

## 강판의 곡가공 시뮬레이션을 위한 전산시스템 개발

이 주 성\*

(98년 9월 25일 접수)

### Development of Software System for Plate Forming Simulation

Joo-Sung Lee\*

**Key Words** : Plate forming (곡가공), Mechanical modelling (역학적 모델링), Line heating simulator (선상가열 시뮬레이터), Bending deformation (굽힘변형), Program module (프로그램 모듈), GUI (Graphic User Interface)

#### Abstract

As it is well appreciated plate forming by line heating takes an important role in ship production process. This paper deals with the development of line heating simulator which can produce the resultant deformation due to line heating in a few minute and with which user can see the result graphically. For the present purpose mechanical modelling is adopted which can explicitly represent the physical resultant of line heating. In developing the present line heating simulator several program modules are integrated by adopting GUI concept such that the simulator can produce resultant deformation with keeping high accuracy. Application example is illustrated for the twisted shape surface which can be frequently seen in ship and offshore structures.

#### 1. 서론

강판의 곡가공 (plate forming)은 선박해양구조물의 건조공정에서 중요한 위치를 차지하고 있다. 강판의 곡가공은 가공할 곡면의 기하학적 특성에 따라 프레스를 이용하는 순수한 냉간가공 (cold forming), 1차 냉간가공 후 선상가열법 (line heating method)에 의한 열 가공 (heating forming) 그리고 선상가

열법에 의한 순수한 열 가공으로 분류할 수 있다. 이와 같은 가공법은 곡면의 형상에 따라 그 적용하는 방법이 달라진다. 어느 한 방향으로 곡률이 일정하거나 곡률의 변화가 완만한 곡면의 경우는 프레스를 이용하는 냉간가공 만으로도 원하는 곡면형상을 가공할 수 있는 반면에, 두 방향으로 곡률이 변하는 경우에 냉간 가공만으로는 원하는 곡면형상을 가공할 수 없기 때문에 대개 냉간 가공

\* 정회원, 울산대학교 수송시스템공학부

과 열 가공을 혼합하는 방법을 이용해서 성형해야 한다. 실제 선박에서 열 가공을 이용하여 곡면을 가공하는 경우는 전체 곡면의 약 60% 이상을 차지하고 있는 만큼 선상가열법에 의한 열 가공 공정의 효율성 향상이 이 공정의 생산성과 직결되어 있고 또한 이는 선박의 전체건조공정에도 영향을 주게 된다.

현재 국내외의 모든 조선소에서 열 가공은 가스 토치를 이용하는 선상가열법으로 곡면을 가공하고 있다. 선상가열법을 이용한 강판의 곡가공은 이론적인 측면에서는 열탄소성 문제에 속하는 것으로서 복잡한 역학적 문제이나, 이 공정은 국내외의 모든 조선소에서 아직도 작업자의 경험과 감각에 전적으로 의존하고 있는 실정이다. 곡가공 공정은 전형적인 3D 작업으로서 최근 숙련공의 고령화와 함께 감소 추세에 있으며, 이에 따른 기능의 계승, 작업환경의 개선에 대한 필요성과 함께 전체 건조 공정에서 차지하는 중요성 등 여러 가지 이유로 선상가열법에 의한 강판의 곡가공 공정을 컴퓨터에서 시연할 수 있는 효율적인 전산 시스템의 개발에 대한 필요성이 널리 인식되고 있다. 선상가열의 물리적 현상을 규명하고 선상가열의 결과와 이와 관련된 영향인자들 사이의 관계를 도출하려는 실험적 및 이론적 연구가 많이 수행된 바 있다<sup>1-8)</sup>. 최근에 와서는 보다 실용적으로 적용할 수 있는 전산 시스템으로서 기계화를 목표로 하는 선상가열 Simulator의 개발에 많은 연구가 수행되어 왔고 현재도 계속 진행 중이다<sup>9-14)</sup>.

본 연구에서는 선상가열법을 이용한 강판의 곡가공 작업을 컴퓨터에서 시연할 수 있는 선상가열 Simulator의 개발을 다루고 있는데, 이미 합당성이 확인된 이론적 배경 하에 개발된 다수의 프로그램 모듈들을 본 연구의 Simulator 개발에 적합하고 정도 높은 결과를 줄 수 있도록 수정 및 보완하고 GUI의 개념을 도입해서 통합된 하나의 시스템으로 개발된 것이다. Simulator의 개발에 배경이 되는 요소 기술적인 내용은 참고문헌<sup>11-13)</sup>에 수록되어 있다. 여기에서는 개발한 Simulator의 기본 배경이 되는 이론적인 부분을 기술하였고 그 전반적인 내용을 소개하였으며, 실제 곡면에 대해 적용한 결과를 예시하였다.

## 2. 선상가열 SIMULATOR의 일반

### 2.1 역학적 모델링

선상가열은 열탄소성해석의 범주에 속하는 복잡한 문제이어서 이에 상당한 계산시간을 필요로 하므로, 그 Simulation 결과 곧, 선상가열의 결과를 짧은 시간 내에 확인하기 위해서는 선상가열의 물리적 현상을 반영할 수 있는 합리적인 역학적 모델을 도입하는 것이 필요하다. 선상가열의 결과는 가열 후 냉각과정을 거치면서 발생하는 굽힘변형인데, Fig.1에 본 연구에서 도입하는 역학적 모델의 개념을 보였다. 가열 후 냉각과정을 거치면 가열선의 법선 방향으로 온도 분포가 균일하지 않기 때문에 굽힘변형을 일으키는 굽힘 모멘트는 Fig.1(a)에

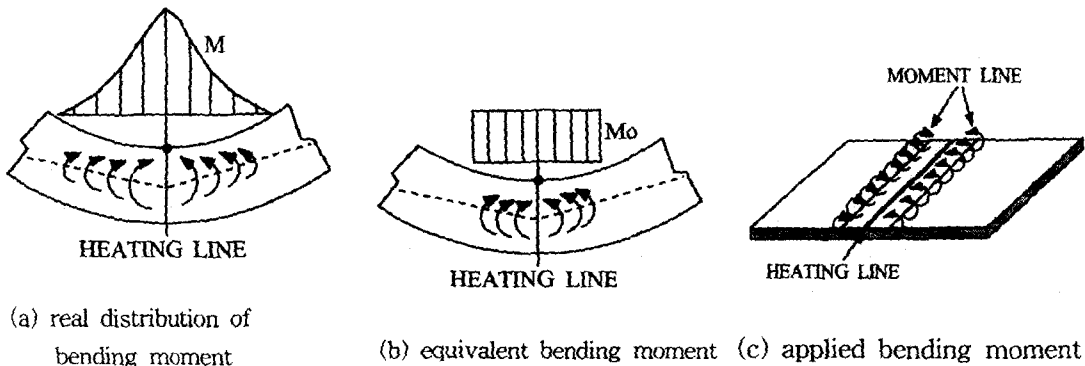


Fig. 1 Mechanical Modelling of Line Heating

보인 형태로 분포한다. 열 영향부의 범위가 판의 폭이나 길이에 비해 상당히 작은 범위 내에 한정되어 있으므로, Fig. 1(b)와 같이 등가의 균일 분포 모멘트로 치환해서 가열선 주위에 작용시키는 것으로 모델링할 수 있겠다<sup>11-13,15)</sup>. 따라서 하나의 가열선이 정의되면 선상가열의 결과는 Fig. 1(c)에 보인 것처럼 가열선의 법선 방향으로 어느 정도 거리가 떨어진 위치에서 가열선에 평행한 두 선상에 연하여 작용하는 굽힘 모멘트에 의한 변형이고, 이 굽힘 모멘트는 대체로 가열선 방향으로 균일하게 분포한다.

선상가열의 결과 곧, 굽힘 변형의 크기에 영향을 주는 영향 인자들은 열원의 종류, 온도, 속도 그리고 강판의 기하학적 형상과 냉각방법 등이 있고 이외에도 실제로 밝혀지지 않은 많은 미지의 인자들이 있다. 이들 중에서 가장 지배적인 인자는 물론 열원의 온도와 속도이다. 선상가열 Simulator를 개발함에 있어서 Fig. 1에 보인 역학적 모델을 도입할 때 선상가열의 결과인 굽힘 변형의 크기는 작용하는 굽힘 모멘트와 직접적인 관계가 있으므로, 굽힘 모멘트와 영향 인자들 사이의 관계를 정량적으로 정의해야한다. Fig. 1(c)에서 가열선 주위에 작용하는 단위길이 당 굽힘 모멘트,  $M_0$ 는 이러한 영향 인자들의 합축적인 함수로 표시된다<sup>12,13)</sup>. 열원의 종류와 냉각방법이 정해져 있다면 단위 길이 당 굽힘 모멘트는 열원의 온도와 속도 및 판의 두께의 함수로서 개념적으로 아래의 식으로 표현할 수 있다.

$$M_0 = F(T, v, t) \quad (1)$$

여기에서  $T$ 와  $v$ 는 각각 열원의 온도와 속도이고,  $t$ 는 판의 두께이다. 한편 Fig.1에서 가열선 주위에 굽힘 모멘트가 작용하는 것은 Fig.2와 같이 가열선을 고정단으로 간주해서 거리  $a$ 만큼 떨어진 위치에 굽힘 모멘트가 작용하는 보의 굽힘 문제로 모델링할 수 있고, 이 경우에 작용하는 단위 길이 당 굽힘 모멘트,  $M_0$ 와 각변형량,  $\theta$  사이의 관계는

$$M_0 = \frac{E_f \theta}{a L_H} \quad (2)$$

와 같이 표시된다<sup>9,15)</sup>. 여기에서  $L_H$ 는 가열선의 길이이고,  $E_f$ 는 판의 굽힘강성이다.

각변형량,  $\theta$ 는 가열시 판에 입열되는 열량의 크기에 의존하는데, 입열량은 냉각방법, 판과 토치 사이의 거리 등이 정해져 있다면 판의 두께, 열원의 온도와 속도에 따라 달라진다. 또한 gas와 산소의 압력이 정해지면 토치의 온도는 거의 일정하고 따라서 가열선 방향으로의 단위 길이 당 입열량은 토치의 속도 즉, 가열속도에 의해 결정된다. 본 연구에서는 이러한 점을 참고해서 아래의 형태로 주어지는 입열량과 각변형량 사이의 관계식을 이용하였다<sup>6)</sup>.

$$\theta = C_1 \exp\left[-C_2 \frac{R_1}{t}\right] p^n \quad (\text{rad.}) \quad (3)$$

이 식에서  $t$ 와  $v$ 는 판의 두께 (cm)와 가열속도 (cm/sec)이고,  $p$ 는 아래의 식으로 정의되는 입열계수(heat input parameter)이다.

$$p = \frac{Q}{N vt} \quad (\times 10^{-3}) \quad (4)$$

$R_1$ 는 가스유량에 따라 결정되는 상수이며,  $Q$ 는 단위 시간당 입열량,  $A$ 는 가스의 유량이고,  $n$ 은  $R_1/t$ 와  $A$ 의 값에 따라 결정되는 상수이다. 열원이 아세틸렌 가스일 때  $n$ 과  $R_1$  등에 대한 자료는 참고 문헌[6]에 수록되어 있다. 본 연구에서는 크기가  $a \times b = 500 \times 500$  mm이고 두께가  $t = 10, 20, 30, 40$  mm인 다수의 강판에 대한 실험결과를 토대로<sup>11)</sup>, 회귀분석법을 적용한 결과 식(3)에 포함된 계수  $C_1$ 과  $C_2$ 가 각각  $C_1=3.02$ ,  $C_2=3.53$ 으로 구해졌다.

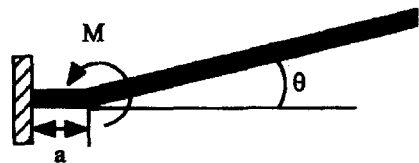


Fig. 2 Beam Modelling

식(2)와 (3)을 이용하면 판의 두께가 주어졌을 때 단위 길이당 굽힘 모멘트,  $M_0$ 를 구할 수 있고 또한 역으로 굽힘변형을 일으키는데 필요한  $M_0$ 에 대응되는 가열속도가 가열조건으로 구해지며, 이는 실제 현장에서 작업 시 가열속도를 변화시켜서 굽

힘 변형량을 조절한다는 점과 맥락을 같이한다.

## 2.2 주요 구성요소

### 2.2.1 가열선의 정보

가열선의 정보로서는 가열선의 기하학적 자료로서 가열선의 위치와 열원의 온도, 속도 등 가열조건이다. 전술한 바와 같이 열원의 온도 즉, 토치의 온도는 대개 고정되어 있어서 토치의 속도로서 입열량을 조정해서 굽힘 변형량을 조절한다는 점을 감안해서, 가열선을 정의하는 정보는 그 시작점과 끝점 그리고 가열속도로서 주어진다.

### 2.2.1 구조해석

판의 어느 위치를 가열하였을 때 굽힘 변형의 결과를 구하기 위해 구조해석을 수행하는데, 구조해석방법으로서 우선 유한요소법을 적용하고, 다루는 문제의 성격상 구조물을 3차원 판 요소로 모델링하였다. 구조해석을 수행하는 데에 있어서 중요한 점은 유한요소해석에 필요한 자료를 준비하는 것으로 Simulation 과정에서 정의한 가열선의 위치와 방향이 가열단계 마다 다르기 때문에 각 경우에 대해 필요한 자료를 일일이 입력시키는 것은 의미가 없다. 따라서 여기에서는 가열선의 정보를 이용해서 구조해석에 필요한 유한요소 자료를 자동적으로 생성할 수 있도록 기 개발한 기법을 적용하였다<sup>12,13)</sup>. 이러한 방법을 적용하게 되면 각 가열선에 대해 구조해석을 위한 자료가 자동으로 생성되며 따라서 구조해석과정을 효과적으로 수행할 수 있다. 유한요소로는 3절점 삼각형과 4절점 사변형 판 요소를 혼합해서 사용하였고, 구조해석은 2.1절에서 기술한 역학적모델링에 의거해서 선형탄성해석을 수행하였다.

### 2.2.2 격자점에서의 변형량 계산

추정한 곡면과 주어진 곡면과의 변형의 정도를 비교하기 위하여, 구조해석 결과로부터 주어진 곡면의 격자점 (grid point)에서의 변위를 추정해야 한다. Fig. 3(a)는 주어진 곡면의 xy 평면상에서의 격자점과 가열선 (굵은 실선)을 표시한 것이고 Fig. 3(b)는 Fig. 3(a)와 같이 가열선이 정의되었을 때 이에 관한 정보를 이용해서 전 절에서 기술한 기법

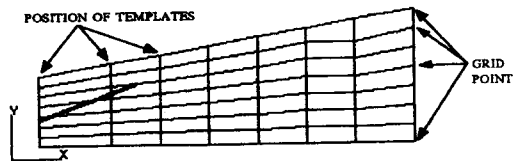
을 적용해서 생성된 요소분할의 결과이다. 구조해석의 결과로서 변위는 절점에서의 값으로 얻어지는데 Fig. 3에서 보듯이 일반적으로 유한요소의 절점과 격자점의 위치가 다르므로 절점변위로부터 격자점에서의 변위를 추정해야 한다. 여기에서는 어느 격자점에서의 변위를 그 점을 중심 주위에 있는 절점변위들을 입력자료로 해서 2차원 보간법으로 추정하는 방법을 이용하였다<sup>11-13)</sup>.

### 2.2.3 Simulation 결과의 비교

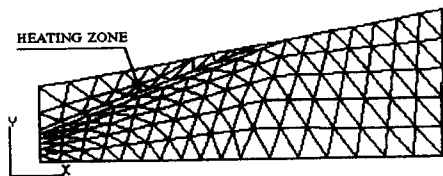
이는 주어진 곡면과 Computer Simulation으로 추정한 곡면 사이의 유사한 정도를 표현하는 방법인데 여기에서는 이를 "유사성 (similarity)" 이라 하였다. 유사성은 기본적으로 곡면의 기하학적 특성치의 정도를 비교하는 것이므로 정의하는 방법이 여러 가지 있을 수 있겠는데, 여기에서는 주어진 곡면과 Simulation 후 곡면의 격자점 위치에서의 변위를 기준으로 아래의 식(5)로 주어지는 값을 유사성의 척도로 정의하였다<sup>12,13)</sup>.

$$\delta = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} d_{ij}^2}{N_T}}, \quad d_{ij} = \frac{g_{ij} - c_{ij}}{g_{max}} \quad (5)$$

여기에서  $N_x$ 와  $N_y$  는 각각 x와 y 방향으로 격자점



(a) defined heating line and grid points



(b) generated mesh

Fig. 3 Grid Points and Generated Mesh

의 수이고,  $N_T$ 는 격자점의 총 수이다.  $g_{ij}$ 와  $c_{ij}$ 는 각 격자점 (i,j)에서 주어진 곡면과 Simulation 곡면의 변위이고,  $g_{max}$ 는 주어진 곡면에서의 최대 변위를 표시한다.  $\delta$ 가 1.0에 가까워질수록 Simulation 결과가 주어진 곡면형상에 접근하는 것을 표시하는데, 이것이 가공의 정도를 의미하는 것은 아니지만 밀접한 관계가 있다.

### 2.3. Simulator의 운영체계

#### 2.3.1 일반

본 Simulator는 다음과 같이 4개의 프로그램 모듈로 구성되어 있고, 이들은 GUI (Graphics User Interface)의 개념을 적용한 제어 프로그램에서 관리된다.

- o Information Input Module for Heating Lines and Cold Bending Line
- o Automatic Data Generation Module for Finite Element Analysis
- o Structural Analysis Module
- o Result Presentation Module

GUI System은 상기한 4개의 과정이 작성된 프로그램들을 실행하는 것을 포함한 모든 기능의 실행을 위해 Pull Down Menu System으로 구성하였고 기능의 실행 결과는 Graphics Tool을 이용하여 표현함으로써 Simulator에 대한 이해와 사용을 용이하도록 구성하였다[16]. Fig.4는 본 Simulator에서 GUI 시스템의 구성도를 표시한다. 본 Simulator의 윈도우 배치를 Fig.5에 보였다. 윈도우는 Graph Region, Input Region, Information Presentation Region으로 표시된 세 영역으로 나누었다. Graph Region은 Graphic Tool을 이용해서 곡면의 표현 등 결과를 시각적으로 표현하는 영역이고, Input Region은 가열선의 정보 등을 키보드를 이용해서 입력하는 영역이다. 마우스 또는 키보드를 통해 입력한 정보나 계산의 결과는 Information Presentation Region에 표시된다. 메뉴는 Simulator를 구성하는 주요 프로그램 모듈들을 실행하고 또한 가공할 곡면의 입력과 시스템의 종료를 나타내는 내용을 포함해서 6개의

의 메뉴로 구성하였다. 메뉴와 항목에 대한 예를 Fig.6에 보였다. 메뉴와 이에 속한 항목들의 기능에 대해서는 본 논문과 관련된 보고서인 참고문헌<sup>15)</sup>에 상세히 기술하였고 이들은 해당되는 기능의 메뉴항목 (Menu Item)을 선택해서 실행해 봄으로써 Simulator가 갖는 기능들을 용이하게 이해할 수 있다.

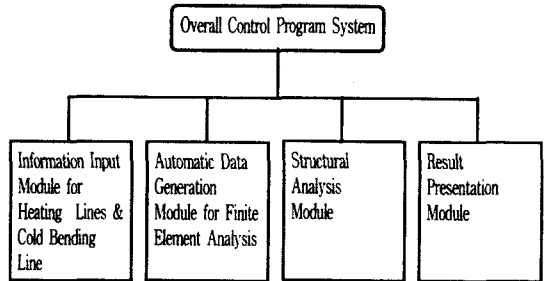


Fig. 4 Overall Construction of GUI System

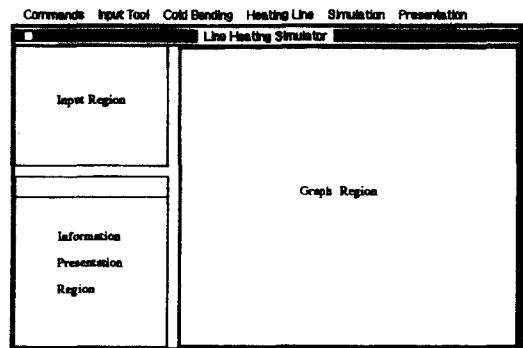


Fig. 5 Window Arrangement

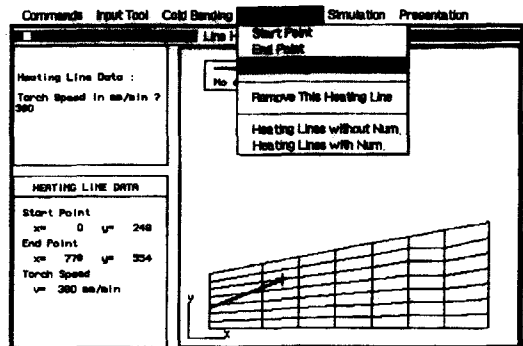


Fig. 6 Menus and Example of Items : items for heating line data input

2.3.2 Data의 입력

Simulator를 실행하는데 필요한 기본적인 자료는 주어진 곡면에 대한 자료로서 각 격자점에서의 좌표값으로 주어진다. 또한 냉간가공을 할 경우 그 시작점과 끝점 그리고 냉간가공의 반경에 대한 자료가 필요하다. 그 이후의 Simulation 과정에서 필요한 자료는 가열선의 정보로서 각 가열선의 시작점과 끝점의 좌표 그리고 가열속도이며 이는 키보드나 마우스를 통해 입력할 수 있다.

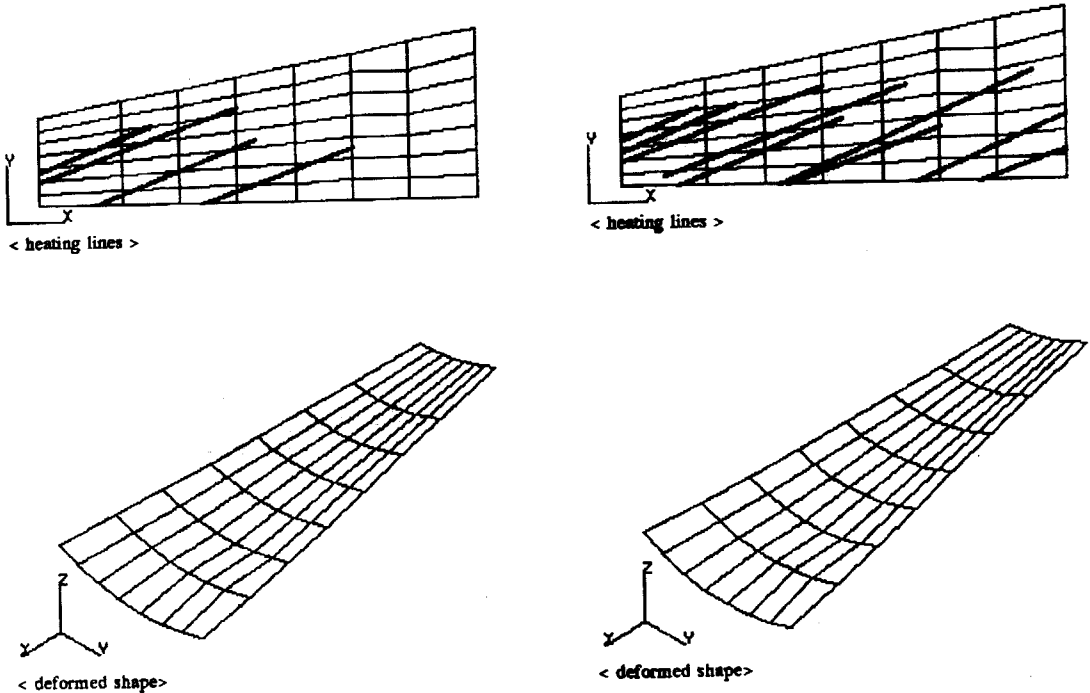
2.3.3 Simulation

선상가열 Simulation은 그때까지 정의된 가열선의 수만큼 Simulation을 실행한다. 이를 위해 우선 정의된 가열선들의 정보를 이용해서 구조해석을 위한 Data의 자동생성과정을 거치고, 그 이후에 Simulation을 실행한다. 유한요소의 분할결과나 Simulation 결과 등은 메뉴에서 해당되는 항목을 선택함으로써 용이하게 확인할 수 있으며 식(5)로

정의된 유사성이 Information Presentation Region에 표시되므로 현재의 Simulation 결과가 주어진 곡면에 접근한 정도를 확인할 수 있고, 경우에 따라 필요 없는 가열선을 제거할 수 있어서 주어진 곡면을 가공하기 위해 필요한 최적의 가열선의 수와 위치를 시행착오과정을 거쳐서 결정할 수 있다.

3. SIMULATOR의 적용

개발한 Simulator의 적용 예를 보여주기 위해 Simulation의 결과 즉, 추정된 곡면이 주어진 곡면과 비교해서 식(5)로 정의된 유사성이 0.9가 될 때까지 가열선의 수를 증가시켜 가면서 Simulation을 수행한 과정을 보였다. 대상곡면은 비틀림형 곡면(twisted shape)이고, 그 크기는 길이×최대 폭 :  $a \times b = 3060 \times 1210$  mm이고 두께는  $t=20$ mm이다. 대상 곡면의 냉간가공에 대한 정보는 다음과 같이 설정하였다.



(a) up to the heating stage 5

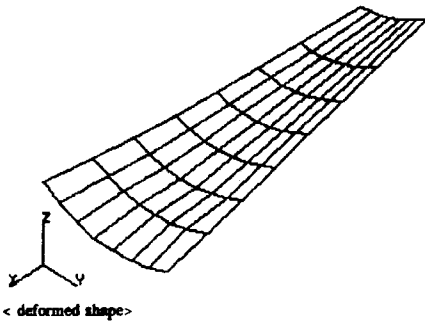
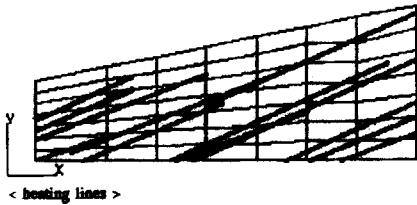
(b) up to the heating stage 10

Fig. 7 Heating Lines and Deformed Shape up to the Particular Heating Stage

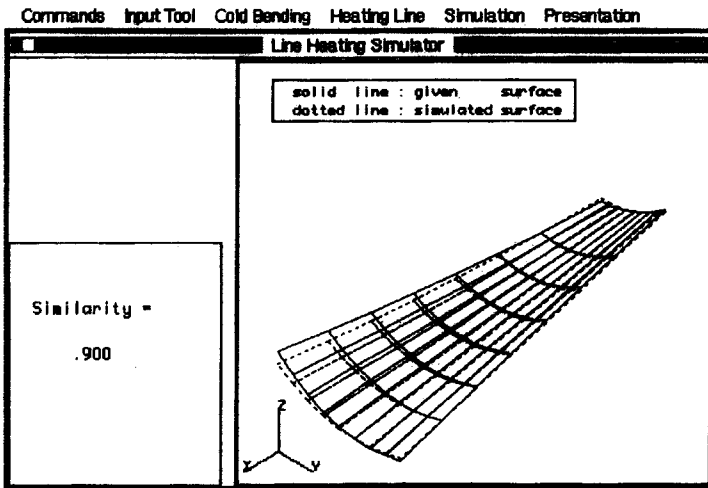
- start point of cold bending line : (0, 75) in mm
- end point of cold bending line : (3060, 720) in mm
- cold bending radius : 3500 mm

개발한 Simulator를 이용해서 가열선을 추가하고 제거하는 과정을 통해 유사성이 목표 값인  $\delta=0.9$  가 될 때까지 가열선의 수가 19개로 늘어났다. 전체 과정을 4개의 그룹으로 나누어서 Simulation 결과를 Fig.7에 보였다. 물론 가열선의 위치를 달리 정

의해서 유사성의 목표 값,  $\delta=0.9$ 에 접근하는 가열선의 분포가 얻어질 수도 있다. Fig.7(a)~(c)에서는 가열단계가 각각 5, 10, 15까지의 가열선의 분포형태와 Simulation 결과 즉, 추정된 곡면형상을 표시한 것이고, 최종 가열단계후 추정된 곡면과 주어진 곡면과의 비교를 유사성과 함께 Fig.7(d)에 보였다. 결과에서 보듯이 추정된 곡면 (점선)이 주어진 곡면 (실선)에 상당히 접근되어 있음을 볼 수 있다.



(c) up to the heating stage 15



(d) up to the heating stage 19

Fig. 7 (continued)

#### 4. 결론

본 연구에서는 선상가열법을 이용한 강판의 곡가공 공정을 컴퓨터에서 시연할 수 있는 선상가열 Simulator의 개발에 대해 다루었다. 본 연구에서 개발된 선상가열 Simulator는 선상가열의 결과로서 굽힘 변형 현상을 대변할 수 있는 역학적 모델링에 바탕을 두고 있으며, 합당성이 확인된 이론적 배경 하에 개발된 다수의 프로그램 모듈들을 Simulator 개발에 적합하고 정도 높은 결과를 줄 수 있도록 수정 및 보완해서 GUI의 개념을 도입한 통합된 하나의 시스템으로 개발하였다. 가열선에 대한 정보로서는 그 시작점과 끝점 그리고 가열속도이며, 이들의 값을 입력하면 선상가열의 결과를 단 시간 내에 확인할 수 있도록 구성하였다. 본 논문에서는 개발한 Simulator의 이론적 배경과 주요 구성요소 그리고 운영체계에 대해 기술하였다. Simulator의 적용 예로서 선박해양구조물에서 흔히 볼 수 있는 비틀림 곡면에 적용한 결과를 예시하였다. 본 Simulator는 선상가열의 결과로서 발생하는 변형현상을 확인하는 데에 사용할 수 있으며 또한 가공할 곡면의 자료가 입력되면 가열선을 추가 및 삭제하는 과정을 거쳐서 가공에 필요한 최적의 가열선 위치와 수를 결정하는 데에도 적용할 수 있어서 실용적으로 활용될 수 있겠다.

#### 후기

이 연구는 1995년도 한국과학재단 연구비지원에 의한 결과임 (과제번호 : 951-1003-064-2).

#### 참고문헌

- 1) Hashimoto, T. and Fujishiro, Y., "An Experiment of Line Heating Designed with the Table Orthogonal Array L32", 일본조선학회 춘계강연집, pp.201-225, 1958
- 2) Iwamura, Y. and Rybicki, E.F., "A Transient Elastic-Plastic Thermal Stress Analysis of Flame Forming", Trans. ASME, J. of Engineering for Industry, pp.163-171, 1973
- 3) Iwaski, Y., Taura, Y., Shioda, K., Hirabai, J. and Fujikura, A., "Study on the Forming of Hull Plate by Line Heating Method", Technical Report Mitsubishi Heavy Industry, vol.12, no.3, pp.51-59, 1975
- 4) Eagar, T.W. and Tsai, N.S., "Temperature Fields Produced by Traveling Distributed Heat Sources", Proc. 64th Annual AWS Convention, pp.346-355, 1983
- 5) Moshaiov, A. and Vorus, W.A., "The Mechanics of the Flame Bending Process : theory and applications", J. of Ship Research, vol.31, no.4, pp.269-281, 1987
- 6) Tsuji, J. and Okumura, Y., "A Study on Line Heating Process for Building of Ship Steel", Trans. The West-Japan Society of Naval Architecture, no.76, pp.149-160, 1988
- 7) Shin, J.G. and Moshaiov, A., "Modified Strip Model for Analyzing the Line Heating Method - part 2: thermo-elastic-plastic plates", J. Ship Research, vol.35, no.3, pp.266-275, 1991
- 8) Shin, J.G., Lee, J.H. and Kim, W.D., "A Numerical Simulation of A Line Heating Process for Plate Forming", Proc. PRADS'95, vol.2, pp.1447-1458, 1995
- 9) Nomoto, T. and Aoyama, "Development of Simulator for Plate Bending by Line Heating", J. Naval Architecture and Ocean Engineering, Society of Naval Architecture of Japan, vol.30, pp.143-148, 1993
- 10) Ueda, Y., Murakawa, H., Mohamed, R.A., Okumoto, Y. and Kamichika, R., "Development of Computer Aided Process Planing System for Plate Bending by Line-Heating", J. Naval Architecture and Ocean Engineering, Society of Naval Architecture of Japan, vol.31, pp.99-112, 1994
- 11) 이주성, 김상일, "선상가열에 의한 강판의 곡가공 시뮬레이터 개발", 대한조선학회 추계연구발표회 논문집, pp.423-428, 1993
- 12) 이주성, "선상가열법에 의한 강판의 곡가공 자



- 동화 시스템 (II)", 대한조선학회 논문집 33권 3호, pp.81-93, 1996
- 13) Lee, J.S., "Development of the Automatic Marking Generation System for Plate Forming by Line Heating", J. Ship Production, SNAME, vol.12, no.4, pp.247-253, 1996
- 14) Kitamura, N., Sakai, Y. and Murayama, H., "3-Dimensional Line Heating System for Curved Shell Plate for Shipbuilding", Proc. ICCAS'97, pp.351-366, 1997
- 15) 이주성, "강판의 곡가공 시뮬레이션을 위한 전산시스템 개발", 한국과학재단 목적기초연구 최종보고서, 1997
- 16) Rogers, D.F. and Adams J.A. : Mathematical Elements for Computer Graphics", 2nd ed., McGraw-Hill Pub. Co., 1990