

---

 論 文
 

---

大韓造船學會論文集  
 第 33 卷 第 3 號 1996年 8月  
 Transactions of the Society of  
 Naval Architects of Korea  
 Vol. 33, No. 3, August 1996

## 선상가열법에 의한 강판의 곡가공 자동화 시스템 (II)

이주성\*

### Plate Forming Automation System of Steel Plates by Line Heating Method (II)

by

Joo-Sung Lee\*

#### 요 약

이 논문에서는 강판의 곡가공과 관련하여 지금까지 수행된 연구의 동향을 검토하였고, 이의 자동화 시스템 구축에 있어서 우선적으로 선행되어야 할 부분으로서 주어진 곡면의 Marking Data를 자동으로 생성하도록 개발한 전산 시스템의 개요와 이를 실제 곡면모델에 적용한 결과를 다루었다. 본 연구에서 소개하는 Marking Data 생성을 위한 전산 시스템을 실제 곡면모델에 적용한 결과로부터 추정된 곡면이 주어진 곡면에 상당히 접근하는 결과를 보여 주고 있으며 생성된 Marking Data 역시 현재 현장에서 시행하는 것에 부합되는 합리적인 것이었다. 따라서 여기에서 소개한 Marking Data 자동생성을 위한 전산 시스템을 추후 더 많은 곡면모델에의 적용을 통해서 보완한다면 현장에서 충분히 실용적으로 사용할 수 있을 것으로 보여진다.

#### Abstract

In this paper reviewed are the past studies on the plate forming and introduced is the computer aided marking data generation system which should precede the automation system for plate forming by line heating method. The developed computer aided marking data generation system has been applied to a real surface which is frequently found in the bow and the stern area of a ship. From its application results, the estimated surface by the present marking data generation system is very close to the given surface and the generated marking data also shows reasonably good agreement with those in the real practice in ship yard at present. shows very good agreement. When the marking data generation system has been

---

접수일자 : 1995년 9월 23일, 재접수일자 : 1996년 5월 17일

\*정회원, 울산대학교 조선 및 해양공학과

complemented through more applications to real surface models, then it can be practically used in the real practice in ship yard.

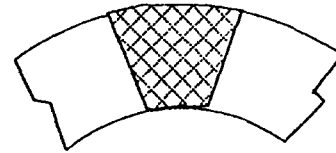
## 1. 개 요

선박 건조공정에 중요한 위치를 차지하고 있는 강판의 곡가공은 그 작업 방법에 따라

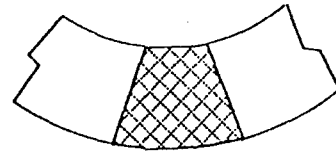
- 1) 프레스를 이용하는 순수한 냉간가공
- 2) 1차 냉간가공 후 선상가열법에 의한 열가공
- 3) 선상가열법에 의한 순수한 열가공

으로 분류되고, 이러한 가공법은 곡면의 형상에 따라 그 적용하는 방법이 달라진다. 가스토치를 이용하는 선상가열법으로 곡면을 가공하는 경우는 전체 곡면의 60 - 70% 이상을 차지하고 있는 만큼 이의 효율성 향상은 곡가공 공정의 생산성에는 물론이거니와 전체 건조공정에 결정적인 영향을 주고 있다. 실제 현장에서 시행하는 곡가공 작업에서는 주어진 곡면을 가공할 수 있는 Marking 작업후에 곡형 (template)을 기준으로 선상가열과 수정작업을 반복하는데 이에는 경험자라 하더라도 상당한 시간이 소요되고 있다. 선상가열법을 이용하는 강판의 곡가공은 Fig.1에 보인 바와같이 가열된 윗면이 냉각후 수축함으로써 가열한 면 방향으로 굽힘변형이 발생한다는 개념적으로는 간단한 역학적 현상을 이용하는 것이다. 이론적인 측면에서는 열탄소성 문제에 속하는 것으로서, 복잡한 역학적 문제에 속한다.

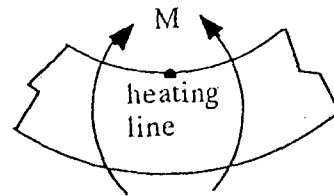
강판의 곡가공에 선상가열법을 적용할때 가장 중요한 사항은 주어진 곡면형상을 가공하기 위한 가열위치와 가열조건을 결정하는 것이다. 또는 열원의 종류, 온도 및 속도 등 가열조건이 주어졌을때 어느 위치를 가열하여 주어진 곡면형상을 가공하느냐 하는 것이 중요한 관건이며, 자동화 시스템 구축에 있어서 우선적으로 선결되어야 할 문제이다. 선상가열법에 의한 강판의 곡가공 공정



(a) during heating



(b) after cooling



(c) bending moment around heating line

Fig.1 Basic physical phenomena of line heating

은 국내외의 모든 조선소에서 숙련된 작업자의 경험과 감각에 전적으로 의존하고 있다. 이의 자동화 시스템 구축에 대한 필요성은 여러 이유로 강조되고 있는데, 작업환경의 개선에 대한 필요성과 요구, 그리고 숙련공이 되기까지 소요되는 긴 훈련기간 등의 이유는 자동화 시스템 구축에 대한 우선적인 이유가 되지 못한다. 가장 큰 이유는 선상가열 작업환경이 과거에 비해 많이 개선되었지만, 가스토치의 소음, 다량의 산소와 유해가스에 의한 신체의 노출 등이 작업은 3D (Danger, Difficulty, Dirty) 에 속하는 공정으로서 숙련공의 고령화와 함께 감소 추세로 향후 몇년 내에 숙련된 작업자의 계속 확보에 대한 불확실성으로 이에 따

른 기능의 계승과 작업능력의 유지라는 극히 현실적인 문제일 것이다. 따라서 선상가열에 의한 곡가공 공정의 자동화 시스템 구축에 대한 필요성은 선박건조공정에서 차지하는 결정적인 중요 위치와 숙련된 작업자의 계속 확보에 대한 불확실성 사이의 관계로서 이 작업의 대리자 측면에서 충분히 설명될 수 있겠다.

2. 연구 동향

선상가열의 결과 즉, 굽힘모멘트의 크기에 영향을 주는 시스템 인자 (system parameter) 들은 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. 지난 20여년간 미국, 일본을 중심으로 자동화 시스템의 구축과 작업환경의 개선을 향해, 선상가열 현상을 규명하고 이러한 시스템 인자들과 굽힘변형과의 관계를 도출하려는 연구가 이론적인 방법과 실험적인 방법을 통하여 많이 수행되었고, 최근 국내에서도 이에 많은관심을 가지고 연구에 박차를 가하고 있다. 지금까지의 연구는 다음과 같이 분류할 수 있다.

- 시스템 인자들과 선상가열의 결과 사이의 관계 규명
- 대체 열원의 적용 가능성 분석
- 선상가열작업을 위한 Computer Aided Simulator 의 개발
- Computer Aided Marking Generator 의 개발

이와 더불어 곡가공 공정에 있어서 선상가열법을 대체할 수 있는 기구의 개발을 들 수 있다. 과거의 연구결과를 검토해 보기 위하여 우선 선상가열법을 이용한 강판의 곡가공은 단순히 평판에만 가열하는 것이 아니고, 가열단계가 진행되면서 서서히 주어진 곡면으로 접근하는 곡면 상에 가열하는 것이며, 또한 가열선의 수와 위치가 같은 경우라도 그들의 순서에 따라서 최종적으로 얻어지는 곡

면의 결과는 상당한 차이가 있다는 점을 언급한다. 시스템 인자들과 선상가열의 결과 사이의 관계 규명 측면은 실험적 연구 부분과 이론적 연구 부분으로 나누어 설명할 수 있다. 우선 실험적 연구 결과를 살펴 보면 1958년 Hashimoto 와 Fujishiro [1] 가 가스토치를 이용하여 체계적인 실험결과를 발표한 바 있고, 그들의 결과는 추후 보완되어 현장에서의 작업을 체계화 하는 데에 활용되었으며, 그 이후에도 많은 실험적 연구가 수행되었다 [2]. 실험적 연구는 이론적 연구의 정당성을 확인하는 하나의 척도로서 활용하는 목적도 있겠지만 그 보다는 다음에서 기술하는 바와같이 이론적 연구에서 고려할 수 없는 미지의 시스템 인자들과 불확실성 (uncertainty) 의 영향을 함축적으로 내포하는 거시적인 측면에서 결과를 도출하기에 이를 실제 현장에 적용할 수 있다는 강점을 무시할 수 없다. 국내에서의 실험적 연구는 울산대학교 조선 및 해양공학과에서 다수의 강판에 대해 수행한 바 있다 [3, 4]. 이의 결과는 비록 실험실 안에서의 결과라는 한계성은 있지만 국내에서는 처음 시도한 것이고 또한 과거의 실험에서 평판을 가로지르는 가열선으로 현상을 규명하는 범주를 벗어나 실제 상황에서 발생하는 경우에 대한 실험을 시도했다는 측면에서 의의를 찾을 수 있겠다. 이의 결과를 뒤에서 설명하는 Marking Generation System 의 개발에 있어서 반석의 역할을 하였다.

이론적인 연구는 주로 유한차분법이나 유한요소법과 같은 수치해석법을 이용하여 평판을 대상으로 수행되었다. 이론적인 연구에서의 접근방법은 열전도 해석을 통해 평판에서의 온도분포의 이력을 구하고 이를 열하중으로 가하여 평판에서 발생하는 잔류변형을 구하는 방법으로 선상가열의 물리적 현상을 규명하고 있다. 이론적인 연구는 과거에는 열탄소성 방정식의 해를 해석적인 방법으로 구하는 연구가 있었고 [5, 6] 최근에는 유한요소법이나 유한차분법과 같은 수치해법을 이용하여 이 문제를 다루고 있다 [7-10]. 한편 대부분의 이론적 연구가 선상가열의 물리적 현상을 규명하려는데에 치우쳐 왔기 때문에 그 결과가 현장에 적용되지 못하고 있는 실정인데, 실험에서 시현하기

가 어려운 시간이력에 따른 변형형상을 시현할 수 있다는 점과 선상가열 인자들의 영향을 정밀하게 분석할 수 있다는 점에서 의미를 찾을 수 있겠다.

선상가열 작업은 주로 가스토치를 이용하여 수행하는데, 이때 발생하는 많은 소음문제와 아울러서 온도나 입열량 등의 조정이 용이하지 않다는 측면에서 가스토치를 대체하는 다른 열원의 적용 가능성에 대한 연구가 진행된 것도 있다. Scully [11]는 레이저를 이용한 선상가열장치를 제안한 바 있고, 한편, 일본에서는 Nomoto 등 [12, 13]과 Ueda 등[14, 15]의 연구팀에서 최근 고주파유도 가열장치를 고안하여 선상가열실험을 수행하였고 현장에 적용하는 것을 적극 검토하고 있다. 레이저 가열장치와 고주파유도 가열장치는 온도의 조절이 가스토치와는 비교되지 않을 정도로 정밀성을 유도할 수 있고 또한 소음이나 공해문제를 해결할 수 있지만, 레이저 가열장치의 경우 레이저가 인체에 주는 영향, 장비의 가격 등의 문제로 실용화 하기에는 여러 문제점이 있는 것으로 보인다. 고주파유도 가열장치는 레이저 가열장치보다는 이점에서 유리한 점이 있기는 해도 장비의 크기가 클 수 밖에 없고 따라서 이동이 용이하지 않다는 점에서 적용에 제한이 있을 것으로 보인다.

선상가열작업의 숙련된 작업자가 되기 위해서는 최소 3-5년의 훈련기간이 소요되고, 작업이 잘 못 되었을 때 이를 수정하는데에 소요되는 시간이 오히려 더 많이 필요하다는 점을 감안하여 Nomoto 등 [12, 13]이 선상가열작업을 위한 Computer Aided Simulator 를 개발하였다. 이는 컴퓨터 내에서 선상가열작업을 시현할 수 있다는 점에서 큰 장점을 가질 수 있다. 더 실용성을 앞세운 연구로서 주어진 곡면을 가공하는 가열선의 위치 끝, Marking Data 를 자동으로 산출할 수 있는 Computer Aided Marking Generator 의 개발에 대한 연구가 일본 Osaka 대학을 중심으로 수행되었다 [14-17]. 이들의 연구에서는 초기곡면에서 주어진곡면을 성형할 때 유발되는 고유 변형도를 기준으로 Marking Data 를 자동생성시킬 수 있는 것인데, 발표된 연구결과에 의하면 현장의 작업에 적용할 수 있는 실용화 가능성이 충분히 있는 연

구이다. 또 하나의 실용화 가능성이 충분히 있는 연구로서는 참고문헌 18과 19에서 적용한 개념을 확장하여 주어진 곡면의 Marking Data를 정도 높게 구할 수 있는 Marking Data Generation System 을 개발한 바 있다 [20].

한편 선상가열법을 대체할 수 있는 곡가공 기구로서는 Universal Press 를 들 수 있다. 이의 개발을 위한 연구는 상당히 긴 기간 동안 수행된바 있는데, 장비가 고가라는 점과 운용의 효율성 측면에서 선상가열법에 의한 곡 가공에 비해 상대적으로 낮은 것으로 보인다. 그러나 모든 곡면의 가공에 적용할 수 있는 Universal Press 는 아니더라도 선상가열로 인한 재질의 변화와 강도저하를 방지하는 목적으로 몇가지 곡면형상에 직접적으로 적용하는 것은 가능할 것으로 보인다.

### 3. 본 논문의 개요

강판의 곡가공 공정 전체를 100% 자동화 하는 것은 현실적으로 많은 문제점이 있으므로, 이 연구에서는 어느 한 곡면을 대상으로 할 때, 주어진 곡면형상을 약 80% 정도 가공할 수 있는 가열경로인 Marking Data를 자동적으로 생성할 수 있는 전산시스템의 개발에 연구의 목적을 두었다.

이 논문에서는 본 저자가 기 발표한 논문 [18-20]의 계속된 연구결과로서 여기에서는 개발한 전산시스템의 개요를 소개하였고, 이를 실제 곡면형상에 적용한 결과를 다루었다. 실제 곡면형상으로는 선박의 선미부에서 흔히 볼 수 있는 곡면형상을 선택하였고, 개발한 전산시스템을 적용한 결과로서 얻어진 Marking Data는 현장에서 작업하는 것과 같은 경향을 보이고 있으며 이에 따르는 Computer Simulation의 결과는 주어진 곡면에 대단히 접근하는 것으로서 그 결과는 본 논문에서 소개한 전산시스템의 실용적 적용 가능성을 충분히 보여 주는 것이다.

### 4. 선상가열의 기본 역학

선상가열에 의한 변형을 이론적 측면에서 보면

이동하는 열원이 있는 열탄소성 해석 범주에 속하는 복잡한 역학적 문제중 하나이다. 선상가열의 결과에 영향을 주는 주된 인자들은 열원의 종류, 열원의 온도와 속도를 비롯하여 판의 재료적 특성치와 기하학적 형상 그리고 냉각방법 등을 들 수 있는데, 이외에도 많은 인자들이 있다. 유한요소법과 같은 수치해석법을 이용한 복잡한 열탄소성 해석을 수행한 결과가 실험결과와 비교해서 적지 않은 오차를 보이는 것은 선상가열의 결과에 영향을 주는 주된 인자들을 모두 고려할 수 없는 점과 함께 수치해석과정에서 고려할 수 없는 미지의 인자들의 영향에 기인한 것으로 보인다. 이러한 인자들의 영향을 고려해서 수치해석법을 이용하여 선상가열 현상을 분석하는 데에 의미를 부여할 수 있겠지만, 실제 현상을 수치해석법으로 정확하게 묘사하는 것에는 적지 않은 어려움과 미시적인 관점을 벗어날 수 없는 한계성에 부딪치게 될 것이다. 선상가열을 위한 자동화 시스템을 구축하기 위해 선행되어야 할 Marking Data 의 생성 문제와의 관련성 측면에서 보자면 이러한 한계성은 두드러질 것으로 판단된다. 따라서 선상가열의 결과를 효과적으로 추정하기 위해서는 미시적인 관점에서 문제를 접근하기 보다는, 비록 간이 해석적인 방법이기도 하지만 이 현상에 내포되는 복잡한 역학적 문제와 가열속도, 온도 등 선상가열의 시스템 인자들이 갖는 불확실성 특성을 함축적으로 반영할 수 있는 역학적 모델을 도입하여 문제를 다루는 것이 바람직 할 것이다.

본 논문에서 도입한 역학적 모델은 참고문헌 12, 18과 19 등에서 기술되어 있는 바와같이 선상가열의 결과는 가열선에 연하여 그 주위에 어떤 양의 굽힘모멘트가 작용하여 이로 인한 굽힘 변형의 결과로 간주하는 복잡한 현상을 대단히 간단한 모델이다. 어느 하나의 가열선에 대해서 동일한 가열조건으로 가열된다면, 가열선을 따라서 작용하는 굽힘 모멘트의 크기는 가열선 방향으로 균일하게 분포하여, 이 굽힘 모멘트를 단위길이당 굽힘 모멘트로 표시할 수 있다. 가열선의 법선방향으로는 가열되는 점을 중심으로 온도분포가 균일하지 않은 영향으로 굽힘모멘트 역시 불균일한

분포를 갖는다. 가열선의 법선방향으로 열영향부가 작은 범위로 제한되는 점을 감안해서 그 분포형상을 그대로 고려하기 보다는 가열선의 법선방향으로 분포된 굽힘 모멘트의 합을 Fig.2 (a) 에 보인 것처럼 가열선에 평행한 선을 따라서 집중된 것으로 간단화할 수 있다 [12, 18-20]. 따라서 선상가열에 의한 굽힘변형은 균일 분포하는 굽힘모멘트에 의한 결과로 간주된다. 균일 분포하는 굽힘 모멘트의 세기, 곧 단위길이 당 굽힘모멘트를 여기에서는  $M_o$  로 표시하였다.  $M_o$  는 전술한 선상가열의 시스템 인자들의 함축적인 함수로 표시되며, 열원의 종류와 냉각방법이 정해져 있다면 이는 개념적으로 열원의 온도와 속도 그리고 판의 두께 만의 함수로서 표현될 수 있다.

$$M_o = F(T, v, t) \tag{1}$$

여기에서  $T$  와  $v$  는 열원의 온도와 속도이고  $t$  는 판의 두께이다. 한편 Fig.2(a)에서 가열선 주위에 굽힘 모멘트가 작용하는 것은 Fig.2(b)와 같이 보의 굽힘 문제로 치환할 수 있고, 작용하는 굽힘모멘트,  $M_o$  와 각변형량,  $\theta$  사이의 관계는 미소변형을 가정해서

$$\theta = \frac{M_o a}{EI} \tag{2}$$

으로 표현된다. 여기에서  $E$ 는 재료의 탄성계수,  $I$  는 보 단면의 2차 모멘트이다. 따라서 단위 길이 당 굽힘 모멘트,  $M_o$  는

$$M_o = \frac{EI\theta}{a} \tag{3}$$

로 표현된다. 판의 치수, 열원의 온도와 속도 등 선상가열의 시스템 인자들의 크기를 변화시켜 가면서 실험을 수행한 후, 각변형량  $\theta$ 를 구하고 식 (3)을 이용하면 시스템 인자들과 단위 길이당 굽힘 모멘트,  $M_o$  사이의 관계가 개념적으로 식(1)의 형태로 도출되며, 이 관계식에는 시스템 인자들이 갖는 불확실성 특성이 함축적으로 포함된다. 이

관계를 이용하면 열원의 온도, 속도 등이 주어지는 경우에 작용시키는 단위 길이당 굽힘 모멘트,  $M_0$  를 구할 수 있고, 또한 역으로 단위 길이당 굽힘 모멘트,  $M_0$  가 주어진 경우에 가열조건, 즉 열원의 온도와 속도를 추정할 수 있다. 이러한 관계식은 실험결과를 토대로 회귀분석법을 거쳐서 유도할 수 있다.

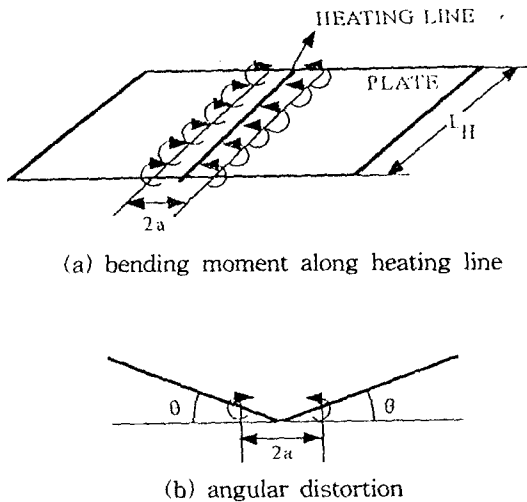


Fig.2 Mechanical modelling of line heating

관계식(1)에서 열원 자체의 온도를 일정하게 놓으면 단위길이당 굽힘모멘트  $M_0$ 는 열원의 속도와 판의 두께 만의 함수로 표현된다. 이식을 도출하기 위하여 울산대학교 조선해양공학과에서 열원을 가스토치로 하여 크기가 500 x 500mm인 연강판에 대해서 판의 두께와 토치의 속도를 변화시켜가면서 실험을 수행한 바 있다 [3, 4]. Fig.3은 실험결과를 도식적으로 표시한 것으로서 실선은 실험결과들을 회귀분석법을 이용하여 구한 것으로서 아래의 식(4)로 표시되는  $M_0$ 와 토치의 속도 사이의 관계식이다.

$$\frac{M_0}{E_f} = 1.8 - 0.6 \log V \text{ for } V < 1000 \text{ mm/min} \quad (4)$$

Fig.3은 판의 굽힘강성이다. 이 식은 굽힘 모멘트의 크기가 토치 속도에 의존한다는 점을 의미하는 것인데, 실제 현장에서 작업시 토치 자체의 온도를 변화시키기 보다는 속도를 변화시켜서 입열량, 즉 굽힘변형량을 조정한다는 점과 맥락을 같이하고 있다. 작용시켜야 할 굽힘 모멘트  $M_0$ 의 크기가 주어지면 식(4)로 부터 역으로 토치 속도를 구할 수 있다. 이 식의 합당성에 대해서는 더 많은 실험을 거쳐서 확인해야 할 것이다.

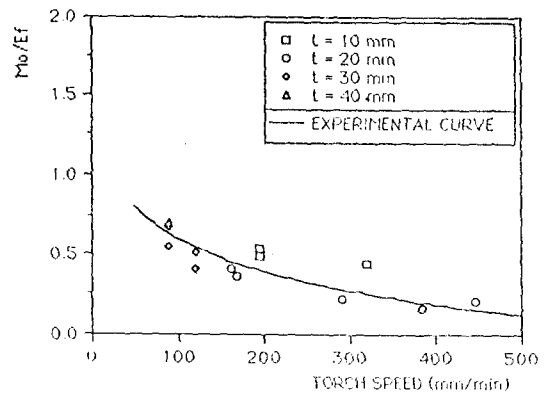


Fig.3 Experimental results for mild steel plate of 500x500 mm and experimental curve

### 5. Marking Data 자동생성 전산 시스템

Fig.4는 본 연구에서 개발한 전산시스템의 전반적인 구조도를 보여준다. 편의상 개발한 전산시스템을 COMHET (Computer Program System of Marking Generation for Line Heating)라 하였다. COMHET는 아래와 같이 크게 네 부분으로 구성되어 있다.

- 가열선의 정의
- 유한요소 Data의 자동생성과 구조해석
- Template 위치에서의 변위 계산
- 곡면의 유사성 계산

가열선은 주어진 곡면의 기하학적 특성치를 이

용하여 정의한다. 주어진 곡면의 여러 점에서 곡률을 구한 다음, 크기가 같은 점들을 Grouping 하여 가열선들이 하나씩 정의되면 이들을 가열선의 후보로 하여 참고문헌 18-20에서 적용한 "Branching & Bounding Technique" 을 이용하여 추정된 곡면이 주어진 곡면과 비교해서 가장 가까운 형태를 주는 가열경로를 가열선들의 수열로서 결정한다. 추정된 곡면과 주어진 곡면과의 변형의 정도를 비교하기 위하여, 구조해석의 결과로부터 주어진 곡면의 Template 위치에서의 변위는 격자점 (grid point) 에서의 변위로서 추정되는데, 이 값은 해당되는 격자점을 중심으로 주위에 있는 절점에서의 변위들을 이용하여 2차원 보간법으로 구한다. 주어진 곡면과 추정된 곡면사이의 닮은 정도의 척도를 여기에서는 "유사성 (similarity)" 이라 하였다. 유사성은 격자점에서 주어진 곡면과 추정된 곡면의 변위를 기준으로의 Template 위치에서의 변위를 기준으로 아래의 식(5)로 정의하였다 [18-20].

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

- 여기에서  $N_x, N_y$  : x 와 y 방향으로 Grid Point의 수
- $N_T$  : Grid Point의 총 수
- $g_{ij}, c_{ij}$  : Grid Point (ij) 에서 주어진 곡면과 추정된 곡면의 변위
- $g_{max}$  : 주어진 곡면에서의 최대 변위

식(5)로 정의되는 유사성은 가공의 정도를 의미하는 것은 아니지만, 이와 대단히 밀접한 관계를 갖는다. 유사성을 계산하는 그 이전 단계로서 구조해석은 3차원 박판 구조물의 유한요소해석을 위한 프로그램을 이용하였다 [21]. 구조해석을 위한 대상 판은 절점당 6자유도를 갖는 3차원 판요소로서 3절점 삼각형 판요소와 4절점 사각형 판요소를 혼합하여 이용하였다. 구조해석에 필요한 유한요소 Data는 정의된 가열선에 대한 정보를 이

용하여 자동분할기법으로 생성된다 [22].

Fig.4에서 가열선을 하나씩 정의하는 과정은 추정된 곡면의 유사성이 요구되는 유사성의 수준,  $\delta_0$  이상이 될 때까지 반복되며, Marking Data는 각 반복과정에서 구한 가열선들의 수열로서 정의된다. 식(5)에서 보듯이 계산된 유사성,  $\delta$ 가 1.0이면 추정된 곡면은 주어진 곡면과 완전하게 일치되는데, 이러한 결과를 얻는 것에는 실제 계산상 많은 어려움이 따르기 때문에 요구되는 유사성의 수준,  $\delta_0$ 을 1.0에 가까운 값으로 설정하여 식(5)로 계산한 추정된 곡면의 유사성,  $\delta$ 가  $\delta_0$ 보다 큰 값이 될 때까지 위의 과정을 반복한다.

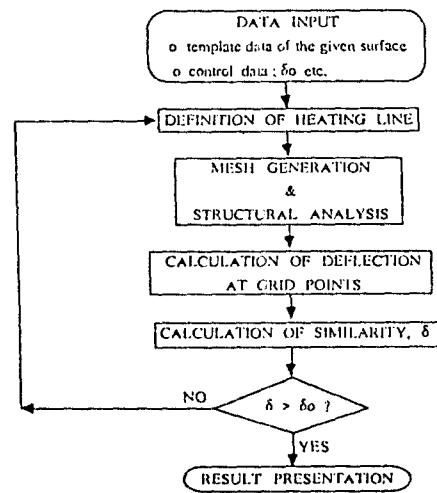


Fig.4 Overall structure of COMHET

## 6. 전산 시스템의 적용

본 연구에서 도입한 역학적 모델을 비롯하여 전산 시스템의 기초가 되는 알고리즘에 대한 합당성은 간단한 곡면모델에 대해 적용한 연구를 통해서 이미 확인된 바 있으므로 [18-20], 여기에서는 선박의 실제 곡면형상을 대상으로 COMHET 를 적용한 내용에 대해 기술하였다.

### 6.1 대상곡면모델

여기에서 선택한 곡면모델은 선수, 선미부에서

흔히 볼 수 있는 비특형 곡면이다. 대상 곡면 모델의 3차원 형상을 Fig.5에 나타내었다. 이러한 형태의 곡면형상을 가공하는 공정은 처음부터 선상가열법을 이용하여 성형 할 수도 있지만, 이 경우에는 가열해야 하는 부분이 많아져서 재료적 성질의 변화로 인한 강도 저하가 초래되기 때문에, Press를 이용하여 1차적으로 냉간가공을 한후, 선상가열법으로 나머지 부분을 성형하게 된다. 한편, 냉간가공을 하지 않고 순수히 선상가열법으로 성형하는 경우에 재질의 변화에 따른 구조강도의 저하가 크지 않다면, 작업시간 측면에서는 유리할 수 있다는 점을 감안하여, 여기에서는 선택한 실제 곡면모델의 성형을 위해 냉간가공을 하는 경우와 하지 않는 경우의 결과를 비교해 보았다.

#### 6.2 적용 결과 - 1 : 냉간가공을 하는 경우

냉간가공을 위한 Cold Bending Line은 Fig.6과 같고 Cold Bending Radius는 3500 mm 이다. COMHET를 적용한 결과로서 최종적으로 얻어진 가열선의 분포 즉, Marking Data를 Fig.7과 같이 도식적으로 표시하였다. 최종단계까지 구해진 가열선의 수는 20개 이고, 가열선의 총 길이는 약 19 m 였다. Fig.7에 표시한 가열선의 분포는 실제 현장에서 작업할 때의 경우와 잘 일치되는 것으로서, 최종가열단계후 추정된 곡면을 주어진 곡면과 비교를 위해 Fig.8과 같이 표시하였다. Fig.8에서 실선과 점선은 주어진 곡면과 추정된 곡면을 각각 나타낸다. Fig.8에서 보는 바와같이 추정된 곡면이 주어진 곡면과 잘 일치되고 있는 것을 볼 수 있다. 최종가열단계 후 추정된 곡면과 주어진 곡면과의 유사성을 식(5)로 부터 구한 값은 1.0에 가까운  $\delta = 0.908$ 이다. Frame No. 23.55, 27.00과 31.20에서 가열단계에 따른 추정된 곡면의 단면형상을 주어진 곡면과 비교해서 Fig.9에 표시하였다. 가열단계가 진행됨에 따라 추정된 곡면이 주어진 곡면에 점점 접근하는 모습을 볼 수 있다. 최종가열단계 후 주어진 곡면과 비교해서 추정된 곡면의 오차는 20mm 정도로서 좋은 결과가 산출되었다.

#### 6.3 적용 결과- 2 : 냉간가공을 안하는 경우

여기에서는 전절에서의 곡면모델에 대해 냉간가공을 하지 않고, 평판에서 시작하여 전체 가공과정을 선상가열법으로만 수행할 때의 결과를 전절과 같은 양식으로 표시하여 냉간가공을 하는 경우와 비교 해 보았다. COMHET의 결과로서 Marking Data, 주어진 곡면과의 비교 그리고 가열단계에 따른 단면형상의 변화 등을 Fig.10~Fig.12에 표시하였다. 최종 가열단계 후 추정된 곡면의 유사성은 0.902 로서 냉간가공을 한 경우보다 조금 낮기는 해도 1.0에 가까운 값을 보이고 있다. Fig.10에 표시한 가열선의 분포와 냉간가공으로 1차 성형을 하는 Fig.7의 경우와 비교해 보면, 가열선의 방향은 비슷하지만 전반적인 분포상에는 차이를 보이고 있다. 이 경우 가열선의 방향은 Fig.6에 표시한 Cold Bending Line 과 유사한 방향임을 볼 수 있고, 이는 Fig.10에 표시한 가열선의 방향으로 부터 냉간가공을 위한 Cold Bending Line 의 방향을 정의하는데에 응용할 수 있다는 점을 의미한다. 이 경우 최종 단계까지의 가열선의 수는 34개 이고, 가열선의 총 길이는 약 44 m 로서 냉간가공을 하는 경우에 비해서 상당히 많은 부분을 가열해야 하는 것으로 얻어졌다. Frame No. 23.55, 27.00, 31.20 에서 가열단계에 따른 단면형상의 변화를 표시하는 Fig.12를 Fig.9와 비교해 보면 곡면의 유사성의 값은 비슷하지만 주어진 곡면에 접근하는 양상에는 상당한 차이가 있음을 볼 수 있다. 주어진 곡면을 기준으로 오차의 정도는 냉간가공을 하는 경우와 비슷한 정도를 보이고 있다.



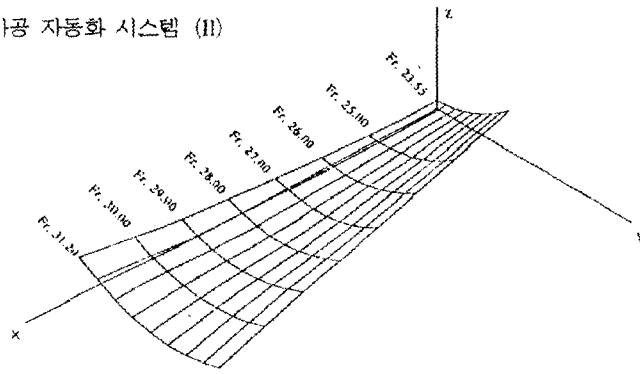


Fig.5 Real surface model

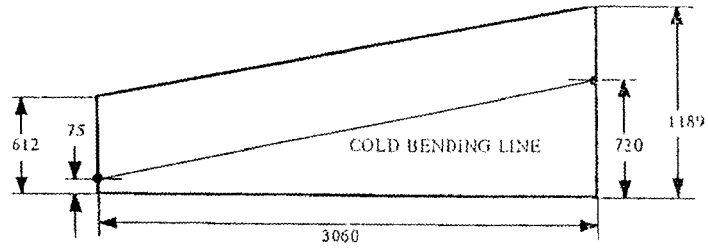


Fig.6 Overall dimension of plate and cold bending scheme (unit : mm)

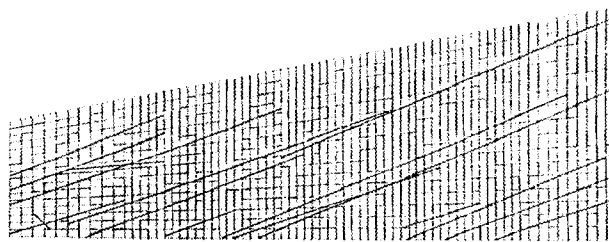


Fig.7 Marking data : cold bending

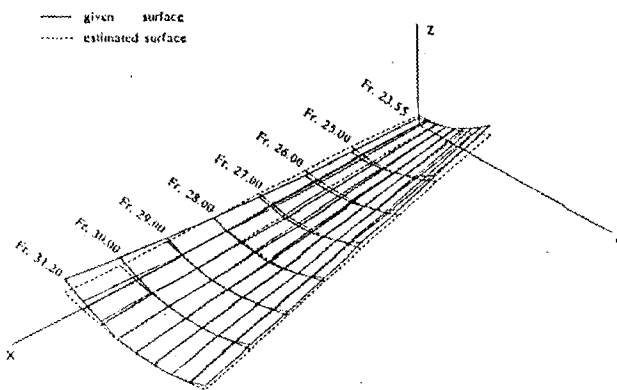


Fig.8 Comparison of 3-dimensional shape : cold bending

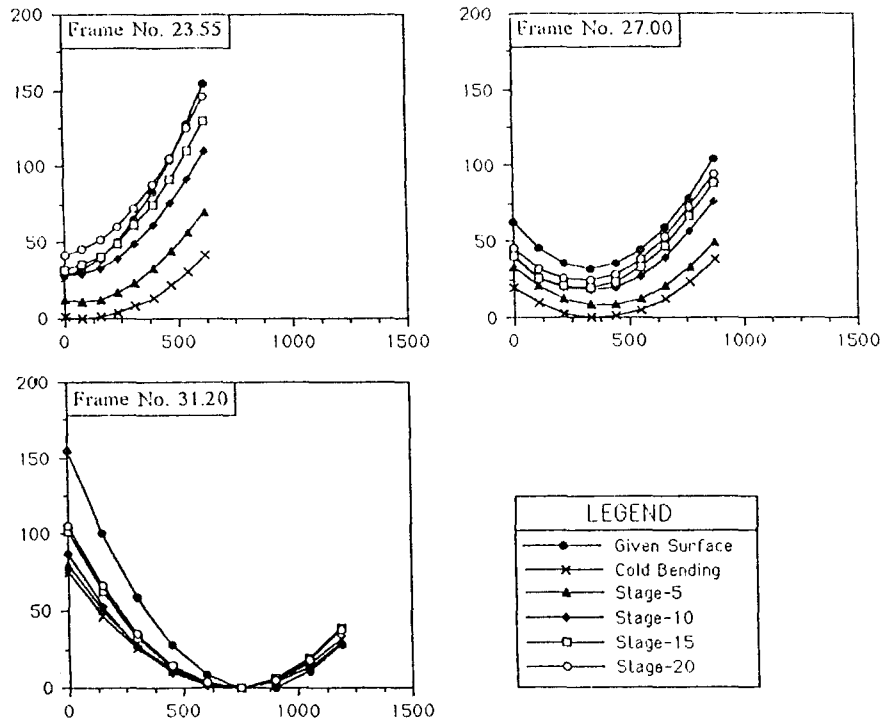


Fig.9 Section shape to heating stage : cold bending

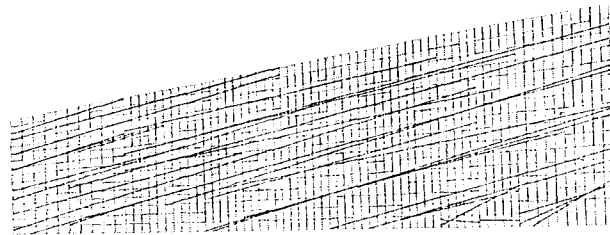


Fig.10 Marking data : no cold bending

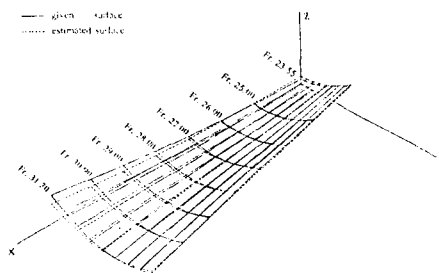


Fig.11 Comparison of 3-dimensional shape : no cold bending

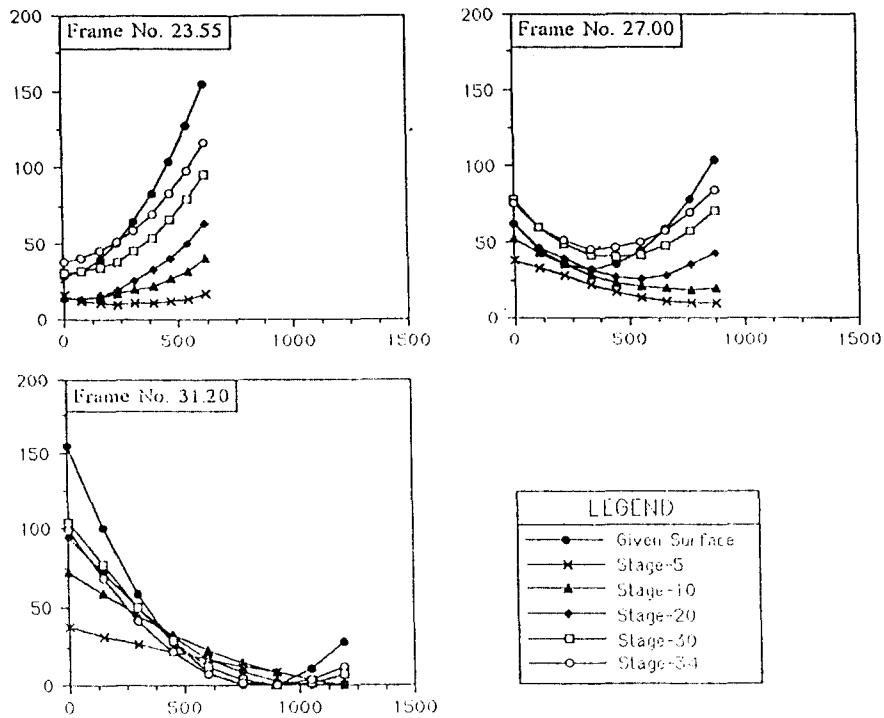


Fig.12 Section shape to heating stage : no cold bending

6.4 결과 검토

실제 곡면모델에 COMHET를 적용한 이상의 결과를 종합해 보면 본 연구에서 개발한 전산시스템인 COMHET는 냉간가공을 하는 경우와 하지 않는 어느 경우이나 최종적인 결과의 정도에 있어서 큰 차이없이 주어진 곡면에 상당히 근접하는 결과를 주고 있다. 전반적으로 볼때 본 연구에서 개발한 전산 시스템 COMHET는 실제 현장에서 작업하는 경우와 거의 일치하는 Marking Data를 생성하고 있으며 추정한 곡면 역시 주어진 곡면에 대단히 근접하는 좋은 결과를 주고 있음을 볼 수 있다. 따라서 전산 시스템 COMHET는 실제 현장에서의 작업공정에 적용할 수 있는 실용성이 충분히 있는 것으로 보여지며, 이의 적용 가능성에 대해서는 더 많은 곡면모델에 대한 적용을 통해 확인 될 수 있겠다. 작업의 효율성 측면에서 볼때, 실제 작업시 소요되는 시간을 직접 비교해 볼 수는 없지만 Fig.7 과 Fig.10에 표시된 가열선의

총 길이가 각각 19 m 와 44 m 로서, 가열선당 가열속도가 일정하다고 가정하면, 냉간가공을 안하는 경우가 냉간가공을 하는 경우에 비해 작업시간이 약 2.3배 정도 소요되지만, 계획된 방법에 따라 냉간가공으로 1차 성형하는 데에 소요되는 시간을 고려할 때, 작업시간 측면에서는 선상가열법 만을 이용해서 성형하는 것이 불리하지 않을 것으로 보인다. 물론 이러한 비교는 선상가열로 인한 재료적 성질의 변화가 강도저하에 결정적인 영향을 미치지 않는다는 가정하에서 성립되며, 이 점에 대해서는 추후 좀 더 많은 비교 연구를 통해 명확히 밝혀야 할 것이다.

7. 결론

이 논문에서는 강판의 곡가공을 위한 자동화 시스템의 구축에 있어서 우선적으로 선행되어야 할 부분인 주어진 곡면의 Marking Data를 자동으로

생성할 수 있는 전산 시스템의 개발과 이의 적용에 대한 내용을 주로 다루었다. 본 연구에서 개발한 전산 시스템인 COMHET를 실제 선박에서 볼 수 있는 곡면형상에 적용해본 결과는 실제 현장에서 작업하는 방법에 부합되는 합리적인 것이며, 따라서 이는 실제 현장에서의 작업시 적용 가능성이 있는 것이라고 말할 수 있다.

본 연구에서 선택한 곡면은 한가지 형태로 한정하였지만, 다양한 곡면형상을 대상으로 COMHET를 적용하고 실험을 통해 비교 분석함으로써 이를 보완한다면 현장에서 충분히 실용적으로 사용할 수 있을 것이며, 추후 자동화 시스템에서 핵심적인 부분으로서 적용할 수 있을 것이다.

### 참 고 문 헌

- [1] Hashimoto, T. and Fujishiro, Y., "An Experiment of Line Heating Designed with the Table Orthogonal Array L32", 일본조선학회 춘계강연집, 1958
- [2] 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, 1975
- [3] 김규호, 김영복, 진준식, 황준석, "강판의 열변형에 대한 실험적 연구 (I)", 졸업논문, 울산대학교 조선 및 해양공학과, 1992
- [4] 김상일, "선상가열에 의한 강판의 곡가공 시뮬레이터 개발", 공학석사학위논문, 울산대학교 조선 및 해양공학과, 1992
- [5] Iwamura, Y. and Rybicki, E.F., "A Transient Elastic-Plastic Thermal Stress Analysis of Flame Forming", Trans. ASME, J. of Engineering for Industry, 1973
- [6] Eagar, T.W. and Tsai, N.S., "Temperature Fields Produced by Traveling Distributed Heat Sources", Proc. 64th Annual AWS Convention, 1983
- [7] Moshaiov, A. and Vorus, W.A., "The Mechanics of the Flame Bending Process : theory and applications", J. of Ship Research, vol.31, no.4, 1987
- [8] 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, 3, 1991
- [9] 신종계, "선상가열법에 의한 평판가공 Simulator 연구", 대한조선학회 논문집, 제 29권 1호, 1992
- [10] 장창두, 김병일, "선상가열에 의한 판 굽힘 변형에 대한 연구", 대한조선학회 춘계연구발표회, 논문집 1993
- [11] Scully, K., "Laser Line Heating", J. Ship Production, vol.3, no.4, 1987
- [12] Nomoto, T., Ohmori, T., Sutoh, T., Enosawa, M., Aoyama, K. and Saitoh, M., "Development of Simulator for Plate Bending by Line Heating", J. Society of Naval Architecture of Japan, vol.168, 1990
- [13] Nomoto, T., Takechi, S., Shouki, K., Aoyama, K., Enosawa, M. and Saitoh, M., "Development of Simulator for Plate Bending by Line Heating Considering Inplane Shrinkage", J. Society of Naval Architecture of Japan, vol.170, 1991
- [14] Ueda, Y., Mohamed, R.A., Kamichika, K., Ogawa, J.I., Murakawa, H., Neki, I. and Ishiyama, M. "Development of Computer Aided Process Planing System for Plate Bending by Line-Heating (3rd report) - relation between heating condition and deformation", J. Society of Naval Architecture of Japan, vol.173, 1993
- [15] Ogawa, J.I., Kamichika, R. and Neki, I., "A Simulation on the Thermo-Elasto-Plastic Deformation of Induction Heated Steel Plate", Proc. ICCAS'94, Bremen, Germany, vol.1, 1994, pp.3.29 - 3.44
- [16] Ueda, Y., Murakawa, H., Mohamed, R.A., Okumoto, Y. and Kamichika, K., "Development of Computer Aided Process Planing System for Plate Bending by Line-Heating (1st report)", J. Society of Naval Architecture of Japan, vol.170, 1991
- [17] Ueda, Y., Murakawa, H., Mohamed, R.A., Okumoto, Y. and Kamichika, K., "Development of Computer Aided Process Planing System for Plate Bending by

- Line-Heating (2nd report)", J. Society of Naval Architecture of Japan, vol.171, 1992, pp.409-419
- [18] 이주성, 김상일, 오석진, "선상가열법에 의한 강판의 곡가공 자동화 시스템 (I)", 대한조선학회 논문집, 제 31권 4호, 1993, pp.139-146
- [19] Lee, J.S., "On the Automation System of Plate Forming by Line Heating Method in Shipbuilding", Proc. ICCAS'94, Bremen, Germany, vol.1, 1994, pp.3.3 - 3.13
- [20] Lee, J.S., "On the Marking Generation System for Steel Plate Forming by Line Heating", Proc. 8th Technical Exchange and Advisory Meeting (TEAM), National Taiwan Univ., Taipei, Taiwan, ROC, Dec. 1994, pp.505-516
- [21] 임상전, 광병만, 이주성, "유한요소법 입문", 동명사, 1985
- [22] 오석진, "대형 구조물의 효율적 구조해석 기법 개발에 관한 연구", 공학석사학위논문, 울산대학교 조선 및 해양공학과, 1992