12와 13에 각각 보였다. 이론상으로는 가열선을 중심으로 변형형상이 좌우 대칭이고 어느 y 위치에서든 x 방향으로 동일한 변형 즉, 어느 x 위치에서 y 방향으로 동일한 변형이 발생해야 하나, 결과 그림에서 보듯이 이론적으로

예상한 것과는 차이를 보이고 있다. 이러한 차이는 여러 원인에서 기인할 수 있는데, 가열선 방향으로 불균일하게 분포한 곡률과 이로 인한 냉각수의 흐름방향이 영향을 주었을 것으로 보이며 변위계측장치의 계측 오차 (최대 ±0.5mm, Table 2 참고)도 한 몫을 했을 것으로 보인다. 여기에서는 하나의 실험에 대해 Fig.12, 13과 같이 계측된 변형량의 평균을 취하여 각 변형량을 구하였다. 이러한 실험의 목적은 선상가열의 영향인자들과 각 변형량 사이의 관계를 도출하려는 것이고 변형량이 어느 것의 함수로 정의하느냐에 따라 식의 형태가 달라지게 된다. 기존의 연구결과에 의하면 (예 : Tsuji & Okumura,1975 ; 이박인 등, 2002 ; 이장현 등,2002) 각 변형은 속도와 판의 두께에 반비례하고 입열량에 비례한다. 한편 입열량은 용접과는 달리 실험 또는 작업환경에 따라 차이가 있을 수 있고, Tsuji & Okumura(1975) 및 이광열(1998)의 연구에 의하면 그 영향은 크지는 않지만 가열속도에 비례한다. 이러한 점들을 고려하여 본 연구에서는 입열량 계수를

$$q = \frac{\eta}{t \cdot v} \quad (1)$$

와 같이 정의하였다. 여기에서 t와 v는 각각 판의 두께와 가열 속도이고, η는 열효율로서 기존의 연구결과 (Tsuji & Okumura, 1975)를 참조하여 아래의 식(2)와 같이 정의하였다.

$$\eta = 0.507 + 0.000183 \cdot v \quad (2)$$

열효율 η와 함께 식(1)로 입열량 계수를 정의하면 4.2절에서 기술한 각 변형에 대한 간이에측식에 입열량의 개념을 함축적으로 포함시킬 수 있기 때문에 입열량에 대해 별도로 정의할 필요가 없다. Fig.14는 실험결과를 이렇게 정의된 입열량 계수와 횡각변형량 사이의 관계를 도식적으로 표현한 것으로서 실선은 Excel로 표현한 추세선이고, 이는 다음절에서 횡각변형에 대한 간이에측식을 도출하는 데 참고로 활용된다.

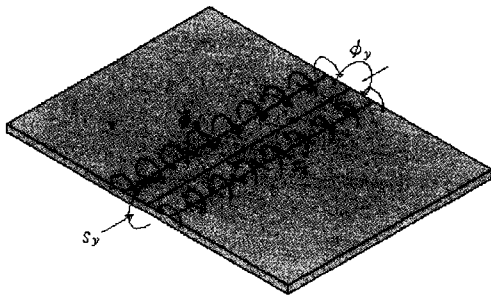


Fig. 8 Deformation types due to line heating

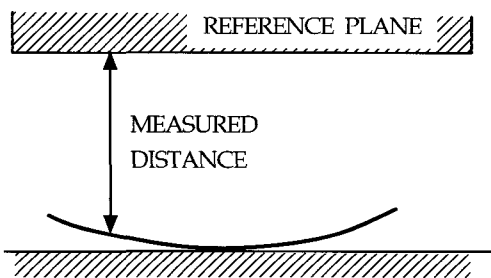


Fig. 10 Displacement measuring

Table 5 Experiment models

model name	item	radius of curvature (mm)	thickness (mm)	heating speed (mm/min)
T9-1		3,175	9	800
T9-2		7,080	9	700
T9-3		8,274	9	600
T9-4		6,149	9	800
T9-5		6,232	9	700
T9-6		6,493	9	600
T12-1		10,812	12	700
T12-2		15,692	12	600
T12-3		19,752	12	500
T12-4		13,520	12	700
T12-5		7,410	12	600
T12-6		5,216	12	500
T15-1		12,259	15	600
T15-2		15,015	15	550
T15-3		20,443	15	500
T15-4		4,567	15	700
T15-5		3,418	15	550
T15-6		3,327	15	500
T18-1		10,865	18	300
T18-2		4,020	18	350
T18-3		3,422	18	250
T18-4		5,291	18	550
T18-5		6,426	18	500
T18-6		6,988	18	450

Table 6 Condition of experiment

heat source	LPG
oxygen pressure	6 kgf/cm <sup>2</sup>
LPG pressure	1.58 kgf/cm <sup>2</sup>
distance between torch tip and plate surface	50mm
cooling method	water cooling

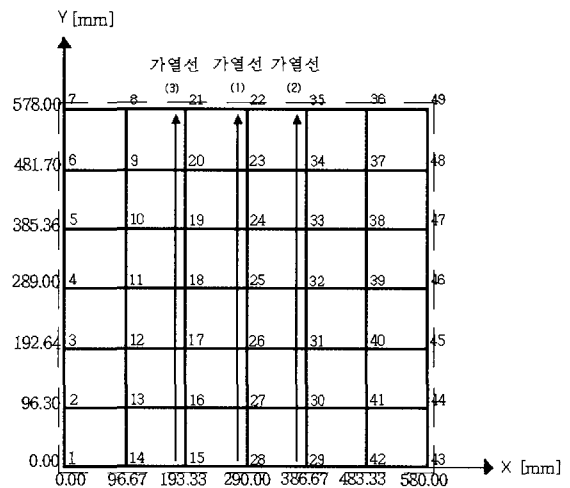


Fig. 9 Heating lines and grid points

4-2 횡각변형에 대한 간이에측식

본 연구의 실험결과를 도식적으로 표현한 Fig.14를 참고하면 각변형량은 식(1)로 정의된 입열량계수의 지수함수로 표현될 수 있는 것을 볼 수 있다. 여기에서는 이 점을 감안하고 가열선에 따른 곡률의 영향을 고려할 수 있도록 각변형량  $\phi_x$ 에 대한 간이에측식을 아래와 같은 형태로 정의하였다. 실험결과 (Fig.14)에 회귀분석법을 적용하면 각변형에 대한 간이에측식이

$$\phi_x = 0.003463e^{1826q} (1 - e^{-0.0885\rho^{0.5104}}) \text{ [rad]} \quad (5)$$

와 같이 유도된다. 실험결과와 식(5)로 추정된 각변형량사이의 관계를 Fig.15에 보였고, 각변형의 비를

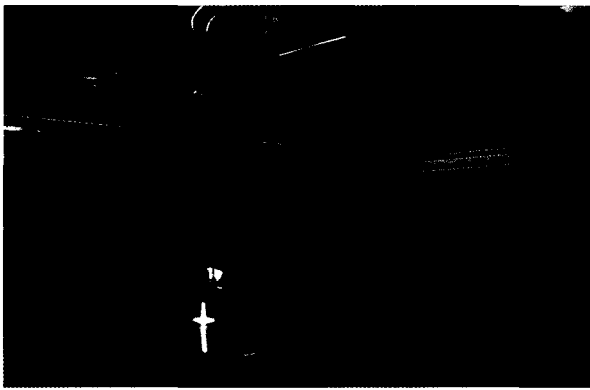
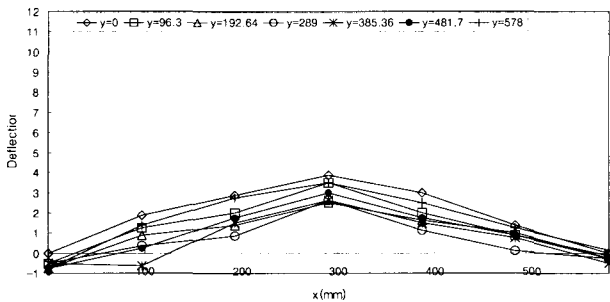
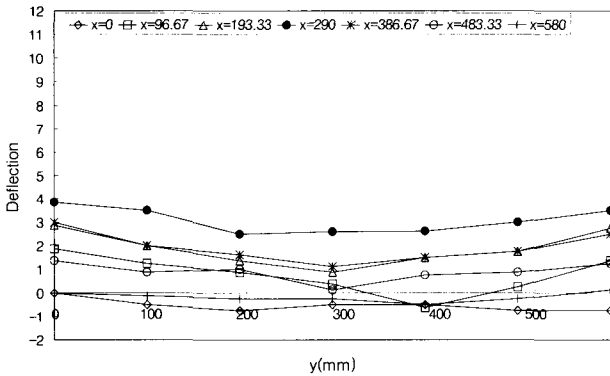


Fig. 11 Line heating experiment



(a) in x direction



(b) in y direction

Fig. 12 Deformation in x- and y-direction of model T12-1

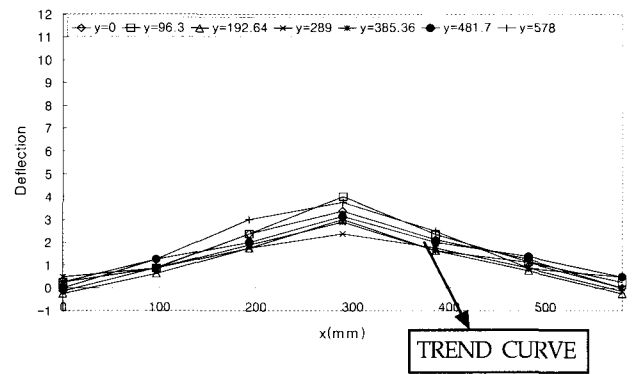
$$\phi_x = c_1 e^{a_1 q} (1 - e^{-a_2 \rho^{a_3}}) \quad (3)$$

$$z = \frac{\phi_x \text{ by experiment}}{\phi_x \text{ by Eq. (5)}} \quad (6)$$

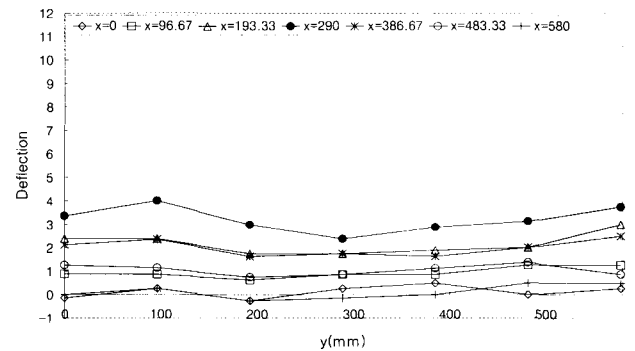
이 식의 두 번째 항인

$$F(\rho) = (1 - e^{-a_2 \rho^{a_3}}) \quad (4)$$

는 가열선에 따른 곡률의 영향을 반영하는 항으로써 가열전 곡률 반경이  $\rho=0$ 일 때,  $F(\rho)=0$ 이고,  $\rho=\infty$ 일 때,  $F(\rho)=1$  라는 조건을 만족하는 함수이다.



(a) in x direction



(b) in y direction

Fig. 13 Deformation in x- and y-direction of model T18-1

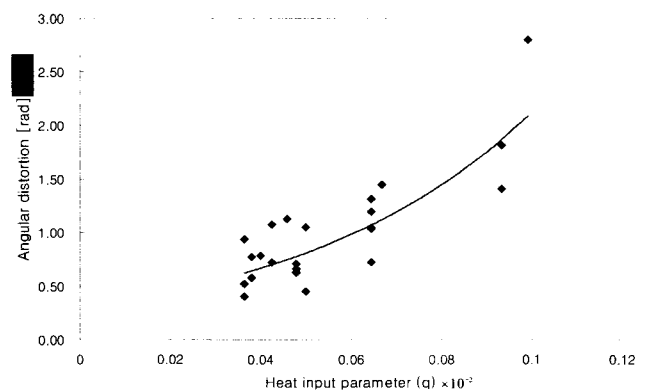


Fig. 14 Relation between angular distortion and heat input parameter

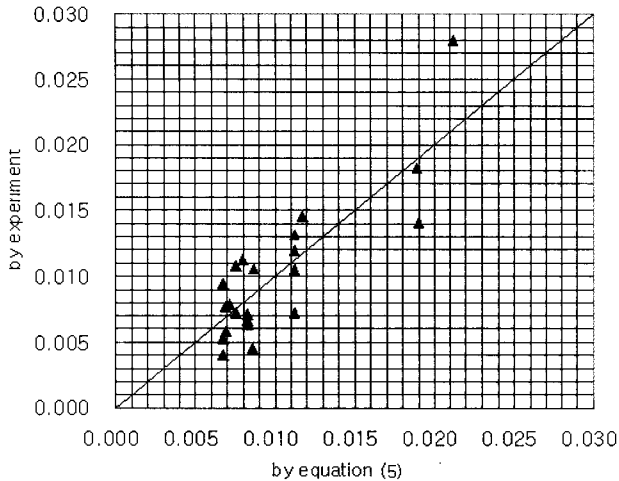


Fig. 15 Comparison between experimental results and the estimated value by Eq.(5)

로 정의할 때, 24개의 실험모델에 대한  $z$ 의 평균과 COV (coefficient of variation)의 값은 각각 0.9821과 0.2699이다. 식 (6)으로 정의된 비  $z$ 의 평균은 1.0에 가까우나 COV는 27% 정도로 분산의 정도가 비교적 크다고 볼 수 있다. 그러나 더 많은 실험을 통한 결과를 토대로 식(3)에 포함된 계수들인  $c_1$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  및  $a_3$ 을 수정하면 분산의 정도가 낮은 보다 개선된 간이에측식을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

### 5. 결 언

본 논문에서는 강판의 곡가공 자동화 시스템 구축을 위해 소프트웨어로서 기존의 가열선 정보 생성 프로그램과 하드웨어로서 자동가열장치사이의 정보를 교환할 수 있도록 하는 인터페이스 프로그램의 개발과 그 적용에 대해 다루었다. 여기에서 개발한 인터페이스 프로그램은 가열선 정보 생성 프로그램에서 산출되는 가열선 정보를 자동가열장치의 위치제어를 위한 신호로 변환하는 부분과 자동가열장치에 포함된 변위 및 온도계측 결과를 가열선 정보 생성 프로그램에서 활용할 수 있도록 데이터 베이스화하는 것으로 두 가지 주된 역할을 하는 것이다. 이 프로그램을 이용하여 성능을 평가한 결과 개선의 여지는 있지만 만족할 제어능력이 있음을 확인하였다. 한편, 본 연구를 통해 개발한 인터페이스 프로그램을 적용하여 다수의 강판에 대한 실험결과를 토대로 횡각변형에 대한 간이에측식을 하드웨어인 자동가열장치의 고유한 특성으로서 유도하였다.

본 연구의 결과로서 곡가공 자동화를 위한 전체 시스템이 구축되었다. 이를 실제 곡면모델에 적용한 결과 그리고 부수적인 결과로서 변형량 추정을 위한 간이에측식이 개선되는 것 등에 대해서는 추가의 연구를 통해 발표할 예정이다. 여기에서 기술한 강판의 자동화 시스템 구축을 위한 인터페이스 프로그램의 개발에 관한 내용은 이와 유사한 연구 수행이 참고 자료가 될 수 있을 것으로 생각된다.

### 후 기

본 연구는 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.

신종계 (1992). "선상가열에 의한 평판가공 Simulator 연구", 대한조선학회논문집, 제29권, 제1호, pp 191-200.

이광열 (1998). "삼각가열에 의한 강판의 곡가공에 관한 연구", 울산대학교 공학석사학위논문.

이박인, 류희승, 변구근, 김학근(2002). "열강가공에 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 (1996). "선상가열법에 의한 강판의 곡가공 자동화 시스템 (II)", 대한조선학회논문집, 제33권, 제3호, pp 81-93.

이주성 (1997). "선상가열법에 의한 강판의 곡가공 자동화 시스템 (III)", 대한조선학회논문집 제34권, 제2호, pp 85-89.

이주성 (1999). "강판의 곡가공 시뮬레이션을 위한 전산시스템 개발", 한국해양공학회지, 제13권, 제1호, pp 79-87.

장장두 (2002). "고주파유도가열에 의한 선상가열 시뮬레이션", 한국해양공학회지, 제16권, 제6호, pp 55-59

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

Tsuji, I. and Okumura, Y. (1975). "A study on line heating process for plate bending of ship steels", 일본서부조선학회지, 제76호, pp 149-160.

2003년 1월 2일 원고 접수

2003년 2월 8일 최종 수정본 채택